

第4部門 構造物と土の相互作用

と 部 兼 雄*

1. 会議の様相

メインセッションIVは第4日の午前中に開かれた。議長は京都大学の松尾先生、副議長はインドの Prof. N.S.V. Kameswara 一般報告はインドの Prof. B.V.Ranganatham であった。

提出された論文は次節でその題名、著者、内容などを紹介するが、このセッションでは20編あった。提出国の内訳は地元のインドが11編で過半数を占め、次いで日本4、イスラエル2、ソビエト2、シンガポール1である。内容の面から見ると、フーチング、クイ、擁壁、ダム、舗装などと土との系の挙動についての実験的または理論的考察、あるいは実際の現場における観察、応用に関する報告がその大部分であったが、そのうち動的な問題すなわち振動、または繰返し荷重を受けた場合の問題を扱ったものが9編で約半数を占めていたこと、あるいはまた解析に有限要素法とか差分法などの数値解析の手法を用いているものが10編あり、さらにその中で土の非線形特性を考慮しているものがいくつかある。提出論文の内容にこのような傾向が出ているのは、今日のコンピューター時代を反映したものと思われる。

会議は例によって一般報告から行なわれた。報告者 Ranganatham 教授は冒頭にこのように立派な論文が沢山提出された会議の一般報告を行なうことはなかなかむずかしいというような半ば辞令的な前置きをした後約一時間にわたって演説した。まず構造物と土との相互作用という問題はいわば応用土質力学全体にかかわるものできわめて重要なテーマであると同時にその取扱いがむずかしいことを述べ、ついで基礎地盤とその上に載る構造物は一体なものとして考えるべきであり、別々に取り扱われてよいものではないこと、従来土質技術者は構造物のことはあまり顧みない、あるいは構造技術者が土を十分に認識しないというようなきらいがないでもなかったが、土の特性を考える場合も構造物の目的、機能その他現場における条件などを考慮に入れて評価なり考察なりを行なわなくては構造物建設の十分な成果は期待できず、土質技術者と構造技術者とは互いに十分な連携を保たなければならない。一方最近のコンピューターの急速な発達、有限要素法などの解析手法の

発達はこの分野に新しい展望を開くもののようである。特に土の非線形的性質の取扱いが容易になったことはいっそう正確な解析がなし得ることであり、またそれに呼応して土質の調査および試験も精密にかつ数多くなされるようになってきたのは幸いなことである、というようなことを述べた後、前述のフーチングなどと土の系の各テーマについて過去に発表された論文や資料なども取り上げながら彼自身の見解を述べた。

続いてパネルメンバーによる発表が行なわれた。パネルメンバーは5人であったが事前の打合わせ、お互いの紹介などは一切なく、また各人とも発表にあたって名前をはっきり述べるということもなかったので他のメンバーがどこの誰なのであるかよくわからなかった。筆者もその一人であったが、あとの人達は全部インドの人達のようにであった。筆者は実行委員会の Ranganatham 教授から前もってパネリストとして意見を発表するように依頼されたが、どのような方針で述べたらよいのか伺ったところそれも任せるといふことだったので、自分達の論文の補足説明のようなことを述べた。あとの人達も大体そのようであるらしかった。らしかったと言うのは、インドの人達の英語はなまりが強く、しかも短い時間内（与えられた時間は8分であった）に少しでも多く述べようとするかのように非常な早口でしゃべるので、何の準備もなしにただ黙って聞いているだけでは言っていることがよく理解できず、スライドなどからおおよそ想像するより仕方がなかったからである。なかには発表の終わりに「急いでしゃべったので英語国でない国の人々にはわかりにくかったことと思う、申し訳なかった」などとわびる人もいた。続いてオープンディスカッションが1人5分以内という時間制限で行なわれた。12人ほどの人がパネリストに対する質問やら意見を述べたあと、それに対する答弁等が1時間以上にわたって行なわれた。討議内容は前述と同じ理由で十分理解できなかったが振動を扱った問題が比較的多く取り上げられていたようであった。

しかしながら討議はいずれも非常に熱の入ったものであった。筆者も質問を受けたが、壇上での答弁だけでは不足で、会議が終わった後の休憩時間にもなおつこんだ質問をされたり、また会場では何も言わなかった人も休憩時間に3人ほどやって来て筆者の発表内容について質問したり

