

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	ギャップブレースを有する鉄骨架構のブレース稼働に伴う影響 その1 実験概要および計測概要
Title(English)	Impact of brace operation on steel frames with gap braces Part1 Experiment outline and measurement outline
著者(和文)	高橋周吾, 佐藤大樹, 矢野将斗志, Alex Shegay, 笠井和彦
Authors(English)	Shugo Takahashi, Daiki Sato, Masatoshi Yano, Aleksey Vadimovich Shegay, Kazuhiko Kasai
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 281-284
Citation(English)	, , , pp. 281-284
発行日 / Pub. date	2022, 3

## ギャップブレースを有する鉄骨架構のブレース稼働に伴う影響

## その1 実験概要および計測概要

構造—振動

大振幅地震動 変形制御機構 ギャップブレース  
既存超高層建物 静的載荷実験 鉄骨架構正会員 ○ 高橋周吾\*<sup>1</sup>// 矢野将斗志\*<sup>1</sup>// 笠井和彦\*<sup>4</sup>正会員 佐藤大樹\*<sup>2</sup>// Alex Shegay\*<sup>3</sup>

## 1. はじめに

## 1.1 背景

近年、南海トラフ地震による長周期地震動などといった大振幅地震動の発生が予測されており、超高層建物への被害が懸念されている。大振幅地震動はこれまでの設計レベルを大きく上回るため、既存超高層建物においても大振幅地震動に対する耐震性を検証することが望ましく、制振ダンパーを用いた制振改修がよく検討される。しかし、既存建物は建築計画や周辺部材の耐力の変更が難しいなどの制約条件が多く、設計者の定めるクライテリアを満足する制振設計ができない場合もある。そこで、設置制限が課せられた状況でも高い変形制御効果を発揮する機構（以降、変形制御機構）が求められる。本研究では、既存超高層建物を対象として、オイルダンパーと層間変形があるレベルを超えたときのみ剛性を高めて変形増加を防ぐブレース機構（以降、ギャップブレース）を併用した制振改修設計法を提案した<sup>1)</sup>。また、想定外の地震発生時に上梁の降伏は許容するが建物の崩壊を防ぐというコンセプトのもと、鉄骨架構にギャップブレースを取り付けた試験体を制作し、静的載荷実験による実験的および解析的検討を行った<sup>2)</sup>。

## 1.2 目的と構成

本研究では、ギャップブレースを取り付けた鉄骨架構の変形制御効果やブレースが稼働する前後での部材に生じる応力状態の変化の把握、また既存部分に与える影響として付加応力の評価を行うことを目的とする。

本報その1では、本実験で設計した試験体の概要・実験概要および応力算出概要を示す。

本報その2では、実験結果における計測の妥当性の検証としてつり合い検討を行い、さらに各部材における応力状態を示す。

本報その3では、実験結果の考察、付加応力の評価を行う。

## 2. 実験概要

## 2.1 セットアップ概要

Fig.1にセットアップ概要を示す。Z方向に2本並ぶ載荷フレームの間に設けられた小梁上に基礎梁を設置し、その上にピン支持材、試験体を設置した。なお、試験体に生じる面外方向挙動を2種類の面外拘束治具で挟み込むことで拘束した。本実験で使用するジャッキの最大揚量は1000 kNであり、左右の2つのジャッキによる繰り返し載荷を実施した。正載荷時は左ジャッキを圧縮側に荷重制御し、右ジャッキをジャッキフリーの状態に保持した。負載荷時はその逆を行った。左右のジャッキの荷重 $Q_L$ 、 $Q_R$ はジャッキに内蔵されたロードセルより計測されており、ジャッキ荷重 $Q_J$ を、 $Q_L$ と $Q_R$ の総和として算出し、載荷時に使用しているジャッキの反対側のジャッキに生じる荷重の影響を考慮した。本実験での目標荷重を $Q_J = \pm 400 \text{ kN}$ 、 $\pm 600 \text{ kN}$ 、 $\pm 800 \text{ kN}$ 、 $\pm 1000 \text{ kN}$ とし、 $Q_J = \pm 400 \text{ kN}$  サイクルでブレース非稼働時の挙動を確認し、 $Q_J = \pm 600 \text{ kN}$  サイクル以降でブレース稼働による影響を確認する。

