

# コンクリートを部分充填した円形鋼製橋脚の 弾塑性挙動に関する研究

井浦雅司<sup>1</sup>・折野明宏<sup>2</sup>・石澤俊希<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 東京電機大学教授 理工学部建設環境工学科 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

<sup>2</sup>正会員 工修 ヤマト設計株式会社(〒460-0002 名古屋市中区丸の内3-17-6 ナカトウ丸の内ビル2F)

<sup>3</sup>工修 新日本技研株式会社 (〒983-0852 仙台市宮城野区榴岡3-7-35)

本報告では、コンクリートを部分的に充填した単柱形式の円形鋼製橋脚を対象として、一定の軸力下において、漸増繰返し横力を作用させた耐荷力実験を行った。供試体の寸法、コンクリートの強度とその充填率、ダイヤフラムの設置位置、載荷方法などを変化させて、供試体の最大耐力、荷重-変位履歴曲線、鋼管の局部座屈発生位置やコンクリートの損傷位置に与えるそれらの影響について調べた。さらに、コンクリート充填鋼管の最大耐力を推定する方法を提案し、本実験結果や既往の実験結果を用いてその妥当性を確認した。また、その推定方法を用いて、コンクリートの最適充填率を求める方法を提案し、本実験結果を用いてその妥当性を検討した。

**Key Words:** concrete-filled tubular steel column, cyclic load, ultimate strength

## 1. はじめに

鋼製橋脚の水平耐力や塑性率を向上させる目的で、これまでも様々な補強方法が提案されている。それらを大別すると<sup>1)</sup>、鋼材により橋脚を補強する方法と、橋脚内部にコンクリートなどを充填する方法に分けられる。本報告では、コンクリートを部分的に充填した単柱形式の円形鋼製橋脚の弾塑性挙動に注目した。

鋼製橋脚の断面には矩形断面が多く用いられているものの、景観上の理由や剛性に方向性を持たないことなどから、円形断面もしばしば採用されている。鋼製橋脚を縦補剛材や横補剛材により補強すると、矩形断面や円形断面といった断面形状に関係なく、橋脚の最大耐力や塑性率が向上することは、既往の研究<sup>2)-6)</sup>により報告されている。文献1)においては、矩形・円形断面の補強方法として、ぜい性的な破壊を防ぐための構造細目例が示されている。

中空鋼製橋脚に関する実験より、矩形断面においては、座屈時に構成板要素が断面の外側と内側へ変形するパターンが観察される<sup>4)</sup>。よって、矩形断面の内部にコンクリートを充填すると、内側への変形が抑えられることにより、耐力や塑性率が向上する。これら

の事実は、コンクリートを全面に充填した矩形合成柱に関する既往の研究<sup>7)-11)</sup>により確かめられている。一方、円形断面においては、径厚比が80を超える場合には、円管の内側へ変形するダイヤモンド座屈も観察されるが、径厚比がそれ以下の場合には、円管の外側へ変形する象の脚座屈が生じる場合が多い<sup>4)-6)</sup>。このため、象の脚座屈の場合、内部コンクリートは鋼管の変形を拘束しないものの、既往の円形合成柱に関する実験<sup>7), 12)-14)</sup>では、鋼管内部にコンクリートを充填することにより、耐力や塑性率が向上することが報告されている。

コンクリートを必要以上に鋼製橋脚の内部に充填すると、自重の増加ばかりでなく最大耐力も上昇し、基礎構造物の設計に大きな影響を与えることになる。逆に、コンクリート充填が少な過ぎると、鋼板の局部座屈がコンクリート上面に発生し、コンクリートの充填効果が見られなくなる。これまでも、部分的にコンクリートを充填した矩形断面鋼製橋脚に関する実験は多く報告<sup>15)-20)</sup>されている。葛西・宇佐美・葛<sup>15)</sup>は、矩形断面を対象として、コンクリートの最適充填高さにおいて、変形能が最大となることを示している。葛・宇佐美・戸谷<sup>16)</sup>は、ダイヤフラムの効果について、コンクリート上面に設置することにより耐震性が向上する

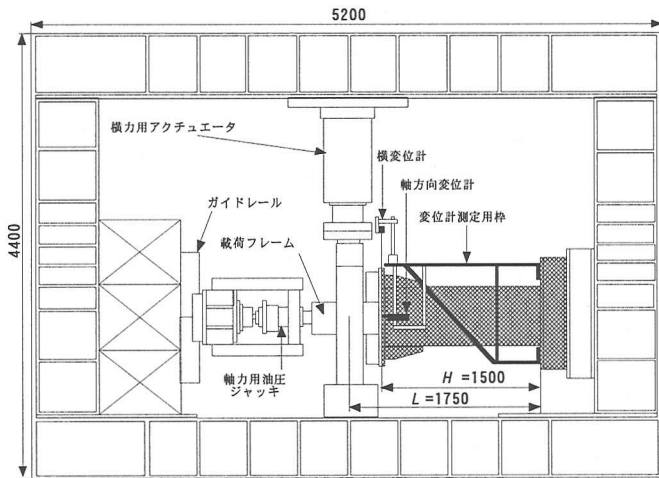


図-1 載荷装置の全体図 (単位:mm)

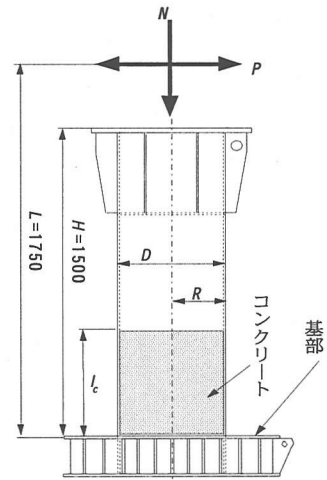


図-2 供試体 (単位:mm)

ことを示している。

コンクリートを部分的に充填した円形断面鋼製橋脚の研究は比較的少なく、岸ら<sup>21)</sup>、森下・青木・鈴木<sup>22)</sup>、折野・井浦<sup>23)</sup>により報告されている。これらの研究においては、コンクリート合成円形柱と同様に、コンクリートを充填する効果は認められているものの、コンクリートの最適充填率、ダイヤフラムの設置効果、などについては未だ研究の余地が残されている。

本報告では、コンクリートを部分的に充填した円形鋼製橋脚モデルの実験を行い、最大耐力や塑性率がコンクリートを充填することにより、どのような影響を受けるのか調べる。また、ダイヤフラムの有無やその設置位置、横力の載荷方法などを変化させ、鋼管の座屈発生位置やコンクリートの損傷状態について調べた。さらに、最大耐力を推定するパラメーターを提案し、その妥当性について本実験結果と既往の実験結果を用いて検証する。また、文献1)にあるように、コンクリート充填高さは、ある一定以上の高さ(最適充填率)を必要とすることから、最適充填率を求める方法についても言及している。その妥当性については、本実験結果を用いて検証している。

## 2. 実験装置と供試体

### (1) 実験装置と載荷方法

実験装置の全体図を図-1に示す。単柱形式の円形鋼製橋脚をモデル化した供試体を横向きにして、円管基部を高力ボルトにより反力フレームに固定し、円管上端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 $N$ は橋脚の上部構造の重量に相当するものであり、50tf油圧ジャッキにより載荷した。その大きさは、充填コンクリートを無視した鋼管全断面塑性軸力の15%であり、常に一定の大きさを作用させた。なお、鉛

直方向に供試体が変位しても、常に水平方向の軸圧縮力が作用するように、油圧ジャッキと反力フレームの間にガイドレールを設置し、油圧ジャッキが上下方向に動けるように工夫されている。横力 $P$ は地震力に相当する荷重であり、50tfアクチュエータにより変位制御で載荷を行った。載荷方法としては、降伏変位 $\delta_y$ を基準とした正負交番1回漸増繰返し載荷を基準としている。なお、降伏変位 $\delta_y$ は次式で与えられる。

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

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

ここで、 $L$ は基部から横力作用点までの距離、 $H$ は基部から横変位測定位置までの距離、 $R$ は鋼管の外側までの半径、 $I, A, E, G$ はそれぞれ鋼断面のみの断面二次モーメント、断面積、ヤング係数、せん断弾性係数である。 $\sigma_y$ は鋼管の降伏応力であり、実験前に行った鋼材の素材試験より求めた。

### (2) 供試体

供試体の概要図を図-2に示す。今回行った供試体の数は14体であり、それぞれの供試体に用いた材料特性および実験方法を表-1に示す。供試体の作製方法は文献6)で述べた方法と同一であり、ここでは詳細を省略する。なお、今回用いた供試体の径厚比( $R/t$ )は35から51の範囲内にある。

