

5. 港湾施設の液状化の再現解析

5-1. 検討概要

境港と米子港の港湾施設を対象に、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」（平成11年4月：社団法人 日本港湾協会）に規定されている設計手法に基づいて液状化の予測・判定を行い、被災状況の再現性を検証する。

被災メカニズムの再現解析は、重複反射モデルとしてよく用いられている「SHAKE」により一次元地震応答解析を行い、その解析結果に基づいて地表面の作用震度の算定、地盤の液状化の予測・判定を行う。また、「重力式の簡易耐震性能照査の手引き(案)」（平成11年7月：財団法人 沿岸開発技術研究センター）により被災変形量の推定を行う。なお、米子港の検討対象施設の一次元地震応答解析に用いる入力地震動は、米子港が気象庁観測記録のある境港より震源に近い場合、震源と観測地点と検討地点の距離を考慮して設定すべきであるが、本検討では適切な入力地点米子港近傍の観測記録が得られていないため、境港と同じ入力地震動を使用することとした。

被災状況の再現性の検証は、被災要因（作用震度、液状化層厚）を施設毎に平面図に落とし込み、地区毎の被災要因の特徴を調べ、被災要因と被災程度の相関関係を調べることを行う。また、検討対象施設が3施設と少ないが、実測の被災変形量と「重力式の簡易耐震性能照査の手引き(案)」（平成11年7月：財団法人 沿岸開発技術研究センター）により推定した被災変形量を用いて定量的な再現性の検証も行うこととした。

5-2. 検討対象施設

境港、米子港の主要施設を表-5.2.1に示す。この中で被災の有無、構造物の型式を考慮し、各地区から抽出した代表的な施設（網掛けしている施設）について再現解析を行う。位置図を図-5.2.1に示す。

表-5.2.1 代表施設の選定一覧表

施設名称	延長 (m)	構造形式		被災の有無	
		水深 (m)	構造		
境 港					
外 か く 施 設	境港防波堤	650	不明	ブロック (混成)	不明
	防波堤①	120	不明	ケーソン (混成)	不明
	防波堤②	3,850 (120m 工事中)	不明	ケーソン (混成)	不明
	S-1 中野東防波堤	470	不明	ブロック (混成) 直立消波ブロック (混成)	被災あり
	中野中防波堤	150	不明	ブロック (混成)	被災あり
	S-2 竹内波除堤	250	-4.5	直立消波ブロック (混成)	被災あり
	竹内南防波堤	185	不明	セルラーブロック (直立)	被災あり
	竹内南東防波堤	200	不明	ケーソン (混成)	不明
主 要 係 留 施 設	S-3 昭和北1号岸壁	140	-4.5	鋼矢板式 (2バース)	被災なし
	昭和北2号岸壁	220	-5.5	鋼矢板式 (2バース)	被災なし
	外港1号岸壁	370	-9.0	横棧橋式 (2バース)	不明
	外港2号岸壁	260	-7.5	横棧橋式 (2バース)	不明
	S-4 昭和南1号岸壁	270	-13.0	ケーソン式 (1バース)	被災あり
	昭和南2号岸壁	185	-10.0	ケーソン式 (1バース)	被災あり
	昭和南3号岸壁	130	-7.5	ケーソン式 (1バース)	被災なし
	S-5 中野岸壁	585	-4.5	鋼矢板式 (9バース)	被災あり
	S-6 中野防波護岸	29.5	-2.0	ブロック (混成)	被災あり
	中野7号,8号物揚場	365	-2.5	横棧橋式	被災あり
	S-7 内港1号岸壁	200	-7.0	横棧橋式 (2バース)	被災なし
	内港2号岸壁	91	-5.5	L型方塊 (1バース)	不明
	内港3号岸壁	273	-6.4	L型方塊 (2バース)	不明
	竹内1号岸壁	100	-5.5	横棧橋式 (1バース)	被災あり
	S-8 竹内2号岸壁	100	-5.5	横棧橋式 (1バース)	被災あり
	外江1号岸壁	300	-4.5	L型方塊 (5バース)	不明
	外江2号岸壁	300	-4.5	鋼矢板式 (5バース)	不明
	S-9 江島1号岸壁	165	-9.0	鋼矢板式 (1バース)	被災あり
江島2号岸壁	130	-7.5	鋼矢板式 (1バース)	被災あり	
森山岸壁	300	-4.5	L型方塊 (5バース)	被災あり	
石油ドルフィン1~4 棧橋	606	-7.5	鋼管杭式ドルフィン	被災あり	
木材ドルフィン江島棧橋	485 (岸壁換算延長)	-9.0	鋼管杭式ドルフィン	不明	
米子港					
主 要 係 留 施 設	旗ヶ崎岸壁	不明	-6.0	不明	被災あり
	Y-1 旗ヶ崎岸壁	不明	-5.0	L型ブロック (2バース)	被災あり
	旗ヶ崎岸壁	不明	-4.5	横棧橋式	被災あり
	Y-2 旗ヶ崎物揚場	不明	-3.0	L型ブロック	被災あり
	灘町岸壁	397	-4.5	横棧橋式 (6バース)	被災あり
	Y-3 灘町物揚場	136.5	-3.5	ブロック (混成)	被災あり
	灘町他物揚場	103	-3.0	L型ブロック	被災あり
内町物揚場	45.8	不明	不明	不明	

境港

境港潮位表

最高潮位	+2.2m (1988.8.20)
高潮位	+2.0m (1988.8.20)
平均高潮位	+1.7m (1988.8.20)
平均低潮位	+0.5m (1988.8.20)
最低潮位	-0.2m (1988.8.20)
最低潮位	-1.2m

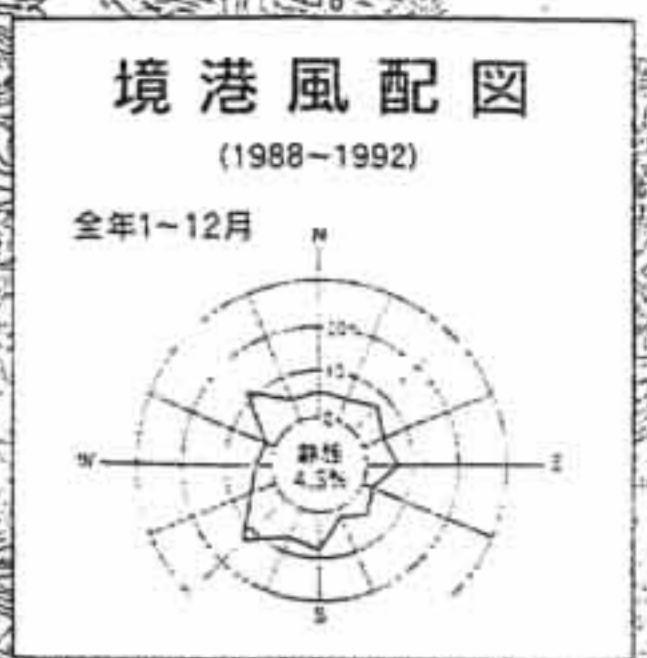


図-5.2.1(1) 検討位置図(境港)



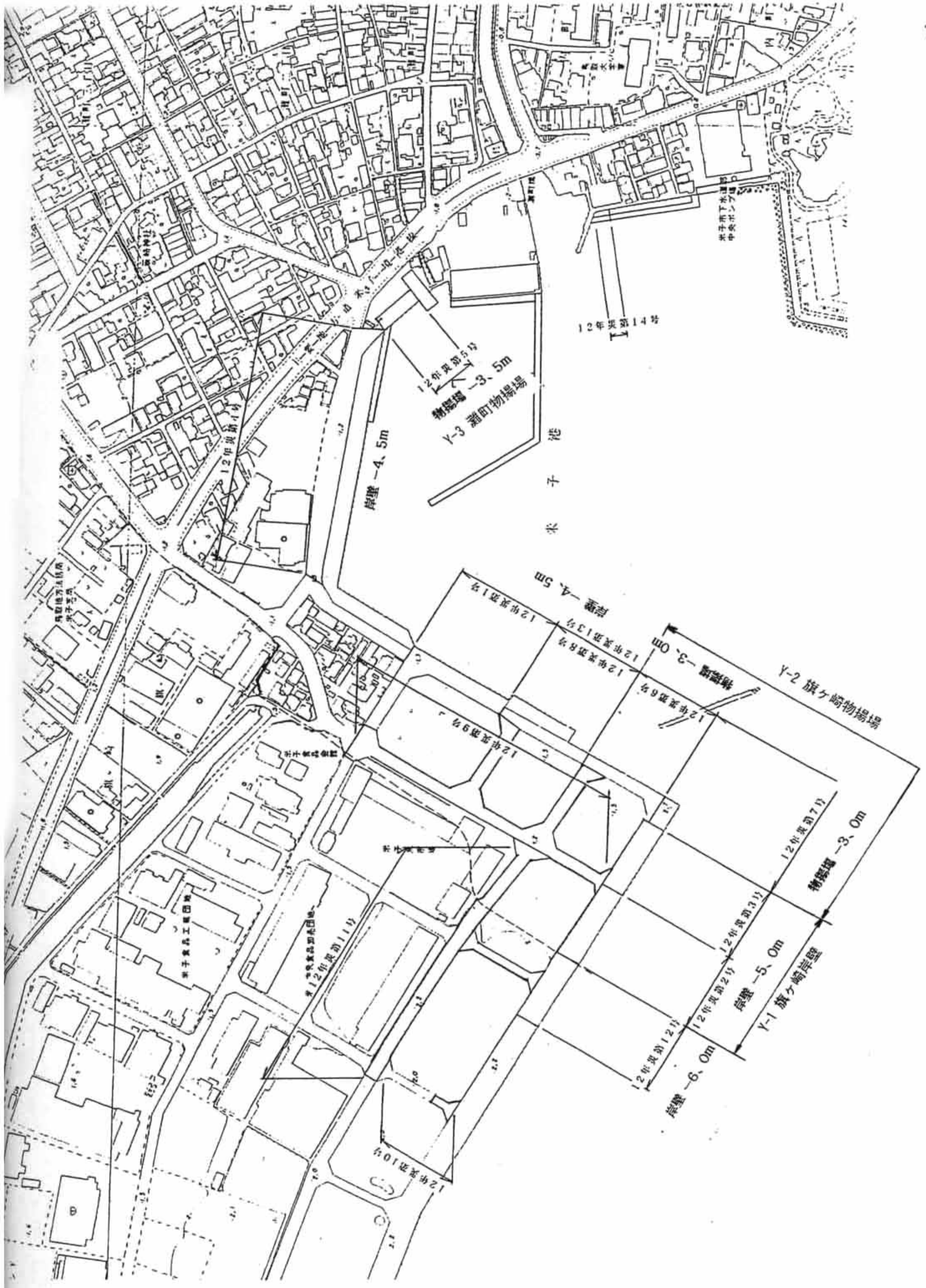


図-5.2.1(2) 検討位置図(米子港)

