

# 遠心力載荷装置を用いた ハイブリッド地震応答実験手法の開発

小寺雅子<sup>1</sup>・高橋良和<sup>2</sup>・澤田純男<sup>3</sup>

<sup>1</sup>京都大学大学院工学研究科都市社会専攻  
(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail:kodera@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

<sup>2</sup>京都大学防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail:yos@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

<sup>3</sup>京都大学防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail:sawada@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

本研究では、遠心載荷装置を用いたハイブリッド地震応答実験という新しい実験手法を提案する。ハイブリッド実験の動的相互作用および遠心場への適用性を検討し、遠心場とハイブリッド実験の相似則が一致することが確かめられた。また同条件で行う遠心場振動台実験との比較を行うことで、遠心場ハイブリッド実験の有効性を検証し、最大振幅や応答性状、杭のモーメント分布などがよく一致することを確認した。さらに、非線形の上部構造物を仮定しハイブリッド実験を行い、その影響を評価できた。以上より遠心場ハイブリッド実験は、動的相互作用問題に対して有力な実験手法であると考えられる。

**Key Words :** centrifuge, soil-structure interaction, hybrid simulation

## 1. はじめに

構造物の地震応答を考える上で、地盤の影響は無視し得ず、構造物と地盤の動的相互作用に関する研究は、解析的、実験的の両面から精力的に行われている。地盤を対象とした実験研究を行う場合、遠心模型実験が有効である。これは遠心力によって高重力場を発生させ、縮小模型と実大スケールの地盤応力状態を一致させることができるためであるが、遠心模型実験では模型が小さすぎるために、コンクリート構造物など、複雑な上部構造物の非線形性などを適切に評価することは困難である。本研究では、この問題を解決する方法として、遠心場ハイブリッド実験手法を提案する。ハイブリッド実験とは、コンピュータで行う数値解析と実際の加力実験を組み合わせて構造物の地震応答を再現する実験手法である。

本研究では動的相互作用問題に対するハイブリッド実験の適用性について整理し、その一つの応用例として構造物-杭基礎-地盤系の遠心ハイブリッド実験を実施する。また全体系による遠心振動台実験も実施し、その結果の比較から動的相互作用問題への適用性を検討する。

## 2. 動的相互作用問題へのハイブリッド実験の適用性

### (1) 慣性力相互作用とキネマティック相互作用

動的相互作用は主に二つの種類に分けられる。構造物が主として振動する場合には、構造物の振動応答の結果生じた慣性力が地盤に加わり、地盤がその力に対し抵抗する。一方、地盤が主として振動する場合には、地盤変形によって生じる力が構造物に加わる。前者を慣性力相互作用、後者をキネマティック相互作用と呼び、構造物と地盤との剛性の違いや、揺れの振動数によってどちらの影響が卓越するか決まる。

基礎へ入力される地震動が、基礎の剛性によって、自由地盤の地震動と比べて低減する効果を入力損失効果と呼び、キネマティック相互作用に分類される。慣性力相互作用としては構造物の振動エネルギーが地盤に逃げていくため、構造物の振動が減衰する効果である地下逸散効果などがある。

### (2) 慣性力相互作用問題への適用

#### a) 動的地盤ばね

動的相互作用を考慮するためには、地盤と構造物の間に動的地盤ばねを設定する必要がある。一般に動的地盤ばねは周波数依存型であり、変形に比例し

た抵抗力を生み出すばね的な効果と、変形速度に比例した抵抗力を生み出すダッシュポッド的な効果が含まれる。動的アクチュエータを用いたハイブリッド実験の場合、周波数依存問題は自動的に解決できるが、静的加力によるハイブリッド実験（擬動の実験）の場合、周波数依存ばねを時間領域で扱うための工夫が必要となる。土岐ら<sup>1)</sup>は、1G場における実物大基礎-地盤系の動的相互作用問題において、ハイブリッド実験を適用した。事前に行った基礎-地盤系の動の実験の結果から、周波数依存性を示す地盤ばねの複素剛性 $k$ を推定し、この結果をハイブリッド実験で考慮できるモデルを提案している。提案された手法の運動方程式を式(1)に示す。

