

須崎港津波防波堤の建設

Construction of Tsunami Protection Breakwater at the Port of Susaki

伊藤 和央

Kazuo ITOH

1. はじめに

土佐湾に面する須崎市は、リアス式の海岸形状のため津波の被害を受けやすく、記録に残っているだけでも古くは7世紀の白鳳地震津波から、昭和21年の南海地震津波や昭和35年のチリ津波など過去幾多の津波によって、尊い人命と貴重な財産を奪われてきた。運輸省第三港湾建設局では、津波の被害を最小限にとどめる恒久的な津波対策として、須崎港の入口に津波防波堤の建設を進めている。本講では、須崎港津波防波堤について、その計画（2章）、設計（3章）、施工（4章）の概要を紹介する。

2. 計画の概要

2-1. 計画の背景

(1) 地勢

須崎港は高知市の南西約30km、土佐湾のほぼ中央部に位置し、沈降海岸の一部をなす須崎湾の中で発展してきた天然の良港である。須崎湾は、西の角谷岬と東の山崎鼻を結ぶ線の南側で土佐湾に接続し、湾内は幅300m～500mの入り江が蛇行しながら3km程北方へ湾入している。湾中央右岸には須崎市街地が形成されており、湾奥は海岸堤防を隔てて多ノ郷平野となっている。また、湾口部右岸に新莊川、湾奥部に桜川が流入しており、湾口部東側には野見湾が隣接している。

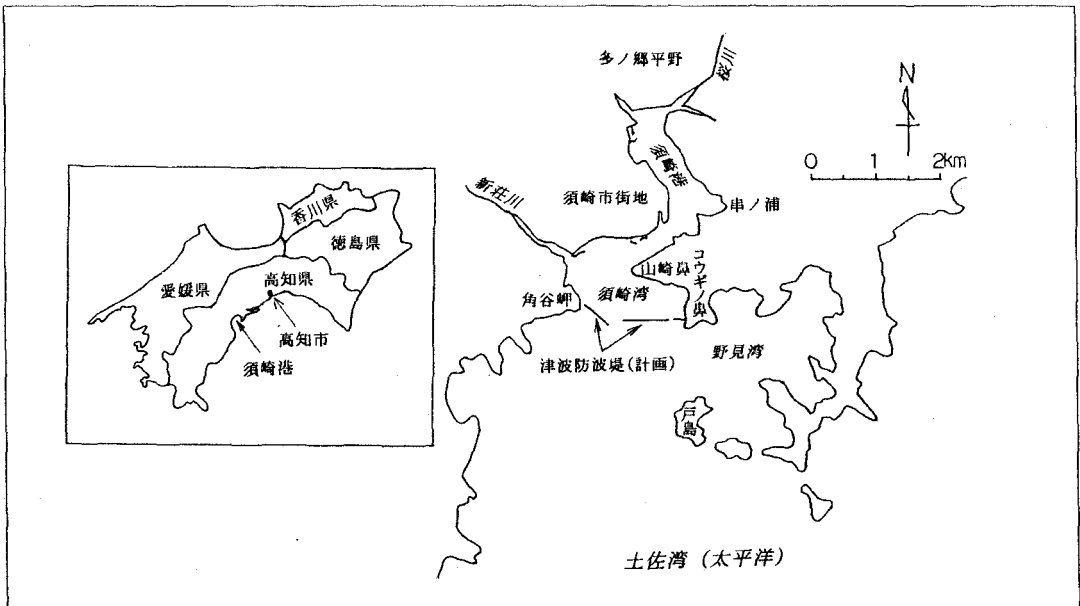
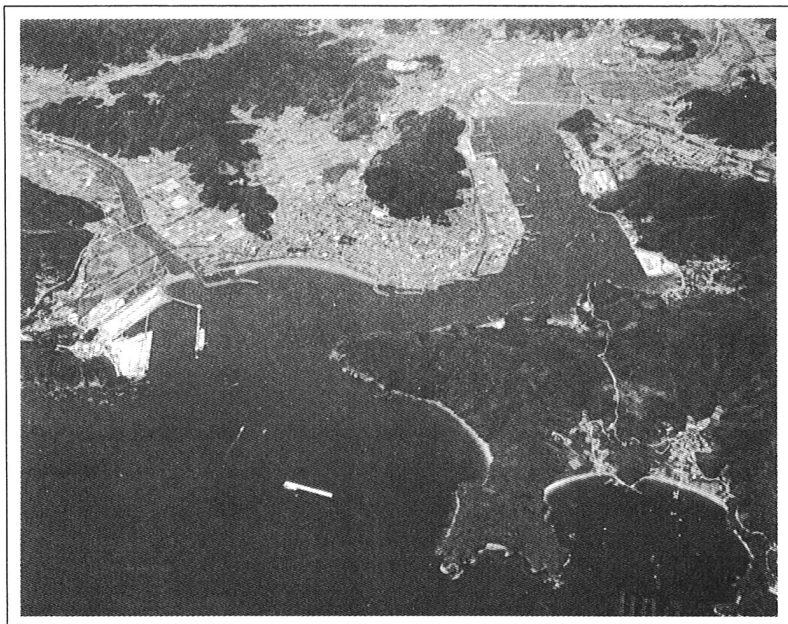


図-1 須崎港の位置

(2) 須崎港の現況

須崎港は須崎市をはじめ1市4町4村からなる高幡広域生活圏を背後圏とする中核港湾で、昭和40年に重要港湾に指定されている。

平成8年の須崎港取扱貨物量は、輸出350万トン、輸入70万トン、移出1,130万トン、移入260万トン、合計1,810万トンで高知県全体の54%を占めている。主たる取扱品目は、日鉄鉱業による石灰石の輸移出、住友大阪セメントによるセメントの輸移出、須崎木材工業団地による原木・製材の輸入などである。



写真－1 須崎港の航空写真（H9.3撮影）

(3) 過去の津波と被災状況

土佐湾に面する須崎市は、リアス式の海岸形状のため津波の被害を受けやすく、記録に残っているだけでも古くは7世紀の白鳳地震津波から、昭和21年の南海地震津波や昭和35年のチリ津波など過去幾多の津波によって、尊い人命と貴重な財産を奪われてきた。

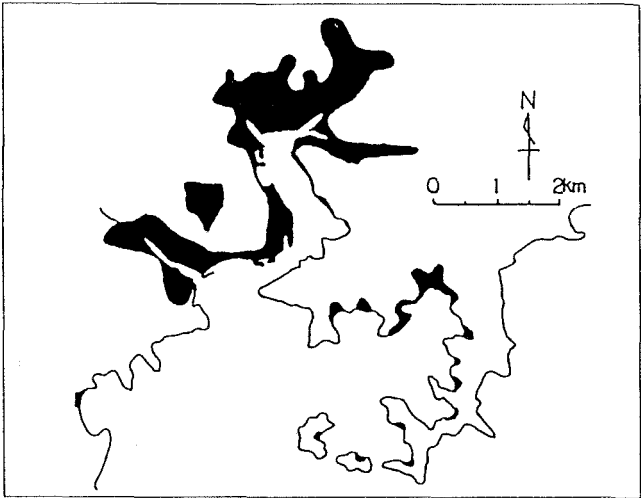
須崎市に津波被害をもたらした主たる地震は、南海道沖を震源とする巨大地震であり、その発生メカニズムはプレートテクトニクス理論によって説明される。フィリピン海プレートが、四国を乗せたユーラシアプレートの下に、南海トラフという海溝のところで潜り込むとき、地殻が壊れることで地震が起きるという理論である。これまで100年から150年間隔で発生しているが、次の地震は2030年頃にも発生するのではないかと予測する地震学者もいる。

