

被災した重力式ケーソン岸壁の耐震強化法

運輸省 第三港湾建設局 松永康男*

運輸省 第三港湾建設局 及川 研*

運輸省 第三港湾建設局 園山哲夫*

阪神・淡路大震災によって、神戸港の岸壁はそのほとんどが非常に大きな被害を受けた。被災岸壁の復旧では、岸壁の被災原因、被災状況および各種制約条件を考慮するとともに、復旧に併せて岸壁の耐震性を強化することも考え併せ、各施設に適した方法を適用している。

神戸港震災復興では、被災した重力式ケーソン岸壁の復旧方法の一つとして、被災岸壁を補強するとともに土留め構造として有効利用した「デタッチトケーソン構造」による復旧を初めて適用した。復旧断面の設計は震度法で行っているが、耐震強化岸壁については、模型振動実験および数値シミュレーションを併用して復旧断面の耐震性を調査した。その結果、本構造形式による復旧断面の耐震性は非常に高く、強震時の残留変形量も小さく抑えられることが確認された。

1. はじめに

阪神・淡路大震災によって大きな被害を受けた神戸港における岸壁の復旧では、岸壁の被災原因、被災状況および各種制約条件を考慮するとともに、復旧の基本的方針として、①早期復旧完了（暫定供用と本格復旧工事を同時併行）、②耐震性の増強（設計震度の引き上げ）、③構造形式の多様化を考えている。この条件の下に、各施設に適した各種の復旧工法（耐震補強工法）を適用している^{1)・2)}。

被災した重力式ケーソン岸壁の復旧方法の一つとして、「デタッチトケーソン構造」による復旧があるが、これは、被災岸壁の前面にケーソンを新設する復旧方法の一つであり、被災岸壁の補強および有効利用と新設ケーソンの耐震性に配慮した復旧方法である。本手法は、神戸港震災復興で新たに考案された復旧構造形式であり、図-1に示す13バースの復旧に適用されている。ここでは、神戸港震災復興で重力式ケーソン岸壁の復旧に新たに適用された「デタッチトケーソン構造」による復旧について報告する。

2. 岸壁被害の概要

神戸港の岸壁は、その多くが重力式ケーソン構造で

あり、基礎地盤としては沖積粘性土を床掘置換工法で改良した置換砂（主にまさ土）が主流であった。このような岸壁が、設計地震動（設計震度0.10～0.18、地盤最大加速度200～300Gal程度）を大幅に上回る今回の地震動（地盤最大加速度500Gal以上）によって非常に大きな被害を受けた¹⁾。

重力式ケーソン岸壁の被災状況は、法線のはらみ出し1～5m、天端の沈下1～2.5m、本体の傾斜3～5度、本体背面位置で1～3.5mの段差、エプロンに沈下・亀裂などが発生するといった状況であり、その変形性状としてはケーソン本体と捨石マウンドが一体となって変形していた^{1)・3)}。これら岸壁の変形によって、ガントリークレーンの脚部が股裂き状態になり、脚部の座屈・変形や車輪部の脱輪・破損などの大きな被害が発生し、倒壊したものも1基あった¹⁾。

重力式岸壁の被災原因としては、設計で想定した地震動の2～3倍の地震動による慣性力および土圧に加え、岸壁背後地盤および置換砂中の過剰間隙水圧の上昇に伴うせん断抵抗の低下によって生じたと考えられた¹⁾。ただし、摩耶埠頭に建設されていた耐震強化岸壁3バース（設計震度0.25）については、非常に軽微な被害にとどまり、その耐震性が検証された。

3. 被災岸壁の復旧

(1) 復旧設計の基本的考え方

キーワード：重力式岸壁、耐震強化、復旧工法

* 震災復興建設部

078-333-2554

被災岸壁の復旧設計は震度法を基本としている⁴⁾。震度法における設計震度は、地域別震度、地盤種別係数および重要度係数の積で算出される。復旧設計では、一般岸壁（再現期間75年の期待値に相当する地震に耐え得る岸壁）の設計震度の算定に当たって、下記に示すように、神戸港における岸壁の重要度係数を従来の1.0から1.2に増加させ、設計震度を従来の0.15あるいは0.18から0.20へ増加させている。なお、計算値を二捨三入あるいは七捨八入して設計震度としている。

$$\begin{aligned} \text{設計震度 (0.20)} &= \text{地域別震度 (0.15)} \\ &\quad \times \text{地盤種別係数 (1.0 or 1.2)} \\ &\quad \times \text{重要度係数 (1.0} \rightarrow \text{1.2)} \\ &= 0.15 \times (1.0 \text{ or } 1.2) \times 1.2 = 0.18 \text{ or } 0.216 \rightarrow 0.20 \end{aligned}$$

