

早稲田大学 学生会員 河野 麻紀子
早稲田大学 学生会員 清水 幸範
早稲田大学 学生会員 江浪 亮介
早稲田大学 正会員 小泉 淳

1. はじめに

近年、東京都や大阪府などの都市河川流域部では、急激な都市化に伴う降雨時の洪水や浸水などのいわゆる都市型水害が増加している。このような都市型水害の対策として、地下調節池や地下河川を根幹とした治水対策が行われているが、都市部では既設構造物が密集しているため、これらの構築にはシールド工法の適用が最も有効であると思われる。しかし従来のトンネルとは異なり、満水時あるいは異常時にはその内部に高い内水圧が作用することから、現状では覆工構造に検討すべき課題が多い。

一般に覆工構造は、内水圧を①一次覆工のみで負担する構造、②一次覆工と二次覆工で負担する構造、③二次覆工のみで負担する構造、の3つに大別できる。これらの覆工構造は、①では一次覆工（特に継手部）に高い引張強度と水密性を要する、②では両覆工の荷重分担を明確にする必要があり、二次覆工には適度な水密性が要求される、③では二次覆工自体が高い引張強度と水密性を必要とするため、設計は比較的明確であるが経済性に問題が生じるなどの課題を有する。また有筋であれ無筋であれ、二次覆工をコンクリートで構築する場合には、その引張強度を超える引張力が作用すれば二次覆工には貫通クラックが生じる。その結果、貫通クラックから両覆工間に水が浸透し、両覆工間には水圧が作用することになる。また内水圧が取り除かれた後に、この水圧が残留するか否かは設計上重要な問題である。筆者らは、水が両覆工間へ浸透する状況と両覆工間に浸透した水が残留するか否か、およびそれらの過程における両覆工の挙動を明らかにするため基礎的な模型実験とそれを対象とした解析を行った。本報告はその結果を示すとともに、合理的な覆工構造や設計法について若干の考察を加えたものである。

2. 模型実験の概要とその結果

一次覆工は外形 300mm、厚さ 20mm、長さ 760mm のアクリル円筒でモデル化し、二次覆工は外形 260mm、厚さ 25mm および 40mm、長さ 750mm の無筋モルタルをアクリル円筒の内側に直接打設することでモデル化した。また二次覆工には内面が平滑なものと、クラックを誘発する目的でノZZを設けたものの2種類を用いた。実験はこのトンネル模型内部を水で満たし、ポンプで内水圧を作用させて、模型の中央断面におけるひずみ、変位および覆工間の水圧を測定するとともに、二次覆工にクラックが発生した後の水の挙動を目視により観測するものである。実験は①クラック発生までの加圧と、②急激な除圧、③クラック発生後の加圧と、④緩やかな除圧の4段階に分けて行った。模型実験から得られた主な知見は次のとおりである。①クラック発生前は主に二次覆工で内水圧を負担し、クラック発生後は覆工間の水圧、変位、および一次覆工の応力が急激に増加し、一次覆工が主に内水圧を負担する。②貫通クラックが生じると急激に水が両覆工間に浸透する。また貫通クラックは内面が平滑な場合でも、約 180° 隔てた2カ所に発生したことからコンクリートの局所的な剥落を防止する目的で二次覆工に鋼繊維などを混入する必要はないと予想される。③内水圧を急激に除くと、覆工間の水圧と内水圧に差が生じ、二次覆工は軸圧縮状態となる。しかし発生したクラックが水みちとなり、この水圧差が時間とともに減少して覆工間に残留水圧は生じない。

表1 各レベルの覆工の状態

レベルⅠ	内水圧が小さく応力も低レベル
レベルⅡ	クラック発生直前。モルタルのひずみは終局状態に近いレベル
レベルⅢ	クラック発生直後。水の浸透により両覆工に偏圧が作用するレベル
レベルⅣ	内水圧が高く水は両覆工間に完全に浸透しているレベル

