

径厚比パラメータが小さい電縫鋼管の正負交番載荷実験

尾添仁志¹・小野潔²・七澤利明³・河野哲也⁴・原田健彦⁵

¹正会員 JFE シビル株式会社 社会基盤事業部（〒111-0051 東京都台東区蔵前 2-17-4）

²正会員 博(工) 早稲田大学教授 創造理工学部（〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1）

³非会員 工修 国立研究開発法人 土木研究所 CAESAR（〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6）

⁴正会員 博(工) 国立研究開発法人 土木研究所 CAESAR（〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6）

⁵正会員 博(工) 株式会社オリエンタルコンサルタンツ 事業本部（〒530-0005 大阪市北区中之島 3-2-18）

1. はじめに

山岳地での道路建設工事では狭隘地や地形の改変が困難な傾斜地など施工条件の制約が大きいことがある。このような場合、図-1に示すコンパクトな部材で構成した栈道形式の道路構造物が採用されることがある。橋脚にはSKK400およびSKK490の鋼管杭が用いられており、外径は一般の円形鋼製橋脚と比べて小さく、工場での大量生産が可能で製作鋼管より安価な電縫鋼管が適用されている。しかしながら、橋全体の耐震性能のうえで重要な役割を果たす橋脚に電縫鋼管を用いた場合の評価法については十分に明らかにされているとは言いがたい。

ここで、電縫鋼管は製鉄所でコイル材から連続的に能率よく製造されるため品質が高い。一方、製造過程において様々な塑性加工の影響を受けるため、その機械的性質は原板から製品に至るまでに変化する。一般に降伏応力度は原板のときと比べて造管後に高くなり、径厚比が小さいほどその上昇が著しい¹⁾という特徴を有する。そのため、電縫鋼管の降伏比は鋼製橋脚として一般的に用いられるベンディングロールで製作された鋼管と比べて高くなる場合があり、耐力および変形能も異なる可能性がある。道路橋示方書・同解説V耐震設計編²⁾（以下、「道示V」という）に示されている鋼製橋脚の曲げモーメント-曲率関係の評価法（以下、「 $M-\phi$ 関係評価法」という）はベンディングロール鋼管を対象として既往の正負交番載荷実験³⁾（以下、「共同研究」という）に基づいて定められている。したがって、橋脚として電縫鋼管を用いた場合には道示Vの $M-\phi$ 関係評価法をそのまま適用できない可能性がある。また本構造の橋脚は一般の円形鋼製橋脚と比べて外径が小さいことから相対的に細長比パラメータが大きい⁴⁾ため、道示Vの $M-\phi$ 関係評価法における細長

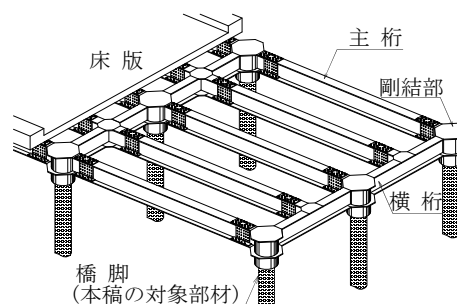


図-1 構造概念図

比パラメータの適用範囲を超過する場合もある。

こうした中、著者らの実験的研究⁴⁾ではSKKの電縫鋼管を対象に共同研究の手法に準拠した正負交番載荷実験を行い、細長比パラメータが大きい場合の耐力および変形能に関する基礎的データを得た。その実験結果からは破壊形態は全供試体に共通して電気抵抗溶接部も含む基部の局部座屈であり、耐力は最大水平荷重点以降、局部座屈の進展に伴い低下することを確認した。これらの結果は既往のベンディングロール鋼管の実験結果³⁾と同様であり、電縫鋼管を対象とした許容変位時に対応するひずみを設定できれば道示Vの手法に従って橋脚の $M-\phi$ 関係により評価を行うことができる可能性を示した。一方、径厚比パラメータを小さくすることによる耐力および変形能の向上については、細長比パラメータが大きいこと、降伏比が高いことにより明確な効果が見られなかったため、今後の追加実験が必要であるとしている。

