

# (66) CFRP 製軽量床を用いた 超軽量超高層鋼構造建物の研究

山崎 賢二<sup>1</sup>・岡崎 智仁<sup>1</sup>・井上 竜太<sup>1</sup>・佐藤 恭章<sup>1</sup>・稲葉 澄<sup>1</sup>・松井 孝洋<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 正会員 株式会社竹中工務店 技術研究所 (〒 270-1395 千葉県印西市大塚 1-5-1)

E-mail: yamazaki.kenji@takenaka.co.jp  
okazaki.tomohito@takenaka.co.jp  
inoue.ryota@takenaka.co.jp  
sato.yasuaki@takenaka.co.jp  
inaba.tooru@takenaka.co.jp

<sup>2</sup> 正会員 東レ株式会社 ACM 技術部 (〒 103-8666 東京都中央区日本橋室町 2-1-1)

E-mail: takahiro\_matsui@nts.toray.co.jp

建物の高層化は生産効率を高めることができるが、巨大地震時において高層な建物が被る人的・物的被害は甚大である。そのため、耐震性能を効果的に向上させる技術の重要性が年々増している。本研究の目的は、建物重量が通常の建物に比べ非常に大きい超高層建物を対象とし、地震力の低下を目指して超軽量化を実現することである。本報ではまず超軽量な建物が従来建物よりも高い耐震安全性を確保できる有力な技術であることを確率統計的に明らかにした。また、独自の CFRP 製軽量床を提案し、基礎的な実験により開発を進める上での課題を明確にした。

**Key Words:** Vertical expansion, Lighter, High strength steel, damping, P-Δ effect

## 1. はじめに

建物の高層化は知的生産拠点の集約化とともに人と物の移動時間の短縮化につながり、生産効率を高めることができる。生産年齢人口の減少<sup>1)</sup>や都市のコンパクト化の推進<sup>2)</sup>を考えると高効率な生産拠点の確保は今後さらに重要になる。

一方で巨大地震時において高層な建物が被る人的・物的被害は甚大となる可能性が高く、特に社会的・経済的な重要性が高い超高層建物に関しては、耐震性能を効果的に向上させる技術の重要性が年々増している。効果的な技術の一つとして建物の減衰性能を高める制振技術が挙げられる。制振技術は、建物に入力する地震エネルギーを吸収し、地震力を低減させることができるため、地震に関わる全ての構造部材の設計を効率化できる。

制振技術に関して、嶺脇、山本ら<sup>3)</sup>は、1基で従来のおよそ3倍の最大減衰力(6000kN)を発揮する制振用オイルダンパーを開発している。また、櫛部、井上ら<sup>4)</sup>は、大地震や長周期地震動など、大振幅で継続時間が長い地震を受けても継続的に有効な大変形領域における優れた変形性能と疲労特性を有する制振部材を開発している。

しかしながら、こうした制振部材は建築計画上の制約やコスト上の制約から設置できる箇所が限られることが一般的である。そのため、限られた制振部材を用いて地震力の低減を実現する技術は建物の高層化において重要である。

そこで本研究は建物重量が通常の建物に比べ非常に大きい超高層建物を対象とし、地震力の低減を目指して超軽量化した超高層鋼構造建物(以降、超軽量超高層鋼構造建物)およびこれを実現する技術について検討を行う。

本報ではまず超軽量超高層鋼構造建物が従来建物よりも高い耐震安全性を確保できる有力な技術であることを確率統計的に明らかにする。ここでは観測波を元に作成した多数の模擬地震動を用いて P-Δ を考慮した多質点系応答解析を行い、最大層間変形角の違いを比較することでその優位性を示す。

また、昨今航空・宇宙用途から自動車用途への採用が進み、量産体制が整いつつある炭素繊維補強プラスチック(以下、CFRP)に着目し、建物重量で最も高い割合を占めている床重量の軽減を実現する軽量床の開発を行う。本報では、独自の CFRP 製軽量床を提案し、本軽量床に対して基礎的な実験を行い、開発を進める上での課題を明確にする。

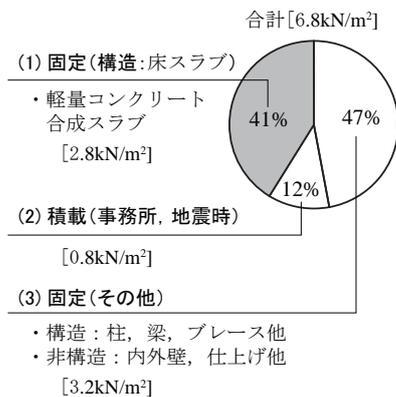


図1 超高層鋼構造建物の重量内訳例

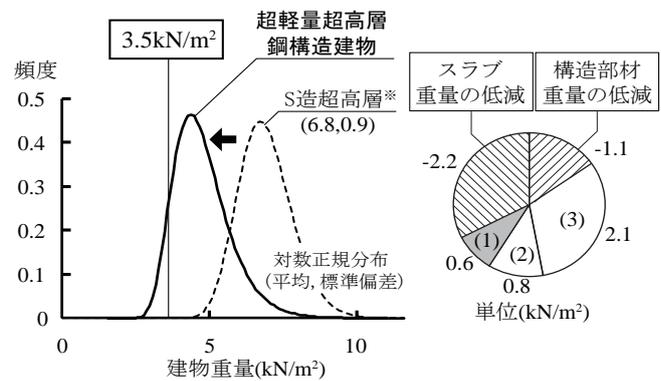


図2 軽量化による目標重量 (※は参考文献5)

