

(34) 合成版式沈埋函における高流動コンクリートの施工

Pouring Works of High Fluidity Concrete for Immersed Tunnel by Steel-concrete Composite Structure

浅山英章* 白岩成樹** 北澤壮介*** 西村敬一**** 久米仁司*****

*運輸省第三港湾建設局神戸港湾工事事務所第一工事課長 (〒651-0082 神戸市中央区小野浜町7番30号)

**元運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所技術開発課長 (〒650-0024 神戸市中央区海岸通)

*** (財)沿岸開発技術研究センター第二調査研究部長 (〒102-0092 千代田区隼町3-16)

**** (財)沿岸開発技術研究センター第二調査研究部主任研究員 (〒102-0092 千代田区隼町3-16)

***** (株)ニュージェック港湾空港部海工室 (〒542-0082 大阪市中央区島之内1-20-19)

In the case of an immersed tunnel portion of the Kobe Bay Minatoshima tunnel, steel-concrete sandwich composite structure is adopted. The immersed tunnel element is manufactured by pouring the high fluidity concrete into steel shell structure, which has been assembled in a dry dock. Manufacture of immersed tunnel element was already completed and high fluidity concrete was used for 5 tunnel elements and terminal joint element.

Pouring of high fluidity concrete is very difficult works, because this type of concrete varies in its properties due to various external factors, and moreover pouring has to be performed into steel shell structure under the conditions, that it can not be inspected by visual observation. In this report, an outline of this work and work execution results are reported.

1. はじめに

神戸港港島トンネルは、神戸港の海上都市「ポートアイランド」の拡張計画に伴い、予測される交通量の増加に対応するとともに、1本の橋梁のみに依存していたライフラインの二重化を図ることを目的として建設された海底トンネルである。

この沈埋トンネルは、全長520m、6函の沈埋函で構成されている。図-1に縦断面図、図-2に標準的な沈埋函の断面図を示す。沈埋函は、上床版、側壁、隔壁、中壁、下床版で構成され、これらの部材のうち、下床版が外側のみに鋼材を配したオープンサンドイッチ構造で、その他の部材は、部材両面に鋼材を配したフルサンドイッチ構造となっている。図-3にフルサンドイッチ構造の概念図を示す。

フルサンドイッチ構造を採用することにより、施工上の利点として、以下のものが挙げられる。

- ① 鉄筋・型枠の材料節減と、これに伴う配筋・型枠組み立て作業の低減が図れ、工期が短縮できること。
- ② 複数の工場で鋼殻を製作することにより工期が短縮できること。

また、施工上の難点として、以下のものが挙げられる。

- ① 構造上の特徴(密閉された隔室と剛性の高い鋼殻)から、コンクリートの締め固めが十分にできないこと。
- ② 鋼とコンクリートを一体化する必要があることから、コンクリートを材料分離せずに、鋼殻の隅々(特に隔室上面)まで隙間なく、連続的に充填しなければならないこと。



図-1 縦断面図

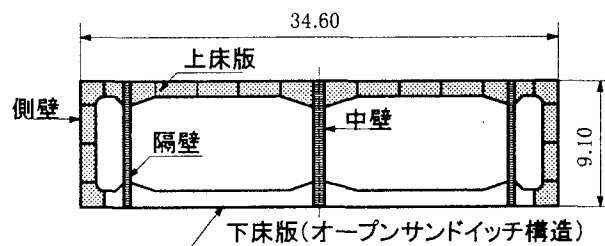


図-2 沈埋函の標準的な断面

これらの難点を克服するために、高流動コンクリートが使用されるようになった。

フルサンドイッチ構造の鋼殻内へのコンクリートの充填という課題に対し、高流動コンクリートの施工システムを構築し、そのシステムを確実に運用することにより、高品質の沈埋函を無事に完成することができた。本稿では、フルサンドイッチ構造が採用された2号函から6号函と最終継ぎ手函のうち、打設量の多い2号函から6号函までの施工結果とその評価について報告する。¹⁾²⁾³⁾

