

神戸港のケーソン式岸壁にみられる 地震時設計に関する考案

松 並 仁 茂*

Studies on Design during Earthquake for Caisson type Quay Walls in Kobe Port

Hitoshige MATSUNAMI

The Jun. 17 1995 Hyogo-Nanbu Earthquake destroyed also many facilities of Kobe Port. These damages were reported by many massmedia. According to the reports most wharfs in Kobe Port were constructed with caisson type quay walls and other types were a few. These damaged situation of Kobe Port which were consisted of caisson type quay walls were recognized same damaged pattern. In this paper, the caisson type facility which most of Kobe Port were constructed by is examined by reference to existing "Technical Standards for Port and Harbour". And the propriety of the design of caisson quay walls during earthquakes is investigated.

1. はじめに

平成7年1月17日未明に起きた兵庫県南部地震は、神戸港においても甚大な災害をもたらした。これらについての報告は、それぞれのマスメディアによって行われたが、港湾施設の技術に関する情報は、土木学会誌や日本港湾協会発行の雑誌「港湾」などによって、より専門的に報告された。これらによると、神戸港の岸壁はそのほとんどがケーソンを用いた重力式構造で出来ており、他の構造形式の岸壁は非常に少ないこと。さらに、これらケーソン式岸壁の被災状況にはおおむね同様のパターンがみられると報ぜられている。それで、ここでは、港湾施設の大半がケーソン式岸壁からなる神戸港の被災状況に着目し、現行の、いわゆる港湾施設の設計基準¹⁾に照査し、それらの地震時における設計の妥当性について考察することにした。

2. 兵庫県南部地震にみられる神戸港ケーソン岸壁の地震被災について

神戸港は我が国の外貿コンテナ貨物の3割を取り扱う代表的港湾であるが、兵庫県南部地震によって、その港湾施設はほとんど壊滅的な被害を被り、港湾の機能もかなりの期間停止の状態に

* 建設工学科 土木工学専攻

なり、経済的・社会的に多大の打撃を与えることとなった。

神戸港の岸壁の9割を占めるといわれているケーソン式岸壁の基礎は、他の構造の場合と同様に、海底の軟弱地盤を真砂土で置き換えたいわゆる置換工法によって改良されているものが多い。こうしたケーソン岸壁の被害状況について、上部²⁾は次のようにまとめている。

- ・ほとんどの岸壁が被災したが、耐震強化岸壁の被害は軽微であり、その利用には支障は生じない程度であった。
- ・神戸港の大部分を占めるケーソン式岸壁の被災形態はほぼ同じであり、図-1に示すように、岸壁本体のケーソンが海側に変位し、その背後のエプロンやヤードが沈下している。岸壁の法線の直線性はかなり保持されていた。
- ・新・旧埋立地で噴砂等の液状化の発生の痕跡が広範囲にみられた。六甲アイランドは、ポートアイランドに比較すると液状化の発生の痕跡は少なかった。

これに対し、セル式構造の岸壁は、ケーソン式の岸壁に比較して軽微な被害となっていたと報告している。

横田は、これに関連して、ケーソンが数10cm程度の沈下を伴って数10cm～2m程度海側に変位したその結果、ケーソンが前傾するとともに、直背後のエプロンやヤードが最大3m程度沈下・陥没した。しかし、ケーソンが移動したにもかかわらず、岸壁法線の直線性はかなり保持されているとともに、ケーソン自体の破損は生じていない。このため、背後の陥没部分を埋め戻すなどして応急復旧により暫定的な使用が可能なものが多いと述べている。

一方、井合³⁾は運輸省第三港湾建設局で実施したG.P.S (Global Positioning System) と呼ばれる人工衛星を用いた測量による地震後の水平変位を示し、これによって、大まかには南北方向への変位が卓越する傾向がみられると述べている。さらに、神戸港

