

R C地中構造物の損傷過程に関する実験的研究 (その3) R C部材の非線形性を考慮した解析手法の適用

松井 淳¹・大友敬三¹・松本恭明²・岡市明大²

¹正会員 工修 (財)電力中央研究所 我孫子研究所(〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

²正会員 工修 関西電力(株) 土木建築室(〒530-8270 大阪府大阪市北区中之島3-3-22)

強震時における地中構造物の変形性能に関する実証データを得ることを目的として、一連の実験的研究を進めている。本論文はこのうち、小型振動台実験で得られたRC試験体の挙動に対して、地盤および構造物をそれぞれRamberg-Osgoodモデル、軸力変動型トリリニアモデルで表した地盤-構造物連成の非線形動的有限要素解析を実施し、その適用性について調べたものである。解析結果から、RC部材が隅角部において降伏する時期やその時の変形状態を良好に再現していることが確認された。

Key Words : RC In-ground structure, shaking table test, history dependence model, dynamic analysis, plastic deformation

1. はじめに

著者らは、強震時における地中構造物の変形性能に関する実証データを得ることを目的として、一連の実験的研究を進めている。本報では、既報^{1),2)}で報告した振動台実験に対して、地盤および構造物を履歴依存モデルで表した地盤-構造物連成による非線形動的有限要素解析を実施し、その適用性について調べた。

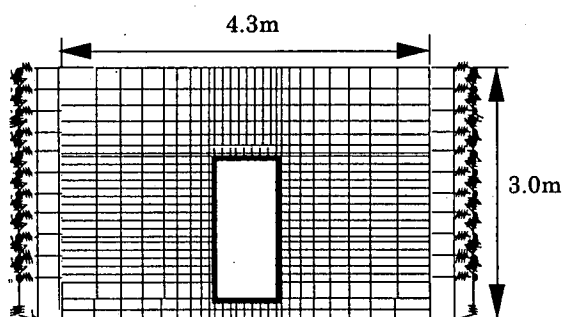


図-1 有限要素解析モデル

2. 解析の概要

(1) 解析モデル

せん断土槽の寸法にて、2次元有限要素解析モデルを構成した(図-1)。地盤と構造物間の離接・滑動は考慮していない。また、せん断土槽自身の重量の影響を考慮するため、地盤の側方境界には、図-2に示すようなバネ-質点系を付加した。鉛直および底面境界については水平および鉛直とも固定とした。

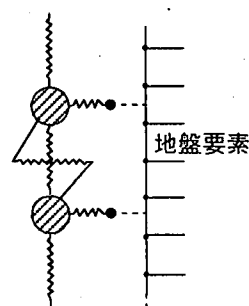


図-2 側方境界条件

(2) 地盤のモデル化

地盤の動的変形特性についての諸物性については、平均有効応力を変化させた中空ねじりせん断試験の結果から、拘束圧に依存した初期せん断剛性等を定めた。地盤の履歴モデルとして、全応力型のRamberg-Osgoodモデルを用い、式(1)を用いること

により、骨格曲線を表示するパラメータに破壊ひずみをが含まれるモデルとした。

$$\gamma = \frac{S_u}{G_0} s (1 + \alpha |s|^\beta) \quad (1)$$

ここに、 G_0 ：初期せん断剛性、 s ：基準化せん断応力、 $S_u(\tau_f)$ ：単純せん断試験から求めたせん断強度、 $\alpha = \tau_f/\tau_r - 1$ 、 $\gamma_r = S_u/G_0$ 、 β は $G/G_0 - \gamma$ 、 $h - \gamma$ 関係のフィッティングに関するパラメータである。
 これらのうち、 G_0 と S_u については拘束圧依存性を考慮するので、平均有効応力を変化させた動的変形特性試験、単純せん断試験によりそれぞれ求めた。 S_u については、単純せん断試験を行っても明確なピークが得られなかったもので、 $\gamma = 2.5\%$ に対するせん断応力を S_u とした。 β については、平均有効応力 0.3kgf/cm^2 における動的変形試験結果に対して拘束圧依存性を考慮した上で、フィッティングを行った。

以上のようにして定めたRamberg-Osgoodモデルの動的変形特性を動的変形特性試験結果と比較して示すと、図-3のようになる。これは、1%以上のせん断ひずみ領域における試験結果の剛性低下に適合したものである。

