

## 重力式岸壁の被災程度に関する有効応力法による検討

運輸省港湾技術研究所 一井康二\*  
井合 進\*\*  
森田年一\*

兵庫県南部地震において被災した神戸港のケーソン式岸壁に対し、液状化を考慮した2次元有効応力解析を実施した。解析の結果、本研究で用いた解析プログラムFLIPの重力式岸壁の変形量解析に対する適用性が検証された。そこで、岸壁の条件および入力地震動の加速度レベルを変えてパラメトリックスタディを行い、ケーソン式岸壁の地震時変形量に影響を及ぼす因子について検討した。また、過去の被災事例をもとに野田・上部によって提案された方法による予測変形量と本解析の結果を比較し、重力式岸壁の被災変形量の簡易予測法について検討を加えた。

### 1.はじめに

神戸港の岸壁は全体の約9割がケーソン式岸壁であり、地震により最大5m・平均3mの水平変位、平均1.5mの沈下、3~4度の傾斜が生じた。これらの岸壁の被災メカニズムについて、筆者らは有効応力法による数値解析を行い検討を行ってきた。有効応力解析による再現計算結果は、地震後に調査されたケーソンの被災状況とよく整合するものであり、解析プログラムの適用性が検証されると同時に、被災メカニズムの概略を示すことができたと思われる。また、若干のパラメトリックスタディによって、置換砂・埋立土が岸壁の変形に及ぼした影響と上下動の影響についても分析してきた<sup>1)</sup>。

本論文では、以上の結果を踏まえ、有効応力解析結果のより詳細な分析を行うと同時に、パラメトリックスタディを行い、重力式岸壁の被災程度に影響を及ぼす因子について検討した。

### 2. 有効応力解析モデルと入力パラメータの設定

有効応力解析では過剰間隙水圧の発生に伴う有効応力の変化を考慮して動的解析を行うため、適切な応力-ひずみ関係および過剰間隙水圧モデルが必要である。本研究では応力-ひずみ関係として東畑・石原による任意方向せん断面の双曲線モデルを、過剰間隙水圧に

ついては筆者らの一人による塑性せん断仕事及びせん断応力の関数として与えるモデルを用いた<sup>2)</sup>。今回の解析に用いた液状化汎用解析プログラムFLIP (Finite element analysis of LIquefaction Program) は、前述のモデルを用いることにより、液状化解析で特に重要となる異方圧密状態からの繰返しせん断時の主応力回転の影響を適切に考慮できる点に特徴がある。解析は非排水条件で行い、モデルのパラメータは運輸省第三港湾建設局が実施した各種地盤調査・試験結果 (PS検層・凍結サンプリングを含む) に基づいて決定した。なお、パラメータの詳細は参考文献 (1) を参照されたい。ケーソン背面及び底面にはジョイント要素を用い、コンクリート壁面にそった滑りを考慮できるようにした。側方境界では無限遠方における水平成層地盤の地震応答を考慮し、下方境界ではポートアイランドの地中 (GL-32m) の観測記録のNS成分とUD成分を境界液として20秒間入力した。図-1に入力した波形を示す。

### 3. 重力式岸壁の被害の再現計算と被災メカニズム

再現計算の対象とした岸壁は六甲アイランドの南側にある-14m岸壁である。図-2に岸壁の被災状況図を示すが、天端の水平変位が約5m、同鉛直変位 (沈下) 約2m、傾斜角約8% (約5度) である。一方、解析によって得られた変形図を図-3に示す。ケーソン周辺の詳細図のみを示しているが、天端の水平変位約3.5m、鉛直変位 (沈下) 1.5m、傾斜角約4度 (海側) という結果であり、実被害とオーダー的に整合する結果となっている。変形の状況を詳しく見ると、ケーソンが直下の捨石マウンドに傾斜しながらのめり込む形態を示しており、これは六甲アイランドの同様の形式の岸壁を

キーワード：ケーソン式岸壁、有効応力解析、液状化

\*運輸省港湾技術研究所 構造部地盤震動研究室

Tel : 0468-44-5028 Fax : 0468-44-4095

\*\*運輸省港湾技術研究所 構造部地盤震動研究室長

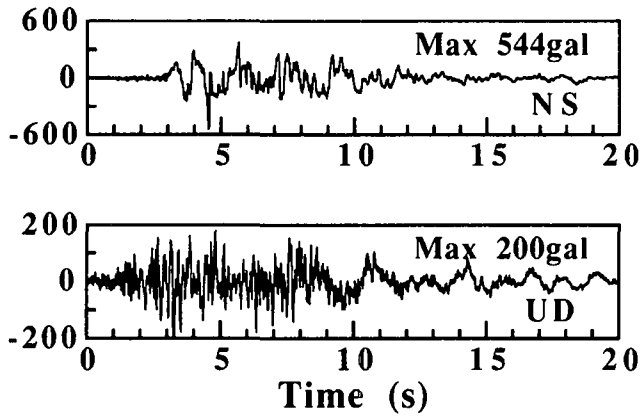


図-1 入力地震動  
(ポートアイランド  
GL-32m, 神戸市開発局)

