

鋼製橋脚の地震時保有水平耐力法の適用

庄野 泉*, 依田 照彦**, 井浦 雅司***, 石毛 立也****
 奥村 恭司+, 小泉 幹男++, 魚谷 明宏+++, 村瀬 孝典++++

- * (株) 酒井鉄工所 (〒590 大阪府堺市出島西町 3-1)
- ** 早稲田大学理工学部 (〒169 新宿区大久保 3-4-1)
- *** 東京電機大学理工学部 (〒350-03 埼玉県比企郡鳩山町)
- **** 川崎重工業 (株) (〒136 江東区南砂 2-11-1)
- + (株) 宮地鉄工所 (〒103 中央区日本橋小伝馬町 15-18)
- ++ 日本鋼管 (株) (〒230 横浜市鶴見区末広町 2-1)
- ++ (株) 春本鉄工所 (〒104 中央区新川 2-26-3)
- ++++ 日本車両製造 (株) (〒456-91 名古屋市熱田区三本松町 1-1)

本報告では既往の研究成果を基に、コンクリートを充填しない鋼製橋脚の地震時保有水平耐力法による耐震設計を行なう。基本的な考え方はコンクリートを充填した鋼製橋脚の場合と同じであり、復元モデルには道路橋示方書に示されている角補強を有する矩形断面鋼製橋脚のモデルを用いた。用いているパラメータの決定方法については議論の余地はあるものの、コンクリートを充填しない鋼製橋脚の地震時保有水平耐力法による耐震設計法の基本的な考え方を示した。なお、動的解析も同時に実施し、地震時保有水平耐力法による結果との比較検討を行った。

Key Words : Steel bridge pier, Ultimate earthquake resistance, Seismic design

1. はじめに

平成8年12月に改訂された「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編」¹⁾(以降は 道示 V 編 と略記)において、鋼製橋脚の地震時保有水平耐力と許容塑性率の算定法が規定された。コンクリートを充填した鋼製橋脚においては、鉄筋コンクリート橋脚と同様の考え方にに基づき、地震時保有水平耐力と許容塑性率の算定方法が示されている。一方、コンクリートを充填しない鋼製橋脚においては、ぜい性的な破壊を防ぎ、じん性の向上を図れる構造とするとともに、非線形性を考慮した動的解析を行うこととしており、地震時保有水平耐力法による設計法は規定されていない。

平成9年3月に発行された、「道路橋の耐震設計に関する資料」²⁾においては、コンクリートを充填しない鋼製橋脚の設計計算例が示されている。そこでは、道示 V 編に示されている角補強を有する矩形断面鋼製橋脚の復元モデルを基に、タイプ I とタイプ II の地震動に対する動的解析が行われ、最大変位・残留変位・終局水平耐力等を照査している。道示 V 編において、コンクリートを充填した鋼製橋脚と、

コンクリートを充填しない鋼製橋脚との設計に差異が生じている理由は、コンクリートを充填しない鋼製橋脚の研究が比較的少なく、その力学的挙動が明確でない点が挙げられる。コンクリートを充填した鋼製橋脚の研究は建設省土木研究所をはじめとし、多くの研究が報告されている。一方、コンクリートを充填しない鋼製橋脚の研究も、阪神・淡路大震災以降、各研究機関において精力的に実施されており、その力学的挙動は明確にされつつある^{3), 4), 5)}。それらの成果を基に、今後、コンクリートを充填しない鋼製橋脚の地震時保有水平耐力法による設計指針も提案されるものと思われる。

そこで本研究においては、既往の研究成果を基に、コンクリートを充填しない鋼製橋脚の地震時保有水平耐力法による耐震設計を試みた。対象構造物として、4ケースの矩形断面橋脚を取り上げた。基本的な考え方は、コンクリートを充填した鋼製橋脚の場合と同じであり、復元モデルには道示 V 編に示されている角補強を有する矩形断面鋼製橋脚のモデルを用いた。本報告においては、パラメータの決定方法等において未だ議論すべき点は残されているものの、

コンクリートを充填しない鋼製橋脚の地震時保有水平耐力法による耐震設計法の基礎的な考え方を示すことができたものと思われる。また、動的解析も同時に実施し、地震時保有水平耐力法による結果との比較検討を行っている。

2. 対象モデル

以下に本報告で対象とした4種類の鋼製橋脚のモデルについて説明する。

2.1 ケース1

ケース1のモデルは、図-1に示すように左右対称のT型橋脚であり、断面は300cm×240cmであり、縦補剛材はフランジとウェブにそれぞれ5本、4本を配置している。支承としてはゴム支承を用いており、地盤種別はⅡ種である。なお、動的解析及び地震時保有水平耐力法は、橋軸・橋直の2方向で行う。

2.2 ケース2

ケース2のモデルは、図-2に示すようT型橋脚であり、ケース1の橋脚と比較し橋脚高が高い。断面は400cm×400cmであり、縦補剛材はフランジとウェブにそれぞれ7本を配置している。支承はBP-A支承であり、地盤種別はⅡ種である。なお、動的解析及び地震時保有水平耐力法は、橋軸・橋直の2方向で行う。

