

# 水平 2 方向入力を受ける座屈拘束ブレースの構面外座屈防止設計法の実験的検証

京都大学 田村祐毅

## 1. はじめに

座屈拘束ブレースは、図 1(a) に示すように芯材の周囲を座屈拘束材で覆っている座屈拘束部と、ブレースを柱・梁に取り付けるための接合部から構成される。座屈拘束ブレースが構面内・構面外の層間変形を受けると、接合部には軸力だけでなく曲げモーメントも作用する。これらの力により図 1(b) に示すガセットプレート接合部（以下、GPL 接合部）や添板が塑性化すると、接合部を含むブレース全体の座屈が生じる。座屈拘束ブレースが安定した復元力特性を発揮するためには、芯材の曲げ座屈だけでなく、接合部を含むブレース全体の座屈を防止するように設計する必要がある<sup>1), 2)</sup>。

既往の研究で提案された構面外座屈防止条件<sup>1), 2)</sup>の妥当性は、構面外の層間変形角を 0 または 1/100rad の一定値とした载荷実験<sup>3), 4)</sup>により確認されているが、構面外の層間変形角の大小が構面外座屈の発生に与える影響については十分に検討されていない。また、添板に関しては、文献 5) において構面内の曲げに対する設計法が提案されているのみであり、構面外の曲げを考慮した設計法は提案されていない。

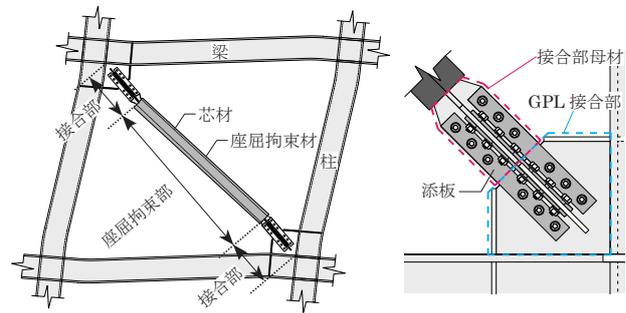
そこで本論では、構面内と構面外の層間変形角を漸増させる大変形 2 方向载荷実験を実施し、ブレースのディテール等が終局性状に及ぼす影響を確認する。また、構面外の曲げを考慮した添板の設計法を新たに提案し、構面外層間変形が 1/100rad を超える場合における、GPL 接合部設計法<sup>1)</sup>や提案する添板設計法の妥当性を実験結果に基づいて確認する。

## 2. 繰返し载荷実験の概要

### 2.1 試験体と実験パラメータ

表 1 に試験体一覧と実験パラメータを、図 2、図 3 に試験体の形状を示す。実験パラメータは表 1 に示すように、座屈拘束の形式（ハーフ十字形式または二重鋼管形式）、GPL 接合部・添板・接合部母材を含めた接合部全体の構面外剛性（以下、接合部剛性）、添板の鋼種、载荷方向に加え、ハーフ十字形式では芯材の両端で拘束材に貫入した部分（以下、のみこみ部）の長さ  $l_c$ 、二重鋼管形式では芯材と拘束材のクリアランス  $s_c$  とする。

ハーフ十字形式では、図 2 に示すように、芯材塑性化部（A 断面）は不等辺の十字形で  $+ - 90 \times 44 \times 12$  (LY225)、のみこみ部（B 断面）は  $+ - 90 \times 90 \times 12$  (SN400B)、座屈拘束材は  $\square - 93 \times 93 \times 9$  (SM490A) とする。接合部母材（C 断面）は  $+ - 150 \times 150 \times 12$  (SN400B) とし、添板を介して GPL 接合部に 12 本の高力ボルト（F10T M12）で摩擦接合される。二重鋼管形式は紙幅の都合上、割



(a) ブレース各部名称 (b) 接合部各部名称  
図 1 座屈拘束ブレースの概略

表 1 試験体一覧

(a) ハーフ十字形式

試験体	接合部剛性 (kN/mm)	$h_s$ (mm)	添板鋼種	$l_c$ (mm)	载荷方向
No.1	(高) 11.3	175	SS400	(長) 190	1 方向
No.2				(短) 50	2 方向
No.3			SM490A	(長) 190	1 方向
No.4				(短) 50	2 方向
No.5	(中) 7.61	150	SM490A	(長) 190	1 方向
No.6				(短) 50	2 方向
No.7				(長) 190	1 方向
No.8	(低) 1.01	0	SS400	(長) 190	1 方向
No.9				(短) 50	2 方向
No.10	(低) 1.01	0	SS400	(長) 190	1 方向
No.11				(短) 50	2 方向
No.12	(低) 1.01	0	SS400	(長) 190	1 方向
No.12				(短) 50	2 方向

