

港湾技研資料

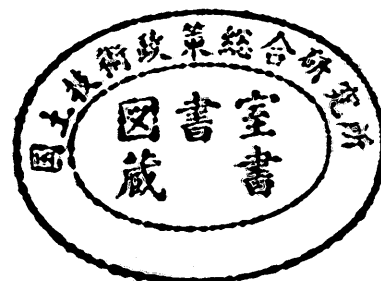
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 813 Sept. 1995

兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察

港湾施設被害検討委員会編

運輸省港湾技術研究所



序 文

稲富 隆昌*
稲垣 紘史**
輪湖 建雄***

平成7年1月17日午前5時46分に淡路島北部を震源とするマグニチュード7.2の地震が発生した。「平成7年（1995年）兵庫県南部地震」と命名されたこの地震は、高度に発達した都市を襲った初めての活断層型直下地震である。神戸市、芦屋市などでは震度7の激震を記録した。この強震により、神戸市を中心に5,500名を越す犠牲者を出すとともに、港湾施設、高速道路、新幹線、ライフラインなどの土木施設、また住宅、ビルなどの建築構造物に未曾有の被害を出し、長期間にわたり都市機能を麻痺させた。同時に、神戸港のポートアイランド、六甲アイランドなどの埋立地では、埋立土の「まさ土」が液状化し、その噴泥が地表面を大規模に覆い、液状化現象を全国に再認識させた。

運輸省第三港湾建設局神戸港工事事務所では、水平加速度が502Gal、上下加速度が283Galの地震動を記録した。被害が集中した神戸港の岸壁の多くはケーソン式岸壁で、被害形態は岸壁の移動と傾斜およびその背後地盤の沈下であった。全国のコンテナ貨物量の約3割を取り扱う神戸港のコンテナ埠頭においても、岸壁が数m移動するなど同様な被害が発生したため、クレーンの脚に損傷が生じ、港湾荷役は完全にその機能を喪失した。一方、このような被災状況下において、耐震性を高めた耐震強化岸壁はほとんど損傷することなくその機能を保持した。この耐震性の保証は、神戸港のみならず、全国に展開する港湾施設の耐震性強化にきわめて重要な技術情報を与えた。

地震から7カ月を経過した現在、被災地港湾では地震に強い港湾を目指して復興が始まっている。同時にケーソン式岸壁の被害の原因究明の調査、研究も図-1に沿って鋭意進められている。本報

兵庫県南部地震に対する ケーソン式岸壁の被害考察 —— 地震動・液状化を中心に ——

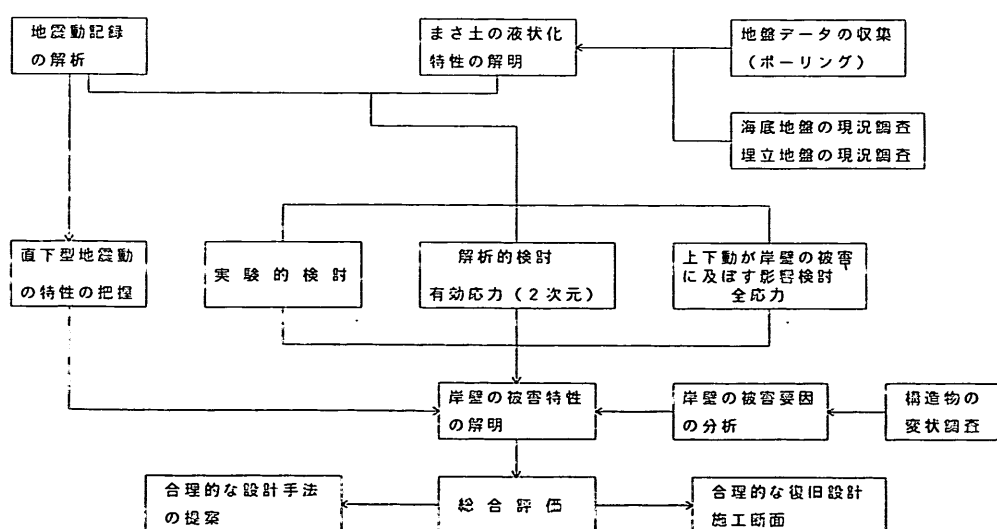


図-1 調査研究フロー

- * 構造部長
- ** 前 運輸省第三港湾建設局長
- *** 運輸省第三港湾建設局 震災復興建設部長

告は現在までに明らかになった研究成果等を速報的に紹介するものである。したがって、復興事業に伴って明らかになる現地情報の内容によっては成果の一部変更もあり、また、解析、実験的研究も継続して実施しているため、最終的な成果は後日に待つ必要がある。

報告では、港湾施設の被害状況および地震動の特性紹介から始まり、液状化を含む埋立地盤の特性、ケーソン式岸壁の変状の要因を明らかにし、また、実験的、解析的検討からケーソン式岸壁の変状を考察した。また、コンテナクレーンについても現地データを用いて被災の実態を明らかにした。

なお、本報告を取りまとめるに際して、運輸省港湾局、同第三港湾建設局、神戸市港湾局、同開発局、兵庫県土木部港湾課、神戸港埠頭公社等から多大なる支援をいただいた。ここに関係の方々に謝意を表す。

平成7年9月

兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察

目 次

序 文

- (その1) 強震記録宮田正史・佐藤幸博・井合 進..... 5
- (その2) 被災状況
- 岸壁、防波堤、海岸保全施設—外山進一・松永康男 51
 - 港湾荷役施設—藤本健幸 77
 - 臨港交通施設—横田 弘 95
- (その3) 神戸港のケーソン式大型岸壁の被災分析
.....上部達生・高野剛光・松永康男..... 127
- (その4) 埋立地盤の特性善 功企・山崎浩之・南 兼一郎・中島由貴..... 147
- (その5) 液状化の判定に関する検討山崎浩之・善 功企・佐渡篤史・館下 徹..... 167
- (その6) ケーソン式岸壁の被災に関する模型振動実験 ...菅野高弘・三藤正明・及川 研..... 207
- (その7) ケーソン式岸壁の有効応力解析井合 進・一井康二・森田年一..... 253
- (その8) ケーソン式岸壁の地震時滑動に関する数値解析
.....野津 厚・上部達生・高野剛光..... 281
- (その9) 神戸港ケーソン式岸壁の安定性に関する一考察
.....長尾 毅・小泉哲也・木阪恒彦・寺内 潔・細川浩二・門脇陽治・宇野健司..... 301
- (その10) コンテナクレーンの地震時挙動吉田由治..... 337

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大型岸壁の被災分析

上部 達生*
高野 剛光**
松永 康男***

要 旨

神戸港で被災したケーソン式大型岸壁(水深-7.5m以上)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要因が何であるのかを検討した。

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。最大はらみ出し量、天端沈下量、被災変形率(最大はらみ出し量と岸壁の高さの比)の各被災変形量と置換砂の層厚とは明瞭な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。傾斜角を除く被災変形量を置換砂の層厚で除した値は危険度(作用震度と破壊震度の比)と明瞭な相関関係が認められた。これは、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。これは今回の地震動が大きな被災変形量を与えるような地震波形であったこと、あるいは液状化の影響によるものと推察される。

キーワード：地震被害、ケーソン式岸壁、地震被災変形量

* 構造部 地震防災研究室長

** 構造部 地震防災研究室

*** 運輸省第三港湾建設局 震災復興建設部 設計部 第二設計課長

Mechanism of Damage to Port Facilities during 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake

(Part 3) Analysis of Earthquake Damage of Caisson Type Quaywalls in Kobe Port

Tatsuo UWABE*
Takemitsu TAKANO**
Yasuo MATSUNAGA***

Synopsis

This report describes the analysis of the earthquake damage of caisson type quaywalls in Kobe Port. The main characteristics of damage deformation of quaywalls and the factors of damage were investigated.

The earthquake damage deformation of the quaywalls whose face line is in the south-east direction was larger than that of quaywalls whose face line is in the north-south direction. This direction was coordinate to the predominant direction of earthquake ground motion. The swelling of face line, the settlement of face line and the ratio between the swelling of face line and the quaywall height were correlated respectively to the thickness of replaced sand layer under caissons. It was estimated that the earthquake damage deformation was affected by the replaced sand layer. The ratio of the earthquake damage deformation to the thickness of replaced sand layer was correlated to the ratio of the corresponding seismic coefficient of the ground acceleration to the seismic coefficient which gives the safety factor of one in the stability analysis of the design standard. Though this result shows same tendency as the result of the past damage data, the earthquake damage deformation of this result shows larger value than that of the past result for the same ratio. It was estimated that this was because of the effects of the earthquake waveform and liquefaction.