特に昭和21年に発生した南海地震津波では、須崎市で死者・行方不明64名、負傷者140名、土地の浸水面積394ha、家屋の倒壊・流出1279戸、浸水1441戸に及び甚大な被害を被り、年輩の市民はその光景をいまでも深く胸に刻んでいる。

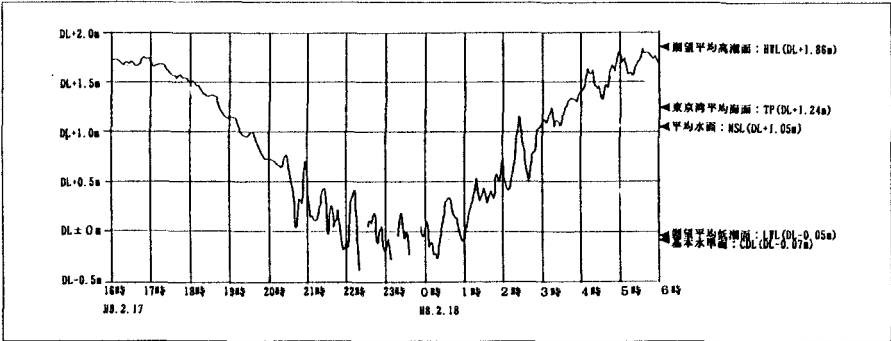
一方、昭和35年のチリ津波のように、遠く太平洋の果てで発生して日本まで伝わる、いわゆる遠地津波の場合は、何年周期で発生するということではなく、いつ発生しても不思議ではないと言われている。平成8年2月17日14:59（日本時間）に発生したニューギニア島沖地震によって、地震発生から数時間後には津波が日本に押し寄せて来た。高知県内では足摺岬方面で漁船が転覆するなどの被害を受けた他、須崎港でも当事務所の潮位計で17日20時過ぎから津波をキャッチし、最大波高（津波の谷から峰までの高さ）70cm程度の津波を観測している。

表－1 高知県を襲った巨大地震津波

津波の名称 (仮称を含む)	年 月 日	地震の 規模	震源	高知県の被災状況
白鳳地震津波	684. 11. 29	M8. 4	南海沖	土佐で田苑約12km ² 海中に沈む
	887. 8. 26	M8. 6	南海沖	津波が土佐を襲う
康和地震津波	1099. 2. 22	M8. 0	南海沖	土佐で田千余町皆海底に沈む
正平地震津波	1361. 8. 3	M8. 4	南海沖	土佐沿岸で被害甚大
明応南海地震	1498. 6. 11	不明	南海沖	不明
慶長地震津波	1605. 2. 3	M7. 9	南海沖	甲浦～室戸岬で死者800余名
宝永地震津波	1707. 10. 28	M8. 4	南海沖	須崎で死者400余名
安政地震津波	1854. 12. 24	M8. 4	南海沖	須崎で死者30余名
南海地震津波	1946. 12. 21	M8. 1	南海沖	須崎で死傷者204名、浸水394ha、被災家屋2720戸
チリ津波	1960. 5. 24	M8. 5	チリ沖	須崎で浸水215ha、被災家屋1137戸



図－2 南海地震津波（昭和21年）による浸水域



図－3 ニューギニア島沖地震津波観測データ (H8.2.17)

(4) 被害推定

昭和58年時点における須崎港防潮堤天端高は湾奥部でDL+4.3mであった。しかし、南海地震津波（昭和21年）では津波高さが湾奥部でDL+5.0m～+6.5mに達しており、再び同規模の津波が来襲したとすれば、須崎市街地はもとより人口増の著しい大間地区及び多ノ郷地区等は壊滅的な被害が予想される。また須崎市は高知県西南部へ通じる交通軸上にあり、国道・鉄道の寸断により高知県西南部への経済的打撃も甚大である。昭和58年時点において南海地震津波（昭和21年）が来襲した場合、浸水面積344ha、被災人口14,009人、被害額760億円に及び被害が発生するものと推定されている。

2-2. 津波防波堤計画

(1) 津波防護方式

津波の被害を最小限にとどめる恒久的な津波対策としては、沿岸地域を大規模な堤防で取り囲む防潮堤単独方式と、一旦湾口部で津波の流入を抑えた上で沿岸地域を堤防で取り囲む津波防波堤・防潮堤併用方式があるが、須崎港で防潮堤単独方式を採用した場合、

- ①沿岸水際線で高密度に行われている港湾活動に支障が生じる。
- ②背後平地部が狭隘で、人家密集地区が水際線付近に集合しており、移転等を要する地区がある。
- ③地震発生から津波来襲までの時間的余裕がなく（南海地震津波では15分で来襲）、多数の大規模な門扉作動が現実には困難である。
- ④防潮堤直背後の市街地における通風、日照及び景観等の生活環境が極度に悪化する。

などの問題があり、また港湾拡張には港内静穏度を確保するため防波堤が必要となることから、津波防波堤・防潮堤併用方式を採用することとした。

(2) 防波堤配置計画

防波堤の配置については、図-4に示す3つの案を対象に津波のピークカット、他地区への影響、工費等の観点から比較検討を行い、第2案のコウギノ鼻～角谷岬地先が最良と判断し、最終的に図-1の配置のとおり東防波堤940m、西防波堤480mを決定した。

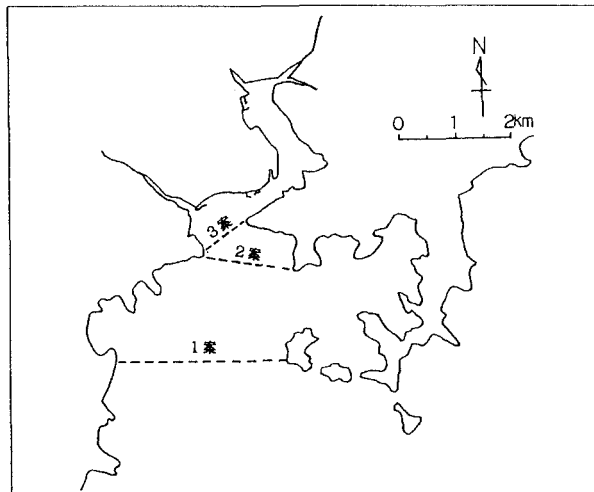


図-4 湾口防波堤位置案

(3) 津波減殺効果

津波防波堤による津波減殺効果としては、数値シミュレーション及び水理模型実験を行った結果、最大水位を20%～30%低減させる効果が期待できる。

3. 設計の概要

3-1. 設計条件

(1) 波浪条件

設計沖波： 過去30年間に土佐湾に異常波浪をもたらした台風を抽出し、その時の周辺港湾の実測値及び推算結果をもとに50年確率波高を求めて設定した。

波高 $H_0=13.0\text{m}$ 、周期 $T_0=16.5\text{sec}$ 、波向SSW~E。

堤前波： 設計沖波をもとに浅海域における不規則波の変形計算を行い、防波堤に作用する波浪を設定した。東防波堤の東端から西側500mの地点における波浪（HHWL時）を例示する。

波高 $H_{1/3}=6.0\text{m}$ 、周期 $T_{1/3}=16.5\text{sec}$ 、波向S、海底地盤-17.6m。

設計潮位： HHWL：+3.5m、HWL：+1.9m、LWL：±0.0m

(2) 対象津波

対象津波は、過去に起こった津波の中で比較的正確な観測結果が得られている南海地震津波（昭和21年）とした。しかし、当該津波においても痕跡高などの実測値はあるものの、どのような波形の津波が入射したか示す実測資料はないため、断層モデルを用いた計算を行い、入射津波を設定した。当該地震においては各種の断層モデルが提案されているが、実測痕跡高と計算津波高が一致する相田が提案した断層モデルを用いることとした。このモデルを用いて計算した結果、以下に示す津波を設計に用いた。