キーワード：シールドトンネル 内水圧

連絡先：〒169-0072 東京都新宿区大久保3-4-1 早稲田大学理工学部土木工学科 小泉研究室 TEL 03-3204-1894 FAX 03-3204-1946

3. 模型実験を対象とした解析の概要とその結果

解析は①クラックが発生する前の段階、②クラックが発生した直後で両覆工間の一部に水が侵入し、両覆工間に局所的な偏圧が作用する段階、③両覆工間に水が十分に回り込み、両覆工間に均一な水圧が作用する段階、の3つの段階に分けて行った。解析には、二層構造のはりーばねモデルを用いた^{1) 2)}。なお両覆工間の相互作用を表すばねのうち接線方向のばね定数はせん断変形領域を各々の覆工厚と仮定し、また半径方向のばね定数は両覆工の圧縮有効厚さを各々の覆工厚の1/2と仮定して算出した。また中心角90°の位置には、接線方向と回転方向を拘束する仮定の支点ばねを4ヶ所設け、これで境界条件を評価した。表1に示すレベルⅠとⅡではこの二層モデルを、レベルⅢとⅣでは一次覆工のみのはりーばねモデルを用いた。またはりーばねモデルによる設計の適用性を確認するために、FEM解析をあわせて行った。これには対称性を考慮した1/4円筒モデルを用いた。覆工間には長さを持たない非線形のばね要素を設け、覆工間に水が浸透した場合には当該の接点がかい離するようにした。以下にはクラック発生前の挙動についてのみ考察する。図1はFEM解析による円周方向の応力分布を、図2ははりーばねモデルによる円周方向の応力分布を示したものである。これらの図を見るとクラック発生前の応力状態はほぼ軸引張状態であること、内水圧により発生する両覆工の引張応力はその軸剛性の比によること、はりーばねモデルはある程度実験模型の挙動を評価していること、はりーばねモデルから得られる覆工の応力は、FEM解析の結果および実験結果のそれと比較して概ね安全側であることがわかる。

4. おわりに

模型実験および解析の結果から、二層構造のはりーばねモデルは軸力が卓越する場合にも十分適用できることがわかった。また水の挙動や残留水圧の挙動、クラックの発生状況などに関する知見から、二次覆工に鉄筋コンクリートや無筋コンクリートを使用しても内水圧に対するその力学的な効果は期待できず、粗度係数の低減、セグメントの摩耗防止程度の役割しか分擔しないものと考えられる。作用する内水圧が高い場合には鋼管などの内挿管を二次覆工として用い、内水圧をこれですべて負担し、二次覆工から外へ水を出さないことが要求される。この場合には鋼管の摩耗や腐食などに対する検討に加えて、内水圧が無い場合に外から侵入する水圧に対しても座屈を起こさない程度の剛性を鋼管に付与することが必要となる。一方、両覆工間に防水シートなどを巻いた上で二次覆工を行う場合には、二次覆工は無筋コンクリートで良く、トンネルの内外への水の移動も考えにくいためトンネルの劣化は少なくその耐久性が向上するものと思われる。今後は覆工に発生する応力のレベルを指標として、合理的な覆工構造を選定する手順やその設計のフローチャートを作成するとともに、それに従い、数値実験を行って実構造への適用性を検討する予定である。

参考文献 1) 村上・小泉：二次覆工で補強されたシールドセグメントリングの挙動について、土木学会論文集，No. 388/Ⅲ-8，pp85～93，1987，
12 2) 村上・小泉：二次覆工された千鳥組セグメントリングの挙動について，土木学会論文集，No. 430/Ⅲ-15，pp135～142，1991，6

表2 解析に用いた諸量

	E(kgf/cm ²)	ν	ばね定数(kgf・cm)
アクリル	1.63×10 ⁵	0.36	Ku 1.03×10 ⁴
モルタル	3.36×10 ⁴	0.22	Kv 4.55×10 ⁴
軸剛性比	E1A1:E2A2 ≒ 1.5:8.5		

