

外-2-3

博士論文概要

論文題目

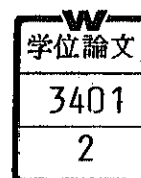
シールド工事用セグメントの
水膨張シール材による止水設計法に関する研究
Water Sealing Design Method
for Shield Tunnel Segment with Hydrophilic Sealing Material

申請者

大塚 正博

Masahiro OHTSUKA

2002 年 4 月



近年、都市部においては、構造物の林立、交通網の過密化などにより、公共事業を行う上で長期間地上を占有することが困難となってきた。新たに都市整備のための公共施設を敷設するためには、地下空間にその場所を探さなければならぬが、地下の比較的浅い部分にはすでに地下鉄、下水道、電力・通信などの施設が輻輳しており、利用できる空間も深層化の傾向にある。このような背景のもと、2000年5月には「大深度地下の公共的使用に関する特別措置法」が制定され、都市部におけるトンネル工事はますます増加する傾向にあり、それに用いられるシールド工法はとりわけ重要な施工法となってきた。

シールド工法は、1818年にフランス人 Brunel が提唱し、1860年から1880年代にかけて英国を始めとする欧州各国を中心に実用化された。

我が国では、1936年の関門鉄道トンネルや1957年の営団地下鉄永田町のルーフシールドトンネルに採用され、さらに1961年の名古屋市地下鉄の覚王山トンネルでは、都市部における円形シールドが本格的に採用された。

これ以降、地下鉄を始め、上下水道、電力・通信用洞道等のインフラ整備のため、高度成長期とともに、シールド工法は多くの都市トンネルに採用され、着実にその実績を増加させてきた。

シールドの形式は、当初は開放型シールドから始まり、1960年から1970年代には、泥水式シールドや土圧式シールドなどの密閉型シールドが実用化され、現在では、さらに、掘削断面の形状や掘削方法を工夫した複円形断面シールド、非円形断面シールド、拡大シールド、球体シールドなどがつぎつぎ開発され、現場への適用実績を増やしている。

このような背景の下で近年の課題として、応力伝達をより合理的にする目的やコストダウン、高速掘進を指向したセグメント形状およびセグメント継手の開発、シールド掘進にともなう周辺地盤の変状メカニズムの解明、近接施工における影響メカニズムの解明、さらには、現状の施工技術を前提としたより合理的な覆工設計モデルの提案や限界状態設計法などに関する提案などが盛んにおこなわれている。

しかし、現時点では長距離施工システム、高速化施工システムの開発や大深度化に伴う設計および施工の課題、さらには環境保全や施設の維持管理に関する課題、トンネルの耐久性に関する課題などが残されている。

シールドトンネルは、都市部で使用されていることから周辺地山が未固結であることが多くその構造体は、土圧と水圧とのバランスで保たれている。トンネルの耐久性を考える場合、まず、シールドトンネルの劣化により漏水が始まり、その量が増加することにより荷重のバランスがくずれて覆工や地山を劣化させ、トンネル変形量の増加、継手部や鉄筋の腐食、コンクリートのひびわれの増加などを引き起こす可能性が高い。

さらに漏水は、耐久性だけでなく、都市部の地下水流にも影響を与え、今後は

環境問題としても厳しく規制されることが予想されるため、環境保全や施設の維持管理の面から考えても、トンネルの止水は特に重要な課題となる。

トンネル内への漏水の対策工としては、地山側から順に裏込め注入工、シール工、防水シート工、二次覆工などが考えられているが、いずれも完全な方法とは言えず、併用するのが一般的である。

これらのうち、防水シートに関しては、東京湾横断道路に採用する際に小泉らの報告にあるような検討がなされ、近年ではラッピングシールド工法と呼ばれる自動的にセグメント外面に防水シートを設置するような工法も試行されている。また、裏込め注入に関しては、小山の研究に見られるように止水としての役割よりも地山変位やセグメントリングの安定問題に寄与するテールボイド（掘削された地山背面とセグメント背面との間隙）の充填方策の検討がこれまでは課題であった。しかし、今後は止水性についても研究する必要がある。コンクリートによる二次覆工については、ひびわれを完全に防止できれば万全な対策工になることは論をまたない。

