

周波数依存型地盤ばねを用いた 遠心場ハイブリッド地震応答実験の開発

小寺雅子¹・高橋良和²

¹東京電力株式会社川崎火力建設所
(〒210-0865 神奈川県川崎市川崎区千鳥町五番一号)

E-mail:kodera.m@tepcoco.jp

²京都大学准教授,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

本研究では、周波数依存型地盤ばねを用いた遠心場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。時間領域で周波数依存性を考慮する解析手法及び本手法に適する数値積分法に関する検討を行い、既存の遠心場ハイブリッド実験手法の拡張を行った。同条件で行う遠心模型振動実験との比較を行った結果、遠心場ハイブリッド実験手法は、地盤変形が大きい現象への評価は難しいものの、地盤変形が相対的に大きくない事象では遠心場振動台実験結果を精度よく再現することができた。また周波数依存型ばねの効果によって高周波成分が減衰するため、実験誤差によるノイズを抑制し、安定した実験を行うことができた。

Key Words : centrifuge, hybrid simulation, soil-structure interaction, frequency dependency

3. 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・実験の両面から精力的に行われている。

解析的研究では、有限要素法、境界要素法に基づいて、地盤と構造物の両者の挙動について同時に数値解析を行う方法では、自動的に相互作用を取り込むことができる。しかしこれらの詳細法は、多大な演算時間と記憶容量を要するため、上部構造物と杭を質点系モデルにおきかえたPenzienモデル¹⁾や、それを改良した修正Penzienモデル²⁾などの簡易モデルが使われることが多い。そこで必要となるのが、地盤と構造物の間に地盤ばねを設定することである。特に水平方向と回転方向に分けて考えたモデルをスウェー・ロッキングモデル(SRモデル)と呼び、広く使われているモデルであるが、地盤ばねの評価には不確定な要素が多いため、様々な評価方法が提案されている。

一方、実験的研究としては、振動台実験、遠心模型実験などが行われている。大型振動台を使った実験はコスト面から実施が難しく研究事例は少ないが、時松ら³⁾は実大スケール振動台実験を行い、上部構造物と地盤の固有周期の大小関係が杭応力に与える影響を検討した。基礎の根入れ効果を対象とした研究事例として、田村⁴⁾は構造物－杭基礎－地盤系の遠心模型実験を行い、土圧及び側面摩擦力が杭頭水

平力に及ぼす影響と上部構造物慣性力との関係を考察している。

動的相互作用に関して、解析的研究にはモデル化や計算の複雑さについての困難や、実際に数値解析がどれほどの精度を有しているかという疑問がある。また、実験的研究については大型実験はコスト面から実施が容易ではなく、遠心実験には上部構造物の非線形性を考慮できないという問題がある。これらを克服する有効な手段として、筆者らは構造物－杭基礎－地盤系を対象とした遠心場ハイブリッド地震応答実験手法を提案した⁵⁾。

遠心場ハイブリッド地震応答実験手法とは、遠心模型実験のなかにハイブリッド実験を組み込んだ実験手法であり、地盤を含んだ小型模型実験で、構造物と地盤の非線形性を考慮することが可能となる。また数値解析モデルの妥当性を検討する手段としても利用できる。しかし実験システム上の制約により、周波数依存性に見られる地盤の動的な作用や、地盤の変形の影響が大きい作用に関しては考慮できず、遠心場ハイブリッド地震応答実験手法の適用範囲は制限されたものであった。

本研究では、筆者らが提案している遠心場ハイブリッド地震応答実験手法の適用範囲を広げるため、付加質量効果、逸散減衰効果を反映できる周波数依存型地盤ばねの適用性について検討する。また周波数依存型地盤ばねを用いた遠心場ハイブリッド地震応答実験を行い、同条件の遠心場振動台実験と比較

し、その実験の精度向上とその有用性について検討する。

4. 動的相互作用と周波数依存型ばね

(2) 動的相互作用

a) 慣性力相互作用とキネマティック相互作用

構造物と地盤との境界部での力-変位関係を、周波数依存型地盤ばねと呼ぶ(動的地盤ばね, 相互作用ばね, インピーダンスなどとも呼ぶ)。また、地震動が入射したときの構造物-地盤境界部での動きを基礎入力動と呼ぶ。これは周波数依存型地盤ばねを介して構造物に作用する入力地震動を基礎入力動に相当する。

周波数依存型地盤ばねと基礎入力動の相互作用効果を、それぞれ「慣性力相互作用」、「キネマティック相互作用」と呼び、周波数依存問題や地下逸散減衰は慣性力相互作用効果に、入力損失はキネマティック相互作用効果に分類される。

