

覆工機能を見直した合理的セグメントの開発

河越 勝* 木戸 義和*

近年の建設事業を取り巻く環境は依然厳しく、コスト削減は避けることの出来ない課題となってきた。本開発は以上のような背景を踏まえ、シールド工事費の中で大きな比率を占めるセグメントに着目し、覆工に必要とされる構造を原点から見直し、RCセグメントの合理化を図ったものである。

キーワード：シールドトンネル、RCセグメント、覆工、コストダウン

1. はじめに

近年の建設事業を取り巻く環境は依然厳しく、コスト削減は避けることの出来ない課題となってきた。2002年には国土交通省より施工に限らず計画や設計の過程まで見直すコスト構造改革が打ち出され、5年間で15%のコストダウンを図ることまで明示された。

本開発は以上のような背景を踏まえ、シールド工事費の中で大きな比率を占めるセグメントに着目し、覆工に必要とされる構造を原点から見直し、RCセグメントの合理化を図ったものである。

2. 概要

2.1 着目点

シールドトンネルは軟弱な地盤を対象に発展してきた工法であり、覆工セグメントにおいても軟弱地盤に十分適用できるような継手構造が一般化された。これまで多種多様な継手が開発されてきたが、良質な地盤においては必ずしも軟弱地盤と同等の継手機能が必要とされないことに着目し、今回は、良質地盤を対象としてセグメントに必要とされる機能の見直しを行なった。

また、供用時に必要とされる機能と、施工時に必要とされる機能を分けて継手構造を見直し、試設計により検証を行ったところ、供用時はリング間のせん断抵抗部材のみで十分であることが確認され (Table. 1、Table. 2 参照)、これを着目点とした。

* 本社 土木事業本部 トンネル技術部シールドグループ

Table. 1 供用時に必要な抵抗部材

	セグメント継手	リング継手
せん断抵抗部材	摩擦力で十分抵抗できるため 不要	隣接セグメントとの添設効果を得るために 必要
引張り抵抗部材	良質な地盤では、隣接セグメントの添設効果と、軸力による回転ばね剛性で十分であるため 不要	軸方向に引張り力は作用しないので 不要

Table. 2 施工時に必要な抵抗部材

	セグメント継手	リング間継手
せん断締結部材	ジャッキ推力やテールの競りでせん断力が発生するため 必要	ジャッキ推力やテールの競りでせん断力が発生するため 必要
引張り締結部材	ジャッキ推力によりラップ状に目開きが発生しようとするため 必要	ジャッキ片押し時、内側に目開きが発生するため、 カーブ区間では必要

2.2 構造

セグメントは、Table. 1 および Table. 2 に示す性能を満足するなかで最も単純な構造を迫及した。その結果、以下のような単純なピン構造のリング継手と簡易な仮設用斜めボルトを用いた構造とした。

リング継手：供用時にはせん断抵抗部材のみが必要となるため、単純なピンジョイントにより、隣接セグメントとの添接機能を確保した (Fig. 1 参照)。基本的にはこのピンと穴にロック機能は設けないが、急カーブなど施工時荷重により目開きが発生することが懸念される区間においてはロック式のジョイントを使用することとした。

