

円形鋼製橋脚の最高荷重および劣化特性に関する研究

石澤俊希* , 井浦雅司**

*学生会員 東京電機大学理工学研究科建設工学専攻修士課程 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町)

**正会員 工博 東京電機大学教授 理工学部建設工学科 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町)

本報告では、縦補剛材を有し、その板厚が高さ方向に変化する円形鋼製橋脚の最高荷重を推定するパラメータを導入し、その妥当性を著者らの実験結果および他の研究機関のデータとも合わせて検討を行っている。また、既往の研究で提案されている最高荷重を推定するパラメータの精度について検討を行っている。最高荷重後の挙動については、鋼製橋脚の耐力劣化に影響を与える要因と考えられる軸力・変位振幅・耐力に注目し、これらが劣化量に及ぼす影響を調べるための新たな実験を行い考察を行った。さらに、座屈部のひずみの挙動についても考察しており、歪みの反転現象が移動していくことが観察され、その理由についても検討を行った。

Key Word : cylindrical shell, cyclic load, ultimate strength, post-buckling

1. はじめに

平成8年12月に改訂された道路橋示方書・同解説¹⁾(以下、道示と略す)において、コンクリートを充填しない鋼製橋脚については未解明な点が多いことから、動的解析を用いる設計手法が提案されている。動的解析を行う際には、繰り返しの影響を考慮した水平載荷実験結果を用いる必要があり、矩形断面鋼製橋脚については復元モデルが提案されている。しかし、円形断面鋼製橋脚に関して、道示¹⁾では脆性的破壊を防ぐ基準として一定の無次元径厚比以下ならばよいとしているだけであり、復元モデルの提案はされていない。この理由は、矩形断面鋼製橋脚に比べ円形断面鋼製橋脚の実験データが少なかつたために、円形断面鋼製橋脚の非弾性領域における挙動が明確にされていないからだと思われる。

近年、繰り返し荷重を受ける円形断面鋼製橋脚モデルの実験が行われるようになり、様々な研究機関により実験結果が報告されている^{2)~17)}。実験的研究の多くは板厚が一定の円形断面を有しているが、文献11), 13), 14)は板厚変化部を有する円形断面を対象としている。一方、文献2), 3), 8), 9)では縦リブを有する円形断面鋼製橋脚の考察がなされ、じん性の向上が確認されている。また、文献5), 6)は巻立て補強に関する考察がなされている。軸力比や横力の繰り返し回数の影響など載荷方法についても多くの機関で考察がなされている。このように、円形断面鋼製橋脚に関する実験結果は徐々に増しており、今後、どのように実験結果を整理するかが重要となる。

本報告では、円形鋼製橋脚モデルを用いて、最高荷重後の挙動に注目した実験を行い、軸力・変位振幅・耐力と劣化量の相互関係についての考察を行う。次に、最高

荷重を推定する新たなパラメータを提案し、その妥当性について、既往の実験結果を用いて検証すると共に、文献3), 18)で提案されているパラメータとの比較検討を行う。

2. 実験概要

2.1. 実験装置

載荷装置の全体図を図-1に示す。円形鋼管を横向きにして、高力ボルトを用いて円管基部を反力フレームに固定し、円管上部に横力と軸力が作用する載荷フレームを設置した。軸力は、鉛直方向に供試体の変位しても、常に水平方向の軸圧縮力が作用するようにLMガイドを50tf油圧ジャッキと反力フレームの間に設置し、50tf油圧ジャッキの中心と載荷フレームの中心は常に一致するように工夫されている。横力は、50tfアクチュエーターによって変位制御で載荷した。

円管上部の横変位や軸方向変位は、剛体変位を取り除くために、円管基部に変位測定枠を設置し測定した。また、横力・横変位・軸方向変位のほかに円管表面の歪みを測定した。歪みの測定は、円管の天部と地部の表面に、基部より3cmの部分から12cmの部分まで3cmピッチで、二軸ゲージを合計8枚貼る事により行った。

2.2. 供試体

供試体は円形鋼製橋脚をモデル化したものであり、数は8体、寸法はすべて同一で、ダイヤフラムは基部から30cmの位置にあり、縦リブは添付していない(図-2)。材料はすべてSS400であり、実験前に行った材料試験の結果を表-1に示す。載荷点付近の局部座屈を防ぐため、三角形補剛材で上部部分を補剛した。

