

多孔質地盤と構造物の相互作用ばねの時間領域における簡便な評価手法

羅 休¹・小長井一男²・西村昭彦¹

¹正会員 工博 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 (〒185 東京都国分寺市光町 2-8-38)

²正会員 工博 東京大学教授 生産技術研究所第1部 (〒106 東京都港区六本木 7-22-1)

¹正会員 工博 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 (〒185 東京都国分寺市光町 2-8-38)

多孔質地盤と構造物の動的相互作用を適切に表現するために、地盤の間隙水が地盤のばねに与える影響を従来の Winkler Soil Model に飽和度、透水係数と間隙率に依存する等価なポアソン比を導入することによって表現する手法を提案した。地下水以下の地盤非排水状態を想定して、Winkler Soil Model の妥当性を可視化模型実験で検討した。また、計算に用いられる等価なポアソン比は簡便化モデルによる多孔質地盤剛性の近似値と厳密解からの結果を一致させることによって決められる。さらに、この時間領域の解析手法を用いて基礎構造物の動的応答に対する地盤の透水性による影響を調べた。

Key Words : porous soil-structure interaction, time-domain, equivalent Poisson's ratio, Biot's theory

1. まえがき

臨海地帯、扇状地等地下水位が高い場所に建設される構造物の動的解析を行う場合、地盤モデルに間隙水の影響を含めることは合理的である。Biot は、飽和地盤を間隙水で満たされた多孔質弾性体としてとらえ、波動伝播問題の解析の基礎となる理論を確立した。近年、この Biot の理論に基く様々な研究により多孔質地盤の動的な剛性が間隙水圧と密接に関連していることが明らかとなった(例えば、Senjuntichai et al¹⁾)。しかし、これらの研究成果に示された理論解は複雑であるため、耐震設計において取り入れることが困難であるように思われる。また、これらの周波数領域の解析手法は地盤の非線型性を取扱いにくい問題点も残されている。本研究では、小長井ら²⁾ が示した一様弾性体地盤の相互作用ばねのモデルを多孔質地盤に適用し、地盤の間隙水が地盤と構造物の動的相互作用に与える影響を、周波数に非依存のパラメーターから成る簡単なモデルで表現する手法を提案した。さらに、このモデルを用いて多孔質地盤にある基礎構造物の動的解析を時間領域で行った。

2. Winkler Soil Model の妥当性検証

杭と長い中空ケーソンのようなたわみ易い地中構造物の時刻歴応答解析を応答変位法に則して行う場合、地盤の相互作用ばねの評価が必要である。本来連続している地盤の剛性は他節点の挙動の影響を受け、周波数にも

依存する。このため、応答解析が複雑なものとなる。小長井らは一様弾性体地盤にある構造から逸散する波頭が簡単な幾何学形状を示す場合には地盤の剛性を当該節点のみの応答で評価でき、その応答が周波数に依存しないばね、ダッシュポットと付加質量からなる Winkler Soil Model の応答で、精度良く近似できることを示して、簡便な時間領域の応答解析手法を確立した。この手法では分割された地盤の水平層が平面ひずみ状態と仮定されて、構造物の鉛直、水平と回転運動による地盤の反応を相互作用ばね Z_z^p 、 Z_x^p と Z_θ^p で表現する(図-1)。これらのばね中のパラメーター k_j 、 c_j 、 m_s 、 k_{aj} と c_{aj} は地盤のせん断係数、密度と構造物の径の関数となっている。さらに、構造物の水平運動に対するばね Z_x^p 中のパラメーター k_j 、 c_j と m_s は地盤のポアソン比に依存する。

