

両端にガセットプレートを有する長柱の弾塑性挙動に関する実験的研究

川本 佑太¹・Shranay Sthapit¹・澤田 守²・志村 保美³・
澁谷 敦⁴・小野 潔⁵

¹学生会員 早稲田大学大学院 創造理工学研究科建設工学専攻（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

²正会員 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

³正会員 日本鋼構造協会（〒103-0027 東京都中央区日本橋3-15-8）

⁴正会員 日本橋梁建設協会（〒105-0003 東京都港区西新橋1-6-11）

⁵正会員 博士(工学) 早稲田大学教授 創造理工学部社会環境工学科（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

1. はじめに

鋼部材の腐食による劣化は鋼橋全体の耐荷性能に影響を及ぼすため、腐食が発生した鋼橋の維持管理コストの増大が問題となっている。鋼 I 桁橋の構成部材の対傾構・横構についても腐食による損傷事例が報告されている。それゆえ、防食性の高いステンレス鋼を対傾構・横構に用いることで維持管理コストの削減が期待される。宇佐美らにより、山形断面及び CT 形断面への圧縮試験¹⁾²⁾は行われているが、普通鋼に対する単調載荷のみを行っている。そのため、ステンレス鋼を用いた場合や繰り返し載荷の耐荷力に関するデータは不足している現状にある。南海トラフなどの地震のリスクが高い日本においては、橋梁の横荷重の一部を負担する部材である対傾構・横構にステンレス鋼を導入した際の耐荷力特性を明らかにする必要があると考える。

そこで本研究では対傾構・横構のデータ収集を目的として、両端にガセットプレートを有する長柱の一軸圧縮試験を実施した。実験では、SS400,SUS316 の異なる鋼種の長柱に、正負交番載荷と繰り返し圧縮載荷を行った。そして載荷時における、各供試体の柱部、ガセット部それぞれの挙動について整理した。

2. 実験概要

(1) 供試体概要

載荷試験は 6 体の供試体で実施した。供試体の構造図を図-1~3 に示す。各供試体の鋼種、載荷履歴、接合方法などを表-1 にまとめる。表-1 の SUS316 は明確な降伏点を持たないため、0.2% オフセット耐力を降伏応力とした。表-1 の図番号は供試体の構造図の図番号にそれぞれ対応している。供試体は長柱部とガセット部から構成され、それらは溶接あるいは高力ボルトによって接合されている。供試体 1,2,3,4 では、長柱部の SUS316 とガセット部の SM400A による異種金属の接触を避けるために、接合部にエポキシ樹脂版³⁾を挟んで絶縁した。エポキシ樹脂版の挿入箇所を図-4 に示す。

供試体のうち、CT 形鋼を有する供試体は横構を、山形鋼を有する供試体は対傾構を主として想定している。すべての供試体にて、ガセット部には SM400A が使用されている。また、供試体 6 では、ガセットプレートと長柱を溶接接合し、接合部の強度を高めることで高い荷重の引張載荷を可能にしている。表-1 の構造諸元における、ガセットの固定点間距離 a はガセット端部から接合部の

表-1 供試体一覧

供試体	鋼種	長柱断面	載荷履歴	接合方法	図番号	長柱部			ガセット部		
						鋼種	降伏応力	長さ	細長比パラメーター	板厚	固定点間距離
						σ_y (MPa)	L (mm)	$\bar{\lambda}$ (-)	t (mm)	a (mm)	
1	SUS316	L	繰返し圧縮載荷	ボルト	1	SUS316	260.7	2000	0.73	9	295
2	SUS316	CT	繰返し圧縮載荷	ボルト	2	SUS316	261.7	2600	0.85	9	295
3	SUS316	CT	正負交番載荷	ボルト	2	SUS316	280.8	2600	0.89	9	295
4	SUS316	L	正負交番載荷	ボルト	1	SUS316	260.7	2000	0.73	9	295
5	SS400	L	正負交番載荷	ボルト	1	SS400	338.6	2000	0.81	9	295
6	SS400	L	正負交番載荷	溶接	3	SS400	337.0	2000	0.82	9	255

