

大断面矩形シールドの設計について

DESIGN OF LARGE SECTION RECTANGULAR SHAPED SHIELD TUNNEL

中村 浩¹⁾・中川 嘉博²⁾・古川 衛³⁾・北嶋 武彦⁴⁾・小嶋 勉⁵⁾

Hiroshi NAKAMURA, Yoshihiro NAKAGAWA, Mamoru FURUKAWA, Takehiko KITAJIMA and Tsutomu KOJIMA

This article describes a design method for the segment of the large section rectangular (9.9m wide, 6.5m high) shield tunnel.

It is required to consider the detail shape of cross section of such a tunnel to reduce the stresses in the segment by resorting to the effect of the subgrade reaction as much as possible.

To this end, the sensitivity analysis of the member forces was made in this article through "the uniform rigidity ring model" and "the beam-spring model" with mentioning some concluding remarks.

Keywords : rectangle shield tunnel, design, beam-spring model, lining, subway

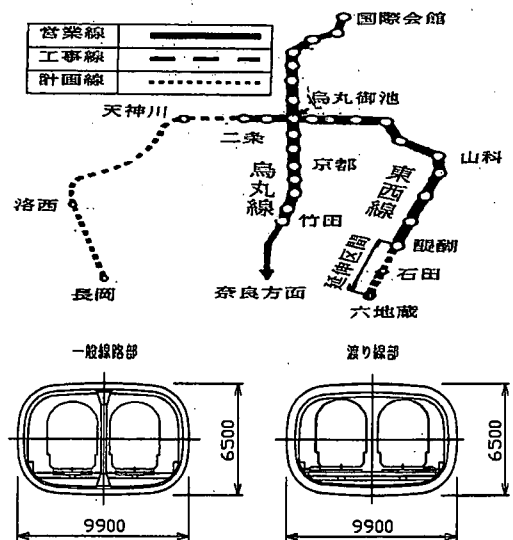
1. まえがき

京都市高速鉄道東西線（図－1 参照、醍醐～二条間、延長 12.7km）の延伸区間として新たに建設される六地蔵～醍醐間（延長 2.4km）のルートは、道路幅員が 15m と狭い上に交通量が多く、地下には外径 3.2m の下水管をはじめ導水管等の大規模埋設物が敷設されている外環状線下である。

工事計画にあたっては、これらの厳しい施工条件のもとで工期内に工事を完了できるように、できる限り開削区間を少なくする方針で検討を進めた。六地蔵駅～石田駅間では、渡り線部と一般線路部を同一断面で施工できる工法として、大断面矩形シールド工法を採用した。

大断面矩形シールドは幅 9.9m、高さ 6.5m で渡り線部（延長 57m）と一般線路部（延長 703m）からなり、渡り線部については柱のない 1 径間形状とした。

本報告は、断面力が低減できる断面形状を設定して側方土圧や地盤反力係数に対する感度分析を行い、さらに 1 径間と 2 径間の断面変化部については、断面形状の違いに起因する断面力の変動を考慮して大断面矩形シールドの設計を行ったものである。



図－1 計画図

- 1) 正会員 京都市交通局
- 2) 正会員 京都市交通局建設室
- 3) 正会員 京都市交通局建設室
- 4) 正会員 中央復建コンサルタンツ株式会社 総合第2本部
- 5) 正会員 中央復建コンサルタンツ株式会社 総合第2本部

2、土質と地下水

大断面矩形シールドの掘進区間の土質は、地表から10mがN値10～30の沖積粘性土を介した砂礫層が主体であり、それ以深はN値20～50の洪積の砂礫層である。最大礫径は100mm程度であり、礫分40～60%、シルト分10～15%となっている。地下水位はGL-2m～-4m、透水係数は 10^{-2} cm/sec程度である。

