

都市型圧入ケーソン 「アーバンリング工法[®]・アーバンウォール[®]工法」

Urban-Ring MethodTM・Urban-WallTM Method

— Urban caisson method developed in urban areas —

松岡 馨 MATSUOKA Kaoru JFE 建材 セグメント技術部 セグメント商品技術室長
松井 良典 MATSUI Yoshinori JFE スチール 建材センター 建材開発部土木技術室 主任部員 (課長)
大場 雄登 OHBA Yuto JFE スチール 土木建築研究部

要旨

都市域の厳しい施工環境に向けて開発した都市型圧入ケーソン『アーバンリング工法[®]』の工法概要と施工事例を紹介する。また、アーバンリング工法が有する特長を活かしつつ、直径 30～50 m 程度の大断面にも対応できる『アーバンウォール[®]工法』の開発にあたって実施した本体の合成構造とセグメント間の継手曲げ性能実験、実現場を想定した組立試験について紹介する。

Abstract:

Outline and examples of construction of urban press-fitted caisson, “Urban-Ring MethodTM”, are introduced. It was developed for severe construction environment in urban areas in late 1990s. In addition, recently developed “Urban-WallTM method” is described in detail. This method corresponds to the large cross section larger than 30 m in diameter utilizing the features of the Urban-Ring MethodTM. Composite structure of the main body, fitting bending performance test, assembling test at the factory and plans of test construction at the site are introduced.

1. はじめに

アーバンリング工法^{®1,2)} は、1996 年 11 月のアーバンリング工法研究会発足と同時に、材料のアーバンリング[®]と共に命名され誕生した都市型圧入ケーソン工法である。“アーバン”の名が示すとおり、主に都市およびその周辺部における立坑や基礎構築のための仮設土留めとして活用されている。

本工法は、近接施工や狭隘地施工、上空制限下や厳しい地下水条件下における施工、さらには路下施工や短工期要請下での施工など、諸々の厳しい条件下で施工可能な工法である。

工場製作による分割構造のリング体を用いて鉛直方向の地下構造物を短工期で構築するという基本コンセプトのもと、材料と施工の両視点から本工法を整備した。施工実績は、本工法の母体である鋼製セグメント圧入工法として 1991 年から販売開始以来、設置数は 360 基、掘削土量は約 40 万 m³ に達している。

一方、近年、構造物の地下化がさらに進み、大口径・大深度の立坑を急速施工する技術が求められるようになっていく。そこで、アーバンリング工法が有する狭隘地施工・急

速施工の特長を活かしつつ、これまでアーバンリング工法で対応できなかった直径 15 m を超える大断面立坑用としてアーバンウォール[®]工法^{3,4)}を開発した。本論文では、アーバンリング工法の概要を紹介するとともに、アーバンウォール工法の開発にあたって実施した各種試験について報告する。