表-1 供試体の材料特性と実験方法と実験結果

供試体	材料特性				実験方法		実験結果	
	板厚	降伏応力	ヤング率	ポアソン比	軸力比	載荷方法	最高荷重	最高変位
No.	t (mm)	σ_y	E		(%)		Pm (t f)	δ m (cm)
C-1	0.58	2.79	2046.5	0.288	15	正負漸増3回繰返し	20.6	1.327
C-2	0.58	2.79	2046.5	0.288	15	正負漸増5回繰返し	20.6	1.347
C-3	0.58	2.79	2046.5	0.288	15	正負漸増7回繰返し	20.4	1.317
C-4	0.58	2.79	2046.5	0.288	15	4.5 δ_y 繰返し	20.1	1.497
C-5	0.57	2.80	2035.3	0.280	20	正負漸増3回繰返し	20.0	1.247
C-6	0.57	2.80	2035.3	0.280	0	正負漸増3回繰返し	21.4	1.578
C-7	0.57	2.80	2035.3	0.280	15	不規則	20.8	1.748
C-8	0.57	2.80	2035.3	0.280	15	単調載荷	20.7	1.828

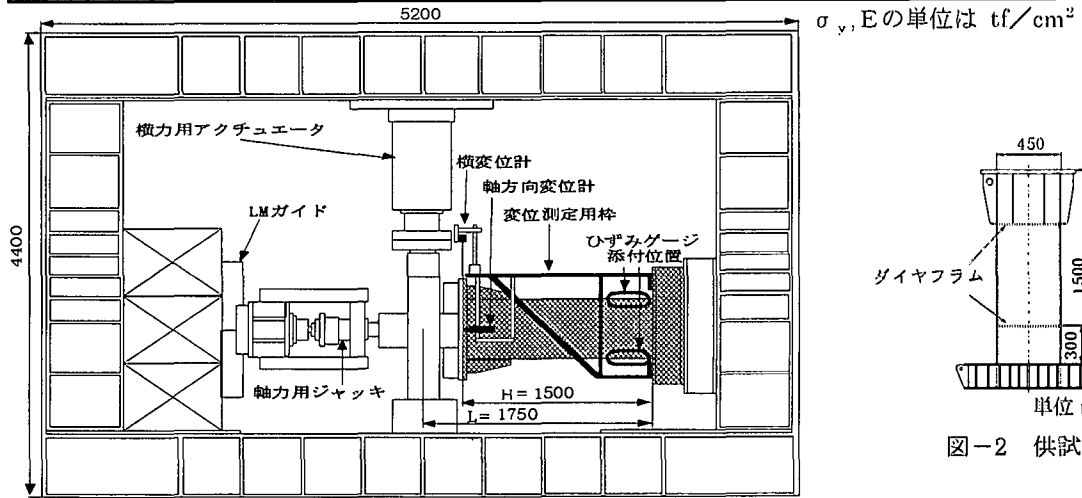


図-1 実験装置

単位 mm

図-2 供試体

2.3. 実験方法

実験方法は、軸力と変位振幅の影響を調べるため、表-1に示すような実験方法とした。なお、変位振幅については図-3のように定義している。C-1,2,3は繰返し回数による影響を調べるために、載荷方法を変化させた。C-1,5,6は軸力による影響を調べるために、軸力比を変化させた。C-4は、最大耐力付近で変位振幅を大きくし、基準変位の大きさが耐力劣化に与える影響を調べるために行った。C-7は、変位振幅が耐力劣化に与える影響を調べるために行った。C-8は、単調載荷であるが、最大耐力を超えた時点から変位を任意に動かした。なお実験の際、基準となる変位は降伏変位 δ_y とした。ここで、 δ_y は次式で与えられる。

$$\delta_y = \frac{P_y H^3}{3EI} + \frac{P_y H^2(L-H)}{2EI} + \frac{P_y H}{GA} \quad (1)$$

$$P_y = \frac{(\sigma_y - N/A)I}{LR} \quad (2)$$

図-1に示すように、Lは固定端から荷重作用点までの距離、Hは固定端から横変位測定位置までの距離、Rは半径、Iは断面二次モーメント、Aは断面積、Eはヤング係数、Gはせん断係数、 σ_y は降伏応力、Nは軸力である。

