

## クリアランス調整工法を用いた拘束指標の小さい 座屈拘束ブレースに関する実験的研究

摺木 悠人 岡本 勇紀 吉田 文久  
Yuto Suruki, Yuki Okamoto, Fumihisa Yoshida

### 概 要

著者らは、芯材を平鋼（材端部は十字形）、拘束材をフランジが不等辺の溝形断面にコンクリートを充填した鋼コンクリート板とする座屈拘束ブレースを実用化している。この座屈拘束ブレースは、クリアランス調整材（ブチルゴム）を芯材弱軸側の全面に貼付している。これに対し、クリアランス調整材を芯材弱軸側に部分的に貼付することで、クリアランス管理が容易となるクリアランス調整工法に関する知見が得られている。本研究では、上述の工法を用い、拘束指標  $R$  ( $R=P_E/P_y$ ,  $P_E$ : 拘束材のオイラー座屈荷重,  $P_y$ : 芯材の降伏荷重) が 1.3~1.6 程度、コンクリート強度が 22~28N/mm<sup>2</sup> 程度の座屈拘束ブレースの試験体を作製し、繰返し載荷実験を実施した。実験の結果、全試験体で荷重変形関係が紡錘形の安定した履歴を描き、全試験体で軸ひずみ 2.0% を超える変形性能を呈した。また既往の研究で得られている局部破壊耐力式によって評価を行った結果、ほとんどの試験体において、耐力式で算出される余裕度から推定される破壊形式となった。

### Experimental Study on Buckling-Restrained Braces with Small Restraint Index Using Clearance Adjustment Method

### Abstract

The authors have put into practical use a buckling-restrained brace in which the core plate is flat steel (cross-shaped at the ends), and the restraining part is a steel-concrete plank with an unequal channel cross-section filled with concrete. This buckling-restrained brace has a clearance adjustment material (butyl rubber) attached to the entire surface of the weak axis side of the core plate. At the same time, knowledge has been gained about a clearance adjustment method that makes clearance management easier by partially attaching a clearance adjustment material. In this study, using this method, we fabricated test specimens of buckling-restrained braces with a restraint index  $R$  ( $R=P_E/P_y$ ,  $P_E$ : Euler buckling load of the restraining part,  $P_y$ : yield load of the core plate) of approximately 1.3 to 1.6 and concrete strength of roughly 22 to 28 N/mm<sup>2</sup>, and performed repeated loading experiments. The experimental results showed that the load-deformation relationship of all test specimens showed a stable spindle-shaped history curve, and all specimens showed an energy absorption capacity of more than 2.0% axial strain. In addition, an evaluation was performed using the design formula obtained from previous research, and it was found that the expected fracture mode occurred in most of the test specimens.

キーワード：座屈拘束ブレース，拘束材，拘束指標，鋼コンクリート板，クリアランス，充填材

# 1. はじめに

著者らは、芯材を平鋼（材端部は十字形）、拘束材をフランジが不等辺の溝形断面にコンクリートを充填した鋼コンクリート板とする座屈拘束ブレースを実用化している（図1）。この座屈拘束ブレースは、クリアランス調整材（ブチルゴム）を芯材弱軸側の全面に貼付している。これに対し、クリアランス調整材を芯材弱軸側に部分的に貼付することで、クリアランス管理が容易となるクリアランス調整工法に関する知見が得られている<sup>2)</sup>。なお、ここで述べるクリアランスとは、芯材弱軸面に設ける芯材と拘束材の隙間を指す。

上述の工法を用い、拘束指標  $R$  ( $R=P_E/P_y$ ,  $P_E$ : 拘束材のオイラー座屈荷重,  $P_y$ : 芯材の降伏荷重) が 1.3~1.6 程度、コンクリート強度が 22~28N/mm<sup>2</sup> 程度の座屈拘束ブレースの試験体を作製し、繰返し載荷実験を実施した。