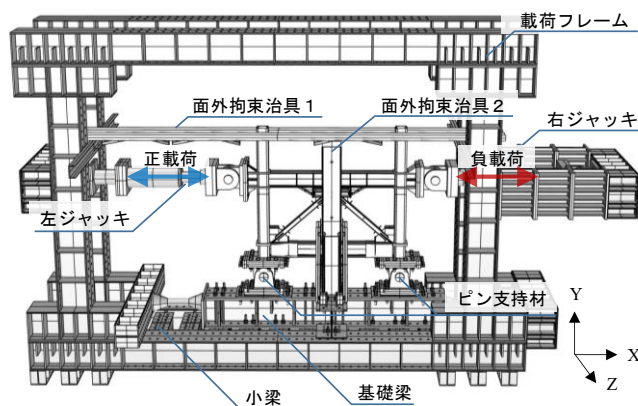


Fig.1 セットアップ概要

## 2.2 試験体概要

本実験では、既存超高層建物 1 層 1 スパンの部分架構を想定した試験体を 0.25 倍のスケール(高さ:962.5 mm, 幅:1800 mm)で作成した. Fig.2 に試験体概要および計測概要を示す. 計測概要については 2.3 節で後述する. 試験体の架構は、柱梁耐力比が 1.2 となるように柱断面を □-150×150×12 の角型鋼管 (STKR490), 上梁断面を H-194×150×6×9 の H 形鋼部材 (SS400) とした. また、本実験において下梁の降伏は望ましくないため、下梁断面を BH200×100×9×22 の H 形鋼部材 (SN490) とし、さらに下梁端部に厚さ 9 mm 長さ 355 mm のカバープレートを接合して部材が弾性となるように設計した. また、ギャップブレースのブレース材断面を角型鋼管 (STKR400) □-80×80×4.5 (以降 B80 試験体) と □-60×60×3.2 (以降 B60 試験体) の 2 種類のブレース材による試験体とすることで、ブレース材断面の違いを試験体のパラメータとした (Fig.2(a)). 各部材に使用した鋼材の材料試験結果を附録 A に示す. ギャップブレースを、主架構にある一定の変形が生じた際に剛性を発揮し始める機構とするため、ブレース材の頂部に箱型の部材 (以降、ブレースヘッド) を取り付け、上梁に完全溶け込み溶接で取り付けた部材 (以降、ビームヘッジ) との間にギャップ間隔を設けた (Fig.2(b)). なお、ブレース接合部にはブレースの降伏軸力が作用することを想定し、また、ビームヘッジと上梁接合部にはブレースに降伏軸力が生じた際のブレースせん断力が作用することを想定して、いずれの接合部も安全率が 1.5 以上となるよう設計を行った. ギャップ間隔は、前章で述べたコンセプトを考慮した事前解析により、 $\Delta u = 7.5 \text{ mm}$  に決定した<sup>3)</sup>. さらに、ブレースヘッドの面外方向挙動を拘束するため、ブレースヘッドを挟み込む形でビームヘッジ間に面外拘束部材を設けた (Fig.2(c)).

## 2.3 計測概要

本節では、本実験における計測概要について示す (Fig.2(a)). 本実験では、合計 294ch の歪ゲージを試験体に貼付して歪計測を行った. 部材に生じる応力を試験体に貼付した一軸歪ゲージにより得られる計測値から算定する. Fig.3 に各部材断面における一軸歪計測位置を示す. 上梁・下梁においては一断面当たり歪ゲージを 8 枚貼付し、上梁においては、左右ビームヘッジを境に 3 断面ずつの計 9 断面、下梁においては、2 断面で計測を行った. 柱・ブレースにおいては、一断面当たり歪ゲージを 4 枚貼付し左右それぞれの部材で 2 断面ずつ計測を行った. また、本実験では、ギャップブレース稼働に伴う応力状態の変化を解明するため、三軸歪ゲージによる計測も行った. 三軸歪計測では、試験体の 22 箇所部材の表裏から行った (全 44 箇所). また、変位計測位置については、本報では層間変形算出に用いた絶対変位計の計測位置を示す. なお、Fig.2(a) に示す以外にも試験体の面外変形や柱

