

# サステナブルビル構造システムに関する研究 - 構造設計法の提案 -

岩田研究室 200770136 島 有希子

## 1. 序

建築鋼構造分野から地球環境に配慮した「サステナブルビル構造システム(図1)」が提案された<sup>1)</sup>。この構造システムは、構造全体の長寿命化を第一の目標とし、やむなく建物を解体しなければならない場合、部材レベルのリユースを可能とする。また、リユース材を主架構の部材である柱や梁に使用することも想定している。

本システムは、主架構と制振部材を分離する損傷制御構造の考え方を採用している。制振部材には方杖状に配置した座屈拘束ブレース(以下、BRブレース)を用いる。柱梁接合部は、接合部ユニットを介して鋼棒に初期張力を導入し、締め付ける(図2)。この鋼棒を用いた接合部をサステナブル接合部(以下、SB接合部)とする。SB接合部では、生じる曲げモーメントの大きさに応じて接合部の剛性が段階的に変化する。そのため、使用時に要求される剛性と大地震時に要求される変形性能を両立している。接合部の剛性が低下するため、BRブレースによる効率の良いエネルギー吸収が可能となる。

また、本システムは、高度に品質管理された汎用的な部材、部品を工場で製作し、現場でそれを組み立てる。そのため、建築物そのものの品質を明確に提示することが可能となる、システム構造体の特徴を併せ持つ。

## 2. 研究目的

既往の研究で行われた、SB接合部の実大実験より、基本的な力学的特性が明らかになり、それを表現できる数値解析モデルが構築された。しかし、SB接合部を含め、システム全体としての設計法が確立していない。

本研究では、既往の実験結果から得られた知見<sup>2)3)4)</sup>を基に、SB接合部やBRブレースの設計方法を確立し、サステナブルビル構造システムの構造設計法を提案する。次に、提案した設計法に沿って試設計を行い、目標クライテリアを満たした設計を示す。

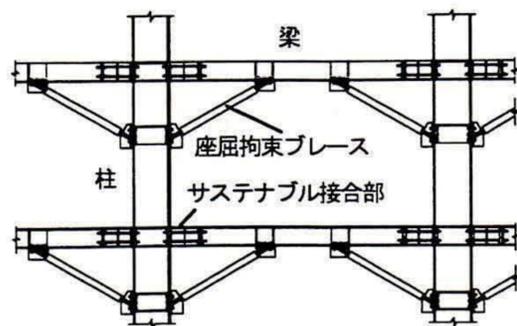


図1 構造システム

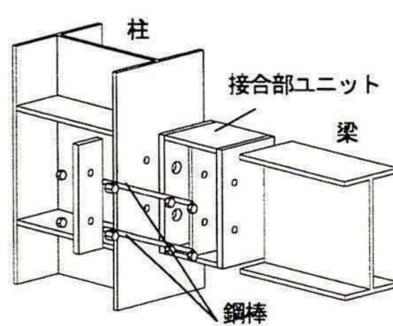


図2 サステナブル接合部

## 3. 設計法

### 3.1 設計フローの提案

図3にサステナブルビル構造システムの設計フローを示す。本システムの設計法は、損傷制御構造の設計概念を基本的な枠組みとする。一般的な設計フローに、SB接合部、BRブレースの設計と時刻歴応答解析が加わる。

#### a) 長期荷重

長期荷重は、主架構のみで負担する。SB接合部を設計するため、柱梁接合部は剛接合の状態、長期荷重時に柱梁接合部にかかる曲げモーメントを算出する。

#### b) 一次設計

BRブレースを配置した後、 $C_0=0.2$ で層間変形角 $1/200$ 以内を満足できるように部材の断面調整を行う。床は合成床として扱うので、梁の剛性に床の分を考慮する<sup>3)</sup>。

#### c) 二次設計

鋼棒の初期張力が解消され、SB接合部が半剛状態となり、BRブレースによるエネルギー吸収が行われる。梁の剛性は床が梁から剥離するとし、梁のみの剛性とする<sup>3)</sup>。

