

新設鋼製橋脚隅角部におけるフィレットによる応力集中低減効果の解析的検討

Stress Reduction Effects in Steel Pier Beam-Column Connections

宮森 雅之
Masayuki MIYAMORI

川田工業㈱技術研究本部
技術研究室

町田 文孝
Fumitaka MACHIDA

川田工業㈱技術研究本部
技術研究室主幹

近年、鋼製橋脚の隅角部において疲労き裂が発見された。隅角部に発生するせん断遅れによる高い応力集中が原因の一つとされている。この隅角部の応力集中を低減するためにフィレット構造の採用が効果的である。本検討では、有限要素法を用いたパラメトリック解析を行い、様々な隅角形状においてフィレットの形状および寸法が、フィレットによる応力集中低減の効果に与える影響を明らかにした。応力集中を50%程度低減するには $W/D = 13\%$ 程度のフィレット寸法が必要である。また、検討の中で確認されたフィレット内やフィレット先端および縁端に発生する応力などについても報告する。

キーワード：鋼製橋脚，隅角部，疲労き裂，フィレット，せん断遅れ，応力低減

1. はじめに

従来、道路橋では鉄道橋と比べて活荷重による影響が小さいために疲労損傷は起こらないとされてきた。しかしながら、近年、道路橋の鋼製橋脚の隅角部において多くの疲労き裂が発見されている¹⁾。これらの損傷は大型車の増大、板組による固有内在きずの発生、応力集中などが原因として推測されている。

隅角部の設計には、奥村・石沢²⁾らのせん断遅れを考慮した解析法³⁾が用いられている。しかしながら、隅角部の角部に発生するせん断遅れによる応力集中の程度は隅角部の形状、断面寸法などによって異なり、疲労性能に影響を及ぼすことから、この高い応力集中が疲労損傷の一因であると考えられている。

現在これら疲労き裂に対する補修補強に関する検討⁴⁾や、今後新設される鋼製橋脚に対しても疲労損傷を防止するための様々な検討が行われている。これらの検討の中で、せん断遅れによる応力集中を低減するための一手法として、**図1**に示すようなフィレット構造の採用が効果的であることが確認されている⁵⁾。しかしながら、フィレットの形状および寸法が応力集中を低減する効果にどのような影響を及ぼすかについては定量的には把握されていない。そこで、フィレットの形状と寸法が与える影響について把握するため、有限要素法（以下、FEM解

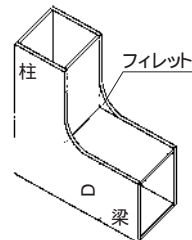


図1 フィレット構造⁶⁾

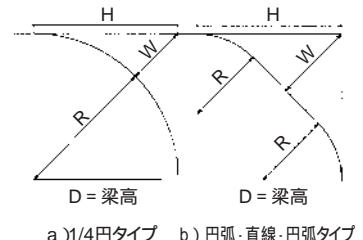


図2 フィレット形状

析と記す)を用いたパラメトリック解析による検討を実施した。本報告では、FEM解析によって確認されたフィレットの形状や寸法が応力集中低減の効果に与える影響や応力性状などについて報告する。

2. 検討概要

応力集中を緩和する検討では、隅角のタイプによる影響も把握するために合計6タイプ（角柱形状4タイプ、円柱形状2タイプ）の隅角部形状において、フィレット形状、寸法を変化させFEM解析を行った。フィレット形状の概略を**図2**に示す。FEM解析ではフィレットの大きさ（突出長） W および横梁高さ D を変化させた。解析モデルの形状、解析ケースなどを**表1**に示す。