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + C_0 \frac{dx}{dt} + R = -M \frac{d^2U_g}{dt^2} - \int_{-\infty}^{\infty} k(t-\tau)R(\tau)d\tau \quad (1)$$

$M$  は質量マトリクス、 $k, C_0$  はそれぞれ複素剛性、減衰マトリクスを表し、動の実験から推定される。 $R$  は復元力、 $x$  と  $U_g$  は応答変位、入力変位ベクトルを表す。複素剛性  $k$  は周波数  $\omega$  の関数であり、これによって周波数依存性を考慮している。本手法は動的な地盤ばねを求めるために動の実験が必要であり、縮小モデルを用いた場合には、後述する相似則の関係より、さらに高周波領域による動の実験が必要となるため、実験、制御が困難となると考えられる。

地盤が非線形化する場合には、固有周波数が短くなり、剛性や減衰における周波数依存性は小さくなる。減衰についても、地盤の非線形による履歴減衰が大きいため、逸散減衰の効果も相対的に小さくなる。このような場合には周波数に依存しない地盤ばねが用いられることが多く、従来のハイブリッド実験における定式化を用いることができる。地盤の非線形を取り扱うため、縮小モデルを用いる場合には実大スケールの地盤応力状態と一致させることができる遠心場での载荷実験が有効である。

#### b) 構造物慣性力による相互作用

構造物慣性力による地盤の変形は、基礎部をアクチュエータで加力することによりハイブリッド実験で適用可能である。基礎-地盤系をスウェイ-ロッキング系にモデル化する場合、これらの変形を再現するために複数のアクチュエータが必要となる。

### (3) キネマティック相互作用問題への適用

#### a) 地盤変形による相互作用

地盤変形による構造物への影響をハイブリッド実験で再現するためには、せん断土槽の外部より複数アクチュエータで加力することにより、ハイブリッド実験で適用可能である。この場合、実験システムが大型化することより、縮小モデルを適用しやすい遠心場での载荷実験が有効である。

#### b) 入力損失効果

基礎の剛性により地盤が拘束されることによる入

力損失効果は、基礎-地盤系モデルを振動台上に設置することで理論的には再現可能となる。この場合動の実験となるため、構造物との相互作用を実験的に再現するためには、動的アクチュエータが必要となる。動的アクチュエータと振動台を融合させたハイブリッド実験は検討例はあるものの、大規模なシステムが必要となる。

### (4) 相似則

遠心場ハイブリッド実験では相似則の検討は特に重要である。本節では遠心実験、1G場振動台実験、ハイブリッド実験の相似則を比較検討し、遠心場ハイブリッド実験への適用性を考察する。

実物についての運動方程式をたてると、

$$M_p \frac{d^2x_p}{dt_p^2} + C_p \frac{dx_p}{dt_p} + R_p = -M_p \frac{d^2u_{gp}}{dt_p^2} \quad (2)$$

下添字 $p$ は実物を、 $m$ は模型を表す。実物と供試体モデルの物理量の関係は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} x_p &= \alpha_l x_m, & u_{gp} &= \alpha_l u_{gm}, & t_p &= \alpha_t t_m \\ M_p &= \alpha_m M_m, & R_p &= \alpha_r R_m, & C_p &= \alpha_c C_m \end{aligned} \quad (3)$$

これを式(2)に代入して整理すると

$$\left( \frac{\alpha_m \cdot \alpha_l}{\alpha_t^2} \right) \frac{d^2x_m}{dt_m^2} + \left( \frac{\alpha_l \cdot \alpha_c}{\alpha_t} \right) \frac{dx_m}{dt_m} + (\alpha_r) R_m = \left( \frac{\alpha_m \cdot \alpha_l}{\alpha_t^2} \right) \frac{d^2u_{gm}}{dt_m^2} \quad (4)$$

ここで式(4)の各項の係数が等しければ式(2)と等価になり、模型も実物と等価になる。したがって、

$$\frac{\alpha_m \cdot \alpha_l}{\alpha_t^2} = \frac{\alpha_l \cdot \alpha_c}{\alpha_t} = \alpha_r \quad (5)$$

