

技術論文

シールドトンネルの安心・安全，長耐久化を実現する 嵌合方式合成セグメントラインアップ

Lineup of Composite Segments with Special Fitting Joints to Achieve Safe and Highly Durable Shield Tunnels

中島正整* 永尾直也 佐田 崇
Masanari NAKASHIMA Naoya NAGAO Takashi SADA

抄 録

シールドトンネルの長期供用を見据えると、供用期間中に起こり得る想定外地震被災に対する安心・安全の確保、セグメント長耐久化ニーズは高いと考えられる。これらのニーズに応えるため、日本製鉄(株)では大口径トンネル向け嵌合方式合成セグメント“NMセグメント®”を開発、市場展開を進めてきた。NMセグメント®は、独自リング間嵌合構造による高い耐震性と止水性等により市場から一定の評価を得ているが、製造制約上、中小口径トンネルには適用できない。これに対し、今回新たに中小口径トンネル向け嵌合方式合成セグメント“NMW®”を開発した。本稿では、この嵌合方式合成セグメントラインアップの特徴およびNMW®の構造性能検証結果について報告する。

Abstract

In view of the long service life of shield tunnels, ensuring security against unexpected earthquakes and increasing the durability of segments are paramount. To meet these needs, we have developed and marketed the NM Segment, a composite segment with special fitting joints for large-diameter tunnels. The NM Segment has received a favorable reputation in the market for its high seismic resistance and water sealing performance due to its unique fitting joints. However, it cannot be applied to small diameter tunnels due to manufacturing constraints. To overcome this limitation, we have developed a new composite segment with special fitting joints “NMW” for small diameter tunnels. This paper reports on the features of this composite segment lineup and the results of structural laboratory tests of NMW.

1. はじめに

一般的に、トンネルを始めとする地下構造物は地震時による地盤変形に追従しやすく、耐震性に優れると考えられている。また、1990年代以降のトンネル技術進歩は目覚ましく、ひび割れや漏水などの初期不具合件数は減少傾向にあり、施工直後のトンネル品質は大きく向上している。しかしながら、2016年に発生した熊本地震では、依山トンネル(NATM工法を適用)が想定外に大きく被災し、トンネル覆工が大規模に崩落している¹⁾。また、供用50年を経た首都高羽田トンネル(開削、沈埋工法などを適用)においては、著しい漏水や部材劣化が顕在化しており、抜本的な改修が必要な状況にある²⁾。さらに、シールドトンネルにお

いても、鋼製セグメントのスキンプレートが想定を大幅に超える速度で腐食し、坑内への漏水が発生した事例の報告もある³⁾。

このように、計画設計段階で想定していなかった被災、劣化が各種トンネルにおいて発生しており、これらはトンネル維持管理費の増加のみならず、中には人命に直接関わる事態に直結し得る可能性も示唆されている。トンネルのさらなる長期供用を見据え、起き得る想定外地震被災に対する安心・安全の確保、地上構造物と比べて大規模改修が困難なトンネルにおける長耐久化などのニーズは高いと考えられる。本稿では、これらのニーズに応え得るシールドトンネル向け嵌合方式合成セグメントラインアップの開発について報告する。

* 厚板・建材事業部 建材開発技術部 土木建材技術室 土木技術第三課 首席主幹 東京都千代田区丸の内2-6-1 〒100-8071

2. 嵌合方式合成セグメントの特徴と効果

2.1 特徴

日本製鉄(株)では、嵌合方式合成セグメント“NMセグメント®”を開発し、大阪府寝屋川北部地下河川“古川調節池(1996～1997年)”より市場に展開し、2022年現在までに地下河川、鉄道、道路トンネルを中心に計12件以上の採用実績を積み上げている。NMセグメント®の最大の特徴は、外面を覆う鋼殻の主桁部にかみ合わせ溝構造を持つ特殊形鋼を採用した点にある(図1)。この特殊形鋼は、トンネルとして組み立てられた際には隣接するリング間同士で全周に渡って嵌合する継手構造となる。また、かみ合わせ溝底には独自形状の止水シールゴムを格納可能であり、供用時には地山側、内空側合わせて計4条の止水線を形成する。

2.2 耐震性能

多数の継手により連結されるシールドトンネルは、地震時に地盤変形に追従しやすいというメリットがある。一方、例えば想定外地震による過大な変形でリング間継手が破損した場合、それぞれのリングが部分的に単リング化し、地震により周辺地盤の拘束状況が予測困難となる中において、トンネルとして多ヒンジ構造に近い極めて不安定な構造になり得る。この時、トンネル変形状態やセグメント間継手の損傷状態によっては、大規模なセグメントピースの崩落という人命に直結する事態を引き起こすリスクが高くなる(図2)。

