

SBHS500を用いたフィレットを有する鋼製橋脚隅角部のフランジの応力低減効果に関する実験的研究

大門 大¹・森下 宣明²・渡邊 俊輔³・丸山 拓也⁴・小野 潔⁵

¹正会員 修士(工学) 名古屋高速道路公社 都心アクセス事業部 (〒453-0804 愛知県名古屋市中村区黄金通7-28-1)

²正会員 名古屋高速道路公社 都心アクセス事業部 (〒453-0804 愛知県名古屋市中村区黄金通7-28-1)

³正会員 修士(工学) エム・エムブリッジ株式会社 (〒733-0036 広島県広島市西区観音新町1-20-24)

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

⁵正会員 博士(工学) 早稲田大学教授 創造理工学研究科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

1. はじめに

鋼製橋脚のはりと柱が交差する隅角部は、従来から常時やレベル1地震時に対して、奥村・石沢の提案した方法¹⁾によって算出したせん断遅れ現象により生じる局所的なピーク応力を用いた弾性設計が適用されている。そのため、隅角部は一般部に比べて厚板化する傾向にあり、溶接性、施工性及び製作性等の面で不都合が生じることがある。隅角部の板厚低減に資する対応として、既往の研究成果^{2),3)}によるとフィレット設置による応力低減効果が得られることが報告されており、そのことを考慮した設計手法も提案⁴⁾されている。さらに2017年改定の道路橋示方書に規定化された橋梁用高降伏点鋼板SBHS500の採用も対応策の一つである。

一方でSM570と比べSBHS500を用いた隅角部のフィレット設置による応力低減効果に関する研究デー

タは不足している。そこで本研究では、フィレットを有するSBHS500製隅角部を含む各種縮小供試体による載荷実験を行い、フィレットによるフランジの応力低減効果について検討を行った。

2. 実験概要

(1) 供試体の設計と諸元

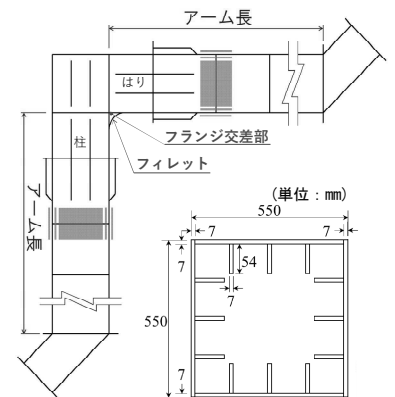
a) 断面寸法

供試体の断面寸法は、実験施設のジャッキ能力、載荷ストローク等各種条件や供試体の製作性を勘案し、高さ・幅がSBHS500の供試体では550mm、SM570の供試体では570mmの矩形断面を基本とした。これは実構造物に対する約1/5のスケールに相当する。またウェブ高さは、既往の研究成果⁴⁾を参考に、はり：柱=1：1を基本とした。供試体諸元を表-1、供試体を図-1にそれぞれ示す。

表-1 供試体諸元

	供試体No. 1	供試体No. 2	供試体No. 3	供試体No. 4
はり・柱断面寸法 フランジ×ウェブ (mm)	550×550mm (t=7mm)	550×550mm (t=7mm)	550×550mm (t=11mm)	570×570mm (t=7mm)
補剛材 h _r ×t _r (mm)	54×7 (3本)	54×7mm (3本)	56×11mm (2本)	54×7mm (3本)
材質	SBHS500	SBHS500	SBHS500	SM570
フィレットの有無	有	無	有	有
公称降伏応力(N/mm ²)	500	500	500	450
実降伏応力(N/mm ²)	700	687	568	575
R _R	0.60 (0.50)	0.59 (0.50)	0.45 (0.42)	0.56 (0.50)
R _F	0.59 (0.50)	0.58 (0.50)	0.53 (0.50)	0.56 (0.50)
γ ₁ /γ _{1req}	1.02	1.02	1.02	1.01
フィレット幅厚比R _{F111}	31.4	—	20	32.6
アーム長 (mm)	2,400	2,400	3,000	2,400