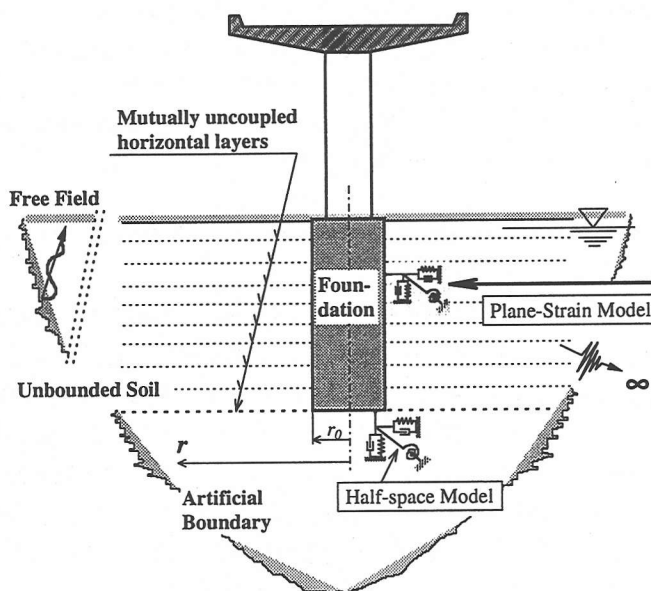
Winkler Soil Model の妥当性を検証するために、可視化模型実験を行った。実験では、地下水以下の地盤が非排水状態で圧縮性に乏しい弾性体とみなされる状態を想定して、ポアソン比がほぼ 0.5 の透明なポリアクリルアミドゲルで作成された地盤模型とポリカーボネート製の杭模型をアクリル製型枠に打設して、杭頭にインパルスを入力することによって杭から放射された波動の空間的分布をモアレ法で観測した(図-2)。地盤模型の水平表面と鉛直断面でのフリンジの写真を写真-1 の上段と下段に示す。圧縮性に乏しいゲルを伝播する縦波速度は本来著しく大きいものであるが、地表面に現れた打撃方向の波頭はせん断波頭の 2 倍強の位置にしか達していないことから表面付近の地盤は地表面の応力開放影響を受

けて、平面ひずみ状態と仮定することは適切ではないと考えられる。そこで、この応力開放の影響を Winkler Soil Model に適切に反映する方法を、地盤平面波動の数値シミュレーションで地表部の等価なポアソン比の深さ方向分布の逆解析を行って検討した。その結果、実験で観測されたフリッジと、解析値を一致させることで、地表部各層の等価なポアソン比を決定した。地表面のポアソン比は 0.33 と算定されているが、これは平面応力状態と仮定した時の値である。これらを Winkler Soil Model に代入して、算定された杭の応答変位は観測値との符合が良い。またこの成果を電力地中線立坑の地震応答解析に適用し、実地震応答を検討した³⁾。

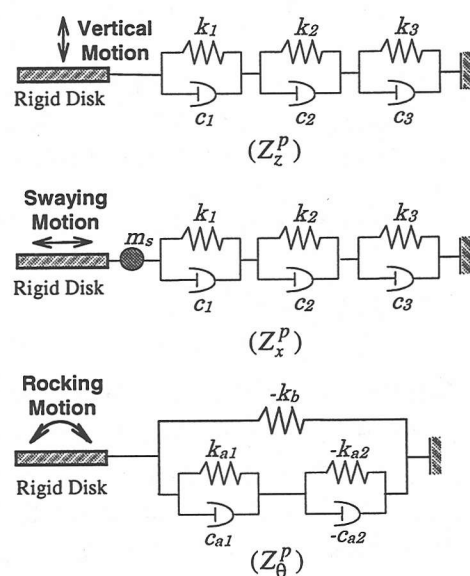
3. 多孔質地盤と構造物の相互作用の簡便化表現

(1) 多孔質地盤と構造物の相互作用ばね

砂層が含まれる扇状地のような透水性の高い多孔質地盤中に埋設された基礎構造物の動的解析を行う時、地盤を二相系材料と仮定して固体相と液体相間の相対運動を考慮することが合理的である。前述の従来の Winkler Soil Model を多孔質地盤に拡張するために、Biot の理論に基く、図-3に示される多孔質薄層内の剛体円盤の各振動モードに対するインピーダンスの厳密解を誘導した(式(1)~式(3))⁴⁾。



