

新型合成セグメントの設計について

The report about the design method of a new composite segment

渡邊崇志¹⁾・向野勝彦²⁾・鈴木義信³⁾・滝本邦彦⁴⁾・白土正美⁵⁾

Takashi WATANABE, Katsuhiko MUKUNO, Yoshinobu SUZUKI, Kunihiko TAKIMOTO, Masami SHIRATO

In recent years, interest to automatic joints and segments of internal smoothness has grown in shield tunneling from the viewpoint of improvement of construction efficiency and Abbreviation of 2nd lining. Furthermore, discharge channel requests the strength of the main parts of shield segments and joints against higher inner hydraulic pressure. In this time, we developed the new composite (DRC) segment that fills above demands and applied to the Metropolitan Area Outer Discharge Channel.

In this paper, we report the design method of the new composite (DRC) segment made clear from an experiment result in each place and the result of simulation analysis.

Key Words: tunnel, hybrid segments, ductile, reinforced concrete

1. はじめに

近年、シールドトンネルでは、大深度・大断面化する一方、二次覆工の省略、施工の合理化などの観点から、セグメント（一次覆工）における「高強度」、「完全内面平滑」、「継手の自動締結による高速施工化」のニーズが高まっている。また、地下河川等のトンネルでは、内水圧による引張力に対してセグメント本体および継手の高剛性と確実な止水性が要求され、道路トンネルや鉄道トンネルなどでは合理的なトンネル断面形状として非円形も検討されており、さらなるセグメント本体および継手の高強度・高剛性が要求されている。

これらのニーズに対応するセグメントとして、著者らは、新型合成セグメント（以下、DRCセグメント（=Ductile and Reinforced concrete segment）と呼ぶ）を考案し、首都圏外郭放水路第4工区トンネル新設工事の全線に採用された。著者らは、各種の実物大構造実験と補足的に実施したシミュレーション解析などで得られた知見を基に、本セグメントの本体構造に関する剛性評価の考え方をまとめたので、本論文でその設計方法を提案する。

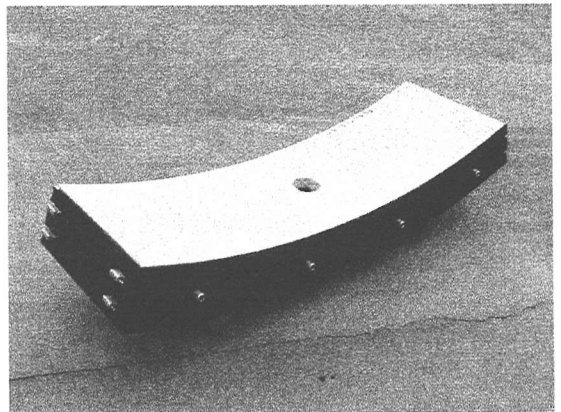


写真-1 DRCセグメントの概要

- 1) 正会員 ㈱クボタ 素形材事業部 素形材技術部
- 2) 正会員 ㈱クボタ 素形材事業部 素形材技術部
- 3) 正会員 鹿島建設㈱ 土木設計本部 プロジェクト設計部
- 4) 正会員 鹿島建設㈱ 土木設計本部 プロジェクト設計部
- 5) 国土交通省 関東地方整備局 江戸川工事事務所

2. DRCセグメントの概要

DRCセグメントの本体構造を、図-1に示す。本セグメントは、ダクトイル鋳鉄と鉄筋コンクリートを配力筋やダクトイル鋳鉄の一体成型による補強リブを配置することで、コンクリート、鉄筋およびダクトイル鋳鉄を一体構造とした合成セグメントである。以下に本体構造の特徴を示す。

- ①合成構造の実現による優れた断面性能により、高耐力・高剛性を確保し、セグメントの薄肉化が可能。
- ②トンネルの内面側に、コンクリートを充填することで内面平滑化を実現。
- ③耐久性の高いダクトイルセグメントの内面にコンクリートを充填し、耐久性と防食性をより一層強化。
- ④5面をダクトイル鋳鉄で囲まれているため、高い水密性を確保し、組立時の欠け落ちが生じない。
- ⑤セグメント継手およびリング継手は、セグメント組立時に推力ジャッキにより押し込むだけで締結が可能な、ASジョイント^{1), 2), 3), 4), 5), 6)}およびアンカージョイント^{2), 3), 4), 5), 7)}を用い、ボルトボックスによる断面欠損部をなくした。