5-3. 被災状況

境港、米子港における被災状況を表-5.3.1に示す。

表-5.3.1 境港、米子港における被災状況

施設名称	構造形式	被災状況	
境 港			
外 か く 施 設	S-1 中野東防波堤	ブロック(混成) 直立消波ブロック(混成)	堤体の傾斜、基礎マウンドの沈下
	中野中防波堤	ブロック(混成)	捨石マウンド下の土砂の液状化による堤体の沈下、クラックが発生
	S-2 竹内波除堤	直立消波ブロック(混成)	堤体の沈下(5cm)
	竹内南防波堤	セルラーブロック(直立)	上部工に亀裂、ブロック間に隙間が生じ港外からの砂の流入によりマリーナが埋塞した。
主 要 係 留 施 設	S-4 昭和南1号岸壁	ケーソン式(1バース)	エプロン部分に段差(50cm)
	昭和南2号岸壁	ケーソン式(1バース)	エプロン部分に段差(20cm)
	S-5 中野岸壁	鋼矢板式(9バース)	矢板岸壁の腹だし、控え矢板周辺の液状化による空洞化、クラックの発生
	S-6 中野防波護岸	ブロック(混成)	堤体の沈下(5cm)
	中野7号,8号物揚場	横棧橋式	棧橋部分の天端が変位、コンクリート舗装に段差、ひび割れが生じた
	竹内1号岸壁	横棧橋式(1バース)	渡版受枠の沈下(10cm)
	S-8 竹内2号岸壁	横棧橋式(1バース)	背後地液状化
	S-9 江島1号岸壁	鋼矢板式(1バース)	エプロン舗装の沈下(10cm)、クラックの発生
	江島2号岸壁	鋼矢板式(1バース)	エプロン舗装の沈下(10cm)、クラックの発生
	森山岸壁	L型方塊(5バース)	エプロン舗装の沈下、クラックの発生
石油ドルフィン1~4棧橋	鋼管杭式ドルフィン	防食部分にひび割れ、ライニング材に滑落が生じた(3号、4号) 1号、2号は不明	
米子港			
主 要 係 留 施 設	旗ヶ崎岸壁(-6.0)	不明	堤体の移動、目地部に開き、エプロンの沈下
	Y-1 旗ヶ崎岸壁(-5.0)	L型ブロック(2バース)	堤体の移動、堤体の沈下(20cm)、目地部に開き、エプロンの沈下(50cm)
	旗ヶ崎岸壁(-4.5)	横棧橋式	液状化によるエプロン舗装の沈下、クラックの発生
	Y-2 旗ヶ崎物揚場	L型ブロック	堤体の移動、堤体の沈下(10cm)、目地部に開き、エプロンの沈下(40cm)
	灘町岸壁	横棧橋式(6バース)	棧橋背後の擁壁の移動、エプロンの沈下
	Y-3 灘町物揚場	ブロック(混成)	堤体の移動、エプロンの沈下、クラックの発生
	灘町他物揚場	L型ブロック	堤体の移動、エプロンの沈下、クラックの発生

(鳥取県港湾課調査資料より)

