

鋼製ラーメン隅角部のフィレット補強に関する解析的研究

Numerical study on reinforcement of beam-to-column connection of steel moment frame by fillet

山口栄輝*, 藤原康典**
Eiki Yamaguchi, Yoshinori Fujiwara

* Ph. D. 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1)

** 修 (工) 総合技術コンサルタント大阪支社 (〒533-0033 大阪市東淀川区東中島 3-5-9)
(研究当時, 九州工業大学大学院 工学研究科博士前期課程)

Since large resultant forces and stress concentration can take place, the design of beam-to-column connections is important for a steel moment frame. To date, in practice, the analytical study of stress concentration due to shear lag has been a mainstay for the design of these connections exclusively. However, the validity of such a design approach in large earthquake is not understood well. In recent years, many existing connections have been found to suffer from fatigue cracks and the reinforcement by fillets has been proposed. In the present study, the effectiveness of the fillets is studied for the reinforcement of a beam-to-column connection under ordinary and large seismic loadings.

Key Words: beam-to-column connection, stress concentration, seismic resistance, fillet

キーワード: ラーメン隅角部, 応力集中, 耐震性, フィレット

1. はじめに

都市高架道路において数多く建設されている鋼製ラーメン橋脚については, 大きな断面力が作用する上に, せん断遅れによる応力集中も生じる隅角部の設計が重要となる. 実務では奥村らが提案したせん断遅れによる応力集中評価式¹⁾に基づいた弾性設計が行われてきており, 隅角部の耐荷力や変形能に関する検討も行われている²⁾⁻⁸⁾. しかしながら, 兵庫県南部地震クラスの巨大地震を対象とした鋼製ラーメン隅角部の研究は少なく, 現段階では耐震設計法が確立された状況にあるとは言い難い. その一方で, 鋼製橋脚隅角部に多くの疲労亀裂が見つかり⁹⁾, 隅角部をフィレットで補強してせん断遅れによる応力集中を緩和する試みが首都高速道路公団 (以下では首都高) で検討され¹⁰⁾⁻¹²⁾, 国道においても原則としてフィレットを設けるようになってきている.

著者らは, 先に池田らの載荷実験⁸⁾を参考にして, 繰り返し荷重を受ける鋼製ラーメン橋脚隅角部の変形挙動に及ぼすハンチやフィレットの影響を検討した¹³⁾⁻¹⁵⁾. 首都高の検討は, せん断遅れによる応力集中を考慮して隅角部を設計した上で

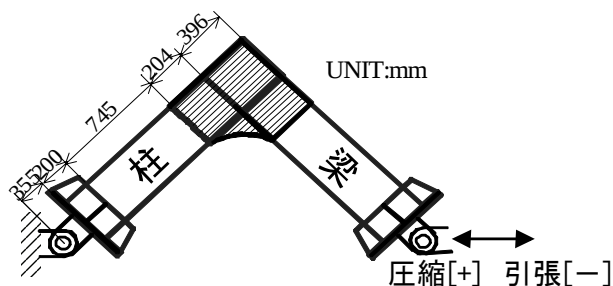
フィレット補強するものであるが, これまでの著者らの検討結果からすれば, 公称応力で隅角部を設計しても, フィレット補強することで安全性を確保できる可能性も考えられる. 大きな板厚の隅角部は, 工場から建設現場までの輸送や現場での架設を難しくするのみならず, 隅角部疲労亀裂予防のために要求される溶接の品質管理をも難しくするため, 公称応力で隅角部を設計できることの利点は大きい.

本研究では, 上記の観点から, 鋼製ラーメン隅角部のフィレット補強に関して検討する. 検討対象は隅角部の疲労耐久性と耐震性の両方になるが, 前者では常時荷重下が考察対象となるため線形解析, 後者では地震荷重が考察対象であるため繰り返し荷重作用下での複合非線形解析を行う. 線形解析には MSC/NASTRAN¹⁶⁾, 複合非線形解析には ABAQUS¹⁷⁾を使用する

2. 解析条件

2.1 解析対象モデル

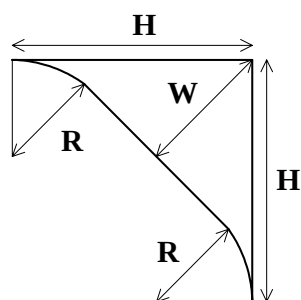
池田らの載荷実験⁸⁾で用いられた G-1, G-3 供試体を参考に解析モデルを構築する. これら供試体の概略図を図-1に示している. 載荷点側の部材を梁,