これらの相互作用の影響の大きさは、構造物と地盤の剛性比によって変化し、構造物の剛性が高く地盤が軟弱な場合には、動的相互作用の影響は大きく、その逆の場合には相互作用の影響は小さくなる⁶⁾。

b) 周波数依存型地盤ばね

周波数依存型地盤ばねには、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效果が含まれており、地下逸散減衰は後者の効果を代表している。また、この2つの効果に加え、基礎周辺の地盤が基礎と一緒に振動することによる付加質量的な効果を持っている。付加質量を \bar{M} として周波数依存型地盤ばね K_g の性質を式で表すと、

$$K_g(\omega) = K_f(\omega) - \omega^2 \bar{M} + j\omega C_f(\omega) \quad (1)$$

となる。 ω は角振動数、 j は虚数単位を表し、 $K_f \cdot C_f$ はばねの剛性、減衰に相当する定数である。式(1)から周波数依存型ばねは複素ばねであることが分かる。

c) 基礎入力動

通常、構造物基礎で観測される地震動は自由地盤の地表の地震動に比べて小さくなり、この効果を入力損失と呼ぶ。これは基礎に埋め込みがあったり、様々な地震動がいろいろな角度から入射することが原因である。ただし一般に、水平の入力は減少するが、ロッキング動やねじれ動が励起されるので注意が必要である。構造物の耐震設計用の地震応答解析では、自由地盤での地表応答波や基礎下端位置の応答波を入力地震動として用いる場合が多い。

(3) 周波数依存型地盤ばねを用いた時刻歴応答解析

a) 周波数依存型ばねと因果律

動的相互作用効果を解析的に表現するには、周波数依存型地盤ばねを用いることが重要である。一般に、周波数依存型ばねを用いるには周波数領域の解

析を行う必要があるが、周波数領域の解析を非線形の問題には使用することができない。ゆえに、時間領域で周波数依存性を考慮できる特殊な解析手法が必要である。

特に周波数依存型ばねを導入したシステムを時間領域で解く際には、因果律の問題に注意しなければならない。以下では簡単のため1自由度系を例にして説明する。バネ-マス-ダッシュポッドからなる1自由度系の運動方程式は

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + r(t) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (2)$$

となる。ここで m は質量、 c は減衰定数、 r は復元力 \ddot{u}_g は入力加速度を表す。周波数領域になおすと、

$$-\omega^2 mx(\omega) + j\omega cx(\omega) + r(\omega) = \omega^2 mu_g(\omega) \quad (3)$$

c と r が周波数に依存する場合、 ω の関数となるが、これを次式のように定数項と ω に依存した項に分解して表すことができる。

$$c = c_0 + c_\omega(\omega), \quad r(\omega) = \{1 + R_\omega(\omega)\}r_0(\omega) \quad (4)$$

これを式(3)に代入すると次式を得る。

$$-\omega^2 mx(\omega) + j\omega c_0 x(\omega) + r_0(\omega) = \omega^2 mu_g(\omega) - \left\{ R_\omega(\omega) + j\omega c_\omega(\omega) \frac{x(\omega)}{r_0(\omega)} \right\} r_0(\omega) \quad (5)$$

ここで $k^*(\omega) = R_\omega(\omega) + j\omega c_\omega(\omega) \frac{x(\omega)}{r_0(\omega)}$ とおき、式(5)を時間領域に戻すと式(2)の右辺にコンボリューション項が付加された形となる。

$$m\ddot{x}(t) + c_0\dot{x}(t) + r_0(t) = -m\ddot{u}_g(t) - \int_{-\infty}^{\infty} k^*(t-\tau)r_0(\tau)d\tau \quad (6)$$

ただし、 $k^*(t)$ は $k^*(\omega)$ を逆フーリエ変換したものである。しかし、式(6)のままでは右辺のコンボリューション項が因果性を満たしている保証はない。これは現在の状態を決めるために未来の情報を用いなければならないことを意味し、実現象と合致しない。因果律を満たす $k^*(t)$ とは、 t が負の時に0となる場合であり、 $r_0(t)$ も t が負の時に0になることを考慮すると、コンボリューション項の積分区間は $0 \sim t$ に書き換えられる。

$$m\ddot{x}(t) + c_0\dot{x}(t) + r_0(t) = -m\ddot{u}_g(t) - \int_0^t k^*(t-\tau)r_0(\tau)d\tau \quad (7)$$

さらに $k^*(\omega)$ の実部と虚部は、互いにヒルベルト変換の関係になる。

b) 土岐らの方法

土岐ら⁸⁾は $k^*(\omega)$ を次式のように近似し、 $k^*(t)$ を得る方法を提案している。

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}[k^*(\omega)] &= R_\omega(\omega) \\ &\cong \begin{cases} -\alpha\omega^2, & (|\omega| < \omega_0) \\ 0, & (|\omega| > \omega_0) \end{cases} \quad \text{ただし } \alpha > 0 \end{aligned} \quad (8)$$