セグメント継手：供用時には特に抵抗部材を必要としないため継手面はフラットの突合せ構造とするが、施工

時荷重に抵抗する部材として（仮設構造部材）斜めボルトを設置することとした。

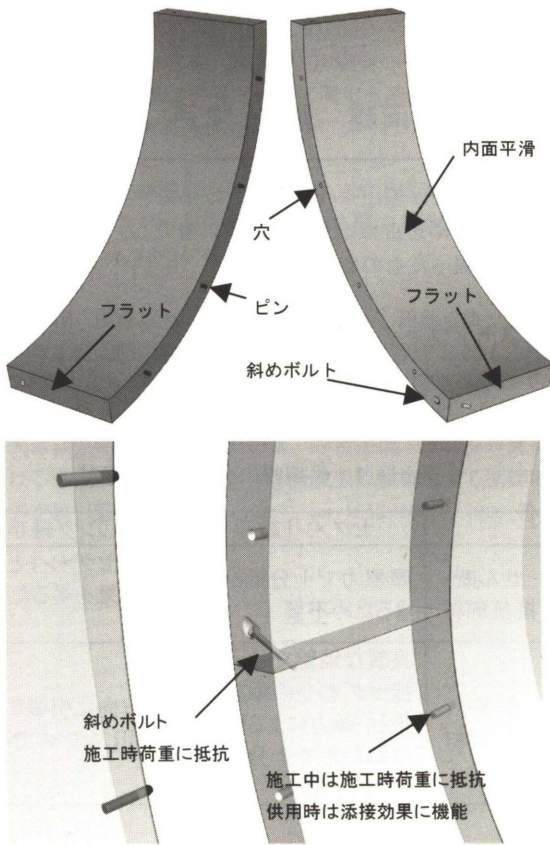


Fig. 1 セグメント構造概要図

3. 適用性検討

3.1 検討概要

今回開発を行った合理的セグメントの適用地盤を把握するため、良質地盤及び軟弱地盤それぞれについて計算を行い、どのような地盤なら適用可能か検討を行った（Fig. 2 参照）。

3.2 検討条件

セグメント継手の剛性に必要とされる剛性を試算するために、地盤条件と継手剛性をパラメータとし、その傾向について既往の計算方法により構造計算を行った。

① セグメント形状

外径 3000 mm × 桁高 150(200)mm × 幅 1000mm

セグメントリングの断面力算定には、二次覆工一体部を考慮し（断面力は桁高 200mm で算定）、応力度の算定には二次覆工一体部を考慮しない（応力度照査は 150mm で算定）。

② 地盤条件のパラメータ

地盤条件としては、Table. 3 に示すような、軟弱地盤（N値 4 程度の粘性土の軟弱地盤を想定）と良質地盤（N値 40 程度の砂質土の良質地盤を想定）の 2 ケースについ

て土被りを変化させて検討を行った。

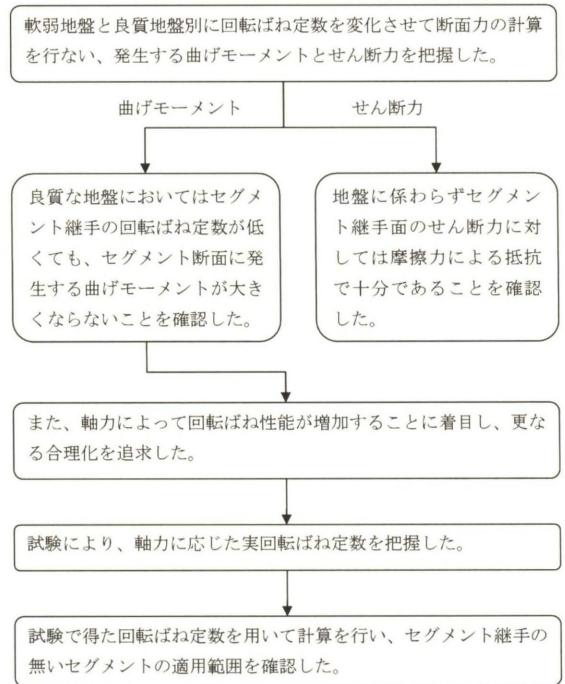


Fig. 2 適用性検討フロー図

Table. 3 試設計の地盤条件

地盤条件	軟弱地盤 (N値 4 程度の 粘性土)			良質地盤 (N値 40 程度 の砂質土)		
	5	7.5	10	10	20	30
土被り(m)	5	7.5	10	10	20	30
地下水頭(m)	—	—	—	8	18	28
土と水の考え方	土水一体・全 土被り			土水分離・緩 み土圧		
側方土圧係数(λ)	0.65			0.40		
地盤反力係数 (MN/m ³)(k)	5.0			40.0		

③ セグメントリングの構造モデルおよび継手剛性のパラメータ

セグメントリングの構造モデルは、はり-ばねモデルとする。また、セグメントの分割は「シールド工用標準セグメント」¹⁾に合わせ、5分割とした。

セグメント継手の回転ばね定数は、継手の剛性を変化させるために $K\theta^* = 0, 0.5, 1.0$ の 3 ケースとした。また、リング継手のせん断ばね定数は継手せん断試験結果より、 $K_s = 36000 \text{ kN/m}$ とした。（ $K\theta^*$ は「内水圧が作用するトンネル覆工構造設計の手引き」²⁾による無次元化した継手剛性を示す）

