

鋼製ラーメン隅角部の補強に関する基礎的研究

Fundamental Study on Reinforcement of Beam-to-Column Connection of Steel Moment Frame

山口栄輝*, 藤原康典**, 久保喜延***

Eiki YAMAGUCHI, Yoshinori FUJIWARA and Yoshinobu KUBO

*Ph. D. 九州工業大学助教授 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)

**九州工業大学大学院 工学研究科博士前期課程 (〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1)

***工博 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)

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, the elastic design based on the analytical study of stress concentration has been the standard method for these connections exclusively. However, such a design approach is not practical against large earthquake. Also, many existing connections that were conventionally designed have been found to suffer from fatigue cracks. In the present study, the effectiveness of the fillets and haunches of various sizes 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, local buckling, fillet, haunch

キーワード: ラーメン隅角部, 応力集中, 局部座屈, フィレット, ハンチ

1. はじめに

1995 年の兵庫県南部地震以降, 大きな繰返し荷重下での変形挙動の把握が耐震設計上重要となり, 単柱形式の鋼製橋脚については実験的・解析的に数多くの研究がなされ, 巨大地震時の変形挙動もほぼ予測できるようになってきた^{1) - 7)}。

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, セン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セン断遅れによる応力集中評価式⁸⁾に基づいた弾性設計が行われてきており, 隅角部の耐力や変形能に関する検討も行われている^{9) - 15)}ものの, 兵庫県南部地震クラスの巨大地震を対象とした研究は少なく, 現段階では耐震設計法が確立された状況にあるとはいえない。

一方で, 最近になって鋼製橋脚隅角部に多くの疲労亀裂が見つかり, 大きな問題となっている¹⁶⁾。そのため, 隅角部にフィレットを取り付け, セン断遅れによる応力集中を緩和する試みが始められている^{17) - 19)}。

著者らは, 先に, 池田らの載荷実験¹⁵⁾を参考にして, 繰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の影響を検討してき

た^{20), 21)}。適切な構成則を用いれば, 有限要素法で実験結果と定量的にもよく一致する解析結果が得られることもその中で示した。この研究の延長として, 今回, 隅角部補強材としてハンチに加えてフィレットについても検討した。また, 疲労亀裂が問題になっていることに鑑み, 巨大地震荷重を想定した繰返し水平荷重のみならず, 常時荷重も検討対象とした。ここではその結果を報告する。なお, ここで言うフィレットとは, ハンチからフランジ部を除き, ウェブのみとした構造のものである。

2. 解析条件

2.1 解析モデル

池田らの載荷実験¹⁵⁾で用いられた G-1 供試体を基本解析モデルとし, その概略を図-1 に示している。載荷点側の部材を梁, 反対側の部材を柱と呼び, 板厚が大きくなった区間とハンチを合わせた領域(図-1の斜線部)を本研究では隅角部と定義する。また, この隅角部からハンチを除いた領域を, 部材の隅角部と呼ぶ。

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。ハンチは四分円型ウェブにフランジを設置した形式で, ウェブの曲率半径は 200mm, ハンチおよ

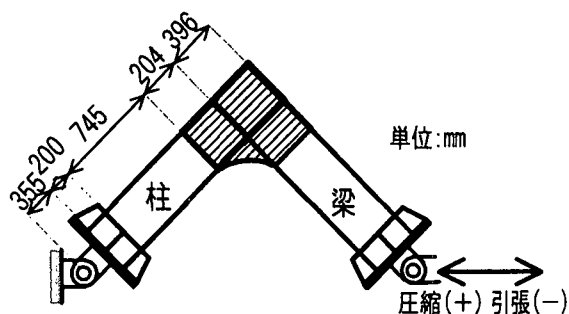


図-1 G-1 供試体概略図

表-1 G-1 供試体の諸元

供試体	梁・柱部材		部材の隅角部板厚
	フランジ	ウェブ	
G-1	410×12mm	380×12mm	16mm

びダイアフラムの板厚はそれぞれ 12mm, 7mm である。

G-1 は、隅角部内側にハンチを取り付けた構造形式になっている。ここでは、G-1 からハンチを取り外したモデル（以下では G-0 と呼称）、ハンチの大きさを 1/2（曲率半径 100mm）にしたモデル（以下では G-1/2 と呼称）、ハンチの大きさを 1/4（曲率半径 50mm）にしたモデル（以下では G-1/4 と呼称）、さらに各モデルでハンチのフランジを取り外し、フィレット構造にしたモデルも検討対象とする。隅角部にフィレットを取り付けたモデルは、対応するハンチ付きモデルの名前の末尾に「-0」を付けることで識別する。例えば、G-1 のハンチからフランジを取り外し、フィレット構造としたモデルは G-1-0 と呼ぶ。

