

港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 276

Sept. 1977

プレストレストコンクリートと港湾および
海洋構造物

—その現状と問題点—

大 即 信 明
関 博

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. ま え が き	3
2. プレストレストコンクリートの概要	4
2.1 プレストレストコンクリートの原理と歴史	4
2.2 プレストレストコンクリートの分類	5
2.3 プレストレストコンクリートの利点および欠点	6
2.4 プレストレストコンクリートに関する新しい考え方	7
3. プレストレストコンクリート海洋構造物	9
3.1 プレストレストコンクリートの利点	9
3.2 プレストレストコンクリートの実例	10
3.3 プレストレストコンクリートによる建設工法	29
4. 海洋構造物部材としてのプレストレストコンクリートの問題点	33
4.1 設計および解析に関する問題	33
4.1.1 設計法の現状	33
4.1.2 波力に対する問題点	34
4.1.3 解析上の問題点	36
4.1.4 プレストレストコンクリート設計に関する2.3の考察	38
4.2 建設工法に関する問題点	42
4.2.1 海洋工事での問題点とプレキャスト化	42
4.2.2 種々の分野におけるプレストレストコンクリートのプレキャスト化	43
4.2.3 海洋構造物のプレキャスト化と接合法	52
4.3 その他の問題点	56
4.3.1 プレストレストコンクリートの使用材料	57
4.3.2 ひびわれについて	57
5. お わ り に	57
参 考 文 献	58

Prestressed Concrete and Offshore Structures

Nobuaki OSTUKI *

Hiroshi SEKI **

Synopsis

Prestressed concrete has many advantages of a structural material for offshore facilities, and it is expected that many facilities of prestressed concrete will be constructed in the future. There are, however, several problems in the design and the construction at present to build the good facilities at high sea of severe marine condition.

This paper explains the concept of prestressed concrete at first, introduces the offshore structures of prestressed concrete, and examines the problems above mentioned to present an idea to solve them.

* Member of Materials Laboratory, Structures Division.

** Chief of Materials Laboratory, Structures Division.

プレストレストコンクリートと港湾および海洋構造物 その現状と問題点

大 即 信 明 *
関 博 **

要 旨

近年、海洋への関心とともに海洋構造物建設への期待も高まっている。

プレストレストコンクリートは海洋構造物材料としてすぐれた性質を有しており、今後これを用いた海洋構造物の建設は増加するものと予想される。しかし、現状ではプレストレストコンクリートを海洋構造物として用いる際の設計法および建設工法等になお未熟な点が多々あり、今後の研究に負う所も多いと思われる。

本資料では、プレストレストコンクリートの概要およびプレストレストコンクリート海洋構造物について文献調査を行い、さらに、プレストレストコンクリートを海洋構造物に用いる際の設計法、建設工法等の問題点を検討した。

その結果、現状での当面の問題点は、海洋における外力条件に対してプレストレストコンクリートの利点を十分に生かせる設計体系がととのっていないこと、および海洋におけるプレストレストコンクリートの一般的な建設工法が確立していないことであるとの結論に達した。

このため、設計に関してはプレストレストコンクリートの耐海水性の定量的な把握および鉄筋コンクリートとプレストレストコンクリートを含めた合理的な設計体系の確立を、また、建設工法上はプレキャスト化を軸とした工法の確立を早急に進めるべきであると思う。

1. ま え が き

我が国は国土は狭く、資源に乏しく、今後海洋をいかに利用するかが重要な問題であることは言うまでもなく、海洋に対する関心とともに、海洋構造物建設への期待も高まるものと考えられる。

既往の海洋構造物として港湾構造物などがあるが、水深の比較的浅い沿岸に建設されており、この建設技術では、さらに水深の大きな外洋での構造物にはそのまま適用できにくい面もある。このため、種々の海洋構造物に幅広く応用できる建設技術を改めて再検討する必要がある。

この建設技術再検討の一つとして、構造物を構成する材料を再検討する必要があるが、強度、経済性からみて、海洋構造物の材料としても当然、鋼およびコンクリートが用いられることになる。この場合、鋼をそのまま部材として用いることもあろうが、複合材料として鉄筋コンクリート、プレストレストコンクリートの形で使用されることになる。特に、プレストレストコンクリートは

高品質の鋼およびコンクリートを有効に活用していること、鉄筋コンクリートの耐海水性の劣化の原因となっているひびわれを発生させる危険性も低いことなどから海洋構造物材料としてすぐれており、すでに北海の貯油施設など大規模な海洋構造物に使用されている。

プレストレストコンクリートがコンクリートおよび鉄筋コンクリートに対して有利な点は、ひびわれ発生の危険性が少ないことであり、鋼に対しては、腐食およびそれに伴う維持管理の面で有利なことである。その反面、従来の海洋構造物、例えば港湾構造物としての使用実績が鋼および鉄筋コンクリートにくらべてはるかに少なく、さらに現行設計体系のもとではプレストレストコンクリートの特性が十分活用されにくいという面もある。

本資料は、プレストレストコンクリートの海洋構造物への適用例および問題点を文献調査し検討を加えたものである。特に、波の不規則性に対する設計上の問題点およびプレキャスト化に伴う接合工法など、施工の問題点を検討した。

* 構造部 材料施工研究室

** 構造部 材料施工研究室長

2. プレストレストコンクリートの概要

2.1 プレストレストコンクリートの原理と歴史

(1) プレストレストコンクリートの原理

プレストレストコンクリートの定義は、次のようなものと考えられる。猪股によれば²⁻¹⁾、「与えられた荷重によっておこる応力度を、所要の程度に打ち消すことが出来るように、あらかじめ、人工的にその応力度分布、応力度などを定めて、内力を与えられたコンクリート」とされている。このように、あらかじめ計画的に導入する応力をプレストレスといい、通常は高張力鋼に引張応力を与えることによってコンクリートに圧縮応力を生じせしめている。そのために使用する鋼材を PC 鋼、PC 鋼筋、PC ケーブルまたは PC 緊張材という²⁻²⁾。

プレストレストコンクリートは、広い意味における鉄筋コンクリートの 1 種であり、鉄筋コンクリートから発達してきたものである。コンクリートは圧縮に対しては強く、圧縮強度は 1000 kg/cm^2 程度のものであるが、引張りには弱く、引張強度は圧縮強度の $1/10 \sim 1/15$ 程度しかなく、それ自体では非常に割れやすい材料である。このため、コンクリートを構造用材料として使用する場合、コンクリートの引張強度を償うために引張強度の高い鋼材と組合せて使用することが考えられて、鉄筋コンクリートが開発された。

コンクリート中に適切に埋め込まれた鉄筋は錆から防護され、さらに両者の間にはかなりの付着力があり一体となって外力に抵抗することができ、さらに、両者の熱膨張係数がほぼ等しく、温度変化によって発生する内部応力を小さくすることができ、鉄筋コンクリートをすぐれた構造材料としている。

鉄筋コンクリートは、構造材料の主流として発達し、広く建設工事に普及してきた。しかし、鉄筋コンクリートは原理的にひびわれの発生を防ぐことはできず、鉄筋コンクリートの設計では、ひびわれはやむを得ないものとして許容されており、また、ひびわれは直ちに部材に危険をもたらすものではない。しかし、大きなひびわれは鉄筋腐食の原因となるので、ひびわれ幅に対しては許容限度が設けてあり、これによって鉄筋の許容応力度が制限され、鉄筋の引張強度を十分利用できないこともある。この欠点を補うのが高張力鋼線、鋼棒の製造と相まって発達してきたプレストレストコンクリートである²⁻³⁾。

図 2.1 に示すように、コンクリート単独けたに直線状の PC 鋼棒を中心線より e 離れた位置に挿入し、PC 鋼棒に引張力 P を与えると、コンクリートにはその反作用として圧縮力 P と曲げモーメント $P \cdot e$ が働くこととなり、プレストレスとしては図の応力図（左から 1 番目）に示すように上縁には引張応力、下縁には圧縮応力が生ずる。この応力分布を v で表わす。一方、死荷重によってその右の応力図に示すように、上縁には圧縮応力、下縁には引張応力が生ずる。この応力分布を d で表わす。プレストレスを与えた直後の応力状態はこの 2 つを合成したものである。活荷重がこのほりに働くことと応力分布 l が生ずる。なお、PC 鋼棒に与える引張応力は通常降伏応力の 75% におよぶ高張力であるから張力のレラクセーションが起こるし、また、コンクリートの側においてクリープおよび乾燥収縮により最初に与えたプレストレスも減少する。この応力変化は ψ と符号が逆であり ϕ で図に示す。プレストレスによる v を適切な値に設計すれば、活荷重が作用していない $v+d$ もしくは $v+\phi+d$ 、および

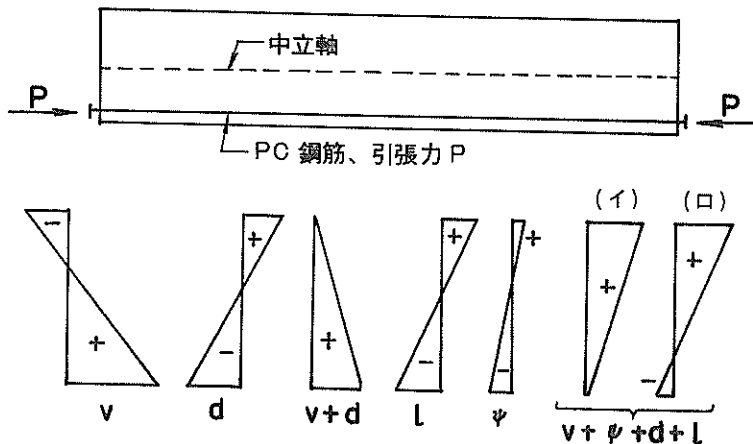


図 2.1 プレストレストコンクリートの原理

び全設計荷重下における $v+\phi+d+l$ の状態においてコンクリートの引張応力を全く発生させないか(図の(イ))または引張応力が生じてもこれをある値以下に制限する(図の(ロ))ことが出来るはずである。これがプレストレストコンクリートの基礎原理である。

(2) プレストレストコンクリートの歴史

プレストレスの基本原則はおそらく数世紀前、たるを造るとき木板に“たが”をかけたときから利用されていたものであろう。すなわち、図2.2に示すように“たが”がかけられると“たが”は引張応力をうけ、木板相互の間には圧縮応力が作用する。すなわち、“たが”と木板はともにプレストレスを受けた状態になっており、たるの内部に液体を貯めることができる。これが最も原始的なプレストレスの応用である²⁻⁴⁾。

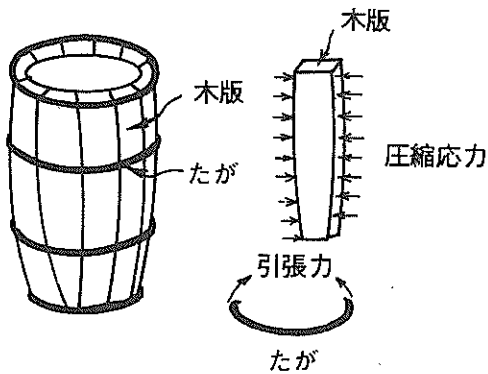


図2.2 たるを造るときプレストレスの原理

この概念をコンクリート工学に初めて利用しようとしたのは1886年P.H. Jackson(アメリカ)および1888年W. Doehring(ドイツ)で、ほとんど同じ時代におのおの別個にPCの特許を取得した。1890年代にドイツのJ. Mandelがプレストレストコンクリートを初めて理論的に論じ、現今のプレテンション方式について述べている。その後、1903年にC.R. Steiner(アメリカ)が鉄筋の端部にナットを用いて、これによって鉄筋に緊張力を与えてプレストレスを導入する方法を考案し、1907年にはKönen(ドイツ)が実験を行った。

これらの試みは成功しなかった。いずれも鋼材の強度が低く最初に与えておいた引張応力は小さなものであったため、コンクリートの乾燥収縮、クリープによって与えられていた鋼材引張応力が消えてしまったのである。

この問題を解決したのはFreyssinet(フランス)で、1928年にはじめて高強度鋼を用いて実用上の問題を解

決した。さらに、プレストレストコンクリートが広範囲に利用されるようになったのは、1939年にFreyssinetが定着用コーンおよびPC鋼線を緊張するための特殊ジャッキを考案してからである。すなわち、これらの利用によって経済的なプレストレスが可能となったのである。

1940年にG. Magnel(ベルギー)はMagnel方式を考案し2本のPC鋼を同時に緊張し、これを鋼製のくさびに定着した。このときまでに、プレストレストコンクリートの重要性が認められ、特にヨーロッパにおいて第2次大戦による鋼材不足と相まって著しい発展をとげた。

我が国におけるプレストレストコンクリートの研究は、1941年に鉄道技術研究所においてプレテンション方式の研究がはじめられたのが最初である。実用に関しては、1950年代の初めに製品の製造および工事を実施する専門会社が続々と発足した。発足当時はスパンの小さなプレテンションのけた、鉄道用杭木等が主たる製品であったが、ポストテンション方式が導入されてから橋りょう等に広く使用されるようになり、1957~60年頃には、スイスのBBRV工法、ドイツのDywidag工法、Baur-Leonhardt工法等、外国の各種工法が続々と技術導入された。

1955年には、我が国において初めて土木学会でプレストレストコンクリート設計・施工指針が制定された。その後のプレストレストコンクリートの発展はめざましく、スパン100mをこえる道路橋も多く建設され、最近では建築、プレキャストコンクリート製品、原子炉の圧力容器、道路および空港の舗装にも応用されるようになった。

2.2 プレストレストコンクリートの分類

(1) 設計方針による分類

プレストレス量を加減することによりコンクリート部材内引張応力の発生を、また、ひびわれの発生を防止することができるし、あるいはひびわれ幅を制限することも可能である。このように設計荷重をうけた部材の挙動によってプレストレストコンクリートを分類することができる。その代表的な例としてCEB-FIPの指針²⁻⁵⁾における分類を述べる。この指針においてはプレストレストコンクリートと鉄筋コンクリートを区別せずに、I種、II種、III種およびIV種と分類している。

これは、CEB-FIP指針が限界状態設計法を基調とし、主として終局限界状態および使用限界状態におけるひびわれ発生の有無を分類の目安としているためである。

この分類を簡単にまとめると次のようである。すなわち、Ⅰ種、Ⅱ種、Ⅲ種をプレストレストコンクリートと考え、Ⅰ種を「設計荷重が作用したとき引張縁に引張応力が発生しないもの」、Ⅱ種を「設計荷重が作用したとき、引張縁に引張応力は発生するが、ひびわれは発生しないもの」、さらにⅢ種を「設計荷重が作用したとき引張縁にひびわれが発生するのは許すが、ひびわれ幅を制限するもの」としている。ただし、厳密に言うところの説明では不十分であり、設計荷重が繰返し荷重であった時の疲労現象、または地震荷重等の衝撃荷重であった場合の対応、また、たわみ易い構造物の場合での変形の許容限界等についての検討も記されている。

(2) プレストレスを与える時期による分類

PC鋼材をコンクリートが硬化する前に緊張するか、硬化した後に緊張するかでプレテンション方式とポストテンション方式に分類される。

プレテンション方式の場合、コンクリートが硬化するまでの間PC鋼材を一時的に緊張しておくアバットが必要である。まず、アバットにPC鋼材を緊張しておき、コンクリートを打設し、コンクリートが必要な強度を得てからPC鋼材のアバットに対する定着をゆるめてコンクリートにプレストレスを導入する。この方式でアバットの間隔を十分に大きくとれば、アバット間に若干の型枠を縦方向に配置して、PC部材を同時に大量生産することができ(ロングライン方式)、プレキャスト製品の工場生産に適している。

ポストテンション方式では、コンクリートが硬化し、必要な強度に達した後、PC鋼材を緊張しコンクリートにプレストレスを与える。この方式は、プレキャスト部材にも、現場打ち部材にも適用できる。

(3) 付着の有無による分類

付着のあるプレストレストコンクリートとは、PC鋼材が全長にわたって周囲のコンクリートに付着しているものであり、そうでないものを付着のないプレストレストコンクリートと言う。

一般に、付着のないプレストレストコンクリートは、付着のあるプレストレストコンクリートに比較して破壊曲げモーメントが小さく、また防錆に対して特別な配慮が必要となるために、あまり用いられない。しかし、施工条件、特に現場施工条件によって、グラウト作業等が困難な場合には、アスファルトをまいたPC鋼材を使用して対応することもある。

2.3 プレストレストコンクリートと他の材料との比較

材料の優劣を検討するには、構造物の形式、設計条件等を限定しなければ正確な議論ができないが、ここでは一般的な比較を、プレストレストコンクリートと鉄筋コンクリートおよび鋼材の間で論じてみる。

(1) プレストレストコンクリートと鉄筋コンクリート

(a) プレストレストコンクリートの鉄筋コンクリートに対する最大の利点は、高張力の鋼材およびコンクリートを合理的に活用していることである。逆に言えば、高張力の鋼材が経済的に製造されているにもかかわらず、従来の鉄筋コンクリートではその特性を十分に生かして使用することが出来ないのである。これは高張力の鋼材を使用した鉄筋コンクリートの破壊荷重は、同量の軟鋼を使用した鉄筋コンクリートに比較して数倍大きくなるが、ひびわれ幅は高張力の鋼材を使用したからといって小さくはならず、同一荷重ではほぼ同じ幅となるので、このためひびわれ幅を制御すると高張力鋼材の強度を十分には利用出来ないことになる。一方、プレストレストコンクリートでは、高張力の鋼材には高応力を導入できるので、それに応じてコンクリートには大きなプレストレスをかけることができ、その結果ひびわれを起こすことなく、あるいはひびわれ幅を制御しながら破壊強度を大きくすることが出来る。このため、鉄筋コンクリートに比べて同一設計荷重であれば小さな断面で設計出来、省資源の面で、また、プレキャスト化した場合には輸送の面でも有利である。

(b) 次に、プレストレストコンクリートでは、死荷重または外部からの荷重による曲げモーメント、せん断力を打消すように、鋼材の配置によってプレストレスの曲げモーメント、せん断力をあらかじめ与えておくことが出来る。この原理は、特に死荷重の割合が高い構造物において、死荷重による曲げモーメント、せん断力の影響をほとんどなくすることが出来るため非常に有利となる。(a)の利点と相まってスパンが大きな橋梁等において特に有利である。

(c) プレストレストコンクリートは軸方向圧縮力を伴っているので一般に主引張応力は小さく、また、PC鋼材の配置によってもせん断力を小さく出来るので、鉄筋コンクリートに比べて腹鉄筋の量を少なくすることが出来る。このため、腹部厚を減らしさらに断面を小さくすることが出来る。

(d) CEB-FIPのⅠ種およびⅡ種では、プレストレスにより設計荷重以下ではひびわれは発生しないし、また、鉄筋コンクリートに比べて高品質のコンクリートを

用いることもあり、内部鋼材腐食の危険度ははるかに少ない。また、過大荷重が作用しひびわれが発生した場合でも、除荷後はほとんど閉合する。この判断は、猪股²⁻⁶⁾が行った繰り返し荷重試験(荷重上限は設計荷重の2~5割増し、繰り返し回数 10^6 回)で裏付けられる。(表2.1参照)。この実験は上記繰り返し荷重実験の前に設計荷重の0~2.6倍の荷重を載荷し、部材にひびわれを

発生させてから(一部は非発生)上記繰り返し荷重実験を行った。部材に設計荷重の2.6倍を事前に載荷した時以外では設計荷重の4~9割の荷重の下でもひびわれ幅は0であった。この試験結果は、水密性を要する構造物にはプレストレストコンクリートを使用する方が有利であることを示している。

表 2.1 繰り返し載荷後の残留ひびわれ幅

はり 番号	荷 重 (t)		下縁応力度(kg/cm^2)		ひびわれ幅 (mm)		備 考
	下限	上限	下限荷重 のとき	上限荷重 のとき	下限荷重 のとき	上限荷重 のとき	
B ₄	0.8	2.4	+69	-20	0	0.075	3.2 t 10^4 回, $-64 \text{ kg}/\text{cm}^2$
B ₅	0.8	2.4	+69	-20	0.05	0.20	5.5 tおよび4 tで各1回, $-191, -108 \text{ kg}/\text{cm}^2$
B ₆	0.8	2.6	+69	-31	0	~0	衝撃によつて微細なひびわれ発生
B ₇	1.4	2.6	+36	-31	0	0	全くひびわれを発生せず
B ₈	1.2	3.0	+47	-52	0	0.013以下	1.5×10^5 回でひびわれ発生
B ₉	1.3	2.6	+41	-31	0	0.025	4.2 tで10回, $-119 \text{ kg}/\text{cm}^2$
B ₁₀	1.8	2.6	+41	-31	0	0.025	4.2 tで10回, $-119 \text{ kg}/\text{cm}^2$

注 (i) フルプレストレッシングとしての設計荷重 2.09 t

(ii) パーシャルプレストレッシング(許容引張応力度 $40 \text{ kg}/\text{cm}^2$)としての設計荷重 2.82 t

(2) プレストレストコンクリートと鋼材

プレストレストコンクリートが鋼材に対して有する最大の利点は、耐海水性および経済性であろう。耐海水性が優れていることは維持管理費が少なくなることを意味している。例えばPCバースは従来の鋼船に対して70%ほど維持管理費が安くすむと言われている²⁻⁷⁾。維持管理費外の経済性についてB.C.Gerwick²⁻⁸⁾は「水深が深く高い水圧を受ける場合には、鋼製のものに比べてプレストレストコンクリート製構造物の価格は約半分となるが、曲げ部材が多い構造物の場合にはその差は小さくなり20~0%の価格減少にとどまる。」と述べている。

鋼製構造物としては問題となる、接合部における応力集中、特にこの点における疲労現象、また、動的荷重による構造物、部材の振動現象等については、プレストレストコンクリート構造物ではあまり問題にはならない。さらに、コンクリート構造物は鋼構造物に比較すれば手軽な設備で建設が可能である。

逆に欠点としては、比強度が低いため鋼構造に比べ重量が多くなる点およびプレキャスト部材の接合は鋼材の方が容易であることなどがあげられる。

2.4 プレストレストコンクリートに関する新しい考え方

構造物をプレストレストコンクリートで設計する場合、大部分の設計者はI種で設計することを考え、II種、III種で設計しようとするものはほとんどないであろう。この理由としては、一般にI種で設計すれば、より安全であると認識されていること、および歴史的にプレストレスは即フルプレストレッシングという概念が定着しているためであろう。

しかし、数年来このI種のみを用いるという傾向に対して、構造物設計条件の要求に応じI種、II種、III種、さらにはPRC(Prestressed Reinforced Concreteの略)をそれぞれ使いわけべきだという意見がある。さらに、鉄筋コンクリートをプレストレスがゼロのプレストレストコンクリートであるとし(GEB-FIP指針のIV種もこれに相当する)、I種、II種、III種を区別せずに、破壊安全度、ひびわれ安全度を信頼性の面から検討するという発展した考えもある。

猪股²⁻⁹⁾は、「構造物について考慮すべき基本的事項は使用状態での挙動および過大載荷状態での挙動である。」

との認識にたち、部材を構成する材料の性質を、(a)弾性材料（弾性体であるが急激な破壊を示す）、(b)降伏材料（弾性体であるが大きなひずみで破壊する）、(c)タフ系材料（非弾性体であって、応力増加率よりもひずみ増加率が次第に大となる）に分け（図2.3）、さらにプレストレストコンクリートは与えられるプレストレスト量により (a)、(b)、(c) いずれにも近似でき（図2.4）、それゆえ

プレストレストコンクリートでは設計条件によって最適なプレストレスト量を選べばよいとの観点にたっている。特に、Ⅲ種プレストレストコンクリートについて述べ、ひびわれ幅制限方法について種々の角度より論じており、今後の研究としてひびわれ幅の検討方法、制限幅はどう定めるかなどが必要であると結んでいる。

横道²⁻¹⁰は鉄筋コンクリートを主体として考え、設計

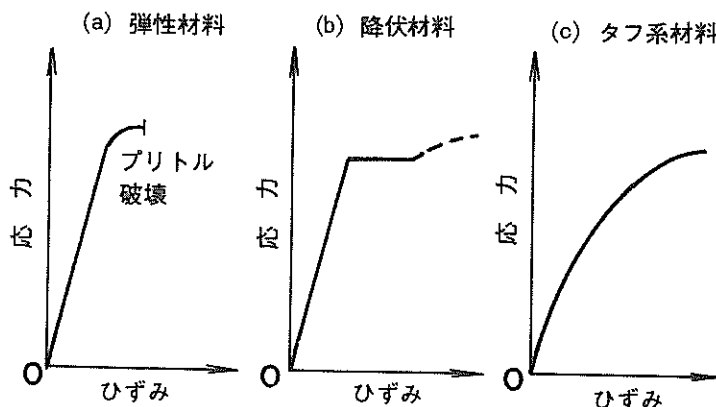


図2.3 構造用材料の特性

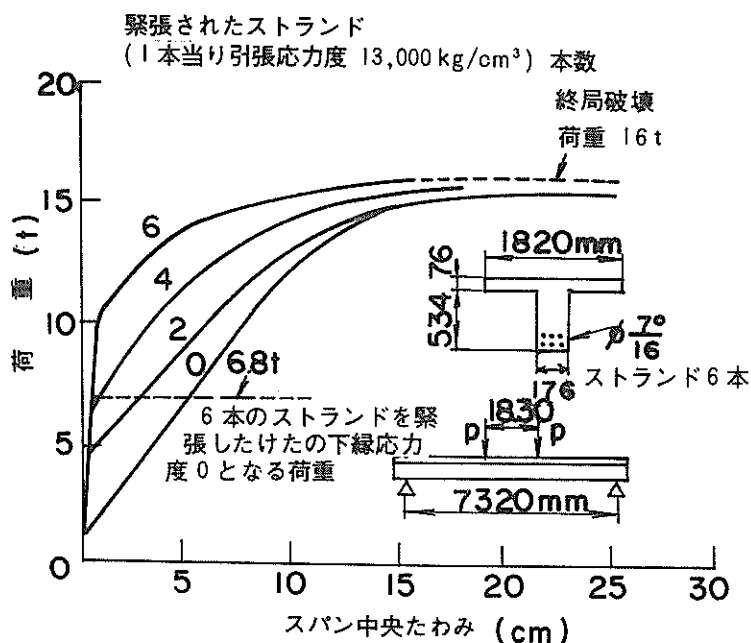


図2.4 プレストレス量を変えた場合の荷重—たわみ曲線の一例

の原則としては鉄筋コンクリートと考え、所要の破壊安全度を得、ひびわれ幅制御に対し必要とされる比較的小量のプレストレスを導入するものをPRCとして提案している。

PRCとⅢ種プレストレストコンクリートとの差は、鉄筋を主と考えるか、PC鋼材を主と考えるかの違いであって、構造としては大差なく、将来設計体系が統一されることが望ましい。

また、Leonhardt²⁻¹¹⁾はプレストレストコンクリートは技術革新の時期は終わり、技術見直しの時期であるとの立場より次のように述べている。Freyssinetの考えでは、プレストレストコンクリート設計に際しては全くコンクリートに引張応力を許さないとしているが、圧縮応力は必ず反り、クリープ等の悪影響を及ぼし、2次応力を発生させるので必要量以上のプレストレスを導入するのは得策ではなく、この対策として付加鉄筋を入れることおよびコンクリートに引張応力を許すこともよいとしている。この場合プレストレス量は、使用限界状態を満足させる必要最小限のものを導入すればよいとし、使用限界状態を定義する量としてはひびわれ巾、クリープ量を用いるべきであると述べている。さらに次のような提案を行っている。すなわち、1)プレストレストコンクリートのⅠ種、Ⅱ種、Ⅲ種といった分類をなくすこと、2)最適な使用限界状態を設定すること、3)設計条件に応じて付加鉄筋を配筋すること、の3つである。

以上互いに重複した点もあるが3つの代表的な考えを示したが、これらに対する著者の意見およびこれからのプレストレストコンクリート技術に対する考え方を述べると以下のものである。

