

鉄道開削トンネルの設計法の変遷調査

— 設計法の変遷が部材の断面算定に及ぼす影響 —

西尾 昭希¹・木村 定雄²・荻野 竹敏³

¹ 学生員 金沢工業大学 環境土木工学科 (〒924-0838 石川県白山市八束穂 3-1)
E-mail: b1818262@planet.kanazawa-it.ac.jp (Corresponding Author)

² 正会員 金沢工業大学 環境土木工学科 (〒924-0838 石川県白山市八束穂 3-1)
E-mail: s.kimura@neptune.kanazawa-it.ac.jp

³ 正会員 東京地下鉄株式会社 (〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6)
E-mail: ta.ogino@tokyometro.jp

鉄道事業における構造物の設計法の適用は、事業者が国土交通省に届出た実施基準に従っている。ここで、大都市部の既存の地下鉄構造物をみると、供用後 50 年が経過するものが増加しつつある。また、建設時期が異なる構造物の設計法は荷重系・構造モデルなどが適宜合理化され適用されてきている。本研究は、1 層 2 径間および 2 層 3 径間の鉄道開削トンネルを例として、掘削深の浅い場合と深い場合における構造モデルおよび側方土水圧の算定式の違いが、部材の断面照査に及ぼす影響を検討した。その結果、構造モデルの違いが、曲げモーメントに及ぼす影響が大きいことを確認した。また、側方土水圧の算定式が異なることによって、下床版の隅角部の断面照査に大きく影響を及ぼすことを確認した。

Key Words: open-cut tunnel, tunnel Design Method, Rankine's coefficient of active soil pressure, subgrade reaction.

1. 研究背景

都市部の既存の地下鉄をみると、供用後 50 年を経過するものが増加しつつある。例えば、東京地下鉄 (株) (旧帝都高速度交通営団：以下、東京メトロと呼ぶ) では、1927 年に開業した銀座線から始まり、丸ノ内線、日比谷線および東西線等が挙げられる。建設当時は浅深度に建設された地下鉄ではあるが、高度成長期には、下水道、電力、通信などの都市インフラの建設も増えたことから、新規建設の地下鉄は深度化が進むようになった¹⁾。最近では、施設利用の利便性など、時代に応じた機能向上が求められ、既存のトンネルに大規模改築が施されている。ここで、鉄道事業における構造物の設計法の適用は、事業者が国土交通省に届出た実施基準に従っている²⁾。この実施基準は、新規建設はもとより、大規模リニューアル (構造変更を伴う改築や改造) にも適用される。また、これまでに建設されてきた地下鉄の設計基準は、その時代に応じて改善し、合理化が図られ、変遷してきている。すなわち、建設時期によって、設計基準に適用する断面力算定法、荷重系および照査法が異なっている³⁾。

図-1 は躯体の断面力算定法、荷重系および照査法の考

え方の変遷を示したものである。とりわけ、開削トンネル躯体の断面力算定法の変遷をみると、1924 年以降、構造計算法としてたわみ角法が用いられていた。その後、耐震設計への対応を踏まえ、2004 年からは、連続体の離散化モデルを用いた数値計算法 (以下、骨組み計算法と呼ぶ) が断面力算定法として用いられている。荷重系の変遷をみると、1924 年以降、掘削深が 20 m 程度未満のとき、粘性土地盤の土水一体の考え方を用いて土水圧を定めていた。1978 年以降、掘削深が 20 m 以深のとき、砂質土地盤の土水分離の考え方を用いて土水圧を定めている。中でも、側方土圧係数の変遷をみると、1924 年以降、掘削深が 20 m 程度未満のとき、土の内部摩擦角からランキンの主働土圧係数を用いて側方土圧係数を定めていた⁴⁾。その後、1978 年以降、掘削深が 20m 以深のとき、ヤーキーの静止土圧係数を用いて側方土圧係数としている⁵⁾。他方、部材の照査法の変遷をみると、1924 年以降、許容応力度を用いた照査法が採用されていた。また、1999 年からは、コンクリートの許容応力度が割増しされている。2004 年からは、設計耐用期間中に生じる作用に対し限界状態を定めた限界状態設計法が採用されている⁶⁾。以上のように、設計法が変遷することから、今

