

# 根入れを有する近接基礎構造物間の動的相互作用の簡便な 評価手法に関する検討

Simple Evaluation of Dynamic Cross-Interaction between Two Embedded Bodies

三 神 厚\*・小長井 一 男\*  
Atsushi MIKAMI and Kazuo KONAGAI

## 1. 緒 言

橋脚の基礎や軟弱基盤中に埋設されているタンクなど、地盤中に構造物が隣接して存在するような場合には、それらの構造物間には地震時に地盤を介した動的な相互作用が現れる。そのため構造物が個々に存在している場合とは異なった挙動を示すので、その時の応答性状を検討しておく必要がある。基礎構造物どうしの動的な相互作用を検討するには、上部構造物とそれらの基礎およびこれらに比べて広大な広がりを持つ地盤を併せて考えなければならない。

根入れを有する構造物相互間の動的相互作用を扱った研究としては、たとえば小堀・日下部<sup>1)</sup>の研究を挙げることができる。彼らの方法は、地盤・基礎を薄層に分割して水平方向には波動論を、鉛直方向には有限要素法を適用し3次元の扱いで解析するものである。ところが、3次元の地形条件や境界条件が複雑になると数値解析にあたっては大きな困難が伴う。そこで、本研究ではなるべく簡便な形でこれらの要因を解析に取り込み、かつ所要の精度を得ることができるような合理的なモデルの確立を目的としている。

解析モデルを単純化する一手法として、上下動が水平動に比べて小さいのでそれを無視するという仮定はこれまでによく用いられてきた。田治見<sup>2)</sup>は3次元波動論に上下動無視の仮定を導入し、深さ方向には級数展開を用いて振動形を表現した。さらにモデルを簡便化するためには、上下動無視の仮定に加えて深さ方向の振動モードを特定する方法もある。本研究では、田村ら<sup>3)</sup>によって開発された不整形地盤の地震応答解析のための擬似三次元モデルを近接する基礎構造物どうしの動的相互作用に適用することを試みた。基礎からの逸散波動の形状が動的相互作用に大きな影

響を及ぼすので、簡便化解析に用いる仮定を、単一ケーソン・地盤系を対象とした可視化実験によって検証する。この可視化実験から得られた知見をもとに、擬似三次元モデルを隣接構造物が存在する場合に対して適用し、田治見の方法に倣った解析解および実験結果との定量的な比較を行い、解析に用いる仮定や地盤物性の適切な評価方法などについて検討する。

## 2. モデルの簡便化の手順と擬似三次元モデル

地盤の上下動は水平動に比べて小さいのでこれを無視するという仮定は、これまで解析を容易にするものとしてよくもちいられてきた。この仮定の妥当性は後半で論ずるとして、円筒座標系  $(r, \theta, z)$  において上下動成分を削除した弾性体の支配方程式は以下のように与えられる。

$$(\lambda + 2\mu) \frac{\partial(\Delta e^{i\omega t})}{\partial r} - \frac{2\mu}{r} \frac{\partial(\Omega_z e^{i\omega t})}{\partial \theta} = \rho \frac{\partial^2(u_r e^{i\omega t})}{\partial t^2} - \mu \frac{\partial^2(u_r e^{i\omega t})}{\partial z^2} - \mu' \frac{\partial^3(u_r e^{i\omega t})}{\partial t \partial z^2} \quad (1)$$

$$(\lambda + 2\mu) \frac{1}{r} \frac{\partial(\Delta e^{i\omega t})}{\partial \theta} + 2\mu \frac{\partial(\Omega_z e^{i\omega t})}{\partial r} = \rho \frac{\partial^2(u_\theta e^{i\omega t})}{\partial t^2} - \mu \frac{\partial^2(u_\theta e^{i\omega t})}{\partial z^2} - \mu' \frac{\partial^3(u_\theta e^{i\omega t})}{\partial t \partial z^2} \quad (2)$$

ここに、 $\lambda, \mu$  は Lamé の定数、 $\rho$  は弾性体の密度、 $\mu'$  は粘性定数、 $(u_r, u_\theta, u_z)$  は  $(r, \theta, z)$  方向変位、さらに

$$\Delta = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \quad (3)$$

$$\Omega_z = \frac{1}{2r} \left( \frac{\partial}{\partial r} (ru_\theta) - \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right) \quad (4)$$

