

大深度ニューマチックケーソンにおける掘削沈下時間予測および コンクリート自動締固めシステムに対する取組み

Excavation Subsidence Time Prediction in Deep Pneumatic Caisson and Efforts for Automatic Concrete Compaction System

前田 智 広^{*1} 濱西 将 之^{*2} 山路 伸 悟^{*3} 井上 浩 杜^{*4} 吉田 優 汰^{*5}
Tomohiro Maeda Masayuki Hamanishi Shingo Yamaji Hiroto Inoue Yuuta Yoshida

【要旨】

ニューマチックケーソン（以下、潜函工法）の掘削沈下において、躯体が沈下する瞬間は土砂バケットがマテリアルロック内で接触する危険や足場上の作業員が足場から墜落する危険があるため、沈下のタイミングを現場に周知することが安全管理上重要である。そこで沈下速度計を躯体に取り付け、沈下前に発生する初期挙動を可視化して現場へ周知し、安全性の向上に貢献した。

また、現場における生産性向上および品質確保の取組みとして、バイブレータ搭載台車によるコンクリート締固め作業を行った。

本稿は、東京都下水道局発注の芝浦水再生センター導水渠立坑設置工事において、上記の取組み内容をまとめたものである。

【キーワード】 大深度ケーソン 掘削沈下時間予測 コンクリート締固め

1. はじめに

近年、地下構造物の大型化・大深度化に伴い、工期や工費の面で有利な潜函工法の採用が増加している。

その中で工期の制約上、掘削沈下と躯体構築が同時並行で進捗する工事も多くあり、躯体が沈下する瞬間も躯体や足場上に多工種の作業員が混在して作業しているため、安全性の確保が課題である（図-1）。

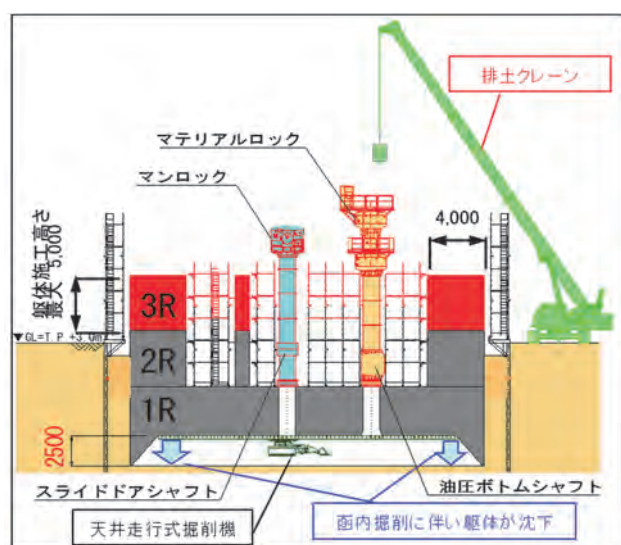


図-1 施設全景概念図

また、作業員の高齢化が進み、熟練労働力も不足している中、次世代への技術継承も進んでいないことから、作業負担の軽減や生産性向上を図るとともに、コンクリート工事の品質確保も喫緊の課題である。

これらのことから、当現場では次の2点に着目した。

- ① 掘削沈下時間予測と沈下前の注意喚起による安全確保
- ② コンクリート締固め作業における生産性向上および品質確保

2. 取組み内容

2.1 掘削沈下時間予測と沈下前の注意喚起による安全確保

躯体沈下時における沈下タイミングの事前周知と作業待機ルールを設定するためには、正確な沈下時間を予測することが重要となる。そこで、本工事では沈下前に発生する0.数ミリの初期挙動に着目し、この挙動を躯体とワイヤでつながれた速度センサ（沈下速度計）で計測するとともに、挙動発生から沈下までに要する時間を傾向変動により予測した。

さらに沈下予測をケーソン遠隔操作室や現場内のディスプレイに識別表示（図-2）することで可視化すると

1. 土木本部 土木FSC 2. 人事部付け (株)ネクストフィールド出向 3. 土木本部 [九州] 白鳥浄水場作業所
4. 土木本部 [首都圏] 川口橋梁作業所 5. 土木本部 [首都圏] R4 団境堤作業所

ともに、沈下時間予測システムによる周知や作業待機フローを以下のとおり決定した。

第1段階：沈下速度が1mm/分以上で、モニタが水色に表示されると外足場上の4台の回転灯が点灯するとともに（写真-1，2），登録している関係者の携帯電話にアラートメールが自動転送される。これにより足場や躯体上にいる作業員やクレーンによる土砂バケットの揚重は作業を一時中断し、沈下に影響しない位置まで移動し待機する（水色表示から沈下開始までの時間は約5分）。