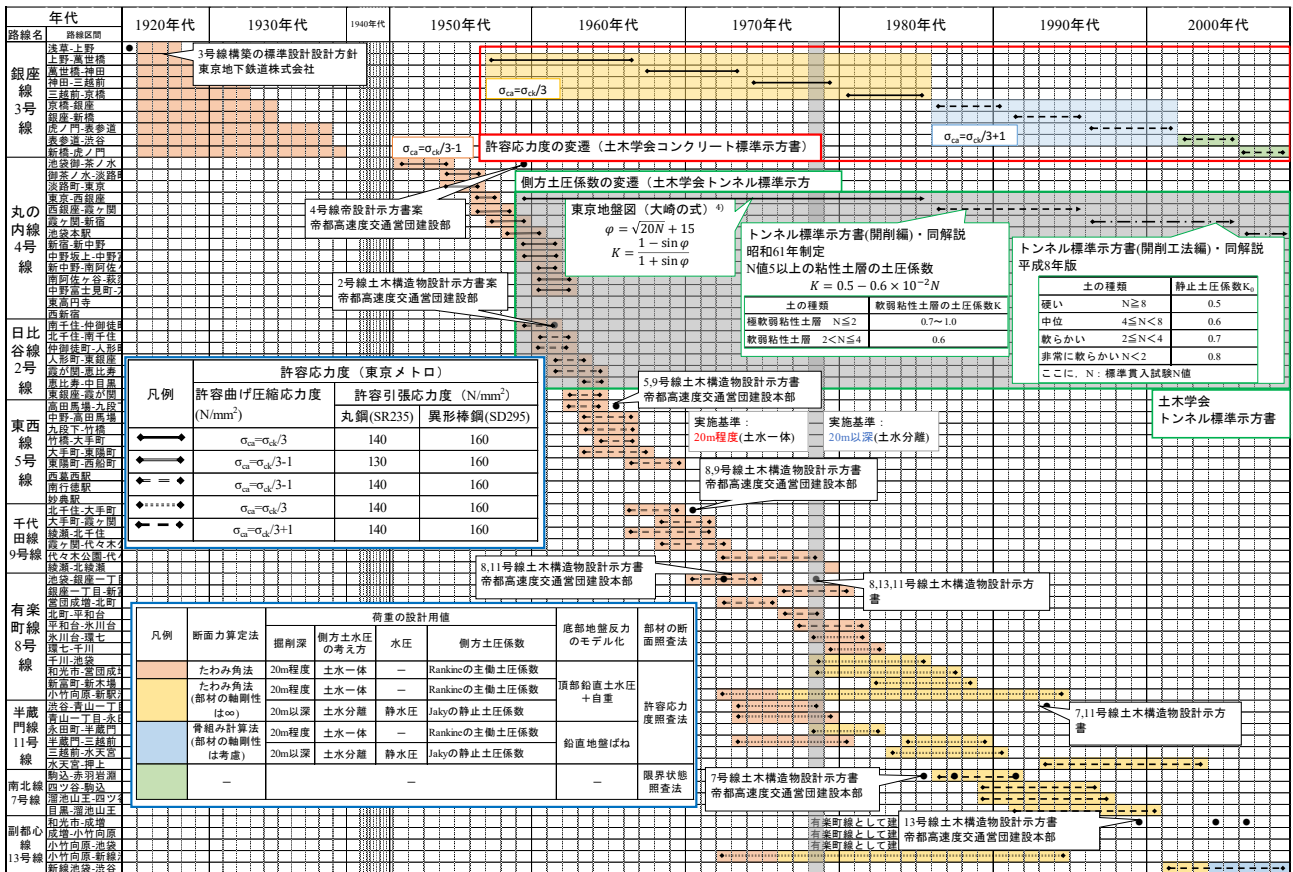


図-1 荷重系・構造モデルおよび部材の照査法の変遷 (9, 10, 11, 12, 13, 14, 15)

後、大規模リニューアルを実施する場合には、過去の設計法の取扱いを十分に考慮し、設計の妥当性を検討する必要がある。

本稿は、東京メトロが過去に建設した1層2径間(掘削深20m程度未満)および2層3径間(掘削深20m以上)の鉄道開削トンネルの設計事例を対象として、断面力算定法、荷重系および照査法の変遷を調査し、部材の断面決定に及ぼす影響を分析する。なお、建設当時、耐震設計は震度法および修正震度法等を用いているが、本分析では常時荷重を対象とする。

2. 掘削深が20m程度未満の検討

(1) 検討条件

1950年代後半、東京下町に建設された1層2径間の開削トンネルの断面の例を図-2に示す。この断面を対象として、建設当時と現在の設計法の変遷が設計用断面力に及ぼす影響を分析する。部材の諸量を表-1に示す。地盤条件は東京下町地域で掘削深が20m程度未満であり、周辺地盤は粘性土である(内部摩擦角 $\phi=20^\circ$ 相当)。図-3は荷重図および支点条件を示したものである。図-4は建設当時の配筋図を示したものである。建設当時、水平土水圧の算定にあたっては、自重を除く頂部鉛直荷重に側方土圧係数を乗じて算定している。式(1)は粘性土地盤

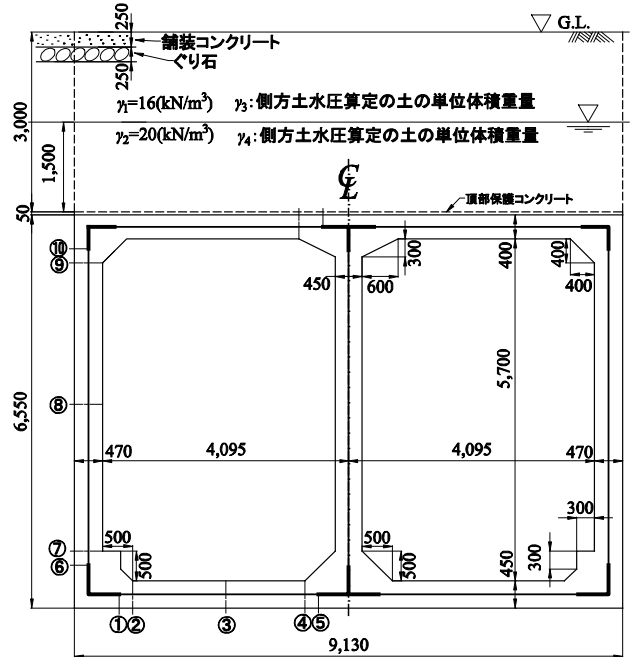


図-2 1層2径間の横断面

表-1 部材の諸量 (1層2径間)

