

<事業番号>

S44

<事業名>

木質系異種複合部材の品質基準における
長期性能の評価方法の検討

<実施者名>

(代表) 帝人株式会社
山佐木材株式会社

<共同研究先>

国立研究開発法人 建築研究所

目次

- 01 事業の背景・目的
- 02 事業の実施体制／委員体制
- 03 事業の実施計画
- 04 既往文献の調査結果
- 05 要素試験
- 06 まとめ

目次

01 事業の背景・目的

02 事業の実施体制／委員体制

03 事業の実施計画

04 既往文献の調査結果

05 要素試験

06 まとめ

1. 事業の背景・目的

脱炭素社会の実現に向け、木材利用を促進する観点から中大規模建築物の木造化等が推進されており、民間企業において、木造の中大規模建築物において特に必要とされる横架材の長スパン化、高剛性化を目指した研究開発が進められている（例えば、鋼棒や炭素繊維を集成材と複合する方法）。

しかしながら、当該複合部材については、構造安全性を容易に確認するための技術基準等が位置づけられておらず、**現状は、個別の建築物ごとに大臣認定を取得する必要がある**。また、これらの木質系異種複合部材などの新材料・新技術等が用いられた部材の性能把握に当たっては、検証に時間を要する**長期特性の評価等が課題**となっており、民間企業において開発された新材料・新技術等の活用に必要な時間を要する要因の一つとなっている。

そこで本事業では、**木質系異種複合部材の長期特性の評価方法について検討し、基準整備等に資する技術的資料をまとめることを目的とする**。

1. 個別認定の建築物例



炭素繊維強化集成材“LIVELY WOOD®”
(帝人株式会社)



ささしま高架下オフィス
場所：愛知県名古屋市／構造：木造2階建て
横架材としてLIVELY WOODを使用している。



鉄筋強化集成材“SAMURAI”
(山佐木材株式会社)