2.3 ケース3

ケース3のモデルは建設省土木研究所で実験された矩形断面を有する供試体No. 23である。本供試体は既設鋼製橋脚の構造諸元を参考として、実橋脚の1/3程度の断面となっている。なお、地盤種別はⅡ種としており、動的解析及び地震時保有水平耐力法は、橋直の1方向のみで行う。

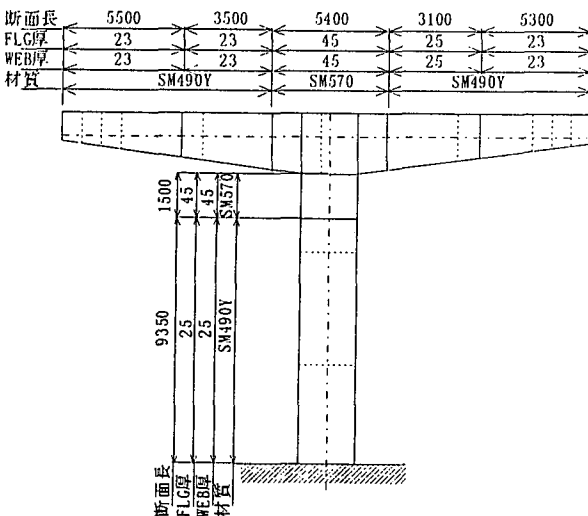


図-1 橋脚寸法(ケース1)

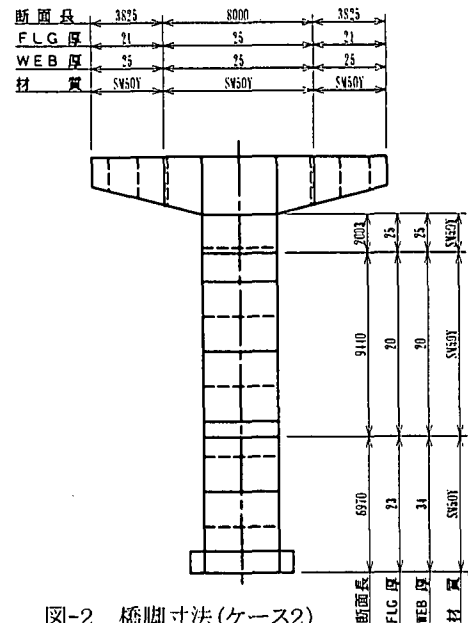


図-2 橋脚寸法(ケース2)

2.4 ケース4

ケース4のモデルは、「道路橋の耐震設計に関する資料」²⁾において試設計されている、コンクリートを充填しない鋼製橋脚P2である。地盤種別はⅡ種とし、動的解析及び地震時保有水平耐力法は、橋軸・橋直の2方向で行う。

3. 動的解析

本報告では、道示V編に従いタイプⅠ、タイプⅡの地震動に対して、コンクリートを充填しない鋼製橋脚の非線形性を考慮した動的解析を行う。非線形性を考慮した動的解析に用いる復元力モデル等の鋼製橋脚の弾塑性挙動を表す諸数値は、道路橋示方書・同解説に従っている。

3.1 入力条件

3.1.1 解析モデル

解析に用いるモデルは、地震時保有水平耐力法と同様に、設計振動単位を1基の下部構造とそれが支持している上部構造部分からなる構造系に分割してモデル化した。また、図-3に示す様に上部構造部分と橋脚の重量を考慮し、ゴム支承および橋脚のパネをモデルに取り入れている。なお、鋼製支承の場合は支承のパネ定数は ∞ としている。なお、基礎および地盤の影響は、比較条件を統一する目的から無視する。

本解析モデルでは、橋脚の曲げ変形を橋脚基部の回転パネ K_p の変形で評価し、回転パネより上の部材は剛部材として取り扱う。また、回転パネ K_p のモーメント M と回転角 θ の関係は、3.1.2で示す橋脚の復元力モデルに等価となるように設定した。

3.1.2 復元力モデル

復元力モデルの設定にあたり、道路橋示方書・同解説にある角補強を有する橋脚の実験データをもとに、タイプⅠの地震動に対する許容変位を $4\delta_y$ 、タイプⅡの地震動に対する許容変位を $5\delta_y$ と設定している。

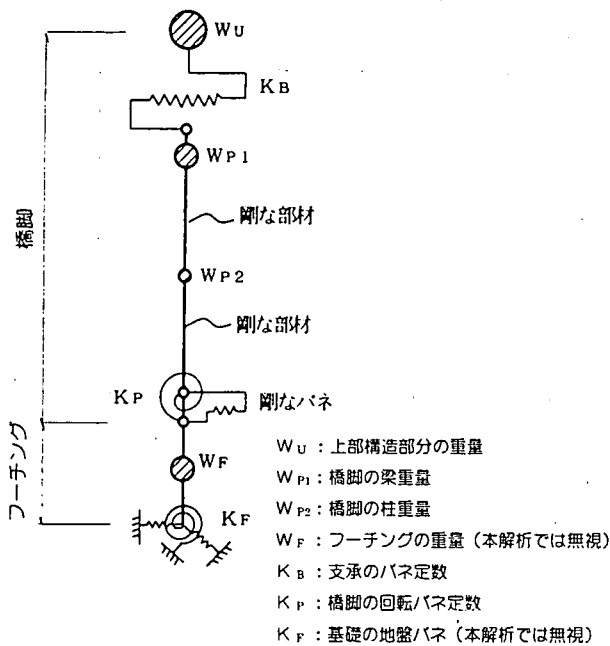


図-3 解析モデル

3.1.3 減衰定数

解析モデルの等価減衰定数 h には、道示 V 編 式(解 6.2.1)により算出した1次モードの等価減衰定数を用いた。この時のゴム支承、橋脚の減衰定数は道示 V 編 6.2 にしたがひ、0.02、0.02としている。