(a) Treatment of soil at the side and bottom of a foundation



(b) Simple models for the side soil

図-1 Winkler Soil Model を用いる地盤と構造物の動的相互作用解析手法の概念図

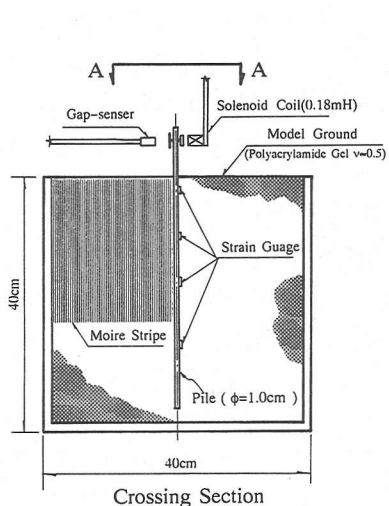


図-2 地盤と杭の模型

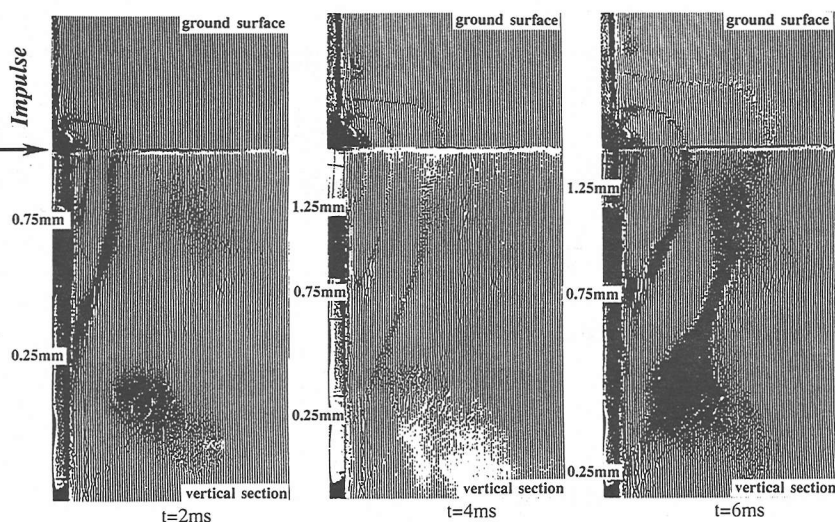


写真-1 杭基礎模型から逸散する波動によるフリッジ(打撃方向の水平変位)

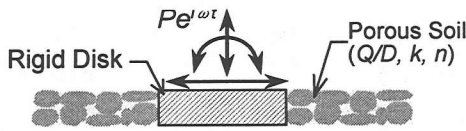


図-3 薄層内の剛体円盤の各振動モード

$$\text{鉛直運動} \quad K_v = \frac{P_z}{u_z} = 2\pi\mu(1+da)a_3^* \frac{K_1(a_3^*)}{K_0(a_3^*)} \quad (1)$$

$$\text{回転運動} \quad K_r = \pi\mu r^2(1+da)(1+a_3^* \frac{K_0(a_3^*)}{K_1(a_3^*)}) \quad (2)$$

$$\text{水平運動} \quad K_h = \pi\mu(a_3^*)^2 \frac{R_2}{R_3} \quad (3)$$

ここで、

$$a_j^* = i\beta_j r_0, (j=1,2,3), \beta_j = \frac{\omega}{v_p^*} \gamma_j, (j=1,2), \beta_3 = \frac{\omega}{v_s^*} \gamma_3,$$