$k^*(t)$ が因果律を満たすためには、 $\operatorname{Re}[k^*(\omega)]/\omega^2$ と $\operatorname{Im}[k^*(\omega)]/\omega^2$ がヒルベルト変換対でなければならない。そのため $k^*(\omega)$ の虚部は

$$\begin{aligned} \frac{\operatorname{Im}[k^*(\omega)]}{\omega^2} &= \frac{c_\omega(\omega)}{\omega} \cdot \frac{x(\omega)}{r_0(\omega)} \\ &= -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\omega - y} \cdot \frac{\operatorname{Re}[k^*(\omega)]}{\omega^2} dy \cong \frac{2\alpha}{\pi} \log \left| \frac{\omega + \omega_0}{\omega - \omega_0} \right| \quad (9) \\ c_\omega(\omega) &= \frac{2\alpha\omega}{\pi} \log \left| \frac{\omega + \omega_0}{\omega - \omega_0} \right| \frac{r_0(\omega)}{x(\omega)} \end{aligned}$$

となり、逆フーリエ変換すると

$$k^*(t) = F^{-1}[k^*(\omega)] = -\frac{2\alpha \sin \omega_0 t}{\pi t} \quad (10)$$

となる。式(8)、式(9)を式(5)に代入すると

$$\begin{aligned} -\omega^2 m x(\omega) + j\omega c_0 x(\omega) + r_0(\omega) \\ = \omega^2 m u_g(\omega) + \alpha\omega^2 r_0(\omega) \left\{ 1 + j \frac{2}{\pi} \log \left| \frac{\omega + \omega_0}{\omega - \omega_0} \right| \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

となるので、式(11)を時間領域になおすと

$$\begin{aligned} m\ddot{x}(t) + c_0\dot{x}(t) + r_0(t) \\ = -m\ddot{u}_g(t) - \int_0^t \frac{2\alpha \sin \omega_0(t - \tau)}{\pi(t - \tau)} \ddot{r}_0(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (12)$$

が導かれ、時間領域の定式化でも式(8)、式(9)のような周波数依存性を考慮できることを表している。この場合の複素剛性は式(8)、式(9)、式(11)から

$$\begin{aligned} \{1 + R_\omega(\omega)\} \frac{r_0(\omega)}{x(\omega)} + j\omega\{c_0 + c_\omega(\omega)\} \\ = \begin{cases} 1 - \alpha\omega^2, & (|\omega| < \omega_0) \\ 1, & (|\omega| > \omega_0) \end{cases} \frac{r_0(\omega)}{x(\omega)} \\ + j\omega \left\{ c_0 - \frac{2\alpha\omega}{\pi} \log \left| \frac{\omega + \omega_0}{\omega - \omega_0} \right| \frac{r_0(\omega)}{x(\omega)} \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

となり、パラメータは α と ω_0 の二つだけであることが分かる。ばね剛性にあたる実部は周波数が上がると共に低下し、減衰にあたる虚部は ω_0 以下で周波数に対して指数関数的に増加しており、 ω_0 で無限大となる。高周波数の減衰が大きくなる特徴は、地盤の逸散減衰効果と同様であるため、この複素剛性は地

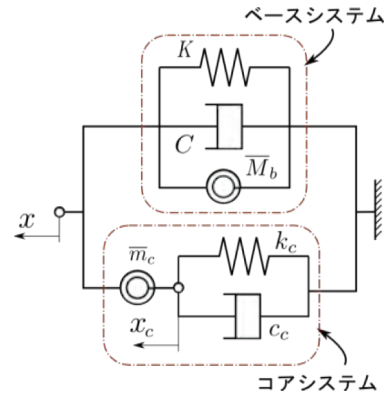


図-1 コアシステム

盤の付加質量効果、逸散減衰効果を表す上で妥当なモデル化であるといえる。ばね剛性の近似が同じであったとしても、境界値 ω_0 をどこに設定するかによって減衰の増加量が大きく変わるのが、このモデルの特徴である。

c) 齊藤の方法

土岐らの方法は、新たにコンポリューション項が付け加えられるため、既存の実験システムに組み込むには工夫を要する。Saitoh⁹⁾はバネ-ダッシュポッド-マス系の地震応答解析アルゴリズムを利用して、周波数依存性を表現する方法を提案している。この方法の特徴は節点間の相対加速度に比例した力を発生させる反力生成要素(gyromass)を使用している点である。図-1の上段のように一般的なバネ-ダッシュポッドモデルに反力生成要素を付け足し(これをベースシステムと称する)、さらにバネ、ダッシュポッド、反力生成要素の3要素からなるコアシステム(図-1下段)を並列につけ加える。ベースシステムのみモデルの場合、複素剛性は

$$K - \omega^2 \bar{M}_b + j\omega C \quad (14)$$

となる。式(14)からベースシステムは付加質量効果と同値であることが分かる。また、コアシステムの複素剛性は

$$\frac{\bar{m}_c \omega^2 \left(\frac{\bar{m}_c \omega^2}{k_c} - \frac{c_c^2 \omega^2}{k_c^2} - 1 \right)}{\left(1 - \frac{\bar{m}_c \omega^2}{k_c} \right)^2 + \frac{c_c^2 \omega^2}{k_c^2}} + j\omega \frac{\bar{m}_c \omega^2 \frac{\bar{m}_c c_c \omega^2}{k_c}}{\left(1 - \frac{\bar{m}_c \omega^2}{k_c} \right)^2 + \frac{c_c^2 \omega^2}{k_c^2}} \quad (15)$$

