

並列ハイブリッド実験システムの実験精度に関する2, 3の考察

Assessment on error propagation in response evaluation by parallel pseudo-dynamic testing system

永田和寿*, 渡邊英一**, 北田俊行***, 杉浦邦征****, 山口隆司*****

Kazutoshi Nagata, Eiichi Watanabe, Toshiyuki Kitada, Kunitomo Sugiura and Takashi Yamaguchi

* 工修 京都大学助手 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., 工博 京都大学教授 工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

*** 工博 大阪市立大学教授 工学研究科土木工学専攻 (〒558-8585 大阪市杉本町3-3-138)

**** Ph. D. 京都大学助教授 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)

***** 博士(工学) 大阪市立大学講師 工学研究科土木工学専攻 (〒558-8585 大阪市杉本町3-3-138)

In this study, the parallel pseudo-dynamic testing system developed was further assessed for error propagation in response evaluation. At first, the system has been established by connecting experimental stations located at Osaka City University and Kyoto University through the Internet. Secondly, error propagation of this testing system was examined. It was found that this testing system was proved to work efficiently. Since the measurement/control error may distort the experimental result, it is necessary to eliminate these errors as much as possible. As a conclusion, accurate loading and data acquisition should be made at each testing site to evaluate the response characteristics of a large-scale structural system.

Key Words: parallel pseudo-dynamic testing, experimental accuracy, elevated bridge, time history response

キーワード: 並列ハイブリッド実験, 実験精度, 高架橋, 時刻歴応答

1. はじめに

構造物は終局状態において非常に複雑な非線形挙動を示すため、その挙動の解明は困難であり、非線形挙動を正確に表現する数値モデルの作成においても数値解析上の精度に関わる問題が多く残されている。したがって、構造物の真の応答性状を求める手法として、未解明な領域もしくは数値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確な領域もしくは数値モデル化が容易な領域に対して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ハイブリッド手法が有効な手段であると考えられている。土木・建築分野においては、この手法が構造物の地震時挙動を評価するためのハイブリッド実験として開発されてきた^{1)~3)}。土木構造物を対象としたハイブリッド実験は、これまで鋼製橋脚柱、合成橋脚柱および鉄筋コンクリート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、その手法および研究成果は、「鋼構造物のダクティリティー評価に関する調査研究グループ」⁴⁾、「鋼構造動的極限性状研究小委員会」⁵⁾、および「鋼構造新技

術小委員会・耐震設計WG」⁶⁾などで報告されている。このように、ハイブリッド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^{7)~9)}。

また、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の接合部において数多くの損傷が報告されている^{10), 11)}。しかし、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、構造物を複数の構造要素から構成される構造システムとしてとらえ、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¹²⁾。

さらに、昨今のインターネットの世界的な整備に伴う情報科学技術の発達により、コンピュータネットワークを用いて情報を共有することができるようになった。し

そこで本研究では、構造システムの耐震性能を評価するための手法として、インターネットにより2台のハイブリッド実験装置を結びつけた並列ハイブリッド実験システムの構築を行い、その検証を行うとともに実験精度に及ぼす誤差評価に関して検討を行った。なお、本研究は、大阪市立大学と京都大学の共同研究として行われた。

並列ハイブリッド実験システムとは、応答計算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、載荷実験を行う複数の実験装置を、インターネットおよび LAN により結びつけた実験システムである。本研究では、インターネットと学内 LAN を用いて 2 台の実験装置と 3 台の EWS を接続することにより、2 つの構造要素の力学特性を載荷実験により評価できる図-1 に示す並列ハイブリッド実験システムを構築した¹³⁾。

次に、この実験システムで採用したデータの共有方法および試験手順について述べる。本実験システムでは、応答計算・実験制御の EWS0 と各実験施設の EWS1 および EWS2 間のデータ転送はサーバー・クライアント方式を用いた。また、すべての EWS は UNIX マシンであり、実験制御用コンピュータは WindowsNT マシンであった。そのため、EWS において UNIX と WindowsNT 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 Samba¹⁴⁾を稼働させることにより、EWS と 2 つの実験制御用コンピュータ間で EWS 内のハードディスクの共有を実現させた。

