

# (176) 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 -

(財) 電力中央研究所 ○ 栃木 均 金谷 守  
 工藤康二 岩楯敏広  
 東京電力(株) 藤谷昌弘

## 1. はじめに

防波護岸の耐震安定性評価法の合理化、高度化を図るためには、建設地点で想定される大地震に対しての動的な挙動を精度良く予測し、それらを反映させた設計法が必要となる。大地震時の挙動としては、ケーソンの滑動、捨石マウンドや裏込めの沈下等が考えられるが、防波護岸の機能維持の観点からは、大地震によってどの程度の変形が生じるかという点が重要である。この場合、ケーソンの天端高の減少量やケーソンが滑動したことによる背後地盤の沈下量等が評価の対象となる。そのため、ジョイント要素を用いたFEMやDEMにより、種々の検討が行われ、主としてケーソンや背後地盤内の滑動に起因する変形量の評価が試みられている<sup>1)</sup>。これらの検討に加えて、背後地盤やケーソンの沈下量を精度良く評価するためには、捨石材の繰返しせん断による体積変化を考慮した解析が必要となる。実施工の面からも、捨石マウンドや裏込めを海中で密に締固めることは困難であり、捨石材の塑性変形による影響が無視できないものと考えられる。

本研究では、防波護岸の耐震安定性評価法を確立するための検討として、ケーソン堤式護岸の大型の模型実験と、捨石材の弾塑性構成則を考慮した非線形FEMによる数値シミュレーション<sup>2)</sup>を実施した。ここでは、これらの内、大地震時挙動の把握を目的とした模型実験の概要について述べる。

## 2. 実験方法

### (1) 実験の概要

幾何縮尺1/26のケーソン堤式の護岸を作成し、模型を傾斜させて静的な地震力を作用させる傾斜実験と、振動台で加振することにより動的な変形・破壊挙動の検討を行う振動実験を実施した。検討の対象は、水深20mの地点に想定した消波ブロック被覆型のケーソン堤式護岸であり、建設地点での有義波高7.8m、水平震度0.2を設定して従来の設計法に基づいて断面を設定した。傾斜実験では、静的な地震力を漸増させて模型を破壊させ、主に、終局耐力の大きさと破壊形態について検討することを目的とする。振動実験では、設計用の模擬地震波を加振波として用い、大地震時の挙動とそれに及ぼす水、消波ブロックの影響について検討することを目的とする。

双方の実験とも、共通の模型を用いたが、傾斜実験では水が無い場合について検討した。実験模型は、高さ1.2m、長さ6m、奥行2mの鋼製の土槽内に作成した。模型の断面設定においては、幾何縮尺を1/26として、Clough-Pirtzの相似則<sup>3)</sup>を考慮した。図1に模型の概要を示す。ケーソンは、密詰め

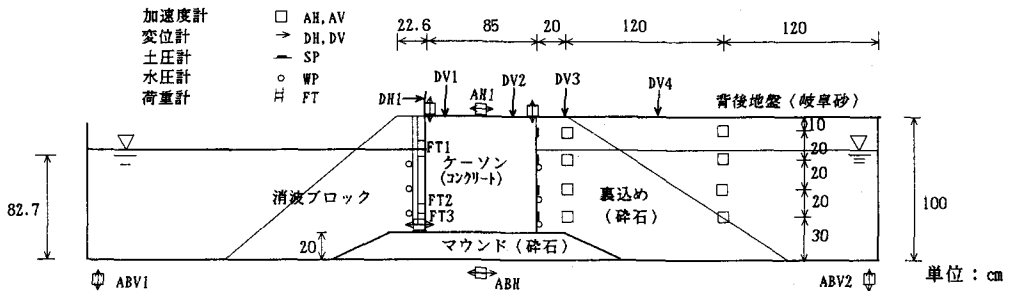


図1 実験模型の概要

製とし、高さ80cm、幅85cm、奥行62cmの寸法で奥行方向に3体設置した。マウンドや裏込めの捨石材としては、実際の捨石材と相似粒度で、粒径5～25mmの碎石を用い、所定寸法の型枠内で密に締固めた。背後地盤の材料としては湿潤状態の岐阜砂を用い、捨石材と同様に相対密度が80%程度となるまで密に締固めた。消波ブロックは、実際の物と相似形のモルタル模型を用い、1個当たり0.7kgと2.2kgのブロックを整積みにした。

