埋め込みを有する構造物の非線形応答に関する実験とその解析

EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL STUDY OF NONLINEAR DYNAMIC BEHAVIOR OF SOIL-EMBEDDED STRUCTURES

鈴木康嗣*, 内藤幸雄**, 堀越清視***

Yasutsugu SUZUKI, Yukio NAITO and Kiyomi HORIKOSHI

Model shaking table tests were conducted to study the dynamic response of an embedded structure which was affected by the plasticity of surrounding soil and dynamic earth pressure acting on embedded walls. A new method for analyzing the dynamic response of an embedded structure was developed. In this method, the material nonlinearity of surrounding soil was handled using the equivalent-linear method, and the geometrical nonlinearity of slide, contact and uplift which occur between a structure and soil was modeled on nonlinear connecting elements.

Simulation was performed for the test results, and the accuracy and reliability of this method were confirmed.

Keywords : interaction, earthquake, dynamic analysis, shaking table, geometrical nonlinearity, material nonlinearity

相互作用, 地震, 動的解析, 振動台, 幾何学的非線形, 材料非線形

1. はじめに

構造物の地震時応答を検討する際に大きな地震力を想定すると, 周辺地盤に関連し, 材料非線形性や, 構造物と周辺地盤の境界における摩擦現象(滑り), および土圧の非対称性にも関連するはく離・浮き上がり等の幾何学的非線形性が顕著になり, 構造物の応答に大きく影響すると考えられる。したがって, より合理的な耐震設計を行うために, このような非線形性を総合的に扱い, 可能な限り実際の現象を表現し得る解析手法の確立が望まれる。

周辺地盤の材料非線形性に関しては, H-D モデル・R-O モデルに代表される一次元せん断振動に関する土の動力学モデルを用いた弾塑性地震応答解析¹⁾や, 弾塑性の履歴曲線を剛性低下率と減衰定数のせん断ひずみに対する依存性に置き換えた等価線形化手法による地震応答解析^{2), 3)}が一般的に行われている。また, せん断応力だけでなく圧縮応力の変化も考慮したものとして, 拘束応力の変化による物性の変化を考慮したモデルの提案⁴⁾や, そのほかやや塑性の扱いに重点を置いたモデルの提

案⁵⁾もなされている。

一方, 本論文で扱う構造物と周辺地盤の境界における幾何学的非線形性に関しては, 岩盤力学や土質力学の分野において, 連続体内の不連続面を表現するために考案されたジョイント要素⁶⁾を, 構造物と地盤との接触面に配し, 有限要素法を用いて動的問題に適用した土岐ら⁷⁾の研究が挙げられる。また, この手法による解析結果を実験結果と比較した研究例として, 構造物の浮き上がりに関する振動台による定常振動実験のシミュレーションを行った渡辺ら⁸⁾の研究がある。同様な研究として, 構造物と地盤の接触面に非線形連結要素⁹⁾を導入し, 有限要素法を用いて, 構造物の浮き上がりに関する振動台による加振実験のシミュレーションを行った筆者ら^{10), 11)}の研究がある。これらの研究では, このような非線形要素を導入することにより, 接触面におけるはく離や滑動現象が考慮でき, 強震時における構造物-地盤系の挙動が表現できることが明らかにされている。

材料非線形性と幾何学的非線形性を同時に扱った研究として土岐ら¹²⁾は, はく離や滑動現象に対し, 構造物周

本論文は, 参考文献 20)~24) を中心に加筆まとめたものである。

* 鹿島建設技術研究所第三研究部 研究員・修士(工学)

** 鹿島建設技術研究所第三研究部 主任研究員・博士(工学)

*** 鹿島建設技術研究所第三研究部 主管研究員

Research Engineer, Building Structural Engineering Department, Kajima Technical Research Institute, Kajima Corp., M.Eng.

Senior Research Engineer, Building Structural Engineering Department, Kajima Technical Research Institute, Kajima Corp., Dr.Eng.

Chief Research Engineer, Building Structural Engineering Department, Kajima Technical Research Institute, Kajima Corp.