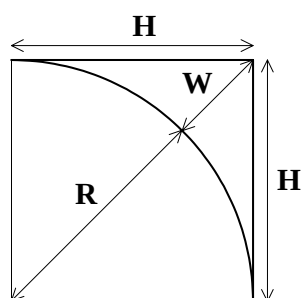
図－1 供試体概略図

表－1 供試体の諸元

供試体	梁・柱部材		隅角部板厚
	フランジ	ウェブ	
G-1	380 x 12mm	410 x 12mm	16mm
G-3			22mm



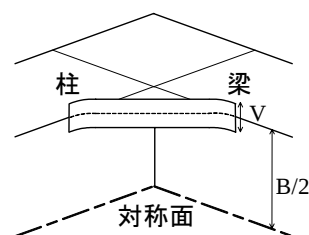
(a) 円弧－直線－円弧型 (M補強)



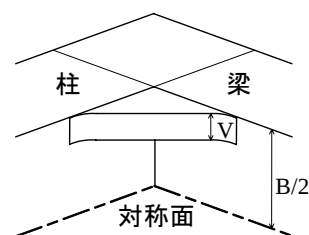
(b) 円弧型 (N補強)

図－2 フィレット形状

反対側の部材を柱と呼ぶ。また、斜線部が隅角部に該当する。梁・柱部材はいずれも箱形断面であり、同じ断面寸法、長さとなっている。諸元は表－1にまとめている。G-3がせん断遅れによる応力集中を考慮して隅角部板厚を定めているのに対し、G-1は公称応力で板厚を決定している。



(a) タイプA



(b) タイプB

図－3 リブ設置方法

G-1, G-3 は、2つの箱形部材を直角に接合した隅角部の内側にハンチを取り付けた構造形式になっている。本研究では、G-1, G-3 からハンチを取り外したモデルをG10, G30とし、解析対象とする。G30が通常の鋼製橋脚隅角部を有するモデルである。

首都高では、隅角部の補強として、円弧－直線－円弧型のフィレット（図－2 (a)）を通常の隅角部に付加している^{10) - 12)}。簡単のため、以下では円弧－直線－円弧型のフィレットによる補強をM補強と呼ぶ。G30にM補強を施した隅角部が、首都高の補強隅角部に相当する。これをM30と呼び、解析対象モデルとする。同様にG10をM補強したモデルも考え、M10とする。なお、いずれにおいてもフィレットの板厚は隅角部板厚に等しくする。すなわち、M10のフィレット板厚は16mm、M30のフィレット板厚は22mmである。また、首都高での検討^{10) - 12)}を参考に、フィレットの大きさは $W/D = 13\%$ 、 $W=R$ とする。M補強はすでに首都高の実務で使用され、国土交通省でもこれに準じていることから、本研究ではM30の変形挙動を基準として、他のモデルの変形挙動を検討する。

当然のことながら、M10の隅角部の剛性は、M30に比すると小さい。M30と同等の補強効果を得るために、M10のフィレットには自由辺にリブを付けることを考える。リブの設置方法は図－3 (a) (タイプA) が標準であるが、鋼製橋脚は都市内で建設されることが多いため、景観への配慮が必要な場合に

表－２ 解析対象モデル

	隅角部 板厚 (mm)	フィレット 補強	フィレット 形状*	リブ 設置 **	リブ 板厚 (mm)
G10	16	なし	—	—	—
G30	22	なし	—	—	—
M10	16	あり	M	なし	—
M30	22	あり	M	なし	—
M1AS	16	あり	M	A	16
M1BS	16	あり	M	B	16
N1AS	16	あり	N	A	16
N1AD	16	あり	N	A	32
N1BS	16	あり	N	B	16
N1BD	16	あり	N	B	32

*：M＝円弧－直線－円弧型フィレット，

N＝円弧型フィレット

**：A＝タイプA，B＝タイプB

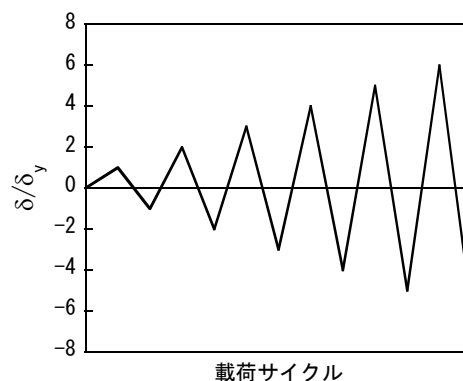
はフランジ幅内にリブを収める選択肢も必要になると考えられる。そのため、図－3 (b)に示すリブ設置方法（タイプB）も考察対象とする。リブの幅はフランジ幅の10%（ $V/B=0.1$ ）とし、板厚はフィレットの板厚と同じとする。これらのモデルについては、設置方法がタイプAのものをM1AS、タイプBのものをM1BSと名付ける。

