

内水圧を受けるシールドトンネルの合理的な覆工構造について

STUDY ON THE RATIONAL LINING OF SHIELD TUNNEL SUBJECTED TO THE INNER WATER PRESSURE

小泉 淳¹⁾・佐合 純造²⁾・清水 幸範³⁾・白井 孝典⁴⁾

Atsushi KOIZUMI, Junzo SAGO, Yukinori SHIMIZU and Takanori SHIRAI

In recent years, a lot of underground rivers and ponds are constructed for the purpose of flood control by the shield tunneling method in urban areas such as Tokyo and Osaka. These tunnels and ponds are subjected to not only the earth pressure and water pressure from the outside of them but also the high water pressure from the inside of them. There are many problems that should be clear for getting the good tunnel. For example, what sort of structures of the tunnel lining is better and what sort of the design method of the tunnel lining is more rational. In this paper, the behavior of the primary lining and the secondary lining and the behavior of the inner water pressure are clarified from the results of simplified model test and their analytical investigations. As a result, the analytical model by which is reasonably able to explain the behavior of the shield tunnel subjected to the inner water pressure is shown. Moreover the rational structure and the design method of the tunnel lining is proposed.

Key words: shield tunnel, water pressure tunnel, tunnel lining, design method

1. はじめに

わが国の都市は経済の高度成長にともない急激な発展を遂げ、雨水の浸透面積の減少や河川沿いへの生活空間の進出によって都市河川流域の保水機能や遊水機能が低下し、降雨が短時間に直接河川へ流入する状況になっている。このため集中豪雨はもとよりちょっとした降雨でも道路や家屋が浸水するケースも増加してきている。

東京都や大阪府は、洪水時の氾濫水を地下に一時貯留する地下調節池や、分水路で迂回させる地下河川などを根幹とした治水対策を計画し実施している。これらの地下調節池や地下河川の構築には、密集した地上施設や輻輳した既設の地下施設に与える影響が少ないシールド工法の適用が最も有効であると思われる。しかしこのようなトンネルは従来のトンネルとは異なり、満水時あるいは異常時には内部に高い内水圧が作用する圧力トンネルとなる。したがって、岩盤構成が複雑で軟弱地盤が多いわが国の都市部で、このような内部に高い水圧が作用するシールドトンネルを構築する場合には、その覆工構造に検討すべき課題が多い。

本研究は内水圧を受けるシールドトンネルの合理的な覆工構造の提案を目的としたものであり、まずこのようなトンネルに対する現状の覆工構造の特徴とその課題を挙げ、次に二次覆工を有するトンネルを対象にした基礎的な模型実験と解析を行い、最後にその結果から合理的な覆工構造を提案したものである。

2. 現状の覆工構造とその課題^{2), 3)}

一般に内水圧を受けるシールドトンネルの覆工構造は、作用する内水圧を①一次覆工のみに負担させる構造、②一次覆工と二次覆工とに協同で負担させる構造、③二次覆工のみに負担させる構造の3つに大別できる。以下にこれら3つの構造の特徴とその課題を述べる。

-
- 1) 正会員 早稲田大学理工学部土木工学科
 - 2) 正会員 (財) 先端建設技術センター 研究第二部
 - 3) 正会員 佐藤工業株式会社 東京支店
 - 4) 正会員 日本シビックコンサルタント(株) 技術本部 設計部

（１）一次覆工のみに内水圧を負担させる構造

一次覆工の内側には直接高い水圧が作用する．この内水圧は覆工の軸引張力で負担される．したがって覆工本体や継手部には高い引張強度と水密性が要求される．特にセグメントに発生する引張応力度が、コンクリートの引張強度を超えるような高水圧レベルでは、コンクリート系のセグメントが適用できない可能性が高い．また一次覆工本体および継手部には、トンネル内部の乾湿の繰り返しや内部を流れる水の水質による腐食および流砂による摩耗などに対する処理が必要となる．このためセグメント自体は相当に高価になるものと予想される．