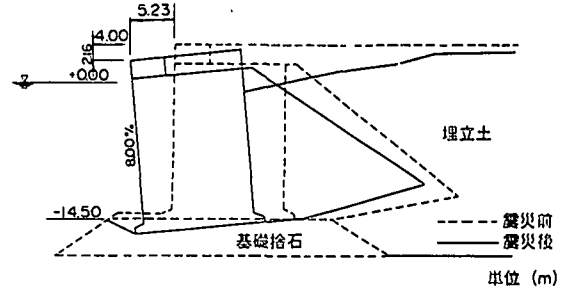


図-2 岸壁の被災状況

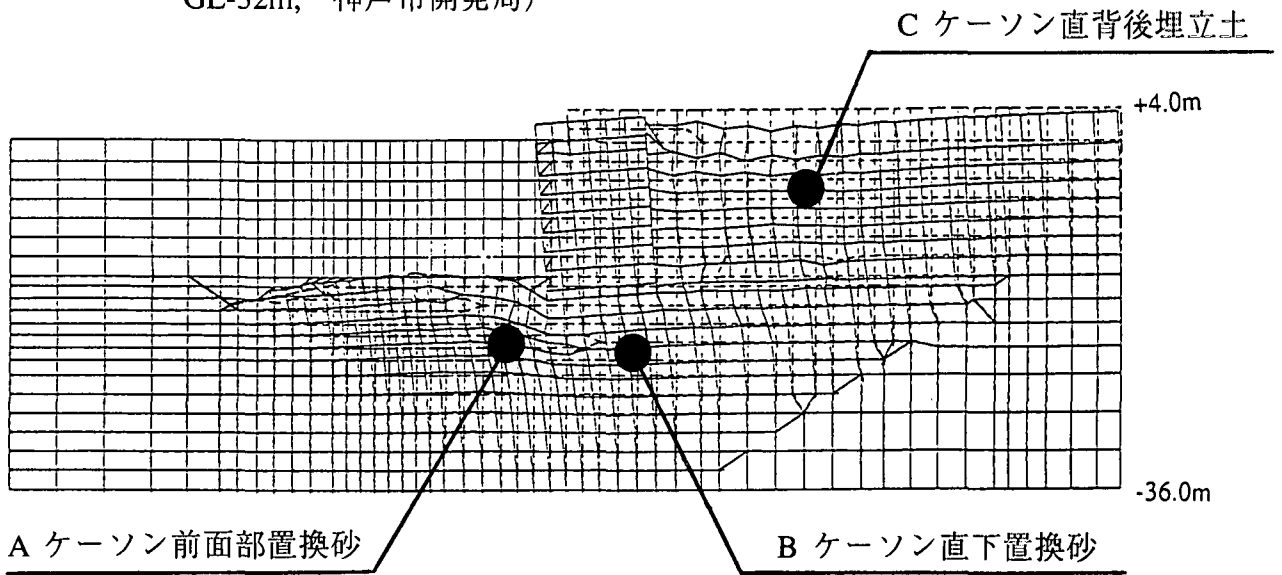


図-3 ケーソン周辺の変形詳細図

対象にした潜水現地調査の結果とも被災形態の点で整合する。以上の点から、本解析の結果は実被害と概ね整合性があり、本解析で使用したプログラムの適用性は検証されたといえる。

岸壁の被災メカニズムについてみると、解析結果によれば置換砂部分及び埋立土部分の連続的な変形に伴う被災形態を示しており、ケーソン底面に沿う滑りや土の崩壊面の発生による滑り破壊とは異なっている。ケーソン前面部置換砂(図-3におけるA)、ケーソン直下置換砂(同B)、ケーソン直背後の埋立土(同C)の応力-ひずみ関係を図-4に示す。それぞれ、平均有効応力とせん断応力の関係(a)、軸差応力と軸差ひずみの関係(b)、せん断応力とせん断ひずみの関係(c)である。なお、ここでは水平方向がX軸方向、鉛直方向がY軸方向であり、圧縮が正である。

ケーソン前面部置換砂ではダイレタンシーの影響で初期において有効応力は一時的にせん断応力とともに増大するが、最終的には初期の有効応力の半分程度の

有効応力で増減を繰り返す。そのため、有効応力及びせん断応力が0近くまで低下することはない。ひずみについてみると、 $\epsilon_y - \epsilon_x$ が $-20\%$ 強まで増加し、横(水平方向:X軸方向)からの圧縮を受け縦方向にのびる形での変形が見られる。一方、 $\gamma_{xy}$ も $-40\%$ 近くになっており、単純せん断に伴う変形も支配的である。

ケーソン直下置換砂においても、有効応力が $2/3$ 程度まで低下するが、そのあたりで増減を繰り返す。ひずみについては、 $\epsilon_y - \epsilon_x$ が約 $+16\%$ になり、上(Y軸方向)からの圧縮を受け横方向にのびる形での変形が見られる。 $\sigma_y - \sigma_x$ も初期の $+140\text{kPa}$ から $+240\text{kPa}$ まで変化しており、ケーソンの傾斜などに伴う土圧の増加によるものだと考えられる。一方、 $\gamma_{xy}$ は $-6\%$ 程度にすぎず、単純せん断に伴う変形は軸差ひずみに伴う変形ほど支配的ではない。