本文中で用いる劣化量の定義を図-4に示す。なお、縦軸と横軸はそれぞれ横力と横力載荷点の変位であり、履歴曲線の第一象限を示している。

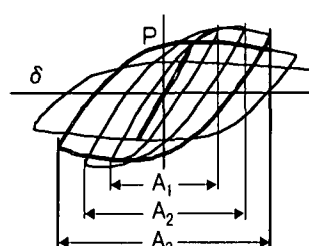


図-3 変位振幅の定義

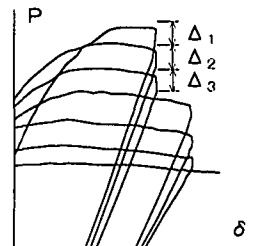


図-4 劣化量の定義

3. 実験結果

3.1. 最高荷重後の劣化特性

縦軸を横力とし、横力を横力載荷点の変位とした時、本実験結果を整理すると図-5のようになる。

図-5において、C-1とC-3の5 δ_y (22mm)の繰返しに注目すると、軸力と変位振幅は同一であるが、耐力がある時ほど劣化量が大きくなるのが分かる。

C-1の4 δ_y (18mm)の繰返しとC-4の4.5 δ_y (20mm)の繰返しに注目すると、軸力と耐力は同一であるが、変位振幅が大きい時ほど劣化量が大きくなるのが分かる。

次に、軸力比20%のC-6と、軸力比0%のC-5に注目すると、耐力と変位振幅は同一であるが、軸力が大きい時ほど劣化量が大きくなるのが分かる。

3.2. 横力と軸方向変位の関係

縦軸を横力に、横軸を軸方向変位としたC-8の実験結果を図-6に示す。これより、各サイクルの最高荷重後に軸方向の変形が起こっていることが分かる。この現象は軸力比0%のC-6を除く他の供試体でも確認された。

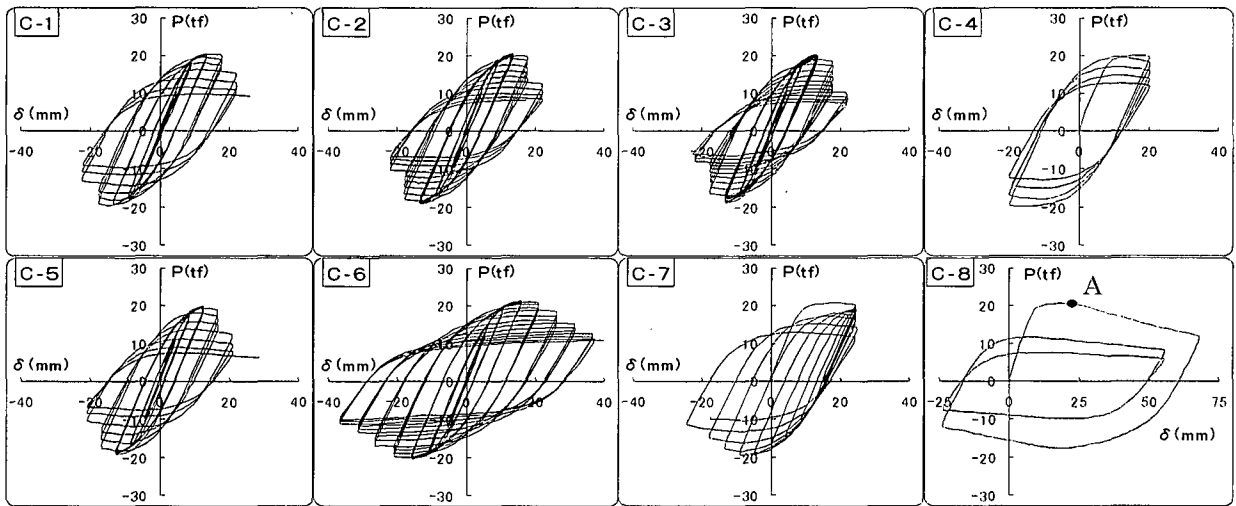


図-5 実験結果 (横力-変位 関係)

