総説 REVIEW

水中コンクリートによる大型コンクリート構造物の施工*

武川 恵之助** 姫路 昭夫***

The Construction of Heavy Underwater Concrete Structures

by

Keinosuke TAKEGAWA and Akio HIMEJI

(Shimizu Construction Co. Ltd., Tokyo)

1 概 説

コンクリートは、セメント、骨材(砂利または碎石)および水を適当な配合比で練り混ぜて、セメントと水との水和反応で固化させたことは周知のとおりである。一般には、空気中(陸上)で、予定の仕上り内空形状の型わくを組立てて、そこにまだ固まらないコンクリートを打設して固化させ、所定の構造物を建設する。水中で同様の作業を行う場合、

(1) 打設方法によっては、まだ固まらないコンクリートに周辺の水が交り、あるいは、水のみ空洞を作り、また、セメントが流失したりする恐れがある。

(2) 型わくの水中設置を完璧に行うことが、陸上に比して困難であり、特に、海底地盤と型わく下端との接触部でのコンクリートの漏えい防止に注意が必要である。

などの諸問題がある。

水中にコンクリート構造物を構築する方法としては、プレキャスト部材を水中に設置するなど、なるべく水中でのコンクリート打設作業をなくするか、最小限度に止めるような方法が取られてきた。そしてごく局部的に袋詰めコンクリートや底開き箱による水中コンクリートなどが施工されてきた。

近年、各種施工技術の向上と施工機械の大型化にとともに、海底地盤の掘削や、プレキャスト部材、型わく部材の大型化が可能になった。また、水中コンクリートの施工法も各種の工法が広く行われるようになった。現在は、大型コンクリート構造物を構築する方法についても、その大部分を陸上(ドライドック内などを含む)で造って設置する方法から、大幅に水中コンクリート工法に依存する場合まで各種の方法がとられ

ている。すなわち、

(1) 海底地盤を造成し、構造物の大部分を陸上またはドライドック内で製作し、現地に曳航して沈設するもの。(防波堤のケーソン、方塊など、沈埋トンネル、海底石油掘削など重力で安定する構造物など)

(2) プレキャスト部材または鋼製型枠を陸上で製作し、海底地盤または、杭基礎上に曳航・設置し、その中に水中コンクリートを打設するもの。(ペルタイプ橋梁基礎、本四連絡橋南北備讃瀬戸大橋下部、大黒大橋下部、荒川湾岸橋下部、黒之瀬戸大橋下部工など)

(3) 型わくを水中施工して、内部に水中コンクリートを施工するもの。(鋼管矢板井筒基礎による橋梁下部工事、ドックの底版、締切り工など)

以上述べた作業の組合せの中で、水中作業としては主に、海底地盤造成、水中型わく設置、水中コンクリートとなるので、本文では、まず、水中コンクリートについて述べ、つぎに、本四連絡橋、大黒大橋、因島大橋での水中コンクリートについて、計画または、実施例をあげる。

2 水中コンクリート

水中コンクリートの施工方法は種々開発されているが、現在使われている代表的な工法をあげ、分類すると、通常のコンクリートを打込む工法と、特殊なモルタルを注入するグラウト工法に大別される。前者には袋詰め、底開き箱(スキップ)、トレミーとその応用工法としてコンクリートポンプ、またさらに特殊な装置を用いる NUCS 工法、KDT 工法などがある。後者には、プレパックドコンクリート工法、コルクリート工法、No Sand Grout などがある。以上の水中コンクリートの施工方法を比較すると表 I に示すようになる。

