

## 鋼製円筒橋脚に生じた局部座屈変形の数値処理

東北大学 中沢 正利\*

和歌山高専 有尾 一郎\*\*

東北大学 岩熊 哲夫\*\*\*

兵庫県南部地震は高架橋に多くの傷跡を残し、特に鋼製円筒橋脚では種々の局部座屈波形が報告されている。我々は「神P585下り」鋼製円筒橋脚の片側断面領域にわたる局部座屈現象を、震災直後の独自の調査から数値的に計測する機会を得た。このデータを周期関数で補間することにより、三次元CGによる局部座屈波形の再現が可能となる手法を示す。さらに、軸方向の縮み量や傾きなどの巨視的変形量を算出することにより、この橋脚に対する地震外力を概算するための基礎資料を得る手法を示す。また最近、この橋脚の詳細図面および鋼材の材料特性が明らかになっている。そこで、単調載荷および漸増繰返し載荷を受ける場合の弾塑性挙動を調べ、この橋脚の局部座屈波形の再現計算および耐荷性能の数値的評価により、実現象との対応について検討した結果を報告する。

### 1. はじめに

1995年1月17日の兵庫県南部地震は近代土木構造物に甚大な被害をもたらし、中でも阪神高速道路は地震の大きさを物語るように多数の高架橋に多くの傷跡を残した。特に、軸対称円筒構造物である鋼製橋脚や各種のタンクには多種多様な崩壊パターンが発生し、境界部付近での局部座屈(例えば、象の足座屈)や軸方向に周期的に凹凸が交互に現れる提灯座屈等の分岐座屈現象が生じたと報告されている。現在もこれらの震災被害の調査および研究が各方面で詳細に行われているが、我々は断面の片側領域にわたる鋼製円筒橋脚の局部座屈現象を、震災後独自の調査から数値的に計測する機会を得た。そこで我々は、ある鋼製円筒形の橋脚に着目してその橋脚に残された永久変形を計測し、その痕跡情報を数値処理することにより、与えられた外力の概算が可能となる手法の一つを示す。

震災によるピルツ系橋脚の震害調査<sup>1),2)</sup>では、現在橋脚に水平および鉛直方向に設計値以上の地震力が作用したとの見解が大方であるが、その値がどの程度であったかという問題については、個々の構造物の位置、地震の大きさ、地盤条件や構造形態等の複雑な要因が関連するため、精密に解析するのは困難である。特に、橋脚の破壊形態については議論が

尽きないところである。

本論文は、ある鋼製橋脚が自然の力により局部座屈を起こしていた事実に基づいて、薄肉円筒殻に残された痕跡よりこの橋脚に与えられた地震力を概算することを目的とし、力学的挙動の実証的な解明のための一つの方法を示す。

さらに、最近この橋脚の詳細図面および鋼材の材料特性が明らかになってきている。そこで、これらの結果をもとに、この橋脚の局部座屈波形の再現計算および耐荷性能の数値的評価を行なう。これらの情報に基づいた橋脚モデルが単調載荷および漸増繰返し載荷を受ける場合の弾塑性挙動を調べ、実現象との対応について検討した結果を報告する。