また、セグメント継手は締結しないため自重時の回転ばね定数は 0 とする。Table. 4 に回転ばね定数の一覧表を示す。

Table. 4 回転ばね定数一覧

無次元化した継手剛性 $K\theta^*$	0	0.5	1.0
回転ばね定数 $K\theta$ (kN·m/rad)	0	8000	16000

3. 2 検討結果

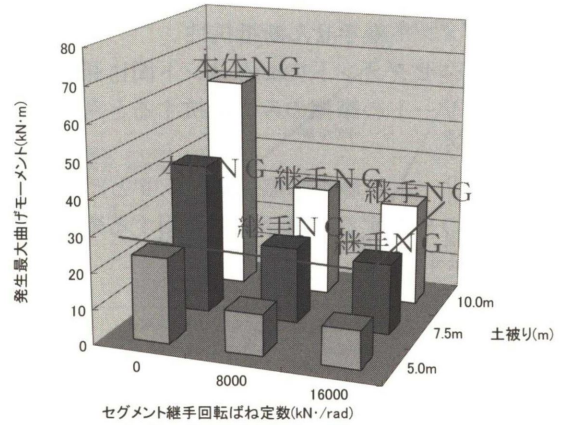
①セグメント継手曲げ抵抗性

回転ばね定数と最大曲げモーメントとの関係を示すグラフを Fig. 3~Fig. 6 に示す。グラフ中の直線は適用限界の目安を示す。

Fig. 3~Fig. 4 は軟弱地盤を示したものである。応力度照査結果では回転ばね定数が小さくなるに従い発生応力は大きくなり、回転ばね定数 $K\theta = 0$ では特に大きな応力が発生した。また、土被りが大きくなるにつれて発生応力が大きくなる傾向となった。土被り 5.0m では回転ばね定数にかかわらず適用可能となったが、土被り 7.5 m、10.0m では全てのケースで応力計算上NGとなった。

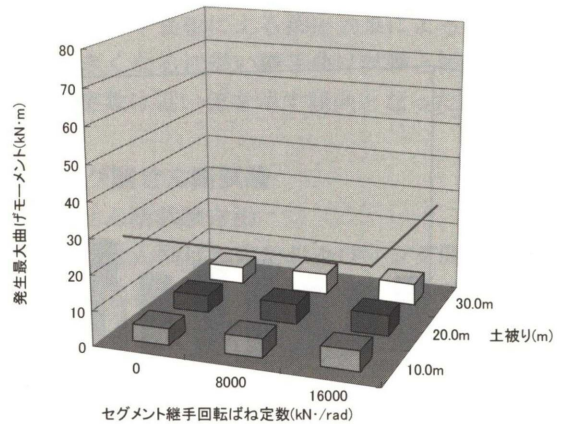
Fig. 5~Fig. 6 は良質地盤を示したものである。良質地盤における応力度照査結果では回転ばね定数が小さくなくても発生応力はほぼ変わらずに、土被りが変化しても発生応力はほぼ変わらない結果となった。

以上の構造計算より、回転剛性の低い継手は軟弱地盤では適用が難しいものの、良質地盤では回転ばね定数 $K\theta = 0$ (kN·m/rad) でも充分適用可能であることが確認できた。



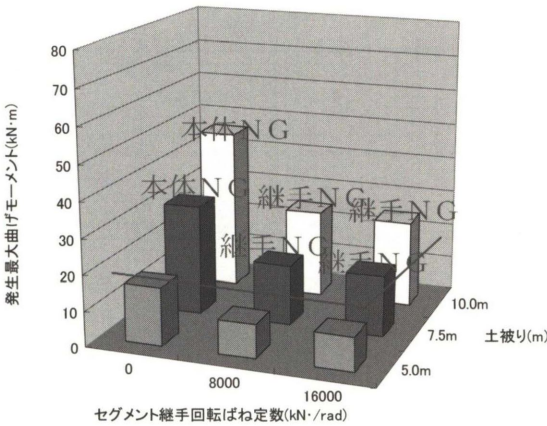
回転ばね定数	0	8000	16000
土被り 5.0m	23.7	11.7	10.8
土被り 7.5m	NG 42.2	NG 21.4	NG 19.9
土被り 10.0m	NG 60.6	NG 31.1	NG 28.9

Fig. 4 軟弱地盤 (負曲げ)



