

サンドイッチ合成構造沈埋函における高流動コンクリート施工（その1）
 （高流動コンクリートの施工課題と試験施工）
 Construction of High-Fluidity Concrete on Sandwich Composite Structure of
 Immerersed Tunnel Element —Part1—
 (Study on Subjects and Model Works on High-Fluidity Concrete on Sandwich Composite Structure)

高橋 秀樹*	平原 光彦*
Hideki Takahashi	Mitsuhiko Hirahara
多田 芳郎*	根本 隆栄**
Yoshiro Tada	Takayoshi Nemoto
前田 詔一**	西田 德行***
Shoichi Maeda	Noriyuki Nishida

要 約

先例のないサンドイッチ合成構造沈埋函工事において、レディーミクストコンクリート2工場を使用して高流動コンクリートの大規模・急速施工を行った。

密閉されたサンドイッチ鋼殻への充填、しかも充填後の出来形確認が難しいことから、高流動コンクリートといえども施工上多くの課題が存在した。そこで、これらの課題を克服するため、製造・品質管理技術を確立するばかりでなく、施工管理システムや充填確認試験方法等施工管理技術を確立して実施工に望み、良好な成果を得ることができた。

本文は、施工管理技術を確立するまでに実施した大規模な試験施工を中心に、その他実施した配合試験や施工管理体制、施工管理支援システム、充填確認試験などの事前検討について報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要と高流動コンクリート施工上の課題
- § 3. 高流動コンクリート施工に係わる課題の検討
- § 4. 試験施工
- § 5. まとめ

§ 1. はじめに

神戸港内にある海上都市ポートアイランドは、人工島拡張計画に伴い、交通量の増加と阪神大震災などの非常時に備えたライフラインの2重化を図るため、沈埋トンネルによる連絡路（港島トンネル）が計画された。

この沈埋トンネルには、施工性や経済性の向上および工期の短縮を目指し、世界最初となるフルサンドイッチ構造（コンクリートを鋼板（鋼殻）で挟む鋼とコンクリートの合成構造）の沈埋函が採用された。

サンドイッチ構造では、鋼板とコンクリートを完全に一体化する必要があり、締固め不要で自己充填性に優れた高流動コンクリートの使用が不可欠となる。しかし、サ

* 関西(支)港島(出)

** 上木設計部設計課

*** 技術研究所土木技術課

サンドイッチ構造のように充填が困難な構造物の品質を確保するには高流動コンクリートをもってしても施工上多くの課題が存在し、本工事の成否に果たす高流動コンクリートの役割は非常に大きなものがあった。

本文では、この沈埋函サンドイッチ構造に高流動コンクリートを使用し、その施工に係わる課題を克服した過程について報告する。

§ 2. 工事概要と高流動コンクリート施工に係わる課題

2-1 工事概要

工事名称：神戸港〔港島トンネル〕沈埋函製作工事

発注者：運輸省第三港湾建設局

工事場所：堺市築港新町1-5 日立造船堺工場

施工者：西松・鴻池・飛島・新日鐵JV

工期：平成6年11月10日～平成8年1月31日

コンクリート量：低発熱コンクリート 7,268m³（下床版）

高流動コンクリート 12,420m³

港島トンネルは、神戸市の第6突堤とポートアイランドを結ぶ延長約520mの道路用海底トンネルで沈埋函6函で構成される。このうち、本工事では2、3号函の2函の製作を行い、沈埋函1函の大きさは、高さ9.1m、幅34.6m、長さ87.4m、重さ約27,000tである。

沈埋函の構造は、上床版、下床版、側壁、中壁および隔壁で構成され、型枠が不要な下床版はサンドイッチ化が見送られ、それ以外はフルサンドイッチ構造となっている。

いる。

沈埋函の基本断面図を図-1に示す。

2-2 高流動コンクリート施工に係わる課題

高流動コンクリートはほぼ実用段階に入りつつあるが、従来構造物に比べコンクリートの充填および充填確認が困難なサンドイッチ構造に高流動コンクリートを適用することは初めてであり、施工上次のような課題があった。

①高流動コンクリートの製造管理技術の確立

高流動コンクリートは、流動性能を保持する時間が極めて限定されており、かつ気温および細骨材の表面水率・粒度分布等の微妙な変動が流動性能・材料分離抵抗性に対し大きな影響を及ぼす。

したがって、安定した高流動コンクリートを供給するための製造管理技術が要求された。

②高流動コンクリートの施工管理技術の確立

高流動コンクリートの流動性能を保持する限られた時間内に、ポンプ車の故障などトラブルを克服しながら打設を完了する必要がある。

したがって、製造・運搬から荷卸までの運行・品質管理、および打設終了までの施工管理を厳しく実施する必要がある。このため、発注者側からはISO 9000（品質保証規格）に準じた施工管理技術が要求された。