### 2. 局部座屈形状の実測調査

#### (1) 現場での局部座屈現象の調査

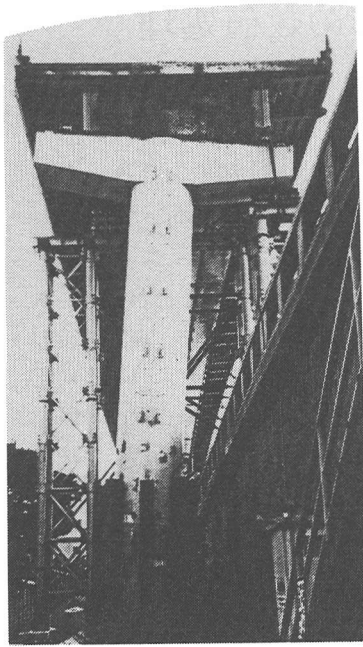
震災により分岐座屈現象が発生していた橋脚の現場は、神戸市長田区東尻池の阪神高速道路神戸線であった。この区間の路線は上下線は国道2号線を挟んで高架が分離され、JR和田岬線を跨いでいる。この付近の橋脚は同型の鋼製円筒シェル構造であり、それぞれ多少の座屈の爪痕を残していた。南側に位置する下り線の桁形式においては、橋脚番号「神585」を境として、西側は箱桁の鋼床版構造で緩やかな曲線の線形を成しているのに対し、東側は4本主桁の鉄筋コンクリート床版構造であることが確認できている。その下り線の橋脚番号「神P584」は周方向に凸型の半波形の局部座屈(いわゆる提灯座屈)を生じている。我々は特に橋脚番号

キーワード：鋼製橋脚、円筒シェル、局部座屈

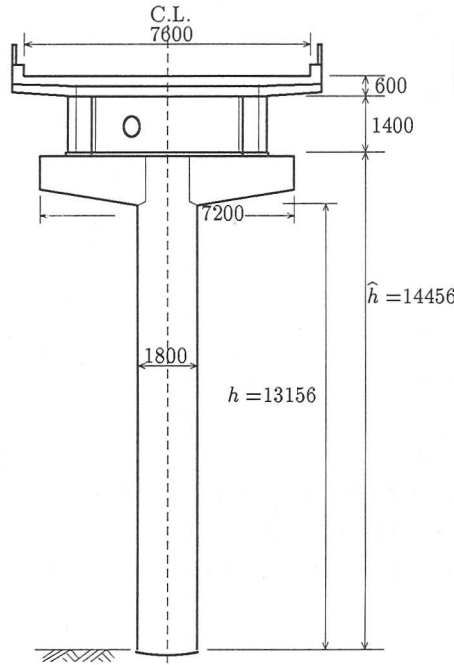
\* 東北大学工学部土木工学科 022-217-7440

\*\* 和歌山高専環境都市工学科 0738-29-2301

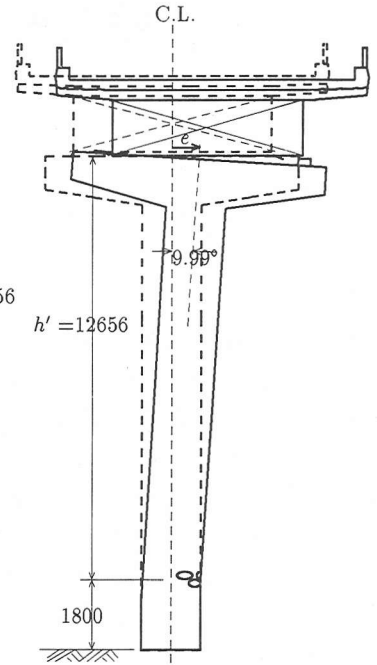
\*\*\* 東北大学工学部土木工学科 022-217-7439



(a) 震災後の写真



(b) 震災前の概寸



(c) 震災後の概寸

図-1 鋼製橋脚(神 P585 下り)の概寸

「神 P585 下り」に注目し、本論文ではこの橋脚の局部座屈現象を解析対象とした。この橋脚に注目した理由は、唯一局所的ではあるが、橋脚の軸方向と周方向の二軸方向に周期波を持つ局部座屈現象と思われる波形を見出したためである。

## (2) 橋脚「神 P585 下り」の座屈変形量の調査

この橋脚の概寸を図-1に示す。天端までの高さは地表から  $\hat{h}=14.46\text{m}$ 、円筒部の高さ  $h=13.16\text{m}$ 、半径  $R=90\text{cm}$  の円断面を持つ鋼製であった。橋脚番号「神 584 下り」の損傷部での板厚は図面より  $t=2.3\text{cm}$  とした。よって、径厚比  $R/t$  は 39.13 程度である。

