

縦リブを有する円形鋼製橋脚の繰り返し載荷実験

○田嶋 仁志¹、半野 久光²、久保田 強³、池田 茂⁴、寺尾 圭史⁵

^{1, 2} 首都高速道路公団 工務部設計技術課 (〒100 東京都千代田区霞が関 1-4-1 (日土地ビル))

³ 首都高速道路公団 東京第二保全部設計課 (〒104 東京都中央区八丁堀 2-14-4)

⁴ 住友重機械工業(株) 鉄構機器事業本部技術部 (〒141 東京都品川区北品川 5-9-11)

⁵ (株)横河メンテック 技術管理室 (〒273 千葉県船橋市山野町 27 (横河テクノビル))

1. はじめに

兵庫県南部地震によって、円形鋼製橋脚においても象の足状の座屈などの損傷が見られた。このため、円形鋼製橋脚の耐震性と、それらの補強手法の検討が必要とされている。この手法の一つとして、縦リブを円筒内面に配置する補強方法が象の足状の座屈を改善し、変形性能を改善する手法として期待されているが、このような縦リブを有する円形断面の鋼製橋脚の変形性能に関する研究成果は比較的少ない。本研究では、縦リブを有する円形橋脚の変形性能を対象に、提案する縦リブ断面の設定法によって補剛した円形断面について、その無次元径厚比に着目して供試体を用意し、2軸繰り返し載荷実験を行ったのでその結果について報告する。なお、本研究では、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、鋼材倶楽部および日本橋梁建設協会の共同研究で行われた実験結果^{1), 2)}とも比較引用している。

2. 変形性能と縦リブ補強の基本的な概念

円形鋼製橋脚は、矩形橋脚に用いる補剛板と異なり、縦補剛せず環補剛のみの単純な円筒断面とするのが一般的である。したがって、道路橋示方書³⁾などでは、その断面の剛性を表すパラメータは円筒の半径 R と板厚 t の比(径厚比: R/t)を用い座屈強度を表している。また、この径厚比は鋼材の降伏点強度を考慮した無次元径厚比 R_t で表し、これまでに、円形橋脚の変形性能をこのパラメータとの関係で表す試みがなされ、その相関として R_t が小さいほど橋脚の変形性能は大きくなることがわかってきている。ここで、無次元径厚比 R_t は次式のとおりとする。

$$R_t = (\sigma_y / E_s) \times (R / t) \times \sqrt{3(1 - \mu^2)}$$

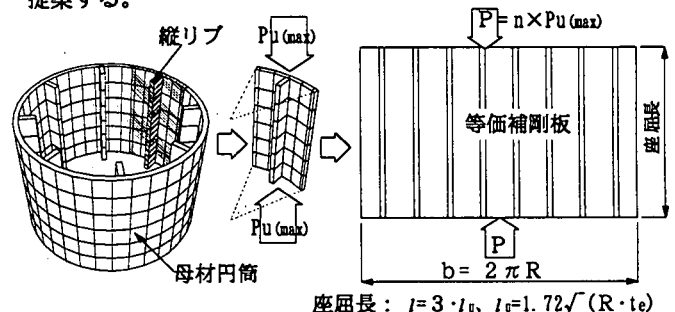
σ_y : 鋼材の降伏点強度 (kgf/cm²)
 E_s : 鋼材のヤング係数 (kgf/cm²)
 R : 円筒の板厚中心までの半径 (cm)
 t : 円筒の板厚 (cm)
 μ : ポアソン比

しかしながら、実際の補強手法としての板厚の増厚は非常に困難であり、耐力の上昇も大きい。そこで縦リブを円形橋脚の内面に取付ける方法を検討した。縦リブによる補強の目的は、円周方向に複数本配置することにより、震災でみられたような円周方向に発生する象の足状の座屈を防止することである。これにより、座屈モードは縦リブを節とするモードに移行し、円筒の座屈特性を改善することによって橋脚の変形性能の向上が期待できる。

3. 縦リブ断面の設定法の提案

(1) 設定法の概要

円形断面の縦リブに対する設定法は、縦リブ断面の設計と、その断面を有する橋脚の変形性能に関する設計よりなるが、縦リブの断面・本数、円筒の半径・板厚等パラメータが多く確立されていない。また補強を考えた場合、縦リブによる断面積増加は、橋脚の耐力上昇につながり、アンカー部に負担をかけることから、極力小さくすることが望ましい。ここでは、これらの点を考慮した簡便的な設定法として、円形断面を図-1のように補剛板に置換する手法を提案する。