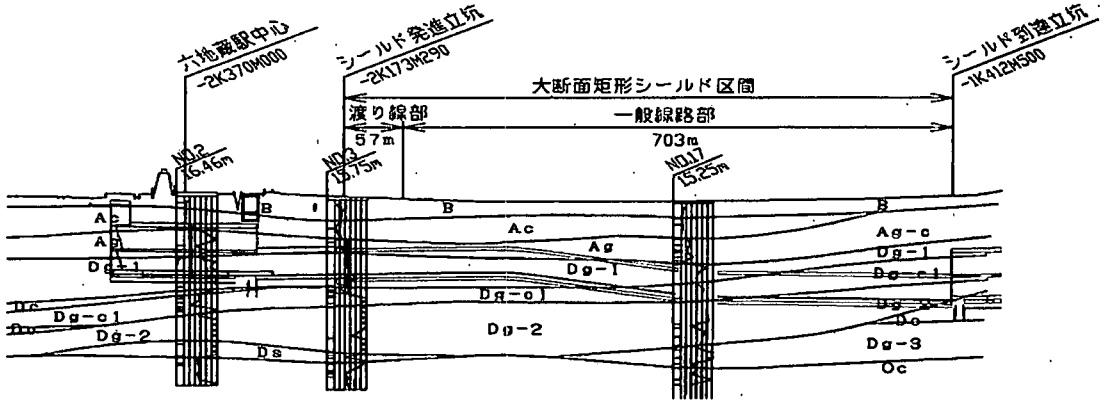


図-2 土層縦断面図

3、覆工設計

鉄道車両が走行する大断面で、かつ、幅：高さ＝1：0.65という扁平な矩形シールドを採用するのは初めての事例である。

覆工設計においては、大きな断面力を低減して有利な設計ができるような覆工断面形状の設定が必要であった。

まず、列車の建築限界を確保しつつ、断面力が低減できるような断面曲率を感度分析により検証し、できる限り断面積を小さくした断面形状を決定した。

次に、決定した断面形状において、土圧・地盤反力の感度分析を行い、覆工の発生断面力の変動について検証した。

設計のフローチャートを図-3に示す。

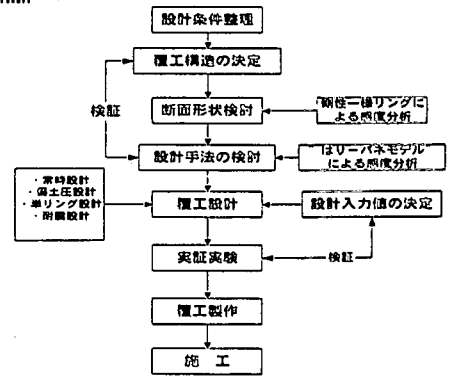
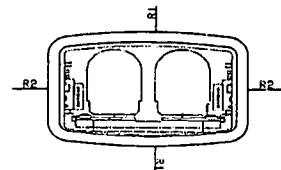


図-3 設計フロー



ATC線形R1(m)	∞	R=29.5	R=29.5	R=9.9
側部線形R2(m)	∞	∞	R=7.8	∞
M_{max} (KN・m)	1437.7(100%)	1356.3(94%)	1166.0(82%)	1167.0(82%)
S_{max} (KN)	964.6(100%)	904.1(94%)	690.3(72%)	814.3(84%)
断面積 (m ²)	64.4	65.7	64.6	66.3

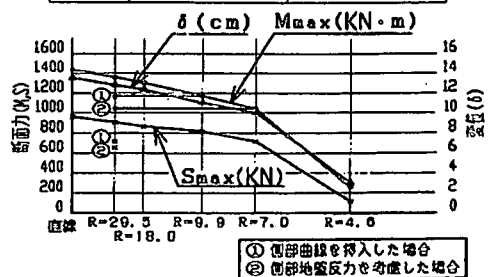


図-4 断面形状結果図

(1) 断面形状の検討

断面形状の検討は、曲げが卓越する構造である渡り線部の1径間断面をモデルとした。

まず、上・下部(R1)と側部(R2)に数種類の曲線を挿入した場合の断面力低減効果について検証した。

上載荷重は全土被り圧とし、側方地盤反力については、当該地盤のN値から求めた地盤反力係数 $k=30000$ (KN/cm³)を考慮する場合と考慮しない場合について実施した。

