

非線形有限要素法を用いた ハイブリッド試験システムの検証試験

堂蘭美礼¹・福山満由美²・堀内敏彦³・今野隆雄⁴
酒井理哉⁵・大友敬三⁶・松尾豊史⁵・萩原豊⁶

¹工修 株式会社日立製作所 機械研究所 (〒300-0013 茨城県土浦市神立町502)

²工博 株式会社日立製作所 機械研究所 (〒300-0013 茨城県土浦市神立町502)

³工博 株式会社日立製作所 研究開発本部 (〒101-8010 東京都千代田区神田駿河台4-6)

⁴株式会社日立製作所 社会システム事業部 (〒300-0013 茨城県土浦市神立町603)

⁵工修 財団法人電力中央研究所 我孫子研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

⁶工博 財団法人電力中央研究所 我孫子研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

An improved substructure hybrid seismic experimental method has been developed. This method consists of numerical computations using a general-purpose nonlinear finite element analysis tool and a pseudo-dynamic vibration test, and visualizes both data measured by sensors placed on the specimen and the results of the numerical analysis. Therefore, it enables seismic testing of large-scale proportions that cannot be loaded onto a shaking table. Moreover, it helps us to understand the behavior of an entire structure consisting of a specimen and a numerical model. We performed verification tests, setting a piping system that includes supports, valves, and a branch pipe to a numerical model, and two elbows to a specimen. The results show the feasibility of this new method.

Key Words : Hybrid Experiment, Nonlinear Vibration, Finite Element Method, Seismic Motion,

1. はじめに

構造設計のための主要な評価技術として、特に耐震工学の分野において、ハイブリッド試験と呼ばれる試験手法が用いられてきた^{1)~4)}。ハイブリッド試験では、構造物の一部の部材(供試体)を取り出して載荷試験や振動台試験を行い、構造物の残りの部分(数値解析部)は数値モデル化して数値解析を行う。試験と数値解析をオンラインで連携させることにより、損傷を評価するために十分な大きさで部材の試験を行いつつ、構造物全体の応答特性と動的荷重の非定常な性質、およびこれらさまざまな要素の間の相互作用を試験条件に反映することができる。

しかし、従来のハイブリッド試験手法には二つの大きな問題があった。第一の問題点は、試験と組み合わせる数値モデルに単純な骨組や質点系しか用いることができなかったため、複雑な構造物の全体系をモデル化することは難しく、適用範囲が比較的単純な問題に限定されていた点である⁵⁾。第二の問題点は、構造物を供試体と数値解析部に分割するため、構造物が全体としてどのような挙動をしているのか理解しにくく、説得力に乏しい場合があるという点である。

以上の観点から、筆者らは、加振の時間軸を引き伸ばして試験する非リアルタイム型ハイブリッド試験に関して、下記の二つの機能を有する方法を開発した⁶⁾。

- ハイブリッド試験の適用範囲を拡大するため、多機能かつ汎用的な非線形構造解析プログラムと力学試験との融合を実現する。
- ハイブリッド試験における現象の理解を支援するため、試験部と数値解析部から得られる情報を統合して、コンピュータグラフィックスで可視化する。

本研究ではこのハイブリッド試験システムの試作システムを製作し、上記2つの機能の実現性を確認する。さらに、対象構造物全体を数値モデル化してハイブリッド試験と同じ条件で地震応答解析を実施し、試験精度を確認する。

