

# 弾性表層地盤中のケーソンからの波動逸散

Wave Dissipation form a structure Embedded in an Elastic Stratum

小長井 一 男\*・前 原 充 宏\*

Kazuo KONAGAI and Mitsuhiro MAEHARA

## 1. はじめに

基礎構造物と地盤の動的相互作用を検討する場合、構造物とこれに対し大きな広がりを持つ地盤を併せて解析する必要がある。弾性波動論を取り込んだ解析は、複雑な構造や境界を有する地盤・構造物系への適用は困難であるものの、無限の広がりを持つ地盤内への波動の逸散を合理的に評価できるものとして広く用いられてきた。このように波動伝播を数理的に扱う場合、解析を容易にするためのさまざまな単純化が行われている。地盤の上下動が水平動に比べ十分小さいとみなし、無視するという仮定もそのうちのひとつである。この仮定は、成層構造の地盤の応答を解析する場合に有効であるが、地盤と異なる動きをする構造物近傍の表面上では上下動は無視できない。基礎構造物の挙動は、特に応力が開放されている地表面付近の地盤の挙動に大きく影響されることが多く、上下動を0とするのではなく、応力を0とするのも単純化の一手法として検討される必要がある。ここでは、底面を剛体基盤上におきロッキング振動するケーソンを対象として、簡便化のためのこれらの仮定の妥当性と問題点を検討する。

## 2. 擬似三次元モデルによる井筒側方地盤の剛性評価

図1は、田村、鈴木<sup>1)</sup>が提案した擬似三次元地盤モデル中にケーソンを置いたものである。この地盤モデルは、剛体基盤上に載る軟弱表層地盤を縦方向に柱状に分割し、それぞれの要素をそのせん断一次振動を考慮して一質点系の振動子に置き換え、これらを有限要素網で連結するものである。表層地盤中に剛性が高い井筒基礎が置かれた状況では、周辺地盤には深さ方向に直線的に変化するモードで振動するような拘束が加えられる。よって、擬似三次元モデルにおける柱の振動モードを基盤に頂点を置く逆三角形とし、有限要素網周辺に波動逸散境界を置くことで井筒基礎、および周辺地盤の挙動を近似的に解

\*東京大学生産技術研究所 第1部

析できる。<sup>2),3)</sup>

一様な水平成層地盤を対象とすると、擬似三次元モデルの有限要素網も一様な平面になる。さらにこれを有限要素のような離散系でなく、Winkler型の連続床の上の一様な平面とすると、その支配方程式は次のとおりとなる。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = V_p^* \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + (V_p^* - V_s^2) \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + V_s^2 \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \omega_0^2 u - 2h\omega_0 \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = V_p^* \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + (V_p^* - V_s^2) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + V_s^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \omega_0^2 v - 2h\omega_0 \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2)$$

ここに、 $u, v$  = 水平面内  $x, y$  方向の変位、 $t$  = 時間、 $V_p^*$  = 縦波の速度、 $V_s^*$  = せん断波の速度、 $\omega_0$  = 土柱のせん断振動の基本固有円振動数  $= \sqrt{k/\rho}$ 、 $k$  = Winkler型の弾性床のばね定数、 $\rho$  = 平面の密度、 $h$  = 減衰定数  $= c/2\sqrt{k\rho}$ 、 $c$  = Winkler型の弾性床の粘性減衰係数  $V_p^*$ はこの平面を平面ひずみ状態とするか平面応力状態とするかで以下のように異なる。

$$V_p^* = \sqrt{\frac{\lambda^* + 2\mu}{\rho}} \quad (3)$$

$$\lambda^* = \lambda \quad (\text{平面ひずみ状態}) \quad (4)$$

$$\lambda^* = \frac{2\lambda\mu}{\lambda + 2\mu} \quad (\text{平面応力状態}) \quad (5)$$

$\lambda, \mu$  = 平面のLameの定数

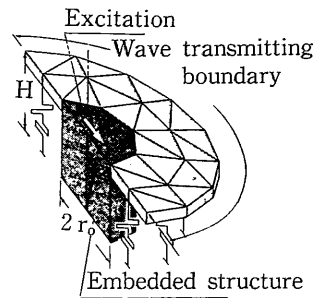


図1 表層地盤のモデル化

研究速報

式(1)(2)に支配される弾性床土上の無限平板上のケーソンに相当する位置にあけられた円孔の複素剛性 $S_H$ は、円筒座標系で解析的に求めることができ、円振動数 $\omega$ の関数として以下のように与えられる。

$$S_H = \pi \mu a_0^* T \quad (6)$$

ここで

$$T = \frac{4K_1(b_0^*)K_1(a_0^*) + a_0^*K_1(b_0^*)K_0(a_0^*) + b_0^*K_0(b_0^*)K_1(a_0^*)}{b_0^*K_0(b_0^*)K_1(a_0^*) + a_0^*K_1(b_0^*)K_0(a_0^*) + a_0^*b_0^*K_0(b_0^*)K_0(a_0^*)} \quad (7)$$

$$a_0^* = \frac{i\omega r_0}{\mu} \sqrt{\rho - k/\omega^2 + c/i\omega}, \quad b_0^* = a_0^* (V_s/V_p^*)$$