現場の状況によっては、フィレット補強により建築限界が問題になることもある。そのため、ここでは円弧－直線－円弧型に加え、円弧型のフィレット（図－2 (b)）も検討する。すなわち、具体的には、M10のフィレット形状を円弧型に代えた隅角部モデルも解析対象とする。円弧型フィレットによる補強はN補強と呼ぶ。M補強とN補強のHは大きさを等しくするが、N補強はM補強に比して剛性が小さくなるため、フィレットの自由辺にリブを付ける。リブの設置方法も図－3に示すタイプA、タイプBの2種類を考える。隅角部の点検に大きな支障が出るのを避けるため、リブの幅はフランジ幅の10%（ $V/B=0.1$ ）とし、板厚はフィレットの板厚と同じ場合に加え、2倍の場合も考える。

本研究で解析対象とするモデルを表－2にまとめて示している。

2.2 荷重方法

池田らの荷重実験⁸⁾では、図－1に示すように、両端にヒンジを取り付け、柱部材端部は固定、梁部材端部は水平方向可動とし、梁部材端部に荷重された。疲労耐久性については常時荷重下の解析による検討を行う。具体的には、梁部材端部で引張方向に荷重することとする。常時荷重下での変形は一般に



図－4 荷重点の水平変位履歴

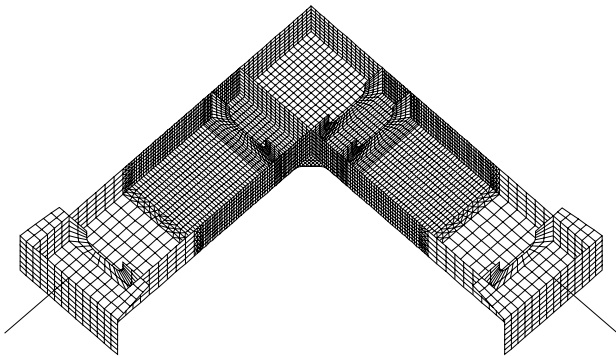
小さいため、線形解析を行えばよく、解析結果として隅角部の応力分布に着目する。

池田らによる耐震性の検討では、フランジの隅角部近傍における軸ひずみの平均値が降伏ひずみに達した時点を降伏点とし、その時の変位 δ_y を用いて、 $0 \rightarrow \delta_y \rightarrow 2\delta_y \rightarrow 3\delta_y \rightarrow \dots$ と次第に振幅を大きくしながら、各振幅で3サイクルずつ繰り返す荷重法が採用されている（図－4）⁸⁾。ところで、鋼製橋脚の荷重実験では、各振幅1サイクルずつの繰り返し荷重が行われることも多い¹⁸⁾。繰り返し回数の違いは最大耐荷力以降の劣化域で顕著となり、サイクル数の多い荷重の方が耐荷力低下の度合いが大きい¹⁹⁾。鋼製橋脚の耐震設計で重要なのは主に最大耐荷力までの変形挙動であること²⁰⁾や実験結果のばらつき¹⁸⁾を考えれば、耐震特性の把握には、1サイクル荷重による検討でも実用上は十分と思われる。そのため、本研究の検討では、図－4のように振幅が漸増する変位制御法を採用するものの、各振幅の繰り返し回数は1サイクルとする。

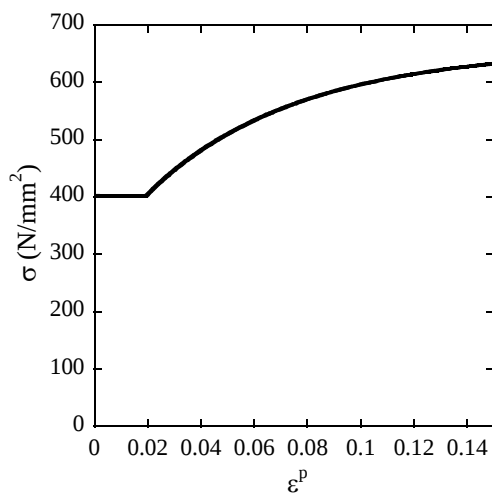
2.3 有限要素解析モデル

対称性を考慮し、各解析対象モデルの1/2のみを解析する。要素分割例として、M10の分割図を図－5に示す。2個の梁要素は供試体端部の荷重治具に対応し、剛としている。初期たわみと残留応力は無視する。

