平成27年度

C L T等新たな製品・技術の開発・普及事業 (住宅等における新たな製品・技術開発)木質系複合材料の長期構造性能の検討

事業報告書

平成28年3月

公益財団法人 日本住宅・木材技術センター

木材の基準強度、あるいは木材を複合化した木質材料等の基準強度は、これまで先人たちが脈々と築いてきた実験データ、主に実大レベルの実験データに基づき慎重な判断のもと、定められてきた。基準強度ばかりではなく、耐久性に係わる係数や、施工に係わる低減係数、さらには荷重継続時間に係わる係数、使用環境に係わる係数なども、直接的ではなくとも実験をもとに定められているものが多い。

本委員会は、複合材料の長期的な調整係数のうち、DOL 係数について取り組んだものである。 今年度は、評価対象を、鉄筋を挿入した部材と、炭素繊維を貼った部材、の2つに限定し、議論 が発散しないように配慮したうえで、今後のこの種の材料の DOL 評価に資することも視野に入 れた、実験結果や既往の研究に基づいた評価の必要性や具体の評価法についての議論をおこなっ た。この DOL の評価は、法37条の指定建築材料の評価と同様に、一般的には実大レベルの実験 による。これは、長い期間にわたる実験で、応力レベルをいくつか変えた実験となることがある ため、多大な労力を要し、新たな複合材料の開発・使用のひとつの障害と呼べるものにもなって いた。

ここで、単体材料の力学的モデルの組み合わせにより、複合材料の力学モデルが表現でき、さらに各要素のクリープ特性や DOL 特性が既知であれば、解析的にクリープ変形や DOL も予想可能と考えられる。しかし、複雑化する複合材料にあっては力の流れも複雑になり、力学的モデルの妥当性の議論に時間を要することもある。とはいえ、今回対象とした鉄筋挿入木材のような比較的単純な構成であれば、木材、鋼材、接着剤、接着面の各力学モデルに対して剛性の変化を時間を考慮して与えることにより、任意経過時間の応力状態を知り、さらに DOL も求めることが可能と考えられる。もちろん、解析的に長期間にわたる乾燥収縮、熱膨張などの二次的な応力についても推定可能である。

一方で、DOLはこれまでの実大レベルの実験で導いている、という背景もあり、樹種による違い、構成材料による違い、接着法による違いなどをすべて考慮した、実大レベルの実験が必須である、という考え方がある。これは、実験によって値が求まるという利点がある反面、前述したとおり、多大な労力を要すること、そして特殊解を積み重ねているにすぎず、すべての適用範囲を網羅できるわけではない。

現段階では、解析、実験ともに課題があり、どちらによるべき、という議論ではなく、ケース バイケースでの対応が望ましいと考えられる。

以上、技術的な課題を中心に述べたが、法令上、新たな複合材料を建築物に使うには、構造計算を要しない範囲のものを除き、

- ① 時刻歴応答解析による国土交通大臣による認定を、建物として受ける。
- ② 法 37 条に基づく指定建築材料に追加し、材料の基準強度を大臣認定によりえて、構造計算により建物を建てる。

というルートがまずは考えられる。

①は、一品生産的なものには適してはいようが、材料の普及の観点から困難を伴うことが予想される。そのうえ、そもそも時刻歴応答解析が超高層建築物を想定していることもあり、外力が中低層建物には厳しすぎ、現実的な断面での設計が難しい。②は、今回検討を開始した DOL をはじめとして、技術的な資料を整える必要がある。ただし、指定建築材料として項目がないとなると、新たな該当項目を作る必要がある。今回対象とした複合材料は該当材料がないため、早急に法 37 条の整備が望まれるところである。また、複合部材という意味では、鉄筋コンクリートがその先例にあたる。鉄筋コンクリートは、その構成材料であるコンクリートと鉄筋の基準強度に加え、付着の基準強度に基づき、日本建築学会等の規準によって部材耐力を求めている。木質材料も接着に関するデータを蓄積し、今後、複合材料の開発、評価の合理化をはかる視点も重要

と考えられる。

また、これは個人的な意見であるが、今回扱った複合材料の評価は、すでに材料特性が明確な材料から構成されているわけであるから、技術的、法令的にも、ほかの材料やこれまでの木質材料との横並びの評価で、矛盾なく、常識的に導かれる妥当な数値に余裕を加え、まずは設計に用いる数値を決める、そして、緩和は今後の研究や制度の進展に期待する、という手法もあるように思われる。一度決めた数値はなかなか変えられないから、という話を聞くが、これらの緩和が可能なようなルール作りも必要と考える。

なお、以上述べた技術的なこと、法令上のこと、いずれにあっても評価値や法令の要求を確実に担保できる製造基準があってこそ、である。比較的、安易に加工したり、接着したりということをする、さらには木材の材料管理は最低限ということであると、性能の担保が難しい。製造者側も、これまでの無等級材で構造計算を要しない時代からの脱却が必要であることもここにひとこと加えておきたい。

とにかく、木質系の複合材料の評価は、上記のような議論が開始された段階で、今後継続的に 議論がなされなければならない。これは今回参加した委員の総意であるように思っている。本資 料が今後の材料開発の一助となるとともに、今後同様のプロジェクトが継続的に実施され、木質 系材料の開発が進み、木質材料のさらなる展開に期待したい。

> 木質系複合材料の長期構造性能検討委員会 委員長 京都大学生存圏研究所 教授 五十田博

目次

第一	1章	事業の趣旨 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1
第 2	2章	事業内容 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	2
4	2.1	事業の概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2
2	2.2	実施体制 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	2
第:	3章	実験計画 ·····	4
	3.1	概要	4
	3.2	試験体	4
ć	3.3	試験方法	5
	4章	構造性能試験 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	10
	4.1	試験体	10
	4.2	短期構造性能	13
2	4.3	長期構造性能	46
第:	5章	鉄筋挿入型複合材料の構造性能 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	75
Ę	5.1	はじめに ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	75
Ę	5.2	短期載荷試験の曲げ剛性と曲げ強度および曲げひずみ分布の挙動の検証 ・・・・・	75
Ę	5.3	鉄筋集成材の構法と構造性能・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	84
第 6	6章	荷重継続時間に係わる文献等調査 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	98
(3.1	木材強度に及ぼす荷重継続時間の研究に関する歴史的な経緯・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	98
6	5.2	L.W.Woodの研究 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	100
(6.3	一定荷重による荷重継続時間の影響に関する研究(その1) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	102
6	6.4	一定荷重による荷重継続時間の影響に関する研究(その2) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	107
6	6.5	クリープ現象からのアプローチ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	108
(6.6	242 414 124 2 414 <u>2215/24 414 2 72</u>	113
(6.7		116
(6.8	新しい木質軸材料のDOLをどう考えるのか? ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	131
	5.9	まとめ	141
(6.1	0 文献	143
第7	7 章	まとめと今後の課題 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	146
参表			
付	1.平	成 12 年建設省告示第 1446 号 抜粋 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	148
付2	2.長	期載荷試験治具の概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	162
付:	3.炭	素繊維シートの関連規格一覧 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	163
		質系複合材料の長期構造性能検討委員会 発言録 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	164

第1章 事業の趣旨

鉄筋や炭素繊維等の異素材と木質系材料を組合わせた複合材料(以下「複合材料」という。)を 建築資材として実用化し広く普及するにあたっては、まず建築基準法(以下「法」という。)上の基 準強度を得て構造設計で使えるようにすることが肝要である。

そのためには2つの方法が考えられる。1つは、当該複合材料をJAS化し平成13年国土交通省告示1024号を改正する等して基準強度の指定を受ける方法、もう1つは、平成12年建設省告示第1446号に当該複合材料が含まれるように改正し、法第37条第二号の規定により指定建築材料として国土交通大臣の認定を受けるとともに、平成13年国交省告示第1540号第2第三号の規定に基づき基準強度の指定を受ける方法がある。

後者の場合、当該複合材料を指定建築材料の木質系の材料の1種として考えることになるが、 品質に関する技術基準として平成12年建設省告示第1446号第10号、第11号で各強度に対する 荷重継続時間の調整係数(=荷重継続時間影響係数、DOL係数)を定めること等が求められる。 これについては、前者の「JAS化」の場合においても同様な知見が求められるであろう。実際の ところ、CLTは実大材による荷重継続時間に関する長期載荷試験を実施中である。

一方で、DOL 係数は、短期荷重、長期荷重等に対する許容応力度の決定に用いられる重要な係数であるが、実はこの長期載荷試験を実施するには膨大な経費と膨大な時間が必要であり、一企業が実施するにはあまりにもハードルが高い場合がある。

また、製材、集成材には DOL 係数が設定されているが、そもそも我が国では荷重継続時間に関する実験や文献は乏しく、1950 年代に杉山英男が研究を発表しているが、その後は最近になり研究が進行している状況である。現在、製材、集成材に使われている DOL 係数は米国マディソン林産研究所(FPL)の L. W. Wood 等の長年の研究から誘導されたもので、我が国の製材、集成材に対して導かれた DOL 係数ではない。

このような状況の中では、厳密な DOL 係数は現行の製材等を含めて検討されるべきであろう。 しかし、建築構造材料の技術開発を進める上では、必ずしも厳密な DOL 係数でなく、一定の構造 安全性を確保した現実的な DOL 係数の設定を付与する道筋もあるべきではないかと考える。現行 の製材や集成材に対する DOL 係数はそのようなものだと考えられる。

そのため、本事業では長期構造性能(DOL 係数等)やその試験法に対して工学的且つ検証的な検討を行い、それらを論理的に整理し、行政側に提案できる資料作成を行いたい。複合材料に関する長期構造性能試験データは非常に少ないため、実験を進めながら長期構造性能の試験や評価の方法論を導くことになろう。

今般、鉄筋や炭素繊維等の木材以外の異素材と木材を接着剤等で組み合わせた複合材料についての研究・技術開発が、各企業や地方公共団体等において進められているところである。

一方で、そのような複合材料について、性能が明らかになっていない面も多く、特に、クリープ、荷重継続時間調製係数等の基礎的な性能について、木材と異素材とが接着すること等によりどのような影響が生じるかということが明らかになっていない。

そこで、本事業においては、まずは基礎的な知見を可能な範囲で収集し、実験方法の合理化等を含め、複合材料の利用拡大のあり方について検討した。

第2章 事業内容

2.1 事業の概要

(1) 複合材料の長期性能の評価・実験方法の検討

複合材料の基礎的性能を確認するために適切な実験方法や評価方法について検討した。

(2) 複合材料と現行の評価・実験方法との関係

(1)を踏まえ、実験と行うことにより、複合材料に対して現行の木質材料の評価・実験方法を適用することの是非について検討した。

(3) 文献調査

国内外の規基準や既往の研究について調査し、分析を行った。

(4) 複合材料の利用拡大のあり方

(1)から(3)までを踏まえ、複合材料について、基礎的な性能について確認するための実験方法や評価方法について、得られた知見の範囲で取りまとめを行った。

2.2 実施体制

(公財)日本住宅・木材技術センター内に、学識経験者を中心に構成する「木質系複合材料の長期構造性能検討委員会」を設置し、事業の概要(1)から(3)までの事項について検討するとともに、これらの検討結果を踏まえ、複合建築材料の利用拡大のあり方について総合的な検討を行った。

(1)委員名簿

(敬称略、順不同)

委員長 五十田博 京都大学 生存圈研究所 教授 委員 河合直人 工学院大学 建築学部 教授

塩屋晋一 鹿児島大学大学院 理工学研究科 教授

中島史郎 宇都宮大学 地域連携教育研究センター 教授

中村昇 秋田県立大学 木材高度加工研究所 教授

安村基 静岡大学学術院 農学領域 教授

槌本敬大 (研)建築研究所 材料研究グループ 上席研究員

渋沢龍也 (研)森林総合研究所 複合材料研究領域 複合化研究室 室長 宮武敦 (研)森林総合研究所 複合材料研究領域 集成加工担当チーム長

中川貴文 国土交通省国土技術政策総合研究所 建築研究部 材料・部材基準研究室

主任研究官

宮林正幸 (有)ティー・イー・コンサルティングー級建築士事務所 取締役所長

協力委員 室星啓和 (一財)建材試験センター 中央試験所 構造グループ 統括リーダー

オブザーバー 長瀬諭司 帝人(株)

村田忠 山佐木材(株)

行政 服部浩治 農林水産省 林野庁 林政部 木材産業課 課長補佐

西村紘明 農林水産省 林野庁 林政部 木材産業課 住宅資材技術係長

中熊靖 農林水産省 食料産業局 食品製造課 課長補佐 大村敏幸 農林水産省 食料産業局 食品製造課 林産係長 髙木直人 国土交通省 住宅局 建築指導課 企画専門官 歌代純平 国土交通省 住宅局 建築指導課 構造係長

事業主体 金子弘 (公財)日本住宅・木材技術センター 専務理事兼研究技術部長

松川隆行 前(公財)日本住宅・木材技術センター 専務理事兼研究技術部長

岡田恒 (公財)日本住宅・木材技術センター 参与兼試験研究所長

鴛海四郎 (公財)日本住宅・木材技術センター 特別研究員

佐野敦子 (公財)日本住宅・木材技術センター 研究技術部 技術主任

(2) 開催実績

・第1回

開催日時:平成27年11月13日(金) 10:00~12:00

開催場所:LEN 貸会議室〈赤坂 T-FRONT〉

• 第 2 回

開催日時:平成28年2月19日(金) 18:30~20:30

開催場所: TKP 新橋内幸町ビジネスセンター カンファレンスルーム 601

第3章 実験計画

3. 1 概要

木材の耐力は、載荷される荷重の継続時間により影響されることが知られている。そのため木材の許容応力度は、荷重継続時間を考慮した設定がなされている。一方、鋼材等ではそのようなことはないと言われており、それらの許容応力度は、荷重継続時間を考慮したものとはなっていない。

ここでは、集成材に鉄筋ないし、炭素繊維シート挿入した複合材料の実用化に向けた検討を行う。その際、最大のネックは、そのような複合材料に対し、荷重継続時間の影響をどう考えるかである。集成材に荷重継続時間の影響のない材を複合させれば、集成材に比べ荷重継続時間の影響は緩和させられると考えられる。そこでここでは、複合材料の耐力に対する荷重継続時間の影響が、集成材に比べ緩和されるかを確認することを目的として実験を行う。

3.2 試験体

試験体は、集成材、集成材に鉄筋を挿入した複合材、集成材に炭素繊維シートを挿入した複合材に3種で、それぞれ梁を想定したものとした。それぞれの断面は図1に示すとおりである。

集成材は (1) に記した仕様とした。鉄筋および炭素繊維シートを挿入した集成材も (1) に記したものと同じ仕様とした。

複合材料の鉄筋関連の仕様は(2)に記したとおりである。複合材料の炭素繊維シート関連の仕様は(3)に記したとおりである。

試験体の仕様から分るように、鉄筋および炭素繊維シートの補強は極力抑えている。これは集成材に比べて、複合材の耐力が高くなると、長期荷重試験の載加荷重をその分大きくしなければならなくなり、実施そのものが困難となるためである。

試験体の数量は(4)に示す。

試験に供するまで、試験体は(5)に示す環境で養生を行う。

(1)集成材(複合材料の母材)

寸法:長辺 120 mm×短辺 105 mm×長さ 3200 mm、

なお鉄筋挿入の場合は、長さ 3250 mm

品質: JAS同一等級構成集成材 4層ラミナ構成 E65F255 ラミナ仕様: スギ、 たて継ぎあり (フィンガージョイント)

接着剤:水性高分子イソシアネート系樹脂

(2) 複合材料1(鉄筋挿入タイプ)

鉄筋: 異形棒鋼 SD295A D10、長さ3170 mm

鉄筋配置: ラミナ外縁より 23 mm、ラミナ側縁から 28.5 mm

鉄筋相互の距離 48 mm

鉄筋充填剤:エポキシ樹脂

(3) 複合材料2 (炭素繊維挿入タイプ)

炭素繊維(CF)シート:厚さ0.3 mm、幅105 mm、長さ3200 mm

CFシート配置:下図のとおり最外層ラミナと2層目ラミナの間、外縁より30 mm

CFの被覆材:エポキシ樹脂

ラミナとの接着剤:水性高分子イソシアネート系樹脂

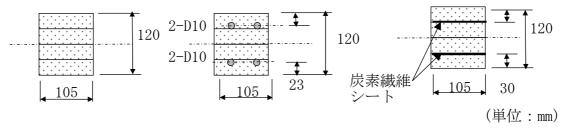


図1集成材、複合材料1、複合材料2の断面図

- (4) 試験体数(合計 54体)
 - 1) 短期曲げ試験用
 - 30体=3タイプ×10体
 - 2) 長期クリープ用
 - 18体=3タイプ×6応力レベル×1体
 - 3) 予備用
 - 6 体= 3 タイプ×2 体

表1 試験体の内訳

タイプ	短期試験用(応力レベル1)	長期クリープ用	予備用
集成材	10体	6 体	2 体
複合材料 1	10体	6 体	2 体
複合材料 2	10体	6 体	2 体

注)予備用は明らかに試験体製作上及び木材の欠点等が破壊要因と考えられる場合に再試験を行うため。

(5) 試験体の養生

養生環境: 20℃、65% 養生期間: 3~4週間

3. 3 試験方法

短期試験、長期試験ともに、上記の養生を経たのち、図2に示すように、試験体に3等分点2 点載荷を行う。なお、長期試験は、試験中も上記養生環境の下で実施する。

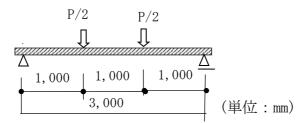


図2 曲げ試験(3等分点2点載荷)図

(1) 短期試験

- 1) 試験体は各タイプとも10体とした。
- 2) 単調載荷を行い、試験の最大荷重の平均値を求める。この平均値を応力レベル 100%とする。
- 3)変位及びひずみの測定は(3)測定項目に示す。

- (2) 長期クリープ試験
 - 1) 試験体は各応力レベルに1体とする(試験の成り行きで変更有り)。
 - 2) 応力レベル95%、90%、85%、80%、75%、70%で載荷試験を行い、破壊に 至るまでの時間を計測する。
 - 3)変位及びひずみの測定は(3)測定項目に示す。
- (3) 測定項目
 - 1) 短期試験、長期試験とも同じ測定項目とする。
 - 2)変位の測定 スパン中央部、両側の加力点・・・3箇所
 - 3) ひずみ測定
 - ①各試験体の引張側及び圧縮側のひずみ。ラミナの外縁のスパン中央部
 - ②鉄筋の引張側及び圧縮側のひずみ。但し、上下鉄筋を1本ずつ。

表2 各部のひずみゲージ

	ひずみゲージ位置	ひずみゲージ部位	試験体あたり
集成材	ラミナ外縁部のスパン中央部	引張側、圧縮側	2箇所
複合材料1			
複合材料 2			
複合材料1の	スパン中央部	鉄筋の引張側、圧縮側	4箇所
鉄筋	上下の鉄筋1本づつ		

(4) 試験体の耐力と変形の推定 試験体の耐力と変形を推定する。

a) 集成材

集成材の断面係数、断面2次モーメントは次の通りである。

断面係数 $Z=252,000 \text{ mm}^3$ 、断面 2 次モーメント $I=15,120,000 \text{ mm}^4$

JAS同一等級構成集成材 E65F255の曲げヤング係数、曲げ基準強度は次のとおりである。 E_w =6.5 kN/mm²=6,500 N/mm²、 F_b =25.5 N/mm²

支点間距離 3,000mm としたとき、最大曲げモーメントは、次式で与えられる。

$$M = P \times 3.000/3 \tag{1}$$

集成材が、曲げ基準強度に達するときの荷重は

$$\sigma = \frac{M}{Z} = \frac{\frac{P/2 \times 3,000}{3}}{252,000} = 25.5 \quad \text{\sharp 0}, \quad P = 12.85 \text{ kN}$$
 (2)

このとき、載加点のたわみは

$$\delta = \frac{15}{486} \frac{P/2 L^3}{EI} = \frac{15}{486} \frac{3000^3}{6.5 \times 10^3 \times 1.512 \times 10^7} P/2 = 0.00848 P/2$$
= 54. 5mm (3)

b) 複合材料1 (鉄筋挿入タイプ)

複合材が曲げを受けたときの断面内の歪の分布を図3に示す。

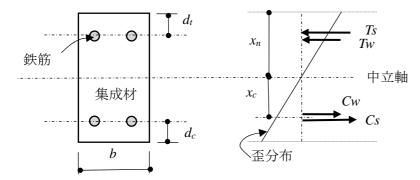


図3 複合材料梁の断面、曲げを受けたときの想定歪分布

集成材の引張縁が曲げ基準強度に達したときの引張歪は次式で与えられる。

$$\varepsilon_{tw} = \sigma_w / E_w \tag{4}$$

ここで、 ε_{tw} =引張縁(集成材)の歪、 E_{w} =集成材のヤング係数 このときの鉄筋重心位置の歪は、次式で与えられる。

$$\varepsilon_{ts} = \varepsilon_{tw} \frac{x_n - d_t}{x_n} \tag{5}$$

ここで、 ε_{ts} =引張鉄筋の歪、 x_n =引張縁から中立軸までの距離 d_s =引張縁から引張鉄筋の重心位置までの距離

一方、鉄筋の降伏歪は次式で与えられる。

$$\varepsilon_{ts0} = \sigma_{v} / E_{s} \tag{6}$$

ここで、 E_s =鉄筋のヤング係数, σ_v =鉄筋に引張降伏応力度(=短期許容引張応力度)

各パラメータの値を代入することで、集成材の引張縁が曲げ基準強度に達した時の引張縁の歪は (4)式より、次のとおりとなる。

$$\varepsilon_{tw} = \sigma_{wb} / E_w = 25.5 / 6.5 = 3.923 \times 10^{-3}$$
 (7)

その時の鉄筋の歪は(5)式より、次のとおりとなる。なお、中立軸は断面の軸芯にあるとする。

$$\varepsilon_{ts} = \varepsilon_{tw} \frac{x_n - d_t}{x_n} = 3.923 \times 10^{-3} \times (60 - 23) / 60 = 2.4192 \times 10^{-3}$$
 (8)

一方、鉄筋の降伏歪は次のとおりである。

$$\varepsilon_{ts0} = \sigma_v / E_s = 295/205 = 1.439 \times 10^{-3} < 2.4192 \times 10^{-3}$$
 (9)

よって、集成材の引張縁が曲げ基準強度時、鉄筋は降伏していることになる。ただし、破断には至っていない。

集成材の引張縁が曲げ基準強度時の引張側集成材の合力は次式で与えられる

$$T_w = \frac{\sigma_w x_n b}{2} = 80,325 \text{ N}$$
 (10)

集成材の引張縁が曲げ基準強度時の引張鉄筋の合力は、鉄筋は降伏しているので

$$T_s = \sigma_v \cdot A_{ts} = 42, 185 \text{ N}$$

よって、集成材の引張縁が曲げ基準強度時の曲げ耐力は次式で与えられる。

$$M = T_s(x_n + x_c - d_t) + T_w(x_n + x_c - \frac{1}{3}x_n) = 9,307 \text{ Nm}$$
 (11)

そのときの荷重は次のようになる。

$$P/2 = M \times \frac{3}{3,000} \text{ L } \% , P = 18.6 \text{ kN}$$
 (12)

このときの載荷点のたわみは、つぎのとおりとなる。

$$\delta = \frac{15}{486} \frac{P/2 L^3}{FI} = 78.9 \text{ mm}$$
 (13)

c) 複合材料 2 (炭素繊維シート挿入タイプ) 複合材が曲げを受けたときの歪分布を図 4 に示す。

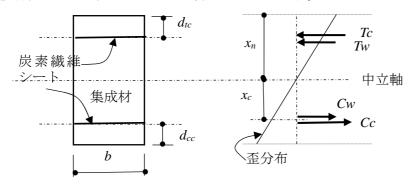


図4 複合材料梁の断面、曲げを受けたときの想定歪分布

集成材の引張縁が曲げ基準強度に達したときの複合材の曲げ耐力は次式で与えられる。

$$M = T_C (x_n + x_c - d_{tc}) + T_w (x_n + x_c - \frac{1}{2} x_n)$$
(14)

ここで、 $x_n=引張縁から中立軸までの距離$

 x_c =中立軸から圧縮力の合力 (Cw+Cc) の作用位置までの距離

 d_{rc} =引張縁から引張側炭素繊維シートまでの距離

 T_w =集成材の引張縁が曲げ基準強度時の引張側集成材の合力で、次式で表わされる。

$$T_{w} = \frac{\sigma_{w} x_{n} b}{2} \tag{15}$$

 T_c =集成材の引張縁が曲げ基準強度時の引張側炭素繊維シートの応力で次のように導かれる。なお、引張側炭素繊維シートは弾性範囲内にあると仮定する。

集成材の引張縁が曲げ基準強度時の引張縁の歪は次式で表わされる

$$\varepsilon_{tw} = \sigma_w / E_w \tag{16}$$

ここで、 ε_{tw} =引張縁(集成材)の歪、 E_{w} =集成材のヤング係数

このときの炭素繊維シートの歪は、次式で与えられる。

$$\varepsilon_{tc} = \varepsilon_{tw} \, \frac{x_n - d_{tc}}{x_n} \tag{17}$$

ここで、 ε_{ts} =炭素繊維シートの歪、 x_n =引張縁から中立軸までの距離

 d_{tc} = 引張縁から引張側炭素繊維シートまでの距離

よって、集成材の引張縁が曲げ基準強度時の引張側炭素繊維シートの応力は次の通りとなる

$$T_c = \varepsilon_{tc} \times E_c \times b \times t_c \tag{18}$$

ここで、 E_c =炭素繊維シートのヤング係数、b=炭素繊維シートの幅

 t_c =炭素繊維シートの厚さ

各パラメータの値を代入することで、集成材の引張縁が曲げ基準強度時の引張側集成材の合力は、

$$T_w = \frac{\sigma_w x_n b}{2} = 80,325 \text{ N}$$
 (19)

集成材の引張縁が曲げ基準強度時の引張縁の歪は、

$$\varepsilon_{tw} = \sigma_w / E_w = 3.923 \times 10^{-3}$$
 (20)

そのときの炭素繊維シートの歪は、

$$\varepsilon_{tc} = \varepsilon_{tw} \frac{x_n - d_{tc}}{x_n} = 1.9615 \times 10^{-3}$$
(21)

集成材の引張縁が曲げ基準強度時の引張側炭素繊維シートの応力は、

$$T_c = \varepsilon_{tc} \times E_c \times b \times t_c = 14,829 \text{ N}$$

$$T_c = \varepsilon_{tc} \times E_c \times b \times t_c = 14,829 \text{ N}$$
 よって、集成材の引張縁が曲げ基準強度時の複合材の曲げ耐力は、
$$M = T_C \left(x_n + x_c - d_{tc} \right) + T_w \left(x_n + x_c - \frac{1}{3} x_n \right) = 6,513 \text{ Nm}$$
 (22)

そのときの荷重は次のようになる。

$$P/2 = M \times \frac{3}{3,000} \text{ } \text{L} \text{ } \text{0} \text{ } \text{,} P = 13.03 \text{ kN}$$
 (12)

このときの載荷点のたわみは、つぎのとおりとなる。

$$\delta = \frac{15}{486} \frac{P/2 L^3}{EI} = 55.2 \text{ mm}$$

第4章 構造性能試験

構造性能試験は短期性能試験と長期性能試験を実施した。短期性能試験は5分前後の短時間で 試験を終了する通常の試験をいい、長期性能試験は載荷荷重に応じて破壊するまでの時間を計測 するクリープ限度試験をいう。短期試験、長期試験とも図4.1.1に示す2点支持3等分点2点 載荷の曲げ方式で試験を実施した。

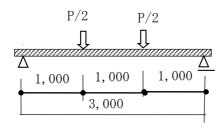


図4.1.1 2点支持3等分点2点載荷方式の曲げ試験 (mm)

4. 1 試験体

試験体は短期試験及び長期試験とも仕様は共通とした。

- (1) 試験体の種類は次の3タイプである。
- 1)集成材+鉄筋入り;以下「鉄筋入り又は鉄筋入り複合材料」という。
- 2) 集成材+炭素繊維 (CF) シート入り;以下「CFシート入り又はCFシート入り複合材料」という。
- 3)集成材:以下「集成材」という。
- (2) 試験体寸法

梁せい120mm×幅105mm×長さ3200mm又は3250mm

- (3) 母集成材の仕様;試験体に用いた母集成材、ラミナ(ひき板)の仕様は共通とした。
 - 1) 集成材の品質

JAS規格の同一構成集成材、4層構成、E65-F255

- 2) ラミナの品質
 - ①樹種 スギ
 - ②たて継ぎ;フィンガージョイント(図4.1.2)
 - ③ラミナの長さ; 40cm~100cm程度
 - ④ラミナのヤング係数;たて継ぎ後に測定した数値(資料 1 参照) 最小 $5.88*10^3$ N/mm²~最大 $8.74*10^3$ N/mm²、(注) C F シートのラミナのヤング係数は不明。

t 1	0. 7
t 2	0.6
P	3. 8
L	15
W	105
かん合度 t1-t2	0. 1
スカーフの傾斜比 θ	1/12

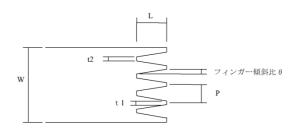


図4.1.2 フィンガージョイントの仕様 (mm)

3)接着剤

ラミナの積層方向接着及びフィンガージョイント接着に用いた接着剤は、水性高分子イソシアネート系接着剤である。

- (4) 鉄筋鋼棒の仕様
- 1) 種類; 異形棒鋼 SD295A D10
- 2) 鉄筋本数;上下の外層ラミナに2本の合計4本
- 3) 鉄筋長さ;3150mm
- 4) 鉄筋部の充填接着剤;エポキシ樹脂
- 5) 鉄筋の配置; 図4.1.3、図4.1.4を参照
- (5) 炭素繊維シート(CFシート)の仕様
 - 1) 厚さ: 0.3 mm
 - 2) CFシート挿入位置:最外層ラミナと2層目ラミナの間、外縁より30mm(図4.1.3)
 - 3) 炭素繊維の被覆材:エポキシ樹脂(繊維体積率;60%)
 - 4) ラミナとCFシートの積層用接着剤:水性高分子イソシアネート系樹脂
 - 5) CFシートの基本物性(参考値; 帝人㈱)

引張強度	曲げ強度	層間せん断強度	引張弾性率	曲げ弾性率
2060MPa	1620MPa	103MPa	137GPa	127 G Pa

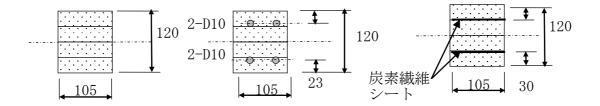
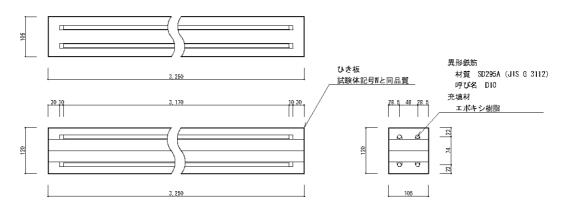


図4.1.3 試験体の断面仕様(mm)



試験体記号:S

図4.1.4 鉄筋の配置図

(6) 試験体数

試験体内訳は表4.1.1に示す合計54体を製造した。

表4.1.1 試験体の内訳

種 類	短期試験用	長期試験用	予備用
集成材	10体	6 体	2 体
CFシート入り	10体	6 体	2体
鉄筋入り	10体	6 体	2体

(7) 試験体の製造

ラミナの製造は一括して山佐木材株式会社が担当した。

試験体の製造は、鉄筋入り複合材料および集成材を山佐木材株式会社、CFシート入り複合材料を帝人株式会社が担当した。

1) 鉄筋のひずみゲージ取付

ひずみゲージのリードの損傷を防ぐため、リードを木材中に設けた切り欠き部分に粘土で 固定しておき、製品仕上げ後に引き出すことで埋め込み鉄筋のひずみ測定を行うことができ た。今後の試験体製作及び試験の実施に有用となる知見を得ることができた。

2) 鉄筋入りラミナの製造

ラミナに掘った溝に鉄筋を入れ、エポキシ樹脂の漏れを防ぐため節抜け部分を油粘土で補修しエポキシ樹脂で目止めした後、溝にエポキシ樹脂を充填した。溝部部はエポキシ樹脂充填後木片で蓋をすることで、エポキシ樹脂の目減りの防止、エポキシ樹脂の使用量の削減、ラミナ塗布面の平滑化による接着性能の向上、鉄筋埋め込み後のラミナ仕上げ作業性の向上など効果が確認され、実用化に向けての知見を得ることができた。



写真1 鉄筋入りラミナの製造

4. 2 短期構造性能試験

- 4. 2. 1 試験体
- (1) 試験体数と養生
 - 1) 試験体数

表 4. 2. 1 試験体内訳

種類	試験体数
W;集成材	10体
S;鉄筋入り複合材料	10体
C;FCシート入り複合材料	10体

2) 試験体の養生

試験体は試験直前まで恒温恒湿室(温度 20 ± 3 \mathbb{C} 、 65 ± 5 \mathbb{C} \mathbb{C} R H)で養生を行った。 養生期間は約 $2\sim3$ 週間程度である。

3) 試験体記号と番号

表 4. 2. 2 試験体番号

試験体記号	番号	備考
W	W1~W10	番号は試験体納入時の重量の軽いものか
S	S1~S10	ら順に番号を付した。
С	C1~C10	

4.2.2 曲げ試験

(1) 加力装置

加力装置は、ミネベア社製の曲げ試験装置を用いて、図4.1.1のように3等分点2点載荷式で実施した。試験時の温度湿度は無調整とし、試験体は試験直前に恒温恒湿室より取り出し、直ちに試験を実施した。なお、加力装置のクロスヘッド速度は15mm/分とした。 試験装置の仕様は以下のとおり。

NMBテクノグラフ、型式 TG-100kN、最大容量100kN、加力点は木材R付ブロックを使用した。

また、試験体は節等の欠点の少ない側を引張面としたが、フィンガージョイントの位置、数は特に配慮していない。

(2)変形(変位)の計測

変形の測定は以下の変位計を使用した。

① スパン中央部の変形

梁の中立軸の両面で巻き込み型 (DTP-0.5MDS) 使用して計測し、その平均値を変形とした。

② 支点の変形

両支点の試験体上面でCDP-50を使用して計測した。

- (3) ひずみの計測
- ひずみの測定には2タイプのひずみゲージを使用した。
- 1) 木材用ひずみゲージ
- ①種類; PL-60-11 (東京測器製) 検長60mm
- ②貼り付け部位及び位置;

試験体の最外層ラミナの表面、位置はスパン長さ及び梁幅の中央部

- ③全試験体で計測した。
- 2) 鉄筋用ひずみゲージ
- ①種類; FLK-2-11-1LJBT (東京測器製) 検長 2mm
- ②貼り付け部位及び位置;

部位は鉄筋リブの両側、位置はスパン長さ中央部より約100mm離れた位置。

- ③ 試験体のゲージ数;4枚/1体(2枚/鉄筋で上下鉄筋各1本)。
- ④ 鉄筋ひずみを測定した試験体は8体である。
- (4) データの取り込み

荷重、変形及びひずみの計測は(株)東京測器研究所のTDS-530データロガーを使用した。

4. 2. 3 試験結果

(1)試験体重量と密度

試験体重量及び密度を表4.2.3~表4.2.5に示す。

1) 重量;試験体の重さ

2) 密度;試験体重さを体積で除したもの

3) 全乾時密度; JASに準じ、乾燥装置で乾燥後の重さを体積で除したもの

4) 小試片;高さ120mm×幅105mm×長さ75mm

表 4. 2. 3 集成材

46 15 1.1	搬入時		試験時		小試片	
集成材	重量(g)	密度	重量(g)	密度	試験時密度	全乾密度
W 1	17175	0.419	17320	0.422	0.398	0.356
W 2	17195	0.419	17300	0.422	0.387	0.344
W 3	17260	0.421	17375	0.423	0.412	0.370
W 4	17400	0.423	17525	0.426	0.406	0.363
W 5	17425	0.423	17530	0.426	0.417	0.374
W 6	17450	0.424	17560	0.427	0.396	0.352
W 7	17560	0.427	17725	0.431	0.397	0.357
W 8	18120	0.442	18245	0.445	0.433	0.390
W 9	18185	0.443	18270	0.445	0.418	0.372
W 1 0	18230	0.444	18355	0.447	0.456	0.404
平均値Ave.	17600	0.428	17721	0.431	0.412	0.368
標準偏差 S. D.	417	0.010	413	0.010	0.020	0.018
変動係数 C. V.	0. 024	0. 023	0. 023	0. 023	0. 049	0. 049

表4.2.4 CFシート入り

X4. 2. 4 OF 2 PAY						
OF8. 1311	搬入時		試験時		小試片	
CFシート入り	重量(g)	密度	重量(g)	密度	試験時密度	全乾密度
C1	17065	0.420	17170	0.422	0.418	0.373
C2	17320	0.428	17410	0.430	0.409	0.365
C3	17545	0.431	17645	0.434	0.437	0.389
C4	17545	0.434	17635	0.436	0.456	0.402
C5	17665	0.436	17770	0.439	0.452	0.400
C6	17750	0.439	17855	0.441	0.408	0.361
C7	17785	0.439	17890	0.441	0.444	0.395
C8	17885	0.442	17990	0.444	0.421	0.374
C9	18145	0.448	18260	0.451	0.457	0.407
C10	18390	0.454	18510	0.457	0.444	0.396
平均値 A ve.	17710	0.437	17814	0.440	0.434	0.386
標準偏差 S. D.	382	0.010	389	0.010	0.019	0.017

変動係数 C. V.	0.022	0.023	0.022	0.023	0.044	0.043
------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

表4.2.5 鉄筋入り

	搬入	.時		試験時	
鉄筋入り	重量(g)	密度	重量(g)	密度	鉄筋重さ ^{*1} を差引いた 重量 (g)
S1	24535	0.597	24615	0.599	17479
S2	24675	0.600	24760	0.602	17619
S3	24725	0.602	24810	0.604	17669
S4	24795	0.602	24865	0.604	17739
S5	24880	0.604	24995	0.607	17824
S6	24960	0.606	25045	0.609	17904
S 7	25220	0.613	25295	0.615	18164
S8	25310	0.616	25390	0.618	18254
S9	25525	0.621	25595	0.622	18469
S10	25540	0.620	25630	0.622	18484
平均値Ave.	25017	0.608	25100	0.610	17961
標準偏差 S. D.	360	0.009	359	0.009	360
変動係数 C. V.	0.014	0.014	0.014	0.014	0.020

^{*1)} 鉄筋重さ; D10 の重さ=560g/m、4本×3.15m×560g=7056g

(2) 試験体の含水率

試験体の含水率は、表4.2.6~表4.2.7に示す。

1) 電気抵抗式水分計 (ケット社製 moco 2 HM520) による含水率 スパン中央部付近の表裏面の平均値を示す。

2) 全乾法の含水率

JASに準じ、小試片 (120×105×75mm) を乾燥装置で乾燥した後の含水率。 (乾燥前重量-乾燥後重量) を乾燥後重量で除したもの。

表 4. 2. 6 集成材 (単位:%)

	1	_
集成材	電気抵抗式水分計(搬入時)	全乾法(試験時)
W 1	12.8	11.90
W 2	14.8	12.50
W3	10.8	11.36
W 4	10.0	11.88
W 5	10.8	11.68
W 6	10.5	12.65
W 7	10.0	11.14
W 8	10.3	10.96
W 9	11.0	12.32
W 1 0	10.8	12.63

注) 鉄筋入りは切断できないため小試片を作成していない。

平均値Ave.	11.2	11.90
標準偏差 S. D.	1.49	0.62
変動係数 C. V.	0.133	0.052

表4.2.7 FCシート入り (単位:%)

FCシート入り	電気抵抗式水分計(搬入時)	全乾法(試験時)
C1	12.0	12.15
C2	13.0	11.90
С3	14.5	12.50
C4	12.0	13.25
C5	12.0	13.02
C6	13.5	13.03
C7	13.5	12.37
C8	12.0	12.53
C9	15.0	12.15
C10	12.0	12.26
平均値 A ve.	13.0	12.52
標準偏差 S. D.	1.14	0.446
変動係数 C. V.	0.088	0.036

表 4. 2. 8 鉄筋入り(単位:%)

鉄筋入り	電気抵抗式水分計(搬入時)
S1	13.8
S2	14.5
S 3	15.5
S4	12.8
S5	14.3
S 6	14.3
S 7	17.0
S8	16.8
S9	15.8
S10	17.5
平均値Ave.	15.2
標準偏差 S. D.	1.6
変動係数 C. V.	0.102

(3) 荷重-変形曲線

試験体3タイプの荷重-変形曲線図を図4.2.1~図4.2.3に示す。

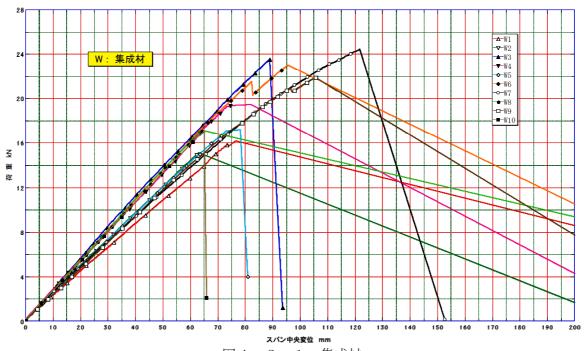


図4.2.1 集成材

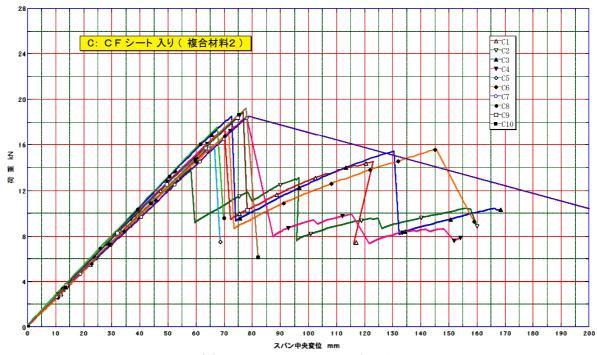


図4. 2. 2 CFシート入り

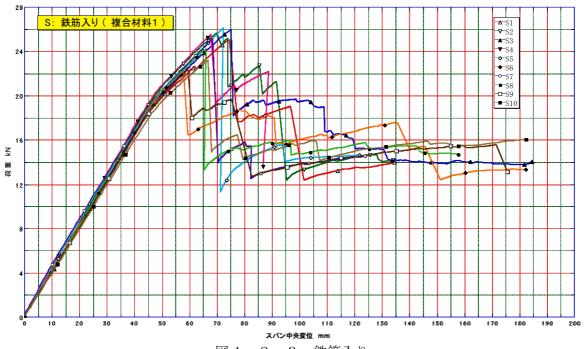


図4.2.3 鉄筋入り

- (4) 曲げヤング係数及び曲げ剛性
- 1) 曲げヤング係数は次式より算定した。; $E = 23 \times \Delta P \times L^3 / 108 \times \Delta \delta \times b \times h^3$
- 2) 曲げ剛性は次式より算定した。 ; E I =23 × Δ P ×L₃/ (1296 × Δ δ) ここで,
- L:スパン (L=3000mm)

ΔP:初期荷重点から最終荷重点の荷重増分

Δδ:初期荷重点から最終荷重点のたわみ増分

b:試験体の幅、h:試験体の梁せい

3) 打撃振動式によるヤング係数

測定は(株)エーティーエー製のグレーディングマシーン(HG-2001)を使用して行った。

- 4) 各タイプの曲げヤング係数及び曲げ剛性は表4.2.9に示す。
- 5) 5%値;信頼水準75%における95%下側許容限界値で、次式より算定した。5%値=平均値×(ばらつき係数=1-変動係数 $CV\times k$)。k=2.104以下の表も同じ扱い。

表4.2.9 集成材の曲げヤング係数及び各タイプの曲げ剛性

記号	Wのヤング係数 (10 ³ N/mm ²)		曲げ剛性(10 ¹¹ N·mm²)		m ²)
	静的載荷	打撃振動式	W	С	S
1	6. 86	8.0	1.04	1.17	1.96
2	7. 69	8.4	1.16	1.16	2.00
3	8. 76	8.9	1.33	1.24	1.91
4	8. 31	9.7	1.27	1.23	2.07
5	7. 59	8.6	1.16	1.25	2.08
6	8. 52	8.6	1.30	1.16	1.96
7	7. 43	8.3	1.13	1.16	2.13
8	8. 52	9.2	1.29	1.27	1.92
9	7. 34	8.2	1.11	1.25	1.90

1 0	8. 23	8.5	1.25	1.18	1.86
平均値 A ve.	7.93	8.6	1.20	1.21	1.98
標準偏差 S. D.	0.63	0.51	0.10	0.04	0.09
変動係数 C. V.	0.079	0.059	0.080	0.036	0.045
5%値	6.60	7.5	1.00	1.11	1.79

(参考)集成材のヤング係数はJAS値E75 (平均E7.5,下限E6.5)に相当する。

(5) 最大荷重 (Pmax)

最大荷重は表4.2.10に示す。

表4.2.10 各タイプの最大荷重(単位:N)

記号	W	С	S
1	16190	16750	25030
2	15110	13920	25620
3	23480	18500	25950
4	19460	18450	25540
5	17170	15900	26060
6	22990	17110	22260
7	24400	18510	25130
8	17160	17550	24200
9	21900	18840	22370
1 0	17110	19180	23200
平均值 A ve.	19497	17471	24536
標準偏差 S. D.	3410	1620	1448
変動係数 C. V.	0.175	0.093	0.059
5%値	12323	14062	21489

(6) 曲げ強度

1) 曲げ強度は次式より算定した。

曲げ強度=PL/bh²

ここで、P:最大荷重(N)

L:スパン長さ (mm)

b:梁幅、h:梁せい (mm)

なお、複合材料 (CFシート入り及び鉄筋入り) は断面を一様として扱った。(比較用)

表 4. 2. 11 曲げ強度(単位: N/mm²)

記号	W	С	S
1	32.06	32.90	49.31
2	29.94	27.50	50.41
3	46.47	36.35	51.16
4	38.35	36.51	50.17
5	33.81	31.49	51.21

6	45.43	33.86	43.81
7	48.14	36.56	49.48
8	33.96	34.70	47.73
0	43.34	37.28	44.09
1 0	33.80	37.89	45.60
平均值Ave.	38.53	34.51	48.30
標準偏差 S. D.	6.73	3.20	2.84
変動係数 C. V.	0.175	0.093	0.059
5%値	24.38	27.78	42.32

(参考) JAS値E65-F255は下限σ25.5N/mm²である。

(7) 最大荷重時変位

表 4. 2. 12 最大荷重時変位(単位:mm)

記号	W	С	S
1	76.56	70.37	74.55
2	63.08	58.13	69.79
3	88.87	72.79	75.19
4	82.12	78.08	67.79
5	78.32	66.69	72.35
6	95.76	71.69	57.91
7	121.71	78.84	68.36
8	65.40	67.69	65.95
9	105.82	76.75	59.45
1 0	65.22	77.84	66.84
平均值Ave.	84.29	71.89	67.82
標準偏差 S. D.	19.11	6.52	5.74
変動係数 C. V.	0.227	0.091	0.085

(8) 最大荷重に達するまでの時間

P max に達する時間は表 4. 2. 1 2 の最大荷重時変位を試験装置のクロスヘッド速度 1 5 mm/分で除して求めた。

表 4. 2. 13 最大荷重に達するまでの時間 (単位: sec.)

