

被災したマンホール部を有する鋼製橋脚の損傷分析

Evaluation of damage to flange plate with the manhole of steel pier affected by the Hyogoken-Nambu Earthquake

山口栄輝*, 幸左賢二*, 秦健作**, 劉銘崇***

Eiki Yamaguchi, Kenji Kosa, Kensaku Hata, Meisuu Ryuu

*Ph. D. 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1)

**阪神高速道路公団 工務部設計課 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3)

***日本技術開発 地震防災部 (〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11)

Numbers of steel piers suffered significant buckling damage during the Hyogoken-Nambu Earthquake. The damage was especially conspicuous around the manhole of flange plates of those piers. To derive the damage mechanism of the manhole, analytical evaluation was performed. Results showed that the arrangement of manhole has influence on the damage level and fractural pattern of flanges, but has very little influence on the bearing capacity of piers.

Key Words: manhole, buckling, earthquake damage, FEM, seismic design

キーワード: マンホール, 座屈, 地震被害, 有限要素法, 耐震設計

1. まえがき

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震により阪神高速道路3号神戸線の橋脚は甚大な被害を被ったが、鋼製橋脚にも多くの損傷が認められた。橋脚の座屈損傷は対象124基中の54基に発生したが、その座屈損傷の特徴として、54基のうち23基(43%)についてはマンホール部を有する補剛板付近に損傷が見受けられた。このことから鋼製橋脚においては中詰めコンクリート部上面ばかりでなく、マンホール部が耐震上の弱点となっている可能性が指摘できる。そこで、マンホール部に着目した損傷の特徴を把握するための定量分析およびFEM解析を実施し、マンホール部損傷の特徴について考察した^{1)~4)}。

2. 鋼製橋脚の柱座屈損傷の特徴

本論文では、特に損傷の大きかった阪神高速道路3号神戸線の武庫川-月見山間の鋼製橋脚124基を検討対象とした。表-1に鋼製橋脚の形式と柱座屈損傷ランクの関係を示す。鋼製橋脚はラーメン橋脚、T型支持ラーメン橋脚(鋼製T型柱の横梁がピン支査を介して鋼製柱あるいはRC柱によって支えられた形式)お

よび単柱橋脚の3種類の構造形式に分類されるが、ラーメン形式が124基中の64基(52%)を占めている。これは、高速道路の拡幅部などの広幅員部で鋼製橋脚が多く使われるためと考えられる。また、表-1における柱座屈損傷ランクは図-1に示すように道路震災対策便覧⁵⁾に準じて分類している。鋼製橋脚の局部座屈による補剛板の面外残留変形量(へこみもしくはふくらみ)と横リブ間隔の比率により柱の座屈損傷ランクを判定しているが、Aランクで概ね40mm以上、Bランクで10mm以上の変形量となっている。橋脚形状に着目すると、柱座屈損傷している54基の内訳は、単柱橋脚が23基(42%)、T型支持ラーメン橋脚が9基(17%)、ラーメン橋脚が22基(41%)となっており、ばらつきはあるものの、いずれの橋脚形式でも損傷が生じている。

橋脚の柱座屈損傷の方向性を表-2に示す。ここで示した柱座屈損傷の方向性は、橋軸方向および橋軸直角方向のうち座屈変形の特徴である補剛板の凹凸変形が大きい方の面とした。同表から分かるように、矩形断面橋脚の場合は対象33基の85%にあたる28基が橋軸方向で座屈損傷が生じていることがわかる。これには地震の方向性の影響も考えられるが、ラーメン形式では橋軸方向に比べて、橋軸直角方向の耐力が大きい

表-1 橋脚形式と柱座屈損傷ランク

橋脚形式 座屈 損傷度 ランク	単 柱		T型支持ラーメン				ラーメン										合計(基)				
																					
	矩形	円形	矩形	円形	矩形	円形	矩形	円形	矩形	円形	矩形	円形	矩形	円形	矩形	円形		矩形	円形	矩形	円形
A s		2			1															3	
A	1	6					2		3		1		1					1		15	
B		3			1		3		2		1		2		1			2		15	
C	1	8					2		3		2				3		2			21	
D(損傷なし)	11	6	6		1		5	1	11	4	18				1			6		70	
As~D (基)	13	25	6		3		12	1	19	4	22		3		5		2		9	124 (100%)	
	44 (35%)				16 (13%)				64 (52%)												

