

兵庫県南部地震における防波堤の有効応力解析

井合 進・一井康二・森田年一

運輸省港湾技術研究所 (〒239横須賀市長瀬3-1-1)

兵庫県南部地震においては、神戸港における防波堤が1.0~2.5m程度沈下する被害を受けたが、その残留水平変位は0.5m以下に留まった。本研究では、このように特徴的な防波堤の変形機構を明らかにするため、有効応力解析を行った。解析の結果は、実際の防波堤の被害と整合するものとなり、防波堤の沈下は、主に防波堤の直下の置換砂部分の過剰間隙水圧の上昇に伴う軸差せん断的な変形によるものであることが示された。

Key Words : Breakwater, Effective Stress Analysis, Liquefaction, Settlements

1. はじめに

阪神大震災においては、神戸港における防波堤が1.0~2.6m沈下する被害を受けた。これら防波堤の沈下量は、神戸港のケーソン式岸壁の沈下量と同程度であった。しかし、残留水平変位は、岸壁の場合には、最大5m、平均3m程度に達したのに対して、防波堤の場合には、0.6m以下に留まった。防波堤、岸壁の両者とも、まさ土による置換地盤の上に建設されたものであったが、その地震時挙動は、このように対照的なものとなった。岸壁の場合には、背後の埋立土からの土圧を受けるのに対して、防波堤の場合には、地盤・構造断面が左右対称で土圧に相当する外力が作用していないことが、このような対照的な挙動を示した一因と考えられる。

しかし、左右対称な断面を持つ防波堤であっても、地震動作用中には、水平方向にも慣性力が作用するはずであり、水平変位がどの程度小さい値に留まるか否かについては明らかではない。また、防波堤の沈下の機構としては、過剰間隙水圧の逸散に伴う沈下の機構とともに、置換地盤内の過剰間隙水圧の上昇にともなう支持力低下による機構も考えられる。地震時における防波堤の挙動については、このように解明すべき点も多々残されている。

本研究では、このような点に関する防波堤の地震時挙動を明らかにするため、防波堤の有効応力解析を行った。なお、ケーソン式岸壁の有効応力解析については、別途報告されている¹⁾。

2. 防波堤の被害状況

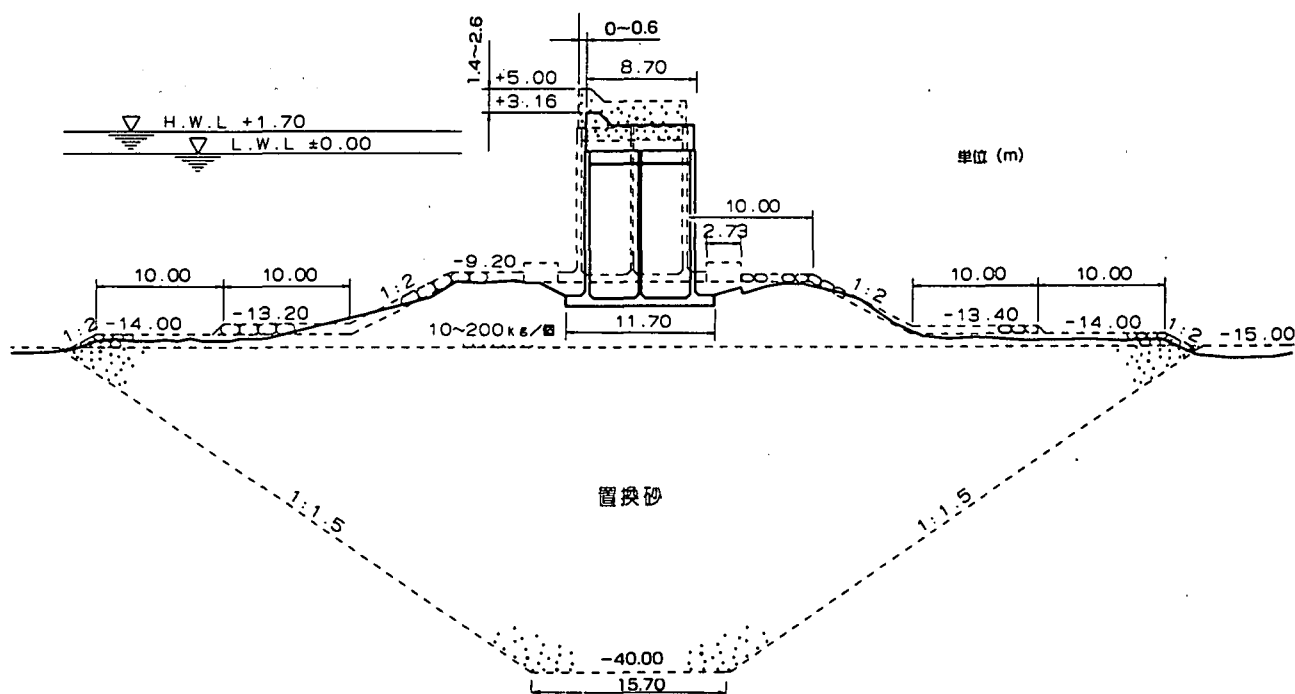
阪神大震災における防波堤被害の代表例として、図-1に神戸港第7防波堤の断面および被災状況を示す。同図に示すとおり、この防波堤は、厚さ25mのまさ土による置換地盤の上に建設され、地震によりケーソンが1.4m~2.6m沈下したが、法線の出入りは0.6m以下にとどまった。高さ約13m、幅約9mのケーソンが厚さ約6mの捨石マウンドの中にめり込むように沈下し、捨石マウンドもそれに連れ込まれるように変形しているのが特徴である。