これらの方程式の特解は、 $r, \theta, z$  それぞれの変数分離形で表現することが可能で、深さ方向 ( $z$ ) の振動形は、これ

\*東京大学生産技術研究所 第1部

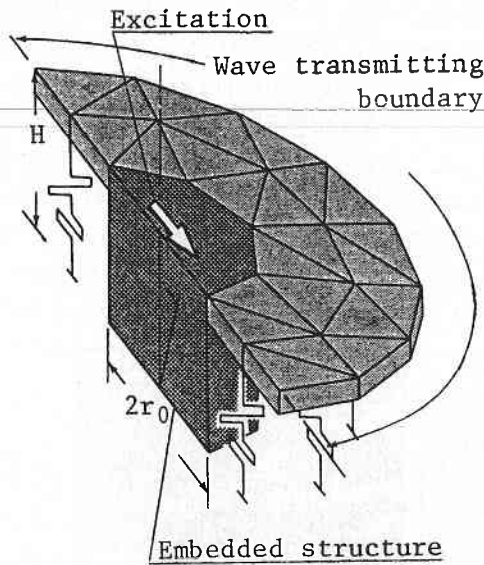


Fig. 1 Quasi-Three-Dimensional Model.

らの特解を用いて三角関数の級数和として与えられる。田治見はこの級数和が剛体ケーソンと地盤の境界条件を満たすように未知係数を決定することでロッキングに対する動的剛性を求めている。これに対し、何らかの拘束条件で場所ごとに表層地盤の深さ方向の振動モードが特定されると仮定できる場合には、場所ごとにこのモードのみの自由度を持つ振動子を想定して解析を行う可能性がある。田村らによる不整形地盤応答解析のための擬似三次元モデルはこの部類に属する近似解法で、表層地盤をいくつもの土の柱に分類し、それぞれが土柱単独のせん断基本振動形で応答するものと想定して、これらを等価な振動子に置き換え、2次元の有限要素網で連結して表層地盤全体のモデルとしている (Fig. 1)。いずれの解放においても、単純に上下動を無視するだけでは、 $\lambda, \mu$  などの物性値は変化しないが、上下動の影響あるいは地盤表面付近での応力解放の影響をこれらの物性値を変えて近似的に解析に取り込む便法も考えられる。擬似三次元モデルを例に採ると、表層地盤は Winkler 型の離散ばねに支持された平面にモデル化されるが、単純な上下動の無視はこの平面を厚さ方向に変形しない平面ひずみ状態とおくことに相当する。一方これと対極にあるものが平面応力状態である。これは  $x$  方向に関する応力成分が表層地盤の表面付近ばかりでなく内部まで解放されているか、あるいはこの応力成分の面内方向 ( $r, \theta$ ) への変化がきわめて小さいと仮定することになり、結果として等価な  $\lambda$  の値が変化する。地盤の Poisson 比が 0.5 の場合、その変化は著しく、平面応力状態の要素を伝播するみかけの縦波速度 ( $V_p^*$ ) とせん断波速度 ( $V_s$ ) の比

$V_p^*/V_s$  は 2 である一方、平面ひずみ状態の要素で  $V_p^*/V_s$  は無限大となる。擬似三次元モデルでは想定する土柱の振動形は場所に応じて適切に設定されるべきものである。したがって、底面を中心にロッキングする剛なケーソンを置いた場合、その近傍では拘束の影響が大きく現れ、モードは底面に頂点を置く逆三角形になる。反面、ケーソンから遠方の地盤ではこうした拘束が顕著でない分、特定のモードの設定が困難になる。しかしながら、振動数の低い場合には側方地盤の剛性は主に近傍地盤の応答に支配され、表層の共振振動数、あるいはこれを越える周波数領域では、表層地盤全体の基本固有振動数が側方地盤剛性に大きく影響を与えることから、逆三角形モードを想定して平面要素の物性を設定しこれを支える Winkler 型ばねの物性は  $\omega_0$  を保存するよう定める便法が考えられる。

### 3. 実験方法および可視化実験結果

前章で述べたように、簡便化解析を進める上でみかけの縦波速度 ( $V_p^*$ ) と横波速度 ( $V_s$ ) の大きさとこれらの波動の逸散状況を把握することが求められる。このため逸散波動の可視化実験を行った。