③充填確認試験方法の確立

未充填部が生じた場合、打設のやり直しや未充填部の補修が困難であり、事前に充填確認試験方法を確立しておく必要があった。

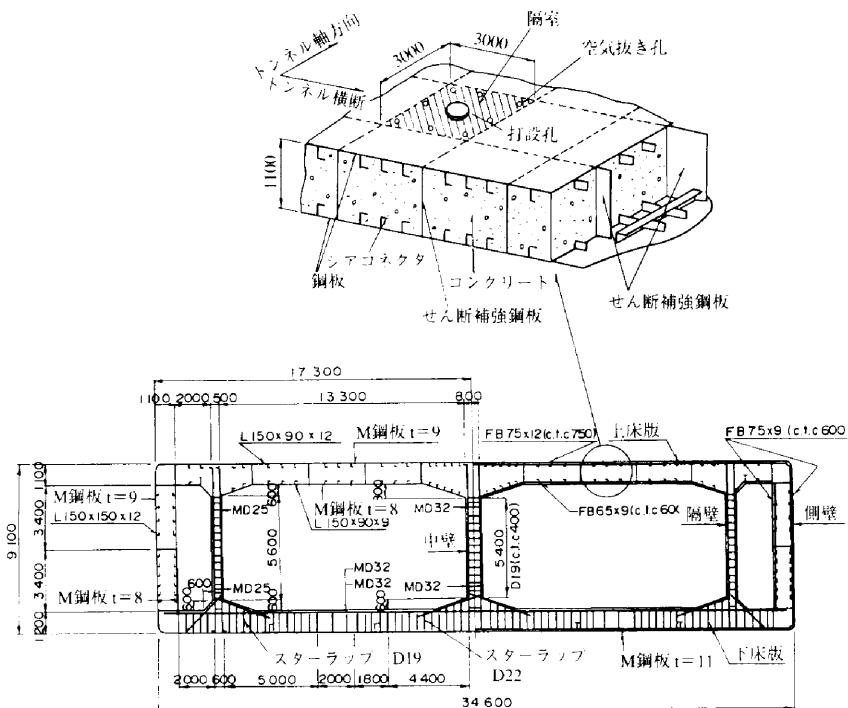


図-1 沈埋函基本断面図

§ 3. 高流動コンクリート施工に係わる課題の検討

3-1 製造管理技術の検討および確立

(1) 高流動コンクリートの品質基準

約12,000m³と大量の高流動コンクリートをレディーミクストコンクリート工場で連続的（2カ月間）に製造することは初めての試みであり、また密閉鋼殻内へコンクリート充填（未充填深さ：5mm以下）を行うため、以下に示す厳しいコンクリートの品質基準が設けられた。

- ①設計基準強度 (σ_{28}) 300 kgf/cm² (29.4N/mm²)
- ②スランブフロー 65±5cm
- ③V75ロート流下時間 10±5秒
- ④空気量 5%以下
- ⑤単位容積質量 2.3~2.35t/m³
- ⑥ブリーディング率 0%*

(*最終的に試験施工等の結果から0.5%以下)

品質基準の特徴は、フレッシュ時の規格としてスランブフロー（流動性）、V型ロート（口先75×75mm：10mm）流下時間（材料分離抵抗性や粘性）、さらに上部鋼板へ密着させるためブリーディング率の限度まで定められたことである。その他、製作ドックから仮置場所の神戸港まで曳航していく関係で単位容積質量の規格まで設定され、空気量調整も煩雑となった。

(2) 製造管理技術の検討フロー

製造管理技術を確立するために実施した検討フローを図-2に示す。

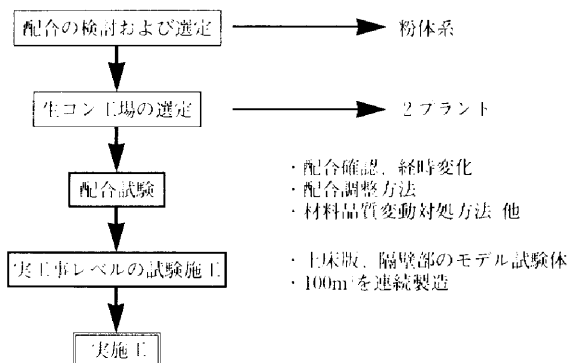


図-2 検討フロー

(3) 配合および工場の選定

1) 配合の検討および選定

高流動コンクリートは、流動性と材料分離抵抗性をバランスさせ、高い充填性を有した縮固め不要かつ硬化後の品質にも優れた高性能なコンクリートである。

現在、高流動コンクリートの研究開発は活発に行われ、各種の材料を使用した高流動コンクリートが製造されているが、何れも高性能AE減水剤を使用して流動性を確保することを主体としている点は共通であるが、所要の材料分離抵抗性を確保する方法から、a.粉体系、b.増粘剤系、c.併用系の3つに分類できる。