図-1 実験システム

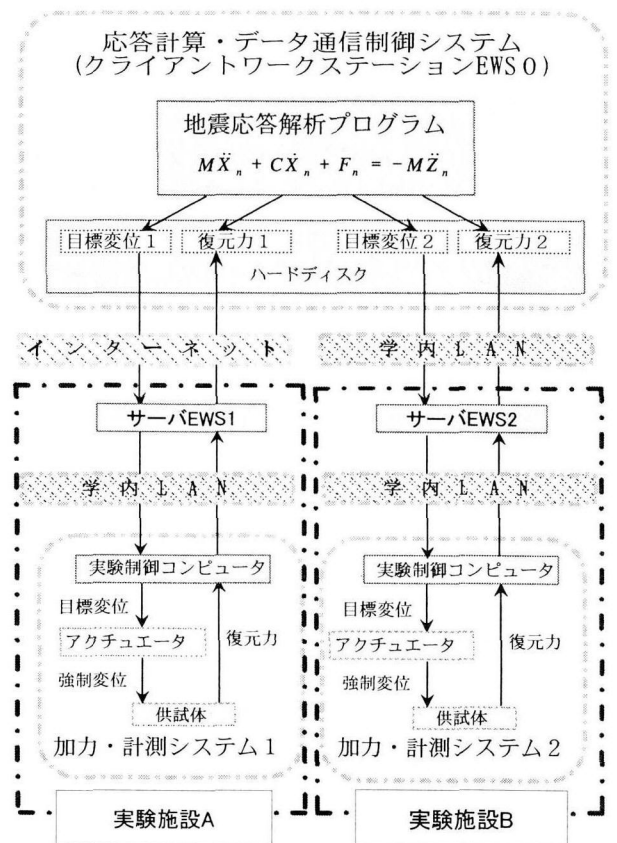


図-2 データの流れ

3. 実験システムの検証

本検証には、図-3 に示すような 2 本の橋脚と桁の 3 つの構造要素から構成される高架橋を 2 自由度バネ-質点

系によりモデル化し、その地震時応答を中央差分法により求めた。その運動方程式を式(1)に示す。

$$M \cdot \ddot{X} + C \cdot \dot{X} + F = -M \cdot \ddot{Z} \tag{1}$$

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

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

$$F = \begin{pmatrix} f_a + k_g \cdot (x_a - x_b) \\ f_b - k_g \cdot (x_a - x_b) \end{pmatrix}$$

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

ここで、 $\ddot{Z}$ は地震入力加速度、 $\ddot{X}, \dot{X}, X$ はいず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、減衰マトリックス、復元力ベクトルである。ここで、添え字 a, b, g はそれぞれ橋脚Aと橋脚B、さらにそれらをつなぐ桁に関する変数であることを示している。この検証では、各橋脚の復元力 f_a, f_b を載荷実験により求め、この運動方程式を解いた。なお、この運動方程式を解くための時間積分に中央差分法を用いたが、この手法による解の安定性は、 $\omega \cdot \Delta t \leq 2$ (ω : 固有円振動数 (rad/sec), Δt : 積分時間間隔 (sec)) の条件を満たすことにより保証される¹⁵⁾ ので、解の精度を向上させるため積分時間間隔を最小固有周期の 1/20 以下として、積分時間間隔を 0.01 秒として応答計算を行った。

3.2 実験概要

力学的特性が比較的正確に解明されている SS400 の II 型鋼を用いて、仮想的な高架橋の弾性応答を対象とした検証実験を行った。ここで、各実験装置においてこの実験供試体の剛性の評価を等しくするため、柱基部から水平荷重載荷位置までの距離が等しくなるように実験供試体の長さを調整した。また、実験供試体の縮尺率は 1/5 とした。2つの実験装置を写真-1 および写真-2 に示す。

ハイブリッド実験において、変位の計測・制御を精度よく行うことが実験精度を高める上で非常に重要である。そこで、本検証実験では、実験装置 A ではアクチュエータの内部変位計、実験装置 B では柱基部を基準として水平荷重載荷位置に取り付けた外部変位計により、変位の計測・制御方法を変えた。

はじめに、実験供試体の剛性を評価するため載荷実験を行った。その結果、実験装置 B ではほぼ理論上の剛性 (9.8kN/mm) を得ることができたが、実験装置 A ではそ