※網掛けをしている施設は再現解析を行う施設を示す。

S-3、S-7は被災なし。

5-4. 被災メカニズムの分析結果

(i) 作用震度と液状化層厚の地区毎の特徴

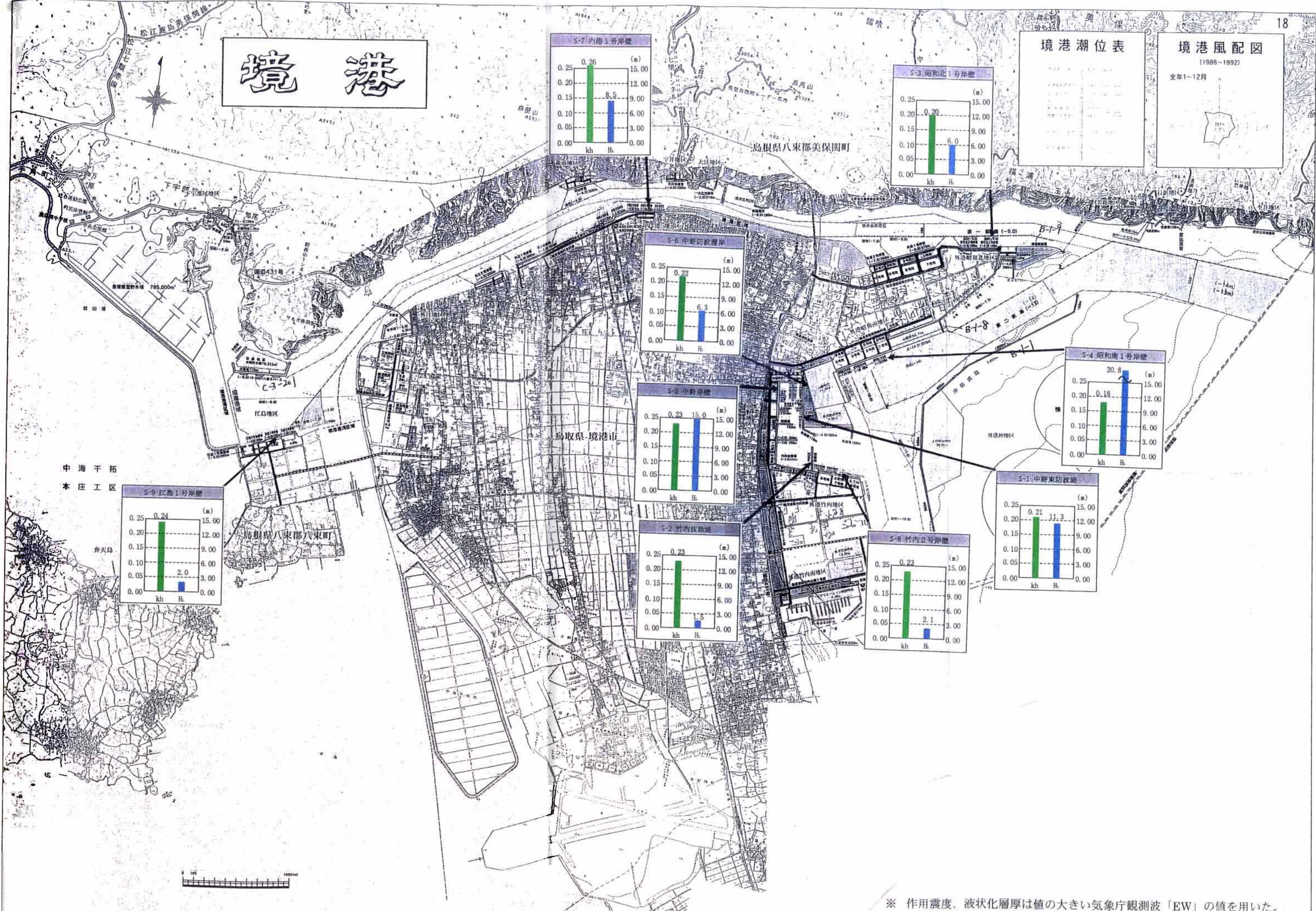
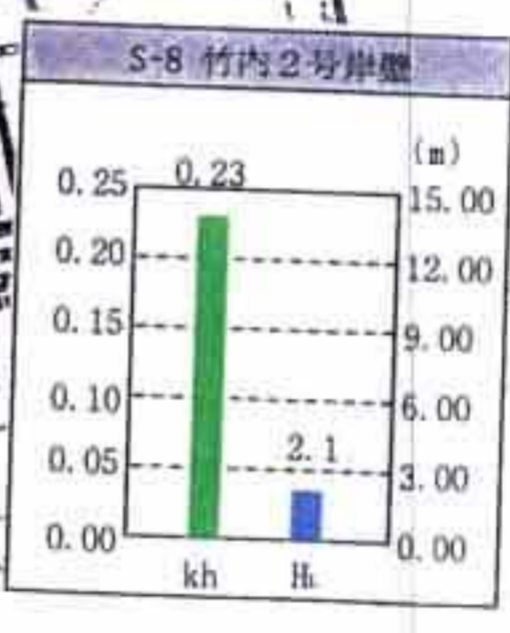
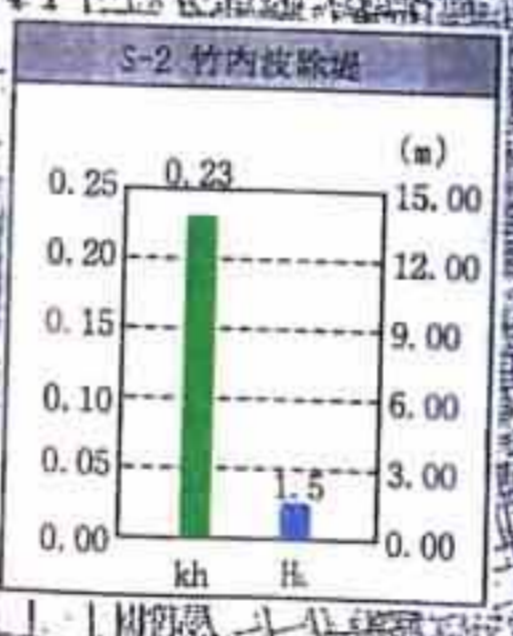
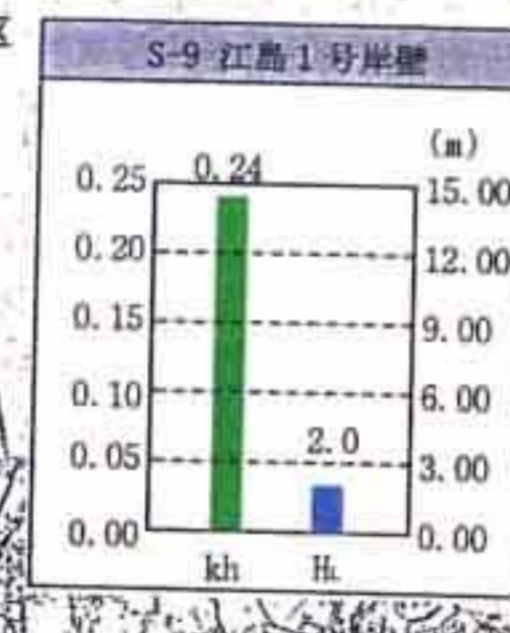
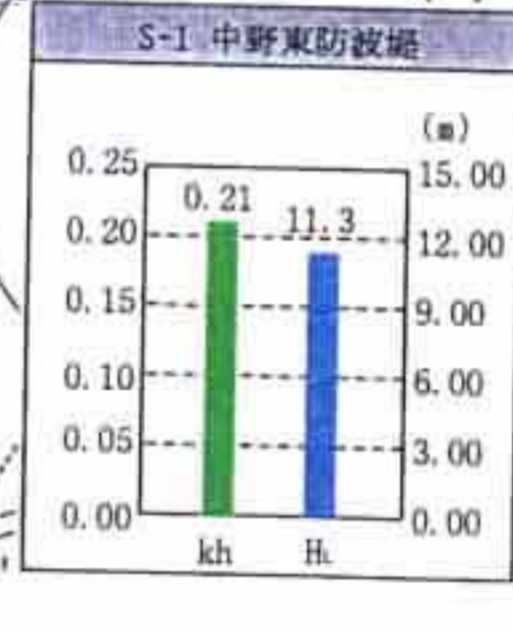
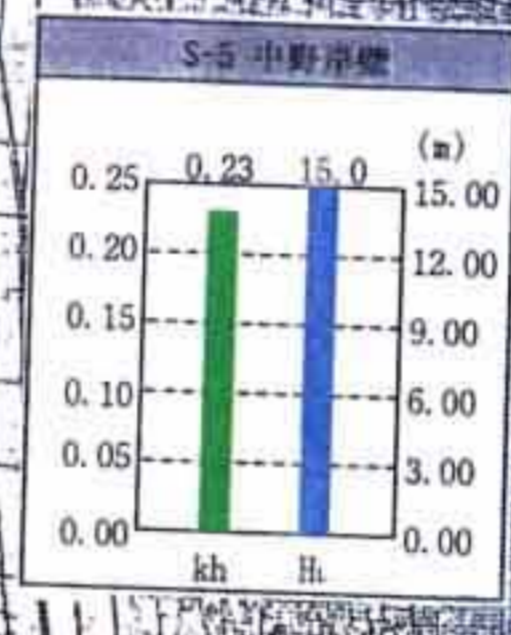
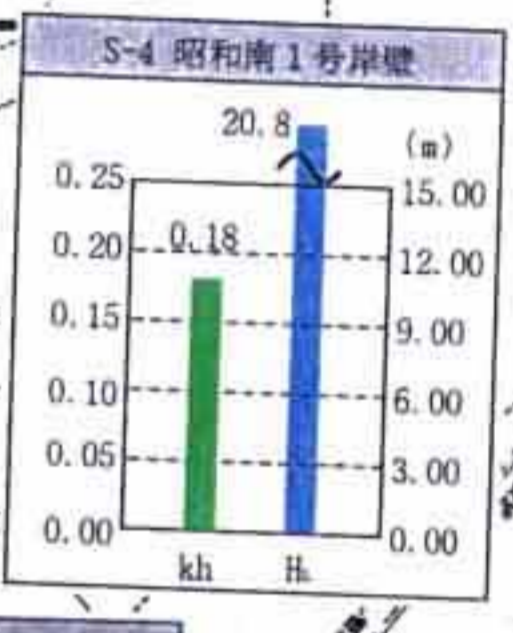
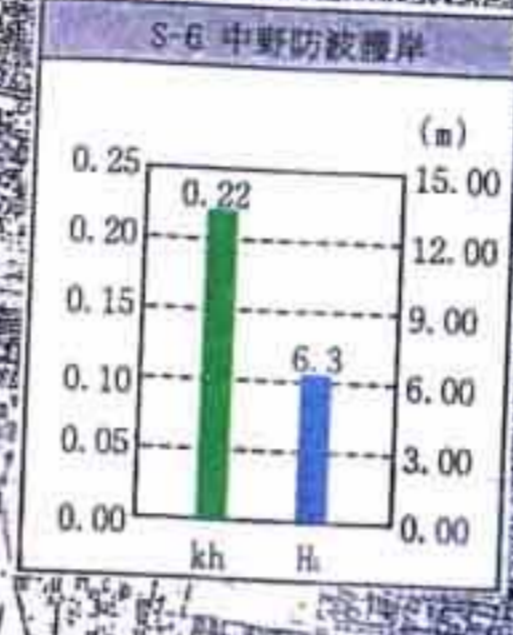
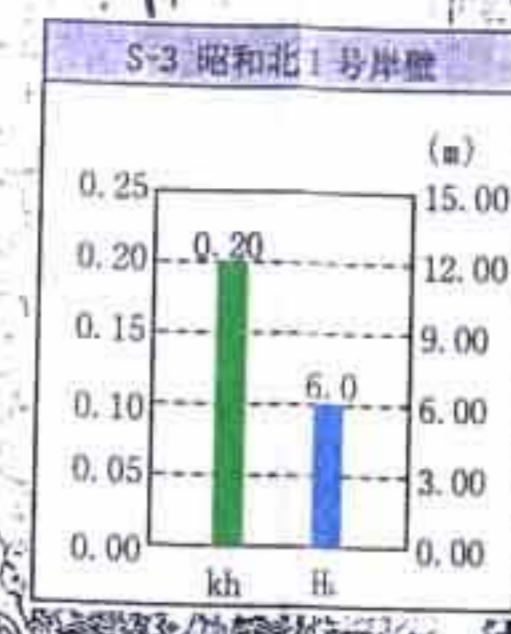
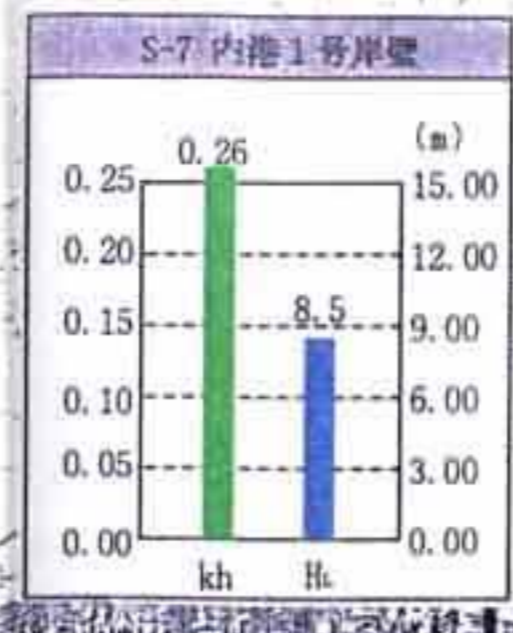
一次元地震応答解析結果より得られる地表面(海底面)の作用震度と液状化の予測・判定結果から得られる液状化層厚を施設毎に境港、米子港の平面図(図-5.4.1)に示す。

作用震度については、境港の昭和地区、内港地区は0.10以下、中野地区、竹内地区は中野岸壁を除いて0.10~0.15の範囲内であった。米子港では旗ヶ崎岸壁(BP-1)を除いては全て0.20以上であった。

作用震度については、境港の昭和南1号岸壁以外全ての施設で0.20以上であり、境港の中野地区から竹内地区にかけて0.21~0.23、昭和地区で0.18~0.20、米子港で0.23~0.26であった。

液状化層厚については、境港の昭和南1号岸壁で約20mと最も大きく、竹内波除堤で1.5mと最も小さかった。施設によって値にばらつきがあり、同じ地区内でもばらつきがみられた。液状化すると判定された主な層は、海底面の砂層、標高D.L.-20m以上の塑性指数10以下の粘性土層、埋立土層であった。

境港



※ 作用震度、液化化層厚は値の大きい気象庁観測波「EW」の値を用いた。

図-5.4.1 (1) 施設毎の作用震度と液化化層厚 (境港)