	上床版	下床版	側壁	中壁	剛域
コンクリートのヤング係数 E_c (kN/mm ²)	21*($\sigma_{sk}=21$ kN/mm ²) ※コンクリート標準示方書昭和33年版				
鉄筋のヤング係数 E_s (kN/mm ²)	210				
断面積 A (m ²)	0.40	0.45	0.47	0.45	—
断面二次モーメント I (×10 ⁶ m ⁴)	5.3	7.6	8.7	7.6	I _r =1000

$$E = K (L + \gamma H) \quad (1)$$

ここで、E：水平土水圧(kN/m²)

K：側方土圧係数(ランキンの主働土圧係数)

L：地表面上の荷重(kN/m²) (22.5kN/m²)

γ ：水の重さを含めた土の単位体積重量(kN/m³)

H：地表面から設計側圧までの深さ(m)

(上床版軸線：3.250m, 下床版軸線：9.375m)

の土水一体に用いる側方土水圧の算定式である。地下水の取扱いは全応力状態として土の単位体積重量を定め、これに側方土圧係数を乗じて側方からの土水圧を定めている。

断面力算定法および側方土圧係数を要因とした計算ケースを表-2に示す。S34は昭和34年(1959年)の建設当時の断面力算定法(たわみ角法)と前述したランキンの主働土圧係数を側方土圧係数としたケースである。

R3_{0.49}およびR3_{0.8}は令和3年(2021年)現在の断面力算定法である骨組み計算法を用いたケースである。骨組み計算法では、ハンチ部に剛域を設定する。剛域の範囲および大きさは、鉄道標準⁹⁾に従い設定する。また、両計算法に用いる軸剛性、せん断剛性および曲げ剛性は鉄道標準の値から定める⁹⁾。ただし、現行の骨組み計算法では、下床版下に作用する地盤反力をWinklerばね、または躯体の剛体変位に伴う地盤ばねでモデル化しているが、本分析では考慮しないものとする。本分析では、設計に用いる側方土圧係数の定め方の変遷の影響を吟味する。

R3_{0.8}は、建設当時(昭和34年)の周辺地盤の内部摩擦角20°を $\phi = \sqrt{20N+15}$ 式⁷⁾に代入して得られるN値1.25を用いて、N値と土圧係数との関係⁸⁾から求めた側方土圧係数を0.8とするケースである。これは、昭和53年(1978年)の実施基準に適用されていた側方土圧係数の考え方による⁹⁾。なお、現行の鉄道標準における側方土圧係数は、静止土圧と主働土圧の両方で照査することを基本としており、これによる値は、0.79と0.53である。

一方、設計当時の資料では、粘性土地盤におけるN値と内部摩擦角との関係が示されていない。このため、N値と内部摩擦角との関係式は、砂質土地盤における有効応力状態の内部摩擦角との関係⁷⁾から定めている。粘性土地盤において全応力状態の内部摩擦角に置換すると、側方土圧係数は有効応力状態と比べて大きな値になる。建設時とリニューアル時では、復水等の影響により水位が変動することが考えられる。また、長期的に作用する水圧がその水深によって定まるものと考え、全応力状態の水圧に側方土圧係数を乗じる考え方は吟味する必要がある。したがって、リニューアル時の設計における地下水の取扱いは十分考慮する必要がある。

表-2 検討ケース(1層2径間)

ケース	断面力算定法	側方土圧係数	土の単位体積重量	
			γ_3 (kN/m ³)	γ_4 (kN/m ³)
S34	たわみ角法	0.49	16	20
R3 _{0.49}	骨組み計算法	0.49		
R3 _{0.8}	骨組み計算法	0.80		

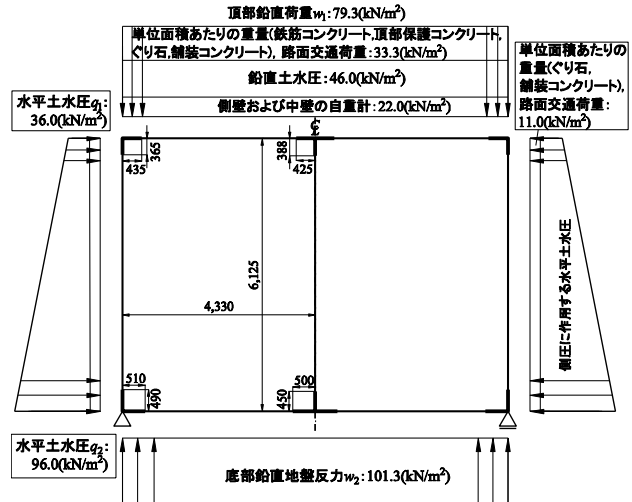


図-3 荷重および支点条件(1層2径間)