表1 解析モデル概略

Type-2 : 角柱T型(1)										
解析モデル概略図										
	寸法	形状			Flg厚	Web厚				
	梁断面	Flg 2 500 x Web 2 000			-	-				
	柱断面	Flg 2 500 x Web 2 200			-	-				
解析ケース	解析ケース名称	フレット形状(mm)			M/S比	板厚	備考			
		W	R	H			W/DX (%)	R/DX (%)	タイプ	
	Type-2.1.0	なし			3 : 1	25	-	-	-	
	Type-2.1.1	165.69	400				8.3	20	a)	
	Type-2.2.0	なし					6 : 1	-	-	-
	Type-2.2.1	165.69	400		8.3			20	a)	
	Type-2.3.0	なし			9 : 1			-	-	-
	Type-2.3.1	165.69	400				8.3	20	a)	
	Type-2.4.0	なし				3 : 1	-	-	-	
	Type-2.4.1	165.69	400		8.3		20	a)		
	Type-2.5.0	なし			6 : 1		-	-	-	
	Type-2.5.1	165.69	400			8.3	20	a)		
	Type-2.6.0	なし				9 : 1	-	-	-	
Type-2.6.1	165.69	400		8.3	20		a)			

Type-3 : 角柱T型(2)										
解析モデル概略図										
	寸法	形状			Flg厚	Web厚				
	梁断面	Flg 2 500 x Web 2 800			34	34				
	柱断面	Flg 2 500 x Web 2 200			34	34				
解析ケース	解析ケース名称	フレット形状(mm)			備考					
		W	R	H	W/DX (%)	R/DX (%)	タイプ			
	Type-3.0	なし			-	-	-			
	Type-3.1	224	200	399.63	8	7.1	b)			
	Type-3.2	336	200	568.02	12	7.1	b)			
	Type-3.3	560	560	1 023.92	20	20	b)			

Type-4 : 角柱Hの字型										
解析モデル概略図										
	寸法	形状			Flg厚	Web厚				
	梁断面	Flg 2 500 x Web 2 000			28	22				
	柱断面	Flg 2 500 x Web 2 200			25	22				
解析ケース	解析ケース名称	フレット形状(mm)			備考					
		W	R	H	W/DX (%)	R/DX (%)	タイプ			
	Type-4.0	なし			-	-	-			
	Type-4.1	165.69	400	400	8.3	20	a)			
	Type-4.2	200	200	365.69	10	10	b)			
	Type-4.3	400	400	731.37	20	20	b)			
Type-4.4	600	600	1 097.06	30	30	b)				

Type-5 : 角柱逆L型										
解析モデル概略図										
	寸法	形状			Flg厚	Web厚				
	梁断面	Flg 3 000 x Web 3 000			37	37				
	柱断面	Flg 3 000 x Web 2 750			37	37				
解析ケース	解析ケース名称	フレット形状(mm)			備考					
		W	R	H1	H2	W/DX (%)	R/DX (%)	タイプ		
	Type-5.0	なし					-	-	-	
	Type-5.1	240	200	469.12	422.25	8	6.7	b)		
	Type-5.2	360	200	671.91	591.96	12	6.7	b)		
	Type-5.3	600	600	1 204.71	1 097.06	20	20	b)		

Type-6 : 円柱T型										
解析モデル概略図										
	寸法	形状			Flg厚	Web厚				
	梁断面	Flg 1 600 x Web 2 000			34	34				
	柱断面	2 000			46					
解析ケース	解析ケース名称	フレット形状(mm)			控え材	備考				
		W	R	H		W/DX (%)	R/DX (%)	タイプ		
	Type-6.0.0	なし			なし	-	-	-		
	Type-6.1.1	160	200	309.12	なし	8	10	b)		
	Type-6.1.2	160	200	309.12	台形	8	10	b)		
	Type-6.2.1	240	200	422.25	なし	12	10	b)		
	Type-6.2.2	240	200	422.25	台形	12	10	b)		
	Type-6.2.3	240	200	422.25	台形(小)	12	10	b)		
	Type-6.3.1	400	400	731.37	なし	20	20	b)		
	Type-6.3.2	400	400	731.37	台形	20	20	b)		