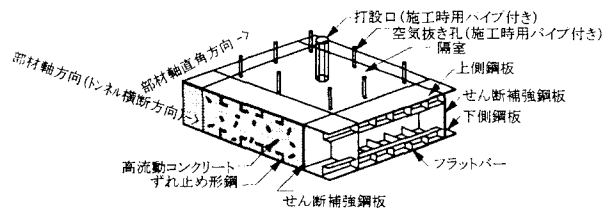


図-3 フルサンドイッチ構造の概念図

2. 港島トンネル沈埋函工事の概要

沈埋函は3つの共同企業体(その2, 3, 4工事と示す)により製作され、その2工事が2,3号函を、その3工事が4,5号函を、その4工事が6号函を製作した。

(1) 打設期間・打設量

各函の高流動コンクリートの打設期間および打設量を表-1に示す。

表-1 打設期間・打設量

	2号函	3号函	4号函	5号函	6号函
期間自	H7.9.25	H7.10.26	H9.2.18	H9.2.5	H9.2.7
期間至	H7.10.24	H7.11.28	H9.4.17	H9.3.26	H9.3.28
打設量	6210m ³	6210m ³	6584m ³	6146m ³	6965m ³

(2) 製造

高流動コンクリートの製造は、20分以内に打設現場までコンクリートを運搬できる市中生コン工場(JIS表示許可工場)を1工事あたり2工場選定した。打設日は、1工場を専有し、他のコンクリートは一切製造しないものとした。

工場のミキサーは2.75m³から3.00m³の容量で、高流動コンクリートは、1バッチ当たり2.25m³を練り混ぜた。

(3) 運搬

高流動コンクリートの運搬は、アジテータ車を使用した。アジテータ車1台あたりのコンクリート積載量は、2バッチ分4.5m³とした。なお、打設日に使用するアジテータ車は専有し、他のコンクリートは運搬しないものとした。

(4) 打設

高流動コンクリートは、普通のコンクリートより粘性が大きく、圧送抵抗が大きい。ため、打設は30m級ロングブーム付き吐出量100m³/h以上の能力を有するポンプ車を2台使用した。2台のポンプ車は、各々沈埋函の両側壁側に配置し、打設区画が対称になるようにそれぞれ別々の打設区画を打設した。また、ポンプ車の故障により、隔室内部での打設中断を防止するために、予備のポンプ車を1台待機させるものとした。

(5) 品質管理

高流動コンクリートの品質管理基準を表-2に示す。

フレッシュコンクリートの品質管理は、表の規格値を基本としたが、コンクリートのフレッシュ性状を生コン工場でコントロールするために、全てのアジテータ車について、スランプフロー試験とコンクリート温度を測定した。

コンクリートの性状は、高性能AE減水剤の添加量で調整する。高性能AE減水剤での調整は、わずかの添加量過多が原因でスランプフローの上限値を超えるおそれがあるが、細骨材の表面水管理を厳密に行うことから、発注者の係官立ち会いのもと、材料分離がないことを確認して、規準値は越えるが、スランプフロー70cm以上73cm以下のものは合格とした。

表-2 フレッシュコンクリートの品質管理基準

試験項目	規格値	頻度
スランプフロー	65±5 cm	最初の5台、以後75m ³ に一回
V75漏斗流下時間	10±5 秒	同上
単位容積質量	2.3~2.35t/m ³	同上
コンクリート温度	5℃~30℃	同上
ブリーディング	0 %	150m ³ に1回

(6) 充填確認

隔室に打設したコンクリートの充填を確認するために、コンクリート打設直後とコンクリート硬化後に、鋼板上から、非破壊検査により鋼板とコンクリートの間隙量を測定した。非破壊検査の方法は、工事開始前に実施した施工管理実証実験において、最も有用な方法と判断された放射線(γ線)法(以下RI試験)を用いた。

測定原理は、測定器に内蔵した線源から放出された微量のガンマ線が鋼板を透過し、コンクリート面で反射して、再び測定器に戻る放射線量を計数し、次に示す方法で求めた間隙量と計数値との相関関係から間隙量を求めた。図-4は、充填する高流動コンクリートと同じ配合で作成したコンクリートブロックの上に、間隙量を模擬するアクリル製のスペーサーを置き、その上に実構造と同じ材質、同じ厚さの鋼板を置いて、擬似的に鋼板下に間隙を作った試験体である。間隙量と放射線の計数値の相関関係は、スペー

サーの厚さを変化させて作成する。なお、測定器が測定する放射線量は、測定器下面の約 20cm×20cm の範囲で検知するので、間隙量は、この範囲の平均的な値となる。