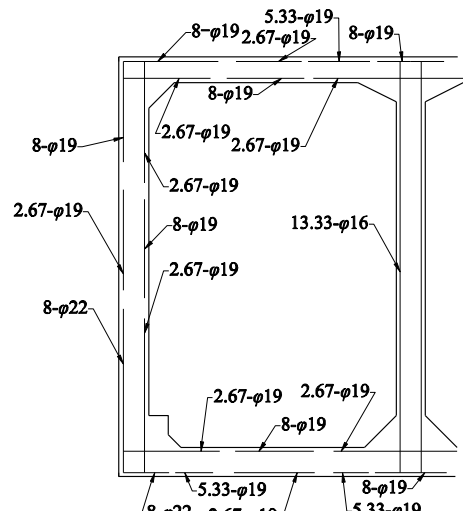
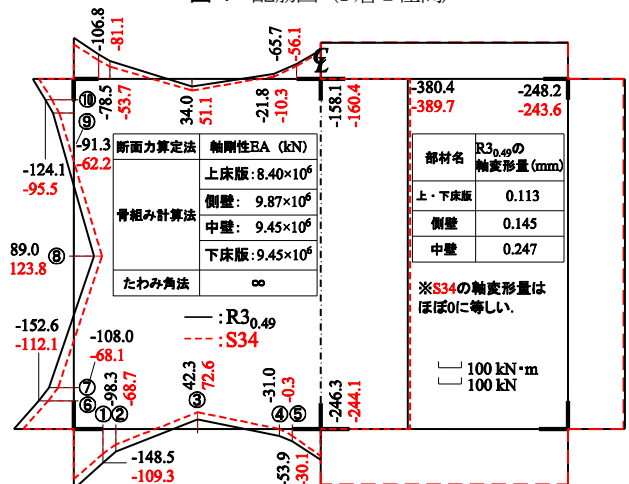


図-4 配筋図(1層2径間)



1) 曲げモーメント 2) 軸力

図-5 断面力の算定結果(断面力算定法の影響)

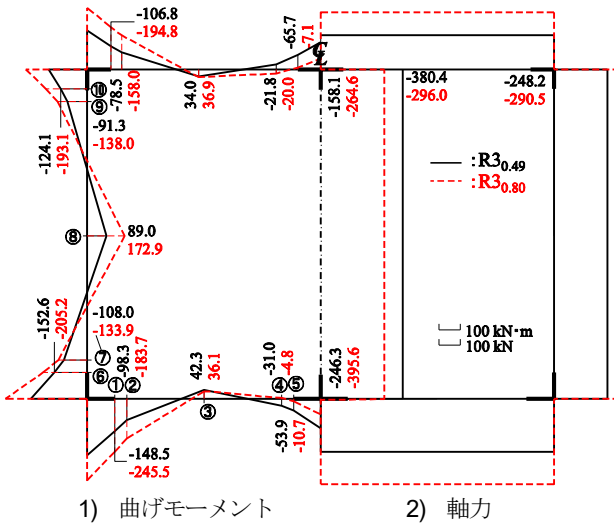


図-6 断面力の算定結果 (側方土圧係数の影響)

(2) 検討結果

a) 断面力算定法の影響

断面力算定法の違いが断面力に及ぼす影響を図-5に示す。図中の実線は R3_{0.49}の値、破線は R3_{0.80}の値を各々示している。下床版に生じる曲げモーメントをみると、たわみ角法による値は骨組み計算法による値と比べて、左隅角部①で約0.7倍、左ハンチ部②で約0.7倍、中央部③で約1.7倍、右隅角部⑤で約0.6倍となる。これらの値の差異は、たわみ角法において、支点となる部材の軸変形量に依存する。そこで、各部材の軸変形量をみると、側壁で0.15mm、中壁で0.25mm、下床版で0.11mmである。したがって、骨組み計算法によって、側壁および中壁の軸変形量を考慮すると、上・下床版の隅角部に生じる曲げモーメントは大きくなる。

b) 設計に用いる側方土水圧の影響

側方土圧係数の違いが断面力に及ぼす影響を図-6に示す。図中の実線は R3_{0.49}の値、破線は R3_{0.80}の値を各々示している。下床版に生じる曲げモーメントをみると、R3_{0.80}の値は R3_{0.49}の値と比べて、左隅角部①で約1.7倍、左ハンチ部②で約1.9倍、中央部③で約0.9倍、右隅角部⑤で約0.2倍となる。このように、側方土圧係数が大きくなると、隅角部の曲げモーメントが増加し、中壁部の曲げモーメントが減少する。これは上床版においても同様である。一方、軸力をみると、下床版で約1.6倍、上床版で約1.7倍となる。

側壁に生じる曲げモーメントをみると、R3_{0.80}の値は R3_{0.49}の値に比べて、下隅角部⑥で約1.3倍、下ハンチ部⑦で約1.2倍、中央部⑧で約1.9倍、上隅角部⑩で約1.6倍となる。このように、土の全応力状態を考慮することで、側方土圧係数が大きくなると、側壁の隅角部および中央部で曲げモーメントは大きくなる。

c) 断面照査法の影響

許容応力度による照査と終局限界による照査を分析す

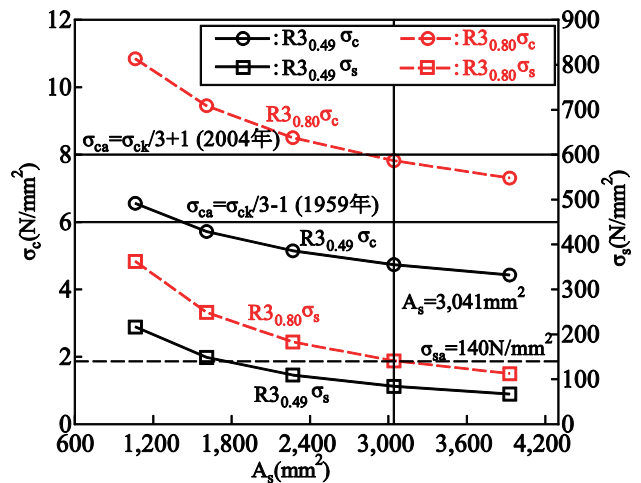


図-7 A_s と発生応力度との関係 (下床版隅角部①)