※R_R, R_Fは実降伏応力(カッコ内の数字は、公称応力)を用いて算出。



供試体断面の例(供試体 No. 1)

図-1 供試体

b) 材質および板厚

材質はSBHS500材を基本とし、材質の違いを調べるため供試体No.4のみSM570材とした。板厚については、荷重フレームおよびジャッキ能力を勘案して7mmを基本とした。またフィレット幅厚比の違いを調べるため、供試体No.3のみ板厚を11mmとした。

c) 補剛材設計

隅角部フランジおよびウェブパネルに配置する補剛材の本数および断面寸法は、実構造物の上限値を踏まえ、 $R_R=0.5$ 程度、 $R_F=0.5$ 程度、 $\gamma/\gamma_{l.req} \geq 1$ となるよう設定した。

d) フィレット形状

フィレットは、フィレット突出長 W をはり高の20%とした形状（図-7参照）を標準とし、実構造物への適用も踏まえ2020年改定の鋼道路橋設計便覧にも例示のある緩和曲線を設けた形状を採用した。本研究の供試体については、フィレットを設置することを基本とし、供試体No.2のみフィレットなしの構造とした。

(2) 実験施設及び実験装置

実験装置および供試体の設置は、図-2に示すように隅角供試体の柱とはりの両端をピンで固定し、片側を反力壁に固定、もう片側を荷重フレームを介したジャッキに固定してジャッキ変位によって供試体に圧縮・引張が作用するよう正負交番荷重を行った。

(3) 実験方法

a) 計測項目

ひずみ計測は、図-3に示すようにフランジ交差部のフランジ表面より50mmの位置（フランジ交差部近傍）で実施した。

変位計測は、ジャッキストロークに加え、図-2に

示す隅角部から柱・はりそれぞれに1パネル分だけ離れたダイヤフラム位置同士を結んだ線上で実施した。この変位計による値を隅角変位 δ とする。また、フランジおよびフィレットの面外変形を計測するため、はり下側フランジおよび柱内側フランジ外面と、フィレット突出部にも板の面外方向に変位計を設置した。

b) 荷重荷重方法

本実験では、はり下側フランジまたは柱内側フランジそれぞれのフランジ交差部近傍の外面に設置したひずみゲージの値の平均のうち、大きいほうの値がミルシートに記載の降伏応力度より算出した降伏ひずみに達した時点フランジの降伏とみなした。また、この時点での隅角変位 δ をフランジの実験時降伏変位 δ_y と定義した。荷重の荷重方向はジャッキが伸びる方向（供試体を圧縮する方向）を正、ジャッキが縮む方向（供試体を引っ張る方向）を負とし、正方向より荷重を開始した。そしてフランジが降伏に達した時点（隅角変位 $+1\delta_y$ ）で荷重方向を反転させて除荷を行い、次に負方向に隅角変位 $-1\delta_y$ まで荷重を行った。以降 $\pm 2\delta_y$ 、 $\pm 3\delta_y$ 、・・・と $1\delta_y$ ずつ変位を漸増させながら正負交番荷重を行い、供試体

