

特集

PC海洋・港湾構造物

## 最近の港湾技術開発の動向

中山 茂 雄\*

### はじめに

欧米の技術者によって、明治初期にもたらされた近代港湾建設技術をもとに、その後、一世紀に及ぶ先人技術者の工夫、改良が加えられたものが、我が国の港湾技術である。

今日の我が国の技術水準は神戸港ポートアイランド、横浜港大黒埠頭に見られる軟弱地盤上の沿岸人工島港湾、鹿島港、苫小牧港に見られる大規模な掘込港湾の建設等を通じて、世界第一級の技術水準を保持するに至っている。これらの技術はまた、大規模な海上空港、沖合人工島、洋上石油備蓄基地等の沿岸域開発プロジェクトを支える基礎技術として援用され、海外の発展途上国の港湾開発にも大きく貢献している。

現在、港湾整備の分野では物流の近代化、既存施設の再開発、環境問題等への対応が要請されているのに加え沿岸海域の空間利用の稠密化が進行しつつある。

今後、港湾技術面では施設の合理化、経済性と安全性のより一層の追求を行っていくための技術開発を推進し技術の総合的な水準の向上を図るとともに沖合海域での開発プロジェクトの推進といった新しい要請に対応していくための課題の解決を行っていくことが必要である。

### 1. 主要技術開発課題と技術開発の現状

港湾整備および沿岸域の利用開発を円滑に推進していくためには、調査・計画・設計・施工・維持管理の各分野にわたり、安全性と経済性を両立させつつ、大規模なプロジェクトを推進していくことを可能にする技術開発



\* Shigeo NAKAYAMA  
運輸省港湾局技術課技術指導官

を行い、確立していくことが重要であることから、現在表—1 に示されるような各種の技術開発課題について試験・研究を実施しているところである。

以下には、これらの課題のもとに進められている港湾構造物、特に防波堤と護岸に関する技術開発の現状について述べていきたい。

### 2. 新形式防波堤の開発新形式護岸の開発

防波堤は港湾の最外郭を形成するものであるため、大水深、大波浪といった最も厳しい条件下で建設することが要求される。特に近年の港湾の沖合展開に対応して、より苛酷な条件のもとで防波堤の建設を進めなければならない場合が多くなってきている。防波堤の建設コストは、水深、波浪等の条件の苛酷化に対応して急激に増大することから、湾整備を円滑に進めるためには、防波堤の建設コストの低廉化を図ることが要請されている。

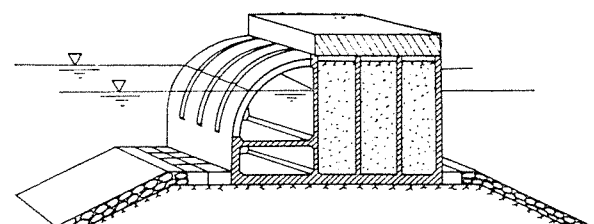
このため、運輸省港湾局では次に紹介するような新形式の防波堤の技術開発を行っている。

#### 2.1 曲面スリットケーソン堤

通常のケーソン式防波堤では波の反射率が高いこと、条件によっては、強い波力を受けることなどの短所がある。この対策として一般にはケーソンの前面に消波ブロックを積んだ消波ブロック被覆堤を用いているが、この構造では水深の増大に伴って断面が急激に増大することなどから建設コストが急増するという問題がある。

このため、消波性能においては消波ブロック被覆堤に遜色がなく、しかも外海の大波浪域においても、適用し得る経済性の高い防波堤として曲面スリットケーソン堤（図—1）が開発された。

曲面スリットケーソンは通常のケーソンの前面に円弧状でかつ縦方向にスリットを開けた曲面壁を設け、内部にはほぼ四分の一円形状の遊水室を形成するところに構



図—1 曲面スリットケーソン堤

プレストレストコンクリート

表—1 主要技術開発課題

技術開発課題	主な内容
① 大水深、大波浪下における合理的・経済的な港湾技術の開発	・新構造物の開発、設計法および施工技術・機械の開発、各種調査技術の開発等
② 沿岸域開発のための総合的な海域利用・計画技術の開発	・海域利用計画技術の開発、波エネルギー利用技術の開発等
③ 港湾構造物の維持・管理・補修技術の開発	・防食技術の開発等
④ 港湾管理・運営に関する技術の開発	・港湾財政シミュレーションモデルの開発、港湾情報システムの開発等
⑤ 効率のかつ経済的で信頼性の高い地盤改良技術の開発	・各種軟弱地盤改良工法の設計・施工法の確立、液状化対策工法の開発等
⑥ 港湾の安全性の確保に関する技術の開発	・避泊システムの開発、新耐震技術の開発、荷役安全システムの開発、気象・海象予測精度向上技術の開発、防災対策技術の開発等
⑦ 海域環境の保全・調和および創造に関する技術の開発	・海域汚染防止および浄化技術の開発、環境アセスメント技術の開発、海浜創造技術の開発等