Key Words : Earthquake Damage, Caisson Type Quaywalls, Earth-quake Damage eformation

* Chief of Earthquake Disaster Prevention Laboratory, Structural Engineering Division
** Member of Earthquake Disaster Prevention Laboratory, Structural Engineering Division
*** Chief Engineer, Technical Division, Earthquake Disaster Restoration Headquarters, The Third District Port

目 次

要 旨	127
1. はじめに	131
2. ケーソン式岸壁の被災変形量	131
3. 対象としたケーソン式岸壁	131
4. ケーソン式岸壁の被災分析	133
4. 1 被災分析の検討項目	133
4. 2 ケーソン式岸壁の被災変形量と前面水深の関係	134
4. 3 ケーソン式岸壁の被災変形量と岸壁の法線方向の関係	136
4. 4 ケーソン式岸壁の被災変形量と置換砂の層厚の関係	136
4. 5 法線の方向性、置換砂の層厚を考慮した各被災変形量と前面水深との関係	136
4. 6 ケーソン式岸壁の被災変形量と危険度との関係	137
4. 7 コンテナクレーンのレール幅の地震前後の差と岸壁の最大はらみ出し量との関係	142
5. 結論	144
6. あとがき	145
参考文献	145
記号表	145

1. はじめに

神戸港の各施設は本報告の(その2)において示したような被害を受けているが、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要因が何であるのかを検討する。神戸港の岸壁の構造形式はケーソンを用いた重力式構造がほとんどであり、現在までに被災変状データが整備されているのはケーソン式岸壁のみであるので、ここではこのケーソン式岸壁を対象として検討を行った。神戸港にはケーソン式岸壁のほかに各種構造形式の岸壁もあり、これらの被災変状を相互に比較することは重要であるが、まだこれらの被災変状データが整備されていないので、ここではこうした検討は行わない。なお、ここで用いたケーソン式岸壁の被災データは1995年6月時点でまとめられたものである。

ここでは、まず、対象としたケーソン式岸壁の被災データを示し、次に、検討すべき各種被災要因を選択し、これらと各種被災変形量の関係を検討した。

2. ケーソン式岸壁の被災変形量

一般的なケーソン式岸壁の被災変状を図-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、岸壁法線のはらみ出し量、天端沈下量、岸壁本体の傾斜、エプロン沈下量がある。岸壁法線のはらみ出し量の最大値を最大はらみ出し量として、以下の検討ではこの最大はらみ出し量を用いる。最大はらみ出し量は岸壁の規模の影響を受けると考えられるので、この最大はらみ出し量を岸壁の高さで除したものを百分率で表示した値を被災変形率と定義し、この値も被災変形量として用いている。

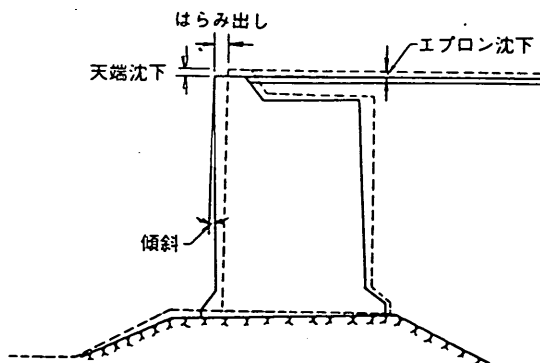


図-1 ケーソン式岸壁の被災変状

3. 対象としたケーソン式岸壁

今回の地震で被災した港湾施設で構造形式が判明しており、被災程度が与えられている施設のうち重力式岸壁

を選択し、被災程度別に示したのが表-1である。ここで言う被災程度とは、表-2のように定義されたものである。この被災程度と各被災変形量との関係は過去の地震被災事例解析によれば、表-3のように与えられている。

表-1によれば、被災程度Ⅲの重力式岸壁がもっとも多く、全体の約6割を占めている。これら重力式岸壁のうち、1995年6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岸壁(前面水深-7.5m以上)をここでは対象とする事とした。これら対象としたケーソン式岸壁を表-4に示す。

表-4に示すようにここで対象としたケーソン式岸壁はポートアイランド、六甲アイランドの25施設である。岸壁の前面水深は-7.8mから-14mまでで、その内訳は図-2に示すとおりである。図では前面水深を四捨五入したメートル単位で示している。前面水深-12mの施設がもっとも多く、その他の前面水深の施設の数ほぼ等しくなっている。各施設的设计震度は0.1, 0.15, 0.18であり、それぞれの施設数は図-3に示すとおりである。

表-1 被災した重力式岸壁の被災程度

被災程度	被災施設数 (重力式係船岸)
I	1
II	45
III	84
IV	15
計	145

表-2 被災程度

被災程度	被災の状況
0	無被災。
I	本体に異常はないが、付属構造物に破壊や変状が認められるもの。
II	本体にかなり変状が起こったもの。
III	形はとどめているが、構造物本体に破壊が起こったと認められるもの。
IV	全壊して形をとどめていないもの。

表-3 各被災程度と被災変形量の範囲
(過去の重力式岸壁の被災事例)

被災程度	最大はらみ出し量 (cm)	平均はらみ出し量 (cm)	天端沈下量 (cm)	エプロン沈下量 (cm)	傾斜角 (°)
0	0	0	0	0	0
I	25以下	25以下	30以下	50以下	5°以下
II	25~70	40以下	50以下	20~60	1~8°
III	70~200	40~200	100以下	30~100	2~15°
IV	200以下	200以上	100以上	100以上	15°以上

表-4 対象としたケーソン式岸壁

港名	地区名	施設名(設備名)	構造形式	水深 D(m)	ケーソン前面水深 D'(m)	岸壁高 (m)	設計深度 Kc	ケーソン幅 B(m)	ケーソン高さ H(m)	置砂の厚 T(m)	最大はらみ出し量 (cm)	天端以下量 (cm)	傾斜角 (度)	被災変形率 (%)	方向	被災程度	
1	神戸港	ポートアイランド	-10mB岸壁	重力式(ケーソン)	-12.0	-12.0	4.0	0.18	12.2	14.7	15.3	403	120	2.7	24.1	2	III
2	神戸港	ポートアイランド	PC 7	重力式(ケーソン)	-12.0	-12.0	4.0	0.10	9.6	14.5	7.5	363	158	3.8	22.0	2	III
3	神戸港	ポートアイランド	PC 8	重力式(ケーソン)	-12.0	-12.0	4.0	0.10	9.6	14.5	7.5	330	114	5.9	20.0	2	III
4	神戸港	ポートアイランド	PC 9	重力式(ケーソン)	-12.0	-12.0	4.0	0.10	9.6	14.5	7.5	325	115	6.2	19.7	2	III
5	神戸港	ポートアイランド	PC 11	重力式(ケーソン)	-12.0	-12.0	4.0	0.10	9.6	14.5	15.5	442	148	8.8	26.8	2	III
6	神戸港	ポートアイランド	PC 12	重力式(ケーソン)	-12.0	-12.0	4.0	0.10	9.6	14.5	15.5	333	108	2.9	20.2	2	III
7	神戸港	六甲アイランド	-12m岸壁(W、X)	重力式(ケーソン)	-12.0	-12.3	4.0	0.18	10.6	15.0	17.0	493	136	9.4	29.0	2	III
8	神戸港	六甲アイランド	-10m岸壁①(物質別D-1)	重力式(ケーソン)	-10.0	-10.2	4.0	0.18	10.4	13.0	11.0	318	99	2.4	21.2	2	II
9	神戸港	六甲アイランド	-10m岸壁②(C岸壁)	重力式(ケーソン)	-10.0	-10.2	4.0	0.18	10.4	13.0	14.0	257	126	3.2	17.2	1	II
10	神戸港	六甲アイランド	-10m岸壁③(S-V)	重力式(ケーソン)	-10.0	-10.2	4.0	0.18	10.4	13.0	17.0	270	156	7.2	18.0	2	II
11	神戸港	六甲アイランド	-7.5m岸壁(N-1orA)	重力式(ケーソン)	-7.5	-8.0	4.0	0.18	8.8	10.5	16.0	277	146	4.8	22.2	1	II
12	神戸港	六甲アイランド	-7.5m岸壁②(N-2)	重力式(ケーソン)	-7.5	-7.8	4.0	0.18	7.0	10.3	24.0	520	216	4.8	42.3	2	III
13	神戸港	六甲アイランド	-7.5m岸壁③(K-ACT)	重力式(ケーソン)	-7.5	-8.0	4.0	0.18	8.7	10.0	24.0	600	176	7.6	50.0	2	II
14	神戸港	六甲アイランド	RC 1	重力式(ケーソン)	-13.0	-13.0	4.0	0.15	10.6	15.5	15.0	198	80	1.0	11.3	1	III
15	神戸港	六甲アイランド	RC 2	重力式(ケーソン)	-13.0	-13.0	4.0	0.15	10.6	15.5	15.0	186	67	0.6	10.6	1	III
16	神戸港	六甲アイランド	RC 3(西側)	重力式(ケーソン)	-13.0	-13.0	4.0	0.15	10.6	15.5	16.0	332	112	5.1	19.0	1	IV
17	神戸港	六甲アイランド	RC 3(南側)	重力式(ケーソン)	-14.0	-14.0	4.0	0.15	11.6	16.5	15.5	426	173	6.1	23.0	2	IV
18	神戸港	六甲アイランド	RC 4	重力式(ケーソン)	-14.0	-14.0	4.0	0.15	11.6	16.5	17.5	339	157	5.4	18.3	2	III
19	神戸港	六甲アイランド	RC 5	重力式(ケーソン)	-14.0	-14.0	4.0	0.15	11.6	16.5	17.5	523	216	9.0	28.3	2	III
20	神戸港	六甲アイランド	(RC 6)	重力式(ケーソン)	-14.0	-14.0	4.0	0.15	11.6	16.5	22.5	524	175	6.1	28.3	2	III
21	神戸港	六甲アイランド	(RC 7)	重力式(ケーソン)	-14.0	-14.0	4.0	0.15	11.6	16.5	22.5	521	152	3.9	28.2	2	III
22	神戸港	六甲アイランド	内貿(J-M)	重力式(ケーソン)	-10.0	-10.0	4.0	0.15	9.0	12.5	11.6	372	87	5.5	25.7	2	III
23	神戸港	六甲アイランド	RF1	重力式(ケーソン)	-7.5	-9.0	4.0	0.15	8.0	11.5	13.8	261	116	7.8	19.3	2	III
24	神戸港	六甲アイランド	RF2	重力式(ケーソン)	-9.0	-9.0	4.0	0.15	8.0	11.5	13.8	270	134	2.9	20.0	2	III
25	神戸港	六甲アイランド	RF3	重力式(ケーソン)	-8.5	-9.0	4.0	0.15	8.0	11.5	13.8	473	194	11.8	35.0	2	III