最も大きな圧縮力を負担する1本の縦リブに着目し、これが円周方向に連続する補剛板を擬似的に想定する。

図-1 縦リブを有する円筒断面の等価補剛板への置換

i) 縦リブを取付けた断面の局部座屈に対する照査

円筒を縦リブによって補剛された等価な補剛板として座屈照査を行う。

ii) 変形性能の向上

縦リブ補強によって、円筒断面の有する変形性能を向上させることが期待できる。向上する変形性能の増分は実験結果より決定する。

(2) 補剛板に置換した縦リブの剛性

この場合の補剛板としての必要な等価幅厚比は、矩形断面と同様に計算し、円筒としての効果も期待できるので、実験結果、解析結果などより判断し、以下の制限値とした。

補剛板:

$$R_F \leq 0.4 \text{ (補強に対する制限値)}$$

縦リブ(自由突出板):

$$R_h \leq 0.5$$

円筒板パネル:

$$R_R \leq \text{約 } 0.7$$

なお、 R_F 、 R_h 、 R_R は道路橋示方書に示される幅厚比であり、 R_R の制限により縦リブ本数が決定され、 R_F および R_h の制限により縦リブの断面が決定される。また、補剛

板としての縦寸法(a)は、ダイヤフラム間隔ではなく、座屈長(l)とし、横寸法(b)を円筒の板厚中心で考えて平板に展開した補剛板と考える。すなわち、

$$\text{縦寸法(a)} : l = 3 \cdot l_u, \quad l_u = 1.72 \sqrt{R \cdot t_e}$$

$$\text{横寸法(b)} : b = 2 \cdot \pi \cdot R = n \times \text{リブ間隔}$$

ここで、

l : 補剛板としての座屈長 (cm)

l_u : 円筒の基準座屈長⁴⁾ (cm)

R : 板厚中心で計った円筒の半径 (cm)

t_e : 等価板厚 (cm)

この等価補剛板の縦寸法を座屈長(l_u)の3倍としたのは、円形断面の損傷形態が局部的に集中する傾向にあるため、既設橋脚で通常5~6m間隔に配置されているダイヤフラム間隔は、損傷モードに影響を与えないと仮定したことによる。この仮定により、必要縦リブ断面を過大とせず合理的な配置ができる。

なお、縦リブの剛性を評価するパラメータとして、矩形断面の補剛板で用いるような1本の縦リブとそれに協働する円筒部分を柱とみなす細長比 λ_s ^{5), 6), 7)}も考えられるが、基本的な考え方は同じであることから本論文では道路橋示方書で用いられている幅厚比を用いた。

4. 2軸繰返し載荷実験

(1) 実験概要

縦リブを有する円形橋脚を主眼にし実験を行った。提案する設定法による縦リブ寸法を基準としたリブの有無、および円筒断面の無次元径厚比に着目して供試体を用意し、変形性能などを計測した。道路橋示方書において弾性座屈の範囲である径厚比の大きいケースは実験例が少ないことを考え、本研究の対象とした。

(2) 実験手法

実験装置は、降伏荷重の15%の軸力を一定として載荷し、

水平方向に繰返し載荷する2軸載荷装置を用いて行った。水平方向の載荷のパターンを図-2に示す。

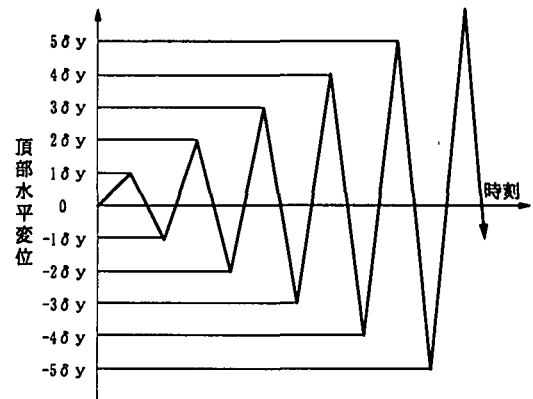


図-2 繰返し載荷方法

(3) 実験供試体

本実験に用いた供試体の形状および構造特性を図-3(a)に示す。参考のために、建設省土木研究所で行われたNO.6、NO.8¹⁾、橋建協で行われたB2²⁾も図-3(b)に示した。供試体の選定にあたって、無補強の円筒断面に対して縦リブを有する断面を同じ径厚比で設定し、結果を対比させるようにした。本実験の対象とする無次元径厚比(R_t)は、既設橋脚などの調査から、0.09、0.11、0.15の3ケースとした。