ケーソンの直背後における埋立土を見ると、液状化により一度有効応力、せん断応力ともに0近くまで低

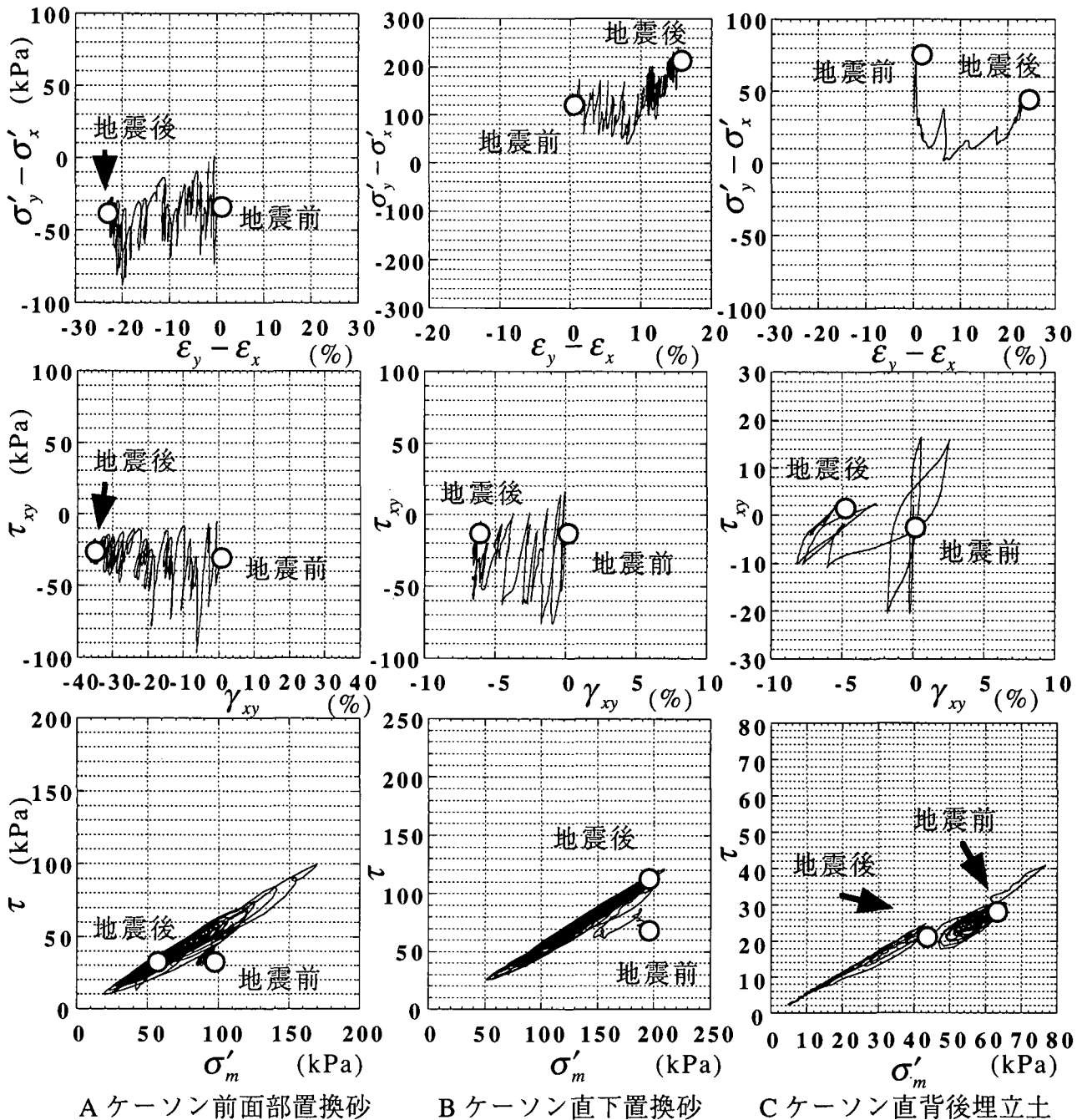


図-4 要素の応力ひずみ関係

下するが、その後再び増加し、最終的には有効応力が約40kPa、せん断応力が約25kPa程度になる。この原因としては、ケーソンの海側への変位に伴い要素が横方向にのびる形で変形し、軸差ひずみが生じると同時に有効応力が回復したと思われる。最終的に軸差ひずみは約+25%に達し、これが支配的な変形モードとなっている。

ケーソン背面の土圧合力の時刻歴を図-5に示す。これはケーソン背面のジョイント要素における軸垂直方向の応力を合計して求めたものである。加震前はケーソンを海側に押す方向に約500kPaの土圧が作用しており、加震後4秒ほどは初期の土圧500kPaを中心に変動

する。その後、10秒頃になるまで800kPaあたりを中心に変動し、土圧は全体的な傾向としては増加しているようである。10秒過ぎになると、500kPa近くを中心に変動する状態に戻る。また、ケーソンに加わる慣性力の時刻歴を図-6に示す。同図において、ケーソンを海側に押す方向が正である。加震後4秒から10秒あたりで大きな慣性力が海向き、陸向き両方に作用している。

一方、ケーソン下面要素のせん断力の時刻歴を図-7に示す。陸向き、つまり海側へのケーソンの変位に抵抗する方向が正である。このせん断力は土圧および慣性力の合力に対し抵抗する力であり、慣性力の増減に対応してせん断力も増減している。また、加震後4秒

