

加振併用型充てんコンクリートの鋼コンクリートサンドイッチ構造沈埋函への適用と施工

THE APPLICATION OF SEMI-SELF COMPACTING CONCRETE TO STEEL-CONCRETE SANDWICH STRUCTURAL IMMERSED TUNNEL

水谷征治¹・水口直仁²・高橋宏治³・傳亮司⁴・大田康弘⁴・末岡英二⁵
Seiji MIZUTANI, Naohito MIZUGUCHI, Kouji TAKAHASHI, Ryouji TSUTAE, Yasuhiro OTA
and Eiji SUEOKA

¹正会員 東洋建設株式会社 美浦研究所（前大阪本店）（〒300-0424 茨城県稲敷郡美浦村受領1033-1）

²国土交通省 近畿地方整備局（〒552-0007 大阪府大阪市港区弁天1-2-1-7000）

³正会員 東洋建設株式会社 関東支店（前大阪本店）（〒135-0064 東京都江東区青海2-43）

⁴東洋建設株式会社 大阪本店（〒541-0043 大阪府大阪市中央区高麗橋4-1-1）

⁵正会員 東洋建設株式会社 美浦研究所（〒300-0424 茨城県稲敷郡美浦村受領1033-1）

In this construction, steel-concrete sandwich structural immersed tunnel constructed by using the semi-selfcompacting concrete for the winter season. In this application, the quality under the degree environment of low temperature of the semi-selfcompacting concrete mixed by the system mixer was checked. Moreover the filling experiment was conducted using the full-scale model which imitated the very narrow division, and the filling performance was checked. In actual construction, the new technologies for semi-selfcompacting and site management were developed and introduced.

These measures have proved semi-selfcompacting that filling nature equivalent to hi-performance concrete could secure. Therefore, it turned out to steel-concrete sandwich structural immersed tunnel that semi-selfcompacting concrete can apply enough.

Key Words : Semi-selfcompacting concrete, Steel- concrete sandwich structure, Immersed tunnel

1. はじめに

大阪港夢洲トンネル事業は、大阪港臨海部の国際物流機能強化のため、咲洲と夢洲の両地区を結ぶ道路と鉄道併設の海底トンネルと陸上トンネルを整備する事業として計画、実施されている。海底トンネル部は、図-1 のような鋼コンクリートサンドイッチ構造（以下サンドイッチ構造と称す）沈埋函を接合する沈埋トンネル工法により施工される。

サンドイッチ構造沈埋函は、大部分が閉鎖された鋼殻から構成され、その中にコンクリートを充てんするため、自己充てん可能な高流動コンクリートが用いられており、その実績も多い。しかし、高流動コンクリートは、その高い性能を発揮するために材料費が高く、製造、運搬、および品質管理の過程で種々の制約を受けることによるコストアップや煩雑さも生じている。そこで、図-2 に示すようにスランプフローが 500mm 程度で、自己充てん性は高流動コンクリートに比べて若干劣るが、内部振動機などによる間欠的な加振を行うことで高流動コンクリートと同等の充てん性が発揮でき、材料費が安価で、