（２）一次覆工と二次覆工に負担させる構造

一次覆工と二次覆工との両者に内水圧を負担させる構造の場合、外からの荷重に対しても内水圧に対しても両覆工を構造部材として評価するため、経済性に優れた構造になると考えられる．しかしこの場合には両覆工の荷重分担を明確にする必要がある．また二次覆工には適度な引張強度と水密性が要求される．これらをどのように評価するかが問題である．

（３）二次覆工のみに負担させる構造

二次覆工のみに内水圧を負担させる構造の場合、設計は比較的明確であるが二次覆工自体に高い引張強度と水密性を必要とするため経済性には問題がある．また両覆工が互いに力を伝達しないような工夫が必要となる．

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ひびわれが生じる．その結果貫通ひびわれから両覆工間に水が浸透し、両覆工には水圧が直接作用するため二次覆工は構造部材として何ら意味をなさなくなる．このため、高い水圧レベルが想定される場合にはコンクリートによる二次覆工は適用できない可能性が高い．また内水圧が取り除かれた後に、両覆工間に水圧が残留するか否かは設計上の重要な課題である．

3. 内水圧を受けるシールドトンネルの模型実験

（１）実験の概要

図-1は実験装置の概要を示したものである．一次覆工は外径 300mm、厚さ 20mm、長さ 760mm のアクリル円筒でモデル化し、二次覆工は外径 260mm、厚さ 25mm および 40mm、長さ 750mm のモルタルを、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．モルタルの配合は重量比で水：セメント：砂の比が 1：2：6 である．また二次覆工には内面が平滑なものと、ひびわれを誘発する目的で切り欠きを 2 つ（中心角が 180° 間隔）設けたもの、切り欠きを 4 つ（中心角が 90° 間隔）設けたものの 3 種類を用いた．図-2 に一例として切り欠きを 2 つ設けた模型の断面図と切り欠きの寸法を示す．

実験は図-1 に示すようにアクリル円筒の両端に鋼製のふたを設置し、それらを 6 本のボルト（中心角が 60° 間隔）で締結した後、トンネル模型の内部を水で満たして手動ポンプを用いて内水圧を作用させるものである．

実験は①ひびわれ発生までの加圧、②急激な除圧、③ひびわれ発生後の加圧、④緩やかな除圧の 4 段階にわけて行った．表-1 にトンネル模型に用いた材料の諸元を示す．なおこれらのトンネル模型は、トンネル内の水の挙動を把握することが主目的であることから、特に相似則などは用いていない．

表－１ 模型材料の諸元

	弾性係数 (N/mm ²)	ポアソン比	圧縮強度 (N/mm ²)
アクリル	3.4×10 ³	0.36	—
モルタル	1.8×10 ⁴	0.22	21.0

（２）測定項目

測定は鋼製のふたの拘束の影響を受けないように模型の中央断面において行った．測定項目は、アクリルの内周および外周のひずみ（中心角が 45° 間隔で各 8 点）、モルタルの内周のひずみ（中心角が 45° 間隔で最大

8点), アクリルの半径方向の変位(中心角が 60° で6点), 内水圧, および覆工間の水圧(中心角 180° で2点)である。測定位置を図-2に示す。このほかに目視によりモルタルにひびわれが発生した後の覆工間への水の浸透状況を観測した。なお、覆工間の水圧は二次覆工に超小型圧力計を埋込んで測定した。

