

継手部に緩衝キーを設けたセグメントの施工報告

大塚正博¹⁾・綿引秀夫²⁾・園田徹士³⁾・名倉浩³⁾・萩原勉³⁾

Masahiro OTSUKA, Hideo WATAHIKI, Tetsushi SONODA, Hiroshi NAGURA, Tsutomu HAGIWARA

The segmental lining with the key lock around joints was used for the execution worker. In this segmental lining design, the suitable shape and the joint characteristic of the key lock were confirmed by the shearing experiments. As a result, it was judged that the key to 8–12mm in height and about 40mm in width was suitable. In the execution worker, the joint offsets, the joint gaps, and the crack were generated in the joint between rings in the vicinity of the springline at the curve in initial stage. However, after measures of the thoroughness in linear control etc. were considered, something wrong was almost lost, and can have done the thing to construct a good tunnel.

Key Words:key lock, segmental lining, joint, execution

1. はじめに

シールドトンネル工事では低コスト化、工期の短縮、品質の向上、安全性の向上などといった施工技術が近年大幅な進歩を遂げている。技術提案型、いわゆる V E 提案型の工事が急増しているのはその現れの一つといえる。環 7 東海松原橋管路新設工事(1 工区)に於いても V E 提案を導入し、その一つとして継手部に緩衝キーを設けたセグメントを国内で初めて採用した。本セグメントは緊締部周囲のコンクリートへの応力集中を継手面全体に分散・低減させることで、覆工の構造的な安定性と、経済性、施工性の向上を図ったセグメントである。本文は施工に先駆け緩衝キーの特性確認と最適な緩衝キー形状を決めるために行った継手部の基本性能確認試験、および実工事における施工結果について報告するものである。

2. 工事概要

(1) 工事概要

環7東海松原橋管路新設工事(1工区)は首都圏南部の電力需要に対応するために建設される地中送電用トンネル工事の内、東京都大田区東海4丁目～大田区平和島4丁目の延長約2.7kmの工事である。

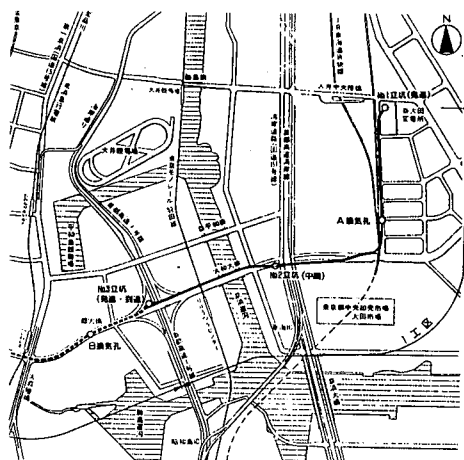


圖-1 路線圖

- 1) 正会員 東京電力株式会社 地中送変電建設所 大森工事事務所
2) 正会員 東京電力株式会社 東京南支店 流通設備部
3) 正会員 株式会社 間組 十木本部 都市十木統括部

本工区はφ7,100mmとφ4,850mmのセグメント外径の異なる大小のトンネル区間に分かれており、この内、セグメント外径φ4,850mm（延長960m）の区間に継手部に緩衝キーを設けたセグメントを用いた。この区間は路線の半分がR=150mの曲線施工で、路線上には東京モノレール、京浜運河、首都高などの重要構造物が近接する。曲線区間ではセグメント幅1,200mmのテーパセグメント(テーパ量ΔWT=65mm)とスタンダードセグメントの組み合わせにより施工を行った。図-2にシールド縦断面図を示す。