被災変形率:最大はらみ出し量/(ケーソン高さ+2m)×100(%) 方向1:法線方向が南北方向
方向2:法線方向が東西方向

ケーソン式岸壁の基礎には全て置換砂が用いられており、この置換砂の層厚は7.5mから24mまでの範囲にある。置換砂の層厚には海底面より上の砂マウンドの層厚も含

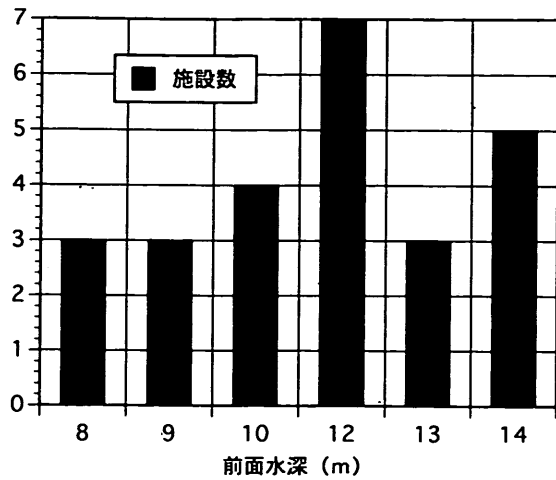


図-2 前面水深別の施設数

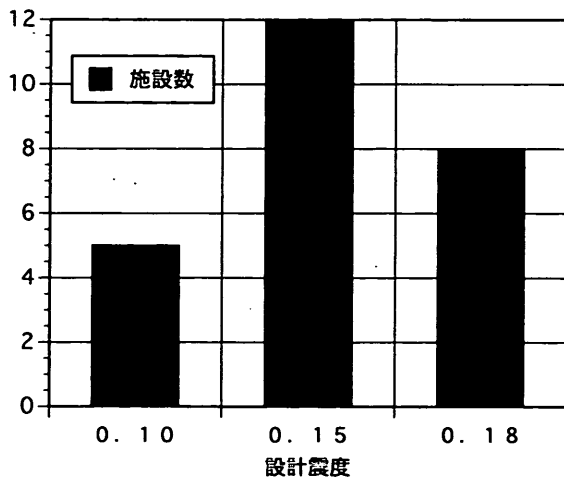


図-3 設計震度別の施設数

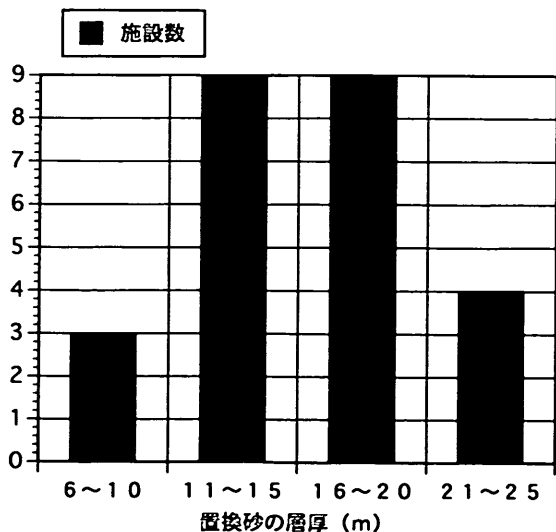


図-4 置換砂の層厚別の施設数

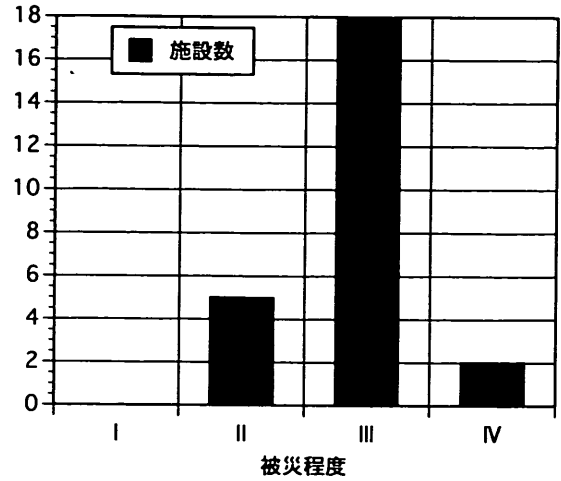


図-5 被災程度別の施設数

まれている。各岸壁の置換砂の層厚がどの範囲にあるのかを示したのが図-4である。また、各岸壁の被災程度を示したのが図-5である。この図によればほとんどの岸壁の被災程度はⅢである。

表-4の最大はらみ出し量はGPS (Global Positioning System, 汎地球測位システム) による補正が実施された後のデータである。このGPSの補正では、岸壁の最大はらみ出し量の測定で用いた基準点の地震前後の移動量をGPS測量より求め、この値を最大はらみ出し量の測定値に加算している。また、被災変形率は最大はらみ出し量を、(ケーソン高さ+2m)で除して、百分率表示したものである。さらに、表中の「方向」とは岸壁の法線方向を意味しており、「方向1」というのは岸壁の法線方向が南北方向であること、「方向2」はそれが東西方向であることを示している。

4. ケーソン式岸壁の被災分析

4.1 被災分析の検討項目

今回の神戸港の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、現在までに入手されている被災事例のデータが限られている事、この報告が解析の第一報である事等を考慮して、本報告では下記の項目についてだけ検討することとした。

- i) 被災変形量と岸壁の前面水深の関係
- 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となる時の震度である。構造物の耐震設計における安定計算結果の安全率は必ずしも1ではなく、1以上の時もあるので、この破壊震度は設計震度より大きくなる場合が多い。本報告のとりまとめ時点では、構造

物の地震時の安定計算を再度行い、その結果より破壊震度を求める作業を実施していないので、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、別に実施されている検討で設計震度0.1の構造物の破壊震度が0.13と計算されているので、この値を用いた検討も併せて実施している。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¹⁾。

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

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

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。この地盤加速度よりポートアイランドと六甲アイランドの各法線方向の作用震度を求めた結果を表-5に示す。本報告の(その1)において示したように、今回の地震動には方向性が認められるので、作用震度も岸壁法線に直交する方向について求めている。

表-5 ポートアイランド及び六甲アイランドの作用震度

場 所	地盤加速度 (Gal)		作用震度	
	南北方向	東西方向	南北方向	東西方向
ポートアイランド	3.41	2.83	0.23	0.22
六甲アイランド	5.40	2.00	0.27	0.20