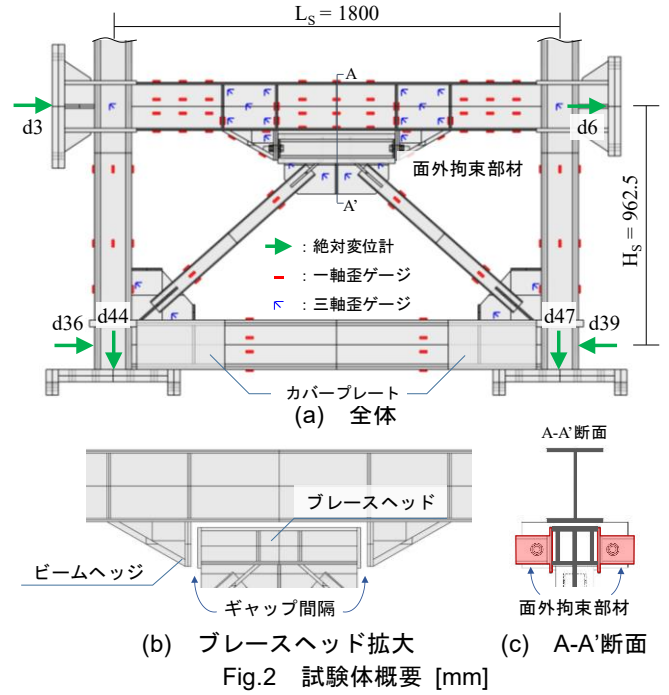


Fig.2 試験体概要 [mm]

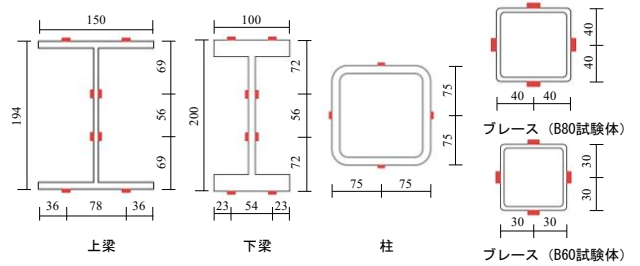


Fig.3 部材断面における一軸歪計測位置 [mm]

脚支持材や基礎梁のすべり有無を計測するための変位計など合計 81ch の変位計を用いて計測を行った.

## 3. 層間変形・層間変形角算出概要

本章では、2.2 節で示した変位計位置で計測した変位計測結果から求まる層間変形  $\Delta x'$  および層間変形角  $R$  の算出方法を示す. 本実験での試験体に生じる層間変形は、上梁の X 方向変位 ( $d3, d6$ ) と下梁の X 方向変位 ( $d36, d39$ ) の差から、剛体回転による影響 ( $d44, d47$ ) を差し引いた値として定義した. 層間変形  $\Delta x'$  および層間変形角  $R$  の算出方法を式(1), (2)に示す.

$$\Delta x' = \frac{(d3 + d6)}{2} - \frac{(d36 - d39)}{2} - \frac{(-d44 + d47)}{L_s} \cdot H_s \quad (1)$$

$$R = \Delta x' / H_c \quad (2)$$

ここで、 $L_s$  は試験体柱間の距離 (= 1800 mm),  $H_s$  は階高 (= 962.5 mm) を示す.

## 4. 応力算出概要

### 4.1 上梁に生じる応力

本節では、上梁における応力算出方法を示す. Fig.4 に正載荷時におけるモーメント分布, Fig.5 に上梁応力算出概要を示す. 上梁においては、計測断面を 9 断面 (LL~

RR) 設けており、各断面に貼付した歪ゲージより得られる歪計測結果に上梁に使用した鋼材の材料特性を反映させて応力度の算出を行う。上梁で使用した鋼材の材料特性より、一次剛性  $E_1 = 205$  (kN/mm<sup>2</sup>)、二次剛性  $E_2 = 0$  (kN/mm<sup>2</sup>)とし(附録 A(b)), ステップごとに算出される応力度  $\sigma(i)$ が降伏応力度  $\sigma_y$ に達した場合に  $E_2$ とした。算出方法を式(3), (4)に示す。

$$\sigma_j(i) = \varepsilon_j(i) \cdot E(i) \quad (*i=1) \quad (3)$$

$$\sigma_j(i) = (\varepsilon_j(i) - \varepsilon_j(i-1)) \cdot E(i) + \sigma_j(i-1) \quad (*i>1) \quad (4)$$

