

I-13 インターネット並列ハイブリッド実験システムの開発

Development of Pararell Pseudo-dynamic Testing System using Internet

岸本吉弘, 鈴鹿良和, 渡邊英一, 北田俊行, 山口隆司, 永田和寿, 杉浦邦征

Yoshihiro KISHIMOTO, Yoshikazu SUZUKA, Eiichi WATANABE, Toshiyuki KITADA,
Takashi YAMAGUCHI, Kazutoshi NAGATA and Kunitomo SUGIURA

【抄録】インターネットの世界的な整備に伴い, ネットワークを用いてコンピュータの情報を共有することも珍しくなくなってきた。一方, ハイブリッド実験による, 構造要素間での相互作用までを考慮した全体構造システムの動的挙動の解明は, 必要となる載荷装置が大規模になるなどのことからあまり進んでいない。そこで, 既存のハイブリッド実験システムをインターネットにより結合し, 各構造部材それぞれに対して分担して実験し, その結果をもとにシステム全体の動的挙動を評価できれば, その意義は非常に大きい。本研究では, インターネットを介したデータ通信による遠隔制御実験手法を利用し, 部材間の相互作用を考慮できるハイブリッド実験システムを構築した。

【Abstract】 With improved Internet all over the world, it has become popular to share the information with other computers through it. Consequently, in order to understand the dynamic response behavior of structures considering interaction between structural members experimentally, a pseudo dynamic parallel testing system using Internet is developed. And applicability of this developed system is discussed based on the results of a simulated elevated bridge system, consisting of two piers and one girder.

【キーワード】 情報の共有化, シミュレーション, インターネット

【Keywords】 Information Sharing, Simulation, Internet

1. まえがき

昨今のインターネットの世界的な整備に伴って, ネットワークを用いてコンピュータ上に存在する情報を共有することも珍しくない。このいわゆる‘インターネット’を利用することは, 電話回線やそれに代わる専用線を用いた情報共有に比べて, システムの構築が汎用的かつ簡便であり, しかもその利用に必要な費用が基本的には無償であるなど, そのメリットは非常に大

きい。

またコンピュータが発達し, 実験や解析がこれらを用いて行われることが多くなってきている現在, ネットワークを通じて正確にかつ迅速に情報を伝達することができれば, それを介した遠隔操作により分散環境下での実験や解析などを容易に行うことができると考えられる。

このようにネットワークを利用することは, 研究者が利用したい実験施設や解析用計算機に

岸本 吉弘 : 大阪市立大学大学院工学研究科土木工学専攻

〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138 e-mail : kissy@br.civil.eng.osaka-cu.ac.jp

直接出向くという負担が大幅に減少するだけでなく、既存の装置を利用して並列的に実験や解析が大規模にできるようになることを意味している。

本研究では、遠隔制御実験手法を利用したインターネット並列ハイブリッド実験システムを構築した。

ハイブリッド実験とは、仮動的実験とも呼ばれ、構造物の動的挙動を静的な載荷実験と応答計算とを組み合わせる実験手法の一つであり、振動台などを必要としない。振動台実験では、載荷装置の能力にもよるが、動的挙動を実験により直接求めるため、大きなモデルに対しての実験は困難であり、大変形領域の動的力学的挙動を正確に再現するには限界がある。

実際、このハイブリッド実験は、構造物の動的非線形挙動を知る上で大きな成果を上げてきており^{1)~3)}など、その文献も多い。また最近では、学内 LAN を用いた並列ハイブリッド実験システムが渡邊らにより開発され、単径間高架橋モデルに対して、その適用が試みられている⁴⁾。

このように、実験による構造物の動的挙動の解明は、単柱式橋脚柱に代表される単独の構造物においてかなり進んでいる。しかし、構造部材間での相互作用までを考慮した、システムとしての動的挙動の解明はあまり進んでいない。このような構造部材間の相互作用を反映したハイブリッド実験を行うためには、載荷装置が複数必要となるなど大規模になり、研究機関単独で実験を行うには設備や費用の点から非常に難しい。

したがって、国内外に点在する既存のハイブリッド実験システムを結合し、各構造部材をそれぞれで分担して、1台のコンピュータにより各実験を同時に制御できれば、その意義は非常に大きい。

2. インターネットを介したハイブリッド並列実験制御手法の開発

2. 1 インターネットを使用した時に求められる基本性能

インターネット実験では、インターネットという公共のネットワークを使用すること、応答計算機と実験制御機とが離れていることなどを考慮する必要があり、以下のような性能が求められる。

- ① インターネットに対応した通信方法であること。
- ② インターネットでは、常に接続を一定の固定した経路で維持しておくことは困難であるため、必要なときだけ接続を行うこと。
- ③ ネットワークの混乱により、データを受信することができなかつたり、同じデータを複数受信した場合には、それを異常として判断できること。
- ④ 実験制御機がなんらかの理由で正常に実験できないと判断すれば、それを応答計算機に通知し、実験を中断できること。