(b) 二重鋼管形式

試験体	接合部剛性 (kN/mm)	$h_s$ (mm)	添板鋼種	$s_c$ (mm)	载荷方向
No.13	(高) 11.3	175	SM490A	(中) 5.4	1 方向
No.14				(中) 5.4	2 方向
No.15				(小) 2.0	1 方向
No.16				(小) 2.0	2 方向

$h_s$ : 接合部サイドスチフナ長さ  $l_c$ : のみこみ部長さ  
 $s_c$ : 芯材と拘束材のクリアランス

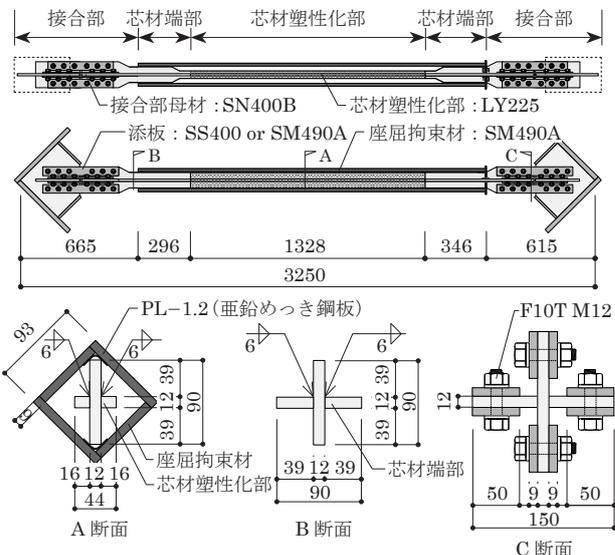


図 2 ハーフ十字形式ブレース試験体（単位：mm）

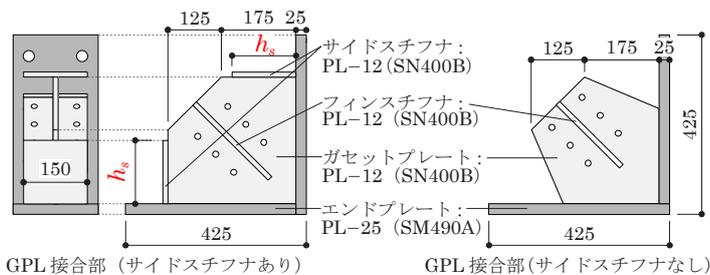


図3 GPL 接合部詳細

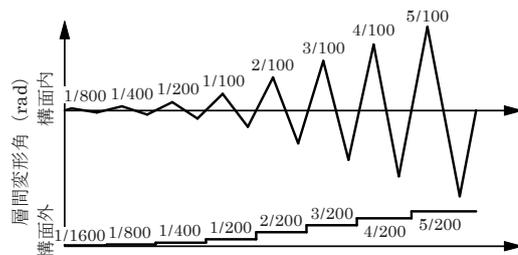


図5 載荷履歴

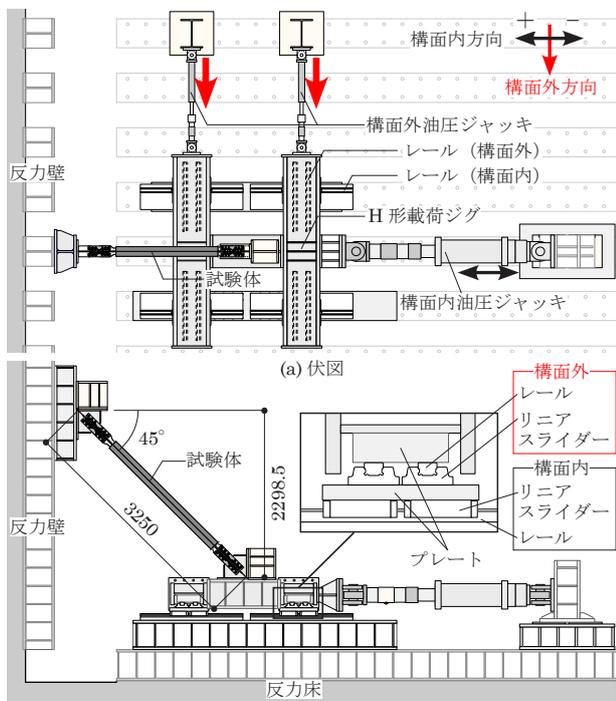


図4 載荷装置 (単位: mm)

