

報告 サンドイッチ合成構造沈埋函の高流動コンクリートの施工

中島 由貴*¹・小島 朗史*²・城代 高明*³・高橋 秀樹*⁴

要旨：先例のないサンドイッチ合成構造沈埋函工事において、市中の生コン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。したがって、その品質を確保するため、製造・品質管理技術を確認するばかりでなく施工管理体制や管理支援システムの導入、充填確認試験方法など施工管理技術を確認して施工を行い、良好な品質管理結果を得ることができた。

キーワード：沈埋函，サンドイッチ構造，高流動コンクリート，施工管理，品質管理

1. はじめに

神戸港内にある人工島ポートアイランドの拡張計画に伴い、交通量の増加と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第二の連絡路(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。サンドイッチ構造物には、高流動コンクリートの使用が不可欠であるが、施工上多くの課題があり、工事の成否に果す高流動コンクリートの役割は非常に大きなものがあつた。

本文では、この沈埋函工事において、約12,000m³の高流動コンクリートを市中の生コン工場で2カ月間にわたって連続的に製造・施工を行い、貴重な成果が得られたので報告する。

2. 工事の概要と高流動コンクリート施工上の課題

2.1 工事の概要

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函の製作を行った。

沈埋函1函は、高さ9.1m、幅34.6m、長さ87.4m、重さ約27,000tの大きさである。

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、これらのうち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。

沈埋函の基本断面図を図-1に示す。

2.2 施工上の課題と検討

(1) 施工上の課題

課題として、①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、②高流動コンクリートの性能を保持する限られた時間内で施工するため、製造から打設終了までの施工管理、さらに③直接目視による出来形検査が不可能であるため、充填確認試験方法の明確化が挙げられた。

*1 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所(正会員)

*2 運輸省第三港湾建設局次長

*3 運輸省第三港湾建設局神戸港湾震災復興事務所

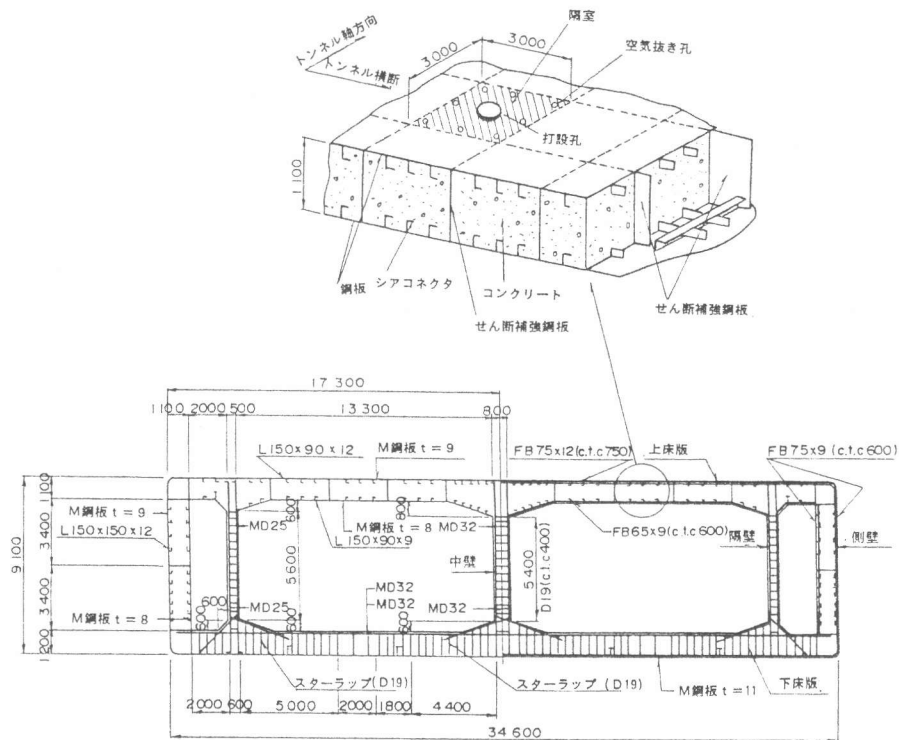
*4 西松建設(株)(正会員)

(2) 課題の検討

課題をクリアするため、製造に関しては、安定したコンクリートを提供するための材料や品質管理、施工に関しては時間管理を行うため人的体制の提案やパソコンによるネットワークを用いた支援システムの導入、充填管理方法の検討を行った。

