

2.6 港湾施設

2.6.1 兵庫県南部地震による港湾施設の被害の検討

(1) 兵庫県南部地震による被害調査

平成7年兵庫県南部地震では、兵庫県をはじめとして大阪府、徳島県の港湾施設に被害が生じた。特に神戸港は大半の港湾施設が被災し、地震直後の港湾機能はほとんどが麻痺状態に陥った。岸壁、護岸の被災形態に関しては、港湾施設の設計震度、構造形式により被害の程度に明確な相違が見られたようである。

港湾施設の設計震度に着目して被害程度を検討すると、設計震度の小さな施設は大半のものが被害を受けた。例えば、神戸港の岸壁の9割はケーソン式岸壁であるが、設計震度 $k_h=0.1\sim 0.18$ が用いられたようである。¹⁾

一方、神戸港の中で最大の設計震度を持つ耐震強化岸壁である摩耶埠頭地区の3バースはほとんど被害がなかった。この3バースは他の岸壁に比べ、設計震度を大きく設定することで耐震性を高めた耐震強化岸壁である。南北方向の法線で既存セル岸壁の前面に前だしし、-10m岸壁は栈橋構造、-12m岸壁はケーソン式で築造された。基礎地盤が良好なので浅い置き換え基礎を使っている場所で、既存岸壁の直前にあるため土圧の作用が小さいこと、地震動の軌跡から東西方向の地震力が小さいという好条件が重なったことから、この耐震強化岸壁の被害は軽微であった。²⁾

ここで、耐震強化岸壁とは、震災直後の緊急物資輸送等の確保、経済社会活動の維持等を考慮し、特に通常の岸壁より耐震性を強化した岸壁で、設計震度 $k_h=0.25$ で設計がなされている岸壁をいう。また、構造形式についてみると、被災の程度は栈橋式等の軽い構造物に比べ、ケーソン式、ブロック式等の重量の重い構造物の被害が大きかった。

そこで、神戸港の岸壁の9割を占めるケーソン式岸壁の被害状況に関して検討する。

ケーソン式岸壁とは、鉄筋コンクリート製のケーソンを海底地盤上に設置し、背後の土圧に対してはケーソンの底面の摩擦力で抵抗する構造形式である。したがって、一定以上の水平外力が作用した場合、ケーソン本体が滑動することにより入力エネルギーを消散させる免震構造であり、ケーソン本体が損傷を受けることはほとんどない。また、上下方向の荷重に対しては、海底地盤が十分な支持力を有していることが必要である。海底地盤が十分な支持力を有していない場合、海底は厚い軟弱地盤の粘土であるため地盤改良が必要となり、埋立に用いられたマサ土による置換工法が主として用いられた。

既に説明したように、神戸港はケーソンを用いた重力式構造であるため、被害形態はほとんどの岸壁と同様である。

例えば、ポートアイランドのコンテナバース等に見られる大型岸壁に関してその被災形態をみると、ケーソンが海側に最大5m程度滑動するとともに、最大2m程度の沈下を起こしている。その結果として、ケーソンが前傾するとともに、岸壁背後のエプロンヤード等が最大3m程度陥没した。

しかしながら、ケーソンが滑動したにも関わらず、岸壁法線自体は概ね直線を保ち、ケーソン本体にもひび割れ発生などの損傷は見られなかったようである。

ポートアイランド及び六甲ライナーに建設されたケーソン式岸壁の地震後に行った詳細な残留変位に関する測量結果では、大まかには南北方向に卓越する傾向が見られるようである。一方、神戸港で観測された強震記録の最大加速度成分の方向と、残留変位の卓越方向は、概ね整合性があることが確認されている。³⁾

これより、地震動によるケーソン本体に作用する慣性力が残留変形量に与えた影響は大きいものと推定される。

(2) 被害原因の検討

兵庫県南部地震による港湾施設の被害原因を検討するために詳細な現地調査が行われ、岸壁の被災状況の整理、岸壁の変形調査と傾向の整理がなされている。この調査結果に基づいて、岸壁の被災メカニズムを検討するために大型水中振動台を用いた模型振動実験が行われた。

この実験では、ケーソン式岸壁の水平及び上下方向の変形量に与えた影響度を検討するために、埋立地盤と置き換え地盤の締め固め程度や作製方法を変化させて、過剰間隙水圧の上昇程度を制御させた種々模型振動実験が実施された。この模型振動実験と平行して、数値解析的な検討が有効応力法を用いた種々の条件下での動的解析から検討がなされた。

これらの実験的検討と解析的検討の両面の結果から、神戸港のケーソン式岸壁の被災原因は以下のようにとりまとめられている。⁴⁾

- ① ケーソン式岸壁は、海側に最大5 m程度、平均3 m程度水平移動し、沈下及び海側への傾斜を見たが、これは設計で想定した以上の地震時慣性力と土圧が作用したことに加え、ケーソン背後の埋立地盤及びケーソン直下の置き換え土層の過剰間隙水圧が上昇し、これらのせん断抵抗が低下したことによって生じたと推定される。
- ② 埋立地盤、置き換え土層におけるせん断抵抗の低下の影響は、これらの地盤、土層全体に著しい変形をもたらす形で現れ、ケーソン式岸壁の変形を地震動のみの影響による変形の2倍程度に大きくしたものと推定される。
- ③ 埋立地盤、置き換え土層におけるせん断抵抗の低下がケーソン式岸壁変形の増加に与えた影響の割合は、おおよそ1：2と推定される。

以上より、埋立地盤及び置き換え土層の地震時による過剰間隙水圧の上昇に伴い、せん断抵抗の低下がケーソン式岸壁の変形に大きな影響を与えたことがわかる。

2.6.2 レベル2の地震時の設計方法

港湾施設の設計は、阪神・淡路大震災以前では「港湾の施設の技術上の基準・同解説」(平成元年2月・日本港湾協会)により震度法にしたがって設計を行っている。また、震災後に通達(港湾の施設の耐震設計に係わる当面の措置について：1995.11.17)が出され、直下型地震を対象とした設計法(レベル2地震動対応の手法)が示された。

第2次提言では、レベル2地震動に対して、港湾施設に以下に示す事項を要求している。

すなわち、

- ① 重要施設(耐震強化岸壁)は、初期の機能を維持する。
- ② 周辺施設に重大な被害を生じさせない。

ここでは、第2次提言を受けた設計法はどうあるべきかについて検討を行う。損傷過程に立ち入った耐震性能の評価を行う場合には、周辺地盤との動的相互作用を考慮し、変形照査が可能な解析手法の適用が必要となる。この場合の解析手法は技術的にも高度となるため、これらを通常の設計実務に適用するに当たっての課題について検討を行う。また、港湾構造物の安定に関しては、液状化現象を考慮することが重要となるため、ここでは、併せて液状化についての検討も行う。

(1) 設計法の比較

i) 現行設計法のまとめ

港湾施設の設計は「港湾の施設の技術上の基準・同解説」により行われてきた。

震災後(第2次提言前)に湾技143号(平成7年11月17日)の通達(港湾の施設の耐震設計に係わる当面の措置について)により、重要な施設に対する設計震度の重要度係数A級(1.2)の採用と直下型地震を対象とした耐震強化岸壁の耐震設計が追加された。以下にその概要を示す。

a. 港湾の施設の技術上の基準・同解説

12.1 一般

港湾の施設が適切な耐震性を有するよう、その設計においては、地震の影響を考慮するものとする。

【解説】の抜粋

- (1) 港湾の施設は、本章に示される方法に従って耐震設計を行わなければならない。
- (2) 対象施設の耐震性を検討する場合、以下の事項が考慮されなければならない。
 - (a) 対象とする地域の地震活動度
 - (b) 建設地点の地盤条件
 - (c) 施設の重要度(社会性、経済性を含む総合的な判断に基づくもの)
- (3) 耐震性に関する検討項目として、次のものがある。
 - (a) 構造物全体の安定性
 - (b) 基礎地盤の滑りに対する安定性
 - (c) 液状化現象が基礎地盤の安定性及び上部構造物に及ぼす影響
 - (d) 構造物の部材応力
 - (e) 機能上から見た構造物各部、あるいは隣接する構造物や地盤との相対変位

12.2 震度法

固有振動周期が比較的短く減衰性の大きい構造物に作用する地震力は、震度法によって算定するものとし、本編12.3設計震度に規定する設計震度を用いて、次のいずれかのうちで構造物に対

し不利な方を、その重心に作用させるものとする。

(1) 地震力 = 自重 × 設計震度

(2) 地震力 = (自重 + 載荷重) × 設計震度

【解説】の抜粋

- ・ 防波堤や岸壁のような港湾構造物に対する耐震設計においては、一般の土木構造物、建築構造物と同様に震度法が適用される。すなわち、地震動の卓越振動周期に比べて、これらの構造物の固有振動周期は短いと見なせるので、地震時にこれらの構造物はあたかも堅固な台上の剛体のように挙動すると考えられる。
- ・ 震度法によれば、地震時に生じる最大地震力が、あたかも静的な力として常に作用するものとして設計するわけであるから、このような設計法と実際に起こっている現象との差異をよく考慮に入れて設計を行わなければならない。この点を考慮して、地震時には異常時荷重に対する材料の安全率、許容応力度などを、常時と異なる値にとっている。
- ・ 構造物の安定に及ぼす地震動の鉛直成分の影響は、構造様式や水平成分ともかかわり合っており複雑である。したがって、鉛直震度を用いて鉛直方向の地震力を取り入れるのが、より厳密な検討方法であろうが、実際の耐震設計に際しては鉛直震度は考慮されていない。その理由は、計算の煩雑さを避けるためであり、また、観測結果によると震央付近を除けば鉛直成分は水平成分に比べてあまり大きくない事が示されているためである。さらに、水平震度は、これまでの経験に基づき、鉛直方向を含めた地震動の影響をも含めて水平震度として表していると考えられるので、一般的な港湾構造物に対しては水平震度のみで設計しても特に問題はないと考えられる。