## 2. 超軽量超高層鋼構造建物の目標重量と目標性能

図1は荷重指針<sup>5)</sup>に示される超高層建物重量の平均を基に、床スラブ重量、積載重量、その他重量で分けた場合の内訳例を示す。建物総重量のうち床スラブは41%であり、部材単体の重量として最も大きな割合を占めている。よって床スラブの軽量化は建物の軽量化に最も効果的であることがわかる。既往の研究では様々な軽量化<sup>6),7)</sup>を検討しており床スラブ重量は1/4や1/5にすることも可能である。また床スラブ重量の低減により、作用力を低減することで他の構造部材の重量低減にもつながる。さらに、構造部材の重量低減には、高強度鋼材 HSA700 の活用<sup>8)</sup>も考えられる。

そこで本研究では床スラブに木材やCFRPを使用することを想定して床スラブ重量を0.6kN/m<sup>2</sup>、また高強度鋼材の使用により構造部材重量を低減し、固定(その他)重量を2.1kN/m<sup>2</sup>とする。ここで仮に構造部材が全て強度で設計される場合、構造部材重量はHSA700と普通鋼材SN490の強度比の逆数の比率で重量を低減できるので、元の構造部材重量を2.0kN/m<sup>2</sup>と仮定して1.1kN/m<sup>2</sup>の重量の低減を考慮した。以上より本研究では図2に示すように現行の建物重量の平均値6.8kN/m<sup>2</sup>に対して0.51倍の3.5kN/m<sup>2</sup>を超軽量超高層鋼構造建物の目標重量として位置付ける。ただし、本目標重量は各層の吹抜けやEV・PSなどの開口を考慮していない点や構造部材が強度のみで決定すると仮定している点を考えると極端に軽量であり、目標重量の下限を示すものとして捉えるべきである。

建物の継続使用を考えると巨大地震に対しても弾性範囲に抑える設計(以降、弾性設計)を行い、塑性化後の変形性能は想定外に対する余力として確保することが望ましい<sup>9)</sup>。高強度鋼を用いて弾性変形範囲を拡げてダンパーによりエネルギー吸収する方法<sup>8)</sup>は弾性設計を実現する上で有力であるが、必要

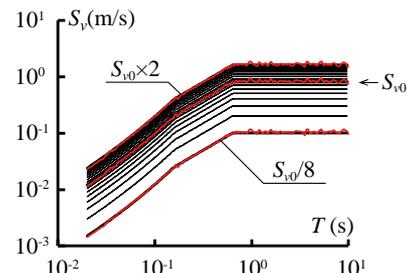


図3 目標応答スペクトル

ダンパー量が過大となる問題がある。超軽量建物は重量減によりダンパーによる減衰の効果が向上するので上記方法と組み合わせることは効果的である。

そこで本研究では超高層建物に対して超軽量化、高強度鋼およびダンパーの活用により弾性設計を実現する。

## 3. 時刻歴応答解析

### 3.1 模擬地震動

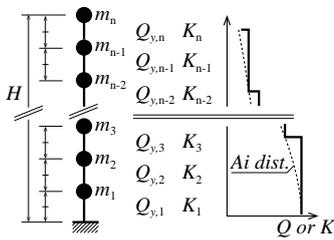
1940年～現在までに観測された強震記録から無作為に118波を抽出し、それらの観測波の位相特性を元に図3に示す目標応答スペクトルに適合する加速度波形を正弦波合成法により作成した。目標応答スペクトルは建築基準法告示第1461号で定められた解放工学的基盤における応答スペクトル(極めて稀)S<sub>0</sub>を基準とし、S<sub>0</sub>/8×k(k=1,2,3...16)の16レベルのスペクトルを用いて合計1,888波(118波×16レベル)の模擬地震動を作成した。

### 3.2 建物モデル

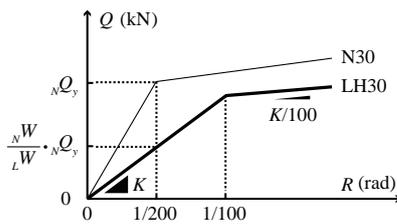
表1に検討する建物モデルの一覧、図4に解析モデル概要を示す。モデルは従来建物のN30と超軽量超高層建物のLH30の2種類である。N30,LH30モデルは層数n=30であり、階高4mで建物高さH=120mである。建物重量WはN30を6.8kN/m<sup>2</sup>、LH30を

表1 検討建物モデル

Model	Type	$n$	$H$ (m)	$W$ (kN/m <sup>2</sup> )	$m$ (ton)	$K_1$ (kN/m)	$Q_y$ / $Q_{ym}$	$T_e$ (s)
N30	従来	30	120	6.8	2496	$7.34 \times 10^6$	1.6	2.5
LH30	超軽量超高層			3.5	1285	$3.78 \times 10^6$	3.2	