水中コンクリート施工法のうち、大型水中構造物に適用する場合は、その施工条件、例えば、水深、波浪、

* 原稿受理 昭和54年8月21日

** 清水建設(株)土木開発部 東京都中央区京橋

*** 清水建設(株)土木技術部 東京都中央区京橋

表Ⅰ 水中コンクリート施工法の比較

施 工 法		施工法の概要	必要とする機器	特 徴
袋 詰 め		麻袋、合成繊維で編んだ袋にコンクリートを20～30 kg 入れて、海中に設置する。	袋 クレーン 潜水夫	水底に簡易な型わくを作るのに最適。型わくの根固め、漏洩防止工など簡易で少量のコンクリートにより、構造用コンクリートには適さない。
	底 開 き 箱 (スキップ)	底開き箱にコンクリートを入れて、これを打込み場所に吊り下げ、底を開いて打込む。	底開き箱 クレーン (潜水夫)	不陸修正、均しコンクリートなど少量のコンクリートに最適、旧コンクリートの上にしか新コンクリートを打込めないで、一体性に問題がある。構造用コンクリートとして用いられた場合もある。
ト レ ミ ー		トレミー管を打込み場所まで沈設して、水面上からコンクリートを打込む。打込み始めにはプランジャー等を用いる。	トレミー管 (ホッパー付) プランジャー等 クレーン 作業足場、管の支持台	構造用コンクリートを大量に施工できる。施工実績は多い。水中で水平に管を移動することが困難で、広い面積を施工する場合には適さない。
ポ ン プ		コンクリートポンプを用いて、陸上部と同様に施工する。ホースの先端は潜水夫が持って移動していく。	コンクリートポンプ フレキシブルホース プランジャー等 潜水夫	構造用コンクリートを大量に施工できる。ホースの先端を潜水夫が持ち回るので、広い面積でも施工可能。潜水夫の技能、水中作業の安全性の問題あり。
特 殊 工 法	ハイドロバルブ	たわみ性ホースを用いて、コンクリートを打込む	たわみ性ホース クレーン 作業足場、管の支持台	たわみ性ホースの中をコンクリートが落下するので、水中落下せず、材料分離が少い。旧コンクリートの上にしか新コンクリートを打込めないが、広い面積にも施工可能。
	KDT ²⁾	穴開き外管の内側にたわみ性ホースを取付けた2重管を用いて打込む。	2重管 (穴開き外管とたわみ性ホース) クレーン 作業足場、管の支持台	原理はハイドロバルブと同じであるが、外管に剛性があるので、旧コンクリート中に先端を差し込めるメリットがある。
	NUCS ³⁾	トレミー管の先端に特殊バルブ、検知センサーを取付けた装置を用いて、トレミー工法、ポンプ工法と同様にして打込む。	特殊バルブ、検知センサー付トレミー管先端装置、クレーン、作業足場またはコンクリートポンプ	剛性の大きいトレミー管の先端に特殊バルブが付いているので、管の水中・水平移動は容易。検知センサーでコンクリート表面の高さの管理が容易。広い面積に大量に構造用コンクリートを打込める。
プレパックドコンクリート		型わくの中に予め粗骨材を詰めて、その間隙に注入モルタルを注入してコンクリート体とする。	粗骨材投入用機械、モルタルプラント (ミキサー、ポンプ等) 注入管、輸送管等作業足場	粗骨材、注入モルタルを別々に施工するので、施工速度が速い。大量に構造用コンクリートを打込める。RC、SRC構造でも付着が良好である。
No Sand Grout ⁴⁾ 工法		砂を使わないで、特殊な海水セメント、混和剤、水を練り混ぜたグラウトを、たわみ性ホースを用いて注入する特殊プレパックドコンクリート工法	たわみ性ホースを含んだ注入装置 モルタルプラント (ミキサー等)、作業足場	注入装置によって注入速度を制御できる。砂を含んでいないので材料分離が少い。海水セメントを用いるので水和熱が小さい。

潮流、コンクリートの打設量などから一般にはプレパックドコンクリート、トレミー、また特殊工法に限られてくる。わが国においては、大規模構造物とか重要構造物には、プレパックドコンクリートが採用された例が多く、大黒大橋、黒之瀬戸大橋、荒川湾岸橋の下部工に用いられた。もちろん本四連絡橋の下部工の施工においては、この工法によって一橋脚当り25万 m³の水中コンクリートが計画されている。橋梁下部工以外では、ケーソン基礎の底盤コンクリートに用いられたものもあり、広島大橋では水深55mの深さで施工されている。その他、ドライドックの渠底版、ゲートシル構造にも用いられている。港湾構造物としては防波堤・岸壁の構造体、洋上沖合の灯標・灯台の基礎にも用いられている。

一方トレミーは、防波堤や防波護岸の基礎などの海岸工事や、場所打ちのコンクリートくいや地中連続壁などの基礎工事に用いられている。トレミー工法の原

理を応用し、トレミーパイプの移動を簡易化した特殊な装置を用いる KDT トレミー工法、ハイドロバルブ工法、NUCS 工法などは、比較的大型水中構造物の施工に適した工法といえよう。

大型水中 (海中) 構造物の水中コンクリートを施工する場合大切なことは、均等質で高品質のコンクリートが得られることと、施工に際して周辺海中汚濁を未然に防ぐ対策を構想することである。そのための留意点を次に述べる。

2・1 プレパックドコンクリートの場合

均等質で高品質のプレパックドコンクリートを得るためには、適切な粒度の清浄な粗骨材を型わくの中へ投入するとともに、均等質で高品質の注入モルタルを連続製造して、材料分離が起らないよう入念に注入することが大切である。そのため要求される施工速度に見合った製造能力のモルタルプラントを用いることが必要である。さらに、粗骨材の最小寸法と、注入管水

平間隔を適切に設定することが要求される。一般に、粗骨材の最小寸法を 15~40 mm にして、注入管ピッチを 2.0 m 程度とし、20~60 m³/hr の製造能力を有するモルタルプラントを用いる。

プレパックドコンクリートを水中で施工する場合、設計にない場所に水平打継目を設けないで注入することが原則である。そのためには、モルタルを連続して大量に製造する高性能モルタルプラントを設け、注入作業を中断するようなトラブルが発生しない注入システムを作っておく必要がある。

2.2 トレミーによる水中コンクリートの場合 (その他の応用技法を含む)

水中コンクリートの品質変動の原因としては、コンクリートが行きわたらないためにコンクリート躯体内に生ずる空げきや、モルタルが流失して、骨材だけの部分、あるいは、レイタンスがコンクリート躯体内に内蔵されるなどが考えられる。そのため、トレミー管の先端を常に、既に打設してまだ固まらないコンクリート中に置き、新しく排出されるコンクリートを直接水にさらさないようにすることが大切である。

水中コンクリートの配合では、一般のコンクリートとしての諸条件を充す他、次のことに注意する必要がある。

- (1) ワークビリティが良好であること。
- (2) 粘着性に富み材料分離の少ないこと。
- (3) コンシステンシーが良好であること。

一般的な配合としては、スランプはトレミーコンクリートの場合、13~18 cm、水セメント比50%以下、単位セメント量 320~370 kg/m³ とした例が多い。