試作棟
場所：山佐木材工場内／構造：木造平家
横架材としてSAMURAIを使用している。

目次

01 事業の背景・目的

02 事業の実施体制／委員体制

03 事業の実施計画

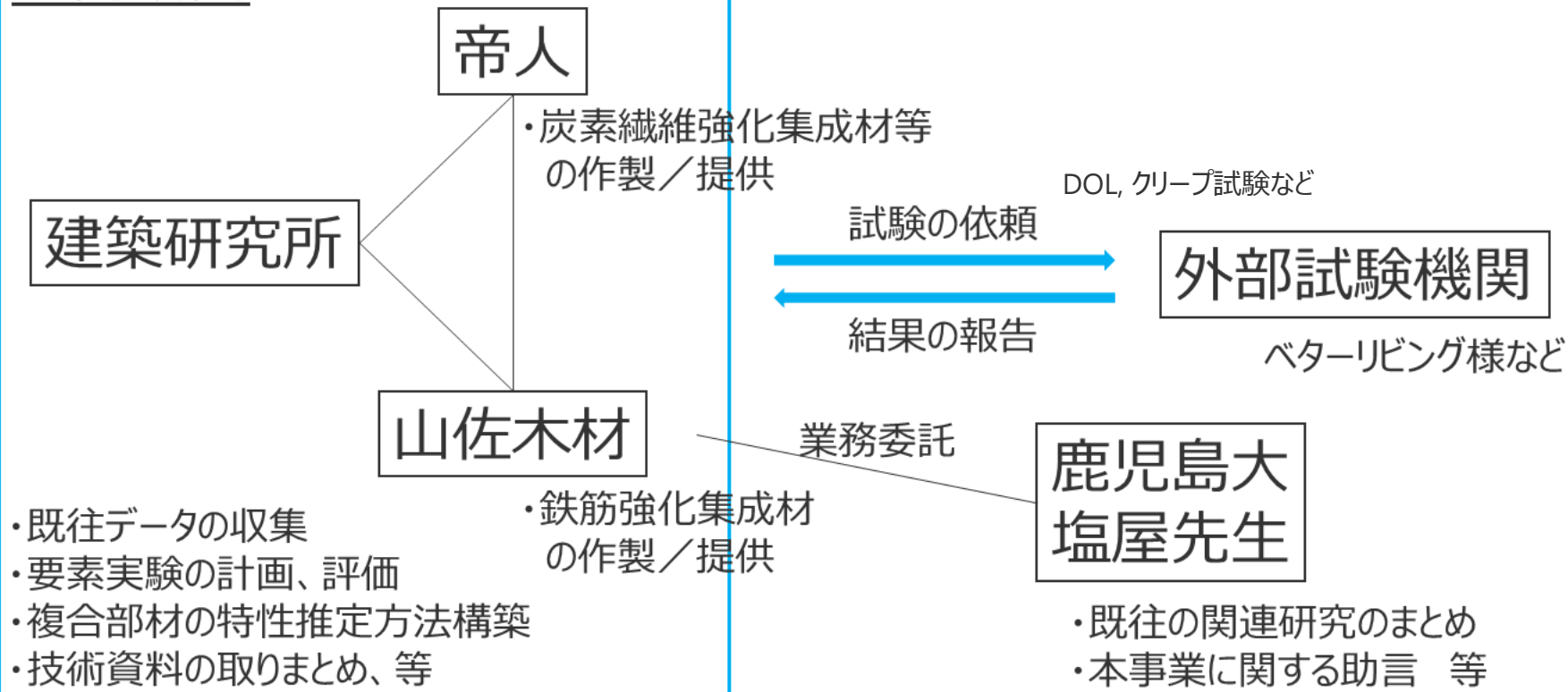
04 既往文献の調査結果

05 要素試験

06 まとめ

2. 事業の実施体制

共同研究



2. 事業の委員体制（令和6年度）

役 割	氏 名	所 属
委員長	中村 昇 様	岡山大学 グリーンイノベーションセンター 特任教授
委 員	中島 史郎 様	宇都宮大学 地域デザイン科学部 建築都市デザイン学科 教授
委 員	塩屋 晋一 様	鹿児島大学 理工学域工学系 理工学研究科（工学系） 工学専攻 建築学プログラム 教授
委 員	槌本 敬大 様	国立研究開発法人 建築研究所 材料研究グループ グループ長
委 員	秋山 信彦 様	国立研究開発法人 建築研究所 材料研究グループ 主任研究員
委 員	酒井 優太 様	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
委 員	平松 靖 様	国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所 木材研究部門 複合材料研究領域 領域長
委 員	宮武 敦 様	国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所 木材研究部門 複合材料研究領域 研究専門員
委 員	津田 千尋 様	一般財団法人 ベターリビング つくば建築試験研究センター 性能試験研究部 主席試験研究役
オブザーバー	担当官様	国土交通省 住宅局
オブザーバー	瀧能 功介 様	小松マテール株式会社 新規事業開発部 先端材料リーダー
実施者	桐野、小松	山佐木材株式会社
実施者	長瀬、佐藤	帝人株式会社

目次

01 事業の背景・目的

02 事業の実施体制／委員体制

03 事業の実施計画

04 既往文献の調査結果

05 要素試験

06 まとめ

3. 事業の実施計画

※本事業の実施期間は、1年毎の2年間

- (イ) 木質系異種複合部材に関する既往のデータ収集。
 - (ロ) 木質系異種複合部材を構成する要素の長期特性を把握するための調査、実験及び解析を行う。
 - (ハ) 木質系異種複合部材を構成する要素の長期特性から複合部材の特性を推測するための与条件及び推定方法を検討し、検証実験及び解析を行う。
- (二) (イ) から (ハ) の検討内容を踏まえた、木質系異種複合部材の基準整備等に資する技術的資料をとりまとめる。

実施項目	2024年度				2025年度			
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
体制構築、実施計画・内容検討	→				→			
既往データ収集	→	→	→					
要素の長期特性に関する調査、実験、解析等		→	→	→	→	→	→	→
複合部材の特性推定方法の検討、検証実験、解析等				→		→	→	→
技術的資料とりまとめ		→		→		→		→

目次

01 事業の背景・目的

02 事業の実施体制／委員体制

03 事業の実施計画

04 既往文献の調査結果

05 要素試験

06 まとめ

4. 既往文献の調査結果

1940年代から現在までの木質系異種複合材のクリープとDOL* に関する既往の研究を調査。

*DOL: Duration Of Load, 荷重継続時間

1) 研究報告の件数、地域は近年増加傾向。

1946-1990年(34年間)で15件(国外のみ)、1991-2000年(10年間)で12件(国外:8, 国内:4)、2001-2010年(10年間)で10件(国外:8, 国内:3)、2011-2024年(14年間)で44件(国外:30, 国内:14)となり、2011年以降、急増。

2) 補強材料として用いられる部材

- ・1980年以前：鋼材のみ。
- ・1980年代以降：鋼材、炭素繊維、アラミド繊維、ガラス繊維、バサルト繊維（玄武岩）など。

3) 力学的性能に関する研究

- ・1994年以前：短期の剛性と耐力を増大させる効果に関する研究。
- ・1995年以降：梁のたわみのクリープ特性に関する研究も行われるようになった。

DOLについては、2016~2017年に林野庁補助事業として行われた、日本住宅・木材技術センターで実施された梁の実験と、これに関する鉄筋と木の接着界面に関する実験、および鉄筋集成材の梁の影響係数の推定に関する研究のみ。クリープ係数の推定方法も鉄筋集成材の曲げ変形とせん断変形の成分に分離して推定する方法のみ。

4) 実際の新築の建物に実用された例は、我が国の5棟のみ*。

*2024年度調査時点

目次

01 事業の背景・目的

02 事業の実施体制／委員体制

03 事業の実施計画

04 既往文献の調査結果

05 要素試験

06 まとめ

5. 要素試験 目次

05 要素試験

1. CFRP, PET曲げ試験

- ①短期曲げ試験
- ②曲げクリープ試験
- ③曲げDOL試験

2. 木/木, CFRP/木, PET/木接着試験

- ①短期ブロックせん断試験

3. 鉄筋/木 付着試験

- ①短期付着試験
- ②付着DOL試験

5. 要素試験

実施者間で議論し、木と組み合わせる異種部材として、以下を選定した。

- ①鉄筋（クリープ・DOL なし）
- ②炭素繊維強化プラスチック（CFRP）（クリープ・DOL 小*）
- ③ポリエチレンテレフタレート樹脂（PET）（クリープ・DOL 大*） *当初予想

＜選定理由＞

クリープ・DOL特性が異なると予想される材料を選定。

①、②は実施者の製品に関連する材料であり、③は①、②と特性が異なり（②は熱硬化性樹脂ベース、③は熱可塑性樹脂）、かつ、今後の検討を見据え、比較的長尺品（最大2,440 mm）が入手可能な材料として選定。

5. 要素試験

※本事業の実施期間は、1年毎の2年間

全体試験計画（2024年度事業時点）

今回報告範囲

異種部材	要素曲げ			接着・付着ブロックせん断			複合部材曲げ		
	短期試験	クリープ試験	DOL試験	短期試験	クリープ試験	DOL試験	短期試験	クリープ試験	DOL試験
CFRP	○	○	○	○	○	○	○	○	○
PET	○	○	○	○	○	○	○	○	○
鉄筋	-	-	-	○	○	○	○	○	○
(木)	-	-	-	○ 比較	○ 比較	○ 比較	-	-	-