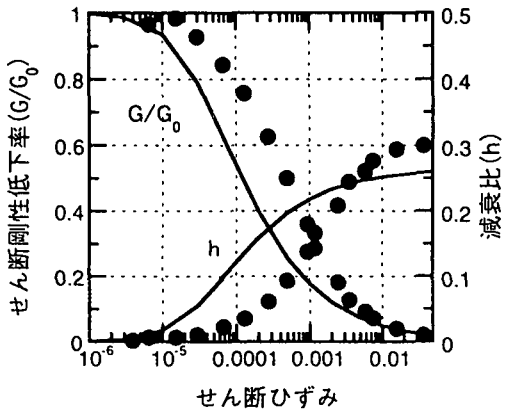


図-3 解析に用いた地盤の $G, h - \gamma$ 関係

(3) RC部材のモデル化

RC部材の曲げモーメント-曲率関係に関する復元力特性を軸力変動型トリリニアモデルで表した(図-4)。ここでは、曲げと軸力を受けるはり部材の断面力の計算結果から、第1折れ曲がり点を「曲げひび割れ発生」に第2折れ曲がり点を「断面降伏(引張鉄筋の降伏または圧縮コンクリート部の破壊)」にそれぞれ対応させた。なお、せん断剛性については、非線形性を考慮していない(コンクリートおよび鉄筋の物性値や断面の諸元については、参考文献1)を参照されたい)。

以上のような要領でモデル化を行い、地盤-構造物連成による動的非線形有限要素法により、振動台実験を模擬したシミュレーションを実施した。入力加速度波形としては、実験時に主筋の降伏が初めて確認されたケース(最大加速度 366gal)において、振動台底面にて測定された加速度波形を用いた(図-5)。

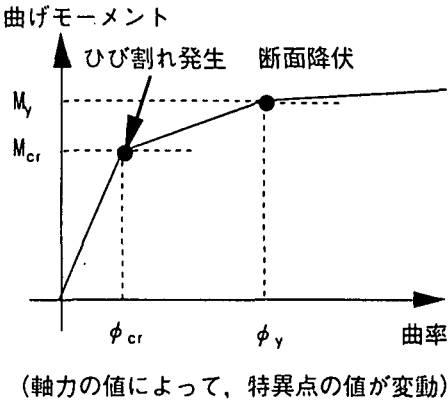


図-4 軸力変動型トリリニアモデル

3. 解析結果

(1)地盤-構造物全体系の変形挙動

図-6にRC試験体の頂底版間の相対変位が最大となった時刻(3.75秒)における全体変形図を示す。地表面と振動台底面との間の相対変位は 2.4cm であり、地盤のみのときの実験結果とはほぼ同一の値である。また、図-7は、各レベルにおける水平方向相対変位の最大値分布について、地盤のみによる同様な実験結果解析結果および地盤-構造物連成解析結果の三者で比較したものである。これより、RC構造物は強震時において、地盤の一次せん断変形に支配的であることが再現されている振動台実験を良く模擬している分かる。さらに、図-6からは実験時に観察された側壁の曲げ変形(試験体内部方向へのたわみ)も僅かであるが解析でも再現している。これは、起振前の初期静止状態においても確認されている変形であり、RC試験体全体のせん断剛性が地盤の

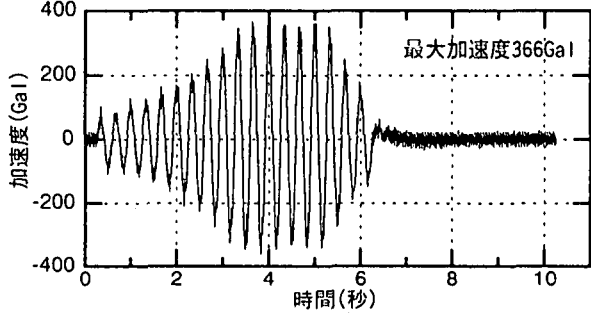


図-5 解析に用いた入力加速度

ん断剛性よりやや小さい設計がなされているためによるものと考えられる。

図-8、9に、それぞれ実験結果、解析結果のRC試験体全体の荷重-変位曲線を示す。全体荷重には側壁下端固定部分のせん断力の合計値を、変位には頂底版間相対変位を用いている。両者を比較することにより、解析ではRC試験体全体の剛性をやや大きめに評価していることが分かる。これは、
 ①RC部材の初期のひび割れを考慮していない。

②徐荷剛性等をやや過大に評価している。
 ③地盤-構造物間の離接や滑動を考慮していない。
 等によるものと考えられる。特に、構造物の塑性変形量の算定精度を向上させるためには、これらの項目についての十分な検討が必要であり、今後の課題である。

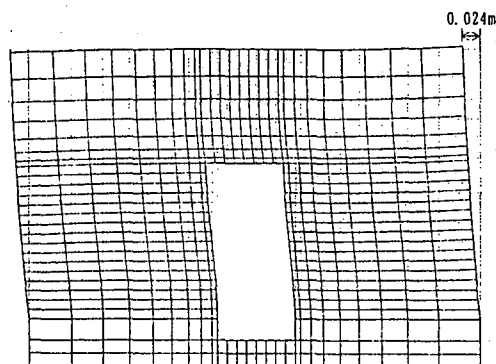


図-6 全体変形図 (時刻: 3.75秒)