2.3 水中コンクリートの建設公害対策

大型水中構造物を施工するときには、すべての材料が大型化、大量化し、作業船台数も極端に増加する。その結果、海上の占有面積も広くなり、一般の航行船舶の交通障害にもなる。この場合の対策としては、大

型の繫留アンカーを設置して、アンカーワイヤーを極力短くし、かつ、作業船の配置も考慮して占有面積の縮小化を図るとともに、工期の短縮を期することが大切である。その他、計画を早めに立案し、海上を管理する当局と打合せのうえ、占有の方法を公示し、一般船舶への宣伝に努力する必要がある。

一方、注入モルタル、あるいはコンクリートが周辺の水に接して汚濁水が発生する。このとき、汚濁水はセメントまたは砂の粒子のため、浮遊物質(SS)が多く、かつ水素イオン濃度(pH)が高くなる。しかしセメント粒子は急速に沈澱し、アルカリ分も希釈とか中和によって容易に無害化することができる。そのため発生する汚濁水に対しては、そのまま放流しないように流出防止策を構ずるとともに、発生する汚濁水は回収処理して、放流するよう検討しなければならない。

3 本州四国連絡橋のプレパックドコンクリート

本四連絡橋の下部工は、潮流が最大 4 m/sec と速く、水深 50 m 以上の海中に建設するものもある。そのため、厳しい条件下でも施工できる工法について本州四国連絡橋公団では昭和 38 年以降実験を重ねて、設置ケーソン工法を考案している。設置ケーソン工法は、図 1 に示すように、陸上で鋼製の型わくを製作して、これを海上曳航し、所定の位置に沈設した後に、内部にプレパックドコンクリートを打設して、海中に大型コンクリート構造物を構築する工法である。

下部工 1 基で約 25 万 m³ の水中プレパックドコンクリートを施工するものもあって、プレパックドコンクリートを大量に急速施工する方法が必要とされた。

本四連絡橋の下部工が一つの契機となって、わが国における大型海中構造物をプレパックドコンクリートで大量急速施工することが普及したといえよう。

3.1 大量急速施工方法

プレパックドコンクリートは型わくの中に予め粗骨材をてん充しておき、その間げきに特殊な性能のモル

図1 設置ケーソン工法

タルを注入して造るコンクリートであり、粗骨材とモルタルを別々に施工する点に海象条件の厳しい海洋で施工する場合に優れている。本四連絡橋の場合、連続稼働日数が最大4日間と限定されており、粗骨材の投入とモルタル注入が別作業でできるプレパックドコンクリートの方が通常のコンクリートよりも大量に施工できる利点があった。

しかし、下部工1基で約25万 m³ の水中プレパックドコンクリートを連続4日以内に施工するためには、なお、従来の方法では対処できなかった。すなわち、一般にプレパックドコンクリート工事は、粗骨材の最小寸法を15 mm以上、注入管径は38 mm程度、注入管の水平間隔は2 m程度、20 m³/hr程度の能力のモルタルプラントを用いている。このような従来の施工方法で本四連絡橋下部工のような超大型構造物を施工すると、モルタルプラントの台数、注入管本数が極端に多くなり、連続注入、施工管理、均等質なプレパックドコンクリートの施工、材料の安定供給などが実質上不可能になる。

そこで、長年にわたる研究開発の結果、大型コンクリート構造物をプレパックドコンクリートで施工するために、

- (1) 注入管の水平間隔を大きくする。
- (2) 連続注入システムを確立する。

の2点について解決すればよいことが示された。

(1) 注入管の水平間隔を増大する方法

本四連絡橋下部工のように平面積が最大64×75 mと広くなると、施工管理上、注入管の本数を減らす必要があり、結果として注入管の水平間隔を大きくしなければならない。

注入管の水平間隔が大きくなると、粗骨材の間げき中を注入モルタルが流動する距離が長くなるので、モルタルの材料分離が生じるという欠点がある。多くの実験を行った結果、材料分離を少くして注入管の水平間隔を大きくするために、次のような配慮をすればよいことが明らかにされた。

- (i) 粗骨材の間げきをモルタルが流動しやすくするために、粗骨材の寸法を大きくし、80～150 mmの碎石を用いる。
- (ii) 注入モルタル自体の粘性を高めて、材料分離が生じにくいように配合し、セメント：フライアッシュ：砂=C:F:S=1:0.25:1.25、水・セメント比= $W/(C+F)=50\%$ とする。
- (iii) コンシステンシーを軟らかくして流動しやすくし、Pロートによるフロー値を17±2秒とする。
- (iv) 容量の大きなモルタルポンプを用いて施工速度を速める。

その結果、注入管の間隔を4～8 mにしても材料分離

の少ないプレパックドコンクリートが得られることが明らかになった。

(2) 連続注入システム

プレパックドコンクリートを水中で施工する場合に、設計にない場所に水平継目を設けないで、モルタルを連続注入することが原則である。大型構造物にモルタルを連続注入するためには、