Type-7 : 円柱Hの字型										
解析モデル概略図										
	寸法	形状			Flg厚	Web厚				
	梁断面	Flg 2 500 x Web 2 500			14	15				
	柱断面	2 500			34					
解析ケース	解析ケース名称	フレット形状(mm)			控え材	備考				
		W	R	H		W/DX (%)	R/DX (%)	タイプ		
	Type-7.0	なし			なし	-	-	-		
	Type-7.1	165.69	400	400	なし	8.3	20	a)		
	Type-7.2	165.69	400	400	小	8.3	20	a)		
	Type-7.3	165.69	400	400	台形	8.3	20	a)		
Type-7.4	165.69	400	400	大	8.3	20	a)			

ここで、タイプとはフレットの形状を示し、a): 1/4円タイプ、b): 円弧・直線・円弧タイプ

それぞれの隅角形状において、比較の基準としてフィレットを設けないケースについても解析を行った。これら検討に用いた隅角部形状および部材寸法は、既設および計画中の実橋脚を参考にした。解析条件を下記に示す。

- ・静的弾性FEM解析
- ・使用要素：薄肉シェル要素，梁要素
- ・評価位置要素サイズ：25 mm
- ・載荷荷重：任意の単位荷重
- ・境界条件：柱部材上下端を全自由度拘束
：シンメトリック部は鏡面条件
- ・解析ソフト：MSC.Marc2001

評価位置はせん断遅れによる応力集中の代表点として、横梁フランジにおける柱部材から50 mm，かつ横梁ウェブから50 mm離れた位置とした。この評価位置は、板要素の交差線から2要素分離することで解析上の局部的な応力の乱れの影響がなくなると判断して便宜上定めた

位置である。評価方法は、応力が最大となる板外面の主応力を用いた。また、フィレットの先端および縁端の応力についても整理した。なお、円柱形状については、円柱内に設けるフィレットの控え材の有無および大きさの影響についても検討を行った。

3. 解析結果

(1) フィレットの効果

はじめにフィレットによる応力集中低減の効果について述べる。図3(a)～(e)に角柱トの字型(Type-4.0～Type-4.4)下フランジの主応力図を示す。これらの図より、フィレットを設けることで、隅角部角部(梁ウェブ近傍)に発生する応力集中を緩和できていることがわかる。フィレット寸法が大きくなるに伴い隅角部角部の応力が低減できている。横梁下フランジの柱部材から50 mm離れた位置での主応力を図4に示す。図5に評価位置における

