

那覇沈埋トンネル 4号函製作工事の報告

A Report on the Production of Element No. 4 of Naha Submerged Tunnel

中村 哲世^{※1} 永井 英輔^{※2} 梶 正樹^{※3} 藤本 尚志^{※4}
Noriyoshi Nakamura Eisuke Nagai Masaki Kaji Hisashi Fujimoto
田中 齊^{※5} 花田 幸生^{※6} 市村 英紀^{※7} 伊藤 淳^{※8}
Hitoshi Tanaka Yukio Hanada Hidenori Ichimura Atsushi Itou

【要旨】

那覇沈埋トンネルは、島国沖縄のターミナルである那覇空港と那覇港の地域間における人や物の輸送体系の強化を目的に計画された那覇臨港道路空港線的那覇ふ頭港口横断部に採用された海底道路トンネルである。当社はトンネル区間を構成する8つの沈埋函のうち、4号函の製作工事を担った。この工事では、鋼コンクリート合成構造を採用された沈埋函について、鋼殻を本土で製作し沖縄まで長距離海上輸送した後、栈橋に係留した状態の鋼殻内部にコンクリートを打設（海上浮遊打設）したことや、キャリアアウト方式により鋼殻の台船積込を実施したことなど多くの新工法、新方式が採用された。ここでは、製作工事全般に関して報告する。

【キーワード】 沈埋トンネル フルサンドイッチ構造 長距離回航 係留管理 高流動コンクリート 海上浮遊打設

1. はじめに

那覇港臨港道路の海底トンネルは8つのエレメントで構成する沈埋工法で計画されている。一般に、沈埋トンネルは ①立坑の建設、②沈設位置の海底浚渫、③函体エレメント（沈埋函）の製作、④函体の沈設（水中接合）、⑤埋め戻し、⑥函内設備の整備等の工程を経て完成する。当社は、このうち、「4号函」の製作工事を実施した（図-1）。

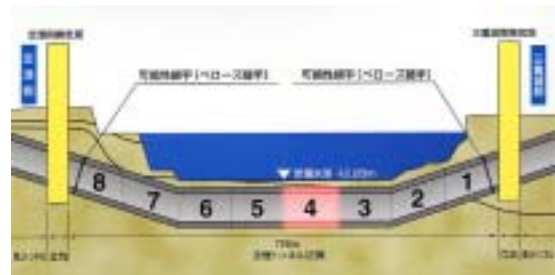


図-1 那覇沈埋トンネル縦断面図

トンネルと沈埋函の諸元の概要¹⁾²⁾³⁾を以下に示す。

[那覇沈埋トンネル (図-1)]

- ・延長：724m（立坑間）
- ・函体構成：8エレメント

[トンネルの規格 (図-2)]

- ・道路規格：第3種1級（高規格道路）
- ・設計速度：80km/h
- ・車線数：片側3車線往復6車線



図-2 那覇沈埋トンネルの規格概要図

[沈埋函(4号函)の形状 (図-3)]

- ・寸法：L90m×B37m×H8.7m
- ・構造：鋼コンクリート合成構造
- ・鋼殻質量：約3,000トン
- ・完成質量：約30,000トン

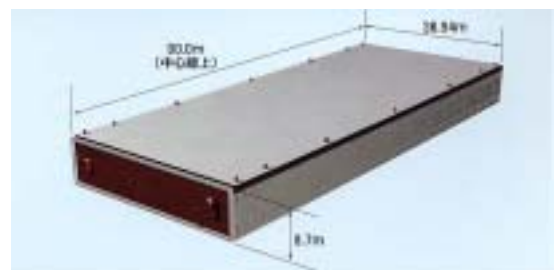


図-3 4号函の形状図

2. 工事概要

2.1 工事の内容

主要工種内訳等は、表-1のとおりである。

表-1 工事の基本情報と主要工種内訳

工事件名 ： 那覇港（那覇ふ頭地区）道路（空港線）沈埋函（4号函）製作工事	
工事場所 ： ①本土 兵庫県加古郡播磨町新島41 ㈱神戸製鋼所 播磨橋梁工場 ②沖縄 沖縄県浦添市伊奈武瀬地先	
工期 ： 自平成14年10月19日 ～ 至平成16年3月15日	
発注者 ： 内閣府 沖縄総合事務局 開発建設部 那覇港湾・空港整備事務所	
施工者 ： 飛鳥建設㈱・㈱神戸製鋼所・㈱鴻池組 特定建設工事共同企業体	
工 種	数 量
【本体工】	
鋼殻・バルクヘッド製作	約 3,000 t
本体コンクリート（高流動30-65-20N）	10,160 m ³
保護コンクリート（18-12-20N, 30-12-20N）	648 m ³
道床コンクリート（18-12-20N）	476 m ³
充填モルタル（無収縮 30N/mm ² ）	42 m ³
電気防食（115年耐用, Al合金）	196 個
ゴムガスカート（GINA型190-148-40/40）	88 m
防食塗装	11,470 m ²
防汚塗装	1,521 m ²
【構築工】	
一次構築①（本土鋼殻製作地）	1 式
一次構築②（沖縄）	1 式
【回航工】	
台船積込（本土製作場所）	1 函
回航（本土～沖縄）	1 函
進水（那覇港内）	1 函
係留（那覇新港仮設棧橋）	1 函
【仮設工】	
係留用ケーソン据付（浮上・仮置×2回）	2 函
打設準備工	1 式
仮設備工	1 式
【計測工】	
高流動コンクリート品質管理	1 式
函体計測	1 式
函体吃水計測	1 式
係留ロープ張力測定	1 式
【仮置工】	
仮置	1 函

2.2 工事の特徴

沈埋トンネルは、施工ヤードの省スペース化や施工の省力化・合理化等に向け、各種の新工法・新工法を採用している。当工事の主な特徴は以下のとおりである。

- ① 工事を鋼殻製作までとコンクリート打設以降に分け、それぞれ、本土鋼殻製作工場（兵庫県）と海上ヤード（沖縄県）の2箇所で別々に実施したこと。
- ② 工事対象構造物（沈埋函鋼殻）を 672 海里（約 1,200km）にもの長距離に及んで海上輸送したこと。
- ③ 構造形式にフルサンドイッチ鋼コンクリート合成構

