

シールドトンネルランプ接続部の 非開削拡幅工法の開発と設計土圧

Development of Expansion Construction Method by the Non-Opencutting in the
Ramp Connection Section of the Shield Tunnel and Design Earth Pressure

寺山 徹¹・山本泰幹²・今田 徹³

Toru Terayama, Yasumiki Yamamoto and Toru Konda

¹正会員 工修 首都高速道路公団 神奈川建設局建設第一部 (〒221-0013 横浜市神奈川区新子安1-2-4)

²正会員 工修 首都高速道路公団 工務部 (〒100-8930 東京都千代田区霞ヶ関1-4-1)

E-mail:yamamoto.yas@mex.go.jp

³フェロー 工博 東京都立大学名誉教授 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-12-1)

When a road tunnel is built with shield method, development of technology of expansion construction method in the connection section of the side ramp is one of the very important subjects. The object of this examination is a road shield tunnel to through under housing in urban area. Therefore shaft isn't available, it is a non-open cutting completely. The method of construction which the ramp shield tunnel was used for as a candidate of expansion construction method with the rationality was developed by the safety as well. And, as for the design earth pressure in stiff soil ground, it could be estimated by using the concept of the characteristic line which took excavation process, lining or tunnel supports stiffness into consideration.

Key Words : shield tunnel, expansion method, non-open cutting, earth pressure, tunnel lining

1. まえがき

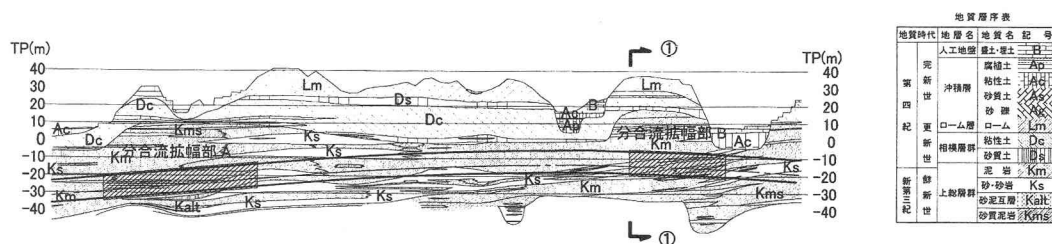
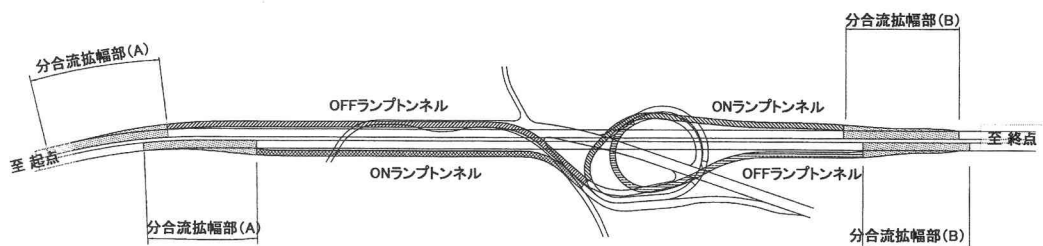
都市部における高速道路の整備事業では、住居地域などの周辺環境の保全、地上の用地取得の制約などの理由からトンネルで建設されることが多くなるとともに、既設の地下構造物やライフラインなどが幅限する地下中浅部の利用制約上、トンネルの深度は深くなる。シールド工法で道路トンネルを建設する場合には、ランプ接続部における拡幅工法の技術開発が最重要課題のひとつとして挙げられる。特に、非開削工法でランプ分合流拡幅部を建設する場合には、完成時および仮設時の構造の安定性、設計土圧の設定、ならびに沈下抑制や止水対策など、非常に難しい技術課題がある。

これまでの大規模なトンネル拡幅工事の施工実績としては、鉄道トンネルでは、地下鉄駅部の建設において、併設シールドをかんざし桁工法で拡幅施工した事例がある¹⁾。道路トンネルでは、岩盤地山の山岳トンネルにおいて、ランプ接続部を拡幅施工した事例がある²⁾。また、供用中の山岳トンネルを対象に、車両の大型化や老朽化などに

伴い、既設トンネルのリニューアルを目的として、断面拡大技術の開発が行われている³⁾。しかし、道路シールドトンネルを対象としたランプ接続部の大規模な拡幅工事については、センターランプ方式で、開削および立坑を利用した非開削の拡幅工事を実施している首都高速中央環状新宿線の事例を除き、これまでにないのが現状である⁴⁾。