式(6)はケーソンの側方地盤の剛性の近似解となる。これを周波数の関数として田治見により求められた弾性波動論による厳密解とともに図2に示す。田治見による厳密解は、弾性床土上の平板を平面ひずみ状態とした解とよく一致している。これは、擬似三次元モデルの妥当性を

示すと同時に、田治見の解で上下動を小さいものとして無視したことが平面ひずみの仮定に対応していることを示している。しかし、地盤のポアソン比が0.5に近くなると、図3に示すように平面ひずみ、平面応力の仮定によって計算結果は大きな差違が生じる。平面ひずみ状態では地表面での上下動が拘束されることに対応するので、 $\omega = 0$ での静的な剛性はあがる。また複素剛性の実部が $\omega$ の増加とともに急減するがこれは、ケーソンとともに動く地盤の付加質量が大きくなったことを示している。平面ひずみ、平面応力いずれの仮定がより妥当な解を与えるか検討する第一段階として、今回は表面付近を $V_p^*$ の速度で伝播する波動に焦点を絞り、これを模型実験で観測する。

### 3. 模型実験とその検討

一様な厚さの表層地盤中の円筒ケーソンを対象として模型を作製する。地盤の材料としては、弾性波動(せん断波)の速度が小さく、その伝播の観測の容易なものとしてポリアクリルアミドゲルを用いた。これを図4に示すように57cm×57cm×13.5cmのアクリル製型枠内に深さ9cmで打設し、その中央に直径5cmのアクリル円筒をケーソンのモデルとして埋め込んでいる。ケーソン模型の底面には真鍮製の円錐をつけアクリル型枠底板上でロッキングが可能のようにしてある。このケーソンのゲル表面から6cmの所に圧電型のカセンサーを介してインパルスを入力する。インパルスは、3.2kvで充電された50 $\mu$ Fのコンデンサーをソレノイドコイル(0.18mH)を通して放電させることにより発生する<sup>4)-6)</sup>。