耐震強化岸壁（数百年に1回程度の地震もしくは発生確率は低いが更に大規模な地震に耐え得る岸壁）の設計では、昭和59年～60年に摩耶埠頭に建設された耐震強化岸壁（設計震度0.25）が、今回の地震によって非常に軽微な被害で済んだ実績を考慮して、設計震度0.25を採用するとともに、震度法で決定した断面について想定地震動（神戸波）に対する岸壁の変形照査を行っている⁵⁾。なお、摩耶埠頭耐震強化岸壁の設計震度は、神戸港における既往最大として、1596年京都文

禄地震をもとに算出された設計震度と重要度係数1.5をもとに求められた設計震度を比較検討し、両者から同じ0.25の値が得られたことから設定されていた。

また、-7.5m以深の大型岸壁に対しては、岸壁裏埋土に液状化対策を実施するとともに、岸壁の重要度に応じて基礎地盤の耐震性（液状化防止）にも配慮している¹⁾。なお、神戸港では岸壁構造として重力式が多数を占めていたことから、これらの岸壁の被災形態も概ね同様となったため、復旧では岸壁構造を多様化して地震応答特性に幅を持たせることにより、神戸港全体として地震に強い港となるように配慮している。

(2) 復旧断面の基本パターン

被災岸壁の復旧に当たっては、施設の被災状況や各種制約条件などを考慮し、図-2に示す復旧方法を比較検討して、各施設に最も適した復旧方法あるいは組み合わせによる復旧方法を適用した^{1)・3)}。

- ①案：被災岸壁前面に岸壁を新設する案
- ②案：岸壁（ケーソン等）を一旦撤去し、被災前位置に岸壁を築造し直す案
- ③案：岸壁背後土圧の低減や構造的に補強する案