の成立が必要である。模型縮尺を $1/n$ とすると  $\alpha_l = n$  であり、材料を実物と同じものを用いると質量密度比が1になるため、 $\alpha_m = n^3$ となる。

1G場実験では、加速度の相似比が1に固定されるため、

$$\frac{\alpha_l}{\alpha_t} = 1 \quad \therefore \alpha_t = \sqrt{n} \quad (6)$$

ここで応力比を1、すなわち  $\alpha_r = n^2$  とすると、式(5)が成立しなくなり、相似則を満足できない。そこで1G場実験では模型質量の他に付加質量 $(n-1)/n^3$ を加えることで強制的に  $\alpha_m = n^2$  にして式(5)を成立させる。

遠心場、ハイブリッド実験ではひずみ速度依存性を考慮していない。そのため $R$ は静荷重の場合と同一であると考えられるため  $\alpha_r = n^2$  となる。これを式(5)に代入して加速度の相似比を求めると、

$$\alpha_i = \frac{\alpha_m \cdot \alpha_l}{\alpha_R} = n^2 \quad \therefore \alpha_i = n \quad (7)$$

$$\frac{\alpha_i}{\alpha_i^2} = \frac{1}{n} \quad (8)$$

遠心場では遠心力により重力加速度をコントロールし、この相似則を満足させている。ハイブリッド実験において、計算機と模型の間にやり取りされる数値は復元力Rと変位xのみであるので、質量や時間などの物理量は計算機上で与えられているにすぎない。そのため、実験では応力だけを一致させれば良いので、アクチュエーターなどで応力状態を再現し、相似則を満足させる。3つの相似則をまとめたものを表-1に示す。

以上より、遠心模型実験とハイブリッド実験は同じ相似則で記述されることが分かる。

#### 4. 実験概要

##### (1) 実験対象問題

本研究では、遠心場ハイブリッド実験の適用例として、図-1に示すような問題を考える。ここで、地盤は非線形することを想定し、また基礎部（フーチング）を静的アクチュエーターで加力するシステムを用いることから、動的相互作用問題のうち、構造物慣性力による相互作用を考え、周波数非依存型地盤ばねを想定する問題を取り扱うことになる。

##### (2) 共通システム

実験は京都大学防災研究所の遠心载荷装置を用い、40G場で行った。遠心力载荷装置は、実験容量24G-tonで、最大積載質量は120kgである(図-2)。土槽は内寸450mm×150mm×300mm(長さ×奥行き×高さ)の剛土槽を使用した。また地盤材料には珪砂7号の乾燥砂(表-2)を用い、空中落下法により相対密度70%になるように、またフーチングが20mmまで根入れされるように調整した。基礎模型はフーチングと杭から構成され、杭模型は幅6mm、奥行き10mmの角柱アルミ杭4本で、ロッキングを防止するために杭頭、杭端共に剛結合とし、またひずみゲージを7断面に設置した。フーチングは真鍮製で、地盤作成時に構造物真下にも砂が均等にいきわたるようにするため、中央に直径25mmの穴が空いている。土槽、地盤、杭模型は両実験に共通である。

##### (2) 振動台実験

実験対象問題の正解として、遠心場振動台実験を実施する。振動台実験で使用した模型(図-1)は、杭、フーチング、上部構造物を模擬する板ばねと真鍮製のおもりで構成されている。フーチングは厚さ30mm、質量0.752kgであり、おもりの質量は0.858kgである。フーチングと上部構造物の質量となるおもりはりん青銅製の板バネ4で連結されており、この接続はすべて剛結である。このため、基礎

表-1 相似則(実物/模型) ※太字は前提条件を表す

	1G場 振動台実験 <sup>2)</sup>	遠心場 <sup>3)</sup>	ハイブリッド 実験 <sup>4)</sup>
長さ	<b>n</b>	<b>n</b>	<b>n</b>
質量密度	1	<b>1</b>	<b>1</b>
質量	<b>n<sup>3</sup></b>	<b>n<sup>3</sup></b>	<b>n<sup>3</sup></b>
応力	付加質量を加えて 相似則を満足	遠心力により 応力状態を再現	軸方向に外力を与え 応力状態を再現
加速度	<b>1</b>	1/n	1/n
時間	<b>n</b>	<b>n</b>	<b>n</b>