12.3 設計震度

設計震度は、地域別、地盤種別、構造物の重要度を考慮して、次のように定めることを原則とする。

設計震度 = 地域別震度 × 地盤種別係数 × 重要度係数

ただし、設計震度は、構造物上特に必要な場合を除き、水平震度のみを考慮するものとする。

地域別震度は、表-12.1の値を標準とする。表-12.1に規定のない区域の地域別震度は、当該地域の地震活動及び表-12.1に規定のある付近の地域別震度を考慮して適切に定めるものとする。

表-12.1 地域別震度

地区名	地域別震度
第一地区	0.15
第二地区	0.10
第三地区	0.05

地盤種別係数は、表-12.2の値を標準とする。

表-12.2 地盤種別係数

地盤種別	第一種地盤	第二種地盤	第三種地盤
係数	0.8	1.0	1.2

地盤種別は第四紀層（沖積層，洪積層）の厚さ，その他を考慮して表-12.3のように定めるものとする。

表-12.3 地盤種別

四紀層の厚さ	砂 礫 層	一般の砂質土, 粘性土地盤	軟弱地盤
5 m以下	第一種	第一種	第二種
5 ~ 25m	第一種	第二種	第三種
25m以上	第二種	第三種	第三種

重要度係数は，構造物の重要度に応じて表-12.4の値を標準として定めるものとする。

表-12.4 重要度係数

構造物の種別	構造物の性格	重要度係数
特 定	A級構造物の性格のうち①～③の程度が著しいもの	1.5
A 級	① 構造物が被害を受けた場合，多くの人命・財産の損失を与える恐れのあるもの。 ② 震災復興に重要な役割を果たすもの。 ③ 有害物又は危険物を取扱う構造物で，震害を受けた場合に人命又は財産に重大な損失を与えるおそれのあるもの。 ④ 構造物が震害を受けた場合，関係地域の経済・社会活動に重大な影響を及ぼすもの。 ⑤ 構造物が震害を受けた場合，復旧にかなりの困難が予想されるもの。	1.2
B 級	特定，A級及びC級以外のもの	1.0
C 級	特定及びA級以外の小規模な構造物で容易に復旧が可能なもの。	0.5

【解説】の抜粋

- (1) 構造物の設計震度を決定する因子は，地震発生 of 地域的危険度，地盤の良否，構造物の動的特性，構造物の重要性があげられるが，港湾構造物の大多数は固有振動周期が比較的短く，かつ減衰性が大きいいため，地震動による動的応答効果を考慮しなくてもよいと考えられ，一般には構造物の動的特性を考慮せずに本文で定める設計震度を用いて本編12.2 震度法で述べた方法により耐震設計を行う。
- (2) 地震の活動度，地震動の特性，地盤における地震動の増幅等の調査を行って設計震度を精度よく定めることができる場合には，その値を用いてよい。たとえば，建設地点の地震資料及び強震記録に基づいて設計に用いる入力震度を設定し，地盤の地震応答解析を行う場合，又は，構造物の地震動による動的応答特性を考慮するために構造物の地震応答解析を行う場合には，こうした解析結果に基づいて設計震度を定めることができる。
- (3) 本文で求まる設計震度は，多数の建設実績や過去の地震被災経験を踏まえた工学的判断に基づいて定められており，地盤の最大加速度の重力加速度に対する比をそのまま設計震度と見なすことは出来ない。地盤の最大加速度から設計震度を定める場合には，設計震度と地盤の最大加速度の関係の過去の研究成果をふまえて十分検討する必要がある。

12.5 地震応答解析

港湾の施設のうち，特に重要なもの又は過去に類例のないものについては，本編12.2 震度法

又は本編12.4 変位法と併せて、地震応答解析に基づき、その耐震性を検討することが望ましい。

【解説】の抜粋

(1) 一般

過去に類例の少ない場合や、対象構造物の需要度が特に高い場合には、前章までに述べた耐震設計法と併せて、地震応答解析によって構造物の地震時の挙動をより正確に把握し、その耐震性を検討することが望ましい。

(2) 地震動の加速度

(a) 耐震設計に用いる地盤の加速度波形及びその最大振幅は、想定する地震の規模、震央距離、地盤の動的応答特性等を考慮して選定することが望ましい。

(b) 地震波の振幅の周期等の特性は、地震のマグニチュード、震源からの距離、伝ば経路の性質、地表層の性質等によって変化する。したがって、動的解析により耐震設計を行うとき、使用する加速度波形の選定には、これらの要素を考慮する必要がある。基本的には実測記録をもとに選定するべきである。

b) 港湾の施設の耐震設計に関わる当面の措置について

局長通達（抜粋）

1. 港湾全体の耐震性の強化

港湾全体の耐震性を強化するため、港湾施設の構造形式の選定に当たっては、地震応答の異なる構造形式を組み合わせるなど、構造様式の多様化に配慮する。

2. 耐震設計基準の厳正な適用

港湾施設の設計震度の設定に用いる重要度係数は、構造物の重要度に応じて、個々の施設毎に設定してきたところであるが、今後とも耐震基準を厳正に適用し、所要の耐震性の確保を図る。特に、コンテナターミナルの岸壁などの重要な施設については重要度係数A級を原則とする。

3. 耐震強化岸壁の設計

震災直後の緊急物資輸送等の確保、経済社会活動の維持等を考慮し、特に通常の岸壁より耐震性を強化した「耐震強化岸壁」を設計する際は、設計震度の設定に当り、重要度係数は「特定」を採用する。

ただし、「耐震強化岸壁」について兵庫県南部地震に相当するような直下型地震が想定される場合には、これを設計対象地震とする。設計震度は、地盤の地震応答解析等を踏まえて設定し、震度法により設計を行う。

4. 臨港交通施設の耐震設計

特に重要と考えられる道路橋、高架の道路に関わる耐震設計は、当面、原則として「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に関わる仕様」（平成7年2月建設省道路局）を準用する。

鉄道の高架橋等に係わる耐震設計は、当面、原則として「阪神・淡路大震災に伴う鉄道復旧構造物の設計に関する特別仕様」（平成7年4月運輸省鉄道局）を準用する。

臨港交通施設のうち、水際の橋脚等の基礎については、前面の護岸の挙動や構造を考慮した設計を行うものとする。

課長通達（抜粋）

1. 耐震設計基準の厳正な適用

設計震度の設定にあたり、重要な施設については、重要度係数A級の採用を原則とする。特に、以下の施設については重要度係数A級を採用するものとする。

- ・ 計画水深－7.5m以深のコンテナ岸壁
- ・ 計画水深－7.5m以深のフェリー岸壁
- ・ 親水護岸等人が多く集まる施設
- ・ 重大な二次災害を引き起こす可能性のある施設

2. 直下型地震を対象とした耐震強化岸壁の設計

耐震強化岸壁の設計において、兵庫県南部地震に相当するような直下型地震が想定される場合には、以下のように耐震性を検討するものとする。

なお、直下型地震を想定しない場合の耐震強化岸壁の耐震性検討は、従来どおりである。

(1) 耐震設計の目標

設計対象地震に対し、岸壁としての機能を確保することを目標とする。

(2) 設計対象地震

兵庫県南部地震に相当するような直下型地震を設計対象地震とする。解析等にあたっては兵庫県南部地震において観測された波形を用いることができる。

(3) 設計法

震度法によって設計を行う。設計震度は、地盤の地震応答解析の解析結果等を踏まえて設定する。

(4) 変形状態の検討

構造物の性格等から地震時の変形状態を検討する場合は、既往の被害事例に基づく解析方法、地震応答解析、模型振動実験などを用いることができる。

(5) 液状化の検討

液状化の予測・判定に使用する地震動は上記2. (2)と同じ地震波形を用いることができる。

3. 耐震補強について

岸壁等の既存施設の耐震補強工法及び橋梁、高架橋の基礎構造の耐震補強工法については、実務の参考となる資料等を平成7年度末を目途に作成する予定である。

1. 設計地震波

- ・ 原則として、1995年兵庫県南部地震で神戸市がポートアイランドで観測した実測波形を用いる。
- ・ この波形は、最大加速度の水平成分679Gal、鉛直成分187Galである。
- ・ 活断層と岸壁法線の方向性は考慮しない。

2. 設計法

- ・ 震度法による。水平震度のみとし、鉛直震度は考慮しない。
- ・ 設計震度は、地盤の地震応答解析の解析結果等を踏まえて設定する。
- ・ 一般的に、水平震度の算定では一次元等価線形応答解析を用い、設計地震波を工学基盤に入力し、地表面の最大加速度を算出し、加速度から震度への換算式によって作用震度を求める。
- ・ 水平震度の設定に際して、上述の算定震度が0.25を下回る場合は0.25を設計震度とする。
- ・ 加速度から震度を求める換算式として、以下の式を使うことが出来る。

$$K_h = \frac{\alpha}{g} \quad \alpha \leq 0.2g$$

$$K_h = \frac{1}{3} \left(\frac{\alpha}{g} \right)^{1/3} \quad \alpha > 0.2g$$

ここに、 K_h ：設計水平震度

α ：地盤加速度(Gal)

g ：重力加速度(Gal)