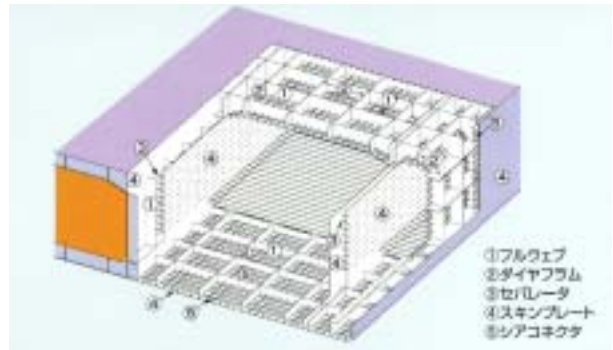


図-4 鋼コンクリート合成構造

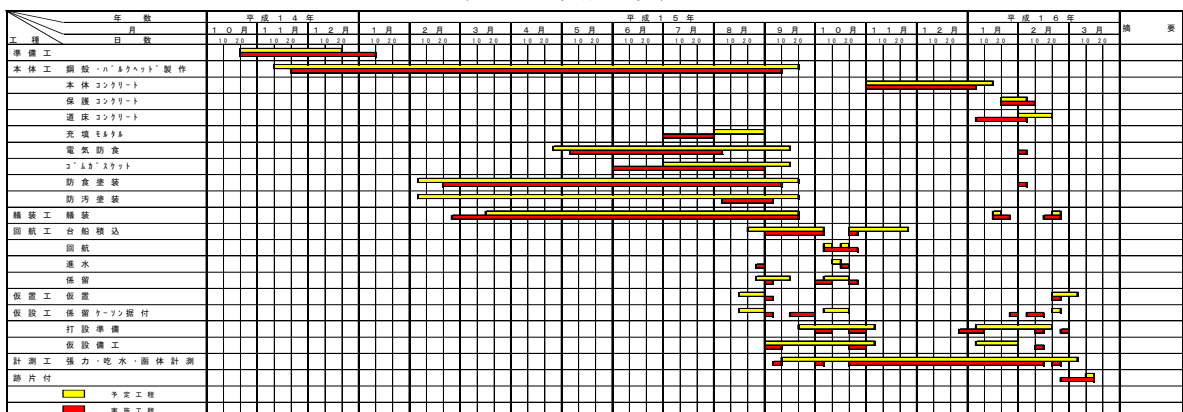
造（図-4 那覇沈埋トンネルで日本初）が採用された沈埋函を施工したこと。

- ④ 函体の台船積込み方法として在来工法（すくい上げ方式、スキッドアウト方式）以外の第3番目の方式としてキャリアアウト方式を採用したこと（沈埋函に関して世界初）。
- ⑤ 本体コンクリート（高流動コンクリート）について配合計画～製造～品質～施工を一貫して管理したこと。[高流動コンクリート品質管理]
- ⑥ 沈埋函の内空寸法に加えて、隣接函と所定の角度での接合が可能となるよう、函両端接合面の取付精度を管理したこと。[函体計測]
- ⑦ 沈埋函の本沈設（水中）に備え、将来実施される浮上～曳航～沈設の各工程における安全確保を満足する所定の吃水（函体重量）をもつ函体に仕上げたこと。[函体吃水計測]
- ⑧ 函体は海上で進水した後、完成して仮置されるまで係留された浮遊状態であったが、係留期間における函体の動揺に関して安全性を確保したこと。[函体動揺解析、係留ロープ張力測定]

2.3 工事工程

表-1に実施工程表を示す。

表-1 実施工程表



3. 主要工種別の施工状況

3.1 鋼殻・バルクヘッド製作

本土鋼殻製作地として(株)神戸製鋼所播磨橋梁工場内にJV製作工場を設定した。鋼殻・バルクヘッド(総質量約3000t)は、75のブロックに分割して製作する計画とした。鋼殻ブロックは、外部工場として住友金属工業(株)、松尾橋梁(株)、日本橋梁(株)、JV工場として(株)神戸製鋼所播磨橋梁工場で製作した。製作されたブロックはJV製作工場に集めて大組立を実施した(図-5)。

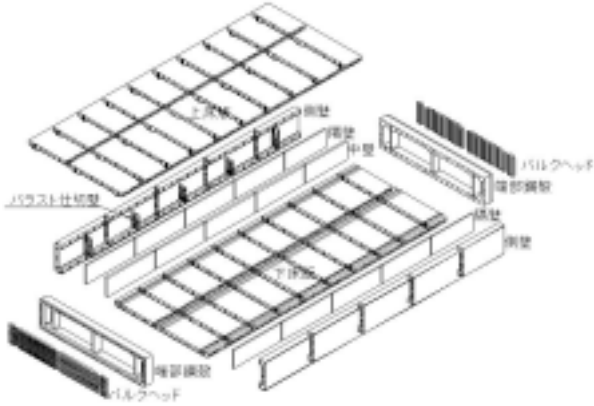


図-5 鋼殻ブロック割付計画図

まず、各工場でCADから原寸取りして加工・製作された鋼殻ブロックを海上輸送によりJV製作工場に搬入しクローラークレーン(450t級, 150t級)で水切りを行った。次に、改良整地された地盤上に高さ1.6m程度の支持架台を設置し、その上に下床版ブロック、中壁ブロック、隔壁ブロック、側壁ブロック、上床版ブロックの順番に搭載・仮接合して大組立を行った(写真-1)。



写真-1 鋼殻大組立

さらに、搭載された鋼殻ブロックと隣接ブロックとを溶接接合し、高流動コンクリートの海上浮遊打設時や仮置における強度・安全性を確保するため、全溶接部に対して耐圧性と水密性などに関する水密性確認試験を実施した。試験は溶接部の状況に応じて放射線透過試験, 超音波探傷試験, 磁粉探傷試験, バキューム試験を適用し全箇所合格を確認した。

3.2 鋼コンクリート合成構造

鋼コンクリート合成構造は、従来のRC構造と比較すると鋼殻本体を防水鋼板および鉄筋代りとして用いる構造である。せん断力に対してはコンクリートとフルウェブが負担し、鋼板とコンクリートのずれに対してはシアコネクタとダイヤフラムで抵抗する構造である(図-6)。

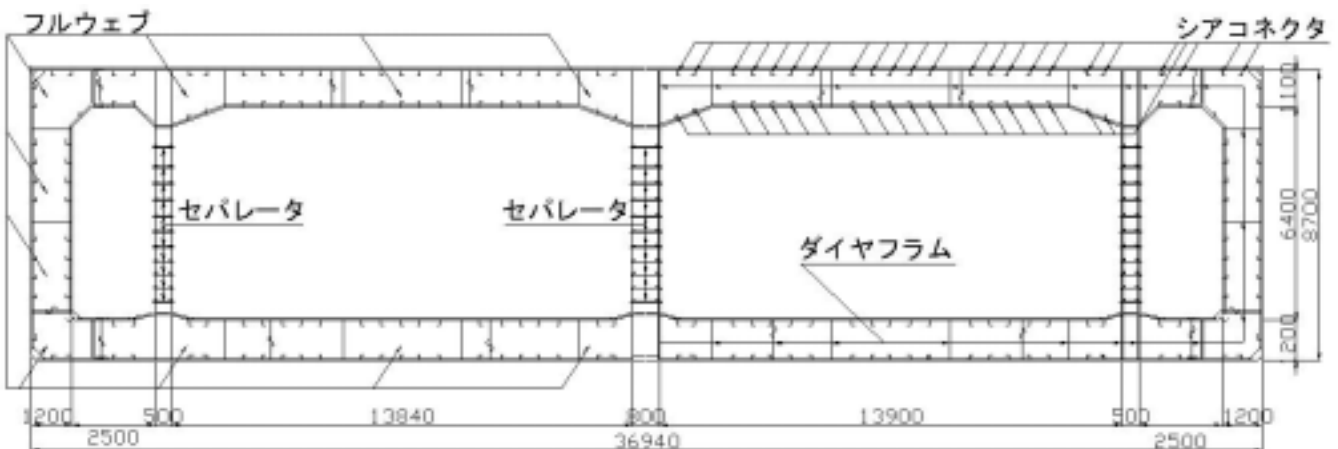


図-6 鋼殻断面図

3.3 端面プレート設置

沈埋函は隣接函と接合して一連のトンネル線形を形成するため、函体両端の接合面の取付精度が最も重要な管理項目となる。沈設後の函体方向修正可能量は、ゴムガスケットの水密機能により定まる。4号函で使用したゴムガスケットの場合では、函体延長90mに対する法線修正量はわずか50mm程度であった。