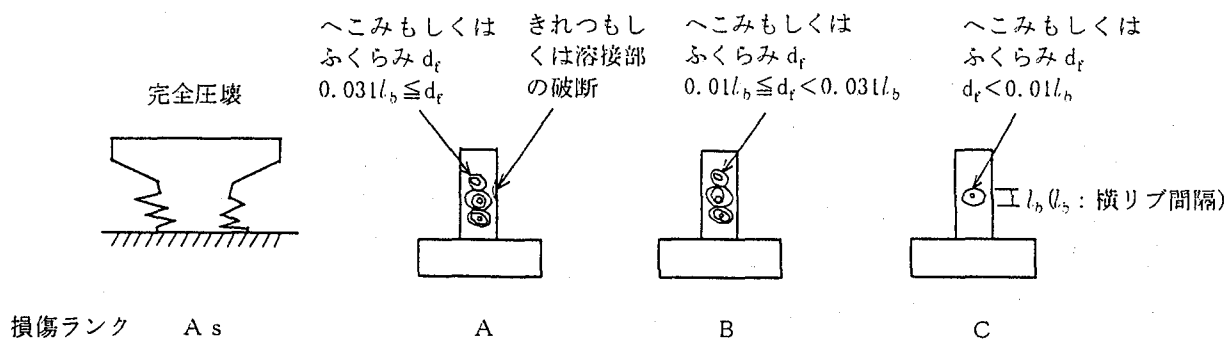


図-1 鋼製橋脚の座屈損傷判定ランク

表-2 柱座屈損傷の方向性

橋脚形式 \ 断面形状	矩形断面		円形断面
	橋軸方向	直角方向	
単柱	0	2	21
T型支持ラーメン	8	0	0
	1(崩壊)		
ラーメン	20	2	0
小計	33(61%)		21(39%)
合計(基)	54(100%)		

表-3 柱座屈損傷箇所と損傷ランク

断面 形状 座屈 損傷度ランク	マンホール部		マンホール部 以外		合計 (基)
	矩形	円形	矩形	円形	
A s	0	0	1	2	3
A	6	0	2	7	15
B	9	0	2	4	15
C	7	1	6	7	21
小計	22	1	11	20	54 (100%)
合計(基)	23 (43%)		31 (57%)		

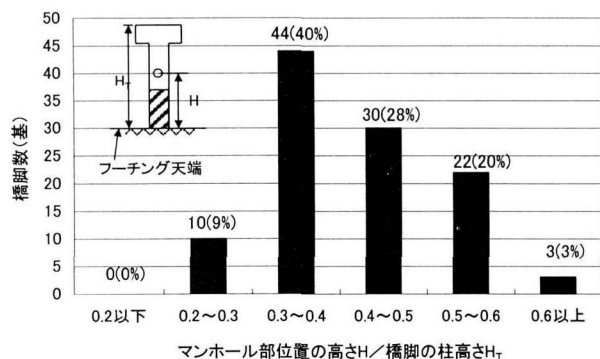
ことや、橋軸方向にはマンホールがあることが多いことなども要因としては考えられる。なお、円形断面橋脚の場合は座屈を生じた方向の判断が困難なため、方向ごとの分類は行っていない。

柱座屈損傷箇所と損傷ランクの関係を表-3に示す。柱の座屈損傷は複数箇所で見られるため、本論文では、柱の座屈損傷が顕著に見られた損傷方向の橋脚補剛板において最大面外残留変形量を生じた箇所を損傷位置として定義している。同表より、柱の座屈損傷を受けた54基のうちの23基(43%)の橋脚は、マンホール部で座屈損傷を生じていたことになり、橋脚の座屈損傷の特徴的な現象と考えられる。特に矩形断面では損傷橋脚33基中の22基(67%)がマンホール部で主に損傷している。

3. マンホール部の損傷分析

3.1 マンホールの設置位置・形状

対象鋼製橋脚124基のうち、柱部にマンホールのあるものは109基であった。109基のうち、マンホールの位置が推定できる101基について、柱高さ(H_T)とマンホール位置(H)の関係を図-2に示す。ここで、柱高さはフーチング上面から橋脚天端までの距離で、



図－2 マンホール位置と橋脚高さの関係

マンホール位置はフーチング上面からマンホール中心までの距離と定義している。橋脚高さ 10m 程度で、マンホール位置が 3～5m のものが一般的であることから、 H/H_T が 0.3～0.6 程度のものが多い。また、設置面については、交通規制することなしに容易に点検が実施できることから橋軸面にマンホールを設置する 경우가多く、矩形橋脚を例にとると、90 基のうち 78 基 (87%) が橋軸面にマンホールを設けている。

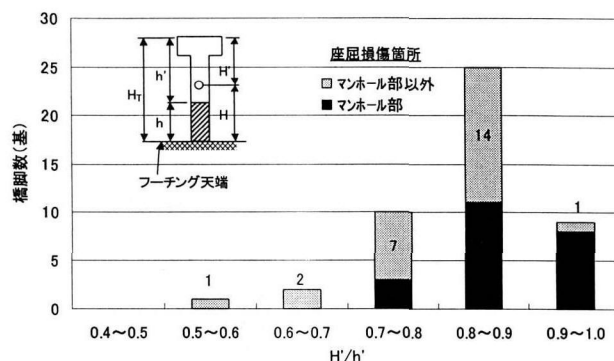
マンホール形状では、楕円型が 109 基のうち 84 基 (77%)、円形が 16 基 (15%)、角形が 9 基 (8%) となっているが、その形状の使用区分については現在までのところ不明である。

