

技術展望 水中コンクリートの歴史

HISTORICAL DEVELOPMENT OF UNDERWATER CONCRETE

中原 康*・大友忠典**

Yasushi NAKAHARA and Tadasuke OHTOMO

* 工博・鹿島技術研究所 第二研究部長
(〒182 東京都調布市飛田給 2-19-1)

** 鹿島技術研究所 第二研究部・主管研究員

Key Words : *underwater concrete, tremie, concrete pump, preplaced aggregate concrete, anti-washout concrete*

1. 水中コンクリート施工法の歴史

港湾、沿岸、沖合、河川等で建設される構造物に限らず、都市部での構造物の基礎の多くは、水中または、地下水のある地盤中に設置される。構造物は主に鋼材かコンクリートで構成されるが、その建設にあたっては、長年の間、水中コンクリートは信頼性に乏しいということから、水替えを行いドライにして施工するか、鋼材やプレキャストコンクリートを使用して、水中コンクリートの使用は最小限にとどめるのが、望ましいとされてきた。

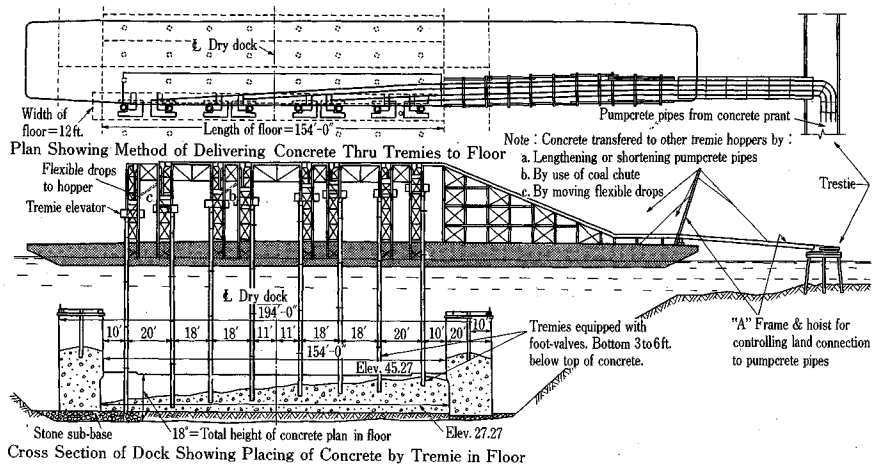
しかし、信頼性の高い品質の水中コンクリートが得られれば、水替を実施せずに施工ができることから、工期、工費を大幅に低減できるので、できるだけ信頼性の高い水中コンクリートを得るための研究、開発が古くから行われ、実用にも供されてきた。水中コンクリートは、古代ローマ時代に始まると言われているが、近代セメントが使用され始めてからは、1856年に木製シュートによって施工されたのが記録に残されている¹⁾。水中コンクリートの施工法として最も標準とされているトレミー工法は、開発時期は定かではないが、この工法によって施工された大工事としては、1906年のDetroit River Tunnelおよび1909年の真珠湾のドライドックの工事が報告されており²⁾、以後主に米国で技術開発が行われ、第二次世界大戦時のドック建設に貢献したとされ、その時の、マッシュな水中コンクリートの施工方法として、ほぼ現在の形の技術が完成していたようである。トレミー工法は装置が簡単で施工能力が大きいことから、その特徴を生かして、広い面積の構造物を施工するための改良工法として、ハイドロバルブ³⁾、KDTトレミー³⁾、NUCS⁴⁾等の各工法が、1969～1974年に欧米や我が国で開発され、実用にも供せられてきた。トレミー工法の使用対象物として、今日でも多用されているものに、場所

