

鋼製円形橋脚の座屈パラメータと終局ひずみの関係式に関する研究

河藤 千尋¹, 運上茂樹²

¹工修 独立行政法人土木研究所耐震研究グループ（〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6）

²工博 独立行政法人土木研究所耐震研究グループ（〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6）

1. はじめに

鋼製橋脚の非弾性域の挙動を考慮して耐震設計を行う場合、その終局状態の与え方が重要となる。鋼製橋脚の耐震性能、特に終局状態の変形性能を調べるために、数多くの正負交番載荷実験が行われており¹⁾、また多くの数値解析による検討も行われている。これら実験と数値解析によって、鋼製橋脚の終局状態の定式化も幾つか提案されている^{2)~7)}。

本文では、筆者らが既に矩形の鋼製橋脚に対して行った方法⁷⁾を使って、円形の鋼製橋脚を対象にシェル要素を用いた非弾性有限変位解析を行い損傷領域のひずみ分布および終局ひずみの設定法を解析するとともに、鋼製円形橋脚に関する実験データとの比較により終局状態の評価法の検討を行ったものである。

2. 終局状態の評価方法

(1) 終局状態の評価法

本研究では実設計において鋼製円形橋脚の終局状態（耐力、終局変位等）を求める場合を想定し、はり要素でモデル化した鋼製円形橋脚のプッシュオーバー解析に基づいて終局状態を与える方法を基本とした。はり要素でモデル化した鋼製円形橋脚のある範囲の圧縮側のひずみ値の平均が、別途鋼製円形橋脚をシェル要素でモデル化し、圧縮側の座屈の影響を考慮して求めたある範囲の損傷領域のひずみ値と等価になるときを、鋼製円形橋脚の終局状態と設定するものとした。

(2) 終局ひずみの設定法

水平荷重が最大値に達したとき（終局状態）の圧縮側のある範囲に生じるひずみ分布に着目し、塑性損傷領域のひずみを評価することを試みた。

1) シェル要素から求めた終局ひずみ

図1はシェル要素を用いた鋼製円形橋脚の1/4部分における基部付近の要素分割を示したものである。ここに、円周方向の $i=1,2,\dots,n_i$ は、載荷方向の z 軸から y 軸方向への1/4円周に沿った要素の分割であり、縦軸 ($j=1,2,\dots,n_j$) が基部から橋脚天端へとなっている。シェル要素中心の軸ひずみを ε_{ij} で表示する。圧縮側1/4の円周方向への要素分割数と橋脚の高さ方向への要素分割数をそれぞれ n_i と n_j とする。これらの諸量を用いて、塑性損傷領域に生じる平均的なひずみを、次の方法によって求める。

図1に示すように、円形断面に載荷方向の z 軸から y 軸へ角度 α の領域 ($i=1,2,\dots,n_\alpha$) と要素分割による橋脚の高さ $l=l_j$ の範囲に存在する全シェル要素中心の軸ひずみ ε_{ik} ($i=1,2,\dots,n_\alpha$; $k=1,2,\dots,j$) の平均値を求め、その値を平均終局ひずみ ε_a とする。 ε_a は次式によって計算できる。

$$(\varepsilon_a)_{\alpha j} = \left\{ \sum_{k=1}^j \left(\sum_{i=1}^{n_\alpha} \varepsilon_{ik} \right) / n_\alpha \right\} / j \quad \alpha = 0 \sim 90^\circ; \quad j = 1, 2, \dots, n_j \quad (1)$$

2) はり要素から求めた終局ひずみ

シェル要素から終局ひずみを求める方法と同様に、はり要素円形断面の1/4部分に着目し、断面の微小要素の分割数は n_i 、橋脚高さ方向へのはり要素の分割数は n_j とする。したがって、載荷方向 z 軸から y 軸への角度 α 、基部から高さ l_j の範囲に存在する全積分点のひずみを用いて平均終局ひずみ ε_{ba} を式(1)と同じように次式で求めることができる。

$$(\varepsilon_{ba})_{\alpha j} = \left\{ \sum_{k=1}^j \left(\sum_{i=1}^{n_i} \varepsilon_{ik} \right) / n_i \right\} / j \quad \alpha = 0 \sim 90^\circ; \quad j = 1, 2, \dots, n_j \quad (2)$$

