

兵庫県南部地震で観測された地震波を用いたハイブリッド 地震応答実験による鋼製橋脚の激震時挙動

名古屋大学 ○才塚 邦宏*
名古屋大学 宇佐美 勉**
名古屋大学 鈴木 森晶***
名古屋大学 伊藤 義人****

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震では多くの人命が奪われ、また多くの土木構造物にも被害が生じた。土木構造物でも、とりわけ橋脚の被害は大きくクローズアップされた。本研究では、鋼製橋脚をモデル化した補剛箱形断面片持柱の供試体6体(鋼製橋脚モデル3体、コンクリート部分充填鋼製橋脚モデル3体)を製作し、兵庫県南部地震で得られた地震波形(神戸海洋気象台、JR警報地震計(鷹取)、東神戸大橋観測地震波)を用いてハイブリッド地震応答実験を行った。さらに、本大学で提案された鋼製橋脚に対する復元力モデルを用いて地震応答解析を行い、今回の地震波の特徴、橋脚の応答に及ぼす影響等について研究を行った。

1. 緒言

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震では、6000名もの人命が奪われ、近年希な大惨事となった。また、土木構造物にも被害が生じ、とりわけ鋼製橋脚に関しては、地震の影響で完全に崩壊した事例は世界でもほとんどなく、大きな課題を残すこととなった。

今回の兵庫県南部地震で得られた地震記録(神戸海洋気象台の地震波で最大水平加速度818gal)は、従来、橋脚の2次設計に用いてきた地震時保有水平耐力照査用地震波(Level 2)(最大水平加速度443gal)[1]の規模をはるかに超える大きなものであった。しかし、鋼製橋脚の中には、車両等の衝突の防護策として柱基部に中詰めされていたコンクリートの影響で完全なる崩壊を免れた例もあり、コンクリートを柱基部に部分的に充填する効果が出たものと考えられる。

そこで、本研究では、実験供試体として鋼製橋脚モデル(3体)およびコンクリート充填鋼製橋脚モデル(3体)を製作し、兵庫県南部地震で観測された地

震波形(I種地盤用:神戸海洋気象台観測地震波形、II種地盤用:JR警報地震計(鷹取)観測地震波形[2]、III種地盤用:東神戸大橋観測地震波形)を用いてハイブリッド地震応答実験[3~7]を行った。得られた実験結果より、今回の地震波の特性、またこれまで用いてきた地震波との違いに関して比較を行い、さらに、名古屋大学で提案された鋼製橋脚に対する復元力モデル[8]を用いてハイブリッド実験結果との比較を行った。

2. 実験概要

(1) 実験供試体

本研究では実験供試体として、鋼製橋脚あるいはコンクリート充填橋脚をモデル化した片持柱を、鋼製橋脚モデルとして3体、コンクリート充填橋脚モデルとして3体製作した。供試体の概念図を図-1に示す。製作には板厚4.5mmのSS400材およびSM490YA材を用い、図-1に示すように供試体の上下部には端部治具を取り付けるための鋼板が溶接されている。また、供試体下部フランジおよびウェブには、局部座屈を防止し、かつ剛域を確保するための三角リブが取り付けられている。

また、コンクリートの充填高さは、文献[9]に提案されている考え方にに基づき、各供試体に対して最適な充填高さとなるように決定した。

表-1に実験供試体の測定寸法を示し、表-2に製作に使用した鋼板から切り出したJIS5号試験片による引張試験結果を示す。表-1の幅厚比パラメータ R_f および細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ は以下の式で表さ

キーワード: 阪神・淡路大震災, ハイブリッド実験, 鋼製橋脚

* 名古屋大学大学院博士課程(前期課程)在学, 052-789-4617

** 名古屋大学工学部土木工学科教授, 052-789-4617

*** 名古屋大学工学部土木工学科助手, 052-789-4617

**** 名古屋大学理工学総合研究センター教授, 052-789-2737

表 - 1 供試体実測寸法 (図 - 1 参照)

Specimen	L (mm)	h (mm)	h _c /h	B (mm)	D (mm)	t (mm)	b _s (mm)	t _s (mm)	γ/γ*	λ̄	R _f	H _{y0} (kN)	δ _{y0} (mm)
S45-35H	1153	973	—	285	172	4.31	42	4.31	14.1	0.380	0.480	110.5	6.67
S30-25H	754	598	—	220	130	4.76	39	4.76	2.7	0.281	0.298	100.9	2.69
S30-60H	1655	1436	—	220	130	4.79	39	4.79	2.7	0.673	0.296	42.3	15.50
SC45-25-25H	1051	904	0.25	321	197	5.00	43	5.00	2.4	0.262	0.404	139.3	3.74
SC45-35-20H	1449	1265	0.20	321	197	4.71	43	4.71	2.7	0.374	0.436	95.4	7.59
SC45-60-20H	1653	1434	0.20	220	130	5.05	30	5.05	2.3	0.619	0.400	37.4	13.88

