

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

Jorge MÜLLER¹, 三木千寿², 佐々木哲也³

¹学会員 工修 東京工業大学留学生 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

²正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

³学会員 工修 東京工業大学学生 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

阪神淡路大震災で鋼製橋脚に多くの被害が発生した。その中でも鋼管柱の橋脚には、いわゆる提灯座屈が随所に見られる。一部には、鋼管の断面変化部近傍で、局部座屈が発生し、さらにその部分から割れが発生しているものも見受けられた。本実験では断面変化を有する鋼管柱に対して、種々の繰り返し載荷パターンを用いてを行い、提灯座屈の再現を試みた。さらに載荷パターンの違いによる座屈形状への影響、荷重位置履歴曲線への影響を検討した。その結果、実際の鋼管橋脚の断面変化部で見られた提灯座屈と同様の局部座屈の発生が認められたと同時に、鋼管の座屈形状・履歴曲線ともに繰り返し載荷パターンによって大きく影響を受けることが確認された。また応答解析や有限要素法解析や疑似動的載荷実験も行いました。

Key Words : buckling, steel pipe pier, hybrid experiment, response analysis.

1. はじめに

阪神淡路大震災では、土木構造物に数多くの被害が生じた。その中で鋼製橋脚にも数多くの被害があり、中には倒壊に及んだものもあった¹⁾²⁾。こうした被害の中で円形断面鋼製橋脚の断面変化部や橋脚基部において局部座屈が随所に見られ、全周にわたって円周方向にはらみ出す提灯座屈と呼ばれている局部座屈が生じたものもあった。さらには局部座屈の部分から亀裂が発生し、それが周方向に進展しほぼ全周にわたって破断しているものも見られた。

これまで、鋼管柱の耐震強度について繰り返し水平力を受けた時の耐荷力に関する実験的³⁾解析的研究⁴⁾も試みられているが、断面変化部がある場合の強度についてはさほど明らかにされていない。本実験では、特に断面変化のある鋼管柱を対象として、一定鉛直荷重のもと、種々の繰り返し載荷パターンを用いて水平載荷を行い、耐荷力特性および座屈モードの違いや、水平荷重・水平変位の履歴曲線に対する影響を検討した。

2. 実験

2.1. 試験体

実験に用いた試験体を Fig. 1 に、また、各試験体の諸元を Table 1 に示す。試験体は試験体の高さ、および外径を一定として、径厚比、鋼管の製作法をパラメータとし、3種類の鋼管を製作した。断面変化部より下部を Sec.1、上部を Sec.2 と定義する。

Type 1 は、Sec.1 が板厚 10.3mm、Sec.2 が板厚 6.0mm の異なる電気抵抗溶接鋼管(STK400-E-G)を溶接して製作してい

る。径厚比は Sec.1 が 15.5、Sec.2 が 26.5 である。このタイプを基本タイプとして7体製作し、荷重履歴の影響を調べる目的で繰り返し回数を変化させた変動変位振幅載荷実験、および疑似動的実験を行った。

Type 2 は、Sec.1 が板厚 10.3mm、Sec.2 が板厚 6.0mm であり、鋼板(SM400)を冷間曲げ加工によって製作した。径厚比は、Sec.1 が 15.5mm、Sec.2 が 26.5 である。

Type 3 は、Sec.1 が板厚 4.0mm、Sec.2 が板厚 3.0mm であり、Type 2 と同様に鋼版を板曲げすることにより製作されている。Type 2 との比較により径厚比の影響について検討する。

2.2. 実験装置

載荷の状況を Fig. 2 に示す。水平載荷は反力壁に取り付けられた油圧ジャッキにより行い、鉛直荷重は載荷フレームに取り付けられた油圧ジャッキにより加えている。鉛直ジャッキと載荷フレームの間には、水平にスライドする装置が取り付けられており、水平変位が与えられたときにも一定の鉛直荷重を載荷出来るようになっている。実験は、荷重制御により鉛直荷重を一定に保った状態で、水平ジャッキを変位制御で制御している。

本研究では、試験体頂部の水平変位、水平荷重、鉛直方向変位及び座屈発生付近の歪みを測定した。試験体頂部で測定される変位には試験体基部の回転が含まれているため、リブ真上の変位及びベースプレートの変位を用いて試験体下部の剛体回転を除去した。水平荷重は、水平ジャッキに取り付けられているロードセルの値により測定した。歪みは、1軸または3軸塑性歪みゲージにより、座屈が発生すると予想される断面変化部近傍を中心に測定した。