断面形状検討は、スパンの大きい1径間部に使用する設計断面を検討モデルとした。

R1と断面力の低減効果は図-4に示すとおりである。

R1 を半径 29.5m とした場合、セグメントに発生する断面力は R1 が直線（曲率 ∞ ）の場合の 95% 程度まで低下した。さらに、R1 を 29.5m として R2 を半径 7.8m とした場合の断面力は R2 を直線とした場合の 80% 程度に低下した。

側部の地盤反力を考慮した断面力は、地盤反力を考慮しない場合の 86% 程度に低下することがわかった。

以上のことから、大断面矩形シールドトンネルの断面形状として、R1 に半径 29.5m の曲線を挿入し、R2 に曲線半径 7.8m を挿入した断面形状とすれば、R1、R2 を直線とした場合の 70% 程度に低減できる。

(2) 土圧、地盤反力に対する感度分析

今回の矩形シールドでは単円シールドに比べてテールボイドも大きいというに、裏込め注入の注入圧の分布メカニズムが単円シールドとどの程度異なるのか明らかでないため、設計においては、側方土圧、地盤反力の変動を考慮する必要がある。

今回は、「鉄道構造物等設計標準（シールド工法編）」（以下、シールド標準）で設計を進めるが、側方土圧や地盤反力係数が変動した場合に、断面力がシールド標準の断面力に比べてどの程度変動するのか検討した。

検討モデルを図-5 に、設計荷重を図-6 に、継手剛性を図-7 に示す。

断面力の変動に関する感度分析は、シールド標準による断面力と、都市トンネル設計で用いられる下記の基準類の側方土圧や地盤反力係数を用いた場合の断面力を比較し、断面力の変動幅について検討した。

比較する基準類

「トンネル標準示方書シールド工法編」（以下、シールド示方書）

「鉄道構造物等設計標準（坑土圧編）」（以下、基礎標準）

各検討 CASE の断面力の結果を表-1 に示す。

表-1 によれば、シールド標準において地盤調査の N 値から求めた $\lambda = 0.45$ 、 $K_v = 30000$ (KN/cm³) を用いたケース 1 の断面力と上記の基準によるケース 2、3 の断面力は、ケース 1 の断面力の $\pm 10\%$ の幅に収束しており、側方土圧や地盤反力係数の変動が設計へ与える影響は小さいと考えられる。

表-1 感度分析検討結果

ケース	λ	Kv1 Ks1 (KN/m ³)	Kv2 Ks2 (KN/m ³)	Mmax (KNm)	Smax (KN)	準拠基準
1	0.45	30000 10000	30000 10000	+943.0 -986.2	1122	シールド標準
2	0.45	32000 11000	35000 12000	+926.2 -941.1	1105	基礎標準
3	0.45	30000 0	30000 0	+952.9 -1023.0	1115	シールド示方書

