

周囲を橋脚に取り囲まれた大深度立坑ケーソンの施工報告

Report on the Construction of a Caisson for a Vertical Shaft at a Great Depth in an Area Surrounded by Bridge Piers

天野 裕 史^{※1} 林 尚 孝^{※1} 中村 哲 世 士^{※2}
Hirofumi Amano Naotaka Hayashi Noriyoshi Nakamura
金 井 大 輔^{※1} 岡 田 直^{※1} 岩 佐 歩^{※1}
Daisuke Kanai Nao Okada Ayumu Iwasa

【要旨】

本工事は、名古屋環状2号線（国道302号および名古屋第二環状自動車道）の整備に合わせて、道路下に共同溝を整備する事業の一部として、JR東海道本線、JR東海道新幹線および大高川と交差する区間を含む926mをシールド工法により共同溝を築造するものである。シールド工事に先立ち発進立坑として緑地立坑（外径=18.0m、円形、躯体高=44.6m）を築造するが、シールドが橋脚基礎の下を通過するため、支持杭との離隔を確保して発進立坑口がGL-35.0mに設計されている。このため、立坑は大深度となり築造方法としてニューマチックケーソン工法が採用されている。

緑地立坑は先行して整備された4橋の跨線橋の桁下空間に位置し、かつ周囲を8基の橋脚に取り囲まれて位置するため、沈下掘削による周辺構造物への影響を低減するために、一般的なニューマチックケーソンに備わる躯体形状の段差（フリクションカット）がない形状で設計されていた。我々はこのような条件下で大深度ケーソンを施工するために種々の工夫に取り組み立坑を完成させた。

【キーワード】 近接施工、大深度ケーソン、摩擦低減塗装、中埋めコンクリート、非AEコンクリート

1. はじめに

本工事は国道302号の整備に伴い、国道が大高川とJR東海道本線、JR新幹線と交差する区間に共同溝を築造するものである。

1.1 工事概要

- ① 工事名 平成20年度 302号緑地共同溝工事
- ② 発注者 国土交通省 中部地方整備局
- ③ 工事場所 愛知県 名古屋市緑区大高町
- ④ 工期 平成21年3月3日～平成24年3月16日

工事は先ず緑地立坑（外径18.0m、躯体高44.6mの円形ケーソン）を構築・沈設し、これを発進立坑として中間立坑（坊主山立坑：既設）を経由し到達立坑（殿山立坑：既設）までの区間にシールド（外径5.95m、延長926m）を掘進させ、内部を共同溝として構築整備するものである。

主に工事を実施する緑地立坑は、既に完成された名古屋第二環状自動車道上下線の高架橋直下に位置し、その両脇には国道302号線上下線の跨線橋区間の建設が進められていた。したがって、立坑工事は平面的に高架橋4橋の橋脚構造物8基に取り囲まれ、更に上空を架設された4橋の橋桁に覆われた桁下空間で実施された（図-1、図-2参照）。

