

特集論文(阪神・淡路大震災)

阪神大震災における漁港施設の 被害分析と液状化解析

大槌正紀¹・高木伸雄²・藤井照久²・若槻好孝²¹正会員 工博 農林水産省水産工学研究所 (〒314-04 茨城県鹿島郡波崎町海老台)²正会員 工修 (財) 漁港漁村建設技術研究所 (〒101 東京都千代田区内神田一丁目14-10)

1995年1月17日に阪神大震災が発生し、阪神・淡路地区にある27の漁港が被害を受けた。本論文は、被害を受けたけい船岸の被害特性の分析結果および代表的な漁港における液状化解析結果を示した。被害の特性は、構造物の型式や方向性について地震の主要動と対比して行った。また、液状化解析では従来の設計ガイドに基づいた一次元解析および実地震波を用いた一次元解析、二次元有効応力解析を実際に被害を受けた漁港に対し行い、それぞれの解析結果を比較検討した。

Key Words : case history, earthquake damage, liquefaction, site investigation, quaywall, fishing ports, liquefaction analysis

1. まえがき

平成7年1月17日に発生した阪神大震災は、阪神・淡路地区に甚大な被害をもたらし、兵庫県本土側、同淡路島、大阪府および徳島県の27漁港(図-1)で大きな被害を受けた。これらの漁港の中には、液状化により被害を受けたと思われる漁港も数多く確認された¹⁾。

これまで、海岸構造物の地震による被害は1964年の新潟地震以降、運輸省管轄の大型港湾施設について、被害の有無に関係なく構造物の状況が被害報告²⁾の形でとりまとめられ、以降の耐震設計に関する研究に役立てられている。これに対し、漁港施設では、これまで地震による被害の状況をまとめた資料は少ない。そこで、著者らは、釧路沖地震を契機に漁港の被害調査を実施するとともに被害の状況およびその特徴をとりまとめている^{3) 4)}。

また、漁港施設における液状化の予測・判定手法は、「漁港構造物の設計ガイド」⁵⁾にとりまとめられている。設計ガイドの予測・判定手法は、漁港施設などのように比較的小規模な構造物に対して簡便かつ経済的に液状化予測・判定を実施できることを目的としている。

著者らは、この手法の適用性を検討するために、これまで、釧路沖地震および北海道南西沖地震により被害を受けた漁港に対して漁港構造物の設計ガイドによる液状化解析とこれらの実地震波を用いた詳細な液状化解析^{6) 7)}を行っている。その結果、設計

ガイドによる液状化の予測・判定と詳細な各種の液状化解析結果とは、比較的良く一致しており、漁港構造物の設計ガイドによる液状化の予測・判定手法の妥当性をほぼ確認している。しかし、今回の阪神大震災クラスの直下型で、かつ巨大な地震力を有する地震に対して適用できたかどうかは明確ではない。

本論文は、以上のような背景を踏まえ、阪神・淡路地域の漁港施設の被害特性と、液状化が確認された代表的な被害漁港の液状化解析の結果を検討したものである。漁港施設の被害特性の分析は、現地調査および現地の調査資料に基づき、地震動の大きさ、構造物の形式・規模・設置方向、変状の種類・大きさなどについて検討した。液状化解析については、液状化が発生した漁港のうち代表として垂水漁港および仮屋漁港の地盤を対象に、現地の土質調査結果に基づき、これまでの解析と同様、漁港構造物の設計ガイドに基づく液状化解析と実地震波を用いた地震応答解析および液状化試験などの結果を用いて行った。

2. 漁港施設の被害特性の分析

(1) 被害調査の概要

漁港構造物の被害調査は主に漁港の耐震設計を考慮しているけい船岸を対象として行った。調査対象としたけい船岸の構造形式は、重力式(L型、セラー、方塊、直立消波、ケーソンなど)が最も多く、矢板式および杭式を含め、総数103である。被害形

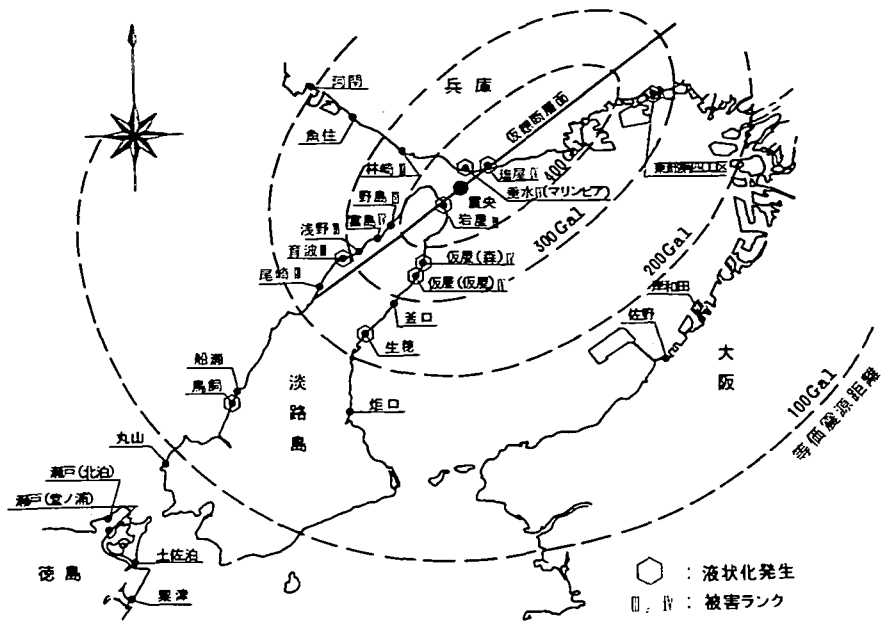


図-1 調査漁港と被災概要

態の分析に当たっては、けい船岸の本体で、前出し、沈下と傾斜について、また、背後のエプロンで、開きと段差について、それぞれの変位量の大きさを測定し、被害を定量的に評価するために表-1のようにランク分けして整理した。ここで、これらの被害項目の定義を以下に示す。

- 前出し：本来の法線位置に対する水平方向の移動
 - 沈下：法線上の計画高に対する変位
 - 開き：上部工の後端とエプロンの前端の水平方向の開き
 - 段差：上部工の後端とエプロンの前端との鉛直方向の変位
 - 傾き：高さ1mに対する水平の変位
- 被害ランクにおいて、Iは被害が軽度で平成7年7月時点で復旧の処理が行われていないものが多い。Ⅲ以上は応急復旧が困難な被害程度である。ⅡはIとⅢの中間程度の被害であり、当面では応急復旧によって荷揚げ作業などが行われた程度の被害に相当する。なお、傾きについては他の変位に含まれているとし、分析の対象としていない。