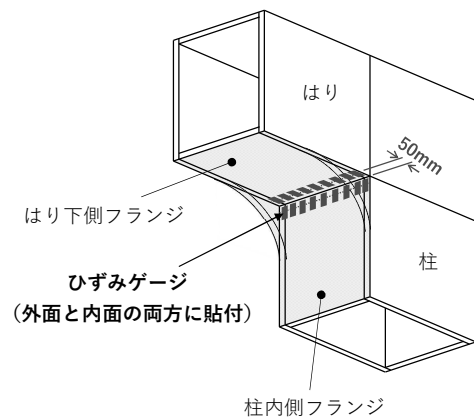


図-3 フランジ交差部近傍のひずみゲージ設置位置

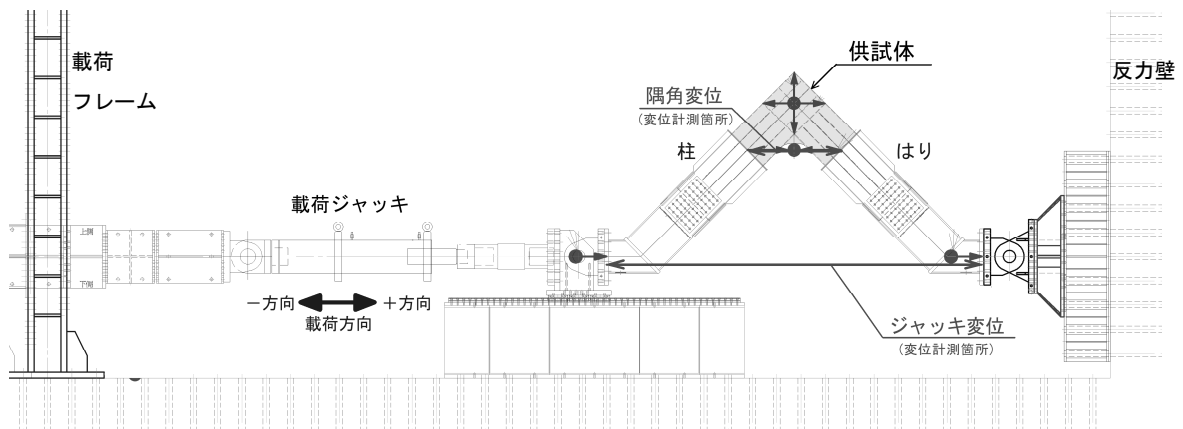


図-2 実験装置

No.4以外最大荷重が観察されるまで载荷を行った。なお、供試体No.3のみ正方向への単調圧縮载荷を実施した。また、弾性域から降伏に至るまでの荷重-変位関係を詳細に把握することを目的として、前述した $+1\delta_y$ までの载荷に先立ち、 $+0.5\delta_y$ 程度から荷重ゼロまでの繰り返し载荷を数回実施した。

3. 実験結果

(1) 荷重-変位関係

各供試体の荷重 P と隅角変位 δ の関係 (P - δ 関係)を図-4に示す。本論では、主に弾性域におけるはり下側フランジ、柱内側フランジのひずみに着目し、フィレット設置による応力低減効果の考察を行った。

(2) 弾性域におけるフランジのひずみ

a) フィレットの有無

供試体の断面寸法、材質が同様でフィレット設置

の有・無の違いがある供試体No.1と供試体No.2を比較した。図-5に降伏荷重 $P_y \times 0.25$ 時と常時 ($=P_y/1.7$)のはり下側フランジにおけるフランジ交差部近傍のひずみ分布を供試体No.1, No.2それぞれ示すほか、はり理論に基づき計算される平均応力によるひずみ値と、奥村・石沢式によって算出されるひずみ値の二種類を併記する。

図-5(c)(d)に示すようにフィレットが無い供試体No.2では、 $P_y \times 0.25$ 時、常時においてフランジ端部にせん断遅れによる応力集中が内面と外面ともに確認できた。一方で、図-5(a)(b)に示すようにフィレットを有する供試体No.1ではフランジ端部の応力集中の度合いが小さく、常時において外面のひずみが平均ひずみを超えるものの内面との平均においてはひずみが低減されていることがわかる。フィレットを有するその他の供試体No.3,4においても、フランジ端部の応力集中が緩和されており、平均応力以下となっていることが確認できた。

