

並列仮動的実験手法による構造システムの 地震時非線形応答性状評価

鈴鹿 良和^{*}, 渡邊 英一^{**}, 杉浦 邦征^{***}, 永田 和寿^{****}

^{*}京都大学大学院工学研究科土木工学専攻修士課程 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

^{**}工博, Ph.D. 京都大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

^{***} Ph.D. 京都大学助教授 大学院工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

^{****}工修 京都大学助手 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

1995年の兵庫県南部地震では、複数の構造要素からなる構造物の力学的特性が不連続である部位において数多くの損傷が報告されている。そのような混合形式の構造物に対する真の応答性状に基づいた耐震設計法を確立するには、構造物を1つの構造システムとして捉え、各構造要素間の動的相互作用を明らかにしなければならない。しかし、構造要素の力学的特性は、終局状態では超非線形となり数理モデル化が困難であるため、実験によりその評価を行う必要がある。そこで本研究では、各構造要素の力学的特性を正確に評価しながら構造物の地震時応答性状を求められるよう仮動的実験装置を、インターネットによって有機的に結びつけた並列仮動的実験システムの構築を行った。さらに、この実験システムの適用性を示すために、混合形式の構造物として鋼製橋脚とRC橋脚からなる高架橋を取り上げ、高架橋の地震時応答性状の評価を行った。その結果、高架橋の非線形応答性状がより明らかになったとともに、本実験システムは構造システム全体の非線形応答性状を明らかにする手法として有効であることが分かった。

Key Words : Restoring force characteristics, Pseudo-dynamic test, Internet, Dynamic interaction

1. はじめに

構造物の終局状態における力学的挙動は超非線形となるため、その数理モデル化にはまだまだ多くの問題が残されている。したがって、構造物の真の応答性状を求める手法として、未解明な部分もしくは数理モデル化が困難な領域に対しては実験によりその評価を行い、それ以外の既に力学的挙動が明らか部分もしくは数理モデル化が容易な領域は計算機上で解析を行い、これを同時に並行しながら進める仮動的実験が有効な手段であると考えられている¹⁾。仮動的実験はこれまで鋼製橋脚柱、および合成橋脚柱の耐震性評価に関する研究などに用いられており、その手法の概要および研究成果は、「鋼構造物のダクタリティー評価に関する調査研究グループ」²⁾、「鋼構造動的極限性状小委員会」³⁾、および、「鋼構造新技術小委員会・耐震設計WG」⁴⁾などで報告されている。このように、仮動的実験は構造要素の力学的挙動や地震時応答性状を解明する手法として有効であることが認識されるようになった。

しかし、近年の構造材料や設計・施工技術の進歩により、土木構造物は力学的挙動の異なった材料から構成される混合形式となるのが一般的である。その結果、1995

年の兵庫県南部地震では構造特性が不連続である部位、言い換えれば混合形式の構造物において数多くの損傷が報告されている^{5), 6)}。例えば高架橋は立地条件の面から鋼製橋脚が、経済性の面からRC橋脚が用いられるが、これら異種橋脚の隣接した箇所において数多くの被害が見られた。その原因は鋼製橋脚とRC橋脚のような、復元力特性の異なる橋脚における橋脚間の動的相互作用であると考えられる。

このような混合構造物の非線形応答性状に基づいて信頼性の高い耐震設計を行うためには、複数の構造要素を並列または直列につなぎ合わせた構造システムとして構造物をとらえ、その損傷メカニズムを解明しなければならない。そのためには、各構造要素の力学的特性を正確に評価でき、かつ構造要素間の動的相互作用を精度良く表現することができる解析手法もしくは実験手法の構築が必要である⁷⁾。

したがって、本研究では構造システムの耐震性評価手法として、インターネットを用いることにより、複数の仮動的実験装置を有機的に結びつけた並列仮動的実験システムの構築を行った。さらに、この実験システムを鋼製橋脚とRC橋脚からなる単径間高架橋の地震時応答性