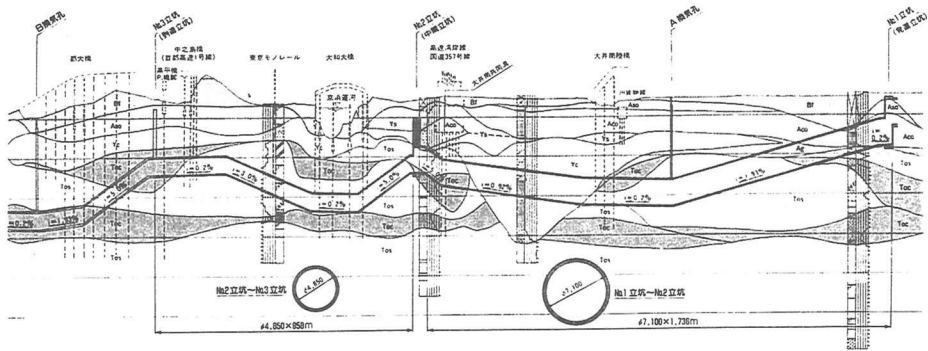


図-2 シールド縦断面図

(2)セグメント概要

この工事には図-3の継手部詳細図に示すような円弧状の「緩衝キー」を継手面に設けたR Cセグメントを用いた。セグメントの仕様を表-1に示す。

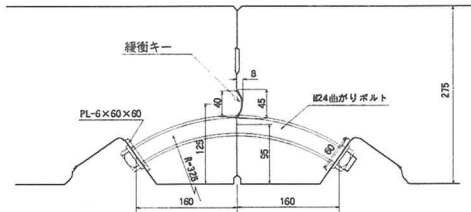


図-3 継手部詳細図(リング間)

表-1 セグメント仕様

本 体	種 別	緩衝キー付RCセグメント
	外 径	φ4,850mm
	桁 高	275mm
	幅	1,200mm
	分割数	6分割(5+K)
	コンクリート	σck=420kgf/cm ²
緩衝キー	主 筋	D19×4+D16×4(TYPE-D) D16×2+D13×6(TYPE-E)
	幅	凸側：40mm 凹側：45mm
	高 さ	セグメント間：6.5mm リング間：8.0mm
ボルト	種 別	曲がりボルト
	サイズ	M24
	強 度	セグメント間：8・8 (TYPE-D) 6・8 (TYPE-E) リング間：4・6

3. 基本性能確認試験

本セグメントの設計には継手部の力の伝達特性を考慮し、2リング梁ばねモデルによる設計方法を用いている。本工事のセグメント設計を行う際し、必要なセグメント間およびリング間の継手特性を基本性能確認試験により確認した。

(1)継手曲げ試験

継手曲げ試験はセグメント間継手の回転ばね定数等の曲げ特性の確認をするために行った。試験ではセグメント継手を模擬した直梁型の供試体を用い、2種類のセグメントタイプ(TYPE-D, TYPE-E)に対して正曲げ、負曲げ方向の曲げ試験を行った。

試験結果を表-2にまとめる。正曲げに対する回転ばね定数は880~1106tf・m/radとなり、継手構造の釣り合いから求まる¹⁾設計値(=1001tf・m/rad)とほぼ同程度の値となった。一方負曲げに関しては回転ばね定数が121~128tf・m/radと、設計値(=240tf・m/rad)より小さな値となったが、オーダー的にはほぼ妥当な値であると考えられる。

表-2 継手曲げ試験結果まとめ

CASE	曲げ方向	ボルト	回転ばね定数 $K\theta$ (tf・m/rad)		
			離間前	離間後	設計
CASE1(A)	正曲げ	6・8(1回目)	880	279	1001
		6・8(2回目)	1106	447	
CASE1(B)		8・8	972	370	
CASE2(A)	負曲げ	6・8(1回目)	121	44	241
		6・8(2回目)	128	46	
CASE2(B)		8・8	124	49	

(2)せん断試験

せん断試験はリング間継手のせん断ばね定数等のせん断特性を確認するために行った。試験は3つの直梁型の供試体に軸力を導入し、中央の供試体を押し抜く方法で行い、異なる緩衝キー形状を持つ供試体について試験することで最も効果の高いキー形状を選定するとともに、継手条件を変えたケースについても試験を行い、その特性を確認した。

試験結果を表-3にまとめる。同一条件下(CASE4~6を除いたケース)でのせん断ばね定数は $K_s=9.6 \times 10^3 \sim 4.1 \times 10^4$ tf/mの間にあり、オーダー的に見ると全てほぼ同じレベルにある。緩衝キーの大きさによる違いは、緩衝キーの幅が大きいほど耐力、せん断ばね定数の値が小さくなる傾向が見られることから、継手部のせん断強度は緩衝キ

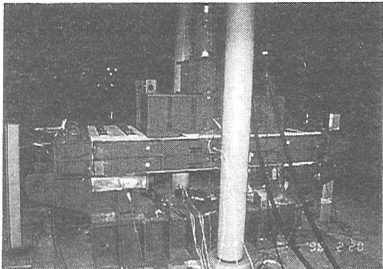


写真-1 せん断試験状況

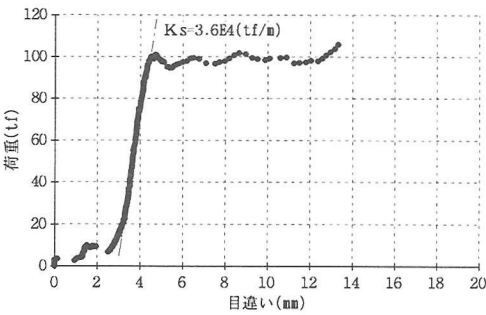


図-4 目違い量(CASE0)