* 中央開発株式会社 技師長

メインセッション

意見を述べてくれたりしてその熱心さには好感がもてた。

ただちょっと残念に思ったのは発表や討論をしたのはほとんどインドの人達で、国際会議というよりはまるでインド国内の会議のようであったことである。パネリスト討論者を含めて20人以上であったが、外国人は筆者ただ1人であったように思われた。世界的な不況のせいで外国人の参加人員が少なかったためであろうが、それにしてももう少し外国人に発言の機会を与えたり、あるいはまた論文集は会議の1か月くらい前に参加者に配り前もって討論の準備をさせるなどの配慮がしてもらえたら国際会議としてもっと盛り上がったものになったのではないかと感じられた。

2. 提出論文の概要

以下に提出された各論文の名称、著者、内容の簡単な紹介を述べる。

1) Prediction of Resonant Frequency of R.C. Footings.

A. Sridharam, J. Raman (インド)

(1~36) ft² のいろいろな大きさを持つ円形、正方形、1:2 および 1:4 の長方形のフーチングを実際の地表面上に作成し、これにいろいろな大きさの静荷重および鉛直方向の振動荷重を与えて共鳴振動を起こす現場実験を行なっている。

フーチング基礎の共振々動数はこれまで静荷重の平方根に逆比例し、フーチングの面積の四乗根に比例すると言われているが、この実験の結果からは静荷重 W の 0.4 乗に逆比例し、また共振動数とフーチングの面積との間には直角双曲線の関係が成立することがわかったとしている。

2) Dynamic Amplification in Two Dimensional Soil.

Media R.N. Iyengr, P.N. Rao (インド)

岩盤上にタイ積し、一定の幅と深さを有する地盤に岩盤から振動が与えられた場合の土の挙動について取り扱っている。

すなわち自由表面と一定の深さおよび長方形の断面を持つ地盤を考え、下面は剛体の水平面に接し、また長方形断面の両側面ではつぎの(a), (b)のような境界条件を設定し、下面に振動が与えられた場合の土の振動に対する一般解を誘導し、また表面上の中心点における数値解を与えている。

$$(a): u = \partial v / \partial x = 0 \quad (b): v = \partial u / \partial x = 0$$

ここに u , v はそれぞれ x (水平) y (鉛直) 方向の変位である。

3) Formation of Earth Pressure on Lock Chamber Walls.

V.I. Vutsel, I.K. Samarin, V.I. Shcherbina

(ソビエト)

数多くの実際のこう門 (LOCK) の側壁に作用する土圧を実測するとともに遠心力を利用した模型実験を行ない、土の状態と発生する土圧の関係を吟味している。

その結果裏込めの土の密度は土圧の大きさに非常に大き

な影響をもつこと、土圧は構造物の変形量によって値が異なることはもちろん、裏込め土の締固めの状況によって大いに異なること、また土の密度が不均一の場合、下部の密度が上部の密度より小さいと、発生する土圧はクーロンの理論によって計算された値よりもかなり大きくなることなどがわかったとしている。

4) Analysis of the Displacements of Interface between Earth Dam, Soil Foundation and Outlet Conduit.

S.K. Parikh, R.G. Kale (インド)

土えん堤に設けられる放水管は基礎地盤と堤体の境界面に設置されることが多いが、この場合放水管の設計はそこに生ずる最大変位を条件として行なう。そして、その変位を解析する場合これまでは管自体の剛度は無視して行なっているが、ここではこれを考慮して解析をしている。計算は有限要素法を用い、堤体土、基礎地盤、管の剛度をいろいろに変えて60種の組合わせについて行なった。

この結果、管の剛度は境界面の変位にかなり大きな影響がある。ただし、基礎地盤のほうが堤体土より弱い場合はこの影響は小さいとしている。

5) Footings Subjected to Horizontal Vibrations.

K.S. Sankaran, M.S. Subrahmanyam, K.R.