有限要素解析においては、対称性を考慮し、供試体の 1/2 のみを解析対象とする。図-2 に G-1 の解析で用いる要素分割を示す。使用した要素数はシェル要素 3630 個、梁要素 2 個である。梁要素は供試体端部の荷重治具の部分に対応しており、剛としている。初期たわみと残留応力は無視する。

巨大地震荷重を想定した繰り返し荷重下では複合非線形解析を行うことになるが、その際の構成則には三曲面モデル^{2,2)}を採用する。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-3 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、本解析では汎用有限要素解析プログラム ABAQUS^{2,3)}を用い、三曲面モデルはユーザーサブルーチンで組み込んでいる。ここで記した解析法は、先の検討で用

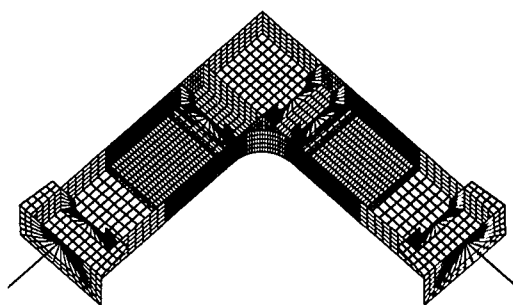


図-2 要素分割

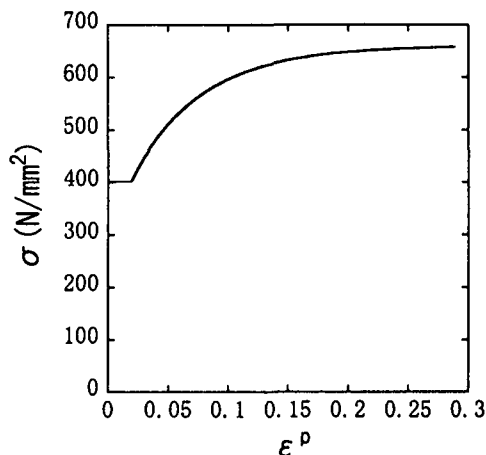


図-3 真応力-対数塑性ひずみ関係

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^{2,0), 2,1)}。

2.2 荷重方法

池田らの荷重実験^{1,5)}では、図-1 に示すように、両端をヒンジ固定（一端は水平方向可動）し、梁部材端部の水平変位 δ を制御することで荷重された。具体的には、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）。圧縮、引張の定義は図-1 に示す通りであり、圧縮が正、引張が負として取り扱われている。

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²⁾。繰り返し回数の違いは最大耐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力低下の度合いが大きい^{2,4)}。鋼製橋脚の耐震設計で重要なのは耐力が若干低下するまでの変形挙動であること^{2,5)}や実験結果のばらつき²⁾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、

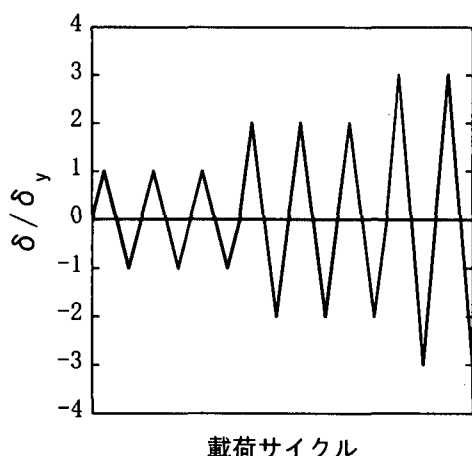


図-4 载荷点の水平変位履歴

図-4のような振幅が漸増する変位制御法を採用するものの、各振幅の繰返し回数は1サイクルとする。なお、G-1の δ_y は11mmであり、他のすべての解析でもこの値を用いる。

常時荷重下での解析では、梁部材端部で引張方向に载荷することとする。常時荷重下での変形は一般に小さいため、線形解析を行えばよい。従って、常時荷重下における補強材の影響の考察では、応力分布に着目し、ハンチが全くない場合との比較に重きを置くこととする。

