

## 表層地盤中のケーソンから放射される弾性波動の空間分布

Spatial Variation of Wave Propagation from a Rigid Cylindrical Foundation Embedded in an Elastic Stratum

佐 山 順 二\*・三 神 厚\*・小長井 一 男\*

Junji SAYAMA, Atsushi MIKAMI and Kazuo KONAGAI

### 1. はじめに

地盤中に埋め込まれたケーソンがロッキング振動するときに周辺地盤に逸散する波動の特徴を把握することは、この形式の構造物と地盤の動的相互作用を評価する上で重要である。小長井、前原<sup>1)</sup>は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模型地盤表面上の波動伝播の可視化を行い、田村ら<sup>2),3)</sup>による擬似三次元地盤モデルで、地盤に相当する Winkler 型の弾性床上の平面を平面応力状態とすることの妥当性を検討している。これらの検討は地盤表面での波動伝播に限定されているが、波動の空間的分布を可視化することで、より詳細な相互作用の検討と実用的な相互作用ばねの評価につながる情報を得ることができる。ここでは、ゴム状のモアレ格子を用いて地盤表面および内部の波動の空間分布を可視化した結果について報告する。

### 2. 模型実験

#### 2.1 模型実験装置

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成する。地盤の材料には、ポリアクリルアミドゲルを用いた。ポリアクリルアミドゲルはせん断波の速度が小さく透明であるため内部を伝播する波動の観測が容易である。図1に示すようなアクリル製型枠 (57 cm × 57 cm × 13.5 cm) にこのゲルを 9 cm の深さで打設し、その中央に直径 5 cm 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ちゅう製の円錐をつけ、ケーソンがアクリル底盤型枠上でロッキングできるようにしてある。このケーソンのゲル表面より 6 cm の所にインパルスを入力する。このインパルスは 3.0 kv 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 (0.18 mH) を通して放電させることにより発生させる<sup>4),5)</sup>。ケーソンから放射された波動の空間的分布を観測するためにモアレを用いる。1 mm 間隔で 0.5 mm 幅の縞がシルクスクリーン印刷されてい

\*東京大学生産技術研究所 第1部

るシートを直接模型地盤表面にのせ格子のパターンを精度よく転写することは、観測断面が多かつ複雑になるとかなり熟練を要する困難な作業となる。このため、いったん格子をオブラートシートに転写した後、これを模型地盤の所定の表面および断面に直接貼り付けることにした。断面へシートを貼り付けるために、型枠内の所定の断面位置に仕切壁を設け、この仕切壁で区切られた区画にゲルを打設し、ゲルが硬化した後仕切壁を取り外すという方法をとった。こうして現れた断面にシートを貼り付けた後、残りの部分にゲルを打設した。シルクスクリーン印刷に使用されるインクはゴムを主な原料としていること、また、オブラートはゲル中の水分を吸収し

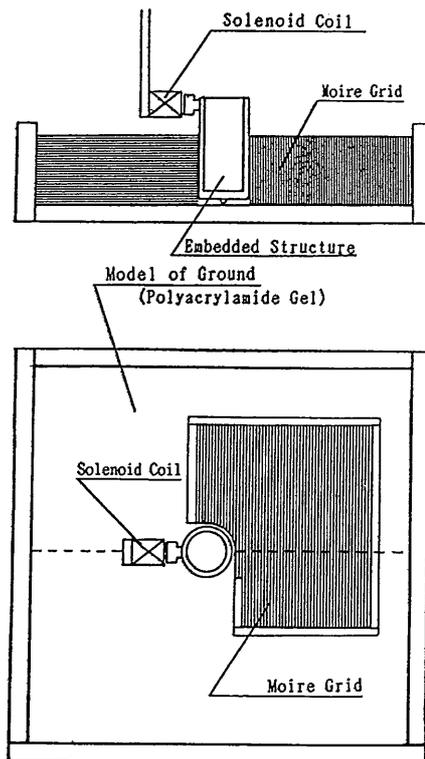


図1 地盤・構造物模型

研 究 速 報

溶解してしまうことから、転写された格子パターンはエントロピー弾性を持つゲルの動きに追従し、大変形に対してもひび割れを生じない。

転写された格子の静止状態と波動が伝播している状態を重ね撮りして現れるモアレフリンジはモアレ格子の直

線と直交する方向の変位の等高線を表わすことになる。モアレの撮影は模型を暗室内に置き、カメラを開放状態としてストロボを発光させて行った。ストロボ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ーで任意の遅れ時間を生じさせることで制御している。(図2)