記号	W	С	S
1	306	281	298
2	189	233	279
3	267	291	301
4	328	312	271
5	313	267	289
6	383	287	232

7	487	315	273
8	262	271	264
9	423	307	238
1 0	261	311	267
平均値Ave.	322	288	271
標準偏差 S. D.	88	26	23
変動係数 C. V.	0.273	0.090	0.084

(9) 鉄筋入り試験体の第2ピーク時荷重と変位

表4.2.14 試験体Sの第2ピーク時荷重と変位

鉄筋入り	①最大荷重 (N)	②最大荷重時 変位(mm)	③第2ピーク時 荷重(N)	④第2ピーク時 変位(mm)
S1	25030	74.55	19040	96.70
S2	25620	69.79	22730	85.42
S 3	25950	75.19	19620	83.35
S4	25540	67.79	20900	76.50
S 5	26060	72.35	15570	94.32
S6	22260	57.91	18590	77.18
S 7	25130	68.36	15830	80.29
S8	24200	65.95	15950	96.76
S9	22370	59.45	19670	75.33
S10	23200	66.84	16470	77.34
平均値 A ve.	24536	67.82	18440	84.32
標準偏差 S. D.	1448	5.74	2.42	8.62
変動係数 C. V.	0.059	0.085	0.131	0.102

参考; (3/①=75%) (④/②=124%)

(10)破壊状況と各種構造性能

- 1) 試験体の破壊状況と構造性能を横並びで示す。
- 2) F J 部破壊; 最外層ラミナのフィンガージョイント部が破壊した。
- 3) 引張破壊;最外層ラミナが引張破壊した。

表 4. 2. 15 集成材

~	>14/9414				
集成材	最大荷重 (N)	曲げ強度 (N/mm²)	最大荷重時変 位(mm)	試験に要した 時間(sec.)	破壊状況
W 1	16190	32.06 76.56 306		306	FJ部破壊
W 2	15110	29.94	63.08	189	FJ部破壊
W3	23480	46.47	88.87	267	引張破壊
W 4	19460	38.35	82.12	328	FJ部破壊
W 5	17170	33.81	78.32	313	FJ部破壊
W 6	22990	45.43	95.76	383	FJ部破壊

W 7	24400	48.14	121.71	487	FJ部破壊
W 8	17160	33.96	65.40	262	FJ部破壊
W 9	21900	43.34	105.82	423	FJ部破壊
W 1 0	17110	33.80	65.22	261	FJ部破壊
平均値 A ve.	19497	38.53	84.29	322	
標準偏差 S. D.	3410	6.73	19.11	88	
変動係数 C. V.	0.175	0.175	0.227	0.273	
5%值	12323	24.38			

表4.2.16 CFシート入り

CFシート入 り	最大荷重 (N)	曲げ強度 (N/mm²)	最大荷重時変 位(mm)	試験に要した 時間(sec.)	破壊状況
C1	16750	32.90	70.37	281	FJ部破壊
C2	13920	27.50	58.13	233	FJ部破壊
СЗ	18500	36.35	72.79	291	FJ部破壊
C4	18450	36.51	78.08	312	節亀裂,FJ部破壊
C5	15900	31.49	66.69	267	FJ部破壊
C6	17110	33.86	71.69	287	FJ部破壊
C7	18510	36.56	78.84	315	FJ部破壊
C8	17550	34.70	67.69	271	FJ部破壊
C9	18840	37.28	76.75	307	FJ部破壊
C10	19180	37.89	77.84	311	FJ部破壊
平均値 A ve.	17471	34.51	71.89	288	
標準偏差 S. D.	1620	3.20	6.52	26	
変動係数 C. V.	0.093	0.093	0.091	0.090	
5%値	14062	27.78			

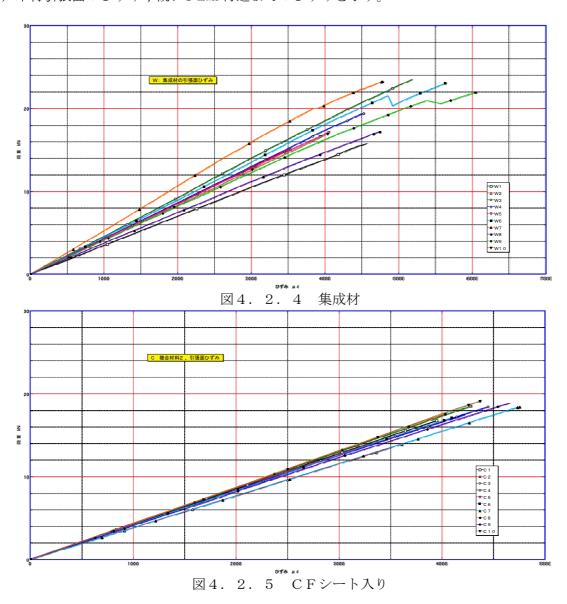
表4.2.17 鉄筋入り

		47 🗸 7			
鉄筋入り	最大荷重	曲げ強度	最大荷重時変	試験に要した	破壊状況
2011,110	(N)	(N/mm²)	位(mm)	時間(sec.)	
S1	25030	49.31	74.55	298	FJ部破壊
S2	25620	50.41	50.41 69.79 279		FJ部破壊
S 3	25950	51.16	75.19	301	FJ部破壊
S4	25540	50.17	67.79	271	FJ部破壊
S5	26060	51.21	72.35	289	FJ部破壊
S6	22260	43.81	57.91	232	FJ部破壊
S 7	25130	49.48	68.36	273	FJ部破壊
S8	24200	47.73	65.95	264	FJ部破壊
S9	22370	44.09	59.45	238	FJ部破壊

S10	23200	45.60	66.84	267	FJ部破壊
平均值 A ve.	24536	48.30	67.82	271	
標準偏差 S. D.	1448	2.84	5.74	23	
変動係数 C. V.	0.059	0.059	0.085	0.084	
5%値	21489	42.32			

(11) ひずみ曲線

1) 木材引張面のひずみ;概ねPmax付近までのひずみを示す。



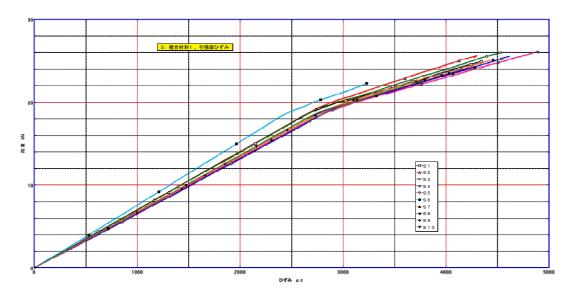
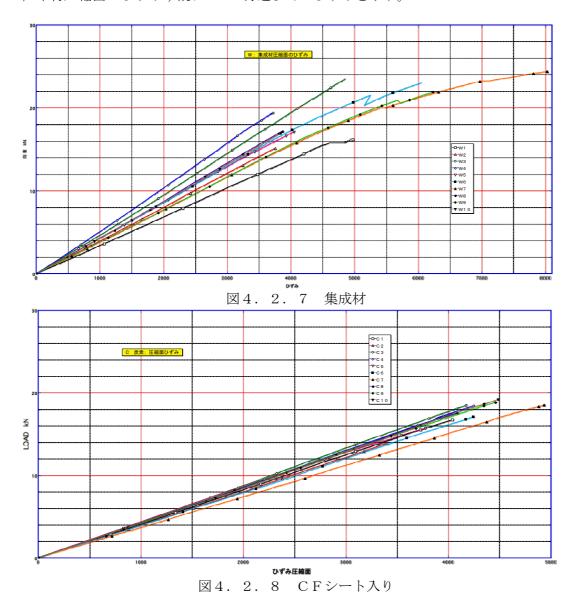
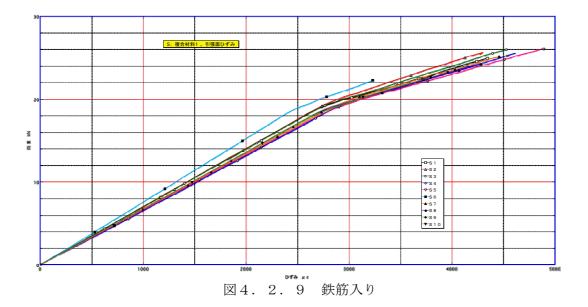


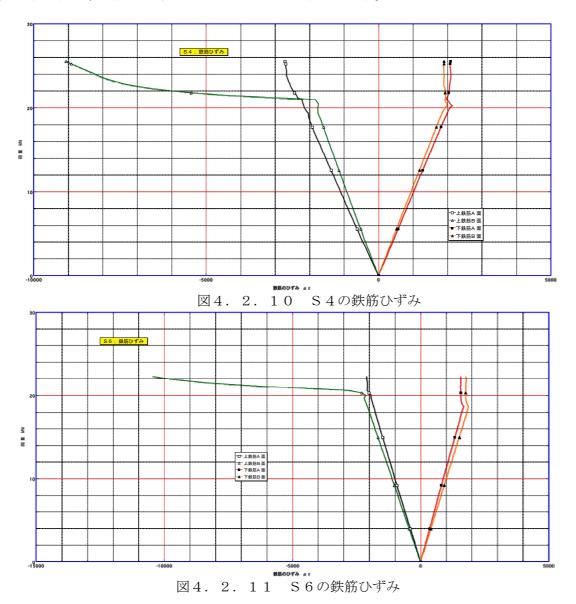
図4.2.6 鉄筋入り

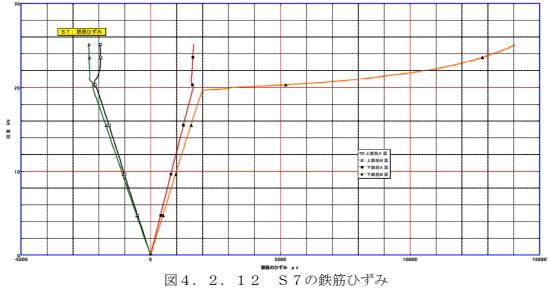
2) 木材圧縮面のひずみ; 概ね P max 付近までのひずみを示す。

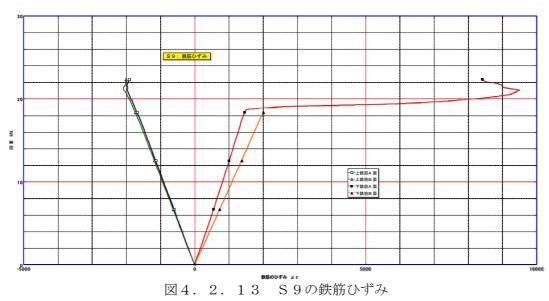




3) 鉄筋ひずみ;鉄筋リブ部のPmax付近までのひずみを示す。







4. 2. 4 試験結果のまとめ

- (1) 試験体に使用されたスギラミナは、全乾時密度の平均値は 0.3 7 から 0.3 8 程度であり、 一般的なスギ材である。
- (2) 試験体の全乾時含水率は平均で11.9%程度であり、温度20℃、関係湿度65%時の 平衡含水率12%に概ね達している。
- (3) 集成材のヤング係数は平均7.9MPa、下限値6.6MPaで、これはJAS規格のE7 5に相当する。
- (4) 曲げ剛性の平均値の比率は、W:C:S=1.0:1.0:1.6程度であった。
- (5) 最大荷重の平均値は、W=19.5kN、C=17.5kN、S=24.5kNで、その比率はW:C:S=1.0:0.9:1.25程度であった。
- (6) 上記の最大荷重の平均値を長期載荷試験の基準値(応力レベル100%)の数値とした。
- (7) 最大荷重又は曲げ強度の変動係数は、W=1 7.5%、C=9.3%、S=5.9%の順であるため、下側5%値に換算するとW=2 4.4 k N、C=2 7.8 k N、S=4 2.3 k Nとなり、平均値のWとCの順序が逆転した。
- (8) 複合材料(C、S)は、集成材にくらべ剛性、耐力ともばらつきが小さい傾向が確認できた。
- (9) 複合材料(C、S)の木材ひずみ曲線は集成材Wにくらべて、収束傾向する傾向が確認できた。
- (10) 鉄筋ひずみ曲線 (4体) では、概ね荷重が20kN前後で鉄筋に降伏が生じていることが確認でき、これは荷重-変形曲線の比例限度に符合している。
- (11) 鉄筋入りSの破壊状況は、まず鉄筋が降伏→最外層ラミナのフィンガージョイント部破壊(Pmax)→荷重低下→荷重再上昇→第2ピーク荷重→荷重低下→変形100mm~180 mm程度で試験終了。終了時の残存荷重は概ねPmaxの50%以上。
- (12) CFシート入りCも鉄筋入りSと似かよった破壊経過を示すが第2ピーク荷重→荷重低下時にCFしーとの部分的な引張破壊が生じ、荷重低下が大きい。残存荷重は鉄筋入りより小さいが確認できた範囲ではPmaxの50%前後であった。
- (13) 最外層ラミンのフィンガージョイント破壊は、ジョイントが破壊しているが接着状態は良好である。

資料1 ラミナのヤング係数

ヤング係数は山佐木材(株)が計測した数値である。

付表 1 集成材Wのラミナのヤング係数 (10³N/mm²)

記号	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	W10
圧縮側										
1層目ラミナ	7.95	6.83	8. 21	7. 14	6.68	8.01	7.40	7.68	7.11	8.38
2層目ラミナ	6.84	8.00	7. 93	7. 91	7. 14	6.88	7. 92	7.47	6.56	7. 34
3層目ラミナ	7.60	6.99	6.04	8.74	8. 32	6.44	7.71	8.14	7.86	6.51
4層目ラミナ	5.88	7.41	7.61	7.44	7. 43	7.85	6. 78	8.10	7.14	7. 70
				5	出張側					
参考 集成材のヤング係数 (10 ³ N/mm ²) 及び曲げ剛性 (10 ¹¹ N·mm ²)										
ヤング係数	6.86	7. 69	8.76	8.31	7. 59	8. 52	7. 43	8. 52	7. 34	8. 23
曲げ剛性	1.04	1. 16	1.33	1. 27	1. 16	1.30	1. 13	1. 29	1. 11	1. 25

付表 2 鉄筋入り複合材料のラミナのヤング係数 $(10^3 N/mm^2)$

1111	1121 21337 17 [X [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] []									
記号	S1	S2	S3	S4	S5	S 6	S7	S8	S9	S10
圧縮側										
1層目ラミナ	7. 99	7.32	7.60	8. 17	8. 36	7. 90	7.82	7.96	8.04	7.27
2層目ラミナ	7.71	7.86	7.88	7.60	7. 76	7.86	7.88	8.13	7.87	7.53
3層目ラミナ	8.21	8.11	8.05	7. 93	7.89	7. 75	7. 92	7.56	7.85	7.91
4層目ラミナ	7.75	8. 16	7. 55	7.69	8.00	7.83	7.64	7.95	7.75	7.54
引張側										
参考 複合材料の曲げ剛性 (10 ¹¹ N·mm ²)										
曲げ剛性	1.96	2.00	1.91	2.07	2.08	1.96	2. 13	1.92	1.90	1.86

注) 1層目、4層目は鉄筋用溝加工がない状態。

資料2 木材ひずみ

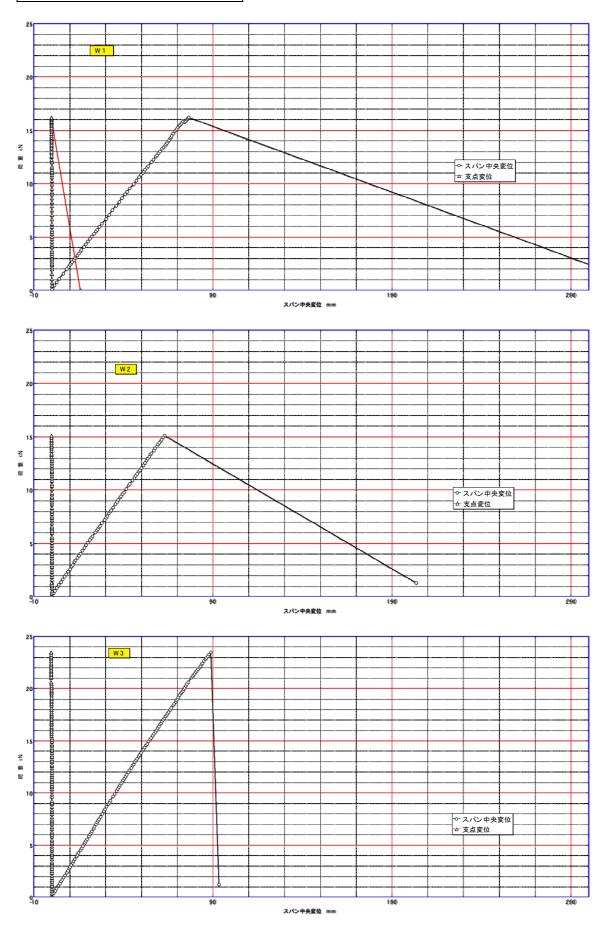
最大ひずみは、最大荷重時までに確認できた数値を示す。

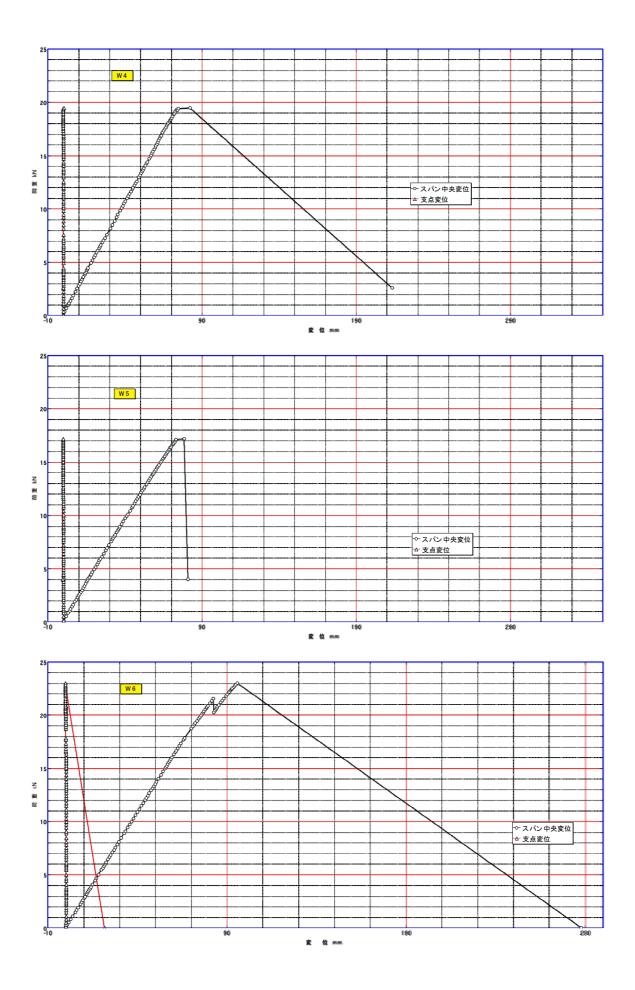
付表3 最大ひずみ(10-6)

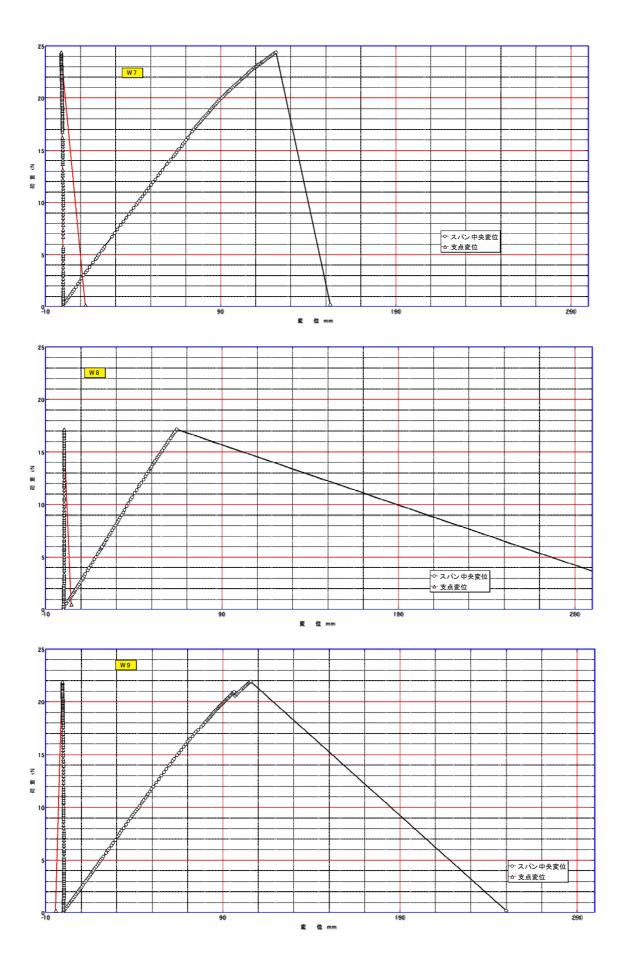
種類										
種類				CFシート入り;C						
試験体記号	圧縮側	引張側	圧縮側	引張側	圧縮側	引張側				
科學作品方	ひずみ	ひずみ	ひずみ	ひずみ	ひずみ	ひずみ				
1	4977	4580	4041	3951	4875	4341				
2	3756	3528	3401	3611	3976	4301				
3	4856	5184	4173	4282	4545	4527				
4	3718	4532	4246	4445	4496	4613				
5	4051	4054	3779	3762	4219	4891				
6	6053	5640	4244	4096	3167	3232				
7	8026	4785	4934	4753	4301	4457				
8	3869	4747	4087	4030	3985	4277				
9	6231	6048	4461	4657	3586	3722				
1 0	3840	4038	4485	4369	4333	3956				
平均值Ave.	4938	4714	4185	4196	4148	4232				
標準偏差 S. D.	1433	761	414	373	495	480				
変動係数 C. V.	0. 290	0. 161	0.099	0.089	0.119	0. 113				

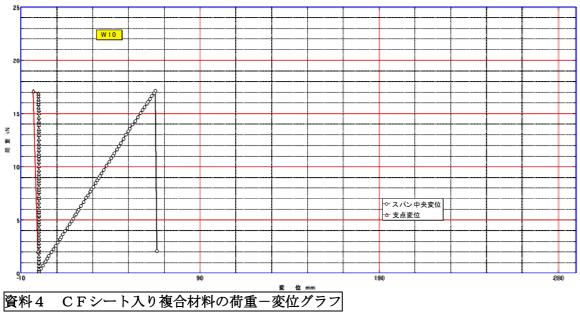
注)黒字; Pmax 時のひずみ、赤字; Pmax 前の荷重時のひずみ

資料3 集成材の荷重-変位グラフ

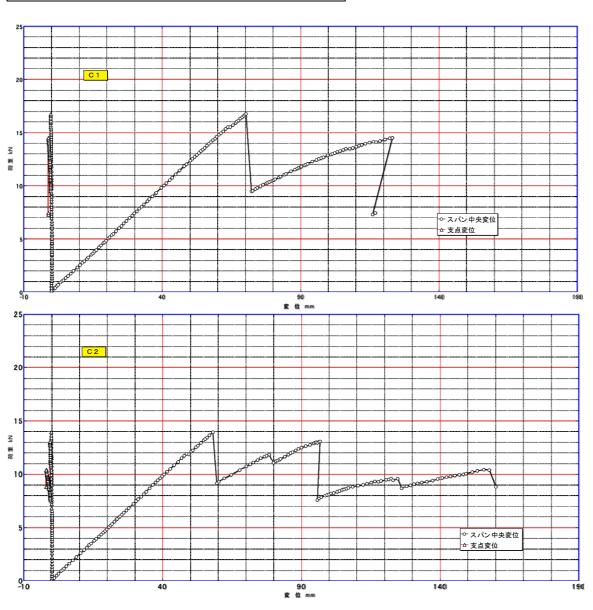


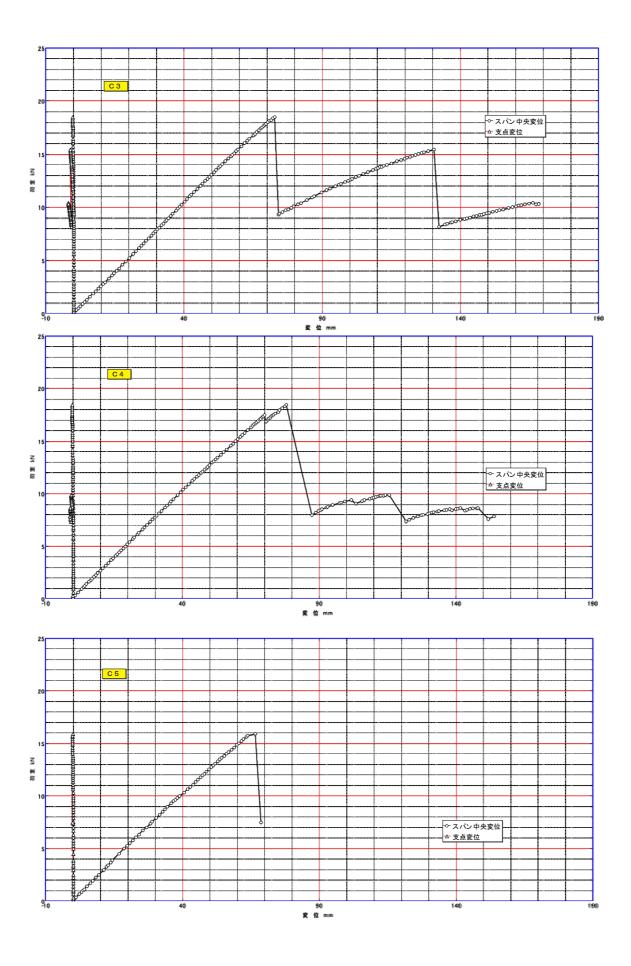


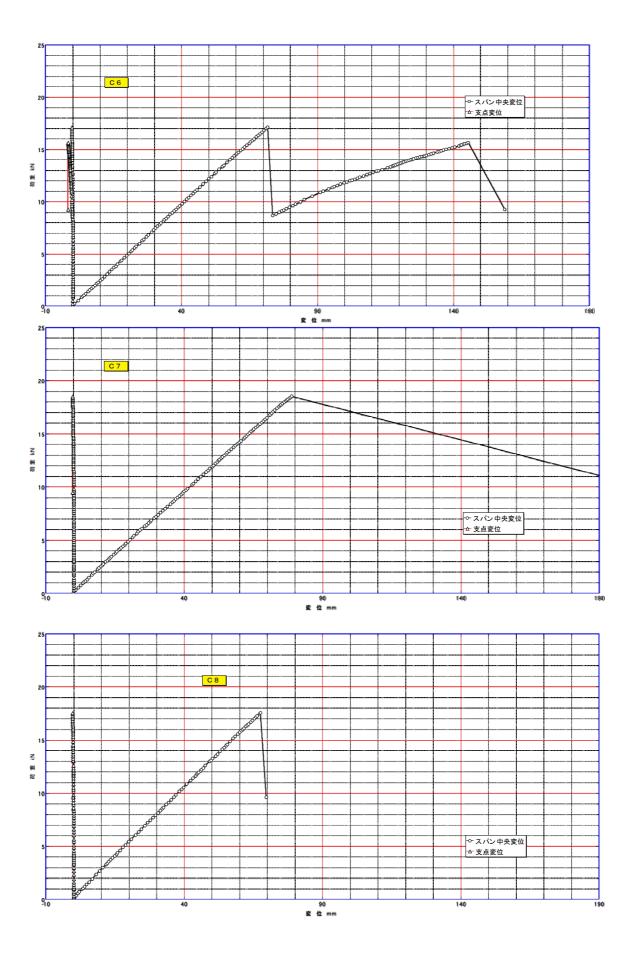


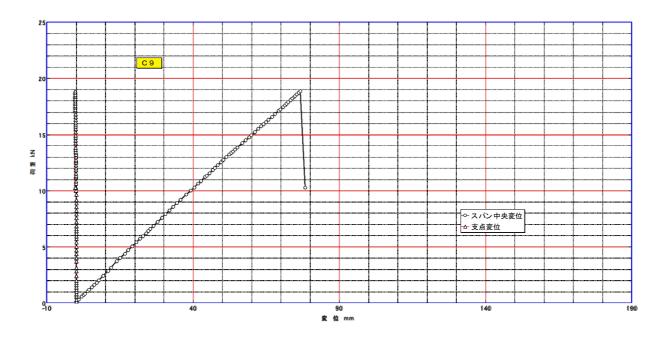


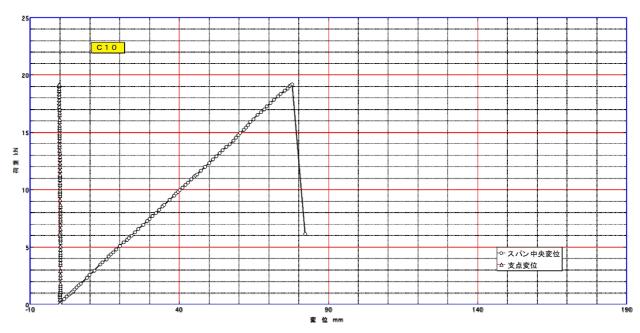
資料4

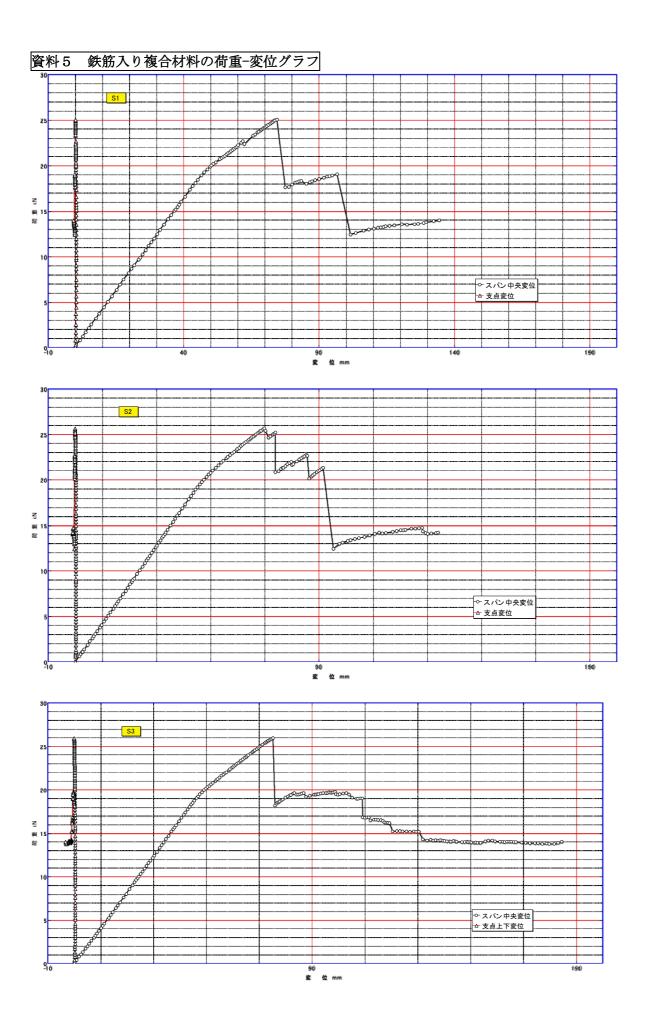


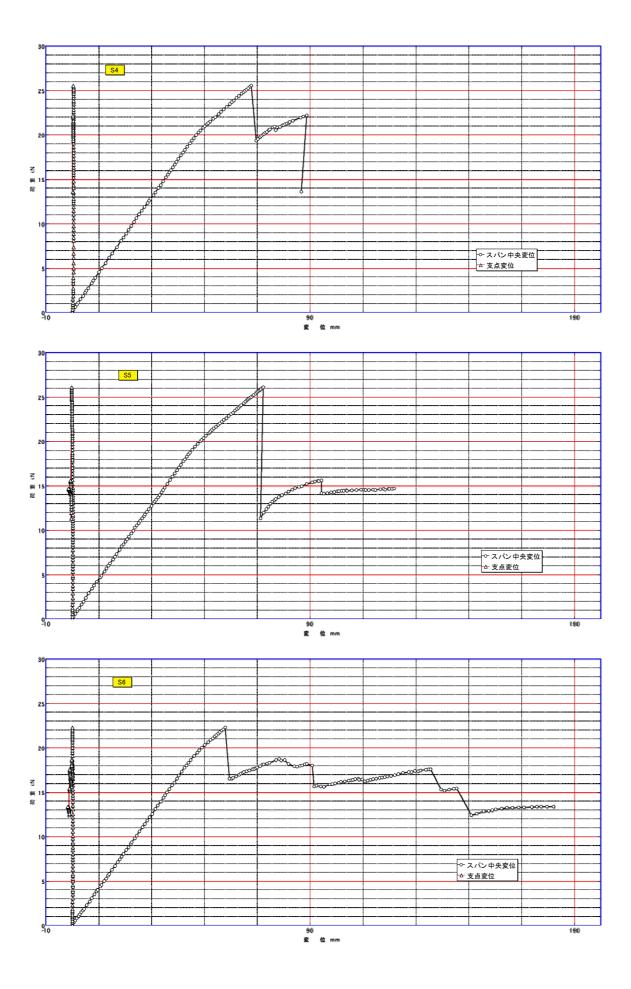


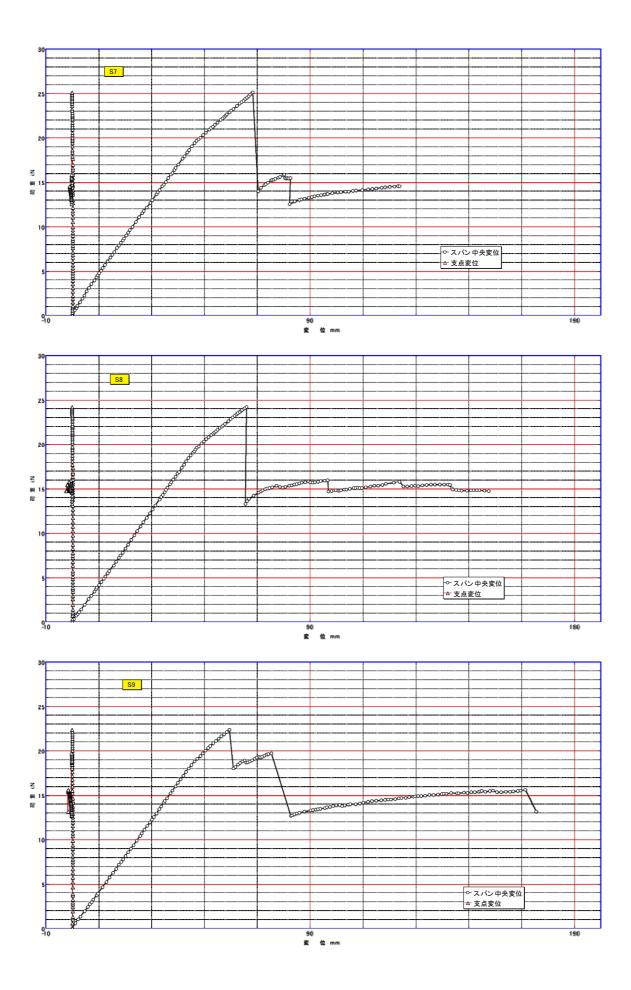


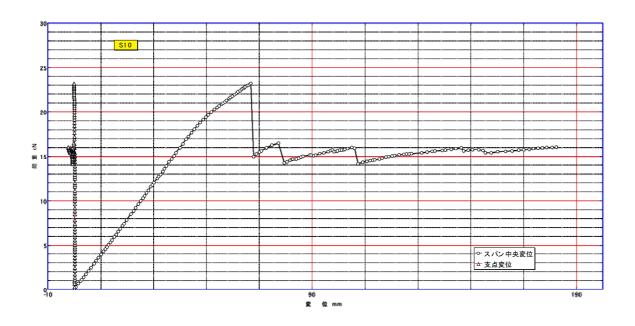












資料 6 接着性能

- JAS規格に準拠した減圧加圧試験 (2回) を実施した結果を以下に示す。
- JASの品質基準 (構造用集成材の接着の程度) は以下のとおりである。
- (1) すべての接着層の全体のはく離率は5%以下
- (2) 同一接着層のにおけるはく離率の長さの合計がそれぞれの接着層の長さの1/4以下
- (3) はく離長さ:mm、接着層長:mm

付表 4 集成材の結果

	No.	A 面 1 層	A 面 2 層	A 面 3 層	B 面 1 層	B 面 2 層	B 面 3 層	合計長さ	全体はく 離率 5%以下
	各層はく 離長さ	2. 45	0. 00	0. 00	0. 00	0. 00	0. 00	2. 45	0. 4%
W1-2	接着層長	106. 70	106. 50	107. 20	106. 50	106. 60	107. 20	640. 70	
	各層はく 離率	2. 3%	0	0	0	0	0	各 1/4 以下(25%)	
	各層はく 離長さ	0. 00	0. 00	0. 00	0.00	0. 00	0. 00	0. 00	0%
W2-2	接着層長	106. 90	105. 70	105. 45	107. 15	105. 90	105. 65	636. 75	
	各層はく 離率	0	0	0	0	0	0	各 1/4 以下(25%)	
	各層はく 離長さ	0. 00	0. 00	0. 00	6. 25	0. 00	0. 00	6. 25	1%
W3-2	接着層長	107. 95	107. 55	108. 30	107. 70	107. 40	108. 00	646. 90	
	各層はく 離率	0	0	0	5.8%	0	0	各 1/4 以下(25%)	
	各層はく							0.00	
W4 O	離長さ	0. 00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0%
W4-2	接着層長	106. 35	106. 00	105. 65	106. 30	106. 00	105. 70	636.00	
	各層はく 離率	0	0	0	0	0	0	各 1/4 以下(25%)	
	各層はく								
WE 0	離長さ	0. 00	0. 00	0. 00	0. 00	0. 00	0.00	0.00	0%
W5-2	接着層長	106. 80	106. 10	106. 60	106. 65	106. 10	105. 70	637. 95	
	各層はく 離率	0	0	0	0	0	0	各 1/4 以下(25%)	
	各層はく 離長さ	0. 00	3. 80	0. 00	0. 00	0. 00	0. 00	3. 80	0.00:
W6-2	接着層長	107. 40	107. 00	106. 45	107. 15	106. 75	106. 40	641. 15	0.6%
	各層はく 離率	0	3. 6%	0	0	0	0	各 1/4 以下(25%)	
	各層はく 離長さ	0. 00	0.00	0.00	0.00	0.00	0. 00	0. 00	0%
W7-2	接着層長	106. 75	106. 25	106. 50	107. 00	106. 40	106. 70	639. 60	070
	各層はく	0	0	0	0	0	0	各 1/4 以	

	離率							下 (25%)	
	各層はく 離長さ	13. 65	0. 00	0. 00	0. 00	2. 85	0. 00	16. 50	2. 6%
W8-2	接着層長	105. 60	105. 30	105. 55	105. 25	105. 20	105. 50	632. 40	2. 676
	各層はく 離率	12, 9%	0	0	0	2. 7%	0	各 1/4 以下(25%)	
	各層はく 離長さ	0. 00	0. 00	0. 00	0.00	0.00	0.00	0. 00	0%
W9-2	接着層長	107. 00	106. 10	105. 30	107. 00	106. 05	105. 05	636. 50	0,70
	各層はく 離率	0	0	0	0	0	0	1/4 以下 (25%)	
W4 0	各層はく 離長さ	0. 00	0.00	0.00	0.00	0.00	0. 00	0. 00	0%
W10-	接着層長	106. 45	106. 60	106. 00	106. 95	106. 80	106. 40	639. 20	
	各層はく 離率	0	0	0	0	0	0	各 1/4 以下(25%)	

付表5 CFシート入り複合材料の結果

13公 01 2 1 八分後日内在707年									
	No.	A 面 1 層	A 面 2 層	A 面 3 層	B 面 1 層	B 面 2 層	B 面 3 層	合計長さ	全体はく 離率 5%以下
01	各層はく 離長さ	0. 00	0. 00	3. 90	0. 00	0. 00	0. 00	3. 90	0.6%
C1- 2	接着層長	106. 45	107. 60	106. 40	106. 35	107. 25	106. 15	640. 20	
2	各層はく 離率	0	0	3. 7%	0	0	0	各 1/4 以下 (25%)	
00	各層はく 離長さ	0.00	0. 00	0.00	0. 00	0. 00	0. 00	0.00	0%
C2- 2	接着層長	105. 75	106. 80	106. 50	105. 85	106. 70	106. 40	638. 00	0,70
	各層はく 離率	0	0	0	0	0	0	各 1/4 以下 (25%)	
00	各層はく 離長さ	2. 65	0. 00	12. 70	0. 00	0. 00	18. 00	33. 35	5. 2%
C3- 2	接着層長	105. 90	106. 60	106. 00	106. 10	106. 55	106. 10	637. 25	<u> </u>
	各層はく 離率	2. 5%	0	12. 0%	0	0	17.0%	各 1/4 以下 (25%)	
0.4	各層はく 離長さ	0. 00	0. 00	0. 00	0. 00	0. 00	0.00	0.00	0%
C4- 2	接着層長	105. 70	106. 80	106. 05	105. 75	106. 85	106. 30	637. 45	0,0
	各層はく 離率	0	0	0	0	0	0	各 1/4 以下 (25%)	
C5-	各層はく 離長さ	0. 00	0.00	0.00	0.00	0. 00	0.00	0.00	0%
2	接着層長	106. 00	105. 80	105. 00	106. 00	105. 70	105. 05	633. 55	

1 1			1	ı	1			kt 4 /4 isi —	
	各層はく 離率	0	0	0	0	0	0	各 1/4 以下 (25%)	
	各層はく								
	離長さ	3. 40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3. 40	0.5%
C6- 2	接着層長	106. 55	106. 60	105. 20	106. 15	106. 40	105. 20	636. 10	0.070
	各層はく 離率	3. 2%	0/4	0/4	0/4	0/4	0/4	各 1/4 以下 (25%)	
	各層はく								
C7-	離長さ	0. 00	0.00	0.00	0.00	0. 00	0.00	0.00	0%
2	接着層長	104. 60	104. 35	104. 70	104. 65	104. 55	104. 65	627. 50	
	各層はく 離率	0	0	0	0	0	0	各 1/4 以下 (25%)	
	各層はく								
00	離長さ	0. 00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0%
C8- 2	接着層長	105. 95	107. 05	105. 65	106. 00	107. 10	105. 65	637. 40	
	各層はく 離率	0	0	0	0	0	0	各 1/4 以下 (25%)	
	各層はく								
00	離長さ	0. 00	0.00	0. 00	0. 00	0.00	0.00	0.00	0%
C9-	接着層長	105. 60	106. 90	105. 85	105. 55	106. 65	105. 50	636. 05	
_	各層はく 離率	0	0	0	0	0	0	各 1/4 以下 (25%)	
,	各層はく								
C10	離長さ	0. 00	0. 00	4. 70	0. 00	0. 00	0.00	4. 70	0.7%
-2	接着層長	105. 70	107. 25	106. 30	105. 50	107. 35	106. 50	638. 60	
_	各層はく 離率	0	0	4. 4%	0	0	0	各 1/4 以下 (25%)	

破壊状況等の写真

鉄筋入りラミナ



養生中の試験体



曲げ試験の状況



W集成材の破壊状況







C 炭素繊維入り









鉄筋入り







4. 3 長期構造性能

4. 3. 1 試験体

試験体は、4.2と同じ仕様の木質系複合材料であり、構造用集成材、ひき板に補強材として 異形鉄筋を挿入した複合材料、ひき板間に補強材として炭素繊維シートを挿入した複合材料の3 種類である。試験体の一覧を表 4.3.1.1 に、試験体の詳細を図 4.3.1.1 に、試験体の含水率、密 度、曲げ剛性及び曲げヤング係数を表 4.3.1.2 に、荷重一たわみ曲線を図 4.3.1.2~4 に、ひき板 の曲げヤング係数を表 4.3.1.3 に、鉄筋の引張試験結果を表 4.3.1.4 に、応力一ひずみ曲線を図 4.3.1.5 に示す。

表 4.3.1.1 試験体

衣 4. 3. 1. 1							
試験体 記号	寸法 mm	母材	補強材	数量			
W	幅:105 高さ:120 長さ:3200	 ・同一等級構成構造用集成材 ・樹種 スギ ・積層数 4 ・強度等級 E65-F255 ・ひき板 たて継ぎ(フィンガージョイント)あり ・ひき板相互の接着剤水性高分子イソシアネート系樹脂 		8			
S	幅:105 高さ:120 長さ:3250		・材質 SD295A (JIS G 3112) ・配筋 上下とも 2-D10 ・充填材 エポキシ樹脂	8			
C	幅:105 高さ:120 長さ:3200	・ひき板上記と同品質のものを使用・ひき板相互の接着剤水性高分子イソシアネート系樹脂	・材質 炭素繊維シート(炭素繊維+ エポキシ樹脂,繊維体積率 60%) ・断面寸法 厚さ 0.3mm,幅 105mm ・配置 上下とも1枚 ・ひき板との接着剤 水性高分子イソシアネート 系樹脂	8			

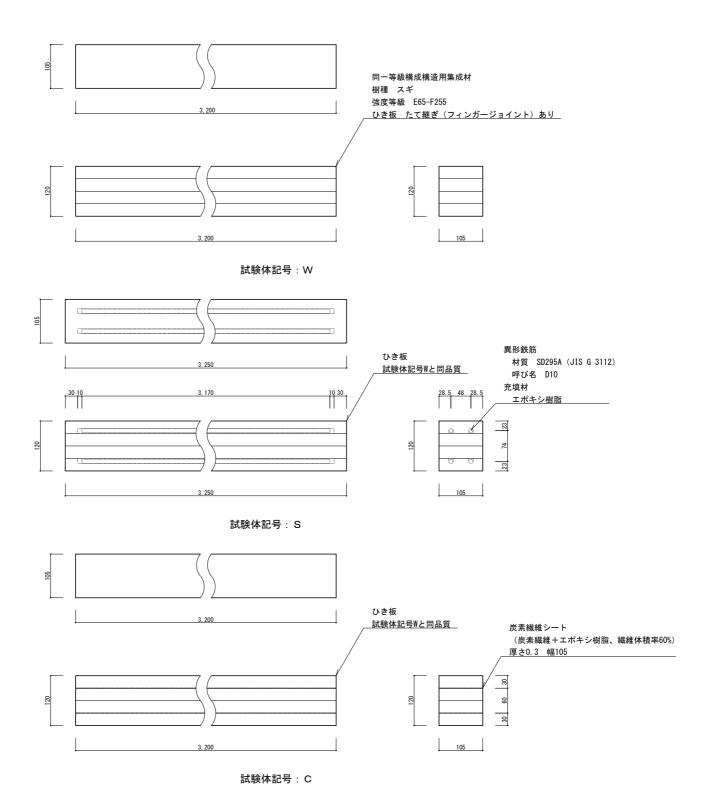


図 4.3.1.1 試験体

表 4.3.1.2 試験体の含水率,密度,曲げ剛性及び曲げヤング係数

		ı				
======================================	式験体	含水率	密度	曲げ剛性	曲げヤング係	数 $\times 10^3$ N/mm ²
記号	番号	%	${ m g/cm^3}$	$ imes 10^{11}~\mathrm{N}\cdot\mathrm{mm}^2$	載荷式	打擊振動式
	1	12. 7	0.42	1. 21	8.0	8.6
	2	13. 4	0.42	1. 20	8.0	8. 1
	3	12. 2	0.43	1. 19	7.9	8.3
	4	12.0	0.43	1. 33	8.8	9. 2
	5	12. 2	0.43	1. 23	8.2	8. 1
W	6	12. 9	0.44	1. 33	8.8	9. 4
	7	12.5	0.44	1. 21	8.0	9. 2
	8	13. 3	0.44	1. 22	8.0	8.6
	平均	12.7	0.43	1. 24	8.2	8. 7
	標準偏差	0.52	0.008	0.057	0.37	0. 52
	変動係数	0.041	0.019	0.046	0.045	0.060
	1	13. 7	0.43	2.03	/	
	2	13.6	0.44	2.07		
	3	13. 0	0.45	2.05		
	4	13. 9	0.45	2.05		
	5	13.8	0.46	2.06		
S	6	13. 2	0.46	2.08		
	7	13.8	0. 47	2.02		
	8	13. 7	0.45	2.00		
	平均	13.6	0.45	2.05		
	標準偏差	0.32	0.010	0.027		
	変動係数	0.023	0.023	0.013		
	1	13.6	0.42	1. 23	/	
	2	14. 6	0. 42	1. 12		
	3	14. 1	0. 43	1. 26		
	4	13.8	0. 44	1. 25		
	5	13. 1	0. 44	1. 22		
С	6	13. 1	0. 45	1. 23		
	7	14. 0	0. 45	1. 23		
	8	14. 2	0. 45	1. 23	/	/
	平均	13.8	0.44	1. 22		
	標準偏差	0.53	0.013	0.043		
	変動係数	0.038	0.029	0.035		

- (注) 1. 測定は、試験体搬入後、恒温恒湿室(20℃, 65%)で2~3週間の養生を行った後実施した。
 - 2. 含水率の測定は木材水分計(電気抵抗式,測定範囲 7~80%)を使用して行い,表中の値は 最外層のひき板6点の平均値である。
 - 3. 密度は、測定した試験体質量を体積(公称寸法より算出)で除した値である。なお、試験体記号Sについては、鉄筋の質量(公称寸法及び公称単位質量より算出)を差し引いた値を試験体質量とした。また、試験体記号Cについては、炭素繊維の質量(公称寸法及び公称単位質量より算出)を差し引いた値を試験体質量とした。
 - 4. 曲げ剛性は、3 等分 2 点荷重方式(支持スパン L=3m)による曲げ試験を行い、荷重ーたわみ曲線の初期荷重点と最終荷重点のデータを用い、次式より算出した。

曲げ剛性= $23 \times \Delta P \times L^3 / (1296 \times \Delta \delta)$

ここで、 AP: 初期荷重点から最終荷重点の荷重増分

Δδ:初期荷重点から最終荷重点のたわみ増分

- 5. 試験体記号 W の載荷式による曲げヤング係数は、曲げ剛性を断面二次モーメント $(105 \times 120^3 / 12 \text{ mm}^4)$ で除した値である。
- 6. 試験体記号 W の打撃振動式による曲げヤング係数の測定は、株式会社エーティーエー製のグレーディングマシン (HG-2001) を使用して行った。

試験体記号:W

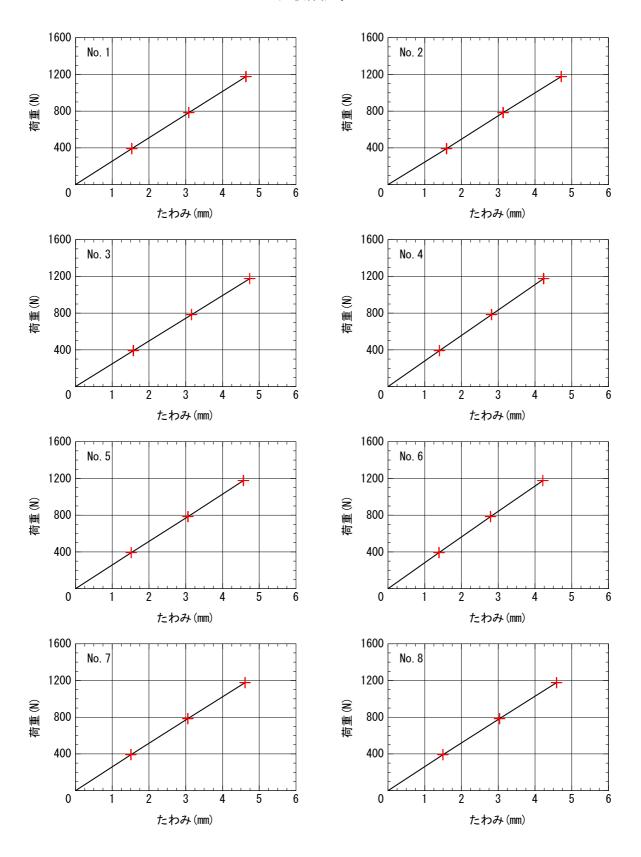


図 4.3.1.2 荷重-たわみ曲線

試験体記号: S

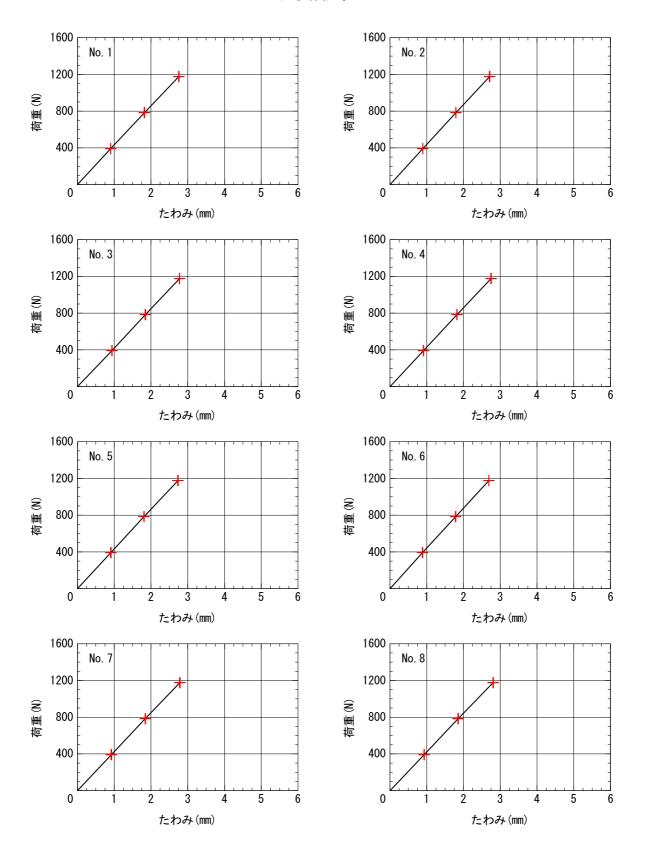


図 4.3.1.3 荷重-たわみ曲線

試験体記号: C

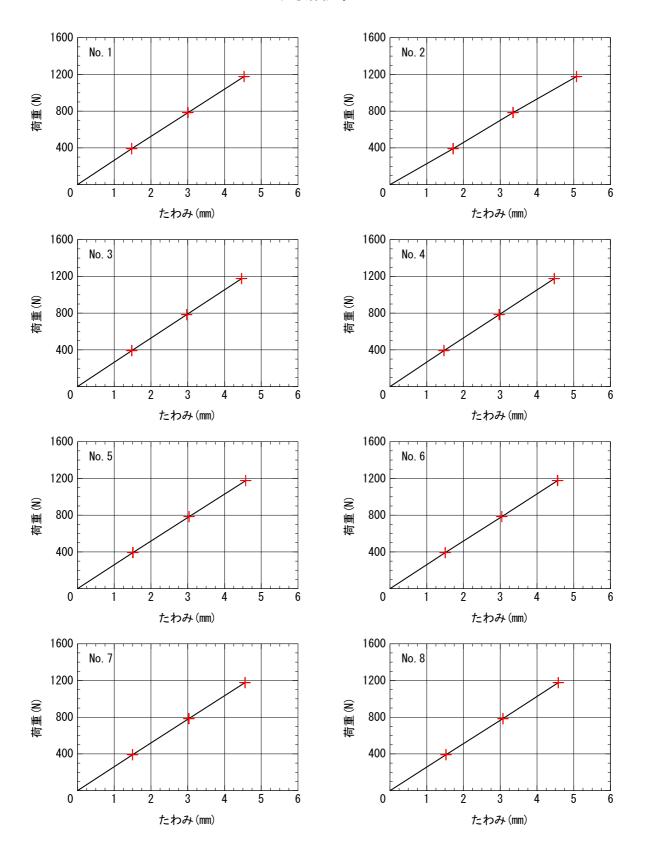


図 4.3.1.4 荷重-たわみ曲線

表 4.3.1.3 ひき板の曲げヤング係数

試験	倹体		曲げヤング係数	$\times 10^3 \text{ N/mm}^2$	
記号	番号	1層目	o 园 口	3 層目	4層目
記与	番写	(圧縮側最外層)	2 層目	3 唐日	(引張側最外層)
	1	6. 12	7.41	8. 15	7. 96
	2	7. 07	5. 75	8. 33	7. 40
W	3	6. 50	8. 24	8.08	7. 13
VV	4	8. 53	7.63	7. 67	7. 30
	5	6. 96	6. 90	7.32	8. 25
	6	7. 46	9.05	8. 10	8. 47
	1	7. 55	8.09	7. 46	7. 46
	2	7. 73	7. 70	7. 70	8. 14
S	3	7. 98	7. 91	7. 36	8. 11
	4	7. 95	7. 75	7. 98	7. 56
	5	8. 10	8. 59	7. 28	8. 39