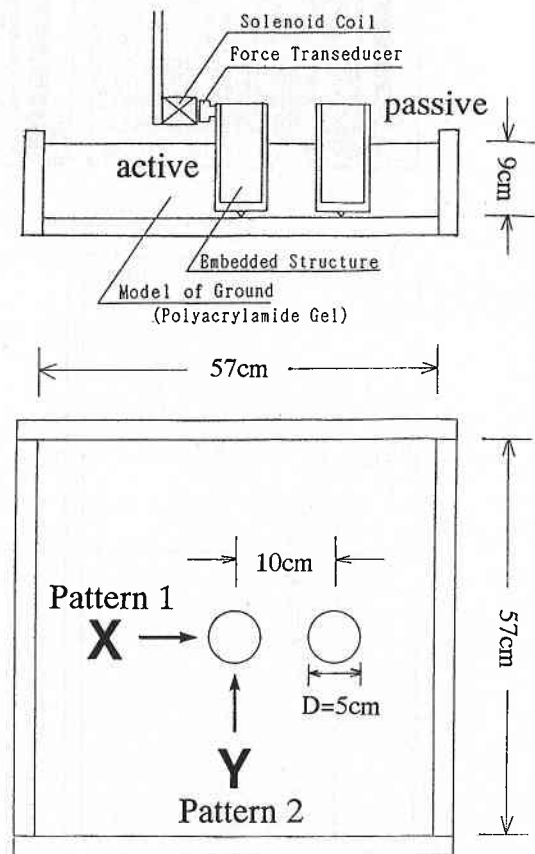


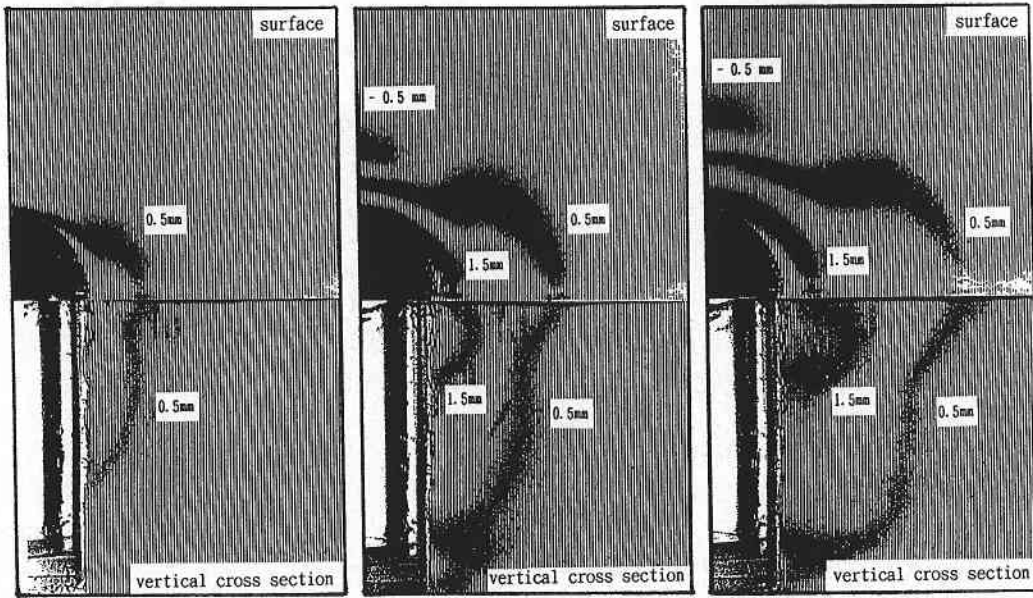
Fig. 2 Structure-Soil (-Structure) Model.

