

1

世界初の大断面矩形シールドトンネルの計画設計

北嶋武彦

KITAJIMA Takehiko

中央復建コンサルタンツ
株式会社/地下構造系グループ/
プロジェクトマネージャー



畔取良典

KURATORI Yoshinori

中央復建コンサルタンツ
株式会社/地下構造系グループ/
プロジェクトマネージャー



1— 矩形シールドの計画

(1) 設計区間

京都市では、国際会館からJR京都駅を經由して竹田に至る烏丸線と、六地蔵から山科を經由して二条に至る東西線を現在供用中である。本シールドは、1999年10月～2004年11月に実施した東西線六地蔵～醍醐間延伸工事のうち、六地蔵～石田間のシールド区間に採用された。

(2) 矩形シールドトンネルの採用

本区間は、道路幅が15mと狭く交通量が多いために渋滞が多発し、

地下には幹線下水管・水道管・ガスパ等のライフラインが輻輳している。

また、六地蔵駅は始発駅となることから、渡り線部が必要となる。このような場合には、駅部と渡り線部を開削工法、駅間は単線並列シールドトンネルとするのが一般的であるが、開削工法による道路交通への影響、輻輳する埋設物処理等の大きな問題があった。

これらの諸問題に対して、①複円形シールド工法、②矩形シールド工法、③単線並列シールド工法、④複

線シールド工法を比較検討した。矩形シールドトンネルは全く新たな発想のシールド形状である。

比較検討の結果(図2a、b参照)、幹線下水管の直下でのシールド施工が必要なことから、矩形シールドを採用した場合には、駅が浅くなり利用者の利便性が高まること、また掘削土量が少なく、環境負荷の軽減に寄与すること、駅部を含めた全体工事費でコスト縮減ができること等の利点が判明し、矩形シールドを採用した。



図1—京都市交通局の地下鉄路線図

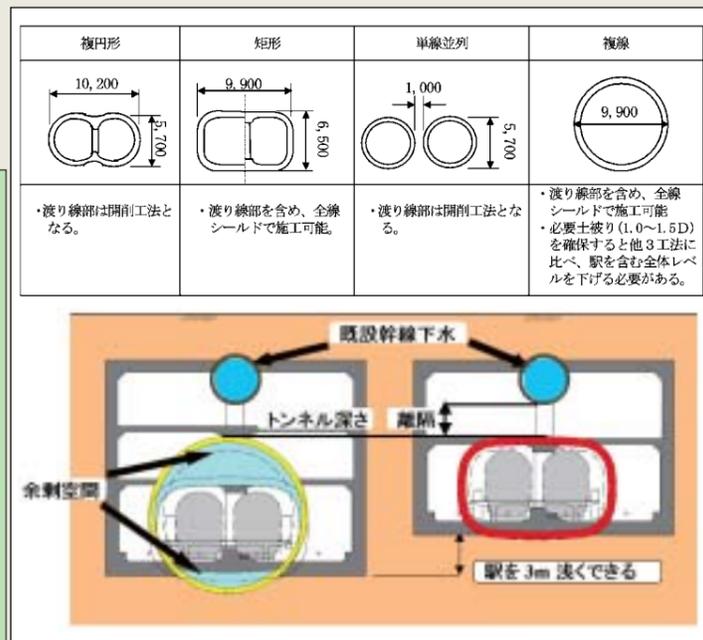


図2a—各種シールド工法の比較(その1)