愛する。本論では、図3に示すサイドスチフナの長さ  $h_s$  を変更することで接合部剛性を調整している。

## 2.2 載荷方法

載荷装置は図4に示すように、H形載荷ジグの下に構面内方向リニアスライダーと構面外方向リニアスライダーを各4組設置したものである。試験体を水平面に対して45°の角度に傾斜させ、反力壁とH形載荷ジグに取付けた上で、H形載荷ジグに接続した油圧ジャッキにより構面内と構面外に載荷する。

載荷はブレースに圧縮力が作用する方向を正とし、図5に示すように構面内層間変形角  $R_i$  の振幅を1回ずつ漸増させながら与える。2方向載荷の場合は、まず構面外方向に構面内層間変形角  $R_i$  の1/2の層間変形角  $R_o$  を与え、これを一定に保った上で構面内方向に載荷する。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 荷重変形関係

図6に軸力  $N$  - 構面内層間変形角  $R_i$  関係を示す。 $N-R_i$  関係の×は最大圧縮軸力を示している。座屈拘束形式やのみこみ部の長短による実験結果の差異は小さかったため、図6ではハーフ十字形式でのみこみ部の長い8体の試験体に関して示している。

図6より、接合部剛性の低い試験体は高い試験体

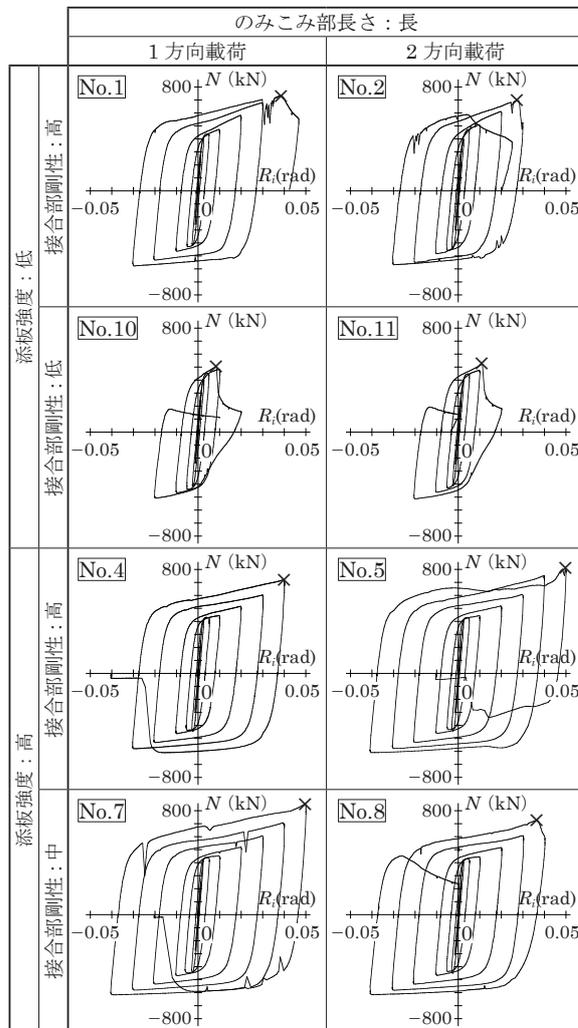


図6 ブレース軸力 - 構面内層間変形角関係

に比べて、また添板強度の低い試験体は高い試験体に比べて早期に耐力の低下が生じたことがわかる。載荷方向による荷重変形関係の違いは接合部剛性の高い試験体もしくは中程度の試験体に見られ、2方向載荷の場合は1方向載荷の場合に比べて早期に耐力が低下した。このことから、接合部剛性・添板強度を増大させることで最大耐力の到達を遅らせられること、2方向載荷の場合は、1方向載荷に比べて構面外座屈が生じやすいことがわかる。

### 3.2 各部降伏状況と終局性状

図7に各部の降伏状況と図8に試験体の終局性状を示す。図7中のマークは、その振幅の載荷中にブレースの各部が初めて降伏したことを表している。図7中の☆, △, ▲印に示すように、いずれの試験体も、芯材とのみこみ部が降伏している。