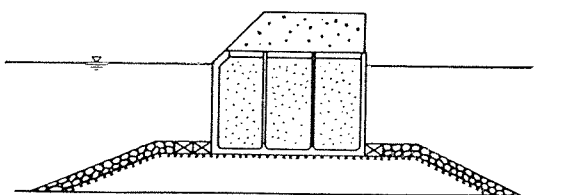
造的な特徴を有する消波タイプのケーソンである。曲面スリットのアイデアの原点は耐波性の面で優れている傾斜堤と消波性能の面で注目される直立スリットケーソンなどの遊水部の場合であり、強度的に優れたアーチ構造をスリット部に用いることが考えられた。この曲面スリット部材は大きな純引張力が作用するためプレストレストコンクリート構造とし、本体との接合箇所も大きなせん断力、引張力が作用するため後打ちコンクリート目地とし、プレストレスを加えている。

曲面スリットケーソンの設計・施工法を確立するため昭和55年に秋田湾において実験堤を設置し、波力、部材応力などの観測および施工性の確認を行った。この実証実験から良好な結果が得られたため、昭和59年度には船川港の防波堤として実用化第一号の曲面スリットケーソンが製作され、昭和60年度に設置される予定であり、この場合には従来の消波ブロック被覆堤に比して約15%経済的なものとなっている。

### 2.2 上部斜面堤

従来のケーソンを用いた防波堤は波から受ける力に対して、ケーソンの重量を大きくすることにより抵抗するよう設計されている。このため、大波浪の条件下ではケーソンを非常に大きくする必要があり、施工が困難となり、しかも建設コストが増大します。この問題を解決するため、波から受ける力を従来のケーソンより小さくし堤体の安定性の向上と建設コストの低廉化を図る上部斜面堤(図—2)が開発されました。

上部斜面堤は従来のケーソンの前面上部の隅切りを行い、波力の大きな部分を斜面状にしたものである。これにより波が前面で反射するのではなく、斜面をはい上が



図—2 上部斜面堤

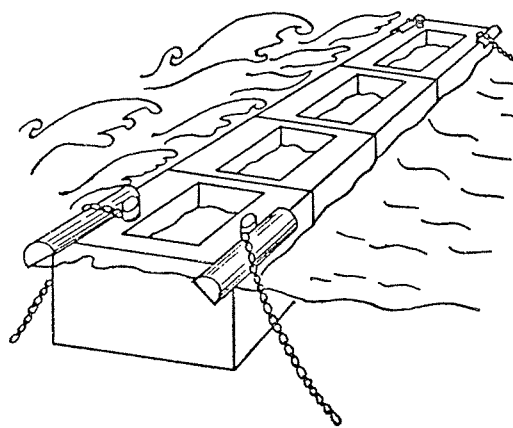
ることによって波力を軽減することができる。

このように、上部斜面堤は波から受ける力を軽減するが、反面、波のはい上りにより港内への伝達波が若干増大する。しかし、荒波浪時における伝達波をある程度許容してもよい場合には上部斜面堤の経済性は高く有力な構造形式である。

上部斜面堤に対しても秋田湾において実験堤を設置して実証実験が行われ、その成果を受けて既に新潟東港の西防波堤に採用され工事が進められている。なお、新潟東港では伝達波をおさえるために通常よりも天端高を高くしたが、地盤が軟弱であり存来工法に比して経済的な防波堤の建設が可能となった。

### 2.3 浮防波堤

大きな船舶などの浮体により、ある程度波浪を防ぐことができることは従来から知られている。この船舶の代わりに、鋼やコンクリート製の浮体を用いて波を防ごうとするのが浮防波堤である(図—3)。浮防波堤が波を防ぐ原理は、通常の防波堤と異なり波によって浮体自身が動揺し、この浮体の動揺によって発生する波が入射波を打ち消す動きをするわけである。このため、浮防波堤の効果は入射する波によって異なり、どんな波でも一様に防ぐことはできないが、一定の範囲の波については極めて効果的な防波が可能である。



