

施工時荷重が偏平シールドトンネル覆工の 設計断面力に及ぼす影響

EFFECTS OF LOADS DURING CONSTRUCTION ON THE DESIGN SECTIONAL FORCE OF ELLIPSOIDAL TUNNEL LINING

大門信之¹⁾・矢萩秀一¹⁾・中村兵次²⁾・鈴木久尚³⁾

Nobuyuki OKADO, Syuichi YAHAGI, Hyoji NAKAMURA, and Hisanao SUZUKI

Conventionally, shield tunnels mainly have been circular section in form because of superior workability and safety. Recently, however, different forms of shield tunnel sections, such as ellipsoidal tunnels, etc., have come to be constructed. In such cases, special design conditions due to the tunnel section shape apply. In particular, it is necessary to understand the effects of loads, such as grouting pressure, which temporarily act on the lining structure during construction.

This paper evaluates the effects of loads during construction on tunnel lining sections for elliptical tunnels and considers the safety of construction of ellipsoidal shield linings

Key Words: ellipsoidal shield tunnel lining, loads during construction, finite element method,

1. はじめに

従来、シールドトンネルは、その施工の安全性および力学的優位性から円形断面が主体であったが、近年その用途に応じたトンネル断面の有効利用の観点から異形断面シールドトンネルが採用されるようになってきた¹⁾。しかし、トンネル断面形状等に起因する設計条件が特殊であり、覆工構造に作用する荷重および応力状態が通常の円形シールドと比較して複雑になると考えられ、とくに、施工時に一時的に覆工に作用する裏込め注入圧等の施工時荷重の覆工構造に与える影響が想定される^{2),3)}。

本研究は、偏平断面を有する大断面トンネルを想定し、施工時荷重を受ける覆工に対して施工過程を考慮した解析的手法により覆工に発生する断面力を算定し、異形断面シールドトンネルの設計に供する資料を得る目的で、施工時荷重の覆工の設計断面力に与える影響を通常の円形断面の場合と比較検討したものである。

2. 解析手法および解析条件

(1) 解析手法

裏込め注入材は、注入された直後では液体に近いので覆工にほぼ等方圧力として作用し、円形断面ではこの注入圧の鉛直および水平方向の荷重の総和が水平方向卓越となるため、一般にはやや縦長の変形となり、大きな曲げモーメントを発生させることなく、結果として覆工の応力は軸力が卓越することとなる。これに

-
- 1) フェロー 帝都高速度交通営団 建設本部
 - 2) フェロー 工学博士 パシフィックコンサルタンツ(株)
 - 3) 正会員 パシフィックコンサルタンツ(株) トンネル部

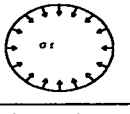
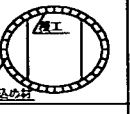
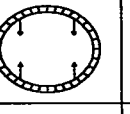
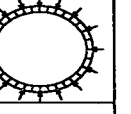
STEP-1	STEP-2	STEP-3	STEP-4	STEP-5
初期応力の計算	シールドの応力解放	テールボイド圧力の消散	形状保持装置の撤去	縦方向のアーチングの影響
				
$K\sigma = 0.5$ ($\nu = 0.33$) ただし、STEP-2以降は $\nu = 0.40$ とする。 (ダイレタンスーを考慮)	$\sigma_r = \alpha (\sigma_{\theta} + p - p_i)$ σ_t : シールド掘削面外周に作用させる荷重 σ_{θ} : 初期地盤応力 (有効応力) p : 掘削水圧 p_i : 裏込め注入圧力	STEP-2のモデルに対してセグメントリング形状保持装置および裏込め材を設置する。	STEP-3のモデルに対して形状保持装置を撤去する。	$\sigma_r = (1 - \alpha) (\sigma_{\theta} + p + p_i)$ σ_t : 縦方向のアーチングの影響による荷重

図-1 解析ステップ

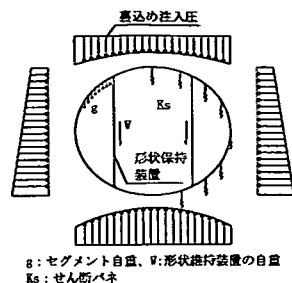


図-2 テールボイド中の覆工の計算 (線材-ばねモデル)