これに対して、NMセグメント®のリング間全周嵌合継手構造は、リング間に発生するせん断力を分散負担する高強度リング継手と見做すことができる(図3)。これにより想定外地震作用時においてもリング間の接続を維持し、セグメントピースの崩落といった重大災害の発生を抑止できる。

2.3 耐久性

一般的に、トンネル劣化現象は坑内への漏水が主要因とされており、その多くは継手から発生している。継手部の止水性能は、止水用ゴムを継手面に貼付することで確保しており、世界的にはエチレンプロピレンゴム(EPDM)ガス

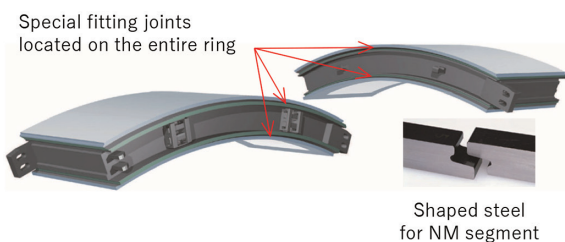


図1 NMセグメント®
NM segment

ケットを1条貼付するのが一般的であり、国内では水膨張ゴムを2条貼付するのが大口径トンネルにおいて一般的となっている。

これに対して、NMセグメント®の水膨張ゴムを用いた4条独自シール構造(図4)は、極めて高い止水性能を発揮し、前述した古川調節池は供用開始後25年を経過した後も漏水はほぼ発生していない。その他の採用事例においても、セグメント本体の鋼殻構造による止水効果と合わせて、漏水はほぼゼロとなる極めて高い止水実績が確認されている。さらに、トンネル坑内への漏水がないため、トンネル内の腐食環境は計画設計時の想定に近く、トンネル内部材の腐食劣化も想定内に留まっていると考えられる。

3. 新嵌合方式合成セグメントNMW®の開発

3.1 NMW®の開発と特徴

NMセグメント®は優れた耐震性、耐久性を持つものの、



図2 地震時トンネル損傷イメージ
Predicted damage of tunnel by earthquake

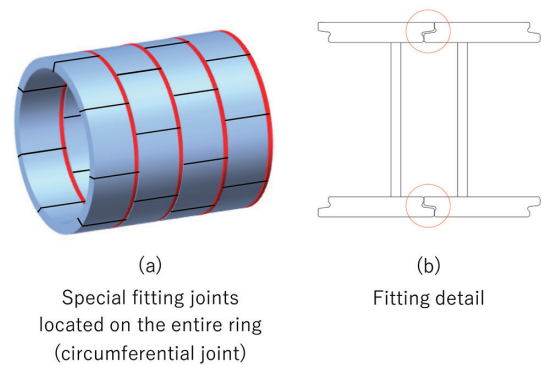


図3 全周嵌合継手
Special fitting joints

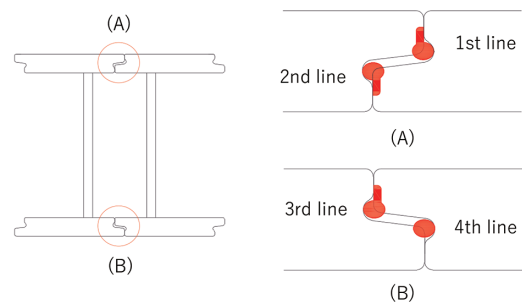


図4 4条止水シール構造
4 sealing lines of NM segment

その特殊形鋼を始めとする部材加工の制約から、トンネル外径7m程度以上の大口径トンネルへの適用に限られてきた。一方、激甚化する豪雨対策など、地下空間の活用ニーズは、東京や大阪を始めとする大都市に留まらず、各地方自治体でも広がりを見せているが、これらのトンネルは比較的小口径であるため、NMセグメント®の適用は困難であった。

これに対し、日本製鉄では2021年に中口径トンネル向け新型嵌合方式合成セグメント“NMW®”を新たに開発した。NMW®はNMセグメント®と同じかみ合わせ構造を持つ新たな主桁用形鋼を採用し、構造を極力簡易化することで部材加工の制約を軽減している(図5)。さらに、NMW®のセグメント間継手は、NMセグメント®と同様に継手に作用する引張力を本体主構造部材である主桁に直接伝達できる構造としつつ、現場作業の省力化を目指して新たに開発したダンベル継手構造とした(写真1)。