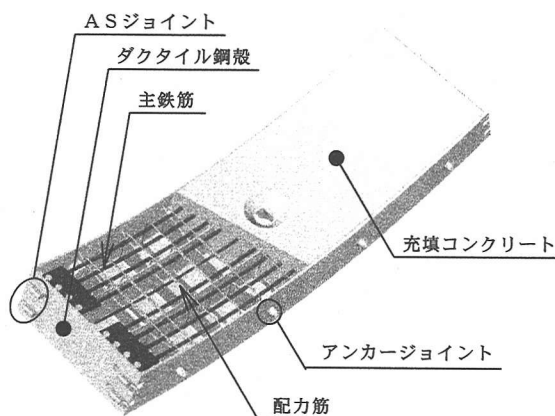


図-1 DRCセグメントの概念図

3. DRCセグメントの設計について

DRCセグメントは、ダクトイル鋼殻の中に鉄筋を配置し、コンクリートを充填したセグメントである。積極的なジベル等によるせん断ズレ止めを行っていないが、鋼殻内部の補強リブや配力筋を鋼殻に固定していることにより合成構造として挙動することを実験により確認した。

そこで、断面力算定時の「本体の曲げ剛性」について、実験的手法と解析的手法の両面から検討するとともに、合成構造とするために必要とされる「補強リブ」および「配力筋」の配置設計についても、実験結果とそのシミュレーション解析結果から得られた知見より、設計手法の提案を行った。

また、応力度照査時の「本体の断面性能」は、鉄筋コンクリート理論（以下、RC理論と呼ぶ）の一部に修正を加えた計算式により応力度照査ができることを、実験的手法から実証した。

(1) 試験供試体と载荷試験の概要

試験方法は、図-2に示すように、2点集中载荷（支点間距離 3400mm、载荷間距離 1000mm）による単純曲げ試験とし、正曲げ（ $P=3645\text{kN}$ 、 $M=2187\text{kN}\cdot\text{m}$ ）、負曲げ（ $P=4145\text{kN}$ 、 $M=2487\text{kN}\cdot\text{m}$ ）ともに部材耐力相当の荷重まで载荷を行った。

本試験に用いた供試体は、桁高 450mm×幅 1200mm、長さ 3800mm のダクトイル鋳鉄製の鋼殻に、D32 の主鉄筋 8 本を長手（＝円周）方向に、配力筋 14 列（＝28 本）をセグメント幅方向に配置し、設計基準強度 $\sigma_{ck}=30\text{N/mm}^2$ のコンクリートを充填した実大平板供試体とした。