(3) 2つの終局ひずみの違い

先に定義した2つの終局ひずみの違いを見るため、パラメトリックスタディに先立ち、繰り返し載荷試験体に対して、プッシュオーバー解析を行った。詳細は後述するが、1つはシェル要素でモデル化した

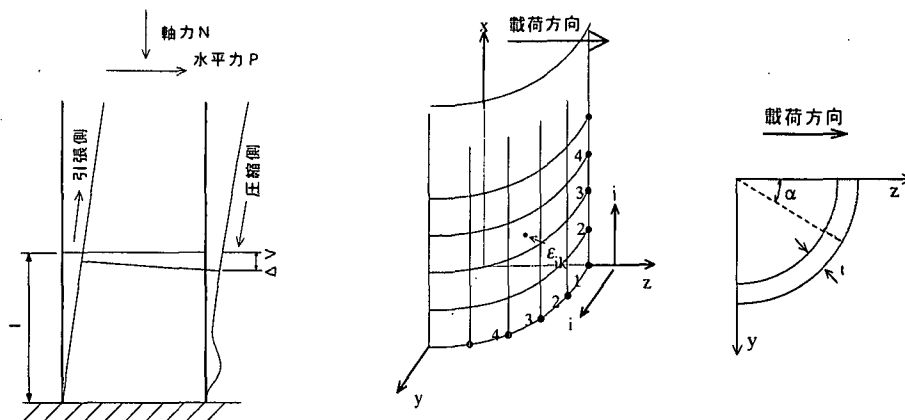
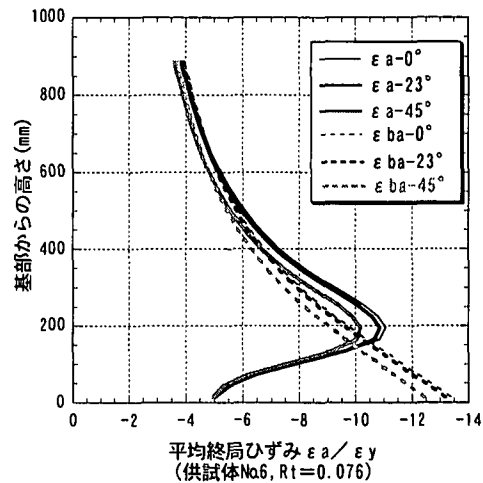
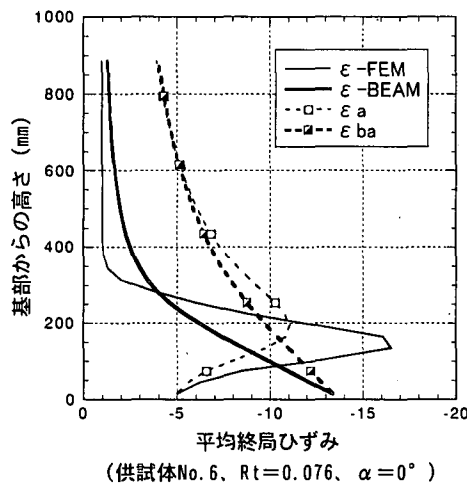


図1 供試体のシェル要素の分割



(1)シェル要素とはり要素の平均終局ひずみの違い (2)圧縮側のひずみの载荷方向からの角度の違い

図2 最大荷重時におけるシェル要素とはり要素の平均終局ひずみの違い

もの、もう1つははり要素（ファイバーモデル）でモデル化した。ここでは、はり要素を用いたプッシュオーバー解析より得られる各供試体の水平変位が、シェル要素を用いた非弾性有限変位解析（以下、FEM 解析と呼ぶ）より得られる最大荷重の水平変位に達するまで荷重を漸増させた。図2は最大荷重時の変位まで载荷したはり要素を用いた解析から得られるはり要素の軸ひずみ（ ϵ -BEAM）と平均終局ひずみ（ ϵ_{ba} ）の分布とシェル要素のひずみ（ ϵ -FEM）とシェル要素の平均終局ひずみ（ ϵ_a ）の分布を示したものである。解析した実験供試体は文献1）に示されるNo.6 供試体である。

図2(1)に示すはり要素とシェル要素のひずみ分布を比較すると、局部座屈の影響によって両者の分布が大きく異なっていることがわかる。シェル要素の局所ひずみは、橋脚基部よりやや上方に位置する局部座屈が生じるところで最も大きくなっているに対して、はり要素を用いた解析では、ひずみは橋脚基部で最も大きくなっている。これは、ファイバーモデルを用いたはり要素の解析では、局部座屈の影響を考慮できないために、塑性変形が基部に集中するか