本開発により、NMセグメント®と同様の耐震、耐久性を中口径トンネルでも発揮でき、両製品を合わせたラインアップにより、嵌合方式合成セグメントの適用範囲を拡大することが可能となった(図6)。以下に、NMW®の本体



図5 NMW®
NMW segment



(a) "Dumbbell" joint (M) (b) "Dumbbell" joint (after fitting)

写真1 NMW®セグメント間継手
Circumferential joint of NMW

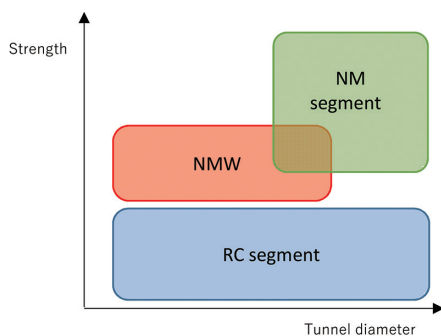


図6 NMW®の適用範囲イメージ
Application of NMW

およびセグメント継手性能を実験により検証したので、その結果を報告する。

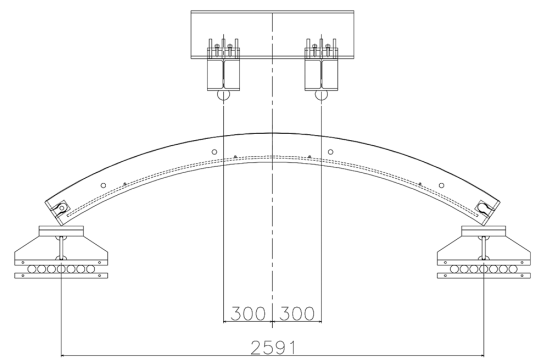
3.2 NMW®の本体性能

3.2.1 試験方法

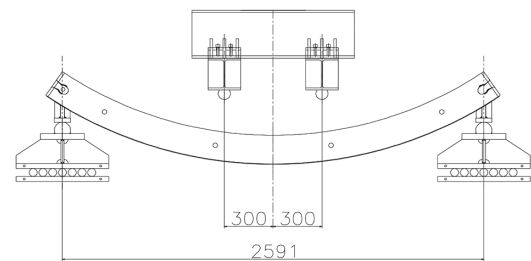
NMW®の本体耐荷性能の検証として、単体曲げ試験を実施した。試験は、円弧型試験体を用いて、正曲げと負曲げについて4点曲げ载荷にて実施した。試験概要を図7に、試験体概要を図8および表1に示す。

3.2.2 構造モデル

NMW®の構造解析は、主桁を鉄筋に換算し、中詰めコンクリートは圧縮側のみ全幅有効としたRC断面(以下“本



(a) Positive bending test



(b) Negative bending test

図7 NMW®単体曲げ試験概要
Bending test of NMW

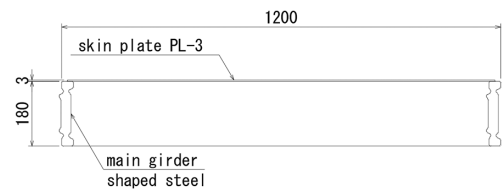


図8 NMW®単体曲げ試験体主断面
Cross-section of NMW

表1 NMW®単体曲げ試験体主要諸元
Specification of NMW test specimen

| | |
|-------------|-------------------|
| Width | 1200 mm |
| Height | 183 mm |
| Main girder | 27 mm (thickness) |
| Skin plate | 3 mm (thickness) |

体構造モデル”と記す)としてモデル化している。本試験において本体構造モデルに入力した材料物性値は，材料試験結果に基づく実測値を採用している。材料物性値を表2に示す。

3.2.3 試験結果

(1) 耐力とマクロ剛性評価

載荷荷重から算出した試験体中央部の発生曲げモーメントと，試験体ひずみから算出した同位置における曲率の関係を図9に示す。図中に，試験値と合わせて本体構造モデルにより算出した理論耐力カーブを示す。正曲げ試験の最大荷重は構造解析結果の最大値を約15%上回り，最大耐力発揮後も高い変形性能を示している。一方，負曲げ試験の最大荷重は構造解析結果の最大値を約70%上回っている。これは，構造解析上は構造部材として見做していないスキンプレート（負曲げにおいては引張側最外縁に位置）が全幅に渡って抵抗していたことが要因と考えられる。