3. 変形状態の検討

構造物の性格等から地震時の変形状態を検討する場合は、既往の被害事例に基づく解析方法、地震応答解析、模型振動実験などを用いることが出来る。

4. 液状化の検討


- ・ 岸壁の基礎地盤及び背後地盤ともに、設計対象地震に対して液状化を発生させないように、必要があれば液状化対策等を施工する。
- ・ 液状化の検討には、上記設計地震波によって応答計算から液状化の判定に必要な各土層のせん断応力を求める。
- ・ 液状化の予測・判定法は、基本的に従来どおりであるが、粒度・N値法における粒度範囲の検討及び液状化しないとする土層の等価N値の上限の設定等については、1993年釧路沖地震における液状化対策の効果の実績、1995年兵庫県南部地震の液状化発生の実状等を参考にする。

5. その他

直下型地震を想定しない場合の耐震強化岸壁の設計法は、従来どおりである。(下表参照)

直下型地震を想定しない場合の岸壁の耐震設計

設計震度		75年期待値に相当する地震	数百年に1回程度の地震	発生確率は低いが一層に大規模な地震
対象岸壁		通常岸壁	耐震強化岸壁	耐震強化岸壁
設計地震動 (基盤最大加速度)		八戸，大船渡型 (地域別期待加速度)	八戸，大船渡型 (既往最大地震など 特定地震の加速度)	神戸型 (直下型地震，ポ ートアイランドでの 観測値)
設計法	震度法	○	○	○
	(水平震度)	$K_h = \text{地域別震度} \times \text{地盤種別係数} \times \text{重要度係数}$	$K_h = \text{地域別震度} \times \text{地盤種別係数} \times \text{重要度係数}(1.5)$	$K_h = 0.25 \text{ 以上}$
	(鉛直震度)	$(K_v = 0)$	$(K_v = 0)$	$(K_v = 0)$
変形照査		×	×	必要に応じ行う
液化化の検討		○	○	○

 は今回追加する事項

ii) 第2次提言のまとめ

a. 入力地震動

第2次提言では，レベル2地震動の設定の考えとして以下のように記述している。

- ① 地域毎に活断層を同定し，その震源メカニズムに基づいて地震動を設定することを基本
- ② 上記①が困難の場合には「兵庫県南部地震」の地震動記録をもとに標準的な地震動を作成したものを適用
- ③ 関東地震のように陸地に近いプレート境界に発生する巨大地震の地震動特性に関する研究の推進

b. 耐震性能

耐震性能の考えとして，以下のように記述している。

- ① 重要度の高い区間に対して，重点的に耐震性の強化を図ることを基本とする。
- ② レベル1の地震動に対して，重要度の高いものについては機能維持と健全性を保持する。その他の一般の区間については，周辺に悪影響を及ぼさない程度の損傷は許容するが，短期間に復旧可能とし，全体的な機能が早期に回復できることを目標とする。
- ③ レベル2の地震動に対して，重要度の高い区間にあるものについてはそれらが支持する構造物や周辺の諸施設に重大な被害を生じさせないことを目標とする。

被災地への緊急輸送路の確保を目的とする重要施設（例えば耐震性強化岸壁等）は、レベル2地震動に対して、その初期の機能を維持することを耐震性能の目標とする。その他の一般の区間にあるものについては、周辺に2次災害等の悪影響を及ぼさないことを目的とする。

- ④ 岸壁の設計では、重要度に応じた所定の性能を保持できるレベルに変形・変位が収まるように設計することが肝心である。（④は解説）

c. 液状化

液状化に関する検討課題として以下の記述がなされている。

- ① 沖積層または埋立土層で礫を多く含む土についても液状化判定の対象とするなどの改善を図るべきである。
- ② 高密度、低繰り返し回数のもとでの液状化強度を適切に評価できるよう基準等を改訂する必要がある。
- ③ 均等係数の高い土の静的及び動的変形強度特性についての研究の進展が望まれる。

iii) 現行設計法と第2次提言の比較

第2次提言で述べられている項目に関して、第2次提言、港湾基準、通達の比較を行う。比較した結果を表-2.6.2.1に示す。

(2) 第2次提言を受けた設計法の考え方と課題

第2次提言では、レベル2地震動に対して構造物が損傷を受けることを考慮し、その損傷過程にまで立ち入って、構造物の耐震性能を照査するとしている。

現行設計法では、震度法により変形を考慮しない設計法を用いているが、再現期間の極めて長いレベル2地震動に対しては、損傷過程に立ち立った耐震性能の評価が求められていることに対して、レベル1地震動と同じく弾性範囲内の安全性能確保水準を適用することは合理的でない。

第2次提言では、レベル2地震動に対して具体的には、

- ① 重要施設（耐震強化岸壁）は、初期の機能を維持する。
- ② 周辺施設に重大な被害を生じさせない。

としている。ここでは、まず、被害調査結果より港湾構造物の被害形態を把握し、また、港湾技術研究所で実施された模型振動実験、有効応力解析の結果を踏まえ、これらの考察からどのような設計法が望ましいかの検討を行う。

なお、岸壁には種々の形式があるが、ここでは、特に被害の集中しているケーソン岸壁について検討を行う。

表-2.6.2.1 第2次提言と現行設計法の比較

	第2次提言	港湾基準	通 達
入力地震動	<ul style="list-style-type: none"> ・地域毎に活断層を固定し震源メカニズムに基づいて設定 ・兵庫県南部地震記録をもとに標準的地震動を作成 ・プレート境界に発生する巨大地震の地震動特性に関する研究 	設計震度規定の中で「地震の活動度、地震動の特性、地震における地震動の増幅度等の調査により設計震度を精度よく定めることができる場合にはその他を用いてもよい。」という設計方針がある	<ul style="list-style-type: none"> ・兵庫県南部地震のポートアイランドで観測した実測波形を用いる。 ・最大加速度の水平成分679Gal, 鉛直成分187Gal. ・活断層と岸壁法線の方向性は考慮しない。
保有すべき耐震性能	レベル1, レベル2	規定なし	耐震強化岸壁ではレベル2に対応
設計法	損傷過程にまで立ち入って耐震性能を照査	震度法	震度法
変 形	原位置観測や実験により評価方法や耐震性向上方法について研究の促進	な し	地震時の変形状態を検討する場合は、既往の被害事例に基づく解析方法、地震応答解析、模型振動実験などを用いる。
測方流動	メカニズムと流動量の予測法に関する研究を促進	な し	水際の橋脚等の基礎については、前面の護岸の挙動や構造を考慮して設計
液 状 化	<ul style="list-style-type: none"> ・沖積層又は埋立土層で礫を多く含む土についても液状化判定の対象 ・高密度、低繰り返し回数のもとでの液状化強度の適切な評価 ・均等係数の高い土の静的及び動的変形強度特性についての研究の進展 	判定方法 ・ステップ1 粒度によって液状化する可能性のある土層を含む地盤かどうかの判定を行う。可能性がなければこのステップで終了する。 ・ステップ2 各土層の等価N値と等価加速度により判定を行う。	<ul style="list-style-type: none"> ・設計対象地震に対し、液状化を発生させないように必要があれば液状化対策を行う。 ・上記の設計地震波により応答計算から液状化の判定に必要な各土層のせん断応力を求める。 ・液状化の予測・判定法は基本的には従来どおり。 ・粒度・N値法における粒度範囲の検討及び液状化しないとする土層の等価N値の上限の設定は、釧路沖地震の液状化対策の効果の実績、兵庫県南部地震の液状化発生の実状等を参考にする。

i) 被害調査, 実験及び解析からの考察

a. 被害調査結果

ケーソン岸壁の被害は、ケーソン基礎部分の置換砂の影響が大きく、上部ら⁵⁾によれば、図-2.6.2.1に示すように岸壁のはらみ出し量、天端沈下量及び被災変形率（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）は置換砂の層厚が大きいほど被害は大きい。

また、岸壁の被害は、無被害か破壊かという二者択一的なものではなく、地震外力の増加とともに変形量が連続的に増加していく。すなわち、上部ら⁵⁾によれば、ケーソン岸壁の被災変形量（岸壁のはらみ出し量、天端沈下量、被災変形率）を置換砂の層厚で除した値は、図-2.6.2.2に示すように、危険度（作用震度と破壊震度の比）と明瞭な相関関係がある。

これらのことから、ケーソン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。ここで、破壊震度とは、安定計算で安全率が1となるときの震度である。

したがって、ケーソン岸壁の設計では置換砂層の厚さを考慮でき、かつ、岸壁の変形を取り込んだ手法の採用が望まれる。

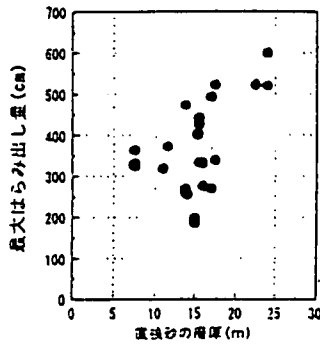
b. 振動台実験

震災後の現地調査のみでは、ケーソン背面地盤、あるいは、基礎置換砂内部の地盤変状を把握することが出来ない。このため、菅野ら⁶⁾は、1/17縮尺模型を用いて水中振動台実験を行った。同実験より以下のことが判明している。

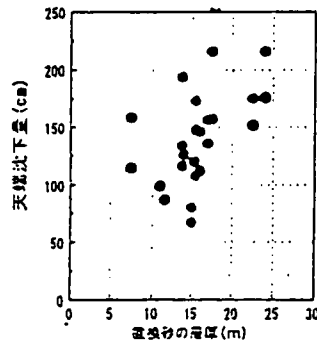
- ① ケーソン背後の埋立地盤では、過剰間隙水圧比が0.9程度まで上がり、液状化の発生が認められた。
- ② ケーソン函体の移動、沈下は、入力主要動終了時にほぼ最大値になっている。
- ③ ケーソン函体とマウンド間の相対水平変位は小さい。
- ④ 置換土層の過剰間隙水圧の上昇により、せん断剛性が低下し、マウンドが水平方向に移動した。
- ⑤ ケーソン沈下は、置換土層の地震動による軟化に伴うせん断変形が支配的であった。