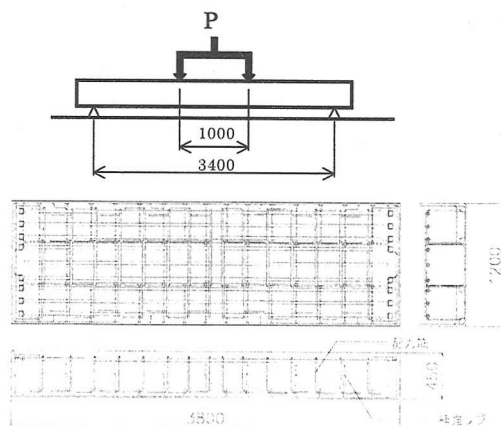


図-2 実験に使用した平板供試体 【単位：mm】

(2) シミュレーション解析の方法

実験による荷重試験をシミュレートするために、図-3に示す接点数482の材料非線形の有限要素法による解析を行った。

解析に用いた、材料特性は図-4に示すように、ダクタイル鋳鉄とコンクリートの材料特性を非線形に設定している。

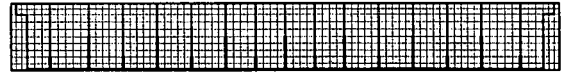


図-3 シミュレーション解析のモデル

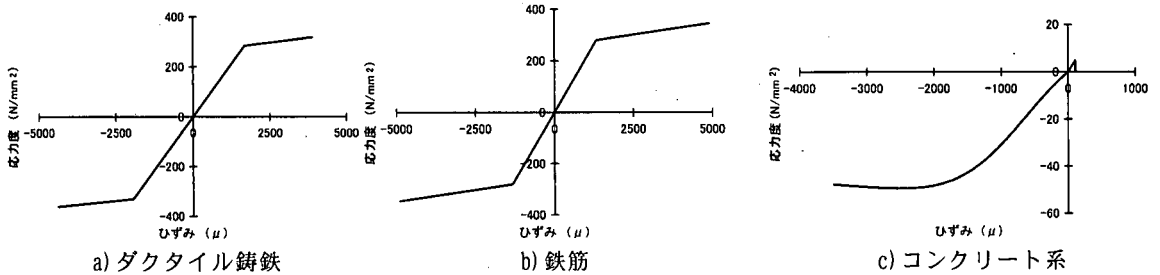


図-4 解析に用いた物性値

(3) 断面力算定時の曲げ剛性の設定方法

DRCセグメントは、前出のようにダクタイル鋳鉄とコンクリートの合成構造であるため、本体の曲げ剛性の評価が重要な課題の一つであった。鉄筋コンクリートの場合、コンクリートに対して鉄筋の占める割合が小さいため、断面力算定時には、コンクリートの矩体と仮定した曲げ剛性を用いて鉄筋を無視している。しかし、DRCセグメントの場合、鉄筋とダクタイル鋳鉄を合わせた断面積比が、全体の8%近く（今回の供試体は7.89%）を占めるため、この影響は無視できないことが予想される。

そこで、コンクリートの矩体とダクタイル鋳鉄を実ヤング係数比でコンクリートの等価断面の梁に換算した計算値と、平板供試体の単純曲げ試験の結果、さらに、材料非線形でモデル化した解析の結果を図-5（正曲げ）および図-6（負曲げ）に示す。

図-5、6のグラフより、正曲げ、負曲げともに、弾性域における計算値、終局時付近までのシミュレーション解析の値と実験値が近似していることが確認できる。

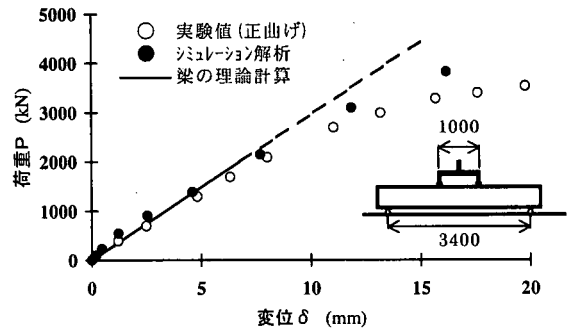


図-5 荷重と変位の関係（正曲げ）

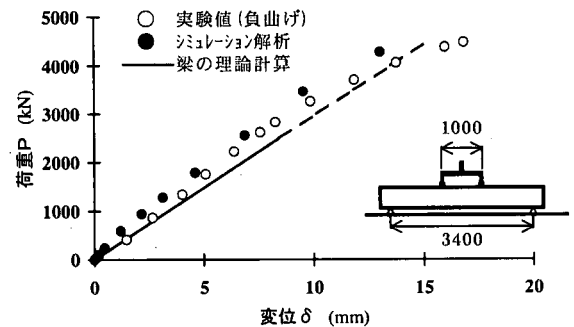


図-6 荷重と変位の関係（負曲げ）

(4) 配力筋の設計

DRCセグメントの「配力筋（以下、スターラップと呼ぶ）」は、主鉄筋と直角方向に配置し、曲げに対しての充填コンクリートの鋼殻からの抜け出しを防ぐ機能を有している。そこで、スターラップは、以下に示す設計を行う必要がある。

セグメントに作用する腹圧力 u （図-7参照）は、主鉄筋の有効断面積を A_s 、主鉄筋の許容応力度を σ_{sa} 、主鉄筋の本数を n 、鉄筋までの半径（≡セグメント内面までの半径）を r としたとき、次式により求められる。

$$u = \frac{z}{r} = \frac{A_e \cdot \sigma_{sa} \cdot n}{r} \dots\dots\dots \text{式 1)}$$