(注) ひき板の配置は本試験時の配置である。

表 4.3.1.4 2 号試験片による鉄筋 (D10, SD295A) の引張試験結果

番号	降伏点 N/mm²	引張強さ N/mm²	破断伸び %	破断位置	ヤング率 ×10 ⁵ N/mm ²
1	363	523	25. 4	A	1. 92
2	362	524	28. 5	A	1. 98
3	365	525	25. 7	A	1. 96
平均	363	524	26. 5	_	1. 95

- (注) 1. 降伏点は、最初に試験力の減少が観察されるより前の応力の最大値である。
 - 2. ヤング率は、応力一ひずみ曲線から算出し、降伏点の 1/3 の点と 2/3 の点を結んだ直線の勾配とした。なお、ひずみの測定は、原標点間中央のリブ 2 ヵ所にひずみゲージ(軟鋼用、検長 2mm、抵抗値 120Ω)を貼付して行い、ひずみの値は 2 点の平均値とした。

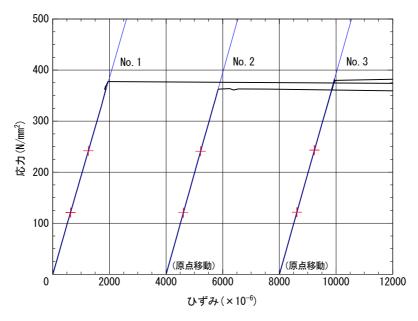


図 4.3.1.5 応力-ひずみ曲線

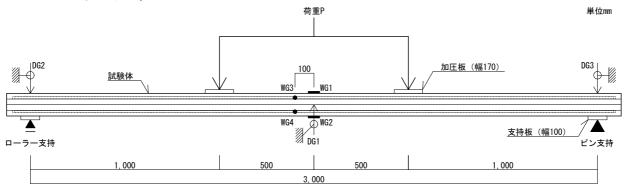
4. 3. 2 試験方法

試験方法を図4.3.2.1 に、載荷装置及び測定装置の一覧を表4.3.2.1 に、試験実施状況等を 写真 4.3.2.1~6 に示す。

試験は恒温恒湿室で実施した。てこ式の載荷ジグを使用して、試験体に3等分2点荷重方式 による一定の曲げ荷重を加え、試験体が破壊するまでの荷重継続時間を測定した。

変位の測定は、試験体中央及び支持点の上下方向変位について行った。また、ひずみの測定 は、木材及び鉄筋の材軸方向ひずみについて行った。

なお、載荷ジグのキャリブレーション、各試験体の載荷荷重及びデータのサンプリング方法 については後述する。



DG1:試験体中央の上下方向変位 DG2, DG3: 支持点の上下方向変位 変位の符号:加力方向への変位を+とする。

試験体のたわみ: DG1-(DG2+DG3)/2

WG1:木材上面の材軸方向ひずみ WG2:木材下面の材軸方向ひずみ

WG3:上端鉄筋の材軸方向ひずみ(リブ2ヵ所の平均) WG4:下端鉄筋の材軸方向ひずみ(リブ2ヵ所の平均)

図 4.3.2.1 試験方法

表 4.3.2.1 載荷装置及び測定装置

種類	名称		仕様及び用途				
	恒温恒湿室	温度 20℃±2	℃,湿度 65%±5%				
載荷装置	てこ式載荷ジグ	最大載荷容量	と: 45kN, 支持スパン: 3000mm, 6 台使用				
	載荷おもり	鋼板及びおも	鋼板及びおもり(鉛袋)				
	電気式変位計	容量:500mm,感度:20×10-6/mm,非直線性:0.3%RO					
	电风风发型司	容量:50mm,	容量:50mm,感度:100×10-6/mm,非直線性:0.2%R0				
		木材用	種類:木材長期測定用				
測定装置	ひずみゲージ	/ / / / / / / / / / / / / / / / / / /	検長:60mm,抵抗値:120Ω				
	い g みり 一 シ	鉄筋用	種類:軟鋼用				
			検長:2mm,抵抗値:120Ω				
	データロガー	変位及びひす	ずみ測定用				



写真 4.3.2.1 試験実施状況(全景)



写真4.3.2.2 おもりの設置状況



写真4.3.2.3 載荷点の状況



写真 4.3.2.4 載荷点の状況



写真 4.3.2.5 支持点 (ローラー) の状況



写真 4.3.2.6 支持点 (ピン) の状況

(1) 載荷ジグのキャリブレーション

試験に先立ち、載荷ジグ 6 台について、載荷点中央に発生する荷重とおもりの関係を測定した。おもりには鋼板を使用し、質量は 0.01 kg 単位で測定した。載荷点中央の荷重は、センターホール型ロードセル(容量: 50 kN、ヒステリシス: 0.3 %RO、非直線性: 0.3 %RO)を使用して測定した。

載荷点中央の荷重とおもりの関係を図4.3.2.2 に示す。図より各載荷ジグの回帰直線は次式となり、これらを用い、所定の載荷荷重に対応するおもりの質量を算出した。

 $P = a \times W + b$

ここで、P: 載荷点中央の荷重、W: おもり、a、b: 下表による。

載荷ジグ	1 号機	2 号機	3 号機	4 号機	5 号機	6 号機
а	0.0590	0. 0589	0. 0593	0.0587	0. 0589	0.0591
b	8. 793	8. 895	8. 849	8.852	8.846	8.884

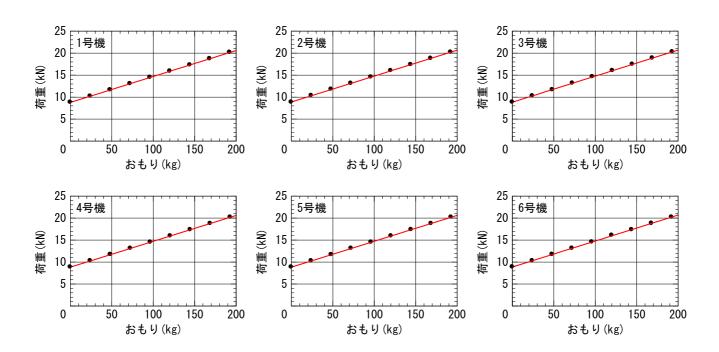


図 4.3.2.2 載荷点中央の荷重とおもりの関係

(2) 各試験体の載荷荷重

各試験体の載荷荷重の設定値を表 4.3.2.2 に示す。なお、基準強度については、4.2の曲 げ破壊試験で得られた最大荷重の平均値とした。

表 4.3.2.2 載荷荷重の設定値

試馬)	応力レベル	載荷荷重	基準強度	
記号	番号	%	kN	kN	
	1	95	18. 522		
	2	90	17. 547		
117	3	85	16. 572	10 407	
W	4	80	15. 598	19. 497	
	5	75	14. 623		
	6	75	14. 623		
	1	95	23. 309		
	2	90	22. 082		
S	3	85	20.856	24. 536	
	4	80	19. 629		
	5	75	18. 402		
	1	95	16. 597		
	2	90	15. 724		
C	3	85	14.850	17. 471	
	4	80	13. 977	11.411	
	5	80	13. 977		
	6	75	13. 103		

(3) データのサンプリング方法

載荷は、試験体に衝撃的な荷重が加わらないよう、加力部のバランスや試験体の変形状況を 確認しながら徐々に行った。載荷終了までの時間は約5分程度であった。

変位及びひずみのサンプリングは、載荷終了後、600 秒までは 10 秒間隔で行った。その後、90 分までは 1 分間隔,次いで、400 分までは 5 分間隔で行い、以後、1 時間間隔で行った。

試験室の温度及び湿度の測定はデジタル温湿度計を使用して行い,1時間間隔で測定した。測定結果を図4.3.2.3に示す。

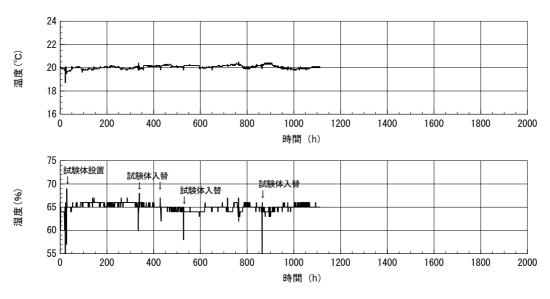


図 4.3.2.3 試験室の温度及び湿度

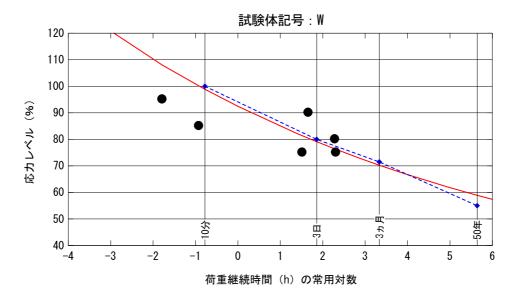
4. 3. 3 試験結果

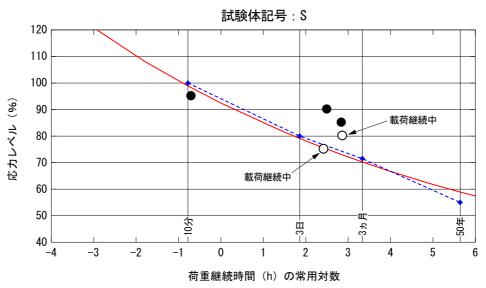
- (1) 試験結果の一覧を表 4.3.3.1 に、応力レベルと荷重継続時間の常用対数の関係を図 4.3.3.1 に示す。なお、図において、載荷中に破壊した試験体の荷重継続時間は1分として図示した。また、図中には参考として、建築基準法施行令第89条における応力レベルと荷重継続時間の関係(青色の破線)及びマディソン・カーブ(赤色の実線、y=108.4/ $x^{0.04635}+18.3$ 、ここで、x: 破壊までの時間 sec、y: 応力レベル%)を示した。
- (2) たわみ及びひずみの測定結果を表 4.3.3.2 に示す。
- (3) たわみ及びひずみと荷重継続時間の関係を図4.3.3.2~12に示す。
- (4) 試験体の破壊状況を写真 4.3.3.1~17 に示す。

表 4.3.3.1 試験結果

試験	倹体	応力	載荷荷重		荷重継続時間		
記号	番号	レベル %	軟何何里 kN	S	min	h	備考
	1	95	18. 522	_	_	_	載荷中に破壊
	2	90	17. 547	166810	2780. 2	46. 34	_
W	3	85	16. 572	440	7. 3	0. 12	_
VV	4	80	15. 598	706810	11780. 2	196. 34	_
	5	75	14. 623	120010	2000. 2	33. 34	_
	6	75	14. 623	746420	12440. 3	207. 34	_
	1	95	23. 309	730	12. 2	0. 20	_
	2	90	22. 082	1160410	19340. 2	322.34	_
S	3	85	20.856	2560810	42680. 2	711.34	_
	4	80	19. 629	(2708410)	(45140.2)	(752.34)	載荷継続中
	5	75	18. 402	(976810)	(16280. 2)	(271.34)	載荷継続中
	1	95	16. 597	22510	375. 2	6. 25	_
	2	90	15. 724	91210	1520. 2	25. 34	_
C	3	85	14. 850	(3925210)	(65420.2)	(1090.34)	載荷継続中
	4	80	13. 977	156010	2600. 2	43. 34	_
	5	80	13. 977	13210	220. 2	3. 67	_
	6	75	13. 103	(976810)	(16280. 2)	(271.34)	載荷継続中

⁽注) 載荷継続中の試験体については、2月29日時点の載荷時間を参考値として()内に示した。





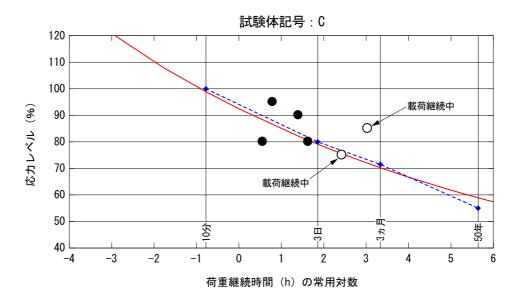


図 4.3.3.1 応力レベルと荷重継続時間の関係

表 4.3.3.2 たわみ及びひずみの測定結果

記 日本	試験体 応		応力	衣 4. 3. 3. 2	.3.2 にわみ及いいすみの側に結果 木材のひずみ ×10 ⁻⁶		鉄筋のひずみ ×10 ⁻⁶		
号 号 % h mm WG1 WG2 WG3 WG4 1 95 破壊直前 64.2 -4224 3880 2 90 載荷直後 72.6 -4277 4256 3 85 栽荷直後 69.3 -4204 3752 3 秋荷直後 69.3 -4204 3752 0.12 72.2 -4441 3870 5 75 載荷直後 60.0 -3542 3194 33.34 70.3 -3942 3500 6 75 載荷直後 63.1 -3906 3729 -8228 1575 207.34 72.2 -4270 4183 -8409 1544 2 90 載荷直後 63.1 -3906 3729 -8228 1575 0.20 65.2 -4091 3540 -8409 1544 2 90 載荷直後 53.3 -9972 3256 -1347 2348 3 85 載荷直後 49.7 -3185 3070 -1882 3527 711.34 63.1 グラジウト 4174 -1924 4471 4 80 載荷直後 43.0 -2490 2499 -1662 2068	-			載荷時間	たわみ	小州のいすみ ×10°			
2 90				h	mm	WG1	WG2	WG3	WG4
Year 1	W	1	95	破壊直前	64. 2	-4224	3880	/	
46.34 90.4 -5551 4875		2	90	載荷直後	72. 6	-4277	4256		
W 4 80 12 72.2 -4441 3870 4 80 最荷直後 57.6 -3431 3413 196.34 66.8 -4081 3928 5 75 載荷直後 60.0 -3542 3194 33.34 70.3 -3942 3500 6 75 載荷直後 54.5 -3322 3170 4 95 載荷直後 63.1 -3906 3729 -8228 1575 2 90 載荷直後 53.3 -2972 3256 -1347 2348 3 32.34 67.4 -3796 3914 -1389 3599 3 85 栽荷直後 49.7 -3185 3070 -1882 3527 711.34 63.1 グージアウト 4174 -1924 4471 4 80 萩荷直後 46.6 -2670 2731 -1694 1777 5 75 載荷直後 43.0 -2490 2499 -1662 2068 (271.34) (46.5) グージアウト (271				46. 34	90.4	-5551	4875		/
W 4 80 載荷直後 57.6 -3431 3413 5 75 載荷直後 60.0 -3542 3194 5 75 載荷直後 60.0 -3542 3194 6 75 載荷直後 54.5 -3322 3170 6 75 載荷直後 63.1 -3906 3729 -8228 1575 1 95 載荷直後 63.1 -3906 3729 -8228 1575 2 90 載荷直後 53.3 -2972 3256 -1347 2348 2 90 載荷直後 53.3 -2972 3256 -1347 2348 3 85 載荷直後 49.7 -3185 3070 -1882 3527 711.34 63.1 ゲージアウト 4174 -1924 4471 4 80 載荷直後 43.0 -2490 2499 -1662 2068 (271.34) (46.5) ゲージアウト (2716) (-1783) (2171) 1 95 載荷直後 66.9 -3650 3850 6 25 72.7 -4001 4206 2 90 載荷直後 70.2 -3879 4378		3	85	載荷直後	69. 3	-4204	3752		
4 80 196.34 66.8 -4081 3928 5 75 載荷直後 60.0 -3542 3194 6 75 載荷直後 54.5 -3322 3170 6 75 載荷直後 63.1 -3906 3729 -8228 1575 2 90 載荷直後 53.3 -2972 3256 -1347 2348 3 322.34 67.4 -3796 3914 -1389 3599 3 85 載荷直後 49.7 -3185 3070 -1882 3527 711.34 63.1 ゲージアウト 4174 -1924 4471 4 80 載荷直後 46.6 -2670 2731 -1694 1777 (752.34) (52.8) (-2986) (3118) (-1855) (1725) 5 75 載荷直後 43.0 -2490 2499 -1662 2068 (271.34) (46.5) ゲージアウト (2716) (-1783) (2171) 1 95 載荷直後 70.2 -3879 4378 <td>0. 12</td> <td>72. 2</td> <td>-4441</td> <td>3870</td> <td rowspan="5"></td> <td></td>				0. 12	72. 2	-4441	3870		
196,34 66.8 -4081 3928		4	80	載荷直後	57. 6	-3431	3413		
5 75 33.34 70.3 -3942 3500 6 75 載荷直後 54.5 -3322 3170 207.34 72.2 -4270 4183 1 95 載荷直後 63.1 -3906 3729 -8228 1575 2 90 載荷直後 53.3 -2972 3256 -1347 2348 322.34 67.4 -3796 3914 -1389 3599 322.34 67.4 -3796 3914 -1389 3599 3527 711.34 63.1 グージアウト 4174 -1924 4471 4 80 載荷直後 46.6 -2670 2731 -1694 1777 (752.34) (52.8) (-2986) (3118) (-1855) (1725) 5 75 載荷直後 43.0 -2490 2499 -1662 2068 (271.34) (46.5) グージアウト (2716) (-1783) (2171) 1 95 載荷直後 66.9 -3650 3850 6.25 72.7 -4001 4206 2 90 載荷直後 70.2 -3879 4378 4 80 載荷直後 58.1 -322				196. 34	66.8	-4081	3928		
1 95		5	75	載荷直後	60. 0	-3542	3194		
6 75 207.34 72.2 -4270 4183 // 1 95 載荷直後 63.1 -3906 3729 -8228 1575 2 90 載荷直後 53.3 -2972 3256 -1347 2348 3 322.34 67.4 -3796 3914 -1389 3599 3 85 載荷直後 49.7 -3185 3070 -1882 3527 711.34 63.1 ゲージアウト 4174 -1924 4471 4 80 載荷直後 46.6 -2670 2731 -1694 1777 4 80 載荷直後 43.0 -2490 2499 -1662 2068 (271.34) (46.5) ゲージアウト (2716) (-1783) (2171) 1 95 載荷直後 66.9 -3650 3850 6.25 72.7 -4001 4206 2 90 載荷直後 58.1 -3224 3168 (1090.34) (70.3) (-3774) (3803) 4 80 載荷直後 56.8 -2791 3003 4 80 載荷直後 56.0 -3182 3017 5 80 載荷直後 <td>33. 34</td> <td>70. 3</td> <td>-3942</td> <td>3500</td> <td></td>				33. 34	70. 3	-3942	3500		
1 95 載荷直後 63.1 -3906 3729 -8228 1575 2 90 載荷直後 53.3 -2972 3256 -1347 2348 3 322.34 67.4 -3796 3914 -1389 3599 3 85 載荷直後 49.7 -3185 3070 -1882 3527 711.34 63.1 ゲージアウト 4174 -1924 4471 4 80 載荷直後 43.0 -2490 2731 -1694 1777 (752.34) (52.8) (-2986) (3118) (-1855) (1725) 5 75 載荷直後 43.0 -2490 2499 -1662 2068 (271.34) (46.5) ゲージアウト (2716) (-1783) (2171) 1 95 載荷直後 66.9 -3650 3850 (2 90 載荷直後 70.2 -3879 4378 2 90 載荷直後 58.1 -3224 3168 (1090.34) (70.3) (-3774) (3803) 4 80 載荷直後 56.8 -2791 3003 4 80 載荷直後 56.0 -3182 3017 5 <td rowspan="2">6</td> <td rowspan="2">75</td> <td>載荷直後</td> <td>54. 5</td> <td>-3322</td> <td>3170</td> <td></td> <td></td>		6	75	載荷直後	54. 5	-3322	3170		
1 95 0.20 65.2 -4091 3540 -8409 1544 2 90 載荷直後 53.3 -2972 3256 -1347 2348 32.34 67.4 -3796 3914 -1389 3599 数 載荷直後 49.7 -3185 3070 -1882 3527 711.34 63.1 ゲージアウト 4174 -1924 4471 4 80 載荷直後 46.6 -2670 2731 -1694 1777 (752.34) (52.8) (-2986) (3118) (-1855) (1725) 5 75 載荷直後 43.0 -2490 2499 -1662 2068 (271.34) (46.5) ゲージアウト (2716) (-1783) (2171) 1 95 載荷直後 66.9 -3650 3850 6.25 72.7 -4001 4206 2 90 載荷直後 58.1 -3224 3168 (1090.34) (70.3) (-3774) (3803) 4 80 載荷直後 56.8 -2791 3003 5 80 載荷直後 56.0 -3182 3017 5 80 載荷直後 56.0 -3				207. 34	72. 2	-4270	4183	/	
S 0.20 65.2 -4091 3540 -8409 1544 2 90 載荷直後 53.3 -2972 3256 -1347 2348 322.34 67.4 -3796 3914 -1389 3599 3599 322.34 67.4 -3796 3914 -1389 3599 3599 3599 3599 3599 4 80 載荷直後 49.7 -3185 3070 -1882 3527 711.34 63.1 ゲージアウト 4174 -1924 4471 4 80 載荷直後 46.6 -2670 2731 -1694 1777 (752.34) (52.8) (-2986) (3118) (-1855) (1725) 5 75 載荷直後 43.0 -2490 2499 -1662 2068 (271.34) (46.5) ゲージアウト (2716) (-1783) (2171) 1 95 載荷直後 66.9 -3650 3850 6.25 72.7 -4001 4206 2 90 載荷直後 58.1 -3224 3168 3 85 載荷直後 56.8 -2791 3003 4 80 載荷直後 56.0<		1	95	載荷直後	63. 1	-3906	3729	-8228	1575
S 2 90 322.34 67.4 -3796 3914 -1389 3599 3 85 載荷直後 49.7 -3185 3070 -1882 3527 4 80 載荷直後 46.6 -2670 2731 -1694 1777 (752.34) (52.8) (-2986) (3118) (-1855) (1725) 5 75 載荷直後 43.0 -2490 2499 -1662 2068 (271.34) (46.5) ゲージアウト (2716) (-1783) (2171) 1 95 載荷直後 66.9 -3650 3850 2 90 載荷直後 70.2 -3879 4378 2 90 載荷直後 58.1 -3224 3168 3 85 載荷直後 58.1 -3224 3168 4 80 載荷直後 56.8 -2791 3003 4 80 載荷直後 56.0 -3182 3017 5 80 載荷直後 56.0 -3182 3017 5 80 載荷直後 52.1 -3083 3043				0.20	65. 2	-4091	3540	-8409	1544
S 322.34 67.4 -3796 3914 -1389 3599 3 85 載荷直後 49.7 -3185 3070 -1882 3527 711.34 63.1 ゲージアウト 4174 -1924 4471 4 80 載荷直後 46.6 -2670 2731 -1694 1777 (752.34) (52.8) (-2986) (3118) (-1855) (1725) 5 75 載荷直後 43.0 -2490 2499 -1662 2068 (271.34) (46.5) ゲージアウト (2716) (-1783) (2171) 1 95 載荷直後 66.9 -3650 3850 6.25 72.7 -4001 4206 2 90 載荷直後 58.1 -3224 3168 (1090.34) (70.3) (-3774) (3803) 3 85 載荷直後 56.8 -2791 3003 4 80 載荷直後 56.0 -3182 3017 5 80 載荷直後 56.0 -3182 3017 5 80 載荷直後 52.1 -3083 3043		2	90	載荷直後	53. 3	-2972	3256	-1347	2348
S 3 85 711.34 63.1 ゲージアウト 4174 -1924 4471 4 80 載荷直後 (752.34) 46.6 -2670 2731 -1694 1777 5 75 載荷直後 (271.34) 43.0 -2490 2499 -1662 2068 6 271.34) (46.5) ゲージアウト (2716) (2716) (-1783) (2171) 1 95 載荷直後 66.9 -3650 72.7 3850 -4001 4206 2 90 載荷直後 (1090.34) 70.2 -3879 -4120 4378 4778 3 85 載荷直後 (1090.34) 58.1 -3224 (70.3) 3168 (3803) 4 80 載荷直後 43.34 56.8 -2791 -2937 3003 3185 5 80 載荷直後 3.67 59.5 -3406 3309 3309 3043				322.34	67. 4	-3796	3914	-1389	3599
1 134 63.1 ゲージアウト 4174 -1924 4471 4 80	S	3	85	載荷直後	49. 7	-3185	3070	-1882	3527
4 80 (752.34) (52.8) (-2986) (3118) (-1855) (1725) 5 75 載荷直後 (271.34) 43.0 -2490 (46.5) 2499 (-1662) -1662 (-1783) 2068 (2711) 1 95 載荷直後 66.9 -3650 -3650 3850 4378 2 90 載荷直後 25.34 70.2 77.9 -4001 -4120 4206 4778 3 85 載荷直後 (1090.34) 58.1 (70.3) -3224 (-3774) 3168 (3803) 4 80 載荷直後 43.34 56.8 62.1 -2791 -2937 3003 3185 5 80 載荷直後 3.67 56.0 59.5 -3406 3309 3309 3043				711. 34	63. 1	ゲージアウト	4174	-1924	4471
(752.34) (52.8) (-2986) (3118) (-1855) (1725) 載荷直後		4	80	載荷直後	46.6	-2670	2731	-1694	1777
5 75 (271.34) (46.5) ゲージアウト (2716) (-1783) (2171) 1 95 載荷直後 66.9 -3650 3850				(752.34)	(52.8)	(-2986)	(3118)	(-1855)	(1725)
(271.34) (46.5) ゲージアウト (2716) (-1783) (2171) 載荷直後 66.9		5	75	載荷直後	43.0	-2490	2499	-1662	2068
C 1 95 6.25 72.7 -4001 4206 2 90 載荷直後 70.2 -3879 4378 2 25.34 77.9 -4120 4778 3 85 載荷直後 58.1 -3224 3168 (1090.34) (70.3) (-3774) (3803) 4 80 載荷直後 56.8 -2791 3003 43.34 62.1 -2937 3185 5 80 載荷直後 56.0 -3182 3017 5 3.67 59.5 -3406 3309 6 75 載荷直後 52.1 -3083 3043				(271.34)	(46.5)	ゲージアウト	(2716)	(-1783)	(2171)
C 6. 25 72. 7 -4001 4206 2 90 載荷直後 70. 2 -3879 4378 2 25. 34 77. 9 -4120 4778 3 85 載荷直後 58. 1 -3224 3168 (1090. 34) (70. 3) (-3774) (3803) 4 80 載荷直後 56. 8 -2791 3003 43. 34 62. 1 -2937 3185 5 80 載荷直後 56. 0 -3182 3017 3. 67 59. 5 -3406 3309 6 75 載荷直後 52. 1 -3083 3043		1	95	載荷直後	66. 9	-3650	3850	/	1
C 2 90 25. 34 77. 9 -4120 4778 3 85 載荷直後 (1090. 34) 58. 1 (70. 3) -3224 (3168) 4 80 載荷直後 56. 8 (2791) 3003 (3803) 4 43. 34 (62. 1 (2937) 3185 5 80 載荷直後 56. 0 (3803) 6 75 載荷直後 56. 0 (3803) 52. 1 (3803) 3017 (3803) 3 (309) 3017 (3803) 4 3017 (3803) 5 80 3017 (3803) 5 3017 (3803) 3 (3017) 3017 (3803) 3 (3017) 3017 (3803) 4 3017 (3803) 5 80 4 50. 0 (3803) 5 3017 (3803) 3 (3017) 3017 (3803) 3 (3017) 3017 (3803) 4 3017 (3803) 5 3017 (3803) 6 75 (3803) 7 3017 (3803) 80 (3803) 3017 (3803) 80 (3803) 3017 (3803) 80 (3803) 3017 (3803) 80 (3803) 3017 (3803) 80 (3803) 3017 (3803) 80 (3803) 3017 (3803) 80 (3803) 3017 (3803) <t< td=""><td>6. 25</td><td>72. 7</td><td>-4001</td><td>4206</td><td></td><td> / </td></t<>				6. 25	72. 7	-4001	4206		/
C 25. 34 77. 9 -4120 4778 3 85 載荷直後 (1090. 34) 58. 1 (70. 3) -3224 (-3774) 3168 (3803) 4 80 載荷直後 43. 34 56. 8 62. 1 -2791 -2937 3003 3185 5 80 載荷直後 3. 67 56. 0 59. 5 -3406 3309 3017 309 6 75 載荷直後 52. 1 52. 1 -3083 3043		2	90	載荷直後	70. 2	-3879	4378		/
C 3 85 (1090. 34) (70. 3) (-3774) (3803) 4 80 載荷直後 56. 8 -2791 3003 4 43. 34 62. 1 -2937 3185 5 80 載荷直後 56. 0 -3182 3017 3. 67 59. 5 -3406 3309 6 75 載荷直後 52. 1 -3083 3043	С			25. 34	77. 9	-4120	4778		/
C (1090. 34) (70. 3) (-3774) (3803) 4 80 載荷直後 56. 8 -2791 3003 43. 34 62. 1 -2937 3185 5 80 載荷直後 56. 0 -3182 3017 3. 67 59. 5 -3406 3309 6 75 載荷直後 52. 1 -3083 3043		3	85	載荷直後	58. 1	-3224	3168		/
4 80 載荷直後 43.34 56.8 62.1 -2791 -2937 3003 3185 5 80 載荷直後 3.67 56.0 59.5 -3182 -3406 3017 3309 6 75 載荷直後 52.1 52.1 -3083 3043				(1090.34)	(70.3)	(-3774)	(3803)		
43.34 62.1 -2937 3185 5 80 載荷直後 56.0 -3182 3017 3.67 59.5 -3406 3309 6 75 載荷直後 52.1 -3083 3043		4	80	載荷直後	56.8	-2791	3003		
5 80 3.67 59.5 -3406 3309 6 75 載荷直後 52.1 -3083 3043		1	00	43. 34	62. 1	-2937	3185		
3.67 59.5 -3406 3309 6 75 載荷直後 52.1 -3083 3043		5	80	載荷直後	56. 0	-3182	3017		
				3. 67	59. 5	-3406	3309] /	
(271. 34) (59. 2) (-3568) (3389)		6	75	載荷直後	52. 1	-3083	3043		/
				(271. 34)	(59. 2)	(-3568)	(3389)		/

⁽注) 載荷継続中の試験体については、参考値として2月29日時点のデータを()内に示した。

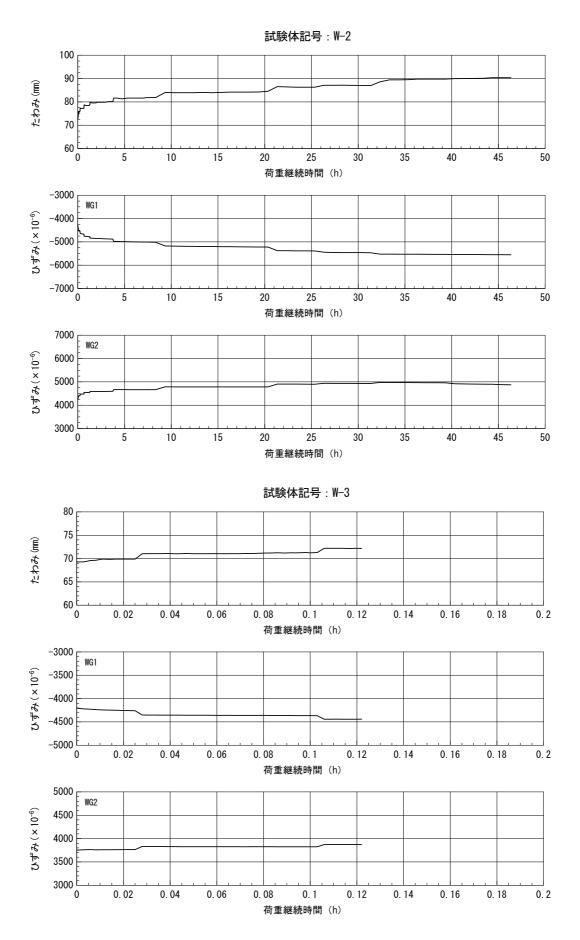


図 4.3.3.2 たわみ及びひずみと荷重継続時間の関係

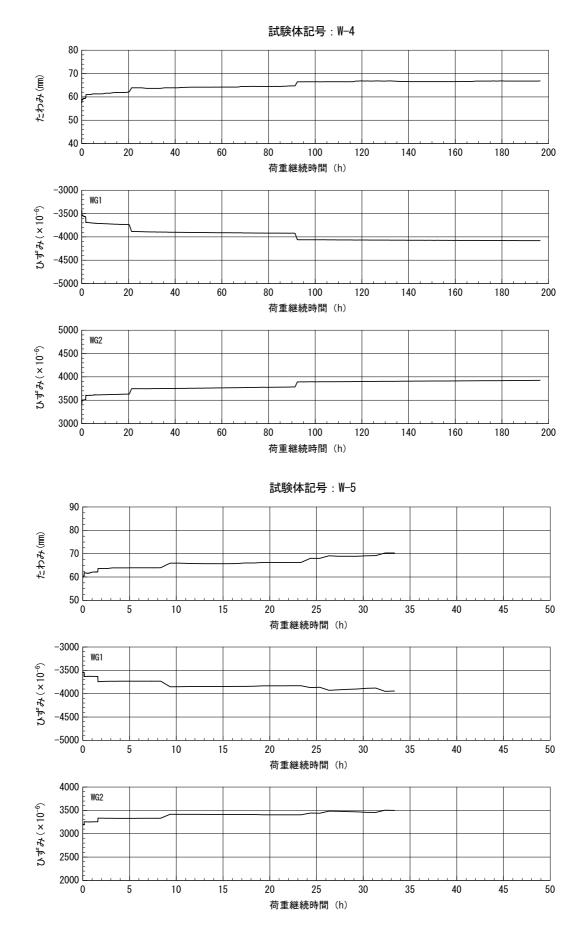


図 4.3.3.3 たわみ及びひずみと荷重継続時間の関係

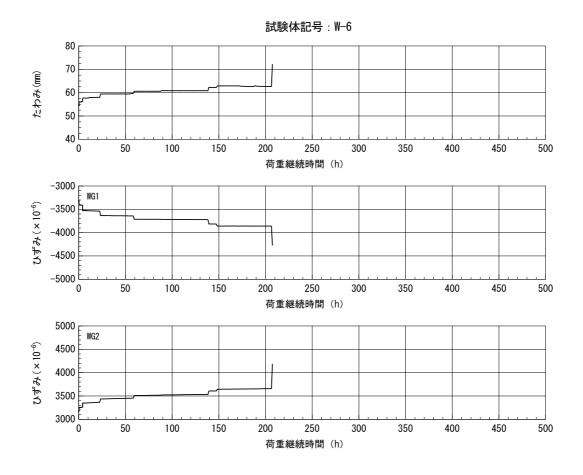


図 4.3.3.4 たわみ及びひずみと荷重継続時間の関係

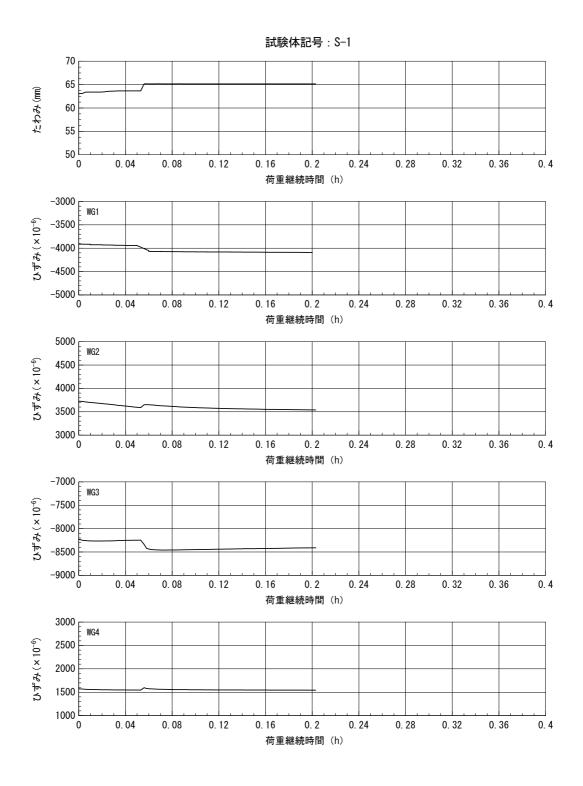


図 4.3.3.5 たわみ及びひずみと荷重継続時間の関係

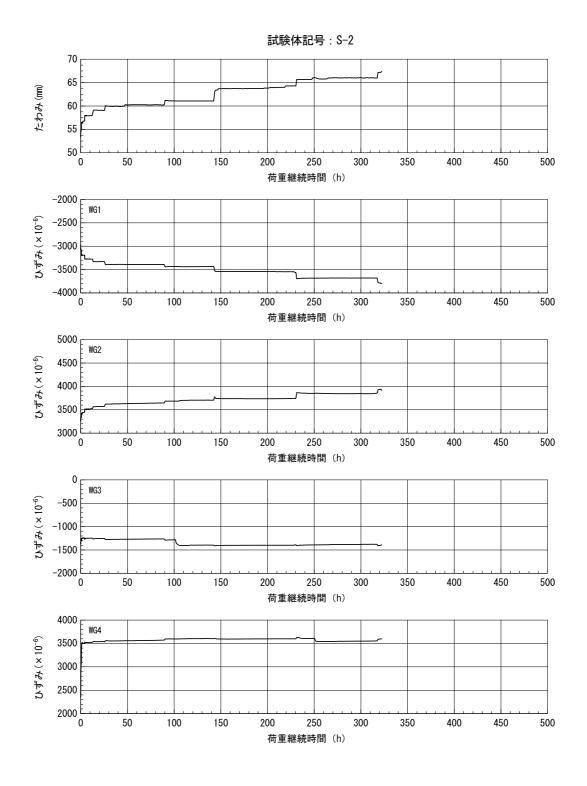


図 4.3.3.6 たわみ及びひずみと荷重継続時間の関係

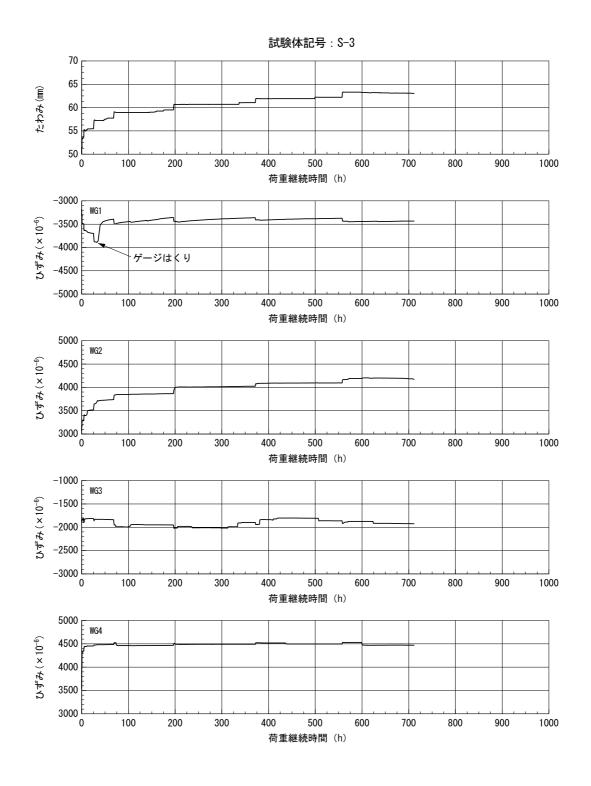


図 4.3.3.7 たわみ及びひずみと荷重継続時間の関係

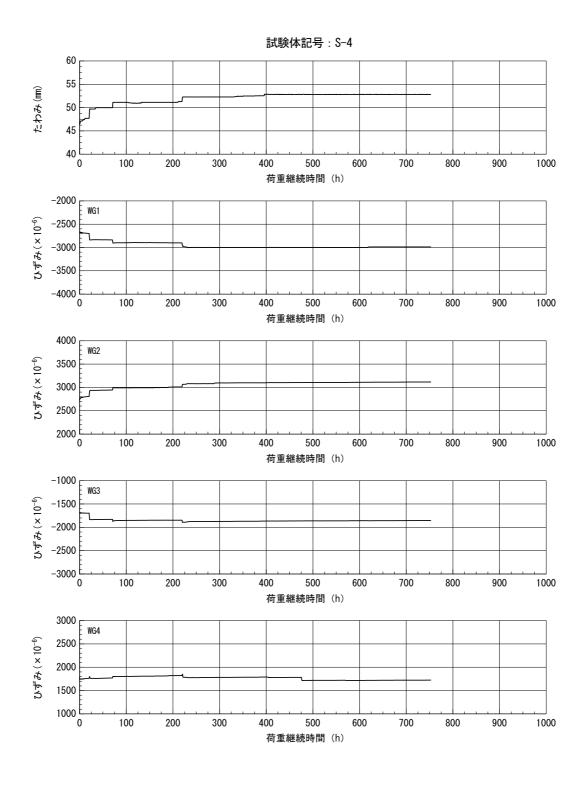


図4.3.3.8 たわみ及びひずみと荷重継続時間の関係

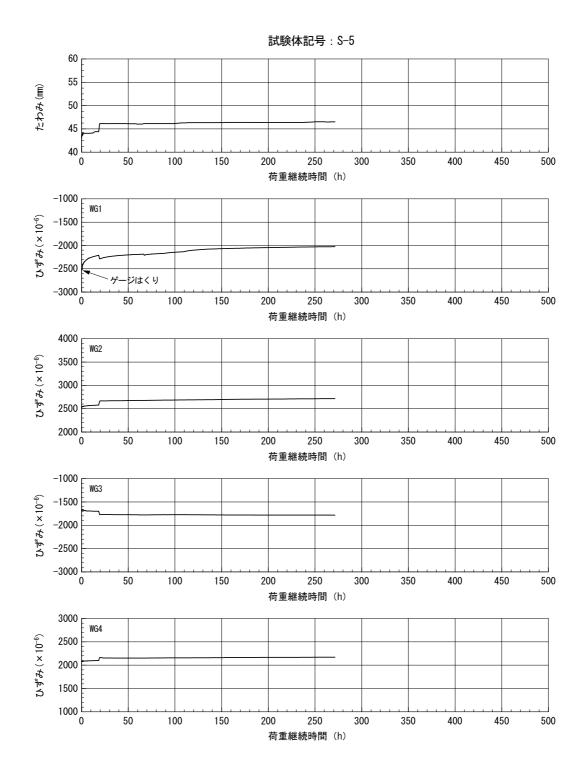


図 4.3.3.9 たわみ及びひずみと荷重継続時間の関係

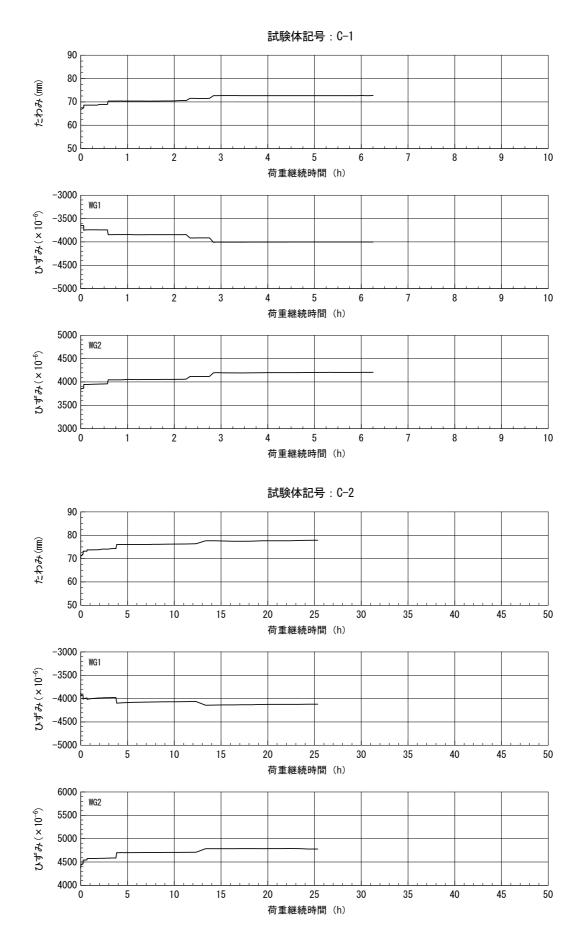


図 4.3.3.10 たわみ及びひずみと荷重継続時間の関係

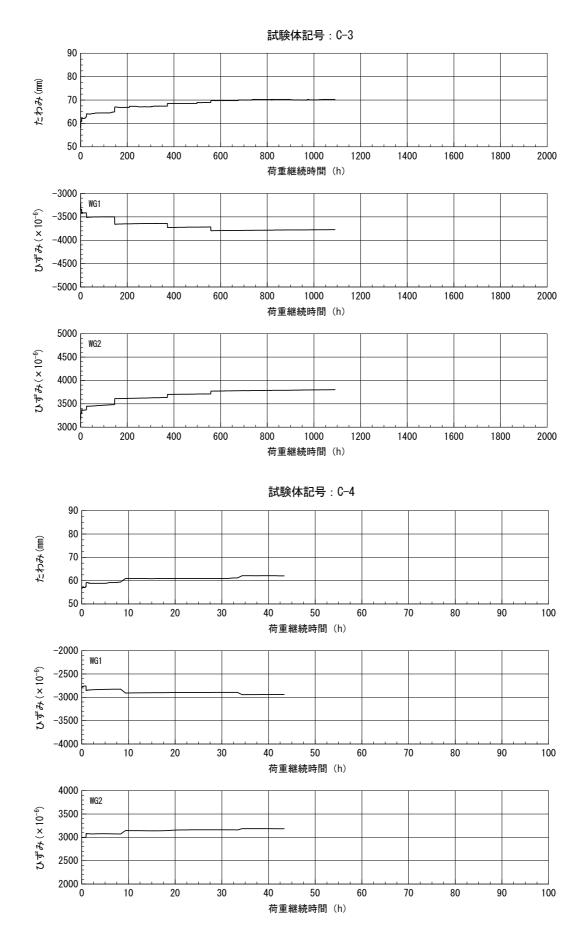


図 4.3.3.11 たわみ及びひずみと荷重継続時間の関係

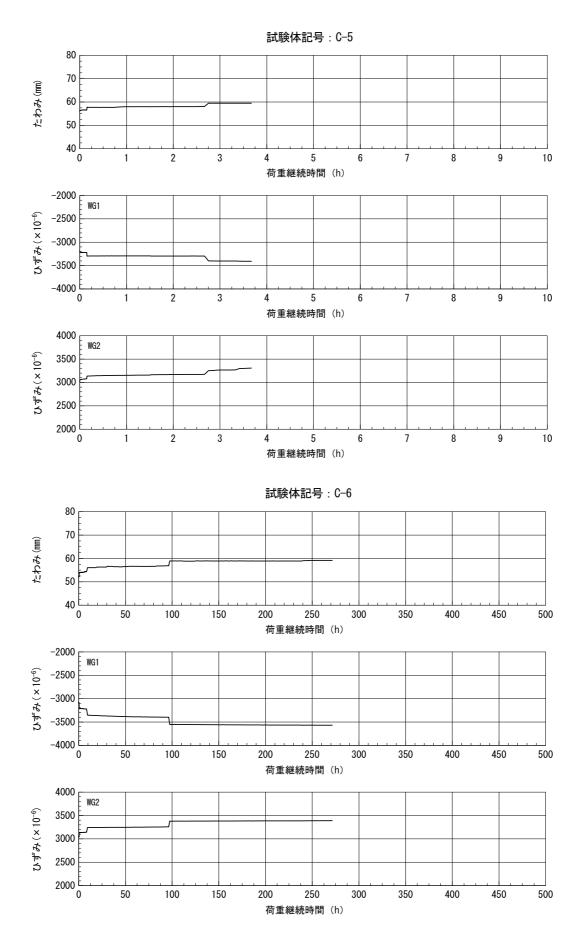


図 4.3.3.12 たわみ及びひずみと荷重継続時間の関係



写真 4.3.3.1 破壊状況 試験体記号: W-1 フィンガージョイント部で破壊



写真 4.3.3.2 破壊状況 試験体記号: W-2 フィンガージョイント部で破壊



写真 4.3.3.3 破壊状況 試験体記号: W-3 フィンガージョイント部で破壊



写真 4.3.3.4 破壊状況 試験体記号: W-4 フィンガージョイント部で破壊



試験体記号: W-5 フィンガージョイント部で破壊



写真 4.3.3.6 破壊状況 試験体記号: W-6 フィンガージョイント部で破壊



写真 4.3.3.7 破壊状況 試験体記号: S-1 フィンガージョイント部で破壊



写真 4.3.3.8 破壊状況 試験体記号: S-2 フィンガージョイント部で破壊



写真 4.3.3.9 破壊状況 試験体記号: S-3 フィンガージョイント部で破壊



写真 4.3.3.10 破壊状況 (載荷継続中) 試験体記号: S-4



写真 4.3.3.11 破壊状況 (載荷継続中) 試験体記号: S-5



写真 4.3.3.12 破壊状況 試験体記号: C-1 フィンガージョイント部で破壊



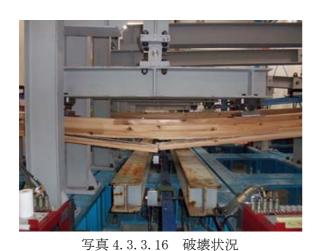
写真 4.3.3.13 破壊状況 試験体記号: C-2 フィンガージョイント部で破壊



写真 4.3.3.14 破壊状況 (載荷継続中) 試験体記号: C-3



写真 4.3.3.15 破壊状況 試験体記号: C-4 フィンガージョイント部で破壊



式験体記号: C-5 フィンガージョイント部で破壊



写真 4.3.3.17 破壊状況 (載荷継続中) 試験体記号: C-6

第5章 鉄筋挿入型複合材料の構造性能

5.1 はじめに

本章では、5.2 節で長期載荷に先立ち、実施された短期載荷の実験結果の分析と結果を述べ、鉄筋補強集成材の荷重継続時間に係わる影響係数(DOL 係数)の予測式と予測を述べる。

5.3 節で鉄筋集成材を用いる構法と構造性能および試作棟の概要と施工状況を述べる。5.4 節で既往の研究に基づき、既に整理している鉄筋集成材を用いる構法の構造設計の引き書の項目と、既往の研究の論文目録を記す。その論文は参考資料として添付する。

5.2 短期載荷試験の曲げ剛性と曲げ強度および曲げひずみ分布の挙動の検証

5.2.1 はじめに

部材断面において曲げ縁に近い位置に鉄筋を接着して、曲げ剛性と曲げ強度を増加させる集成材を鉄筋集成材と定義する。鉄筋集成材の荷重継続時間に関わる係数は、集成材自体の係数より大きくなり、その集成材の係数が基準を満足して入れば、鉄筋集成材の係数も基準を満たすことを裏付ける根拠資料となるように、短期載荷試験の結果を整理する。