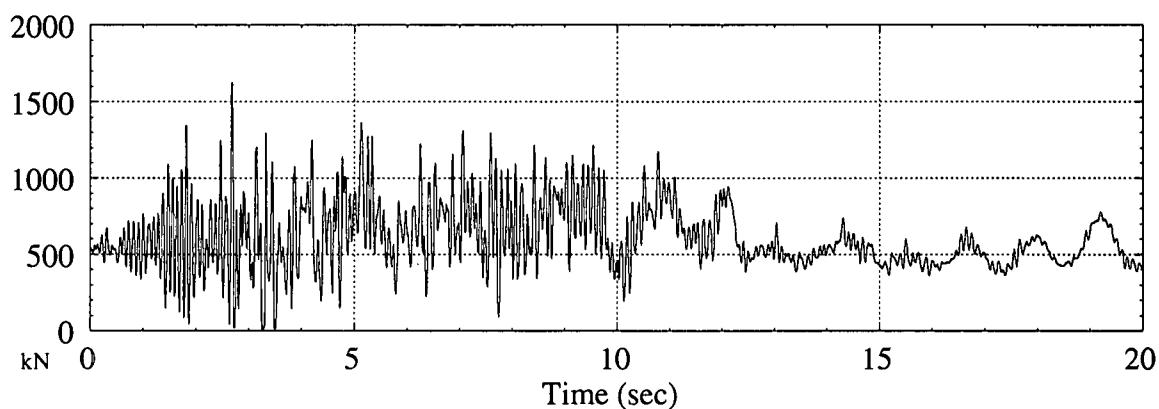


図-5 ケーソン背後からの土圧

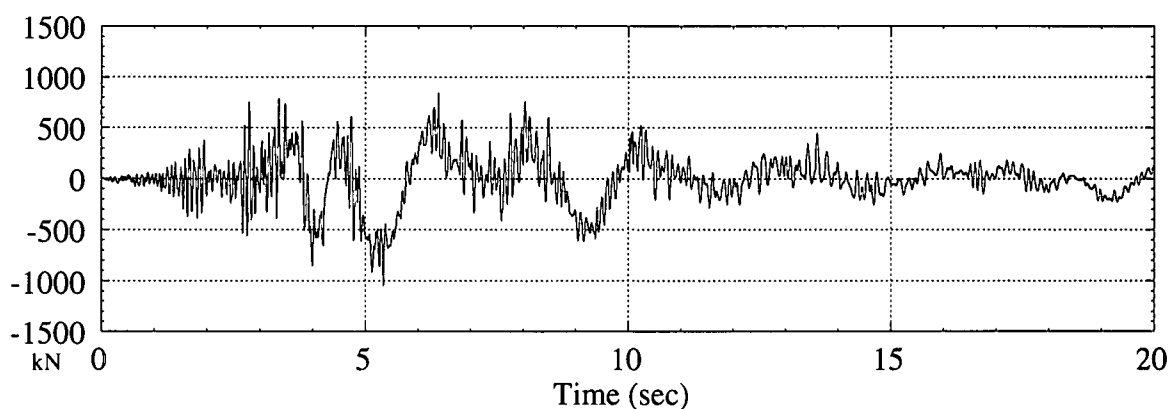


図-6 ケーソンに加わる慣性力

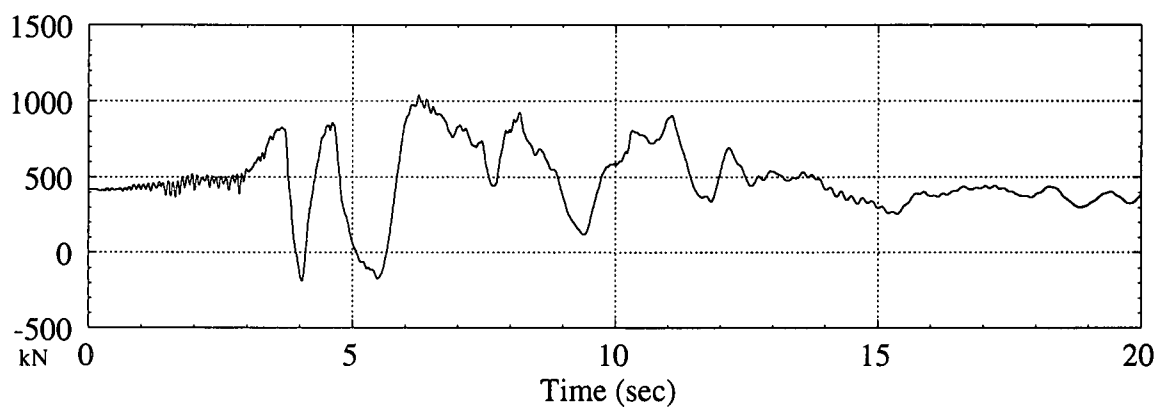


図-7 下面にかかるせん断力

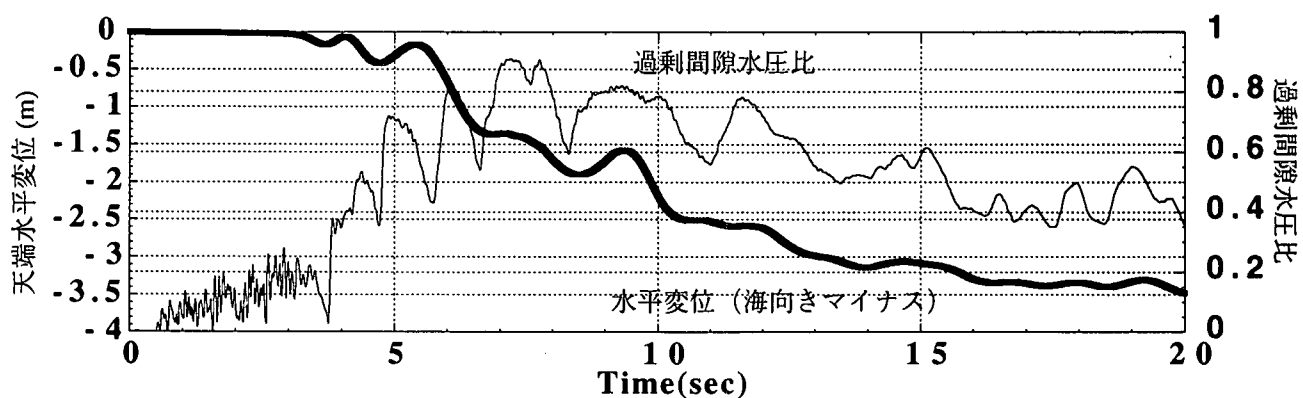


図-8 ケーソン天端の水平変位と背後要素の過剰間隙水圧比

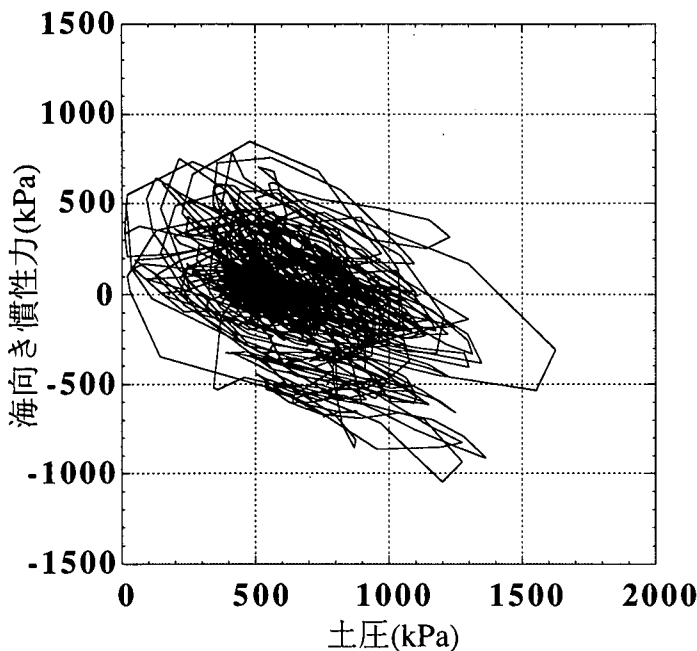


図-9 ケーソンに加わる土圧と慣性力

から10秒過ぎまでは土圧の全体的な増加にともない、せん断力の変動の中心軸も増加している。

土圧および慣性力とケーソンの変形との関連を見るため、図-8にケーソンの天端の水平変位の時刻歴とケーソン直背後の要素の過剰間隙水圧比の時刻歴を示した。大きな慣性力が加わる加震約4秒後に過剰間隙水圧が発生すると同時に水平変位が発生している。その後、大きな慣性力が加わると水平変位が大きく発生する。