#### d) 時刻歴応答解析

地震波を入力し、構造全体の層間変形角、主架構の柱梁部材の損傷確認、SB接合部の状態、BRブレースのエネルギー吸収量などのクライテリアの確認をする。

### 3.2 想定モデル

外周部にSB接合部を用いたチューブ構造とする。BRブレースは外周部のみ方杖状に配置する。隅角部の柱は角形鋼管とする。床構造は解体が容易な構法<sup>3)</sup>とする。

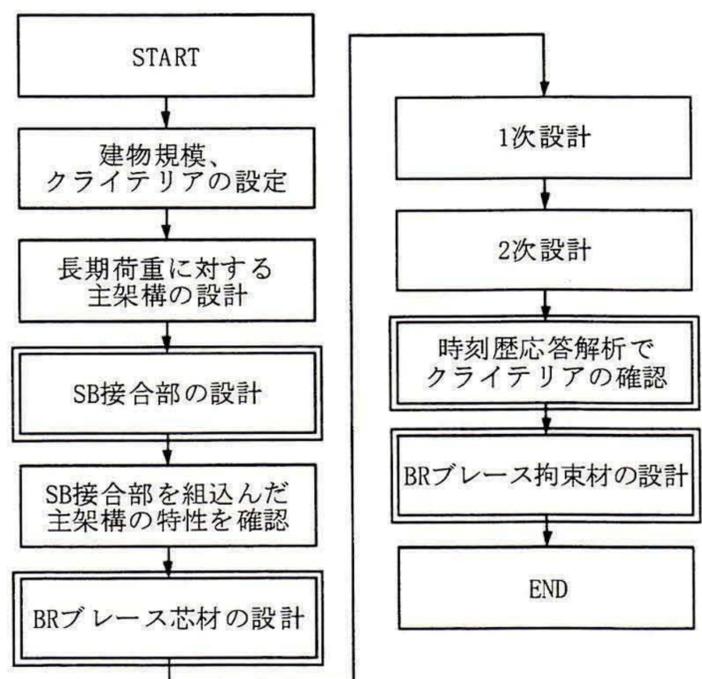


図3 設計フロー

## 4. 解析方法

### 4.1 SB接合部の力学モデル

既往の研究<sup>4)</sup>で構築された、SB接合部の数値解析モデルを用いる。鋼棒は平行部とネジ部を軸バネでモデル化し、直列につないでいる。

### 4.2 SB接合部の寸法設定

図4に接合部ユニットの詳細を示す。鋼棒の平行部の長さ $d_f$ と鋼棒のネジ部の長さは図4に示す通りとする。鋼棒の配置位置は幅(B)、せい(D)ともに梁断面を4分割し、端部から1/4の位置とする(図5)。

### 4.3 BRブレースのモデル化

BRブレース全長を3分割し中央のエネルギー吸収部と両端のガセット部に分けてモデル化する。ガセット部はリブによる補強を想定した矩形の弾性部材とする。

## 5. SB接合部の設計

### 5.1 接合部ユニット

エンドプレート、アンカープレートの板厚は、鋼棒の初期張力によってかかる応力に対して、長期許容応力度以内となるように決定する。本研究では、鋼棒の長さを既往の研究と同様に400mmとする。素材はS45Cとし、初期張力は鋼棒の降伏耐力の1/3とする。