仕様書には、示方配合（案）として粉体系および増粘剤系の2種類の配合が提示されていたが、本工事では、既往の施工実績のある粉体系の配合で検討・実施することとした。

使用材料を表-1に、示方配合（案）を表-2に示す。

表-1 使用材料

材 料	種 類	
セメント	普通ホルトランドセメント：比重3.16、比表面積3,010cm ² /g	
混和材	高炉スラグ微粉末：比重2.90、比表面積6,000cm ² /g級	
A工場	細骨材	比重2.56、吸水率1.66、粗粒率2.63（海砂：砕砂=75：25）
	粗骨材	比重2.63、吸水率0.93、粗粒率6.64：砕石2005
B工場	細骨材	比重2.57、吸水率2.15、粗粒率2.64（海砂：砕砂=70：30）
	粗骨材	比重2.61、吸水率1.19、粗粒率6.58：砕石2005
混和剤	高性能AE減水剤（ホリカルボン酸系：SP-8S）	

2) レディーミクストコンクリート工場の選定

高流動コンクリートを約2カ月で打設する工程から、レディーミクストコンクリート工場は2社選定し、1週間の内2日間ずつ拘束することとした。

(4) 配合試験

高流動コンクリートは、高性能AE減水剤を比較的多量に使用するが、この混和剤は気温の変動に伴いその効果が微妙に変化する。したがって、示方配合（案）の確認だけでは、長期にわたる施工は困難である。

そこで、室内における示方配合（案）の確認のみならず、実機プラントミキサでの配合確認および経時変化の調査、材料の品質が変動した場合に備えた配合試験、さ

表-2 示方配合（案）

配 合	G max 骨材最大寸法 (mm)	Air 空気量 (%)	W/P 水粉体比 (%)	S/a 細骨材率 (%)	GV 粗骨材容積 (t/m ³)	単 位 量 (kg/m ³)					高性能 AE 減水剤
						W 水	C セメント	Sg スラグ	S 細骨材	G 粗骨材	
粉体系	20	5.0以下	30	50	300	176	粉体P (587)		778	777	P×1.3%
							176	411			

らに完全充填させるためブリーディングの抑制方法の検討、気温変動による高性能AE減水剤使用量の調査など、数多くの配合試験を実施し、実施工における品質変動の対処方法の検討を行った。

その結果の一部を図-3～8に示す。

1) 細骨材粒度がフレッシュ性状に及ぼす影響

細骨材粒度を変動させた結果を図-3, 4に示す。

図-3から砕砂の混合比が多くなると、微粒分量が多くなるためスランプフローが減少し、ロート流下時間も遅くなる傾向にあり、ブリーディング率も減少した。しかし、粗粒率（F.M.）が2.5～2.7程度の範囲であれば、フレッシュ性状が所要範囲内に収まり、ブリーディング率も0.5%以下を満足する結果が得られた。そこで、上記粒度範囲であれば、高性能AE減水剤使用量の若干の調整で所要の性状が得られると判断できたため、細骨材の粒度は、上記粒度範囲で管理することとした。

2) 細骨材表面水がフレッシュ性状に及ぼす影響

細骨材表面水を変動させた結果を図-5, 6に示す。

図-5から、細骨材表面水の設定を+0.5%（単位水量

約4kg/m³減）にするとスランプフローは約5cm小さくなり、設定を-1%（単位水量約8kg/m³増）にするとフローは約5cm大きくなった。V75ロート流下時間は、水量の影響に敏感に反応し、水量増加により流下時間は早くなった。

また図-6から、これら配合試験の範囲内では、単位水量が±0.5%変動してもブリーディング率の変動は0.1%程度であった。したがって、配合調整では、表面水率の設定を0.5%を上限として適宜調整することとした。