(2)被害の特徴

表-1の被害ランクの考え方に基づいて整理した被害ランクⅢおよびⅣが発生した漁港と埋立地盤の液状化の発生が確認された漁港の位置を図-1に示し

表-1 被害規模のランク分けの目安

被害ランク	0	I	II	III	IV
最大変位量(cm)	0	10以下	10~50	50~100	100以上

た。また、図中の点線は推定断層位置に沿う等価震源距離^①の考え方における推定基盤最大加速度のコンターを表している。これによると200gal程度以上の範囲の漁港において大きく被害を受けていることがわかる。ただし、兵庫県本土側の推定断層より北西側の阿間、魚住の2漁港は被害は軽微であった。これは地震動の方向性が関与しているものと考えられる。

a)構造形式別の被害延長

表-2は構造形式別の被害延長を整理したものである。総延長10,983.5mのうち7,963.2m(72.5%)が何らかの被害を受けている。また、被害ランクⅢ以上の総延長は3,239.0m(29.5%)で、その大部分が重力式の構造物である。ここで、被害に支配的であった変位は前出しであった。

b)構造形式別の被害傾向

図-2は代表的なけい船岸の被害傾向を示したものである。重力式のけい船岸は、大きな地震力により生じた構造物の慣性力と支持地盤の強度低下(液状化を含む)から滑動あるいは傾斜を生じ、結果的

表-2 構造形式別の被害延長 (m)

	L 型	セルラー	方塊式	直立消波	ケーソン	矢板	杭	計
被災	412.0	50.0	897.7	675.0	60.0	800.6	125.0	3,020.3
ラ	632.8	30.0	709.5	651.0	0.0	194.6	0.0	2,217.9
ン	314.0	175.0	1,444.3	210.0	135.0	128.0	100.0	2,506.3
ク	653.5	60.6	1,390.5	175.0	27.0	0.0	0.0	2,306.6
計	0.0	0.0	286.2	341.6	0.0	304.6	0.0	932.4
計	2,012.3	315.6	4,728.2	2,052.6	222.0	1,427.8	225.0	10,983.5

(注) 被害としては前出しが支配的である。

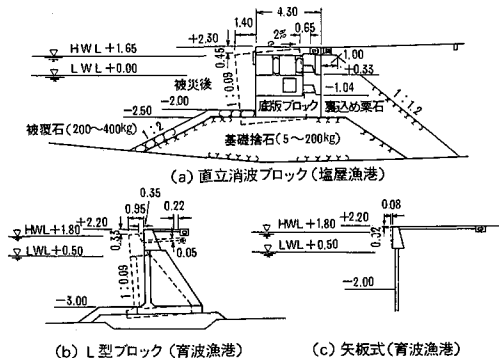


図-2 けい船岸の被害事例

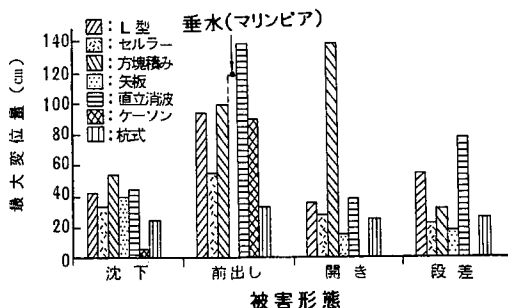


図-3 構造形式と最大変位量の関係

に大きく前出しを生じた傾向にある。また、それに伴い本体とエプロンの段差や開きを生じている。

一方、矢板構造物や杭式構造物では、背後の埋立土層の大規模な液状化の影響を受けた垂水マリンピア護岸の被害を除いて被害は軽微であった。これは、矢板構造物が大きな被害をもたらした北海道南西沖地震とは異なった被害傾向といえる。つまり、主要地震動の継続時間が長い北海道南西沖地震に対して、今回の兵庫県南部地震のように直下型で非常に大きな地震力が瞬時に作用する場合には、矢板式のような構造物本体の自重が小さいものが安定を確保しやすいといえる。

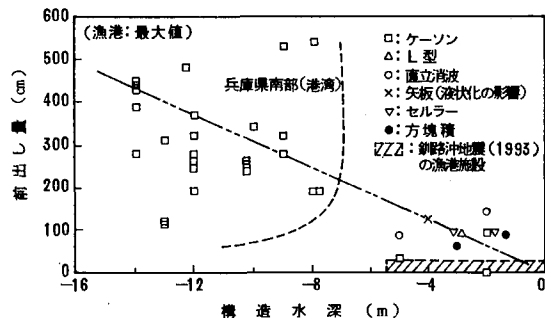


図-4 地震による前出し量と構造水深の関係

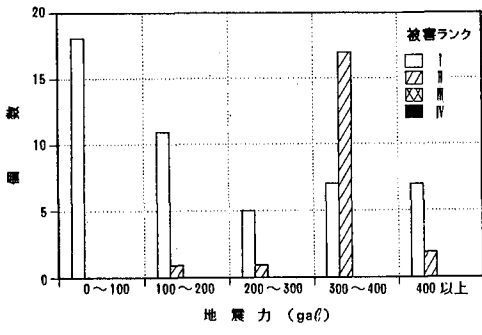
c) 構造形式別の最大変位量

図-3 は構造形式と各種変位の最大変位量を対比したものである。

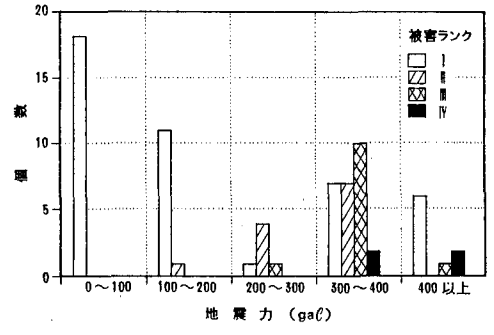
本体の沈下は、ケーソンを除いて構造形式による大きな違いは見受けられず 25 ~ 50cm 程度の範囲にある。前出しは、慣性力の大きな重力式の構造物で顕著に発生している。特に、直立消波ブロック形式では最大 140cm の前出しを生じている。また、垂水マリンピア護岸の最大水平変位 120cm を除けば、矢板式の被害は見受けられず、今回の地震に対して重力式よりも安定性が高かったことが推察できる。