地表から 180cm の高さ付近を中心におよそ  $\pm 40\text{cm}$  の範囲にわたって軸方向に波状形状を示し、周方向については半円周に渡って局部座屈を発生させていた(写真-1参照)。局部座屈の発生により上部工全体が鉛直方向から橋軸直角方向へ  $3.62^\circ$  でほぼ北側に傾き、橋脚天端の水平移動量は  $e=75\text{cm}$  程度であった。橋脚の円周上には既に補強材が充てられていたが、その補強材を基に実測を通して図-2の座屈変形量を得た。

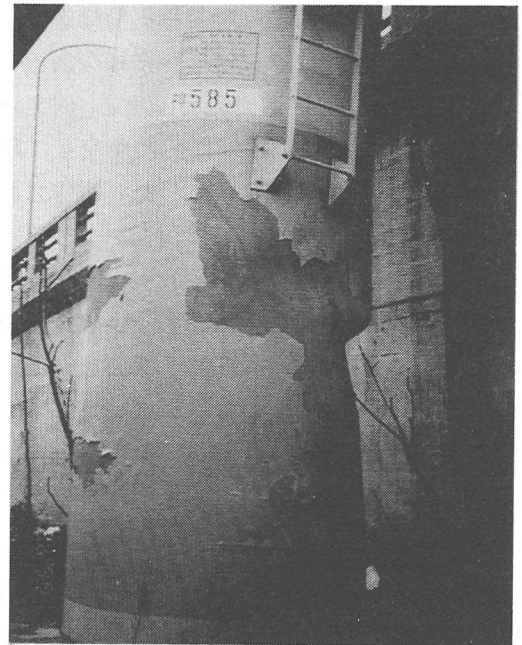


写真-1 鋼製円筒橋脚の局部座屈状況

## (3) 局部座屈現象の CG 再現

前節図-2のデータを3次元空間に忠実に補間し、3次元コンピュータグラフィックスを用いて橋脚の一部の座屈形状を図-3に示すとおり再現した。座屈波形は、高さ 210cm の位置で周方向に沿って3波、高さ 170cm で2波が確認でき、また主軸方向には円周 120cm の位置で1波、円周 190cm 付近

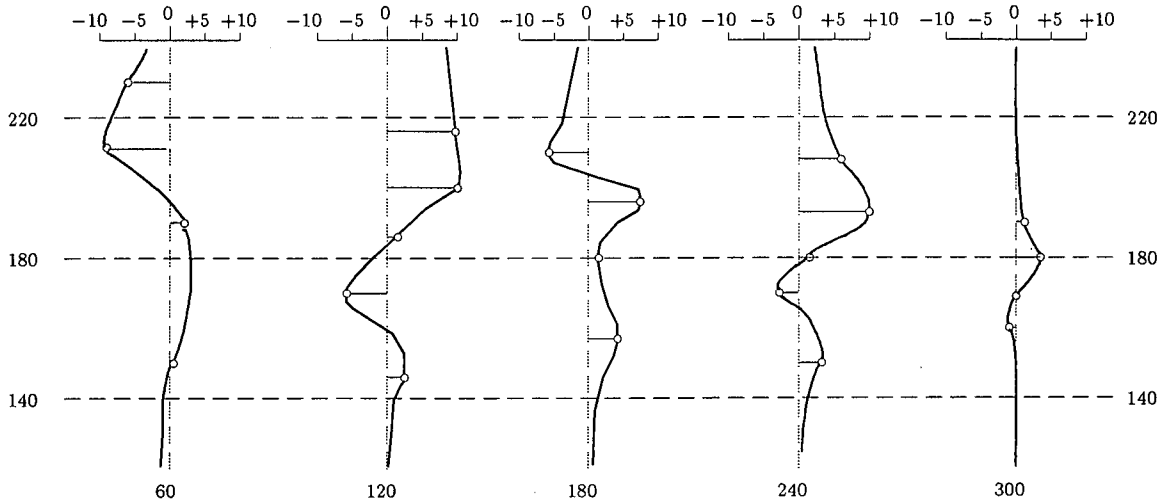


図-2 主軸方向の座屈変形量 (cm) ○印 — 測定値、実線 — 再現値

では逆の波形を有しており、主軸および円周方向に交互に凹凸が繰り返されていることが確認できた。このような座屈波形は文献 [3] のダイヤモンドパターンの座屈波形に類似している。