# 2. 実験概要

## 2.1 試験体概要

試験体図を図2、試験体一覧を表1に示す。試験体図は、全8体のうち代表のものを示す。試験体一覧における芯材板厚  $t_c$ 、芯材塑性化部幅  $b_c$ 、及び溝形断面板厚  $t_f$  は実測値とした。

## 2.2 実験変数

### (1) クリアランス調整材の貼付位置 (No. 1, 2)

基本試験体の No.1 は、文献2)に倣ってクリアランス調整材を貼付した。これに対し、No.2 は芯材幅方向の中央部に材軸方向に連続して貼付した。

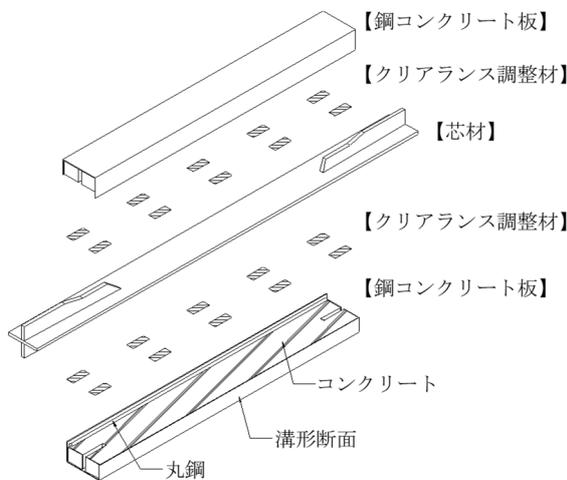


図1 鋼コンクリート板を用いた座屈拘束ブレースの構成

なお、コンクリートと芯材弱軸面との接触面積に対するクリアランス調整材の貼付面積の比は、文献2)とほぼ同等になるようにした。

### (2) コンクリート強度 (No. 1, 3)

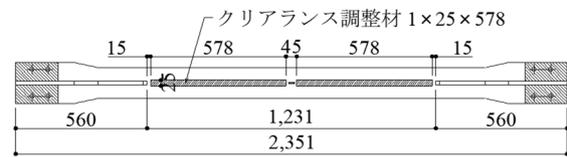
No.3 は No.1 に比べて低強度のコンクリートを用いた試験体である。コンクリートは、試験体の寸法制約により最大粗骨材粒径を 13mm とし、石灰石微粉末を加えることで強度上昇を抑制しつつフレッシュ性状を担保することを狙った特殊な配合とした。その結果、36N/mm<sup>2</sup>を狙った試験体の実強度は 25.2~28.2N/mm<sup>2</sup> (No.1 は 27.6N/mm<sup>2</sup>)、30N/mm<sup>2</sup>を狙った No.3 の実強度は 22.3N/mm<sup>2</sup> となった。

### (3) 平均クリアランス比 (No. 1, 4)

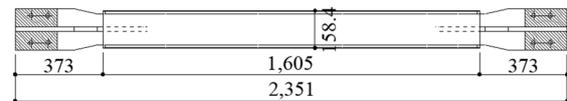
文献3), 4)に倣い、平均クリアランス比（芯材弱軸側に設ける隙間を芯材板厚で除した値）0.15 を狙った No.1 に対し、クリアランス調整材を厚くすることで、平均クリアランス比 0.25 を狙った No.4 を設定した。しかし、試験体における合体溶接時の



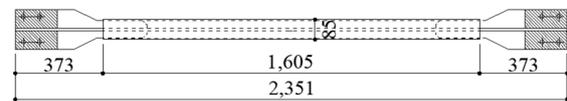
(a) 芯材 (No. 1, 3, 4, 5, 8)



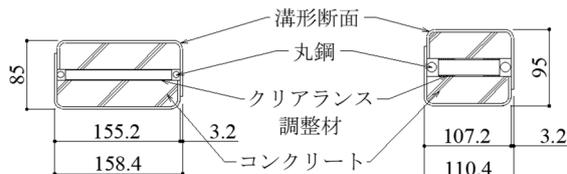
(b) 芯材 (No. 2)



(c) 完成図 (弱軸側, No. 1, 2, 3, 4, 5, 8)