R_t=0.15程度の無補剛断面をM24とし、これに縦リブを取付けた断面をM25とした。無補剛断面に対するR_tをパラメータとする実験は他機関においても実施されているが、R_t≥0.11の範囲の結果が少ないためM24を実施した。R_t=0.11程度の無補剛断面供試体NO.8に対して、M23を用意した。この範囲の径厚比においては、縦リブの断面寸法差による影響を確認するため、縦リブを有する等価補剛板のR_Fを0.26とするM19とR_Fを0.47とするM23の2ケースの縦リブ補強供試体を用意した。また、無補剛断面供試体NO.6はR_tが0.07であり、無補剛でも高い

供試体	M24 (無補剛断面)	M25 (縦リブ補強)	M23 (縦リブ補強)	M19 (縦リブ補強)	M26 (縦リブ補強)
断面図					
側面図					
構成部	円筒	円筒	円筒	円筒	円筒
縦リブ	-	10-Rib PI 45×6	8-Rib PI 45×8	8-Rib PI 70×8	2-Rib PI 60×8
降伏点	$\sigma_y = 3,128 \text{ kgf/cm}^2$	$\sigma_y = 3,128 \text{ kgf/cm}^2$	$\sigma_y = 2,900 \text{ kgf/cm}^2$	$\sigma_y = 2,787 \text{ kgf/cm}^2$	$\sigma_y = 2,780 \text{ kgf/cm}^2$
径厚比 R _t	0.153	0.153	0.113	0.109	0.088
補剛パラメータ					
R _R	-	0.791	0.760	0.745	0.607
R _F (座屈長:l)	-	0.397:l=304 mm	0.465:l=344 mm	0.258:l=355 mm	0.369:l=383 mm
R _H	-	0.464	0.335	0.511	0.436
λ_s (座屈長:l)	-	0.434:l=304 mm (1.285:l=900 mm)	0.486:l=344 mm (1.271:l=900 mm)	0.284:l=355 mm (0.720:l=900 mm)	0.368:l=383 mm (0.864:l=900 mm)
I _R /I _o	-	1.13	1.08	1.15	1.11

I_R/I_o : 縦リブを含む断面と円筒のみの断面二次モーメントの比

図-3(a) 供試体の形状および構造特性

No. 6		φ900×16 mm
		無補剛断面
		$\sigma_y = 3,510 \text{ kgf/cm}^2$
No. 8		φ900×9 mm
		無補剛断面
		$\sigma_y = 2,960 \text{ kgf/cm}^2$
B2		φ900×9 mm
		8-Rib PI 100×11 (断続)
		$\sigma_y = 2,910 \text{ kgf/cm}^2$
		R _R =0.761
		R _F =0.152 (l=379 mm)
		$\lambda_s = 0.181$ (l=900 mm)

図-3(b) 関連供試体の形状および構造特性

変形性能を保有していることより、やや小さい $R_t = 0.09$ 程度の縦リブ補強した断面を M26とした。供試体 M25、M23、M26の縦リブ断面は3節に示した設定法により、その本数および断面が最小となるように決定した。図-3(a)に示