そこで、本稿では径厚比パラメータを小さくすることにより、既往のベンディングロール鋼管と同様の破壊形態であることを確認するとともに耐力および変形能の向上の可能性を検討するため、降伏比を低減した電縫鋼管（以下、「低降伏比電縫管」という）を用いた正負交番載荷実験について報告する。

表-1 供試体の主な諸元・力学パラメータ

			本稿		文献4)	
供試体名			1-2	1.5-2	1-1	2-2
載荷点高さ	h	(cm)	157.0	217.0	157.0	348.0
直径	D	(mm)	323.9	323.9	318.5	318.5
板厚	t	(mm)	14.3	14.3	6.0	14.3
鋼種			SKK490	SKK490	SKK490	SKK490
公称降伏応力度			σ_{yN} (MPa)	315	315	315
材料 試験 結果	降伏応力度	σ_{yM} (MPa)	431	431	487	553
	引張応力度	σ_{tM} (MPa)	544	544	570	623
	降伏比	σ_{yM}/σ_{tM}	0.79	0.79	0.85	0.89
径厚比パラメータ		R_{tN}	0.028	0.028	0.068	0.028
		R_{tM}	0.039	0.039	0.105	0.049
細長比パラメータ		$\bar{\lambda}_N$	0.361	0.498	0.357	0.814
		$\bar{\lambda}_M$	0.422	0.583	0.444	1.079
軸力比		N/N_y	0.20	0.15	0.20	0.15

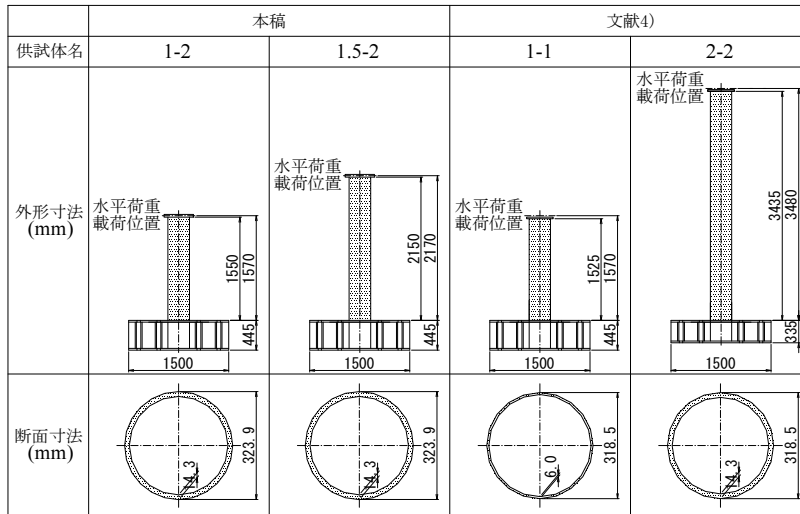


図-2 供試体の概略図

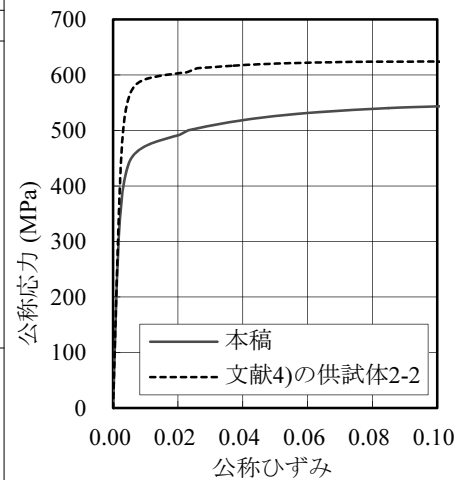


図-3 引張試験結果

2. 実験条件

(1) 供試体

本稿の供試体 1-2 および 1.5-2 の概略寸法は図-2 に示すとおりであり、文献4)の供試体 1-1 と 2-2 は参考として示す。供試体の鋼管は SKK490 の JIS 規格を満足するとともに、供試体 1-2 および 1.5-2 は管周方向に電気抵抗溶接部を 0° とした場合の 90° 位置における管軸方向の降伏比が 85% 以下の低降伏比電縫管である。道示 V に示される円形鋼製橋脚の曲げモーメント-曲率関係 ($M-\phi$ 関係) の設定に必要な許容ひずみは径厚比パラメータ R_t の関数で与えられている。径厚比パラメータ R_t は降伏比を制限した電縫鋼管であればベンディングロール鋼管と同様に耐力および変形能に影響を与えるパラメータとなる可能性が高く、 R_t を小さくすることにより耐力および変形能が向上する可能性が考えられる。そこで本稿の供試体 1-2 および 1.5-2 の公称降伏応力度を使って計算される径厚