ここで、 $\varepsilon$  は計測地点における歪値、 $j$  は歪計測位置 (Fig.5(a)),  $i$  はステップ数を示す。

続いて、計測断面に生じる軸力  $N_{Gu}$ , モーメント  $M_{Gu}$  算出方法を示す。式(3), (4)より一断面につき 8 箇所から算出される応力度と上梁断面高さの関係から最小二乗法を用いることで応力度分布が得られる (Fig.5 (b))。一断面あたりの応力度の平均値である垂直応力度  $\bar{\sigma}$  が断面に一樣分布すると仮定し、垂直応力度  $\bar{\sigma}$  に上梁の断面積  $A_{Gu}$  を乗じた値として計測断面に生じる軸力  $N_{Gu}$  が求まる (式(5))。

$$N_{Gu}(i) = \bar{\sigma}(i) \cdot A_{Gu} \quad (5)$$

計測断面に生じるモーメント  $M_{Gu}$  は、最小二乗法で求めた応力度分布より式(6), (7)にて求まる。

$$M_{Gu}(i) = \sum_{n=1}^k F_{An}(i) \cdot y_n(i) \quad (\text{弾性: } k=4, \text{ 塑性: } k=5) \quad (6)$$

$$F_{An}(i) = \sigma_n(i) \cdot A_n \quad (7)$$

ここで、 $A_n$  は、 $\sigma_n$  の支配断面積である。なお、 $n$  はモーメント算出時の断面分割数を示す。上梁断面の縁応力度が弾性的な場合には、上梁断面を 4 分割 (Fig.5 (c))、塑性域に達した場合には、応力度分布が直線ではなくなるため、5 断面に分割して支配断面に作用する力  $F_{An}$  を求める (Fig.5 (d))。上梁におけるモーメント分布は、ブレースが稼働することで曲げ戻しが生じるため、ビームヘッジを境に不連続となる。ここでは、正載荷時におけるモーメント分布算出方法を示す。正載荷時の載荷ジャッキ側上梁断面では、LL~LR の 3 断面でのモーメント算出結果より最小二乗法を用いてモーメント分布を得る。また、左ビームヘッジより右側に位置する上梁では、CL~RR までの 6 断面のモーメント算出結果より最小二乗法を用いてモーメント分布を得る。それぞれのモーメント分布を上梁-柱の節点まで延長することで、左側上梁端部のモーメント  $M_{Gu}^{Le}$ , 右側上梁端部のモーメント  $M_{Gu}^{Re}$  が得られる。

4.3 柱に生じる応力

本節では、柱における応力算出方法を示す。Fig.6 に左柱における応力算出概要を示す。計測断面を左右の柱でそれぞれ 2 断面ずつ (LU, LD, RU, RD) 設けている。なお、柱における歪計測結果より全ステップで部材は弾性であることを確認している。一例として LU 断面に生じる軸力、モーメント算出方法を式(8), (9)に示す。

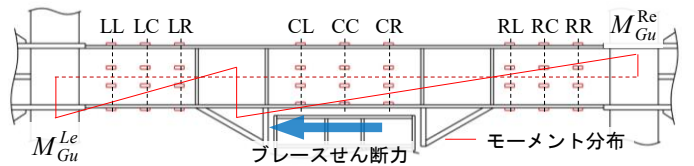


Fig.4 モーメント分布 (正載荷時ブレース稼働時)

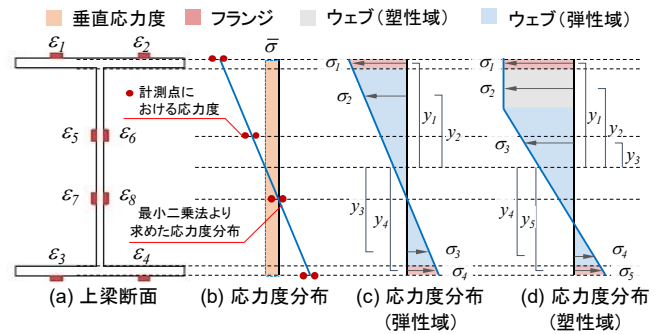


Fig.5 上梁応力算出概要

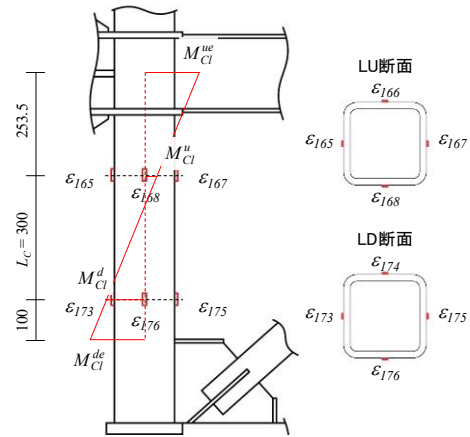


Fig.6 左柱応力算出概要 [mm]

$$N_{Cl}^u = \bar{\varepsilon}_{LU} \cdot E \cdot A_C \quad (8)$$

$$M_{Cl}^u = (\varepsilon_{167} - \varepsilon_{165}) \cdot E \cdot Z_C \quad (9)$$