このようにしてケーソンから放射された波頭を観測するため、モアレを用いることにした。1mm間隔で0.5mmの幅の縞がシルクスクリーン印刷されているシートを模

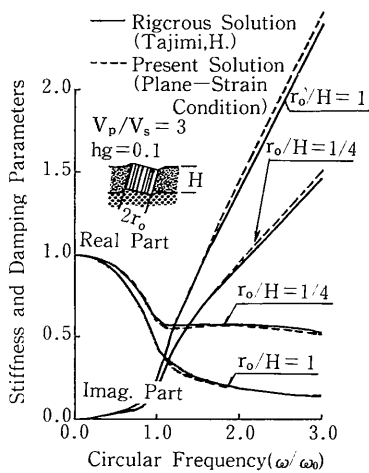


図2 側方地盤の複素剛性の周波数依存性

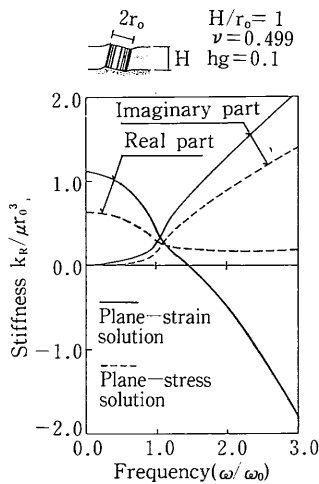


図3 側方地盤の複素剛性の周波数依存性

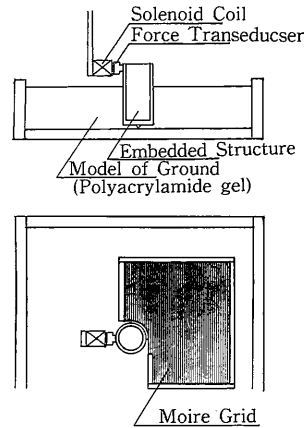


図4 地盤構造物模型

研究速報

型地盤表面に張り、このマークを転写してモアレ用の格子としている。使用しているインクは、天然ゴム、合成ゴム、フェノール樹脂、顔料と糊を混ぜ合わせたもので、エントロピー弾性を持つゲルやゴムに特有の大変形にもひびわれを生じることなく容易に追従する。静止状態と波動が生じている状態での格子を重ね撮りすることにより、モアレを生じさせる。格子の縞の方向は、インパルスの方向と直交するように設定されているので、打撃方向の変位の等高線がフリンジとして現れる。波動の撮影はカメラを開放状態とし、ストロボを発光させて行った(図5)。ストロボの発光のタイミングは打撃時のインパルスをトリガーとして、リターダで任意の遅れ時間を生じさせることで制御している。

観測されたインパルスを図6に示す。周期約0.3msのインパルスが継続して現れるが、この周期は、コイルとコンデンサーの固有周期の1/2に一致する。このときのケーソンのゲル表面上での変位応答を図7に示す。通常であればギャップセンサーを用いた計測が容易であるが、モアレを発生させるために大きな変位を生じさせていることから、モアレ撮影と同じシステム(リターダ、スト

ロボ)を用いて、インパルス発生後所定時間が経過した時点でのケーソン頂部に印した矢印を接写してその変位を読み取り表面上の値に変換した。

この方法で得られた模型表面のモアレ写真を図8(a)(b)(c)に示す。インパルスの入力と直交する方向にせん断波頭が発生している一方で、インパルスの入力方向にその約2倍の速度をもつ波頭が撮影されている。水を取り込んでゲル化するポリアクリルアミドゲルではポアソン比はほぼ0.5であり、その中を伝播する縦波(P波)の速度は水中のそれにほぼ近くせん断波の速度(5.4m/s)に比べて著しく大きい。しかしながら、表面に現れた波頭はむしろポアソン比0.5の平面応力状態の平板中を伝播するたて波速度 $V_p^*$ (式3, 5)にきわめて近い速度を保っている。図9は、これらの写真に対応する擬似三次元モデルを用いたモアレのシミュレーション結果を示している。モデルのケーソン位置には観測されたケーソンの変位を強制的に入力している。モデルの平板のポアソン比は0.5とし、これを平面応力状態としたものである。打撃方向に沿った等変位線の様子は対応するフリンジの様子と異なり数値シミュレーションによるものの方

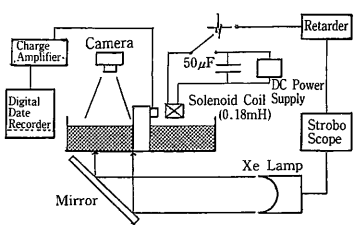


図5 実験装置

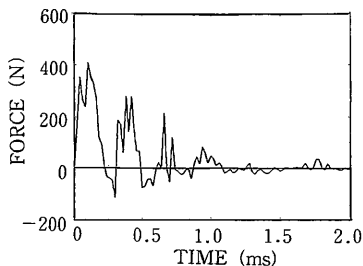


図6 ケーソンに加えられたインパルス

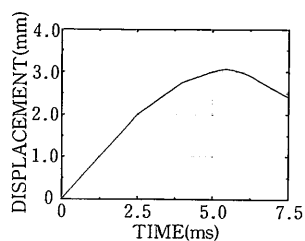
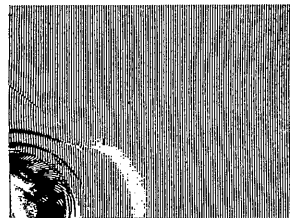
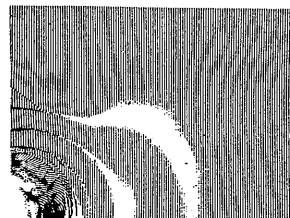