3. 有効応力解析

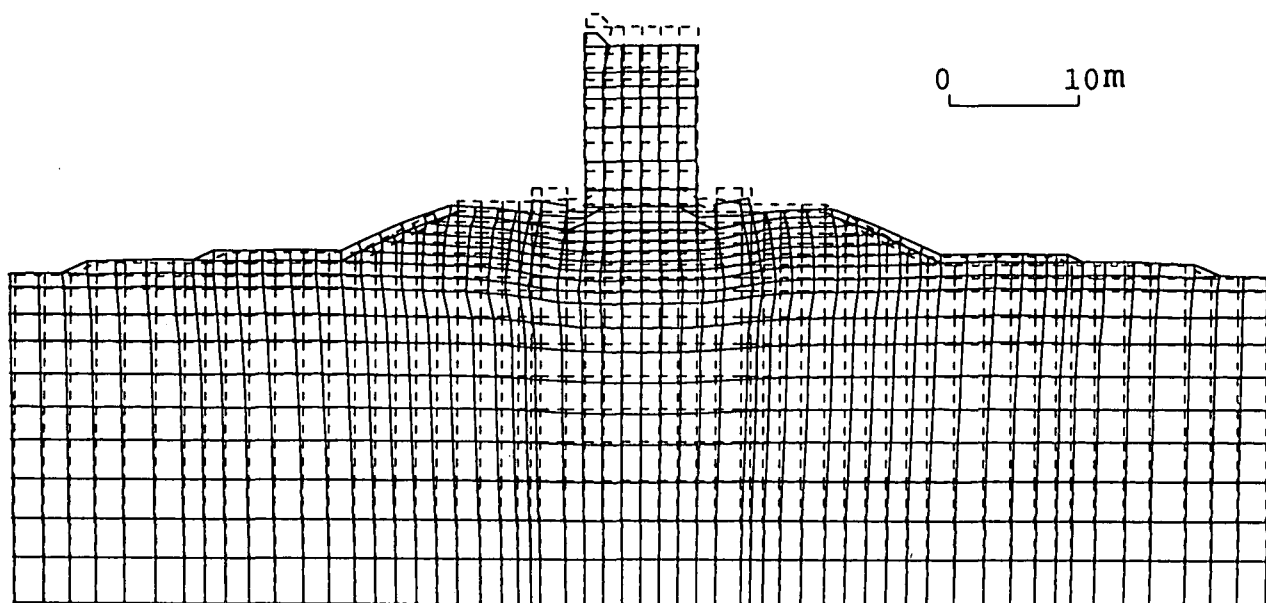
本研究で用いたモデルは、ひずみ空間での塑性論に基づく多重せん断機構モデル²⁾である。このモデルは、地震応答・液状化解析で重要となる主応力軸回転の影響を考慮できる点に特徴がある。主応力軸回転の影響は、異方圧密状態からの繰返しせん断時の土の挙動に著しい影響を与えるので、有効応力解析では特に重要なポイントとなる。解析においては、このモデルを有限要素法に組み込んで、平面ひずみ状態(2次元)、非排水条件下で解析した。