5. 要素試験 目次

05 要素試験

1. CFRP, PET曲げ試験

- ①短期曲げ試験
- ②曲げクリープ試験
- ③曲げDOL試験

2. 木/木, CFRP/木, PET/木接着試験

- ①短期ブロックせん断試験

3. 鉄筋/木 付着試験

- ①短期付着試験
- ②付着DOL試験

5.1.① CFRP, PET短期曲げ試験

CFRP, PETの短期物性の把握・長期試験の基準荷重確認のために、JIS K7074,7171に準拠して試験片の3点曲げ試験実施。CFRPはロット違いの2水準実施。

＜試験体＞・CFRP①、②（PAN系炭素繊維/熱硬化性樹脂）
・ポリエチレンテレフタレート樹脂（PET）

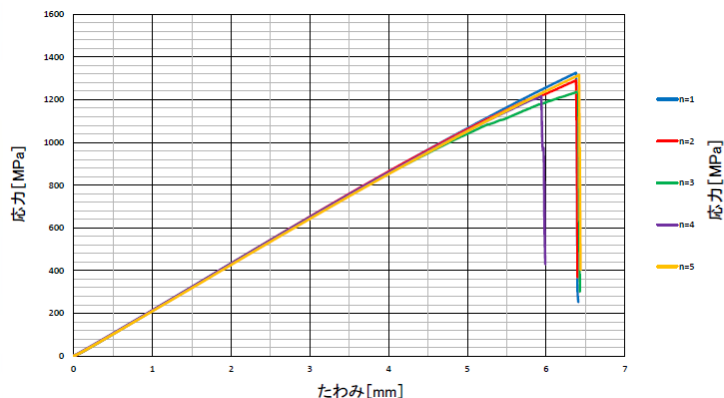
試験時の様子



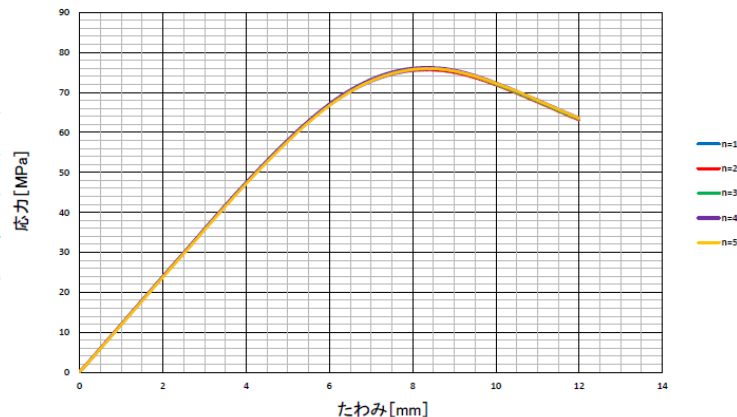
試験結果

応力-たわみ図

CFRP①



PET



※PETは曲げ破壊せず、
最終的に支点から落下して終了

5.1.① CFRP, PET短期曲げ試験

試験結果

	CFRP①			CFRP②			PET		
	荷重	曲げ強さ	弾性率	荷重	曲げ強さ	弾性率	荷重	曲げ強さ	弾性率
	N	GPa	GPa	N	GPa	GPa	N	MPa	GPa
1	678	1.33	115	614	1.20	122	120	75.6	2.06
2	656	1.29	116	618	1.20	122	121	75.7	2.09
3	636	1.24	115	633	1.29	118	121	76.1	2.08
4	622	1.22	114				122	76.3	2.07
5	672	1.32	113				121	76.0	2.06
Ave.	653	1.28	115	622	1.23	121	121	76.0	2.07
σ	23.52	0.05	1.14	9.81	0.05	2.31	0.51	0.27	0.01
C.V.	0.036	0.038	0.010	0.016	0.042	0.019	0.004	0.004	0.006

	曲げ強さ*1 倍	弾性率*1 倍
PET/スギ	3.4	0.3
CFRP/スギ	56.9	17.6

- PETはスギ対比、**曲げ強さは大きい**が、**弾性率（ヤング係数）は低い**
- CFRPはスギ対比、**曲げ強さ・弾性率とも大きい**
- CFRPはPETよりも物性のバラつきが大きいことが示唆された

▶ **得られた最大荷重平均値*を基準に、長期試験の荷重を設定**
*CFRPは②のロット

*1 スギ集成材（E65-F225）対比
CFRPは①基準での倍率

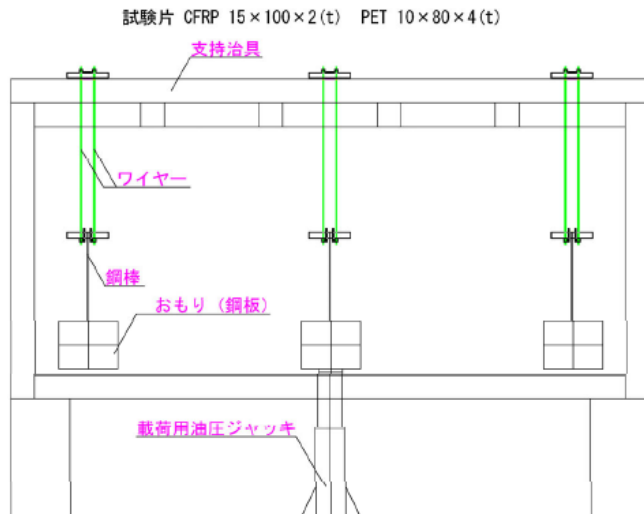
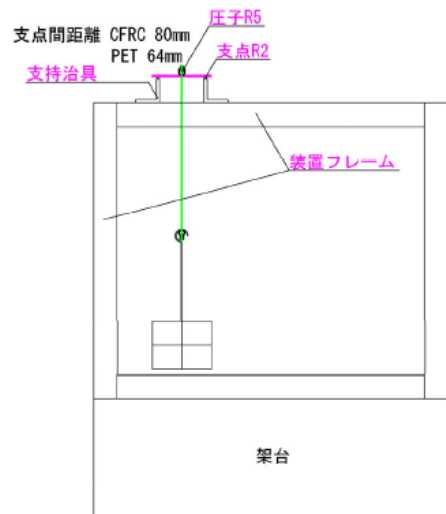
5.1.② CFRP, PET曲げクリープ試験