第①案（前出し方式）は、被災変形量が大きく、既存施設の利用・撤去が困難で、前面水域の利用に支障

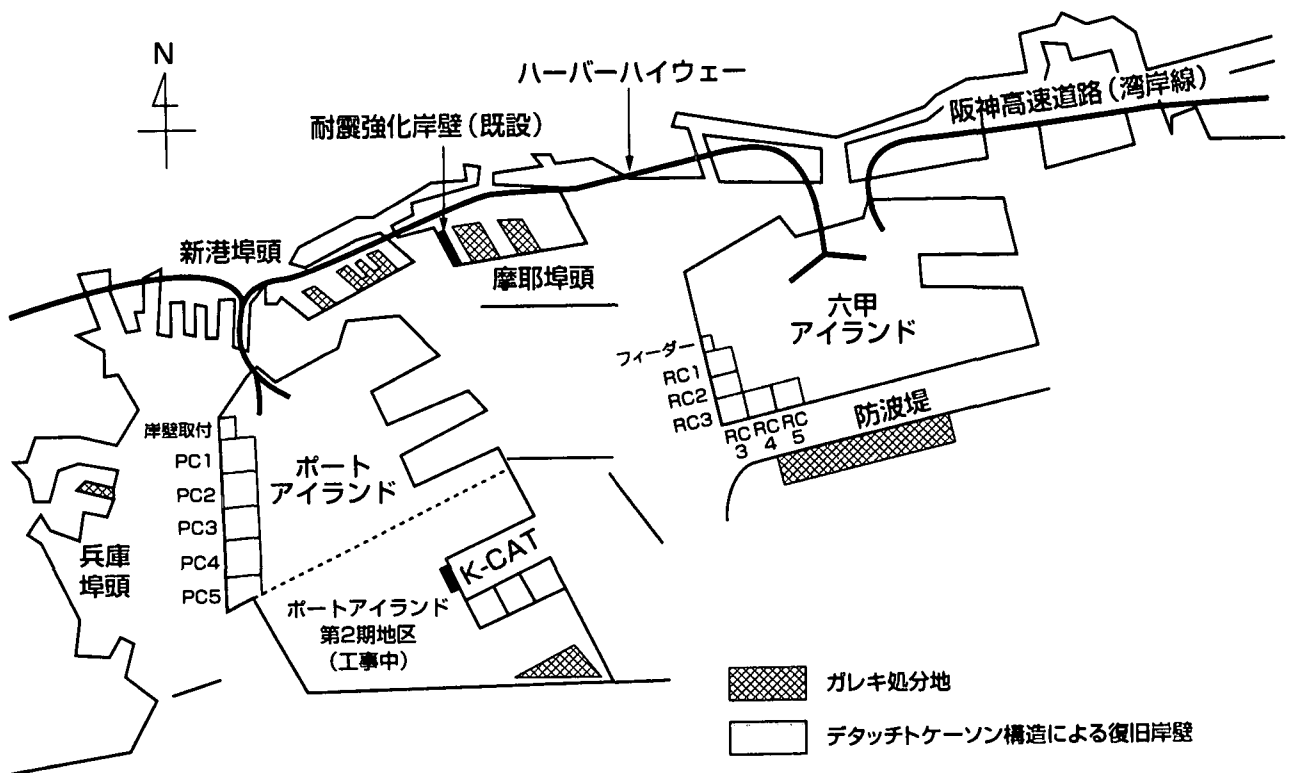


図-1 神戸港平面図

をきたさない場合に採用されている。なお、被災程度によっては、既存施設を土留め構造として利用することも可能であり、既存施設（土留め部）の補強を兼ねた復旧が可能となる。本編で報告するデタッチトケーソン構造もこの範疇に入るものである。第②案（据え直し方式）は、スリップ内のように前面水域に余裕がない場合、あるいは隣接岸壁との法線調整上前出しによる復旧が困難な場合などに採用されている。第③案（補強方式）は、被災変形量が比較的小さく、岸壁背後から作用する土圧の低減や、構造的な補強により被災岸壁の耐震性が確保される場合に適用されている。

4. デタッチトケーソン構造による復旧

(1) デタッチトケーソン構造の考察

先に述べたように、被災した重力式ケーソン岸壁の復旧に際して、被災岸壁の前面に岸壁を新設する「前出し方式」による復旧がある。一般に、新設ケーソンによる前出し方式の場合には、ケーソン設置後、新設ケーソン背後を裏埋し、既設ケーソン（被災岸壁）を埋め殺しすることになる。しかしながら、新設ケーソンの耐震性を考えた場合には、ケーソン間を埋めてしまうことは必ずしも得策ではなく、新設ケーソン背後の「間詰め石」の天端高さを、既設ケーソンの安定に必要な最小限の高さとすれば、新設ケーソンに作用する土圧をその分だけ低減でき、新設ケーソンの耐震性に有利となる。また、既設ケーソンを土留め構造として有効利用できる場合には、既設ケーソンを補強し、その積極的な利用を考えた方が経済的でもある。

このように、新設ケーソンによる「前出し方式」による復旧の考え方と、既設ケーソンの「有効利用」および「補強」の考え方を併せた復旧構造形式（または耐震補強構造形式）が「デタッチトケーソン構造」である（図-3）。

本構造形式の基本的考え方は以下の通りである。

- ① 既設（被災）ケーソンを土留め構造として有効利用し、前面にケーソンを新設する。その際、新設ケーソン基礎地盤の改良は、床掘置換工法でなく、耐震性の高いSCP工法またはCDM工法を基本とする。
- ② 新設～既設ケーソン間の間詰め石の高さは、既設ケーソンの耐震性が確保できる必要高さとし、