4.2 ケーソン式岸壁の被災変形量と前面水深の関係

図-6に各被災変形量と前面水深の関係を示す。ここで言う前面水深は表-6に示すケーソン前面水深であり、

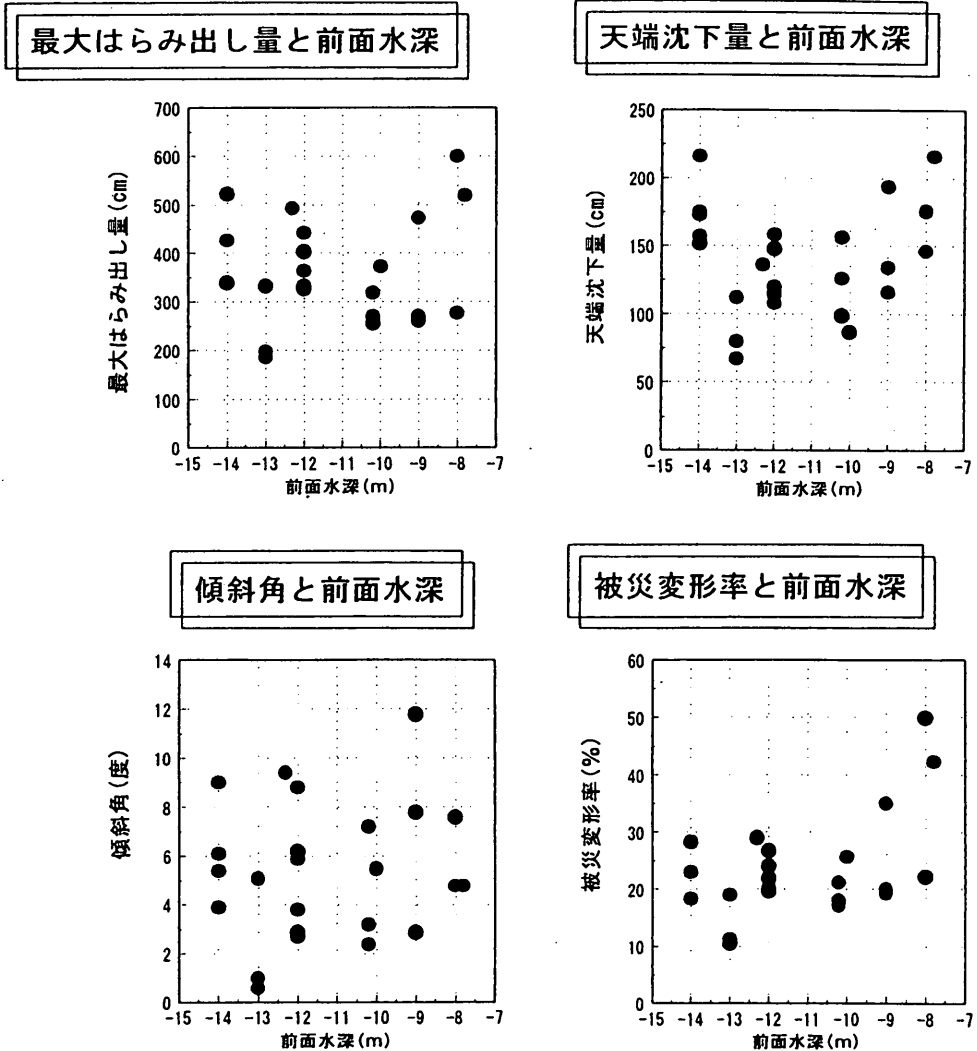


図-6 各被災変形量と前面水深の関係

表-6 被災分析で用いた各データ

港名	地区名	施設名(設備名)	水深 D (m)	ケーソン前面水深 D' (m)	天冠高 (m)	設計波高 Kc	ケーソン幅 B (m)	ケーソン間 H (m)	置換水の厚 T (m)	最大はらみ出し高 (cm)	天冠以下高 (cm)	最大はらみ出し高 /置換水 (%)	天冠以下高 /置換水 (%)	傾倒角 (度)	被災変形率 (%)	危険度 (Kc/K)	危険度 (Kc/Kc)	方向	被災程度
1	神戸港	ポートアイランド	-12.0	-12.0	4.0	0.18	12.2	14.7	15.3	403	120	26.3	7.84	2.7	24.1	1.280	1.280	2	III
2	神戸港	ポートアイランド	-12.0	-12.0	4.0	0.10	9.6	14.5	7.5	363	158	48.4	21.07	3.8	22.0	2.300	1.770	2	III
3	神戸港	ポートアイランド	-12.0	-12.0	4.0	0.10	9.6	14.5	7.5	330	114	44.0	15.20	5.9	20.0	2.300	1.770	2	III
4	神戸港	ポートアイランド	-12.0	-12.0	4.0	0.10	9.6	14.5	7.5	325	115	43.3	15.33	6.2	19.7	2.300	1.770	2	III
5	神戸港	ポートアイランド	-12.0	-12.0	4.0	0.10	9.6	14.5	15.5	442	148	28.5	9.55	8.8	26.8	2.300	1.770	2	III
6	神戸港	ポートアイランド	-12.0	-12.0	4.0	0.10	9.6	14.5	15.5	333	108	21.5	6.97	2.9	20.2	2.300	1.770	2	III
7	神戸港	六甲アイランド	-12.0	-12.3	4.0	0.18	10.6	15.0	17.0	493	136	29.0	8.00	9.4	29.0	1.500	1.500	2	III
8	神戸港	六甲アイランド	-10.0	-10.2	4.0	0.18	10.4	13.0	11.0	318	99	28.9	9.00	2.4	21.2	1.500	1.500	2	II
9	神戸港	六甲アイランド	-10.0	-10.2	4.0	0.18	10.4	13.0	14.0	257	126	18.4	9.00	3.2	17.2	1.110	1.110	1	II
10	神戸港	六甲アイランド	-10.0	-10.2	4.0	0.18	10.4	13.0	17.0	270	156	15.9	9.18	7.2	18.0	1.500	1.500	2	II
11	神戸港	六甲アイランド	-7.5	-8.0	4.0	0.18	8.8	10.5	16.0	277	146	17.3	9.13	4.8	22.2	1.110	1.110	1	II
12	神戸港	六甲アイランド	-7.5	-7.8	4.0	0.18	7.0	10.3	24.0	520	216	21.7	9.00	4.8	42.3	1.500	1.500	2	III
13	神戸港	六甲アイランド	-7.5	-8.0	4.0	0.18	8.7	10.0	24.0	600	176	25.0	7.33	7.6	50.0	1.500	1.500	2	II
14	神戸港	六甲アイランド	-13.0	-13.0	4.0	0.15	10.6	15.5	15.0	198	80	13.2	5.33	1.0	11.3	1.330	1.330	1	III
15	神戸港	六甲アイランド	-13.0	-13.0	4.0	0.15	10.6	15.5	15.0	186	67	12.4	4.47	0.6	10.6	1.330	1.330	1	III
16	神戸港	六甲アイランド	-13.0	-13.0	4.0	0.15	10.6	15.5	16.0	332	112	20.8	7.00	5.1	19.0	1.330	1.330	1	IV
17	神戸港	六甲アイランド	-14.0	-14.0	4.0	0.15	11.6	16.5	15.5	426	173	27.5	11.16	6.1	23.0	1.800	1.800	2	IV
18	神戸港	六甲アイランド	-14.0	-14.0	4.0	0.15	11.6	16.5	17.5	339	157	19.4	8.97	5.4	18.3	1.800	1.800	2	III
19	神戸港	六甲アイランド	-14.0	-14.0	4.0	0.15	11.6	16.5	17.5	523	216	29.9	12.34	9.0	28.3	1.800	1.800	2	III
20	神戸港	六甲アイランド	-14.0	-14.0	4.0	0.15	11.6	16.5	22.5	524	175	23.3	7.78	6.1	28.3	1.800	1.800	2	III
21	神戸港	六甲アイランド	-14.0	-14.0	4.0	0.15	11.6	16.5	22.5	521	152	23.2	6.76	3.9	28.2	1.800	1.800	2	III
22	神戸港	六甲アイランド	-10.0	-10.0	4.0	0.15	9.0	12.5	11.6	372	87	32.1	7.50	5.5	25.7	1.800	1.800	2	III
23	神戸港	六甲アイランド	-7.5	-9.0	4.0	0.15	8.0	11.5	13.8	261	116	18.9	8.41	7.8	19.3	1.800	1.800	2	III
24	神戸港	六甲アイランド	-9.0	-9.0	4.0	0.15	8.0	11.5	13.8	270	134	19.6	9.71	2.9	20.0	1.800	1.800	2	III
25	神戸港	六甲アイランド	-8.5	-9.0	4.0	0.15	8.0	11.5	13.8	473	194	34.3	14.06	11.8	35.0	1.800	1.800	2	III