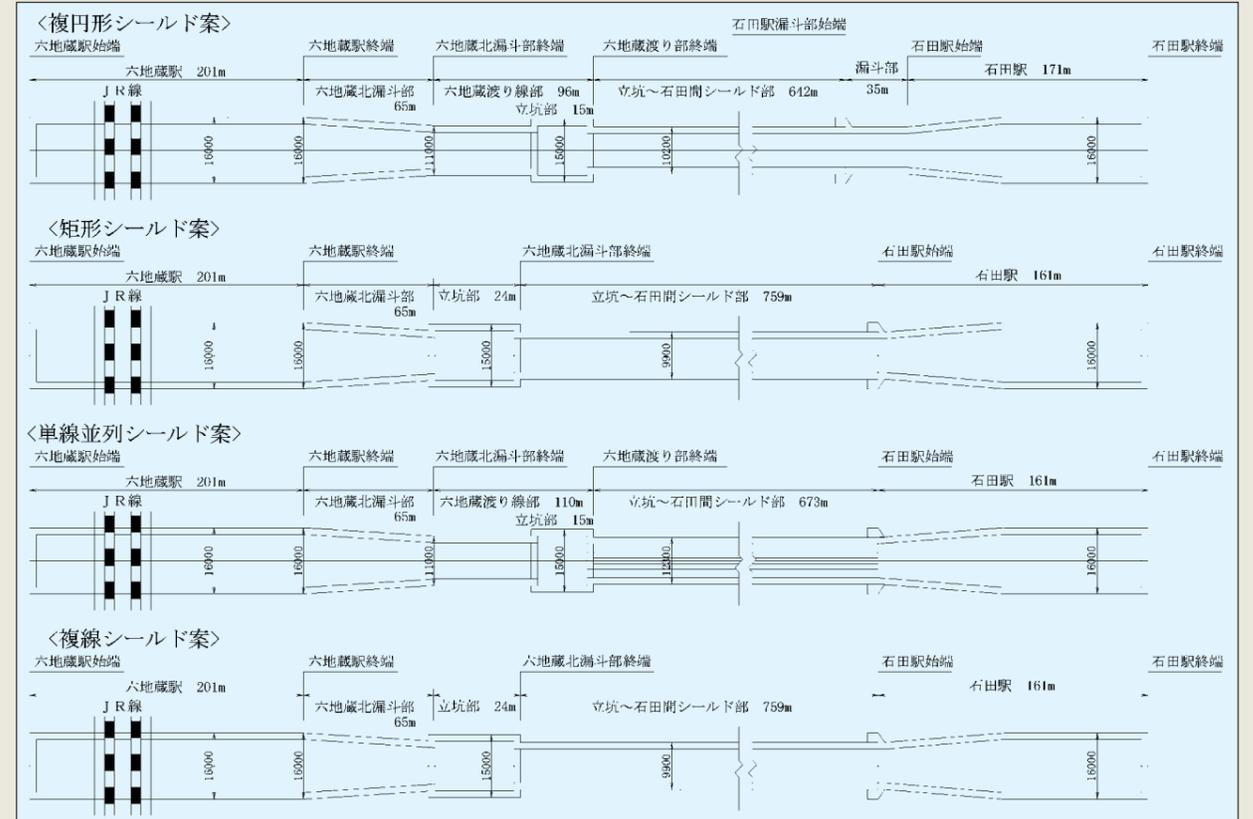


図2b—各種シールド工法の比較(その2)

2— 矩形シールドの概要と設計上の課題

(1) 断面形状

トンネル断面は、高さ6.5m×幅9.9mであり、実績のある大断面円形シールドに匹敵する規模である。

また、矩形シールドにおける実績と比較すると、これまでの矩形シールド面積の1.6倍にあたる約60m²であり、柱のないトンネルと比較した

場合には約2倍近い大きさとなる(図3参照)。

構造形式としては渡り線部(1層1径間、延長約60m)、一般線路部(1層2径間、延長約700m)である。

(2) 通過地盤と土被り

土被りは10m(渡り線部)～15m(一般線路部)であり、N値=10～30の砂礫層を通過する。

(3) 設計上の課題

大断面矩形シールドに対して、以下の設計上の課題が考えられる。

- a) 渡り線部の形状とセグメント
円形シールドでは軸力が卓越するが、渡り線部においては曲げモーメントが卓越し、特にトンネル上部および下部の変形が大きくなる。採用するセグメントおよび継手はこれに対応できるものとする必要がある。

