

鋼管挿入式継手を用いたセグメントの大断面トンネルへの適用

Application of Segments with ANEX Joints To The Large Cross Section Tunnels

石井 昌次¹⁾、金子 研一¹⁾、石田 修²⁾、荒川 陽三³⁾、○川北 潤³⁾

Masatsugu ISHII, Kenichi KANEKO, Osamu ISIDA, Yozo ARAKAWA, Jun KAWAKITA

The purpose of this paper is to introduce the application of the ANEX Joints of segments for the large cross section tunnel such as $\phi 13\text{m}$ class in diameter. The applicable soil condition for this study is comparatively good such as Diluvium layer with sufficient overburden.

In the following study, the ANEX Joints turns out to be useful also in constructing the large cross section shield tunnels, compared with other conventional joints of segments.

Key Words: shield, segment, ANEX,

1. はじめに

近年、土木工事のコスト縮減が特に求められてきているが、シールドトンネル工事におけるコスト縮減対策としては、セグメントの改良による二次覆工の省略、シールド掘進の高速化、シールド掘進の長距離化などを旨とした様々な試みがなされている。また、地上・地下に構造物が輻輳した都市部における都市高速道路を築造する場合、非開削工法（シールド工法）が採用される事例が増加してきており、大断面シールドトンネルへの新しく開発された技術の積極的な適用が求められてきている。筆者らは、コストダウンの方法として二次覆工省略、高速施工に着目した新しい1パスセグメント用継手の開発を進めてきた。この研究・開発の対象である鋼管挿入式継手（ANEX）は次のような特長を有する。

- ①継手金物がトンネル内面に露出せず、金属部が腐食されないため二次覆工省略が可能である。
- ②ボルトボックス等の表面欠損部がなく、構造的に有利であり、また内面が平滑となる。
- ③継手が従来の継手と同等以上の強度や剛性を有しており、継手部の止水性や組立精度を確保できる。
- ④シールドジャッキの推力を利用してセグメントを組立てる1パスセグメントであり、ボルト締結の時間が不要なためセグメントの組立時間を短縮できる。
- ⑤継手部材が単純な構造であり、継手に要する費用が安価である。

本論文では、この新しい構造の継手の開発経緯と、この継手を用いたセグメントを掘削外径13m級の大断面シールドトンネルへ適用するために実施した設計検討について報告する。

2. 鋼管挿入式継手

鋼管挿入式継手（ANEX）とは、ボルトを使用せず、表面に特殊塗装を施した機械構造用炭素鋼管で製作された雄金物（アネクター）と雌金物（コンダクター）から構成され、シールドジャッキの推進力によりアネ

1) 正会員 大成建設株式会社 技術センター
2) 正会員 大成建設株式会社 東京支店
3) 成和コンサルタント株式会社

クターをコンダクターに挿入して締結される、摩擦嵌合方式のリング継手用のワンタッチ継手である。締結はコンダクターの内径より若干大きい外径のアネクターを、シールドジャッキの推力を用いて挿入することにより行われ、コンダクターの周囲に巻かれているポリエチレンフォームがアネクター挿入時の膨らみを吸収してセグメントのひび割れを防止する構造になっている（図-1）。リング継手用に開発された、シールドジャッキの推力により押し込むワンタッチ継手は数種類が提案され実際のシールドトンネルに適用されているが、この鋼管挿入式継手（ANEX）は、他の継手部材と比較して構造がより単純であるところに特徴がある。主な特長を整理すると以下の3点が挙げられる。

- ①ボルトの締結作業が不用：シールドジャッキ推力のみで組立ができるため、組立の高速化、自動化に適している。
- ②二次覆工の省略が可能：シールドセグメントの内面に露出金物がないため、内面が平滑となり、露出金物の腐食や金物を通じた漏水などが無い、二次覆工省略に適した継手部材である。
- ③配筋上の制約が少ない：継手金物、箱抜きが不要であるためセグメントの配筋や鉄筋の加工・組立が簡素化される。
- ④従来製品より安価である：他のリング継手部材と比較して構造が単純であるので、セグメント製作に占める継手の費用が安価となる。