各被災変形量とは最大はらみ出し量、天端沈下量、傾斜角、被災変形率である。図に示すように、各被災変形量とも特に前面水深と明瞭な相関関係が認められない。

4.3 ケーソン式岸壁の被災変形量と岸壁の法線方向の関係

本報告の(その1)で示したように、今回の地震動の東西方向の水平成分より、南北方向の水平成分が大きく、地震動の方向性が確認されている。また、地震直後の被災調査においても、岸壁の法線方向により被災状況に差があることが、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することとした。図-7に各被災変形量を岸壁の法線方向別に示した。図-7によれば各被災変形量とも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大きいことが分かる。これまで述べたように、地震動は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。

4.4 ケーソン式岸壁の被災変形量と置換砂の層厚の関係

図-8には各被災変形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、最大はらみ出し量、被災変形率も置換砂の層厚と正の相関性があることが分かる。置換砂の層厚が大きくなるほど、最大はらみ出し量、天端沈下量、被災変形率が大きくなっている。傾斜角と置換砂の層厚の相関関係は認められない。このように傾斜角を除く被災変形量は置換砂の層厚と明瞭な相関関係があり、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。

4.5 法線の方向性、置換砂の層厚を考慮した各被災変形量と前面水深との関係

4.3, 4.4において、各被災変形量(傾斜角を除く)が置換砂の層厚、岸壁の法線方向に関係していることが判明したので、各被災変形量と前面水深との関係を見直した。まず、各被災変形量をそれぞれの置換砂の層厚で正規化した。この計算結果は表-6に示す。この値を用い

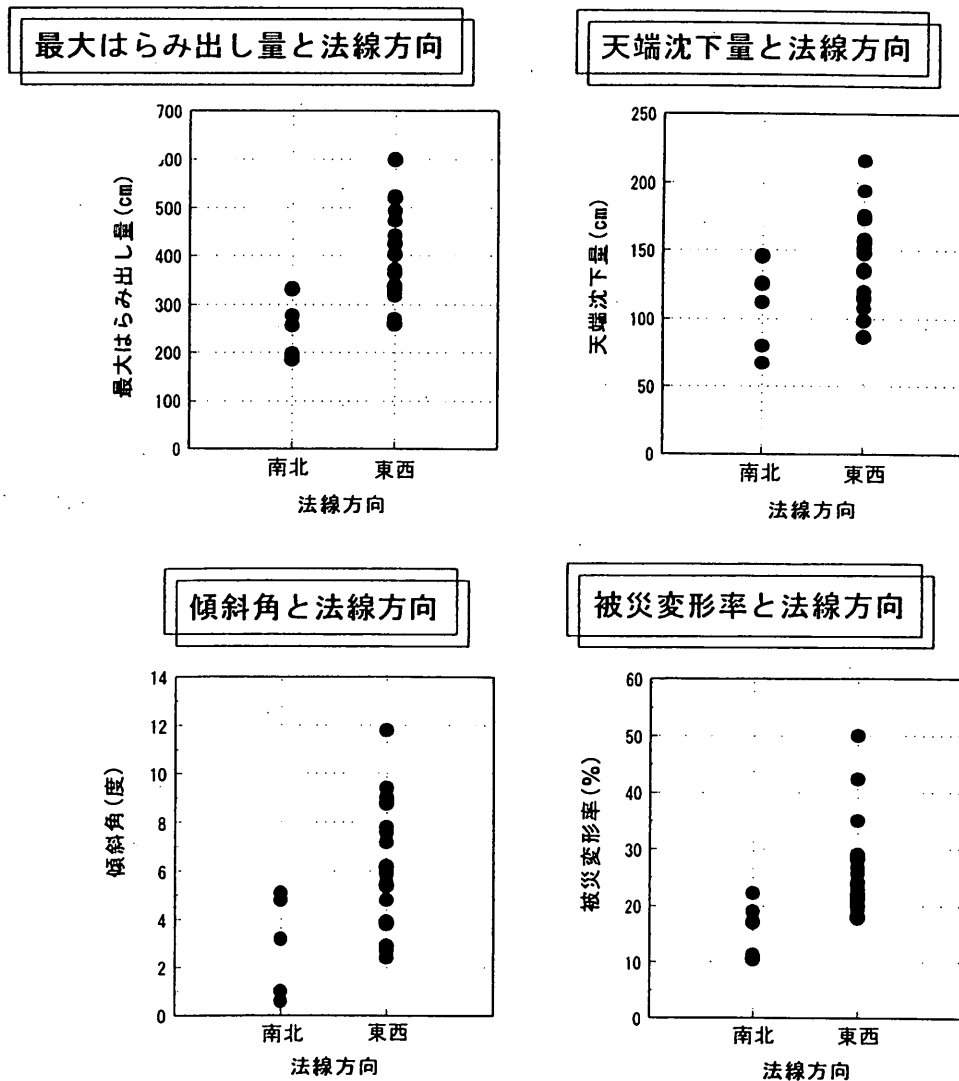


図-7 各被災変形量と岸壁の法線方向の関係

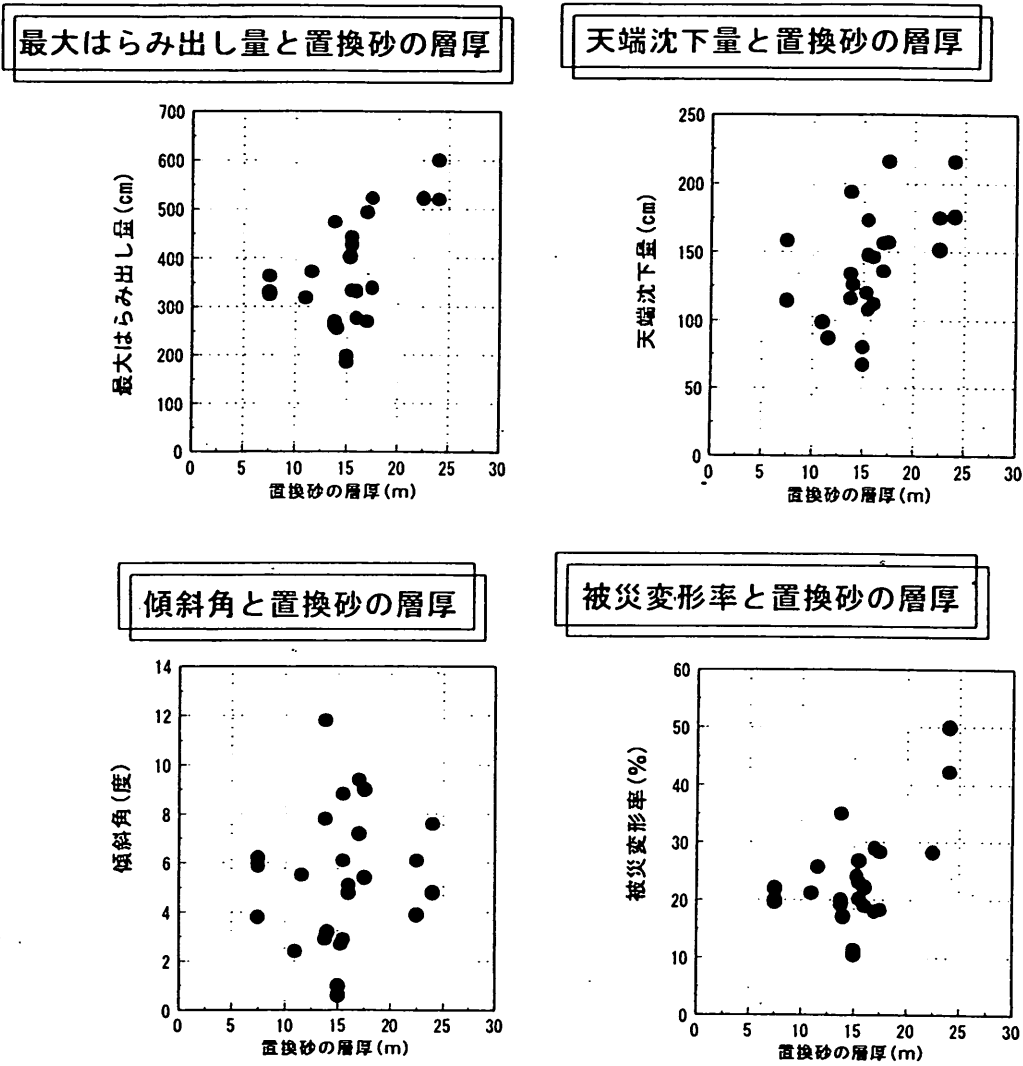


図-8 各被災変形量と置換砂の層厚の関係

て、法線方向別に表示したものが図-9である。図-9の左側には南北方向の法線の岸壁を、右側には東西方向の法線の岸壁を示す。図-9によれば、特に明瞭な相関関係は認められない。