本研究ではこの4点を満足するようシステムの構築を行った。

2. 2 通信方法の検討

渡邊らが開発した LAN を用いた実験システムでは、UNIX と Windows という異なる OS 間で、UNIX 上のファイルを共有するためのアプリケーション Samba⁵⁾を用いている。ここでは、常時接続によりデータを送受信することと等価な環境をファイルの共有という形で実現している。しかし Samba の制約上、異なったドメイン間で、ルータを超えたファイルの共有はできない。したがって、ここではファイルの共有ではなく、通信により情報を共有する手法を検討した。これらの概要を図1に示す。

通信機能は、ISO により OSI という階層構造に標準化されており、その機能により現在7階層に分類されている⁶⁾。また、ネットワークを介してコンピュータ同士が通信を行う上での相互に決められた約束事の集合であるプロトコルもそれぞれの層に分類されている。代表的な

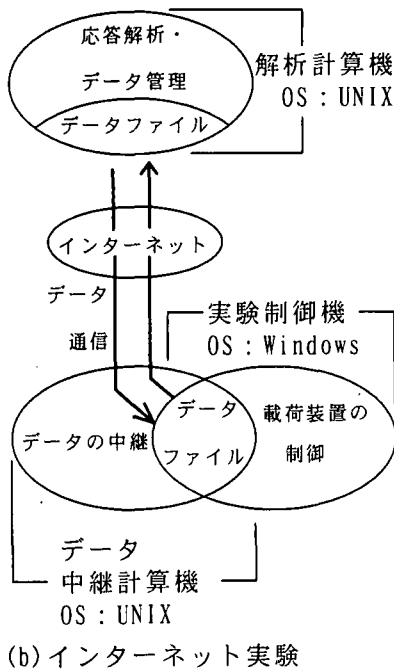
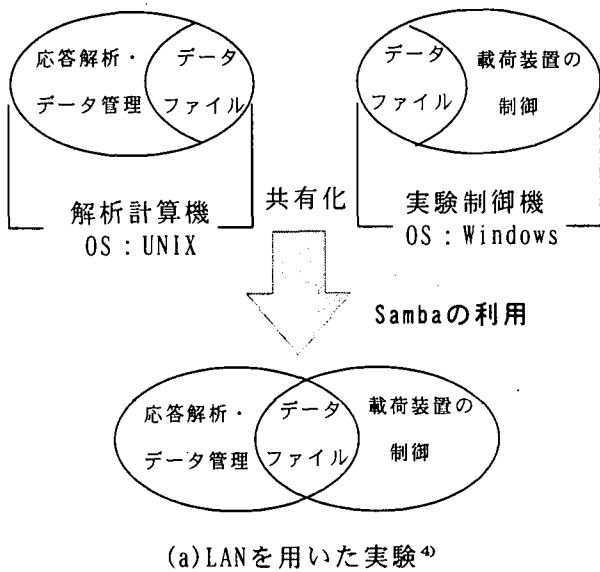


図1 通信手法の概念図

プロトコルを表1に示す。

ここでは通信相手を特定する必要から、第3層についてはIPを必ず使用することとした。次に第4層であるが、データの正確性、確実性が必要なこと、また送信するデータの量が小さく転送速度によって実験時間に大きな差がないことから、TCPを使用することにした。最後に第5層については、FTPプロトコルを使用しないこととした。なぜなら、FTPによる通信はアカウントとパスワードによってデータの管理が

表1 OSIによるプロトコルの分類(抜粋)⁶⁾

階層	機能	代表的プロトコル
第3層 (ネットワーク層)	相手までデータを届けるための通信経路の選択や、通信経路内のアドレスの管理を行う。	IP*
第4層 (トランスポート層)	相手まで確実に効率よくデータを届けるためのデータ圧縮や誤り訂正、再送制御などを行う。	TCP*, UDP*
第5層 (セッション層以上)	通信を利用した様々なサービスを人間の理解できるような形にまとめる。	HTTP, FTP*, SMTP, POP

*ファイル転送に関連したプロトコル

行われるため使用すればデータの機密性は向上するが、接続するごとに何らかの形でパスワードを要求され、リアルタイム性に欠けること、本システムで受け渡すべきデータ量が少なく、間違ったデータを受信した場合でも制御プログラム側で排除することが可能であると考えられるためである。

2.3 データの正誤判定

インターネットを介したデータ通信の場合、ネットワークが公共物であるため、関係のないデータが混入したり、同じデータが複数通信されたり、必要なデータの通信が正常に行われななどの場合が考えられる。そのため、なんらかの正誤認識用データを実験データに付加し、これにより正誤判定を行う必要がある。本研究では、ハイブリッド実験時の‘ステップ数’を付加することにし、ステップ数の比較によりデータの判別を行うこととした。ファイルのデータ例を図2に示す。