辺地盤の降伏が先行したり、あるいは同時に起こる可能性について検討するために、ジョイント要素に加えて、周辺地盤を弾性～完全塑性体と仮定し、材料非線形性を同時に考慮した解析手法を提案し、地盤の降伏が構造物の地震時挙動ならびに滑動に対する安全性に与える影響について検討を行っている。また、Vaughan ら⁵⁾は、地盤に塑性論的モデルを用い、構造物と地盤の境界にインターフェース要素を用いた解析手法を提案し、制御発破を用いた実地盤上の模型構造物の加振実験に対するシミュレーションを行っている。

材料非線形性と幾何学的非線形性を同時に扱う研究を進めるうえで、これらの研究の現状は、筆者らの研究の方向と関連づけて見た場合、以下のようにまとめられる。

a) 滑り・はく離や拘束応力の変化も生ずる複雑な現象を対象とした動的解析手法に関しては、実験結果等実際の現象との対応について研究例も少なく、検討不十分な面がある。したがって、現象を正しく理解するうえで実験結果が必要である。

b) 幾何学的非線形性に関して、文献 8) における解析手法の精度を検討するシミュレーションでは、非線形性がまだ弱い接地率 80 % の浮き上がり実験を対象としており、非線形性がより強くなった場合に関しては今後の検討が待たれるところである。一方、文献 10), 11) は、接地率 63～8 % の浮き上がり実験を対象とし、非線形連結要素の信頼性・有用性が確認されている。そこで、この手法を材料・幾何学同時非線形の対象にも適用する。

c) 材料非線形性と幾何学的非線形性を同時に扱った文献 12) では、周辺地盤の塑性化や局所的な破壊現象を考慮するため、周辺地盤を弾性～完全塑性体として扱っている。これは、周辺地盤の局所的な破壊を問題とする場合には良いが、強震時に広い範囲にわたって地盤が非線形化する軟弱地盤のような場合には不十分であると考えられる。

d) 実験結果との比較が報告されている文献 5) では、構造物の速度応答に関し実験とシミュレーションの結果が示されているが、解析結果の方に高周波成分が多く、加速度応答を比較する場合にはこの高周波成分による差異が問題になると考えられる。

e) 材料非線形性に関し、せん断応力だけでなく拘束応力の変化による物性の変化も考慮した地盤の動的解析手法は、計算時間が長くなる傾向にある。

筆者らは上記 a)～e) の観点から、大地震時に生じると考えられる非線形現象を対象とした実験的・解析的研究を行った。

実験としては、振動台による模型実験¹³⁾を行った。この実験は、構造物と周辺地盤の境界に生じる幾何学的非線形性、および周辺地盤の材料非線形性が大地震時には

顕著になると考え、この 2 つの非線形現象に着目したものである。

次に解析手法としては、周辺地盤の材料非線形性を等価線形で扱い、構造物側面に加わる動土圧の主働側（静止土圧より減少する側）の降伏現象を、構造物と地盤との境界におけるはく離現象としてとらえてモデル化し、さらに境界での滑り現象も同時に扱える非線形連結要素⁹⁾を用いた動的解析手法を提案した。

本論では、この解析手法により振動台実験のシミュレーションを行い、解析手法の精度と信頼性を確認し、大地震時に構造物地下部分と地盤との境界や周辺地盤で生じる非線形現象を扱う解析手法として、提案しようとするものである。

2. 振動台による模型実験

2.1 実験の目的

以下の諸現象を確認するために、振動台による模型実験を行った。

- a) 埋め込み深さの違いによる構造物の応答の変化
- b) 入力加速度の違いによる地盤の非線形性の差異が構造物の応答や構造物側面の動土圧に与える影響
- c) 動土圧の非線形性状

2.2 実験の概要

実験は図—1 に示す構造物-地盤模型を振動台上に載せて行った。地盤模型の側方・下方は固定、すなわち振動台と一体に動く境界とした。これは境界条件を明確にするためである。構造物模型は鋼製でほぼ剛体と見なせるものであり、シミュレーションを 2 次元モデルで行うことを考慮し、構造物と地盤の相互作用を多少とも 2 元的にするために、長方形平面を採用した。この構造物

