

突合せ構造をしたセグメントピース間継手の評価方法と 設計手法に関する提案

A proposal for the evaluation and design method of butt joint structure segment.

松本清治郎¹⁾・古市耕輔²⁾・桑原泰之³⁾・藤野豊⁴⁾・佐久間靖⁴⁾

Seijiro MATSUMOTO, Kousuke FURUICHI, Yasuyuki KUWAHARA, Yutaka FUJINO, Yasushi SAKUMA

Recently, rapid assembling of segments and elimination of secondary tunnel lining are recommended. To satisfy these requirements, we have developed a new type reinforced concrete segment called "QB segment" which is bolt less type and flat shape inner section.

The longitudinal joints of QB segment are not connected. The joints are simply butted; therefore erection time can be reduced.

We intended to adapt the design method of segment using beam-spring model to simplify the calculation. The studies are executed by comparing tests results, theories and analyses, based on axial force parameter, using a full-scale flat segment.

The study reached to the proposal that beam-spring model functions in accordance with axial compression stress, reducing the rotation spring ratio calculated by Betongelenke formula.

Key Words : shield tunnel, QB segment, rapid assembling, elimination of secondary lining, flat shape inner section

1. はじめに

近年のシールド工事では、コストダウンを主目的とした「高速施工」、「二次覆工省略」のニーズが高まっている。このようなシールド工事を取り巻く環境を考慮して、筆者らは、高速組立てに適した内面平滑型のRCボルトレスセグメント（QBセグメント）を開発した。^{*1), *2)}

新型セグメントのセグメント継手は、継手部に締結材を配置しない「突合せ構造」であり、一般に継手部の回転剛性は“継手部の寸法と円周方向に作用している断面力に依存する”と考えられており、地質条件等により当該セグメントに発生する応力・変形特性（特に突合せ継手部）が十分に把握できていない場合、厳密には設計の都度、覆工全体のモデル化を通じた詳細な解析を行ってセグメントの仕様を決定する必要が生じ、多大な労力が必要となる。

従って、セグメント設計の効率化のため突合せ構造に着目したケーススタディーを実施し、従来の検討手法に立脚（梁－バネモデルによる許容応力度設計法）させた設計法への帰結を目指した。検討は、曲率半径無限大の実物大セグメントを用い、“軸力とその作用位置”をパラメーターとした、実験・理論・解析の比較を主体に行った。なお、セグメントリング間の継手は、汎用的なピン式継手を想定しているが、本報告においては特に論議を行っていない。

-
- 1) 正会員 鹿島建設(株) 土木設計本部
 - 2) 正会員 鹿島建設(株) 技術研究所
 - 3) 正会員 鹿島建設(株) 情報システム部
 - 4) 正会員 ジオスター(株) セグメント事業部

2. QBセグメントの概要

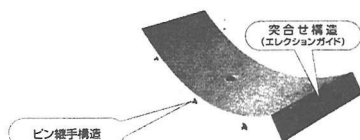
(1) QBセグメントの概要および開発方針

QBセグメントは、写真－1のようにセグメント継手を「突合せ構造」、リング継手を「ピン継手構造」とし、千鳥組による添接効果を有効に活用した、ワンパス方式の内面平滑型RCセグメントである。

従来の鋼板・短ボルト継手方式のセグメントに比べて、1)位置決めと締結を即時に行えることから、組立て時間の短縮が図れると共に、2)締結金具によるセグメント本体の断面欠損がないため、内面が平滑な仕上がりとなる。

既開発のWBセグメント*³⁾（工事適用実績3件）との大きな相違点は、セグメント継手にあり、リング方向に高い締結力が得られるコッター（Cotter）継手金物を配置しているWBセグメントに対し、コンクリート同士の突合せ構造としている点が対照的である。

なお、上記の相違点から、QBセグメントは適用範囲が若干限定されるものの、内面に露出する金物がなく、WBセグメントの特長に加えて更に耐久性・経済性に優れた点が、開発方針と言える。

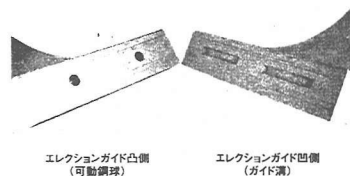


写真－1 QBセグメント(全体)