(d) 完成図 (強軸側, No. 1, 2, 3, 4, 5, 8)



(e) 断面図 (No. 1, 3, 4, 8) (f) 断面図 (No. 7)

図2 試験体図 (単位: mm)

表 1 試験体一覧

試験体	実験変数	芯材					クリアランス調整材			屈曲拘束材		座屈拘束ブレース				
		鋼種	板厚 $t_c$ mm	幅 $b_c$ mm	幅厚比 $b_c/t_c$	降伏 応力度 $\sigma_y$ N/mm <sup>2</sup>	降伏 荷重 $P_y$ kN	貼り方	平均 クリアランス 比 (計画)	平均 クリアランス 比 (実測)	コンクリート 強度 $\sigma_c$ N/mm <sup>2</sup>	溝形 断面 板厚 $t_r$ mm	断面 幅 $B$ mm	断面 せい $H$ mm	オイラー 座屈 荷重 $P_E$ kN	R 指標 $P_E/P_y$
No.1	基本試験体	SN490B	12.0	133	11.1	392	622	両側断続	0.15	0.13	27.6	3.13	158.4	85	887	1.43
No.2	クリアランス調整材貼付位置	SN490B	12.0	133	11.1	392	622	中央連続	0.15	0.10	27.0	3.13	158.4	85	879	1.41
No.3	コンクリート強度：低	SN490B	12.0	133	11.1	392	623	両側断続	0.15	0.15	22.3	3.13	158.4	85	878	1.41
No.4	平均クリアランス比：大	SN490B	12.0	133	11.1	392	622	両側断続	0.25	0.16	27.8	3.13	158.4	85	890	1.43
No.5	芯材鋼種：SN400B	SN400B	12.0	133	11.1	325	517	両側断続	0.15	0.09	28.2	3.13	158.4	75	675	1.31
No.6	芯材鋼種：550N級鋼	BT-HT385B	12.0	109	9.1	452	588	両側断続	0.15	0.12	27.8	3.13	134.4	90	935	1.59
No.7	幅厚比：4	SN490B	19.0	78	4.1	361	531	両側断続	0.15	0.07	26.3	3.13	110.4	95	859	1.62
No.8	構面外変形あり	SN490B	12.0	133	11.1	392	623	両側断続	0.15	0.13	25.2	3.13	158.4	85	911	1.46

収縮により想定以上にクリアランス調整材が潰れ、No.3 を除くすべての試験体で平均クリアランス比が小さくなる傾向が見られた。その結果、No.1 では0.13、No.4 では0.16 となった。

(4) 芯材鋼種 (No. 1, 5, 6)

芯材鋼種を SN490B とした No.1 に対し、SN400B とした No.5、及び建築構造用 550N/mm<sup>2</sup> 鋼板 (BT-HT385B) とした No.6 を設定した。なお、No.1, 5, 6 は拘束指標  $R = 1.4$  程度で統一して設計したが、芯材の降伏応力度の想定値との相違により、拘束指標  $R$  は No.1 が 1.43、No.5 が 1.31、No.6 が 1.59 となった。

(5) 芯材塑性化部の幅厚比 (No. 1, 7)

芯材塑性化部の幅厚比を 11 とした No.1 に対し、4 とした No.7 を設定した。

(6) 構面外方向への偏心 (No. 1, 8)

構面外方向への偏心がない No.1 に対し、構面外方向に 1/100rad の偏心を与えた状態で載荷を実施する No.8 を設定した。

2.3 載荷方法

載荷装置を図 3 に示す。試験体に引張荷重が生じる方向を正とし、1,000kN アクチュエータで水平に載荷した。試験体は芯材の弱軸が載荷構面外を向く方向に設置した。また、試験体は載荷柱に対して角度 45° で設置し、載荷柱の下端部はピン支持とした。載荷パターンは図 4 に示す正負交番漸増繰り返し載荷とし、芯材の降伏ひずみの 1/3、2/3 を各 1 回、芯材塑性化部の軸ひずみ 0.25% を 1 回、0.5%、0.75%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5% を各 2 回載荷した後、3.0% を載荷終了まで繰り返した。載荷終了は、芯材の引張破断、若しくは圧縮荷重が最大圧縮荷重の 80% 以下に低下するまでとした。