図—3 浮防波堤

浮防波堤は浮体を係留したものであるから潮位差の影響を受けず、大水深、軟弱地盤においても設置が容易であるとともに、必要に応じて移動も可能である。更に、海水の交換が自由であり、環境に与える影響も小さいことから、ある条件下では極めて経済性の高い防波堤の建設が可能である。しかし、従来は養殖漁業等のための小型の浮防波堤が用いられているだけで、港湾施設としての本格的な浮防波堤は実用化されていなかった。これに対し、運輸省港湾局では室内実験によって最も消波効率の高いタイプを選定し、実物大の実験堤を建設し熊本港の沖合に設置して現地観測を行った。この実験堤は経済性、耐久性に優れたプレストレストコンクリート製とし浮体四箇を陸上製作した後、海上においてこれらを浮遊状態で接合し、プレストレスを導入して一体化したもので、この接合方法は、今後の海洋開発における大型浮遊式構造物の製作にも活用が期待されている。

この熊本港における浮防波堤の現地実験の結果、十分な防波効果が確認され、現在は浮防波堤の設置位置を移し、浮体、係留鎖等の耐久性の確認を行っている。また福山港福山海岸の離岸堤にも採用され、良好な結果が得られている。

#### 2.4 マルチセルラー式防波堤

マルチセルラー式防波堤(図-4)は斜面を縦に重ねることにより、狭い堤体幅で斜面堤の利点を生かすという発想から生まれた。従来の防波堤のように波を前面で反射するのではなく、入射した波の力を堤体内の空洞を通して上方へ逃がす構造となっているため、波から受ける力を小さくするだけでなく、波の力が堤体を下方に押しつけるように作用するので、堤体の安定性を増大させる

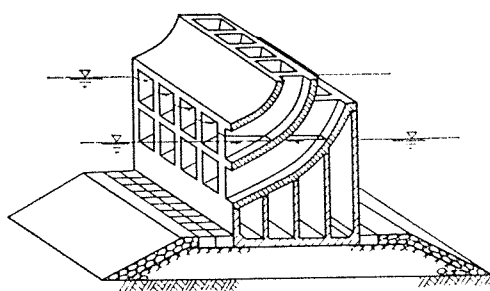


図-4 マルチセルラー式防波堤

ことができる。このため、大波浪域においても安定性の高い防波堤の建設が可能となる。更に、堤体に空間を設けているため、通常のケーソンに比べて軽量となり、基礎の部分の設計にも有利である。

このように、多くの優位性を持った構造であるが、反面、構造が複雑なために堤体に働く波の力の把握、構造物に働く応力集中などの構造力学的課題、製作の困難なこと、浮遊曳航時の安定性の問題等施工面での技術課題

など実用化に向けて解決すべき課題が残されている。

これらのことから、マルチセルラー式ケーソン防波堤については昭和51年から55年に港湾技術研究所において二次元模型実験等による基礎的実験を終え、昭和59年度から4年をかけて、運輸省第三港湾建設局が和歌山港に実験堤を設置して現地実証実験を行うこととしている。この実験堤についての試設計の結果、マルチセルラー式防波堤が、在来のケーソン混成堤に比べて約20%程度経済的となることが見込まれている。

#### 2.5 軟弱地盤着底式防波堤

従来の防波堤は一般に堤体の重量を大きくすることにより波の力に抵抗して安定を保つものであるが、反面、地盤の軟弱な所では防波堤の重量を支えるために地盤改良を行う必要が生じる。このため、地盤の軟弱な所での防波堤建設はコストが極めて高くなる。