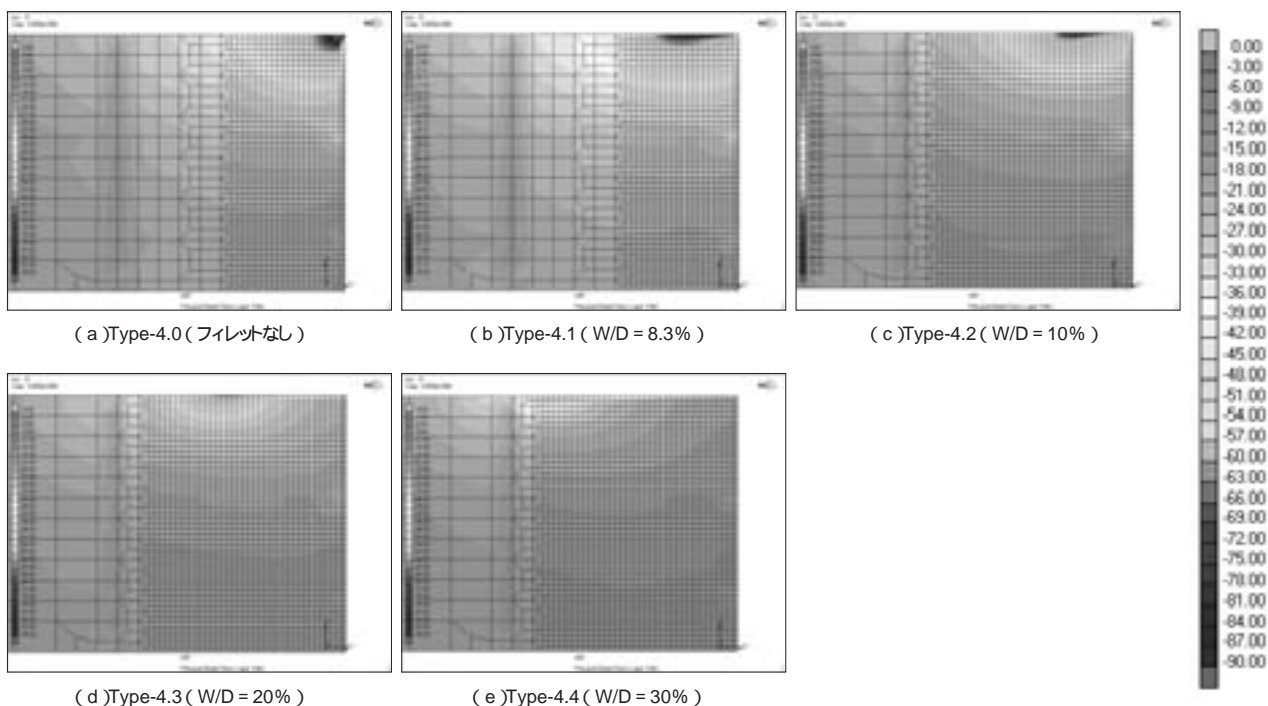


図3 下フランジ主応力図(角柱トの字型)

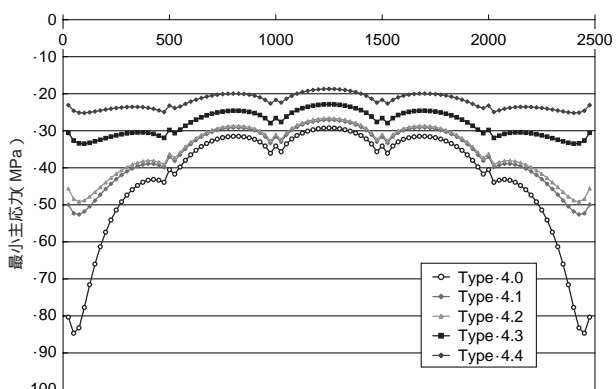


図4 梁フランジの主応力分布

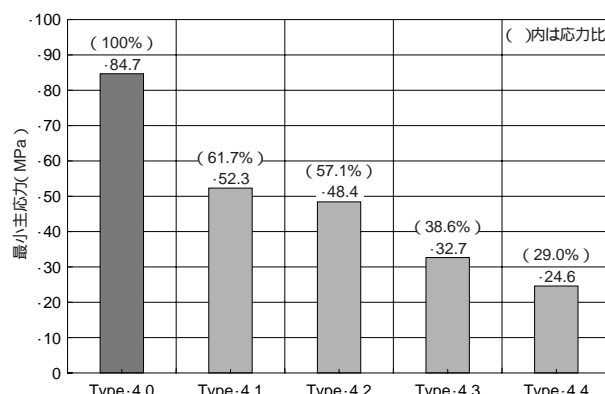


図5 応力比(評価位置)

応力比を示す。ここで応力比とは、フィレットを設けない場合の評価位置の応力を100%としたフィレットの有無による評価位置での応力の比である。図4中（白丸）はフィレットなしをプロットしたもので、隅角部角部で主応力が大きく卓越している。この卓越しているのはフランジ幅に対し20~30%ほどの領域である。フィレットを設けることによって、この領域の応力を低減できている。例えば、R=400の1/4円形状のフィレット（Type-4.1）を設けることで、評価位置の主応力を62%程度に低減できている。また、1/4円形状に比べフィレットの大きさ（突出長）Wを広げられる円弧-直線-円弧タイプでは、W/Dを大きくするに伴って、より効果的に応力集中が低減できることが確認できた。W/D=20%の円弧-直線-円弧タイプの応力低減効果は大きく39%程度に応力を低減できることが確認された。