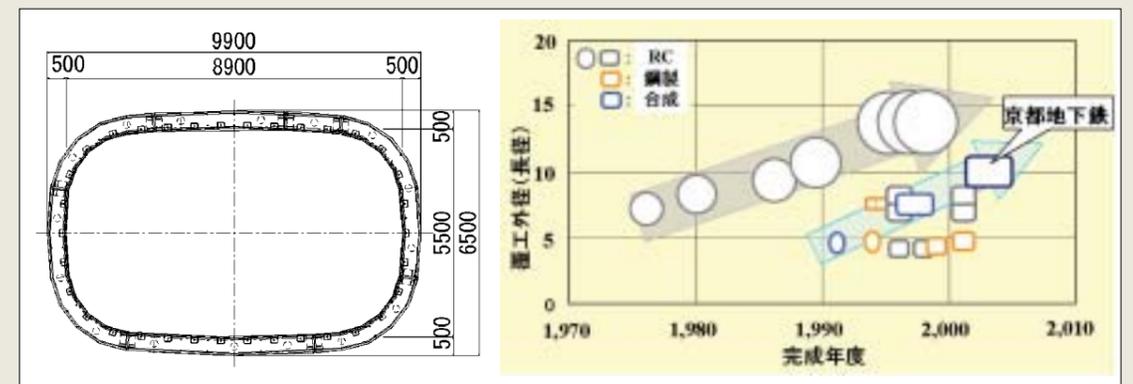


図3—形状概要と断面実績

b) 常時荷重
円形シールド設計に用いる荷重(土圧・水圧)の適用性を確認する必要がある。また、設計に用いられる地盤反力は、施工時の裏込注入の現実性と密接に関連することから、これに対する配慮も必要である。

c) 添接効果とセグメント組み立て
本シールドは、円形シールドと同様に千鳥組により組み立てられるが、渡り線部においてはシールドマシン内でのトンネル上下部の変形が大きくなることが予想され、通常の千鳥組効果を期待できない可能性がある。

d) 変形モードの違いによる接続部対策

渡り線部では、トンネル上下部の径間中央付近の変形が卓越することに対して、一般線路部では中柱を有することから、接続部ではこの影響を考慮する必要がある。

e) 耐震設計

トンネル断面が特殊であることに加えて、一般線路部では中柱を有することから、耐震安全性について検討を加えておく必要がある。

3 常時設計

(1) 断面形状と採用セグメント

a) 形状効果による断面力低減

前述したように、トンネル断面が大断面矩形となることから、円形シールドに比べて、曲げモーメントが卓越する。そこで、断面に曲線を挿入することにより、設計断面力の軽減を図った。計算は土被り10mの全土被り土圧、側方土圧は土水分離($\lambda=0.4$)とし、剛性一様リング($\eta=0.7$, $\zeta=0$)として行った。図4は、トンネル上下部に曲線(R1)を挿入した場合の断面力感度分析結果であり、図中のR1=4.6mは、単円シールドの場合を示している。この感度分析結果より、最終的にはトンネル側部にも曲線(R2)を挿入し、長方形断面の約70%程度に軽減することができた。

b) セグメント

渡り線部のセグメントについては、以下の3種のセグメントを比較対象とした。

- ① コルゲート型ダクタイルセグメント
- ② 嵌合方式合成セグメント(NM)
- ③ サンドイッチ合成セグメント

a) で示した最終形状に対して、経済性および変形(上下部のたわみ量)からサンドイッチ合成セグメントを採用した。

また、一般線路部については、ダクタイルセグメントとした。

(2) 構造モデルと設計法

設計計算に用いる構造モデルは、「鉄道構造物等設計標準・同解説シールドトンネル」に準拠し、セグメント本体をはり、継手を継手バネとしてモデル化する「はり-バネモデル」を採用し、許容応力度法により設計を行なった。