Sastry (インド)

地表面上に置かれた機械基礎に鉛直方向の振動が作用した場合の応答解析には半無限弾性論 (elastic half-space theory) が有効であることはすでに I.I.T. (Indian Institute of Technology) で行なわれた研究で明らかであるが、この研究では水平方向の振動について吟味している。

現場でいろいろな大きさの正方形および長方形の鉄筋コンクリートフーチングを地表面上にセットし、これに水平方向の振動を与えて振動数および振幅を測定した。解析の結果、水平方向の振動に対してもやはり elastic half-space theory を用いて応答予測ができることがわかった。ただし解析に必要な土質定数の決定には簡単な現場振動実験が必要であるとしている。

6) Influence of Soil-Moisture on Footing Vibration.

N.R. Krishnasway, M. Anandakrishnan

(インド)

フーチングに振幅の大きい鉛直方向の振動が与えられた場合、および基礎地盤の含水比が非常に大きい場合の振動応答に及ぼす影響の実験的研究である。シルト質粘土の地盤上に直径約 90 cm、高さ約 120 cm、および 80 cm 角、同じ高さのコンクリートブロックを作りバイブレイターで鉛直方向の調和振動を与え応答を測定した。またブロックの底面下 1 m までほとんど飽和した場合に同じ実験を行ない地盤が高含水比の場合の影響を調べた。その結果土の抵抗は非線型性を示したが、これは亜線型 (sublinear) のスプリングとダッシュポットの組合わせで説明され得ること、および地盤の含水比が大きくなるとバネ定数は明らかに小

さくなり、また減衰係数はやや小さくなることがわかったとしている。

7) Analysis of Active Earth Pressure Problem by FEM.

A. Varadarajan, Yudhbir (インド)

軸方向力の圧力は一定に保っておいて側圧を減少させる三軸圧縮試験を行なって、応力-ヒズミの関係を求め、これを双曲線関数で表わし有限要素法によっていろいろな角度に傾けた擁壁に作用する土圧を計算している。

計算の結果、擁壁に作用する土圧は深さ方向に非線型であること、また裏込め土中の応力変化の径路は上述の方法の三軸圧縮試験の場合と同様であることを確かめている。そして三軸圧縮試験で応力-ヒズミの関係を求めるときは現場における応力径路に適した方法で行なうことの重要性を強調している。

8) Flexural Behaviour of Pile in Viscoelastic Foundation.

A.S. Reddy, G. Ramaswamy (インド)

圧密、クリープなど経時的に変形する土の中に打ち込まれた単グイに軸方向および横方向の荷重が加わった場合について解析している。この場合土をスプリングとダッシュポットを並列に組み合わせたケルビンモデル (Kelvin-Model), さらにスプリングを直列に結合した二要素固体モデル (Standard-Solid-Model) に置き換えている。

解析の結果の一部として両端自由のグイにおけるタワミゼロの点、最大曲げモーメントが生ずる点が時間とともに下がってゆくこと、また土をケルビンモデルに置いた場合同一グイの中に符号の異なる曲げモーメントが生ずるのは載荷後しばらくの間であって最終的にはなくなること、また最も大きな曲げモーメントが発生するのは載荷後のある時点であって最終段階においてではないことなどをあげている。

9) Square and Rectangular Plates on Tensionless Medium.

B.S. Khadilkar, V.S. Chandrasekaran,

R.N. Thyagarajan, S.B. Shinde (インド)

普通の弾性体およびゼロ引張り材料^{注1)}の上に正方形および長方形の板を置き載荷された場合に生ずる接地圧およびタワミなどを差分法で計算して比較している。すなわち最初にすべての節点で地盤反力係数 k を一定にとりタワミ係数を計算した後その結果、負値が出たならばその節点の k をゼロとして再計算し、タワミ係数が負となる節点の k がみなゼロとなるまで計算を繰り返してゼロ引張り材料の場合の解析をしている。いろいろな条件のもとでのタワミ係数および曲げモーメント係数を計算比較した結果、ゼロ引張り材料の場合と普通の弾性体の場合の間にはかなりの差があったとしている。

10) Free Vibration Characteristics of Pile in Cohesionless Soils.