これに対し、軟弱地盤着底式防波堤(図-5)は軟弱地

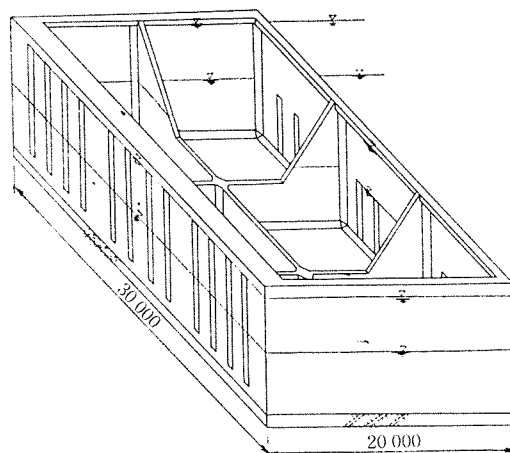


図-5 軟弱地盤着底式防波堤

盤が水を多く含んだ粘性土より成ることから、この粘着力を利用して波の力に抵抗しようという発想から生まれたものである。粘着力により波力に抵抗するため、従来の防波堤のように堤体の重量を大きくする必要がなく、地盤改良を省略することが可能となる。

このように優れた経済性が期待されるが、技術的には解決すべき課題も多い。粘性土の粘着力の大きさがどの程度期待できるかについても、一応の目安はあるものの実際に計測した例がない。更に、波のような繰返し荷重が作用した場合の粘着力は未解明の点が多い。また、軟弱地盤上に単に堤体を設置しただけでは堤体前面が波の力により洗掘等を受け、堤体の安定性に支障をきたす恐れがある。

これらの問題を解明するためには、現地での実証実験が不可欠であるため、昭和59年度から61年度にかけ運輸省第四港湾建設局が熊本港に実験堤を設置して現地実証実験を行うこととしている。昭和59年度には縮小模

型による現地粘着力試験を行い、その結果を踏まえて設計および試験堤の製作を行っている。この試験堤についての試設計の結果、軟弱地盤着底式防波堤が地盤改良を含めた在来ケーソン堤に比べて、約 30% 程度経済的になることが見込まれている。

## 2.6 波力発電防波堤

台風の後などの防波堤の被災例を見ると、数千トンのケーソンが転倒していることに驚かされる。波のエネルギーは絶大なものである。この波のエネルギーを防ぐだけではなく、より有効に活用していこうというのが波力発電である。防波堤は、本来、波を防ぐ目的で設置されることから、比較的波の荒い海域に設置されることが多く、この防波堤に波力発電機能を持たせれば、効果的に波のエネルギーを利用することが可能になる。

波のエネルギーを電気エネルギーに変換する方式は種類のもが発案されているが、運輸省港湾局では波のエネルギーを空気に流れて変えて、これで発電タービンを廻す方式を研究している（図-6）。この方式の原理を簡

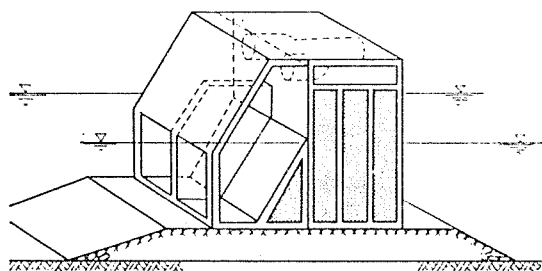


図-6 波力発電防波堤

単に説明すると、防波堤前面にコップを逆さにしたような空気室を設けると、波が入射して空気室の水面が上下する。この水面の上下をピストンにみたて、空気室がポンプの働きをする。このポンプにより空気の流が生じ、これがタービンを廻すという仕組みである。

この波力発電防波堤について、運輸省港湾技術研究所において昭和 57 年度より模型実験等を行い、波エネルギーの電気エネルギーへの変換効率、波力発電防波堤の耐波設計法等についての研究を行っている。この研究成果によると、波エネルギーの変換効率は約 30% 程度であり、この内訳は、波エネルギーの空気エネルギーへの変換効率が 70~80%、タービンの効率が 40~50% である。このため、効率的な波力発電を実用化するためにはタービン系の効率アップが必要であろう。

一方、波力発電防波堤では副次的効果として、反射波の低減、波の力の低減が図られる可能性がある。

なお、参考までに、わが国沿岸に来襲する波のエネルギー総量を試算すると 3100 万キロワットとなり、これは我が国の総電力供給能力の 3 分の 1 に相当する規模で

ある。この莫大なエネルギーを有効に利用していくことは、今後の重要な課題である。

## 3. 新形式護岸の開発

今後の港湾の沖合展開化、あるいは関西国際空港をはじめとする沖合人工島などの海洋開発の進展に伴い、大水深域において護岸を合理的、経済的に建設することが課題となっている。大水深護岸の建設は大水深域の特性から、護岸の構造が大型化するのみならず、調査面、作業性の面等あらゆる面にわたってコストの増大をまねく要因があり、合理的経済的な建設のためには、単に従来の技術を延長するだけでは対処できず、調査・設計・施工・管理の各分野で大水深護岸に固有の技術開発が要請されている。