第2段階：沈下速度が1mm/分→3mm/分→5mm/分と上昇するにつれてモニタの表示色が水色→黄色→赤色と変化し、赤色が表示されてから約5秒後に沈下する。現場は沈下が完了するまで待機を継続する。

2.2 コンクリート締固め作業における生産性向上および品質確保

本工場のコンクリート打設は最大日打設量 1,500m³ で約 8 時間にわたる連続作業であり、締固めに使用する重さ約 15 kg のバイブレータの上下動は1日で500回以上という重労働を作業員は余儀なくされる。この作業を軽減するため、打設箇所の鉄筋組立用鋼材に敷設したレールを走行する台車に、コンプレッサの給排気で伸縮するエアシリンダとバイブレータを固定して締固め作業を自動化した装置を搭載したバイブレータ搭載コンクリート自動締固め台車（以下、Con 台車）を開発した（写真-3）。

バイブレータはコンプレッサからエアシリンダへエアを供給して、エアシリンダの伸縮をバイブレータの上下動に変換した（図-3）。

一般的にはバイブレータによる締固めは「ゆっくり引き上げる」と言われ、作業員の経験や技量に依存することが大きかったが、当工事ではコンクリート1層高さが50 cmの場合、バイブレータ下降(上昇)距離は70cmとし、バイブレータの速度は3秒で境界面まで下降した後、打ち重ね部の20cmを2秒で減速し、5秒で上昇するサイクルとなるよう、エアの供給量を調整しバイブレータの上下動を制御し、バイブレータの上下動を数値化した。

このCon台車は締固め作業のうち、耐久性に大きく影響を及ぼす鉄筋かぶり部分の再振動（後追いソバンプ）に採用し、従来の人力作業と同様に打ち重ね部の新旧コンクリート境界面からバイブレータの先端が20cm下部まで貫入する高さまで上下動させる設定とした。

このCon台車の使用により、作業員はレール上の台車の移動とバイブレータのスイッチ操作のみとなり、バイブレータの上下動に伴う重労働が大幅に緩和されるとともに、配線類やインバータも台車上に搭載するため、打設中の移動に伴う配線盛替えの煩雑さも解消された。