複合非線形解析の構成則には三曲面モデル²¹⁾を採用する。池田らの実供試体に用いられた鋼材はSM490であり、その一軸引張試験も行われている。その結果をもとに三曲面モデルのパラメータ値を定めた。本研究で用いる真応力 σ と対数塑性ひずみ ϵ^p の関係を図－6に示す。ヤング係数とポアソン比はそれぞれ206GPa、0.3である。なお、三曲面モデルはユーザーサブルーチンでABAQUS¹⁷⁾に組み込んでいる。ここで記した複合非線形解析は、先の



図－5 要素分割 (M10)



図－6 真応力－対数塑性ひずみ関係

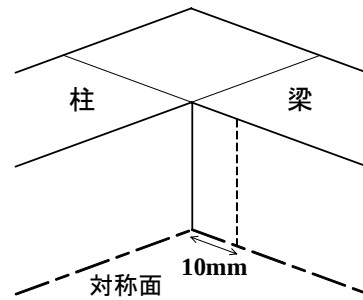
検討で用いたものと同じであり、実験結果とよく一致した結果が得られることは検証済みである^{13), 14)}。

3. 解析結果および考察

3.1 常時荷重下での発生応力

首都高での検討^{10) - 12)}を参考に供試体の寸法を考慮して、柱下フランジとの接合部から 10mm 離れた梁下フランジ位置 (図－7) の最大主応力分布に着目し、解析結果を図－8 にまとめている。10mm の間は 3 個の要素を用いてモデル化している。図－8 では、G10 の最大主応力分布における最大値を基準値 (1.0) とし、それとの相対値で他のモデルの解析結果を示している。なお、以下では簡単のため、最大主応力を単に応力、最大主応力分布における最大値を単に最大応力とも呼ぶ。

図－8 (a) には、フィレット補強のない隅角部



図－7 最大主応力分布の評価位置

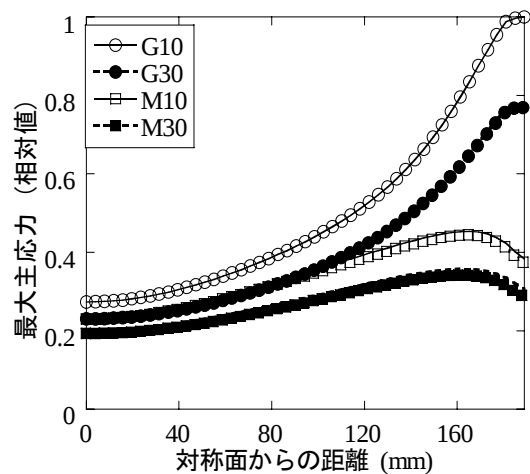
の応力分布 (G10, G30), M補強をした場合の応力分布 (M10, M30) を示している。先に記した通り、通常の隅角部は G30, 首都高で提案されている隅角部は M30 である。この図の結果によれば、せん断遅れによる応力集中評価式¹⁾を用いて板厚を増加させることにより、応力低減効果は認められるものの、低減率は 20%程度に過ぎない。一方、M補強を施すと、応力は大きく減少する。特に、フィレット近傍のフランジ端部で応力低下は著しく、M10 で 0.38, M30 で 0.31 にまで減少している。その結果、最大応力の作用位置はフランジ内側に移動し、最大応力値は M10 で 0.45, M30 で 0.36 となっている。鋼製橋脚隅角部の疲労亀裂は、溶接の難しさもあり、フランジ端部で発生することが多い。このことを思えば、フランジ端部での応力を大きく低下させるフィレット補強は、疲労亀裂予防の観点から非常に好ましい補強方法である。

M10 の応力は M30 より大きく、応力低減効果は M30 に比して劣っている。そこで、M10 のフィレットにリブを取り付けて解析し、結果を図－8 (b) に示している。この図より、リブ設置により応力は減少することがわかる。その効果は設置方法によって差があり、タイプ A の応力低下が若干大きい、タイプ B においても最大応力は 0.37 にまで低下しており、M30 とほぼ同程度の応力分布になっている。