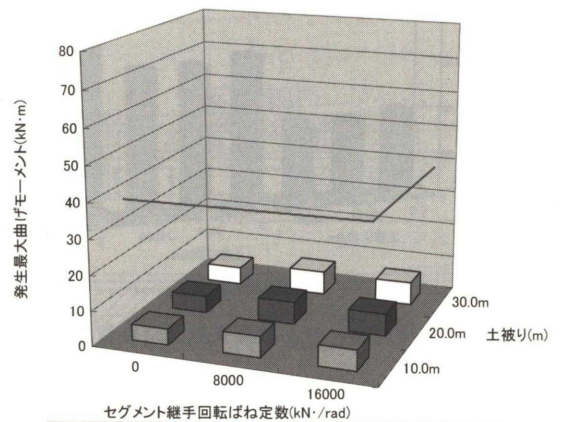
回転ばね定数	0	8000	16000
土被り 10.0m	4.7	5.4	5.7
土被り 20.0m	4.9	5.7	6.0
土被り 30.0m	5.2	6.0	6.3

Fig. 5 良質地盤 (正曲げ)



回転ばね定数	0	8000	16000
土被り 5.0m	16.2	9.6	9.6
土被り 7.5m	NG 31.1	NG 17.0	NG 17.0
土被り 10.0m	NG 46.0	NG 24.8	NG 24.5

Fig. 3 軟弱地盤 (正曲げ)



回転ばね定数	0	8000	16000
土被り 10.0m	4.6	6.1	5.9
土被り 20.0m	4.8	6.4	6.3
土被り 30.0m	5.0	6.8	6.7

Fig. 6 良質地盤 (負曲げ)

②セグメント継手せん断抵抗性

締結レスセグメントのセグメント間に発生するせん断力はコンクリートの摩擦のみで抵抗すると考えせん断力の検討を行う。

コンクリートの静止摩擦係数を0.5とし、 $Q < 0.5 \times N$ であればOKとする。継手部に作用する断面力概要図をFig. 7に示す。

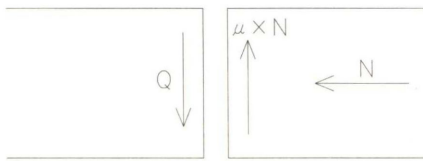


Fig. 7 継手に作用するせん断力

回転ばね定数と継手部発生断面力との関係を示すグラフをFig. 8、Fig. 9に示す。

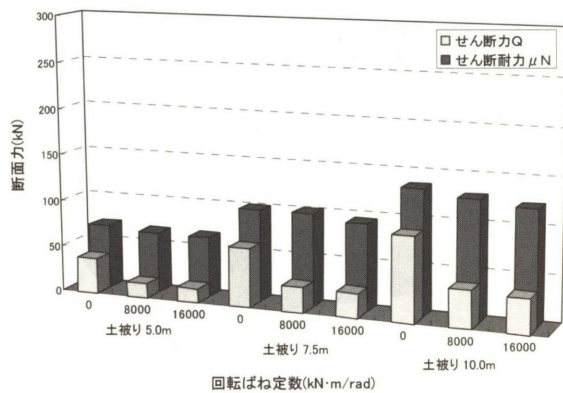


Fig. 8 せん断照査結果 (軟弱地盤)

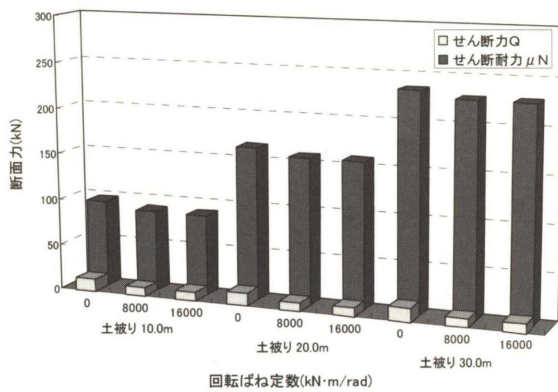


Fig. 9 せん断照査結果 (良質地場)

以上の結果から、軟弱地盤においても発生せん断力は軸力より得られる摩擦抵抗に比べて小さく、良質地盤では更に安全側であることより、セグメント間にせん断抵抗部材のないセグメントでも適用可能であることが確認できた。