本検討の対象とするのは、都市部の住宅地下を通る道路シールドトンネル(外径 12m程度)であり、立坑が利用できない全て非開削の施工条件下で、サイドランプ方式の分合流拡幅部を建設するときの拡幅工法である。安全かつ合理的なランプ分合流拡幅部の構造および施工法の確立を目的として技術検討を行い、シールド工法のランプトンネルを利用して、ランプ接続部を全て非開削で拡幅する工法を技術開発した。

一方、硬質地山の設計土圧についても、掘削過程と覆工剛性を考慮した特性曲線の概念を用い、覆工に作用する土圧を推定して、設計土圧の設定に反映させる一手法を示すことができたので、あわせて報告する。

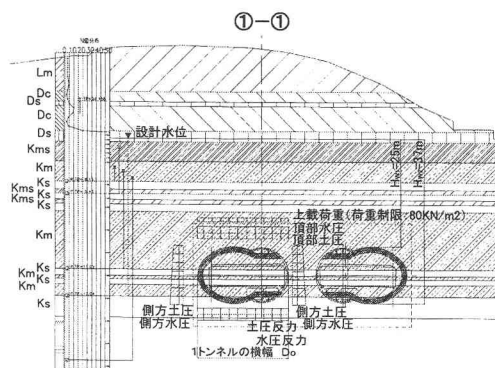


2. 施工条件

(1) 線形条件および地質条件

本検討の対象とする道路トンネルのランプ分合流拡幅部の平面図を図-1に示す。ランプ分合流拡幅部は、起点・終点側の分合流拡幅部(A),(B)と、それらにつながる4本のサイドランプのトンネル(外径約9m)で構成されている。分合流拡幅部の地上条件は住居地域であり、施工に伴う周辺地盤への影響に十分留意する必要がある。平面線形の特徴から、起点側の分合流拡幅部(A)では、同規模のトンネル拡幅断面は併設しないが、終点側の分合流拡幅部(B)では、同規模のトンネル拡幅断面が併設し、特にOFFランプトンネルの分岐部付近では大断面の併設トンネルとなる。ここでは、より併設の影響が大きいと考えられる終点側の分合流拡幅部(B)を対象に検討を行うこととする。

地質縦断図、および検討断面図をそれぞれ図-2, 3 に示す. この分合流拡幅部における地層構成



は、第三紀の自立性の高い上総層群であり、泥岩層 (Km)、砂・砂岩 (Ks)、砂泥互層 (Kalt)、砂質泥岩 (Kms) の互層地山である。これらの地層のうち、介在砂層の Ks、Kalt は被圧帯水層であり、周辺の沖積低地部と連続しているものと考えられる。本線トンネルの上部での土被りは約 48m、水圧は約 250kN/m² の高水圧である。

(2) 施工手順

本線トンネルがシールド工法の場合、ランプ分合流拡幅部の施工手順としては、以下の3ケースが考えられる。

- ①本線シールドに先行してランプ接続部を非開削工法で拡幅しておく。
- ②本線シールドトンネルの完成後に、ランプ接続部を非開削工法で拡幅する。
- ③本線シールドトンネルの施工時または完成後に、拡大シールドなどで拡幅する。

これらのうち、①は、分合流拡幅部では本線シールド機を通過させるため、拡幅断面がさらに大きくなる点で不利である。③の拡大シールドなどの特殊機械による掘削方法は、現状においては、今回のような大断面の施工実績がない。したがって、②の本線トンネルをシールド工法で施工した後、ランプ接続部を非開削工法で拡幅する施工手順について検討する。

このときの分合流拡幅部の施工方法としては、山岳工法により分合流拡幅部を拡幅する案(以下、「山岳拡幅施工案」と呼ぶ)が考えられる。山岳工法は、分合流拡幅部のような断面が変化する

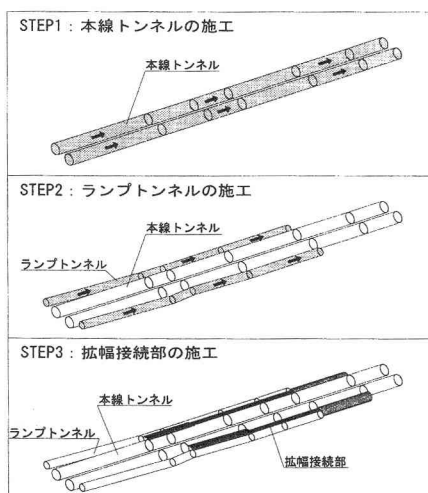


図-4 ランプ分合流拡幅部の施工手順図

トンネルに対しては、比較的容易に対応できる。また、大断面トンネルの覆工構造の安定性にも優れている。

しかしながら、本検討の対象地山においては、詳細な地質調査の結果から、トンネル位置周辺に分布している帯水層(Ks, Kalt 層)は、周辺の沖積低地部とつながりのある可能性が高いことが確認された。このため、山岳工法の場合、沖積低地部への影響を抑制するには、高水压下のトンネル周辺の地山を確実に止水する対策が必要となる。しかし、泥岩主体の地山における、現実的な山岳トンネルの止水工法は、薬液注入工法であるが、介在砂層を含む砂岩や砂泥岩の互層地山に対して、