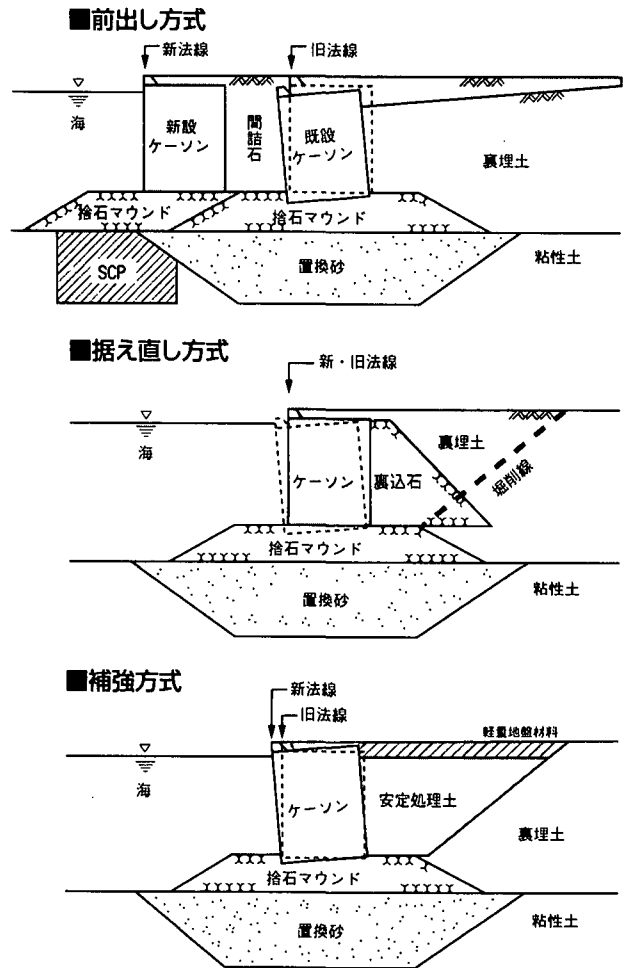


図-2 被災施設の復旧パターン

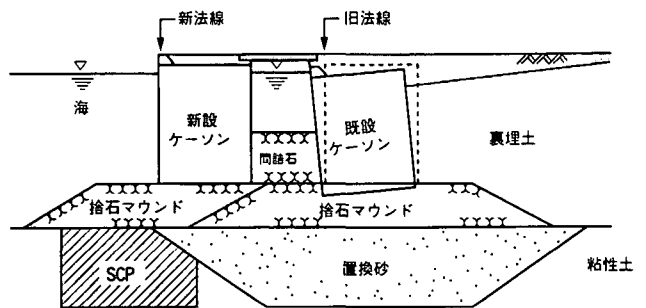


図-3 デタッチトケーソン構造の模式図

新設ケーソンに作用する土圧を低減する。

- ③ ガントリークレーンのレール基礎は、新設および既設ケーソン上に設置することを基本とする。
- ④ 新設～既設ケーソン間は、前出し量に応じて渡版や桁により連結する。

デタッチトケーソン構造による復旧の考え方は、早急な復旧を目指す観点からケーソンの構造設計を省略し、既設ケーソンと同一のケーソンを用いて復旧施設の耐震性を向上させようとしたところにその出発点がある。ただし、同じケーソンを新設しても、背後を全

て裏埋してしまえば十分な耐震性のアップにならないことから、間詰め石の天端を下げ、間詰め石をクッション材と考え、既設ケーソンの耐震不足分を間詰め石および新設ケーソンで受け持ち、あわせて新設ケーソンに作用する土圧を低減しようとする考えである。

(2) 設計の考え方

本構造形式による岸壁の設計は、従来の岸壁と同様に震度法による設計を基本とした。復旧設計では、これら設計の手順を以下に示すとおりとした(図-4)。

- ① 新法線の前出し幅は、施設の被災程度や前面水域の制約を考慮して決定する。コンテナバースの場合には、ガントリークレーンのレールスパンを参考に、レール基礎が両ケーソン上に載ることを基本とする。ただし、後ろ側のレール基礎は、既設岸壁の耐震性を考慮して、できる限りケーソンの背面側に設置する。
- ② 既設ケーソン背後の土圧を新設ケーソンの摩擦抵抗および間詰め石の摩擦抵抗(せん断抵抗)のみで受け持つような新設部(新設ケーソンおよび間詰め石)の断面を決定する。この際、既設ケーソン背後の土圧は新設ケーソン設置水深までの土圧とし、既設ケーソンの摩擦抵抗は考慮していない。作用外力としては、新設ケーソンおよび間詰め石に作用する慣性力も考慮する。
- ③ 既設ケーソンの地震時安定性を照査する。作用外力としてはケーソン本体の慣性力および背後土圧を考え、抵抗力としてはケーソンの摩擦抵抗および間詰め石から作用する受働土圧を考慮する。

既設ケーソンが傾斜している場合には、傾斜面に沿った釣り合いを考え、間詰め石からの受働土圧は、ケーソンが底面に沿って移動し、間詰め石が半無限に存在するものと仮定して算出する。

- ④ 新設ケーソンの地震時安定性を照査する。作用外力としては、新設ケーソン本体の慣性力、間詰め石から作用する土圧、動水圧(間詰め石天端面より上部)、連結桁部から作用する慣性力を考え、抵抗力としてはケーソン底面の摩擦力を考慮する。なお、間詰め石からの土圧については、間詰め石の主働土圧もしくは既設ケーソン側からの受働土圧の差分(既設ケーソンの安定に期待した受働土圧から間詰め石内で期待できるせん断抵抗を引いたもの)の大きい方を考える必要がある。なお、既設ケーソンからの受働崩壊線が新設ケーソン背面の土圧作用面に交差する場合には、交差点を境に上側を受働土圧の差分、下側を主働土圧とする。

このほか、上載荷重やクレーン荷重なども必要に応じて考慮し、新設部の最適断面を決定する。常時の安定についても別途検討する。

(3) 復旧施設の概要

デタッチトケーソン構造による復旧は、神戸港の中心的役割を果たすコンテナバースの復旧に主に用いられている。復旧施設としては、ポートアイランドのコンテナバースPC1~PC5の5バース(水深-12m、延長1,450+50m、公社バース)、同じく岸壁取付(水深-12m、延長100m、直轄バース)、六甲アイランドのコンテナバースRC1~RC3西の3バース(水深-13m、