らである。このことから、はり要素のファイバーモデルを用いた解析では、基部のひずみだけで橋脚の塑性変形性能を評価することは適切ではない。一方、シェル要素を用いた FEM 解析の平均終局ひずみ ϵ_a とはり要素解析の平均終局ひずみ ϵ_{ba} に着目すると、両者の値はある領域を超えればほぼ同じとなる。このため、 ϵ_a と ϵ_{ba} の値が異なる領域は、局部座屈の影響が大きい領域と考えることができる。シェル要素を用いた FEM 解析とファイバーモデルを用いたはり要素解析から判断すると、両者の平均終局ひずみ ϵ_a と ϵ_{ba} の違いは、局部座屈の考慮、非考慮の違いが大きいと予想される。ここでは、 ϵ_a と ϵ_{ba} の差が著しい領域を塑性損傷領域とみなす。

図2(2)に示した対象供試体の平均終局ひずみ ϵ_a と ϵ_{ba} の分布は、円形断面の载荷方向から $\alpha=0^\circ$ 、 $\alpha=23^\circ$ 、 $\alpha=45^\circ$ の何れにおいても、橋脚基部から600mm~800mmの範囲でほぼ一致している。これより、円形鋼製橋脚の変形性能を評価するシェル要素とはり要素の平均終局ひずみを整合させるために、平均終局ひずみを求める円形鋼製橋脚の塑性損傷領域は、円形断面の $\alpha=0^\circ$ 橋脚の高さ $l_a=0.7D$

表 1 解析対象とした断面の諸元

径厚比 パラメータ R_t	高さ h (m)	外径 D (mm)	板厚 t (mm)	断面積 A (cm ²)	I (cm ⁴)	細長比 パラメータ λ
0.060	3.4	900	20.75	573.2	554188	0.288
0.080	3.4	900	15.65	434.8	425190	0.287
0.100	3.4	900	12.57	350.4	345052	0.286
0.120	3.4	900	10.5	293.4	290234	0.285

(3)

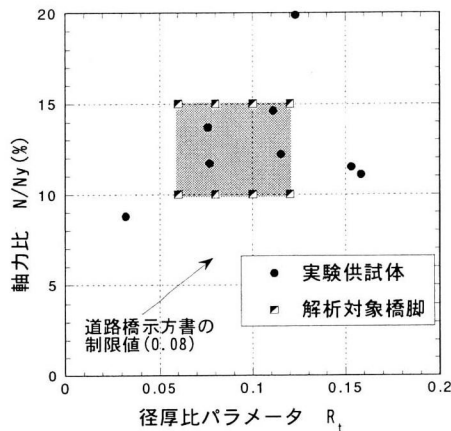


図 3 解析ケースの径厚比パラメータと軸力比の分布

(D：外径) という範囲で評価した。

3. FEM 解析結果

(1) 解析対象橋脚の設定

解析対象とする鋼製円形橋脚は試設計により定めた。解析対象とする橋脚の幅厚比パラメータ R_t の範囲の設定と実験供試体の結果と比較するため、縦リブ付き断面とコンクリート充填および二重鋼管の供試体を除いた標準的な円形断面を有する供試体 8 体を選定した。

次に鋼製円形橋脚の繰返し載荷実験結果により、耐鋼製円形橋脚の耐力特性に最も支配的なパラメータは、径厚比パラメータ R_t と軸力比であることがわかってきたため、この 2 つのパラメータに着目し、径厚比パラメータ R_t は (0.06, 0.08, 0.10, 0.12) 4 つの断面と軸力比 (10%, 15%) の 2 つを組み合わせで解析対象橋脚 8 ケースを設定した。径厚比パラメータ R_t の上下限值の設定は実験供試体の径厚比パラメータのばらつき等を考慮して定めた。解析結果と実験結果を比較するため、橋脚の基本寸法は、直径 900mm、橋脚の高さは 3.4m とした。表 1 に解析対象とした断面諸元を示す。図 2 は解析対象橋脚 8 ケースおよび実験供試体 8 体の径厚比パラメータ R_t と軸力比 N/N_y の分布を示したものである。ここで、幅厚比パラメータ R_t は以下の定義による。