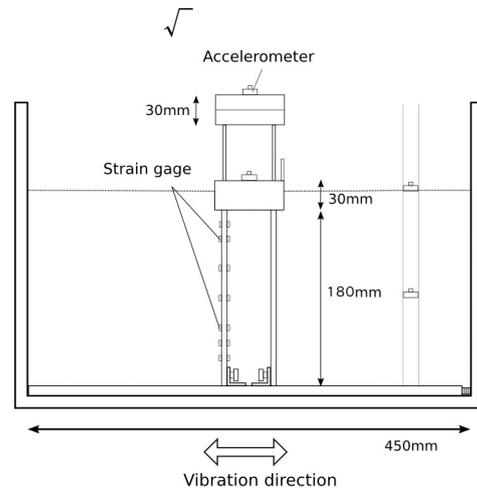


図-1 振動台実験模型

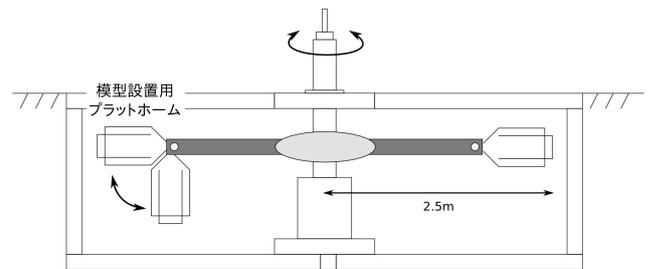


図-2 遠心力载荷装置模式図

表-2 珪砂7号の物理的特性

土粒子比重	2.661
最大密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.568
最小密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.229
最大間隙比	1.164
最小間隙比	0.703

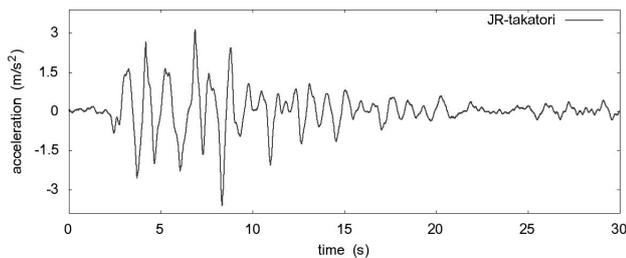


図-3 入力地震動

のロッキングは抑制されるため、スウェイが卓越するモデルとなる。板バネにも 2 断面にひずみゲージを設置している。

また、ひずみゲージの他に加速度計 5 台、レーザ変位計 2 台、入力変位用のギャップセンサ 1 台を使用した。すべてのデータはデジタル下部に設置されたデジタル動ひずみ測定器のアンプでチャンネルごとに増幅・デジタル化され、無線 LAN を介して観測室内の計測用デスクトップパソコンに記録される。入力波は JR 鷹取記録 EW 成分変位波形を最大振幅 4mm、時間を 1/40 に調整したものをを用いた。振動台で再現された加速度波形を図-3 に示す。

### (3) ハイブリッド実験

実験対象モデルに作用する力を図示すると図-4(a)のようになる。これをハイブリッド実験では構造物と基礎の水平振動のみを対象とした 2 質点系のモデルに置き換えて、動的相互作用を取り扱う。図-4(b)に示すように、ハイブリッド実験では構造物と地盤の相互作用を表す動的地盤ばねを設定し、この復元力  $R$  を実験から求める。 $F_1$ 、 $F_2$  は上部構造物とフーチングの慣性力を表しており、この合計  $F_1 + F_2$  は復元力  $R$  と釣り合い関係にある。この復元力  $R$  には、杭頭せん断力や土圧、摩擦力など、慣性力を除いた基礎部にかかる力すべてが含まれており、実験で発現する非線形性を考慮することができる。

本研究におけるハイブリッド実験の運動方程式は次式のようになる。

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + C \frac{dx}{dt} + R = -M \frac{d^2U_g}{dt^2} \quad (9)$$

ここで、 $m_1 \cdot m_2$  は上部構造物及びフーチングの質量、 $x$  は上部構造物及び基礎部のフーチング位置の水平変位、 $U_g$  は地盤変位を表す。上部構造物の剛性は振動台実験で得られた結果を基に設定し、 $C$  は地盤の非線形の影響が大きいと考え 0 とした。