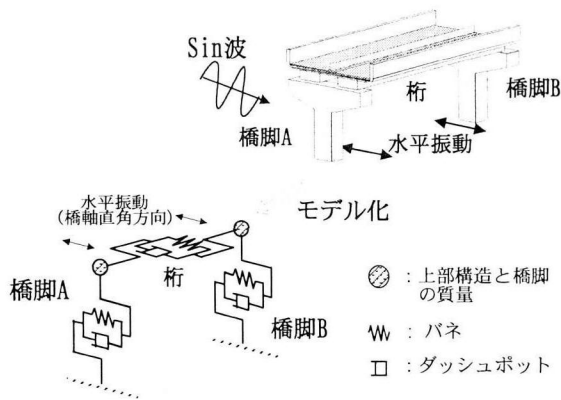


図-3 高架橋のモデル化

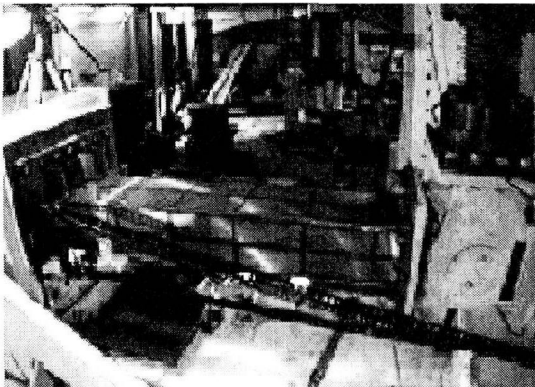


写真-1 実験装置 A

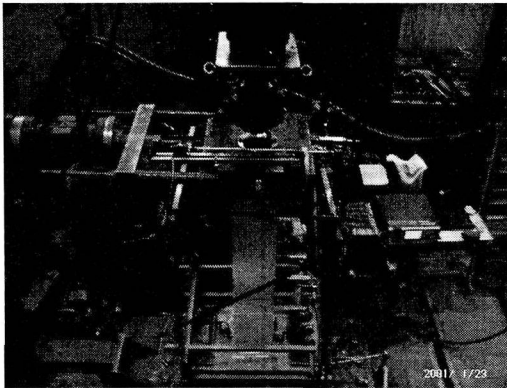


写真-2 実験装置 B

表-1 構造諸元

		質量 (ton)	剛性 (kN/mm)	減衰 係数
橋脚 A		592	29.4	0.05
橋脚 B		370	49	0.05
桁	なし (Case1)	0	0	0
	あり (Case2)	777	4.9	0.03

の 6 割程度の剛性しか得ることができなかった。この理由は、実験装置 B では外部変位計を用いて変位を計測・制御することで、固定治具および高力ボルトの変形に伴

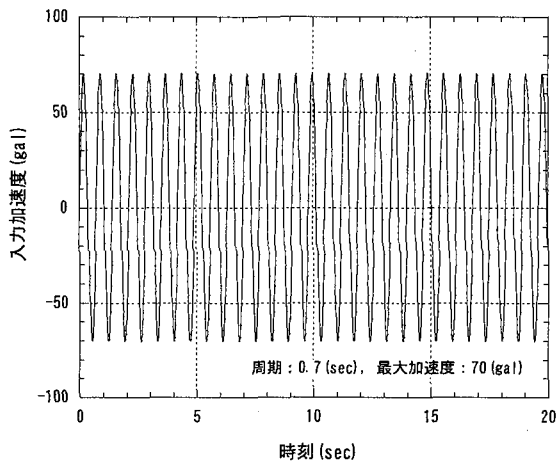


図-4 入力波形

う剛体回転や載荷治具の‘あそび’による誤差を適切に除去することができたためであると考えられる。

次に、表-1 に示すような構造諸元（実構造物レベル）および、図-4 に示すような最大加速度 70.0gal、周期 0.7sec の Sin 波 20sec のうち初めの 5.0sec を入力し検証実験を行い、数値解析の結果と比較した。なお、桁は高架橋全体の応答性状に影響を与える構造要素であるが、橋脚間の力の伝達にどの程度寄与しているかについては明らかとなっていないため、本研究では便宜的に桁を橋脚 B の剛性の 1/10 の剛性を有するせん断バネとしてモデル化した。ここで、桁のせん断剛性による橋脚間の動的相互作用を考慮しない橋脚単独の地震時応答性状を求める Case1 と、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る Case2 の 2 つのケースについて実験を行った。なお、実験および解析結果は実験供試体のレベルで示す。また、橋脚 A と橋脚 B の固有周期は、それぞれ 0.892sec、0.546sec であった。ここで、検証結果を示す前に、この Sin 波を 20sec 間入力した橋脚 A と橋脚 B がそれぞれ単独で揺れた場合（桁なし）の数値解析結果を図-5 および図-6 に示す。これらの図からわかる