2.4 クライアント・サーバ方式

通信用のプロトコルを使用することでファイル処理の大半は可能となるが、実験を行う上では、解析計算機が実験制御機にあるファイルを作成したり、削除したりする必要がある。これらのファイル処理を解析計算機がプロトコルの

みを使用して行うことは困難である。

したがって、本システムでは、クライアント・サーバ方式を採用し、ファイルの作成／削除を行った。ここにクライアントとはシステム全体を制御する役割を果たすものを指し、サーバとは様々なサービスを提供するものを指している。なお、本システムでは解析計算機がクライアント、実験制御機がサーバに相当する。すなわち、解析計算機は必要なファイル処理を直接行えないものとして、実験制御機により間接的に処理を行うこととした。

2. 5 接続のタイミング

本システムでは常に接続を保持しないことから、いつ通信を行うべきかというタイミングを定義する必要がある。ここでは、‘フラグファイル’というダミーファイルを実験制御機に作成し、このファイルが存在するときのみ通信を行うよう設定した。

2. 6 実験エラーの識別

実験制御機が実験を続けることが困難と判断した場合、それを解析計算機に伝達する必要がある。本システムでは、実験制御機が‘エラーファイル’というダミーファイルを制御機自身に作成し、それを解析計算機が認識することで実験を停止させることとした。監視は解析計算機が通信タイミングを確認するために行っているフラグファイルの監視と同時に行うこととした。

2. 7 並列ハイブリッド実験システム

本研究で構築した実験システムを図3に示す。本システムではA大学とB大学の2つのハイブリッド実験をインターネットを通じて結合しており、制御を行う解析計算機（クライアントワークステーション）1台、既存の載荷装置と直接実験を制御する実験制御機（パソコン）およびデータを仲介するデータ中継計算機（サーバワークステーション）それぞれ各1台ずつにより構成されている。

ただし、ここでは2つの実験システムを対象

としているが、クライアントプログラムを変更することで、接続する実験システムをさらに増やすことも容易である。

実験システムにおける応答計算の流れと本システムでのデータの流の詳細を図4および図5に示す。ここで、実験制御機から解析計算機に受け渡すべきデータは復元力であり、解析計算機から実験制御機に受け渡すべきデータは目

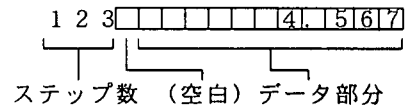


図2 データファイルの例

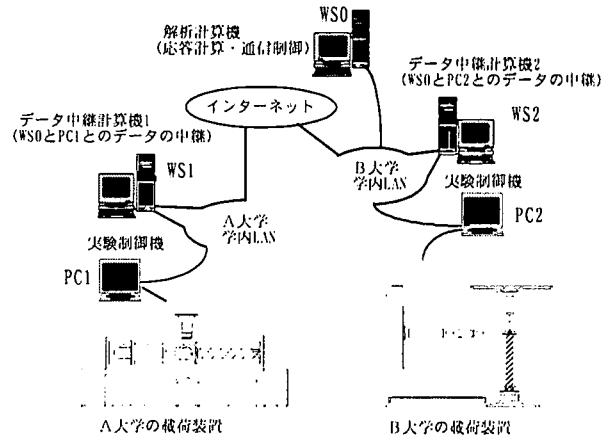
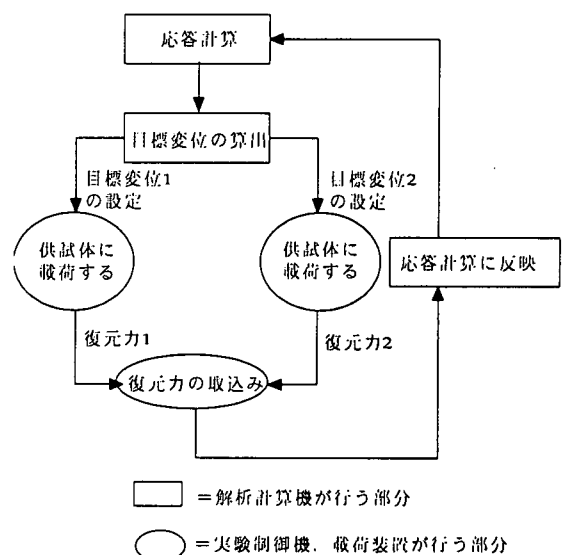