ハイブリッド実験の模式図を図-5 に、土槽上部の写真を図-6 に示す。アクチュエーターはステッピングモーターとボールネジにより構成され、基礎部上面を載荷し、荷重と変位を計測している。遠心場では変位が小さくなるため、デジタル変位計により精度を確保している。

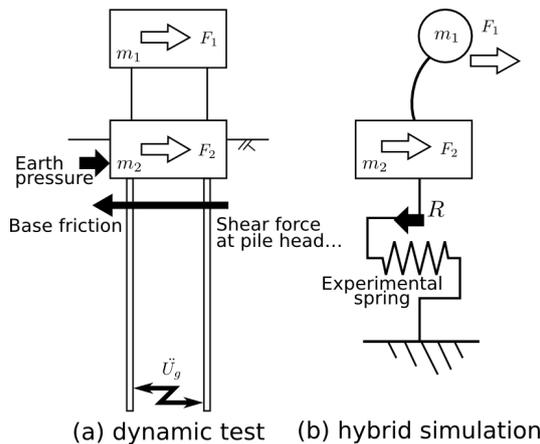


図-4 モデル図

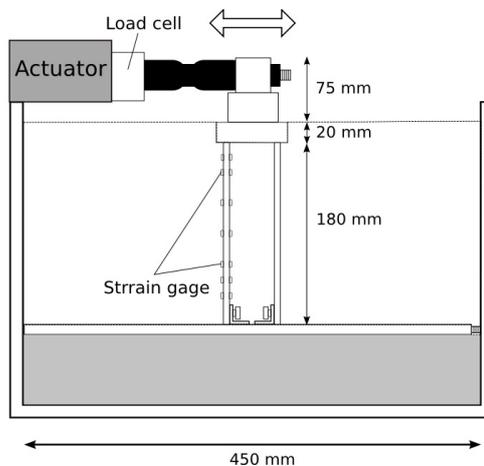


図-5 ハイブリッド実験模型

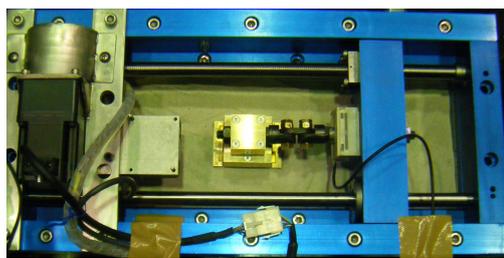


図-6 ハイブリッド実験上部

ハイブリッド実験システムは、ハイブリッドシミュレーションフレームワークである OpenFresco<sup>5-8)</sup> を使い、数値解析部は OpenSees を用いている。OpenFresco はハイブリッド実験を含む実験手法を仮想化したもの (図-7) であり、NEESit<sup>8)</sup> より自由に利用できるようになっている。本実験システムに適用するために、ExperimentalControl 部を拡張し、ステッピングモーターにより加力制御を可能とした。他の部分は OpenFresco に既存のシステムを用いている。

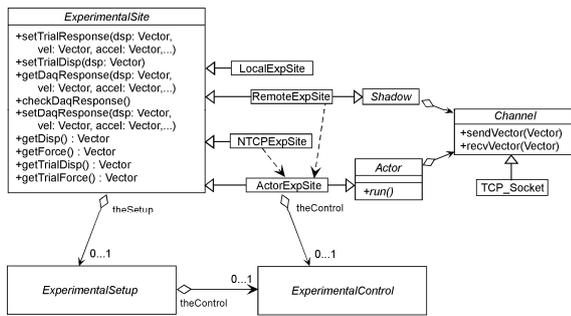


図-7 OpenFresco クラス図

変位データ、荷重データは無線 LAN を介してモバイルノートパソコンに記録され、アクチュエーターもこのパソコンで制御する。ひずみデータは振動台実験と同じ計測システムで取得されるため、厳密な同期はしていない。