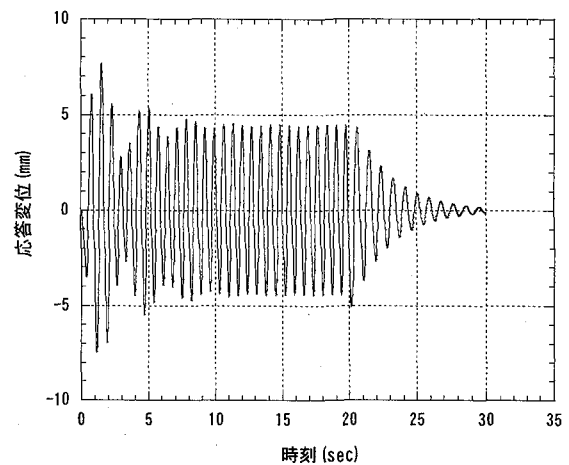


図-5 橋脚 A の応答変位

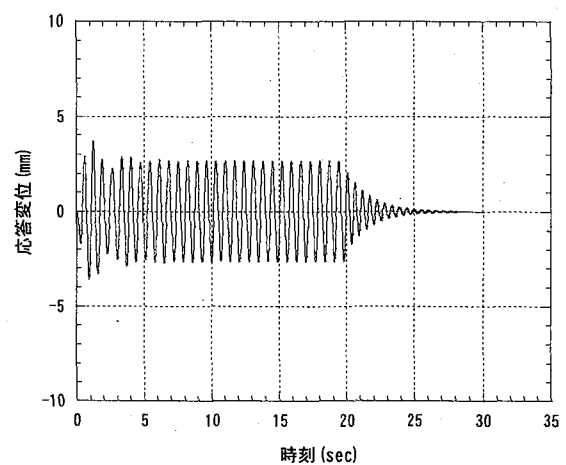


図-6 橋脚 B の応答変位

ように、初めの 10sec 間は過渡応答を示し、その後定常応答になっていることがわかる。なお、実験装置 A において橋脚 A の実験供試体を、実験装置 B において橋脚 B の実験供試体を用いて並列ハイブリッド実験を行った。

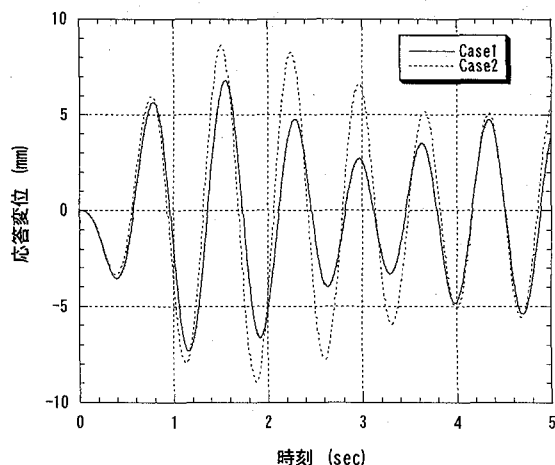


図-7 橋脚 A の変位応答曲線
(実験結果)

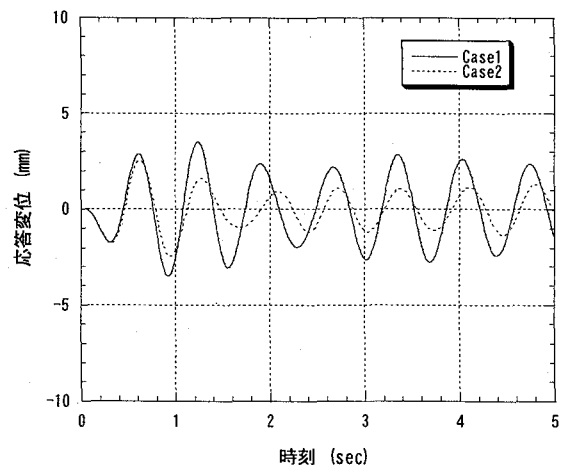


図-8 橋脚 B の変位応答曲線
(実験結果)

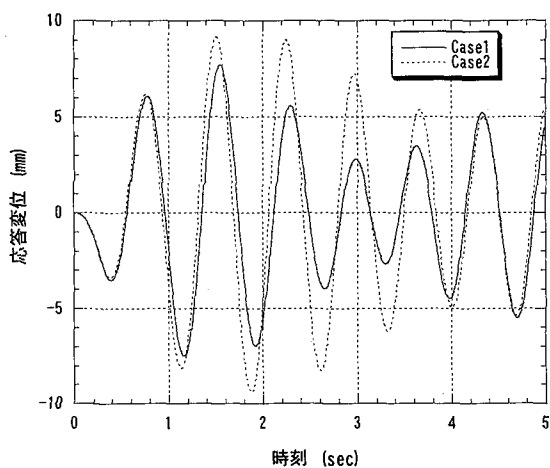


図-9 橋脚 A の変位応答曲線
(解析結果)

