

大蔵海岸 陥没事故調査報告書

平成 14 年 6 月

土木学会海岸工学委員会

目 次

1. 調査概要	1
1-1. 事故の概要	1
1-2. 事故調査小委員会の発足	1
(1) 設立趣旨	1
(2) 委員会規約	4
(3) 委員構成	4
1-3. 委員会活動概要	5
(1) 第1回委員会	5
(2) 第2回委員会	5
(3) 第3回委員会	5
(4) 第4回委員会	5
(5) 第5回委員会	6
1-4. 結果の概要	6
(1) 事故原因	6
(2) 今後の復旧対策の提言	6
(3) 今後の安全管理に向けて	6
2. 大蔵海岸の概要	8
2-1. 事業概要	8
(1) 東播海岸における事業	8
(2) 大蔵海岸C C Z整備の概要	9
2-2. 自然条件	13
(1) 地形	13
(2) 波浪	13
(3) 潮位	13
(4) 地震	14
2-3. 大蔵海岸施設の設計・施工・管理状況	27
(1) 構造設計	27
(2) 施工	27
(3) 管理	34
3. 事故原因究明のための調査	36
3-1. 空洞調査	36
3-2. ケーソン変位状況	41

3-3.	突堤部掘削調査	47
(1)	砂防板の取り付け状況	47
(2)	砂防板の損傷状況	47
3-4.	西側護岸部掘削調査	48
3-5.	土質調査	77
(1)	海浜部	77
(2)	雑石部	77
3-6.	波高・水位・波圧等調査	87
(1)	波高・波圧観測	87
(2)	防砂板の変位観測	88
(3)	間隙水圧観測	88
3-7.	防砂板の材質調査	108
3-8.	砂層内における空洞形成に関する実験	109
(1)	目的	109
(2)	実験概要	109
(3)	結果	111
3-9.	他の人工海浜の調査	114
(1)	人工海浜における陥没等	114
(2)	ケーソン構造の人工海浜	114
4.	事故原因の分析	118
(1)	防砂板の損傷原因	118
(2)	空洞の発生原因	119
(3)	空洞の成長原因	119
(4)	陥没の発生原因	120
5.	今後の復旧対策の提言	121
6.	今後の安全管理に向けて	121
(1)	人工海浜の設計技術の向上	121
(2)	巡視・点検	122
用語解説		123
引用文献		125
巻末資料		

まえがき

兵庫県明石市の大蔵海岸は、明石海峡大橋の全景を望み、風光明媚な場所に位置している。このこともあって、この海岸は、コースタル・コミュニティ・ゾーン整備事業に平成 2(1990)年に認定され、平成 9(1997)年に完成した人工海浜であり、現在では多くの人々に利用され親しまれている。

平成 13(2001)年 12 月 30 日、大蔵海岸において、父親と遊びに来ていた 4 才の少女が砂浜に突然発生した陥没穴に転落し、一時生き埋め状態となった。付き添っていた父親などの懸命の努力により救助されたものの、その後意識不明の状態が続き、去る平成 14(2002)年 5 月 26 日に死亡するという、悲しく痛ましい事故となった。

海岸における砂浜の陥没等の災害は、台風などにより発生する高波やその越波によるものがほとんどであり、今回の事故のように波浪が穏やかなときに、砂浜を散歩中の人を飲み込むような大きな陥没が突然生じる事故については、これまでほとんど報告例がなく、したがって技術的に論じられることがなかったと言える。

土木学会海岸工学委員会は、国土交通省近畿地方整備局および兵庫県明石市から調査の依頼を受け、工学的な観点から事故の原因究明と今後の対策の提言を行うため、関係工学分野の専門家からなる大蔵海岸陥没事故調査小委員会を平成 14(2002)年 1 月 12 日に発足させた。本事故調査小委員会においては、今回の事故の重要性・緊急性に鑑み、工学的に解明できることに万全に取り組みつつ、可能な限り早急に結論を導き出すように努力され、平成 14(2002)年 6 月 1 日までの 5 回の審議により、報告概要がとりまとめられ、公表された。

本報告書は、本事故調査小委員会における審議と報告概要に基づき、今回の事故に関する調査結果を海岸工学委員会としてとりまとめたものである。

わが国では、平成 11 年の「海岸法の一部改正」を受けて、防災機能のみならず利用や環境との調和のとれた総合的な海岸管理制度が創設された。そこでは、「美しく、安全で、いきいきした海岸を目指して」を改正の趣旨としている。今回の事故は、この「安全」の内容を鋭く問うことにつながっている。本報告書は、大蔵海岸の砂浜陥没事故に的を絞りとりまとめたものではあるが、今回の事故の教訓を最大限に活かして、国民の要望の高い、より一層安全で快適な海岸の整備と管理が進められることが望まれる。

平成 14 年 6 月 20 日

土木学会海岸工学委員会

委員長 河田 恵昭

1. 調査概要

1-1. 事故の概要

平成13年12月30日12時51分頃、兵庫県明石市大蔵海岸東地区（図-1.1）において、父親と散歩していた4歳の少女が、東側突堤際の砂浜に突然発生した陥没穴に転落し、生き埋めとなる事故が発生した（写真-1.1）。

事故は、少女が砂浜から東側突堤の上に上がろうと突堤部に近づいた時に、突堤部際の砂浜下に発生していた空洞が、少女の重みで陥没したことで起きたものである。

少女は約25分後に救出されたが、脳が低酸素状態となり意識不明の重体のまま、平成14年5月26日、低酸素性虚血性脳障害のため、入院していた明石市立市民病院で死亡した。

事故が発生した砂浜は、兵庫県と明石市が計画した人工海浜であり、突堤で囲まれた内側に砂等を投入して造成され、平成10年3月から供用開始されていた。

1-2. 事故調査小委員会の発足

わが国の人工海浜において、砂浜が陥没することにより深刻な人身事故が発生したことは、これまでになかった。今回の事故の特殊性・重要性に鑑み、土木学会海岸工学委員会は、国土交通省近畿地方整備局および兵庫県明石市の依頼を受け、関係する分野の専門家による事故調査小委員会を、事故発生から2週間後の平成14年1月12日に発足させた。

委員会の設立趣旨、規約、委員構成は以下の通りである。

（1）設立趣旨

明石市大蔵海岸は、海岸保全機能のより一層の充実と合わせて、白砂青松を復元し、明石海峡大橋の人工美と海峡の自然美が調和する緑豊かな海浜レクリエーションの場の整備がなされてきた海岸である。

平成13年12月30日12時51分頃、大蔵海岸東突堤付近において人工砂浜の陥没事故が発生し、砂浜上部付近にいた4歳の女兒が陥没した場所に吸い込まれ、意識不明の重体となった。

このため、本小委員会は、大蔵海岸で発生した人工海浜の陥没事故について、近畿地方整備局及び明石市より調査の依頼を受け、工学的な観点から事故の原因究明と今後の対策の提言を行うため、（社）土木学会海岸工学委員会内に設置するものである。

(2) 委員会規約

(名 称)

第1条 本会は「大蔵海岸陥没事故調査小委員会」(以下「委員会」という.)と称する。

(目 的)

第2条 委員会は、平成13年12月30日に兵庫県明石市大蔵海岸において発生した砂浜の陥没事故について、工学的な観点から事故の原因を解明するとともに、今後の対策方法を検討することを目的とする。

(構 成)

第3条 委員会は、(3)に掲げる委員により構成する。

(委員長)

第4条 委員会の委員長は、酒井 哲郎 京都大学大学院工学研究科教授とする。

2 委員長は、委員会を代表し、会務を総括する。

3 委員長に事故ある時は、委員長があらかじめ指名する委員がその職務を代行する。

4 委員長は、必要に応じ委員以外の者を会議に出席させることができる。

(会議の運営)

第5条 委員長は、会議の議長となり、議事を処理する。

(設置期間)

第6条 委員会は第2条に規定する目的の達成を以って解散する。

(雑 則)

第7条 委員会の審議に必要な資料の作成等、庶務は(財)国土技術研究センターが行う。

2 この規約に定めるもののほか、委員会に関し必要な事項は、委員会に諮って定める。

附 則 この規約は、平成14年1月12日から施行する。

(3) 委員構成

委員長	酒井 哲郎	京都大学大学院工学研究科土木工学専攻教授
委 員	泉宮 尊司	新潟大学工学部建設学科教授
〃	宇多 高明	国土交通省国土技術政策総合研究所研究総務官
〃	島田 広昭	関西大学工学部土木工学科専任講師
〃	関口 秀雄	京都大学防災研究所教授
〃	善 功企	九州大学大学院工学研究院建設デザイン部門教授
〃	高橋 重雄	独立行政法人港湾空港技術研究所海洋・水工部長
〃	辻本 剛三	神戸市立高等専門学校都市工学科教授
〃	出口 一郎	大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻教授
〃	名合 宏之	岡山大学環境理工学部環境デザイン工学科教授
〃	御船 直人	財団法人鉄道総合技術研究所 ISO 審査登録センター 審査課長(第3回委員会より追加)

1－3. 委員会活動概要

(1) 第1回委員会

平成14年1月12日開催（於：兵庫県明石市市民会館）

- ・ 事故直後の委員会に先立ち、大蔵海岸事故発生箇所周辺の現地視察を行った。
- ・ 委員会の冒頭に、近畿地方整備局と明石市から依頼のあいさつを受けた。
- ・ 公正かつ円滑な議事運営が必要となることから審議は非公開とするが、毎回委員会終了後に記者会見を行うとともに、会議資料と議事要旨を海岸工学委員会のホームページに掲載することにより、積極的な公開・公表に努めることとした。
- ・ 事故の概要について審議したが、明白な事故原因を確認することが出来なかったため、現地調査（掘削調査・空洞探査など）、海象資料分析、類似事例調査などを進めることとした。