### 3. 実測結果に基づく座屈波形の数値処理

#### (1) 座屈波形の近似式

この節では円筒橋脚の表面の変形形状を基に座屈波形を近似する。半径  $R$  を初期形状として、半径方向のたわみ  $w$  の近似式を求めることとする。なお、領域および座標原点の取り方によって各パラメータが異なるが、ここでは、先に得られた調査結果の座標系を用いることとする。再現領域は円周方向に長さ  $[0 \leq y \leq 360]$ 、角度  $[0 \leq \theta \leq 4\pi/3]$  の範囲と主軸方向に  $[120 \leq z \leq 240]$  の領域を対象とした。選点は等間隔に周方向および主軸方向にそれぞれ  $13 \times 13$  をとり、任意点  $k, j$  に対して二重 Fourier 級数

$$w_{kj} \equiv \sum_{m=0}^N \sum_{\gamma=0}^N A_{m\gamma} \exp[-2\pi i(k-1)m/N] \cdot \exp[-2\pi i(j-1)\gamma/N],$$

$$A_{m\gamma} = a_{m\gamma}/N, \quad \text{when } N = 13 \quad (1)$$

に適用する。境界条件によっては  $\sin$  の項が発生するが、ここでは分岐モードを

$$w = - \sum_{m=0}^N \sum_{\gamma=0}^N A_{m\gamma} \cos\left(\frac{m\gamma}{R}\right) \cos\left(\frac{2\pi\gamma z}{L}\right) \quad (2)$$

の形に適合させ、この橋脚に対する座屈形状を三角級数で近似する。ここで、 $m$  は周方向、 $\gamma$  は軸方向の座屈半波数である。この結果、 $m$  について

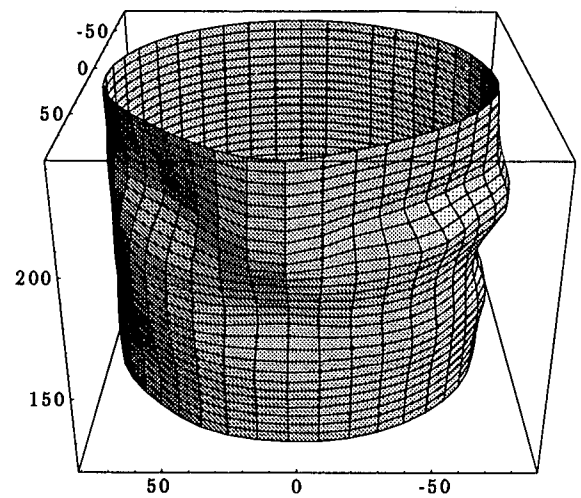


図-3 円筒橋脚の局部座屈波形のCG再現 (cm)

第3項までの係数  $a_{m\gamma}$  として以下の結果を得た。なお、計算には Mathematica を使用した。

$$\begin{aligned} a_{00} &= 9.46, & a_{01} &= -4.35 + 0.835i, \\ a_{10} &= -6.46 + 0.210i, & a_{11} &= -0.494 + 3.58i, \\ a_{20} &= -2.58 - 0.300i, & a_{21} &= -1.79 + 1.49i, \end{aligned} \quad (3)$$

#### (2) 変形伸縮量の算定

この領域における主軸方向および周方向の部分的な座屈変形に伴う伸縮量を算定する。変形に沿った微小線素  $ds$  に対する伸びとして、主軸方向と平行な  $dz$  と微小たわみ  $dw$  との関係から得られる微小伸縮量は

$$\begin{aligned} ds - dz &= \left( \sqrt{1 + \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2} - 1 \right) dz \\ &\approx \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2 dz \end{aligned} \quad (4)$$