大水深護岸の建設に係わる技術開発は、現在、運輸省港湾局を中心にして行われている。運輸省港湾局では大水深域において合理的となる護岸構造を開発するため、いくつかの新構造護岸について試設計を行い、設計、施工上の問題点を整理している。これらの問題点のうち、重要な課題については、具体的に調査、研究が実施されている。現在検討されている新構造護岸は以下のものである。

### 3.1 従来型ケーソン式護岸

従来型ケーソン構造は最も一般的な重力式護岸であり大水深護岸の場合も現在の技術の延長線上で十分対処できる工法であると考えられる。

設計上の問題点としては、捨石均しの精度および不陸が構造物に与える影響、許容端趾圧の考え方、地震時の捨石マウンドと上部工の動力学的解析方法などがあり、現地実験の実施等によりそれぞれ検討が行われている。

施工上の問題点としては、ケーソンを海上曳航するための波切版、ケーソンの海上打継等があげられる。またマウンドならし作業船の開発も進められており、一部実用段階に入ったものもある。

### 3.2 バットレス付きケーソン護岸

大水深護岸において、重力式構造は基礎地盤の端趾圧が、堤体幅の決定要因となることが多いため、バットレス付きフーチングとして端趾圧を軽減し堤体の経済性向上を図るものである（図-7）。

設計上の問題点としては、バットレス付きフーチング部の配筋計算を行う際の有効高さのとり方があるが、机上計算において概略の検討がなされている。

施工上の問題点としては、ケーソンの乾舷が少ないため曳航時の曳航索のとり方に配慮が必要となる点などがあげられる。なお、バットレス付きケーソンについてはフーチング長 4 m 程度までは施工された例がある。