構造物の設計条件に応じたプレストレス量を入れ、Ⅰ種という概念にこだわる必要がないという考えには全く同感であり、理想的には鉄筋コンクリートからプレストレストコンクリートまで同一の設計理論で体系づけられることが望ましいと考える。さらに、Leonhardtのいう限界状態として耐用年数を加味したものを考えるべきで、特に発錆、コンクリート劣化等に関する検討の上になつて、ひびわれ幅、終局強度を考える必要がある。

しかし、こういった考えが合理的であつても、現行の設計体系を無視するわけにはいかないので、まずⅢ種プレストレストコンクリートまたはPRC等の設計手法を認知し、特にPRCにおいてPC鋼材量が多いものに対する手法に重点を置いて認知し、両者の間を埋め、鉄筋コンクリートの設計からプレストレストコンクリートの設計までを一体化することが現実的な道であるとする。

3. プレストレストコンクリート海洋構造物

3.1 プレストレストコンクリートの利点

海洋構造物の種類によって何が利点であるかは異なってくるが、一般には次のような利点をプレストレストコンクリートは有していると考えられる。

(1) 高強度の材料を使用できる利点：前述したように、プレストレストコンクリートにおいては、鉄筋コンクリートで使用が無意味であつた高張力鋼の使用およびそれに伴う高強度コンクリートの使用がその条件とさえなっている。このような高強度材料の使用により、比較的小さな部材断面で大きな強度を有する構造物を建設出来、省資源あるいは資材輸送の面で非常な利点となる。この利点は資材輸送が困難な海洋においては重要である。また、ケーソンのように建設現場まで曳航していくものであつても、ドライドック等で製作する場合には、部材の軽量化が、ケーソンの大型化に伴って必要となる。これに対しても、高強度材料を用いるプレストレストコンクリートは有利である。

(2) 耐海水性に関する利点：鋼に比較してコンクリートは耐海水性に優れており、さらにコンクリート中は弱アルカリ性で内部に埋設された鋼材(鉄筋、PC鋼材)を海水による腐食から保護している。特にプレストレストコンクリートの場合、鉄筋コンクリートに比べてひびわれの発生する危険性は小さく、埋設された鋼材が腐食する危険性も小さい。さらに高強度、高品質のコンクリートを使用するためコンクリート内部を海水等が浸透して悪影響を及ぼす危険性も小さい。このため、プレストレストコンクリートの耐海水性は極めてよいと言える。これは海洋構造物材料としてきわめて有利な性質といえる。

(3) プレキャスト化に伴う利点：海洋での工事は、陸上での工事に比べ、概して困難である。そのため、海上での施工量をできるだけ少くし、短期間に工事が完了することが望まれる。部材のプレキャスト化はこの要望に応えるものである。さらに、プレキャスト製品の場合、品質管理がゆきとどいてるので、水密性等あらゆる点で現場打ちコンクリートにくらべて良質な部材である。実際、建設後20年を経過した鉄筋コンクリートさん橋の劣化状況調査によれば、プレキャスト製品では内部鉄筋の腐食はほとんど認められないのに対し、海上で施工した現場打ちコンクリート部材ではかぶりを比較的大きくとも、鉄筋の腐食は顕著であるという結果が報告されている³⁻¹⁾。プレキャスト製品であつても、鉄筋コンクリートに比較して、高品質のコンクリートおよびPC

鋼材を用いたプレストレストコンクリートの方がより耐久性で優れていることは言をまたない。

3.2 プレストレストコンクリートの実例

前節で述べたように、海洋構造物部材としてプレストレストコンクリートは種々の利点を有しており、多数のプレストレストコンクリート海洋構造物が建設され、あるいは建設中である。ここでは、すでに完成したもの、建設中のもの、さらに計画中のものについてその概要を紹介する。

(1) 外郭および海岸保全施設（主として防波堤）

比較的水深が小さな防波堤の場合、主としてその重量で波圧に抵抗する型式が採用されており、従来型ではプレストレストコンクリートの利点を十分に活用できる場合は少ない。しかし、水深の小さな場合でもPCパイルを用いた防波堤の例もある（図3.1参照）。この防波堤は、リビア Zueitina 港に1969年に建設されたもので、延長207m、幅18.3mの北防波堤および延長210m、幅12.2mの西防波堤よりなる。用いたPCパイルは $\phi 1370$ mm、厚さ127mm、長さ19.5m~25.0m、重量24.2~31.0tのもので9.0tスチームハンマーにより打設した。PCパイルを用いた理由としては、設計から施工完了までを1年以内に行う必要があったこと、北アフリカには多量の石材がないこと、およびコンクリートケーソン形式にはヤードが遠いといったことが挙げられる。

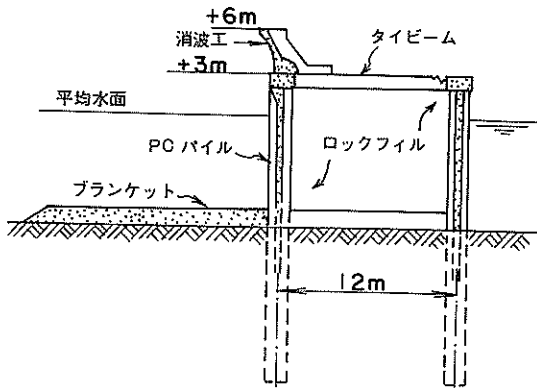


図3.1 PCパイルを用いた防波堤

現在建設されている水深より深い位置に防波堤を建設する要望が高まってくるものと思われる。建設地点の水深が深くなると波浪も強くなることも多いので、大水深防波堤では堤高が高くなるだけでなく、強大な波圧に耐えうる構造でなければならない。このため、波圧を減殺

する構造の開発も必要であり、色々と検討が行われている。

今後、水深および波力等に応じて次のような防波堤形式が利用、開発されていくものと考えられる。a) ケーソン、捨石マウンド等の巨大化によって大水深防波堤を建設すること→b) 海底地盤に根入れをもつ構造物により消波するもの、例えばカーテン式防波堤→c) さらに水深が大きな場合には、浮防波堤による消波。以上のいずれに対してもプレストレストコンクリートの導入は可能であり、また、その特性を発揮するものと思われる。

a) に対しては高品質の材料を用いているため、鉄筋コンクリートを用いたものよりも軽量となり、大型ケーソンを製作する場合には有利である。PCケーソンの一例を図3.2に示す³⁻²⁾が、この場合、波圧減殺のために防波堤前面に孔あき板を設けているが、この種の板にはPC板は優れた利点を発揮するものと思われる。

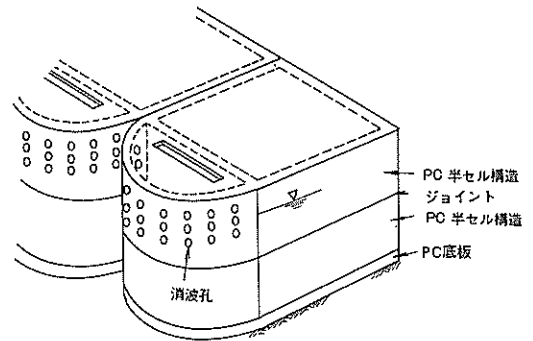


図3.2 PCケーソン

b) に対しては群杭式（図3.3参照）あるいはカーテン式（図3.4~5参照）構造等が考えられる。群杭式のPCパイル、また、カーテン式の反射板としてのPCパネルは、強度上、疲労特性上鉄筋コンクリート部材に比べて優れており、さらに維持管理上からは鋼材に比べて優れていると言えよう。

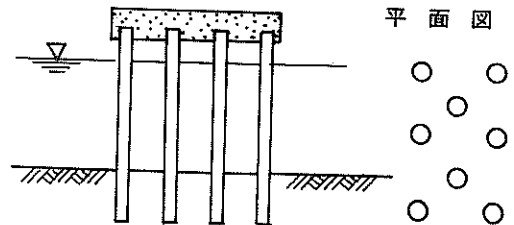


図3.3 群杭式防波堤

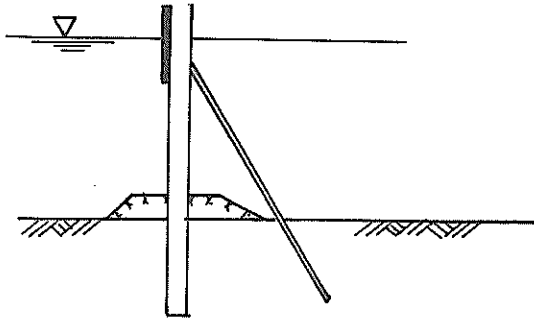


図3.4 杭式カーテン防波堤

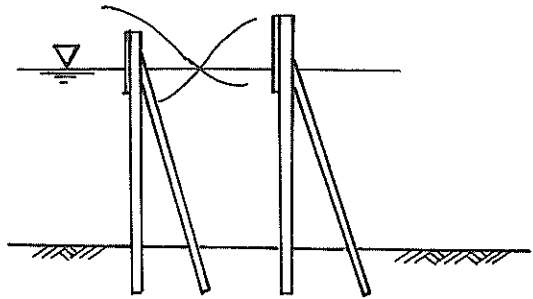


図3.5 二連カーテン式防波堤

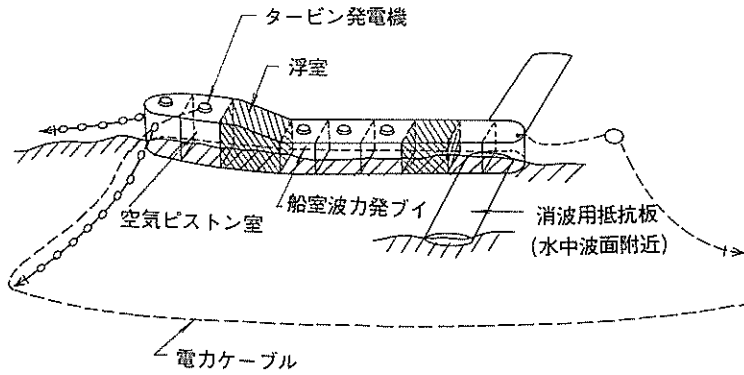


図3.6 発電装置を有した浮防波堤

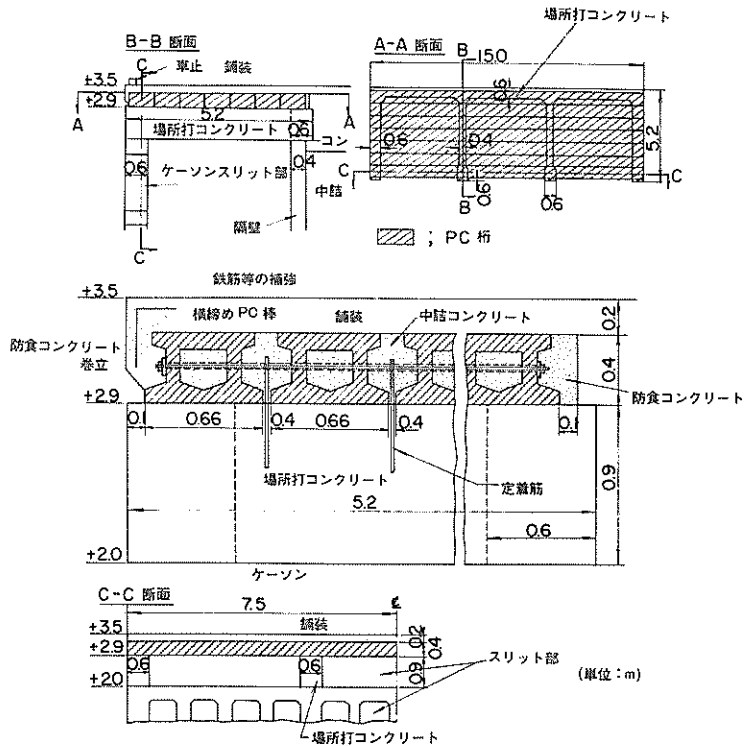


図3.7 小名浜港護岸上部工

c) に対しては後述する PC パージの概念でプレストレストコンクリート製の浮体構造製作は可能であり、また、振動時の安定問題よりみると鋼製のものに比べて有利である。浮体長の 2 割の幅の抵抗板を水面付近に固定すると消波効果が高いという原理によるヘスラー式消波装置を有し、長い浮体によって波力発電もできるという浮防波堤を益田³⁻³⁾は考案した(図 3.6 参照)。この浮防波堤は長さ 120m, 幅 20m, 高さ 5~6m のもので 1 年間に約 700 万 kWh 時の発電ができるそうである。この構造でかん体および抵抗板にはプレストレストコンクリートを利用することは可能であり、その特性を活用できる。この浮防波堤はえい航でき、海洋工事現場の静穏度を確保するため現場に設置することもできよう。

護岸に用いられたものとして図 3.7 に小名浜港先端護岸として検討された例を挙げる。これはプレキャストプレストレストコンクリートけた(重量 6 t 程度)を用い、さらにこのけたをプレストレスで横締めするものである。

(2) けい船施設

けい船施設にプレストレストコンクリートを用いる場合、3つの方法が考えられる。第1に、死荷重の軽減という特長を最大限に生かせる床板として用いるもの(図 3.8 参照)、第2に、杭、脚柱式けい船岸の杭として用いるもの、第3に、浮遊式けい船施設とするもので、これには PC パージを用いるものも含まれる。

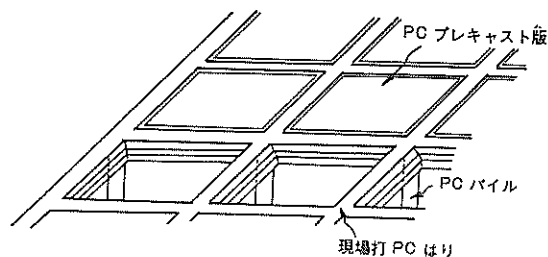


図 3.8 PCを床板として用いる例

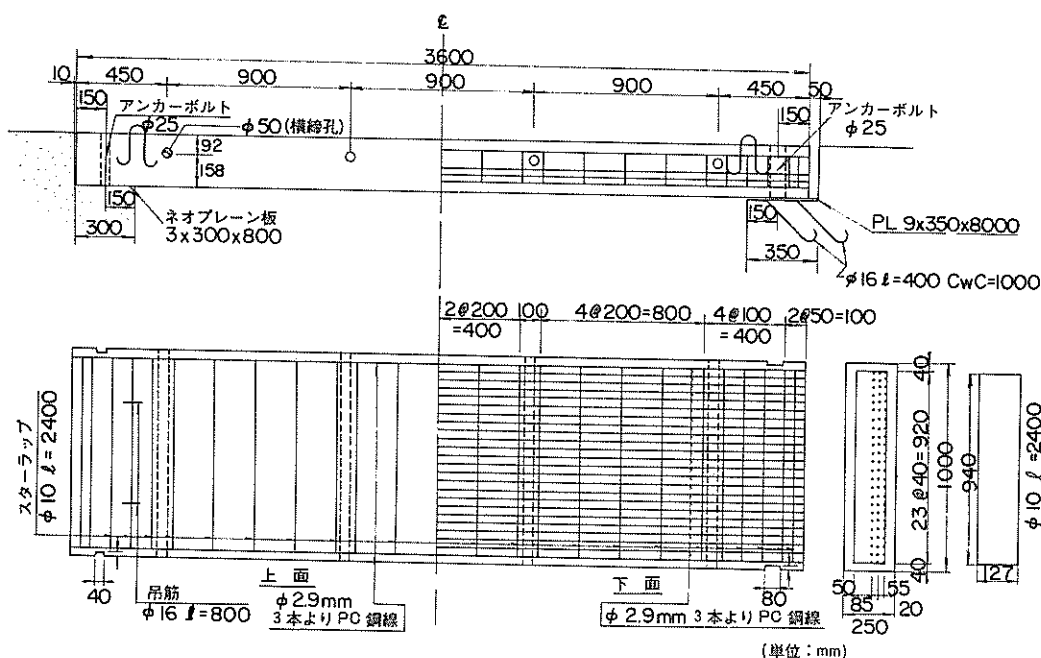


図 3.9 下関港岸壁渡板

第1の用途で渡板としてプレストレストコンクリートを用いたものがあり、その一例として下関港で使用されたプレキャスト板を図 3.9 に示す。また、イラン経済 5 年計画における石油化学コンビナート用さん橋としてプレストレストコンクリートを上部工として用いたものがある。これは、日本の企業が施工したもので概要を図

3.10 に示す。PCプレテンションけたを架設現場近くのヤードで製作し、現場においてポストテンションによって一体化し床板として用いたものである。なお、目地材としてはコンクリートを用いている。この工事においてプレストレストコンクリート工法が採用された最大の理由は工期短縮にあった。

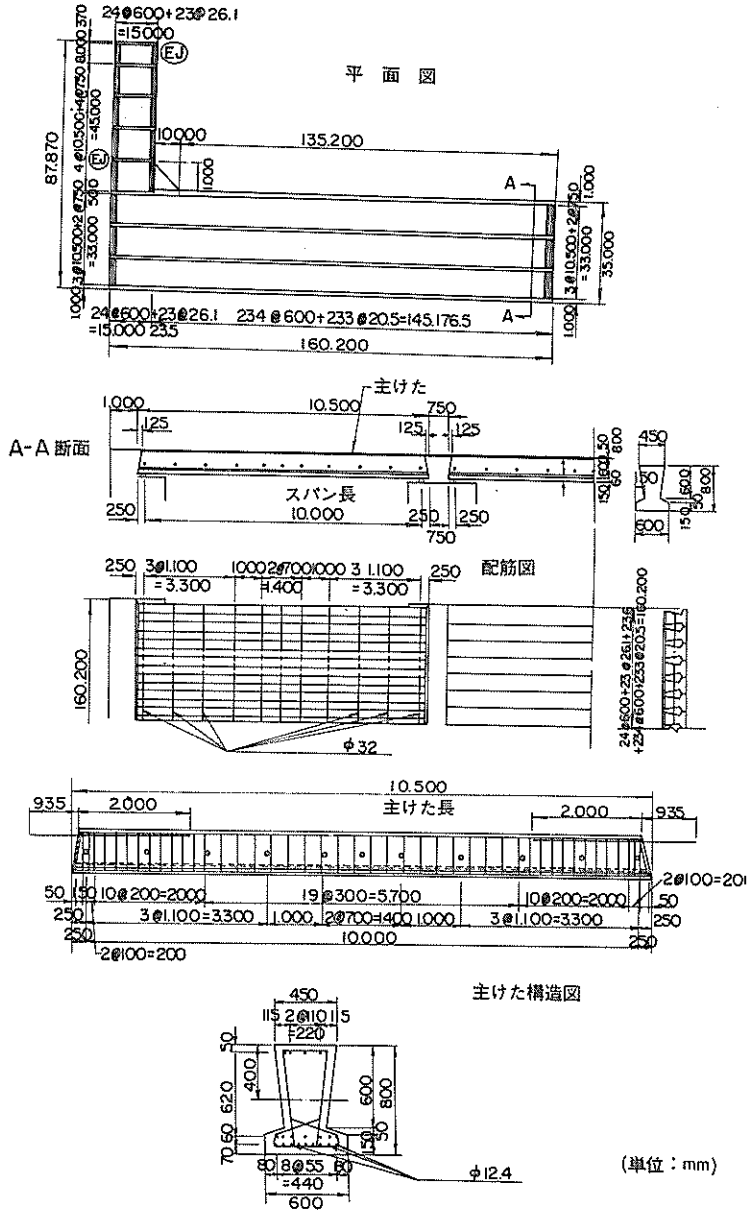


図3.10 PCさん橋概略図

第2の杭、脚柱として用いられた例としてはアメリカにおいて幅35m、長さ360mの埠頭の脚柱としてPCパイプが用いられたものがある³⁻⁴⁾。このPCパイプは長さ45m、断面が直径40cmの円に外接する八角形断面のものである。

第3の浮遊式として建設されたものはないが、構想段階のものとしては、FinsterwalderのU字形（長さ

600m、幅240m）浮さん橋がある。このU字形浮さん橋の直線部はタンカーけい留施設、根元の曲線部は消波部であり、パイプラインを通じて貯油タンクに連結している³⁻⁵⁾（図3.11参照）。さらに、後述するPCバージを応用し、PCバージとドルフィンを組合せたもの、およびPCバージを着底してけい留施設として用いるもの（図3.12）等も考えられる³⁻⁶⁾。

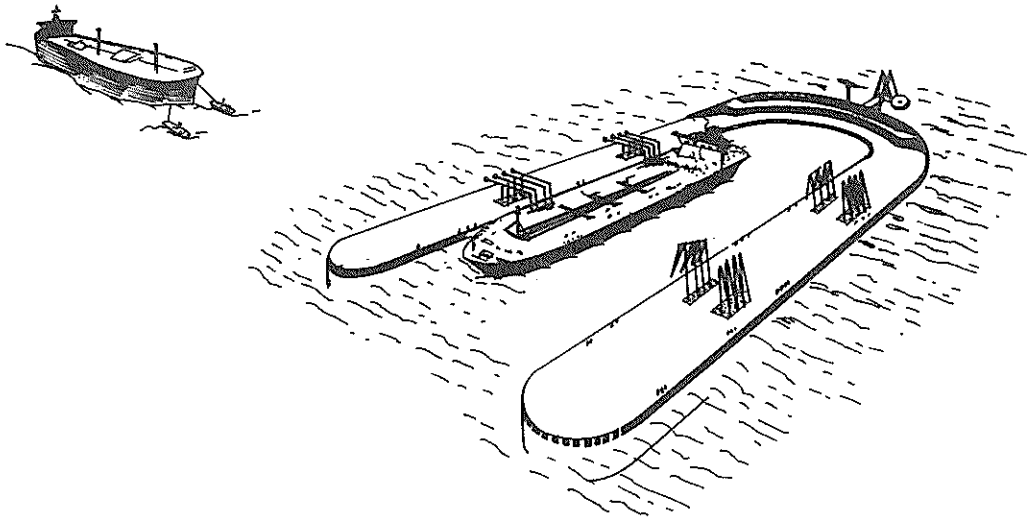


図3.11 U字型浮さん橋

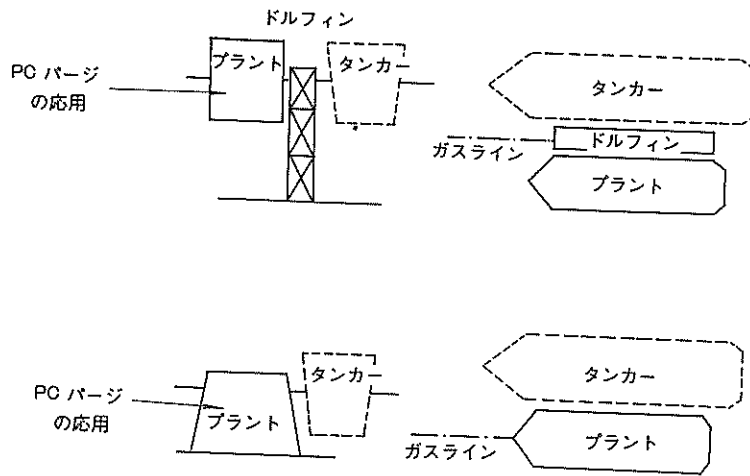


図3.12 PCバージを応用した繋船施設

(3) 交通施設

洋上長大橋にプレストレストコンクリートを用いた例としてはFood海峡浮橋がある。これについては以前にも紹介した³⁻⁷⁾が、Food海峡はワシントン州(アメリカ)にあり、最大水深が100mで普通型式の橋梁の建設は困難とされ浮遊式が採用された。この浮橋の海中基礎としては、長さ111m、幅10m、高さ4.4mの大型PCポンツーン23個をポストテンションにより一体化したものを

用いており、その上部に橋脚および橋梁を設置している(図3.13参照)。

さらに、シベリアとアラスカを結ぶ洋上橋がT.Y.Linによって提案されA. Akiによってその詳細が検討されている³⁻⁸⁾。この案によれば、この橋は1体366mのプレキャストプレストレストコンクリート250体より構成される(図3.14参照)。これらのプレキャスト部材はいか

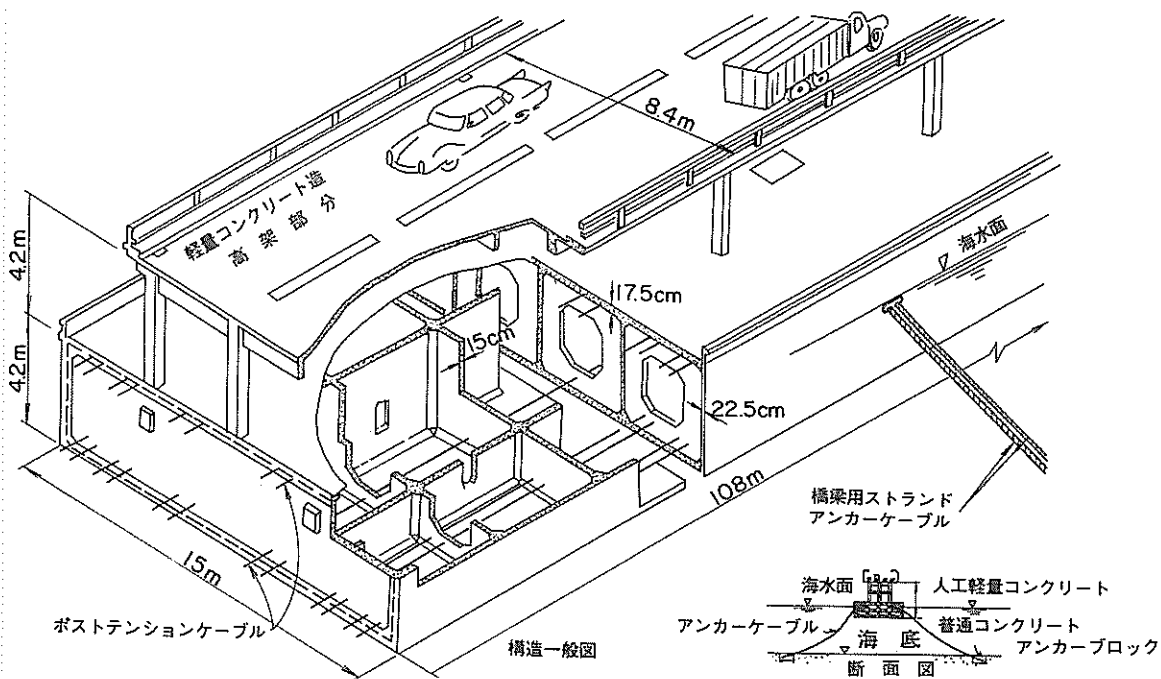


図 3.13 Food 海峡浮橋

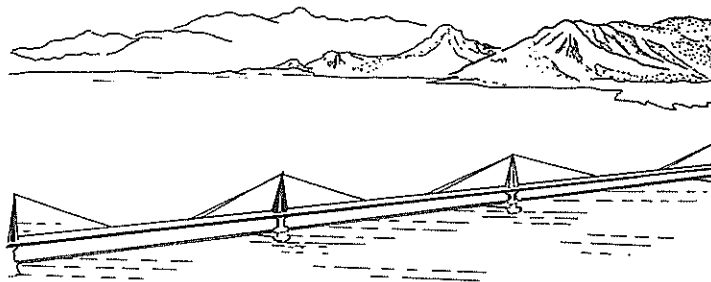


図 3.14 ベーリング海峡横断PC橋

だバージで曳航され、架設現場で基礎のピア上に設置される。また、ピアとしてもプレキャスト部材を用いる。このピアは図 3.15 に示すように、海面付近においては曲面構造で浮氷による外力を軽減する工夫がなされている。

トンネルとしては、沈埋トンネルおよび浮遊式トンネルが考えられる。沈埋トンネルとしては都市ガス用とし

て北九州において施工中のものがある（洞海湾横断沈埋トンネル工事、図 3.16 参照）。まず、製作ヤードにおいて、長さ 4.0m、内径 2.6m、外径 3.2m のコンクリート製同筒かんを製作し、それらを相互にエポキシ樹脂で接合連結し、さらに接合部ジャケットを先端に接合し PC 鋼線で緊張し、長さ 45m の合成プレストレストコンクリート沈埋かんをつくる（図 3.17 参照）。その後、プレ