- (1) モルタルを大量に連続して製造するモルタルプラントの開発
- (2) 大量に連続してモルタルを注入するシステムの開発

が必要であった。

わが国では、かく拌容量1.5 m³のモルタルミキサーを2台備えた60 m³/hrのモルタルプラントが次章4に示した大黒大橋下部工工事で使用された実績がある。本四連絡橋下部工の場合、最大部のものは図2のようで、分割してプレパックドコンクリートを施工するが、1ブロックの最大量は37 000 m³で、これを4日以内に施工するためには、120 m³/hrの速度でモルタルを製造するプラントが2基必要であった。そこで、3.3 m³のモルタルミキサーを開発し、これを2台備えた120 m³/hrの能力のモルタルプラントを開発した。さらに本四公団では、このモルタルプラントを3セット搭載した世界最大のモルタルプラント船「世紀」を開発し、本工事に備えている。「世紀」の構造、仕様を図3、表Ⅱに示す。

図中の数値はコンクリート量 (m³)

図2 大型鋼製ケーソンの一例

モルタルを連続して大量に注入するために、注入管の引上げシステム、モルタル表面の検知システムを確立し、モルタルプラントを運動させて一貫した注入システムを確立する必要があった。すなわち、大型のプレパックドコンクリート工事の場合、トータルの施工管理をいかにするかが、施工の良否を決めるポイントになる。モルタルプラント船「世紀」には、検知図、モルタルポンプなどの全体を把握するシステムが組込まれている。

2章にも示したように、瀬戸内海の海域をプレパックドコンクリート工事で、汚濁することは許されない

図3 モルタルプラント船「世紀」の一船構造図

表Ⅱ 「世紀」の一般的仕様

項 目		設計条件および性能	備 考	
船体主要目	全 長 (mm)	90 000		
	全 幅 (mm)	32 000		
	深 さ (m)	7 500		
	き っ 水 (mm)	4 000		
機関および発電機	主 電 機 関 形 出 力 / 回 転 数 式 電 機	4サイクルディーゼル機関過給機付 1 600 PS/720 rpm 1 350 kVA/450 V	4 台	
	補 助 発 電 機 関 形 出 力 / 回 転 数 式 電 機	4サイクルディーゼル機関過給機付 180 PS/1 200 rpm 150 kW/450 V	2 台	
プ ラ ン ト 部	プラント出力 (l/min)	6 000	2 000×3 系列	
	操 作 方 式	全 自 動 / 手 動		
	材 料 一 次 貯 蔵 量 (t)	セ メ ン ト	600	200×3
		砂	600	200×5
		水	900	
		混 和 剤	200	
	材 料 供 給 能 力 (t/h)	セ メ ン ト	360	120×3
		砂	360	120×3
		水	180	60×3
		混 和 剤	6	6×2 (1 系列運転)
	集合ホッパー容量 (m³)	7.5	各 3 基	
ロータリーフィーダー容量 (m³/h)	480	各 3 台		
ミキサー容量 (l)	3 300	各 6 台		
アジテーター容量 (m³)	30	1 台		
注 入 プ	吐出量 (l/min)	30~300	24台	
	吐出圧 (kg/cm²)	0~ 21		
濁水処理部	処 理 量 (m³/h)	50	平均 2 %	
	モルタル含有量 (%)	5~ 5		
	pH 値	8~13		
	処理規準	浮 遊 物 質 量	20 ppm 以下	
	pH 値	6~9		

ので、モルタルプラントから排出される水については、「世紀」内部で、完全に処理する装置も備えられている。

3・2 大型型わくについて

設置ケーソン工法は、陸上部で製作した鋼製ケーソンを海上曳航し、所定の位置に沈設した後に内部にプレパックドコンクリートを打込む工法である。鋼製ケーソンの最大は、幅64m、長さ75m、高さ55m(図2参照)で、このように大型の型わくであれば、その設計の考え方によって過大な材料を必要とし、経済性に大きな影響を及ぼすので、経済的な型わくの設計方法を確立する必要があった。

各種の実験・研究が行われた結果、プレパックドコンクリートの側圧は、粗骨材圧と注入モルタル圧の算術和としてよいことが明らかとなり、合理的な算定式が確立され、型わくの設計も経済的、かつ合理的に行えるようになった。

瀬戸内海のお底は、風化花こう岩の岩盤であるので、鋼製ケーソンと、海底岩盤との間のモルタルの漏れ止めは、スポンジマットを用いる計画である。

4 大黒大橋下部工における鉄骨プレパックドコンクリート

4・1 工事概要

大黒大橋は横浜市鶴見区大黒町から同沖に埋立てた大黒ふ頭⁵⁾に架かる総延長895m、幅員20.2mの道路橋

図4 P-6 橋脚一般図

である。本橋の中央部は航路確保のためのけた下制限および航路幅の制限などにより、最大スパン165mを有する斜張橋である。

この橋脚のうち3基 (P-4, P-5, P-6) の施工条件は海底面の水深が15mであり、支持層 (土丹層) の深さが-30~-60m となっているため、 $\phi 1500$ mm 大口径長尺鋼管くいを海上作業により施工し、この上に海底面からフーチング部と Y. P.+2.5 m 以深の橋脚部をプレバッキングコンクリートで施工した (図4)。

この工事は、大型海中橋脚に鉄骨プレバッキングコンクリート構造がわが国で初めて採用されたものである。その施工上の問題点および最大の橋脚 P-6 の施工実績について紹介する。

4・2 施工上の問題点

P-6 橋脚の形状は、図4に示すようにフーチング部に34m $\times$ 30m $\times$ 高さ6.4mで高さと平面積が比較的大きく、さらに直径8m、高さ30mの円柱橋脚部2本がフーチング部と一体結合されている。また、この施工地点の海水は透明度50cm以内ときわめて汚濁しており、しかも海底にはヘドロ層が堆積しているため、次のような施工上の問題点が指摘された。