表 2 FEM 解析結果

径厚比パラメータ R_t	軸力比	P_u (kN)	δ_m (mm)	P_u/P_y	δ_m/δ_y
0.06	10%	1814.4	72.1	1.58	5.30
	15%	1764.9	63.7	1.62	4.97
0.08	10%	1331.3	45.2	1.51	3.33
	15%	1295.8	42.4	1.55	3.30
0.10	10%	1047.3	37.5	1.46	2.76
	15%	1018.4	35.4	1.51	2.76
0.12	10%	857.1	33.2	1.42	2.44
	15%	830.7	31.7	1.46	2.47

$$R_t = \left(\frac{R - t/2}{t} \right) \cdot \frac{\sigma_y}{E} \sqrt{3(1 - \nu^2)} \quad (3)$$

ここに、 $R=D/2$ ； D ：断面の外径； t ：断面の板厚； σ_y ：降伏応力； ν ：ポアソン比； E ：ヤング率、鋼材は SM490Y として、公称応力度 $\sigma_y=352.8\text{N/mm}^2$ とした。

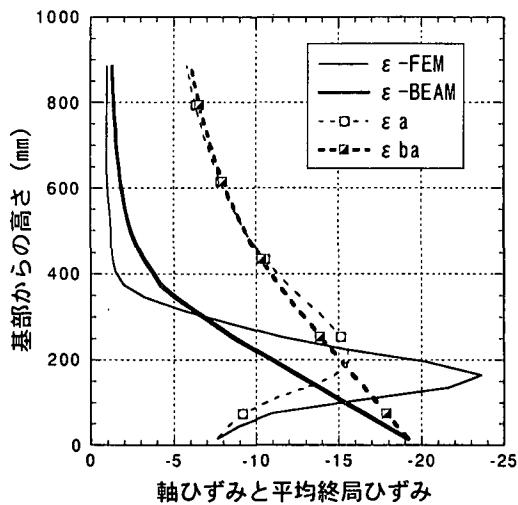
(2) 解析モデルおよび解析条件

解析モデル設定のため、事前にシェル要素を用いた FEM 解析から、損傷の範囲は橋脚基部に集中することがわかってきたため、局部座屈が生じると予想される橋脚基部から 1.8m の範囲をシェル要素でモデル化し、それより上の部分を 3 次元の Timoshenko はり要素でモデル化した。局部座屈現象を精度良く再現するために、橋脚基部付近の 0.9m はより細かく分割した。

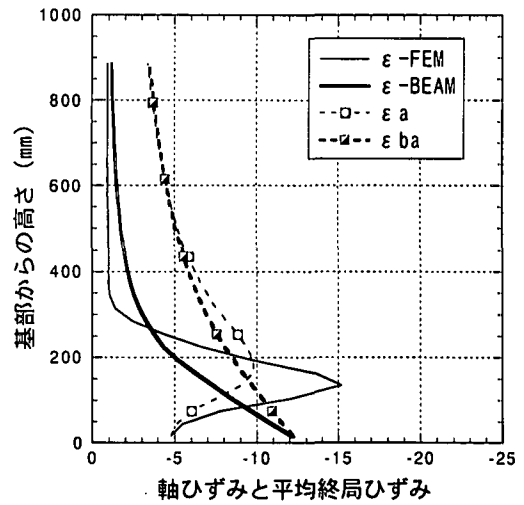
載荷方法は橋脚天端に一定の鉛直圧縮力を作用させた状態で、漸増水平変位を与える。水平変位は、耐力の劣化が生じるまで漸増させる。応力-ひずみ関係は 1% のひずみ硬化を有するバイリニア型とした。

(3) 解析結果

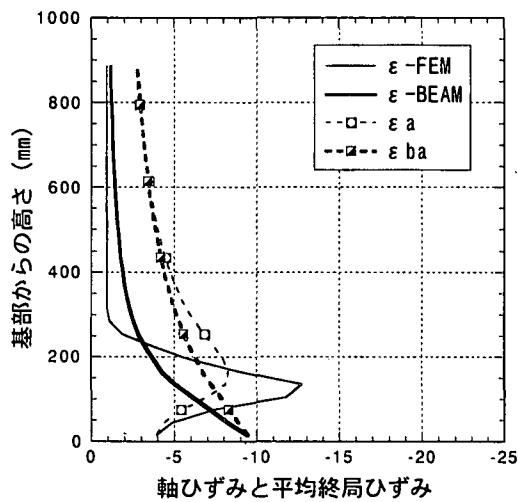
表 2 は FEM 解析より得られた最大荷重と最大荷重時の水平変位をそれぞれ初期降伏耐力および降伏