### 5.2 鋼棒径の最小限度の設計方法

接合部の離間モーメントが長期荷重による梁端モーメントを上回るように鋼棒径を設計する。設計した鋼棒径でせん断力に対する検討も行う。

### 5.3 SB接合部離間モーメント

SB接合部の実大実験<sup>2)</sup>で用いている算定式とする。

$$M_s = 2n \cdot T_0 \cdot d_c \quad (1)$$

$n$ : 鋼棒の行数(2),  $T_0$ : 初期導入張力,  $d_c$ : 梁圧縮フランジ縁端から梁中心距離

### 5.4 鋼棒径の最大限度の設計方法

柱フランジ部の降伏曲げ耐力を算出し、鋼棒の降伏モーメントがその値以下になる鋼棒径で設計する。

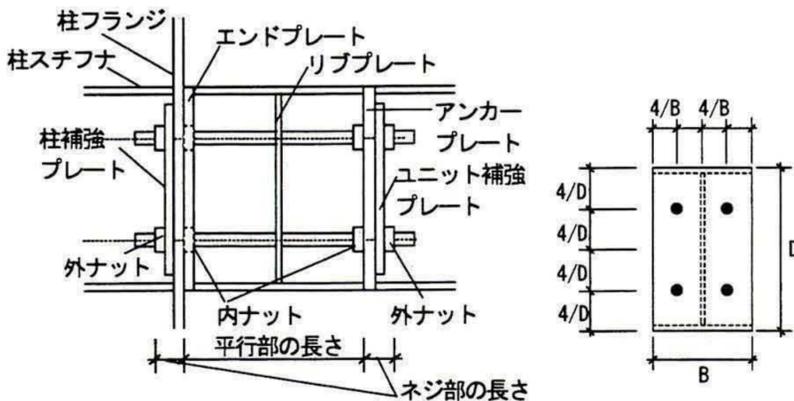


図4 SB接合部詳細

図5 鋼棒配置位置

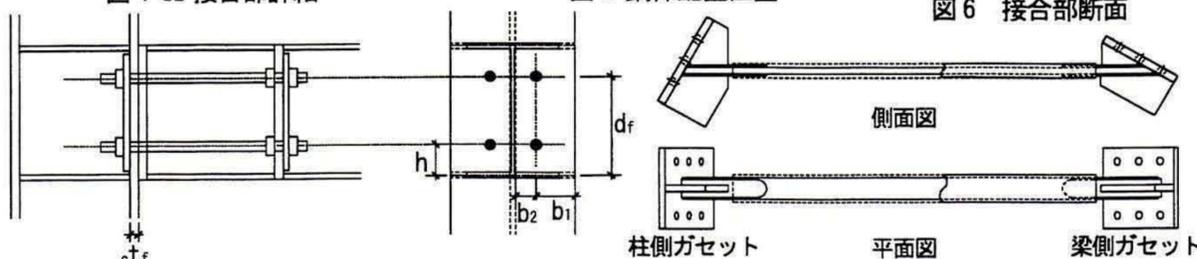


図7 SB接合部の各寸法

図8 BRブレースの形状

図9 BRブレース芯材の断面設計

## 5.5 柱フランジ部の降伏曲げ耐力

柱フランジ部の降伏曲げ耐力はスプリットティ形式柱梁接合部の耐力を参考に算出する。SB接合部は降伏場の数がスプリットティの半分になる(図6)。よって、降伏耐力 $P_y$ の係数を半分の4として計算する。下記の式を用いて柱フランジと補強プレートの降伏曲げ耐力 $M_y$ を計算する。算定に必要な各寸法を図7に示す。

$$M_y = P_y \cdot d_f \quad (2)$$

$$P_y = 4 \cdot M_0 \left\{ \frac{b_1}{h} + \frac{b_1}{h_m} + \pi + \frac{2}{\pi} \left( \frac{h}{b_2} - 1 \right)^2 + \frac{2}{\pi} \left( \frac{h_m}{b_2} - 1 \right)^2 \right\} \quad (3)$$

$$M_0 = \frac{c \cdot t_f^2}{4} \cdot F_y \quad (4)$$

$$h_m = \frac{b_2}{2} + \sqrt{\left( \frac{b_2}{2} \right)^2 + \frac{\pi \cdot b_1 \cdot b_2}{4}} \quad (5)$$