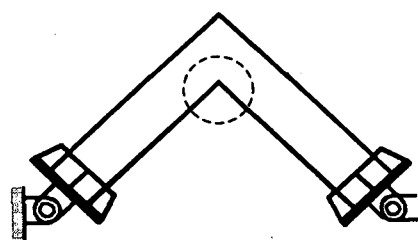
3. 解析結果および考察

3.1 常時荷重下での発生応力

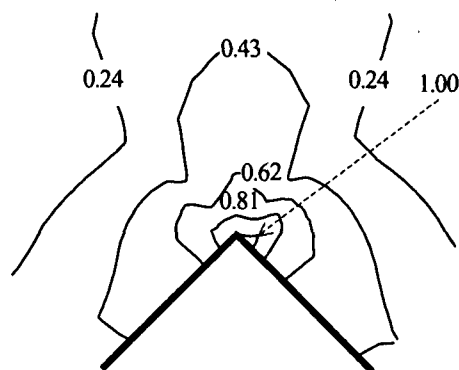
せん断遅れによって応力集中が起こるため、フランジウェブ接合部近傍で応力が大きくなる。そこで、ここでは隅角部ウェブ面内側角近傍の最大主応力に着目する。

図-5(a)に、G-0における応力分布着目領域を示し、図-5(b)にはこの領域での隅角部ウェブ内最大主応力等値線を描いている。この図より、隅角部内側角で大きな応力集中の生じることがわかる。なお、この図の等値線の最大値を基準(1.00)とし、以下ではそれとの相対値で応力を表す。

図-6には、フィレットを有するモデルの隅角部ウェブ内最大主応力等値線を示している。フィレット設置に伴い、部材の隅角部での応力は減少し、最大応力発生位置も隅角部内側角から離れる傾向が認められる。こうしたフィレットの効果は、フィレットのサイズが大きくなるほど強い。一方で、フィレットには大きな応力が作用し、特に自由辺中央部付近で大きくなっている。このフィレット内の応力は、フィレットサイズが大きくなると減少する傾向にある。以上より、フィレットの取り付けに伴い、フィ



(a) 応力分布着目点



(b) 最大主応力応力分布

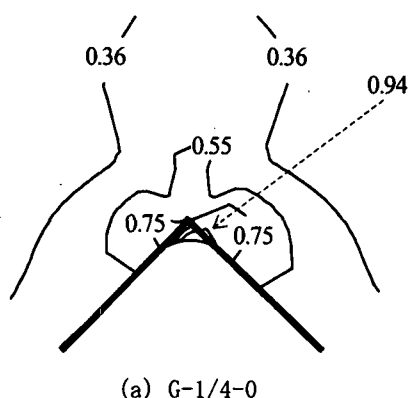
図-5 G-0隅角部ウェブ面内最大主応力分布

レットを介して梁-柱間でかなりの応力が伝達されるようになることが理解される。

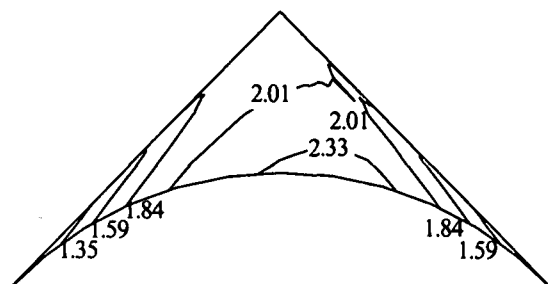
図-7には、ハンチを有するモデルの隅角部ウェブ内最大主応力等値線を示している。フィレットと同様の効果が認められるが、フィレット構造の場合に比すると、部材の隅角部内応力、ハンチのウェブ内応力ともに減少している。また、ハンチウェブ内の最大応力は、フィレットの場合と異なり、円弧境界边上ではなく、ウェブ内部で発生している。この傾向は、ハンチサイズが小さいほど顕著である。以上より、ハンチのフランジ部も、柱と梁部材間の応力伝達に寄与していると考えられる。

3.2 繰返し荷重下での荷重-変位関係

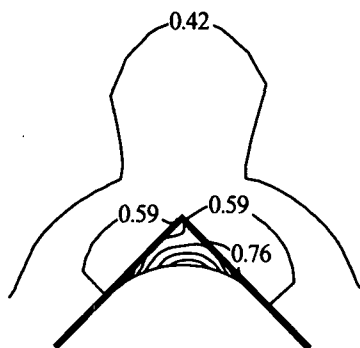
繰返し荷重を作用させて求めた载荷点での水平荷重 H -水平変位 δ 曲線の、第一象限における包絡線を図-8に示す。この図を見ると、補強材のサイズが小さくなるにつれて、剛性と最大耐力は若干減少するが、変形能は大きくなる傾向が認められる。フィレットとハンチを比較すると、フィレット取り付けの方が剛性と最大耐力は若干小さいものの、変形能は向上する傾向にある。すなわち、サイズを小さくしたり、ハンチのフランジ部をなくしてフィレット構造にして補強材の影響を小さくすると、剛性と最大耐力は若干低下するものの、変形能は向上することがわかる。実際、すべてのモデルの中で、ハ