解析モデルの主なパラメタとしては、土の変形特性を規定する微小ひずみ時のせん断弾性係数、内部摩擦角、および土の液状化抵抗(非排水繰返し載荷時の変形特性)を規定するダイラタンシーのパラメタなどが必要となる。これらのパラメタは、PS検層結果、原位置地盤凍結サンプリング試料を用いた繰返し三軸試験結果(供試体直径30cm)などに基

て決定した。有限要素法による数値解析では、防波堤断面の全



図－1 防波堤の構造断面と被災状況（阪神大震災，神戸港第7防波堤）



図－2 有効応力解析による地震後の残留変形（メッシュ変形図）

長約200mの範囲を解析対象範囲とした。ケーソン底面およびその両下端に設置されている根固石の底側面では、スベリおよび剥離を考慮するため、ジョイント要素を用いた。また、解析対象領域の左右境界では、半無限に続く水平成層地盤（自由地盤）の地震応答を考慮し、粘性ダンパーをもって波動透過境界とした。解析対象領域の底面には、ポートアイランドの深さ-32mで観測された兵庫県南部地震での記録波形（神戸市開発局による）を、上下・水平同時に入力した。

有効応力解析では、地震応答解析に先だって、地震前の地盤・構造物の応力状態を再現する必要がある。このため重力を考慮した静的解析を行った。次に、この応力状態を初期条件として、地震応答解析を行った。