(2) 断面力比 (M/S比) および板厚の影響

解析ケースType-2.1.0~Type-2.6.1では、断面力比 (M/S比) および板厚を変化させて解析を行った。すべて同一のフィレット形状および寸法とした。得られた評価位置における応力比を図6に示す。これによれば、フィレットを設けることで隅角部の応力を65%程度以

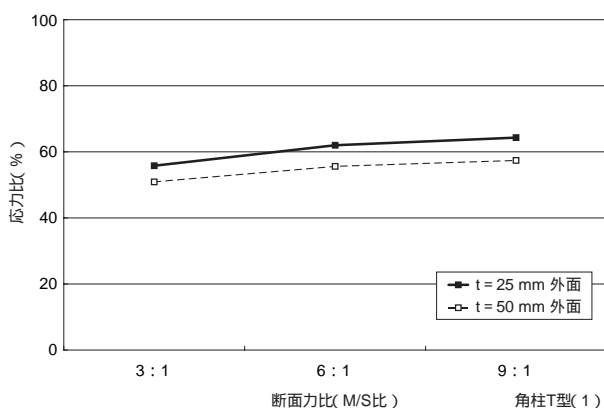


図6 応力比 (評価位置)

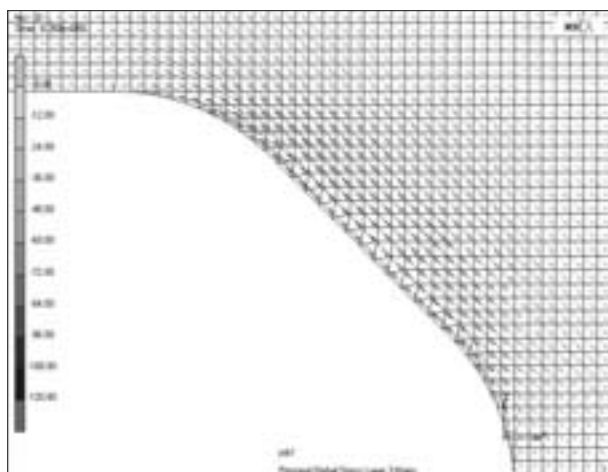


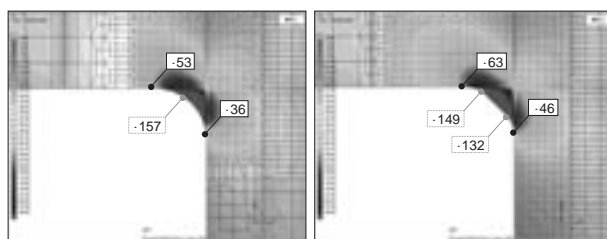
図7 主応力ベクトル図 (フィレット近傍)

下にできることが確認された。断面力比が小さいほどフィレットの効果は大きい傾向にあることがわかった。また、板厚については、母材の板厚が厚いほど応力を低減できている。しかしながら、今回の解析ケースの中で効果が最大となる断面力比が3:1、板厚が50 mmの場合でも応力比50%程度であり、得られた応力集中低減の効果に対しての影響は比較的小さい。つまり、応力集中低減の効果はフィレットの有無に大きく依存しており、断面力比、板厚の影響は小さい。そこで、今回のフィレットの効果を確認するパラメトリック検討においては、これら断面力比および板厚の影響は十分に小さいと判断し、これらは任意に定め、変化させるパラメータからは除外した。

(3) フィレットの縁端および先端の応力

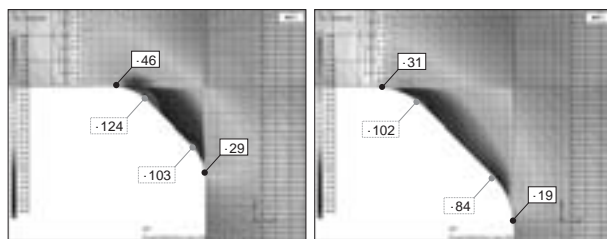
図7にウェブ板中心の主応力ベクトル図の一例を示す。梁部材に生じている応力がフィレットを介して柱部材に流れていることが読み取れる。図8 (a)~(d)にフィレット部の応力図を示す。フィレットの大きさ(突出長)Wを大きくするに伴って、フィレット内に生じる応力も低減されている。また、フィレット端部の仕上げ形状Rを大きくすることでフィレットの先端および縁端での応力集中も低減できている。これに加え、縁端の応力ピークの箇所を梁部材から離すことができることも確認された。また、1/4タイプよりも円弧-直線-円弧タイプの方がフィレット縁端に発生する応力を低減できている。