$k_m = m$ 次の第2種変形ベッセル関数、 γ_j は支配運動方程式中の固体と液体相の運動を非連成する時に必要な固有値で、多孔質地盤の透水係数(k)、相対飽和度(Q/D)と間隙率(n)の関数となっている。水平運動のばね係数 k_h 中の変量 R_2 、 R_3 と R_1 が次のように表される。

$$R_2 = K_1(a_3^*)(4K_1(a_1^*) + a_1^* K_0(a_1^*) + 4R_1 K_1(a_2^*) + R_1 a_2^* K_0(a_2^*) + a_3^* K_0(a_3^*)(K_1(a_1^*) + R_1 K_1(a_2^*))) \quad (3-a)$$

$$R_3 = a_3^* K_0(a_3^*)(K_1(a_1^*) + R_1 K_1(a_2^*) + a_1^* K_0(a_1^*) + R_1 a_2^* K_0(a_2^*)) + K_1(a_3^*)(a_1^* K_0(a_1^*) + R_1 a_2^* K_0(a_2^*)) \quad (3-b)$$

$$R_1 = \begin{cases} \frac{(1+t_{21})\beta_1^2 K_1(i\beta_1 r_0)}{(1+t_{22})\beta_2^2 K_1(i\beta_2 r_0)} & \text{排水状態} \\ \frac{t_{21}\beta_1^2 K_1(i\beta_1 r_0)}{t_{22}\beta_2^2 K_1(i\beta_2 r_0)} A_2 & \text{非排水状態} \end{cases} \quad (3-c)$$

多孔質の波動理論によると P 波に対する固体相と液体相の間には、連成効果の強い剛性連成と弱い質量連成が同時に存在する。一方、S 波では連成効果の弱い質量連成しか存在しない。従って、式(3)-c 中の β_1 と β_2 は P 波の速度 v_p^* に依存していることから、水平運動の際に地盤ばねに対する間隙水圧による影響が大きいことが分かる。相対飽和度が高い時の水平複素数ばね値と地盤のせん断係数の比(k_h / μ)の透水係数に対する変化を図-4に示す。ここでは、無次元振動数(a_0)の増加に伴って、透水係数の高い砂から係数の低い粘土では地盤剛性の実部の差が大きくなる。特に、透水性の低い粘土地盤の剛性に対して、振動数が高くなるとばねモデル中の付加質量 m_s (図-5)の影響が強くなること分かった。

(2) Winkler Soil Model に間隙水の影響を取り込む方法

式(3)のように多孔質薄層内の剛体円盤の水平運動に対する地盤のインピーダンスの厳密解が複雑で、耐震設計に取り入れられることが困難であるため、簡便な表現

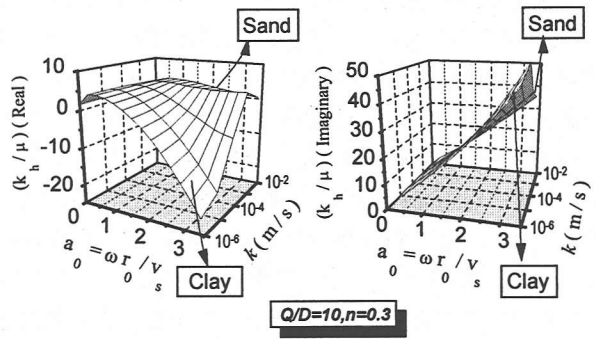


図-4 振動数と透水係数に対する水平ばねの変化(固体相の体積弾性係数 $D=2.0 \times 10^4 \text{tf/m}^2$ 、液体相の体積弾性係数 $Q=2.0 \times 10^5 \text{tf/m}^2$ 、固体相の密度 $\rho_s = 2.6 \text{t/m}^3$)