比パラメータ R_t は、道示 V の $M-\phi$ 関係評価法における円形断面のコンクリートを充填しない鋼製橋脚の適用範囲 ($0.03 \leq R_t \leq 0.08$) の下限値に近くなるように設定した。

供試体の構造諸元・力学パラメータを表-1 に示す。表-1 中の各パラメータのうち細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ と径厚比パラメータ R_t は道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編⁵⁾および道示 V の規定に従い、式(1)および(2)により求めた。

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \cdot \frac{2h}{r} \quad (1)$$

ここで、 h ：水平荷重載荷点高さ、 r ：鋼管の断面 2 次半径、 σ_y ：鋼管の降伏応力度、 E ：弾性係数。

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

ここで、 R ：板厚中心位置での鋼管の半径、 t ：鋼管の板厚、 ν ：ポアソン比($=0.3$)。

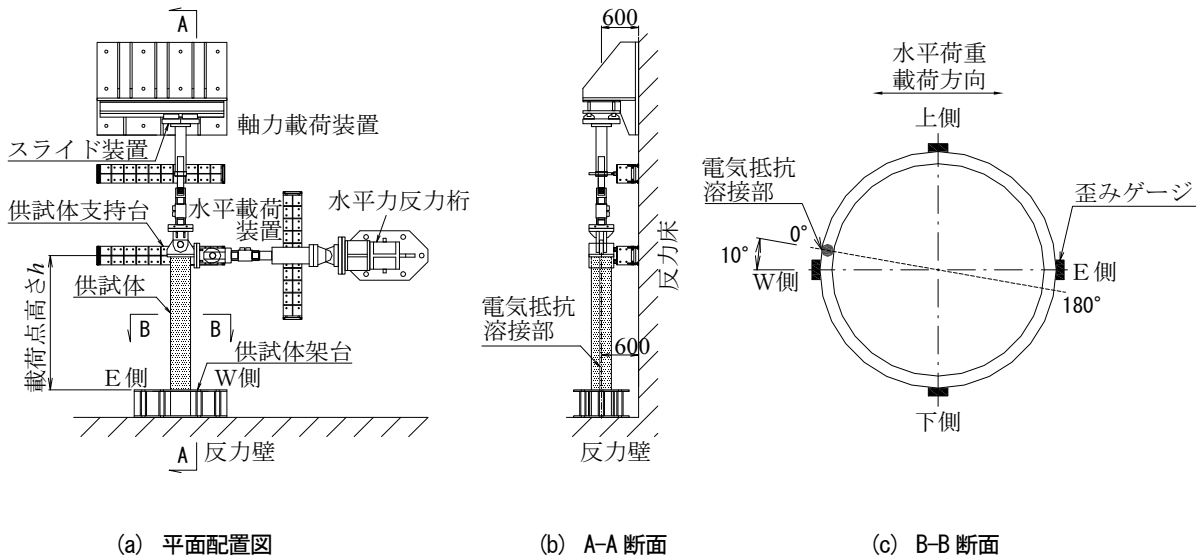


図-4 供試体セットアップ図

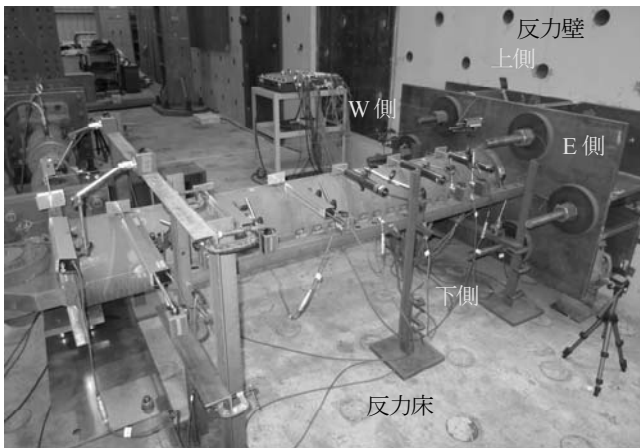


写真-1 供試体セットアップ状況

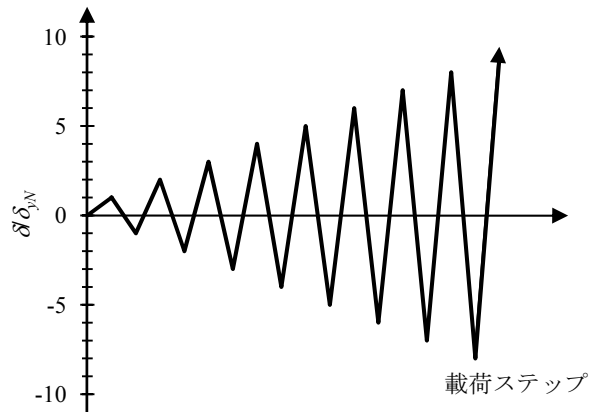


図-5 水平荷重の荷重パターン