この工事に使用した高流動コンクリートは、打設時の充填性を高めるために、鉄筋コンクリート構造に使用する高流動コンクリートよりも粘性が小さく、流動な配の小さい配合とした。そして、施工管理において時間管理を厳密に行ったことから、スランプフローが低下したコンクリートが打設されることはなく、局所的な未充填が発生する可能性は小さいと考えられることから、未充填部は、ブリーディングが原因となるような面的な沈下となると予想される。従って、この測定器における面的な測定で、実構造の鋼板下の間隙量を定量的に測定できると判断した。なお、この測定器に使用するガンマ線は、3.7MBq 以下の密封線源であるので、使用に際し、資格や届けが必要ない。

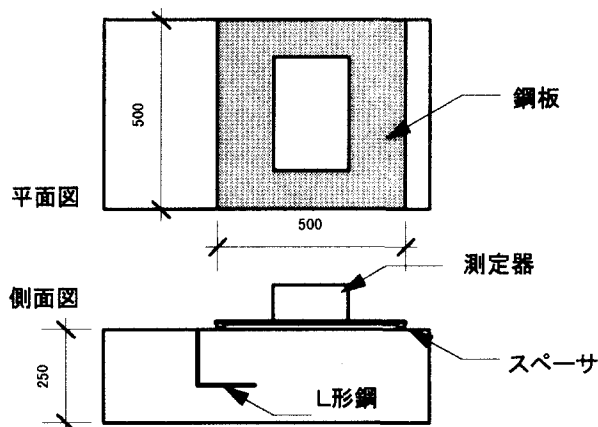


図-4 間隙量と計数値の相関関係の測定方法

3. 施工における課題と対応

この工事を着実に実施するために、次の3つの課題について検討する必要がある。

- ① 高流動性と耐ブリーディング性を同時に有する高流動コンクリートを配合すること。
- ② 様々な外的要因に対し、一定品質のコンクリートを製造・運搬・打設する技術を確立すること
- ③ 確立した技術を適切に実施するための施工システムを構築すること

(1) 高流動コンクリートの配合

フルサンドイッチ構造は、鋼とコンクリートの一体化を図るために、鋼とコンクリートのずれを止める型鋼が隅室内部に取り付けられている。この相互間の力の伝達を確実にするために、コンクリートは、型鋼の根元まで充填することが必要である。そこで、高流動コンクリートは流動勾

配が小さく、流動性の高い配合とした。

コンクリートの流動性を高めると、ブリーディングが発生し易くなる。ブリーディングが発生すると、上側鋼板とコンクリートとの間に間隙が発生するので、コンクリートは、ブリーディングを極力小さくした配合でなければならない。本工事では、種々の配合実験と実物大の隔壁モデルにより充填実験を行ってコンクリートの性能を確認した。表-3に、この工事に使用したコンクリートの配合を示す。

表-3 コンクリートの配合

工事		その2	その3	その4
セメント(C)		OP	BB	OP
混和材(Sg)		Sg	Sg	Sg
粗骨材容積	VG(l)	300	300	315
空気量	Air(l)	20	35	25
水	W(kg)	176	181	175
セメント	C(kg)	176	275	340
混和材	Sg(kg)	411	275	214
細骨材	S(kg)	768	790	786
粗骨材	G(kg)	789	789	822
高性能 AE 減水剤		PC	PC	PC
増粘剤			BG	PS

注：OP は普通ポルトランドセメント、BB は高炉セメント B 種、PC は、ポリカルボン酸系、BG はβグルカン系、PS は、ポリサッカライド系を示す。

(2) 外的要因に対する対策

高流動コンクリートは、細骨材の粒度分布と微粒分量、骨材の表面水の変動、気温や製造からの時間などの変化によって流動性が変化する。外的要因の変動に対し、コンクリート自体の性能だけで要求される品質を満足することはできず、材料管理、製造管理および時間管理の方法を確立する必要がある。

(3) 施工システムの構築

第3番めの課題は、確立した技術を適切に実施するための施工システムの構築である。工事は3年間にわたり複数の企業体別に行われる。そのため、企業体によって品質に差がないように、