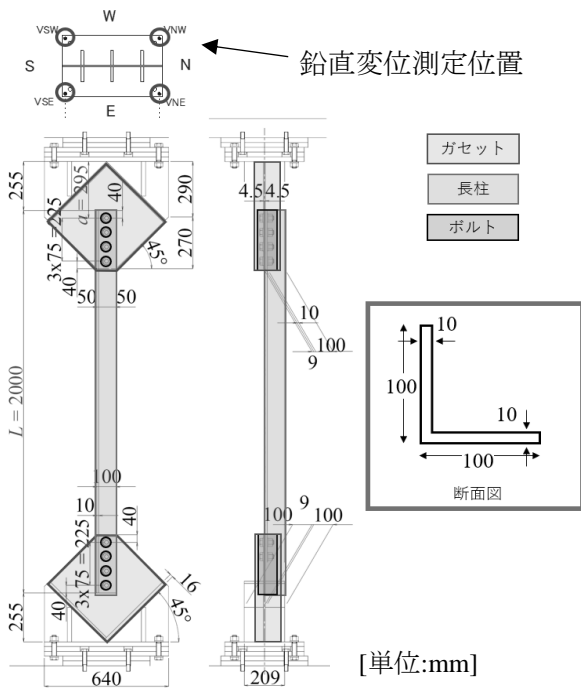


図-1 供試体 1,4,5 の構造図

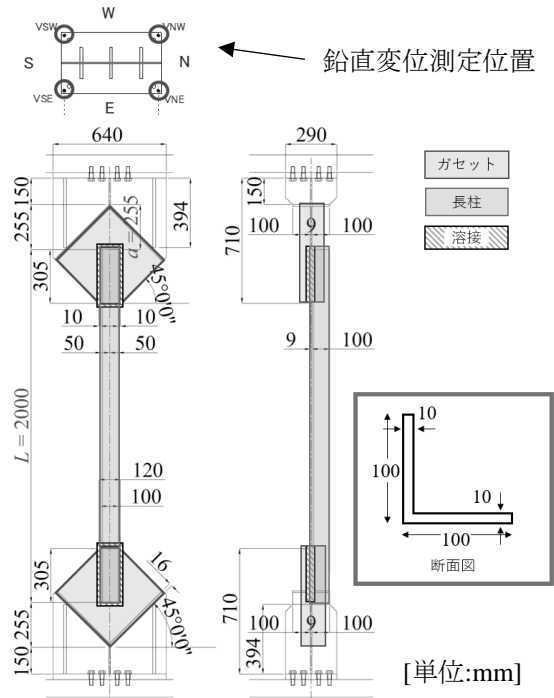


図-3 供試体 6 の構造図

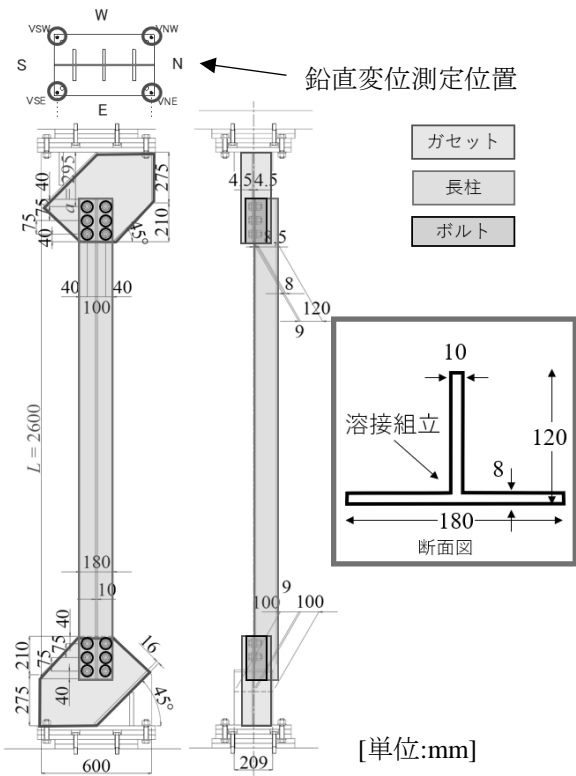


図-2 供試体 2,3 の構造図

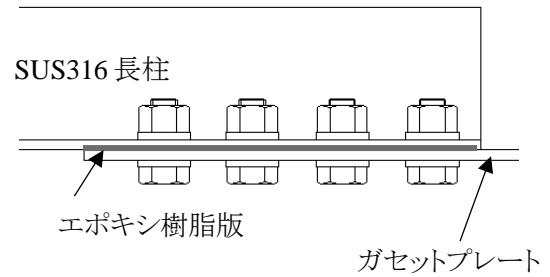


図-4 エポキシ樹脂版の挿入位置

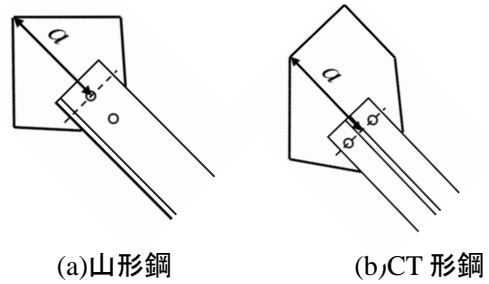


図-5 固定点間距離 a の定義

$$\bar{\lambda} = \frac{L}{r_x} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (1)$$

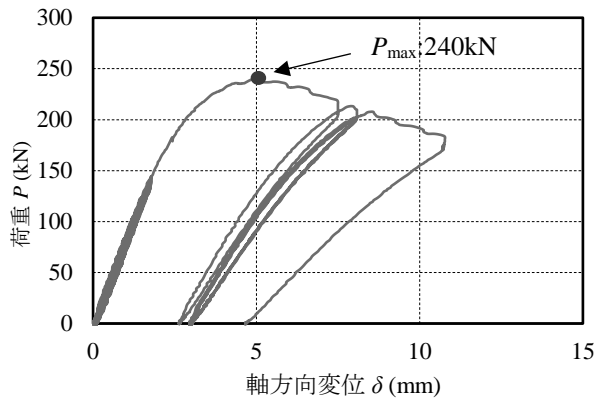
距離を表す。固定点間距離 a の定義を図-5 に示す。また、細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ は式(1)によって求められる。 $\bar{\lambda}$ は実橋梁において実績の多い範囲になるよう設定した。式(1)における有効座屈長 L には形鋼部の長さを採用している。