3) 高性能AE減水剤がフレッシュ性状に及ぼす影響

図-7から高性能AE減水剤使用量を0.1%増やすとスランプフローは約5cm増加した。そこで、配合を調整する場合は、上記割合で調整することとした。

4) 温度がブリーディングに及ぼす影響

図-8から、コンクリート温度が高くなるとブリーディング率は減少することを確認した。

以上の他に、後述する大規模な試験施工を実施して製造・運搬に関する品質管理マニュアルを作成した。

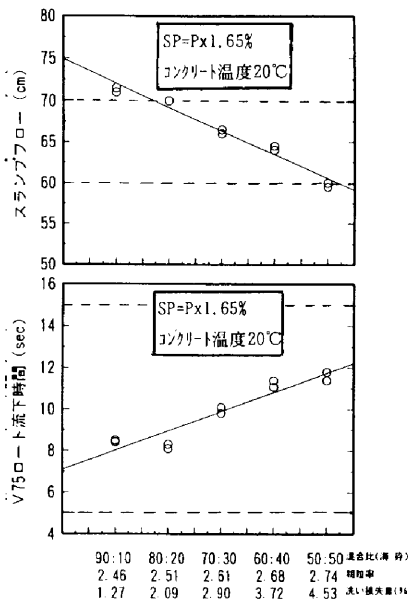


図-3 細骨材粒度変動とフレッシュ性状

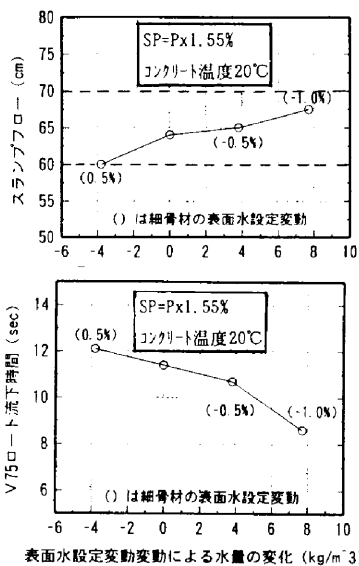


図-5 細骨材表面水変動とフレッシュ性状

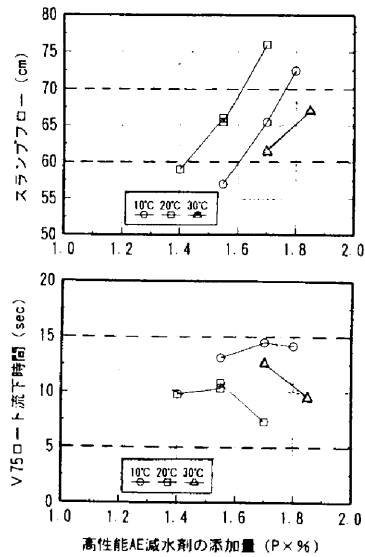


図-7 混和剤使用量とフレッシュ性状

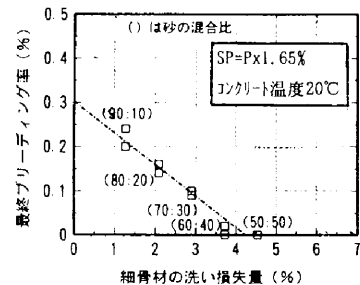


図-4 洗い損失量とブリーディング率

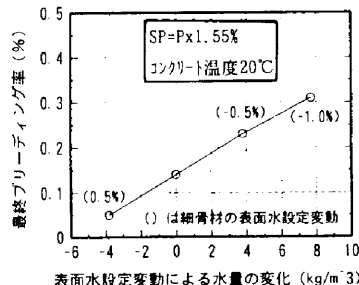


図-6 細骨材表面水変動とブリーディング率

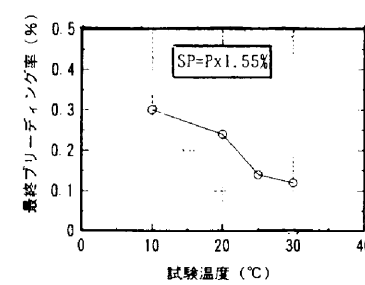


図-8 温度とブリーディング率

3-2 施工管理技術の検討および確立

(1) 施工管理体制の検討

本構造物では、隔室内にコンクリートを連続的に充填することが要求されるため、アジテータ車の遅れや品質規格外のコンクリートが運搬された場合には、充填に大きな影響を与える。したがって、高流動コンクリートの施工には、製造・運搬・打設の一連の作業を施工者の管理の下で一貫して行う必要がある。発注者側からは、品質保証の規格であるISO 9000に準じ、充填されたコンクリートが所要の品質を満たし、かつ適正な手順に基づいて施工が行われたことを確保する体系の構築が要求され、以下に示す施工管理体制の検討および各担当者毎の作業手順書の作成、さらに施工管理支援システムの構築を行った。