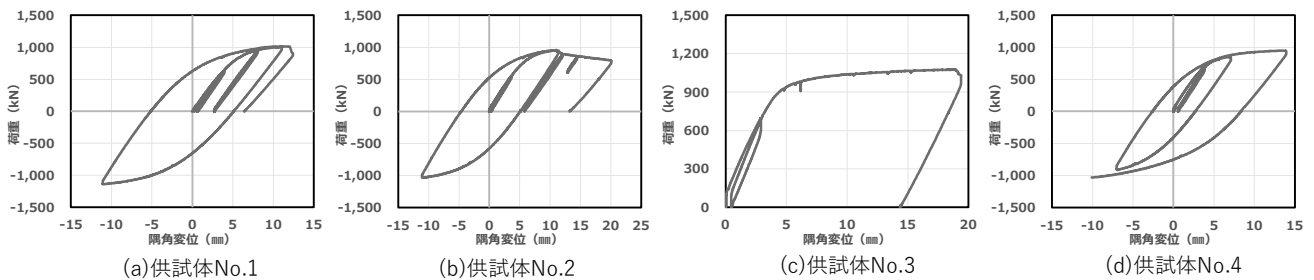


図-4 荷重 P -隅角変位 δ 関係

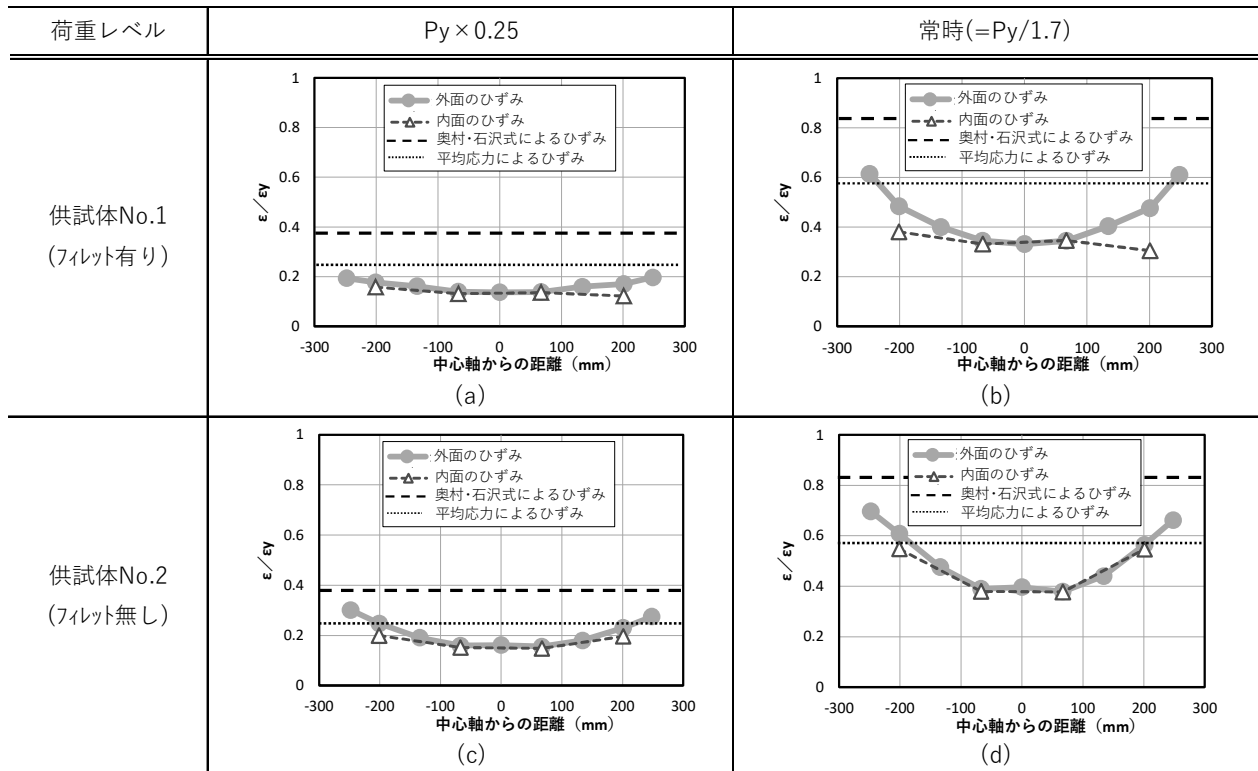


図-5 はり下側フランジ・フランジ交差部近傍のひずみ分布 (供試体 No. 1, No. 2)