津波高： MSL(DL+1.1m)上3.6m

津波波高： 8.1m

堤内外の水位差： 2.4m

周期： 43分

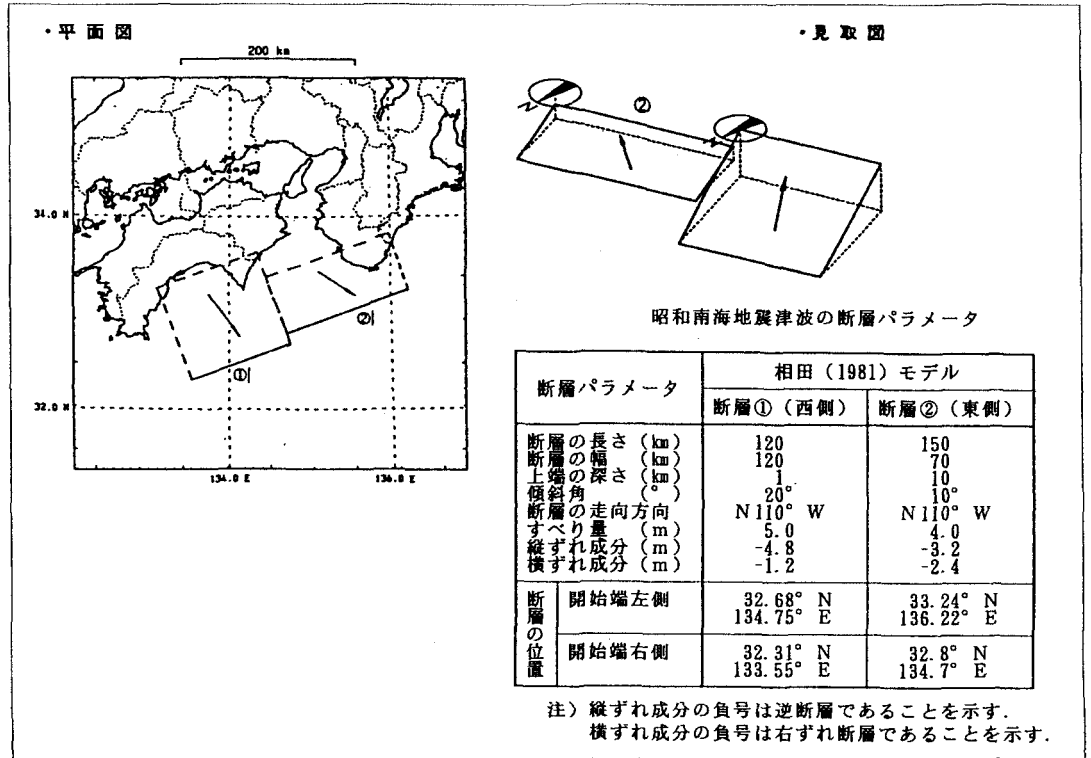


図-5 相田モデル

(3) 土質条件

防波堤計画地点は新荘川の河口に位置することから、粘性土層、レキ混り粘性土層、砂レキ層等の互層を形成している。土質条件は、土質調査に基づき設定した。東防波堤の東端から西側500mの地点における土質条件を例示する。

表-2 土質条件の設定

深さ	土質	単位体積重量	強度等
DL-17.2m	(海水)		
DL-21.0m	粘性土	$\gamma = 2.0 \text{ t/m}^3$	粘着力 $C = 2.4 \text{ t/m}^2$
DL-25.0m	粘性土	$\gamma = 2.0 \text{ t/m}^3$	粘着力 $C = 6.2 \text{ t/m}^2$
DL-27.0m	砂質土	$\gamma = 2.0 \text{ t/m}^3$	内部摩擦角 $\phi = 35^\circ$
DL-30.0m	粘性土	$\gamma = 2.0 \text{ t/m}^3$	粘着力 $C = 9.6 \text{ t/m}^2$
DL-31.0m	砂質土	$\gamma = 2.0 \text{ t/m}^3$	内部摩擦角 $\phi = 30^\circ$
	砂質土	$\gamma = 2.0 \text{ t/m}^3$	内部摩擦角 $\phi = 35^\circ$

3-2. 防波堤の主な破壊パターン

(1) 滑動

波力（または潮位差による水圧など）が、防波堤とマウンドの滑動抵抗より大きい場合、防波堤は後方に押されマウンドを滑り落ちてしまう。通常の設計では安全率1.2以上確保することとしている。

$$\text{安全率} = \text{滑動抵抗} \div \text{波力} \geq 1.2$$

(2) 転倒

波力（または地震力）によって、堤体の後端を支点としたモーメント（回転力）が発生する。このモーメントが防波堤に作用する重力のモーメントより大きい場合防波堤は転倒する。通常の設計では安全率1.2（地震時1.1）以上確保することとしている。

$$\text{安全率} = \text{重力のモーメント} \div \text{波力（地震力）のモーメント} \geq 1.2 \text{ (1.1)}$$

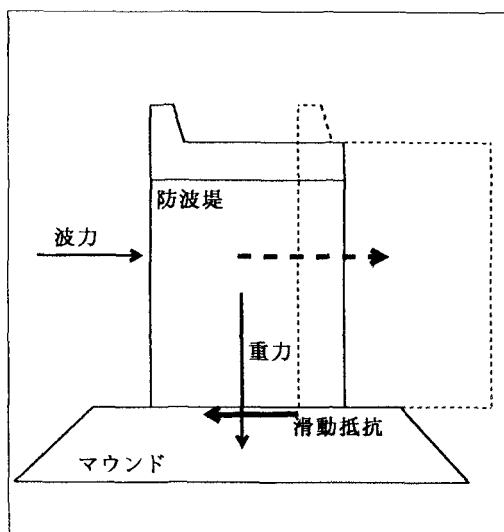


図-6 滑動のイメージ

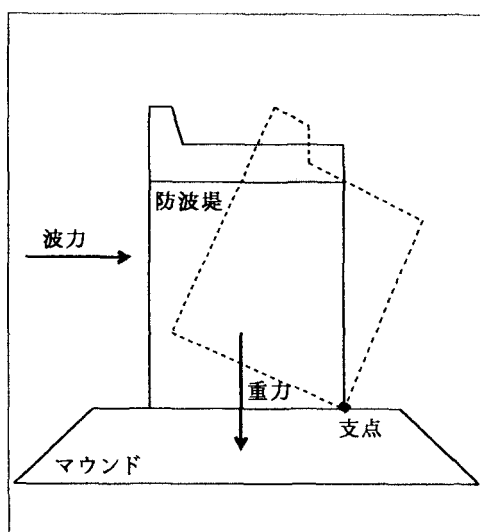


図-7 転倒のイメージ

(3) 円形滑り

防波堤の自重よりも原地盤の防波堤を支える力が小さい場合には、原地盤が防波堤を支えきれず円形に滑り破壊を起こす。通常の設計では安全率1.2以上確保することとしている。