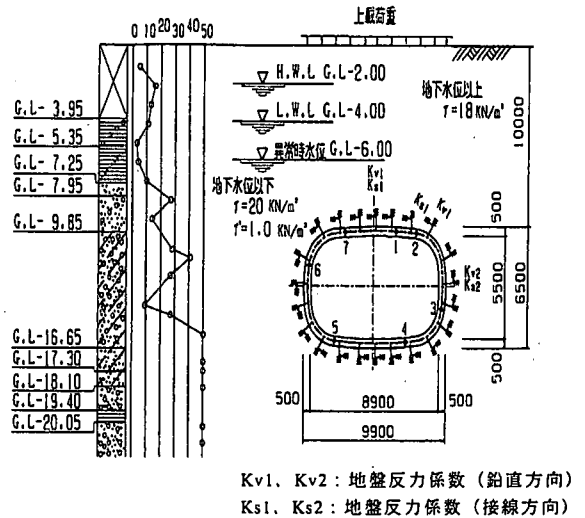


図-5 感度分析検討モデル図

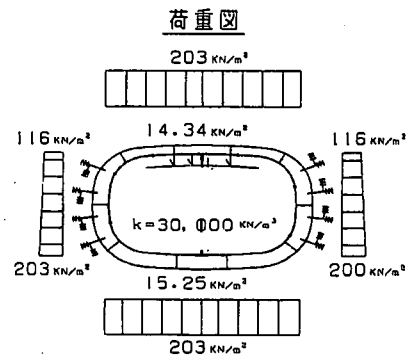


図-6 検討荷重図

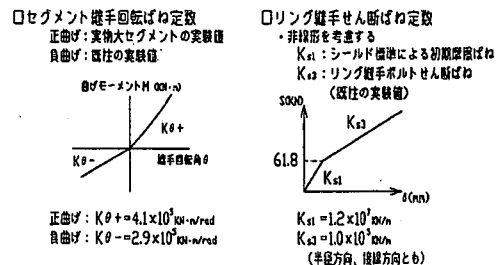


図-7 継手剛性値

(3) 覆工構造

覆工設計は常時設計とレベル2地震クラスの地震時設計を行った。

さらに、常時設計においては、近隣の掘削工事による偏土圧荷状態についても設計した。

大断面矩形という特殊な断面であることから、リング継手の添接効果を考慮しない単リングに対しても対応できる構造とした。

耐震設計の設計モデルを図-8に示す。

耐震設計の手法は“はりばねモデル”を用いた応答変位法で実施した。

地震時の地盤変位は、設計地震波は「鉄道総研適合波」を用いて1次元地震応答解析により求めた。

使用するセグメントの材料は、経済性・剛性・施工性を総合的に判断し、1径間部（渡り線部）にはサンドイッチ型合成セグメント（以下、「合成セグメント」）（セグメント高さ 500mm×幅 1000mm）、2径間部（一般線路部）にはダクトイルセグメント（以下、「D Cセグメント」）（セグメント高さ 350mm×幅 1200mm）を使用することを決定した。（図-9）