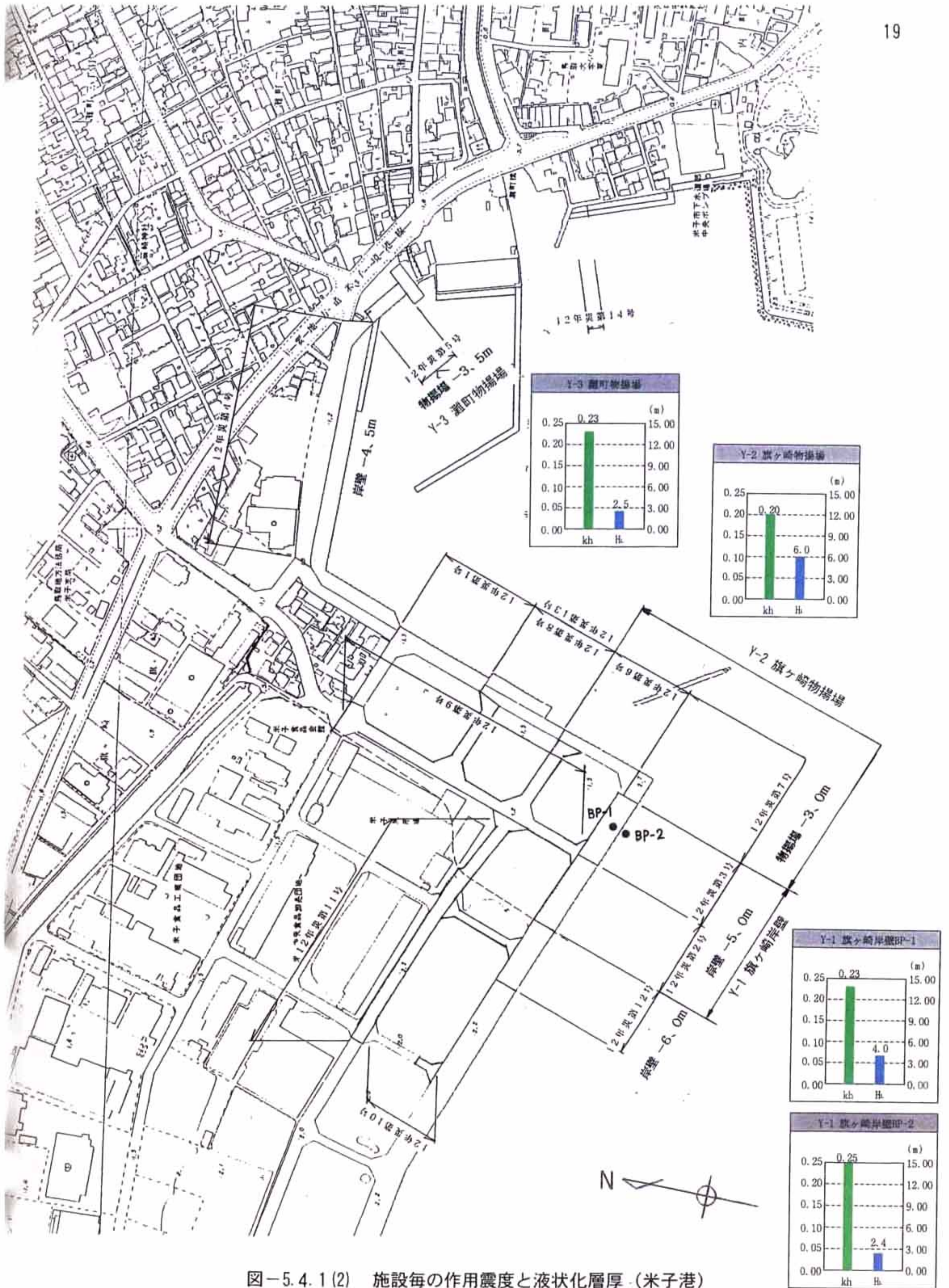


図-5.4.1(2) 施設毎の作用震度と液状化層厚 (米子港)

※ 作用震度、液状化層厚は値の大きい気象庁観測波「EW」の値を用いた。

(ii) 相対震度、液状化層厚と被災程度

相対震度と法線移動に関する被災程度を、表-5.4.1 に、液状化層厚と沈下に関する被災程度を、表-5.4.2 に示す。また、施設毎の作用震度、相対震度、液状化層厚、沈下量を、図-5.4.2 に示す。

なお、相対震度とは作用震度を設計震度で除したものと定義し、 $\text{相対震度} = \text{作用震度} / \text{設計震度} = 1.0$ をその施設の限界震度と考えた。

施設の構造型式毎に見ると、図-5.4.3(1) に示すように重力式では、相対震度が1以下である昭和南1号岸壁以外の全ての施設で法線移動が見られ、相対震度と法線移動量には相関関係が見られた。

矢板式では、図-5.4.3(2) に示すように相対震度 ≈ 2 の中野岸壁のみで法線移動が見られ、江島1号岸壁は相対震度 ≈ 1.5 であったが法線移動は見られなかった。

横棧橋式では、図-5.4.3(3) に示すように内港1号岸壁は相対震度 ≈ 2 であったが法線移動は見られなかった。

このように相対震度と法線移動量との関係には、構造型式により相違が見られた。

表-5.4.2 を見ると、堤体、エプロンの沈下が見られた全ての施設において液状化すると判定されており、沈下の要因が液状化によるものと推測できる。図-5.4.4 に液状化層厚と沈下量の関係を示すが、実際に沈下が見られたところでは旗ヶ崎岸壁(エプロン部、堤体部)を除いては概ね液状化層厚に対する沈下量の割合が1%~5%の範囲に分布している。

旗ヶ崎岸壁については、堤体の側方移動の影響により大きな沈下量になったものと思われる。

また、“被災なし”の昭和北1号岸壁、内港1号岸壁でも液状化すると判定されている。昭和北1号岸壁については、液状化すると判定された層が地表面から5m程度の深さにあり、その層において実際に液状化が起こったかどうかは不明であり、検証することはできなかった。内港1号岸壁については、十分な土質資料(細粒分含有率、塑性指数)が得られておらず、細粒分含有率=0、塑性指数=0と設定したため、実際は液状化していなかった層が液状化すると判定されたものと思われる。

表-5.4.1 相対震度と法線移動に関する被災程度の関係

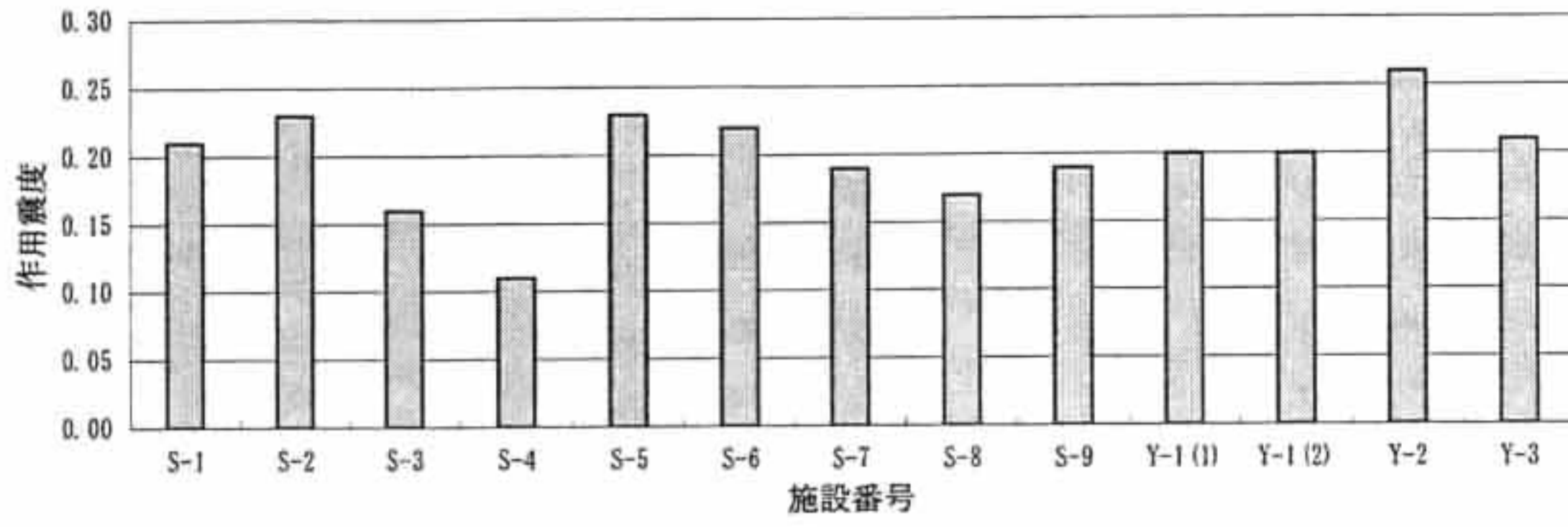
	作用震度	相対震度	法線移動に関する被災程度	施設の構造型式
境 港				
S-1 中野東防波堤	EW 0.21	1.75	法線の出入り最大 6cm	重力式
S-2 竹内波除堤	EW 0.23	1.92	不明	重力式
S-3 昭和北1号岸壁	NS 0.16	1.33	移動なし	矢板式
S-4 昭和南1号岸壁	NS 0.11	0.92	移動なし	重力式
S-5 中野岸壁	EW 0.23	1.92	法線の出入り最大 30cm	矢板式
S-6 中野防波護岸	EW 0.22	1.83	不明	重力式
S-7 内港1号岸壁	NS 0.19	1.90	移動なし	横棧橋式
S-8 竹内2号岸壁	NS 0.17	1.42	不明	横棧橋式
S-9 江島1号岸壁	NS 0.19	1.58	移動なし	矢板式
米子港				
Y-1 旗ヶ崎岸壁 BP-1	NS 0.20	1.67	平均 0.59m、最大 1.01m 移動	重力式
Y-1 旗ヶ崎岸壁 BP-2	NS 0.20	1.67		
Y-2 旗ヶ崎物揚場	EW 0.26	2.17	平均 1.13m、最大 2.14m 移動	重力式
Y-3 灘町物揚場	NS 0.21	1.75	平均 0.17m、最大 0.09m 移動	重力式

※ 作用震度は施設法線と直角方向の値を選定した。

表-5.4.2 液状化層厚と沈下に関する被災程度の関係

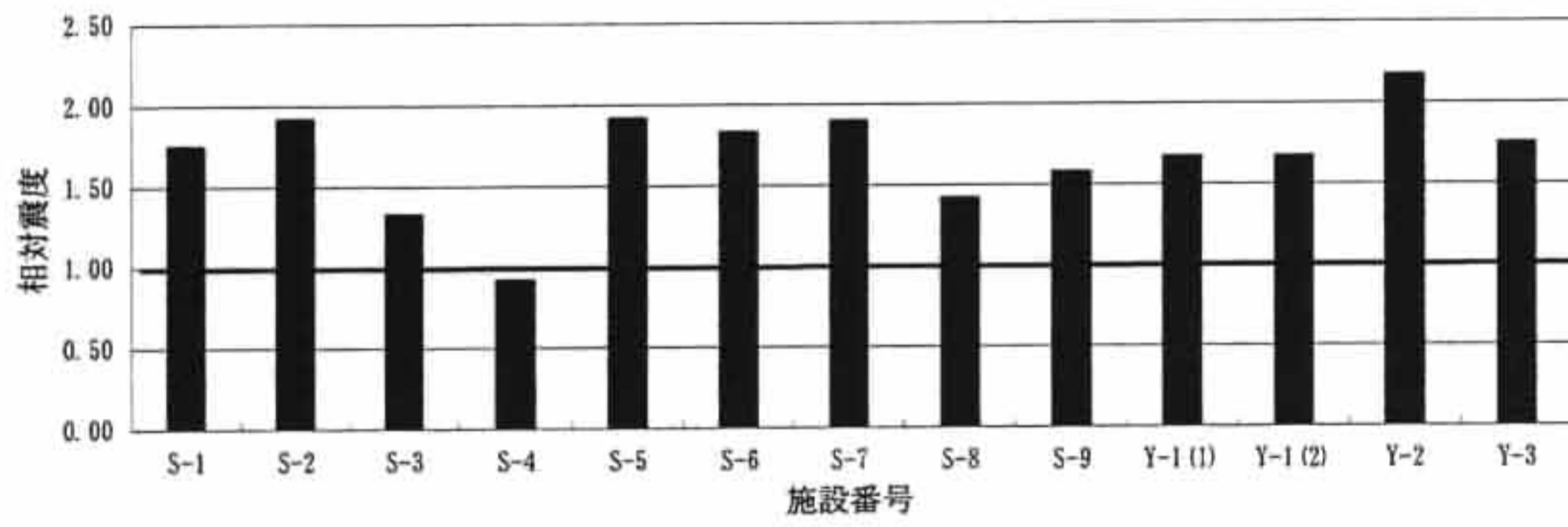
	液状化層厚	沈下に関する被災程度	沈下量÷液状化層厚
境 港			
S-1 中野東防波堤	11.3m	堤体沈下最大 70cm	6.2%
S-2 竹内波除堤	1.5m	堤体 5cm 沈下	3.3%
S-3 昭和北1号岸壁	6.0m	被災なし	—
S-4 昭和南1号岸壁	20.8m	50cm 程度沈下	2.4%
S-5 中野岸壁	15.0m	海面での沈下程度は不明 ただし背後地液状化による空洞が見られた。	—
S-6 中野防波護岸	6.3m	堤体 5cm 沈下	0.8%
S-7 内港1号岸壁	8.5m	被災なし	—
S-8 竹内2号岸壁	2.1m	海面での沈下程度は不明 ただし背後地液状化による沈下が見られた。	—
S-9 江島1号岸壁	2.0m	エプロン沈下 10cm	5.0%
米子港			
Y-1 旗ヶ崎岸壁 BP-1	4.0m	エプロン沈下 50cm	12.5%
Y-1 旗ヶ崎岸壁 BP-2	2.4m	堤体沈下 20cm	8.3%
Y-2 旗ヶ崎物揚場	6.0m	堤体沈下 10cm	1.6%
Y-3 灘町物揚場	2.5m	不明	—