σ_y : 鋼材の降伏応力

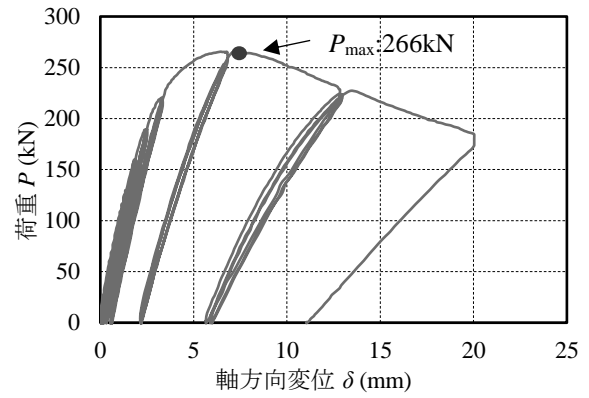
E : ヤング係数

L : 有効座屈長

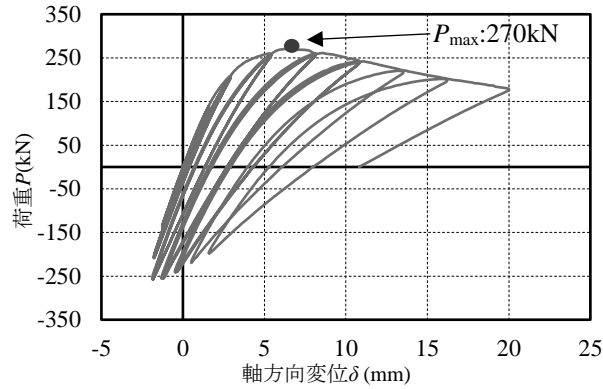
r_x : 断面図心を通り接合面に平行な軸周りの断面二次半径



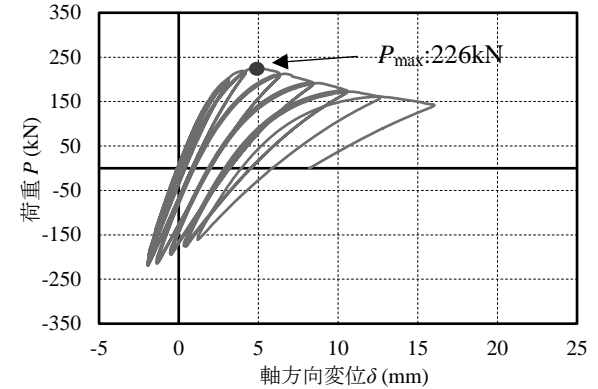
(a) 供試体 1 の荷重-変位関係



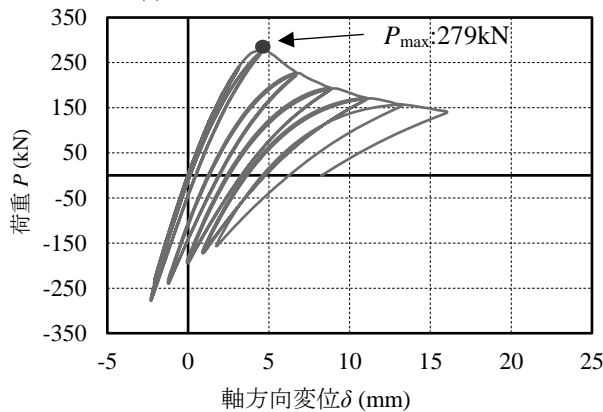
(b) 供試体 2 の荷重-変位関係



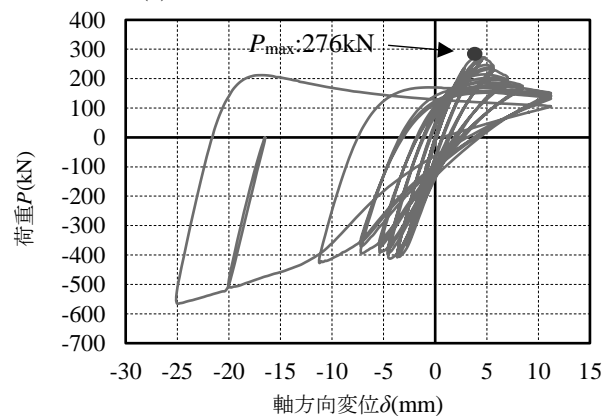
(c) 供試体 3 の荷重-変位関係



(d) 供試体 4 の荷重-変位関係



(e) 供試体 5 の荷重-変位関係



(f) 供試体 6 の荷重-変位関係

図-6 各供試体の荷重-変位関係

(2) 載荷方法

一軸圧縮試験には土木研究所の最大容量 1000kN の構造物試験機を用いた。なお、繰り返しの残留変位、残留ひずみについて考察を行うため、弾性域および最大耐力後の特定点において 3 回の繰り返し載荷を実施した。弾性域では荷重制御、最大耐力後では変位制御で載荷を行っている。供試体 1,2 では圧縮方向のみ繰り返し載荷を行い、供試体 3,4,5,6 では正負交番載荷を行った。そして供試体 1,2,3,4,5 の高力ボルト接合された供試体においては、引張載荷時に継手のすべりが発生しないよう荷重を調整して載荷を行った。

3. 実験結果

(1) ガセットを有する長柱全体の弾塑性挙動

各実験結果の軸方向荷重 P と軸方向変位 δ の荷重-変位関係を図-6 に示す。図-6 においては圧縮を正、引張を負としている。軸方向変位 δ は供試体上部の 4 点の変位の平均より抽出した。変位を抽出した位置は図-1～3 の供試体構造図に示す。図-6(f)、供試体 6 ではガセット部と長柱部を溶接によって接合されているため、高力ボルト接合部のすべり耐力を考慮する必要がない。それゆえ、他の供試体に比べ大きな引張載荷を行い、挙動を確認した。