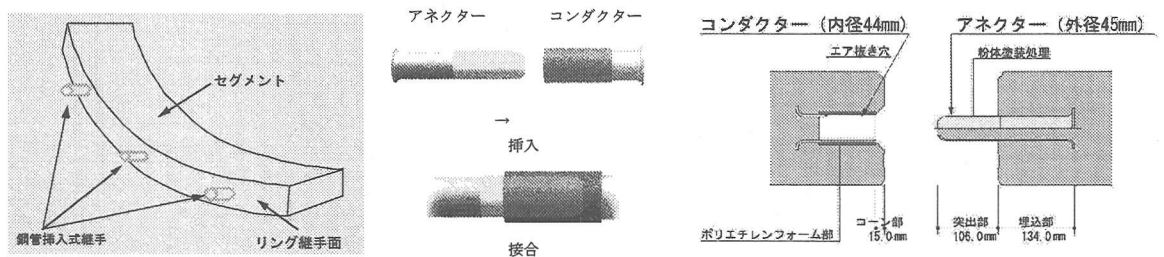


図-1 鋼管挿入式継手の概要図

3. 開発の概要

3.1 継手の基本性能確認試験

新しい継手構造の基本性能の把握、強度や力学特性を把握するための性能確認試験を実施した。この継手はセグメント1ピースあたり1～3箇所ジョイントでリング間の締結を行うものであるため、基本性能が重要な項目であり、基本性能確認試験の目的を以下のように設定した。

- ①本継手の特徴による所定の挿入力・引抜力を確認すること。
- ②せん断耐力の確認とせん断バネ定数の把握
- ③組立作業時における継手の施工性の把握

基本性能確認試験として、具体的には(a)要素実験（継手単体の挿入引抜試験）、(b)直材実験（コンクリートブロックに埋め込んだ継手の挿入・引抜試験、せん断試験）、(c)組立施工性実験（コンクリートブロックに埋め込んだ継手による調芯確認試験、偏心挿入試験、回転挿入試験、施工確認試験）を実施した。また、アネクターに塗布する粉体塗装の剥離実験や継手の腐食に関する検討も併せて実施した。

これらの実験や検討の結果を以下に概説する。この結果により、鋼管挿入式継手の基本性能の把握および本継手を用いたセグメントへの実用化可能性の確認を行うことができた。

①挿入・引抜き・せん断性能

通常、シールド機に装備される推進ジャッキ能力は1000kN以上であり、セグメント組立時にはジャッキ能

力の30% (300kN) 程度が使用されることから、継手1ヶ所当たりの必要挿入力を300kN以下と設定した。また、継手1ヶ所における所要引抜き力はシール材の反発力を100kNと設定し、安全率1.5を確保して150kN以上を目標としたが、要素実験、直材実験の結果、これらの目標値を満足することが確認された。また、最大せん断力105kN、せん断バネ定数8000kN/mを確認した。図-2に主な試験結果を示す。

②施工性

継手中心を20mmずらした状態での挿入試験によりコンダクター先端部のコーン状に成形されたコンクリート部がガイドとなる調芯機能による締結の柔軟性を確認した。またこの調芯機能を抑制した条件で継手中心を4.5mmずらした状態での偏心挿入試験、試験体を5度傾けた状態での回転挿入試験などの実施工を想定した挿入試験により良好な組立性能を確認した。

③粉体塗装の剥離実験

アネクターに施されている粉体塗装の機能は、継手挿入時の鋼管同士の焼付き防止、安定した挿入力・引抜き力の確保、および防錆である。セグメント取扱いの理由で塗装が剥離した場合を考慮した要素実験を行ったが、剥離面積を50%とした場合でも挿入力、引抜き力は目標値を満足することが確認された。

④腐食

地山からの不測の侵入水にはアネクター周囲へのリングシール等に対応が可能である。

3.2 実証施工

基本性能確認試験により継手の特性を把握した後、実際のセグメント組立作業において、作業性が向上し組立時間が短縮できるとともに、組立精度が従来型セグメントと同等以上であることを確認するために、下水道幹線シールド工事において実証施工を実施した。実証施工の概要は次の通りである。