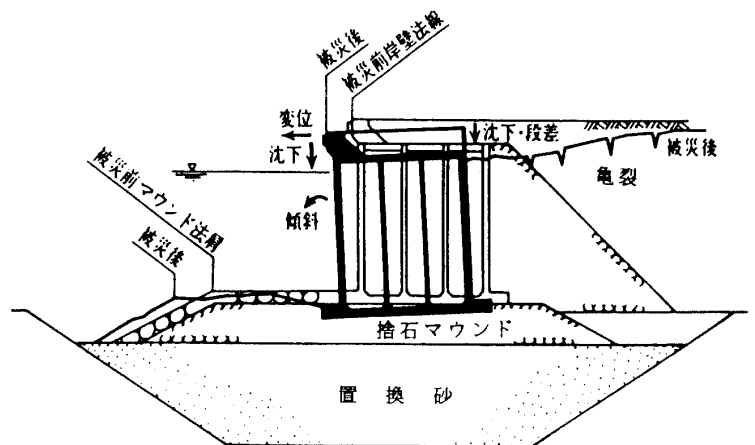


図-1 ケーソン式岸壁の被災状況^{横田)}

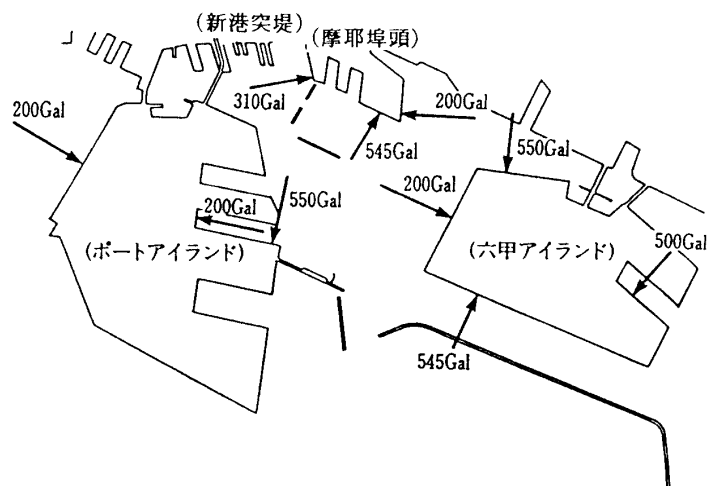


図-2 神戸港の各岸壁における最大加速度ベクトル成分³⁾

工事事務所で観測された地震動の記録を基に求めた主な岸壁の法線直角方向(海陸方向)の最大加速度ベクトル成分を図-2に示している。

神戸港のケーソン式岸壁で、計画水深が7.8m以上の各施設の設計震度は0.10, 0.15, および0.18のいずれかである。この中にあって、耐震岸壁の設計震度に0.25を採用していることは注目される。

また、野田・上部等⁴⁾は重力式岸壁における作用震度と地盤加速度との関係を過去の地震災害の事例解析より次のように与えている。

$$k_e = \frac{1}{3} \left(\frac{\alpha}{g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\alpha \geq 200\text{Gal}) \quad \cdots \cdots (1)$$

$$k_e = \frac{\alpha}{g} \quad (\alpha < 200\text{Gal}) \quad \cdots \cdots (2)$$

ここに、 k_e ：作用震度、 α ：地盤最大加速度 (Gal)、 g ：重力加速度 (980Gal) である。この関係式は港湾施設を設計するにあたり現在も広く用いられているものである。

3. 神戸港のケーソン岸壁にみられる地震時設計とその考察

神戸港は横浜港とともに、明治以来、国の手厚い支援のもとに施設の整備を重ねてきたが、その見返りとして、我が国の中枢的外貿港湾として国民の大きな期待にも応えてきた。それが今回の地震により、数多くの港湾施設が大きな被害を被ることになった。岸壁の9割を占めるといわれるケーソン岸壁は、既に、明治後期から建造されていたが、同様に大きな被害を被った。ここで検討の対象となるケーソン式岸壁は、被災の程度や建造年代および施設の管理機関の違いなどから、新港突堤岸壁(図-3)、ポートアイランド岸壁(図-5)および摩耶埠頭の耐震強化岸壁(図-7)の3か所の岸壁とすることにした。これらの岸壁は、いずれも、土木学会誌などの専門誌に被害の概要が報告されているうえ、その標準断面図も示されているので、今回の技術的検討に当たって、これらの情報を最大限に利用することにした。