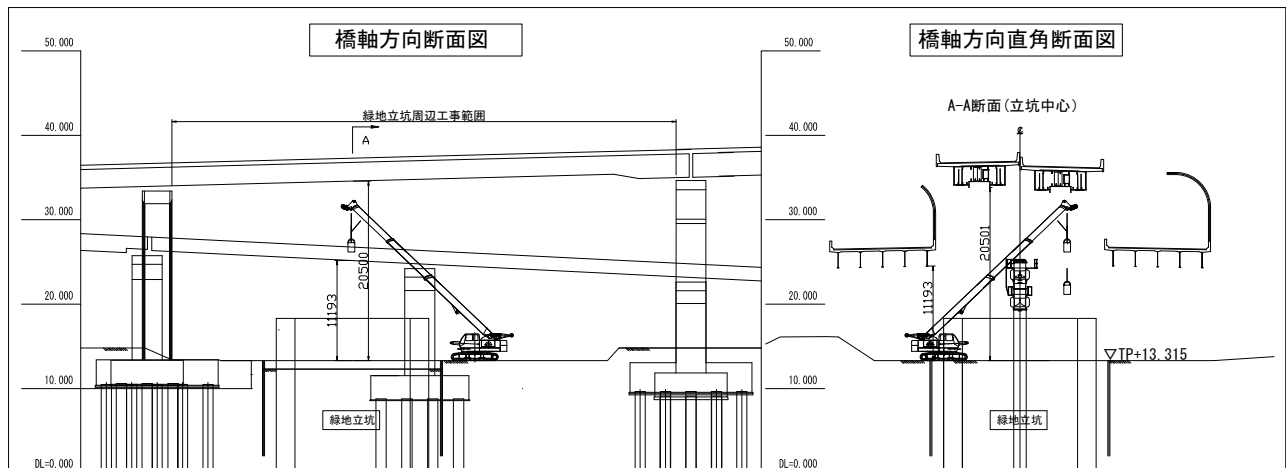
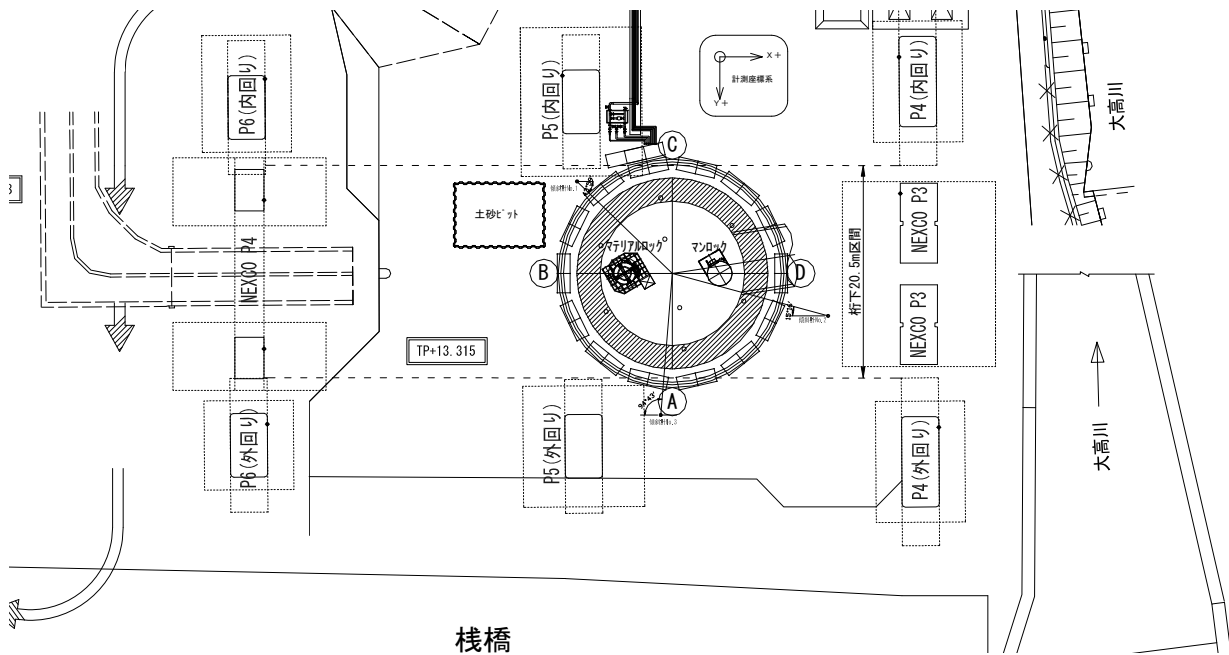


図-1 桁下作業条件概要図

1. 名古屋支店 緑地共同溝作業所
2. 名古屋支店 新川東部浄化C作業所



栈橋

図-2 緑地立坑周辺平面図

1.2 工事の特徴

緑地立坑は躯体高44.6mの大深度立坑であり、約5mの高度で9分割して構築する計画であった。

ニューマチックケーソン工法では艀装を含む躯体重量が総沈下力となり、揚圧力と周面摩擦力、刃口先端支持力が沈下抵抗となる。ケーソンの沈下は、刃口下を掘り下げて先端支持力を除去する方法と、必要に応じて揚圧力の調整（調圧沈下）を併用することを基本に実施するが、それでも沈下力が不足する場合には、沈下促進のためにケーソン内部に水荷重を加える方法を併用する。

また、ニューマチックケーソンでは、躯体第1ロット（刃口及び底版）のサイズに対して第2ロット以降のサイズを5cm程度小さくして大きくして躯体形状によりフリクションカットを設けることが一般的である。この場合、周面摩擦抵抗は躯体第1ロットの周面に大半が作用すると考えられる。

当ケーソンでは、設計段階で予め周辺橋脚構造物への影響が検討された結果、一般的な躯体形状によるフリクションカットを設ける場合には、周辺地盤の変位により橋脚構造物の変位が許容値を超える結果となったため、本ケーソンの躯体にはフリクションカットを設けず、第1ロットから最終ロットまでを同一外径とする設計となっていた（図-3参照）。