開きは、方塊積み式で 140cm 程度であり、他の構造形式と比較して特に大きな変位が発生している。段差は、直立消波が 80cm 程度と最も大きく、次いで、L型が 55cm 程度と大きな変位を生じている。

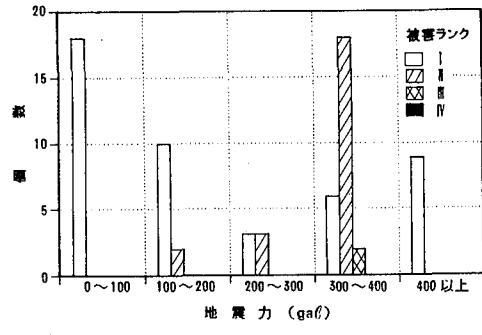
図-4 は代表的なけい船岸の構造水深と最大前出し量の関係を、神戸地区の港湾構造物⁹⁾および 1993 年釧路沖地震³⁾と対比して整理したものである。港湾構造物の場合は水深が -8 ~ -14m と深く、前出し量は 100 ~ 500cm 程度の範囲で大きい。一方、今回調査した漁港構造物の水深は -1 ~ -5m で、前出し量は 30 ~ 140cm 程度である。このことは、構造物の水深が深い港湾構造物に比べ、水深の比較的小さい漁港構造物では被害の絶対値は異なるが、構造物の規模からすると被害の程度は同等レベルに相当



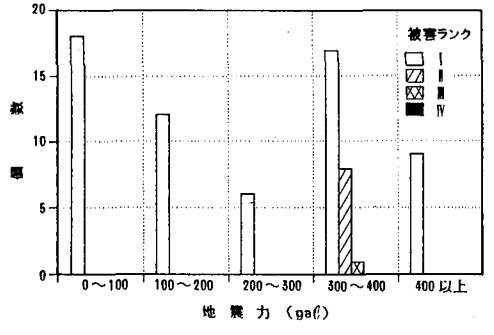
(a)沈下



(b)前出し



(c)開き



(d)段差

図-5 推定基盤加速度と各被害項目個数の関係

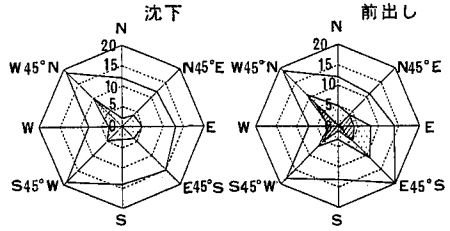
するといえる。これに対して、釧路沖地震においても各地で被害を生じたが、最大値は 30cm 程度であり、今回の地震の激しさを理解することができる。

d)各漁港に作用した推定地震力と被害ランク

図-1 に示した等価震源距離の考え方に基づく各漁港の推定基盤最大加速度に対するけい船岸の被害別個数との関係の概略を図-5 に示す。これらの関係図より、沈下、前出し、開きおよび段差は推定基盤最大加速度が 300gal を越えると被害の程度が顕著となることわかる。また、前出しや開きについては、200gal を越す段階で被害が発生しはじめる傾向がある。

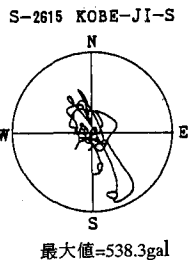
e)構造物の施工方向と被害ランク

図-6 は、各漁港のけい船岸の法線直角方向と沈下、前出しに対する被害ランク別の構造数を整理したものである。この結果、被害ランクⅡ～Ⅳについては北西および南東方向が卓越している。これは、神戸港や神戸海洋気象台で観測された地震動の方向特性、また、想定断層と直角する方向とほぼ等しいことがわかる。直下型地震による被害の特徴といえよう。これはポートアイランドおよび六甲アイランドの港湾構造物¹⁰⁾についても同様な傾向にあるといえる。



最大変位量 (cm) □ I: 0~10 □ II: 10~50 □ III: 50~100 □ IV: 100~

(a)けい船岸法線直角方向の被害レベル



(b)加速度 (gal)

図-6 けい船岸の沈下・前出し量の方向性

表-3 被害のあった漁港施設における被害ランクと液状化確認の有無

漁港施設名	被害ランク	液状化確認の有無	推定基盤最大加速度 (gal)	漁港施設名	被害ランク	液状化確認の有無	推定基盤最大加速度 (gal)
岩屋漁港	Ⅲ	○	400	野島漁港	Ⅲ		390
仮屋漁港(仮屋地区)	Ⅳ	○	350	林崎漁港	Ⅲ		340
仮屋漁港(森地区)	Ⅳ	○	350	魚住漁港	Ⅰ		260
釜口漁港	Ⅱ		290	阿閑漁港	○		200
生穂漁港	Ⅲ	○	230	垂水漁港(マリンピア)	Ⅳ	○	400
炬口漁港	Ⅰ		170	塩屋漁港	Ⅳ	○	400
丸山漁港	Ⅰ		100以下	佐野漁港	Ⅰ		170
鳥飼漁港	Ⅱ	○	150	岸和田漁港	Ⅱ		175
船瀬漁港	Ⅱ		155	粟津漁港	Ⅰ		100以下
尾崎漁港	Ⅲ		230	瀬戸漁港(北泊地区)	Ⅰ		100以下
育波漁港	Ⅲ	○	300	瀬戸漁港(堂の浦地区)	Ⅰ		100以下
浅野漁港	Ⅲ		310	土佐泊漁港	○		100以下
富島漁港	Ⅳ		360	東部第四工区	Ⅳ	○	350

f)被害ランクと液状化の発生の有無

表-3 は、各漁港施設の被害ランクと地表で噴砂等明らかに液状化が生じたと確認されたかどうかの有無を示したものである。この表より、被害ランクのⅢ～Ⅳの大きな被害を受けている施設では液状化の確認がされている箇所が多く、液状化が施設の被害の主原因あるいは助長した可能性が高いことが推察される。

g)被害を受けた施設の埋土および基礎地盤の状況

図-7 は、各漁港の埋土層および埋土層下位に分布する基礎地盤の等価N値の深度分布図を示したものである。ここで、等価N値とは標準貫入試験から得られるN値から有効上載圧の影響を取り除いた次式で表せる値である。

$$(N)_{0.66} = \frac{N - 1.828(\sigma_v - 0.66)}{0.399(\sigma_v - 0.66) + 1} \quad (1)$$