長期荷重でのたわみの確認のため、短期曲げ試験と同様の試験片を用いて、曲げクリープ試験を実施。

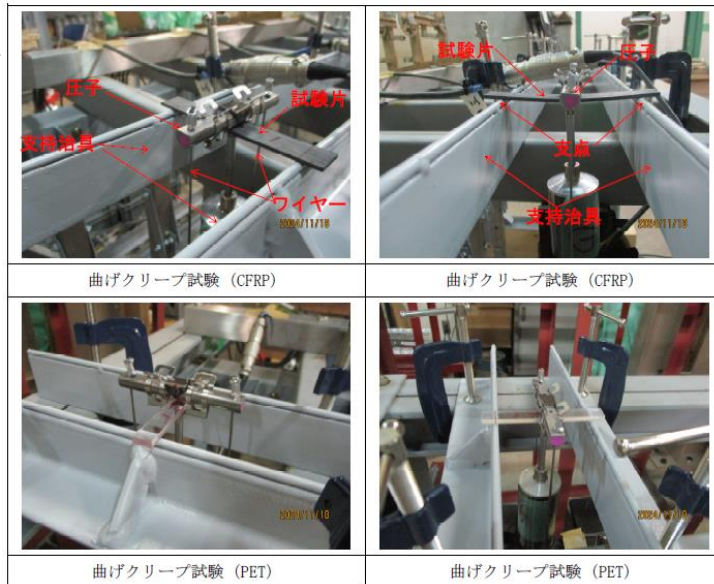
荷重：短期試験の最大荷重の平均値の1.1/3

試験室環境雰囲気：20℃±2℃、相対湿度65%±5%

試験装置の図 ※載荷は、支点間距離の中心の試験片上に配置した圧子とワイヤーを介して、おもりに接続した鋼棒を吊り下げる方法で行った

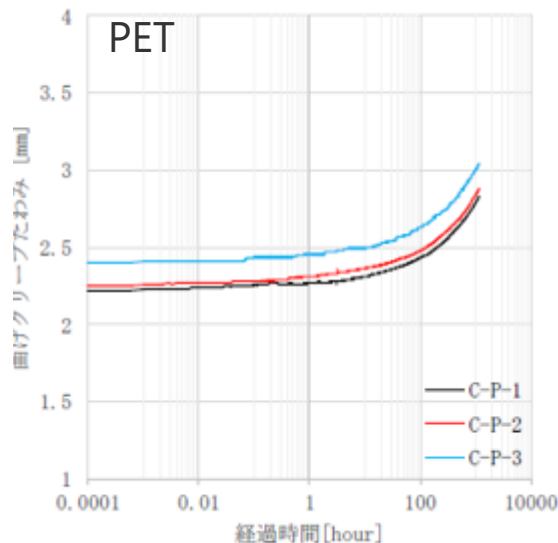
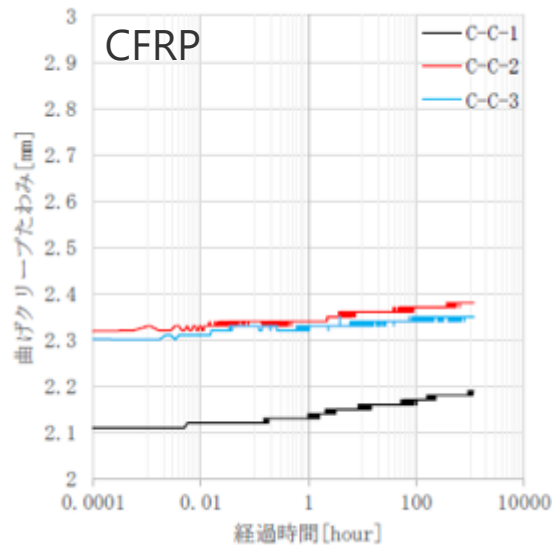