表-3 コンクリートおよび鉄筋の許容応力度

許容応力度の種類	許容応力度 (N/mm ²)
コンクリートの設計基準強度	21
コンクリートの許容曲げ圧縮 応力度 σ_{ca}	6 $\sigma_{ca} = \sigma_{ck}/3-1$
鉄筋の許容引張応力度 σ_{sa} (SSD39)	140
鉄筋の降伏点 σ_y (SSD39)	240

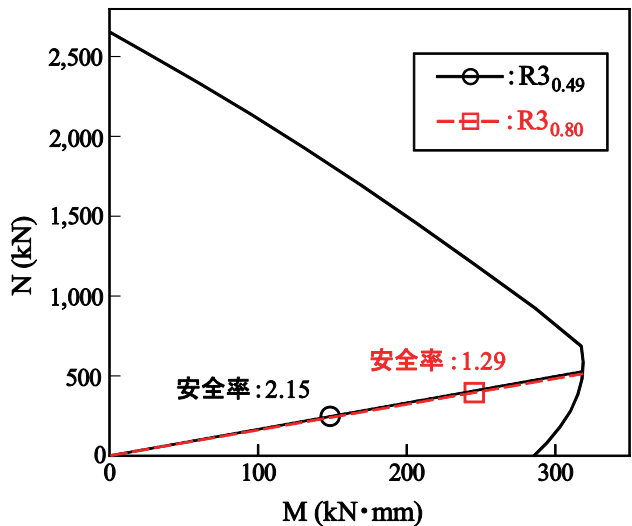


図-8 耐力曲線 (設計用断面力: 下床版隅角部①)

る。コンクリートおよび鉄筋の諸量を表-3に示す。図-7は、 A_s と発生応力度 σ_c および σ_s との関係を示している。図中の実線は R3_{0.49}の値、破線は R3_{0.80}の値を各々示している。過去の設計において、下床版の隅角部①で算定された断面力を設計用断面力として求めた A_s は、3,041mm²である。R3_{0.80}の値は R3_{0.49}の値と比べて、 σ_c は約1.65倍、 σ_s は約1.67~1.68倍となる。これより、R3_{0.80}のケースでは、 σ_{ca} の許容応力度の設定次第では許容応力度を超過する。また、 A_s が3,041mm²より小さくなると、 σ_c および σ_s ともに許容応力度を超える。したがって、部材の断面算定にあたっては、設計当初の環境条件のみならず、将来の環境変化 (周辺地盤の掘削、地下水位の変動など) を十分考慮して断面設定を行うことが望ましいと考える。

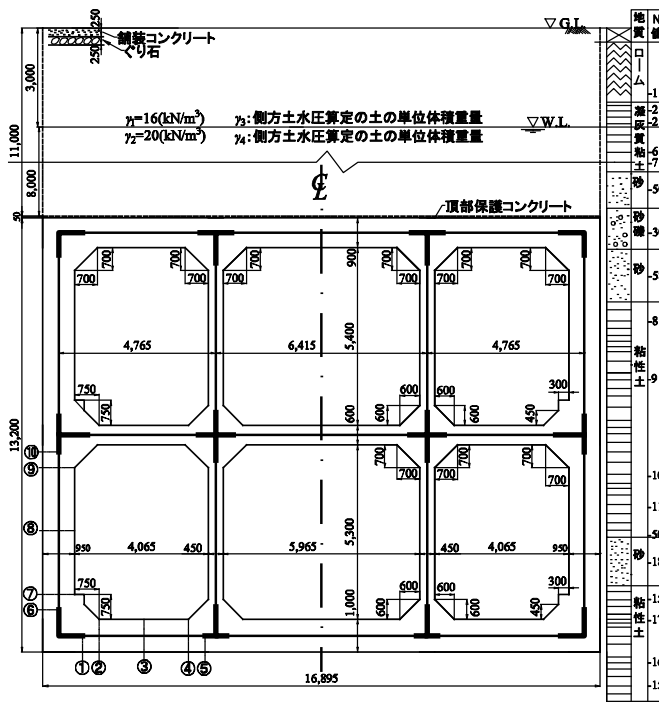


図-9 2層3径間の横断面

S34年に算定された断面を用いた終局限界状態の耐力曲線を図-8に示す。S34年の建設当時の断面照査では、ハンチ内部の圧縮鉄筋を曲げに対して考慮していないため、単鉄筋として、性能曲線を求めている。図-8中の安全率をみると、 R_{3049} の値は約2.15、 R_{308} の値は約1.29となる。このことから、現行の終局限界を考慮した照査法による安全性照査では、部材耐力は有するものの、設計上の部分安全係数の確保は難しい可能性があり、これを十分に検討する必要がある。

3. 掘削深が20m以上の検討

(1) 検討条件

1970年代後半、東京山手に建設された2層3径間の鉄道開削トンネルの断面の例を図-9に示す。この断面を対象として、建設当時と現在の設計用値を用いて断面力を算定し、設計用値の違いが断面力に及ぼす影響を検討する。表4は部材の諸量を示したものである。地盤条件は掘削深が20mより深く、互層であることから、土水一体および土水分離の両者の側方土水圧を検討する。断面力算定法は2004年以降、実施基準で用いている骨組み計算法を適用する。図-10は荷重図および支点条件を示したものである。図-11は既存の配筋図を示したものである。水平土水圧の算定にあたっては、自重を除く頂部鉛直荷重に側方土圧係数を乗じて算定する。