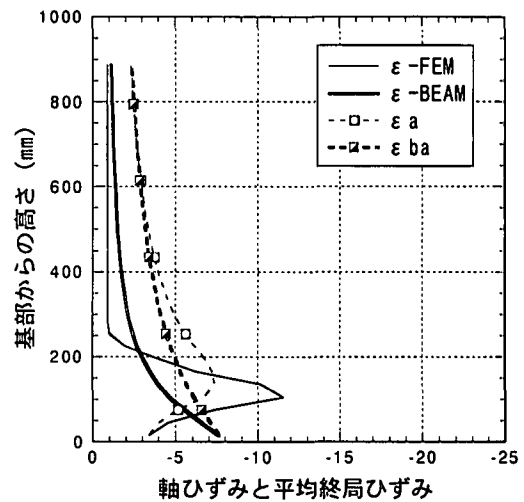
(1) $R_t=0.06, N/N_y=10\%, \alpha=0$



(2) $R_t=0.08, N/N_y=10\%, \alpha=0$



(3) $R_t=0.10, N/N_y=10\%, \alpha=0$



(4) $R_t=0.12, N/N_y=10\%, \alpha=0$

図4 橋脚基部付近の軸ひずみと平均終局ひずみの高さ方向への分布

変位で無次元化した値を示したものである。

最大耐力比 P_u/P_y は径厚比パラメータ R_t の増加に伴い小さくなる傾向があるが、その変化量は 1.42～1.62 と小さなものである。一方、最大塑性率 $\delta m/\delta y$ は径厚比パラメータ R_t の増加に伴い大きく変化している。また径厚比パラメータ R_t が 0.06 の場合で、軸力比の違いによって両者の差が 7% くらいになっている。しかし、径厚比パラメータ R_t が 0.08 以上では軸力比の違いによる影響は小さく無視できる程度である。

図4は、FEM解析の最大荷重時に橋脚基部付近の軸ひずみと平均終局ひずみを示したものである。図には、シェル要素を用いたFEM解析より得られた結果とはり要素を用いたプッシュオーバー解析結果を示してある。はり要素のプッシュオーバー解析は、前述した対象供試体の解析と同様に、ファイバーモデルを用いてFEM解析より得られた最大荷重

時の変位まで載荷した結果である。シェル要素を用いたFEM解析より求めた軸ひずみと平均終局ひずみの分布は、局部座屈の影響によって橋脚の高さ方向に大きく変化している。しかし、ある範囲を超えれば、はり要素の軸ひずみや平均終局ひずみは、FEM解析の結果と近くなる。両者の平均終局ひずみの分布を比較すると、橋脚の高さが約 600mm～800mm の区間でシェル要素の平均終局ひずみ ϵ_a とはり要素から求めた平均終局ひずみ ϵ_{ba} がほぼ一致していることがわかる。

4. 座屈パラメータ R_t と平均終局ひずみの関係

図5は、対象供試体と解析対象橋脚のFEM解析より求めた平均終局ひずみと径厚比パラメータ R_t の関係を示したものである。解析対象の円形鋼製橋脚は、同一の径厚比パラメータ R_t において、軸力比

表 3 実験供試体の提案式による平均終局ひずみの算出

供試体	高さ h (mm)	外径 D (mm)	板厚 t (mm)	径厚比 パラメータ R_t	$\varepsilon_a / \varepsilon_y$ 式 (4)	l_a (mm)
KC2	3.3	850	13	0.111	3.088	595
KC3	3.3	850	13	0.158	2.591	595
No.6	3.4	900	16	0.076	5.037	630
No.8	3.4	900	9	0.115	2.997	630
No.29	3.4	900	9	0.123	2.867	630
T7	5.0	900	16	0.077	4.945	630
M24	3.4	875	7	0.153	2.611	613

