

# 相似則を考慮したハイブリッド地震応答 実験手法に関する考察

才塚邦宏<sup>1</sup>・伊藤義人<sup>2</sup>・木曾英滋<sup>3</sup>・宇佐美勉<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 名古屋大学大学院 工学研究科博士課程(前期課程)(〒464-01 名古屋市千種区不老町)

<sup>2</sup>正会員 工博 名古屋大学助教授 工学部土木工学科(〒464-01 名古屋市千種区不老町)

<sup>3</sup>正会員 工修 新日本製鐵株式会社 建材開発技術部(〒100-71 東京都千代田区大手町 2-6-3)

<sup>4</sup>正会員 D.Sc. 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科(〒464-01 名古屋市千種区不老町)

復元力モデルを用いて、強地震動下の構造物の応答解析を行う場合、実構造物の復元力特性を正確に評価する必要がある。この復元力特性を実験から刻々求め、運動方程式を数値解析する方法として、ハイブリッド実験(オンライン・コンピュータ制御実験)がある。ハイブリッド実験を行うに当たり、筆者らは実橋とモデルの間の相似則を考慮して、4種のハイブリッド実験手法を理論的に考察した後、実験および数値シミュレーションによって、その物理的意味と実験手法の相互関係を明らかにした。そして、地震時保有水平耐力照査用の地震波をハイブリッド実験で用いて、構造物の水平耐力を評価する方法を確立した。

*Key Words* : hybrid test, earthquake response, experimental procedure, scale factor

## 1. 緒言

名古屋大学では過去5年間にわたって、基礎的資料が不足している鋼柱供試体の単調載荷実験および変動変位振幅繰返し載荷実験を行い、鋼箱形断面無補剛柱および補剛柱の復元力特性とエネルギー吸収能について、その特性を明らかにしてきた<sup>1),2),3)</sup>。また、得られた実験結果を用いて、鋼箱形断面柱の復元力特性をモデル化し、弾塑性地震応答解析を行い、強震を受ける鋼製橋脚の安全性を評価する方法を提案した<sup>4),5)</sup>。

しかし、単調載荷実験と変動変位振幅繰返し載荷実験をもとにして作成した復元力特性のモデルの有効性を確認するためには、このモデルを用いて行った実際の地震動下の構造物の応答解析シミュレーション結果を何らかの方法で検証する必要がある。このためには振動台を用いた実験またはハイブリッド実験が考えられる。振動台を用いた実験では、a)小さなモデルしか扱えない、b)軸力を導入するための重りが必要である、c)変位やひずみなどの多数の測定が困難である、d)高価な実験装置と測定装置が必要であるなど欠点がある。そこで、本研究では、ハイブリッド地震応答実験<sup>6)~14)</sup>を行った。この実験方法は、実験装置と計算機をオンラインで結び、複雑な特性を持つ構造物の復元力を刻々実験より取り入れて、計算機上で運動方程式を順次数値解析して、構造物の応答を求めるものである。

本研究においては、ハイブリッド地震応答実験を行う際の実験手法として、相似則を考慮して4種類の実

験手法に分類を行った。これまでの研究<sup>15)~18)</sup>では、実構造物と供試体の相似比および、入力する地震外力の相似則について正確な記述がなく、単に供試体が弾塑性挙動を示すように入力地震波の加速度の絶対値を適当に調整しているものが多く、相似則の適用はあいまいになっていたといえる。これは従来、入力地震波としてエルセントロ地震波などの観測地震波を使用しており、実験目的が構造物の定性的な地震応答特性を明らかにするものが大半であったためと思われる。本研究のように、地震時保有水平耐力照査用の地震波を使い、実構造物の地震応答特性を定量的に考察するためには、相似則を明確に適用する必要があると考える。そこで、まず4種の実験手法の物理的意味を理論的に考察し、その後各実験手法を用いて実験および数値解析シミュレーションを行い、実験手法の違いによる地震応答結果の比較を行った。

入力する地震波としては、建設省土木研究所によって提案されているLevel 1(弾性応答解析用)<sup>19)</sup>とLevel 2(地震時保有水平耐力照査用)<sup>20)</sup>について、それぞれI,II,III種地盤用の合計6種類の地震波を用いた。

## 2. 実験概要

### (1) 実験供試体

本研究では、Table 1に示すように、3体の同一寸法の片持柱供試体を製作し、実験を行った。図表中の幅厚比パラメータ  $R_f$  と細長比パラメータ  $\lambda$  は次式で定義される。

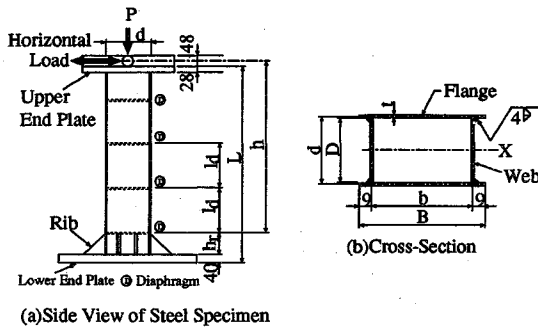


Fig. 1 実験供試体 (単位:mm)

Table 1 実験における供試体, 地盤種および軸力比

Specimen	$R_f$	$\bar{\lambda}$	地盤種	$P/P_y$	固有周期 $T(\text{sec})$
U70-40H[A]	0.7	0.4	I	0.166	0.845
U70-40H[B]			III	0.118	0.714
U70-40H[C]			II	0.138	0.771

Table 2 材料定数

$E$	$\sigma_y$	$\varepsilon_y$	$\mu$	$E_{st}$	$\varepsilon_{st}$	$\Delta l$
203	245	0.121	0.276	3.46	1.37	38.3

Notes:  
 $E$  = Young's Modulus(GPa)  
 $\sigma_y$  = Yield Stress(MPa)  
 $\varepsilon_y$  = Yield Strain(%),  $\mu$  = Poisson's Ratio  
 $E_{st}$  = Strain-Hardening Modulus(GPa)  
 $\varepsilon_{st}$  = Strain at Onset of Strain-Hardening(%)  
 $\Delta l$  = Elongation(%)

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

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

ここで、 $b$  = フランジ板幅、 $t$  = フランジ板厚、 $\sigma_y$  = 降伏応力、 $E$  = 弾性係数、 $\mu$  = ポアソン比、 $k = 4.0$  (板の座屈係数)、 $h$  = 部材長、 $r$  = 断面 2 次半径である。

Table 1 中の  $P/P_y$  は上部構造重量を想定した鉛直荷重 (軸力)  $P$  と、全断面降伏軸力  $P_y$  の比で、この値は、道路橋示方書<sup>19)</sup> に従って求められたものである。

供試体は、全て板厚が 6mm の SS400 材で製作され、Fig.1 に示すように、供試体両端部には端部治具に取り付けるための厚さ 28mm (上部) と 40mm (下部) の鋼板が溶接されている。供試体最下部には、局部座屈の発生を防止し、かつ剛域を確保するための三角リブがフランジとウェブの両面に取り付けられている。なお、供試体は三角リブ上端位置で、ダイアフラムで補剛されている。供試体の柱としての部材長  $h$  は、三角リブ上端のダイアフラムの中心位置から水平荷重の作用位置までである。

Table 2 には、供試体製作の鋼板から切り出した JIS5

Table 3 供試体実測寸法

Specimen	$L(\text{mm})$	$h(\text{mm})$	$l_d(\text{mm})$	$t(\text{mm})$
U70-40H[A]	1351	1211	434	6.17
U70-40H[B]	1351	1212	434	6.08
U70-40H[C]	1351	1214	434	6.01

	$B(\text{mm})$	$D(\text{mm})$	$R_f$	$\bar{\lambda}$
U70-40H[A]	234	156	0.640	0.386
U70-40H[B]	235	156	0.653	0.386
U70-40H[C]	235	156	0.660	0.387