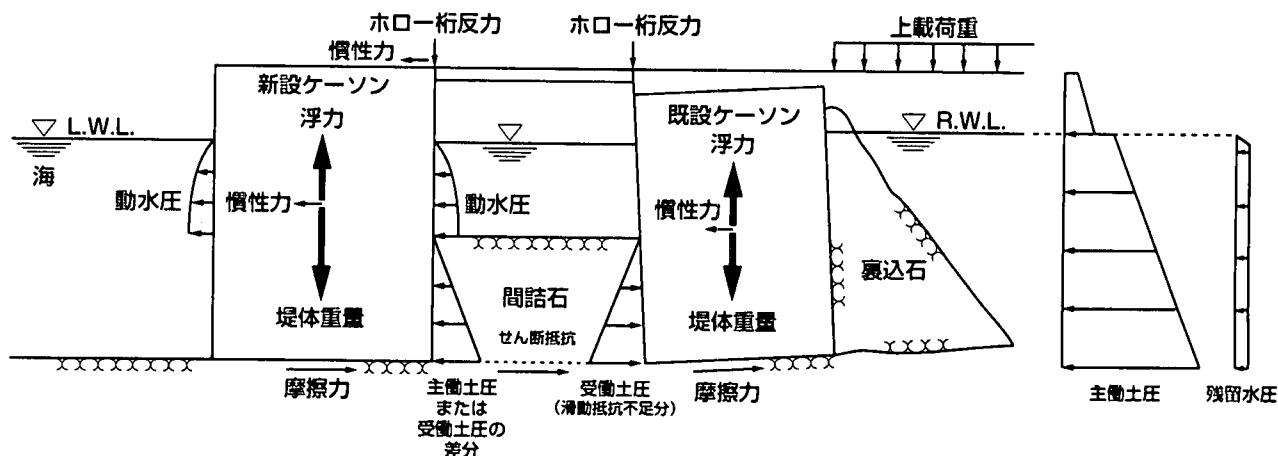


図-4 デタッチトケーソン構造の設計外力・抵抗の考え方

延長 1,050m、公社バース)、同じくRC3南～RC5の 3 バース (水深 -14m、延長 1,050m、公社バース)、同じくフィーダーバース (水深-7.5m、延長 130m、直轄バース) があり、総延長 3,830mの岸壁の復旧に適用されている。このうち、六甲アイランドコンテナバース RC2は耐震強化岸壁 (設計震度0.25) として復旧されている。なお、公社バースの復旧は管理者である (財) 神戸港埠頭公社が実施し、耐震強化岸壁である RC2バースは第三港湾建設局が受託して実施している。以下に RC2バースの復旧について報告する。

5. 六甲アイランド -13m岸壁 RC2バースの復旧

(1) 施設および被害の概要

本施設は、六甲アイランド西南部に位置するコンテナバースであり、同地区の緊急時のコンテナ物流機能を確保するために、耐震強化岸壁 (設計震度0.25) として復旧される延長 350mの -13m岸壁である⁵⁾。

本施設 (当初の設計震度0.15) の被災状況は、岸壁法線が前面に1.4~1.9mはらみ出し、天端が0.7~0.9m沈下した。また、ケーソン背面位置に 1m以上の段差が生じた。なお、本施設の法線直角方向が地震動の卓越方向とずれていたために、被災変形量は比較的小

さくなったが、仮に本岸壁が南側のRC3南～RC5バースと同じ向きにあったとすれば、法線変位量は 5m程度生じたものと推察される¹⁾。

(2) 復旧断面

復旧構造形式としては、各種制約条件を考慮の上、隣接バースの復旧方法と同様に、被災施設の前面にケーソンを前出しする「デタッチトケーソン構造 (旧法線からの前出し幅28m)」が採用された。

本施設の標準断面図を図-5 に示す。なお、旧法線からの新法線前出し幅 (28m) は、ガントリークレーンの両脚が新設ケーソンおよび既設ケーソン上に載るように決められており、両ケーソン間を標準部材であるPCホロー桁 (新設側支点、既設側可動) により連結している。また、本施設の設計では、間詰め石の天端高さを隣接バースと同じ-5mとし、この条件の下に 4. (2) で示した考え方に従って新設ケーソンの断面形状を決定している。復旧断面形状は、4. (2) ②の条件で決定され (地震時安全率 1.0)、その他の条件では比較的余裕のある地震時安全率となっている。