(2) 第2回委員会

平成14年2月2日開催（於：兵庫県明石市 グリーンヒルホテル明石）

- ・ 委員会審議において現地調査結果などを確認し、その後事故箇所の目地部分を平均海面付近まで掘削した状況を現地で確認した。
- ・ 事故箇所の防砂板の平均海面付近に亀裂が発生していることが確認され、防砂板の損傷が陥没発生の主要因と推定された。
- ・ 陥没発生のメカニズムを詳細に審議するため、現地の掘削調査、土質調査、波浪調査などを進めるとともに、事故箇所の防砂板の損傷状況を正確に確認することとした。

(3) 第3回委員会

平成14年2月23日開催（於：大阪府大阪市 ニューオーサカホテル）

- ・ 第3回より、材料工学の専門家である御船直人氏（財団法人鉄道総合技術研究所 ISO 審査登録センター審査課長）を新たに委員に追加した。
- ・ 事故箇所の防砂板を観察した結果、摩耗および劣化と思われる損傷状況が確認された。
- ・ 陥没発生原因に関する議論が進展し、今後の対策についても概略の議論が行われた。
- ・ 現地の波圧調査などを続けるとともに、現地の防砂板の材質試験を行うこととした。

(4) 第4回委員会

平成14年4月13日開催（於：大阪府大阪市新大阪ワシントンホテルプラザ）

- ・ 現地の防砂板の材質試験結果から、摩耗や劣化の状況などが詳細に確認された。
- ・ 事故原因の分析、今後の対策について概ね議論が収束したため、次回に報告概要をとりまとめることとした。
- ・ 基本計画段階から現在までのさまざまな情報を詳細に整理することとした。
- ・ 模型実験を行い、現地の状況を再現してみることにした。

（５） 第５回委員会

平成 14 年 6 月 1 日開催（於：大阪府大阪市 チサンホテル）

- ・ これまでの議論を再整理の上，報告概要（本報告書の第 4～6 章に相当）をとりまとめ，公表した。

1－4. 結果の概要

（１） 事故原因

対象地点の自然条件の解析および各種現地観測成果，さらには水理模型実験から，工学的知見に基づき，事故原因を以下のように推定した。

事故は，砂浜下に発生していた深さ約 2m の縦長の空洞が，その上に載った子供（4 歳の少女）1 名の重みにより，陥没したことにより発生した。縦長の空洞は，東側突堤として並べられ設置されたケーソンの目地部に砂止め用に設置された防砂板が破損したため，目地部に進入した波が押し寄せるときに海水が破損部から侵入し，波が引くときに海水とともに防砂板背後の砂が破損部を通じて海側に徐々に流出して生じたものと推定された。

防砂板の破損原因は，来襲する波浪がケーソン目地部に進入し，目地部に挿入された防砂板の U 字突起部が繰り返し波の力を受け，そのためにその部分が動かされ，その背後の砂および雑石と摩擦を続けたため，摩耗損傷したものと推定される。

（２） 今後の復旧対策の提言

今回の事故調査を通して，大蔵海岸をより安全な海浜として復旧するためには，以下の工法が提案できる。

- ・ 防砂板の適切な選定
- ・ 裏込材の配置と防砂シートの敷設
- ・ 裏込部と砂浜部の間にフィルター材の敷設
- ・ 養浜する砂の層を薄くする
- ・ ケーソン間に目地材を充填

設計に際しては，これらを参考として，万一異常が発生しても事故への進展を抑制できるよう，必要な対策を講じることが望ましい。

（３） 今後の安全管理に向けて

今後，人工海浜がより安全で快適な空間として市民に提供されるよう，以下に示す観点から検討が進められることが望まれる。

1) 人工海浜の設計技術の向上

利便性と安全性の両面からの配慮が必要である人工海浜においては，目に見えないとこ

ろで異常が発生しても事故への進展を抑えられるような対策の検討が重要である。また、万一陥没などの事故が発生しても、人身に及ぶ被害を軽い範囲に抑えることのできるような対策の検討も重要である。なお、今回の事故調査により現象が明らかになった、防砂板の損傷、空洞の発生・成長、陥没の発生については、今後より詳細に工学的な検討を進める必要がある。

2) 巡視・点検

海浜地は日常的に地域住民など公衆の利用する空間であるため、管理者における巡視・点検のみでは手の届きにくいきめ細かな情報を海浜利用者から募ること等により、危険な状態を早期に検知できる住民と行政の連携による管理体制の充実が期待される。

2. 大蔵海岸の概要

2-1. 事業概要

(1) 東播海岸における事業

東播海岸は、瀬戸内海に面し神戸市西端から明石市を経て、加古郡播磨町に至る延長約26kmの海岸である（図-2.1 参照）。本海岸は万葉の時代から白砂青松と詠われた美しい海岸であった。しかし、主として冬季の西風により発達した風浪により、海食崖の形成を伴って侵食が進行してきた（写真-2.1 参照）。明治30年から昭和30年までの侵食状況調査（図-2.2 参照）では、大きいところでは年間1.0m～1.5mも侵食が進行した結果となっている。



図-2.1 東播海岸位置図

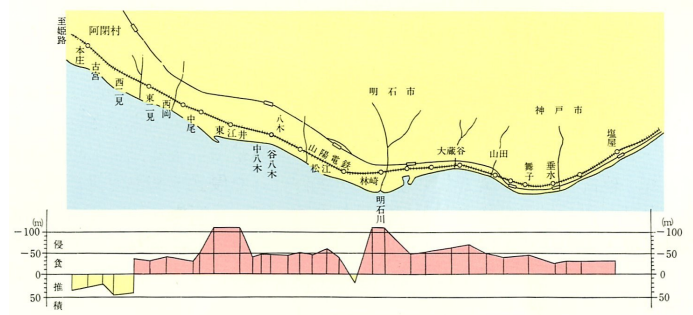


図-2.2 侵食状況のグラフ



写真-2.1 侵食によって崩落した工場(江井ヶ島海岸)

海岸事業としては、大正末期から地元市町村の手により、局部的に小規模な護岸や突堤等が施工され防護にあたったが微々たるもので、昭和25年のジェーン台風による災害を契機に海岸事業の重要性が認識され、兵庫県において海岸侵食対策事業が始まった。その後、昭和32年度から建設省が海岸事業調査を実施し、昭和36年度より直轄事業として、護岸工を主体とした侵食対策事業に着手した。

その後、昭和39年台風20号の来襲時に重軽傷者9名・全壊家屋30戸・半壊148戸、昭和40年の台風23号の来襲時には、家屋流失壊145戸・半壊903戸と甚大な被害を被ったことなどから、昭和43年度以降は、主に越波防止のための消波工・離岸堤等の海岸保全施設の整備を進めてきた。

また、昭和57年からは従来のブロックによる消波工にかわり、景観・海浜利用に配慮した養浜工を整備している。

(2) 大蔵海岸CCZ整備の概要

平成元年、海洋性レクリエーションへの関心が高まり、海浜をうるおいとふれあいの空間として利用していきたいという要請が強くなっていたこと、また東播海岸においては明石海峡大橋が建設中であり、沿岸域の地域整備の機運が高まっていた状況において、神戸市と明石市が舞子および大蔵海岸に海浜公園を計画した。

兵庫県と明石市は、平成元年に明石東部海岸整備基本計画策定委員会を設置した。兵庫県および明石市は、委員会での明石市および明石東部海岸の立地条件および明石海峡大橋等の関連プロジェクトに基づく明石東部海岸の整備方向、導入機能および計画テーマの提案、さらにはレクリエーション需要量推計と施設の具体化の検討結果を受け、平成2年に土地利用計画、事業計画(図-2.4)をまとめた。

一方、これらの海岸を含む東播海岸は当時の建設省近畿地方建設局姫路工事事務所が管理していたことから、関係機関の連絡・調整を図ることを目的として、建設省、兵庫県、神戸市、明石市の間で東播海岸CCZ(用語解説:巻末掲載)整備推進連絡協議会が設置された。

第1回の協議会は平成元年に開催され、東播海岸CCZ整備計画に関するスケジュール、海岸保全施設計画、神戸市・明石市CCZ計画などに関して意見交換をした。

第2回協議会は平成3年に開催され、舞子および大蔵海岸における養浜(用語解説)断面形状、埋立護岸の天端高、南側外郭施設としての人工リーフ(用語解説)形式と離岸堤(用語解説)形式の比較、人工磯(用語解説)の波浪安定性などに関して意見交換をした。

その結果、CCZ整備工法として、南側の外郭施設に離岸堤形式を選定した。

①位置

兵庫県明石市大蔵海岸通1丁目及び2丁目



図-2.3 位置図



写真-2.2 航空写真

②規模

埋立面積: 約32ha(埋立地 約19ha, 砂浜・磯浜・内水面など 約13ha)