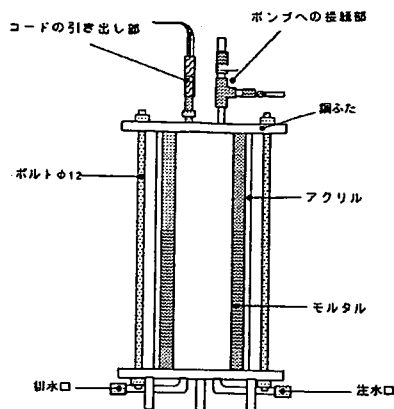


図-1 実験装置の概略図

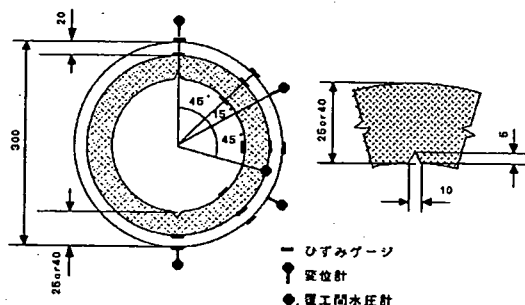


図-2 測定位置

(3) 実験結果

a) 加圧実験について

実験は二次覆工の厚さを2種類実施したが、どちらのケースも同様の結果が得られた。ここでは、二次覆工の厚さ25mmの場合の実験結果を例にとって説明する。図-3は加圧実験における測定値の経時的変化を示したものである。図中の覆工間水圧および変位は測定値の平均値を示す。ひびわれは内水圧を 0.2N/mm^2 から 0.3N/mm^2 に上げた時点で発生したが、これらの図を見るとひびわれが発生する前は主に二次覆工で内水圧を負担し、ひびわれが発生した後は一次覆工の応力と変化が急激に増加する一方で二次覆工の応力が減少し、主に一次覆工で内水圧を負担していることがわかる。またひびわれ発生直後からは覆工間の水圧は内水圧の挙動と一致している。これは目視により確認された状況、すなわちひびわれが発生する覆工間に急激に水が浸入する状況と一致する。図に示す経過時間2分53秒くらいからひびわれ発生までの間は、二次覆工の応力が徐々に減少するとともに一次覆工の応力が発生し始める。また両覆工間の水圧も上昇を始める。これは内水圧によって二次覆工が変形し、一次覆工に応力を伝達し始めたことを意味している。このため両覆工間の水圧計は両覆工間の接触圧力を感知しているものと推定される。

図-4は二次覆工にすでにひびわれが発生した後の供試体を加圧した時の測定値の経時変化を示したものである。この図から二次覆工にひびわれがすでに生じている場合は、内水圧を作用させた直後からその内水圧を一次覆工が負担し二次覆工には応力が発生していないことがわかる。

これらのことから二次覆工にはその引張強度を超える引張力が作用すれば貫通ひびわれが生じ、またその貫通ひびわれから両覆工間に水が浸透して両覆工に直接内水圧が作用することがわかる。したがってすでに貫通ひびわれがある場合を含めて、二次覆工に貫通ひびわれが発生するような高水圧レベルのもとでは、二次覆工は構造部材として何ら機能しないことがわかる。

b) 除圧実験について

図-5は内水圧を急激に除圧する実験で得られた測定値の経時変化を示した図である。この図から内水圧を急激に除くと内水圧と覆工間の水圧には差が生じ、二次覆工は一時的に軸圧縮状態となることがわかる。しかし時間の経過とともにこの水圧差は減少して両覆工の応力は0に近づき残留水圧もほぼ0になる。

一方図-6に示す緩やかな除圧実験の結果を見ると、若干の時間遅れはあるものの同様に残留水圧は0になることがわかる。これらのことから、二次覆工に貫通ひびわれが生じればそのひびわれが水みちとなるため内水圧を急に除いてもゆっくり除いても両覆工間に水圧が残留することはないと結論される。

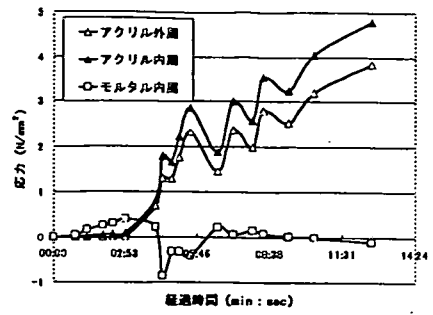
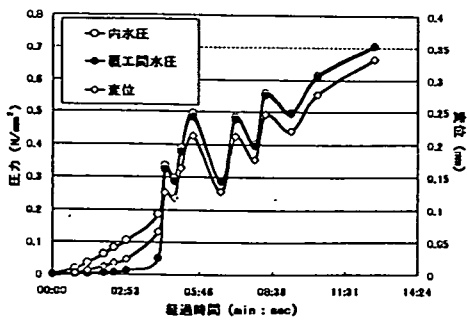