3.3.円管の表面歪み

縦軸を横力に、横軸を座屈発生点付近の表面縦歪みとした C-8 の実験結果を図-7 に示す。歪みが反転する点 A は図-5(C-8)における点 A に相当している。このような歪みの反転現象は、全ての供試体において最高荷重後、又はその直後において観察された。以下に、歪みの反転のメカニズムについて考察する。

図-8 は基部付近における供試体の挙動であるが、図-8,a に示すように、座屈が発生する前は、圧縮縁では圧縮歪みが発生し、引張り縁では引張り歪みが発生する。しかし、座屈が発生すると図-8,b で示すように、座屈頂部で引張りが発生する。これが歪みの反転の原因になっていると考えられる。

図-8,b の座屈発生個所に注目した挙動を図-9 に示す。また、横力と歪みの関係を図-10 から図-13 に示す。図-9,a は座屈発生直後であり、座屈頂部付近の黒塗りの部分で歪みの反転が起こる。この時、頂部外側の表面歪みは引張りとなり、図-11,12 の第一象限のような歪みの挙動となる。その後、除荷を行い変位が反対方向の頂点に達すると、図-9,b に示したように、2つの状態が考えられる。(イ)は座屈変形が無くなり元に戻った状態であり、頂部外側の表面の歪みは引張り→圧縮→引張りへと変化していく。この時の歪みの挙動は図-11 に示すようになる。(ロ)は座屈変形が残留した状態であり、歪みは引張り→圧縮へと変化するだけである。この時の歪みの挙動は図-12 に示すようになる。そして、最終的に座屈変形が残留すると、図-13 に示すように、歪みは圧縮縁の時には引張り方向に進み、引張り縁の時には圧縮方向に進む。この時、図-10 に示す座屈発生前の歪みの挙動は右回りなのに対し、図-13 に示す座屈発生後の歪みの挙動は左回りとなる。これが、歪みの反転現象であると考えられる。

次に、再び圧縮縁になった時は、図-9,c に示すように歪みの反転領域 (黒塗りの部分) が増加すると考えられる。つまり、各サイクルの最高荷重後に圧縮縁で歪みの反転領域が増加するのである。このことを説明するた

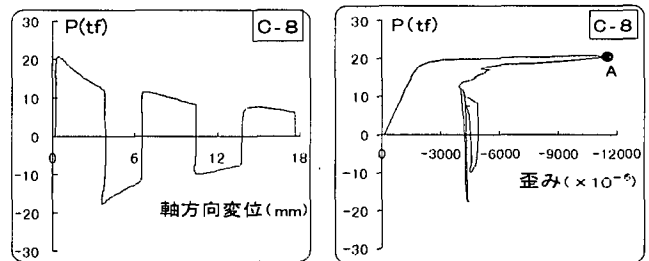


図-6 横力と軸方向変位の結果 図-7 横力と歪みの結果

めに座屈個所の拡大図を図-14 に示す。座屈が進行すると、a の部分は引張りであり、c の部分は圧縮となる。このとき、b の部分は a に近い方から引張りの影響を受け、歪みの反転領域が増加していくと考えられる。以上で述べた歪み反転個所の進展は、実験データからも確認できている。

4. 最高荷重の評価

パラメータの提案にあたり、本実験結果の他に文献 2) から 17) までの実験結果を用いて、その妥当性を検討する。なお、文献 5),6) の巻立て補強の No7・No9・No15、文献 8) の二重管の B3、文献 11) の L10-t22、文献 12) の補剛板を巻き立てているもの、これらは構造が複雑で評価が困難なため、今回は除外した。

パラメータを求める際に使用した形状寸法、材料特性などについては、各文献を参考にされたい。ここで、ヤング率やポアソン比などの文献から得られない値について今回は予想値を用いている。

4.1. 文献 18) の提案

文献 18) では、無次元荷重 P_{max} / P_y を径厚比パラメータ R_t と細長比パラメータ λ で整理している。ここで、 R_t と λ は以下のように定義される。

$$R_t = \frac{R \sigma_y}{t E} \sqrt{3(1-\nu^2)} \quad \lambda = \frac{2L}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}$$

$$P_y = \frac{M_y}{L} \quad (3)$$

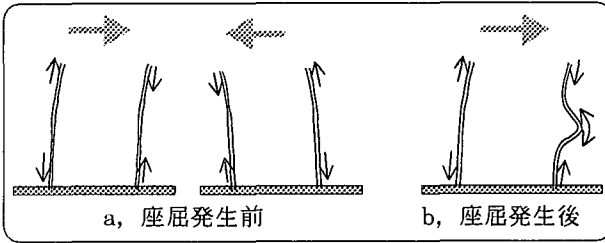


図-8 基部付近の挙動 (その1)