マンホール部の補強手法では、ダブリングによるものが 94 基 (86%)、補強材によるものが 15 基 (14%) となっている。ダブリングによる補強手法が一般的であるが、補強材の厚さは 8～34mm の範囲に分布している。ここで、補剛材補強とは水平方向のリブを切断して、リブ形状を菱形としたものである。

3.2 マンホール部損傷分析

損傷ランクとマンホール位置、マンホールの縦横開口率との関係について詳細に分析した。マンホールの補強手法と損傷度との関係では、ダブリング補強した橋脚の 22% (94 基中の 21 基)、補強材補強した橋脚の 20% (15 基中の 3 基) で損傷が生じており、特に補強手法による差異は認められなかった。

図－3 にマンホール位置と中詰め上面高さとの関係を示す。ここで H' は橋脚天端からマンホール中心までの距離であり、 h' は橋脚天端から中詰めコンクリート上面までの距離である。図－3 に示すように、 H'/h' の比が大きくなるにつれて、すなわち、マンホール部が中詰めコンクリート近くに設置されるほど、マンホール損傷が増加していくことが分かる。このように、マンホール位置によって、中詰めコンクリート上面部が損傷する場合とマンホール部が損傷する場合に分岐



図－3 マンホール位置と中詰め上面高さとの関係

表－4 矩形断面橋脚の座屈面数

座屈損傷のある面数	1	2	3	4	小計
損傷箇所					
マンホール部	10	5	4	3	22
その他	7	0	1	2	10
小 計	17	5	5	5	32

注) 神戸 P55 橋脚は崩壊のため座屈損傷面数不明

され则认为られる。また、マンホール部で損傷した 23 基のうち、4 基については中詰めコンクリート上面部においても損傷が認められ、マンホール部と中詰めコンクリートの耐力比が拮抗している可能性も指摘できる。

表－4 に矩形断面橋脚の座屈損傷面数を示すが、マンホール部損傷では一面のみの座屈が 10 基 (40%) であるのに対して、その他部位の損傷では 7 基 (70%) が一面のみの損傷となっており、マンホール部の場合、複数面での損傷が多い。

図－4 にマンホール部の縦方向開口率と損傷ランクの関係を示す。ここで、縦方向開口率は、マンホール縦寸法 ($D_{||}$) をマンホール部の横リブ間隔 (A 、図－1 に示す L_b) で除したものである。ばらつきが大きく明確な傾向は得られなかったが、縦方向開口率が 0.3 以下でも損傷が認められる。

図－5 はマンホールの横方向開口率と損傷の関係を示す。ここで、横方向開口率は、マンホールの横方向寸法 ($b_{||}$) をマンホール部の柱寸法 (B) で除したものである。図－4 と同様にばらつきが大きく明確な傾向は認められないが、0.2 以下の横方向開口率でも損傷が認められる。

以上のように、詳細分析結果からは、マンホール部損傷の特徴として、マンホール位置が大きく影響することが明確に現れた。また、マンホール部損傷は複数面の損傷となりやすいことが分かった。そこで、マンホール部が大きく損傷した橋脚に対して、マンホール部と中詰め部上面の損傷形態の差異について以下のよ