b) フィレット幅厚比

図-6に供試体No.1 (フィレット幅厚比31.4) と供試体No.3 (フィレット幅厚比20.0) のフランジ交差部近傍における外面のひずみ分布を、はり下側および柱内側それぞれ示す。またグラフには、降伏荷重 $P_y \times 0.25$ 時, $P_y \times 0.5$ 時, 常時 ($=P_y/1.7$) のひずみ分布を示す。なお、フィレット幅厚比 R_{fil} の定義は、図-7に示す通りである。ウェブの板厚の違いによりフィレット幅厚比が異なる供試体No.1と供試体No.3において、フィレット設置によるフランジ交差部に発生する応力低減効果について比較を行った。図-6に示すように $P_y \times 0.25$ 時では供試体No.1,3のひずみ値に差はほとんど無いが、 $P_y \times 0.5$ 時、常時と荷重が増加するにつれ、フィレット幅厚比が小さい供試体No.3は、フィレット幅厚比が大きい供試体No.1に比べ、応力低減効果が大きくなる傾向にあることがわかった。フランジ端部の応力集中が緩和されており、せん断遅れの低減効果とフィレット幅厚比の間に相

関性があることが確認できた。また、はり下側フランジと柱内側フランジそれぞれで同様の傾向が確認できた。

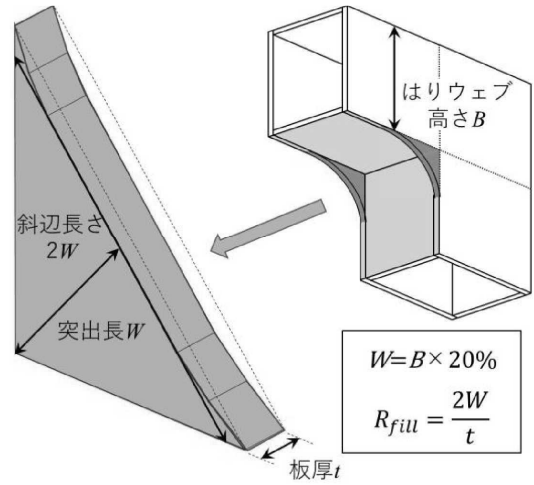


図-7 フィレット幅厚比 R_{fil} の定義

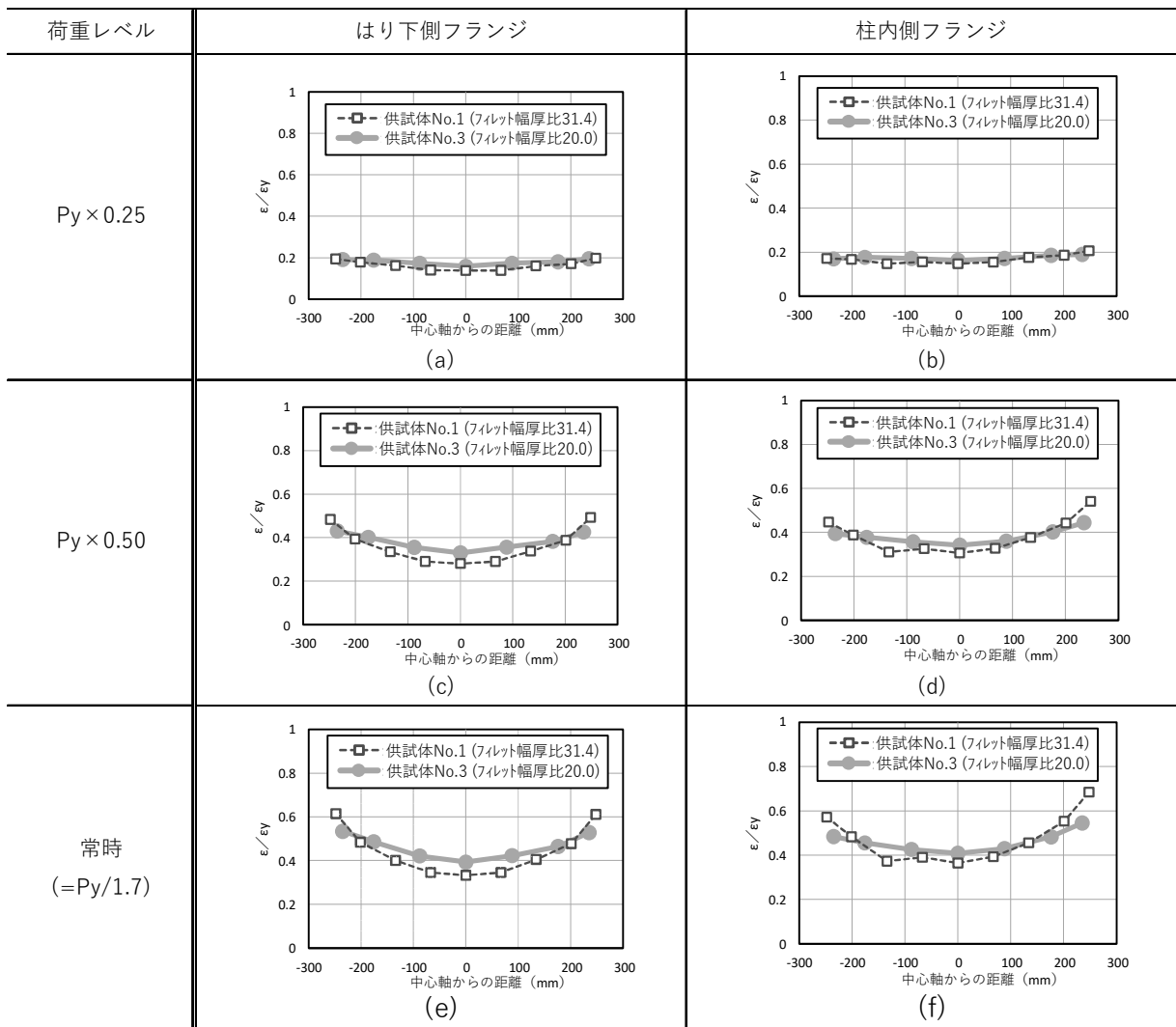


図-6 フランジ交差部近傍における外面のひずみ分布 (供試体 No. 1, No. 3)