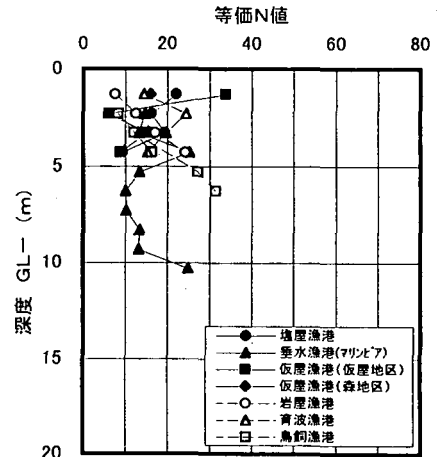
ここで、 N : 土層のN値

σ_v : 土層の有効上載圧 (kgf/cm²)

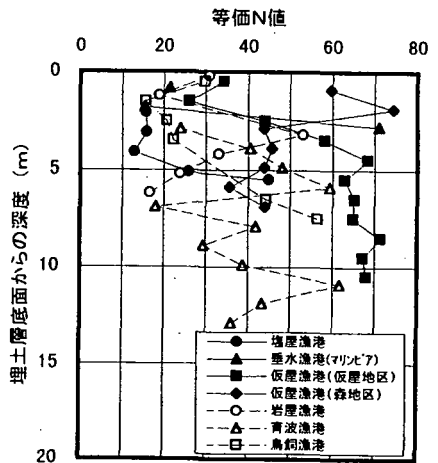
である。

この図より、埋土層では等価N値が概ね 5 ~ 25 の範囲に分布しており、等価N値 20 以下は液状化の可能性があると判断される現行の漁港施設の基準(図-10 参照)を考慮すると、各漁港とも全体に液状化が生じた可能性が高いことがわかる。一方、埋土層下位に分布する基礎地盤の等価N値は、概ね 15 以上の比較的良好な地盤であることがわかる。このことも、図-4 で示した漁港施設の前出し量が港湾施設に比べ小さかったことの一要因と考えられる。

次に、埋土層の粒度特性を重ね合わせ液状化の可能性に関する判定指標と関連づけたのが図-8 であ



(a)埋土層の等価N値の深度分布図



(b)基礎地盤の等価N値の深度分布図

図-7 埋土層と基礎地盤の等価N値の深度分布図

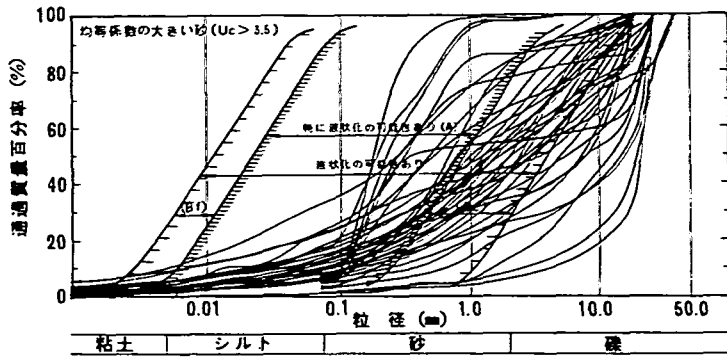


図-8 各漁港施設の粒度特性

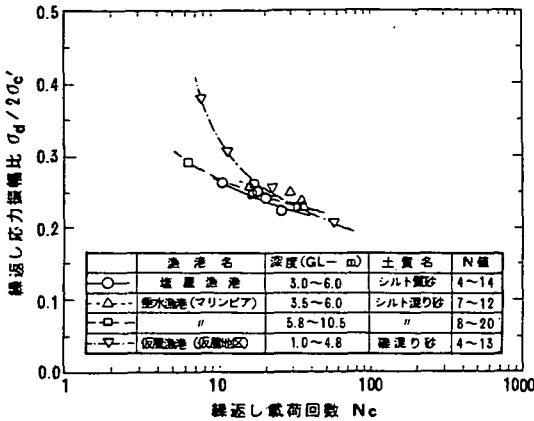


図-9 埋土の液状化強度曲線の重ね合わせ

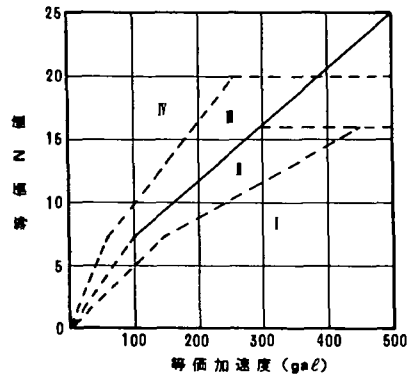


図-10 等価N値と等価加速度による液状化の判定図

る。同図より、ほとんどの埋土材は粗粒分を多く含み、一部ではこれまでは液状化しないと判断されていた粒度特性を示すものも見られる。この粒度分布の状況はポートアイランドおよび六甲アイランドの埋土の粒度特性と類似していることがわかる¹¹⁾。

図-9は、埋土層の液状化強度曲線である。この図より液状化強度曲線はほぼ類似した曲線を描き、繰返し回数20回における応力比は0.24~0.26の範囲にある。

3. 漁港施設の液状化解析

(1) 簡易液状化判定

ここでは、現地踏査で液状化が確認された漁港施設および液状化が確認されなかった26の漁港施設に対し、現行の基準に準じて簡易液状化判定を行った。

現在、漁港構造物における液状化判定は「漁港構造物の設計ガイド」にしたがって行われている。設

計ガイドに示されている手法は、井合・松永ら¹¹⁾の方法により最大せん断応力を求め、式(2)より等価加速度(α_{eq})を算出し、図-10に示す等価N値との関係図から液状化を判定するものである。

$$\alpha_{eq} = 0.7 \cdot \frac{\tau_{max}}{\sigma_v'} \cdot g \quad (2)$$

ここに、 τ_{max} : 最大せん断応力(kgf/cm²)
g: 重力加速度(980gal)

である。なお、解析に使用する地震波形は八戸波と大船渡波であり、想定する基盤最大加速度は当地区の場合250galである。

図-11はその結果図である。図中示している結果は八戸波および大船渡波のうち液状化の可能性の高い方を示している。この簡易液状化判定結果より、いずれの漁港施設においても埋土層内で、「液状化する」~「液状化する可能性が大きい」ことが確認され、液状化発生が予想されていた地盤であることがわかる。また、同図中には推定断層位置に沿う等価震源距離の考えに基づく推定基盤最大加速度のコ