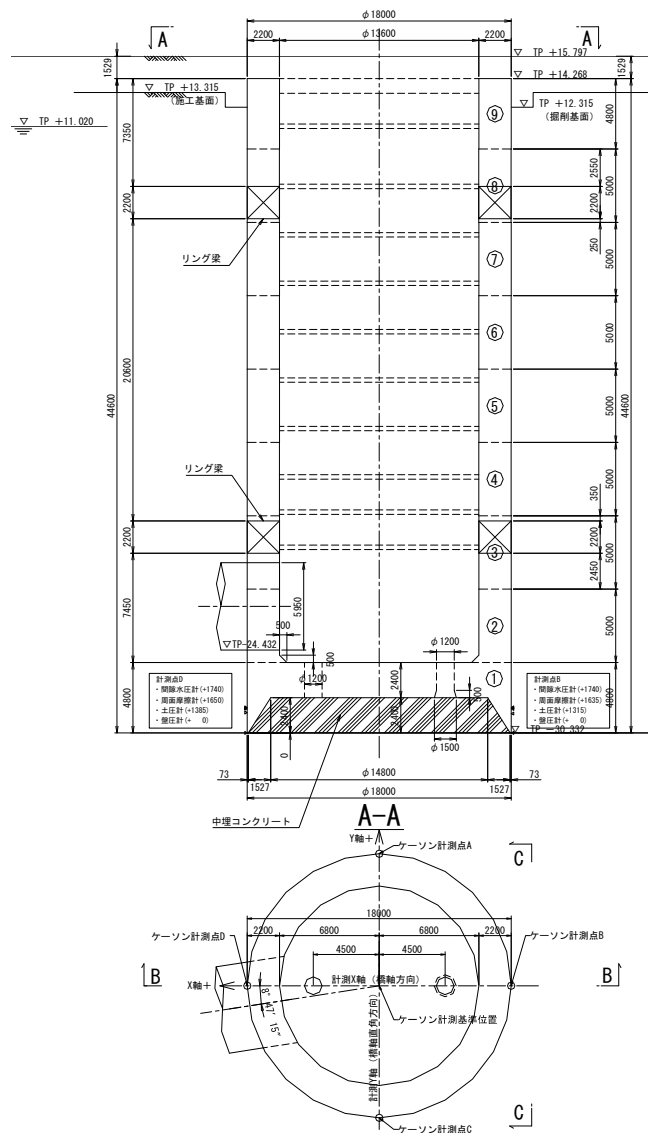


図-3 緑地立坑一般図

2. ケーソン沈設に対する取り組み

2.1 問題点

ケーソン沈設時の主な問題点を以下に示す。

- ① 第1ロットから最終ロットまでの躯体形状を同一外径とするため、一般的なケーソンに比べて大きな周面摩擦力（沈下抵抗力）が作用し、沈下が困難となる恐れがある点

ケーソンの沈下は沈下関係の検討によって計画することが基本となる。このとき、周面摩擦力は沈下抵抗力の主要な要素となる。

沈下関係の検討方法については道路橋標準示方書・IV下部構造編¹⁾等の基準類に示されているが、検討に用いるためにケーソン周面摩擦力度は、躯体形状によるフリクションカットを設けるケーソンにおける施工実績の統計より導かれた値であるため、当ケーソンのように躯体形状によるフリクションカットを設けない場合には、検討のために用いる周面摩擦力度の設定値が不明である。

- ② 大深度ケーソンを周辺構造物に近接して施工するため、ケーソン沈下時の周辺地盤の引込みにより周辺構造物に大きな変状をもたらす恐れがある点

当ケーソンの躯体にはフリクションカットを設けない構造であるため、フリクションカット設ける場合に比べて躯体段差部の空隙に起因する周辺地盤および周辺構造物の変状は低減できると考えられるものの、ケーソン沈下時の躯体と地盤の間に生じる摩擦は逆に大きくなると予想される。そのため、ケーソン沈下に伴う引込み沈下による影響に関しては解決されていない。

- ③ 円形ケーソンであるため施工中のケーソン移動量、回転量の把握が困難な点

円形ケーソンは矩形ケーソンに比べて平面的な移動量とそれに伴う回転量の把握が難しい。特に、当ケーソンはシールド発進立坑として、構築時に躯体にシールド発進用の開口位置を準備するため、発進用開口位置の移動量・回転量の把握は後続するシールド工事のために必要不可欠な管理項目となる。

2.2 対策の検討

問題点を解決するために以下の対策を講じた。

(1) ケーソン躯体周面の摩擦低減

問題点①、②に対応する対策として、躯体周面に摩擦

低減を施す方法を検討した。

ケーソン躯体と周辺地盤の摩擦低減する従来の方法には、コンタクトグラウト配管を利用して躯体と地盤の間に滑材や空気などを注入する方法や、躯体と地盤の間に薄鋼板を沿わせる方法などがある。前者には、躯体周面に一様に滑材が行き渡ることの不確実性、後者にはケーソン沈設時に薄鋼板が地中で破断する可能性があることが懸念された。