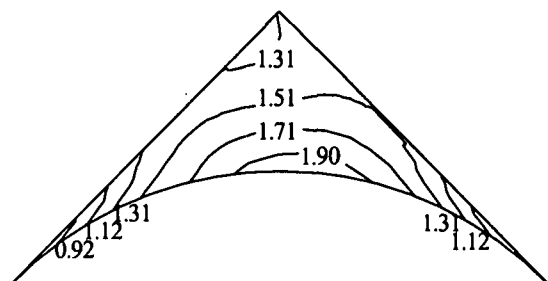
(a) G-1/4-0



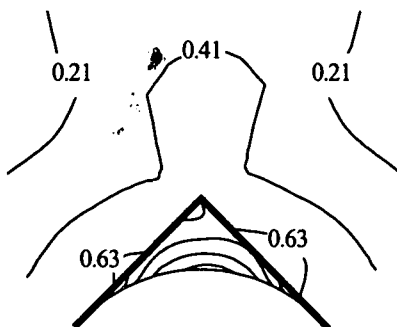
(b) G-1/4-0 (フィレット)



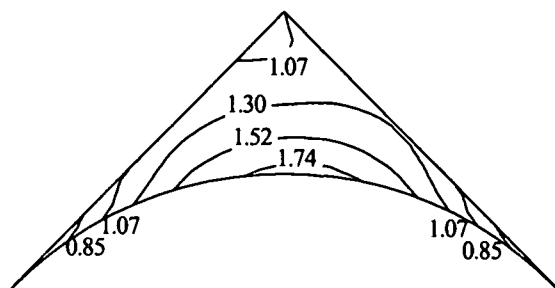
(c) G-1/2-0



(d) G-1/2-0 (フィレット)



(e) G-1-0



(f) G-1-0 (フィレット)

図-6 フィレット付きモデル隅角部ウェブ面内最大主応力分布

ンチやフィレットといった補強材を全く有しないG-0の剛性、耐荷力が最小で、その変形能は最大となっている。

また、G-1-0とG-1/2、G-1/2-0とG-1/4がそれぞれほぼ同じ水平荷重-水平変位関係を示しており、フィレットにフランジを取り付けてハンチ構造とすることにより、一ランク大きなフィレット補強を施した際の水平荷重-水平変位関係を有するようになることがわかる。

3.3 繰り返し荷重下での梁-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^{26), 27)}。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、ここでは図-9に黒丸で示す点の部材軸方向の直ひずみ（梁と柱に生じる直ひずみの大きい方）に着目し、水平荷重-水平変位関係の引張載荷時と圧縮載荷時における折り返し点での水平荷重Hと直ひずみ ϵ をもと