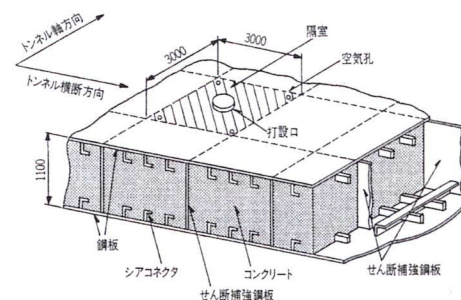


図-1 サンドイッチ構造概念図

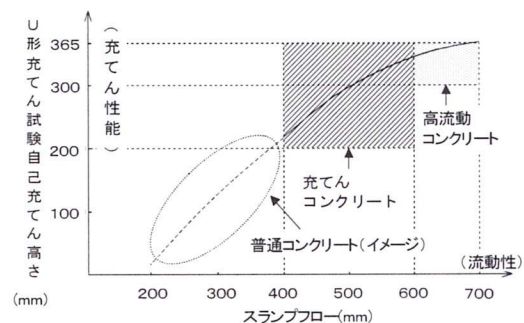


図-2 各コンクリートの自己充てん性能¹⁾

製造や品質管理の軽減によるコストメリットが期待できる加振併用型充てんコンクリート（以下充てんコンクリートと称す）を適用した。

本論文では、本工事で実施した実験および施工を通じて得られた知見にもとづき、サンドイッチ構造沈埋函への充てんコンクリートの適用性について述べる。

2. 充てんコンクリートの配合

充てんコンクリートの材料は、製造の容易さやコスト低減の面から、近隣の生コン工場で一般に使用されているものを用いた。セメントは高炉セメントB種とし、高流動コンクリートで用いられている高炉スラグ微粉末や石灰石微粉末などの混和材や、増粘剤などは使用しなかった。混和剤には、施工時期が冬期となることを考慮して、凝結時間を大きく遅らせることなく、所要の流動性維持が図れる高性能AE減水剤を使用した。

充てんコンクリートの配合は、表-1に示す要求性能を満足するように試験練りにより設定した。この要求性能は、当該コンクリートの設計施工マニュアル²⁾から定めたものである。充てんコンクリートの配合を表-2に示す。本配合の空気量は、所要のコンクリートの単位容積質量を満足するために、一般的な4.5%から3%に削減した。

3. 充てんコンクリートの性状評価

(1) 実験内容

実施工に先立ち、実施工と同条件下での充てんコンクリートの性状や、時間経過に伴う性状変化を把握するために、実施工での製造が予定されているA生コン工場とB生コン工場の大型ミキサ（以下実機ミキサと称す）を用いて試験練り（以下実機試験と称す）を冬期に実施した。

実機試験では、実施工のコンクリート製造中に最も変動が大きいと考えられる、細骨材の表面水率の設定誤差に着目して、性状の安定性について評価した。ここで、表面水率の設定誤差とは、示方配合から現場配合を決定する際に用いる表面水率と、実際の表面水率との差であり、この値が負になると示方配合より製造時の単位水量が多くなる。

フレッシュ性状の維持性能の確認は、製造後から所要の性状を確保できる可使時間を設定する上で、非常に重要であり、製造後から打込み終了までの時間を最大90分程度と予測して、製造後から120分間のフレッシュ性状の変化を調べた。なお、性状確認試験は、実施工に合わせてアジテータ車による攪拌を所定の時間行ったもので実施した。

(2) 実験結果

スランブフローの経時変化を図-3に示す。スラ

表-1 充てんコンクリートの要求性能

項目	評価方法	要求性能
圧縮強度	JIS A 1108	設計基準強度30N/mm ²
流動性	JIS A 1150	スランブフロー500±100mm
流動性の維持時間	—	製造後120分
材料分離抵抗性	JSCE-F511	U形容器障害R2 充てん高さ200mm以上
ブリーディング	JIS A 1123	ブリーディング率2.5%以下
空気量	JIS A 1128	3.0±1.5%
単位容積質量	JIS A 1116	2,250～2,400kg/m ³ (平均2,300kg/m ³ 以上)

表-2 充てんコンクリートの配合

工場名	W/C (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)				SP (C×%)
			W	C	S	G	
A	39.5	3.0	171	433	864	835	1.65
B	38.8	3.0	168	433	869	835	1.6

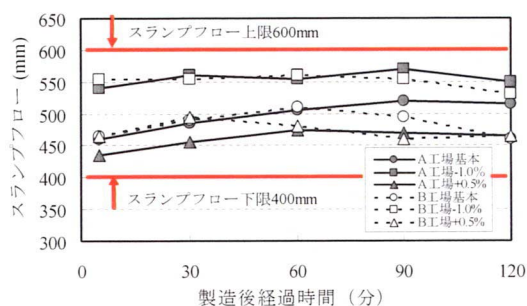


図-3 スランブフローの経時変化

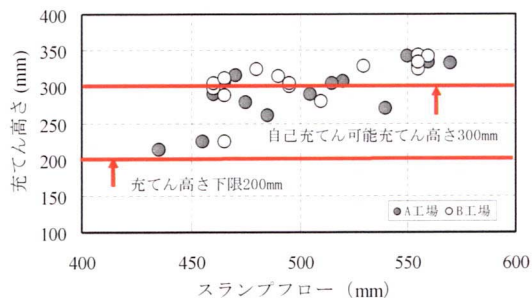


図-4 スランブフローと充てん高さの関係

ンブフローは、いずれのケースも製造直後から30～60分までは大きくなる傾向が見られ、その大きさは50～70mm程度であった。これは、冬期の低温環境下では、高性能AE減水剤の効果が十分発揮されるまでに時間を要することに起因すると考えられた。すなわち、冬期施工の場合には、時間経過に伴うスランブフローの低下の恐れは少ないが、製造直後からのスランブフローの増加を想定した製造管理が必要である。