対して、偏平断面では鉛直方向の荷重が卓越するため裏込め注入圧によって生じる断面力および変形は、円形と比較して大きくなると想定され、これらの影響を小さく抑えるため、裏込め材が十分硬化して地盤地盤反力が期待できるまで形状保持装置で支持させる必要がある。

しかし、裏込め注入直後には裏込め材に発生した注入圧力が残留し、形状保持装置を撤去した時点で覆工が変形するため、この圧力は一旦解放されて水圧程度に低下するものの、裏込め注入圧により生じた覆工および形状保持装置に導入された変形や応力は、裏込め材の圧力が消散しても残留し、結果として覆工には大きな断面力を発生させるものと考えられる。

解析は、上述した施工時荷重としてテールボイド下部での裏込め注入圧の覆工に及ぼす影響に着目し、テールボイド下部での施工過程を考慮した弾性二次元有限要素法 (FEM) を用い、覆工に発生する断面力を算定した。

解析ステップは、図-1 に示すように初期応力解析 (STEP-1) を行い、次に STEP-2 でテールボイド部で応力を解放させる。STEP-3 は、STEP-2 に対して覆工および裏込め材を設置し、テールボイド内圧力を消散させて裏込め材に圧力を導入したステップである。この場合の裏込め材を介した荷重の伝達を図-3 に示す。ただし、覆工にはテールボイド中の裏込め注入圧による断面力を導入している。断面力は図-2 に示すように、線材ばねモデルを用い、形状保持装置を挿入した覆工モデルに対して裏込め注入圧を作用させて算定する。この線材ばねモデルで計算した結果を FEM 解析での断面力計算結果と重ね合わせた。なお、覆工に設置した鉛直バネ K_s は、テールボイドでの覆工体と裏込め注入圧のつり合い分を吸収するためのバネで、縦断方向に覆工を支持する点までのせん断変形から求めた。

STEP-4 は、形状保持装置の撤去を解析するものであり、STEP-3 のモデルで形状保持装置に発生している軸力を解放するものである。

STEP-5 は、縦方向のアーチングの影響を解析するものであり、STEP-2 に対して残りの解放力を作用させるモデルである。

解析は有効応力解析とし、周辺地山および覆工に作用させる荷重は、テールボイドでの応力解放に着目して解放応力と覆工での支持効果を考慮し設定した。なお、この場合の応力解放率 α は 50% とした。また、覆工および裏込め材は、それぞれはり要素、地山と覆工の間に挿入した棒要素としてモデル化した。

(2) 解析条件

解析に用いた、検討トンネル断面は図-4 に示すように円形を基本に真円率 84% および真円率 74% を有する偏平断面の 3 断面とした。

解析条件を表-1 に示すが、土被りは 30m ($H/D \approx 1.5$) で、地質は硬質の洪積砂質土層とした。地下水位

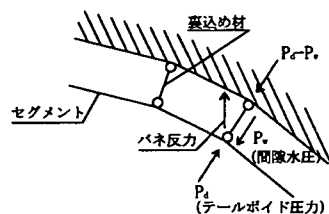


図-3 テールボイド圧力の消散

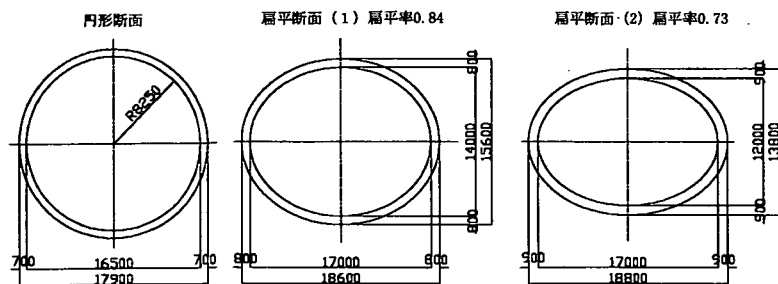


図-4 検討断面

表-1 解析条件	
【地盤条件】	
洪積砂質土層	N値50程度
単位体積重量	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$
変形係数	$E_0 = 200 \text{ MN/m}^2$
内部摩擦角	$\phi = 42^\circ$
粘着力	$c = 50 \text{ kN/m}^2$
土被り	30m, 地下水位 GL-10m
【覆工】	
鉄筋コンクリートセグメント	
弾性係数	$E_c = 39 \text{ kN/mm}^2$
曲げの有効率	$\eta = 0.8$
【裏込め注入圧 (トンネル天端)】	
300, 400, 500 kN/m^2 の3ケース	
(裏込め材の密度は $\rho = 1.2 \text{ g/cm}^3$)	