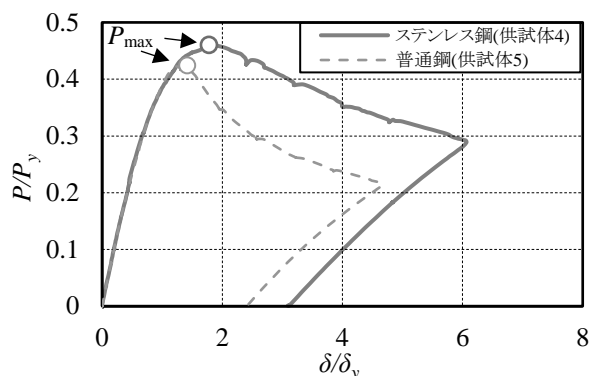


図-7 ステンレス鋼、普通鋼の包絡線の比較

ステンレス鋼と普通鋼の耐荷力に関する差異を確認するために、供試体 4.5 の高力ボルト接合された山形鋼供試体における正負交番荷重について比較する。荷重-変位関係をそれぞれの降伏荷重 P_y および降伏変位 δ_y で無次元化し、包絡線を比較したものを図-7 に示す。図-7 より、弾性域における傾きは概ね一致していることが読み取れる。また、無次元化した場合の最大耐力はステンレス鋼のほうがわずかに上回っているが、差異は小さい。ステンレス鋼と普通鋼供試体の最大荷重に差が生じた原因の考察は(4)にて後述する。最大荷重に達したあとは、ステンレス鋼のほうが普通鋼に比べ、若干緩やかに荷重が減少することを示した。

(2) 柱部の弾塑性挙動

各供試体の長柱の中央部にて、面外変位 v を測定した。山形供試体で面外変位を測定した位置を図-8 に、CT 形供試体で面外変位を測定した位置を図-9 に示す。供試体の断面中央部における鉛直荷重 P と、柱中央断面の面外変位 v の P - v 関係を図-10 に示す。図-10 より、すべての供試体で最大荷重に達するまで、柱部では面残留面外変位が比較的少ない挙動が見られた。そして、最大荷重に達した後では急激に面外変位が増大しており、除荷後には残留面外変位が計測された。

図-10(a),(d),(e),(f) に示す山形鋼の供試体では W-1, W-2 点で測定された面外変位に差が生じていた。山形鋼断面でねじれが生じていた可能性があるが、詳細は今後検討する。

(3) ガセット部の弾塑性挙動

図-11 に示す点にて、ガセット部の面外変位 v を測定した。CT 形鋼の供試体 2 と山形鋼の供試体 5 における実験結果の鉛直荷重 P と面外変位 v の関係を図-12 に示す。図-12(a) の CT 形鋼供試体にて、面外変位が頭打ちになっているのは、変位計の容量を超えた変位が生じ、変位の計測がされなかったためである。

図-11, 図-12 より、山形鋼, CT 形鋼の両供試体において、柱の端部より若干下の位置にある HDR1 の位置では面外変位があまり生じていなかった。一方ガセットと