供試体番号の最初の数字はシリーズ番号を示しており、ここでは実験実施の時期毎に1シリーズから4シリーズに分類している。なお、比較のために1996年に東京電機大学で行われたコンクリート無充填の試験体も併せて載せており、これを供試体No.0-1としている。

表-1 材料特性および実験方法

供試体 No.	鋼管の形状・材料特性					コンクリート強度		実験方法								
	半径 $R$ (mm)	板厚 $t$ (mm)	$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 $E$ (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比 $\nu$	圧縮 (N/mm <sup>2</sup> )	引張 (N/mm <sup>2</sup> )	ダイヤフラム 添付位置(mm)	$P_y$ (N)	$\delta_y$ (mm)	軸力 $N$ (N)	充填率 $\gamma$ (%)	載荷方法			
0-1	255	4.35	288	$2.06 \times 10^5$	0.277	-	-	-	$1.26 \times 10^3$	4.08	$2.98 \times 10^5$	-	1回繰			
1-1	225	4.37	302	$1.95 \times 10^5$	0.283	12.6	1.13	300	$1.05 \times 10^3$	4.91	$2.78 \times 10^5$	14.0	1回繰			
1-2												30.0				
1-3												49.0				
2-1	251	5.76	287	$1.88 \times 10^5$	0.278	22.4	2.21	-	$1.60 \times 10^3$	4.52	$3.86 \times 10^5$	9.0	1回繰			
2-2												17.0				
2-3												28.0				
2-4												48.0				
3-1	251	5.77	312	$1.95 \times 10^5$	0.287	22.6	1.69	300	$1.74 \times 10^3$	4.73	$4.21 \times 10^5$	17.0	1回繰			
3-2								-				28.0	単調			
3-3	200							-	$1.10 \times 10^3$	5.76	$3.35 \times 10^5$	34.0	1回繰			
3-4														34.0		
4-1	250	5.73	280	$1.97 \times 10^5$	0.285	25.4	2.22	490	$1.54 \times 10^3$	4.22	$3.74 \times 10^5$	28.0	単調			
4-2	200							-	$0.98 \times 10^3$	5.12	$2.98 \times 10^5$	34.0	1回繰			
4-3														610	34.0	3回繰

各シリーズにおいては、同一の鋼材とコンクリートを使用している。鋼材の材料は全てSS400であり、加工前に鋼材より5本の試験片を製作し、引張り試験を行いその平均値を表-1に示した。充填したコンクリートの圧縮強度と引張強度も表-1に示しており、これらの値は標準試験体をそれぞれ5体作成し、圧縮試験と割裂試験より求めた平均値である。なお、載荷試験はコンクリート打設後28日を経過してから実施しており、載荷試験日にコンクリートの強度試験を行っている。

表-1におけるダイヤフラムの設置位置は、基部からの距離を示しており、供試体1シリーズは全て基部から30cmの所に設置し、供試体2シリーズは添付なし、供試体No.3-1,3-3,4-1,4-3は充填コンクリート上面に設置し、供試体No.4-2は充填コンクリートの中程に設置し、基部からの距離は22cmである。このようにダイヤフラムの位置を変化させたのは、既設の鋼製橋脚をコンクリート充填により補強する場合を考慮したためである。ダイヤフラムの板厚は全て6mmであり、コンクリートを打ち込む都合上、直径25cmの孔を設けている。コンクリート充填率 $\gamma$ とは、基部から横力載荷点まで鋼管が延びていると仮定した時の、鋼管全容積に対する充填コンクリートの容積率である。コンクリートの打ち込みは供試体上部に直径30cmの孔を設け、そこから打設している。コンクリート打設後、供試体上部の孔を直径30cmの円板により蓋をし、周囲を溶接により固定した。載荷方法は基本的に正負交番1回漸増繰返し載荷であるが、供試体No.3-2,4-1は単調載荷、供試体No.4-3は正負交番3回漸増繰返し載荷である。なお、外力が最大荷重を超えた後に、再び降伏荷重 $P_y$ に達し

た段階で実験を終了することを基準としているが、アクチュエータの限界や鋼管のクラック発生により実験を終了した場合もある。

### 3. 実験結果

ここでは実験結果を整理するに当たり、鋼管の局部座屈発生位置、充填コンクリートの破壊状況、荷重-変位履歴曲線について注目する。

#### (1) 鋼管の局部座屈発生位置

本実験においては、鋼管に発生した局部座屈は全て象の脚座屈であり、鋼管外側へ変形していた。全ての供試体について、その局部座屈発生位置の概要図を図-3に示す。同図において、Bと中黒半円は鋼管の局部座屈とその場所を示しており、Dは環状のダイヤフラムを示しており、さらに斜線部は充填コンクリートの上面であり、それ以下にコンクリートを充填した。また、一点鎖線と灰色の矩形部分は内部に充填したコンクリートの破壊状況を示しており、これについては3.(2)で詳しく述べる。図-3の供試体No. の後に括弧で囲まれた数字は、鋼管の局部座屈が目視により確認された時点を示している。すなわち、 $3\delta_y$ と $4\delta_y$ は、鋼管の局部座屈がそれぞれ3ループ目と4ループ目に確認されたことを示している。単調載荷については、鋼管の局部座屈が確認された時点の横方向変位を示している。なお、コンクリートが充填されていない供試体No.0-1では、3ループ目において基部から約10cmの位置で象の脚座屈が発生した。

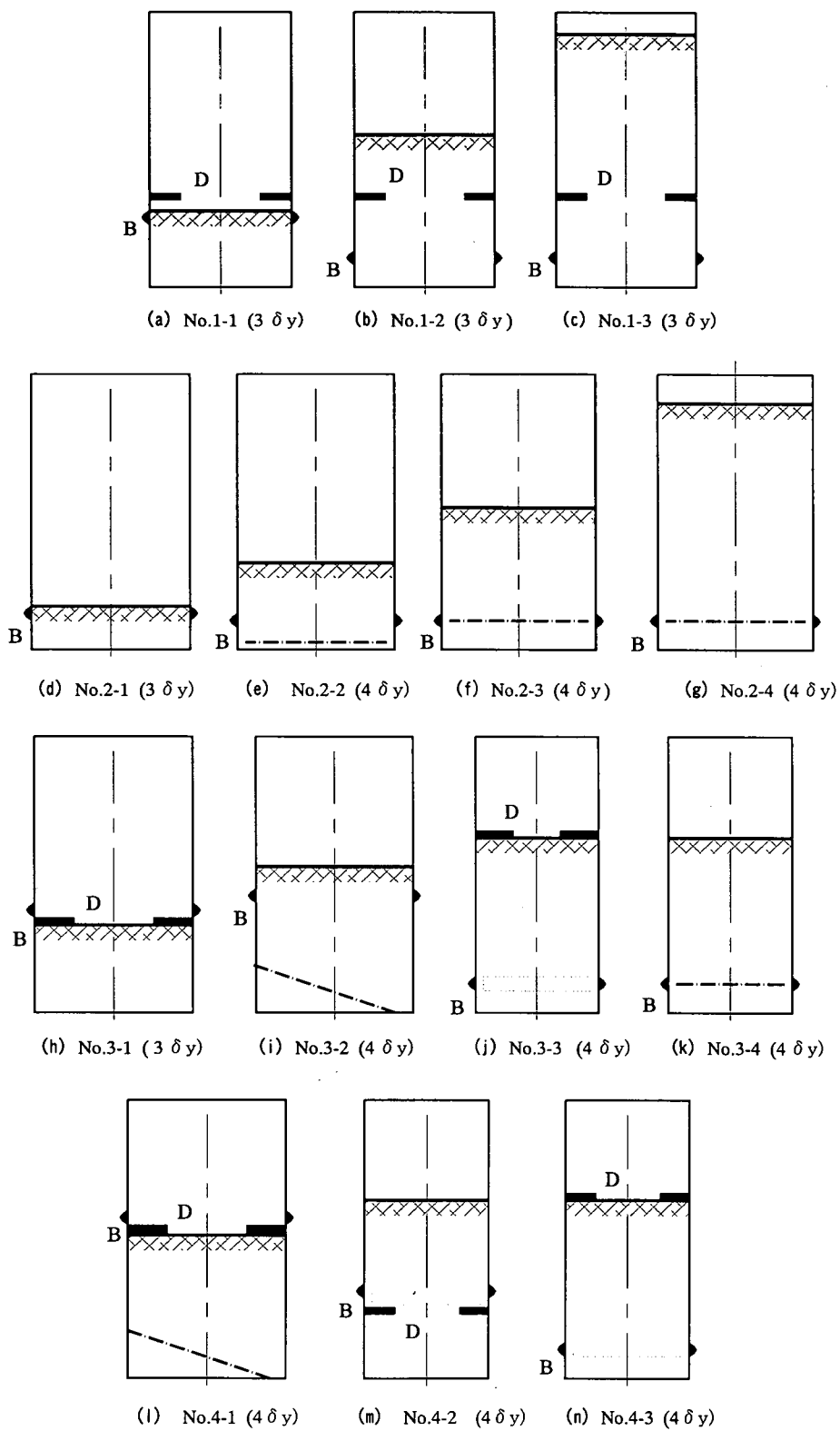
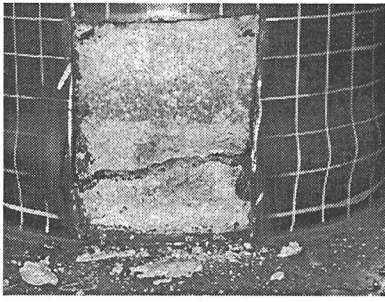
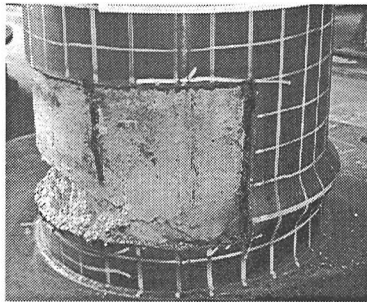