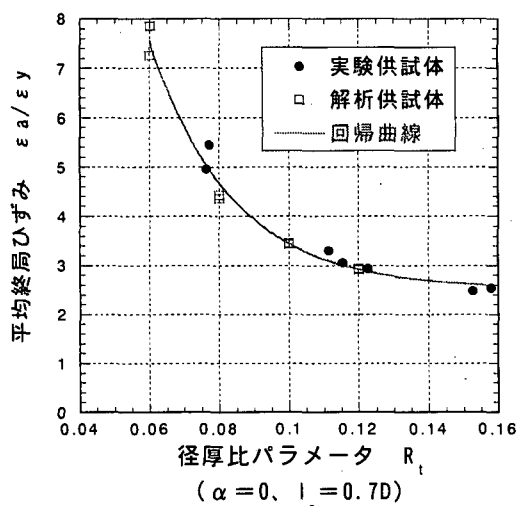


図 5 径厚比パラメータ R_t と平均終局ひずみの関係

を 10%、15%と変化させた。図 5 より、径厚比パラメータ $R_t=0.06$ の場合は、軸力比の影響によって、最大荷重時の平均終局ひずみの差がやや大きい、他の橋脚は、軸力比の影響がほとんどみられない。したがって、ここで対象とした軸力比の範囲では、終局状態の平均終局ひずみに軸力比が与える影響が無視しても良いと考えられる。

図 6 に示した円形鋼製橋脚の終局状態時の平均終局ひずみと径厚比パラメータ R_t から、指数関数で回帰曲線を求めた。回帰式の相関係数は 0.9914 と高く、径厚比パラメータ R_t と平均終局ひずみの間に良い相関関係が得られた。回帰式が次式によって与えられる。

$$\varepsilon_a / \varepsilon_y = 2.51 + 63.2e^{-42.2R_t} \quad (4)$$

上記の回帰式の適用範囲は、径厚比パラメータ R_t が 0.06~0.16 である。ここでは、式(4)を円形鋼製橋脚の終局時に橋脚基部付近に生じる平均終局ひずみの評価式として提案する。

5. 試験供試体への適用

シェル要素を用いた FEM 解析によるパラメトリ

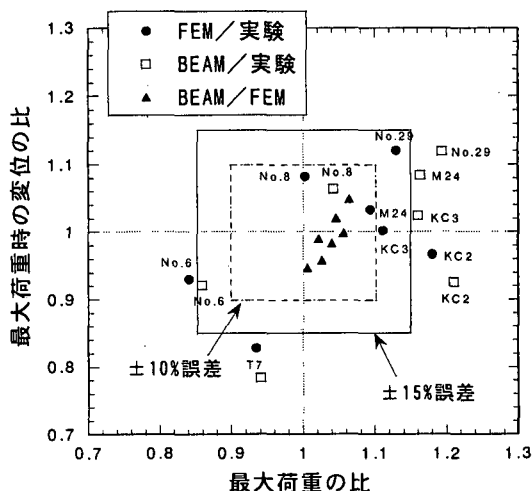


図 6 提案式から求めた解析値と実験値の比較

ックスタディを行い、円形鋼製橋脚の最大荷重時の平均終局ひずみと径厚比パラメータ R_t の関係を最小二乗法によって式(4)のように定式化した。ここでは、選定した実験供試体 8 体のうち、幅厚比パラメータが 0.032 と小さく、式(4)の適用範囲を大きく超える供試体 1 体を除く 7 体の供試体に対してはり要素 (ファイバーモデル) を用いたプッシュオーバー解析を行った。そして式(4)より算出される平均終局ひずみに達する時の水平変位を求め、実験結果や FEM 解析結果と比較することにより式(4)の適用性を検討した。

表 3 は、対象供試体の径厚比パラメータ R_t 、円形断面の外径 D 、平均終局ひずみを評価する塑性損傷領域長 l_a および式 (4) より算出した平均終局ひずみ等を示したものである。損傷領域長 l_a は、0.7D とした。

はり要素を用いたプッシュオーバー解析は、前述したと同様に、せん断変形を考慮できる Timoshenko はり要素と 1%ひずみ硬化型の応力-ひずみ関係を適用した。供試体の平均終局ひずみは、式(4)で定義したものをを用いた。