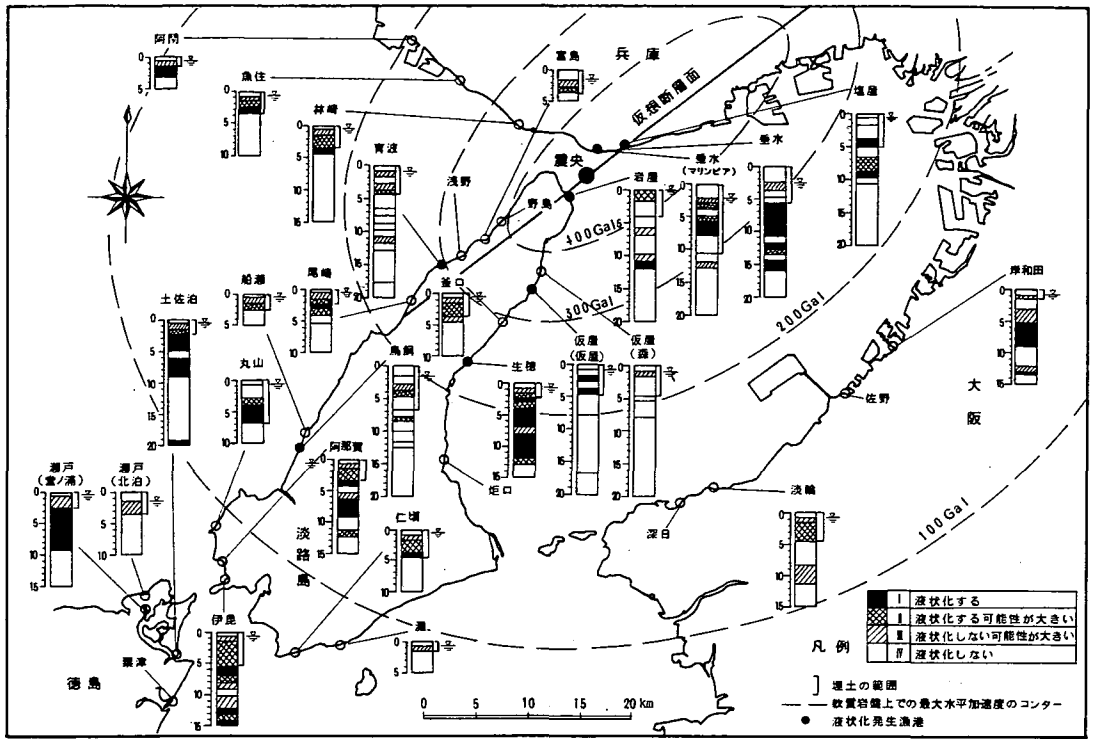


図-11 簡易液状化判定結果

ンターと、実際に現地踏査で噴砂等の液状化の痕跡が確認されたが漁港施設(図中●印)を示している。

液状化が確認された漁港施設は推定基盤最大加速度のコンターが 200gal 以上の領域に集中していることから、現行で用いている基盤最大加速度が妥当な値であったといえる。

(2)一次元液状化解析

ここでは、液状化による被害が大きかった構造形式の異なる2つの漁港施設に対し、より詳細な一次元液状化解析を行った。対象とする2漁港施設の地盤状況および被害状況は以下のものであった。

a) 垂水マリニピア

図-12(a)は、垂水マリニピアの標準断面図である。当漁港は最上部に礫分を多く含む埋土層(Um)が分布し、それより下位に段丘性の堆積物である神戸層群に相当する礫層(Gs)や礫混り砂(Sg)が分布している。兵庫県南部地震によって、護岸背後の地盤は噴砂や地盤面の亀裂が確認され、控矢板形式の護岸が最大で120cm程度前出しているといった被害状況であった。

b) 仮屋漁港

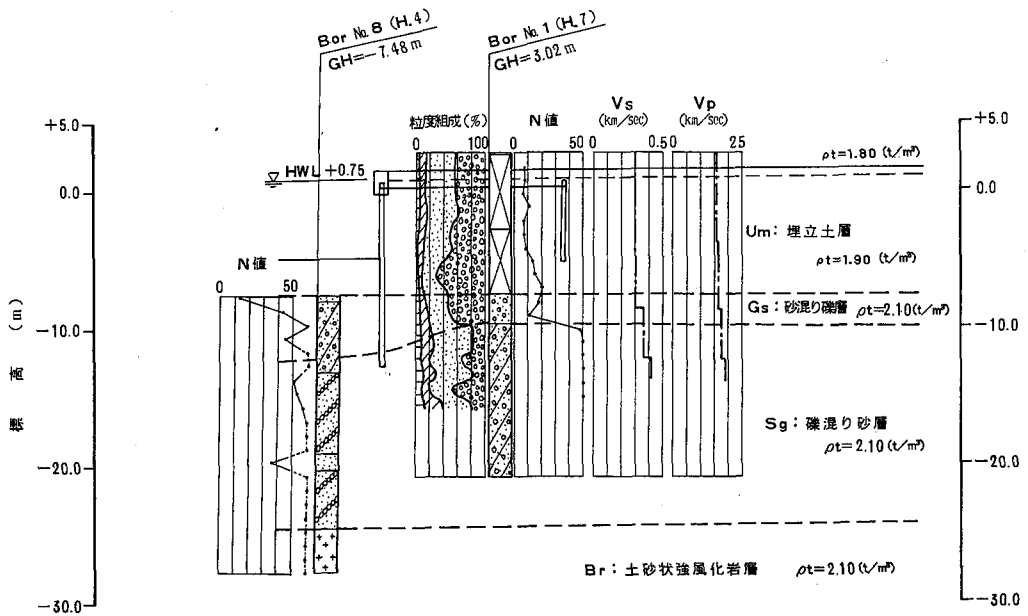
図-12(b)は、仮屋漁港の標準断面図である。当

漁港は、最上部に砂質土を主体とする埋土層(Um)が分布し、それより下位に大阪層群下部層に相当する砂層(Sg)が分布している。地震によって、当漁港は護岸背後の埋土内の至る所で噴砂の後が見られ、方塊式護岸が前面に傾斜しながら、40~60cm前出しているといった被害状況であった。