この実験によるケーソンの移動量、背後埋立地盤の陥没等は、現地の被災調査結果と概ね一致している。

最大はらみ出し量と置換砂の層厚



天端沈下量と置換砂の層厚



被災変形率と置換砂の層厚

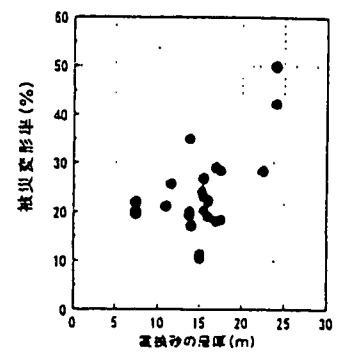
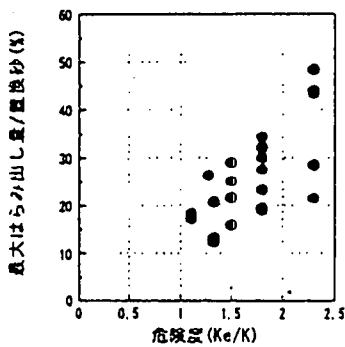
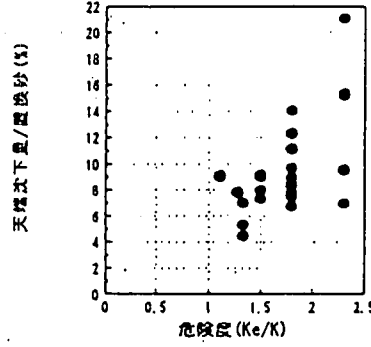


図-2.6.2.1 各被災変形量と置換砂の層厚の関係⁵⁾

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

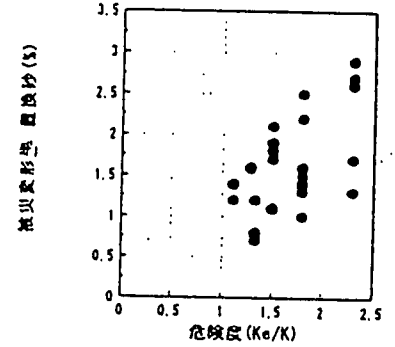


図-2.6.2.2 (各被災変形量/置換砂の層厚)と危険度の関係⁵⁾

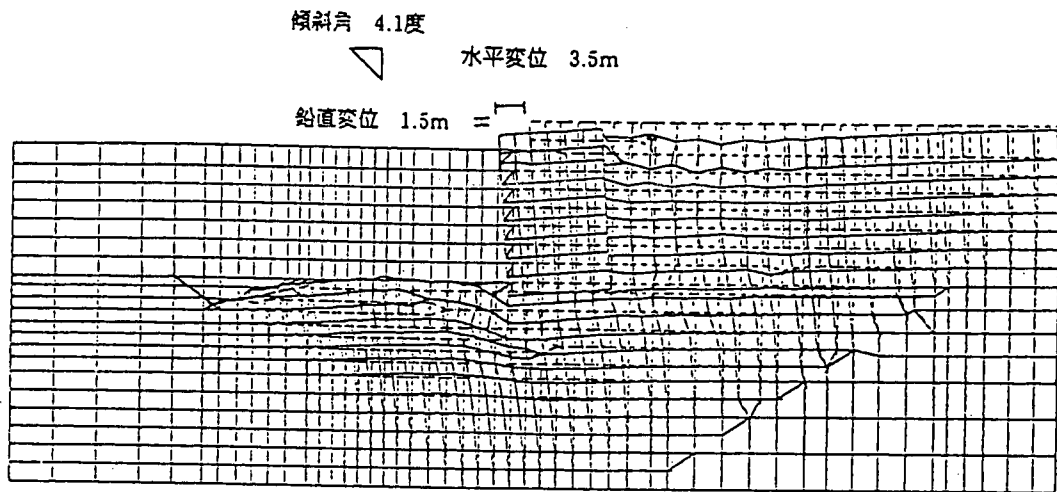
c. 2次元有効応力解析

ケーソン岸壁の被災原因を検討するため、井合ら⁷⁾は2次元有効応力解析を実施している。土の力学的モデルとしては、ひずみ空間での塑性論に基づく多重せん断機構の解析モデルを用いている。有効応力に解析より以下のことが判明している。

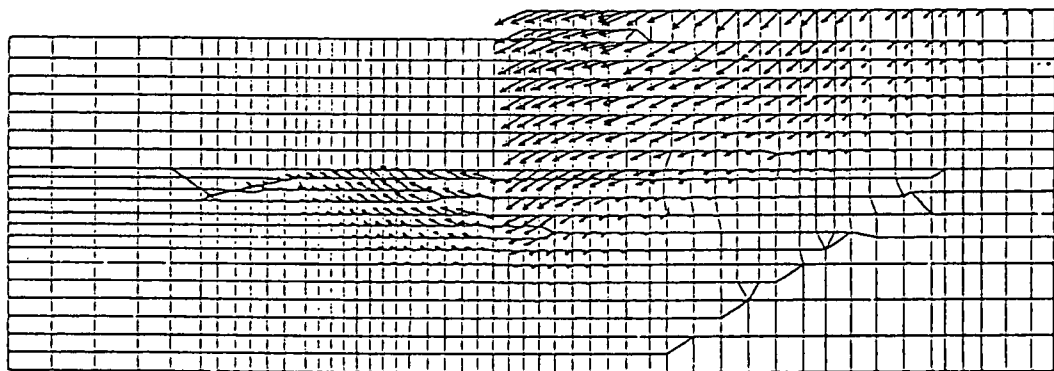
- ① ケーソンが捨石マウンドにめり込み、置換砂、背面埋立土が変形する形態は、被害調査結果を再現している(図-2.6.2.3参照)。この変形は、ケーソンが捨石マウンドとの境界で直線的に滑る挙動とは異なる。
- ② 置換砂のせん断抵抗が低下しない場合は、捨石マウンドとその近傍の置換砂の局所的な変形であるが、せん断抵抗が低下した場合には、置換砂全体の変形となる。
- ③ 変位の時間経過は振動実験と同様の傾向を示し、変位は時間とともに変化し、20秒間の振動後に最大値を示す。
- ④ 基礎置換砂、背面埋立土では過剰間隙水圧の上昇が見られ、せん断抵抗の低下が起こった。この原因により変形が大きくなり、その量は地震動のみの影響によるものより2倍程度大きく

なっている。

- ⑤ 置換砂部分のケーソンからの荷重分散領域では、過剰間隙水圧比が概ね0.8以下であり、特に、ケーソンからの偏心荷重の大きいケーソン海側斜め下方の広い範囲では、0.5以下である。また、埋立土のケーソン背後の約30mの区間においては過剰間隙水圧比が0.5~0.8程度である。
- ⑥ 基礎置換砂、背面埋立土における過剰間隙水圧の上昇が岸壁の変形の増加に与えた影響は、2:1であると考えられる。



(a) 変形メッシュ図



(b) 変形ベクトル図

図-2.6.2.3 地震後の残留変形⁷⁾

ii) 設計法の考え方

a. 現行設計法

港湾構造物は、固有振動周期が比較的短く、減衰性の大きい構造物であるため、震度法により設計されている。すなわち、地震動の卓越振動周期に比べ、これらの構造物の固有振動周期は短いと見なせるので、地震時にこれらの構造物はあたかも堅固な台上の剛体のように挙動すると考

えられるからである。

構造物全体系の安定検討では、慣性力、土圧等の外力を作用させ、抵抗力との比較により検討を行い、また、躯体断面の検討は、外力から算定される断面力で許容応力度法により検討を行っている。

b. 損傷モードから見た望ましい設計法の考え方と課題

ケーソン岸壁の地震時安定性に関しては、被害事例で見てきたように、構造物全体系の滑動、破壊の事例が多い。これらの損傷原因は、置換砂及び背面埋立土層の影響によるものが大きい。変形状態を見ると、ケーソンがマウンドにめり込み、基礎置換砂の変形も大きい。この挙動は、現行設計法での単純なケーソンとマウンドとの境界面における滑動及び地盤支持力の照査では表現できない。これを震度法による設計法（極限釣合法安定解析）の中に取り入れるためには、過剰間隙水圧の上昇度に依存する置換砂層のせん断抵抗力低下の評価をどのように扱うかである。

また、全体変形の影響度は、

過大な慣性力と土圧による影響	約50%
埋立地盤のせん断抵抗の低下による影響	約20%
置換土層のせん断抵抗の低下による影響	約30%

という報告⁸⁾もあることから、ケーソン背面に作用する動土圧の評価も重要な課題である。

c. 解析手法

震度法では、レベル2の設計地震動を用いて設計を行う場合、一つの考え方として通達で出されている手法（直下型地震を対象とした耐震強化岸壁の設計法）がある。この手法で用いる設計地震動は、ポートアイランドで観測された実測波形である。一方、第2次提言では、レベル2地震動の考え方の中で、「活断層の情報から直接地震動を定めることが出来ない場合には、兵庫県南部地震等の断層近傍の強震記録を基に、震源断層の近傍で予想される標準的な地震動を作成してレベル2地震動の基礎とする。」としているため、この手法はレベル2対応と考えられる。

しかしながら、この手法は地盤応答解析により求まる最大応答加速度をある換算式により震度に換算したあと、極限釣合法安定解析を行うため、損傷過程に立ち入った手法とはなっていない。