曲げ断面に平面保持を仮定して、鉄筋集成材の曲げ特性を精度よく評価できることを検証して、 短期載荷による鉄筋集成材の曲げ強度時に、集成材が負担するモーメント Mw と鉄筋が負担する 曲げモーメント成分 Ms の評価方法の妥当性を明らかにし、鉄筋集成材の荷重継続時間に関わる 影響係数 (DOL 係数) の推定について述べる。

5.2.2 弾性曲げ剛性の推定方法

鉄筋コンクリート部材と同様に鉄筋を考慮する断面二次モーメントIeを用いて曲 が剛性を評価する。Ieは一般に用いられる慣用の式(5.2.1)を用いる。

$$Ie = B \cdot D^{-3}/12 + (n-1) \cdot (at+ac) \cdot j^{-2}$$
 (5.2.1)
ここに、 $B: 梁幅$, $D: 梁せい$, $n: 木材に対する鉄筋のヤング係数比$

at:引張鉄筋の面積, ac:圧縮鉄筋の面積,j:図心軸から鉄筋までの距離

5.2.3 降伏モーメントの推定方法

既に誘導している梁の曲げに対する断面算定に関する許容曲げモーメントの評価式を用いる。 以下に仮定と評価式を示す。鉄筋と集成材の許容応力度に、材料試験による鉄筋の降伏強度と、 集成材の曲げ強度を用いる。また、それらのヤング係数も材料試験の値を用いる。いずれも材料 試験値の平均値を用いる。

仮定

- (1)部材では鉄筋と集成材が一体になって抵抗するものとする。
- (2)曲げ材の各平面の断面は材のわん曲後も平面を保ち、各応力は中立軸からの距離に比例するものとする。すなわち、断面の平面保持の仮定を用いる。

梁材の許容曲げモーメント

モーメントを受ける材の曲率 φ は式(5.2.2)で表される。

 $\phi = M / (Ew \cdot Ie)$ (5.2.2)

ここに、φ:曲率

M:モーメント

Ew:集成材の繊維方向の曲げヤング係数

Ie : 鉄筋も考慮した鉄筋集成材の断面二次モーメント

 $Ie=Iw+(n-1) \cdot Is$

Iw:鉄筋を無視した集成材の断面二次モーメント

Is: 鉄筋の、集成材の図心軸まわりの断面二次モーメントn: 集成材の曲げヤング係数に対する鉄筋のヤング係数比

梁断面内において中立軸から離れた距離を y とすると、曲げによる y の位置のひずみ ϵ (y) は式(5.2.3) で表される。これに式(5.2.2) を代入してモーメントについて整理すると式(5.2.5) が得られる。

$$\varepsilon (y) = \phi \cdot y \tag{5.2.3}$$

$$\varepsilon$$
 (y)=M/(Ew·Ie) ·y

(5.2.4)

 $M = \varepsilon (y) \cdot (Ew \cdot Ie) / y$

(5.2.5)

ここに、y:中立軸から対象の位置までの距離、梁の場合、弾性範囲において、中 立軸は断面図心上にある。

ε (y): y の位置の軸ひずみ

(1) 鉄筋が許容応力度に達する時のモーメント Msa

最外縁の鉄筋が許容応力度 sfa に達する時の鉄筋のひずみ ϵ s は、ヤング係数 Es で sfa を除すことにより表される。

 $\varepsilon s = sfa / Es$

=sfa/n·Ew (5.2.6)

ここに、sfa:鉄筋の許容応力度

Es:鉄筋のヤング係数

Ew:集成材の繊維方向のヤング係数

n : Ew に対する Es のヤング係数比 (=Es/Ew)

この ϵ s を式(5.2.5)の ϵ (y)に代入して、中立軸から最外縁の鉄筋までの距離を ys とすると、鉄筋が許容応力度 sfa に達する時の許容曲げモーメント Msa は最終的に式(5.2.7)で表される。

$$Msa = sfa / n \cdot (Ie / ys)$$
 (5.2.7)

ここに、sfa:鉄筋の許容応力度

Es: 鉄筋のヤング係数

Ew:集成材の繊維方向の曲げヤング係数

n : Ew に対する Es のヤング係数比(=Es/Ew)

Ie : 鉄筋も考慮した集成材部材の断面二次モーメント

vs:断面図心から最外縁の鉄筋までの距離、中立軸と断面図心は等しい。

(2) 集成材が許容応力度に達する時のモーメント Mwa

集成材の最外縁が許容応力度 wfa に達する時の集成材の最外縁のひずみ ϵ w は、集成材のヤング係数 Ew で wfa を除すことにより表される。

$$\varepsilon \text{ w} = \text{wfa} / \text{Ew}$$
 (5.2.8)

この ϵ w を式(5.2.5)の ϵ (y)として、中立軸から最外縁の距離を yw とすると、最外縁の集成材が許容応力度 wfa に達する時の許容曲げモーメント Mwa は最終的に式(5.2.9)で表される。

$$Mwa = wfa \cdot (Ie/yw) \tag{5.2.9}$$

ここに、wfa:集成材の許容応力度

Ie: 鉄筋も考慮した集成材部材の断面二次モーメント

vw: 断面図心から最外縁までの距離、長方形断面の場合、梁せいの半分

(3) 許容曲げモーメント Ma

梁の許容曲げモーメント Ma は、鉄筋と集成材の曲げ応力度が許容応力度を超えさせないために、式(5.2.7)の Msa と式(5.2.9)の Mwa の内、小さい値とすることになる。すなわち、式(5.2.10)とする。

$$Ma = min (Msa , Mwa)$$
 (5.2.10)

5.2.4 曲げ強度の推定方法

普通鉄筋で補強する梁が曲げ破壊する場合,その鉄筋の降伏が木材の曲げ破壊より先行する。この条件については5.2.7節で後述する。梁の曲げ耐力Muは,集成材の曲げ耐力Mwに鉄筋の曲げ降伏モーメントsMyを単純に累加することにより近似すると考えられる。式(5.2.11)により近似する。

ここに、Mw:梁の集成材の曲げ耐力で断面係数と曲げ強度の積とする。ただし、鉄筋の断面積と、鉄筋まわりの木の欠損面積は除外した集成材の断面係数を用いる。

sMy:鉄筋の降伏モーメントでMy=at·σy·g で近似する。

at: 引張鉄筋の面積, σy: 鉄筋の降伏応力度

g: 引張鉄筋と圧縮鉄筋の重心間距離

5.2.5 曲げ降伏後の曲げ剛性の推定方法

鉄筋の降伏ひずみは 0.2%程度で、集成材の曲げ強度時の曲げ縁のひずみは 0.34~0.4%程度である。また、鉄筋集成材の断面において鉄筋が曲げ縁に近い位置に配筋されれば、鉄筋の降伏が、集成材の曲げ破断より、先行する。式(5.2.11)において、Ma は Msa により決定される。鉄筋が降伏すると、それ以降、ひずみ硬化までの荷重増加に対しては、集成材が抵抗する。すなわち、降伏後の曲げ剛性は集成材の曲げ剛性となる。ただし、鉄筋の断面積と、鉄筋まわりの木の欠損面積は除外した集成材の曲げ剛性 Ew·Iwe とする。

5.2.6 モーメントー曲率関係の推定結果

図 5.2.1(a)(b)にスパン中央のモーメントー曲率関係(以後、 $M-\phi$ 関係)を実験値と計算値を比較して示す。実験値は、曲率を、梁のたわみから算出される曲率、集成材の上下の曲げ縁に貼り付けられた木ゲージから算出される曲率、上端筋と下端筋の鉄筋に貼り付けられた鉄筋のひずみゲージから算出される曲率、の3種類を用いた関係を、それぞれ示している。計算値は上記の推定方法により算出される $M-\phi$ 関係である。また、 \bigcirc と \bigcirc は、鉄筋が降伏する曲げ強度を示している。 \bigcirc は実験値で、鉄筋が降伏した時点としている。たわみによる $M-\phi$ 関係上に示している。鉄筋による $M-\phi$ 関係が計算値に近い。木のゲージによる $M-\phi$ 関係は計算値より曲げ剛性が大きくなっている。この原因については、次のように考えられる。

短期載荷では瞬間接着剤を用いて、木の表面にひずみゲージ(東京測器、PL-60)を貼付して、防水処理を行っていない。用いている瞬間接着剤は空気中の水分の影響を受ける。貼付した直後では、その接着力は低下しないが、貼付して防水処理もしていないで $1\sim2$ 週間、空気中にさらすと接着力が低下する。その結果、ひずみが生じにくい状況になり、ひずみが小さくなったことも原因と考えられる。一方、鉄筋では瞬間接着剤を用いているが、ゲージを貼付した直

後、蝋(ろう)で防水処理を施し、同日中に鉄筋を梁のラミナにエポキシ接着剤で接着している。 この際、鉄筋はエポキシ接着剤で完全にコーティングされて、ゲージも完全に空気と遮断される。これにより鉄筋のゲージの接着剤は空気中の水分による劣化を生じない。

これらの実験値と計算値と適合度とゲージの防水処理を考慮すると、鉄筋のひずみによる曲率が部材の曲率に近いと推定される。

曲げ降伏後は、鉄筋による曲率は精度が低下する。鉄筋の降伏により、鉄筋表面の黒皮の剥がれや、局所的な塑性ひずみの増加に伴い、その近傍のエポキシ接着剤が損傷し始めて、その低下する。曲げ降伏後の剛性はたわみによる曲率の剛性と計算値が良く一致している。式(5.2.12)により、曲げ降伏後の曲げ剛性を評価してよいと判断できる。

1) 計算に用いた諸値

梁幅: B=105mm, 梁せい: D=120mm, yw=120/2=60mm

引張鉄筋、圧縮鉄筋: 2-D10 (SD295), 鉄筋断面積: 71mm^2/本

曲げ縁から鉄筋までのせい方向の距離: dt=23mm, ys=60-23=37mm

鉄筋と鉄筋まわり欠損断面積(D10/1 本あたり): $Ab=5.5x12+1/2 \cdot \pi \cdot (12/2)2=51.5 \text{ mm}^2$

引張鉄筋比, 圧縮鉄筋比: pt, pc= $2 \times 71/(105 \times 120) = 1.13\%$

集成材のヤング係数: $Ew=7.93 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$

鉄筋のヤング係数: $Es=1.95 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$

ヤング係数比: $Es/Ew=1.95 \times 10^5/7.93 \times 10^3=24.6$

集成材の曲げ強度: 38.5 N/mm^2 , 鉄筋の降伏強度: 363.0 N/mm^2 いずれも材料試験値

集成材の断面二次モーメント(鉄筋を無視した): $Iw=105 \times 120^{3}/12=1.51 \times 10^{7} \text{ mm}^4$

鉄筋の断面二次モーメント : Is = $2 \times 2 \times 71 \times 37^2 = 3.89 \times 10^5 \text{ mm}^4$

鉄筋集成材の断面二次モーメント: Ie=Iw+(n-1)・Is

 $=1.51 \times 10^7 + (24.6-1) \times 3.89 \times 10^5 = 2.43 \times 10^7 \text{ mm}^4$

 $Ie/Iw=2.43 \times 10^7/1.51 \times 10^7=1.61$

集成材の断面二次モーメント(鉄筋とまわり欠損断面積を考慮): $Iw(Ab)=1.44 \times 10^7 \text{ mm}^4$

2) 鉄筋が降伏強度に達する時の時モーメント Mas

$$Msa = sfa/n \cdot (Ie/ys) \tag{5.2.7}$$

 $Msa = 363/24.6 \cdot (2.43 \times 10^7/37) = 9.69 \times 10^7 = 9.69 \text{ kN} \cdot \text{m}$

3) 集成材の曲げ縁が曲げ強度に達する時の時モーメント Mas

$$Mwa = wfa \cdot (Ie/yw)$$

$$Mwa = 38.5 \cdot (2.43 \times 10^7 / 37) = 25.3 \times 10^7 = 25.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$$
(5.2.9)

- 4) 曲げ降伏モーメント: Msa < Mwa となり、鉄筋の降伏が先行して、部材が曲げ降伏する。 My=min (Mas, Mwa)= Msa=9.69 kN·m
- 5) 降伏までの弾性の曲げ剛性は以下の値となる。 $Ew\cdot Ie=7.93\times 10^3 \cdot 2.43\times 10^7 =1.93\times 10^{11} \ N\cdot mm^2$
- 6) 曲げ降伏後の曲げ剛性は下記の値となる。 $Ew\cdot Iw(Ab)=7.93 \times 10^3 \cdot 1.44 \times 10^7 = 1.14 \times 10^{11} \text{ N}\cdot \text{mm}^2$
- 7) 曲げ強度は下記の値となる。

$$Mu = Mw + sMy$$

$$= Fw \cdot Iw(Ab)/yw = 38.5 \times 1.44 \times 10^{7}/60 + 2 \times 71 \times 363 \times (120 - 2 \times 23) = 13.05 \text{ kN} \cdot \text{m}$$
(5.2.11)

8) 短期載荷の梁の曲げ降伏荷重 Py と曲げ破壊時の荷重は下記の値となる。 せん断スパン長さ Lo は 1.0m とする。

 $Py = 2 \cdot My/Lo = 2 \times 9.69 / 1 = 19.4 kN$

 $Pu = 2 \cdot Mu/Lo = 2 \times 13.05 / 1 = 26.1 \text{ kN}$

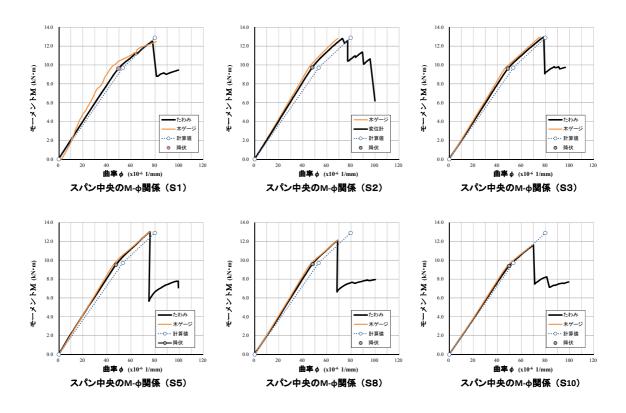


図 5.2.1(a) スパン中央のモーメントー曲率関係(鉄筋のひずみを測定ししなかった試験体)

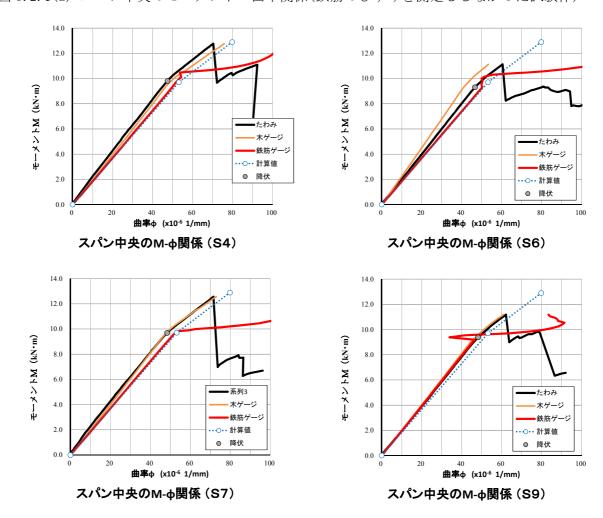


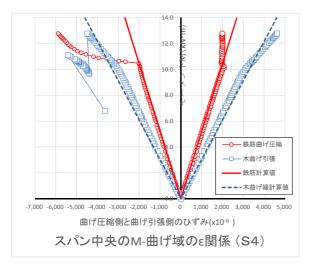
図 5.2.1(b) スパン中央のモーメントー曲率関係(鉄筋のひずみを測定した試験体)

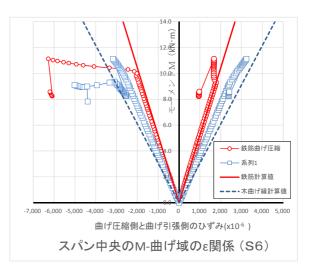
5.2.7 鉄筋と曲げ縁の木のひずみ挙動の推定結果

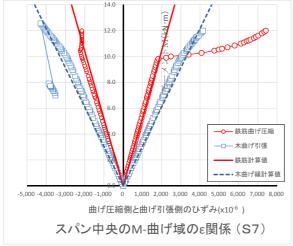
図 5.2.2 に鉄筋と曲げ縁の木のひずみと曲げモーメントとの関係を示す。鉄筋のひずみを測定した試験体について示している。曲げモーメントはスパン中央の値である。鉄筋と曲げ縁のひずみの計算値は式(5.2.4)から算出した。計算値は梁内部の鉄筋のひずみをかなりの精度で推定している。平面保持を仮定して内部の応力状態やひずみ状態を推定できると判断できる。

この結果、前述した図 5.2.1(b)における鉄筋の曲率と計算の曲率がほぼ一致したと判断できる。曲げ縁の木のゲージは、ひずみが計算値より小さくっている。

最大荷重時の圧縮鉄筋と引張鉄筋のひずみは、絶対値が $1\%(10000\,\mu)$ に達していない。鉄筋が降伏した後に生じるひずみ硬化の開始時のひずみは $1.5\sim2.0\%$ である。最大荷重時では、鉄筋の軸応力度は降伏強度の応力を負担していたと推測できる。







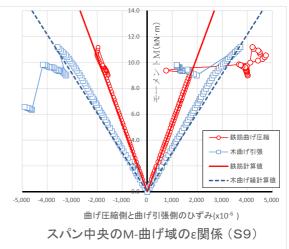


図 5.2.2 鉄筋と曲げ縁の木のひずみー曲げモーメント関係

5.2.8 曲げ剛性と曲げ降伏モーメントと最大曲げモーメントの推定結果

表 5.2.1 に曲げ剛性、曲げ降伏時の曲げ強度と曲率、最大荷重時の曲げ強度と曲率の実験値と計算値を比較して示す。図 5.2.3~図 5.2.6 に各実験値の分布と計算値を比較して示す。

曲げ降伏時の実験値はばらつきが小さい。これは、鉄筋の降伏により決定される強度時で、 同じロットの鉄筋を用いていることによる。鉄筋集成材の強度は安定することになる。計算値 と実験値が比較的、近い理由は、計算に用いた鉄筋の降伏強度は、同じロットの鉄筋の材料試験による降伏強度の実験値を用いたためである。一方、最大の曲げ強度は、木の曲げ強度により決定するため、自然材料である木の強度のバラツキが影響を与える結果となっている。ただし、曲げ強度時も鉄筋が曲げモーメントを30%程度、負担して、木の負担は70%の負担に留まるので、その木の曲げ強度のバラツキの割合は、鉄筋集成材の曲げ強度のバラツキとしては70%に低減されることになる。

表 5.2.1 曲げ剛性・曲げ降伏強度・最大曲げ強度・曲率の実験値と計算値の一覧

					鉄筋降伏時						最大荷重時			
	曲げ剛性(x10 ¹¹ N·mm ²)			モーメント(kN・m)		曲率(x10 ⁻⁶ 1/mm)				モーメント(kN		(N·m) 曲率 (x10 ⁻⁶ 1/mm)		
	実験値 たわみ 木ゲージ 鉄筋ゲージ		計算値	実験値	計算値	実験値			計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	
						たわみ	木ゲージ	鉄筋ゲージ	引身胆	夫₩旭	計昇旭	たわみ	引身胆	
S1	1.95	2.09	_	1.90	9.63	9.55	49.5	46.1	_	50.3	12.52	13.05	77.9	79.5
S2	2.03	2.15	_	1.90	9.74	9.55	49.5	46.1	_	50.3	12.59	13.05	77.3	79.5
S3	1.97	2.08	_	1.90	9.62	9.55	49.5	46.1	_	50.3	12.98	13.05	78.6	79.5
S4	2.06	1.99	1.87	1.90	9.81	9.55	49.5	46.1	52.4	50.3	12.77	13.05	70.4	79.5
S5	2.01	2.09	_	1.90	9.53	9.55	49.5	46.1	_	50.3	13.03	13.05	75.8	79.5
S6	1.99	2.27	1.85	1.90	9.31	9.55	49.5	46.1	50.3	50.3	11.13	13.05	60.5	79.5
S7	2.00	2.02	1.85	1.90	9.69	9.55	49.5	46.1	52.4	50.3	12.57	13.05	71.5	79.5
S8	1.99	2.06	_	1.90	9.59	9.55	49.5	46.1	_	50.3	12.10	13.05	68.9	79.5
S9	1.97	2.00	1.98	1.90	9.38	9.55	49.5	46.1	_	50.3	11.19	13.05	62.1	79.5
S10	1.89	1.95	_	1.90	9.38	9.55	49.5	46.1	_	50.3	11.60	13.05	69.9	79.5

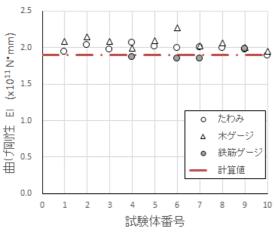


図 5.2.3 弾性曲げ剛性

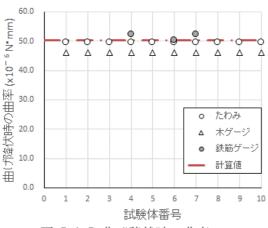


図 5.2.5 曲げ降伏時の曲率

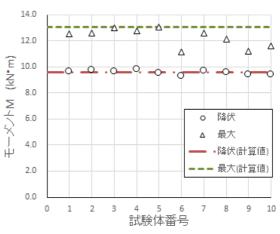


図 5.2.4 曲げ降伏強度と曲げ強度

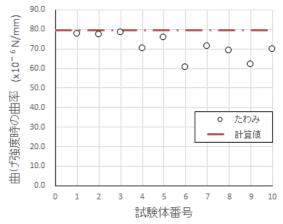


図 5.2.6 曲げ強度時の曲率

5.2.6 鉄筋集成材の荷重継続時間に関わる係数の推定式と試験体の推定

曲げ強度 Mu は鉄筋の挿入・接着により、集成材だけの曲げ強度より増加する。曲げ強度時に集成材が負担する曲げモーメントを Mw とし、鉄筋が負担する曲げモーメントを sMy とする。5.2.5 節で述べた理由により sMy は鉄筋が降伏して負担できるモーメントとする。

鉄筋集成材の曲げ強度 Mu は式(5.2.11)で示され、それによる計算値は集成材の曲げ強度のばらつきを考慮すると、図 5.2.4 で示したように実験値を推定できる。

集成材が負担するモーメントに荷重継続時間に関わる係数を γ wとする。鉄筋の負担する降伏モーメント sMy は荷重継続時間の影響を受けないものとする。想定する荷重継続時間 t 後の鉄筋集成材の曲げ強度 Mu(t)は式(5.2.13)で表される。

$$Mu(t) = \gamma \text{ w } \cdot \text{wM+sMy}$$
 (5.2.13)

短期載荷時の鉄筋集成材の曲げ強度は式(5.2.11)で表される。荷重継続時間 t に関わる係数 γ we は Mu(t)を Mw で除した値で推定できると考えられ、式(5.2.14)で表される。wM に対する sMy の比を α とすると、sMy が α ·wM と表され、これを式(5.2.14)に代入して整理すると、 γ we は式 (5.2.15)で表される。

$$\gamma \text{ we} = (\gamma \text{ w } \cdot \text{wM+sMy}) / (\text{wM+sMy})
= (\gamma \text{ w } \cdot \text{wM} + \alpha \cdot \text{wM}) / (\text{wM+}\alpha \cdot \text{wM})
= (\gamma \text{ w } + \alpha) / (1.0 + \alpha)$$
(5.2.14)
$$(5.2.15)$$

ここに、 γ w:集成材の荷重継続時間に係わる係数 α :短期載荷時の式(5. 2. 11)における wM に対する sMy の比

本試験体の鉄筋集成材の荷重継続時間に係数を算出する。前述の短期載荷の梁の試験体の寸法値を基本寸法として、集成材と鉄筋の材料特性値は材料試験値を用いる。材料特性に関する諸値は、集成材は E60-F225 で、鉄筋は D10(SD295)のものである。これらを前提に係数を算出する。

集成材のヤング係数:Ew=7.93x10³ N/mm²,集成材の曲げ強度:Fw= 38.5 N/mm² 鉄筋のヤング係数 :Es=1.95x10³ N/mm²,鉄筋の降伏強度 : σ y=363.0 N/mm² 鉄筋の溝の欠損を考慮した集成材の断面二次モーメント: I w=B·D³/12+ Σ Ab·yi²=105x120³/12-2x2x{ π ·(12/2)²/2+5x12}x35²=1.455x10 7 mm² Mw=Iw/(D/2)・Fw =1.455x10 7 /(120/2)·38.5= 9.34x10 6 = 9.34 kN·m sMy=at· σ y·g = 2 x 71 x 363 x (120-2x25) =3.60 x10 6 = 3.60 kN·m α =sMy/Mw=3.60/9.34=0.385.

集成材の荷重継続時間に係わる係数 γ w を 0.6 とすると、予想される本試験体の鉄筋集成材の荷重継続時間に γ we は以下となる。

$$\gamma \text{ we} = (\gamma \text{ w} + \alpha) / (1.0 + \alpha)
= (0.6 + 0.385) / (1.0 + 0.385)
= 0.71$$
(5.2.16)

この結果より、鉄筋集成材の荷重継続時間に係わる係数は集成材の係数より大きくなる。今後は、長期載荷の実験データも含めて検証をする予定である。

5.2.7 鉄筋集成材において、鉄筋の降伏により降伏モーメントが決定する条件

式(5.2.10)においてMasがMawより小さければ、集成材の曲げ破壊より鉄筋の降伏が先行することが保証される。使用する材料質によるが、一般に、鉄筋の降伏ひず

みは0.2%、集成材の曲げ破壊時の曲げ縁の破断ひずみで0.4%ある。それぞれの箇所が、同時にこれらのひずみに達する断面の条件は、対称断面においては、断面中心から曲げ縁の距離半分の位置に鉄筋が位置する場合で、これより鉄筋が曲げ縁に近いと、鉄筋の降伏が先行して、鉄筋集成材の曲げ降伏は鉄筋の降伏により決定することになる。鉄筋は曲げ補強を目的として曲げ縁の近くに配筋するので、鉄筋集成材では、降伏モーメントは鉄筋の降伏で決定されることになる。

5.2.8 まとめ

長期載荷に先立ち、実施された短期載荷の実験結果の分析と結果を述べ、鉄筋補強集成材の荷 重継続時間に係わる影響係数(DOL 係数)の予測式と予測を述べた。結論を以下にまとめる。

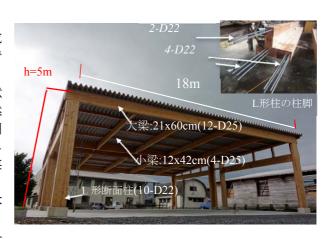
- (1) 鉄筋は集成材と完全に一体となって挙動するものとし、平面保持を仮定することにより、短期 載荷時の鉄筋集成材の曲げ剛性、降伏モーメントおよび曲げ強度などの曲げ特性を評価でき た。短期載荷においては平面保持の仮定を用いても問題ないことが再確認できた。
- (2) 鉄筋集成材の降伏は鉄筋の降伏により決定しやすく、その条件についても述べた。 鉄筋集成材は一般に鉄筋の降伏により部材の曲げ降伏が決定される根拠も述べた。
- (3) 鉄筋集成材の降伏モーメントのばらつきは、鉄筋の降伏強度が安定しているため、小さい。 集成材と鉄筋のヤング係数および鉄筋の降伏強度が材料試験により把握されていると、式 (5.2.7)により、かなりの精度で推定できた。
- (4) 曲げ破壊時の曲げ強度も式(5.2.11)により推定できるが、鉄筋が降伏した以降、集成材の曲げ破壊により決定されるため、集成材の曲げ強度のばらつきを考慮する必要がある。
- (5) 鉄筋の降伏が先行して、曲げ強度が集成材の曲げ破壊により決定する場合の DOL 係数)の予測式として式(5.2.15)を提案した。また、現在、進行している長期載荷試験の試験体の推定値も算出した。その値は 0.71 と計算された。この値は、現在、進行している長期載荷試験の実験結果を説明でき値となっている。
- (6) 鉄筋補強集成材の荷重継続時間に係わる影響係数(DOL 係数)の予測式の式(5.2.15)に及ぼす荷 重継続の影響を、今後、長期載荷の実験結果を分析して、検討する。

5.3 鉄筋集成材の構法と構造性能

5.3.1 木質ハイブリッド構法の必要性

我が国は、四方を海に囲まれ、温暖多雨で樹木の成 長が極めて早い。世界的にも希有な森林資源国家で ある。木材を建築の構造材として大量に利用するこ とは建築構造分野が二酸化炭素の排出削減に貢献 する。さらに建物が役割を終えた後、その木質を燃 焼させてエネルギーに変換できる。樹木の成長周期 (日本スギは約50年)に合わせて森林による自然エ ネルギー循環システムを構築できる。この概念は海 外で調査・研究が始まっている。我が国の風土はこ れに最も適している。可能な限り、建築物の構造体 の木質化を探るべきである。

木質構造を普及させるためには、鉄筋コンクリー ト構造(以後、RC 造)や鉄骨構造(以後、S 造)と同じ 写真 5.3.1 鉄筋集成材構法で建てた試作建物 ような断面寸法とスパン寸法でラーメン架構の建 築計画ができる、木質ハイブリッド部材と、それを 用いる構法システムが不可欠である。



2014 年 7 月建設(構造設計:塩屋晋一)

5.3.2 木質ハイブリッド構法に求められる性能と SAMURAI 集成材の位置づけ

開発後は大量に普及させる必要がある。現行の木質集成材の製品標準(JAS)や製造工程を利用す るプロセスイノベーションを前提としたハイブリッド集成材を開発する必要がある。木質構造は 耐火性能が最大の弱点であるが、規模と階数を限定すれば燃え代設計で対応できる。

今年、6月の建築基準法改正で適用範囲も広がった。大規模の3階建の建物も建設できるよう になった。耐火性能を除くとハイブリッド化で重視すべき点は、1)複合する異種材料が低コスト で少量であり、かつ集成材の製造工程を変化させない、2)木質の軽さと強度を損なわない、3)成 長が早く等級の低い樹木の剛性と強度を効率よく補う、4)部材相互の接合が木質部材の構造性能 を損なわない、5)比例限界ひずみ(繊維方向)が極めて大きいため大変形でも損傷や残留変形を抑 制する、6)クリープ変形を抑制する、7)建物解体後、木質部を容易に燃焼させてエネルギーに変 換できることなどである。

対象にする樹種は成長の早い日本杉(現有の国内林の約30%占める)とすべきである。

木質ハイブリット部材は国内外で研究されている。1)鉄骨を木質で覆うタイプ^{文献 1)2)3)}、2)FRP や CFRP の強化プラスティクのシートや棒を木質部材に接着するタイプ^{文献4)}、3) 鉄筋を部材の曲げ 縁に挿入して接着するタイプ^{文献4)}に分けられる。

部材相互の接合方法としては、鉄筋を用いる glued-in-rod(鉄筋接合)が実用化され、建設され た実績も多い。

一般に使われる鉄筋はくず鉄のリサイクル材料で材料費が極めて安く、流通システムも確立さ れている。部材の接合も含め、材料コストと補強の効率および前述のプロセスイノベーションを 考慮すると、最も普及が期待されるのは鉄筋を用いるタイプである。鉄筋集成材構法はこのタイ プである。このタイプは海外でも研究されている^{文献4)}が、しかし、構法システムと設計理論の構 築までは至っていない。

5.3.3 鉄筋集成材と構法の概略

5.3.3.1 集成材の製造

図 5.3.1 に示すように 45mm 厚さのスギラミナ材に 鉄筋を挿入・接着して積層して製造する。鉄筋が位置 するラミナ材を、前工程で製作しておき、従来の集成 材の製造過程で、鉄筋で補強する集成材を製造する。 鉄筋の位置のラミナ材は写真 5.3.2 に示すようにル ータで溝が掘られ、鉄筋を落とし込み、上からエポキ シ接着剤を所定の高さまで注ぎ、硬化後、所定の厚さ にカンナで削り製作する。確実に鉄筋は木材に接着で きる。この後は従来の工程で木造集成材を製造できる。

5.3.3.2 組み方と特徴

図 5.3.2 にラーメンの構成手順の状況を示す。柱と梁の接合は接合面の孔に接合鉄筋を挿入し、エポキシ接着剤 を注入して接合する。柱脚部は既に工場で挿入接着されている接合鉄筋を、基礎部分のアンカー用のスリーブ に挿入し、無収縮グラウトを注入して接合する。これらの接合法は既往の鉄筋接合によるラーメン構法と同じであるが、本構法は 以下の点で異なる。

- (a)柱と梁に鉄筋で曲げ補強した集成材を用いる。 補強筋により、部材の曲げ剛性を8倍まで、 曲げ耐力を2~3倍まで増加させる。
- (b) 曲げ補強筋と接合鉄筋は木部を介さないで、 図 5.3.5 のように直接応力伝達ができる継ぎ手を開発している。その接合性能は、鉄筋の軸剛性と軸耐力を発揮させる。これにより柱と梁の接合面において伝達できるモーメントを大きくでき、接合面近傍の梁の曲げ剛性を増加させる。
- (c) 柱は二方向ラーメンの応力に有効に抵抗させるため,図 5.3.3の十字形,L形,T形断面を用いる。

5.3.3.3 ラーメンの力学的特徴

- (1) 部材や接合部の曲げ剛性と曲げ耐力を大きくできる ため, ラーメンの水平剛性を増大させて, 変形角が 1/100rad. のレベルで木材の母材の曲げ耐力に相当する耐力を発揮させることができる。
- (2) 柱の断面が十字形,L 形,T 形断面であるため,1 階柱脚の曲げ耐力に対し,直交する部分の接合鉄筋が寄与する。また柱梁接合部のせん断剛性とせん断耐力に対し,直交する木部を寄与させることができる。
- (3) RC 基礎柱と柱脚の接合においては、接合鉄筋の基礎への定着を十分確保することにより、柱脚は繰り返し加力によるエネルギー吸収能力を発揮する。
- (4) スパンを大きくすると梁のたわみ制限が厳しくなり、木造の梁ではクリープ変形を,2

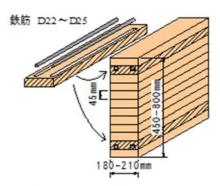


図 5.3.2 鉄筋の挿入と接着



鉄筋の挿入と接着 ラミナ材の接着 写真5.3.2 鉄筋と鉄筋ラミナの接着

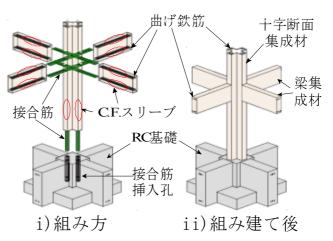


図 5.3.2 二方向ラーメンの柱と梁の組

十字型	ト形	L形		
70 " 70 50 60 50 60 50 195 210, 195	70 " 70 56 60 50 60 50 210 390	70 " 70 06 60 50 01 210 390		
16-D22	16-D22	12-D22		
600 × 600	600 × 600	600 × 600		

図 5.3.3 二方向ラーメンの柱断面

~3 倍見込む必要がある。曲げ補強筋は長期の曲げクリープを激減させる効果を発揮して、 一般の木造梁よりスパンを大きくできる。

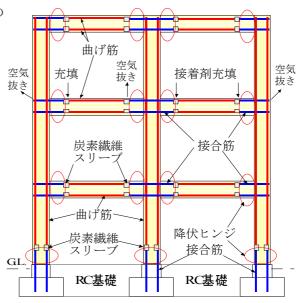


図5.3.4 三階建ての軸組と配筋

5.3.4 部材の構造性能

スギ対称異等級構造集成材(等級: E65-F225)は下記の通りとした。

・基準強度(N/mm²) 圧縮:16.8, 引張:14.4,曲げ:22.2, せん断:2.7,めり込み:6.0

· 長期許容応力度(N/mm²)

圧縮:6.16,引張:5.28,曲げ:8.14, せん断:1.0,めり込み:2.2

・短期許容応力度(N/mm2) 圧縮:11.20,引張:9.60,曲げ:14.80, せん断:1.8, めり込み:4.0

図 5.3.6 に本構法の梁で鉄筋量を増加させた場合の曲げ強度と曲げ剛性の増加率の変化を示す。

5.3.4.1 曲げ剛性と曲げ強度

この性能を有する集成材に異形鉄筋を用いて

曲げ補強を行った部材と RC 部材の構造性能の比較について述べる。

図 5.3.7 の梁断面で RC 梁と性能比較を行う。RC 梁の特性は下記のものとした。

- ・コンクリート: Fc30, Ec: RC 基準に従う。
- ・鉄筋: SD345 降伏応力: 345 × 1.1
- ・曲げひび割れモーメント: Mc=0.56√Fc·Ze
- 等価断面二次モーメント: Ie=B·D3/12+(n-1)·S a·i2
- ・降伏モーメント: Mv=0.9 at s v d
- ・曲げ降伏時の曲げ剛性:曲げ引張側のコン クリートを無視して、それ以外は弾性範 囲として評価する。

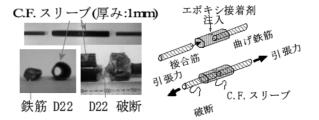


図 5.3.5 接合筋と曲げ筋およびスリーブの接合

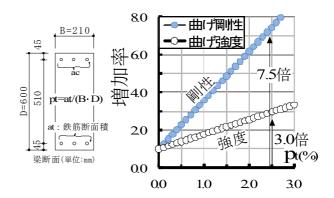


図 5.3.6 pt に伴う曲げ剛性と耐力の倍率

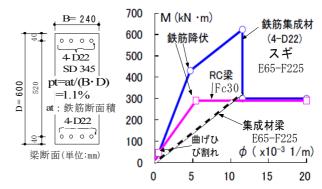


図 5.3.7 RC 梁のモーメントー曲率関係との比較

上記の条件に基づく RC 梁のモーメントー曲率関係 $(-\Box -)$ を図 5.3.7 に示す。ひび割れが発生するまでは RC 梁の曲げ剛性は鉄筋で補強した集成材梁 $(-\Box -)$ より大きいが,ひび割れ以降は急激に低下して鉄筋集成材梁より低下する。鉄筋の降伏が先行して剛性が低下し、その後、曲げ縁の集成材が曲げ強度に達して終局モーメントに達する。終局モーメントは RC 梁の約 2 倍で、集成材が曲げ破断しても、その後の曲げ耐力は RC 梁と同程度となる。鉄筋集成材梁が RC 梁より曲げ性能が良いことが確認できる。

5.3.4.2 せん断強度

5.3.4.2.1 許容せん断応力度の比較

図 5.3.8 にコンクリートの圧縮強度 Fc に伴う許容せん断応力度とスギ集成材のせん断強度を比較して示す。長期はコンクリートの Fc60 に相当し、短期は Fc80 に相当する。同図には柱梁接合部の終局のせん断強度も示す。

5.3.4.2.2 曲げ補強筋による許容せん断 カへ の効果

せん断力を受ける矩形断面の部材は、断面内のせん断応力分布が、パラボラ分布になる。最大のせん断応力 τ max とせん断力の関係は式(5.3.1)で表される。せん断力Qについて表すと式(5.3.2)となる。 τ max を

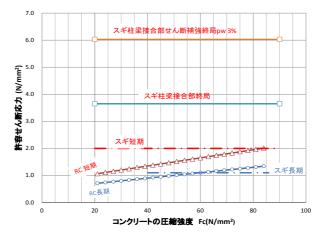


図 5.3.8 許容せん断応力度と柱梁接合部強度

許容せん断応力度 τa とすると、許容せん断力 Qa を表す式となる。

$$\tau \max = \mathbf{k} \cdot \mathbf{Q} / \mathbf{A}$$
 (5. 3. 1)
$$\mathbf{Q} = \tau \max \cdot \mathbf{A} / \mathbf{K}$$
 (5. 3. 2)

鉄筋を入れた断面では鉄筋を考慮して誘導すると κ は式(5.3.3)と式(4)で表される。

i)中間区間:

 $\kappa e = \{1/8 + (n-1) \cdot pt \cdot ys_1\} / \{1/12 + 2(n-1) \cdot pt \cdot ys_1^2\}$ (5. 3. 3)

ここに、b:部材幅, D:部材のせい, n:Ewに対する Es のヤング係数比(=Es/Ew), pt:断面 (b·D)に対する張鉄筋比または圧縮鉄筋比, pt=As/(b·D), As は引張鉄筋または圧縮鉄筋の断面積, ys:=ys/D, ys:断面図心から引張鉄筋または圧縮鉄筋の重心までの距離

図 5.3.9 は ys1 が 0.4 で、n が 31.5 で、pt を変化させた場合の式(5.3.3)による κ e の変化を示している。pt が 1.0%の時、 κ e は 1.36 で、2.0%の時、1.32 で pt の増加に伴い、1.25 に収束する。

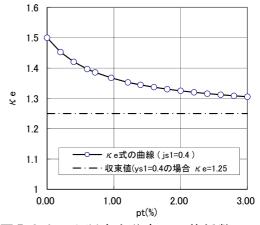


図5.3.9せん断応力分布の形状係数 κe

ii) ヒンジ区間:

 $\kappa p = Ast/\{ (Ast + Asc) \cdot js1 \}$ (5. 3. 4)

(5.3.4)

ここに、Ast:引張鉄筋の断面積, Asc:圧縮鉄筋の断面積

一般に引張鉄筋と圧縮鉄筋の量は等しく、js1 は 0.4 と \overline{s} **図 9 せん断応力分布の形状係数** κ **e** ke の収束値になる。

一般の集成材(矩形断面)の場合は κ を 1.5 とする。この場合の許容せん断力に対して、鉄筋で曲げ補強することにより、中間区間では 1.1 倍 (=1.5/1.36)、ヒンジ区間では 1.2 程度、許容できるせん断力が増加することになる。

5.3.4.2.3 RC 部材との関係

RC 部材ではせん断形状は 1.0 とするが、許容せん断力の評価では式(5)に示すように有効な抵抗断面を b・j とする。

 $Qa = \tau \ a \cdot b \cdot j \tag{3.5.5}$

ここに τa: 許容せん断応力度, b: 部材幅, j は応力中心間距離で一般にせいの 80%とする。

抵抗断面を全断面として許容せん断力を等しくする場合は、せん断形状係数を 1.25(=1/0.8)としていることと等価になる。これは前述のヒンジ区間のせん断応力分布の形状係数と同じである。ヒンジ区間では 5.3.4.2.2 節の結論は変わらないことになる。中間区間のせん断形状係数は 1.32 程度であるため、鉄筋集成材の性能を 5.4%低下させて評価する必要がある。

5.3.5 鉄筋の許容付着応力度

5.3.5.1 許容付付着応力度

図3.5.10 にコンクリートの圧縮強度 Fc に伴う異形鉄筋(梁上端筋でない一般の鉄筋)の許容付着応力度と本構法の部材の許容付着応力度を

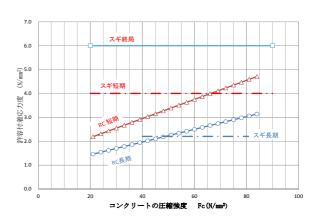


図 3.5.10 鉄筋の許容付着応力度

比較して示す。本構法の部材の許容付着応力度は、集成材からの異形鉄筋の引き抜きまたは押し抜き試験の終局強度の下限値に基づいて設定されている。長期はコンクリートの Fc45 に相当し、短期は Fc65 に相当する。

5.3.5.2 曲げ付着応力度の低減係数

せん断力を受ける RC 部材で主筋に生じる付着応力度は式(5.3.6)で評価される。

 $\tau \text{ rc=Q/}\psi \cdot j$ (5. 3. 6)

ここに、ψ: 引張鉄筋群の総周長 i : 曲げの応力中心間距離

これには曲げひび割れが考慮されている。 しかし本構法の部材では曲げ引張側では集成材も抵抗するため主筋の付着応力度は低減される。部材で生じる主筋の付着応力度は式(5.3.7)で表される。

> τ w=Q/ψ·λ (5.3.7) $\Sigma \subset \ell \subset$, $\lambda = \text{Ew·Ie/(Es·As·ys)}$ = Ie/(n·As·ys)

Es : 鉄筋のヤング係数

Ew: 集成材の繊維方向のヤング係数

n:Ew に対する Es のヤング係数比 (=Es/Ew)

Ie:鉄筋も考慮した断面二次モーメント

As: 引張鉄筋群の総面積 ψ: 引張鉄筋群の総周長

ys:図心から引張鉄筋の重心までの距離

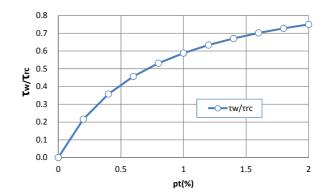


図 5.3.11 RC 部材に対する曲げ付着応力度の比

式 (5.3.6) における応力中心間距離 j が式 (5.3.7) においては λ に置き換えられる。RC 部材の付着応力度 τ rc に対する本構法の部材の付着応力度 τ w の比は式 (5.3.8) となる。

 $\tau \text{ w/ } \tau \text{ rc} = \text{j} / \lambda$ (5. 3. 8)

図 5.3.7 の梁断面で pt を変化させた場合の低減比 τ w/ τ rc の変化を図 5.3.11 示す。pt が 1.0 ~2.0%範囲では、その低減比は 0.6~0.74 となり、本構法では付着応力度が低減される。この低

減を考慮すると、最低でも 26%低減される。本構法の付着強度はコンクリートに対して、長期ではコンクリートの Fc75 に相当し、短期は Fc95 に相当する。

5.3.6 クリープ係数

木質構造の梁では、長期荷重に対してクリープ変形を考慮する。クリープ係数は環境により 2.0 ~3.0 の間で設定される。本構法の曲げ補強筋は梁の曲げクリープ変形を抑制する効果がある。 そのクリープ係数は式(5.3.9.1)で表される。

ゅo:使用する集成材のクリープ係数、2.0~3.0 からで一般的には 2.0 とする。

Es:鉄筋のヤング係数と軸断面積

 $Is = (Ast + Asc) \cdot ys^2$ (5. 3. 9. 3)

Ast、Asc: 引張鉄筋と圧縮鉄筋の軸断面積

vs:断面図心から引張鉄筋または圧縮鉄筋 の重心までの距離

Ew: 集成材の繊維方向のヤング係数

Iwo = Iw - Is (5. 3. 9. 4)

Iw: 鉄筋の存在を無視した断面二次モーメント、長方形断面梁の場合

Iw=B·D3/12 、 B: 梁幅、D: 梁せい

梁は一般的に長方形断面である。また引張鉄筋と圧縮鉄筋の量で、それらの ys も同じである。 この場合、式(5.3.9.1)の λ o は式(5.3.9.5)で表される。

 $\lambda_0 = n \cdot 6 \cdot pt \cdot (j/D)^2 / \{1 - 6 \cdot pt \cdot (j/D)^2\}$ (5. 3. 9. 5)

ここに、n::Ew に対する Es のヤング係数比

pt: 梁断面積に対する引張鉄筋比

pt=Ast/(B·D)

j:引張鉄筋と圧縮鉄筋の重心間距離、ysの2倍に等しい。

Es を $2.05x10^5$ N/mm² とし、Ew を $6.5x10_3$ N/mm² とした場合の pt に伴う式(5.3.9.1)の ϕ e の変化を図 5.3.12 に示す。 j/D については 0.8 と 0.85 について示している。集成材自体のクリープ係数 ϕ w が 2.0 の場合、引張鉄筋比を 1.0%にすると、クリープ係数が 1.28 になり、クリープ係数 ϕ w が 3.0 の場合、1.42 になる。鉄筋が曲げクリープを抑制する。

一方、コンクリートは圧縮応力状態に対しては一般に 1.5 (Fc により多少変化する)を見込むが、部材としては曲げひび割れによる曲げ剛性の低下も考慮して、変形増大係数を国交省告示では 8.0 とする。コンクリートのヤング係数を 2.05×10^4 N/mm² とすると、木の Ew に対しては約 3.1 倍となる。曲げひび割れが発生する以前では、鉄筋の効果を無視すると、本構法の弾性の梁に対して RC 梁の方が 3.1 倍、たわみが生じにくいことになる。

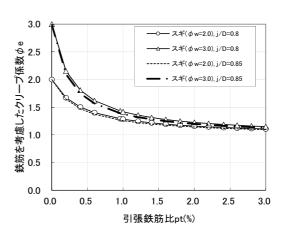


図 5.3.12 引張鉄筋比 pt に伴うクリープ係

しかし、長期荷重時ではRC 梁は変形増大率を8.0 倍とするので、本構法の弾性の梁に対しては結果として2.6 倍(=8.0/3.1)、変形が生じることになる。これに対しては本構法の梁はクリープ係数を1.28 程度とするのでと、弾性の梁の1.28 倍の変形になる。RC 梁は2.6 倍であるので、結論としては、本構法の梁の長期荷重時のたわみは、同じ梁断面であれば、RC 梁のたわみの49%(=1.28/2.6)に抑制されることになる。

5.3.7 単位重量と曲げ剛性比

スギ集成材の一般的な単位重量は 3.5kN/m^3 で、本構法の集成材は鉄筋が挿入されるので $4.5 \sim 5.9 \text{kN/m}^3$ となる。鉄筋コンクリートは 24kN/m^3 である。概算ではあるが、図 5.3.7 の梁断面 (pt=1.1%)で評価すると短期の曲げ強度に対する各材料の比強度の比は、本構法の集成材を 1 とすると下記のようになる。

本構法部材:一般集成材: RC 部材

pt が 1.08%の場合 1.00: 0.49: 0.10 pt が 2.00%の場合 1.00: 0.45: 0.16

これは、部材の強度比較で、接合面の強度は別である。 曲げ剛性についても同様に、単位重量に対する曲げ剛性の比を比較した結果を下記に示す。長期荷重時で集成材のクリープ係数は 2.0 とし、RC の変形増大率は 8.0、コンクリートの集成材に対するヤング係数比は 3.15 としている。

本構法部材:一般集成材: RC 部材

pt が 1.08%の場合 1.00: 0.32: 0.05 pt が 2.00%の場合 1.00: 0.21: 0.04

これは、部材の曲げ剛性比較で、接合面の剛性は別である。 部材の単位重量に対する重量比で 比較すると、RC 部材に対しては極めて構造性能が優れていることが確認できる。

5.3.8 試作建物の施工

5.3.8.1 建物概要

1) 建物名称: 山佐木材 加工場

2) 建築場所: 鹿児島県肝属郡肝付町前田 972

3)用 途 : 製品・資材置き場4)建築主 : 山佐木材株式会社

5) 建築面積:360 m²(延べ面積も同じ)

6)最高高さ:6.2m 7)最大スパン:18m

8) 構造形式: 二方向ラーメン

9)集成材:鉄筋集成材、異等級集成材スギ E65-225, D22, D25(18m スパン大梁, 圧接) SD345

10) 基礎:鉄筋コンクリート造独立基礎

補強鉄筋コンクリートスラブにより独立基礎を固定端にする方法を開発。

- 11) 設計審査:日本建築センター、低層建物部会
- 12) 建築設計一般: 山佐木材設計事務所(榎原氏)
- 13) 構造設計: 鹿児島大学 建築学専攻 塩屋晋一
- 14) 設計協力: 福岡大学建築学科 稲田研究室