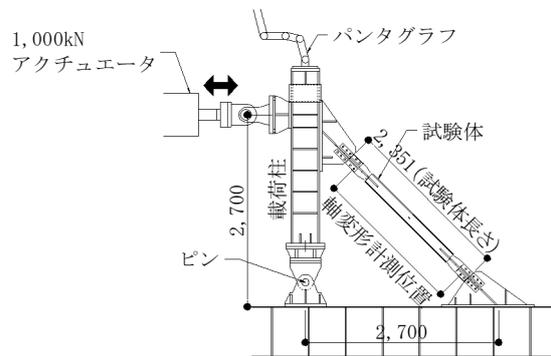


図 3 載荷装置図

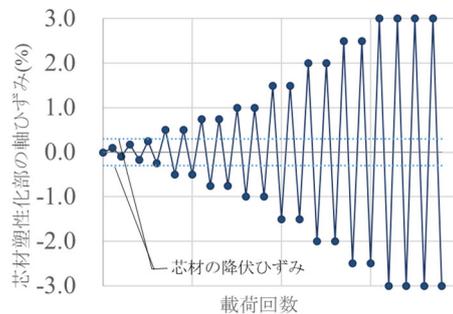


図 4 載荷パターン

3. 実験結果

3.1 結果概要 (履歴曲線, 破壊形式)

各試験体の荷重-変形関係を図 5 に示す。縦軸はブレースに作用する軸方向荷重  $P$  を降伏荷重  $P_y$  で除した降伏耐力比  $P/P_y$ 、横軸は芯材塑性化部の軸ひずみ  $\epsilon$  である。全試験体で安定した紡錘形の履歴を描いた。

実験結果を表 2 に示す。No.3, 4, 8 は軸ひずみ 2.5% での耐力低下となったが、それ以外の試験体は軸ひずみ 3.0% まで到達した。最終破壊形式は、No.2 と No.7 が部材座屈となり、それ以外の試験体は局部破壊となったが、No.2 には局部破壊の兆候も見られた (写真 2(a))。

### 3.2 実験変数による比較

#### (1) クリアランス調整材の貼付位置 (No. 1, 2)

クリアランス調整材の貼付位置は、No.1 は両側断続、No.2 は中央連続とした。いずれも 3.0%ひずみ 2 回目圧縮側まで到達しており、クリアランス調整材の貼付位置による変形性能に差は見られない。

#### (2) コンクリート強度 $\sigma_B$ (No. 1, 3)

No.1 の  $\sigma_B$  は 27.6N/mm<sup>2</sup>、No.3 は 22.3N/mm<sup>2</sup>であった。No.1 は 3.0%ひずみ 2 回目圧縮側に到達したが、No.3 は 2.5%ひずみ 1 回目圧縮側までの载荷となった。このように、 $\sigma_B$  が 28N/mm<sup>2</sup> 程度から 22N/mm<sup>2</sup> 程度まで小さくなることで変形性能は小さくなる。

#### (3) 平均クリアランス比 (No. 1, 4)

No.1 の平均クリアランス比は 0.13、No.4 は 0.16 であった。No.1 は 3.0%ひずみ 2 回目圧縮側に到達したが、No.4 は 2.5%ひずみ 2 回目圧縮側までの载荷となった。平均クリアランス比の差は 0.03 程度だが、個々の計測点におけるクリアランス比の最大値は、No.1 が 0.20、No.4 が 0.29 であった。この

差が履歴性能に影響したと考えられる。

#### (4) 芯材鋼種 (No. 1, 5, 6)

No.1 は SN490B、No.5 は SN400B、No.6 は建築構造物用 550N/mm<sup>2</sup> 鋼板 (BT-HT385B) を用いた試験体である。No.1 は 3.0%ひずみ 2 回目圧縮側、No.5 は 3.0%ひずみ 1 回目圧縮側、No.6 は 3.0%ひずみ 4 回目圧縮側まで到達した。拘束指標  $R$  が 1.3~1.6、コンクリート強度が 28N/mm<sup>2</sup> 前後であっても、耐震ブレースとしては問題のない変形性能を有している。