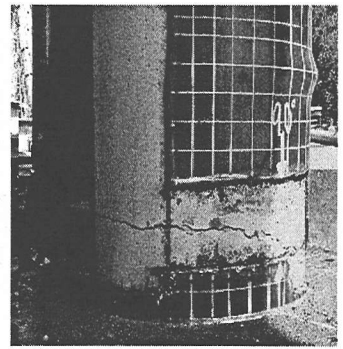
図-3 局部座屈発生位置の概要図



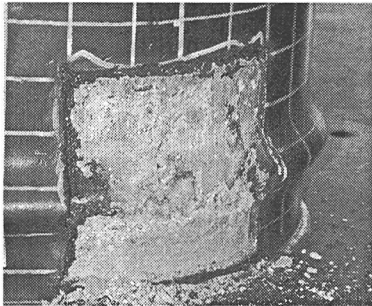
(a) No.2-4



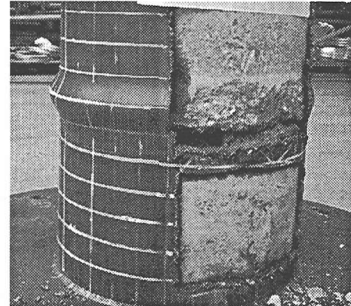
(b) No.4-3



(c) No.3-2



(d) No.2-3



(e) No.4-2

図-4 充填コンクリートの破壊状況

本実験における鋼管の局部座屈発生位置は、以下の5つの場合に分類できる。

- a) 充填コンクリート上面にダイヤフラムを設置しておらず、充填コンクリート上面付近で鋼管の局部座屈が発生する場合。本実験においては、供試体No.1-1,2-1が相当する。
- b) コンクリート充填率がある値以上になると、ダイヤフラムの有無に関係なく基部付近(本実験では基部から約10cm)で鋼管の局部座屈が発生する場合。本実験においては、供試体No.1-2,1-3,2-2,2-3,2-4,3-3,3-4,4-3が相当する。
- c) 充填コンクリート上面にダイヤフラムを設置しており、そのダイヤフラムより少し上で鋼管の局部座屈が発生する場合。本実験においては、供試体No.3-1,4-1が相当する。
- d) コンクリートが充填されている鋼管の中間付近で鋼管の局部座屈が発生する場合。本実験においては、単調荷重を行った供試体No.3-2が相当する。
- e) ダイヤフラムがコンクリートに埋め込まれており、鋼管の局部座屈がこのダイヤフラムの少し上で生じた場合。本実験では供試体No.4-2が相当する。

## (2) 充填コンクリートの破壊状況

実験終了後、鋼管を切断し充填コンクリートの破壊状況を調べた。図-4に代表的な充填コンクリートの破壊状況を示した。図-4(a)は充填コンクリート上面にダイヤフラムが設置されておらず、さらに繰り返し荷重を受けた供試体に観察されたひび割れであり、供試体No.2-2,2-4,3-4がこれに相当する。図-4(b)は充填コンクリート上面にダイヤフラムが設置されており、さらに繰り返し荷重を受けた供試体に観察された破壊状況である。同図より、繰り返しの影響により充填コンクリートの一部が圧壊している様子がわかり、供試体No.3-3,4-3がこれに相当する。図-4(c)は単調荷重の供試体に観察されたひび割れを示しその幅は2-3mmであり、供試体No.3-2,4-1がこれに相当する。図-4(d)は供試体No.2-3におけるコンクリートの損傷状況であり、鋼管の局部座屈発生付近でコンクリートの表面が一部剥離しているものの、明確なひび割れは観察されていない。図-4(e)は、ダイヤフラムが充填コンクリートに埋め込まれる形で設置され、繰り返し荷重を行った供試体No.4-2の破壊状況であり、ダイヤフラム直上におけるコンクリートが圧壊している様子が見える。

図-3における一点鎖線は、図-4(a), (c)に示すひび割れが発生した場所を示している。一方、図-3における

表-2 実験結果および最適充填率

供試体 No.	実験結果			コンクリート応力				等価板厚 $t_e$ (mm)	最適充填率				
	最大耐力 $P_{max}$ (N)	最高変位 $\delta_{max}$ (mm)	座屈発生距離 (mm)	腕の長さ $H$ (mm)	圧縮強度		$\alpha$ (%) $\left(\frac{\sigma_c - \alpha \sigma_k}{\sigma_c} \times 100\right)$		最適 充填率 $\gamma$ (%)	座屈発生位置			
					テストピース $\sigma_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	計算値 $\sigma_k$ (N/mm <sup>2</sup> )				実験	予想		
0-1	$1.90 \times 10^5$	8.6	100	-	-	-	-	-	-	-	-		
1-1	$1.58 \times 10^5$	14.5	220	$1.75 \times 10^3$	12.6	17.7	-40.5	5.50	22.3	上	上(O)		
1-2	$1.73 \times 10^5$	19.5	100			19.2	-52.9			下	下(O)		
1-3	$1.82 \times 10^5$	20.2	100			20.2	-60.7			下	下(O)		
2-1	$2.48 \times 10^5$	13.0	130	$1.75 \times 10^3$	22.5	18.1	19.4	7.08	21.2	上	上(O)		
2-2	$2.68 \times 10^5$	17.6	100			19.5	13.2			下	上(X)		
2-3	$2.66 \times 10^5$	18.4	100			19.4	13.6			下	下(O)		
2-4	$3.06 \times 10^5$	26.2	100			22.3	0.6			下	下(O)		
3-1	$2.82 \times 10^5$	30.4	350	$1.75 \times 10^3$	22.6	20.6	9.2	7.14	21.5	上	上(O)		
3-2	$3.04 \times 10^5$	33.4	400			22.2	2.1			中	下(X)		
3-3	$2.04 \times 10^5$	78.9	100			25.1	-11.1	7.23	23.4	下	下(O)		
3-4	$1.93 \times 10^5$	22.6				23.8	-5.1			下	下(O)		
4-1	$3.10 \times 10^5$	31.4	550	$1.75 \times 10^3$	25.4	22.8	10.2	6.90	21.6	上	下(X)		
4-2	$1.94 \times 10^5$	40.3	240	$1.53 \times 10^3$		21.0	17.2			7.06	22.7	中	下(X)
4-3	$1.98 \times 10^5$	30.6	100	$1.75 \times 10^3$		24.5	3.3					下	下(O)

灰色の矩形部分は、図-4(b), (e)に示すコンクリートの圧壊状況が観察された場所を示している。図-3(a), (b), (c)ではコンクリートの損傷状況が記入されていないが、これは損傷が見られなかったのではなく、供試体1シリーズにおいては、コンクリート全体が圧壊状態にあり、明確なひび割れは観察されなかった。これは供試体1シリーズのコンクリート強度が12.6(N/mm<sup>2</sup>)と低かったのが原因と思われる。