### (2) 傾斜実験の方法

土槽の一端をヒンジで床に固定し、反対側の端をクレーンで静かに吊上げた。図2に傾斜実験の概要を示す。クレーンの吊上速度は毎秒約10cmとし、土槽に付けた加速度計により、クレーンの動きによって及ぼされる衝撃は非常に小さいことを確認している。模型と土槽との間の境界条件は固定とし、模型の内部に破壊が生じるようにした。土槽の傾斜角は分度器と加速度計により計測した。土槽の傾斜角を1～2度刻みで徐々に増加させ、各ステップ毎におよそ15分程度の間において破壊がこれ以上進行しないことを確認してからひずみや変位の計測を行い、次のステップへと進んだ。

### (3) 振動実験の方法

水、消波ブロックおよび背後地盤の有無により4種の模型を作成し、加振後の変形状態や滑動量、沈下量の大きさを相互に比較した。加振は、最大加速度407galの模擬地震波<sup>4)</sup> (M=8.5, 震央距離68kmを想定)を用いて行い、主要動を含む10秒間を加振時間とした。地震波加振の後、振動数5Hzの正弦波を3波入力し、加速度振幅を400, 600, 800galと増大させ模型を破壊させた。これらの加振の他、模型の振動特性を調べるための実験として、自由振動試験、共振実験、低加速度の地震波加振を模型完成の直後に行った。主な計測項目は、ケーソンの加速度、変位、ケーソン壁面の土圧、動水圧、消波ブロック圧、背後地盤内の加速度、間隙水圧であり、実験終了時には、模型の変形、破壊状態を側面および上面から記録した。傾斜実験と同様に、底面の境界条件は土槽に固定することを基本としたが、消波ブロックの底面にのみモルタルの板を敷き、滑動可能な条件とした。

## 3. 実験結果

### (1) 傾斜実験の結果

模型の最終的な破壊形状とそれぞれの傾斜角にお

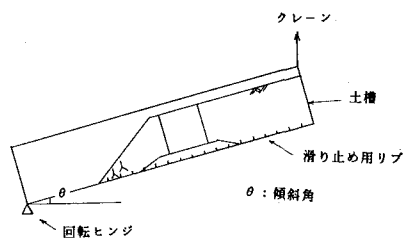


図2 傾斜実験の概要

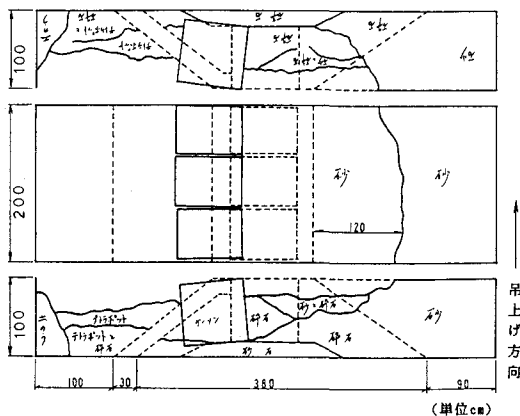


図3 傾斜実験による破壊状況 (傾斜角31度)

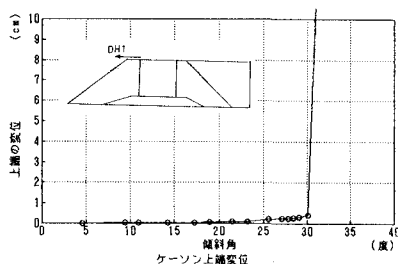


図4 傾斜角と変形量の関係

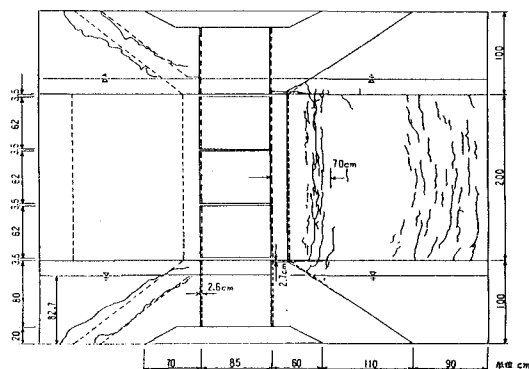


図5 振動実験による破壊状況

るケーソン上端の変位を図3、4示す。実験中の模型の状態は、傾斜角11度以下では変化はなく、26度付近で消波ブロックが2個くずれ落ちた。この頃からケーソンに1~2mmの水平変位が計測され始め、傾斜角31度に達した直後に突然崩壊した。図4に示したように、破壊が起きるまでの変位は微小であり、破壊が始まると急激に変位が増大した。破壊は、消波ブロックがくずれした後ケーソンが滑り落ち、最後に背後地盤の土塊が滑り落ちて終了した。図3の破壊形状からわかるように、破壊後もマウンドはほぼ原型を保っており、ケーソンの滑動による破壊であることが示されている。