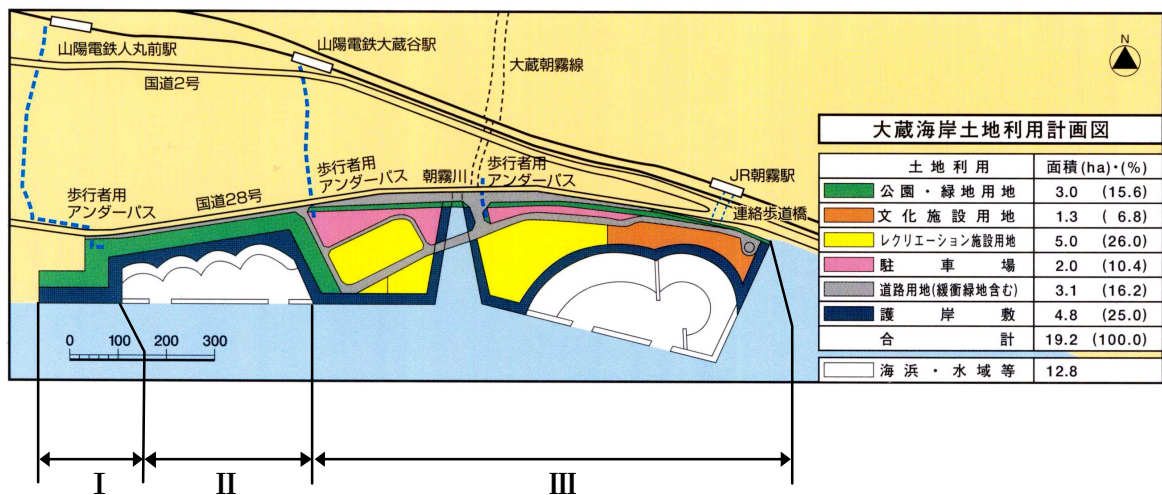
海岸延長: 約1.5km

③事業内容

公有水面埋立により、海浜レクリエーションゾーンを創出するために必要な用地を確保するとともに、公園、緑地、駐車場、文化施設、及びレクリエーション施設（宿泊施設、魚のまち広場、スポーツ・アミューズメント施設）並びに海岸保全施設の一環として砂浜、磯浜などの親水施設を整備する。

④事業主体

- 埋立造成事業
- 明石市
- 海岸保全施設整備事業
- 建設省及び明石市
- 公園・駐車場等
- 明石市
- レクリエーション施設
- 民間企業



	I	II	III
埋立造成事業	明石市	明石市	明石市
海岸保全施設整備事業	明石市	建設省及び明石市 (※養浜・離岸堤・潜堤は建設省、 緩傾斜護岸は明石市)	明石市

図-2.5 各区域の事業主体

⑤事業年度

平成4年度～平成9年度

表-2.1 事業の経緯

年 月 日	内 容
平成 元年 9月 ～平成 2年 6月	明石東部海岸整備基本計画策定委員会による基本計画の審議
平成 元年 9月 ～平成 3年 2月	東幡海岸CCZ整備推進連絡協議会によるCCZ計画の審議
平成2年7月30日	明石市が大蔵海岸CCZ整備計画を建設大臣から認定を受ける
平成 2年 11月 ～平成 4年 2月	大蔵海岸の基本設計 (明石市から中央復建コンサルタンツ株式会社に委託)
平成 4年 10月 ～平成 5年 2月	大蔵海岸の詳細設計 (明石市から中央復建コンサルタンツ株式会社に委託)
平成5年3月18日	兵庫県知事は明石市に対して、大蔵海岸公有水面埋立を免許(平成5年～平成9年 明石市が埋立免許に基づく工事を施行)
平成 5年 2月 ～平成 9年 3月	大蔵海岸の工事施行* (明石市から鹿島・大豊・森長共同企業体に発注)
平成9年3月10日	兵庫県知事は明石市に対して、大蔵海岸公有水面埋立の竣功を認可
平成9年8月 1日	姫路工事事務所長による大蔵海岸の海岸保全施設の引継のための検査の完了

事業費：約264億円

(大蔵海岸全体事業費、但し国土交通省直轄工事(約26億円)及び上物施設を除く)

*：事故個所を含む工区

(大蔵海岸の工事施行と公有水面の埋立の認可は、各々2工区に分割し実施されている)

2-2. 自然条件

(1) 地形

大蔵海岸は明石海峡に面しており、ほぼその正面に淡路島が迫っている（図-2.6）。図-2.7, 2.8 に平成 13 年 8 月に測量して得られた大蔵海岸前面海域の海底地形を示す。この図からわかるように、大蔵海岸は西の明石港から東の舞子にかけて緩く湾曲した海岸の中央付近に位置する。明石港および舞子前面海域は水深 30m まで 1/10 ほどの勾配に対し、大蔵海岸前面は約 1/30 と緩やかな勾配である。また、南側突堤部は水深約 8m であり、東側突堤は水深 8m 以浅に設置されている。

(2) 波浪

大蔵海岸周辺においては図-2.9 に示す位置において、風、波浪および潮位の観測が実施されている。図-2.10 に大蔵海岸の西約 10km に位置する江井ヶ島観測所における波向別の波高頻度分布を示す。ほぼ SSW からの波浪が年間を通じて卓越している。これは、南方向には淡路島が西から南西方向には小豆島を始め多くの島が点在するため、SSW 方向が波を発達させるのに必要な吹送距離が長いためである。SSW 方向からの波浪の来襲に対しては、対象地点の南側突堤はやや斜めではあるが、波の屈折等を考慮すると、ほぼ正面から波浪を直接受ける位置にある。一方、東側突堤は南側突堤により波浪が遮蔽されるため、SSW 方向からの波浪は直接受けることはなく、したがって東側突堤に作用する波力は小さいものと推定される。

次に、図-2.11, 2.12 に江井ヶ島と神戸観測所における波高と周期およびそれらの複合頻度分布を示す。いずれも波高 0.5m 以下が 9 割近くを占め、波高 1.0m 以上は 1% 程度である。周期も両地点とも、3~4s が 7~8 割を占めている。これらの出現回数から、来襲波数を求めたものを図-2.13, 2.14 に示す。江井ヶ島および神戸とも、卓越している波高 0.5m 以下、周期 3~4s の波数が最も多く、7 年間で 1000 万回を越える波数が来襲している。

次に、図-2.15 に江井ヶ島における有義波高の月別最大値を示す。過去 7 年間での最大は、平成 10 年 10 月 18 日に発生した波高 2.85m（周期 5.90s）であり、次いで平成 8 年 8 月 14 日に発生した波高 2.79m（周期 6.00 s）である。

(3) 潮位

神戸港における潮位実況を図-2.16 に示す。朔望平均満潮位および干潮位は各々 T.P.+0.775, T.P.-0.735m であり、その潮位差は 1.5m である。

図-2.17 に明石海峡における西流および東流の最強時の流況を示す。海峡中央付近では 2~2.5m/s の流速があるものの、岸に近づくにつれ、流速は弱まっている。

(4) 地震

東側突堤のケーソン据付が開始された平成 7 年以降に発生した地震震度データ（神戸気象台）を図-2.18 に整理して示した。平成 7 年 1 月 17 日に発生した阪神淡路地震を最大として、その後 10 月までに、震度 2～4 クラスの地震が間欠的に発生しているが、その後沈静化している。

2-3. 大蔵海岸施設の設計・施工・管理状況

(1) 構造設計

朝霧川以東の人工海浜の主要施設である東西および南側突堤は、設計当時の海岸構造物のための設計基準である海岸保全施設築造基準（1987）、港湾の施設の技術上の基準・同解説（1989）をもとに平成2年～5年にかけて設計された。南側および東側突堤の平面図および標準断面図を図-2.19、図-2.20に示す。また、図-2.21にはケーソンにNoを付した図を示す。これら施設を設置する水深が5～8mとなることからケーソン（用語解説）構造が適切であると判断している。

両者の設計条件としての波浪条件は、南側突堤は最高波高 7.2m、有義波高 4.3m に対し、東側突堤は最高波高 5.1m、有義波高 3.0m である。計画潮位は T.P.+2.80m である。

南側突堤は、沖側に正対して配置されている。構造は、基礎捨石マウンドの上に、直立消波型ケーソンが置かれ、その背後に裏込石と雑石で埋め立てられ、さらにその上に養浜されている。一方、東側突堤は、南側突堤から直角に岸側に折れてつながる突堤であり、ほぼ海岸線に直角な方向を向いている。構造は、基礎捨石マウンドの上にケーソンが置かれ、その前面には 8ton 型の異型消波ブロックが設置されている。ケーソンの背後はマウンドの上に被覆のための捨石が置かれ、さらに南側と同様、雑石により埋め立てられ、上部に養浜がなされている。

その場合、ケーソンの目地部からの背後の養浜砂の流出を防ぐため、一般的な方法である防砂板（用語解説）を取り付けるよう、設計された。防砂板については、設計当時においては基準等で規格が示されてなく、その当時一般的に用いられていた防砂板を採用している。また、ケーソンは施工後、波浪や地震などの影響で不等沈下が起こる場合があり、その場合でも目地部の開きに対応できるよう、U字型の突起がついた防砂板を使用した（写真-2.3、図-2.22）。

(2) 施工

まずケーソンを載せる基礎部であるマウンドを、捨石を投入して築き、その上に大型クレーンでケーソンを据付けた。ケーソン据付後は碎石によりケーソンの中詰をするとともに、目地部に防砂板を取り付けた。その後、ケーソン背後を雑石（用語解説）により埋め立て、さらにその上に砂を養浜した。

東側突堤のケーソンは平成7年1月から4月にかけて据えられ、ほぼ同時期に防砂板も設置された（表-2.2）。その後、7月から11月にかけて雑石が投入され、その後翌年4月から5月にかけて砂が投入されている。防砂板を取り付けた後、砂を投入するまでに約1年間の期間があったため、波浪の影響により、南側および東側突堤ケーソンの防砂板を押さえていたフラットバー（図-2.22 参照）が緩んだ状況が確認された。そこで、養浜砂投入直前において、事故個所の防砂板も含め新たなフラットバーで補強を行っている。さらに、南側突堤ケーソン No.4-5～No.10-11 の目地部において、防砂板背後に不織布を当て、土のうを積み上げるにより、防砂板の補強を行っている。