状評価に適用することにより、鋼製橋脚とRC橋脚のように、復元力特性の異なる橋脚間の動的相互作用を考慮した高架橋の地震時応答性状を求めた。

2. 実験方法

2.1 並列仮動的実験システムの構築

並列仮動的実験システムとは、応答計算・実験制御を行うエンジニアリングワークステーション（以下、EWSと記す）と、载荷実験を行う複数の実験制御装置を、インターネットおよびLANによって有機的に結びつけた実験システムである。本研究では鋼製橋脚とRC橋脚からなる単径間高架橋の地震時応答性状を評価することを目的としたため、鋼製橋脚とRC橋脚の2つの異なる復元力特性を考慮できる実験システムを構築した。そのため、本研究では2つの実験装置を学内LANを用いてEWSと接続することにより実験システムを構築した。

载荷実験には、京都大学内に設置された三次元構造物試験装置と大型構造物試験装置の2つの実験装置を用いた。三次元構造物試験装置は、並進3成分および、回転3成分の合計6自由度の変位を、任意に組み合わせて高精度の载荷を可能とするためのマルチ油圧ジャッキシステム、デジタル制御・計測装置、油圧供給装置を組み合わせた実験装置である。また、大型構造物試験装置は、軸方向圧縮力の载荷と繰り返し水平荷重の载荷を行うためのサーボ試験機2台と、デジタル制御・計測装置、油圧供給装置を組み合わせた実験装置である。なお、各実験装置はそれぞれ制御用パソコンを有している。本研究で構築した並列仮動的実験システムを図-1に示す。

次に、この実験システムで採用した、EWSと2つの実験制御装置間のデータの共有方法および実験制御方法について述べる。本研究では、EWSはUNIXマシンであり、実験制御用パソコンはWindowsマシンであった。そこで、EWSにおいてUNIXとWindowsという異なったOS間でファイルを共有するためのフリー・アプリケーションソフトであるSamba[®]を稼働させることにより、EWSと2つの実験制御装置間でEWS内のハードディスクの共有を実現させた。また、実験制御には、通信機能を備えた解析結果を可視化するためのアプリケーションソフトであるAVS[®]を用いた。本実験システムでは、AVS上で並列仮動的実験用のネットワークを作成して応答計算・実験制御を行った。

本実験システムにおけるデータの流れを図-2に示す。まず、EWSにおいて、前ステップで検出した2つの復元力を読み込み、応答計算を行い、次のステップにおける構造要素の目標変位を算出し、ハードディスクに書き込む。次に、目標変位が書き込まれた時点で、それぞれの実験制御ソフトはその値を読み取る。そして、実験制御ソフトはその目標変位にしたがって载荷を行う。载荷完了後、その時の復元力を検出して、ハードディスクに復元力を書き込む。最後に、EWSは復元力が書き込ま