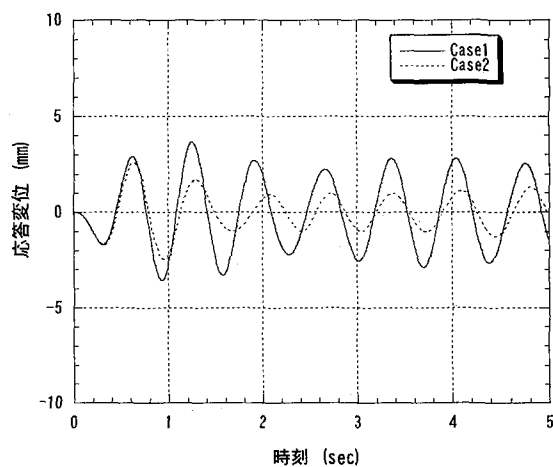


図-10 橋脚 B の変位応答曲線
(解析結果)

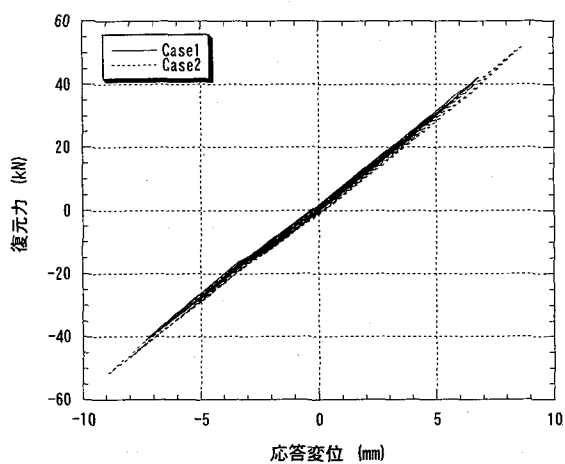


図-11 水平変位－水平荷重曲線 (橋脚 A: 実験)

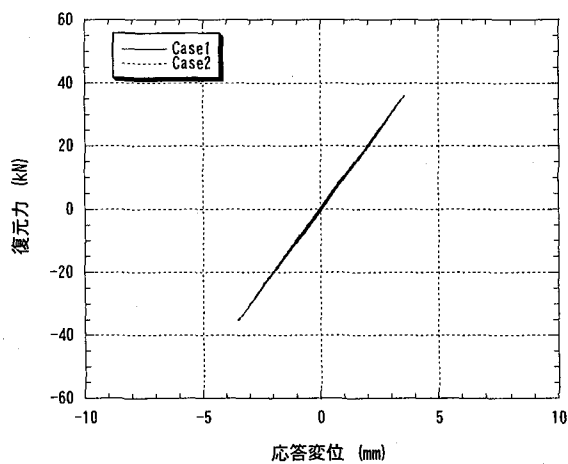


図-12 水平変位－水平荷重曲線 (橋脚 B: 実験)

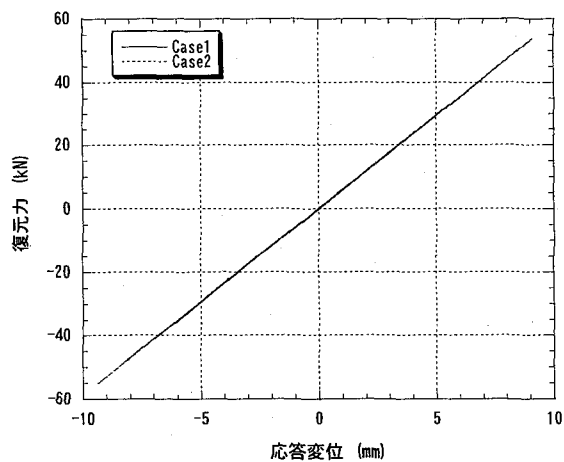


図-13 水平変位－水平荷重曲線 (橋脚 A: 解析)

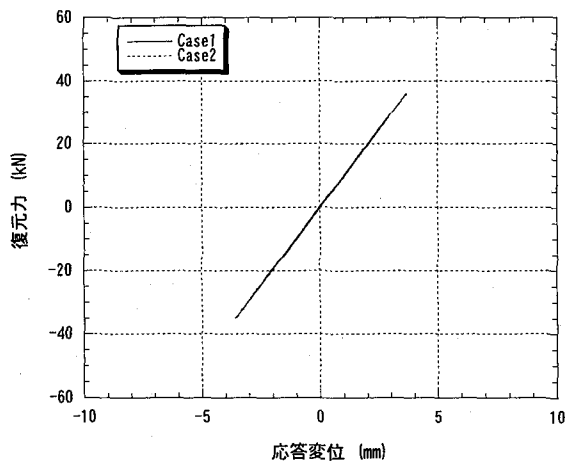


図-14 水平変位－水平荷重曲線 (橋脚 B: 解析)