(3) 管理

事故に至るまでの事故現場周辺の砂浜を含めた施設管理状況を図-2.23 に整理する。

大蔵海岸東地区の埋立造成工事は平成 8 年 12 月には終了し、その後、人工海浜部においては明石市が週 1 回の定期パトロールを実施してきた。砂浜表面のくぼみ（用語解説）は、平成 11 年 1 月 26 日の定期パトロールにおいて、南側突堤ケーソン No.8-9 および No.9-10 間の目地部背後で最初に発見された。その後、平成 13 年 1 月 4 日に同じく南側突堤のケーソン No.6-7 間の目地部で陥没（用語解説）が見つかった。そのため、明石市は平成 13 年 1 月 19 日に陥没箇所を掘削し、碎石で埋め戻した。さらに平成 13 年 1 月 29 日には、同じく南側突堤ケーソン No.6-7 と No.8-9 および No.9-10 目地部において、掘削し水砕スラグを入れたトン袋（用語解説）を 3～4 段積にして埋め戻す対策を講じた。

その後、平成 13 年 2 月 21 日に南側突堤ケーソン No.7-8 目地部背後の砂浜でくぼみが発見され、さらに平成 13 年 6 月 11 日に今度は東側突堤ケーソン No.11-12 の目地部でもくぼみが発見されるに至った。その間の平成 13 年 4 月 18 日には、南側突堤ケーソン No.7-8, No.8-9 および No.9-10 の目地部において掘削調査を実施したところ、防砂板に破れが確認されたため、目地部に新たな防砂板を重ねて設置し、砂を入れたトン袋を 1 段積にして埋め戻す対策を再度講じた。

その後、5,6 月にかけて、ケーソン No.7-8,8-9 および 9-10 目地部でくぼみや陥没が発見されている。明石市は 8 月 23 日にブルドーザーにより砂浜の敷き均しを実施している。

このような相次ぐ陥没を受け、明石市は平成 13 年 12 月 7 日に南側突堤部背後域をトラロープ等で囲み、立ち入り禁止とした。

そして、平成 13 年 12 月 30 日に、立ち入り禁止とした範囲の北端から約 50m 離れた東側突堤ケーソン No.17-18 目地部背後の砂浜において陥没事故が発生した。

3. 事故原因究明のための調査

ここでは、事故後において、その原因究明のために実施した調査について整理した。

3-1. 空洞調査

事故後において、鉄筋棒、レーダー探査、ファイバースコープ、発泡ウレタンによる空洞調査を実施した。表-3.1に各調査方法毎の成果、図-3.1に空洞が確認された平面位置を示す。また、他の調査成果とあわせて示した空洞の状況を後出図-3.5,3.6に示した。それらの結果をまとめると以下のとおりである。

- ・ 事故個所の陥没の深さは現海浜地盤表面より下約 2m であった。
- ・ 事故の個所に近い東側突堤ケーソン No.14-15 の目地部において、事故後に発見された空洞の規模・形状は、現地の測定や発泡ウレタンによる空洞の型取りを実施した結果、現地盤より下約 0.6m から下方約 1.4m にわたって、直径約 0.8m の縦長であることが確認された。
- ・ 南側突堤ケーソン No.5-6 および No.9-10 の目地部付近にも、東側で発見されたよりもやや規模は小さいが、空洞が確認された。
- ・ 事故に至るまでは、南側突堤周辺で砂浜表面に現れるくぼみや陥没はあったが、事故個所周辺ではくぼみや陥没は発生していなかった。

表-3.1 空洞化調査成果

調査方法	調査結果	備考
ファイバースコープによる空洞確認	空洞が確認されている No.5-6, No.14-15, No.9-10 の目地背後に挿入し空洞を確認 ケーソン目地間に挿入	写真 - 3.1
レーダー探査による空洞あるいは砂層の緩み確認	突堤に近いほど顕著な空洞パターンや砂の緩みが認められた。	写真 - 3.2
鉄筋棒による空洞あるいは砂層の緩み確認	No.9-10 目地部に空洞発見 (入口φ約 5cm, 内空φ約 50cm, 深さ 1.5m)	
発泡ウレタンによる空洞形状確認	No.5-6: 内空φ約 30~50cm, 深さ 0.8m No.9-10: 内空φ約 25~45cm, 深さ 1.35m No.14-15: 内空φ約 50~90cm, 深さ 1.45m	写真 - 3.3

3－2. ケーソン変位状況

ケーソンの変位等を把握するため、ケーソン目地間隔、ケーソンの傾き、天端高等を測定した。表－3.2 に計測方法、表－3.3,3.4,図－3.2 に計測結果を示す。

- ・ ケーソンの目地間隔は、概ね 2～8cm であった。また、大きなケーソン法線の出入りや傾きは見られなかった。
- ・ ケーソン上部工の天端高は、南側突堤で約 T.P.+4.0m、東側突堤で約 T.P.+3.8m であり、南側、東側各々隣接したケーソン間で顕著な天端高の違いは見られなかった。

また、潜水夫によるケーソン海側の状況を目視で観察したところ、表－3.5 に示す結果を得た。これによると、No.7-8 ケーソン海側の目地付近で多量の砂の流出（厚さ約 30cm、前出し約 2.5m）が確認された。

表－3.2 ケーソンおよびケーソン目地変状調査方法

	ケーソン部 変形	目地部 変形
模式図		
計測項目	海側傾き： $A(\tan \theta)$	海側上部目地の開き： $D1(\text{mm})$
	陸側傾き： $B(\tan \theta)$	海側下部目地の開き： $D2(\text{mm})$
	法線の出入り： $C(\text{mm})$	海側上下部の離隔： $D3(\text{mm})$

3-3. 突堤部堀削調査

南および東側突堤背後域を、雑石層付近まで堀削し、目地部の状況を観察する(写真-3.4)とともに、一部防砂板については撤去し、詳細に防砂板の損傷状況について調査した。また、西側突堤についても、目地部を中心に堀削し、補修状況を確認した。

南側・東側および西側突堤ともに、一部の目地部は補修された状況が伺えた(図-3.3, 3.4)。補修に至った経緯等は、先の2-3(3)「管理」のところで述べたとおりである。

また各目地部に設置されている砂防板の状況をケーソンの変形状況および海浜部の空洞化状況と合わせて、図-3.5, 3.6に示す。また、撤去した防砂板については、その厚さを測定し、厚さの分布図を作成するとともに、防砂板の表裏の写真と表部(陸側)のスケッチとともに図-3.7に示した。以下に主に防砂板の状態について明らかとことを示す。

(1) 砂防板の取り付け状況

使用されていた防砂板の取り付け状況を確認したところ、以下のことが明らかとなった。

- ・ 事故個所の防砂板はU字型の突起部がついたものが使用されており、ケーソン目地部にその突起部が挿入され、フラットバーでケーソン本体と固定されていた。
- ・ 事故部以外の防砂板については、事故個所と同様、突起部が目地部に挿入されていた個所もあったが、突起部が挿入できないほどケーソン目地部が狭い個所については、突起部が陸側に向くような形で取り付けられている個所もあった。
- ・ No.16-17 の目地部防砂板は図-3.8 に示すように、U字突起部が目地部からはずれ、平板部が目地部を押さえている状態であった。

(2) 砂防板の損傷状況

事故個所を含めた防砂板を取り外して、その損傷状況を確認した。

1) 事故個所の防砂板

- ・ 事故個所である東側突堤ケーソン No.17-18 の目地部に取り付けられていた防砂板は、平均海面付近(T.P.-0.29~T.P.+0.05m)のU字突起部に縦方向に約 34cm にわたって亀裂が発生しており(写真-3.5, 写真-3.6)、またその周辺は厚さ 1mm 以下と薄く(新品で約 5mm 厚)、亀裂上端部周辺には径 0.5mm 程度のピンホールが多数あいている状態であった。また、亀裂の生じている付近の陸地側表面には細かな凹凸が無数に確認された。
- ・ 防砂板の海側表面には、細かい亀甲状のひび割れが生じており、カーボンブラック(用語解説)が遊離し、表面上に墨状に付着していた。

2) 事故個所以外の防砂板

- ・ 事故個所の防砂板と同様、U字突起部に、亀裂、摩滅、欠損等の損傷個所が集中している。

- ・ 損傷個所は平均海面付近から、それ以下の部分がほとんどであり、損傷個所の陸側背後は雑石層部分に相当する。
- ・ 事故個所付近と比べ、南側突堤の防砂板の損傷が激しく、亀裂が広範囲に砂層まで及び、また欠損している部分も多い。
- ・ 一方、南側突堤と比べ、東側突堤の事故個所周辺については、損傷の程度は小さく、亀裂は平均海面付近の雑石層部分に集中しているものが多い。
- ・ 事故個所の南隣であるケーソン No.16-17 の防砂板は、理由は不明であるが他の個所とは異なり、U字型部分ではなく平坦な部分が目地部に固定されており、他の個所で見られた平均海面付近の亀裂は確認されなかった。
- ・ 西側突堤において砂浜から 20m 西に離れた埋立部分の同種防砂板を掘削により調べた結果、平均海面付近では防砂板が薄くなり、数 cm 程度の小さな穴が数ヶ所発生していた。

東側突堤のケーソン No.11-12 目地部に設置されていた防砂板を部分的に切除して、50 倍に拡大し観察した結果、以下のことがわかった。

- ・ 海側表面には、細かい亀甲状のひび割れが生じており、カーボンブラックが遊離し、表面上に墨状に付着していた（写真－3.7）。
- ・ 陸側表面の平均海面より上部には、細かい縦長のひび割れが生じていた（写真－3.8）。
- ・ 損傷の著しい平均海面付近の陸側表面には、固いもので擦れたような細かい凹凸が生じていた（写真－3.9）。