と表されるので、領域高さ  $L(=120\text{cm})$  に渡って積分することにより伸び  $S_z(\theta)$  は式 (2) を使って

$$\begin{aligned} S_z(\theta) &= \frac{1}{2} \int_L \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 dz \\ &= \frac{\pi^2}{L} \sum_{m=0}^N \sum_{n=0}^N \sum_{\gamma=1}^N \gamma^2 A_{m\gamma} A_{n\gamma} \cos(m\theta) \cos(n\theta) \quad (5) \end{aligned}$$

となる。ここで、 $\theta=0$  のとき最大値が得られ、

$$\begin{aligned} S_{z\max} = S_z(0) &= \frac{\pi^2}{L} \sum_{m=0}^N \sum_{n=0}^N \sum_{\gamma=1}^N \gamma^2 A_{m\gamma} A_{n\gamma} \\ &\simeq -7.57 \text{ cm, when } N = 13 \quad (6) \end{aligned}$$

となる。この値は局部的であるが最大ひずみ  $\varepsilon_{\text{axi}} = 6.3\%$  を与え、主に面外変形により高さが失われたと考えられる。因みに降伏ひずみは  $\varepsilon_Y = \sigma_Y / E = 0.15\%$  (SM50) と算出され、残留ひずみはこれよりはるかに大きな値を示している。

同様に周方向においても伸縮量は円周長  $L_c$  にわたって周積分することによって求められ、

$$S_y(z) = \int_0^{L_c} \left\{ -\frac{w}{R} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} dy \quad (7)$$

と表せる。式 (6) と同様に、式 (7) に式 (2) を代入すると、 $z=0$  時の最大変形は

$$\begin{aligned} S_{y\max} &= - \sum_{m=0}^N \sum_{\gamma=0}^N A_{m\gamma} \frac{1}{m} \sin \left( \frac{mL_c}{R} \right) \\ &+ \frac{1}{8R} \sum_{m=0}^N \sum_{\gamma=0}^N \sum_{\rho=0}^N A_{m\gamma} A_{m\rho} m \\ &\quad \cdot \left[ \frac{2mL_c}{R} - \sin \left( \frac{2mL_c}{R} \right) \right] \\ &\simeq 5.14 \text{ cm, when } N = 13 \quad (8) \end{aligned}$$

と求められるので、周ひずみは  $\varepsilon_{\text{circ}} = 0.91\%$  と算出される。同様に、局部変形量の情報からこの柱の傾斜角などの概算値なども算出可能であり、この橋脚が受けた地震外力を算定する際の貴重な情報として活用できる。

#### 4. 局部座屈波形の再現計算

##### (1) 「神 P585 下り」橋脚の断面詳細

阪神高速道路公団より提供いただいた図面より「神 P585 下り」橋脚の断面形を抽出して、その概要を図-4に示す。この情報は構造工学委員会構造工学震災調査特別小委員会 WG2 「非線形構造解析