- (1) フーチング部と橋脚部の打継目処置
- (2) 連続注入可能な注入平面積の設定
- (3) 浮遊泥土の影響
- (4) 主たる構造部材となる CT 型鋼周辺へのモルタル充てん性
- (5) 遠距離圧送による注入モルタルの品質変動
- (6) プレバッキングコンクリートの硬化熱
- (7) 大型モルタルミキシングプラントの必要性

そこで、本工事の施工前に、大型の試験体を作製して施工実験を行って、問題点の解決をはかった。表Ⅲに試験条件と結果を示す。

なお、プレバッキングコンクリートの硬化熱については実測をも行ったが、本工事においてはフーチング部の側面や上層部に型鋼が配置されており、温度応力への特別の配慮はしなかった。

モルタルプラントは後述するように、かく拌容量1.5 m³ の ω 型モルタルミキサを2基備えた60 m³/hrのモルタル製造能力のプラントを開発して本工事に備えた。

4・3 P-6 橋脚の施工実績

4・3・1 施工順序 P-6 橋脚の施工順序は図5に

表Ⅲ 試験体の仕様と試験結果一覧表

試験体 記 号	寸 法	施 工 条 件	フロー 値 (秒)	3時間後の 膨張率 (<i>E</i>) ブリーチ ング率 (<i>B</i>) (%)	流 動 こう配 平均値	圧縮強度 σ_{20} (kg/cm ²)				はつり断面の観察結果
						注入モ ルタル ($\phi 5 \times$ 10 cm)	コンク リート ($\phi 15 \times$ 30 cm)	コ ア ー ($\phi 32 \times 64$ cm)		
								上 部	下 部	
No.1	円 筒 形 $\phi 3 \times H3$ m	陸上で鋼製型わくに粗骨材を投入し、清水を満たしてモルタルを注入した。	19.6	$E=6.1$ $B=1.4$	1/3.3	383	271	269	259 (10.8)*	海底設置日数……0日 充てん状況は最良であった。
No.2	直 方 式 $4 \times 2.5 \times$ H2 m	陸上で粗骨材を投入し、海底(P-5 橋脚近傍)に1週間静置後、陸上でモルタルを注入した。注入は2回に分けて行い、再注入は5時間後に対辺の注入パイプより行った。	18.7	$E=6.0$ $B=1.95$	1/2.8	320	244	167	220 (14.1)	海底設置日数……7日 浮遊泥土の混入付着はほとんど認められなかった。 打継目にはレイタンス、浮遊泥土の混合物が5~10mm程度認められた。
No.3	円 筒 形 $\phi 3 \times H3$ m	海底に据え付けた型わく内に1/2だけ粗骨材を投入し、2週間後にモルタルを注入し、表面のレイタンスの除去、目荒しを行い、残り1/2の粗骨材を投入してそのまま海底に1週間放置した後、モルタルを注入した。	18.7	$E=6.05$ $B=1.9$	1/5.2	300	238	199	197 (4.6)	海底設置日数…… 13日 (第1回分) 7日 (第2回分) 浮遊泥土の混入付着は上部にはほとんど認められなかった。下部では局部的に混入付着していた。 打継目には、レイタンスと思われる層か数 mm 程度認められた。
No.4	円 筒 形 $\phi 3 \times H3$ m	海底に据え付けた型わく内に粗骨材を投入し、3週間後にモルタルを2回に分けて注入した。再注入は5時間後に同一注入パイプより行った。	18.4	$E=4.65$ $B=2.3$	1/3.3	276	250	127	223 (1.0)	海底設置日数……20日 浮遊泥土が粗骨材上表面に付着していた。上部 1mの範囲で顕著である。 打継目にはレイタンス、浮遊泥土の混合物が5~10mm程度認められた。
No.5	円 筒 形 $\phi 3 \times H3$ m	海底に据え付けた型わく内に粗骨材を投入し、2週間後にモルタルを注入した。型わく内にはCT型鋼を配置した。またモルタルの圧送距離は150mとした。	18.4	$E=6.4$ $B=2.15$	1/5.8	270	231	148	212 (3.6)	海底設置日数……15日 浮遊泥土が上部の粗骨材上表面に付着していた。下部ではほとんど認められなかった。CT型鋼直下には、粗骨材が充てんされていないが、注入モルタルが十分に充てんされていた。圧送前後の注入モルタルのフロー値、膨張率、強度はほぼ同等であった。

* () 内の数字は変動係数%を示す。

図5 P-6橋脚の施工順序

示すようにした。すなわち、フーチング部の構造用鉄骨および型わくを予め陸上で製作し、これを大型クレーン船で曳航して所定の位置に沈設し、その内部にプレパクトドコンクリートを打設した点に特長がある。

4・3・2 しゅんせつ・砂置換え 海底面の軟弱土を約 11 m (49 200 m³)、グラブ船でしゅんせつし、しゅんせつこう配を 1:5 とした。その後、良質の海砂を厚さ約 3.5 m (6 813 m³) に敷いた。

4・3・3 鋼管くいの打込み 鋼管くいにフーチング部の鉄骨型わくを据え付けるために、鋼管くいの打込みにはきわめて高い精度が要求された。そのためには、まず、4本のガイドくいを正確に打込んだ後に、くい打定規 (遣方フレーム) を配置して残りのくいを打込んだ。その後、ガイドくいを残して所定の高さに鋼管くいを水中切断した。