4. 地震時防波堤挙動の解析結果

有効応力解析の結果、図－2，3に示すような防波堤の残留変形が得られた。ケーソンが捨石マウン

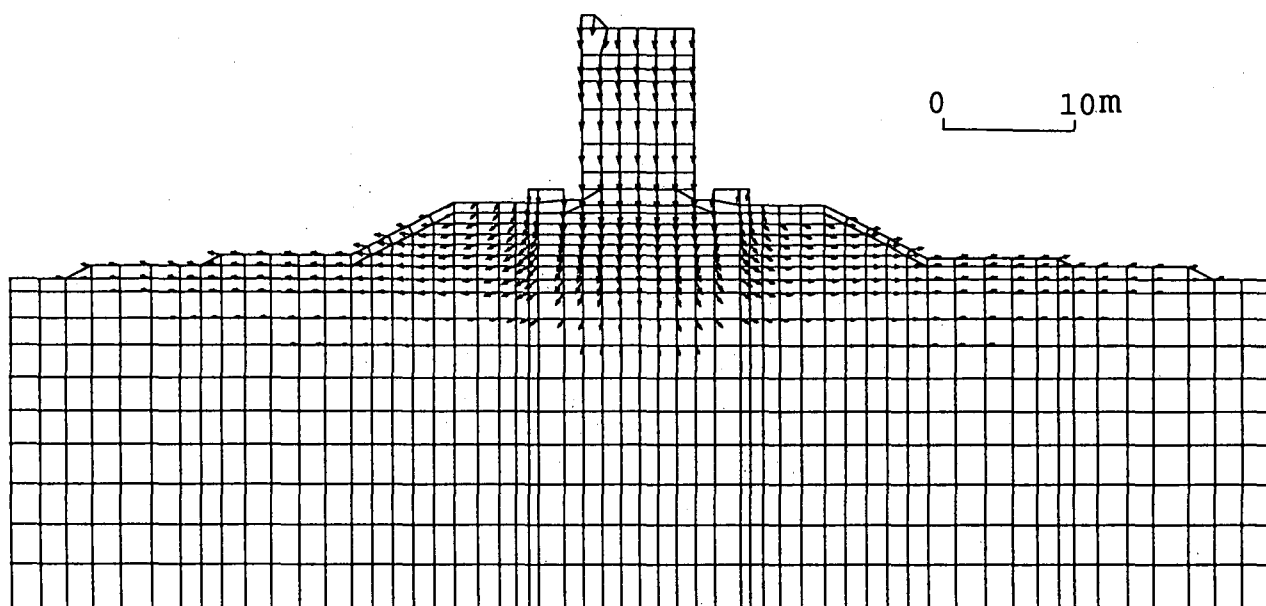


図-3 有効応力解析による防波堤の地震後の残留変形（変位ベクトル図）

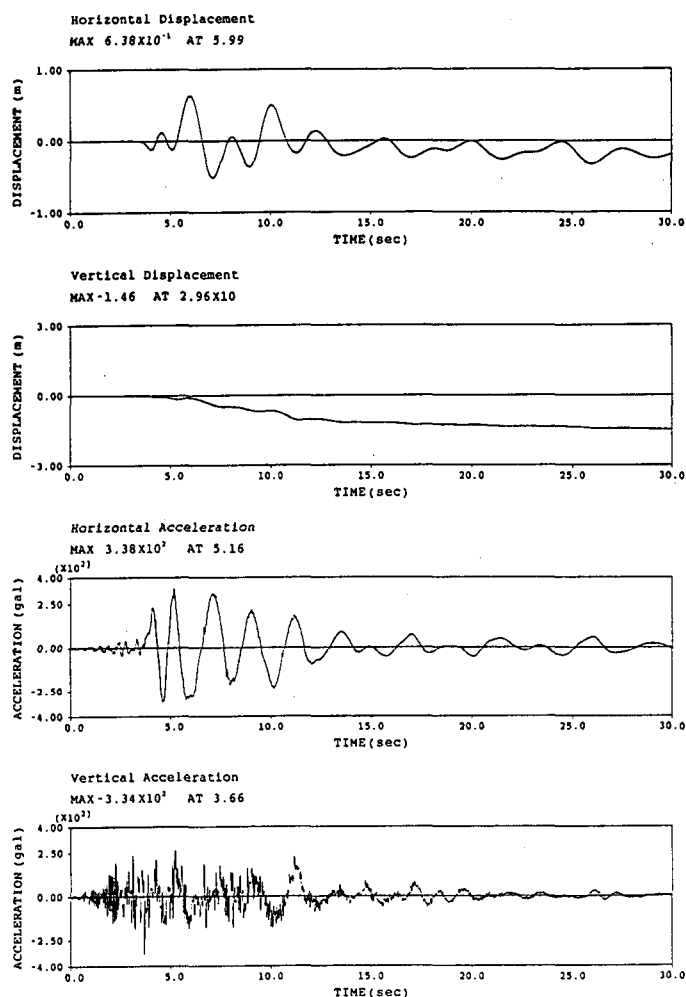


図-4 防波堤天端の加速度・変位応答時刻歴解析結果

ドを通して、置換層の中にめり込むように沈下しており、先に述べた現地被害調査結果と整合する変形形態となっている。

解析結果として得られたケーソン天端の沈下は、図-4（上2段目）に示すとおり、加振とともに累積し、残留沈下量は1.5m程度となった。先に述べた現地調査結果（1.4～2.6m）と比べると、解析結果は平均で0.5m程度小さ目の値を示しているが、これは置換砂層厚（25m）の2～3%に相当する値であり、解析において、間隙水の排水に伴う沈下を考慮しなかった分に相当するとの解釈も成り立つ。

ケーソン天端の水平応答は、図-4（上1, 3段目）に示すとおり、加振中の最大加速度は340Gal、これに応じて最大0.6m程度の変位が発生しているが、残留水平変位は0.2～0.3mに留まった。置換砂を含む防波堤全体の断面が対称形でバランスがとれているため、岸壁とは異なり、残留水平変位が小さくなるのではないかと考えられる。なお、ケーソン天端の水平変位の内の5割程度は、図-5に示すケーソンの傾斜角の時刻歴から理解されたとおり、ケーソンのロッキングによって励起されている。