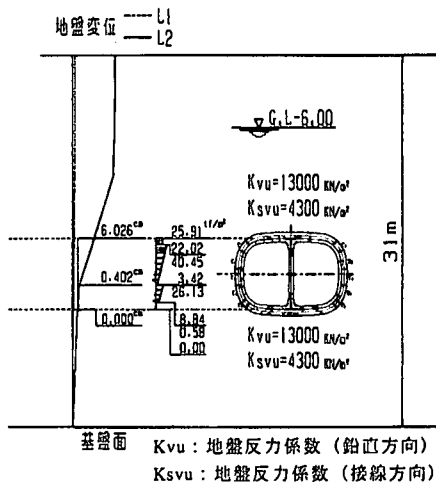


図-8 耐震設計モデル図

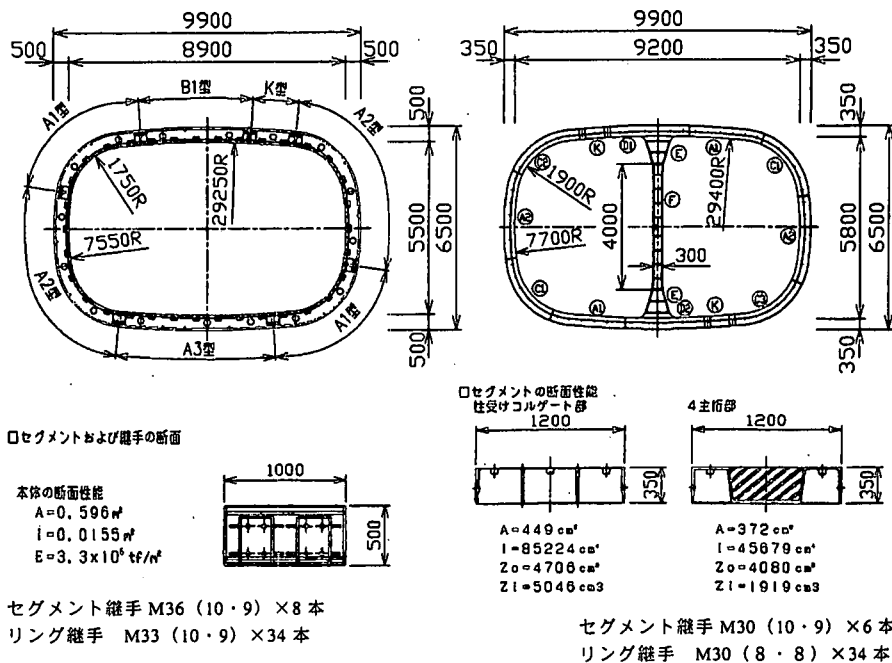


図-9 セグメント構造図

(4) 1径間部と2径間部の接続部の覆工構造

1径間部、2径間部の覆工は、変形や発生断面力が異なることから、接続部においてリング継手や中柱に大きな荷重が作用することが考えられた。このため、接続部の断面力の発生状況について検討することとした。接続部の覆工設計は、“はりばねモデル”に加えて、接続部セグメントの縦断方向の変形について考慮できる“3次元シェルバネモデル”により接続部の断面力およびその影響範囲について検討した。

図-10に検討モデルを示す。

検討ケースは表-2に示すとおり、接続部のセグメントの変形に影響する継手の拘束条件を変えた4ケースについて行った。

検討の結果、各ケースとも、接続部では中柱のある2径間部側のセグメントについて断面力が増加する傾向となった。

断面力増加の割合はセグメント本体およびセグメント継手において常時断面力の2倍から4倍程度、中柱においては常時軸力の3倍程度となった。

また、リング間のせん断力については、図-11に示す通り、リング間を剛結としたCASE2においては大きなせん断力が発生しているものの、リング継手の非線形性を考慮したケースでは常時設計の8~13倍のせん断力が発生する結果となった。

さらに、リング継手のせん断力が増加する範囲は図-11からもわかるように、接続部の前後5リング以内であった。

以上の結果から、接続部のセグメントの構造は下記の事項に対応できる構造とした。

- ① セグメントおよび継手の断面は2径間部セグメントの最大4倍の断面力に耐えられる構造とする。
- ② 中柱についても同様に2径間部中柱軸力の3倍程度の軸力に耐えられる構造とする。
- ③ 接続部のリング継手間のせん断力は2径間部リング継手間のせん断力の最大5倍程度となる。

上記の条件を満たすセグメントとして、接続部のセグメントは図-12の合成セグメントに中柱を取り付けた構造として設計した。

なお、接続部セグメントの配置はリング継手間のせん断力が増加する接続部の前後5リング区間とした。

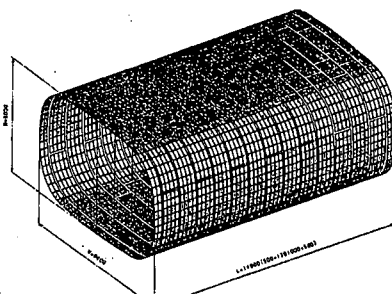


図-10 接続部モデル図

表-2 接続部検討ケース

ケース	解析 方法	セグメント継手		リング間継手		解析リン グ数	備考
		回転	せん断	回転	せん断		
CASE 1	梁パネ	非線形	-	-	非線形	対称 60ダ	端部に収束条件を強制 変位として入力
CASE 2		拘束		拘束	拘束		
CASE 3	シェル パネ		拘束		線形 (第1勾配)	対称 100ダ	
CASE 4			線形 (第1勾配)		線形 (第2勾配)		

