

大断面シールドトンネル切開き部における鋼殻の設計

A DESIGN METHOD FOR STEEL SEGMENTAL LININGS PARTIALLY REMOVED FOR CUT-AND-OPEN SECTIONS OF LARGE DIMENSIONAL SHIELD TUNNELS

土橋 浩¹⁾・川田成彦²⁾・白鳥 明³⁾

Hiroshi DOBASHI, Naruhiko KAWADA, Akira SHIRATORI

山中宏之²⁾・森 益基³⁾

Hiroyuki YAMANAKA, Masuki MORI

In the Central Circular Shinjuku Route of Tokyo Metropolitan Expressway, the "Cut-and-cover and cut-and-open method for shield tunnels" is fully applied for the construction of its ramps and junction sections. This method is executed as follows; 1) Two parallel shield tunnels are constructed independently. 2) The ramps or junction sections are constructed by connecting between the RC frame bodies of the sections and the partially removed steel segmental linings of the two tunnels.

In the following text, we report on the outlines of the "Cut-and-cover and cut-and-open method for shield tunnels" and of the design method for steel segmental linings of the two tunnels.

Key Words: Large Dimensional Shield Tunnel, Cut-and-Cover and Cut-and-Open Method, Steel Segment

1. はじめに

中央環状線は都心から半径約8kmに位置する全長約46kmの環状道路であり、都心部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せて早期整備が社会的ニーズとなっている路線である。中央環状線の北側および東側部分の約26kmは既に完成しており、残る区間についても鋭意建設および計画を進めているところである(図-1)。

中央環状新宿線は中央環状線の西側部分11kmを形成する路線であり、環状6号線の地下にトンネル構造で建設される。道路規格は往復4車線、設計速度60km/hであり、街路とアクセスする出入口が5箇所、放射方向に伸びる他の首都高速道路とのジャンクションが3箇所および換気所が9箇所設置される(図-2)。

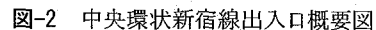
環状6号線は断面交通量にして約30,000台/日の交通量を抱えるため、施工にあたっては極力街路交通に支障を与えないよう現況の車線数を確保しつつ街路を切廻しながらの施工となる。



図-1 路線概要図

- 1) 正会員 首都高速道路公団 東京建設局
- 2) 正会員 鹿島建設(株) 土木設計本部
- 3) 正会員 大成・フジタ・戸田建設共同企業体

中央環状新宿線の計画地は、表層はローム層、河川との交差部は沖積層が堆積しているが、計画深度では主として東京礫層、上総層群といったN値が50を超える硬質な地盤である。また、これらの地層の中には砂層・礫層で代表される滞水層が存在するため、設計および施工にあたっては地下水に対する十分な配慮が必要となっている。



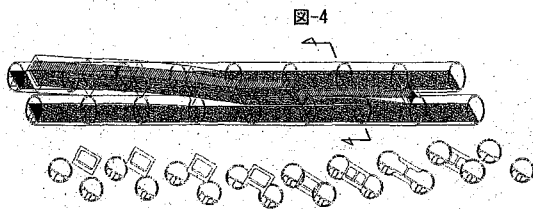


図-3 分岐合流部構造概要

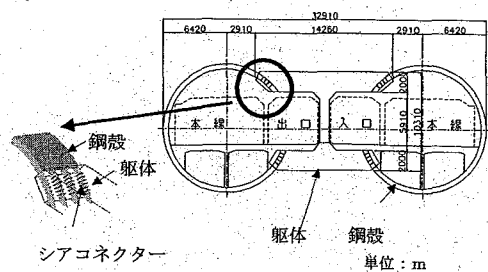


図-4 標準構造図

(3) 施工法の概要

開削切開き部の施工手順を図-5に示す。施工手順としては、まず、トンネル上部に山留壁、トンネル外側に遮水壁を施工した後にシールドを掘進する。次に、掘削に伴う鋼殻の変形を防止するために、トンネル内に内部補強工を設置した後、地表面から掘削を行う。そして、トンネル間の掘削を行いながら頂版、底版および中壁を構築し、最後に鋼殻を撤去する。

