

現場計測に基づく高速道路シールドトンネルの設計法に関する検討

STUDY ON METHOD FOR DESIGNING EXPRESSWAY SHIELD TUNNELS BASED ON FIELD MEASUREMENT

西岡藍子¹⁾，川田成彦²⁾，大場 新哉³⁾，団 昭博⁴⁾，斉藤 正幸⁵⁾

Aiko NISHIOKA, Naruhiko KAWADA, Shinya OBA, Akihiro DAN, Masayuki SAITOU

The Central Circular Shinjuku Route of Metropolitan Expressway constitutes the 11 km-long western section of the central circular expressway of a radius of 8 km from the city center and a total length of approximately 46 km. The majority of this section, which have two lanes in each direction, is planned to be constructed using the shield tunneling method. Since the tunnels have a huge cross section of 11 to 13 m in outer diameter, a design method was developed for shield segments based on beam-spring models.

This report describes the verification of the design method by comparing the results of structural analysis that was conducted using this method and the measured data collected at the site where segments were assembled.

key words: expressway shield tunnel, tunnel lining, design method, field measurement

1. はじめに

首都高速中央環状新宿線は、都心から半径約8kmに位置する全長約46kmの環状道路のうちの西側部分11kmを形成する片側2車線の路線であり、都市内における慢性的な交通渋滞の解消のために他の環状道路と合わせて、早期整備が社会的ニーズとなっている路線である。また、周辺環境保全および公共用地有効利用の観点から、幅員40mに拡幅される環状6号線の地下を通過する道路トンネルとして計画されている。この区間の多くではシールドトンネルによる施工が計画されているが、トンネル外径が11~13mに及ぶ超大断面トンネルであり、さらに二次覆工を省略することを前提としている。

一方、本シールド用セグメントの設計にあたっては、今後、首都高速道路公団としてもシールドトンネルを採用する機会が増加すると予想されること、また超大断面トンネルであることから合理的かつ経済的な構造とするために、はりばねモデルを基本とした高速道路シールドトンネル用セグメントの設計手法を策定した。しかし、この設計手法は机上検討において各種構造解析を実施し、その成果を反映したものであり、その妥当性については、現場計測結果を踏まえて評価することが望ましい。

本報告は、この手法による解析結果とセグメント現場計測結果を比較することによって、設計手法の妥当性を検証したものである。

2. 現場計測概要

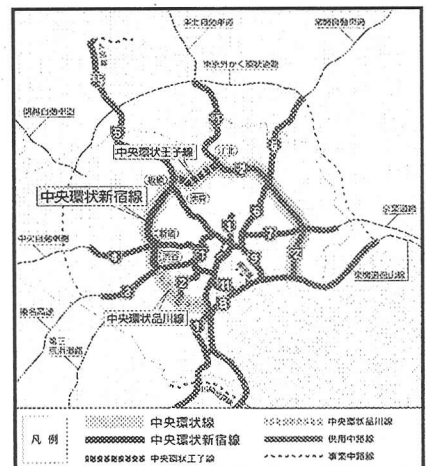


図-1 中央環状新宿線路線概要

1)正会員 首都高速道路公団 東京建設局建設第一部
2)正会員 首都高速道路公団 東京建設局建設第一部
3)正会員 首都高速道路公団 東京建設局建設第一部

4)正会員 工修 日本シビックコンサルタント株式会社 技術本部技術研究部
5)正会員 工修 日本シビックコンサルタント株式会社 技術本部技術研究部

2. 1. 計測トンネルの概要

中央環状新宿線シールドトンネル区間は2車線用大断面トンネルによる併設施工で計画している。この区間で初めての施工となる西新宿シールドは、国道20号線（甲州街道）と交差する初台交差点付近の都道環状6号線（山手通り）地下に構築する、施工延長599m、土被り21～27m、最小離隔2.6mの併設トンネルである。施工付近の地質状況は、地表面より表層、関東ローム層、東京層（砂層・粘土層）、東京礫層および上総層群で構成されており、このうち東京礫層および上総砂層を泥水式シールド工法によって掘進する。図-1に本シールドの平面線形および地質縦断面図を示す。また、本トンネルのセグメント構造を表-1に示す。