打ち杭および地中連続壁がある。これは、掘削機械の発達と用途の拡大に伴った結果であるが、これらは主に欧州で開発され、我が国には1954年にオールケーシング工法(ベノト杭)、1959年に地中連続壁工法が初めて導入され、その後、わが国の建設事情のニーズの増大により、多くの用途拡大があり、高品質の水中コンクリートをトレミー工法により施工する努力が継続して行われている。これらの構造物は、施工面積は狭いものの、地下100m以上の深さのものもあり、我が国独自の掘削技術や水中コンクリートの品質の信頼性を高めるための努力がなされているのである。トレミー工法と共に、バケット工法も今日まで実用に供せられてきたが、信頼性の点では、今一つの観がある。

1938年には、プレパックドコンクリート工法が開発され、一段と信頼性の高い水中コンクリートが施工できるようになり、1957年に完成したMackinac橋、1989年に完成した児島坂出間の本州四国連絡橋の橋脚に大量に使用されたのは記憶に新しい⁵⁾。

コンクリートポンプの発達に伴って、トレミーのホッパーへのコンクリートの供給に止まらず、ポンプ配管に直結したホースまたは打設管によって水中コンクリートを打込む工法も実用にも供されてきたが、この工法で打込まれるコンクリートの性状は、トレミー工法の場合と基本的には同様と考えて良い。

以上の各水中コンクリート工法で注入または打ち込まれたコンクリート(モルタル)は、水中で流動する過程で、周りの水に洗われて分離する傾向があり、配合等を工夫しても限界があり品質低下を招くものであり、それを最小限にするために装置や施工方法を工夫したものといえる。これに対して、1975年西ドイツSIBO社で開発されたハイドロクリートは、コンクリートの性質を混和剤によって大幅に改良し、水の洗い作用を受けてもほ



図一1 トレミー工法によるドック渠底の施工

とが、記録にあるが、その詳細は不明である。1950年前後になると、トレミーで、打込み始めの分離防止に配慮した工法の事例やコンクリートポンプによる間接および直接打込みの事例が報告されている。

(2) 場所打ち杭、地中連続壁

場所打ち杭は、掘削機械の開発に伴って発展してきたものであるが、1900年初期より世界各国で開発されてきたとされるが、我が国では、1954年にベント工法を導入したのが始まりとされている。以来、リバース工法、アースドリル工法等の機械および掘削方法は異なるが、いずれも、地中深く、直径数10cmから最大6m程度の孔に水またはバイトナイト安定液を満たして掘削し、掘削完了後、鉄筋籠を挿入した後にコンクリートをトレミーによって打込むものである。孔底に堆積したスライム処理には配慮が必要であるが、打込まれたコンクリートは流動距離も短く、施工法の原則を守れば、比較的問題は少なく、現在でも多用されている。

地中連続壁についても、場所打ち杭を連続して施工することによって、壁を形成する柱列式地中連続壁工法から始まり、今日の本格的な工法として、各種の掘削機械を使用し、多くの用途に活用されているが、ほとんどがコンクリート打込みにはトレミー工法が使用されている。

我が国では、1959年、イタリアから導入したイコス工法で、中部電力丹波ダムの止水壁を施工したのが始まりとされている。以来、主に欧州で開発された各種工法が導入され、止水や土留の仮設的な用途に始まり、壁構造物の一部や橋梁の基礎のケーソンの代わりの用途に使用され発展してきた。

1970年代の後半には、臨海地帯に数万kl.にのぼる巨大なLNG地下タンク建設工事において、100m以上の深度の地中連続壁が止水および土留の目的で建設され

ようになり、掘削精度、継手構造、コンクリートの品質等の向上は目を見張るものがある。さらにこれらの地中連続壁をタンク本体の一部としても使用したり、都市部の大深度地下構造物建設にも使用する目的で、コンクリートの品質も設計での圧縮強度が500 kgf/cm²以上のものも要求され、技術開発が現在でも進められている。これに使用されるコンクリートは、水セメント比30%前後で、高性能減水剤、低発熱のセメントおよび混和材を利用し、高い流動性を保有する必要があり、かつ、施工の確実性が求められているのである。なお、地中連続壁の平面的寸法は、厚さ最大3.2m、長手方向で8m程度であり、トレミーは、3~4本が使用されるのが一般的である。