2. 試作システムの構成

(1) 構成機器

検証試験に用いた試作システムの全体構成を図-1

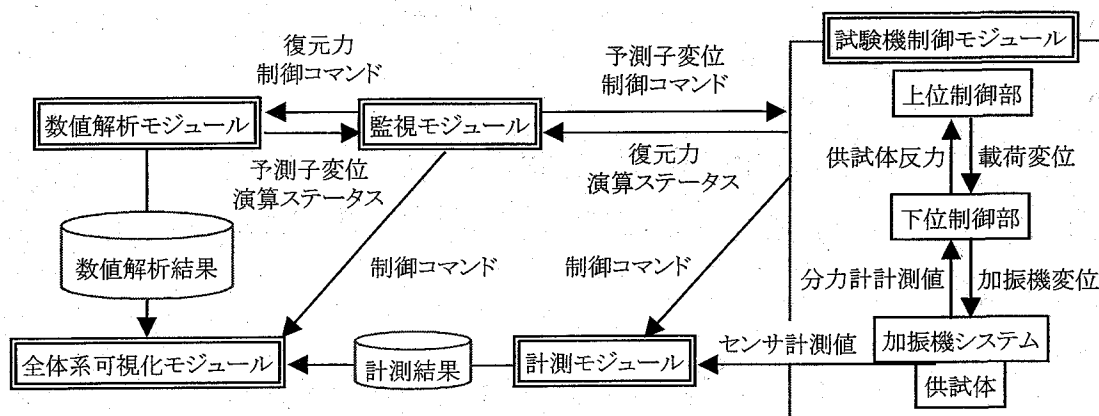


図-1 試作システムの構成

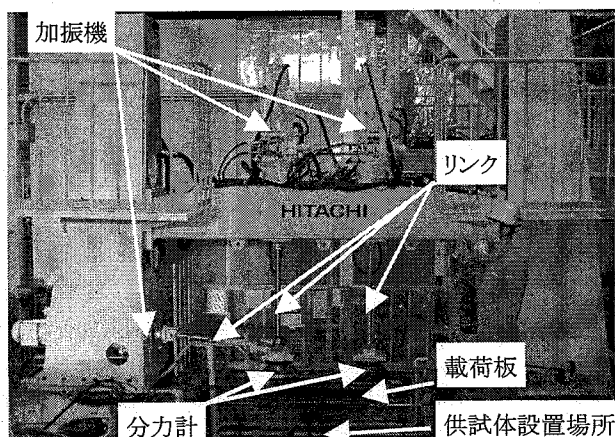


図-2 加振機システム

に示す。本試作システムは LAN 接続された 5 つのモジュールで構成される。このようなモジュール構成とすることで、試験目的に合致した加振機システムあるいは構造解析プログラムの適用を可能としている。以下に各モジュールについて説明する。

(2) 数値解析モジュール

数値解析モジュールは 1 計算時間刻み毎に地震加速度や供試体の復元力を入力として数値解析部の振動応答を計算し、数値解析部と供試体の境界点の変位を算出する。試作システムでは、有限要素法に基づく非線形構造解析プログラム TDAPⅢ⁷⁾に α -Operator Splitting 法⁸⁾ (以降、 α -OS 法と略す) を組み込んだもの⁹⁾を用いた。

(3) 試験機制御モジュール

試験機制御モジュールは数値解析モジュールが算出した境界点の変位に応じて供試体に荷重し、そのときの復元力を計測する。本モジュールは一般的な荷重処理 (相似則処理や監視モジュールとの通信制御など) を行う上位制御部、加振機システムに固有な処理 (絶対座標系と加振機座標系の座標変換など) を行う下位制御部、ならびに、加振機システムとで構成される。上位制御部と下位制御部を分割することで前者に汎用性を持たせている。

加振機システムの概観を図-2 に、加振機システムの仕様を表-1 に示す。本加振機システムでは 3 台

表-1 加振機システムの仕様

荷重設備	自由度	3
	加振機台数	3
加振機	ストローク	± 100 mm
	最大加振力	50 kN
分力計	計測方向	水平 2 方向、垂直方向
	水平方向容量	各 100 kN
	垂直方向容量	200 kN

の油圧加振機がリンクで荷重板に接続されており、荷重板と基礎の間に設置された供試体に対して鉛直平面内での 3 自由度の荷重を行う。リンクと荷重板の間には 2 台の分力計が設けられ、供試体反力の計測を行う。

