

那覇沈埋函浮遊時の高流動コンクリート大量打設および計測管理について

小笠原 哲也* 大村 隆一郎*
 竜野 三生** 玉井 昭治*
 池田 泰敏* 太田 信之***

要 旨

現在、那覇港口部の海底トンネルとして沈埋トンネルが施工されているが、そのうちの1号函を五洋JVが製作した。本工事では、世界で初めて、海上浮遊状態でフルサンドイッチ構造の沈埋函へ我が社最大の約 10,000m³ もの高流動コンクリートを打設した。また沈埋函動揺状態で、打設にともなう変形をトータルステーションによる三次元計測およびレーザーとCCDカメラにより計測・管理した。さらに沈埋函変形シミュレーションに生かせる鋼殻・コンクリート等の温度計測、沈埋函の吃水計測を実施した。

以上の、高流動コンクリート大量打設での品質管理、打設方法および沈埋函浮遊状態での計測結果を示し、それらに対する問題点・考察・今後の展望等を記す。

1. はじめに

現在、那覇港口部の海底トンネルとして沈埋トンネルが施工されているが、そのうちの1号函を五洋・新日鐵・三井不JVが製作した。

本工事では、世界で初めて、海上浮遊状態でフルサンドイッチ構造の沈埋函へ高流動コンクリートを打設し、その数量約 10,000m³ は、1 工事としては我が社最大数量である。

また、他にも初めて実施されることが多く、それらの事前検討を十分実施して施工にのぞんだが、本報では、そのうち以下の3項目について報告する。

高流動コンクリート大量打設時の施工管理

下床版打設のために新たに開発したコンクリートホース巻上機（：以下エスカルと称す）

多種類の計測項目のうち、函体の変形を主とする4種類の計測結果

のエスカルについては、2000 年度の技術年報において試験施工を含めて報告しており、それを踏まえて報告する。なお、4種類の計測の他に、係留ロープ計測、および技術研究所の協力を得て、風況・波浪・沈埋函動揺量を測定しているが、ここでは割愛する。

2. 工事概要

沈埋函寸法 長さ 92.00m × 幅 36.94m × 高さ 8.70m

片側 3 車線両側 6 車線

鋼殻約 3,500t 高流動コンクリート約 10,000m³

工期：平成 11 年 9 月 2 日～平成 13 年 3 月 15 日

鋼殻製作場所：新日鐵若松鉄構海洋センター（北九州市）

浮遊係留場所：浦添ケーソンヤード（沖縄県浦添市勢理客）

鋼殻を北九州にて製作し、スキッドアウト方式により半潜水式台船に搭載し、その後 591 海里の距離を沖縄まで回航した。沖縄にて進水、仮設棧橋への係留後、海面に浮遊させた状態で高流動コンクリートを打設した。高流動コンクリート打設後、200mm 厚の保護コンクリートを打設し、乾舷調整の検討後、道床コンクリートを打設した。その後、2 次艀装し、仮置きした。

図 - 1 に沈埋函詳細図を示す。

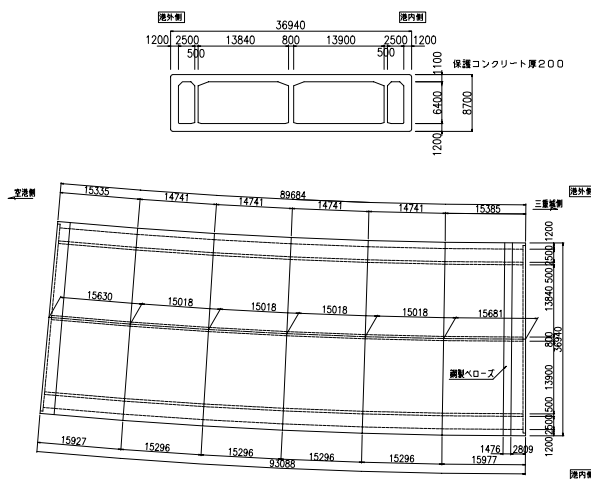


図 - 1 沈埋函詳細図

*九州支店 **技術研究所 ***大阪支店



写真 - 1 浮遊状態における高流動コン打設状況

3. 高流動コンクリート大量打設

3.1 概要

高流動コンクリートは、一般にフレッシュ時の材料分離抵抗性を損なうことなく流動性を高めたコンクリートである。そのため、振動・締固め作業を行わずに、型枠の隅々まで材料分離を生じることなく充填することが可能である。那覇沈埋函はフルサンドイッチ構造であるため、パイプレタによるコンクリートの締固めを十分にできない。そこで締固め不要で、高い自己充填性を有する高流動コンクリートを使用した。

打設時期：2000年11月上旬～2000年12月下旬

高流動コンクリート数量：10,260m³

写真 - 1 に海上浮遊状態における高流動コンクリート打設状況を示す。

高流動コンクリートの製造は、ミキサー船や現場プラントで実施する方法もあるが、機械調達・価格等の面で現実的ではない。また、1日の打設量により、2工場で製造せざるを得ない場合があるので、打設現場まで20分以内で運搬できる現地の生コン工場4社を選定した。沖縄での高流動コンクリート大量打設は、今回が初めてとなるので事前に試験施工を行い、工場技術者や作業員に品質管理の難しさを認識させた。

3.2 使用材料

表 - 1 に使用材料を示す。

表 - 1 使用材料一覧

材 料	種 類	
セメント	普通ポルトランドセメント	
混和材	石灰石微粉末	6000cm ² /g級
細骨材	海 砂	沖縄県東村新川沖産
	砕 砂	沖縄県本部産
粗骨材	砕 石	沖縄県本部産2005
混和剤	高性能 A E 減水剤 (SP)	ポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体
	増粘剤 (VA)	水溶性セルロースエーテル
	空気量調整剤 (AE)	A E 剤

