

# (177) 防波護岸の耐震性に関する研究 (その2)

— 非線形解析手法による模型実験の数値シミュレーション —

(財) 電力中央研究所 金谷 守・栃木 均  
 同上 工藤康二・岩楯敏広  
 東京電力(株) 安田 登

## 1. はじめに

近年、空港島や発電所施設の人工島立地など沖合いの海洋空間利用に対する社会的要請が高まっており、防波護岸の安全に対する信頼性の向上がますます重要となってきた。また、防波護岸の耐震安定性評価に対するより一層の高度化・合理化を図るためには地震時における防波護岸の動的な挙動を把握し、本来防波護岸に要求される機能を適確に評価しうる評価法を確立する必要がある。以上の観点から著者らは、防波護岸の強震時における挙動を調べるため模型実験や構成材料の物性試験、数値解析的検討を実施している。

本文では、それらの内、地震時における防波護岸の変形挙動の予測をジョイント要素を用いた非線形解析手法によって行うために実施した模型実験の数値シミュレーション結果について述べている。

## 2. ケーソン堤の傾斜実験のシミュレーション

### (1) 傾斜実験結果の概要<sup>1)</sup>

ケーソン堤式防波護岸模型の傾斜実験は、図1に示す通り土槽内に防波護岸の模型を作成し、土槽の一端を釣り上げることによって模型全体を徐々に傾斜させ、破壊に至るまでの傾斜角と模型の状態との関係を調べるものである。実験時における模型の傾斜角と等価な震度との関係については図2に示した通りとなる。ケーソン堤は傾斜角がおよそ30度に達した時点で破壊に至ったが、その時の状況は消波ブロックの崩壊と同時に、ケーソン本体が滑動するという形態となっていた。なお、傾斜角  $\theta = 30^\circ$  は図2より  $K_H = 0.5$ ,  $K_V = 0.13$  という震度に相当する。

### (2) 非線形解析法の概要

本実験の数値シミュレーションには、有限要素法を用いた静的2次元非線形解析法 (CONSEP) を用いた。本解析手法は、地盤材料に対して弾・塑性理論に基づいた応力-ひずみ関係<sup>2)</sup>を適用した非線形解析手法である。

### (3) 解析モデルと入力物性値

解析モデルの有限要素分割図を図3に示した。境界条件としては、モデル底面のみ固定境界とした。解析はすべて排水条件としている。

砂ならびに碎石の入力物性値は、排水三軸圧縮試験による応力-ひずみ関係を構成式によってシミュレーションして決定した。また、実験では2種類の重さの消波ブロックが用いられているが、解析では自重以外両者同一の物性値とし、内部摩擦角  $\phi_f$  のみ与えてバイリニアな応力-ひずみ関係とした。

本解析ではケーソンの周面にジョイント要素を配置する。ジョイント要素は一般によく用いられている Goodman流の要素で、せん断ならびに剥離に関する構成関係は図4(a)(b)に示されている通りとした。

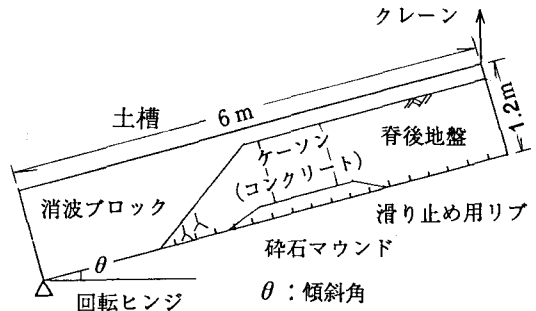


図1 傾斜実験の概要

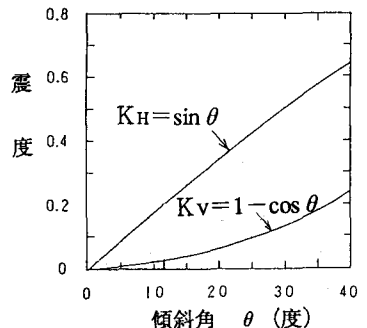


図2 傾斜角と震度の関係

ただし、ジョイント要素に引っ張り応力が生じた  
と判定された場合には、たとえせん断応力が破壊  
強度に至っていてもせん断破壊が生じたもの  
と見なすことにした。またジョイント要素のせん  
断強度については摩擦係数 $\mu = 0.50, 0.55$ の2通  
りを与えて解析している。