c) 鋼種

図-8に供試体No.1 (SBHS500) と供試体No.4 (SM570) のフランジ交差部近傍における外面のひずみ分布を、はり下側および柱内側それぞれ示す。またグラフには、降伏荷重 P_y の0.25倍と0.5倍、常時(= $P_y/1.7$)のひずみ分布を示す。

SBHS500とSM570との鋼種の違いに着目し、フィレット設置によるフランジ交差部に発生する応力低減効果について比較を行った。図-8(a) (b)に示すように $P_y \times 0.25$ 時では、供試体No.1,4のひずみ値に差はほとんど無い。 $P_y \times 0.5$ 時、常時と荷重が増加するにつれ、SM570の供試体No.4は、SBHS500の供試体No.1に比べ、フランジ端部の応力低減効果が大きい傾向が確認できた。これはd)で後述するフィレット面外変位の影響も関係していると推測される。

d) フィレット面外変位

フィレットの面外変位に着目し、フランジの応力低減効果の検証を行った。図-9に荷重 P とフィレ

ット面外変位関係の包絡線を示す。なお、図-9に示すフィレット面外変位は、初期たわみの影響は考慮していない。

フィレット幅厚比が小さい供試体No.3は、フィレットの剛性が高いため、常時荷重時でもフィレットの面外変位の増加が小さい。一方で、フィレット幅厚比の大きな供試体No.1は、 $P_y \times 0.25$ 時以降にフィ

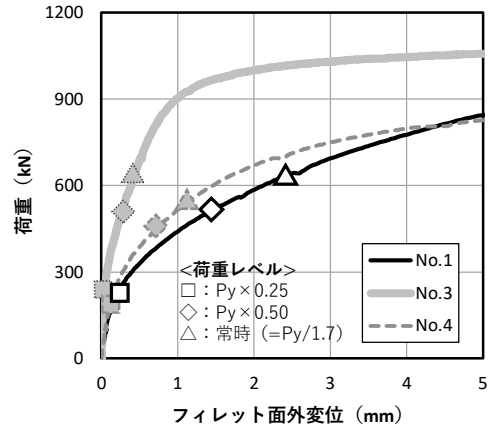


図-9 荷重とフィレット面外変位関係 (包絡線)