ここで、 $\bar{\varepsilon}_{LU}$  は LU 断面における歪平均値、 $E$  はヤング係数 (=205 kN/mm<sup>2</sup>)、 $A_C$  は柱の断面積、 $Z_C$  は柱の断面係数を示す。なお、他の計測断面においても同様にして軸力、モーメントの算出を行う。

続いて、左柱のせん断力算出方法を式(10)に示す。

$$Q_{Cl} = \frac{(M_{Cl}^u - M_{Cl}^d)}{L_c} \quad (10)$$

左柱のせん断力  $Q_{Cl}$  は、上下計測断面におけるモーメントの差を計測断面高さ ( $L_c = 300$  mm) で除すことで求まる。なお、右柱においても同様に算出する。

#### 4.4 ブレースに生じる応力

本節では、ブレースにおける応力算出方法を示す。Fig.7 にブレース応力算出概要を示す。ブレースにおいては、計測断面を左右のブレースでそれぞれ 2 断面ずつ (LU, LD, RU, RD) 設けている。ブレースにおける歪計測結果より、ジャッキ荷重増大に伴う塑性化を確認しているため、ブレースに使用した鋼材の材料特性を考慮して応力度の算

出を行う。応力度算出方法は、式(2)、(3)と同様であるが、ブレースには明確な降伏点が表れない STKR 材を使用しているため、剛性  $E$  を材料特性に基づきマルチリニアで変化させるという点において上梁と異なる。この時の剛性を、一次剛性  $E_1 = 205$  (kN/mm<sup>2</sup>)、二次剛性  $E_2 = 70.43$  (kN/mm<sup>2</sup>)、三次剛性  $E_3 = 17.23$  (kN/mm<sup>2</sup>)、四次剛性  $E_4 = 3.03$  (kN/mm<sup>2</sup>) とし、ステップごとに算出される応力度  $\sigma(i)$  が一次降伏点  $\sigma_{y1}$  に達した場合に  $E_2$ 、二次降伏点  $\sigma_{y2}$  に達した場合に  $E_3$ 、三次降伏点  $\sigma_{y3}$  に達した場合に  $E_4$  とした(附録 A(c))。続いて、ブレースに生じる軸力、モーメント算出方法を示す。一例として LU 断面における算出方法を示す(式(11)、(12))。

$$N_{Bl}^u = \bar{\sigma}_{LU} \cdot A_B \quad (11)$$

$$M_{Bl}^u = (\sigma_{183} - \sigma_{181}) \cdot Z_B \quad (12)$$

ここで、 $\bar{\sigma}_{LU}$  は LU 断面における応力度平均値、 $A_B$  はブレースの断面積、 $Z_B$  はブレースの断面係数を示す。なお、他の計測断面においても同様に算出する。

続いて、ブレースのせん断力算出方法について示す。本実験では、ブレースのせん断力をブレースに生じる軸力の水平成分と定義する。左ブレースにおけるせん断力算出方法を式(13)、(14)に示す。

$$Q_{Bl} = N_{Bl} \cdot \cos \theta \quad (13)$$

$$N_{Bl} = (N_{Bl}^u + N_{Bl}^d) / 2 \quad (14)$$

なお、ブレースにおいて、柱のせん断力算出方法と同様にモーメント勾配より求まるせん断力は、軸力の水平成分の 0.006%以下であり、本検討においては無視できるほど小さい。右ブレースにおいても同様に算出する。

