

十字型補剛壁を有する鋼製円形橋脚の繰返し挙動特性

Hysteretic Behavior of Steel Tubular Bridge Piers Stiffened with Inner Cruciform Walls

松村 新也*・山尾 敏孝**・平八重 真嗣***・津曲 志郎****・王 占飛*****

Shinya MATSUMURA, Toshitaka YAMAO, Masatsugu HIRAYAE, Shiro TSUMAGARI, Zhanfei WANG

*学生会員 熊本大学 自然科学研究科 博士後期課程 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

**正会員 工博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

***非会員 第一復建(株) (〒812-0016 福岡市博多区博多駅南 3-5-28)

****非会員 熊本大学 自然科学研究科 博士前期課程 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

*****学生会員 熊本大学 自然科学研究科 博士前期課程 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

This paper presents experimental and analytical results on hysteretic behavior and ductility of steel tubular bridge piers stiffened with inner cruciform walls. Numerical analyses were carried out using the finite element package MARC. Two types of specimens, one with inner cruciform plate and the another without it, were tested under a constant compressive axial load and cyclic horizontal loads. The strength and ductility of steel tubular bridge piers stiffened with cruciform walls were greater than those of unstiffened tubular steel bridge piers. It was found that the effect of the ratio of cylinder diameter to wall thickness parameter R , and the slenderness ratio parameter $\bar{\lambda}$ on the ductility of steel tubular bridge pier is large.

Key Words: inner cruciform walls, hysteretic behavior, ductility, steel tubular bridge pier

1. まえがき

兵庫県南部地震を契機として、橋梁の耐震設計に関する知見が蓄積されてきている。特にコンクリート充填橋脚については、そのメカニズムが解明されてきており、その成果を踏まえ、平成 14 年に改訂された道路橋示方書¹⁾において、コンクリート充填橋脚に関する設計方法がより具体的に記された。しかしながら、コンクリートを充填しない鋼製橋脚については、耐震性能を向上させる数種の例を挙げながらも、強地震下での挙動が明らかではないとして、設計をする際には充分な検討をするように指示されるにとどまっている。あわせて、新設される橋脚については、道示改訂前に引き続き、じん性が充分に確保できるような断面形状の開発が求められている。

円形鋼製橋脚を対象にした強度や変形性能に関する研究は、矩形断面に比べ比較的少ないものの、各研究機関で実験的・解析的研究が精力的に行われてきた^{2)~11)}。実験的研究としては、コンクリートを充填した円形鋼製橋脚の繰返し載荷実験が行われ、変形性能に関する研究が発表されている^{10), 11)}。

著者らは鋼製橋脚の変形性能を高める補剛形式として、橋脚基部からある高さまで十字型に組んだ鋼製板(以

後、十字型補剛壁とよぶ)を配置することを提案し、この橋脚の強度と変形性能特性について検討してきた。繰返し載荷実験及びFEM解析により、コンクリート部分充填鋼製橋脚や、角補強が施された鋼製橋脚と同等あるいはそれ以上の変形性能を有することを明らかにし、提案法の有効性を確認してきた^{12)~16)}。鋼製円形断面橋脚についても、十字型補剛壁をある高さまで入れ、適用した場合の鋼製橋脚への補剛効果について一定の補剛効果があることを確認しているが、数値解析による検討であるため、実験的に十字型補剛の耐震性能への有効性を確かめる必要があった。

本研究では、円形断面の基部に十字型補剛壁を入れた鋼製円形断面橋脚の強度と変形性能特性を明らかにするため、模型供試体による繰返し載荷実験を行い、その後解析的に挙動を解明し検討を加えた。特に、径厚比パラメータ、細長比パラメータを変化させ、橋脚の変形性能への影響を調べた。また、これまで実験では未確認であった、十字型補剛壁の変形状態および抵抗メカニズムについて調べ、十字型補剛壁の変形性能向上への関わりについて検討した。最後に塑性率により、十字型補剛壁を有する鋼製円形断面橋脚の挙動特性に対する十字型補剛壁高さの影響について評価した。

2. 繰返し載荷実験

2.1 実験装置と実験供試体

十字型補剛壁を有する鋼製円形橋脚の強度と変形性能特性を検討するために、図-1に示すような実験装置を用いて繰返し載荷実験を行った。実験装置のサーボ試験機は、最大載荷容量 490kN、最大ストローク±100mmを有するアクチュエータで、供試体に強制変位を与えた。水平変位を作用させる際、特に円形断面供試体は基部の局部変形により、供試体の軸が水平載荷方向から外れることが危惧されたため、供試体頂部に図-2のような拘束枠を設置した。

図-3には十字型補剛壁を有する供試体の概略図(十字型補剛橋脚)を示すが、供試体の断面形状は、図-4に示すような無補剛断面(PNS型)と十字型補剛壁を有する断面(PCS型)の2断面とした。実験では無補剛断面を2体、十字型補剛壁を有する断面を3体の合計5体を製作した。図-3に示すように、供試体高さ(載荷点高さ) L の円形橋脚の基部内部に、高さ h の十字型補剛壁を配置し、ダイアフラムは供試体に4箇所設置した。なお、十字型補剛壁下端部を 30mm の角材で挟みこみ、ベースプレートに溶接することで固定端とした。

式(1)で定義する径厚比パラメータ R_t については、既設橋脚等を参考にして、 $R_t=0.10, 0.15$ とした。細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ の影響を調べるために、式(2)で定義した $\bar{\lambda}$ を 0.2 および 0.3 となるようにした。十字型補剛された橋脚の細長比 $\bar{\lambda}$ は、十字型補剛壁を含んだ断面を考慮した値を用いることも考えられるが、今回は無補剛橋脚と比較しやすいように、無補剛断面の $\bar{\lambda}$ と同じ値とした。十字型補剛壁高さ h については、橋脚高さ L の 23.5%, 27%, 35% とした。これは、事前の解析で十字型補剛壁の高さを変化させると、局部変形の発生位置が橋脚基部、十字型補剛壁直上と変化し、橋脚の変形性能に影響を与えたことが確認されたことを勘案して決定した値である。表-1に実験供試体の諸元を示す。供試体名の数字 48 及び 69 は、それぞれの径厚比($=R/t$)を、続く 2 及び 3 はそれぞれの $\bar{\lambda}$ に対し、 $\bar{\lambda} \times 10$ を示し、最後の 24, 27 及び 35 は $h/L \times 100$ を示す。鋼種は SS400 材を用いた。

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

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

表-1 実験供試体諸元

供試体名	L (mm)	R (mm)	t (mm)	h (mm)	h/L	R_t	$\bar{\lambda}$	
PNS483	1440	152.5	3.1			0.10	0.30	
PCS483-24		152.5		339	23.5%			
PNS692		219.0				0.15		0.21
PCS692-27		219.0		389	27.0%			
PCS692-35		219.5		504	35.0%			