2.2 模型実験結果

模型表面でのモアレ写真を写真1の上段に、鉛直断面のモアレを下段に示す。格子の直線の間隔が1 mmであることから、波頭に近い側から0.5 mm, 1.5 mmの打撃方向の等変位線がフリンジとして現れている。地表面では小長井、前原<sup>1</sup>の実験と同様、せん断波の速度の2倍強の速度を持つ波頭が打撃方向に進んでいく様子が撮影されている。また、せん断波が伝播する打撃直角方向には、わずかながら打撃と逆方向の戻りの波が先行して現れる。鉛直断面での変位の等高線は地表面での境界条件の影響を受けて地表面付近で大きく曲がり複雑になっている。

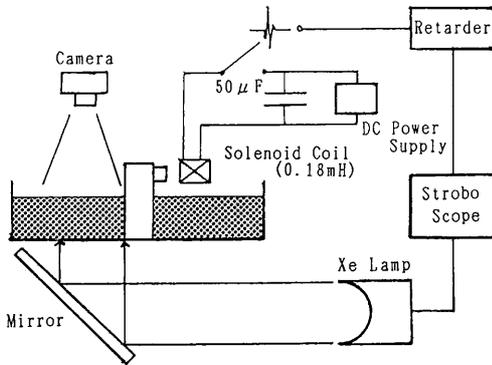


図2 実験装置

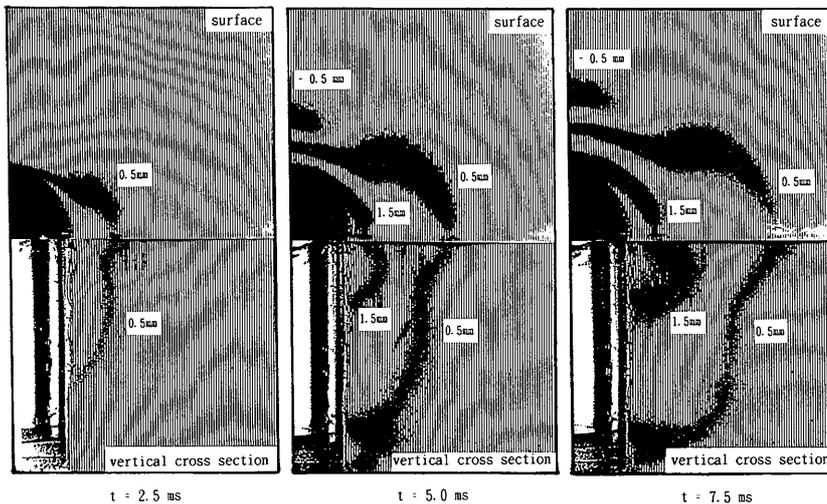


写真1 井筒基礎模型から逸散する波動によるモアレ (打撃方向水平変位)

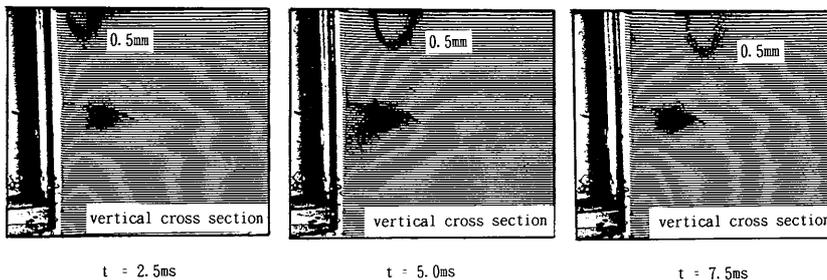


写真2 井筒基礎模型から逸散する波動によるモアレ (打撃方向鉛直変位)