となる。さらにベースシステムとコアシステムを並列に接続すると(図-1)、式(14)と式(15)からその応答特性は

$$\begin{aligned} K - \omega^2 \bar{M}_b \frac{\bar{m}_c \omega^2 \left(\frac{\bar{m}_c \omega^2}{k_c} - \frac{c_c^2 \omega^2}{k_c^2} - 1 \right)}{\left(1 - \frac{\bar{m}_c \omega^2}{k_c} \right)^2 + \frac{c_c^2 \omega^2}{k_c^2}} \\ + j\omega \left\{ C + \frac{\bar{m}_c \omega^2 \frac{\bar{m}_c c_c \omega^2}{k_c}}{\left(1 - \frac{\bar{m}_c \omega^2}{k_c} \right)^2 + \frac{c_c^2 \omega^2}{k_c^2}} \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

と表される。これを複素剛性として対象とするシステムに導入すると周波数依存型ばねが実現できる。この複素剛性は \bar{M}_b , \bar{m}_c , k_c , c_c がパラメータであるため、このパラメータの決め方によって任意の複素剛性を設定できる。

一方、図-1の運動方程式は

$$\begin{bmatrix} M + \bar{M}_b & -\bar{m}_c \\ -\bar{m}_c & \bar{m}_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{x}_c \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & c_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_c \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & k_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ x_c \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} M \\ 0 \end{Bmatrix} \ddot{u}_g \quad (17)$$

で表されるため、この方程式を Newmark の法などの数値積分法を用いて解けばよい。反力生成要素を用いる利点は、従来の方法から、 $[M]$, $[K]$, $[C]$ マトリクスの値を変えるだけで、周波数依存の解析を行えることである。

ただし注意しなければならないのは、この方法は因果律の問題を全く考えていない点である。そのため実際に使用するには、因果律を満たす複素剛性を別の方法で求め、その複素剛性に合うようにパラメータを決めなければならない。

5. 動的相互作用へのハイブリッド地震応答実験の適用性

(1) 慣性力相互作用問題への適用

a) 周波数依存型地盤ばね

動的相互作用を考慮するためには、地盤と構造物の間の地盤ばねが周波数依存特性を持つことが必要である。動的アクチュエータを用いたハイブリッド実験を実施することができれば、通常のハイブリッド実験のアルゴリズムを用いても自動的に周波数依存問題を解決できる。一方、静的加力によるハイブリッド実験（擬動的実験）の場合、実験部分では周波数依存性が反映されないため、解析で取り扱う地盤ばねを周波数依存型にしなければならない。よって通常のハイブリッド実験のアルゴリズムでは表現できず、周波数依存型ばねを時間領域で扱うための工夫が必要となる。

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-地盤系をスウェー-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。

筆者らは地盤の応力状態を再現できる遠心場においてハイブリッド地震応答実験を行う手法(以下、遠心場ハイブリッド実験)を提案した⁵⁾。遠心模型実験のなかにハイブリッド実験を組み込み、構造物を数値モデル化することにより、地盤を含んだ小型模型実験で複雑な構造物と地盤の非線形性を考慮することが可能となる。

提案手法では周波数依存型地盤ばねの影響よりも地盤非線形の影響が大きいと考えたため、周波数に依存しない地盤ばねを用いた検討を行い、遠心場振動台実験と比較した。結果、遠心場ハイブリッド実験は遠心場振動台実験を良い精度で再現した。しかし動的相互作用現象において地盤ばねの周波数依存特性は、その影響の大小に関わらず無視することのできない効果である。

(2) キネマティック相互作用問題への適用

a) 基礎入力動

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。この場合動的実験となるため、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¹⁰⁾は検討例はあるものの、大規模なシステムが必要となる。

b) 地盤変形による相互作用

一般に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ことは困難であると考えられるが、鉄道総合研究所で開発されたようなせん断土槽の外部より複数アクチュエータで加力する方法¹¹⁾を応用することにより、ハイブリッド実験でも取り扱うことができる可能性がある。

6. 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-2(a)に示すような問題を考える。ここで、地盤は非線形化することを想定し、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。土槽は内寸450mm×150mm×300mm(長さ×奥行き×高さ)の剛土槽を使用した。また地盤材料には硅砂7号の乾燥砂を用い、空中落下法によりフーチングが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5mm、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。

(3) 遠心場振動台実験

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。遠心場振動台実験で使用した模型（図-3）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枚で連結されており、この接続はすべて剛結である。このため基礎のロッキングは抑制され、スウェイが卓越するモデルとなる。板バネには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-4に示す。

(4) 周波数依存型地盤ばねを用いた遠心場ハイブリッド実験

本実験では上部構造物とフーチングの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。このモデルの概略を図-2(b)に示す。上部構造物の慣性力 F_s を、フーチングの慣性力を F_f とすると、この合計 $F_s + F_f$ が復元力 R_f と釣り合い関係にある。この復元力 R_f には、杭頭せん断力や土圧、摩擦力など、慣性力を除いたフーチングに作用する力すべてが含まれている。