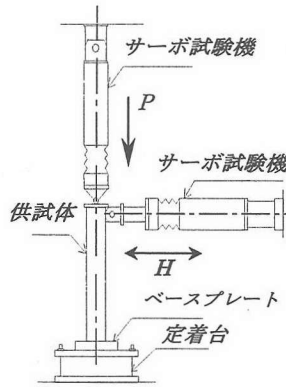


図-1 実験装置

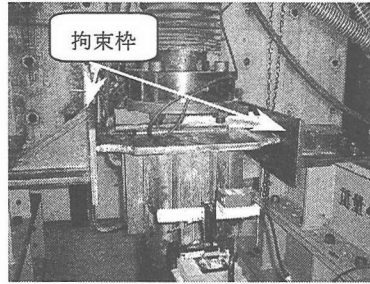
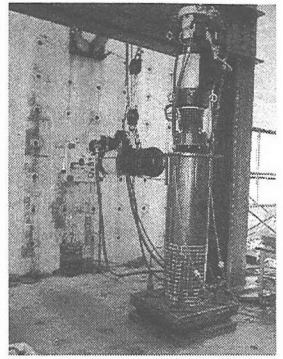


図-2 拘束枠

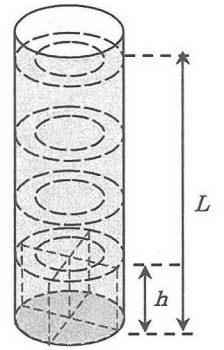


図-3 実験供試体

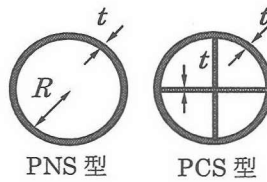


図-4 断面形状

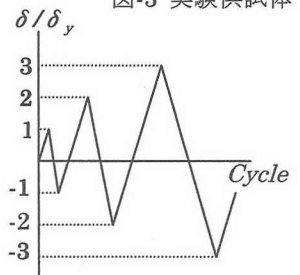
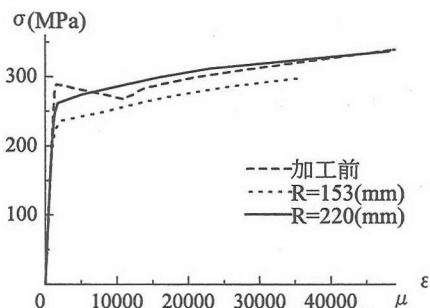
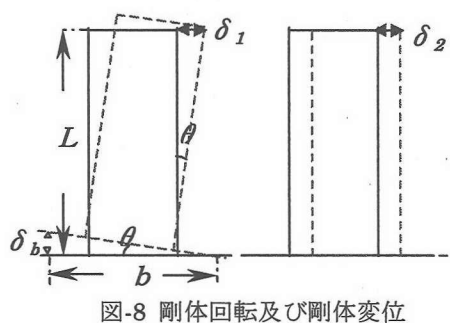
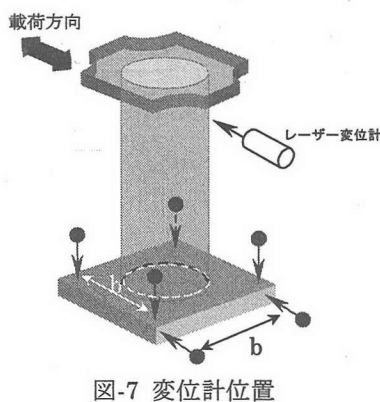
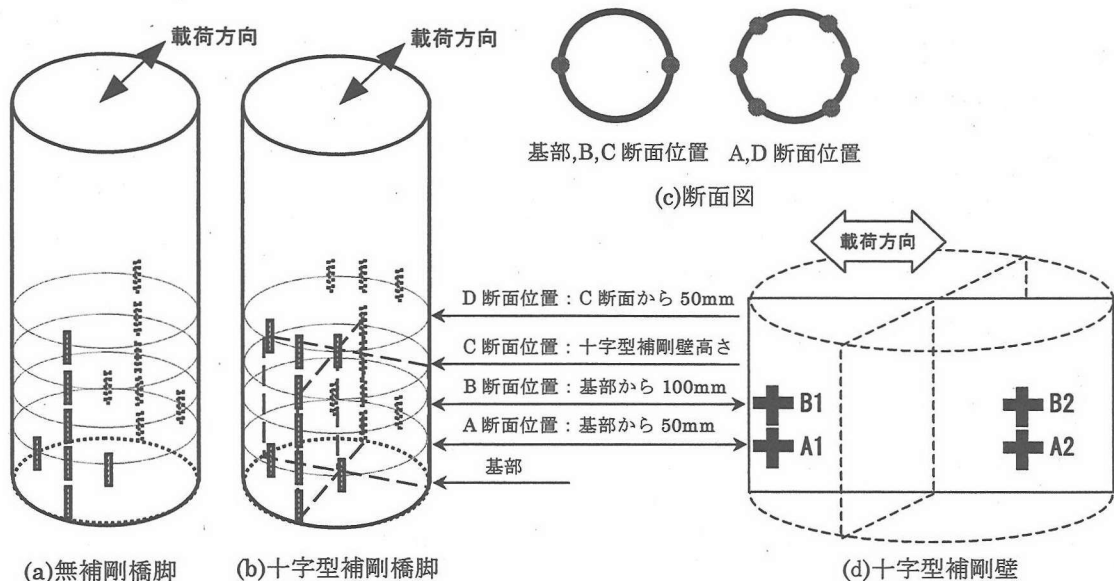


図-5 載荷ステップ

ここに、 R :鋼管の半径、 t :鋼管・十字型補剛壁の板厚、 σ_y :降伏応力度、 E :ヤング係数、 ν :ポアソン比、 L :供試体高さ、 r :断面 2 次半径

2.2 載荷方法

載荷方法は、まず、図-1に示すように、フレームから吊るしたアクチュエータにより、橋梁の上部構造重量を想定した一定鉛直荷重 P を、外側鋼管の全断面降伏荷重 P_y の 15% として荷重制御により与えた。次に強制変位 δ を反力壁に設置したアクチュエータによって供試体頂部に与え、その反力を水平荷重 H として求めた。載荷パターンは図-5に示すような、降伏水平変位 δ_y を基準とする正負交番漸増繰返しの載荷である。降伏水平変位 δ_y 、降伏水平荷重 H_y は式(3)、(4)で定義した。なお、十字型



補剛橋脚は図-3 に示すように断面形状が途中で変わるため、式(4)をそのまま用いることができない。そこで、文献 12)を参考に式(5)で定義した。

$$\delta_{y1} = \frac{H_y L^3}{3EI_1} \quad (3)$$

$$H_y = \left(\sigma_y - \frac{P}{A_1} \right) \frac{I_1}{RL} \quad (4)$$

$$\delta_{y1or2} = \frac{H_y}{3EI_{1or2}} \left\{ L^3 + (L-h)^3 \left(\frac{I_2}{I_1} - 1 \right) \right\} \quad (5)$$

ここに、 A_1 :無補剛部分の断面積、 I_1 :無補剛部分の断面 2 次モーメント、 I_2 :十字補剛部分の断面 2 次モーメント、 P :軸力、 δ_{y1} :無補剛橋脚の降伏水平変位、 δ_{y2} :十字補剛橋脚の降伏水平変位、 H_y :降伏水平荷重