なお、表-1 の力学パラメータの最後の添字「N」および「M」は、降伏応力度として公称降伏応力度を用いて計算した値、材料試験の降伏応力度を用いて計算した値であることをそれぞれ示している。

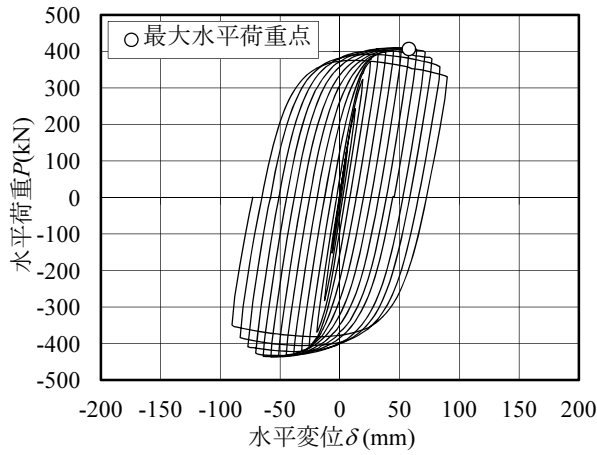
供試体 1-2 と供試体 1-1 は径厚比パラメータ R_t を変化させた実験であるため、荷重点高さは等しい。供試体 1.5-2 と供試体 2-2 は細長比パラメータ $\bar{\lambda}_N$ を道示 V の $M-\phi$ 関係評価法における適用範囲 ($0.2 \leq \bar{\lambda} \leq 0.4$) を超えて設定したものであり、径厚比パラメータ R_{tN} は同等である。供試体 2-2 の実験結果からは降伏比が高いことによる影響のほか、細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ の影響が耐力および変形能に与える影響が大きいことが考えられたため、供試体 1.5-2 の $\bar{\lambda}$ は供試体 2-2 より小さく設定した。

電縫鋼管の素材としての機械的性質を調べるため、鋼管の鋼管軸方向から切り出した試験片 (JIS12C 試験片) による引張試験結果は図-3 に示すとおりであり、参考に

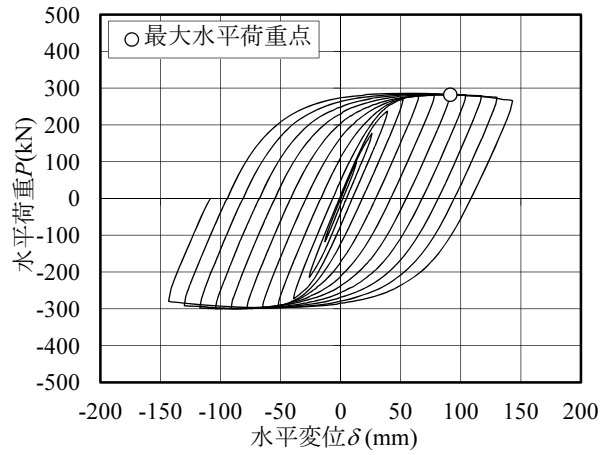
文献 4) の径厚比パラメータ R_t が小さい供試体 2-2 の結果も併せて示す。引張試験結果から 0.2% オフセット法により求めた降伏応力度 σ_{yM} は表-1 中に示しており、低降伏比電縫管の降伏比は 79% であり、供試体 2-2 の 89% と比べると 10% 低下している。