V. Chandrasekaran, S. Prakash, S. Bhargava

(インド)

150 cm 角、深さ 100 cm の木箱の中に均等係数 0.55 の砂を詰め、その中に $EI=1.31 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$ 、長さ 70 cm のアルミニウム製の模型グイを埋め込んでグイの模型振動実験を行なっている。

あらかじめグイ頭を横方向に引っぱっておき、これをクラッチを使って瞬間的に解放して振動を与えて加速度計 (acceleration pick-up) で測定している。

実験の結果、振動数は土-グイ系の剛度、およびグイ頭に加わる荷重が大きくなると減ること、群グイの場合の振動数はグイの数、打込み間隔によって変化するなどの結果が得られたとしている。

11) Seismic Analysis of Building-Foundation System.

P. Karasudhi, B. Lumantarna, S.L. Lee

(シンガポール)

建物-基礎系の地震応答解析に関する近似解法である。

すなわち減衰力を無視して系の固有振動数と振動型を求め振動型の一次結合で変位を与え、これを用いてもとの運動方程式を変形しさらに減衰項の非対角要素を無視して非連成にする。これより各振動型ごとに一自由度系として解析する。系の地震応答は最初の数個の振動型を重ね合わせれば求まるとしている。この方法で、5, 10, 15 層の建物-基礎系に1940年のカリフォルニア地震のエルセントロ N-S 成分の加速度記録を応用して計算し、運動方程式を逐次法 (Step-by-Step) によって直接解いた結果と比較した。その結果、基礎のせん断波速度が 600 ft/sec より早い場合は実用上十分な結果が得られ、また計算時間は著しく短縮されたとしている。

12) Calculation of a Foundation Plate with Consideration for Non-linear Properties of Soil.

A.L. Goldin, L.B. Sapozhnikov, A.P. Troitsky

(ソビエト)

砂質地盤上に置かれた 300 MWT タービンの基礎板の解析を有限要素法を用いて行なった。ここでは地盤の非線型的な性質すなわち応力レベルによって異なる応力とヒズミの関係については、有限要素法を用い非常に数多くの弾性計算を繰り返して行なって処理した。このような有限要素法による計算が、基礎-土の系の問題に十分利用し得ることを確かめた後、実際の土の性質を用いて基礎のせん断力、曲げモーメントおよび接地圧を計算してよい結果を得た、としている。

13) Dynamic Bearing Capacity under Rotational Failure.

A.V. Chummar (インド)

非粘性土上の長いフーチングに動荷重および静荷重が作用した場合の支持力についての室内実験的研究である。す

注1) Tensionless Medium: たとえば砂のように圧縮応力は発生するが引張り応力は発生しない材料

メインセッション

なわち (2 ft×1 ft×3 in) の片面がガラスとなっている 実験そうの中に砂を入れ、フーチングを置いて荷重の大きさやフーチングの幅などをいろいろに変えて実験し破壊のパターンや支持力などを測定している。

その結果動のおよび静的な荷重が加わってフーチングが回転して基礎地盤が破壊するときはある定まった破壊のパターンが生ずるがその形は回転軸の位置に支配されること、回転沈下がある程度許される場合は静荷重に対する抵抗力が若干大きくなること、その抵抗力の増加分はダイナミックパルスの性質と時間および基礎—土の系の円振動数 (natural circular frequency) によって定まることなどがわかったとしている。

14) Analysis of Initially Curved Piles.

N.V.R.L.N. Rao, D.B. Rao, Z.H. Mazindrani
(インド)

最初から曲がっている支持グイに軸方向荷重が加わったときに生ずるタワミや応力の解析である。

従来この問題に対しては閉形解 (closed-form-solution) が利用されているが、この場合は加わる軸方向応力、地盤反力係数など土の性質あるいはクイの剛度などが一定でなく深さ方向に変化した場合は解けなかった。ここでは差分式を用い、つぎのような条件の場合について数値解析を行ない一つの設計曲線を与えている。また計算の手順を示す流れ図も与えている。

条件: 1) 土の反力係数は、深さ方向に一樣に変化する、2) 軸方向応力は深さ方向に放物線的に変化する、3) クイの剛度および断面積は一定、4) クイの最初の曲がり半正弦曲線で表わされる。

15) Analysis of Laterally Loaded Steel Pipe Piles

Embedded in Poor Subsoils.