3－4. 西側護岸部掘削調査

突堤部と同様のケーソン構造とU字突起部をもつ防砂板を使用している西側護岸（図－3.9）においても掘削調査を実施し、防砂板の状態を確認した。この部分は護岸として設計されたため、防砂板背後には裏込石があり、その点、突堤部と構造が異なる（図－3.10）。防砂板を観察したところ、掘削した個所の防砂板は突起部が陸側に向けて取り付けられていた。また、主に平均海面以下の部分でこの突起部を中心に、大きなもので直径 5cm 程度、小さなもので 3～5mm 程度の穴が数箇所開いていた（図－3.11）。

3-5. 土質調査

現地海浜砂および雑石層部の粒度分布を調査した。

(1) 海浜部

ケーソンから 1,5,10m 離れた箇所の深さ 0.5,1.5,2.5m および雑石層内部から底質を採取し粒度分析した(図-3.12)。分析から得られた粒径加積曲線を図-3.13 に、均等係数を表-3.6 に示す。南側突堤背後の No.7-8 地点については、ケーソン部から 1m 距離地点の中央粒径は約 1mm 程度に対し、ケーソン部から 10m 離れた地点は約 0.3mm と、ケーソン部に近いほど粒径が粗い傾向が見られる。一方、東側突堤背後の No.14-15,15-16 および 16-17 地点では、南側突堤で見られた粒径の変化は見られず、中央粒径約 1mm であった。

(2) 雑石部

南側突堤 No.5-6 背後と、東側突堤 No.19-20 背後部において各々3ヶ所、雑石層の天端付近から底質を採取し粒度分析等を実施した(図-3.14)。2地点の粒度分布を比較すると、東側突堤部の雑石は中央粒径約 10~50mm であり、また 0.1mm~300mm と広い範囲の粒度分布を示しているのに対し、南側突堤部は中央粒径 70~100mm と大きく、さらに 50mm 以下の粒径が 30%以下と少なく、東側突堤部に比べて、粒径がそろっている(図-3.15,表-3.7, 3.8)。

3-6. 波高・水位・波圧等調査

ケーソン目地部で実施した波浪観測，水位観測，砂防板変位測定等について以下に整理する。観測状況を写真-3.10～3.14 に，観測位置，観測方法およびその結果を図-3.16～3.23 に示す。

(1) 波高・波圧観測

異なる2回の時期に，南側突堤および東側突堤の目地部で観測した波高（水位）および波圧の観測結果を表-3.9 に示す。なお，目地前面では波高（水位）を，目地間では波高（水位）と波圧を観測している。その結果，以下のことが明らかとなった。

- ・ 平成14年2月19日に実施した1回目観測において，東側突堤に位置する No.11-12, No.16-17 および No.19-20 の目地前面波高は，南側突堤に位置する No.7-8 の目地前面波高の2～4割に低減している。
 - ・ 同じ東側突堤で測られている目地前面波高で比較すると，岸に近づくにつれ波高は低減する傾向にある。
 - ・ 目地間での波高が測られている No.7-8 および No.11-12 目地においては，目地前面の波高とほとんど変わらない結果が得られている。
 - ・ No.7-8 および No.11-12 目地間の平均水面に近い個所（中部）で測られた波圧を比較すると，東側突堤に位置する No.11-12 の波圧は南側突堤に位置する No.7-8 の波圧よりも4～6割程度に低減している。
 - ・ 平成14年3月6日において実施した2回目観測においては，1回目とは異なり，東側突堤に位置する No.16-17，No.19-20 の目地前面波高あるいは No.11-12 の目地間波高は，南側突堤に位置する No.7-8 の目地前面波高あるいは目地間波高の1.2～1.4倍に高まっている。
 - ・ No.11-12 の目地間波圧についても，No.7-8 目地間波圧よりも大きな値を示している。
- 1回目と2回目の観測結果の傾向が異なった理由としては，以下のことが考えられる。
- ・ 1回目の観測は，当海岸の卓越波の波向きに相当する S～SW 方向からの波浪であったことから，東側突堤前面は南側突堤により波浪が遮蔽されていたため，南側突堤よりも波高が小さい値を示した。
 - ・ また，その波の遮蔽効果は東側突堤前面域にとって，岸に近いほど顕著であった。
 - ・ それに対し，2回目の観測は，SE～ESE 方向からの波浪であったため，東側突堤に直接波浪が入射していた状況であり，1回目のような波の遮蔽効果が見られなかった。

（２） 防砂板の変位観測

防砂板に加速度計をつけて、防砂板の変形状態を観測した。観測位置は No.9-10 および No.10-11 の目地部に設置した防砂板のU字突起部の先端部陸側である（図－3.17）。なお、No.9-10 に設置した加速度計は故障によりデータが得られなかったため、ここでは No.10-11 における観測成果を整理した。

観測結果の一部（平成 14 年 2 月 19 日 16:10～16:20）を図－3.20 に示す。この時の波高は隣の No.11-12 の目地間で観測していた結果から、最高波で波高約 0.4m であった。

防砂板の変位は、観測された加速度値を 2 回積分することで算定するため、精度を向上させることをねらって精度を落とす原因である高周波成分を除去して行った。具体的には、FFT 解析により波形を分解した後に、平均周波数の 3 倍の高周波数を取り除いた後、逆 FFT 解析により再び合成した波形を積分して求めている。

図－3.21 には外力である波圧と防砂板の変位の状態を示している。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ・ 海象条件としては比較的穏やかな場合でも、防砂板のU字突起部は来襲する波浪の周期に対応して小刻みに振動している。
- ・ 最高波高約 40cm に対し、ケーソン目地部に挿入されているU字突起部が陸側に最大約 10cm 前後押し戻されるような動きをしている。

（３） 間隙水圧観測

間隙水圧は、No.16-17 および No.19-20 の目地周辺（目地背後 0.5m 地点、目地背後 1.5m 地点、ケーソン背後 1.5m 地点の 3 地点における T.P.-1.3m 付近と T.P.-3m 付近の計 6 ケ所）で計測している（図－3.19）。図－3.22,3.23 にこれら地点の間隙水圧と時間変化を、波高および水位と比較して示す。

間隙水圧は、目地部背後と、目地と目地の中間部にあたるケーソン背後部では、ほとんど差は見られず、両者とも目地部の水位、すなわち潮位と連動して変動している。また、観測期間中に来襲していた波高が低かったこともあり、波浪と間隙水圧との相関は見られない。

3－7. 防砂板の材質調査

東側突堤のケーソン No.11-12 目地部に設置されていた防砂板を部分的に切除して、材質について試験を行った。また、現地海岸の海水を採取し、水質分析も実施した。分析項目を表－3.10 に示す。

表－3.10 分析項目

対象	試験項目	試験内容
防砂板＊	EPMA(電子線マイクロアナライザー)による表面および断面分析	検出された元素の相対量を示す。
	材料分析	原料ポリマー、老化防止剤等の配合割合を検出
	外観観察	目視およびデジタルマイクロスコープによる観察
	磨耗(侵食)深さの測定	デジタルマイクロスコープを用いて磨耗した厚さを観察
	物性試験	硬度、引張強さ、伸び、磨耗測定
	損傷状況の再現試験	オゾン劣化試験
		サンシャインウエザーメータを用いた促進耐候性試験
		海水浸せき、温風乾燥サイクル試験
海水	水質分析	水素イオン濃度、油分等

＊「グラベルシール SK 型」(製造：西武ポリマ化成株式会社)

分析の結果から、以下のことがわかった。なお、詳細な試験報告書を巻末資料に示す。

- ・ 防砂板は、最新の設計基準「港湾の施設の技術上の基準・同解説（1999）」（巻末資料参照）で標準的であると示されている 5mm の厚さ以上のものが使用されていた。
- ・ 調べた防砂板と未使用の同製品とは、ゴムの配合成分に大きな差異はなかった。
- ・ 未使用の同製品に対し、J I S K 6 2 5 1 (旧 J I S K 6 3 0 1) の「加硫ゴム物理試験方法」に従う硬さ、引張強さ、伸びおよび老化試験を実施した結果、「港湾工事共通仕様書 平成 13 年 4 月」に規定されている防舷材と同程度のゴムの材質基準（巻末資料参照）を満たしていた。
- ・ 海水からは防砂板の劣化要因となる油分などの物質は検出されなかった。

3-8. 砂層内における空洞形成に関する実験

(1) 目的

本実験は、空洞形成過程の解明の一助となることを目的とし、現地調査で得られた条件のもとで実施した。ただし、砂の挙動を対象とした水理模型実験では、相似則を満足させることができないため、砂層内の空洞の形成過程を定性的に把握することを主目的とする。本実験は国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部 海岸研究室が行ったものである。

(2) 実験概要

1) 模型および観測計器の配置

実験装置を図-3.24、写真-3.15に示す。模型は、大蔵海岸を模しており、模型縮尺は 1/10 である。ケーソン模型（アクリル製）2基が 10mm の隙間を空けて設置され、その上に上部コンクリート模型（アクリル製）がネジで固定され、隙間の上部を塞いでいる（写真-3.16）。ケーソン模型間の隙間には、防砂板模型（アクリル製）がネジによってケーソン模型および上部コンクリート模型に取り付けられている。防砂板模型には損傷状況を模してスリットを設けてある（写真-3.17）。また、ケーソン模型および上部コンクリート模型にはハンドホールが設けられており、内部からも観察できるようになっている（写真-3.18）。

陸側については、平均潮位相当（模型ではケーソン模型の天端より 12cm 低い位置）までを単粒度碎石 5 号（粒径 1.3～2.0 mm）、その上部に砂を設置した

海側については、前面の海底勾配を 1/10 とした。また、造波中にケーソン模型からの反射波により水路内に重複波が発生するため、ケーソン模型より 90cm 離れた箇所に反射吸収装置を設置した（写真-3.19）。波高を計測するため、ケーソン模型の前面および沖側に波高計をそれぞれ 1 本ずつ配置した。