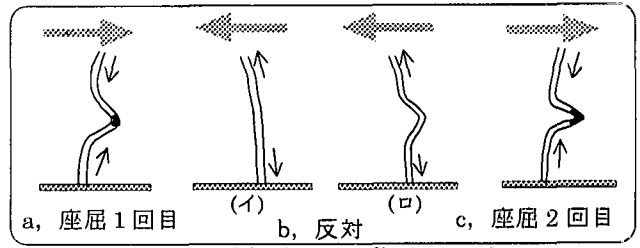


図-9 基部付近の挙動 (その2)

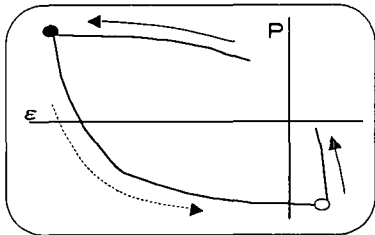


図-10 横力と歪みの関係 (座屈前)

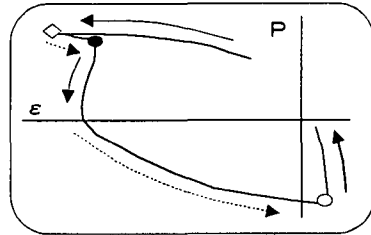


図-11 横力と歪みの関係 (座屈後1)

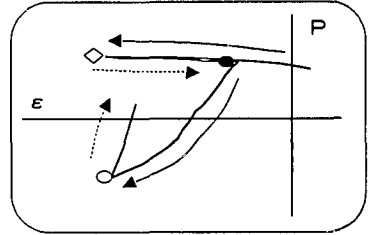


図-12 横力と歪みの関係 (座屈後2)

- > 圧縮方向に進行
-> 引張り方向に進行
- 横力の正側除荷点
- 横力の負側除荷点
- ◇ 正側の最高荷重点

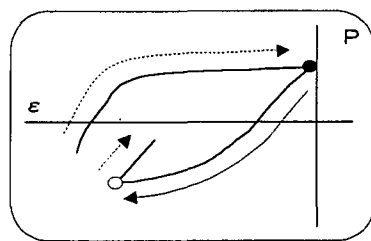


図-13 横力と歪みの関係 (座屈後3)