一方、変形を考慮した設計法は、現行設計法では、土圧、慣性力等の外力を作用させ安定計算を行うのみで、周辺地盤との相互作用を考慮していない。しかしながら、ケーソン岸壁の地震時挙動は、上述したように構造物周辺地盤の応答に大きく影響される。

地震時の変形を考慮するためには、周辺地盤との相互作用を考慮する必要がある。この構造物と地盤の動的相互作用は、構造物が大きくなるほど、また、周辺の地盤が軟らかいほどその効果は大きくなるため、設計においてこの考えを導入することが望まれる。

構造物と地盤の動的相互作用の効果を考慮した解析手法としては、

- ① 2次元有効応力法
- ② 全応力法
- ③ 個別要素法

等が考えられる。

上記の手法による解析実施例及び解析手法を表-2.6.2.2に示す。

表-2.6.2.2 解析実施例及び解析手法

タイトル／著者	内 容
有効応力解析によるケーソン式岸壁被災原因分析 ⁹⁾ 一井康二，井合 進，森田年一 (運輸省港湾技術研究所)	兵庫県南部地震におけるケーソン式岸壁の被災原因を明らかにするため，2次元有効応力解析（解析プログラム：FLIP）を実施。 ひずみ空間での多重せん断機構に基づく解析モデルを用いる。同モデルは，異方圧密状態からの繰り返しせん断時の主応力回転影響を表現できる。 ケーソン背面，底面にジョイント要素。
平成7年兵庫県南部地震による重力式岸壁の被災数値シミュレーション解析 ¹⁰⁾ 森田年一，井合 進 (運輸省港湾技術研究所)	兵庫県南部地震における被災時の重力式岸壁付近の地盤の挙動を明らかにするため，非線形動的FEM（FLIP）による数値シミュレーションを実施。 概ね，地震時挙動をシミュレートできる。
重力式岸壁の液状化対策範囲の決定に関する検討 ¹¹⁾ 松永康男，井合 進 (運輸省港湾技術研究所)	有効応力解析により，液状化対策範囲と液状化により岸壁に発生する変形量との関係をまとめる。
土圧を受ける重力式港湾構造物の地震時安定性に関する研究 ¹²⁾ 風間基樹（運輸省港湾技術研究所）	重力式構造物と周辺地盤系の地震応答解析の為の剛体・地盤パネモデルを提案し，構造物と周辺地盤の動的相互作用が剛体構造物の地震応答に及ぼす影響を明らかにする。
ケーソン式護岸の遠心模型実験の数値シミュレーション ¹³⁾ 藤谷昌弘，石川博之（東京電力） 佐藤正行，王均，黒瀬浩公， 小瀬木克巳（東電設計）	遠心载荷装置を用いた実験に対するシミュレーションに飛田・吉田モデルを修正した構成則を組み込んだ2次元有効応力解析を適用。

(3) 設計実務上の課題の検討

設計実務を行う場合の問題点として，ここでは①震度法を用いる場合，②変形を考慮した設計法を用いる場合について検討を行う。

i) 震度法の適用

a. 適用条件

震度法を適用する前提条件は，地震時にケーソン岸壁があたかも堅固な台上剛体のように挙動すると考えられることである。しかしながら，ケーソン岸壁の基礎は置換砂層であり，地震時には堅固なものとは考えることはできない。

有効応力解析では，「置換砂部分のケーソンからの荷重分散領域では，過剰間隙水圧比が概ね0.8以下であり，特に，ケーソンからの偏心荷重の大きいケーソン海側斜め下方の広い範囲では，0.5以下である。」ということから，レベル2の地震動では過剰間隙水圧の上昇により置換砂部分は軟化する。

震度法を適用するためには、地盤改良によりケーソン基礎を強固な地盤に改良することが必要である。

b. 設計水平震度

レベル2の地震動による設計では、現行基準による震度を用いるのではなく、地盤の地震応答解析を一次元等価線形応答解析により行い、地表面の最大加速度から震度を換算することで対応できる。しかし、港湾施設を造る場所は一般に地盤が悪く、レベル2の地震動を入力した場合、地盤のひずみが相当大きくなり、加速度の応答も伸びないことが予想される。このような地盤にレベル2の地震動を用いた一次元等価線形応答解析の課題が残されている。

c. 応答加速度から震度への換算

地盤の非線形性を考慮して応答計算を行っても、加速度から設計震度への換算に課題が残ると考えられる。地震応答解析後の応答加速度から設計震度への換算として次式が提案されている。

$$\alpha > 0.2g \text{ のとき} \quad K_h = \frac{1}{3} \left[\frac{\alpha}{g} \right]^{1/3}$$

上記の式は、被害地震における岸壁の解析及び強震観測の記録¹⁴⁾から得たものである。

このときの解析結果では上限が $K_h = 0.25$ であった。レベル2の地震動を用いた解析において上式の精度を高めるためにデータの蓄積が望まれる。

d. 動的解析と震度法の相違

構造物の地震時挙動は、震度法で考えられている挙動とはかなり異なると考えられる。

すなわち、構造物の応答は周辺地盤の応答に大きく影響され、構造物と自由地盤の間の応答は連続的に変化している。また、動的土圧分布は、構造物と自由地盤の相対的な動きに対応している。

設計法として震度法を採用するのであれば、実際の地震時挙動に近づけるよう、構造物に作用する外力が動的解析とどのように異なるかを明らかにしておくことが必要である。

e. 新しい所見の導入

実験により確認されている事項、例えば、風間¹³⁾によれば、①地震時慣性力と動的土圧には、ケーソンの質量の大小、入力加速度の大きさに係わらず位相差があること、②動的土圧分布は、地盤の相対変位分布に対応していること等を震度法の中に取り入れることが必要である。

f. 形状の巨大化

レベル2地震を考慮し、0.25の設計水平震度に対しケーソン岸壁が滑動しないような剛構造とすれば、構造物の形状は非常に大きなものとなる。

ii) 変形を考慮した設計法の適用

a. 入力地震動

第2次提言ではレベル2の地震動の考え方を述べているが、一般の設計者が第2次提言で述べられている入力地震動を作成し、解析に用いることは困難であると考えられる。

今後、新たに設定される基準の中で、一般の設計者が容易に利用できる形の“入力地震動”を示すことが望ましい。

b. 解析手法

解析手法としては、①2次元有効応力法、②全応力法、③個別要素法等が考えられるが、これらの手法は表-2.6.2.2で示したように、模型振動実験のシミュレーション等、現状では研究者レベルで使用されている段階である。

解析に用いるプログラムも広く一般に普及されておらず、また、解析に用いる地盤の非線形性の取扱いも十分に解明されていないこともあり、一般の設計者が上記の手法を用いて設計するためには今後の開発が望まれる。

設計の中に変形を考慮した思想を導入することは重要であると考えられるが、震度法から一気に上記の設計法にステップアップするのではなく、簡便法を用いた変形設計等の段階を経て移行していくのも一つの考え方である。

簡便法としては、いくつかの提案がある。及川ら¹⁵⁾は、2つの簡易手法を用いて岸壁の沈下量を計算している。第1の方法は、地震による砂の液状化安全率と液状化後の排水に伴う体積ひずみの関係を用いて、液状化後の砂地盤の沈下量を推定する手法である。

山崎ら¹⁶⁾は、変形係数の低下に着目し、繰り返し三軸試験より得られるS-N曲線、繰り返し三軸法で得られる液状化抵抗率、線形弾性FEMを用いて岸壁変位を簡易に算出する方法を提案している。この場合、地震動の変形に対する影響は無視している。

c. 許容変位量の考え方

ケーソン岸壁が滑動すれば、構造物は破壊することはほとんどなく、外力のエネルギーを消散させることができる。この場合、移動量はいくらまで許容されるかが問題である。許容変位量を設定するためには、地震後にコンテナクレーンや背面構造物の機能が維持可能かを考える必要がある。

コンテナクレーンの基礎は、海側は岸壁上に、また、陸側は岸壁背面の別の基礎（杭基礎等）上に設置されているため、地震時には両基礎は別々の挙動を示し、特に岸壁の変状が大きい場合には、コンテナクレーンは前後の足が股裂き状態となる。

また、岸壁の変状が大きいと水際構造物の変状により地盤の側方流動が発生し、周辺諸施設に被害を与えることになる。

したがって、岸壁の許容変位量は背後の構造物の耐震性能、重要度等を勘案して決定することが必要である。

(4) 変形照査の検討

震災直後の緊急物資輸送等の確保、経済社会活動維持等を考慮し、通常の岸壁より耐震性を強化した耐震強化岸壁が整備されている。兵庫県南部地震の規模に相当するような直下型地震が想定される場合の耐震強化岸壁の設計は、変形の照査を必要に応じて行うこととしている。

変形照査の検討方法は、既往の被害事例に基づく解析方法、地震応答解析、模型振動実験などを用いることができる。⁸⁾

既往の被害事例に基づく解析方法では、各種の港湾構造物毎の被害程度と入力地震動、解析精

度に関するデータの蓄積が継続的になされているが、予測精度の向上を図るためにも、今後も引き続き種々のデータの蓄積が望まれる。

地震応答解析の方法としてはFLUSHに代表されるような全応力法と過剰間隙水圧の上昇を考慮した有効応力法がある。構造形式、地盤状況、入力地震動の大きさなどの条件を考慮して解析手法を選択することになる。

解析手法に関しては、実地震動による被害の解析、模型振動実験の数値シミュレーション解析などが精力的になされ、近年解析精度の向上が図られている。今後も入力パラメーターの決定手法をはじめとして、各種の項目に関する一層の研究開発が望まれる。