3.1.4 入力地震動

入力地震動は、道示 V 編 図-解 6.3.4 に示されたタイプ I とタイプ II の標準加速度応答スペクトルと近似するように、振動数に応じて振幅調整した波形(建設省 土木研究所作成波形)を使用した。なお、解析では各タイプごとに3波の加速度波形を入力し、各タイプごとの応答結果の平均値を用いて後編にて地震時保有水平耐力法結果との比較を行っている。

3.2 解析結果

ここでは、タイプ I 地震動に対する橋軸直角方向の天端における変位応答を、ケース1からケース3について図-4 から図-6に示す。

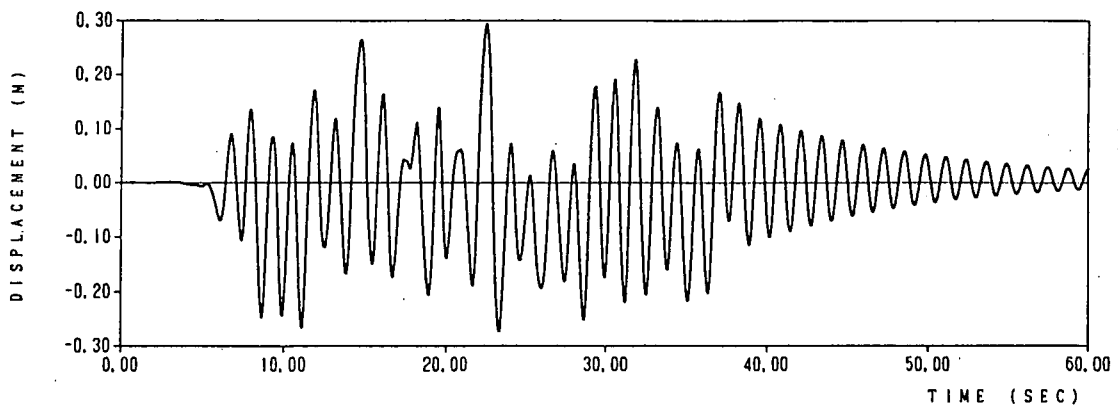


図-4 ケース1の時刻歴応答 (その1)

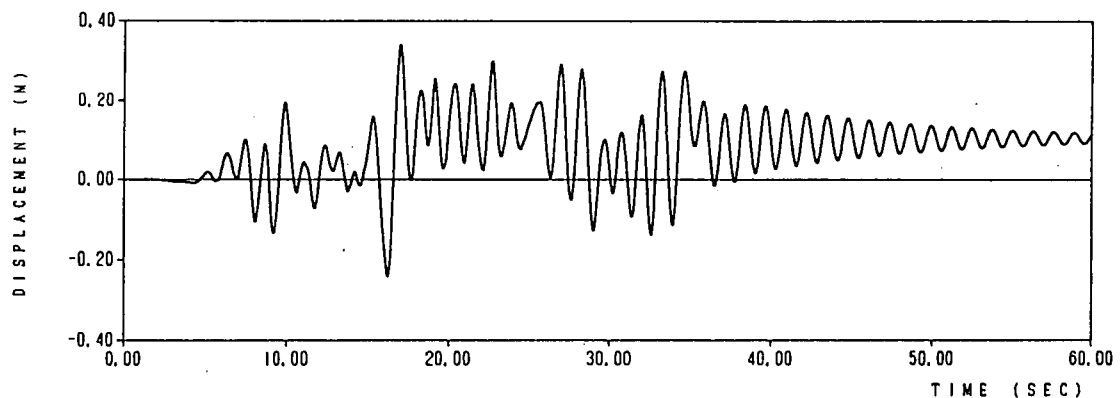


図-4 ケース1の時刻歴応答 (その2)

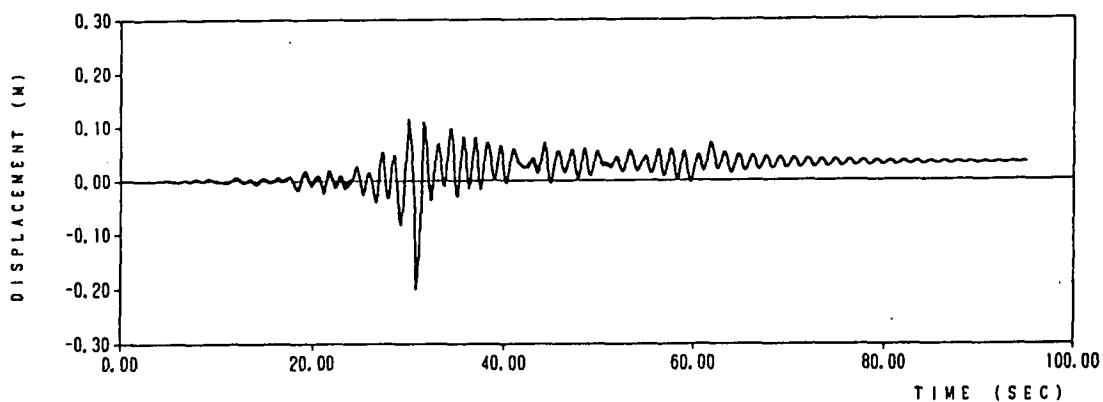


図-4 ケース 1 の時刻歴応答 (その 3)