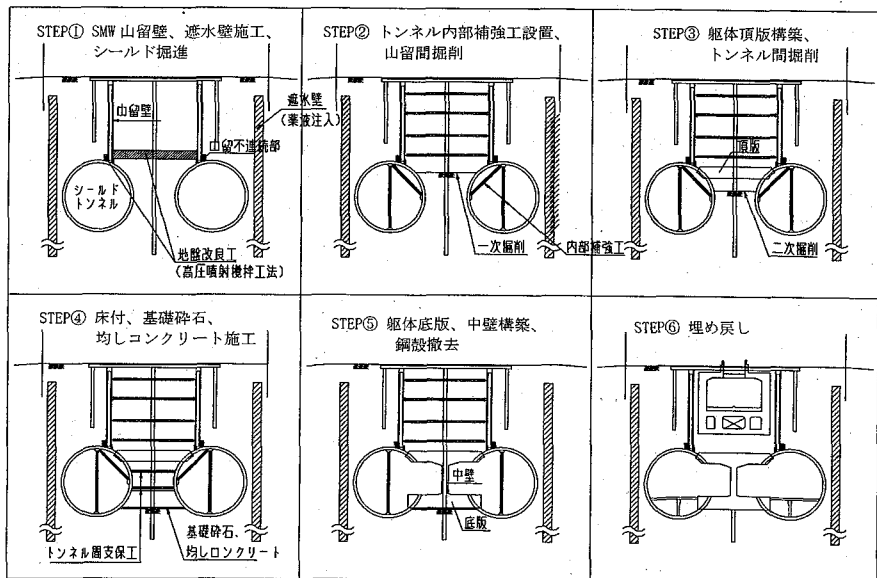


図-5 施工手順図

この施工手順において、STEP1でシールドが通過した後もシールドの掘進作業は続いているため、STEP2～STEP6の切開き作業はセグメント搬送等の作業との同時施工となる。

(4) 本工法の適用にあたっての課題と対策

本工法を適用するにあたり、図-6に示すような、①山留不連続部からの出水および②トンネル全体の安定を最重要課題と位置付け、これらについて様々な対策工の比較検討を行った。その結果、それぞれ以下に示す対策工を選定した。

a) 山留不連続部からの出水対策工

本工法では、図-7に示すように山留とトンネルの接合部が不連続となり、かつ、この接合部が地下水を豊富に含む東京礫層に位置しているため、ここからの出水が懸念された。

この山留不連続部からの出水対策として、図-7に示すような、高圧噴射改良体（C J G改良体）と止水鉄板による対策を施すこととした。このような対策を施しても、切開き掘削時のトンネル変形により水みちが生じ、そこから出水することも考えられるため、トンネル外側に薬液注入による遮水壁を設置し、その出水を限定的なものにとどめることができるよう計画した。

b) トンネル全体の安定対策工

切開き掘削時にはトンネルの片側のみを掘削するため、シールドトンネルに作用する荷重は著しい偏荷重状態と

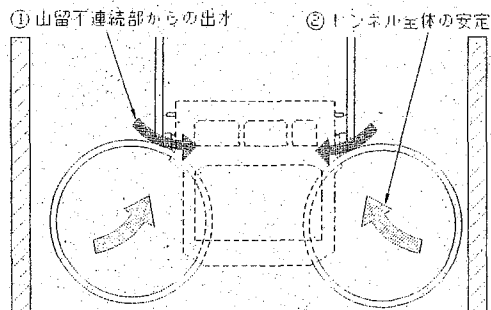


図-6 切開き工法の課題

なる。そのため、トンネル全体の安定が崩れ、トンネル全体が回転するような掘削側への浮き上がりが懸念された。

そこで、2次元非線形FEMによる逐次掘削解析を行い、トンネルの安定性について検討を行った。その結果、地盤物性を適切に評価し、トンネル間支保工を適切に配置すれば、床付け掘削時においても周辺地山は破壊せず、図-8に示すようにトンネルの変形量も構造・施工に影響を及ぼさない程度に抑えられることが確認できた。なお、図-8の変形量はシールド上部掘削時から床付けまでの増分量である。