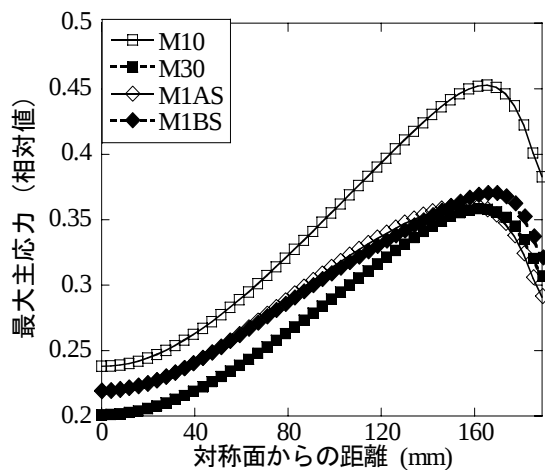
N補強の効果は図－8 (c) にまとめている。リブの設置方法によって若干の差が生じており、リブ板厚が 16mm の N1AS, N1BS では最大応力がそれぞれ 0.38, 0.41 であり、M30 の最大応力に比べると 5% ないし 13% 大きく、応力低減効果は十分でない。しかしながら、リブ板厚を 2 倍 (32mm) にすることで応力をさらに低減でき、リブ設置がタイプ A の N1AD では M30 よりも最大応力は 0.05 小さくなり、タイプ B の N1BD でも M30 の最大応力を若干下回るようになる。

3.2 繰返し荷重下での荷重－変位関係

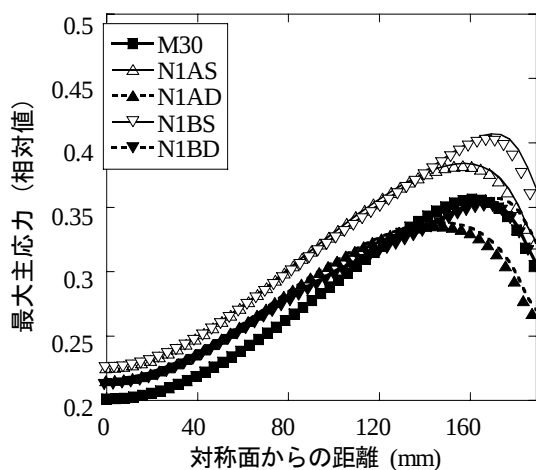
繰返し载荷により荷重－変位関係の履歴曲線



(a) 板厚, M補強の影響



(b) リブの影響



(c) N補強の影響

図－8 最大主応力分布

が得られるが、圧縮側、引張側の荷重で大きな違いはないため、ここでは荷重点での水平荷重 H －水平変位 δ 関係の第 1 象限（圧縮側）における荷重折り返し点を結んだものを解析結果として示す。

図－9 (a) には、フィレット補強のないモデル (G10, G30)、M補強したモデル (M10, M30) の結果を示している。隅角部板厚が小さく、フィレット補強のない G10 の耐力が最も小さいが、最大耐力点に対応する変位は最も大きい。最大耐力到達前に塑性変形挙動となっているため、M補強により耐力はあまり変化しないが、最大耐力点の変位は若干減少する傾向が認められる。せん断遅れによる応力集中を考慮して隅角部板厚を大きくしたモデルでは、フィレット補強の影響は小さい。また、M10 においてはフィレットの面外変形が認められたが、M30 ではフィレットの変形は見られなかった。

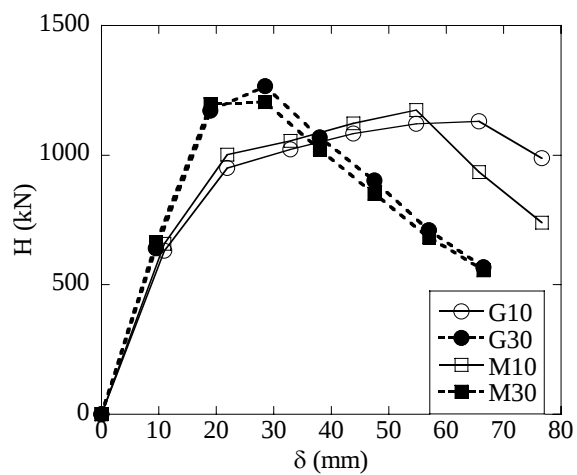
M10 のフィレットにリブを設置した場合の結果を図－9 (b) にまとめている。リブ設置により、耐力はさほど変化しないが、最大耐力点の変位は減少している。リブ設置方法による違いはほとんど認められない。

N補強モデルの荷重－変位関係は図－9 (c) に示す通りである。リブ設置方法がタイプ B の場合、リブ板厚の影響は小さく、N1BS と N1BD の荷重－変位曲線はよく似たものとなっている。タイプ B に比べると、タイプ A のモデルでは最大耐力点の変位が減少している。また、リブ板厚の影響は最大耐力点以降の劣化域で見られ、リブ板厚の大きな N1AD の方が耐力の低下は早い。