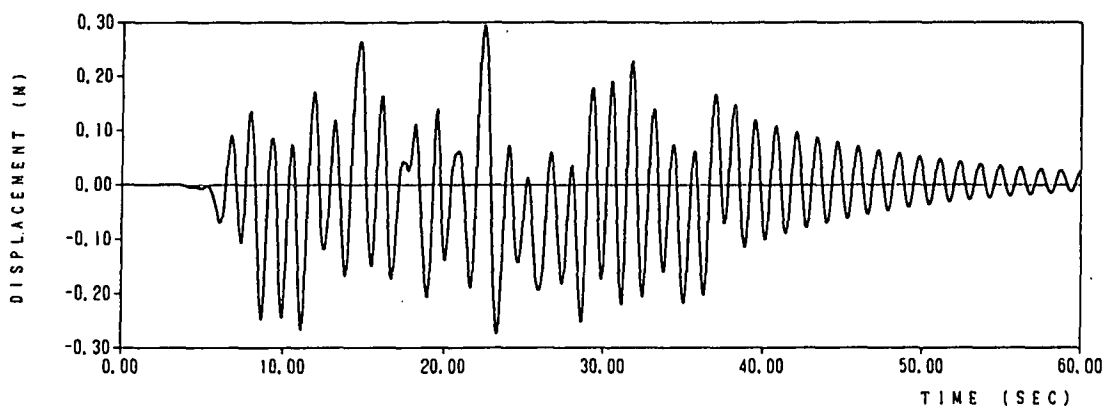


図-5 ケース 2 の時刻歴応答 (その 1)

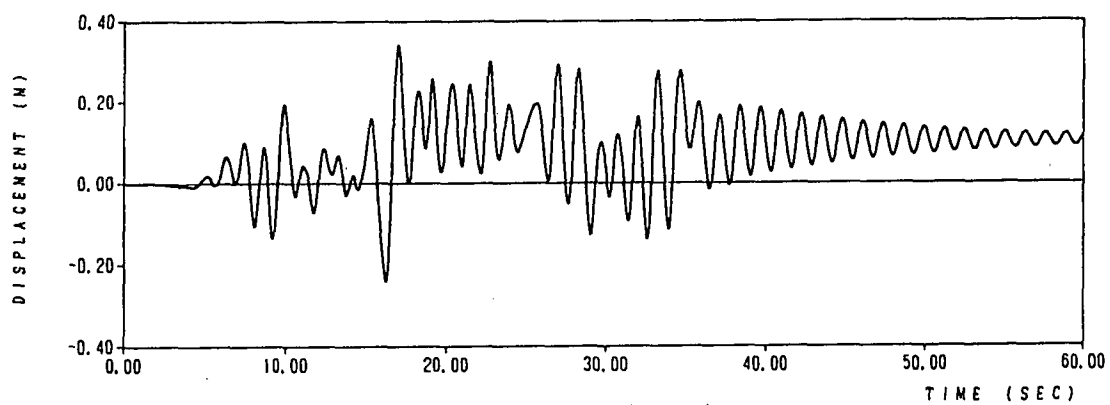


図-5 ケース 2 の時刻歴応答 (その 2)

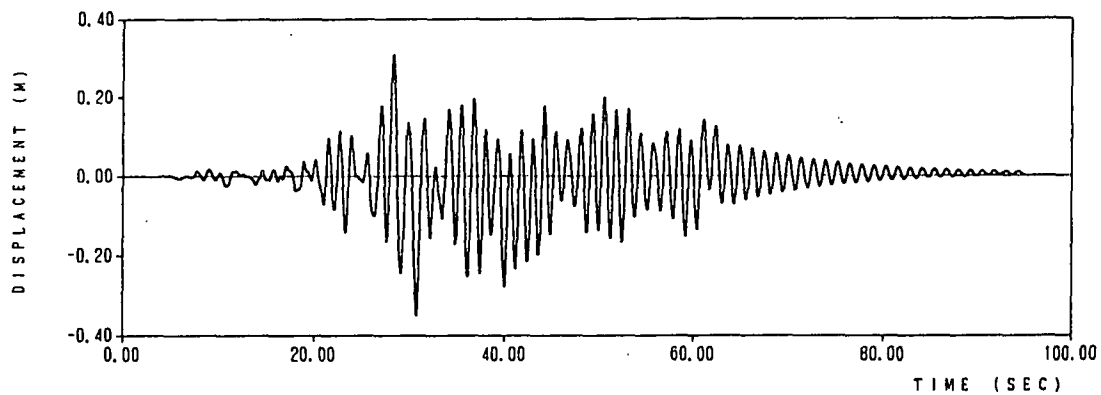


図-5 ケース 2 の時刻歴応答 (その 3)