また、ケーソン模型内に設置したビデオカメラで防砂板模型背後の砂層の状況を観察した。

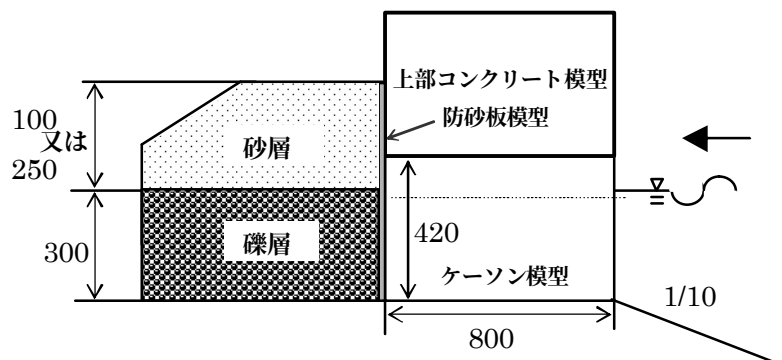


図-3.24 模型概要（単位：mm）



写真-3.15 実験装置側面

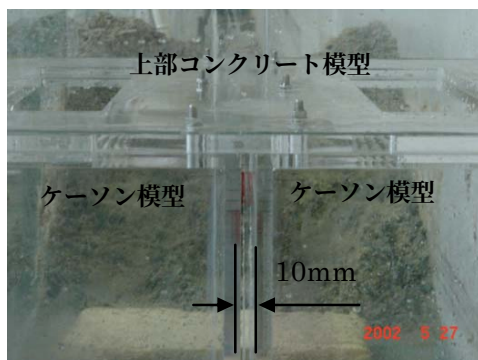


写真-3.16 実験装置（海側）

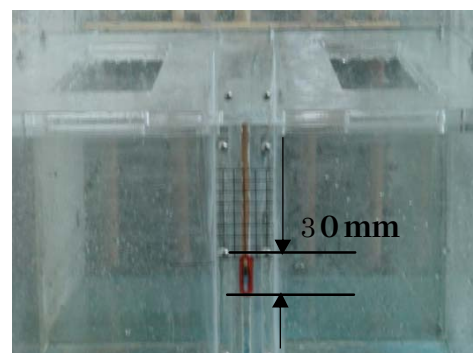


写真-3.17 実験装置（陸側・砂礫設置前）

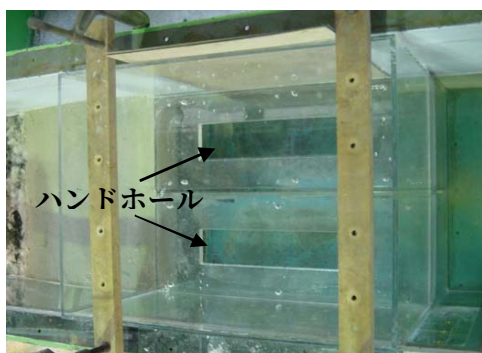


写真-3.18 実験装置（ハンドホール）

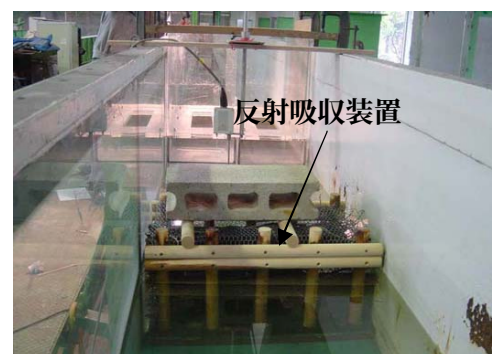


写真-3.19 実験装置（反射吸収装置）

2) 実験ケース

実験ケースの一覧を表-3.11 に示す。

波浪条件は、現地の常時来襲波波高 50cm、周期 5 秒をもとに波高約 5cm 周期 1.5 秒とした。また、現地の東突堤には消波工が設置されており、防砂板に常時作用する波力はこれよりも小さいと考えられるので、比較のため波高約 2cm、周期 1.5 秒の場合を設定した。ケーソン模型海側前面より 40cm の地点で設定波高となるように造波を行ない、砂の流出がほぼ止まった時点で造波を停止した。表-3.11 には、実測された波高の平均値を示す。なお、空洞の形成には、波浪及び潮位変動が関係していることが考えられるが、今回の実験では波浪による空洞形成のみを対象とし、平均水位を平均潮位相当で一定とした。

防砂板模型は、図-3.25 の通り 2 タイプを用いた。事故現場の防砂板の損傷は、平均潮位から下方へ約 30cm の亀裂となっており、他の個所に設置された防砂板の亀裂より短い。そこで、事故現場の防砂板の損傷状況を模して、スリット上端の位置を平均水面に合わせ、スリットの長さを現地スケール 30cm に相当する 3cm とした Type-A と、スリットの上端の位置を平均海面より 1.5cm（現地スケールで 15cm）高くした Type-B 3、B12（添字 3、12 は

図-3.25 に示すスリットの長さ：cm)とした。また、防砂板の亀裂は縦長であり、波浪による海水の流入・流出時に最大値としてはケーソン間の隙間程度まで広がっていた可能性もある。しかしそれを証明するデータがないため、ここではスリット幅をケーソン間の隙間の約1/2 (5mm)と仮定した。また、砂の流出を抑制したケースとでは更に狭い3mmを選出した。

礫層上部の砂層については、養浜砂の中央粒径は約1mmであり1/10に縮小すると0.1mmとなるが、粒径を小さくするとサクションが大きくなって水位が上昇し、含水率分布が現地と著しくことなることが予想されるため、中央粒径0.35mmの東北硅砂を用いた。ただし、礫層を砂で充填した場合、砂の初期流出以降、空洞の成長が見られなくなったケースがあるので、スリット幅が3mmの場合、中央粒径0.5mmの粗砂を用いて比較した。なお、砂層厚は、空洞の内空の測定を目的とした場合には25cm(現地2.5m)、その他は10cmとした。

礫層については、現地に比べて砂が礫より相対的に粒径が大きいので礫層内を砂で充填しないものとし、比較のためあらかじめ上層の砂で充填して砂の礫層への流出を抑制したケースを設定した。

表-3.11 実験ケース

ケース No	波高 (cm)	礫層内 の充填	砂層厚 (cm)	砂質	防砂板模型	
					タイプ	幅(mm)
1	4.1	無	25	硅砂	B 3	5
2	4.9	無	25	硅砂	B 12	5
3	5.6	無	10	硅砂	B 12	5
4	5.4	無	10	硅砂	B 3	5
5	1.8	無	10	硅砂	B 3	5
6	5.2	無	10	硅砂	A 3	5
7	2.3	無	10	硅砂	A 3	5
8	5.0	無	25	硅砂	A 3	5
9	5.4	有	10	粗砂	B 3	3
10	4.9	有	10	粗砂	A 3	3
11	5.2	有	10	硅砂	A 3	5

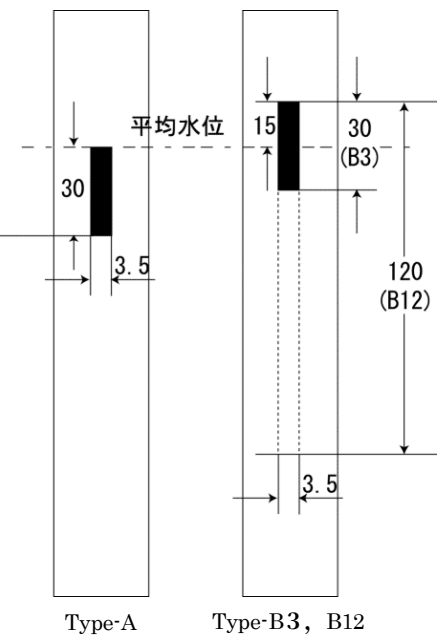


図-3.25 防砂板模型タイプ
(単位：mm)

(3) 結果

- ・ 砂層厚が25cmの場合(ケース1, 2, 8)および礫層内を砂で充填した場合(ケース9, 10, 11)では空洞が発生したが、陥没は生じなかった。礫層内を充填しない場合(ケース3, 4, 5, 6, 7)では、空洞が発達し陥没が起きた(表-3.12)。
- ・ 礫層内を硅砂で充填した場合(ケース11)では、引き波時に防砂板模型に設けたスリットから気泡が発生するとともに、初期段階で砂の流出が停止し、砂層中には顕著な空洞が発達しなかった(写真-3.20)。
- ・ ケース11以外の場合には、防砂板模型に設けたスリットから、断続的な砂の流出が観察

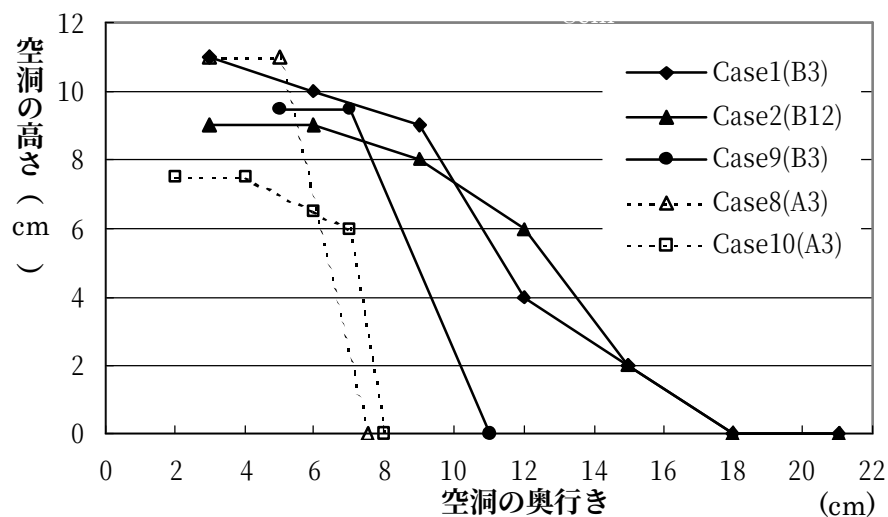
された（写真－3.21）。

- ・ 事故現場の防砂板の損傷を再現した Type-A では、縦長の空洞が形成された。また、Type-A で陥没が発生する場合には、図－3.26、写真－3.22 に示すように短時間で発生した。
- ・ 空洞が形成された場合には、その側壁はほぼ鉛直な壁面を形成している（写真－3.23）。
- ・ 水は押し波時に、Type-A では鉛直上向き流れとなって水が流入し、Type-B では水平方向に噴き出すように流入していた（写真－3.24）。