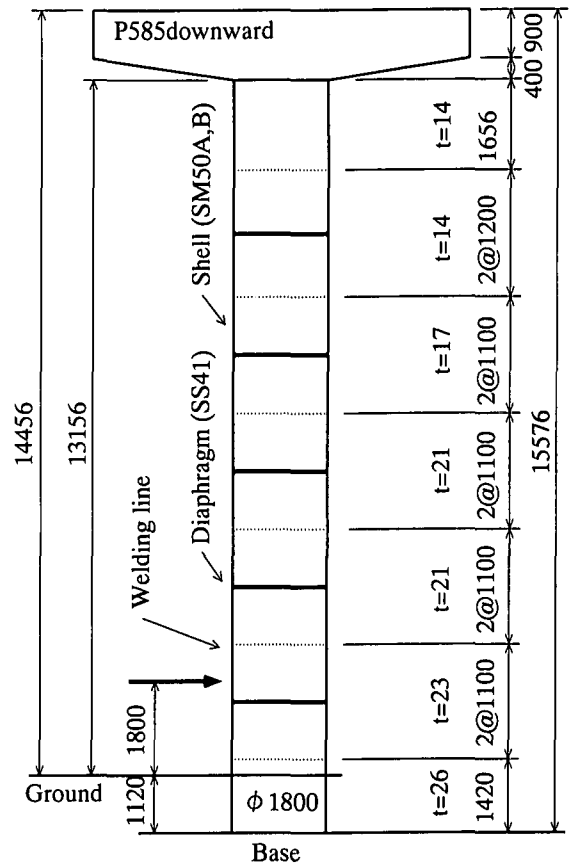


図-4 「神 P585 下り」橋脚の断面詳細

によるシミュレーション」(主査：早稲田大学理工学部土木工学科 依田照彦教授) に提供いただいたものであることをここに記して謝意を表す。この図面によれば、円筒の板厚は高さ方向に5段階に変化しており、またダイヤフラムはほぼ等間隔に設置されている。材質は円筒部分が SM50A、ダイヤフラムが SS41 と明記されていた。局部座屈により損傷を受けた部位は目測では板厚変化部分 ( $t=23\text{mm} \rightarrow 21\text{mm}$ ) のやや下に位置している。

##### (2) 材料試験結果

同じく阪神高速道路公団から御提供いただいた P585 橋脚の試験片を用いて引張り試験を実施し、材料特性としての応力-ひずみ曲線を得た。以後の再現計算に用いた円筒シェル部分の材料特性としての応力-ひずみ関係を図-5に示す。また、ダイヤフラム部分については、降伏応力度  $\sigma_Y = 2400$  ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ) の完全弾塑性体を仮定した。

##### (3) 単調および繰り返し載荷に対する終局挙動

弾塑性非線形構造解析には汎用プログラム Marc を使用したが、解析には残留応力および初期たわみは考慮していない。1800 節点、1776 要素で分割

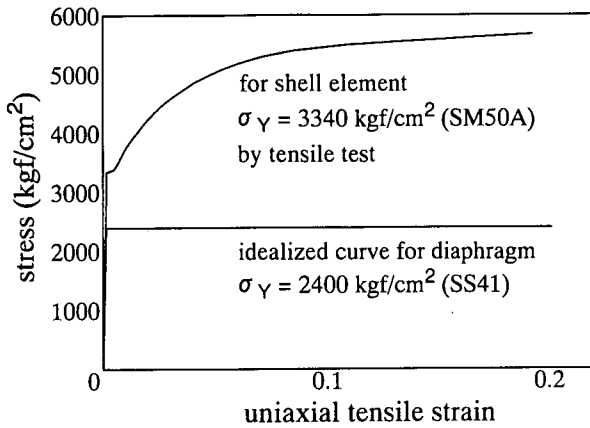


図-5 P585 橋脚鋼材の材料特性

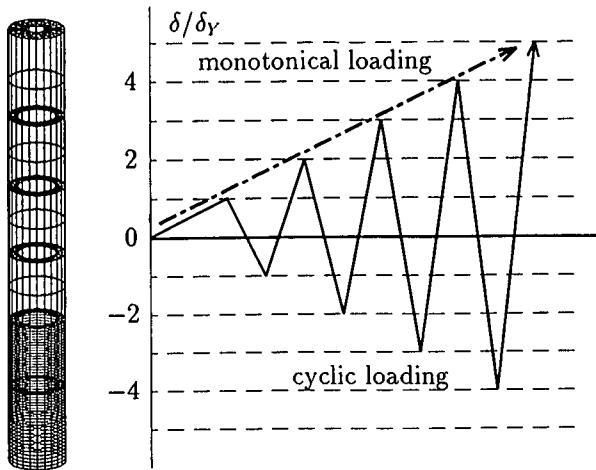


図-6 構造解析用橋脚メッシュ分割および荷重パターン  
し、参考文献 [5] の解析例を参考にして、基部から上 2 パネルを高さ方向に 24 分割し、その他のパネルは局部座屈を生じないので 2 分割している。周方向には 24 分割とし、四辺形厚肉線形要素 75 番の shell 要素を用いた。そのメッシュ分割を図-6に示す。橋脚の上部には、上部構造の重量を想定した一定鉛直荷重  $P=0.15P_Y$  (上部断面で算定した降伏軸力) を与え、さらに強制水平変位を制御している。この水平変位は橋脚基部断面の一部が降伏する時の水平降伏変位  $\delta_Y$  を指標として次式で表される。