- ・セグメント外径 : $\phi 4300\text{mm}$
- ・セグメント厚さ : 200mm
- ・セグメント幅 : 1000mm
- ・セグメント分割数 : 6 (5+K)
- ・セグメント継手 : コンクリート突合せ
(ガイドンスロッド+組立ボルト)
- ・リング継手 : 鋼管挿入式継手 16ヶ/リング
- ・組立リング数 : 100リング

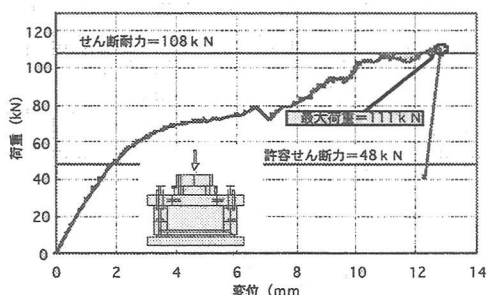
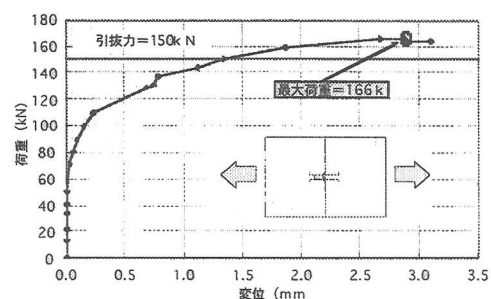
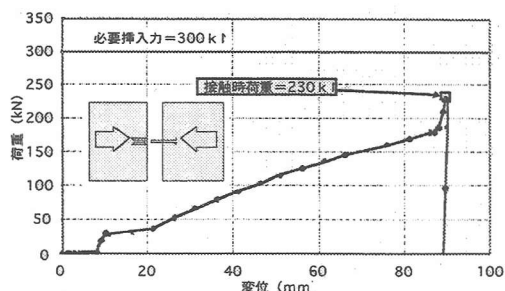
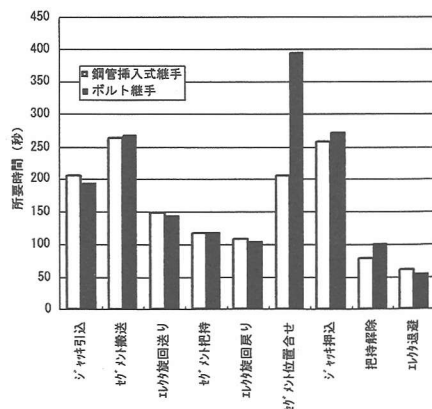


図-2 鋼管挿入式継手の実験結果



- ・土被り : 約 30m (水圧: 0.28MPa)
- ・土質 : 洪積砂質礫層

実証施工の結果、以下のことを確認した。

①組立時間について、シールドジャッキで押込むことにより容易に締結が可能であり、従来の金物式ボルト継手のセグメントと比較して、位置合わせ時間が約 40%短縮、セグメント組立時間が約 9%短縮（組立時間約 25 分）との結果を得ることができた（図- 3）。また、シールドジャッキの配置を工夫することでより大きな短縮効果が期待できると考えられる。

②セグメントの組立精度は高く、金物式ボルト継手のセグメントと比較して、真円度の変動範囲が小さく、真円度の平均値が向上した結果となった。また、目違い量、目開き量とも良好な結果となった（図- 4～図- 6）。

③リング間にはボルトボックスがないことから、セグメントの内面平滑性が良いことを確認した。

④セグメント組立時間の短縮効果により金物式ボルト継手のセグメントに比べて約 5%増の進捗が得られる結果が得られ、高速施工が可能となることにより、労務費、機械設備費等を低減するコスト縮減効果が確認された。