その後、接合部剛性の高い試験体では添板が降伏し、添板とのみこみ部が折れ曲がり、図8に示す構面外座屈【I】が生じた。接合部剛性の低い試験体ではGPL接合部が降伏しGPL接合部とのみこみ部が折れ曲がり、構面外座屈【II】が生じた。

接合部剛性の高い試験体に関して、添板強度の高低で比較を行うと、添板の強度が高い試験体は添板とGPL接合部が降伏せず、芯材の破断が生じた一方、添板強度が低い試験体では添板が降伏し構面外座屈【I】が生じた。接合部剛性が中程度の試験体に関して、荷重方向で比較すると、2方向荷重の試験体ではGPL接合部の降伏が見られ、その後に構面外座屈【III】が生じたが、1方向荷重の試験体では添板やGPL接合部の降伏が見られなかった。以上より、構面外座屈を防ぐには、構面外層間変形により生じる曲げモーメントを考慮して添板やGPL接合部が降伏しないように設計する必要がある。

#### 4. GPL接合部と添板の構面外降伏防止条件

##### 4.1 既往の文献におけるGPL接合部の設計

文献1)では、芯材の塑性化に伴い座屈拘束部の両端がヒンジとみなせる場合において、GPL接合部に作用する曲げモーメント $M_J$ と軸力 $N$ に対してGPL接合部が弾性を保つための条件を次式で与えている。

$$\frac{N}{cN_y} < 1, \quad \frac{M_J}{sM_y} < 1 \quad (1)$$

$$M_J = \frac{N \cdot \xi l \cdot \theta_{J_0}}{1 - N / {}_p N_{cr}^b} \quad (2)$$

(1) 式中の $cN_y$ はガセットプレートの降伏軸力、 $sM_y$ はサイドスチフナの降伏曲げモーメント、(2)式中の ${}_p N_{cr}^b$ は接合部を含むブレース全体の構面外座屈荷重であり、文献1)に詳しい。また、 $\xi$ は座屈拘束ブレース全長 $l$ に対する接合部の長さの比である。 $\theta_{J_0}$ は接合部と芯材が構面外方向になす角度であり、文献6)に詳しい。

##### 4.2 構面外変形を考慮した添板の設計

図9に示す添板断面に軸力 $N$ と構面外の曲げモーメント $M_{S_0}$ が作用する場合、軸力 $N$ を添板の全断面で、構面外の曲げモーメント $M_{S_0}$ を図9中に斜線で示された4枚の添板Oで負担すると考えて、添板が弾性を保つための条件を次式のように定める。

$$\frac{N}{N_{Sy}} + \frac{M_{S_0}}{M_{Sy}} < 1 \quad (3)$$

ここで、 $N_{Sy}$ は添板断面全体の降伏軸力、 $M_{Sy}$ は図9中に示す添板Oの降伏曲げモーメントである。(3)式中の $M_{S_0}$ を算出するため、片側の接合部を図10

添板強度		接合部剛性		荷重方向	$l_e$	構面内層間変形角 $R_i$ の荷重振幅 (rad)								終局性状
						1/800	1/400	1/200	1/100	2/100	3/100	4/100	5/100	
低	高	1方向	長	☆	☆	△	▲	○	×				構面外座屈【I】	
			短	☆	△	▲	○	×						
	2方向	長	☆△			◇◆×						構面外座屈【II】		
		短	☆△			◇◆×								
高	高	1方向	長	☆			△			▲×			芯材の破断	
			短	☆			△		▲		×			
	2方向	長	☆			△				▲×	構面外座屈【III】			
		短	☆		△			▲	◇×					
	中	1方向	長	☆				△						構面外座屈【III】
			短	☆		△			▲	◇×				