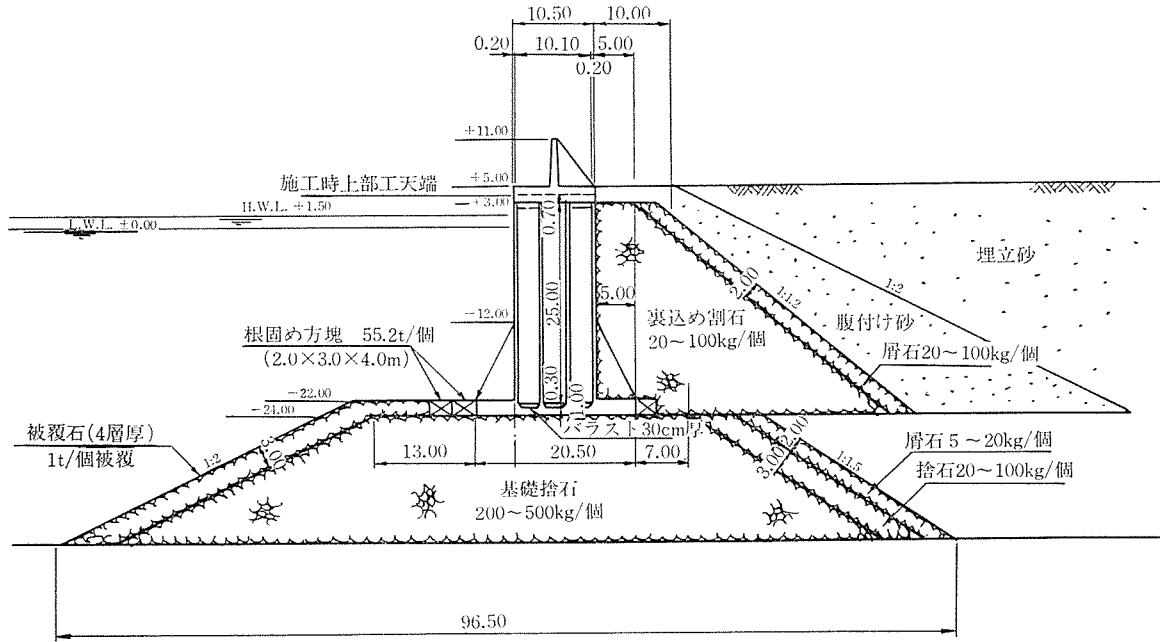


図-7 バットレス付きケーソン式護岸

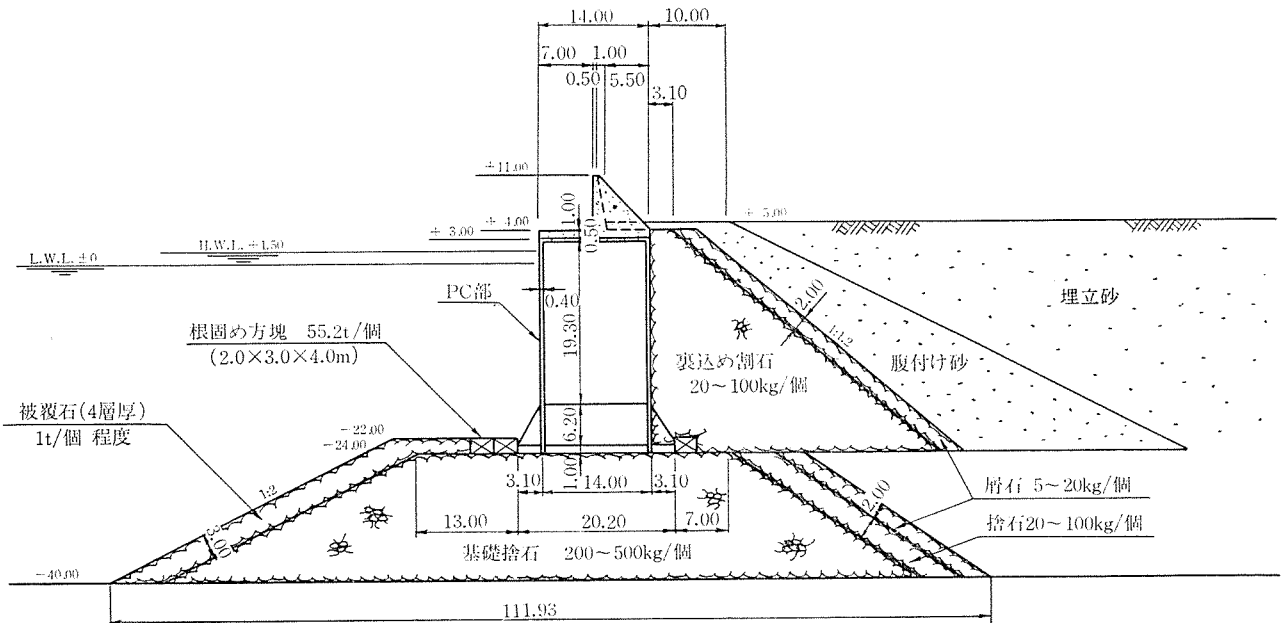


図-8 円形 PC セル式護岸

### 3.3 円形 PC セル式護岸

この形式は、バットレス付きケーソンの堤体を PC 材を用いて円形にすることで隔壁を省き重量を軽減し、起重機による直吊りで運搬据付けを行うものである (図-8)。

設計上の問題点としては、波力および土圧によってセル本体に発生する応力の解明があるが、これも机上計算によって概略検討されている。

### 3.4 根入れ式鋼板セル護岸

根入れ式鋼板セルは、材質、板厚、形状寸法の選択が自由であり、堤体幅にも制限はなく、急速施工が可能で

あるので、鋼材を使った断面としては実現可能性のある構造物と考えられる (図-9)。

設計上の問題点としては、セルがらに働く水平方向張力の算定、補剛材の入れ方などがあり、模型実験等によって検討が行われている。

施工上の問題としては、施工中の先端部の洗掘と、セルが傾いた場合のアーク部の施工等がある。

### 3.5 半円形つり鐘式護岸

堤体を半円形にするとともに部材を半円の中心に集めることによって堤体に作用する波力および土圧による偏心度を少なくし、中詰めを要しないことから堤体重量を