(4) 荷重条件

荷重条件は傾斜角に応じて図2に示す震度に対  
応した節点力を加えるものとし、解析は荷重増分  
法によって行った。

(5) 要素安全率の定義

ソリッド要素の要素安全率は次式のように定義  
した。

$$FS = \frac{\sigma' \cdot \tan \phi_f}{(\sigma_y - \sigma_x)^2 / 4 + \tau_{xy}^2}^{0.5} \quad (1)$$

ジョイント要素については、ジョイントのせん断  
応力がせん断強度に相当する応力を超過するか、引  
張り応力が発生した時を破壊と見なした。

(6) 解析結果

図5(a)(b)には、それぞれジョイント要素の摩  
擦係数を0.55, 0.50とした解析による傾斜角 $32^\circ$   
における安全率 $FS < 1.0$ の要素の分布とジョイント  
要素の破壊状況を示した。図中、破壊したジョイ  
ント要素に○印をしている。図に示していないが、傾  
斜角の増加に伴って消波ブロックで $FS < 1.0$ とな  
る要素が次第に広がって行き、実験時とほぼ同じ傾  
斜角に達すると消波ブロックのほぼ全域で $FS < 1.0$   
になる。しかし、背後地盤については依然とし  
て $FS < 1.0$ の領域は存在しない。ジョイント要素  
の破壊状況に着目すると、 $\mu = 0.55$ の場合、ケー  
ソンの海側端部で破壊していない要素が存在している。  
これは背後地盤からの土圧によりケーソンが海側に傾斜  
しようとするため、端部の拘束圧が増加したことによる  
と考えられる。一方、 $\mu = 0.50$ とすると傾斜角 $32^\circ$   
の段階でケーソン底面のジョイント要素がすべて破壊  
する結果となり、実験結果と良い対応を示すものとな  
っている。

3. ケーソン堤の模型振動実験のシミュレーション

(1) 模型振動実験の概要<sup>1)</sup>

強震時における防波護岸の変形挙動を調べる目的で、  
水の有無、消波ブロックの有無など種々の条件下にお  
ける模型振動実験が実施された。その結果、砕石マウ  
ンドや背後地盤が密に締め固められている場合、ケー  
ソンの沈下量は小さいこと。背後地盤表面の沈下は主  
にケーソンの海側への滑動に起因していること。消波  
ブロックはケーソンの滑動を押えるのに効果があること  
などの知見が得られている。

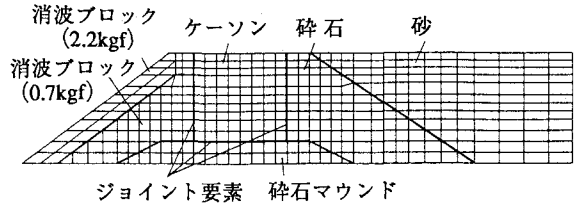


図3 解析モデルの有限要素分割図

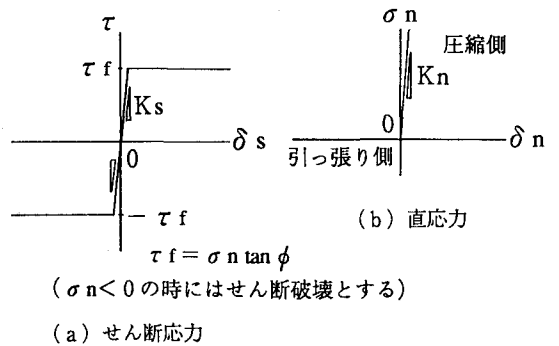


図4 ジョイント要素の構成関係

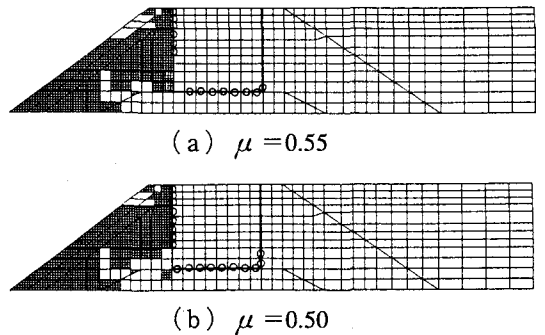


図5 要素安全率の分布とジョイント要素の破壊状況 (○印はジョイント要素が破断,  $\theta = 32^\circ$ )