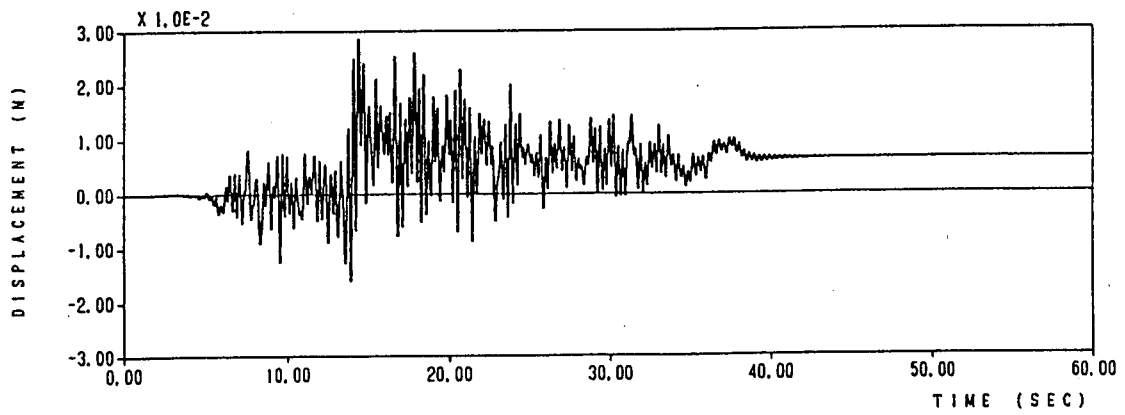


図-6 ケース3の時刻歴応答（その1）

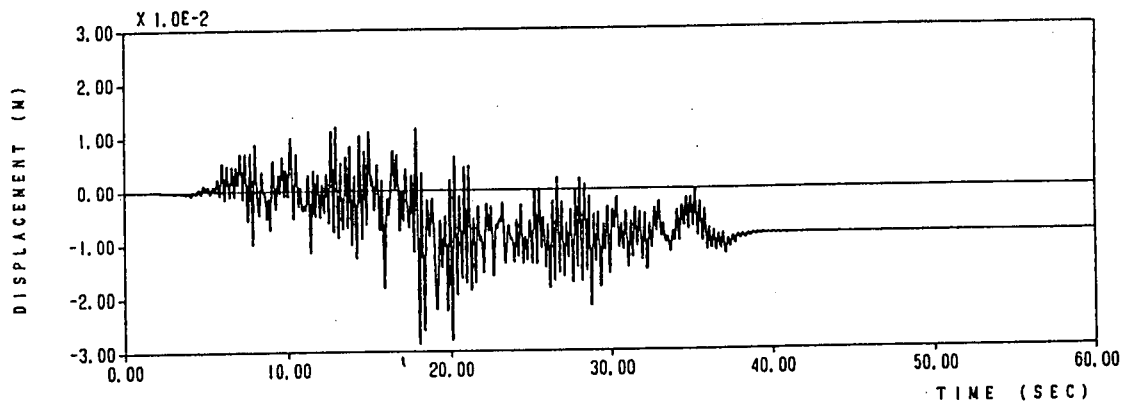


図-6 ケース3の時刻歴応答（その2）

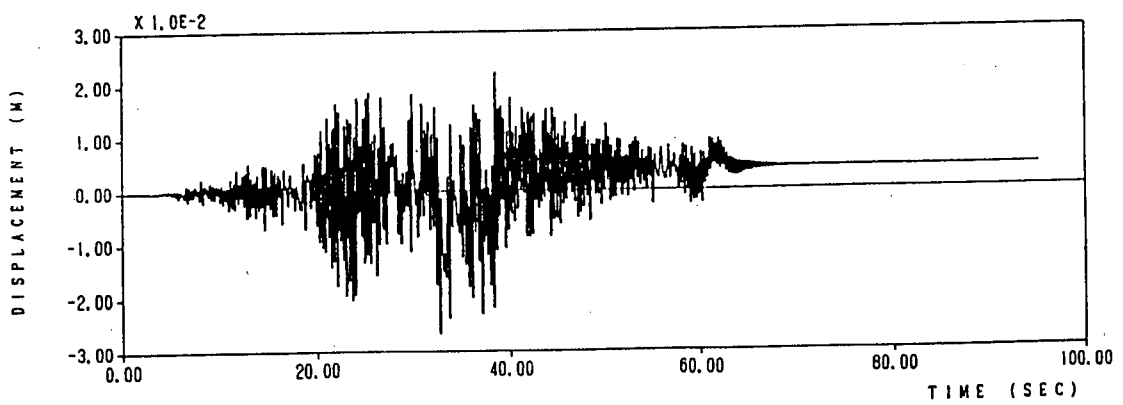


図-6 ケース3の時刻歴応答（その3）

4. 地震時保有水平耐力法による照査

道示 V 編において、コンクリートが中詰めされた鋼製橋脚の地震時保有水平耐力法による照査が示されており、ここではそれを参考としている。

4.1 基本条件

地震時保有水平耐力 P_a と許容塑性率の算定は道示 V 編 10・2・1 に示されている方法を用いる。その際、終局変位 δ_u と終局水平耐力 P_u は道示 V 編 10・3・4 の解説にある復元モデルを用いており、それを図-7 に示す。