すようにこれらの縦リブ補強断面の供試体において、無補強断面に対する断面二次モーメント比は約1.1程度となっており、これにより計算する耐力の上昇率は大きくない。

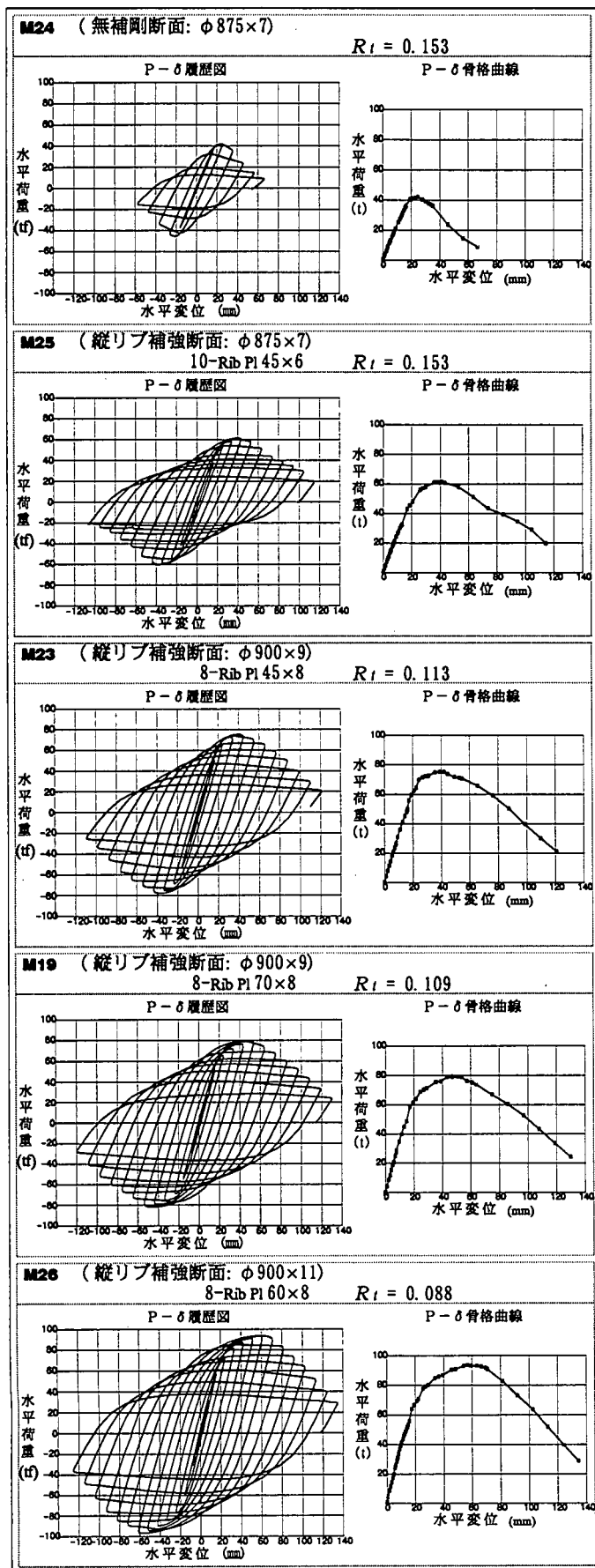


図-4 水平荷重-変位履歴図および骨格曲線

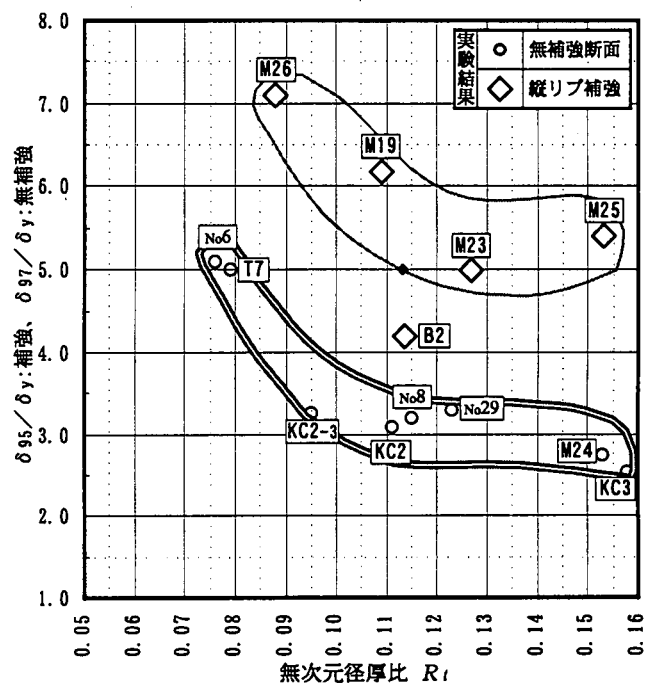


図-5 供試体の形状および構造特性

(4) 実験結果

a) 変形性能

図-4 に実験結果の荷重-変位履歴図および骨格曲線を示す。

また、図-5 に最大耐力付近の変位と降伏変位との比 δ_{97}/δ_y と無次元径厚比 R_t との関係を示す。

無補強断面で比較すると R_t が小さいほど変形性能が大きいことが分かる。しかしながら、 R_t が 0.11 をこえた M24 と No. 8 を比較するとそれほど変形性能に差がないことがわかる。縦リブ補強した断面はいずれも無補強断面に対し、大きく変形性能が向上していることがわかる。

無補強断面では $R_t \geq 0.11$ では δ_{97}/δ_y の値は約 3 程度となっているが、 $R_t \approx 0.07$ で約 5 程度とれることがわかる。これに対し、縦リブ補強した断面では、 $R_t \approx 0.15$ でも約 5 程度の値を示しており、補強効果が大きいことを示している。

また、本論文で提案する設定法による縦リブを取付けた補強断面の変形性能の上昇は通常の利用範囲では R_t によらず一定で δ_{97}/δ_y の値にして 2.0 程度であることがわかった。これにより、 R_t をパラメータにして、無補剛断面および縦リブ補強した断面の変形性能を推定でき、耐震性の照査が可能と考えられる。

一方、縦リブの断面を設定法に対して余裕を大きくして設けた供試体 M19 は、無補剛断面 No. 8 に対する変形性能の上昇値で見ると、3 節の制限値を満たす縦リブを設けた M23 に比べて、約 1.2 と大きい。これによって、縦リブの断面により変形性能に差がでることがわかった。ただし、