(4) 監視モジュール

監視モジュールはハイブリッド試験全体を制御 (開始、一時停止、再開など) するとともに、数値解析モジュールと試験機制御モジュールの間の通信を仲介する。

(5) 計測モジュール

計測モジュールは試験機制御モジュールと同期して供試体や加振機システムに設置した各種センサの計測値を収集し、フィルタリングなどを行う。

(6) 全体系可視化モジュール

全体系可視化モジュールは、計測モジュールが収録したセンサ計測値と数値解析から得られる情報を統合し、対象構造物全体の様子をコンピュータグラフィックスで可視化を行う。

3. 試験方法

(1) 対象構造物

対象構造物の選定においては、非線形構造解析プログラムの適用という本ハイブリッド試験システムの長所と二次元 3 自由度の荷重設備の利点を活用することに着目した。そこで、過大な地震力に対して非線形応答し、かつ、二次元面内の並進・回転の

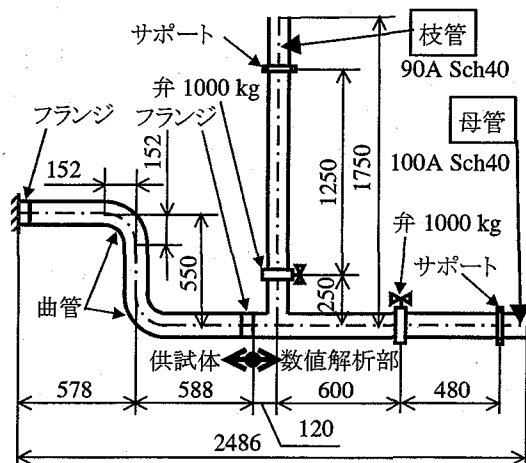


図-3 検証試験対象構造物

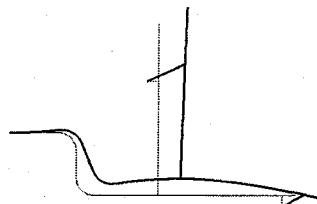
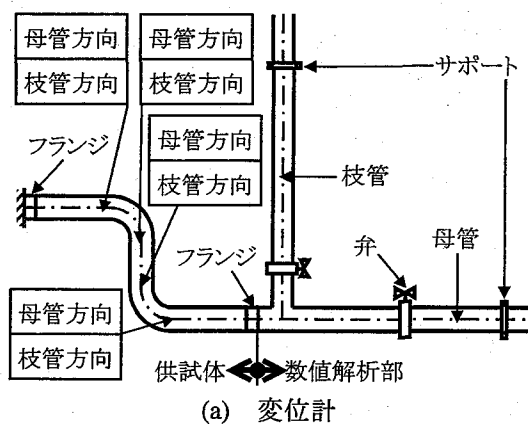
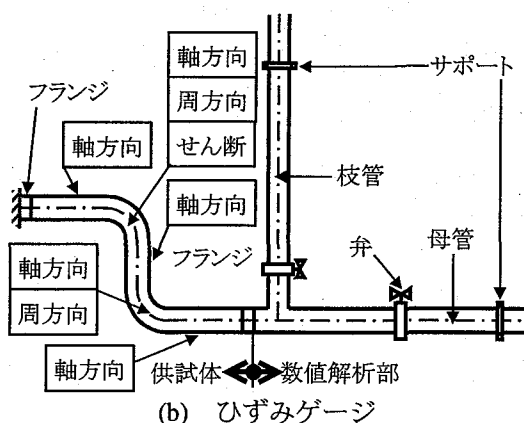