2. アーバンリング工法[®]の概要

アーバンリング工法は、**図 1** に示すように、工場で製作

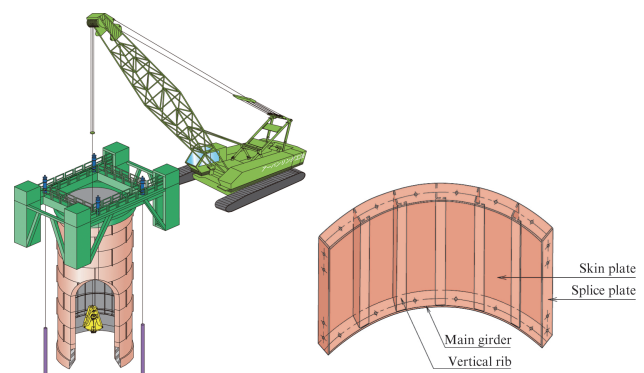


図 1 鋼製ピース構造

Fig. 1 Steel piece structure

2018 年 9 月 27 日受付

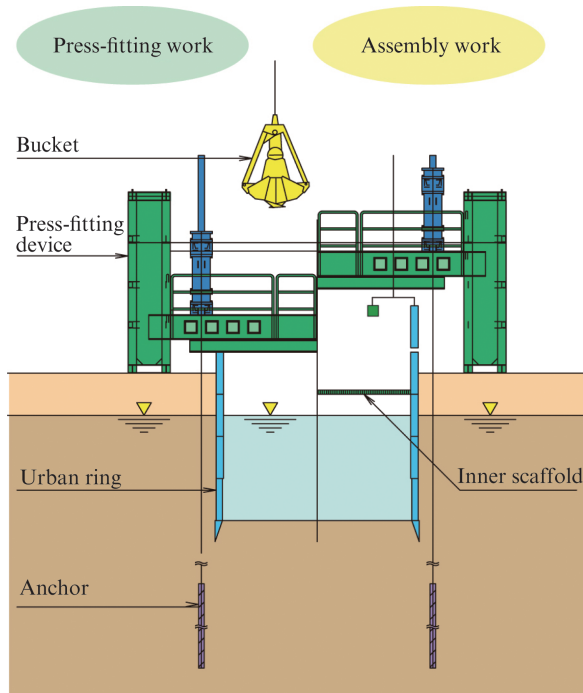


図2 アーバンリング工法[®]の掘削状況
Fig. 2 Drilling Urban-Ring MethodTM

されたアーバンリングピース（鋼製の場合）を円形または小判形に組み立て、鉛直方向に積み重ねたリング内部を主にクラムシェルなどのバケット系掘削機を用いて掘削し（図2）、沈設用グラウンドアンカーを反力に所定の深度まで圧入させていく工法である。

アーバンリング工法は、躯体に工場製品を使用しているため寸法精度が良いことから、出来形公差の大きい現場製作のケーソンと比較して刃口部のフリクションカット量（余掘り量）を半分以下にできる。そのため、周辺地盤に与える影響が少ない。また、現場での躯体の養生時間が不要となるため施工速度が圧倒的に早く、工事に対する環境負荷を低減できる。リングの組立作業は地上で行い、リングの高さも1m前後と低いため、安全に配慮した工法と言える。圧入装置がコンパクトで、アーバンリングは現場工程にあわせて工場から搬入するため、施工ヤードに平面的制約がある場合にも小スペースで施工が可能である。

また、アーバンリング工法は水中掘削を基本としているため、ヒービングやボーリングの心配がない。さらに、硬質地盤などには補助工法として先行削孔工を併用し、適用範囲を広げている。また、滑材注入工は、圧入抵抗を低減するのみでなく周辺地盤の安定にも有効である。

用途の大半を占める立坑向けの特長をまとめると以下のとおりである。

- (1) 設計、施工の自由度が高い
- (2) 周辺環境への負荷が小さい
- (3) 施工精度が高い
- (4) 急速施工が可能

3. アーバンリング工法[®]の施工実績

アーバンリング工法は、「狭隘地」、「短工期」という特性を生かし、様々な用途、条件での施工実績を積み重ねてきた。図3に外径と沈設深度ごとの実績分布図を示す。施工実績の平均外径は6m、平均深度は30mであり、近年はシールドの発進・到達立坑への採用が増加しているため、より大深度・大口径化の傾向にある。

アーバンリング工法は立坑、人孔、橋梁下部ケーシング、橋脚補強、井戸、地下駐輪場など多様な施工例があり、用途に合わせて鋼製（写真1）とコンクリート製のアーバンリングが使われている。