継手バネ値については、既往の実験結果からバネ値を設定した。このバネ値設定については、実物大の継手実験を行い、その妥当性の確認を実施した。

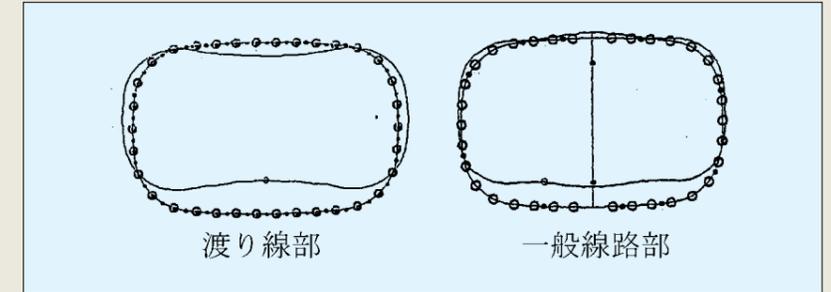
(3) 考慮する荷重

a) 土水圧

円形のシールドトンネルでは、経験的に定められた側方土圧係数 λ と地盤反力係数 k が用いられている。本トンネルの場合、その断面形状は開削トンネルに近い矩形であることから、設計では、シールドとしての設計のほか、開削トンネルとしての設計も行い、厳しい値を採用した。

b) 単リング設計

シールドは、千鳥組で組み立てられるが、シールドマシン内でのトンネル上下部の変形が大きくなること



■図7-変形モードの違い

が予想され、通常の千鳥組効果を期待できない可能性があった。そこで、添接効果を期待した「3リングはり-バネモデル」のほか、安全側設計の観点から、添接効果を期待しない「単リングはり-バネモデル」による設計計算を合わせて実施し、厳しい値を設計断面力とした。

c) 偏土圧を考慮

過去の複円形シールド現場計測結果から、本シールドにおいても、偏土圧+50kN/m²を考慮した。

4 接続部の設計

(1) 接続部の問題点

本トンネルでは、構造形式の異なる、渡り線部(1層1径間)と一般線路部(1層2径間)が連続することとなる。図7にそれぞれの変形モード図を示すが、上下床版径間中央付

近で大きく変形モードが異なり、特に一般線路部側中柱セグメントおよびリング継手に大きな荷重が作用することが予想された。

(2) 3次元解析による設計

上記の問題に対して、渡り線部および一般線路部をそれぞれ5リングとした「10リングはり-バネモデル」によるほか、図8に示す「10リング3次元シェル-バネモデル」を用いて設計を行った。