(a) 多質点系モデル



(b) 復元力特性モデル

図4 解析モデル概要

3.5kN/m<sup>2</sup>とし、各階床面積を60m×60mと仮定することで質点の質量 $m$ をそれぞれ2496ton, 1101tonとした。各層の保有水平耐力 $NQ_y, LQ_y$ は、設計用標準ベースシア係数 $C_0$ を0.3<sup>10)</sup>として求めた必要保有水平耐力 $NQ_{ym}, LQ_{ym}$ に対し、N30では1.6倍、LH30では3.2倍とした。各層の初期剛性 $K$ は一次設計用荷重時の層間変形角 $R$ が1/200となるように定めた。一次設計用荷重はN30では $NQ_y$ 、LH30では $(LW/LW) \times NQ_y$ とする。ここで、下付き文字 $N, L$ はN30, LH30を区別する。また、上記で求めた $Q_y$ と $K$ は高さ方向に $A_i$ 分布に従うが、解析では図4(a)のように3層一節を考慮して、3層ごとに同一の値を用いた。表中の $T_e$ は一次固有周期を示しており、N30とLH30はそれぞれ同じ値である。各層の復元力特性はバイリニア型とし、二次勾配は初期剛性の1/100倍とした。

### 3.3 解析結果

解析条件として $P-\Delta$ 効果と付加減衰を考慮した。 $P-\Delta$ 効果は、質点モデルの付加水平力として考慮した<sup>11)</sup>。付加減衰はオイルダンパーを想定しており、等価リニア粘性要素として粘性減衰係数 $c_d=68,000\text{kN}/(\text{m}/\text{s})$ を各層に考慮した。

図5はEl Centro NSの位相特性をもとに $S_{i0}$ を目標応答スペクトルとした地震波による解析結果であり、各層における最大層間変形角 $R_{i,max}$ を示す。N30では $P-\Delta$ により下層部に变形が集中しており、最下層で1/30程度の変形が生じている。LH30では

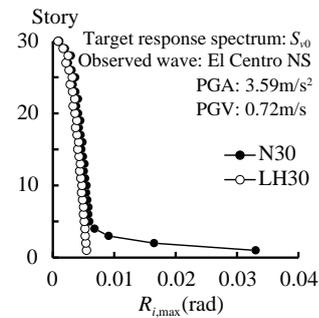
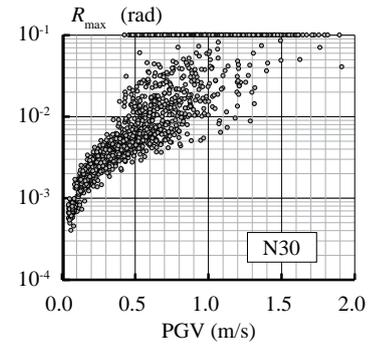
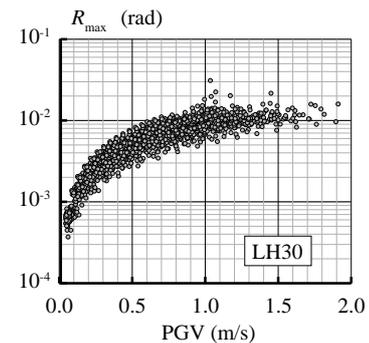


図5 各層の最大層間変形角



(a) N30 Model



(b) LH30 Model

図6  $R_{max}$ -PGV関係

1/100以下であり小さな変形に収まっている。

図6は全層における最大層間変形角 $R_{max}=\max(R_{i,max} | i=1\sim 30)$ とPGVの関係を示す。ただし、 $R_{max}$ が0.1以上の場合、 $R_{max}=0.1$ としてプロットしている。N30とLH30を比較するとLH30の軽量化したモデルの方が変形が抑えられている傾向が確認できる。特にLH30では $PGV \leq 1.0\text{m}/\text{s}$ の範囲で概ね1/100以下で弾性範囲に抑えられており、 $PGV > 1.0\text{m}/\text{s}$ の範囲で概ね1/50以下に抑えられていることがわかる。

## 4. CFRP製軽量床の開発

### 4.1 軽量床開発の課題

事務所建築の床に求められる性能は様々であるが、文献12)を参考に代表的なものを表2にまとめ

表2 オフィスの床に求められる性能

分類項目	重要度	性能項目	
構造	★	鉛直荷重支持能力(通常時)	
		HeavyDuty対応(通常時)	
		水平力の伝達(地震時)	
	構造性能の経年劣化	ひび割れ・亀裂 耐疲労性能 耐クリープ	
居住性 その他 基本性能	★	振動 歩行振動制御	
		音 遮音性(軽量床衝撃音) 遮音性(重量床衝撃音) 遮音性(空気伝播音) 音鳴り防止(熱伸び・風)	
	熱	耐熱(火災以外) 断熱 結露防止	
		火災	防火性能 耐火性能
耐久性	★	腐食性・腐朽性 へこみ・摩耗性等(硬度) 防水性 耐薬品	
		ディテール その他 設計全般	OAフロア設置方法 吊り物対応 カーテンウォール取合い 床版隙間処理
		施工	生産性 品質確保の容易さ その他
運用	★	保守 メンテナンスフリー	
		改修 修復作業等の容易さ 改修対応の可能性	
環境性能	★	環境指標 LCC LCCO2	
		資源有効利用 リユース・リサイクル	
コスト	★	ライフサイクルコスト	
工期	★	現場施工期間	