また，設計上の弾性範囲において，曲げ剛性は正曲げ試験と構造解析においてよく一致している。一方，負曲げ試験では，前述したようにスキンプレートが構造部材として抵抗するため，理論値よりも高い曲げ剛性を示している。

(2) 部材マイクロ挙動の評価

降伏荷重レベルにおける構造部材の周方向ひずみ桁高方向分布を図10に示す。図中の直線は，本体構造モデルに

表2 NMW® 単体曲げ試験体材料強度
Material strength of NMW test specimen

| | Steel (SM490) | | Concrete |
|--------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---|
| | Yield strength (N/mm ²) | Tensile strength (N/mm ²) | Compressive strength (N/mm ²) |
| Experimental value | 315 | 513 | 41.3 |

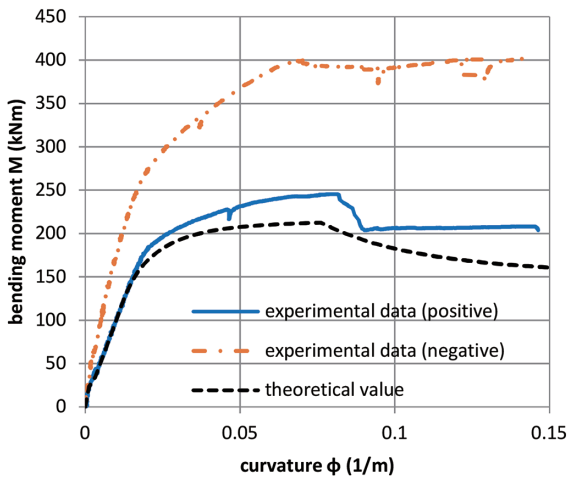


図9 NMW® 単体曲げ試験結果 (M-φ関係)
M-φ relation of NMW bending test

より算出したひずみ分布の理論値である。正曲げ試験におけるひずみ分布は理論値とはほぼ一致しており，部材マイクロ挙動としても本体構造モデルにより再現可能であることを確認した。負曲げ試験においては，耐力評価と同様にスキンプレートの寄与により剛性が高くなり，発生ひずみも理論値よりも小さくなっている。

(3) 破壊モードの評価

載荷試験終了後の試験体内空側および地山側のコンクリート状況を写真2に示す。正曲げ試験においては，内空側は十分なひび割れ分散性が確保されていることが分かる。また，地山側は想定通りのコンクリート圧壊現象が確認された。なお，図示は省略するが，負曲げにおいても同様の傾向が確認されている。

3.2.4 本体性能評価のまとめ

NMW®の本体耐荷性能について，単体曲げ試験により確認された主要事項を以下にまとめる。

- 1) 本体構造モデルにより安全側に耐力を評価できる。
- 2) 正曲げにおける部材マイクロ挙動は，本体構造モデルにより精度よく評価できる。
- 3) 破壊モードはコンクリート圧壊となり，本体構造モデルによる想定と一致する。
- 4) 負曲げにおいては，構造部材として見做さないスキンプレートの寄与により耐力が高くなる。

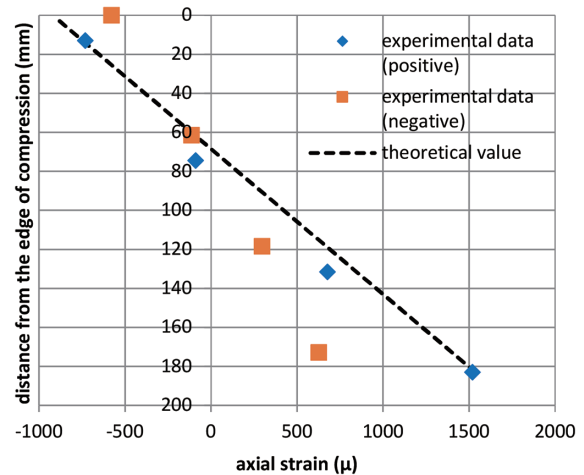


図10 NMW® 単体曲げ試験結果 (ひずみ分布)
Strain distribution of NMW bending test



(a) Inside

(b) Outside

写真2 NMW® 単体曲げ試験結果 (破壊状況)
Ultimate state of NMW bending test

プレートが抵抗するため、耐力、剛性ともに本体構造モデルによる想定を上回る。

上記4項目全てを確認することにより、NMW® 本体が合成構造として成立していることが確認された。

3.3 NMW® のセグメント間継手性能

3.3.1 試験方法

セグメントを想定した鋼製箱を2体製作し、これらをダンベル継手によって接続した試験体に対して4点曲げ試験を実施した。試験概要を図11に、試験体概要を図12および表3に示す。