これらの3か所の岸壁の設計計算書は手元にない。新たに入手することも容易ではないと思われるので、ここでは、まず、おのおのの標準断面図を基に当初の設計諸条件を推定し、試算を繰り返して、当初設計採用の緒係数を求めることにした。次に、これらの設計諸条件を基に、今回の地震による被災の情報を加え、ケーソン岸壁の安定計算を行い検討することにした。

3-1. 新港突堤岸壁の考察

新港突堤岸壁(図-3)は3か所のうち、最も古く、国によって建造され、大正12(1923)年に完成したとされている。当初の設計計算においては、約1.8mもあるフーチングの土圧計算への関わり方がポイントになる。表-1が検討結果であるが、いわゆる壁面摩擦角を15度、 $(2/3)\phi$ および ϕ (土の内部摩擦角)とした時の3通りについて示している。壁面摩擦角を大きく採るということは、それによって生ずる僅かな主働土圧の減少というより、主働土圧の鉛直成分の増加を期待することにあるのであるが、この表からは壁面摩擦角を土の内部摩擦角に等しく採ってい

たと推察される。これは過大な期待となるので、より小さな値を採るべきものと思われる。

新港突堤岸壁の被災状況は図-1に示したように、滑動・沈下・背後エプロンの陥没・沈下という典型的パターンを示しているが、その大半の岸壁は背後のエプロンに緊急に土砂を投入する応急手当によって、緊急物資の搬入に活用されたと報告されている。ここ

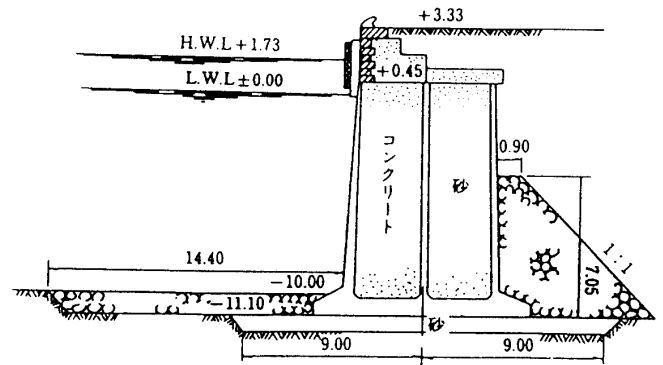


図-3 新港突堤岸壁標準断面図²⁾

表-1 新港突堤岸壁において壁面摩擦角が岸壁の安定に与える影響（地震時）

壁面摩擦角（度）	（設計基準値）	15 度	$(2/3) \phi$	ϕ
上載荷重 (tf/m ²)		1.0	1.0	1.0
滑動の安全率	1.0	0.86	0.94	1.04
転倒の安全率	1.1	1.52	1.74	2.04
端趾圧 (tf/m ²)	40.0	52.6	43.0	36.8

では、図-2に示されている岸壁法線直角方向の最大加速度を200Galとし、また、壁面摩擦角を15度として、背後地盤の沈下量を推定した。図-4がその計算結果であるが、背後地盤の陥没・沈下量は約4.0mとかなり大きな値となった。

3-2. ポートアイランド岸壁の考察

ポートアイランド岸壁（図-5）は昭和56（1981）年に完成したが神戸港埠頭公社が管理運営してい

る。これらの岸壁の設計震度はすべて0.15であり、一般の公共岸壁の0.18に対してやや小さい値となっている。これら両者の設計震度の違いは重要度係数の採用値の差異によるものであるとの発表もあった。被災状況については、ここでもケーソン岸壁特有の被災パターンを示しているの