$$\text{安全率} = \text{滑り抵抗モーメント} \div \text{滑り起動モーメント} \geq 1.2$$

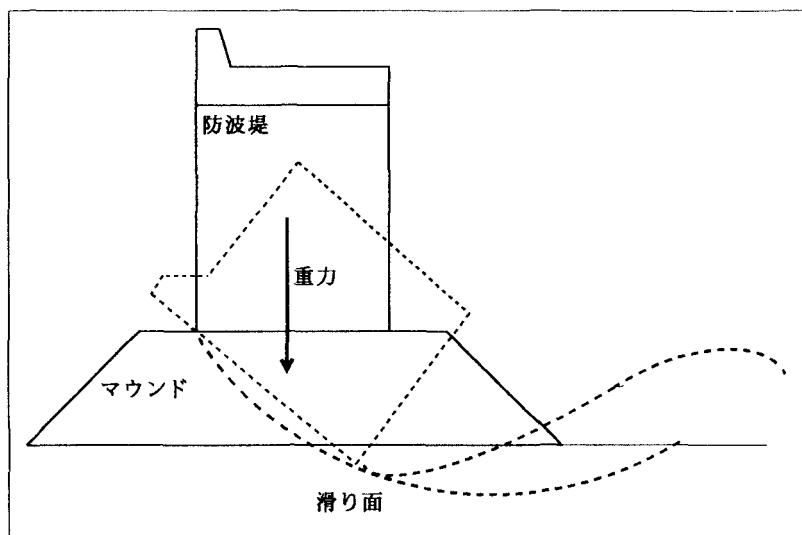


図-8 円形滑りのイメージ

(4) 偏心傾斜荷重による破壊

堤体が波力を受けた場合、堤体に作用する力は斜め後方に傾斜する。この力が大きい場合、マウンドは滑り破壊を起こす。通常の設計では安全率1.0以上確保することとしている。

$$\text{安全率} = \text{滑り抵抗モーメント} \div \text{滑り起動モーメント} \geq 1.0$$

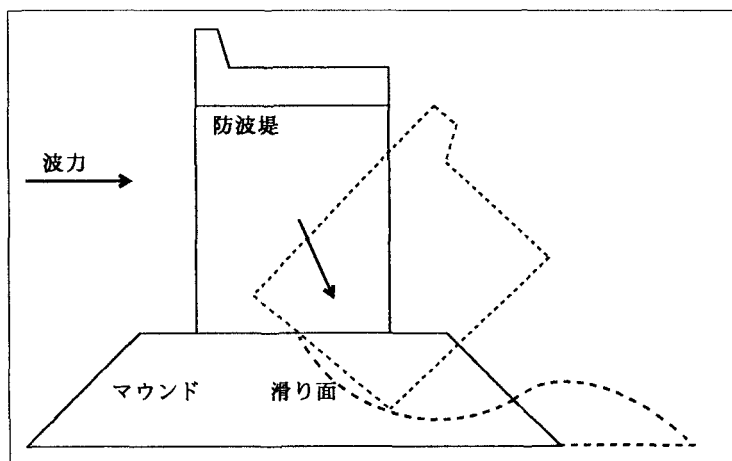


図-9 偏心傾斜荷重による破壊のイメージ

3-3. 基本設計

(1) 構造形式

須崎港津波防波堤の構造様式は、①津波の透過を抑える必要があること、②防波堤前面海域で筏養殖が行われており反射波を抑える必要があることから、消波ブロック被覆堤（ケーソン式混成堤）を採用した。

表-3 防波堤の主な構造様式

分類	特徴
傾斜堤	石やブロックを台形状に捨て込んだもの。 主として斜面での砕波によってエネルギーを散逸させる。
直立堤	前面が鉛直である壁体を海底に据えた構造。壁体には通常ケーソンが用いられるが、水深・波浪の条件が緩い場合はブロックが用いられることもある。 主として波のエネルギーを反射させる。
混成堤	捨石部の上に直立壁を設けたもの。 波高に比べ捨石天端が浅い時は傾斜堤の機能に近く、深い時は直立堤の機能に近い。
消波ブロック被覆堤	直立堤あるいは混成堤の前面に消波ブロックを設置したもの。 消波ブロックで波のエネルギーを散逸させるとともに、直立部で波の透過を抑える。