鋼製は主に小ロットや仮設構造物に用いられ、コンクリート製は本設構造物や同一サイズロットの多いものに用いられている。

一般的な施工現場の風景を写真3に示す。写真3からわかるように、構築する立坑サイズの3倍程度の面積があれば施工が可能である。

アーバンリング工法を橋脚基礎に活用した実例として、阪神高速16号大阪港線と1号環状線を接続する西船場ジャ

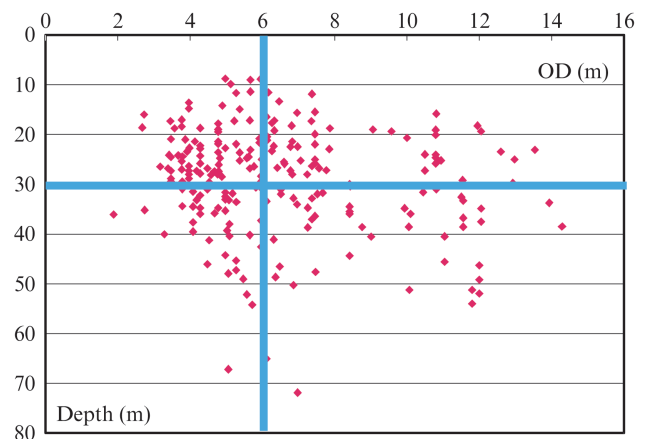


図3 外径・深度ごとの施工実績
Fig. 3 Construction record of urban-ring

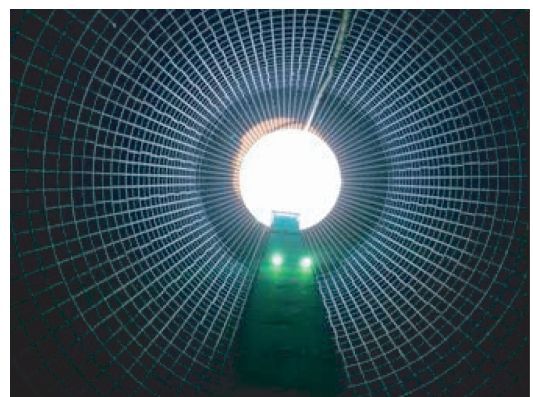


写真1 鋼製
Photo 1 Steel urban-ring

ンクションの基礎工事について紹介する^{5,6)}。本工事は、当初オープンケーソン工法で計画されていたが、既存高架橋の空頭制限がある上に、工事に必要となる主要幹線道路の占有帯を可能な限り小さくし、占有期間を短縮する必要があった。そのため、狭隘地施工や短工期施工が可能なアーバンリング工法によって構築した立坑を仮設土留め壁として利用し、ケーソン基礎を立坑内で構築する施工法が採用された。これにより、約40%の工期短縮が実現された。

また、通常アーバンリング工法の底版は、揚圧力に耐えるよう、**図4**の左図の方法にて立坑内にケーソン基礎を構築するが、本工事では**図4**の右図のようにアーバンリング工法の底版をケーソン基礎の本体構造とみなせるよう、構造体の再検討および施工方法の工夫により合理化を図っ



写真2 コンクリート製
Photo 2 Concrete urban-ring



写真3 施工現場
Photo 3 Construction site

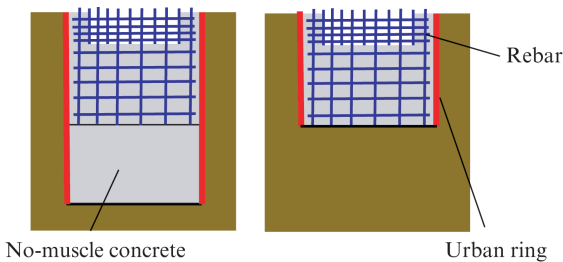


図4 底版部の比較
Fig. 4 Comparison of bottom plate

ている。

次に、首都高港北JCTの基礎工事について紹介する⁷⁾。本現場は、地盤面から支持層線までの大部分がN値0~1の沖積粘性土で、その下はN値50以上の泥岩層となっている。そのため、支持層での側面地盤反力の確保が必要であり、かつ支持層刃口貫入長が15m以上となる難現場であった。当初はニューマチックケーソン工法で計画されていたが、N値がほぼゼロの非常に軟弱な地盤に精度よく沈設させるためには工期を要すことから、沈装置により圧入がコントロールできるアーバンリング工法が採用された。しかし、アーバンリング先端の刃口では、硬質な泥岩層において圧入できなくなる懸念があったため、先行削孔による砂置換が検討された。従来の先行削孔方法では基礎周辺地盤を緩めてしまい、側面の地盤反力が期待できなくなるため、**図5**のように砂置換の範囲をリング内側とすることで、外側の地盤を緩めることなくリングを圧入させるよう工夫している。