次に、近年鋼管杭や鋼矢板の打ち抜き工事で実績を上げている摩擦低減材に注目してケーソンに応用できる技術を調査した結果、片面に摩擦低減材を塗布した薄鋼板や繊維シートなどをケーソン周辺に沿わせたり、張り付けたりして利用することが可能であることが分かった。しかし、いずれも工場でシート状の材料に摩擦低減材を塗装した製品であり、均一な品質は期待できるものの費用が高額となる点や、従来方法と同様にケーソン沈設時の破断や剥離の可能性がある点が懸念された。

そこで、ケーソン躯体面へ摩擦低減効果を確実にもたらす方法として、躯体面に摩擦低減塗装を直接施す（現場塗装）について検討し、コンクリート面に密着する4層塗装構成の組合せを見出すことができたためこれを採用した。

問題点①に対して、一般的なケーソンと当ケーソンの周面摩擦抵抗に関する違いは、2ロット以降の躯体外径寸法が1ロットより小さいか同じかという点であるため、2ロット以降の周面摩擦抵抗の違いが問題となると考えられる。したがって、当ケーソンでは、2ロット以降の躯体表面の周面摩擦抵抗が、一般的なケーソンと同程度になることを目指して2ロット以降の躯体表面について塗装範囲を検討し、地質的に摩擦抵抗が大きいと推測されるTP+6.42以深の第三紀層に接する範囲に設定した（図-4参照）。

問題点②に対して、ケーソンの掘削による周辺構造物の影響は、最終的に周辺構造物がケーソン中心方向に変位するものと推測される。ケーソンは周囲を8基の橋脚構造物に囲まれた環境であるが、ケーソンと構造物の距離が近いものほど影響が大きくなると考えられるため、摩擦低減塗装は特に近接した3橋脚（P5内回り、P5外回り、NEXCO P3）への影響範囲を対象とし、かつ、ケーソン中心に対してバランスがとれる範囲に設定した（図-5参照）。

(2) 円形ケーソンの移動量、回転量管理

ニューマチックケーソンの出来形管理では刃口深度、傾斜量、移動量、回転量を把握する必要がある。このうち刃口深度と傾斜量については、ケーソンに計測器を設置することで自動計測管理することが可能であるが、移動量と回転量については、自動計測管理が難しいため、

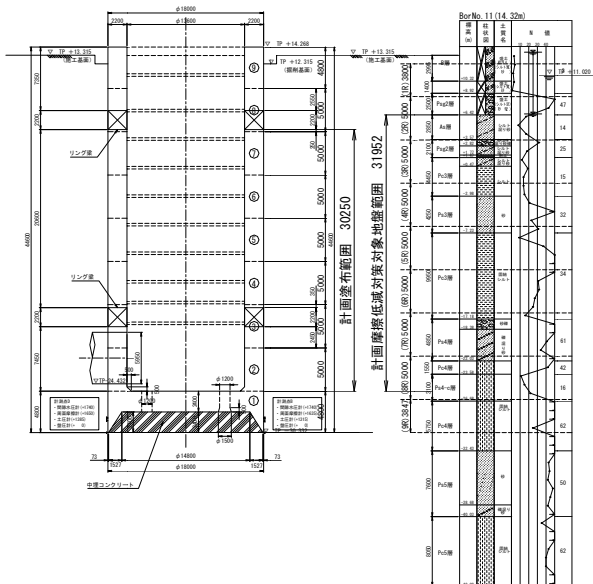


図-4 摩擦低減塗装計画範囲図 (1)