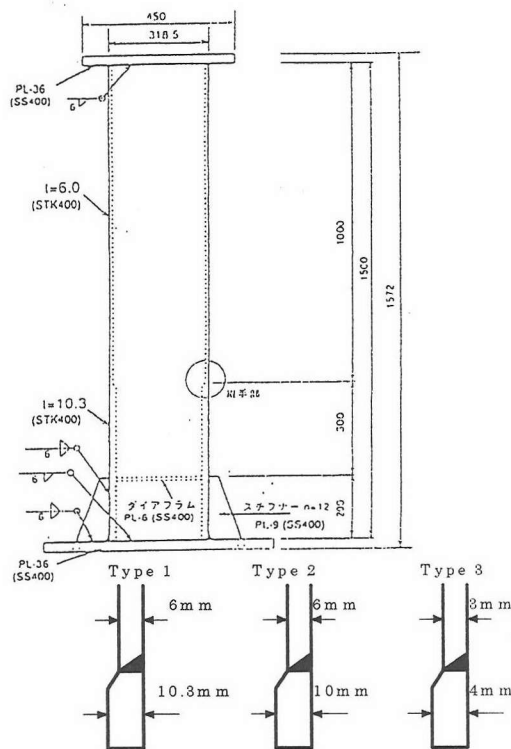


Figure 1 鋼管柱試験体

	TYPE1		TYPE2		TYPE3	
	Sec 1	Sec 2	Sec 1	Sec 2	Sec 1	Sec 2
Diameter (mm)	318.5		318.5		318.5	
Height (mm)	1300		1300		1300	
Thickness (mm)	10.3	6.0	10.0	6.0	4.0	3.0
Cross area (cm ²)	99.73	58.90	94.57	58.90	39.50	29.70
Inertia (cm ⁴)	11854	7193	11542	7193	2490	1876
Diamet./Thickn.	15.5	26.5	15.9	26.5	39.8	53.1
Material	STK400		SM400		SM400	

Table 1 試験体の諸元

2.3. 荷重方法

2.3.1. 一定変位繰り返し実験

橋梁上部構造の死荷重を想定した一定鉛直荷重のもとで、降伏開始水平変位 δy を基準として実施した。Fig. 4 に示すように $2\delta y, 3\delta y, 4\delta y, \dots$ に対応する一定変位振幅を与え、各変位で n サイクルごとの繰り返し荷重を行う変動変位振幅荷重を行った。各変位での繰り返し回数 n は、一般的には 3 回とする方法が採用されていることから、本研究においても繰り返し回数 3 回 ($n=3$) の繰り返し荷重を基本とした。

荷重履歴による座屈形状、水平耐力に及ぼす影響を検討するため、Type1 の試験体に対して繰り返し回数 1 回 ($n=1$), 10 回 ($n=10$) の変動変位振幅荷重、及び単調荷重 ($n=0$ とする) を行った。また、Type1 の試験体に対し各サイクルの振幅の増加を $1/3 \delta y$ とし、繰り返し回数 $n=3$ とした。

いずれの実験においても鉛直荷重は Sec.2 での全断面降伏軸荷重 P_y の 20% とした。すなわち Type 1, Type 2

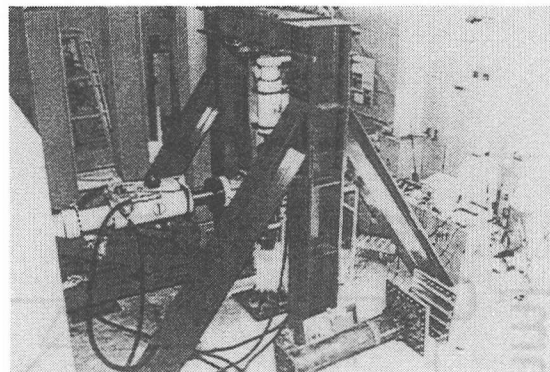


Figure 2 荷重装置

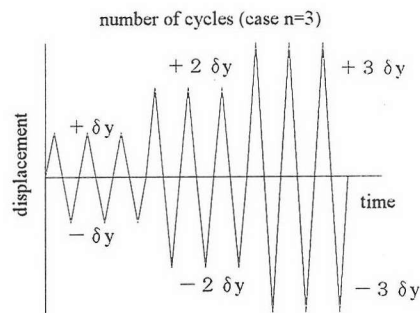


Figure 3 荷重パターン

の試験体に対しては、すべて 28.3tonf、Type 3 においては 14.3tonf である。また鉛直荷重の座屈形状、水平耐力への影響を検討するため、Type 3 の試験体の一本については鉛直荷重を Sec.2 での全断面降伏軸荷重 P_y の 40% としている。

2.3.2. 疑似動的荷重実験

本実験においては、才塚ら⁵⁾の研究による相似モデル解析型手法を採用する。今回用いた Type1 試験体は実橋脚をモデルとしたものではないが相似比 $S=5$ と仮定して行った。減衰定数は 0.05 とした。鉛直荷重は、繰り返し荷重実験と同様に全断面降伏荷重の 20% とした。モデル試験体の上部構造の質量は 5660 Kg とし、初期剛性 $K_0=1.911d7 \text{ N/m}$ 、固有周期は 0.504 sec で計算した。タイムステップは、固有周期の $1/10$ を満たす 0.002 sec で行った。応答計算は線形加速度法により行った。本実験では、橋脚を 1 自由度のバネ質点系として応答計算を行った。

入力地震波は、阪神淡路大震災において神戸海洋気象台で観測された南北成分(最大 818 gal)の特徴的な部分の 12 秒間を採取したものをを用いた。

3. 繰り返し実験の結果

3.1. 座屈形状

Type 1 の N°1,3,4,5,7 の試験体に対する変位振幅 δy は実験により決めた。

Type1 の試験体で変位振幅の繰り返し回数 $n=3$ とした N°7 試験体 ($\delta y=6.6$ mm)では、 $-2 \delta y$ の 2 サイクルで、断面変化部の溶接線から 7.5cm-10.0cm 上付近の片側にわずかに外側にはらみ出す座屈の発生が確認できた。さらに次の +側への载荷により $+2 \delta y$ の 3 サイクルで反対側にも同様の位置にわずかに座屈の発生が確認された。その後、繰り返し载荷の進行にともない、 $+3 \delta y$ の 1 サイクル目において、見た目にははっきりと分かるほど、座屈によるふくらみが進んだ。この時の座屈の下端は、断面変化部の溶接部から上に 7.5cm, 上端は、12.5cm ほどであった。