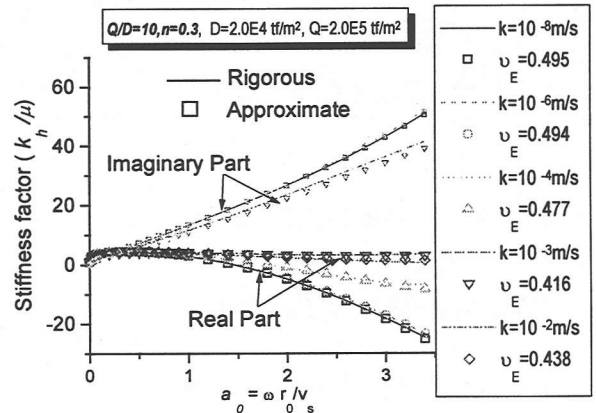
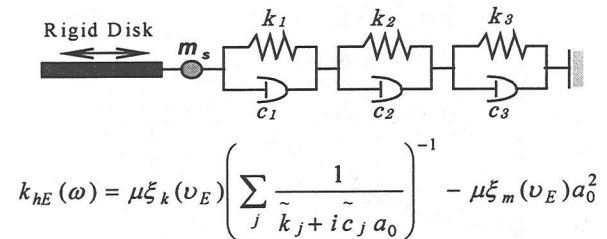


図-5 地盤水平剛性の簡単なモデルとフィッティング結果

手法を検討した。多孔質薄層内の剛体円盤が水平運動する際、同時に生じる P 波と S 波による間隙水圧が地盤剛性に与える影響を P 波と S 波速度の関係を表す地盤のポアソン比で近似に表現することができると考えられる。従って、図-5に示される Winkler Soil Model に飽和度、間隙率と透水係数の影響を反映した等価なポアソン比(v_E)を導入することによって、等価な多孔質地盤の剛性(k_{hE})が得られる。この等価なポアソン比(v_E)は簡便化モデルによる近似値と厳密解からの結果を一致させることによって決められる。図-5にはこのような逆解析結果の一例が示され、近似値と厳密値との符合が良いことから各透水係数に対する等価なポアソン比の値が決定された。等価なポアソン比は透水係数の減少に連れて大きくなること分かった。

多孔質地盤の性質を表すために、固体相においては5つ(土粒子の比重 G_s 、間隙率 n 、透水係数 k とラメの定数(λ, μ))液体相においては2つ(飽和度 s と絶対圧力度 p)のパラメーターが必要である。各種類土のこれらの上限値と下限値を与えて、それぞれに対して等価なポアソン比を算定して可能な変化範囲を求めた。例えば、図-6に示すように砂の等価なポアソン比(ν_E)は透水係数(k)、相対飽和度(Q/D)と間隙率(n)によって0.25から0.498まで変化していることが分かる。通常PS検層法で地下水面下で1500m/s程度の縦波速度が観測された地盤のポアソン比は、地盤を一樣弾性体とみなした時はほぼ0.5となるものの、透水性等の大小でその等価なポアソン比は著しく変化していることが示された。

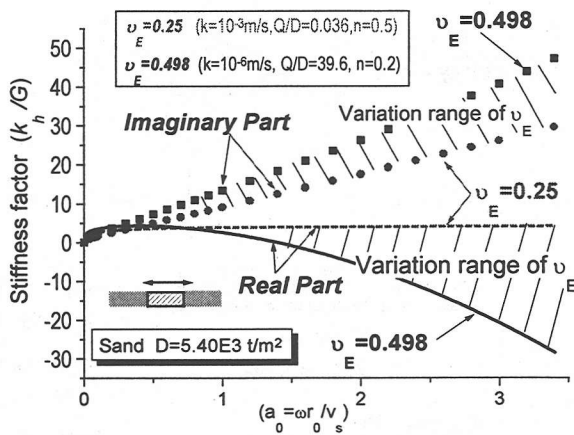


図-6 地下水面下砂層地盤の等価なポアソン比の変化範囲

4. 構造物の時間領域の動的解析

多孔質地盤にある基礎構造物を拡張された Winkler Soil Model に支えられた Timoshenko 梁と仮定して、伝達マトリックス法による時間領域の動的解析を行った。解析の対象はケーソンに支持された高架橋で、地盤は扇状地地形扇端部の典型的な神戸芦屋川近傍である。地表部には深さ 9m の埋立て層を仮定してその透水性を 2 ケースと想定している(図-7)。それぞれに対して構造物の応答変位を計算した。基盤に対するケーソン天端の相対変位は透水性大小によって大きい差が生じることが図-8に示されている。この差は構造物の代表的な径と波長との比が大きいほど大きくなる。