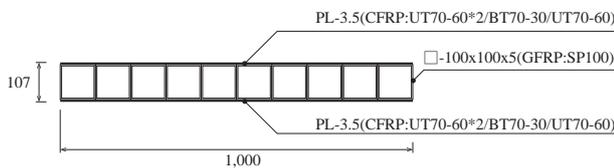


図7 CFRP製軽量床の形状・構成



写真1 CFRP製軽量床

た。床を軽量化する際には構造面ばかりでなく、非構造面の性能も損なわないように注意しなければならない。特に★印で示す項目は床性能のうち重要度の高い性能と考えられ、特に注意が必要である。

以下ではCFRP製軽量床の開発のうち、構成・製作のほか、「水平力の伝達」性能、「鉛直荷重支持能力」性能、「歩行振動制御」・「重量床衝撃音」性能の検証として実施した接合部実験、構造実験、振動実験の結果およびそれぞれの課題について説明する。

#### 4.2 CFRP製軽量床の構成・製作

図7にCFRP製軽量床の形状・構成を示す。本床板はサンドイッチ構造とし、表面材にCFRP板、芯材に角形GFRP管を使用した。GFRP管は幅方向に連続に並べることで床板を形成している。表面材と芯材は樹脂系接着剤によって一体化している。

写真1は幅1m、長さ3mをユニットとして製作した実大モックアップである。モックアップ製作時の手順は下記の通りである。

- (1) CFRP面の一部積層を成形(ハンドレイアップ)
- (2) 下側CFRPの上に残積層を含浸
- (3) 未硬化時に角形GFRP管の据付
- (4) 樹脂硬化まで養生
- (5) GFRP管上に残積層を含浸(ハンドレイアップ)
- (6) 硬化前にCFRPを接着・養生
- (7) 硬化したら完成

#### 4.3 構造実験

構造実験では基本的な力学的性能を把握するため、4点加力により等曲げ区間を考慮した鉛直加力試験を行った。図8は鉛直加力試験装置を示す。支持間隔Lは2.4mであり、支持間隔を3等分する2点で上部から鉛直方向に加力を行った。加力は単調増分載荷であり、床が鉛直支持能力を失うまで載荷した。

図9に試験によって得られた荷重-変位関係を示す。縦軸の荷重は等価等分布荷重 $w_{eq}$ であり、加

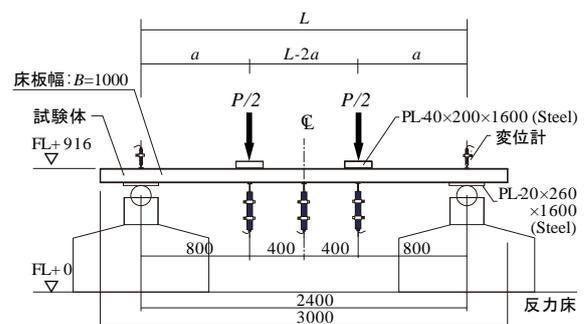


図8 鉛直加力試験装置

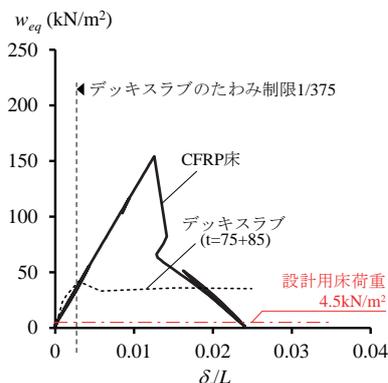


図9 荷重-変位関係

表3 設計用床荷重例

項目	重量(N/m <sup>2</sup> )
タイルカーペット	50
OAフロア	700
天井+ダクト	200
間仕切り	200
耐火被覆	200
その他	250
積載(事務所)	2,900
合計	4,500

力によって生じる最大曲げモーメントと等しくなる等分布荷重の値で、合計鉛直荷重  $P$  との関係は  $w_{eq}=4aP/BL^2$  である。横軸の変位は基準化たわみ量  $\delta_c/L$  であり、 $\delta$  は床中央の鉛直変位である。デッキスラブ (デッキ高さ 75mm, デッキ山コンクリート厚さ 85mm) と比較すると、剛性は同程度、耐力は 3 倍以上の値を示している。また表 3 に示す設計用床荷重例と比較しても十分な耐力を有していることが分かる。耐力は床中央下面の CFRP 板と GFRP 管の間におけるせん断剥離によって決定した。写真 2 に最終破壊状況を示す。