さらに繰り返し载荷を進めてゆくと、座屈変位計は、周方向に進行し、 $+3 \delta y$ の 3 サイクル目付近において全周につながり、いわゆる提灯座屈と呼ばれている、局部座屈の形状になった(Fig.4 参照)。さらに繰り返し载荷を続けると、面外方向への膨らみが進み、その後、座屈部分より上端が、座屈凸部に食い込んで行き、側面においては、反対に座屈の上端が食い込んで行く形状になった。なお、同様の試験体タイプ、载荷パターンとした N°5 もほぼ同じような座屈形状の進展であった。

一定変位振幅の繰り返し回数を $n=10$ とした N°4 場合は、 $-2 \delta y$ の 7 サイクル目において、N°7 と同様な位置にわずかな膨らみが確認された。その後の $2 \delta y$ の振幅においてもさほど座屈は進展しないが、 $+3 \delta y$ に進むと座屈ははっきりと確認できるようになり、さらに同じ変位振幅で繰り返すことより局部座屈が進展していった。

繰り返し回数 $n=1$ の N°3 においては $+3 \delta y$ において同様な位置に座屈の発生が確認でき、その後の繰り返しにより、局部座屈が進んでゆく。また、変位振幅を $1/3$ にし、繰り返し回数 $n=3$ で行った、N°1 においても同様に $3 \delta y$ に達すると、座屈の発生が確認され、その後繰り返し载荷より、同様な座屈形状となった。いずれの試験体においても、亀裂は発生しなかった。

単調载荷とした、Type 1 の N°2 試験体では、変位が $3 \delta y$ 付近に達すると、断面変化部の溶接付近を下端とした、外側にはらみ出す局部座屈が見られ、繰り返し载荷とは異なる位置に発生した。この挙動は繰り返し変位を加えた他の試験体と全く異なる。

Table 2 試験体タイプ・载荷条件・実験結果

Number	Type	Loading	Ver. Load (ton)	Buckling detetion	Position from welded joint (cm)	Buckling at full circumf.
No 1	1	repeating ($1/3 \delta y$)	28.3	3 rd cycle, +3 y	7.5 to 10	3 rd cycle, -3 y
No 2	1	monotony ($n=0$)	28.3	+3 y	0	10y
No 3	1	repeating ($n=1$)	28.3	3 rd cycle, +3 y	7.5 to 10	3 rd cycle, -3 y
No 4	1	repeating ($n=10$)	28.3	7 th cycle, -2 y	7.5 to 10	1 st cycle, +3 y
No 5	1	repeating ($n=3$)	28.3	2 nd cycle, -2 y	7.5 to 10	3 rd cycle, +3 y
No 6	1	hybrid	28.3	0.6 seconds	5 to 12.5	did not
No 7	1	repeating ($n=3$)	28.3	2 nd cycle, -2 y	7.5 to 10	3 rd cycle, +3 y
No 8	2	repeating ($n=3$)	28.3	1 st cycle, -2 y	7.5	2 nd cycle, +3 y
No 9	2	hybrid	28.3	failed	failed	failed
No 10	3	repeating ($n=3$)	14.3	1 st cycle, +2 y	2.5 to 7.5	1 st cycle, -2 y
No 11	3	repeating ($n=3$)	28.6	1 st cycle, +2 y	2.5 to 7.5	3 rd cycle, +2 y
No 12	3	hybrid	14.3	failed	failed	failed

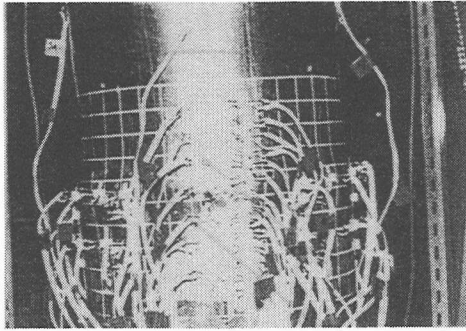
このように、同じ Type 1 の試験体において、一定変位振幅の繰り返し载荷においては、座屈の発生位置、及び座屈形状は、繰り返し回数によらずほぼ同様であったが、繰り返し载荷と、単調载荷とでは、座屈発生位置が異なることがあきらかとなった。これは、断面変化部の溶接により生じる残留応力が、繰り返し载荷より、再分配されることによる影響と考えられる。また、局部座屈が発生する変位は単調载荷及び繰り返し回数 $n=1$ では、 $3 \delta y$ であるのに対し、N°1 試験体を除くと、 $n=3$ 以上では $2 \delta y$ であり、変位の繰り返し回数は局部の発生にも影響を及ぼすと言える。

Type 2 の N°8 試験体では、繰り返し回数 $n=3$ の変動変位振幅载荷を行ったが、 $-2 \delta y$ において、負側の断面変化部の溶接線から 7.5cm ほど上を下端として膨らみを確認した。さらに载荷を進めてゆくと、周方向に斜め下方に進んでゆく。形状は、ほぼ Type 1 の繰り返し载荷のものと同様であった。最終状態を、Fig.8 に示したがって、鋼管の製造方法の差は、本実験結果に影響をおよぼしていないと言える。