図7 各部の降伏状況

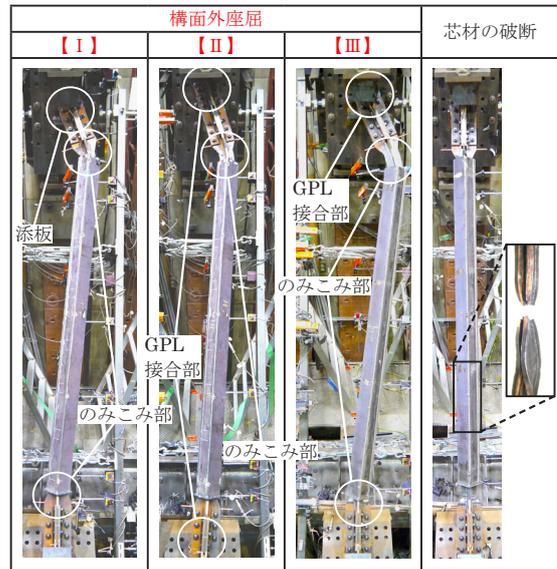


図8 試験体の終局性状

のように曲げ剛性 $EI_J$ を持つ線材でモデル化する。本論では、芯材の塑性化により芯材の曲げ剛性が失われていると考え、接合部と座屈拘束部の境界にある断面に作用する曲げモーメントを0としている。図10に示すモデルに軸力 $N$ が作用する際、座屈たわみ角公式に境界条件を当てはめることで、接合部端から $z$ の距離にある点の構面外変形 $u$ が(4)式により求められる。

$$u = \frac{M_J}{N} \left( \frac{z}{\xi l} - 1 + \cos \frac{\alpha z}{\xi l} - \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} \sin \frac{\alpha z}{\xi l} \right) + R_J \cdot z \quad (4)$$

ここで、 $R_J$ は接合部材角、 $\alpha$ は軸力に関するパラメータ( $\alpha = \xi l \sqrt{N/EI_J}$ )である。

以上より、添板長さ方向の中心に位置し、接合部端から $l_s$ の距離にある断面に作用する添板構面外方向曲げモーメント $M_{S_0}$ は次式により求められる。

$$M_{S_0} = EI_J \left. \frac{d^2 u}{dz^2} \right|_{z=l_s} = M_J \sin \left( 1 - \frac{l_s}{\xi l} \right) \alpha / \sin \alpha \quad (5)$$

##### 4.3 実験結果との比較

上下のみこみ部が降伏した2方向荷重の試験体に関して、GPL接合部の軸力 $N$ -構面外曲げモーメ

ント  $M_J$  関係を図 11 に、添板の軸力  $N$  - 構面外曲げモーメント  $M_{So}$  関係を図 12 に示す。図 11 の縦軸は  $N$  を  $gN_y$  で、横軸は  $M_J$  を  $sM_y$  で無次元化したものである。図 11 中の灰色線は (2) 式による  $M_J$  の算定値を示しており、黒線は  $M_J$  の実験値を示している。また、図 12 の縦軸は  $N$  を添板の降伏軸力  $N_{Sy}$  で、横軸は  $M_{So}$  を  $M_{Sy}$  で無次元化したものである。図 12 中の灰色線は (5) 式による  $M_{So}$  の算定値を示しており、黒線は添板に貼り付けたひずみゲージの計測値から計算した  $M_{So}$  の実験値を示している。図中のプロットは構面内層間変形角  $R_i$  が載荷振幅に到達した時点のものである。添板が降伏すると応力とひずみの線形関係が成立しなくなり、ひずみを用いて  $M_J$  や  $M_{So}$  を正しく算出することができないため、添板降伏後は実験結果を黒破線で示している。各図の青実線は弾性限相関曲線を示しており、軸力と曲げモーメントが弾性限相関曲線の内側に存在する場合、GPL 接合部または添板は弾性と判定している。

図 11, 図 12 より、 $M_J$  と  $M_{So}$  の算定値は実験値を若干上回っているか、概ね合致していることがわかる。算定値が実験値を若干上回っている原因として、構面外方向に載荷する際、添板には軸力により生じる変形と逆方向の変形が生じており、実験値が小さくなっていることが考えられる。また、GPL 接合部が降伏した No.9 試験体と、添板が降伏した No.3 試験体について、軸力 - 曲げモーメント関係の計算結果が弾性範囲外となったサイクルと、実験において GPL 接合部または添板が降伏したサイクルに大きな差はなく、(1) 式や (3) 式の降伏防止条件は妥当であるといえる。

## 5. まとめ

本論では、片流れ配置された座屈拘束ブレースを対象とし、構面内と構面外の層間変形角を漸増させる大変形 2 方向載荷実験を実施し、ブレースのディテール等が終局性状に及ぼす影響を確認した。また、構面外曲げを考慮した添板の設計法を提案し、構面外層間変形が  $1/100\text{rad}$  を超える場合における GPL 接合部設計法<sup>1)</sup>と添板設計法の妥当性を検証した。結論を以下に示す。

- 本実験の範囲内では、すべての試験体で芯材とのみこみ部の降伏が確認された。その後、添板または GPL 接合部が降伏した試験体では構面外座屈が生じた。
- 2 方向載荷の場合は 1 方向載荷の場合に比べて早期に耐力が低下