図-3 加圧実験における経時変化

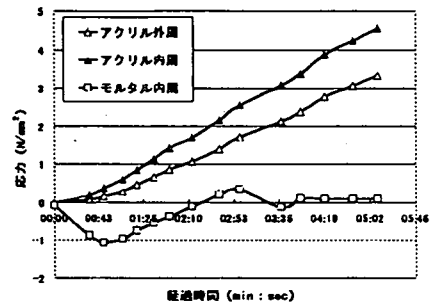
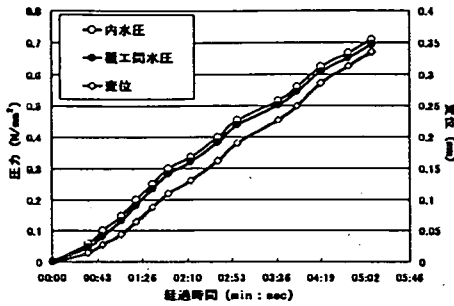


図-4 クラック発生後の経時変化

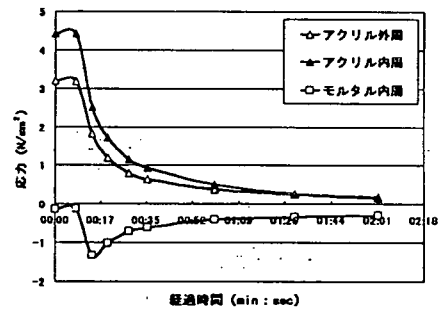
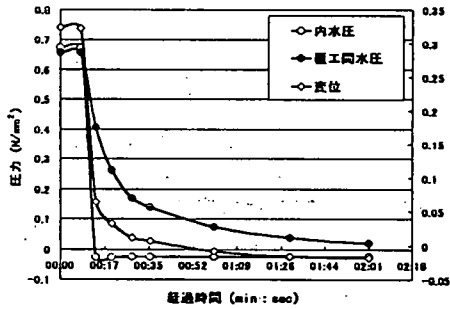


図-5 急激な除圧の経時変化

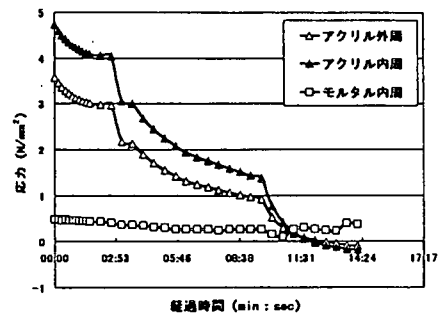
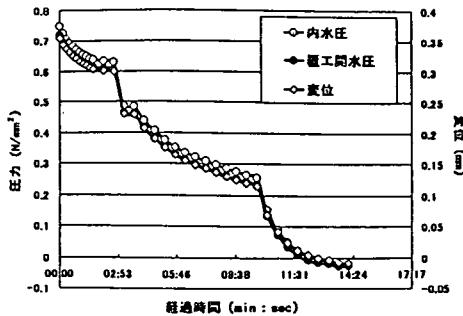


図-6 緩やかな除圧の経時変化

c) ひびわれの発生状況について

二次覆工に生じる貫通ひびわれは、内面が平滑な場合でも切り欠きを設けた場合でも、1ヶ所もしくはおよそ 180° 隔てた 2ヶ所に生じることがわかった。当初は二次覆工の近接した 2ヶ所以上の断面にひびわれが発生すると、コンクリートの局所的なはく落などが予想されるため、これを防止する目的で二次覆工には網筋を

入れたり鋼繊維などを混入する必要があるのではないかと考えたが、この結果を見ると特にそのような配慮は必要ないように思われる。しかし切り欠き（ひびわれ誘発目地）を設けることは、ひびわれの発生位置を特定できるメリットがあるため有効であると考えられる。