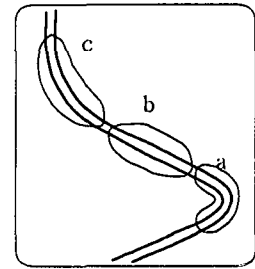


図-14 座屈部の図

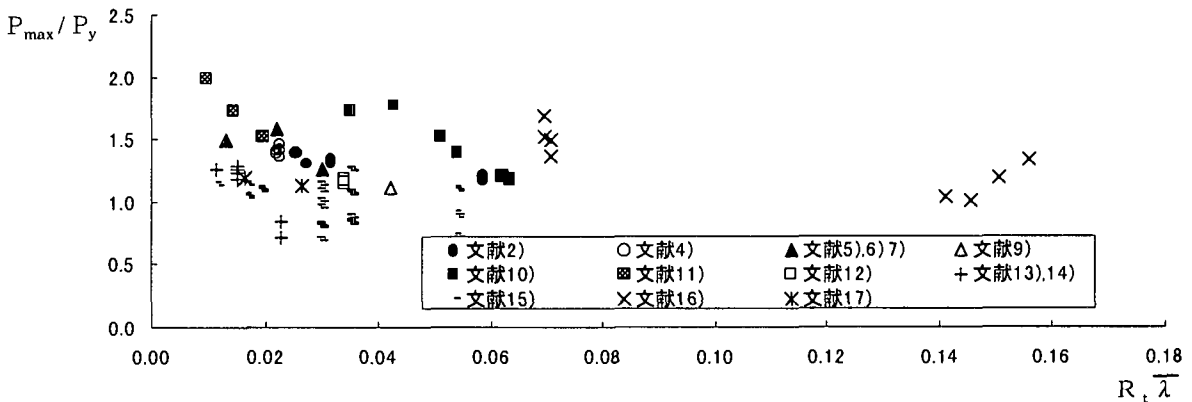


図-15 文献18)のパラメータを用いた最高荷重評価

ここで、 R は円管の半径（中心から外縁まで）、 t は母材の板厚、 σ_y は母材の降伏応力、 E は母材のヤング率、 ν は母材のポアソン比、 L は基部から載荷点までの距離、 i は断面二次半径、 M_y は軸力を考慮しない降伏モーメントである。図-15はこのパラメータを用いて最高荷重を整理した結果を示している。ただし、このパラメータは無補剛断面を対象としているため、補剛材を有する実験結果は除外した。

4.2. 文献3)の提案

文献3)では、無次元最高荷重 P_t^* と無次元径厚比 r_t^* により実験結果を整理している。以下に、 P_t^* と r_t^* の定義を示す。

$$P_t^* = \frac{P_{\max} L}{\pi^2 E I_c} \quad r_t^* = \frac{R \sigma_y t^*}{2 E \sqrt{t I_c}}$$

$$I_c = \frac{t^3}{12(1-\nu^2)} + \frac{n t_s h_s^3}{3 \pi D} \quad t^* = t + \frac{n A_r}{2 \pi R} \quad (4)$$

ここで、 L は載荷距離、 n はリブの本数、 t_s はリブの板厚、 h_s はリブの高さ、 A_r はリブの断面積である。なお、詳細については文献3)を参照されたい。図-16はこのパラメータを用いた結果を示している。ただし、文献3)では横軸に r_t^* の逆数をとっている。この時、回帰曲線の式は

$$P_t^* = 629.8 \times \left(\frac{1}{r_t^*} \right)^{-1.89} \quad (5)$$

となり、その決定係数が0.95となる。本報告の決定係数が文献3)の決定係数よりも小さくなってしまふのは、本報告では文献15)のように小さい供試体のデータも含まれているからだと考えられる。また、 $1/r_t^*$ が小さくなるにつれ、実験結果にばらつきが見られる。