#### (5) 芯材塑性化部の幅厚比 $b_c/t_c$ (No. 1, 7)

No.1 は  $b_c/t_c=11$ 、No.7 は  $b_c/t_c=4$  の幅厚比の試験体である。No.1 は 3.0%ひずみ 2 回目圧縮側、No.7

表 2 実験結果

試験体	耐力低下時の軸ひずみ	最終破壊	
		形式	方向
No.1	3.0%ひずみ2回目圧縮側	局部破壊	弱軸
No.2	3.0%ひずみ2回目圧縮側	部材座屈	弱軸
No.3	2.5%ひずみ1回目圧縮側	局部破壊	弱軸
No.4	2.5%ひずみ2回目圧縮側	局部破壊	弱軸
No.5	3.0%ひずみ1回目圧縮側	局部破壊	弱軸
No.6	3.0%ひずみ4回目圧縮側	局部破壊	弱軸
No.7	3.0%ひずみ4回目圧縮側	部材座屈	弱軸・強軸
No.8	2.5%ひずみ1回目圧縮側	局部破壊	弱軸

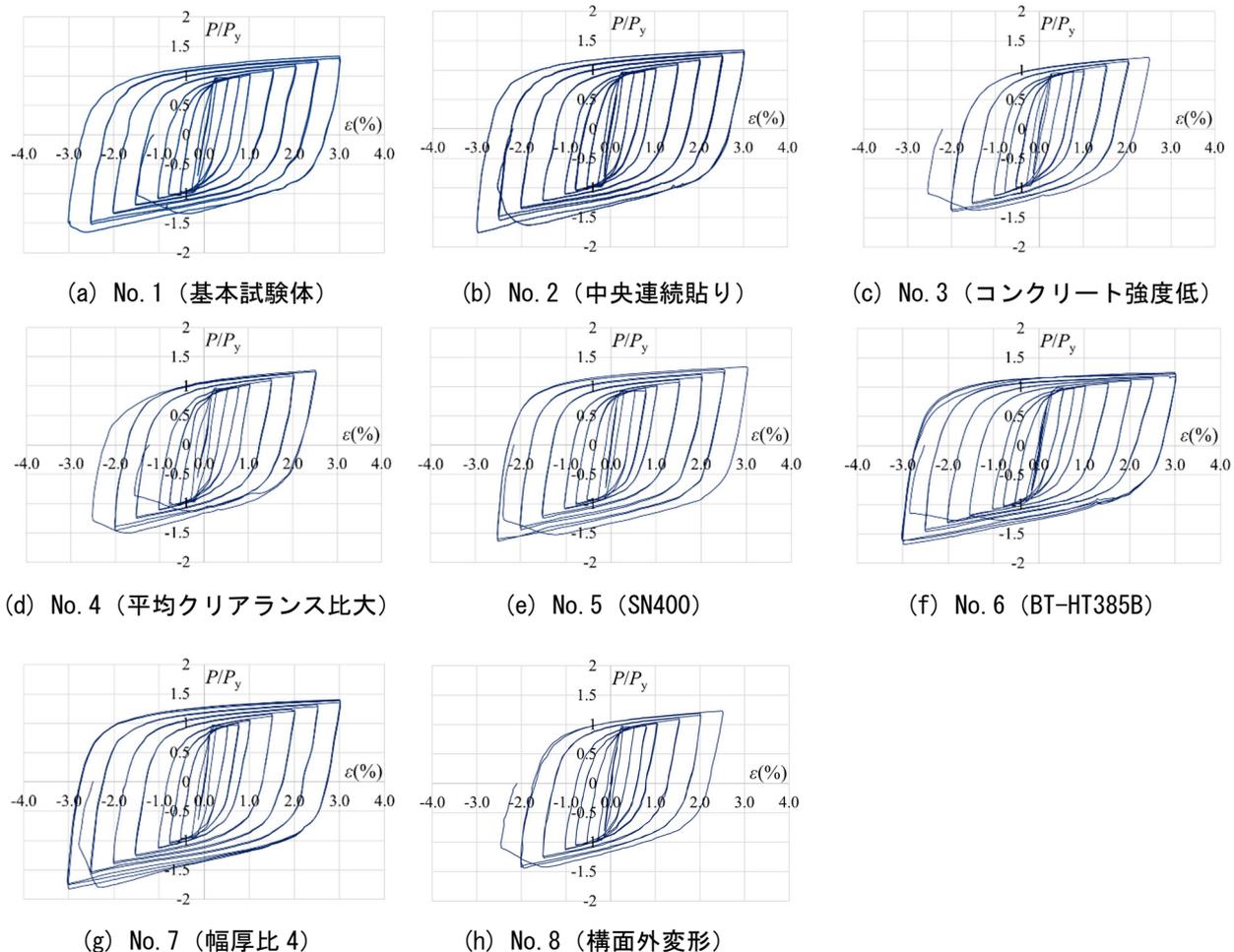


図 5 荷重-変形関係

は3.0%ひずみ4回目圧縮側まで到達した。No.7は、軸ひずみ3.0%ひずみの载荷において、载荷を重ねるごとに圧縮側の耐力上昇が見られた。No.7の最終破壊形式が弱軸・強軸の両方向に湾曲する部材座屈が最終的に生じたが、十分な変形性能を有している。

#### (6) 構面外方向への偏心 (No. 1, 8)

構面外方向への偏心がないNo.1に対し、No.8は構面外方向に1/100radの偏心を付加して载荷した。No.1は3.0%ひずみ2回目圧縮側に到達したが、No.8は2.5%ひずみ1回目圧縮側までの载荷となった。構面外方向に1/100radの偏心があった場合でも、耐震ブレースとしては問題のない変形性能を有している。

