

神戸港における岸壁の設計震度と地震被害の関係

Analysis of Earthquake Damage of Caisson Type Quaywalls in Kobe Port

上部 達 生 (うわべ たつお)

運輸省港湾技術研究所 地震防災研究室長

稲 垣 紘 史 (いながき ひろし)

助沿岸開発技術研究センター 審議役

及 川 研 (おいかわ けん)

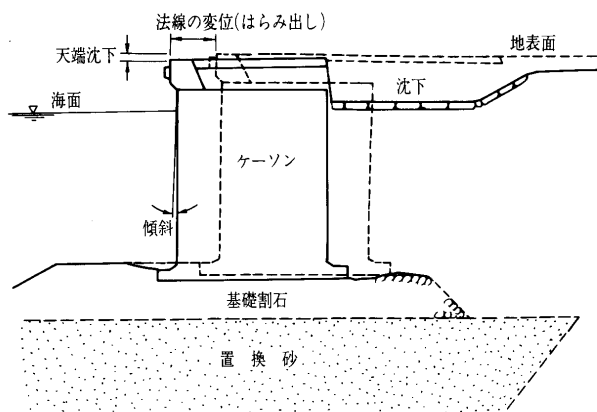
運輸省第三港湾建設局震災復興建設部 設計部長

1. はじめに

兵庫県南部地震において神戸港は、耐震強化岸壁（摩耶埠頭地区の3岸壁）を除く大半の施設が大きな被害を受け、我が国のみならず、アジアの経済活動に深刻な影響を与えた。この神戸港の被害についてはこれまでに報告している^{1),2)}、ここではこうした港湾施設の被災変状にどのような特徴があるのか、あるいは被災の主要な原因が何であるのかを、岸壁の設計震度と被災量の関係を中心に検討する。神戸港の岸壁の構造物はコンクリートケーソンを用いた重力式構造がほとんどを占めており、ここでもこのケーソン式岸壁を検討対象とした。

2. ケーソン式岸壁の被災変状

一般的なケーソン式岸壁の被災変状を図一1に示す。この図に示すようにケーソン式岸壁の被災変形量としては、岸壁法線の変位量（はらみ出し量）、天端沈下量、岸壁本体の傾斜、岸壁本体背後のエプロン沈下量がある。一つの岸壁（1バース）の法線の変位量の平均値をここでは法線変位量として、以下の検討で用いている。岸壁の地震前の正確な位置の資料が無い場合、次のように法線変位量を求めた。まず、仮の基準点からの岸壁の変位量を求め、次に、仮の基準点の地震前後の移動量をGPS（Global Positioning System, 汎地球測位システム）により測定し、この測定値を仮の基準点からの変位量に加算し、これを岸壁の法線変位量とした。このGPS測量の精度は5cm程度と推定されている。



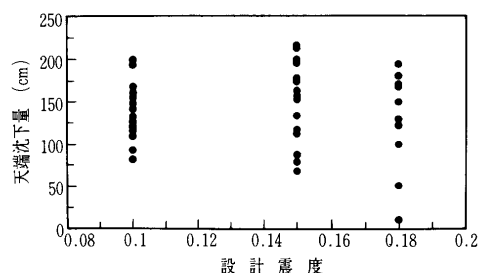
図一1 ケーソン式岸壁の被災変状

3. 対象としたケーソン式岸壁

1995年8月現在までに被災変形量がほぼ正確に判明しているもので大型のケーソン式岸壁（設計水深7.8m以上）の56施設をここでは対象とした。これら施設の位置はポートアイランドが30施設、六甲アイランドが22施設、摩耶埠頭が3施設、新港突堤が1施設である。各施設の設計震度は0.1, 0.15, 0.18のいずれかである。ケーソン式岸壁の基礎にはすべて置換砂が用いられており、この置換砂の層厚は2.6mから24mまでの範囲にある。