4. 開発実験

4. 1 概要

良質地盤では回転ばね定数 $K_{\theta} = 0$ (kN·m/rad) でも適用出来ることが確認されたが、今回軸力を積極的に考えて回転ばね定数を算出し、締結レスセグメントの更なる合理化を図るために各種実験を行った。

4. 2 継手部曲げ試験

①継手曲げ試験方法

突合せ構造のセグメント継手の挙動および回転ばね定数を把握するために軸力導入継手曲げ試験を行った。

試験供試体サイズは桁高 200mm、幅 1000mm、供試体長 4200mm (2100mm×2 供試体)の平板型を作成し、配筋は試設計によって得られている鉄筋比相当の鉄筋量とした (鉄筋比 $P=0.661\%$)。

実験方法は、図-10 に示すとおりである。実験供試体を平面上に両端可動支持として両端部より実験軸力を導入する。導入軸力は、150kN、300kN、450kN の 3 パターンについて行う。

次に軸力を一定に保った状態で二点集中載荷により鉛直荷重を加えた。

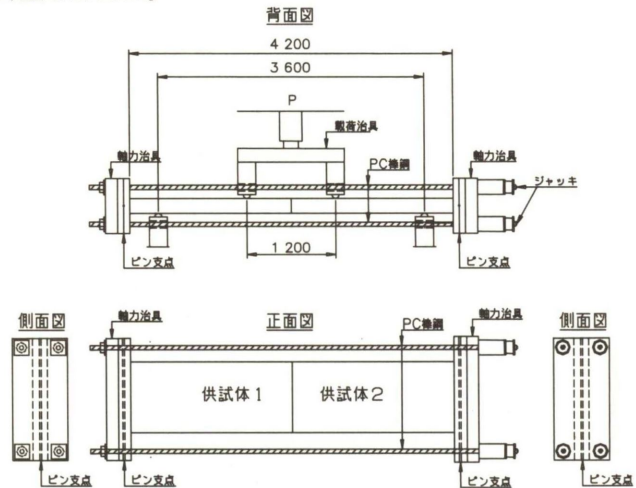


Fig. 10 継手曲げ試験方法

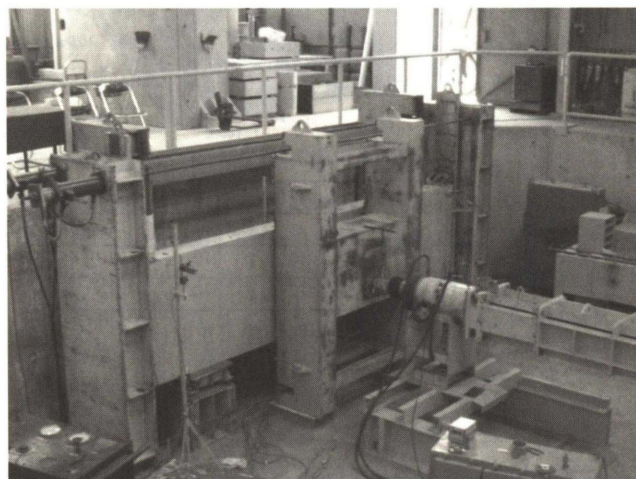


Photo. 1 継手曲げ試験状況

②添接曲げ試験方法

突合せ構造のセグメント継手部及び添接セグメントの本体の挙動および回転ばね定数を確認するために軸力導入添接曲げ試験を行った。また、継手曲げ試験結果と比較し千鳥組みによる添接効果の検証を行った。

試験供試体サイズは桁高 200mm、幅 1000mm、中央供試体長 4200mm (2100mm×2 供試体) の平板型を作成し、配筋は試設計によって得られている鉄筋比相当の鉄筋量とした (鉄筋比 $P=0.661\%$)。