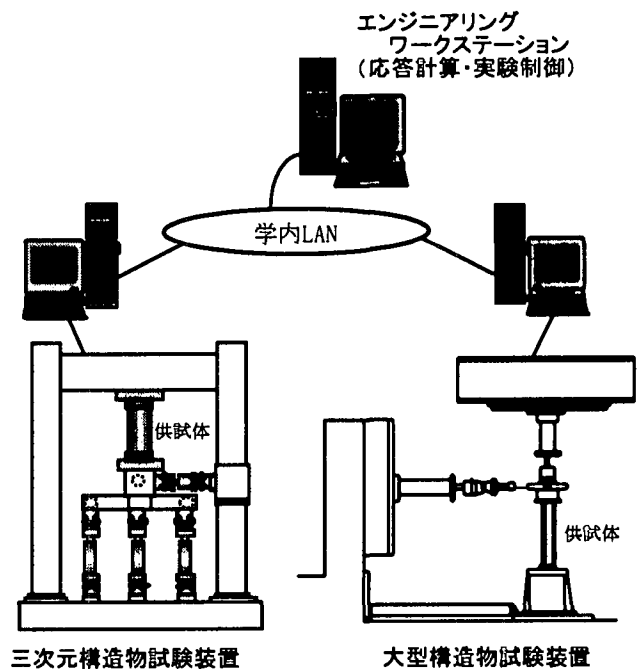


図-1 並列仮動的実験システム

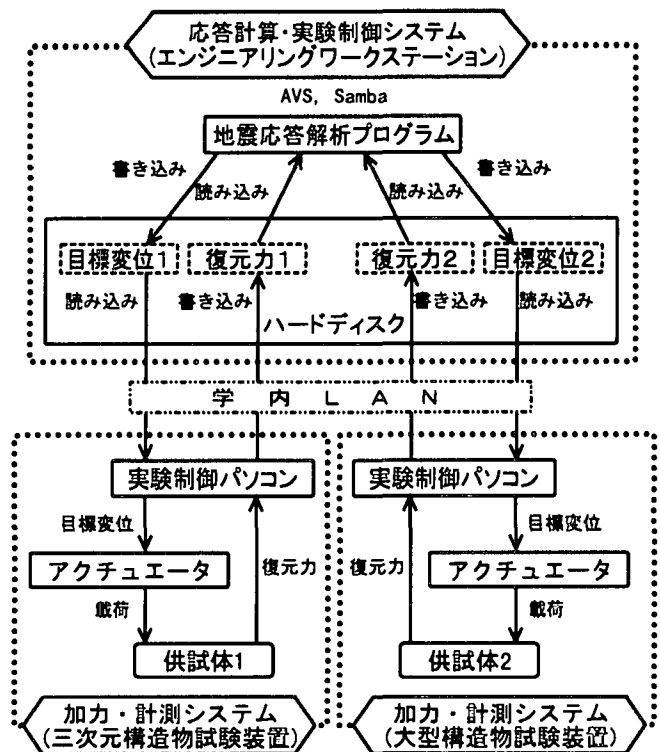


図-2 並列仮動的実験システムにおけるデータの流れ

れた時点で、次の応答計算ステップへと進む。なお、目標変位や復元力が書き込まれた時点でフラグを立てる（フラグファイルがハードディスクに書き込まれる）ことによって、応答計算プログラムもしくは実験制御ソフトがタイミングを狂わせることなくそれぞれの復元力と目標変位の読みとりを可能にした。

単一橋脚の高架橋の地震時応答性状を評価するための単独仮動的実験システムは、本研究で構築した並列仮動的実験システムにおいて、1つの実験制御装置においてのみ載荷実験を行うよう AVS 上でネットワークを作成した。

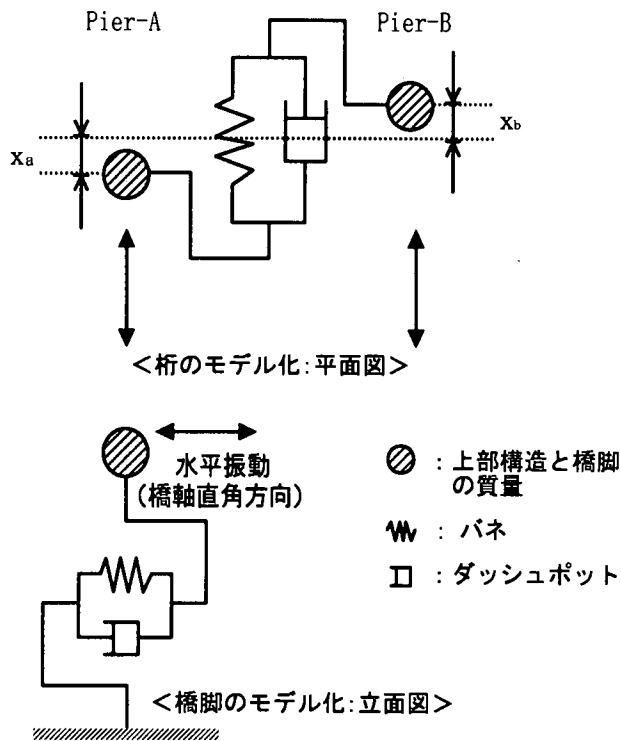


図-3 高架橋のモデル化

2.2 構造物のモデル化および応答計算

2.1 で述べた実験システムを構築するためには、構造物のモデル化および応答計算を行う必要がある。以下に本研究で対象とした高架橋のモデル化および橋軸直角方向の応答計算手法について述べる。