- ①材料管理の方法
- ②フレッシュコンクリートの品質制御方法
- ③コンクリートの時間管理方法
- ④充填確認方法

について、施工システムを構築し、ISO9000 シリーズに準拠した施工マニュアル⁴⁾を作成して品質管理を行った。

4. 施工結果

(1) 使用コンクリートの出荷量と廃棄コンクリート

その2工事からその4工事で、廃棄したコンクリートの内訳を表-4に示す。廃棄した理由のうち、「運行」と示したものは、道路交通渋滞やポンプ車の故障が原因で運搬または待機時間が長くなり、廃棄したものである。「品質低下」は、品質試験には合格したが打設時にポンプ車の筒先から排出されたコンクリートの軟度が低下していたものである。この原因は、打設時期が冬季であり、ポンプ車のブームが冷えていたことによる。

品質不合格で廃棄したコンクリートは、その2工事の場合、製造開始後5台までの間で発生したものが4台、その他は、それ以後運搬されたコンクリートで発生した。その3工事、その4工事の場合は、製造開始後5台までの間でのみ発生した。

(2) 品質試験結果

表-5は、その2工事からその4工事毎の75m³毎に行う現場荷卸し時の品質試験結果をまとめたものである（ただし、1工事あたり使用した2箇所の工場のうちの1工場分のデータを示した）。

この工事の製造管理の良好性は、品質試験結果の標準偏差によって判断できる。各工事の標準偏差は、スランプフローの標準偏差が0.72cm～2.06cm、V75漏斗流下時間は1.13～2.25秒である。既往文献⁹⁾では、高流動コンクリートの工事12例についてアンケート調査を行った品質試験の結果が示されている。その結果では、各々の工事でのスランプフローの標準偏差は2～3cmであった。本工事のスランプフローの標準偏差は、これより小さく、適切な管理が実施されたことがわかる。

表-6は、各工事で使用したコンクリートのブリーディング率を打設した沈埋函毎に示したものである。ブリーディングの試験は、打設日毎150m³/回の頻度で行った。試験するコンクリートは、生コン工場でアジテータ車に一度搭載したコンクリートを、出荷前に採取したものである。2、3号函に使用したコンクリートは、混和剤として高性能AE減水剤とAE助剤のみ使用した粉体系高流動コンクリートである。試験の結果より、2、3号函とも同じ配合であるが、3号函に打設したコンクリートのブリーディング率は最小、最大、平均とも、2号函のものより大きい。

4、5号函に打設したコンクリートは、混和剤として高性能AE減水剤やAE助剤の他に増粘剤をブリーディング防止の目的で添加した併用系高流動コンクリートである。このコンクリートのブリーディング率は、最小0%で最大でも0.2%以下である。6号函に打設したコンクリートは、4、5号函に使用したコンクリートとは、別の配合であるが同様に増粘剤を添加した併用系高流動コンクリートである。このコンクリートのブリーディングも4、5号函のコンクリートと同程度のブリーディング率である。

この2種類の高流動コンクリートは、2、3号函に使用した高流動コンクリートよりブリーディング率の小さいコンクリートといえる。

表-4 廃棄コンクリートの内訳

工事	その2	その3	その4
対象沈埋函	2・3号	4・5号	6号
打設量	12,420	12,732	7,135
出荷台数	2784	2838	1591
廃棄台数	14	16	5
廃棄率	0.50%	0.74%	0.31%
廃棄した理由			
運行 (台)	3	5	0
品質低下 (台)	0	2	0
品質不合格 (台)	11	9	5
品質不合格の内訳 (台)			
スランプフロー	5 (大4小1)	2 (大2)	0
V75 漏斗流下時間	5 (遅い)	4 (遅い)	5 (遅い)
単位容積重量	1 (軽い)	3 (軽い)	0

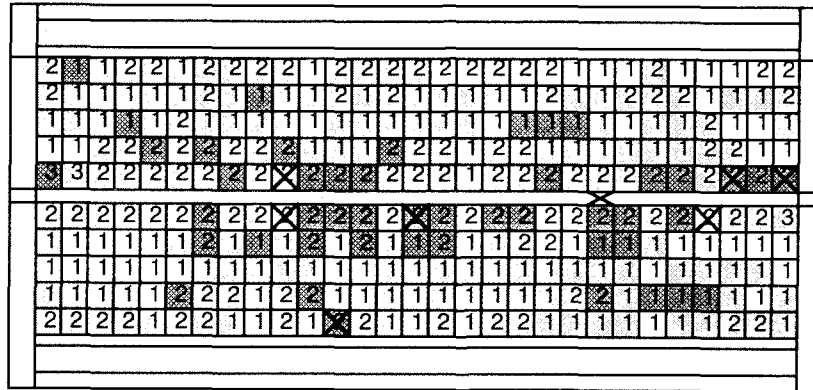
表-5 品質試験結果

		その2 工事	その3 工事	その4 工事
スランプフロー (cm)	最大	73	75	70
	最小	60.5	64	67
	平均	68.2	70.0	69.3
	標準偏差	2.06	1.51	0.72
V75 漏斗 流下時間 (秒)	最大	16.6	24.2	15
	最小	5	7.4	9.2
	平均	8.11	10.9	11.5
	標準偏差	1.54	2.25	1.13