表面水率の設定誤差によるスランブフローの変動は、単位水量が増加する場合（負の値）では80mm/%の変動量、単位水量が減少する場合（正の値）では50mm/%の変動量であった。充てんコンクリートの既往の知見^{3),4)}と比較して、前者の値は同

等、後者の値は若干小さい値であった。また、表面水率の設定誤差によるスランプフローの変動は、時間の経過とともに若干小さくなった。

スランプフローとU形間隙通過性試験の充てん高さの関係を図-4に示す。スランプフローの増加とともに、充てん高さが高くなる傾向にあり、自己充てん性能の目安となる充てん高さを300mm以上とすれば、充てんコンクリートにおいても、スランプフローが550mm以上であれば、自己充てん性能が発揮できる。

また、実験を通じて、A工場でのコンクリート温度が12.0～12.8℃、空気量が2.0～3.4%、単位容積質量が2,315～2,342kg/m³、ブリーディング率が0.22～0.49%、材齢28日の圧縮強度が66.6～73.4N/mm²で、B工場でのコンクリート温度が8.0～10.0℃、空気量が2.2～3.3%、単位容積質量が2,315～2,340kg/m³、ブリーディング率が0.51～0.64%、材齢28日の圧縮強度が65.7～67.5N/mm²であり、充てんコンクリートは製造後から120分間要求性能を満足することができた。

4. 充てん性確認実験

(1) 実験内容

本工事で最も狭隘な端部鋼殻の下床版は、鋼材の最小間隙幅が100mmの箇所が存在する。これまで標準的な上床版等を対象とした充てん実験⁵⁾は実施されているが、このような部材における充てん性の確認はされていない。そこで、図-5に示す実大モデルを用いて、充てんコンクリートの充てん性を検討した。コンクリートの打込みは実施工を想定したポンプ車(110m³/h)を用いて、15～20m³/hの速度でモデル中央部の打設口から行った。同区画は、中間フランジ及び中間ダイヤフラムにより仕切られることにより、内部振動機による加振が困難な構造となっているため、加振が不十分な場合も想定し、表-3に示すように中間フランジ下の加振の有無によるコンクリートの充てん性の違いも確認した。

(2) 実験結果

コンクリートの製造はA工場で行い、表-2の配合とした。フレッシュ性状の試験結果を表-4に示す。荷卸し時のスランプフローは、通常の充てんコンクリートに比べてやや大きい値となった。

打設中の充てん状況は、目視では把握できないため、鋼殻内側に貼り付けた振動デバイス式の充てんセンサー⁶⁾により把握した。充てんコンクリートは、中間フランジに達するまでは、中間ダイヤフラムの内側(打設孔側)と外側でコンクリートの打ち上がり時間に若干差が見られたが、その後上鋼板到達時には、ほぼ水平に打ち上がることがわかった⁷⁾。また、中間フランジ下の加振の有無の影響はほとんど見られなかった。実験で用いた充てんコンクリートはスランプフローが大きく、ある程度自己充てん性

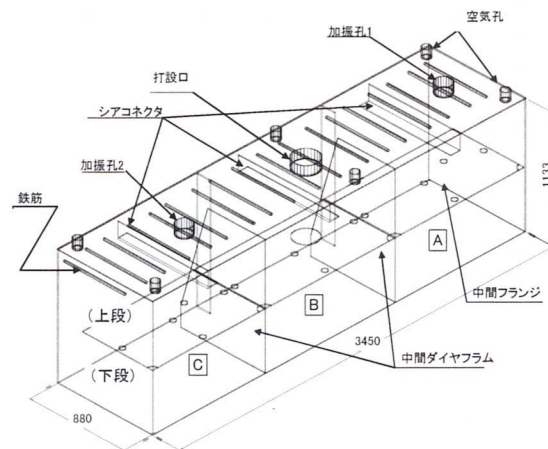


図-5 実大モデル型枠

表-3 加振方法

場 所	加振孔 1	加振孔 2
中間フランジより上部	標準振動機による加振 (200/240Hz, φ52mm)	標準振動機による加振 (200/240Hz, φ52mm)
中間フランジより下部	加振なし	小型振動機による加振 (200～250Hz, φ28mm)