$P_y$ : 柱フランジ部の面外降伏引張耐力,  $F_y$ : 柱フランジの降伏強さ

$d_f$ : 梁フランジ-引張力が作用する鋼棒間距離,

$b_1$ : 接合鋼棒-柱フランジ縁端距離,  $b_2$ : 接合鋼棒-柱ウェブ間距離,

$h$ : 接合鋼棒-梁フランジ板厚中心間距離,  $t_f$ : 柱フランジ板厚,

### 5.6 鋼棒の降伏モーメント

SB接合部の実大実験<sup>2)</sup>で用いている算定式とする。

$$M_y = \sum_{i=1}^n 2F_y \cdot \frac{d_i^2}{d_1} \quad (6)$$

$F_y$ : 鋼棒の降伏強度,  $d_i$ : 梁圧縮フランジ縁端から*i*行目の鋼棒までの距離,

$d_1$ : 梁圧縮フランジ縁端から最初に降伏する鋼棒までの距離

## 6. BRブレースの設計

BRブレースとして図8のような形状の鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレース<sup>5)</sup>を使用する。

### 6.1 芯材断面の設計

図9に示すように等価線形化法に基づいて設計する。計算の条件は、BRブレースによる剛性付加分を考慮し、BRブレース付加による効果は直线性を有する減衰の付加とする。また、主架構の一次モードは直線と仮定する。

### 6.2 拘束材の設計

BRブレースの拘束材の設計は、文献<sup>5)</sup>に従って行う。BRブレースの累積塑性歪エネルギー率 $\omega$ は、設計した芯材断面のBRブレースを組込んだ解析モデルで地震応答解析を行い算出する。



## 7. 試設計

提案した設計フローに基づき、サステナブルビル構造システムの試設計を行う。設計した建物モデルで地震応答解析を行い、本解析モデルの応答性状を確認する。

### 7.1 立体解析モデル

解析モデルは、階数の異なる2つのモデルとする。各構面とも5スパンで同一平面の5層と10層の鉄骨造とする。柱脚は露出形式柱脚を想定し、回転バネでモデル化する。

図10に10層モデルの平面図と立面図を示す。表1に両モデルの主架構の部材断面表を示す。本解析においては、 $D_s=0.3$ としたときの保有水平耐力を満足する部材断面とする。想定荷重は、固定荷重 $5.1\text{kN/m}^2$ 、積載荷重 $1.8\text{kN/m}^2$ とし、全ての層において、 $6.9\text{kN/m}^2$ とする。