4. プレパックドコンクリート工法

プレパックドコンクリートは、1938年に米国で開発され、特許工法であり、プレパクトコンクリートと称せられていた。この工法で施工されたものとして、1954年に始まったマキナック橋の基礎工事があり、これには34万m³の大量のプレパクトコンクリートが使用されている。我が国には、1953年に技術導入され、1957年頃より主に港湾工事に使用されており、他工法と比較して、信頼性の高い水中コンクリート工法とされてきた。プレパクトコンクリートは、予め型わくに15mm以上の粗骨材を詰め、粗骨材の間にモルタルを注入して所定の品質を持つコンクリートとするもので、注入するモルタルの品質がコンクリートの品質に大きく影響するものであり、イントリュージョンエイドと称する混和剤によって必要な性質を付与するとされていた。その後、我が国では、港湾技術研究所や多くの研究機関での研究開発の結果、フライアッシュを使用し、イントリュージョンエイドの代わりに、凝結遅延型の減水剤と膨脹性を与える

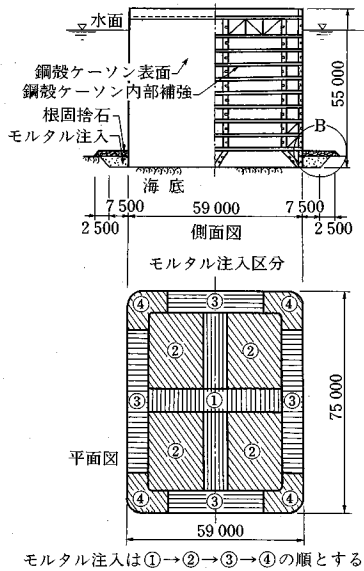


図-2 プレパックドコンクリート工法による海中基礎の施工

アルミ粉末を用いることにより、所定の品質のコンクリートが得られることが分り、施工技術の開発もあって、港湾工事に限らず、河川工事事、橋梁の基礎工事に広く使用されるようになった⁷⁾。さらに、土木学会が、1966年に『プレパックドコンクリート施工指針(案)』を作成刊行することにより、この工法の一層の普及に貢献することとなった。なお、同時期に英国では、同様の工法として Colcrete 工法が開発されているが、これは、2槽式の特殊ミキサで、所要の品質のモルタルを製造するもので、超高速の回転翼(1500~2500 rpm)を備えたミキサでセメントペースト(水、セメント、フライアッシュ、スラグ微粉末)を練り、このペーストを別のミキサで砂と混合し、このモルタルを注入するものである。欧州では、かなり使用されたようであるが、我が国では普及するに至らなかった。

本州四国連絡橋児島坂出ルート of 工事において、設置ケーソンプレパックドコンクリート工法が計画され、1966年より始まった施工調査実験において、同工法を大々的に採用するための実験が開始されたが、プレパックドコンクリートの大量急速施工にあたっては、粗骨材の最小寸法、モルタルの注入速度、注入管の設置間隔(モルタルの流動距離)等の材料・施工方法が、従来の指針に従うだけでは問題があることが判明し、以後、数次にわたって各種の実験工事が実施された。その結果に基づき、1978年に6 m³/minのモルタルの製造・注入設備を備えたモルタルプラント船『世紀号』が完成し、1980年末より4年間にわたって、11基の基礎(最大22.3万m³)に、59万m³のプレパックドコンクリートが施工されたのである⁸⁾。当工事で最大規模の7Aの基礎の形

状寸法を図-2に示す。下の平面図に示すように、全体を13程の区画に分け、4区画ずつを3昼夜程度かけて連続注入で施工している。

約20年間にわたる実験工事および施工を通じて研究開発された成果をもって、プレパックドコンクリートの大量急速施工法が完成されたと言えるよう。

5. 水中不分離性コンクリート

水中不分離性コンクリートは、1975年に西ドイツで開発され、1979年我が国に導入され、当初は特殊水中コンクリートと呼称されていたが、現在では、標記の名称に統一されている。