角度 $\theta$ だけ傾斜させたときの荷重状態は、単位重量当り斜面下方向に $g \sin \theta$  ( $g$ は重力加速度)、斜面直角方向に $g(1 - \cos \theta)$ の力が作用した状態となる。傾斜角から破壊が起きたときの荷重の大きさを求めると、斜面方向に0.52g、斜面直角方向に0.14gとなる。このことは、拘束圧が多少低下していることを考慮に入れないとしても、水の無い場合には、少なくとも0.52gの地震加速度までは護岸模型に大きな変形が生じないことを示している。

## (2) 振動実験の結果

加振後の模型の破壊状況を図5に示す。同図は全ての加振が終了した後の状態であり、個々の加振による変形が全て累積されて示されている。同図にあるように振動台による加振によって、ケーソンが海側におよそ2.6cm滑動し、背後地盤や消波ブロックが数cm程度沈下した状態となった。ケーソンの沈下や傾斜は微小であり、マウンドの形状にも大きな変化は認められない。傾斜実験の場合と同様に、ケーソンの滑動による破壊であると見ることができる。図6には、それぞれの加振によるケーソンの滑動量と背後地盤の沈下量の関係を示すが、それらの間にはほぼ正比例に近い強い相関性があることが示されている。すなわち、背後地盤に生じた沈下量のほとんどがケーソンの滑動によって引き起こされたものと見ることができる。これらの結果は、ケーソン堤式護岸の主な破壊形態が、海底地盤が十分な強度を持ち、捨石マウンドを密に締り固めた場合には、ケーソンの海側への滑動とそれに伴う背後地盤の沈下となることを示している。

図7には、模擬地震波による加振を行ったときの挙動を示す。入力波の最大加速度は407galであり、この加振によってケーソンが海側に滑動し、約5mmの残留

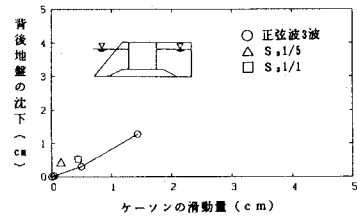


図6 ケーソンの滑動量と背後地盤の沈下量の関係

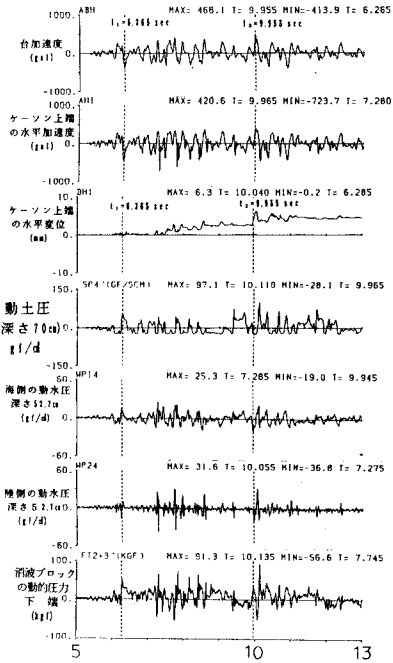
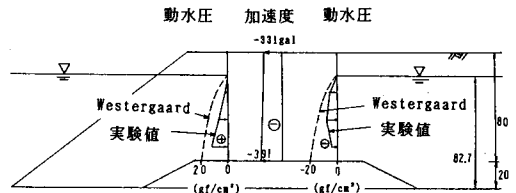
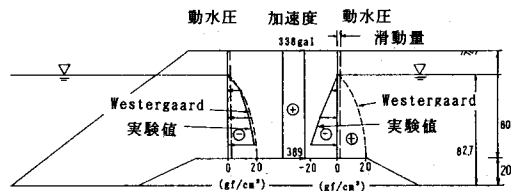


図7 ケーソンの地震時挙動 (S<sub>2</sub>1/1, 407gal)



(a) 加速度が負の場合(t=6.265秒)



(b) 加速度が正の場合(t=9.955秒)

図8 動水圧の分布 (S<sub>2</sub>1/1, 407gal)