図—1 構造物・地盤模型の概要

模型を支持地盤模型の中央に設置し、下端を地盤に接着してその周囲を砂で埋めた。また、実験結果の解釈を容易にするために、材料非線形性は構造物側方地盤だけに生じさせることとし、支持地盤模型には弾性体と見なせるシリコンゴムを用いた。なお、このシリコンゴムのヤング係数を小さくし、構造物の挙動が側方地盤で支配されるようにしている。例えば、側方地盤が無い場合の線形時の構造物のロッキングが卓越する共振振動数は 3.8 Hz であるが^{10), 11)}、深さ 20 cm または 30 cm の側方地盤がある場合のロッキングが卓越する共振振動数は 20 Gal 加振では 10 Hz 前後である (図-2 参照)。側方地盤には豊浦標準砂を用い、再現性のある実験とするために振動台上で振動させて締め固めた。

実験は表-1 に示すように、埋め込み深さと加振加速度を変えて合計 6 ケース行った。加振は 10 秒間で、水平一方向とし、振動台と試験体各点の加速度の関係が波形で見た場合にも分かりやすいためスweep波を用いた。スweep加振では振動数変化率 $q^{11), 14)}$ が一定になるように振動数を 10 秒間で連続的に変化させた。表-1 に示す振動数の変化の範囲は、構造物模型のロッキングの共振振動数が含まれ、かつ共振する時刻が 10 秒間の加振時間のうちあまり加振開始早々や終了間際にならないように設定した。

2.3 実験結果

図-2 に振動台に対する構造物模型頂部ならびに下部加速度のフーリエ・スペクトル比を示す。各図の 1 次ピークは構造物模型のロッキングが卓越する共振振動数であり、2 次ピークは支持地盤模型の変形が卓越し、構造物模型底部が大きく動き、頂部がほとんど動かないモードの共振振動数である。各入力加速度に関して、埋め込みが深いほど 1 次共振振動数が高くなる傾向にある。これは埋め込みによりロッキングに対応する剛性が増大したためであると考えられる。一方、2 次の共振振動数も埋め込みが深いほど高くなる傾向がある。これは支持地盤より側方地盤の剛性が高く、しかも側方の境界が固定条件であるので、側方地盤の拘束効果が強く表れたためと考えられる。また、各埋め込み深さに関して、入力加速度が増加するほど 1 次・2 次共振振動数共に低くなる傾向にある。これは側方地盤の非線形性や構造物側面の動土圧にかかわる非線形性および滑りによるものと考えられる。

表-1 実験の種類

埋め込み深さ (cm)	加振加速度 (Gal)	スweep加振振動数 (Hz)
30	20	2.8 ~ 42.0
	50	
	100	
20	20	2.8 ~ 42.0
	50	
	100	

図-2 実験結果の振動台に対する構造物模型頂部ならびに底部加速度のフーリエ・スペクトル比

次に、側方地盤に生じるひずみが最大となる埋め込み深さ 20 cm, 100 Gal 加振の場合の構造物模型側面の動土圧時刻歴を図—3 に、20 cm, 100 Gal 加振, ならびに 30 cm, 100 Gal 加振の場合の動土圧-相対変位関係を図—4 に示す。図—3 および図—4 の縦軸は、動的な変動土圧成分であり、図—4 の横軸は、土圧計設置位置での構造物模型変位（構造物模型を剛体と仮定して模型頂部と底部の加速度記録 AH1 と AH2（図—1 参照）を積分し、線形補間して求めている）と側方地盤変位（側方地盤上端と下端の加速度記録 AH3 と AH4（図—1 参照）を積分し、線形補間して求めている）との相対変位である。両図より、構造物模型側面に作用する動土圧は主働側（引張側）で明らかに降伏し、時刻歴や履歴ループに平坦部が現れている。これより、振動時における主働側降伏土圧状態に達しているものと推測される。そして、動土圧と相対変位の関係は静的繰返し载荷試験から得られる土圧と変位の関係¹⁵⁾と同様に三角形型を示している。