以来、混和剤メーカーと建設会社の共同で開発が進められ、現在では、十種余りの水中不分離性混和剤が市販され、この混和剤を使用し、各社のノウハウを組込んだ水中コンクリート工法として、主に各建設会社が独自のネーミングを行っている。この十余年で多くの施工実績があり、このコンクリートでなければ施工できないような構造物への適用例も増加し、これまで施工量は150万m³余りにも達している。

1986年に(財)沿岸開発技術研究センターおよび(財)漁港漁村建設技術研究所によって『特殊水中コンクリート・マニュアル』が作成され、それまでの研究や施工実績をもとに、設計・施工の体系的なとりまとめがおこなわれ、1991年には、土木学会によって、それまでの研究開発の成果、施工実績ならびに新たな研究を積み重ね、『水中不分離性コンクリート設計施工指針(案)』が完成されており、併せ、水中不分離性コンクリート混和剤の品質基準(案)、水中不分離性コンクリートの試験方法(案)が作成されており、水中不分離性コンクリートの今後の普及活用と共に新しい用途の開発が大いに期待されている。

(1) 水中不分離性コンクリートの特徴

使用される混和剤は水溶性高分子であり、大別するとセルロース系とアクリル系の2種類があり、両者ともメーカーによって組成や分子量等が若干異なっている。これらの標準使用量は、コンクリートの場合でセルロース系2~3 kg/m³、アクリル系で3~4 kg/m³、である。

特徴として、フレッシュコンクリートの性質が、普通コンクリートと著しく異なっており、その主な性質は次の通りである。①水の洗い作用に対する抵抗性が大きく、ブリージングがほとんど生じない ②流動性が高く、充填性やセルフレベリング性に優れている ③凝結時間がかなり遅延する傾向にある。

①の性質を端的にあらわすテストが図-3に示すモルタルによるメスシリンダーテストである。普通のモルタルをメスシリンダー中の水の中に落とすとモルタルはバラバラになって沈み、水は濁るが、水中不分離性のモル

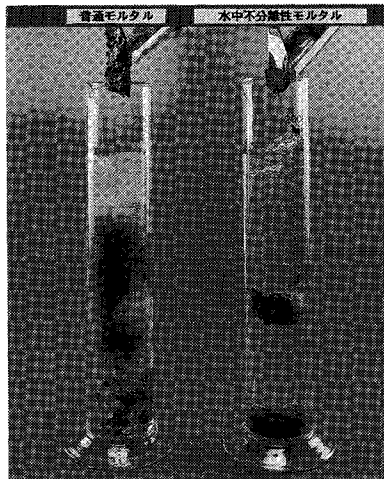


図-3 メスシリンダーテスト

タルはそのようなことは起こらず、フレッシュモルタルの状態のものがそのまま沈んでいく。

これらの性質は、水中不分離性混和剤の種類及び添加量によって異なってくるが、一般に添加量が増加するにしたがってこれ等の特徴が顕著になる。水中不分離性混和剤を添加すると、コンクリートの粘性が増加するので施工性が低下する。所要の施工性を確保するためには、単位水量を増加させる必要があり、単位水量をある限度以下にして高性能減水剤(流動化剤)をセメント量の2%前後併用するのが一般的である。

コンシステンシーを表す指標としてスランプフロー値が用いられ、40~60 cmの範囲が使用されている。標準的には、50~55 cmの例が多いが、傾斜のある鉄筋コンクリートや張り石の固結には、より硬練りのものが用いられ、狭い隙間の充填やセルフレベリングが要求されるばあいには、より軟練りのものが使用されている。