しかし、土圧が増加している加震約4秒後から12秒後まではほぼ連続的に変位が増大している。また、ケーソンの変位にともない、ケーソン直背後の要素の過剰間隙水圧は低下するが、過剰間隙水圧の低下にともなって土圧も初期の値に回復している。

なお、土圧および慣性力に高い周波数の変動が上乘せられているのは、高周波の上下動成分によって生じる全応力の変化によるものと思われる。

ケーソンに加わる土圧と慣性力を図-9に示す。これによると慣性力が海向きに作用するときには土圧が減少し、土圧が増加するときには慣性力は陸向きに作用する。したがって、本解析においては土圧と慣性力の作用は逆位相であり、両方が同時に作用するもっともクリティカルな状態は生じていない。

ケーソンの変形の様子を見るため、ケーソンの4隅の点の軌跡を図-10に示す。海側の天端は時々逆行するものの、比較的なめらかに斜め下方へ移動している。すなわち、ケーソンの水平移動と沈下は同時に複合して生じており、ケーソンが海側に移動するとケーソンの重量が海側直下の土要素に加わり、その結果、軸差ひずみが生じてケーソンが沈下・傾斜するというメカニズムが考えられる。一方、陸側の端点の軌跡を見ると、陸側に移動するときに沈下が生じ、海側に移動す