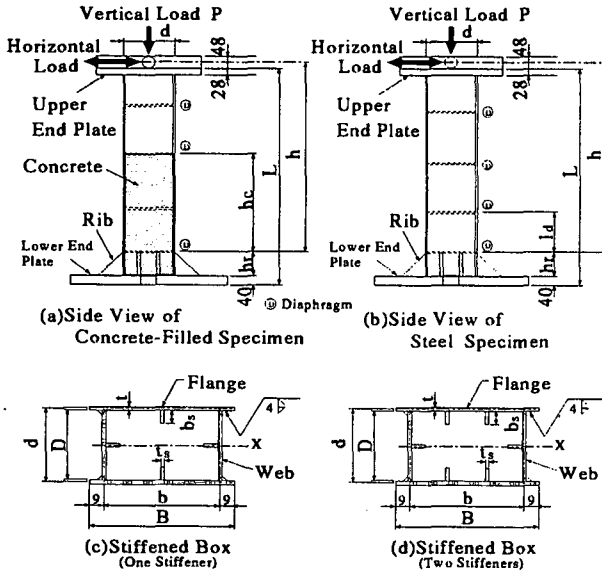


図 - 1 実験供試体

れる。

$$R_f = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \cdot \frac{12(1-\mu^2)}{\pi^2 k}} \quad (1)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{2h}{r} \cdot \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (2)$$

ここで、 b = フランジ板幅、 t = フランジ板厚、 σ_y = 鋼材の降伏応力、 E = 鋼材の弾性係数、 μ = 鋼材のポアソン比、 $k = 4n^2$ = 板の座屈係数、 n = 補剛材で囲まれたサブパネル数、 h = 部材長、 r = 鋼断面の断面 2 次半径である。表 - 1 中の γ はフランジ板の補剛材剛比、 γ^* は線形座屈理論から求められる最適剛比である。また、 H_{y0} 、 δ_{y0} は、それぞれ水平荷重のみが片持柱先端に作用したときの初期降伏水平荷重およびそれに対応する変位であり、次式で定義される。

$$H_{y0} = \frac{M_y}{h} \quad (3)$$

$$\delta_{y0} = \frac{H_{y0} h^3}{3EI} \quad (4)$$

表 - 2 鋼材の材料定数

E	σ _y	ε _y	μ	E _{st}	ε _{st}	Δl
Test Specimen S45-35H						
192	374	0.194	0.277	5.44	2.05	34.0
Test Specimen S30-25H, S30-60H						
208	327	0.158	0.271	3.62	1.77	35.1
Test Specimen SC45-25-25H, SC45-60-20H						
208	295	0.142	0.266	3.83	1.11	32.8
Test Specimen SC45-35-20H						
204	299	0.147	0.263	3.38	1.06	33.3

ここで、 M_y = 鋼断面の降伏モーメント、 EI = 鋼製断面柱の曲げ剛性であり、いずれも充填コンクリートの影響は無視する。なお、供試体名の初めに付く S または SC は、それぞれ補剛断面鋼製橋脚、補剛断面コンクリート充填橋脚を意味し、次に続く 2 桁の数値は、順に幅厚比パラメータ、細長比パラメータ、コンクリート充填率の設計時の値をそれぞれ 100 倍した値を示している。

(2) 入力地震波

本研究では、兵庫県南部地震で観測された地震波の内、I 種地盤用として神戸海洋気象台 (以下 JMA)、II 種地盤用として JR 警報地震計 (鷹取) (以下 JR-Takatori)、III 種地盤用として東神戸大橋 (以下 Higashi-Kobe) の観測地震波を入力してハイブリッド実験および解析を行った。これらの地震波の加速度波形を図 - 2 に示す。ただし地震波は、実験および解析のため加速度の特徴ある部分だけを取り出して、20 秒間の波形に縮め、自由振動のために、加速度が零の成分を 5 秒を加えて全体で 25 秒の地震波に変更してある。

図 - 2 を見ると、JMA に関しては最大加速度が 818.0gal であり、これまで用いてきた土木研究所提案のレベル 2 地震波 (最大加速度 442.9gal) の 2 倍近い