模型振動実験に関しては、大型振動台、遠心載荷装置の整備が図られ、実現象に近い状況の振動実験が可能となってきている。地震による実被害と実験結果との整合性も図られつつあるが、今後も種々の港湾構造物の被害と実験結果に関するデータの蓄積が望まれる。

既往の被害事例に基づく解析方法、地震応答解析、模型振動実験に関する3種類の変形照査の現状を概観したが、これら3種類の方法による照査結果を踏まえて、総合的に判断するのがよいものと考えられる。

(5) 今後の設計法の課題

兵庫県南部地震の規模に相当するような直下型地震が想定される場合の耐震強化岸壁の設計は、震度法にしたがって許容応力度設計を行う。震度法にしたがって設計された構造物を、変形照査、耐力照査の段階で必要に応じて既往の被害事例に基づく解析方法、地震応答解析、模型振動実験などで検討する。

この手法は、ケーソン式岸壁などの重力式構造物に関しては合理的な方法であるものと判断される。これは、神戸港のケーソン式岸壁の被害にも見られるように、設計で想定した以上の外力が構造物に作用した場合、構造物は滑動、沈下することにより外部エネルギーを消散させ、構造物本体が損傷を受けることは基本的にはないものと判断される。

なお、ケーソン本体の滑動、沈下は構造物背後の埋立地盤及び置き換え地盤の液状化の程度が大きく影響したものと考えられている。したがって、照査の段階で構造物背後の埋立地盤及び置き換え地盤の軟化に伴う構造物の変形により、機能低下が想定された場合、地盤改良を行うことにより構造物本体の変形量を所定の範囲内に押さえることが可能となる。

栈橋などの杭構造物の設計に関しては、被害状況に関するデータの蓄積、解析手法の精度の向上を図ることにより、今後は、杭の損傷過程に立ち入った耐震性能の評価の向上が望まれる。

2.6.3 港湾施設の重要度の考え方

(1) 重要度設定の意義と目的

現行の基準における港湾施設の重要度は、レベル1地震動に対する震度法による耐震設計の設計震度を決定する際に、構造物の性格毎に係数として設定されている。すなわち、重要度によって所要耐震性能の階級分けをしている。

第2次提言では、既存の港湾施設を耐震補強する場合、地域における地震発生の切迫度、構造物が構成するシステム全体の地震防災性向上に与える影響度合いと経済性を考慮することとしている。

この重要度は、①構造物が損傷を受けた場合に人命・生存に与える影響の度合い、②避難・救援・救急活動と二次災害防止活動に与える影響の度合いを考慮して決定される。この決定要素は、現行の基準における重要度の考え方とほぼ同様である。

しかしながら、現行の基準では重要度の区分の個々の施設への適用が明確でなく、また、レベル2地震動に対する耐震性能、許容損傷程度概念が含まれていない。

公的資金を使用する補強工事における優先順位については、当然、一般的に納得される合理性が必要である。その決定要因の一つである施設の重要度についても明確さが求められるため、ここでは、現行の重要度区分の明確化とレベル2地震動への適用案を検討することとした。

ただし、実際の適用に当たっては、個々の施設の置かれた状況は単純ではないため、その状況ごとに詳細な検討が必要である。

(2) 港湾施設の機能別分類

i) 港湾の機能

港湾は海陸の接点に位置し、海陸交通を円滑に結びつける機能のほか、生産、生活等の諸機能をもつ複合的な空間として重要な役割を果たしている。すなわち、港湾本来の重要機能はおよそ次のようにまとめられる。

- ① 陸海運の輸送の中継ぎの場として能率良い安全確実な荷役を行い背後の陸上交通と均衡して地域流通活動の中心をなす。
- ② 船舶の安全な入出港と停泊・補給・修理の基地として、安全確実な海上交通を支援する。
- ③ 大規模な用地及び大量な海上輸送手段をバックに臨海工業地域を構成し、地域開発を促進すると同時に、我が国に必要なエネルギーの輸入、備蓄基地となる。
- ④ 埋立地等により住宅、下水処理施設等を提供し、また、ゴミや建設残土などの廃棄物を適切に処分する空間として市民生活と密接に関連する。同時にウォーターフロントやレクリエーション施設等の基地として生活を豊かにする役割は今後ますます増大する。

ところが阪神淡路大地震以後、地震に強い港湾に向けて議論が進むなかで、震災において港湾が果たすべき役割についても、従来以上に積極的にとりあげられ次のようにまとめられた。

- ⑤ 震災において港湾が果たすべき役割

被災地の市民の安全の確保、被災地の復旧、復興の支援、内外の経済活動を支える物流機能の維持

以上の機能を勘案し、“二次提言”を踏まえた港湾構造物の耐震補強を考えていく必要がある。

ii) 港湾の施設と機能

港湾法第2条5に示されている港湾施設を表-2.6.3.1に示す。これらの施設は機能を示す役目別に分類されている。同時に、同表には設計の面からみた時「港湾の施設の技術上の基準・同解説」でどのように扱われているかを示した。表からも明らかのように一般に港湾構造物と称し、今回の

耐震に関する検討対象となっている主要施設は次のものである。

- ① 外かく施設
- ② けい留施設
- ③ 廃棄物処理施設の内の埋立護岸

港湾施設の本来の機能を考えた場合、上記施設をとりあげればよいが、震災時の役割、機能を考える場合には単独施設の整備というよりもシステムとして整備する必要がある。すなわち、阪神淡路大震災の教訓として、震災後においても岸壁から内陸幹線道路までの連絡を確保することが第一の要件であり、その間に防災拠点としての施設や物流機能を維持するための施設を確保する。ただし、防災拠点施設といっても、本来の港湾施設を転用して震災後も使用できればよいわけであり、要は港湾施設が図のように一連として確保できればよい。

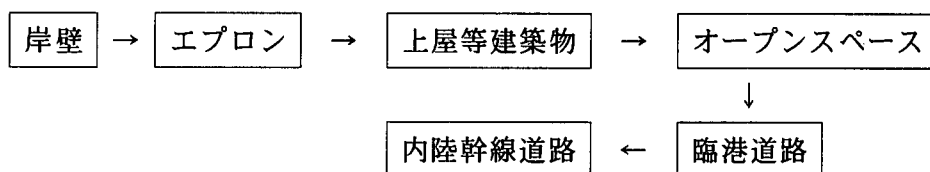


図-2.6.3.1 防災拠点として確保すべき港湾施設の連携イメージ

iii) 港湾防災施設ルート確保

港湾各施設が相応の耐震性能を保持し、機能を確保することが重要であるが、レベル2地震に対して全て確保することは困難である。そこで既に述べたように、港湾防災施設ルートともいえるべき一連の施設をレベル2に対し、防災拠点として確保できれば最低限必要な物流機能も維持できる。そして、この港湾防災拠点となる一連の施設も本来の港湾施設を利用し整備していけば、特に新規の施設を必要としないと思われるので、整備補強すべき一連の施設と既往の港湾施設の対応の考えを示したものが表-2.6.3.2である。

(3) 重要度の設定

i) 耐震性能について

各施設の重要度の議論の前に耐震性能の考え方を明確にしておく必要がある。“2次提言”においても、対象とする構造物の種類により耐震性能の考えが異なり、異なった構造物の接点部では多少のあるいは重大な不整合が生じることがありうるが、いま、岸壁・堤防・盛土の項をみると次のように表現されている。

① レベル1地震動に対して

- ・ 重要度の高い区間は構造物自体の機能を維持すると同時に、地震後も当初の設計条件を保持するものとする。（耐震性能 I-1 とする）
- ・ 一般区間は周辺に悪影響を及ぼさない軽度の損傷は許容するが、短期間に復旧が可能で全体系としての機能が早急に回復できること。（耐震性能 I-2 とする。）

表-2.6.3.1 港湾施設の分類と設計上の取扱い

港湾法第2条5号規定		「港湾の施設の技術上の基準・同解説」による設計上の規定
機能を表す項目	具体的な施設	
1. 水域施設	航路, 泊地, 船だまり	・船舶が安全かつ円滑に利用できるように位置・構造・設備を定めるが, 構造物はないと考えてよい。
2. 外郭施設	防波堤, 防砂堤, 防潮堤, 導流堤, 水門 閘門, 護岸堤, 防突堤, 胸壁	・一般に港湾構造物と呼ぶ施設で, 設計上の基準が詳細に規定されている。今回の対象も大部分がここに分類されている構造物と考えられる。
3. 係留施設	岸壁, 係船浮標, 係船杭, 棧橋, 浮棧橋 物揚場, 船揚場	
4. 臨港交通施設	道路, 駐車場, 橋梁, 鉄道, 軌道, 運河, ヘリポート	・道路構造令, 道路橋示方書, 鉄道構造規則 航空法, セメント又はアスファルト舗装要 要綱等を準用。
5. 航行補助施設	航路標(入出港船舶用), 信号施設, 照 明施設, 港務通信施設	
6. 荷さばき施設	固定式荷役機械, 軌道走行式荷役機 械, 荷さばき地, 上屋	・荷役機械はクレーン構造規則等を遵守, 荷さばき地は舗装を原則, 上屋は建築基準 法, 危険物荷さばき施設は消防法, 石油パ イプライン事業法等。
7. 旅客施設	旅客乗降用固定施設, 手荷物取扱所, 待合所, 宿泊所	・旅客乗降用施設については, 道路橋示方 書, 立体横断施設設計基準等
8. 保管施設	倉庫(含サイロ), 野積所(貯木場, 貯 炭場, 危険物置場), 貯油施設	・倉庫事業法, 危険物については消防法, 高圧ガス取締法等
8-2. 船舶役務用 施設	船舶給水施設, 給油施設, 給炭施設, 船舶修理施設, 船舶保管施設	・水道法等
9. 港湾公害防止 施設	汚濁水浄化用導水施設, 公害防止用 緩衝地帯, その他公害防止用施設	
9-2. 廃棄物処理 施設	廃棄物埋立護岸, 廃棄物受入施設, 廃 棄物焼却施設, 廃棄物破碎施設, 廃油 処理施設, その他の廃棄物処理施設	
9-3. 港湾環境 整備施設	海浜, 緑地, 広場, 植栽, 休憩所その他 の港湾環境整備用施設	特に港湾基準に記述はないが, 他の関連 する基準を準用する。
10. 港湾厚生施設	船舶乗組員及び港湾労務者の休泊所 診療所, その他の福利厚生施設	例えば, 廃棄物処理施設については“廃 掃法”に準拠し, 護岸については港湾設 計指針改訂検討中である。
10-2. 港湾管理 施設	港湾管理事務所の港湾管理用資材倉 庫, その他の港湾管理用施設	
11. 港湾施設用地	前各号の施設の敷地	
12. 移動式施設	移動式荷役機械, 移動式旅客乗降用 施設	
13. 港湾役務提供 用地移動施設	曳船(船舶の為の), 給水船, 給油船, 給炭船(車輛・廃棄物処理用), 清掃船 通船, その他港湾管理用移動施設船 舶, 車輛, はしけ, 作業船, 計量照明装 置	