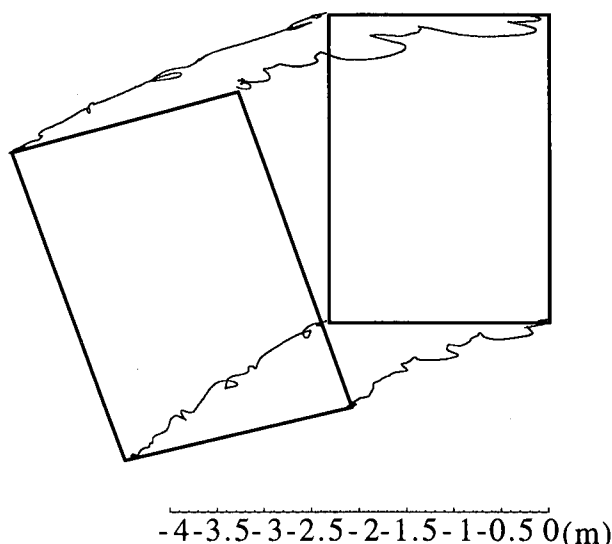


図-10 ケーソン端点の軌跡の模式図

るときには弧を描いて上方に隆起している。すなわち、陸側にケーソンが変位するときには、ケーソン重量によってケーソンの陸側直下の土要素に軸差せん断が加わり、要素が縦に縮むことによってケーソンの傾斜が緩和される方向に沈下が生じている。また、海側にケーソンが変形するときにはケーソンの傾斜に伴い端点は上方に移動し、直下の土要素は上方に引張られるかたちで土圧が軽減されていると考えられる。以上の検討から、ケーソン周辺の変形（特にケーソンの傾斜）には、ケーソンが前後にゆれるロッキング振動が著しい影響を与えているのではないかと考えられる。

#### 4. 置換砂層厚がケーソンの変形に及ぼす影響

以上の再現計算においては、ケーソンの被災は置換砂部分及び埋立土部分の連続的な変形に伴うものと考えられた。したがって、ケーソンの被災量には変形する置換砂部分の範囲が大きく影響を及ぼしているものと考えられる。この点を検討するため、置換砂層厚を変化させたパラメトリックスタディを行った。ここでは、解析のメッシュは上述の再現計算のものを使い、下方の節点の自由度を拘束することで基盤面を上昇させた解析を行った。つまり、置換砂の上面の位置は一定であるので、基盤高が高いほど置換砂の層厚は薄くなる。

図-11に置換砂層厚と最大はらみだし量との関係、図-12に天端の鉛直変位（沈下）との関係、図-13にケーソンの傾斜角との関係、図-14にケーソンの変形率（はらみだし量／構造物高さ）を示す。また、六甲アイランドにおける前面水深7.5m以上の岸壁の実測値もプロットしている<sup>4)</sup>。