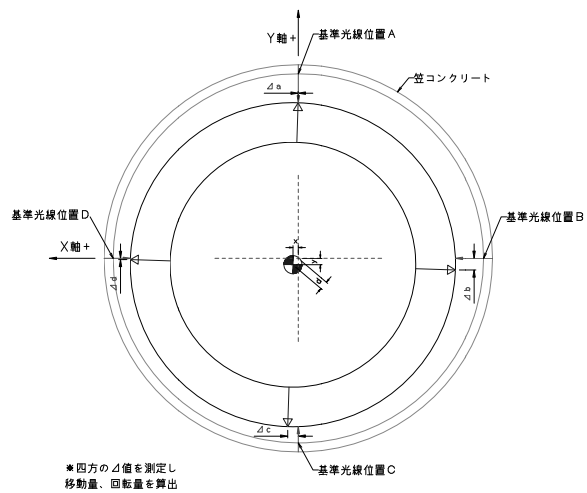


図-6 移動量・回転量管理方法

2.3 対策の実施と効果

(1) 躯体周面への摩擦低減材の塗布

4層で構成される摩擦低減塗装は、脱枠直後の側壁躯体面に刷毛施工で実施した(写真-1)²⁾。作業は掘削準備期間に実施することができ、工程的に影響は生じなかった。

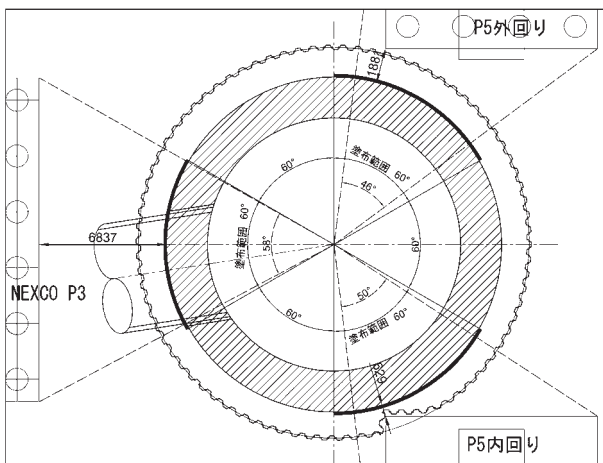


図-5 摩擦低減塗装計画範囲図 (2)

ケーソン周辺の基準から躯体を測量して随時把握する必要がある。

矩形ケーソンの場合には躯体面の2方向を測量することから移動量と回転量を管理することは容易であるが、円形ケーソンの場合は躯体面が平面ではなく角も無いため測量管理が難しくなる。また、単にケーソン周囲に設けた基準点から躯体までの距離を管理する場合でも、測量値に躯体のハラム等の構築出来形誤差が含まれる点が懸念された。

そこで、ケーソン外周 1.5m の位置に設けた防護鋼矢板の笠コンクリートを基準とし、その上にケーソン計測座標系4方向の基準線(レーザー光線)を据えて、ケーソン自体の4方向の鉛直軸(ドラフトマーク)と基準線の差(躯体表面における水平距離)を管理することにより、基準線(レーザー光線)標高におけるケーソン軸2方向の移動量、と回転量を演算して管理する方法を採用した。



写真-1 摩擦低減塗装状況

問題点①について：本工事で築造するケーソンは1基であったため、摩擦低減効果については比較対象がなかった。フリクションカットが備わる一般的なケーソンとしての沈下計画と当ケーソンでの沈下実績による沈下関係図を図-7、図-8に示す。

沈下計画では、最大沈下抵抗力は約140,000kNと試算されたが、沈下実績では約180,000kNとかなり大きな値となった。ここでは定量的な効果を示すことはできないものの、防護鋼矢板の内側地盤の引込沈下量は非塗装範囲の約0.25mに比べて、塗装範囲では約0.05mと躯体周辺の引込沈下量が少なかったことより、塗装による摩擦低減効果があったものと考えられる。

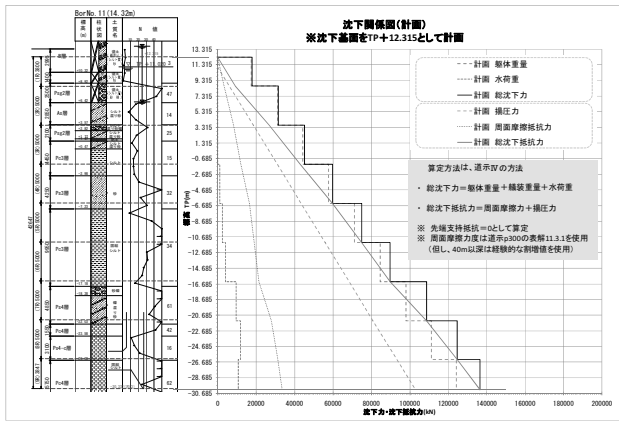


図-7 沈下関係図(計画)

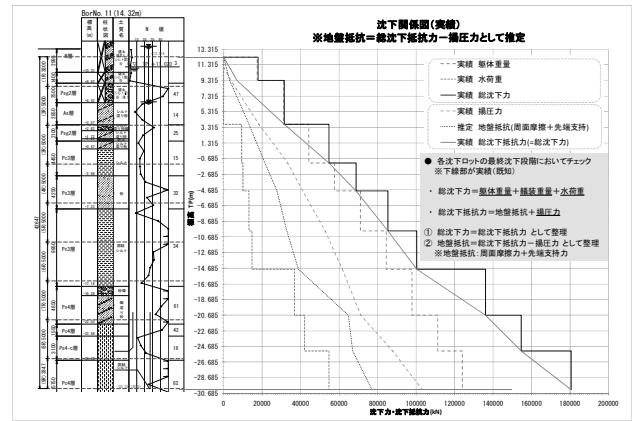


図-8 沈下関係図(実績)