し、構面外座屈が生じやすいことを確認した。

- $1/100\text{rad}$  以上の構面外層間変形角が生じた場合において、文献 1) の GPL 接合部曲げモーメント算定法 ((3) 式) による算定値が実験値を若干上回っているか、概ね合致していることを確認した。加えて、文献 1) の GPL 接合部降伏防止条件 ((1) 式) が妥当であることを示した。
- 構面外曲げを受ける添板の降伏防止条件 ((3) 式) および添板の構面外曲げモーメント算定法 ((5) 式) を新たに提案し、(3) 式を満足することで添板を弾性に保つことができることを示した。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：鋼構造制振設計指針，第 1 版，2014.11
- 2) 日本建築学会：鋼構造座屈設計指針，第 4 版，2018.2
- 3) 聲高裕治，木下智裕：座屈拘束ブレースの構面外座屈防止設計法，日本建築学会構造系論文集，第 641 号，pp.1371-1378，2009.7
- 4) 竹内徹，小崎均，松井良太：拘束材端部の曲げモーメント伝達能力を考慮した座屈拘束ブレースの構面外機構安定性評価，日本建築学会構造系論文集，第 691 号，pp.1621-1630，2013.9
- 5) 清水考憲，藤原一善，上村健二，井上一朗：極軟鋼管ブレース接合部を含む座屈拘束設計法，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1 構造 III，pp.781-784，1997.9
- 6) 木下智裕，聲高裕治，井上一朗，飯谷邦祐：接合部を含む座屈拘束ブレースの構面外座屈防止条件，日本建築学会構造系論文集，第 621 号，pp.141-148，2007.11

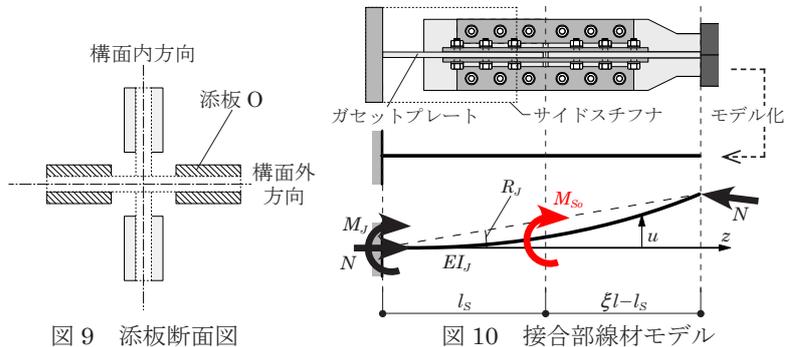


図 9 添板断面図

図 10 接合部線材モデル

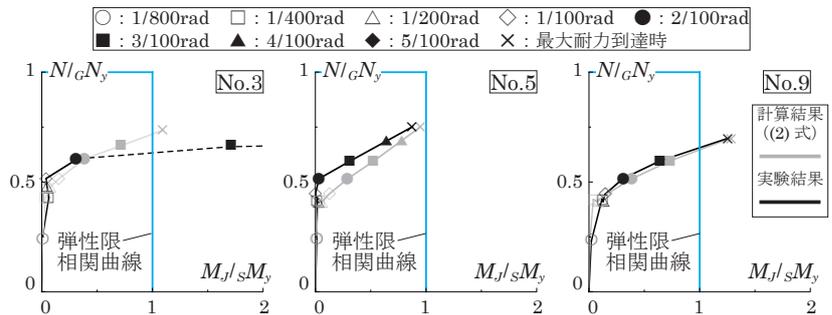


図 11 軸力 - GPL 接合部端の構面外曲げモーメント関係

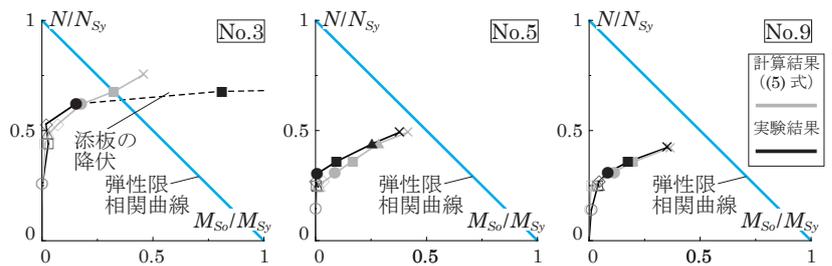


図 12 軸力 - 添板の構面外曲げモーメント関係