は GL-10m とした。裏込め注入圧による覆工の影響を把握するため、注入圧は 300, 400 および 500 kN/m^2 の3ケースとした。

覆工は鉄筋コンクリートセグメントとし、覆工厚は円形で 70 cm で、扁平断面 (1) および扁平断面 (2) はそれぞれ 80 cm, 90 cm と設定した、なお、これらの覆工厚は事前のゆるみ土圧を用いた慣用計算法によりその安全性を確認している。

3. 解析結果及び考察

(1) テールボイド中における裏込め注入圧作用時の覆工の応力状態

図-5 にテールボイド中で裏込め注入圧が作用した場合の線材-ばねモデルによる各断面の覆工に発生する断面力を示す (図-5 は裏注圧 300 kN/m^2 の場合であるが、400, 500 kN/m^2 も同様な発生モードを示す)。また、表-2 に裏込め注入圧による形状保持装置に発生する軸力を示す。

円形断面では、縦長の楕円となり大きな曲げモーメントも発生することなく、軸力が卓越した断面力となっている。このため、形状保持装置に作用する軸力も小さい。

これに対して扁平断面では断面形状に依存する割合が大きく、裏込め注入圧による鉛直方向の荷重が卓越するため、形状保持装置による覆工に対する変形抑制効果が大きく機能し、形状保持箇所において大きな負の曲げモーメントが発生している。また、形状保持装置には円形断面と比較して大きな軸力が発生している。

真円率が小さくなるに従い、軸力卓越から曲げ卓越断面となり、裏注圧作用時の形状保持装置が変形抑制に大きく寄与していることがわかる。

表-2 形状保持装置に作用する軸力 (kN/m)

裏注圧 (kN/m^2)	位 置	円形断面	扁平断面 (1)	扁平断面 (2)
300	上端	11.6	647.4	1,025.1
	下端	28.7	662.6	1,038.3
400	上端	16.6	812.2	1,285.7
	下端	33.6	827.4	1,299.0
500	上端	21.5	976.9	1,546.4
	下端	38.6	992.1	1,559.6

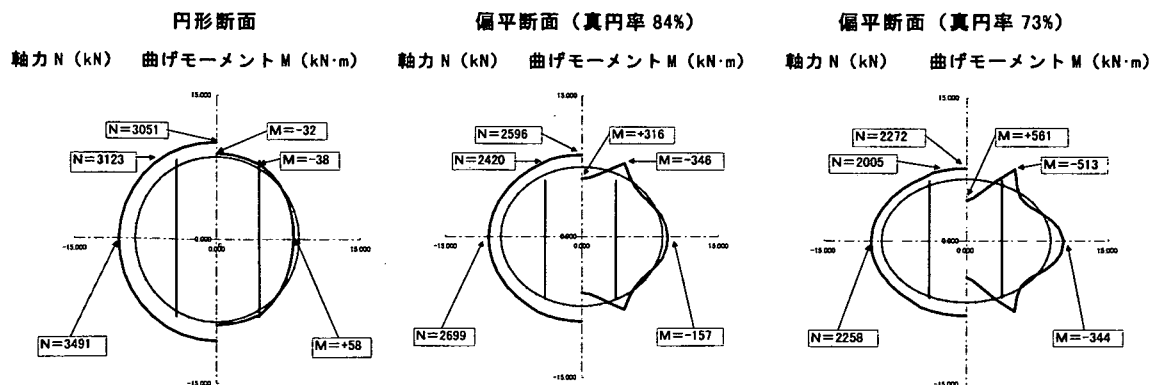


図-5 テールボイド中の覆工断面力 (裏込め注入圧 300 kN/m^2)