図6 鉄骨型わくの据付け作業

4・3・4 鉄骨型わくの据付け YP+2.5 m 以深の橋脚部およびフーチング部の鉄骨および型わくの組立ては、陸上で予め組立て、これを 1 500 t 吊りの大型クレーン船で沈設した。

据付け作業は昭和48年4月29日に、図6に示すように4本のくいがガイドとして、2方向から位置を測定しながら正確に行った。

4・3・5 粗骨材の投入 粗骨材は 40~120 mm の富士川産川砂利をガット船で投入した。その後、モルタル注入までに浮遊泥土が粗骨材中に堆積しないようにフーチング部表面をビニールシートで覆った。橋脚部は打継目の処理をした後に投入した。

4・3・6 モルタル注入工 モルタルの注入は図7に示すような設備で行った。モルタルプラントは埋立地に設置し、P-6 橋脚の海上に作業架台を設け、作業架台の脇にモルタルポンプ、アジテーターを載せた作業台船を配置した。

モルタルプラントは図8に示すように、大型モルタルプラント (60 m³/hr) 1基と小型モルタルプラント (15 m³/hr) 2基の合計3基使用し、注入モルタルの製造能力は 90 m³/hr とした。

注入モルタルの配合は試験工事に基づいて表Ⅳのようにした。

モルタルプラントで製造されたモルタルは16台のモ

表Ⅳ 注入モルタルの配合

フロー値 (秒)	$\frac{W}{C+F}$	$\frac{F}{C+F}$	$\frac{S}{C+F}$	$\frac{I.A.}{C+F}$	単 位 量 (kg/m³)			
	(%)	(%)	(%)	(%)	C+F	S	W	I. A.
19±3	49.0	16.0	0.9	1.0	845.1	760.6	414.0	8.451

(注) I. A. は使用した混和剤 (イントルージョンエイド) である。

図 7 施工配置図

図 8 モルタルプラントの配置

図 9 注入管切換え方式および検知管配置図 (フーチング部)

ルタルポンプで注入した。すなわち、MG-15 ポンプ (約 7.2 m³/hr) 8 台、MG-10 ポンプ (約 4.8 m³/hr) 8 台であって、モルタルプラント 製造能力 90 m³/hr よりいくぶん大ききした。

モルタルポンプは図 9 に示すように配置して、1 時

間ごとに矢印の方向の注入管に移動させる切替え方式を採用した。モルタルポンプを切替えた後、管理図 (図10) に基づいて注入管を引上げた。

注入モルタルの品質管理試験結果は表Ⅴに示すとおりできわめて満足したものであった。プレパックドコンクリートの材令28日の圧縮強度はフーチング部 218 kg/cm²、橋脚部 247 kg/cm² で設計基準強度 (180 kg/cm²) を充分に満足していた。

注入モルタルの注入実績は表Ⅵに示すようで、空き率は約41%と標準的な値であった。

5 因島大橋下部工事におけるトレミーによる水中コンクリート

つぎに、水中コンクリートを2章に示した特殊工法のうちの NUCS 工法で打設した例を紹介する。

5・1 工事概要

因島大橋は本州四国連絡橋・尾道〜今治ルートの中の向島と因島を結ぶ1等橋道路橋吊橋で、昭和56年度末には東洋一の大橋となって完成する。

この下部工工事の中の主塔基礎工事は、向島側 2P、因島側 3P の両基礎とも水際線に位置しているため、それぞれに締切り工を設けてドライワークができるように計画された。3P 締切り工は昭和48年と50年の2年間に鋼管矢板を用いた締切り工法の実験工事としてすでに施工されている。

一方、2P 締切り工は、主塔基礎構築用の締切り工としてその遮水性が重視される現場打ち重力式擁壁とセルラブロックを沈設し、その上部にコンクリート擁壁を構築して、橋りょう上部工の資材荷役の用に供せられる護岸とによって構成されている。

図10 注入モルタルの上昇検知記録

表V 品質管理試験結果

フーチング部					橋脚部				
フロー値 (秒)	練り上り 度 (℃)	3時間後の 膨張率 (%)	3時間後のブ リージング率 (%)	3時間後の 純膨張率 (%)	フロー値 (秒)	練り上り 度 (℃)	3時間後の 膨張率 (%)	3時間後のブ リージング率 (%)	3時間後の 純膨張率 (%)
17.8	30.6	9.2	1.9	7.3	17.0	33.8	6.2	2.3	3.9

項 目	材 令	フーチング部			橋脚部		
		圧縮強度 (kg/cm ²)	標準偏差 (kg/cm ²)	変動係数 (%)	圧縮強度 (kg/cm ²)	標準偏差 (kg/cm ²)	変動係数 (%)
注 入 モ ル タ ル	7日	172	19.5	11.3	171	22.3	13.1
	14日	203	33.8	16.6	199	18.3	9.2
	28日	235	29.7	12.6	276	18.4	6.7
	91日	333	32.3	9.7	317	14.8	4.7
プレバッドコンクリート	7日	146	10.8	7.4	151	19.1	12.6
	14日	185	14.9	8.0	185	21.0	11.3
	28日	218	13.2	6.1	247	11.0	4.5
	91日	266	14.6	5.5	279	9.6	3.4

表VI 注入モルタルの注入実績 (昭和48年)