側方土水圧の考え方および側方土圧係数を要因とした計算ケースを表-5に示す。S51_{土水一体}は、昭和51年(1976年)の建設当時の土水一体の側方土水圧を用いたケース

表-4 部材の諸量 (2層3径間)

	上床版	下床版	中床版	側壁	中壁	剛域
コンクリートのヤング係数 E_c (kN/mm ²)	27 ※ ($\sigma_d=27 \text{ kN/mm}^2$) ※コンクリート標準示方書昭和42年版					
鉄筋のヤング係数 E_s (kN/mm ²)	210					
断面積 A (mm ²)	0.90	1.00	0.60	0.95	0.45	—
断面二次モーメント I ($\times 10^6 \text{ mm}^4$)	6.1	8.3	1.8	7.1	0.76	$I_f=1000$

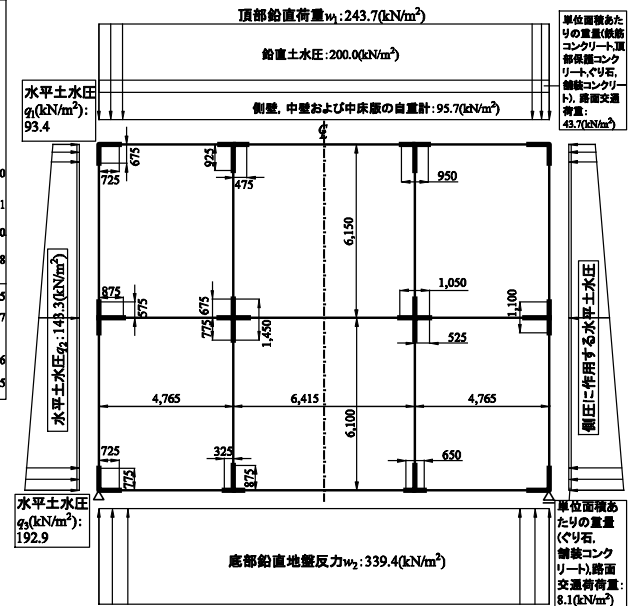


図-10 荷重および支点条件 (2層3径間)

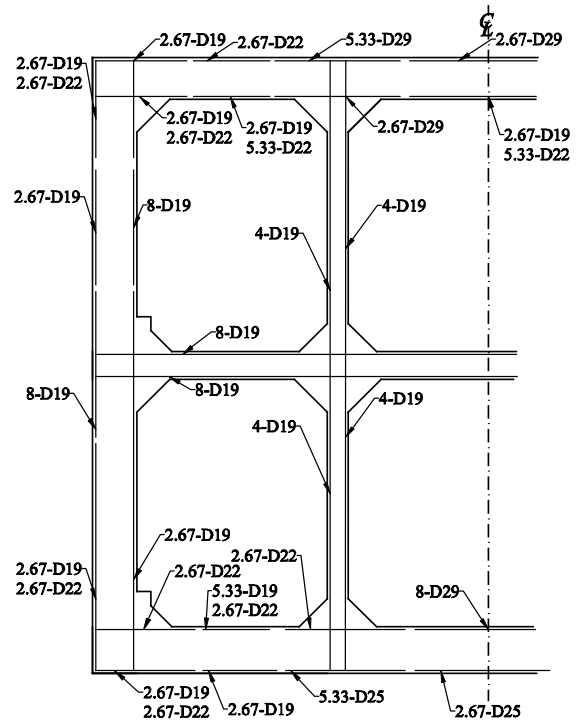


図-11 配筋図 (2層3径間)

表-5 検討ケース (2層3径間)

ケース	側方土水圧の考え方	土の単位体積重量		側方土圧係数	水圧
		γ_1 (kN/m ³) 地下水位以上	γ_2 (kN/m ³) 地下水位以下		
S51 _{土水一体}	土水一体	16	20	0.406	—
R3 _{土水分離}	土水分離	18	8	0.577	静水圧

表-6 コンクリートおよび鉄筋の許容応力度

許容応力度の種類	許容応力度 (N/mm ²)
コンクリートの設計基準強度	21
コンクリートの許容曲げ圧縮応力度 σ_{ca}	$\sigma_{ca} = \sigma_{ck}/3$
鉄筋の許容引張応力度 σ_{sa} (SD30)	160

である。R3 土水分離は、令和3年(2021年)の互層の地盤条件を砂質土とする土水分離の考え方で、土の内部摩擦角(建設当時の設計用値、 $\phi=25^\circ$)を用いて、ヤーキーの静止土圧係数から算定した側方土圧係数を用いるケースである。