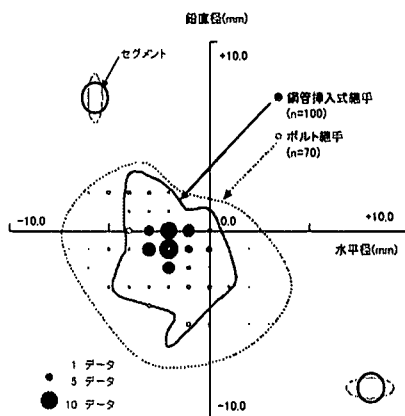


図- 4 セグメント真円度実績

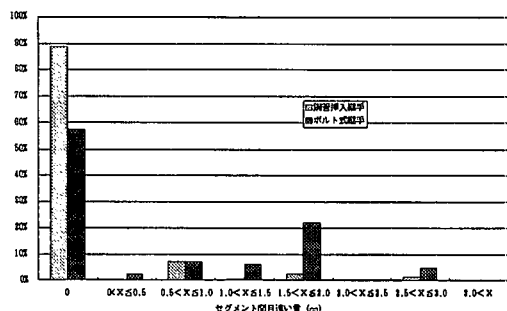


図- 5 セグメント間目違い量実績

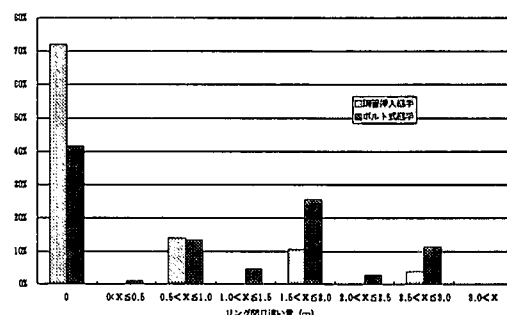


図- 6 リング間目違い量実績

4. 大断面トンネル用セグメントの設計

4.1 大断面トンネルへの適用

鋼管挿入式継手（ANEX）については、これまでに要素実験による基本性能の確認および中程度の断面のシールドトンネルにおける実証施工による有効性の確認を行ってきた。これらの成果を踏まえ、今後都市部において増加してくるシールド工法による大断面トンネルにこの継手形式を用いたセグメントを適用することを想定して具体的な設計検討を行った。対象とした条件として、東京の山の手地域の良好な地盤に 20～35m 程度の土被りでφ13m 級のシールドトンネルを考えた。その検討結果を受けて既往の同クラスの実績と比較することによりその特徴について考察を行った。

4.2 鋼管挿入式継手を用いたセグメントの設計

想定した地域の地盤は、地表部から関東ローム層、東京層、東京礫層、上総層群の土層構成とし、トンネル通過部の上半に東京層・東京礫層（N値>50）、下半に上総層群の砂層（N値>50）が分布しているものと

した。覆工は大断面シールドトンネルとしての適用性と実績より、二次覆工を行わないRCセグメントを前提とし、リング間継手として鋼管挿入式継手（ANEX）を用いるものとした。セグメント間継手はコンクリート突合せ方式とするが、セグメント組立時の安定を考慮、組立ボルト（継手1ヶ所あたり M24[6.8]×2 本）を配置する。設計土水圧は洪積砂礫層および洪積粘性土層が対象であることから土水分離で算定することとし、構造解析は継手剛性を忠実に評価するために近年大断面トンネルを中心に設計に用いられる実績が増加してきている梁バネモデル計算法を用いた。図-7 に代表位置の地質縦断面図を、図-8 に断面諸元を示す。

梁バネモデル計算法を用いた今回の設計手法の概要は以下のとおりである。①組立時の照査として自重解析を行い、最終応力状態は、自重解析での応力状態と土水圧作用時での応力状態の足し合わせとする2ステップ解析を行う。②セグメント継手の回転バネは、組立時および完成時で分けて算定する。組立時には組立ボルトを考慮して回転バネを定め、完成時は組立ボルトを考慮せず、レオンハルト（Leonhard）らによるコンクリートの継手理論に従って、軸力の偏心率により変化する非線型バネとして評価する。③リング間継手は上記の性能試験の結果に基づき設定した線形のせん断バネとして評価する。大断面セグメントに使用した場合においても個々の継手に作用する荷重の作用状態は変わらないと考えた。④千鳥組による継手の添接効果を2リングモデルにより評価する。⑤セグメント継手間はコーキング溝を除いて全断面有効の突合せ継手として回転剛性を検討し、通常の許容応力度法を用いて圧縮応力度の照査を行う。