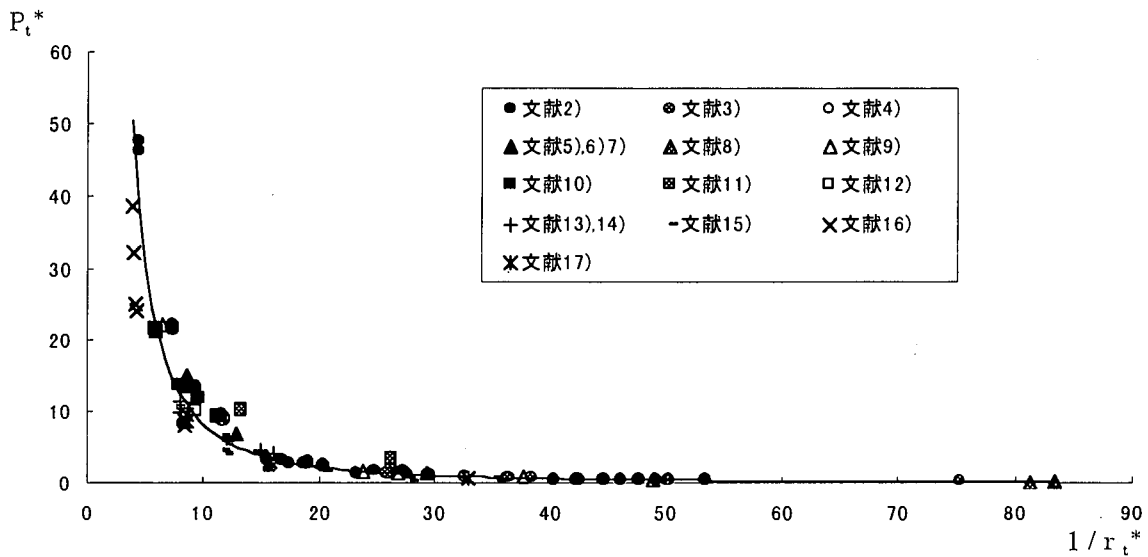


図-16 文献3)のパラメータを用いた最高荷重評価

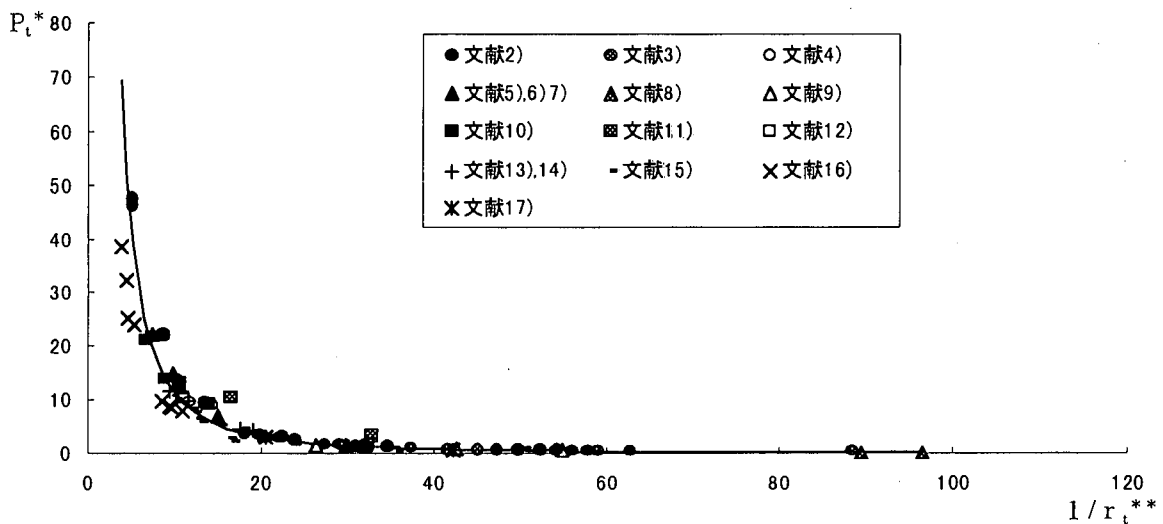


図-17 本パラメータを用いた最高荷重評価

4.3. 新パラメータの提案

文献3)においては、軸力の影響は考慮されていない。一方、既往の実験結果では軸力比がかなり大きいものも含まれており、その影響は必ずしも無視できるとは思われない。そこで本報告では、 r_t^* に $(1 - n_j)$ をかけた r_t^{**} で既往の実験結果を整理してみる。ここで、 n_j は軸力比である。図-17に本パラメータを用いて実験結果を整理したものを示す。この時、回帰曲線の式は

$$P_t^* = 842.7 \times \left(\frac{1}{r_t^{**}} \right)^{-1.87} \quad (6)$$

となり、その決定係数が0.96と向上し、既往のパラメータを用いた結果よりも精度が良くなることが確認された。

式(6)の適用範囲は実験結果が得られている範囲であり、それ以外の範囲については、さらに実験結果を増やして決定していかなければならない。

5. まとめ

5.1. 劣化特性

本報告での実験により、最高荷重後の挙動や歪みのメカニズムなど明らかになったことを以下に示す。

- (1) 軸力、変位振幅が同一であるならば、耐力が大きい時、劣化量は大きくなる。
- (2) 軸力、耐力が同一であるならば、変位振幅が大きい時、劣化量は大きくなる。
- (3) 耐力、変位振幅が同一であるならば、軸力が大きい時、劣化量は大きくなる。
- (4) 軸力比がある程度ある時、軸方向変位は各サイクルの最高荷重後に成長する。
- (5) 最高荷重後、圧縮側で歪みの反転が起こり、耐力の低下が起こる。その後は、各サイクルの最高荷重後に歪みの反転領域が増加する。

以上より、最高荷重後のパラメータが確認されたので、今後はそれらを定量的に評価する方法を見出すことが課題である。

5.2. 最高荷重の評価

本報告で提案したパラメータは、文献 3) で提案されている r_i^* に $(1 - n_j)$ をかけて、軸力の影響を付け加えたものであり、その精度については本実験結果や既往の実験結果を用いて確認した。結果としては、以前のものよりも若干良くなっただけである。