5.3.8.2 スケジュール

1) 設計期間:平成25年6月~8月の約3月間

2) 審査期間: 平成 25 年 9 月末~12 月

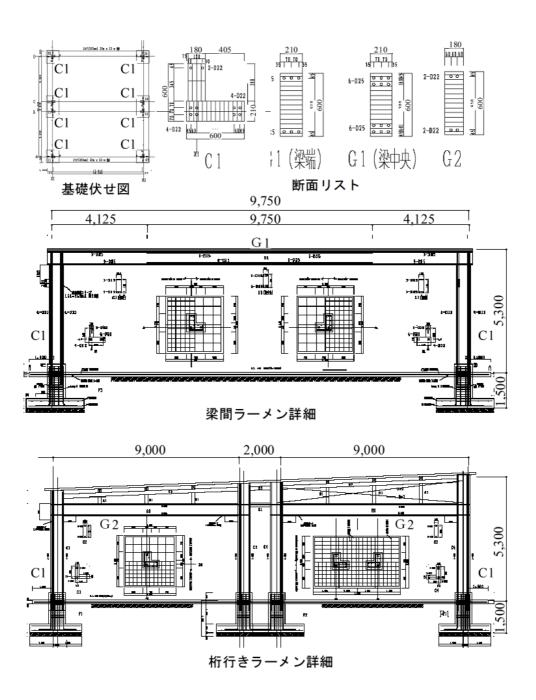
3) 設計図書の整理:平成26年1月~2月

4) 国土交通省大臣認定取得:平成26年3月末

5)建設着工:平成26年5月中旬

6)集成材製造開始:平成26年5月中旬

7) 竣工: 平成 26 年 7 月 31 日





19m のラミナに 3-D25 鉄筋を挿入



18.2mの曲げ筋のための圧接部分





L型断面柱の柱脚



18.4mの大梁の運搬



L 形柱の柱脚の RC 基礎への挿入作業



柱脚の接合鉄筋の RC 基礎の孔



桁梁 G2 の入れ込み



桁組の建て方



桁梁と梁間大梁および柱の接合



竣工後の全景

5.3.9 設計審査での主な指摘事項

- 1) 柱脚の支持のモデル化
- 2) 炭素繊維スリーブと接合鉄筋に対する接着剤の充填方法
- 3) 炭素繊維スリーブの品質管理
- 4)接着剤の品質管理
- 5)柱のL断面の設計でのモデル化
- 6) L 形断面柱の二次接着
- 7)集成材の曲げ縁のかぶりラミナの剥がれ
- 8) 木部の乾燥と収縮の繰り返しの体積変化による接着剤への悪影響
- 10)接着剤の耐久性
- 11)接着剤の付着クリープ性能特性
- 12) 鉄筋と木材又は接着剤の熱膨張係数の ▽ RF +11000 p 違いによる付着切れ
- 13)50 年後の鉄筋と木の付着のクリープせん断ひずみを明示する。
- 14) 含水率 3%変動の影響を考慮する。
- 15) 鉄筋を接着した集成材の煮沸試験
- 16) 炭素繊維スリーブの接合耐力の余裕度

5.3.10 設計可能なスパン

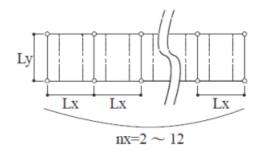
許容応力度設計を行い、設計可能と判断できたスパン割やスパン長さについて述べる。

5.3.10.1 検討変数と検定項目

図 5.3.13 にスパン割を示す。図 5.3.14 に軸組図を示す。最上階は屋根の小屋組を 組み,屋根の仕上げを行い,屋根にはスラ ブを設けないものとした。スパン数は梁間 を 1 とし、桁行を 2 ~ 12 で変化させた。 桁行のスパン数をnx とする。スパン長さは 梁間を8m~14mで, 桁行を4m~12mで 変化させた。桁行のスパン長さは、均等と する。梁間のスパン長さをLy とし, 桁行き をLx とする。スラブはCLTとして梁間方向 の大梁と小梁の間, または小梁の間に掛け ることを想定している。一構面のラーメン 骨組の主要な箇所の応力と変形を桁明らか にして, 許容曲げモーメント, 梁の許容た わみ、許容層間変形角に基づいて、ラーメ ンのスパン数に応じた設計可能なスパン長 さを明らかにした。

5.3.10.2 建物概要

- (1) 建物用途は事務所とした。
- (2) 延べ床面積の最大は 1500m² とする。地 下なしで地上 3 階建てとした。
- (3) 軒の高さは, 11.0 m とした。建築物の 高さは, 13m とした。基礎底深さは,



Ly: 梁間スパン長さ Lx: 桁行スパン長さ nx: 桁行スパン数

図5.3.13 伏せずと柱スパン割

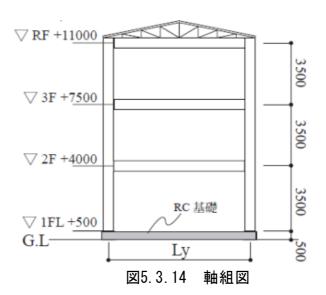
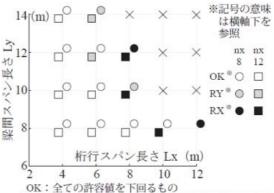


図5.3.15 断面リスト



RY (RX): 梁間 (桁行) の層間変形が許容値を上回るもの

図5.3.16 設計可能なスパン長さ

- G. L. -1.5m である。階高は各階とも 3.5m とした。1 階の床はコンクリート構造スラブとした。 階高は、床仕上げ面の間の高さとした。1 階のスラブの上面は G.L より 500mm の高さとした。
- (4) 基礎は鉄筋コンクリート構造とした。
- (5) 骨組は異形鉄筋で補強した集成材とした。
- (6) 梁間方向, 桁行き方向とも純ラーメン骨組とした。耐力壁またはブレースは設けなかった。
- (7) 準防火建築とする。1 時間準耐火建築とした。

5.3.10.3 本構法の柱と梁およびスラブの断面

図 5.3.15 に柱と梁の断面リストを示す。階や加力方向に関係なく全て 1 種類とした。柱は配置位置によっては,T 形,L 形の断面形状になる。しかし,それらの柱の挙動は現時点では十分,解明されていないため,図 5.3.15 の柱断面の長辺方向が柱せい方向として抵抗させた。柱と梁はスギ集成材の異等級対称断面 E65–F225 とした。曲げ補強筋は SD345 の D22 の 1 種類とした。

5.3.10.4 梁間 1 スパンの建物で設計可能なスパン長さ

図 5.3.16 に設計の許容値を下回る境界のスパン長さ Lx と Ly の組み合わせを示す。白塗り(○、□)は設計可能な組み合わせである。薄塗りは梁間の層間変形角が許容値を上回ったもので、黒塗りは桁行の層間変形角が上回ったものである。

桁行きスパンの長さ Lx を 4m にすると梁間のスパン長さ Ly は 14m まで、Lx を 6m とすると Ly は 10mまで、Lx を 8m とすると Ly は 8m まで設計可能である。

5.3.11 本構法の問題点

現時点での性能としての問題点は下記の事項があげられる。

- ①柱梁接合部での鉄筋定着を確保するために柱せいを 600mm 以上とする必要がある。
- ②配筋の自由度か小さい。
- ③部材同士の接合面にダボを設ける必要がある。
- ④曲線部材が難しい。
- ⑤耐火の対策が必要となる。

参考文献

- 1) 長村寛行, 桐野康則, 腰原幹:5 階建木質複合建築の実現に関する研究, 日本本建築学会大会学 術講演梗概集(近畿) 構造IV pp. 199-204, 2005. 9
- 2) 藤田正則,宿輪桃花,大越友樹,村井正敏,岩田 衛:鋼と木質材料の複合構造システムの構 法成立の可能性,日本建築学会環境系論文集 第78巻,第691号.725-731(2013)
- 3) W. Winter, K. Tavoussi, T. Pixner, F. Riola Parada: SEISMIC DETAILING OF POST-TENSIONED TIMBER FRAMES, Proceedings of the World Conference on Timber Engineering WCTE 2014, Quebec City, Canada, 2014
- 4) M. Kaestner, W. Haedicke, M. Jahreis, K. Rautenstrauch: HIGH-TECH TIMBER BEAM, Proceedings of the World Conference on Timber Engineering WCTE 2014, Quebec City, Canada, 2014
- 5.4 鉄筋集成材を用いる構法の構造設計の引き書の項目と、既往の研究の論文のリスト

5.4.1 構造設計の引き書の項目

既に下記の事項に関する定義、設計概念、算定手法、設計資料を整備して設計の手引き を作成している。試作建物では、これを用いて設計して建設した。

- 1. 範囲
- 2. 用語の定義
- 3. 集成材の種類と品質および各種強度等
- 4. 鉄筋の種類と品質および各種強度等
- 5. エポキシ接着剤および各種強度等
- 6. 炭素繊維スリーブと接合強度等
- 7. 構造解析の基本事項

- 8. 断面算定における基本仮定
- 9. 梁の曲げに対する断面算定
 - 9.1 中間区間の許容曲げモーメント
 - 9.2 ヒンジ区間の許容曲げモーメント
- 10. 柱の軸方向力と曲げに対する断面算定
 - 10.1 中間区間の許容曲げモーメント
 - 10.2 ヒンジ区間の許容曲げモーメント
 - 10.2.1 鉄筋コンクリート基礎に接合される場合の柱脚の許容曲げモーメント
 - 10.2.2 梁勝ちで柱頭が梁に接合される場合の柱頭の許容曲げモーメント
- 11. 柱または梁のせん断力に対する断面算定
 - 11.1 中間区間の許容せん断力
 - 11.2 ヒンジ区間の許容せん断力
- 12. 柱と梁の接合面のせん断力の検定
- 13. 柱梁接合部のせん断力の検定
- 14. 柱または梁の鉄筋の付着応力度の検定
 - 14.1 中間区間の付着応力度
 - 14.2 ヒンジ区間の付着応力度
- 15. 柱梁接合部での接合鉄筋の定着の検定
- 16. 接合鉄筋と曲げ補強筋の継ぎ手
- 17. 梁のたわみ制限とクリープ係数
- 18. 半剛節架構の接合部の曲げバネのモデル化
- 19. ヒンジ区間のモーメントー曲率関係のモデル化
- 20. エポキシ接着剤の耐用年数とクリープひずみ
- 21. 鉄筋と集成材の熱膨張係の違いによる応力算定
- 22. 集成材の含水率の変動に伴う鉄筋と集成材の付着応力算定
- 23. 煮沸試験による鉄筋と集成材の付着強度の低下係数の確認
- 24. 炭素繊維スリーブの接合耐力と接合余裕率

5.4.2 鉄筋集成材とその接合の構造性能に関する発表論文

「鉄筋集成材と構法に関する研究報告の一覧」 鹿児島大学建築学科塩屋研究室で実施した研究の報告書の一覧

鉄筋集成材に関する研究は2009年度か開始して、2010年3月から成果を公開している。 日本建築学会大会梗概集で一部の概要を公開している。

2010年

1) 山田直樹,塩屋 晋一:鉄筋で曲げ補強する木造集成材の架構の開発 -部材の曲げ剛性に関する梁の曲げ加力実験-,日本建築学会研究報告,九州支部,第47号・1,構造系,pp. 613-616,2010,3

2011年

- 2) 古賀武司, 塩屋 晋一, 比良朋香, 有馬武城: 高剛性・高耐力・高エネルギー吸収性能の木造ラーメンの開発に関する実験的研究, その1. 柱梁接合部のせん断加力実験と十字型骨組の水平加力実験, 日本建築学会研究報告, 九州支部, 第48号・1, 構造系, pp. 649-652, 2011, 3
- 3) 比良朋香, 塩屋 晋一, 古賀武司, 有馬武城: 高剛性・高耐力・高エネルギー吸収性能の木造ラーメンの開発に関する実験的研究, その2. 柱梁接合部のせん断特性と剛性の評価, 日本建築学会研究報告, 九州支部, 第48号・1, 構造系, pp. 653-656, 2011. 3

2012 年

- 4) 石峯忠浩、塩屋晋一, 比良朋香, 古賀武司: 高剛性・高耐力・高エネルギー吸収型の立体木質 ラーメン骨組の開発, その 1. 開発する構法の概要と十字型断面柱の柱梁接合部のせん断加力実験:日本建築学会九州支部研究報告, 第50号・1, pp.585-588, 2012. 3
- 5) 古賀武司、塩屋晋一、比良朋香、石峯忠浩:高剛性・高耐力・高エネルギー吸収型の立体木質

- ラーメン骨組の開発, その 2. 柱と梁の接合部における鉄筋の継手方法の開発, 日本建築学会九州支部研究報告, 第50号・1, pp.589-592, 2012. 3
- 6) 比良朋香,塩屋晋一,古賀武司:高剛性・高耐力・高エネルギー吸収型の立体木質ラーメン骨組の開発 その3.鉄筋で曲げ補強した梁のクリープ試験,日本建築学会九州支部研究報告,第50号・1,pp.593-596,2012.3
- 7) 比良朋香,塩屋晋一,古賀武司:高剛性・高耐力・高エネルギー吸収型の立体木質ラーメン骨組の開発 その 4. 鉄筋による曲げクリープ変形の抑制効果の評価と梁の曲げ性能,日本建築学会九州支部研究報告,第50号・1,pp.597-600,2012.3

2013年

- 8) 河邊亮介, 塩屋晋一, 石峯忠浩: 鉄筋で曲げ補強する木質ラーメン構法の実用化研究 その 1. 柱梁接合部のせん断補強に関する実験, 日本建築学会研究報告, 九州支部, 第 52 号・1, 構造系, pp. 681-684, 2013. 3
- 9) 石峯忠浩, 塩屋晋一, 河邊亮介: 鉄筋で曲げ補強する木質ラーメン構法の実用化研究 その2. 十字形断面柱の曲げせん断加力実験と実験結果概要, 日本建築学会研究報告, 九州支部, 第 52号・1, 構造系, pp. 685-688, 2013. 3
- 10) 塩屋晋一,石峯忠浩,河邊亮介: 鉄筋で曲げ補強する木質ラーメン構法の実用化研究 その 3. 十字形断面柱の1階柱の復元力特性と評価方法,日本建築学会研究報告,九州支部,第52 号・1,構造系,pp. 689-693,2013.3

2014年

- 14) 児玉高志,塩屋晋一,河邊亮介,富吉恵理子:鉄筋で曲げ補強する木質ラーメン構法の実用 化研究 その1.曲げ補強筋量の多い梁の曲げせん断特性に関する加力実験,日本建築学 会研究報告九州支部、第53·1号構造系,pp.673-676,2014.3
- 12) 河邊亮介,塩屋晋一,石峯忠浩,児玉高志,冨吉恵理子:鉄筋で曲げ補強する木質ラーメン構法の実用化研究 その2. 部材のせん断特性と長スパン梁の継ぎ手実験,日本建築学会研究報告九州支部,第53·1号構造系,pp.677-680,2014.3
- 13) 石峯忠浩, 河邊亮介, 塩屋晋一, 児玉高志, 冨吉恵理子:鉄筋で曲げ補強する木質ラーメン 構法の実用化研究 その3. 柱梁接合部における鉄筋の引き抜き剛性と耐力の基礎式の誘導, 日本建築学会研究報告九州支部, 第53·1号構造系, pp.681-684, 2014. 3
- 14) 冨吉恵理子,塩屋晋一,石峯忠浩,河邊亮介,児玉高志:鉄筋で曲げ補強する木質ラーメン構法の実用化研究 その4.柱梁接合部からの鉄筋の引き抜き実験と評価式の特性値の検討,日本建築学会研究報告九州支部,第53·1号構造系,pp.685-688,2014.3

2015年

- 15) 富吉恵理子,塩屋晋一,河邊亮介,八木日出美:鉄筋補強集成材を用いる木質ラーメン構法の実用化研究 その1. 建設された木質ラーメン建築物の構造性能の検証,日本建築学会研究報告 九州支部,第54号・1 構造系,pp.729-732,2015.3
- 16) 富吉恵理子, 八木日出美, 塩屋晋一, 河邊亮介:鉄筋補強集成材を用いる木質ラーメン構法の実用化研究 その2. 鉄筋の付着実験と付着性能が及ぼす影響: 日本建築学会研究報告 九州支部, 第54号・1 構造系, pp.733-736, 2015. 3
- 17) 富吉恵理子,八木日出美,塩屋晋一,河邊亮介:鉄筋補強集成材を用いる木質ラーメン構法の実用化研究 その3. CLT スラブの梁の曲げ剛性への寄与効果,日本建築学会研究報告九州支部、第54号・1 構造系、pp.737-740,2015.3
- 18) 河邊亮介,塩屋晋一:鉄筋補強集成材を用いる木質ラーメン構法の実用化研究,その4.三階建て建物の試設計による可能なスパン割とスパン長さ,日本建築学会研究報告 九州支部,第54号・1 構造系,pp.741-744,2015.3
- 19) 河邊 亮介,公文祐斗,塩屋 晋一:鉄筋補強集成材を用いる木質ラーメン構法の実用化研究,その5. 柱脚が曲げ降伏する柱の水平荷重-変形角関係と履歴特性の評価方法,日本建築学会研究報告 九州支部,第54号・1 構造系,pp.745-748,2015.3
- 20) 塩屋 晋一, 河邊 亮介:鉄筋補強集成材を用いる木質ラーメン構法の実用化研究, その6. 水平力を受けるラーメンの層間変形に及ぼす因子とその影響量, 日本建築学会研究報告 九州支部, 第54号・1 構造系, pp.749-752, 2015. 3

第6章 荷重継続時間に係わる文献等調査

6.1 木材強度に及ぼす荷重継続時間の研究に関する歴史的な経緯

木材への荷重継続時間の影響に関する研究は、古くから行われている。文献によれば、少なくとも 18 世紀の初めには、継続的な荷重のもとでは、木材の強度が減少することが認められていた 11 し、Buffon は 1740 年にはオークに関し、長期荷重に対する安全な荷重が実験的に求められている 21 。また、Herman Haupt 31 は次のようなことを実験で明らかにした。「通常の方法で試験され、数分で壊れる試験体を、破壊しない応力よりもかなり小さい応力を加えると、長い時間では破壊してしまう。(Timber may be injured by a prolonged stress far within that which leaves the materials uninjured when the test is made in the usual way and occupies a few minutes only.)」この時の試験体の寸法は、 $60\times3\times14$ ンチ $(152.4\times7.62\times2.54$ cm)で、樹種は、ホワイトパイン、ヘムロック、イエローパイン、ロクナット、ホワイトオークで、木材は、優良の選抜された材と書かれているので、無欠点小試験体と考えられる。そして、1881 年当時、このようなことは一般的理解されていなし、認められてもいないと Robert H. Thurston は記述しており 31 、このことを確かめるために、Thurston 自身が追実験を行っている。Haupt と同等に、無欠点小試験体(断面は約 1 インチ×1 インチ)を用いて、短時間の破壊試験による強度の約 60%の荷重では、8~15 ヶ月の間に破壊したという結果を得ている。一方、同時期に、Lanza 41 はスパン 20 フィートの比較

的大きな断面 (6×12 インチ) の材 で、1000~1700 ポンド/インチ² の応力を生じる荷重を加えたとこ ろ、6 ヶ月では破壊するという証 拠を得ることはできなかった。さ らに、Johnson⁴⁾は、長時間荷重を 加えた柱(断面 1.5×1.5 インチ) の強度は、短時間破壊試験による 強度の約50%であると報告してい 1908年、Tiemann⁵⁾は、荷重 を継続して加えた梁の強度につい て、次のような仮の結論を発表し ている。(a)静的な弾性限度以下の 応力が継続的に加わったとしても、 破壊する前に取り除かれるのであ れば、静的な強度や剛性は影響を 受けない。(b)乾燥したパインの梁 は、湿度が上昇しなければ、弾性

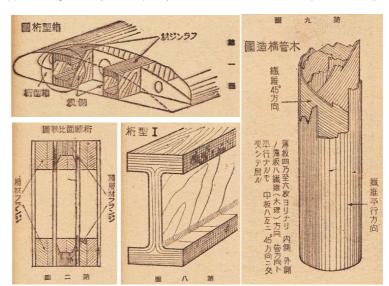


図 6.1.1 積層材の利用:左上 箱型桁の翼構造、左下 箱型桁の構造、中下 押型治具によるI型桁、右 桁材として利用できる積層構造の木管

限度の75%以内であれば、永久的に破壊しないかも知れない。(c)変形の増加率が時間とともに減少するならば、荷重を継続的に加えても安全である。

その後、1930年以降、特に高速度荷重の影響に関して、研究が活発に行われた。これは、木材が航空機の構造材として用いられるようになったことが、大きな原因の一つである。余談であるが、「航空朝日 特集:航空機と木材(昭和19年第1号)」に掲載された航空機用に考えられた積層材を図6.1.1に示すが、今も同じであることが分かる。

アメリカウィスコンシン州マジソン (Madison) の林産試験場 (Forest Products Laboratory: FPL) の Markwardt⁶⁾は、1930 年、シトカスプルースの無欠点小試験体を用いて、0.01 秒から約1 年にわたる荷重継続時間の実験を行い、荷重継続時間の増加とともに、比例限応力、曲げ強度が減少することを示した。断面寸法は、2×2 インチの無欠点試験体である。結果を図 6.1.2 および表 6.1.1 に示した。最初

の5分間の曲げ強度の減少が、その後の1年間の継続による減少よりも大きいということは注意すべきである。杉山は文献7)でこのように記述しているが、後で述べるように荷重速度の影響 (図 6.1.2 の点)と一定荷重を継続的に載荷したときの影響 (図 6.1.2 の b)を一緒に論じるのは、違和感がある。

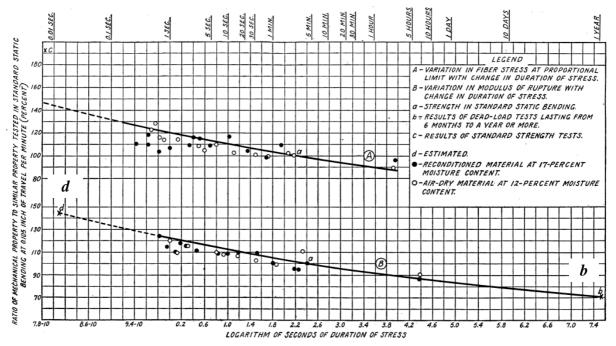


図 6.1.2 標準的な試験に対する比例限応力、曲げ強度の比と荷重継続時間との関係 (注) 1 つの点は 5 から 10 の試験の平均、横軸の荷重継続時間とは荷重を加えてから比例限応力ある いは曲げ強度に至るまでの時間、ただし、b は固定荷重を 1 年間加えた結果、また、d は外挿

同じ FPL の Liska⁸は、シトカスプルース、ベイマツ、カエデ、カンバの無欠点小試験体を用いて、縦圧縮試験および高速曲げ試験を行った。結果の一例を図 6.1.3 に示す。縦圧縮試験の結果から、次式を導いている。

$P = 121 - 8.5 \log_{10} T$

また、曲げ試験の結果からは、次式を導いている。

表 6.1.1 Markwardt の実験結果

荷重継続時間	比例限度に おける応力比	曲げ強度に おける応力比			
0.01 秒	1.44	1.45			
0.1 秒	1.32	1.33 1.22 1.05			
1秒	1.20				
1分	_				
1 時間	0.90	0.92			
1 日	_	0.84			
1年	_	0.70			

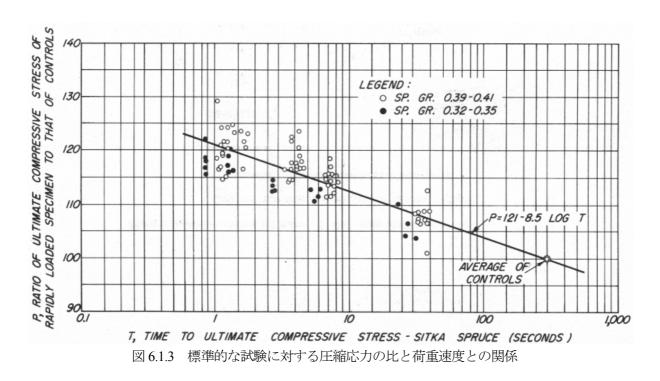
$P = 121 - 7.5 \log_{10} T$

ただし、Pは、試験時の曲げ強度と標準試験時の曲げ強度の比(%)、Tは破壊に至るまでの時間(秒)である。また、次のことを指摘している。曲げの場合のみ記述。

- (1) 荷重速度の増加に対し、針葉樹材では、比例限応力の増加率の方が、曲げ強度の増大率よりも大きいが、広葉樹材では逆である。
- (2) 荷重速度が変化しても、弾性係数は、すべての樹種に対しほぼ同じである。
- (3) 最大荷重時のたわみは、針葉樹材では加重速度に関わらずほとんど同じであるが、広葉樹材では加重速度が減少すると増加する傾向がある。
- (4) 最大荷重までの仕事量は、一般的に荷重速度が増加すると大きくなるが、広葉樹材ではこの増加の割合が特に大きい。

荷重継続時間の係数(a duration-of-load factor)は、最終的には持続的に加わる荷重の影響(sustained load effect)を説明するための係数 9/16 となるが、この 9/16 という数値は、標準的な強度試験で、木材の曲げ強度に対する弾性限度の比として認められていた。そして、少なくとも 1920 年代までは、9/16 という係数は、特に時間制限を設けることなしに、長期荷重のための係数として受け入れられていた。その後、1939 年に $Comb^{10}$ は、約 500 年継続的に加わる荷重に相当する係数と考えた。彼は、Markwardt と $Comb^{10}$ により示された、木材の曲げ強度における荷重速度の影響を一次的に表した荷重継続曲線を外挿したのである。彼はまた、その外挿に基づき、様々な継続時間と比較するために、10 年の荷重継続時間を与える曲線を提案した。10 年の設計荷重は、 $Comb^{10}$ に、 $Comb^{10}$ にはいる。

Markwardt や Liska の研究は、以後 FPL の研究者に受け継がれており、次に示す世界的に影響を及ぼす Wood の研究へとつながっている。



6.2 L.W.Woodの研究

第二次世界大戦中、FPL において、含水率 6 および 12%の無欠点小試験体の曲げ荷重の継続における荷重レベルの影響に関して、包括的な研究が行われた。断面寸法 1×1 インチのベイマツを用いたもので、図 6.2.1 に結果を示した。この研究の部分的な結果 11 に基づき、1947 年、標準的な試験方法による強度に対する割合に関する曲線 11 を提案した。この曲線は、約 5 分とそれに対応する標準的な試験による強度の 100% という点、および、外挿によって、約 27 年とそれに対応する標準的な試験による強度の 56% (係数 9/16 と同等) という点を通る。これに基づけば、応力レベル(SL: stress level)と破壊までの時間 (D: 単位は時間) は、次式で表される。

$SL = 90.4 - 6.3 \log_{10} D$

図 6.2.1 を見ると、少なくとも、Wood のデータに基づけば、係数 9/16 が示す長期的な荷重継続時間は、上述した Comb の提案による 500 年よりも、27 年と考えた方がいいようである。数年後の 1951 年、Wood は、自分のデータに、先述した Liska のデータを反映させた双曲線形式の次式を提案する 12 。ただし、同式の D の単位は秒である。この曲線は、マジソンカーブと呼ばれており、図 6.2.2 に示す。

$$SL = \frac{108.4}{D^{0.04635}} + 18.03$$

同式からは、56.25%つまり 9/16 に相当する長期的な荷重継続時間は 216 年となる。また、応力比が 18.3%以下であるなら、ほぼ永久的に荷重を保持できることになる。この双曲線は、上述した Comb の提案に類似しているが、どの部分でも傾きが急である。また、横軸は対数となっており、応力比が 同じでも、破壊までの時間には大きな変動があることが分かる。これを、95%信頼区間などで表すな らともかく、1 本の曲線で表すのは適切ではないように思うのは筆者だけであろうか。

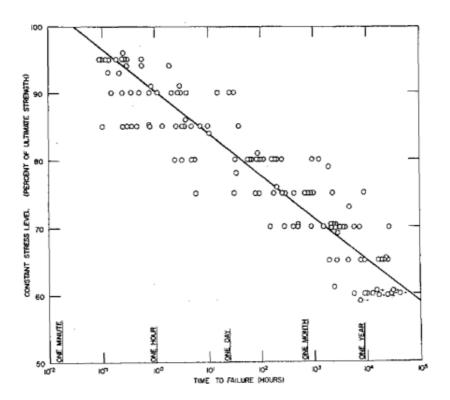


図 6.2.1 Wood による曲げ試験における荷重継続時間の結果

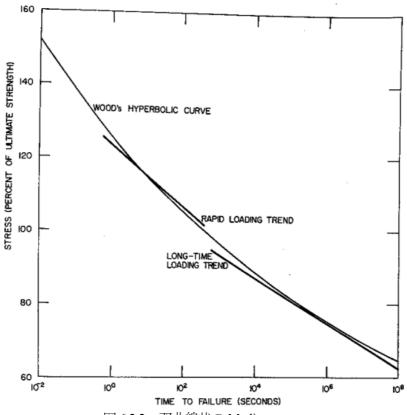


図 6.2.2 双曲線状の Madison curve

Wood の提案した双曲線の式は、長期、短期荷重領域をカバーしようとしたものであろうが、上述したように、Liska の試験は、荷重速度の影響であり、Wood の試験は、固定荷重による荷重継続時間の影響であり、これらを一つにまとめていいのであろうか、疑問である。現実的には、短期に相当するのは地震荷重や風荷重であり、一方、長期に相当するのは固定荷重や積載荷重であり、荷重の掛かり方からすれば、その通りなのである。航空機のように、瞬間的な衝撃力を受けるのであれば、高速の荷重に対する設計となるであろうが、地震力については、鉛直方向に突き上げる場合の設計を別にすれば、地震力や風圧力による水平方向の設計に対しは、短期許容せん断力で設計するのであるから、DOL は考慮する必要はないのではないか。また、荷重速度を変えた場合と、一定荷重が継続的に加わった場合とでは、破壊のメカニズムが異なるのではないかと思うのである。杉山もは文献7)で、次のように記している。「動的試験形式及び静的試験形式の結果とクリープ試験形式の結果とは厳密な意味では比較出来ない性質のものであるが、両形式の破壊機構は木材固有の同じ性質に支配されるものと考えられる上に、木材の曲げ強度と荷重継続時間との関係は、一つの連続した曲線に依り表現されるべきだと推測される。」

6.3 一定荷重による荷重継続時間の影響に関する研究(その 1) ¹³⁾

先述したように、荷重継続時間の影響に関する研究には、荷重速度の影響(rate of loading)と一定荷重による荷重継続時間の影響(constant loading)が含まれるが、ここでは、一定荷重による荷重継続の影響だけを示す。また、これまでの研究から、応力比SL(stress level)と破壊までの時間Dの関係は、次式で表されることが分かっている。

$$SL = A + B \log_{10} D$$
 (6.3.1)

以後、これらの式に基づいた解析を紹介していく。

6.3.1 無欠点小試験体による研究

文献に記載された結果をまとめて、表 6.3.1 に示した。文献の括弧内は、章末に示した文献番号である。また、図 6.3.1 に、表 6.3.1 にある(6.3.1)式で表されたグラフを示した。無欠点小試験体の場合は、試験体をマッチングして、標準的な試験で片方を破壊させ、その応力から DOL 試験を行う応力レベルを算出している。

番		試験	試験 体数	樹種	含水率 (%)	係数		応力比 100%	10年に対
番号	文献					A	В	に対する時	する応力
7								間(分)	比(%)
1	Wood (12)	曲げ	126	ベイマツ	6、12	90.4	-6.3	1.8	59
2	Youngs (14)	曲げ	13	ベイマツ	6, 12	90.4	-6.3	1.8	59
3	Schniewind (15)	曲げ	64	ベイマツ	12	90.4	-6.3	1.8	59
4	Brokaw (16)	縦圧縮	163	シトカスプ	12	82.2*	-6.7*	0.13	49
4				ルース					
5	Brokaw (16)	曲げ	197	シトカスプ	12	83.7*	-7.4*	0.38	47
3				ルース					
6	Leont'ev (17)	せん断	30	スプルース	10~12	91.4	-70.4	8.9	40
7	Sugiyama (7)	曲げ	22	スギ	(3)	90	-8.9	4.5	4
		切り欠きを有す							
8	Schniewind (18)	る材や繊維に直	76	ベイマツ	12	89	-7.3	1.9	53
		交方向の曲げ							

表 6.3.1 無欠点小試験体における試験結果

(注)*: 文献に記述されたものではなく後で求められた、温湿度が一定ではない通常の換気が行われている実験室で行われた、文献の後にある括弧内の数字は文献番号を表す

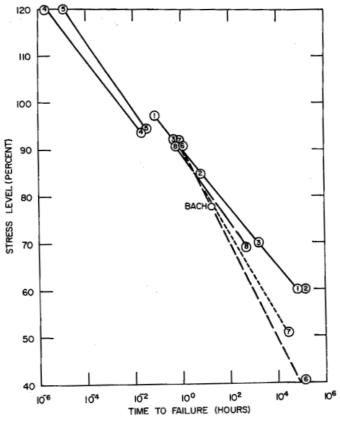


図 6.3.1 無欠点小試験体に対する一定荷重継続試験における破壊までの時間と応力比との関係

(注) グラフに示された番号は表 2 における文献番号に対応する、BACH のプロットは BACH, L.: Nonlinear Mechanical Behavior of Wood in Longitudinal Tension, Doctoral dissertation, Syracuse University, New York, 1965.による

1、2、3、5、7:曲げ、4:縦圧縮、6:せん断、8:繊維に直交方向の曲げ

図 6.3.1 を見ると、8 つのグラフのうち多くが、応力比が約 90%で一致しているが、それ以下の応力比ではあまり一致していない。この理由は、材質、樹種、試験条件が異なることが考えられる。また、表 6.3.1 には、応力比 100%に対する破壊時間が示されている。これは、標準的な破壊試験における時間を表し、一般的には 5 分であるが、かなり短いものから長いものまであることが分かる。上述した破壊時間 10 年に対応する応力比の値も示されているが、かなり変動している。この理由として、恒温恒湿室ではない実験室で行われ、含水率が変動していることがあげられる。

6.3.2 木質材料に関する研究

木質材料に関する DOL 試験について、無欠点小試験体と同様に、文献に記載された結果をまとめて、表 6.3.2 に示した。文献の括弧内は、章末に示した文献番号である。また、図 6.3.2 に、表 6.3.2 にある(6.3.1)式で表されたグラフを示した。いかなる応力レベルでも、一致していないことが分かる。材料が異なっていることも一致しない理由として挙げられるが、最大の理由は、応力比算定の基となる標準的な試験(コントロール)における荷重速度が異なっていることである。例えば、文献 19)では、ハードボードの引張試験を行っているが、最大荷重となる時間が約 61 秒であり、これまで紹介してきた標準的な試験時間 5 分の 1/4 である。つまり、荷重速度が速いと、コントロール試験体の強度を高くしてしまい、標準的試験時間 5 分の試験から算出される応力レベルとは言えないであろう。換言すれば、同じ荷重速度でないならば、比較することはできないと考えられる。したがって、図 6.3.2 におけるハードボードの継続時間は、マジソンカーブよりも小さい値をとっているのである。

そこで、表 6.3.1 および表 6.3.2 のデータに対し、意味ある比較をするために、これらの表にある式を共通の基準にしたがい調整してみよう。ここでの共通基準は、100%の応力レベルに対する継続時間を 28 秒とする。この基準にたがって調整した係数を表 6.3.3 に、グラフを図 6.3.3 に示した。

図 6.3.3 を見ると、4 つのグループに分けられる。(1)カーブ C2、1、2、3、5、(2)カーブ A、C3、D、G3、G1、4、8、(3)カーブ E2、G2、B1、C1、B2、7、(4)カーブ E1、6 である。また、唯一カーブ C2のみがマジソンカーブつまり木材よりも上にあるが、ほとんどのカーブがマジソンカーブよりも下にある。つまり木質材料の方が、木材よりも荷重継続時間の影響が大きい。その中でも、せん断(カーブ6)が、同じ応力比に対し継続時間が最も短いことが分かる。

このように、コントロールコントロールとなる標準的な試験による破壊時間が異なると、荷重継続時間の影響を表す曲線が大いに異なってくる可能性があることに注意が必要であろう。

≐ ¬		試験	試験体数	木質材料	試験条件		係数		応力比 100%	10年に対
記号	文献				温度 (F)	相対湿 度(%)	A	В	に対する時 間(分)	する応力 比(%)
A	Bryan (19)	曲げ	64	パーティクルボ ード	72	30	84.3	-6.5	0.23	52
B1	McNatt (20)	表面の繊維 方向に平行 な引張	68	ハードボード	75	50	78.5	-7.5	0.08	41
B2	McNatt (21)	表面の繊維 方向に平行 な引張	44	パーティクルボード	75	50	84.8	-8.3	0.88	44

表 6.3.2 木質材料における試験結果

C1	Haygreen (22)	曲げ	66	ハードボードリ	72	72	89.3	-8	3.4	47
C2	Haygreen (22)	曲げ	24	ハードボード ²⁾	72	42	86.7	-5.3	0.19	61
С3	Haygreen (22)	曲げ	24	ハードボード ³⁾	72	42	80.6	-6.3	0.05	49
D	Littleford (23)	曲げ	28	集成材	-6	-	97.5	-7.7	28	59
E1	Kufner (24)	曲げ	30	パーティクルボ ード(平行)	-6	١	85.9	-4.3	1.8	40
E2	Kufner (24)	曲げ	30	パーティクルボ ード(直交)	-6	_	76.3	-6.8	0.02	43
G1	Mohler (25)	曲げ	31	8mm カバ合板	68	65	72.9	-5.8	0.001	44
G2	Mohler (25)	曲げ	26	16mm カバ合板	68	65	79.4	-7.2	0.08	44
G3	Mohler (25)	曲げ	78	8mm と 16mm の マコーレ合板、 12mm のリンバ 合板	68	65	91.5	-7.1	3.8	56

(注)1):湿式および乾式によるものを含んでいる、2):乾式による、3):湿式による、文献の後にある括弧内の数字は文献番号を表す

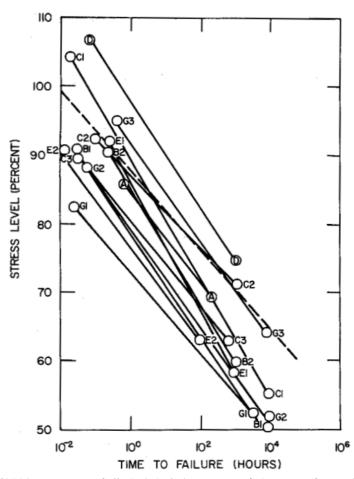


図 6.3.2 木質材料における一定荷重継続試験における破壊までの時間と応力比との関係

(注) グラフに示された番号は表 3 における文献番号に対応する、点線はマジソンカーブ A,E1,E2: パーティクルボードの曲げ、B2: パーティクルボードの引張、C1,C2,C3: ハードボードの曲げ、B1: ハードボードの引張、D: 集成材の曲げ、G1,G2,G3: 合板の曲げ

表 6.3.3 100% 応力レベルにおける継続時間 28 秒に調整した係数

番号、記号	A	В
C2	88.6	-5.4
1,2,3,5	87.8	-5.8
A	86.0	-6.6
C3,D,G3	85.9	-8.7
G1	85.6	-6.8
4,8	85.3	-7.0
E2	84.2	-7.5
G2	83.9	-7.6
B1	83.2	-7.9
C1	83.1	-8.0
B2	82.9	-8.1
7	82.7	-8.2
E1	81.4	-8.8
6	80.6	-9.2

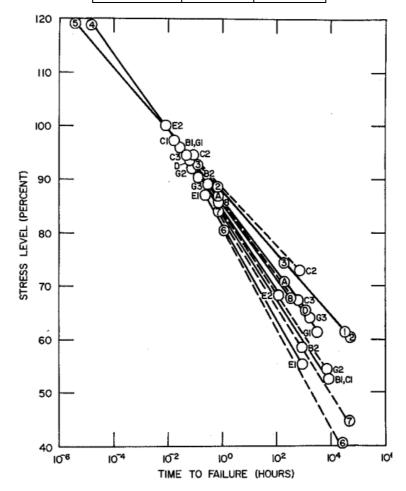


図 6.3.3 共通の基準にしたがって調整した係数を用いて表したグラフ

6.4 一定荷重による荷重継続時間の影響に関する研究(その2)26

時代は少し遡るが、もう一つ DOL 研究についてまとめた文献があるので、紹介する。まとめられた文献を表 6.4.1 に示した。結果は(6.3.1)式として次のようにまとめられている。

$$SL = 91.5 - 7 \log_{10} D$$

表 6.3.1 と同じ文献があることが影響していると思われるが、表 6.3.1 とほぼ同じである。ただし、応 カレベル 100%で分けた結果も載せている。それによると、次のようである。

応力レベル 100%より大きいレベルでは、 $SL = 88.2 - 8\log_{10} D$

応力レベル 100%以下では、 $SL = 90.4 - 6.5 \log_{10} D$

応力レベルが 100%より大きいレベルでは、荷重速度の早い試験を行っており、そのことが影響しているのではないかと考えられる。これは、先述した通りである。

表 6.4.1 試験体と実験

文献	樹種	含水率	試験体の寸法	試験体数	試験の種類	
A	Blackbutt	生材	2×2×40 インチ	24	一定荷重:4点曲げ 応	
Armstrong (27)	(ユーカリ)	初期は生材だが、 荷重載荷中乾燥	2×2×40 インチ	24	力比:90%、80%、70%、 60%	
Clouser (28)	ベイマツ	6%	1×1×22 インチ	58	一定荷重:中央集中	
Clouser (20)	• • • •	12%	1×1×22 インチ	51	足何里, 十大来十	
	Red Oak	生材	0.8×0.8×11 インチ	24		
	Red Oak	13.80%	0.8×0.8×11 インチ	24		
James (29)	Suveet gum	生材	0.8×0.8×11 インチ	29	衝撃試験:静的な試験に	
James (29)	Sweet gum	14.80%	0.8×0.8×11 インチ	29	よるマッチング試験体	
	Yellow birch	生材	0.8×0.8×11 インチ	15		
	i ellow ollen	14.00%	0.8×0.8×11 インチ	15		
	ベイマツ	12%	1×2×16 インチ	121	変形速度一定:0.2、1、	
Liska (8)	シトカスプルース	12%	1×2×16 インチ	159	変形速度一定: 0.2、1、 3、12、80 インチ/分、中	
Liska (o)	カエデ	12%	1×1×16 インチ	57	央集中	
	カバ	12%	1×1×16 インチ	48	大朱丁	
Littleford (23)	ベイマツ(集成材)	乾燥材	3.25×10×192 インチ	29	一定荷重: 4 点曲げ、14 フィート以上のスパン	
Sasaki and Maku (30)	台湾ヒノキ (集成材)	乾燥材	4×6×200cm	5	一定荷重: 方持梁形式	
		乾燥材	10×1×125cm	5	田学芸またな姓とら	
Sugiyama (7)	スギ	乾燥材	5×1.5×60cm	23	固定荷重を突然与え	
		乾燥材	3.5×1.25×60cm	23	る:方持梁形式	
Youngs and	ベイマツ	6%	1×1×22 インチ	15	ひずみ速度一定:1、4、	
Hilbrand (14)	' ' '	12%	1×1×22 インチ 15		16 時間、中央集中	

6.5 クリープ現象からのアプローチ

荷重継続時間は、一定荷重が継続的に加わった場合における破壊までの時間を、応力比との関係で表したものである。一定荷重が継続的に加わると、材料はクリープを生じるため、荷重継続時間の影響という現象は、クリープ破壊と表現されることもある。ここでは、クリープ現象からのアプローチを考える。まず、杉山の研究から紹介しよう。

6.5.1 杉山の研究 31)

杉山は次のように言っている。「長期間作用する載荷荷重の大きさが変動しても、はりの圧縮側外縁応力が比例限度に達しない限りは、それによって生ずるクリープは遅延弾性と見なすことができる。したがって、このようなクリープの経歴は、材料の強度性状が永久に変わることのない状態で設計しようとする所謂弾性設計の立場をとり不都合な変形ではない。しかるに、はりの圧縮側外縁応力が比例限度を越すような状態が発生すると、そのクリープ経歴は弾性設計の立場を阻害する。故に、はりの圧縮側外縁応力度がちょうど比例限度に達したときの応力または荷重状態をもって曲げクリープ限度と定義するのが妥当であると考える。」それでは、曲げクリープ限度に達しないような低い応力を継続的に受けたとき、はりはどれ位たわむか、杉山は次のように考えた。

時間の経過につれ、圧縮応力度が変化する場合の応力度とひずみ度の関係は、クリープ関数を用い、コンクリートに対する坂博士の近似式に準じた形の式が成立すると仮定する。この他に、次の2つのことを仮定する。始め引張を受けていた断面の一部が、時間の経過とともに圧縮に代わり、クリープが進むとき、そのクリープひずみ度をクリープ関数を用いて表す式を仮定する。つまり、図6.5.1 のように考える。ここで、クリープ関数は、時間0のときのひずみ度と時間tのときのひずみ度の比で、次式で定義される。

$$\phi(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon(0)}$$

したがって、時間tのときのひずみ度は次式で算出される。

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \{1 + \phi(t)\}$$
 (ε_0 : 初期ひずみ)

継続荷重が載荷された直後のはりの断面の応力分布とひずみ度の関係は、(a)である。その後、時間 t が経過した後の応力分布とひずみ度の関係が(b)に示されている。上述したように、 $\eta(t)$ だけ中立軸 が引張側にシフトすると考える。このことは、木材における引張クリープひずみ度は、圧縮クリープ ひずみ度よりも極めて小さいと考えられていることに基づいている。そこで、引張クリープを無視し、

圧縮におけるクリープ関数を $\phi_{\epsilon}(t)$ とし、断面内のモーメントの釣合から、次式が得られる。

$$\Theta = \frac{\frac{1}{16}\phi_c}{N\left(1 + \frac{1}{4}\phi_c\right) - \frac{1}{16}\phi_c} = \frac{\theta(t)}{\theta(0)}, \quad N = \frac{\frac{1}{8}\phi_c + \frac{1}{16}\phi_c^2}{1 + \phi_c + \frac{15}{64}\phi_c^2} = \frac{\eta(t)}{h}$$

ここで、 Θ は回転角、h ははりのせいである。また、N は中立軸の移動率である。

以上より、圧縮縁のひずみ度の増加率 $oldsymbol{arepsilon}_c$ 、圧縮縁の応力度の変化率 $oldsymbol{\sigma}_c$ は次式で表される。

$$\varepsilon_{c}' = \frac{\varepsilon_{c}(t)}{\varepsilon_{c}(0)} = \Theta(1+2N) \cdot \sigma_{c}' = \frac{\sigma_{c}(t)}{\sigma_{c}(0)} = \frac{1}{1+\frac{1}{2}\phi_{c}} \left[\Theta(1+2N) - \frac{1}{2}\phi_{c}\right]$$

また、引張縁のひずみ度の増加率arepsilon、引張縁の応力度の変化率 σ 、は次式で表される。

$$\varepsilon_{t}' = \frac{\varepsilon_{t}(t)}{\varepsilon_{t}(0)} = \Theta(1 - 2N), \quad \sigma_{c}' = \frac{\sigma_{t}(t)}{\sigma_{t}(0)} = \Theta(1 - 2N)$$

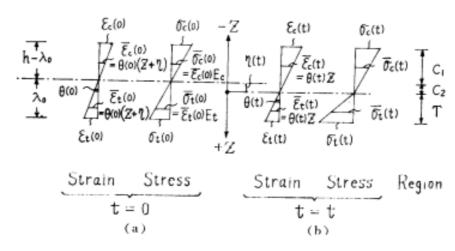


図 6.5.1 一定荷重が継続的に載荷されたはりの断面における応力とひずみ

これらを見ると、すべてクリープ関数 $\phi_c(t)$ だけの関数であり、継続載荷荷重の大小とは無関係である。

次に、 $\phi_c(t)$ が $0\sim2$ までの範囲に対し、図示すると図 6.5.2 となる。余談になるが、図 6.5.1 の仮定は、

断面内の釣合から、引張ヤング係数の方が圧縮ヤング係数よりも大きいことを前提とする。しかし、文献 32)によれば、「引張と圧縮とでヤング係数の値にほとんど差異はなく、各試験でもとめられる数値のバラツキの範囲内にとどまるものとみられる。(中略)一般的にみて、わずかながら引張の方が圧縮より高い値をしめす傾向がある。」と記されており、ほぼ同じと考えられる。図 6.5.3 を参照。このことから、杉山の仮定は無理があるように思う。このことから、圧縮側でクリープが生じ、引張側ではほとんど生じないと考えると、梁の断面は保持されていないということになる。つまり、クリープにはせん断歪が影響している可能性がある。このことは本章にはあまり関係ないが、木材学的には興味深いことである。

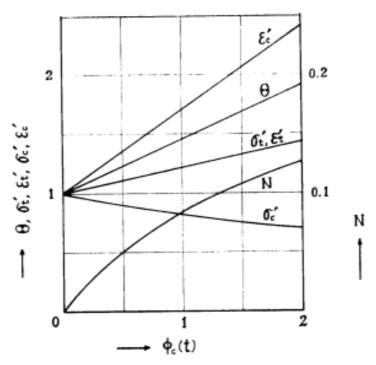


図 6.5.2 圧縮側のクリープ関数を基にした応力およびひずみ度の変化率

それでは、これを基にすると、DOL はどのように考えればよいのだろうか?まず、現在の設計体系では、最大荷重の 2/3 が比例限度と考えられているので、クリープ限度の応力比は 67%である。応力レベルがこれ以下であれば、DOL では破壊しないことになる。通常は、破壊させることになるので、例えば、90%、80%、70%などの応力レベルで試験を行うことになる。このレベルでは、比例限度を超えている。「曲げ変形を受けると、まず圧縮側が圧縮強さに達して塑性変形を生じ、中立軸が引張側に移動し、引張側の縁応力が引張強さに達して破壊する」というのが、最も一般的な考えである。したがって、応力レベルが比例限度以上ならば、図 6.5.1 において既に中立軸は引張側に移動してしまっていることになる。杉山の考えにしたがえば、その後、クリープによってさらに中立軸が引張側に移動していくことになる。図 6.5.2 で言えば、横軸が 0 ではなく、例えば 0.5 から始まることになる。応力レベルが高ければ高いほど、始まりは右にずれることになるので、引張側ではクリープすることなしに破壊するとするならば、応力レベルが高い方が継続時間が短くて破壊することになり、杉山の考えと齟齬はない。ただ、定量化は難しいかも知れないが、モデルを仮定すれば可能かも知れない。

また、杉山は自身の試験結果⁷から、次のように記している。「長期荷重を受けた材は、受けない材よりも弾性係数が小さ。然し長期荷重を受けた材は受けない材と較べて、破壊に近づいても大きな撓みの増加が見られず、脆い破壊性状を呈している。(中略) 載荷期間の長い程加工硬化が著しいと解されよう。」このことから、杉山の仮定は無理があると書いたが、圧縮側が塑性していることが考えられ、先述したこととも整合性が取れる。