4. ケーソン式岸壁の被災分析

図一2に天端沈下量と設計震度の関係を示す。この図では天端沈下量と設計震度に明確な相関関係が認められない。設計震度が大きくても被災変形量がさほど変わらないのは、現行設計法に問題があるためか、あるいは、別に何か主要な被災原因があるためであると考えられる。もし、現行設計法に問題があるとすれば何らかの対処が必要であり、この点を明確にしなければならない。以下には、この設計震度と地震被害の関係を主要検討項目として実施した岸壁の被災分析の結果を示す。



図一2 天端沈下量と設計震度の関係

ケーソン式岸壁の被災変状の要因には様々な項目が考えられるが、本報告では下記の項目について検討することとした。

- i) 被災変形量と岸壁の設計水深の関係
- ii) 被災変形量と岸壁の法線方向の関係
- iii) 被災変形量と岸壁の基礎の置換砂の層厚との関係
- iv) 被災変形量と危険度との関係

ここで検討する危険度とは作用震度を破壊震度で除した値である。破壊震度は構造物の地震時の安定計算で安全率が1となるときの震度である。現状ではすべての施

設においてこの地震時の安全計算が実施されていないので、ここでは破壊震度の代わりに構造物の設計震度を用いることとした。ただし、設計震度0.1の岸壁についてはその破壊震度が0.13と計算されているので、設計震度0.1の岸壁の破壊震度は0.13とした。

作用震度は地震時に構造物に作用したと考えられる震度で、この作用震度と地盤加速度の関係は過去の地震被災事例解析より下記のように与えられている³⁾。

$$K_e = 1/3 (\alpha/g)^{1/3} \quad (\alpha \geq 200 \text{ Gal})$$

$$= \alpha/g \quad (\alpha < 200 \text{ Gal})$$

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)

上式を用いて、地盤加速度より作用震度を推定している。

ポートアイランドおよび六甲アイランドの地盤最大加速度はポートアイランドについては神戸市開発局の強震記録、六甲アイランドについては神戸港工事事務所の強震記録より推定した。なお、今回の地震動には方向性が認められると報告されているので、作用震度も岸壁法線に直交する方向について求めた。

(1) ケーソン式岸壁の被災変形量と設計水深の関係

図-3に法線変位量と設計水深の関係を示す。図に示すように、各被災変形量とも特に設計水深と明りょうな相関関係が認められない結果となった。

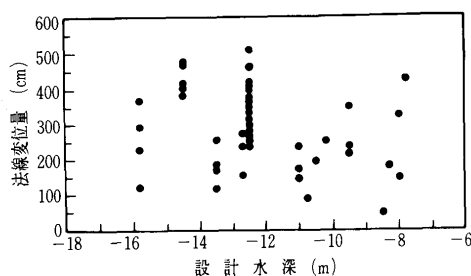


図-3 法線変位量と設計水深の関係

(2) ケーソン式岸壁の被災変形量と岸壁の法線方向の関係

地震直後の被災調査において、岸壁の法線方向によりその被災変状に差があることが指摘されているので、ここでは各被災変形量と岸壁の法線方向との関係を検討した。図-4～6に各被災変形量を岸壁の法線方向別に示す。これらの図によれば法線変位量、傾斜角は東西方向の法線の岸壁の被災変形量の方が、南北方向のそれより