① 施工管理体制

事前検討に試験施工から修正を加えた施工管理体制の概念を図-9に示す。

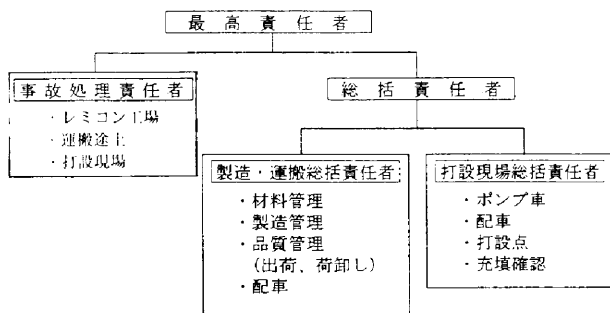


図-9 施工管理体制の概念図

製造・運搬グループは、材料管理、製造管理、品質管理、配車担当者で構成され、レディーミクストコンクリート工場に常駐し、コンクリートの製造から現場到着までを管理する。

打設現場グループは、ポンプ車、配車、打設点、充填確認担当者で構成され、ドック内現場管理室および打設現場に常駐し、現場品質管理試験を通過したコンクリートの場内運搬、打設、養生、充填確認作業を管理する。また、これらのグループにはそれぞれ総括責任者を配置し、さらにこの両者を統括し、最終意志決定を行うグループを現場事務所に配置し、通常時の管理体制とした。

また、これらとは別に工事中ポンプ車故障などのトラブルが発生した場合そのトラブルを工事から切り離して処理するために、事故処理責任者とそのグループも用意した。

② 作業手順書

適正な手順に基づいて施工管理を行えるように、作業

手順書を各セクションの担当者毎に作成した。

(2) 施工管理支援システム

製造・運搬から荷卸までの品質を確保するため、各担当毎の品質管理試験と時間データを記入した品質管理表（4枚綴り）からその結果をパソコンに入力し、出荷から荷卸までの経時変化を把握し、さらに連続打設および可成時間（1時間）以内の運行管理ができるように、プラント・打設現場・管理室（現場事務所）をオンライン化し、コンクリートポンプ車の故障や交通渋滞によるミキサ車の遅延などのトラブルに対して速やかな対処が可能なような施工管理支援システムを構築した。

システムの構成を図-10に示す。

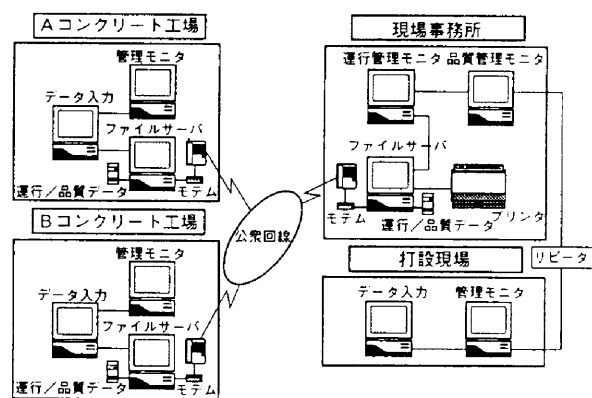


図-10 システム構成図

3-3 充填確認試験の検討

隔室内に打設したコンクリートの充填性を確認する方法として、①超音波法、②RI（中性子）法、③RI（ γ 線）法、④赤外線（サーモグラフィ）法、⑤打音法が考えられた。そこで、これらの測定方法の適用性について、人工的に空隙を設けた模擬試験体（2,000×2,000×H1,100）による充填度確認の性能試験を実施した。

充填確認性能試験結果を表-3に示す。

試験結果から、RI法と打音法を併用すれば、かなりの精度で空隙の確認が可能であることが判った。

RI法の中性子法と γ 線法については、計測費用を比較検討し、最終的に γ 線法を採用することとした。

§ 4. 試験施工

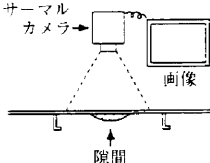
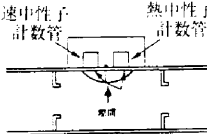
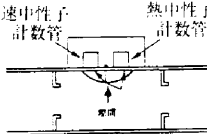
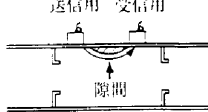
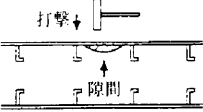
4-1 第1回試験施工（H7/6. 14,15）