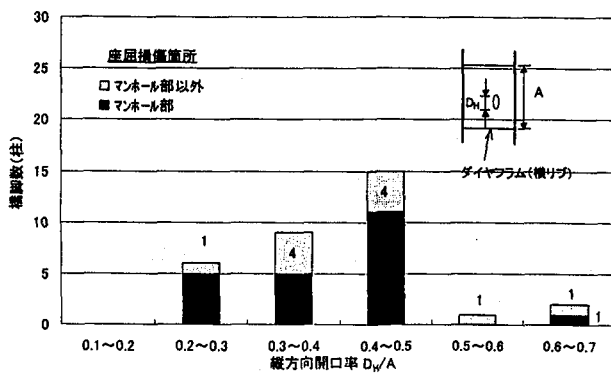


図-4 縦方向開口率分布

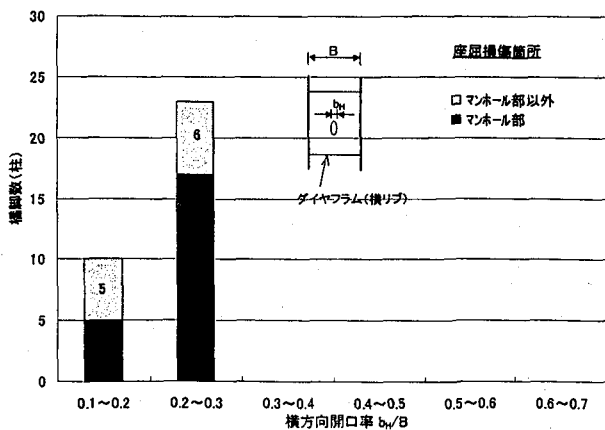


図-5 横方向開口率分布

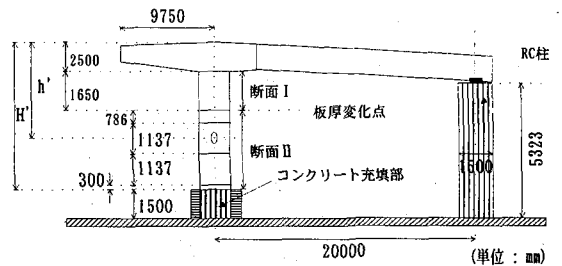
うな解析を実施した。

4. 有限要素解析

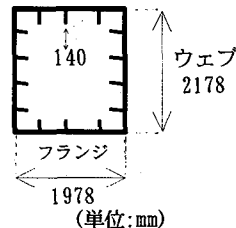
4.1 解析対象

マンホール部に損傷を受けた典型的な鋼製橋脚である神 P74 橋脚を取り上げて有限要素解析を行い、マンホール部を有する鋼製橋脚の変形特性に関して検討を加える。この解析には、汎用有限要素解析プログラム ABAQUS⁶⁾を用いる。

神 P74 橋脚の概略を図-6 (a)に示している。これは T 型支柱ラーメン橋脚であり、マンホール位置 H'/h' は 0.73 である。マンホールを有する鋼製柱の断面諸元を図-6 (b)に示している。図中、フランジはマンホールを有する補剛板およびそれと平行に位置する補剛板、ウェブは残りの補剛板を表している。この鋼製柱は、上部(断面 I)と下部(断面 II)で板厚が異なり、変断面構造となっている。また、図-7に示すように、マンホール部の周囲は、橋脚の内側に幅 80mm、厚さ 22mm の板を張ることによってダブリング補強されている。図-7 上方に示すのは A-A での断面図であり、マンホール部の周囲は板厚がちょうど 2



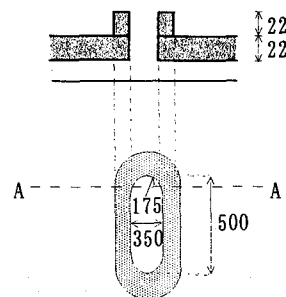
(a) 概略



(b) 鋼製柱の断面

	板厚 (mm)	
	断面 I	断面 II
フランジ	36	22
ウェブ	22	22
縦補剛材	12	12

図-6 橋脚形状



(単位:mm)

図-7 マンホール形状

倍になっていることが理解される。兵庫県南部地震における神 P74 橋脚の損傷状況を図-8に示す。複数の補剛板で座屈が生じているが、マンホール部で最も大きな面外変形が観察されている。

図-8の損傷状況や本橋脚の橋軸方向と橋軸直角方向の剛性差を考えると、この橋脚は橋軸方向に大きく変位し、座屈が生じたと推定される。そこで、橋軸方向に載荷して FEM 解析を行い、マンホールを有する鋼製橋脚の変形特性を検討する。橋軸方向についてはラーメン構造としての特性はあまり発揮されないこと、また計算量の軽減を図る必要があることから、ここでは鋼製柱を単柱形式として単純化した橋脚モデルで解析を行う。ただし、上部工重量やラーメン橋脚梁部の重量によって鋼製柱上端に作用する軸力、橋軸回りの曲げモーメントは別途算出し、鋼製柱上端に初期荷重として作用させることとする。なお、コンクリート充填部は、他の箇所比して剛性がかなり大きく、局部