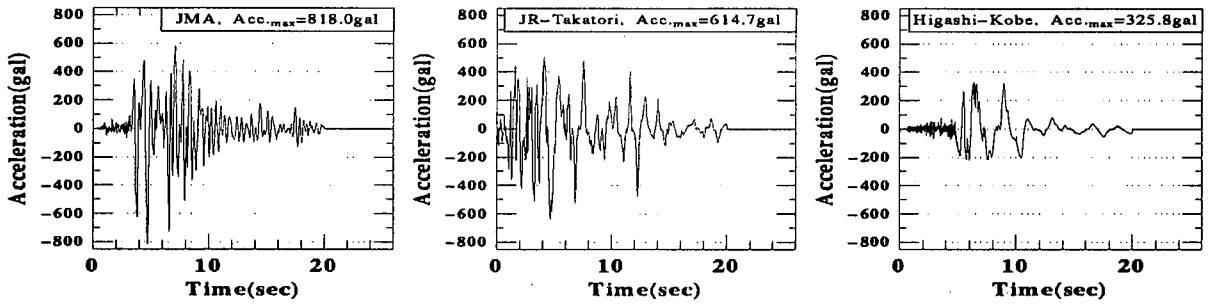


図 -2 兵庫県南部地震観測地震波の加速度波形

表 -3 載荷順序および実験結果

Specimen	Sq.	G.T.	Accel.	$\frac{P}{P_y}$	T (sec)	$\frac{H_y}{H_{y0}}$	E_e (kN · cm)	$\frac{\delta_R}{\delta_y}$	$\frac{\delta_{max}}{\delta_y}$	$\frac{\sum E}{E_e}$
S45-35H	1	III	Higashi-Kobe	0.143	0.746	0.890	29.7	1.22	3.30	12.9
	2	I	JMA	0.199	0.878	0.832	29.2	1.77	3.75	46.4
	3	II	JR-Takatori	0.167	0.829	0.866	28.1	5.34	10.61	95.7
S30-25H	1	I	JMA	0.226	0.574	0.774	9.5	6.39	13.46	165.6
	2	II	JR-Takatori	0.191	0.551	0.809	10.4	2.58	9.88	105.4
S30-60H	1	I	JMA	0.133	1.307	0.867	25.4	0.06	2.66	11.2
	2	II	JR-Takatori	0.091	1.301	0.909	27.9	1.44	5.24	48.8
	3	III	Higashi-Kobe	0.077	1.207	0.923	28.8	0.02	2.32	5.0
SC45-25-25H	1	III	Higashi-Kobe	0.172	0.509	0.828	16.3	0.10	2.40	9.2
	2	I	JMA	0.235	0.635	0.765	15.8	2.18	9.52	132.6
	3	II	JR-Takatori	0.199	0.605	0.801	18.7	1.43	10.12	93.7
SC45-35-20H	1	III	Higashi-Kobe	0.130	0.752	0.870	25.3	0.90	3.42	12.8
	2	I	JMA	0.182	0.930	0.818	24.5	1.17	4.44	45.3
	3	II	JR-Takatori	0.152	0.852	0.848	26.5	2.63	9.75	95.2
SC45-60-20H	1	III	Higashi-Kobe	0.081	1.056	0.919	20.4	0.89	3.03	7.5
	2	I	JMA	0.129	1.365	0.871	19.3	0.38	2.78	17.1
	3	II	JR-takatori	0.096	1.211	0.904	22.0	0.44	5.43	61.8

Notes : Sq. = Sequence, G.T. = Ground Type, Accel. = Accelerogram, $E_e = \frac{1}{2} H_y \cdot \delta_y$

値となっている。JR-Takatoriも最大加速度641.7galであり、レベル2地震波より大きな地震波であることがわかる。また、JMAの波形はピークがパルス状に出ているのに対し、Higashi-Kobeの波形は斧状にピークが出ていることも特徴である。

(3) 実験方法

実験においては、1体の供試体に対し、JMA、JR-TakatoriおよびHigashi-Kobeをそれぞれ入力した。各実験における載荷順序、軸力比(P/P_y)および固有周期(T)を表-3に示す。ただし、軸力比 P/P_y (P_y =鋼断面の全断面降伏軸力)に関しては充填コンクリートを無視して、前論文[4~6]と同様な方法で求めた値を用いた。表-3中で H_y =前論文[4~6]と同様に求めた水平耐荷力(安全率 $\nu=1.0$)、 $\delta_y=H_y$ に対応した変位である。また、 δ_{max} 、 δ_R 、 $\sum E$ はそれぞれ各実験における最大応答変位、残留変位、累積吸収

履歴エネルギーである。

ハイブリッド実験は文献[4]の実験手法の内、実験手法2(相似モデル解析型手法)を用い、減衰係数は $\xi=0.05$ を用いた。

3. 実験結果および考察

(1) 地震波の特性

実験結果の内、供試体SC45-35-20Hの実験における地震入力エネルギー(E_I)、履歴吸収エネルギー(E_H)、減衰エネルギー(E_D)の関係を図-3に示す。

地震波の入力エネルギーについて、図-3を見ると、JMAの特徴としては、地震開始後の3.5~4.8秒の部分で全エネルギーの6割程度が入力されることがわかる。これは、300galを超える加速度のピークが連続的に生ずる部分に当たり、最大加速度の818galのピークもこの部分に含まれる。JR-Takatori

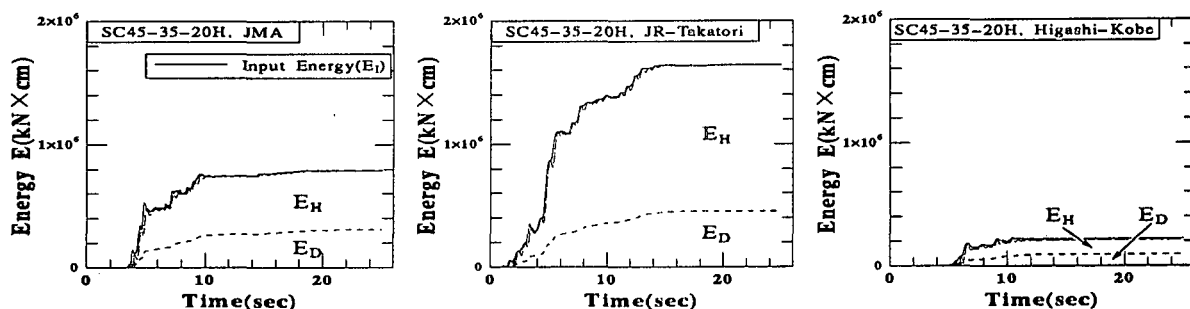


図-3 実験より得られた累積エネルギーの時間的変化

は、比較の入力エネルギーが大きく、地震開始直後から 5.8sec までの部分で全エネルギーの約 7 割が入力されている。また、Higashi-Kobe に関しては、地震開始後 5.2~6.6 秒の部分で全エネルギーの約 7 割が入力され、約 11 秒で構造物の応答はほとんど決まると言える。