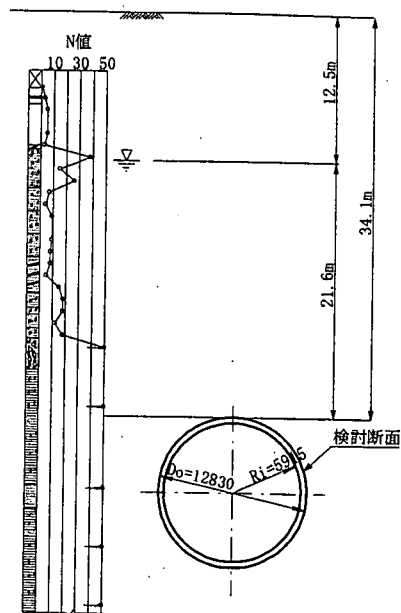


図-7 土質柱状図（代表断面）

〔セグメント断面諸元〕

- ・セグメント種類 : RC セグメント
鋼管挿入式継手タイプ（ANEX）
- ・コンクリート設計基準強度 : $f'_{ck} = 48\text{N/mm}^2$
- ・セグメント外径 : $D_o = 12,830\text{mm}$
- ・セグメント内径 : $D_i = 11,830\text{mm}$
- ・セグメント幅 : $B = 1,200\text{mm}$
- ・セグメント厚 : $h = 500\text{mm}$
- ・セグメント図心半径 : $R_c = 6,150\text{mm}$
- ・分割数 : 10 等分割（7A+2B+K）

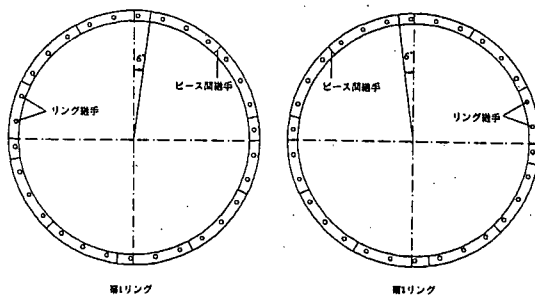


図-8 セグメント形状寸法

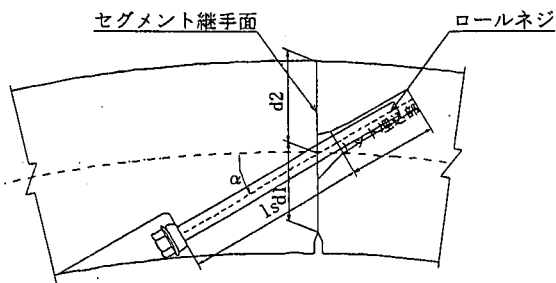


図-9 セグメント継手構造概略

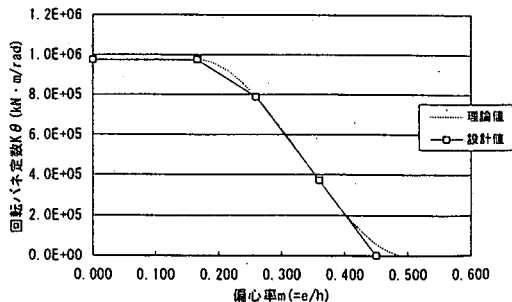
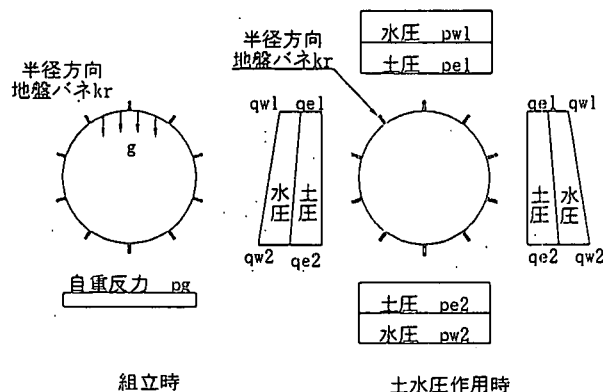