しかしながら、工事箇所によってはセグメントを切開く範囲が広く不安定となる場合やシールド通過部分の地盤条件が良好でない場合があるため、これらについては①トンネル間支保工の段数増加、②出入口躯体の逆巻き施工等を安定対策として実施することを考えている。

3. 鋼殻の設計

開削切開き部の鋼殻の設計にあたっては、いくつかの課題が考えられた。以下にその概要と対応策について述べる。

(1) 鋼殻設計における課題

a) 鋼殻と躯体の適切なモデル化

切開き部の構造はRC躯体と鋼殻からなる複合構造である。この複合構造における鋼殻の発生応力を適切に評価するためには、鋼殻と躯体一体系からなる複合構造全体の剛性を適切に評価したモデル化を行うこと、また、鋼殻と躯体の接合状態を適切にモデル化することが必要である。

b) 躯体の剛性低下の評価

RC構造となる躯体は図-9に示すように完成後、クリープや曲げひび割れにより曲げ剛性が低下し、変形が増大する。この躯体の変形が鋼殻の断面力に大きな影響を与えるため、これを適切に評価した設計が必要となる。

c) 施工時の先行応力の評価

開削切開き部の施工は図-5に示したように、複雑な施工手順を追って行われる。これらの各施工段階において、鋼殻には様々な変形や応力が発生する。設計においては、これら各施工段階における鋼殻の応力照査を行うとともに、施工時の残留応力を踏まえて完成時の部材照査を行う必要がある。

(2) 鋼殻設計上の課題に対する対応方針

a) 鋼殻と躯体のモデル化

解析モデルとしては、複合構造としての構造全体系の剛性を適切に評価するために、鋼殻のみを両端固定の欠円

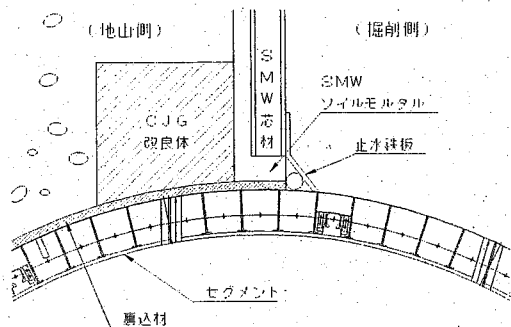


図-7 山留不連続部の構造

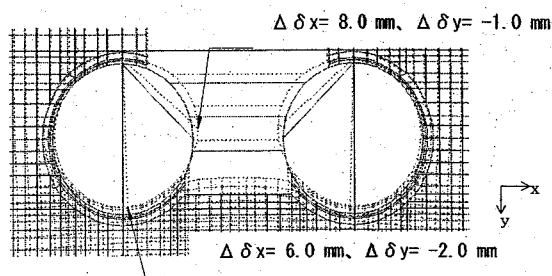


図-8 逐次掘削解析結果

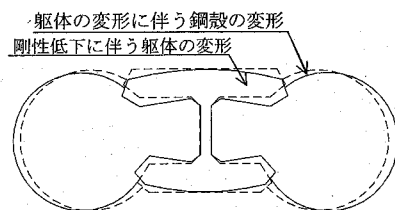


図-9 躯体の剛性低下

モデルとするのではなく、鋼殻と躯体の全体系をモデル化する。モデル化の方法としては、躯体をソリッド要素、鋼殻を剛性一様のビーム材でモデル化する。このモデル化により、鋼殻と躯体の接合部付近の断面力を適切に評価するものとした。

