

現行設計法などによる神戸港ケーソン式岸壁の地震時安定性評価

運輸省港湾技術研究所 長尾 毅*
 同上 小泉哲也*
 同上 寺内 潔*

神戸港のケーソン式岸壁14施設について、現行の港湾の設計法を用いて地震時安定性を評価し、被災量との相関を分析した。その結果、ケーソンの最大はらみ出し量と液状化時の安全率との間に相関性が認められることなどがわかった。次に、一質点系の運動方程式からケーソンの滑動量を評価した。液状化の影響の少ない施設については解析結果と実変位は近い値を与えるが、他の施設では実変位よりも解析値が少ない傾向となり、ケーソンの変位に置換砂層のせん断抵抗力の減少などの影響が含まれていることがわかった。上下動については、水平動との間の位相差のため、影響は少なかった。

1. はじめに

神戸港の岸壁は重力式が多く、その多くが大きな被害を受けた。本研究では、神戸港のケーソン式岸壁のうち設計震度、設計水深、法線方向、施設設置位置、置換砂層厚などに違いのある14施設を検討対象とした。14施設の平面位置を図-1に示す。本研究の対象施設の被災状況・検討結果は表-1にまとめたとおりである。被災量の最大値は、はらみ出し量で施設⑬の4.4m、ケーソン天端沈下量で施設⑫の2.1mとなり、六甲アイランド地区の施設の方が相対的に大きな被害を受けているといえる。

2. 地盤の地震応答解析

各岸壁に作用した地震動の推定を行うため、神戸市開発局によるポートアイランド-79m地点の強震観測データを反時計方向に22°補正した値を入力値とした地盤の地震応答計算を、プログラムSHAKEによって行った。せん断弾性係数と減衰定数のひずみ依存性は、埋立地の液状化対策ハンドブック¹⁾に示された特性を用いた。最大ひずみと有効ひずみの比の値は0.65とした。基本的に全施設について応答計算を行ったが、施設⑤、⑥、⑦、⑬については土質データを入手できなかったため、近隣の施設の応答値を用いた。表-1の値は、各施設の法線直角方向の陸側向きの地盤加速度の最大値を示している。応答加速度は特に六甲アイランド地区の施設において長周期化する傾向が見られ、軟化が進んでいることが推定される。

野田・上部ら²⁾は過去の重力式岸壁の被災事例を解析し、地盤加速度と震度の関係として下式を提案している。この関係式によると、作用震度は平均的に0.21から0.24程度で、設計震度より大きな震度であったといえる。