コンクリート充填部分において鋼管の局部座屈が発生する場合には、コンクリートのひび割れや圧壊もその局部座屈と同じ位置に発生する場合が多い(供試体No.2-3, 2-4, 3-3, 3-4, 4-2, 4-3)。しかしながら、図-3(e), (i), (l)に示すように、供試体No.2-2, 3-2, 4-1では鋼管の局部座屈とコンクリートのひび割れ発生位置が異なっていた。特に、単調載荷実験を行った供試体No.3-2, 4-1では、コンクリートの引張領域と思われる場所で斜めのひび割れが発生しており、圧縮領域のコンクリートには損傷が観察されなかった。

充填コンクリートの上面付近に鋼管の局部座屈が発生した供試体No.2-1, 3-1においてはコンクリートのひび割れや圧壊は観察されなかった。

### (3) 荷重-変位履歴曲線

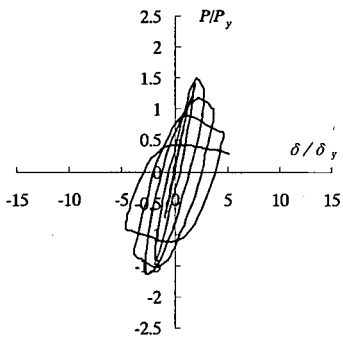
本実験において得られた代表的な荷重-変位履歴曲線(以下、履歴曲線と呼ぶ)を図-5に示す。なお、コンクリートが充填されていない供試体No.0-1の履歴曲線

を図-5(a)に示す。これら履歴曲線に与える影響として、鋼管の局部座屈発生位置、載荷方法、ダイヤフラム設置位置、コンクリートの応力状態に注目して、以下に履歴曲線の説明を行う。

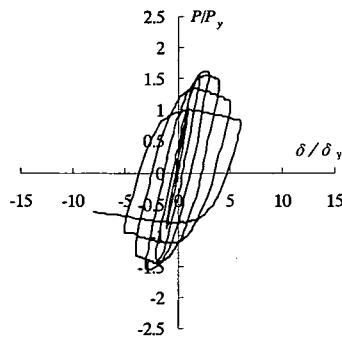
#### a) 鋼管の局部座屈発生位置

3. (1)において、鋼管の局部座屈発生位置を5つのケースに分けた。ケースa)に相当する供試体No.2-1の履歴曲線を図-5(b)に示す。図-5(a)と図-5(b)を比較すると、両者の履歴曲線が類似していることがわかる。すなわち、充填コンクリートの上面において鋼管の局部座屈が発生した場合には、コンクリート無充填の場合と同様に、最大耐力を越えた後は、鋼管の局部座屈により、著しい耐力の低下が観察される。なお、供試体No.1-1の履歴曲線は、供試体No.2-1のそれと類似しているためここでは省略した。

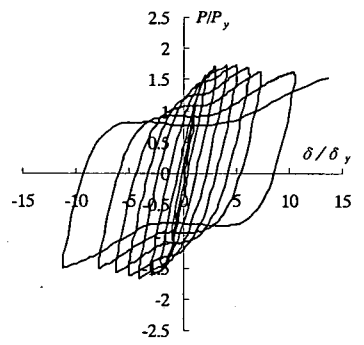
ケースb)に相当する供試体No.2-3の履歴曲線を図-5(c)に示す。コンクリートが充填されている基部付近に鋼管の局部座屈が発生したために、最大耐力を越えた後もそれ程著しい耐力の低下は見られない。特に、図-5(c)の第1, 3象限において剛性の増加が見られており、これは鋼管が座屈しているにも拘らず、充填コンクリートが圧縮力を負担しているためと考えられる。このような傾向は、鋼管の局部座屈がコンクリートを充填した基部付近に発生した供試体の多くに見られた。すなわち、充填コンクリートの役割として、鋼管の局部座屈を防止することではなく、鋼管の座屈後、曲げ



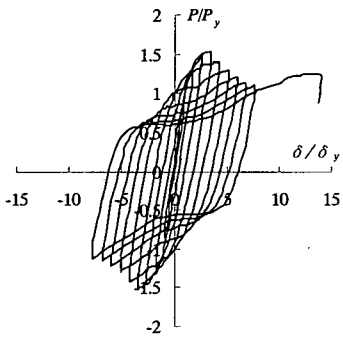
(a) No.0-1



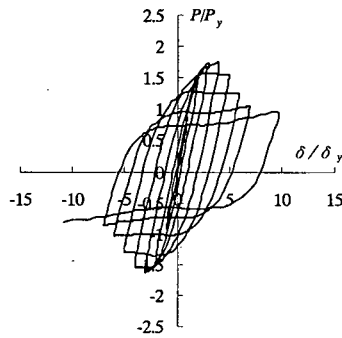
(b) No.2-1



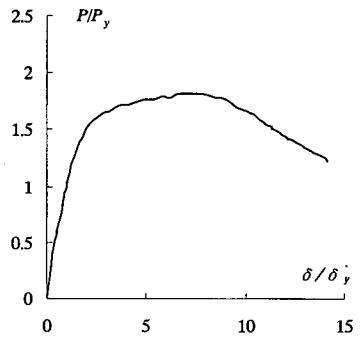
(c) No.2-3



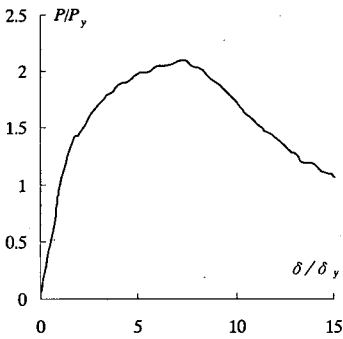
(d) No.1-3



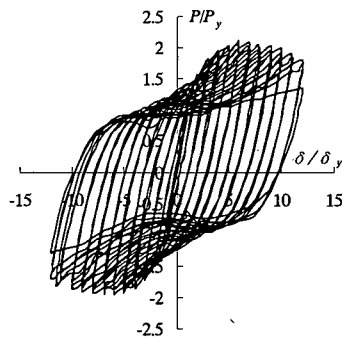
(e) No.2-2



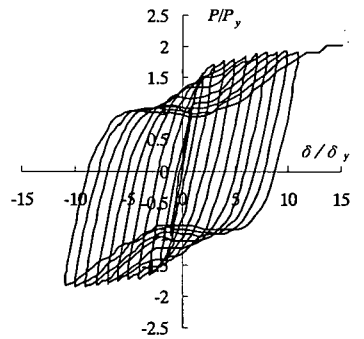
(f) No.3-2



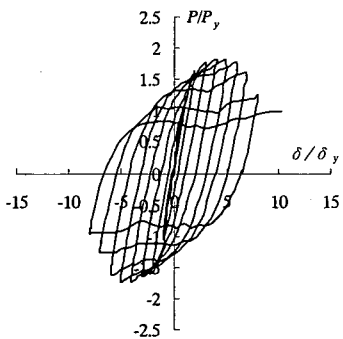
(g) No.4-1



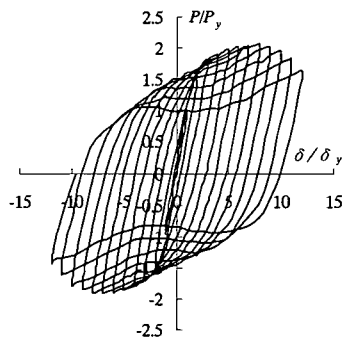
(h) No.4-3



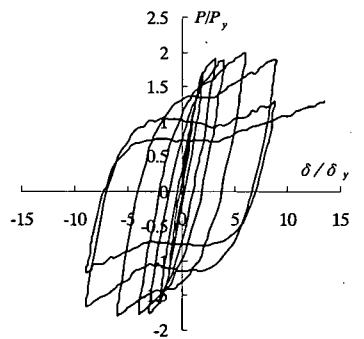
(i) No.3-3



(j) No.3-4



(k) No.4-2



(l) No.2-4

圖-5 荷重-變位履歷曲線

による圧縮力を負担することにより、構造系としての塑性率向上に寄与していることがわかる。

図-5(d)はケースb)に相当する供試体No.1-3の履歴曲線であり、鋼管の局部座屈が基部付近に出ているものの、その履歴曲線は図-5(c)に示す供試体No.2-3のそれとは若干異なっている。すなわち最大耐力を越えた後は、耐力が徐々に低下する傾向が見られる。これはコンクリート強度が低かったためと思われるが、図-5(d)に示すように、 $8\delta_y$ を越えて変位を上げていくと剛性の増加が観察された。正負漸増1回繰り返しから包絡線を求めると、図-5(d)の場合には $10\delta_y$ 付近でかなり耐力が低下することになるが、本実験のようにさらに変位を上げていくと耐力が増加する傾向にあり、包絡線は安全側の評価となっていることがわかる。