さらに、実施工に先立ち試験施工（上床版、隔壁モデル）および下床版を利用してシミュレーションを実施して、高流動コンクリートを連続的に大量製造した

場合の配合やその性状・充填度、打設方法、運行管理、施工管理などを確認し、最終的に管理マニュアルを作成して実施工に望んだ。



図－1 沈埋函基本断面図

3. 高流動コンクリートの施工

3.1 製造

(1) 使用材料および配合

本工事に使用した使用材料を表－1に、配合を表－2に示す。

(2) 製造プラントと製造

約12,000m³の高流動コンクリートを2カ月で打設する工程から生コン工場は2社選定し、1週間の内2日間づつ拘束することとした。1バッチの練混ぜ量および練混ぜ時間は、試験練りの結果からどちらも2.25m³（ミキサ容量：A工場2.5m³、B工場3m³）、全材料投入後2分で実施した。

表－1 使用材料

材 料	種 類
セメント	普通ポ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（ポリカルボキレート系）

表－2 示方配合（A工場）

配合	骨材最大寸法 (mm) G max	水粉体比 (%) W/P	水粉体比 (%) W/VP	粗粒細骨材容積比 Sc/M	細骨材率 (%) S/a	粗骨材容積 (l/m ³) GV	単 位 量 (kg/m ³)					高性能 AE 減水剤
							水 W	セメント C	スラグ Sg	細骨材 S	粗骨材 G	
粉体系	20	29	0.85	0.43	50	300	176	粉体P (587)		768	789	P× 1.4%
								176	411			

3.2 品質管理

(1) 品質管理基準

従前の充填実験結果から、表-3に示す品質管理基準を設定した。

(2) 材料管理

細骨材の粒度については、粒度を変動させた試験結果から、

表-3 品質管理基準

フレッシュ	スランプフロー	土木学会基準(案)	65±5cm	最初の連続5台、以後75m³に1回(出荷)、荷卸し時は全車
	V75ロート試験	試験方法(案)	10±5秒	1回/75m³および随時
	空気量試験(単位容積質量)	JIS A 1128	5%以下 (2.3~2.35t/m³)	同上
コンクリート	温度及び気温		5~30℃	同上
	ブリーディング	JIS A 1123準拠	0%	150m³に1回(出荷時)
	塩化物量	JIS A 5308	0.3kg/m³以下	同上(荷卸時)
硬化	圧縮強度	JIS A 1108	$\sigma_{ck}=300\text{kgf/cm}^2$	同上(荷卸時: σ_7 , σ_{28})
	単位容積質量	JIS A 1116	2.3~2.35t/m³	同上(荷卸時) 500×500×500

試験時の上下限の粒度範囲(F.M.=2.5~2.7程度)で管理すれば、高性能AE減水剤量の微調整で所要の品質を満足すると判断できたため、この粒度範囲で管理することとし、入荷前に粒度のチェック(月次の定期試験、目視、触診など)を実施し、粒度範囲内に収まった材料を使用した。また、プラントの細骨材の貯蔵は屋外のため、降雨時や降雨後の表面水の変動が懸念されたため、シート養生を行った。なお、製造時のミキサ油圧値やフレッシュ性状に変動が認められた時には、随時細骨材表面水のチェックを行い、結果的に1時間に1回以上の表面水測定を行った。

(3) 製造時の管理

試験を実施しない場合の出荷可否は、練混ぜ時のミキサ油圧値やモニタカメラによる目視などで判断した。

配合調整は、①細骨材表面水率の微調整(ブリーディングの抑制から±0.5%を上限)、②高性能AE減水剤の添加量(フロー調整量5cmにつき添加量0.1%の割合)調整により行った。また、細骨材表面水率の設定は、測定値と設定値との差が0.5%以上とならないよう管理を行った。

(4) 荷卸し時の管理

1) スランプフロー試験による全車管理

荷卸し時は、打込むコンクリートの品質を高頻度で確認するため、スランプフロー試験によるアジテータ車の全車管理を実施した。

2) 高流動コンクリートの可使時間

実機での配合試験における高流動コンクリートの経時変化は、80分程度まで所要の品質性状(スランプフロー60cm以上)を満足していた。これに対し、可使時間は原則として1時間と設定し、余裕をもって施工に望んだ。

3) 打設時のアジテータ車管理

製造待ち等のトラブルによって打設が中断すると充填性の低下が懸念され、連続打設するために、常時打設中のポンプ車の傍らに1隔壁の数量を確保するだけのアジテータ車を待機させた。

3. 3 施工

(1) 打設計画

本工事では、工程上から約2カ月で打設する必要があり、プラントの製造能力(40~45m³/h: 1バッチ2.25m³の製造時間約3分)から、一日の打設量を350~400m³程度で計画した。