均質な止水品質を確保することは、現在の技術レベルでは非常に難しいと考えられる。

このため、山岳拡幅施工法案は、構造や施工性の面では技術的に可能と考えられるが、本検討の対象とする地山条件においては、トンネル周辺地盤への影響を抑えるための確実な止水方法等について課題があり、より詳しい地下水調査や確実な止水方法の施工技術開発等が、今後の課題として考えられる。

3. 非開削拡幅工法の技術開発

(1) 構造概要

前章で述べた理由から、シールド工法によるランプトンネルを利用して、分合流拡幅部を施工する案（以下、「ランプシールド利用案」と呼ぶ）について、技術検討を行った。この施工法案は、図-4に示すように、本線シールドの施工後に、ランプのシールドトンネルを分合流拡幅部の先端付近まで延伸し、その後、本線トンネルとランプトンネルを接続する方法である。

ランプシールド利用案の構造一般図を図-5に示す。また、構造概要図を図-6に示す。完成形の覆工・躯体については、これまでの地中構造物にない独創的な形状であるが、シールドセグメントと躯体の多心円形の形状であり、安定性が高い構造形である。また、シールド工法は、地盤の変形を抑制しながら施工する工法であるため、地表への影響抑制の面からも優れている。

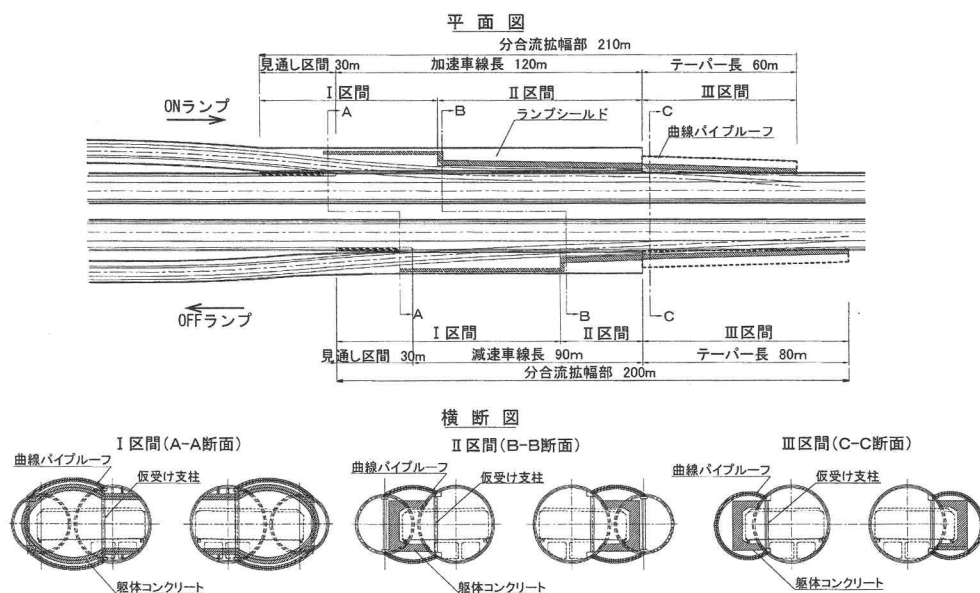


図-5 ランプシールド利用案の構造一般図

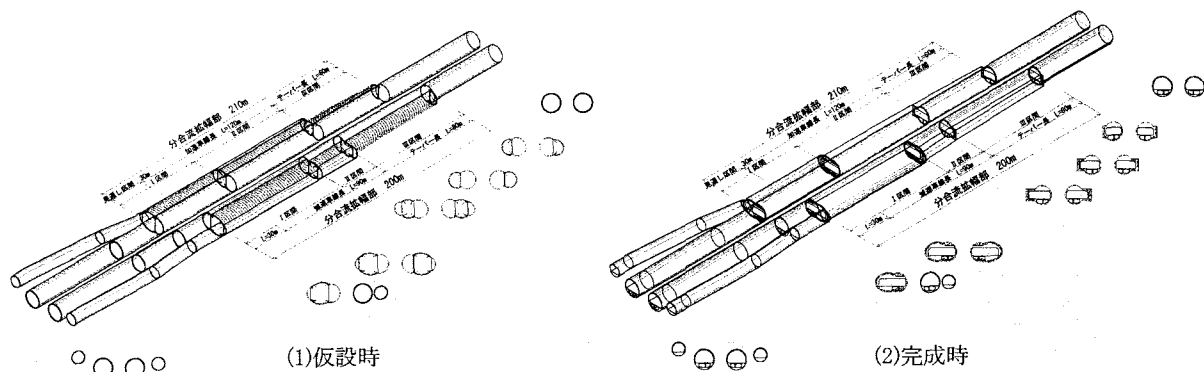


図-6 ランプシールド利用案の構造概要図

一方、仮設時は、拡幅接合部にかかる土圧・水圧を曲線パイプルーフで受け持たせるため、凍結工法は止水のみの機能で良く、凍土厚を薄くすることができる。また、山岳工法に比べると周辺の地下水へ与える影響はほとんどない。曲線パイプルーフの施工は、既往の曲線ボーリングおよび直線パイプルーフの応用技術であるため、実現できる可能性は高いと考えられる。

ランプ分合流拡幅部では、道路線形に沿って必要内空が変化することから、必要内空が小さい加減速区間とテーパ区間では、トンネル拡幅断面をコンパクトにする方が合理的である。このため、最大断面となるノーズ付近の区間（Ⅰ区間）に対して、加減速区間（Ⅱ区間）とテーパ区間（Ⅲ区間）では、必要内空に合わせて躯体断面形状をコンパクト化する。また、Ⅱ区間の曲線パイプルーフ長を短くするとともに、拡幅幅の小さいⅢ区間では、ランプトンネルを利用しない代わりに、

円弧状の曲線パイプルーフで躯体の構築空間を確保する。

(2) 施工方法