(2) 継手の構成と特長

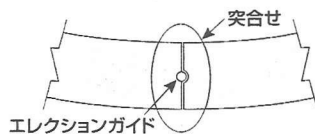
a) セグメントピース間継手

当該セグメントのセグメント継手は、上記の通りコンクリート同士の面接合である。また、既設ピースに押し当てることで、組立セグメントに倣って位置合せを容易にさせる、「エレクションガイド」と呼ぶ調芯機構を配置している。（写真－2、図－1参照）こうした突合せ構造とすることにより、セグメントの組立てを1工程のみの「1パス」セグメントとしている。



写真－2 セグメントピース間継手

なお、次章以降、「突合せ構造」に関し、継手部の寸法および継手部に作用する断面力から、コンクリート継手の回転剛性を導いた Leonhardt（レオンハルト）の Betongelenke（コンクリートの突合せ構造）に基づいた評価・検討結果に関して報告を行なう。



図－1 エレクションガイド説明図

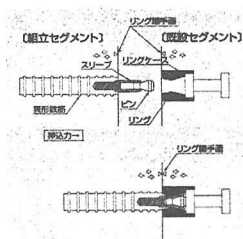
b) セグメントリング間継手

当該セグメントのリング継手は、地山条件やトンネル外径および耐震性能等の設計条件に応じて、WLP（ウェッジロックピン）などの任意のピン式継手の選択が可能と定義している。ここでは、以下にWLP継手の紹介を行なう。

WLP継手は、「くさび効果」によって締結させる機構であり、凸型金物を凹型金物に押し込むことでピンを介してスリーブが押し広げられ、凹側のリングとくさび結合して高い締結力が得られるものである。（図－2参照）

なお、凹型金物のテーパ付きリングは、リングケース内で可動できる構造となっているため、凸型金物の偏心挿入に対しても確実な締結が得られるとともに、セグメントの製作誤差や組立て誤差に対応できる。

また、WLP継手を用いたリング継手はせん断剛性およびせん断強度が大きいため、高い添接効果による合理的なセグメントの設計が可能であり、かつ引張剛性と引張耐力が大きいため、シール材の封入はもちろん、曲線施工時の引張力や地盤の不等沈下・地震力などが作用した場合の構造安定性においても優れた継手構造である。



図－2 セグメントリング間継手(WLP)

3. 突合せ構造に関する解析結果と実験結果の比較

(1) Betongelenke の理論式および適用性の検討

Betongelenke によると、図-3 に示す幾何学的関係から、継手部の回転角 θ は次式で与えられる。

$$\theta = \frac{\Delta S}{r} = \frac{1}{r} \cdot S \cdot \frac{\sigma_R}{E_0} \dots\dots\dots \text{①式}$$

また、①式で示される圧縮応力の影響範囲 S は、ほぞ幅 a と同一であると仮定した上で、力の釣合条件からセグメントピース間の回転ばね定数 K_θ として、②式を導いている。

$$K_\theta = \frac{M}{\theta} = \frac{N \cdot e}{\theta} = \frac{9 a^2 b E_0}{8} m (1-2m)^2 \dots\dots\dots \text{②式}$$

- ここで、 K_θ : 回転ばね定数 (N・m/rad)
 θ : 回転角 (rad)
 r : 圧縮力の作用範囲
 m : 荷重偏心率
 $m = e / a = M / (N a)$
 e : 荷重偏心量 ($e = M / N$)
 S : 圧縮応力の影響範囲
 σ_R : 圧縮縁応力度
 ΔS : 圧縮縁変形量
 N : 軸力 (N)
 M : 曲げモーメント (N・m)
 a : ほぞの幅 (m) <セグメント桁高>
 b : ほぞの長さ (m) <セグメント幅>
 E_0 : コンクリート弾性係数 (N/m²)