(2) 固有周期の違いによる応答の比較

今回の地震では、固有周期 T の違いが構造物の応答に大きく影響していると言われている。ここでは、ほぼ同一の幅厚比パラメータを有し細長比パラメータの変化した、異なる固有周期を持つ 3 体の供試体 SC45-25-25H, SC45-35-20H, SC45-60-20H に対して、JMA, JR-Takatori および Higashi-Kobe を入力し、その地震応答値の比較を行う。

表 - 3 に地震波入力順序および実験結果を示し、図 - 4(a), (b), (c) にそれぞれ JMA, JR-Takatori, Higashi-Kobe を入力した場合の時刻歴応答波形および復元力履歴ループを示す。

図 - 4(a) を見ると、JMA を入力した場合、固有周期が小さいほど、すなわち柱の長さが短いほど、降伏変位で無次元化した最大応答変位 $\delta_{\max}/\delta_{y0}$ は大きくなる傾向にあり、固有周期の短い SC45-25-25H と長い SC45-60-20H を比較すると、SC45-25-25H の最大応答変位は SC45-60-20H の 3 倍以上の値となっている。また同様に、無次元化した残留変位 δ_R/δ_{y0} に関しても、固有周期が小さくなるほど大きくなる傾向が見られる。図 - 4(b) の JR-Takatori を入力した場合、3 体の供試体すべてにおいて 3 種の地震波を用いた実験の内、最大の応答を示しており、この地震波が非常に大きな応答を生じさせる危険な地震波であることがわかる。SC45-25-25H に関しては最大応答変位が $9\delta_{y0}$ にもおよんでいる。また、図 - 4(c) の Higashi-Kobe に関しては、固有周期の違いによる最大応答変位の違いはほとんどなく、最大で $3\delta_{y0}$ 程度しか生じていない。

次に、本研究で用いたすべての供試体の実験結果に関して、横軸に固有周期を、縦軸に最大応答変位、残留変位および累積吸収エネルギーをそれぞれ δ_y , E_e で無次元化した値をとったグラフを図 - 5 に示す。また、同図中に、過去に名古屋大学で建設省土木研究所 (PWRI) の Level 2 地震波 (I, III 種地盤) を入力して行ったハイブリッド実験結果 [6~7] の内、補剛断面供試体の実験結果もあわせて示す。

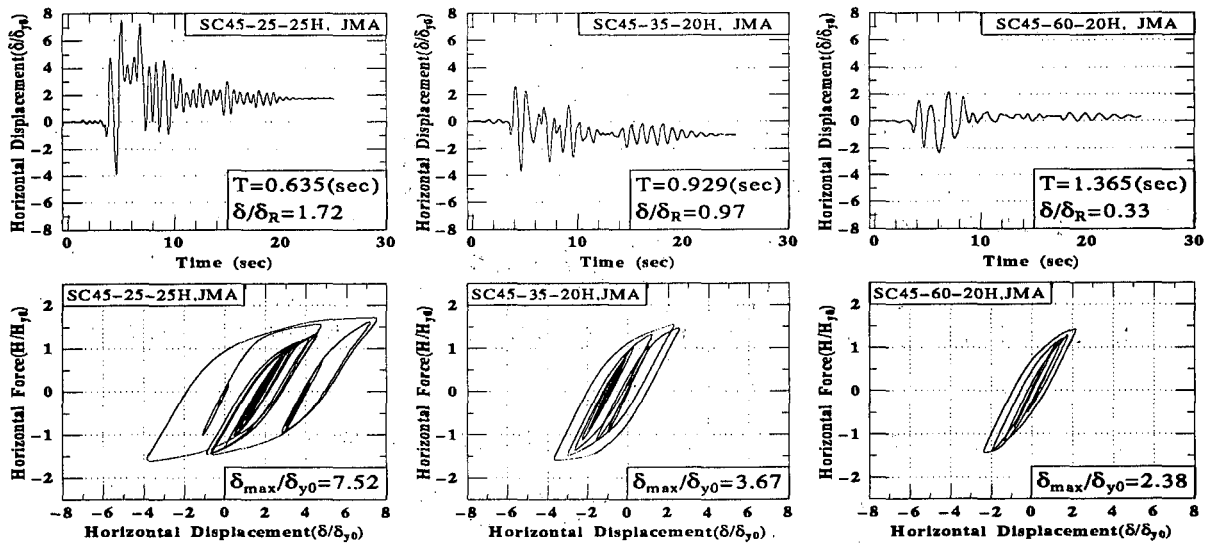
図 - 5(a) より、JMA に関しては、固有周期が小さくなるにしたがい、最大応答変位が極端に大きくなっていることがわかる。JR-Takatori を入力した場合には、固有周期 1.0 秒以下の供試体に関しては最大応答変位は $10\delta_y$ と非常に大きく出るが、あまり固有周期による違いがないことが確認できる。また、Higashi-Kobe に関しては、固有周期の違いによる変化は見られず、最大応答変位 δ_{\max}/δ_y は 2~4 の範囲内におさまっており、固有周期が 1.0 秒より大きな供試体に対しては、JMA 入力による最大応答変位とあまり差はない。I, III 種地盤用 Level 2 地震波の最大応答変位を見ると、両者とも δ_{\max}/δ_y は 5 以下であり、固有周期によって差はなく一定である。