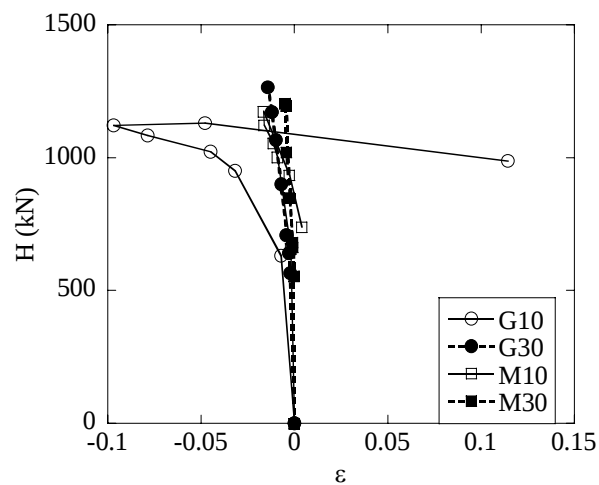
モデル間の差は、一般に最大耐力よりも最大耐力点の変位が大きく、隅角部の剛性が大きくなると変形能は小さくなる傾向が認められる。これはハンチ付き隅角部でも見られた傾向であり、隅角部の剛性が大きくなるにつれ、局部座屈による面外変形が、板厚の薄い一般部で生じやすくなることに起因している^{13), 14)}。逆に G10 の場合、他の供試体に比して隅角部での面外変形が大きく、一般部よりも隅角部の板厚が大きいことから、局部座屈発生前に大きな塑性変形を生じ、最大耐力点の変位が大きくなっている。

3.3 繰返し荷重下での梁－柱接合部の直ひずみ

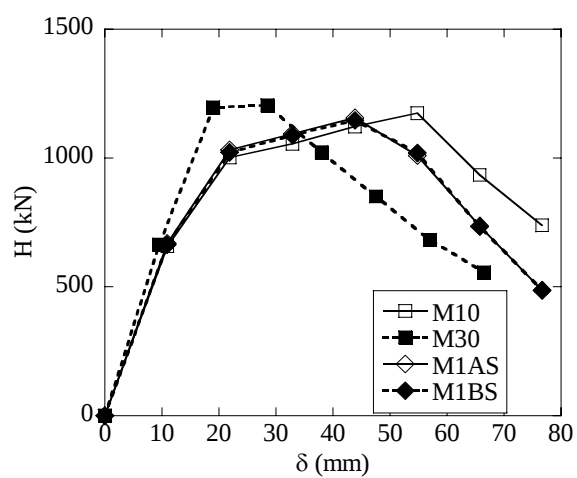
ノースリッジ地震や兵庫県南部地震では、梁と柱の接合部における脆性破壊の被害が報告されている^{22), 23)}。梁－柱接合部におけるひずみ集中がこうした脆性破壊の一因と考えられるため、ここでは接合部端点での部材軸方向の直ひずみに着目し、荷重折り返し点での水平荷重 H と直ひずみ ε をもとに得られた関係を図－10 にまとめている。