ケースb)に相当する供試体No.2-2においても、鋼管の局部座屈は基部付近に発生しているものの、その履歴曲線(図-5(e))より、最大耐力を越えた後に耐力が徐々に低下する傾向が見られる。図-3(b)に示すように、供試体No.2-2では鋼管の局部座屈発生位置とコンクリートのひび割れ発生位置が異なっており、これは繰り返し载荷を行った他の供試体では見られない現象であった。また、後述するように、供試体No.2-2の局部座屈は充填コンクリート上面で発生するものと予想していたが、実験結果と予想は異なっていた。この原因の一つとして、充填コンクリートと鋼管の密着度が不足していたものと考えられ、このために、供試体No.2-2の履歴曲線は図-5(d)に示す供試体No.1-3のそれと類似したものと思われる。

ケースc)に相当する供試体No.3-1,4-1の履歴曲線は、図-5(b)に示す履歴曲線と類似しており、最大耐力を越えてからの耐力低下は比較的顕著である。なお、供試体No.4-1の履歴曲線は図-5(g)に示してある。

なお、ケースd)に相当する供試体No.3-2の履歴曲線については3.(3).b)において説明し、ケースe)に相当する供試体No.4-2の履歴曲線については3.(3).c)において説明する。

## b) 载荷方法

本報告では、正負漸増1回繰り返し実験の他に、単調载荷実験(供試体No.3-2,4-1)と正負漸増3回繰り返し実験(供試体No.4-3)を行った。

供試体No.3-2,4-1と供試体No.2-3は基本的に同一形状であるが、供試体No.4-1のみが充填コンクリート上面にダイヤフラムを配置し、供試体No.2-3,3-2ではダイヤフラムを設置していない。なお、実験実施時期が異なったため、材料特性の値はそれぞれ若干異なっている。それぞれの履歴曲線を表した図-5(c), (f), (g)を比較すると、単調载荷実験(供試体No.3-2,4-1)では繰り返し実験(供試体No.2-3)に比べ最大耐力は大きくなり、

また最大耐力時の変位も大きくなるのがわかる。このような傾向はコンクリートを充填しない円形鋼製橋脚の実験でも観察されている<sup>9)</sup>。

次に、ダイヤフラムの影響を調べると、コンクリート上面にダイヤフラムを設置した供試体No.4-1と設置していない供試体No.3-2の比較より、同じ単調载荷でもダイヤフラムを設置した供試体No.4-1の最大耐力が大きくなっていることがわかる。なお、単調载荷実験を行った供試体No.3-2,4-1において、最大耐力を越えた後の耐力の低下が著しいことがわかる。これは、図-3(i), (l)からわかるように、単調载荷実験では、鋼管の局部座屈が充填コンクリートの上面付近に発生しているためと考えられる。

正負漸増3回繰り返し実験を行った供試体No.4-3は、供試体No.3-3と基本的には同一形状であり、両試験体においてダイヤフラムが充填コンクリート上面に設置されている。供試体No.4-3,3-3の履歴曲線を図-5(h), (i)に示すが、これらはいずれも供試体No.2-3の履歴曲線(図-5(c))と同様に、最大耐力を越えた後の耐力低下はそれ程顕著ではない。しかし、図-5(h)と図-5(i)とを比べると、3回繰り返しを行った供試体No.4-3において、 $7\delta_y$ を越えたあたりから、僅かに耐力が低下しており、これは繰り返し回数の影響と思われる。

## c) ダイヤフラム設置位置

ダイヤフラム設置位置が、履歴曲線へ与える影響を調べるために、供試体No.3-3,3-4,4-2を取り上げる。表-1に示すように、これら供試体は基本的に同一形状であるが、供試体No.3-3のダイヤフラムは充填コンクリート上面に設置され、供試体No.3-4はダイヤフラムが無く、供試体No.4-2のダイヤフラムは充填コンクリートの中程に設置されている。

図-5(i), (j), (k)に示される供試体No.3-3,3-4,4-2の履歴曲線より、構造的に優れているものを順位付けると、供試体No.3-3,4-2,3-4の順となる。すなわち、充填コンクリート上面にダイヤフラムを添付した供試体No.3-3では、コンクリートの拘束効果が現れ、耐力の低下は実験範囲内では見られなかった。一方、充填コンクリートの中程にダイヤフラムを配置した供試体No.4-2では、図-3(m)に示すように、ダイヤフラムの上面に鋼管の局部座屈が発生しているため、コンクリートの拘束効果は供試体No.3-3に比べ小さく、耐力の低下が見られたものと思われる。供試体No.4-2とNo.3-4は共にコンクリート充填部で鋼管の局部座屈が発生しているが、履歴曲線を比較すると供試体No.4-2よりもNo.3-4の耐力低下が大きいことが分かる。この原因の一つとして、コンクリートの応力状態が考えられ、これについては3.(3).d)において考察する。

本実験結果において、構造的に優れた履歴曲線を示



すものは、いずれも充填コンクリート上面にダイヤフラムが配置されており、さらに鋼管の局部座屈が基部に発生しているものであった。

#### d) コンクリートの応力状態

ダイヤフラムが添付されていなくても、ある程度コンクリートが充填されていれば、図-5(c)に示す供試体No.2-3のように耐力の低下が防げることが予想される。そこで、図-5(i)にダイヤフラムが無く、コンクリート充填率が48%である供試体No.2-4の履歴曲線を示す。図-5(c)と図-5(i)とを比較すると、図-5(i)では $8\delta_y$ を境にして耐力が低下していることが分かる。この耐力低下を説明するため、ここでは最大耐力時におけるコンクリート強度を調べる。鋼管の表面に貼付したひずみゲージの値よりコンクリートの応力を推定することもできるが、最大耐力時には鋼管の局部座屈により鋼管の面内ひずみだけを検出することは難しい。よって、ここでは以下のような簡便な方法を採用した。

まず、最大耐力時まで鋼材とコンクリートにおける応力とひずみの関係は線形であると仮定して、以下の式よりコンクリートの縁応力を求めた。

$$\sigma_k = \frac{E_c P_{max} H}{\frac{E_s I_s}{R_c - \ell} + \frac{E_c I_c (R_s - \ell)}{(R_c - \ell)^2}} \quad (3)$$

ここで、 $P'_{max}$ は実験での最大耐力、 $H$ は載荷点から着目点までの距離、 $R_s$ と $R_c$ は円管中心から鋼管外側とコンクリート外側までの距離(cm)、 $\ell$ は鋼管中心から中立軸までの距離、 $I_s$ と $I_c$ は、コンクリート充填鋼管の中立軸に関する鋼管部分の断面二次モーメントと、同じ中立軸に関する圧縮側コンクリート部分の断面二次モーメントである。 $E_c$ はコンクリートのヤング係数であり $2.94 \times 10^4$ (N/mm<sup>2</sup>)とした。 $E_s$ は鋼のヤング係数であり材料試験により算出された値である。

式(3)より求めたコンクリートの縁応力を、表-2に計算値 $\sigma_k$ として示した。なお、載荷点から着目点までの距離 $H$ は、供試体No.4-2ではコンクリートの破壊がダイヤフラム付近で生じているため、 $H=135$ cmとしている。それ以外の供試体では $H=175$ cmである。また、コンクリート標準試験体より得られた圧縮強度 $\sigma_c$ と計算値 $\sigma_k$ の誤差として $\alpha=100 \times (\sigma_c - \sigma_k) / \sigma_c$ を求め、その値も表-2に示した。

表-2において、 $\alpha$ が負の場合は実験供試体における充填コンクリートの一部に圧縮破壊が生じている可能性が考えられる。一方、 $\alpha$ が正の場合にはコンクリートの圧縮破壊は進んでいないものと予想される。

先に説明した供試体No.2-3とNo.2-4における $\alpha$ の値は、それぞれ14と1となっている。これより、供試体No.2-3におけるコンクリートは圧壊しておらず、一方、

供試体No.2-4のコンクリートは圧壊状態に近いものと予想される。図-4(a) (供試体No.2-4)と図-4(d) (供試体No.2-3)を比較すると、内部のコンクリート状態は供試体No.2-4よりも供試体No.2-3の方が良好である。このような内部コンクリートの影響により、図-5(i)に示す供試体No.2-4の履歴曲線は、 $8\delta_y$ 付近において急激な耐力低下を示したものと思われる。