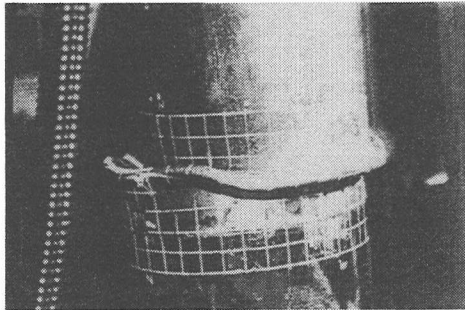
径厚比を Type2 に比べて 2 倍とした Type3 の N°10 試験体では繰り返し回数 $n=3$ の変動変位振幅载荷の、($\delta y=3.0$ mm)では、 $+2 \delta y$ の 1 サイクル目において、断面変化部の溶接線から 2.5cm の部分を下端とし、7.5cm 付近を上端とした、外側にはらみ出す座屈の発生が確認された。続く、 $-2 \delta y$ の 1 サイクルに向かうところで、反対の面にも同様な位置に座屈の発生が確認され、さらに繰り返しが進むと、座屈は、周方向に進んでゆく。 $+3 \delta y$ の 1 サイクル目において、座屈の上端であった 7.5cm 付近が内側には入り込んでゆくと同時に、側面も同様に座屈の上端が内側に入り込んでいった。最終的には、提灯座屈と Diamond 座屈の中間のような座屈形状になった。

Type 3 の N°11 ($\delta y=2.3$ mm)試験体、断面変化部より上部

の全断面降伏荷重の40%の一定鉛直荷重28.54tonfのもとでくり返し回数 $n=3$ の変動変位進展載荷を行った、では、 $-2\delta y$ の1サイクル目において付近において断面変化部の溶接線から上に2.5cm付近を下端とし、7.5cm付近を上端とする、外側に膨れる座屈が発生した。次の $-2\delta y$ において反対側の面にも座屈の発生が確認された。 $+2\delta y$ の3サイクル目において座屈形状が、N°10同様な座屈形状に変化した。 $-2\delta y$ の3サイクル変位0に向かう途中において、急激に鉛直方向の落ち込んだため試験を終了した。



N°7, 3回目 +3 δy
Figure 4 座屈形状



N°8, 最後状態
Figure 5 座屈形状

3.2. 水平荷重-水平変位履歴曲線

Fig. 6に水平荷重-水平変位履歴曲線を、Fig. 7(a-c)に水平荷重-水平変位履歴曲線の包絡線を示す。繰り返し一定変位を与えた場合、局部座屈が生じる前は変位を繰り返す前は耐荷力が上昇する。これは材料の有する繰り返し硬化の影響である。しかし、局部座屈が生じた時は変位を繰り返す毎に耐荷力は低下する。

3.2.1. 繰り返し回数の影響

繰り返し変動変位振幅載荷のN°1,3,4,5,7と単調載荷のN°2とは、大きな差がある。最も高い耐荷力曲線を示すのが単調載荷($n=0$)の場合であり変位の繰り返し回数の大きいほど座屈発生後の耐力も低下が激しく、また、局部座屈が発生した後は変位を増加させなくても水平耐力の低下は進んで行くことが分かる。すなわち、局部座屈が生じた

後の耐荷力はその後の荷重に大きく依存すると言える。

Fig. 6に示すType 1の試験体のN°1-4,およびN°7より、変動変位振幅の場合、 $2\delta y$ (13.2mm)までの変位においてはいずれの場合においても、変位の繰り返しにより若干耐荷力は上昇する傾向を示し、強度劣化は認められない。 $3\delta y$ (19.6mm)のサイクルになると、繰り返しによる強度の劣化が現れ始め、繰り返し回数による差も現れてくる。これは、 $3\delta y$ における座屈の発生により、強度の劣化が引き起こされていると分かる。局部座屈した後の耐荷力低下はN°4試験体の $n=10$ の試験において顕著に現れている。 $2\delta y$ で繰り返している間に耐荷力はほとんど0まで失われている。

3.2.2. 径厚比の影響

Fig. 7(b)の比較より径厚比の影響を検討する。なお、Fig. 7(b)は、水平変位、水平荷重をそれぞれ初期降伏水平変位 δy 、降伏水平荷重 H_Y で無次元化してある。径厚比が大きい場合、すなわち薄肉N°10の場合、降伏変位 δy (4.8mm)から $2\delta y$ に向かう途中で耐荷力が減少現状し始める。この時座屈が発生していたことと一致する。N°1の試験体は $3\delta y$ の2サイクル終了時に完全に耐力を失っている。径厚比が小さい厚肉のN°8では、 $2\delta y$ では、強度の劣化はおきず、加工硬化による最高荷重の上昇が見られた。N°8では、 $3\delta y$ の1サイクル目において、荷重の低下が、生じている。このように、径厚比が大きいほど最大荷重は小さく、耐力の低下が早いことが分かる。

3.2.3. 鉛直荷重の影響

Fig. 7(c)の比較より、鉛直荷重を全断面降伏荷重の40%で載荷した、N°11では、最大耐力は小さく、最大耐荷力をすぎた後の耐荷力の低下が急激であり、P- δ 効果が顕著に現れている。特に座屈発生後の耐力の低下に与える影響が大きい。