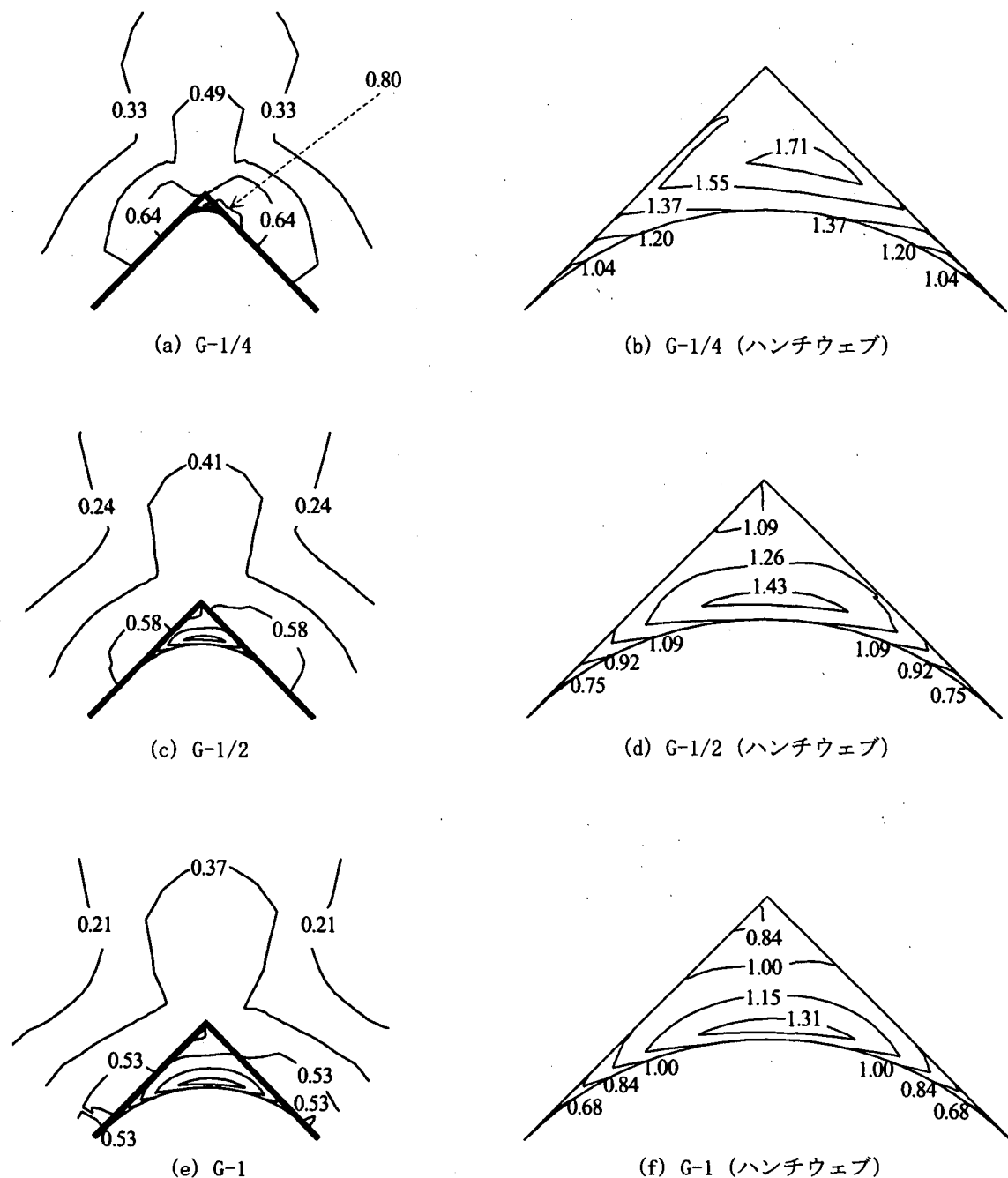


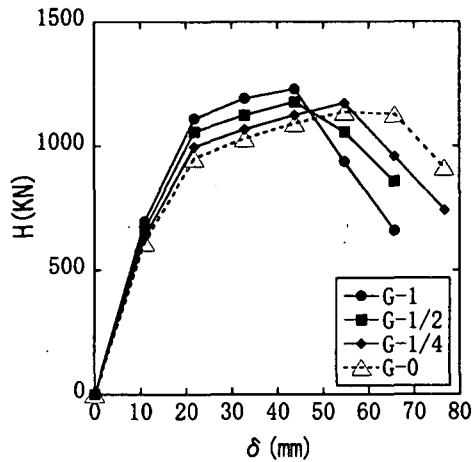
図-7 ハンチ付きモデル隅角部ウェブ面内最大主応力分布

に得られた関係を図-10にまとめている。

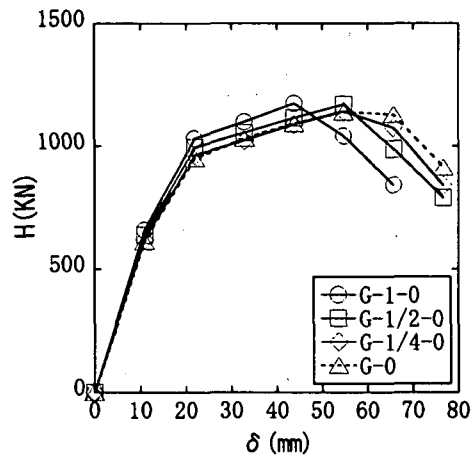
この図より、ハンチが小さい程、またハンチよりもフィレットの方が、ひずみは大きくなる傾向が認められる。しかしながら、補強材を持たないG-0のひずみに比べると、他のモデルで生じるひずみは小さい。梁-柱接合部のひずみの抑制には、フィレット、ハンチともに有効で、特にハンチは大きな効果を有することが理解される。

3.2で、G-1-0とG-1/2、G-1/2-0とG-1/4がそれ

ぞれほぼ同じ水平荷重-水平変位関係を示すと述べた。これに対し、ここで検討対象とする局所的な変形については、これらのモデル間でも差異が見られる。巨視的な変形挙動と異なり、局所的な変形挙動では、ハンチ部フランジ有無の方が、補強材のサイズよりも大きな影響を有していることがわかる。