2.3 ひずみゲージおよび変位計取付け位置

載荷時の外側鋼管と、十字型補剛壁に発生するひずみ分布を調べるため、図-6 に示すように一軸ゲージを貼り

付けた。鋼管には、図-6(a), (b)に示すように、載荷軸上に圧縮側、引張り側、それぞれ 5 枚ずつ縦に貼り、局部座屈が発生すると思われる場所 (A 断面または D 断面) には円周方向に 6 枚ずつになるよう貼りつけた。図-6(c)には、断面図により鋼管に貼りつけたゲージの位置関係を示した。十字型補剛壁の応力状態を確認するため、図-6(d)に示すように、鋼管と補剛壁が接合されている補剛壁の端部(A1, B1)と、局部変形の発生が予想される補剛壁の中心線部分(A2, B2)に、水平方向、軸方向のひずみが計測できるようにひずみゲージを補剛壁の裏表に貼り付けた。高さは、A 断面と B 断面位置である。なお、A 断面:基部から 50mm, B 断面:基部から 100mm, C 断面:十字型補剛壁高さ, D 断面:C 断面から 50mm の位置を示す。

載荷点の水平変位の測定には図-7 に示すように、実験供試体に対して無接触のレーザー変位計を用いた。実験供試体のベースプレートは、反力床に強固に固定されているが、載荷中に剛体変位してしまう可能性がある。そこで、ベースプレートの浮上がり量、水平変位量を測定するため、図-7 に示すように、変位計をベースプレートの角から 30mm の位置に設置した。

表-2 実験供試体の鋼材特性

鋼種	R (mm)	t (mm)	E (GPa)	σ_y (MPa)	ν
SS400	加工前	3.1	218.5	267.5	0.29
	152.5		200.9	241.1	
	219.0		209.7	268.0	

表-3 作用軸力，降伏水平荷重及び降伏水平変位

供試体名	P (kN)	H_y (kN)	δ_y (mm)
PNS483	107.7	31.7	4.6
PCS483-24	107.7	31.7	4.2
PNS692	170.5	72.6	3.4
PCS692-27	170.5	72.6	3.1
PCS692-35	170.5	72.9	3.0

2.4 水平変位の補正

レーザー変位計で測定した水平変位には，図-8に示すような基部の剛体回転や剛体変位が含まれると考えられるため，ベースプレートに取りつけた変位計から得られた測定値を用いて式(6)により水平変位の補正を行った。

$$\delta = \delta_m - \delta_1 - \delta_2 = \delta_m - \frac{\delta_b}{b} L - \delta_2 \quad (6)$$

ここに， δ ：補正後の水平変位， δ_m ：レーザ変位計で測定した水平変位， θ ：底板の回転角， δ_b ：浮き上がり変位， b ：変位計間の距離

2.5 材料試験

実験供試体の材料特性は，使用鋼材から JIS5 号試験片を円形橋脚加工前と加工後のあわせて 8 本製作し，引張試験を行って求めた。加工後の試験片からは明確な降伏点が出なかったため，0.2%耐力点を用い σ_y を求めた。材料定数の平均値を表-2 に，鋼材の応力-ひずみ関係を図-9 に示す。また，これらの材料定数から，実験に用いる軸力 P ，降伏水平荷重 H_y ，降伏水平変位 δ_y を式(3)，(4)により求め，表-3 にまとめて示した。

3. 弾塑性有限変位解析

繰り返し載荷実験結果との比較を行うために，数値解析を行った。解析には，既往の解析研究^{(12)~(15)}で使用し，妥当性が示されているので，ここでも同様に，解析プログラム MARC⁽¹⁷⁾を用いた。表-4 に解析上の仮定や諸条件をまとめて示した。なお，十字型補剛壁高さの影響を調べるために，実験供試体としては取り扱わなかった $R_t=0.10$ (PNS483 断面)に十字型補剛壁を 35%まで入れた解析モデルを追加し，PCS483-35A とよぶことにした。

解析モデルの一例を図-10 に示す。要素分割数については，実験結果と比較検討した上で，外側鋼管の分割数は周方向に 36 分割，高さ方向分割は，橋脚基部から十字型補剛壁高さの半分までの間は 1 要素の縦横比が 1:3

表-4 解析条件

材料特性	等方性・弾塑性
降伏曲面	von Mises の降伏条件
構成則	移動硬化則
収束計算法	Newton Raphson 法
要素	シェル要素 要素種:4 辺形肉厚線形シェル要素 (MARC 要素番号 75) 積分点:面内 2×2，板厚方向分割数:10
その他	大変形理論，アップデート・ラグランジェ法，有限弾塑性ひずみ解析

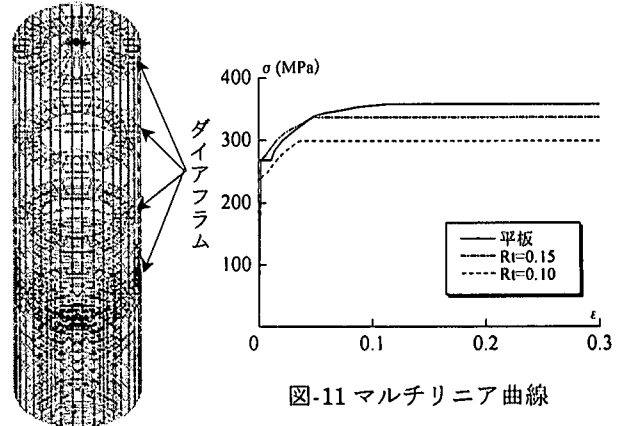


図-10 解析モデル例

となるように分割した。十字型補剛壁直上部分で局部座屈が発生する場合があるので，これについても同様のメッシュ分割にした。橋脚上部については，解析精度に与える影響は少ないと考え，徐々に粗く分割した。また，橋脚内部の十字型補剛壁については，幅方向に 10 分割し，縦横比 1:1 にした。ダイヤフラムについては半径方向に 2 分割とした。境界条件は，外側鋼管基部と十字型補剛壁下端を完全固定とした。ダイヤフラムは実験供試体と同様に設置した。

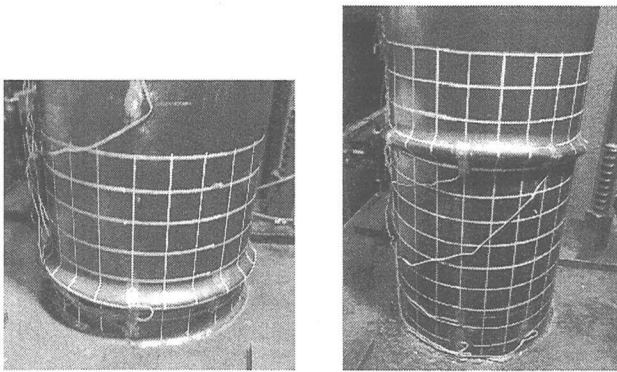
載荷方法は，前述した実験に合わせ，上部構造重量を想定した円管の断面降伏荷重の 15%にあたる一定鉛直軸力 P の下，降伏水平変位 δ_y を基準とした正負交番 1 回漸増繰り返し変位を作用させた。この時の一定鉛直軸力 P 及び降伏水平変位 δ_y は表-3 に示す値を用いた。