## 5. 内力算出概要

Fig.8 に外力および内力概要を示す。ジャッキ荷重  $Q_J$  (=外力) を加えると、試験体の主架構せん断力  $Q_F$  とブレースせん断力  $Q_B$  (本実験では、ブレース軸力の水平成分とする) の和が内力  $Q_S$  として寄与される。それぞれの算出式を式(15)~(17)に示す。

$$Q_S = Q_F + Q_B \quad (15)$$

$$Q_F = Q_{Cl} + Q_{Cr}, \quad Q_B = Q_{Bl} - Q_{Br} \quad (16), (17)$$

## 6. まとめ

本報その 1 では、本実験で設計した試験体の概要、実験概要および応力算出概要を示した。

謝辞はその 3 にまとめて記す。

### 参考文献

- 1) 上野ほか: オイルダンパーと変形制御機構を併用した大振幅地震動に対する既存超高層建物の制振改修設計法, 構造工学論文集, pp.353-365, 2020.3
- 2) 矢野ほか: ギャップブレースを取り付けた鉄骨架構の力学的挙動の検討(その 1-3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.793-798, 2021.9
- 3) 美濃地ほか: ギャップブレースを取り付けた架構の静的載荷実験における事前解析, 日本建築学会大会関東支部研究報告集, pp.477-480, 2020.3

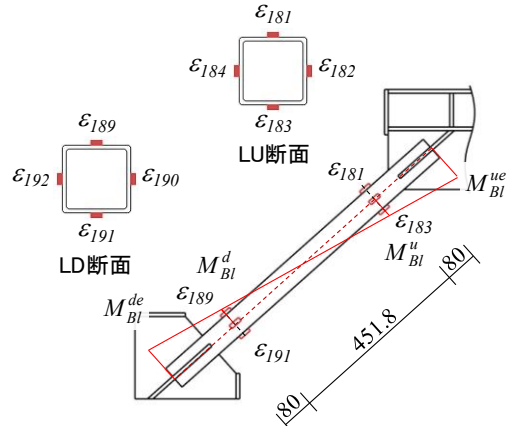


Fig.7 ブレース応力算出概要 [mm]

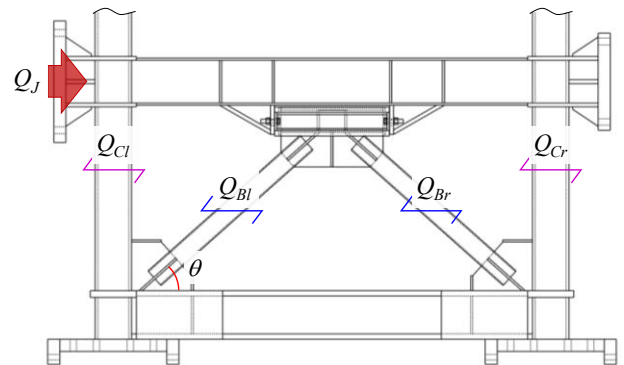


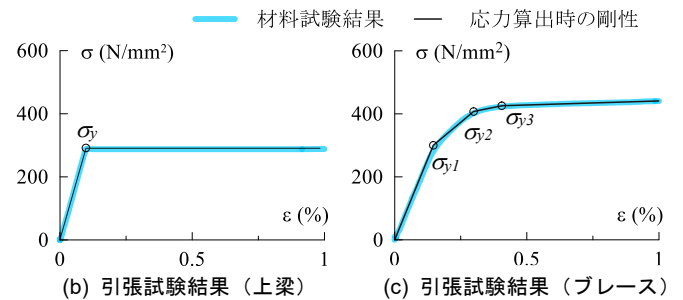
Fig.8 外力および内力概要

## 附録 A 材料試験結果

### (a) 降伏耐力および引張強さ

部材	鋼材種	降伏耐力(実験) $\sigma_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	降伏耐力(ミルシート) $\sigma_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	引張強さ $\sigma_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]
上梁	SS400	299.3	289	419.1
下梁	SN490	418.7	409	559.8
ブレース	STKR400	425.9	434	468.1
柱	STKR490	385.4	408	505.5

※ STRK 材における降伏耐力は 0.2%offset 耐力比とする。



\*1 学生会員 東京工業大学 大学院生

\*2 東京工業大学 未来産業技術研究所 准教授・博士(工学)

\*3 東京工業大学 未来産業技術研究所 助教・Ph. D.

\*4 東京工業大学 科学技術創成研究院 特任教授・Ph. D.

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology \*1

Associate Prof, FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng. \*2

Assistant Prof, FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng. \*3

Specially Appointed Prof., IIR, Tokyo Institute of Technology, Ph.D. \*4