通常のハイブリッド実験の運動方程式は

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_f \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s & -C_s \\ -C_s & C_s + C_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{x}_f \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} R_s \\ R_f \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} M_s \\ M_f \end{Bmatrix} \ddot{u}_g \quad (18)$$

となる。遠心場ハイブリッド実験では、復元力 $R_f(t)$ を実験から求め、それを式(18)に代入し、次ステップの変位 $\{x(t+1)\}$ を算出する。模型スケールに換算した変位 $x_f(t+1)$ を実験模型に与え、その時の復元力 $R_f(t+1)$ を計測する。この繰り返しで地震応答解析をおこなうと、復元力 R_f に実験で発現する非線形性を考慮することができる。本実験では、実物スケールの値を用いて計算をおこない、実験模型とのデータの受け渡し時に相似則を考慮する。

ここで地盤ばねが周波数依存型である場合、齊藤の方法を用いると地盤ばねの数値モデルは図-2(b)の吹出し部のようにになる。さらに運動方程式は式(17)を用いて以下のように書き直される。

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 & 0 \\ 0 & M_f + \bar{M}_b & -\bar{m}_c \\ 0 & -\bar{m}_c & \bar{m}_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_f \\ \ddot{x}_c \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s & -C_s & 0 \\ -C_s & C_s + C_f & 0 \\ 0 & 0 & c_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{x}_f \\ \dot{x}_c \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} R_s \\ R_f \\ k_c x_c \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} M_s \\ M_f \\ 0 \end{Bmatrix} \ddot{u}_g \quad (19)$$

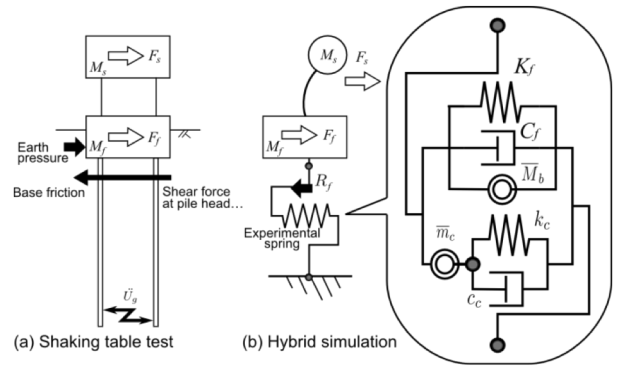


図-2 解析モデル

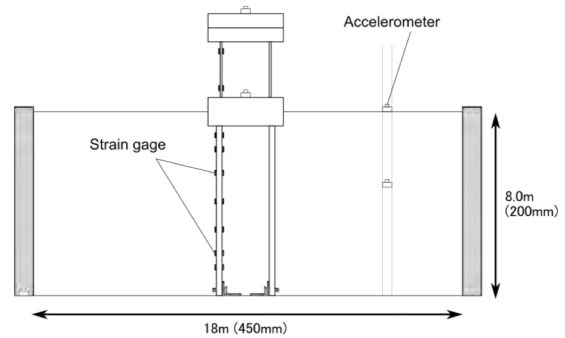


図-3 遠心場振動台実験

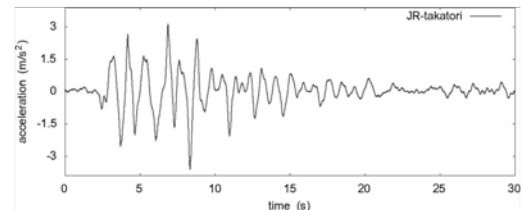


図-4 入力地震動

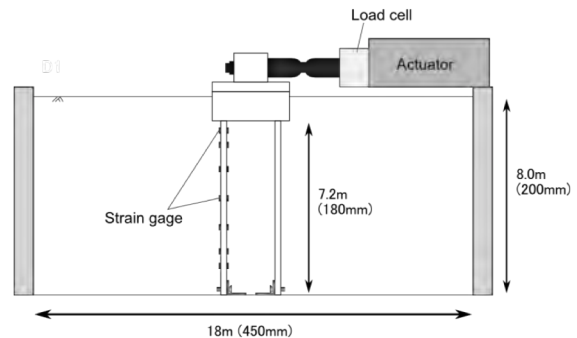


図-5 遠心場ハイブリッド実験

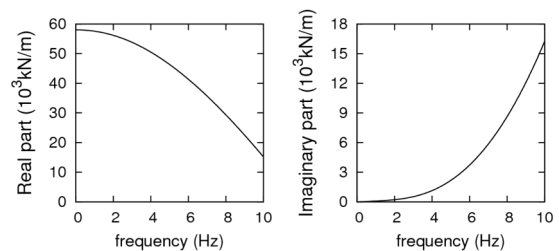


図-6 周波数依存型ばね特性

式(19)が周波数依存型地盤ばねを用いた遠心場ハイブリッド実験(以下、周波数依存型遠心場ハイブリッド実験)の基本式となる。これらの計算は、反力生成要素を実装した地震応答解析ソフトウェア OpenSees¹²⁾および OpenFresco¹³⁾を用いて行った。OpenFresco とは、ハイブリッドシミュレーションのためのオブジェクト指向型ソフトウェアフレームワークである。