表-6 使用したコンクリートのブリーディング率

沈埋函	2号	3号	4号	5号	6号
試験回数	17	18	18	17	20
最小 (%)	0.13	0.23	0	0	0
最大 (%)	0.40	0.47	0.18	0.16	0.22
平均 (%)	0.260	0.400	0.074	0.070	0.074
標準偏差 (%)	0.089	0.067	0.052	0.048	0.069

3号函 充填確認結果



ランク	平均間隙量
1	$t \leq 1 \text{ mm}$
2	$1 < t \leq 3 \text{ mm}$
3	$3 < t \leq 5 \text{ mm}$
4	$5 \text{ mm} < t$

注: 図中の数字は充填直後の間隙のランク
濃淡で示したランクは硬化後のランク
×は充填材を充填した箇所

図 - 5 コンクリート硬化前後の間隙量の変化 (3号函上床版)

(3) 充填確認結果

表 - 7 は、コンクリート硬化後に、沈埋函の上面鋼板下の間隙量を非破壊検査で測定し、間隙量 5mm 以上と測定され、充填材を充填した箇所数を示したものである（以下、未充填箇所とする）。測定点は、1 函当り 7000 点以上であるので、未充填箇所はわずかであった。未充填箇所は、この工事で最初に完成した 2 号函が 30 箇所と最も多く、その後に施工した函は少なくなっている。表 - 7 と表 - 6 に示した各沈埋函に打設したコンクリートのブリーディング率と比較すると、未充填箇所が最も多い 2 号函のブリーディング率の平均値が 0.26% であるのに対し、ブリーディング率の平均が最も大きい 3 号函が 0.40% であるにも関わらず 8 箇所と少なく、明確な関係は見出せない。2 号函の未充填箇所が他の沈埋函より多いのは、打設時に隔壁の内側に残された空気の影響によるものと考えられる。そこで、2 号函以降については、コンクリート打設直後に空気抜き処理を行ったので未充填箇所が減少したと考えられる。

表 - 7 間隙量 5mm 以上と測定された箇所数

沈埋函番号	2号	3号	4号	5号	6号
箇所数	30	8	0	4	0

(4) 間隙量とブリーディング率の関係

図 - 5 は、3 号函の上床版に充填したコンクリートの硬化前後の間隙量の変化を示したものである。間隙量は、1 隔壁当り数点から 10 点程度測定した間隙量の平均値をランク別けし、図中の数字は、コンクリート充填直後に、網掛けの濃淡ではコンクリート硬化後のランクを示したものである。ランクは、間隙量 t が 1mm 以下の隔壁をランク 1、

1mm 超え 3mm 以下をランク 2、3mm 超え 5mm 以下をランク 3、それ以上をランク 4 とした。

すなわち、数字で示したランクより、網掛けで示したランクが大きくなる場合には、コンクリート打設直後より硬化後の間隙量が大きくなることを示している。表 - 8、9 は、2 号函と 3 号函について、この変化を表にまとめたものである。表 - 8 と表 - 9 を比較すると硬化後に間隙量が増えた隔壁は、2 号函の場合は 97 であるのに対し、3 号函は、上床版隔壁数 290 に対し、153 の隔壁で間隙量が増加している。

表 - 8 コンクリート硬化前後の間隙量の変化 (隔壁数)

2号函		硬化後の測定				
		ランク1	ランク2	ランク3	ランク4	増加計
硬化 前 の 測定	ランク1	42	76	4	0	80
	ランク2	17	124	17	0	17
	ランク3	0	8	2	0	0
	ランク4	0	0	0	0	0
	合計	対象隔壁数 290				97

表 - 9 コンクリート硬化前後の間隙量の変化 (隔壁数)

3号函		硬化後の測定				
		ランク1	ランク2	ランク3	ランク4	増加計
硬化 前 の 測定	ランク1	41	107	13	0	120
	ランク2	6	87	33	0	33
	ランク3	0	2	1	0	0
	ランク4	0	0	0	0	0
	合計	対象隔壁数 290				153