(2) 検討結果

a) 設計に用いる側方土水圧の影響

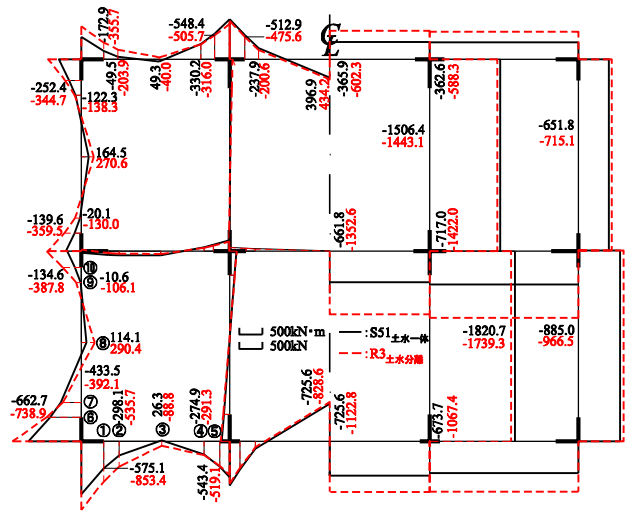
側方土水圧の考え方の違いが断面力に及ぼす影響を図-12に示す。図中の実線はS51 土水一体の値、破線はR3 土水分離の値を各々示している。下床版に生じる曲げモーメントをみると、R3 土水分離の値はS51 土水一体の値と比べて、左隅角部①で約1.5倍、左ハンチ部②で約1.8倍、中央部③で約4.4倍、右隅角部⑤で約0.96倍となる。このように、側方土圧が大きく、かつ、静水圧を作用させると、下床版と側壁との接合部で曲げモーメントが増加する一方、中壁との接合部に生じる曲げモーメントは減少する。これは上床版においても同様である。一方、軸力をみると、下床版で約1.6倍、上床版で約1.6倍となる。

側壁に生じる曲げモーメントをみると、R3 土水分離の値はS51 土水一体の値に比べて、下隅角部⑥で約1.1倍、下ハンチ部⑦で約0.9倍、中央部⑧で約2.5倍、上隅角部⑩で約2.9倍となる。このように、側方土圧が大きく、かつ、静水圧を作用させると、側壁の隅角部および中央部の曲げモーメントは大きくなる。

b) 断面照査法の影響

許容応力度による照査と終局限界による照査を分析する。コンクリートと鉄筋の許容応力度を表-6に示す。図-13は A_s と発生応力度 σ_c および σ_s との関係を示している。図中の実線はS51 土水一体の値、破線はR3 土水分離の値を各々示している。過去の設計において、下床版の隅角部①で算定された断面力を設計用断面力として求めた A_s は $2,828\text{mm}^2$ である。R3 土水分離の値はS51 土水一体の値と比べて、 σ_c は約1.46~1.49倍、 σ_s は約1.37~1.41倍となる。両ケースともに、許容応力度を超えることはない。とくに、R3 土水分離のケースでは、 A_s が小さくなると、鉄筋が現行の許容応力度を超えるため、余裕をもたせる断面を設定することが望ましい。

S51年に算定された断面を用いた終局限界状態の耐力曲線を図-14に示す。S51年の建設当時の断面照査では、ハンチ内部の圧縮鉄筋を曲げに対して考慮していないため、単鉄筋として、性能曲線を求めている。図-14中の安



1) 曲げモーメント 2) 軸力

図-12 断面力の算定結果(側方土水圧の考え方)

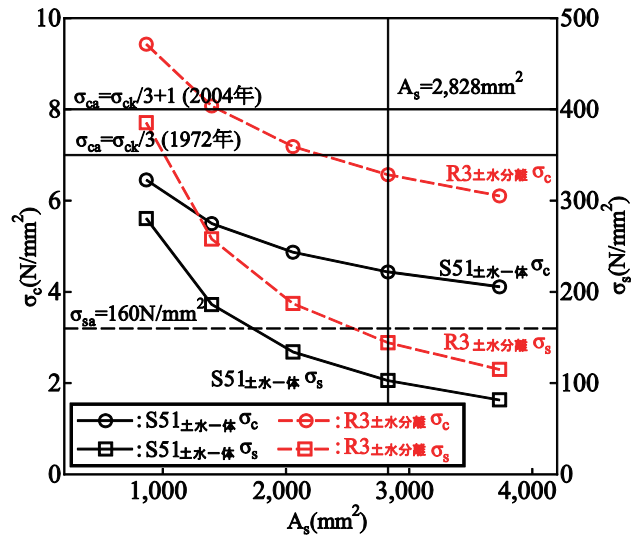


図-13 A_s と発生応力度との関係 (下床版隅角部①)

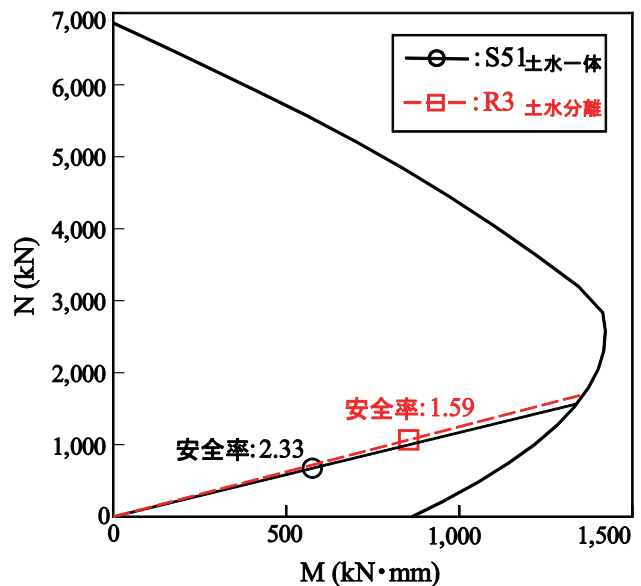


図-14 耐力曲線 (設計用断面力: 下床版隅角部①)