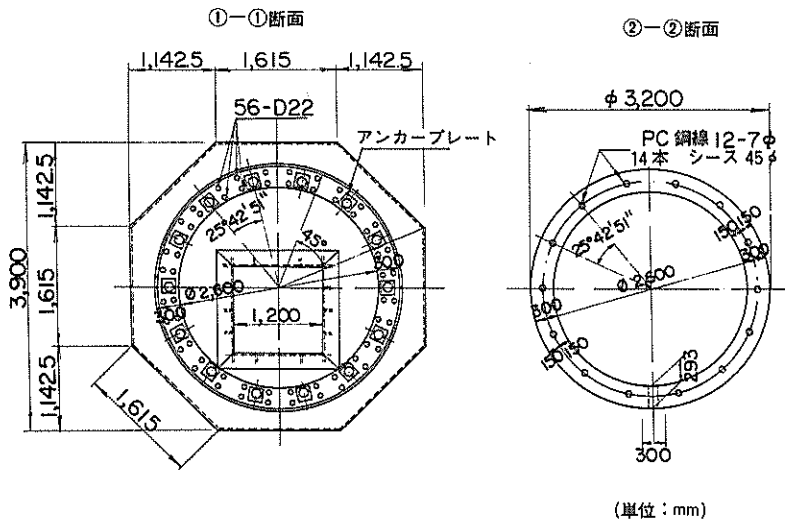
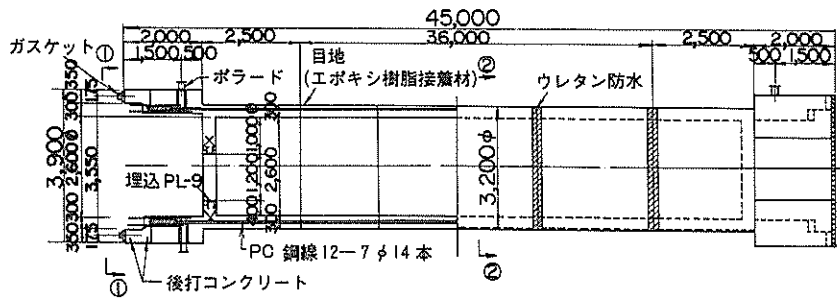


図3.17 沈埋かん構造図

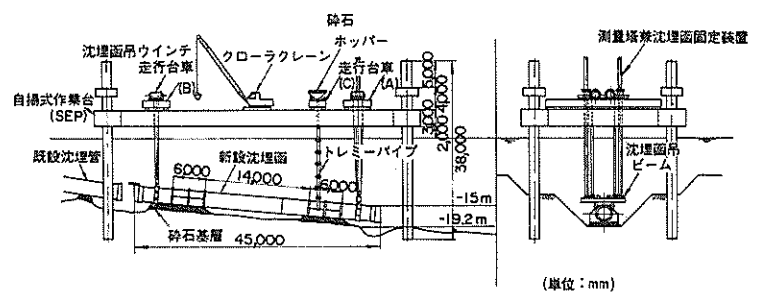


図3.18 沈埋かん施工図

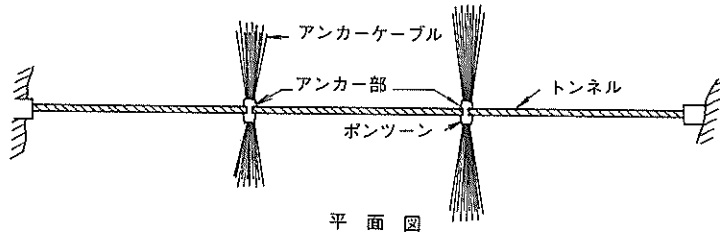
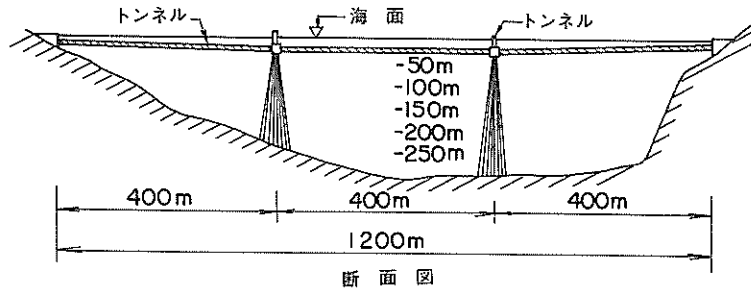


図3.19 ノルウェーにおける浮遊式潜水型トンネル

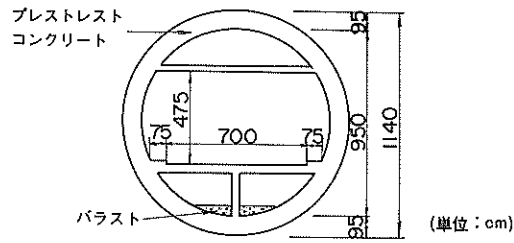


図3.20 浮遊式潜水型トンネル断面図(ノルウェー)

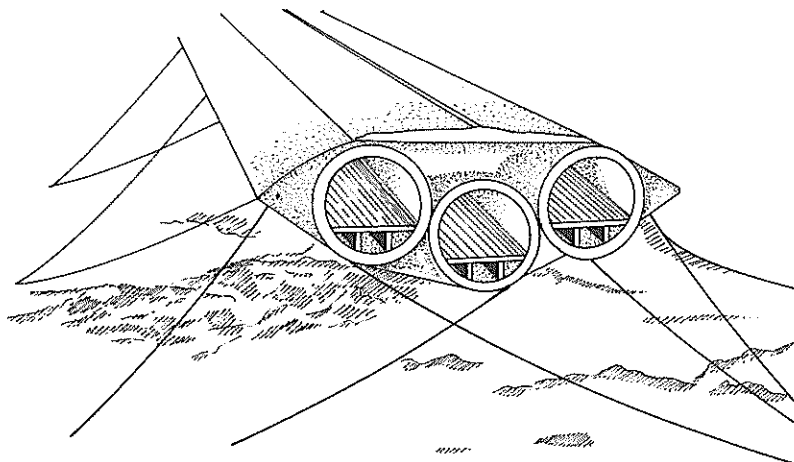


図3.21 イタリア(メッシナ)における浮遊式潜水型トンネル

(4) 海中貯油施設等

石油資源の開発が大陸棚へ進むにつれ、海中貯油施設への関心が高まってきた。開発の現場が陸上貯油施設から遠く離れている場合、荒天でタンカー等による石油運輸が困難な時も石油を連続的に採取しようとすれば、海中貯油施設が必要となる。このような海中貯油施設としてプレストレストコンクリートを用いれば、次のような利点が考えられる。

①コンクリート構造物自体はドライドック等で製作され、その後現場に曳航沈設されるので、施工期間の大半を現地の海象条件の影響をほとんど受けなくて済む³⁻¹²⁾。

②鋼製構造物の場合と異なり、耐久性はよいので厳しい海洋環境においても維持費はほとんど必要ない。

③鉄筋コンクリート構造物はひびわれの発生をほぼ避け得ないが、PC構造物はひびわれが発生することを防止、またはひびわれ幅を制御できるので、ひびわれに起因する油漏れの危険性ははるかに低い。

現在、海中貯油施設の大部分は北海油田に集中しており、その構造形式は大きく2つに分けることが出来る。その1つは穴あき壁を用いて波のエネルギーを減殺する形式で、C. G. Dorisにより設計されたEkofisk貯油タンクが最初のものである。第2の形式は貯油タンクを形成する広い基礎の上に3~4本の細い塔を載せ、これでデッキを支持するものでCondeepあるいはAndocといったものがある。

第1の形式に属するものとして次の4つを紹介する。

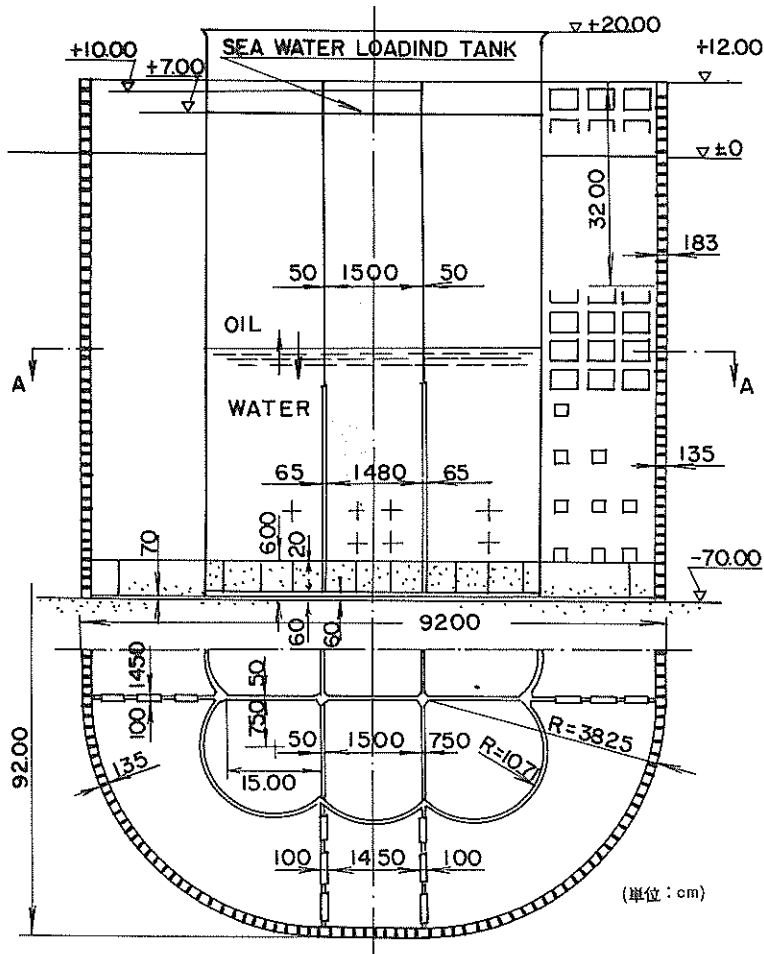


図3.22 Ekofisk 貯油タンク断面図

a) Ekofisk 1 : 1973年に設置された世界初のプレストレストコンクリート製原油貯蔵施設である。1969年末、スタバンゲル港(ノルウェー)より270 km 沖合の大陸棚に油田が発見され、油田の規模は大きく、1日4.8万 m^3 生産することがわかり、それに伴い、タンカーが悪天候で航行できない場合に生産量の3日分強(16万 m^3)を貯油できる、重量215,000tのコンクリートケーソン(吃水深64m)を現場水深70mの海底地盤上に設置することが計画された。競争設計により鋼構造体とコンクリート構造体とが比較された。その結果、北海の海象条件、海上での現場施工状況を考慮して、全構造物をしゃへいされた内湾ですべて完成させ、これを海洋の現場に曳航し防波堤のケーソンと同様に海底地盤へ沈下据付けし、自重で安定させるという設計が有利とされ、C. G. Dorisの提案したプレストレストコンクリート構造体に決定した³⁻¹³⁾。この海中貯油タンクは外直径92m、全高90mで図3.22に示すものである。また、波圧軽減

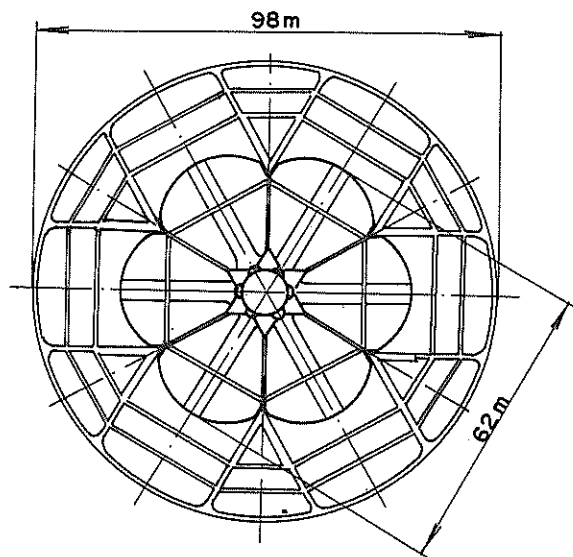


図3.23 Frigg-total CDP 1 水平断面

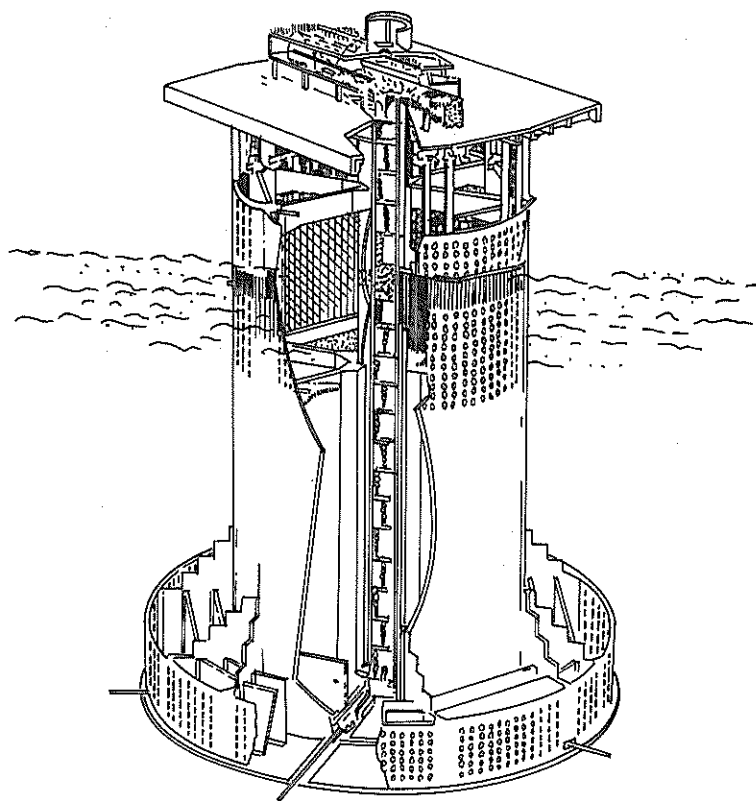
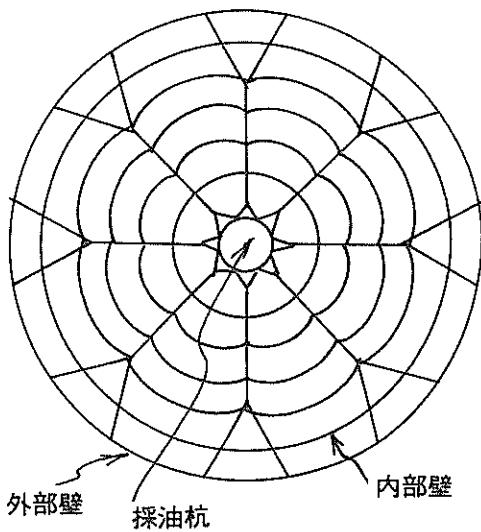
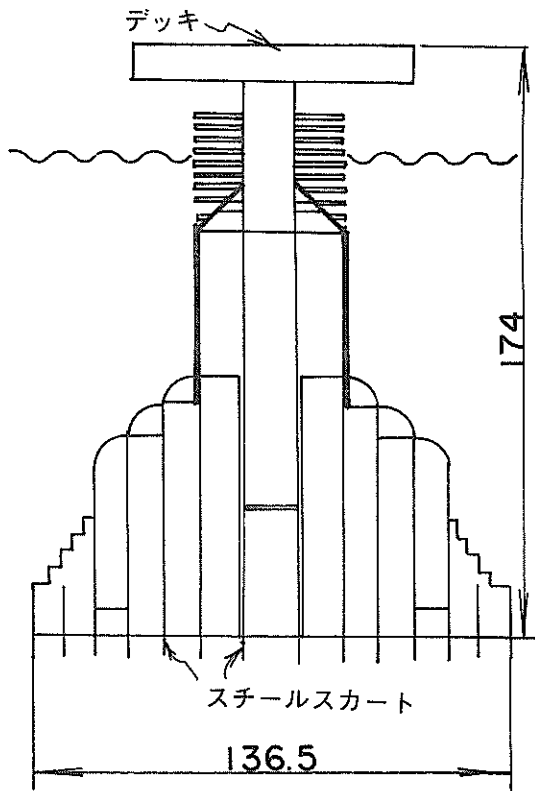


図3.24 Frigg-total MP 2 概念図



(単位：m)

図 3.25 Ninian-Chevron 概要図

装置として穴あき壁を用いているが、その利点としては、反射波が少なく作用する波圧は既往の防波堤に作用する波圧より減少することを狙っている。

b) Frigg-total GDP 1³⁻¹²) : 原油採取および貯蔵用施設で、1975年完成したものである。構造物は直径98mの基礎に載っており、底スラブは厚さ0.70~0.80mで、高さ15mの区間では半径方向と円周方向との壁によって補強されており(図3.23参照)、また、外側の2つの壁は穴あき壁である。構造物の本体は直径62mのシリンダーで、下方68mは厚さ0.55mの壁面を6個の半径方向ダイヤフラムで補強したものであり、上方は厚さ1.2mの壁面で頂面において高さ4mの半径方向の梁で補強されている。中央の内径9mのシャフトにはガスパイプが挿入されている。さらに、採油用の24本のパイプが本体壁の内部バラストを貫通して配置されている。

c) Frigg-total MP 2³⁻¹²) : Frigg 採掘現場と海岸(スコットランド)の工場との間で、パイプラインのガス再圧縮用プラットホームとして用いるもので、1976年に完成した。構造形式はFrigg GDP1と同様であるが、デッキは1つである(図3.24参照)。

d) Ninian-Chevron : 原油採取および貯蔵施設で1977年完成予定である。この施設が完成すれば、水深139m、高さ168mとなり、現時点では世界最大の規模である。構造形式はEkofiskおよびFriggと類似で中央に内径14m、高さ160mのシャフトが設置され、このシャフトを外径45.0m、高さ152mの円筒壁が取巻き、上方72mは穴あき壁である。また、海底基礎の外壁は高さ15mの穴あき壁で、基礎の径は140mである(図3.25参照)。

次に第2の形式に属するものを3つ紹介する。

a) Condeep-Mobil A : 原油採取および貯蔵施設で1975年に完成した。タンク容量は149,000m³である。プラットホームはタワー形式で、海面における波浪の影響を避けている。底部で直径20mのシリンダ19個を一体化し、外寸法100mの六角形としている。そのうち16個のシリンダは高さ51mで貯油用であり、残り3個はテーパーをつけて延長され鋼製デッキを支持する。この構造物の全高は138.8mである(図3.26参照)。

b) Condeep-Shell B : 形状はCondeep-Mobilとほぼ同様であるが、各シリンダの高さは63m、コンクリート構造物の全高は162.25mで1975年に完成しタンク容量は160,000m³である。

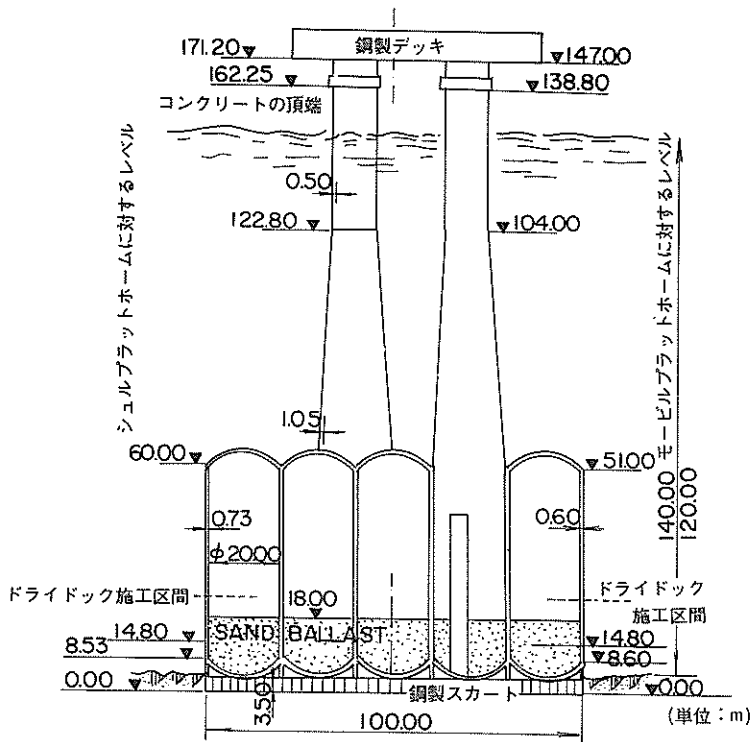


図 3.26 Condeep Mobil A および Shell B 概要図

c) Andoc-Shell：原油採取および貯蔵施設で1976年に完成した。設計の基本はCondeepと同じである。タンクは高さ32mの81個のシリンダからなり、容量は220,000 m³である。基部の外寸法は104m×104mで、鋼製スカートが周辺および中央9個のシリンダに取り付けられている。また、基部より109mのタワー4本が設けられ、その上部に鋼製柱およびデッキが載せられる。このタワーはプレストレストコンクリート製で、基部で径22.65m、上端で径6.0mである(図3.27参照)。

以上2つの形式以外にも、例えば図3.28に示すPetrobrasタンクがある。これはブラジルで1977年完

成予定の採油および貯蔵施設である。

さらに、貯油施設ではないが、10万重量トンの石炭運搬船用のターミナルとしてプレストレストコンクリートケーソンが用いられている。これはグリーンランド沖(オーストラリア)に1975年完成したものである(図3.29参照)。この形式を採用した理由としては、維持管理上の利点と現場施工が少なくなることが挙げられる。また、プレストレスはプレキャスト部材と現場打ち部材との接合部に使用されている。このターミナルに用いられた最大のケーソンの外寸法は46m×38m×8mである³⁻¹⁴⁾。

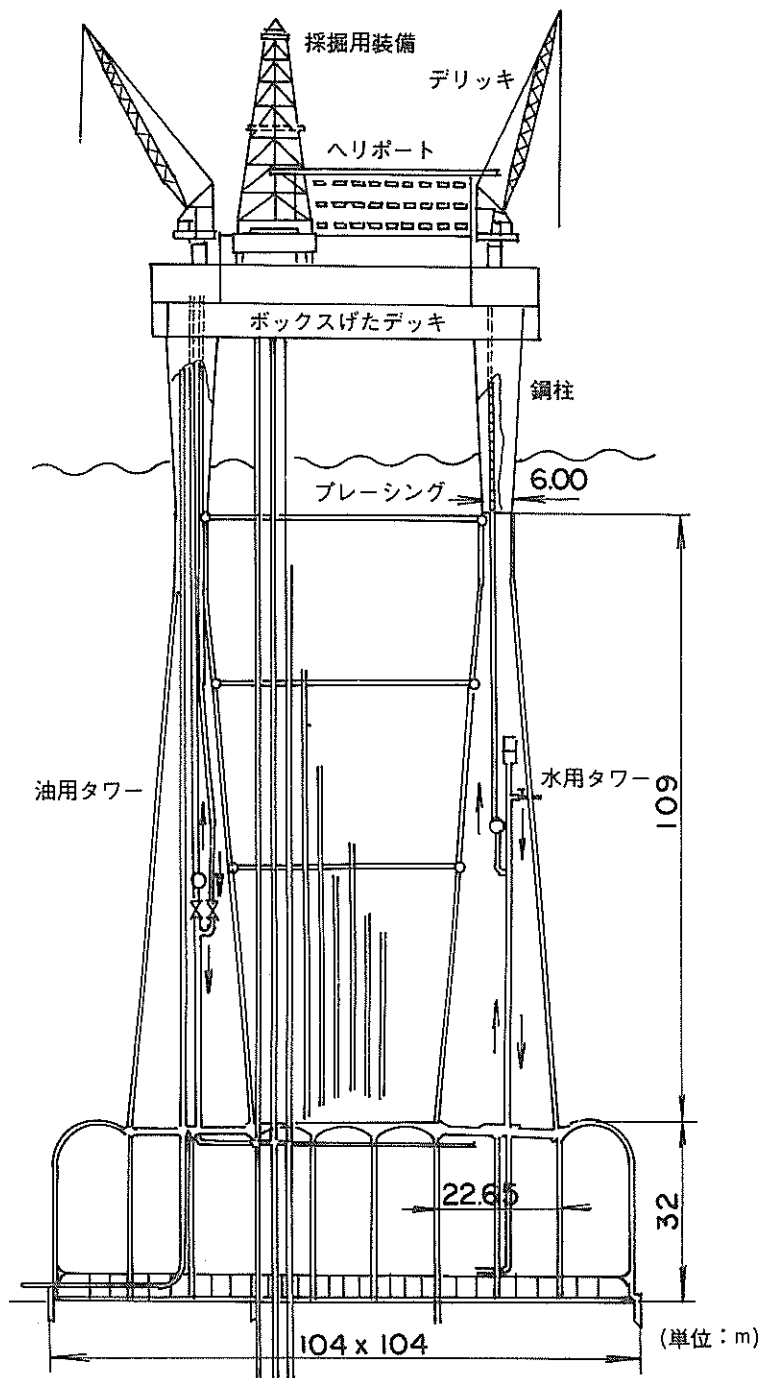


図 3.27 Andoc - Shell 断面図

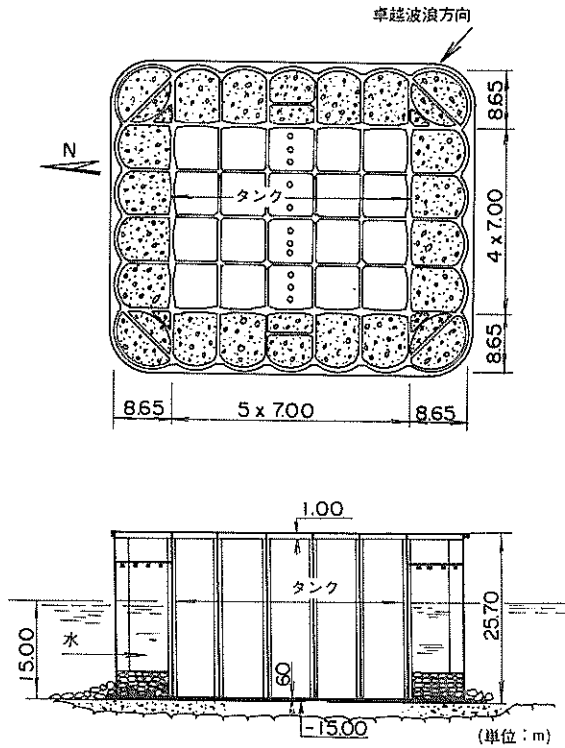


図 3.28 Petrobras タンク 概要図

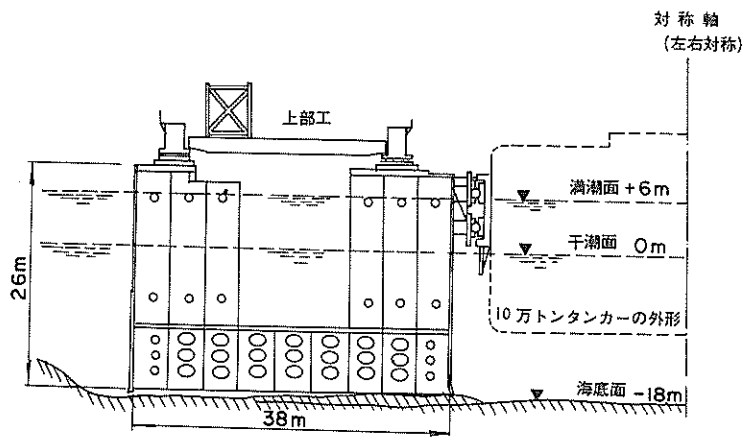


図 3.29 石油運搬船用ターミナル (オーストラリア)