鋼材の応力-ひずみ関係は，図-8 に示す引張試験結果を図-11 に示すようにマルチニア化して使用した。

4. 実験結果及び解析結果と考察

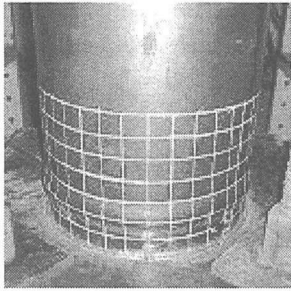
4.1 変形状況及び変形モード

図-12 に各供試体の実験終了後の変形状況を示す。実験において無補剛断面供試体 2 体は，+3 δ_y 付近において基部から 80mm の高さで載荷方向に膨らむ変形が生じ，頂部の変位とともに徐々に全周に広がり，最終的には写真(a)，(c)に示すような提灯座屈を形成した。十字型補剛された $R_t=0.10$ ， $h/L=24\%$ 供試体 PCS483-24 は，

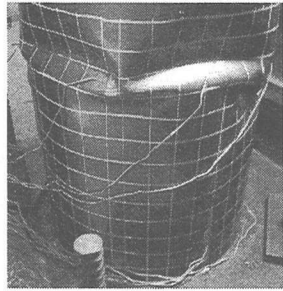


(a) PNS483

(b) PCS483-24



(c) PNS692



(d) PCS692-27



(e) PCS692-35



(f) 十字型補剛壁
PCS692-35

図-12 実験後の最終変形状況

+3 δ_y において十字型補剛壁直上の外側鋼管（基部から 360mm の高さ）で載荷方向に膨らむ変形が生じ、徐々に変形が進展して全周に広がり、写真(b)に示すような提灯座屈を形成した。この変形は無補剛供試体の変形と同様の提灯座屈となっていることがわかる。これは十字型補剛壁高さが充分でなく、十字型補剛壁部分が座屈に至る前に、無補剛部分が座屈を起こしてしまったためと考えられる。

一方、 $R_t=0.15$, $h/L=27\%$ 供試体の PCS692-27 では、+4 δ_y において十字型補剛壁がなくなる付近（基部から 440mm の高さ）で、載荷方向に膨らむ変形が生じ、徐々に変形が進展した。供試体 PCS483-24 と同様の提灯座屈を形成すると思われたが、+7 δ_y において内側に窪む変形が加わり、最終的には写真(d)に示すような複雑な変形を形成した。なお、-7 δ_y では、大きな破断音が発生し、図-13 に示すような溶接割れが外側鋼管の溶接部分で確認された。

$R_t=0.15$, $h/L=35\%$ 供試体の PCS692-35 は、まず+3 δ_y で基部から 80mm の高さで局部変形が確認され、-3 δ_y では基部から 40mm の高さでも局部変形が現れた。また+5 δ_y では基部から 240mm の高さでも局部変形が確認された。+6 δ_y では十字型補剛壁の直上(基部から 560mm の高さ)で載荷方向に膨らむ緩やかな変形が生じはじめたが、その後は十字型補剛された部分の局部変形のみが進展していき、+8 δ_y には基部から 80mm の高さで、十字型補剛壁で支持されていない部分が窪む変形となり、最終的には図-12(e)に示すような複雑な座屈形状

となった。この供試体においては、溶接割れは実験終了まで発生せず、十字型補剛壁が外側鋼管と一体となって有効に作用したと考えられる。

実験後の全供試体を切断し、十字型補剛壁の変形状況を調べた。十字型補剛壁については、PCS692-35 供試体のみ図-12(f)に示すように基部付近に局部変形が認められた。この変形は外側鋼管とほぼ同じ高さに発生しており、十字型補剛壁が外側鋼管とともに外力に抵抗していたことがうかがえる。

ダイアフラムと十字型補剛壁との溶接状況を調べてみると、PCS692-27 供試体については、ダイアフラムが十字型補剛壁と外側鋼管に充分溶接されていなかったことが確認された。これが原因となり、PCS692-27 供試体の鋼管の変断面部は、拘束の小さい自由端に近い状況となり、複雑な変形を許したと考えられる。このような不十分な溶接は、鋼管の溶接割れの一因になり得るので、部材の溶接では注意が必要である。実験供試体の変形状況と局部変形位置をまとめて表-5 に示す。

図-14 は、解析により得られた $R_t=0.15$, $\bar{\lambda}=0.2$ の解析モデルの変形状況を示したものである。局部座屈の発生する場所が、基部付近、十字型補剛壁直上、十字型補剛された基部部分と 3 タイプに分けられる。無補剛のモ

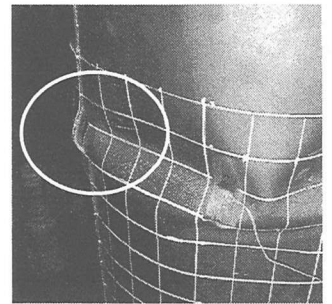


図-13 PCS692-27 の溶接割れ

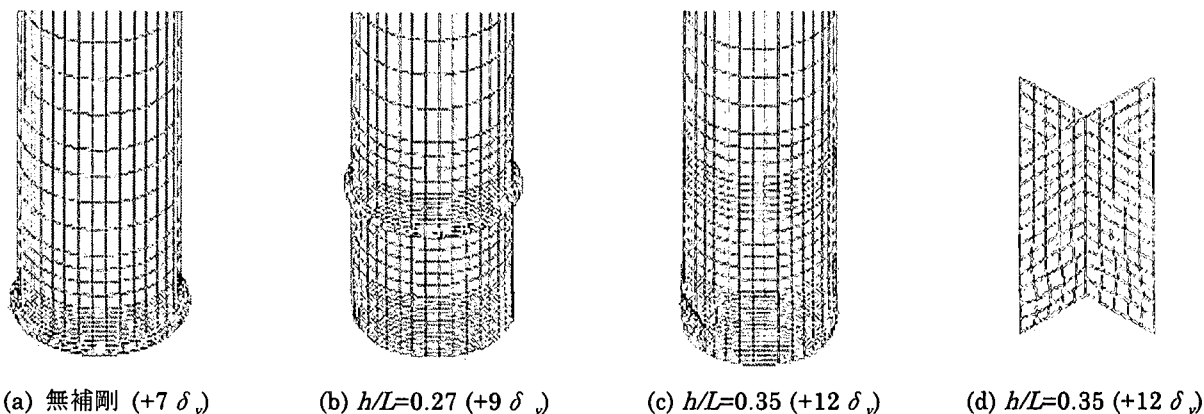


図-14 解析モデルの変形状況

デルは実験と同様に基部付近で局部変形が生じ、図-14(a)のような提灯座屈を形成した。 $h/L=27\%$ のモデルでは、図-14(b)に示すように、十字型補剛壁がなくなる鋼管の断面で提灯座屈形状が形成された。解析の座屈形状は、実験の座屈形状と異なっているが、実験では鋼管の変形と溶接不足によりダイヤフラムが外れてしまっており、実験供試体の境界条件が変わってしまったことが原因と考えられる。 $h/L=0.35$ のモデルにおいては実験同様、複雑な座屈変形を形成した。

十字型補剛壁については、解析においても図-14(d)に示すようにPCS692-35の十字型補剛壁に変形が生じた。この十字型補剛壁に発生した局部変形的位置は、鋼管の局部変形の発生位置に対応していることが確認された。