3. (3). c)で述べた供試体No.4-2とNo.3-4について考えると、 $\alpha$ の値はそれぞれ17と-5となっており、 $\alpha$ の値から判断すると、供試体No.3-4のコンクリートの一部に圧縮破壊が生じていると予想される。すなわち、供試体No.4-2よりもNo.3-4の耐力低下が大きい原因の一つとして、コンクリートの応力状態の差異が影響しているものと考えられる。

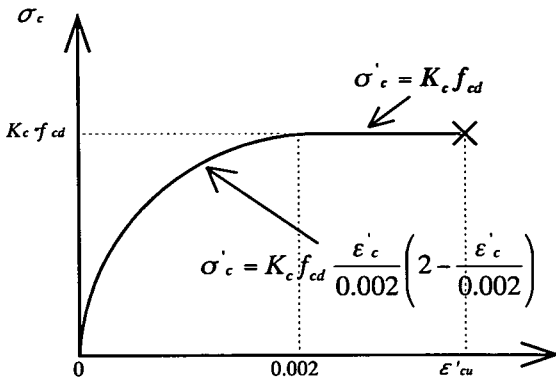
$\alpha$ が19と大きな値を示した供試体No.2-1は、鋼管の局部座屈がコンクリート上面に発生しており、図-5(b)に示す履歴曲線からも、最大耐力後の耐力低下が大きいことがわかる。これは、充填コンクリートの効果が少ないことを示しており、コンクリートは健全なままであることを示している。図-5(b)と同様の傾向を示す図-5(e)の供試体No.2-2における $\alpha$ の値は13であり、これよりコンクリートへの負担が少ない場合には、最大耐力後の耐力低下が大きくなることがわかる。

一方、 $\alpha$ が大きな負の値を示す供試体1シリーズでは、実験後の観察よりコンクリート全体が圧壊していた。 $\alpha$ が-11である供試体No.3-3の履歴曲線(図-5(i))では、耐力の低下は見られず充填コンクリートは健全のままのように思われるが、実験後の観察をスケッチした図-3(j)より、コンクリートの劣化は顕著であった。供試体No.3-3の履歴曲線において耐力の低下が見られない理由は、充填コンクリート上面にダイヤフラムを設置したことにより、コンクリートの拘束効果が働いたためと考えられる。

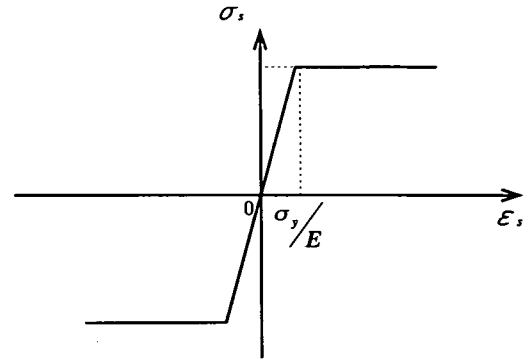
#### 4. 最大耐力推定法

鋼製橋脚の最大耐力を推定する方法はこれまでも数多く提案されている。村田ら<sup>19)</sup>はコンクリートが充填された円管合成柱の曲げ降伏耐力を求める方法を提案している。ここでは、部分的にコンクリートが充填された鋼管の最大耐力を、著者ら<sup>20)</sup>がこれまで提案したパラメーターを若干修正することにより求めることとする。

文献24)において、著者らは中空矩形断面の最大耐力を推定するパラメーターとして無次元最大モーメント $M^*$ と無次元塑性断面係数 $Z^*$ を提案した。ここでは、文献24)における無次元塑性断面係数に含まれる軸力比を一部修正して、以下のパラメーターを用いる。



(a) コンクリート



(b) 鋼管

図-6 応力-ひずみ関係

$$M^* = \frac{P_{max} L_0}{Et_0^3 \sqrt{1-n_j}} \quad (4)$$

$$Z^* = \frac{Z \sigma_y \sqrt{1-n_j}}{Et_0^3} \quad (5)$$

ここで $P_{max}$ は実験における最大耐力、 $L_0$ は荷重点から着目点までの距離、 $n_j$ は軸力比であり、 $E$ 、 $\sigma_y$ 、 $t_0$ 、 $Z$ はそれぞれ充填コンクリートを無視した鋼管のみのヤング係数、降伏応力、板厚、塑性断面係数である。

式(4)、(5)は充填コンクリートを無視したパラメータとなっており、鋼管の局部座屈が充填コンクリート上面付近に生じた場合にも適応できるものである。一方、コンクリートが充填されている個所で鋼管の局部座屈が発生した時には、鋼管の板厚をコンクリートの影響を考慮した等価板厚に置き換え、式(4)、(5)を用いて最大耐力を求めることにする。以下にそれぞれの場合に分けて式(4)、(5)の適応方法について説明する。

#### (1) コンクリート上面付近で座屈が発生する場合

図-5に示した履歴曲線より、充填コンクリート上面付近で鋼管の局部座屈が発生した場合、その履歴曲線は中空鋼管の履歴曲線と類似していることがわかった。また、この場合、充填コンクリートの損傷もNo.1-1を除いて全く見られなかった。これより、鋼管の局部座屈がコンクリート上面付近で発生した場合には、コンクリート上面を基部とみなして考えることとする。その際に、 $L_0$ は荷重点から鋼管の座屈個所までの距離として以下の式より求める。

$$L_0 = L - \ell_c - e \quad (6)$$

ここで、 $L$ は基部から荷重点までの距離、 $\ell_c$ は基部から充填されたコンクリート上面までの距離、 $e$ は基部から座屈発生位置までの距離であり、本実験供試体においては10cmである。式(4)、(5)におけるそれ以外の値は、充填コンクリート上部の鋼管部分によって計算できる。式(6)によれば、コンクリート充填率が100%の時、 $L_0$ は負の値となる。しかし、本実験からも明らかのように、コンクリート充填率が上昇すると鋼管の局部座屈は基部周辺に出る。よって、コンクリート充填率が上昇した時には、式(6)を用いることは無く、 $L_0$ が負の値となる不都合は生じない。なお、供試体No.1-1、2-1、3-1は、本方法により式(4)、(5)のパラメータを計算し、それ以外の供試体は以下に示す方法により計算した。

#### (2) 充填コンクリート部で座屈が発生する場合

鋼管の局部座屈が、コンクリート充填部分において発生する場合には、そのコンクリートの効果を考慮する必要がある。ここでは、まず $L_0$ を求めるに当たり、佐藤・金本<sup>13)</sup>により提案されている、塑性ヒンジ長さの概念を用いることとする。これは、円形合成柱の最大曲げ耐力を求めている村田ら<sup>14)</sup>の研究においても用いられている。佐藤・金本<sup>13)</sup>の研究では、全体的にコンクリートが充填された鋼管を対象としているのに対し、ここではコンクリートが部分的に充填されている鋼管を扱っており、その影響を考慮したパラメータが必要となる。ここでは文献13)を基に、以下の式により $L_0$ を求める。

$$L_0 = L - 2R \times (1.5 \times n_j^2 + 0.5) \times \left( \frac{\gamma}{100} \right)^2 \quad (7)$$

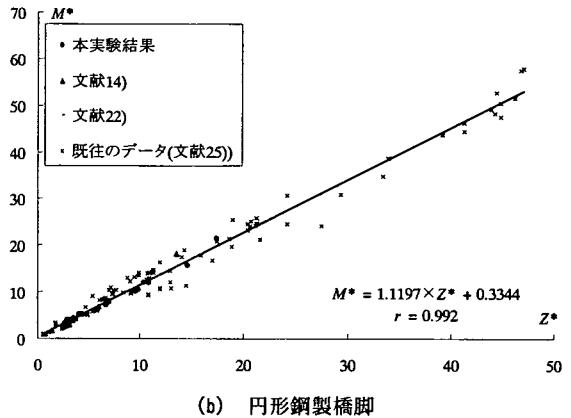
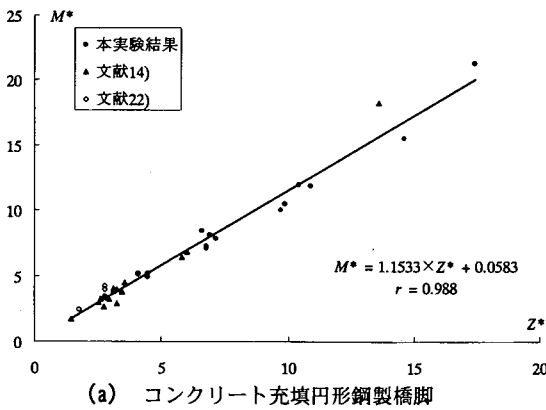