図 - 5(b) においては、JMA のみ固有周期が小さくなるにしたがい、残留変位が大きくなっていることがわかる。

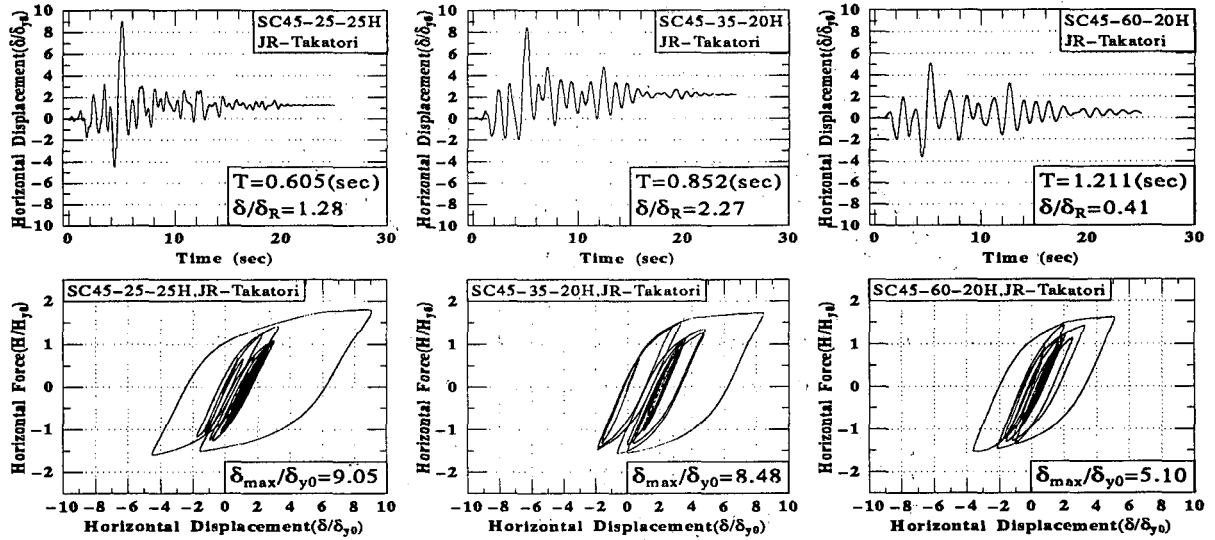
また、図 - 5(c) の累積吸収エネルギーについて、JMA, JR-Takatori, Higashi-Kobe に関しては最大応答変位と似た傾向を示しているが、Level 2 地震波に関しては III 種地盤用地震波が非常に大きな値になっている。これは III 種地盤用地震波が継続時間が 50 秒と最も長く、大きな変位を地震終了時まで繰り返し生じさせる地震波であることが原因である。

(3) コンクリート充填の効果

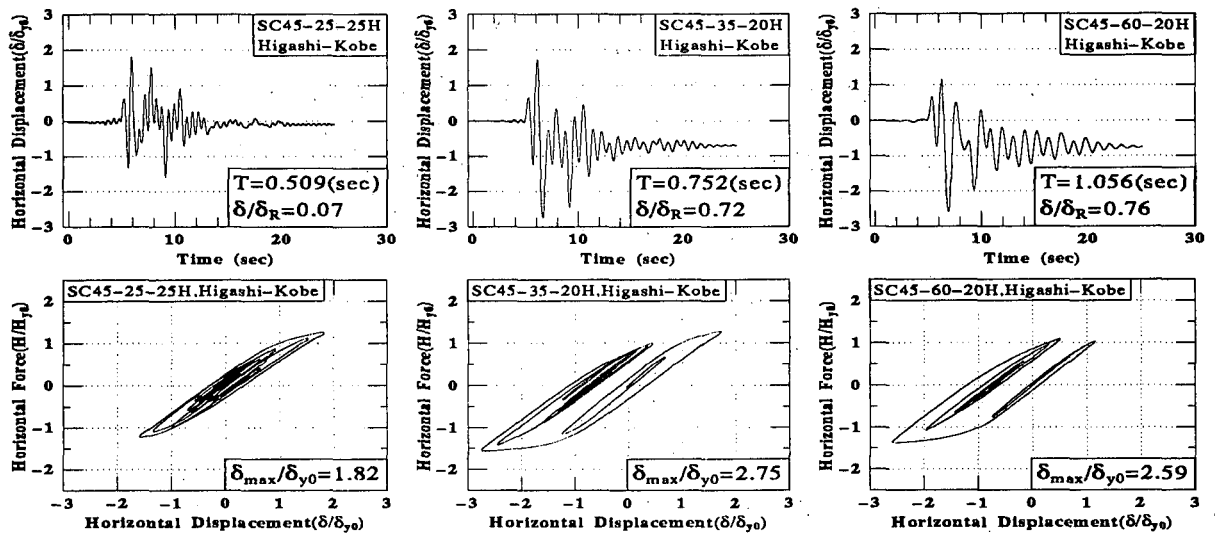
本研究で用いた供試体内、コンクリート充填の効果と比較する供試体として鋼柱供試体 S45-35H とコンクリート充填供試体 SC45-35-20H の 2 体を用



(a) JMA 入力時の地震応答



(b) JR-Takatori 入力時の地震応答



(c) Higashi-Kobe 入力時の地震応答

図-4 コンクリート部分充填柱の時刻歴応答変位および復元力履歴ループ (実験結果)