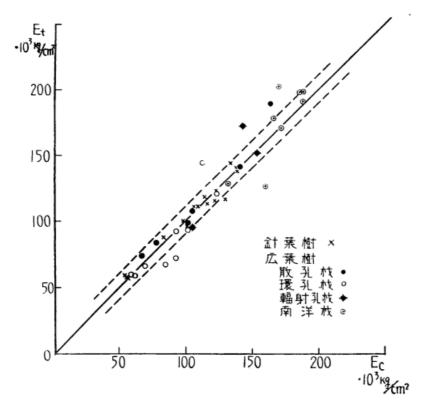


図 6.5.3 引張ヤング係数と圧縮ヤング係数の関係

6.5.2 Clouserの研究²⁸⁾

クリープ変形は、図 6.5.4 にように模式化される。同図で C 点は、変形が急激に増加し始める点であり、屈曲点 (PI: point of inflection) と言われている。この C 点は、これまで紹介してきたクリープ関数を用いれば、推測することが可能である。木材のクリープ変形は、次式のように、一般的には指数関数で表すことができる。

$$\delta(t) = \delta_0 + At^n$$

 δ_0 は瞬間変形量、 $\delta(t)/\delta_0$ は相対クリープと呼ばれ、一般に気乾状態の木材は、 A/δ_0 =0.2、n=0.2 程度を想定しておけばよい。例えば、C 点での変形量 δ_{Pl} が図 6.5.5 のように推定でき、さらに、図 6.5.6 のように、 δ_{Pl} と応力レベルの関係が把握できれば、C 点までの時間も推定できることになる。例えば、C 点までの時間 D_{Pl} と応力レベルとの関係は、次式のように表される。

 $SL = 88.0 - 6\log_{10} D_{PI}$ (含水率 6%)

 $SL = 91.0 - 7\log_{10} D_{PI}$ (含水率 12%)

一方、Clouser は D_{PI} ではなく、破壊までの時間 D_F と応力レベルの関係も得ており、次式で表される。また、図 6.5.7 にグラフを示した。

 $SL = 89.0 - 6\log_{10} D_F$ (含水率 6%)

 $SL = 90.0 - 6\log_{10} D_F$ (含水率 12%)

 D_{PI} と D_{F} と応力レベルとの関係式はほぼ同じである。

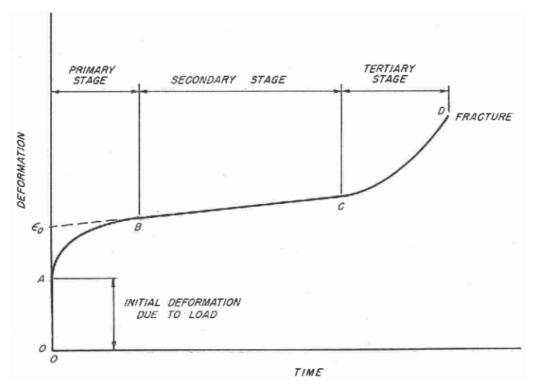


図 6.5.4 クリープ変形の模式図

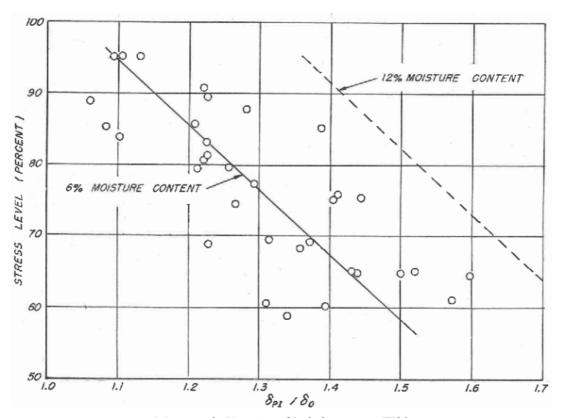


図 6.5.5 相対クリープと応力レベルの関係

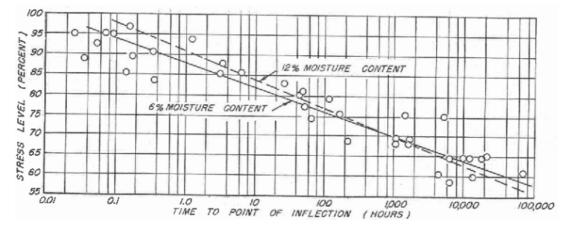


図 6.5.6 C点までの時間と応力レベルとの関係

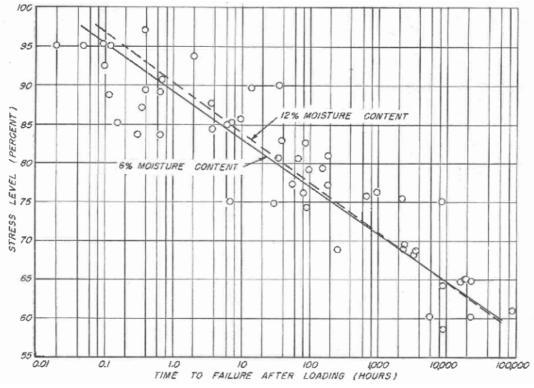


図 6.5.7 破壊までの時間と応力レベルとの関係

6.6 実大材に関する荷重継続時間の影響

1970 年代になると、実大材の強度試験が盛んに行われるようになる。これは、ブリティッシュコロンビア大学の Madsen 教授が始めたことである。製材の許容応力度は、無欠点小試験体の強度実験結果を基に、荷重継続時間影響係数、含水率影響係数、寸法効果係数、欠点を考慮した製材強度と無欠点小試験体強度の比(強度比)、安全率を乗じあるいは除して算出していた。しかし、これらの各種係数が、製材=実大材に対しても適用可能か、Madsen 教授は検討を加えたのである。Madsen 教授は、次のように考えた。

無欠点小試験体の曲げ試験による初期破壊は、もめが圧縮側で生じ、中立軸が移動し、引張側で最終的な破壊に進展する。一方、製材は節などの成長に起因する欠点を含み、繊維に直交する横引張によるクラックが生じ、引張側での複合的な破壊モードに進展する。圧縮側強度が引張側強度より小さな defect-free wood と圧縮側強度が引張側強度より大きな timber は、異なる材料なのである。したがって、上記係数を見直し、製材に適用できるように改善すべきであるという意見もあるが、defect-free

wood と timber では破壊の論理が異なり、試験体系を変えた方がいいのである。 defect-free wood は wood scientist にとっては恰好の材料であるが、構造材を扱う engineering の観点からは信頼できるデータを与えてくれない。 それは、コンクリートの強度を知りたければ、セメントだけの試験をしないのと同じなのである。

荷重継続時間影響係数についても、実大材を用いた DOL の試験が行われた。具体的には、 2×6 インチの No.2 材を用いて、ある時間は一定の応力レベルが加わり、その後応力レベルが段階的に上がっていく試験 $^{33)}$ をしている。その結果をまとめて、荷重継続時間の影響係数を表 6.6.1 のように提案している。その後、Madsen と Barrett Barrett Barrett 最前した一定荷重と破壊までの時間の関係は、無欠点小試験体と実大材では異なるという結論に達した。

次 0.0.1 内里/配剂	的向こが音が数
荷重継続時間	影響係数
1週間以下	1.45
1週間-3ヶ月	1.35
3ヶ月-2年	1.20
2-10年	1.00
10-50年	0.85
50 年以上	0.7

表 6.6.1 荷重継続時間と影響係数

また、 $Gerhard^{36}$ はベイマツの製材に対し、図 6.6.1 のような結論を得ており、やはり、無欠点小試験体とは異なることを示した。(6.3.1)式で表すと、次のようになる。ただし、時間 TC の単位は分である。

特級 $SL = 1.110 - 0.0932 \log_{10} TC$

No.2 $SL = 1.080 - 0.0958 \log_{10} TC$

No.3 $SL = 1.088 - 0.1061 \log_{10} TC$

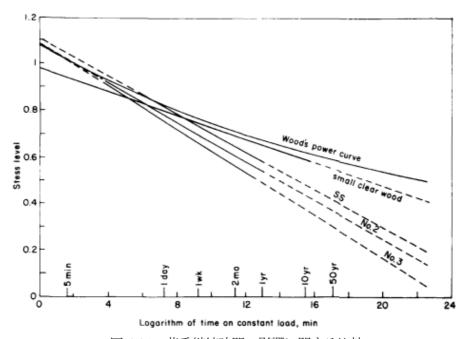


図 6.6.1 荷重継続時間の影響に関する比較

Hoffmeyer³⁷⁾は、樹種ノルウェースプルース、断面 44×95 mm、長さ 1800mm の試験体 102 体について、含水率が 11%および 20%となる恒温恒湿室で、13 年間の一定荷重載荷試験を行い、図 6.6.2 のような結果を得ている。やはり、無欠点小試験体とは傾向が異なっていることが分かる。

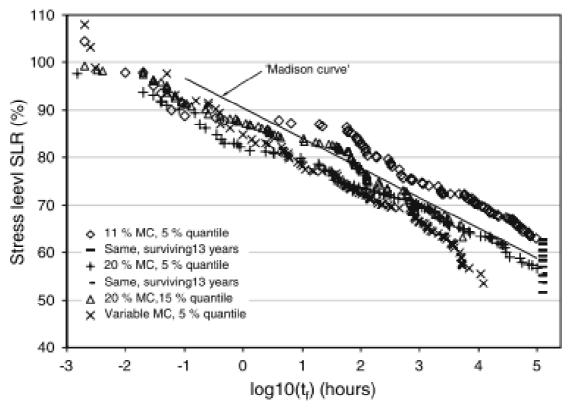


図 6.6.2 異なった含水率における応力レベルと破壊時間の関係

その他にも様々な文献³⁸⁾があるが、上述したように、無欠点小試験体と実大材とは異なる結果である。その理由として、無欠点小試験体の破壊は、最外縁の引張応力で破壊するが、実大材は図 6.6.3 に示すように、節などの欠点があり、その周囲では繊維が乱れ、繊維に対し直交方向の応力やせん断応力で破壊している可能性があることがあげられる。

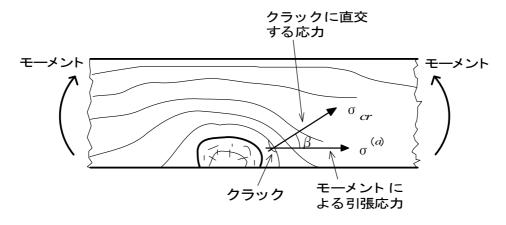


図 6.6.3 引張応力に対し傾いたクラック

6.7 DOLの理論的研究

DOL についての小試験体や実大材の実験結果についてのレポートは多いが、これらは謂わば現象論であり、DOL のメカニズムや理論式の提案などについては、それほど多いわけではない。しかし、そのなかで、特筆すべき考え方を二つ挙げたい。その一つは、木材をクラックを有する線形粘弾性体(Nielsen, L.F.)とし、クラックの先端が開口していく時間を推定する理論である。もう一つは、メカニズムではないが、外力によるダメージが累積していき、ついには破壊してしまうというモデル(Foschi et al.)で、接合部など、他の構造要素にも適用が可能である利点を有している。

6.7.1 粘弾性クラック進展理論 39)

木材は、クラックを有する材料であるし、また、粘弾性体でもある。クラックに関する力学は線形破壊力学で、粘弾性は粘弾性理論で扱うことができる。推定式算出の詳細は文献 ⁴⁰⁾を参照していただくとして、同理論は、図 6.7.1 のように表すことができる。

応力が加えられていない状態では、クラックの長さは 2a であり、もちろん塑性域も生じていない。クラックを開口させる引張応力が作用すると、クラック面間に長さ r_p 、距離 δ_0 の塑性域が生じるが、クラックの長さは 2a のままである。さらに時間がたち t_s となると、クラック面間の距離がクリティカルな大きさ δ_{cr} となり、クラックの長さとともに塑性域も増加し始める。そして、ついには、時間 t_{cat} において、これ以上応力を保持できなくなり、破壊してしまうと言うモデルである。

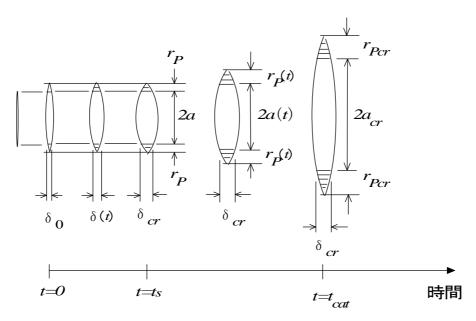


図 6.7.1 クラックの進展

破壊までの時間を算定した例を図 6.7.2 に示す。ここには表さないが、この結果は、文献 41)で示されているように、実験値とほぼ一致していることを断っておく。上述した仮定のように、応力比が同じであっても加える応力により破壊するまでの時間が異なっており、加える応力にかなり依存していることが分かる。また、同図には Madison curve も示しているが、傾向がかなり異なっていることがお分かりいただけるであろう。欠点の存在する lumber と無欠点の wood では DOL も異なっているのである。

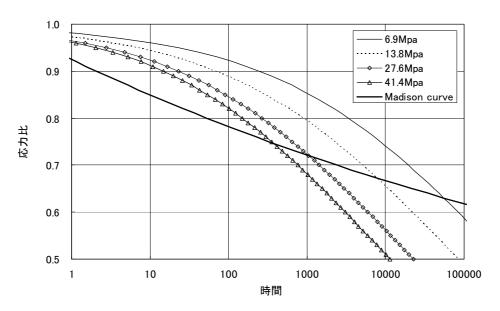


図 6.7.2 固定荷重を加えた場合の、応力比と破壊するまでの時間関係

6.7.2 ダメージ累積理論

クリープ破壊試験における破壊モードは、靱性型から脆性型まで様々である。しかし、クリープ破壊は、基本的には、クラック進展理論と同様、ミクロあるいはマクロな空隙・クラックの開始・進展によるものと考えられている。したがって、クリープ破壊における破壊までの時間は、これらのプロセスの進展の様子を反映しており、材料の微細構造と深く関係している。

既往の研究によれば、クリープ破壊における加えられる応力と破壊時間の関係は、図 6.7.3 にように、 リニア型、バイリニア型、トリリニア型に分類することができる。バイリニア型やトリリニア型の非 線形型は、破壊モードが靱性型から脆性型、あるいは他の破壊モードに変化することに対応している。

複雑な破壊特性を有する異方性材料や不均一な材料に対しては、曲率が変化する非線形の破壊曲線を考慮する必要があろう。それでは、木材の DOL 破壊曲線は線形型か非線形型かと言われれば、既往の実験により異なり、いずれも当てはまると言うしかない。また、バイリニア型の破壊曲線を応力ゼロに外挿すると、破壊までの時間が極端に短くなってしまう。これまで数世紀の間構造物に使用されてきた部材が存在することを考えれば、図.6.7.3 に点線で示す閾値、つまり、ある値以下の応力では破壊しない応力値が存在することを示唆するものであ

以上のことを考慮すれば、DOL 破壊曲線をモデル化する場合、次ぎに示す事項が重要になろう。

- (1) 加わる荷重の履歴を反映できなければならない
- (2) 非線形を表現できなければならない
- (3) 閾値を考慮できなければならない

ろう。

(4) 応力分布や寸法効果を考慮できなければならない クリープ破壊における破壊時間を、材料の内部で生じ ている物理的な現象に関連づけて説明する試みは様々行 われている。ダメージ累積理論はその中の一つであり、

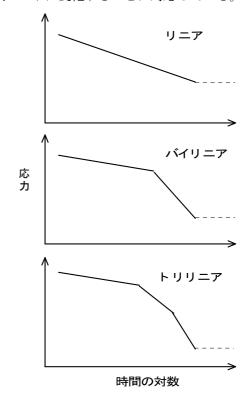


図 6.7.3 一般的な DOL 破壊曲線 (注) 閾値は点線で示されている

文献 34 にあるように、新しいものではなく、かなり古くから提案されているようである。これは、 α =0 はダメージがない場合に、 α =1 は破壊に対応し、ダメージの累積する割合 $d\alpha/dt$ が、t における 応力 σ と累積ダメージ α の関数と考えるもので、次式で表すことができる。

$$\frac{d\alpha}{dt} = F(\sigma, \alpha) \tag{6.7.1}$$

実験結果に適合する関数を選ぶことにより、 $F(\sigma,\alpha)$ を決めることができる。ここでは、2 つのモデルを紹介する。

6.7.2.1 モデル1⁴²⁾

モデルは簡単なほどよいので、閾値σοを考慮した式を示す。

$$\frac{d\alpha}{dt} = \begin{cases} a(\sigma - \sigma_0)^b \alpha^c & \sigma > \sigma_0 \\ 0 & \sigma \le \sigma_0 \end{cases}$$
 (6.7.2)

 σ や σ_0 は応力としているが、基準強度 (basic strength) に対する加えられた応力の比 (stress ratio) と考えてもかまわない。

破壊する時間をTとし、(6.7.2)式を積分すると

$$a(1-c)\int_{0}^{T} \left[\sigma(t) - \sigma_{0}\right]^{b} dt = 1$$
 (6.7.3)

となる。図 6.7.4 に示すように、通常の実験における応力履歴は、応力が一定のステップ関数荷重か応力速度一定のランプ荷重を用いるので、これらの 2 つのタイプの応力履歴に対し、(6.7.3)式より T を求める。

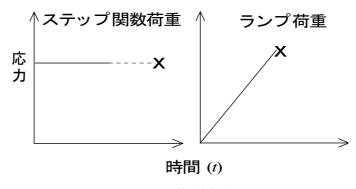


図 6.7.4 荷重履歴

ステップ関数荷重の場合には、ヘビサイドのステップ関数 H(t)を用いて、応力 $\sigma(t) = \sigma \cdot H(t)$ と表わすことができるので、(6.7.3)式より破壊までの時間 T_s は次式で表すことができる。

$$T_s = \frac{1}{a(1-c)(\sigma - \sigma_0)^b}$$
 (6.7.4)

c の値により、時間と α の関係が線形にも、非線形にも表すことができるが、いかなる T_s の値に対しても、破壊曲線の曲率の符号は正で、上に凸の曲線である。

次ぎにランプ荷重の場合には、応力 $\sigma(t)=k\cdot t$ と表わされるので、破壊までの時間を T_r とすれば、(6.7.4)式の T_s を用いて、次式で表すことができる。

$$T_r = T_s(b+1)\frac{\sigma}{\sigma - \sigma_0} \tag{6.7.5}$$

このように、破壊応力が等しければ、ランプ荷重による破壊時間 T_r は、ステップ関数荷重による破壊時間 T_s より長いことが分かる。モデルパラメータ a、b、c を得るためには、通常ステップ関数荷重試験およびランプ荷重試験が用いられる。特にランプ荷重試験は、基準強度を得るために行われ、本質的に短時間(short duration) で行われるので、基準強度は材料の短期強度(short-term strength) とも言われる。

しかし、(6.7.3)式を見ると、根本的な問題が存在していることが分かる。それは、破壊時間 T は、a(1-c)に依存し、個々のパラメータ a、c にはよらないということである。したがって、実験結果から、a、c を特定することはできない。

例えば、Wood による有名な無欠点小試験体を用いた試験結果に当てはめた場合の、パラメータの 算出法を示そう。ただし、c=0 とする。

応力比が時間 T_r^* のランプ荷重試験による基準強度に基づくとすれば、破壊時には応力比 σ は1となるから、(6.7.4)、(6.7.5)式より、aとbには次の関係が成り立つ。

$$a = \frac{b+1}{T_r^* (1-\sigma_0)^{b+1}}$$
 (6.7.6)

ステップ関数荷重試験の応力比と破壊時間のデータに対し、非線形二乗法を用いてパラメータbを求めることができる。ただし、ステップ関数荷重では破壊時間は(6.7.4)式で求められるので、(6.7.6)式を(6.7.4)式に代入した、次式を用いなければならない。

$$T_{s} = \frac{T_{r}^{*}(1-\sigma_{0})^{b+1}}{(b+1)(\sigma-\sigma_{0})^{b}}$$

Wood のステップ関数荷重試験では、 $T_r^*=5$ 分=0.08333 時間であり、 σ_0 =0.2 とし、a=0.17・ 10^6 (1/時間) b=26.9

が得られる。これを用いて、破壊曲線を描くと図 6.7.5 のように表すことができる。同図には、Wood の曲線 Madison curve も示してある。

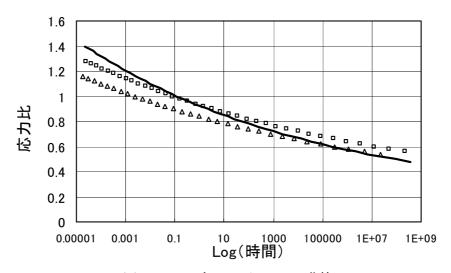


図 6.7.5 モデル 1 による DOL 曲線

(注) △:ステップ関数荷重、□:ランプ荷重、実線: Madison curve

6.7.2.2 モデル2⁴³⁾

2番目のモデルとして、 $d\alpha/dt$ が、t における応力 σ および α に関わる項との和であるとする式を示す。

$$\frac{d\alpha}{dt} = \begin{cases} a(\sigma - \sigma_0)^b + \lambda\alpha & \sigma > \sigma_0 \\ 0 & \sigma \le \sigma_0 \end{cases}$$
(6.7.7)

モデル1と同様の手法により、無欠点小試験体を用いた試験結果に当てはめた場合のパラメータを 次に示す。

a=0.1110 x 10⁷ (1/時間)

b = 34.29

 $\lambda = 0.79 \text{ x } 10^{-3}$ (1/時間)

これらを用いた DOL 曲線を図 6.7.6 に示した。同図を見ると、DOL 曲線がバイリニア型をしていることが分かる。

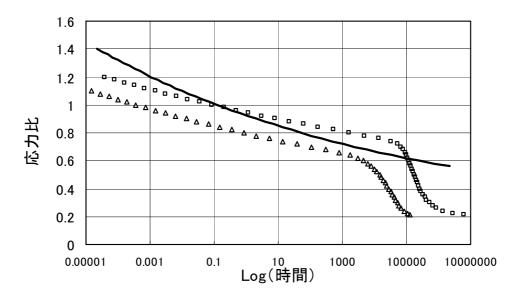


図 6.7.6 モデル 2 による DOL 曲線

(注) △: ステップ関数荷重、□: ランプ荷重、実線: Madison curve

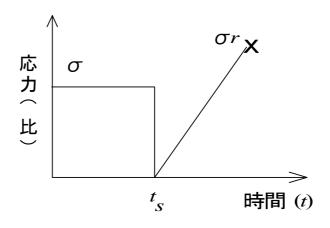


図 6.7.7 一定荷重載加後のランプ荷重試験

6.7.2.3 進化するダメージ累積理論 44)

以上は、確定論を念頭に置いたモデル式であるが、確率論に適用できるようにもしている。それは (6.7.6)式を基にした次式である。

$$\frac{d\alpha}{dt} = \begin{cases} ae^{\omega_1 R_N} (\sigma - \sigma_0)^b + \lambda e^{\omega_2 V_N} \alpha & \sigma > \sigma_0 \\ 0 & \sigma \leq \sigma_0 \end{cases}$$

ダメージの累積する割合は部材により異なることが考えられる。そこで、定数 ω_1 、 ω_2 および正規分布にしたがう正規変数 R_N 、 V_N を導入することにより、部材によって異なる破壊時間の変動、換言すれば分布を表すことが可能となるのである。定数 ω_1 は、主に短期強度の変動を表し、数字的には短期強度の変動係数に等しいと考えられる。また、定数 ω_2 は、主に長期試験の破壊時間における変動を表し、Madison curve に用いられたデータからはほぼ 1.0 と考えられる。よりデータに適合するモデルを求めるは当然であり、このダメージ累積理論も以後高度化している。しかし、先述したクラック進展理論のように、物理的な裏付けのあるモデル式ならばいいが、単なる複雑化は避けて欲しいものであるが、何はともあれ、高度化したモデル式を示そう。(6.7.1)式は、一般的には指数級数を用いて、

$$\frac{d\alpha}{dt} = F(\tau(t), \alpha) = F_1(\tau(t)) + F_2(\tau(t))\alpha + \dots + F_n(\tau(t))\alpha^{n-1}$$
 (6.7.8)

と表されるが、この中の第2項までを用いて、

$$\frac{d\alpha}{dt} = a[\tau(t) - \sigma_0 \tau_s]^b + c[\tau(t) - \sigma_0 \tau_s]^n \alpha \tag{6.7.9}$$

と表している。ただし、 τ (t)は加える応力、 τ _sは標準的なランプ荷重による強度、 σ ₀は応力比で表された閾値である。この微分方程式を閉じた式で解くことはできず、次ぎに示す手法により、破壊時間を求めている。

時間をある一定の時間 Δt で区切り、 Δt では加えられる応力を一定とみなす。区切られた時間を 1 番目から n 番目とし、i 番目では τ_i が加わるが、 Δt の最初の時点での累積ダメージが $\alpha_{i\cdot 1}$ 、 Δt の最後の時点での累積ダメージが α_i とすれば、

$$\alpha_i = \alpha_{i-1} K_i + L_i$$

が成り立つ。ただし、 K_i および L_i は次式で得られる。

$$K_i = \exp[c(\tau_i - \sigma_0 \tau_s)^n \Delta t]$$

$$L_i = \frac{a}{c} (\tau_i - \sigma_0 \tau_s)^{b-n} (K_i - 1)$$

これを繰り返すことによって、累積ダメージ α が1になる時間を求めることができるのである。(6.7.9) 式には、5つのパラメータ a、b、c、n、 σ 0があるが、これらは対数正規分布にしたがう確率変数とし、それらの平均値と変動係数を実験により求める必要がある。正規分布ではなく、対数正規分布としたのは、察するところ、負の値になることを嫌ってではないかと考えられる。これらのパラメータは、次のようにして求める。

実際の実験では、図 6.7.8 のような荷重履歴を加える場合が多いが、この場合の破壊時間 T_f は次式で表される。

$$T_{f} = t_{c} + \frac{1}{c(\tau_{c} - \sigma_{0}\tau_{s})^{n}} \ln \left[\frac{c + a(\tau_{c} - \sigma_{0}\tau_{s})^{b-n}}{\alpha_{c}c + (\tau_{c} - \sigma_{0}\tau_{s})^{b-n}} \right]$$
(6.7.10)

5 つのパラメータa、b、c、n、 σ_0 の初期値を与え、それぞれの試験について、(6.7.9)式で算出される破壊時間 T_f を求める。 T_f と実験による破壊時間 T_d から、次式を最小にするようなパラメータa、b、c、n、 σ_0 の値を求める値である。Nは試験体数である。

$$\Phi = \sum_{i=1}^{N} \left(1 - \frac{T_{fi}}{T_{di}} \right)^2 \ddagger \uparrow c \mid t \downarrow, \quad \Phi = \sum_{i=1}^{N} \left(T_{di} - T_{fi} \right)^2$$

ただし、(6.7.9)式には 5 つのパラメータ a、b、c、n、 σ_0 があるが、a および b には関係式が成り立つ。(6.7.9)式から、閉じた形での関係式を求めることはできないが、短期のランプ荷重試験では、(6.7.9)式の第 2 項は大きな影響を及ぼすことはないと考えられるので、省略したモデル式を用いて、関係式を求めると次式となり、これで代用する。ただし、k は荷重速度である。

$$a = \frac{k(b+1)}{\left[\tau_s(1-\sigma_0)\right]^{b+1}}$$

これより、 α_c を求めると次式のようになる。

$$\alpha_c = \left[\frac{\tau_c - \sigma_0 \tau_s}{\tau_s - \sigma_0 \tau_s} \right]^{b+1}$$

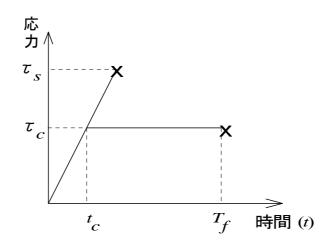


図 6.7.8 実験における荷重履歴

例えば、ベイツガ 2×6 の No.2 and better を用いた実験によりパラメータの平均値は、応力が MPa 単位の場合、

b=37.161, $c=1.623 \times 10^{-4}$, n=1.290, $\sigma_0=0.533$

であった。このときの DOL 曲線を図 6.7.9 に示した。図 6.7.8 と似ているが、閾値が大きい分だけ、曲線の急激な下降が見られない。

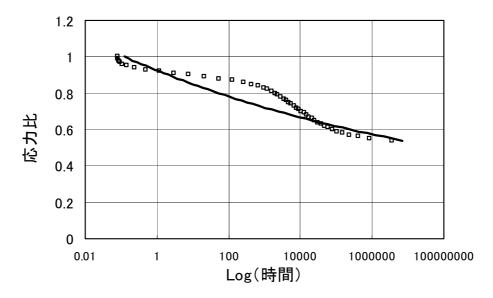


図 6.7.9 高度モデルによる DOL 曲線 (注) 実線: Madison curve

6.7.2.4 アメリカの累積ダメージ理論 ⁴⁵⁾

アメリカでも、ダメージ累積理論を用いて解析されている。モデル式は、次式で示されるように、 比較的簡単な数式である。

$$\frac{d\alpha}{dt} = \exp\left(-a + b\frac{\tau(t)}{\tau_s}\right) \tag{6.7.11}$$

これは、(6.7.8)式の第1項のみを考慮した式である。この式から、ダメージは加えられた応力 τ (t) にのみ依存するので、ダメージは線形的に増加することが分かる。この式のパラメータ a は、b と τ s の関数であり、ランプ荷重の場合には、荷重速度を k とすれば、次式を満足することになる。

$$\exp(-a) = \frac{bk}{\tau_s [\exp(b) - 1]}$$

これを用いて、(6.6.11)式を積分すると、次式が得られる。

$$\ln(T_c) = a - b \frac{\tau_c}{\tau_c}$$

前章で示したベイツガのデータを用いて、パラメータを求めると、b=67.65 が得られる。実験値が分からず図示しようがないので、文献 43)をご覧いただきたいが、これらの値を用いて、実験値と比較してみると、あまり適合性がいいとは言えない。やはり、ダメージは、そのときの荷重だけではなく、それまで累積してきたダメージにも依存しているようである。

ここで、以上の理論的な考察と無欠点小試験体との結果をまとめて図 6.7.10 に示す。ダメージ累積理論にだけ、閾値が入っている。閾値の存在については、実験的に確かめられているわけではないし、クラック粘弾性進展理論からも、存在の確証は示されない。しかし、クラック粘弾性進展理論には、上述したように t_s という時間が示されている。 t_s は、クラックの幅が広がるだけで、進展しない極限の時間であり、この間は製材の強度は変わらない。そのような意味では、ダメージはないということであり、 t_s は時間と応力の間に関係するある意味での閾値と言えるのかも知れない。この t_s を用いると、基準強度の 1/4 ほどの応力では、10 年間も強度の減少が生じないことが分かる。木材の密度の小

ささ、および図 6.7.10 における t_s の存在が、かなり昔に建てられた古い木造が、今日も同じような強度を有している理由と考えられる。しかし、 t_s の値に対する実験的な検証はなされておらず、今後の課題でもある。

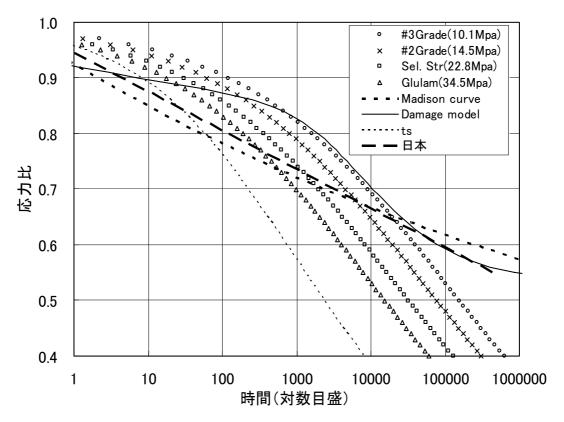


図 6.7.10 DOL 曲線

(注) 等級のかっこ内は下側 5%値=基準強度、図中の t_s は、クラック粘弾性進展理論において、応力を受けるクラックが、基の長さを維持できなくなり、進展し始める直前までの時間

6.7.3 スギへの当てはめ⁴⁶

6.7.3.1 材料の基礎データと試験体

用いた試験体は、幅 40mm、せい 90mm、長さ 2000mm の宮崎県産スギである。まず、宮崎県産スギ実大材 1206 体の基礎データにに関し、フィットする経験分布を求めたところ、MOE は対数正規分布が、MOR については正規分布が当てはまる結果であった。これらの中から、後述するように、縦振動法によるヤング係数 E_t が E_t 0、 E_t 0、 E_t 0、 E_t 0 に属する材を選んで試験体として用いた。

6.7.3.2 試験方法

載荷方法を図 6.7.11 に、荷重履歴を図 6.7.12 に示した。試験方法手順は以下の通りである。

- ① E_f により等級分けされた試験体、E50 は 48 体、E70 は 99 体、E90 は 27 体について、ヤング係数の分布が同じになるように 3 つのグループに分けた。
- ②スパン 1800mm の 3 等分点荷重方式で、各グループに対し、図 6.7.12 に示すステージ I の荷重を負荷した。 σ_C は、表 6.6.1 に示すように 3 つのレベルで行った。
- ③ステージ I で破壊しなかった試験体は、ステージ II に示す荷重載荷を行った。ステージ II の期間はすべての試験体において、 σc の荷重レベルに関係なく 1 週間とした。
- ④さらに、ステージⅡでも破壊しなかった試験体は、ステージⅢに示すように静的荷重を加え、破壊

に至らしめた。それぞれのステージで破壊までに要した時間を記録した。なお、クロスヘッドの移動 速度はステージⅠおよびⅢで一定とした。

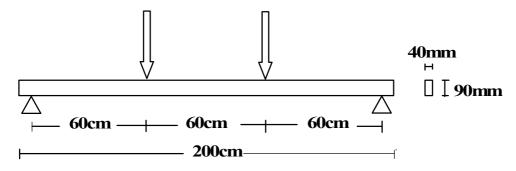


図 6.7.11 DOL 試験における載荷方法

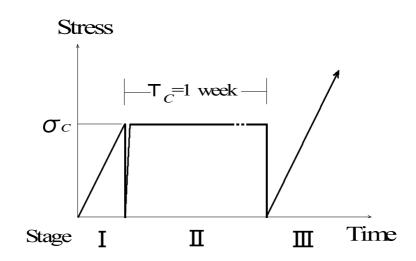


図 6.7.12 DOL 試験における荷重履歴 (注) σ_c は表 6.6.1 を参照

応力比 $\sigma_C(N/mm^2)$ 等級 平均 33.5 E50 В 平均 × 0.9 30.5 C 平均 × 0.8 27.0 平均 38.0 A 平均 × 0.9 E70 В 34.0 C 平均 × 0.8 30.5 平均 A 42.5 E90 平均 × 0.9 В 38.0 \mathbf{C} 平均 × 0.8 34.0

表 6.7.1 各等級における応力レベル

6.7.3.3 結果と考察

DOL 試験結果をまとめたものを表 6.7.2 に示した。上述したように、E50 は 48 体(各応力レベル 16 体)、E70 は 99 体(各応力レベル 33 体)、E90 は 27 体(各応力レベル 9 体)の試験を行なったが、同表に示したように、データロガーのトラブル等で全ての試験体についてのデータが得られたわけではない。測定できた試験体すべてについて、破壊までの時間 T_f を横軸にして、縦軸に累積確率を用いて表すと図 6.7.13 となる。同図は、概ねカナダにおける結果 44 と同様の傾向である。ただし、ステージ

Ⅱで破壊しなかった試験体については、ステージⅢで静的破壊試験を行っているので、それ以後の累積確率がなだらかではなく、急激に増加している。前述したように、ダメージ累積モデルはいつくか提案されているが、ここでは扱いが比較的簡単なアメリカンモデルとカナディアンモデルに当てはめ、それらの変数に関する分布を求める。

等級	応力比	破壊した数			MOE	破壊時間	含水率(%)	
守拟	ルロノフトロ	I	П	Ш		(kN/mm^2)	(時間)	占 小学(%)
	A	8	6	2	平均	5.15	5.49	12.11
E50	В	3	9	0	最小値	3.70	0.003	10.50
	C	1	5	1	最大値	6.20	102.02	13.10
	A	8	24	1	平均	6.75	11.20	12.32
E70	В	2	23	8	最小値	5.10	0.001	11.40
	C	2	4	10	最大値	8.30	142.00	13.40
	A	3	5	1	平均	8.10	10.58	12.17
E90	В	0	9	0	最小値	7.00	0.004	10.90
	C	0	1	8	最大値	9.70	79.00	13.00

表 6.7.2 各ステージで破壊した数、破壊までの時間および含水率

6.7.3.3.1 アメリカンモデルへの当てはめ

前述したアメリカにおけるダメージ累積モデルに当てはめた。パラメータaおよびbの算出のアルゴリズムを次ぎに示す。

① それぞれのステージにおける破壊までの時間を算出する式を求める。各ステージにおける破壊時間は次式で表わすことができる。

ステージ I:
$$t_1 = \frac{\sigma_C}{bk} \cdot \ln \left(\frac{bk \cdot \exp(a)}{\sigma_C} + 1 \right)$$

ステージ
$$II: t_2 = \left(\exp(a) + \frac{\sigma_C}{bk}\right) \cdot \exp\left(-\frac{b}{\sigma_C}\tau_S\right) + \left(\frac{\tau_S}{k} - \frac{\sigma_C}{bk}\right)$$

- ② パラメータは対数正規分布にしたがうとしているので、対数正規分布における平均値と変動係数の 初期値を仮定する。
- ③ ②で仮定した対数正規分布を用いて、DOL 試験体と同じ数N だけのパラメータ a_i 、 b_i を発生させる。これらの値と、①で求めた式を用いて、破壊するまでの時間の推定値 T_{di} を算出する。また、MOE および MOR は、それぞれ対数正規分布および正規分布としたが、これらの変数は相関関係を有しているので、相関関係を考慮した乱数を発生させた。
- ④ DOL 試験により得られている破壊するまでの時間 T_{ft} と T_{ct} より、

$$\Phi = \sum_{i=1}^{N} \left(1 - \frac{T_{fi}}{T_{di}} \right)^{2} \tag{6.7.12}$$

を算出する。

⑤ ②で仮定した対数正規分布における平均値と変動係数を少しずつ変化させ、(6.7.12)式の値が最も小さくなるような平均値と変動係数の値を求める。つまり、最小二乗法により、パラメータa、bの分

布が求められることになる。

このようにして算定したパラメータの平均値と変動係数の値を表 6.6.3 に示した。既往の文献 44 におけるベイツガの結果と比べると、平均値で 2 倍ほどになっており、樹種や試験方法が異なるとパラメータの値が異なることが考えられる。また、これらの値を用いて、破壊までの時間を 1500 体シミュレーションした。このときの結果を図 6.7.13 に示した。これを見ると、実験結果の傾向を表していると言い難い。そこで、試験方法が異なることを考え、a、b が独立のパラメータとして、上述した方法と同様の方法でそれぞれの平均値と変動係数(表 6.7.3 参照)を求め、その値を用いてシミュレーションを行なった結果も図 6.7.13 に示してある。これを見ると、b だけをパラメータとした場合よりも適応性が高いが、それでも短時間で破壊してしまう場合にはフィットしているとは言い難い。この理由として、やはり試験方法の違いが考えられることと、2 つのパラメータでも傾向を表わし難いことが考えられる。

	• •			
		パラメータ	平均	変動係数
	(1)	b	120.3	0.31
スギ	(2)	b	19.89	0.31
		а	20.29	0.10
ベイツガ 3)		b	67.65	0.32

表 6.7.3 パラメータ a、b の平均値および変動係数

⁽注) (1)ではaは独立ではないとした、(2)ではaは独立とした

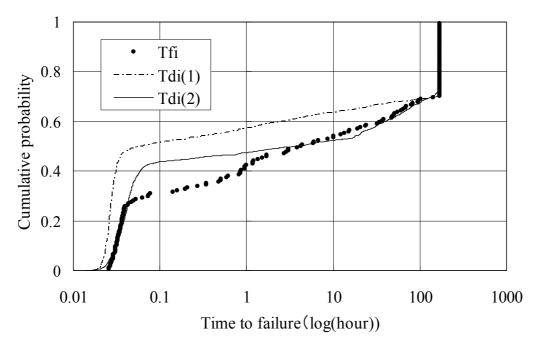


図 6.7.13 アメリカンモデルにおける破壊時間の累積確率と実験値

(注) 点線 Tdi(1)は表 6.7.3 における(1)の場合、実線 Tdi(2)は表 6.7.3 における(2)の場合、• Tfi は実験値

6.7.3.3.2 カナディアンモデルへの当てはめ

前述したカナダにおけるダメージ累積モデルに当てはめた。図で示された荷重履歴にしたがい、ダメージを算出し、1 を越えた時間を破壊するまでの時間とした。実際に用いた Δt は約 6 秒である。これを用いて、アメリカンモデルと同様にパラメータの算定を行った。まず、図 6.7.13 と同様に、破壊までの時間を 1500 体シミュレーションした。このときの結果を図 6.7.14 に示す。同図には、実験結果

も示してある。これを見ると、アメリカンモデルよりも実験結果の傾向を表してはいるが、それでもフィットしているとは言い難い。このときのパラメータの平均値と変動係数を表 6.6.4 に示した。アメリカンモデルと同様に既往の文献 ³⁶⁾におけるベイツガとの結果を比較すると、どのパラメータの値も異なっており、アメリカンモデルと同様、樹種や試験方法が異なるとパラメータの値が異なることが考えられる。そこで、アメリカンモデルと同様、*a* の値も独立として、同様の方法でそれぞれのパラメータの平均値と変動係数の値を求め、破壊までの時間をシミュレーションした結果を図 6.7.14 に示した。これをみると、実験結果にかなりフィットしていると考えられ、また、(6.7.2)式に示す二乗差を最小にすることにより算出しており、パラメータの値には統計的な妥当性があると思われる。

3.7.4 / // / u, b, c, n 4030 0 ((*) 十名 直4030 及動 () 数								
		パラメータ	а	b	С	n	σ_0	
	(1)	平均	_	26.74	5.91×10 ⁻⁵	1.020	0.745	
スギ	(1)	変動係数	_	0.307	0.594	0.100	0.307	
7+	(2)	平均	8.79×10 ⁻⁷	8.29	5.16×10 ⁻⁵	1.888	0.730	
	(2)	変動係数	0.243	0.361	0.383	0.192	0.161	
ツガ	36)	平均	_	37.16	1.62×10 ⁻⁴	1.290	0.533	
	,	変動係数	_	0.281	0.574	0.075	0.298	

表 6.7.4 パラメータ a, b, c, n および σ_0 の平均値および変動係数

⁽注) (1)ではaは独立ではないとした、(2)ではaは独立とした

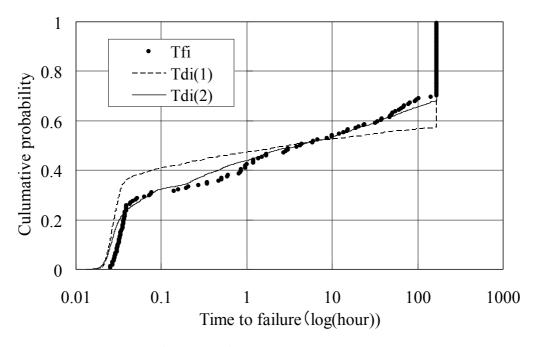


図 6.7.14 カナディアンモデルにおける破壊時間の累積確率と実験値

(注) 点線 Tdi(1)はパラメータ b, c, n および σ_0 を用いた、実線 Tdi(2)はパラメータ a、b、c、n および σ_0 を用いた、 \bullet Tfi は実験値

6.7.3.4 DOL係数の算出

以上のことを基とし、DOL係数を次のように算出する。

例えば固定荷重(D)+積載荷重(L)の組合せの場合、ターゲットとする信頼性指標を β_T とすれば、設計式は初期強度を基にして、次ぎのように表せる。

$$\gamma_D D_n + \gamma_I L_n \le \phi R_n \tag{6.7.13}$$

ここで、 γ_D 、 γ_L は荷重係数、 ϕ は耐力係数、 D_n 、 L_n 、 R_n はそれぞれ固定荷重効果、積載荷重効果および耐力効果の公称値である。

実際には荷重によるダメージが累積していく(荷重継続時間の影響の)ため、信頼性指標は β_T より小さくなって(破壊確率は大きくなって)しまう。そのため、実際の信頼性指標 β を基にした設計式は(6.7.13)で示した設計式と異なってしまう。つまり、信頼性指標を決めると、荷重・耐力係数は一義的に決まってしまうのである。しかし、荷重や耐力の分布、荷重や耐力の公称値、ターゲットとする信頼性指標は同じとするのであるから、荷重・耐力係数は(6.7.13)式と変わるはずがない。一方で、荷重によるダメージにより破壊確率が大きくなることを表すためには、見かけ上 R_n を小さくする(これは、梁であれば断面を大きくすることと同義である)ための係数を R_n に乗じなければならない。また、このことは荷重効果を減じることと同意義である。

これを概説すれば、次のようになろう。いま、実際に加わる荷重効果をD+Lとすれば、設計上は、

$$D + L \le \phi R_n \tag{6.7.14}$$

を満たさなければならない。(6.7.14)式の両辺に上述したように荷重効果を減じる係数 k を乗じると、

$$k(D+L) \le k\phi R_n \tag{6.7.15}$$

となる。(6.7.15)式が示すように、荷重によるダメージの累積を考慮し、信頼性指標を当初の β_T と同じにするためには、荷重効果に係数を乗じてやればよいことが分かる。この係数を DOL 係数と考えればよい。つまり、 $k=k_{DOL}$ である。

ここでは、モンテカルロシミュレーションを用い、ポアソン過程により D+L を発生させ、その D+L に(6.7.15)で示したように、係数を乗じ、破壊確率 P_f を求める。 P_f より算定される β と β _Tが等しくなる k_{DOL} が荷重継続時間を考慮した係数として算定した。

設計期間を 50 年、ターゲットとする信頼性指標 β を 2.5 とすると、設計式は次のようになる。耐力は対数正規分布を仮定し、宮崎産のスギ強度データより、耐力(強度)の変動係数を 0.2 とした。

$$1.01D_n + 2.39L_n \le 1.01R_n$$

この設計式を満足すれば、50年の破壊確率は β = 2.5 に対応する値を以下になる。しかし、DOL の影響により、実際には破壊悪率は β = 2.5 に対応する値より大きくなってしまう。そこで、耐力の基本値を変え、断面を大きくすることにより、DOL の影響で破壊確率が大きくなった値を当初の β = 2.5 に対応する値になるようにしようというのである。つまり、DOL を考慮した設計式は、次のようになる。

$$1.01D_n + 1.99L_n \le 0.81R_n$$

 $R_n = k_{not} R_n$ である。以下具体的に算出方法を述べる。

上述したように、ダメージ累積に係るパラメータを算出してあるので、これを用いてシミュレーションを行い、部材の破壊確率を算出することにより係数を求めることができる。ここでは、アメリカンモデルにしたがうことにする。

図 6.7.15 に、固定荷重と積載荷重の組合せにおけるイメージを描いた。床梁のスパン 3,640cm、荷重負担幅 182cm、固定荷重の基本値(D_n)=600N/m²(荷重の大きさ=正規分布、変動係数=0.1)、常時の積載荷重 L_s (荷重の大きさ=対数正規分布、変動係数=0.6、平均発生率=1/8 回/年、平均継続時間=8 年)、非常時の積載荷重 L_e (荷重の大きさ=グンベル分布、平均発生率=1 回/年、平均継続時間=1 日)であり、常時および非常時の積載荷重の基本値(L_n)=1000N/m²である。

時間に伴う荷重の変動

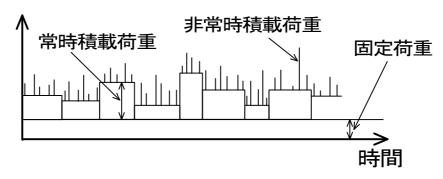


図 6.7.15 固定荷重+積載荷重の生起イメージ

10,000 体の仮想床梁を発生させ、1 体 1 体につき、図 6.7.15 のような荷重を発生させる。(6.7.11)式にしたがい、ダメージを計算し、累積ダメージが 1 になったとき破壊したと考え、破壊確率を求める。 k_{DOL} を 0.3、0.35、0.4、・・・、0.9 と変化させ、それぞれについて破壊確率を算出し、その結果を図 6.7.16 に示した。図 6.7.16 は、積載荷重として、常時の積載荷重 L_s と非常時の積載荷重 L_e を考慮している。しかし、日本における住宅の居室の場合、パーティーなどの短期的な集中荷重は考えにくい。そこで、図 6.7.16 には、積載荷重として L_s のみを考慮した場合における DOL 係数と β の関係も示している。これより、 L_e+L_s と L_s のみでは、ほぼ同じ傾向を示すこと、つまり L_e が加わってもあまりダメージが累積しないことが分かる。また、当初設定した信頼性、つまり $\beta=2.5$ を確保するためには、 $k_{DOL}=0.55$ とすればよいことが分かる。

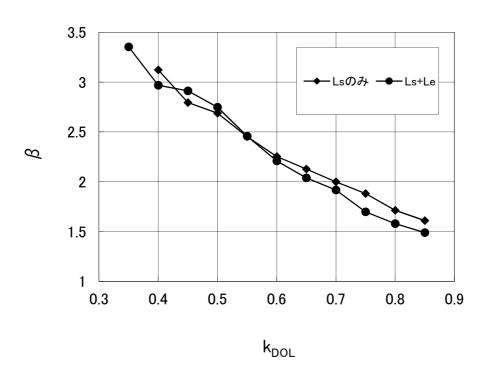


図 6.7.16 DOL 係数と β の関係

6.8 新しい木質軸材料のDOLをどう考えるのか?

木質材料を新たに開発しようとすると、建設省告示第 1446 号が立ちはだかる。様々な試験をしなければならないが、DOL に関する事項では、以下のように記してある。

ホ 二で得られた曲げ強度に対して3以上の段階の割合(以下「応力レベル」という。)を選択し、これを各調整係数用本試験体に対するサイドマッチング用試験体の曲げ強度の平均値に乗じた応力に対応する荷重をそれぞれ10体以上の調整係数用本試験に与え、試験体が破壊するまでの時間(以下「破壊荷重継続時間」という。)を計測すること。この場合において、少なくとも1以上の応力レベルにつき、すべての試験体の半数以上の破壊荷重継続時間を6ヶ月以上としなければならない。

へ 荷重継続時間の調整係数は、ホにより計測した各調整係数用本試験体の応力毎の破壊荷重継続時間の常用対数と応力レベルの関係について回帰直線求め、回帰直線上において 50 年に相当する応力レベル (1.0 を超える場合は、1.0 とする。) として求めること。

認定を得ようとする軸材料の耐力が大きい場合、DOL 試験は手間も費用も大変である。特に、木材系の企業は中小が多く、何も苦労して取得することはないと考えるのは極めて普通であろう。これでは、わが国からは、新しい材料は生まれようがない。筆者は、次のように考え方を変えることも必要ではないかと考える。

6.8.1 そもそも生じる応力は小さい

現行の設計では、材料の強度分布の信頼度 75%における 5%下限値に、DOL 係数などの調整係数を乗じて、許容応力度を算出している。例えば、強度分布を正規分布とし、試験体数 n 体の平均値を μ 、変動係数を CV とすれば、5%下限値の値 $\sigma_{0.05}$ は次式で算出される。

$$\sigma_{0.05} = \mu(1 - \gamma \times CV)$$

 γ は信頼度 75%を表すばらつき係数である。DOL 係数を 1.1/2 とすると、許容応力度 σ AS は、次式となる。

$$\sigma_{AS} = \mu(1 - \gamma \times CV) \times \frac{1.1}{2}$$

試験体数を 10 体とすれば、 γ の値は 2.104 である。今、CV=0.2 とすれば、 σ_{AS} は次式で算出される。

$$\sigma_{AS} = \mu(1 - 2.104 \times 0.2) \times \frac{1.1}{2} = \mu \times 0.329$$

ここで、告示にあるサイドマッチングをどう考えるかであるが、平均値を基準とすれば、その約33%の値で設計することになる。また、現行の設計体系を考えるならば、信頼度75%における5%下限値が基準強度になるのであるから、長期を考えれば、基準強度の55%で設計することになる。さらに言えば、弾性設計することを考えると、現行の設計体系では、終局強度の2/3を比例限度としており、平均値を基準とすれば約22%、信頼度75%における5%下限値を基準とすれば約37%で設計することになる。

これまで紹介してきた文献には、DOLには閾値が存在するというものもある。その値は様々であるが、50%ほどと考えてもいいと思われる。とすると、現行の設計体系でいけば、DOLは単に安全率を考え、1.1/2 でいいのではないかと考える。

6.8.2 実験で確認する必要がある場合(その1)

それでは納得せず、やはり実験で確かめるべきであるという意見に対し、どうしたらいいのか?次のような考え方もあるのではないだろうか?