スターラップには、安全側を考慮して円周方向のピッチ ℓ 分に相当する全腹圧力が作用するものとして、次式によりスターラップの応力度 σ_{sirp} を算定することができ、この値が許容応力度 $\sigma_{sa-sirp}$ に収まるようにスターラップの径とピッチを設定する必要がある。ただし、式中の A'_e は、スターラップの有効断面積とする。

$$\sigma_{sirp} = \frac{u \cdot \ell}{A'_e} \leq \sigma_{sa-sirp} \dots\dots\dots \text{式 2)}$$

式2)の計算値と実験値およびシミュレーション解析値の比較を図-8に示す。実験値およびシミュレーション解析値は、いずれも初期のひずみが式2)の値より小さいが、これは、充填コンクリートと鋼殻部の摩擦による影響であると推定できるため、設計では安全側の評価となる式2)を採用して問題ないとする。

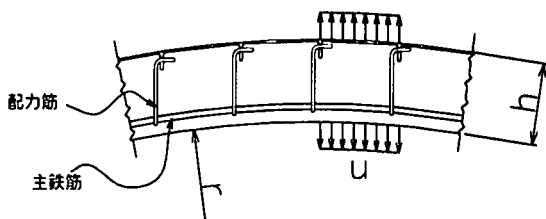


図-7 腹圧力の概念図

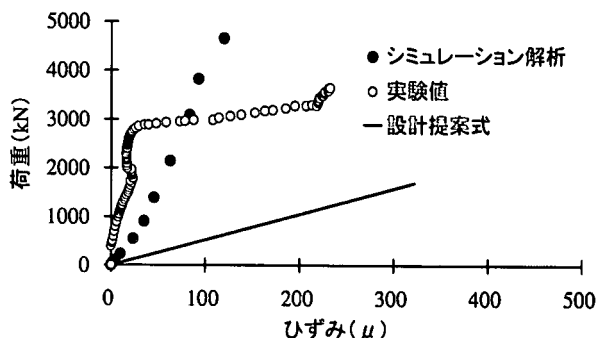


図-8 荷重とひずみの関係

(5)補強リブの設計

DRCセグメントの補強リブは、図-9に示すように、構造上の「縦リブ」として機能するが、スキンプレートと一体化しているため「シアコネクタ」として機能すると考えられる。そのため、シアコネクタとしての必要量、ジャッキ推力に耐える縦リブとしての必要量、また、製作上の必要量から最大となるものを採用する必要があるが、本論では、純粋に合成構造のせん断力を伝播するためのシアコネクタとしての必要量の検討方法を以下に述べる。

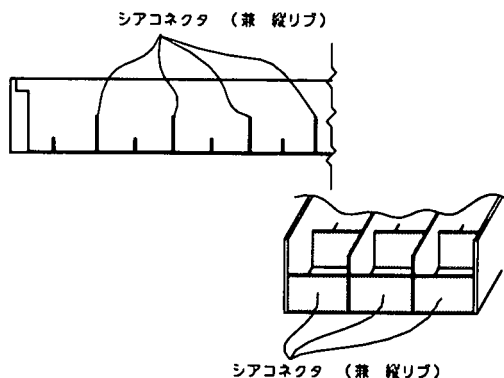


図-9 補強リブの概念図

今回のDRCセグメントは、シアコネクタが本体構造と一体鋳造されているため、従来のシアコネクタ⁷⁾とは、剛性や変形拘束といった点で相違がある。また、トンネル用セグメントという特性上、桁高全域に渡ってシアコネクタにせん断力が作用することは稀であり、シアコネクタがセグメント桁高の半分程度の高さまでである場合には、コンクリートのパンチシア型の破壊現象も生じにくいと考えられる。そこで、本セグメントのシアコネクタは、既往の研究⁸⁾などの「部材直角方向に配置されているせん断補強鋼板」に相当すると考えられるため、接合部の直接せん断耐力をせん断伝達耐力とすることができると推定する。