これらの結果から、こうした現象を扱う解析手法が備えるべき条件として、以下のことが挙げられる。

- 大地震時に構造物が側方地盤から受ける力を評価する場合、非線形性を考慮する必要がある。
- 構造物側面が受ける動土圧は、主働側で早い段階から降伏現象が見られ、解析的にもこれを降伏点として扱うことが必要である。

なお、主働側で降伏した動土圧時刻歴や履歴ループに現れる平坦部は、構造物と側方地盤がはく離した場合の土圧に予想されるものと類似であることから、以後簡単のためこの主働側降伏土圧をはく離点と呼ぶことにする。

図—3 実験結果の構造物模型側面の動土圧時刻歴（埋め込み深さ 20 cm, 100 Gal 加振）

図—4 実験結果の動土圧と相対変位の関係

3. 解析手法

3.1 解析手法の概要

本論では、周辺地盤および構造物と周辺地盤間の非線形現象を明確にすることに焦点をあてており、それ以外の諸要因はできるかぎり単純化している。したがってシミュレーションにおいても、連結要素と等価線形による非線形現象の扱いに重点を置き、構造物と地盤に関しては 2 次元 FEM によるモデル化を行った。2 次元モデルとした理由は、計算機の容量・時間の点で現実的である事、実験でも現象が多少とも 2 次元的になるよう長方形平面の構造物模型としている事を考慮したためである。

解析手法の特徴は以下のとおりである。

- 構造物と周辺地盤間の滑り・はく離・浮き上がりの幾何学的非線形性は、非線形連結要素^{9), 11)}でモデル化する。
- 周辺地盤の塑性化、すなわち材料非線形性は等価線形で扱う。なお、剛性低下が著しく、FEM 要素の形状と体積がともに変化している場合でも、等価線形解析の使用が妥当であり、サイロの振動台実験のシミュレーションによる確認もなされているとする著者らの論文¹⁶⁾がある。
- 埋め込みがない場合の浮き上がりに関する振動台実験のシミュレーション^{10), 11)}により、幾何学的非線形性に関しては、実験と解析の比較・検討が既に行われている。

解析は、構造物と地盤を 2 次元 FEM 要素でモデル化し、構造物と地盤の境界面の接点間に図—5 に示す軸ばねと摩擦ばねからなる非線形連結要素を設けて行う。非線形連結要素は、構造物と地盤の接触面における状態

図—5 非線形連結要素のメカニズム

図—6 非線形連結要素を用いた解析モデルの概要

を、①接着・②滑り・③はく離の3形態に分けて扱うものである。こうした連結要素は、埋め込みのない場合・ある場合にそれぞれ図-6に示すように、構造物と地盤の境界節点に設定する。

この解析フローを図-7に示す。まず、非線形連結要素を線形ばねに置き換えた状態で等価線形解析を行い、周辺地盤の塑性化の程度を求める。その後、この結果の要素剛性と減衰定数を用いて、幾何学的非線形性を考慮した時刻歴応答解析を行う。ただし、幾何学的非線形性はある限界以上の入力によって生じるものなので、入力が比較的小さい場合には周辺地盤の塑性化のみを考慮すれば十分な場合もある(図-7の*1)。逆に幾何学的非線形性の影響が大きい場合には、時刻歴応答解析による周辺地盤の塑性化の程度(ひずみ)が最初の等価線形解析で仮定した値から大きくずれてくるので、周辺地盤の塑性化の程度を求め直して再び時刻歴応答解析をする必要が生じてくる(図-7の*2)。なお、時刻歴応答解析では、減衰項がバンドマトリックス性を保ち得ることを考慮し、周辺地盤の塑性化を評価した複素剛性の減衰に対して等価なレーレー減衰定数を設定し、応答計算を行っている。

3.2 解析モデルと諸定数

埋め込み深さ 30 cm の場合の解析モデルを図-8に示す。構造物と地盤は2次元 FEM 要素に分割し、地盤の側方と下方の境界は実験の状態に合わせて固定端の扱いとした。加振実験のシミュレーションでは、この固定端が振動台と同一の動きをすることで応答解析が行われた。応答解析は自重を考慮しない動的な釣合いに関して行い、自重による初期応力は非線形連結要素の滑り・はく離の各判定条件の中でのみ考慮した。具体的には、構造物模型側面では主働側(引張側)の動土圧が静止土圧と主働側降伏土圧の差(はく離点)を超えた場合にははく離が生じ、滑りが生じている場合の摩擦力は静止土圧(本