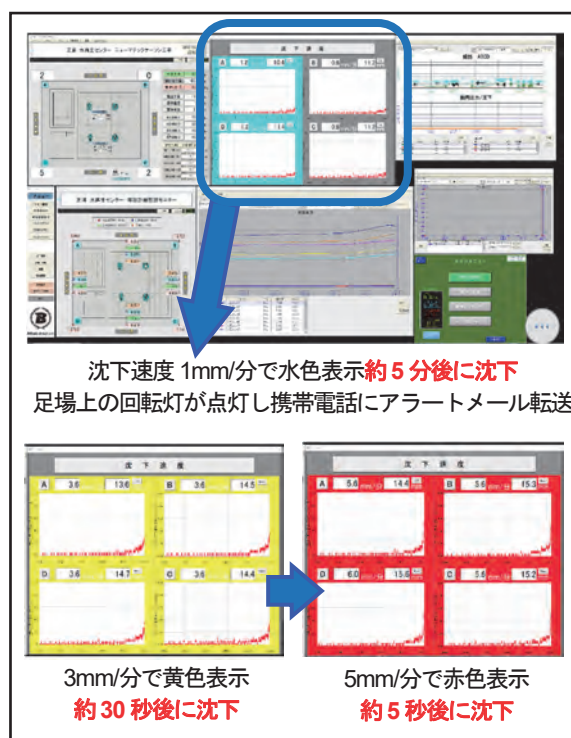


図-2 沈下時間予測システム表示フロー



写真-1 足場上回転灯（4灯）表示

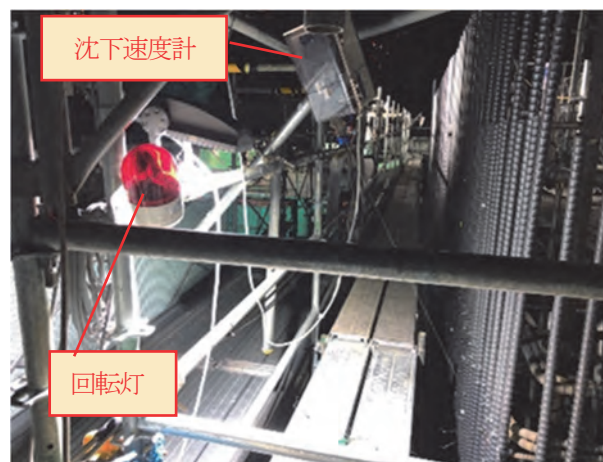


写真-2 回転灯と沈下速度計



写真-3 コンクリート自動締め台車

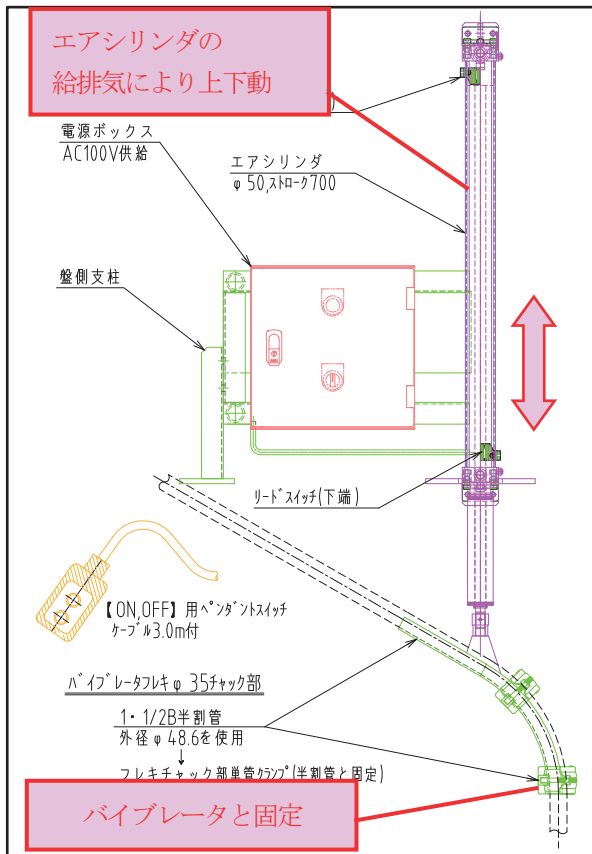


図-3 コンクリート自動締めパイプブレータ

3. 考察および現場検証

3.1 掘削沈下時間予測の明確化と情報共有

本システムにより、掘削量と計測データから沈下時間を経験的に把握していた従来と比べ、正確な沈下時間を全員が視覚的に確認できるため、作業中断の判断基準が明確となり、安全に待機することが可能となった。

また、本工事は24時間稼働している芝浦水再生センターの本館や中央監視室に近接しているため、沈下に伴う振動が本館の杭基礎を経由して建物内に伝達してしまう。しかし、本システムで沈下時間を予測し、事前にセンターに発信することで、地震動との区別も可能となり、監視室との情報共有ができることから、発注者の評価も非常に高かった。

3.2 コンクリート打設の省力化および品質確保

本システムの省力化の有効性を検証するため、動画で撮影した打設状況から人の関節を17点の節点にフレーム化し、移動量をAIで認識するPosenet(姿勢推定技術)を取り入れたところ、従来工法と比較し、特に上半身において低減率24%という高い低減効果が得られた。



写真-4 運動量評価手法(節点設定)