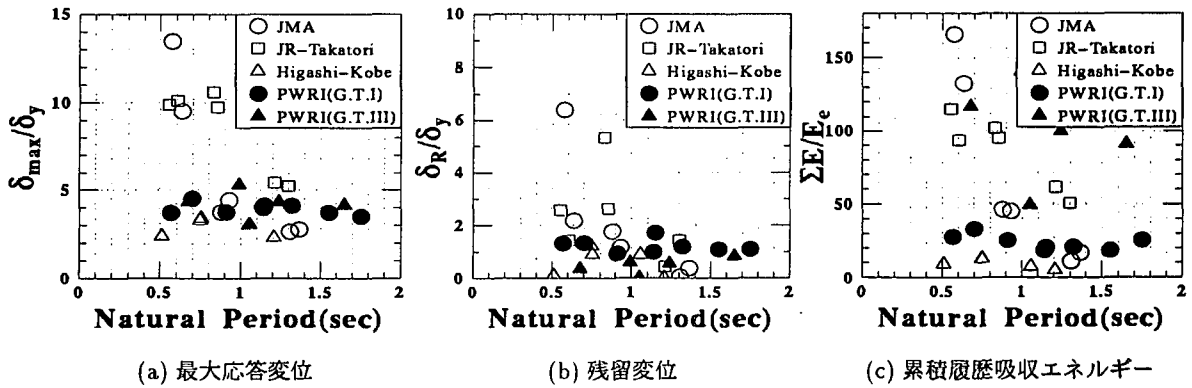


図-5 最大応答変位, 残留変位および累積履歴吸収エネルギー

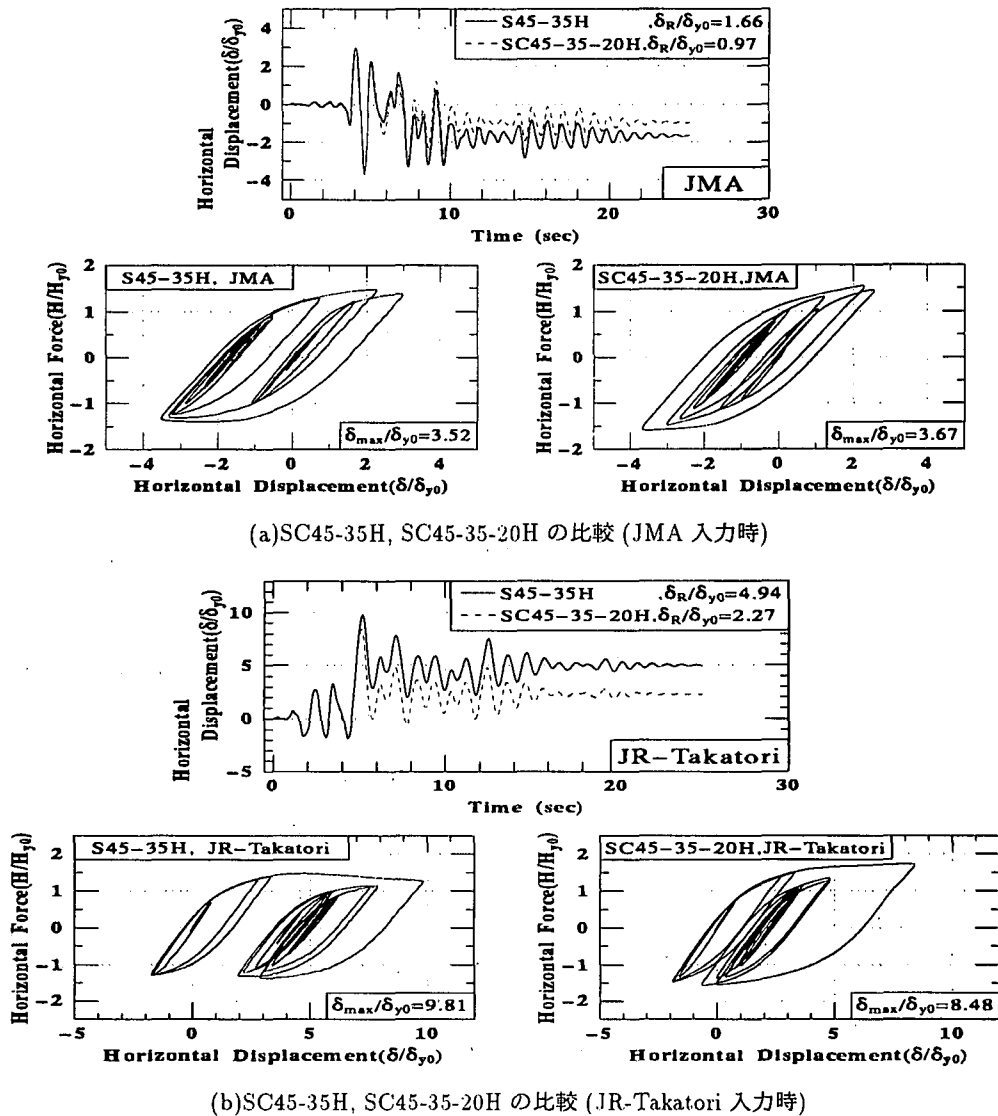
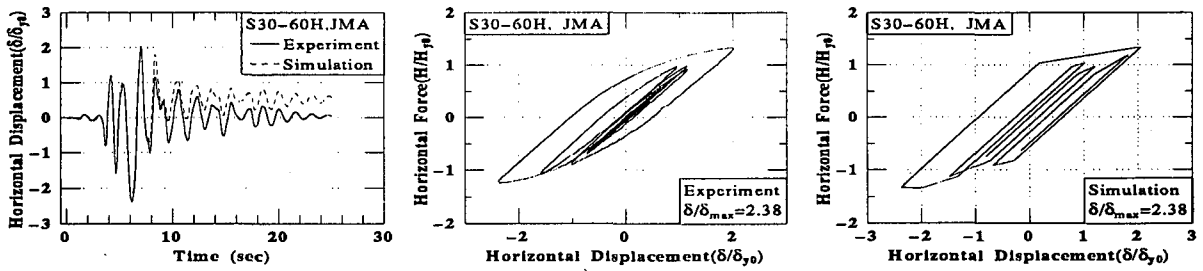