※ 液状化層厚は気象庁観測波「EW」と気象庁観測波「NS」の大きい方を用いた。



※ 作用震度は施設法線と直角方向の値を選定した。

図-5.4.2 (1) 施設毎の作用震度



※ 作用震度は施設法線と直角方向の値を選定した。

図-5.4.2 (2) 施設毎の相対震度

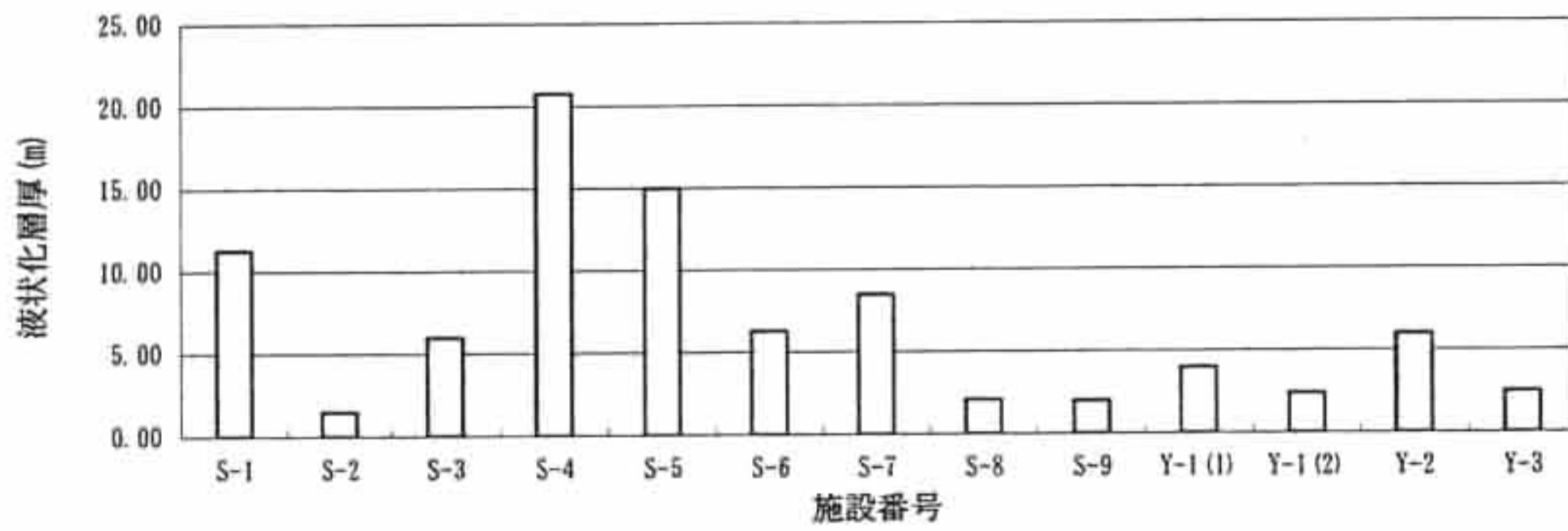


図-5.4.2 (3) 施設毎の液状化層厚

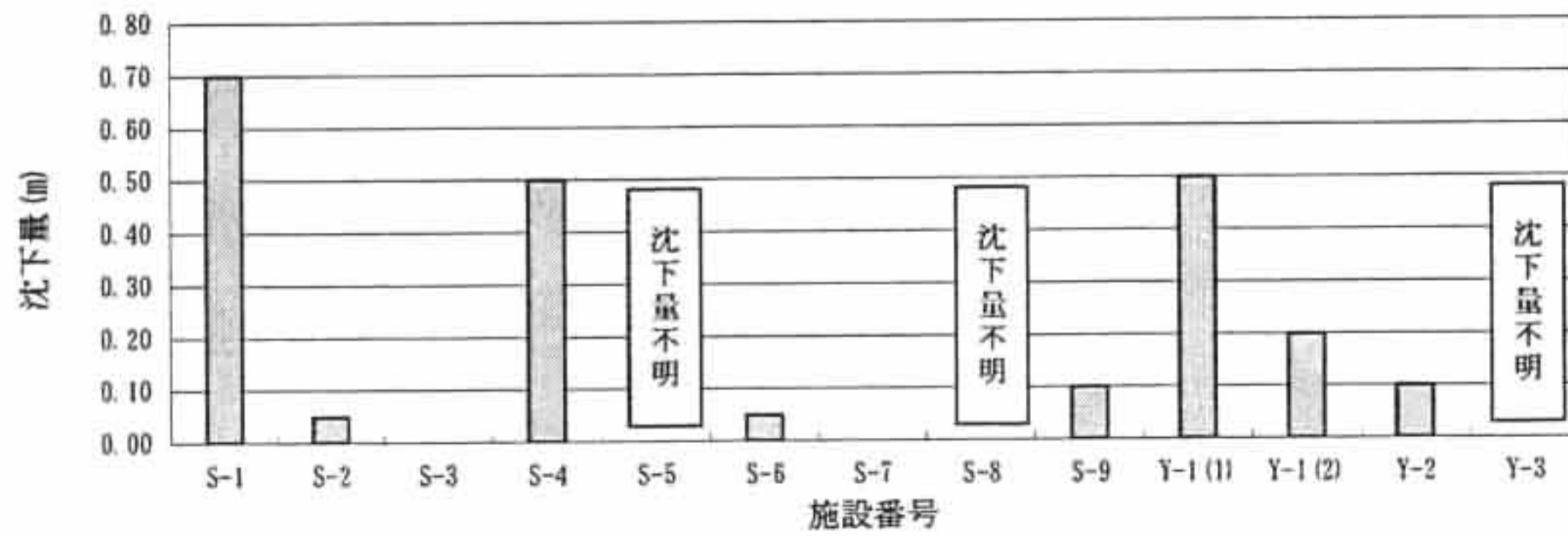


図-5.4.2 (4) 施設毎の沈下量

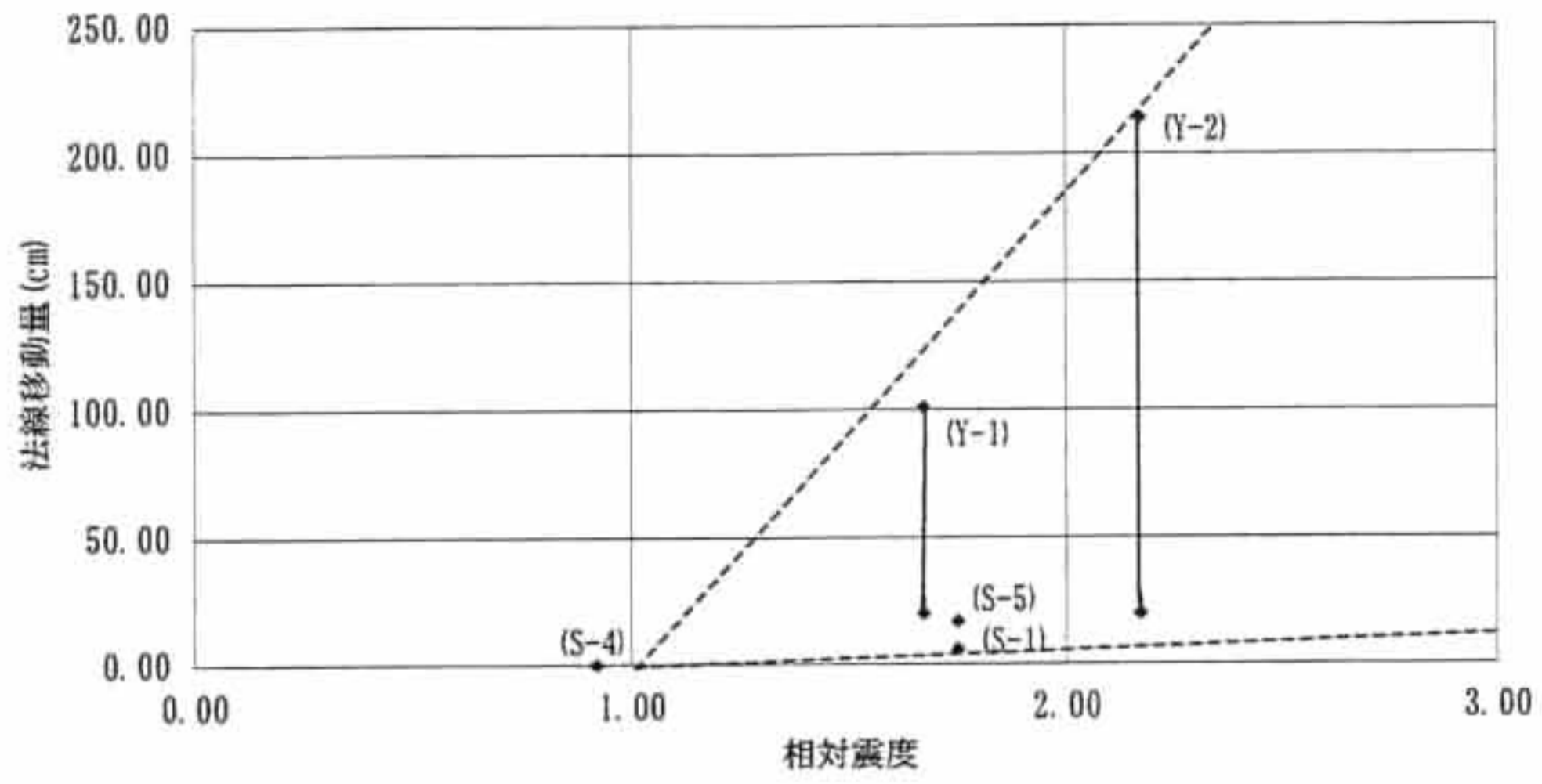


図-5.4.3(1) 重力式施設の相対震度と法線移動量の関係

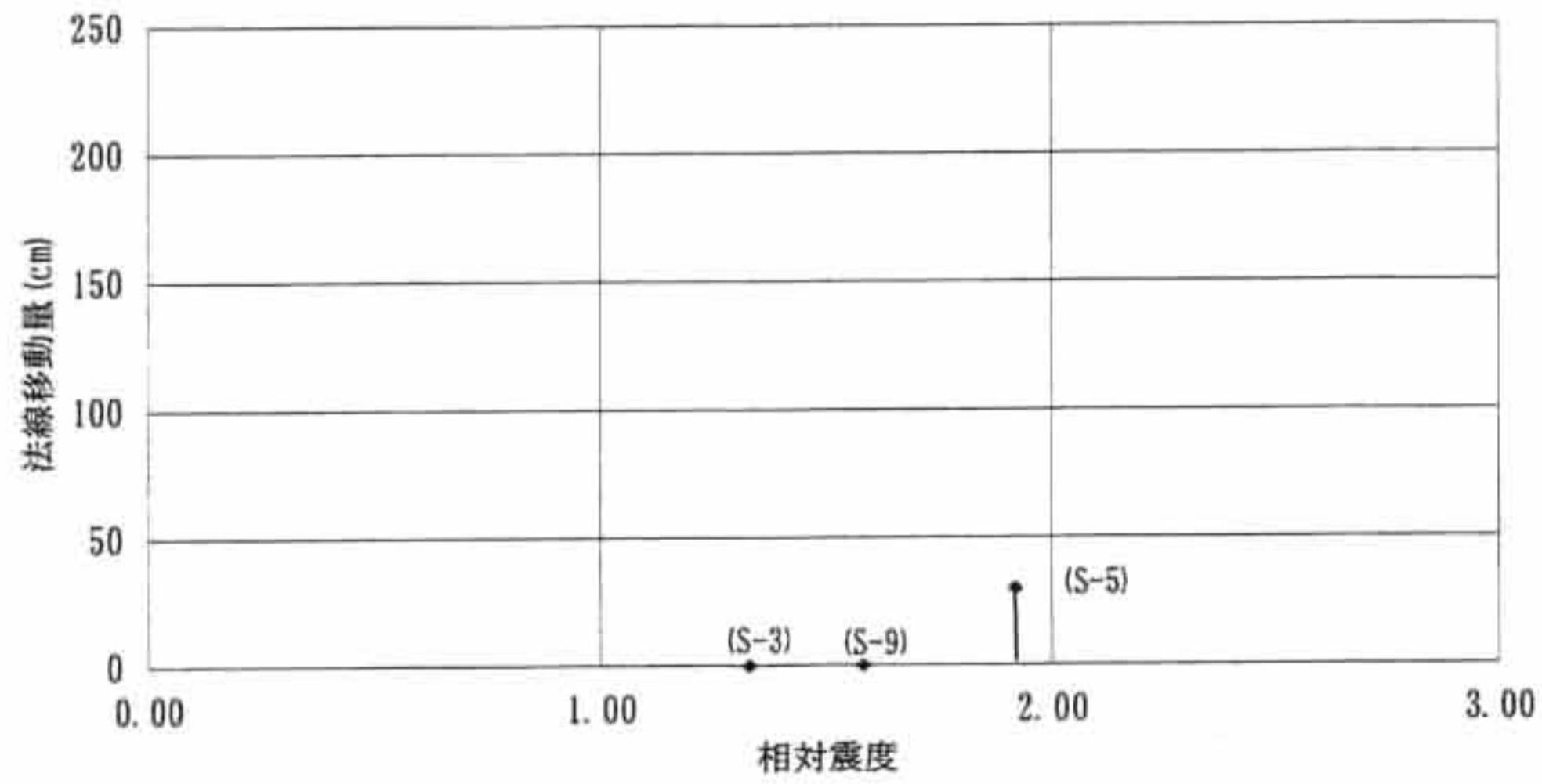