4. アーバンウォール[®]工法の概要

4.1 リング構造とピース構造

アーバンウォール工法は、直径30~50m程度の大断面にも耐えるよう、**図6**に示すとおり内側リングと外側リング

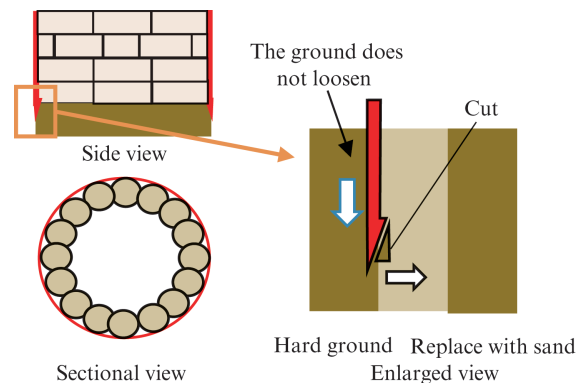


図5 先行削孔と刃先圧入時のメカニズム
Fig. 5 Mechanism of preceding drilling and cutting edge

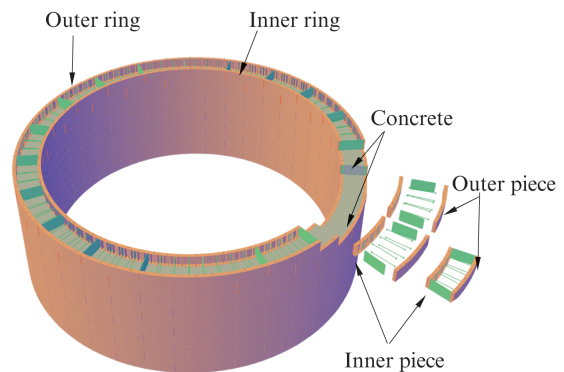


図6 リング概要
Fig. 6 Outline of ring

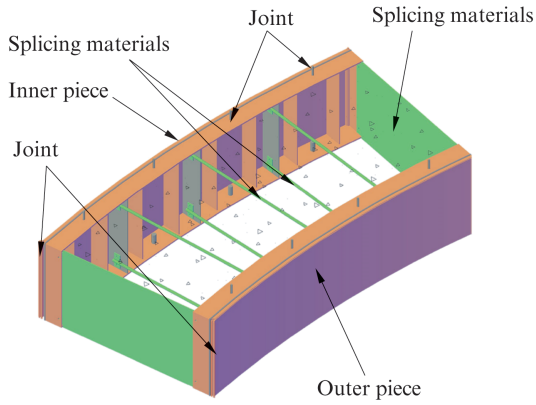


図7 ピース構造
Fig. 7 Piece structure

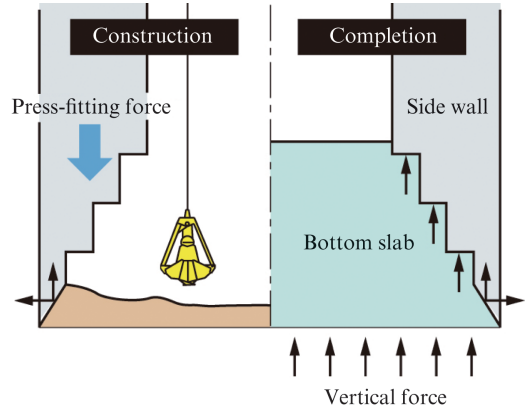


図8 刃口構造
Fig. 8 Cutting edge structure



写真4 継手構造
Photo 4 Joint structure

の2重鋼殻構造となっている。工場製作された通常サイズの鋼製ピースを現場で1リング毎に組み立て、内側鋼製ピースと外側鋼製ピースをつなぎ材で締結したのち中央部にコンクリート打設し、合成構造の躯体を構築する。

図7からわかるように、小さな工場製作の鋼製ピースは、現場で大きな合成構造のピースに生まれ変わる。大きな合成構造ピースは、小さな鋼製ピースの端部や上部に設置したセグメント継手（ピース間継手、リング間継手）とつなぎ材によって組み立てられる。このセグメント継手を有する合成構造のセグメントピースが柔軟な構造体を可能にし、立坑としての耐震性を向上させている。

ピース間継手は、写真4に示すとおり、JFE スチールで製造された直線形鋼矢板（Jフラットパイル[®]）の継手をスキンプレートに直接溶接した構造となっている。Jフラットパイルの継手は、大きな耐力を有するとともに、上部から差し込む形状となっているため、組み立て時の急速施工に寄与する多分割ボルトレス継手が適用可能である。

4.2 刃口構造

従来工法であるオープンケーソンの刃口部には、底スラブと側壁間のくさび形状によりフープテンション（円周方向の引張力）が発生する。

一方、アーバンウォール工法の刃口部は、図8に示すように、側壁厚さを段階的に変えることにより、鋭角な刃先形状を得ている。この刃先に沿って刃口部の土砂を掘削、クラムシェルで排土することができる。