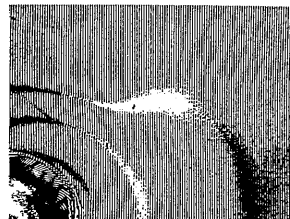
図7 ケーソンのゲル表面上での変位



(a) 2.5ms

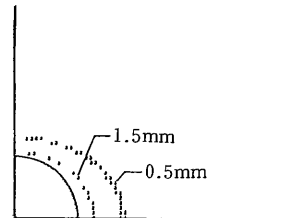


(b) 5.0ms

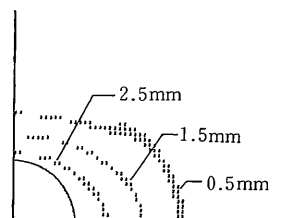


(c) 7.5ms

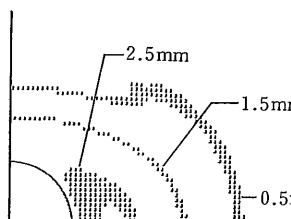
図8 模型地盤表面でのモアレフリンジ



(a) 2.5ms



(b) 5.0ms



(c) 7.5ms

図9 模型地盤表面での打撃方向の等変位曲線

研究速報

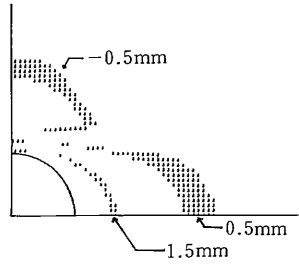


図10 模型地盤表面での打撃方向の等変位曲線  
( $V_p/V_s=15$ , 打撃後2.5ms)

が応答をいくぶん過大に評価しているが、波頭の位置はきわめてよく対応している。一方、平面ひずみの仮定で、表層に現われる波動のシミュレーションを時刻歴で行うことは、せん断波速度 $V_s$ に対して $V_p^*$ が著しく大きいいため極めて困難である。このため $V_p^*=15V_s$ として、シミュレーションを行った結果を図10に示す。平面ひずみ状態でポアソン比がほぼ0.5に近いので、打撃直後に広範囲に変形が生じ観測されたフリンジの様子とはかなり異なったものになっている。表面近くの地盤の挙動に関する限りは、平面応力の仮定による簡便化が現実の現象とよりよく対応する結果となっている。

#### 4. ま と め

一様厚の表層地盤中に埋め込まれたケーソンが剛体基礎上でロッキング振動するとき周辺地盤に逸散する波動の特徴を地盤材料にポリアクリルアミドゲルを用いた模型実験で調査した。波動の可視化を行うために格子が印刷されたゴム状の薄膜を模型地盤表面に転写し、動的なモアレの撮影を行った。実験の結果得られた知見を整理すると、以下ようになる。

- 1) ケーソン模型を打撃したときに、模型地盤表面には明瞭なせん断波頭と、これと直交する方向に、そのほぼ2倍の速度を持つ波頭が現われた。
- 2) 地盤を擬似三次元モデルのようにWinkler型の弾性床の平面上でモデル化した場合、この平面を平面応

力状態としたときに、観測結果に近い速度の波頭を表現することができる。

本研究を行う上で、日本大学生産工学部、田村重四郎教授から貴重な助言をいただいた。またゲル状材料へのモアレの格子転写、およびモアレの撮影について、東京大学生産技術研究所映像技術室、岡宮誠一氏から技術的な助言を得た。ここに深甚なる誠意を表します。なお本研究の一部は文部省科学研究費(代表:土岐 憲三教授(京都大学防災研究所), 課題番号:01302039)の援助を受けた。(1992年1月16日受理)

#### 参 考 文 献

- 1) Tamura, C. and Suzuki, T.: A Quasi-Three-Dimensional Ground Model for Earthquake Response Analysis of Underground Structures-Construction of Ground Model-, "SEISAN-KEN-KYU", (Monthly Jour., Inst., Industrial Science, Univ. of Tokyo), Vol. 39, No. 1, pp. 37-40, 1987.
- 2) Tamura, C., Konagai, K. and Suzuki, T.: Earthquake Response Analysis of Soft Soil Deposit on Undulating Bedrock, Report of the Institute of Industrial Science, the University of Tokyo, Vol. 36, No. 5, (Serial No. 234) pp. 228-261, 1991.
- 3) Tamura, C. and Konagai, K.: Simple Approach for Evaluation of Dynamic Stiffness of Embedded Structure, Proc., 9th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. III, pp. 373-378, 1988.
- 4) Konagai, K., Takahashi, M. and Ogawa, S.: Experiments on Soil-structure Interaction using Electromagnetic-Induction-Type Shock Wave Source, Proc. JSCE, Structural Eng. /Earthquake Eng. Vol. 2 No. 1, pp. 175-184, 1985.
- 5) Konagai, K., Koizumi, Y. and Ogawa, S.: Experiments on Soil-Pile Interaction Using Electromagnetic-Induction-Type Impulse Generator, Geotechnical Special Technical Publication on "Dynamic Behavior of Pile Foundations (Experiments Aspects)", ASCE, No. 11, pp. 91-101, 1987.
- 6) 小長井一男:基礎構造物と地盤の動的相互作用の簡便な解析法について, 生産研究 第40巻 第7号, pp. 307-314, 1988

43