図3 実験システム図



□ = 解析計算機が行う部分
○ = 実験制御機、載荷装置が行う部分

図4 応答計算の流れ

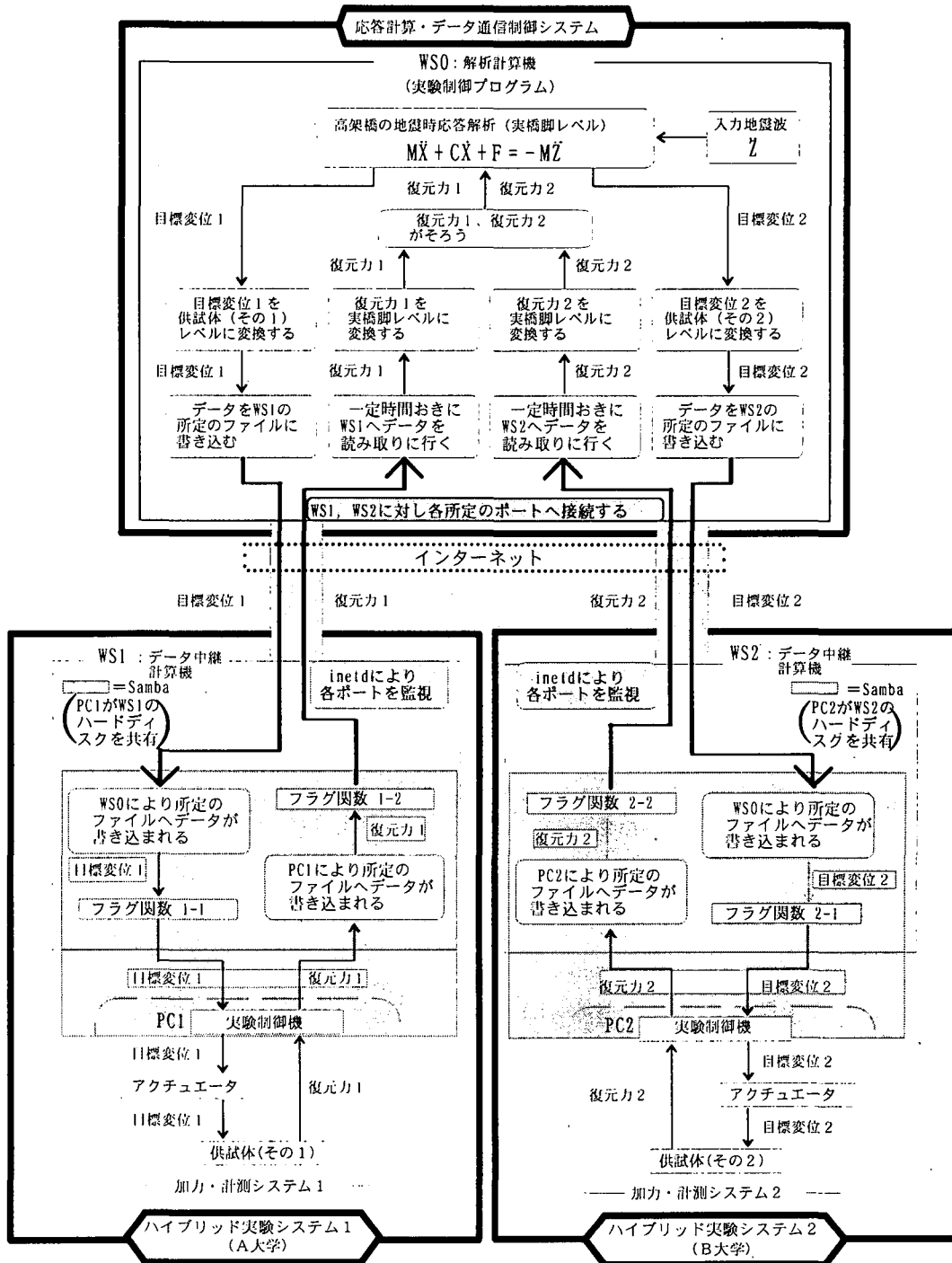


図5 並列ハイブリッド実験システムにおけるデータの流れ

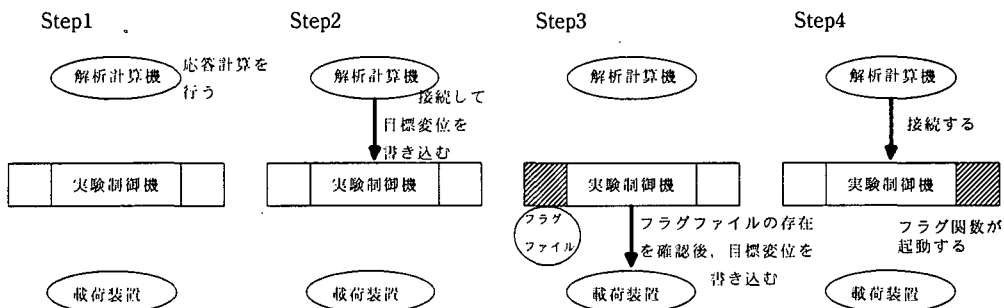


図6 通信手順の概要

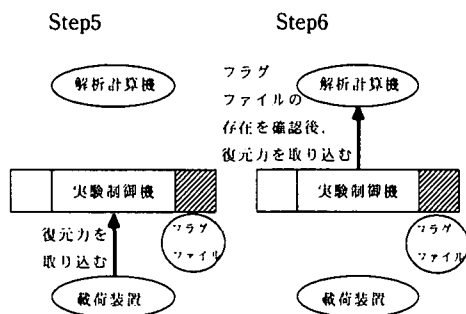


図6 通信手順の概要(続き)