表-2.6.3.2 港湾防災施設ルート

震災時港湾が果たすべき機能 ⇒

- | |
|---------------|
| ① 被災地の市民の安全確保 |
| ② 被災地の復旧復興支援 |
| ③ 物流機能の確保 |

震災時必要施設	岸壁	緊急物資荷さばき施設	災害対策本部医療施設情報拠点	避難用地、備蓄施設	連絡道路
港湾施設	耐震強化岸壁を含む岸壁	エプロン、荷役機械	上屋又旅客ターミナル等の建築物	線地、広場、倉庫	臨港道路
レベル2対応耐震性能の目安	接岸可能	重機の走行や荷役可能	耐震建築	平坦性、安全性の確保	車両走行可能

② レベル2地震動に対して

- ・ 耐震強化岸壁のような重要施設は初期の機能を維持する。（耐震性能Ⅱ-1とする。）
- ・ 重要度の高い区間はそれらが支持する構造物や周辺の諸施設に重大な被害を生じさせないこと。（耐震性能Ⅱ-2とする）
- ・ 一般区間は周辺に二次災害等の悪影響を及ぼさないこと。（耐震性能Ⅱ-3とする）

ii) 従来の重要度の考え方

従来、港湾構造物の設計において設計水平震度を設定するときに、地域別及び地盤種別と合わせて重要度係数を導入しており、その値は表-2.6.3.3に示すように構造物の性格を重要度として評価している。

これらの重要度は、当然レベル1地震動に対応するものであるが、i)で述べた耐震性能Ⅱ-1、Ⅱ-2という概念はなく、具体的に適用すべき施設も明示されていない。

しかしながら、重要度係数は現在まで長年にわたって使用され、実績もあり妥当性も高いので耐震性能レベルはこれを基本として、今後、レベル2の地震動への対応に発展させていくことも一つの方法であろう。

iii) レベル2地震動に対する重要度の設定

a. 重要度のイメージ

港湾施設について重要度を一度に定量的な評価を行うことは難しいため、まず、地震に対する港湾施設の重要度の高低のイメージを表-2.6.3.4のように挙げてみた。

表に示すように、重要度に影響を及ぼす要因は、規模の大小、機能役割別、損傷した場合の影響、震災時の維持機能等である。幸い、レベル1については前述のように重要度係数として表現され、各等級の対象施設も経験的に判別されているので、これを基本にレベル2についても検討する。

表-2.6.3.3 重要度係数

構造物の種別	構造物の性格	重要度係数
特定	A級構造物の性格のうち①～③の程度が著しいもの	1.5
A 級	① 構造物が震害を受けた場合、多くの人命・財産の損失を与えるおそれのあるもの ② 震災復興に重要な役割を果たすもの ③ 有害物または危険物を取り扱う構造物で、震害を受けた場合に人命または財産に重大な損失を与えるおそれのあるもの ④ 構造物が震害を受けた場合、関係地域の経済・社会活動に重大な影響を及ぼすもの ⑤ 構造物が震害を受けた場合、復旧にかなりの困難が予想されるもの	1.2
B 級	特定、A級及びC級以外のもの	1.0
C 級	特定及びA級以外の小規模な構造物で容易に復旧が可能なもの	0.5

(出典：港湾の施設の技術上の基準・同解説)

b. 重要度の設定

新しい重要度の設定については次の順で行った。

- ① 従来のレベル1の重要度係数(表-2.6.3.3)の各級に属する施設を今までの実績を踏まえて具体的に設定する。
- ② 施設の重要度はレベル1、レベル2に対して基本的には同じ級順に属するので、①で行った施設の分類を基本にする。
- ③ レベル2に対しては表-2.6.3.4の重要度イメージの基本として、次の2つの要素すなわち、
[A]施設の損傷の程度をどこに押さえるか。
[B]設定した許容損傷度を超えた場合に、人命、市民生活、環境、経済活動等にどのような影響を及ぼすかにより重要度を設定する。
- ④ 各施設の重要度を[A][B]総合的に勘案して分類する。ただし、防災拠点システムあるいは物流システム等の一連施設については全体として最重要の特級とする。

このように設定した重要度を表-2.6.3.5に示す。

ここで設定した施設の重要度は、保持すべき耐震性能のレベルを示すと共に、補強の優先順位を表すと考えてよいが、実際の設計にどのように生かすかは今後の課題である。

表-2.6.3.4 重要度のイメージ

要因	低 ⇒ ⇒ ⇒ ⇒ ⇒ ⇒ ⇒ ⇒ ⇒ ⇒ ⇒ 高
規模	小 ————— 大
機能・役割	<p>土留護岸</p> <p>廃棄物護岸</p> <p>背後に重要構造物</p> <p>親水護岸</p> <p>係船岸壁</p> <p>危険物取扱岸壁</p> <p>クレーン付岸壁</p> <p>耐震強化岸壁</p>
損傷した場合の影響	<p>機能回復</p> <p>レジャー活動停止</p> <p>環境汚染</p> <p>経済活動停滞</p> <p>市民生活停滞</p> <p>人命</p>
震災時の維持機能	<p>物流機能</p> <p>救援活動</p> <p>防災拠点</p>

表-2.6.3.5 重要度の考え方

レベル1地震動(従来設計)		レベル2地震動に対する評価						
種別	構造物の性格	重要度係数	施設例	二次提言耐震性能	耐震性能目標値	許容損傷程度	許容損傷程度を越えて損傷した場合の影響	重要度階級
C級	特定及びA級以外の小規模な構造物で容易に復旧が可能なもの	0.5	小規模な土留め護岸で背後に重要な施設が無い場合、公園・緑地護岸等	I-2		大規模な土砂流出がなければ、部分的倒壊も可	修復に費用を要するが市民生活、経済活動等への影響は少ない。修復の緊急性もない。	C
B級	特定、A、C級以外のもの	1.0	小規模な係留施設、物揚場、小型船舶係留施設、マリナー施設 中規模護岸(背後に重要施設がない) 小規模防波堤 大規模防波堤	I-2	II-3	水平移動などの変形により船舶接岸不能でも可 護岸は水平蛇行変形及び一部転倒は可 防波堤も同上	機能が停止し、修復に費用、期間を要するが、人命、環境及び経済活動に重大な影響はない。	B
A級	①構造物が震害を受けた場合、多くの人命・財産の損失を与える恐れのあるもの	1.2	大規模埋立護岸	I-1	II-2	通常の埋立護岸はある程度の水平移動は可 大規模な土砂の流出は不可	人命・環境に直接的な影響は少ないが、人命、環境、市民生活、経済活動に直接的な影響は少ないが、二次的な影響がある。	A2
	②震災復興に重要な役割を果たすもの		水深7.5m以上の係留施設、フェリー及びコンテナ船岸壁、危険物取り扱い岸壁、固定式・軌条式クレーンのある岸壁			水平移動等の変形により船舶接岸不能となっても、若干の補修により機能を維持できる程度 ・重力式の場合、転倒・地盤破壊は不可 ・杭、矢板の部材応力は局部的に降伏状態になっても可	人命・環境には影響が少ないが、機能が停止するために一時的に経済活動市民生活への影響がある。	
	③有害物又は危険物を取り扱う構造物で、震害を受けた場合に人命又は財産に重大な損失を与える恐れのあるもの		廃棄物埋め立て護岸			管理型廃棄物の汚水の漏れを、短時間で阻止できる程度の変形は可 短期間で補修・機能回復出来る程度の変形は可	環境汚染への影響が大きい。	
	④構造物が震害を受けた場合、関係地域の経済・社会活動に重大な影響を及ぼすもの。		防潮堤、親水護岸				人命・環境への影響は少ないが補修が長引くと二次災害の恐れがある。背後構造物が独立した耐震性能を維持できれば問題は無い。	
	⑤構造物が震害を受けた場合、復旧にかなりの困難が予想されるもの		背後に橋脚等の重要構造物のある護岸				護岸と橋脚では初期機能を保持する変形量が異なるため、最終的には橋脚基礎等背後構造物目体で対処することが望ましいが、困難な場合は、背後構造物に大きな影響を与えない変形量とする。	
特定	A級構造物の性格の内①～③の程度が著しいもの	1.5	耐震強化岸壁 耐震強化岸壁 背後荷捌地 荷役機械 上屋、ターミナルビル等 緑地・広場・公園等 臨港道路	I-1	II-1	初期の機能(船舶の接岸、荷役等)を維持できる程度の軽微な変形までとする。 補修なしで接岸可能 重車両の通行可能な平坦性及び舗装構造の保持	機能が停止すれば経済への影響は大きい。救援活動も停止。	特定
なし	防災拠点としての連携的役割	なし			II-1	荷役機械が稼働可能な軽微なII-1損傷 災害対策本部、医療施設として多くの人々が安全に使用できること 一部、緊急物資や重機等の集積が可能な平坦性の保持(液状化防止)。 但し、避難用地等はその後、重機で補修して広げることが可能。 岸壁から内陸幹線道路までの車両走行が可能な平坦性及び舗装構造の保持、液状化防止。	一部でも損傷すれば救援活動及び経済活動に重大な影響がある。 (防災拠点としての機能が著しく損なわれる。)	特級