応答計算の部分で、対象とした単径間高架橋を、図-3に示すような動的特性をバネとダッシュポットで表現した2自由度バネ-質点系モデルに置き換えることによりモデル化した。したがって、EWSにおける応答計算の部分では式(1)に示す橋軸直角方向の運動方程式を解いた。

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + F = -M\ddot{Z} \quad (1)$$

ただし、
$$M = \begin{pmatrix} m_a & 0 \\ 0 & m_b \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} c_a + c_g & -c_g \\ -c_g & c_b + c_g \end{pmatrix}$$

$$F = \begin{pmatrix} f_a + f_g & -f_g \\ -f_g & f_b + f_g \end{pmatrix}$$

表-1 構造要素の諸元

	重量 (tonf)	減衰定数	剛性 (tonf/cm)
鋼製橋脚	512	0.05	—
RC 橋脚	754	0.05	—
桁	482	0.03	31.2

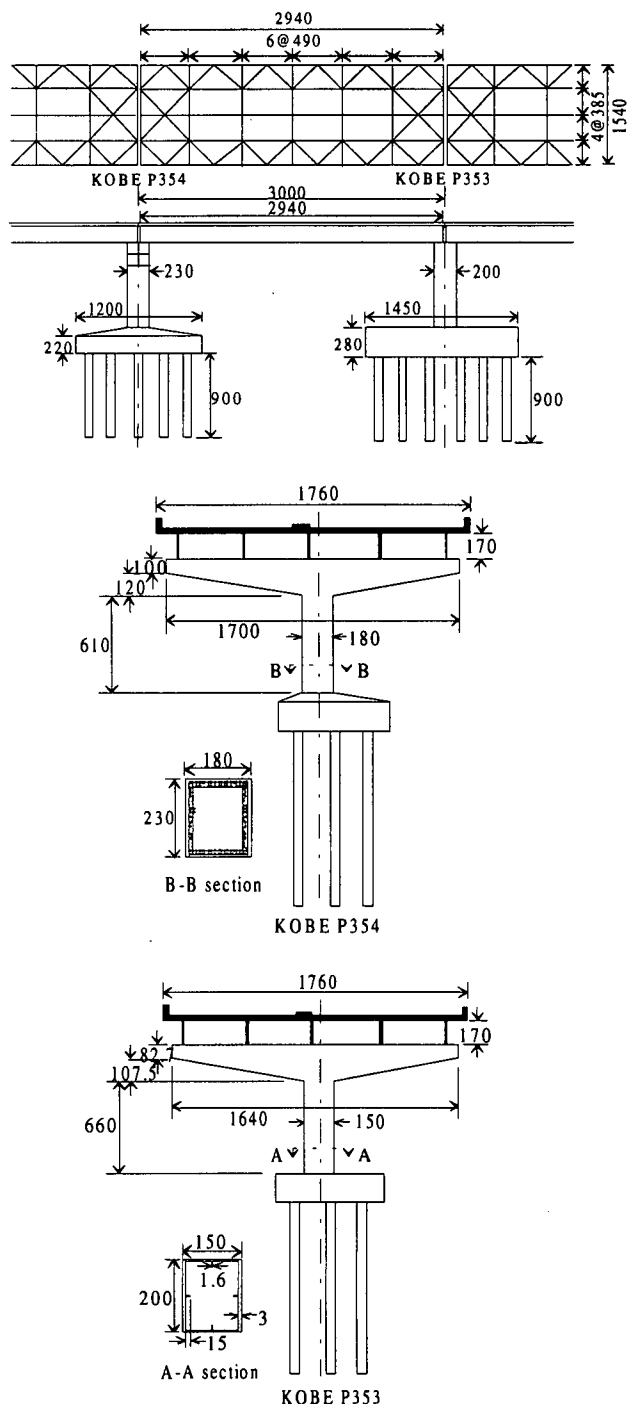


図-4 対象とした高架橋 (unit:cm)

$$\ddot{X} = \begin{pmatrix} \ddot{x}_a \\ \ddot{x}_b \end{pmatrix}, \quad \dot{X} = \begin{pmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{x}_b \end{pmatrix}, \quad X = \begin{pmatrix} x_a \\ x_b \end{pmatrix}$$