(5) 海上空港

近年、海上空港への関心は高まっており、さん橋方式あるいは浮遊方式による海上空港が計画され一部建設されている。

さん橋方式の海上空港としては、La Guadia 空港（アメリカ）において滑走路の一部を海上に建設したものがあ（図 3.30 参照）。下部工の杭としてコンクリートを充填した鋼管パイル 3,000 本を使用し、上部工として 3,000 本のプレキャスト PC 梁および 13,000 枚のプレキャスト PC 板を使用した。上部工の概要を 図 3.31 に示す。この設計を採用した理由は、イ) プレキャスト PC 製品を用いることによって型枠作業を少なくすること、ロ) 大規模工事をプレキャスト製品を使用することにより、単純作業の繰り返しとし工事の簡略化をはかる、ハ) 品質管理の向上をはかる、等であった³⁻¹⁵⁾。

プレストレストコンクリートを用いた浮遊式の海上空港の計画としては、トロント海上空港および Seadrome の構想³⁻¹⁶⁾がある。Seadrome 計画は次の 2 種の構造物でなりたっている。すなわち、(イ)滑走路、ターミナル等空港施設とそれを支える浮体、(ロ)波浪からこの浮体を保護するための浮防波堤である。これらの浮体は内部に発泡プラスチックをつめ、それ自体浮いているプレ

ストレストコンクリート箱を連結して製作することを考えている。また、この空港は 4,200 m の滑走路 2 本を有し、国際空港としての規準を満たすものである（図 3.32 参照）。

(6) その他の施設

その他の施設として、フローチングドック、海上都市等が考えられるが、ここではフローチングドックについて例をあげる。さらに、海洋構造物の範ちゆうに属さない面もあるが、PC パージについても例をあげる。

図 3.33 にフローチングドックの概要を示すが、これはイタリアにおいて建設予定のフローチングドックで 10 万 t の容量を有するものである。このフローチングドックは骨組として鋼材を使用し、スラブとして軽量コンクリートを用いたプレストレストコンクリートを使用する。また、このフローチングドックは既往のタイプのものに比べて建設費で 20%、維持費で 70% 経済的になるとされている³⁻¹⁷⁾。さらに、スペイン北部において、プレストレストコンクリートフローチングドックが完成しているが、詳細は不明である。

PC パージについては、A. A. Yee によって製作されたもの、ARCO の LPG 船、さらに A. A. Yee が提案しているものについて述べる。

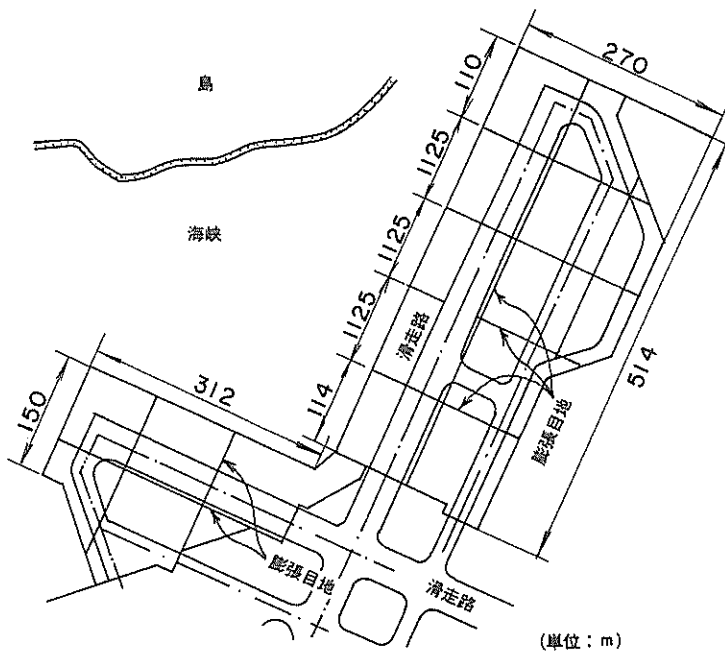
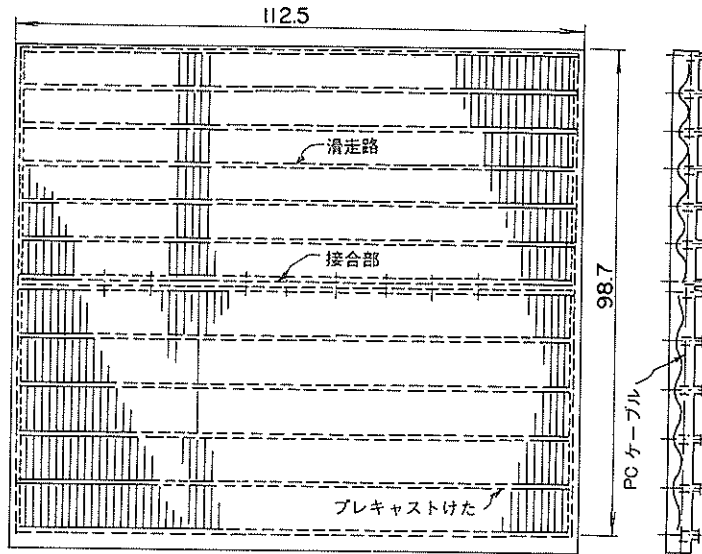
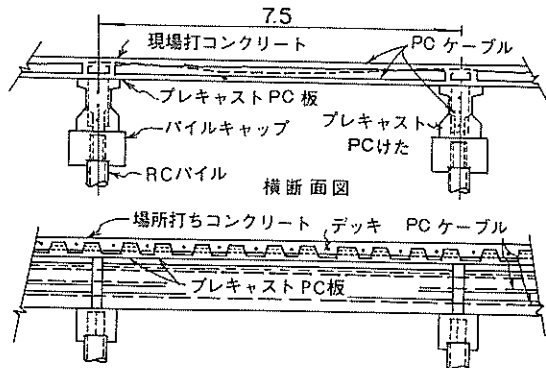


図 3.30 La Guadia 海上空港滑走路概要図



平面図



縦断面図 (単位:m)

図3.31 La Guadia 海上空港滑走路上部工概要図

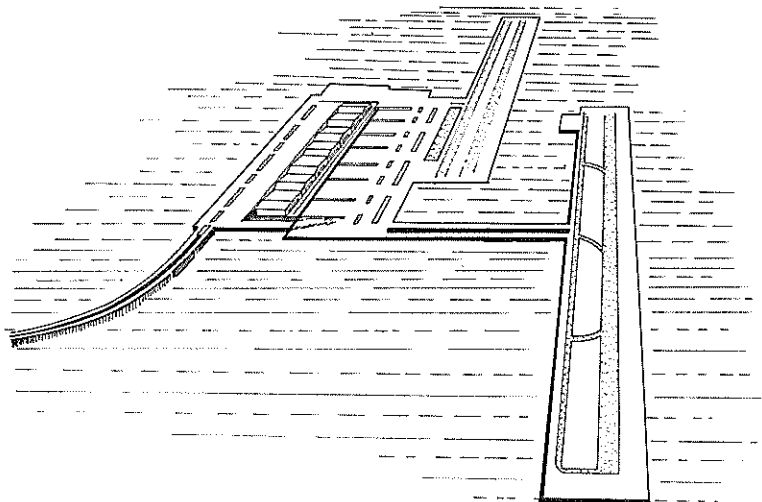


図3.32 Seadrome 概要図

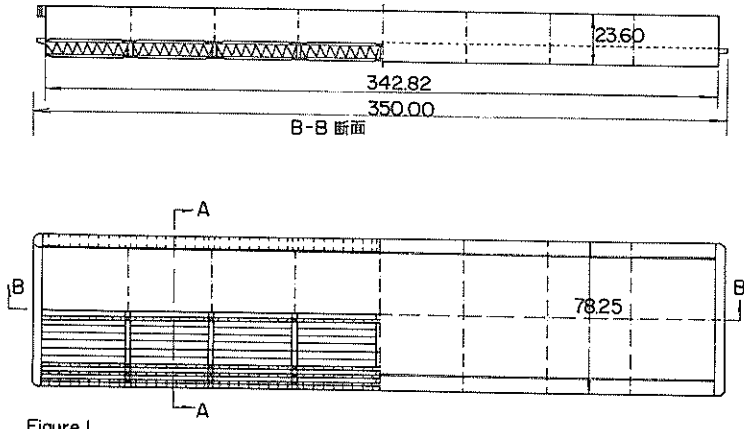


Figure 1

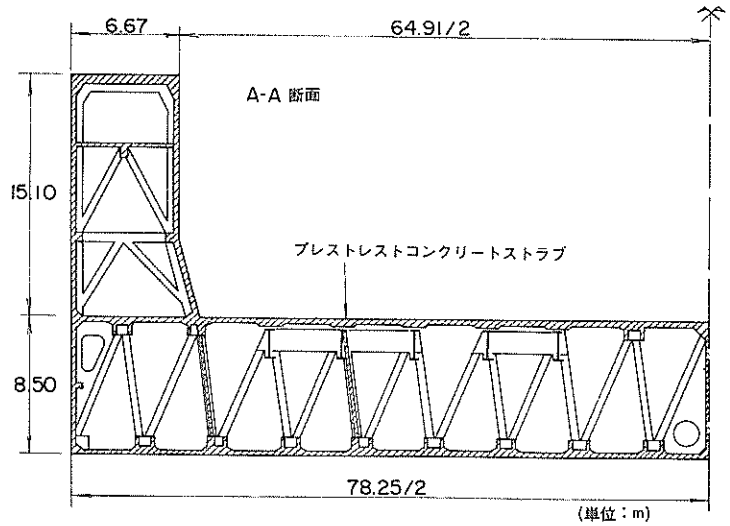


図 3.33 イタリアにおける浮フローチングドック概要図

PCバージが比較的数多く建造され現在まで使用されているものは、フィリピンにおいてA. A. Yee の設計、建造したバージであろう。その一例として2,000DWTのカーゴバージの概要を図3.34に示す³⁻¹⁸⁾。このバージはすでに10年以上の使用実績をもち、鋼製バージに比べて維持費が少ないことが認められた。

次に、LPGターミナルとしてPCバージが用いられた例を示す。これは1976年アメリカ、ワシントン州タコマで建造されジャワ海へ曳航された後、操業をはじめたものである(図3.35参照)。ターミナルとしてPCバージが用いられた理由としてAnderson³⁻¹⁹⁾は、経済性と建設期間の2つを挙げている。経済性からは、(イ)液化ガ

スは比重が小さく鋼製バージではバラストが必要となるが、重量の大きなコンクリート船では特別なバラストは必要ない、(ロ)コンクリートは低温で強度が増加するので、2次バリアとして船体に使用することができる³⁻²⁰⁾、などの理由が考えられる。また、建設期間に関しては当時世界的な造船ブームで鋼製を注文しても4年先でないと建造されないが、コンクリート船であればすぐ着手されるという事情があった。

今後もPCバージは広く用いられると思われるが、その一例として、A. A. Yeeによって提案された蜂の巣状構造を図3.36に示すが、比較的小断面で耐力があるため、その応用範囲は広いものと思われる。

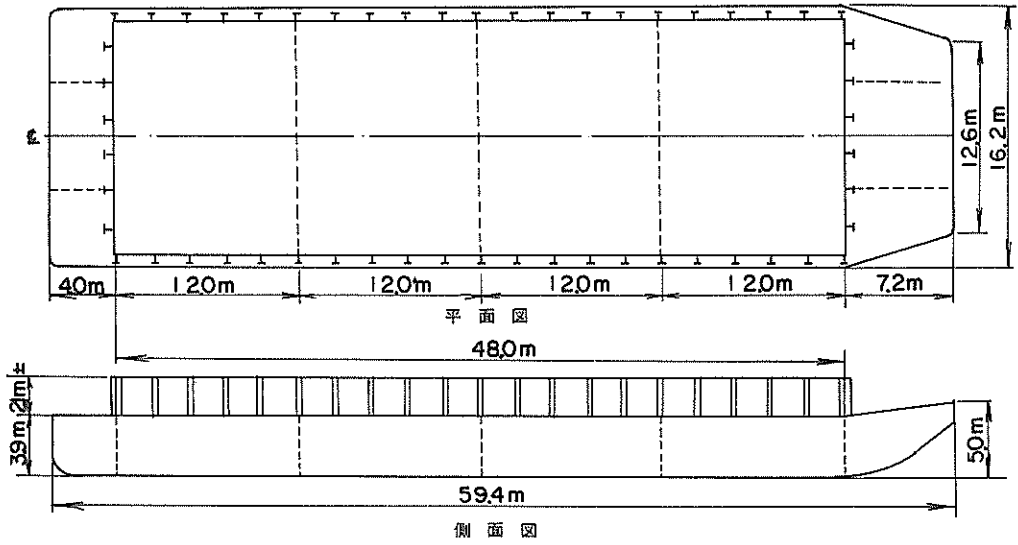


図3.34 A. A. YeeによるPCバージ概要図

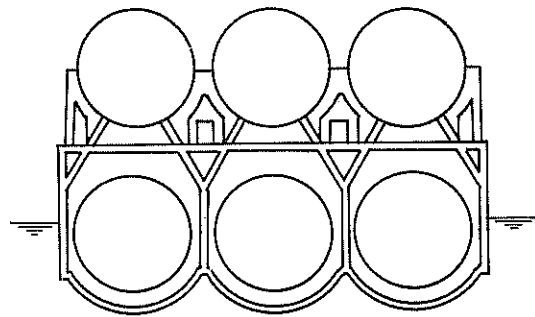


図3.35 LPGターミナル断面図

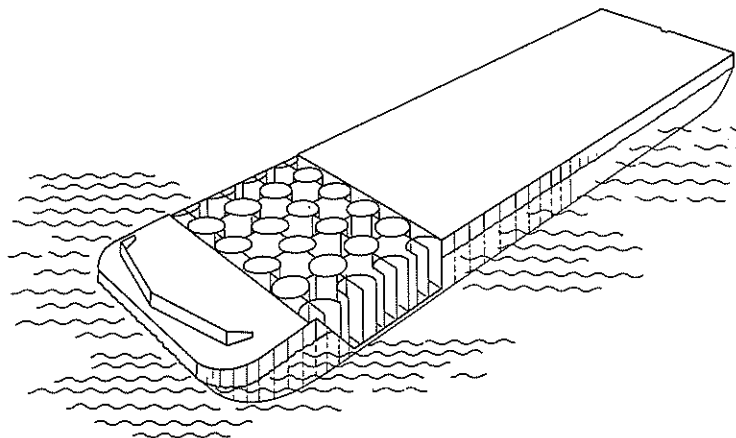


図3.36 蜂の巣状構造を有したPCバージ

3.3 プレストレストコンクリートによる建設工法

いままで述べたように、プレストレストコンクリートを用いた海洋構造物の種類は多く、その建設工法を一概に述べることは困難である。本節では、海中貯油施設のように設置地点とは異なった場所で大部分の施工を行うもの、プレキャスト部材を現場で組立てるものおよびPCバジの建設工法について述べる。

(1) 設置地点とは異なった場所で大部分の施工を行うものこの代表的なものとして北海の海中貯油施設について述べる。北海の場合、ノルウェーにフィヨルドという海上組立てに好都合な湾があったため図3.37に示す建設手順を採用した。具体的な手順をEkofisk海中貯油タンクを例として概説する³⁻²¹⁾(図3.38参照)。

(1) ドライドックの建設：湾の浅い箇所に仮設ドライドックを建設し、厚さ6mで169室から成るセル型のいかだ基礎および構造物の一部をここで建造する。

(a) いかだ基礎の曳き出し：ドライドックに海水を導入し、いかだ基礎および高さ10mの消波壁から成る45,000tのケーソンを浮上させた後、鋼ぐいを引抜き締め切り堤を撤去し曳き出した。その後、高水深のフィヨルドにアンカーで定着し、排水量215,000tのケーソンを完成させた。

(b) 完成したケーソンをEkofisk油田に曳航し据え付けた。

なお、この貯油タンクの消波壁として穴あき壁を建設したが、これは図3.39に示すような手順で製作された。

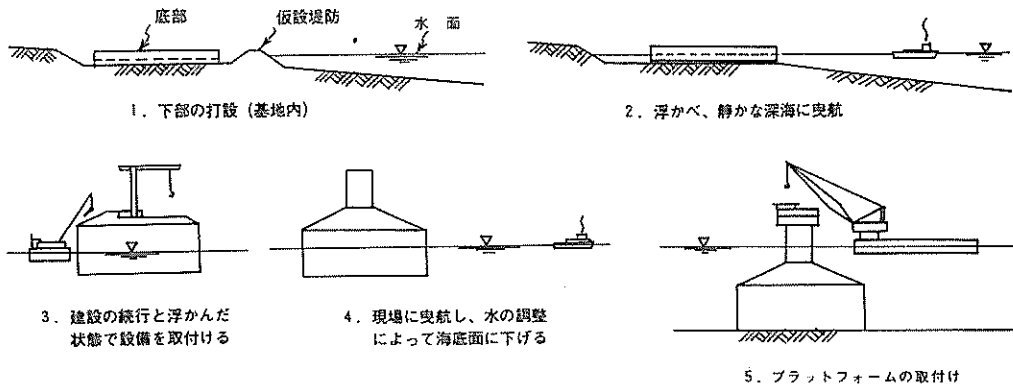


図3.37 海中貯油タンク建設手順

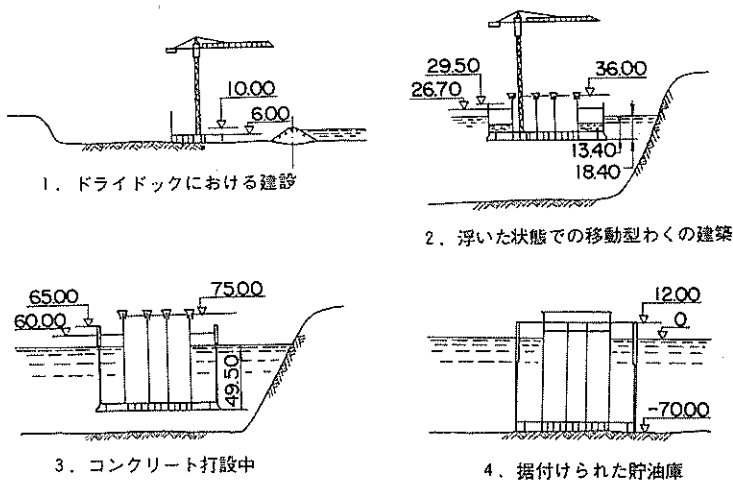


図3.38 Ekofisk貯油タンク建設手順

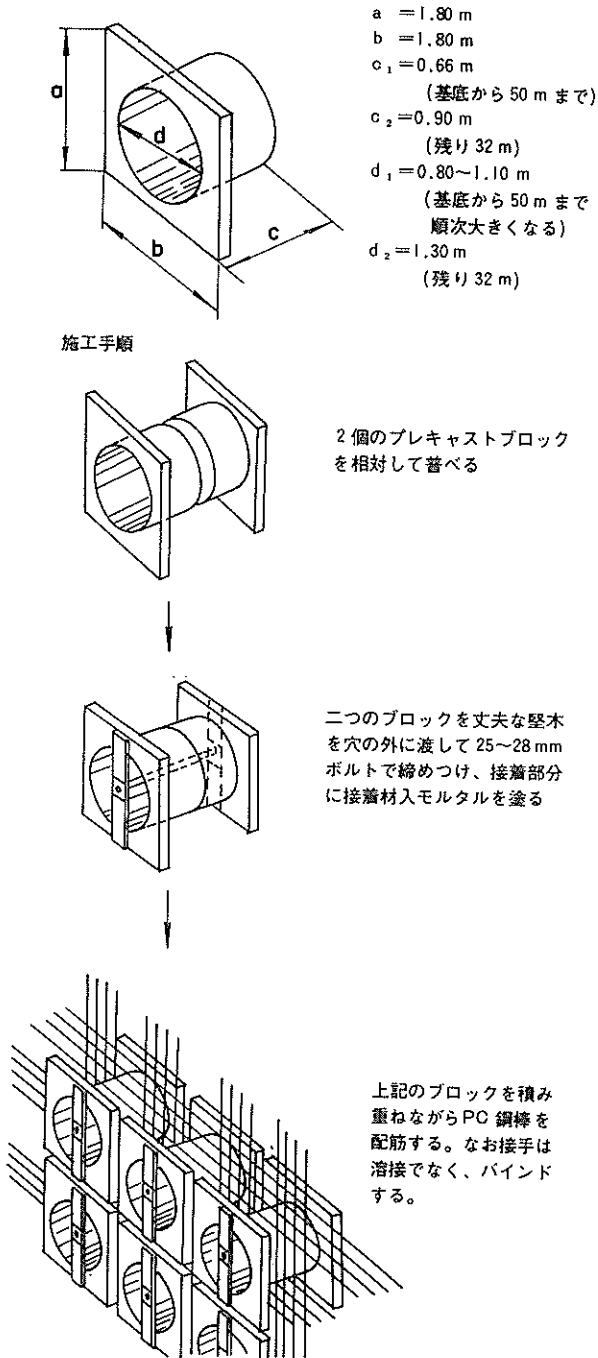


図 3.39 穴あき防波堤建設手順

このように、北海における貯油タンク建設工法の最大の特徴は、フィヨルドにアンカーで定着し移動型わくを用いて現場打ちコンクリートで構造物を完成させたことである。

(2) プレキャスト部材を現場で組立てるもの

プレキャスト部材を現場で組立てる工法は大きく分けて2つある。すなわち、接合をプレストレスで行うものとそうでないものとに分けられる。

接合をプレストレスで行うものは、陸上構造物、特に橋梁において PC ブロック工法と言われるものと同様の型式である。これは、プレレストコンクリートあるいは鉄筋コンクリートのセグメントを現場で組立て、これらを数本あるいは多数の PC 鋼材で緊張し一体の構造物とするものである。この工法は、接合部目地材の種類によってさらに分類できる。

部材がプレレストコンクリートであるが、プレストレスで接合せず他の工法によつたものとしては、前述した洞海湾の PC 沈埋トンネルがある。この接合工法はプレレストコンクリート部材に限らず、一般の沈埋トンネルの沈埋管相互の連結に広く利用されるもので、新たに沈設し、既設の管材に接合すべき管材を水底における水圧によって既設の管材に密着させる方式である。

また、La Guadia 空港にみられるように、プレキャスト部材を一種の型わく代りに用い現場打ちコンクリートを打設し、現場打ちコンクリートにプレストレスを与えるものもある。

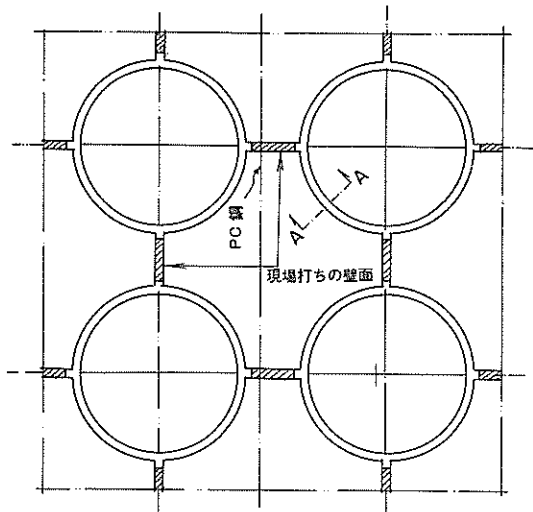
なお、プレキャスト部材を用いた建設工法については 4 章で述べる。

(3) PC バージの建設工法

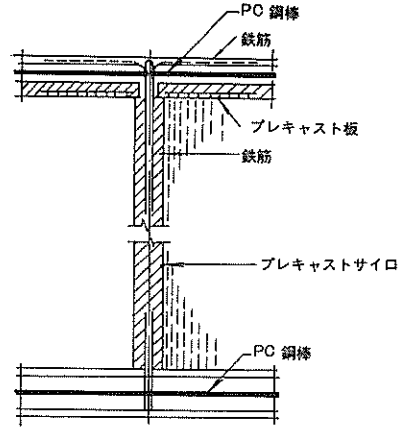
PC バージの建設工法として A. A. Yee の“蜂の巣状サンドイッチパネル”および PC バージの製作、進水方法を紹介する。

Yee の“蜂の巣状サンドイッチパネル”は種々の海洋構造物に応用できるもので、2 枚の板の間に多数の筒状セルをはさみこんだ合成構造物であり、この上下 2 枚の板をプレストレスで一体化すると強度も強くなる。この概念を図 3.40~41 に示す。これを用いれば、強度的には同等のものを比較的少ない材料でつくれ、この種の数種のプレキャスト部材を適切に組み合わせれば種々の形状の構造物が可能と考えられる。この蜂の巣パネル以外で考えられているバージの建造工法を図 3.42 に示す。

さらに PC バージの建造工法を考える上で進水方法が問題となるが、図 3.43 にその例を示す。



平面図



A-A 断面

図 3.40 蜂の巣状パネルの組立て—主として PC によって接合するもの

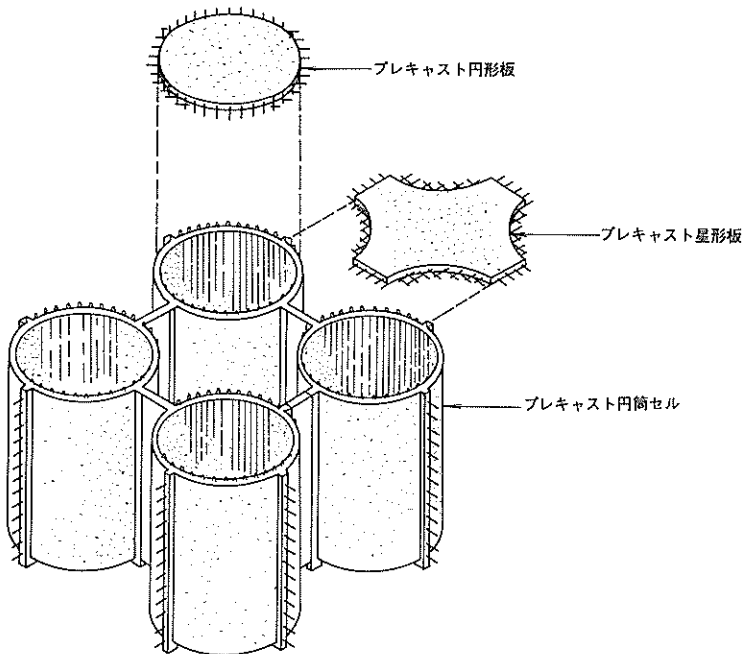
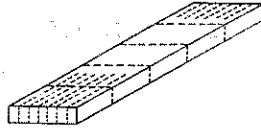
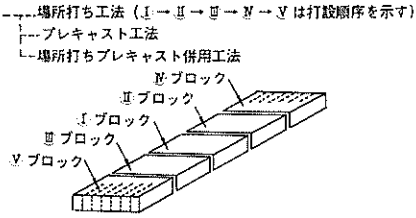


図 3.41 蜂の巣状パネルの組立て—PC を用いない場合

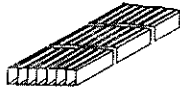
(1) 一体場所打ち工法



(2) 大ブロック工法



(3) 小ブロック工法……プレキャスト工法



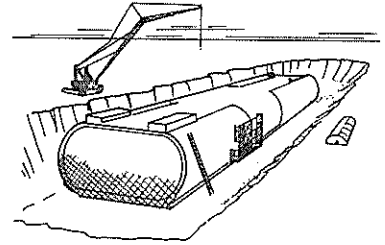
(4) パネル工法……プレキャスト工法



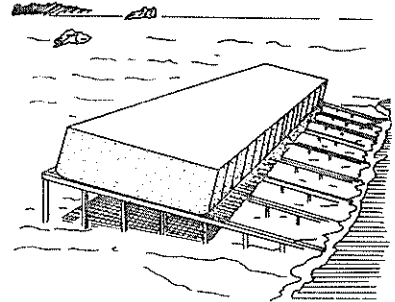
(5) プレキャストパネル工法と場所打ち工法の併用

- ・下部構造をプレキャスト工法、後洋上で上部構造を場所打ち工法併用 (ARCOのLPGターミナルはこの工法)
- ・下部構造を場所打ち、上部構造をプレキャスト工法併用