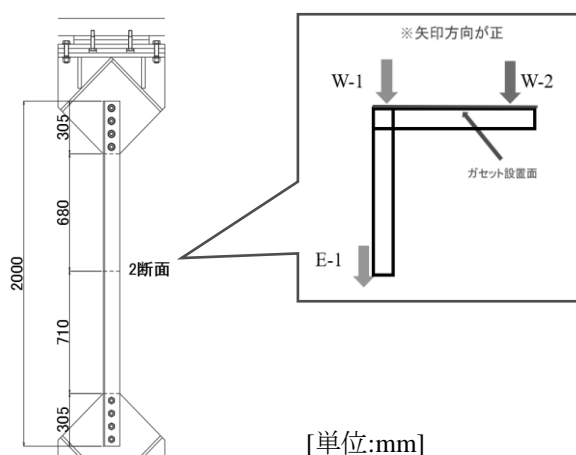


図-8 山形鋼供試体における面外変位測定点

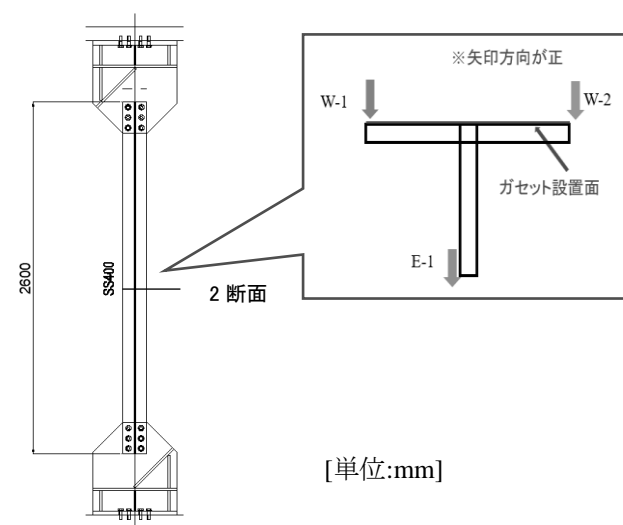


図-9 CT 形鋼供試体における面外変位測定点

柱が重なる部分である、山形鋼供試体の HDR6, CT 形供試体の HDR4 計測点では、計測した点の中で最も大きな面外変位が生じた。このことにより、座屈は主に柱部で生じたと考えられる。また、すべての計測点において、 P_{max} に達するまでの間は除荷時に残留面外変位が生じず、 P_{max} に達した後の荷重サイクルから残留面外変位が生じた。ガセット部の残留面外変位は図-10 に示す柱部に比べ、小さい値をとった。ガセット部の構造諸元によって残留面外変位は異なるため、今後検討をする必要があるが、本実験においてはガセットの残留面外変位が柱部に比べて小さくなる傾向が示された。

(4) 既往の耐荷力曲線との比較

耐荷力の評価法の検討のため、実験結果の最大荷重と降伏荷重の比 σ_{cr}/σ_y と、細長比パラメータ λ を道路橋示方書・同解説 II 鋼部材編⁴⁾(以下、「道示 II」)に示される耐荷力曲線と比較し、道示 II の耐荷力評価手法について検討した。道示 II の耐荷力曲線と実験結果を図-13 で比較する。道示 II に示される柱の耐荷力曲線式を