3.3.2 構造モデル

ダンベル継手とセグメント本体の主桁との接続は、回転を拘束しないピン結合としている。これにより、継手に曲げモーメントが作用した際に、ダンベル継手軸部に作用する二次曲げの影響を極力抑え、軸部耐力を最大限に発揮できる構造としている。ただし、構造解析においては、ダンベル継手軸部を通常のボルトと同様の引張部材と見做し、安全側の評価となるモデル（以下“継手構造モデル”と記す）を採用している。

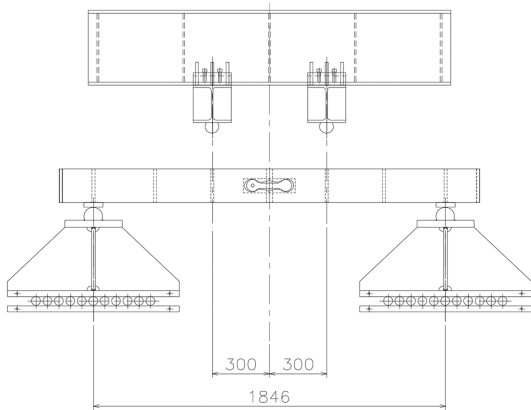


図11 NMW® 継手曲げ試験概要
Joint bending test of NMW

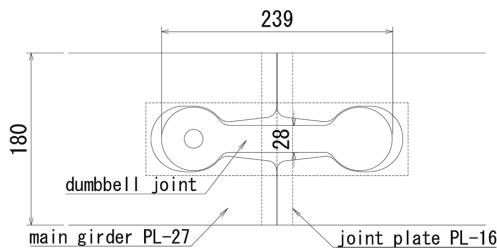


図12 NMW® 継手曲げ試験体詳細
Joint detail of NMW test specimen

表3 NMW® 継手曲げ試験体主要諸元
Specification of NMW joint test specimen

| | |
|-----------|-----------------------------|
| Width | 239 mm |
| Height | 28 mm (shaft center) |
| Thickness | 27 mm (same to main girder) |

3.3.3 試験結果

(1) 耐力評価

載荷荷重から算出した試験体中央部の発生曲げモーメントと、継手目開きおよび目閉じ計測値から算出した継手回転角の関係を図13に示す。図中に、試験値と合わせて継手構造モデルにより算出した降伏曲げモーメントを示す。

試験は、試験機の限界で継手回転角が0.2radに達した時点で終了としたが、その時点における最大荷重は降伏曲げモーメントの約2倍以上であった。また、降伏曲げモーメント以下の範囲においては、曲げモーメント-回転角の関係は直線性を保っており、マクロ的に弾性挙動を示している。

(2) 部材マイクロ挙動評価

作用曲げモーメントに対するダンベル継手軸部のひずみ履歴を図14に示す。ひずみは、ダンベル継手軸部長手方向中央部の上端・中央・下端の3点で計測した。図中に、試験結果と合わせて降伏曲げモーメントおよび鋼材の降伏ひずみを示す。降伏曲げモーメント相当の曲げモーメント