接合面（端面プレート）の取付けに先立ち、発注者により既製作函（1～3号函）の函体出来形と既沈設函（1号函）の据付出来形が照査され、4号函の端面プレートの取付角度が検討された。検討の結果、4号函では始点側の端面プレートの取付角度を函体両端で+10mm から-10mm の割合で修正するよう指示を受け、これに従い端面プレートを取付け、鋼殻を完成させた（写真-2）。



写真-2 鋼殻完成

3.4 函体計測

鋼殻製作は陸上で行われたが、台船積込以降は沈埋函が完成し海底に仮置きされるまで函体は浮遊した状態となる。浮遊状態の鋼殻に本体コンクリート打設他の作業を施して沈埋函を完成させるため、作業段階に応じて函体の変形を把握する必要がある。

当工事では函体全体の形状の把握を鋼殻製作完成時と函体仮置時（函体完成時）に三次元計測システム（MONMOS）を用いて実施した。端面プレートの位置（函外）は鋼殻完成時にしか測量できないため、これらの点に対応する点を函内端部鋼殻に設け、函内外の双方の位置関係が保持されると仮定して測量を実施した。また、台船積込み時や本体コンクリート浮遊打設段階等の製作作業中に、精密写真測量システム⁴⁾を用いて、函体内空断面の変化量の計測管理を行った。函体計測の概要と精密写真測量の計測状況を写真-3に示す。

表-2 函体計測（出来形測量）

計測時期	計測システム区分	
	三次元	精密写真
鋼殻製作完了時	224点	136点
台船積込後	—	136点
浮遊打設前	—	136点
浮遊打設中	—	136点
浮遊打設後	—	136点
函体仮置時	140点	104点

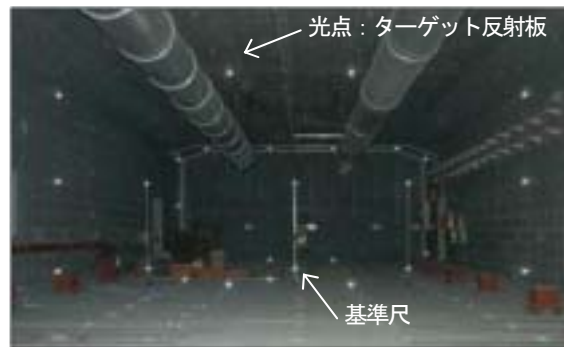


写真-3 精密写真測量

計測の結果、鋼殻完成時と函体仮置時を比較して、内空断面で水平方向に最大10mm程度のねじれ、函軸方向に部分的に最大8mm程度の伸びを確認されたが、これは既製作函と同程度の変形量で問題とならない。なお、最終出来形は三次元座標として、5号函の端面プレート取付け角度補正に反映される。

また、鋼殻製作完了時と仮置時の間での変形確認の目的で、精密写真測量を補間使用したが、三次元計測と同様の精度で有害変形のないことを確認できた。

3.5 鋼殻台船積込

本土鋼殻製作工場で作成した鋼殻は、半潜水式台船に搭載して沖縄へ海上輸送された。鋼殻の製作工場にはドックが備わっていないため製作工場から棧橋を経由して台船までの区間、鋼殻（質量約3000t）を陸上移動させる必要があった。当工事では、搭載能力500tのスーパーキャリア（写真-4）を8両編成させて、鋼殻を軌道運搬でなく、タイヤ車両で台船まで移動させるキャリアアウト方式（図-7）を採用した。

鋼殻下に挿入するスーパーキャリアは、車高1.5～2.0mの油圧ストロークを持ち、前方側4編成と後方側左右2編成を独立した支持グループとした。各グループ内で油圧システムを連結させて、3つのグループの重心点が三角形をなす3点支持状態で鋼殻の姿勢を制御し局所的な応力が生じないように計画した。

なお、キャリアアウト時に鋼殻製作時と支持位置が変更するので、予めFEM解析により函体に塑性変形が生じない範囲であることを確認した。

積込時には台船を棧橋に係留後、台船から棧橋にスロープ車路を設置した(写真-5)。鋼殻が台船に載り掛かると台船が沈み、支持点の反力変化による鋼殻変形が生じるため、作業中の台船の姿勢を一定(水平)に保つ必要がある。台船の動揺を計測システムでリアルタイムに監視し、台船の姿勢に応じて台船内のバラストタンクの海水を排水して積込完了までの姿勢を制御した。積込作業の時間帯は、当該海域の潮位が上げ潮になる時間帯を選定し、作業中のバラスト調整が排水のみとなるよう配慮した。作業時間は台船のバラスト調整がクリティカルとなり、作業完了まで5時間を要した。



写真-4 スーパーキャリア

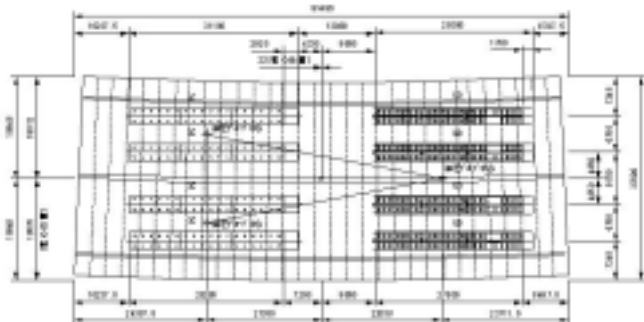


図-7 スーパーキャリアの配置



キャリアアウトの状況

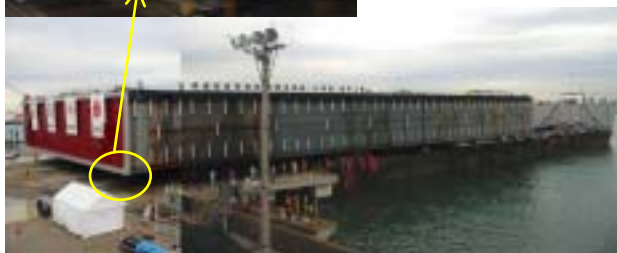


写真-5 鋼殻台船積込状況とスロープ斜路

3.6 回航・進水・係留

本土製作工場から那覇港まで672海里(約1,200km)の回航を下記船団で実施した。(写真-6, 7)