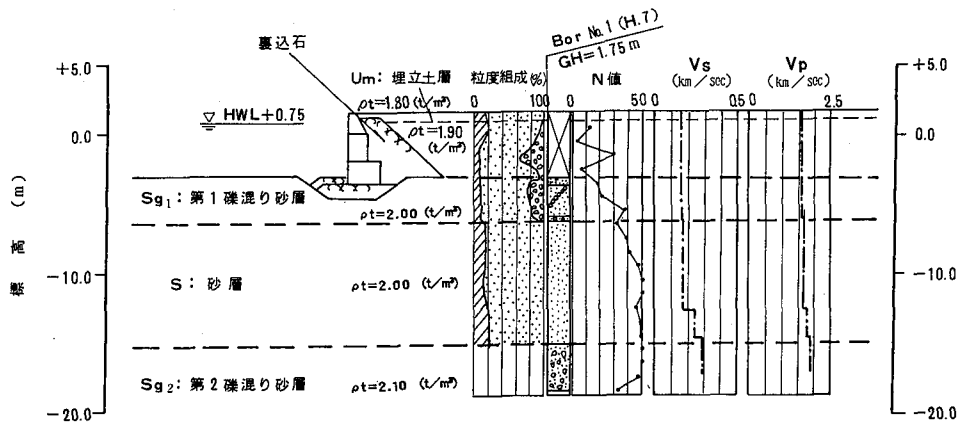
一次元液状化判定は、漁港構造物の設計ガイドに準じた判定と、阪神大震災の際ポートアイランドで実際に得られた地震波形を用いて判定を行った。各々の液状化判定法についてとりまとめたのが表-4である。

実地震波を用いた液状化判定では、阪神大震災の際ポートアイランドで得られた強震記録¹³⁾のうち、KP-79m地点の洪積粘土層M a12下の下部洪積砂礫層で得られた波形のNS成分を用いた。NS成分を用いる理由は、NS成分はEW成分より最大加速度が大きく液状化に対してより支配的であったと考えられるからである。

各漁港施設に用いる基盤最大加速度の求め方としては一般にマグニチュードと震源距離を媒体にして距離減衰式の形で示され、これまで多数の関係式が提案されている。距離減衰式の欠点は、点震源を仮定し遠方場まで対象としていることにある。したが



(a) 垂水マリンピア



(b) 仮屋漁港

図-12 各漁港の標準断面図

表-4 一次元液状化解析方法

設計ガイドに準じた液状化判定方法		実地震波を用いた液状化判定方法	
詳細(1)	一次元全応力解析 (SHAKE) から等価加速度を求め、等価N値との関係図より液状化を判定する方法	兵庫詳細(1)	詳細(1)と同様な方法
詳細(2)	一次元全応力解析より求まる最大せん断力比と不攪乱試料を用いた液状化試験によって求まる液状化強度比との関係から液状化を判定する方法	兵庫詳細(2)	詳細(2)と同様な方法
地震波形	八戸波、大船渡波	兵庫詳細(3)	一次元有効応力解析 (YUSA-YUSA) ¹⁴⁾ により液状化を判定する方法
基盤最大加速度	垂水海洋牧場、仮屋漁港共に250gal	地震波形	ボートアイランド KP-75m NS成分
		基盤最大加速度	垂水詳細: 400gal 仮屋: 350gal

表-5 各漁港施設の基盤最大加速度

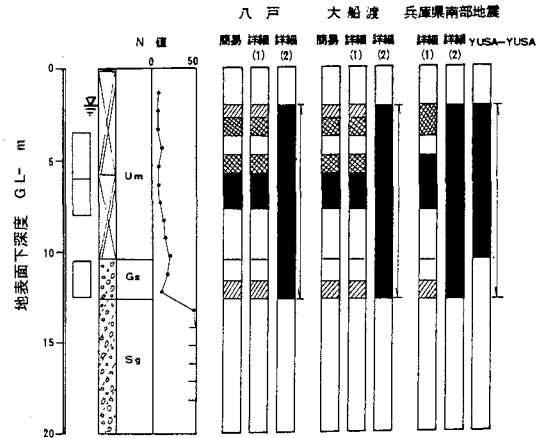
漁港施設名	基盤最大加速度
垂水マリンピア	400gal
仮屋漁港	350gal

って阪神大震災のような断層周辺の最大加速度を推定する場合には適していない。そこで、本論文では、既往の調査資料を対象に次のように基盤最大加速度を決定した。この方法は、Ohno⁽⁴⁾の等価震源距離(X_{eq})の概念を導入し、震源近傍の距離減衰を物理的に明確にしたものである³⁾。図-11中にこの等価震源距離(X_{eq})を用い断層近傍の基盤最大加速度を示している。図-11より求めた各漁港施設の基盤最大加速度を表-5に示す。

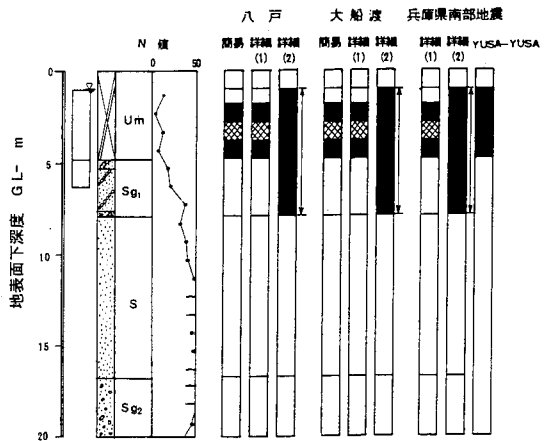
図-13は、垂水、仮屋の各漁港施設において、各種液状化判定結果を比較したものである。なお、図中には簡易液状化判定の結果および詳細(2)で必要な繰返し三軸試験を行った位置も併せて示す。同図より、現行の設計ガイドで得られた判定結果と実地震波の結果とを比較すると、両者とも埋土層(Um)が液状化した可能性の高い点は一致しており、現行の設計ガイドが兵庫県南部地震クラスの液状化予測・判定をある程度判別できていたことを示唆している。一方、簡易法、詳細(1)、詳細(2)、詳細(3)の各判定手法の結果を比較すると、簡易法と詳細(1)の結果はほぼ同一の結果を示しているのに対し、詳細(1)と詳細(2)の結果では、一部で異なった判定が確認される。この理由としては、

- ①N値の信頼性
- ②限界N値法の適用限界
- ③サンプリングリングの問題

などが考えられる。①は、特に礫分の含有量が場所毎に複雑に異なる層(例えば埋土層)で発生する。このような層では、N値を測定する30cm間でも礫の含有率により貫入長と打撃回数の関係が一定でないため正確なN値を把握することが難しい。②は、現行の限界N値法においては等価Nが20以上(図-10参照)の場合、どんなに地震力が大きくても液状化しない判定結果になってしまう。実際の現場においては等価N値が20以上の箇所においても液状化の発生が確認された箇所もあるため、現行の判定法そのものの適応性の限界を修正する余地があると考えられる。③はサンプリングによる試料の乱れの影響である。本調査においては、N値15以下の地盤から採取した試料に対し行った動的変形試験から求めたG_oと、PS検層より求めたG_oとの値がほぼ同値であったため、サンプリングによる乱れは少なかったものと考えられる。しかしながら、N値が20