解析の結果得られた置換砂の内部の過剰間隙水圧比の分布を図-6に示す。ここに、過剰間隙水圧比

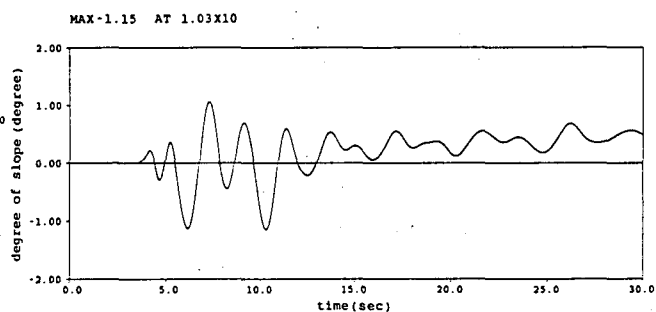


図-5 防波堤の傾斜の時刻歴解析結果

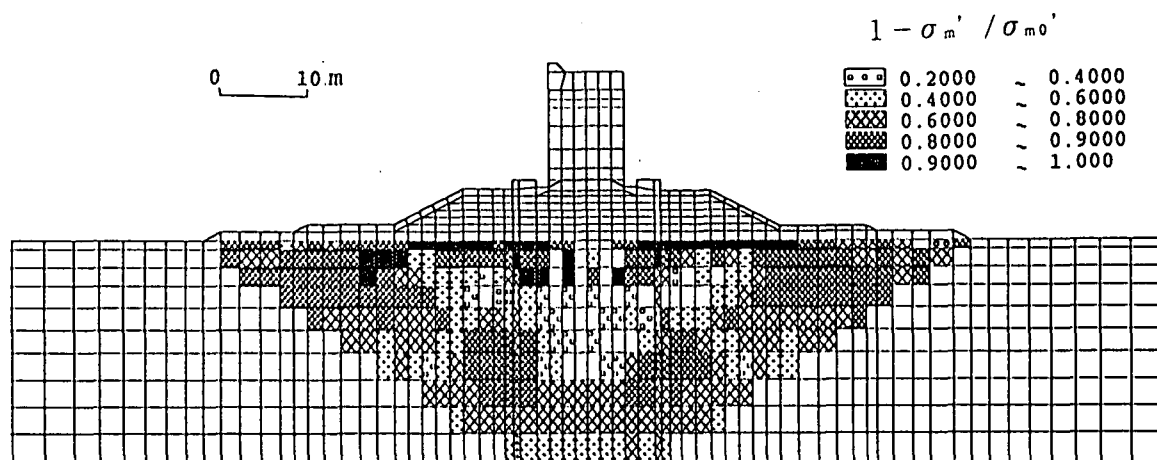


図-6 有効応力解析による加振後の過剰間隙水圧比の分布

は、地盤内の初期平均有効応力 σ'_{m0} に対する振動中の平均有効応力 σ'_m の比を用いて、 $(1 - \sigma'_m / \sigma'_{m0})$ なる量により定義している。同図に示すとおり、基礎の支持力に最も関係するケーソン直下の地盤で過剰間隙水圧比は0.4~0.8程度上昇しており、ケーソンの沈下は、これら過剰間隙水圧の上昇にともなって基礎地盤の支持力が低下し、置換砂のせん断変形が進行したためと考えられる。

以上のとおり、置換砂上に建設された防波堤の被害状況については、有効応力解析により、概ね現地調査結果と整合する結果が得られ、その水平応答や沈下などに関する地震時挙動が明らかにされた。

5. 結論

阪神大震災において約2m沈下した神戸港の防波堤の有効応力解析を行い、以下の結論を得た。

- (1) 解析結果は、沈下1.5m、水平変位0.2~0.3mとなり、概ね地震による防波堤の変形挙動と整合するものとなった。
- (2) 防波堤の沈下の7割程度は、ケーソン直下の置換砂層における過剰間隙水圧上昇に伴う支持力低下の機構によるものであり、残りの3割程度が過剰間隙水圧の逸散によるものと推定される。
- (3) 解析によるケーソンの応答は、ロッキング的なモードが卓越するものとなり、ケーソン天端の水平最大加速度は340Gal、これに応じて最大変位も0.6mに達したが、置換砂を含む防波堤全体の断面が対称形でバランスがとれているため、その残留水平変位は小さい値に留まったものと推定される。

参考文献

- 1) 一井康二, 井合 進, 森田年一: 重力式岸壁の被災程度に関する有効応力法による検討, 第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, 土木学会, 1997, pp. 251~258
- 2) lai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations, Vol. 32, No. 2, pp. 1-15