(4) 補強の優先順位の考え方

i) 基本的考え方

- ① 岸壁から内陸幹線道路まで、震災後にも連絡できる輸送ルートを補強整備することを第一の目標とする
- ② 基本的には前出(3)の重要度の設定で検討した重要度の順に補強整備する。
- ③ 重要度がほぼ同程度の場合には次のことを検討し総合的に判断する。
 - ・ 重要度の詳細な評価
 - ・ 耐震性能と現在の施設の耐力の差の大きい施設
- ④ 他の条件が同等の場合、液状化が発生する箇所の施設を優先する。

ii) 岸壁から内陸幹線道路までの一連ルートの補強整備

港湾が震災後、防災拠点としての機能保持の場合はもちろん、本来の物流機能維持のためにも岸壁から内陸幹線道路までを一連として補強整備し、人や物流の運搬を可能にしておかなければならない。岸壁については耐震強化岸壁として位置づけられている箇所を優先して補強整備をすすめる。

iii) 重要度に基づく補強整備

個々の施設については前出の(3)の重要度の設定で検討した重要度に応じて補強するが、重要度が同程度の場合にはさらに次の検討を行う。

a. 重要度の再評価

対象となるいくつかの施設についてはさらに次の項目について詳細に検討し、その地域の特性を考慮して補強順位を決定すべきである。

- ・ 人命に影響を与える程度
- ・ 市民生活に影響を与える程度
- ・ 環境を汚染する程度
- ・ 経済に与える影響の程度
- ・ 近くに代替施設があるか

b. 所有すべき耐震性能と現状施設の耐力

各施設はレベル1及びレベル2地震に対し、必要な耐震性能を保持する必要がある。しかしながら、現状では材料の老朽化が進むとともに、設計震度の変更のあった箇所もあり、所要の耐震性能が大幅に低下している可能性がある。これを設計上、定量的に評価し、低下割合の大きい施設を優先して補強するという考えで現状施設の危険度総合評価のフローを示すと、図-2.6.3.2のように表すことができる。

(5) 問題点と今後の課題

施設の重要度は、その施設が損傷した場合の社会に及ぼす種々の影響の度合いで評価されることになるが、現時点ではこれを定量化して具体的に表す方法が提案されていない。

個々の施設の必要性は、港湾計画上で検討されているものであることから、これと関連づけて計画時点で重要度の評価を行うことも考えられる。

また、レベル2地震動に対する許容損傷程度については、設計上定量化の必要となるものであるため、重要度と関連して設定手法の検討が必要と考えられる。

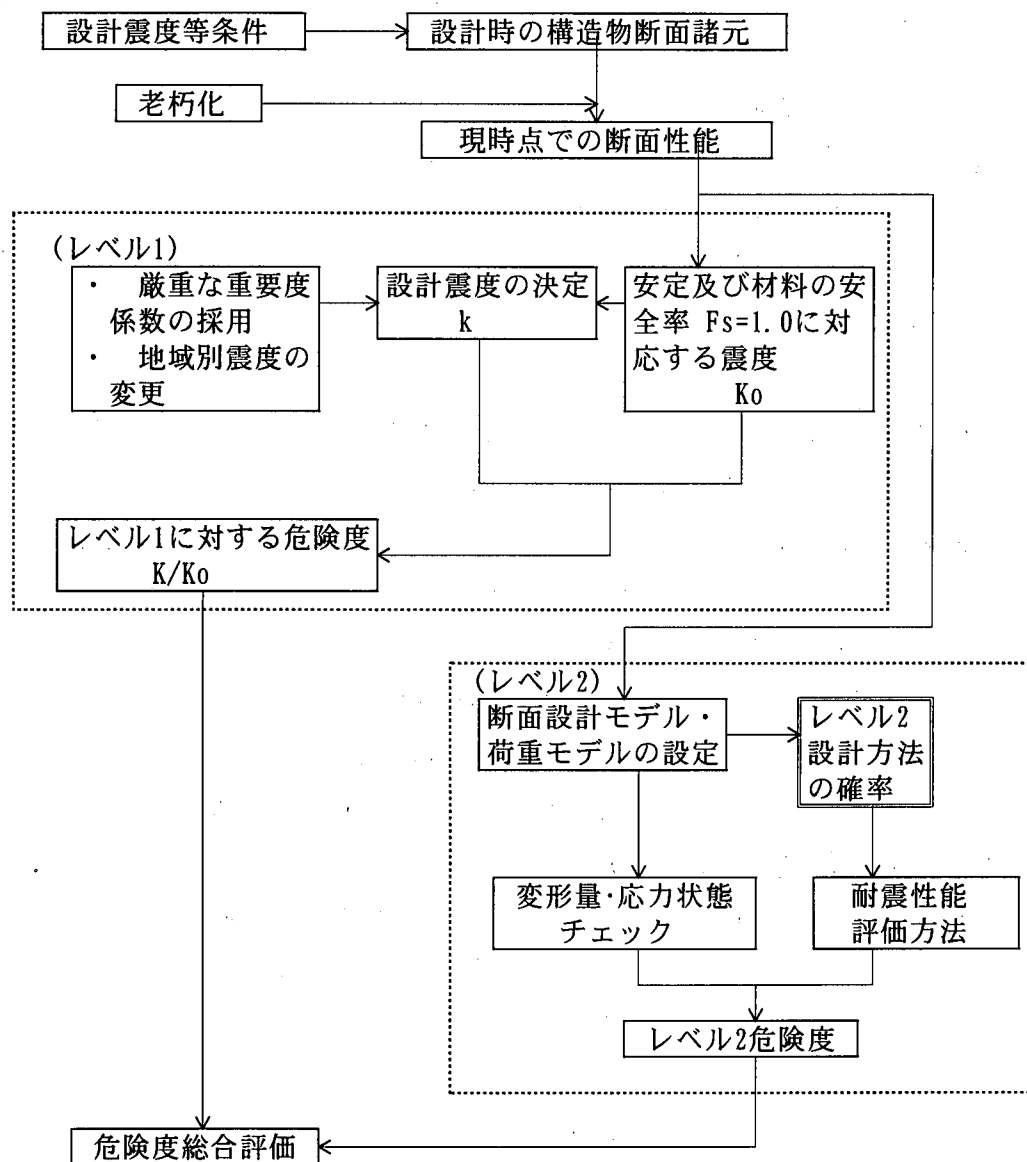


図-2.6.3.2 現状施設の危険度総合評価フローチャート

－ 参考文献 －

- 1) 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，No. 40，PP. 6～10，1995年4月
- 2) 外山進一，松永康男：兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察(その2)被害状況－岸壁，防波堤，海岸保全施設－，港湾技研資料，Vol. 813，PP. 51～75，1995年9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，No. 6，PP. 46～49，1995年6月
- 4) (財)沿岸開発技術研究センター，地震対策に関する港湾技術セミナーテキスト，PP. 181～199，1995年10月
- 5) 上部達生，高野剛光，松永康男：兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察(神戸港のケーソン式大型岸壁の被災分析)，港湾技研資料，No. 813，PP. 127～146，1995年9月
- 6) 菅野高弘，三藤正明，及川研：兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察(ケーソン式岸壁の被災に関する模型振動実験)，港湾技研資料，No. 813，PP. 207～252，1995年9月
- 7) 井合進，一井靖二，森田年一：兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察(ケーソン式岸壁の有効応力解析)港湾技研資料，No. 813，PP. 253～280，1995年9月
- 8) 地震対策に関する港湾技術セミナーテキスト，PP. 66，1996年10月
- 9) 一井康二，井合進，森田年一：有効応力解析によるケーソン式岸壁被災原因分析，阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，土木学会，PP. 397～404，1996年1月
- 10) 森田年一，井合進：平成7年兵庫県南部地震による重力式岸壁の被災数値シミュレーション解析，阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，土木学会，PP. 405～412，1996年1月
- 11) 松永康男，井合進：重力式岸壁の液状化対策範囲の決定に関する検討，第48回土木学会年次学術講演会，PP. 400～401，1993年9月
- 12) 藤谷昌弘，石川博之，佐藤正行，王均，黒瀬浩公，小瀬木克巳：ケーソン式護岸の遠心模型実験の数値シミュレーション，第51回土木学会年次学術講演会，PP. 312～313，1996年9月
- 13) 風間基樹：土圧を受ける重力式港湾構造物の地震時安定性に関する研究，港湾技研資料，No. 752，PP. 1～103，1993年6月
- 14) 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 第14巻，第4号，PP. 67～127，1975年12月
- 15) 及川研，松永康男，坪井英夫，仁田尾洋：地震による重力式港湾構造物の沈下量の簡易的な評価，第51回土木学会年次学術講演会，PP. 310～311，1996年9月
- 16) 山崎浩之，善功企，佐渡篤史：地震時の岸壁変形の簡易な算定，第31回地盤工学研究発表会講，PP. 1137～1138，1996年7月