この結果と各々の沈埋函に充填されたコンクリートのブリーディング率と比較すると 2 号函のコンクリートのブ

リーディング率が0.26%、3号函が0.4%であり、リーディング率が大きくなると、コンクリートの硬化に伴って、間隙量が増加することがわかる。

(5) 考察

この工事の製造管理の良好性は、打設現場に運搬されたコンクリートの品質試験の標準偏差によって判断できる。各工事の標準偏差は、スランプフローの標準偏差が0.72cm～2.06cm、V75漏斗流下時間は1.13～2.25秒である。既往の高流動コンクリートの工事でのスランプフローの標準偏差が2～3cmであるので、本工事のスランプフローの標準偏差は、これより小さく、適切な管理が実施されたことがわかる。

リーディング率については、2,3号函に使用した高流動コンクリートは、4,5号函および6号函に使用したものより大きくなる傾向にある。4,5号函および6号函に使用したコンクリートは、リーディングを少なくするために増粘剤を添加した併用系高流動コンクリートであり、その効果が現れている。ただし、2号函と3号函の未充填箇所数と各々に使用したコンクリートのリーディング率からは、リーディング率の大きいコンクリートを使用した沈埋函の未充填箇所数が少ないことから、未充填箇所の発生数とリーディング率の相関はないといえる。

図-5は、コンクリート硬化前後で、硬化後に間隙量が大きくなった沈埋函の上床版の間隙量の変化を示したものである。この沈埋函に使用されたコンクリートのリーディング率の平均は0.4%と他より大きく、間隙量の変化とリーディング率との関係が見出せ、その増加は、リーディング率0.4%で1mmから2mmに相当する。

5. まとめ

今回の実施工を通じて得られた高流動コンクリートの施工管理に関する知見を以下にまとめる。

- (1) 異なる施工企業体、異なる配合のコンクリートを使用し、異なる市中生コンクリート工場を使用して、3年間の間に約30,000m³を越える高流動コンクリートをフルサンドイッチ構造の沈埋函に充填した。
- (2) 施工にあたり、施工マニュアルを作成し、全ての工事にこれを適用した。
- (3) その結果、どの工事においても、品質のばらつきの少ないコンクリートを安定して製造することができた。
- (4) 充填後の充填確認で、間隙量が5mmを越える箇所について充填材を充填した。充填した箇所数は、一番最初に施工した2号函に30箇所の未充填箇所が発生した。この未充填箇所は、隔室内に残留した空気が原因と考えられ、その後の沈埋函に対しては、空気抜き処理に工夫を加え、その後施工した沈埋函の未充填箇所はごくわずかとすることができた。

- (5) リーディング率が大きいコンクリートを使用するとコンクリートの硬化に伴って、鋼板下の間隙量が増加する傾向にある。間隙の増加量とリーディング率の関係は、リーディング率0.4%で1mmから2mmに相当する。
- (6) 以上より、本工事で構築した施工システムの有効性が立証できたと判断できる。

最後に、本工事を実施するにあたり、施工システムの研究について、港島トンネル高流動コンクリート専門検討会 故藤井学委員長（当時京都大学教授）、構造専門委員会 園田恵一郎委員長（大阪市立大学教授）をはじめ委員の方々のご指導や関係各位の貴重なご助言をいただきました。また、その他多くの方々の支援をいただきました。この紙面を借りて感謝いたします。

参考文献

- 1) 小島朗史他：港島トンネル鋼コンクリートサンドイッチ構造沈埋函の高流動コンクリートの施工、コンクリート工学、vol34, No8, pp21-28, 1996
- 2) 山本幹夫他：鋼コンクリートフルサンドイッチ構造への高流動コンクリートの適用、コンクリート工学、vol36, No4, pp16-19, 1998
- 3) 新藤竹文他：フルサンドイッチ構造沈埋函への併用系高流動コンクリートの適用、コンクリート工学年次論文集 vol20, No2, pp511-516, 1998
- 4) 鋼コンクリートサンドイッチ沈埋函の設計と高流動コンクリートの施工、(財) 沿岸開発技術センター, 1996
- 5) 松田敦夫：構造物の条件と自己充填コンクリートの特性に関する調査、自己充填コンクリートセミナー論文報告集 土木学会, 1997.5