### 7.2 解析モデルの設計条件

表2に主架構、SB接合部、BRブレースそれぞれの目標ク

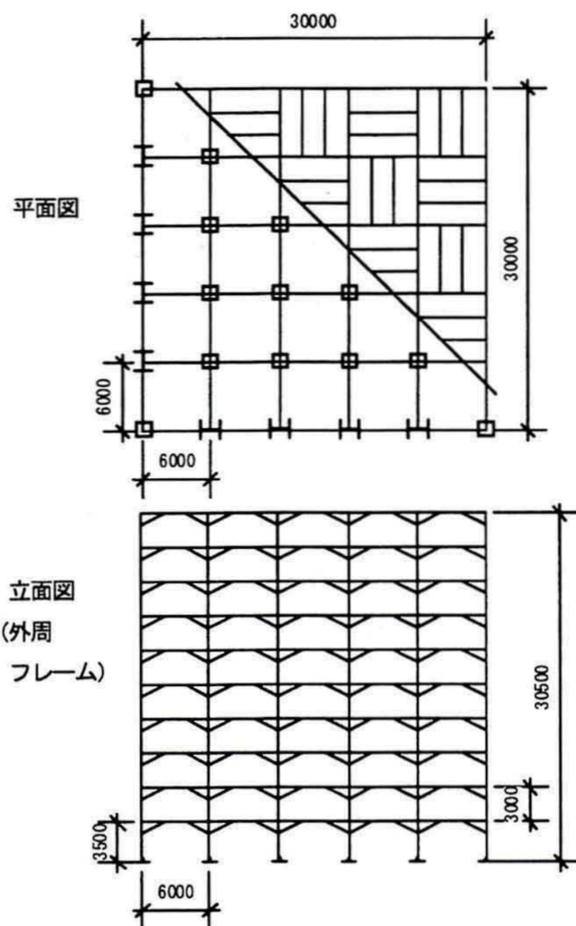


図10 解析モデル

表3 鋼棒径の最小限度算定  
a) 5層モデル

	梁端モーメント (kN.m)	離間モーメント(kN.m)			
		φ21	φ29	φ32	φ36
R	65.3	54	103	125	159
10F	64.0	54	103	125	159
9F	67.5	68	129	157	199
8F	67.3	68	129	157	199
7F	67.8	81	155	189	239
6F	67.2	81	155	189	239
5F	68.1	81	155	189	239
4F	67.6	97	185	225	285
3F	66.0	97	185	225	285
2F	64.7	97	185	225	285

b) 10層モデル

	梁端モーメント (kN.m)	離間モーメント(kN.m)			
		φ21	φ29	φ32	φ36
R	68.8	48	92	113	143
5F	71.1	69	132	161	204
4F	71.6	83	159	193	244
3F	71.0	83	159	193	244
2F	67.2	83	159	193	244

ライテリアを示す。 $\omega_{max}$ は、拘束力の指標 $P_E/P_y$  ( $P_E$ : 拘束材のオイラー座屈荷重、 $P_y$ : 芯材の降伏荷重)を用いた性能評価式 $\omega=150 P_E/P_y$ の関係より算出する<sup>5)</sup>。

静的増分解析における外力分布は、 $A_i$ 分布に従うものとする。減衰は瞬間剛性比例型とし、1次固有周期に対する減衰定数は2%とする。

時刻歴応答解析に用いる入力地震動は、観測地震動は神戸海洋気象台 NS、El centro NS、八戸 EW、Taft EW、模擬地震動は、日本建築センター作成によるBCJを採用する。観測地震動は、地動最大速度 $25\text{kine}$ と $50\text{kine}$ に基準化し、それぞれレベル1、レベル2の設定とする。

### 7.3 鋼棒径の最小限度の設計

表3に各層外周フレームの梁端モーメントの最大応力と、SB接合部の鋼棒径 $\phi 21$ 、 $\phi 29$ 、 $\phi 32$ 、 $\phi 36$ のそれぞれの離間モーメントを示す。初期張力は鋼棒の降伏耐力の $1/3$ とする。表3より、各階ごとに比較すると、長期荷重時にかかる最大梁端曲げモーメントを負担可能な鋼棒径は、両モデルとも $\phi 29$ 以上となる。よって、鋼棒径の最小限は $\phi 29$ とする。

表1 主架構部材断面表  
a) 5層モデル

	C1 (BCP235)	C2 (SS400)	G1 (SS400)	G2 (SS400)
最上階	□-300×300×9×18	H-350×350×12×19	H-350×175×7×11	H-350×175×7×11
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
最下階	□-450×450×9×18	H-458×417×30×50	H-600×200×11×17	H-396×199×7×11

b) 10層モデル

	C1 (BCP235)	C2 (SS400)	G1 (SS400)	G2 (SS400)
最上階	□-300×300×19×38	H-400×400×13×21	H-390×300×10×16	H-294×200×8×12
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
最下階	□-450×450×22×55	H-498×432×45×70	H-700×300×13×24	H-390×300×10×16

C1: 隅柱、C2: 外周の柱、G1: 外周の梁、G2: 外周部の内側の梁

表2 耐震設計クライテリア

	1次設計	2次設計	地震波(レベル1)	地震波(レベル2)
外力	$C_o=0.2$ の水平力	$C_o=1.0$ の水平力	地動速度 $25\text{kine}$	地動速度 $50\text{kine}$
許容層間変形角	1/200	1/100	1/200	1/100
主架構の損傷	無損傷	無損傷	無損傷	一部降伏
鋼棒 (SB接合部)	第一段階 (剛接合)	離間、鋼棒の降伏 (半剛状態)	第一段階 (剛接合)	鋼棒の降伏 (半剛状態)
BRブレース	弾性域	塑性域	降伏 ( $\omega < 1/2\omega_{max}$ )	降伏 ( $\omega < 3/4\omega_{max}$ )