研 究 速 報

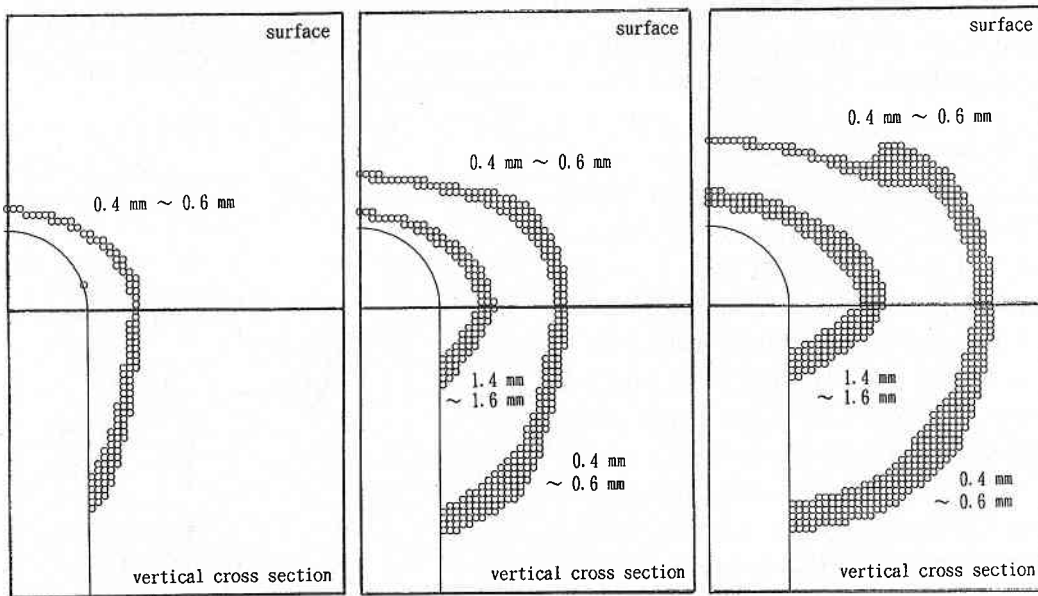
一様な厚さの表層地盤中の円筒ケーソンを対象として模型を作成した。地盤の材料として用いたポリアクリルアミドゲル (Poisson 比  $\approx 0.5$ ) はせん断波の速度が小さく透明であるため内部を伝播する波動の観測が容易である。Fig. 2 に示すようなアクリル製型枠 (57 cm  $\times$  57 cm  $\times$  13.5 cm) にこのゲルを 9 cm の深さで打設しその中央に直径 5 cm のアクリル製円筒をケーソンのモデルとしてロッキング振動できるように設置した。このケーソンのゲル表面より 6 cm 上部にインパルスを入力した。ケーソンから放射

された波動の空間分布を観測するためにモアレを用いた<sup>4)</sup>。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るシートを模型地盤表面および鉛直断面に転写し、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することによって、モアレ格子の直線と直交する方向の変位の等高線を可視化した。

隣接構造物が存在する場合は、既存のケーソン基礎から中心間路離で 10 cm 離れたところに同径の円筒ケーソンを隣接させる。そして片方のケーソンにのみインパルスを



t = 2.5 ms                      t = 5.0 ms                      t = 7.5 ms  
Photo 1 Observed Moire Fringes (Horizontal disp. in the excitation direction).



t = 2.5 ms                      t = 5.0 ms                      t = 7.5 ms  
Fig. 3 Simulated Moire Fringes ( $V_p^*/V_s=2$ , corresponds to Photo 1).

X 方向に加える (加振パターン 1) かあるいは Y 方向に加える (加振パターン 2), その時インパルスが加えられた基礎 (加振基礎) と加えられない井筒基礎 (受振基礎) の両者の応答を渦電流式の変位センサーを用いて測定した。

可視化実験の結果を Photo 1 に示す, 上段は模型地盤表面でのモアレフリンジ, 下段は鉛直断面のモアレフリンジである。格子の直線間隔が 1 mm であることから, 波頭に近い側からそれぞれ 0.5 mm, 1.5 mm の等変位線 (打撃方向) が現われている。地表面では, せん断波の 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。また鉛直断面での変位の等高線は地表面での応力解放の影響を受けて複雑に曲がっている。

Fig. 3 は, 擬似三次元モデルにおいて地表面での応力解放の影響を考慮した平面応力状態を仮定して  $V_p^*/V_s=2$  とし, Photo 1 に対応する模型地盤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ュミレーションを行ったものである。シュミ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 (0.4 mm ~ 0.6 mm, 1.4 mm ~ 1.6 mm) 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 0.5 mm 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によく一致しているが, 1.5 mm のフリンジはシュミレーションによるものの方が観測されたものより遠方に現われていて, この位置の打撃方向変位を幾分過大に評価している。鉛直断面のシュミ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。これはケーソンの近傍では, 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。しかしながら全体的には, 擬似三次元モデルの解析解と観測された波動伝播状況はおおむね整合している。