(2) 実験手法

供試体のセットアップ状況は図-4 および写真-1 に示すとおりであり、電気抵抗溶接部は水平力の荷重方向近傍に配置した。供試体は鋼管軸線と実験施設の床面が平行になるように横向きに設置し、剛な供試体架台をアンカーボルトで緊張して実験施設反力壁に固定した。供試体天端部には水平変位に追従できるように、水平ローラーを用いたスライド装置により鉛直荷重の支持を行った。また供試体と支持台の間には摩擦を防ぐためボールベアリングを設置した。



(a) 供試体 1-2



(b) 供試体 1.5-2

図-6 水平荷重—水平変位関係

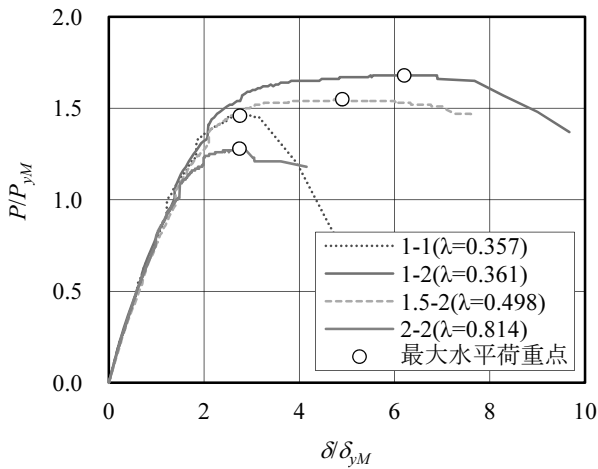


図-7 包絡線の比較

載荷方法は表-1に示す一定軸力を保持した状態で水平力は正負交番繰り返し載荷とした。一定軸力 N は設計で想定する最大値とし、道示Vの適用条件を満足する供試体は公称降伏軸力 N_y の20%、細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ が大きい供試体は15%の荷重とした。水平力は図-5に示すとおり変位制御で与えることとし、その大きさは柱頂部に式(3)から求まる降伏水平変位 δ_{yN} を基準とし、整数倍を片振幅として $\pm 1\delta_{yN}$, $\pm 2\delta_{yN}$ ・・・の要領で漸増させた。

$$\delta_{yN} = \frac{P_{yN} h^3}{3EI} \quad (3)$$

$$P_{yN} = \left(\sigma_{yN} - \frac{N}{A} \right) \frac{W}{h} \quad (4)$$

ここで、 I ：鋼管の断面2次モーメント、 σ_{yN} ：鋼材の公称降伏応力度、 N ：作用軸力、 A ：鋼管の断面積、 W ：鋼管の断面係数。

3. 実験結果

(1) 水平荷重—水平変位関係

供試体 1-2 および 1.5-2 の水平荷重—水平変位関係($P-\delta$ 関係)の実験結果をそれぞれ図-6(a)および(b)に示す。図中での水平変位は共同研究の手法に従い、供試体架台の剛体的な並進および回転に起因する変位量を控除することにより補正を行っており、図中の○印は最大水平荷重点を示す。

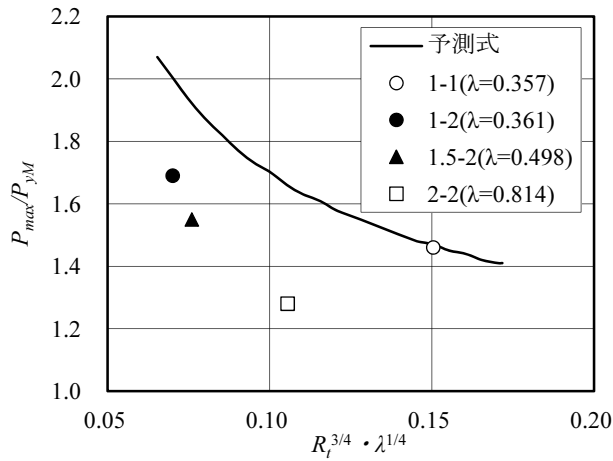
$P-\delta$ 関係の正側載荷の包絡線について、材料降伏応力度 σ_{yM} を用いて算定した降伏水平力 P_{yM} と降伏水平変位 δ_{yM} で除して無次元化したものを図-7に示す。供試体 1-2 は供試体 1-1 と比べて耐力および変形能は大きく、径厚比パラメータ R_t を小さくした効果が顕著である。供試体 1.5-2 は供試体 1-2 と比べて耐力および変形能が低下するが、これは細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ の影響によると考えられる。径厚比パラメータ R_t が小さい本稿の供試体 2 体と供試体 2-2 の 3 体に共通して、供試体 1-1 と比べて最大水平荷重点以降の耐力の低下が緩やかである。