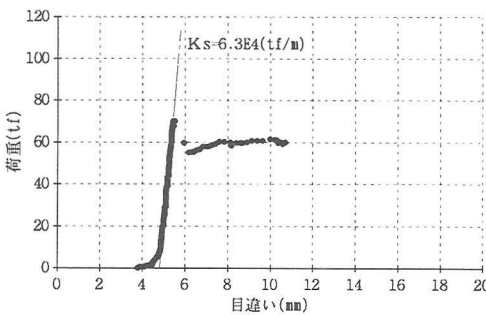


図-5 目違い量(CASE4)

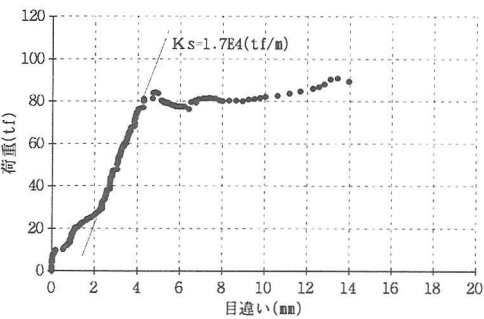


図-6 目違い量(CASE6)

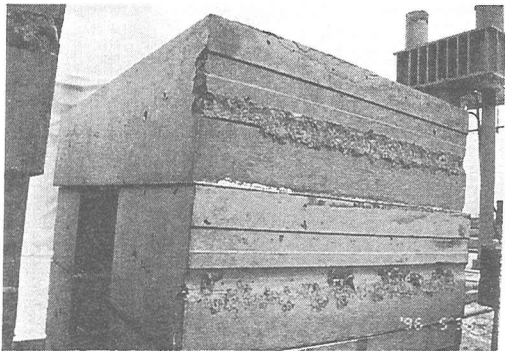


写真-2 解体状況(CASE0)

一の直接一面せん断強度によらないことが推測できる。すなわち、せん断応力はセグメント本体方向に向かって分散されるといえる。また、緩衝キーの持つ円弧半径が大きくなると、緩衝キー表面の剝離傾向が見られやすくなり、緩衝キーの効果の低減も考えられる。

表-3 せん断試験ケースと結果のまとめ

ケース	緩衝キー形状 (1)内径(寸法単位)		導入軸力 (tf)	試験内容	Pmax(tf)	せん断ばね定数 Ks(tf/m)	破壊形態				破壊形態例
	高さ(mm)	幅(mm)					①	②	③	④	
CASE 0	8	40(45)	5	基本ケース	106	3.6×10^4	○		○	○	①
CASE1-1	5	40(45)		キー高さ変更	120	4.1×10^4	○	○			②
CASE1-2	12	40(45)		キー高さ変更	96	2.2×10^4		○	○		③
CASE1-3	20	40(45)		キー高さ変更	102	2.2×10^4		○	○	○	④
CASE2-1	8	35(40)		キー幅変更	93	1.9×10^4		○	○		
CASE2-2	8	50(55)		キー幅変更	97	9.6×10^3	○	○		○	
CASE2-3	8	60(65)		キー幅変更	68	9.6×10^3	○	○			
CASE 4	8	40(45)		強制目開き1.5mm ^{(*)1}	70	6.3×10^4		○	○		
CASE 5	8	40(45)		止水シールあり ^{(*)2}	113	2.5×10^4	○	○			
CASE 6	8	40(45)		クッション材有り ^{(*)3}	91	1.7×10^4		○	○		

(*)1 継手面にテフロンシートを挿入
(*)2 CR系永年弾塑性(クロロブレンゴム)
(*)3 φ3mm円形クロロブレンゴム

実施工を想定したCASE

4.5に関してせん断ばね定数のオーダー、耐力的な違いはほとんどなく、実施工においても緩衝キーの効果は十分期待できると考えられる。クッション材を貼り付けたCASE6は継手面の摩擦抵抗が切れた後の急激な目違いの増加は見られないが(図-6)、緩衝キーの噛み合わせの効果が低下するため、せん断ばね定数の値が若干低くなっている。

これらの結果を踏まえ、シール材や組立精度によって生じる目開きなども考慮すると、キーの高さは8mm程度必要であり、その際のキー幅を40mm程度とするのが本工事のセグメント桁高に適すると考えた。