論の実験では最大測定範囲 $\pm 2 \text{ kgf/cm}^2$ の土圧計を用いたため、静止土圧の測定には不向きな面があったので、静止土圧=はく離点土圧として扱った)と動土圧の和に摩擦係数を乗じた値とした。なお基礎底面には線形ばねを用いた。

解析に用いた定数を表-2に示す。構造物模型は、ヤング係数がひずみに依存しないとし、各部寸法の詳細測定の結果に基づき、下端(基礎中心)回りの回転慣性と重心位置および総重量が模型と解析モデルで一致するように重量を配分した。側方地盤に用いた豊浦標準砂は、同密度に詰めた砂のPS検層結果より、深さ 30 cm の平均で $V_s=90 \text{ m/s}$ であった。しかし、実験に用いた砂は地盤を安定させるために、砂の部分が大きく振動する振動数(40 Hz)で約 1 日振動させて締め固めたため、剛性はかなり大きくなっているものと考えられた。文献(17)を参考にして初期せん断弾性係数 G_0 の変化を考慮すると、1.5~2 倍程度大きくくなっている可能性があった。そこでこの結果と別途実施した固有値解析の結果も考慮して G_0 を V_s から求めた値の 1.8 倍とした。ただし、砂の G_0 は上載応力に大きく依存するため、上載応力の 0.5 乗に比例し、しかも深さ 30 cm の平均で前述の値となるように(1)式により深さごとに変化させた。

$$G_0 = 1650 \sigma_v^{0.5} \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 σ_v : 上載応力 (kgf/cm²)

また、せん断弾性係数ならびに減衰定数のひずみ依存性は図-9に示す標準砂の動的変形試験結果¹⁸⁾を用いた。

図-8 解析モデル(埋め込み深さ 30 cm)

表-2 解析に用いた定数一覧

項 目	構造物模型	支持地盤	側方地盤
単位体積重量 γ (gf/cm ³)	—	1.555	1.60
ヤング係数 E_0 (kgf/cm ²)	2.10×10^6	47.0	(2) 式より算出
ポアソン比 ν	0.30	0.48	0.325
減衰定数 h_0	0.05	0.025	0.005
総重量 W (kgf)	247.6	—	—
回転慣性 I_g (kgf·cm ²)	1.30×10^6	—	—

図-7 解析フロー

図-9の横軸は(2)式に示す基準せん断ひずみ $\gamma_{0.5}$ で正規化している。

$$\gamma_{0.5} = 0.0569 \sigma_v^{0.5} (\%) \dots \dots \dots (2)$$

図-9 側方地盤に用いた砂のせん断弾性係数と減衰定数のせん断ひずみ依存性¹⁸⁾

図-10 主働側降伏土圧

したがって、せん断弾性係数のひずみ依存性は、深さごとに異なっている。

構造物模型側面の非線形連結要素のばね剛性は、数値解析上の安定性を考慮して側方地盤の要素剛性程度に設定し、その主働側のはく離点は図-4等で得られた降伏土圧を深さの関数とみなして得られた図-10に示す結果を用いた。なお、図-10は構造物両側面の値の平均で示している。

また、鋼製の構造物模型と側方地盤との間の摩擦係数は、鋼材表面を研摩仕上しているので、文献19)に示されている研摩仕上げしたステンレス鋼と豊浦標準砂との摩擦係数である0.1を採用した。

4. 実験結果と解析結果の比較

シミュレーションは、表-1に示した6ケースについて実施した。各ケースについて図-7に示した解析フローに従い、等価線形解析と非線形連結要素を用いた解析を行った。解析結果の内、埋め込み深さ30 cm・20 cmの各々について50 Gal加振の場合の構造物模型頂部と底部の応答加速度時刻歴および構造物模型側面の動土圧時刻歴を、実験結果・等価線形解析結果・非線形連結要素を用いた解析結果の順に並べて図-11～図-14に示す。また同様のケースについて、振動台に対する構造物模型頂部と底部加速度のフーリエ・スペクトル比(以下スペクトル比とする)を、図-15、図-16に示す。