ハイブリッド実験の模式図を図-5 に示す。モーターの動力はリードスクリューを介して载荷ブロックに伝えられ、载荷ブロックと構造物模型をヒンジをはさんで剛結合させることで、水平力のみを载荷する。ロードセルを载荷ブロックとヒンジの間にとりつけ、反力を計測する。モーターはパルス信号で制御するステップモーターを使用し、基礎部の変位はレーザー変位計を用いて計測する。変位データ、荷重データは無線 LAN をしてモバイルノートパソコンに記録され、モーターもこのコンピュータから制御する。

(5) 実験ケース

本研究の遠心場ハイブリッド実験は遠心場振動台実験を模擬する目的で行ったため、上部構造物は線形を仮定した。この剛性は、遠心場振動台実験で模型構造物のみを自由振動させて得られた結果を基に設定した。入力地震動は、遠心場振動台実験時に得られた振動台の加速度と地表面の加速度を用いている(図-4)。

遠心場ハイブリッド実験では、上部構造物は $P-\delta$ 関係を比較的単純な履歴モデルで仮定し、履歴モデルの剛性は振動台実験の結果と同程度のものを仮定した。実験のパラメータを表-1 に、周波数依存型遠心場ハイブリッド実験の複素剛性を図-6 に示す。

7. 実験結果及び考察

(1) 周波数依存型ハイブリッド実験のための数値積分法

ハイブリッド実験では、アンダーシュート誤差に代表される変位誤差は系の最高次のモードを励起する傾向があり、応答値に高周波ノイズがのりやすい。そこで解の安定性確保と実験誤差累積の制御を同時に確保できる α -OS 法が広く利用されている。

一方、周波数依存型地盤ばねの特徴は、高次になるほど剛性が小さくなることに加えて減衰が大きくなることであるため、減衰に関して α -OS 法の特徴と同じである。すなわち本問題に対して α -OS 法を適用すると得られた結果における減衰の効果が周波数依存型地盤ばねによるものか、数値減衰によるものかを評価することが出来ないため、動的相互問題に対して α -OS 法を採用することは適当ではない。

そのため本研究では、陽的 Newmark 法を適用する。陽的 Newmark 法は数値減衰がないという利点

表-1 実験パラメータ (実スケール)

(a) 遠心場振動台実験

上部構造物	質量	M_s	27.2	t
	剛性	K_s	5.2×10^3	kN/m
基礎部	質量	M_f	49.0	t

(b) 遠心場ハイブリッド実験

上部構造物	質量	M_s	27.2	t
	剛性	K_s	5.2×10^3	kN/m
	減衰	C_s	0	kNs ² /m
基礎部	質量	M_f	49.0	t
	ベースシステム	K_f	5.8×10^7	kN/m
		C_f	13.4	kNs ² /m
		\bar{M}_b	3.2×10^{-4}	t
	コアシステム	m_c	10.9	t
		k_c	4.8×10^4	kN/m
c_c		2.0×10^3	kNs ² /m	

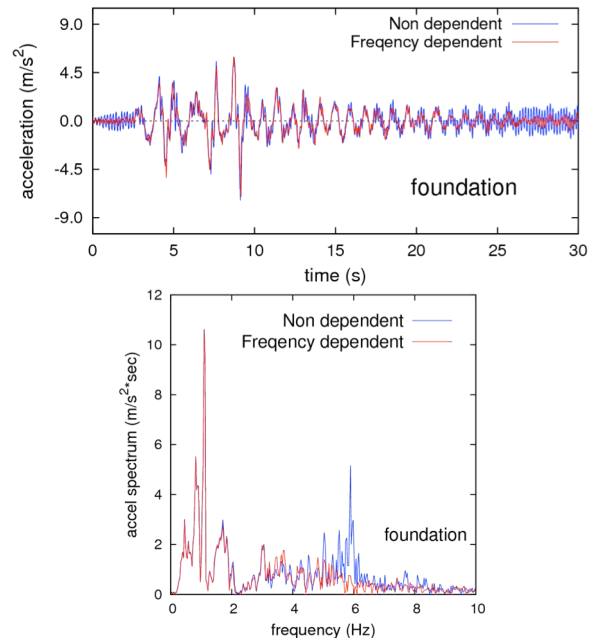


図-7 周波数依存型ばねの効果

を持つが、条件付き安定という欠点があり、対象とする構造物の固有周期に対して十分小さな積分刻みをとらないと、解が発散してしまう。積分刻みを小さくしすぎると、実験において1ステップあたりに制御すべき変位量が大変小さくなるため、構造物の自由度が多い事象には適さない。本研究では比較的自由度が少ないため適用に問題はない。