表 - 2 高流動コンクリート品質基準

管理項目	品質基準
設計基準強度 (28)	30N/mm ²
粗骨材の最大寸法	20mm
スランブフロー	65 ± 5cm
V 7.5 漏斗試験	5 ~ 20秒
ブリーディング率	1.0%未満
単位容積質量	2.3 ~ 2.4t/m ³

一般に高流動コンクリートのフレッシュ性状は、使用材料の品質変動に敏感であるため、材料の品質を管理し、なるべく変動を少なくすることが望ましい。しかし、沖縄で採取される海砂は採取方法、採取地点などで粒度が変動することが多いとの報告があり¹⁾、高流動コンクリートの製造において望ましいものではない。

そこで、この対策として、中間ヤードを設けて海砂を一括して仮置きし、粒度を確認後、高流動コンクリートの材料として使用可能（粗粒率2.3程度）であればその海砂を確保した。次に散水除塩後、表面水率の変動を極力少なくするために、ストックした海砂の表面を防水シートで覆い、雨水が浸入しないように養生を行った。

3.3 品質基準

表 - 2 に高流動コンクリート品質基準を示す。

コンクリートの可使時間を製造終了～打設終了まで90分とした。

3.4 示方配合

高流動コンクリートの種類は併用系とした。各工場の使用材料や機械特性にあわせ、試験練りにより定めた示方配合を表 - 3 に示す。

表 - 3 示方配合

工場名	空気量 (%)	W/C (%)	単位量(kg/m ³)							VA (W%)	SP (P%)	AE (P%)
			水	セメント	石灰石微粉末	骨材						
						75 μ以下	海砂	砕砂	砕石			
沖 縄	4.0	50.7	175	345	230	20	573	246	755	0.1	1.175	0.00125
球 陽						32	368	450	756		1.175	0.0015
山 城						32	407	407	755		1.075	0.0010
琉 球						26	529	285	757		1.200	0.0010

表 - 4 骨材の試験方法

骨 材	試験項目	試験方法
細骨材	比重及び吸水率試験	JIS A 1109
	洗い試験	JIS A 1103
	ふるい分け試験	JIS A 1102
	表面水率試験	JIS A 1111
粗骨材	比重及び吸水率試験	JIS A 1110
	洗い試験	JIS A 1103
	ふるい分け試験	JIS A 1102
	単位容積質量 及び実績率試験	JIS A 1104

表 - 5 高流動コンクリート品質管理試験項目

試験項目	試験方法	試験頻度
スランプフロー V75漏斗 空気量 単位容積質量 コンクリート温度	高流動指針 高流動指針 高流動指針 JIS A 1116 棒状温度計	各工場、最初の5台 その後1回/75m ³ および監督員が必要とするとき
塩化物量 圧縮強度 ブリーディング率	高流動指針 JIS A 1123	各工場、1日1回とし 1日の打設量が150m ³ を 越えるときは1日2回 および監督員が必要とするとき
単位容積質量	50×50×50cm 供試体	各工場、1日1回

3.5 品質管理試験項目

使用する骨材に関しては、表 - 4 に示す各種試験を実施し、打設前日までに物理定数を把握した。

細骨材の表面水率は、製造開始直前に測定し、その後は1時間に1回の割合で測定を行った。

コンクリートの性状に関しては、現場品質管理試験場において、表 - 5 に示す品質管理試験を実施し、品質基準を満足することを確認してから打設を行った。

なお、品質保証と製造中のコンクリート性状コントロールの観点から、スランプフロー試験に関しては、自主的に全アジテータ車について実施した。

3.6 施工管理体制

高流動コンクリートの製造・運搬・打設が安全にかつ

表 - 6 施工管理体制

担 当	1工場時	2工場時
最高責任者	1名(JV)	
総括責任者	1名(JV)	
運行管理責任者	2名(JV)	
生コン工場責任者	1名(JV)	2名(JV)
製造管理担当者	1名(JV)	2名(JV)
材料管理担当者	1名(工場)	2名(工場)
現場品質管理試験責任者	1名(JV)	
現場品質管理試験担当者	2名(JV)	3名(JV)
アジテータ車誘導係	4名(工場、警備会社)	
ポンプ車責任者	1名(JV)	
打設現場責任者	1名(JV)	
筒先責任者	2名(JV)	2名(JV)

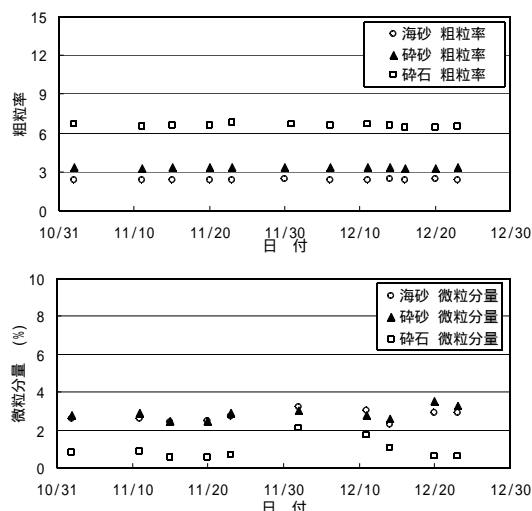


図 - 2 骨材試験結果

効率良く行えるように表 - 6 に示すような各担当者を配置した施工管理体制とした。

各アジテータ車の製造終了時間を生コン工場から打設現場まで周知させ、可使時間を明確にし、製造と打設を効率良く行うために、アジテータ車毎運行・品質管理表を利用した。製造・運搬・品管試験・打設等の所要時間や品質管理結果を各担当者が記録し、情報を無線により運行管理責任者に集中させた。その情報をもとに運行管理責任者は製造、運搬、待機、打設状況を把握した。また、生コン工場責任者は現場品管試験結果を、即座に製造時配合修正の判断材料とすることができた。