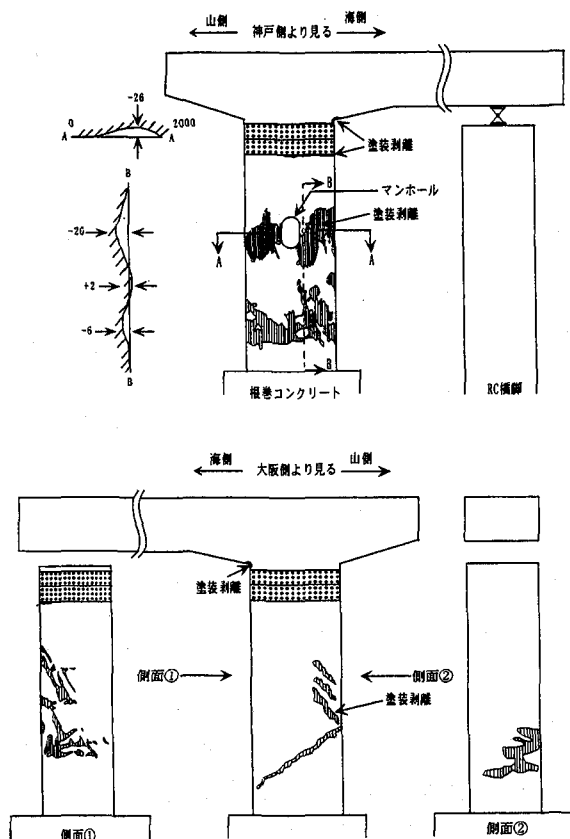


図-8 神P74 橋脚の損傷状況

座屈も生じないことから、コンクリート充填上面を固定端とする片持ち柱として鋼製柱をモデル化する。

以上で記した解析対象の鋼製柱を図-9に示す。図中、Y軸が橋軸方向である。また、P、Mは、上部工および梁部の重量によって鋼製柱上端に作用する軸力、橋軸回りの曲げモーメント、Hおよび δ は橋軸方向の水平荷重、水平変位をそれぞれ表している。

軸力 P、橋軸回りの曲げモーメント M の大きさは、T型支柱ラーメン橋脚全体を解析することで定められる。そのため、ここでは、梁要素で橋脚をモデル化して解析を行った。その際、外力には上部工重量と梁部の重量を考え、ヤング率、ポアソン比をそれぞれ $2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、0.3 と仮定した。この解析の結果、軸力 $P=8.65 \times 10^6 \text{ N}$ 、橋軸回りの曲げモーメント $M=3.84 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{mm}$ が得られた。これらの値は、それぞれ降伏軸力、降伏曲げモーメントの11%、7.5%に該当する。

4.2 解析方法

局部座屈を取り扱うため、ここでは幾何学的非線形と材料非線形の両方を考慮した複合非線形解析を行う。使用する弾性定数は前節で用いた値と同じであり、弾塑性構成則には三曲面モデル⁷⁾を用いる。三曲面モデルは、ユーザーサブルーチンで ABAQUS に組み込んで

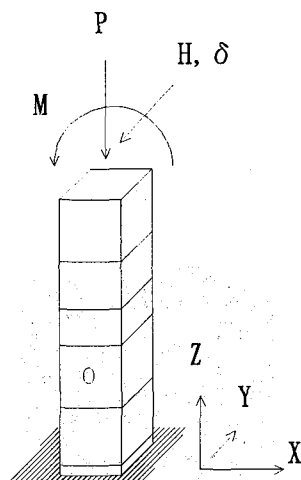


図-9 鋼製柱モデル

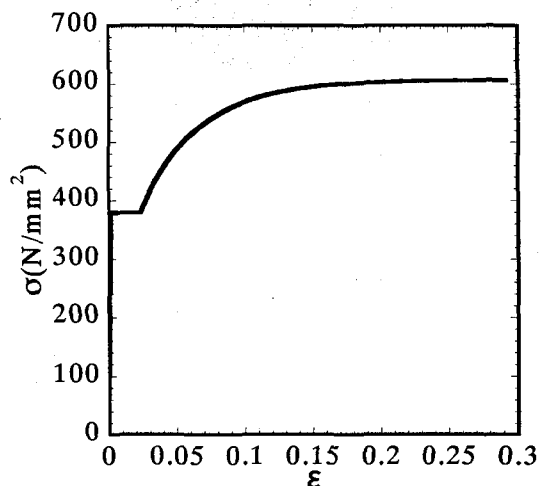


図-10 応力-ひずみ関係

いる。鋼材の変形特性として、図-10に示す一軸引張荷重下での応力-ひずみ関係を仮定し、三曲面モデルのパラメータはこれをもとに決定する。なお、この応力-ひずみ関係は同種の鋼材の材料試験で得られたものである⁸⁾。

FEM 解析に際しては、鋼製柱の断面Ⅱの区間はシェル要素 (10276 個)、残りの区間は梁要素 13 個で要素分割する。要素分割図を図-11に示す。なお、柱と梁の交差部 (隅角部) に対応する区間は剛としている。

図-7に示したように、マンホール部の周囲は、橋脚の内側に板を張ってダブリング補強されている。そのため、補剛板パネル一般部の中立面とダブリング補強された箇所の中立面は一致せず、補強部外周縁において不連続に変化する。シェル理論では、一般に、シェル状の物体をその中立面で代表させる。そのため、中立面が不連続に変化するような場合には、そのモデル化において何らかの工夫が必要となる。