4. 解析

(1) 解析モデルの概要

実験結果によれば、トンネル模型は二次覆工にひびわれが発生する前と発生した後ではその挙動が異なる。すなわちひびわれ発生前は両覆工で内水圧を負担しているが、ひびわれ発生後は一次覆工のみで内水圧を負担し、二次覆工は構造部材として機能していない。そこでひびわれ発生前は図-7 に示すような二層構造のはりばねモデルを^{4), 5)}、ひびわれ発生後はその二次覆工リングを取り除いたはりばねモデル^{6), 7)}をそれぞれ解析モデルとして用いた。このモデルにおいて、一次覆工であるアクリルリングは軸剛性 $E_1 A_1$ 、曲げ剛性を $E_1 I_1$ を有する剛性一様リングで、二次覆工であるモルタルリングは軸剛性 $E_2 A_2$ 、曲げ剛性 $E_2 I_2$ を有する剛性一様リングで評価する。また両覆工間の相互作用は、接線方向のばね K_u と法線方向のばね K_v で評価し、境界条件は仮定の支点ばねをアクリルリングに設けこれにより評価した。

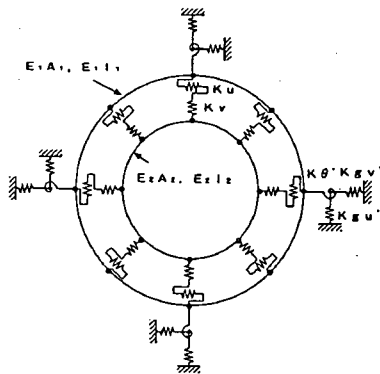


図-7 はりばねモデル

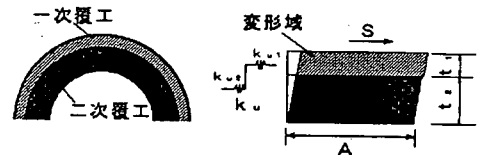


図-8 せん断ばねモデル

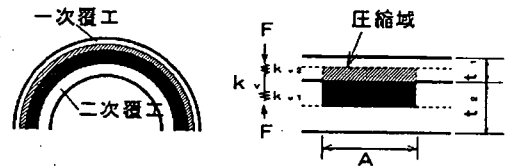


図-9 圧縮ばねモデル

2) 各種ばねのばね定数の算定

a) 覆工間のばね

接線方向のばねのばね定数 K_u は図-8 に示すようなせん断変形の領域を考慮して求める。すなわち、両覆工のせん断変形領域を各々の覆工厚 t_1 、 t_2 とすると、各覆工のばね定数 K_{u1} 、 K_{u2} は次式で表される。

$$K_{u1} = \frac{E_1 A}{2(1 + \nu_1) t_1} \quad (1a)$$

$$K_{u2} = \frac{E_2 A}{2(1 + \nu_2) t_2} \quad (1b)$$

ここに、 E は弾性係数、 ν はポアソン比、 t は覆工厚、 A は解析上の節点間の弧長にトンネルの長手方向の単位長さを乗じた単位面積である。また添え字1、2はそれぞれ一次覆工、および二次覆工を表す。接線方向のばね定数 K_u はこれらのばねが直列に連結されたものと考えると次式で表される。

$$K_u = \frac{K_{u1} \cdot K_{u2}}{K_{u1} + K_{u2}} \quad (2)$$

一方、法線方向のばねのばね定数 K_v は図-9 に示すような圧縮領域を考慮して求める。すなわち、両覆工の圧縮有効厚さを各々の覆工厚さの1/2と仮定すると、そのばね定数 K_{v1} 、 K_{v2} は次式で表される。

$$K_{v1} = \frac{2 E_1 A}{t_1} \quad (3a)$$

$$K v_2 = \frac{2 E_2 A}{t_2} \quad (3b)$$

法線方向のばね定数 $K v$ はこれらのばねを直列に連結したものと考えると次式で表される。

$$K u = \frac{K u_1 \cdot K u_2}{K u_1 + K u_2} \quad (4)$$

なおこれらのばねは両覆工間で対応する各節点において、圧縮力が作用したときのみ有効とし、引張力が生じた場合は $K u$ 、 $K v$ をともに 0 とする。

b) 支点ばね

支点ばねはモデルの剛体移動および回転を抑止するためのばねであり、図-7 に示すようにアクリルリングの中心角 90° の位置に 4 つ設け、これで境界条件を評価した。トンネル模型は、その作用する内水圧に対し半径方向に一樣な変形をすると考えられるため、数値解析上 $K g u'$ は非常に大きなばね定数とし、 $K g v'$ と $K \theta'$ は 0 とした。