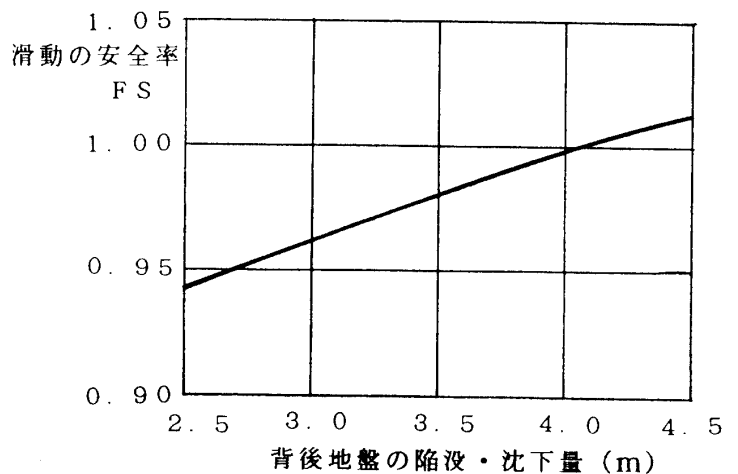


図-4 新港突堤岸壁における背後地盤の陥没・沈下量と滑動の安全率

であるが、六甲アイランドと同様にその被害程度は大きく、ここでは、岸壁そのものの被害は軽微であるが、液状化による地盤の陥没・沈下が激しく2.0m以上も沈下している箇所がかなり見られたと報告されている。

本岸壁の地盤に作用したと想定される法線直角方向加速度は、図-2によれば550Galと極めて大きい。この値をそのまま現行の物部・岡部の土圧式に適用しても計算不能となる。

そこで、被災報告から、ここでの岸壁背後の地盤の陥没量が3.0mであるとして、そのときの破壊震度を求めることにした。図-6がその計算結果であるが、破壊震度は0.29であることが分かる。上述の式(1)に $\alpha = 550\text{Gal}$ と置くと、作用震度は $k_s = 0.275$ を得る。これら両者の値はほぼ等しいといえるが、そのことは、野田・上部等の重力式岸壁に作用する作用震度の関係式の有用性について、ここでも確認することができたといえよう。