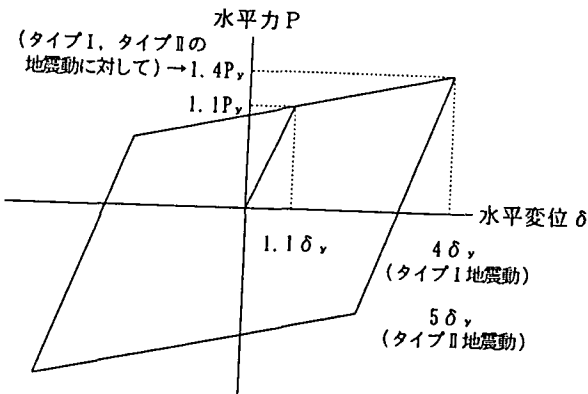


図-7 角補強を有する橋脚の復元力モデル

4.2 安全性の照査

道示 V 編 5.2 に従い以下の式により安全性の照査を行う。

$$P_a \geq Khe * W$$

$$W = W_u + C_p * W_p$$

ここで、 W は等価質量、 W_u は上部構造部分の重量、 W_p は橋脚躯体の重量、 $C_p (=0.5)$ は等価重量算出係数である。

4.3 地震時保有水平耐力 P_a の算出

道示 V 編を基に、以下の式より地震時保有水平耐力 P_a を求める。

$$P_a = P_y + (P_u - P_y) / a$$

$$a = 3 \text{ (タイプ I 地震動)}, 1.5 \text{ (タイプ II 地震動)}$$

ここで、 P_y は降伏水平耐力、 P_u は終局水平耐力であり $P_u = 1.4P_y$ である。降伏水平耐力 P_y は次式より算出しており、部材は降伏応力まで座屈しないものとする。

$$P_y = (M_y - M_o) / h_o$$

$$M_y = (\sigma_y * N / A) * Z$$

ここで、 M_y は降伏モーメント、 M_o は死荷重による偏心モーメント、 h_o は脚下端から上部構造慣性力の作用位置までの高さ、 σ_y は降伏応力、 N は軸力、 A は総断面積、 Z は総断面積の断面定数である。

4.4 固有周期の算出

等価固有周期 T は次の2方法により求め、それぞれに

ついて地震時保有水平耐力を算定する。

1) 動的解析においては、まず固有値解析を行い固有周期を求めた。

2) 従来の地震時保有水平耐力法と同様に、次式により固有周期を求めた。

$$T = 2.01 \sqrt{\delta}$$

$$\delta = W * h^3 / (3EI)$$

$$W = W_u + 0.3W_p$$

4.5 等価水平震度 Khe の算出

道示 V 編 5・3 より以下の式より等価水平震度 Khe を求める。

$$Khe = Khc / \sqrt{2\mu a - 1} \ (\geq 0.4C_z)$$

ここで、 Khc は設計水平震度、 μa は許容塑性率であり、これらの算出方法は省略する。

5. 動的解析と地震時保有水平耐力法の比較

3章および4章において計算した各ケースの結果について、2つの方法の比較検討を行う。

5.1 固有周期の比較

各ケースの固有周期について、動的解析と地震時保有水平耐力計算時の道示 V 編 式(3.3.1)とを比較し、表-1 に示す。これより、道示 V 編 式(3.3.1)が、各ケースの1次モードの固有周期を短い側に近似していることが分かる。また、ゴム沓を用いたケース1においては、その差が大きくなる傾向のあることが分かる。ただし、ケース4の動的解析による固有周期は「道路橋の耐震設計に関する資料」²⁾に掲載されていなかったためここでは省略した。

表-1 固有周期の比較

ケース	方向	動的解析時の固有周期(s)		震度法時固有周期(s)
		1次モード	2次モード	
		a	b	c
CASE1	L	1.447	0.153	0.613
CASE1	T	1.613	0.178	0.928
CASE2	L	1.279	0.007	1.226
CASE2	T	1.139	0.009	1.126
CASE3	—	0.312	—	0.280
CASE4	L	—	—	1.270
CASE4	T	—	—	1.480

5.2 作用水平力の比較

動的解析によって算出される最大水平力(3波の最大値と平均値)と、地震時保有水平耐力法によって算出される作用水平力($k_{ne}W$)を図-8、図-9に示す。図中、CASE以降の記号はケース番号を、IとIIはそれぞれタイプIとタイプIIの地震動を示し、Lは橋軸方向地震時、Tは橋軸直角方向地震時を示す。