今回、生コン工場～運行管理～現場間で無線による連絡体制を採用したが、パソコンネットワークと比較して、タイムロスがほとんどなく、また人員を削減できた。また、各担当者が運行管理責任者に情報伝達するだけで、すべての担当者が情報を共有でき非常に有益であった。

なお、生コン工場～運行管理と、現場～運行管理で別のチャンネルを使用したため、混線することなく情報伝達を行うことができた。

3.7 施工管理結果

1) 骨材試験結果

図 - 2 に高流動コンクリート製造期間中のある工場の骨材試験結果を示す。

細骨材の粗粒率が変動した場合は、海砂と砕砂の混合比率を変更し、混合粗粒率が2.6付近になるようにして使用した。施工全体にわたって、安定した品質の骨材を使用することができた。

高流動コンクリートにおいては、骨材の表面水率の変動が、フレッシュ性状に与える影響が大きい。そのため、

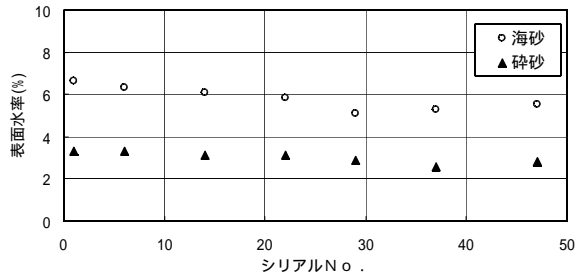


図 - 3 細骨材表面水率測定結果

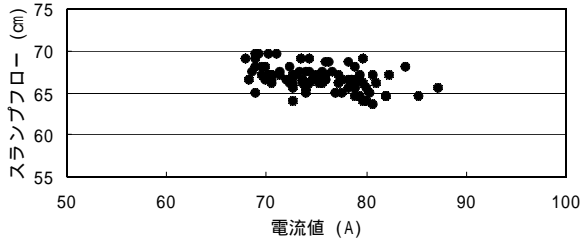


図 - 4 ミキサ電流値とスランプフローの関係

天候に関係なく工場へ骨材搬入後は、骨材ヤードをビニールシートで覆い、外部からの雨水等の侵入を防いだ。図 - 3 に、ある工場での 1 日の表面水率測定結果を示す。変動は小さく、最大でも 1% 程度であった。今回のような対策を行うことにより、表面水率の変動を抑制できることが確認できた。

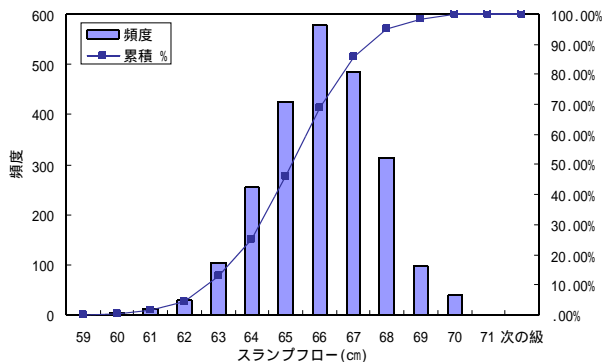


図 - 5 スランプフロー試験結果

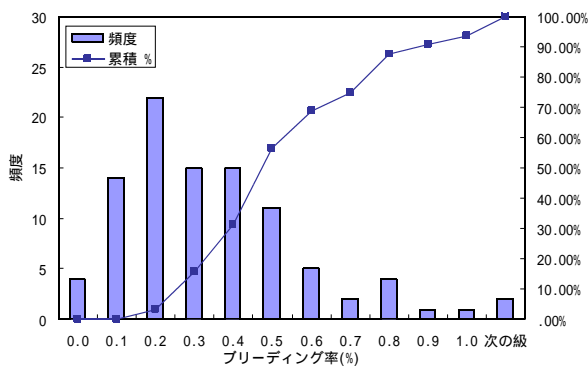


図 - 6 ブリーディング試験結果

表 - 7 各工場、各サイクルの平均所要時間

工場名	製造	運搬
沖縄生コン	05:21	07:30
球陽生コン	08:22	14:04
山城生コン	05:51	13:27
琉球生コン	08:47	14:42

分:秒

打設箇所	品管待機	品管試験	打設待機	打設	製造～打設
避難通路下	03:34	04:17	24:45	20:43	67:57
側壁下、隔壁、中壁	02:32	03:36	09:37	11:34	38:04
側壁上	02:02	03:16	05:00	09:57	31:54
下床版	02:17	03:13	11:34	08:43	38:44
上床版	02:34	03:08	06:56	07:05	31:54

2) 製造管理結果

高流動コンクリートの製造時の管理は、モニターによる目視、現場品質管理試験に加えて、練混ぜ時のミキサ電流値で行った。電流値は製造する工場やその日の温度によって異なるが、同じ日の同じ工場であれば、スランプフローを管理する上で有効な手段であった。

図 - 4 にミキサ電流値とスランプフローの関係の一例を示す。この場合、練上がり時のミキサ電流値を 70 ~ 80A の間で管理することにより、安定した品質のコンクリートを製造することができた。

3) コンクリート試験結果

スランプフロー試験結果を図 - 5 に示す。合計で 10,403m³ 出荷したが、品質管理基準を外れたもの(スランプフローが基準値をオーバー)は、アジテータ車 2 台分の 9 m³ であり、スペックアウト率 0.087% という良好な結果となった。また、工場別でも大きなバラツキはみられず、各工場とも安定して製造することができた。

ブリーディング試験結果を図 - 6 に示す。品質管理基準である 1.0% を越えたものが 2 回発生した。そのコンクリートが打設された箇所については、後日 R I 法による充填確認を実施し、鋼板下の間隙が 5mm 未満であることが確認されている。