標変位である。単独実験では1つの目標変位を載荷装置に与え、そこで得られる1つの復元力を応答計算に返しているが、本システムでは2つの載荷装置にそれぞれの目標変位を与え、各載荷装置で得られた2つの復元力を応答計算に返している。なお、図中の‘フラグ関数’とは、データファイルが存在すれば、フラグファイルを作成するプログラムである。

通信手順の概要を図6に示す。実験が始まると、解析計算機が解析計算を行う(Step1)。次に解析計算機が実験制御機に接続し、目標変位を書き込んだ後、接続を切断する(Step2)。その後、フラグ関数が起動しフラグファイルが作成される。そして、そのフラグファイルを実験制御機が認識して、載荷装置に目標変位を書き込む(Step3)。次に、解析計算機が実験制御機に接続し、フラグ関数が起動する(Step4)。そして実験制御機が載荷装置からの復元力を取り込み、フラグファイルを作成する(Step5)。その後、解析計算機はフラグファイルの存在により、復元力の存在を確認し、復元力を取り込む(Step6)。そして、取り込んだ復元力を用いて、解析計算機が解析計算を行う Step1にもどり、これらを繰り返すことで実験が進んでいく。

ここで‘フラグファイル’の存在は、約1秒の間隔で確認するように設定した。

3. 単径間高架橋システムへの適用

3.1 検証実験の概要

構築したシステムの検証を行うために、図7

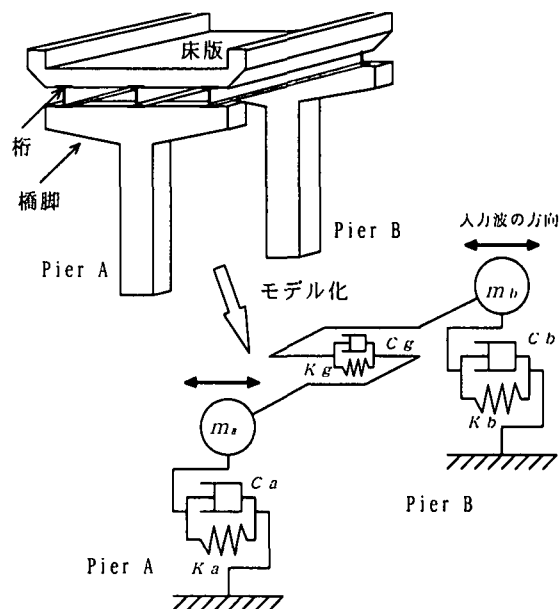


図7 単径間高架橋のハイブリッド実験モデル

に示す2つの橋脚と1つの桁からなる単径間高架橋システムを対象に、並列ハイブリッド実験を行った。なお、入力地震加速度の方向は橋脚直角方向である。載荷はPier Aを大阪市立大学で、Pier Bを京都大学で担当した。桁については剛性および減衰定数が常に一定であると仮定して解析計算の中でモデル化した。

対象としたモデルの運動方程式を以下に示す。

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

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

$$\text{減衰定数行列 } C = \begin{pmatrix} c_a + c_g & c_g \\ c_g & c_g + c_b \end{pmatrix},$$

$$\text{復元力行列 } \mathbf{F} = \begin{pmatrix} f_a + k_g \cdot (x_a - x_b) \\ -k_g \cdot (x_a - x_b) + f_b \end{pmatrix},$$

$$\text{速度ベクトル } \dot{\mathbf{X}} = \begin{pmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{x}_b \end{pmatrix},$$

$$\text{変位ベクトル } \mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_a \\ x_b \end{pmatrix},$$

$$\text{外部加速度ベクトル } \ddot{\mathbf{Z}} = \begin{pmatrix} \ddot{z} \\ \ddot{z} \end{pmatrix}$$

である。

m, c, x, f および \cdot はそれぞれ質量、減

表2 要素の諸元(供試体レベル)

	Pier A	Pier B	Girder1	Girder2
橋脚間の相互作用	—	—	なし	あり
想定重量(kN)	36.064	36.064	305.0	305.0
橋脚が受け持つ桁の重量(kN)	196.0	109.0	—	—
導入軸力(橋脚と桁の重量の和) / 降伏荷重*1	0.08	0.05	—	—
剛性(kN/mm)*2 (k_g)	588*2	980*2	0.0	9.8×10^5
質量(ton) (m_a, m_b)	118.4	74.0	—	—
減衰比 (c_a, c_b, c_g)	0.05	0.05	0.00	0.03

*1降伏荷重：2900 kN *2 解析のみに用いた値

衰定数, 水平変位, 橋脚の復元力および時間微分を表している. 変数の添え字 a, b , および g はそれぞれ Pier A, Pier B および桁を表している. また, k_g は桁の剛性である.