$$k_h = \alpha / g \quad (\alpha \leq 0.2g)$$

$$k_h = 1/3 \cdot (\alpha / g)^{1/3} \quad (\alpha > 0.2g)$$

ここに、 k_h :震度、 α :地盤加速度(gal)、 g :重力加速度(gal)である。

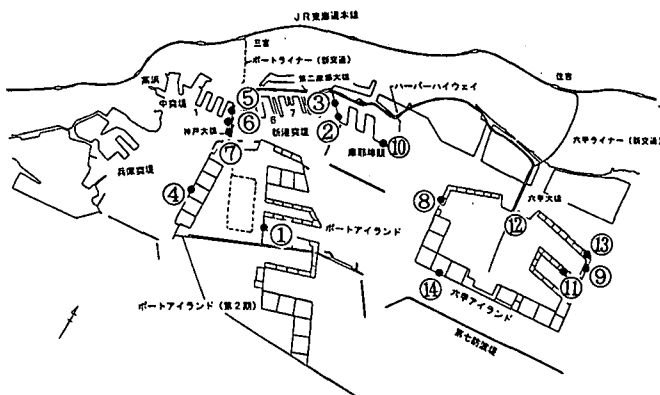


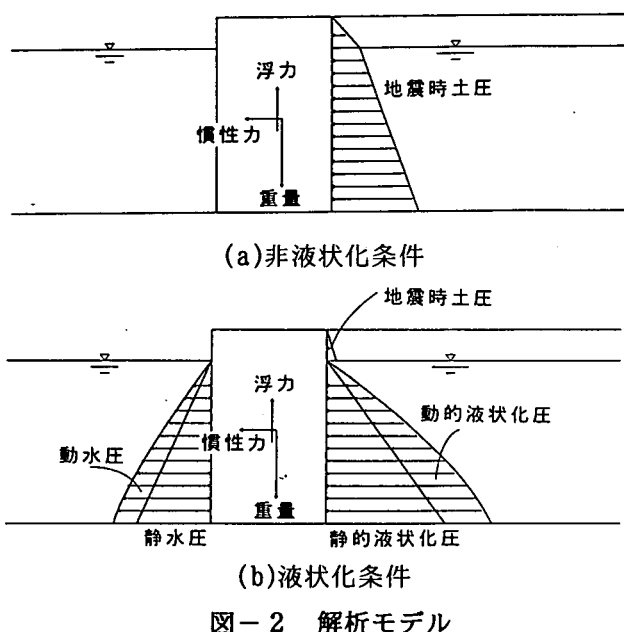
図-1 検討対象施設位置

キーワード：ケーソン式係船岸、震度法、滑動破壊

* 運輸省港湾技術研究所，0468-44-5037

表一 1 検討結果一覧

施設番号	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭
被災状況														
最大はらみ出し量(m)	2.6	0.3	0.4	2.8	0.5	2.4	1.9	2.6	2.0	4.2	2.7	3.9	4.4	4.0
最大沈下量(m)	1.0	0.7	0.3	1.7	0.2	0.5	1.0	1.3	1.7	0.5	1.6	2.1	1.6	1.9
地震応答解析														
最大加速度(gal)	357	269	269	363	350	350	432	221	165	297	241	293	324	276
想定作用震度	0.24	0.22	0.22	0.24	0.24	0.24	0.25	0.20	0.17	0.22	0.21	0.22	0.23	0.22
現行設計法逆解析														
限界震度	0.14	0.25	0.25	0.14	0.12	0.22	0.28	0.20	0.17	0.18	0.20	0.13	0.18	0.15
非液化化時滑動安全率	0.67	1.13	1.13	0.65	0.65	0.89	1.10	1.02	1.00	0.90	0.99	0.74	0.90	0.80
液化化時滑動安全率	0.46	0.79	0.89	0.51	0.48	0.60	1.06	0.70	0.75	0.60	0.70	0.59	0.68	0.54
一貫系モデル解析														
非液化化時滑動量(m)	0.75	0	0	1.02	0.92	0.23	0.22	0.05	0	0.68	0.09	2.07	1.02	0.69
液化化時滑動量(m)	2.84	0.01	0.01	2.11	1.95	0.73	0.14	0.34	0.09	2.58	0.42	3.62	1.72	3.25



3. 現行設計法による地震時安定性の評価

(1) 解析手法

震度法によって各施設の安定性を評価した。検討は、液化化が発生しない条件（以下、非液化化と呼ぶ）と、背後地盤が完全に液化化した条件（以下、液化化と呼ぶ）の2ケースにつき行った。解析モデルを図-2に示す。検討対象地点では地震後に噴砂の発生が認められており、液化化が発生したものと推定される。ただし、新港地区の施設⑤については、背後地盤が一部粘性土によって構成されており、完全な液化化状態にあったと断定することはできない。また、施設②、③はケーソンの背後に鋼板セルが埋め殺しされており、液化化の影響はダイレクトでないため、完全な液化化の想定は過大であると思われる。それ以外の施設については、液化化条件がより

現実に近いと考えられる。

(2) 現行設計法による地震時安定性

表-1に限界震度として示した値は、滑動・転倒・支持力のいずれかのモードで破壊すると判定される震度の最小値である。施設①、④、⑤、⑥、⑩、⑪、⑫、⑬、⑭では非液化化条件でも安全率が1.0を下回っており、地震時の慣性力と土圧によって破壊が生じると判定される結果となる。このうち施設①、④、⑤では安全率は0.7以下と極めて低い値を示している。非液化化条件で過半数の施設の安全率が1.0を下回るということは、地震時慣性力の想定以上の大きさが今回の被災の大きな原因の一つであったことを示している。液化化を考慮すると、非液化化条件よりも安全率は減少し、施設⑦を除いたすべての施設で安全率が1.0未満となる。つまり、置換砂や海底地盤に液化化が発生しなくとも、慣性力と堤体背後からの液化化による泥水圧の作用によって、堤体は安定性を失う結果となる。

施設⑦は、置換砂層厚が比較的厚く、またマウンドの一部まで置換砂で代用していることが特徴であり、このことが支持力の減少に寄与した可能性がある。施設②、③は置換砂層厚が1~1.5m程度と薄く、この影響は少ない。この施設は南北方向に限界震度を越える加速度543gal（震度0.27）を受けており、この影響が考えられるが、詳細は更に検討が必要であろう。

(3) 地震時安定性と被災量の相関

各施設の地震時安定性を示すパラメータと被災量の相関を調べた。結果を図-3~4に示す。安定性を示すパラメータと被災量の相関性はあまり強くない。特に、沈下量についてはいずれのパラメータと