(1) 目的

第1回試験施工は、次の目的で2回実施した。

- ① 充填状況、打設方法（打込み方法、打設速度）の検討
- ② 配合試験から定めた基本配合の確認、経時変化の把握

表-3 充填確認性能試験結果一覧

測定方法		赤外線サーモグラフィ	放射線法		超音波反射法	打音法
測定原理	測定	コンクリートと隙間で熱伝導度が異なることから、発生する温度差を赤外線の放出量からサーマルビデオシステムにより検知し判断する。 	RI (中性子) 法 鋼板に設置した測定器の中性子あるいはγ線源から放射された中性子がコンクリートに衝突・散乱して、再び測定器に戻ってくる量(強度)を測定し、判断する。 	RI (γ線) 法 鋼板に設置した測定器の中性子あるいはγ線源から放射された中性子がコンクリートに衝突・散乱して、再び測定器に戻ってくる量(強度)を測定し、判断する。 	鋼板表面に送・受信用探触子を設置し、入射された超音波が受信用探触子に到達するまでの時間およびその量を検知して判断する。 	人がテストハンマーにより、鋼板表面に打撃を与え、その音の差異を耳で聞き分けることにより判断する。 
		検査時間が限定されるが、最も精度が良い。 ○	測定間隔により差があるが、本測定では良好な結果は得られなかった。 △	中性子法より測定間隔が狭かったため、ある程度の分布は把握できた。 △	分布状況は明瞭に判らなかつた。 ×	空隙の有無は判断できるため、分布状況の把握は可能である。 △
測定結果	空隙分布状況					
測定結果	空隙厚さ	相対的な評価(浅い深い)のみ。 △	測定値の誤差が5mm以上となった。 △	測定精度は、最も良好であった。 ○	測定値の誤差は、20~80mm程度となった。 ×	空隙厚さと測定結果の相関は不明である。 ×
解析時間		長い	短い	短い	短い	最も短い
作業性		×	△	△	×	○
経済性		×	△	△	△	○

③品質・施工管理体制のチェックおよび作業手順の修得と見直し

(2) 試験体および打設方法

試験体は、上床版の1隔室(3.0×3.0×H1.1m:V=10m³)をモデルに全部で6体作成した。表-4に試験体および打設方法を示す。図-11に試験施工の模式図を示す。

4-2 第2回試験施工(H7/7. 5,6)

(1) 目的

第2回試験施工は、次の目的で2回実施した。

- ①高流動コンクリートの連続製造・打設(約100m³)
- ②隔壁部における充填状況、打設サイクルの確認
- ③管理支援システムを導入した管理体制のチェック

(2) 試験体および打設方法

表-4 試験体および打設方法

	型枠形式	試験体	打設方法	打設速度(m³/h)	突き棒
第1日	Type.A	No.1	筒先隔離	22.5	有
	Type.B	No.2	ホッパー	22.5	有
	Type.B	No.3	筒先隔離	30.0	有
第2日	Type.A	No.4	ホッパー	30.0	無
	Type.B	No.5	筒先隔離	30.0	無
	Type.B	No.6	筒先挿入	30.0	無

※Type.A:側面(4面)と上面にアクリル板を使用

※Type.B:上面および側面の一部にアクリル板を使用

表-5に試験体および打設方法を示し、図-12に試験施工の要領模式図を示す。

4-3 試験施工結果

(1) 配合および品質管理

試験施工では、細骨材表面水率の適切な設定および高性能AE減水剤使用量を適切に調整することにより規格値内で安定した品質の高流動コンクリートを供給することができた。

また、製造したコンクリート品質の経時変化については、ほぼ90分程度まで所要の品質を満足し(図-13参照)、ブリーディング率については最終的に0.5%以下に収まり基本配合の妥当性が確認できた。