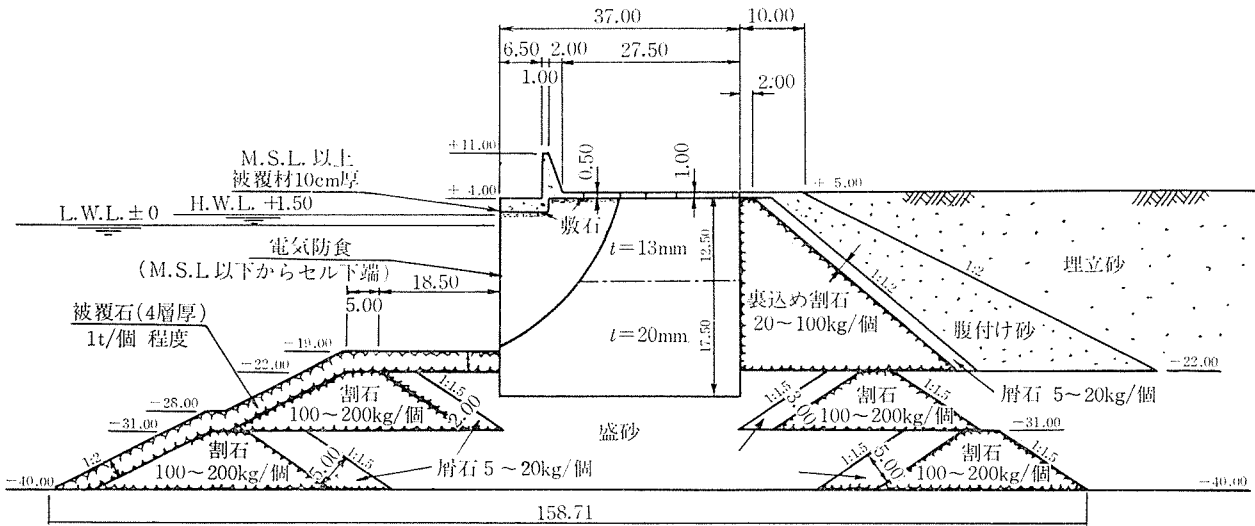


図-9 根入れ鋼板セル護岸

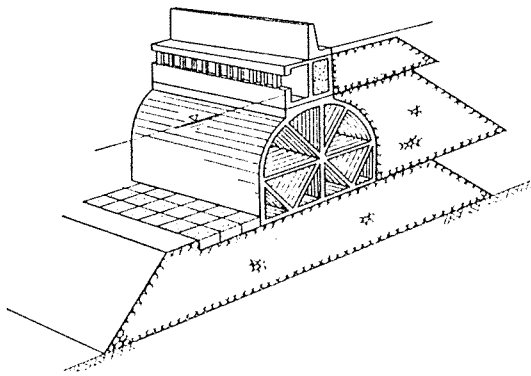


図-10 半円形つり鐘式護岸

軽くし、地盤反力を軽減させる構造である(図-10)。

今回の試設計においては、他の重力式構造が端趾圧によってその形状が決定しているのに対し、本構造は波による滑動に対する安定から形状が決定しており、他の構造と比べて部材設計が大きな検討項目となる。このほか曲面部に作用する波圧および土圧の算定法も設計上の課題であり、模型実験および数値計算によって検討が進められている。

施工面においては、高強度高品質コンクリートの打設方法や、運搬、据付け方法等の課題がある。

#### 4. 今後の技術開発課題と技術開発への取組み

今日、港湾整備の分野では物流の近代化、陳腐化した港湾施設の再開発、エネルギーの安定供給基地としての機能の確保、背後都市のアメニティー向上への寄与、広域的な整合性の確保、海洋および港湾環境の保全、安全の確保などの多種多様な要請に対して新たな対応を迫られている。また、沿岸海域空間利用のより一層の稠密化が進んできている。このため、今後は下記のような新たな技術開発の要請が高まるものと予想される。