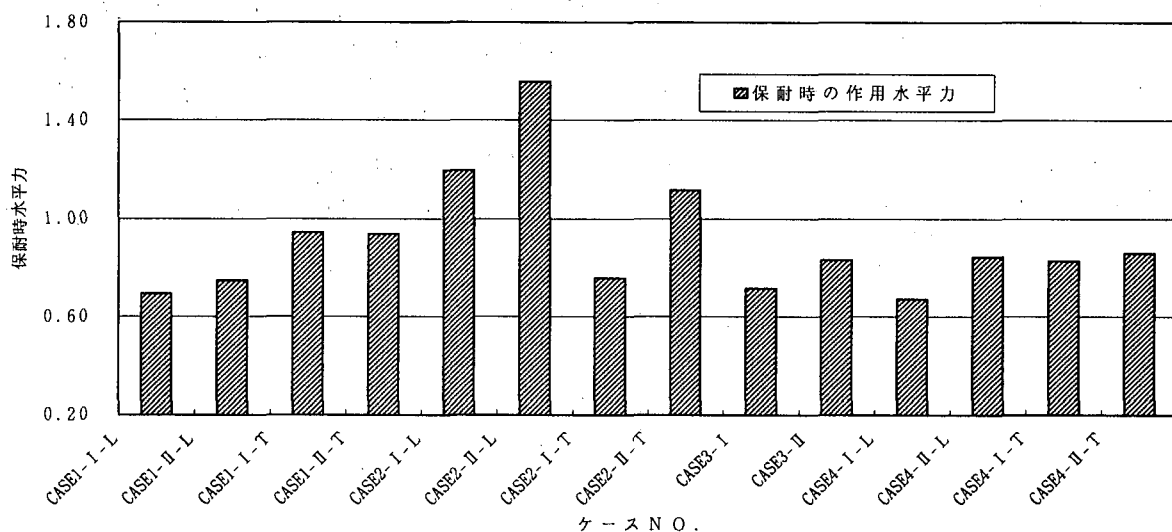


図-8 動的解析時の最大水平力（3波の最大値）を1.0とした時の保耐法による作用水平力

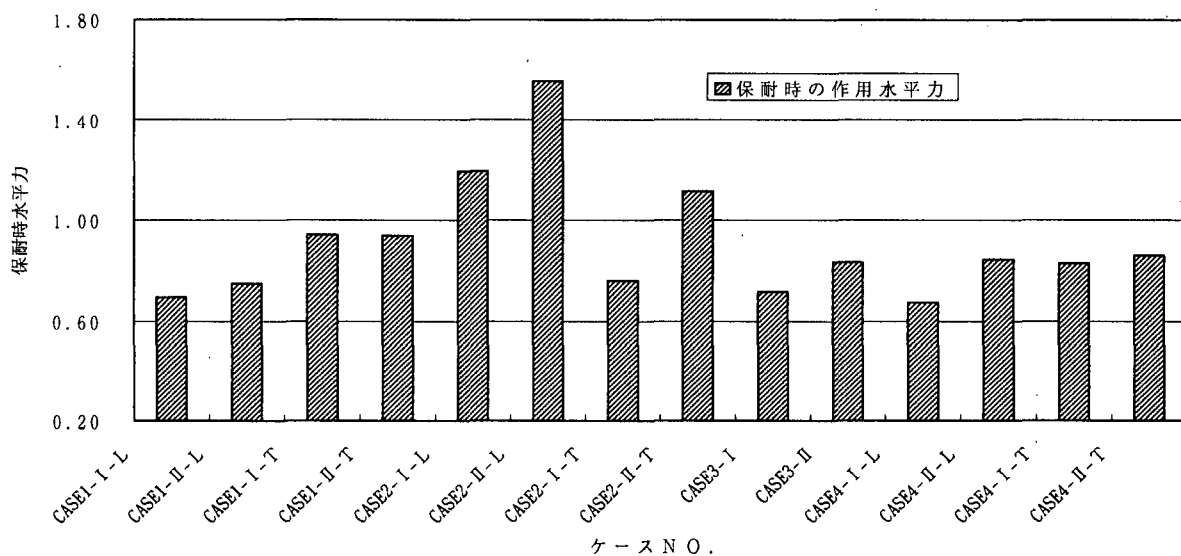


図-9 動的解析時の最大水平力（3波の平均値）を1.0とした時の保耐法による作用水平力

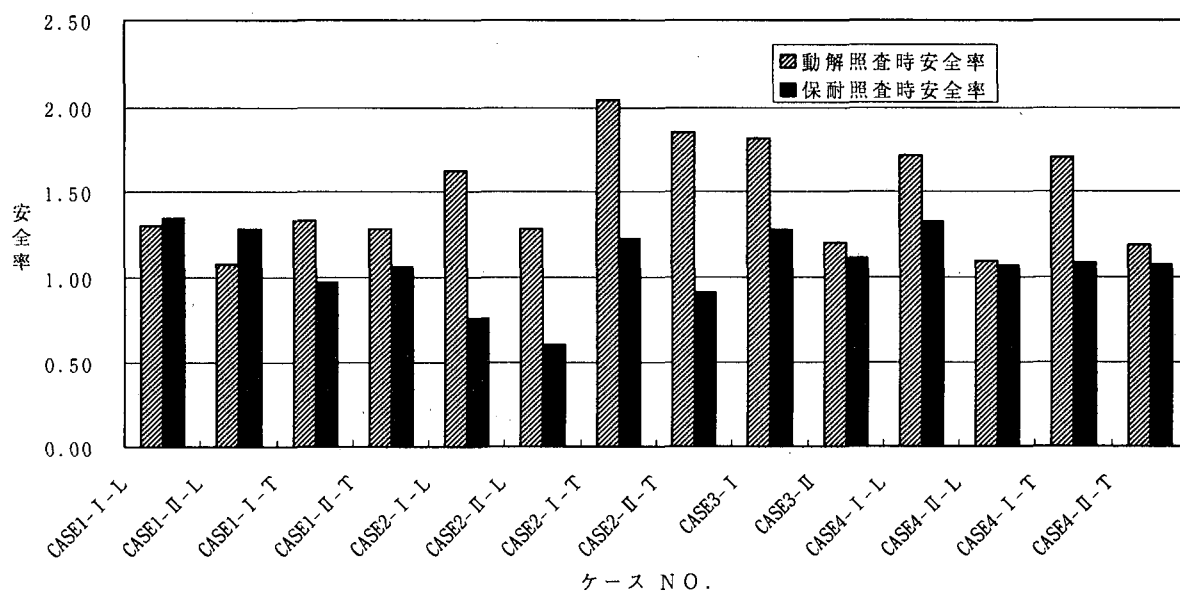


図-10 各ケースにおける安全率の比較

図-8, 9より, 地震時保有水平耐力法により計算された水平力は, 3例を除き, 動的解析によって得られる水平力よりもやや少ない値を算出する傾向があることが分かる。また, 入力3波の最大値と比較するか, またはその平均値と比較するかについては差異がないことがわかる。

5.3 照査結果の比較

動的解析による設計照査は最大水平変位と許容水平変位の比較による照査であり, 地震時保有水平耐力法による設計照査は, 作用水平力と保有水平耐力の比較による照査である。そこで, この2つの異なった方法による照査がどのような関係にあるかを調べるため, それぞれの方法によって断面照査を行った場合の安全率を算出し, どちらの方が安全側の設計となっているかを検討する。図-10に各ケースの安全率を図示した。

図-10より, 同じ断面を設計した場合, 地震時保有水平耐力法の方が安全率を低めに算出することが分かる。つまり, 同じだけの安全率を確保して断面を設計すれば, 地震時保有水平耐力法の方が大きな断面を設計することとなり, 安全率が高いと言える。

6. おわりに

本報告ではコンクリートを充填しない鋼製橋脚について, 道示 V 編に見られる角補強を有する鋼製橋脚の耐震設計法に注目した。鋼製橋脚の地震時の復元力モデルとしては道路橋示方書に与えられているバイリニャーモデルを用い, 設計計算の簡易化を目標とした。つまり, 地震時の保有水平耐力が降伏時の水平耐力をもとに簡易に計算でき, さらに, このバイリニャーの復元力モデルを利用すれば, 容易に動的解析も実施できることを示した。

ここで提案している保有水平耐力法による照査方法と動的解析法は, 適用対象を角補強を有する矩形断面橋脚に限定しているものの, 簡単な計算により事前に保有水平耐

力や動的解析の結果が予想でき, 断面決定が容易になる点に特徴がある。簡易な地震時保有水平耐力法により算出される最大水平力(3つの地震波に対する最大水平力の平均値)とを比較した結果, ここで求められた地震時保有水平耐力法による作用水平力は, ほとんどの場合に対して動的解析により得られる最大水平力より小さい値となっている。すなわち, 簡易な地震時保有水平耐力法を用いて断面設計を行えば安全側の設計が行えるとの結論が得られた。