4.2 水平荷重 - 水平変位履歴曲線及び包絡線

図-15 は実験及び解析から得られた水平荷重 - 水平変位履歴曲線で、実線は実験値、破線は解析値である。いずれも表-3 に示された降伏水平荷重 H_y 、降伏水平変位

δ_y で除して無次元化した。

実験、解析ともに無補剛断面供試体 2 体は比較的早期に最大強度に達し、その後、繰り返し载荷により急激な強度劣化がみられた。十字型補剛断面供試体のうち、十字型補剛壁直上で局部変形が発生した $h/L=23.5\%$ 、 27% の供試体は無補剛断面と同様に最大強度到達後、急激な強度の劣化がみられた。これは十字型補剛壁の高さが充分でなかったことにより、局部変形位置が十字型補剛壁の上となったことによる。しかし、 $h/L=35\%$ の供試体では、基部付近に局部変形が発生し、最大強度後の劣化勾配も緩やかであった。

図-16 に、水平荷重 - 水平変位履歴曲線から得られた包絡線を径厚比パラメータ R_t ごとにまとめて示す。グラフは荷重-変位曲線同様、無次元化してある。これにより、本論文での R_t の範囲では、橋脚高さの 35% の高さの十字型補剛壁を橋脚基部に入れると、最終的に局部変形が鋼管基部付近で生じ、橋脚の変形性能を向上させることが可能であると言える。

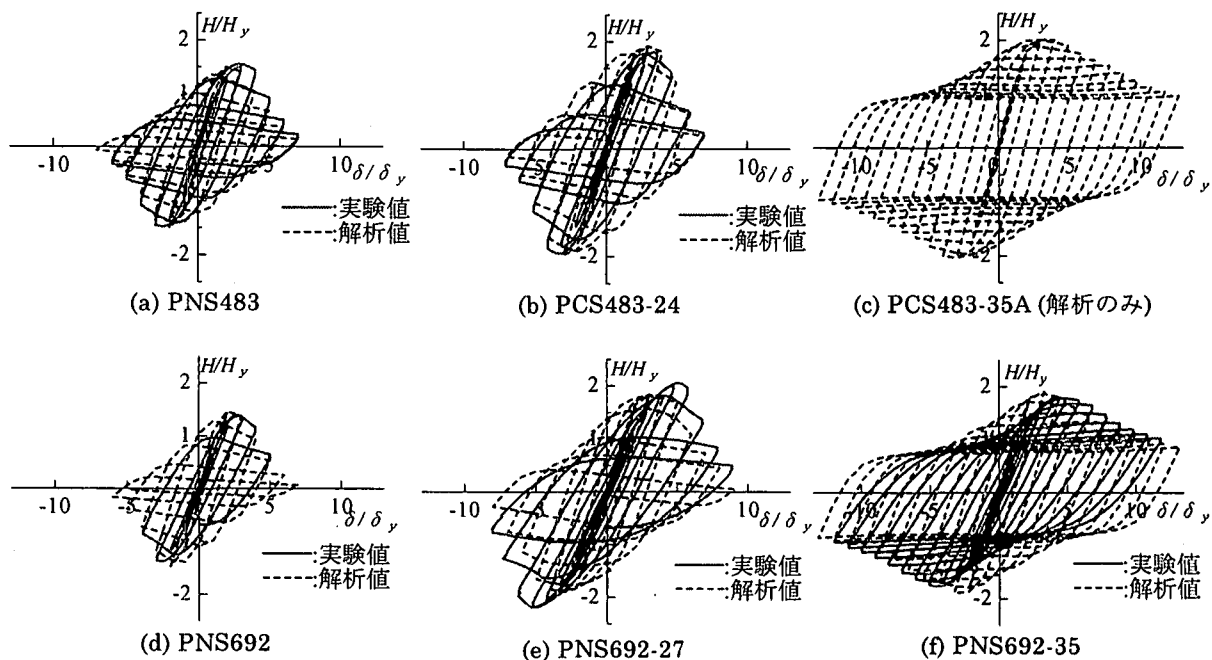


図-15 水平荷重-水平変位履歴曲線

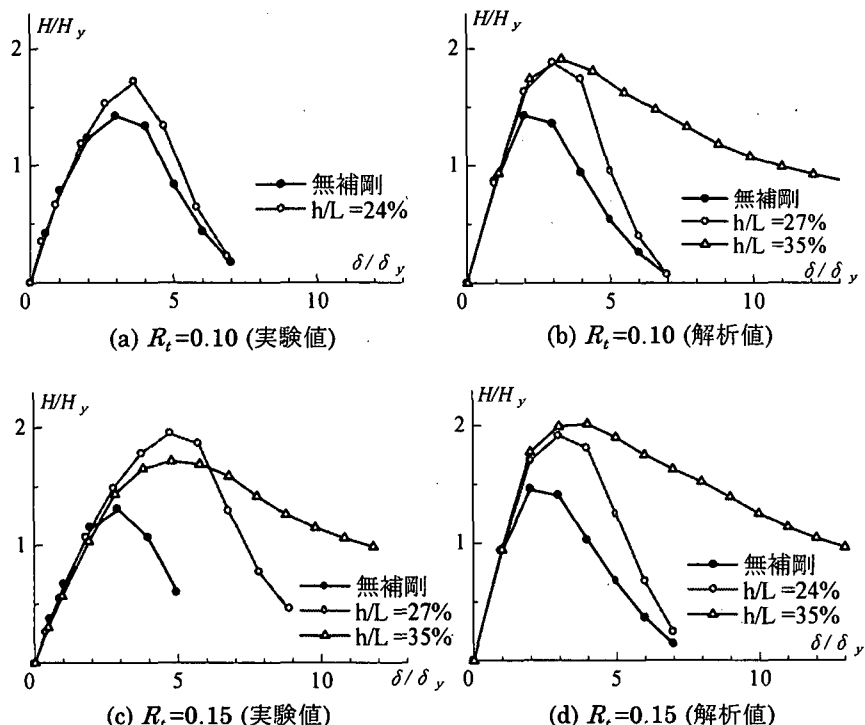


図-16 包絡線

また、別途行った著者らのコンクリート部分充填柱の実験¹⁶⁾と比較すると、相違点としては、変形状況について、コンクリート充填柱は一樣に外側にはらみ出す変形であったのに対し、十字型補剛では、補剛壁部分を節とする局部変形であったこと、また、最大強度については、十字型補剛橋脚がコンクリート充填柱を上回っていることが挙げられる。共通点としては、最大点以降の強度劣化勾配が類似していたことが挙げられる。しかし、対象が少数であり、より詳細な比較は今後の課題となる。

4.3 ひずみ分布

実験前に行った解析では、外側鋼管基部に局部変形が発生すると、十字型補剛壁にも局部変形が発生した。その際、塑性化が外側鋼管の座屈部分に集中せず、外側鋼管では十字型補剛壁がある高さまで、十字型補剛壁では局部変形部分を中心に、高応力度域が広範囲に分布した。一方、外側鋼管の局部変形が十字型補剛壁の直上で発生すれば、外側鋼管の局部変形部分に応力度が集中した。ところが十字型補剛壁部分には大きな応力度は発生せず、