完成時、底スラブ設置による浮力がもたらすフープテンションは、この階段状の側壁形状により上向きの軸力に変換され、鋭角な刃先と刃口全体にフープテンションが作用することを抑制している。

5. アーバンウォール[®]工法の施工方法

5.1 施工概要

アーバンウォール工法の施工は、リング組立の工程を除くと従来のアーバンリング工法と同様である。大口径・大深度に伴い増加する工期に対し、ケーソンなどの従来工法と比較して躯体構築時間を30%程度に短縮することができる。掘削工程においては、掘削機の台数を増加することによって工期短縮を図っている。

5.2 リング組立

アーバンウォール工法の最大の特徴である内外二重の鋼製ピースを用いた組み立てにより、従来必要であった内足場が不要となった。また、内側鋼製ピースを先行して組み立てることにより、坑内への転落防止機能も兼ね備えている（図9）。

内外のリングを組み立て後、つなぎ材を取り付け、コンクリートを打設する。コンクリートの打設はピース単位で行うことができるので、コンクリートの供給能力に左右されない。

5.3 掘削圧入

リング組立完了後、コンクリート養生中は掘削作業のみを実施する。コンクリートの養生完了後、圧入沈設設備を設置しアーバンウォールを地中に圧入するとともに、掘削作業

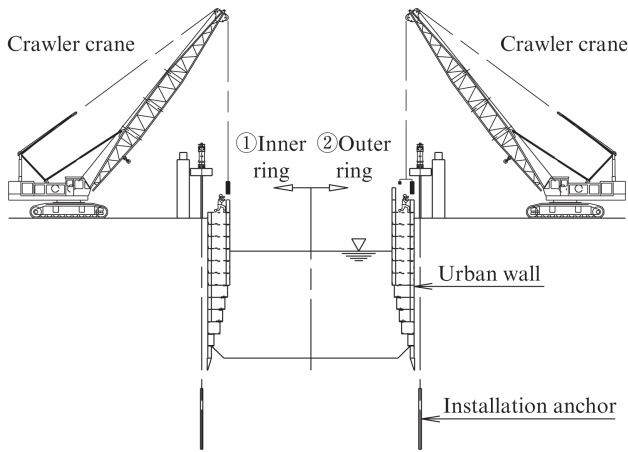


図9 リング組立作業
Fig. 9 Assembly of ring pieces

を継続する。外側リング部分のみに圧入力を作用させて圧入することから、ダイレクトに圧入力を刃先先端に伝達することができる。

6. アーバンウォール[®]の確性試験

6.1 本体部曲げ試験

合成構造の躯体本体部の曲げ耐力性状を把握するため、**図10**に示すような、支間7.5 m、荷重点間1.5 mの4点荷重試験を実施した。

試験体断面は、1/2縮尺の1.25 m×0.5 mとした。主桁の板厚が8.7 mm（降伏強度386 N/mm²）、スキンプレートの板厚が4.5 mm（降伏強度376 N/mm²）で、長手方向に300 mm間隔でD16異形鉄筋を両側の鋼製ピースのつなぎ材として配置する。コンクリートは、最大骨材寸法20 mm、スランプ8 cm、空気量4.1%、および試験当日の圧縮強度は32 N/mm²であった。

試験は、鋼材の許容応力度200 N/mm²として計算した設計荷重（521 kN）まで荷重・除荷した後、試験体反力が低下するまで荷重した。

図11に、試験結果を鋼とコンクリートとが完全合成であるとして計算した理論値との比較を示す。

図11より、セグメント本体は、設計荷重の3.4倍の曲げ耐力を保有していることが確認できた。また、耐力曲線（ $P-\delta$ 関係）に関し、実験結果が理論値とおおむね一致していることから、完全合成断面として扱えることがわかる。