最大水平荷重 P_{max} および最大水平荷重時変位 δ_m について、SM490 の円形断面鋼製橋脚を対象とした下記の既往の予測式⁶⁾(5)および(6)による計算値と材料試験結果から算定した力学パラメータで整理した実験結果を比較したものをそれぞれ図-8(a)および(b)に示す。なお、供試体 2-2 の細長比パラメータ $\bar{\lambda}_N$ は予測式の適用範囲外である。

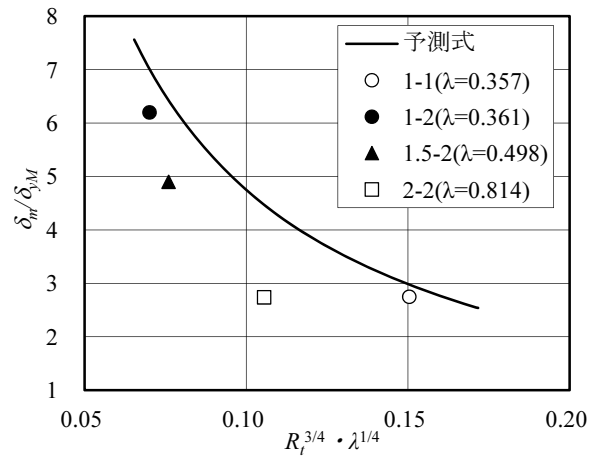
$$P_{max}/P_y = 0.07 \times \frac{1}{R_t^{3/4} \bar{\lambda}^{1/4}} + 1.00 \quad (5)$$

$$\delta_m/\delta_y = 0.53 \times \frac{1}{R_t^{3/4} \bar{\lambda}^{1/4}} - 0.55 \quad (6)$$

ここに式(5)および(6)の適用範囲は、 $0.04 \leq R_t \leq 0.12$, $0.285 \leq \bar{\lambda} \leq 0.503$ および $0.10 \leq N/N_y \leq 0.30$ である。



(a) 最大水平荷重



(b) 最大水平荷重時変位

図-8 予測曲線との比較

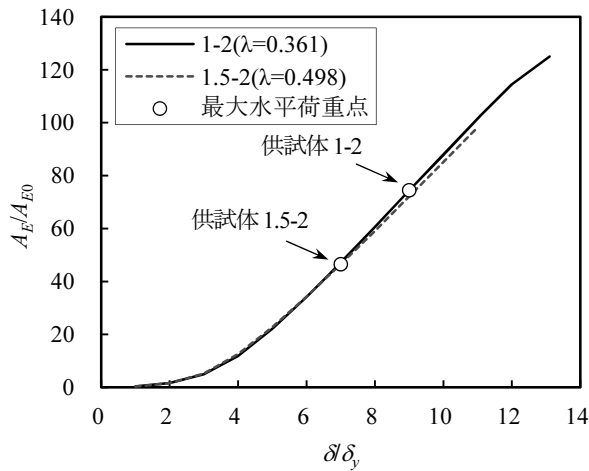
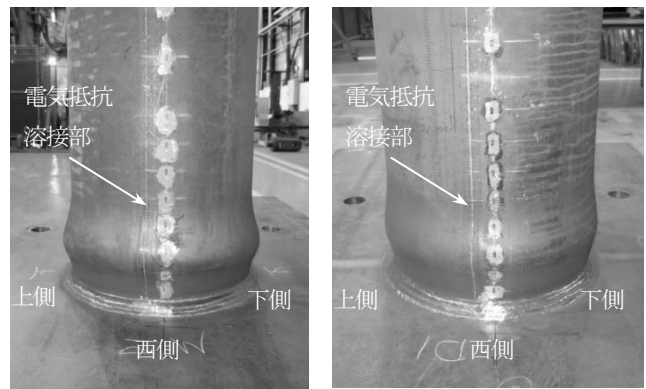