圧縮強度試験は材齢 7 日で平均 47.3N/mm²、材齢 28 日で平均 55.5N/mm² の高い強度を得ることができた。

4) 運行管理結果

前述のとおり、アジテータ車 1 台のコンクリート可使用時間を製造終了～打設終了まで 90 分として管理を行った。表 - 7 に各工場、各サイクルの平均所要時間を示す。打設箇所により値は異なるが、1 台あたりの運行時間は可使用時間を大きく下回る結果となった。時間オーバーによるコンクリートの廃棄量は、全出荷 10,403m³ のうち 7 m³ でスペックアウト率 0.067% という良好な結果となり、運行管理体制が良好であったといえる。

3.8 まとめ

本工事では、材料品質管理およびミキサ電流値などによるコンシステンシー管理を行うことにより、所要品質範囲内の高流動コンクリートを製造することができた。

高流動コンクリートは確実な管理を行えば、一般コンクリートと同様の製造が可能であるという認識を得ることができた。

今後は、省力化とより安定したコンクリートを製造する方法を検討する必要がある。品質管理試験要員の減少を図るため、全数試験の回数を減少させる必要があるが、安定した品質の供給を考えると現実的ではない。対策として、全量試験器の開発、導入等が考えられる。また、実用化の用途は不明だが、表面水の影響を排除した生コン工場での骨材計量方法が提案されている。²⁾

4. 沈埋函下床版打設方法

昨年度の技術年報において報告したとおり、沈埋函のすべての部位においてフルサンドイッチ構造が採用されたのは、那覇沈埋トンネルが初めてである。従来までは、下床版はオープンサンドイッチ構造であり、下床版への高流動コンクリート打設は、なされたことがなかった。

さらに沈埋函を浮遊状態とするため、あらかじめバルクヘッドが設置されることから、密閉された車道部内で打設を実施することになり、上床版にあけた貫通孔から筒先を挿入して打設することになる。

一方で、閉塞工の手間や止水の関係から、貫通孔はなるべく少なくした方が有利であり、設計では必要最小限の貫通孔があげられているのみである。そのため、1つの貫通孔から数個の下床版区画を打設することとなり、貫通孔と打設孔に水平距離が生じるためホースをかなりの曲率で曲げる必要がある。さらに、函上から下床版を打設するためホースが長くなり、ホースおよびホース内のコンクリート重量や圧送時の脈動による衝撃力などを考慮すると、人力による打設は困難と判断した。

よって、これらの問題を解決するためにコンクリートホース巻上機(エスカル)を開発した。図-7に詳細図を示す。

エスカルの半円形部によりコンクリートホースを保持し、半円形部を回すことによりホースを巻き上げる。打設孔間移動にはキャスターを使用し、人力にて押して動かす。打設状況図を図-8に、打設状況写真を写真-2に示す。

昨年度の技術年報において報告したとおり、試験施工により、その施工性・効率性は期待以上のものと確認できたが、より改善するため、本施工時には次のような改

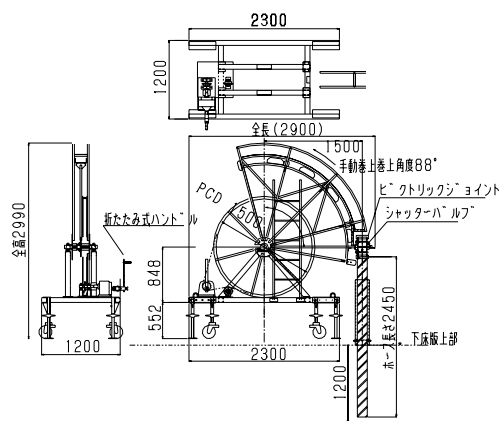


図-7 コンクリートホース巻上機(エスカル)詳細図

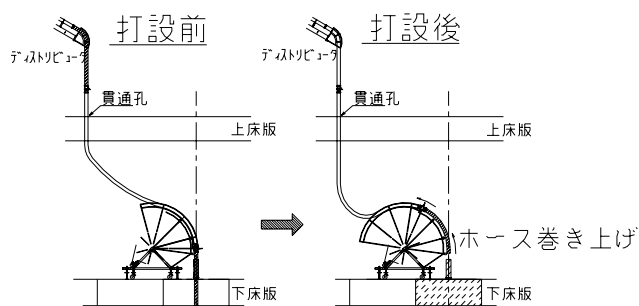


図-8 エスカル打設状況図

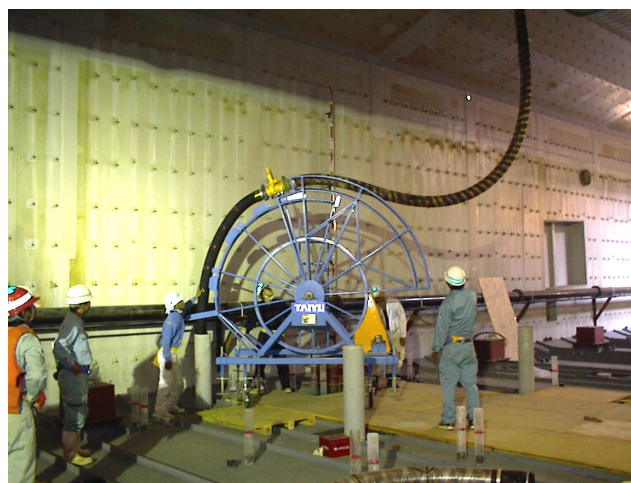


写真-2 エスカル打設状況写真

良を加えた。

エスカルのホース巻上用動力を手動とした。これにより、バッテリー交換等によるロスをなくしまた故障しにくい構造とした。エスカルのコンパクト化・軽量化を図った。

作業用開口部からの沈埋函内への搬入、車道部間での長距離移動を考慮し、半円形部の半径を 2m から 1.5m、また架台長さも 2.7m から 2.3m とコンパクト化した。