3.3. 歪みの測定結果

歪みの測定結果の例として、単調載荷のN°2と繰り返し回数3回のN°7の座屈発生近傍の水平荷重-歪み曲線をFig. 8に示す。N°2においては溶接線から2.5cm、N°7では溶接線から10cmのものが座屈の凸部のものである。座屈が発生する $3\delta y$ において急激に歪みの変化が生じる。座屈凸部近傍では座屈の進展と異に圧縮から引っ張りに向きが変わるのが分かる。また、歪みは各サイクルにおいて荷重が低下し始めると異に進んでいくことが分かる。

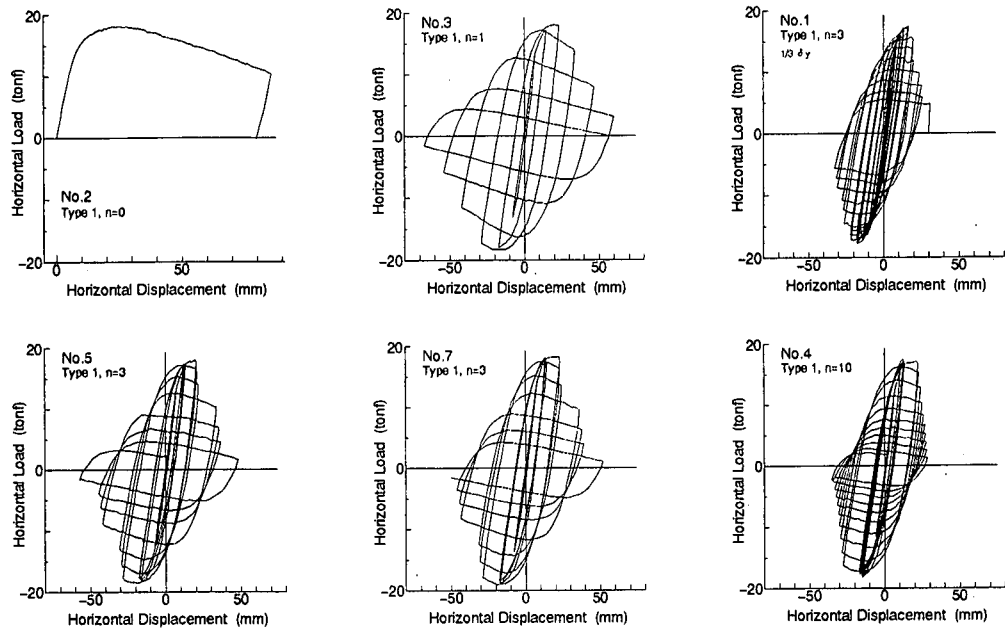


Figure 6 水平荷重—水平変位履歴曲線

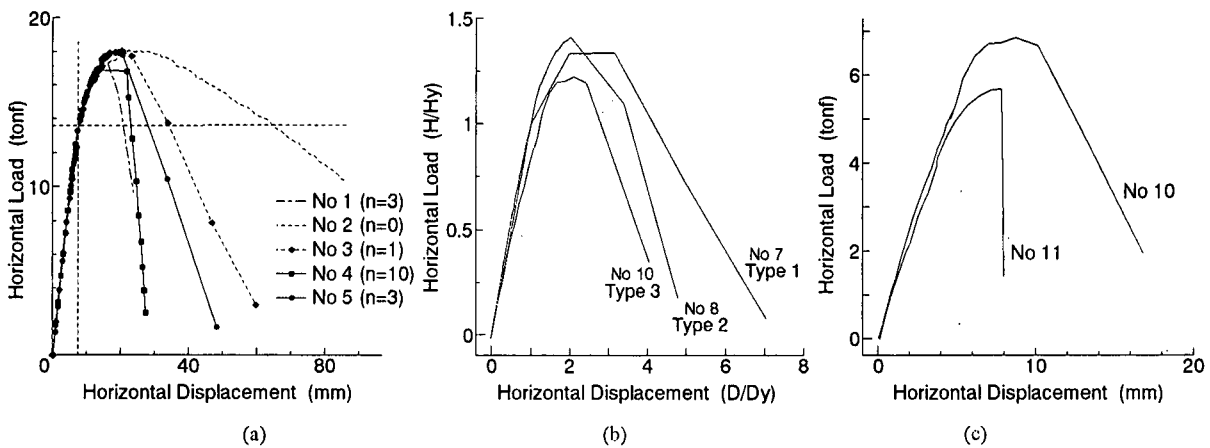


Figure 7 水平荷重—水平変位履歴曲線の包絡線

中には、0.3%の振幅で繰り返し歪みを受けているものもあり、このような繰り返し歪み履歴を受けた剛材は、繰り返し硬化を受けていると考えられ、また、荷重履歴により歪みの硬化の程度も異なることが考えられる。今回用いたSM400等の軟鋼では繰り返し歪みを受けると硬化し、引張強さが上昇し、破断延性が低下する⁷⁾など、材料特性も変化していることが考えられるため、このような繰り返し歪み履歴を受けた剛性の材料試験を行う必要がある。