図-11～図-14に示された構造物頂部の加速度時刻歴

図-11 応答加速度時刻歴(埋め込み深さ30 cm, 50 Gal加振)

図-12 動土圧時刻歴(埋め込み深さ30 cm, 50 Gal加振)

図—13 応答加速度時刻歴（埋め込み深さ 20 cm, 50 Gal 加振）

図—14 動土圧時刻歴（埋め込み深さ 20 cm, 50 Gal 加振）

図—15 振動台に対する構造物模型頂部ならびに底部加速度のフーリエ・スペクトル比（埋め込み深さ 30 cm, 50 Gal 加振）

のピークや土圧時刻歴のピークは、各ケースにおける構造物頂部のスペクトル比の低振動数側のピーク（構造物のロッキングが卓越するピーク）に対応している。

両ケースとも、2次の共振振動数である構造物底部のスペクトル比のピークは、両解析結果とも実験結果と良く対応しており、2次のピークのひずみ・変位の範囲では等価線形化により地盤の剛性を正しく評価していることが分かる。しかし、等価線形解析結果は、構造物模型側面の動土圧が受働側（圧縮）・主働側（引張り）の両方に効くことおよび滑りが考慮されていないことから、ロッキングが卓越する共振振動数が実験結果よりも高く

なっている。これに比べ非線形連結要素を用いて滑り・はく離の幾何学的非線形性を考慮することにより、実験結果とかなり良く一致するようになった。また動土圧時刻歴では、受働側・主働側における土圧の非対称性等実験で確認された現象が解析でも再現されていることが分かる。

次に、全解析ケースに関して入力加速度の増加による構造物模型頂部加速度の最大値の変化を実験結果とともに図—17に示す。実験結果と両解析結果はほぼ対応していることから、構造物の最大加速度を推定するだけであれば、等価線形解析と非線形連結要素を用いた解析と

図一16 振動台に対する構造物模型頂部ならびに底部加速度のフーリエ・スペクトル比
(埋め込み深さ 20 cm, 50 Gal 加振)

図一17 入力加速度と構造物模型頂部の
応答加速度最大値の関係

図一18 入力加速度と構造物模型の
ロッキングが卓越する1次
共振振動数の関係

図一19 入力加速度と構造物模型
底部の動きが卓越する2
次共振振動数の関係

で有意な差は認められないとの見方もできる。しかし、図一18に示す入力加速度と構造物模型のロッキングが卓越する共振振動数の関係では、前述の等価線形解析結果は非線形連結要素を用いた解析結果や実験結果の振動数よりかなり高くなっている傾向が確認できる。また、図一19に示す入力加速度と2次共振振動数の関係では、両解析結果とも入力加速度の増加に対する共振振動数の低下が実験結果と比較してやや顕著であるが、概略両解析結果とも実験結果と対応しており、2次ピークのひずみ・変位の範囲の地盤の剛性評価としては、両解析で有意な差はないと言う前述の傾向が確認できる。以上の結果は、等価線形解析には限界があり、非線形連結要素を用いた解析が有効であることを示している。

構造物模型側面の動土圧最大値分布を図一20に示す。これらの図では、実験結果の最浅部 (GL-2.5 cm 位置) の動土圧がすべてのケースで解析値より大きくなっている。これは、側方地盤を振動によって締め固めた時、地表付近は振動が大きく良く締め固まったこと、および構造物模型近傍では構造物の振動によって地表付近の砂がもぐり込み特に強く締め固められたことにより、砂の剛性が高くなっているためと考えられる。一方解析では、側方地盤の剛性が拘束圧の0.5乗に比例する((1)式参照)と仮定しているため、最浅部ではかなり小さな動土圧を与えることになる。この部分を除いて実験結果のばらつきの範囲を考慮すると、動土圧の非対称性が最も強い埋め込み深さ 20 cm, 50 Gal・100 Gal 加振を除け