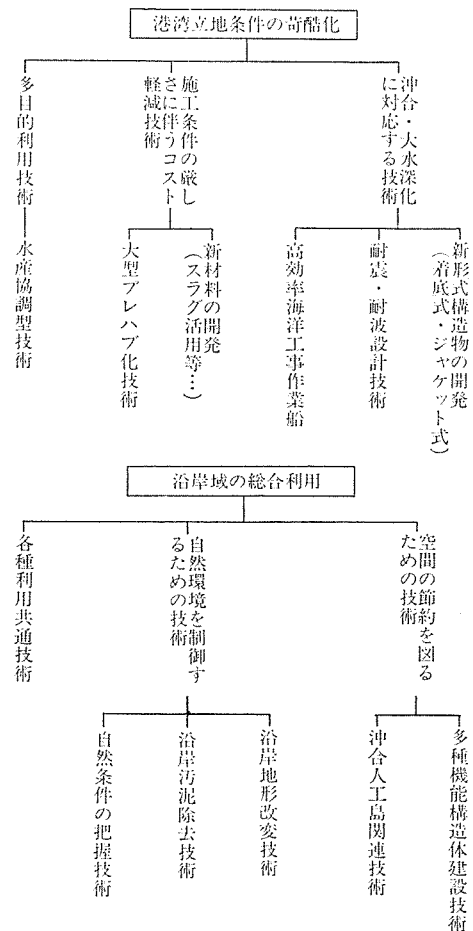


図-11 今後の具体的な技術課題の例

(1) 合理的、経済的かつ安全性の高い港湾技術の総合的な水準の向上

港湾施設の整備が比較的容易であった沿岸海域空間の利用が今日既にかかなりの程度進んでいることから、今後は従来に増して水深の深い海域に整備せざるを得ない場合も多くなる。これに伴って、水深、波浪、地盤等自然

条件はより一層厳しくなる。

したがって、環境保全に万全の注意を払いつつ、より苛酷な自然条件を克服して、施設の合理性、経済性および安全性をより一層検討し、構造物の機能の極限までの追求、より精緻な設計、施工法の確立を目指した港湾技術の総合的な水準の向上を図るための技術開発が必要である。

(2) 海洋開発を推進するための海洋土木技術の確立

沖合人工島の建設などによる沖合の海洋空間の高度利用を円滑に推進していくには、安全かつ合理的、総合的な海洋空間利用のための技術開発を進める必要がある。この際、水深 20~30 m 以浅における沿岸海域の開発を通じて蓄積された港湾技術に対する期待は大なるものがあり、今後の海洋開発プロジェクトの推進にあたっては

港湾技術が中核となって更に関連分野技術を導入した海洋土木技術の確立を目指した技術開発を強力に推進していく必要がある。

このような新たな要請に対処していくためには、大規模な実証試験を伴った技術開発が中心になることが予想されるが、これら技術開発は、リードタイム、開発資金、関連技術分野の広がり等の点から開発リスクが大きく、民間では取り組み難いものも多い(図-11 参照)。

このため、港湾、海洋開発の大型技術開発を積極的に推進し得るよう国の研究・技術開発機能の一層の充実を図るとともに、民間が取り組み得る種類の技術課題は民間に委ねるなど合理的な技術開発体制を確立していくことが肝要であると考えられる。

---

◀刊行物案内▶

## プレストレストコンクリート構造物の設計・施工と最近の話題

本書は、全国七都市で開催された第 13 回 PC 技術講習会のテキストとして編纂されたもので、1984 年 8 月カルガリーで行われた FIP シンポジウムの Commission WG 報告をはじめ、近代技術にふさわしい施工法、工期の短縮および経済性を考慮した最近の実施例、30 数年を経過した PC 構造物の損傷事例をふまえての設計法、最近我が国でも急速に利用範囲の広まった海洋構造物への PC の応用例等々、多岐にわたる内容を取り上げてのものです。PC 関係の技術者には欠くことのできない貴重な資料と考えられます。

ご希望の方は、代金を添えて(社)PC 技術協会宛お申し込みください。

体 裁：A 4 判 160 頁

定 価：3,500 円 送 料：450 円

内 容：(A) 緊張材引張力と伸びとの関係——FIP Commission on Practical Construction WG 報告から——引張力～伸び関係についての基本、設計上の観点、FIP Commission の方法による  $\mu$ ,  $k$  推定法、例題。(B) PC 板埋設型枠の利用による構造の実例、PC 板埋設型枠合成床版に関する実験的研究、同設計例、設計施工上の問題点と適用の実例。(C) 海洋構造物への PC の応用、海洋 PC 構造物の現状、本四連絡橋工専用 PC バージ、横浜港横断橋の PC バージ。(D) プレストレストコンクリート橋の施工について、まえがき、型枠支保工、コンクリート工、鉄筋工、プレストレッシング工、PC グラウト工、架設工。(E) 維持管理面よりみたプレストレストコンクリート構造物の細部設計、まえがき、損傷事例の調査、改善法の提案、あとがき。(F) 新幹線大宮—上野間のプレストレストコンクリート橋とその技術、まえがき、T 形桁の標準設計、主な PC 橋りょう、技術上の問題点。