Notes:

$L$  = Total Length of Specimen

$h$  = Height of Column

$l_d$  = Distance between Diaphragms

$t$  = Thickness of Plate

$B$  = Width of Flange Plate,  $D$  = Width of Web Plate

$\bar{\lambda}$  = Slenderness Ratio(Eq.(2))

$R_f$  = Width-Thickness Ratio of Flange(Eq.(1))

号試験片 3 本を用いて、引張試験を行った結果の材料特性の平均値を示す。Table 3 には供試体の測定寸法を示す。

また、本実験においては、実橋脚と供試体の相似比  $S$  としては、 $S=8$  を想定している。この相似比および上部重量荷重  $P$  を用いて計算した、実橋脚の固有周期を Table 1 に示す。実橋脚と供試体の相似比の詳細に関しては、後で示す式 (3a) ~ (3h) を参照されたい。

## (2) 実験装置

実験装置として、パーソナルコンピュータ (制御用: Compaq 社製 DESKPRO M486/50)、デジタルコントローラー (載荷装置とのインターフェース: Model490 TestStar<sup>21)</sup>、外部変位計 (制御用: MTS 社製 Tempsonic Model490<sup>22)</sup>、ロード・ユニット・コントロールパネル (載荷実験装置の制御用) をこれまでの実験装置<sup>1)</sup> に新たに取り入れた。実験装置の概要を Fig. 2 に示す。

外部変位計はセンサーとしてのリング状の永久磁石と、その磁石を差し込んであるパルス磁場を通すロッドから成り立っている (Fig. 2 の部分拡大図)。この外部変位計は、リング状の永久磁石が作り出す磁場とパルス磁場の干渉を感知することによって、リング状の永久磁石の位置を認識し、その信号をデジタル信号として、デジタルコントローラーに送り、そこで変位に換算して表示する仕組みになっている。

なお、本実験では、供試体上部の荷重載荷位置にヒンジで固定した重りの付いたスリット板にセンサーのリング状磁石を取り付けることより、供試体の変位し、たわみ角や鉛直縮みが発生しても、荷重位置における正確な水平変位を計測して制御できるように工夫した。さらに、重り付きのスリット板がスムーズに動き、かつ振動しないようにするため、振動を減衰させる役割を持つ液体の注入された水槽も取り入れた。これらに

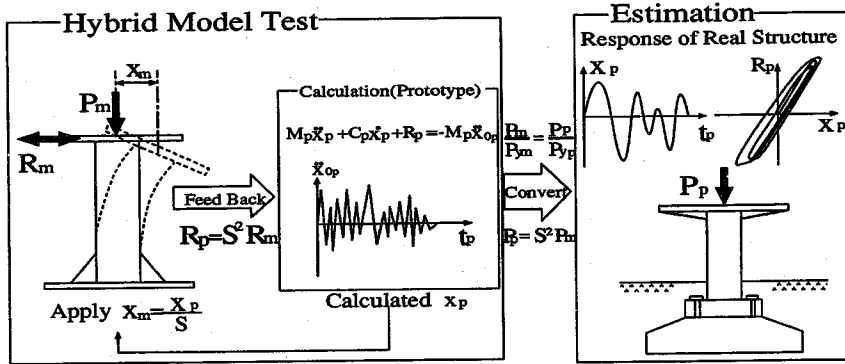


Fig. 4 実験手法1の概念図

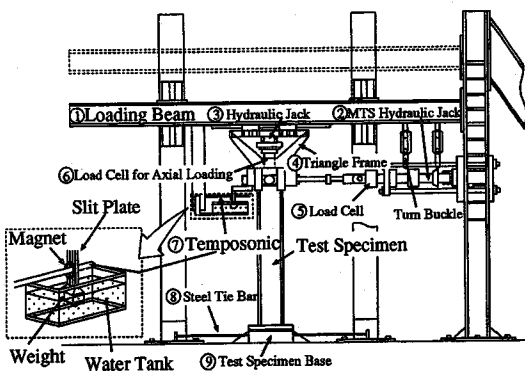


Fig. 2 荷重実験装置

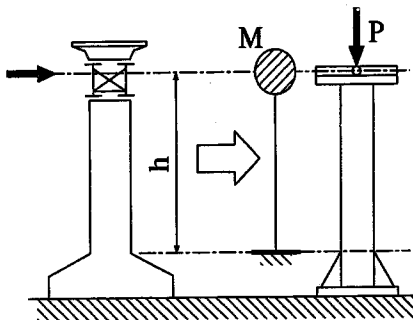


Fig. 3 実橋脚から1質点系モデルへの置き換え

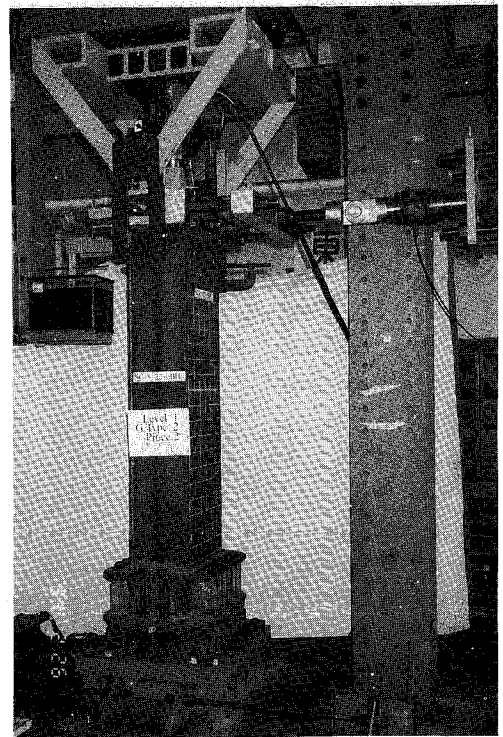


Photo.1 実験中の荷重装置

よって、コンピュータで求められた次ステップの応答変位を正確に制御することができるようにした。Photo.1に実験中の写真を示す。

### 3. ハイブリッド実験手法

実橋脚を Fig. 3 に示すように1質点系のモデルに置き換え、実地震動を受ける場合の応答を推定するためのハイブリッド実験を考える。ここでは、まず相似則を考慮した異なる3種類のハイブリッド実験の実験手

法について理論的に考察する。

#### (1) 実験手法1(実構造物解析型手法)

実験手法1の概念図を Fig. 4 に示す。この実験手法では、実橋脚を考え、この実橋脚に対して相似である供試体モデルを用いて実験を行い、この実験により得られた供試体モデルの復元力の結果を、相似則を用いて実橋の復元力に変換して、逐次実橋脚に対して行う応答解析へフィードバックしながら実験及び数値解析