ここで、 \ddot{Z} は地震入力加速度、 \ddot{X} 、 \dot{X} 、 X は何れも、橋軸直角方向の、地表に対する上部構造重心位置の相対加速度、相対速度、相対変位であり、 M 、 C 、 F はそれぞれ質量マトリックス、減衰定数マトリックス、復元力マトリックスである。また、添え字 a, b, g はそれぞれ橋脚 Pier-A, 橋脚 Pier-B, それら橋脚をつなぐ桁に関するパラメータであることを表している。ここで、Pier-A, Pier-B の復元力は載荷実験により求める。応答計算において用いた各諸元を表-1 に示す。運動方程式を解くための直接時間積分法は中央差分法であり、時間間隔を 0.01(sec)として計算を行った。

橋脚は、阪神高速道路・3号神戸線において兵庫県南部地震で被災した鋼製橋脚と RC 橋脚が隣接している神 P353 (鋼製橋脚) と神 P354 (RC 橋脚) をモデルとして取り上げた。この橋脚を図-4 に示す：それらの橋脚に対して、鋼製橋脚は 8/75 スケールに RC 橋脚は 1/6 スケールで供試体を製作した。ただし、RC 橋脚は製作誤差により縮尺に若干の違いが生じていた。その結果、鋼製橋脚と RC 橋脚の固有周期は、それぞれ 0.799 秒、0.657 秒であった。なお、固有周期を求める際に用いた橋脚の剛性はそれぞれの橋脚の準静的繰り返し載荷実験より求めた値を用いた。

桁は、橋脚間の力の伝達にどの程度寄与しているかについて明らかになっていない。そのため本研究では、桁の復元力について考慮せずに並列仮動的実験を行った。ただし、桁の減衰効果については考慮した。

また入力加速度波形は、兵庫県南部地震において JR 鷹取駅で観測された NS 成分であり、この波形を用いて 40 秒間の応答評価を行った。入力加速度波形を図-5 に示す。

3. 実験結果および考察

本研究では、鋼製橋脚と RC 橋脚からなる高架橋に対して並列仮動的実験を行うとともに、鋼製橋脚と RC 橋脚それぞれの橋脚に対して単独の仮動的実験を行った。したがって、それら橋脚の応答を比較することにより橋脚間の動的相互作用を評価した。鋼製橋脚の変位-復元力曲線を図-6 に、変位応答の時刻歴曲線を図-7 に示す。また、RC 橋脚の変位-復元力曲線を図-8 に、変位応答の時刻歴曲線を図-9 に示す。ここで、並列仮動的実験結果を実線で、単独仮動的実験を点線で表示している。

この地震波により両橋脚とも損傷することが確認された。並列仮動的実験における各橋脚の観察記録を以下に示す。鋼製橋脚は最大応答変位は 5.91 秒時に設計降伏変位 $\delta y=7.61\text{cm}$ の約 3.4 倍となり、また、5.75 秒後時に設計降伏荷重 $P_y=339\text{tonf}$ の約 1.4 倍で柱基部に座屈が観察された。一方、RC 橋脚は最大応答変位は 6.16