5. 実験結果と解析結果との比較

図-10 はひびわれ発生前の円周方向の応力分布と半径方向の変位分布を示したものであり、図-11 はひびわれ発生後のそれらを示したものである。図-10 を見ると、ひびわれ発生前の一次覆工には大きな応力が発生しておらず実験値と解析値とはよく一致していることがわかる。しかし二次覆工の応力分布の解析値は実験値とあまりよい一致を示していない。モルタルの外周にはひずみゲージを貼付できないため正確には推定

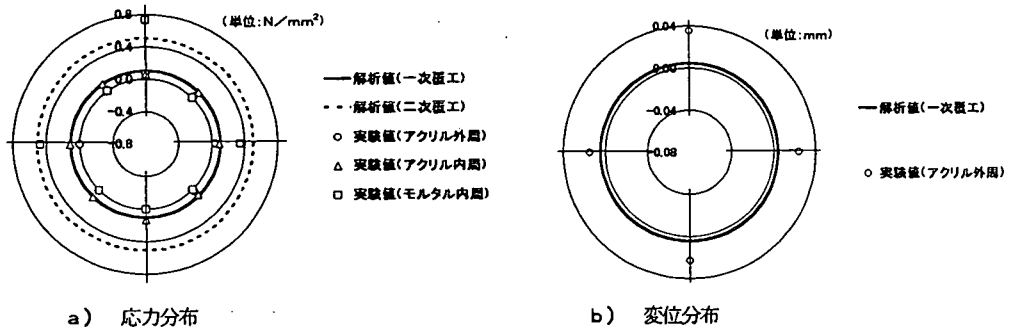


図-10 クラック発生前の応力分布と変位分布

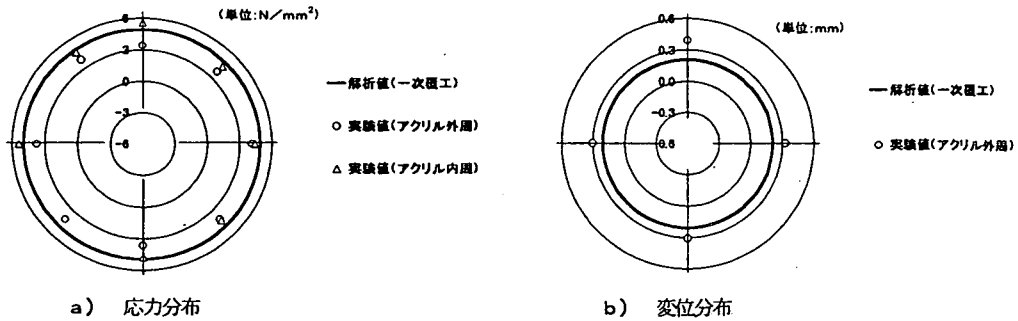


図-11 クラック発生後の応力分布と変位分布

できないが、モルタル内面に設けた切り欠きの影響でモルタルリングの一部に曲げモーメントが発生したのではないかと考えられる。また、モルタルはその硬化に伴い収縮することから、実験の開始前にすでに両リングは局所的に剥離していることも十分予測される。これらのことから両覆工はある断面では重ね構造として挙動し、ある断面では一体構造に近い状態で挙動していたものと推定される。またアクリルリング外側の変位を見