(2) 打設方法

打設方法は、上床版を模擬した試験施工結果からポンプ筒先を徐々に上げていく筒先隔離方式を採用し、また上端近くで打設速度を落とす方が充填性が良好であったため、上端から20cm下がりまでは30m³/h、その後は15m³/hの打設速度でゆっくり行うこととした。ポンプは、100m³/h級

のロングブーム車を2台使用し、ポンプ故障など不測のトラブルを考慮し、予備1台を配備した。

(3) 施工管理

1) 施工管理体制

サンドイッチ構造では、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、アジテータ車の遅れや規格外のコンクリートの打込みは許されない。したがって、責任者が的確に打設の可否を判断できるように、品質・時間の情報が必要であるが、その膨大な情報を整理するため、責任者の秘書ともいえる「管理・分析担当者」を、またトラブルを未然に防ぎ、打設作業と並行してトラブルが処理できるよう「事故処理班」を特別に配置した。実施管理体制を図-2に示す。

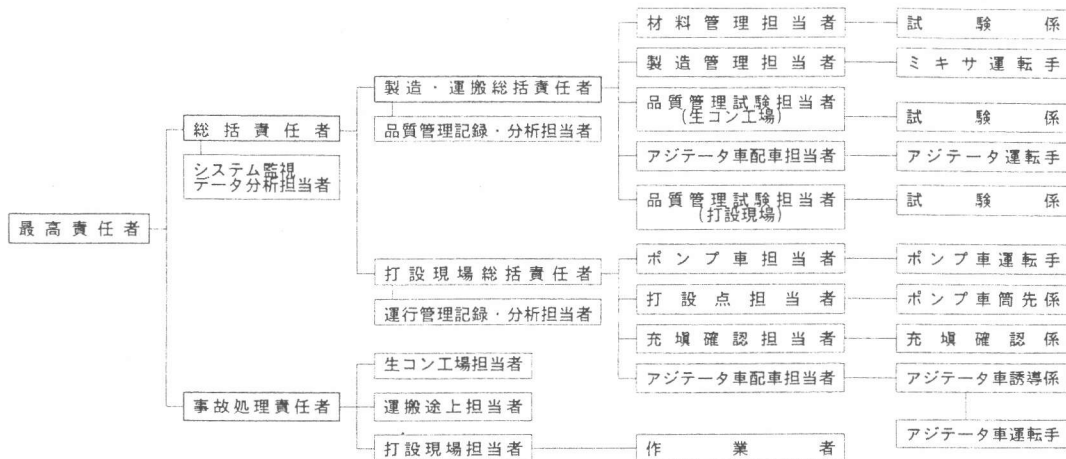


図-2 施工管理体制

2) 施工管理支援オンラインシステム

製造から運搬・荷卸しまでの品質の経時変化を把握し、さらに連続打設・可使時間以内の運行管理ができるように、工場・打設現場・管理室(事務所)をオンライン化した。これにより、表面水量、運行時間等種々の情報を5分程度のタイムラグで、責任者等主要な担当者がモニタでき、各情報値に異常値が発生した際には時期を失せず担当者間で連携して有効な対策を講ずることができた。システムを図-3に示す。

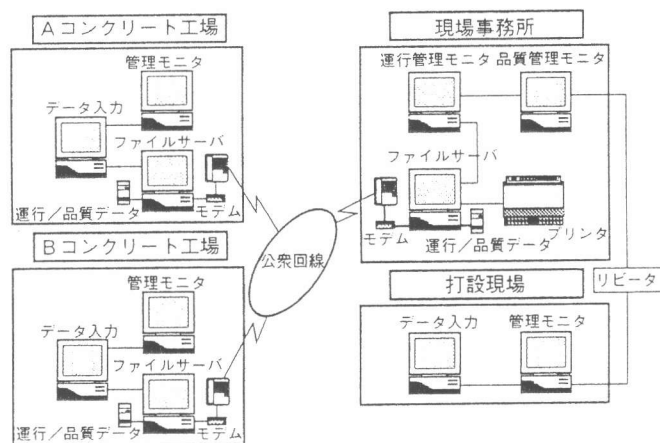


図-3 オンラインシステム構成図

(4) 充填管理

①超音波法、②R I (中性子) 法、③R I (γ線) 法、④赤外線(サーモグラフィ)法、⑤打音法の各試験方法について、人工空隙(2~10mm)を作製した模擬試験体(2,000×2,000×1,100H)による性能試験を実施した。その結果、空隙厚測定にはR I 法のみ有効で、蓋の変形が生じたため把握精度は落ちるが、計測誤差は1mm程度、またキャリブレーション誤差は0.3mmと十分な精度であった。また、空隙範囲の把握には打音法で十分対応可能であり、実施工では両者(R I 法は、経済性からγ線法を選定)を併用して、充填管理法とした。