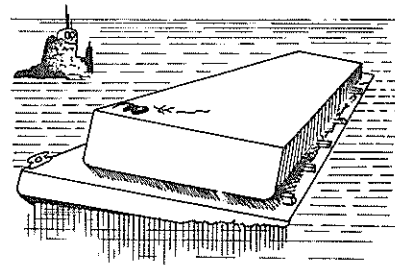
図 3.42 各種バージ建設工法



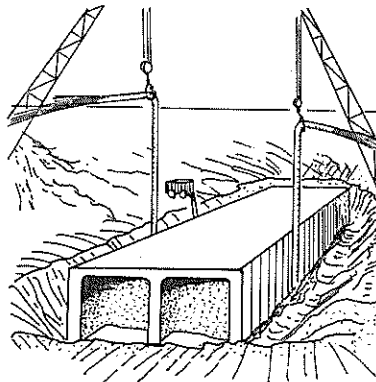
ドック内で建設進水する方式



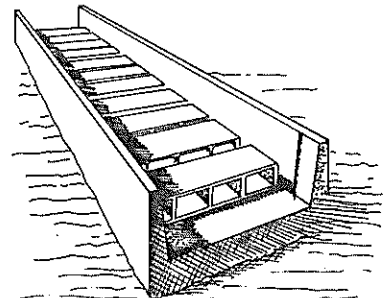
サイドランチング方式



バージランチング方式



サンドジャッキ方式



ドライドック方式 (浮ドック)

図3.43 各種進水方式

4. 海洋構造物部材としてのプレストレストコンクリートの問題点

プレストレストコンクリートを海洋構造物として使用する場合、陸上構造物と大きく異なる点は、荷重に関しては外力の大きな部分が波によるものであること、材料に関しては部材周囲の環境が海洋で材料の劣化がより激しいこと、さらに作業条件が波浪により非常に影響をうけることであろう。

本章では、部材に働く波浪の影響を中心に、設計および解析に関する問題点、施工に関する問題点、さらにそれ以外の問題点に分けて検討を行う。

4.1 設計および解析に関する問題

4.1.1 設計法の現状

構造物は常に何らかの目的のために建設される。したがって、構造物はある予定された期間中、その目的のための機能を維持しなければならない。構造物の設計は、その目的のための機能を使用されると予定された期間に対して維持できるように計画することにある。具体的に言えば、まず、予想される使用期間中に構造物に作用する外力に対して安全であるように、構造物およびその部材の材料、形状、寸法を決定すること、ついでその機能が十分発揮できるように必要にして十分な設備等を配置することにある。

厳密には構造物が予定された期間中その機能を維持したかどうかを判定するには、その構造物をまず建設し、その予定された期間を使用してから後で、はじめてできることである。しかしながら、この判定は事後であり、設計者の必要とする事前判定ではないので、外力および構造物をモデル化し、これに基づいて解析して構造物の安全性を検討する手法、つまり設計法がとられている。設計法は実際の構造物の安全性がよりの確に判断できるものが望ましいが、使い易さということも考えなければならない。ここで、設計法、現象のモデル化を“使い易さ”から“合理性”の順に、いいかえると、設計法の発展を順にならべてみると、(1)決定論的設計法→(準)確率論的設計法→確率論的設計法、あるいは、(2)許容応力度設計法(材料における安全性の検討)→終局強度設計法(部材における安全性の検討)→終局荷重設計法(構造物全体における安全性の検討)、さらに、(3)弾性設計法→塑性設計法という順に並べることができよう。

これらの概念はたがいに複雑にからみあっており、それら設計法の現状を文献⁴⁾より引用すると次のようである。なお、以下に述べる設計法はプレストレストコンクリートを含めた鉄筋コンクリートについてのものである。

「鉄筋コンクリート部材の設計は、外力、耐力ならびに安全率の三つからなる体系化された設計理念に基づいて行われているが、これは基本的に二つに大別される。その一つは材料強度に対して安全率をとり、弾性解析に基づく部材応力のある限度以内とする許容応力度法であり、他の一つは構造物あるいは部材の安全率を考える方法、すなわち材料のみかけの塑性を考慮し、荷重に対して直接安全係数をとり、破壊荷重に対する構造物あるいは部材の安全性を検討する、いわゆる塑性設計法である。後者はさらに、構造部材の耐力をもととする終局強度設計法、構造形の崩壊をもととする極限設計法に分けることができる。さらに塑性設計に一部弾性設計を加味し、構造物の使用時ならびに終局破壊時の各種限界時の検討をする限界状態設計法も後者の中に入れられる。一方、後者の設計において、荷重(外力)作用ならびに材料あるいは部材強度の必然的に有するばらつきを、確率論的に取扱うかによって表現上の差異は生じている。

鉄筋コンクリート部材の設計は、従来から広く許容応力度設計法が用いられ、わが国では一部を除いてこの設計法が使用されているが、許容応力度設計法による場合の構造物の各部材の安全率が明確でないなどの問題があるので、アメリカ(ACI Code)、イギリス(CP 110)、ドイツ(DIN 1045)、ソ連(SNiP)などでは限界状態ないし終局強度設計法の全面的あるいは大幅な採用を行っており、また、CEB-FIPからも限界状態設計法による鉄筋コンクリートおよびプレストレストコンクリートを含むコンクリート構造物設計施工指針が提案されている。」

我が国においても、使用材料、施工管理などの技術の進歩に基づいて、すべての構造物の安全性を統一した概念で評価しようという機運が高まっており、許容応力度法から終局強度設計法あるいは限界状態設計法へ移行する段階にあると思われる。

プレストレストコンクリートの設計については従来から設計荷重作用時に対しては弾性理論を、破壊に対しては終局強度理論を採用しており、比較的合理的な設計法であると言える。この設計法の概要は以下のようである。

- a) 設計をフルプレストレッシング、パーシャルプレストレッシングのいずれにするかを定める。(Ⅰ種、Ⅱ種、Ⅲ種に分けることも多い)
- b) 応力度の計算は弾性理論で行う。
- c) 安全度を以下の場合について検討する。
 - i) プレストレスを与えた直後(弾性理論)
 - ii) コンクリートのクリープおよび乾燥収縮、PC鋼材の

- レラクセッションが終了する前に外力が作用した時
 (iii) コンクリートのクリープ、PC鋼材のレラクセッションが終了した後外力が作用した時
 (iv) 破壊に対する安全度の計算（終局強度理論）
 (v) セン断力に対する計算（弾性理論）

この設計法は、設計荷重が指定できれば、フルプレストレッシング、パーシャルプレストレッシング（あるいはⅠ種、Ⅱ種、Ⅲ種）という区別も明確となり実用的と言える。

しかしながら、海洋構造物の設計に用いる場合、主たる荷重である波浪は極めて非定常で「*n*年確率での最高波」といった確率的な概念でしか表示できぬので、Ⅰ種、Ⅱ種といった区別も確率的となり、そのため確率的な設計概念を大幅にとり入れる必要がある。さらに、コンクリート、鋼材の劣化が陸上構造物に比べて激しいため、合理的な設計をするには構造物の使用期間といったものを明確にすることも必要である。また、波浪荷重、波圧そのものも条件によって大きく変動するものであり、砕波圧、または衝撃波圧については現時点でも不明な点も多く、かつ、動的な波力に対する構造物の応答現象についても十分にわかっていないなどの問題点がある。

4.1.2 波力に対する問題点

海洋構造物に作用する外力は、海洋コンクリート構造物設計施工指針(案)によれば次のように分類できる。すなわち、(a)死荷重、(b)活荷重、(c)船舶力、(d)風荷重、(e)波力、(f)流れによる流体力、(g)静水圧および浮力、(h)浮遊えい航時の動荷重、(i)地震荷重、(j)土圧、(k)骨材圧、(l)コンクリート圧、(m)その他の荷重、と分類される。このなかで海洋構造物に特有でしかも支配的な外力は波力であり、設計上の問題点の多くは波力に起因する。その問題は大きくわけて、どの波を設計波に用いるかというもの、砕波など衝撃的波力の算定が困難なこと、および不規則な繰り返し波力の部材に対する影響の算定が困難なことである。

(1) 設計波としてどの波を用いるか

水深が大きくなり、波力を部材強度で支持することを考えると、構造物使用期間中の最高波の推定が重要となる。この最高波の推定には異常波浪統計が必要となってくる。異常波浪というのは、1年に数回発生するような波高の大きな波浪状況をさすものである。現状においては、波の統計資料はいずれも統計期間が不足しているため、異常波浪統計の作成法も確定しておらず、種々の方法が試みられている。

この異常波浪統計によって最高波を求める際の問題点を文献⁴⁽²⁾より引用すると次のようである。

「異常波浪統計の作成および利用における最大の問題は、長期にわたる統計資料が求めにくいことである。波高計による観測値は年数が限られ、また地点によっては砕波などの影響で波高が減衰していることがある。波浪推算による場合は、40年間程度の資料を作成することができるけれども、推算値の信頼度に不安が残る。推算の方法および担当者の経験、判断などにより波高が3割以上違うこともある。

また、データが信頼できるとしても、これは統計的なサンプルの一例であり、母集団の特性にどこまで近づいているかという問題がある。したがって、高波の発生確率を推定する場合には、統計上の信頼限界を求めてこれを表示しておく、こうした統計的な変動を減少させるには、対象期間を長くとり、極大値あるいは年最大波の個数を増さなければならない。波浪推算を行うための天気図を入手できる範囲で、できるだけ長期間について作業を行うべきである。

高波の発生確率が求められたとして、次には設計波の再現期間をどの程度にとるべきかの問題がある。再現期間というのは、その波高を超える強さの波浪が発生する時間間隔の平均値であり、その間には高波が発生しないという保証期間ではない。今、構造物の耐用年数を t_d とし、再現期間を R_p で表わすと、その期間内に設計波浪以上の高波に遭遇しない確率は次式で与えられる。

$$P(H_{all} \leq H_p) = \exp\{-t_d/R_p\} \dots\dots (A)$$

(H_p : 設計波)

再現確率が耐用年数に等しい場合の非遭遇確率は $1/e \approx 37\%$ であり、非遭遇確率を90%にまで高めるには $R_p = 9.5 t_d$ としなければならない。海洋構造物の設計では、耐用年数の数倍の再現期間が用いられるようであり、APIの規定でも100年期待値とか250年期待値などの引用例がある。

最後に、発生確率を求めるのは波浪状況の代表値としての有義波高なのか、あるいは個々の波としての最高波の期待値なのかの問題がある。これは構造物の設計において代表波を使うか、それとも最大の1波である最高波を用いるかの選択に係る。Jahns Wheeler(1972)などは H_{max} の発生確率について検討するように主張している。しかし、異常波浪統計の不確かさを考えれば、 H_{max} の期待値を細かく計算することは数字の遊びに終る可能性が強い。したがって、高波の発生確率は有義波

高の極大値について計算し、その結果求められる N 年期待値の有義波を1.8~2.0倍して H_{max} の N 年期待値とする程度で十分と思われる。」

上記の説明で明らかであるが、いかなる方法を用いても、その構造物の使用期間中に発生する最高波を求めることは非常に困難である。局部的な破壊が致命的な破壊となる危険の高い海洋構造物において、最大荷重が不明確であることは重要な問題である。このような構造物においては、材料の破壊強度を超えるような応力がただ1回発生しただけでその機能を失うわけであり、そのため最高波としてかなり大きな波を採用せざるを得ない。

このこととプレストレストコンクリート設計法との関連を考えると次のようである。まず第1の問題は、フルプレストレス、パーシャルプレストレス、あるいはⅠ種、Ⅱ種、Ⅲ種といった設計上の区別をどう考えるかである。極端に考えるならば、いかなる最高波を考えようとも（砕波限界波高に達すれば問題は異なってくる）、耐用年数内にその波を超える波の発生確率はあるわけである。例えば、既述A式を用いれば、耐用年数50年のときに再現期間1,000年の波を考えても超過確率はなお4.9%ある。勿論、部分安全係数等で割増しを行うので単純には考えられないが、何に対するフルプレストレス、あるいはⅠ種であるのかという根拠がいまいちとなる。しいて表現するならば、耐用年数内における非遭過率何%に対するⅠ種とか、再現期間何年に対するフルプレストレスであるという表現が可能であろう。

(2) 衝撃的波力に対する問題

波高が砕波限界によって制限される場合には、最高波の推定といった問題はないが、波力の算定が困難となる。また、海洋構造物によっては、いわゆる砕波でなくとも衝撃的波力を受けるものと思われる。ここでは、衝撃的波力の算定について議論することはできないが、海洋構造物には予想外の波力がかかることがあり得ることを例示する。

図4.1は、大型造波水路内に設置した混成防波堤模型の直立部前壁に作用する波圧分布である。前壁を多段横梁で構成してそれぞれの横梁の応力測定を行い、横梁には静的に等価な波力強度が作用するものと仮定して求めたものである。このなかで特に衝撃的な波圧を図4.1に示してある⁽⁴⁻³⁾。図中白丸は30波中の最大値を、黒丸は

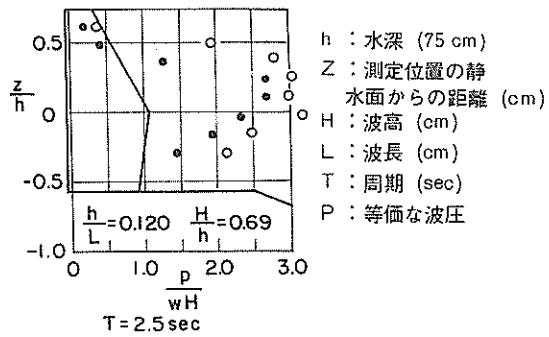


図4.1 衝撃的砕波の波圧

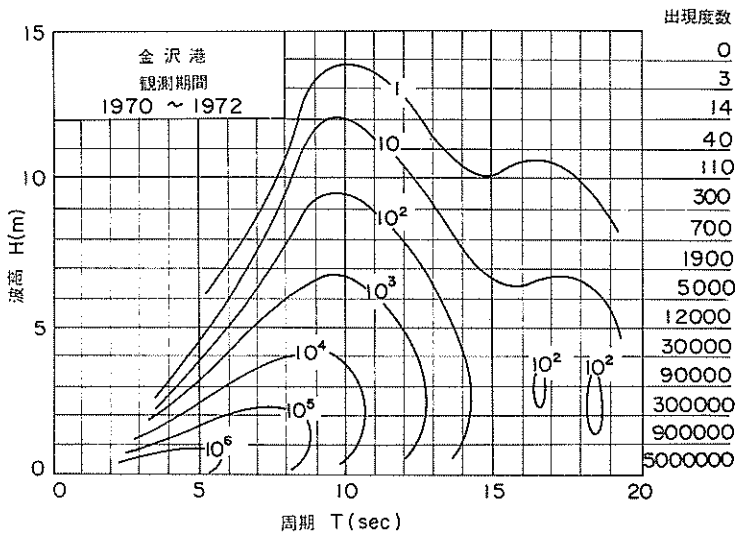


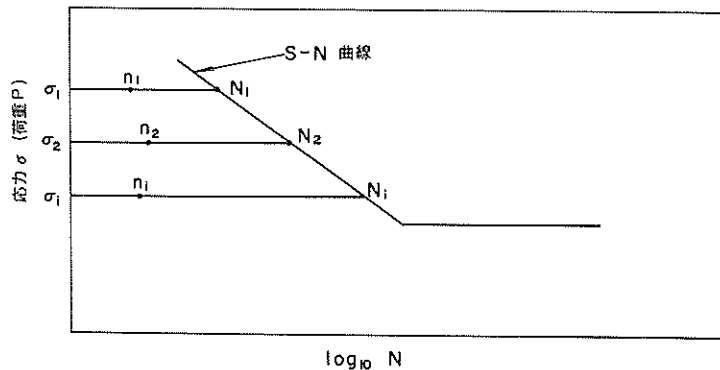
図4.2 金沢港の波浪の総出現度数の計算例

最大10波の平均値を示したものである。これによれば、最大波力強度は、 $3.0wH$ を超えるものもある。また、この波力強度の計算では、各横梁に対して一様な波力強度であると仮定しており、局部的にはさらに大きな波圧が発生しているものと考えられる。

また、構造物の設置水深が深まるに伴い、波力およびその他の外力に対する知識、理論が少なく、それらの予測も困難となり、予想外の外力の作用する可能性が増加すると思われる。このため、破壊性状といったものにも今後は注意を払う必要がある。

(3) 波浪による疲労

波浪による疲労が他の疲労現象と異なる点は次の2点であろう。第1点は、繰返し回数が多いことである。例えば、金沢港においては年間約500万回の波が観測されている(図4.2参照)。通常の疲労試験では100万回あるいは200万回、多い場合でも1,000万回(国鉄新幹線のPCまくら木の場合)を規準としている。ところが、海洋構造物の場合、年間500万波と考え耐用年数を30年あるいは50年とすれば、おのおの1億5千万回、2億5千万回の波力の繰返しをうけていることになる。このため、高張力下のPC鋼材およびプレストレスを受けているコンクリートの疲労といったことが問題となるわけで、いままでの実験結果の類推から、なるべく有効プレストレス量は少ないほうが安全であると考えられる。



Minerの仮説

ある応力振幅 σ を N 回受けて破壊するとき、その応力振幅を1回受けると $1/N$ だけ寿命が失われ、したがって $N/N = 1$ に達したとき破壊が起るという考え。

一般に $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m$ なる m 段の応力振幅があり、もしそれらが単独に加わるなら N_1, N_2, \dots, N_m 等の繰返し数で破壊するところを、実際にはそれらの応力を N_1, N_2, \dots, N_m 回加えた場合、破壊の起る条件は

$$\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} = 1 \text{ と表せる。}$$

図4.3 Miner 仮説の説明

もう一つは荷重の強さが0に近い荷重から設計荷重に近いものまでがランダムに作用する不規則繰返し荷重となる点である。これは、例えば列車荷重、自動車荷重等のように比較的似かよった荷重の繰返しとは異なる。すなわち、高応力で繰返し回数の少ない疲労から、低応力で繰返し回数の多い疲労までを検討しなければならないわけである。

また、上記の問題と関連して、万一ひびわれのはいった後の疲労も検討する必要がある。

4.1.3 解析上の問題点

海洋構造物は、波力の他にも4.1.2で示した種々の外力を受け、それらの外力および組合せた外力によって、解析上困難な点がある。これらの問題を、主として文献⁽⁴⁾を参考として紹介する。

(1) 動的解析

従来、波力を算定する場合、ある定まった波(例えば有義波)が、静的に作用しているものとした。しかしながら、実際の波は波高も、周期も、方向も不規則である。それゆえ、波の不規則性も考慮して波力を算定することが望ましく、例えばエネルギースペクトルを用いて波の統計的性質を表わし、それによって動的解析を行うことが試みられている。このスペクトルに関しては多大の研究が行われており、現在も改良が試みられている。

構造物の動的挙動は非常に複雑で、構造物の形状、剛性、質量、減衰特性、さらには水による制動効果の影響をうける。さらに、基礎地盤の特性も重要な影響を及ぼすが、それらの特性は変位の関数ともなり、極めて解析が困難である。

動的解析の例では、静的に波力が作用すると考えた場合に比べて波力による影響は4～6倍、さらには10倍にも達する。また、構造物は $10^6 \sim 10^8$ 回の繰返し荷重をうけ、特に基礎や柱頭の疲労に関しては十分考慮する必要がある。

(2) 疲 勞

疲労に対する設計法は2通り考えられる。第1の方法はFIPの指針に代表されるもので、いわゆる通常の外力条件では応力のある許容値以下に制限し、設計波に対してはひびわれを許さない方法であつて実用的な方法である。

第2の方法は波力による荷重履歴を考え、その累積損傷度といったものを例えばMiner則によつて定め、疲労に対する安全性を検討するものである。このMiner則に関する問題として、不規則な荷重に適用できるか否かといった問題がある。Miner則に反する事実として、例えば、ある荷重レベル以下の繰返し荷重は、逆に部材耐力を向上させるといったものがある。(Miner則については図4.3^{4,5)}参照)。

現在、疲労に関して種々の研究が行われているが、この中で重要な問題はひびわれが有る場合、無い場合それぞれにおけるコンクリート部材の疲労およびそれに対する海洋環境の影響である。具体的には、コンクリートの海水による劣化、凍結融解作用による劣化および内部PC鋼材の腐食に関するものである。また、疲労を検討する場合、曲げ、圧縮、引張、せん断、さらに付着等に関する疲労があり、構造物によつて種々のものを考える必要があろう。

ここで、プレストレストコンクリート梁(PC鋼材の量は釣り合い鉄筋比以下としてある)の曲げ疲労特性(破壊特性も含む)試験結果について文献^{4,6)}などよりまとめると次のようである。

- (i) 静的破壊荷重の50%以下の繰返し荷重であれば破壊することはない(ただし、数百万回の繰返しで)。
- (ii) 繰返し荷重が、静的破壊荷重の60～80%の場合、破壊する。このとき、PC鋼材は1本ずつ破断する。
- (iii) 繰返し荷重が、静的破壊荷重の85%以上であると、1部のPC鋼材が降伏したのち、圧縮側コンクリートが圧壊する。

- (iv) 繰返し荷重によつて有効プレストレス量は減少する。
- (v) 破壊に至る回数は、PC鋼材の疲労試験結果とMiner則により概略予測できる。

この試験結果は、限られた試験条件で行われたものであり、さらに検討する必要がある。例えば、初期に過大荷重を受けひびわれが発生した場合、両振り疲労の場合、さらに繰返し回数が $10^7 \sim 10^8$ 回の場合の疲労性状の検討など、海洋構造物に適用する際に問題となる事項がある。

他の組合せ応力による疲労は、曲げ以上に困難で、例えばせん断については、静的破壊耐力の算定も困難な現状である。

(3) せん断

せん断については種々の研究がなされているが、せん断破壊機構および耐力算定式もいまだに研究段階と思える現状である。また、既往の研究では主として長方形断面の梁を試験しているが、この場合、スターラップにほとんどせん断力が伝達されず、T字梁等と異なっており、試験結果を利用できないという意見もある^{4,7)}。また、現在種々の設計公式があるが、実際のせん断耐力よりかなり小さな値を与える場合もある。

さらに、既往の構造物とはかなり異なった外力を受け、異なった環境にある海洋構造物に既往の公式を適用することは疑問である。B. C. Gerwickによれば、北海貯油タンクの設計に際し、既往の公式をそのまま適用すれば、圧縮-せん断破壊に対し危険となるため、1/5模型による試験により修正を行ったが、従来の設計よりもさらに補強鉄筋が必要となつた。

また、水中においては、部材にひびわれが発生すると、ひびわれに進入した水のために骨材、コンクリート間の摩擦係数が減少し、骨材のかみ合い効果が期待できなくなり、せん断機構そのものも異なってくるため^{4,8)}、注意深い検討が必要である。特に、シェル構造等で水深が深い場合、複雑な応力が発生しせん断が特に問題となろう。

(4) 破壊性状

既往の海洋構造物、例えば北海の貯油タンクは、再現確率100年の波を設計波として用い、さらにその波力に安全率を乗じ破壊に対して設計上十分な余裕をとっている。しかしながら、前述したように、動的解析、衝撃的波力、さらに地盤の特性など十分には解明できていない面があり、予想外の現象により破壊に至るおそれが全くないとは断言できない。このような破壊に備えて、仮りに予想外の破壊が起こつたとしても致命的な破壊は避けるといふ考えは従来の設計法にもみられる。例えば、鉄筋コンクリートの曲げに対する設計において、鋼材の降

伏以降延性的な破壊を進行させる考え、およびせん断破壊は絶対に避けるよう設計する考えなどは破壊性状を考慮したものである。海洋構造物の設計に際してこのような考え方はより以上に重要である。

プレストレストコンクリートを鉄筋コンクリートに比べるとその破壊性状は急激である。これは第2章で、同一鋼材を入れプレストレスト量を変化させた梁によって説明したように、プレストレスト量が多くなるほど弾性域は高くなるが変形能力は小さくなるわけである。逆に言えば、破壊性状をよくするには、プレストレスト量を必要最小限にとどめ、プレストレストを導入しない鋼材量を増やせばよいわけである。すなわち、鉄筋コンクリートを含むプレストレストコンクリートは、鋼材量およびプレストレスト量という2つの可変因子によって破壊耐力、弾性域、変形能力(延性)をある範囲で調節できるという特性をもっており、鋼材等に比べ合理的な設計が可能である。

(5) 衝 撃

海洋構造物に作用する衝撃的な外力としては、前述した衝撃的波力の他に、流氷によるもの、船舶によるもの、さらに特殊なものとして航空機の衝突などが考えられる。このうち、船舶接岸力など比較的衝突速度の遅いものに関しては、等価な静的荷重として考えることが可能である。しかしながら、速度の大きな衝撃力に関しては、力の大きさ、分布、特に応力集中が問題となろうが、それらに関する知識はほとんど得られていない。

理論的な解析によれば、衝撃力に対しては広範囲に分散された引張鉄筋およびスターラップが必要であると言われている。また、研究の方向としては、次の2つの限界状態に関する検討が行われている。すなわち、通常の衝撃(例えばCEB-FIP指針では1カ月に1度発生する程度のもの)に対しては弾性域内での挙動を、また過大な衝撃力に対しては究極的な崩壊を防ぎ修理可能な破壊性状でとどまるように検討するというものである。

筆者の考えとしては、衝撃的な外力で特に速度の大きなものでは、時間的に作用時間が短いという問題と共に、応力集中という問題が大きいと思う。特に、構造物が大きく、また複雑な形状となった場合、局部的には設計で考慮する応力の数倍~数十倍の応力がかかることも考えられる。その場合、局部的に構造物が破壊されることはある程度避けられないと考えられる。しかし、その破壊性状はゆるやかでなくてはならず、その部材の破壊が全体の破壊へとつながることのないよう十分な配慮が必要である。

(6) 地 震

地震が発生する地域に海洋構造物を建設する場合には、耐震性の検討が必要となる。

プレストレストコンクリート部材については、設計にどの程度の地震を想定するかが、ひびわれ発生の危険性およびPC鋼材腐食の問題と関連して重要な問題となる。既述したように、波力に対してプレストレストコンクリートを設計する場合、波力を確率的に理解せねば取扱いが困難であることを明らかにしたが、地震に対しても同様のことが言えよう。

現行の基準、示方書等では、設計で想定する地震は“まれ”にしか生じないものであるとし、コンクリートおよび鉄筋の許容応力度として一般に用いる値を割増しして使用したり、プレストレストコンクリートにおいてひびわれを特に許容することもあり、このように“まれ”といった表現等で確率的な考えを示している。

これらの設計方針は概念的には納得できるものであるが、地震は不規則な現象であり“まれ”をどのように評価し、安全性を検討するかが問題であろう。地震といっても、構造物に作用する外力の一つであるので、すべての外力を確率的に理解して、構造物の安全性を検討することがプレストレストコンクリートのみならず、合理的な設計として望ましいと考える。

また、海洋構造物は新しい構造物であり、その耐震性を明らかにするには、動的解析が必要となり、特に構造物と水との相互作用について十分に検討すべきである。その解析手法の一つとして付加質量の導入もあるし、また、動水圧として計算する手法などもあるが、不明確な点も多い。

いずれにせよ、想定する地震の発生頻度および地震動の性質も不確定な要素が多いので、プレストレストコンクリート部材のひびわれ発生の危険性および破壊の危険性も確率的に理解するしかない。このため、波力の場合と同様に、地震に対してもひびわれ発生および破壊の危険性に対し十分に検討し、併せて、ひびわれ発生後の性状も十分に検討する必要がある。

4.1.4 プレストレストコンクリート設計に関する 2、3の考察

ここまで、プレストレストコンクリート設計法の現状および海洋構造物部材として設計、解析する問題点について概略述べてきた。ここでは、設計するに当たってどのようにこれらの問題点に対応してゆくべきかについて2、3の考察を述べる。