ランプ分合流拡幅部の最大断面であるⅠ区間の施工ステップ図を表-1に代表して示す。施工方法は以下のとおりである。

- ①ランプトンネルを地上から発進させ、分合流拡幅部の接続区間では、本線トンネルに併設して施工する（STEP1,2）。
- ②本線とランプトンネルの接合箇所に、鏡切り防護の止水注入を行い、本線トンネルから曲線パイプルーフにて、先受け鋼管を施工する。その後、曲線パイプルーフ内に凍結管を挿入し、鋼管内にコンクリートを充填する（STEP3～5）。
- ③支保工を取付ける台座をセグメントに設置し、支保工を架設する。前ステップで鋼管内に挿入

表-1 ランプシールド利用案(Ⅰ区間)の施工ステップ図

1. 本線シールド推進	2. ランプ(円形)シールド推進	3. エントランス取付け、坑口止水注入	4. 曲線パイプルーフ設置
5. 凍結管挿入・コンクリート充填	6. 支保工取付け	7. パイプルーフ止水凍土造成	8. シールド間上半掘削(主桁切断)
9. シールド間下半掘削(主桁切断)	10. 構築・埋戻し(底板)	11. 構築・埋戻し(側壁・頂版)	12. 支保工撤去

表-2 土質定数

記号	平均 N値	γ (kN/m^3)	c (kN/m^2)	ϕ (度)	E (kN/m^2)	ν	K (cm/s)
B	3	14.0	8	0	1690	0.45	2.6×10^{-5}
Ap	1	12.0	24	0	570	0.45	1.0×10^{-6}
Ac	4	18.0	20	33	1700	0.40	8.2×10^{-6}
As	1	15.0	30	0	1500	0.45	6.9×10^{-5}
Ag	15	0.0	0	30	19550	0.35	8.2×10^{-5}
Lm	5	13.5	56	0	6400	0.45	2.6×10^{-5}
Dc	8	15.5	120	0	1220	0.40	3.0×10^{-7}
Ds	34	18.5	42	33	30300	0.30	9.5×10^{-4}
Km	>50	18.5	2190	6	703800 183900	0.30	4.8×10^{-8}
Ks	>50	19.5	63	42	107300	0.30	1.9×10^{-3}
Kms	>50	19.0	1930	11	284300	0.30	2.7×10^{-7}

*) Km の上段は、分合流拡幅部(A)、下段は、分合流拡幅部(B)の定数を表す。

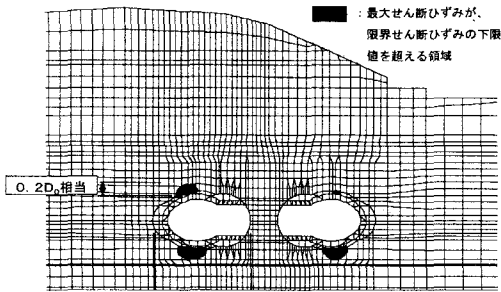


図-7 ランプシールド利用案のゆるみ領域の解析結果(完成時)