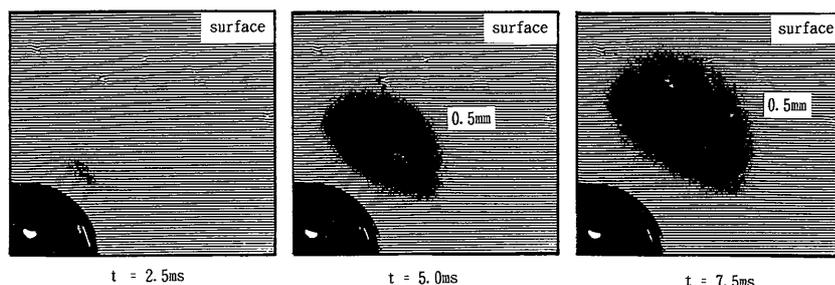


写真3 井筒基礎模型から逸散する波動によるモアレ (打撃直角方向変位)

写真2は鉛直断面に水平方向格子縞を貼ってモアレ観測したもので、モアレのフリンジは0.5mmの上下方向の等変位線を示している。ケーソンより模型地盤へ与えた最大水平変位は約2mm ( $t = 5$  msec)であり、ケーソン付近地盤において上下動は水平動に比べて小さいものの、無視できる大きさではないことを意味している。

模型表面に打撃方向と平行に格子を貼ってモアレを観測した結果を写真3に示す。打撃直角方向の等変位線(0.5mm)が打撃方向に対し約45°の方向に現れ伝播していくようすが撮影されている。

### 3. 擬似三次元モデルにおける評価

これらの模型実験結果の擬似三次元モデルによるシミュレーションを行った。ケーソンを置いた地盤の擬似三次元モデルの概念を図3に示す。このシミュレーションでは、分割された土の柱の振動モードが、剛体ケーソンの影響を強く受けるものとして、基盤に頂点を置く逆三角形で近似できるものと仮定している。それぞれの土柱に対する振動子を連結する有限要素は、地表面での応力の解放を考慮して平面応力状態としている。ケーソンには、実験により観測された変位を強制的に入力している。計算時間は7.5msまで、計算領域は計算時間内に平面応力状態内の平面を伝達する縦波および横波が境界に達しないようにとっている。(ケーソン中心を一頂点とおく正方形領域(200mm×200mm))

図4に写真1に対応する模型表面および打撃方向に沿った鉛直中央断面のモアレのシミュレーション結果を示す。シミュレーションにおけるフリンジは $\pm 0.1$ mmの変位幅に入る範囲(0.4mm~0.6mm, 1.4mm~1.6mm)を示したものである。地表面でのモアレで、波頭に最も近い0.5mmの変位に対応するフリンジの位置は観測されたフリンジの位置と比較的よく一致しているが、1.5mmのフリンジはシミュレーションによるもののほうが、観測されたものより遠方に現れていて、この位置の打撃方向変位を幾分過大に評価している。鉛直断面の

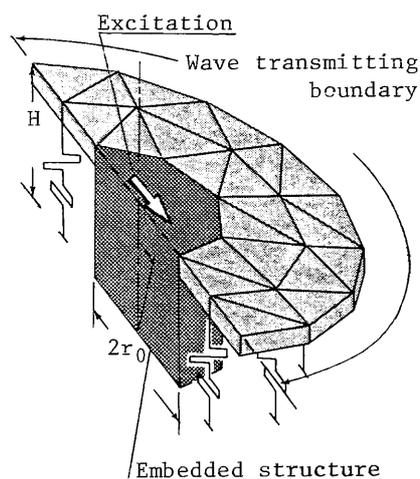


図3 表層地盤のモデル化

フリンジのシミュレーションと観測されたフリンジは打撃直後ではかなりよく一致しているが、時間が経過し波動がケーソンから遠ざかるにつれて両者の違いが大きくなる。これはケーソン近傍において地盤の逆三角形の振動モードを仮定することは妥当であるが、ケーソンから離れるにしたがって異なるモードの寄与が大きくなることを示すものである。

図5は地表面で打撃直角方向の変位の等高線を計算したものであり、写真3がこれに対応する。打撃方向に対し約45°の方向に現れるリング状のフリンジの位置は観測結果とよく対応している。