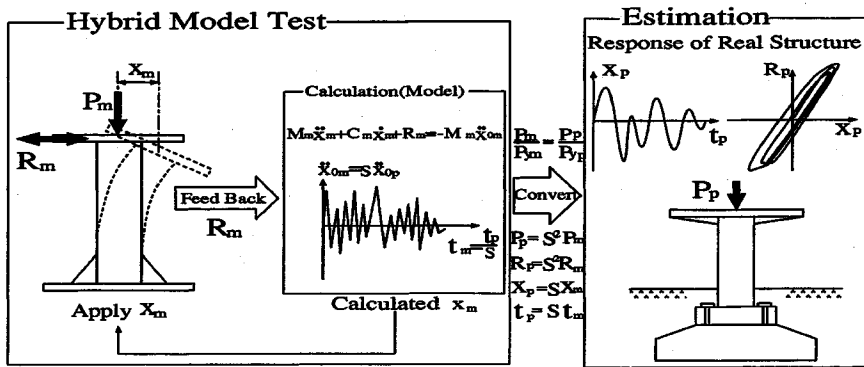


Fig. 6 実験手法2の概念図

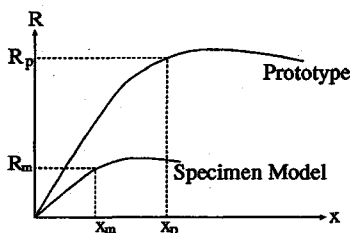


Fig. 5 供試体と実橋脚の復元力-変位関係

を同時に進行させる。実橋脚と供試体モデルの相似比を  $S$  倍 ( $S > 1$ ) であるとすると、実橋脚と供試体モデルの間の物理量の相似関係は、次式で与えられる。

$$t_p = S t_m, \quad x_p = S x_m \quad (3a), (3b)$$

$$\dot{x}_p = \dot{x}_m, \quad \ddot{x}_p = \frac{1}{S} \ddot{x}_m \quad (3c), (3d)$$

$$\frac{R_p}{R_m} = S^2 \frac{R_m}{R_m}, \quad \frac{M_p}{M_m} = S^3 \frac{M_m}{M_m} \quad (3e), (3f)$$

$$\frac{C_p}{C_m} = S^2 \frac{C_m}{C_m}, \quad \frac{K_p}{K_m} = S \frac{K_m}{K_m} \quad (3g), (3h)$$

ここで、 $t$ :時間、 $x$ :変位、 $\dot{x}$ :速度、 $\ddot{x}$ :加速度、 $R$ :復元力、 $M$ :質量、 $C$ :減衰係数、 $K$ :剛性、 $S$ :相似比である。添字  $m$  は供試体モデル、 $p$  は実橋脚を表す。この相似関係の誘導は、Appendix を参照されたい。

下線を引いた実橋脚と供試体モデルの復元力と応答変位の関係は、地震動が作用する構造物のひずみ速度程度では応力-ひずみ関係への影響は小さいと考えられ、これを無視すると、時間軸の相似則と無関係になるので、これより述べる全ての実験手法において、同じ供試体を使用する限り不変であり、Fig. 5 に示すように復元力-変位曲線は相似関係になっている。

実験手法1では上記のような相似関係が供試体モデルとの間で成り立っている実橋脚について運動方程式を解き、応答計算を行う。運動方程式は以下のようになる。

$$M_p \ddot{x}_p + C_p \dot{x}_p + R_p = -M_p \ddot{x}_{op} \quad (4)$$

ここで、 $M_p$ :実橋脚を1質点系に置き換えたときの等価質量、 $\ddot{x}_p$ :実橋脚の応答加速度、 $C_p$ :実橋脚の減衰係数(本研究では減衰定数  $\xi = 0.05$  を使い、 $C_p = 2\xi \sqrt{K_p M_p}$  として算出。ただし、 $K_p$  は実橋脚の弾性剛性であり、供試体モデルで計算した弾性剛性  $K_m$  を用いて  $K_p = S \cdot K_m$  により求めた)、 $\dot{x}_p$ :実橋脚の応答速度、 $R_p$ :実橋脚の復元力、 $\ddot{x}_{op}$ :入力地震波加速度である。

この運動方程式中の復元力  $R_p$  は、前に述べたように実験供試体から得られる復元力  $R_m$  より式(3e)に示した相似則を用いて求められる。

供試体の復元力  $R_m$  は、式(4)を用いて計算された各ステップの変位を、式(3b)の関係を用いて供試体モデルの値に変換し、実験制御装置を介して供試体に与えることによって逐次求められる。なお、供試体に与える軸力比  $P_m/P_{ym}$  ( $P_m$ :供試体に作用させる軸力、 $P_{ym}$ :供試体の降伏軸力で、Table 1 の  $P/P_y$  と同一) は、実橋脚の軸力比  $P_p/P_{yp}$  と同じにするようにしている。これは、軸力が復元力特性に与える影響を供試体と実橋脚とで同じにするためであり、全ての実験手法で、この考え方が適用される。

## (2) 実験手法2(相似モデル解析型手法)

実験手法2において、実橋脚と供試体モデルを相似とし、実橋脚を供試体モデルの  $S$  倍として基礎相似比を考えることは前述の実験手法1(実構造物解析型手法)と全く同じである。よって、実橋脚と供試体モデルの間には式(3)と同じ関係が成り立つ。実験手法2では、このように相似則に関しては3.(1)の方法と同じであるが、応答計算を供試体モデル側で行い、実橋脚の応答は、実験終了後に相似則を考えることにより、換算して求める方法である。実験手法2の概念図を Fig.6 に示す。

実験手法2でのハイブリッド実験は、応答計算を供

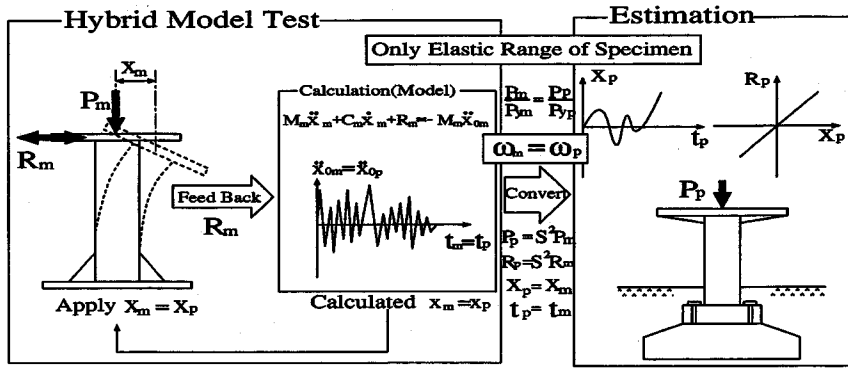


Fig.7 実験手法3(その1)の概念図

試体モデルについて行うために、時間の相似則を考え、実橋脚へ入力されるべき地震波に相似な入力地震波、すなわち、実地震波の加速度 $\ddot{x}_{0p}$ を $S$ 倍し、かつ、時間軸を $1/S$ 倍したものを供試体モデルに入力する。この実験手法は、振動台実験で考慮される相似則の考え方と同じである。

実験手法1(実構造物解析型手法)では実橋脚について応答を考え、実験の供試体モデルからは復元力のみを得ていたが、実験手法2(相似モデル解析型手法)では入力地震波を含めたすべてを実橋脚に相似な供試体モデルについて考える。よって実験時に解く運動方程式は式(5)になり、式(5)より計算される各ステップの変位は供試体の値となるので、その値を直接実験供試体に与えることになる。

$$M_m \ddot{x}_m + C_m \dot{x}_m + R_m = -M_m \ddot{x}_{0m} \quad (5)$$

式(5)に式(3)の相似則を適用し、実橋の諸量に直せば、式(4)と同一の運動方程式を得る。そのため、式(5)を用いて行ったハイブリッド実験結果から、実橋脚の応答を式(3)の相似条件を用いて求めることができる。

また、供試体モデルの固有円振動数 $\omega_m$ は、次式で表され、式(4)の実橋脚の固有円振動数 $\omega_p$ の $S$ 倍となる。

$$\omega_m = \sqrt{\frac{K_m}{M_m}} = \sqrt{\frac{K_p/S}{M_p/S^3}} = S \sqrt{\frac{K_p}{M_p}} = S \omega_p \quad (6)$$

### (3) 実験手法3(周波数特性同調解析型手法)

実験手法3(周波数特性同調解析型手法)は実橋脚と供試体モデルの周波数特性すなわち固有円振動数を合わせる方法である。この実験手法は、これまでの一般のハイブリッド実験で多く用いられている実験手法である。運動方程式を、供試体について考えるのは、実験手法2と同じである。実験手法3は入力加速度振幅