表-4 フレッシュ性状の試験結果

品質管理項目	測定値	
	荷卸時	圧送後
スランプフロー(mm)	550	530
U形充てん試験：充てん高さ(mm)	285	344
空気量(%)	2.1	2.3
単位容積質量(kg/m ³)	2,344	2,339

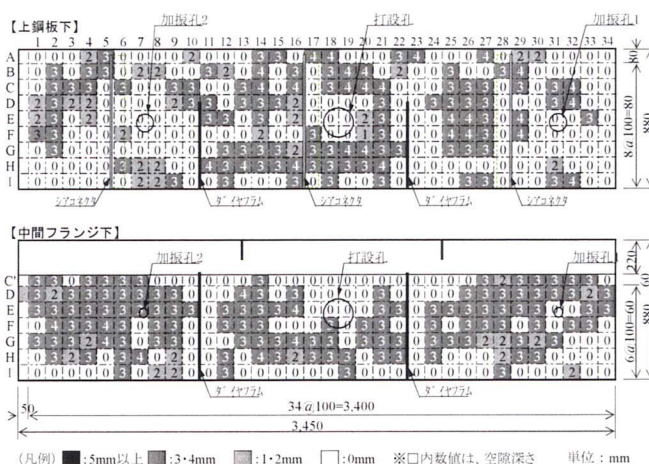


図-6 コンクリート上面の残留気泡深さ

能によって充てんできたことも一因と考えられる。

コンクリート上面の残留気泡深さを図-6に示す。モデル体は外観から観察して未充てん箇所は見られなかったが、コンクリート上面に残留気泡が見られた。残留気泡跡は、沈埋函で一般的に許容される深さ(5mm)以下であり、鋼板周りにも十分充てんされていた。また、モデル体から採取したサンプリグコアの圧縮強度は、ばらつきも小さく、封緘養生の品質管理供試体の圧縮強度と同等であった⁸⁾。

サ負荷値によりワーカビリティの管理が行われている。本施工でのA工場の充てんコンクリートのスランプフローとミキサ負荷値の関係を図-12に示す。これらの相関係数は小さかったが、スランプフローの増加によりミキサ負荷値の低下が見られた。また、1日間においては、スランプフローとミキサ負荷値に良い相関が見られる場合もあり、ワーカビリティの管理手法の一つとして活用できると考えた。

製造終了から荷卸し終了までの時間のヒストグラムを図-13に示す。平均時間は34分であったが、昼休みや待機の時間を考えると最大90分程度の可使用時間が必要であったが、本施工前に120分の流動性維持が可能なことを確認した。

(3) コンクリートの品質

施工中の充てんコンクリートの品質試験の頻度は、各打設日ごとに最初の3台と75m³に1回とした。スランプフロー試験結果のヒストグラムを図-14に示す。出荷時から荷卸し時まで40mm程度の増加が見られ、荷卸し時におけるスランプフローの範囲は概ね500±50mmの範囲であった。製造終了から荷卸し完了までに要した時間は平均で34分であり、実機試験で確認したフレッシュ性状の経時変化の傾向と同様であり、適切に管理されていることが確認された。その他の品質管理試験結果も、表-5に示すように平均値は、各品質基準のほぼ中央値を示しており、良好な品質が確保されていた。

(4) 打込み・加振

上床版鋼殻の平面図を図-15に示す。打込みは、鋼殻上鋼板に設けられた打設口のみから行い、振動機による加振は、鋼殻上鋼板に設けられた数箇所の加振孔のみから5秒の加振を間欠的に実施した。

CCDカメラで撮影した上床版鋼殻内の充てん状況を写真-1に示す。撮影した鋼殻内に打設された充てんコンクリートのスランプフローは500mm程度であり、充てんコンクリートの流動勾配はかなり小さく、シアコネクタ周りにも十分充てんしていることが確認できた。さらに、内部振動機の加振の伝播や、コンクリートの流動性の向上が確認できた¹⁰⁾。