試験時の様子



5.1.② CFRP, PET曲げクリープ試験

試験結果



1000時間までのデータから求めた
50年に対するクリープ調整係数

	告示法	パワー則
CFRP	1.04	1.09
PET	1.29	3.35

曲げクリープたわみ

- 炭素繊維強化集成材では、変動係数が木材の2よりも大きく抑えられる可能性が示唆された。
- PETはたわみの増加が継続。継続評価中。

5.1.③ CFRP, PET曲げDOL試験

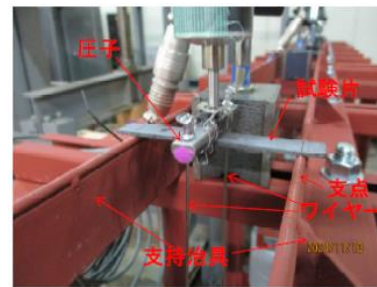
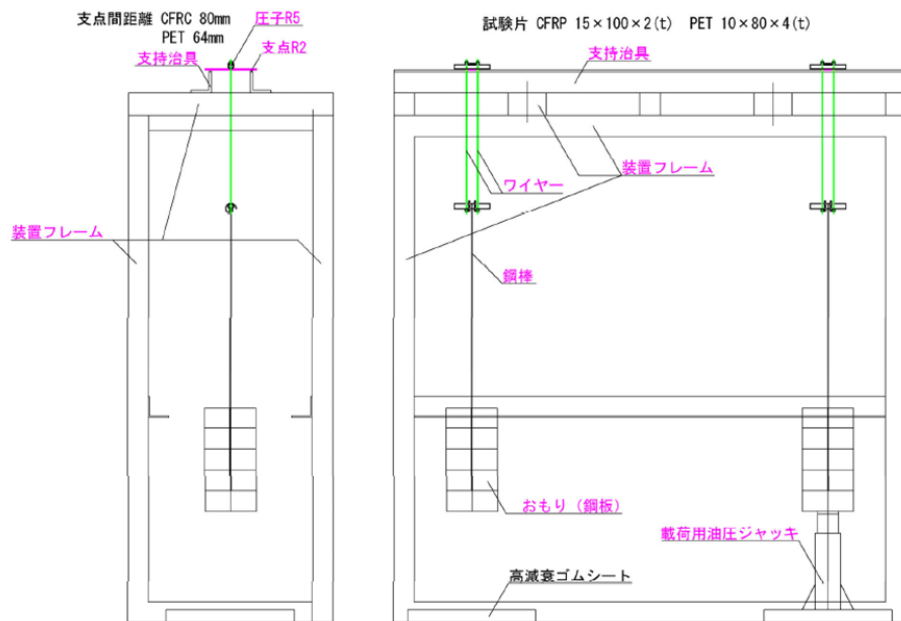
DOL特性把握のため、短期曲げ試験と同様の試験片を用いて、曲げDOL試験を実施。

荷重：短期試験の最大荷重の平均値の95%, 90%, 80%

試験室環境雰囲気：20℃±2℃、相対湿度65%±5%

試験装置の図 ※載荷は、支点間距離の中心の試験片上に配置した圧子とワイヤーを介して、おもりに接続した鋼棒を吊り下げる方法で行った

試験時の様子



曲げDOL試験 (CFRP)



曲げDOL試験 (CFRP)



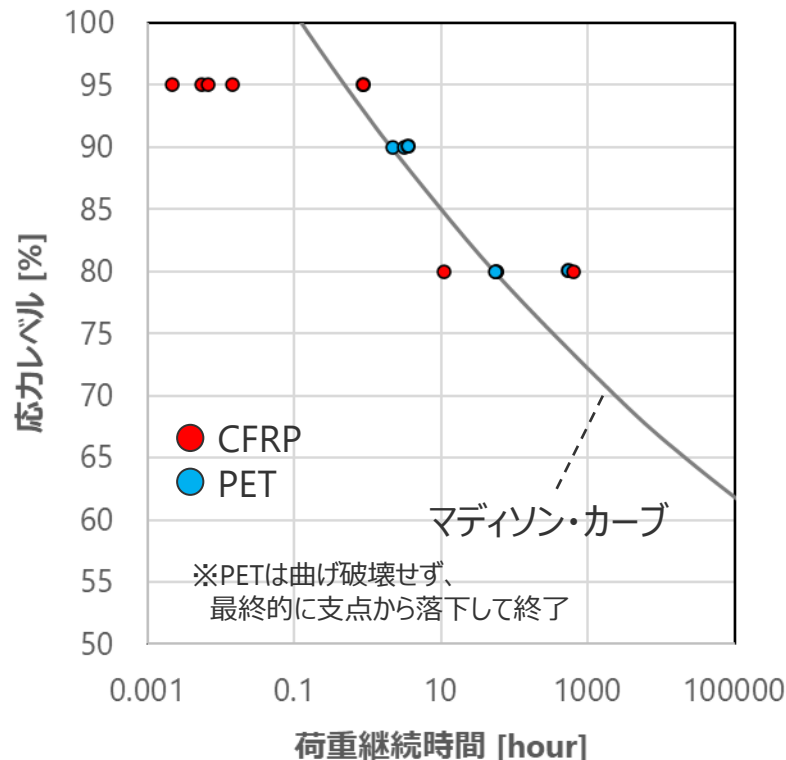
曲げDOL試験 (PET)



曲げDOL試験 (PET)

5.1.③ CFRP, PET曲げDOL試験

試験結果



マディソン・カーブは木材に関するグラフであるが、木質系異種複合部材においてもDOLの評価は必要であること、木部材と複合化する異種材料の特性把握の観点から、CFRP、PETそれぞれの結果をマディソン・カーブと比較した。

- CFRPでは、応力レベル0.95, 0.8を評価。
- それぞれ、5体中1体、3体中2体がマディソン・カーブを超える結果となった。
- PETでは、応力レベル0.9, 0.8を評価。
- どちらも3体中3体がマディソン・カーブを超える結果となった。