の調整の有無により以下に述べる2種類の方法が考えられる。

#### 実験手法3(その1): 実地震波を入力する場合

入力する加速度波形の振幅、時間軸ともFig.7に示すように、実橋脚のそれと同じものを用いる。すなわち、時間に関する相似則は考えず、 $t_p = t_m$ とする。実験手法3(その1)の弾性域内での実験の概念図をFig.7に示す。

この実験手法でも、供試体モデルについて運動方程式をたてるので、式(5)が成り立つ。ここで、実橋脚と供試体モデルの弾性時の周波数特性を同調させるために、 $\omega_m = \omega_p$ とする。すなわち、

$$\omega_m = \sqrt{\frac{K_m}{M_m}} = \omega_p = \sqrt{\frac{K_p}{M_p}} \quad (7)$$

これより、

$$M_m = \frac{K_m}{K_p} M_p (= \frac{M_p}{S}) \quad (8)$$

この関係を式(5)に代入し、両辺に $K_p/K_m$ を乗ずると次式を得る。

$$M_p \ddot{x}_m + \frac{K_p}{K_m} C_m \dot{x}_m + \frac{K_p}{K_m} R_m = -M_p \ddot{x}_{0m} \quad (9)$$

ここで、

$$\frac{K_p}{K_m} = S \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{K_p}{K_m} C_m &= \frac{K_p}{K_m} 2\xi \sqrt{M_m K_m} = 2\xi \sqrt{\frac{K_p^2}{K_m^2} \cdot \frac{K_m}{K_p} M_p \cdot K_m} \\ &= 2\xi \sqrt{K_p M_p} = C_p \end{aligned} \quad (11)$$

この関係を使うと式(9)は、以下ようになる。

$$M_p \ddot{x}_m + C_p \dot{x}_m + S R_m = -M_p \ddot{x}_{0m} \quad (12)$$

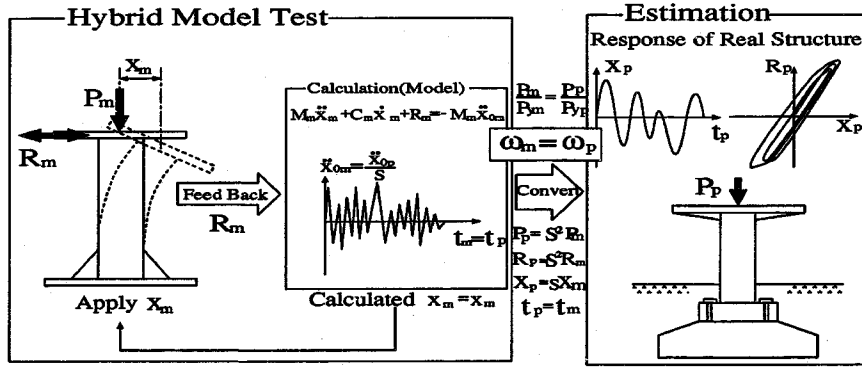


Fig.8 実験手法 3(その 2) の概念図

さらに説明のため、両辺を  $S$  倍する。

$$M_p(S\ddot{x}_m) + C_p(S\dot{x}_m) + S^2R_m = -M_pS\ddot{x}_{0m} \quad (13)$$

ここで、入力加速度は実橋脚と同じものを使うため、 $\ddot{x}_{0m} = \ddot{x}_{0p}$  である。時間の相似則は考えない ( $t_p = t_m$ ) ので、モデルと実橋脚の剛性に関する相似則のみを考え、加速度、および速度を時間と長さの基礎物理量を用いて表現すると、次の関係が成り立つ。

$$S\ddot{x}_m = \ddot{x}_p, S\dot{x}_m = \dot{x}_p, Sx_m = x_p, S^2R_m = R_p \quad (14)$$

この関係を使うと式 (13) は次式のようになる。

$$M_p\ddot{x}_p + C_p\dot{x}_p + R_p = -M_pS\ddot{x}_{0p} \quad (15)$$

式 (15) は、実橋脚に  $S$  倍の実地震波 ( $S\ddot{x}_{0p}$ ) を与えたときの実橋脚の運動方程式である。そのため、式 (5) を解いて得られる供試体モデルの応答変位  $x_m$  は、 $S$  倍の実地震波を与えたときの実橋脚の応答変位の  $1/S$  となる。すなわち、 $S$  倍の実地震波という、相似比  $S$  の値が 1 前後以外では工学的に意味のない場合を想定したことになる。

ただし、弾性範囲内に限れば、供試体モデルの応答変位  $x_m$  は実橋脚に実地震波 ( $\ddot{x}_{0p}$ ) を入力したときの応答変位  $x_p$  に等しい。これは、以下のように考えるとよくわかる。まず、弾性範囲内を考え、 $R_m = K_m \cdot x_m = \frac{1}{S} K_p \cdot x_m$  として、さらに、 $\ddot{x}_{0m} = \ddot{x}_{0p}$  とおくと、式 (12) は次式のようになる。

$$M_p\ddot{x}_m + C_p\dot{x}_m + K_p x_m = -M_p\ddot{x}_{0p} \quad (16)$$

式 (16) を式 (4) で  $R_p = K_p x_p$  とおいた式と比較すると、弾性範囲内では、ハイブリッド実験により得られる供試体応答から、実橋脚についての応答への変換は式 (17) のようになる。

$$x_p = x_m, \dot{x}_p = \dot{x}_m, \ddot{x}_p = \ddot{x}_m \quad (17)$$

すなわち、この実験手法は供試体モデルに、直接実橋脚の応答変位を発生させるようなことになり、相似比  $S=1$  の場合のみ有効であり、今回の実験のように  $S=8$  のような大きな相似比の場合は、この実験手法は使うことができないことが、この考察から直感的に分かる。上記の考察から、Fig.7 の概念図では弾性領域の実験の流れのみを考えた。

#### 実験手法 3(その 2): 実地震波を調整して入力する場合

実験手法 3(その 2) では、入力加速度は実地震波の  $1/S$  とする。ただし、実橋と供試体で周波数特性を同調させているため、時間軸は実橋脚と同じものを用いる。実験手法 3(その 2) の概念図を Fig.8 に示す。

運動方程式は供試体モデルについてたてるので、式 (5) が成り立つ。さらに、実橋脚と供試体モデルとの間で周波数特性を同調させるのは実験手法 3(その 1) と同じであるので、式 (13) が成り立つ。ただし、この実験手法では  $\ddot{x}_{0m} = \frac{1}{S}\ddot{x}_{0p}$  であるので、式 (13) より、

$$M_p(S\ddot{x}_m) + C_p(S\dot{x}_m) + S^2R_m = -M_p\ddot{x}_{0p} \quad (18)$$

この実験手法における相似則に関する条件は、式 (14) と同じになるので、この相似条件を考えると式 (18) は式 (4) と同じである。よって、式 (5) を解いて得られる供試体モデルの応答を用いて式 (14) の相似則を用いることにより、実橋脚の応答を評価可能である。

以上のように、実験手法 1, 2, 3(その 2) は理論的に等価なものであり、実験手法 3(その 1) のみ、相似比  $S=1$  以外では工学的に意味のないものになっていることがわかる。

Table 4 に、本研究で用いた実験手法の運動方程式、入力パラメータ、入力地震波および実橋脚に対する応答の評価の仕方に関するまとめを示す。

Table 4 ハイブリッド実験手法のまとめ (添字の  $p$  は実構造物,  $m$  は供試体モデル表す)