局部変形も生じなかった。つまり、塑性化域が一部分に集中することなく、広域に分布することは、橋脚の変形性能向上に大きく影響するので重要である。応力度の分布状況を実験で確かめるため、図-6に示すように一軸ひずみゲージを供試体に貼りつけ、ひずみ分布を調べた。

図-17は $R_t=0.15$ 供試体の外側鋼管の各断面におけるひずみ分布を示したものである。無補剛橋脚では、図-17(a)に示すように、局部変形が生じた基部部分のみで大きなひずみが生じ、供試体上部では試験開始から終了まで大きなひずみが発生していない。つまり、基部部分に応力度が集中していることがわかる。一方、十字補剛橋脚では、図-17(b),(c)に示すように、

頂部の変位が進むにつれて $+3\delta_y$ までは、外側鋼管は基部から十字型補剛壁直上部の領域で、一樣に軸ひずみが増加していることが分かる。その後、基部部分に局部変形が生じたため、ひずみが一気に増加していることが分かる。特に $h/L=35\%$ 供試体においては基部を中心に広くひずみが増加していることが分かる。このことから、応力度は十字型補剛された部分で広く分布し塑性域が広域になることで、鋼の持つじん性を引き出しながら橋脚基部全体で外力に抵抗しているのだと考えられる。

次に十字型補剛壁のひずみの変化を $R_t=0.15$ 、 $h/L=35\%$ の供試体(PCS692-35)を例に挙げ示す。図-18に、十字型補剛壁の軸方向と水平方向のひずみの履歴とそのゲージの位置を示した。図中のA1,A2,B1,B2は十字型補剛壁の裏表に貼り付けたひずみゲージの位置を示している。図-18(a),(c)に示すように、外側鋼管と接する部分のA1, B1ではひずみが大きく、外側鋼管の変形と関連していると考えられる。特に基部から100mmのB1の水平方向ひずみが大きくなっているが、外側鋼管が外側にはらみ出すのを十字型補剛壁が抑制していると考え

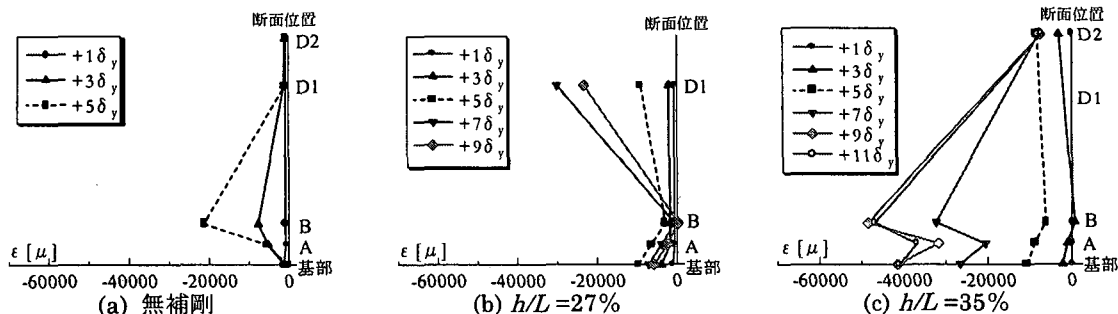


図-17 $R_t=0.15$ 供試体における外側鋼管のひずみ分布

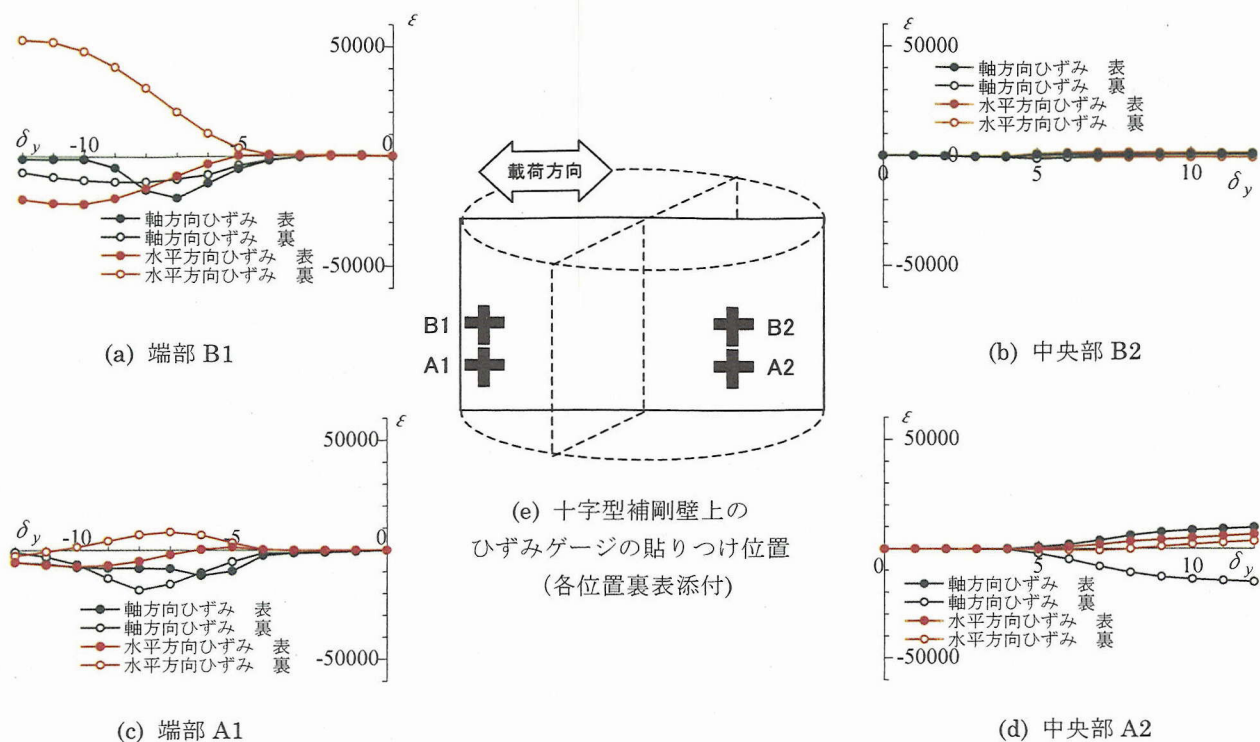


図-18 十字型補剛壁部分のひずみ分布 (PCS692-35)