図 10 は FEM 解析による実験の再現性を示す。解析モデルは図 11 に示す直交異方性積層ソリッドを用いた 1/4 対称モデルである。解析に用いた CFRP, GFRP, Steel の各種材料特性一覧を表 4, 5 に示す。初期剛性を比較すると解析の初期剛性  $K_{FEM}$  は実験を精度よく再現できていることがわかる。また理想 4 点曲げ時の剛性評価式を以下に示す。評価式では、(1)CFRP および GFRP フランジが曲げ応力度、GFRP ウェブがせん断応力度を負担し、(2)CFRP の積層による剛性低下は無視している。このとき、 $\delta$  と  $P$  の関係は次式となる。

$$\delta = P \left( \frac{23L^3}{324D} + \frac{L}{3G_g w A_g} \right) \quad (1)$$

$$D = E_c I_c + E_g I_g \quad (2)$$

ここで、 $E_c$ : CFRP 材軸方向ヤング率、  
 $E_g$ : GFRP 材軸方向ヤング率、  
 $G_g$ : GFRP せん断弾性率 (板要素面内方向)、  
 $I_c$ : 床板断面二次モーメント (CFRP 部)、  
 $I_g$ : 床板断面二次モーメント (GFRP 部)、  
 $w A_g$ : 床板ウェブ断面積 (GFRP 部)  
 である。したがって、 $w_{eq}$  に対する剛性は次式で表すことができる。

$$K_{CAL} = \frac{w_{eq}}{\delta/L} = \frac{4aP/BL^2}{\delta/L} = 4 \left( \frac{a}{BL} \right) \cdot \left( \frac{P}{\delta} \right) \quad (3)$$

図に示す太破線は (3) 式から求めた値であり、実験および FEM 解析に対して若干低い値を示す。これは理想的な 4 点曲げと鋼板を介した本実験との架自重条件の違いによるものと考えられるが、 $K_{CAL}/K_{FEM}=0.936$  であり実用上十分な精度で安全側に評価可能である。



写真 2 最終破壊状況

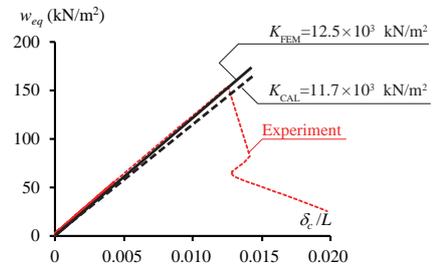


図 10 FEM 解析による実験の再現性

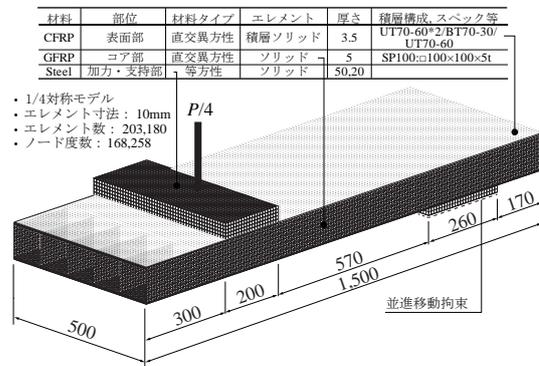


図 11 解析モデル

表 4 材料特性一覧 (比重, 弾性率, ポアソン比)

材料	名称	比重	弾性率 (GPa)			せん断弾性率 (GPa)			ポアソン比		
			$E_1$	$E_2$	$E_3$	$G_{12}$	$G_{23}$	$G_{13}$	$\nu_{12}$	$\nu_{23}$	$\nu_{13}$
CFRP	UT70-60 ( $V_f=35\%$ )	1.38	88.1	9.0	9.0	3.3	1.3	1.3	0.33	0.30	0.33
	BT70-30 ( $V_f=35\%$ )	1.38	48.9	48.9	9.0	3.3	1.3	1.3	0.06	0.33	0.33
GFRP	引抜き・SP100	1.96	32.2	13.0	13.0	3.3	1.3	1.3	0.28	0.30	0.28
Steel	SM490	7.85	209.0			79.0			0.30		

表 5 材料特性一覧 (厚さ, 材料強度)

材料	名称	厚さ (mm)	引張強度 (MPa)			圧縮強度 (MPa)			せん断強度 (MPa)		
			$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\tau_{12}$	$\tau_{23}$	$\tau_{13}$
CFRP	UT70-60 ( $V_f=35\%$ )	1.00	1,610	28	28	600	110	110	100	55	55
	BT70-30 ( $V_f=35\%$ )	0.50	720	720	28	270	50	50	100	55	55
GFRP	引抜き・SP100	5.00	285	-	-	110	-	-	0	-	-
Steel	SM490	-	325			325			187		

#### 4.4 接合部実験

軽量床の実現は躯体への伝達水平力が低減する為、床の接合方法の選択肢を拡げる。ここでは既存の接合方法であるボルト接合等に加えて、新たな乾式接合方法として面ファスナーを用いた接合の実現可能性を検討した。面ファスナーは、フック形状 (Hook) とループ形状 (Loop) にそれぞれ起毛された2種の面同士を押し当てるように重ねことで接着効果が現れるようになっており、繰り返しの着脱が可能である。日常的な衣類から航空機や自動車などで広く利用されている。