	実験手法 1	実験手法 2	実験手法 3: 固有周波数特性同調解析型手法	
	実構造物解析型手法	相似モデル解析型手法	その 1	その 2
運動方程式	実構造物		供試体モデル	
質量	$M_p$ (橋脚の場合は $(P_p + 0.3W_p)/g$ ) $W_p$ : 橋脚の重量	$\frac{M_p}{S^3}$	$\frac{M_p}{S}$	
減衰	同じ減衰定数 $\xi$ の値を用いる (本研究では 0.05)			
復元力	$S^2 R_m$	$R_m$		
入力地震動	実地震動	実地震動の加速度: $S$ 倍 時間軸: $1/S$ 倍	実地震動	実地震動の加速度: $1/S$ 倍
軸圧縮荷重	軸力比 $P/P_y$ は実構造物と供試体モデルで同一 ( $P_p/P_{yp} = P_m/P_{ym}$ )			
実構造物の応答	交換の必要なし	$R_p = S^2 R_m$ $x_p = S x_m$ $t_p = S t_m$	$R_p = S^2 R_m$ $x_p = S x_m$ $t_p = t_m$ (実地震動の $S$ 倍の加速度を入力した時の実構造物の応答が求まる)	$R_p = S^2 R_m$ $x_p = S x_m$ $t_p = t_m$
その他の相似則	$\ddot{x}_p = \ddot{x}_m/S, \dot{x}_p = \dot{x}_m, C_p = S^2 C_m$		$\ddot{x}_p = S \ddot{x}_m, \dot{x}_p = S \dot{x}_m, C_p = S C_m$	
コメント	実構造物について運動方程式を解くため, 実験供試体から得られる復元力を, 相似比の二乗倍して実橋脚の復元力として取り込む.	運動方程式を供試体について解くため, 質量などのパラメータの値は実験手法 1 に比べ, 相似則により小さい値になる. 実験からの復元力は, そのまま運動方程式に取り込む.	実構造物と実験供試体の相似比 $S$ が大きいときは, ハイブリッド実験手法としては不向きである.	供試体について運動方程式を解くが, 質量は実橋との周波数特性を合わせるため, 実験手法 2 で用いる質量の相似比の二乗倍になっている. 実験からの復元力は, そのまま運動方程式に取り込む.

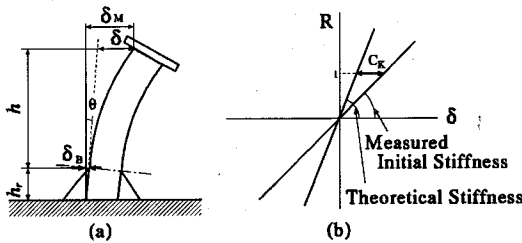


Fig.9 供試体の剛体変位除去法

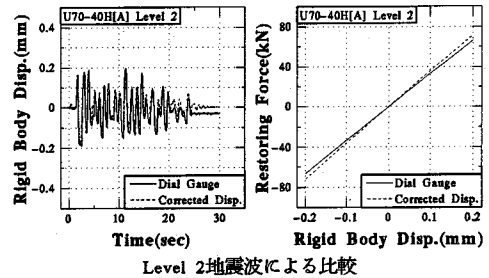


Fig.10 剛体変位除去の理論値と実測値の比較

#### 4. 実験精度の検討

##### (1) 剛体変位の除去の妥当性

今回行ったハイブリッド実験の精度を確認するために, まず, 実験における剛体変位の除去の妥当性について考察を行う. 実験における供試体の剛体変位は, 実際に柱長と考えられる部分より下の三角リブが付けられている部分 (Fig.9(a) の  $h_r$  の部分) の変位として生じる. この変位の除去が妥当であるかどうかによって, 実験の精度に大きく影響する. 本研究の実測例 (Fig.10) によれば, Fig.9(b) に示すように, 剛体変位量は, 復元力と線形関係にあるとみなしてよいので, 理論剛性と供試体を用いた実測剛性の単位荷重に対する変位の差を剛体変位補正係数  $C_K$  において, 以下の式により剛体変位の除去を行った.

$$\delta = \delta_M - C_K \cdot R \quad (19)$$

$$C_K = 1/K_M - 1/K_T \quad (20)$$

ここで,  $\delta$ :剛体変位除去後の変位,  $\delta_M$ :計測変位,  $C_K$ :剛体変位補正係数,  $R$ :供試体の復元力,  $K_M$ :実測剛性,  $K_T$ :理論剛性である. ハイブリッド実験における各ステップの変位制御は, この剛体変位量を考慮して行う.

以上の剛体変位除去法を用いて行った実験結果を検証するため, 今回の方法での剛体変位除去変位量と実測の剛体変位量とを比較したものを Fig.10 に示す. Fig.10 は供試体として, U70-40H[A] を用い, Level 2 地震波を入力した場合について比較を行ったものである. 実線で示す実測の剛体変位量は Fig.9(a) に示す三角リブ

Table 5 最大応答変位および時刻の比較  
(Level 1 地震波)

		実験値 (1)	解析値 (2)	(1)/(2)
I 種地盤	$\delta_{max}$ (cm)	-0.483	-0.480	1.008
	Time(sec)	2.07	2.05	-
III 種地盤	$\delta_{max}$ (cm)	-0.527	-0.515	1.023
	Time(sec)	32.47	32.48	-

上端の水平変位量 $\delta_B$ を用いたものである。破線で示す値は、今回用いた水平荷重位置の剛体変位量を、三角リブ上端位置の量に換算したものである。Fig.10より、剛体変位除去量に関しては、今回用いた方法と実測値でよく一致しており、正確に剛体変位量をハイブリッド実験で考慮しているといえる。一般に、三角リブ上端の変位量は小さいため測定精度が良くなく、今回用いた弾性範囲内の理論剛性と実測剛性の差を使って剛体変位量をハイブリッド実験の前に推定しておく方法の方が優れている。

(2) 実験結果による実験精度の検証

次に、弾性応答解析用の Level 1 地震波を用いて行ったハイブリッド実験結果と数値解析シミュレーション結果との比較を行う。これは、弾性範囲内の実験が理論値通りに行えることを確かめることが、ハイブリッド実験システムの精度を確認するための必要条件と考えたからである。

比較のための数値解析シミュレーションは、実験で求めた弾性範囲内の線形の復元力を仮定し、運動方程式を線形加速度法により差分形式として数値解析を行ったものである。数値積分の時間間隔は0.01秒であり、これはハイブリッド実験と同じである。ハイブリッド実験結果については継続時間の短いI種地盤の地震波(25sec)、および継続時間の長いIII種地盤の地震波(50sec)の実験結果を用いた。供試体としてはU70-40H[A],[B]を用いた。Fig.11にハイブリッド実験結果と数値解析シミュレーションの応答変位の比較を示す。実線はハイブリッド実験結果を、破線は数値解析シミュレーション結果を示す。また、最大応答変位発生時での実験値と数値解析シミュレーション値の変位の比、およびその時の時刻をTable 5に示す。

Fig.11(a),(b)とTable 5から分かるように、I,III種地盤ともに、ハイブリッド実験結果と数値解析シミュレーション結果の差はほとんどなく、応答変位振幅および周波数特性ともに、精度よく一致している結果が得られた。

この結果、今回作製したハイブリッド実験システムは、十分な精度で動作しているといえる。

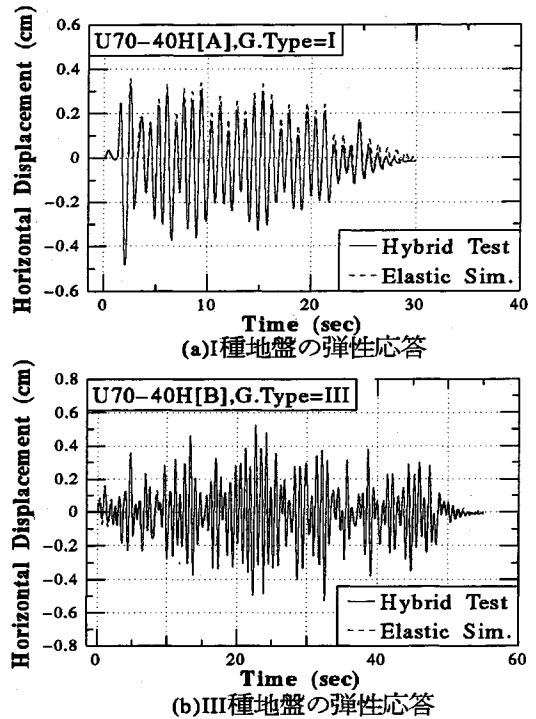


Fig.11 ハイブリッド実験結果と数値シミュレーション結果との比較 (Level 1 地震波入力時)