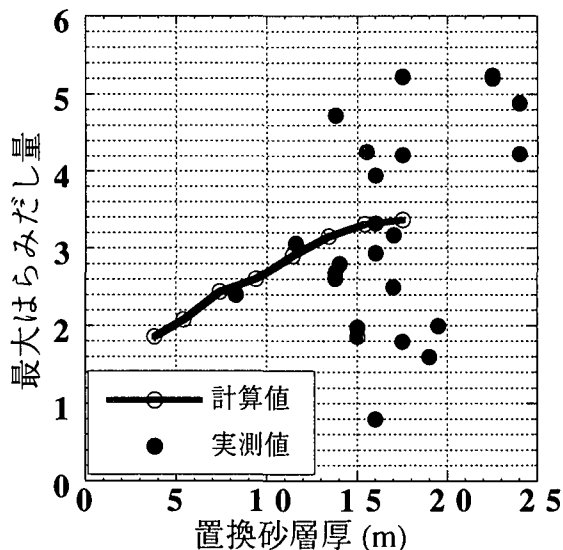


図-11 置換砂層厚と最大はらみだし量

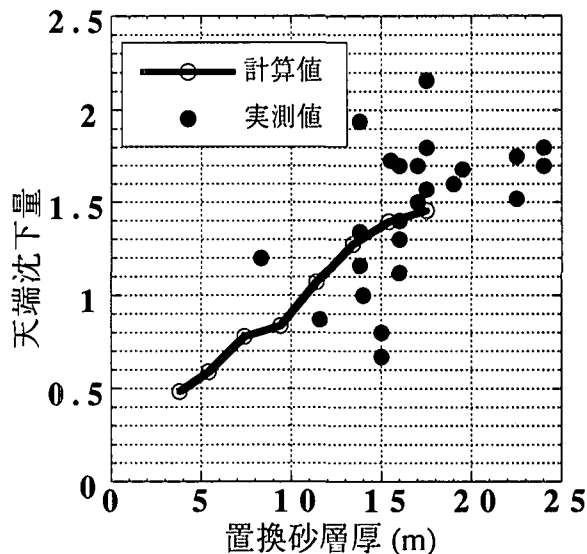


図-12 置換砂層厚と天端沈下量

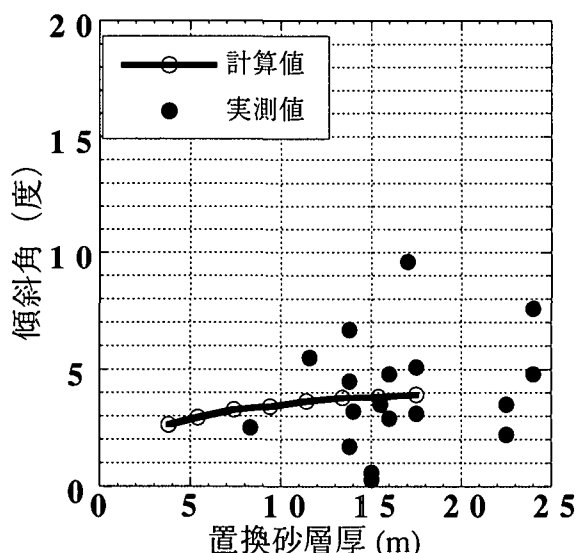


図-13 置換砂層厚と傾斜角

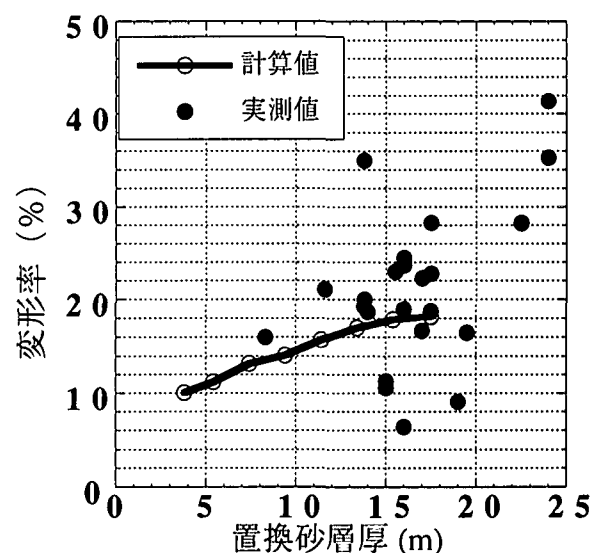


図-14 置換砂層厚と変形率

最大はらみだし量・沈下量・傾斜角・変形率の実測値はかなりばらついている。計算値はいずれも、ほぼ実測値の平均と一致している。また、最大はらみだし量・沈下量および変形率の計算値は置換砂層厚が増えるほど増加しており、実測値の傾向とも一致している。これは、置換砂層が薄くなると変形を生じる範囲が狭くなり、各要素に生じるひずみレベルが同じなら全体の変形量が小さくなる結果であると思われる。しかし、傾斜角と置換砂の層厚の関係は大きくばらついており、傾斜角に影響する因子は置換砂層厚の他に存在すると推察される。

#### 5. 入力加速度レベルに関する検討

次に入力加速度の大きさが重力式岸壁に与える影響について検討を加えた。図-1に示した入力波形の振幅

をそのまま縮小した波を入力する方法を用い、入力波の周波数特性や継続時間は変化させていない。

重力式岸壁の変形量予測については、従来より地震被災事例に基づく推定手法(野田・上部の方法)<sup>5)</sup>が用いられてきた。それによると、まず地震時に岸壁に作用したと思われる作用震度を

$$K_e = \frac{\alpha}{g} \quad (\alpha < 200Gal) \quad (1)$$

$$K_e = \frac{1}{3} \left( \frac{\alpha}{g} \right)^{1/3} \quad (\alpha \geq 200Gal) \quad (2)$$

で求める。ただし、ここで $\alpha$ は地盤最大加速度であり、ここでは自由地盤上での最大水平加速度を考えた。次に作用震度を破壊震度 $K_e$ (岸壁が被災する最小の震