図-9 エネルギー吸収量の比較



(a) 供試体 1-2

(b) 供試体 1.5-2

写真-2 座屈モード (実験終了時)

予測式の適用範囲内である供試体 1-2 の P_{max}/P_{yM} および δ_m/δ_{yM} は予測値と比べて低下するものの、細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ が同等である供試体 1-1 と比べて特に δ_m/δ_{yM} は大きく向上した。供試体 1.5-2 の P_{max}/P_{yM} および δ_m/δ_{yM} は供試体 2-2 と比べて細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ を小さくしたことと低降伏比電線管を使用したことにより向上している。このことから今回の実験結果では降伏比を低く制限すれば、供試体 1.5-2 の細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ までの範囲において、径厚比パラメータ R_t を小さくすることによる耐力および変形能の向上の可能性があることが確認された。

(2) エネルギー吸収量

各サイクルのエネルギー吸収量 A_E を下記の式(7)で示す弾性エネルギー A_{E0} で除した値の推移は図-9 に示すとおりであり、図中の○印は最大水平荷重点が観察されたループを示す。

$$A_{E0} = \frac{1}{2} P_{yM} \delta_y \quad (7)$$

最大水平荷重点に達するまでのエネルギー吸収量は細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ の影響により供試体 1-2 と比べて供試体 1.5-2 のほうが小さい。2 体の供試体に共通して最大水平荷重点以降もエネルギー吸収量は増加し、スライド装置の可動限界のループまでにはエネルギー吸収量の低下は確認できなかった。この傾向は共同研究のベンディングロール鋼管の研究とも一致する。

(3) 座屈モード

供試体 1-2 および 1.5-2 の実験終了時の座屈変形はそれぞれ写真-2(a) および (b) に示しており、座屈モードは電気抵抗溶接部も含み鋼管の全周方向にわたり外側にはらみ出す「提灯座屈」である。また供試体 1-2 および 1.5-2 の最大水平荷重点が観察されたループ以降の座屈変形量を型取りゲージによって測定した結果はそれぞれ図-10 および図-11 に示すとおりであり、供試体 2 体に共通して载荷ループ数が増えるにつれて鋼管外側への面外変形が増加した。この座屈モードについても共同研究のベンディングロール鋼管の研究と一致する。

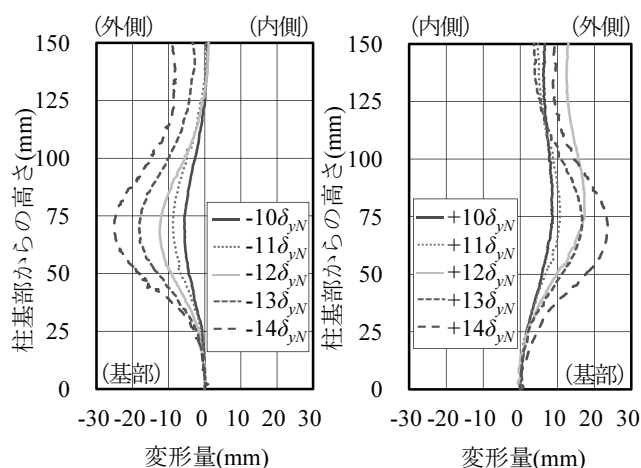


図-10 基部の面外変位の推移 (供試体 1-2)

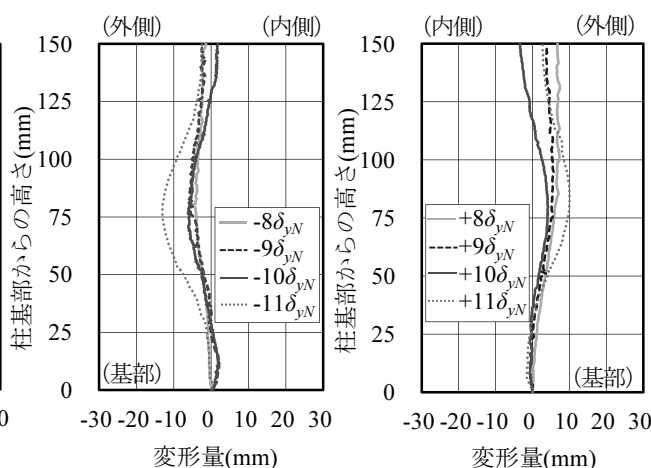


図-11 基部の面外変位の推移 (供試体 1.5-2)