今後、CFRP 0.9/0.7/0.6, PET 0.7, 0.6を評価予定。

5. 要素試験 目次

05 要素試験

1. CFRP, PET曲げ試験

- ①短期曲げ試験
- ②曲げクリープ試験
- ③曲げDOL試験

2. 木/木, CFRP/木, PET/木接着試験

- ①短期ブロックせん断試験

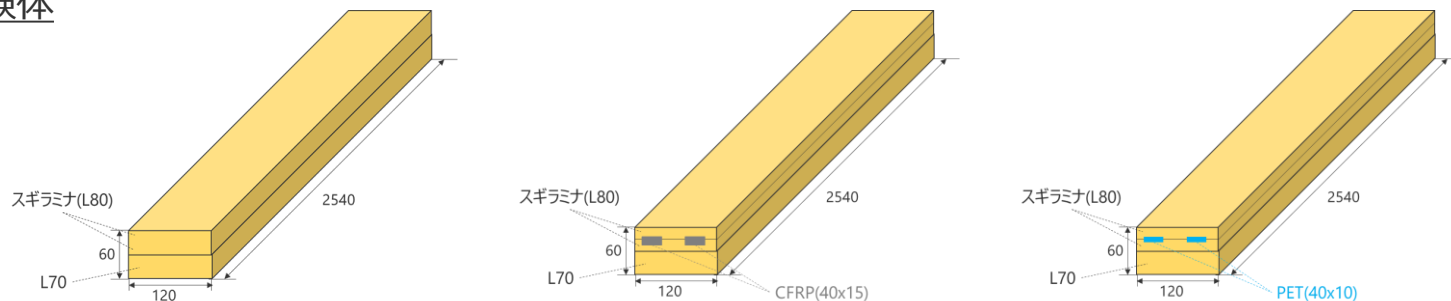
3. 鉄筋/木 付着試験

- ①短期付着試験
- ②付着DOL試験

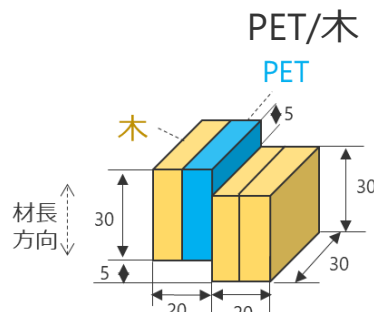
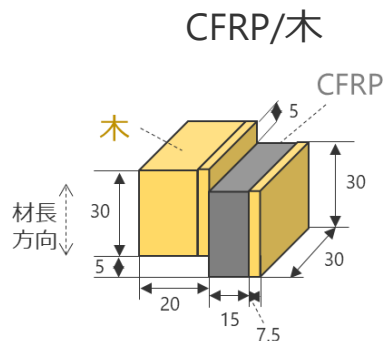
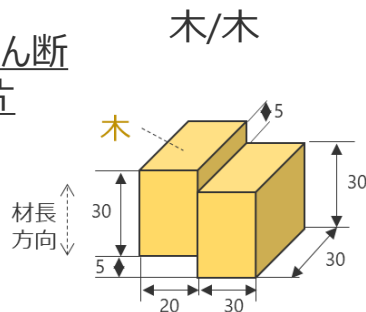
5.2. 木/木, CFRP/木, PET/木接着試験

接着性能評価用の試験体として、以下の2plyのラミナを作製した。接着剤としてはすべて同じイソシアネート系接着剤を用いた。PETについては事前評価の結果、そのままでは接着しなかったため、表面をやすりがけした後に接着を行った。また、試験体から、ブロックせん断用試験片を切り出した。

試験体



ブロックせん断 用試験片



試験時の様子



5.2.① 短期ブロックせん断試験結果

試験結果

項目	評価数	平均せん断 強さ (N/mm ²)	標準偏差 (N/mm ²)	変動係数
木	13	4.5	1.8	39.6%
CFRP	12	7.6	2.9	37.7%
PET	13	6.7	3.0	44.8%

ブロックせん断後のせん断面の写真（抜粋）



CFRPやPETが接着できていることは確認できたが、全体的にバラつき（変動係数）が大きいため、改めて評価実施する。

5. 要素試験 目次

05 要素試験

1. CFRP, PET曲げ試験

- ①短期曲げ試験
- ②曲げクリープ試験
- ③曲げDOL試験

2. 木/木, CFRP/木, PET/木接着試験

- ①短期ブロックせん断試験

3. 鉄筋/木 付着試験

- ①短期付着試験
- ②付着DOL試験

5.3 鉄筋/木 付着試験

背景: 鉄筋を木内に接着して部材の曲げ剛性を約5倍、曲げ耐力を約3倍。

- ・接着による鉄筋と木の付着剛性と付着強度の保証が不可欠。
- ・長期使用における性能の保証が重要、多数の実大試験が困難。
- ・木のDOLとクリープは既知。
- ・鉄筋についてはDOLとクリープは無視できる。

課題: 部材内における鉄筋と木の接着領域のDOLとクリープの把握が不可欠。

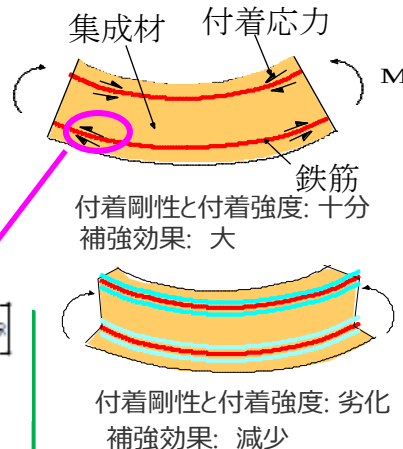
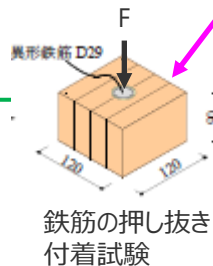
要素試験

- ①短期付着試験, ②付着DOL試験
- ③付着クリープ試験

変数:

- ・鉄筋の表面形状(3種類)
竹節、ねじ鉄筋、丸鋼

- ・エポキシ接着剤(2種類)
低粘度(変移点: 67°C)
中粘度(変移点: 110°C)



実大鉄筋集成材の梁1体の長期載荷
断面: 210x502mm, スパン: 8.91m
2023.12-現在も計測中(1年5ヵ月)