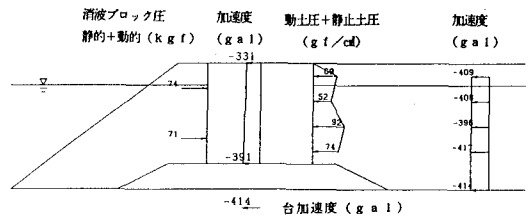
変位を生じている。これらの記録を用いて、振動台の加速度が正（右向き）のピークをとる時刻と負（左向き）のピークをとる時刻についての動水圧、土圧、消波ブロック圧の分布を示したのが図8、図9である。動水圧の分布（図8）によると、海側のケーソン壁面に関しては、常に慣性力と同じ向きの動水圧が作用し、Westergaardの動水圧との対応も良好である。ケーソンの陸側の壁面に関しては、慣性力とは逆向きの付加質量としては表現できない動水圧が認められる。これは、ケーソンが滑動したことによる急激な体積変化によって引張りの向きの動水圧が作用したためである。土圧と消波ブロック圧の分布（図9）については、加速度が負の場合（同図(a)）には、慣性力の作用によってケーソンと消波ブロックが背後地盤を押し込んだ状態が表われている。加速度が正の場合（同図(b)）には、ケーソンが消波ブロックを押し込んだ状態で滑動し、背後地盤との間に剥離が起きた状態が表われている。

図10では、水、消波ブロック、背後地盤の有無によるケースを相互に比較することによってそれらがケーソンの滑動に及ぼす影響について検討した。その結果、背後地盤有り場合には、土圧の作用によってケーソンが滑りやすくなること、水を入れた場合には、浮力の作用により接地圧が減少するためさらにケーソンが滑りやすくなることが明らかとなった。また、消波ブロックの有無の比較からは、消波ブロックを積んだ場合にはその抵抗によりケーソンが滑りにくい状態となることが示された。この結果は、消波ブロックを考慮しないモデルでケーソンの滑動量評価を行った場合には、滑動量を大きめに評価することとなるため、安全側の評価となることを示している。

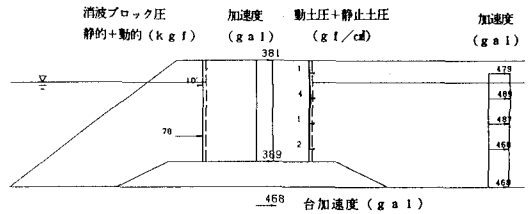
なお、本研究は電力共通研究「原子力発電所の新立地土木技術に関する研究」の一環として行われたものである。御協力頂いた関係各位に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 栃木 均：防波堤・護岸の耐震性に関する研究－個別要素法の消波ブロックへの適用－、土木学会第48回年次学術講演会概要集、1993。
- 2) 金谷 守、栃木 均、工藤康二、岩楯敏広、安田登：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－、第22回地震工学研究発表会、1993。
- 3) Clough, R. W. and Pritz, D. : Earthquake Resistance of Rock-Fill Dams, Transactions of ASCE, Vol. 123., 1958.
- 4) 軽水炉改良標準化耐震設計小委員会：耐震設計の標準化に関する報告書、1980

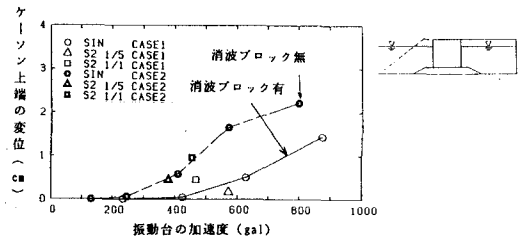


(a) 加速度が負の場合 (t=6.265秒)

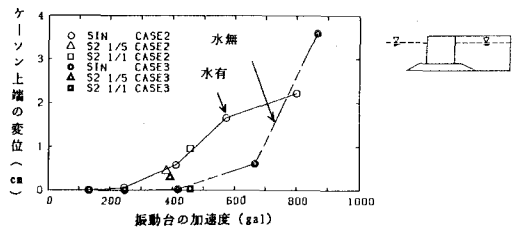


(b) 加速度が正の場合 (t=9.955秒)

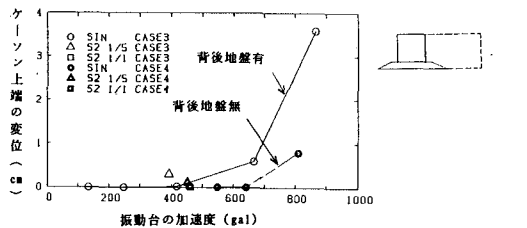
図9 土圧、消波ブロック圧の分布 (S<sub>2</sub>1/1, 407gal)



(a) 消波ブロックの影響



(b) 水の影響



(c) 背後地盤の影響

図10 ケーソンの滑動に及ぼす水、消波ブロック、背後地盤の影響