T. Yamauch, K. Tobe, S. Kutsuzawa (日本)

実際の構造物 (セキ) の大径鋼管グイ ($\phi 1$ m) に対して行なった変形解析である。解析はクイ頭における変位量の実測値をもとにして有限要素法を用いて行なっているが、そのときクイをハリ部材に置き換えたり、またそのハリと土との系に対する剛性マトリックスの作成などに若干の工夫を行なっている。また土の水平方向変形係数について事前にボーリング孔内で測定されたものと、この解析から逆算されたものとの間には大きな差があったと報告している。論文は上述の解析上の工夫と土の変形係数の評価に対する考え方を中心に述べている。

16) The Deflection of a Plate on an Elastic Foundation.

G. Wiesman (イスラエル)

地盤を有限な深さの弾性体に、また舗装を弾性の板に置き換えたモデル (Hogg Model) を考え、載荷試験の結果から地盤の弾性係数と舗装板の剛度を知る方法を提案している。すなわち平面上ある範囲に荷重が作用した場合に対して Hogg の集中荷重の式の数値積分を行ない、さらに

表面タワミの計算のための影響図を作成している。なお載荷試験の結果から地盤の弾性係数、舗装板の剛度を求めるいくつかの図表を与え、さらにその例題として Benkelman beam の方法で測定したタワミから上述の図表を使って弾性係数、剛度を求めている。

17) Design of Shallow Foundation with Corrugated Contact Surface.

T. Hasegawa, T. Sawada (日本)

構造物と基礎地盤との接触面の形状の変化に対する構造物内あるいは基礎地盤内の応力、変位の変化の関係を感度係数 (Sensitivity) としてこれを用い、経済的などその他の条件は一応無視して構造物の基礎底面の最適形状を設計する方法を与えている。つぎに応用例として一部に弱い部分のあるダム基礎地盤の最適掘削形状の設計を取り上げている。すなわち有限要素法を用いて掘削形状に対する応力変化の感度係数を求め、それより掘削形状に対する安全率を計算し構造物としての安全率という制約条件のもとで、目的関数を堤体の引張り応力にとって最適の掘削形状を求めている。

18) Frictional Elements in the Finite Element Solution of Axisymmetric Problems.

J. Uzan (イスラエル)

土と構造物の境界にジョイント要素を入れて有限要素法によって計算する軸対称問題を取り扱っている。すなわち砂およびジョイント要素には非線型の変曲線的な応力—ヒズミの関係を与えて一つは砂の中に打ち込まれたクイの周辺摩擦力の分布、および先端抵抗を計算し、もう一つは砂で満たした円筒形の実験そうの底に円板を入れておいて砂の表面に載荷した場合に円板に加わる圧力を、実験そうの内壁に生ずる摩擦力を考慮に入れて計算している。

計算の結果は実験の結果とよく一致し、ジョイント要素を用いることは実際の境界条件を考慮に入れるうえに非常に有効であるとしている。

19) Effects of Particle Characteristics on Dynamic Deformational Properties of Soils.

E. Kuribayashi, T. Iwasaki, F. Tatsuoka
(日本)

Drenvich タイプの円柱共振試験機を用いいろいろな粒径、粒形の砂質土およびガラスビーズなど16種類の材料に対し動的土質試験を行ない、ヒズミ振幅が非常に小さい振動において粒度特性がせん断弾性係数 (shear modulus)、減衰特性 (damping capacity) に及ぼす影響を研究している。

供試体の大きさは外径 10 cm、内径 6 cm、高さ 25 cm の円筒体である。

その結果シルトやシルト質砂のせん断弾性係数はきれいな砂のものより小さいこと、ガラスビーズのせん断弾性係数は粒子が細くなると小さくなること、小さなせん断弾

性係数を持つ土のほうが大きな履歴減衰係数 (hysteretic damping coefficient) を有することなどがわかったとしている。

20) Resilience Characteristics of Unsaturated Soils under Repeated Loading and their Application to the Estimation of Pavement Deflection.