図-10 セグメント継手回転バネ（完成時）

設計においては、最大土被り位置と最小土被り位置の各々について地下水の変動を考慮した複数の荷重ケースを考慮して断面を決定するが、ここではそのうちの代表的な荷重ケースについて設計荷重図、断面力図、検討結果一覧を示す(図-11、表-1、表-2)。

設計荷重に示されるように今回の検討条件では主荷重のうち水圧の占める割合が比較的大きくなっている。また、完成時の断面力図によれば、側部の地盤反力により曲げ挙動が抑えられており、セグメント本体部、継手部の発生せん断力も小さくなっているなど、圧縮軸力が卓越する変形モードになっている。すなわち、偏心率により変化する突合せ型のセグメント間継手の剛性が大きく、千鳥組によるリング間継手部のせん断伝達力が比較的小さい状態で安定を確保できている挙動であると分析することができる。



・荷重一覧表

項目	記号	数値
荷重条件		
鉛直土圧	pe1	375.39 KN/m ²
鉛直水圧	pw1	216.27 KN/m ²
頂部水平土圧	qe1	132.12 KN/m ²
頂部水平水圧	qw1	218.77 KN/m ²
底部水平土圧	qe2	168.42 KN/m ²
底部水平水圧	qw2	342.07 KN/m ²
セグメント単位重量	g	13.00 KN/m
自集による底部反力	pg	40.84 KN/m ²
側方土圧係数	λ	0.35
地盤反力係数	k	50.0 KN/mm ³
継手特性		
セグメント間継手(組立時)	Kθ	14,000 KN-m/rad
セグメント間継手(完成時)	Kθ	975,000~0 KN-m/rad
リング継手	ks	8,000 KN/m