例えば、今回の実験では、最外層のフィンガージョイントで破壊している。 DOL 試験でもフィン

ガージョイントで破壊すると考えられるので、フィンガージョイント材の引張り DOL 試験をすればいいのではないか、という考え方である。標準的な破壊試験により、フィンガージョイント材の引張試験(曲げ試験でもいいかも知れない)を行い、その強度を基にした応力レベルを決め、DOL 試験をすればよいと考える。実際の曲げ試験により、フィンガージョイント材の破壊時の引張強度を求め、その強度を基にした応力レベルを決めた方がいいという意見もあると思われるが、フィンガージョイント材の引張試験より求めた引張強度を有しているからこそ、梁の曲げ試験で測定される曲げ強度を有しているのであり、フィンガージョイント材の引張試験より求められる引張強度を基にすればよいと考える。

6.8.3 実験で確認する必要がある場合(その2)

新しい木質複合軸材料は、これまでに JAS や JIS となっている材料の複合、組合せである。JAS や JIS となっている材料の DOL 係数は、告示で示されており、長期であれば先述した通り 1.1/2 で、共通である。それでは、JAS や JIS となっている材料を新たに複合した場合、何が問題となるかと言えば、それらを接合する接着層であろう。それならば、そこだけ取り出して、DOL 試験をすればいいのではないかという考え方である。そんなことができるのかと思われる方もいらっしゃるであろうから、文献を示そう。

「発生破壊試験片数による接着剤の耐クリープ性能評価試験」⁴⁷⁾という題目である。目的は以下である。

実験操作や得られる特性値とその評価の難易等を考慮して ASTM D4680-92「静的圧縮せん断による接着剤のクリープ試験方法及び破壊時間測定試験法(木材/木材)」⁴⁸⁾の載荷方法を、判定評価については破壊時間ではなく、一定載荷時間内にクリープ破壊を起こす試験片数による方法を試みた。すなわち、数種の接着剤を用いて作製した試験片に温湿度条件・荷重レベルを変えて載荷試験を行い、一定時間内における試験片の破壊頻度によって接着剤の耐クリープ性能評価を行い、本方法が接着剤の実用的な耐クリープ性能評価法として適用可能か否かを検討した。

初めての方が多いと思われるので、内容を以下に示す。

6.8.2.1 実験

6.8.2.1.1 供試接着剤

供使した接着剤は、耐クリープ性に優れ構造用接着剤として広く認知されている熱硬化性樹脂のレゾルシノール樹脂接着剤 (RF)、逆に熱可塑性樹脂で耐クリープ性に欠ける酢酸ビニル樹脂接着剤 (PVAc)、耐水性には優れているが耐クリープ性に問題があるとされる変成酢酸ビニル樹脂接着剤 (M-PVAc) 2種、及び近年構造用にも用途が拡大している水性高分子イソシアネート系接着剤 (API) である。なお、API については、架橋剤の添加量が耐クリープ性に大きく影響するため、架橋剤の配合割合を3水準設定した。実験に使用した接着剤を表 6.8.1 にまとめた。

記号	接着剤(主剤)	架橋剤または硬化剤と その添加量		備考
RF	J-6000	TD 473	15phr	大日本インキ化学工業(株)
API	KR-7800	AJ-1	3,5,10,15phr	光洋産業(株)
M-PVAc(A)	マルチホ゛ント゛ 900	C-64	5phr	(株) オーシカ
M-PVAc(B)	マルチホ゛ント゛ 940R L	C-64	5phr	(株) オーシカ
PVAc	CH-18			コニシ (株)

表 6.8.1 供試接着剤

RF:レゾルシノール樹脂接着剤、API:水性高分子イソシアネート接着剤、M-PVAc:変成酢酸ビニル

樹脂エマルジョン接着剤、PVAc: 酢酸ビニル樹脂エマルジョン接着剤

6.8.2.1.2 クリープ試験装置

クリープ試験装置として、図 6.8.1 に示す ASTM D4680 のスプリング式クリープ試験治具を用い、破壊時間が測定できるよう一部改良を加えた。万能試験機により治具頂部のボルトに所定の加重を負荷し、内蔵するスプリングによって荷重が保持される。試験片が破壊すると装置にセットされたピンが落ちて接続されているタイムカウンターのスウィッチが切れ、破壊時間が計測される。

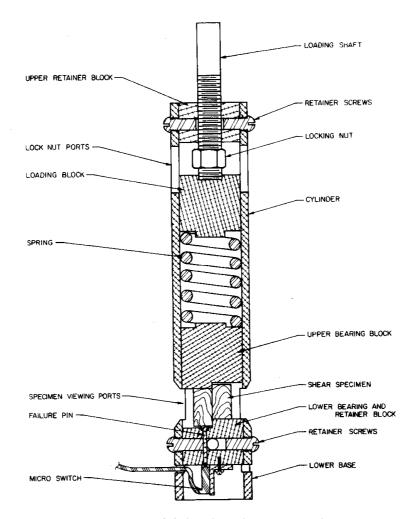


図 6.8.1 クリープ試験用治具(ASTM D4680)

6.8.2.1.3 試験片

供試材としてカバのまさ目から板目の材 $22cm(L)\times12cm(W)\times10mm(T)$ 、平均気乾密度 0.65、平均含水率 12%を用意し、中央に接着層を持つ 2 枚合わせの供試板を作製した。各接着剤の塗布量は $250g/m^2$ とし、圧締圧 $15kgf/cm^2$ 、常温で 24 時間圧締を行い、 $20^{\circ}C65\%RH$ で 1 週間以上養生した。これらの試験板から JIS 型のブロック試験片を切り出しクリープ試験片とした。

6.8.2.2 実験方法

採取した JIS 型のブロックせん断試験片を 1 条件につき 10 片用意し、以下に記す応力レベル及び温湿度の雰囲気条件で 720 時間(1 ヶ月)間のクリープ試験を行い、その間に破壊した試験片の個数、破壊に至るまでの時間(以下破壊時間)、木破率を記録した。

なお、載荷期間における荷重の変化をチェックするためにいくつかの試験治具のスプリングと載荷 ヘッドの間にロードセルを組み込み、荷重の変化をデータロガーに記録させた。

6.8.2.2.1 応力レベル

表 6.8.2 に供試接着剤の常態ブロックせん断試験結果を示す。なお、平均接着強さは、1つの接着剤につき 20 個の試験片を 20℃65%RH (目標 EMC12%) で調湿した後ブロックせん断試験を行い、それらの測定値を平均したものである。各接着剤間で平均接着強さにかなりの違いあるが、これは供試材に用いた木材自身のばらつき、あるいは接着剤の特性によるものと考えられる。

松羊如	平均接着強さ	標準偏差	平均木破率
接着剤	(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)	(%)
RF	207.4	27.8	64
API-15phr	162.6	10.9	89
API-10phr	190.2	21.2	81
API-5phr	218.7	42.0	71
API-3phr	185.8	37.7	41
M-PVAc(A)	178.0	10.4	100
M-PVAc(B)	215.7	14.7	100
PVAc	204.5	22.1	54

表 6.8.2 各種接着剤の常態接着強さ

表 6.8.3 には 20°C65%RH の条件における応力レベル 70~95%の 1 ヶ月にわたる RF のクリープ試験 結果を示す。応力レベル 95%及び 90%の試験片のいくつかが破壊している。しかしながら、それらの 試験片の破壊状況をみると、破壊時間が比較的長いものは木破率がきわめて高く、木破率の低いものは載荷直後か間もなく破壊している。このことは、これらの破断が接着剤の明らかなクリープ破壊によるものではなく、接着強さあるいは被着材の強度のばらつきによる破壊であることを示している。したがって、応力レベル 90%では初期接着力のばらつきによる初期破壊が生じるため、載荷応力レベルは各接着強さの常態ブロックせん断試験の平均接着強さの 50~80%に設定した。

表	表 6.8.3 RF の 720 時間クリープ試験結果(破壊試験片と破壊時間、木破率)									
試験片		応力レベル (%)								
番号	959	%	90%		809	%	70%			
	破壊時間	木破率	破壊時間	木破率	破壊時間	木破率	破壊時間	木破率		
	(h)	(%)	(h)	(%)	(h)	(%)	(h)	(%)		
1	5.8	90	0	80			_			
2	595.5	70	_		_		_			
3	_		_		_		_			
4	0.2	30	_		_		_			
5	_		2	70	_		_			
6	_		30.1	80	_		_			
7	_		_		_		_			
8	373.3	80	_		_		_			
9	29.2	30	_		_		_			
10	_		_		_		_			

⁽注)(一)は試験片が破壊しなかった事を示す。

6.8.2.2.2 環境雰囲気条件

環境条件としては、平衡含水率を一定に温度条件のみを変化させることとした。すなわち、目標平衡含水率 12%、試験温度 20° C及び 50° Cの 2条件とした。実際の環境条件は、 20° C65%RH(標準条件)及び 50° C74%RH である。

なお、載荷は試験片をそれぞれの温湿度条件下で約1ヶ月養生した後開始した。

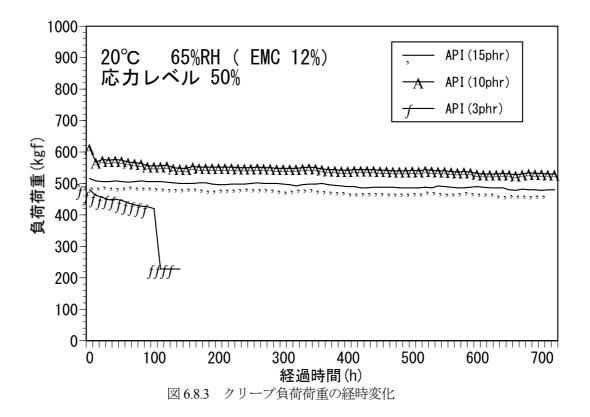
6.8.2.3 結果及び考察

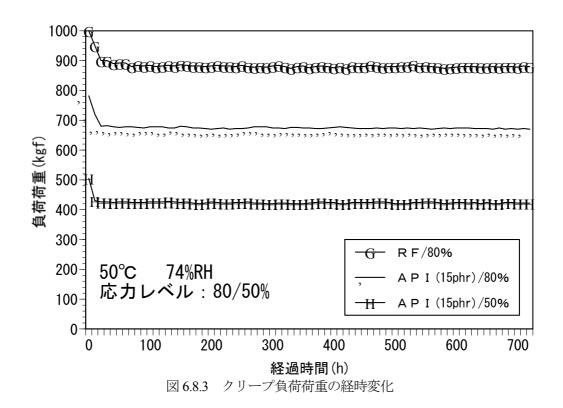
6.8.2.3.1 スプリング式クリープ試験治具における継続荷重の経時変化

クリープ試験においては設定荷重が載荷の全期間にわたって正確に負荷されることが必須である。 この状況を把握するために荷重負荷スプリングと載荷へッドとの間にロードセルを設置し、ブロック せん断試験片にかかる荷重の経時変化を測定した。

図 6.8.2 に 20%65%RH 条件下における応力レベル 80%の RF 及び架橋剤 15 部添加の API(以下 API-15 部と記す)及び架橋剤 3 部添加の API(以下 API-3 部と記す)の載荷試験における負荷荷重の経時変化を示した。API-3 部の 30 時間後にみられる急激な荷重の低下は試験片のクリープ破壊によるものである。したがって、この試験片を除けば負荷荷重の低下は初期の荷重に対し 5%にも満たなかった。これを応力に換算すると応力レベル 80%に対し 3%以下の低下である。図 6.8.3 は 50%C74%RHにおける RF 及び API-15 部の載荷試験における負荷荷重の経時変化を同じく示したものである。すべての試験片で、負荷開始直後数時間に負荷加重の約 10%、応力レベルに換算すると 7、8%の初期低下がみられるが、これは治具の温度上昇等に伴う初期低下と考えられ、その後は負荷加重が一定に保持されている。

これらの事実から1ヶ月程度の荷重期間においては負荷荷重の低減はほとんどないとみてよく、このスプリングによる載荷方式が実用的に十分使えることが示された。





6.8.2.3.1 応力レベルと破壊時間による評価

図 6.8.4 は耐クリープ性に欠け、破壊時間が極端に短いと想定される PVAc の応力レベルと破壊時間の関係を示したものである。50%という低い応力レベルでクリープ破壊を起こし破壊時間も短いが、それでも ASTM D4680 に規定されている応力レベルー破壊時間曲線を求めようとすると、少なくとも1,000~10,000 時間(1ヶ月)以上の試験期間が必要となる。

図 6.8.5 は M-PVAc(A)の応力ー破壊時間の関係を示したものである。80%という高いレベルの応力をかけても 720 時間(30 日)以内にクリープ破壊しない試験片が多数存在している。このことは、より低い応力レベル、あるいは耐クリープ性に優れた接着剤の評価試験にあってはこの応力ー破壊時間曲線を求めるのに長大な時間を要することを意味している。したがって、この ASTMM にある応力ー破壊時間曲線による方法は構造用接着剤の耐クリープ性の実用的な評価試験法としては適当でないことを示している。

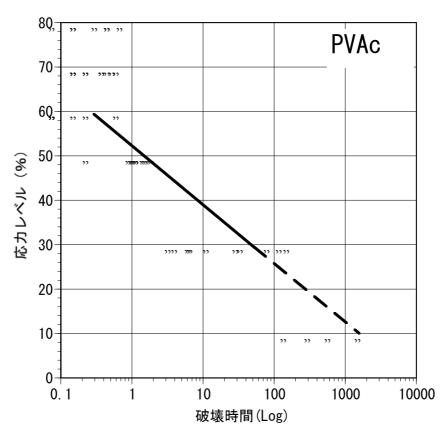


図 6.8.4 応力レベルー破壊時間関係図

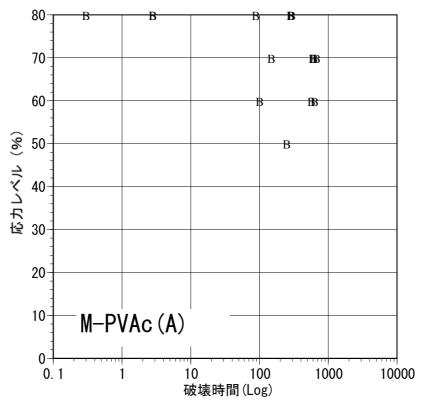


図 6.8.5 応力レベルー破壊時間関係図

6.8.2.3.1 一定時間内の破壊試験片数による評価

表 6.8.4 に 20℃65%RH 及び 50℃74%RH の 720 時間(30 日) クリーブ試験における各種接着剤のクリープ破壊状況を示した。構造用木材接着剤として用いられている RF ではいずれの温度条件でも応力レベル 80%以下で破壊する試験片は全く認められなかった。API についても架橋剤添加 15 部のものでは RF と同様両環境条件で1 片の破壊も認められず、RF と同様高い耐クリープ性を持つことを示唆している。しかし、架橋剤の添加量が少なくなるにつれて、耐クリープ性が低下するようになり、また温度の影響も強く受けるようになることを示している。すなわち、架橋剤添加量 10 部では試験温度 20℃では応力レベル 80%で1 片しかクリープ破壊を生じてないのに対し、試験温度 50℃では 10 片中4 片に破壊が生じ、応力レベル 70%で1 片、70%で4 片(全試験片数の 60%)がクリープ破壊に至っている。更に、架橋剤の添加量が低下すると耐クリープ性は低下し、3%の添加したものでは耐クリープ性能はほとんど期待できないことを示している。M-PVAc についても、品番により差異はあるもののいわれているように接着耐久性には優れていても耐クリープ性はほとんどないことが示唆される結果となっている。特に温度がかかると致命的であることを示している。PVAc は表示した最低の応力レベル 50%でも耐クリープ性ゼロであり、恐らくこれ以下の応力レベルでも実用上の耐クリープ性は期待できない。

これらの結果は、一般に認められている各種接着剤の耐クリープ特性を極めてよく合致しているものと言えよう。また、これらの結果は常態接着試験の結果をベースに論議したものであり、接着剤により同一応力レベルであっても実際の負荷には違いがあった。これを調整するために、被着材であるカバ材のせん断強度をベースに調整した応力レベルと破壊試験片数の関係を示したもの図 6.7.6 である。これにも各種接着剤の耐クリープ特性が如実に現れている。

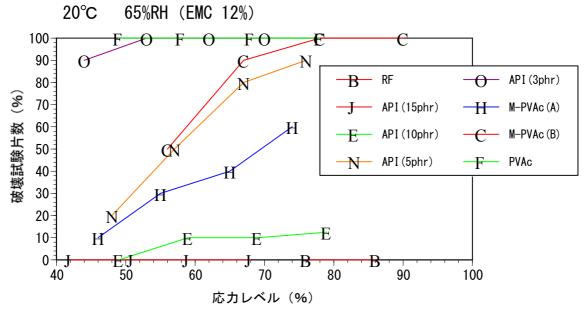


図 6.8.6 720 時間クリープ試験における応力レベルと各種種接着剤の破壊試験片数 (注) **応力レベル: 対被着材強度比(%)**

表 6.8.5 は、別途測定した供試接着剤フィルムの動的粘弾性の結果から、今回の実施した試験温度 20 Cと 50 Cにおける貯蔵弾性率 E'を求めたものである。E'は接着剤の硬さを表し、一般的に E'の値が高いほど耐クリープ性に優れていると考えられている。このことから判断すると、20 Cにおける E'は RF、API-15 部、API-10 部、M-PVAc(A)で差がほとんど認められず、残りの API-5 部、API-3 部 M-PVAc(B)、PVAc に比べ高い値を示している。しかしながら、50 Cになると RF、API-15 部、API-10 部、M-PVAc(A)の順に E'の値が小さくなっており、これは、50 C74%RH におけるクリープ試験の結

果とほぼ同様の傾向を示している。このことは、クリープ試験における破壊試験片数によるクリープ 性能の評価が一定の妥当性を持つことを示すものである。

表 6.8.4 クリープ試験のける応力レベルと各種接着剤の破壊試験片数

	20°C65%RH(EMC;12%)							
接着剤	応力レベル (%)							
	50	60	70	80				
RF	_	_	0/10	0/10				
API-15phr	0/10	0/10	0/10	0/10				
API-10phr	0/10	1/10	1/10	1/8				
API-5phr	3/10	4/10	8/10	9/10				
API-3phr	9/10	10/10	10/10	10/10				
M-PVAc(A)	1/10	3/10	4/10	5/10				
M-PVAc(B)	5/10	9/10	10/10	10/10				
PVAc	10/10	10/10	10/10	10/10				
	50°C74%RH(EMC12%)							
		応力	レベル (%)					
	50	60	70	80				
RF	_	_	0/10	0/10				
API-15phr	0/10	0/10	0/10	0/9				
API-10phr	0/10	1/10	4/10	6/10				
M-PVAc(A)	10/10	10/10	10/10	10/10				

表 6.8.5 動的粘弾性試験から求めた接着剤フィルムの弾性率 (109N/m²)

	雰囲気	雰囲気温度			
接着剤	20°C	50°C			
RF	2.17	2.18			
API-15phr	2.9	0.95			
API-10phr	3.02	0.8			
API-5phr	1.55	0.33			
API-3phr	1.3	0.2			
M-PVAc(A)	2.4	0.23			
M-PVAc(B)	1.08	0.38			
PVAc	1.28	0.06			

6.8.2.4 例

例えば、文献 49)にあるような、 I ジョイストの場合、標準的な試験により、写真 6.8.1 のような破壊が見られた。これがウェブとフランジの接着層のせん断破壊とするなら、この部分だけを取り出して、図 6.8.1 に示す装置を用い、DOL 試験をすればよいと言うことである。つまり、図 6.8.1 に示す装置により、標準的なせん断試験を行い、その強度を基にした応力レベルを決め、DOL 試験をすればよいと考える。実際の I ジョイストの曲げ試験により、対象とする部分の破壊時のせん断強度を求め、その強度を基にした応力レベルを決めた方がいいという意見もあると思われるが、図 6.8.1 に示す装置により求めたせん断強度を有しているからこそ、 I ジョイストが測定される曲げ強度を有しているの

であり、図 6.8.1 に示す装置により求められるせん断強度を基にすればよいと考える。





写真 6.8.1 Ⅰ型ジョイスト曲げ試験における破壊状況

図 6.8.1 のような装置をつくる必要があるが、実大材の試験をすることを考えると、ランニングコストを考慮すれば、費用は少ないと思われる。写真 6.8.2 には当研究所でつくった装置を示す。 1 体 5 万円ほどである。



写真 6.8.2 接着層の DOL 試験装置

6.9 まとめ

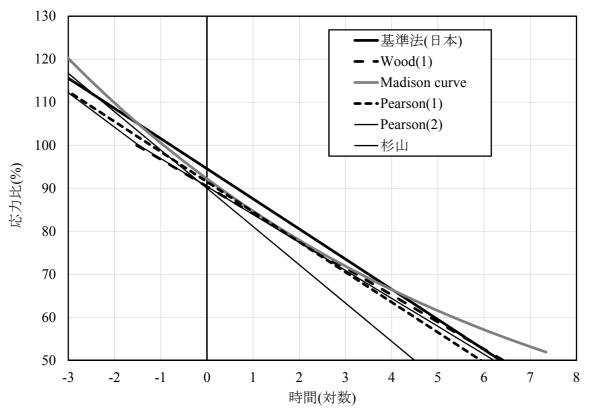


図 6.9.1 主に、無欠点小試験体を用いた場合の応力比と破壊時間の関係

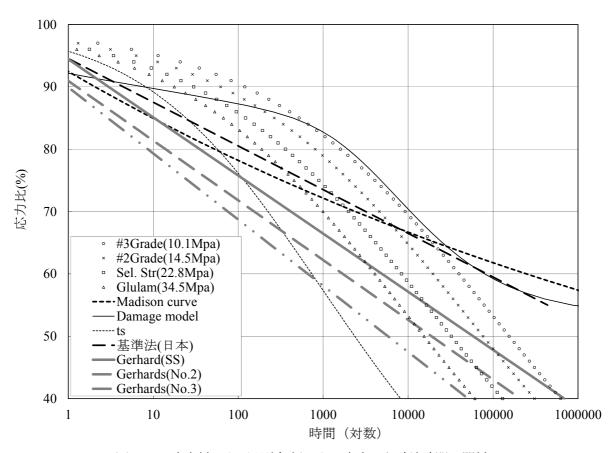


図 6.9.2 実大材および理論解析による応力比と破壊時間の関係

図 6.9.1 に示すように、無欠点小試験体では、様々な文献による結果はほぼ同じである。無欠点小試験体の場合、応力比を算出する場合、サイドマッチングなどのマッチングにより標準的な試験による強度を算出し、これを分母にする。一方、実大材の場合には、マッチングは難しく、例えば、図 6.9.3 に示すように、Equal Rank Assumption という方法が用いられる。

まず、試験に供する試験体を、ヤング係数や強度の分布は同じと考えられる、いつくかのグループに分ける。次に、一つのグループに対し、標準的な試験により、強度分布を求める。図 6.9.3 で言えば、◇の曲線となる。横軸の正規化した値は累積確率と同じである。もう一つのグループに対し、一定荷重、図 6.9.3 では 28MPa の載荷試験行う。その結果を破壊時間の短い順に正規化したものが、+で示されている。ランクの小さな箇所では、載荷途中で破壊したことを表している。そして、例えば、一定荷重載荷後 7 日で破壊した+と同じ正規化した値に対する◇の強度を算出し、それを分母として応力比を算出するのである。これを一定荷重載荷試験で破壊した+に対して順次行えば、DOL 曲線が得られる。この Equal Rank Assumption が正しいかどうかは分からないが、少なからず変動があると思われる。その他の方法として、ヤング係数や密度、節径などを説明変数とした多変量解析により、一定荷重試験体の強度を推定している文献もあるが、これも変動を有しているであろう。この変動は、無欠点小試験体における変動よりも大きいのではないか?つまり、縦軸の変動が大きいことも無欠点小試験体と実大材の傾向が異なっていることの理由の一つと考えられる。

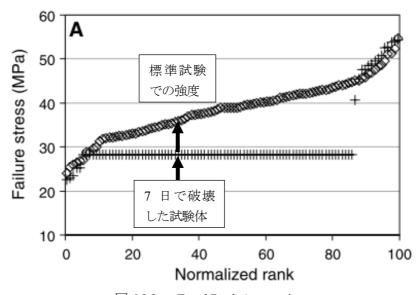


図 6.9.3 Equal Rank Assumption

また、これまで紹介してきた観点 から、今回の3種類の試験体につい て、考察してみる。

まず、6.3で紹介した問題点である、標準的な試験による破壊時間であるが、表 6.9.1 を見ると、破壊時間に関しては集成材が他の2つの試験

表 6.9.1 標準的な試験による結果

		集成材	炭素繊維入	鉄筋入
強度	平均值(N/mm2)	38.53	34.50	48.20
刀虫/支	変動係数	0.175	0.093	0.058
破壊時間	平均値(秒)	321.9	287.5	271.2
似绿时间	変動係数	0.273	0.090	0.084

体より大きく、一定荷重載荷試験の結果に影響を及ぼすかも知れない。また、鉄筋入集成材は強度の変動が小さく、DOL 曲線が右下がりにならないかも知れない。さらに荷重一たわみ曲線を見ると、鉄筋入集成材に比べ、集成材や炭素繊維入集成材は脆性的に破壊しており、6.5で紹介したクリープという観点からは影響が出るかも知れない。

6. 10 文献

- 1) Parent. : Experinces pour Connaître la Resistance des Bois de Chene et de Sapin, L'Academie Royale des Science, Paris, Historie et Memoires, 512, 1707.
- 2) Buffon, G. H. and Oskin, E. T.: Experiences sur la Force du Bois, Paris L'Academie Royale des Science, Historie et Memoires, Vol.292 Also Vol.453, 1741.
- 3) Thurston, G. H.: On the effect of prolonged stress upon the bending strength and elasticity of pine timber, American Association for the Advancement of Science, Summarized Proceedings, P.9-16, 1881.
- 4) Tiemann, H. D.: The effect of speed of testing upon the strength of wood and the standardization of tests for speed, Proceeding of ASTM 11th Annual Meeting, p.541-557, Philadelphia, Pennsylvania, 1881.
- 5) Tiemann, H. D.: Some results of dead load bending tests of timber by means of a recording deflectometer, Proceeding of ASTM 12th Annual Meeting, p.534-548, Philadelphia, Pennsylvania, 1908.
- 6) Markwardt, L. J.: Aircraft Woods Their Properties, Selection and Characteristics, National Advisory Committee for Aeronautics Report No.345, 1930.
- 7) 杉山英男: 木材の曲げ強度と剛性に及ぼす荷重時間の影響、日本建築學會論文集 (52), 85-94, 1956.
- 8) Liska, J. A.: Effect of rapid loading on the compressive and flexural strength of wood, U. S. Forest Products Laboratory, Report No. 1767, Madison, Wisconsin, 1950.
- 9) Markwardt, L. J. and T. R. C. Wilson: Strength and related properties of woods grown in the United States, USDA Technical Bulletin, No.479, Washington, D.C. 1935.
- 10) Comb, T. C.: A seismic design of wood structures: Duration of stress consideration, Bulletin of the Seismological Society of America, 29(4), p.539-547, 1939.
- 11) Wood, L. W.: Behavior of wood under continued loading, Engineering News-Record, 139(24), p.108-111, 1947.
- 12) Wood, L. W.: Relation of strength to wood to duration of load, U. S. Forest Products Laboratory, Report No. R-1916, Madison, Wisconsin, 1951.
- 13) C. C. Gerhards: Effect of Duration and Rate of Loading on Strength of Wood and Wood-Based Materials, USDA Forest Service. Research Paper, FPL 283, Madison, Wisconsin, 1977.
- 14) Youngs, R. L. and H. C. Hilbrand: Time-related flexural behavior of small beams under prolonged loading, Forest Products Journal, 13(6), p.227-232, 1963.
- 15) Schniewind, A. P.: Creep-rupture life of Douglas-fir under cyclic environment conditions, Wood Science Technology, 1(4), p.278-288, 1967.
- 16) Brokaw, M. P. and G. W. Foster: Effect of rapid loading and duration of stress on the strength properties of wood tested in compression and flexure, U. S. Forest Products Laboratory, Report No. R-1518, Madison, Wisconsin, 1945.
- 17) Leont'ev, N. L.: Long term resistance of spruce wood to shear along the grain, Lesn. Z. Arhangel'sk, 4(4), p.122-124, 1961.
- 18) Schniewind, A. P. and J. C. Centeno: Fracture toughness and duration of load factor. I. Six principal systems of Crack propagation and the duration factor for cracks propagating parallel to grain, Wood and Fiber, 5(2), p.152-159, 1967.
- 19) Bryan, E. L.: Bending strength of particleboard under long term load, Forest Products Journal, 10(4), p.200-204, 1960.
- 20) McNutt, J. D.: Design stress for hardboard effect of rate, duration and repeated loading, Forest Products Journal, 20(1), p.53-60, 1970.
- 21) McNutt, J. D.: Effect of rate of loading and duration of load on properties of particleboard,, U SDA Forest Service Research Paper, FPL 270, Madison, Wisconsin, 1975.
- 22) Haygreen, J. and D. Sauer, : Prediction of flexural creep and stress rupture of hardboard by use of time-dependent relationship, Wood Science, 1(4), p.241-249, 1969.

- 23) Littleford, T. W.: Performance of glued-laminated beams under prolonged loading, Information Report, Forest Products Laboratory, No. VP-X-15, Vancouver B. C., 1966.
- 24) Kufner, M.: Creep in wood particleboard under long-term bending load, Holz als Roh-und Werks, 28(11), p.429-446, in German, 1970.
- 25) Mohler, K. and J. Ehlbech: Tests on the fatigue resistance of particleboard and plywood under bending load, Holz als Roh-und Werks, 26(4), p.118-124, in German, 1968.
- 26) R. G. Pearson: The effect of Duration of Load on the Bending Strength of Wood, Holzforschung, 26(4), p.153-158, 1972.
- 27) Armstrong, L. D.: Division of Forest Products, CSIRO, Australia, Private Communication, 1971.
- 28) William S. Clouser: Creep of Small Wood Beams under Constant Bending Load, U SDA Forest Service Research Paper, FPL 2150, Madison, Wisconsin, 1959.
- 29) James, W. L.: Dynamic strength and elastic properties of wood, Forest Products Journal, 12(6), p.253-260, 1962.
- 30) 佐々木光、満久崇麿: 曲げクリープについて、木材研究、京都大学木材研究所報告、31、p.41-49、1963.
- 31) 杉山英男:木材ばりのクリープ性状の理論的考察(その1) -木材および木質材料を用いた構造の断面設計の新体系確立のための提案と考察—(第1報)、日本建築学会論文報告集、第155号、p.9-16、昭和44年1月.
- 32) 澤田 稔:木材の強度特性に関する研究、林業試験場研究報、108、p.115-224、1958.
- 33) Madsen, B.: Duration of Load Tests for Dry Lumber in Bending, S.R.S. Report No.3, Vancouver, Canada, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, 1971.
- 34) Madsen, B. and Barrette, JD.: Time Strength Relationship for Lumber, S.R.S. Report No.13, Vancouver, Canada, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, 1976.
- 35) Foschi, RO. and Barrette, JD.: Load Duration Effects in Western Hemlock Lumber, ASCE, Journal of Structural Division, 108(ST7), p.1494-1510, 1982.
- 36) C. C. Gerhards: Effect of Grade on Load Duration of Douglas-fir Lumber in Bending, Wood and Fiber Science, 20(1), p.146-161, 1988.
- 37) P. Hoffmeyer and J. D. Sorensen: Duration of load revisited, Wood Science and Technology, 41(8), p.687-711, 2007.
- 38) Erol Karacabeyli and Lawrence A. Soltis: State of the art Report on Duration of Load Research for Lumber in North America, Proceeding of the 1991 International Timber Engineering Conference, Vol.4, p.4.141-4.155, London, 1991.
- 39) Nielsen, L. F.: Crack Failure of Dead-, Ramp- and Combined-Loaded Viscoelastic Materials, Proceedings of First International Conference on Wood Fracture, p.187-200, 1978.
- 40) 中村 昇: 木質構造のここが分からない 第5回、Journal of Timber Engineering, 65, p.88-95, 2005.
- 41) B. Madsen and K. Johns: Duration of load effects in lumber. Part II: Experimental data, Canadian Journal of Civil Engineering, 9, p.515-525, 1982.
- 42) J. D. Barrette and R. O. Foschi: Duration of load and probability of failure in wood. Part I. Modelling creep rupture, Canadian Journal of Civil Engineering, 5, p.505-514, 1978.
- 43) J. D. Barrette and R. O. Foschi: Duration of load and probability of failure in wood. Part II. Constant, ramp, and cyclic loadings, Canadian Journal of Civil Engineering, 5, p.515-532, 1978.
- 44) F. Z. Yao and R. O. Foschi: Duration of load in wood: Canadian results and implementation in reliability-based design, Canadian Journal of Civil Engineering, 20, p.358-365, 1993.
- 45) Gerhards, C. C.: Time-related effects of loading on wood: a linear cumulative damage theory, Wood Science, 11(3), p.139-144, 1979.

- 46) 中村 昇、荒武志朗, 飯島泰男, 堀江和美:荷重継続時間の影響に関する試験法の提案と影響係数の算出、木材学会誌、Vol. 56, No. 5, p.326-332, 2010.
- 47) 吉田弥明: 発生破壊試験片数による接着剤の耐クリープ性能評価試験、木材工業技術短信、21(1), p.1-8、2003.
- 48) ASTM D 4680-82 : Creep and Time to Failure of Adhesives in Safety by Compression Loading (Wood-to-Wood), 1992.
- 49) 平成 21 年度林野庁補助事業 2×4 住宅部材の開発事業 「国産材料を用いた高性能な純国産 I 型ジョイストの開発」 事業成果報告書 全国木材協同組合連合会平成 23 年 2 月 28 日.

第7章 まとめと今後の課題

本事業は、鉄筋や炭素繊維等の異素材と木質系材料について、それぞれの利点を活かした形で組み合わせ、優れた複合建築資材として、実用化・普及に資することを目的とした委託事業である。

複合材料のような新材料を構造材料として、広く利用できるようにするには、建築基準法上の 基準強度を得て設計上使いやすくすること等が必要であると考えられる。

また、複合材料は、木質系材料と異種材料を接着剤により一体化したものである。木質系材料と異種材料については、それぞれ個々に基準強度が与えられている場合が多いことを考えると、接着剤により異種材料を木質系材料に付着させる付着強度の評価方法を確立させ、その評価方法を法的に位置づけることも、このような複合材料を利用しやすくする方法の一つであると考えられる。よって、そのための検討もしておく必要があるが、この方向からの検討は、過去にあまり例がなく、長期的な課題と考えられる。

したがって、複合材料を広く利用できるようにするためには、やはり、建築基準法上の基準強度を得ることが現実的な手段であり、そのためには、当該複合材料の JIS 又は JAS の制定・法第37条に規定する指定建築材料への追加が必要であると考えられる。

この点、JIS 又は JAS、指定建築材料のいずれであっても、複合材料に法令上の位置づけを求める場合には、品質管理に関する技術的基準を定めることが必要であると考えられる。

ここでは、仮に、指定建築材料のうち木質接着成形軸材料の品質に関する技術的基準(平成 12 年建設省告示第 1446 号)を準用し、費用と時間の面で一民間企業が実施するにはハードルが高いと考えられる「各強度に対する荷重継続時間の調整係数」について、まずは長期性能の基礎的知見を収集し、それらの課題の解決に向けての検討を行うこととした。

平成27年度、以下のような結果を得た。

(1) 短期試験の結果

最大耐力について、集成材、鉄筋挿入複合材、炭素繊維シート挿入複合材、それぞれ 10 体の試験の結果を得た。その結果、集成材では最大耐力の変動係数が 17.5%とかなり大きいことが分かった。これは既往の実験とも一致している(H24 年度基整促報告書によると、2009 年の実験では20.4%、2011 年の実験では13.54%)。それに対し、鉄筋挿入タイプでは5.9%、炭素繊維シート挿入タイプでは9.3%と小さくなった。

今回の試験では、長期試験の関係で、鉄筋挿入、炭素繊維シート挿入による耐力を増やすことは極力抑えた。しかし、最大耐力の変動係数が小さくなったことだけでも、鉄筋挿入、炭素繊維シート挿入により、設計耐力が増える可能性が示された。

(2)長期試験の結果

現在のところ、応力レベル 75%~80%、荷重継続時間 1 か月程度までの結果が得られている。この段階で、集成材は応力レベル 75%以上のものは全て破壊している。

これに対し鉄筋挿入タイプは85%以上のものは破壊しているが、80%のものは破壊に至っていない。炭素繊維シート挿入タイプは、90%以上および、80%のものは破壊しているが、85%のものは破壊していない。というように、鉄筋挿入、炭素繊維シート挿入により荷重継続時間の影響が緩和される傾向が見られる。

(3) 鉄筋挿入複合材のこれまでの試験結果の分析

試験により検討している鉄筋挿入複合材は、鉄筋の降伏が集成材の破壊に先行するものである。 短期試験での鉄筋および集成材の応力、歪挙動は、平面保持を仮定した理論的考察からの推定と ほぼ同じ結果であった。最大耐力時、鉄筋の応力負担割合は30%、集成材は70%程度と推察され た。その鉄筋と集成材との応力負担割合から、最大耐力のばらつきが70%程度軽減されると推測 される。これは短期試験で鉄筋挿入複合材の最大耐力のばらつきが、集成材に比べ軽減されたこ とに一致している。鉄筋と集成材の応力負担割合から、DOL 係数が集成材に対し、鉄筋挿入複合 材が0.6から0.7強に軽減されると推定された。これについては今後実験等による検証が必要で ある。 (4) 荷重継続時間に関わる文献調査およびそれらを基とした考察

木材強度に対し荷重継続時間が影響することは、少なくとも 18 世紀には認められていた。第 2 次世界大戦中、無欠点小試験体の曲げ荷重の継続に関する研究が米国の FPL で勢力的に行われ、1951 年に Wood、L. W. がいわゆるマジソンカーブを提案している。1970 年代になり、Madsenn, B. らにより実大試験が行われるようになった。その結果、実大試験の結果は無欠点小試験体とは異なるという結論に至っている。理論的な研究は、粘弾性クラック進展理論、ダメージ累積理論等の検討が行われている。しかし、いずれも検討途上にあり、実用的には多くの問題が残されている。

DOL 試験の対象とする荷重は、木質材料の基準強度が破壊荷重の5%下限値であることから、長期許容応力度が破壊荷重の1/3程度と、極めて小さい。その程度であれば、継続時間が∞になっても破壊しないのではという文献もある。そのようなDOLに関して、木質材料等の大臣認定基準で課されている試験方法、評価方法は、手間、費用が過大であり、新しい材料の出現を阻んでいる。また、接着剤の特性について、集成材では木破率が高いとして無視されているが、複合材では検討する必要があるであろう。

以上の結果を踏まえ、平成28年度は次の課題に取り組みたい

- (1) 現在実施中の長期曲げ試験を継続する。また試験体数を増やし、現在までに得られている傾向がより確かなものであることを確認する。
- (2) 異種材料(鉄筋、炭素繊維等)と母材(集成材)の構成比率の異なる複合材料の構造性能 を調べ、構成比率をもとに長期構造性能を予測する手法を実験的に検討する。
- (3) 異種材料の母材への接着剤による付着の構造性能について実験的に検討する。
- (4)解析的手法等により複合材料の長期性能を予測できるかを、海外文献等により調査する。

なお、これは余談であるが、複合材料が JIS 又は JAS 制定・指定建築材料の追加を目指す場合、業界から当該材料についての需要が大きいことが示されることが重要であり、本事業で行う技術的な検討に加え、民間企業において、複合材料の製作に関わる品質管理体制等を確立させておく必要がある。

参考

付1. 平成12年建設省告示第1446号 抜粋

(別表第1及び別表第2は10号木質接着成形軸材料および11号木質複合軸材料のみ抜粋)

建築物の基礎、主要構造部等に使用する建築材料並びにこれらの建築材料が適合すべき 日本工業規格又は日本農林規格及び品質に関する技術的基準を定める件

制定: 平成12年5月31日 建設省告示第1446号 改正: 平成20年8月11日 国土交通省告示第968号

建築基準法(昭和25年法律第201号)第37条の規定に基づき、建築物の基礎、主要構造部等に使用する建築材料並びにこれらの建築材料が適合すべき日本工業規格又は日本農林規格及び品質に関する技術的基準を次のように定める。

第1

建築基準法(以下「法」という。)第37条の建築物の基礎、主要構造部その他安全上、防火上又は衛生上重要である部分に 使用する建築材料で同条第一号又は第二号のいずれかに該当すべきものは、次に掲げるものとする。

- 構造用鋼材及び鋳鋼
- 二 高力ボルト及びボルト
- **三** 構造用ケーブル
- 四 鉄筋
- 五 溶接材料(炭素鋼、ステンレス鋼及びアルミニウム合金材の溶接)
- 六 ターンバックル
- 七 コンクリート
- 八 コンクリートブロック
- 九 免震材料(平成12年建設省告示第2009号第1第一号に規定する免震材料その他これに類するものをいう。以下同じ。)
- 十 木質接着成形軸材料(木材の単板を積層接着又は木材の小片を集成接着した軸材をいう。以下同じ。)
- 十一 木質複合軸材料(製材、集成材、木質接着成形軸材料その他の木材を接着剤により I 形、角形その他所要の断面形状に複合構成した軸材をいう。以下同じ。)
- **十二** 木質断熱複合パネル(平板状の有機発泡剤の両面に構造用合板その他これに類するものを接着剤により複合構成したパネルのうち、枠組がないものをいう。以下同じ。)
- **十三** 木質接着複合パネル(製材、集成材、木質接着成形軸材料その他の木材を使用した枠組に構造用合板その他これに類するものを接着剤により複合構成したパネルをいう。以下同じ。)
- **十四** タッピンねじその他これに類するもの(構造用鋼材にめねじを形成し又は構造用鋼材を切削して貫入するものに限る。)
- 十五 打込み鋲(構造用鋼材に打込み定着するものをいう。以下同じ。)
- 十六 アルミニウム合金材
- 十七 トラス用機械式継手
- 十八 膜材料及びテント倉庫用膜材料
- 十九 セラミックメーソンリーユニット
- 二十 石綿飛散防止剤
- 二十一緊張材
- 二十二軽量気泡コンクリートパネル

第2

法第37条第一号の日本工業規格又は日本農林規格は、別表第1(い)欄に掲げる建築材料の区分に応じ、それぞれ同表(ろ)欄に掲げるものとする。

第3

法第37条第二号の品質に関する技術的基準は、次のとおりとする。

- 別表第二(い)欄に掲げる建築材料の区分に応じ、それぞれ同表(は)欄に掲げる測定方法等により確認された同表(ろ)欄に掲げる品質基準に適合するものであること。
- 二 別表第三(い)欄に掲げる建築材料の区分に応じ、それぞれ同表(ろ)欄に掲げる検査項目について、同表(は)欄に掲げる検査方法により検査が行われていること。
- 三 別表第二の(ろ)欄に掲げる品質基準に適合するよう、適切な方法により、製造、運搬及び保管がなされていること。
- 四 検査設備が検査を行うために必要な精度及び性能を有していること。
- 五 次に掲げる方法により品質管理が行われていること。
 - イ 社内規格が次のとおり適切に整備されていること。

- (1) 次に掲げる事項について社内規格が具体的かつ体系的に整備されていること。
 - (i) 製品の品質、検査及び保管に関する事項
 - (ii) 資材の品質、検査及び保管に関する事項
 - (iii) 工程ごとの管理項目及びその管理方法、品質特性及びその検査方法並びに作業方法に関する事項
 - (iv) 製造設備及び検査設備の管理に関する事項
 - (v) 外注管理 (製造若しくは検査又は設備の管理の一部を外部に行わせている場合における当該発注に 係る管理をいう。以下同じ。) に関する事項
 - (vi) 苦情処理に関する事項
- (2) 社内規格が適切に見直されており、かつ、就業者に十分周知されていること。
- ロ 製品及び資材の検査及び保管が社内規格に基づいて適切に行われていること。
- ハ 工程の管理が次のとおり適切に行われていること。
 - (1) 製造及び検査が工程ごとに社内規格に基づいて適切に行われているとともに、作業記録、検査記録又は 管理図を用いる等必要な方法によりこれらの工程が適切に管理されていること。
 - (2) 工程において発生した不良品又は不合格ロットの処置、工程に生じた異常に対する処置及び再発防止対策が適切に行われていること。
 - (3) 作業の条件及び環境が適切に維持されていること。
- ニ 製造設備及び検査設備について、点検、検査、校正、保守等が社内規格に基づいて適切に行われており、これらの設備の精度及び性能が適正に維持されていること。
- ホ 外注管理が社内規格に基づいて適切に行われていること。
- 苦情処理が社内規格に基づいて適切に行われているとともに、苦情の要因となった事項の改善が図られている
 こと。
- ト 製品の管理、資材の管理、工程の管理、設備の管理、外注管理、苦情処理等に関する記録が必要な期間保存されており、かつ、品質管理の推進に有効に活用されていること。
- 六 その他品質保持に必要な技術的生産条件を次のとおり満たしていること。
 - イ 次に掲げる方法により品質管理の組織的な運営が図られていること。
 - (1) 品質管理の推進が工場その他の事業場(以下「工場等」という。)の経営方針として確立されており、品質管理が計画的に実施されていること。
 - (2) 工場等における品質管理を適切に行うため、各組織の責任及び権限が明確に定められているとともに、 品質管理推進責任者を中心として各組織間の有機的な連携がとられており、かつ、品質管理を推進する 上での問題点が把握され、その解決のために適切な措置がとられていること。
 - (3) 工場等における品質管理を推進するために必要な教育訓練が就業者に対して計画的に行われており、また、工程の一部を外部の者に行わせている場合においては、その者に対し品質管理の推進に係る技術的指導が適切に行われていること。
 - ロ 工場等において、品質管理推進責任者を選任し、次に掲げる職務を行わせていること。
 - (1) 品質管理に関する計画の立案及び推進
 - (2) 社内規格の制定、改正等についての統括
 - (3) 製品の品質水準の評価
 - (4) 各工程における品質管理の実施に関する指導及び助言並びに部門間の調整
 - (5) 工程に生じた異常、苦情等に関する処理及びその対策に関する指導及び助言
 - (6) 就業者に対する品質管理に関する教育訓練の推進
 - (7) 外注管理に関する指導及び助言
- 2 前項の規定にかかわらず、製品の品質保証の確保及び国際取引の円滑化に資すると認められる場合は、次に定める基準によることができる。
 - 製造設備、検査設備、検査方法、品質管理方法その他品質保持に必要な技術的生産条件が、日本工業規格 Q9001 (品質マネジメントシステムー要求事項) 2000 の規定に適合していること。
 - 二 前項第一号から第四号まで及び第六号ロの基準に適合していること。
 - 要造をする建築材料の規格等に従って社内規格が具体的かつ体系的に整備されており、かつ、製品について規格等に 適合することの検査及び保管が、社内規格に基づいて適切に行われていること。

別表第1(法第37条第一号の日本工業規格又は日本農林規格)

(V)	(3)
《略》	≪略≫
第一第十号に掲げる建築材料	構造用単板積層材の日本農林規格(昭和63年農林水産省告示第1443号)
《略》	≪略≫

別表第2(品質基準及びその測定方法等)

Ī	(V)	(ろ)	(は)
- 1	, ,	(- /	V /

建築材料の区分	品質基準	測定方法等
≪略≫	≪略≫	≪ 略≫
第1第十号に掲げる建築材料	一 寸法及び曲りの基準値が定められていること。ただし、湾曲部を有する形状に成形した木質接着成形軸材料の曲りの基準値については、この限りでない。	一 寸法及び曲りの測定は、次に掲げる方法又はこれと同等以上の精度を有する測定方法によること。 イ 試験体は、次に掲げる方法により採取すること。 (1) 標本は、生産の段階で同定可能な母集団から、当該母集団の材料特性を適切に表すものとなるように採取すること。 (2) 同一の標本から採取する試験体の数は、母集団の特性値を適切に推定できる数とすること。 ロ 試験体は、温度摂氏20度±2度、相対湿度65%±5%の環境下で平衡状態になるまで静置すること。 ハ 寸法の測定は、ノギス、マイクロメータ又はこれらと同等以上の測定精度を有する測定器具を用いて行うこと。 ニ 曲りの測定は、平成3年農林水産省告示第143号第6
	二 曲げ強さ及び曲げ弾性係数の 基準値が定められているこ と。	条に規定する測定方法によって行うこと。 二 曲げ強さ及び曲げ弾性係数の測定は、次に掲げる方法又はこれと同等以上の曲げ強さ及び曲げ弾性係数を測定できる方法によること。 イ 試験体は、(は)欄第一号イに掲げる方法により採取すること。 ロ 試験体は、(は)欄第一号ロに掲げる方法により静置すること。 ハ 試験を行う環境は、ロで試験体を静置した環境と同一とすること。 ニ 単板積層材の日本農林規格別記3(9)に掲げる方法によること。この場合において、「曲げヤング係数」とあるのは、「曲げ弾性係数」と読み替えるものとする。
	三 せん断強さ及びせん断弾性係 数の基準値が定められている こと。	三 せん断強さ及びせん断弾性係数の測定は、次に掲げる方法又はこれと同等以上にせん断強さ及びせん断弾性係数を測定できる方法によること。 イ 試験体は、(は)欄第一号イに掲げる方法により採取すること。 ロ 試験体は、(は)欄第一号ロに掲げる方法により静置すること。 ハ 試験を行う環境は、ロで試験体を静置した環境と同一とすること。 ニ せん断強さは、単板積層材の日本農林規格別記3(5)に掲げる方法によること。この場合において、「水平せん断強さ」とあるのは、「せん断強さ」と読み替えるものとする。 ホ せん断弾性係数は、ハに規定する方法により得られた荷重一変形関係を用いて求めること。
	四 めりこみの応力の生ずる部分 に用いる場合にあっては、め りこみ強さの基準値が定めら れていること。	四 めりこみ強さの測定は、次に掲げる方法又はこれと同等以上にめりこみ強さを測定できる方法によること。 イ 試験体は、(は) 欄第一号イに掲げる方法により採取すること。