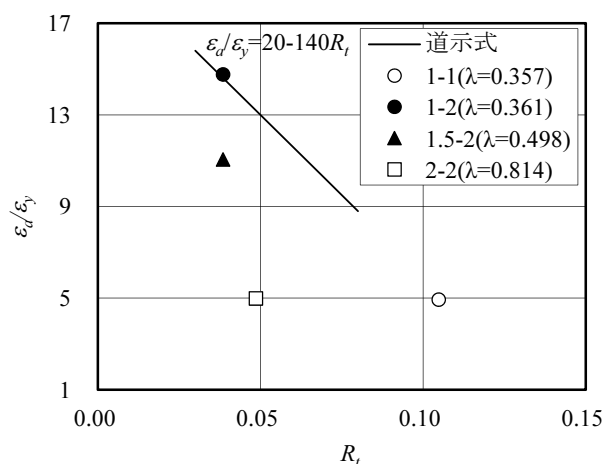


図-12 ε_d の試算結果

(4) 許容変位時に対応するひずみの試算

鋼製橋脚の正負交番荷重実験の結果に基づき、既往の $M-\phi$ モデル設定手法⁷⁾により許容変位 δ_d 時に対応するひずみ ε_d を試算した。許容ひずみ ε_d を降伏ひずみ ε_y で除した値と径厚比パラメータ R_t との関係を図-12に示す。図中には道示Vの $M-\phi$ 関係評価法で規定される算定式も併記しており、供試体1-2の値はその線上付近にプロットされる。供試体1.5-2の値は耐力および変形能の結果と同様に、細長比パラメータ λ の影響により供試体1-2と比べて低下するが、供試体2-2と比べて大きく向上した。

4. まとめ

本実験では既往の実験で対象とした電縫鋼管の構造条件を基に、降伏比を低減した電縫鋼管を用いた場合、径厚比パラメータを小さくすることによる耐力および変形能の向上の可能性を検討するために、共同研究の手法に準拠した正負交番荷重実験を行った。以下に、得られた主な知見を示す。

- (1) 降伏比を低減した電縫鋼管を使用する場合、実験で確認した細長比パラメータの範囲であれば、径厚比パラメータを小さくすることによる耐力および変形能が向上する可能性があることが明らかとなった。
- (2) エネルギー吸収量および座屈モードの傾向は既往のベンディングロール鋼管の研究とも一致しており、電縫鋼管を対象とした許容変位時に対応するひずみを設定することで道示Vの手法に従って、橋脚の $M-\phi$ 関係により評価することができる可能性がある。

引き続き、電縫鋼管の材料特性について詳細に検討を行うとともに、電縫鋼管を対象とした $M-\phi$ 関係による評価法について検討を行う。

参考文献

- (1) (社)土木学会：座屈設計ガイドライン改訂第2版，2005。
- (2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V 耐震設計編，2012.3。
- (3) 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，(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。
- (4) 飯島翔一，原田健彦，大森貴行，尾添仁志，河野哲也，七澤利明，小野潔：フーチングを有しない多柱式ラーメン構造の耐震性能評価法に関する一考察，第18回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp.351-356，2015。
- (5) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説II 鋼橋編，2012.3。
- (6) 後藤芳顕，江坤生，小畑誠：2方向繰返し荷重を受ける薄肉円形断面鋼製橋脚柱の履歴特性，土木学会論文集，No.780/I-70，pp.181-198，2005.1。
- (7) 小野潔，西村宣男，西川和廣，高橋実，中洲啓太：円形断面鋼製橋脚の正負交番荷重実験結果に基づく $M-\phi$ モデル設定手法に関する検討，鋼構造論文集，第8巻第31号，pp.97-105，2001.9。