この点に関する最も簡単な対処法は、補強部の中立

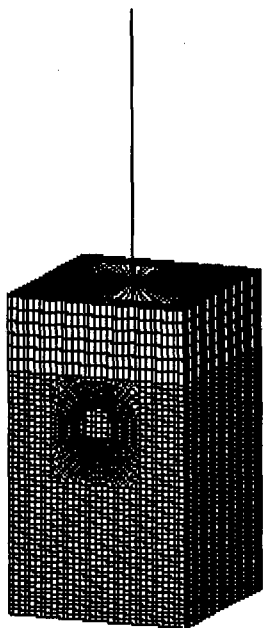


図-11 要素分割

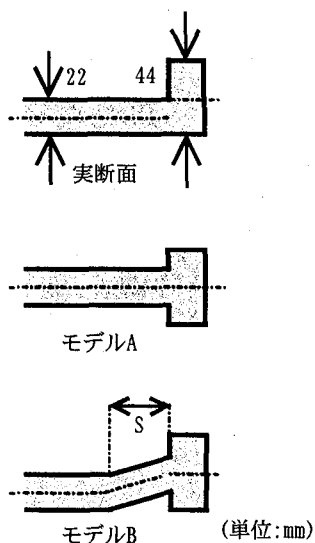


図-12 補強部のモデル化

面を移動させて、中立面の不連続性をなくしたモデルを採用することである。また、中立面を徐々に変化させることで、中立面の不連続性に対処することも考えられる。図-12には、これらの考え方に基づいた、マンホール周辺の補強部のモデル化を示している。モデルAが前者、モデルBが後者の考えに基づいたものである。なお、モデルBの S は中立面の傾斜部であり、本来、大きさを持たない（ゼロである）。そのため、 S の大きさが解析結果に及ぼす影響にも注意する必要がある。そこで、 S の大きさに種々の値を用いて解析を行い、検討を加える。荷重条件としては、軸力 P 、橋軸回りの曲げモーメント M を図-9に示すように作用させた上で、橋軸（ Y 軸）方向の水平変位を制御し、

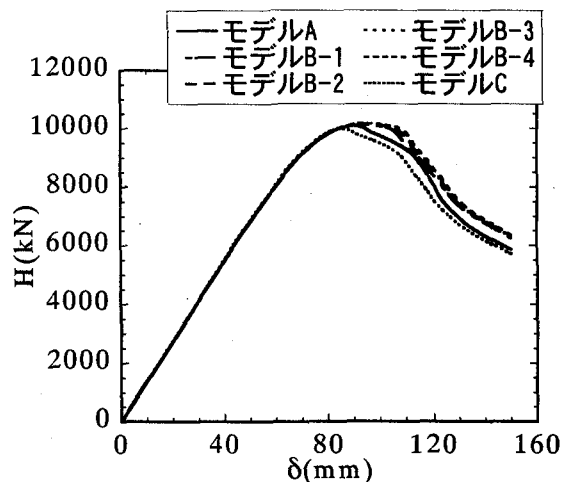


図-13 水平荷重-水平変位関係（単調荷重）

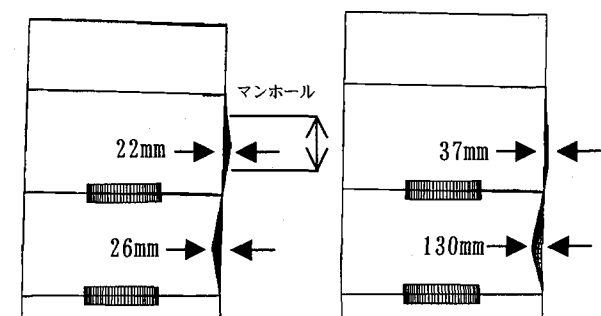
水平方向に荷重する。

4.3 解析結果と考察

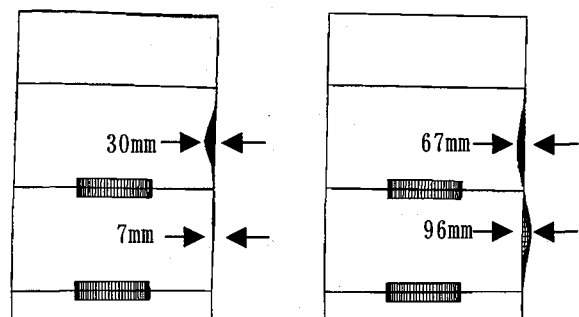
まずマンホールを含む面が圧縮される方向に単調荷重し、解析した。具体的には、水平変位を制御することで、最大耐荷力以降の変形挙動も求め、計算結果として、図-13に荷重点での水平荷重 H -水平変位 δ 曲線を描いている。モデルBの傾斜部長さ S には55, 27.5, 11, 5.5mmを仮定し、4ケースの解析を行った（ S の大きな方からB-1, B-2, B-3, B-4と呼称する）。この解析結果を見ると、中立面を移動させるモデル（モデルA）と傾斜をつけるモデル（モデルB）間に明確な差が認められる。モデルBでは S の大きさにより4ケースの解析を行っているが、その差はごくわずかであり、 S を5.5mm（モデルB-4）より小さくする必要は特にないと判断される。そのため、以下では、 $S=5.5$ mm（モデルB-4）の解析結果をモデルBの結果として記す。