ると、実験値は解析値より大きな値となっていることがわかる。これは主に変位の計測精度に起因するものと考えられる。

一方、図-11 に示すひびわれ発生後の状況を見ると、応力分布は実験値と解析値とがよい一致を示している。このことは間接的ではあるが二次覆工が応力を負担していないことを示している。また変位分布を見るとひびわれ発生前と同様に、実験値の方が解析値に比べて若干大きめの値となっていることがわかる。これらの図から、はりばねモデルはひびわれ発生の前後においてほぼ実験模型の挙動を説明していること、またはりばねモデルにより得られる覆工の応力は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。なおひびわれ発生前において、内水圧により発生する両覆工の引張応力は、それらの軸剛性の比になっていることが確認された。

6. 合理的な覆工構造

一次覆工のみで内水圧を負担する構造の場合、施工性や工期は他の構造と比較して優れているが、セグメントや継手部に高い引張強度と水密性が要求される。外から作用する荷重による断面力と内水圧により発生する断面力とを重ね合わせた場合に、曲げモーメントが0で軸力が引張りとなる断面が存在するならば、コンクリート系のセグメントは使用できず、鉄鋼製セグメントを使用することになる。鉄鋼製セグメントを用いる場合でも継手部には十分な強度と剛性が要求される。またどのようなセグメントを用いても、供用後にはトンネル内部を流れる水の水質による化学的な腐食やトンネル内部の乾湿の繰り返しによる劣化が予想されるため、それに対するトンネル内面の処理が長期にわたり定期的に必要となる。したがってセグメント本体は相当に高価なものになると考えられ、またトンネルの機能を維持するためのランニングコストも必要となることから、内水圧のレベルにもよるがその経済性は必ずしもよくない。

一方、二次覆工のみに内水圧を負担させる構造の場合には、模型実験により得られた知見、すなわち両覆工の挙動や残留水圧の状況およびひびわれの発生状況などからみると、二次覆工に鉄筋コンクリートや無筋コンクリートを用いてもその引張強度を超える引張力が作用すれば覆工には貫通ひびわれが生じ、その貫通ひびわれから覆工間に水が浸透して両覆工に内水圧が直接作用するため、二次覆工に力学的な効果は期待できないと結論される。この場合には二次覆工は粗度係数の低減あるいはセグメントの摩耗防止程度の役割しか担わないものと考えられ、一次覆工であるセグメントには高い引張強度と耐食性が要求される。このことから、二次覆工に鉄筋コンクリートを用いてそれに内水圧を負担させる構造は、施工を煩雑にし経済性を欠くばかりでなく、引張力を鉄筋コンクリートに負担させるという考え方自体が合理性に欠けると言わざるを得ない。

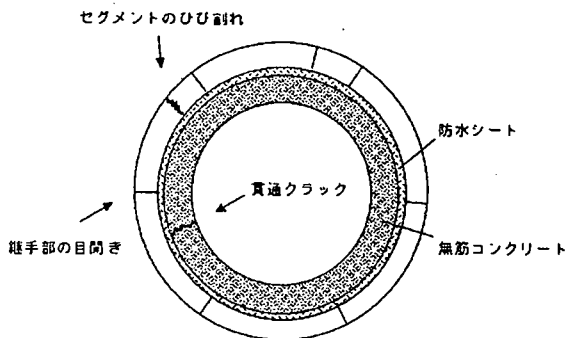


図-12 防水シートを用いる方法

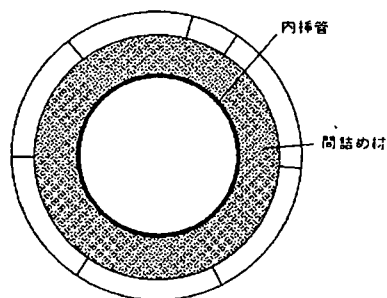


図-13 内挿管を用いる方法

以上のことから、図-12 に示すような一次覆工の内側に防水シートを敷設し、これを二次覆工で押さえる構造が合理的な覆工構造であると思われる。この構造の場合、防水シートを覆工間に敷設するためトンネル内外への相互の水の移動は考えにくく、セグメントのひびわれや継手部の目開きが生じていても、侵入する水はトンネル断面の地山側から防水シートまでの間に留まるいわゆる「死水」であり活性は持たないものと想像される。一方、二次覆工はその機能が防水シートの固定、トンネル内面の粗度係数の低減、および摩耗防止などである