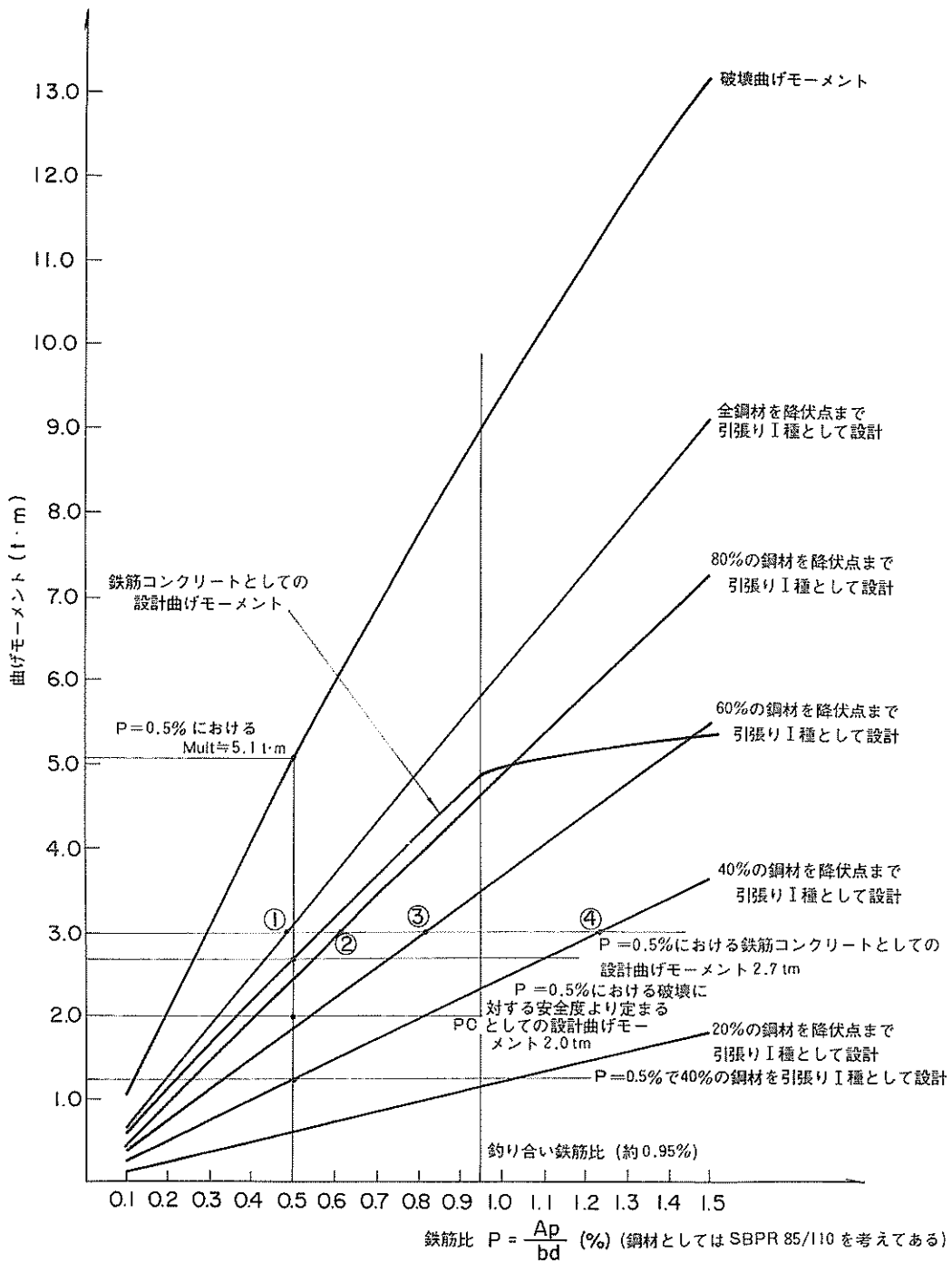


図4.4 鉄筋コンクリートの設計曲げモーメントとPC I種としての設計曲げモーメント

(1) プレストレストコンクリートおよび鉄筋コンクリート設計の比較

プレストレストコンクリートの鉄筋コンクリートより優れている点は、耐久性に関連してひびわれを制御できることおよび高強度の鋼材、コンクリートを使用していることである。

しかし、部材の破壊時についてみれば、鋼材もコンクリートも既に塑性状態になっており、同じ形状、同じ材料を用いているプレストレストコンクリートと鉄筋コンクリートは、ほぼ同じ破壊耐力となる。しかし、現行の示方書および指針に従って計算すると同一の設計強度とはならない。この例を図4.4によって説明する。図4.4に幅20cm、有効高さ25cmの梁の場合において鋼材量と曲げモーメントの関係をプレストレストコンクリート、鉄筋コンクリートをあわせて表示してある。また、鋼材の一部にのみプレストレスを受け、残りは鉄筋と同じ作用を考えた場合の設計曲げモーメントも併せて表示した。

現行の設計体系では、プレストレストコンクリートは破壊に対する安全度も検討する必要がある、土木学会プレストレストコンクリート設計施工指針によれば、次のようである。すなわち、「55条 破壊に対する安全度：破壊に対しては、次の荷重状態に対して断面が安全であることを確かめなければならない。1.3×(静荷重) + 2.5×(動荷重) および 1.3×(静荷重および地震荷重の最も不利な組合せ)」となっている。海洋構造物においては、動荷重としては波力が考えられるが、この場合、安全側の検討をするとすれば、2.5という破壊安全率をとることになる。これを図4.4で考えると例えば次のようである。鋼材量0.5%の場合、図より破壊曲げモーメント $M_{ult} = 5.1 \text{ t}\cdot\text{m}$ である。この場合、プレストレストコンクリートとしての許容設計曲げモーメントは、 $5.1 / 2.5 = 2.0 \text{ t}\cdot\text{m}$ であるが、図より明らかなように、鉄筋コンクリートとしての設計曲げモーメントは約 $2.7 \text{ t}\cdot\text{m}$ である。すなわち、動荷重が強く作用する部材では鉄筋コンクリートとして設計した方が設計曲げモーメントを高くとれるわけであり、若干問題があるように思える。

つぎに、構造物として望まれる性質の一つであるじん性について考察してみよう。鋼材量は0.5%のままプレストレス量を減少させてゆくと、100%プレストレスの場合のⅠ種としての設計モーメントは $3.0 \text{ t}\cdot\text{m}$ であったが、次第に低下し80%プレストレスの場合では、破壊安全度より定まるモーメントより低い $2.4 \text{ t}\cdot\text{m}$ 、60%では $1.85 \text{ t}\cdot\text{m}$ 、40%では $1.25 \text{ t}\cdot\text{m}$ となる。鋼材の40%のみプレストレスをかけると破壊安全率(破壊荷重

／設計荷重)は4.1となり、破壊に対して余裕のある構造物といえる。同じことではあるが、設計モーメント $3.0 \text{ t}\cdot\text{m}$ を一定として鋼材量を次第に増加させてゆくと、図4.9の①、②、③、④となり、いずれのケースでも設計は可能であり、また、①より②が、②より③が、③より④が、破壊に対して余裕のある構造物といえよう。しかし、現行の指針では、②、③、④のような一部プレストレスという考えが評価されにくく、海洋構造物の設計法としては望ましい手法が指針にとりあげられていないのは残念である。

一部の設計者は、プレストレストコンクリートでありながら、名目上は鉄筋コンクリートとして計算してプレストレストコンクリートとしての破壊安全度に関係なく、設計曲げモーメントをⅠ種として設計するよりも大きくなり、しかもひびわれも一応制御する設計を行っている。この考え方に沿うものとして、PRCの設計をあげることができる。このPRCをプレストレストコンクリートとして考えるとPCⅢ種に相当する。

実際、同一材料を用いてプレストレストコンクリートと鉄筋コンクリートを製作した場合、鋼材を緊張し種々の性状を改善したと思われるプレストレストコンクリートの設計曲げモーメントがより低くなること、また、付加鉄筋を入れ破壊耐力および破壊性状を改善しながらその効果を全く考慮されないことは不合理である。また、その不合理をのりこえるために、プレストレストコンクリートを鉄筋コンクリートと見なして設計するという手段も割り切れない思いがする。

海洋構造物部材としてプレストレストコンクリートを用いる場合、ひびわれ制御の他に破壊耐力、破壊性状も重要であるので、これも含めた合理的な設計体系が望まれる。そのためには、鉄筋コンクリートとプレストレストコンクリートを同じ基準で判断するという考えから出発する必要がある。

(2) PCⅠ種、Ⅱ種、Ⅲ種および破壊耐力と繰返し荷重、通常の荷重および異常時荷重の関係について

プレストレストコンクリートを海洋構造物部材として設計する場合、前述したように、現行の設計法では納得できない面がでてくる。それらをまとめると以下のごとくである。

i) 構造物に波力をあたえる波は統計的に取扱わねばならないので、Ⅰ種、Ⅱ種、Ⅲ種の設計荷重として波圧を定めることが困難であり、その区別の根拠があいまいとなる。

ii) 破壊に対する安全度を検討する場合、プレストレスト

コンクリートを鉄筋コンクリートと見なした方が、高い設計曲げモーメントをとることができる場合がある。

Ⅲ)Ⅰ種の概念で設計した場合、プレストレスを与えない鋼材を付加して破壊耐力をあげ、破壊性状を改善しても設計計算上その改良効果を評価することにならない。

プレストレストコンクリートを海洋構造物部材として合理的に設計するためには、これら納得できない面をなくす必要がある。そのためには、プレストレストコンクリートが種々の荷重条件に対してどのような適応性を有し、また、海洋構造物部材の荷重条件としてどのようなものを考慮すべきかまとめる必要がある。

まず、プレストレストコンクリートの独立した性質を挙げると次のようである(同一断面で考える)。

P i)有効プレストレス量を変化させることにより、引張縁に引張応力を生じない荷重範囲を変化させることができる(PCⅠ種に対応)。

P ii)鋼材の配置、プレストレスを与えない鋼材の補強(鋼状の鋼材のこともある)などでプレストレスを増加させることなく、ひびわれ幅をある程度減少させることができる(PCⅢ種に対応)。

P iii)PC鋼材、付加鉄筋を添加することにより破壊耐力を増大させることができる(破壊耐力および破壊性状)。

P iv)可能性は小さいが、コンクリートの曲げ引張強度を

かえることによってひびわれ荷重を制御することができる(PCⅡ種に対応)。

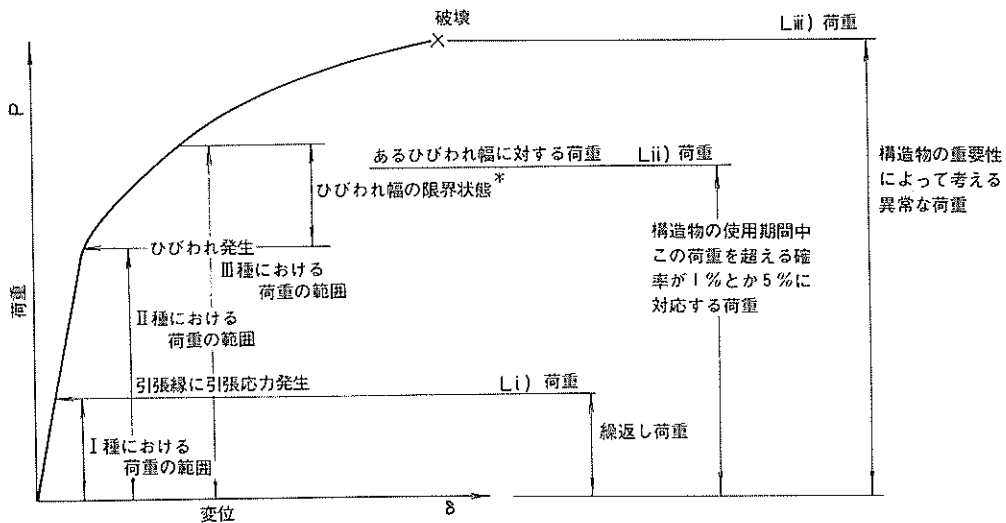
また、海洋構造物部材に作用する外力として次の3分類を考えられる。

L i)繰返し荷重:構造物の寿命に影響を与えない繰返し荷重の限界で、この定義は非常に難しくFIP指針では2~3万回以上作用する荷重とされているが、根拠が明確でなく今後の問題として残る。

L ii)許容荷重:いわゆる設計荷重に相当するものである。

L iii)破壊荷重:構造物の重要度によって万一の事故に備え、余分の破壊耐力をとったり破壊性状を改善する必要のある場合を想定した荷重条件。

この海洋構造物に対する荷重条件とプレストレストコンクリートの性状を対応させることで合理的な設計が可能となる。すなわち、海洋構造物の主な設計条件として、耐用期間中に急激にして突発的な破壊を起こさないこと、耐用期間中にPC鋼材等に重大な影響をおよぼすひびわれを発生させないこと、繰返し荷重によって破壊させないことが挙げられる。このそれぞれに対して、どの程度の荷重を対象として設計するか、どの程度のひびわれ幅を許容するか、繰返し荷重による影響をどう評価するか、という問題があるが、一応図4.5のように対応させることができよう。実際には、部材耐力、荷重に対しそ



*設計条件によってひびわれ幅の基準が異なり、条件によって鉄筋コンクリート(Ⅳ種)も含まれる。

図4.5 プレストレストコンクリートの荷重—変位曲線と構造物に作用する荷重との対応

それぞれ安全率を考慮するので、直接には対応していないが、基本的な考え方としてはこの図で説明される。

また、種々の設計条件を図4.6に示すが、これらの要求に対してP I)、P II)、P III)、P IV)の性質を利用してある程度対応できる。このように、プレストレストコンクリートは種々の設計条件に対しある程度合理的な設計ができるが、現行の設計体系ではPC I種またはフルプレストレッシングに対する要求が強く、破壊性状改善等の評価がない恨みがあり、合理的な設計をするには各技術者の判断が重要である。

しかしながら、CEB-FIPの指針において鉄筋コンクリートとプレストレストコンクリートは本来同一であるという考えがあること、LeonhardtによるI種、II種、III種の区別を廃止するという考え、さらに、現在PC III種とPRCがそれぞれ別の立場から研究が進められているが、いずれも同じ立場で検討する必要がある、といった合理的な設計体系を形成する機運がある。これらの背景と海洋での荷重条件を考えると早期に合理的な設計体系の確立が望まれる。

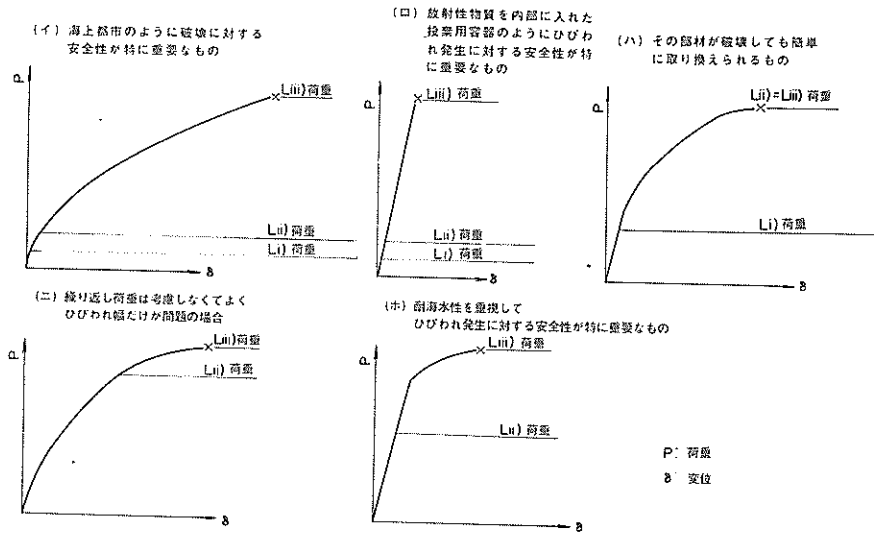


図4.6 種々の構造物に対する要求と部材の荷重—変位曲線

4.2 建設工法に関する問題点

海洋工事は、風や波の影響で作業条件が極めて悪く、できるだけ避けることが望ましい。そのための工法として、静穏な海域で大部分製作して曳航するもの、陸上で製作したプレキャスト部材を曳航して現場で組立てるもの、その2つの組合せとするもの、などが考えられる。また、静穏な海域で大部分製作するものでも、それら相互を接合する必要が生じることも考えられる。本節では以上のような点について述べる。

4.2.1 海洋工事での問題点とプレキャスト化

海洋工事は、陸上工事と比べて自然環境、特に風と波の影響を受けやすい。一般に海洋工事では、種々の作業船を用いるが、作業船は貨物船、客船と比べて耐波性が

良好とは言えず、大部分の作業船は、風速10m/sec以上あるいは波高1.0m以上では作業が非常に困難になると言われている。

波については、湾内または内海と外海とは波浪状況が異なり、一概に述べることはできない。湾内または内海の波浪特性は現地の地形、気象条件の影響を強く受け、また比較的静穏な期間が長く、また予測も容易である。それに対して、外海では静穏な海面を期待するのは難しく、いわんや静穏な日々を連続して期待するのはさらに困難である。その1例として、作業可能限界といわれている有義波高 $H_{1/3}$ が1.0m以下となる日、つまり作業可能日が何日間続くかを、太平洋の荒波が押し寄せる小名浜港で調査した結果を表4.1に示す(49)。

表 4.1 $H_{1/3} \leq 1\text{m}$ の波の出現率と連続作業の月別可能回数 (小名浜港)

月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	平均	
1日だけの出現率 (%)	30	80	61	60	76	88	89	74	81	41	75	86	74	
2日連続出現率 (%) 1958~66年平均	58	62	40	33	48	69	72	51	52	17	50	62	52	
2日連続出現回数 1958~66年平均	9.0	8.6	6.3	5.0	7.4	10.3	11.1	7.9	7.8	2.6	7.5	9.7	7.8	
2日連続出現回数 1966年実績	12	8	8	5	7	7	13	10	8	7	5	8	8.2	
連続作業 の月別 可能回数 (1966年 実績)	1日作業	27	17	17	14	17	19	27	23	18	16	16	18	19.1
	2日作業	12	8	8	5	7	7	13	10	8	7	5	8	8.2
	3日作業	7	3	2	1	3	4	8	6	4	4	4	4	4.2
	4日作業	5	3	2	0	1	2	6	4	3	2	0	1	2.4
	5日作業	4	2	0	0	1	6	4	3	2	1	0	0	1.9
	6日作業	3	1	0	0	1	2	3	2	2	1	0	0	1.3
	7日作業	1	1	0	0	0	2	2	2	2	1	0	0	0.9

コンクリートを現場施工する場合、最低2日は必要であると考え表4.1を参照すれば月平均8日しか作業できず非常に能率が悪いことがわかる。さらに、波浪状況を完全に予想することができるという条件で、月平均8日という日数の工事が施工できるということであり、実際には施工のための準備があるから、施工可能日を事前に予測せねばならぬので、予測の精度も考慮せねばならず、条件はさらに悪いと考えられる。

このため、既往の港湾工事においてはケーソン、セルラーブロック等のプレキャスト部材が使用され、北海の貯油タンク建設においても同じ概念でのプレキャスト構造物が使用されている。このように、従来より海洋構造物にはプレキャスト製品が用いられていた。

同じ理由で今後プレストレストコンクリートを海洋構造物として用いる場合でも、当然プレキャスト化が考えられるが、従来のケーソン、セルラーブロックとは異なり、海洋構造物は大型なのでプレキャストパネル、プレキャスト部材等を組立てて大型構造物に組上げてゆくことになるが、一方、構造物は一体の構造として厳しい波浪等に耐えていかねばならず、部材相互の接合を完全にしかも手際よく行うことが要請されることになる。

また、北海の貯油タンクのような点としての構造物であれば、構造物全体を静穏な海面で組立てる建設工法が採用できるが、浮防波堤のような線、海上空港のような

面の構造物では建設全体を静穏な海面で接合することは不可能となり、やはり現位置における接合が必要となり、完全でしかも施工性のよい接合技術の開発が今後の大きな問題となろう。

4.2.2 種々の分野におけるプレストレストコンクリートのプレキャスト化

近年、種々の分野においてプレキャスト部材を用いる工法が増加する傾向にある。その理由としては次のことが考えられよう⁴⁾¹⁰⁾。すなわち、近年、熟練工の不足に加えて賃金の高騰があり、現場打ちコンクリートの適用分野を広げることは難しい。このような背景もあって、従来の工法からプレハブ化、工業化への転換が進められている。アメリカにおいては、工場製のけたに対してはPCIが数種の標準形を製作し、その使用を推奨している。また、日本でもこれらの部材のJISが行われている。その他、コンクリート床板、壁パネルなどの販売量も年々増加の一途をたどっている。このように、現場打ちコンクリートによる建設工法は、製品を工場で経済的に製作し現場ではそれを組立てるだけといった工法に順次変わっていくものと考えられる。

また、コンクリートを工場生産した場合、その品質は向上する。従来、プレストレストコンクリート用の現場打ちコンクリートは28日圧縮強度で300~500kg/cm²

程度を期待していたのに対し、工場製品の場合、550～850 kg/cm²程度が十分確保される。このように、品質の向上したコンクリートにプレストレスを導入して用いれば、部材の断面寸法を小さくできるばかりでなく、構造物の死荷重の軽減にも大いに役立つのである。

今後、プレキャスト化の動きは建設工事全般にわたって進展すると思われるが、我が国で最もプレキャスト化が進んでいるのは橋梁であろう。本節では、橋梁における施工例を中心にその2～3の例を紹介する。さらに、工場製品として、PCパイルおよびPCパネルについて、その概要および施工例を紹介する。

(1) 橋梁における施工例

橋梁をプレキャスト化する場合、もつとも簡単なものは、下部工を現場施工し、上部工として工場生産したプレキャスト部材をそのまま使用するものである。この工法は、比較的小さな橋(長さ20m程度以下)において、多数用いられている。

大規模な橋梁をプレキャスト化する場合、プレキャスト部材を架設現場で継ぎ合わせて、プレストレスを導入し一体化した構造物とすることが多い。この工法は、PCブロック工法とも呼ばれ、1950年頃から世界各地で種々の橋梁が建設されている。このうち、国外および国内における代表例をそれぞれ1例紹介する⁴⁻¹¹⁾。

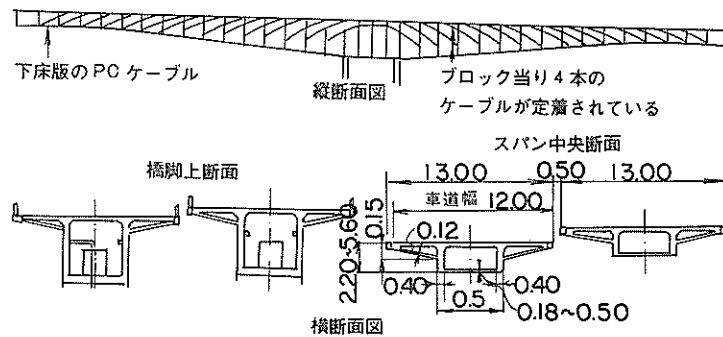


図4.7 シロン高架橋の概要図

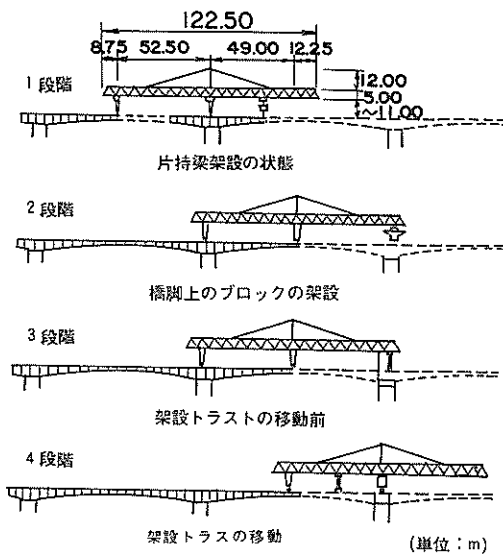


図4.8 シロン高架橋の架設説明図

(a) シロン(Chillon)高架橋

シロン高架橋(スイス、1968～1969)は、ロンドンとナポリを結ぶヨーロッパ高速道路の一部で、スイス国道9号線上、レマン湖畔の山腹を走る高架橋であり、湖面上約100mを通り、平面形状はクロノイド曲線によるS字型である。

この高架橋は、平行に走る上下線よりなり、PCブロック工法で施工されている(図4.7参照)。

ブロックは、現場付近のヤードで製作され、45℃で12時間蒸気養生され、ストックヤードに貯蔵される。その後ブロックはすでに完成した橋梁上を台車で運搬され、架設トラスを用いた片持ばり工法で架設される(図4.8参照)。

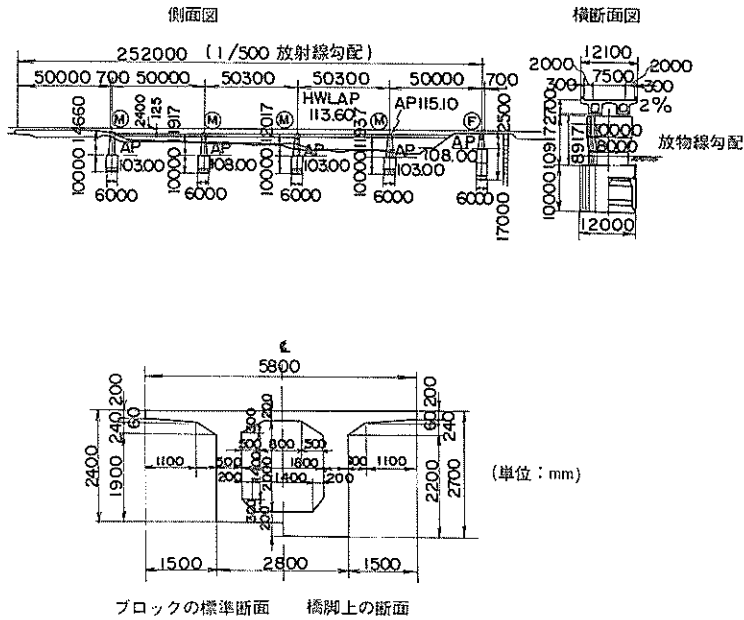


図 4.9 多摩大橋概要図

(b)多摩大橋

本橋（東京都、1968～1969）は、都下北多摩郡多摩川にあり、河川管理上からスパン長を50m以上とすることが要求された。架設地点の地盤は良質な砂れきより成り、十分な支持力が期待でき、鋼橋と比較して経済的なPCブロック工法による片持式架設法が採用された（図4.9参照）。ブロックは、下流の河川高水敷に設けられた長さ25m、2基の製作台で製作された。

この2橋以外にも数多くの橋梁がPCブロック工法により建設されているが、図4.10に代表的な橋梁の建設に用いられたPCブロックの形状、寸法、重量等を示した。

これらPCブロックは精度よく製作されることを要求され、隣接するPCブロックは順次前のブロックの背後打設面を自分の型わくとして使用するのが通例である。PGI指針⁴⁾¹²⁾には、long-line methodおよびshort-line methodの2つが記されている。long-line methodは、すべてのセグメント(PCブロック)を実際

の構造物と同じ状態に並べて製作するもので、型わくを移動させてコンクリートを打設する（図4.11参照）。short-line methodは、型わくを移動させずに図4.12に示す手順でセグメント(PCブロック)を製作する。

このPCブロック工法は、架設が簡単で工期が短縮できる、ブロックの品質が良い、等の利点があるが、その反面、目地（接合部）が欠点となりやすい、ブロックに精度が要求され大型部材になるほど乾燥収縮、クリープ等により精度の確保が難しい、などの短所がある。

また、我が国では近年、鉄道橋（鋼橋）の騒音が社会問題化しており、スパンの長大化という問題も加わり、PCトラス橋が有力な構造として考えられている。ここでは岩鼻架道橋について述べる⁴⁾¹³⁾。岩鼻架道橋は、橋長46.3m、スパン45.0mの単線下路PCトラス橋であり、山陽新幹線広島車両基地の入出庫線として架設された。本橋には高強度コンクリートを使用し、主部材には設計基準強度 $\sigma_{ck} = 800 \text{ kg/cm}^2$ のコンクリートを使用している。