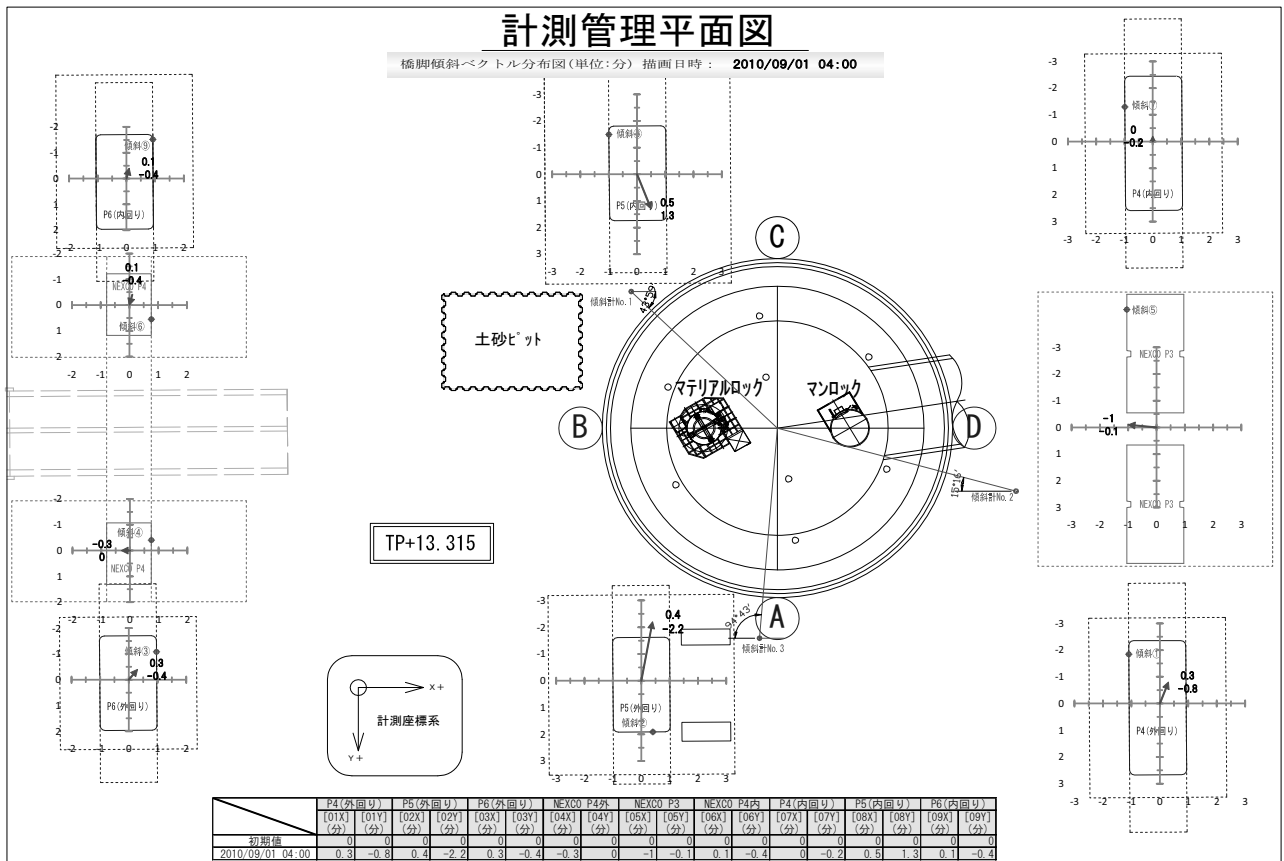


図-9 周辺橋脚の傾斜方向分布図(最終掘削時)

問題点②について：ケーソン施工期間において、周辺の橋脚について直交2軸の傾斜量(分)と沈下量(mm)の項目について変状計測を実施した。沈下掘削の最終段階では近接する3橋脚がほぼケーソン中心方向に傾斜する傾向を示したことにより、ケーソン引込沈下低減のための摩擦低減塗装範囲の設定方針は妥当であったと考えられる(図-9参照)。

ケーソン工事が終了した段階で、近接するP5橋脚(外回り、内回り)とNEXCO P3橋脚を含めた全ての橋脚で変状を許容値以内に収めることができた。

以上より、摩擦低減塗装は問題点①、②に対してともに有効な対策であったと評価される。

(2) 円形ケーソンの移動量、回転量管理

ケーソン沈下作業期間において毎日作業開始時と終了時に基準位置4点からレーザー光線を発光して、躯体面におけるケーソン自体の4基準軸(ドラフトマーク)の水平移動量をそれぞれ測定した(写真-2参照)。この測定値からレーザー光線の標高におけるケーソンの移動量と回転量を演算から求め、更にケーソン計測システムで測定された傾斜量と刃口深度の情報を加算して、刃口先端標高における移動量も算出し、掘削作業に活用した(図-10)。