ところが, 擬似三次元モデルを用いる解析で  $V_p^*/V_s$  を次第に大きくすると観測されたパターンとの一致が悪くなる。時刻歴解析で発散の生じない範囲で  $V_p^*/V_s$  を大きくして, これを 6 にした状況を Fig. 4 に示す。シュミレートされたフリンジは観測されたものよりはるかに遠方に現れており, このことは, 擬似三次元モデルによる解析で平面要素に平面応力状態を仮定することで, 地表面での応力解放の影響を擬似的に取り扱うことができることを示している。

#### 4. 隣接構造物がある場合の動的相互作用解析

隣接構造物が存在する場合に対して擬似三次元モデルを適用するにあたって, 前章と同様, 平面要素は平面応力状態, 地盤の振動モードは逆三角形と仮定した。また田治見の方法に倣い, より厳密な側方地盤の剛性の解析解を導いた。ここでは単に上下動を無視するのではなく擬似三次元モデルと同様,  $V_p^*/V_s$  が応力解放の影響を受けて小さくなることを表現するよう Lamé の定数のうち  $\lambda$  を等価値 ( $-\frac{2\lambda\mu}{\lambda+2\mu}$ : 平面応力状態に相当) に変えている。また深さ方向モードの級数展開は第 9 次の項までとしている。周波数領域での解析からは 2 つのケーソンが対称あるいは逆対称で振動する場合の応答が得られるので, 両者の和あるいは差を 2 で割って Fig. 2 に対応する加振パターンを得, 実験結果との比較を行なった。

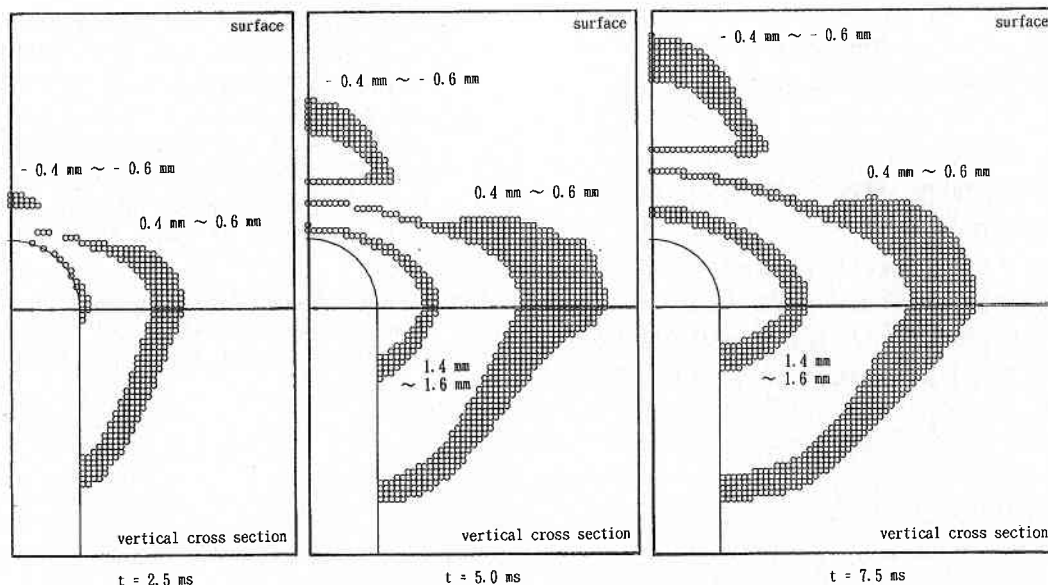


Fig. 4 Simulated Moire Fringes ( $V_p^*/V_s=6$ , corresponds to Photo 1).