図-4 振動モード図



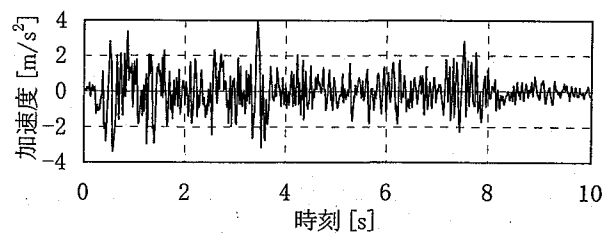
(a) 変位計



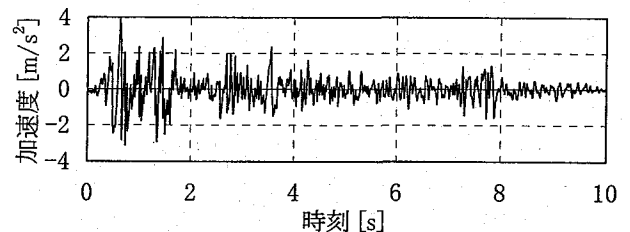
(b) ひずみゲージ

図-5 可視化用センサの配置

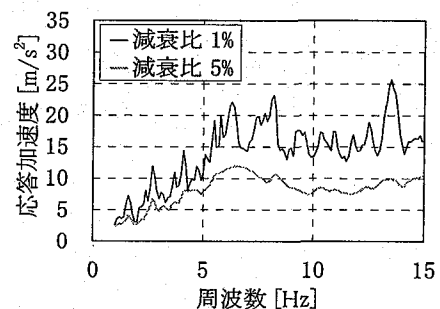
複合的な振動挙動を示す構造物として、図-3に示すような配管系を対象構造物とした。この配管系は曲管、分岐管、サポート、弁を含んでおり、一般的な配管系を模擬していると考えられる。このような構造物では曲管部が強い非線形性を示し、塑性域にお



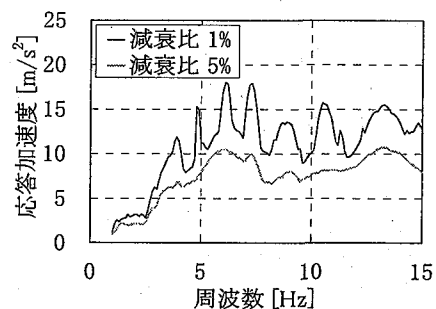
(a) 母管方向時刻歴波形



(b) 枝管方向時刻歴波形



(c) 母管方向応答スペクトル



(d) 枝管方向応答スペクトル

図-6 入力地震波 (Case1)

いて数値モデル化が困難となる。そこで、曲管部を供試体とし、残りの部分を数値解析部とする。なお、配管の寸法や弁の質量などは加振機システムの性能を考慮して選定した。この対象構造物の事前解析で得られた振動モードを図-4に示す。

(2) 可視化用センサ

対象構造物の挙動の可視化用センサとして、供試体に変位計とひずみゲージを設置する。各センサの配置を図-5に示す。

これらのセンサの他、油圧加振機に内蔵された変位計と載荷板に設置された分力計も可視化に利用する。

(3) 入力地震波

入力地震波として耐震試験で広く使用されてい

表-2 検証試験の条件

Case	最大加速度	枝管サポートの剛性
1	4 m/s ²	9.8×10 ⁷ N/m
2	12 m/s ²	9.8×10 ¹⁰ N/m

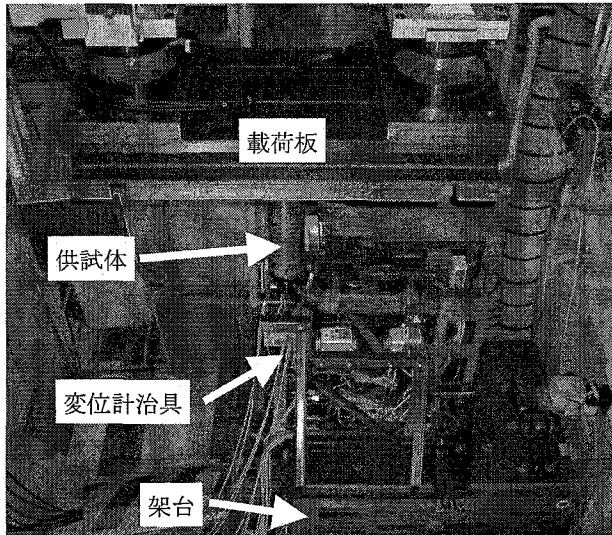


図-7 供試体と試験装置

るエルセントロ波を用い、母管方向にはEW波で、枝管方向にはNS波で加振する。ただし、配管系の1次固有振動数(約6.5 Hz)と地震波の卓越周波数がほぼ一致するように地震波の時間軸を0.3倍に圧縮し、さらに、母管方向と枝管方向の最大加速度が一致するように振幅の相似変換を行った。