空気抜き孔がエスカル移動時の邪魔となりにくいようにエスカル架台高さを高めた。

これにより、一層作業性を向上した。

打設に携わった作業員へのヒアリングによると、下床版打設は、エスカルなしには考えられないという声が圧倒的であった。函内温度は平均 30 近く、風通しも十分ではない状況であり、あまりよい労働条件とは言えない。その中でコンクリートの入ったホースを数人で肩で担ぎながら、移動～挿入～引き上げ～移動の作業を 1 日 20 回人力で行うのは作業員の負担、作業の効率性から考えて困難と言える。特に週 4 日打設していたため、打設に伴う作業員の疲労蓄積を考えると、効率的でない。

エスカルを使用した下床版は、作業性の劣る箇所でありながら、打設時間や移動時間が他のブロックとさほど変わらず効率よく打設できた。表 - 7 参照。

今後の課題としては、下床版部には補剛材としてフラットバーが突出しており、エスカルのキャスター移動のために、合板等による移動床を設けざるをえないことである。この点は、沈埋函構造の制約のため改善困難なところである。

なお、この「エスカル」については、我が社の特許として申請中である。

5. 計測工

5.1 計測工概要および目的

本報告では、以下の 4 種類の計測を報告する。

- 1) トータルステーションによる 3 次元函体計測
- 2) レーザと CCD カメラによる函体端面計測
- 3) 温度計測
- 4) 吃水計測

上記の 1) ~ 3) については、以下のように高流動コンクリート打設による沈埋函変形を把握するため実施したものである。

従来の沈埋函はドライドックで製作され、製作誤差や、コンクリート熱および日射熱等による鋼の変形を、前面プレートをコンクリート打設後に取付けることによって吸収していた。しかし那覇の沈埋函では、本土で鋼殻製作完了後、沖縄で浮遊打設することにより、あらかじめ前面プレートを設置した状態でコンクリートを打設することになり、変形などの修正が不可能である。よって水

和熱やコンクリート自重などにより沈埋函の変形が懸念され、特に端部の出来形が許容値を大きく逸脱すれば水压接合に支障をきたすおそれもある。図 - 9 参照。

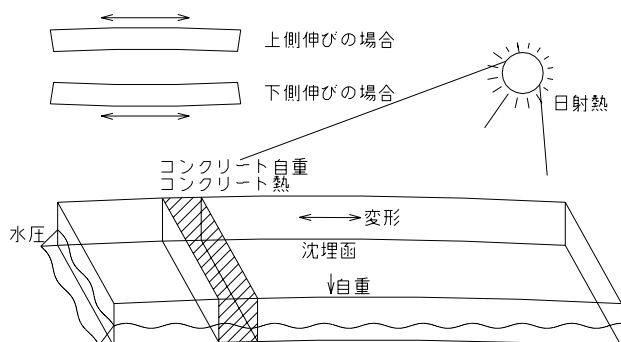


図 - 9 沈埋函変形概念図

一方、本沈埋函では平面的および断面的に、変形の生じにくい最適打設順序が決定されており、底版よりも壁部を先に打設する方が沈埋函に付与する剛性が高く、コンクリート重量、水と熱および日射熱による荷重が作用しても、沈埋函接合作業に支障をきたすような大きな端部変形を生じないと予測されていた。那覇の沈埋函はフルサンドイッチ構造であり、従来の RC 構造よりも剛性が高く変形しにくい構造であることもその一因である。

よって、最適打設順序に従ってコンクリート打設することにより、沈埋函変形は小と考えられるが、このような施工が初めてで不測の事態が生じるおそれもあり、浮遊打設時の沈埋函変形状態を監視することは重要である。

そのため、1) および 2) により沈埋函変形状態を測定し、またコンクリート・鋼殻などの温度を測定した。

なお、1) 2) の函体計測については浮遊中の計測となるので、通常と異なる以下のような問題点がある。

浮遊打設時には、函外側測点の一部分が水中に没しており、着底時にはすべての函外側測点がある。よって光波測量機械による直接測量は不可能である。

浮遊打設時に測量する場合、函の動揺により、函内部に設置した測量機械自体も動揺する。

沈埋函内部には隔壁があるため、1 箇所からの見通しはできず、内部測量の際には数箇所から測量しなければならない。

これらの問題を解決するために、1) では以下のような工夫をした上でトータルステーションによる 3 次元高精度測量を実施した。

- a) 函内出来形と函外出来形の関係を、あらかじめ製作

時に測量し把握した。その後は函内測量点を測量して函外を類推した。

- b)最初に選定した3点を計測して沈埋函上にXYZの3軸を設定し、浮体が動揺しても座標系自体が浮体と一体に動揺することにより、動揺による影響を排除した。
- c)複数の機械設置位置からの計測結果を、繋ぎ点を使用して、同一座標上に乗せた。座標変換には、複数測量結果を一括処理するソフトを使用した。

また、2)においても、1)の函内測量による函外変形類推、沈埋函に固定されたレーザ発振器やCCDカメラを使用することによる動揺の影響排除、壁部の開口部近くを計測することによる端面のみの一括測量によって問題なく測量できた。

なお、1)と2)では函体変形を計測するという意味では同様の計測であるが、1)は測点数の多さから計測に4~5時間を必要とし、そのため工事中の測定回数を少なくした。万一の不測の変形を憂慮し、その点を補うため、少ない測点を頻度を多くして即座に測定する計測方法として2)の計測方法が発注者により採用された。

3)については沈埋函変形に大きく影響する鋼殻・コンクリート温度などを、今後の変形シミュレーションに生かすために測定し、4)については沈埋函乾舷予測と安定予測を実施するために測定した。