4.6 ケーソン式岸壁の被災変形量と危険度の関係

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はなく、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、4.1で示した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-10、表-7に示す²⁾。なお、図-10に示されているデータには明確に液状化したと推定される岸壁のデータは含まれていない。

正確には構造物の地震時の安定計算を実施し、破壊震度を求めて、この値を用いて作用震度との比から危険度を計算すべきであるが、時間的制約からここでは破壊震

度の代わりに設計震度を用いることとした。ただ、設計震度が0.1の構造物については、その破壊震度が0.13と推察されたので、この値を用いて危険度を計算した。この検討ではこれを区別して危険度2と表現している。したがって、設計震度が0.1以外の危険度2は先に求めた危険度と等しい。このようにして求めた危険度、危険度2の値を表-6に示してある。

各被災変形量と危険度の関係を図-11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。既に示したように、各被災変形量は置換砂の層厚と明確な相関関係にあるので、各被災変形量を置換砂の層厚で除した値と危険度の関係を求めた。その結果が図-12である。図-12では被災変形量を置換砂の層厚で除した値は危険度と明瞭な相関関係にあることが分かる。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-10の結果と同様な結果が得られている。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、

6. あとがき

今回の検討結果は1995年6月時点で取りまとめられたポートアイランド、六甲アイランドのケーソン式大型岸壁のみを対象としたものである。今後、他の地区の岸壁のデータの整備を待ってさらに検討を実施する予定である。また、今回はケーソン式岸壁だけの結果であるが、神戸港等ではその他の形式の岸壁も被災しており、構造形式別の被災状況の比較検討も重要なある課題であるので、これについても今後の検討課題であると考え。さらに、今回のケーソン式岸壁の大きな被災変形量に影響を与えたと推察される地震動の性質あるいは液状化の二つの要因の被災変形量に与える影響の度合いに関する検討も今後の重要な課題である。

参考文献

- 1) 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, 14巻, 4号, 1976年1月
- 2) 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年12月

記号表

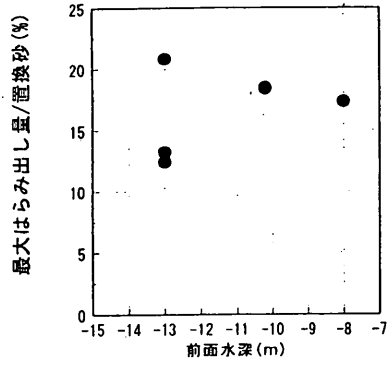
K_e : 作用震度

α : 地盤最大加速度

g : 重力加速度

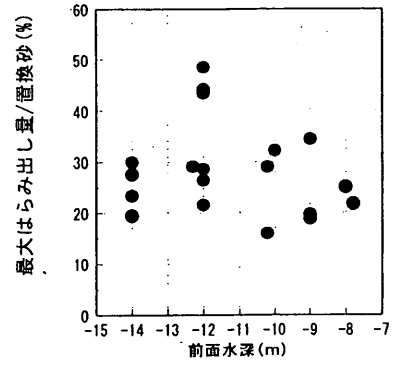
法線方向 南北(1)

最大はらみ出し量/置換砂と前面水深

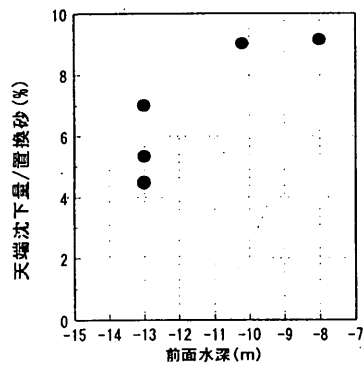


法線方向 東西(2)

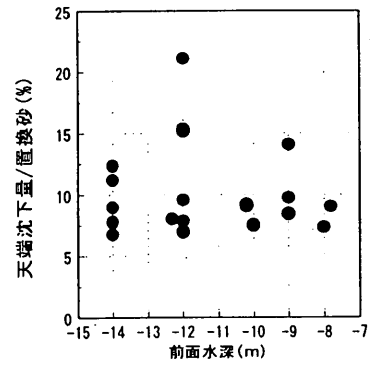
最大はらみ出し量/置換砂と前面水深



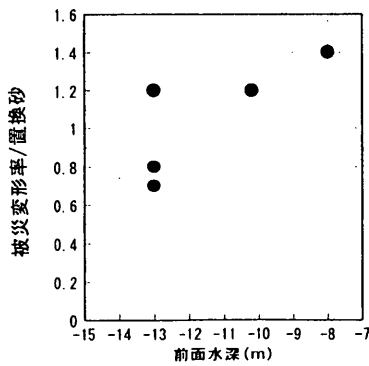
天端沈下量/置換砂と前面水深



天端沈下量/置換砂と前面水深



被災変形率/置換砂と前面水深



被災変形率/置換砂と前面水深

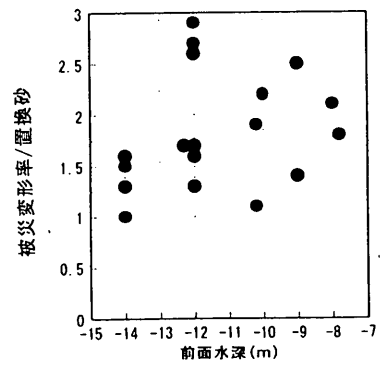


図-9 (各被災変形量/置換砂の層厚)と前面水深の関係

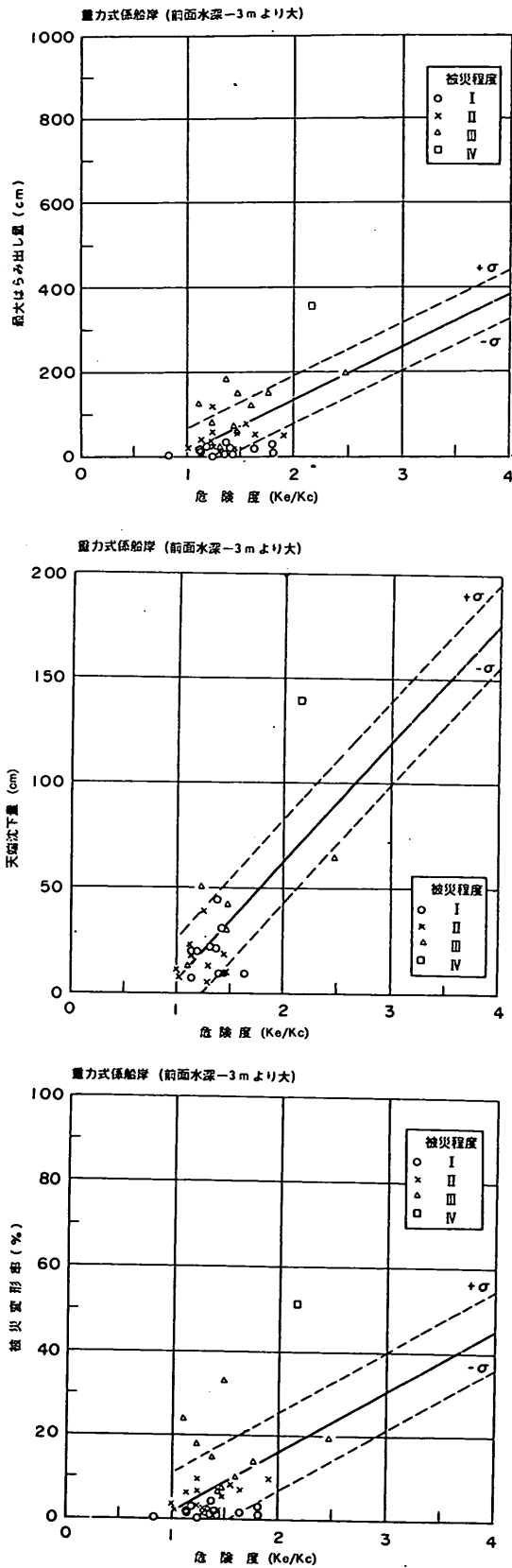


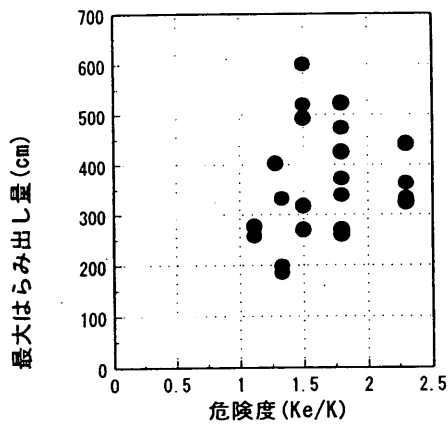
図-10 各被災変形量と危険度の関係
(過去の重力式岸壁の被災事例)