した凍結管により、パイプルーフ間の止水凍土造成を行う (STEP6, 7)。

- ④上部セグメントの撤去、シールド間の上半を掘削する。引き続き、下部セグメント撤去、下半を掘削する。掘削完了後、躯体構築・埋め戻しを行う。躯体は最大の必要内空を満足する断面とする (STEP8～11)。

- ⑤躯体構築完了後、支保工を撤去する (STEP12)。

ここで、ランプトンネルのセグメントを分合流拡幅部の完成構造の一部に利用することについては、仮設時の応力の累積や、先行応力が生じているセグメントを合成構造部材として扱うことに対して、懸念があると考えられたため、仮設部材の扱いとした。

4. 設計土圧の検討

(1) 硬質地盤の設計土圧

非開削によるランプ接続部の拡幅工法を技術開発するときの課題の一つに、設計土圧の評価がある。これは、仮設時あるいは完成形の覆工・躯体構造の成立に対して、非常に重要となる。

シールドトンネルや都市部山岳トンネルの覆工

設計では、覆工にかかる作用荷重を設定し、骨組構造解析により断面力を算出するが、地山条件、土被り、トンネル径等により、全土被り荷重または緩み荷重を一般に適用している。しかし、自立性が高い地山のトンネル設計にあたっては、Terzaghi の緩み土圧では粘着力が大きいため、緩み土圧は生じないという問題がある。

このときの土圧の設定方法については、これまで確立された方法がなく、様々な方法が適用されている現状である⁵⁾。一方、土木学会のトンネル工学委員会技術小委員会のトンネル荷重検討部会 (西村部会長) では、都市 NATM とシールド工法の境界領域における設計用荷重の統一化について、特性曲線の概念を用いた考え方が示されている⁵⁾。

そこで、特性曲線の概念を用いて、第三紀の硬質地盤における設計土圧について検討する。検討の対象とするのは、ランプ分合流拡幅部のランプシールド利用案に加えて、比較の山岳拡幅施工法案および本線シールドの各工法である。

シールドトンネルは、外径 12m 程度の併設断面で、離隔は 0.5D (D: シールドトンネルの外径) である。また、山岳拡幅施工法案は、ランプ分合流拡幅部を想定した併設断面 (片側およそ 270m² 程度) である、補助工法に長尺鋼管先受け工 (φ 139.8mm, t=11.1mm) を用いている。

(2) 地山の緩み領域の解析的検討

はじめに、施工ステップを考慮した非線形弾性 FEM 解析を行い、解析で得られる最大せん断ひずみと地山の限界せん断ひずみとの比較により、完成時の緩み高さを推定する⁶⁾。土質定数を表-2 に示す。泥岩層の限界せん断ひずみは、一軸圧縮試験の結果から 0.4% とする。検討箇所は、図-1～3 に示すように、構造の成立が最も厳しい分合流拡幅部(B)における I 区間の大断面トンネルである。

解析方法は、FEM 解析結果から得られるモールの応力円と地山の破壊崩落線の近接度により、変形係数とポアソン比を変化させる方法である⁶⁾。

ランプシールド利用案の完成時の解析結果を図-7 に示す。完成時のゆるみ領域は 1 つのトンネルの横幅 Do に対して概ね 0.2Do 相当の範囲となる。

なお、仮設時についても、トンネル周辺地山に生じている最大せん断ひずみ分布は、完成時とさほど相違がなかったことから、仮設時のゆるみ領域も完成時の 0.2Do 相当の範囲とするのが適当と考えられる。

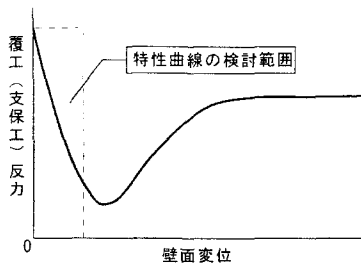


図-8 トンネル壁面の変形と覆工に作用する土圧の概念

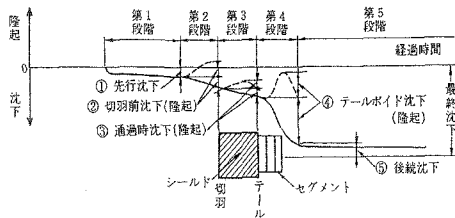


図-9 シールド掘進に伴う応力解放過程の概念⁷⁾

	STEP1: 先行変位	STEP2: 覆工設置後の変位
概要	掘削時の断面 掘削後の断面 覆工剛性は考慮しない	掘削時の断面 掘削後の断面 覆工(支保工) O2は先行変位を除いた変位