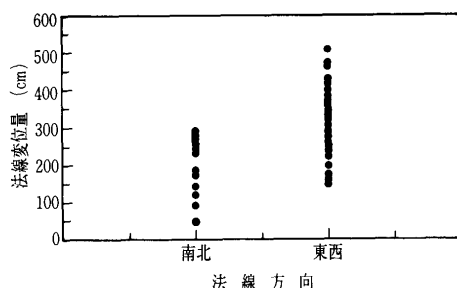


図-4 法線変位量と法線方向の関係

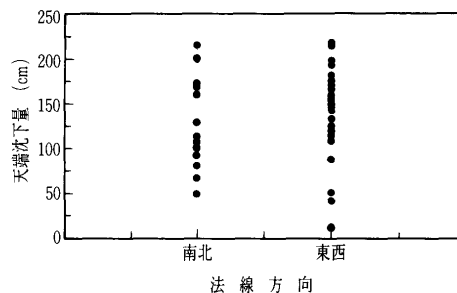


図-5 天端沈下量と法線方向の関係

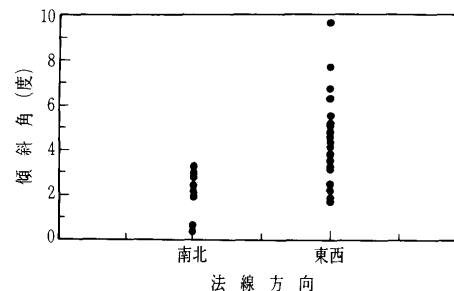


図-6 傾斜角と法線方向の関係

大きいことが分かる。これまで述べたように、地震動の観測結果によれば、南北方向の水平成分の方が東西方向の水平成分より大きく、これは岸壁の被害状況と整合性のとれたものとなっている。

(3) ケーソン式岸壁の被災変形量と置換砂の層厚の関係

図-7には法線変位量と置換砂の層厚の関係、図-8には天端沈下量と置換砂の層厚の関係を示す。図に示すように、天端沈下量だけでなく、法線変位量も置換砂の層厚と正の相関性があることが分かる。なお、傾斜角と置換砂の層厚には明確な相関関係は認められなかった。このように傾斜角を除く被災変形量は置換砂の層厚と相関関係があり、ケーソン式岸壁の被災変状に置換砂が影響を与えたことが推察される。

(4) ケーソン式岸壁の被災変形量と危険度との関係

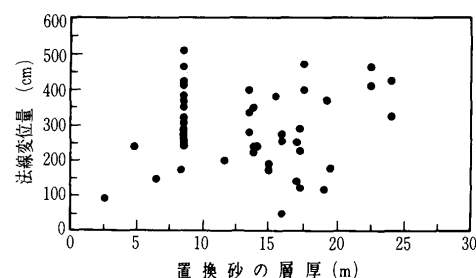


図-7 法線変位量と置換砂の層厚の関係

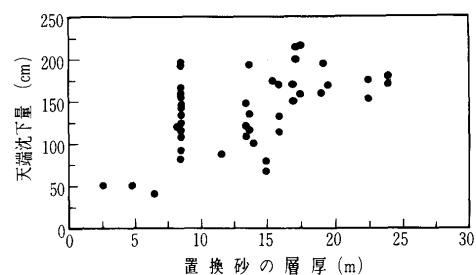
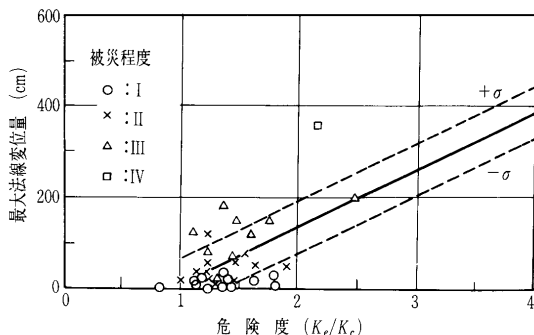


図-8 天端沈下量と置換砂の層厚の関係

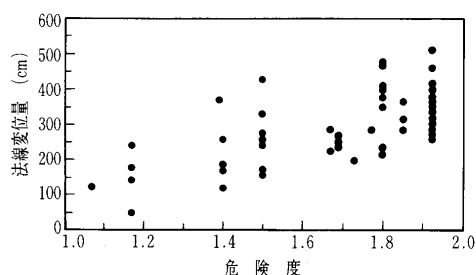
事例報告

ケーソン式岸壁のような重力式構造物の場合は、その地震時の挙動は無被害、破壊の二者択一的でなく、地震外力の増大とともに変形量が連続的に増加していくものと考えられる。過去の地震被災事例解析の結果では、作用震度が破壊震度を越えると、破壊状態に移行し、作用震度の増加（危険度の増加）とともに被災変形量が増加することが確認されている。この検討結果を図一9に示す⁴⁾。なお、図一9に示されているデータには明確に液状化の痕跡のあった岸壁のデータは含まれていない。また、図中の回帰直線、被災程度の定義は参考文献4)を参照されたい。