座屈発生時までの最大歪みと歪み振幅によって、荷重・歪みの履歴のことを考えられる。

荷重・歪みは、繰り返し荷重において繰り返し回数の差異の影響と径厚比の影響があり、繰り返し荷重回数は多いと最大歪みと歪み振幅が小さくなっていく。

4. 疑似動的実験結果

疑似動的荷重実験により、実際に被災した橋脚に生じた被害の再現を試みた。入力地震波はFig. 9に示す神

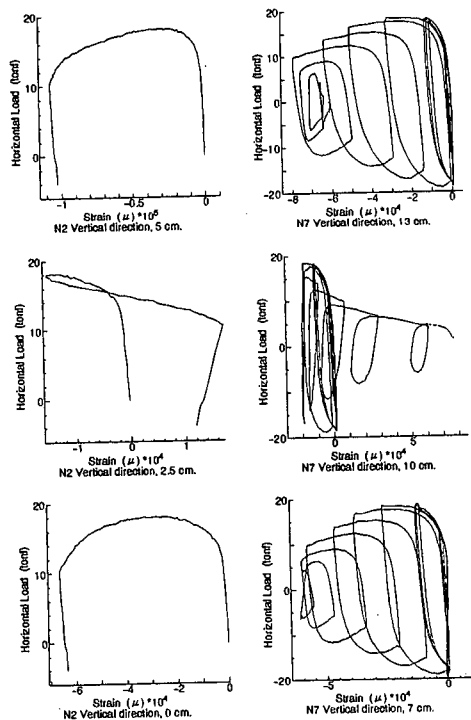


Figure 8 水平荷重—歪み履歴曲線

戸海岸気象台で観測された南北成分最大振幅 818 gal の特徴的な部分の約 12 秒間を取り出したものである。相似則を考慮し、相似比を 5 とし、モデルに対する運動方程式を解く相似モデル解法を用いた。そのためモデルに入力する地震波は時間軸を 5 分の 1、加速度を 5 倍としたものを入力した。なお、Fig. 9 実地震波のものとなっている。

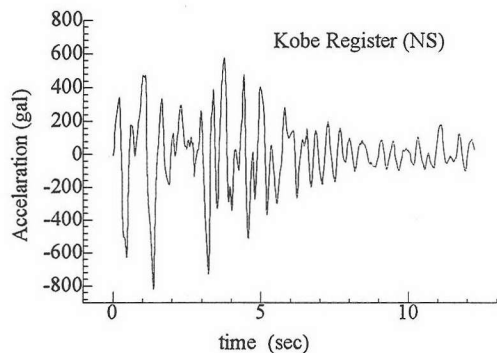


Figure 9 入力地震波

変形形状を Fig. 10 に、応答変位を Fig. 11 に、水平荷重-水平変位履歴曲線を Fig. 12 に示す。なお、Fig. 11 の時間軸は、実地震波の時間で示している。0.6 sec. に水平変位 22.7 mm において、座屈の発生を確認した。この変位は Type 3 試験体を除けば(n=1)に繰り返し載荷実験で座屈発生時の変位とほとんど同じである。座屈の下端が溶接線より 5 cm, 上端が 12.5 cm 上に生じた。この位置は N2 試験体を除けば(n=0)に繰り返し載荷実験で座屈位置はほとんど同じである。0.6 sec においてさらに座屈形状の進展が見られた。ここでの変位は 22.8 mm であった。0.88 sec で負側のピークを迎える。1.58 sec において、42.8 mm まで急激に変位が生じた。その後座屈発生後の耐力が低下してから変位が著しく増加し、座屈の進展と異に、変位は一方向(正側と呼ぶ)に移行していく傾向が認められた。7 sec 以降は、ほぼ弾性内での振幅にとどまっている。座屈は片側のみを生じ、座屈が周方向につながる提灯座屈とはならなかった。

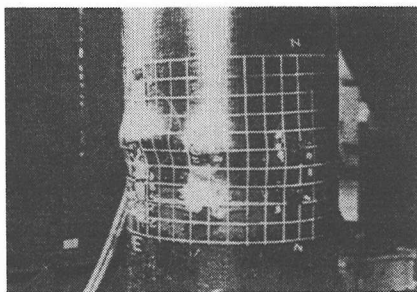


Figure 10 座屈形状

繰り返しによる座屈の進展により、水平荷重-水平変位履歴曲線は単調載荷のものより最大荷重後の耐力の低下が大きくなっている。また、初期に角側に変位したのみで、その後角側に変位することはなく、これは塑性変形による中立軸の移動、および局部座屈発生による剛性の低下によ

って移動していくと考えられる。このような荷重履歴は変動変位振幅載荷実験とは異なるものであり、地震波により挙動は異なるので、設計等で検討をする際に地震波の選択には注意を要する。

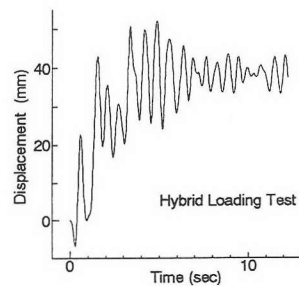


Figure 11 応答変位時履歴曲線

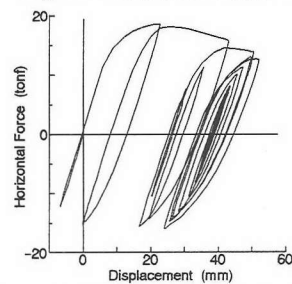


Figure 12 水平荷重-水平変位履歴曲線

疑似動的実験の結果と応答解析の結果の比較を行った。水平荷重・水平変位履歴曲線より Skelton 曲線が求められている。この Skelton 曲線よりばね係数 k よりにモデルを測定する。このモデルを Fig. 13 示す。