表－3.12 空洞形成，陥没，砂流出の有無

Case No.	砂層厚 (cm)	防砂板模型 Type	空洞形成	陥没	砂流出
1	25	B 3	○		○
2	25	B 12	○		○
3	10	B 12	○	○	○
4	10	B 3	○	○	○
5	10	B 3	○	○	○
6	10	A 3	○	○	○
7	10	A 3	○	○	○
8	25	A 3	○		○
9	10	B 3	○		○
10	10	A 3	○		○
11	10	A 3	※		※

※ :造波初期段階から防砂板模型のスリットから気泡が発生し、空洞の成長が停止した。



図－3.26 陥没しない場合の空洞断面図（ケーソン模型面に鉛直な面）

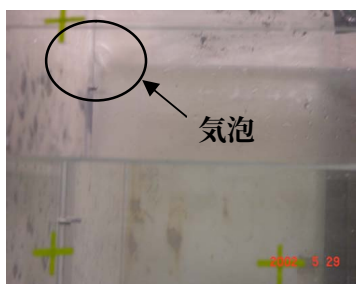
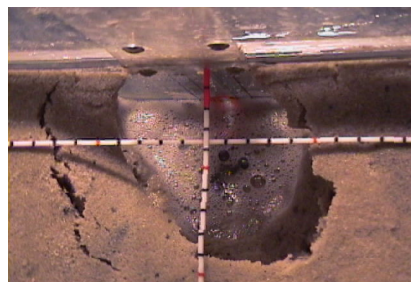


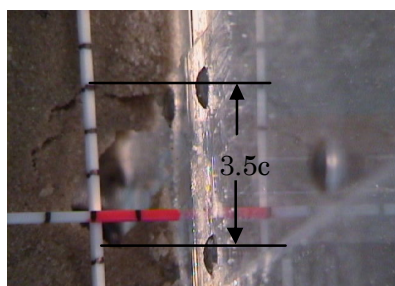
写真-3.20 気泡発生状況(Case11)



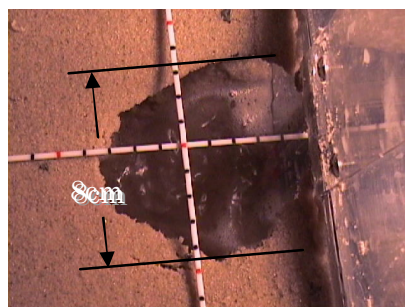
写真-3.21 砂の流出 (Case3)



Case3(6分後)



Case6(2分後)



Case4(18分後)



Case7(3分後)

a)Type-A



Case5(30分以上)

b)Type-B

写真-3.22 陥没状況 (括弧内は陥没発生時刻)：左側に Type-A, 右側に Type-B



写真-3.23 空洞の側壁 (Case5)



写真-3.24 水の流入状況 (Type-B)

3-9. 他の人工海浜の調査

(1) 人工海浜における陥没等

事故発生後、国土交通省が海岸管理者に指示して実施した巡視等の結果（表-3.13）によると、平成14年5月29日調査時現在供用中の人工海浜を有する全国247地区の海岸のうち、平成14年1月4日以前に大蔵海岸以外の5地区で、陥没やくぼみが確認されていることが分かった（表-3.14）。さらに、平成14年1月4日以降、巡視等を強化した結果、陥没やくぼみが確認された人工海浜が、大蔵海岸以外で7地区報告されている（表-3.15）。これらの地区のうち、ケーソンにより砂浜を取り囲む構造形式は、大蔵海岸以外では1地区（兵庫県神戸市舞子地区）である。

(2) ケーソン構造の人工海浜

全国の247地区（国土交通省所管）の人工海浜のうち、大蔵海岸以外でケーソンにより砂浜を取り囲む構造形式のものは2地区（表-3.16）である。また、これらの2地区では、ゴム製の防砂板は採用されていない。また、これらの2地区は、大蔵海岸の設計・施工時期にはまだ供用されていなかった。

なお、海岸保全施設以外のケーソン背後の埋立部分における陥没はこれまでも確認されているが、台風などの高波浪の直後に広い範囲で陥没が生じる場合が多く、高波浪が確認されていない時期におけるケーソン目地部分での局所的な陥没は確認されていない。

4. 事故原因の分析

先に示した対象地点の自然条件の解析、各種現地観測成果、さらには水理模型実験から、工学的知見に基づき、事故原因を以下のように推定した。

事故は、砂浜下に発生していた深さ約 2m の縦長の空洞が、その上に載った子供（4 歳の少女）1 名の重みにより、陥没したことにより発生した。縦長の空洞は、東側突堤として並べられ設置されたケーソンの目地部に砂止め用に設置された防砂板が破損したため、目地部に進入した波が押し寄せるときに海水が破損部から侵入し、波が引くときに海水とともに防砂板背後の砂が破損部を通じて海側に徐々に流出して生じたものと推定された。

防砂板の破損原因は、来襲する波浪がケーソン目地部に進入し、目地部に挿入された防砂板の U 字突起部が繰り返し波の力を受け、そのためにその部分が動かされ、その背後の砂および雑石と摩擦を続けたため、摩耗損傷したものと推定される。

以下に事故に係わる原因を時系列的に示す。

（1）防砂板の損傷原因

防砂板の損傷原因は、来襲する波浪がケーソン目地部に進入し、目地部に挿入された防砂板の U 字突起部が繰り返し波の力を受けるためにその部分が動かされ、その背後の砂および雑石と摩擦し続け、摩耗損傷したものと推定される。

外力が波浪である理由は、

- ・ 破損が激しい個所は、波の力が最も大きく作用する平均海面付近を中心とした水面下に位置する部分に集中している。
- ・ 防砂板に取り付けた加速度計による観測によると、波浪の周期に合わせて、破損個所が集中していた防砂板の U 字突起部が往復変動していたことが確認された。
- ・ 対象地点の波浪は、近隣の波浪観測結果から、南西方向から進入するものが卓越しており、そのため波浪を直接受けやすい南側突堤部の防砂板の方が、波浪の遮蔽域となりやすい東側突堤部の防砂板よりも、波浪の影響、すなわち、波浪による往復変動の程度が激しく、その結果損傷の程度も激しい。

損傷が防砂板背後の砂あるいは雑石との摩耗であること理由は、

- ・ 防砂板陸側の U 字突起部には、堅いものと接触して削り取られたと思われる無数の細かい凹凸が確認されたこと。
- ・ 損傷部は波の作用により動きやすい U 字突起部に集中していること（観測により U 字突起部が往復変動していることを確認済み）。

なお、防砂板の海側表面に見られた亀甲状の細かいひび割れや、防砂板の平均海面より上

部に見られた細かい縦長のひび割れは、空気中や海水中に含まれるオゾンや酸素の影響によるゴムの劣化の表れと思われる。この防砂板表面の劣化が、防砂板の摩耗を促進させたと推定される。

今回の事故調査の結果、波浪の長期的な繰り返し作用によって防砂板が部分的に変動し、背後の砂等との摩擦によって損傷するという、これまで知られていなかったことが明らかになった。しかし、防砂板の損傷の度合いは場所によってばらつきがあるため、いつ、どの程度損傷が生じるのかなど詳細に把握することはできなかった。

（２） 空洞の発生原因

事故の原因とされている空洞は、東側突堤ケーソン No.17-18 の目地部に、砂止め用に設置された防砂板が破損したため、破損箇所から砂浜部の砂が抜け出して生じたものと推定された。その理由は、以下のことによる。

- ・ 事故箇所を含むその周辺で確認された砂浜の陥没あるいは空洞の発生箇所がケーソン目地部のすぐ背後であった。
- ・ 陥没、空洞が発生していた箇所の目地部に取り付けられていた防砂板には、亀裂や欠損等の砂が流出しうる損傷が見られた。
- ・ 防砂板が破損した場合、波が目地部から進入し押し寄せるときに破損部から海水が目地背後に侵入し、波が引く時に進入した海水とともに砂が破損部を通じて海側に流出する状況が、同様の状況を想定した水理模型実験により確認された。
- ・ 潜水調査により、事故箇所のケーソン目地部に、防砂板損傷部から流出したと推定される砂の存在が確認された。

（３） 空洞の成長原因

事故箇所の空洞は、事故による空洞の崩壊によりその規模は明確でないものの、４歳の少女が頭まで埋まってしまった事故時の状況、および事故箇所に近い同じ東側突堤部ケーソン No.14-15 の目地部において確認された空洞規模から、深さ 2m 程度、直径 1 m 以内程度の縦長の空洞であった可能性が高い。このような形状、規模の空洞が発達した要因としては、以下のことが想定される。

- ・ 空洞は、周囲の砂が乾いた状態や完全に水で飽和した状態であれば崩壊しやすい。しかし、事故箇所の空洞は平均海面付近から上部に発生していたことから、平均海面より上の砂層では毛管現象により不飽和層（用語解説）が形成され、砂粒子同士が引き合う力（サクション）（用語解説）が働き、その結果、空洞は崩壊しにくい状態であった。
- ・ 上記に加え、地盤深部の空洞は、アーチ作用（用語解説）により上層からの荷重に対して崩壊しずらく、ゆっくりとした砂の流出によって空洞が上方向へと拡大していったと考えられる。
- ・ 防砂板の損傷は、南側突堤と比べ、東側はその程度が小さかったこと、また南側と比べ、