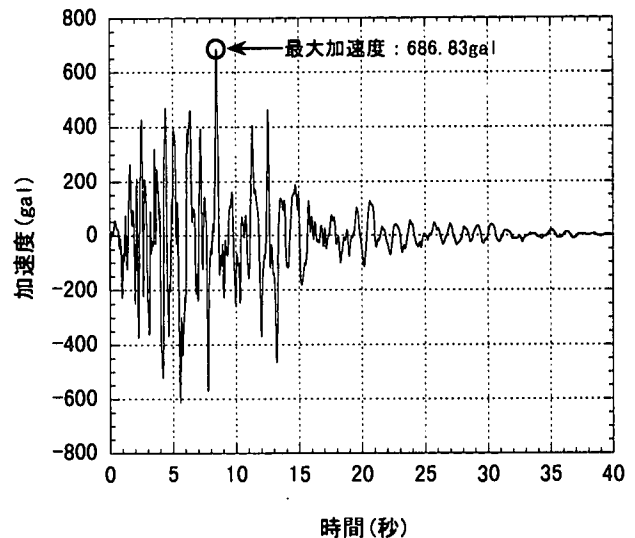


図-5 入力加速度波形

秒時に設計降伏変位 $\delta y=3.90\text{cm}$ の約 10 倍となり、柱基部では水平方向の亀裂および圧壊と思われるかぶりコンクリートの剥離が観察された。

鋼製橋脚と RC 橋脚の最大相対変位は、単独仮動的実験では 6.38 秒後に生じ、48.2cm であったのに対し、並列仮動的実験では橋脚同士の応答変位が逆位相となった 6.36 秒後に生じ、39.6cm であった。最大相対変位が小さくなった原因としては、桁の減衰による効果があげられる。また、最大変位応答後の変位応答に着目すると、単独仮動的実験において一方の橋脚に比べて大きな変位応答を示した橋脚は、並列仮動的実験において小さな値を示していることが分かる。逆に、単独仮動的実験において一方の橋脚に比べて小さな変位応答を示した橋脚は、並列仮動的実験において大きな値を示していることが分かる。この現象も同様に、桁の減衰によって鋼製橋脚と RC 橋脚の応答が拘束されたためであると思われる。

残留変位は、単独の仮動的実験において鋼製橋脚では約 -5.5cm, RC 橋脚では約 4.5cm 見られるのに対し、並列仮動的実験では鋼製橋脚, RC 橋脚共に残留変形はほとんど見られなかった。この原因は、橋脚が降伏後桁によって橋脚間の相対変位が減少させられる方向に応答が拘束されたためと考えられる。しかし、これは橋脚の損傷が鋼製橋脚, RC 橋脚共に軽微であったためと考えられ、橋脚の損傷状況によっては、残留変形の大きい橋脚にもう一方の橋脚の応答が拘束され、高架橋全体として大きな残留変形が残ることも考えられる。

このように、桁の特性が高架橋全体の応答に与える影響は大きいと考えられる。本研究では桁の復元力は考慮せずに減衰のみを考慮したが、より実現象に近い応答を求めるためには、桁の特性について適切なモデル化を行う必要があると考えられる。

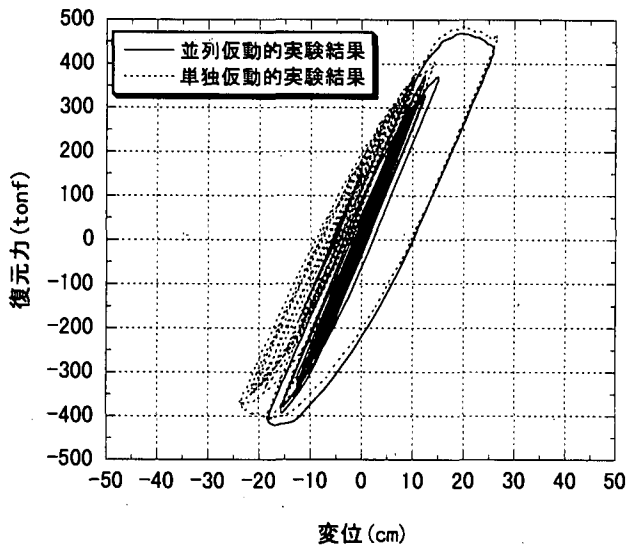


図-6 変位-復元力曲線 (鋼製橋脚)