なお、つなぎ材として用いる鉄筋の量は、1/2縮尺曲げ試験に先立って実施した、同様の1/3縮尺曲げ試験結果を参考に決定した。

6.2 継手部曲げ試験

合成構造の躯体継手部の耐力および回転バネ定数を確認するため、**図12**に示すような、支間9.1 m、荷重点間2.5 m

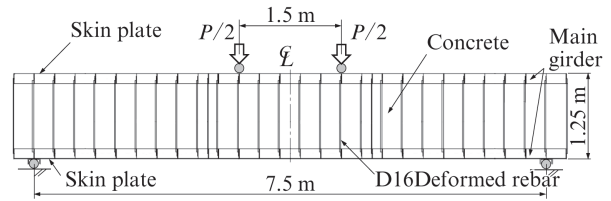


図10 本体部1/2縮尺曲げ試験体と荷重状況
Fig. 10 1/2 scale bending test of the body

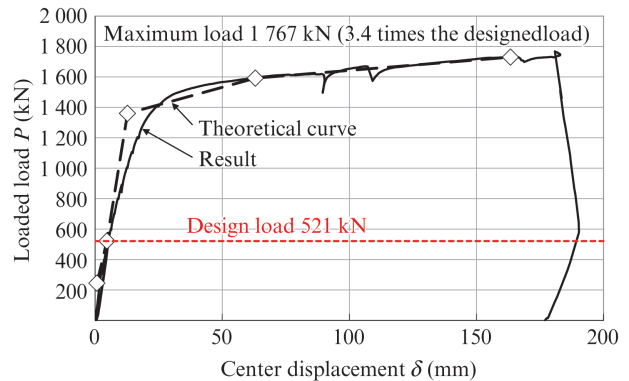


図11 セグメント本体1/2縮尺曲げ試験結果
Fig. 11 1/2 scale bending test result of the body

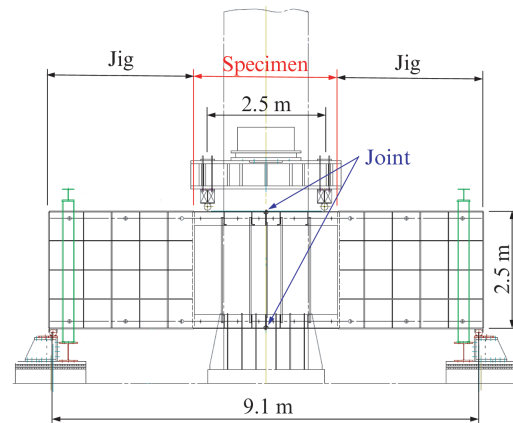


図12 継手部実物大試験体と荷重状況
Fig. 12 1/1 scale bending test of the joint

の4点荷重試験を実施した。

試験体断面は、実物大を想定し、2.5 m×0.5 mとした。セグメント継手である直線形鋼矢板の板厚が9.5 mm（降伏強度407 N/mm²）、主桁の板厚が16 mm（降伏強度351 N/mm²）、スキンプレートの板厚が9 mm（降伏強度403 N/mm²）で、つなぎ材は600 mm間隔でD32異形鉄筋を配置している。コンクリートは、最大骨材寸法20 mm、スランプ8 cm、空気量6.0%、および試験当日の圧縮強度は23 N/mm²であった。

継手部の許容応力度を160 N/mm²として計算した設計曲げモーメントまで荷重・除荷した後、継手が降伏ひずみを超え、かつ継手の爪の開き量が0.25 mmを超えた時点で

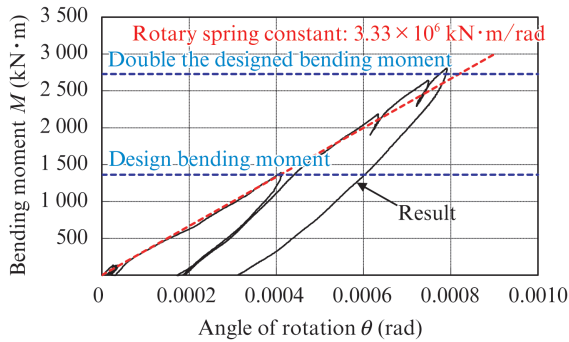


図13 セグメント継手部の実物大試験結果
Fig. 13 1/1 scale bending test result of the joint

除荷した。

試験結果を図13に示す。図13より、設計曲げモーメントの2倍以上の継手耐荷性能を保有していること、および継手の回転バネ定数が計算値 $3.00 \times 10^6 \text{ kN}\cdot\text{m/rad}$ に対し $3.33 \times 10^6 \text{ kN}\cdot\text{m/rad}$ であることを確認した。