4. 高流動コンクリートの施工結果

4. 1 材料(骨材)管理

細骨材粒度については、工場管理が的確であったため設定した粒度管理範囲内で管理することができた。また、細骨材表面水の管理についても概ね5%以下（平均値：海砂4.3%，砕砂0.9%）で管理することができた。粒度および表面水管理試験結果を、以下に示す。

- ①細骨材粒度（A工場）平均値 2.57 [2.53～2.62]：（B工場）平均値 2.61 [2.53～2.69]
- ②細骨材表面水（A工場）平均値：海砂4.5% [3.6～5.7%]：砕砂1.0% [0.6～2.2%]
（B工場）平均値：海砂4.1% [2.8～6.0%]：砕砂0.8% [0.1～3.3%]

4.2 品質管理

(1) 製造時の管理

製造時の管理に使用したミキサ練混ぜ時の油圧値と荷卸時のフレッシュ性状との関係を図-4に示す。前回のミキサ油圧負荷値や当日最初の油圧値を基に、その後油圧値が±5 kgf/cm²程度以上変動した場合に配合の調整を行った。その結果、油圧値で厳密に管理することは難しいが、図-4に示すように荷卸し時において概ね良好な結果が得られ、管理の目安として役立った。

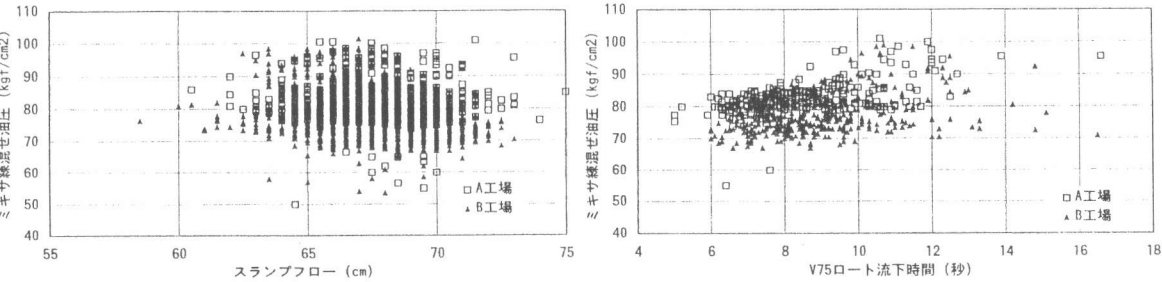


図-4 ミキサ油圧値と荷卸時のフレッシュ性状

(2) 品質管理試験結果

荷卸し時のスランプフローの管理目標値は、試験施工などから充填性が良好と判断された規格値より厳しい65～70cmとした。

品質管理試験結果一覧を表-4に、図-5に温度と高性能AE減水剤使用量との関係を示す。

試験結果から、規格値を外れて打込んだものもあるが、次の理由による。

スランプフローが70cm以上の場合には、目視で

表-4 品質管理試験結果一覧

試 験 項 目		範 囲	平均	標準偏差	備 考
出 荷	スランプフロー (cm)	56.0 ～ 72.5	64.9	2.9	N= 343
	V75ロート流下時間 (秒)	6.0 ～ 12.9	8.6	1.4	N= 327
	空 気 量 (%)	1.5 ～ 4.9	3.0	0.8	N= 325
	(単位容積質量(t/m³))	2.29～ 2.35	2.33	0.0	N= 325
	ブリーディング率 (%)	0.09～ 0.50	0.33	0.10	N= 98
荷 卸 し	スランプフロー (cm) (打込範囲)	58.5 ～ 75.0 60.0 ～ 73.0	67.5 67.5	1.9 1.9	N=2,781 N=2,758
	V75ロート流下時間 (秒) (打込範囲)	5.0 ～ 30.0 5.0 ～ 14.8	8.8 8.7	2.0 1.6	N= 634 N= 627
	空 気 量 (%) (打込範囲)	2.0 ～ 5.1 2.0 ～ 4.8	3.7 3.7	0.5 0.5	N= 531 N= 526
	(単位容積質量(t/m³)) (打込範囲)	2.30～ 2.38 2.30～ 2.38	2.33 2.33	0.0 0.0	N= 526 N= 521
	圧 縮 強 度 (kgf/cm²)	σ7 σ28	529 ～ 740 681 ～ 918	634 814	37 48
単位容積質量 (t / m ³)		2.30～ 2.34	2.33	0.0	N= 98