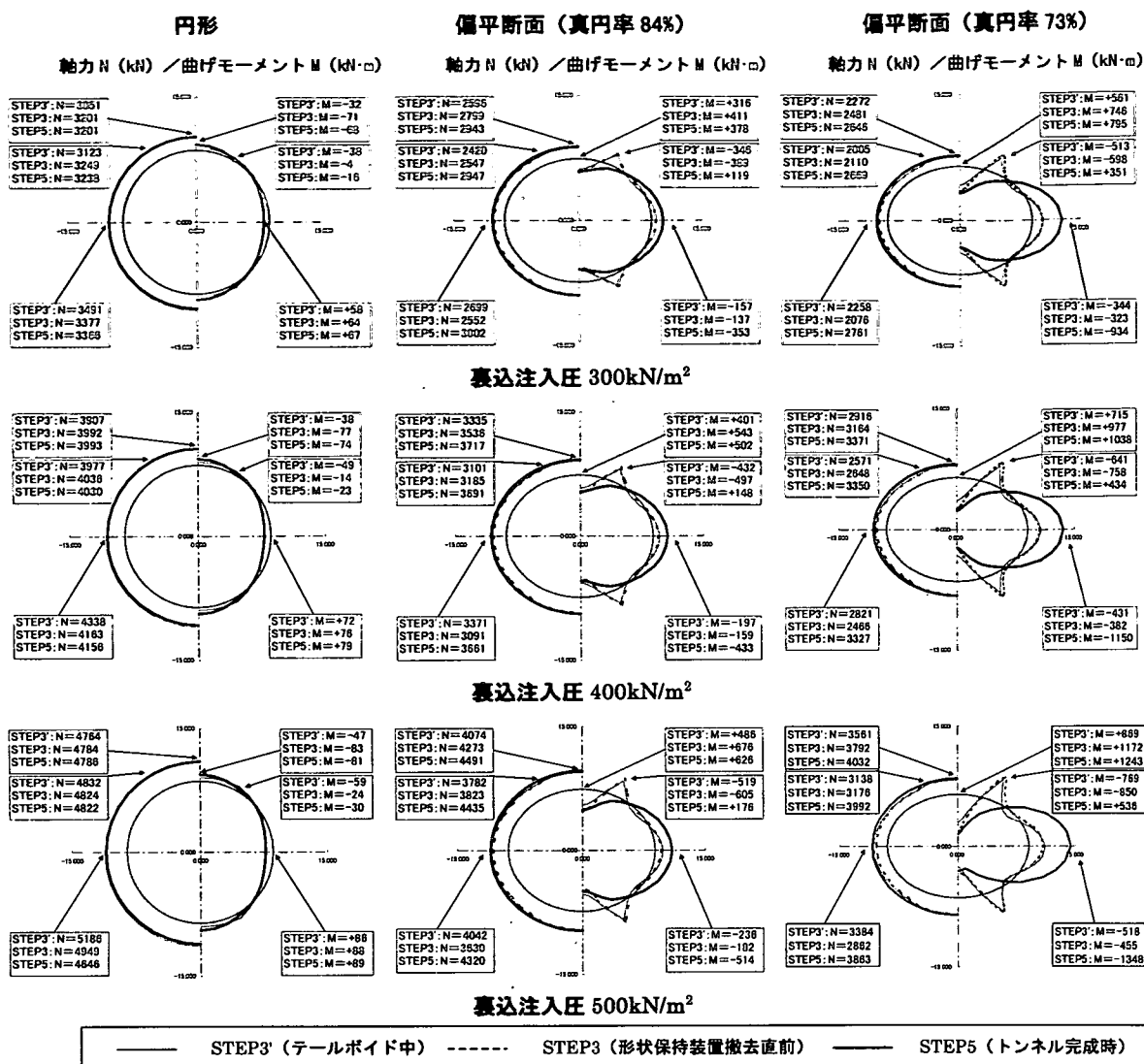


図-6 覆工断面力図

(2) 断面形状の違いが覆工の断面力に与える影響

図-6に、各断面について裏込め注入圧を300, 400および500kN/m²と変化させたときの、裏込め注入圧作用時(STEP-3'), テールボイド圧力の消散(STEP-3), トンネル完成(STEP-5)までの各施工ステップにおける覆工に発生する断面力を示す。また、図-7はSTEP-3'を基本にそれ以降の各施工ステップにおける断面力の発生増加率を裏込め注入圧として300kN/m²の場合を示したものである。