部材の長期性能の推定へ展開

- ・部材のDOL値
- ・部材のクリープ係数

5.3.① 鉄筋の短期付着試験（押し抜き試験）

試験体: 105x105x90(スギL70), 異形鉄筋:D29(SD390), 鉄筋孔: $\Phi 33\text{mm}$



鉄筋孔の目荒らし



エポキシの充填(負圧注入)
鉄筋を挿入後、注入全長:4m



長さ9cmに切断後、
含水率を一定にするため
エポキシ接着剤コーティング
底面は粘性の高いエポキシ
接着剤でキャピング



耐圧試験機による
短期載荷



鉄筋に対する
鋼球による載荷



支持鋼板と押し抜き孔($\Phi 50\text{mm}$)



上面



底面

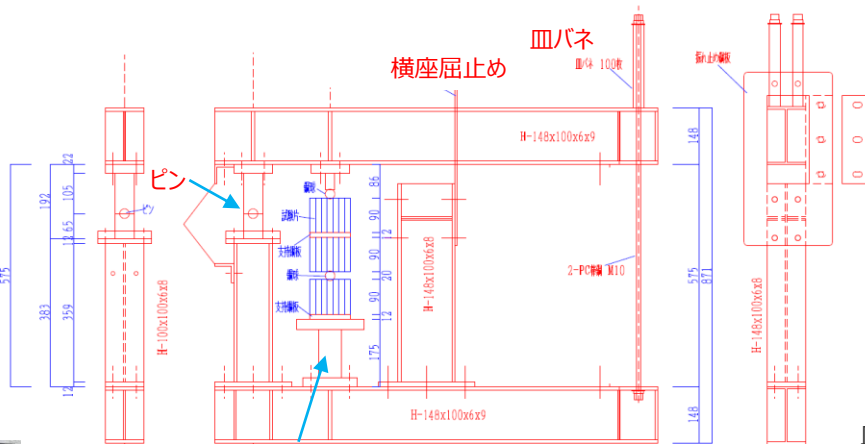
鉄筋まわりに割れ確認

最大荷重を確認後の破壊状況

5.3.② 長期押し抜き試験装置の開発



荷重中の状況



ロードセル 装置の側面図

特徴: 実大鉄筋1本の荷重可能
3個の荷重が同時に可能
荷重が極めて容易
荷重の減少が極めて少
令和6年度:6組製作
DOL試験を継続中
令和7年度:3組追加
クリープ試験を実施



皿バネ300枚,
0.10kN/日の減少



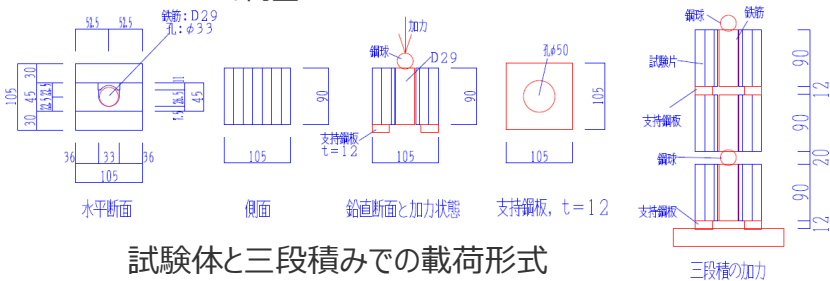
支持鋼板



押し抜き止めの円盤



円盤を挿入した状態



試験体と三段積みでの荷重形式



合板による座屈防止

内面はグースを塗布



押し抜き防止



ビスによる角形合板
圧縮加力を安定させる



中段試験片の破壊



下段試験片の破壊

5.3.② 鉄筋の付着（押し抜き） DOL試験の結果

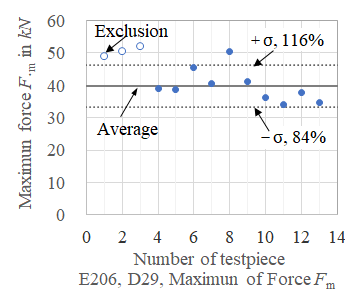
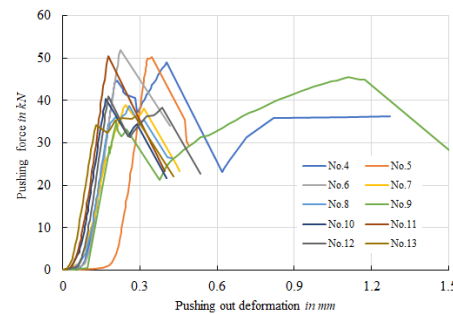


表 短期荷重の最大荷重

No.	Testpiece	F_{max} in kN	L_d in mm	ϕ in mm	A_s in mm ²	τ_m in N/mm ²	Type of adhesive	Note
1	E-100-1	49.0	90.90	31	8848	5.54	E-206	No.4
2	E-100-2	50.3	90.15	31	8775	5.73	E-206	No.5
3	E-100-3	51.9	92.35	31	8989	5.77	E-206	No.6
4	E-100-4	38.9	89.00	31	8663	4.49	E-206	No.7
5	E-100-5	38.7	90.60	31	8819	4.39	E-206	No.8
6	E-100-6	45.5	90.30	31	8790	5.18	E-206	No.9
7	E-100-7	40.5	89.00	31	8663	4.67	E-206	No.10
8	E-100-8	50.5	89.15	31	8678	5.82	E-206	No.11
9	E-100-9	41.1	89.20	31	8683	4.73	E-206	No.12
10	E-100-10	36.3	87.70	31	8537	4.25	E-206	No.13
11	E-100-11	34.1	89.85	31	8746	3.90	E-206	E-90-1'
12	E-100-12	37.6	89.60	31	8722	4.31	E-206	E-90-2'
13	E-100-13	34.7	90.05	31	8765	3.96	E-206	E-90-3'
Average		39.8	89.45	31	8707	4.57		
Max		51.90	92.35	31	8989	5.82		Number at cutting
Min		34.10	87.70	31	8537	3.90		testpiece
Min/Max		0.66	0.95	1.00	0.95	0.67		from mother
σ		6.39	1.13	0.00	109.87	0.70		member