(a)垂水マリンピア



(b)仮屋漁港

凡例

■	I	液状化する
▨	II	液状化する可能性が大きい
▧	III	液状化しない可能性が大きい
□	IV	液状化しない

□ サンプリング位置

← 詳細(2)の予測・判定区間

図-13 各種一次元液状化予測・判定結果の比較

以上の比較的密な地盤から採取した試料に関しては、PS検層より得られた値とやや異なっていたため、サンプリングによる乱れが大きかったものと考えられる。以上のことを考慮すると、N値20以上の密な地盤に対しては(例えば仮屋漁港のSg₁層)、より精密なサンプリングを行うことにより、慎重な判定を行う必要があると考えられる。

また、兵庫詳細(2)の一次元全応力解析結果と兵庫詳細(3)の一次元有効応力解析の結果を比較すると両者は一部を除きよい対応を示しており、一次元

表-6 LIQCA に用いる定数の一例 (仮屋漁港)

層名	U _o 層	S _e 層
初期間隙比 e_o	0.581	0.570
圧縮指数 λ	0.010	0.010
膨張指数 κ	0.0020	0.0020
ポアソン比 ν	0.25	0.25
透水係数 k	1.6E-5	2.2E-6
密度 ρ	1.90	2.00
S 波速度 V_s	150	160
P 波速度 V_p	1580	1630
変相応力比 M_o^*	1.348	1.365
破壊応力比 M_r^*	1.506	1.523
B_o	2000	2500
B_i	10	12
C_i	10	7

全応力解析結果の有用性も確認される結果となった。

(3) 二次元有効応力解析との比較

ここでは二次元有効応力解析を行うことにより、地盤と構造物の相互作用により液状化に至る過程を数値シミュレーションし、垂水マリニピアと仮屋漁港の被害事例との比較を行った。なお、本論で使用したプログラムは LIQCA⁽⁶⁾ である。このプログラムは、Biot の二層混合体理論に基づき固相の変位と液相の間隙水圧を未知数とした u-p 形式の定式化を行っている。構成式は岡・足立の構成式を用いており、ほとんどのパラメータを通常の室内試験等から直接的に求めることができる。ただし、硬化関数を表現するためのパラメータについては、要素試験等の数値シミュレーションを行いフィッティングを行う必要がある。表-6 は LIQCA に用いた定数の一例を示している。図-14 が埋土層の繰返し三軸試験結果に対してフィッティングを行った結果であり、図-15 が液状化強度曲線のフィッティングを行った結果である。

図-16 は、過剰間隙水圧比のコンター図である。同図において網掛けしたゾーンは、地震応答解析によって過剰間隙水圧比が 0.9 以上に達した領域であり、液状化に至ったと判断される領域である。この図より垂水マリニピアでは矢板背後の埋土層 (U_o) と矢板前後に分布している砂層 (S)、仮屋漁港の構造物背後の埋土層 (U_m) と構造物前後に分布する礫混り砂層 (S_g) で液状化が発生していることがわかる。この結果は、一次元解析結果と比較的良好一致している。

一方、仮屋漁港の重力式岸壁では構造物直下において液状化に至っていない領域が見られる。これは

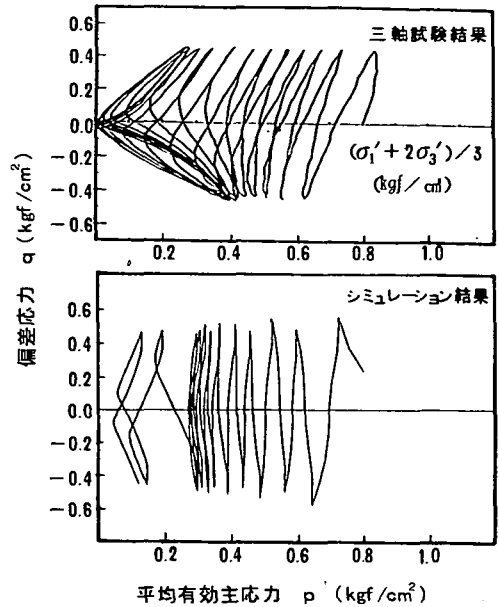


図-14 繰返し三軸試験結果とシミュレーション結果の比較 (有効応力経路: 仮屋漁港)

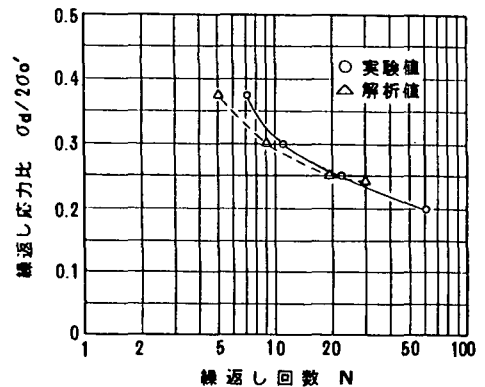
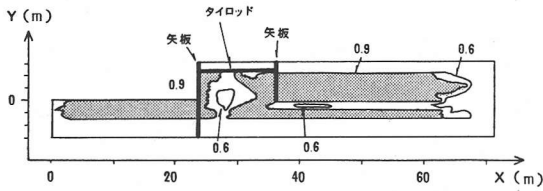
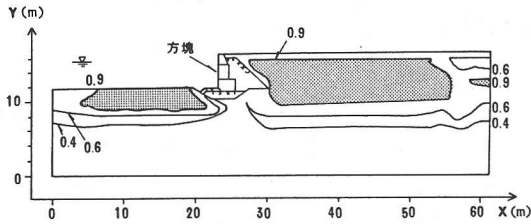


図-15 繰返し三軸試験結果とシミュレーション結果の比較 (液状化強度曲線: 仮屋漁港)

構造物の直下は、有効上載圧が大きく、また初期せん断応力が作用しているため、過剰間隙水圧比が 1.0 まで上昇しなかったためと考えられる。このため、構造物直下では完全に液状化しないものの、構造物の自重による慣性力の発生、埋土層の液状化に伴う構造物背後の土圧の増大そして構造物前面の完全液状化が生じたことにより、図-17 に示すような支持力不足が生じたものと推察される。この結果は、