主曳船	鳳翔丸	6000PS
補助曳船	第二周防丸	2000PS
半潜水式台船	オーシャンオルカ	24000t

既製作工事の実績を参考として、平均航行速度5.5kt(10km/h)として、10月4日朝に東播磨を出港し、10月9日朝に那覇港へ到着する丸5日間の回航計画を立てた。しかし、実際には途中荒天に遭遇し鹿児島湾と薩川湾(奄美大島)に避泊したため、那覇港への到着は8日遅れの10月17日朝となった。

到着した台船を沖防波堤に係留し、鋼殻の固縛を外した後に台船を潜水させて函体を進水させた。(写真-8)浮上した函体4隅から4隻の曳船にラインをとり沖防波堤から那覇新港内まで曳航し仮設棧橋に係留した。(写真-9, 10)



写真-6 回航状況(明石海峡)



写真-7 台船潜水状況



写真-8 鋼殻曳出状況



写真-9 函体曳航状況



写真-10 函体係留完了

3.7 係留計画管理

進水時の鋼殻は、質量が約 3000t で鋼殻全高 8.7m の内、海面下に沈む高さ(吃水)は 0.95m 程度である。この状態で係留した浮遊状態の鋼殻に本体コンクリート、保護コンクリート、道床コンクリート、一次艀装等を施すと、吃水 8.6m 程度の質量約 30000 t の函体となる。したがって、沖縄到着後から施工段階毎に変化する函体吃水と潮位変動を考慮した函体の係留計画管理が必要になる。

係留計画に際しては、既 1～3 号函に関する函体動揺解析報告書を参考に検討気象海象条件 (5 年確率, 10 年確率, 20 年確率の波・風) を設定し, 4 号函における 12 本の係留索の最小張力を 29.4kN(3tf) と設定して動揺解析を実施した。この結果, 設定条件における函体動揺に対して函体側面・函体底面はそれぞれ仮設棧橋・海底仮置マウンドとの間に安全離隔が確保され, かつ係留索の張力は係船柱の引張耐力 343kN(35tf) 以下になった。既製作工事の実績を参考にして, 係留索としてワイヤロープとナイロンロープ (トエルロープ φ100, φ60) の組合せとした結果, 索張力と函体移動量が許容値に収まることを確認した後, これを基に係留計画を立てた。

係留管理では, 12 本の係留索にそれぞれ張力計を設置し, 係留開始から完了までの期間で張力を測定した。係留した全期間において張力に過不足は起きず, 一般的に函体を安全に係留することができた。

3.8 本体コンクリート工

鋼殻内は, コンクリート充填のために約 1,000 の打設区間に仕切られている。基本的に打設区間は立方形とし天板には中央に打設孔 1 箇所と 4 隅とその中間に計 8 箇所の空気抜孔を設けた。係留した鋼殻内にコンクリートを打設することによって函体重量の増加, 函底水圧の増加, 函側水圧の増加および発熱作用等が複雑に作用するため, 予め函体のひずみ量を最小とする打設順序を計画して, 本体コンクリート (高流動コンクリート) を打設した (図-10, 図-11)。

打設は 2 台のコンクリートポンプ車を使用し, 函体上に 2 機備えたディストリビュータを中継して施工した (写真-11, 12, 13)。函体の傾斜を少なくするよう

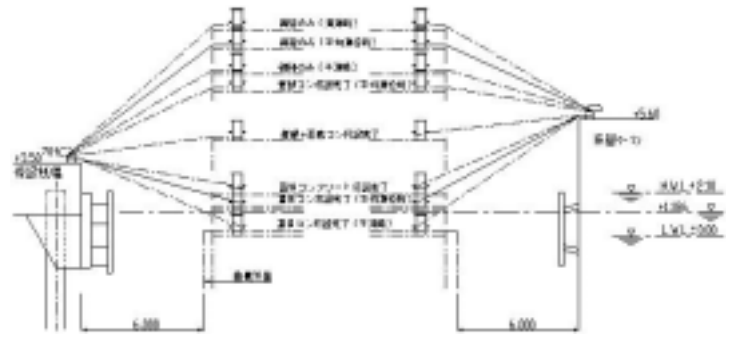


図-8 施工段階における函体吃水変化図

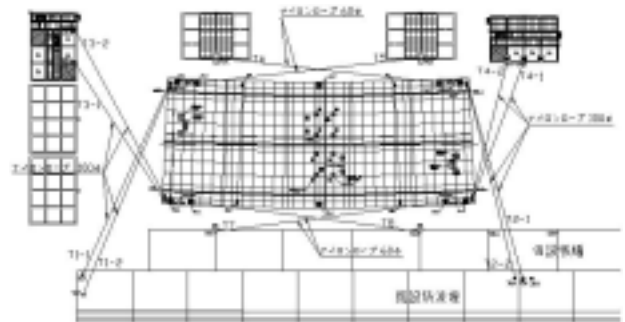


図-9 係留計画平面図

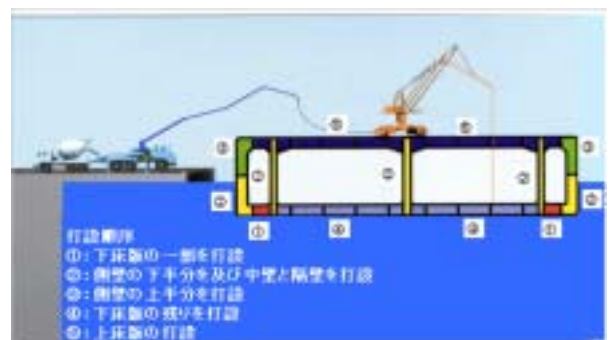


図-10 最適打設順序 (部材打設順序)

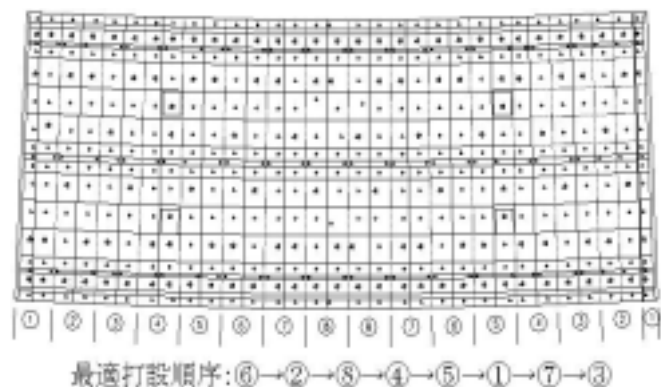


図-11 最適打設順序 (平面打設順序)

に函中心に対して対象に施工を進めた。下床版の打設に関しては、予め上床版に配管を貫通させる孔を準備し、函内に準備した打設補助機（写真-14、15）を使用して施工した。