岸壁構造としては、新設ケーソン基礎地盤をSCP工法により改良して耐震性を高め²⁾、併せて間詰め石を必要高さまで投入して、新設 (SCP改良) ~間詰

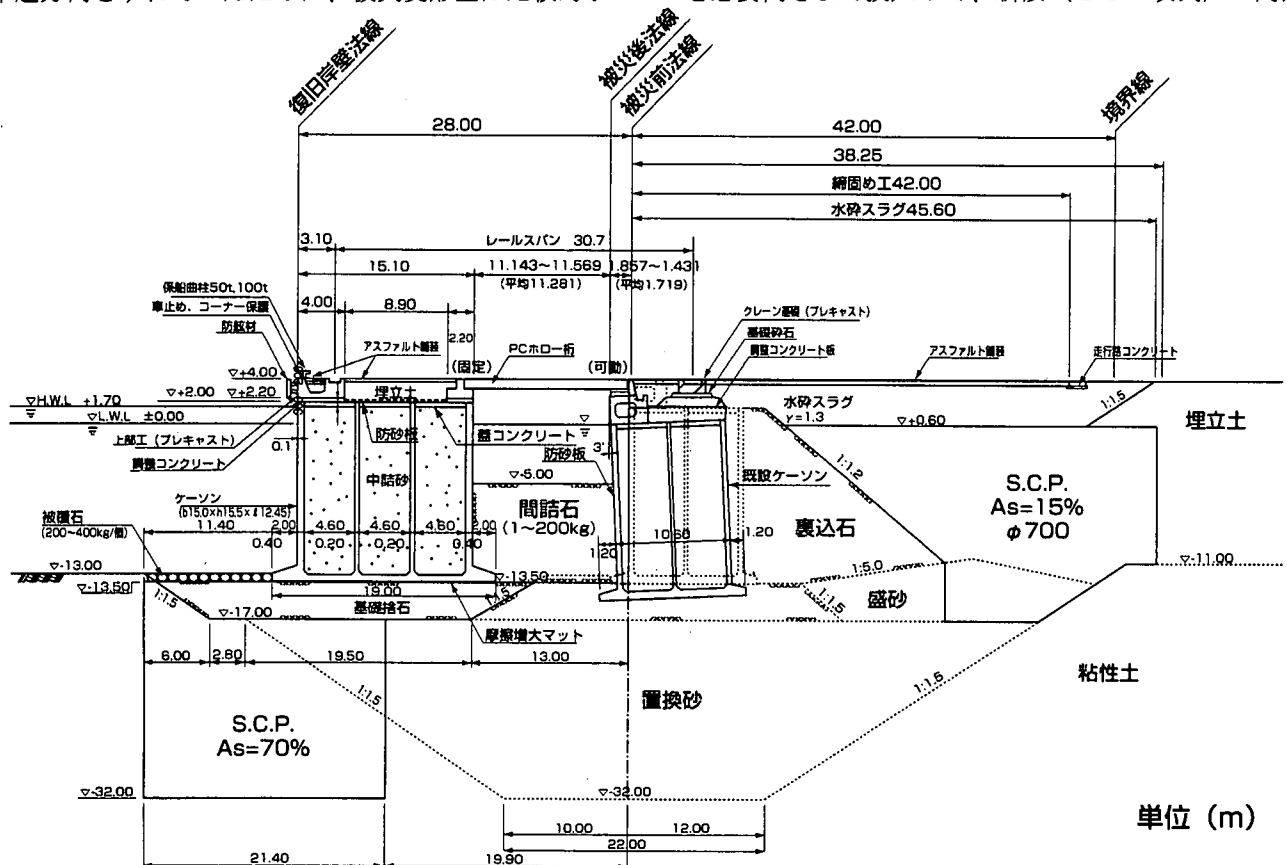


図-5 六甲アイランド -13m岸壁RC2 の標準断面図

め石～既設（置換砂）全体として強震時の耐震安定性を確保するようにしている。また、既設ケーソン背後地盤の液状化対策としてSCP工法による地盤改良を実施するとともに、土圧低減のため表層地盤（+0.6m以浅）を軽量地盤材料としての水砕スラグ（気中重量 1.3t/m^3 、水中重量 0.7t/m^3 ）で置換している。

（３）変形照査

本施設の設計は、震度法（設計震度0.25）を基本としているが、耐震強化岸壁であることから、模型振動実験⁷⁾と数値シミュレーション⁸⁾を併用して強震時の残留変形（耐震性）の検証を行った⁵⁾。この際、入力地震動は、神戸市開発局がポートアイランド内にて観測した基盤波のNS成分（最大加速度 544Gal ）を基本としている。なお、これら変形照査手法の適用性については、被災岸壁の原因究明の際に行った一連の実験および解析で既に確認されている^{1)、7)、8)}。

本岸壁の変形照査の結果として、数値シミュレーションによる残留変形図を図-6に示す。本岸壁に対しては、地震動の卓越方向の問題から、被災時と変形照査時の入力地震動の最大加速度が異なっているが、仮に被災前の岸壁に変形照査時の入力地震動を作用させた場合には、5m程度の法線変位が想定された岸壁が、デタッチトケーソン構造による復旧によって、残留変形量が非常に小さくなり、しかも許容変形量（法線変位量1m程度）以内に抑えられた（表-1）^{5)、9)}。また、実験結果と解析結果からほぼ同等の変形量が得られ、両者の整合性が確認されたとともに、デタッチ