M. Nishi, K. Tanimoto (日本)

地盤材料 (シルト質粘土) および基層材料 ($D_e=0.22$ mm, $U_0=21$) 試料の繰返し三軸圧縮試験を行ない各応力度に対する、繰返し応力とヒズミの比 (resilient modulus) の値を定め有限要素法によって舗装のタワミを計算し、一方大きさの異なる二種類の模型を使い SEED などの考案した器具で繰返し平板載荷試験を行ない、その結果を計算結果と対比している。

その結果舗装—地盤の構成が一層系の場合すなわち地盤に直接載荷した場合および三層系すなわち表層、基層、地盤の場合は、計算値と実測値が一致したが、二層系すなわち基層および地盤の場合はよく一致しなかった。この原因は剛な載荷板の下に生じた応力集中によるものであるとしている。また材料の性質評価の重要性を統計的手法によって強調している。

3. 提出論文一覧

IV Structure Soil Interaction

- 1) A. Sridharam, J. Raman. (India): Prediction of Resonant Frequency of R. C. Footings
- 2) Media R.N. Iyengar, P.N. Rao. (India): Dynamic Amplification in Two Dimensional Soil
- 3) V.I. Vutsel, I.K. Samarin, V.I. Shcherbina. (USSR): Formation of Earth Pressure on Lock Chamber Walls.
- 4) S.K. Parikh, R.G. Kale. (India): Analysis of the Displa-

- 5) K.S. Sankaran, M.S. Subrahmanyam, K.R. Sastry. (India): Footings Subjected to Horizontal Vibrations.
- 6) N.R. Krishnaswamy, M. Anandakrishnan. (India): Influence of Soil Moisture on Footing Vibration.
- 7) A. Varadarajan, Yudhbir. (India): Analysis of Active Earth Pressure Problem by FEM.
- 8) A.S. Reddy, G. Ramaswamy. (India): Flexural Behaviour of Pile in Viscoelastic Foundation.
- 9) B.S. Khadilkar, V.S. Chandrasekaran, R.N. Thyagarajan, S.B. Shinde. (India): Square and Rectangular Plates on Tensionless Medium.
- 10) V. Chandrasekaran, S. Prakash, S. Bhargava. (India): Free Vibration Characteristics of Piles in Cohesionless Soils.
- 11) P. Karasudhi, B. Lumaantarna, S.L. Lee. (Singapore): Seismic Analysis of Building Foundation System.
- 12) A.L. Goldin, L.B. Sapozhnikov, A.P. Troitsky. (USSR): Calculation of a Foundation Plate with Consideration.
- 13) A.V. Chummar. (India): Dynamic Bearing Capacity under Rotational Failure.
- 14) N.V.R.L.N. Rao, D.B. Rao, Z.H. Mazindrani. (India): Analysis of Initially Curved Piles.
- 15) T. Yamauchi, K. Tobe, S. Kutsuzawa. (Japan): Analysis of Laterally Loaded Steel Pipe Piles Embedded in Poor Subsoils.
- 16) G. Wiesman. (Israel): The Deflection of a Plate on an Elastic Foundation.
- 17) T. Hasegawa, T. Sawada. (Japan): Design of Shallow Foundation with Corrugated Contact Surface.
- 18) J. Uzan. (Israel): Frictional Elements in the Finite Element Solution of Axisymmetric Problem.
- 19) E. Kuribayashi, T. Iwasaki, F. Tatsuoka. (Japan): Effects of Particle Characteristics on Dynamic Deformational Properties of Soils.
- 20) M. Nishi, K. Tanimoto. (Japan): Resilience Characteristics of Unsaturated Soils under Repeated Loading and their Application to the Estimation of Pavement Deflection.

(原稿受理 1976. 3. 10)

技術手帳

か っ 色 森 林 土

あ い ば よ の
相 場 芳 憲*

1. 性質と定義

わが国の森林土壌の調査に広く用いられている分類体系は、大政正隆 (1951) の区分を基本として、農林省林業試験場がとりまとめたものである¹⁾。この分類では、日本の森林土壌を、ポドソル・ポドソル化土壌、かっ色森林土、赤・黄色土、暗赤色土、グライ土壌、泥炭、層位不完全土

壌などに分け、さらに細分する。

一般にかっ色森林土は、温帯の湿潤な気候下に分布する落葉樹林帯の典型的な土壌といわれ、その性質はつぎのようになっている。土壌の色調がかっ色味を帯びて、鉄やアルミの溶脱・集積や粘土の移動などが認められない土壌で、土壌の酸度は中性に近く、石灰飽和度が比較的高い土壌である。分類上、間帯性土壌綱—石灰成土壌亜綱に位置づけられている。

* 農博 東京農工大学助教授 農学部