図-10 掘削過程と覆工剛性を考慮した特性曲線を求める解析手法の概念

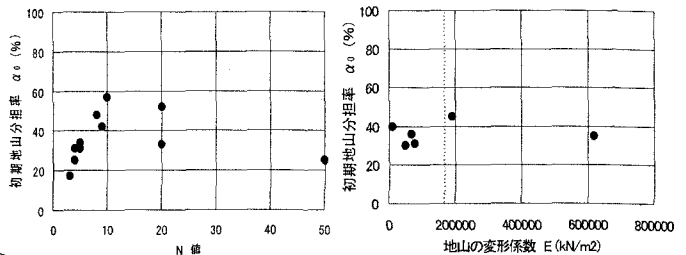
(3) 特性曲線の概念を用いた作用土圧の考え方

NATMにおける特性曲線 (Fenner-Pacher Curve) の概念を図-8 に示す⁷⁾。この図は、素掘りのトンネルを掘削したときの半径方向土圧とトンネル壁面変位の関係を示したものである。内空変位が生じると、地山変形によりトンネル周辺地山で応力再分配が生じるため、覆工および支保工の反力は小さくなる。

シールド工法においても、図-9 に示すように切羽が接近する過程から掘削に伴う応力解放が発生するため、覆工が耐荷可能な状態になる以前に掘削応力の一部が解放されて地山が負担している⁷⁾。このときのトンネル地盤の力学挙動は、NATMの特性曲線の概念と同様と考えられる⁸⁾。なお、本検討では、図-8 の左端の領域を扱うことになる。

(4) 掘削過程と覆工剛性を考慮した特性曲線

同一地盤であっても、トンネル施工法、形状、および覆工や支保工の剛性等によって作用土圧は変化する⁹⁾。トンネルの覆工と地山の連成解析を



(1) シールド工法

(2) 山岳工法

図-11 初期地山分担率の例

FEMで行う場合、一般的に図-10 に示すように、覆工を設置する前に、STEP1 で初期地山応力の一部 (初期地山分担率: α_0) を解放して先行変位を求め、STEP2 では、この状態に覆工を設置し、残りの地山応力 ($1-\alpha_0$) を解放する。掘削過程と覆工の剛性を考慮した特性曲線は、各ステップのFEM 解析から求まるトンネル頂部の地山応力度 (覆工反力に相当) と掘削面の変位の関係をプロットして求めることができる。覆工に作用する土圧は、STEP2 における覆工の反力と地山応力度が釣合った平衡点から求めることができる。

(5) 初期地山分担率

初期地山分担率 α_0 は、覆工が載荷可能となる状態までに解放される地山応力度 ($\sigma_0 - \sigma_1$) の初期地山応力度 σ_0 (全土被り土圧相当) に対する割合として、次式によって定義される⁹⁾。

$$\alpha_0 = (\sigma_0 - \sigma_1) / \sigma_0 \quad (1)$$

ここに、 α_0 : 初期地山分担率

σ_0 : 初期地山応力度

σ_1 : 覆工が載荷可能となる状態の作用土圧

シールド工法と山岳工法の初期地山分担率 α_0 の例を図-11 にそれぞれ示す。

山岳工法の α_0 は、過去の計測結果の報告^{6,10~14)} から地山の变形係数との関係を整理した。シールド工法の α_0 は、粘性土地盤については、杉嶋ら⁹⁾ が検討しているが、硬質地盤について α_0 の算定例はこれまでにない。そこで、ここでは首都高速中央環状新宿線のシールドトンネルにおける洪積地盤の土圧計測データから、初期地山分担率を算定した。ただし、今後さらに計測データを蓄積していく必要があると考えられる。

本検討の対象地山における初期地山解放率 α_0 は、図-11 により、シールド工法は約 25% (N 値=50 相当)、山岳工法は約 40% (E =約 180,000kN/m² 相当) と算定される。また、ランプシールド利用案の α_0 は、工法的にシールド工法とほぼ同じで

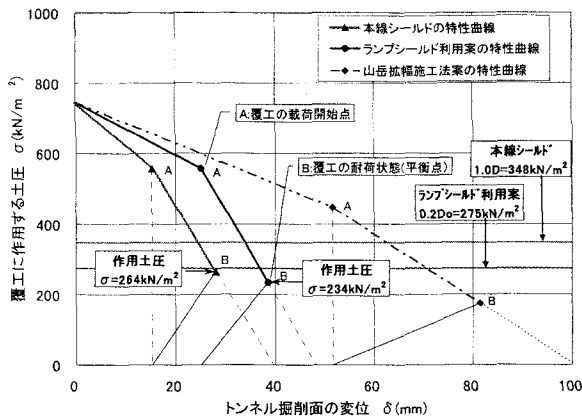


図-12 特性曲線と作用土圧の算定結果

あると考えられるため約25%とする。

(6) 特性曲線と作用土圧の算定

掘削過程と覆工剛性を考慮した特性曲線を用いて、各工法のトンネル掘削面の変位と作用土圧との関係を求めた結果を図-12に示す。

特性曲線が途中(A点)で折れるのは、ここで覆工が耐荷状態になり、当初の地山物性が見かけ上、覆工という固い物質が含まれる地山物性に变化するためである。

この地山に対して、覆工に作用する土圧(B点)を算定した結果、ランプシールド利用案では234kN/m²である。これは、おおむね前述の非線形弾性解析のゆみ高さから求めたゆみ土圧0.2Doに相当する。一方、比較のシールド工法では264kN/m²である。これは、おおむね1Dに相当する。