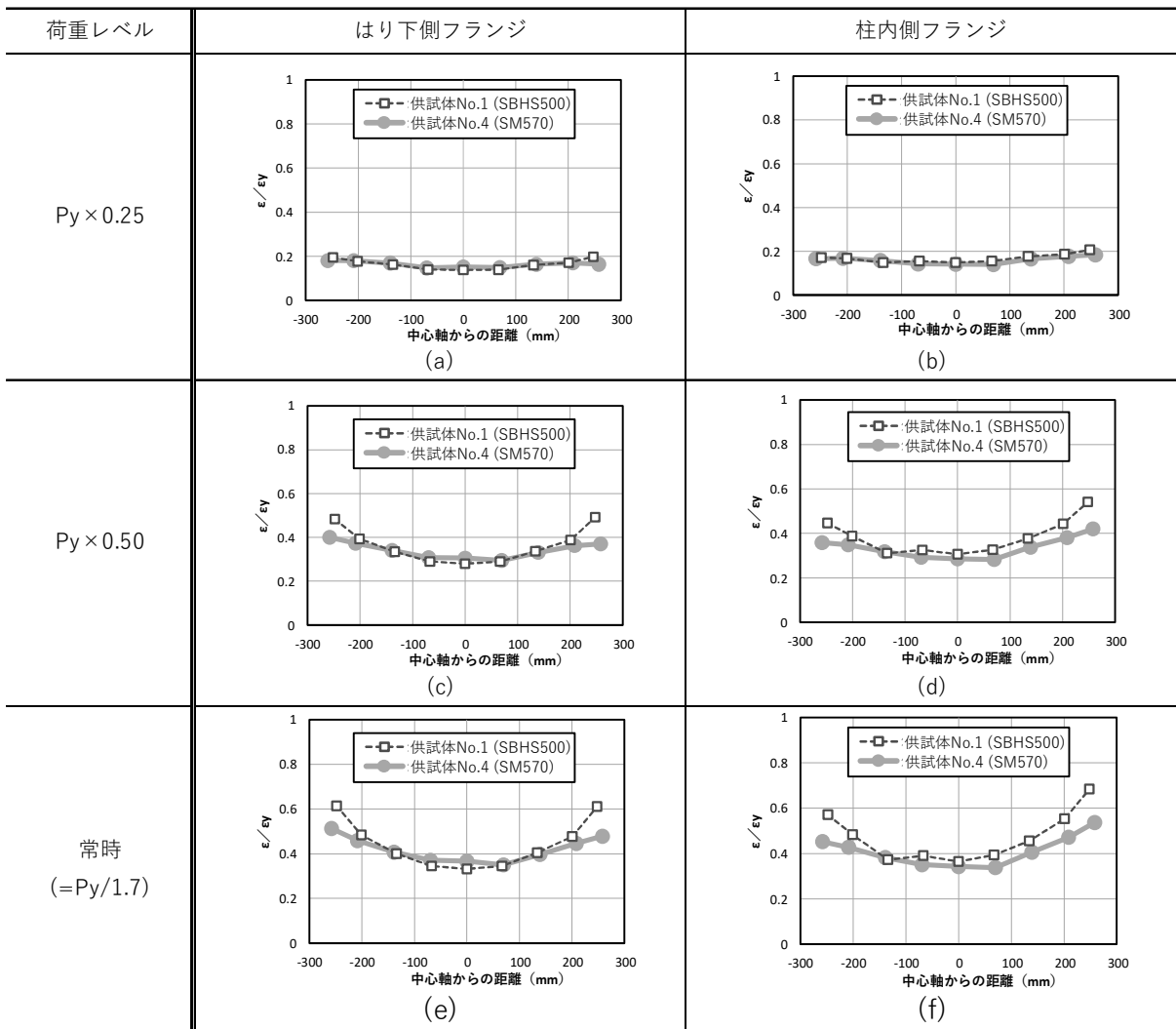


図-8 フランジ交差部近傍における外面のひずみ分布 (供試体 No. 1, No. 4)