表4 鋼棒径の最大限度算定  
a) 5層モデル

	柱フランジ曲げ耐力 (kN.m)	接合鋼棒降伏モーメント(kN.m)			
		φ21	φ29	φ32	φ36
R	331	135	258	314	397
10F	331	135	258	314	397
9F	830	169	322	392	497
8F	830	169	322	392	497
7F	2002	204	388	473	599
6F	2002	204	388	473	599
5F	2002	204	388	473	599
4F	5639	242	462	563	713
3F	5639	242	462	563	713
2F	5639	242	462	563	713

b) 10層モデル

	柱フランジ曲げ耐力 (kN.m)	接合鋼棒降伏モーメント(kN.m)			
		φ21	φ29	φ32	φ36
R	343	121	231	281	356
5F	886	173	330	402	509
4F	1745	208	396	483	611
3F	3879	208	396	483	611
2F	3879	208	396	483	611

### 7.4 鋼棒径の最大限度の設計

表4に仮定断面で算定した柱フランジ部の降伏曲げ耐力と、鋼棒の降伏モーメントを示す。表4より、両モデルともφ36では10階、R階において鋼棒の降伏モーメントが柱フランジ部降伏モーメントを超えてしまうため、鋼棒の最大径はφ32とする。

以上の結果より、鋼棒径の最小限はφ29、最大限はφ32なので、せん断力に対する検討も考慮した上で、本解析モデルでは常時荷重時の安全性を考慮し、φ32とする。

表5 BR ブレース芯材断面表

a) 5層モデル		b) 10層モデル	
BR1~BR3	PL - 16 × 150	BR1~BR3	PL - 22 × 200
BR4	PL - 12 × 100	BR4~BR6	PL - 22 × 200
BR5	PL - 9 × 90	BR7~BR8	PL - 22 × 180
		BR9~BR10	PL - 16 × 150

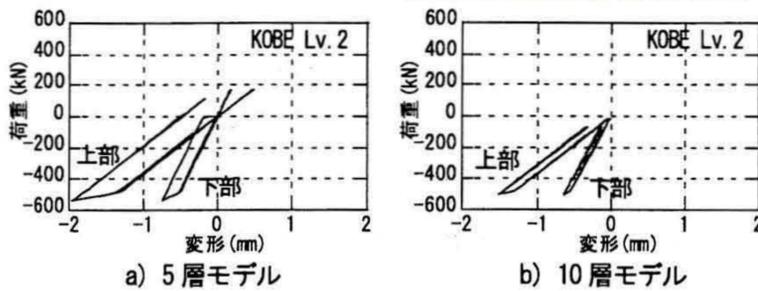


図11 鋼棒の変形 - 荷重関係

表6 応答層間変形角一覧

階	a) 5層モデル			
	El Centro	八戸	Taft	BCJ
FL5	1/76	1/164	1/112	1/115
FL4	1/74	1/172	1/102	1/102
FL3	1/71	1/172	1/107	1/104
FL2	1/74	1/130	1/113	1/100
FL1	1/105	1/144	1/145	1/121

階	b) 10層モデル			
	El Centro	八戸	Taft	BCJ
FL10	1/195	1/277	1/197	1/210
FL9	1/125	1/188	1/139	1/141
FL8	1/136	1/188	1/115	1/146
FL7	1/128	1/180	1/86	1/132
FL6	1/132	1/168	1/114	1/151
FL5	1/117	1/132	1/125	1/133
FL4	1/117	1/118	1/133	1/113
FL3	1/140	1/130	1/136	1/102
FL2	1/141	1/117	1/120	1/90
FL1	1/156	1/123	1/126	1/99

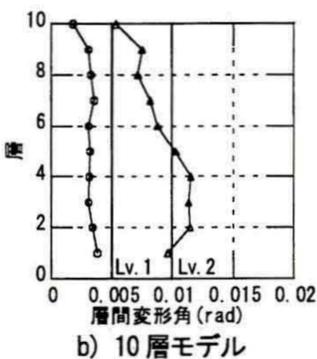
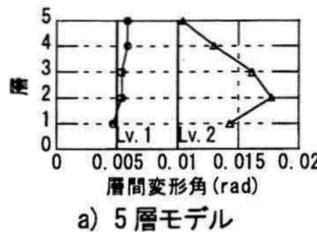