橋脚についてはシステムの検証を主目的にすることから, H形鋼(鋼種:SS400)を用いることにした. 2つの大学の実験システムの違いを考慮し, 柱基部から載荷位置までの距離を等しくした. 供試体の形状を図8に示す. また, 橋脚および桁の諸元を表2にまとめる.

これらの値の設定にあたっては, まず桁および橋脚の重量に相当する軸力を考え, この軸力が橋脚の降伏軸力の約5%程度になるように質量を設定した. ただし, 相互作用の影響を考慮するため, Pier A と Pier B とで導入軸力の大きさを若干変えている. なおこれらの設定値は, 実橋脚の柱高を8mとして相似率⁷⁾5倍として設定している.

実験では, ①インターネットとLANを用いることによって, 実験結果が左右されないこと, ②相互作用の評価が可能であること, の2点に注目して, 入力加速度および相互作用を有無の異なる4つの実験ケースを設定した. 設定した実験ケースを単独の場合を含めて, 表3に示す. またそれぞれの入力加速度波形を図9に示す. すべてのケースにおいて弾性範囲内の応答となるように加速度を設定している. 時刻歴の応答計算には中央差分法を用い, 計算時間間隔を0.01秒とした.

表3 並列実験のケース

Case	入力外部加速度	桁の種類	種別
0	周期0.70(s), 最大	—	単独
1	加速度 70.0(gal)	Girder1	並列
2	の正弦波	Girder2	
3	地震波 Level 1-1 ⁸⁾	Girder2	

3.2 実験結果およびその考察

Pier A および Pier B の実験結果を図10および図11にそれぞれ示す. 図中には比較のため, 解析値も示した. 解析は, 表2に示す復元力特性を仮定し, 中央差分法によって式(1)に示す運動方程式を解き, 応答を求めた. また, 解析では $F=K \cdot X$ とし, 橋脚の剛性 K は以下の式によって計算した.

$$K = \frac{L^3}{3EI} \quad (2)$$

ただし,

柱高(=基部上端から載荷位置まで):

$$L = 1,600(\text{mm})$$

ヤング率: $E = 2.058 \times 10^5(\text{N/mm}^2)$

断面2次モーメント:

$$I = 6.750 \times 10^7(\text{mm}^4)$$

である. ヤング率は公称値を用いた.

なお, 載荷位置での変位の測定方法が大阪市立大学と京都大学とでは異なるので, Pier A (大阪市立大学) の剛性を Pier B の剛性の6割と補正して解析した.

実験に要した時間を表4に示す. 並列実験はケースによる時間の差がほとんどなかったので3ケースの平均値を示す.

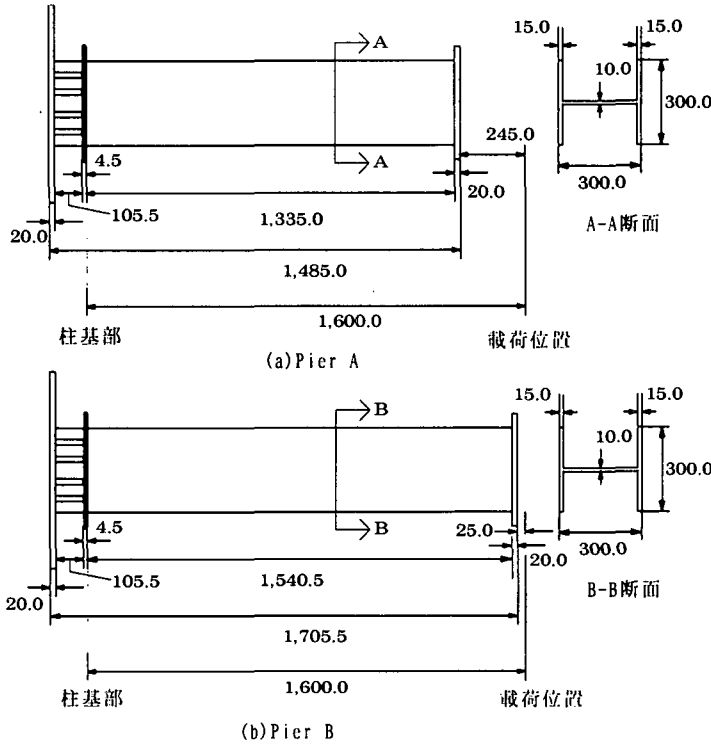
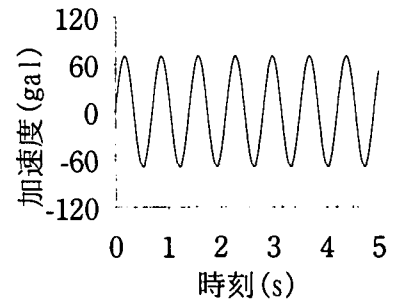
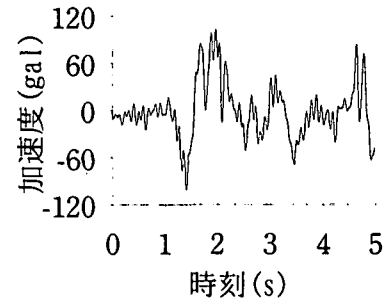