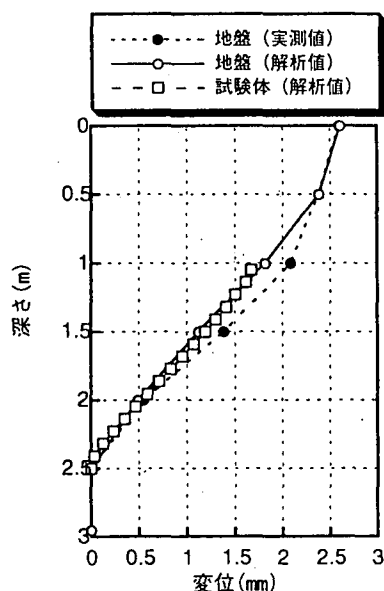


図-7 水平方向相対変位の最大値分布

(2) RC部材の変形挙動

図-10に頂底板間の相対変位の時刻歴を示す。側壁が初めて降伏した時の時刻及びその時の相対変位量は、実験時は3.39秒、1.0cm、解析では3.05秒、0.978cmであり、良く一致している。しかし全ての隅角部が降伏した後の相対変位量、特にその最大値、残留値についてはそれぞれ1.0mm、2.0mm程度の差異が見られる、(1)で述べた①～③等がその要因であると考えられる。

一方、部材の損傷の分布については、良好な一致が見られた。紙面の関係上損傷分布図は割愛するが、
 ①断面が降伏した部位は隅角部4カ所である。
 ②層せん断変形角が0.5～0.7% (時刻: 3.0～4.0秒)の時期に連続的に降伏している。

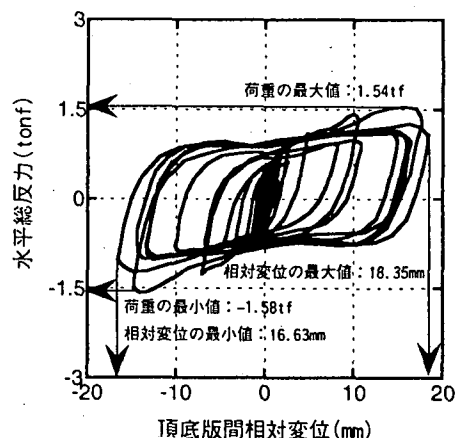


図-8 荷重-変位曲線 (実験)

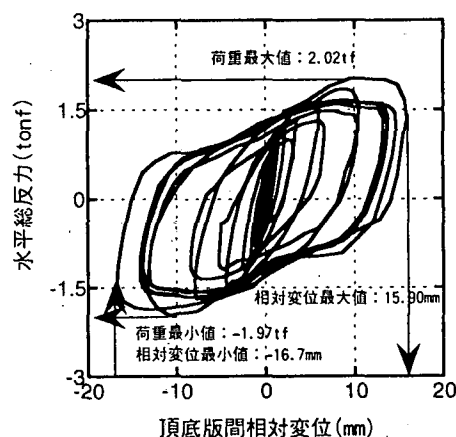


図-9 荷重-変位曲線 (解析)

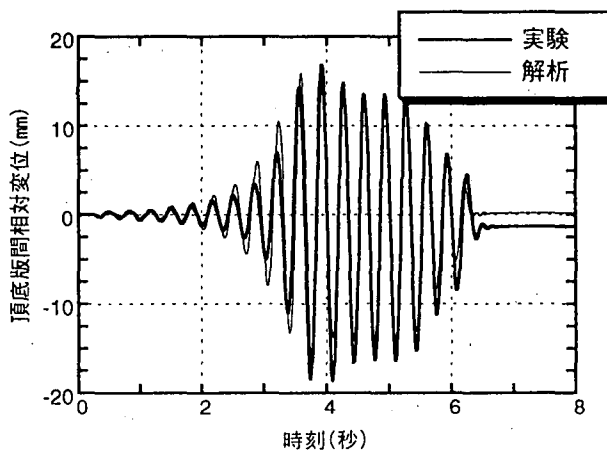


図-10 頂底板間相対変位の時刻歴

③降伏した部位の応答塑性率は1.0～2.0の間である。ことについては、良好な一致を見た。このことから本研究で実施した解析がこの種の構造物の降伏直後までの挙動を良く再現していることが明らかとなった。

(3) 構造物近傍の土圧

側壁上端部及び中央における増分直土圧の時刻歴を図-11、12に示す (圧縮側を正としている)。こ

れから、RC試験体が降伏するまでの3.0秒までについては、実験と解析で良好な一致をみているが、RC試験体の断面降伏が生じた時間帯（3.0～4.0秒）以降では、実験と解析では差異が認められる。特に、解析では引張側の土圧が算出されている。これは、地盤-構造物間において、離接を考慮していないことに起因することと考えられる。一方、載荷後の土圧の残留については、解析においても算出されることが明らかとなった。