図12 応答層間変形角

表7 BR ブレース累積塑性歪エネルギー率一覧

階	a) 5層モデル			
	El Centro	八戸	Taft	BCJ
FL5	134	12	64	146
FL4	186	12	80	176
FL3	118	5	40	99
FL2	172	17	88	173
FL1	92	9	49	103

階	b) 10層モデル			
	El Centro	八戸	Taft	BCJ
FL10	0	0	0	0
FL9	11	1	7	10
FL8	7	1	6	4
FL7	20	2	23	16
FL6	21	4	17	23
FL5	31	11	17	42
FL4	41	26	18	64
FL3	45	42	29	96
FL2	53	53	40	124
FL1	59	59	46	135

図13 BR ブレース累積塑性歪エネルギー率

### 7.5 BRブレース芯材の設計

等価線形化法の計算結果より、両モデルとも主架構とBRブレースの剛性比は5とする。表5に設計した各階のBRブレースのエネルギー吸収部の断面を示す。

### 7.6 一次・二次設計

主架構にBRブレースを配置し、一次設計と二次設計を行って部材の断面調整を行う。また、5層モデルの一次固有周期は0.686秒、10層モデルは1.138秒である。

### 7.7 応答解析結果

図11に神戸波レベル2の3層目中央部における、鋼棒の軸変形荷重関係を示す。鋼棒の塑性率は最大で2程度であり、破断には至らない。下層では鋼棒の初期張力が抜けて塑性化し、接合部は半剛接合の状態となっている。主架構の損傷程度を見ると、両モデルとも柱梁部材は弾性範囲内であり、BRブレースでエネルギーを吸収している。鋼棒は下層で塑性化しているものが見られた。

図12に神戸波におけるレベル1とレベル2、表6に各地震波におけるレベル2の応答層間変形角を示す。両モデル共に目標とした層間変形角を超える地震波もあるが、概ね満足している。5層モデルでは、固有周期が短いことから特定の地震波で応答変位が大きく出た。

以上より、5層モデル10層モデルにおいて、本システムで設計クライテリアを満足した設計ができたと言える。

### 7.8 BRブレース拘束材の設計

図13に神戸波におけるレベル2、表7に各地震波におけるレベル2のBRブレースの累積塑性歪エネルギー率 $\omega$ を示す。 $\omega$ の値は各層の最大値である。全ての地震波の中での最大値は5層モデルでは186、10層モデルでは135であり、拘束力の指標 $P_E/P_y$ を5層では1.65以上、10層では1.2以上とすればよい。

### 8. 結論

- 1) 既往の実験結果の知見を統合し、サステナブルビル構造システムの設計法を提案した。
- 2) 提案した設計法に沿って5層5スパンと10層5スパンの建物を想定した立体モデルで試設計を行い、設計法の有効性を確認した。

#### 【参考文献】

- 1) 會澤貴浩、山田哲、岩田衛：サステナブルビル構造システムの提案とその基本特性、日本建築学会環境系論文集、第581号、2004.7
- 2) 岡田健、山本重治、山田哲、岩田衛：サステナブルビル構造システムの柱梁接合部に関する実験、日本建築学会構造系論文集、第591号、2005.5
- 3) 島有希子、平田倫央、加藤貴志、前田親範、岩田衛：サステナブルビル構造システムの部分架構実験、日本建築学会技術報告集、2008.6
- 4) 岩田衛、平田倫央、山本重治、長尾真奈：サステナブルビル構造システムの柱梁接合部の力学モデルとその検証、日本建築学会構造系論文集、第606号、2006.8
- 5) 村瀬亮、村井正敏、岩田衛：鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースの実験的研究 - その4 -、日本建築学会構造系論文集、第620号、2007.10