5.2 トータルステーションによる3次元函体計測

1) 計測機器

計測には、トータルステーションMONMOSを使用した。

2) 計測点

以下のことを考慮して測量ポイントを決定した。

函端部出来形は、函接合のために非常に重要であるので、測量ポイントを多くする。

上面鋼板、横方向補鋼材、縦方向補鋼材の3部材が交差する付近を測量ポイントとする。この箇所は、剛性が高く、局所的な変形をする恐れが少ない。

製作時には、函外出来形と函内出来形の位置関係を把握するため函体外側周囲と函体内部を測量する。

図-10に測点配置図を示し、表-8に総括表を示す。

3) 計測時期

計測作業は、日照の影響による変形が少なく、外気温・水温の安定する夜間作業とした。ただし、曇天または雨天時、別途の温度計測により日射の影響がほとんどなく温度が安定していると確認できた場合には、日没1時間程度後の計測も実施した。

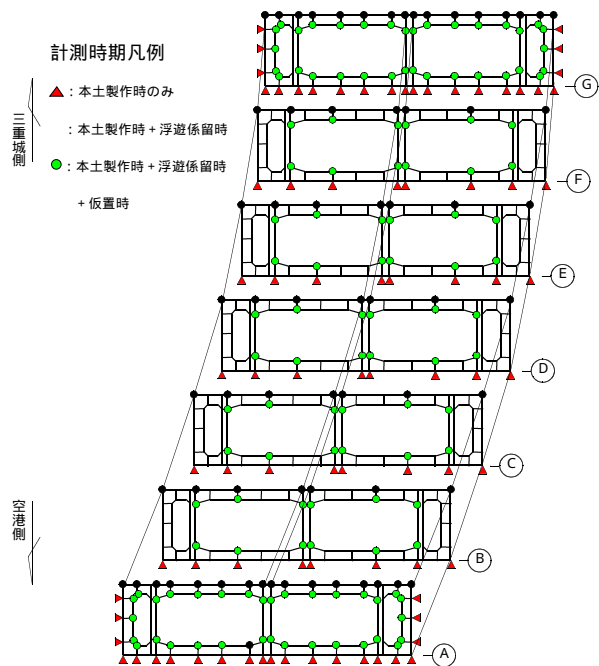


図-10 3次元函体計測計測点配置図

表-8 3次元函体計測計測点総括表

	計測点	備考
本土製作時	284点	函体外156点+函体内128点
浮遊係留時	200点	函体外72点+函体内128点
仮置時	118点	函体内118点

4) 計測頻度

工場製作時に1回測定。台船搭載時に1回測定。

係留直後に浮遊状態の初期値として1回測定。

コンクリート打設中については、基本的には1週間に2回(コンクリート打設2回に1回の頻度)。

コンクリート打設後に1回測定。仮置き時に1回測定。

合計19回測定した。

5) 計測方法

計測状況を写真-3に示す。写真は函内の計測状況であるが、フラッシュに反応して函体の壁部で光っているものが計測ターゲットであり、これを手前の計測機器MONMOSで視準し、反射する赤外線によってターゲットの3次元座標を計測した。それを複数箇所から表-10に示す測点数計測し、後に同一座標へ変換した。

6) 計測結果

鋼殻のみの浮遊状態を初期値として、結果を整理した。

本報告では、そのうちの沈埋函中央たわみについて記述し、表-9に各計測回数での結果、図-11に仮置き完了後の函軸方向たわみ最終計測結果を示す。なお、沈埋函が上に凸となるときの中央たわみを正とする。



写真 - 3 トータルステーションによる3次元計測状況

表 - 9 3次元計測による沈埋函中央たわみ結果

計測No.	4	5	6	7	8	9	10	11
打設箇所	運搬通路下完了	側壁埋設中 2日目	側壁埋設中 4日目	側壁埋設中 6日目	側壁埋設中 8日目	側壁(上部)打設完了	下床版打設 2日目	下床版打設 4日目
たわみ量 (mm)	0.1	1.4	1.5	3.4	1.9	8.6	6.9	-3.3
計測No.	12	13	14	15	16	17	18	19
打設箇所	下床版打設 6日目	下床版打設完了	上床版打設 2日目	上床版打設 4日目	上床版打設 6日目	上床版打設完了	コンクリート打設完了後	仮置完了後
たわみ量 (mm)	0.4	-5.8	5.4	9.3	9.4	7.8	1.8	0.2

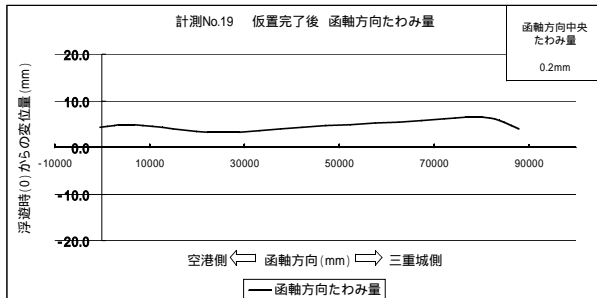


図 - 1 1 仮置き完了後沈埋函中央たわみ量

表 - 9 のように函軸方向中央たわみ量は、プラス側への変形(上に凸)、マイナス側への変形(下に凸)がコンクリート打設に伴い推移し、最終中央たわみ量は 0.2mm であり、沈埋函長さ 92m に対してごく微小なものであった。函体の出来形形状に何ら問題はなく、不測の変形は生じていないと言える。

図 - 1 1 に示すように、最終函軸方向たわみ量はプラス側で一定に近くなっている。これは函軸方向の沈埋函剛性を上げるため、下床版、上床版より壁部を優先的に打設した結果、自重等により側壁部が下がり函軸直角方向には上に凸の変形をしたことを示している。