2. 2. 計測概要

現場計測は初台交差点付近で実施しており、セグメントリングの自重作用時および地盤の安定状態におけるセグメントリングの挙動、さらには後行シールド通過に伴う先行トンネルの挙動等を把握することを目的として、セグメントリング組立直後より計測を実施している（図-2）。

セグメントリングに設置した計測機器は、土圧計、水圧計および周方向に鉄筋計を配置した。図-3に計測機器設置概要を示す。

表-1 セグメント構造諸元

構造形式	RC平板形短ボルト
分割数	等10分割
外径	13,000mm
内径	11,900mm
厚さ	550mm
幅	1,200mm

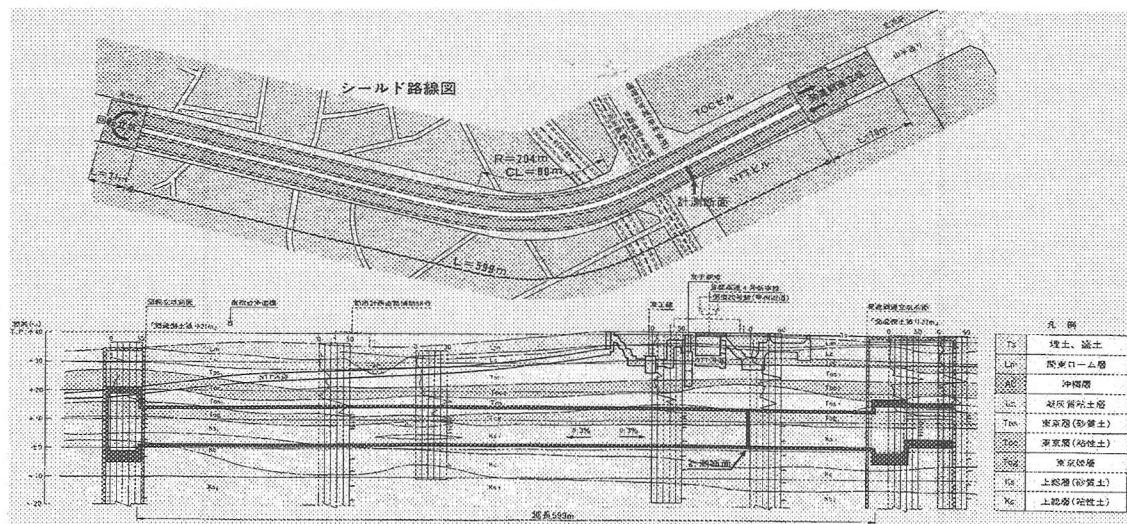


図-1 西新宿シールド平面・縦断面図

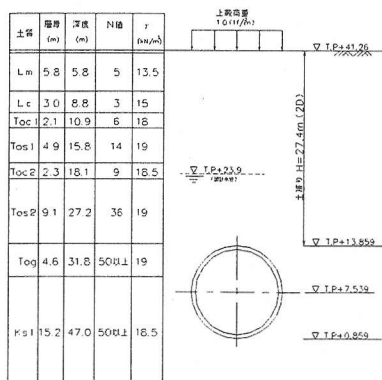
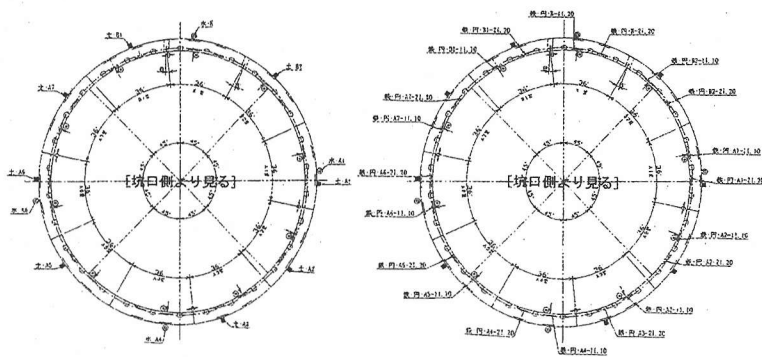