① 円形断面

円形断面では、裏込め注入直後(STEP-3')において裏込め材が液圧として作用するため、トンネルが縦長の変形を呈し、覆工に発生する曲げモーメントはトンネル天端およびインバート下端で負曲げとなり、スプリング部で正曲げとなっている。裏込め材の圧力を消散させたSTEP-3では縦長変形を若干の助長させ、これに伴い曲げモーメントも増加している。形状保持装置の撤去と残りの解放力を作用させたSTEP-5

のトンネル完成時では裏込め注入圧作用時の影響が残留しているため、最終的には縦長の変形となっている。

また、覆工の発生軸力については、各施工ステップで大きな変化がなく、施工過程による軸力への影響は小さい。

以上のように、円形断面では裏込め注入直後の注入圧力により生じた断面力が支配的であり、施工過程において形状保持装置撤去後も、その断面力に変化はみられず、形状保持装置の有無による断面力への影響は小さく問題とはならないと考えられる。

②偏平断面

偏平断面では、形状保持装置撤去前後において曲げモーメントの発生モードが大きく変化する。これは裏込め注入圧に対して形状保持装置が担う役割が非常に大きいことによる。すなわち、裏込め注入直後の圧力によりトンネルは横長の変形を拘束するよう形状保持装置が機能するため、この結果として形状保持箇所では覆工には大きな負曲げが発生し、形状保持装置には軸力が導入される。そして形状保持装置の撤去時には形状保持装置に導入された軸力を解放し覆工に配分されることにより、形状保持箇所での曲げモーメントの正負が逆転し、スプリング部に大きな負曲げが発生するなど曲げモードが変化するからである。

形状保持装置撤去時における曲げモーメントの変化は、図-7に示したように、トンネル天端およびインパート中央においては変化は少なく正曲げとなり、スプリング部においては大きく変化し負曲げとなっている。

また、覆工に発生する軸力は、トンネル天端およびインパート中央においては変化がすくないものの、スプリング部において増加している。

以上のように、偏平断面では断面形状に依存するため、形状保持装置撤去前後において断面力の変化割合が大きく、裏込め注入圧力に対して形状保持装置が担う役割が大きいと考えられる。

(3) 裏込め注入圧が覆工の断面力に与える影響

図-8～図-11は、裏込め注入圧の大きさと覆工の断面力の増加割合を示したものである(裏注圧 400kN/m² 場合)。

裏込め注入圧と最終断面力の関係はほぼ比例関係となっており、覆工断面力に対しては裏込め注入圧が支配的要素となっていることがわかる。とくに偏平断面の曲げモーメントの増加率は円形断面と比較して大きく、円形断面が裏注圧 300kN/m² を基本に 500kN/m² の場合正曲げおよび負曲げの増加率が 1.3～1.2 であるのに対して偏平断面では、1.6～1.45 程度なる。軸力の増加率については、断面形状に差異はなく正曲げおよび負曲げに対して増加率は 1.5～1.4 程度である。