したがって、残された課題はシール工についてである。つまり、セグメントの継手部の止水、すなわちシール工は経済性や確実性、施工性の観点からみて、現状では最も合理的な漏水対策工と思われる。

一般に、現在のシールドトンネルのシール工には定形品の水膨張シール材が用いられることが多く、その止水効果は室内試験により確認されている。また、実施工においても概ね良好な成果が得られている。しかしながら、その材質や形状寸法等の選定は、従来からの経験や実績に基づき行われてきたのが実状であり、シール材による止水設計法についての力学的かつ系統的な研究はいまのところほとんどない状況である。

水膨張シール材が使用され始めたのは、1980年代後半であり、それまでは、非膨張のブチル系シール材などが使用されていた。したがって、実績としてはまだ20年程度と短く、長期的な耐久性については評価されていないのが現状である。このため、長期耐久性を評価するための試験方法も定まっておらず、水膨張シール材の良否を判定する基準も今のところない状況である。

本研究はこれらの観点に立って、シール材による止水機構を力学的に検討し、その設計法を提案するとともに、シール材の長期耐久性を実験的に検討し、その評価方法を提案するものである。

本論文は6章で構成されており、その概要は以下のとおりである。

第1章は序論である。研究の背景としてシールドトンネルにおいて、防水上重要となる継手部のシール材による止水設計法の必要性、および、その長期耐久性評価手法の必要性を述べるとともに研究の目的および各章ごとの概要について述べている。

第2章は、過去から現在におけるシール材使用実績をレビューし、シールドトンネル止水の考え方の変遷やセグメント用水膨張シール材の膨張メカニズムについて述べている。このシール材はJIS B 0116「配管：パッキンおよびガスケット用語」に示されているガスケットに相当するという認識にたち、設計水圧に対する所要シール材の仕様（形状・寸法・硬さ）は、密封の原理（パッキン理論）にもとづく止水設計概念、すなわち、シール材が圧縮されることにより、セグメント継手面のシール材に発生する応力（接面応力という）が、作用水圧以上であれば漏水は生じないが、接面応力が作用水圧より小さければその接触面から漏水が発生するという考え方により決められる。

第3章は前章で提案したシール材による止水設計の考え方、現在主流となっている水膨張シール材に適用可能であることを実証するための止水性能試験とその結果について述べている。

設計水圧を最大500kN/m²とし、密封の原理に基づき、形状を基本的な矩形としたときのシール材の基本的な止水性能試験と現場の施工状況を模擬した試験を実施した。その試験の結果、いずれの条件においても密封の原理が成立していることを確認し、従来のように、止水試験を実施せずに、その止水性能を推定できることをあきらかにした。

第4章は前章で妥当性を確認できたシール材による止水設計法についての提案およびその品質管理方法について述べている。すなわち、止水に対する設計パラメーター（シール溝寸法、シール材の形状寸法、初期接面応力、接面応力の有効率・増加率など）について提案した。

また、セグメントの組み立て時においては、シール材がシール溝内に封入できるようボルトの締結力を考慮することを提案している。

次に、シール材の納入時の性能確認試験方法及び品質管理上の留意点についても述べている。

第5章は、水膨張シール材の耐久性能およびその耐久性試験とその結果について述べている。

まず、ゴム材の耐久性に関する既往の研究についてレビューし、化学反応速度論に基づく評価法の一つであるアレニウス法の適用性について考察した。

次に、水膨張シール材の耐久性に対する要求性能、接面応力の経時変化状況、温度促進試験による寿命を推定した結果、水膨張シール材の種類によっては、高温による温度促進試験では、その耐久性を評価する事が難しいことがわかった。

そこで、常温でのシール材の応力緩和試験を長期にわたり実施し、水膨張シール材の応力緩和による接面応力の減少率と時間との関係を求め、シール材の長期耐久性の推定方法を提案した。

第6章は結論であり、本研究で得られた知見をまとめるとともに、残された課題と今後の研究の方向性について述べている。