$$\delta_Y = \frac{H_Y \ell^3}{3EI}, H_Y = \frac{M_Y}{\ell} = \frac{(\sigma_Y - P/A)W}{\ell} \quad (9)$$

ここで、 $H_Y$  は降伏水平力、 $\ell=\hat{h}$  は柱長、 $W, A$  は基部での断面係数および断面積である。

まず、基本的な弾塑性挙動をみるために、単調荷重解析を行なう。この曲線は、繰り返し荷重履歴曲線の包絡線という意味合いとともに、繰り返し荷重による延性の低下を計る基準線ともなる。図-7に水平荷重  $H$  と水平変位  $\delta$  で示した荷重-変位関係

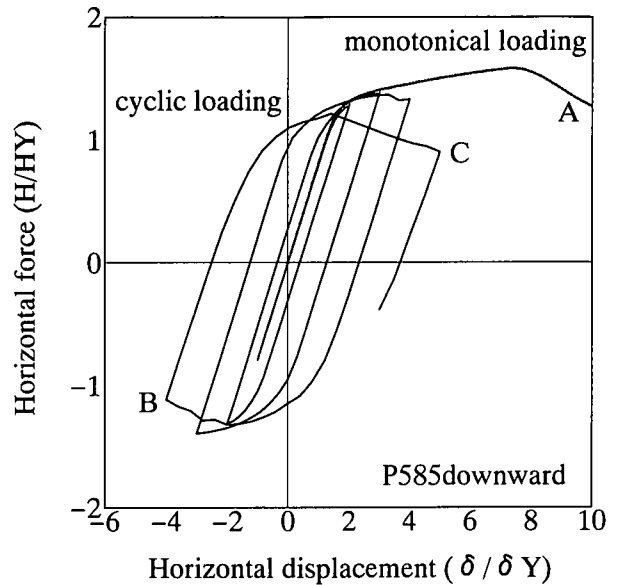


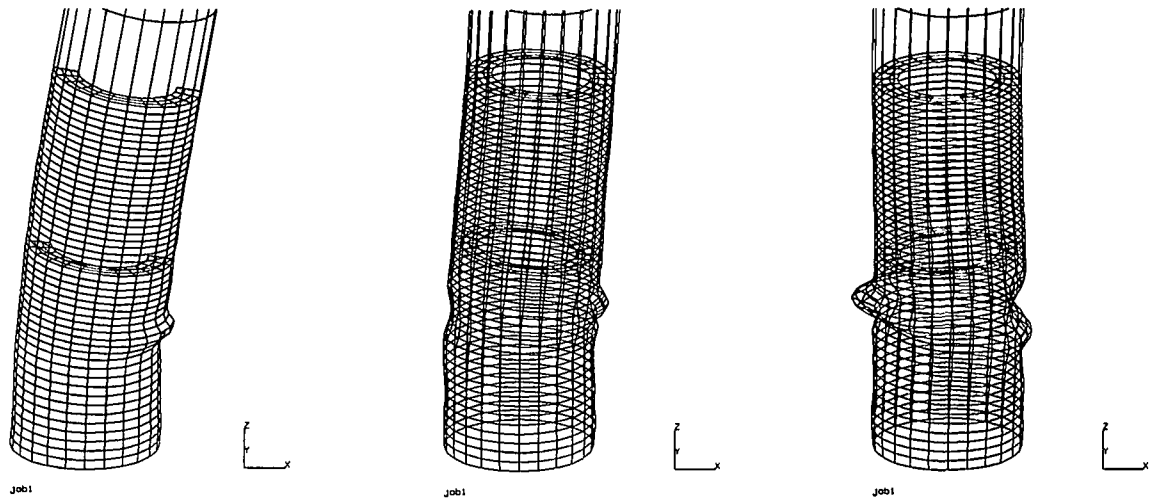
図-7 荷重履歴曲線

を示す。単調荷重では、 $8\delta_Y$  あたりから局部座屈による耐力の低下が見られる。一方、繰り返し荷重では、地震力を想定して  $1\delta_Y$  ずつ漸増する繰り返し水平変位 ( $\delta$ ) を与えた。単調荷重の場合と比較すると  $3\delta_Y$  あたりからの早期の耐力低下が認められる。

図-8に図-7の中で示した位置での円筒シェルの変形状態を示す。単調荷重および繰り返し荷重とも提灯座屈形のみを示し、ここで採用した荷重条件ではシェル周方向への局部座屈は再現されていない。また、局部変形の生じる位置は基部から 1 パネル目であることは同様で、仮定した鉛直軸力の算定によっても変化することが考えられる。なお、繰り返し荷重時には片側凸、他方凹の局部変形が生じており、一般的な提灯座屈形ではない。

## 5. 結語

1. 兵庫県南部地震によって損傷を受けた薄肉円筒橋脚「神 P585 下り」をとり上げ、局部座屈変形の痕跡を数値データとして実測した。これを三角関数で補間することによる CG 再現を果たし、また数値処理を通して伸縮ひずみや傾き等の変形量を求める手法を示した。
2. 図面から確定した断面寸法を対象に、弾塑性構造解析による再現計算 (単調荷重、静的繰り返し荷重条件) を実施したが、ここで採用した荷重条件下では提灯座屈が顕著であり、周方向への波形は再現できなかった。



(a) 単調載荷時 (A 点、 $10\delta\gamma$ )      (b) 繰り返し載荷時 (B 点)      (c) 繰り返し載荷時 (C 点)

図-8 鋼製橋脚基部パネルの代表的な局部変形モード

謝辞： 本論文をまとめるにあたり、写真提供を頂きました横河ブリッジ(株)・深沢誠氏とその情報を頂きました新日本製鐵(株)・大田孝二氏、建設図書(株)・岩田哲夫氏に厚くお礼申し上げます。

#### 参考文献

- [1] 土木学会：阪神大震災震害調査 緊急報告会資料，土木学会，1995.
- [2] 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会：兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告書，pp.1-8 ~ 1-12，建設省，1995.