図-5.4.3(2) 矢板式施設の相対震度と法線移動量の関係

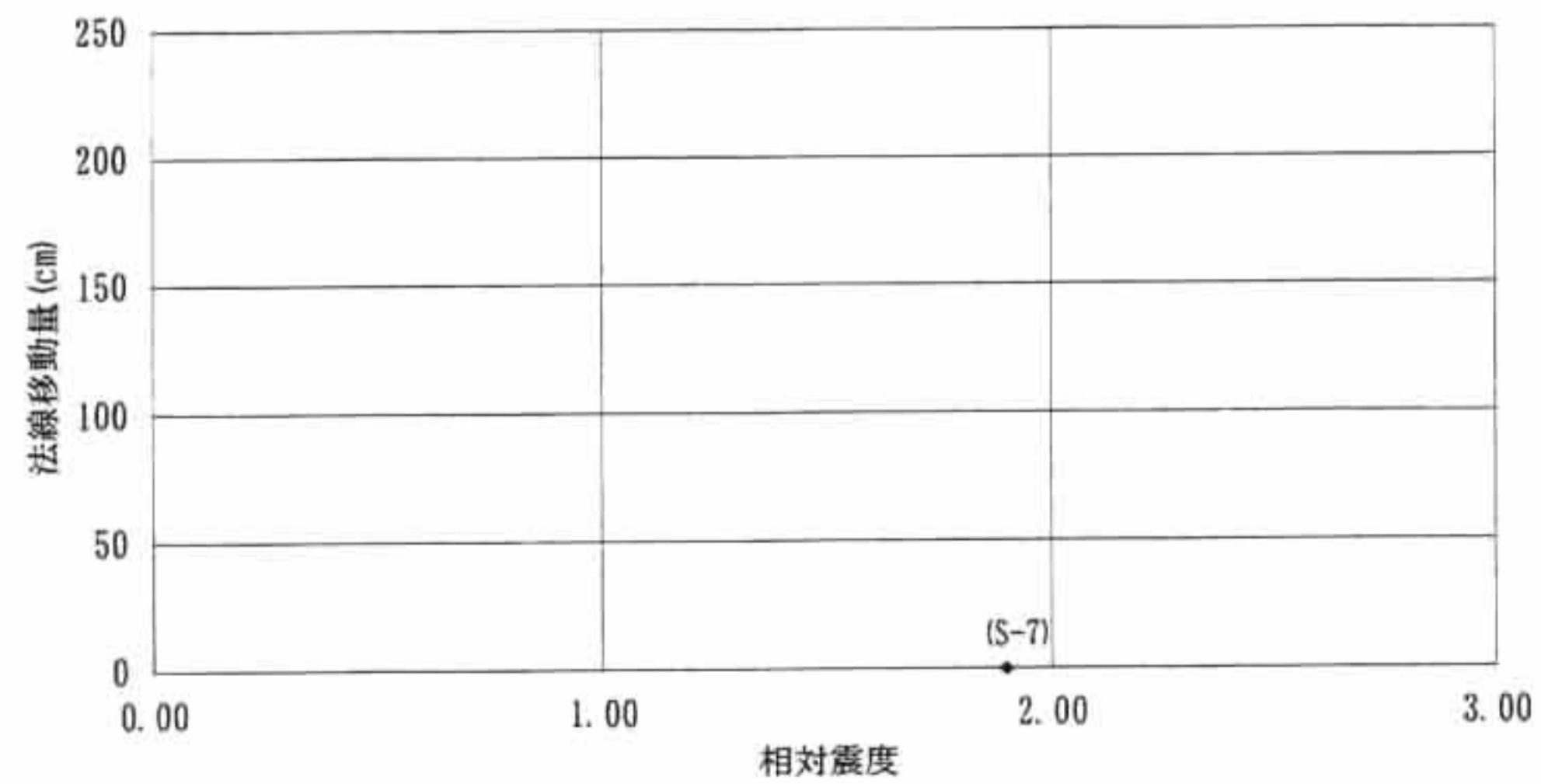


図-5.4.3(3) 横棧橋式施設の相対震度と法線移動量の関係

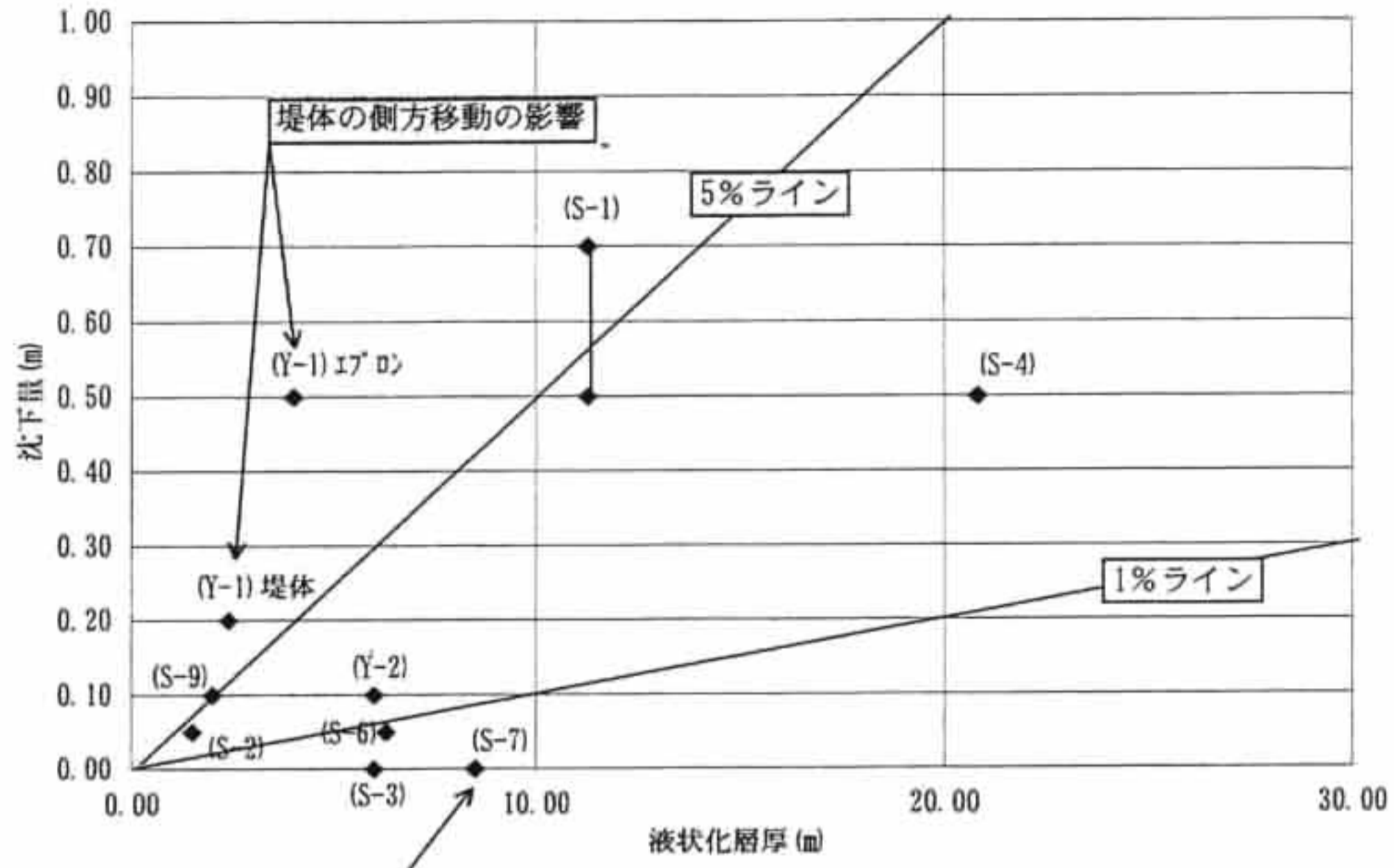


図-5.4.4 液状化層厚と沈下量の関係

土質データの影響

(5) 被災変形量の分析結果

図-5.4.5、図-5.4.6に被災変形量の実測値と予測値の関係を示す。

水平変位について、中野防波護岸以外の背後の裏埋土砂が液状化した2施設に関しては、岸壁法線と垂直な方向の地震動による推定結果が実測値に近い値となった。

沈下量について、すべての施設において予測値が実測値を上回る結果となった。