基準点をケーソン周囲に施した防護鋼矢板の笠コンクリート上に設けたため、施工中の基準点の移動が管理精

度に大きく影響することが懸念されたが、施工途中段階で基準位置を測量確認した結果、基準点の移動量は極わずかであった。

ケーソン沈設終了後に内部足場を解体し、GL-39.8mの底盤スラブ上面の立坑中心点を測量した結果とレーザーポインタを利用した管理手法による移動量（算出値）との誤差はわずか2mmであったため、この手法によるケーソン姿勢管理は有効であったと評価できる。



写真-2 函体移動、回転量測定状況

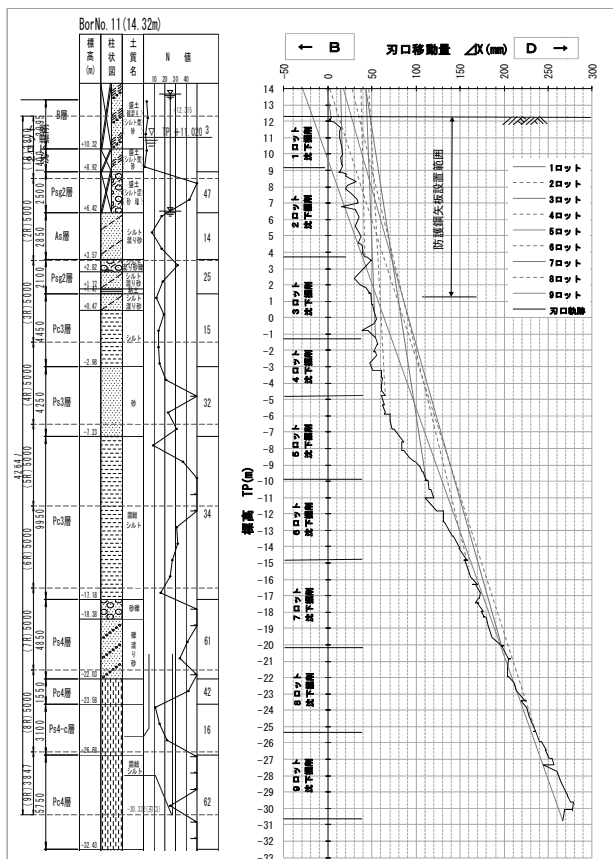


図-10 移動量管理図

3. 中埋めコンクリートに対する取り組み

中埋めコンクリートは立坑底盤反力を支持地盤（最終掘削盤）に伝達するためにケーソン沈下終了後に作業室内に充填される材料である。圧力環境に着目して施工順序を整理すると、大気圧環境下の生コン工場で所定の品質で製造されたコンクリートを、高気圧環境下の作業室内に注ぎ充填される材料である。

3.1 問題点

中埋めコンクリートの設計配合は18-18-25BB（JIS配合）であるため、空気量は4.5%で配合されたAEコンクリートとなる。AEコンクリートはAE混和剤（AE剤、AE減水剤など）によりコンクリート中に連行させるエントレインドエア（独立微細気泡、気泡径：25～250 μ m）のベアリング効果などによりフレッシュコンクリートのコンシステンシー（スランプ、流動性など）を調整した配合である。しかし、この材料を圧気環境中で使用する場合、大気中（絶対気圧：1.0気圧）で所定のスランプ値が確認されても、充填する作業室内の圧力下（最大作業気圧0.42MPa、絶対気圧：5.1気圧）では、単純に空気量（＝気泡容積）は絶対気圧比により1/5.1程度に圧縮され、所定のコンシステンシー（流動性＝充填性）が阻害されることが推測された。

3.2 対策の検討

作業室内における中埋めコンクリートの流動性確保を目的とした配合検討に関する文献を調査した結果、AE混和剤を用いない「Non AEコンクリート」として配合条件を見直した場合に、高気圧下においてもスランプが殆ど変動しない事例が得られた。参考文献³⁾⁴⁾によると、改良型中埋めコンクリート（Non AEコンクリート）を用いて国交省発注の2工事（最大作業気圧0.38MPa、0.28MPa）で試験施工した結果、共に問題なく施工できたことが報告されている。当工事も参考文献の実績に類似した環境であるため、これを参考に下記の3方針を立て、中埋めコンクリート作業における圧力環境の変化に影響されない非AEコンクリート配合を検討した。