(2) ジョイント要素を用いた非線形地震応答解析法の概要

模型振動実験のシミュレーションには電中研で開発された非線形地震応答解析法 (NAFSS) を用いる。本解析法はBiotの二相混合体理論に基づく運動方程式(U-W解法)に、弾・塑性論に立脚した繰返しせん断時における粒状体のダイレイタンシー特性を評価しうる構成式を導入した解析手法である<sup>3) 4)</sup>。今回の解析では先に示したものと同一ジョイント要素を導入した。

(3) 解析モデルと境界条件

解析に用いた有限要素分割図を図6に示している。ジョイント要素はケーソン底面と背後地盤側の側面に配置した。境界条件はモデル底面を固定境界とし、背後地盤と土槽の側面との境界には、ジョイント要素を配置して地盤と土槽間の剥離ならびに地盤の鉛直方向への変形を許すことにした。

(4) 入力物性値

砂・碎石の入力物性値については、動的変形試験、動的強度試験<sup>3)</sup>などを構成式でシミュレーションすることにより決定した。また、ケーソンと碎石間の摩擦係数は0.55とした。

解析ではレーリー減衰を考慮する。その際、ケーソン部については1次の固有振動数に対して5%の剛性比例型減衰を、砂および碎石に対しては同様に1次の固有振動数に対して2%の質量比例型減衰を与えた。

(5) 時間領域における直接積分法

時間領域における直接積分には、陰-陽混合法<sup>5)</sup>を用い、剛性の高いケーソンを陰解法領域とし、剛性の低い地盤領域を陽解法領域として解析した。また、タイムステップは $\Delta t = 10,000$ 分の1秒とした。

(6) 解析ケース

今回の解析では、水が存在しない実験のシミュレーションを行うことにした。したがって、すべて排水条件で解析している。また入力動についてはS1地震動：時間軸1/1の不規則地震動を用いた実験を対象とした。なお、実験では地震動の継続時間がおよそ10秒となっているが、6秒以降の変形量は小さかったことから図7に示す通りその主要動とみなしうる $t = 5 \sim 11$ 秒の6秒間の加速度波形を解析用の入力波形とした。

(7) 解析結果

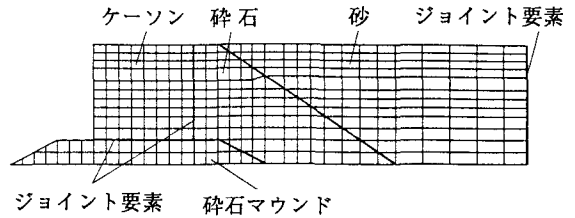


図6 解析モデルの有限要素分割図

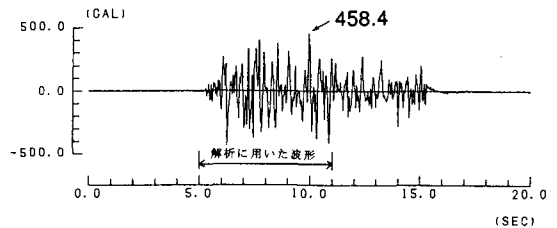


図7 入力地震動の時刻歴

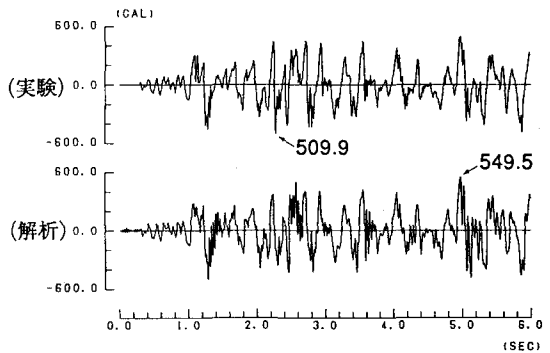


図8 ケーソン天端の水平応答加速度の比較 (AH1)

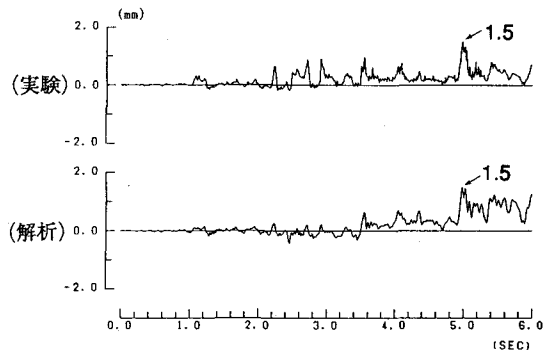


図9 ケーソンの水平変位の比較 (DH1)