構造上、打設区画内の充填は重要な管理項目である。基本的な充填管理方針は、打設箇所の打設孔にL=1.0mの鋼管を、空気抜孔にL=50cmの亚克力管を設置し、打設により亚克力管内の30cm高の位置までコンクリートが噴き上がった段階で充填完了とした。しかし、溶接等による天板のひずみや函体の動揺状況などにより空隙が残ることが懸念されたため、打設区画毎に打音で充填状況を確認した。充填の実施要領は天板がコンクリートで充填される手前で打設を中断し、各孔に竿を挿入し

てコンクリート表面を揺らし流動性を高め空気が逃げやすい状態にしてから打設を再開し、木槌等の打撃により空気を追い出しながら充填を完了させた。粘性の高い高流動コンクリート表面を揺らす方法を試行した結果、パイプレータでは挿入箇所周辺しか効果が及ばず、人力で竿をゆっくり押し引きする方法が最も効果的であった。

高流動コンクリートは、JIS 規格外品として、JVが配合を計画し、近隣の生コン工場を4箇所借りて製造管理、運行管理、品質管理、現場管理をトータル管理した。

（写真-15、16、17）

本社からの応援を含めた全職員がそれぞれの役割を徹底した結果、不具合なく施工を終えることができた。コンクリートの品質管理については、別途4.に記載する。



写真-11 浮遊打設の状況 [全景]



写真-12 浮遊打設の状況 [棧橋より望む]



写真-13 移動式ディストリビュータ



写真-14 函内打設状況（打設補助機）



写真-15 コンクリート自己充填状況（隔壁内）



写真-16 現場管理（圧送管理・可使時間管理）



写真-17 現場管理（充填管理 その1）



写真-18 現場管理（充填管理 その2）

3.9 吃水管理

2.2 の特徴⑦にも記したとおり、沈埋函では函体質量が重要な品質性能となる。当函体を引継いで実施される後続工事の曳航作業や沈設作業上の安全性（浮上り安全率＝函体重量／浮力）が適切に確保されたものでなければならぬ。

函体係留直後に函体側面6箇所吃水計を設置して作業を開始した。本体コンクリート工を終えた段階で吃水を確認したところ、函体質量が270t程度不足していることが判った。また、函体が対角で10cm程度傾斜していることも判明した。この対策として、道床コンクリートの打設量を増加調整すると共に、打設エリアによって打設厚さを配分して函体が水平になるよう調整を行った。最後に、保護コンクリートを施工して目標吃水に至り函体が完成した。

3.10 仮置き

完成した沈埋函は海底トンネルとして沈設されるまでの間、係留位置の海底に準備されている仮置きマウンドに着座仮置き状態で維持される。仮置きに必要な艀装を施して、2隻の起重機船を用いて沈埋函を仮置きを終了して、全ての工事の完了至った。（写真-19）。

4. 本体コンクリート(高流動コンクリート)の品質管理

4.1 本体コンクリート(高流動コンクリート)の概要

(1) 高流動コンクリートの工事概要

前述のように、那覇港沈埋トンネル用沈埋函は、鋼とコンクリートとの合成構造によるフルサンドイッチ構造であるために、一般のコンクリート構造物のようにパイプレータ等による充分なコンクリートの締固めが困難で

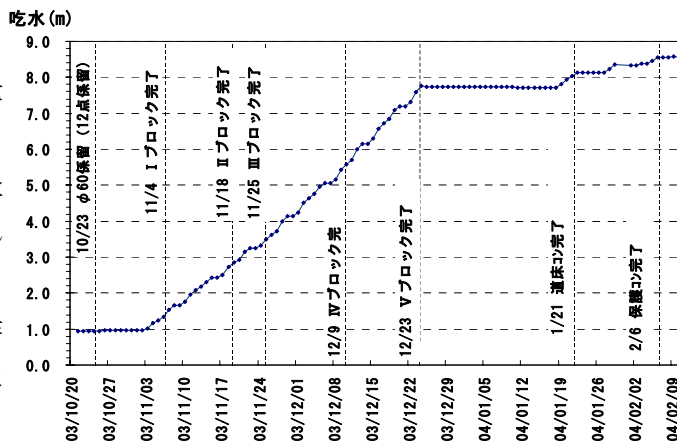


図-12 函体吃水経時変化図



写真-19 仮置き

ある。そこで、本体コンクリートとして、締固め不要で、かつ高い自己充填性を有する高流動コンクリートが採用されている。高流動コンクリートは、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著しく高めたコンクリートであり、従来のコンクリートとは異なる特殊な配合がとられるが、今回の沈埋函用の本体コンクリート(高流動コンクリート)には、石灰石微粉末および増粘剤を加えた「併用系配合」が採用されている。

表-3に高流動コンクリートの施工概要を示す。

表-3 本体コンクリート工の概要(高流動コンクリート)

区分	内容	備考
打設時期	2003年11月3日～同年12月23日	この間に、30回の打設を実施
コンクリートの数量	打設総量 10,438.9 m ³	計画数量10,160m ³
コンクリートの種別	高流動コンクリート(併用系配合)	石灰石微粉末および増粘剤を添加
配合設定	仕様書の参考示方配合をもとに試験練りによって、施工時期や条件に整合した修正示方配合を設定	冬期実機試験練り(2002年12月)、室内試験練り(2003年9月)および直前の実機試験練り(2003年10月)を実施
コンクリートの製造形態	生コン工場の要員・設備を使用してJVが高流動コンクリートの製造・品質管理から施工までを一貫して実施【従来のようなコンクリートの購入形態ではない】	・近隣の生コン4工場を選定して高流動コンクリートを製造 ・JVによる製造、品質管理、施工体制を構築して、相互に連絡網を配置して品質確保を図った
打設方式	浦添ふ頭内の施行ヤードにおいて、海上に浮遊係留した函体にバランスをとりながら順次コンクリートを打設	浮遊函体の傾斜バランスを考慮しながら2基のディストリビュータを用いた分割打設

(2) コンクリートの品質基準, 配合および使用材料

所定のコンクリート並びに沈埋函を確保するために、特記仕様で沈埋函用の「高流動コンクリートの品質基準」および「参考示方配合」が定められている。なお、特記仕様には「参考示方配合」を基に施工条件に応じて、実際の工事に適用する「修正示方配合」を定めることとなっているが、これまで先行の1~3号函の沈埋函製作工事では、製造日毎の骨材の含有微粒分量に応じた石灰石微粉末単位量の増減や化学混和剤使用量（高性能AE減水剤およびAE助剤）の微調整は行わないもの、「参考示方配合」をそのまま「修正示方配合」としていた。

今回の4号函の製作工事では、2002年12月の「実機試験練り」、2003年9月の「室内試験練り」および同年10月の「実機試験練り」によって、①所定の品質基準を十分に満足するとともに、かつ②充填施工後の鋼殻ブロック上部の空隙発生を減じることを目的に、ブリーディング率の抑制を考慮した「修正示方配合」を設定した。