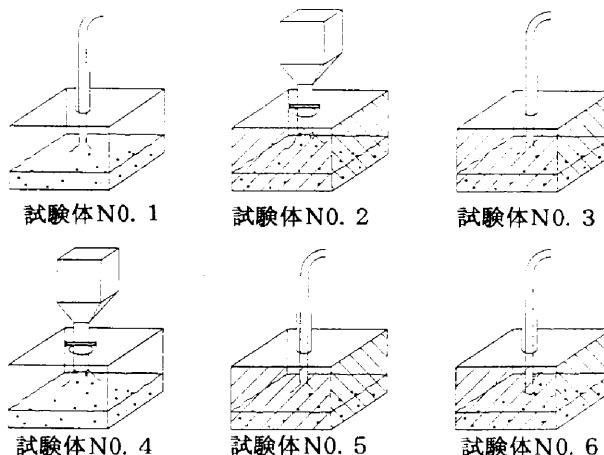


図-11 第1回試験施工模式図

表-5 試験体および打設方法

Type	試験体No.	モデル	型枠構造	V (m ³)	個数	摘要
A	2, 13	上床版	全面: アクリル	10	2	第1回試験施工結果の再確認用。筒先隔離方式により、上面から20cm下がりまで打設速度30m/hで打込み、残りを15m/hで打設。
B	4, 7, 16, 17	上床版	側面: メタル 頂版: アクリル	10	4	上面充填度の再確認。
C	14	上床版	側面: メタル 頂版: 鋼板	10	1	頂版の鋼板とスチフナーはボルト接合とし、硬化後蓋を撤去。
D	6	上床版	全面: 鋼板	10	1	設計図書に指定されたもの。
E	1, 3, 8, 9, 10, 11, 12, 18	上床版	側面: メタル 頂版: なし	10	10	高流動コンクリートの連続打設状況を確認するための試験体。途中、打設速度を高め、筒先からのコンクリートの吐出状況を確認。
F	5	隔壁	表面: アクリル 裏面: 鋼板	11.3	1	隔壁一般部のモデル。打設口から一定の打設速度で打設し、コンクリートの充填状況、流動勾配を確認。水平に立ち上がるのに要する各打設口からの打設時間を確認。
G	15	隔壁	表面: アクリル 裏面: 鋼板	11.3	1	引寄せジャッキ用箱抜き部分のモデル。1箇所からの打設口からコンクリートを打設し、箱抜き部廻りの充填状況を確認。

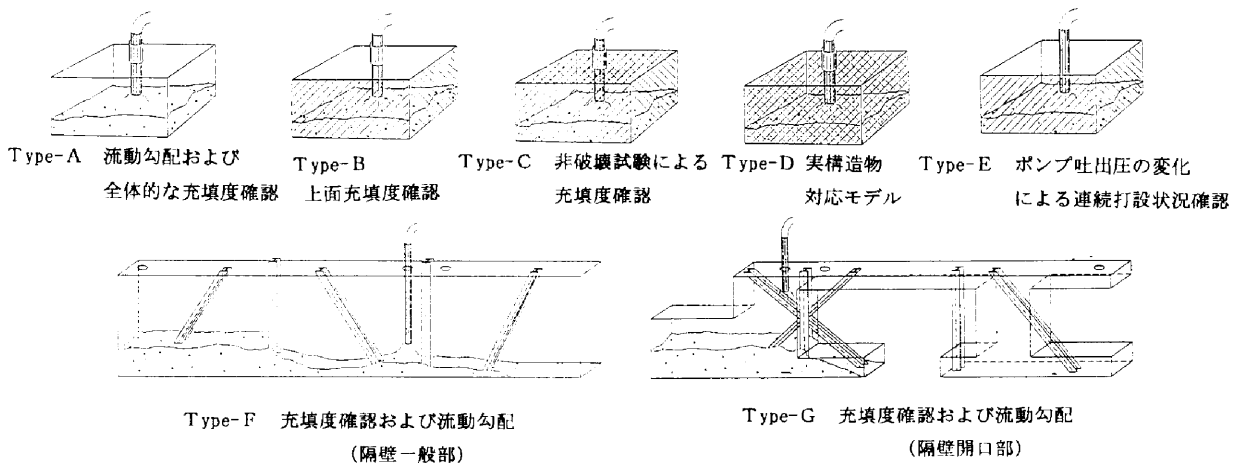


図-12 試験施工要領図

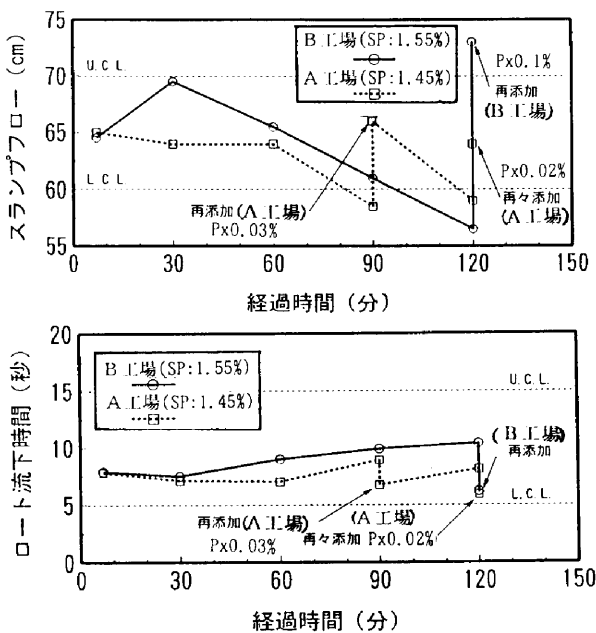


図-13 高流動コンクリートの経時変化



写真-1 試験施工の状況

1) 上床版モデル

第1回試験施工における充填結果を表-6に、充填状況の例を図-14に示す。

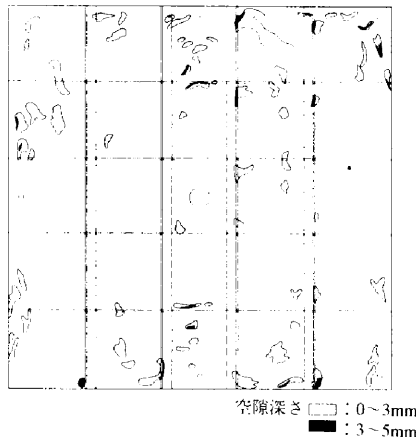
試験施工結果から、各打設方法とも5mm以上の空隙は無く、充填率はほとんど95%以上と非常に良好な結果が得られ、また打設方法および突き棒作業の有無による天端の充填率に大きな差はなかった。したがって、実施工における打設方法は、作業性を考慮し、ポンプ筒先を