5.3 レーザと CCD カメラによる函体端面計測

本計測も「5.2 トータルステーションによる函体

計測」と同様に、沈埋函の変形を計測するものであるが、沈埋函で重要である端面に注目して、それを 10 分程度の短い時間で、トータルステーションより 2.5 倍の頻度で計測した。

計測項目としては、端面面外変位、函体のねじり、波によるサギング・ホギングの 3 種類を計測したが、紙面の都合上ここでは端面面外変位について報告する。

1) 計測原理

本計測では、ある地点からレーザ光線を発振して CCD カメラに照射し、光線の重心スポットを CCD カメラで撮影・取得して、その位置変化を計測することが基本である。図 - 1 2 参照。このレーザと CCD カメラの台数および位置をさまざまに組み合わせて、函体の変形を計測した。

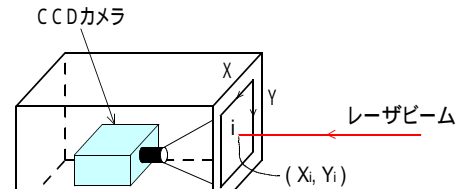


図 - 1 2 CCDカメラ(位置センサー)

端面面外変位の計測原理図を図 - 1 3 に示す。函体の一方から発振したレーザをペンタプリズムにより直角に曲げ、そのレーザビームの軌跡が一定の仮想面となるので、この仮想面からの距離 V を測定することで面外変位を測定する。図 - 1 3 は、壁 1 の測定原理図であるが、壁 2 については図 - 1 3 に対して機材を対称に設置し計測する。

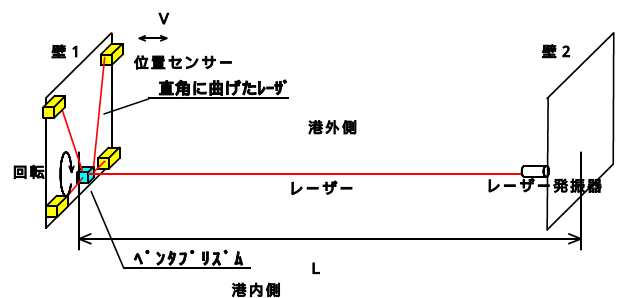


図 - 1 3 端面面外変位計測原理図

2) 計測時期

トータルステーション計測と同様に、夜間計測を原則とし、温度の安定が確認されたときには日没 1 時間程度の計測も実施した。

3) 計測頻度

工場製作時に 1 回測定。台船搭載時に 1 回測定。

係留直後に浮遊状態の初期値として1回測定。

コンクリート打設中については、頻度を多くする観点から土日を除く1日1回とした。ただし本計測は、不測の変形が懸念される沈埋函剛性が比較的低い下床版打設完了までとし、コンクリート打設完了まで計測のトータルステーションよりは計測期間を短くした。

4) 計測方法

計測状況写真を写真 - 4 に示す。左側からレーザが発振され、右側のペンタプリズムで曲げ、CCD カメラに照射する。



写真 - 4 レーザとCCDカメラによる計測状況写真

5) 計測結果

空港側の端面面外変位は最大で ± 4 mm 以内であり、三重城側の端面面外変位は最大で ± 3 mm 以内であった。函体全長 92 m に対しての変位量としては、ごく微小なものであった。よって、3次元計測と同様に沈埋函に有害な変形は生じず、また不測の変形は生じていないと判断できる。なお、本システムによる計測値は、3次元函体計測による中央たわみ量および端面倒れ量と相関しておらず、傾向は一致していない。これは、最適順序で十分な管理のもとコンクリート打設したことから、沈埋函に不測の変形が生じず、端面面外変位自体が小さく有意な変位量とならなかったためと考えられる。

本工事のように、変位が少ないものや複雑な変形をするものに対して変形形状の把握を考える場合には、端面だけではなく、中央たわみを測定して関連づけるか、もう少し計測点を増やす必要があると考えられる。

測点数が多いので今回は手動計測であるが、他の構造物計測で、少ない点、例えば1、2点を常に監視しておく必要があるような場合には、レーザとCCDカメラを点数分固定することにより、高精度で自動的に常時計測できるという重要なメリットがあるので、有効な計測方法と考えられる。

5.4 温度計測

1) 計測概要

温度計測は、熱電対を使用し、1断面につき9カ所の測定を実施した。断面的な測定箇所を図 - 14 に示す。函軸方向には、三重城側、空港側の端部鋼殻2ラインと中央部の1ラインの計3ラインとし、合計3ライン \times 9カ所 = 27カ所の測定である。1カ所に鋼殻上面1点、下面1点、コンクリート中央部1点の計3測点としたので、81測点となる。その他に水温6点、函内気温6点、函外気温2点を測定した。

計測は、現場事務所までケーブルを敷設し、データを自動的にパソコンに取り込んだ。

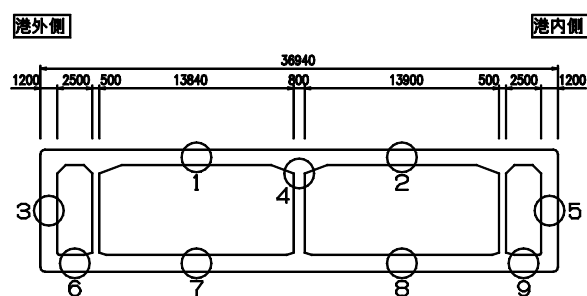


図 - 14 温度計測配置図

2) 計測結果

計測結果をまとめたものを以下に示す。

コンクリートの平均温度上昇量は、41.2 ~ 43.2 であり、平均最高温度は、71.8 ~ 74.1 の範囲であった。（ただし側壁部を除く）

コンクリートの最高温度到達日は、打設後1日であった。

コンクリート温度降下日は、8日~9日であった。3ラインでの温度差がほとんどないことから、一次元的な熱伝達が卓越していると推定される。

函内気温のほうが函外気温より高い。

海水に面していた函外鋼板は、外気に接していた他と比較して温度上昇量が小さい。

散水養生を実施したブロックの鋼板温度は、日射を受けた状態の鋼板と比較して低く、散水養生の効果が確認できる。

コンクリート温度上昇量は、高流動コンクリートの粉体として石灰石微粉末を使用したことにより、その粉体量にしては比較的低い。また、函内に水と熱が伝達されることにより、換気していても函内気温が高くなり、30程度であった。作業環境としてはあまりよくなかった。海水に面していた部分や鋼板に散水養生していた部分