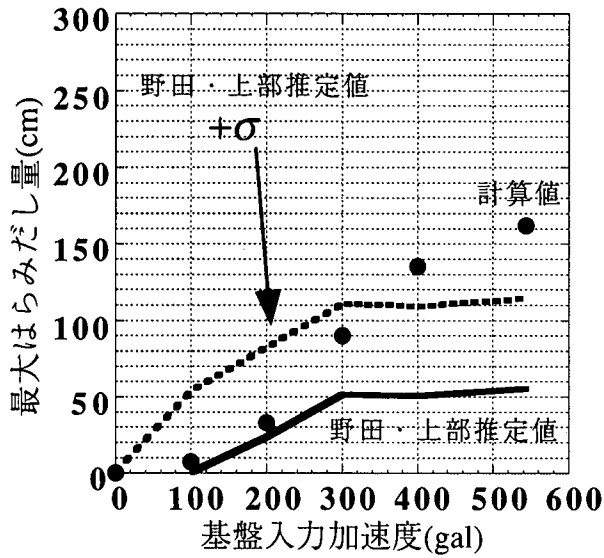


図-15 基盤入力加速度と最大はらみだし量

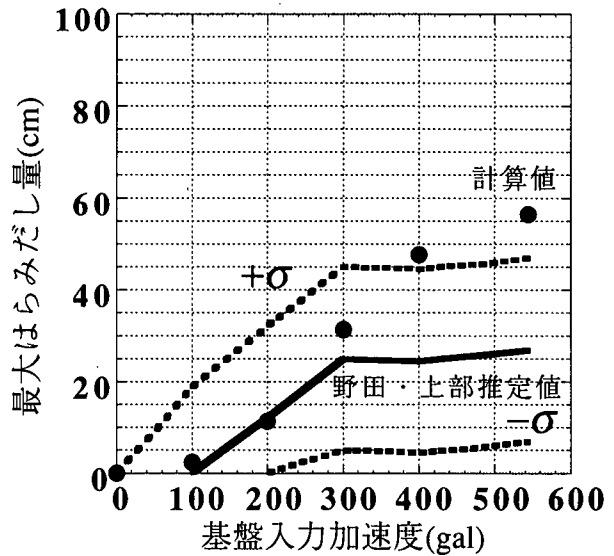


図-16 基盤入力加速度と天端沈下量

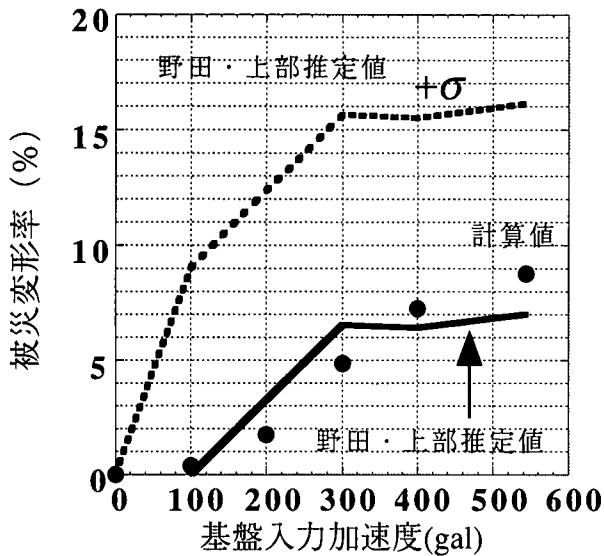


図-17 基盤入力加速度と変形率

図-15には入力の最大水平加速度と最大はらみだし量の関係、図-16には入力加速度と天端沈下量の関係、図-17には入力加速度と被災変形率の関係を示す。各々、解析による結果を●で示し、野田・上部の方法による結果を実線で示している。また、野田・上部の方法は被災事例からの回帰分析によって求めたものであるので、回帰式の標準偏差に相当する値を破線で示している。なお、野田・上部の方法では液状化を考慮していないので、解析においても過剰間隙水圧が発生しない場合の解析結果を用いた。

入力波の最大水平加速度が544gal、400gal、300gal、200gal、100galの5ケースについて検討しているが、300gal程度までは野田・上部の方法による推定値と解析結果はよく一致している。300galを越える辺りから解析結果の方が大きな変形量を示している。これは、300galを越えると今回の解析では非線形性が大きくなり、余り増幅が起こらず地表面加速度が小さく評価されるので、野田・上部の方法による推定値が頭打ちになったためだと思われる。

度)で割った値を危険度  $F_c = K_e/K_c$  と定義し、この危険度と被災変形量の関係式

$$D_x = -113.8 + 124.4F_c \quad (3)$$

$$S_p = -50.9 + 57.1F_c \quad (4)$$

$$R_G = -12.7 + 14.5F_c \quad (5)$$

より変形量を予測する。ここで、 $D_x$ は最大はらみだし量であり、 $S_p$ は天端の沈下量、 $R_G$ は最大はらみだし量を構造物の全高で割った被災変形率(%)である。

本検討では、有効応力解析による結果と上述の野田・上部の方法により算定した被災変形量を比較した。ここで、作用震度は自由地盤における最大水平加速度から算定し、破壊震度としては設計震度0.15を用いた。

## 6. まとめ

本研究では、1995年兵庫県南部地震において被害を受けた神戸港のケーソン式岸壁に対し有効応力解析を行った。その結果、以下のような結論が得られた。

1) 兵庫県南部地震において被災した神戸港のケーソン式岸壁の再現計算を行った。その結果、置換砂・埋立土の広範囲の土の変形による被災メカニズムが明らかになった。また、ケーソンがロッキング振動を起こしながら変形していく様子、ケーソン背面の土圧の変動などが明らかになった。

2) 置換砂の層厚を変化させたパラメトリックスタディを行った結果、置換砂の層厚の増加に伴い水平変

位置・沈下量とも増加した。実被害とも傾向が一致し、重力式岸壁の水平変位および沈下量に置換砂層厚が大きく関係していることが明らかになった。

3) 入力時震動の加速度レベルを変化させたパラメトリックスタディを行い、野田・上部による非液状化の被災事例をもとにした予測量と比較した。液状化をしないという条件での解析結果は、野田・上部の方法による値ときわめて良い整合性を示した。

#### 【参考文献】

- 1) 一井康二・井合 進・森田年一：有効応力解析によるケーソン式岸壁の被災原因分析、阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、pp397-404、1996
- 2) 井合 進・松永康男・亀岡知弘：ひずみ空間における塑性論に基づくサイクリックモビリティのモデル、港湾技術研究所報告、第29巻、第4号、pp.27-56、1990

3) 上部達生・高野剛光・松永康男：兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察（その3）神戸港のケーソン式岸壁の被災分析、港湾技研資料、No.813、pp127-145、1995

4) Hirofumi Inagaki et al.: PERFORMANCE OF CAISSON TYPE QUAY WALLS AT KOBE PORT, Special Issue of Soils and Foundations, pp.119-136, 1996

5) 上部達生：地震被災事例に基づく重力式および矢板式係船岸の被災変形量と被災額の推定、港湾技研資料、No.473、1983

## Analysis of Deformation to Gravity Type Quay Walls Using Effective Stress Analysis

Koji ICHII, Susumu IAI, and Toshikazu MORITA

Mechanism of deformation to gravity type quay walls in 1995 Great Hanshin Earthquake is studied using effective stress analysis. The effective stress model used in the study consists of a multiple shear mechanism defined in strain space. Results of the finite element analysis are basically consistent with the observed performance of the quay walls and it shows the mechanism of deformation to quay walls.

Parametric studies are conducted in order to identify the factors affecting the deformation. The effect of the levels of ground shaking are also examined. Calculated Deformation without considering excess pore water pressure agree with the estimated deformation using Noda and Uwabe's empirical formula.