これらより、隅角部角部およびフィレットに発生する応力を低減するためには、円弧-直線-円弧タイプを用い、フィレットの大きさ(突出長)Wおよび先端部の仕上げ形状Rを大きくすることが効果的であることがわかった。



(a) Type-4.1 (W/D = 8%, R/D = 20%)

(b) Type-4.2 (W/D = 10%, R/D = 10%)



(c) Type-4.3 (W/D = 20%, R/D = 20%)

(d) Type-4.4 (W/D = 30%, R/D = 30%)

図8 フィレット部主応力図

(4) 円柱橋脚における控え材の影響と効果

円柱橋脚においてはフィレットから柱部材に伝達する応力が柱部材に局所的な板曲げを発生させることが想定できるため、控え材を設けることとした。控え材とは、**図9**に示すようなフィレットと同一線上の円柱内に設ける材片のことを示す。今回の検討では、控え材がフィレットによる応力低減効果に与える影響と柱部材に発生する応力への影響を確認した。また、控え材の大きさが与える影響についても確認した。**図10**に円柱形状タイプ (Type-6.0.0 ~ Type-6.3.2) の梁フランジにおける柱部材から50 mm離れた位置での主応力を示す。これによれば、フィレットによる応力集中低減の効果は、角柱と同様にフィレットの寸法に依存しており、控え材の有無による影響は極めて小さい。また、柱部材とフィレットの交線上の応力を**図11**に示す。各々の線は柱部材の内面、板中心、外面の応力を示す。各々の線は柱部材の内面、板中心、外面の応力である。フィレットなしの場合には、隅

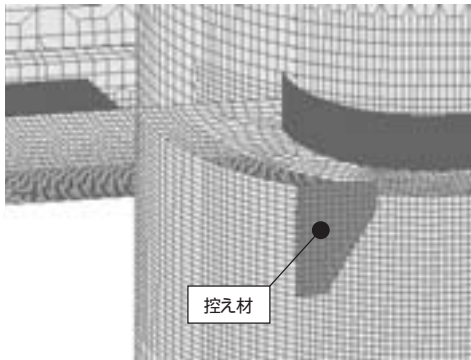


図9 控え材概略図

角部角部に大きな板曲げが発生していることに加え、隅角部から150mm程度離れた箇所では表裏(外面および内面)の応力が逆転していることがわかる。フィレットのみ控え材なし (Type-6.2.1) の場合にも柱部材の表裏で主応力が大きく異なり板曲げが発生している。一方、控え材を設けた場合には柱部材の表裏における応力の差が低減されている。また、控え材寸法を大きくすることにより、控え材による板曲げ低減の効果は大きくできることもわかった。これらのことから、円柱形状の隅角部において、フィレットを設けた場合には、フィレットの背面となる円柱内には局所的な板曲げを低減できるため控え材を設けた方がよいことがわかった。ただし、控え材の適切な形状、寸法については、横梁幅と柱径の関係(フィレットと柱部材がなす角度)なども影響していると思われるため、別途確認する必要がある。さらに現在、控え材は