最大加速度は4 m/s²と12 m/s²の2通りとし(表-2 参照)、いずれも主要動を含む10秒間(原波では33秒間)を用いた。入力地震波の時刻歴波形と応答スペクトルを図-6に示す。

(4) 試験手順

a) 初期剛性計測

供試体の初期剛性の計測は载荷方向以外の方向の自由度を拘束する条件で加振機システムを駆動して実施した。母管方向、枝管方向、回転方向それぞれについて荷重と変位、あるいは、モーメントと回転角との関係から初期剛性を算出した。なお、本試験システムにおいては、変位計と荷重計の設置位置の関係上、この初期剛性には供試体を設置するための架台と载荷治具の剛性も含まれる。

b) 数値解析モジュールの設定

数値解析部(図-3 参照)の直管部分は二次元非線形はり要素でモデル化し、2箇所を弁を模擬する集中質量、2箇所にサポートを模擬する1方向ばね要素を設けた。

α -OS法での計算に必要な供試体の線形剛性マトリックスは、供試体をはり要素で、架台と载荷治具を並進2方向、回転1方向のばねで数値モデル化し、これにグヤンの静縮合を適用することで作成した。

以上のようなモデルを用いて、 α -OS法におけるパラメータ α を-0.05、Rayleigh減衰を1%、解析時間刻みを0.00593232秒として解析を行った。

c) 全体系可視化モジュールの設定

全体系可視化モジュールには可視化用構造モデルを設定した。この構造モデルは、数値解析部と同等の数値モデル、供試体の変位計測点に対応する節点、ならびに、ひずみ計測点に対応する1次元要素から構成される。

d) 地震波加振試験の実施

図-7のように供試体を設置し、表-2に示す2通りの条件で試験する。Case1では供試体、数値解析部ともに線形範囲での加振を実施して本ハイブリッド試験システムの基本的な機能を確認する。Case2では非線形範囲での加振を実施して本システムの実用性を確認する。

(5) 全体系地震応答解析

本ハイブリッド試験システムの試験精度の検証を目的とする対象構造物全体の地震応答解析は以下のようにして実施した。

解析には汎用有限要素法コードABAQUS⁹⁾を用いた。供試体の直管と曲管にはエルボ要素を使用し、フランジとリブが設けられている部分は等価な断面積と断面2次モーメントを持つパイプ要素でモデル化した。供試体の固定端と境界点それぞれには架台、载荷治具を模擬する並進2方向、回転1方向の3つのばねを設けた。これらのばね剛性は検証試験結果の周波数分析より推定される対象構造物の固有振動数と全体系数数モデルの固有振動数とが等しくなるようチューニングして定めた。数値解析部については、母管と枝管をパイプ要素でモデル化し、検証試験と同様に、2箇所に弁を模擬する集中質量、2箇所にサポートを模擬する1方向ばね要素を設けた。

4. 試験結果

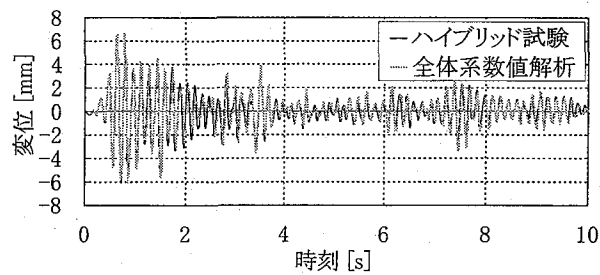
(1) Case1の試験結果

Case1における供試体と数値解析部の境界点での変位と荷重を図-8、図-9に示す。いずれの図においても、実線が本ハイブリッド試験システムでの結果、破線が全体系数数解析の結果である。