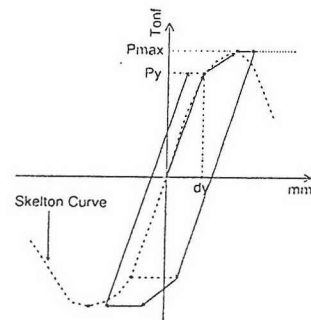


Figure 13 線モデル

この解析の結果から応答変位と疑似動的実験の結果も Fig. 14 示している。

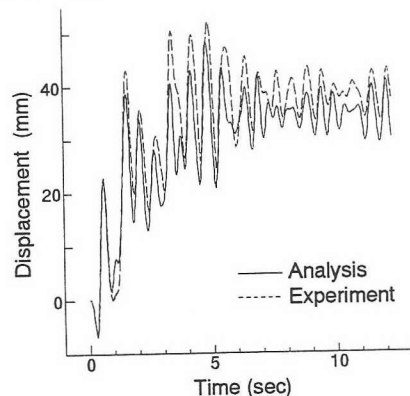


Figure 14 応答変位

両方の曲線は座屈発生前同じですが、Skelton モデルで座屈の影響が考慮せずので座屈発生後疑似動的解析と応答解析の曲線で差異がある。

5. 鋼管柱における残留応力の測定

鋼管柱の動的載荷の結果では、繰り返し載荷により、座屈が起こったが、その位置は断面変化部である溶接線近傍ではなく、溶接線より 2~7cm ほど上部であった。応力的に考えれば座屈が起こりやすいのは断面変化部直上である。

座屈発生断面が最大モーメント断面からおれることおよび $n=0$ とそれ以外で異なること。この原因として溶接残留応力が考えられる。そこで溶接により発生した残留応力の大きさと分布を調べるために、残留応力測定用の試験体を用意し、実験を行った。試験体は繰り返し実験の鋼管柱の溶接部分を切り出し形状のものである。試験体の寸法を Fig. 15 に示す。残留応力の測定は、歪みゲージを貼った状態で電動ノコギリやバンドソーを用いて試験体部分を切り出しことより、残留応力を解放して求める。歪みゲージは三軸ゲージを用い、溶接線を中心として試験体の表と裏の両面に、21 枚ずつ貼った。

歪みゲージを貼り付けた状態で歪みを解放していくことによって得られた解放歪みがあり、これらをグラフにプロットすると、溶接部に垂直な方向に対して、試験体の外側の溶接部では引張、内側の溶接部で圧縮の解放歪みが出ていることが分かる。これは残留応力で考えると、試験体の外側に圧縮、内側に引張の残留応力が生じていることになる。

この残留応力分布からは、繰り返し変位を与えた際の座屈の発生位置は溶接線から離れたのこの説明はできず、今後の検討が必要といえよう。

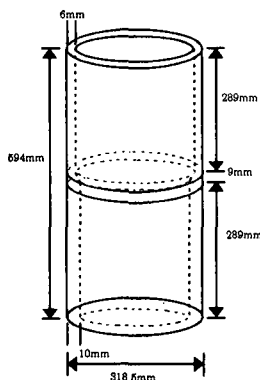


Figure 15 試験体

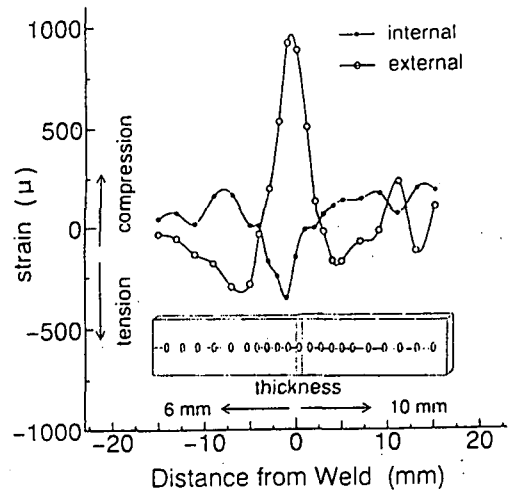


Figure 16 残留応力実験結果

6. 弾塑性解析による検討

実験による得られた、断面変化部を有する円形断面鋼橋脚の挙動を、弾塑性有限要素法解析検討する。

解析に用いた有限要素モデル Fig 17 に示す。モデルは対象性を考慮して 2 分の 1 のモデルとする。境界条件は下部で全方向固定である。鉛直荷重を集中荷重として天端中央に載荷した。解析には有限要素ソフト MARC を用いた。

用いた要素は 4 接点厚肉シェル要素を用いた。総数要素は 500 である。構成則は Von Mises の降伏条件、硬化則としては等方硬化則を用いた。応力歪み曲線において弾塑性、塑性後の剛性 1/400 に低下である。Type 2 のモデルの解析より得られた変形を Fig. 18 に示す。

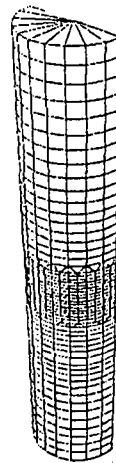


Fig. 17 モデル

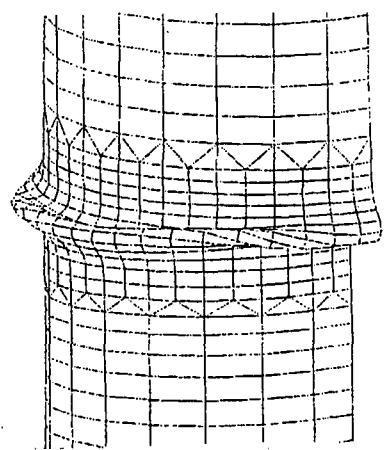


Fig. 18 解析より変形

等方硬化と移動硬化による水平荷重・水平変位と水平荷重・歪み曲線を Fig. 19 に示す。Fig. 19 より、移動硬化法は繰り返し載荷実験の結果を概略再現していると言える。