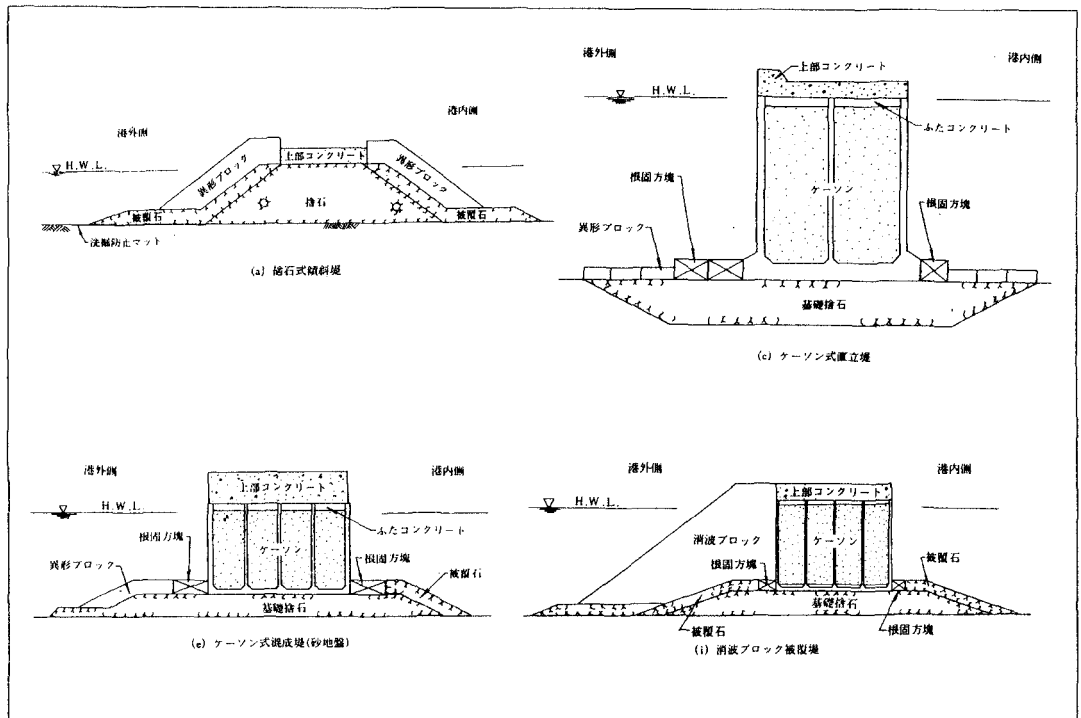


図-10 防波堤の主な構造様式

(2) 標準断面

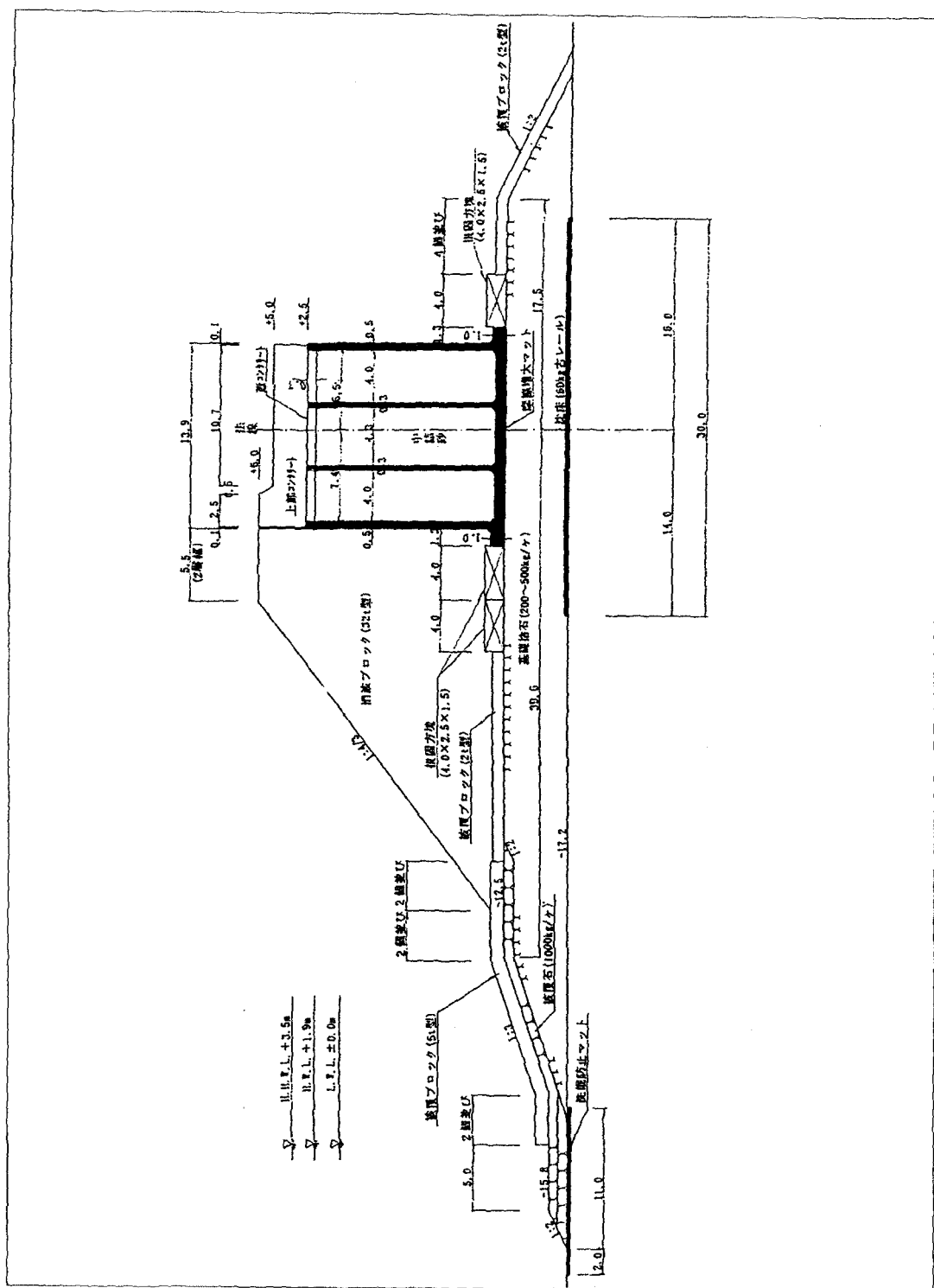


図-11 標準断面図（東防波堤の東端から西側500mの地点）

4. 施工の概要

4-1. 基礎工

(1) 新幹線レールによる沈床工

粘性土層における円形滑りの安全率を確保するには、サンドコンパクション工法等による地盤改良が一般的であるが、東防波堤の東端から西側500mの地点においては、経済的に有利な沈床工法を採用した。

沈床工法の考え方は「沈床を切るような円形滑りは発生しない」ということである。このため、沈床を敷くことにより滑り面の円弧をコントロールでき、弧長を長くすることで粘性土層の粘着力による抵抗モーメントが増大し、円形滑りの安全率を所定の安全率まで上げることができるものである。

沈床部材は、断面力を確認のうえ資源再利用の観点から新幹線の高レールを用いることとした。

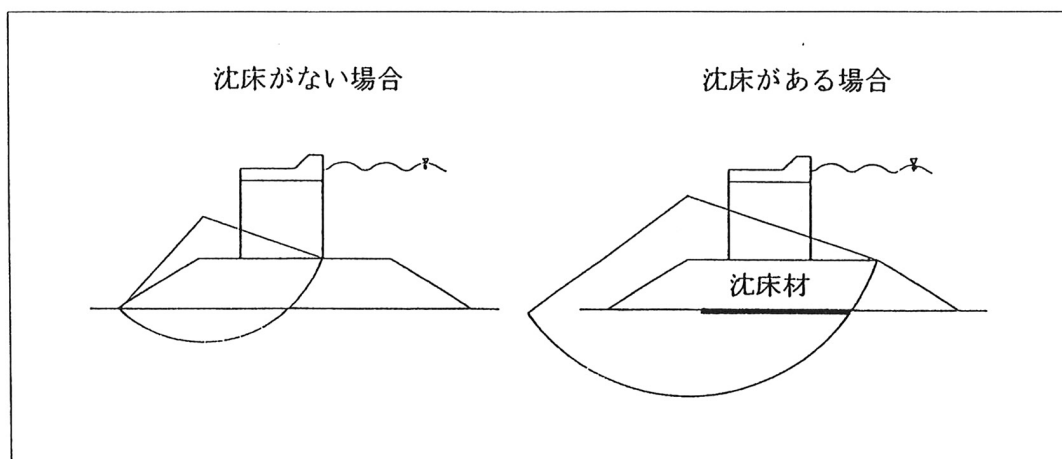


図-12 沈床工法のイメージ

新幹線レールによる沈床材は、あらかじめ申の浦作業ヤードにて長さ30m、幅5mの簀の子状のブロックに加工した。レールの連結にはH形鋼を用い現場溶接を行った。溶接によるレールの強度低下が懸念されたが、溶接試験片を削り出し引張試験を行った結果、十分な強度が得られ施工に耐えることが確認された。