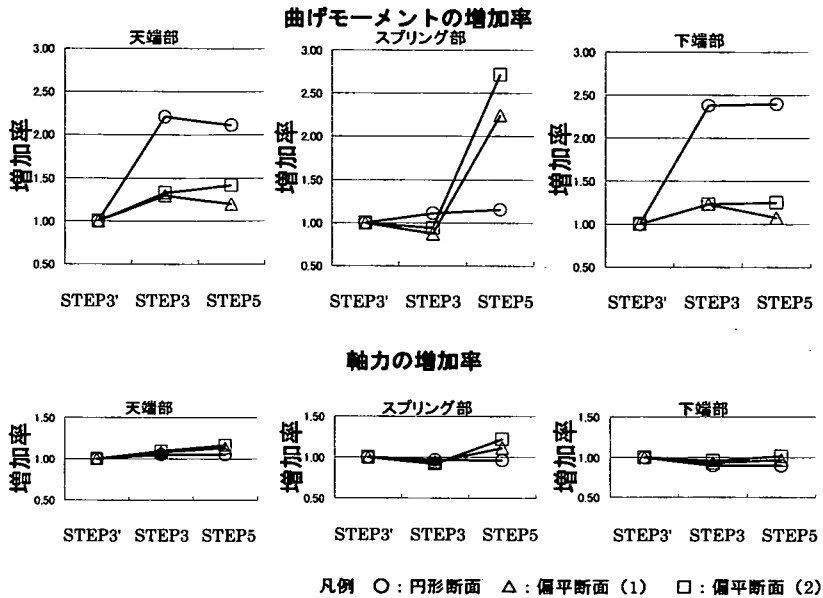


図-7 施工過程における断面力の変化(裏注圧 300kN/m²)

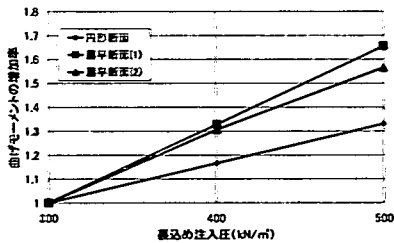


図-8 裏込め注入圧と曲げモーメントの増加率（正曲）

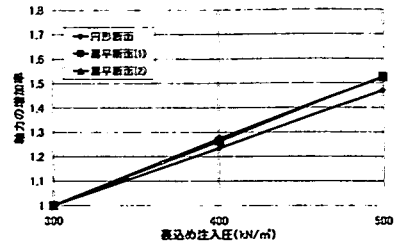


図-9 裏込め注入圧と軸力の増加率（正曲位置）

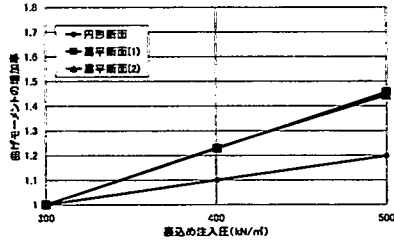


図-10 裏込め注入圧と曲げモーメントの増加率（負曲）

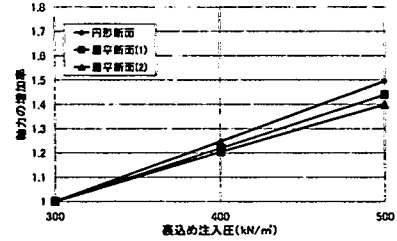


図-11 裏込め注入圧と軸力の増加率（負曲位置）

以上のように裏込め注入圧を増加させた場合の発生断面力の増加割合は、断面形状（真円率）による影響が大きく、発生断面力は断面形状に依存する。

4. おわりに

施工時荷重（裏込め注入圧）が偏平シールドトンネル覆工の断面力に与える影響を施工過程を考慮した解析的手法により検討し、トンネル断面形状と裏込め注入圧力の関係について考察した結果を以下に示す。

- ①裏込め圧力を消散させても裏込め注入時に発生した変形が残存するため、覆工に対して裏込め注入圧による影響が大きく、この傾向はトンネル断面形状がより偏平になると顕著に現れる。
- ②裏込め注入圧と最終断面力の関係が比例関係となっていることから、覆工断面力に対しては裏込め注入圧が支配的要素となっており、覆工設計に対しては裏込め注入圧の影響について考慮する必要があると考えられる。
- ③偏平断面では施工時荷重に対して変形抑止効果など形状保持装置が担う役割が非常に大きい。

今後は、施工時荷重に着目した計測結果を基に、地山と覆工とを一体とした三次元解析により施工時荷重の影響を定量的に把握して、覆工設計に反映させたいと考えている。

参考文献

- 1) 助川・中島・藤木・荻野・小泉: 3心円形駅シールドトンネルの設計法に関する研究、トンネル工学研究発表会論文・報告集 第3巻, 1993
- 2) 大門・矢萩・大石・小松: 半径の異なる三連型駅シールドの計測結果と考察、トンネル工学研究論文・報告集第10巻, 2000
- 3) 有泉・岡留・五十嵐・長屋: シールド洞道に働く施工時荷重に関する分析、トンネル工学研究論文・報告集第9巻, 1999