実験方法は、Fig. 11 に示すとおりである。

実験供試体 8 体を平面上に両端可動支持として、縦方向、横方向の両端部より実験軸力を導入する。

次に軸力を一定に保った状態で二点集中荷重により鉛直荷重を加えた。

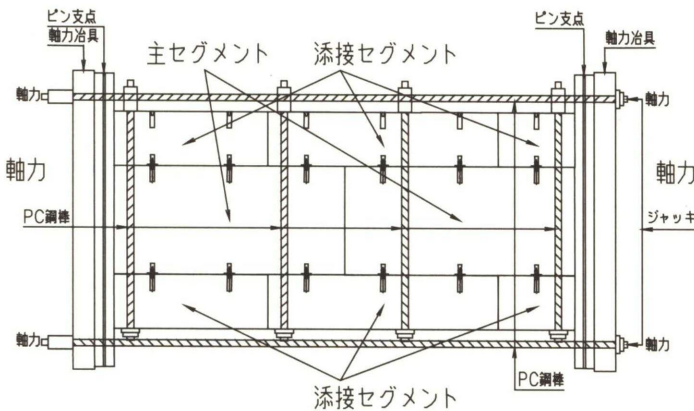


Fig. 11 添接曲げ試験方法

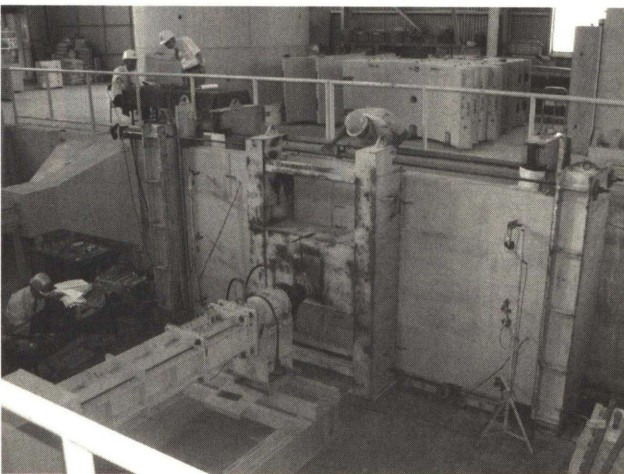


Photo. 2 添接曲げ試験状況

③試験結果

セグメント継手金物を省略した突き合わせ構造のため、回転ばね定数は軸力によって決定される。継手曲げ試験および添接曲げ試験の設計荷重時の軸力と回転ばね定数の関係を Fig. 12 に示す。

短ボルト式および高剛性継手は「内水圧が作用するトンネル覆工構造設計の手引き」2) による計算式を採用した参考値である。

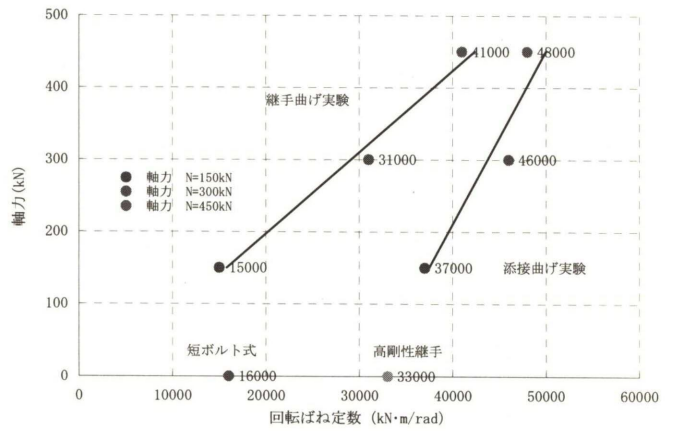


Fig. 12 軸力-回転ばね定数相関図

継手曲げ実験結果より得られた軸力と回転ばね定数の関係は、ほぼ比例関係にあることが分かった。継手曲げ試験の結果と添接曲げ試験の本体部の試験結果を比較すると、添接曲げ試験結果の方が回転ばね定数は高い値を示した。これは、千鳥組みによる添接効果によるものである。軸力が大きくなるに従い継手曲げ試験と添接曲げ試験の回転ばね定数は近い値を示す傾向となった。

4. 3リング間せん断試験

①リング間せん断試験方法

ピン式継手のせん断ばね定数およびリング間継手部の挙動を確認するためにリング間継手せん断試験を行った。

試験供試体サイズは (桁高 200mm、幅 650mm、長さ 600mm) の平板型を作成し、Fig. 13 に示すように 3 体の供試体を結合させ、中央の供試体に荷重を与えることによって継手部にせん断力を発生させた。結合した両側の供試体の跳ね上がりを防止するために長ボルトでフレームに固定し、供試体にはジャッキ推力によって軸力が生じることを再現するため、想定したシールドの装備ジャッキの 50% を与え 3 分間保持した後、試験軸力の 44kN (常用推力の 10%) まで低下させて行った。