沈床材の敷設は、旋回式起重機船(250t吊)及び吊り枠を使用し、潜水士の指示により行った。

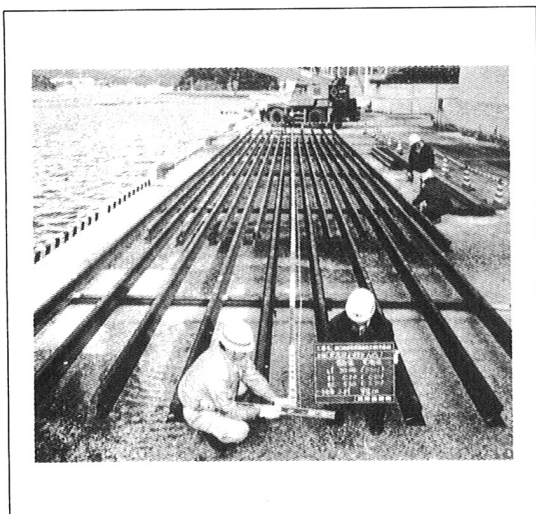


写真-2 沈床材の製作

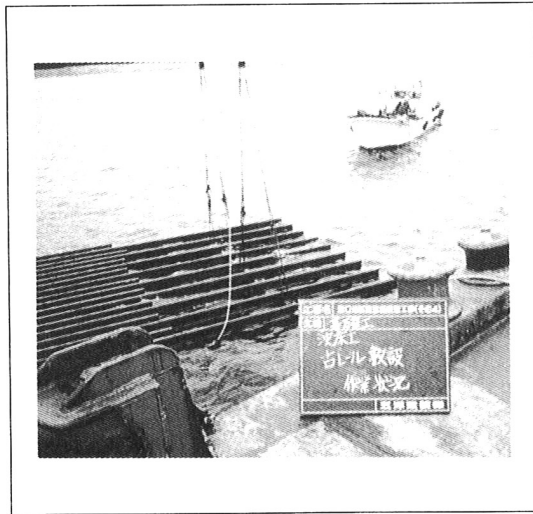


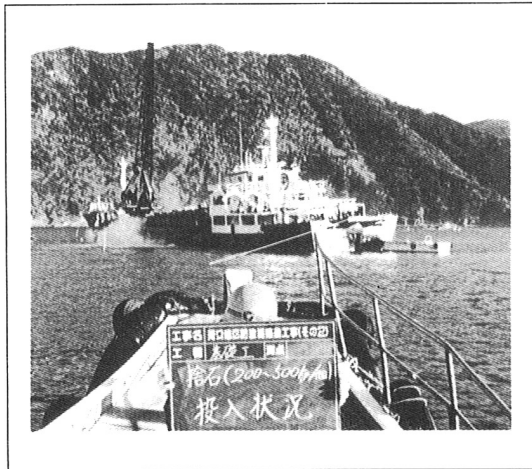
写真-3 沈床材の敷設

(2) 基礎捨石

沈床工の敷設を行った後、基礎捨石(200～500kg)をケーソン据付天端高(CDL-12.2m)まで投入し、潜水土により平坦に均した。ここで、設計上の据付天端高はCDL-12.5mであるが、本工事においては沈下余裕高として30cmの余盛を行った。捨石搬入及び投入はガット船(499t型)を使用し、予め捨石断面の変化点に設置した測量竹を目標に、潜水土の投入指示に従って投入した。次に港外側前面には被覆石(1,000kg)を投入し、潜水土の合図誘導で整形した。洗堀防止工として合成樹脂マットを旋回式起重機船(250t吊)を使用し潜水土の合図誘導により敷設した。



写真－4 捨石投入状況(1)



写真－5 捨石投入状況(2)

4-2. 本體工

(1) ケーソン製作

ケーソン底板の下に作業ヤードとの絶縁のために敷砂(5cm程度)を敷き均し、その上に路盤紙を敷いた。さらに、マウンドとの滑動抵抗を増大させるため、アスファルトマットを敷設した。鉄筋組立は、配筋図に従い正確に緩みのないよう焼鈍鉄線を用いて結束した。2ロット以降の組立は前ロットのコンクリート打設後2日目以降に行った。

型枠は鋼製型枠を用い、部材にはワイドパネルビーム及び角形鋼管を使用した。型枠清掃後、剝離材を塗布しクローラクレーン(150t吊)を使用して所定の場所に建て込み、コンクリート打設時に変形、緩みが生じないように組み立てた。

コンクリートの打設は、底板部層高を1.5m、2ロット以降の層高を2.7mとして6層に分割して打設を行った。レディミクストコンクリート(設計基準強度 $24\text{N}/\text{mm}^2$ 、粗骨材最大寸法25mm、スランプ12cm、普通セメント)を、コンクリートポンプ車を使用し打設した後、バイブレーターにより十分締固めた。打継目にはモルタルを5cm程度敷き均した。打設完了後、高温、乾燥、急激な温度変化による有害な影響を受けないよう型枠脱型まで養生マットを使用し養生した。

据え付け時に使用する吊鉄筋については、吊点数32点、 $\phi 95\text{mm}$ 、 $l=6,300\text{mm}$ を使用した。

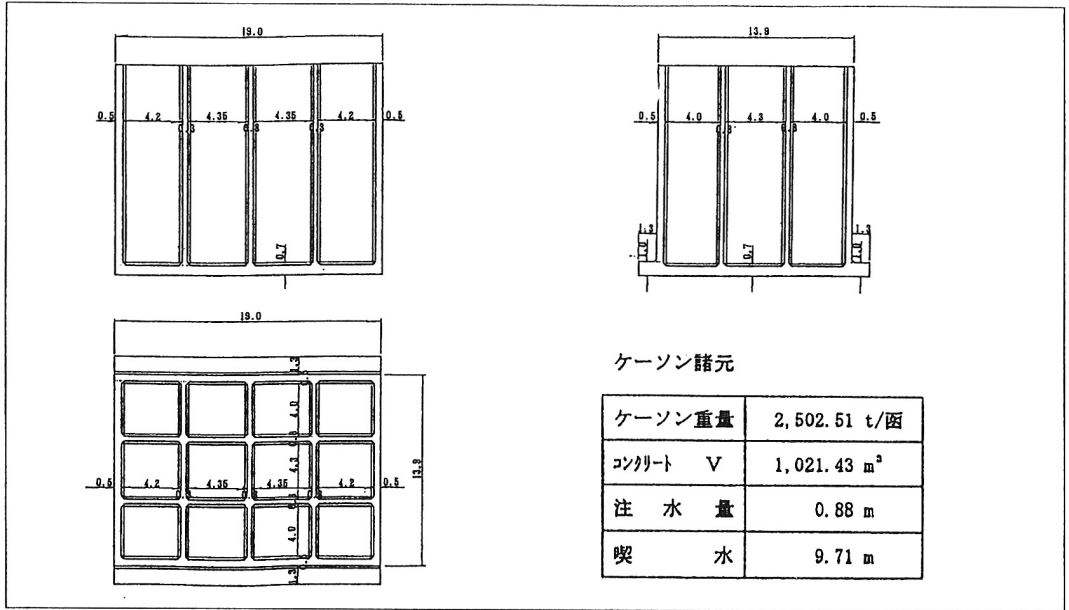


図-13 ケーソン一般図

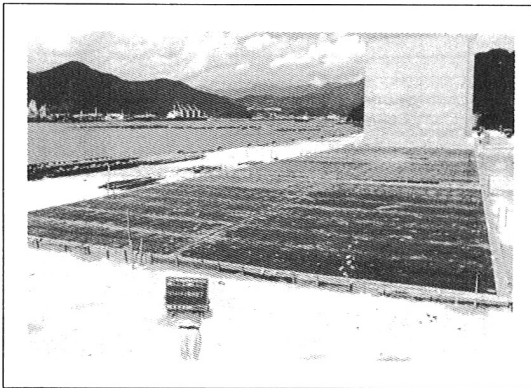


写真-6 ケーソン製作状況 (1)

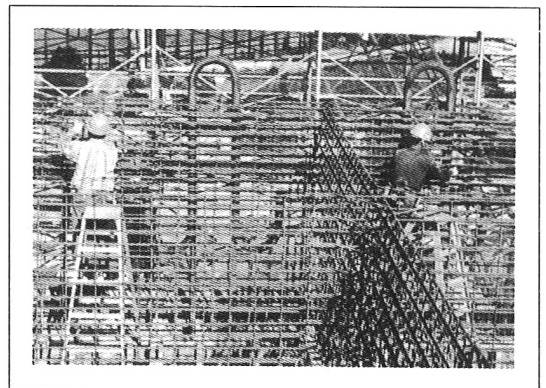


写真-7 ケーソン製作状況 (2)

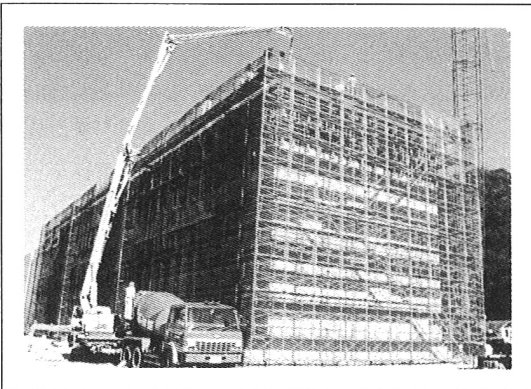


写真-8 ケーソン製作状況 (3)

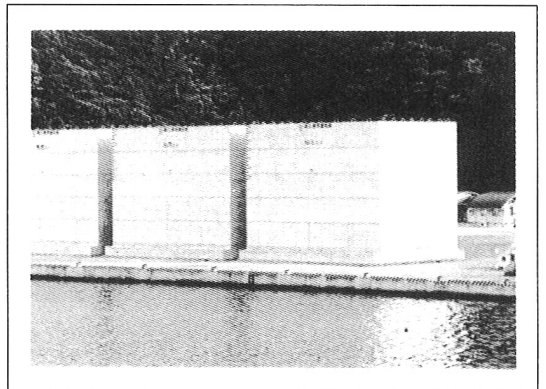


写真-9 ケーソン製作状況 (4)