図8 実験供試体の形状(単位: mm)

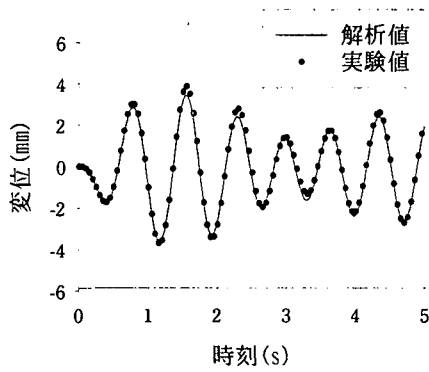


(a) Case1, 2

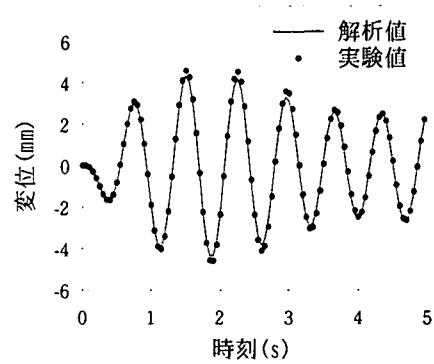


(b) Case3

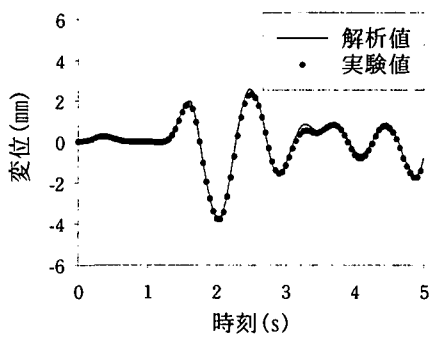
図9 入力加速度



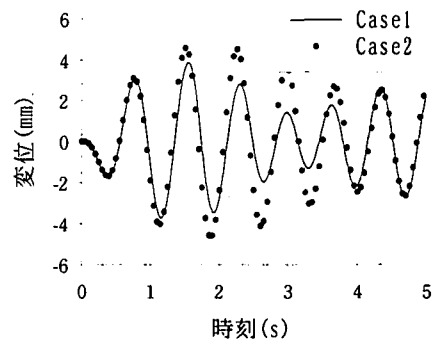
(a) 変位応答(Case1)



(b) 変位応答(Case2)



(c) 変位応答(Case3)



(d) 変位応答(Case1, 2)

図10 実験結果(Pier A)

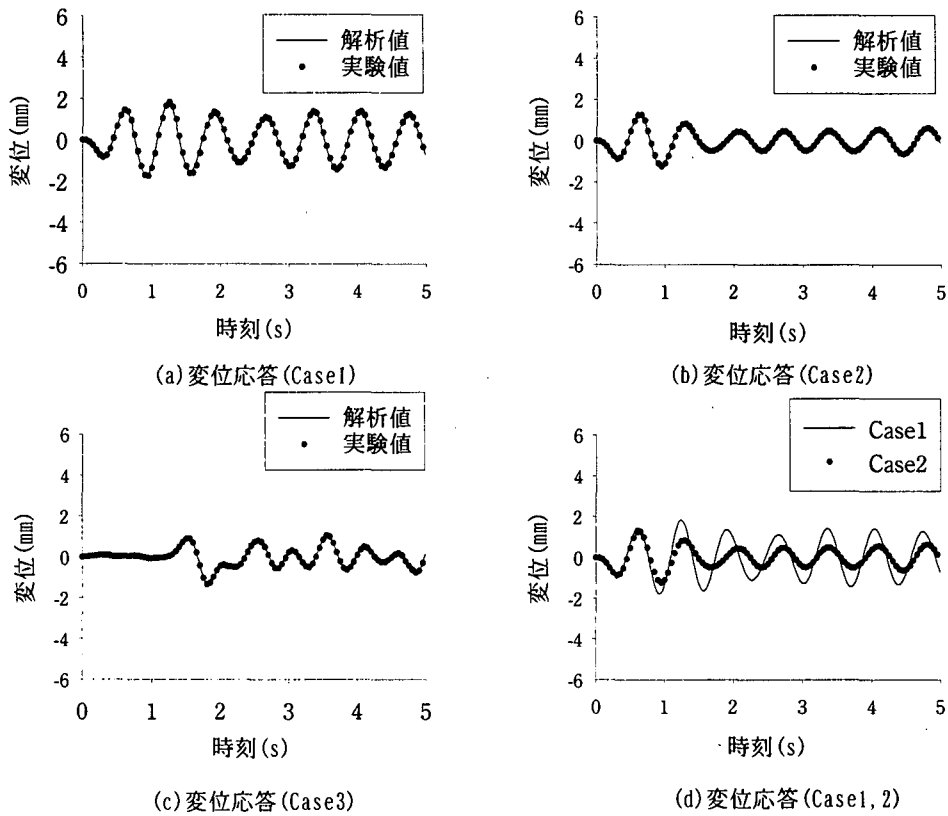


図 1 1 実験結果 (Pier B)