充てんコンクリートは、内部振動機により5秒の加振を1分間隔で実施しており、普通コンクリートで一般的に行う締固め作業とは異なる。また、壁部打設時の加振では、加振位置も上面鋼板と水平ダイヤフラム付近に限定して加振を行うことが必要となり、コンクリート天端位置とパイプレタ位置の高さ管理が重要となる。そこで、加振時間と頻度の管理は、自動で制御できる「加振制御装置」を作製し、人による時間管理を排除した。また、高さ管理については、振動デバイスを用いた充てんセンサーを利用した「打上り高さ管理システム」を導入した。このシステムは、写真-2に示すようにセンサーをパイプレタ先端に取り付け、コンクリートにセンサーが反応した際に手元のランプが点灯する仕組み

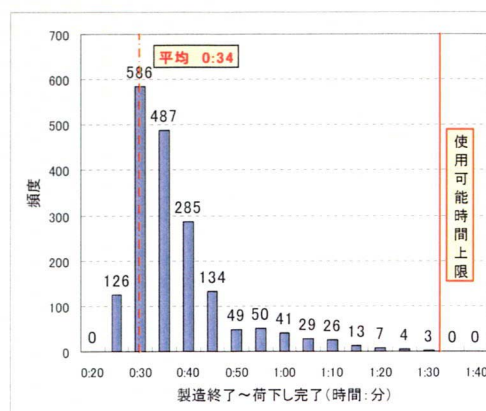


図-13 製造から荷卸しまでの時間

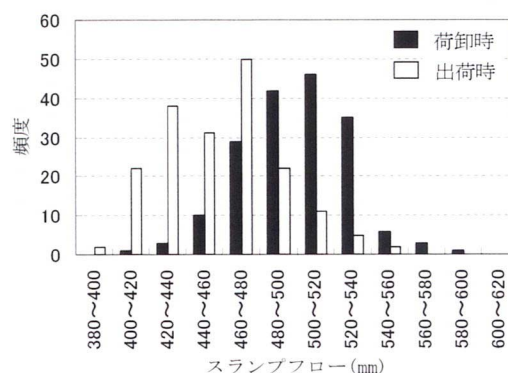


図-14 スランプフロー試験結果

表-5 フレッシュ性状試験結果

試験項目	単位	平均値		品質基準
		出荷時	荷卸し時	
スランプフロー	mm	460	502	400~600
空気量	%	2.62	2.65	1.5~4.5
単位容積質量	kg/m ³	2,333	2,331	2,250~2,400
単位水量 A工場	kg/m ³	166	168	156~186
単位水量 B工場	kg/m ³	164	164	153~183

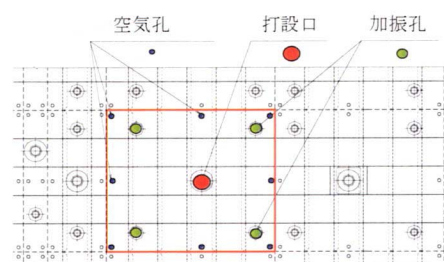


図-15 上床版鋼殻の平面図

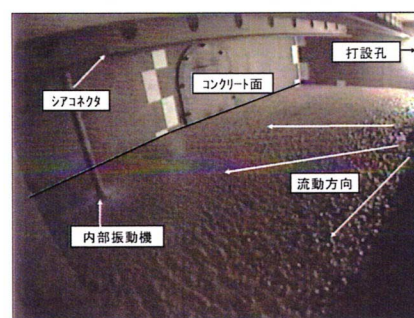


写真-1 充てんコンクリートの充てん状況

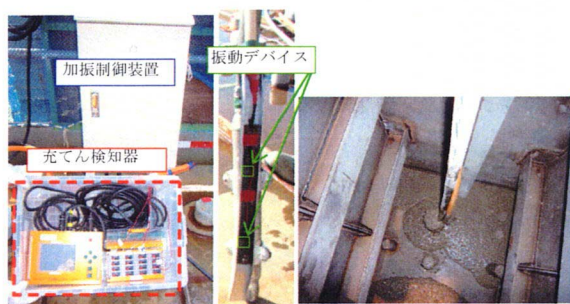


写真-2 加振制御装置と打上り高さ管理システム

で、反応を確認してバイブレータを稼働させることで、所定の位置での正確な加振を可能にした。

(5) 出来形

打設中の充てん完了の確認は、各区画の端部に設けられた空気抜き孔にアクリルパイプを立て、30cm以上コンクリートが立ち上がることで、全区画で確認できた。また、硬化後の充てん確認は、鋼殻上面を木づちにて打診し、異音を確認した箇所については、鋼板削孔による空隙深さの計測を実施した。一般的に沈埋函で許容される空隙深さ(5mm)以上の空隙は、全区画の7%程度であり、最大の空隙深さは10mmであった。この結果は、同時期に高流動コンクリートで施工されたものと同程度の結果であった。