(a) 垂水マリニピア



(b) 仮屋漁港

図-16 過剰間隙水圧比カウンター

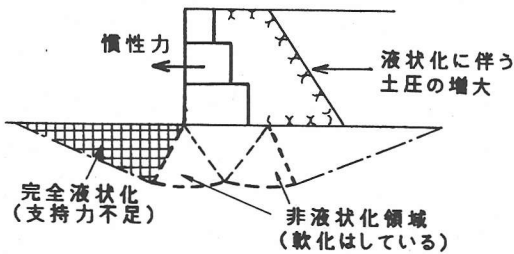
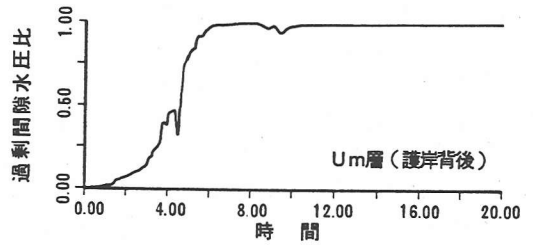


図-17 漁港施設の被害メカニズムの想定

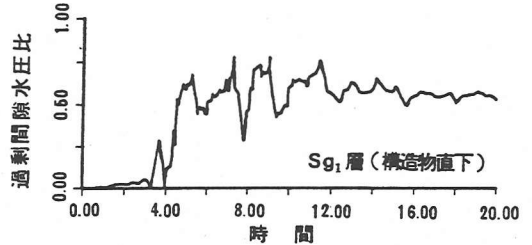
当漁港の構造物が前面に傾斜し、前出ししている被害状況を比較的良く表しているといえる。

また、埋土層中の過剰間隙水圧比が上昇していく過程を示したのが図-18である。この図より地震動の初動より5~6秒程度までに液状化に達している。これはほぼ最大加速度の発生時刻に一致しており、液状化が主要動の比較的早い段階で発生していたことを示している。なお、両漁港施設断面とも解析境界端部(約5m)は境界の影響を受けているため過剰間隙水圧比が0.9以上に達していないが、けい船岸壁近傍の結果には影響ないと考えられる。

これらの結果をまとめると、一次元の条件に割り切ってもある程度液状化の傾向を把握できることがわかった。しかしながら、岸壁などの構造物近傍の安定性については、対象とする構造物の重要度に応じて、二次元解析、検討を実施する必要があるといえる。



(a) 液状化層



(b) 非液状化層

図-18 過剰間隙水圧の時刻歴

4. まとめ

今回の直下型地震によるけい船岸の被害傾向の分析および液状化解析を行った。

被害の特徴としては、軽量の構造形式では地震時慣性力が小さくなり被害への影響は軽微となる傾向がみられるものの、背後の地盤の液状化によっては構造物の自重あるいは剛性が安定性に影響を及ぼすといった相反する問題に対処する必要がある。

液状化解析結果では、現行の基準が阪神大震災クラスの地震に対してもある程度対応可能であったことが確認された。しかしながら礫分の多い埋土層や等価N値が20付近の土層に対してはその液状化強度を修正する必要があることも確認した。また、二次元有効応力解析の有用性も確認し、対象とする構造物の重要度に応じて、実施する必要があることがわかった。

以上の結果を踏まえ、今後は漁港構造物の耐震性向上に関する検討を進めることとしている。

なお、今回の論文をとりまとめるに際しては、兵庫県、神戸市、大阪府、徳島県の協力を得た。謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 大楨正紀, 高木伸雄, 藤井照久, 福田直三: 兵庫県南部地震による漁港施設の被災の特性と液状化解析, 土と基礎, Vol.44, No.2, pp.57-59, 1996.
- 2) 例えば 1993 年釧路沖地震港湾施設被害報告, 港湾技術資料, 766, 1993.
- 3) 山本竜太郎, 大楨正紀, 福田直三, 高橋暁: 釧路地震による漁港のけい船岸の被災概要, 軟弱地盤における地震動増幅シンポジウム, pp.225-232, 1994.
- 4) 山本竜太郎, 大楨正紀, 高橋暁, 福田直三: 釧路沖地震(1993 年)による漁港の被害, 水産工学研究所技報(水産土木), 第 17 号, 1993.
- 5) 社団法人 全国漁港協会: 漁港施設の設計ガイド, pp.200-205, 1995.
- 6) 福田直三, 藤井照久, 山本竜太郎, 大楨正紀: 釧路沖地震による漁港けい船岸液状化評価における地震動の影響について, 軟弱地盤における地震動増幅シンポジウム, pp.219-224, 1994.
- 7) 北海道開発局 開発土木研究所・財団法人 漁港漁村建設技術研究所: 液状化地盤調査検討業務報告書, 1995.
- 8) 鹿島建設株式会社: 平成 7 年度兵庫県南部地被害報告書(第二報), pp.64-72, 1995.
- 9) 平成 7 年度港湾施設耐震構造検討委員会資料, 1995.
- 10) 井合進: ケーソン式岸壁の被害の特徴, 土木学会誌, Vol.80-7, pp.46-49, 1995.
- 11) Inagaki, H., Iai, S., Sugano, T., Yamazaki, H. and Inatomi, T.: Performance of caisson type quay wall at kobe port, *Special Issue of Soils and Foundations*, pp.119-136, 1996.
- 12) 井合進, 松永康男: 液状化予測におけるせん断応力比の簡易算定法の検討, 第 25 回土質工学研究発表会, pp.773-776, 1990.
- 13) 神戸市開発局: ポートアイランド地震記録.
- 14) Ohno: Revision of attenuation formula considering the effects of fault size to evaluate strong motion spectra in near field, *Tectonophysics*, 218, pp69-81, 1993.
- 15) 東畑郁男, 吉田望: YUSAYUSA2, SIMMDL-2, 理論と使用法, 1991.
- 16) Oka, F., Yashima, A., Shibata, T., Kato, M. and Uzuoka, R.: FEM-FDM coupled liquefaction analysis of a porous soil using an elasto-plastic model. *Applied Scientific Research* 52, pp.209-245, 1994.

(1996. 7. 1 受付)

DAMAGE OF FISHING PORTS FACILITIES AND LIQUEFACTION ANALYSIS DURING THE GREAT HANSHIN EARTHQUAKE.

Seiki OHMAKI, Nobuo TAKAGI, Teruhisa FUJII and Yoshitaka WAKATUKI

The Great Hanshin earthquake occurred on January 17th, 1995. Structures of 27 fishing ports were damaged. This paper presents the results of investigation of damages of the ports and liquefaction analysis of Kariya fishing port and Tarumi sea pasture as a representative. Damage characteristics were examined as the damage pattern of structure's type, direction dependence of damage compared with the main earthquake motion. Comparative study of liquefaction between one dimensional and two dimensional analysis was carried out.