(2) ケーソン据付

ケーソン運搬に先立ち、ケーソン上に作業用足場をラフタークレーン(25t吊)を使用し取り付けた。

ケーソンの運搬には起重機船(3,000t吊級)を用い、吊り上げたまま据付位置まで約3km曳航した。運搬据付時の安全対策として、警戒船を湾口航路と港内航路及び起重機船の前後の合計4隻を配置した。当日は海運会社等の各関係者に通知し協力を依頼した。

ケーソンの据付は、1日1函とし所定の位置に移動させ、位置決定の後水中ポンプで注水し、着底させた。

中詰砂の材質は、シルト分以下細粒分の含有が20%以下とした。投入はガット船(199t、499t)を使用しケーソン各室に均等に投入した。

蓋コンクリートの打設は、コンクリートミキサー船(打設量 $90\text{m}^3/\text{h}$)による現場練りコンクリート(設計基準強度 $16\text{N}/\text{mm}^2$ 、粗骨材最大寸法 40mm 、スランプ 8cm 、高炉セメントB種)を使用し行った。中詰砂上面に路盤紙を敷設し、出来るだけ水平となるように打設を行った。締め固めはバイブレーターを使用し十分締め固めた。打設完了後、養生マットで被覆し養生を行った。

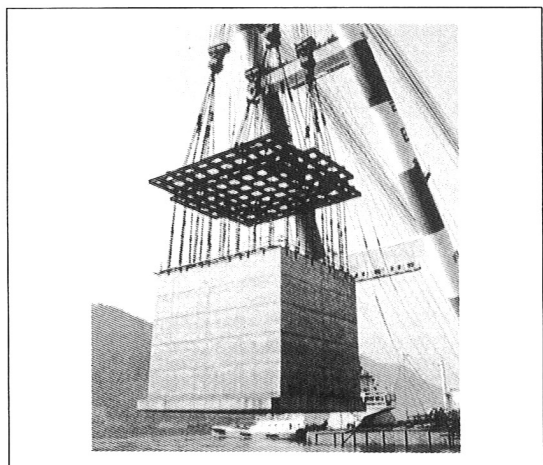


写真-10 ケーソン運搬据付状況(1)

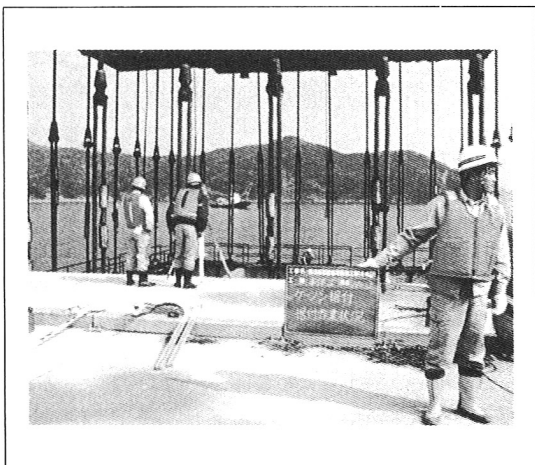


写真-11 ケーソン運搬据付状況(2)

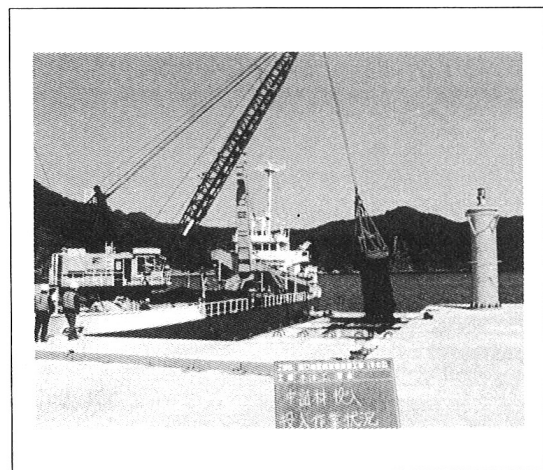


写真-12 中詰材投入状況

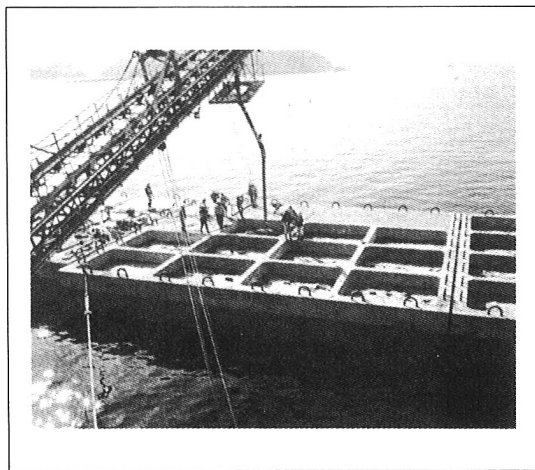
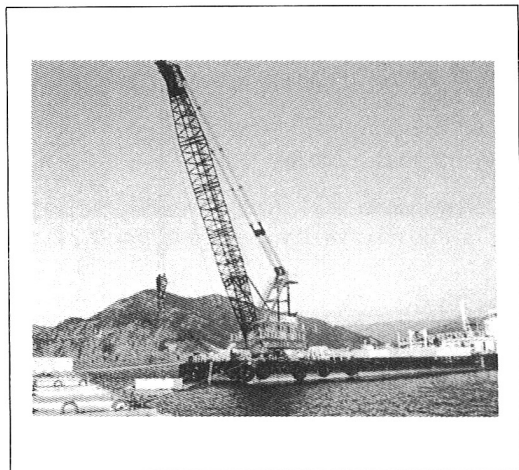


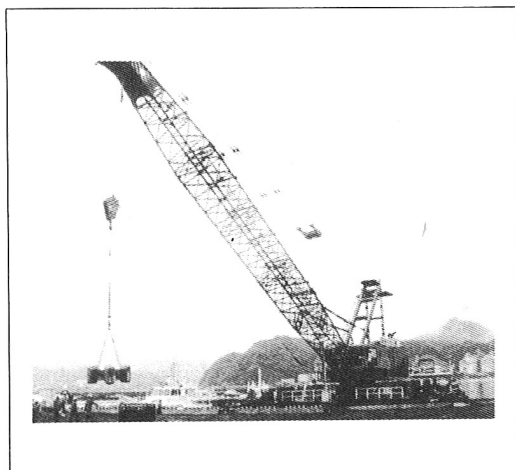
写真-13 蓋コンクリート打設状況

(3) 根固・被覆ブロック

ケーソン据付完了後、洗掘を防ぐため根固方塊でケーソンの足下を固めるとともに、被覆ブロックで捨て石マウンドを被覆した。根固方塊及び被覆ブロックの据付は、旋回式起重機船(250t吊)を使用し、潜水士の合図誘導により行った。