- [3] Yamaki,N. : Elastic Stability of Circular Cylindrical Shells, *Applied Mathematics and Mechanics* 27, Elsevier, Amsterdam, 1920.
- [4] 座屈設計のガイドライン作成小委員会：座屈設計のガイドライン，土木学会鋼構造委員会 技報堂出版，1988.
- [5] 桜井孝昌・忠 和男・佐々木亮介：繰り返し荷重を受ける鋼製橋脚のダクティリティ特性，土木学会第51 回年講概要集，pp.114-115，1996.
- [6] 社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，丸善，1990.
- [7] 成瀬泰雄：鋼管構造，森北出版，1971.

## Numerical treatment and consideration for local buckling configuration of a cylindrical steel pier

Masatoshi NAKAZAWA, Ichiro ARIO and Tetsuo IWAKUMA

The 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake gives us various local buckling patterns in the cylindrical shell structures. We found the local buckling deformation like a periodic wave(ex. the diamond pattern type) near the base of a steel pier "P585". This marks of deformation are measured in the digital data and interpolated by means of the sinusoidal function. As the result, the reappearance of them in 3-D space can be possible. Moreover, the shortening and inclination of the pier can be easily calculated by this numerical technique. Furthermore, recently, the detail profile of this pier and property of cite material are revealed. Using these informations, the reappearance trial are carried out by the elasto-plastic FEM analysis under the monotonical and cyclic loading.