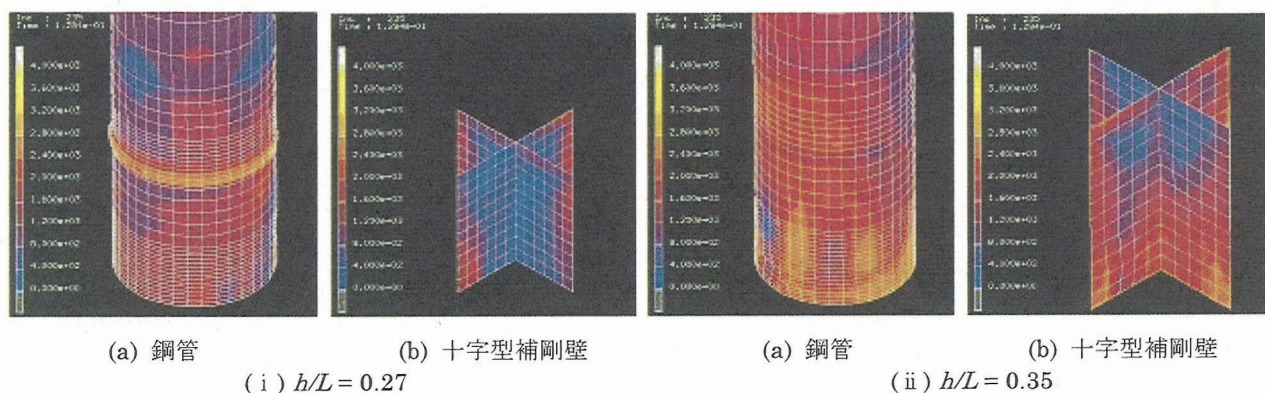


図-19 $R_t=0.15$ のモデルの+5 δ_y 時における応力分布

られる。また、補剛壁パネルの中心線上にある A2, B2 では、図-18(b),(d)に示すように、基部から 50mm の A2 で大きなひずみが発生しているが、基部から 100mm の B2 では大きなひずみは発生していない。A2 点では+4 δ_y 以降に軸方向ひずみが引張り側と圧縮側に分離しており、このとき十字型補剛壁に局部変形が起こったことがわかる。この位置は、図-12(f)に示した局部変形状況と対応している。一方、十字型補剛壁直上で局部変形が生じたときの十字型補剛壁の軸方向ひずみは、最も大きいもので軸方向、水平方向それぞれ 2200 μ 程度で、基部部分で局部変形が生じた $h/L=0.35$ 供試体と比べ非常に小さかった。

図-19 に $R_t=0.15$ の解析モデルの応力分布図を示す。 $h/L=0.27$ モデルでは鋼管の局部変形が十字型補剛壁直上で発生し、十字型補剛壁では大きな応力度が発生しておらず、また鋼管は、局部座屈部分に応力度が集中して

いるのに対し、 $h/L=0.35$ モデルでは鋼管の局部変形が基部で発生し、鋼管、十字型補剛壁両者とも応力度が広範囲に渡り発生している。これは実験によるひずみの広がりとは一致している。このことから、十分な十字型補剛壁高さがあれば、十字型補剛壁を含む基部で局部変形を生じさせることができることがわかる。またこのとき、鋼管と十字型補剛壁の広い範囲に塑性域が生じ、鋼の持つじん性を合理的に引き出すことができる。このことが橋脚の変形性能を向上させる要因になっていると言える。

4.4 径厚比パラメータの変形性能に対する影響

径厚比パラメータ R_t 、細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ の変形性能に対する影響を調べるために、 R_t と $\bar{\lambda}$ を変化させて関係を解析的に検討した。表-6 に解析モデルの諸元を示す。解析条件はこれまでと同様とした。

まず R_t の影響について検討する。図-20 に示した包絡

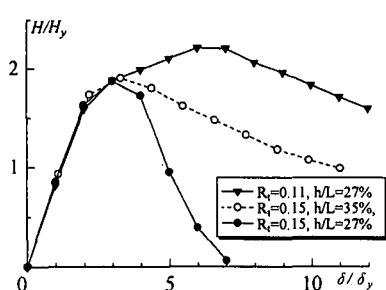
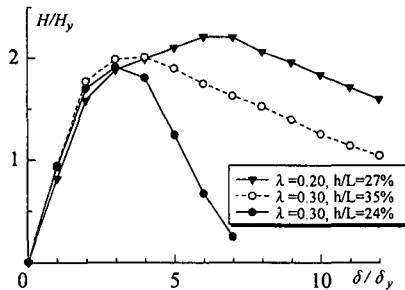
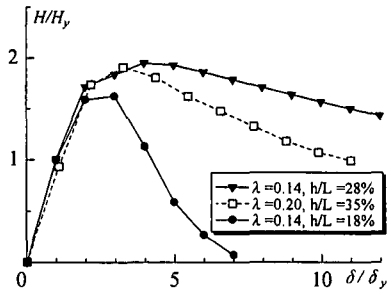


図-20 R_t の影響 ($\bar{\lambda}=0.20$)



(a) $R_t=0.11$



(b) $R_t=0.15$

図-21 $\bar{\lambda}$ の影響

線により $R_t=0.11$ モデル (凡例▼) と $R_t=0.15$ モデル (同●) を比べると、同じ $\bar{\lambda}$, $h/L=27\%$ では、 $R_t=0.11$ モデルの方が変形性能が高いことが分かる。しかし、このとき $R_t=0.15$ のモデルでは、十字型補剛壁直上で鋼管に局部変形が生じており、直接の比較は難しい。そこで、基部で局部変形が生じた $R_t=0.15$, $h/L=0.35$ 供試体と比較すると、やはり $R_t=0.11$ モデルの方が高い変形性能を示していることがわかる。よって、 R_t が小さい方が十字型補剛橋脚は高い変形性能を示すと言える。

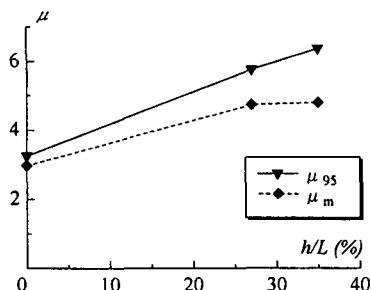
次に細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ の影響について検討する。

図-21(a)に $R_t=0.11$ モデルの包絡線を示すが、ほぼ同じ h/L のモデル (凡例▼と●) では、 $\bar{\lambda}=0.20$ の方が高い変形性能を示している。しかし、この場合も R_t の場合と同様、局部変形の発生位置が異なるため、基部で局部変形を起こした $\bar{\lambda}=0.30$, $h/L=35\%$ モデル (凡例○) と比較しても、 $\bar{\lambda}=0.20$ の方が高い変形性能を示している。また、図-21 (b)には $R_t=0.15$ の包絡線を示すが、 $R_t=0.11$ モデルと同様の結果が確認され、十字型補剛橋脚の変形性能は $\bar{\lambda}$ の影響を受け、 $\bar{\lambda}$ の値が小さい方が高い変形性能になることが分かる。

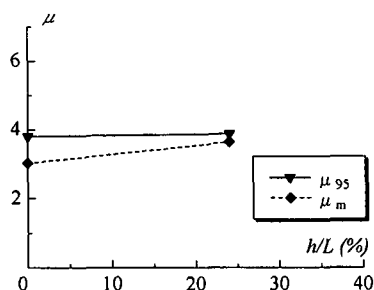
以上から、 R_t , $\bar{\lambda}$ は橋脚全体の変形性能に影響を与え、これらが小さいほうが変形性能が大きくなることが分かる。なお、今回はパラメータ範囲を限定しているが、本論文の範囲に入らないパラメータ R_t , $\bar{\lambda}$ を持つ橋脚については、今後さらに検討が必要である。