図-7 最大耐力推定方法

ここで、文献13)と異なるのは最後のコンクリート充填率に関する項を付加した点であり、乗数の値については、後述の最大耐力推定における相関係数がより高くなるように決定した。

次に等価板厚 $t_0$ の求め方について述べる。鋼管がコンクリート充填部分において局部座屈するときには、図-3に示したようにコンクリートもほぼ同一断面で損傷が生じている。そこで、鋼管の局部座屈発生断面に注目して、コンクリート充填鋼管の終局曲げモーメントを求める。次に同じ直径を有する中空鋼管の終局曲げモーメントを計算し、両者の終局曲げモーメントが一致する際の中空断面の板厚を $t_0$ (ここでは、等価板厚と呼ぶ)とする。以下に、それぞれの終局曲げモーメントの計算方法について説明する。

まず、コンクリート充填鋼管の終局曲げモーメントを求めるに当たり、以下の仮定を用いる。

- a) コンクリート充填円形鋼管断面をファイバー要素に分割する。
- b) 曲げを受ける時、コンクリートと鋼管は一体となり、平面保持の法則に従うものとし、そのひずみ分布は直線である。
- c) コンクリートの引張応力は無視する。
- d) 鋼管およびコンクリートの応力-ひずみ曲線は図-6に示すように仮定する。なお、コンクリートにおける諸条件はACI条件を用いる。
- e) 軸力は鋼管のみに作用し、コンクリートには作用しない。

ここでACI条件<sup>12)</sup>とは、鋼管部分を充填コンクリートの周りに同等補強の鉄筋に置き換え等間隔に配置し、通常の鉄筋コンクリート部材と同様の方法で終局モーメントを求める。その際に、コンクリートの終局ひずみ $\epsilon'_{cu}$ を0.003とし、内部のコンクリートが鋼管に拘束されるため、低減係数 $K_c$ を1.00としている。仮定d)

において、鋼管の局部座屈に伴う耐力劣化は考慮していない。これは、文献13)において、鋼管の局部座屈による材料強度の低下は見られないという報告があるためである。なお、仮定e)はコンクリートが部分的にしか充填されておらず、軸力は鋼管を通して作用するため妥当なものと思われる。

次に中空鋼管の終局曲げモーメントを求めるに当たり、以下の仮定を用いる。

- f) 板厚中心における半径は、コンクリート充填鋼管の半径と等しい。
- g) 平面保持の法則に従うものとし、ひずみ分布は直線である。
- h) 応力分布は、図-6(b)の鋼管の応力分布とする。

以上の方法により、それぞれの終局曲げモーメントが一致するように等価板厚 $t_0$ を求め、中空鋼管の断面を決定する。次に、この断面を用いて式(4)、(5)のパラメータを計算する。

なお、供試体No.3-2, 4-1では、鋼管の局部座屈がコンクリート上面付近に出ているものの、コンクリートのひび割れが基部周辺に発生しているため、最大耐力を推定する際には4.(2)の手法を用いた。

### (3) 最大耐力の推定

式(4)、(5)により定義された2つのパラメータを用いて、既往のコンクリート充填鋼管の実験結果を整理したものを図-7(a)に示す。同図には本実験結果だけでなく、文献14)、22)の実験結果も併せてプロットした。図-7(a)からわかるように、既往の実験結果はほぼ同一直線上にあり、本パラメータの有効性が認められる。なお、図中には相関式と相関係数 $r$ を示したが、 $r=0.988$ と高い精度で実験結果が整理できていることがわかる。本報告では、コンクリート強度を変化させ、1シリーズでは低強度、2、3シリーズでは通常

用いられている強度、4シリーズでは若干高強度のコンクリートを用いている。充填コンクリートの影響を考慮した等価板厚を用いて最大耐力を推定したところ、コンクリートの強度に関係無く良好な結果が得られた。

本パラメータはコンクリートが充填されている場合にも、また充填されていない場合にも用いることができる。そこで図-7(b)において、コンクリート充填鋼管の他に、コンクリート無充填の円形鋼製橋脚に関する既往の実験結果<sup>25)</sup>も含めて整理した結果を示す。同図に相関式と相関係数 $r$ を示したが、 $r=0.992$ と求まり図-7(a)のそれよりも高い値を示している。以上のように、本パラメータを用いることにより、コンクリート充填あるいは無充填の円形鋼製橋脚の最大耐力が精度よく推定できることが確認された。

## 5. 最適充填率

前述のとおり、コンクリート充填率を上げていくと鋼管の局部座屈は基部周辺に発生し、座屈後の耐力の低下も少なく塑性率の向上を計ることができる。しかしながら、コンクリート充填率を上げることは、鋼製橋脚の自重を増加させることに繋がりあまり望ましいことではない。葛西・宇佐美・葛西<sup>18)</sup>は矩形断面を対象として、コンクリート充填部分と中空断面部分とが同時に破壊を起こす際のコンクリート充填率を最適充填率としている。本報告でも同様に、鋼管の局部座屈発生位置に注目し、コンクリート充填鋼管基部で局部座屈が発生する横力と、コンクリート上面で局部座屈が発生する横力とが等しくなる時、このコンクリート充填率を最適充填率としている。以下にそれぞれの場合の横力を求める方法について説明する。

### (1) 横力算出方法

ここでは、先に提案した最大耐力推定法を用いて、鋼管の局部座屈が発生する横力を計算する。なお、計算式としては、図-7(b)に示す相関式を用いることとする。

#### a) コンクリート上面で局部座屈が発生する場合

式(4)を変形して、以下の式より横力 $P_s$ を計算する。

$$P_s = \frac{M^*}{L_0} \times Et_0^3 \sqrt{1-n_j} \quad (8)$$

ここで、 $L_0$ は式(6)で与えられ、 $M^*$ は以下の式で表される。

$$M^* = 1.1197 \times \frac{Z\sigma_y \sqrt{1-n_j}}{Et_0^3} + 0.3344 \quad (9)$$

#### b) 基部で局部座屈が発生する場合

式(4)、(5)、(7)により、以下の式より横力 $P_c$ を計算する。

$$P_c = \frac{M^*}{L_0} \times Et_0^3 \sqrt{1-n_j} \quad (10)$$

ここで、 $L_0$ は式(7)で与えられ、 $M^*$ は以下の式で表される。

$$M^* = 1.1197 \times \frac{Z\sigma_y \sqrt{1-n_j}}{Et_0^3} + 0.3344 \quad (11)$$

### (2) 最適充填率

上記の方法により求めた最適充填率を表-2の右側に示した。供試体3シリーズと4シリーズでは、鋼管の径を変化させているため、それぞれの径により最適充填率は異なっている。

最適充填率が求まると、実際に充填したコンクリート充填率がそれ以下の場合には、鋼管の局部座屈発生位置はコンクリート上面と予想され、そうでない場合には、鋼管の局部座屈発生位置は基部と予想される。表-2では、本実験で観察された座屈発生位置が、上、中、下として示されている。ここで、上とはコンクリート上面で、下とは基部で、中とは鋼管の中程でそれぞれ鋼管の局部座屈が生じていることを示している。同時に、本報告で予想された座屈発生位置も表-2に示しており、予想が当たっている場合には○印を、予想が外れている場合には×印を記した。なお、本報告の手法では鋼管の中程で鋼管の局部座屈が発生することは予想できない。表-2より、本実験の供試体14体において、予想が外れたのは4体(No.2-2, 3-2, 4-1, 4-2)であった。以下にそれら供試体について考察する。

供試体No.2-2では、図-3(e)に示すように鋼管の局部座屈発生位置とコンクリートのひび割れ発生位置とが異なっていた。供試体No.2-2と同一形状で、ダイヤフラムをコンクリート上面に設置した供試体No.3-1では、鋼管の局部座屈はコンクリート上面付近で発生しており、これは本報告の予想と一致している。このことから、供試体No.2-2においては、充填コンクリートと鋼管との密着度が弱かったことが予想される。

供試体No.3-2は単調載荷を行ったものであり、図-3(i)に示すように、鋼管の局部座屈発生個所とコンクリートのひび割れ個所は異なっている。供試体No.3-2と同一形状で、正負交番漸増1回繰り返し実験を行った供試体No.2-3では、鋼管の局部座屈は基部周辺で発生しており、これは本報告の予想と一致している。単調載荷実験を行った別の供試体No.4-1においても、図-3(l)に示すように、鋼管の局部座屈発生個所とコンク