配合の特徴としては、骨材最大寸法は20 mmまたは25 mmが一般的である。これは、流動性の良い水中不分離性コンクリートでは、最大寸法を大きくしても、普通コンクリートのように細骨材率を小さくし、単位水量を少なくすることが困難であり、20 mmの場合でも40 mmの場合でも細骨材率は40%程度、単位水量は流動化剤を使用しても220 kg程度が適切とされている。単位セメント量および水セメント比は必要な設計基準強度に応じて広い範囲で使用されている。空気量は、この種の混和剤は気泡を連行し易く、消泡剤を混入して、最大5%程度となるように調整してある。

硬化コンクリートの性質としては、強度関係は水セメント比に支配されるのは普通コンクリートと同様であるが、単位水量が多く、骨材量が少ないことから、弾性係数がやや小さい性質を示す。このコンクリートはプリージングを生じないことから、レイタンスが極めて少ない

こと、RC構造物での水平筋との付着強度が著しく向上すること等の特長があるが、欠点として、耐凍害性が劣ることおよび乾燥収縮が大きくなることがあげられ、寒冷地の水際部や気中部のコンクリートへの適用には特別の配慮が必要である。

水中不分離性コンクリートの製造および施工にあたっては、ミキサは普通コンクリートに使用されるものは利用できるが、パッチ式の強制攪拌式ミキサが望ましい。練りませの際の攪拌抵抗が大きいので、十分な練りませ効果を得るには、普通コンクリートよりも1パッチの練りませ量をやや少なくし、練りませ時間を長くするのが一般的である。従って、パッチャープラントの製造能力は、普通コンクリートの場合よりもある程度低下することを考慮する必要がある。練りませにあたっては、水および流動化剤を除いた材料を20~30秒間空練りした後に残りの材料を投入して所定時間練りませることになる。これは、水中不分離性混和剤が完全に分散・溶解するために必要とされている。

運搬には、主にアジテータトラックが使用される。打込みには、前述の施工方法のうち、プレバッキングコンクリート工法以外は、全て使用できるが、ポンプによって圧送及び打込みを行う場合、普通コンクリートに比較して、水中不分離性コンクリートは、管内抵抗が3~4倍大きく、圧送距離及び単位時間の圧送量が大幅に低下することに注意する必要がある。コンクリート打込みにあたって、従来の水中コンクリートでは絶対に行ってはならない水中自由落下もある程度は可能で、ポンプの筒先から50 cm以下であれば、十分信頼性の高い品質のコンクリートが得られる。施工条件によっては自由落下距離が50 cmを大幅に越える場合もあるが、その場合には混和剤量を増加させたり、または、そのことを配慮して配合強度を大幅に高めることによってある程度の対応も可能である。

また、打ち込んだコンクリートは流動性が良く、ポンプの筒先またはトレミーから吐出されたコンクリートは遠くまで小さい勾配で流動するので打込み位置の間隔を大きく取ることができる。流動勾配はスランプフロー、その保持時間、水中不分離性混和剤の量、打込み流量等によって影響を受けるが、一般に、コンクリート打込み完了後も変形を継続し、流動勾配は更に小さくなる傾向を示し、その程度はスランプフローの保持時間や凝結時間が長い程大きい。スランプフローが50~55 cmの標準的な配合では、1/50前後の勾配の例が多いが、凝結遅延剤を併用した場合で1/200以下となった例もあり、このような例ではほとんど表面仕上げの必要がないことになる。しかし流動性がよくとも遠くまで流動させると粗骨材が沈降して分離する傾向を示すとともにコンクリートの品質も低下するので、最大の流動距離は5~