躯体をソリッド要素でモデル化した場合とビーム材でモデル化した場合の断面力についての比較解析例を図-10に示す。この解析例では、躯体をソリッド要素でモデル化した場合の鋼殻と躯体の接合部付近の断面力は、躯体をビーム材でモデル化したものに対し 1/2 以下の値となっている。これは、セグメントと躯体の接合部におけるセグメントの拘束位置、拘束条件の違いによるものである。

b) 躯体の剛性低下の評価

曲げひび割れ、クリープおよび乾燥収縮による剛性低下の影響を考慮した躯体の有効剛性を「コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕」²⁾に基づき算出し、その剛性を用いて鋼殻と躯体全体系の解析を行う。これにより、躯体の長期的な変形の影響を踏まえた鋼殻設計を行うものとした。

剛性低下を考慮した場合とこれを考慮しない場合の断面力についての比較解析例を図-11に示す。剛性低下に伴う躯体の変形の影響により、この解析例では剛性低下を考慮した場合の断面力は、これを考慮しない場合の 1.7 倍以上の値となっていることが確認できる。

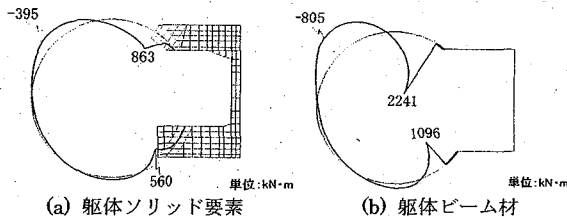


図-10 断面力の比較（曲げモーメント）

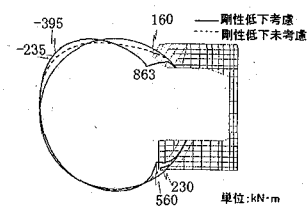


図-11 断面力の比較（曲げモーメント）

c) 施工時の先行応力の評価

施工履歴を考慮した逐次解析により、施工時の先行応力を適切に評価した鋼殻設計を行うこととした。逐次解析では、上述したとおり、鋼殻についてはビーム材で、躯体についてはソリッド要素でモデル化した上で、地盤を地盤パネで評価している。このように地盤をパネ評価した逐次解析手法により求まるセグメントの変形、発生断面力の妥当性については、地盤をソリッド要素でモデル化した 2 次元非線形 FEM による逐次掘削解析により確認している。

逐次解析結果の例を施工履歴を考慮しない単独解析結果と比較して図-12に示す。これより、施工時の応力が躯体完成時にも残留することが確認できる。

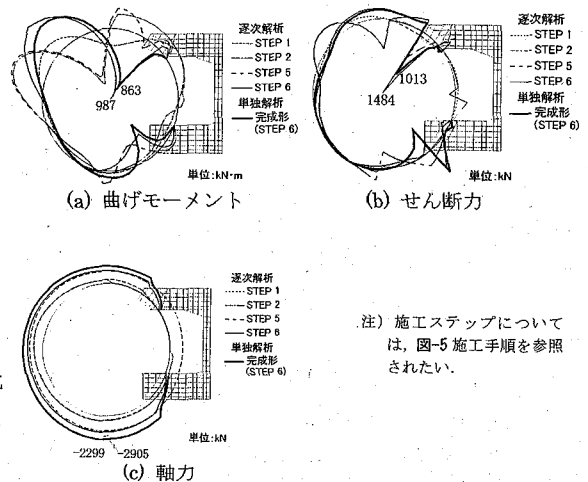


図-12 逐次解析結果

注) 施工ステップについては、図-5 施工手順を参照されたい。

(3) 合理的な鋼殻設計に向けた方策

開削切開き部に用いる鋼殻には、施工時、完成時において様々な要因により大きな応力や変形が生じる。施工時には、まず、山留間の上部掘削によりリバウンドの影響を受け、次に、トンネル間の土を掘削することによって非常に大きな偏圧を受けることとなる。また、完成後には RC 躯体の剛性低下により大きな変形が生じる。