では外気に接した部分より鋼板温度が低くなった。

5.5 吃水計測

1) 計測概要

図-15のように、沈埋函の4隅および函軸長辺中央に水圧式の吃水計を設置した。吃水計センサーから現場事務所までケーブルを敷設し、データをパソコンに取り込んで自動計測を実施した。

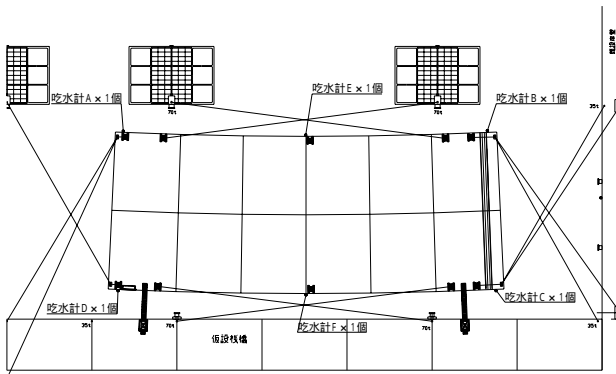


図-15 吃水計配置図

2) 計測結果と乾舷検討

1号函は、三重城側に鋼製可撓性継ぎ手のペローズがあることから、重心が中心からずれ、鋼殻のみの係留直後は、三重城側へ約25cm傾いた状態で浮かんでいた。

この函軸方向への傾きは、コンクリートを打設することにより徐々に改善されたが、一方で半径1000mの曲函であることから、函軸直角方向に対してコンクリート打設に伴い円弧の長い港内側へ徐々に傾く傾向にあった。高流動コンクリート打設終了時点では、三重城側へ約10cm、港内側へ約20cm傾いた。

函上にいる人間が気にならないほどの傾きであるが、沈設時の施工性を考えると、できるだけレベルに近づける必要があり、乾舷調整コンクリートである1次道床コンクリート厚を変えて対応した。

まず保護コンクリート打設終了時点、つまり道床コンクリート打設前に計測した吃水と傾きから、次式により沈埋函の重量および函心からの重心ずれを逆算した。

平均吃水量 d (m)

$$d = \frac{W}{A \times \gamma}$$

メタセンター高さ GM (m)

$$GM = KC + CM - KG = d/2 + B^2/12d - KG$$

$$\text{ヒール } h \text{ (m)} = B \times (\text{函心からの重心ずれ}) / GM$$

ここで、 W ：函体総重量(t)、 A ：函の底面積(m^2)

：海水比重(t/m^3)、 KC ：浮心高(m)

KG ：重心高(m)、 CM ：傾心 - 浮心高(m)

h ：函体の吃水量の差(m)、 B ：函体幅(m)

検討の結果、計画吃水(8.65m：乾舷25cm)とするためには約490 m^3 の道床コンクリートを打設する必要があり、打設後の沈埋函重量は約29,600tとなった。

一方で、沈埋函をレベルにするには、重心ずれを矯正する必要があり、4つの道床コンクリート打設ブロックにおいて、打設厚を変えた検討を実施し、全打設面積約1,566 m^2 で28.5～34.0cmと最大約5cm変えて打設した。

それにより、ほとんど誤差なく計画通りの吃水となり、また沈埋函の浮遊姿勢もほぼレベルとなった。最終の吃水差は約1～2cmであり、計測誤差程度であった。

おわりに

本工事は、世界で初めて浮遊状態の鋼コンクリート合成構造沈埋函へ高流動コンクリートを打設した。十分な事前検討と施工管理により、心配された沈埋函変形は少なく、高流動コンクリートについても、我が社では最大の約10000 m^3 という大量打設に関わらず、安定した品質のものが打設できた。今後の沈埋函施工のプロトタイプとして、十分誇りうるものが達成できたと考える。また計測工によって得られたデータは、今後鋼コンクリート合成構造沈埋函の浮遊状態における挙動を解析するための貴重なデータとして有効活用されるものと思われる。

本工事のノウハウが、2号函以降および今後の沈埋函施工に生かされることを切に願う。

謝辞

本報告は、那覇港(那覇ふ頭地区)道路(空港線)沈埋函製作工事をもとに執筆いたしました。工事に関係した沖縄総合事務局の方々、沖縄県生コンクリート協同組合、沖縄生コン(株)、球陽生コン(株)、山城生コン(株)、琉球生コン(株)、琉球セメント(株)、ポゾリス物産(株)、新日本非破壊検査(株)、横河ブリッジ(株)、ミネベアアジオテクノロジー(株)、共和電業(株)、新日本製鐵(株)鉄構海洋事業部および若松鉄構海洋センター、五洋建設(株)技術研究所および本社機械部、五洋・新日鐵・三井不JV職員には本工事を遂行するにあたって、多くのご指導、ご助言、ご協力をいただきました。紙面を借りて謝意を表します。

参考文献

- 1) 仲田康司・津堅智子：沖縄地区、コンクリート工学、Vol.34、No.7、pp70～73、1996.7
- 2) 十河茂幸・近松竜一：細骨材の表面水に影響されないコンクリートの製造方法、土木学会第55回年次学術講演会、V-411、2000.9