表-7 各被災変形量と危険度の回帰分析結果
(過去の重力式岸壁の被災事例)

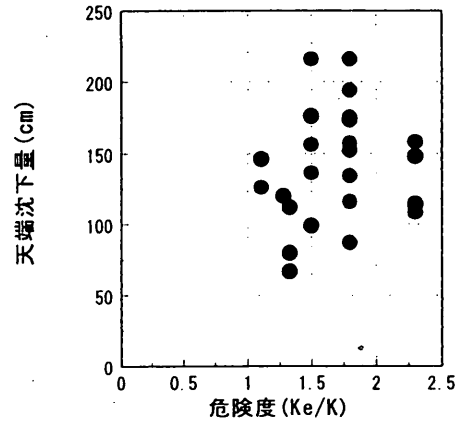
説明変数(F_c): 危険度(K_e/K_c)

目的変数	回帰式	相関係数	標準偏差
最大はらみ出し量 (D_x , cm)	$D_x = -113.8 + 124.4 F_c$	0.559	59.1
天端沈下量 (S_p , cm)	$S_p = -50.9 + 57.1 F_c$	0.677	20.0
被災変形率 (R_G , %)	$R_G = -12.7 + 14.5 F_c$	0.455	9.1
加算変位 (D_a , cm)	$D_a = -127.5 + 148.5 F_c$	0.540	73.2

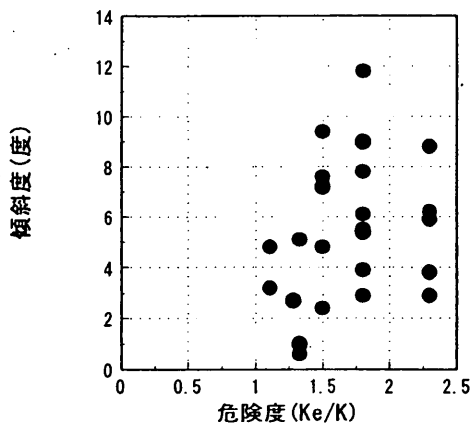
最大はらみ出し量と危険度



天端沈下量と危険度



傾斜角と危険度



被災変形率と危険度

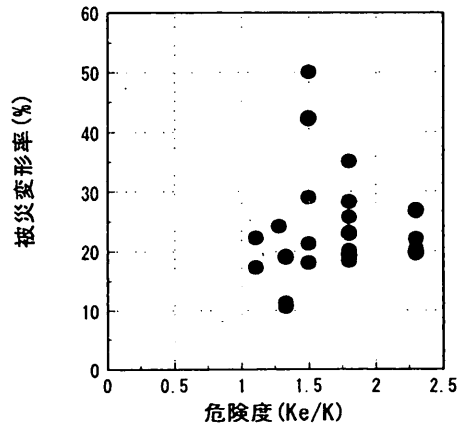
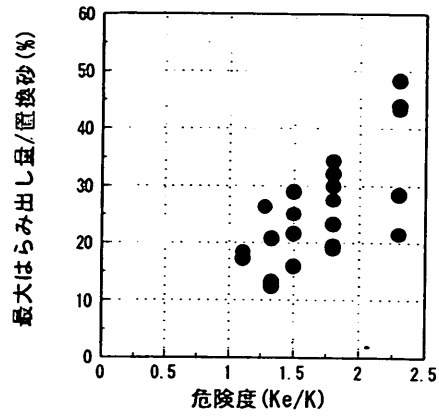
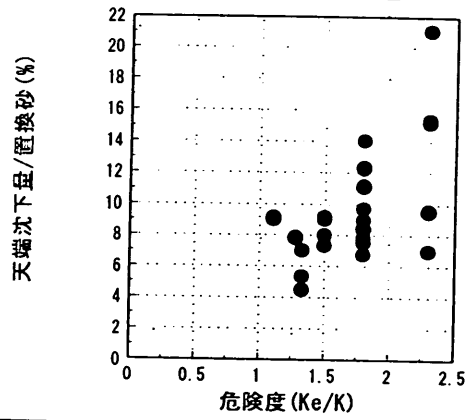


図-11 各被災変形量と危険度の関係

最大はらみ出し量/置換砂と危険度



天端沈下量/置換砂と危険度



被災変形率/置換砂と危険度

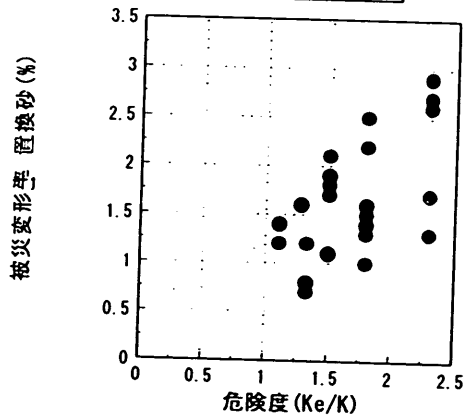


図-12 (各被災変形量/置換砂の層厚)と危険度の関係

これは地震動の性質（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）あるいは液状化によるものと推察される。この大きな変形量を与えたと推察される二つの要因がどのように影響を与えたのかは今後の課題である。

危険度2についての検討結果を図-13, 14に示す。危険度2についての結果も前に示した危険度の結果と同様な傾向が得られている。

4.7 コンテナクレーンのレール幅の地震前後の差と岸壁の最大はらみ出し量との関係

コンテナクレーンの被災調査で地震後のレール幅が測定されている。地震前のレール幅はクレーンの脚幅と考えられるので、この両クレーン幅から地震前後の変化量を求めれば、これが岸壁背後の地盤の移動量となる。そして、この移動量はGPSより推定された岸壁の最大はらみ出し量の妥当性の検討に利用可能である。こうした観点から、レール幅の地震前後の差と、最大はらみ出し

量を比較したものを図-15に示す。両者とも最大値であるので、同じ位置での比較にはなっていない点注意が必要であるが、この図の結果では最大はらみ出し量がクレーン幅の地震前後の差よりかなり大きいのが分かる。ただ、六甲アイランドの西側の岸壁ではその差はあまり大きくない。このように、最大はらみ出し量がレール幅の地震前後の差より大きいのは、クレーンのある位置よりさらに後方の背後地盤まで海側に移動したためか、あるいは、最大はらみ出し量の推定に問題がある可能性がある。この点については、さらに検討が必要であると思われる。