沈埋函用の「高流動コンクリートの品質基準」および工事に採用した「修正示方配合」を表-4、表-5に示す。高流動コンクリートの使用材料の一覧を表-6に示す。

表-4 高流動コンクリートの品質基準

品質項目	品質基準
設計基準強度(σ_{28})	30 N/mm ²
粗骨材の最大寸法	20 mm
スランプフロー	65±5 cm
V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	2,300~2,400 kg/m ³

表-5 工事に採用した高流動コンクリートの「修正示方配合」

生コン工場	空気量 (%)	s/m (%)	W/P (%)	W/C (%)	単 位 量 (kg/m ³)					増粘剤 VA (W×%)	高性能AE減水剤 SP (P×%)	空気量調整剤 AE (P×%)		
					水 W	セメント C	石灰石微粉末 Ls	骨 材						
								75μ以下	海砂				砕砂	砕石
沖縄	4	45.7	30.4	50.7	175	345	196	34	506	340	765	0.115	1.175	0.001
球陽							199	31	504	338	761	0.115	1.175	0.001
山城							198	32	420	422	761	0.110	1.250	0.0015
琉球							198	32	500	341	761	0.115	1.175	0.001

注) 1)記号 s/m:細骨材モルタル容積比 W/P:水粉体比 W/C:水セメント比
 2)工事では材料密度や骨材中の微粒分量に応じて単位量を適宜調整する。
 3)工事では製造条件に整合させて高性能AE減水剤(SP)および空気量調整剤(AE)の添加量を適宜調整した。
 4)単位量に表記の[75μ以下]とは骨材中に含まれる微粒分量を表したもので、実際に計量される値ではない。

使用材料のうち、海砂、石灰石微粉末、化学混和剤および増粘剤のみが同一種類であり、それ以外は生コン工場にて常用の材料を用いた。

(3) 工事に際して実施した試験練り

高流動コンクリートの施工に際して実施した試験練りの概要を表-7に示す。

種類	生コン工場			
	沖縄生コン	球陽生コン	山城生コン	琉球生コン
セメント	普通ポルトランドセメント			
	太平洋セメント(株)		琉球セメント(株)	
海砂	東村新川沖産			
砕砂	本部産 儀間砕石	本部産 儀間砕石	本部産 山城鉱山	本部産 儀間砕石
	本部産 山原鉱山	本部産 本部鉱山	本部産 山城鉱山	本部産 安和鉱山
練り混ぜ水	地下水	上水道水	地下水	上水道水
混和材(石粉)	石灰石微粉末 (粉末度600cm ² /g)			
高性能AE減水剤	レオビルドSP-8HR			
空気量調整剤	マイクロエア775S			
増粘材	SFCA2000(水溶性セルロースエーテル)			

4.2 品質確保および施工性向上のための対策

(1) ブリーディング低減対策

4号函製作工事では、充填施工後のブリーディング発生に伴う鋼殻ブロック内の上部空隙の発生を極力減じること、また、その信頼性を高めることを目指した。使用する高流動コンクリートには、品質基準を満足することはいうまでもないが、更にブリーディングを抑制した配合を適用した。ブリーディングの抑制には石灰石微粉末の増量や細骨材率の修正等も挙げられるが、基本的に配合変更が不要で、比較的導入の容易な”増粘剤の増量”によって高流動コンクリートの保水性を向上させて、これに伴ってブリーディングを抑制することとした。

試験練り区分	目的	概要
冬期実機試験練り (2002年12月) 〔立会・自主試験〕	1)「参考示方配合」による流動コンクリートの性状把握 2)冬期(低温期)におけるフレッシュ性状の経時変化の把握 3)表面水変動による影響把握 4)生コン4工場の最終決定判断	・生コン4工場を対象に実施 ・化学混和剤の使用量を調整することで品質基準を満足するコンクリートを得た(立会試験) ・細骨材の表面水変動(±0.5%)を再現して品質への影響を把握(自主試験)
室内試験練り (2003年9月) 〔自主試験〕	1)施工前段階での材料を用いた高流動コンクリートの配合と品質確認 2)ブリーディング抑制のための効果的な対策の把握	・「沖縄県生コンクリート工業組合 中南部地区共同試験所」の試験室にて実施 ・施工前の骨材を用いて所定のコンクリートが得られる配合調製方法を把握 ・ブリーディング抑制への増粘剤増量の有効性とその適正量を把握 ・「参考示方配合」と試験練り結果から最適な「修正示方配合」(案)を設定
直前実機試験練り (2003年10月) 〔立会試験〕	1)施工直前での「修正示方配合」(案)による品質、性状の確認 2「現着流動調整*」の有効性及び品質影響のなことを確認	・「修正示方配合」の妥当性を確認 ・適正な化学混和剤使用量を把握 ・「現着流動調整*」の有効性と高性能AE減水剤の後添加量を把握

*:現着時のスランブフローが品質基準を下回った場合又は流動性を増し施工性向上を図る場合に、製造時と同種の高性能AE減水剤を後添加してアジテート車を高速攪拌させて流動性のみを改善した高流動コンクリートに調整する手法

ただし、増粘剤の増量は、ブリーディング抑制に有効であるが、反面高流動コンクリートの粘性増加による流動性の障害に繋がるおそれがあるので、流動性に悪影響のない適正な増粘剤の増加量を試験練りを経て設定した。

具体的には、表-5に示す「修正示方配合」を採用したが、この配合は特記仕様に記載の「参考示方配合」に対して、工場特性に応じ増粘剤量を10~15%増量している。こうした、対策を行った結果、[4.4 用いたコンクリートの品質]に後述のように、全ての品質管理試験においてブリーディング発生率0%を達成し、充填性の高い良質の沈埋函を製作した。

(2) 現着流動調整

「現着流動調整」とは、4号函製作工事において独自に適用した手法であり、現場において高流動コンクリートの製造と同種の高性能AE減水剤をアジテート車中に後添加して、その後2分間の高速攪拌を行って、品質を変えずに流動性状のみを改善する手法である。現着流動調整は、発注者の承認を得て図-13および表-8の要領で適用した。

実際の工事では品質基準値を下回るスランブフローの高流動コンクリートの発生がなかったため、「施工性向上が望ましい場合」を対象として現着流動調整の適用を行った。その結果、現着時61.0~62.0cmであったものを66.0~69.0cmまでスランブフローを増大させて、コンクリートの確実な充填とともに、一定の打設速度を確保して工事を円滑に推進した。また、現着流動調整の適用による「現着までを視野に入れた広範囲な高流動コンクリートの製造管理」(川下管理)の有効性を確認でき、今後の適用に向けその有効性と可能性が示唆された。