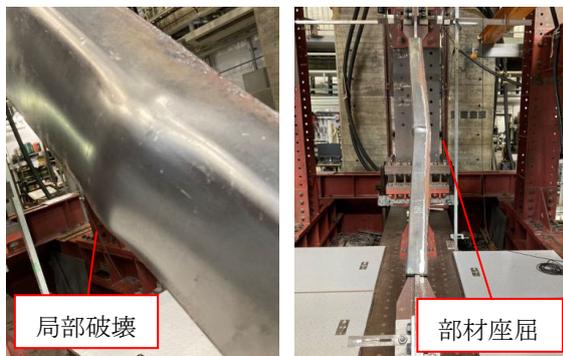
### 3.3 最終破壊性状

载荷後の試験体を写真1、解体後の試験体を写真2に示す。写真1, 2ともに局部破壊・部材座屈の代表的な写真を示す。最終破壊性状が局部破壊となった試験体は、いずれも写真1(a), (c), 写真2(b)のような様子を呈していた。写真2(c), (d)より、No.7が弱軸・強軸の両方向に部材座屈した様子が分かる。



(a) No. 1

(b) No. 2



(c) No. 6

(d) No. 7

写真1 载荷後の試験体

### 3.4 局部破壊時の耐力検討

文献3)を参考に、局部破壊時の耐力  $P_{ysm}$  を検討した結果を表3に示す。充填材(コンクリート)強度が低いため、 $P_{ysm}$  は全試験体で充填材の局部破壊時の耐力  $P_{yf}$  で決定した。補剛力  $P_d$  に対する  $P_{ysm}$  ( $=P_{yf}$ ) の余裕度  $P_{ysm}/P_d$  はいずれも1未満となっており、部材座屈を生じたNo.2とNo.7を除けば余裕度通りの破壊形式になったと言える。また、No.2とNo.7とNo.5(芯材鋼種SN400B)を除く試験体の余裕度は0.33~0.43となった。これより、SN490級以上の材料強度を有する芯材における  $P_{yf}$  には余力がある。