また、同一の硬質地山におけるシールド工法と山岳工法の作用土圧を、図-12に示すように、掘削過程と覆工剛性を考慮した特性曲線を用いて、統一的に算定することができた¹⁵⁾。

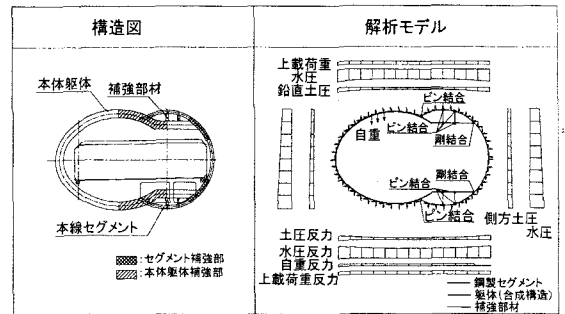
5. 覆工・躯体の構造検討

(1) 完成時

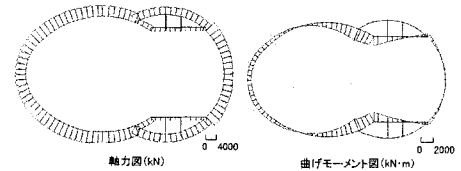
前節で検討した設計土圧(ゆみ土圧0.2Do)を用いて、ランプシールド利用案の覆工・躯体構造を検討する。

検討箇所は、設計土圧の検討断面と同じ、構造の成立が最も厳しい分合流拡幅部(B)におけるI区間の大断面トンネルである。

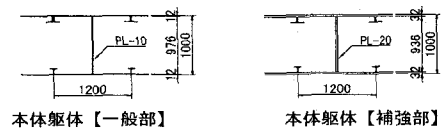
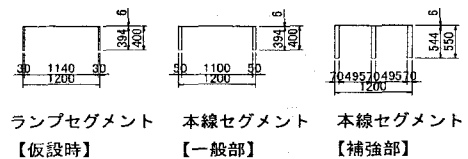
外荷重には、設計土圧、完全止水とした水圧を考慮する。また、将来の建物荷重として、制限荷



(1) 構造図および解析モデル(完成形)



(2) 軸力図および曲げモーメント図(完成形)



(3) セグメントおよび本体躯体の構造緒元

図-13 覆工・躯体構造の検討結果

重80kN/m²を考慮する。側方土圧係数については、各種の基準類や類似地質における施工事例の調査結果から0.5とした。完成時の覆工・躯体構造の検討結果を図-13に示す。

分合流拡幅部の完成構造の一部になる本線トンネルの覆工は、スチールセグメントで、楕円形の本体躯体は、合成構造で構造が成立する。完成時の覆工・躯体構造の成立のために工夫した点は、以下に示すとおりである。

① 本体躯体の形状は、安定性が有利な円形および楕円形を基本とし、本体躯体と本線セグメントを結合した形は、構造の安定に有利な多心円形とした。軸力図および曲げモーメント図からわかるように、断面力の局所的な集中がない安定した構造形である。

②楕円形の本体躯体から水平部材を延ばして本線セグメントにつなぐとともに、この水平部材と本線セグメントを連結する複数の縦部材を設置して、セグメントにかかる曲げモーメントを抑制した。

③楕円形の本体躯体のアーチ部と本線セグメントの接合部は、覆工・躯体の曲げモーメントが小さくなる様に、ピン構造とした。

④本体躯体をRC構造とした場合は、部材厚が大きくなるため、施工性や施工品質の確保が難しいと考えられる。このため、合成構造として部材厚を低減した。

⑤分合流拡幅部の構造によって、一般部の本線シールドのトンネル径が影響を受けないように、断面力が大きい本体躯体とセグメントの結合部のみを一部補強することで対処した。

(2) 仮設時

ランプシールド利用案で、凍結止水を行った場合に可能性のあるトラブルのうち、設計で対応すべきものの一つとして、凍結膨張圧の作用にともなう仮設部材の影響が挙げられる。このため、仮設時の外荷重には、設計土圧、完全止水とした水圧に加え、凍結による凍結膨張圧も考慮する。