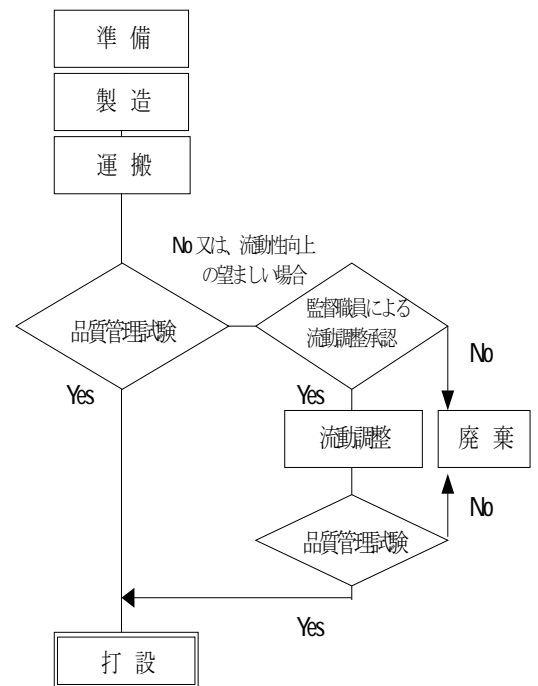


図-13 現着流動調整の実施フロー

表-8 現着流動調整の適用要領

適用区分	適用要領
流動性状が基準を下回った場合	①流動調整前のスランブフローが55cm以上について適用する。 (著しく流動性を下回るコンクリートには適用しない) ②流動調整によるスランブフローの増加量は、10cm以下とする。 ③流動調整のための再混練は、アジテータ車に高性能AE減水剤投入後の高速攪拌2分間を行うことを標準とする。 ④出荷当初の1~5車には適用しない。
施工性向上が望ましい場合	①部材中に開口部や箱抜きがあり、コンクリートの充填性をより向上させるのが望ましい部位とする。 ②流動調整前のスランブフローが62.5cm以下について適用する。 ③流動調整によるスランブフローの増加量は、7.5cm以下とする。

4.3 高流動コンクリートの製造・運行・品質の管理

高流動コンクリートの製造・運行・品質に対する管理の内、主なものを以下に紹介する。

(1) 採取直後における海砂の採否管理

海砂は、沖縄県砂利採取事業協同組合により沖縄県東村新川沖にて採取後、中城湾の中間ストックヤードに採取船単位（約 1400m³）を1ロットとし仮保管される。

海砂は、いずれの生コンの工場でも共通する重要なコンクリート材料であり、高流動コンクリートの品質に大きな影響を及ぼすために、JVによって仮保管のロットを対象とした品質試験を行い採否を判断し、良質な海砂の選定と確保を図った。

(2) 骨材表面水の低減措置と管理

高流動コンクリートは、通常のコンクリートよりも骨材表面水の変動の影響を受けやすく、スランプフローが敏感に変化する。特に、表面水を多く含む細骨材は表面水率の変動が生じやすく、細骨材の表面水率を低減・制御することが、高流動コンクリートの品質安定のポイントである。4号函製作工事では、骨材表面水の変動影響を受けないように、以下の対策を図った。

- ①骨材の表面水の低減対策(保管, 工場出荷要領の指示)
- ②生コン工場での保管骨材への降雨対策等
(降雨時のシート掛け, 天日乾燥の徹底)
- ③コン工場での入念な混合による骨材表面水均質化
- ④製造中の頻繁な細骨材表面水の確認と補正

(1日当たり7~12回の表面水測定と補正を実施)

上記の対策により、生コン工場によっては若干の違いがあるものの表面水の変動を小さくコントロールすることができた。また、日内における表面水率をみても、当日の初期以外は安定しており、表面水変動による大きな

影響を受けることなく、順調に高流動コンクリートの製造が可能であった。

(3) 高流動コンクリートの練り混ぜ管理

高流動コンクリートは、練り混ぜ開始直後には比較的粘性が高くミキサへの負荷が大きいため、ミキサ容量の8割以下を1回の練り混ぜ量とした。練り混ぜ中には、カメラ映像やミキサ内部の目視監視によって、コンクリートの状態を観察すると共に練り混ぜ中のミキサ負荷（電流値）の経時変化を参考として、練り混ぜ進行と流動性状を把握する目安とした。

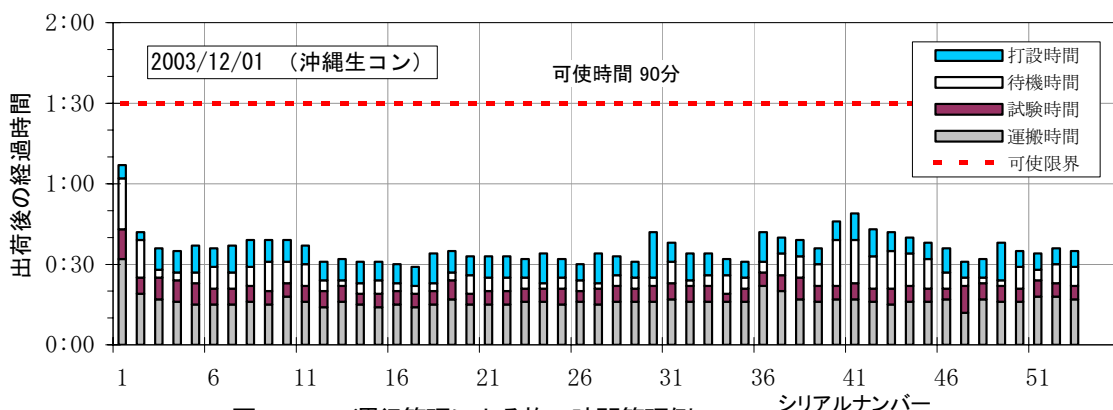
(4) 生コン工場での出荷時のフレッシュ性状の確認

現場による品質管理結果は、重要な情報であり、この時点で品質基準に適合するように生コン工場での製造を行った。一方、生コン工場による品質確認は、出荷後に性状変化が生ずる前提ではあるが、次バッチの製造のための情報を直ぐに得られる点で大きな利点がある。

4号函では、現場での品質管理結果に加えて、生コン工場での出荷時のフレッシュ性状の両方を情報として、より精度の高い高流動コンクリートの製造を行った。

(5) アジテート車の運行管理(シリアルナンバーによる管理)

4号函製作工事では、1日当たり196~456m³のコンクリートを打設し、打設量の多い日には2工場の体制で高流動コンクリートを出荷した。打設数量の最多の場合には、1工場当たり6~8分の早い頻度でコンクリートが現場に到着することとなる。また、高流動コンクリートには可使時間が設定されており、90分間以内に打設完了しなければならない。これらを円滑に推進することと、使用コンクリートのトレーサビリティ確保のために、出荷~打設完了までアジテート車を特定できるシリアルナンバー方式による運行管理を行った。



図一14 運行管理による施工時間管理例

生コン工場，JV本部，品質管理箇所および打設箇所の間で無線連絡網を配置して，アジテート車の運行，品質管理結果の情報共有，可使時間の管理やトラブル時の対応などを円滑に管理した。図-14には，コンクリートの運行管理による施工時間管理の例を示す。当日の初期～数台は製造を慎重に行ったので，アジテート車の到着時間の間隔が離れて打設終了時間までの時間が少し長くなる傾向にあるが，全体を通して可使時間90分に対して余裕を持って高流動コンクリートの打設を完了した。