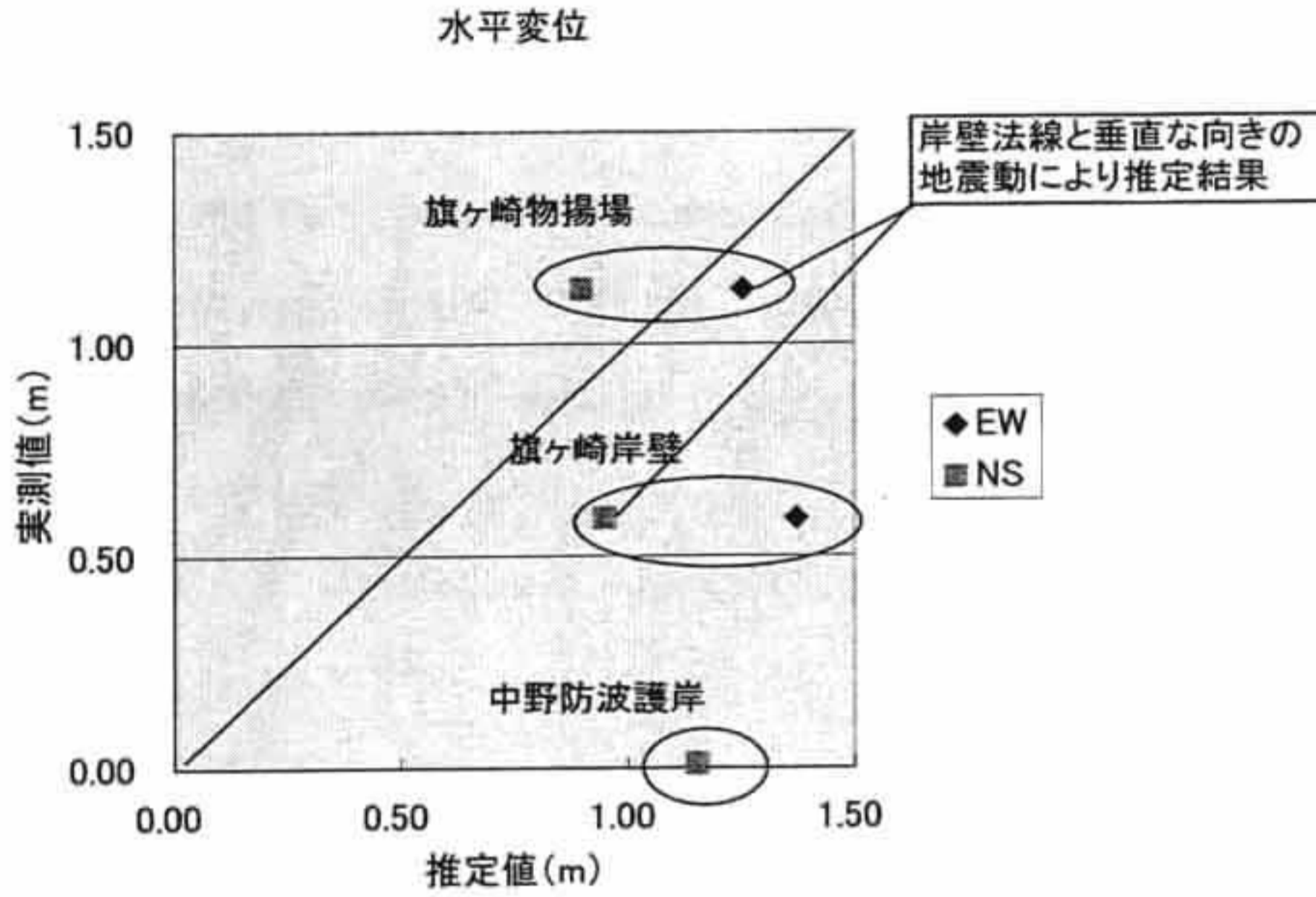


図-5.4.5 水平変位量の実測値と推定値

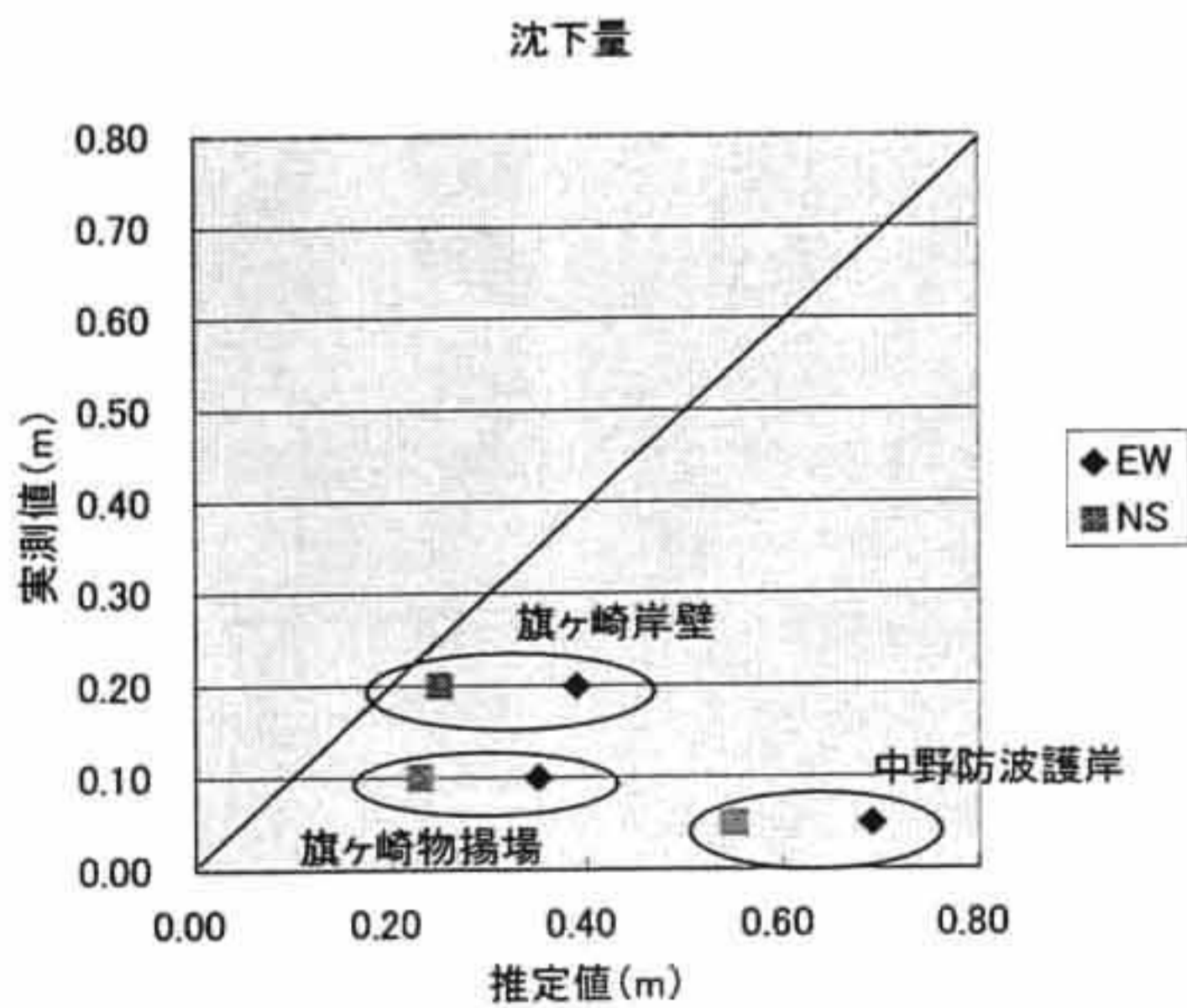


図-5.4.6 沈下量の実測値と推定値

5-5. 被災メカニズムの考察・評価

以下に被災メカニズムの考察・評価を記す。

① 作用震度（地表面加速度）について

作用震度は、境港の昭和南1号岸壁を除く全ての施設で0.20以上であった。

地表面加速度と地盤の平均的な固有周期の関係を図-5.5.1に示す。入力地震動の気象庁観測波「EW」、「NS」ともに固有周期 $T=0.7\sim 2.3$ (s) のゾーンでは、基盤応答スペクトル(減衰定数 $h=15\%$)と地盤応答解析プログラム“SHAKE”の地表面加速度は概ね良い対応を示している。