閉鎖された鋼殻内への充てんの原理は、区画中央部からコンクリートを打設し、区画端部に設けた空気抜き孔から空気を追い出すことで区画全体にコンクリートを充てんする。しかし、鋼殻上鋼板の不陸は完全に排除することが困難であり、若干の残留気泡が発生したものと考えられた。なお、確認された許容値以上の空隙に対しては、本体コンクリートと同等以上の強度を有する無機系注入材により再充てん処理を行った。

6. まとめ

本施工を通じて以下の知見が得られた。

- (1) 充てんコンクリートは、冬期の大量打設においても安定した性状を保持し、1分間隔で5秒間の加振を併用することで、高流動コンクリートと同等の充てん性を発揮でき、サンドイッチ構造沈埋函に適用可能であった。
- (2) 充てんコンクリートは、製造中の細骨材表面水率の設定誤差により流動性が変動するが、その変動に対しても、通常の表面水率管理を行うことで、スランプフローの管理基準値400～600mmを満足することができる。

- (3) 充てんコンクリートは、高流動コンクリートに比較して練混ぜ時間が短縮できるため、製造速度も高流動コンクリートに比較して20%程度の増加となる。
- (4) 充てんコンクリートは、冬場において製造後120分間のフレッシュ性状の維持が可能であり、本施工で必要となった可使時間90分を十分満足できた。
- (5) コンクリート施工管理システムの導入により、適正な運行管理が可能となり、トレーサビリティの向上が図れた。

なお、本工事は東洋建設(株)、みらい建設工業(株)、(株)大本組の3社による共同企業体により施工したものである。

参考文献

- 1) 佐野清史, 白石悟: 合成構造沈埋函用に開発された新しい充てん用コンクリート, セメント・コンクリート, No. 698, pp. 25-31, 2005.
- 2) (財) 沿岸開発技術研究センター: 鋼コンクリートサンドイッチ構造沈埋函を対象とした加振併用型充てんコンクリートマニュアル, 2004.
- 3) 末岡英二, 羽瀨貴士, 壹岐直之, 清宮理: 合成構造沈埋函に用いる加振併用型充てんコンクリートの性能に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No. 1, pp. 1611-1616, 2004.
- 4) 末岡英二, 羽瀨貴士, 安田直弘, 濱田秀則, 清宮理: 各種細骨材を用いた加振併用型充てんコンクリートのフレッシュ性状に関する検討, 土木学会第59回年次学術講演会, 5-165, pp. 327-328, 2004.
- 5) 北澤壮介, 東俊夫, 山縣延文, 白石修章: 合成構造沈埋函に用いる充填コンクリートの適用性に関する実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No. 1, pp. 1197-1202, 2002.
- 6) 金子稔, 安田正雪: コンクリート充てん検知システムとその応用技術, コンクリート工学, Vol. 44, No. 5, pp. 98-101, 2006.
- 7) 高橋宏治, 松崎忠彦, 水口直仁, 末岡英二: 沈埋函製作工事における加振併用型充てんコンクリートの配合および施工性の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No. 2, pp. 451-456, 2007.
- 8) 高橋宏治, 登米一雄, 宮竹秀典, 宮川卓, 末岡英二: 加振併用型充てんコンクリートの沈埋函端部鋼殻モデル充てん実験, 土木学会第61回年次学術講演会講演概要集, pp. 375-376, 2006.
- 9) 前田敏, 阿部龍介, 加藤直幸, 登米一雄, 水谷征治: コンクリート打設管理システムについて, 土木学会第62回年次学術講演会講演概要集, VI部門/6-41, pp. 81-82, 2007.
- 10) 末岡英二, 竹中寛, 水谷征治, 高橋宏治, 清宮理: 沈埋函製作工事における加振併用型充てんコンクリートの施工性について, 土木学会第62回年次学術講演会講演概要集, V部門/5-205, pp. 409-410, 2007.