図-6 鋼柱とコンクリート充填柱の実験結果の比較

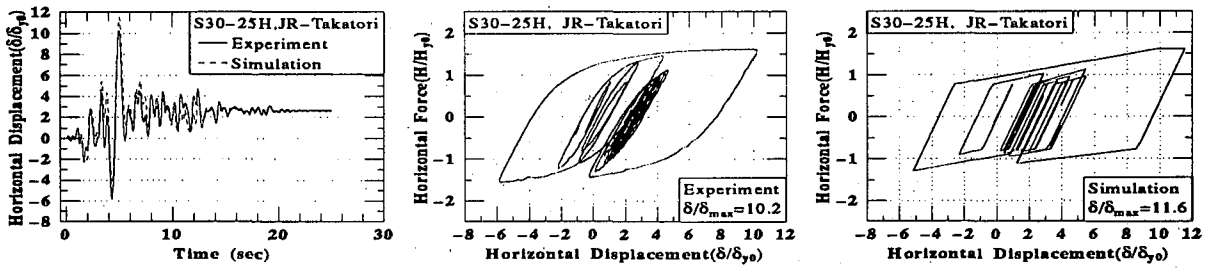
いた。この2体に対して、それぞれ JMA および JR-Takatori を入力して応答を求めた。

図-6(a),(b)にそれぞれ JMA および JR-Takatori を入力した場合の時刻歴応答変位波形、復元力履歴ループの比較を示す。

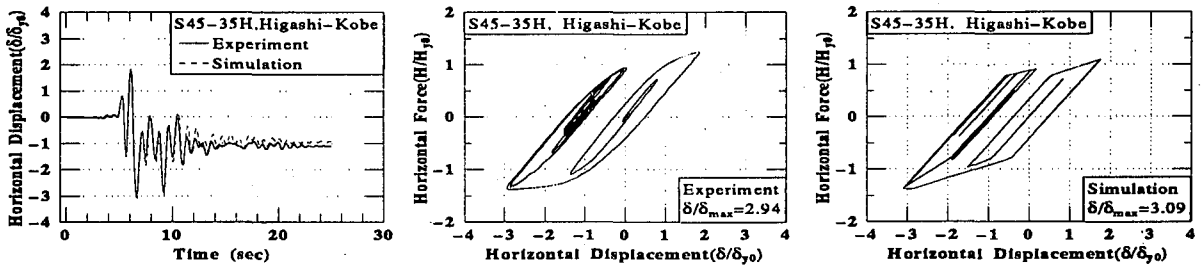
図-6を見ると、JMA を入力した実験結果において、最大応答変位はコンクリートを充填した SC45-35-20H の方が4%程度大きくなっている。これは、SC45-35-20H の方が S45-35H よりも固有周期が短く、コンクリートを充填したことによる剛性の上昇



(a) JMA 入力時の実験結果と解析結果の比較



(b) JR-Takatori 入力時の実験結果と解析結果の比較



(c) Higashi-Kobe 入力時の実験結果と解析結果の比較

以上に、JMA が固有周期の短い供試体に対して厳しい応答を生じさせる地震波であることが影響していると考えられる。JR-Takatori を入力した場合は、S45-35H の方が最大応答変位は 15% 程度大きくなっている。

また最大荷重に関しては、JMA, JR-Takatori を入力した場合ともに、S45-35H においては耐力の低下が見られるが、SC45-35-20H では最高荷重にまで達しておらず、耐力を維持していることが確認できる。これは、コンクリートの充填により、柱基部での局部座屈による急激な損傷の進展が抑えられたものと考えられる。

残留変位に関しては、SC45-35-20H の方が、JMA を入力した実験において 41%、JR-Takatori を入力した実験において 54% 小さくなっており、コンクリート充填の効果が出たものと考えられる。応答変位波形全体においても、SC45-35-20H の方が応答は小さく、振動の振幅も S45-35H と比べて小さく抑えられている。

(4) 解析結果との比較

本研究で用いた鋼柱供試体と同一のパラメータを有するモデルに対して、本大学で提案された復元力モデルを用いた地震応答解析を行った。入力地震波としては、ハイブリッド実験と同様に JMA, JR-Takatori および Higashi-Kobe を用いた。これらの地震波を入力した場合の応答解析結果とハイブリッド実験結果の比較をそれぞれ図 - 7(a), (b), (c) に示す。

図 - 7 の時刻歴応答変位波形の比較図を見ると、残留変位に関しては比較的良い精度でハイブリッド実験結果を表現している。復元力履歴ループについても実験と良く一致しており、最大応答変位に関して、図 - 7(a) ではほとんど等しい値となっている。また、図 - 7(b) の JR-Takatori 入力時の比較では、急激に応答変位が増加する挙動を良く表現しており、精度は良いものであると言える。