Average, Max, and min: Average, Maximum, and Minimum
 σ : Standard derivation, L_d : Height of testpiece, ϕ : Diameter hole for rebar
 $A_s = L_d \cdot \pi \cdot \phi$, $\tau_m = F_{max} / A_s$

表 DOL荷重の破壊時間

Testpiece	Stress level in %	Load in kN	Time to failure		Failure
			in minute	in hour	
90-1	88.4	35.18	0.03	0.00	Collapsed
90-2			1417.48	23.62	Collapsed
90-3			253.73	4.23	Collapsed
85-1	85	33.82	97.00	1.62	Collapsed
85-2			53330.67	888.84	2025/5/15
85-3			101.25	1.69	Collapsed
80-1	80	31.83	0.00	0.00	Untested
80-2			0.00	0.00	
80-3			0.00	0.00	
75-1	75	29.84	0.00	0.00	Untested
75-2			0.00	0.00	
75-3			0.00	0.00	
70-1	70	27.86	0.00	0.00	Untested
70-2			0.00	0.00	
70-3			0.00	0.00	

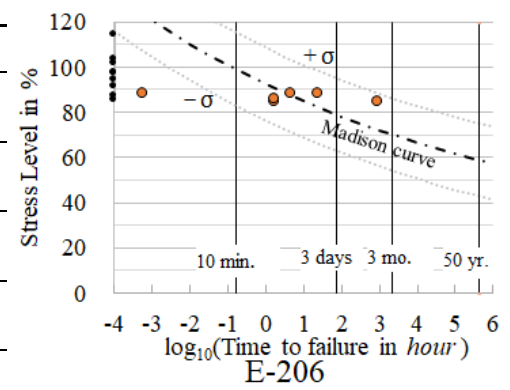


図 応力レベル比-荷重継続時間関係

表1 対象にするエポキシ接着剤、鉄筋の形状および荷重レベルと試験片の個数 計画

接着剤	鉄筋押し抜きDOL試験			クリープ試験		
	異形鉄筋D29	ねじ鉄筋D29	丸鋼Φ30	異形鉄筋D29	ねじ鉄筋D29	丸鋼Φ30
コニシE206	100,90,80,75,70%	-	100,90,80,75,70%	1.1/3=37%	-	1.1/3=37%
オーシカTE-257L2	100,90,80,75,70%	100,90,80,75,70%	-	-	1.1/3=37%	-

DOL試験の試験片の個数: 荷重レベル100%; 9個, 90%-70%:各3個

クリープ試験の試験片の個数: 荷重レベル37%; 各2個

試験装置は9組製作する。

目次

- 01 事業の背景・目的
- 02 事業の実施体制／委員体制
- 03 事業の実施計画
- 04 既往文献の調査結果
- 05 要素試験
- 06 まとめ

6. まとめ 1/3

1. 木質系異種複合部材の長期特性の評価方法の検討のために、過去文献の調査を行った。また、異種部材として、鉄筋、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)、ポリエチレングレフタレート樹脂(PET)を選定し、要素試験を行った。
2. 近年、木質系異種複合部材に関する検討は各国で増加しているが、DOLに関する研究報告や、複合部材の新築の建物への適用例は日本のみ。
3. CFRPとPETの短期曲げ試験を行い、スギ集成材(E65-F225)対比、CFRPは曲げ強さ・弾性率とも高い、PETは曲げ強さは高いが、弾性率は低い、という結果が得られた。

6. まとめ 2/3

4. 短期曲げ試験で得られた結果を基に、CFRPとPETの曲げクリープ試験、曲げDOL試験を実施。

【クリープ】CFRPは調整係数が1に近く、PETはたわみが落ち着かず、継続的な評価の必要性が示唆された。

【DOL】応力レベル0.95~0.8で木材のマディソン・カーブと比較的近い結果が得られた。

5. 木/木, CFRP/木, PET/木の短期接着試験を実施。CFRP、PETが接着できていることは確認できたが、バラつき（変動係数）が全体的に大きかったため、再度評価予定。

6. まとめ 3/3

6. 鉄筋/木の付着に関する短期試験、DOL試験を実施。

- ・実大部材において鉄筋1本をずらす状態を想定して、3つの試験片に同時に載荷可能できる装置と、3個の全ての試験片を破壊させる手順と方法を開発した。
- ・鉄筋の表面の形状を3種類または接着剤を2種類に限定して、全ての種類の試験片を製作して、1種類の試験片の短期載荷と長期載荷を実施している。
- ・現時点では、荷重レベル比(90%,85%)を終えており、荷重継続時間は、既往の荷重-継続時間曲線(マディソンカーブ)に沿った結果となっている。



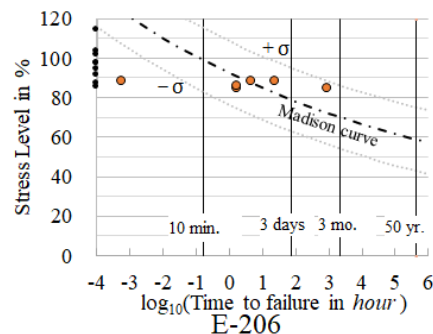
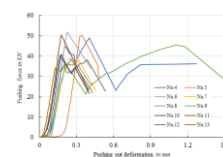
開発した鉄筋押し抜きDOL試験装置



試験体の変数と製作および短期載荷試験と結果

変数:

- ・鉄筋の表面形状(3種類)
竹節, ねじ鉄筋, 丸鋼
- ・エポキシ接着剤(2種類)
低粘度(変移点: 67°C)
中粘度(変移点: 110°C)



DOL試験結果の1例