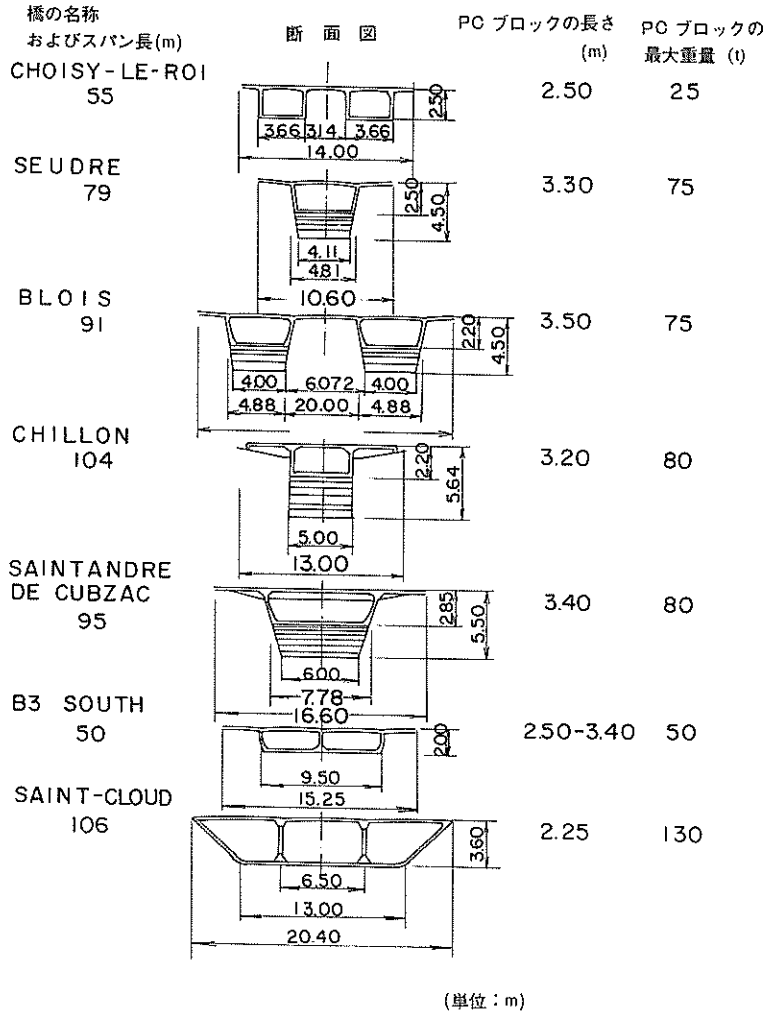


図4.10 種々の橋梁におけるPCブロックの形状および重量

本橋のプレキャスト部材の製作は次のようである。トラスの三角形を構成する弦材、斜材、上下格点の接合方法はすべて接着目地としており、誤差に対する余裕がほとんどなく、工場敷地内でトラスの側面を横にして一体化した状態でコンクリートを打設した。硬化後、各部材を分解して現場まで運搬して、部材を組立てる方法とした。また、本橋の架設手順は、図4.13に示すようである。

(2) 建築における施工例

建築の分野においても、プレストレストコンクリートの使用、プレキャスト化の研究および施工は年々増加している。そのなかで、プレキャスト部材を用いた8階建程度の量産住宅構造の概要(建研式PSI法とも言われ

る)について紹介する⁴⁻¹⁴⁾。

この住宅は、図4.14に示す+、L、TおよびI形の壁柱および図4.15に示すはり部材から成っている。この壁柱とはりを鉛直方向に積み重ねて基礎に定着させ、各部材を貫通するPC鋼材を各階でカップラー接続しながら4階まで組立てる。4階で一度PC鋼棒を緊張定着し、グラウトを行った後、さらに上部を組立てる。図4.16に接合部の構造概要を示す。

また、海外においてもプレキャスト部材を用いたプレストレストコンクリート建築物は多く、その例として、クリンカー貯蔵タンクに用いたもの⁴⁻¹⁵⁾を図4.17に、また、Logan空港駐車場に用いたもの⁴⁻¹⁶⁾を図4.18に示す。

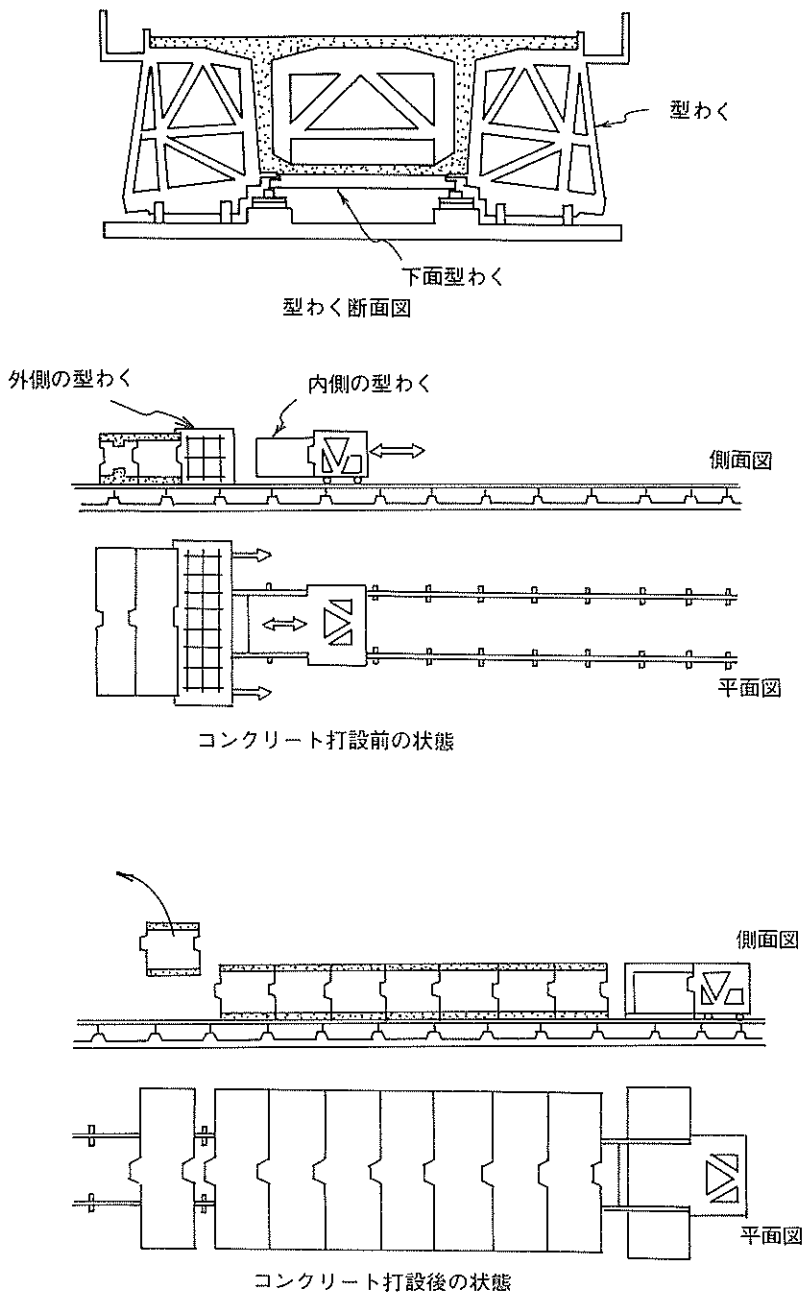
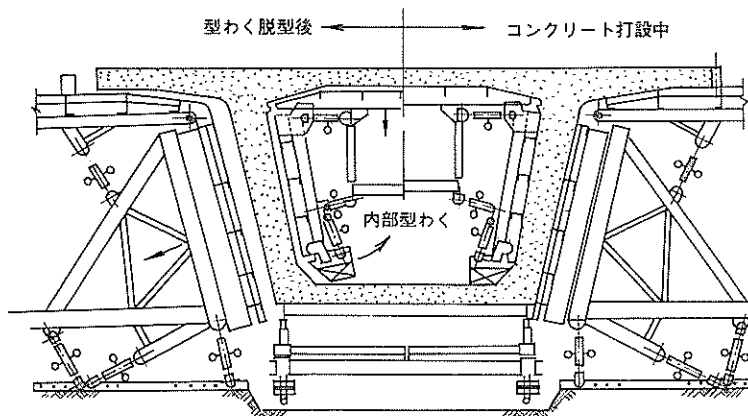


図4.11 long-line method の概要図



Short-line method の型わく

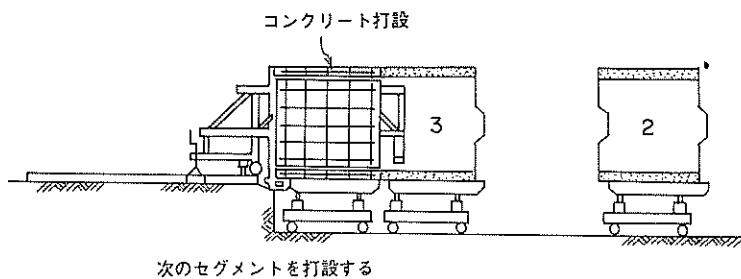
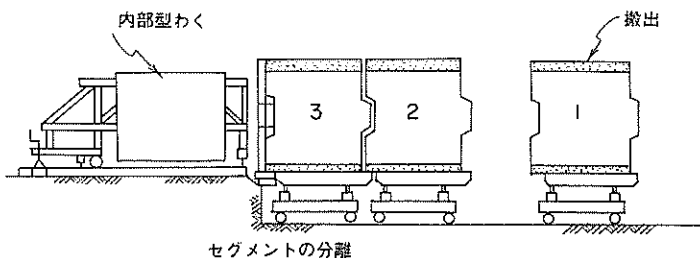
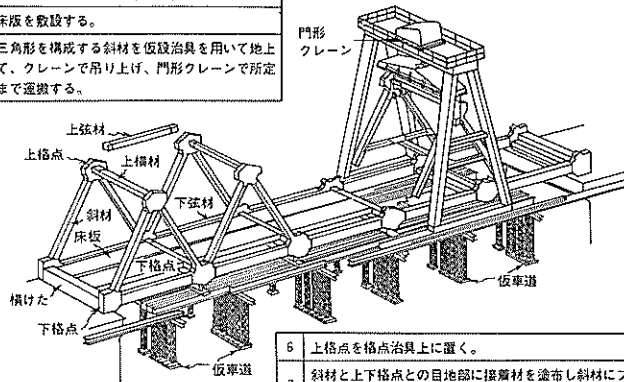


図4.12 short-line method の概要図

格 工 手 順	
1	下弦材、下格点を所定位置に接着材を用いて配列し、一次プレストレスを与える。
2	横けたを配列し、格点との目地部並びに横横けたコンクリートを打設、硬化を持ってプレストレスを与える。
3	下弦材に二次プレストレスを与える。
4	床組用床版を敷設する。
5	一つの三角形を構成する斜材を仮設治具を用いて地上で組立て、クレーンで吊り上げ、門形クレーンで所定の位置まで運搬する。



6	上格点を格点治具上に置く。
7	斜材と上下格点との目地部に接着材を塗布し斜材にプレストレスを与える。
8	上横材を仮設治具上にのせその目地部にコンクリートを打設、硬化を持ってプレストレスを与える。
9	上弦材を配置し、目地部にコンクリートを打設する。

図 4.13 岩鼻 PC トラス橋施工概要図

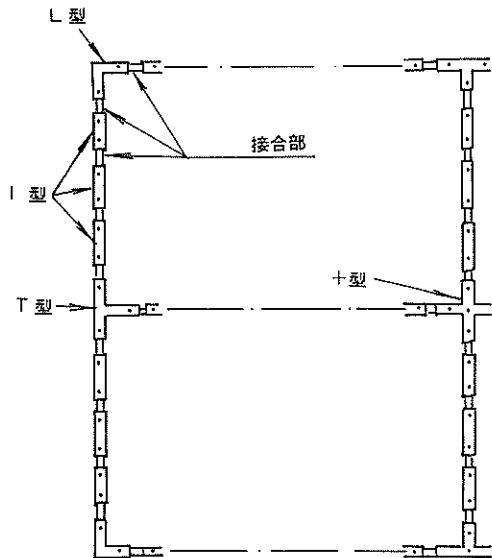


図 4.14 PC 住宅壁伏図

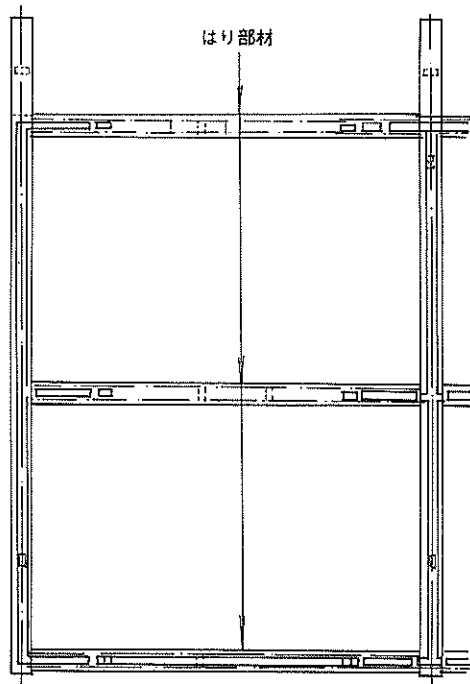
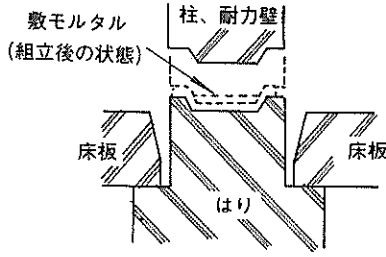
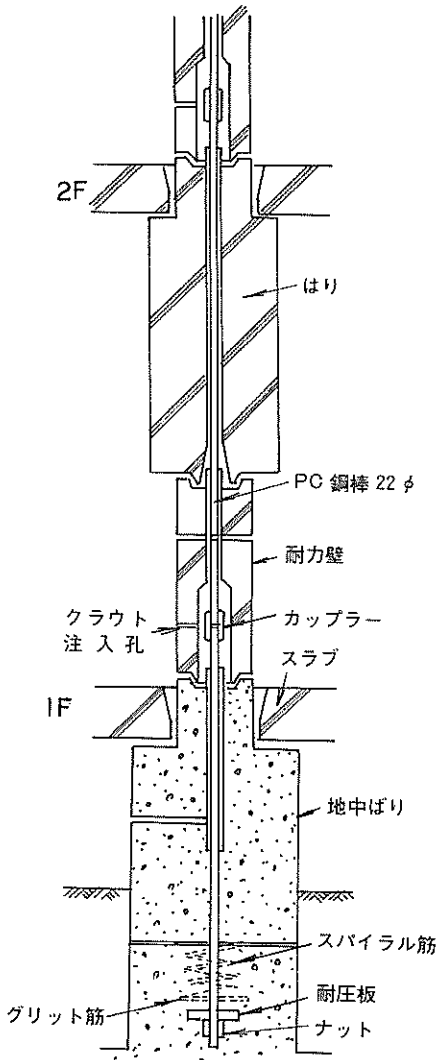


図 4.15 PC 住宅はり伏図



(a) 柱・はり接合部詳細



(b) PC 鋼棒ジョイント詳細図

図 4.16 PC住宅接合部構造概要図

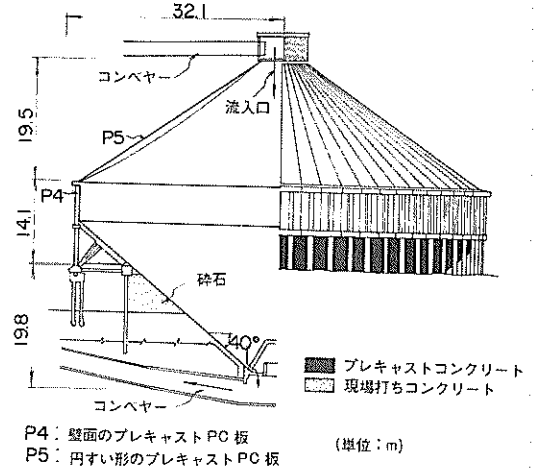


図 4.17 プレキャスト PC 部材を用いた
クランカー貯蔵タンク

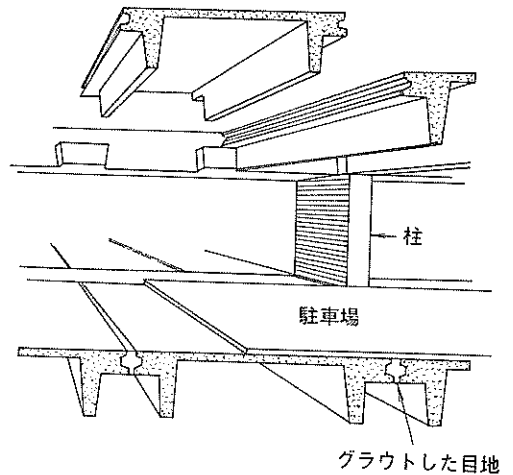


図 4.18 プレキャスト PC 部材を用いた
駐車場建設の概要図

(3) PC パイルについて

工場生産されるプレキャストプレストレストコンクリート製品として最も多く用いられているものの1つとしてPCパイルがある。

我が国では戦前より、遠心力を利用して製作したRCパイルが用いられてはいたが、本格的に使用されはじめたのは1950年代の後半からである。しかし、遠心力RCパイルには多くの不満足な点があった。すなわち、運搬途中および設計応力に対して容易にクラックが発生すること、打撃施工時に頭部破損が起きやすいことなどである。このような問題点の多くは、PCパイルによって解

決される。我が国では1962年に遠心力プレテンション方式のPCパイプが実用化され、首都高速1号線の東品川海上さん橋に採用されたのが最初であり⁴⁻¹⁷⁾、その後需要は急増し1973年には遠心力コンクリートパイプ全体の80%を占めるにいたっている。

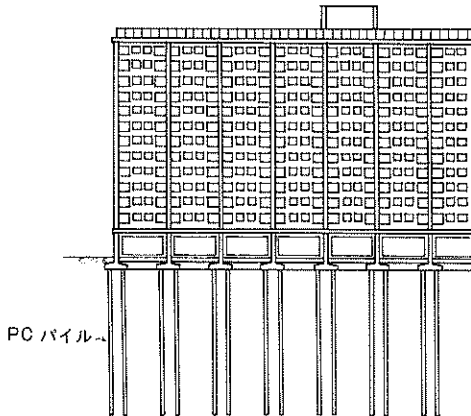
PCパイプの概要は次のようである。我が国ではPCパイプの大部分は遠心力締固め成形方法によって製造されている。遠心力締固め成形方法は、車輪の上に型わくを載せて回転させ、このとき生じる遠心力によってコンクリートを締固めるものである。この方法は、中空円筒形の製品をつくるには能率のよい方法である。さらに、型わくの回転能率等を考えて早期脱型の方向へと進み、常圧蒸気養生、高温高圧養生（オートクレーブ養生）が実用化されている。

また、従来のPCパイプは圧縮力に対して設計されていたが、用途の多様化に対応して曲げに対してもプレストレス量を変化させ設計することができる。

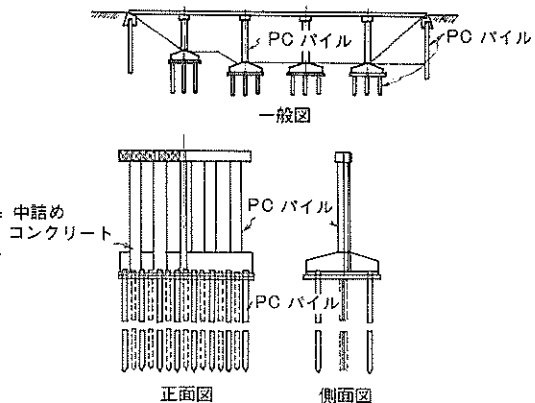
さらに、オートクレーブ養生したPCパイプは、コンクリート圧縮強度 $800\text{kg}/\text{cm}^2$ 以上であり、コンクリート中に有離石灰もなく、耐海水性、耐硫酸塩性にすぐれていると言われる。

現在、PCパイプは高層ビルなどの巨大な建物の基礎ぐい、プレハブ建築などの柱材、道路橋の橋脚および基礎等として用いられている（図4.19参照）。しかしながら、海洋構造物への使用例は少なく、その理由の1つとして、耐海水性にすぐれ、施工が容易で、しかも経済性にすぐれた接合法のないことが挙げられる。

高層ビルなどの巨大な建物の基礎として



道路橋などの橋脚およびその基礎として



プレハブ建築などの柱材として

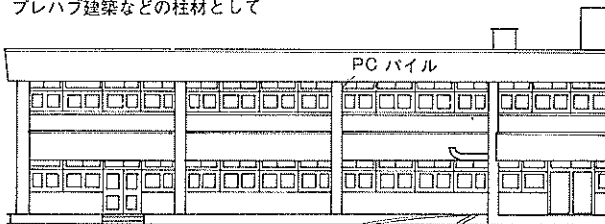


図4.19 PCパイプ使用例

(4) PCパネルについて

PCパネルも工場生産され、幅広い用途を有している。La Guadia空港においてもPCパネルが型わくを兼ねた形で使用されている。我が国では、トンネルの天井板として、さらには地下連続壁工法のパネル板として⁴⁻¹⁸⁾

も多く用いられている。

ここでは、プレキャストPCパネルを型わくとして用いる場合の構造および問題点を紹介する⁴⁻¹⁹⁾。この方法は図4.20に示すPC板を図4.21に示すように橋桁間に敷設し、これを型わくとして鉄筋を組みコンクリートを

打設するものである。場所打ちコンクリート硬化後に床板に作用する死荷重および活荷重に対しては、PCパネルと場所打ちコンクリートとがPCパネルにあらかじめ埋設されたスパイラル筋および付着によって一体化された床板として機能するものである。この試験結果によれば、施工時および静的荷重に対してはほとんど問題ないが、動的荷重に対しては合成桁としての機能に問題があると報告されている。

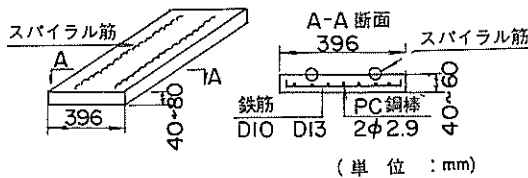


図4.20 プレキャストプレストレストコンクリート板

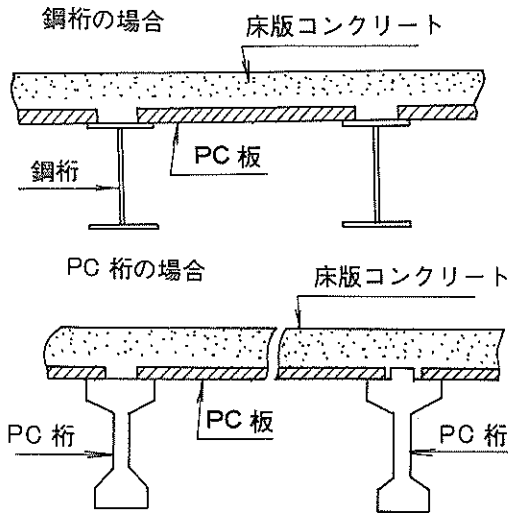


図4.21 PC板を用いた鋼桁およびPC桁

以上で、プレキャスト部材を用いたプレストレストコンクリート構造物の概略を述べた。このような構造形式は年々増加すると考えられるが、構造上最も大きな問題は接合部であろう。その理由として、接合部は現場施工であること、構造物の一体性は接合部によって失われやすいことなどが挙げられる。

4.2.3 海洋構造物のプレキャスト化と接合法

プレキャスト部材を用いたプレストレストコンクリート海洋構造物を考えた場合、最大の問題点は接合法であると考えられる。ここでは、一般的な接合法を述べるとともに、プレキャスト部材を用いたプレストレストコンクリート海洋構造物の建設順序を考察し、どのような接合法が望ましいか検討する。

(1) 接合法の種類

接合法の分類にはいろいろな方法があるが、ここでは表4.2のような分類とした。これらの接合法について、文献(4-20) (4-21) (4-22)を参考として説明する。

表4.2 種々の接合法

プレストレスを用いないもの	コンクリートまたはモルタル目地を用いる接合
	鋼材を溶接して接合
プレストレスを用いるもの	機械的に接合
	ボルト継手
	ロック機構継手
	リング継手
	くさび継手
	スリーブ継手等
プレストレスを用いるもの	コンクリートまたはモルタル目地を用いる場合
	グラウトまたはドライパッキング目地を用いる場合
	樹脂を目地とした接合
	から目地とした接合

プレストレスを用いずにコンクリートまたはモルタル目地を用いて接合する方法を図4.22に示すが、どのような工法であれプレキャスト部材にプレストレストコンクリートを用いた場合には接合部が弱点となろう。

プレストレスを用いず鋼材を溶接して接合する工法の1例として、PCパイルの溶接継手を図4.23に示す。この接合法は全強継手となりうるが、腐食代をとること

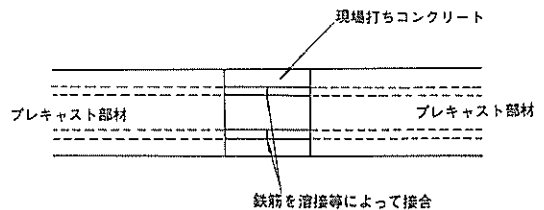


図4.22 プレストレスを用いずにコンクリートまたはモルタル目地を用いた接合

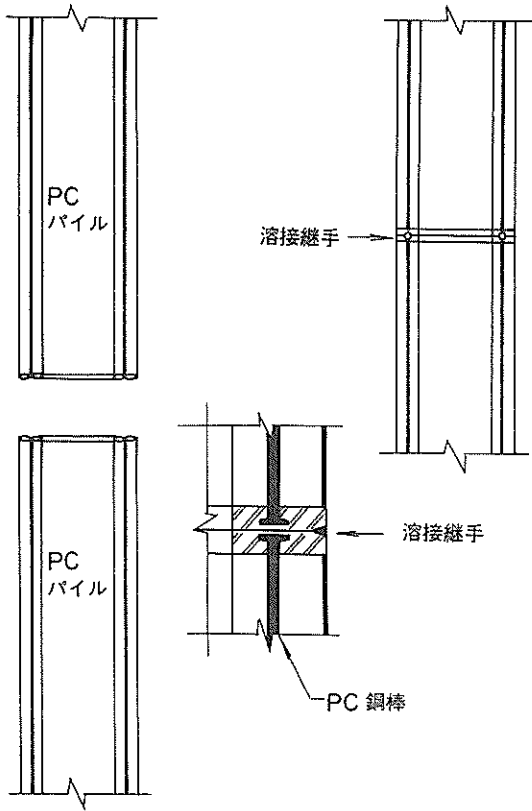


図4.23 PCパイル溶接継手

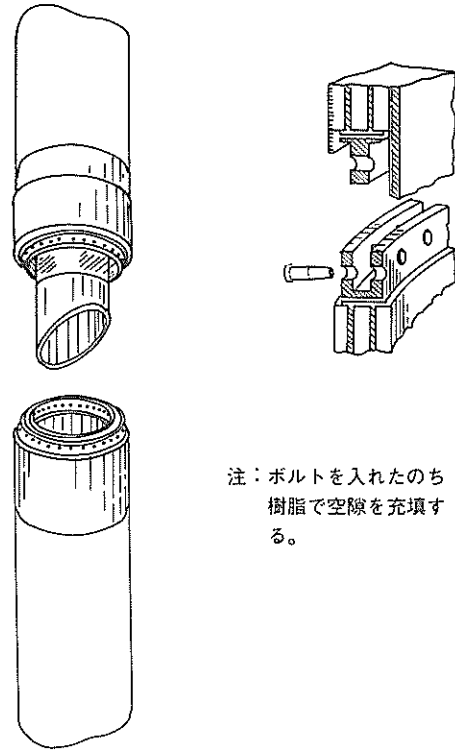


図4.24 PCパイルのロック機構継手

および信頼性の面でPCパイルのもつ長所を半減させる。

プレストレスを用いずに機械的に接合する方法は、さらに分けるとボルト継手、ロック機構継手、リング継手、くさび継手、スリーブ継手等があり、いずれも圧縮力に対しては問題はないと思われるが、曲げ、引張り荷重が繰返される場合は問題が生じると思われ、また、耐海水性も問題である。耐海水性に関しては図4.24に示すロック機構継手がよいと言われているが、施工に難点がある。