(a) ハンチ付きモデル



(b) フィレット付きモデル

図-8 水平荷重-水平変位関係 (包絡線)

3.4 繰り返し荷重下での変形状

図-11に最大荷重以降の劣化域における変形状を示している。ハンチを有するモデルでは、局部座屈が一般部のみで生じており、隅角部に明確な面外変形は見られない。フィレット付きモデルでは、フィレットサイズが小さい場合に部材の隅角部で面外変形が認められるが、フィレットサイズが大きいと、部材の隅角部での面外変形は見られない。これに対し、補強材を全く設置していないG-0では、梁-柱接合部近傍まで面外変形が及んでいる。図-10の水平荷重-直ひずみ関係は、こうしたモデルの変形状とよく整合している。

図-12には、最大荷重作用時におけるG-1-0のフィレットの変形を示す。このモデルでは、図-11(f)から理解されるように、部材の隅角部に面外変形は

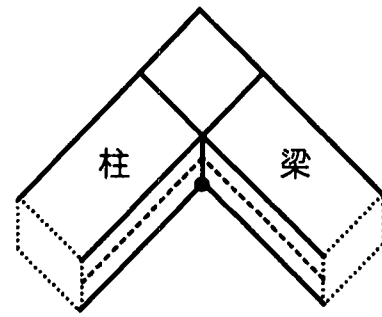
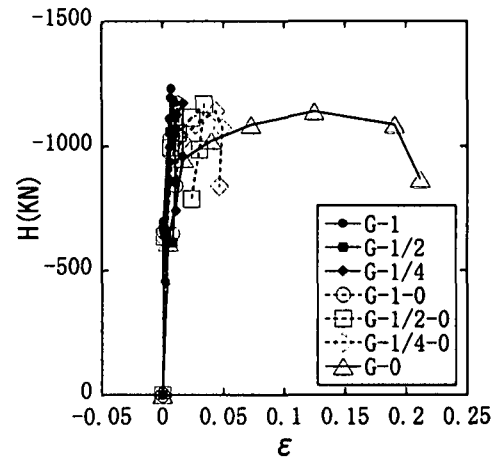
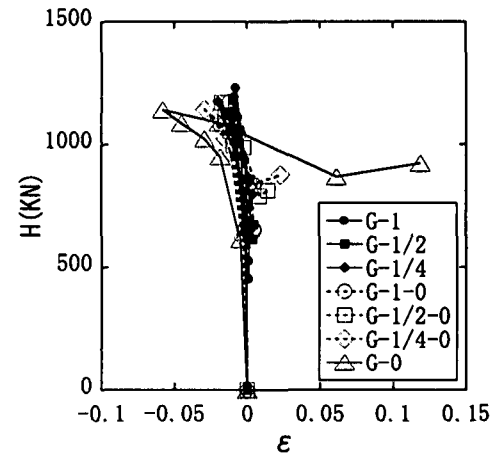


図-9 直ひずみ着目点 (黒丸)



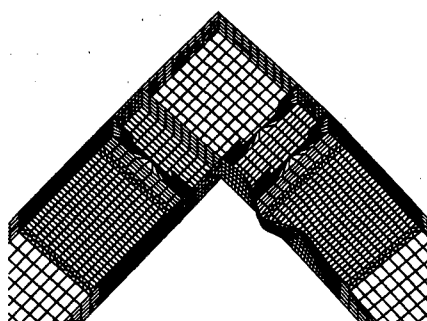
(a) 引張荷重時



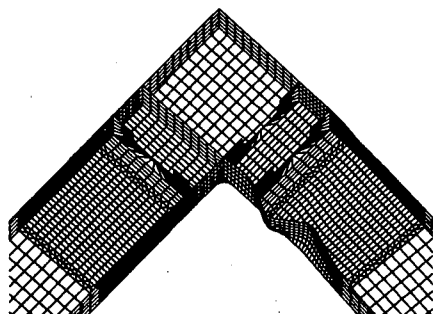
(b) 圧縮荷重時

図-10 水平荷重-直ひずみ関係

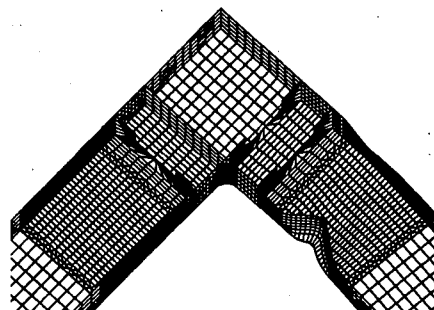
見られない。しかしながら、図-12で明らかなように、フィレットは局部座屈し、面外変形の発生が認