(5) 現場受け入れによる品質管理

1工場当たり最短6分毎にアジテート車が到着し，更に2工場体制の場合にはアジテート車が3分毎に現場に到着した。現場による受け入れの品質管理試験は，品質基準に対して合否を判定する重要な試験であり，かつ打設位置へ円滑にコンクリートを送らなければならない。このため現場敷地内に図-15に示す品質管理用の施設（品質管理ハウス）は3方向の壁と屋根で構成されており，雨天時にも品質管理試験を可能としている。

4.4 用いた高流動コンクリートの品質

(1) フレッシュ性状

フレッシュ性状の品質管理結果の例を図-16に示す。製造したコンクリート全てにわたり品質基準を満足しており，良好に高流動コンクリートの打設が可能であった。また，全アジテート車を対象に2640回のスランプフロー管理試験の結果をみると，その平均値は65～66cmであり，品質基準の中間値よりもやや大きめスランプフローが得られており，かつ4工場とも同じバラツキ範囲にあり，ほぼ同様のフレッシュ状態の高流動コンクリートが得られていた。



図-15 品質管理ハウスの配置

(2) ブリーディング率

高流動コンクリートには，閉鎖された鋼殻ブロック内の上部空隙の発生を制限するためにブリーディングの抑制が重要となる。よって，特記仕様にはブリーディング率を1%以下とする規定が設けられている。

4号函製作工事では，前述のブリーディング抑制に配慮した高流動コンクリートの採用によって，全ての本体コンクリートについてブリーディング率0%を達成した。

(3) 硬化後の性状

図-17に圧縮強度の品質管理結果の例を示す。図-17に示した以外の3工場においても，得られた圧縮強度の分布にはほぼ同様のバラツキのあるものの，品質基準である30(N/mm²)を大きく上回る強度値が得られた。

また，50×50×50cmの試験体により測定した硬化コンクリートの比重についても，2,343～2,377(kg/m³)の比較的狭い範囲にあり，安定した結果であった。

試験項目	工場名	琉球生コン		
		平均	標準偏差	標本数
スランプフロー(cm)		66.1	1.42	639
V75漏斗流下時間(秒)		10.8	2.08	91
ブリーディング率(%)		0	0	26
単位容積質量(kg/m ³)		2,349	0.02	91

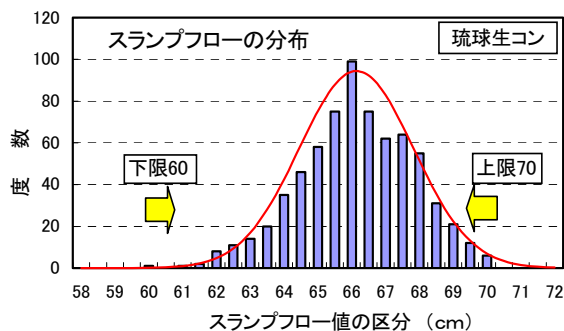


図-16 品質管理結果の例〔フレッシュ性状〕

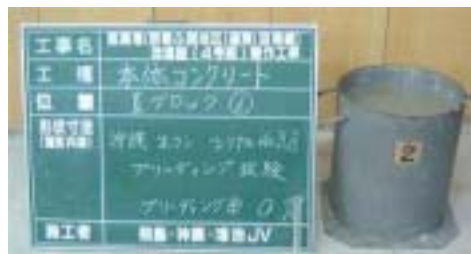
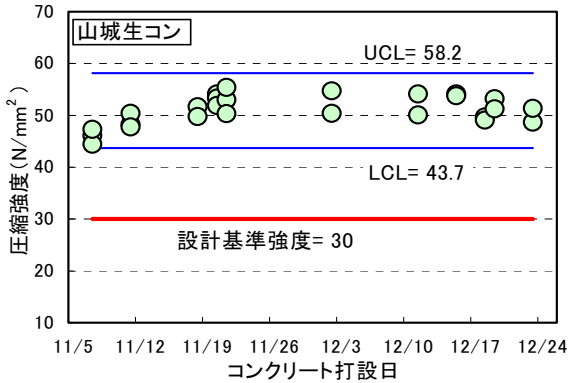


写真-15 ブリーディング試験結果の例

試験項目	工場名 山城生コン		
	平均	標準偏差	標本数
圧縮強度 σ_{28} (N/mm ²)	50.9	2.77	26



図一 17 品質管理結果の例〔圧縮強度〕

5. おわりに

当工事は比較的短い工期の中で新しい工法・方式が多用されたが、発注者や既往工事関係者から豊富な過去の実績等の情報を入手することができたため、それらを参考にしながら、然るべき方針を立て工事を進めることができた。これは、当工事で製作した構造物が後続工事でも取扱われる都合上の特異な風習であったかも知れないが、企業の壁を超えて技術を引継ぐことはこれまでにない貴重な経験となった。

当社は長年沈埋工事に携わってきたが、主導的立場での工事は今回が初めてであった。工事を率いた花田幸生、市村英紀の両氏がこれまで培ってきた技術には現在の沈埋技術に標準化されたものもあり、当社の沈埋技術として今後も伝承すべきである。

最後に、工事を通じて技術情報を提供して下さった内閣府沖縄総合事務局開発建設部、五洋建設、東洋建設の関係者の皆様と臨機に応じ工事に支援頂いた本土木本部、技術研究所の方々に感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 中村：那覇港沈埋トンネル函鋼殻の回航作業，作業船No. 274，2004年7月，日本作業船協会，pp21-26
- 2) 飛島・神鋼・鴻池JV：那覇港（那覇ふ頭地区）道路（空港線）沈埋函（4号函）製作工事工事報告書，2004. 4
- 3) 飛島・神鋼・鴻池JV：新北風（ミィニシ）に挑む，那覇沈埋トンネル4号函製作工事記録ビデオ，2004. 4
- 4) 近久，中原，阿保：市販されているデジタルカメラを用いた長大法面の挙動監視システム“TPhotoS”電力土木，No.294，2001.7

Summary Naha submerged tunnel is a seabed road tunnel connecting Naha Airport and Naha Port in Okinawa planned for improving the efficiency of physical distribution and traffic between these areas. It is constructed at Naha port on the Naha seaside road airport line. Tobishima produced element No. 4 among the eight composing the tunnel of full-sandwich construction using steel and concrete.

The steel shell of the element was assembled in Hyogo Prefecture, towed on a barge over a distance of more than 1,000 km to Okinawa, and filled with self-compacting concrete to complete the element.

A number of innovative methods were adopted for this project, including the “carrier-out system” for conveying the steel shell onto the barge and placement of concrete in the steel shell floating on the sea.

This report describes the entire procedure of the project.

【Key Words】 submerged tunnel, full-sandwich structure, long-distance towing, mooring management, self-compacting concrete, concrete placement in a shell floating on the sea