図-20 構造物模型側面の動土圧最大値分布

図-21 解析結果のひずみ範囲

ば、両解析結果は実験結果と比較的傾向が合っていると言える。しかし、埋め込み深さ 20 cm、50 Gal・100 Gal 加振では等価線形解析結果の土圧は実験結果に比べて小さくなる。

解析結果の各要素のひずみ範囲を図-21 に示す。剛性低下率で 0.1 程度になっている要素が存在しているにもかかわらず、解析結果が実験結果と比較的傾向が合っていたことは、この解析手法の適用範囲が相当に広いことを示している。

5. 結 論

大地震時に生じると考えられる地盤-構造物相互作用

の非線形現象を検討するために、この非線形現象に焦点をあてた振動台による模型実験を行った。この実験結果を基に、材料非線形性を等価線形で扱い、幾何学的非線形性を非線形連結要素でモデル化して、両者の非線形現象を同時に扱い得る 2 次元 FEM による動的解析手法を提案した。この解析手法を用いて実験結果のシミュレーションを行った。これらの実験と解析を通して以下のことが分かった。

a) 振動台による模型実験の結果から、非線形性を考慮する必要があることが実験的に確認された。

b) 実験から得られた構造物側面が受ける動土圧は、顕著な非対称性を示し、ひずみが大きい場合の履歴ループは三角形の形状となった。特に主動側では早い段階で降伏現象が見られ、解析的にはこれをはく離点として扱い得る。

c) 地盤の材料非線形性を等価線形で扱い、地盤と構造物の接触部分の滑り・はく離の幾何学的非線形性を非線形連結要素でモデル化した解析手法を提案した。

d) 振動台による模型実験のシミュレーションを行い、本解析手法の妥当性を検討し、構造物模型の加速度応答倍率、共振振動数、動土圧時刻歴などの諸応答量に関して実験結果と整合する結果が得られた。シミュレーションが 2 次元モデルであることや、実験・解析ともに有限領域のものであるという制約はあるが、本解析手法の精度・信頼性が確認された。

本解析手法は、適用範囲として周辺地盤の剛性低下率で 1/10 程度までカバーしているため、軟弱地盤に建設される一般構造物や塔状構造物等の設計に広く利用できるものと思われる。

本解析手法は、適用範囲として周辺地盤の剛性低下率で 1/10 程度までカバーしているため、軟弱地盤に建設される一般構造物や塔状構造物等の設計に広く利用できるものと思われる。

謝 辞

本論文は既発表文献^{20)~24)}を中心に加筆したものであるが、これらの内容のうち、実験およびシミュレーションの一部は、6 電力（東京・東北・中部・北陸・中国・日本原子力発電）と鹿島建設（株）との共同研究「原子炉建屋の地震時安定性に関する研究」で実施されたものである。本研究では、電力共通研究の幹事である東京電力（株）矢野明義氏をはじめとする各電力の方々にご指導をいただきました。深く感謝いたします。

なお、本研究のシミュレーションを行うにあたり、鹿島建設（株）構造設計部藤本信夫氏に御協力をいただいた。また、本論文をまとめるにあたり鹿島建設（株）技術研究所津川恒久氏に貴重なご助言をいただいた。感謝