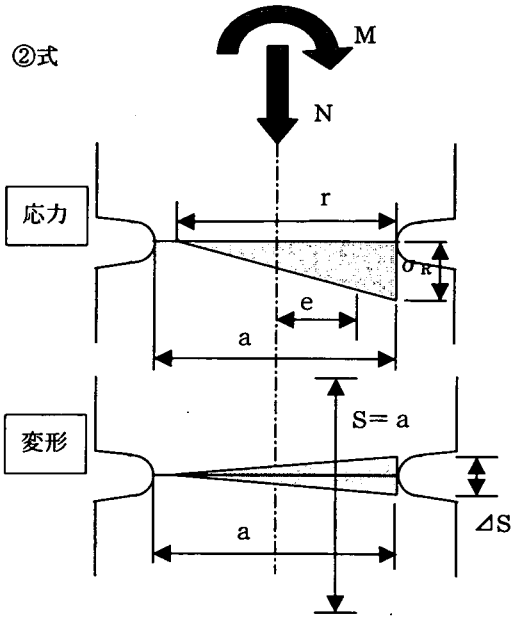


図-3 継手部の応力-ひずみ関係

次に、圧縮応力の影響範囲 S の仮定 ($= a$) に関し、次章で詳述する FEM 解析結果の一部を図-1 に示す。図は、突合せ接合面からの深さ d ごとに桁高方向のひずみ分布を整理したものであり、深さ 10cm ($= a / 2$) あたりから均一に分散していることが認められ、上記仮定の正否の確認がなされる。また、後述の図-10 においても、一般に用いられる「Betongelenke 式」と今回の FEM 解析の結果は、圧縮応力の影響範囲を同じとすることで、ほぼ同等の結果となることが確認できた。

以上より、Betongelenke 式は、コンクリートヒンジの支持挙動について実験的研究から導かれたもので、厳密には接合部の境界条件が異なるもの、後述する補正係数 α を考慮することを加味し、その使用に関する適用性については特に問題ないと判断された。

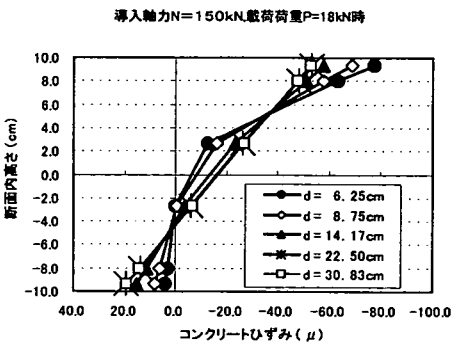


図-4 断面内ひずみ分布状況

(2) 検討ケースおよび検討モデル

突合せ構造の検討に際し、ケーススタディーを実施した検討ケースは、表－１に示すとおりである。また、載荷実験をシミュレートした解析検討（表－２参照）は、以下に示す２つの手法を用いて行った。

表－１ 検討ケース

検討ケース	解析モデル	検討条件	
		試験種別	導入軸力値 (kN)
No.1～ No.3	構造・材料非線形 フレーム解析	軸力導入 継手曲げ試験	150/300/ 450
No.4～ No.6	構造・材料非線形 FEM解析		
No.7	構造・材料非線形 フレーム解析	軸力導入 添接曲げ試験	600

※）今回の検討の桁高は、すべてT=200mmとした。

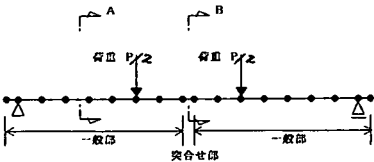
表－２ 解析に用いた物性値

鉄筋	$E_s = 2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$
PCケーブル	$E_p = 2.041 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$
コンクリート (弾性)	$E_c = 4.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
コンクリート (非線形)	$\sigma_c = 67.20 \text{ N/mm}^2, \epsilon_c = 2000 \mu,$ $\sigma_u = 63.00 \text{ N/mm}^2, \epsilon_c = 2300 \mu,$ $\sigma_t = 6.72 \text{ N/mm}^2, \epsilon_t = 3.00 \text{ N/mm}^2$

① ファイバーモデルによる構造・材料非線形フレーム解析

<使用プログラム：複合非線形フレーム解析プログラム SLAP>

解析モデルは、図－５に示す梁モデルであり、一般部および突合せ部の断面を図－６に示す。なお、一般部のモデル化については、道路橋示方書(耐震編)に従い、横拘束筋の効果を見込んだモデル化を行った。



図－５ フレーム解析モデル

<一般部：A断面>



<突合せ部：B断面>



図－６ 断面評価

② 平面応力２次元ソリッドモデルによる構造・材料非線形FEM解析

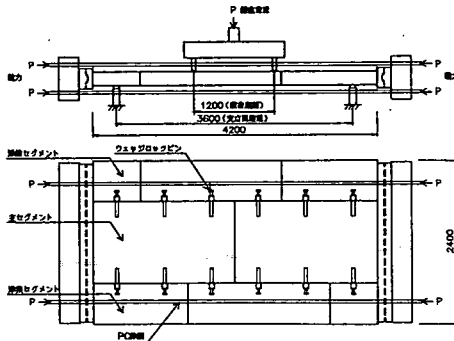
<使用プログラム：汎用構造解析システム ADINA>

解析モデルは、図－７に示した Mesh により構成されるソリッドな梁モデルであり、断面内の鉄筋については、主筋のみをトラス部材でモデル化し、帯筋については考慮していない。また、支承部は水平ローラーとし、突合せ部の境界条件は、対称条件とした。