研 究 速 報

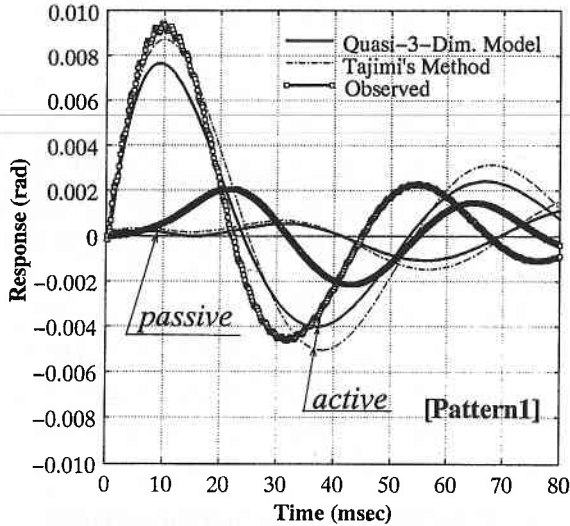


Fig. 5 Response of caisson in the X-direction.

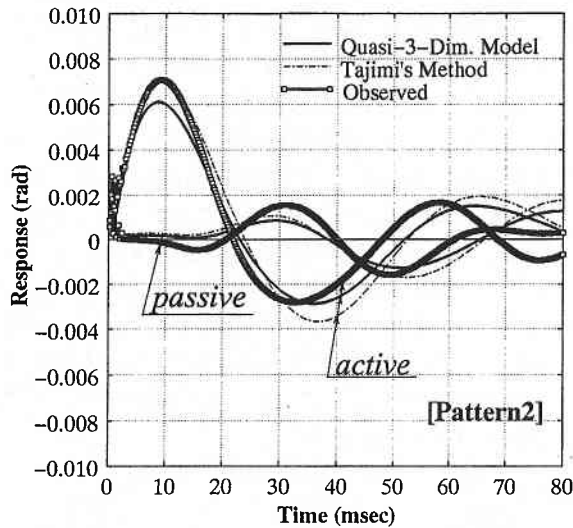


Fig. 6 Response of caisson in the Y-direction.

Fig. 5, 6 は横軸に時間，縦軸に井筒基礎の回転角をとり，インパルスを加えた後80 (msec) までの応答について擬似三次元モデル，田治見の方法に倣った厳密解，実験のそれぞれの結果を比較したものである（なお50 msec 以降については模型地盤境界からの反射波の影響を受けるため検討対象から除外する）。全体的に擬似三次元モデルに

よる解と厳密解との間にほとんど明瞭な差異は現れていない。加振パターン2の場合は，加振ケーソン，受振ケーソンともにおおむねシミュレーション結果と実験結果はよく符合する。加振パターン1の場合，加振ケーソンの応答の周期はやや過大評価されているものの，おおむね良い一致が得られている。一方，受振ケーソンの応答については両者の隔たりが大きい。このことは隣接構造物が存在する場合，構造物が単一で存在する場合とは異なった境界条件，拘束条件の影響をより詳細に検討し，モデルに取り込んでいく必要があることを示している。

5. ま と め

擬似三次元モデルによる単一円筒基礎・地盤系の応答解析では，地表面での応力開放の影響を考慮し Winkler 型バネ上のモデル平面に平面応力状態を仮定し，剛な構造物の拘束の影響を考慮して深さ方向に逆三角形振動モードを仮定することで側方地盤の剛性と挙動をおおむね評価できることを確認した。一方，2つのケーソンが近接して存在する場合には単一基礎・地盤系解析に用いた仮定に加え，隣接構造物の拘束の効果をより詳細に検討して解析に取り込むことが必要であることが示された。

なお，本研究は文部省科学研究費補助金による研究成果の一部を取りまとめたものである。

(1994年7月8日受理)

参 考 文 献

- 1) 小堀鐸二・日下部馨：近接する根入れ構造物相互の連成振動特性について，京都大学防災研究所年報，第21号 B-1, pp. 249-276, 1978.
- 2) Tajimi, H.: Dynamic Analysis of a Structure Embedded in an Elastic Stratum, Proc. of the 4th World Conf. on Earthq. Eng. Vol. III, A-6, pp. 54-69, 1969.
- 3) 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.
- 4) Konagai, K. and Maehara, M.: Study on Hypotheses for Simple Numerical Evaluation of Soil-Embadded Structure Interaction, Bull. ERS, Univ. of Tokyo, No. 25, pp. 69-76, 1992.