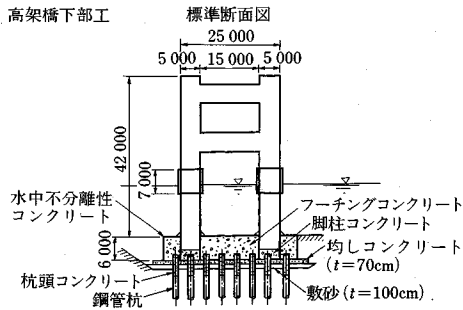


図-4 水中不分離性コンクリートを使用した海中高架橋の施工

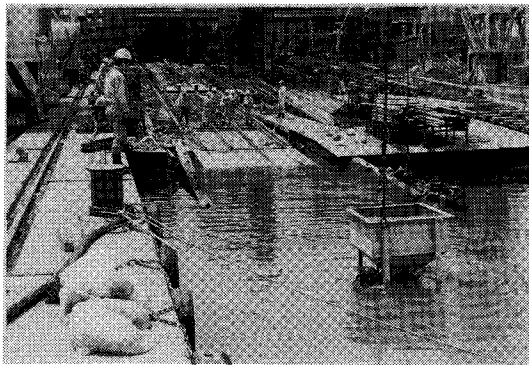


図-5 水中不分離性コンクリートを使用したスリップウェイの施工

10m 以内になるよう打込み位置の間隔を定めるのが望ましいとされている。

さらに、施工中の浮遊物質や PH の上昇が水質汚濁防止の観点から問題となる場合があるが、水中不分離性コンクリートでは、極端な水中自由落下をさせない限り、周囲の水質への影響は極めて少なくすることが可能である。落下高さが大きい場合には、混和剤量を増加させることで、ある程度の対応が可能となっている。

(2) 施工実績

前述のような特徴を持った水中不分離性コンクリートは、その特徴を利用して、これまで多くの施工が積み重ねられており、その使用目的を分類すると次のようになる。

- ① 流動性を主眼とした間隙充填
 - ② 施工方法を簡略化し、かつ、材料分離防止を特に配慮した高品質水中コンクリート
 - ③ 水中での鉄骨または鉄筋コンクリート
 - ④ 工事現場周囲の水質汚濁防止に特に配慮した施工
 - ⑤ 鋼管杭や鋼矢板の補修および防食ライニング
 - ⑥ 護岸の張石や捨石マウンドの固結
 - ⑦ 災害復旧としてのコンクリート構造物の補修補強
- 以上の使用目的は、単独の場合もあるが、多くは複数の目的を持って使用されている。②③④の代表的な例と

水中コンクリート年表

年号	事 柄
1856	フランスで木製シュートを用いた水中コンクリートの実験が行われる。
1906	デトロイト川トンネルでトレミーを用いた水中コンクリートの施工が行われる。
1909	真珠湾ドライドックでトレミーを用いた水中コンクリートの施工が行われる。
1920	大阪湾第一係船岸工事橋脚基礎で水中コンクリートの施工が行われる。
1930	Boonstra によりバケットを用いた水中コンクリートの施工が行われる。
1938	プレバクトコンクリートが開発される。
1943	我が国最初の土木学会無筋コンクリート標準示方書に水中コンクリートが記述される。
1944	ACI 誌にコンクリートポンプを使用した水中コンクリートが記述される。
1953	宇部港 9 m 岸壁工事でコンクリートポンプを使用した水中コンクリートが施工される。
1953	プレバクトコンクリートが我が国に導入される。
1953	港湾工事でプレバクトコンクリートが全国的に使用され始める。
1954	マキナック橋基礎工事がプレバクトコンクリートで開始される。(34 万 m ³)
1954	場所打ち杭が我が国で施工され始め、安定液中の水中コンクリートが施工され始める。
1959	地中連続壁が我が国で施工され始め、安定液中の水中コンクリートが施工され始める。
1964	天草五橋基礎工事がプレバクトコンクリートで開始される(1 万 m ³)
1966	土木学会からプレバクトコンクリート施工指針(案)が刊行される。
1969	ハイドロバルブがオランダで開発される。
1973	KDT トレミー工法が開発され、ドライドックの渠底工事に適用される。(3 万 m ³)
1978	NUCS 工法が開発され、渡海橋下部工事に適用される。
1975	水中不分離性コンクリート(ハイドロクリート)が西ドイツ(当時)で開発される。
1978	本州四国連絡橋公団によりプレバクトコンクリート用にモルタルプラント船『世紀号』建造される。
1980	瀬戸大橋基礎工事がプレバクトコンクリートで開始される。(55 万 m ³)
1980	水中不分離性コンクリートが我が国に導入される。
1982	水中不分離性コンクリートの我が国での使用が始まる。
1986	沿岸開発技術研究センター・漁港漁村建設技術研究所から特殊水中コンクリート・マニュアルが刊行される。
1987	関西新国際空港連絡橋基礎工事が水中不分離性コンクリートで開始される。(14 万 m ³)
1989	沿岸開発技術研究センター・漁港漁村建設技術研究所から既刊の特殊水中コンクリート・マニュアルが改訂されて水中不分離性コンクリート・マニュアルとして刊行される。
1989	明石海峡大橋基礎工事が水中不分離性コンクリートで開始される。(59 万 m ³)
1991	土木学会から水中不分離性コンクリート設計施工指針(案)が刊行される。