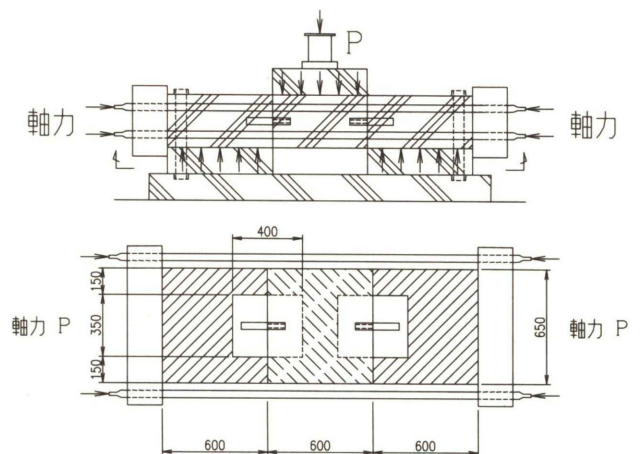


Fig. 13 リング間せん断試験方法

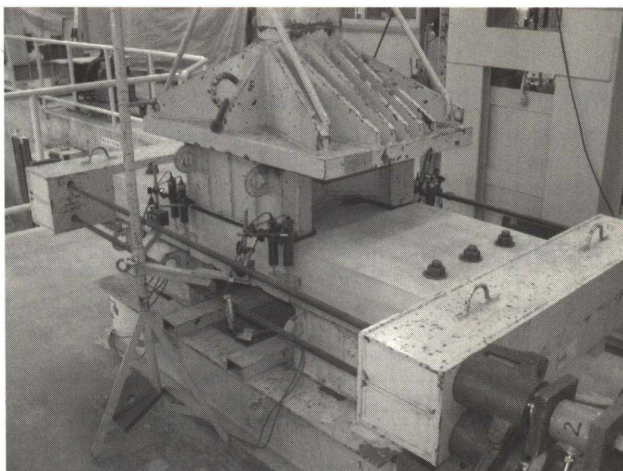


Photo. 3 リング間せん断試験状況

②試験結果

荷重と変位の関係をFig. 14に示す。

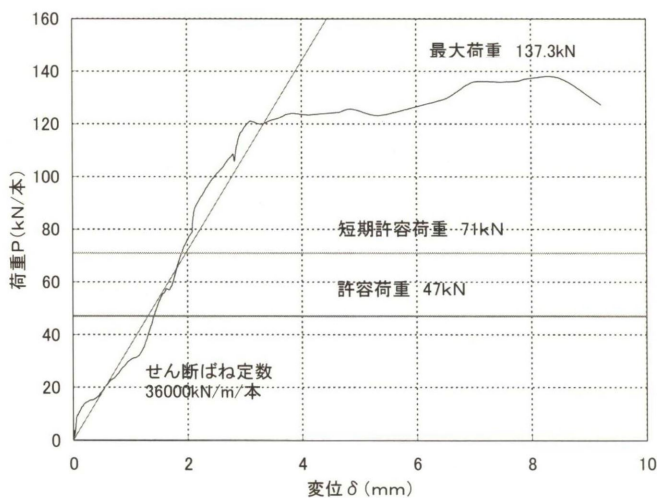


Fig. 14 せん断荷重－変位図

せん断耐力は 137.3kN となり、許容荷重および短期許容荷重を大きく超える結果となり、リング継手としての機能は十分確保されていることが確認された。また、許容荷重時のせん断ばね定数は 36000kN/m となった。

最終的な破壊状況は継手上部のコンクリートがコーン破壊して試験を終了した。

5. 適用範囲

5. 1 適用検討概要

軟弱地盤から良質地盤までの地盤特性を仮定し、開発実験での結果を用いて今回開発した合理的セグメントの適用地盤を把握するために検討を行った。

5. 2 検討条件

① セグメント形状および地盤条件

外径 3000 mm×桁高 150(200)mm×幅 1000mm

セグメントリングの断面力算定には、二次覆工一体部を考慮し（断面力は桁高 200mm で算定）、応力度の算定には二次覆工一体部を考慮しない（応力度照査は 150mm で算定）。