図 6 は、はり要素を用いたプッシュオーバー解析より得られた実験供試体の最大荷重と最大荷重時の

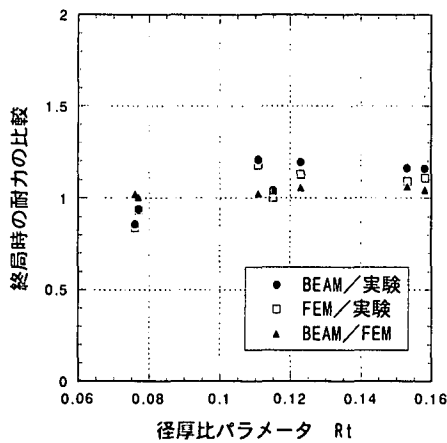


図7 径厚比パラメータ R_t と終局時の耐力の比較

水平変位を実験結果や FEM 解析結果と比較したものである。プッシュオーバー解析の値は、供試体の塑性損傷領域の平均終局ひずみ $\varepsilon_a/\varepsilon_y$ が表 3 に示した値に達した時の水平荷重と水平変位である。図 6 に示すように、プッシュオーバー解析より得られた供試体の最大荷重とそのときの水平変位は、実験値と比較すると、シェル要素を用いた FEM 解析の結果よりバラツキはやや大きくなった。これは、はり要素を用いたプッシュオーバー解析より得られた終局耐力は、全ての供試体においてシェル要素を用いた FEM 解析の終局耐力よりも大きいからである。しかし、はり要素のプッシュオーバー解析と FEM 解析の結果を比較すると、両方の終局耐力と変位における差の最大値は約 6%と小さい。これより、平均終局ひずみの提案式(4)は、円形鋼製橋脚の変性性能を評価するために行うはり要素（ファイバーモデル）を用いたプッシュオーバー解析に適用できといえる。

図 7、図 8 は、終局耐力や終局変位における解析結果と実験結果の比率と橋脚の径厚比パラメータ R_t の関係を示したものである。径厚比パラメータ R_t の増加に伴い、終局時の耐力と変位ともに解析の方は実験値より大きくなる傾向がある。道路橋示方書に規定される径厚比パラメータの制限値 0.08 より小さければ、解析より得られる耐力と水平変位は実験結果よりも小さくなっている。これより、ここで提案した式(4)は、径厚比パラメータ R_t が 0.08 よりも小さい領域では設計上安全側の評価を与えることになる。

6. まとめ

鋼製円形橋脚の耐力と変性性能について、座屈パラメータ R_t に着目して解析的な検討を行った。結論をまとめると以下ようになる。

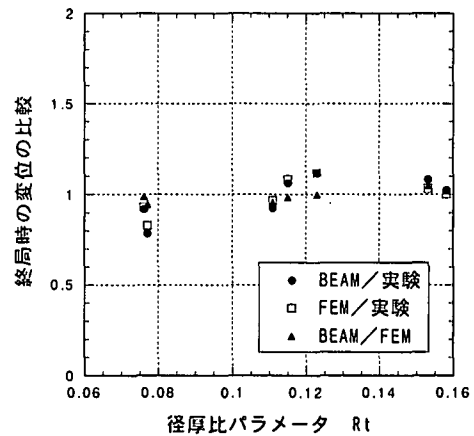


図8 径厚比パラメータ R_t と終局時の変位の比較

- 1) 鋼製円形橋脚に対して、シェル要素を用いた FEM 解析を行い、最大荷重時の平均終局ひずみと径厚比パラメータ R_t の関係を定式化した。
- 2) 提案式の適用性を見るため、繰り返し載荷実験供試体の結果と比較すると、0.11~0.16 の R_t の範囲では良く一致するが、道路橋示方書の制限値である $R_t=0.08$ より小さい領域では安全側の値を与える。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所、首都高速道路公団、阪神道路公団、名古屋高速道路公社、(社)鋼材倶楽部、(社)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研究報告書(I)~(VII)、1997.4
- 2) 宇佐美勉：ハイダクティリティ鋼製橋脚、橋梁と基礎、97-6
- 3) 運上茂樹、寺山徹：鋼製橋脚の終局変位の算定方法に関する検討、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、pp99~106、1998.11
- 4) 深谷茂広、小野潔、沈赤、村越潤、西川和廣：矩形断面鋼製橋脚の正負交番載荷実験結果を基にした曲げ-曲率関係の検討、構造工学論文集、Vol. 46A、pp1365~1376、2000.3
- 5) 鄭沂、葛漢彬、宇佐美勉：鋼構造物の強度と変形性能の統一的評価法、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、pp25~32、2000.1
- 6) 陵城成樹、堀江佳平、加賀山泰一、新名勉、内田諭、渡邊英一、円形断面を有する鋼製橋脚の弾塑性挙動と耐震設計法に関する研究、構造工学論文集、Vol. 46A、pp815~820、2000.3
- 7) 運上茂樹、林昌弘、河藤千尋：鋼製橋脚の座屈パラメータと終局ひずみの関係式に関する一研究、第4回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、pp323~328、2000.12