の意を表します。

参考文献

- 1) たとえば, 原 昭夫, 清田芳治, 大崎順彦: 地盤振動解析のための土の動力学モデルの提案と解析例, 第5回日本地震工学シンポジウム, pp.697~704, 昭和53年11月
- 2) Per B. Schnabel, John Lysmer and H. Bolton Seed: SHAKE-A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, EERC 72-12 (Univ. of California · Berkeley), 1972.12
- 3) John Lysmer et al.: FLUSH-A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil-Structure Interaction Problems, EERC 75-30 (Univ. of California · Berkeley), 1975.11
- 4) 原 昭夫, 清田芳治: 組み合わせ応力下における土の非線形解析手法, 鹿島建設技術研究所年報, 第32号, pp.125~128, 昭和59年6月
- 5) D.K. Vaughan and J. Isenberg: Soil-Structure Interaction in Explosive Testing of Model Containments, Nuclear Engineering and Design 77, pp.229~250, 1984
- 6) Goodman, R.E.: Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks, West Publishing Company, ch.8, pp.300~368, 1976
- 7) 土岐憲三, 佐藤忠信, 三浦房紀: 強震時における地盤と構造物の間の剝離と滑動, 土木学会論文報告集, 第302号, pp.31~41, 1980.10
- 8) 渡辺啓行, 桒木 均: すべり剝離を伴う基礎・地盤の動的相互作用に関する模型振動実験と数値シミュレーション, 土木学会論文集, 第368号/I-5, pp.319~327, 1986.4
- 9) 原 昭夫, 内藤幸雄, 堀越清視, 藤本信夫: 建屋と地盤間の浮き上がり・剝離・すべりを考慮した動的解析, 鹿島建設技術研究所年報, 第33号, pp.139~144, 昭和60年6月
- 10) 矢野明義, 原 昭夫ほか6名: 建屋浮き上がりに関する静的・動的実験と解析(その1~その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.165~170, 昭和60年10月
- 11) 矢野明義, 内藤幸雄, 堀越清視: 非線形連結要素 FEM モデルによる基礎浮き上がり動的解析, 日本建築学会構造系論文報告集, No.427, pp.87~98, 1991年9月
- 12) 土岐憲三, 三浦房紀: 地盤-構造物系の非線形地震応答解析, 土木学会論文報告集, 第317号, pp.61~68, 1982.1
- 13) 矢野明義, 原 昭夫ほか5名: 埋め土・浮き上がり非線形に着目した地盤建屋模型の振動台実験とその解析(その1~その4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.689~695, 昭和59年10月
- 14) N. Norby Nielsen: Steady-state versus Rundown Tests of Structures, ASCE, ST 6, pp.51~64, 1964.12
- 15) 矢野明義, 原 昭夫, 清田芳治: 模型土構造物の振動実験のための基礎的研究—その2 土の圧縮・引張り変形特性—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.599~600, 昭和56年10月
- 16) 内藤幸雄: 等価線形 FEM の適用に関する考察, 日本建築学会構造系論文報告集, 第368号, pp.57~66, 昭和61年10月
- 17) Drnevich, V.P. and Richart, F.E.: Dynamic Prestraining of Dry Sand, Proc. ASCE, Vol.96, SM 2, pp.453~469, 1970.3
- 18) 原 昭夫, 清田芳治: 大型動的せん断試験装置による土の動的変形特性(その2) 砂の動的せん断変形特性値の上載応力依存性, 第19回土質工学研究発表会, pp.581~582, 昭和59年6月
- 19) Tatsuoka F. and Haibara O.: Shear Resistance between Sand and Smooth or Lubricated Surface, Soils and Foundations, Vol.25, No.1, pp.89~98, 1985.3
- 20) 矢野明義, 原 昭夫, 内藤幸雄, 鈴木康嗣, 堀越清視, 藤本信夫: 埋め土・浮き上がり非線形に着目した地盤建屋模型の振動台実験とその解析(その5~その6), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.171~174, 昭和60年10月
- 21) 矢野明義, 原 昭夫, 堀越清視, 内藤幸雄, 藤本信夫, 鈴木康嗣: 埋め込みを有する建屋の強震時非線形応答に関する実験および解析(その1~その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.509~512, 昭和61年8月
- 22) 原 昭夫, 堀越清視, 内藤幸雄, 鈴木康嗣, 藤本信夫: 埋め込みを有する建屋の地震時土圧に関する実験と解析, 第22回土質工学研究発表会, pp.705~708, 昭和62年6月
- 23) 原 昭夫, 堀越清視, 内藤幸雄, 藤本信夫, 鈴木康嗣: 地下壁と地盤の滑り・はく離が埋め込み建屋の動的応答におよぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.565~566, 昭和62年10月
- 24) 原 昭夫, 堀越清視, 内藤幸雄, 藤本信夫, 鈴木康嗣: 埋め込みを有する建屋の非線形応答に関する振動台実験とその解析, 鹿島建設技術研究所年報, 第35号, pp.135~142, 昭和62年6月

(1992年1月10日原稿受理, 1992年5月12日採用決定)