図-11 設計荷重図

表-1 断面力図

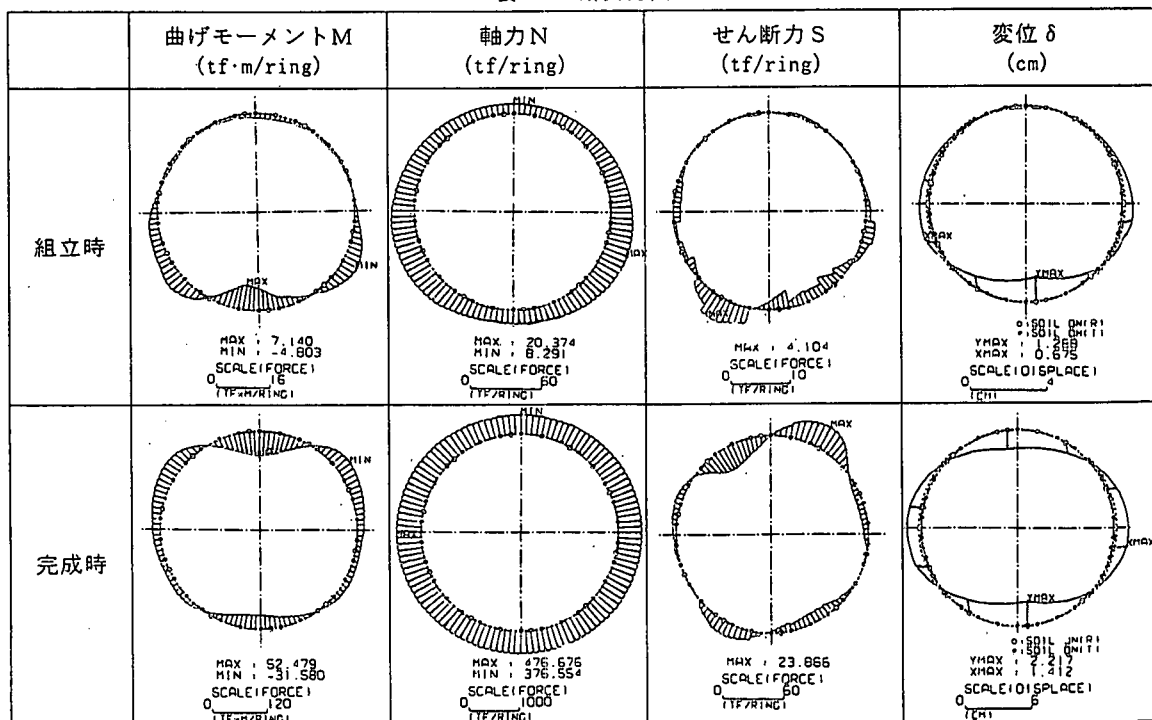


表- 2 検討結果一覧表

検討ケース				組立時				完成時			
				本体部		セグメント継手部		本体部		セグメント継手部	
検討位置				正曲げ	負曲げ	正曲げ	負曲げ	正曲げ	負曲げ	正曲げ	負曲げ
発生 応力度	コンクリート曲げ圧縮応力度	σ_c	N/mm ²	1.9	1.4	7.3	3.1	13.2	10.6	17.7	14.9
	鉄筋（ボルト）圧縮応力度	σ_s'	N/mm ²	16.3	14.2	-	-	157.1	136.3	-	-
	鉄筋（ボルト）引張応力度	σ_s	N/mm ²	37.0	15.8	303.2	41.9	18.1	-39.2	-	-
	コンクリート平均せん断応力度	τ_m	N/mm ²	0.1	0.1	-	-	-0.5	-0.5	-	-
	ボルト平均せん断応力度	τ_b	N/mm ²	-	-	60.4	60.4	-	-	-	-
許容 応力度	コンクリート曲げ圧縮応力度	σ_{ca}	N/mm ²	27.0	27.0	27.0	27.0	18.0	18.0	18.0	18.0
	鉄筋圧縮応力度	σ_{sa}'	N/mm ²	300.0	300.0	435.0	435.0	200.0	200.0	-	-
	鉄筋引張応力度	σ_{sa}	N/mm ²	77.7	77.7	435.0	435.0	77.7	77.7	-	-
	コンクリートの平均せん断応力度	τ_{ca}	N/mm ²	1.0	1.2	-	-	1.0	1.4	-	-
	ボルトの許容せん断応力度	τ_{ba}	N/mm ²	-	-	300.0	300.0	-	-	-	-
判定				OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
リング継手の最大せん断力/1箇所		Smax	KN	11.549				13.416			
リング継手の許容せん断力/1箇所		Sa	KN	72.000				48.000			
判定				OK				OK			

4.3 考察

シールドセグメントの継手構造を考えると、一般に軟弱地盤や曲げモーメントが卓越するような非円形断面、内圧が作用する場合などでは高い継手剛性が要求されるが、硬質地盤では高い剛性が必要とされず、リング間のせん断力の伝達を小さくできる。セグメントの継手構造に必要な強度、剛性は地盤条件の影響を受けるが、大断面トンネルの場合、セグメントの厚さが大きくなるのはもちろんのこと、継手構造も規模の大きなものとなる。逆に硬質地盤で高い剛性が必要とされない場合、継手構造に着目することにより、より合理的な設計が可能となる可能性がある。

シールド工法による大断面トンネルのRCセグメントに用いられた継手構造の実績と今回の検討結果を比較したものが表- 3 である。

表- 3 大断面トンネルのセグメント構造の実績比較

トンネル名	①今回検討セグメント	②東京湾横断道路	③外郭放水路	④首都高西新宿トンネル
主な地質	洪積層・土丹	軟弱粘性土層	洪積層	洪積層・土丹
セグメント 外径	φ 12.83m	φ 13.9m	φ 11.8～11.9m	φ 13.0m
セグメント形式※ セグメント厚	平板型 t=500mm	平板型 t=650mm	平板型 t=600～650mm	平板型 t=550mm
セグメント間 継手※	コンクリート突合せ式	通しボルト式継手 M36(10・9)×3本×2	タクトイル金物式継手 M36(10・9)×3本×2	鋼製金物式継手 M36(10・9)×2本×2
リング間 継手※	鋼管挿入式継手 (ANEX)	通しボルト式継手 M36(10・9)	ピン・ボルト併用方式 M30(10・9)	鋼製金物式継手 M36(10・9)
リング間 継手個数	30 箇所/ring	44 箇所/ring	36 箇所/ring	30 箇所/ring