このように応力的な負荷の大きい鋼殻に対し、より合理的な設計を行うことが重要である。ここでは、合理的な鋼殻設計に向けて採用した方策について述べる。

a) 合理的な仮設支保工計画の採用

トンネルに内部補強を行わない場合、トンネル間の 1 段切梁設置時（1 次掘削時）に鋼殻に過大な断面力・変形

が生じる。この過大な断面力及び変形を抑制するために、シールド掘進および躯体構築に支障がない範囲で、図-13に示すような支保工計画を採用するものとした。また、2つのトンネル間に設置する1段切梁設置レベル（1次掘削レベル）についても、これが鋼殻の発生断面力に大きな影響を与える。このため、出入口部躯体構築において支障がない範囲で、1段切梁設置レベルを高い位置（躯体頂版に近い位置）に設置するものとした。

なお、当初計画では掘削と平行して鋼殻主桁を撤去するものとしていたが、主桁自体が非常に大きな補強効果を発揮することから、主桁については躯体完成後に撤去するものとした。

b) 合理的な鋼殻仕様の採用

鋼殻に発生する断面力は、鋼殻と躯体の接合部が最も厳しいものとなる。この最も厳しい断面力でリング全体の鋼殻仕様を決定した場合、不経済なものとなる。そのため、図-14に示すように、鋼殻と躯体の接合部付近を補強部鋼殻、接合部から離れた側円部を一般部鋼殻とし、それぞれの位置において発生する断面力により鋼殻仕様を設計するものとした。このように、同一リング内で2種類の鋼殻を採用することにより、鋼殻仕様の合理化を図るものとした。

c) 最適な鋼種の選定

鋼殻の使用材料については、図-15に示すように、鋼材の許容耐力と材料費を整理した上で、必要となる耐力に応じて最も経済的な鋼材を選定するものとした。

d) 合理的な鋼殻許容応力度の設定

鋼殻の設計においては、前述したとおり、施工履歴を考慮した逐次解析により施工時の先行応力を評価するものとした。この解析により、施工時の応力履歴を適切に評価することから、施工時の短期応力度は降伏点まで許容するものとした。

4. おわりに

新宿線の建設工事は、早期供用を目指して現在工事の最盛期を迎えつつある。切開き部の工事工程としては2004年夏頃からシールド掘進と平行して切開き工事に着手する予定であり、現在のところ、山留工、遮水壁工等を施工中である。

切開き部の鋼殻の設計においては、施工過程で生じる地盤や各構造体の様々な挙動に対し、検討を加えながら設計を進めているが、これまでに実績のない施工内容が含まれているため、施工途上で解決しなければならない問題が生じることも十分に考えられる。実施工に際しては、作業の安全性と構造物の品質確保を図るため、種々の計測管理を行いながら施工を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 土木学会：鋼・コンクリートサンドイッチ構造設計指針(案)，pp.17-20，1992.7.
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書 [構造型態照査編]，pp.108-111，2002.3

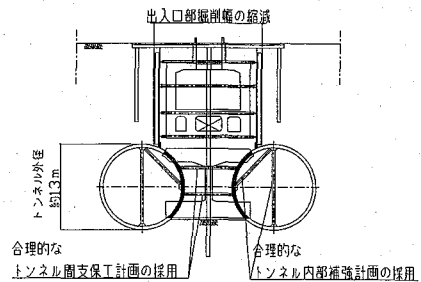


図-13 合理的な仮設支保工計画

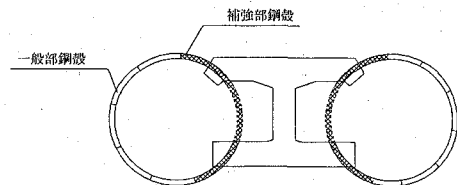


図-14 鋼殻仕様区分

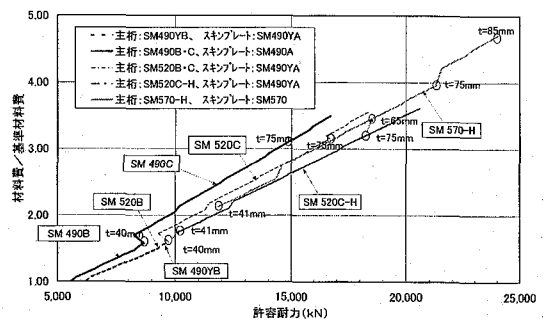


図-15 鋼種別の許容耐力と材料費の関係