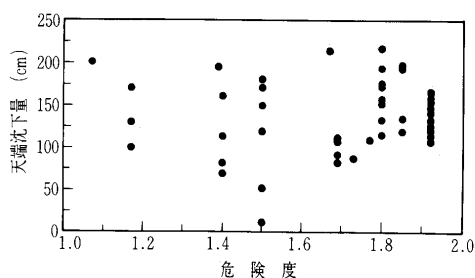


図一9 過去の事例による法線変位量と危険度の関係

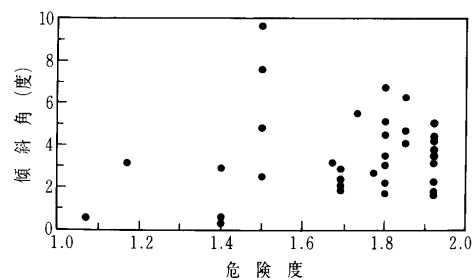
各被災変形量と危険度の関係を図一10～12に示す。図に示すように各被災変形量は危険度の増加とともに増加傾向にある。ただし、天端沈下量ではこの傾向が明りょうでない。既に示したように、天端沈下量は置換砂の層厚と明確な相関関係にあるので、天端沈下量を置換砂の層厚で除した値を百分率表示した置換砂沈下率と危険度の関係を求めた。その結果が図一13である。図一13に示す置換砂沈下率と危険度には明りょうな相関関係があることが分かる。このように、今回の地震被災事例の被災変形量と危険度の関係も過去の地震被災事例に基づいて導かれた図一9の結果と同様な傾向が得られている。このことは、図一2の被災変形量と設計震度の関係で危惧



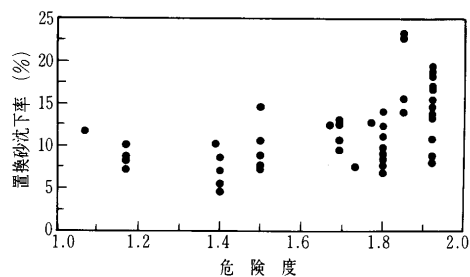
図一10 法線変位量と危険度の関係（兵庫県南部地震）



図一11 天端沈下量と危険度の関係（兵庫県南部地震）



図一12 傾斜角と危険度の関係（兵庫県南部地震）



図一13 置換砂沈下率と危険度の関係（兵庫県南部地震）

した震度法による現行設計法の考え方に大きな問題はないと考える。ただ、今回の被災変形量は、同じ危険度の過去の事例のものより大きく、これは地震動の特性（今回の地震動が大きな変形量を与えるような地震波形である）、あるいは置換砂、岸壁背後の埋立地盤の液状化によるものと推察される。

5. ま と め

- (1) 東西の法線方向のケーソン式大型岸壁の被災変形量は、南北の法線方向の岸壁のそれより大きな値を示した。これは地震動の卓越方向と整合していた。
- (2) 法線変位量、天端沈下量の各被災変形量と置換砂の層厚とは相関関係が認められた。ケーソン式大型岸壁の被災変状に置換砂が影響を与えたことが推察される。
- (3) 法線変位量と危険度（作用震度と破壊震度の比）、天端沈下量を置換砂の層厚で除した値と危険度には明りょうな相関関係が認められた。この関係は、過去の地震被災事例の検討結果と同様な傾向であるが、同じ危険度に対する被災変形量は過去の結果より大きな値を示した。これは地震動の特性、あるいは、置換砂、岸壁背後の埋立地盤の液状化の影響によるものと推察される。

参 考 文 献

- 1) 上部達生：兵庫県南部地震による港湾施設の被害，土木学会誌，Vol. 80, No. 4, pp. 6～10, 1995.
- 2) 井合 進：ケーソン式岸壁の被害の特徴，土木学会誌，Vol. 80, No. 6, pp. 46～49, 1995.
- 3) 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, pp. 67～111, 1976.
- 4) 上部達生：地震被災事例に基づく重力式及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.

(原稿受理 1995.10.4)