※：セグメント形式、継手形式は代表的なものを記した。

従来の実績では、地盤条件による差はあるものの比較的軟質な地盤に計画されたトンネル(②)や特殊な荷重条件のトンネル(③)の場合セグメント厚が外径の4.6～5.5%と比較的厚くなっており、曲げモーメントにより部材各部が決定していると考えられる。この場合、セグメント間継手部が構造上の弱点となり易く、そのため構造上千鳥組による添接効果に大きく期待することにもなり、セグメント間継手部における曲げモーメントおよびリング間継手部におけるせん断力に抵抗するために比較的大きなボルトを用いた継手構造となっている。しかし、今回適用を検討したような硬質地盤の場合は、地盤反力が期待できること、水圧が主要

な荷重となることなどから軸力卓越型の断面力分布となり、コンクリート突合せ式のセグメント間継手が高剛性を発揮し、またリング間継手に必要となるせん断伝達力が比較的小さいため、比較的小型の鋼管挿入式継手で構造安定性を満足することができる検討結果が得られている。この結果、セグメント製作費のうち、継手の費用が従来型セグメントと比較して大きく低減できるとともに、ワンパス継手としての施工の高速化も実現できることが明らかとなった。

5. まとめ

鋼管挿入式継手（ANEX）の開発と性能試験による力学特性の把握、実証施工による施工精度・施工性の確認により、その有利性を確認した。さらに、大断面の都市道路トンネルへの適用を踏まえた設計検討により、従来型の金物継手式セグメントと比較して、単純な構造の継手構造で構造安定性を確保できることを確認し、大断面トンネルにおいても同継手の有利性が発揮される可能性があることが明らかとなった。

セグメントの継手構造は、適用地盤によりその要求性能が変化すると考えられる。曲げが卓越するような軟弱地盤の場合にはセグメント継手またはリング継手に高い剛性が求められるが、軸力が卓越するような比較的良質な地盤では継手構造は必ずしも高い剛性を必要としない。適用地盤にあったセグメント、継手構造の選択はシールド工事全体の安全性や経済性を考える際に重要な観点である。硬質地盤に大断面シールドを施工する場合には、鋼管挿入式継手は他の継手構造と比べて小規模な構造で必要十分な性能を確保できることが今回の検討で分かった。このことは、セグメント製作費の低減、施工の高速化、二次覆工の省略等による大きなコスト縮減効果が期待できるものである。

本論文が今後ますます増加してくると思われる都市部における大断面トンネルの計画の参考になれば幸いである。これらの成果は、(財)下水道新技術推進機構他との共同研究がその基本となるものであり、関係各位にこの場を借りて謝意を表します。

参考文献

- 1) (財)先端建設技術センター、先端建設技術・技術審査証明報告書「CONEX-SYSTEM」、1998
- 2) 石田、今井ほか：ANEX 継手の性能試験、土木学会第 53 回年次学術講演会第 6 部-23、1998.10
- 3) 石井、金子、畑野、北山、橋本：セグメントの二重螺旋形組立てによるシールドトンネルの構造、トンネル工学研究論文・報告集第 8 巻（土木学会）、1998.11
- 4) 今井、金子ほか：小型 ANEX 継ぎ手の開発、土木学会第 54 回年次学術講演会第 6 部-65、1999.9
- 5) (財)下水道新技術推進機構、リング間に鋼管挿入式継手を用いたセグメントの実用化に関する共同研究報告書、2001.3
- 6) 井上、白井、遠藤：東京湾横断道路実物大セグメントの力学的特性（その 1）実験結果、土木学会第 46 回年次学術講演会、1991.9
- 7) 宮尾、鴨下ほか：首都圏外郭放水路のシールド工事、トンネルと地下、第 30 巻 4 号（1999.4）
- 8) 春日、石田、土橋ほか：西新宿シールドセグメントの継手試験報告、土木学会第 55 回年次学術講演会、2000.9