図12は面ファスナーを用いた接合例であり、床板同士の接合に鋼製板を介して面ファスナーによって水平力を伝達させる機構である。ボルトを用いているが鋼製板の浮き上がりの防止とフェールセーフ機能を目的としており、地震時には基本的に面ファスナーがせん断抵抗を担う。

面ファスナーは JIS L 3416 において対となるテープの組合せ別の強度区分があり、引張せん断強さが示されている。しかし、引張せん断強さは一方単調荷の値であり、地震動のような繰り返し荷重は想定されていない。ここでは面ファスナーの基礎的な力学的性能を把握する目的として、繰り返し加力実験により荷重変形関係の履歴性状を確認した。

表6は試験体一覧を示す。試験体は Type-A,B,C の3種類であり、それぞれはテープの組合せが異なる。表中の Tape1 はループ形状をした繊維の密度が異なる Loop 面を、Tape2 は形状が異なる Hook 面を

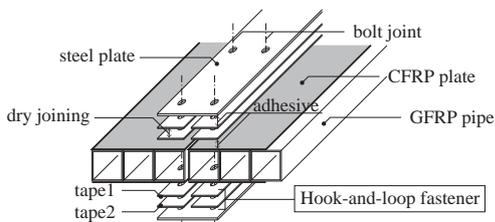


図12 面ファスナーを用いた接合例

表6 試験体一覧

Type	Tape1	Tape2	JIS	$\tau_n$ (N/mm <sup>2</sup> )
A	Normal	Hook	HL2 class	0.063
B	Tightly	Mushroom	MN2 class	0.169
C	Loosely	Fin	HN3 class	0.126

写真3 面ファスナー接合面形状

	Type		
	A	B	C
Tape1	Normal	Tightly	Loosely
Tape2	Hook	Mushroom	Fin

示す。JIS 規格に示す強度区分では各試験体は HL2 級, MN2 級, HN3 級であり、規定される引張せん断強さ  $\tau_n$  は 0.063, 0.169, 0.126 N/mm<sup>2</sup> である。写真3は各試験体の接合面形状を示している。

図13はせん断加力装置である。図に示す可動部をアクチュエータにより水平に移動させることにより、可動部と非可動部との接合面に設けた試験体にせん断力を与える機構となっている。載荷速度は 0.1 mm/sec 以下とした。

図14は試験結果であり、各試験体の繰り返し履歴性状を示す。いずれの試験体も全履歴における最大せん断応力度  $\tau_{max}$  は  $\tau_n$  を上回っており、十分な耐力を確保できていることがわかる。また  $\tau_{max}$  以降では

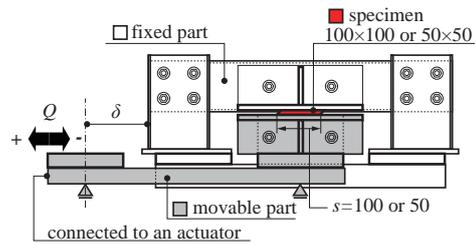
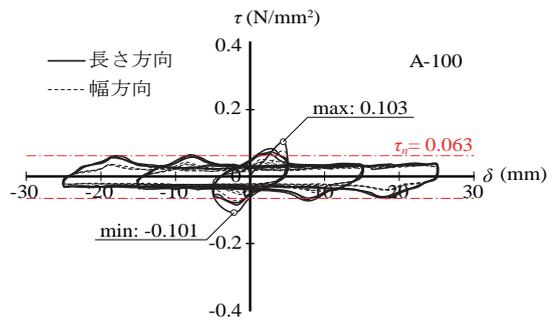
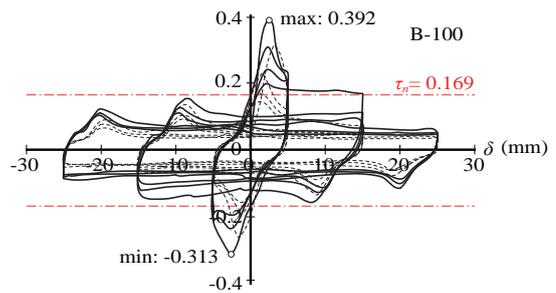