5. まとめ

多孔質地盤と構造物の動的相互作用を適切に表現するために、地盤の間隙水が地盤のばねに与える影響を周波数に非依存するパラメーターから成る簡単な Winkler Soil Model で表現する手法を提案した。このモデルの

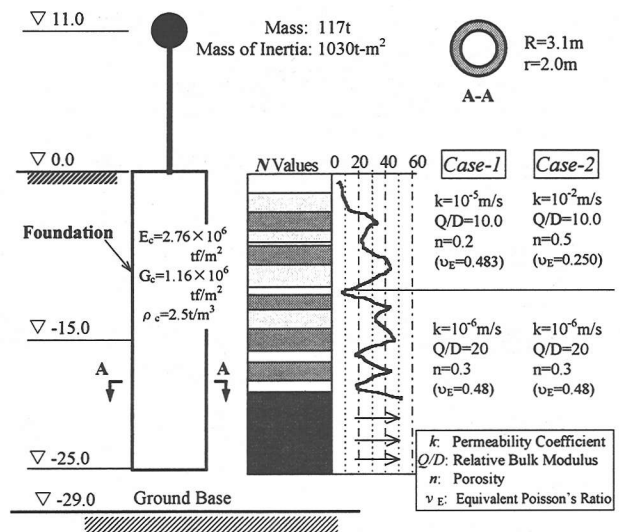


図-7 ケーソン基礎と扇状地地盤のプロファイル

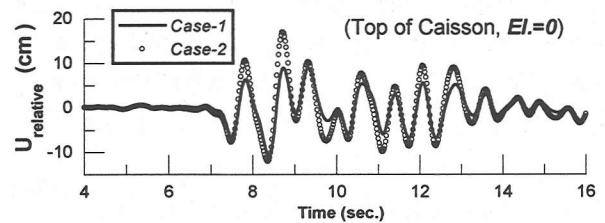


図-8 地盤の透水性差異によるケーソン天端応答の比較

妥当性が可視化模型実験と数値解析例を通して検証された。簡便化モデルに用いられているパラメーターを地盤の透水係数、飽和度と間隙率の影響を反映した等価なポアソン比の関数とすることによって、厳密な剛性との一致が良い近似解を得た。多孔質地盤に建設された構造物の動的解析結果から、地盤の透水性が基礎構造物の地震応答に与える影響は構造物の代表的な径と波長との比が大きいほど大きくなり、透水性が高い地盤の等価なポアソン比はPS検層法で得られた数値よりはるかに小さいことが分かった。

参考文献

- 1) Senjuntichai, T., Rajapakse, R., K., N., D. (1994). Dynamic Green's function of homogeneous poroelastic half-space, *J. Engng. Mech., ASCE*, 120(11), 2381-2404.
- 2) Konagai, K., Nogami, T. (1994). Subgrade model for transient response analysis of multiple embedded bodies, *Earthquake eng. struct. dyn.* 23, 1097-1114.
- 3) 羅休、小長井、佐山順二: 地中線立坑の時刻歴地震応答、第 22 回地震工学研究発表会、pp.634, 1993.
- 4) Luo, X., Konagai, K., Assadolla, N., Nogami, T. (1996). Simplified Time-Domain Expressions for Porous Soil-Structure Interaction, *Proceedings of 11th WCEE*, paper No.1157.