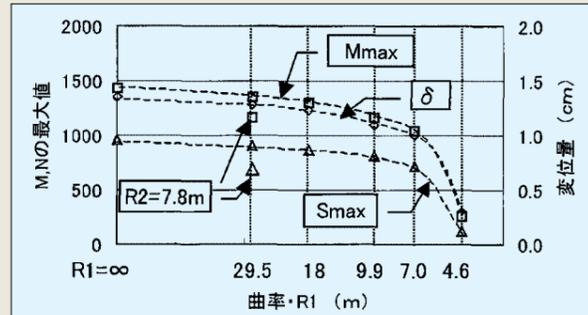
(3) 対策

検討の結果、渡り線部側の断面力が減少し、一般線路部側に断面力の増加が認められたため、渡り線部側のサンドイッチ型合成セグメントを一般線路部側5リングに適用した。

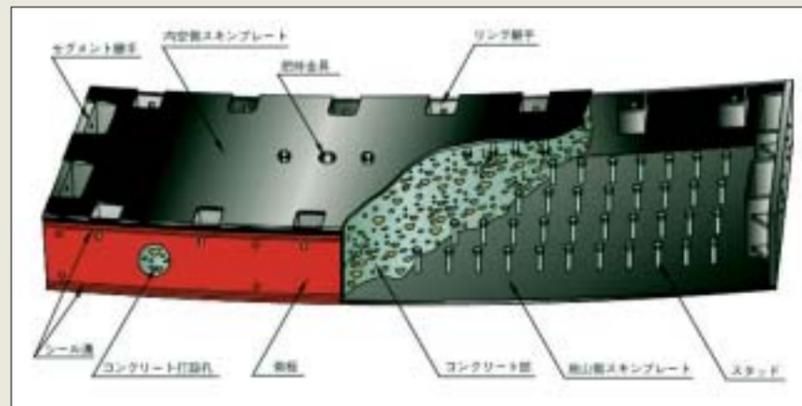
5 おわりに

京都市地下鉄東西線「醍醐~六地藏」間延伸工事において、世界で初めての試みとなった大断面矩形シールドトンネルの完成に対して、事業主体の京都市交通局、計画・設計の中央復建コンサルタンツ、施工業者の鹿島・奥村・大豊・吉村・岡野共同企業体の3社が「平成15年度土木学会技術賞」を受賞した。これは、都市空間利用に幅広く応用できる設計および施工技術が高く評価され受賞に至ったものと考えている。

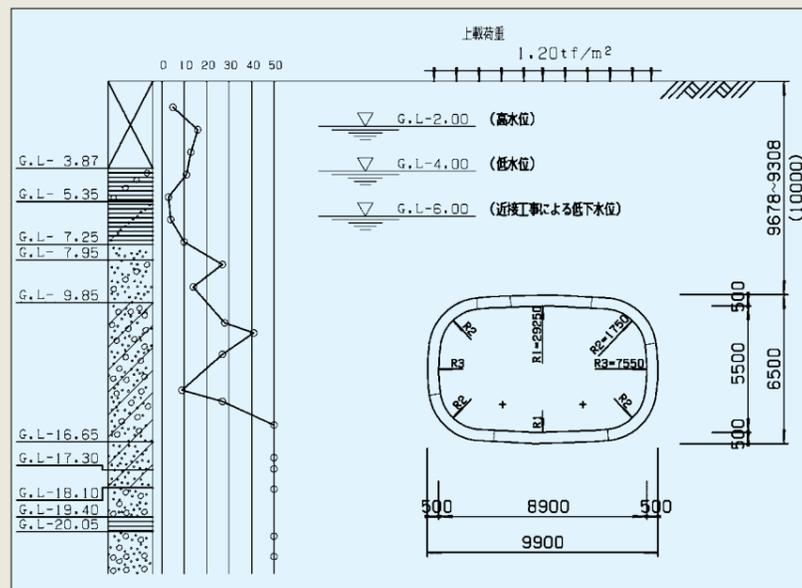
この延伸工事は、平成16年11月に無事開業し、現在は市民の足として幹線都市鉄道の機能を果たしている。



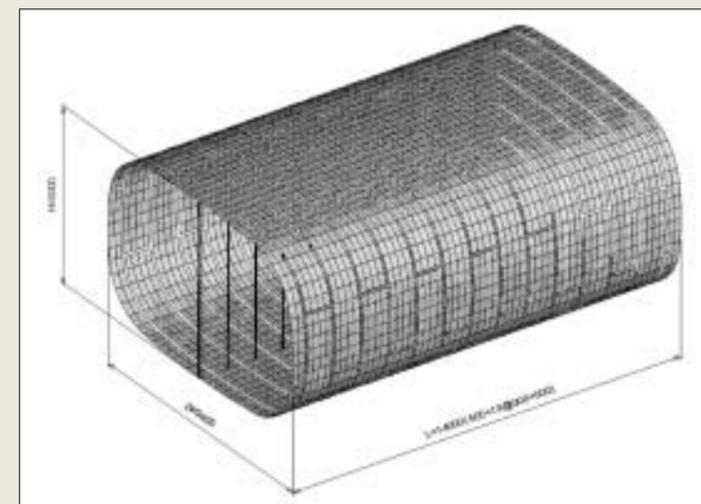
■図4-断面力感度分析結果



■図5-サンドイッチ型合成セグメントの概要



■図6-地盤モデル



■図8-10リング3次元シェル-バネモデル