トケーソン構造による復旧によって強震時の残留変形量が大幅に低下することが確認された。

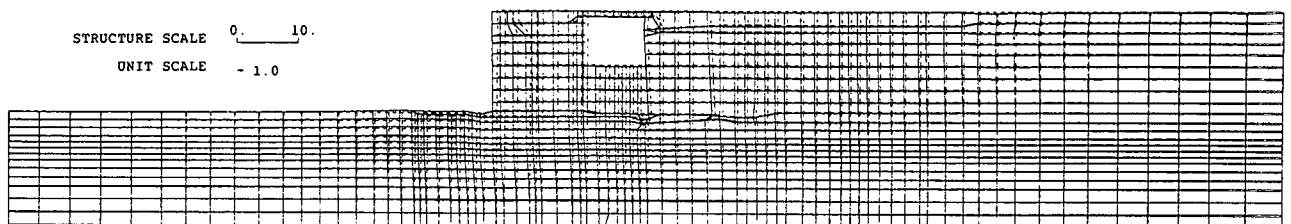
特に、図-7に示す新設ケーソンおよび既設ケーソン天端の水平変位時刻歴から明らかなように、デタッチトケーソン構造による復旧断面では、両ケーソンの変形・振動性状がほぼ同一であることが確かめられ、新設～既設ケーソン間隔は残留値として25cm程度の開きが生じる結果が得られた（表-1）。実設計では、この結果を参考にしてPCホロー桁の可動支承側の許容開き量を設定している。コンテナパースの被害では、岸壁の大変位に伴いガントリークレーンの脚部が股裂き状態になり、これによって脚部の座屈などの大きな被害が生じたが、本復旧構造によりガントリークレーンにも大きな外力（被害）を与えにくい構造であることが確認された⁹⁾。

表-1 変形照査の結果（ケーソンの残留変位）

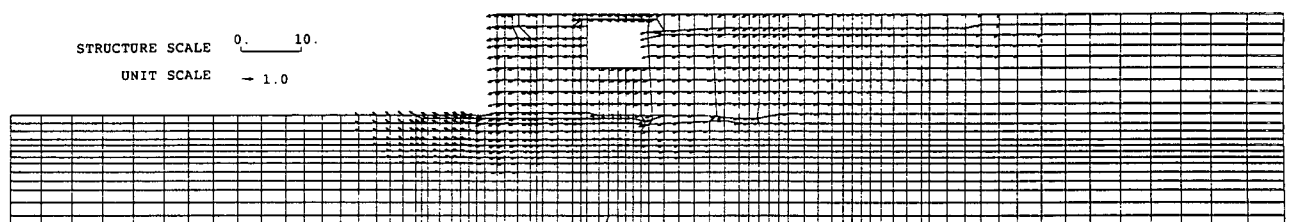
	模型振動実験		数値シミュレーション	
	新設ケーソン	既設ケーソン	新設ケーソン	既設ケーソン
法線変位 (変位差)	81cm (25cm)	56cm	88cm (27cm)	61cm
天端沈下	13cm	45cm	21cm	19cm

（４）施工状況

六甲アイランドRC2 パースは、港湾機能の停止した神戸港のコンテナ荷役をいち早く再開するため、震災後直ちに応急復旧工事が開始され、震災3ヶ月半後の



(a) 残留変形図



(b) 変位ベクトル図

図-6 六甲アイランド -13m岸壁 RC2パースの数値シミュレーション結果

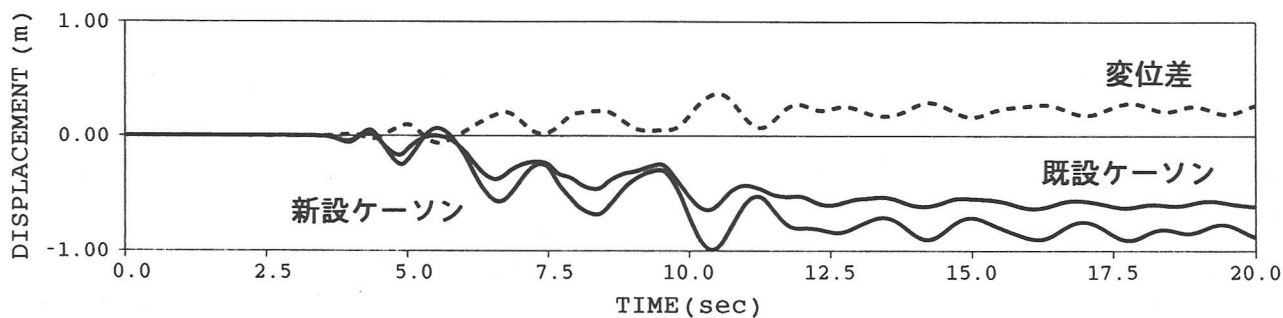


図-7 数値シミュレーションによる新設ケーソンおよび既設ケーソンの天端水平変位時刻歴(RC2)



写真-1 六甲アイランド -13m岸壁 RC2バースの施工状況 (平成 8年10月末)