以上、プレストレスを用いない接合法を概略紹介したが、静的荷重に対しては十分であると思われ、施工もプレストレスを用いるものに比べて簡単であるが、繰返し荷重に対する一体性およびプレストレスコンクリートのもつひびわれ特性を接合部がもたないため不満足なものが多い。そのため、施工上はともかく、構造上はこれより述べるプレストレスを用いた接合法が望ましい。

プレストレスを用いてコンクリートまたはモルタル目地とした接合法の基本形を図4.25に示す。この接合法

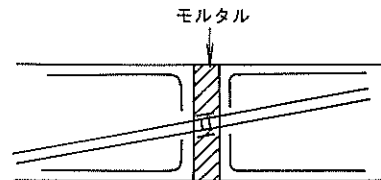
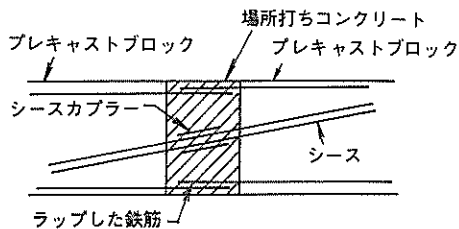


図4.25 プレストレスを用いてコンクリートまたはモルタル目地を用いた接合

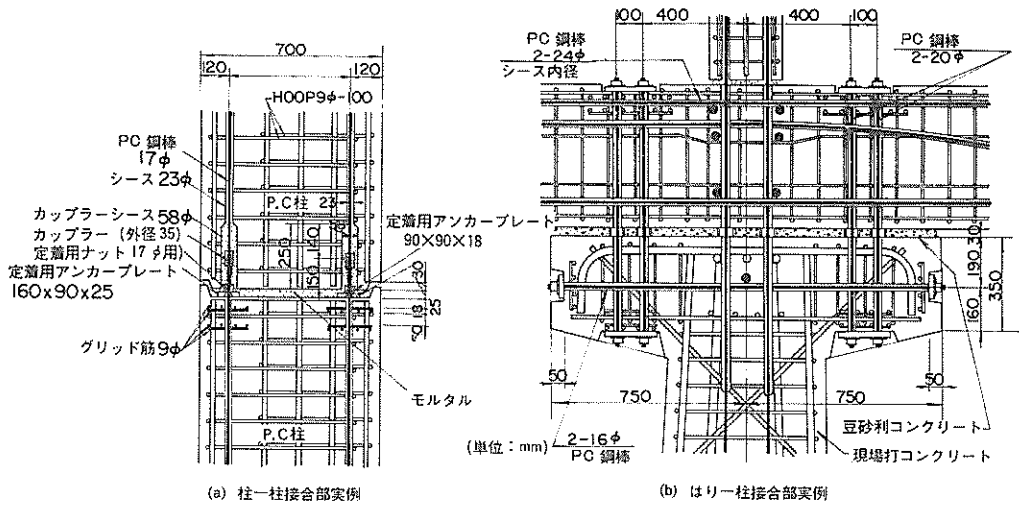


図4.26 建築におけるプレキャスト部材接合例

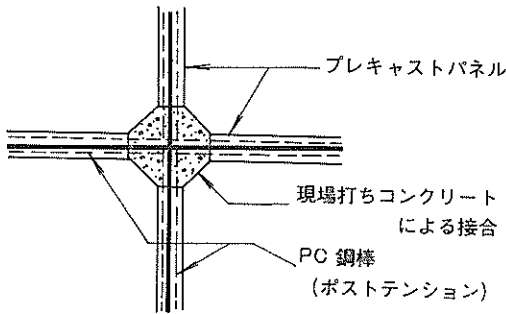


図4.27 PCバースにおける接合法 (現場打コンクリートを用いたもの)

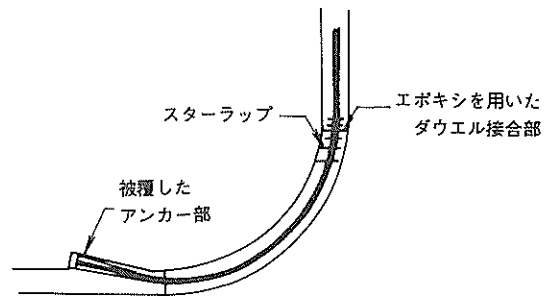


図4.28 PCバースにおける接合法 (樹脂を用いたもの)

は建築におけるプレキャスト部材の接合法 (図4.26 参照) および PC バースにおける接合法 (図4.27 参照) にも用いられている。

接着剤を用いた目地は、目地厚は1mmの数分の1以下で、両接合面は完成に一致するように作られる。この目地を用いると短時間でプレストレスを導入することが可能となり、前述のPCブロック工法による橋梁の接合はほとんどこの接合法であり、PCバースにおいても用いられている (図4.28 参照)。

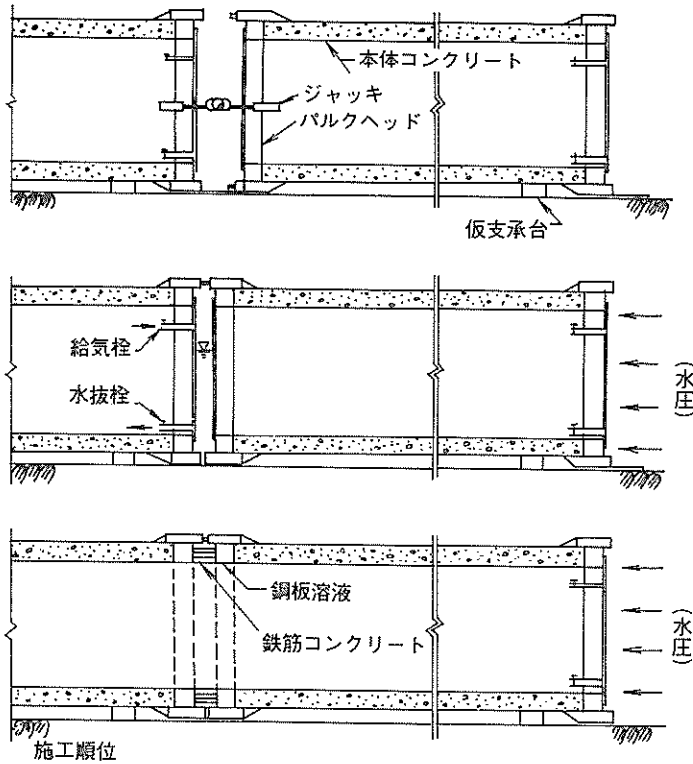
その他のグラウト、ドライパッキングあるいはから目地は、あまり重要でない部材以外には用いられていない。

施工性から考えると、現場でプレストレス作業を行うのは、その分だけ機材および技能を要し、必ずしも得策ではない。しかし、構造物の一体性から考えると、接合

部にプレストレスを導入しなければ、プレストレスコンクリートを用いた意味が半減する。また、プレストレスを用いた接合法では急速施工という面からは樹脂を用いた方がよいが、一般に接合面が海水等で湿っており接着力の低下が心配される。また、PRCのように鉄筋が用いられている部材の場合には、コンクリート目地とする必要がある。さらに、プレストレスを用いた接合法では海中で接合することは非常に困難である。

海中での接合という問題では、プレストレスを用いない接合法でも困難ではあるが、例えば、溶接継手あるいは図4.29に示す沈埋トンネルに用いる方法で可能である。

結局、現有の接合法では不満足な点が多く、場合によって種々の接合法を検討する必要がある。



- ① バルクヘッド撤去
- ② 鋼板溶接
- ③ 鉄筋コンクリート打設

図4.29 沈埋管の接合（衣浦港海底トンネル）

(2) プレキャスト部材を用いたプレストレストコンクリート海洋構造物の建設手順および接合法

プレキャスト部材を用いてプレストレストコンクリート海洋構造物を建設する手順は種々あろうが、それらをまとめると図4.30のように考えられる。この図で(㊦)の海洋構造物は3章で述べたあらゆる海洋構造物を対象としている。

プレキャスト部材の生産から順に述べると、プレキャスト工場では、一般に製品を陸上輸送する関係上、部材の寸法20m程度以下、重量20t程度以下のものが考えられる。プレキャスト工場が海に面してそのまま海上輸送が可能な場合は、それより大型のプレキャスト部材の生産が可能である。また、プレキャスト化の利点として大量の同一製品を生産することでコストを下げることから、将来は海洋構造物の構成部材を整理、統合して基本的な部材を数種類選択して（例えば、十、L、I形といったもの）、それらを大量生産することになるかもしれない。これらプレキャスト部材は、そのまま建設現場に

運搬して用いるもの、例えば、L形ブロック、PCパイプ等およびドライドック、海上においてさらに大型部材の製作に用いるものに分けられる。

次に、(㊦)の部材を、主としてドライドック等の陸上部で組立てるものについて述べる。従来のケーソンもこれに属するが、ここでは主として工場生産されたプレキャスト部材を接合してケーソン等を含めた部材を製作すること、すなわち、比較的小型のプレキャスト部材を接合し、寸法としては20~100m程度、重量数千トンの大型プレキャスト部材を組立てることを考えている。この段階では、小型プレキャスト部材相互の接合であり、陸上部でもあるのでコンクリート打設も比較的容易であり、プレストレスを用いたコンクリート目地による接合法が有利であると考えられる。この理由としては、この接合法は構造的にはほとんど問題なく、接着剤を用いたものに比べてプレキャスト部材の精度はそれほど要求されず、また、主鉄筋相互も接合できるため、あらゆるプレキャスト部材に適用できるからである。ここで組立てられる

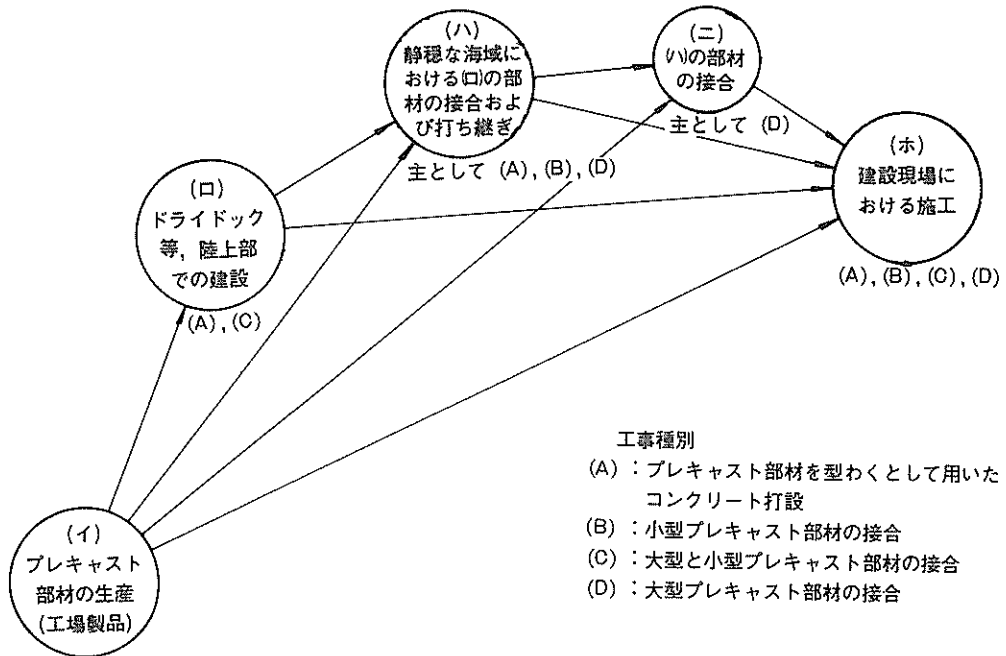


図4.30 プレキャスト部材を用いたプレストレストコンクリート海洋構造物の建設手順および接合法

大型プレキャスト部材は、そのまま建設現場へ曳航されるものと、静穏な海域においてさらに大型なものへと建設されるものがある。

次に、(イ)の段階では、(ロ)で建設したプレキャスト部材を相互に接合し、あるいはコンクリートを打ち継ぎ、さらに大型のプレキャスト部材を製作する。コンクリート打ち継ぎを行う場合、例えば北海貯油タンクの穴あき防波壁の建設のように、小型プレキャスト部材を型わくに兼ねて用いることも有力な手段である。この段階では、図に示すあらゆる接合法が必要となるが、特に大型プレキャスト部材の海上での接合法は困難である。また、(イ)の段階として、(ハ)で建設した大型プレキャスト部材をさらに接合することも考えられる。

最後に、建設現場における施工であるが、ここではあらゆる接合法が考えられる。(イ)の段階と異なる点は、(イ)より海象条件が厳しく、それだけ急速施工および工法の簡略化が望まれる。接合法としては急速施工の面からプレストレスを用いた場合は、硬化時間の短い樹脂目地としたもの、また、プレストレスを用いない場合は鋼材を溶接するものおよび機械的に接合するものが考えられる。樹脂目地の場合、プレキャスト接合面に相当の精度が要求され、特に大型プレキャスト部材の接合に用いるのは

かなり困難と思われる。また、プレストレスを用いない接合法は、施工上は可能であるが、一体性または耐海水性の面で困難な問題を生ずるとと思われる。また、コンクリート打設を伴う接合法は硬化時間の面で、海象条件によっては問題となる。結局、プレキャスト部材を用いた場合でも建設現場での施工は最小限にすることが最もよい解決法と思われる。

また、プレストレスを用いた接合法における施工の簡略化については、アンボンド工法の採用も有力な手段である。この工法は、ポストテンション方式⁴⁻²³⁾においてグラウト作業が省略できるため非常に施工が簡略化される。現在我が国では、この方式では破壊耐力が低くなることおよびびびわれ性状がよくないため、あまり使用されないが、今後見なおされるものと考えられる。

4.3 その他の問題点

4.1, 4.2 で設計上および建設上の問題点を述べた。ここでは、その他の問題点として、プレストレストコンクリートの使用材料および耐海水性に関して述べる。これらは、設計または建設上の問題にも含まれる事項ではあるが、若干異なった要素も含んでいる。

4.3.1 プレストレストコンクリートの使用材料

一般に、プレストレストコンクリートに用いる鋼材およびコンクリートは高品質のものを要求されるが、海洋構造物として用いる場合、耐海水性を考慮してさらによい品質のものが要求される。PC鋼材については、腐食、特に応力腐食に対する抵抗が大きなものが望まれる。コンクリートについては、コンクリート自体の海水作用による強度低下を防ぐとともに、内部鋼材への有害物質の浸透を防ぐという2つの性質が要求される。

コンクリート自体の劣化に対しては、FIP指針、土木学会指針および文献⁴⁻²⁴⁾を参照すると、i) C₃Aの量に関する規定(FIP指針では8%以下)、ii) 水セメント比に関する規定、iii) 骨材に関する規定、iv) 水質に関する規定、が主なものとして挙げられる。おおよそ、これらの規定を守れば、耐海水性の高いコンクリートとなる。

しかしながら、我が国の骨材事情を考えると、iii) 骨材に関する規定、を必ずしも守れない場合が現実と考えられる。特に、細骨材に関しては海砂の使用量が増大し、塩分含有量が大きな問題となっている。例えば、「海砂の絶乾重量に対しNaClに換算して0.01%」を許容限度とする規定に従う場合、水で洗う方法、良質の砂と混合する方法、野積にして塩分含有量が下がるのを待つ方法、のいずれにしろ相当困難である。この場合、あくまで許容限度を守るのが最も望ましいが、他にも対策が考えられる。1つは、塩分の効果を相殺するような防錆剤の使用であるが、これは我々土木技術者としては開発を期待する性質のものである。もう1つは、プレストレスを与える緊張材としてFRPのように腐食の心配のないものを使用することが考えられる。FRPを緊張材としたプレストレストコンクリートの性状は、鋼材を緊張材としたプレストレストコンクリートに比べて付着がよくないといった問題はあるが実用化は可能である⁴⁻²⁵⁾。

さらに、海砂を塩分含有量に関係なく使用できるプレキャストプレストレス部材の応用例を提案する。これは、PCパネルおよびPCロッド(コンクリートのロッドにプレストレスを導入したもの)を工場生産し、PCパネルを型わく、PCロッドを鉄筋として用い、海砂、さらには海砂利を用いたコンクリートを打設し、一種の合成構造として使用する⁴⁻²⁶⁾のである。PCロッドを合成ばりとして用いた研究⁴⁻²⁶⁾によれば、十分実用性はある。

4.3.2 ひびわれについて

プレストレストコンクリートを海洋構造物に用いる場

合、使用者が最も警戒するのはおそらくPC鋼材の応力腐食であると考えられる。コンクリート内部における応力腐食は定量的には把握されておらず、内部のPC鋼材がどの程度腐食しているか、また、どのような条件で腐食するかが未解決のため、なおさら不安が残る。

それゆえ、海洋構造物でプレストレストコンクリートを用いる際、I種で設計するという傾向があるのは無理からぬことである。しかし、前述したように、I種という概念は波力の不規則性には対応できぬものであり、また、設計する荷重によっては危険な設計法ともなる。かつて1度ひびわれが起こった構造物はもはや使用できないのか、また、1年間に1回程度ひびわれが発生する構造物はどう扱うのか、といった問題も今後検討してゆかねばならない。

おそらく、常時ひびわれが発生しているプレストレストコンクリートのPC鋼材は応力腐食で破断するであろうし、1年間に1回程度ひびわれが発生する程度では腐食しないと思われるが、その定量的な検討は今後の問題として残っている。

5. おわりに

海洋という未知の分野に高さが数10mあるいは100m以上の大規模な構造物を建設するには色々解明してゆかねばならない問題点は多々ある。主な外力である波が不規則であり確率的に理解せねばならないため、設計および安全性に対する取扱いがあいまいとならざるを得ない。

また、建設地点における海洋工事は、波や風のため、作業条件ははなはだ厳しいものとなる。

これらは、特にプレストレストコンクリート固有の問題ではなく、使用する材料に関係なく発生する問題で、一般的なものとして解決されるべき問題である。

現在、種々の海洋構造物がプレストレストコンクリートを用いて建設されているが、現在のところその使用割合は必ずしも大きくない。この理由として次の2つが考えられる。1つは、プレストレストコンクリートの利点は定性的には認められてはいるが定量的ではなく、利点を生かせる設計体系がないことである。もう1つは、海洋におけるプレストレストコンクリートの施工法が、特殊なものを除き確立していないことである。

前者に対しては、例えば耐海水性に優れていると言われているが、その定量的な把握ができていないため、設計にその利点を生かせない。また、鉄筋コンクリートとプレストレストコンクリートは本質的には連続しているものでありながら、設計上不連続となっているため、

合理的でない面が生じていることも挙げられる。

後者に対しては、高品質の材料を使用することおよび海洋工事の困難さを考えると、プレキャスト化が望ましいと考えられる。

今後、海洋に対する関心とともに、海洋構造物への要望も高まるものと思われ、その建設に際し、海洋構造物部材として優れた利点を有するプレストレストコンクリートを合理的に利用する体系を確立することが必要であると考えられる。

参 考 文 献

- 2-1) 猪股俊司：PCの設計および施工，技報堂，1957年，pp. 1~3.
- 2-2) 横道英雄：コンクリート橋，技報堂，1972年，p 64
- 2-3) 野口 功：プレストレストコンクリート工法，セメント協会，1971年，p 1.
- 2-4) 永野高明：鉄筋コンクリート工学，森北出版，1971年，p 1.
- 2-5) CEB-FIP：コンクリート構造物設計施工国際指針，1970年.
- 2-6) 猪股俊司：PCの設計および施工，技報堂，1957年，pp. 586~594.
- 2-7) Robert F. Mast：The ARCO LPG Terminal Vessel，1975年.
- 2-8) Ben C. Gerwick Jr：Prestress Concrete Structures and Ships，1975年.
- 2-9) 猪股俊司：Ⅲ種プレストレストコンクリート，コンクリートジャーナル，Vol. 12, No.9, 1974年9月，pp. 1~13.
- 2-10) 横道英雄：PRCの設計方法について，プレストレストコンクリート，Vol. 15, No.4, 1972年8月，pp. 3~10.
- 2-11) Fritz Leonhardt：To new frontiers for prestressed concrete design and construction, PCI Journal, 1974, Sept-Oct pp. 54~69.
- 3-1) 関 博，堀井義一：建設後20年を経過した鉄筋コンクリートさん橋の劣化状況調査，港研資料，No. 255, 1977年3月，pp. 1~53.
- 3-2) 港湾技術研究所：明日への港湾技術，1976年10月，p 67.
- 3-3) 益田善雄：浮防波堤と海洋工事，橋梁，1976年2月，pp. 40~45.
- 3-4) A. R. Anderson, 山本泰彦訳：最近のアメリカにおけるプレキャストプレストレストコンクリートによる建設工事の進歩，コンクリートジャーナル，1973年10月，pp. 77~81.
- 3-5) Fritz Leonhardt：To new frontiers for prestressed concrete design and construction, PCI Journal, 1974, Sept-Oct, pp. 54~69.
- 3-6) 金子信夫，荻野賢治：PCバージの諸設備とその性能，海洋開発，Vol. 9, No.1, 1976年1月，pp. 62~72.
- 3-7) 関 博，古賀尚宏：海洋環境におけるプレストレストコンクリートの耐久性，港研資料，No. 191, 1974年6月，pp. 1~30.
- 3-8) T. Y. Lin：The future of prestressed concrete-A long look ahead, PCI Journal, 1976, Sept-Oct, pp. 204~214.
- 3-9) 三井建設(株)：PC工法による洞海湾横断沈埋トンネル工事，1977年.
- 3-10) Anton Brandtzeag：Concrete underwater floating tunnels, Proc of FIP symposium, 1972, Sep, pp. 42~47.
- 3-11) Alan B. Grant：Floating submerged tunnel for the strait of Messina, Proc of FIP symposium, 1972, Sep, pp. 53~60.
- 3-12) 猪股俊司：プレストレストコンクリートを用いた海洋構造物，土木施工，18巻1号，1977年1月，pp. 81~90.
- 3-13) 長崎作治：海洋土木の新しい動き-(3)海洋におけるコンクリート構造物の究明と動向，施工技術，第6巻，第10号，1973年10月，pp. 115~127.
- 3-14) A. G. F. Eddie：Concrete replaces steel in offshore coal-loading terminal, A SCE, 1976, April, pp. 60~62.
- 3-15) Arne Lier：La Guadia runways, ASCE, 1966, Aug, pp. 32~37.
- 3-16) A. J. Harris Seadrome—a floating, airport, Proc of FIP symposium, 1972, Sep, pp. 26~30.
- 3-17) F. Levi et al：Prestressed concrete floating drydock with a lifting capacity of 100000 t, Proc of FIP symposium,

- 1972, Sep, pp. 31~36.
- 3-18) A. A. Yee : Design consideration and configurations—The Yee concept, 1975, Sept.
- 3-19) Arthur R. Anderson : Concrete vessel is star of first totally offshore LPG facility, ASCE, 1976, April, pp. 58~60.
- 3-20) 百島祐信 : PC構造物の現状と今後の課題, 海洋開発, 1976年1月, pp. 35~41.
- 3-21) 長崎作治 : 海洋土木の新しい動き—(3)海洋におけるコンクリート構造物の究明と動向, 施工技術, 第6巻, 第10号, 1973年10月, pp. 115~127.
- 4-1) 小柳 治 : 鉄筋コンクリートに関する各国規定, 鉄筋コンクリート設計法の最近の動向, 土木学会, 1976年, pp. 3~9.
- 4-2) 合田良実 : 波浪の統計的性質とその応用, 第22回海岸工学講演会, 1975年, pp. 1~29.
- 4-3) 谷本勝利 : ケーソン壁に作用する波力と応答計算, 港研資料, No.224, 1975年9月, pp. 1~39.
- 4-4) Ben C. Gerwick, Jr : Current trends in concrete sea structures, PCI Journal, 1976, Sept—Oct. pp. 176~190.
- 4-5) 川田雄一 : 金属の疲労と設計, オーム社, 1962年6月, pp. 215~216
- 4-6) P. W. Abeles et al : Fatigue resistance of under-reinforced prestressed beams subjected to different stress, Miners Hypothesis, ACI SP41—11 pp. 237~277.
- 4-7) Fritz Leonhardt : Shear in Concrete structure 講演, 1976年10月.
- 4-8) ASCE—ACI Committee : The Shear Strength of Reinforced Concrete Members, Proc of ASCE Vol. 99, No. ST6, June 1973.
- 4-9) 赤塚雄三 : 海洋コンクリートの施工上の要点, 土木施工, 1977年1月, pp. 70~80.
- 4-10) Arthur R. Anderson (山本泰彦訳) : 最近のアメリカにおけるプレキャストプレストレストコンクリートによる建設工事の進歩, コンクリートジャーナル, 1973年, 10月号, pp. 77~81.
- 4-11) 池田哲夫監修 : プレキャストブロック工法, 日刊工業新聞社, 1976年8月, pp. 7~27.
- 4-12) John H. Hanson Recommended Practice for Segmental Construction in Prestressed Concrete, PCI Journal, 1975年, March—April, pp. 22~41.
- 4-13) 小須田敏元, 小林栄次郎 : PCトラス鉄道橋, コンクリート工学, 1976年3月, pp. 74~80.
- 4-14) 岡本 伸, 篠沢清見, 中川 淳 : 建築とプレストレストコンクリート, 建築技術, 1975年, pp. 163~178.
- 4-15) William E. Pery : Precast prestressed clinker storage silo saves time and money, PCI Journal, 1976, Jan—Feb, pp. 50~69.
- 4-16) Michael T. A. : Large precast prestressed concrete decks over air right, PCI Journal, 1975年, March—April, pp. 74~86.
- 4-17) 建築技術編集部 : 発明と開発の記録—PCパイプ, 建築技術, 1975年10月, pp. 239~243.
- 4-18) 宮崎義成, 村田 淳, 前原昭一郎 : プレストレストコンクリートパネルを用いた地下連続壁試験施工, 土木施工, 1975年10月, pp. 36~44.
- 4-19) 神田創造, 興水千尋, 大神芳馬 : プレキャストPC板を用いた橋梁床板プレストレストコンクリート, 1973年12月, pp. 28~33.
- 4-20) Robert N. Bruce, David G. Hobert : Splicing of precast prestressed concrete piles Part I—review and performance of splices, PCI Journal, 1974年 Sept—Oct, pp. 70~97.
- 4-21) 池田哲夫監修 : プレキャストブロック工法, 1976年8月, 日刊工業新聞社, pp. 3~4.
- 4-22) 相原俊弘 : プレストレストコンクリート工法, 建築技術, 1976年7月, pp. 294~303.
- 4-23) ACI—ASCE Committee : Tentative Recommendations for Concrete Members Prestressed with unbounded Tendons, ACI Journal, 1969, Feb, pp. 81~86.
- 4-24) Ben C. Gerwick Jr : Prestressed concrete ocean structure and ships, PCI, 1975年, Sep, pp. 14~16.
- 4-25) 長滝重義, 佐藤良一 : GFRP—BARで緊張したPC部材の力学的特性, 東工大研究報告, 1974年12月,
- 4-26) 後藤祐司 : PCロッドを用いた合成部材の複合機構に関する基礎研究, 土木学会第29回年次学術講演会講演概要集第5部, 1974年, pp. 10~13.

港湾技研資料 No. 276

1977・9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 (株)伊東印刷所

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.