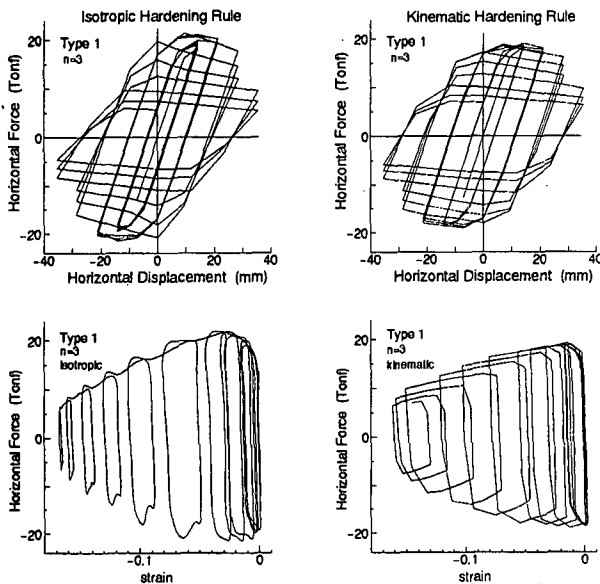


Figure 19 水平 $P-\delta$ と $P-\epsilon$ 履歴曲線

7.- まとめ

本研究では、断面変化部を有する円形断面鋼橋脚を対象として、阪神淡路大震災において生じた断面変化部での局部座屈を再現すること、および、荷重履歴、径厚比、の差異による、座屈形状、水平耐力のおよぼす影響について検討した。それにより得られた結論を以下にまとめる。

- 1) 繰り返し載荷実験より断面変化部において提灯座屈と呼ばれている局部座屈の再現することができた。
- 2) 座屈形状は、繰り返し載荷において繰り返し回数の差異の影響はほとんど見られないが、単調載荷と繰り返し載荷とでは座屈位置が異なること、径厚比の差異により座屈形状が異なることを示した。
- 3) 耐力は、局部座屈の発生後低下してゆき、局部座屈が発生するまでは繰り返し回数の影響はほとんど見られないが、局部座屈発生後は繰り返し回数の影響が多きく、繰り返し回数多いほど耐力の低下が著しいことが分かった。また、鉛直荷重を増加させると、最大耐力は減少し、その

後の耐力低下が著しくなることが分かった。

4) 径厚比の影響は、径厚比が大きいほど耐力の低下が早く、また最大耐力後の耐力の低下も著しくなる。

5) 疑似動的載荷実験の結果は、座屈は、断面変化部に片面のみ生じ、水平変位は、正負交互に振れる訳ではなく、塑性変形による中立軸の移動、局部座屈による剛性の低下により、片側に移動してゆき、繰り返し載荷とは異なることが分かった。

6) 繰り返し載荷実験で鋼管柱の挙動の再現は有限要素法解析によってできることが分かった。

7) 荷重・歪み履歴曲線に載荷パターンの影響がよく分かった。で繰り返し載荷回数は多いと最大歪みと歪み振幅が小さくなっていく。

本研究は、東京工業大学創造プロジェクト研究会都市基盤施設研究体の活動の一環として実施したものである。館石和雄助教授には有益な助言をいただいた。関係各位に深謝いたします。

参考文献

- 1) 土木学会：阪神大震災災害調査緊急報告会資料, 1995.
- 2) 東工大土木工学科：阪神大震災鋼橋被害調査報告, 1995
- 3) 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。第50回年次学術講演概要集第1部 A, I-19, pp 38-39, 1995.
- 4) 佐々木亮介、桜井孝昌、忠和男：地震力を受ける鋼製円筒橋脚の外力と座屈形状。第50回年次学術講演概要集第1部 A, I-20, pp 40-41, 1995.
- 5) 才塚邦宏、伊藤義人、木曾英滋、宇佐見勉：相似則を考慮したHybrid地震応答実験手法に関する考慮、土木学会論文集, N°507/I-30, pp. 583-590. 1996.1.
- 6) 西村俊夫、三木千寿：構造用鋼材の歪み制御低サイクル疲れ特性、土木学会論文報告集、第279号, pp. 29-44, 1978.11.

(平成9年3月31日)

STUDY ON SEISMIC RESISTANCE OF STEEL PIPE PIER BY CYCLIC LOADING TEST AND ELASTO-PLASTIC ANALYSIS

J. Müller, C. Miki and T. Sasaki

In this study the local buckling of steel pipe piers which occurred in the Hanshin-Awazi Earthquake are simulated by experiments under 2-axial loading conditions which simulates the actual seismic loading. The specimens are made by two different sections, representing actual bridge piers. The elastic-plastic behaviour of steel pipe piers under the following conditions are discussed by experiment, response and FEM analysis. The effect on the seismic resistance of the thickness of pipe plate and weld residual stresses near weld joints between 2 different sections were also studied. As a result, it was found that the modes of buckling and hysteresis curves are strongly influenced by loading patterns.