凍結膨張圧の抑制対策として、曲線パイプルーフの管内には、超低温と低温の制御管をそれぞれ掘削側と地山側に配置して、凍土成長を制御する。これにより、鋼管径 600mm の曲線パイプルーフ、仮設柱、および本線・ランプのスチールセグメントの構成部材で、仮設時の構造は成立する。

6. まとめ

1) 道路シールドトンネルに出入口を全て非開削の施工条件下でサイドランプ方式の分合流拡幅部を建設するときの技術検討を行い、シールド工法のランプトンネルを利用して、ランプ接続部を全て非開削で拡幅する工法「ランプシールド利用案」を技術開発した。

本工法は、構造、施工性、沈下抑制および止水対策の面では技術的に可能と考えられる。ただし、曲線半径の小さいパイプルーフ工法の施工技術開発、構造詳細および施工計画の検討などが、今後の課題として考えられる。

2) 梁ばねモデルの解析における設計荷重について、その概念は異なるが、掘削過程と覆工剛性を考慮した特性曲線の概念を用いて、硬質地盤

における覆工に作用する土圧を推定し、設計土圧の設定に反映させる一手法を示すことができた。

7. あとがき

本検討については、「横浜環状北線トンネルの設計施工に関する調査研究」委員会（平成 14、15 年度）の検討項目の一つとして審議した。

各種の施工法案について技術検討を行った結果、本検討の対象とする施工条件においては、ランプシールド利用案が、非開削トンネルに出入口を非開削で接続する場合の安全かつ合理的な分合流拡幅部の構造および施工法の候補の一案として確認された。なお、ランプシールド利用案および山岳拡幅施工法案の各課題については、今後も引き続き検討を行っていく予定である。

本委員会に際して、熱心に審議された委員をはじめ関係各位に厚く御礼を申し上げる。

参考文献

- 1) 須藤央、萩野竹敏：永田町直下、かんざし桁工法でシールド地下駅を造る 地下鉄南北線（7号線）永田町（仮称）駅工事、トンネルと地下、Vol26, No.5, pp.37-47, 1995.
- 2) 横関義美、岩波和昌：大断面拡幅工事に挑む 神戸市第2布引トンネル、トンネルと地下、Vol23, No.2, pp.15-20, 1992.2.
- 3) 真下英人、石村利明：既設トンネルの断面拡大技術の開発、トンネルと地下、Vol34, No.9, pp.41-48, 2003.
- 4) 大場新哉、小島直之：シールドトンネル開削切り開き工法の概要について、土木学会第58回年次学術講演会講演概要集IV, pp.273-274, 2003.
- 5) 土木学会トンネル工学委員会技術小委員会トンネル荷重検討部会：都市 NATM とシールド工法の境界領域・荷重評価の現状と課題、2003.
- 6) 日本トンネル技術協会：トンネル解析手法の適用に関する検討報告書（日本道路公団本社委託）、2002.
- 7) 地盤工学会：シールド工法の調査・設計から施工まで、1997.
- 8) 中村浩、山崎糸治、中廣俊幸、杉嶋敏夫、大西豊：応力解放率の概念を導入したシールドトンネルの一設計法、土木学会論文集、No638/Ⅲ-49, pp.241-250, 1999.
- 9) 杉嶋敏夫、足立紀尚：地山支保力と施工過程を考慮したシールドトンネルの一設計法、トンネル工学研究論文・報告集、Vol.11, 2001.
- 10) 谷岡敬春、佐藤秀行、藤岡一頼、佐藤哲夫：洪積層地山における中壁工法の検証 第二東名高速道路 沼津トンネル、トンネルと地下 Vol.32, No.7, pp.15-27, 2001.
- 11) 猪熊明、重田佳幸：応力解放率に着目した山岳トンネル弾性有限要素法に関する研究、土木学会第30回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.108-112, 2002.
- 12) 角湯克典、猪熊明、山村浩介：未固結合水地山トンネルにおける地盤変状予測に関する研究、トンネル工学研究発表会論文・報告集、Vol.1, 1991.
- 13) 山本弘隆、神田文夫、畔高伸一：横浜市地下鉄の大断面 NATM の施工、熊谷組技報、vol.34, pp.147-158, 1984.
- 14) 岩田充功、福家佳則、荻原智寿、横尾敦：都市部における低土被り土砂 NATM の施工と計測、トンネル工学研究論文・報告集、vol.10, pp.101-106, 2000.
- 15) 山本泰幹：硬質地山におけるシールド工法と都市 NATM の設計土圧、土木学会第59回年次学術講演会講演概要集Ⅲ, pp.497-498, 2004.