リートのひび割れ箇所は異なっており、本報告の予想は外れている。本報告では、コンクリートの終局断面と鋼管の局部座屈発生位置は一致すると仮定し、コンクリートの最適充填率を求めている。しかしながら、本実験における単調載荷の実験では、上記の仮定が成立していないことがわかる。よって今後の課題として、載荷方法の差異が鋼管の局部座屈発生位置に与える影響を調べることは重要と考える。

供試体No.4-2の局部座屈は、基部周辺と予想していたが、図-3(m)に示したようにダイヤフラム直上で発生した。供試体No.4-2と同一形状で、ダイヤフラムがコンクリート上面に設置された供試体No.3-3、およびダイヤフラムが設置されていない供試体No.3-4では、鋼管の局部座屈は基部周辺で発生しており、これは本報告の予想と一致している。供試体No.4-2におけるダイヤフラムは、最適充填率よりも低い位置に設置されており、ダイヤフラム設置位置が基部の役目を果たしたものと考えられる。このように、鋼管の局部座屈はダイヤフラムの設置位置にも影響を受けることがわかる。

## 6. おわりに

コンクリートを部分的に充填した単柱形式の円形鋼製橋脚を対象とし、コンクリート充填率、ダイヤフラム設置位置、横力の載荷方法などを変化させて耐荷力実験を行った。一般に、鋼管の局部座屈発生位置とコンクリート損傷位置とは一致しているものの、それらの位置が必ずしも一致しない場合もある。特に、単調載荷実験と繰り返し載荷実験とでは、コンクリートの損傷状態が異なっており、コンクリート充填鋼管の弾塑性挙動に与える載荷方法の影響は今後の大きな課題であると考えられる。さらに、重要課題の一つである塑性率の推定方法について、本報告では触れていない。著者らは、文献(6)、(26)において、コンクリート無充填の鋼製橋脚の塑性率推定方法について議論している。しかし、コンクリート充填鋼製橋脚の塑性率については、今後さらに研究を進め、改めて報告する予定である。最後に、本報告で得られた結論を以下に要約する。

- 1) コンクリート充填部において鋼管の局部座屈が発生する場合、コンクリートは局部座屈を防止しないが、曲げによる圧縮力を負担することにより、鋼製橋脚の塑性率向上に寄与する。
- 2) 矩形断面鋼製橋脚と同様に、鋼管の局部座屈がコンクリート充填部において発生する時、コンクリート上面にダイヤフラムを設置することにより、塑性率は向上する。
- 3) 最大耐力推定法を提案し、その妥当性を本実験結果

並びに既往の実験結果を用いて確認した。本手法はコンクリート充填および無充填の円形鋼製橋脚に適用できる。

- 4) 上記の最大耐力推定法を用いて、コンクリートの最適充填率を求める方法を提案し、繰り返し載荷を受ける供試体については適用できることが示された。しかし、単調載荷を受ける場合には、鋼管の局部座屈とコンクリートの損傷位置が異なるため、本手法を適用することはできない。

## 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）、平成8年12月。
- 2) 川島一彦、グレゴリー・A・マックレイ、運上茂樹、飯田寛之：鋼製橋脚のじん性に及ぼす垂直補剛材の板厚の影響、土木技術資料、34-6, pp.60-67, 1992。
- 3) 宇佐美勉、水谷慎吾、青木徹彦、伊藤義人、安波博道：補剛箱型断面鋼管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.38A, pp.105-117, 1992。
- 4) 土木学会鋼構造委員会・鋼構造新技術小委員会・耐震設計WG：鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のための新技術、1996。
- 5) 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。
- 6) 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, pp125-5, 1998。
- 7) 中井博、吉川紀：コンクリートを充てんした鋼製橋脚の耐荷性に関する実験的研究、土木学会論文、pp.195-204, No.344/I-1, 1984。
- 8) 葛漢彬、宇佐美勉、寺田昌弘：コンクリートを充填した鋼製箱形短柱の圧縮耐荷力に関する実験的および理論的研究、構造工学論文集、Vol.38A, pp.119-132, 1992。
- 9) 渡辺浩、崎元達郎、山尾敏孝、持田拓児、寺田昌弘：内部にコンクリートを充填した角型鋼管柱の局部座屈に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol.41A, pp.321-328, 1995。
- 10) 鄭真安、津田恵吾、松井千秋：高強度コンクリートを用いたコンクリート充填角形鋼管柱の耐力、鋼構造論文集、第6巻第21号、pp.25-32, 1999。
- 11) Uy, B.: Strength of concrete filled steel box columns incorporating local buckling, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.126, No.3, pp.341-352, 2000。
- 12) Zhang, W. and Shahrooz, B.M.: Strength of short and long concrete-filled tubular columns, ACI Structural Journal, Vol.96, No.2, pp.230-238, 1999。
- 13) 佐藤孝典、金本清臣：充填鋼管コンクリート構造における分担力抽出のための変形経路再現実験、日本建築学会構造系論文集、第468号、pp155-164, 1995。

- 14) 村田清彦, 山田正人, 池田学, 瀧口将志, 渡邊忠朋, 木下雅敬: コンクリート充填円形鋼管柱の変形性能の再評価, 土木学会論文集, No. 640/I-50, pp.149-163, 2000.
- 15) 宇佐美勉, 葛漢彬, 水谷慎吾: コンクリートを部分的に充填した無補剛箱型鋼柱の繰り返し弾塑性挙動, 構造工学論文集, Vol. 39A, pp. 249-262, 1993.
- 16) 葛漢彬, 宇佐美勉, 戸谷和彦: 繰り返し荷重を受けるコンクリート充填鋼柱の強度と変形能に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 40A, pp. 163-176, 1994.
- 17) 鈴木俊光, 宇佐美勉, 伊藤義人, 豊島啓: 細長比パラメーターの大きなコンクリート部分充填鋼柱の地震時挙動, 土木学会論文集, No. 537/I-35, pp. 77-88, 1996.
- 18) 葛西昭, 宇佐美勉, 葛漢彬: コンクリート部分充填鋼製橋脚の耐震性能, 橋梁と基礎, pp. 23-29, 1997.
- 19) 天野麻衣, 葛西昭, 宇佐美勉, 葛漢彬, 岡本慎吾, 前野裕文: コンクリート部分充填鋼製橋脚の弾塑性挙動に関する実験的及び解析的研究, 構造工学論文集, Vol. 44A, pp. 179-188, 1998.
- 20) 北田俊行, 中井博, 中西克佳: 鋼製箱形断面を有する橋脚柱の耐震性向上法に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 591/I-43, pp. 219-232, 1998.
- 21) 岸徳光, 佐藤昌志, 小枝日出夫, 小室雅人, 小野信市: 正弦波加振を受けるコンクリート充填鋼管柱模型の弾塑性応答性状, 第2回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計の応用に関する論文集, pp. 185-192, 1998. 11.
- 22) 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. 3.
- 23) 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の応用に関する論文集, pp. 83-88, 2000. 1.
- 24) 鈴木賢治, 石澤俊希, 井浦雅司: 矩形断面鋼製橋脚の最大耐力推定法, 土木学会論文集, No. 626/I-48, pp. 251-255, 1999.
- 25) 石澤俊希, 井浦雅司: 円形鋼製橋脚の最高荷重および劣化特性に関する研究, 第2回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計の応用に関する論文集, pp. 115-120, 1998.
- 26) 鈴木賢治, 井浦雅司, 熊谷洋司: 矩形断面を有する鋼製橋脚の最高荷重推定法, 第2回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計の応用に関する論文集, pp. 107-113, 1998.

(2001. 4. 27 受付)

## ELASTO-PLASTIC BEHAVIOUR OF CONCRETE-FILLED STEEL TUBULAR COLUMNS

Masashi IURA, Akihiro ORINO and Toshiki ISHIZAWA

The results of tests conducted on 14 concrete-filled steel tubular columns are reported. The primary test parameters were the radius and thickness of test specimens, the concrete strength, the concrete height, the position of diaphragms and the loading conditions. The local buckling were observed at the top of concretes or at the bottom of test specimens. Its position depend on the concrete height. New parameters are proposed to predict the maximum lateral load of concrete-filled steel tubular columns. The validity of the present parameters is confirmed through the present and existing experimental results. With the use of the present parameters, the optimum height of concrete filled in the columns is also proposed.