図8にはケーソン天端の水平応答加速度の時刻歴の比較を示した。最大加速度の大きさについては解析値の方が若干大きめの値を示しており、最大加速度が生じる時刻も多少のずれが認められるものの、ほぼ良好にシミュレーションされているものと評価される。

図9には、ケーソン左上端の水平変位の比較を示した。なお、図ではケーソンの海側への変位を正として表わしている。実験では時刻  $t = 5$  秒付近で海側への水平変位が最大1.5 mmとなっているが、解析結果もほぼ同時刻に海側への水平変位が同じだけ生じており、今回の実験程度の滑動量レベルに対する本解析手法の適用の妥当性を示す結果となっている。

図10はケーソン右上端での鉛直変位の時刻歴の比較を示した。今回の模型実験では砕石マウンドが十分締め固められていたため、震動によるケーソンの鉛直変位は極く微小なものになっていたが、解析によるケーソン沈下もほとんど生じない結果になっている。

図11には、時刻  $t = 6$  秒におけるモデル全体の変形状態を示している。ケーソンは背後地盤からの土圧により最終的には海側への滑動を伴いながら傾斜し、ケーソン周辺の背後地盤はその影響によって沈下する様子が良好に表現されている。

#### 4. まとめ

強震時における防波護岸の変形・破壊挙動を予測するための手法として、ジョイント要素を用いた非線形 FEM 解析手法を取り上げ、模型実験の数値シミュレーションを実施した。特に模型振動実験のシミュレーション解析より、震動時におけるケーソンの変位、ならびにケーソンの変位に伴うケーソン周辺の背後地盤の変形モードに関して良い一致をみた。今後は水が存在する場合の模型振動実験のシミュレーションを行うと共に、消波ブロックのような異形材料の変形破壊挙動をより精度よく解析するための手法の開発を行う予定である。

なお、本研究は電力共通研究として実施したものである。御協力頂いた関係各位に感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 栃木 均他：防波護岸の耐震性に関する研究（その1）—模型実験による大地震時挙動の把握，第22回地震工学研究発表会，投稿中，1993。
- 2) Nishi, K. and Esashi, Y. : Stress-strain relationships of sand based on elasto-plasticity theory, Proc. of JSCE, Vol.280, pp.111-122, 1978.
- 3) Kanatani, M., Nishi, K. et al : Numerical simulation of shaking table test by nonlinear response analysis method, Proc. 2nd Int. Conf. on Recent Adv. in Geotech. Earthq. Eng. and Soil Dynamics, St. Louis, pp.685-692, 1991.
- 4) Nishi, K. and Kanatani, M. : Constitutive relations for sand under cyclic loading based on elasto-plasticity theory, Soils and Foundations, Vol.30, No.2, pp.43-59, 1990.
- 5) 金谷 守他：地震時における基礎地盤の安定性評価（その8）—模型振動実験を対象とした数値シミュレーション手法の検証と地震時安定性評価の例示—，電中研研究報告，U90064, 1991.

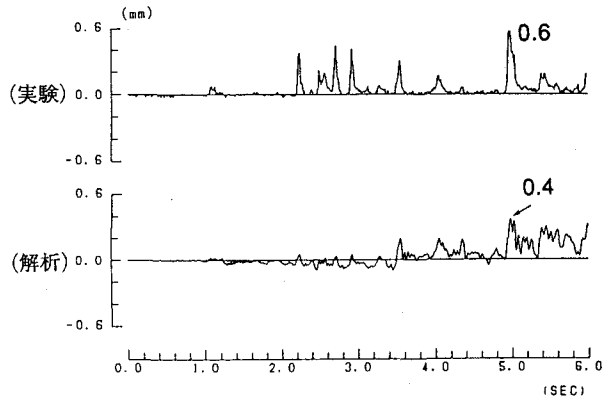


図10 ケーソンの鉛直変位の比較 (DV2)

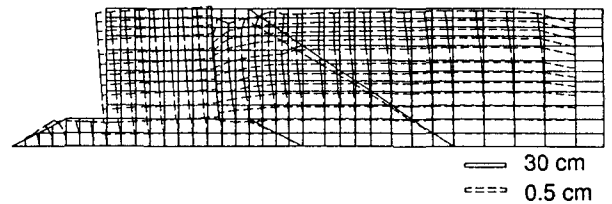


図11 時刻  $t = 6$  秒時のモデルの変形状態