図-2 計測断面土質概要



(1)土圧計・水圧計

(2)周方向鉄筋計

図-3 計測機器設置概要

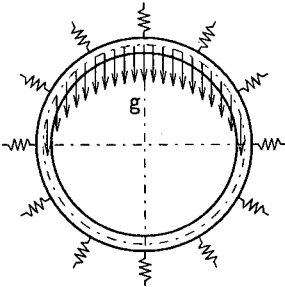
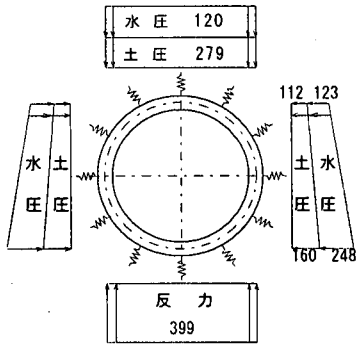
3. 構造解析概要

3. 1. 解析条件

高速道路シールドセグメントの設計手法として採用している構造解析方法は、セグメント本体を梁に、セグメント継手を回転ばねに、また、リング継手をせん断ばねにそれぞれモデル化し、千鳥組による添接効果も考慮できる2リングはりばねモデルとした。作用荷重については、従来、セグメントの設計で採用されている手法¹⁾を基本として、セグメント自重作用時および土水圧荷重作用時をそれぞれ単独に解析し、これらの合成断面力を設計断面力として扱っている。このとき、本トンネルが最大で13m程度に及ぶ超大断面であるため、従来の設計手法では設計断面力に占めるセグメント自重による断面力の割合が大きくなる。しかし、既往の研究等²⁾において報告されているように、隣接リングによる拘束やシールドジャッキによる押付け等の影響によって、セグメント組立時の発生断面力は設計断面力に比べて小さい水準であることから、セグメント自重作用時にセグメントリング全周が仮想ばねによって支持されているものとした。このときに用いる仮想ばね定数については、シールドジャッキ、隣接リング、テールシールドおよび周辺地盤等による拘束、さらに施工課程を考慮した多リングモデル³⁾により設定した。

また、継手部のばね定数については、既往の研究成果に基づいて設定している。セグメント継手回転ばね定数 k_θ は、継手板およびコンクリートの力学特性をモデル化して骨組解析⁴⁾により、正曲げおよび負曲げそれぞれに対して算定した。また、リング継手せん断ばね定数 k_s については、実物大せん断試験結果を参考として、バイリニアで設定した。なお、土圧および水圧荷重値については、現場計測結果より推定した値を採用した。表-2に構造解析条件を示す。

表-2 セグメント構造解析条件

	セグメント自重作用時	地盤安定状態（土水圧作用時）
土と水の扱い	—	土 水 分離
荷重条件 (kN/m^2)		
側方土圧係数 λ	—	$\lambda=0.4$
地盤反力係数 k (接線方向は無視)	半径方向 $k_r=5.0\text{MN/m}^3$ (引張方向は無視)	半径方向 $k_r=50.0\text{MN/m}^3$ (引張方向は無視)
セグメント継手 回転ばね定数 k_θ	・既往の研究により、軸力を無視して算出 正曲げ： $k_\theta^+=2.5 \times 10^5 \text{kN} \cdot \text{m/rad}$ 負曲げ： $k_\theta^-=1.0 \times 10^5 \text{kN} \cdot \text{m/rad}$	・既往の研究により、軸力を考慮して算出 正曲げ： $k_\theta^+=2.0 \times 10^5 \text{kN} \cdot \text{m/rad}$ 負曲げ： $k_\theta^-=1.0 \times 10^7 \text{kN} \cdot \text{m/rad}$
リング継手 せん断ばね定数 k_s	・せん断試験結果を採用し、バイリニアとする 第1勾配： $k_{s1}=2.50 \times 10^5 \text{kN/m}$ 第2勾配： $k_{s2}=1.38 \times 10^4 \text{kN/m}$ ・法線方向、接線方向ともに同値を採用	同 左

3. 2. 解析結果および考察

解析結果および計測結果の比較を表-3に示す。これよりわかることを以下に列挙する。

(1) セグメント自重作用時

平均軸力をみると、解析値が66kNであるのに対し、計測値が375kNと大きい水準で発生していることがわかる。これは、底部付近で発生した計測軸力が解析値を大幅に上回っていることに起因している。このような軸力が発生した理由として、図-4に示すシールド掘進と発生軸力の推移をみると、ジャッキ推力が作用した時点において発生軸力が急激に増加する傾向を示し、シールド機掘進停止後、次リングの組立て完了後においては軸力が初期の状態に戻っているものの、トンネル底部の軸力は増加する傾向が認められる。このことから、トンネル底部に発生した計測軸力は、セグメント自重およびジャッキ推力の影響を受けているものと推察される。