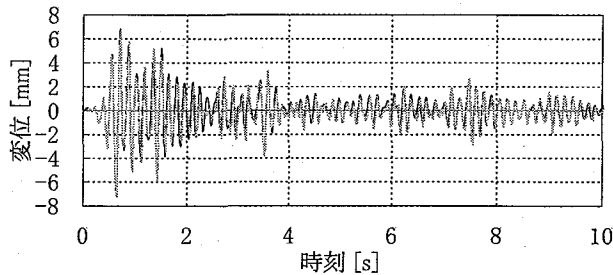
図-8、図-9より、検証試験結果と全体系数数解析結果の差異は、境界点の最大変位に関し、枝管方向で4%、母管方向で6%、回転角で24%であり、境界点の最大荷重については、枝管方向で0.2%、母管方向で5%、モーメントで15%である。回転角については、最大回転角が0.005 rad(0.2度)程度と微小であるため、誤差が相対的に大きくなっていると考えられる。以上より、本ハイブリッド試験システムの基本的な機能が確認され、さらに十分な精度を有すると言える。

(2) Case2の試験結果

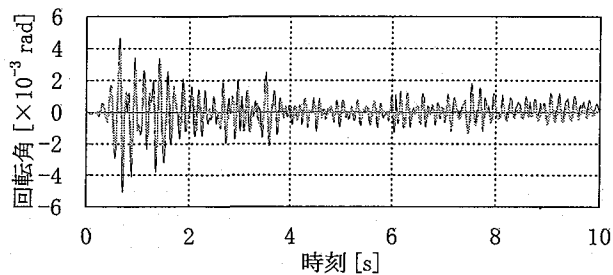
Case2における供試体と数値解析部の境界点の荷重-変位履歴を図-10に示す。履歴にヒステリシス現象があることから供試体が非線形範囲で加振されていることが確認される。



(a) 母管方向

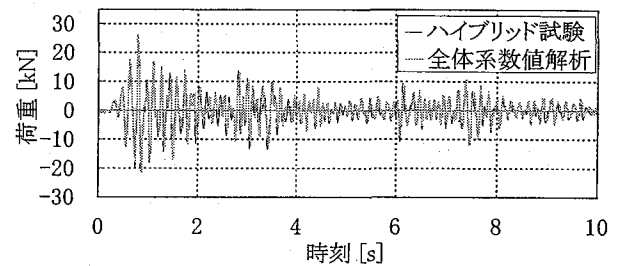


(b) 枝管方向

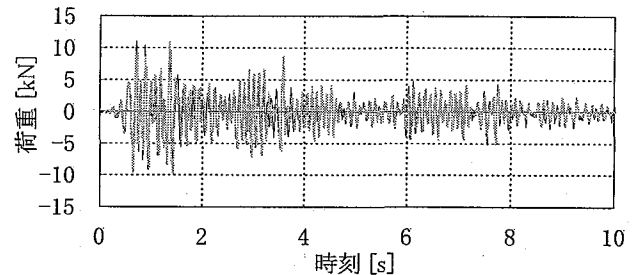


(c) 回転方向

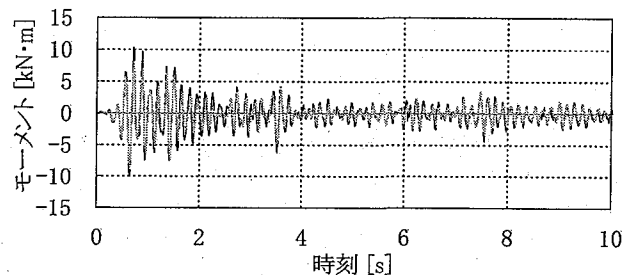
図-8 境界点の変位応答 (Case1)



(a) 母管方向



(b) 枝管方向



(c) 回転方向

図-9 境界点の荷重応答 (Case1)