実際の載荷実験に用いた供試体の基本形状は、(L)2100×(T)200×(B)1200の直方体（図－８参照）であり、セグメント継手部に、二重シール溝とエレクトロニクスのガイド溝を設けた。なお、配置する鉄筋およびリング継手は、それぞれD13×10 ($p_w = 0.68\%$)、M22 (8.8) 相当のピン式継手（ウェッジロックピン）とした。その他、検討ケースおよび材料物性値等の諸条件は、上記の解析ケースと合致している。



図－７ FEM解析モデル



図－８ 軸力導入曲げ実験概要図（添接条件）

(3) 解析結果と実験結果の比較

a) 継手曲げ試験

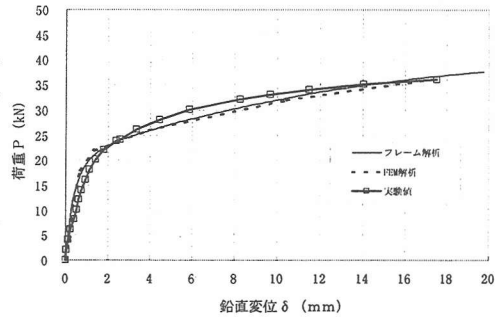
一連の検討ケースの中から、導入軸力 $N=150\text{kN}$ における、突合せ部の荷重－変位関係を図－9に、回転ばね定数－偏心量関係を図－10に示す。解析値と実験値の検討結果として、以下の事項が明らかとなった。

1. 突合せ部の荷重－変位曲線は、載荷初期の一部を除き、実験値が解析値を若干上回っている状態が確認されるが、全体的にはほぼ等しい履歴を示していると判断できる。

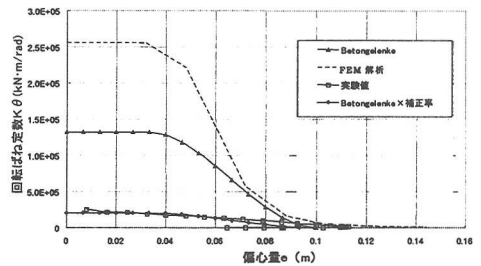
(図－9)

2. 回転ばね定数については、実験値（目開き変位量から算出）が解析値を大きく下回る結果となった。解析結果では全断面圧縮時に目開きの発生はないものの、実験においては載荷初期の段階から目開きの発生が測定された。(図－10)

3. 継手曲げ実験の終局状態は、すべての検討ケースにおいて、突合せ接合部の圧縮縁コンクリートの圧壊（かぶり厚さ部分）であり、軸力レベルが大きいほど剥離位置が桁の中央方向に移動する傾向が確認された。(写真－3)なお、継手部の補強鉄筋のひずみレベルは、圧壊時においても 150μ 程度であった。以上より、セグメントピース間を突合せ構造とする場合、隣接セグメントに対して十分な荷重の伝達が期待できる、添接効果の高いセグメントリング間継手を選定することが肝要であり、設計においては梁－バネモデルなどを用いた覆工構造全体としての評価を行う必要があることが判った。

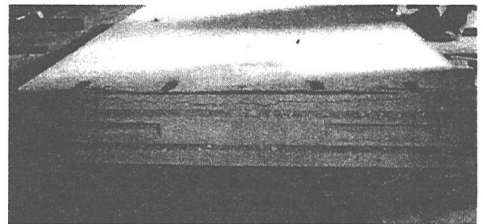


図－9 荷重－変位関係図



※図中のFEM解析における回転ばね定数の算定は、突合せ部から $(a/2 \times 1/2)$ の位置であり、Betongelenke式の算定位置 $(a/2)$ と同じとすれば、ほぼ同等の結果となる。