しては、大規模プロジェクトの関西新国際空港連絡橋の基礎(約 14 万 m³)、本四連絡橋明石海峡大橋(約 54 万 m³)が代表的であろう。両者とも、事前に多くの検討実験を実施して、満足のいく本工事が完了している。

図-4 は関西新国際空港連絡橋の基礎の説明図である。海中に杭を打ち、造船所で製作したフーチング・橋脚一体の工作物をその上にかぶせ、水中不分離性コンクリートで両者を結合して海中橋脚を施工することを説明

している。仮設という最終的には不要なものをほとんど必要としない施工方法である。

③として、図-4に示した事例は、造船所のスリップウェイの鉄筋コンクリートであるが、水中不分離性コンクリートならでの事例である。⑥の用途は、他のコンクリートでは有り得なかったものである。

6. 今後の展望

わが国は、周りを海に囲まれ、雨量に恵まれ急流河川も多く、かつ、都市の多くが沖積層の上にあり、地下水が豊富である。狭い国土の有効利用の観点から、新たなインフラ建設にあたっては、臨海部、沿岸部、海洋部の利用は不可欠であり、また、都市部では、大深度地下の利用も増加している。それらの工事に『水中不分離性コンクリート』の出現によって信頼性の高い水中コンクリートの施工が可能になったことは、水中コンクリート構造物の建設の計画および施工にあたって画期的な時代に入ったといえるであろう。

新しい材料は、新しい施工方法を生み、新しい施工方法は、新しい構造形式や設計思想の出現の可能性を示唆しており、これまでの実績にもその兆しが見られ、今後の発展性が期待されるのである。特に建設の企画、設計

の担当者の理解と活用を期待したい。

参考文献

- 1) F.K. Ligtenberg, 他, : HERON, Underwater Concrete, VOLUME 19, 1973, No.3, Delft. The Neiterlands.
- 2) Schoewert, L.C & Hillen, H.F. : Underwater Transporting of Concrete with the Hydro-Valve, ACI Journal Proc. Vol.69, No.9 Sept.1972.
- 3) 中原康・大友忠典・横田慎一: KDT トレミー工法の開発と実績, 鹿島建設技術研究所年報, No.23, 1974年6月
- 4) 平山純一・前田宗司・姫路昭夫: 因島大橋下部工事における移動式トレミーコンクリート打設工法の施工, 土木施工20巻2号, 1979.2
- 5) Arthur R. Anderson : A Study of Sub-Aqueous Concrete, Journal of the ACI. Jan. & Feb.1973.
- 6) P.J. Hallorant & K.H. Tablot : The Properties and Behavior Underwater of Plastic Concrete Jour. of ACI. June,1943.
- 7) 土木学会コンクリート委員会: プレパックドコンクリート施工例集, コンクリートライブラリー第13号, 昭和40年(1965年)3月.
- 8) 本州四国連絡橋公団第二建設局: プレパックドコンクリート施工記録, (財)海洋架橋調査会, 1986年3月.
(1993.2.19 受付)