項 目	フーチング部		橋脚部		備 考
	横 浜 側	川 崎 側	横 浜 側	川 崎 側	
注 入 月 日	6月11日~13日	6月16日~17日	7月12日	7月16日	鋼管くい、鉄骨を除く
プレバッドコンクリート量	3266.4 (m ³)	2916.4 (m ³)	536.8 (m ³)	536.8 (m ³)	
注 入 時 間	38.5 (時間)	21.0 (時間)	7.6 (時間)	6.75 (時間)	
モルタル注入量	1317.1 (m ³)	1195 (m ³)	220.5 (m ³)	205 (m ³)	
平均注入速度	34.5 (m ³ /hr)	56.9 (m ³ /hr)	29.0 (m ³ /hr)	33.4 (m ³ /hr)	
モルタル上昇高さ	0.16 (m/hr)	0.30 (m/hr)	1.38 (m/hr)	1.55 (m/hr)	
空 げ き 率	40.3 (%)	41.0 (%)	41.1 (%)	41.9 (%)

図11 2P 締切り工の概要

この2P 締切り工において、水中コンクリートの施工方法としてトレミー管の移動を容易かつ確実にした特殊バルブ装置付きの移動式トレミーコンクリート打設工法 (NUCS) を採用し、この工法が大型の水中コンクリート構造物の建設に効果的に応用できることが示された。

5・2 施工上の問題点

2P 締切り工事は図11に示すように 2P 基礎締切り部と物揚場部に大別されるが、本項では2P 基礎締切り部についてのみ述べる。

2P 基礎締切り部は、幅 5.0m、延長 95.5m、高さ 4.5~9.45m の現場打ち 重力式コンクリート擁壁をつくるものである。このうち、37.55m の部分は、堤体天端 TP+3.50 m までのうち TP±0.00 までを水中コンクリートで約 650m³ を施工し、それより上部は気中コンクリートを打設する。海底岩盤は傾斜が急 (1:2 程度) であり、波浪などで浸食されており、風化花こう岩で C_M ないし C_H クラスの状態となっており、締切り堤体の安定性と止水性の確保のために水中コンクリートの施工の良否が問題となった。

このようなところに打設する水中コンクリートの問題点として次の項目が挙げられる。

- (1) 海底岩盤へのコンクリートの密着度が大きく止水性を左右するので、コンクリートの材料分離が生じない高品質の水中コンクリートの施工が要求される。
- (2) 打設面積が 5m×37.55m と広く、海底面が傾斜していき裂、浸食による溝など不陸が大きいため、このような場所でも施工性が良いこと。
- (3) 水中コンクリートの施工は気中で施工する場合

と違って、信頼できる品質のコンクリートをいかにして確保するかが問題であるので、そのための管理技術が必要であること。

これらの問題点を検討し、水中コンクリートの施工法についても比較した結果、以下の諸点から NUCS 工法が最適であると判断した。

- (1) 材料分離が少い工法である。
- (2) 広い面積を施工性よく効率的に作業できる。後述するように型わく内部にタイロッド、H型鋼、コンクリート打設用の仮設足場などがあるため効率的な施工性が要求される。
- (3) コンクリート表面レベルの管理装置が具備されている。
- (4) コンクリートを直接打込む工法であり、工程上有利である。
- (5) 経済的である。
- (6) 段取りが簡単である。

5・3 NUCS の概要

図12 NUCS の装置概要

図13 NUCS の作業順序

図14 水中型わく構造図

NUCS の装置の構成は図12に示すようで、従来のトレミーコンクリート工法を改良したものである。

5・3・1 特殊バルブ装置 トレミー管の先端に取付けた特殊バルブで、コンクリートの打設や中断が自由にできる。

したがって、打設済のコンクリート中から管を引抜くことができるようになり、管内のコンクリートの水中落下や管内の水の逆噴現象を生起させることなく、トレミー管を移動することが可能となった（図13）。

このため、従来のトレミー管1本当りの受持ち面積約15m²に比べ、このNUCSは大幅にその受持ち面積を増大した。また、コンクリートの水中落下による水の汚濁が少くなると同時に、コンクリートが水で稀釈されることも少くなった。

5・3・2 コンクリート表面レベル検知システム

トレミー管の先端に取付けた検知センサーがコンクリートに触れると、地上においた検知器本体がその旨をブザーとランプで知らせるようにしたものである。

このシステムをトレミー管に取付けることにより、検尺の作業や潜水夫が不要となり、しかも、確実かつ簡単に管のコンクリート中への挿入深さ、コンクリートの打上り高さ、引上げ、再貫入などの管理ができる。

5・3・3 簡易プロクター貫入抵抗試験器 現場用の簡易プロクター貫入抵抗試験器により簡単にコンクリートの硬化状況が把握でき、トレミー管の移動管理が容易かつ確実となった。

5・4 2P締切り部の水中コンクリート打設実績

5・4・1 水中型わく 図14に示すように、まず、型わく支持用のH型鋼350mmを海底岩盤に3.1mピッチで削孔し建込み、そのH型鋼の間に、幅3.0m、高さ9.0m（高さは海底深さに応じて変わる）の大組型わくをはめ込んだ。またコンクリートの漏れを防ぐために、内面にシートを張り、岩盤と接する部分には、前もって袋づめコンクリートを施工した。