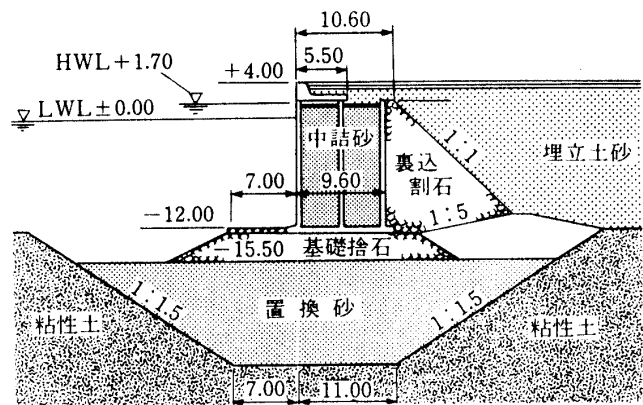


図-5 ポートアイランド岸壁標準断面図³⁾

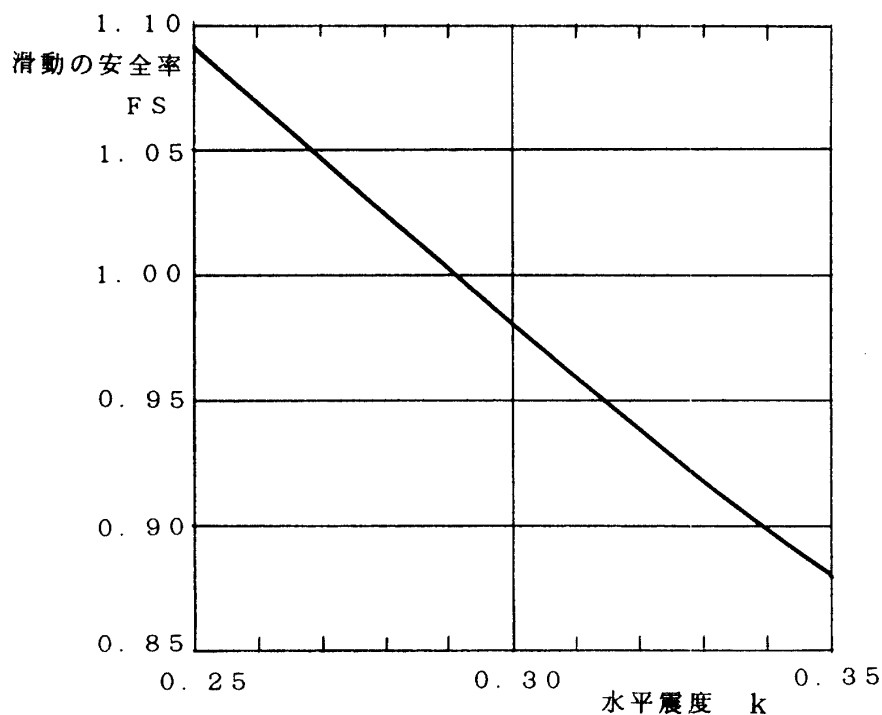


図-6 ポートアイランド岸壁における水平震度と滑動の安全率

3-3. 摩耶埠頭耐震岸壁の考案

摩耶埠頭耐震強化岸壁(図-7)は昭和42(1967)年に完成した。本岸壁はその第一突堤の西側バースの先端部にある。耐震岸壁として改良された岸壁で、設計震度は0.25あり、他の岸壁に較べて極めて大きい値である。今回の地震で殆ど被害を受けなかったことから、広く知られることとなった。この岸壁は標準断面図にあるように、岸壁の背後に直径15.5mの直線鋼矢板によるセル式構造物がある。また、ケーソン本体の底盤と捨石マウンドの間にアスファルトマットが敷設されているが、これは最近ではほとんど用いられなくなったが、滑り抵抗を増すためのものである。ここでの検討事項は、まず、当初設計において、岸壁背後のセル構造物が岸壁の安定に与える影響と、アスファルトマットの滑り抵抗の効用とについて、いかに考慮していたかを確認することにある。過去において、アスファルトマットが敷設されている場合の摩擦係数 μ を0.8に採るのもよい⁵⁾とされたことがあった。それゆえ、ここでは、アスファルトマットの摩擦係数を0.6と0.8の両方について検討することにしたが、表-2がその結果である。これによると、岸壁背後にあるセル構造物を考慮した設計になっていることと、そして、アスファルトマット使用による摩擦係数の増加を行っていないことが分かる。一方、今回の地震について図-2に示されている本岸壁の法線直角方向の最大加速度310Galを用いた計算結果が表-3であるが、これによればアスファルトマット使用による摩擦係数の増加を考慮したように見える。しかし、上述の野田・上部等の重力式岸壁に作用する作用震度を算定すると $k_0=0.227$ を得るので、当初の設計計算結果などを考慮すると、本岸壁はアスファルトマットの効用を期待しなくても、今回の地震に対して十分安全であったといえることができる。