モデルAとモデルBの違いを変形モードの点から検討するため、図-14にモデルAとモデルBで得られた鋼製柱の変形図（ x 軸の正方向への投影図）を示している。最大耐荷力点付近である $\delta=95$ mmにおいて、モデルAでは橋脚下部の変形が大きいのに対し、モデルBではマンホール部での面外変形が大きく、変形モードの異なることが理解される。しかしながら、モデルBにおいても、徐々に橋脚下部での面外変形が大きくなり、モデルAと同じような変形モードを示すようになる。

マンホールがない場合についても同様の解析を行った。モデルCとして図-13に示すのがその結果である。モデルCは他のモデルに比して最大耐荷力が小さく、耐荷力の低下が早く始まる。水平荷重 H -水平変位 δ 曲線、変形モードともに、モデルBよりモデルAに近



(a) モデル A ($\delta = 95\text{mm}$) (b) モデル A ($\delta = 150\text{mm}$)
(変形倍率 4 倍)



(c) モデル B ($\delta = 95\text{mm}$) (d) モデル B ($\delta = 150\text{mm}$)
(変形倍率 4 倍)

図-14 変形図 (単調載荷)

い結果となっている。

荷重-水平曲線と変形モード図を見比べると、橋脚下部の面外変形が耐力低下と深く関連していることがわかる。また、マンホール近傍で面外変形が生じると、橋脚下部の面外変形が緩和されている。したがって、マンホールを有する補剛板パネルは構造ヒューズのような役割を果たし、この橋脚の最終的な変形モード（崩壊モード）である橋脚下部の局部座屈への移行を遅らせていると考えることができる。

モデル B で $\delta = 100\text{mm}$ まで載荷した後、水平荷重を完全に取り除き、残留変位を調べた。この時の変形状態を図-15 に示しているが、マンホール部には最大面外変位 25mm が見られる。この変形状態を兵庫県南部地震後に観察された被災状況（図-8）と比較すると、変形モードのみならず、面外変位もよく一致している。これは、兵庫県南部地震時に、神 P74 橋脚は最大耐力に達する程度の変形状態に至ったことを示唆するものである。なお、モデル A では異なった変形モードとなるため、兵庫県南部地震時の被災状況を再現することはできなかった。

次に、柱頭部に繰り返し水平荷重を与えて解析を行った。水平荷重の大きさは、載荷点の水平変位の振幅が $0 \rightarrow +\delta y \rightarrow -\delta y \rightarrow +2\delta y \rightarrow -2\delta y \rightarrow \dots$ と漸次増加しながら変化するように制御した。ここに、

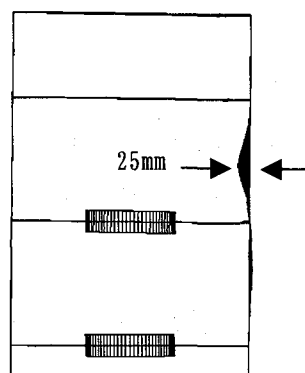


図-15 残留変形(モデル B:単調載荷, 変形倍率 4 倍)

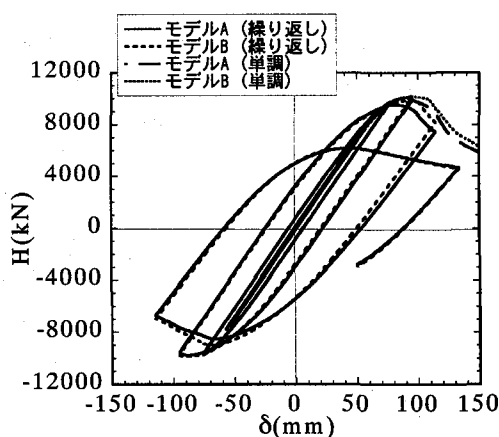


図-16 水平荷重-水平変位関係

δy は、マンホールを無視して片持ち柱として求めた柱頭部での降伏水平変位である。この載荷方法は、鋼製橋脚の耐震性を検討する際によく用いられるものである⁹⁾。得られた載荷点での水平荷重 H -水平変位 δ 関係を、単調載荷の結果とともに図-16 に示している。