$P_{ysm}$  : 拘束材の局部破壊時の耐力

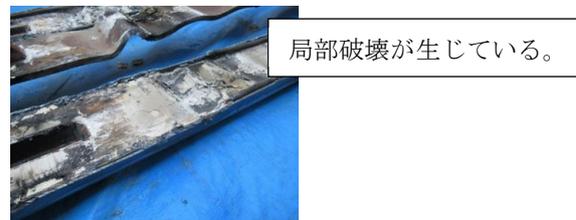
$P_{ysm1}$  : 補正係数を用いた鋼材の局部破壊時の耐力

$P_{ysm2}$  : 置換断面を用いた略算による鋼材の局部破壊時の耐力

$P_{yf}$  : 充填材の局部破壊時の耐力



(a) No. 2



(b) No. 6



強軸方向



弱軸方向

※部材座屈が弱軸方向と強軸方向の両方生じている。

(c) No. 7

写真2 解体後の試験体

表 3 局部破壊時の耐力<sup>3)</sup>

試験体	補剛力	局部破壊耐力				照査 $P_{ysm}/P_d$
	$P_d$ kN	$P_{ysm1}$ kN	$P_{ysm2}$ kN	$P_{yf}$ kN	$P_{ysm}$ kN	
No.1	64.1	55.3	46.6	26.0	26.0	0.41
No.2	54.3	55.1	50.1	27.7	27.7	0.51
No.3	60.8	56.6	49.8	20.0	20.0	0.33
No.4	69.4	55.8	50.3	23.7	23.7	0.34
No.5	34.9	56.3	48.8	30.3	30.3	0.87
No.6	61.9	48.0	45.7	22.3	22.3	0.36
No.7	33.9	35.3	32.7	28.4	28.4	0.84
No.8	55.2	55.3	51.2	23.8	23.8	0.43

#### 4. まとめ

鋼コンクリート板を用いた座屈拘束ブレースにおいて、クリアランス調整工法を採用し、拘束指標  $R$  及び、コンクリート強度を変数とした座屈拘束ブレースの実験を行い、以下の知見を得た。

- (1) 全試験体で安定した紡錘形の履歴を描き、全試験体で軸ひずみ 2.0%を超える変形能力を呈した。
- (2) 文献 3)を参考に、局部破壊時の耐力  $P_{ysm}$  について検討した。全試験体で充填材の局部破壊時の耐力  $P_{yf}$  が最小となり、部材座屈を生じた No.2, No.7 を除き余裕度通りの破壊形式になった。

#### 謝辞

本研究にあたり、神奈川大学の岩田衛名誉教授、

神奈川大学建築学部建築学科の藤田正則教授、中村慎特別助教には多大なるご協力をいただいた。ここに記して敬意を表する。

#### 参考文献

- 1) 岡本勇紀, 森貴久, 吉田文久, 他: 芯材に建築構造用 550N/mm<sup>2</sup>鋼を用いた座屈拘束ブレースの実験的研究(その1, 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1, pp.1055-1058, 2014.
- 2) 中村慎, 藤田正則, 岩田衛: 鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースにおける芯材と拘束材のクリアランス調整工法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 791 号, pp.20-30, 2022.
- 3) 中村慎, 瀧澤裕貴, 藤田正則, 他: 鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースの実験的研究 - 充填材の影響を考慮した拘束材の局部破壊に関する検討 -, 日本建築学会構造系論文集, 第 807 号, pp.844-855, 2023.
- 4) Masanori Fujita, Makoto Nakamura, Kengo Awazu, et al.: Effects of the clearance between the core plate and restraining part on the structural performance of the buckling restrained brace using steel mortar planks, Steel Construction 15, 2022.

#### 執筆者紹介

##### ひとこと

本技術は、運用開始から15年以上経過した現在でも採用が継続している技術です。さらなる技術の改善改良を行い、社会課題の解決や、現場のニーズに応えるために、今後も研究開発に邁進していきます。



摺木 悠人  
修士(工学)