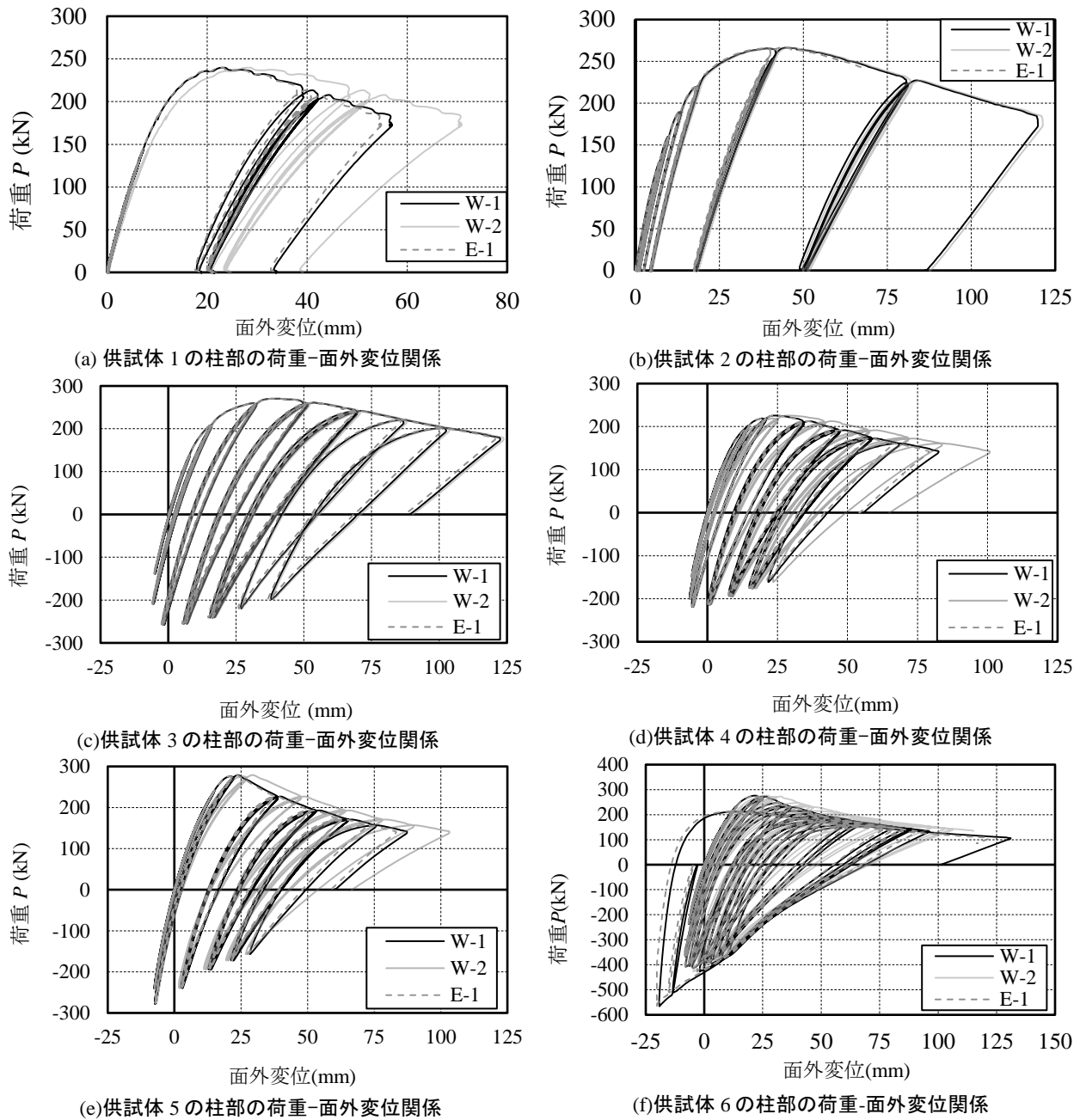


図-10 各供試体の荷重-面外変位関係

式(2)および式(3)に示す. 式(2) は溶接箱形断面以外における耐荷力曲線であり, 式(3)は山形鋼・CT 形鋼における耐荷力曲線で, 偏心を考慮している.

・溶接箱形断面以外(偏心なし)

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} = \begin{cases} 1.00 & (\bar{\lambda} \leq 0.2) \\ 1.109 - 0.545\bar{\lambda} & (0.2 < \bar{\lambda} \leq 1.0) \\ \frac{1}{0.733 + \bar{\lambda}^2} & (1.0 < \bar{\lambda}) \end{cases} \quad (2)$$

・山形鋼・CT 形鋼断面(偏心あり)

$$\frac{\sigma_{cud}}{\sigma_y} = \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} \left(0.5 + \frac{L/r_x}{1000}\right) \quad (3)$$

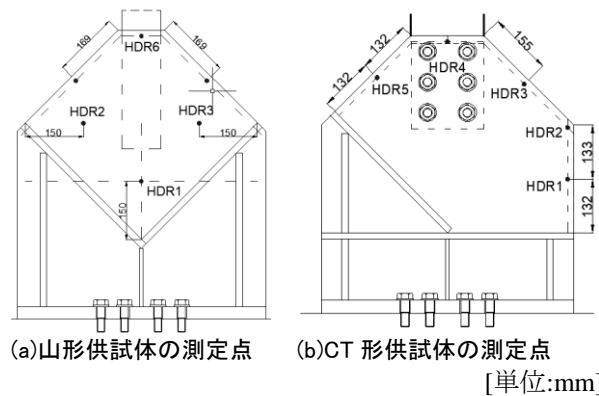
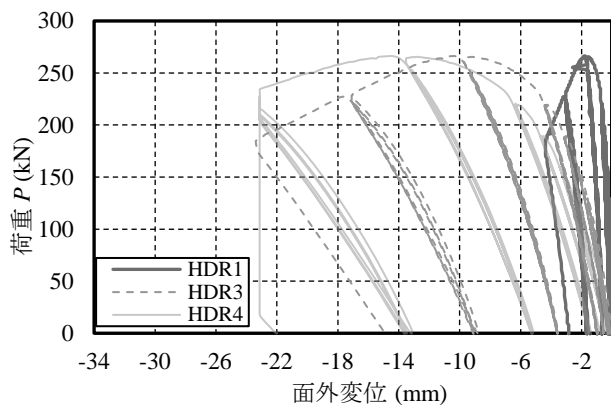
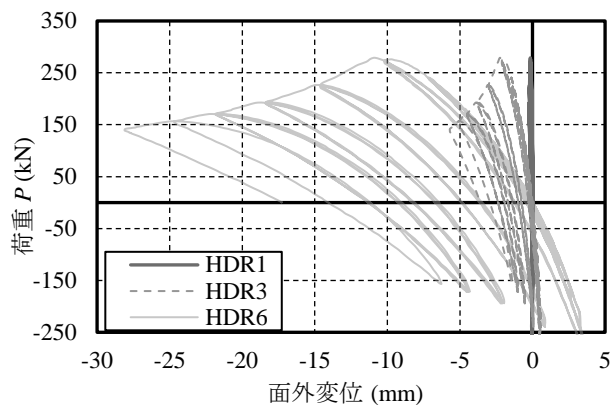