しかし、灘町物揚場のケースでは、基盤応答スペクトル(減衰定数 $h=15\%$)と地表面加速度は大きく相違している結果となった。これは地盤解析プログラム“SHAKE”が周波数非依存型であり、せん断剛性と減衰定数を用いていること、多層地盤系の応答値と1質点系の応答値の相違等が考えられ、特に固有周期が低周期領域ではその相違が顕著になったものと推測できる。

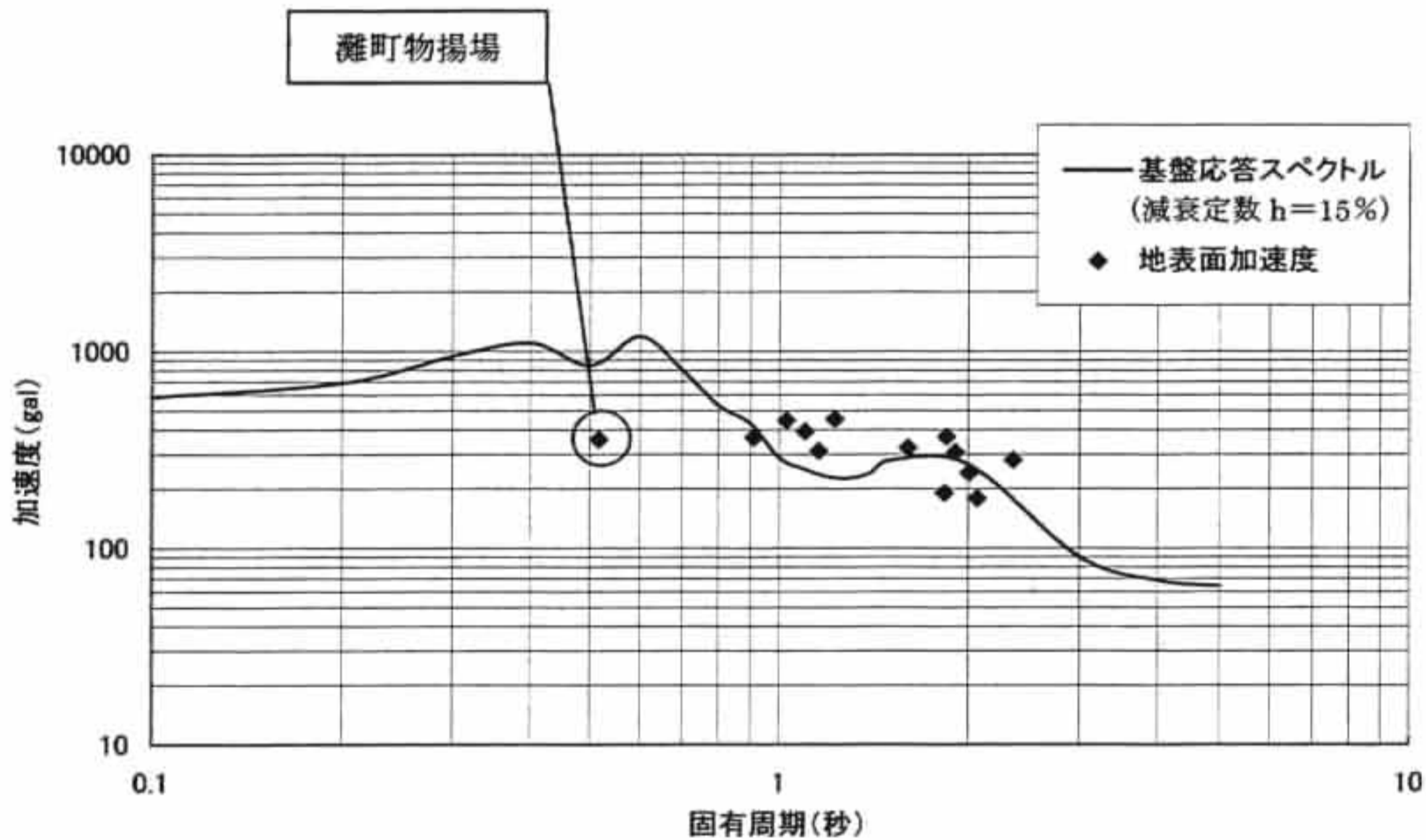


図-5.5.1(1) 地表面加速度と地盤の平均的な固有周期（気象庁観測記録「EW」）

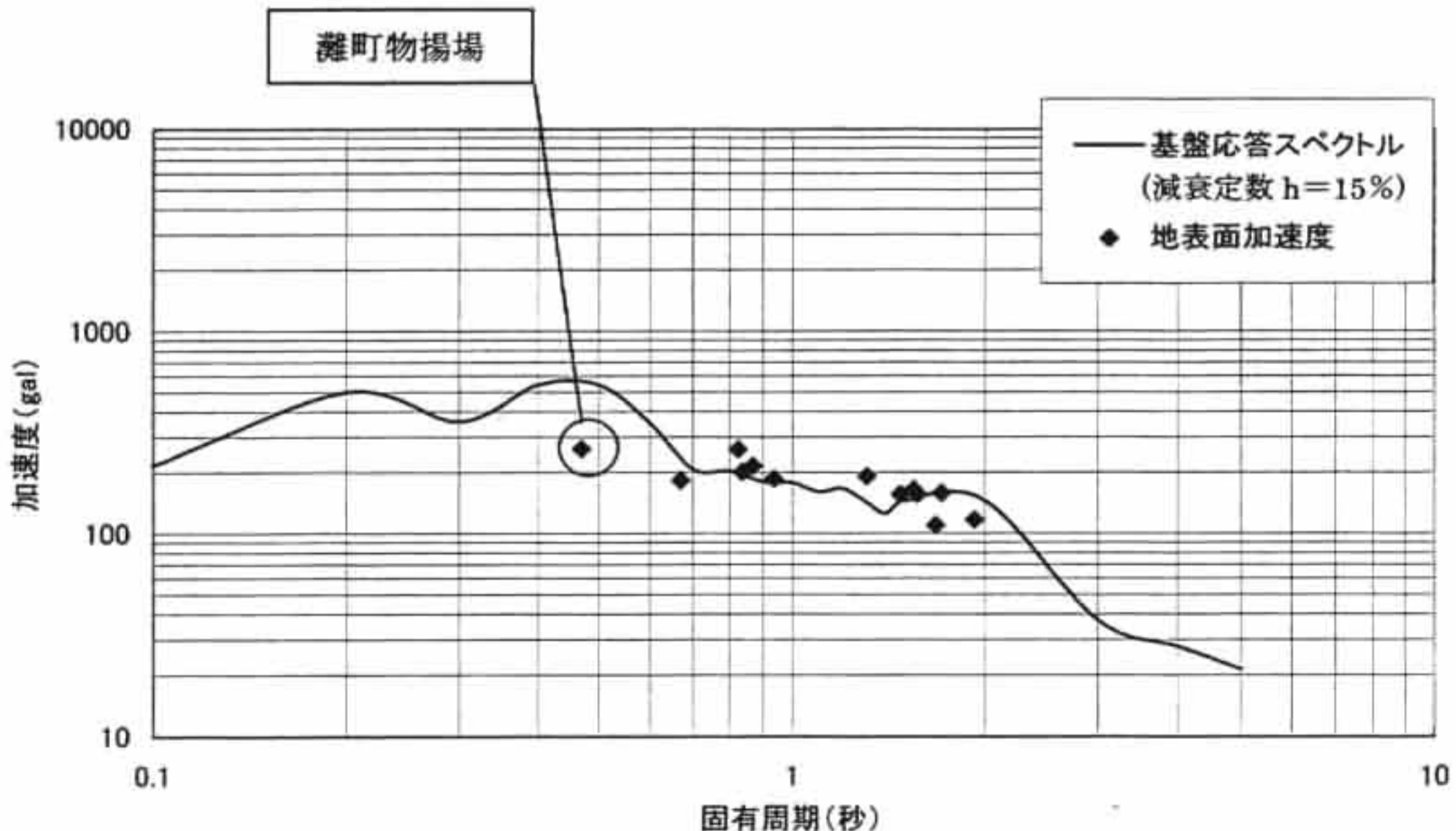


図-5.5.1(2) 地表面加速度と地盤の平均的な固有周期（気象庁観測記録「NS」）

② 被災要因について

作用震度について、構造型式が重力式の場合、相対震度（＝作用震度／設計震度）が1以下の施設では法線移動は見られなかったが、それ以外の全ての施設で法線移動が見られ、相対震度と法線移動量には相関関係が見られた。矢板式の場合、相対震度≒2の施設で法線移動が見られたが、相対震度≒1.5であっても法線移動は見られなかった。横棧橋式の場合、相対震度≒2であっても法線移動は見られなかった。

相対震度と法線移動量との関係には、構造型式により相違が見られた。

液状化について、堤体、エプロンの沈下が見られた全ての施設で液状化すると判定されており、沈下の要因が液状化によるものと推測できた。また、ほとんどの施設において、液状化層厚に対する沈下量の割合が1%～5%の範囲であった。

③ 被災変形予測について

水平変位の被災変形量の推定結果は、背後地が液状化している2施設について、岸壁法線と垂直な向きの地震動による推定結果が、実測値に近い結果となった。このことから、水平変位の被災変形量は、地震動の加震方向と岸壁施設方位とに関係があると推測できる。また、沈下量の被災変形量の推定結果は、検討を行った3施設全てで実測値に比べて大きい値となった。