4. 実施工と現場計画

(1)初期施工段階

本セグメント使用区間の発進後、直線施工区間に於いて本セグメントに不具合は見られず、良好な施工であった。しかし、縦断勾配変化点(-0.2→-3.8%)をむかえ、さらにR=150mのS字曲線に入ると、曲線内側スプリングライン付近のリング継手に目違い、目開きが見られ、トンネル周方向のクラック・欠けが発生した。これらはセグメント組み立て後2～5リング後方、すなわちマシンテールを抜けた後に生じ、特に状況の悪い箇所ではそれらの現象が連続的に生じた。

(2)原因と対策

曲線内側スプリングライン付近のクラック発生の主な原因として、以下の点が挙げられた。

- ① 曲線部施工ではジャッキ推力によって曲線内側に引張力が働き、目開きが生じる
- ② セグメントの組み立て時の精度(真円度)の悪さ
- ③ マシンとセグメントがせることによりセグメントに部分的な偏心荷重が生じる
- ④ 中折れ装置が上下・左右同時に使用できない構造であった

これらの要因により図-7に示すようなメカニズムでクラックが発生すると考え、主に目開き・目違いの低減を図って次のような対策を講じた。

- ① 真円度を中心とした組立管理の徹底
- ② 掘進中のボルトの増し締め
- ③ 曲線内側のセリとマシンとセグメントの偏心量を制御する線形管理の実施
- ④ 中折れ装置の改良

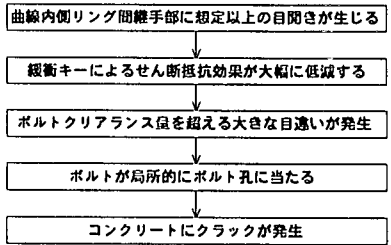


図-7 クラック発生挙動

⑤組立後の変形を制御するため、プレート状の真円保持リングをマシンテール部内面（セグメント組立後方部）に取付

(3)現場計測とその後の施工

(2)に示したような対策を講じた後、S字曲線部での施工時に目違い、目開き量およびコンクリートに発生するひずみ等を現場計測を行い確認した。計測は主に曲線内側のスプリングライン付近を中心に行い、併せてジャッキ推力、ジャッキパターン、組み立て精度等の施工状況も調査した。現場計測を行った結果例を図-8～図-10に示す。

図-8に示すトンネル軸方向のコンクリートひずみのグラフは、初めの2本がセグメント切羽側、後の2本がセグメント坑口側の同じリング間継手を挟んだ同一ラインでのコンクリートひずみの発生状況を示している。切羽側、すなわちジャッキに直接押される側のコンクリートひずみは、セグメントが組まれた直後の掘進時および次リング組み立て時に若干引っ張られる傾向が見られる（グラフでは引張を+で表示）。これは、坑口側ではあまりその傾向が見られないことから、ジャッキ推力による一時的な偏心荷重によるものと考えられるが、その大きさは小さく、クラック発生には至らない。また、2～3リング後には変動がほぼなくなり、セリの影響も見られない。

目違いは掘進に伴い増大し2～4mm程度発生しているが、目開きが初期状態から大きな変化がなく0～1mm程度となっていることから緩衝キーが噛み合っており、その効果が現れている状態にあると考えられる。これは基本性能試験で行ったせん断試験に於いて1.5mm強制目開きさせたCASE4で緩衝キーの効果が現れた結果(図-5)が得られていることから推定できる。

本セグメントに用いた曲がりボルトは、一般に用いられている直ボルトに比べ継手部の拘束力が低いいため、特に曲線部の施工時に於いては、目開きや目違いを起こしやすいと考えられる。目開きが大きくなると、緩衝キーの効果が低減することから、この量をいかに少なくさせるかという点が、本セグメントを施工する上でのポイントになると考える。

図-11に各リング毎のクラック、目違い、目開きの発生状況の調査結果を示す。このグラフからも判るように、対策を施したNo.200リング付近からは、不具合の発生はほとんどなくなり、その状況も程度の軽いものとなった。

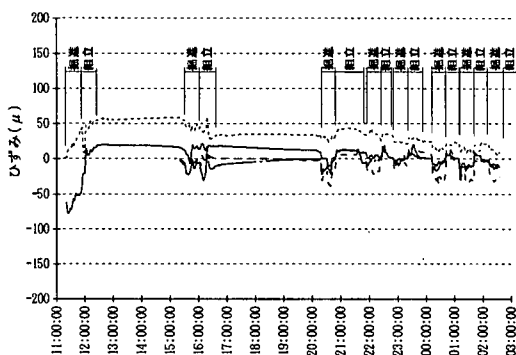


図-8 コンクリートひずみ(曲線内側/トンネル軸方向)