現在、径厚比や細長比による評価法はある程度の精度まで到達しているの、今後は径厚比や細長比にとらわれず、別の視点に注目し考察する必要があると思われる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 (V 耐震設計編), 平成 8 年 12 月
- 2) 井浦雅司, 熊谷洋司, 小牧理：横力と一定軸力を受ける円筒シェルの終局状態に関する研究, 土木学会論文集, No.556/I-38, pp107-118, 1997.1
- 3) 井浦雅司, 熊谷洋司, 小牧理：繰り返し横力を受ける円形鋼製橋脚の強度と変形能に関する研究, 土木学会論文集, No.598/I-44, pp125-135, 1998.7
- 4) 石澤俊希, 井浦雅司：繰り返し横力を受ける円形鋼管の劣化特性, 第 25 回関東支部技術研究発表会講演概要集, p.102, 1998.3.
- 5) 西川和廣, 山本悟司, 名取暢, 寺尾圭史, 安波博道, 寺田昌弘：既設鋼製橋脚の耐震性能改善方法に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.975-986, 1996.3
- 6) 上仙靖, 西川和廣, 村越潤, 高橋実, 橋本修身：円形断面鋼製橋脚の隙間あけ鋼管巻き立て補強に関する実験的検討, 土木学会第 51 回年次学術講演会, I-B292, pp584-585, 1996.9
- 7) 橋本修身, 小林洋一, 安波博道, 中川知和, 水谷慎吾：コンパクト断面橋脚の耐震性に関する検討, 橋梁と基礎, 1996.8, pp.135-137
- 8) 日本橋梁建設協会・震災に関する調査特別委員会 鋼製橋脚の耐荷力に関する研究 WG：道路橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同研究報告書 (VII), 1997.4
- 9) 土木研究所：縦リブを有する円形橋脚載荷実験の整理, 平成 10 年 3 月 4 日
- 10) 水谷慎吾, 宇佐美勉, 青木徹彦, 伊藤義人, 岡本隆：パイプ断面鋼圧縮部材の繰り返し弾塑性挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.105-114, 1996.3
- 11) 小枝日出夫, 熱海明彦, 佐藤昌志, 岸徳光：鋼管橋脚の交番載荷実験と解析, 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, pp.161-168, 1997.5
- 12) 忠和男, 桜井孝昌, 日下部和弘, 後藤芳顕：円筒鋼製橋脚の耐震性能向上の為に補剛法, 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, pp.169-174, 1997.5
- 13) 三木千寿, 館石和雄, 穴見健吾, 本間宏二, 佐々木哲也：断面変化部を有する円形断面鋼橋脚の地震時保有水平耐力に関する研究, 東工大土木工学科研究報告 No.53, 3 月, 1996
- 14) Jorge MULLER, 三木千寿, 佐々木哲也：繰り返し水平載荷実験と弾塑性解析による鋼管柱の耐震性能の検討, 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, pp.315-322, 1997.5
- 15) 津田恵吾, 松井千秋：一定軸力と変動水平力を受ける円形鋼管柱の弾塑性性状, 日本建築学会構造系論文集, 第 505 号, pp131-138, 1998.3
- 16) 安波博道, 寺田昌弘, 青木徹彦, 山田将樹：高張力鋼 (SM570Q) 鋼管柱の繰り返し弾塑性挙動に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.591/I-43, pp233-242, 1998.4
- 17) 森忠彦, 安波博道, 富永知徳：繰り返し水平力を受ける鋼管柱の変形性能に関する実験的研究, 土木学会第 50 回年次学術講演会, I-19, pp38-39, 1995.9
- 18) 宇佐美勉：ハイダクティリティー鋼製橋脚, 橋梁と基礎, 1997.6, pp.30-36

(1998 年 8 月 17 日受付)

ULTIMATE STRENGTH AND SOFTENING BEHAVIOR OF STEEL CYLINDRICAL PIERS

Toshiki ISHIZAWA and Masashi IURA

In this paper, new parameter has been proposed to predict the maximum load of stiffened cylindrical shells with varying thickness. The experimental results obtained by the authors and also by other institutions are utilized to show the validity of the parameter. In order to study the post-buckling behavior, the effects of axial load, displacement amplitude and maximum load at each loop on the softening of rigidity are investigated on the basis of experimental results. The cyclic load tests have shown that the strain reverse portions increase when the softening of rigidity occurs.