(2) 周波数依存型ばねの効果

図-7 は非周波数依存型遠心場ハイブリッド実験(青線)と周波数依存型遠心場ハイブリッド実験(赤線)の比較である。これより周波数依存型ばねを用いた実験では、6Hz より高い周波数成分が減衰し

ていることが分かり、周波数依存型ばねが正しく機能していることが分かる。

また、高周波成分の減衰以外に大きな違いは見られず、付加質量効果の影響は確認できない。この理由として、付加質量の設定を過少評価しすぎた可能性も否定できないが、やはり地盤の非線形性の影響が大きいためと考えられる。

図-7 において、周波数依存型ばねの効果が確認出来るのは、制御誤差によるノイズがのりやすい変位が小さい部分のみであり、大きな変位部分には違いが見られない。結果的に、対象とする現象には周波数依存はあまり影響しなかったと考えられる。

(3) 遠心場振動台実験との比較

図-8 に両実験の変位時刻歴を示す。位相、振幅共によく一致しており、この実験では残留変位の方角まで再現できている。図-9 に基礎部の履歴曲線を示す。初期剛性、等価剛性、形状とよく一致している。図-10 は 7.264~7.648 秒の杭の曲げモーメント分布図の比較である。変曲点の位置、モーメント最大値には大きな違いが見られない。以上より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。

ただし、図-8、図-9から周波数依存型遠心場ハイブリッド実験が基礎部の最大応答値を過小評価していることが分かる。遠心場ハイブリッド実験では地盤に载荷していないため、大きな地盤変形は起こらない。図-11はハイブリッド実験終了後の写真であるが、構造物模型脇の地盤がくぼんで変形している。これは、静的実験のため地盤に慣性力が作用せず、地盤変形範囲が限定されているためと予想される。一方、遠心場振動台実験では土槽全体で地盤変形が生じるため、その差が最大変位の違いに表れているものと考えられる。

8. まとめ

本研究では、杭模型による周波数依存型地盤ばねを用いた遠心場ハイブリッド実験の有用性を検証した、以下の結論を得た。

- ・時間領域での周波数依存性を考慮した解析手法について統一的な記述ができることを確認した。
- ・反力生成要素を用いて周波数依存性を表現する動的な地盤ばねを、地震応答解析ソフトウェア OpenSees に実装した。
- ・遠心場ハイブリッド実験の精度を向上させ、遠心場振動台実験との比較から良い精度で一致することが確認できた。
- ・周波数依存型地盤ばねをハイブリッド実験で用いることで、忠実な減衰特性の再現を可能にし、高周波成分の減衰による実験誤差制御効果を確認した。