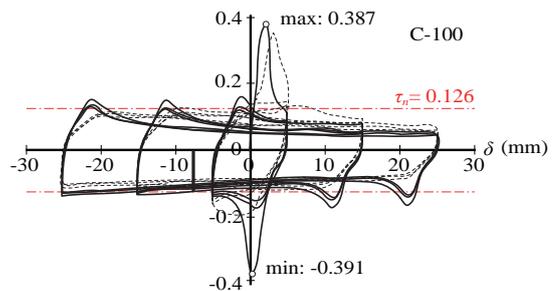
図13 せん断加力装置



(a) Type-A



(b) Type-B



(c) Type-C

図14 繰り返し履歴性状

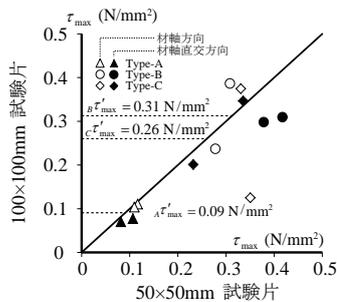


図 15 接合面積の影響

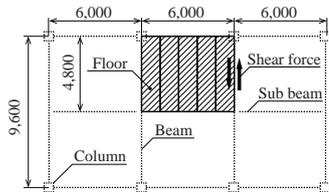


図 16 検討対象スラブ

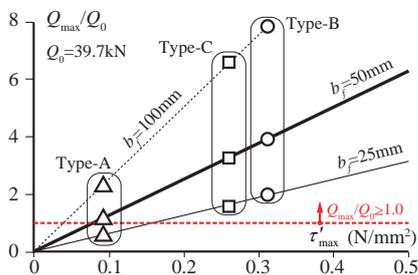


図 17 スラブ接合部のせん断耐力

急激に耐力低下するものの、Type-A,C では個々の繰返し履歴における最大せん断強度は概ね  $\tau_n$  程度が発揮されている。Type-C は Type-B に比べて最大せん断強度が低い繰返し履歴性状は安定している。

図 15 は接合面積の影響を示している。図中の  $j\tau'_{max}$  ( $j$ : Type-A,B or C) は面ファスナーの Type 別の最大せん断強度の平均値である。表 6 の 3 種の試験体に対して接合面積 100mm×100mm と 50mm×50mm の 2 ケースで試験を行い、 $j\tau'_{max}$  を比較している。若干ばらつきがあるものの概ね接合面積に関わらず同一の最大せん断強度を発揮できている。

ここで、面ファスナーを用いた CFRP のスラブ接合部が、床スラブに作用する地震時の水平力を躯体に伝達しうるかを検討する。

検討対象とする床スラブを図 16 に示す。検討対象床スラブは 4.8m×6m (床面積  $A=4.8\text{m}\times6\text{m}\approx 30\text{m}^2$ ) に CFRP スラブを敷き詰めて構成されるオフィス用途の 1 フロアとする。地震時慣性力が作用するスラブ質量  $W=W_d+W_f=270\text{kg/m}^2$  とする。ここで固定荷重  $W_d=90\text{kg/m}^2$ 、架構設計用の長期積載荷重  $W_f=180\text{kg/m}^2$  とした。また、面ファスナーの幅  $b_f$  は実製品を参考に  $b_f=25\text{mm}, 50\text{mm}, 100\text{mm}$  とし、接合形式は図 12 に示すスラブ上下面に面ファスナーを用いる 2 面せん断形式とする。接合部の必要せん断強度

$Q_0=0.5WA=39.7\text{kN}$  である。また、面ファスナーの平均最大せん断強度  $\tau'_{max}$  を用いて、接合部の最大せん断耐力  $Q_{max}$  を次式により算定した。

$$Q_{max}=\tau'_{max}\times b_f\times L\times n \quad (4)$$

ここで、 $L$  は面ファスナーの最小長さで  $L=5\text{m}$  とし、 $n$  は接合面数で  $n=2$  面とした。

図 17 は  $Q_{max}/Q_0$  と  $\tau'_{max}$  の関係を示す。 $Q_{max}/Q_0$  は接合部が有する最大せん断耐力を必要せん断耐力で除した値であり、 $Q_{max}/Q_0 \geq 1$  のとき、地震時に床スラブに生じる水平力を躯体に伝達させることができる。また、図中の  $\Delta$ ,  $\square$ ,  $\circ$  は表 6 に示す実験に用いた各面ファスナーの  $\tau'_{max}$  における結果であり、図中の点線、太実線、細実線は面ファスナーの幅  $b_f$  の違いを示す。

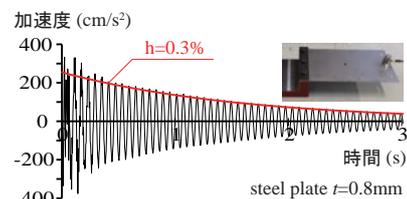
TypeA の  $b_f=25\text{mm}$  が NG であるのみで、残り全ては必要せん断耐力を満足する結果であることがわかる。特に、TypeB,C の  $b_f=50\text{mm}, 100\text{mm}$  における接合部では、必要せん断耐力の 3 倍以上の耐力が期待できる。

以上より、接合部に面ファスナーを用いる方法は、比較的現実性があると考えられる。ただし、純粋なせん断力を受ける理想的な状態を想定した場合に成立する結果であるため、今後は耐力に関わる他の要素を考慮して検討する必要がある。

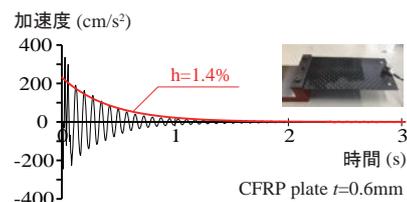
#### 4.5 振動実験

床の軽量化は鉛直方向の動的作用に対して床板の応答加速度を増大させるため、歩行などによる床振動の居住性や重量床衝撃音遮断性能の低下につながる。対策としては①床板への減衰付加、② TMD などの制振装置、による振動抑制が挙げられる。