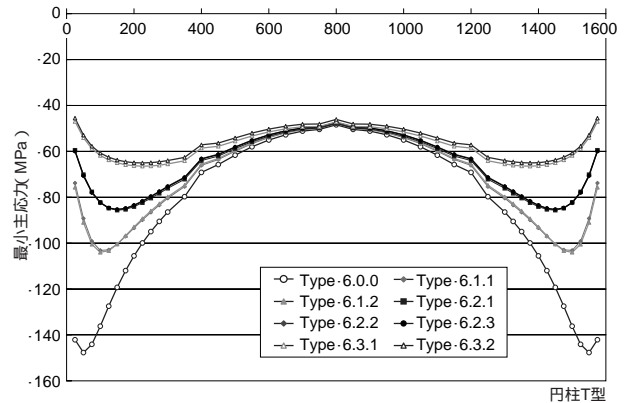
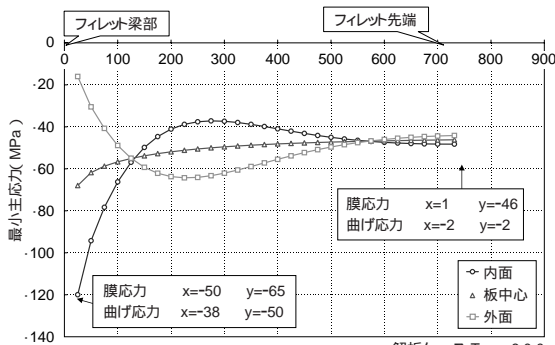
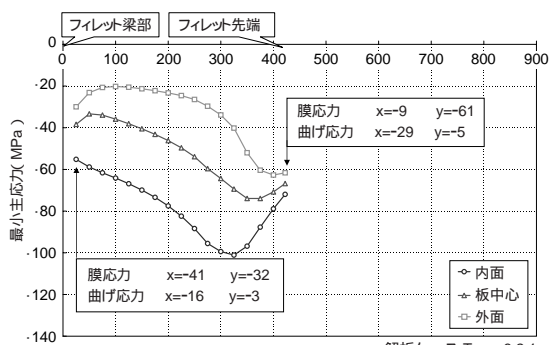


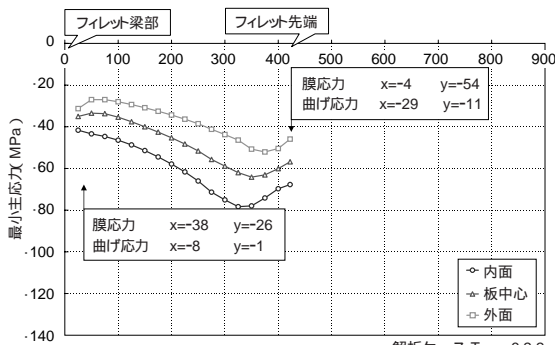
図10 梁フランジの主応力分布



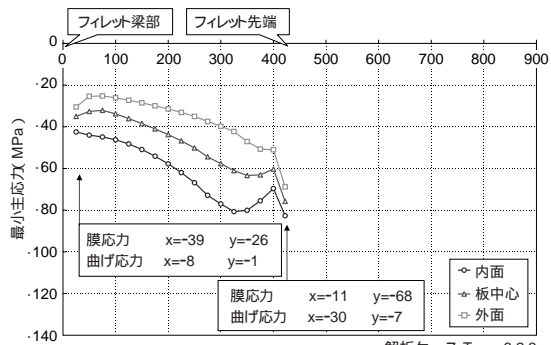
(a) フィレットなし



(b) W/D = 12%控え材なし



(c) W/D = 12%控え材あり



(d) W/D = 12%控え材(小)あり

図11 控え材の効果 (柱部材主応力)

Full Webとしており、控え材の形状、寸法は疲労に対する検討だけではなく、耐震性の検討も行って決定する必要がある。

(5) フィレットの形状と寸法

各橋脚隅角部におけるフィレットの寸法が応力集中低減効果へ与える影響を整理するために、図12にW/Dと応力比の関係を示す。W/Dが大きくなるに伴い、応力集中が低減できている。しかしながら、フィレットを大きくしてもW/D = 20%程度から応力は低減されにくくなっている。そのため、極大なフィレットを設けることは非効率である。個々については、角柱では、隅角タイプにより応力集中低減効果のばらつきが大きい。角柱T型(2)ではW/D = 8%で応力比を43%程度にできているのに対し、角柱トの字型がもっとも応力集中低減効果が小さく、応力比50%程度にするためにはW/D = 13%程度が必要となっている。一方、円柱ではW/D = 11%ほどで応力比を50%以下にできることがわかった。円柱については解析タイプが少ないが、隅角タイプによるばらつきは角柱より小さいと考えられる。これらより、隅角部角部に発生する応力集中を応力比50%以下にするためには、W/D = 13%以上が必要である。