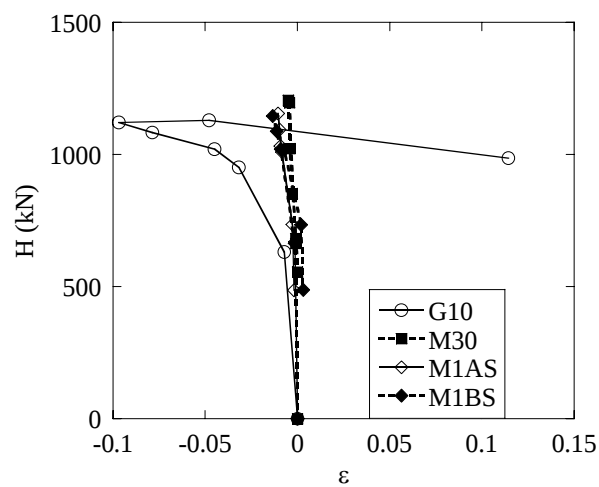
(a) 板厚, M補強の影響



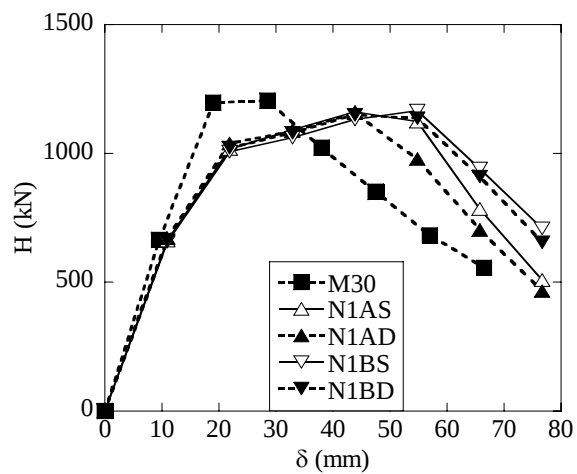
(a) 板厚, M補強の影響



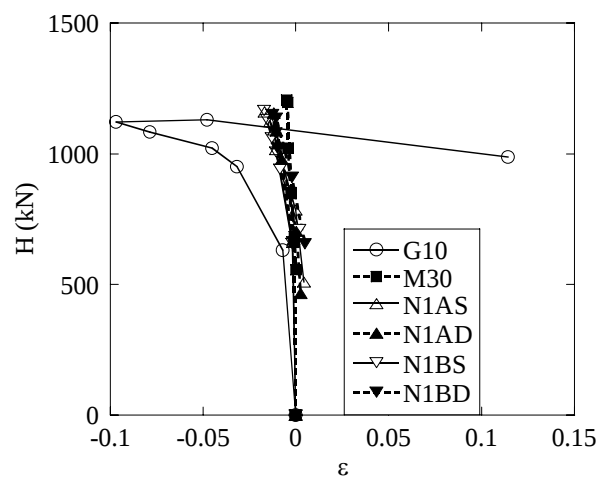
(b) リブの影響



(b) リブの影響



(c) N補強の影響



(c) N補強の影響

図-9 水平荷重-水平変位関係

図-10 水平荷重-直ひずみ関係

この図によれば、G10 のひずみが非常に大きく、公称応力をもとに板厚を設計した隅角部では、フィレットを設置しない限り、大きなひずみが発生することが分かる。それに比すれば、他のモデルで生じているひずみは非常に小さく、隅角部の板厚増あるいはフィレット補強によるひずみ低減効果は顕著であることが理解される。

4. まとめ

本研究では、鋼製ラーメン隅角部のフィレット補強について検討した。得られた結果をまとめると次の通りである。

常時荷重下：

- (1) せん断遅れによる応力集中を考慮して板厚を増加させても、20%程度の応力低減効果しか得られない。
- (2) フィレット補強により応力は大きく減少する。特にフィレット近傍のフランジ端部での応力減少は著しく、最大応力発生箇所が、疲労亀裂が発生しやすいフランジの端部から内側に移動する。
- (3) M補強により、最大応力はG10 の場合の45% (M10) ないし36% (M30) にまで減少する。
- (4) M10 に作用する応力はM30 よりも大きい。しかしながら、M10 のフィレット自由辺にリブを設置すると、その設置方法によって応力低減効果に若干の差はあるものの、M30 とほぼ同等ないし、それ以下の応力値となる。
- (5) N補強においては、リブ板厚がフィレット板厚と同じ(16mm)であるN1AS、N1BSの場合、最大応力はG10 の約40%であり、M30 に比べると応力低減効果は十分でない。
- (6) N補強のリブ板厚をフィレット板厚の2倍(32mm)にすると、いずれのリブ設置方法においても、最大応力はM30 の場合よりも小さくなる。

繰り返し荷重下：

- (7) フィレット補強のないG10 の耐力が最も小さいが、最大耐力点に対応する変位は最も大きい。
- (8) G10 にM補強を施すと、耐力はさほど変わらないものの、最大耐力点の変位は減少する。
- (9) せん断遅れによる応力集中を考慮して設計した板厚の大きな隅角部では、フィレット補強の影響は小さい。
- (10) M10 においてはフィレットの面外変形が生

じるが、M30 ではフィレットの面外変形は生じない。

- (11) M10 にリブを設置した場合、耐力はそれほど変化しないが、最大耐力点の変位は減少する。リブ設置方法による違いはほとんど認められない。
- (12) N補強モデルでは、タイプBの場合、リブ板厚の影響は小さく、N1BS と N1BD の荷重－変位曲線はよく似たものとなっている。タイプBに比べると、タイプAのモデルでは最大耐力点の変位が減少している。また、リブ板厚の影響は最大耐力点以降の劣化域で見られ、リブ板厚の大きなN1ADの方が耐力の低下は早い。
- (13) モデル間の差は、一般に最大耐力よりも最大耐力点の変位で大きく、隅角部の剛性が大きくなると変形能は小さくなる。
- (14) 公称応力をもとに隅角部板厚を設計したモデル(G10)では、非常に大きなひずみが梁－柱接合部に発生する。それに比すれば、他のモデルで生じているひずみは非常に小さく、板厚増あるいはフィレット補強によるひずみ低減効果は顕著である。

以上の検討結果は、公称応力で隅角部板厚を設計しても、リブ付きフィレットで補強すれば、疲労耐久性、耐震性ともに、首都高で検討されている隅角部とほぼ同等の性能を持たせ得ることを示唆している。また、建築限界に配慮してフィレット形状を円弧型にする、景観に配慮してリブをフランジ幅内に納めるといったことも十分可能と考えられる。なお、具体的なリブの取り付け方法を含め、ここで提案した補強法を実用にするには、さらに実験による検討が必要になると考えている。