全率をみると、 $S51$ $_{土水一体}$ の値は約 2.33、 $R3$ $_{土水分離}$ の値は約 1.59となる。したがって、前述した掘削深が 20m程度未満の場合と同様に、部材耐力は有するものの、設計上の部分安全係数の確保は難しい可能性があり、これを十分に検討する必要がある。

4. まとめ

掘削深が 20m程度未満の浅い場合と 20m以深の深い場合における断面力算定法、側方土水圧の考え方および照査法の違いが、部材の断面決定に及ぼす影響を分析した。その結果、以下の知見が得られた。

- a) 断面力算定法の影響：骨組み計算法を適用することで、側壁および中壁の軸変形量を考慮すると、たわみ角法に比べて、上・下床版の隅角部に生じる曲げモーメントが大きくなる。
- b) 側方土水圧の考え方の影響：
 - ① 掘削深 20m 程度未満の浅い場合、土の全応力状態を考慮することで、側方土圧係数が大きくなり、側壁の隅角部および中央部の曲げモーメントは大きくなる。また、側方土水圧の算定にあたっては、地下水の取扱いに十分に留意する必要がある。
 - ② 掘削深 20m 以深の深い場合、土の有効応力状態および静水圧を考慮することで側方土水圧が大きくなり、側壁との接合部で曲げモーメントが増加し、中壁との接合部に生じる曲げモーメントが減少する。
 - ③ 地下水位の変動を考慮すると、その設計上の取扱いは、土留め壁の形式を考慮し、側方土圧の設定とともに、十分留意する必要がある。
- c) 断面照査法の影響：
 - ① 許容応力度を用いた照査法を適用する場合、構造計算の合理性のみならず、余裕をもたせる断面設定を行うことが望ましい。
 - ② 現行の限界状態を考慮した照査法では、既存の部材耐力は有するものの、設計上の部分安全係数の確保は難しい可能性があり、これを十分に検討する必要がある。

以上から、東京メトロにおける鉄道開削トンネルの躯体の設計法の変遷をみると、設計に用いる側方土圧、地下水圧および照査法が異なることで、部材の断面設定に及ぼす影響がある程度定量的に把握できたと考える。一方、土留め壁工法の技術も進化していること、既設構造物の周辺環境、すなわち、近接構造物に変化すること、復水など地下水位の変動が考えられることから、リニューアルの構造設計では、これらを十分に考慮し、より安全な設計体系を構築する必要がある。また、地下水の特性は、躯体の設計のみならず、周辺地盤にも影響を及ぼすため、十分検討する必要がある。

REFERENCES

- 1) 例えば、国土交通省：新たな都市づくり空間、大深度地下、大深度地下の公共的使用に関する特別措置法について、p.3, 平成 19 年 12 月作成, 平成 24 年 12 月一部修正。
- 2) 土木関係技術基準調査研究会編著：解説 鉄道に関する技術基準（土木編）第三版, 国土交通省鉄道局監修, p.12, 2014.
- 3) 例えば、帝都高速度交通営団建設部：2 号線設計示方書案, 1959 年, 1960 年改訂, 1961 年増補
- 4) 帝都高速度交通営団建設本部：8, 13, 11 号線土木構造物設計示方書, p.15, 1978 年 8 月
- 5) 財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説—コンクリート構造物, pp133-140, 2004.
- 6) 財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説—トンネル・開削編, p107, 2021.
- 7) 東京地盤調査研究会：東京地盤図, p.18, p.19, 1959 年, 1961 年 2 刷発行。
- 8) 土木学会：トンネル標準示方書（開削編）・同解説, pp.22-24, 1986 年。
- 9) 東京地下鉄株式会社建設部：営団地下鉄建設技術史, 平成 18 年 4 月発行。
- 10) 東京地下鉄株式会社：パンフレットで読み解く東京メトロ建設と開業の歴史, 2014 年 4 月 1 日発行。
- 11) 東京地下鉄株式会社：3 号線構築の標準設計設計方針, 大正 13 年 5 月制定。
- 12) 帝都高速度交通営団建設本部：8,13,11 号線土木構造物設計示方書, 昭和 53 年 8 月制定。
- 13) 帝都高速度交通営団：東京地下鉄道有楽町線建設史, pp.50-51, 平成 8 年 7 月 31 日発行。
- 14) 東京地下鉄株式会社：東京地下鉄道副都心線建設史, p.51, 平成 21 年 3 月 31 日発行。
- 15) 帝都高速度交通営団：東京地下鉄道半蔵門線建設史（渋谷-水天宮前）, pp.46-47, 平成 11 年 3 月 31 日発行。

(Received September 30, 2022)

(Accepted January 6, 2023)

STUDY OF CHANGES IN DESIGN OPEN-CUT TUNNEL METHODS
—INFLUENCE OF CHANGES IN DESIGN METHODS ON CROSS-SECTION CALCULATION OF MEMBERS—

Haruki NISHIO, Sadao KIMURA and Taketoshi OGINO

The number of existing subway structures in metropolitan areas that have been in service for 50 years is increasing. In addition, design methods for structures constructed in different periods of time have been rationalized and applied to load systems, structural models, etc. as appropriate. In this paper, the effects of the structural model and the calculation formulas for lateral soil pressure on the cross-sectional verification of members were investigated for shallow and deep excavation. As a result, it was confirmed that the difference in the structural model had a significant effect on the bending moment. It was also confirmed that the different calculation formulas for lateral soil pressure have a significant effect.