一方、曲げモーメントの分布形状をみると、解析値と計測値は概ね一致する傾向を示しているものの、底部での発生量が解析値は計測値に比べて小さいものとなっている。また、曲げモーメント最大値をみると、負の曲げモーメント最大値については110kN・m程度で概ね再現しているものの、正の曲げモーメントについては、解析値は計測値の50%程度である。

(2) 地盤安定状態

平均軸力をみると、解析値が2,991kN程度であるのに対し、計測値が2,975kNとなり、両者は概ね整合していることがわかる。このことから解析に用いた荷重強度は、セグメントに作用する土水圧を概ね再現しているものと推察される。

一方、曲げモーメントの分布形状をみると、解析値は頂部付近において正の曲げモーメント最大値461kN・mを示し、スプリングライン付近において負の曲げモーメント最大値377kN・mを示す傾向が認められる。これに対し計測値は、上半部と下半部でほぼ同様の分布形状となっており、発生量は正の曲げモーメント最大値が550kN・m、負の曲げモーメント最大値が400kN・mとなっている。このことから、分布形状については、下半部において整合性が認められないものと考えられ、また発生量についても、正曲げ・負曲げともに解析値のほうが計測値よりも6~15%程度低い水準となっている。

(3) 設計手法の課題

以上のことから、現場計測結果に基づいて高速道路シールドセグメントの設計手法における課題を抽出すると、以下の事項が挙げられる。

- ・セグメント自重作用時においては、セグメント底部の曲げモーメントが頂部付近の曲げモーメントと同等以上に評価されるように、解析モデルを改善する必要がある。
- ・地盤安定状態においては、セグメント自重作用時と同様にセグメント底部の曲げモーメントが頂部付近の曲げモーメントと同等以上に評価されること、また、正および負の曲げモーメント最大値についても、計測値と同等またはそれ以上の水準に評価されるよう、解析モデルを改善する必要がある。

4. 原設計手法の改善解析

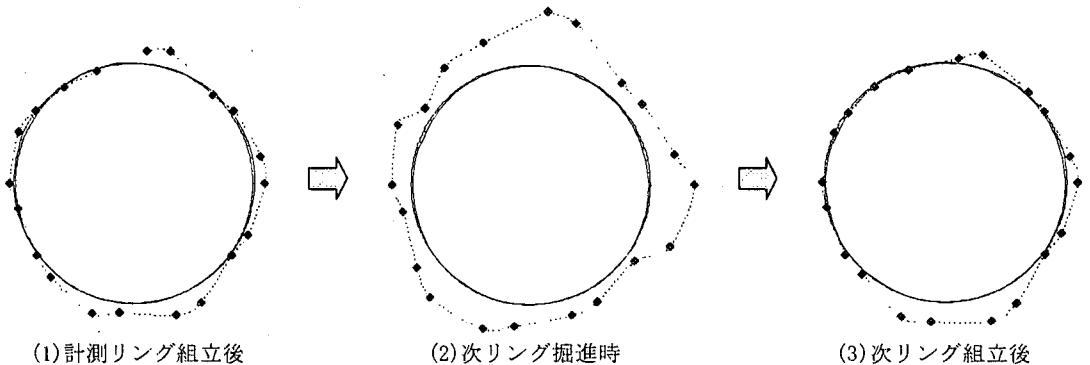
先述の改善事項を踏まえ、ここでは現場計測結果との整合性を高めることを目的として、現行のセグメント設計手法における改善を試みることとした。

試行解析条件は表-4に示すように、セグメント自重作用時においては従来のセグメント設計手法⁹⁾でも適用されている、自重に対する反力を考慮することとした。また、地盤安定状態においては、水圧計測値がセグメントの半径方向に作用する分布形状となっていることを考慮して、鉛直または水平方向に作用する作用形状から既にシールドセグメントの設計基準⁵⁾で適用されている、半径方向に作用する分布形状とした。