図 1 0, 図 1 1 のそれぞれ(a)から(c)より, 並列実験と解析との応答性状がほぼ一致しており, 構築した実験システムの妥当性が確認できる.

また, 相互作用の影響を比較した図 1 0 (d)と図 1 1 (d)よりその応答に差が認められ, 本システムにより相互作用の影響を検討することが可能であると考えられる.

次にインターネットを用いることによる実験時間への影響については, 並列実験での 1 ステップあたりに要する時間が, 京都大学の単独実験とほぼ等しくなっている. すなわち並列実験での実験時間は, 単独実験で最も時間のかかるシステムに依存していると言える. このことは, 逆に通信に要する時間が実験時間に比べて非常に短いことを示しており, インターネットを用いることが実験時間に及ぼす影響は少ないと考えられる.

表 4 実験時間の比較

実験種類	実施機関	ステップ	実験時間		使用 計算機 の性能
			全体	1 ステップ ^o	
単独	京大	400	約 2.5 時間	約 22 秒	DEC 21164A
単独	市大	500	約 1.5 時間	約 11 秒	DEC 21164A
並列	京大 市大	500	約 3.0 時間	約 22 秒	

京大=京都大学, 市大=大阪市立大学

3. 3 実験システムの信頼性

すべての実験ケースにおいて, データの欠落や重複などが原因で実験が中断することはなかった. また, 試験的にエラーを発生させた場合においてもエラーファイルにより実験を中断することも可能であることが確認された. したが

って開発した本システムにより、インターネットを介した並列実験を行うことは可能である。

4. 結論

本研究では、インターネットを介したデータ通信による並列ハイブリッド実験システムを開発した。得られた結論、および今後の課題を以下に示す。

- (1) 本研究で構築した並列ハイブリッド実験システムの妥当性および適用性を検討した結果、構造系全体を対象としたシステムの動的挙動の実験的解明が本システムにより可能であることを確認した。
- (2) 既存のプロトコルを用いることによって、インターネットを介したデータ通信により、実験を遠隔操作することができる。また、このインターネットを経由することによる時間遅れは実験時間に比べて小さくその影響は小さい。
- (3) 計算機の役割を解析または実験に限定し、クライアント・サーバ方式を採用することにより、拡張性の高い並列ハイブリッド実験システムが構築できる。
- (4) 本システムではエラーファイルによって、実験制御機の異常を解析計算機に伝え、実験の中断を行うことが可能である。ただし、実験制御機でどのような異常が発生したかなどの詳細な情報を伝達できるしくみを有しておらず、今後このような機能を付加していく必要がある。
- (5) 本システムでは、通信データとして変位と復元力の数値データのみを対象としてシステムを構築している。しかし、実験の状況を各実験施設で総合的に把握するためには、変位やひずみに代表される各種データの時刻歴変化や供試体の画像なども通信データとして取り上げ、これらをシステムに組込む必要がある。

謝辞

本研究は科学技術振興事業団の計算技術開発短期集中事業として、その援助を受けた。

参考文献

- 1) 宇佐美 勉, 木曾英滋, 才塚邦宏, 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地震挙動, 土木学会論文集, No.519/I-32, pp.101-113, 1995年7月.
- 2) 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, pp.577-580, 1993年12月.
- 3) 中西克佳: 鋼製・合成橋脚柱の耐震性に関する実験的研究, 大阪市立大学大学院工学研究科土木工学専攻博士論文, pp.9-27, 1998年4月.
- 4) 渡邊英一, 杉浦邦征, 永田和寿, 鈴鹿良和: 並列仮動的実験システムの構築とその検証, 第10回地震工学シンポジウム, pp.2205-2210, 1998年11月.
- 5) John D.Blair 著: Samba リファレンス, 翔泳社, 1999年3月.
- 6) マルチメディア通信研究会: 標準LAN教科書(上), アスキー出版局, 第二版, 1997年6月.
- 7) 宇佐美 勉, 伊藤義人, 木曾英滋, 才塚邦宏: 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, 土木学会論文集, No.507, pp.179-190, 1995年1月.
- 8) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説(V耐震設計編), 改訂版, pp.51-82, 1999年7月.