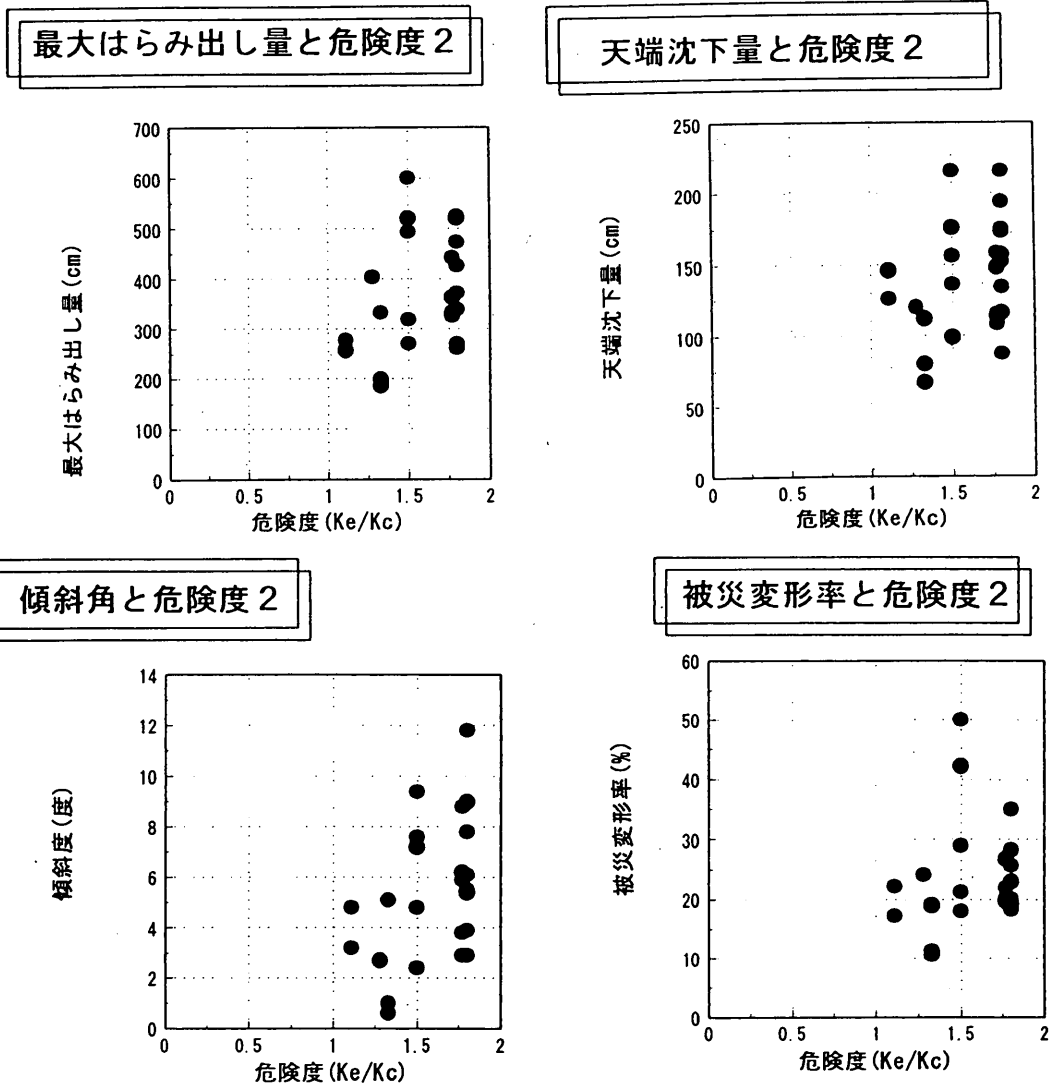
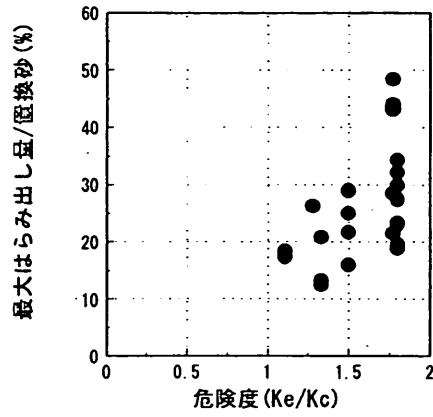
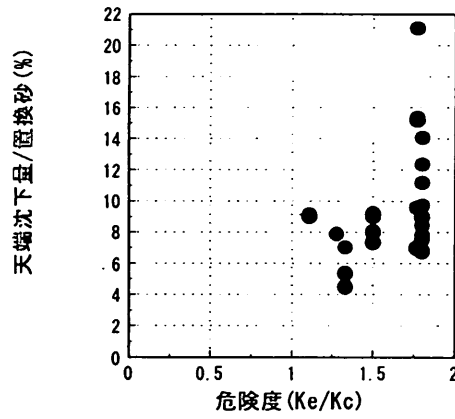


図-13 各被災変形量と危険度2の関係

最大はらみ出し量/置換砂と危険度 2



天端沈下量/置換砂と危険度 2



被災変形率/置換砂と危険度 2

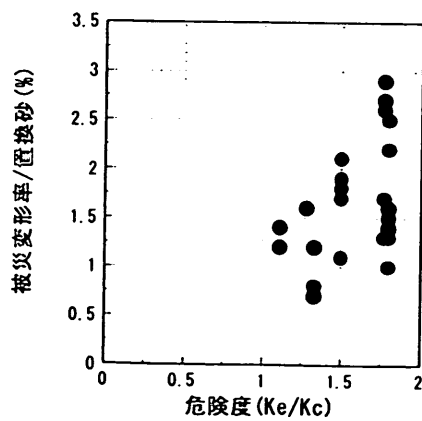


図-14 (各被災変形量/置換砂の層厚) と危険度 2 の関係

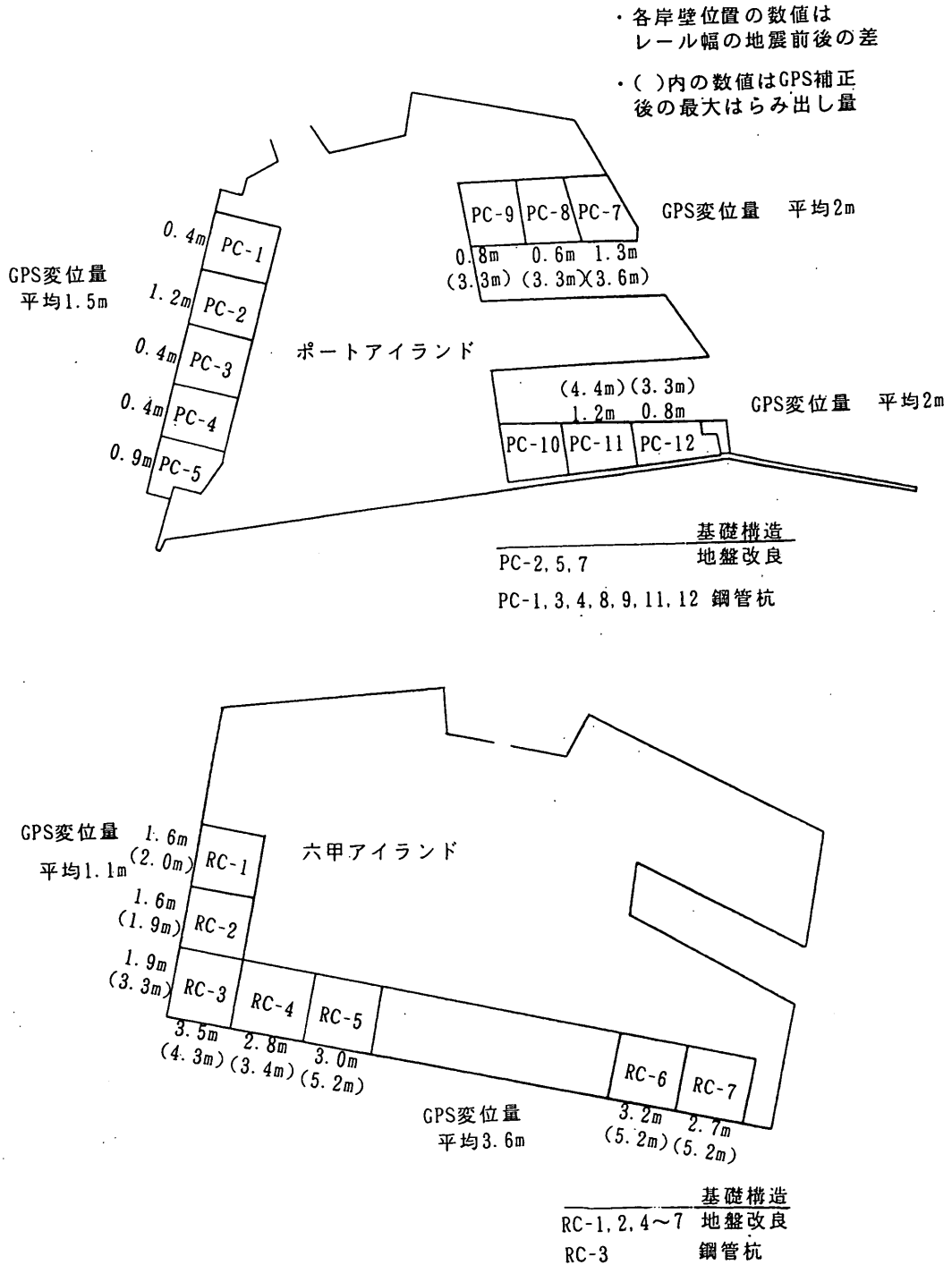


図-15 レール幅の地震前後の差と岸壁変位量の比較

5. 結 論

- (1) ケーソン式大型岸壁（前面水深-7.5m以上）では被災変形量と前面水深との明瞭な相関関係は認められなかった。
- (2) 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。
- (3) 最大はらみ出し量、天端沈下量、被災変形率（最大はらみ出し量と岸壁の高さの比）の各被災変形量と置換

砂の層厚とは明瞭な相関関係が認められた。ケーソン式大型岸壁の被災変形に置換砂が影響を与えたことが推察される。

- (4) 傾斜角を除く被災変形量を置換砂の層厚で除した値は危険度（作用震度と破壊震度の比）と明瞭な相関関係が認められた。これは、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。これは今回の地震動が大きな被災変形量を与えるような地震波形であったこと、あるいは液状化の影響によるものと推察される。

港湾技研資料 No.813

1995・9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 (有)つばさ印刷技研

Published by the Port and Harbour Research Institute. Nagasaki, Yokosuka, Japan.

Copyright © (1995) by P.H.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted into a machine language without the written permission of the Director General of P.H.R.I.

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複製は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。