表-6 解析モデル諸元

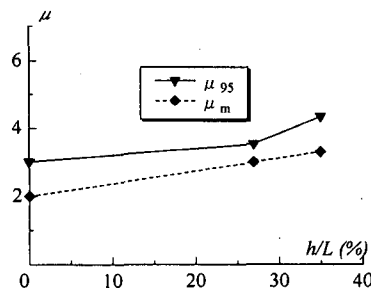
モデル名	R_t	$\bar{\lambda}$	L (mm)	R (mm)	t (mm)	h (mm)	h/L (%)	
PCS4820-18	0.11	0.20	940	153	3.2	165	18	
PCS4820-27						260	28	
PCS4830-24		0.30	1440			339	24	
PCS4830-35						504	35	
PCS6914-18	0.15	0.14	940	220		165	18	
PCS6914-28						260	28	
PCS6921-27		0.21	1440			389	27	
PCS6921-35						504	35	



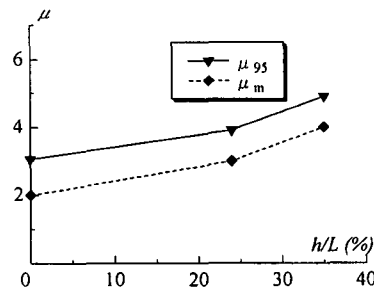
(a) $R_t=0.15$, 実験値



(b) $R_t=0.10$, 実験値



(c) $R_t=0.15$, 解析値



(d) $R_t=0.10$, 解析値

図-22 塑性率 μ と十字型補剛壁高さ h/L の関係

4.5 塑性率と十字型補剛壁高さの関係

次に変形性能の指標として塑性率を取り上げ、以下の2つの塑性率 μ を用いて耐震性能を評価し、十字型補剛壁高さが塑性率に与える影響について検討した。また、それぞれの塑性率は以下の式で定義する。

$$\mu_k = \frac{\delta_k}{\delta_y} \quad (7)$$

ここに、 $k = \max$ または 95 である

- ① μ_{max} : 最大水平荷重 H_{max} に対応する水平変位 δ_m を用いたもの
- ② μ_{95} : 最大水平荷重後、最大荷重の 95% まで強度が低下した時の水平変位 δ_{95} を用いたもの

図-22 に塑性率をグラフで示した。これらから、実験値と解析値に多少差異は見られるものの、両者とも塑性率において無補剛断面に十字型補剛壁を導入することで塑性率が上昇していることがわかる。特に実験における μ_{95} は無補剛断面のほぼ 2 倍の塑性率の向上が確認できる。十字型補剛壁高さについては橋脚高さの 35% 程度の高さで変形性能の向上を図ることができると言える。

以上より、十字型補剛壁を用いる場合には基部付近で局部変形が生じるような十字型補剛壁高さを用いることで、鋼製橋脚の変形性能の向上を図ることができる。その際、溶接割れ等が起こらないようにする必要がある。

5. おわりに

十字型補剛壁を有する鋼製円形断面橋脚の耐震性能特性について、実験と解析を通して比較検討した。特に十字型補剛壁高さと橋脚高さの比、径厚比、細長比が橋脚の耐震性能に与える影響について検討した。

本研究で得られた知見を以下に挙げる。

- (1) 本研究で用いたパラメータにおいては、橋脚長の 35% の高さまで十字型補剛壁を導入することで強度や変形性能を向上させることが十分可能である。
- (2) 十分な高さの十字型補剛壁を有する鋼製橋脚は橋脚基部で広範囲に応力度が分布する。このことが、鋼の特性であるじん性を十分に発揮させ、変形性能が向上をもたらす。
- (3) 十字型補剛壁を有する鋼製橋脚の変形性能は径厚比パラメータ R_t 、細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ に影響を受け、両パラメータが小さい方が高い変形性能となる。
- (4) 十字型補剛壁高さが充分でないと、十字型補剛壁直上で局部変形が発生し、脆性的な破壊が起こる可能性がある。

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, 社団法人日本道路協会, 2002.
- 2) 安波博道, 寺田昌弘, 名取暢, 寺尾圭史, 西川和廣:弾塑性 FEM による鋼管柱載荷実験のシミュレーション解析, 鋼構造論文集, 第 3 巻, 第 9 号, pp.1-10, 1996.
- 3) 葛漠彬, 高聖彬, 宇佐美勉, 松村寿男:鋼製パイプ断面橋脚の繰返し弾塑性挙動に数値解析の研究, 土木学会論文集, No.577, I -41, pp.181-190, 1997.
- 4) 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, pp.107-117, 1997.
- 5) 西村宣男, 池内智行, 谷口直子:円形断面橋脚の最適補剛材寸法, 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, pp.63-68, 1998.
- 6) 岡本隆, 水谷慎吾, 長山秀昭, 原茂樹, 半野久光, 田嶋仁志:縦リブ補強した円形断面鋼製橋脚の耐震性評価, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.97-108, 2000.
- 7) 中沢正利, 目黒誠, 岩熊哲夫:二重円筒鋼製橋脚による延性向上策の検討, 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, pp.57-62, 1998.
- 8) 三木千壽, Jorge Muller, 佐々木哲也:断面変化部を有する円形断面鋼製橋脚の耐震性能の検討, 土木学会論文集, No.605, I -45, pp.117-127, 1998.
- 9) 後藤芳顯, 張崇厚:比較的厚肉の円筒殻における提灯座屈からダイヤモンド座屈への塑性分岐過程の解析, 土木学会論文集, No.605, I -45, pp.105-115, 1998.
- 10) 折野明宏, 井浦雅司:部分的にコンクリートを充填した円形鋼製橋脚の挙動, 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, pp.83-88, 2000.
- 11) 森下益臣, 青木徹彦, 鈴木森晶:コンクリート充填円形鋼管柱の耐震性能に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.73-83, 2000.
- 12) 松村新也, 原岡雅史, 岩坪要, 山尾敏孝:十字型補剛壁を有する鋼製橋脚の耐震性能に関する研究, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.809-818, 2001.
- 13) Shinya Matsumura, Toshitaka Yamao, Masashi Haraoka, Kaname Iwatsubo: Cyclic Behavior and Ductility of Steel Box Cross-Section Bridge Piers, The First International Conference on Steel & Composite Structures, Vol.2, pp.1597-1604, 2001.6.
- 14) 松村新也, 山尾敏孝, 岩坪要:比較的幅厚比の大きい鋼製箱型断面における十字型補剛壁の補剛効果, 平成 13 年度土木学会西部支部研究発表会概要集, 佐賀大学, 2002.3.
- 15) 松村新也, 山尾敏孝, 森守正, 小串正明, 岩坪要:比較的幅厚比の大きい断面形状を有する鋼製橋脚における十字型補剛壁の補剛効果, 土木構造・材料論文集, 第 18 号, pp.35-42, 2002.12.
- 16) Kaname Iwatsubo, Toshitaka Yamao, Muncaki Ito and Shinya Matsumura: Experimental Study on Ductility and Seismic Behavior of Steel Tubular Bridge Piers under Cyclic Loading, Proceedings of Sixth Pacific Structural Steel Conference, Beijing, China, pp.502-507, 2001.10.
- 17) 日本マーク株式会社:User's Manual A-E, 1997.

(2003 年 4 月 18 日 受付)