5. ハイブリッド実験手法の差の影響

(1) 実験結果による比較

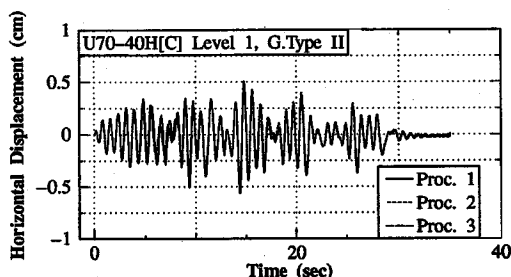
3.で述べた3種の実験手法を用いて、同一形状の供試体を用い、ハイブリッド実験を行い、実験手法の違いによる結果を考察する。ただし、実験手法3に関しては前述したように、実験手法3(その1)は工学的な意味がないと考えられるので、(その2)のみを用いた。

3種の実験手法を用いて実験を行ったのは、単に3.で述べた理論の検証を行うだけでなく、各実験手法の違いによる、精度への影響についても考察するためである。

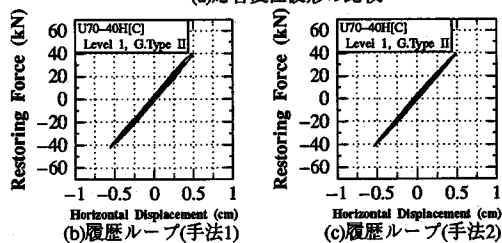
弾性応答の比較

ハイブリッド実験手法による応答結果の違いは、U70-40H[A],[B],[C]の3体の供試体を用いた実験結果を使って比較を行う。まず、弾性範囲内の応答の差を見るために、Level 1 地震波を使って、供試体 U70-40H[C] を用いて、3種の実験手法で弾性範囲内のハイブリッド実験を行った。弾性範囲内の応答であるので、同じ供試体に Level 1 の地震波を数回入力しても良いと考えた。地盤種としてはII種地盤を想定して行った。Fig.12に、3種の実験手法のハイブリッド実験の結果の比較を示す。Fig.12(a)は、応答変位の時刻歴曲線を比較したもの



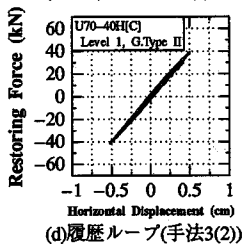


(a) 応答変位波形の比較



(b) 履歴ループ(手法1)

(c) 履歴ループ(手法2)



(d) 履歴ループ(手法3(2))

Fig.12 3手法による U70-40H[C] の応答の比較 (Level 1 入力時)

であり、Fig.12(b)～(d)は、各実験手法を用いて行ったハイブリッド実験の復元力の履歴ループである。なお、各実験手法の結果は、直接比較できるように、相似条件を用いて、変位軸は供試体のものを用い、時間軸は実地震波のものに変換してある。また、このハイブリッド実験における実験手法1と実験手法2の、変位差-相対頻度スペクトルをFig.13に示す。スペクトル図では、縦軸には相対頻度を、横軸としては実験手法2と実験手法1による各ステップの応答変位の差を、実験手法2の最大変位で除した割合をとってある。

Fig.12(a)の時刻歴応答変位を見ると3種の実験手法による結果は、ほとんど一致していることが確認できる。ただし、実験手法1については5～10秒、17～18秒付近で実験手法2,3と比較すると、わずかに差が見られるが、この誤差は伝播しておらず復元力のフィードバックの際に生じた実験装置側の誤差であると思われる。また、Fig.13より、実験手法1と実験手法2における応答の差はほとんどないことが確認できる。

#### 弾塑性応答の比較

Level 2地震波による弾塑性応答における各実験手法の比較は、II種地盤とIII種地盤を想定して行った。II

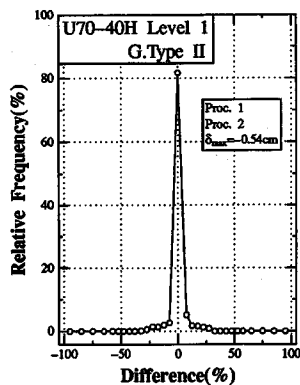


Fig.13 変位差-相対頻度スペクトル (Level 1地震波)

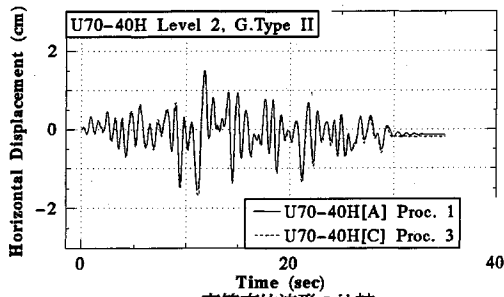
種地盤を想定したときは、U70-40H[A],[C]の供試体を用い、Fig.14に示すように、実験手法1と実験手法3(その2)の比較を行った。また、III種地盤を想定したときは、U70-40H[A],[B]の供試体を用い、Fig.15に示すように、実験手法1と実験手法2の比較を行った。Fig.14およびFig.15には応答変位波形および復元力-変位曲線を示す。これらの図はLevel1の場合と同様に、変位軸と復元力軸は供試体レベルで、時間軸は実地震波レベルで描いてある。また、Level1の場合と同様に、実験手法1と実験手法3(その2)の変位差-相対頻度スペクトル図をFig.16に示す。

Fig.14およびFig.15より、弾塑性範囲においても、実験手法による差はほとんど見られないことが分かる。復元力履歴ループについても、変位および復元力の最大値や、履歴ループの形状でも、よく一致していると言える。また、Fig.16からも、実験手法1と実験手法3(その2)における応答の差はほとんどないと言える。

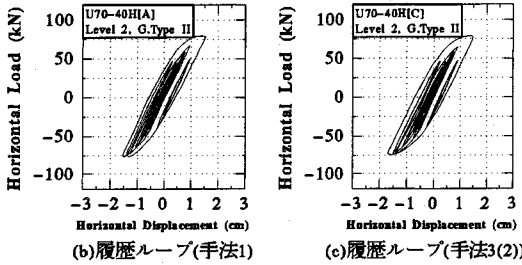
以上の実験結果から、実験手法の違いによるハイブリッド実験応答値への影響はないものと考えられ、3.で理論的に考えた3種の実験手法の関係は、実験的にも検証されたと言える。すなわち、実験手法としては、ここで考えた、実験手法1、実験手法2、実験手法3(その2)は等価であり、どの実験手法を用いてハイブリッド実験を行っても、相似条件を考慮すれば、実橋脚の応答を求めることができることが分かった。

#### (2) 数値解析シミュレーションによる比較

5.(1)において、実験的に3種の実験手法による応答結果に違いがないことを示した。しかし、実験手法3においては、実験手法3(その2)しか用いておらず、実験手法3(その1)における挙動は明確でない。そこで、実験手法3(その1)を模擬した弾塑性応答解析を数値解析シミュレーションで行う。さらに、ハイブリッド実験と同様に実験手法1,2,3(その2)を模擬した数値解析シ