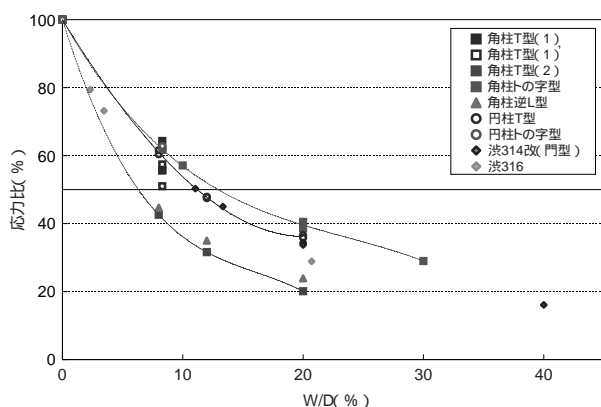


図12 フィレットの寸法と応力低減効果の関係

4. まとめ

フィレットによる応力集中低減の効果について以下のことがわかった。

- ・板厚および断面力比が与える影響は比較的小さい。
- ・フィレットの大きさ(突出長)W/Dを大きくすることにより応力集中を低減できる。Hを同じとしたときにフィレットの大きさ(突出長)Wを大きくできる円弧 - 直線 - 円弧タイプの方が、1/4円タイプよりも効果的である。
- ・フィレットの大きさ(突出長)Wをおよびフィレット先端の仕上げ形状Rを大きくとることで、フィレ

ット先端に発生する応力を低減できる。

- ・一般的にはフィレットの寸法はW/D = 13%以上とすることで応力比を50%以下にできると考えられる。
- ・応力集中低減効果は橋脚形状によりばらつきがある。

また、

- ・円柱橋脚においては、フィレットの背面となる円柱内に控え材を設けることで、柱部材に発生する板曲げを低減できる。

5. おわりに

本検討では、薄肉シェル要素を用いてFEM解析を行い、フィレットの形状・寸法が応力集中低減効果に与える影響を把握した。W/D = 13%程度のフィレットを設けることで隅角部角部に発生する応力集中を50%以下に低減できることがわかった。本検討ではすべての隅角形状、板厚などの解析を行っていない。また、実構造物の設計においては、輸送限界の制限や製作性を考慮した上で、検討する必要があると思われる。なお、首都高速道路公団におかれては、W/D = R/D = 20%を標準として提案している。

また、今回は実設計における疲労強度などを検討していない。今後はそれらについても検討を行い、実設計においても応用できるように模索したい。

本検討を行うにあたり、多大なご指導をいただきました首都高速道路公団の方々には紙面を借りて厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 森河, 下里, 三木, 市川: 箱断面を有する鋼製橋脚に発生した疲労損傷の調査と応急対策, 土木学会論文集, No.703/I-59, pp.177-183, 2002.
- 2) 奥村, 石沢: 薄板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, No.153, pp.1-18, 1968.
- 3) 首都高速道路公団: 首都高速道路・鋼構造物設計基準, 1992.
- 4) 尾身, 飯古, 他: 矩形鋼製橋脚隅各部の疲労損傷と補強設計(その2), 土木学会第57回年次学術講演会概要集, I-297, 2002.
- 5) 三木, 田辺, 他: ハンチ取付による箱断面鋼製ラーメン橋脚隅角部の疲労強度向上, 土木学会第57回年次学術講演会概要集, I-163, 2002.
- 6) 時田, 溝口, 他: 新設鋼製橋脚隅角部におけるフィレット構造の応力低減効果(その1) ~ (その3), 土木学会第58回年次学術講演会概要集, I-424 ~ 246, 2003.