分離が認められないと判断できた場合に使用し、品質規格値を外れて廃棄したものは約50m³ (0.4%：対出荷)と僅かであった。またブリーディング率については、事前の実験から充分0に近い配合を選択したが、施工に際し発注者側も含めた種々の手違いがあり、当初禁止していた水によるフロー調整が実施されたこともあって、表-5にみられるようなブリーディングによるものと考えられる空隙が発生した。単位容積質量試験は、供試体重量を測定して管理を行った。なお通常の品質管理試験では、空気量試験とセットで測定を行い、参考値とした。

温度の変動に対しては、図－5に示すように、基本的に高性能AE減水剤使用量で調整した。

4. 3 運行管理

運行管理では、試験施工等から製造・運行・打設終了までのサイクルタイム（約50分）を把握することができたため配車スケジュールを組んで運行管理を実施し、連続打設を心がけ次の点に留意して管理を行った。

- ①高流動コンクリートの可使時間1時間以内の打設
- ②上床版1隔室を50分以内での打設
- ③スランブフローのロスを考慮して荷卸し時の品質

管理試験終了後、15分以内の打設

その結果、①の可使時間以内での管理を基本とすることにより、②はほぼ自動的にクリアできたが、③は15分を経過する例が散見された。なお、後述するトラブル等により1時間を越えた場合もあったが、この場合には打込み前に品質を再チェックし、不合格の場合には廃棄した。

4. 4 充填管理

各函体別の空隙厚の測定結果を表－5に示す。

表－5 充填管理試験結果（空隙厚）

充填検査は鋼板の温度による変形や硬化後の沈下などが想定されたため打設直後（30分以内）と硬化後（20～60日後）の2回測定した。その結果、約3,700の測定点の内、硬化後において5mm以上となったのは、2号函で1.2%、3号函で0.2%程度と僅かであった。なお、構造上若干でも支障が懸念された場合や、5mm以上の空隙は無機系材料による注入を実施し、補修を行った。

部 位	2 号 函 (mm)		3 号 函 (mm)	
	打設直後	硬化後	打設直後	硬化後
側 壁	1.836	2.349	0.707	1.353
隔 壁	2.812	2.734	0.671	1.442
中 壁	3.027	3.523	1.507	2.294
上床版	1.149	1.603	0.919	1.820

4. 5 施工時におけるトラブル

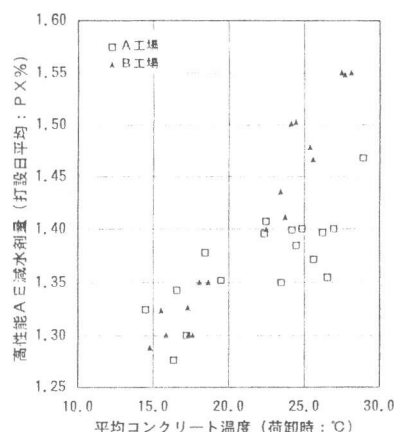
施工時のトラブルについては、①ポンプ車の故障や管の破損、②アジテータ車の遅れ（交通渋滞、事故、規制など）、③製造プラントにおける出荷システムの故障、④計量装置の故障（粉体によるゲートの目詰まり）などが発生したが、予備のポンプ車や管の取替え、アジテータ車台数を増やしたり、ゲート開閉による送風などにより何れも適切な対処を施すことができた。

5. まとめ

フルサンドイッチ構造の沈埋函に高流動コンクリートを使用したのは本工事が初めてで、しかも約12,000m³と大量の高流動コンクリートを生コン2工場で2カ月間ほとんど毎日連続的に製造・施工したが、このように細心の注意を払って施工を行った結果、良好な成果が得られた。

しかしながら、製造したコンクリートが所要の品質を満足し、かつサンドイッチ構造内に充填できたことを確保するため、品質・施工管理に関わる要員が多く必要であり、今後の課題として、電力値などによる製造時の自動管理や荷卸し時の全量受入れ検査装置の開発、充填管理試験など品質・施工管理方法の合理化、省力化を進めていく必要がある。

最後に、本工事に関してご指導・ご助言戴いた「神戸港港島トンネル専門委員会および高流動コンクリート専門検討会」の関係諸氏、並びに本工事に関わった西松・鴻池・飛島・新日鐵建設工事共同企業体、さらに施工にご協力・ご支援を戴いた関係者各位に深謝する次第である。



図－5 高性能AE減水剤使用量と温度