表－３ 現行設計手法と計測結果との比較

	セグメント自重作用時		地盤安定状態（土水圧作用時）	
軸 力 N		・解析 $N_{average} = -66\text{kN}$ ・計測 $N_{average} = -375\text{kN}$		・解析 $N_{average} = -2,991\text{kN}$ ・計測 $N_{average} = -2,975\text{kN}$
曲げモーメント M		・解析 $M_{max}^+ = 120\text{kN}\cdot\text{m}$ $M_{max}^- = -117\text{kN}\cdot\text{m}$ ・計測 $M_{max}^+ = 230\text{kN}\cdot\text{m}$ $M_{max}^- = -110\text{kN}\cdot\text{m}$		・解析 $M_{max}^+ = 461\text{kN}\cdot\text{m}$ $M_{max}^- = -377\text{kN}\cdot\text{m}$ ・計測 $M_{max}^+ = 550\text{kN}\cdot\text{m}$ $M_{max}^- = -400\text{kN}\cdot\text{m}$

凡 例 ◆◆◆ : 自重時 ▲▲▲ : 2.5ヶ月後 — : 解析値



図－４ シールド掘進と発生軸力の推移

表－４に示した、改善事項を反映した解析結果と現場計測結果との比較より、セグメント自重作用時における曲げモーメント分布をみると、セグメント底部の分布形状を再現することが可能となり、発生量についても現行設計手法のそれに比べて近似する結果となった。一方、地盤安定状態における曲げモーメント分布についてみると、セグメント底部の分布形状を再現することが可能となったものの、発生量が現場計測値よりも25～40%程度高い水準となり、さらに軸力についても25%高い水準となった。

５. まとめ

高速道路シールドトンネルの特殊性を考慮して策定したセグメント設計手法に対し、セグメント挙動計測結果に基づいて構造解析手法の妥当性を評価した。この結果、セグメント自重作用時および地盤安定状態ともに、発生断面力を概ね再現できることが確認された。ただし、トンネル底部の曲げモーメント分布に多少の相違が認められたことから、現場計測結果を重視した設計手法の改善を試みたところ、セグメント自重作用時における自重

反力の扱い，あるいは水圧の作用形状の変更などの課題が残されていることが明らかとなった．今後は現場計測を実施するなどして計測データの蓄積を図り，合理的な設計手法を確立するためにも，継続して検討を進める必要がある．

表－４ 設計手法の改善事項および解析結果と計測結果の比較

	セグメント自重作用時		地盤安定状態	
改善事項	自重作用時において，トンネル底部に発生する曲げモーメント分布形状の整合を図る		地盤安定状態において，トンネル底部に発生する曲げモーメント分布形状の整合を図るとともに，正および負の曲げモーメント最大値を同等以上とする	
概要	自重解析時において自重の作用に対して底部反力を考慮する		セグメント自重作用時の条件（自重反力を考慮）に加えて，地山安定期の解析において，地下水圧の作用形状をトンネル半径方向に作用させるものとする	
軸力 N		・解析 $N_{average} = -123\text{kN}$ ・計測 $N_{average} = -375\text{kN}$		・解析 $N_{average} = -3,776\text{kN}$ ・計測 $N_{average} = -2,975\text{kN}$
曲げモーメント M		・解析 $M_{max}^+ = 202\text{kN}\cdot\text{m}$ $M_{max}^- = -169\text{kN}\cdot\text{m}$ ・計測 $M_{max}^+ = 230\text{kN}\cdot\text{m}$ $M_{max}^- = -110\text{kN}\cdot\text{m}$		・解析 $M_{max}^+ = 697\text{kN}\cdot\text{m}$ $M_{max}^- = -566\text{kN}\cdot\text{m}$ ・計測 $M_{max}^+ = 550\text{kN}\cdot\text{m}$ $M_{max}^- = -400\text{kN}\cdot\text{m}$
凡 例 ◆…：自重時 ▲…：2.5ヶ月後 ———：解析値				

参考文献

1)土木学会：トンネル標準示方書〔シールド工法編〕・同解説，1996

2)高橋，中村，石村：首都圏外郭放水路シールドトンネルの挙動計測，トンネル工学研究論文・報告集第11巻，2001.11.

3)渡辺，田嶋，並川：施工課程を考慮したシールドセグメントの合理的設計，土木学会第55回年次学術講演会第VI部門，2000.9.

4)村上・小泉：シールド工事用セグメントのセグメント継手の挙動について，土木学会論文集，No.296，1996.3.

5)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 シールドトンネル，1997