以上のように, 本報告の結果は角補強を有する鋼製橋脚の耐震設計法にその適用範囲が限定されているが, 他の補強構造を持つ鋼製橋脚に対しても, 復元力モデルが適切に与えられれば, 簡易な保有水平耐力による耐震性の照査が可能になると考えらる。

本研究は, 鋼橋技術研究会の設計部会(部会長: 星埜正明 日本大学教授)内に設置されたワーキンググループでの成果を纏めたものである。データや資料の提供を賜りました鋼橋技術研究会の会員の皆様に感謝の意を表します。

7. 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, 丸善, 1996.12
 - (2) 日本道路協会: 道路橋の耐震設計に関する資料, 丸善, 1997.3
 - (3) 建設省土木研究所: 鋼製橋脚の正負交番繰返し載荷実験(その1), 1997.3
 - (4) 鈴木森晶, 宇佐美勉, 寺田昌弘, 伊藤努, 才塚邦宏: 鋼製箱桁断面橋脚の復元力モデルと弾塑性地震応答解析, 土木学会論文集 No.549/I-37, 191-204, 1996.10
 - (5) 高橋実, 西川和廣, 村越潤, 上仙靖, 中嶋浩之, 岡田淳: 角補強を施した鋼製橋脚の耐震補強に関する実験, 土木学会第51回年次学術講演会, I-B291, 1996.9
- (1998年8月17日受付)

A DESIGN OF STEEL BRIDGE PIERS BY THE ULTIMATE EARTHQUAKE RESISTANCE METHOD

Izumi SHONO, Teruhiko YODA, Masashi IURA, Tatuya ISHIGE
Kyouji OKUMURA, Mikio KOIZUMI, Akihiro UOTANI and Takanori MURASE

The ultimate earthquake resistance method has been used for designing steel bridge piers. We have employed the load-displacement curve proposed by the Specification for Highway Bridges of Japan. Nonlinear dynamic analysis has also been conducted. Four models have been used to compare the design results obtained by the ultimate earthquake resistance method and by the nonlinear dynamic analysis. The comparison shows that the ultimate earthquake resistance method gives the more conservative results than the nonlinear dynamic analysis.