供試体と数値解析部の境界点での変位と荷重を図-11、図-12に示す。両図において、全体係数値解析では境界点変位が母管方向、枝管方向ともに約 5 mm ドリフトしているのに対し、検証試験結果ではほとんどドリフトしていない。この主な原因は両者の間でフランジに設けたリブ近傍の配管の挙動が異なっていることにあると考えられる。全体係数値解析ではリブ近傍の配管を断面積と断面 2 次モーメントを一致させたパイプ要素の使用によりモデルを簡素化しているため非線形範囲での現象を適切に表現できないためである。このリブ近傍の塑性化による影響を除けば、検証試験結果と全体係数値解析結果の変位や荷重の波形は良く似ていていると言える。以上より、非線形範囲での加振に対しても本ハイブリッド試験システムの成立性が確認された。

(3) 可視化サブシステムの試験結果

Case2 実施中の可視化画面の例を図-13に示す。各図の上段が変形図、下段が軸方向のひずみのコンター図である。変形図では、計測結果と数値解析結果の変位が、あらかじめ対応付けられた節点からの変形として表示されており、また、対象構造物全体が変形していることから、供試体と数値解析部から得られる情報の統合表示機能が確認された。また、ひずみのコンター図では、あらかじめ対応付けられた要素の色が変化していることから、計測結果のグ

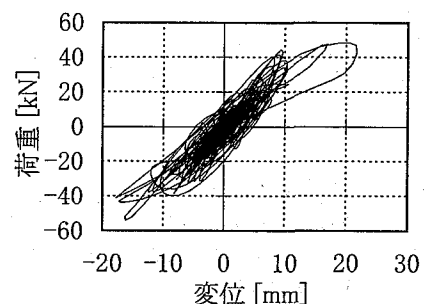


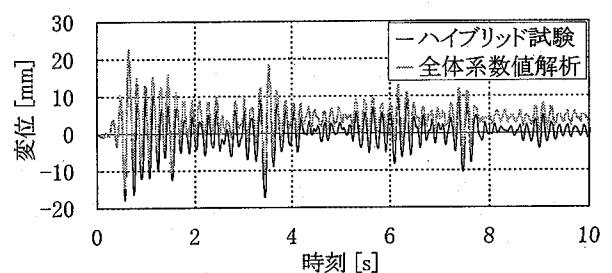
図-10 境界点の荷重変位履歴 (Case 2, 母管方向)

ラフィックス表示機能が確認された。

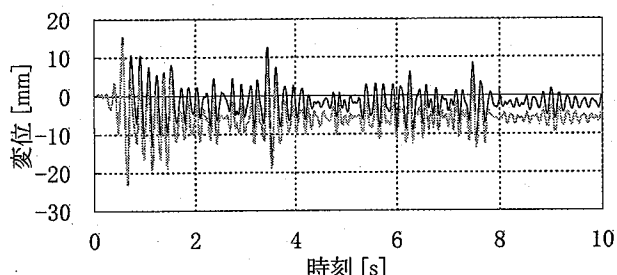
5. まとめ

本研究では、載荷試験と α -OS 法を組み込んだ非線形汎用構造解析プログラムとを連携させる機能、ならびに、載荷試験と数値解析の両方から得られる情報を統合してグラフィックス表示する機能を有するハイブリッド試験システムを試作し、二次元 3 自由度の加振機システムを使った検証試験を実施した。その結果、上記 2 つの機能の成立性を確認した。

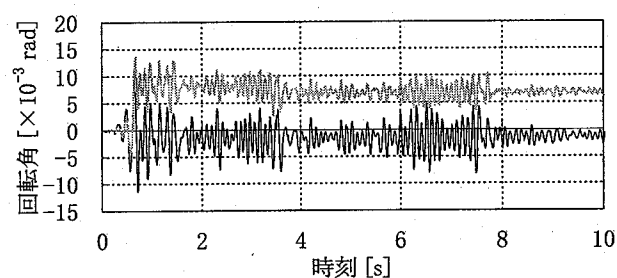
さらに、線形範囲の加振において、対象構造物全体を数値モデル化して地震応答解析した結果と比較し、並進方向変位、荷重とも 6 % 以内の相違に収まることを確認し、本システムが十分な精度を有す