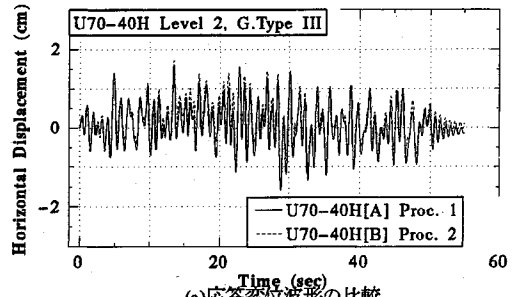
(a) 応答変位波形の比較



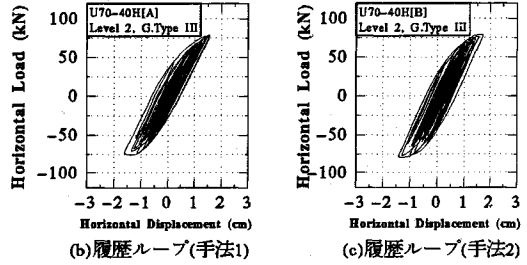
(b) 履歴ループ(手法1)

(c) 履歴ループ(手法3(2))

Fig.14 実験手法1, 実験手法3(2)の実験結果の比較 (Level 2地震波入力時)



(a) 応答変位波形の比較



(b) 履歴ループ(手法1)

(c) 履歴ループ(手法2)

Fig.15 実験手法1, 実験手法2の実験結果の比較 (Level 2地震波入力時)

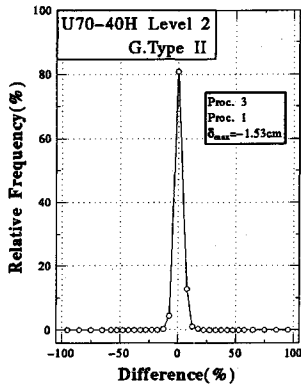


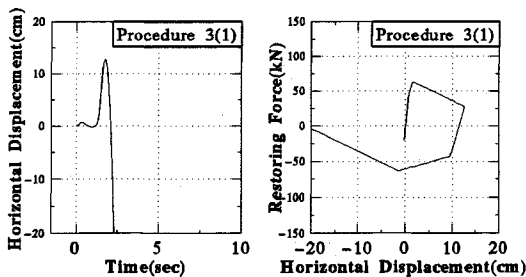
Fig.16 変位差-相対頻度スペクトル (Level 2地震波)

Table 6 入力パラメータ

地盤種	質量 $M \times 10^{-3}$ ton	剛性 $K$ kN/cm	減衰係数 $C \times 10^{-1}$ kN · sec/cm
I	2.508	82.94	1.428
II	2.088	82.94	1.302
III	1.789	82.94	1.205

ミュレーションを行い、比較を行う。数値解析シミュレーションには名古屋大学で考案された修正3パラメータモデル<sup>4),5)</sup>を復元力モデルとして用いる。シミュレーションの対象としては供試体U70-40Hを取りあげ、入力パラメータ  $M, K, C$  は Table 6 に示すような、実験で用いたものと同じものを用いる。入力地震波としては最も応答変位が大きく出る、Level 2のI種地盤の地震波を用いる。

実験手法3(その1)を用いて応答を求めた数値解析シミュレーション結果を Fig.17 に示す。ただし、変位軸は供試体レベルで、時間軸は実橋レベルで描いてある。計算結果の応答変位は、2秒程度で大きな変位応答が発生し、その後、発散した結果が得られた。Fig.17(b)の復元力履歴ループを見ると、この解析結果は予想していた通り弾性域をこえ塑性域に入った後すぐに変位が急増し破壊にいたる。この実験手法による応答は、実橋脚側の運動方程式で考えると、実橋に実地震波の  $S$  倍の加速度を入力した場合の応答になる。供試体側で考えると、供試体と実橋脚の固有周期を合わせるために調整した巨大な質量が載荷された状態で、実地震波が入力された場合の応答になる。実際に、相似比  $S$  が大



(a) 応答変位波形(手法3(1))

(b) 復元力履歴ループ(手法3(1))

Fig.17 U70-40Hの実験手法3(その1)による応答解析波形

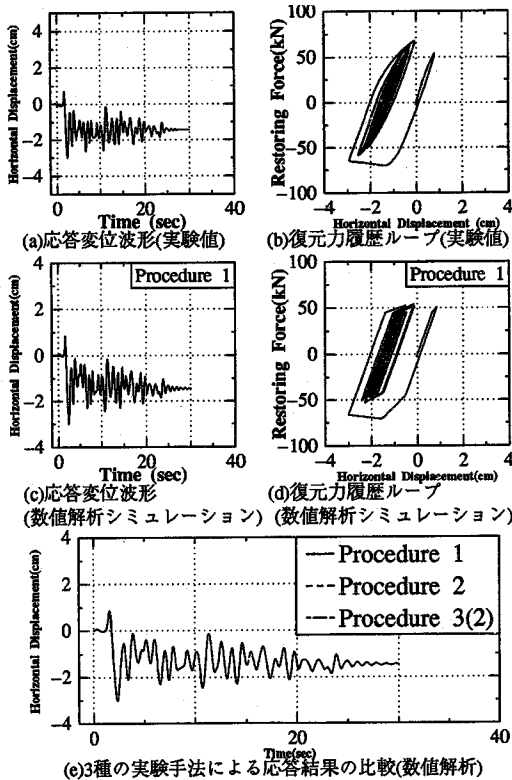


Fig.18 実橋脚の応答変位波形および復元力履歴ループの数値解析結果

きな供試体について、この実験手法を用いてハイブリッド実験を行ったとした場合、供試体の弾性範囲内では有効ではなく、すぐに大きな変位応答を示し、供試体は壊れてしまうことが予想され、ハイブリッド実験手法としては有効でないことは明らかである。

次に、実験手法1、実験手法2、実験手法3(その2)の各実験手法を模擬する数値シミュレーションを行った。実験手法1を適用した応答解析の時刻歴変位、復元力履歴ループの数値解析シミュレーション結果、およびハイブリッド実験結果をそれぞれ Fig.18(a)～(d)に示す。ハイブリッド実験結果と数値解析シミュレーション結果は、Fig.18(a),(b)と Fig.18(c),(d)を比較して分かるように、良く近似していると言える。3種の実験手法を模擬した数値解析シミュレーションの時刻歴応答変位結果を比較した図を Fig.18(e)に示したが、全く同じ結果が得られたため、一本の曲線になっている。このことより3種のハイブリッド実験手法が数値解析的にも等価な実験手法であることがこの例から実証された。

## 6. 結論

本研究では、従来の変動変位振幅繰り返し載荷実験

システムに新しい実験装置を取り入れることで、ハイブリッド地震応答実験を行った。ハイブリッド実験を行うに当たり、これまであいまいになっていたハイブリッド実験の相似則を考察するため3種の実験手法として、実験手法1(実構造物解析型手法)、実験手法2(相似モデル解析型手法)、実験手法3(周波数特性同調解析型手法)を考え、その相互関係を理論的、実験的および数値解析的に考察した。

さらに、全ての実験手法について、修正3パラメータ復元力モデルを用いた数値解析シミュレーションを行い、実験手法による応答値への影響および実験手法3(その1)の実用性の有無についても検討した。これらの結果をまとめると以下ようになる。

- 1) 実地震動下の橋脚の応答を求めるための、十分な精度を有しているハイブリッド実験システムを試作できた。
- 2) 相似則を考慮した3種のハイブリッド実験手法を考えて、それらの相互の関係を、まず、理論的に明らかにし、その後、実験的に検証を行い、これまであいまいであったハイブリッド実験における相似則の取扱いを明確にした。その結果、実験手法1(実構造物解析型手法)、実験手法2(相似モデル解析型手法)、および実験手法3(その2、周波数特性同調解析型手法)の3種の実験手法は等価であり、相似則を考慮することにより、実橋脚の地震応答を推定した場合、同じ結果を得ることができることを明らかにした。また、数値解析シミュレーションによっても、この結果を検証した。
- 3) 理論的考察と数値解析シミュレーションによって、従来広く行われてきたハイブリッド実験の実験手法3(その1、周波数特性同調解析型手法)の物理的意味を明らかにした。実構造物と実験供試体の相似比 $S$ が $S=1$ 前後でのみ、この実験手法は有効であることを明らかにした。そのため、地震時保有水平耐力照査用の地震波を用いて、実構造物の弾塑性応答を定量的に評価するときは、相似比 $S$ が大きな場合は、この実験手法は工学的に使うことができないことを例を用いて示した。
- 4) ハイブリッド実験において、供試体基部の剛体変位の除去の重要性を示し、本実験で用いた剛体変位除去法が有効であることを、実験的に明らかにした。