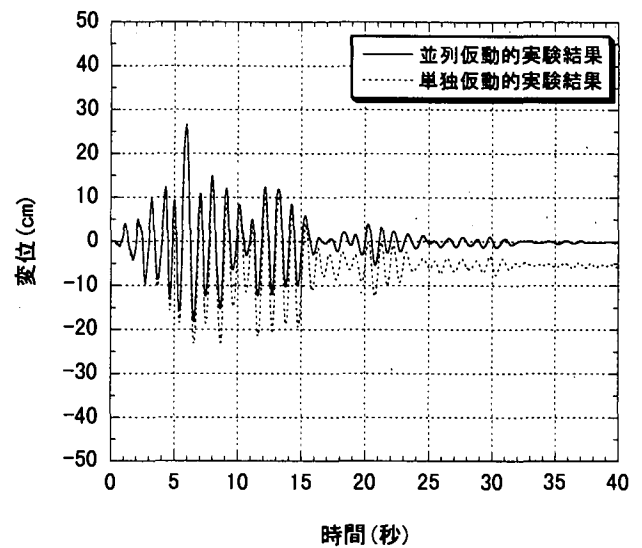


図-7 変位応答の時刻歴曲線 (鋼製橋脚)

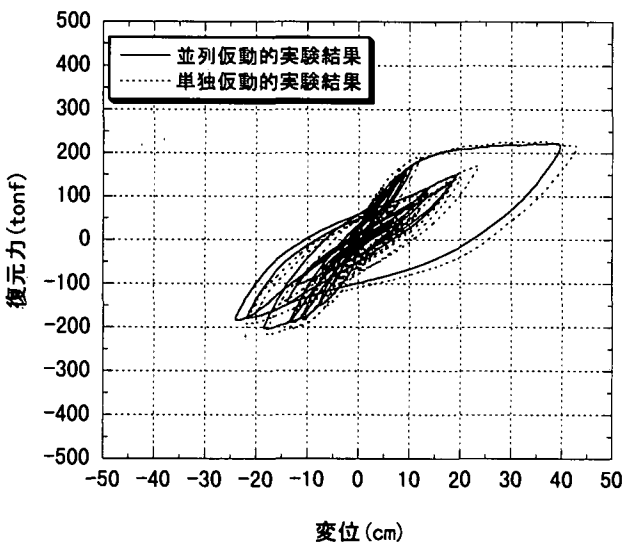


図-8 変位-復元力曲線 (RC橋脚)

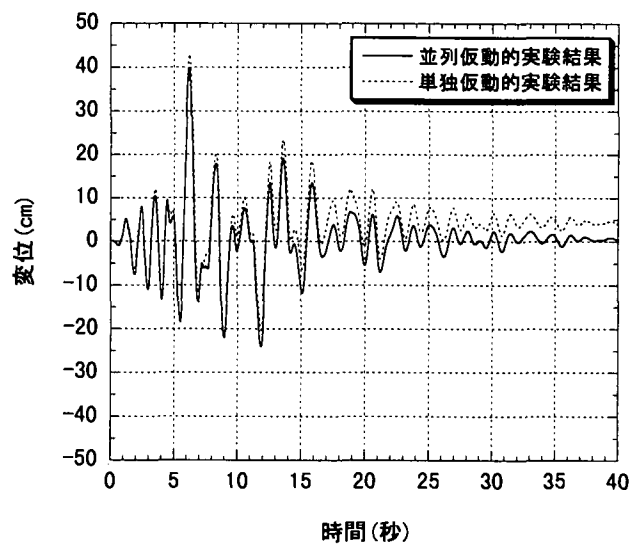


図-9 変位応答の時刻歴曲線 (RC橋脚)

また、鋼製橋脚、RC 橋脚共に、並列仮動的実験と単独仮動的実験では、橋脚の最大変位応答前には応答に大きな違いがみられないにも関わらず、最大変位応答後に大きな違いが見られる。これは橋脚が損傷し剛性が変化したことにより、橋脚の損傷前の固有周期が損傷後の固有周期に対して大きく変わったため、単独仮動的実験と並列仮動的実験で異なる応答を示したものと考えられる。したがって、構造要素の損傷は構造システム全体の挙動に大きな影響を与えらると思われる。