地盤応答は振動台実験で得られた加速度記録を入力し、実物スケールによる運動方程式を解き計算する。計算で得られたフーチングの変位を相似則に従い変換し、アクチュエーターの水平移動によって、フーチングの変位制御を行う。地震応答計算はオペレーター・スプリッティング(OS)法による数値積分法を用いる。

入力波は振動台実験で得られた加速度 (図-3) を用いた。

## 5. 振動台実験とハイブリッド実験の比較

実験結果は相似則により実物スケールで記す。

図-8に両実験の変位時刻歴を示す。振動台実験結果には基礎部に残留変位が見られるものの、両実験結果は上部構造物、基礎部共に10秒程度まで良く一致している。上部構造物については、10秒以降ハイブリッド実験結果の方が大きい、これは粘性減衰を0に設定した影響であると思われる。

図-9は基礎部の履歴曲線の比較である。初期剛性、等価剛性、全体の形状が共によく一致していることが見てとれる。

図-10に4.32~4.816秒での杭の曲げモーメント分布の比較を示す。変曲点の位置、モーメント最大値がほぼ一致している。実際の計測時間になおすと、振動台実験は0.0132秒、ハイブリッド実験は306秒になる。時間スケールの違いにもかかわらず、同様の結果が得られたことから考えて、遠心場ハイブリッド実験は十分な精度を有していると言える。

## 6. 非線形構造物の応答

ハイブリッド実験では上部構造物の数値モデルを自由に変化させることができ、非線形構造物を設定することが容易である。ここでは鋼柱の履歴モデル (Giuffre-Menegotto-Pintoモデル)を設定し、遠心場ハ

イブリッド実験を実施した。図-11,図-12に変位時刻歴と履歴曲線を示す。図-8,図-9に比べて基礎部の変位が小さい。上部構造物がエネルギー吸収した結果、基礎部の応答が小さくなったことを評価することができた。

## 7. まとめ

遠心場ハイブリッド実験を提案し、地盤特性を正確に反映したシミュレーションを行うことができ、振動台実験と比較した結果、良い精度で一致することを確認した。また、非線形の上部構造物を仮定しハイブリッド実験を行いその影響を評価できた。以上より、遠心場ハイブリッド実験は、構造物・地盤が非線形となる現象を取り扱うための、有力な実験手法であることが示された。

**謝辞：**本研究は文部科学省科学研究費補助金 (若手研究(S)19676004番、代表：高橋良和)の助成を受けて実施したものである。遠心力载荷装置による実験に際し、京都大学防災研究所飛田哲男助教のご支援、ご助力を得た。ここに厚くお礼申し上げる次第である。

## 参考文献

- 1) 土岐憲三, 佐藤忠信, 清野純史：杭基礎の非線形復元力に関するハイブリッド実験, 京都大学防災研究所年報, 第32号B-2, 1989年4月.
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の構造実験評価研究委員会報告書, 163-164, 2004年3月.
- 3) 香川崇章：土構造物の模型振動実験における相似則, 土木学会論文集, 第275号 69-77, 1978年7月.
- 4) 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手法に関する考察, 土木学会論文集, 第507号I-30, 179-190, 1995年1月.
- 5) Takahashi, Y. and Fenves, G.L. (2006). Software framework for distributed experimental-computational simulation of structural systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35, 267-291.
- 6) Schellenberg, and Mahin, S.A. (2006). Application of an Experimental Software Framework to Hybrid Simulation of Structures through Collapse. *Proc. of 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, paper number 1221.
- 7) Fenves, G.L., McKenna, F., Scott, M.H., and Takahashi, Y. (2004). An object-oriented software environment for collaborative network simulation. *Proc. of 13th World Conference on Earthquake Engineering*, paper number 1492.
- 8) OpenFresco web site. (2006). <https://neesforge.nees.org/project/openfresco/>