(a) 母管方向

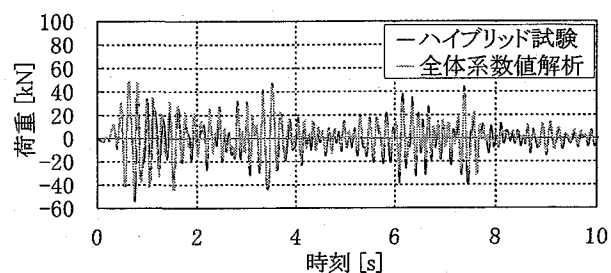


(b) 枝管方向

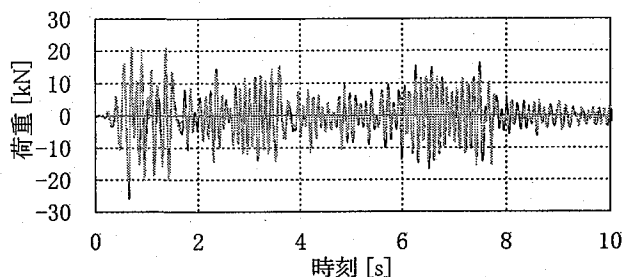


(c) 回転方向

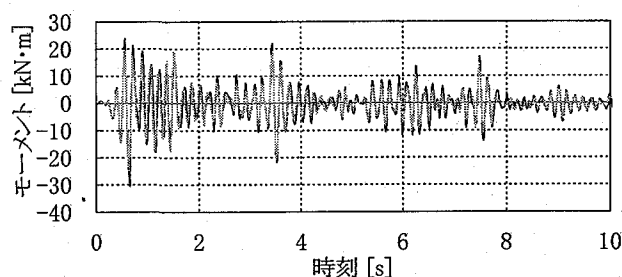
図-11 境界点の変位応答 (Case2)



(a) 母管方向



(b) 枝管方向



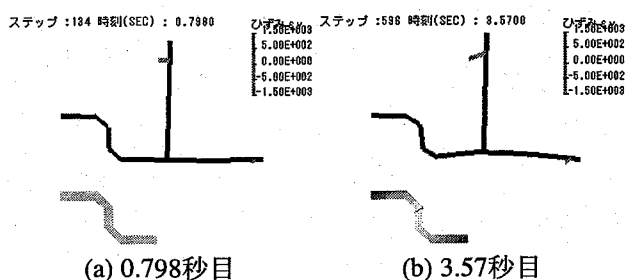
(c) 回転方向

図-12 境界点の荷重応答 (Case2)

ると言える。

参考文献

- 1) 伯野元彦 他: 計算機により制御されたはりの動的破壊実験, 土木学会論文報告集, No.171, pp.1-9, 1969.
- 2) 家村浩和: ハイブリッド実験の発展と将来, 土木学会論文報告集, No.356, pp.1-10, 1985.
- 3) Takanashi, K. and Nakashima, M.: Japanese Activities on On-Line Testing, J. Engrg. Mech., ASCE, 113-7, pp.1014-1032, 1987.
- 4) Mahin, S. A. et al: Pseudodynamic Test Method - Current Status and Future Direction, J. Engrg. Mech., ASCE, 115-8, pp. 2113-2128, 1989.
- 5) 伯野元彦 他: ハイブリッド実験の応用マニュアル, 平成元年度科学研究費補助金 (総合研究(A))研究成果報告書, 1989.



(a) 0.798秒目 (b) 3.57秒目

図-13 可視化画面の例

- 6) 酒井理哉 他: 非線形有限要素法を用いたハイブリッド試験システムの開発, 第5回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム講演論文集, 2004 (発表予定)
- 7) <http://www.ark-info-sys.co.jp/product/tdap3/index.html>
- 8) 中島正愛 他: 実験誤差制御機能を有したサブストラクチャ仮動的実験のための数値積分法, 日本建築学会構造系論文集, No.454, pp.61-71, 1993.
- 9) <http://www.hks.com/>