3.3 検証結果

実験によって得られた橋脚 A および橋脚 B の応答変位

の時刻歴をそれぞれ図-7, 図-8 に, また数値解析によって得られた応答変位の時刻歴をそれぞれ図-9, 図-10 に示す. さらに, 実験によって得られた橋脚 A および橋脚 B

の水平変位－水平荷重曲線をそれぞれ図-11、図-12 に、また数値解析によって得られた水平変位－水平荷重曲線をそれぞれ図-13、図-14 に示す。

これらの図より実験結果と解析結果の最大応答変位は、橋脚 A は Case1、Case2 とともに解析結果の 94. 9%，橋脚 B の Case1 は 96. 1%，Case2 は 98. 1 となっており、両橋脚の応答とも実験結果と解析結果がよく一致している。また、桁による動的相互作用を考慮しない Case1 に比べ、動的相互作用を考慮した Case2 では、橋脚 A の応答は大きくなり、逆に橋脚 B の応答は小さくなっており、この実験システムによって相互作用の影響を考慮できていることがわかる。

以上の点より、この実験システムはデータの書き込みと読み込み、及び、通信・実験制御が正しく行われていることが確認できた。したがって、本並列ハイブリッド実験システムは力学的特性の異なる要素からなる多自由度構造物の動的相互作用を考慮した応答性状を評価する上で有効な実験システムであることがわかる。

4. 実験精度に関する考察

上述の変位計測・制御でもみられたように、様々な誤差要因が実験結果を歪める原因になるため注意が必要である。そこで、変位の計測・制御に何らかの不具合がある場合として、変位計の設置などに問題があり剛性（復元力）が正しく計測できない場合と、制御のばらつきにより目標変位に誤差が生じる場合の 2 つのケースについて数値解析を行い実験精度に関して考察を行った。

4.1 ケース I（剛性の評価）

はじめに、橋脚間の相互作用を考慮しない場合として、橋脚 A の剛性を表-2 のように-10%から+10%まで変化させ、橋脚 A 単独の応答結果に及ぼす影響を橋脚の最大応答変位により検討した。その結果を図-15 に示す。ここでは、剛性に変化がない場合（0%）、つまり剛性が正しく評価されたときとの最大応答変位の比を応答比とした。

この表からわかるように、剛性の変化率と応答比が比例しておらず、剛性の変化率の値以上に応答比の値が変化していることがわかる。したがって、実験に際しては、剛性の評価（変位の計測・制御）法について十分検討する必要がある。特に、製作誤差、製作に用いた材料の物性値の不確定性により剛性の真値が不明であるため、応答実験に先立ち何らかの結果を保証するための手順を確立する必要がある。

また、この図からわかるように剛性が+1%～+10%と増加しているにもかかわらず応答変位が大きくなり、一方剛性が-1%～-10%と減少しているにもかかわらず、応答変位が小さくなっていることがわかる。この現象は入力波形の固有周期との関係（共振）であり、剛性を増加させる方向は入力波の固有周期に接近するため、その影響が大

表-2 固有周期と応答比

剛性の変化率 (%)	固有周期 (sec)	応答比
-10	0. 940	0. 872
-5	0. 915	0. 930
-1	0. 896	0. 986
0	0. 892	1. 000
+1	0. 887	1. 018
+5	0. 870	1. 083
+10	0. 850	1. 178