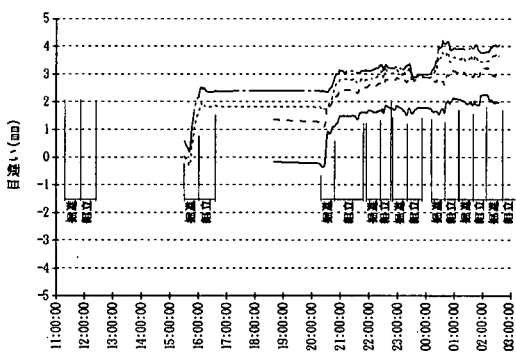


図-9 目違い(曲線内側/リング間継手部)

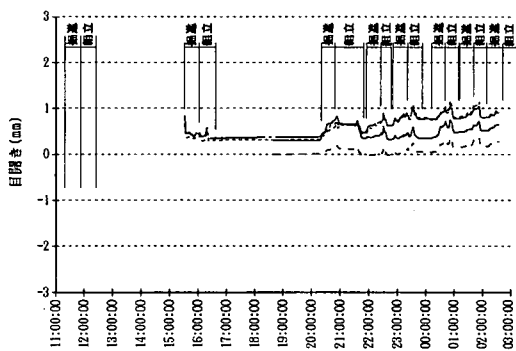
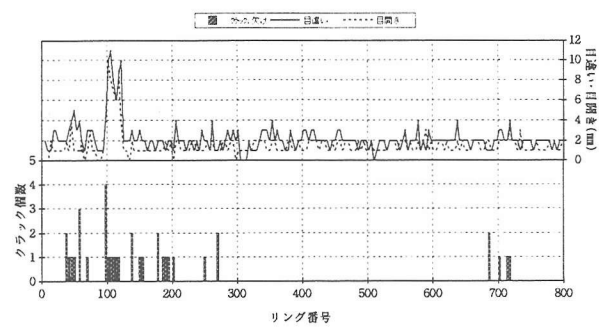


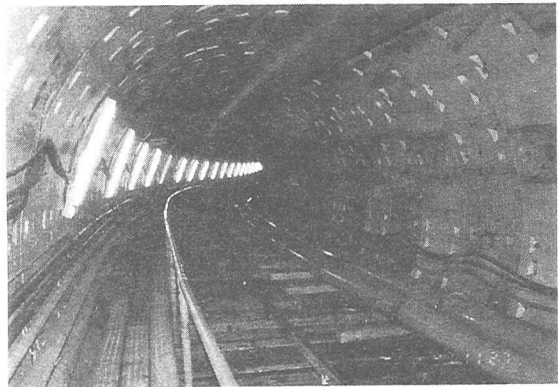
図-10 目開き(曲線内側/リング間継手部)

本セグメントを使用した延長960mの区間は比較的難工事であったが、6月中旬に発進の後、12月初旬に到達と、初期掘進・段取り替えを含め約6ヶ月弱で掘進した。当初は前述したように不具合の発生等で進捗状況も遅れ気味であったが、最後の1ヶ月は月進約340mを達成することができた。



図－１１ クラック等調査結果

本セグメントは緩衝キーの効果によりトンネル構造の安定を図っているが、その前提として緩衝キーが効果的に働いていなければならない。そのためには、実施工に於いて組立精度を上げ、目開きや目違いを最小限に抑えることが重要となり、その対策を事前にセグメント、シールド機および施工方法に施す必要があると考える。また、継手部の拘束力が低い場合は、シールド材の選定には十分留意する必要がある。



写真－３ トンネル完成状況

今回の施工で得られた設計や構造、施工のノウハウが今後の本セグメントやこれに類したセグメントに活かされてゆくことを期待する。

最後に、本セグメントの開発と適用に当たってご指導、ご協力を頂いた関係各位に深く感謝の意を表す次第である。

6. 参考文献

1)園田徹士，藤本明生，田中秀明，萩原 勉，内田雅博：「継手部に緩衝キーを設けたセグメントの開発」第6回トンネル工学研究発表会論文・報告集，1996.10
2)園田徹士，名倉 浩，萩原 勉：「曲がりボルト締結に関する試験報告」第7回トンネル工学研究発表会論文・報告集，1997.10