単調載荷の結果と比較すると、最大耐力付近まではそれほど大きな差は認められないが、最大耐力以降の劣化域において、繰り返し載荷の方が耐力低下の度合いが大きくなっている。また、最大耐力付近でモデル A とモデル B の荷重-変位曲線に差が見られるが、この領域では、単調載荷の場合と同様に、2つのモデル間で局部座屈モードに違いがある。局部座屈モードの違いは変形の進展とともに小さくなり、荷重-変位曲線もほぼ一致するようになる。

繰り返し載荷の解析においても、モデル B の鋼製柱で水平変位が $\delta = 100\text{mm}$ に到達した後、水平荷重を完全に除去し、残留変位を調べた。この時の変形状態を図-17 に示している。橋脚下部よりマンホール部の変形が大きく、最大面外変形は 25mm である。これは、兵庫県南部地震時の被災状況とほぼ同じで変形状態である。また、マンホール部と対をなすフランジに面外

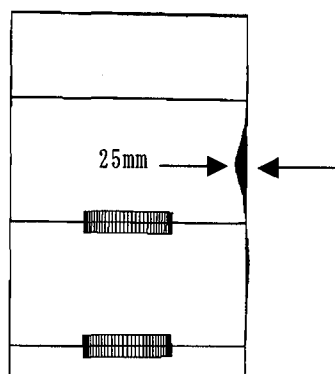


図-17 残留変形 (モデルB:繰り返し載荷,
変形倍率4倍)

変形はほとんど見られず、この点でも兵庫県南部地震時の被災状況とよく一致している。したがって、繰り返し載荷の解析結果からも、神 P74 橋脚は兵庫県南部地震時に最大耐荷力付近に達する程度まで変形したと推察される。

5. まとめ

被災した3号神戸線のマンホール部を有する鋼製橋脚を対象とした損傷分析結果を以下にまとめる。

- ①対象鋼製橋脚 (124 基) の 54 基で座屈損傷が観察され、そのうちの 23 基についてはマンホール部で主な損傷が見られた。
- ②マンホール部のパラメータ分析の結果、損傷したマンホール部は中詰めコンクリート上面近くにあるものが多く、マンホール位置が大きく影響することが明らかとなった。
- ③マンホール部の補強手法、縦方向開口率、横方向開口率と損傷には明確な傾向は見いだせなかった。
- ④代表例として比較的マンホール部損傷の大きな神 P-74 橋脚を FEM 解析した結果、被災状況をほぼ再現できた。また、再現結果は、兵庫県南部地震時に、神 P74 橋脚は最大耐荷力付近に達する程度まで変形したことを示唆するものであった。
- ⑤マンホールの有無により、初期段階の局部座屈モードには違いが生じるが、最終的には橋脚下部での面外変形が大きくなり、耐荷力が低下した。
- ⑥FEM 解析に際しては、ダブリング補強部のモデル化

に注意を要する。

以上の研究成果をもとに、今後マンホール部を有する鋼製橋脚の損傷分析を解析的に行う予定である。

謝辞

本研究を遂行するにあたっては、鋼材倶楽部の才村幸生氏、九州工業大学大学院の久保知徳氏にたいへんお世話になった。ここに記して感謝する次第である。

参考文献

- 1) 安木清史, 秦健作, 幸左賢二, 中沢好夫, 才村幸生: 兵庫県南部地震による円形断面鋼製単柱橋脚の座屈損傷に関する一検討, 第 55 回土木学会学術講演会概要集 I, 2000.
- 2) 秦健作, 水谷治弘, 幸左賢二, 才村幸生, 劉銘崇: 兵庫県南部地震における鋼製橋脚の損傷と座屈パラメータの関係について, 第 55 回土木学会学術講演会概要集 I, 2000.
- 3) 中井博, 北田俊行, 鈴木巖, 堀江佳平, 祝賢治: 開口部を有する圧縮補剛板の実績調査, 橋梁と基礎, Vol.30, No.9, pp.31-38, 1996.
- 4) 中村雅樹, 藤井堅, 有吉孝文, 上野谷実: ダブリング補強されたマンホールを有する鋼製橋脚の変形能, 構造工学論文集 Vol.45A, pp.175-183, 1999.
- 5) 日本道路協会, 道路震災対策便覧 (震災復旧編), 1988.
- 6) ABAQUS/Standard User's Manual, Ver.5.5, 1995.
- 7) 後藤芳顯, 王慶雲, 高橋宣男, 小畑誠: 繰り返し荷重下の鋼製橋脚の有限要素法による解析と材料構成則, 土木学会論文集, No.591/I-43, pp189-206, 1998.
- 8) 山口栄輝, 後藤芳顯, 阿部圭吾, 林正挙, 堂上幸男, 吉崎信之: 繰り返し水平荷重を受ける鋼製R付断面橋脚の弾塑性有限変位解析, 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, 土木学会, pp.249-254, 1998.
- 9) 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, 日本橋梁建設協会: 道路橋橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同報告書 (I), 1997.

(2000年9月14日受付)