そこで著者らは、シアコネクタの直接せん断力による設計法の提案を行う。

シアコネクタに作用するせん断力は、図-10に示すように、スキンプレートに作用する引張力がセグメントの中立軸に向かって0になるように作用する分布荷重と、隣接するシアコネクタに作用するそれとの差分と考えられ、次式で表せる。

$$S = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{2} \cdot \frac{h}{2} \cdot w \dots\dots\dots \text{式 3)}$$

この時、 h はセグメントの桁高を示し、 w はセグメントの幅を示す。なお、計算の簡略化のために、中立軸の位置をセグメントの桁高中央とした。一方、シアコネクタと本体の取り合い長を ℓ_{sc} 、取り合い部の部材厚さを t_{sc} 、スキンプレートの許容応力度を σ_a としたとき、シアコネクタに発生する応力度 σ_{sc} は、式4)で表せる。なお、設計上は、シアコネクタの個数を n_{sc} とし、引張力の作用位置を特定せずに式5)で照査するのが適している。

$$\sigma_{sc} = \frac{S}{\ell_{sc} \cdot t_{sc}} \quad \dots\dots\dots \text{式 4)}$$

$$\sigma_{sc} = \frac{\sigma_a \cdot h \cdot w}{4 \cdot \ell_{sc} \cdot t_{sc} \cdot n_{sc}} \quad \dots\dots\dots \text{式 5)}$$

実験のシミュレーション解析結果と、式4)の計算結果を比較した結果を、図-11に示す。

位置①および②は、式4)と同様の傾向を示し、安全側の値となる式4)の妥当性が確認できた。

なお、等曲げ区間の位置③および④にはせん断力が作用せず、シミュレーション解析の結果からもそれを確認できた。なお、一般的には、鋼殻製作上の必要となる縦リブが最大となることが多い。

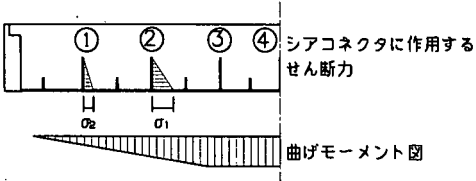


図-10 シアコネクタに作用するせん断力

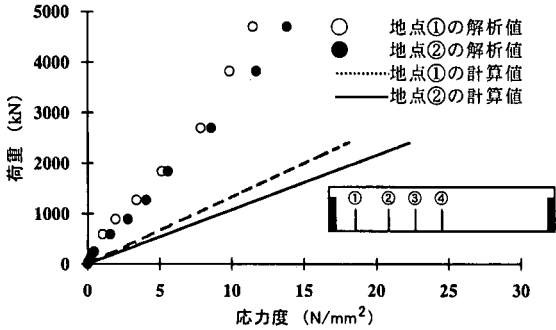


図-11 シアコネクタの応力度

(6)セグメント本体断面の応力度照査

DRCセグメント本体断面の応力度照査において、圧縮域のダクタイル鋳鉄、鉄筋およびコンクリートと、引張域のダクタイル鋳鉄および鉄筋を強度部材とする断面で、弾性域では、面内保持が保たれているものとして応力度の算定を行う従来のRC理論を採用できるかを、実験的手法を基に検討した。

ただし、以下の点で、RC理論に修正を加えた。

- ①ダクタイル主桁が桁高方向に連続しており、中立軸を境に圧縮から引張へ変化する構造であるため、中立軸の位置によって、圧縮域および引張域の部材の断面積を変化させる計算を行った。
- ②鋼材比（＝ダクタイル鋳鉄と鉄筋の合計した断面積のコンクリート断面積に対する比）が大きく、内・外径の断面性能のバランスが不均等であるため、核内作用の限界を「桁高の1/6以内」とする計算式を用いずに、理論による核内・格外作用の判定を採用した。
- ③コンクリート断面は鋼材比が大きいため、鋼材による欠損を考慮した。