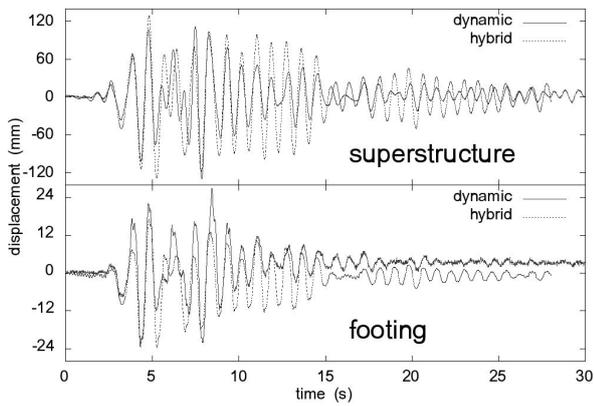


図-8 変位時刻歴の比較

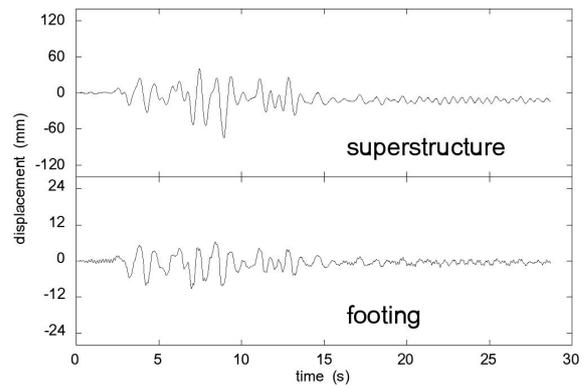


図-11 非線形上部構造物の変位時刻歴

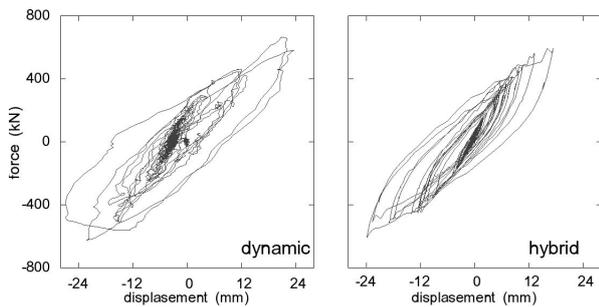


図-9 基礎部の履歴曲線の比較

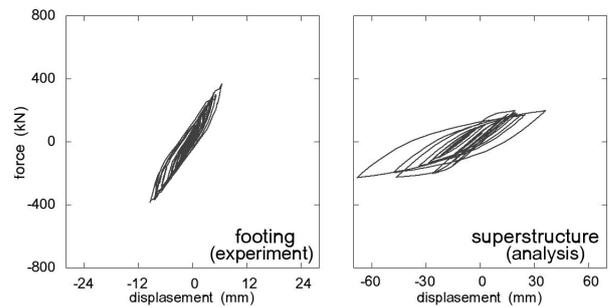


図-12 非線形上部構造物時の履歴曲線

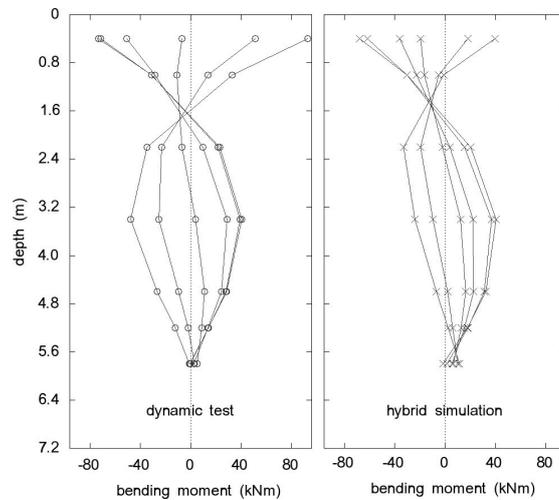


図-10 曲げモーメント分布

## Development of Pseudo-dynamic Test Method in Centrifugal Field

Masako KODERA, yoshikazu TAKAHASHI and Sumio SAWADA

The pseudo-dynamic test method in centrifugal field is proposed. To clarify the effectiveness of the test method, shaking table tests are also conducted. As the result, pseudo-dynamic test can simulate seismic response considering the soil-structure interaction. The results of pseudo-dynamic test are good agreement with that of shaking table test. Assuming that hysteretic model of the structure is a nonlinear steel column, it can evaluate the effects of the nonlinear superstructure. In addition, the centrifuge similitude is equal to that of the pseudo-dynamic test. Therefore, the pseudo-dynamic test is an powerful tool for soil-structure interaction.