* 第1勾配、第2勾配は図-7のKs1、Ks3を使用する

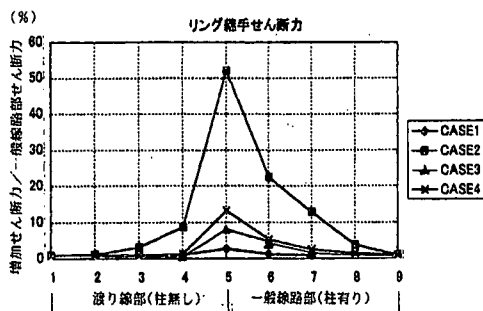


図-11 リング間せん断力結果

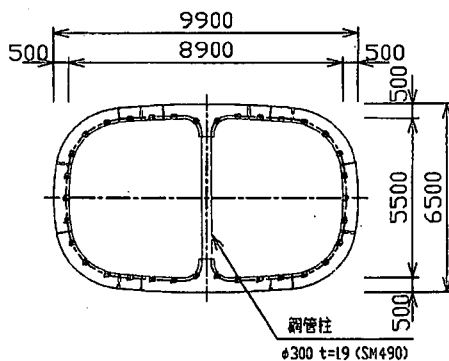


図-12 接続部覆工構造図

4. 実証実験

実証実験により、覆工設計の妥当性について確認するため、合成セグメント、DCセグメントについて実物大の試験の単体試験、継手試験、リング載荷試験を実施した。

これらについては第11回トンネル工学研究発表報告「大断面矩形シールドの実用化の検討-京都市高速鉄道東西線・六地藏北工区-」において報告する。

5、終わりに

大断面矩形シールドの覆工設計において、応力的に有利な覆工形状を確定し、扁平な大断面矩形シールドの設計に用いる側方土圧や地盤反力に対する感度分析を行い、シールド標準に基づいてセグメントの設計を行ってきた。

実施工における覆工への作用土圧や地盤反力の作用状況・覆工の添接効果などそのメカニズムに対してはまだ未解明な点が多いが、今後は、施工において実際の挙動を計測し、フィードバック解析を行い、設計手法の妥当性を実測値との比較検討により検証したい。

なお、本設計は、京都市交通局建設技術委員会ならびに矩形シールドワーキングの指導を得ながら進めた。委員ならびに関係者各位に謝意を表する次第である。

(参考文献)

- 1) 鉄道構造物等設計標準・同解説シールドトンネル, 1997, 7
- 2) トンネル標準示方書 シールド編, 1997, 7
- 3) 鉄道構造物等設計標準・同解説 坑土圧構造物, 1997, 3
- 4) 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 1999, 10
- 5) 中村 浩, 山崎糸治, 山口直紀, 小嶋 勉; 大断面矩形シールドセグメントの設計について, 土木学会第55回年次学術講演会一般発表論文, 2000, 10
- 6) 中村 浩, 山崎糸治, 北嶋武彦, 畔取良典; 中柱を有する大断面矩形シールドセグメントのレベル2耐震設計について, 土木学会第55回年次学術講演会一般発表論文, 2000, 10
- 7) 山崎糸治; 大断面矩形シールド工法の概要について(京都市高速鉄道東西線六地藏北工区), SUBWAY(サブウエイ), 2001, 1
- 8) 中川嘉博, 溝田正志, 北嶋武彦, 菅 一也; 複線断面扁平シールドの課題と対応, 土木学会第56回年次学術講演会一般発表論文, 2001, 10
- 9) 岡崎弘, 魚野清史, 竹國浩司, 今野 勉, 青木敏行; 矩形ダクタイトイルセグメントの構造試験, 土木学会第56回年次学術講演会一般発表論文, 2001, 10
- 10) 小畑 博, 杉山弘士, 畔取良典, 小林洋一, 前島 稔; 大型矩形サンドイッチ型合成セグメントの構造試験(その1), 土木学会第56回年次学術講演会一般発表論文, 2001, 10
- 11) 岡本直久, 川端敏之, 小嶋勉, 岩橋正佳, 前島 稔; 大型矩形サンドイッチ型合成セグメントの構造試験(その2), 土木学会第56回年次学術講演会一般発表論文, 2001, 10
- 12) 塚下安彦, 福田昌弘, 畔取良典, 栗山裕司; 矩形シールドにおける構造変化点の検討(その1 梁バネモデルを用いた解析), 土木学会第56回年次学術講演会一般発表論文, 2001, 10
- 13) 井上豊司, 玉田康一, 中尾 努, 小嶋 勉, 栗山裕司; 矩形シールドにおける構造変化点の検討(その2 梁バネモデルとシェルバネモデルの比較), 土木学会第56回年次学術講演会一般発表論文, 2001, 10
- 14) 中村浩, 古川 衛, 山口直紀, 溝田正志; Planning for shield driven double track subway tunnel of box shape, IS-Kyoto, 2001, 10