ため、有筋とする必要はなく無筋コンクリートで十分であり覆工厚もその自重に対して安全であれば良い程度と思われる。

このようにすれば一次覆工であるセグメントの鉄筋の腐食やコンクリートの中性化に伴う劣化は少なく、その耐久性は格段に向上すると考えられ、二次覆工は内水圧に対する特別な配慮は必要としない。

また、作用する内水圧が相当に高い場合には、図-13 に示すように二次覆工として鋼管やFRPM管などの内挿管を用い、これと一次覆工との間に間詰め材を打設する構造も有効であると考えられる。この構造では、基本的に一次覆工は外力を負担し、二次覆工は内水圧のみを負担するので設計は比較的明確である。内挿管として鋼管を用いる場合は、乾湿の繰り返しによる腐食を防止するために鋼管の内面に何らかの処理が必要となるが、FRPM管は化学的な腐食に強く、ある程度の耐摩耗性が期待でき防水性も保証されていることからトンネルの劣化の防止には有効なものと考えられる。しかしいずれの場合もあらかじめ摩耗代を見込んでおく必要がある上に、地山からの漏水が一次覆工の防水層を突破すれば、内挿管には水圧が作用して、大きな軸力が発生するためこれにより座屈しない程度の剛性を付加することが必要となる。また間詰め材には水密性は必要ないが、一次覆工との間の相互の力の伝達をできるだけ小さくするように両者の変形を十分吸収することのできる性能が要求される。現状では発泡モルタルや発泡ウレタンなどが有効であると考えている。

7. おわりに

以上に内水圧を受けるシールドトンネルの現時点において合理的と思われる覆工構造とその設計の考え方を示した。このうち防水シートを用いる構造と内挿管を用いる構造の両者に共通な最大な利点は、これらによりトンネル内外への水の移動が完全に抑止されることである。トンネルの劣化は水により発生すると考えて良く、これらの構造はトンネル本体の劣化の抑制に高い効果が期待できる。

しかしこれらの構造を実際の工事にさらに効果的に適用するには、いくつかの技術開発が必要と考えている。防水シートを用いる構造の場合には、防水シートを迅速にかつ確実に巻立てる方法、二次覆工の合理的な打設方法などが、また内挿管を用いる場合には内挿管や間詰め材の材質、両覆工間に間詰め材を充填する合理的な方法などがそれにあたる。さらに、連続した内挿管を用いる場合にはトンネル内の温度変化に伴って生じる内挿管の応力や変形なども検討すべき課題であると考えている。

最後に本論文をまとめるにあたって、この研究の端緒となった財団法人「先端建設技術センター」の委員会の関係諸氏ならびに卒業論文として実験などに助力願った当研究室江浪亮介君、林淳平君、河野麻紀子さんに感謝する次第である。

参考文献

- 1) Herman Kastner, 金原弘訳：トンネルの力学 (Statiku Des Tunnel-und Stollenbaues), 森北出版, 1974
- 2) (財) 先端建設技術センター：内圧トンネル覆工構造検討要領 (案), 1994
- 3) 神田川地下調節池 (第1期) の二次覆工に関する技術検討会：検討会資料, 1994
- 4) 村上博智, 小泉淳：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, 第388号/Ⅲ-8, pp. 85-93, 1987
- 5) 村上博智, 小泉淳：二次覆工で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, pp. 135-142, 1991
- 6) 村上博智, 小泉淳：シールドセグメントリングの耐荷機構について, 土木学会論文集, 第272号, pp. 103-115, 1978
- 7) 村上博智, 小泉淳：シールド工事用セグメントのセグメント継手の挙動について, 土木学会論文集, 第296号, pp. 73-86, 1980
- 8) 小泉淳, 小林亨：最近のシールドトンネルにおける防水技術 (3), トンネルと地下, 第23巻6号, pp. 37-40, 1992