も強い相関性は示さなかった。図-4には、上部³⁾による過去の非液状化状態のケーソン式岸壁の地震被災量と危険度（作用震度（ K_e ）と破壊震度（ K_c ）の比）の関係の回帰式も示してあるが、今回の被災量は回帰式よりも大きく、液状化の発生により堤体の変位量が大きくなったことを示している。いま、施設②、③、⑤を捨象し、液状化の影響を受けたと推定される施設の地震時安定性と被災量の関係調べてみると、最大はらみ出し量と安全率、最大はらみ出し量と危険度の間に比較的強い相関が認められる結果となる。相関係数の絶対値はいずれも0.4程度である。一例として地震時安全率と最大はらみ出し量の関係を示すと、下式ようになる。

$$f_s = -0.08h + 0.89 \quad (\text{相関係数}-0.44)$$

ここに、 h ：最大はらみ出し量(m)、 f_s ：安全率である。

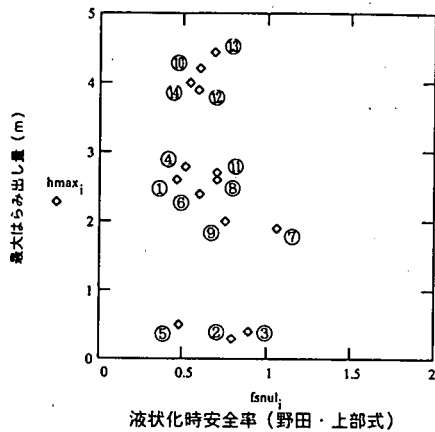


図-3 安全率と最大はらみ出し量の関係

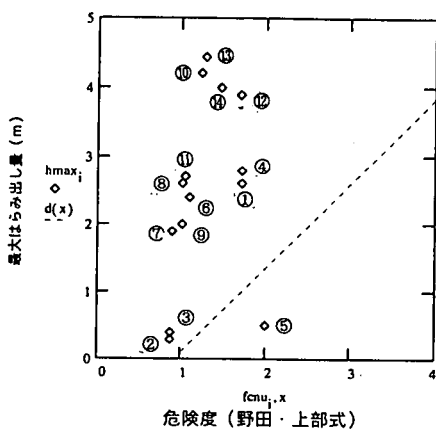


図-4 危険度と最大はらみ出し量の関係

4. 一質点系モデルによるケーソン滑動量解析

(1) 解析手法

現行設計法で用いている震度法は、地震時慣性力の最大値を静的な力に置き換えて構造物の安定性を

評価するものであり、被災量と安全率は本来相関性が高いものとはいえない。そこで、一質点系の運動方程式から、ケーソンの滑動量を推定する手法を適用した。ケーソンは作用荷重が抵抗力を上回ると滑動を開始し、下式の運動方程式に従って滑動すると考える。そして、相対速度がゼロになった時点で滑動を停止するとする。数値積分はRunge-kutta法によった。

$$\frac{w}{g} \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{w}{g} \alpha_h + P_h + P_d + P_a + P_l - \mu \left\{ \frac{w'}{g} (g + \alpha_v) + P_v \right\}$$

ここに、 w ：堤体重量(tf)、 g ：重力加速度(gal)、 x ：堤体の相対変位(cm)、 t ：時刻(sec)、 w' ：有効堤体重量(tf)、 α_h ：地盤の水平加速度(gal)、 P_h ：地震時土圧合力の水平成分(tf)、 $P_d \cdot P_a$ ：動水圧(tf)、 P_l ：泥水圧（液状化モデルのみ）(tf)、 μ ：摩擦係数、 α_v ：地盤の鉛直加速度(gal)、 P_v ：地震時土圧合力の鉛直成分(tf)である。摩擦係数は、ケーソンと捨石の場合、明確なピークが現れず静摩擦係数と動摩擦係数は等しいと考えられるため、通常安定検討時に用いる摩擦係数をそのまま用いた。ケーソンに作用する地震時土圧は、ケーソンが海側に相対的に滑動している時および相対的に静止している時は主動土圧とし、ケーソンの相対速度が負（背後地盤を押し出す方向）の場合は受動土圧とした。

(2) 解析結果

解析結果として表-1に示した値は、鉛直方向加速度を考慮しないケースの結果である。例として、施設①の堤体変位・速度の時刻歴を図-5に示す。加速度のピークにほんのわずか遅れる形で堤体は相対速度を持ち、相対変位を数回起こして残留最大変位に至る。また、負の相対変位（堤体が背後地盤を押し返す方向の変位）はほとんど生じない。

各施設の計算結果を見ると、液状化条件での滑動量は、非液状化条件での滑動量の約倍程度となることが多い。液状化の影響を考慮すべき施設（施設②、③、⑤以外）では、2つの計算条件の中では、液状化条件の方が実変位に近い結果を与えるが、実変位よりも計算結果が少ないケースがほとんどで、最大2m程度の差がある。この差には、置換砂層のせん断抵抗力の減少による支持力低下の影響が含まれている可能性がある。液状化の影響が少なく、置換砂層厚の薄い施設②、③、⑤では、非液状化条件の解析