なお、セグメント寸法の変化に伴う性能の差異確認のため、図10の試験体中央に継手部を設け、上下端に図12と同じ直線形鋼矢板継手を設置した試験体に対し、図10と同様な継手部1/2縮尺曲げ試験を実施した。1/2縮尺の場合も、実物大の場合と同様、設計曲げモーメントの2倍以上の継手耐荷性能を保有していること、および継手の回転バネ定数が計算値 $6.39 \times 10^6 \text{ kN}\cdot\text{m/rad}$ に対し $6.00 \times 10^6 \text{ kN}\cdot\text{m/rad}$ と誤差が1割程度であることを確認した。

6.3 組立試験

多分割ボルトレス継手の組立性と組立精度を確認するため、外径13m×20分割×3リングを製作し、実現場を想定した組立試験を実施した(写真5)。組立試験では、5ケースの組立方法を試し、全ケースで同程度の組立精度(±15mm以内)(φ10mは通常±20mmが公差)が得られることを確認した。

また、つなぎ材を用いた内外リングの施工性(コスト、工



写真5 組立試験状況
Photo 5 Assembly test

期)と、つなぎ材の形状、施工手順なども確認している。

大深度用シール材による組立性(施工性)と組立精度に対する影響については、つなぎ材締結用ボルトにより、大深度用のシール材が十分につぶれ、組立性に影響ないことを確認している。

7. おわりに

都市部を中心として、狭隘地や上空制限といった厳しい施工条件下において工期短縮の切り札として活用されている、都市型圧入ケーソン工法、アーバンリング工法[®]の概要について述べた。また、最近適用が増加しているアーバンリング工法を橋脚基礎の仮設土留めとして活用する事例と、そこで工夫されている技術について紹介した。

さらに、大深度・大口径化する地下構造物の建設ニーズに対応すべく2014年から開発してきた、アーバンウォール[®]工法の内容について報告した。

今後、地下構造物はさらに大深度化し、より大きな構造物が地中に建設されるようになる。

大深度対応工法として、地下連続壁、ニューマチックケーソン、圧入オープンケーソンなどがあるが、さらなる大深度化に対してはどの工法も課題を抱えており、安心、安全、確実な工法開発が求められている。

大口径の地下構造物の構築は、工期を要し、機械設備の能力アップやメンテナンスに対するリスクが飛躍的に増大する。大深度になると地下水に対するリスクが非常に高くなるが、少なくとも人災だけは絶対に回避する必要がある。

アーバンウォール工法は、地下水に対するリスクが小さいオープンケーソンを進化させた工法であり、リスク低減型の大深度・大口径の標準工法となると確信している。

今後は実案件に向け本工法の普及に注力し、並行して開発している掘削・排土技術と合わせてさらなる改良・改善を行っていきたいと考えている。

参考文献

- (財)国土技術開発技術センター、「アーバンリング工法 建設技術審査証明報告書」. 1998.
- 佐藤和義, 長岡省吾, 鶴見明俊, 大木一慶, 濱田良幸. アーバンリング. NKK技報. 2002, no. 176, p. 91-96.
- 松岡馨, 濱田良幸, 中西克佳, 辰見ター, 松井良典. アーバンウォール工法. 建設機械. 2017, p. 24-28.
- 松岡馨, 濱田良幸, 中西克佳. アーバンウォール工法. トンネルと地下. 2018, p. 70-73.
- 藤原勝也, 山中利明, 山本利史, 岩元佑太郎. 重要構造物に近接してのアーバンリング圧入管理手法と鉄筋かご建込み方法の創意工夫. 土木学会第71回年次学術講演会. 2016, p. 29-30.
- 杉山裕樹, 曾我恭匡, 遠藤和雄, 大高正裕, 小野田元. 西船場JCT改築工事におけるアーバンリング工法を用いたケーソン構造の合理化. 土木学会第71回年次学術講演会. 2016, p. 31-32.
- 戸塚孝文, 渡邊知英, 木村真二, 吉田祥二. アーバンリングを泥岩層に貫入させる先行削孔の工夫. 土木学会第72回年次学術講演会. 2017, p. 853-854.



松岡 馨



松井 良典



大場 雄登