謝辞

名古屋工業大学の後藤芳顕教授には、三曲面モデルを用いた解析法について指導して頂いた。ここに記して深く感謝する。

参考文献

- 1) 奥村敏恵、石沢成夫：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，第153号，pp.1-18，1968。
- 2) 中井博、福岡悟、酒造敏廣、明橋克良：鋼製ラーメン隅角部のShear lagと耐力点に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.33A，pp.193-206，1987。
- 3) 酒造敏廣、事口寿男：鋼製ラーメン隅角部の崩壊性状と変形性能に関する実験的研究，構造工

- 学論文集, Vol. 37A, pp. 121-134, 1991.
- 4) 黄元燮, 西村宣男, 高津秀俊: 鋼製ラーメン橋脚隅角部の強度と変形能に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 40A, pp. 201-214, 1994.
 - 5) 黄元燮, 西村宣男, 西野滋博: 鋼製ラーメン隅角部パネルの強度および変形能の評価法, 構造工学論文集, Vol. 40A, pp. 215-226, 1994.
 - 6) 山田尚之, 青木徹彦: 鋼製八角形断面柱を有するラーメン隅角部の静的および繰返し強度特性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 42A, pp. 197-205, 1996.
 - 7) 青木徹彦, 長谷川桂, 山田将樹: 鋼製ラーメン橋脚隅角部モデルの曲げおよび繰返し強度特性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 43A, pp. 177-186, 1997.
 - 8) 池田学, 市川篤司, 山田正人, 安原正人: 鋼製ラーメン隅角部の交番載荷実験, 鉄道総研報告, 第13巻, 第4号, 1999.
 - 9) 森河久, 下里哲弘, 三木千壽, 市川篤司: 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.
 - 10) 時田英夫, 溝口孝夫, 町田文孝, 澁谷敦, 宮森雅之, 清川昇悟: 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), 土木学会第58回年次学術講演会概要集, 第1部門, 2003.
 - 11) 並川賢治, 溝口孝夫, 町田文孝, 澁谷敦, 宮森雅之, 清川昇悟: 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2), 土木学会第58回年次学術講演会概要集, 第1部門, 2003.
 - 12) 並川賢治, 溝口孝夫, 町田文孝, 澁谷敦, 宮森雅之, 清川昇悟: 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3), 土木学会第58回年次学術講演会概要集, 第1部門, 2003.
 - 13) 山口栄輝, 市川篤司, 池田学, 久保知徳, 三木千壽: 繰返し荷重を受ける鋼製ラーメン隅角部におけるハンチの効果, 構造工学論文集, Vol. 46A, pp. 119-125, 2000.
 - 14) 山口栄輝, 仰木芽久美, 南野能克, 久保知徳, 久保喜延: ハンチ付き鋼製ラーメン隅角部の変形挙動に関する解析的研究, 応用力学論文集, Vol. 3, pp. 457-466, 2000.
 - 15) 山口栄輝, 藤原康典, 久保喜延: 鋼製ラーメン隅角部の補強に関する基礎的研究, 応用力学論文集, Vol. 6, pp. 675-683, 2003.
 - 16) MSC/NASTRAN, professional, 2003.
 - 17) ABAQUS/Standard User's Manual, Ver. 5.7, HKS, 1997.
 - 18) 建設省土木研究所, 首都高速道路公団, 阪神高速道路公団, 名古屋高速道路公社, 鋼材倶楽部, 日本橋梁建設協会: 道路橋橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同報告書(I), 1997.
 - 19) 宇佐美勉, 坂野茂, 是津文章, 青木徹彦: 鋼製橋脚モデルの繰返し弾塑性挙動におよぼす荷重履歴の影響, 構造工学論文集, Vol. 39A, pp. 235-247, 1993.
 - 20) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, V 耐震設計編, 丸善, 2002.
 - 21) 後藤芳顯, 王慶雲, 高橋宣男, 小畑誠: 繰返し荷重下の鋼製橋脚の有限要素法による解析と材料構成則, 土木学会論文集, No. 591/I-43, pp. 189-206, 1998.
 - 22) Chen, W.F. and Yamaguchi, E.: Spotlight on steel moment frames, Civil Engineering, March, ASCE, pp. 44-46, 1996.
 - 23) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会: 阪神・淡路大震災調査報告 土木構造物の被害原因の分析 第2章 鋼構造物, 土木学会, 1997.
(2006年9月11日受付)