4月30日に暫定供用を開始している。このため、本格復旧工事は隣接岸壁 RC1および RC3バースの復旧完了後に、バースシフトが行われてからの平成 8年 5月以降のこととなった。本工事の施工状況は、平成 8年10月末現在で、基礎地盤工事が終了し、ケーソン全28函の半数が据え付けられた状況にあり、年度末の完成に向けて鋭意工事が進められている(写真-1)。

6. まとめ

阪神・淡路大震災で被災した神戸港の重力式ケーソン岸壁の復旧に際し、「デタッチトケーソン構造」による復旧方法を新たに考案し、神戸港の中心的な役割

を果たすコンテナバースなどの復旧に適用した。

以下に、その主な結論を示す。

- ① 神戸港震災復興において、重力式ケーソン岸壁の復旧構造形式として「デタッチトケーソン構造」を新たに考案し、その設計手法を提示した。
- ② 神戸港コンテナバースを中心に、総延長 3,830 mの被災岸壁の復旧に本構造形式を適用した。
- ③ 「デタッチトケーソン構造」による復旧は、被災岸壁の補強および土留め構造としての有効利用を考慮するとともに、既設・新設岸壁を含む岸壁構造全体の耐震強化を考えた復旧構造形式である。

- ④ 復旧設計は震度法を基本とし、耐震強化岸壁については模型振動実験および数値シミュレーションによる変形照査を併用した。
- ⑤ 耐震強化岸壁として整備する RC2バースは、今回と同等の地震動を作用させても、その残留変形量は小さく抑えられ、その耐震性が非常に優れていることが確認された。特に、新設ケーソンと既設ケーソンの変形・振動性状が同じであり、その間隔の変化も小さく抑えられることが確認された。

謝辞

「デタッチトケーソン構造」による復旧方法を取りまとめるにあたり、第三港湾建設局 稲垣紘史 前局長（現 財団法人 沿岸開発技術研究センター常務理事）にご指導・ご助言を頂いた。また、復旧断面の耐震性の検証においては、数値シミュレーションは港湾技術研究所 井合 進 室長からご指導を受け、模型振動実験は港湾技術研究所 菅野高弘 室長からご指導を受けた。ここに、深甚なる謝意を表す次第である。

[参考文献]

- 1) 運輸省港湾局・運輸省港湾技術研究所・運輸省第三港湾建設局：阪神・淡路大震災による港湾施設等被災状況調査報告書（第2集）、平成7年10月。
- 2) 及川 研・輪湖建雄・松永康男・成瀬英治：神戸港の港湾施設の復旧・復興、阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、土木学会、1996年1月。
- 3) 松永康男・及川 研・輪湖建雄：阪神・淡路大震災による重力式港湾構造物の基礎地盤部の変形、阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、土木学会、1996年1月。
- 4) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説、改訂版、(社)日本港湾協会、平成元年2月。
- 5) 松永康男・及川 研・園山哲夫：神戸港震災復興における耐震強化岸壁の設計・施工、第13回港湾技術報告会講演集、運輸省港湾局、平成8年11月。
- 6) 寺内 潔：耐震強化岸壁の設計法、Coastal Development No.24、(財)沿岸開発技術研究センター、1996年6月。
- 7) 菅野高弘・三藤正明・及川 研：ケーソン式岸壁の被災に関する模型振動実験、兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察（その6）、港湾施設被害検討委員会編、港湾技研資料No.813、Sept. 1995。
- 8) 井合 進・一井康二・森田年一：ケーソン式岸壁の有効応力解析、兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察（その7）、港湾施設被害検討委員会編、港湾技研資料No.813、Sept. 1995。
- 9) 田中祐人・阿比留久徳・渡邊英一・長井正嗣・松井五郎・倉石謙司・丸山繁人・近江宗作：兵庫県南部地震によるコンテナクレーンの被災状況と地震時の応答について、阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、土木学会、1996年1月。

Reinforcing method of Gravity Caisson Type Quay Walls in the Port of Kobe

Yasuo Matsunaga, Ken Oikawa, Tetsuo Sonoyama

The Third District Port Construction Bureau, Ministry of Transport

Almost all of the facilities in the port of Kobe suffered a great damage by the 1995 Great Hanshin-Awaji Earthquake. Many of the quay walls were a gravity caisson type structure and they deformed to sea side about 5m and subsided about 2.5m at maximum. Gantry cranes for the handling of containers were also severely damaged.

An appropriate restoration method is applied to each of the damaged facilities taking degree of damage and restricting conditions etc. into account. 'A detached caisson method' is the one of the restoration method of gravity type quay walls in the port of Kobe and it was made clear that the facilities restored by the detached caisson method performed very well against strong ground motions such as the 1995 Great Hanshin-Awaji earthquake.