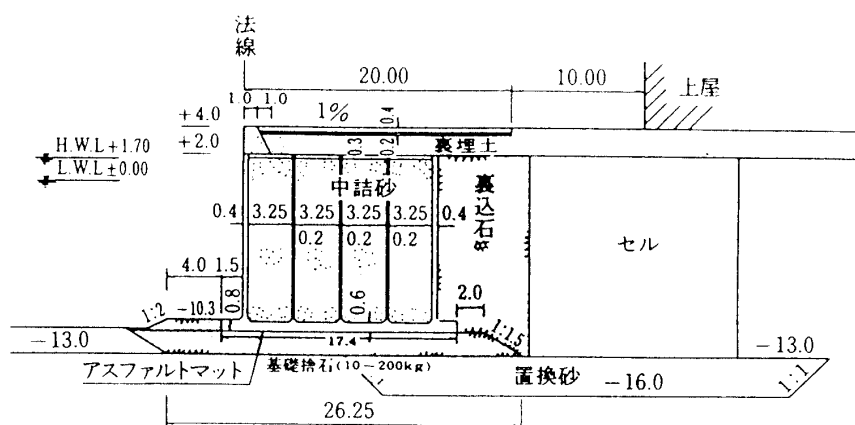


圖-7 摩耶埠頭耐震強化岸壁標準断面圖²⁾

4. 結 言

ケーソン式岸壁は重力型岸壁の代表的構造物であるが、神戸港の場合、岸壁の9割を占めるといわれている。兵庫県南部地震は、神戸港の港湾施設に大きな被害をもたらした。同時に、ケーソン式岸壁にも多大な被害が生じたが、その殆どは、ケーソン本体自体を破損することなしに、

表－2 摩耶埠頭耐震強化岸壁において背後のセル構造物が岸壁の安定に与える影響（地震時）

セル構造物の考慮条件		（設計基準値）	セルを考慮しない場合	セルを考慮する場合
上載荷重（tf/m ² ）			1.0	1.0
滑動の安全率	$\mu = 0.6$	1.0	0.88	1.00
	$\mu = 0.8$	1.0	1.17	1.34
転倒の安全率		1.1	2.10	2.15
端趾圧（tf/m ² ）		50.0	37.9	37.0

表－3 摩耶埠頭耐震強化岸壁の地震時（310Gal）安定計算結果

セル構造物の考慮条件		（設計基準値）	セルを考慮しない場合
上載荷重（tf/m ² ）			1.0
滑動の安全率	$\mu = 0.6$	1.0	0.84
	$\mu = 0.8$	1.0	1.12
転倒の安全率		1.1	1.79
端趾圧（tf/m ² ）		50.0	45.0

滑動による破壊と前傾，そして，それに伴う背後地盤の陥没・沈下という被害パターンを示した
こと，また，被災後の岸壁法線の直線性についてもかなり保持されていることが報告によって明
らかになった。

物部・岡部の地震時土圧式は，特に，地震時主働土圧を的確に表わすものとして広く認識され
ている。これを用いて，運輸省神戸港工事事務所構内の地震計の記録をそのまま 3 km 以上も離れ
ているケーソン式岸壁の被災挙動について検討したが，現行の港湾施設設計法が地震時設計に十
分応えるものであることが分かった。殊に，重力型岸壁の地震震度の与えかたについては，野田・
上部等の作用震度の関係式が有効であることが分かった。設計震度の決定は最終的には政策的判
断によるものではあるが，その重点資料として技術的・経済的な検討がさらに行われることが重
要であることは言うまでもないことである。

本研究は平成 8 年度の卒業研究の一部を加えて取りまとめたものである。ここに，小寺弘邦君・
京免幹也君・八田将幸君・細田貴弘君・山田尊教君の諸君にたいし感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説（改訂版），日本港湾協会，平成元（1989）年 6 月
- 2) 上部達生：兵庫県南部地震による港湾施設等の被害，土木学会誌，Vol.80-4，pp.6-10，1995 年 4 月
- 3) 井合 進：ケーソン式岸壁の被害の特徴，土木学会誌，Vol.80-6，pp.46-49，1995 年 6 月
- 4) 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.4，19

76年1月

5) 例えば, 長尾義三: 港湾工学, 共立出版, p.303, 昭和43(1968)年4月

(平成8年10月12日受理)