4. 結言

本研究では、鋼製橋脚モデルおよびコンクリート充填橋脚モデルを用いて、ハイブリッド地震応答実

験および解析を行った。入力地震波としては兵庫県南部地震で得られた観測地震波の内、神戸海洋気象台(I種地盤：JMA)、JR警報地震計(鷹取)(II種地盤：JR-Takatori)および東神戸大橋(III種地盤：Higashi-Kobe)の観測地震波を用いた。実験および解析結果より以下のように結論が得られた。

- (1) 本研究で用いた供試体のパラメータの範囲では、JMAは構造物の固有周期が小さいほど最大応答変位、残留変位および累積吸収エネルギーを大きくする特性を持ち、最大応答変位に関しては、その影響は非常に顕著である。
- (2) JR-Takatoriは、非常に大きな最大応答変位を生じさせる危険な地震波であるが、固有周期が1.0秒より小さい構造物に関しては、固有周期の違いによる最大応答変位の差はあまりない。
- (3) Higashi-Kobeに関しては、固有周期の違いによる最大応答変位への影響は小さく、本研究で用いた範囲内の固有周期ではほぼ一定の値を示した。
- (4) 兵庫県南部地震観測地震波による応答と従来の建設省土木研究所 Level 2地震波を入力した場合の応答と比較すると、観測地震波の方が、固有周期によっては最大応答変位で3倍程度大きく生じた。
- (5) コンクリートを柱基部に部分的に充填することによって、地震応答を低減させることが可能であり、特に残留変位に関してはその効果は大きい。
- (6) コンクリートの充填によって、柱基部での局部座屈進展に伴う急激な耐力の低下を抑制することが可能である。
- (7) 本研究で用いた供試体のパラメータの範囲では、兵庫県南部地震観測地震波を入力しても、母材のクラックは生じなかった。

- (8) 提案された鋼製橋脚の復元力モデルによる地震応答解析結果は、ハイブリッド実験結果を良く表現している。

謝辞

本研究は土木学会鋼構造委員会・鋼構造新技術小委員会・耐震設計ワーキンググループ(主査：宇佐美勉)からの研究費の補助を受けて行った。また、鉄道総合技術研究所の中村豊氏からは、JR警報地震計(鷹取)観測地震波形の提供を受けた。ここに記して深く感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 建設省土木研究所：道路橋の免震設計法マニュアル(案)、1992年3月。
- 2) NAKAMURA, Yutaka: "Waveform and its Analysis of the 1995 Hyogo-Ken-Nanbu Earthquake", JR Earthquake Information No.23c, Feb. 1995, Railway Technical Research Institute.
- 3) 伯野元彦, 岡田恒雄, 高梨晃一, 土岐憲三, 池田尚治, 家村浩和, 片田敏行: ハイブリッド実験の応用マニュアル, 1990年3月。
- 4) 才塚邦宏, 伊藤義人, 木曾英滋, 宇佐美勉: ハイブリッド地震応答実験手法に関する考察, 土木学会論文集, No.507/I-30, pp.179 - 190, 1995, 1.
- 5) 宇佐美勉, 才塚邦宏, 木曾英滋, 伊藤義人: ハイブリッド地震応答実験による鋼製橋脚の強震時挙動, 土木学会論文集, No.519/I-32, pp.101 - 113, 1995, 7.
- 6) 才塚邦宏, 宇佐美勉, 木曾英滋, 伊藤義人: コンクリートを部分的に充填した鋼製橋脚のハイブリッド地震応答実験, 構造工学論文集, Vol.41A, pp.227 - 288, 1995, 3.
- 7) 鈴木俊光, 宇佐美勉, 伊藤義人, 豊島徑: 細長比の大きなコンクリート部分充填柱の強震時挙動, 土木学会論文集に掲載予定。
- 8) 鈴木森晶, 宇佐美勉, 寺田昌弘, 伊藤努, 才塚邦宏: 箱形断面鋼製橋脚の復元力モデルと弾塑性地震応答解析, 土木学会論文集へ投稿中。
- 9) 宇佐美勉, 鈴木森晶, Iraj H.P. Mamaghani, 葛漢彬: コンクリートを部分的に充填した鋼製橋脚の地震時保有水平耐力照査法の提案, 土木学会論文集, No.525/I-33, pp.69-82, 1995, 10.

HYBRID TESTING AND ANALYSIS OF STEEL BRIDGE PIER MODELS USING THE HYOGO-KEN-NANBU EARTHQUAKE ACCELEROGRAM

Kunihiro SAIZUKA, Tsutomu USAMI, Moriaki SUZUKI and Yoshito ITOH

The Hyogo-ken-nanbu earthquake which struck Kobe area on January 17, 1995 caused considerable loss of life and property. Although a variety of Civil Engineering structures were damaged, the damage to bridge piers was the most prominent.

On this study, 6 steel box column specimens (including 3 concrete-filled steel specimens) modeling steel bridge piers were tested pseudodynamically using the accelerograms obtained during the Hyogo-ken-nanbu earthquake (Ground Type I: JMA; Ground Type III: JR-Takatori; Ground Type III: Higashi-Kobe). The piers were also analyzed using the hysteretic model developed in Nagoya University. Results indicate that the natural period and presence of infilled concrete have a significant effect on the seismic response of such piers.