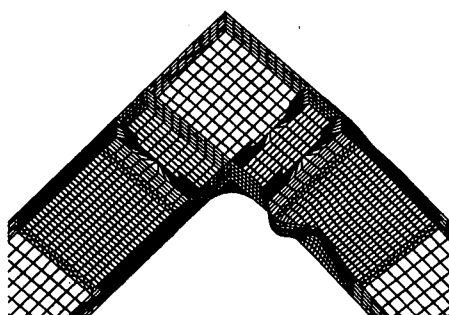
(a) G-0 ($+7 \delta_y$)



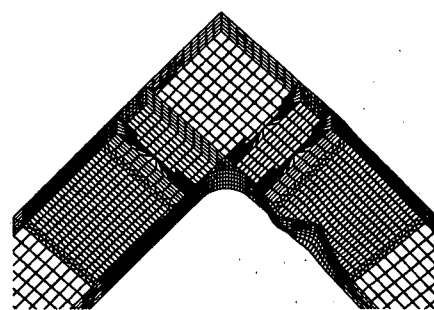
(b) G-1/4-0 ($+7 \delta_y$)



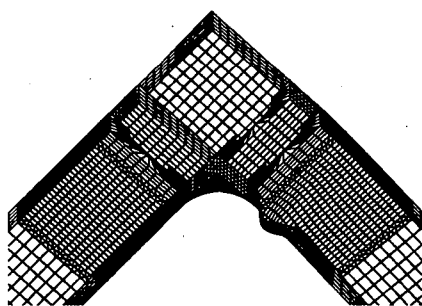
(c) G-1/4 ($+7 \delta_y$)



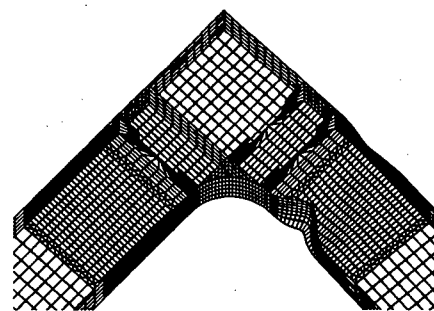
(d) G-1/2-0 ($+7 \delta_y$)



(e) G-1/2 ($+6 \delta_y$)



(f) G-1-0 ($+6 \delta_y$)



(g) G-1 ($+6 \delta_y$)

图-11 变形性状

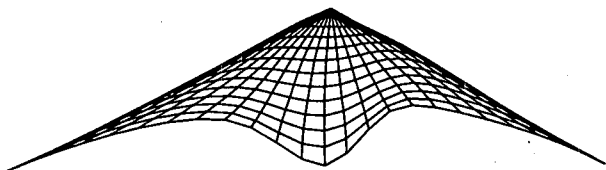


図-12 フィレットの変形 (G-1-0)

められる。フィレット構造の他のモデルでも、フィレットの局部座屈が生じている。

一方、ハンチ構造の場合には、フランジがあるためハンチのウェブに自由境界辺はなく、その座屈強度はフィレットの場合よりも大きくなる。その結果、ハンチ付きモデルでは、ハンチウェブの面外変形は見られない。3.3 節で、局所変形に関しては、ハンチ部フランジ有無の影響が補強材サイズよりも大きいと記したが、これは、ハンチ部フランジがない場合、隅角部補強材（フィレット）に局部座屈が発生することが主たる原因と考えられる。

4. まとめ

本研究では、鋼製ラーメン隅角部の補強について、基礎的検討を行った。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) 隅角部に補強が全くない場合、隅角部内側角近傍で大きな応力集中が生じる。
- (2) フィレット設置に伴い、部材の隅角部での応力は減少し、最大応力発生位置も隅角部内側角から離れる。一方で、フィレットには大きな応力が作用し、特に自由辺中央部付近で大きくなっている。
- (3) ハンチはフィレットと同様の効果を有しているが、ハンチのフランジ部も柱と梁部材間の応力伝達に寄与するため、フィレットの場合に比すると、部材の隅角部内の応力、ハンチウェブ内の応力ともに小さい。
- (4) ハンチウェブ内の最大応力は、フィレット構造の場合と異なり、円弧境界辺上ではなく、ハンチウェブ内部で発生する。この傾向は、ハンチのサイズが小さいほど顕著である。