- ロ 試験体は、(は)欄第一号ロに掲げる方法により静置すること。
- ハ 試験を行う環境は、ロで試験体を静置した環境と同一と すること。
- ニ 試験体の形状は、一辺が2 cm以上の正方形の断面であり、当該辺の長さの3倍の数値の長さを有するものとすること。
- ホ 試験は、次に掲げる方法によること。
 - (1) 試験体の長さ方向の直角方向を荷重方向とし、試験体は底面による全面支持とすること。
 - (2) 荷重は、試験体の幅と等しい幅及び当該幅より大きな長さを有する鋼製ブロックを試験体の上面におき、当該鋼製ブロックの上から試験体の中央に加えること。この場合において、試験体の長さ方向の直角方向を鋼製ブロックの長さ方向としなければならない。
 - (3) 試験体に作用する荷重及び収縮量を適切な精度を有する方法で測定すること。
- へ めりこみ強さの基準値は、ホに規定する試験による試験体の収縮量が試験体の厚さの5%に達したときの荷重を試験体の受圧面積で除して得た各試験体ごとのめりこみ強さの信頼水準75%の95%下側許容限界値とすること。
- 五 含水率の基準値が定められて いること。
- 五 含水率の測定は、JIS Z2101(木材の試験方法)-1994の3.2 の含水率の測定方法又はこれと同等以上に含水率を測定できる方法によること。
- 六 湿潤状態となるおそれのある 部分に用いる場合にあって は、第二号に規定する曲げ強 さ及び曲げ弾性係数、第三号 に規定するせん断強さ及びせ ん断弾性係数並びに第四号に 規定するめりこみ強さに対す る含水率の調整係数が定めら れていること。ただし、せん 断強さ若しくはめりこみ強さ 又はせん断弾性係数に対する 含水率の調整係数は、合理的 な方法により曲げ強さ又は曲 げ弾性係数に対する含水率の 調整係数と同等以上であるこ とが確かめられた場合にあっ ては、曲げ強さ又は曲げ弾性 係数に対する含水率の調整係 数により代替することができ
- 六 曲げ強さ、曲げ弾性係数、せん断強さ、せん断弾性係数及び めりこみ強さ(以下この号において「各力学特性値」という。) に対する含水率の調整係数の測定は、次に掲げる方法又はこ れと同等以上に含水率の調整係数を測定できる方法による こと。
 - イ 試験体は、(は)欄第一号によるほか、次に掲げる方法に より採取すること。
 - (1) 標本の数は、10以上とすること。
 - (2) 各標本より採取する調整係数用本試験体の数は、1 とすること。
 - (3) (2)の調整係数用本試験体に隣接する位置又は材料特性の差が最も小さくなる位置から採取するサイドマッチング用試験体の数は、2 とすること。
 - ロ サイドマッチング用試験体は、(は)欄第一号ロに規定する方法により静置し、当該環境下で(は)欄第二号から第四号まで(試験及び試験体ごとの各力学特性値の測定に係る部分に限る。) に規定する方法により各力学特性値を求めること。
 - ハ 調整係数用本試験体は、次に掲げる使用環境に応じて、 (1)又は(2)のいずれかに定める環境下で平衡状態となるまで静置し、当該環境下で(は)欄第二号から第四号まで(試験及び試験体ごとの各力学特性値の測定に係

- る部分に限る。) に規定する方法により各力学特性値を 求めること。
- (1) 常時湿潤状態となるおそれのある環境(以下「常時湿潤環境」という。) 気温摂氏 20 度±2 度及び相対湿度 95%±5%
- (2) 屋外に面する部分(防水紙その他これに類するもので有効に防水されている部分を除く。) における環境又は湿潤状態となるおそれのある環境(常時湿潤状態となるおそれのある環境を除く。)(以下「断続湿潤環境」という。) 気温摂氏20度±2度及び相対湿度85%±5%
- ニ 各力学特性値に対する含水率の調整係数は、ハで得られた調整係数用本試験体ごとの各力学特性値のロで得られた対応するサイドマッチング用試験体の各力学特性値の平均値に対する比率を各標本ごとに求め、それらの数値を平均して得た数値(1.0超える場合は1.0とする。)とすること。
- 七 第二号に規定する曲げ強さ、 第三号に規定するせん断強さ 及び第四号に規定するめりこ み強さに対する荷重継続時間 の調整係数が定められている こと。ただし、せん断強さ又 はめりこみ強さに対する荷重 継続時間の調整係数は、合理 的な方法により曲げ強さに対 する荷重継続時間の調整係数 と同等以上であることが確か められた場合にあっては、曲 げ強さに対する荷重継続時間 の調整係数により代替するこ とができる。
- 七 曲げ強さ、せん断強さ及びめりこみ強さ(以下この号において「各力学特性値」という。) に対する荷重継続時間の調整 係数の測定は、次に定める方法又はこれと同等以上に荷重継続時間の調整係数を測定できる方法によること。
 - イ 試験体は、(は) 欄第六号イに掲げる方法により採取する こと。
 - ロ 試験体は、(は)欄第一号ロに掲げる方法により静置すること。
 - ハ 試験を行う環境は、ロで試験体を静置した環境と同 ーとすること。
 - ニ サイドマッチング用試験体について、(は)欄第二号から 第四号まで(試験及び試験体ごとの各力学特性値の測定 に係る部分に限る。)に規定する方法により各力学特性 値を求めること。
 - ホ 一を超えない範囲内の数値(以下「応力レベル」という。) を3以上選択し、これを各調整係数用本試験体に対応するサイドマッチング用試験体の各力学特性値の平均値に乗じた応力に対応する荷重を調整係数用本試験体に加え、当該試験体が破壊するまでの時間(以下「破壊荷重継続時間」という。)を測定すること。この場合において、少なくとも1以上の応力レベルにつき、すべての試験体の半数以上の破壊荷重継続時間を6ヶ月以上としなければならない。
 - へ 各力学特性値に対する荷重継続時間の調整係数は、ホの 規定により測定した各調整係数用本試験体の応力レベル ごとの破壊荷重継続時間の常用対数と応力レベルとの関 係について回帰直線を求め、回帰直線上において破壊継 続時間が50年に相当する応力レベルの数値(1.0を超え る場合は、1.0とする。)とすること。
- 八 第二号に規定する曲げ弾性係 数及び第三号に規定するせん
- 八 曲げ弾性係数及びせん断弾性係数(以下この号において「各 力学特性値」という。) に対するクリープの調整係数の測定

断弾性係数に対するクリープの調整係数が定められていること。ただし、せん断弾性係数に対するクリープの調整係数は、合理的な方法により曲げ弾性係数に対するクリープの調整係数と同等以上であることが確かめられた場合にあっては、曲げ弾性係数に対するクリープの調整係数により代替することができる。

- は、次に定める方法又はこれと同等以上にクリープの調整係 数を測定できる方法によること。
- イ 試験体は、(は)欄第六号イに掲げる方法により採取する こと。
- ロ 試験体は、(は)欄第一号ロに掲げる方法により静置すること。
- ハ 試験を行う環境は、ロで試験体を静置した環境と同一とすること。
- ニ サイドマッチング用試験体について、(は)欄第二号及び 第三号(試験及び試験体ごとの各力学特性値の測定に係 る部分に限る。)に規定する方法により各力学特性値を 求めること。
- ホ 調整係数用本試験体について、対応するサイドマッチング用試験体の二で求めた各力学特性値の平均値に(ろ)欄第六号に規定する含水率の調整係数、(ろ)欄第七号に規定する荷重継続時間の調整係数及び2/3を乗じて得られる応力に相当する荷重を加え、各力学特性値を測定する際に用いた部分に相当する部分の変形を、荷重を加え始めてから、1分、5分、10分、100分及び500分後並びにその後24時間ごとに五週間以上測定すること。
- へ ホの調整係数用本試験体それぞれについて、各時間ごと に測定された変形に対する荷重を加え始めて1分後に測 定された変形の比(以下「クリープ変形比」という。)を 計算すること。
- ト へにより計算した各調整係数用本試験体のそれぞれの 時間に対応したクリープ変形比(1分及び5分に対応す るものを除く。)の常用対数と、時間の常用対数との関 係について、回帰直線を求めること。
- チ 各力学特性値に対するクリープの調整係数は、トで得られた回帰直線上の、時間が50年に相当するクリープ変形比の数値(1.0を超える場合は1.0とする。)とすること。
- 九 第二号に規定する曲げ強さ及 び曲げ弾性係数、第三号に規 定するせん断強さ及びせん断 弾性係数並びに第四号に規定 するめりこみ強さに対する事 故的な水掛りを考慮した調整 係数が定められていること。 ただし、せん断強さ若しくは めりこみ強さ又はせん断弾性 係数に対する事故的な水掛り を考慮した調整係数は、合理 的な方法により曲げ強さ又は 曲げ弾性係数に対する事故的 な水掛りを考慮した調整係数 と同等以上であることが確か められた場合にあっては、曲
- 九 曲げ強さ、曲げ弾性係数、せん弾強さ、せん断弾性係数及び めりこみ強さ(以下この号において「各力学特性値」という。) に対する事故的な水掛りを考慮した調整係数の測定は、次に 定める方法又はこれと同等以上に事故的な水掛りを考慮し た調整係数を測定できる方法によること。
 - イ 試験体は、(は)欄第六号イに掲げる方法により採取する こと。
 - ロ 試験体は、(は)欄第一号ロに掲げる方法により静置すること。
 - ハ 試験を行う環境は、ロで試験体を静置した環境と同一と すること。
 - ニ サイドマッチング用試験体について、(は)欄第二号から 第四号まで(試験及び試験体ごとの各力学特性値の測定 に係る部分に限る。) に規定する方法により各力学特性 値を求めること。
 - ホ 調整係数用本試験体は、採取後に試験体の片面に均一に

げ強さ又は曲げ弾性係数に対 する事故的な水掛りを考慮し た調整係数により代替するこ とができる。

- 散水できる装置により72時間散水した後、自然乾燥、 熱風による乾燥その他これらに類する方法で当該試験 体の質量がロに規定する方法により静置された当該試 験体の質量を下回るまで乾燥させること。
- へ ホの処理後の調整係数用本試験体については、(は) 欄第 二号から第四号まで(試験及び試験体ごとの各力学特性 値の測定に係る部分に限る。) に規定する方法により各 力学特性値を求めること。
- ト 各力学特性値に対する事故的な水掛りを考慮した調整 係数は、へで得られた調整係数用本試験体ごとの力学特性値の二で得られた対応するサイドマッチング試験体 の各力学特性値の平均値に対する比率を各標本ごとに 求め、それらの数値を平均して得た数値(1.0を超える場合は、1.0とする。)とすること。
- 十 接着耐久性に関する強さの残 存率が、それぞれ 0.5 以上と した定められていること。
- 十 接着耐久性に関する強さの残存率の測定は、次に定める方法 又はこれと同等以上に接着耐久性に関する強さの残存率を 測定できる方法によること。
 - イ 試験体は、(は)欄第六号イに掲げる方法により採取すること。
 - ロ サイドマッチング用試験体について、(は)欄第二号(試験及び試験体ごとの曲げ強さの測定に係る部分に限る。) に規定する方法により(ろ)欄第二号に規定する曲げ強さを求めること。
 - ハ 調整係数用本試験体について、ホに規定する劣化処理を 行うこと。
 - 二 ハの劣化処理後の試験体について、(は)欄第二号(試験 及び試験体ごとの曲げ強さの測定に係る部分に限る。) に規定する方法により(ろ)欄第二号に規定する曲げ強 さを求めること。
 - ホ 劣化処理は、次の分類に応じ、(1)から(3)までに掲げる 方法とすること。
 - (1) 加熱冷却法 次の(i)から(vi)までの処理を順に 行う方法
 - (i) 摂氏49度±2度の水中に1時間浸せきする。
 - (ii) 摂氏93度±3度の水蒸気中に3時間静置する。
 - (iii) 摂氏-12 度±3 度の空気中に20 時間静置する。
 - (iv) 摂氏 99 度±2 度の乾燥空気中に 3 時間静置 する。
 - (v) 摂氏93度±3度の水蒸気中に3時間静置する
 - (vi) 摂氏99度±2度の乾燥空気中に18時間静置 する。
 - (2) 煮沸法 次の(i)から(iii)までの処理を順に行う方法
 - (i) 沸騰水中に4時間以上浸せきする。
 - (ii) 常温水中に1時間以上浸せきする。

第1第十一号に	十一 防腐処理(インサイジングを含む。以下同じ。)による力学特性値の低下率の基準値が定められ、かつ、防腐処理に用いる木材防腐剤の名称が明らかにされていること。この場合において、注入処理による場合にあっては、当該木材防腐剤の有効成分の含有量の基準値が定められていること。	(iii) 摂氏70度±3度に設定した恒温乾燥器中で当該試験体の質量が口に規定する方法により静置されたサイドマッチング用試験体の質量を下回るまで乾燥する。 (3) 減圧加圧法 次の(i)から(iii)までの処理を順に行う方法 (i) 635水銀柱mに減圧した常温水中に5分間以上浸せきする。 (ii) 1cm°あたり51±2.9 Nに加圧した常温水中に1時間以上浸せきする。 (iii) 摂氏70度±3度に設定した恒温乾燥器中で当該試験体の質量が口に規定する方法により静置されたサイドマッチング用試験体の質量を下回るまで乾燥する。 (接着耐久性に関する強さの残存率は、二で得られた対応するサイドマッチング試験体の曲げ強さの平均値に対する比率を各標本ごとに求め、それら数値を平均して得た数値のうち、使用する環境に応じて、それぞれ次の(1)から(3)までの条件を満たす数値とすること。 (1) 常温湿潤環境 加熱冷場性を6回繰り返し行った調整係数用本試験体を用いて得られた数値 (2) 断縮起潤環境 煮沸法を2回繰り返し行った調整係数用本試験体を用いて得られた数値 (3) 乾燥環境 ((1)又は(2)以外の環境をいう。以下同じ。) 煮沸法を行った調整係数用本試験体を用いて得られた数値のうちいずれか小さい数値 (3) 乾燥環境 ((1)又は(2)以外の環境をいう。以下同じ。) 煮沸法を行った調整係数用本試験体を用いて得られた数値のうちいずれか小さい数値 (3) 乾燥環境 ((1)又は(2)以外の環境をいう。以下同じ。) 煮沸法を行った調整係数用本試験体を用いて得られた数値のうちいずれかっさい数値の方式であるまず特性値の低下率の測定及び木材防腐剤の有効成分の含有量の測定は、次に掲げる方法又はこれと同等以上に防腐処理による各力学特性値の低下率以び木材防腐剤の有効成分の含有量を測定による方学特性値の低下率は、防腐処理を施されないものについての当該基準値に対する比率とすること。 中 第十号に掲げる建築材料の項(は)欄第一号に掲げる方法によること。
掲げる建築材料	が定められていること。ただし、湾曲部を有する形状に成形した木質複合軸材料の曲りの基準値については、この限	法によること。

	りでない。		
			各部の曲げ強さ、せん断強さ及びめりこみ強さの基準値並び
	さの基準値、曲げ弾性係数及		に曲げ弾性係数及びせん断弾性係数の基準値は、各部の受入
	びせん断弾性係数の基準値並		時に、納品書、検査証明書又は試験証明書等の書類によるこ
	びにめりこみ強さの基準値		Ł₀
	(めりこみの応力が生ずる部		
	分に用いる場合に限る。) が定		
	められていること。		
三	各部相互の接着に用いる接着	三	接着の性能を維持させるのに必要となる事項は、接着剤の受
	剤について、接着の性能を維		入時に、納品書、検査証明書又は試験証明書等の書類による
	持させるのに必要となる次に		こと。
	掲げる事項を定められている		
	こと。		
	イ 接着剤の名称(一般的名称		
	があるものにあっては、そ		
	の一般的名称)		
	ロ pH(接着剤フィルムの場合		
	は、2.5以上とする。)		
	ハ調合及び貯蔵の過程		
	ニ 必要最小限度の塗布量		
	ホ 必要最小限度の圧締圧		
	へ 被着材の条件		
	ト被着材の含水率の許容最		
	大値及び許容最小値		
	チ 可使時間(使用環境温度及		
	び被着材の含水率に応じ		
	て、当該接着剤を塗布した		
	面が空気にさらされて溶		
	剤が蒸発し得る状態で放		

置されている時間及び当 該接着剤を塗布した面が 空気にさらされない状態 で圧縮されるまで放置さ れている時間をいう。) リ 接着時の最低温度及び最

> 12%のベイマツ(比重0.43 以上の無欠点材とする。)を被着材とした圧縮せん 断試験によるものとし、当 該試験により得られるせ ん断強さが1 mm²につき 7.38 N以上の数値を満た すこと。ただし、被着材の 種類に応じて、含水率が 12%のベイマツを被着材 とした圧縮せん断試験に

低養生時間 ヌ せん断強さ(含水率が

- より得られるせん断強さ と同等以上のせん断強さ を有する接着となること を確かめた場合にあって は、この限りでない。)
- ル 促進劣化試験の方法と当 該試験による強さの残存 率
- ヲ 促進劣化試験後のはく離 試験による木部破断率
- 四 最大曲げモーメント及び曲げ 剛性の基準値が定められてい ること。
- 四 最大曲げモーメント及び曲げ剛性の測定は、各部の曲げ強さ 及び曲げ弾性係数並びに各部間の接着強さ及び接着剛性に 基づいて統計的に合理性を有する方法で計算し、当該計算に より得られた数値が、基準値の種類に応じて、次の表に掲げ る条件式を満たすことを確かめる方法又はこれと同等以上 に最大曲げモーメント及び曲げ剛性を測定できる方法によ ること。ただし、次に掲げる方法により試験を行った場合に おける数値とすることができる。
 - イ 試験体の数は、ロに規定する試験を行う試験体の厚さごとにそれぞれ10以上とすること。ただし、当該厚さを3以下とする場合にあっては、試験体の合計を53以上としなければならない。
 - ロ 試験は、次に掲げる方法によること。
 - (1) 支点間距離は、試験体の厚さの17倍以上21倍以下とすること。
 - (2) 載荷点は、(1)の支点間距離を3等分する位置に2点設け、局部的な損傷が生ずるおそれのある場合にあってはクロスヘッド(載荷点及び支点に用いる十分な曲率を有する鋼材をいう。以下同じ。)の使用その他の有効な損傷防止措置を講ずること。この場合において、載荷点における荷重が分散しないものとすること。
 - (3) (2)の2点の載荷点にはそれぞれ等しい荷重を、試験体が破壊するまで漸増して加えること。この場合において、荷重を加え始めてから試験体が破壊するまでの時間は、1分以上としなければならない。
 - ハ 最大曲げモーメントの基準値は、ロに規定する試験により得られた最大荷重から、試験体ごとの最大曲げモーメントの信頼水準75%の95%下側許容限界値とすること
 - ニ 曲げ剛性は、ロに規定する試験により得られた荷重-変 形関係から、試験体ごとの平均値として求めること

表

基準値の種類	条件式	
最大曲げモーメント	$T_1 \leq E_1$	
曲げ剛性	$T_2/E_2 < 1.0 + (\sigma (T_2/E_2)/\sqrt{n})$	
この表において、 T_1 、 E_1 、 T_2 、 E_2 、 σ (T_2 / E_2)及び n は、それ		

ぞれ次の数値を表すものとする。

計算により得られた最大曲げモーメント(単位 N·m) T_1 E. 3以上の試験体についてイからハまでに規定する試験に より得られた最大曲げモーメント(単位 N·m) T₂ 計算により得られた曲げ剛性(単位 N·mm²) E2 三以上の試験体についてイ、ロ及び二に規定する試験に より確認された曲げ剛性(単位 N·mm²) σ (T₂/E₂) T₂/E₂の標準偏差 イに規定する試験体の数 五、せん断強さ及びせん断弾性係 五 せん断強さ及びせん断弾性係数の測定は、次に掲げる方法又 数の基準値が定められている はこれと同等以上にせん断強さ及びせん断弾性係数を測定 こと。 できる方法によること。 イ 試験体の数は、ロに規定する試験を行う試験体の厚さご とにそれぞれ10以上とすること。ただし、当該厚さを3 以下とする場合にあっては、試験体の合計を53以上とし なければならない。 ロ 試験は、次に掲げる方法によること。 (1) 載荷点は、試験体の中央に一点又は中央から等し い距離だけ離した2点とすること。 (2) 支点は、(1)の載荷点から試験体の端部側にそれぞ れ試験体の厚さの1.5倍以上の距離だけ離して設 けること。 (3) 荷重(載荷点を2点とした場合は、それぞれ等しい 荷重とする。) は、(1) の載荷点の上面にクロス ヘッドを置き、当該クロスヘッドの上から試験体が 破壊するまで漸増して加えること。この場合におい て、荷重を加え始めてから試験体が破壊するまでの 時間は、1分以上としなければならない。 (4) (3)のクロスヘッドの形状は、試験体に局部的な損 傷が生ずるおそれのないものとすること。 (5) I形の断面形状に複合構成された建築材料であっ て、ウェブが継手を設けている場合にあっては、こ れを(2)の載荷点と支点による応力集中がない部分 に位置しなければならない。 ハ せん断強さの基準値は、ロに規定する試験により得られ た荷重-変形関係から、回帰分析により各試験体ごとの せん断強さの信頼水準75%の95%下側許容限界値とす ること。 ニ せん断弾性係数は、口に規定する試験により得られた各 試験体の最大荷重から、各試験体ごとのせん断弾性係数

六 めりこみの応力が生ずる部分

六 めりこみ強さの測定は、第1第十号に掲げる建築材料の項

の平均値とすること。

に用いる場合にあっては、めりこみ強さの影情が定められていること。		
部分に用いる場合にあっては、第四号に規定する最大曲けモーメント及び曲け剛性、第五号に規定するせん制物さきに対する含水率の調整係数が定められていること。ただし、せん断強さ者しくはめりこみ強きに対する含水率の調整係数は、合理的な方法により最大曲げモーメント又は曲げ剛性に対する含水率の調整係数は、合理的な方法により最大曲げモーメント又は曲げ剛性に対する含水率の調整係数は、合理的な方法により最大曲げモーメント又は曲げ剛性に対する含水率の調整係数により代替することができる。 加 第四号に規定する最大曲がモーメント又は曲げ剛性に対する含水率の調整係数は、合理的な方法により最大曲げモーメント又は曲げ剛性に対する含水率の調整係数により代替することができる。 加 第二第十号に掲げる建築材料の項(は)欄第七号に掲げる走を対した場合は、当該数値とすることができる。 加 第二第十号に掲げる建築材料の項(は)欄第七号に掲げる方法により最大曲げモーメントのよっただし、せん断強さ及び第六号に規定するめりこみ強さに対する荷重総時間の調整係数が定められていること。ただし、せん断強さ及びめりこみ強さ」とあるのは、「最大曲げモーメントに対する荷重総時間の調整係数と同等以上であることが確かめられた場合にあっては、最大曲がモーメントに対する荷重総時間の調整係数と同等以上であることが確かめられた場合にあっては、最大曲がモーメントに対する荷重総時間の調整係数と同等以上であることが確かめられた場合にあっては、最大曲がモーメントに対する荷重総時間の調整係数と同等以上であることが確かめられた場合にあっては、最大曲がモース・とが確かがあるれた場合にあっては、最大曲がモース・とができる。	りこみ強さの基準値が定められていること。 七 含水率の基準値が定められていること。ただし、各部ごとに含水率の基準値が定められている場合は、この限りでな	法は、長さを試験体の幅の3倍とするものとする。)又はこれと同等以上にめりこみ強さを測定できる方法によること。ただし、各部の組合せに対するめりこみの力の影響を考慮し、めりこみの応力の生ずる各部のめりこみ強さの基準値を用いて計算する場合は、当該数値とすることができる。 七 第1第十号に掲げる建築材料の項(は)欄第五号に掲げる方
カ 第四号に規定する最大曲げモ ーメント、第五号に規定する せん断強さ及び第六号に規定 するめりこみ強さに対する荷 重継続時間の調整係数が定め られていること。ただし、せ ん断強さ及びめりこみ強さに 対する荷重継続時間の調整係数が定め られていること。ただし、せ ん断強さ及びめりこみ強さに 対する荷重継続時間の調整係数とに 対する荷重継続時間の調整係数と同等 以上であることが確かめられ た場合にあっては、最大曲げ モーメントに対する荷重継続時間の調整係数と同等 以上であることが確かめられ た場合にあっては、最大曲げ モーメントに対する荷重継続時間の調整係数とより代替す	八 湿潤状態となるおそれのある 部分に用いる場合にあって は、第四号に規定する最大曲 げモーメント及び曲げ剛性、 第五号に規定するせん断強さ 及びせん断弾性係数並びに第 六号に規定するめりこみ強さ に対する含水率の調整係数が 定められていること。ただし、 せん断強さ若しくはめりこみ 強さ又はせん断弾性係数に対 する含水率の調整係数は、合 理的な方法により最大曲げモ ーメント又は曲げ剛性に対す る含水率の調整係数と同等以 上であることが確かめられた 場合にあっては、最大曲げモ ーメント又は曲げ剛性に対す る含水率の調整係数により代	法によること。この場合において、同号中「曲げ強さ、曲げ弾性係数、せん断強さ、せん断弾性係数及びめりこみ強さ」とあるのは、「最大曲げモーメント、曲げ剛性、せん断強さ、せん断弾性係数及びめりこみ強さ」と、「(は)欄第二号から第四号まで」とあるのは、「第1第十一号に掲げる建築材料の項(は)欄第四号から第六号まで」とそれぞれ読み替えるものとする。ただし、各部の組合せに対する含水率の影響を考慮し、各部の含水率の調整係数を用いて計算した場合は、当
十 第四号に規定する曲げ剛性及 十 第1第十号に掲げる建築材料の項(は)欄第八号に掲げる方	九 第四号に規定する最大曲げモーメント、第五号に規定する せん断強さ及び第六号に規定 するめりこみ強さに対する荷 重継続時間の調整係数が定め られていること。ただし、せ ん断強さ及びめりこみ強さに 対する荷重継続時間の調整係 数は、合理的な方法により最 大曲げモーメントに対する荷 重継続時間の調整係数と同等 以上であることが確かめられ た場合にあっては、最大曲げ モーメントに対する荷重継続 時間の調整係数により代替す ることができる。	法によること。この場合において、同号中「曲げ強さ、せん 断強さ及びめりこみ強さ」とあるのは、「最大曲げモーメン ト、せん断強さ及びめりこみ強さ」と、「(は)欄第二号から 第四号まで」とあるのは、「第1一第十一号に掲げる建築材 料の項(は)欄第四号から第六号まで」とそれぞれ読み替える ものとする。ただし、各部の組合せに対する荷重継続時間の 影響を考慮し、各部の荷重継続時間の調整係数を用いて計算 した場合は、当該数値とすることができる。

び第五号に規定するせん断弾性係数に対するクリープの調整係数が定められていること。ただし、せん断弾性係数に対するクリープの調整係数は、合理的な方法により曲げ剛性に対するクリープの調整係数と同等以上であることが確かめられた場合にあっては、曲げ剛性に対するクリープの調整係数により代替することができる。

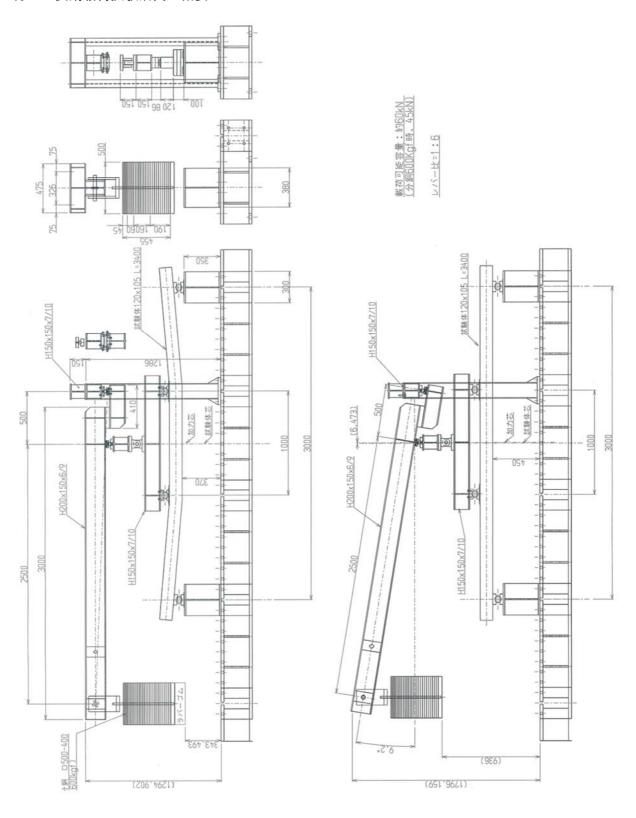
法によること。この場合において、同号中「曲げ弾性係数及びせん断弾性係数」とあるのは、「曲げ剛性及びせん断弾性係数」と、「(は)欄第二号及び第三号」とあるのは、「第1第十一号に掲げる建築材料の項(は)欄第四号及び第五号」とそれぞれ読み替えるものとする。ただし、各部の組合せに対するクリープの影響を考慮し、各部のクリープの調整係数を用いて計算した場合は、当該数値とすることができる。

- 十一 第四号に規定する最大曲げ モーメント及び曲げ剛性、第 五号に規定するせん断強さ及 びせん断弾性係数並びに第六 号に規定するめりこみ強さに 対する事故的な水掛りを考慮 した調整係数が定められてい ること。ただし、せん断強さ 若しくはめりこみ強さ又はせ ん断弾性係数に対する事故的 な水掛りを考慮した調整係数 は、合理的な方法により最大 曲げモーメント又は曲げ剛性 に対する事故的な水掛りを考 慮した調整係数と同等以上で あることが確かめられた場合 にあっては、最大曲げモーメ ント又は曲げ剛性に対する事 故的な水掛りを考慮した調整 係数により代替することがで きる。
- 十一 第1第十号に掲げる建築材料の項(は)欄第九号に掲げる 方法によること。この場合において、同号中「曲げ強さ、曲 げ弾性係数、せん断強さ、せん断弾性係数及びめりこみ強さ」 とあるのは、「最大曲げモーメント、曲げ剛性、せん断強さ、 せん断弾性係数及びめりこみ強さ」と、「(は)欄第二号から 第四号まで」とあるのは、「第1第十一号に掲げる建築材料 の項(は)欄第四号から第六号まで」とそれぞれ読み替えるも のとする。ただし、各部の組合せに対する事故的な水掛りの 影響を考慮し、各部の事故的な水掛りを考慮した調整係数を 用いて計算した場合は、当該数値とすることができる。

- 十二 接着耐久性に関する強さの 残存率が、それぞれ0.5以上 として定められていること。 ただし、第三号に掲げる接着 剤の品質が確認され、かつ、 促進劣化試験による強さの残 存率が接着の性能を維持する ために必要な数値である場合 にあっては、この限りでない。
- 十二 第1一第十号に掲げる建築材料の項(は)欄第十号に掲げる方法によること。この場合において、「(は)欄第二号(試験及び試験体ごとの曲げ強さの測定に係る部分に限る。)に規定する方法により(ろ)欄第二号に規定する曲げ強さ」とあるのは、「第1第十一号に掲げる建築材料の項(は)欄第四号(試験及び試験体ごとの最大曲げモーメントの測定に係る部分に限る。)に規定する方法により第1第十一号に掲げる建築材料の項(ろ)欄第四号に規定する最大曲げモーメント」と読み替えるものとする。ただし、各部の組合せに対する接着の影響を考慮し、各部及び接着剤の強さの残存率を用いて計算した場合は、当該数値とすることができる。
- 十三 防腐処理による力学特性値 の低下率の基準値が定められ、かつ、防腐処理に用いる 木材防腐剤の名称が明らかに
- 十三 第1第十号に掲げる建築材料の項(は)欄第十一号に掲げる方法によること。この場合において、同号中「(ろ)欄第二号から第四号まで」とあるのは、「第1第十一号に掲げる建築材料の項(ろ)欄第四号から第六号まで」と読み替えるもの

	されていること。この場合において、注入処理による場合にあっては、当該木材防腐剤の有効成分の含有量の基準値	とする。
	が定められていること。	
≪略≫	≪略≫	≪略≫

付2. 長期載荷試験治具の概要



付3. 炭素繊維シートの関連規格一覧

JIS K 7074:1988 炭素繊維強化プラスチックの曲げ試験方法

炭素繊維強化プラスチックの3点曲げ(A法)及び4点曲げ(B法)による曲げ試験 方法について規定。

JIS K 7076:1991 炭素繊維強化プラスチックの面内圧縮試験方法

炭素繊維強化プラスチックの面内圧縮試験方法について規定。

JIS K 7078:1991 炭素繊維強化プラスチックの層間せん断試験方法

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の短い試験片の3点曲げによる層間せん断試験方法について規定。

JIS K 7165:2008 プラスチックー引張特性の求め方-第5部:一方向繊維強化プラスチック複合材料の試験条件

JIS K 7161-1:2014 プラスチック—引張特性の求め方—第1部:通則 に基づき,一方向繊維強化プラスチック複合材料の引張特性を求める試験条件について規定。

付4. 木質系複合材料の長期構造性能検討委員会 発言録

第1回木質系複合材料の長期構造性能検討委員会 発言録

1. 日時

平成27年11月13日(金)10:00~12:00

2. 会場

LEN貸会議室 <赤坂T-FRONT> 3階

3. 出席予定者(順不同、敬称略、下線は欠席)

委員長:五十田博

委 員:河合直人、塩屋晋一、中島史郎、中村昇、安村基、槌本敬大、渋沢龍也、宮武敦、

中川貴文、宮林正幸

協力委員:室星啓和

オブザーバー:長瀬諭司、塩﨑征男、村田忠

行 政: 髙木直人、歌代純平、牧野弥生、中熊靖、大村敏幸、服部浩治、西村紘明

事務局:松川隆行、岡田恒、鴛海四郎、佐野敦子

4. 配付資料

資料1 実施計画/委員名簿

資料2 実験計画

参考1 関係法令の概要

5. 議事

(1) 林野庁挨拶、委員紹介

第1回の開催にあたり、林野庁服部課長補佐からの挨拶の後、委員紹介が行われた。

- (2) 事業の概要について
- 1) 趣旨説明
- 2) 事業内容及びスケジュールの説明

事務局による本事業の趣旨、実施内容、スケジュールおよび実施体制の説明の後、以下の質疑 応答、意見交換を行った。

① 将来の見通し

- ・ 本事業の将来的な見通しは JAS 化と 37 条の告示改正の 2 つの方法のうち、後者への試験方法 の提案ということでよいか。
 - → 告示 1446 号の試験項目のうち、DOL について試験方法の提案をしたい。
 - → 事業者の考えや法令所管部局の立場もあり、林野庁としては現時点ではどちらにするか等を決めているわけではない。本事業では今後複合材料について法的な位置づけを得るための働きかけをしていく上で必要となるバックデータを得たいと考えている。

② 複合材料の破壊の判断基準

- DOL 試験を行う前に、試験の最大荷重を基準強度とするのか、鉄筋が降伏するように部材を 設計するのかなど基準強度等をどう考えるかの議論が必要である。この事業ではその議論を行 うのか、単に試験方法のみを提案するのか。
 - → 鉄筋は降伏後に降伏棚があるので、鉄筋が先に降伏しその後木材が壊れたところで部材全体の破壊は決まると予想している。したがって基準強度は木材の挙動を中心に決めることになると考えられる。実際の試験等で確認できるのではないか。

- → 力学モデルをつくって長期性能、クリープ現象を盛り込んで応力分担を考えて力学的な挙動を説明できれば、DOL試験は要らなくなるかもしれない。
- → そのためには熱膨張が異なる鉄と木材の接着の長期的な性能も確認しておく必要がある。
- → 今回は対象を力学的な抵抗挙動がある程度わかっている材料に限定し、実験によりその挙動を確認することになると思う。
- (3) 複合建築材料の長期性能の評価・実験方法の検討
- 1) 複合材料の長期性能の評価・実験方法について
- 2) 実験計画について

事務局による複合材料の長期性能試験方法および実験方法の説明の後、以下の質疑応答、意見交換を行った。

① 試験体のコントロール等

- ・ 試験方法は告示で規定された方法が原則であり、これより試験体数を減らしたり応力レベル の数を少なくしたりするのであれば事前の検討、材料の管理、試験中の応力分担の測定などが 必要である。
 - → ラミナのヤング率測定、鉄筋および試験体へのひずみゲージのとりつけを検討する。長期 試験の試験体数は試験場所等の関係で増やすことができない。
 - → 試験体数については同等以上に評価できる方法であればよいので、ばらつきが小さければ少ない標本数でもよいと思う。例えば集成材の場合は適切にラミナを管理して DOL 試験を行い、DOL 係数がいくつでばらつきは 試験体数≥0.1537×CV² を満たしていますという説明は受け入れられやすい。ただし、強度については実際の工場で行われる品質管理以上の管理をした試験体のデータは受け入れられないと思う。
- 事業の目的は試験方法の提案であるとのことだが、告示の規定よりも試験体数を減らしてもいいということを言いたいのか。得られたデータを位置付けたいのであれば、材料及び試験体を十分に把握しておく必要があると思う。
 - → 項目は試験方法の検討としているが、異種材料を含む複合材料の DOL 係数は集成材等で使われている値でいいのではないかということを証明するために同一環境で集成材と複合材料を比較する DOL の試験方法を提案している。
 - → この実験からこの断面形状とこの品質管理に対してはこの DOL 係数でいいというのは言えるが、それ以上のことは言えないと思う。
 - → この断面形状というのがどこまでを示すのかはわからないが、今回試験を行う2種類の複合材料であればある程度の範囲についてこのDOLの値でいいという結果が得られると思う。
 - → 鉄筋や炭素繊維の入った集成材と入っていない集成材の DOL の傾向をこの実験で確認できればよいと考えている。

② 試験体の断面寸法の影響

- ・ 実際想定されている材料は非常に断面の大きなもの、例えば梁せい 60cm 以上のものなどもあるのか。計画している試験は断面 105mm×120mm で曲げ系だが、梁せいが大きくなると引張り系になってきて応力の割合や分布が変わってくると思う。
 - → それであれば既に DOL 係数が定められている材料もすべて断面ごとに DOL 係数を変えようという話にすらなりかねない。今回の取り組みは、既に決まっている 0.55 という数値がある状態の中で、ある特定のものだけが厳しく見られて新しい技術を阻害しているという側面を改善していく第一歩として考えている。
 - → この事業がそういうことの第一歩なのであれば、やはり断面を変えた試験を行って、応力 の分布等が変わることをおさえておくことが必要なのではないか。
 - → この試験で適用できる範囲は別途考えなければならないと考えている。

③ 試験体の設計

・ 鉄筋を先に降伏させたいなら、ばらつきを考慮した上で確実に鉄筋が先に降伏するような設計にしておかないと、いろいろな壊れ方が出てきて結果的に何をやっているかわからなくなる

- のではないか。複合材料の破壊をどう考えるかが重要である。
- → 今回の試験体は短期試験において最初に鉄筋が降伏して最終的に木材が破断する材料を想定しており、同じ挙動を示す範囲については今回の長期試験の結果を適応できると考えている。

④ 長期試験の応力レベルの設定

- ・ 応力レベルを2つではなく、例えば100%から5%刻みで下げて応力レベルと荷重継続時間を1対1のデータにした方がばらつきは小さくなるのではないか。
 - → 最終的に最小二乗法近似をするので、y の値(応力レベル)は増やした方がばらつきは減る。荷重継続時間が短いデータのみだと近似線の傾きは大きくなる。
 - → 委託事業が終わった後もできるだけ載荷を続け長期のデータを取れるようにしてほしい。

⑤ 各部の組み合わせの短期・長期性能データ

- 木材と鉄筋の付着強度の短期と長期の試験等は必須である。
 - → 告示 1446 号に異種複合材料が追加され品質基準と測定方法が定められるとすれば、木質複合軸材料と同様に「各部組み合わせに対する荷重継続時間の影響を考慮」という文言は必ず入ると思うので、各構成要素や付着の実験は必要である。
 - → 鉄筋入り集成材については既に時刻歴で建物も建っており、部材設計の際にそのあたりの データは収集している。DOL は検討していない。

⑥ 長期試験の応力レベルの算定方法

- ・ 長期試験では終局耐力の何割かの応力をかけるとして、集成材の場合は終局耐力の 2/3 が短期と決まっているのに対し、複合材料ではそうなるとは限らない。応力レベルを短期に対して決めるのか終局に対して決めるのかで結果は異なってくると思う。
 - → 短期試験をすると鉄筋が降伏した後に終局に至る流れがわかるので、それをもとに長期試験の応力レベルを検討することになる。鉄筋の降伏以降はおそらく木材の方に応力が負担されていくと思うが、鉄筋の降伏点より低い応力レベルなどいくつかのパターンは想定した方がよい。炭素繊維は弾性挙動が続いて急に切れるので状況が変わる。
 - → 応力レベルについては短期試験が終わった時点で荷重変形等をみながらの検討が必要である。

(7) 試験体の寸法

- ・ 計画では試験体厚さの 26.7 倍となっている曲げ試験のスパンについても議論が必要ではないか。曲げとせん断の比率が変化する材料ではせん断が卓越し木材が圧縮的に壊れることがあるので試験体は長い方がいいのかもしれない。
 - → 実際に使われるのはもっと梁せいの高いものだと思うが、試験体は梁せいをできるだけ小さくしてせん断でなく曲げで壊れるように設計している。

⑧ ラミナのたて継ぎ

- 今回フィンガージョイントを外した理由は何か。
 - → 試験体数が少ないので、ばらつきを減らすためである。
 - → 集成材はたて継ぎがないと強度もばらつきも大きくなって何の試験をやっているかわからなくなるので、たて継ぎを入れた方がばらつきは減ると思う。

⑨ 圧縮側の破壊の観察

- 長期試験時の圧縮側の変化は記録できるのか。
 - → これまでの実験で鉄筋が圧縮側に突き出したことはほとんどない。
 - → 鉄筋だけが変形に追随できなくて木材が破壊すると、外見的には圧縮側で壊れているようにみえる。

3) 文献調査について

事務局による文献調査の方針の説明が行われ、調査方針を了承した。

(4) その他

以下の質疑応答、意見交換を行った。

- ① FRP の試験方法及び基準値
- FRP の基本的な物性値の試験方法や基準値を調べておいてほしい。
 - → 建築用の規格はほとんどない。JISの圧縮、引張り、曲げ、内部せん断などの試験方法を集める。
- ② FRP と木材の接着
- ・ FRP と木材の接着に問題はないか。
 - → CFRP は炭素繊維とエポキシ樹脂またはフェノール樹脂でできている。CFRP と木材の接着は今回は水性高分子イソシアネート樹脂を使用するがレゾルシノール樹脂も使用できる。ブロックせん断試験ではスギの基準(5.4MPa)より高い数値が出ている。
 - → 長期性能のデータは現在取得中である。

次回委員会の開催候補日時を平成28年2月19日18時からまたは2月22日18時からとし、 今回の欠席者の都合を聞いた上でいずれかに決定することとした。

第2回木質系複合材料の長期構造性能検討委員会 発言録

1. 日時

平成28年2月19日(金)18:00~20:30

2. 会場

TKP 新橋内幸町ビジネスセンター カンファレンスルーム601

3. 出席予定者(順不同、敬称略、下線は欠席)

委員長:五十田博

委員:河合直人、塩屋晋一、中島史郎、中村昇、安村基、槌本敬大、

渋沢龍也、宮武敦、中川貴文、宮林正幸

協力委員:室星啓和、上山耕平、庄司秀雄 オブザーバー:長瀬諭司、村田忠、西胤謙吉

行 政:髙木直人、歌代純平、牧野弥生、中熊靖、大村敏幸、香月英伸、服部浩治、

西村紘明

事務局:金子弘、岡田恒、鴛海四郎、佐野敦子

4. 配付資料

資料1 第1回木質系複合材料の長期構造性能検討委員会 議事要旨(案) 資料2 事業報告書(案)

5. 議事

(1) 前回議事要旨の確認

前回議事要旨を確認し、以下の指摘事項のとおり修正することとした。

- ・ (4)②の FRP と木材の接着の長期性能のデータについて、「以前のデータがあると思う。」を「現在取得中である」に修正する。
- この議事要旨案は委員会としての合意事項のみが記録されている訳ではないため、議事要旨でなく発言録とする。

(2) 第3章 実験計画について

担当者による説明の後、以下の質疑応答、意見交換を行った。

- ・ DOL 試験は前回の議論を踏まえて応力レベルを変更したとのことだが、どのように変更したのか。
 - \rightarrow 当初は応力レベル 2 つ試験体 3 体ずつであったのを、応力レベル 95%、90%、85%、80%、75%、70%、1 体ずつに変更した。
- ・ 異素材による補強効果を極力抑えて試験体を設計したという説明があったが、載荷するおもりに合わせて設計した等別の書き方にできないか。
 - → 補強すると荷重を大きくしなければならなくなり、試験装置等大変なことになる。したがって今回は専ら荷重継続時間の影響に関わるところに絞って確認することとし、補強効果はみないことにした。それが安全側かどうかは別の議論が必要と考える。

(3) 第4章 4.1 短期構造性能について

担当者による説明の後、以下の質疑応答、意見交換を行った。

- ・ 試験体の設計では最大荷重は集成材 12.85kN、炭素繊維入り 13.03kN、鉄筋入り 18.6kN となっており炭素繊維入りはほとんど補強効果がないという予想のもとでやっているが、実験では炭素繊維入りと鉄筋入りは予想より高い値が出ているということでよいか。
 - → 変動係数が影響していると思う。
 - → 変動係数の大小は結局木材以外に流れる力の割合を示しているようなもので、木材の方に

流れる力が少なければ変動係数は鉄筋や炭素繊維の影響を受けると思う。

- ラミナのヤング係数の測定方法と試験体のどの部分にどのヤング係数のラミナが使用されたのかを確認したい。
- → 炭素繊維入り以外はラミナのヤング係数を記録してあるので、最終の報告書には記載する。
- → ラミナのヤング係数の測定方法は 1m 程度の短尺のときに中央集中で測ったものをたて継ぎしてプレーナーがけしたものを再度連続式のグレーディングマシンで測定し、その平均値を求めた。
- ・ 鉄筋の試験体の鉄筋の位置が11ページと12ページの図で異なる。
 - → 鉄筋の位置は途中で変更しており、25mmでなく23mmが正しいので修正する。

(4) 第4章 4.2 長期構造性能について

担当者による説明の後、以下の質疑応答、意見交換を行った。

- ・ 載荷に 10 分かかるとすると数秒くらいで壊れる応力レベル 95%のデータは有効ではないのではないか。
 - → クレーンでおもりをセットしたものを釣り上げておいてチェーンブロックで下ろしていく 方法で載荷した。治具の先がナイフエッジになっており下げる速度が速いとバランスが崩れ る。載荷に要する時間は慣れてくると実際は1、2分であり、全部の試験体が終わった時点で 載荷に要する時間の平均値を出したい。
- 破壊はすべてフィンガージョイントと考えてよいか。
 - → 全部の試験体がフィンガージョイントで壊れている。
- ・ データロガーがなくて載荷できないということだが、変位計とデータロガーの合計金額より ウェブカメラ1台の方が安いと思う。
 - → 当初はまず応力レベル 70%で3種類載荷する予定であり、データロガー1台で足りると考えていた。炭素繊維入りと鉄筋入りは 70%で壊れず、集成材のみが壊れたというのは一つの結果だったかもしれない。
 - → 応力レベルの低いものは 6 月まで載荷する予定である。6 月の時点で終わっていない可能 性もあるが壊れるまで載荷できるとよい。
- ・ 集成材の75%と炭素繊維入りの80%は早く壊れたので再試験を行ったがいずれも再試験の方が早く壊れた。
 - → やはり1体や2体では難しい。
- ・ 時間軸が対数でわかりにくいので縦線を引いてわかりやすく示してほしい。
- ・ 鉄筋入りのひずみの WG3 と WG4 はどこを測定したものか。
 - → 奇数が圧縮側で偶数が引張側、1 と 2 が木材で 3 と 4 が鉄筋である。圧縮側にも鉄筋が入っている。
- ・ 鉄筋の圧縮側と引張側の差はどうか。
- → 限定的なところで測定しているのでわからないが、局所的に降伏した影響があるかもしれない。壊れたフィンガーとの位置関係も分析しきれていない。応力の計算には短期のデータを使った方がいいと思う。
- 短期の最大曲げたわみよりも長期で破壊したときのたわみの方が小さいようにみえる。
- → 荷重と変位からエネルギー量をみると、長期は荷重一定でその分たわみがのびるので、短期と長期のエネルギー量はあまり変わらないようである。エネルギー量から長期性能が推定できるかもしれない。

(5) 第5章 鉄筋挿入型複合材料の構造性能について

担当者による説明の後、以下の質疑応答、意見交換を行った。

- 数字のところは前提条件を書いておくほうがよい。
- 最後に長期性能 0.71 が出ているが、例えば応力比などのパラメータは入らないのか。
 - → 今回の報告には間に合わなかった。
- ・ 集成材の荷重継続時間影響係数を 0.6 とする仮定は的を得ている。これまでの集成材の実験でも 0.55 から 0.66 の間であったと思う。鉄筋入り集成材はこの理論が確立すれば鉄筋が先に降伏するストーリーなら DOL 試験は要らないのではないか。

- → 平面保持さえ仮定できれば内部のせん断応力の分布は計算できる。鉄筋が降伏しなくても同じ理論は成り立つが、せん断に関しては DOL がよくわからない。
- ・ 鉄筋と曲げ縁の木のひずみ挙動のところで鉄筋は計算値と一致するが木材は合わないという 話があったが。
 - → 木材のひずみが合わない理由の1つは想定しているI型断面のフランジの外側にある木の部分の応力、ひずみの状態の若干のずれの影響で、もう1つはひずみゲージへの水分の影響と考えている。
 - → 木材は個体差もあるうえに個体の中でも違いがあるので今回の計算値と実測値はよく一致 していると思う。

(6) 第6章 荷重継続時間に係わる文献等調査について

担当者による説明の後、以下の質疑応答、意見交換を行った。

- 114ページの図 6.9.2 データはどこまで確認されているのか。
- → いずれの文献も曲線を外挿しただけなので確認はされていない。最長のものは図 6.6.2 の 無欠点材ではない実大材を 13 年間やっている。応力比が 50%台で壊れているものもあり実 大材では厳しいということがいえる。
- ・ 1.1/2 はパーティクルなどではかなり異なってくるので一般的なものを考えるのは難しいと 思う。鉄筋の比率がある程度の範囲ならばよいが、多くなるとせん断の方が大きくなるので別 途検討が必要と考えてよいか。
 - → そのとおりであり、条件付きだと思う。

(7) 第7章 まとめと今後の課題について

担当者による説明の後、以下の質疑応答、意見交換を行った。

- 今後実験を継続した場合、計算どおりになるかを確認するとともにその計算式が適用される 条件を確認していくことになるのか。来年度以降の実験計画というかやるべきことの摺合せを した方がいいのではないか。
 - → 実用的なところも考慮しつつ適応範囲をおさえて、適用範囲の上限ぐらいで実験をやって それで安全性を確認するのがよいと思う。平面保持が仮定されている、つまり接着で一体化 されているという保証のもとではクリープ限界を計算できる。その前提条件でこういう実験 をすればいいという計画を立てられればその範囲内で DOL は問題ないという結論が導かれる と思う。
 - → 梁せいだけでなく鉄筋の割合でも決まるのでそれらのリミットは調べなければならない。
 - → 最大のせん断に対しても長期の許容応力度が上回る保証があれば木材自体の DOL になる。 木と鉄筋の付着性能は優れており RC のレベルではないことは実験で確認しており、鉄筋と木 の剛性が 1/2 になってもほとんど変わらないことを解析で調べているので、このような工学 的な裏付けがあればこの範囲はいいということを認めてほしい。
 - → 結局、各要素の DOL との関係ですべてが決まると思われ、要素実験等で抜けているとすれば鉄筋と木との接着のところが問題としてあるので、DOL を確認する必要があるかもしれない。そうすればこの仕様については計算で求められる。
 - → 今回の検討は異種材料というより鉄筋と炭素繊維に限った話である。