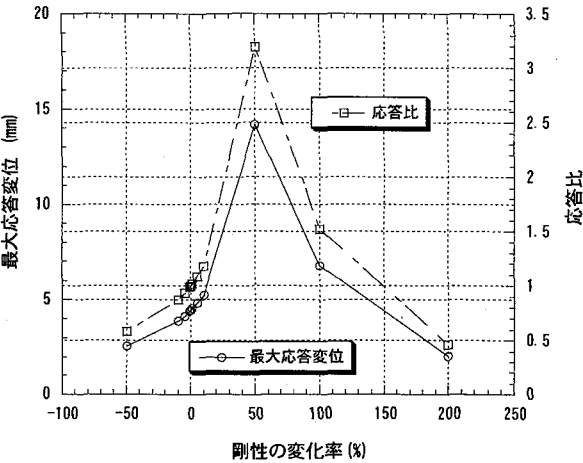


図-15 剛性の変化率に対する最大応答変位

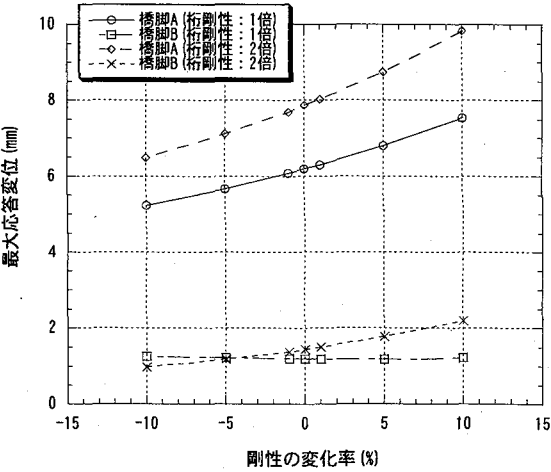


図-16 構造要素に及ぼす影響

きいことがわかる。したがって、応答比は必ずしも剛性の変化率に比例せず、入力波形との兼ね合いにより、誤差を非常に増幅させることも考えられるため注意が必要である。

次に、橋脚間の相互作用を考慮した場合として、橋脚 A のみ剛性を同様に-10%から+10%まで変化させ、橋脚 A と橋脚 B の応答結果に及ぼす影響を橋脚の最大応答変位により検討した。その結果を図-16 に示す。この図からわか

るように、桁の剛性が1倍のときは、橋脚Bの最大応答変位はほとんど一定であるため、橋脚Aの剛性の変化率（誤差）が及ぼす影響は小さいが、桁の剛性が2倍のときはその影響が大きくなっていることがわかる。また、橋脚Aにも同様の影響が表れていることがわかる。したがって、構造要素間を誤差が伝達するため、本実験時には各実験施設レベルで誤差が生じないよう実験精度に十分注意を払う必要がある。

4.2 ケースⅡ（制御変位の評価）

一様乱数を発生させ、目標変位にその係数をかけることによって制御変位をばらつかせ、構造物の応答評価に及ぼす影響を調べた。ここでは、混合型合同法を用い区間[0, 1)で一様に分布する乱数を発生させた。はじめに、1000個の乱数を3回発生させた際の統計値を表-3に示す。3回とも平均値は0.5および分散は0.0833(=1/12)にほぼ等しく、乱数の発生は適切であると言える。

次に、この乱数を用いてあるばらつきをもって変動する係数を発生させた。その一例として、図-17に10%のばらつきで変動する係数を1000個発生させた場合を示す。なお、4.1において1つの構造要素の誤差が他の構造要素の応答性状に伝達する影響は明らかになっているため、ここでは橋脚A単独の応答性状に及ぼす影響を調べた。

そこで、変位の制御誤差を1%、3%、5%とし、各制御誤差に対し3回ずつ応答計算した結果の一例を図-18に、まとめを表-4に示す。制御誤差大きくなるにつれ、応答誤差はさらに大きくなっていることがわかる。応答誤差を3%程度に納めるためには、制御変位の誤差は1%程度に納める必要がある。したがって、実験精度を高めるためには、わずかな制御変位のばらつきでも注意が必要である。また、ここでは変位の制御誤差をランダムとして仮定したが、変位誤差が累積する方向での誤差についても今後検討する必要がある。

5. 結論および今後の課題

本研究では、並列ハイブリッド実験システムの構築を行いその検証を行うとともに、実験精度に及ぼす誤差評価に関して検討を行った。得られた結論および今後の課題を以下に示す。

- 異なる大学間で並列ハイブリッド実験システムを構築し、その妥当性を検証した結果、データの書き込みと読み取り、および通信実験制御が正しく行われていることを確認した。また、構造要素間の動的相互作用を考慮した弾性範囲内における実験・数値解析を行い、その影響を検討した。したがって、本実験システムは多自由度構造物の動的相互作用を考慮した応答性状を評価する上で有効な実験システムと考えられる。

表-3 一様乱数の統計値

	1回目	2回目	3回目
最小値	0.0007	0.0012	0.0002
最大値	0.9995	0.9998	0.9989
平均値	0.5052	0.4993	0.4851
分散	0.0832	0.0828	0.0838