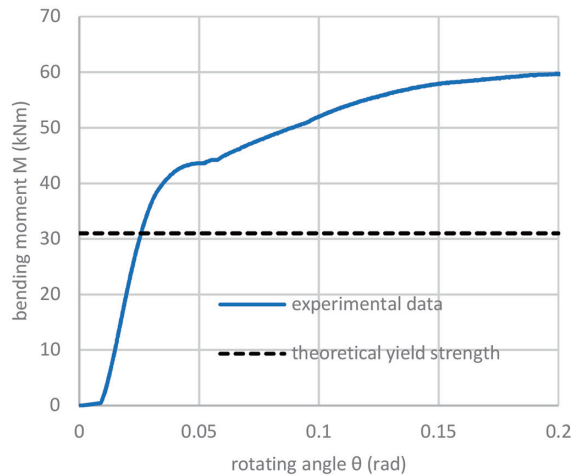


図13 NMW® 継手曲げ試験結果 (M-θ関係)
M-θ relation of NMW joint bending test

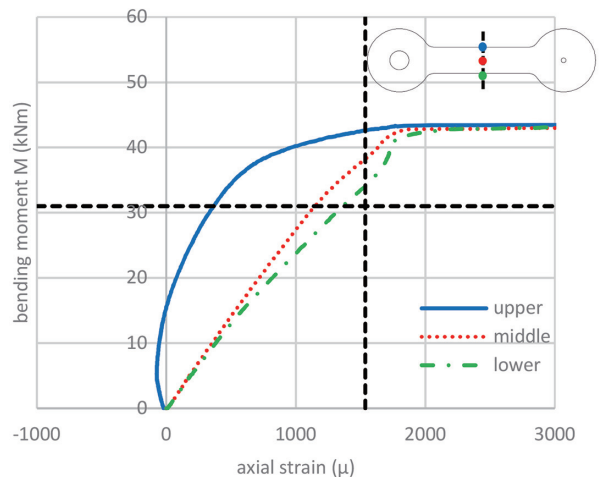


図14 NMW® 継手曲げ試験結果 (ひずみ履歴)
Strain history of NMW joint bending test

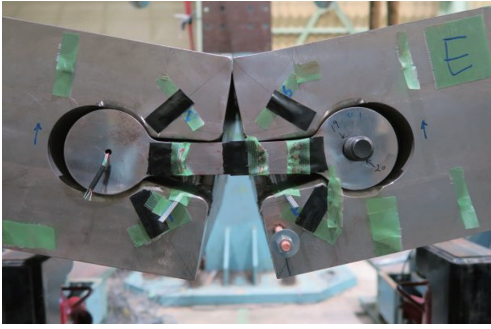


写真3 NMW® 継手曲げ試験結果（破壊状況）
Ultimate state of NMW joint bending test

が継手に作用したとき、軸部に発生するひずみは全て鋼材の降伏ひずみ以下であり、継手構造モデルにより部材マイクロ挙動を安全側に評価できていると言える。また、軸部ひずみは上端、中央、下端の順に大きくなっているが、基本的には全断面引張領域にあり、回転を拘束しないことでダブル継手の負荷を低減できていることが分かる。さらに、降伏曲げモーメント以上の領域では、3点のひずみはほぼ等しくなり、全断面等引張状態になった。

(3) 破壊モード

載荷試験後の継手状況を写真3に示す。軸部が大きく伸び変形しているが、鋼材や溶接部に割れなどの異常は観察されず、脆性的な破断あるいは継手の抜け出しは発生しないことが確認された。

3.3.4 セグメント継手評価のまとめ

NMW®のセグメント継手耐荷性能について、継手曲げ

試験により確認された主要事項を以下にまとめる。

- 1) 継手構造モデルにより安全側に耐力を評価できる。
- 2) 部材マイクロ挙動は、継手構造モデルにより安全側に評価できる。
- 3) 終局状態においても脆性的な破壊や継手抜け出しなどは生じない。

4. おわりに

近年のシールドトンネル全体の需要規模は、下水道や主要地下鉄網の整備がほぼ完了したことを受けて漸減傾向にあるが、都市部渋滞解消のための高速道路網整備、地下鉄延伸、さらには激甚化する豪雨対策としての地下河川整備など、地下空間利用ニーズは引き続き一定規模を維持するものと予想される。一方で、想定外自然災害に対する安心・安全の確保、さらなる長期供用を見据えたLCCの適正化など、シールドトンネルに対するニーズはより高度化していると考えられる。日本製鉄はこれらのニーズに応えるべく、NMセグメント®、NMW®という嵌合方式合成セグメントラインアップを中心に、さらなる製品開発、市場への提案活動を今まで以上に強力に推進していきたい。

参考文献

- 1) 土木学会トンネル工学委員会：熊本地震調査特別小委員会報告書，2018年7月
- 2) 首都高速道路(株)：首都高速道路の大規模更新・修繕及び機能強化に関する技術検討委員会資料，2022年1月
- 3) 日本トンネル技術協会：トンネルと地下，50，773(2019)



中島正整 Masanari NAKASHIMA
厚板・建材事業部 建材開発技術部
土木建材技術室 土木技術第三課 首席主幹
東京都千代田区丸の内2-6-1 〒100-8071



佐田 崇 Takashi SADA
厚板・建材事業部 建材開発技術部
土木建材技術室 土木技術第三課 主幹



永尾直也 Naoya NAGAO
厚板・建材事業部 建材開発技術部
土木建材技術室 土木技術第三課長