図-13に5.0秒における直土圧の分布を示す（側壁外側方向を圧縮側と定義している）。ここでも、側壁中央部では実験と解析では値の符号が反転した結果となっており、地盤-構造物間の離接を考慮していないことの影響が確認された。一方、側壁端部および頂版では、実験と解析ではほぼ一致する結果が得られた。

さらに、実験では加振波形の周波数の2倍程度の波形が観察されており、鉛直方向において最大で492Galの応答加速度が発生している。これは地盤のダイレタンシー等によるものと考えられる。これについては、地盤をRamberg-Osgoodモデルで表した本解析では詳細に検討することは困難である。今後、ダイレタンシーの影響を考慮した構成則により地盤をモデル化した解析による検討の必要性が生じた。

以上の考察により、本解析では、構造物が降伏直後までのRC構造物の変形特性および土圧の推移について、良く再現されていることが明らかとなった。今後は、より塑性変形が大きい時期における解析精度の向上が課題である。

4. おわりに

本研究で実施した解析は、RC製地中構造物の降伏直後までの変形挙動を良好に表すことが確認された。今後、平成11年に実施予定の大型振動台実験を念頭に置きつつ、RC構造物の塑性変形についての解析精度の向上を目指して、本解析で採用したモデルの改良を図る予定である。

謝辞：本研究は、電力9社と日本原子力発電（株）による電力共通研究の一部として実施した。本研究の関係各位に謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 松本敏克ら：RC地中構造物の損傷過程に関する実験的研究（その1）小型振動台におけるRC試験体の挙動予測と設計，第25回地震工学研究発表会講演概要集，1999.7.

- 2) 末広俊夫ら：RC地中構造物の損傷過程に関する実験的研究（その2）小型振動台実験で得られたRC試験体挙動について，第25回地震工学研究発表会講演概要集，1999.7.

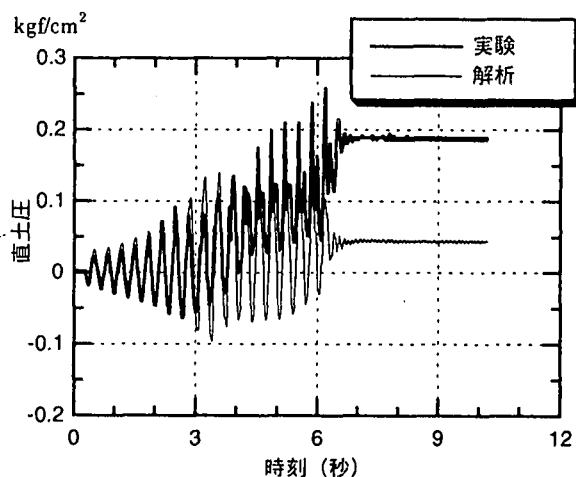


図-11 直土圧の時刻歴（側壁下端付近）

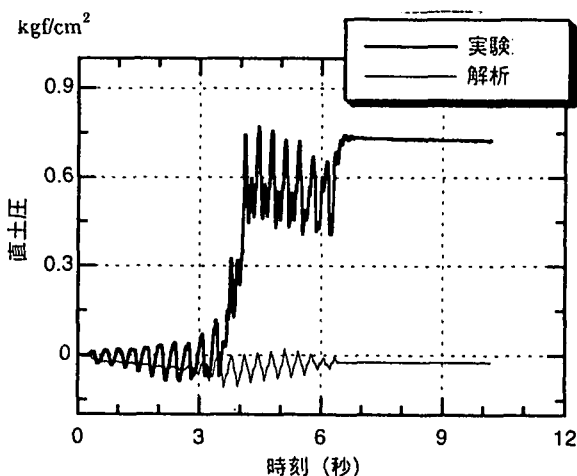


図-12 直土圧の時刻歴（側壁中央部）

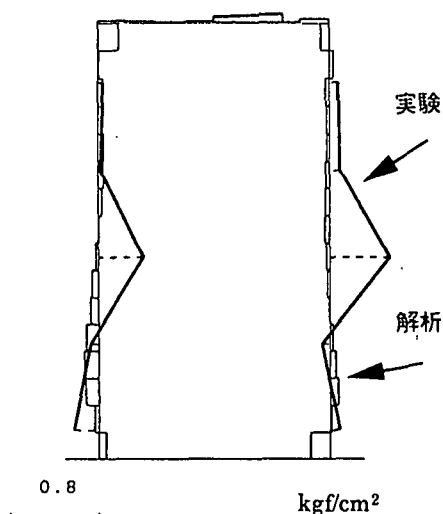


図-13 直土圧分布（時刻：5.0秒）