繰り返し荷重下：

- (5) 補強材のサイズを小さくする、あるいはハンチをフィレットに代えて、補強材の影響を小さくすると、剛性と最大耐力は若干低下するものの、変形能は向上する。

- (6) フィレットにフランジを取り付けてハンチ構造にすると、一ランク大きなフィレット補強を施した際の水平荷重－水平変位関係を有するようになる。
- (7) 補強材のサイズを小さくする、あるいはハンチをフィレットに代えて、補強材の影響を小さくすると、梁－柱接合部における直ひずみは大きくなる。
- (8) 全く補強材のないモデルの梁－柱接合部直ひずみに比べると、他のモデルで生じるひずみは小さい。梁－柱接合部のひずみの抑制には、フィレット、ハンチともに有効で、特にハンチは大きな効果を有している。
- (9) 載荷点での水平荷重－水平変位曲線といった巨視的な変形挙動と異なり、梁－柱接合部の水平荷重－直ひずみ曲線のような局所的な変形挙動では、ハンチ部フランジ有無の方が、補強材サイズよりも大きな影響を有する。
- (10) ハンチを有するモデルでは、局部座屈が一般部のみで生じており、隅角部に明確な面外変形は見られない。フィレット付きモデルでは、フィレットサイズが小さい場合に隅角部で面外変形が認められるようになり、補強材を全く設置していないモデルでは、梁－柱接合部近傍まで面外変形が及んでいる。梁－柱接合部でのひずみ性状は、こうしたモデルの変形状と一致している。
- (11) フィレット構造は局部座屈し、面外変形が生じ得る。一方、ハンチ構造の場合には、ハンチウェブの面外変形は見られない。これが、局所変形ではハンチ部フランジ有無が補強材サイズよりも大きな影響を有する要因である。

以上のように、本研究では、フィレットやハンチといった補強材の設置に伴って生じる鋼製ラーメン隅角部の力学的な現象の変化を調べ、基礎的考察を行った。隅角部の応力性状や変形状は、さらに補強材の形状や板厚などにも大きな影響を受けると考えられる。今後は、鋼製ラーメン隅角部の設計に資するべく、そうした因子もパラメータとして取り上げ、さらに検討していく予定である。

謝辞

本研究は、科学研究費特定領域研究(B)「日米共同研究による都市地震災害の軽減」の活動の一環として始めたものであり、研究助成を受けた。本研究を遂行するにあたっては、東京工業大学の三木千寿教授、首都高速道路公団および首都高速道路センターの鋼橋補修関係者から貴重な情報、意見を頂いた。また、名古屋工業大学の後藤芳顕教授には、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) 耐震設計研究WG：鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のための新技術，土木学会（鋼構造委員会鋼構造新技術小委員会），1996年。
- 2) 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年。
- 3) 構造工学震災調査特別小委員会：鋼製橋脚の非線形数値解析と耐震設計に関する論文集，土木学会（構造工学委員会），1997年。
- 4) 鋼構造物の耐震検討小委員会：第2回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集，土木学会（鋼構造委員会），1998年。
- 5) 鋼構造物の耐震検討小委員会：第3回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集，土木学会（鋼構造委員会），2000年。
- 6) 鋼構造物の耐震検討小委員会：第4回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集，土木学会（鋼構造委員会），2002年。
- 7) 鋼橋の耐震設計小委員会：鋼構造物の耐震解析用ベンチマークと耐震設計法の高度化，日本鋼構造協会（次世代土木鋼構造研究特別委員会），2000年。
- 8) 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年。
- 9) 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と耐力とに関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.33A，pp.193-206，1987年。
- 10) 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年。
- 11) 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年。
- 12) 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年。
- 13) 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り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年。
- 14) 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り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年。
- 15) 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年。
- 16) 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年。
- 17) 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年。
- 18) 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年。
- 19) 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年。
- 20) 山口栄輝，市川篤司，池田学，久保知徳，三木千寿：繰り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年。
- 21) 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年。
- 22) 後藤芳顯，王慶雲，高橋宣男，小畑誠：繰り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年。
- 23) ABAQUS/Standard User's Manual，Ver.5.7，HKS，1997。
- 24) 宇佐美勉，坂野茂，是津文章，青木徹彦：鋼製橋脚モデルの繰り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年。
- 25) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編，丸善，2002年。
- 26) Chen, W.F. and Yamaguchi, E.: Spotlight on steel moment frames, Civil Engineering, March, ASCE, pp.44-46, 1996。
- 27) 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年。

(2003年4月18日受付)