### 4. ま と め

剛体基盤上に底面を置き一様厚の表層地盤中に埋め込まれたケーソンがロッキング振動するとき周辺地盤に逸散する波動の空間分布の特徴を、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可視化した。実験結果より得られた知見を整理すると以下ようになる。

(1) 擬似三次元モデルでケーソン近傍の地盤の振動モー

研 究 速 報

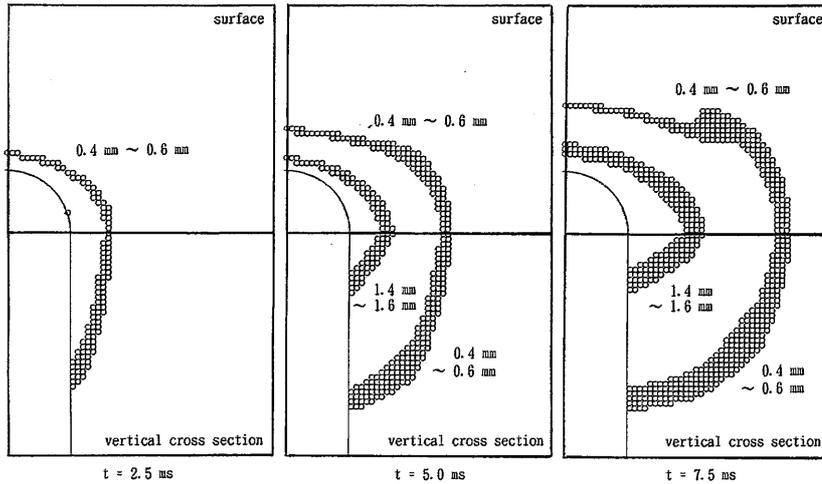


図 4 擬似三次元モデルによるモアレのシミュレーション結果 (平面応力状態, 写真 1 に対応)

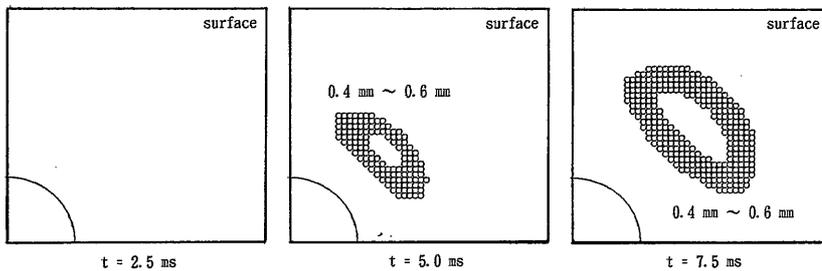


図 5 擬似三次元モデルによるモアレのシミュレーション結果 (平面応力状態, 写真 3 に対応)

ドを基盤を頂点とする逆三角形と仮定することは妥当であるが、ケーソンから離れるにしたがってより複雑なモードの寄与が大きくなる。

(2) ポアソン比が0.5に近い模型地盤のケーソン近傍では、地盤表面の上下動は水平動の1/4~1/2程度に達し無視できる大きさではない。このような地表面での応力開放の影響は、擬似三次元地盤モデルにおいて、地盤を構成する水平の有限要素を平面応力状態とすることで擬似的に取り扱うことができる。(1992年9月4日受理)

参 考 文 献

- 1) 小長井一男・前原充宏：弾性表層地盤中のケーソンからの波動逸散, 生産研究第44巻第4号, pp. 40-43, 1992
- 2) Tamura, C. and Suzuki, T.: A Quasi-Three-Dimensional Ground Model for Earthquake Response Analysis of Underground Structures-Construction of Ground

Model-, "SEISAN-KENKYU", (Monthly Jour., Inst., Industrial Science, Univ. of Tokyo), Vol. 39, No. 1, pp. 37-40, 1987.

- 3) Tamura, C., Konagai, K. and Suzuki, T.: Earthquake Response Analysis of Soft Soil Deposit on Undulating Bedrock, Report of the Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Vol. 36, No. 5 (Serial No. 234), pp. 228-261, 1991
- 4) 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.
- 5) 小長井一男：基礎構造物と地盤の動的相互作用の簡便な手法について, 生産研究第40巻第7号, pp. 307-314, 1988