4. 結論

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

(1) 鋼製橋脚と RC 橋脚からなる単径間高架橋を取り上げ、橋脚間の動的相互作用を考慮したその高架橋の地震時非線形応答性状を評価する手法として、各構造要素の

力学的特性を正確に評価しながら高架橋全体の応答性状を求められる仮動的実験を応用した並列仮動的実験システムの構築を行った。

(2) 単径間高架橋に対して、その橋軸直角方向の地震時応答性状を並列仮動的実験システムにより求めた。その結果、鋼製橋脚および RC 橋脚の変位応答は、桁の減衰の効果により、それぞれ橋脚単独の時の応答に比べて小さくなった。また、橋脚の残留変位もほとんど見られなかった。

(3) 鋼製橋脚、RC 橋脚共に並列仮動的実験と単独仮動的実験では、橋脚の損傷前は大きな違いが見られなかったが、橋脚の損傷後大きな違いが見られた。このことにより、各構造要素の損傷が構造システム全体に大きな影響を与えていると考えられる。したがって、信頼ある構造物の耐震設計を行うためには、構造物を1つの構造シ

システムとしてとらえ、各構造要素の役割を明確にし、構造システム全体として耐震性能が高まるようバランスのとれた設計を行う必要である。

(4) 並列仮動的実験システムは、インターネットを用いて複数の実験装置を有機的に結びつけることによって構築している。したがって、インターネットに接続されている世界中に点在する優れた実験施設を有機的に結びつけることによって、大規模な系の構造物の挙動を解析する実験システムへと発展させることができると思われる。

なお本研究は、文部省科学研究費補助金・重点領域研究(研究代表:小谷俊介・東京大学教授)から研究費の補助を受けて行った。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 伯野, 岡田, 高梨, 池田, 土岐, 家村: ハイブリッド実験の応用マニュアル, 平成元年科学研究費補助金(総合研究(A)) 研究成果報告書, 平成2年3月.
- 2) 土木学会関西支部: 鋼構造のダクタリィティー評価に関する調査研究, 1991年6月.
- 3) 土木学会・鋼構造委員会・鋼構造動的局限性状研究小委員会: 鋼構造の弾塑性性状と耐震設計法, 1994年8月.
- 4) 土木学会・鋼構造委員会・鋼構造新技術小委員会・耐震設計研究WG: 鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のための新技術, 1997年7月.
- 5) 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, 1995年12月.
- 6) 土木学会: 阪神大震災震災調査緊急報告会資料, 1995年5月.
- 7) 渡邊英一, 杉浦邦征, 永田和寿: 京都大学「マルチフェイズダイナミクス実験設備」の紹介, マルチフェイズダイナミクス研究展望講演概要集, 京都大学土木系専攻教室, pp. 1-6, 平成9年11月.
- 8) NIKKEI Windows NT, 日経 BR 社, pp.231-234, 1997年7月.
- 9) Advanced Visual Systems Inc. : AVS ユーザーズ・ガイド, クボタコンピュータ株式会社, 平成2年10月.
(1998年8月17日受付)

EVALUATION OF NON-LINEAR SEISMIC BEHAVIOR OF STRUCTURAL SYSTEM BY REMOTE PARALLEL PSEUDO-DYNAMIC TESTING SYSTEM

Yoshikazu SUZUKA, Eiichi WATANABE, Kunitomo SUGIURA, and Kazutoshi NAGATA

Generally speaking, civil engineering structures consist of structural elements with different load-displacement characteristics. It was reported that the viaducts consisting of different types of piers, such as steel piers and RC piers, were heavily damaged by the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake. The damage was caused by the interaction of structural elements with different hysteretic behavior. In this study, remote parallel pseudo-dynamic testing system using two experimental stations and an engineering workstation through the INTERNET was developed to assess the interaction of two structural elements. In order to demonstrate the feasibility of such a system, the characteristics of the viaduct's response consisting of a steel pier and a RC pier was evaluated by remote parallel pseudo-dynamic testing system. As a result, it was found that this remote parallel testing system seems very effective to evaluate the interaction of the structural system.