作用する波力が小さかったことにより、砂の流出速度が小さくなったことが考えられる。

- ・ そのため、防砂板の損傷程度が事故個所より大きく、砂の流出速度が速かったと予想される南側突堤では、砂の流出により砂浜表面の陥没となって現れたのに対して、事故個所では砂の流出が時間をかけて徐々に進行したため、砂浜表面が陥没しにくく、空洞が大きく発達する原因となったと考えられる。
- ・ 南側突堤では、高波浪時にケーソンを越える波浪の飛沫が多いため、空洞が発生しても、海水が砂浜表面から供給されることにより、空洞上部の砂が緩み、空洞は早期に崩れやすかった。その反対に東側突堤は波浪の遮蔽側となることから、そのようなことが生じにくかった。
- ・ 水理模型実験によると、事故個所と同じように平均水面下の雑石層部分に防砂板の亀裂が生じた場合には、縦長に空洞が発達することが確認された。

今回の事故調査の結果、波浪の影響により防砂板の破損個所から砂が抜け出し、空洞が形成され、大きく成長していることが明らかとなった。しかし、防砂板が破損している個所においても、空洞や陥没が確認された個所と確認されない個所があり、どのような状況で空洞が発生し、成長するのかなど詳細に把握することはできなかった。

（４） 陥没の発生原因

一般的には、地盤中に空洞が存在しても、必ずしも上からの荷重によって陥没が発生するものではない。しかし、事故個所においては、土砂粒子間のサクションおよびアーチ作用等によって空洞が大きく成長した結果、地盤の自重と被災者の重みに耐えられずに空洞が崩壊し地盤が陥没したと考えられる。

空洞は、その規模や位置、あるいは土質条件などによってその安定性が異なるが、具体的に陥没が発生する条件については十分な知見が無く、今後詳細な研究が必要である。

5. 今後の復旧対策の提言

今回の事故調査を通して、大蔵海岸をより安全な海浜として復旧するためには、以下の工法が提案できる。設計に際しては、これらを参考として、万一異常が発生しても事故への進展を抑制できるよう、必要な対策を講じることが望ましい。

① 防砂板の選定

現地状況を考慮して、適切な防砂板を選定する必要がある。摩耗を起こしやすい環境においては、波浪により変位しやすいU字型の断面形状をもつ防砂板は避けるべきである。

② 裏込材の配置と防砂シートの敷設

マウンドからの浸透波圧等による埋立土の変形や砂の吸い出しを抑えるために、大粒径の石材を使った裏込材をケーソン背面部分に砂浜表面の高さ以上に積み上げ、その背後に防砂シートを敷設することが有効である。

③ フィルター材の敷設

万一、防砂シートに亀裂等が発生しても、砂の吸い出しを抑えられるように、裏込材と防砂シートとの間に数mm～数cm程度の中間粒径の石材を敷設することが有効である。

④ 砂層を薄くする

現地のケーソン周辺の砂層厚は約2.5mであるが、砂層下部を雑石もしくはフィルター材に置き替え、砂層を浅く抑えておけば、万一陥没が生じた際にも深刻な人身事故を回避できると考えられる。

⑤ ケーソン間に目地材を充填

突堤の上面から削孔し、樹脂等の目地材をケーソン間に充填し、複合的に機能を向上させることも有効である。

6. 今後の安全管理に向けて

今後、人工海浜がより安全で快適な空間として市民に提供されるよう、以下に示す観点から検討が進められることが望まれる。

(1) 人工海浜の設計技術の向上

海浜は、本来大きな波浪エネルギーなどにより若干の変形の生じうるものである。しかし、利便性と安全性の両面からの配慮が必要である人工海浜においては、目に見えないところで異常が発生しても事故への進展を抑えられるような対策の検討が重要である。また、万一陥没などの事故が発生しても、人身に及ぶ被害を軽い範囲に抑えることのできるような対策の検討も重要である。

なお、今回の事故調査により現象が明らかになった、防砂板の損傷、空洞の発生・成長、陥没の発生については、今後より詳細に工学的な検討を進めることが必要である。

（２） 巡視・点検

海浜地は日常的に地域住民など公衆の利用する空間であるため、管理者における巡視・点検のみでは手の届きにくい、きめ細かな情報を海浜利用者から募ること等により、危険な状態を早期に検知できる住民と行政の連携による管理体制の充実が期待される。

用語解説

- ・ C C Z : Coastal Community Zone の略称。C C Z 整備計画とは、昭和 62 年に建設省が制定した施策で、豊かな国民生活を生み出し、海洋性レクリエーションの要望等に対応できるよう、様々な機能を備えた海浜空間を整備し、地域の人々が気軽に海と親しめる、うるおいのある空間をつくりだそうとするものである。整備にあたっては、海岸、公園、道路、下水道などの公共事業を重点的に実施し、加えて民間活力を積極的に導入した諸施設の整備やイベントなどの開催によって海浜地域の有効利用を目指すものである。
- ・ 養浜：砂礫等を投入することで、砂浜を造成したり、侵食した海浜を復元すること。
- ・ 人工リーフ：サンゴ礁の地形のような浅瀬を人工的に石材等で海中部に造成し、波をその部分で砕かせることで波浪を低減し、海岸を越波や侵食から守る構造物。
- ・ 離岸堤：波消しブロックを汀線から離れた沖合いに置くことで、波を弱め、その背後の海岸を越波や侵食から守る構造物。
- ・ 人工磯：礫や岩などで造った人工的な潮溜まり。
- ・ ケーソン：コンクリート製の箱型（中空構造）の函塊であり、通常、陸上で製作して、設置場所まで浮揚させて運搬し、中空部に碎石等を投入し海底部に着底させ、設置する。複数のケーソンを並べて設置して、港湾の防波堤等を建設する。
- ・ 防砂板：ケーソンの目地部に設置する砂止め用の板状の製品。
- ・ 雑石：天然石または破碎石もので、ふるいを通さないため比較的粒径の分布が広い。
- ・ くぼみ：砂浜表面がなだらかな形状でへこむ状態。
- ・ 陥没：砂浜表面が部分的に不連続な形状でへこむ状態。
- ・ 水砕スラグ：製鉄所の溶鉱炉から出る溶融した鉄さい（スラグ）を水中で急冷して得られる碎石状のもの。
- ・ トン袋：通常の土のう袋よりも大きい袋状のものであり、土のう袋と同様、土砂等を詰めて押さえ等に使用する。土砂を詰めた場合、1 トン程度の重さとなる。
- ・ カーボンブラック：ゴムを補強する充てん材。
- ・ 不飽和層：土砂の空隙に含まれている水分が負の間隙水圧をもつ状態の層。負の間隙水圧をもつため、土砂に見かけの粘着力が発生し、形が崩れにくくなる。
- ・ サクション：引き合う力。この場合、土砂の不飽和層内で生じる負の間隙水圧によって生じる圧力。
- ・ アーチ作用：緩く湾曲した構造に垂直な方向からの力が作用する場合、その力を湾曲軸方向へ分散させることで、垂直方向からの力に対して抵抗する作用。アーチ橋、アーチダムなどが、その作用を利用した構造物である。

計画の概要	海岸保全対策とあわせて、公園・道路（街路）・下水道・治水等の建設省所管公共事業を有機的関連をもって実施するとともに、民間活動を積極的に導入した施設整備を一体的に計画的に行うものである。CCZ整備計画は、市町村が策定し、その計画を都道府県知事を経由して建設大臣が認定するもので、整備の期間は概ね5年を目標としている。
関連公共事業 の整備	海岸→海岸環境整備事業等 （護岸・消波構造物・養浜・遊歩道等） 公園→海浜公園等 （広場・運動施設・駐車場・各種利便施設等） 道路→アクセス道路整備（道路・街路整備）案内標識整備 下水道→下水道整備 治水→河川整備
民間活動の 積極的な活用	レクリエーション施設 →スポーツ施設（テニスコート、マリーナ、レンタルショップ等）、水族館、博物館、自然観察館、キャンプ場等 サービス施設 →レストラン、ショッピングセンター、更衣室、シャワー施設、公衆トイレ、駐車場等 イベント施設 →屋外広場、コンサートホール等 宿泊施設 →ホテル、民宿、ロッジ、貸別荘等

CCZ整備計画概要

引用文献

- 1) 海岸保全施設築造基準連絡協議会（1987）：海岸保全施設築造基準，p.269.
- 2) 社団法人 日本港湾協会，運輸省港湾局監修（1989）：港湾の施設の技術上の基準・同解説，上巻 p.469，下巻 p.499.
- 3) 社団法人 日本港湾協会，運輸省港湾局監修（1999）：港湾の施設の技術上の基準・同解説，p.1181.
- 4) （財）港湾建設技術サービスセンター，運輸省港湾局編集（2001）：港湾工事共通仕様書，平成 13 年 4 月
- 5) 兵庫県・明石市（1990）：明石海峡大橋関連大蔵海岸整備基本計画策定調査，平成 2 年 3 月，p.187.
- 6) 建設省近畿地方建設局姫路工事事務所,(株)新日本技術コンサルタント（1990）：東播海岸利用計画策定業務（舞子・大蔵海岸 CCZ 整備計画）報告書,平成 2 年 3 月,p.136
- 7) 建設省近畿地方建設局姫路工事事務所,(株)新日本技術コンサルタント（1991）：東播海岸利用計画策定業務（舞子・大蔵海岸 CCZ 整備計画）報告書,平成 3 年 3 月,p.11