5・4・2 打設計画 トレミー管の内径は15cm

図15 施工機械の配置

とし、NUCS 装置の本体は陸上から 25 トン吊りトラッククレーンで所定の位置への移動を行うこととした。

施工機械の配置は図15に示すようで、ブーム付コンクリートポンプ車で打設した。

工程の関係上、図16に示すようにA部とB部の2回に分けて施工することとした。

コンクリートの打設は NUCS 装置 1 台で、順次打込み位置を変え片押しタイプで施工することにした。トレミー管を差し込む間隔は図14に示すように約 3.1 mとし、1か所当りの受持ち面積を約 18 m² となるようにした。

また、トレミー管の差し込みが困難となり、コンクリートの再打設が不可能となる限界は、陸上部コンクリートのコールドジョイントが生じない限界のプロクター貫入抵抗値 1 kg/cm² とほぼ一致することが実験で確認されていたので、すでに打込んだコンクリートのプロクター貫入抵抗値を試験して、これが 1 kg/cm² を越える前に NUCS を移動して戻すように管理して打設した。

5・4・3 打設実績 コンクリートの配合は表Ⅶに示すようで、品質管理試験結果は表Ⅷのようであった。

A部の打設量は約 460 m³ で、平均打込み速度は約 35 m³/hr であった。B部は約 190 m³ を 5 時間で打設した。

コンクリート表面の流動こう配は表Ⅸに示すように平均で 1:10.7 であった。

トレミー管を差し込むときの旧コンクリートのプロ

表Ⅶ コンクリートの配合

スラ ンプ (cm)	粗骨材 の最大 寸法 (mm)	水セメ ント比 W/C (%)	細骨 材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
				C	W	S	G	AE 剤
10~18	25	50.8	46.0	370	188	777	980	0.3

表Ⅷ 品質管理試験結果

項 目	スランプ (cm)	空 気 量 (%)	コンクリート 温度 (℃)
総 平 均	17.1	4.6	30.6
標 準 偏 差	0.56	0.18	0.92

表Ⅸ 流動こう配

測定順序	打込み位置	流動こう配	プロクタ 貫入抵抗値 (kg/cm ²)
①	イ	1: 6.25	—
②	イ	1: 2.50	0.10
③	ロ	1: 4.55	0.82
④	ハ	1: 14.3	0.03
⑤	ロ	1: 5.88	0.03
⑥	ニ	1: 10.0	—
⑦	ホ	1: 6.67	—
⑧	ロ	1: 5.0	0.62
⑨	イ	1: 7.14	0.50
⑩	ホ	1: 5.26	0.80
⑪	ハ	1: 12.5	0.18
⑫	イ	1: 5.0	0.08
⑬	ホ	1: 8.33	0.04
⑭	ロ	1: 14.3	0.04
⑮	ニ	1: 12.5	0.69
⑯	ヘ	1: 25.0	0.69
⑰	イ	1: 14.3	0.65
⑱	ハ	1: 33.0	—
平 均	—	1: 10.7	0.38
標準偏差	—	(7.8)	0.32

注 1) 流動こう配は $1: \alpha(1 \frac{\text{cm}}{\text{cm}})$ として表示した、

2) プロクタ貫入抵抗値は、NUCS を差し込むときの旧コンクリート層の値である。

図16 打設計画図

表X コンクリートの圧縮強度

項 目	比 重		圧縮強度 (kg/cm ²)		静弾性係数 (kg/cm ²)		ポアソン比	
	平均	標準 偏差	平均	標準 偏差	平均	標準 偏差	平均	標準 偏差
標準供試体	2.31	0.22	284	21.6	261 000	7 300	0.217	0.030
コ ア	2.28	0.03	238	42.1	197 000	15 600	0.215	0.026
コアと標準供 試体の比(%)	99	—	84	—	76	—	99	—

クター貫入抵抗値は表Ⅷのよう、平均で 0.38 kg/cm² で限界値 1 kg/cm² 以内であって、コールドジョイントのないコンクリートが打設できた。

コンクリートの圧縮強度は表 X に示すようで、コア供試体でも標準供試体の約 84% であった。

したがって、NUCS で良好な水中コンクリートを打設できた。

6 お わ り に

大型コンクリート構造物の水中施工に、水中コンクリートが信頼性あるものとして、最近増々多く使われるようになった。今後とも他の工法との組合せによって、有利な水中構造物の施工が期待される。また、良質の水中コンクリートを得るための高性能減水剤の開

発も盛んに行われているので、今後の海洋工事などにさらに希望がもてるものと思われる。

最後に文献を引用させていただいた方々に深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 平山純一, 前田宗司, 姫路昭夫, 土木施工, **20**, 2 号, p. 1 (1979).
- 2) 中原 康, 大友忠典, 横田慎一, 第29回土木学会年次学術講演会概要集, p. 317 (1974).
- 3) 水中グラウト施工技術研究会, セメント・コンクリート, No. 300, p. 30 (1972).
- 4) “世界最大規模のモルタルプラント船誕生”, 土木学会誌, **63-4**, p. 106 (1978).
- 5) 桜井紀朗, 壺阪祐三, 宮坂慶男, “特殊コンクリートの施工”(1976) 共立出版
- 6) 奥村忠彦, 黒田正信, 吉原重紀, 第32回土木学会年次学術講演会概要集, p. 333 (1977).
- 7) 武川恵之助, “大黒埠頭連絡橋脚工事における鉄骨プレパックドコンクリートの施工”, コンクリートジャーナル, **12**, p. 14 (1974).