結果と実変位は±50cmの差で近い値を与える。施設②，③では，前述したように法線直角方向の加速度が最大加速度方向の値に比べて半分程度と小さいことから，堤体が最大加速度方向の加速度を受けたと仮定して滑動計算を行うと，液状化・非液状化のいずれの条件においても相対変位が1m程度生じる結果となった。

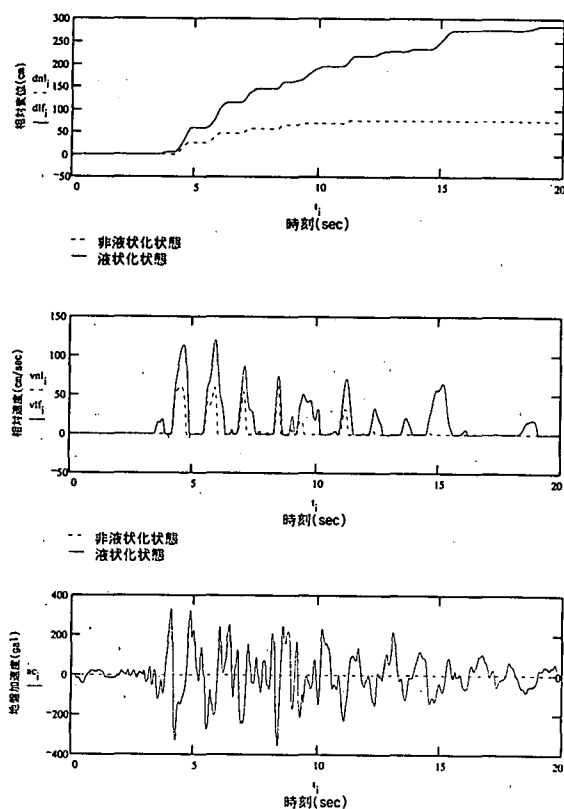


図-5 堤体変位・速度の時刻歴

次に，上下動の影響を考察する。ポートアイランド地区の施設①，④について，ポートアイランド地表面の鉛直方向の地盤加速度を考慮して計算すると，施設①で非液状化時0.81m，液状化時3.08m，施設④で非液状化時0.98m，液状化時1.95mとなり，水平動のみの値とほとんど変わらない結果となった。これ

は，上下動と水平動に位相差があったためである。

図-6に，施設①の鉛直面内の加速度の軌跡を示す。

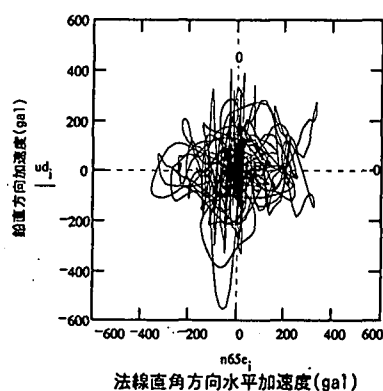


図-6 鉛直面内加速度軌跡

5. おわりに

摩耶埠頭岸壁については，別稿で報告するように有限要素モデルによる検討も行っている。今後さらに様々な解析モデルを適用し，成果を耐震設計手法に反映していきたいと考えている。

最後に，強震観測データを提供頂いた神戸市開発局，施設被災量を提供頂いた運輸省第三港湾建設局など，関係者・関係機関に厚く感謝します。

参考文献

- 1)埋立地の液状化対策ハンドブック：運輸省港湾局監修，(財)沿岸開発技術研究センター，1993.
- 2)野田節男，上部達生，千葉忠樹：重力式岸壁の震度と地盤加速度，港湾技術研究所報告，Vol.14，No.4，1975，pp.67～111.
- 3)上部達生：重力式係船岸の地震被災量に関する研究，港湾技研資料，No.548，1986.
- 4)上部達生，守屋正平，工藤勝己：剛基礎上の重力式係船岸の地震時滑動量推定手法の実験的研究，港湾技術研究所報告，Vol.27，No.2，1988，pp.211～240.

Evaluation of Stability of Caisson Type Quaywalls in Kobe Port by means of Present Design Method

Takashi Nagao, Tetsuya Koizumi, Kiyoshi Terauchi

Seismic stability of caisson type quaywalls in Kobe Port during the 1995 Hyogo-Ken Nanbu Earthquake has been evaluated by means of earthquake response analyses and present design method. Comparatively strong correlation between factor of safety and maximum horizontal displacement has been observed. One-dimensional model analyses have also been carried out.