図－10 回転ばね定数－偏心量関係図

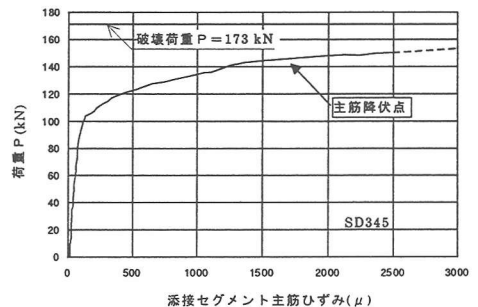


写真－3 突合せ面破壊状況
(継手曲げ実験)

b) 添接曲げ試験

添接曲げ実験においては、上記の脆性的な突合せ部の破壊と異なり、添接セグメント本体の引張鉄筋の先行降伏（図－11）を経て、最終的に同セグメント本体のコンクリート曲げ圧縮破壊に至った。また、リング間の継手部直下に大きなひび割れが発生するような不具合もなかったことから、千鳥組による適切な添接効果が得られるリング継手を選択すれば、セグメント間の継手に「突合せ構造」を採用しても延性的な破壊形態をもつ覆工構造体の提案ができることを検証した。

荷重－変位関係については、実験と解析（フレームモデル）結果において、終局荷重はほぼ一致するが、履歴については上記の継手曲げ試験ほどシミュレートすることができなかった。これは、セグメントの添接状況を完全に再現できていないモデル化上の問題であると推測される。



図－11 荷重－主筋ひずみ関係図
(添接曲げ実験)

4. 突合せ構造をしたセグメントピース間の剛性評価と設計法に関する提案

実験で得られた回転ばね定数が、理論値および解析値を下回る主要な要因は、実験供試体においては、解析などのように理想的に仮定された断面と異なり、製作精度の範囲であっても突合せ部の接触状況（表面粗度や面精度）が部分的であるためだと推測される。^{*4)} また、突合せ部の接触状況は、導入される軸力のレベルに影響されるものと考えられる。

図-12は、理論値（Betongelenke 式）と実験値の回転ばね定数の比率を、接合面に作用している軸圧縮応力度で整理したものである。現在のところ、図中のデータ数は少ないものの、高い相関性が確認できる。

以上より、縦軸の値を実現象に対する補正係数 α として、算出の容易な Betongelenke 式を用いた回転ばね定数を、梁-パネモデルへの入力値として利用することを提案する。^{*5)} 一般に、設計においては回転ばね定数が小さいと、千鳥組による添接効果からセグメント本体の発生断面力を大きく算出することとなるため、安全側の評価になると考えられる。

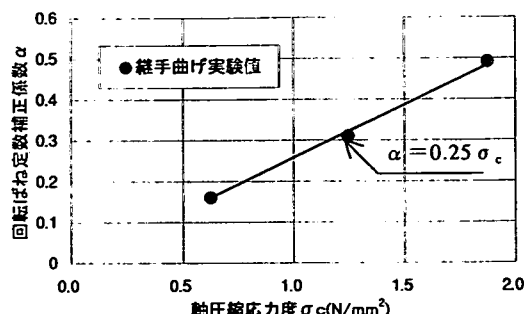


図-12 回転ばね定数の補正係数

5. おわりに

本報告では、設計で用いる回転ばね定数(k_j)の値を、「軸圧縮応力レベルに応じて Betongelenke 式より得られる回転ばね定数を低減した値とする」ことを提案した。本手法によると、梁-パネモデルを用いて、突合せ継手を有する覆工構造の合理的な設計（非線形回転ばね定数を用いた収束計算）が可能となる。

また、構造・材料の非線形特性を考慮したフレーム及びFEM解析は、実験とよく一致し、セグメントの耐力および破壊モードに関しても評価できる有効な手段である事が検証できた。

今後、データ数の充実や解析における添接効果のモデル化など、追加検討を実施し、評価精度の向上を図って行きたいと考えている。

参考文献

- 1) 山本 他：QB(クイックブロック)セグメントの開発（その1）
土木学会第54回年次学術講演会、VI-54、1999.9
- 2) 中川 他：QBセグメントの開発（その2）、（その3）
土木学会第55回年次学術講演会、III-B133、VI-43、2000.9
- 3) 中川 他：WB(ウェッジブロック)セグメントの開発（その1）、（その2）、（その3）
土木学会第53回年次学術講演会、IV-20、IV-21、IV-22、1998.10
- 4) 藤沼 他：軸力と曲げとを受けるセグメント継手の回転ばね定数に関する実験的研究
土木学会第54回年次学術講演会、III-B100、1999.9
- 5) 林：ほぞセグメントの力学特性およびその合理的製造方法に関する研究 博士論文、1996.9