- ① AE減水剤を用いないコンクリートとし、空気量は2.0%（自然潜入空気量）とする。
- ② 流動性保持のため空気量減量分の容積はモルタルで置換える。
- ③ 材料分離抵抗性保持のためW/Cを55%程度とする。

設計配合 (18-18-25BB)

- ・呼び強度 18.0 N/mm²
- ・スランプ 18.0 cm
- ・粗骨材最大寸法 25 mm
- ・セメント種類 高炉セメントB種
- ・空気量 4.5 % JIS 配合
- ・W/C=60~65%程度... JIS 配合(強度による)

計画配合 (24-18-25BB, W/C=55.0%指定, Air2.0%指定)

- ・呼び強度 24.0 N/mm²
- ・スランプ 18.0 cm
- ・粗骨材最大寸法 25 mm
- ・セメント種類 高炉セメントB種
- ・空気量 2.0 % JIS 規格外
- ・W/C=55 % JIS 規格外(材料分離抵抗性による)

計画配合では W/C を指定したため、呼び強度が 24N/mm² となった。

3.3 対策の実施と効果

中埋めコンクリート充填時の作業気圧は 0.402MPa であったが、予定通りに作業室内への打設充填が実施できた。充填状況の管理は遠隔カメラを利用した監視であったが、モニタを監視する限り材料分離や流動性低下は生じていなかった。なお、空気量の管理については JIS 規格外の値を目標としたことにより管理基準が無かったため、暫定的に JIS 同様の管理幅を採用して 2.0±1.5% として管理した (写真-3 参照)。



写真-3 受入検査状況

流動性について：作業室内に打設されたコンクリートの表面は水平に近い状況であり、十分な流動性を発揮したのと考えられる。また、打設中の作業室内圧力調整のために実施する排気作業に対しても、コンクリート面がよく反応して流れ、最終段階での排気口からのコンクリートの吐出状況も良好であった。更に、断気後のアンカーリング（底版部に設けたシャフト孔）内部からの漏水も少なく作業室内が十分に充填されているものと推測された。

材料分離抵抗性について：打設時と打設後にアンカーリング部のコンクリート表面を観察したが、材料分離やブリーディングの傾向はなかった。(写真-4 参照)



写真-4 アンカーリング部充填監視画面

以上より、今回の中埋めコンクリートの配合変更は有効なものであったと思われる。

4. 最後に

本工事の施工条件は比較的狭い環境であったため、上述した以外にも仮設備等について様々な工夫を検討して工事を実施してきた。取り組んだ工夫の全てが成果につながるものではなかったが、アクションを起こさないと時間が経過するばかりで何も変える(改善する)ことができないことを意識して作業所全体で取り組んできた。

土木工事は現地における単品受注生産活動であり、同じ条件での工事は二度とない。そのため、今の現場で、今の作業でこの工夫に取り組もうという意識をもつことが最も重要であり、更にそれを行える雰囲気を作るのが大切であると思われる。



写真-5 緑地立坑完成状況

謝辞：ニューマチックケーソン工法による大深度立坑の建設に関して様々な技術的助言を頂きました技術伝承士細見孝治所長に紙面を借りてお礼を申し上げます。

【参考文献】

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編, pp.300-301, 2002.3
- 2) 飛鳥建設㈱ホームページ：
<http://www.tobishima.co.jp/project/kyodokou/kyodokou02.html>
- 3) 井上智裕, 大石雅彦, 杉山隆文：高気圧下環境がコンクリートのスランブに及ぼす影響, 土木学会第61回年次学術講演会, pp.5-195, 土木学会, 2006.9
- 4) 日本圧気技術協会事務局：改良型中埋めコンクリートの実施工への適用性, 建設と圧気 No.30, pp.15-16, 日本圧気技術協会, 2007

Summary In this project, a 926-m tunnel section is constructed by the shield tunneling method as part of utility tunnel construction with the improvement of Nagoya-kanjo (loop) Expressway No. 2 (National Highway No. 302 and Nagoya-dainikanjo (second loop) Expressway). The section includes a section in which Japan Railways Tokaido Line, Tokaido-shinkansen Line and the Ohtaka River cross one another. A vertical shaft was constructed in a green zone as the shield launching shaft before the implementation of shield tunneling work (circular shaft with an outer diameter of 18.0 m and a height of 44.6 m). The entrance to the shield launching shaft was designed to be located at a depth of 35.0 m below ground level to ensure clearance from support piles because the shield was expected to pass under a bridge foundation. Then, the vertical shaft was at a great depth and the pneumatic caisson method was adopted for construction.

Key Words : *Neighboring Construction, Caisson, Friction Reduction Painting, Filling Concrete, Non AE Concrete*