上記の対策を検討する前提として、CFRP 板の減



(a) 鋼板



(b) CFRP 板

図 18 単板の減衰性能

衰性能を把握する目的で、まず CFRP 板と鋼板の単板による減衰性能の比較試験を行った。図 18 に一边を固定したキャンチレバー状の試験体 200 mm×100 mm の先端を衝撃加振した際に先端に生じる加速度波形を示す。図より、単板では CFRP 板は鋼板に比べ 5 倍程度の減衰性能を有していることが分かる。

次に、長辺の両端からそれぞれ 0.3m の 2 箇所をピン支持した 3m×1m の試験体について、図 19 に示す各種床板のアクセランスの比較試験を行った。インパルスハンマーを用いて床板中央を加振した際に近傍に生じる加速度波形を測定した。図 20 に、加振力と加速度の関係からアクセランスを算出した結果を示す。図には、加速度の自由減衰波形から求めた減衰定数も併せて記した。図より、試験体の質量、剛性によって固有振動数が異なり、軽量かつ高剛性である CFRP 板が最も高い固有振動数を示すことがわかる。一方、減衰定数については大きな差がみられなかった。

このことは、CFRP 板を床板として用いる場合、RC スラブ等の他の床と同等程度の減衰性能しか期待できず、軽量になった分だけ RC スラブよりも揺れやすくなることを意味している。今後、この結果を踏まえた上で、CFRP 板の構成の見直しや、上述の①および②の対策仕様の検討を進めたい。

## 5. まとめ

高強度鋼とダンパーから構成される超軽量建物を定義して、その耐震安全性を検討した。層間変形角を指標とした場合、従来建物に比べて高い耐震安全

### 【参考文献】

- 1) 総務省：平成 28 年版情報通信白書，2016.7
- 2) 内閣府都市再生本部：都市再生基本方針，2012.7
- 3) 嶺脇重雄，山本雅史，曾根孝行，中原学，露木 保男：高減衰オイルダンパーの実大性能実験，日本建築学会技術報告集，第 52 巻，pp.881，2016.10
- 4) 櫛部淳道，井上泰彦ほか：Fe-Mn-Si 系合金制振ダンパーの開発と超高層建物への適用 その 1~5，日本建築学

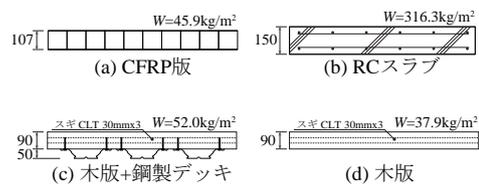


図 19 床振動実験用試験体



写真 4 床振動実験

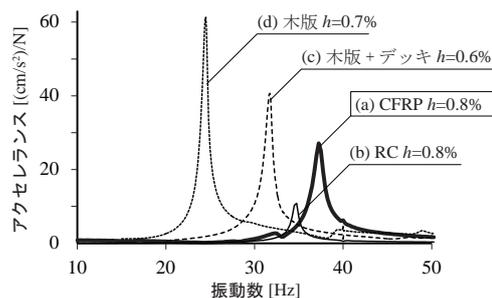


図 20 床振動性能

- 会大会学術講演梗概集 (九州)，pp.101-110, 2016.8
- 5) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，2004
- 6) 藤井秀行，稲田達夫：超高層建物への木床導入に関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道)，pp.361-362, 2013.8
- 7) 松本幸広，岡日出男：FRP/ALC サンドイッチ床版の曲げ特性，日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道)，pp.1517-1518, 2013.8
- 8) 日本鋼構造協会：高強度鋼の建築構造への適用，JSSC テクニカルレポート，No.97,2013
- 9) 中村豊，中井政義ほか：超高強度鋼を用いた無損傷設計法の提案，日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州)，pp.201-202, 2007.8
- 10) 馬谷原伴恵，北村春幸：長周期地震動に対する鋼構造高層建物の耐震安全性評価その 1，日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿)，pp.373-374,2005.9
- 11) 半貫敏夫，秋山宏ほか：地震下における骨組の変形応答に及ぼす P-Δ 効果の影響，日本建築学会構造系論文集，No.559,pp.79-83,2002
- 12) 日本鋼構造協会：鋼構造建築物の床構工法，JSSC テクニカルレポート，No.87,2009

## Study on Super-Lightweight High-Rise Steel Buildings using Lightweight Floor made of CFRP

Kenji YAMAZAKI, Tomohito OKAZAKI, Ryouta INOUE, Yasuaki SATO, Toru INABA and Takahiro MATSUI

Vertical expansion of buildings is important for concentration of intellectual production bases and shortening of traveling time, and the vertical expansion can make production efficiency high. On the other hand, the vertical expansion raises the possibility of causing the severe damage concerning people and objects. The purpose of this study is to clarify the condition of making it realized to significantly reduce the force of seismic load to which high-rise steel buildings are subjected. This paper indicates the validity of super-lightweight buildings with damping system using high strength steel. Moreover, lightweight floor made of CFRP in order to realizing the new buildings is proposed in this paper.