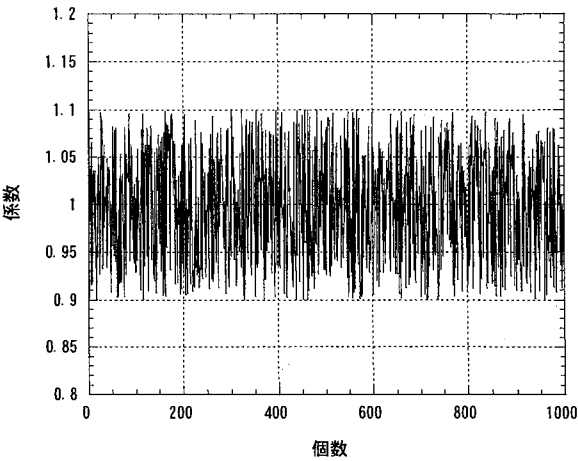


図-17 一様乱数（ばらつき：10%）

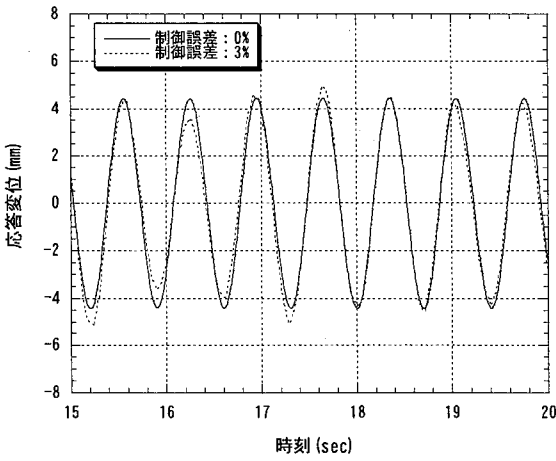


図-18 応答の歪み（一例）

表-4 最大応答変位のばらつき

変位の制御誤差		1%	3%	5%
応答変位 (mm)	1回目	4.63	5.18	5.67
	2回目	4.57	4.98	5.42
	3回目	4.56	4.96	5.45
	平均	4.59	5.04	5.51
	応答誤差	3.30%	13.5%	24.2%

ばらつきがない場合：4.44mm

- 2) 変位の計測・制御に何らかの不具合がある場合を想定し、剛性と制御変位の値に誤差を与えた場合の実験精度について検討を行った。その結果、これらの誤差は応答性状を歪めることになるため、実験時には十分な注意を払う必要がある。また、実験ではこれ以外にも多くの誤差要因があるため、それらの要因が実験精度に与える影響についてさらに検討する必要がある。
- 3) 本論文で提案した実験システムのような実験では実験装置の制御・計測誤差が伝播し、実験結果全体を歪める恐れがある。したがって、この実験手法を応用し構造物全体の安全性を議論するためには、実験装置のベンチマーク試験のマニュアル化を行うなど、実験精度の検証をシステム化する必要がある。また、本実験を実施するためにはインターネットの利用が必要不可欠である。したがって、コンピュータネットワークの様々な障害に対して安全で確実に情報の伝達が可能な実験システムに今後改善していく必要がある。

謝辞

本研究は、科学振興事業団の平成11年度計算科学技術開発短期集中型事業の補助を受けて行ったものである。また、本研究を実施するに当たり、大阪市立大学大学院修士課程2回生の岸本吉弘君、京都大学大学院修士課程2回生の鈴木英之君および1回生の廣島和樹君から多大な協力を受けた。ここに記して、深謝の意を表する。

参考文献

- 1) 中島正愛：仮動的実験における積分時間刻みと応答の安定の関係、構造系論文報告集第353号、日本建築学会、pp.132-141, 1985.
- 2) 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、1990.
- 3) 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43回応用力学連合講演会講演集、pp.577-580, 1993.
- 4) 土木学会関西支部：鋼構造のダクティリティー評価に関する調査研究、1991.
- 5) 土木学会鋼構造委員会・鋼構造動的極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.
- 6) 土木学会鋼構造委員会・鋼構造新技術小委員会：最終報告書(耐震設計研究)、1996.
- 7) 才塚邦宏、伊藤義人、木曾英滋、宇佐美勉：相似則を考慮したハイブリッド地震応答実験法に関する考察、土木学会論文集、No.507, pp.179-190, 1995.
- 8) 宇佐美勉、木曾英滋、才塚邦宏、伊藤義人：ハイブリッド応答実験による鋼製橋脚の強地震挙動、土木学会論文集、No.519/I-32, pp.101-113, 1995.
- 9) 中西克佳：鋼製・合成橋脚の耐震性に関する実験的研究、大阪市立大学博士論文、1998.
- 10) 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.
- 11) 永田和寿、渡邊英一、杉浦邦征：鋼製橋脚とRC橋脚からなる高架橋システムの地震時応答性状と動的相互作用に関する考察、構造工学論文集、1999.
- 12) 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, 1997.
- 13) 岸本吉弘、鈴木良和、渡邊英一、北田俊行、山口隆司、永田和寿、杉浦邦征：インターネット並列ハイブリッド実験システムの開発、第25回土木情報シンポジウム論文集、pp.111-120, 2000.
- 14) NIKKEI Windows NT、日経BR社、pp.231-234, 1997.
- 15) 清水信行、本間美知枝、山本鎮男、渡辺嘉二郎、嶋田健司：大次元微分方程式の直接数値積分法(積分法の評価と設定基準)、日本機械学会論文集46-401c, pp.26-41, 1980.

(2001年9月14日受付)