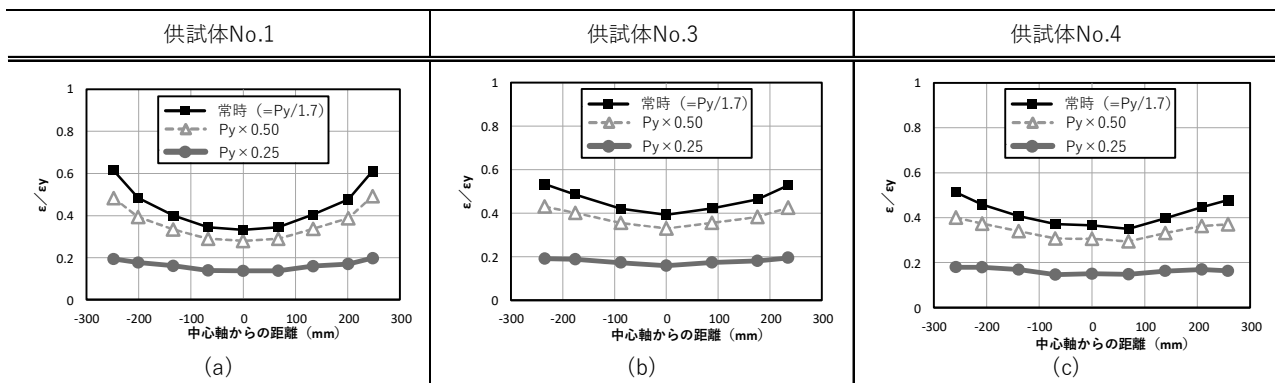


図-10 はり下側フランジ・フランジ交差部近傍における外面のひずみ分布（供試体 No. 1, 3, 4）

レットの面外変位が急増していることがわかる。また図-10にはり下側フランジのフランジ交差部近傍における各荷重ケースでの外面のひずみ分布を示す。 $P_y \times 0.50$ 時と常時のフランジ端部のせん断遅れによるひずみが比較的low減されている供試体No.3,4と比べると、供試体No.1は、 $P_y \times 0.50$ 時でフランジ端部のせん断遅れによるひずみが比較的大きくなっている。これは、フィレットの面外変位が進行したことで、応力低減効果が薄れたと推測される。このことから、フィレット面外変位は応力低減効果に影響を与える一因であると考えられる。

4. まとめ

フィレットを有するSBHS500製隅角部を含む各種縮小供試体による荷重実験を行い得られた知見を、下記に示す。

- SBHS500 製隅角部において、フィレットを設置したことによりフランジ交差部近傍のせん断遅れによる応力が低減することが確認できた。
- SM570 材と SBHS500 材を用いたフィレットを有する隅角部において、鋼種の違いによる応力低減効果の大きな傾向の違いは確認されなかった。
- フィレット設置による応力低減効果には、フィレットの幅厚比およびフィレットの面外変位が影響していることが確認できた。フィレット幅厚比が小さい（板厚が厚い）ほうが応力低減効果が大きく、面外変位が小さい方が荷重が増加した際の応力低減効果が持続する傾向があることがわかった。

謝辞：本研究は、「名古屋都心アクセス構造検討委員会」の検討の一環として実施されたものです。委員の先生方をはじめ、関係者の方々には多くの助言やご指導をいただきました。ここに深く感謝致します。

参考文献

- 1) 奥村敏恵, 石沢成夫; 薄型構造ラーメン隅角部の応力計算について, 土木学会論文集, 第153号, pp.1-18, 1968.5.
- 2) 田辺篤史, 三木千壽, 市川篤司, 佐々木栄一, 下里哲弘; 既設箱形断面鋼製ラーメン橋脚隅角部のリブ取付による疲労強度向上, 土木学会論文集, No.773/I-69, pp.137-148, 2004.10.
- 3) 長谷川和夫, 伊東昇, 山本泰幹, 齊藤亮, 清川昇悟, 村野益巳; 首都高速道路の建設における鋼製橋脚隅角部の疲労耐久性向上の技術, 橋梁と基礎, Vol.41, No.2, pp.31-39, 2007.2.
- 4) 美島雄士, 小野潔, 西村宣男; 鋼製ラーメン橋脚隅角部の弾塑性挙動およびフィレットの効果を検討した設計法の提案, 土木学会論文集A1, Vol.70 No.1, pp.31-50, 2014.