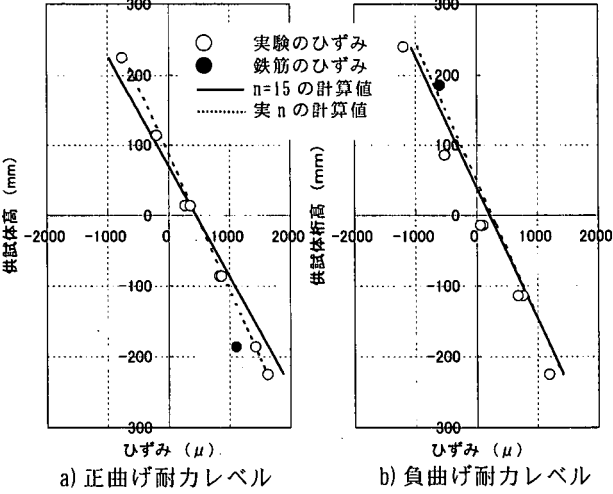


図-12 断面のひずみと計算値の比較

以上の修正を行った計算結果と、実験から得られた断面内のひずみ分布の比較を図-12 a), b)に示す。実験から得られたひずみ分布は、正曲げ、負曲げともに、耐力レベルまで線形を示し、また、計算値と一致していることが確認できた。なお、ヤング率比を実ヤング係数比とした場合の計算結果と、RC理論

で良く使用される値（＝コンクリートと鉄筋のヤング係数比 $n=15$ を基にダクタイルの弾性係数を換算した値）で比較した場合、後者の方が安全側の結果となる。

これらの結果より、RC理論に上記3点の修正を加えた計算方法で、DRCセグメントの応力度照査が可能であることを確認した。

4. 終わりに

今回の検討より、DRCセグメントにおける本体構造の設計は、以下の手法で行うことが妥当であることを確認できた。

- ①実験的手法および解析的手法の検討結果から、実ヤング係数比を用いて等価断面換算した断面性能を用いることで荷重と変位の状況をよく表現できるため、断面算定時の断面性能は、この値を用いることが妥当である。
- ②合成構造を実現するためには、充填コンクリートとダクタイル鋳鉄による鋼殻との一体化が必要であるが、これは、数値解析的手法から前出の式2)によるスターラップの設定と、式5)によるシアコネクタの設定をするのが妥当である。
- ③セグメント本体部の応力度照査は、従来のRC理論にいくつかの修正を加えた手法で計算するのが妥当である。なお、ヤング係数比は、従来どおりのコンクリートと鉄筋のヤング係数比 $n=15$ を基にダクタイルの弾性係数を換算するのが安全側の設計であり妥当である。

5. 謝辞

本研究を進めるにあたり、種々のご指導・ご助言をいただいた早稲田大学・小泉 淳教授に厚く御礼申し上げます。また、施工にあたり多大なご協力をいただいた鹿島・飛島・西松 特定建設工事共同企業体の関係の皆様方に深く感謝の意を表します。

6. 参考文献

- 1) 石川 幸彦, 渡邊 健, 佐藤 宏志, 宮武 順一, 石井 悟: ダクタイルセグメント用トンネル軸方向挿入型継手構造の開発 (その1), 土木学会第50回年次学術講演会, pp1236, 1237, 1995.
- 2) 石川 幸彦, 渡邊 健, 向野 勝彦, 奥山 恵昭, 佐藤 宏志: ASジョイントセグメントの施工試験, 土木学会第51回年次学術講演大会, pp278, 279, 1996
- 3) 中島 誠三, 秋山 信次, 八坂 光洋, 佐藤 宏志, 向野 勝彦: トンネル軸方向挿入型ダクタイルセグメントの開発: トンネル工学研究論文・報告集第8巻 pp40, 41, 1998
- 4) 中島 誠三, 渡邊 健, 八坂 光洋, 佐藤 宏志, 辻本 和則: ASセグメントの試験施工 (その1) 組立, 土木学会第53回年次講演大会, pp284, 285, 1998
- 5) 中島 誠三, 渡邊 健, 八坂 光洋, 今野 勉, 青木 敏行: ASセグメントの試験施工 (その2) 計測, 土木学会第53回年次講演大会, pp286, 287, 1998
- 6) 石川 幸彦, 渡邊 健, 辻本 和則, 宮武 順一, 吉野彰一: 自動アンカージョイントの開発: 土木学会第51回年次講演大会, pp270, 271, 1996
- 7) 上田 多門, チン チー キオング: 形鋼シアコネクタのせん断強度, 第2回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, pp149, 156, 1989
- 8) 鋼コンクリートサンドイッチ構造設計指針 (案), 土木学会