(2) 打設方法と充填度

試験施工の状況を写真-1に示す。

表一六 充填結果

試験体	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
打設方法	筒先隔離	ホッパ	筒先隔離	ホッパ	筒先隔離	筒先挿入
打設速度	22.5m ³ /h (天端近く 15m ³ /h)	22.5m ³ /h (天端近く 15m ³ /h)	30.0m ³ /h (天端近く 15m ³ /h)	30.0m ³ /h (天端近く 15m ³ /h)	30.0m ³ /h (天端近く 同・速度)	30.0m ³ /h (天端近く 同・速度)
突き棒	有	有	有	無	無	無
充填率(%) (5mm以下)	96.04 (3.96)	96.24 (3.76)	95.83 (4.17)	96.72 (3.28)	94.47 (5.53)	94.12 (5.88)

NO.5 筒先隔離方式 打設速度30m³/h 突き棒無し

図一四 充填状況の例

徐々に上げていく一般的な筒先隔離方式を採用した。

また、天端近くなってから打設速度を落とす方が充填率が良好であったため、天端から20cm下がり（シアコネクターから5cm下がり）まではプラントの製造能力から30m³/hと設定し、その後は充填性を上げるため15m³/hとゆっくり打設を行うこととした。

なお、打設時の充填確認方法は、空気孔から透明なアクリル管を1m立上げ、空気孔よりコンクリートが30cm程度上昇した時点まで打設終了とすることとした。

2) 隔壁モデル

実構造物をモデル化した試験型枠（9.0×0.5×H3.0m）に3mピッチに打設孔を設置し、各打設孔から充填状況を確認した。トラス材、鉄筋があるにも拘わらず、高流動コンクリートはほぼ水平を保って打設された。したがって、各打設孔から均等に打設するため打設量やサイクル等の細かい設定は必要なく、一定時間間隔で打設を行うこととした。

また、箱抜き部分の充填状況も良好であり、支障となるところはなかった。

(3) 運行管理

第1回試験施工により製造・運搬から打設終了までのサイクルタイム（約50分）を把握できたため、第2回試験施工では配車スケジュールを組んで実施した。

試験結果では、品質管理試験を行った場合や打設の段

取り替え、連続打設のためアジテータ車の確保から待機時間が長くなった場合、可使用時間（1時間）を越え、所要のフレッシュ性状を保つ限界に近い90分を越えた場合もみられた。このうち、品質管理試験は5～10分程度と僅かな時間であるがばらつきがみられたので時間の短縮、さらに出荷時については試料を採取し、運行中に試験を行って出荷の可否を判断するなど再考する必要があった。

(4) 施工管理体制

本試験施工では、100m³の連続打設、管理支援システムを導入した初めての試みだけにスムーズに機能しなかった部分が多く、特に連絡・指示・判断について周知徹底されていない面があった。

§ 5. まとめ

試験施工によって、①基本配合の確立、②高流動コンクリート性状の把握、③上床版および隔壁への高流動コンクリートの充填性の確認、④最適打設方法および打設速度の設定についてはほぼ目的が達成できた。

しかし、①実施に即した運行管理、②支援システムを導入した管理体制の確立、③連絡・指示系統の明確化、④情報伝達手段の確立についての課題が抽出された。

これらについては、

①施工管理体制の見直し

（体制表の再構築、作業手順書の見直し）

②施工サイクルの短縮

③品質管理試験方法の見直し

④管理支援システム改善及び各担当者への周知徹底

⑤トラブル事象の絞り込みおよび対処方法の検討

等を図り、さらに下床版を利用してシミュレーションを3回（340, 340, 70m³）実施して、実施に望んだ。

実施では、約12,000m³と大量の高流動コンクリートをレディーミクストコンクリート2工場で2ヶ月間ほとんど毎日連続的に製造・施工するという急速施工であったが、このように試験施工を含めて実施した数多くの検討から品質・施工管理マニュアルを整備し、さらに施工管理体制・支援システムを確立することによって良好な成果を得ることができた。

最後に、本工事に関してご指導・ご助言を戴いた運輸省第三港湾建設局、ならびにご指導・ご支援を戴いた本社（土木設計部、土木部、機材部、技術研究所）・関西支店、さらに施工にご協力・ご支援を戴いた関係者各位に感謝する次第であります。