図-11 ガセットにおける面外変位の測定点



(a)供試体 2 のガセット部の荷重-面外変位関係



(b)供試体 5 のガセット部の荷重-面外変位関係

図-12 ガセットの荷重-面外変位関係

図-13 より、すべての実験結果が耐荷力曲線の上側にプロットされた。また実験結果より、細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ が小さくなるほど、降伏荷重に対する最大荷重の比 σ_{cr}/σ_y が高くなる傾向も見られた。これらの結果より、道示IIに示される耐荷力曲線はステンレス鋼を用いた長柱、そして正負交番載荷においても耐荷力を評価できる可能性が示された。

図-7 における、供試体 4,5 の無次元化した荷重-変位関係の比較で、最大荷重に差が生じた原因を図-13 の耐荷力曲線上のプロットを踏まえて考察する。図-13 の耐荷力曲線において、細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ が小さくなると、 σ_{cr}/σ_y が高くなる傾向にある。表-1 より、SUS316とSS400では降伏応力に差があるため、供試体 4(図-13 の◆)の細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ は 0.73、供試体 5(図-13 の▲)の細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ は 0.81 と供試体 4 の細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ が小さくなる。それゆえ、図-7 において、無次元化した最大荷重を比較すると、SUS316 の供試体 4 における σ_{cr}/σ_y が SS400 の供試体 5 と比較して大きくなったと考えられる。

4.まとめ

本研究では、ガセットプレートを有する鋼長柱の弾塑性挙動を確認するために載荷実験を行った。SS400、SUS316 からなる山形鋼、CT 形鋼の供試体に対し、繰返し圧縮載荷あるいは正負交番載荷を行った。以下に実験から得られた知見を示す。

- 実験結果は道示IIで示される耐荷力曲線の上側にプロットされた。そのため、ガセットプレートを有する鋼長柱の耐荷力はステンレス鋼や正負交番載荷時においても、既往の耐荷力曲線によって評価できる可能性があることが示された。また、細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ が小さい場合、最大荷重と降伏荷重の比が大きくなるという実験結果は、基準耐荷力曲線の特性と一致した。

- 最大耐力後の繰返し載荷において、ガセット部の残留面外変位は柱部の残留面外変位に対して小さな値を示

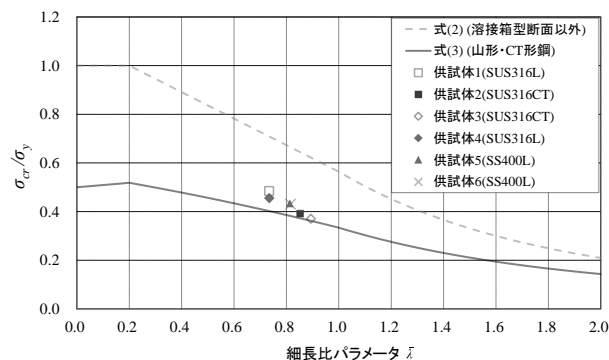


図-13 耐荷力曲線と実験結果の比較

す傾向にある。

謝辞: 本研究は、(国研) 土木研究所、(一社) 日本鋼構造協会、(一社) 日本橋梁建設協会、長岡技術科学大学、長岡工業高等専門学校、早稲田大学、本州四国連絡高速道路(株)との共同研究「耐久性向上のための高機能鋼材の道路橋への適用に関する共同研究」の一環として実施されたものです。関係各位の皆様には深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 宇佐美勉, T.V.Galambos: 2 軸曲げを受ける単一山形鋼柱の強度, 土木学会論文報告集, Vol. 191, pp.31-44, 1971.7.
- 2) 宇佐美勉, 福本昉士: プレーシング材としての山形及び T 形鋼部材の圧縮強度と設計, 土木学会論文報告集, Vol. 201, pp.43-50, 1972.5.
- 3) 澁谷 敦, 村井 啓太, 志村 保美, 小林 裕輔, 小野 潔, 玉越 隆史: ステンレス鋼と炭素鋼の異材摩擦接合継手に関する実験的研究, 令和元年度土木学会全国大会第 74 回次学術講演会, I-447, 2019.8.
- 4) 公益社団法人 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説II 鋼橋・鋼部材編, 2017.11.