写真－１４ 根固方塊据付状況

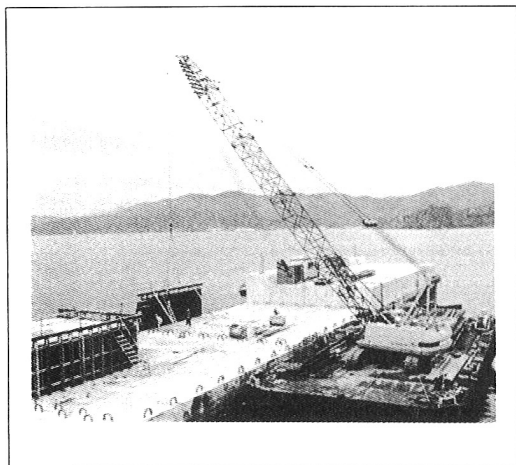


写真－１５ 被覆ブロック据付状況

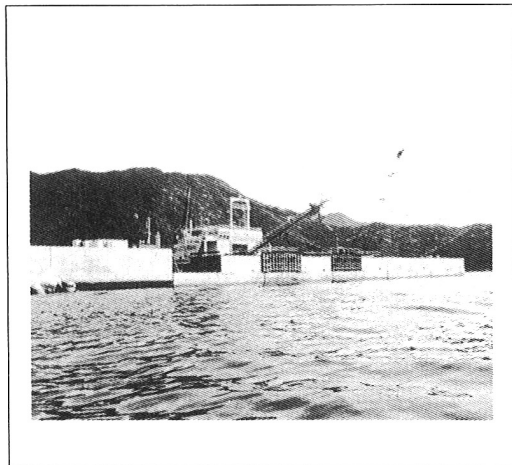
4-3. 上部工

上部コンクリートは、コンクリートミキサー船(打設量 $90\text{m}^3/\text{h}$)による現場練りコンクリート(設計基準強度 $16\text{N}/\text{mm}^2$ 、粗骨材最大寸法 40mm 、スランブ 8cm 、高炉セメントB種)を使用し打設を行った。

施工はケーソン1函につき4スパン(パラペット部は2スパン)に分割し順次打設を行った。陸上で大組みした鋼製型枠を台船にて運搬しクローラークレーン(50t吊)を用いて所定の位置に組み立て剥離材を塗布した。また、伸縮目地材は樹脂発砲体($t=10\text{mm}$)を取り付けた。コンクリートの打設は出来るだけ水平となるように行い、横移動による材料分離を防止するように行った。締め固めはパイプレーターを使用し十分締め固めた。打設完了後、養生マットで被覆し養生を行った。型枠脱型はクローラークレーン(50t吊)を用いて行った。



写真－１６ 上部コンクリート打設状況(1)



写真－１７ 上部コンクリート打設状況(2)

4-4. 消波工

最後に、消波ブロック(32t型)をケーソン前面に据え付けた。据え付けは、旋回式起重機船(250t吊)を使用し、水中部は潜水士の合図誘導により、また水上部は防波堤上の指示者の合図誘導により行った。

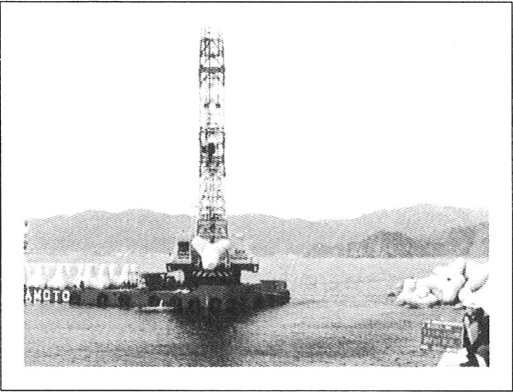


写真-18 消波ブロック据付状況(1)

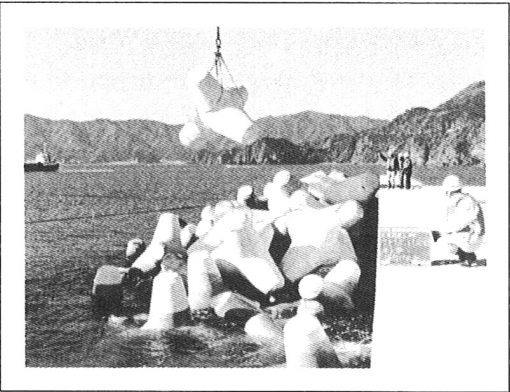


写真-19 消波ブロック据付状況(2)

4-5. 防災情報システム

南海地震津波(昭和21年)以前は「地震があっても津波が来るまでには小一時間余裕があるから、飯を炊いて逃げれる」との話があったそうである。しかし、南海地震津波を実際に体験された方々は「大地震があったら先ず逃げることだ。そして、避難場所の確認や訓練を日頃からしておくことが肝心だ」と教訓を語っている。自然災害への備えは、防災施設の整備だけでは不十分で、防災関係機関の即応体制の整備などや、とりわけ市民一人一人の常日頃からの備えが大事である。特に、南海地震津波(昭和21年)よりも大きな津波が来襲した場合、津波防波堤のピークカット効果は期待できるものの、浸水を完全に防ぐことはできない。平成9年4月に全国で初めて運用を開始した防災情報表示盤(高さ約7m、幅約4.5m)は、気象庁が発表する津波警報などの緊急情報とともに、運輸省港湾局、日本気象協会、沿岸開発技術研究センターが提供する、海の波や潮位、天気などについての通常情報を大型LED画面に表示するものである。この情報盤は防災情報を画面表示するだけでなく、情報盤端末を消防署内に設置していることから防災無線などによる地域防災体制との連携も可能な仕組みになっている。これによって、災害発生時に迅速な行動がとれるとともに、市民の防災意識の高まりにも役立ち、より安全な街になることを期待している。

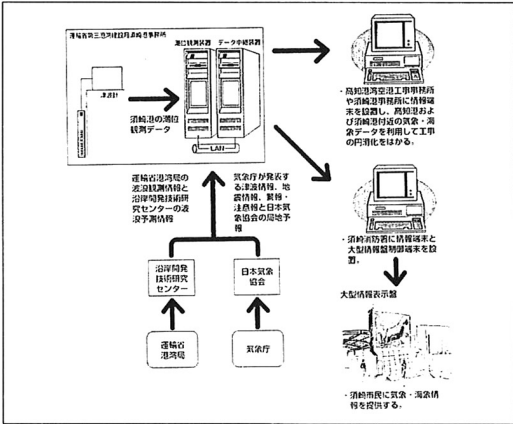


図-14 須崎港防災情報システム

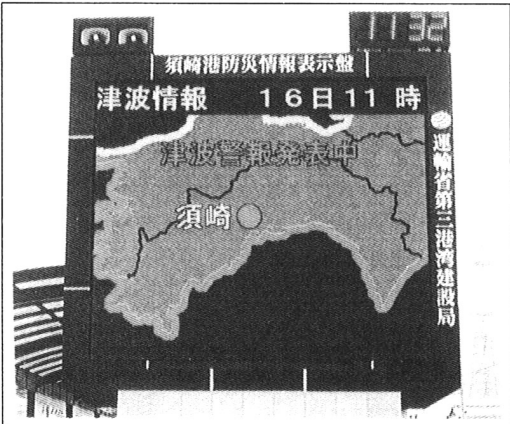


写真-20 須崎港防災情報表示盤

5. むすび

南海道沖を震源とする巨大地震は、これまで100年から150年間隔で発生しているが、昭和21年の南海大地震から既に50年が過ぎ、次の地震は2030年頃にも発生するのではないかと予測する地震学者もいる。一方、昭和35年のチリ津波のように、遠く太平洋の果てで発生して日本まで伝わる、いわゆる遠地津波の場合は、何年周期で発生するというようなことはなく、いつ発生しても不思議ではないと言われている。このようなことから、私どもは、津波の被害を最小限にとどめる恒久的な津波対策として、県の海岸工事と連携し、須崎港の入口で津波の流入を抑える津波防波堤の建設を進めている。計画延長1,420mのうち、現在270m程海上に顔を出しているが、早期完成に向けてさらに努力して参りたい。