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、建設省土木研究所の川島一彦氏からは、標準地震波形(レベル1,2)の提供を受け、大阪市立大学 北田俊行助教授、京都大学 杉浦邦征助教授および大同工業大学 酒造敏

廣助教授からは、研究を遂行するに当たり、種々のアドバイスをいただいた。ここに深く感謝の意を表します。

#### Appendix 相似則<sup>23)</sup>について

実構造物および供試体モデルの運動方程式は次式のようになる。

$$M_p \ddot{x}_p + C_p \dot{x}_p + R_p = -M_p \ddot{x}_{0p} \quad (A.1)$$

$$M_m \ddot{x}_m + C_m \dot{x}_m + R_m = -M_m \ddot{x}_{0m} \quad (A.2)$$

ここで、 $\ddot{x}_0$ は地震加速度を表し、添字  $p$  は実構造物、 $m$  は供試体モデルを表す。いま、式(A.1)と式(A.2)の各物理量間の関係を以下のようにおく。

$$x_p = S x_m, \quad M_p = M^* M_m, \quad C_p = C^* C_m$$

$$t_p = t^* t_m, \quad R_p = R^* R_m, \quad \ddot{x}_{0p} = x_0^* \ddot{x}_{0m}$$

ここで、\*印の付いた文字は、各物理量間の相似比を表し、この関係を用いて式(A.1)を変形すると次式が得られる。

$$M_m \frac{d^2 x_m}{dt_m^2} + \frac{t^* C^*}{M^*} C_m \frac{dx_m}{dt_m} + \frac{t^{*2} R^*}{M^* S} R_m = -\frac{t^{*2} x_0^*}{S} M_m \ddot{x}_{0m} \quad (A.3)$$

式(A.2)と式(A.3)を比較すると、

$$\frac{t^* C^*}{M^*} = 1.0, \quad \frac{t^{*2} R^*}{M^* S} = 1.0, \quad \frac{t^{*2} x_0^*}{S} = 1.0 \quad (A.4) \sim (A.6)$$

ここで、復元力  $R$  は材料のひずみ速度依存性を無視しているため、静荷重の場合と同一と考えられるので、 $R_p = S^2 R_m$  となる。従って、 $R^* = S^2$  となる。また、質量  $M$  に関しては、体積に比例することから、 $M^* = S^3$  となる。よって、式(A.4)～(A.6)より次のように導ける。

$$t^* = S, \quad C^* = S^2, \quad x_0^* = 1/S$$

#### 参考文献

- 1) 宇佐美勉, 今井康幸, 青木徹彦, 伊藤義人: 繰り返し荷重を受ける鋼圧縮部材の強度と変形能に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.37A, pp.93-106, 1991.
- 2) 宇佐美勉, 水谷慎吾, 青木徹彦, 伊藤義人, 安波博道: 補剛箱形断面鋼圧縮部材の繰り返し弾塑性挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.38A, pp.105-117, 1992.
- 3) 宇佐美勉, 坂野茂, 是津文章, 青木徹彦: 鋼製橋脚モデルの繰り返し弾塑性挙動におよぼす荷重履歴の影響, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.235-247, 1993.
- 4) 伊藤 努: 地震時の鋼製橋脚の損傷度評価に関する研究, 名古屋大学工学部土木工学科修士論文, 1992.
- 5) 寺田昌弘: 強震時の鋼製橋脚の安全性評価法に関する研究, 名古屋大学工学部土木工学科修士論文, 1993.
- 6) 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, 平成2年3月.

- 7) 伯野元彦, 四俣正俊, 原 司: はりの動的破壊実験, 土木学会論文報告集, 第171号, pp.1-9, 1969年11月.
- 8) 山田善一, 家村浩和, 伊津野和行, 大本修: ハイブリッド実験による修復・補強RC部材の地震時剛性劣化過程, 土木学会論文集, 第386号/I-8, pp.407-416, 1987年10月.
- 9) 渡邊英一, 杉浦邦征, 宇都宮智昭, 樋口良典: 材料の動特性を考慮した構造物の仮動的実験手法, 第48回応用力学連合講演論文集, pp.577-582, 平成6年1月.
- 10) 土木学会鋼構造委員会新技術小委員会, 耐震設計研究WG: 平成4年度研究成果報告書, 平成5年6月.
- 11) 土木学会鋼構造委員会鋼構造小委員会: 鋼構造の新技術に関する調査研究(中間報告), 平成5年6月.
- 12) 中井 博, 北田俊行, 吉川 紀, 中西克佳, 尾山達巳: コンクリートを充填した長方形箱形断面柱の耐荷力と変形性能に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.1347-1360, 1993年3月.
- 13) K.Takahashi and M.Nakashima: Japanese Activities on On-Line Testing, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.113, No.7, pp.1014-1032, July, 1987.
- 14) S.A.Mahin, P.S.B.Shing, C.R.Thewalt, and R.D.Hanson: Pseudodynamic Test Method - Current Status and Future Directions, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.115, No.8, pp.2113-2128, August, 1989.
- 15) 堤 英明, 東浦 章, 佐藤和英, 鈴木敏夫, 村本道哉, 近藤吾郎: 仮動的実験システムの開発について, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.437-438, 昭和60年10月.
- 16) 高梨晃一, 宇田川邦明, 関松太郎, 岡田恒男, 田中 尚: 電算機-試験機オンラインシステムによる構造物の非線形地震応答解析(その1: システムの内容), 日本建築学会論文報告集, 第229号, pp.77-82, 昭和50年3月.
- 17) 宇田川邦明, 高梨晃一, 田中 尚: 電算機-試験機オンラインシステムによる構造物の非線形地震応答解析(その2: はり崩壊型一層スパン鋼製フレーム), 日本建築学会論文報告集, 第268号, pp.49-58, 昭和53年6月.
- 18) 岡田恒男, 関松太郎: 電算機-試験機オンラインシステムによる鉄筋コンクリート骨組の地震応答解析(その2: オンライン応答実験), 日本建築学会論文報告集, 第279号, pp.77-84, 昭和53年4月.
- 19) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, V 耐震設計編, 平成2年2月.
- 20) 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.
- 21) MTS: *TestStar Programming Reference Manual, Operating Manual*, 1993.
- 22) MTS: *Temposonics Installation and Instruction Manual*, 1993.
- 23) ラプラス研究会編: 機械・構造物の振動, 養賢堂, 1989. (1994. 7. 19 受付)

## A CONSIDERATION ON PROCEDURES OF HYBRID EARTHQUAKE RESPONSE TEST TAKING ACCOUNT OF THE SCALE FACTOR

Kunihiro SAIZUKA, Yoshito ITOH, Eiji KISO and Tsutomu USAMI

In case of performing a response analysis under severe earthquake ground motion using a hysteretic model, the information of restoring force characteristics of real structures is necessary. The purpose of the hybrid test(on-line computer-controlled experiment) is to obtain the responses with a combination of numerical analyses and model tests. The authors consider three hybrid test procedures taking account of the scale factor between prototypes and models, and carry out hybrid tests and numerical simulations using each procedure. As the result, it is found that the responses with three procedures are almost identical.