地盤条件としては側方土圧係数λと地盤反力係数kを組み合わせてることにより、軟弱地盤から良質地盤までをモデル化した。なお、この組み合わせは「トンネル標準示方書（シールド工法編）・同解説」³⁾を参考に決定した。軟弱地盤は土水一体、全土被りとし、良質地盤は土水分離、ゆるみ土圧(=2D)とした。

②回転ばね定数およびせん断ばね定数

セグメント継手金物を省略した突き合わせ構造であるため、回転ばね定数は軸力によって決定される。軸力と回転ばね定数の関係は継手曲げ試験の結果より算出した一次式を用いることとした。これは、実験値が理論値に比べ小さく一定勾配であったことによる。（その理由として、実際は継ぎ手面全体が面タッチしていないことによると思われる）せん断ばね定数はリング間せん断試験結果のせん断ばね定数を用いることとした。

③検討結果

検討結果をまとめた適用範囲一覧表を Fig. 15 に示す。

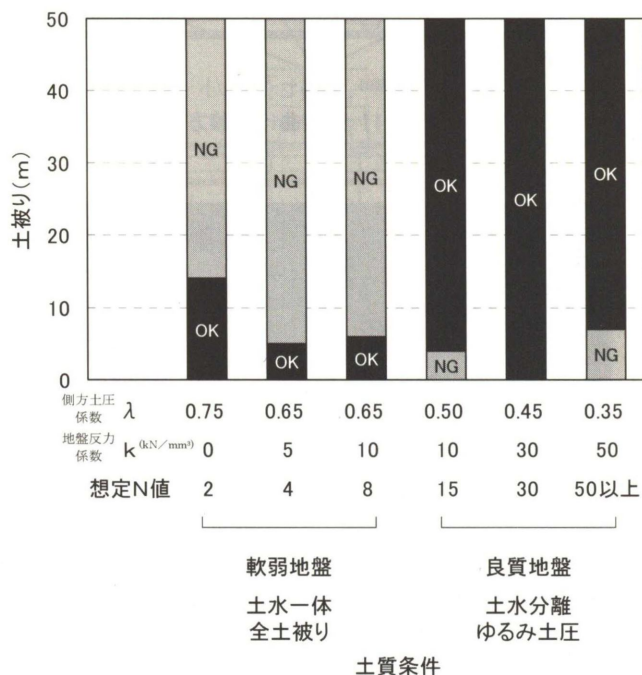


Fig. 15 土質条件による適用範囲

良質地盤では地盤反力が大きく軸力に対して発生曲げモーメントが比較的小さいために適用範囲は十分広く、軸力の小さい低土被り以外で使用可能である。また、軟弱地盤でも使用は可能であるが、地盤反力が小さく軸力に対して曲げの影響が大きくなるため、適用範囲は土被り 10m 程度になる。

6. まとめ

試験結果を反映させ適用範囲の検討を行なった結果、良質地盤では適用範囲は十分広いことが確認された。軟弱地盤や小土被りの場合は適用照査が必要であるが、条件次第では適用も可能と思われる。

今後はこのセグメントによる実施工を行い、データの蓄積および解析により設計手法の妥当性の評価と更なる改良を目指す所存である。

謝辞

本研究は(株)熊谷組とジオスター(株)の共同開発であり、実験はジオスター東松山工場で実施した。開発にあたりご協力をいただいた関係各位に感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) (社)土木学会・(社)日本下水道協会 共編:シールド工用標準セグメント、2001.
- 2) (財)先端建設技術センター:内水圧が作用するトンネル覆工構造設計の手引き、1999.
- 3) トンネル標準示方書(シールド工法編)・同解説、1996.

Development of the rational segment which improved the function needed for tunnel lining

Masaru KAWAGOE and Yoshikazu KIDO

Abstract

The circumstance surrounding recent construction project is still severe, and cost reduction is being an unavoidable subject. The crusade of cost structural reformation to be improved at the process of not only construction but a plan or a design was indicated from the Ministry of Land, Infrastructure and Transport in 2002, and it was also clearly shown till aiming at 15% of cost reduction within five years. Based on above background, the rationalization of cost for RC segment, which occupies a big ratio in a total budget of shield tunnel construction, has attained by reviewing of required basic tunnel lining structure.

Keywords: Shield tunnel construction, Lining, RC segment, Tunnel lining, Cost reduction