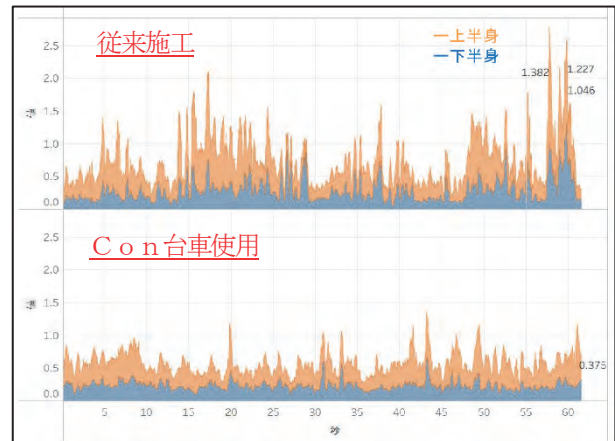


図-4 Posenetによる運動量評価

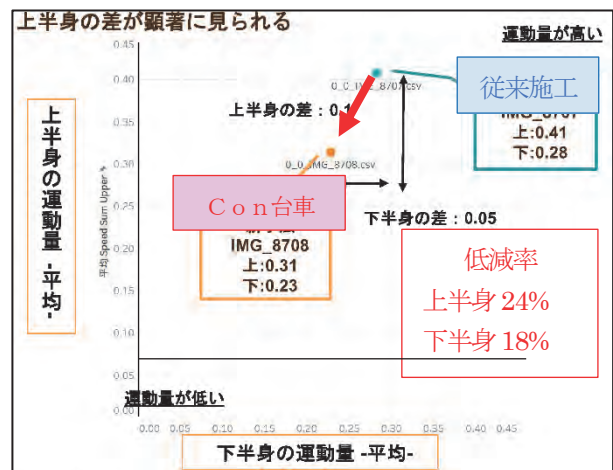


図-5 Posenetによる運動量比較

これはパイプレータを自動化することにより、上下動に伴う運動量が減少し、特に上半身において高い低減効果が得られたものである（写真-4、図-4、図-5）。

また、従来工法と Con 台車を使用した場合のコンクリートの品質を比較するため、テストハンマによる強度推定調査および表面気泡測定の結果をヒストグラムで整理した結果を示す（図-6、図-7）。強度推定調査の結果はほぼ同等であり、表面気泡の数は Con 台車の方がややばらつきが少ない結果となった。またダブルチャンバー法による表層透気試験の結果はいずれも $0.07 \sim 0.119 \times 10^{-16} \text{m}^2$ と透気性が小さい値となり、本システムの有効性が確認できた。

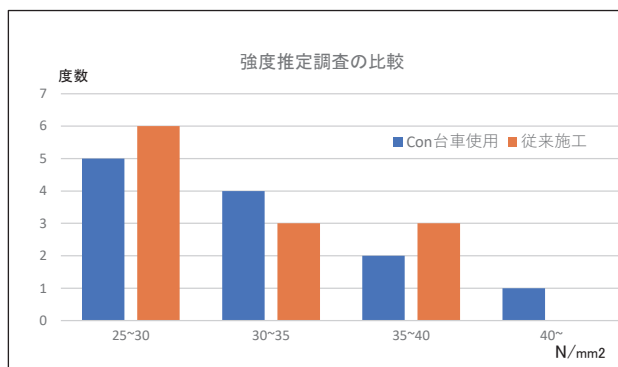


図-6 強度推定調査結果の比較

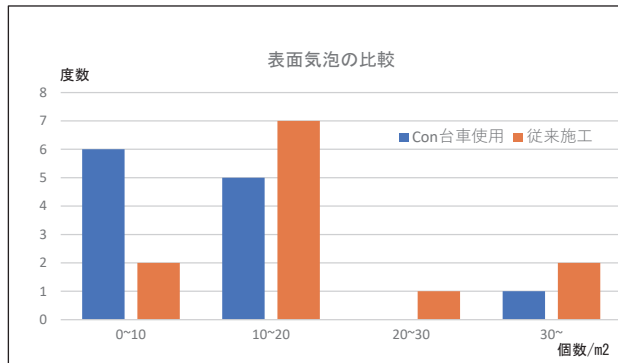


図-7 単位面積当たりの表面気泡数の比較

今回は壁厚が 2m~4m と厚みがあったため、躯体内部に台車を走行することが出来たが、多くの現場では台車を走行させられるほどの内部スペースを確保することが出来ない。そこで Con 台車の更なる展開を図るため、レール架台式から足場懸垂型に改造し、現場実証を行った（写真-5）。

外足場からブラケットを張り出し、レールを敷設することで、外足場での作業スペースを確保しコンクリート自動締固めを行い、その実行性を確認できたので今後の展開が期待できる。



写真-5 足場懸垂型

4. まとめ

本稿で紹介した技術は、ちょっとしたアイデアや好奇心から端を発した事例であり、現場で創意工夫として意見を出し合い取り組んだ結果である。特に後者のコンクリート自動締固めシステムについては、「コンクリート締固め用振動装置」として特許出願中である。

謝辞：本工事は5年以上の工期に渡ったが、無事故無災害で竣工し、顧客から高い評価を得ることができました。

これは現場に携わった者だけでなく、本支店や協力会社によるサポート体制のおかげであり、この場を借りて御礼申し上げます。

Summary Since there are risks of contact of an earth and sand bucket in material lock and fall of a worker from the foothold at the instant of skeleton subsidence in the excavation subsidence of the pneumatic caisson (hereinafter “caisson method”), it is important to make the timing of subsidence well known to the site from the viewpoint of safety management. Therefore, we installed a subsidence speed indicator to the skeleton to visualize the initial behavior generated before subsidence to make it well known to the site to contribute to the improvement of safety.

In addition, we performed concrete compaction work by a vibrator-loaded carriage as efforts to productivity improvement and quality assurance on-site.

This paper is the summary of the above efforts in the work for installing a shaft for a water conduit of the Shibaura Water Recycling Center ordered by the Tokyo Metropolitan Sewage Work Bureau.

Key Words : Deep pneumatic caisson, excavation subsidence time, concrete compaction system