また今後取り組むべき課題を以下に挙げる。

- ・周波数依存型地盤ばね特性を、薄層法などの解析や動的実験に基づき設定する必要がある。

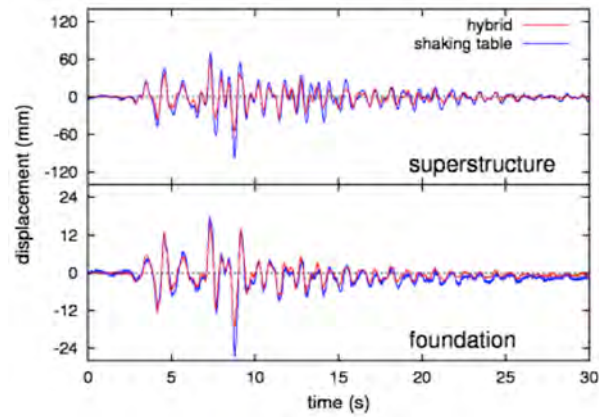


図-8 変位時刻歴

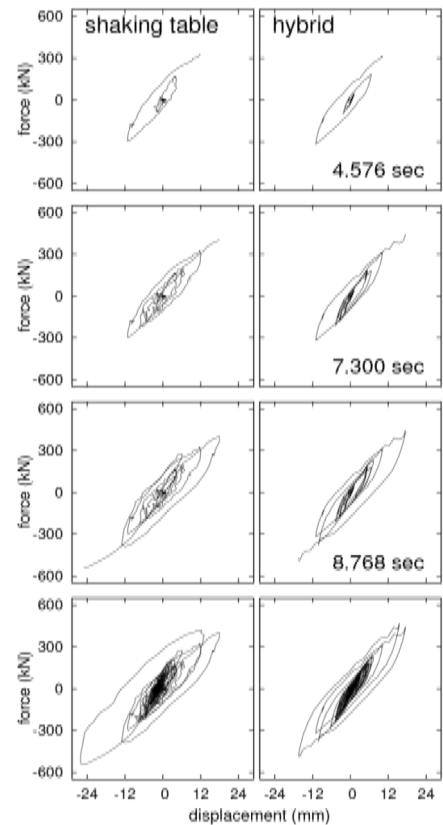


図-9 履歴曲線

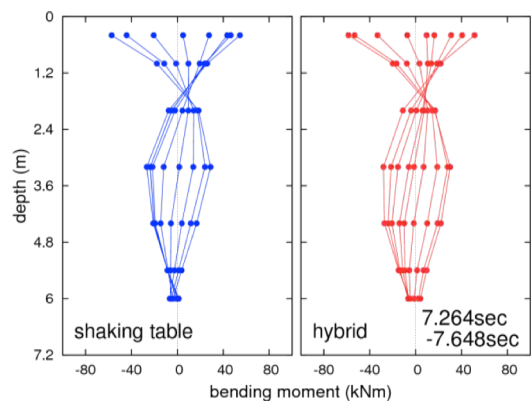


図-10 モーメント分布

・最大応答変位の違いやせん断土槽を用いた実験からキネマティック相互作用の影響は無視できないが、地盤変形の大きい現象に対してはハイブリッド実験は適用が難しい。キネマティック相互作用を考慮できるように、構造物模型だけでなく地盤模型にも直接載荷できるようなシステムが望まれる。

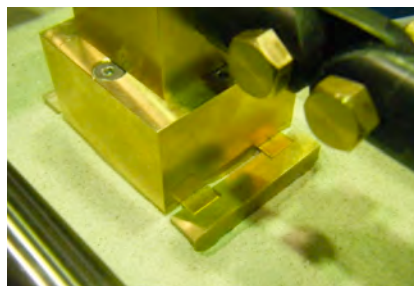


図-11 遠心場ハイブリッド実験後の地盤状態

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。遠心力載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) Penzien J., C.F.Scheffey, R.A.Parmelee : Seismic Analysis of Bridges on Long Piles, Jour. of the Eng. Mechanics Division, ASCE, vol.90, NoEM3, pp223-254, 1964.
- 2) 河村壮一: 埋立地盤に建つ杭支持構造物の地震動観測と解析(その 7)Penzien 型モデルと集約型モデル, 日本建築学会大会学術講演概要集, 415-416, 1975 年 10 月.
- 3) 時松孝次, 鈴木比呂子, 鈴木康嗣, 藤井俊二: 地盤一杭一構造物系動的相互作用が杭応力に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 587 号, 125-132, 2005 年 1 月.
- 4) 田村修次: 遠心載荷実験における基礎の根入れ効果が杭頭水平力に及ぼす影響と液状化層厚, 日本建築学会構造系論文集, 第 73 巻第 625 号, 409-415, 2008 年 3 月.
- 5) 高橋良和, 小寺雅子: : 動的相互作用問題への遠心力場ハイブリッド実験手法の適用性, 土木学会構造工学論文集, No.56A, 334-341, 2010 年 3 月.
- 6) 日本建築学会: 建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計, 2006.
- 7) 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.
- 8) 土岐憲三, 佐藤忠信, 清野純史, Nozar KISHI GARMROUDI, 吉川正昭: 地盤一構造物系の非線形動的相互作用に関するハイブリッド実験法の開発, 京都大学防災研究所年報, 第 31 号 B-2, 1988 年 4 月.
- 9) Masato Saitoh : Simple Model of Frequency-Dependent Impedance Functions in Soil-Structure Interaction using Frequency-Independent Elements , Jour. of the Eng. Mechanics Division, ASCE, vol.133, pp1101-1114, October 2007.
- 10) 神田政幸, 西岡英俊, 山畑栄, 高橋一人, 甲斐輝雅: 鉛直力水平力モーメントおよび鉛直変位水平変位回転角による載荷制御可能な基礎構造物の載荷試験装置の開発, 第 40 回地盤工学研究発表講演集, 1461-1462, 2005 年 6 月.
- 11) Hiroshi Kobayashi , Keiichi Tamura , Shunsuke Tanimoto: Hybrid vibration experiments with a bridge foundation system model, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol.22, pp1135-1141, 2002
- 12) OpenSees web site. (2011) : <http://opensees.berkeley.edu>
<https://nees.org/resources/openseesbuild>
- 13) OpenFresco web site. (2011):
<https://nees.org/resources/openfresco>

PSEUDO-DYNAMIC TESTS IN CENTRIFUGAL FIELD FOR STRUCTURE-FOUNDATION-SYSTEM WITH DYNAMIC SOIL SPRING

Masako KODERA, Yoshikazu TAKAHASHI

The pseudo-dynamic test method in centrifugal field is proposed for the soil-foundation-structure interaction problem. To take into account additional mass effect and radiation damping, dynamic soil spring which represents frequency dependency is used. And shaking table test is conducted to verify the pseudo-dynamic test in centrifugal field. The results of pseudo-dynamic test are good agreement with that of the shaking table test. High frequency is reduced because of the effect of dynamic spring. Therefore the pseudo-dynamic test is a powerful tool for considering soil-foundation-structure interaction. However the max displacement is underestimated in pseudo-dynamic test. This is because large soil deformation doesn't occur in the pseudo-dynamic test. To improve the accuracy of the pseudo-dynamic test, Kinematic interaction can't be considered.