

外93-47

早稲田大学大学院理工学研究科

2066

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

砂質地盤の泥水式シールドにおける間隙水圧の上昇現象と
それに伴うカッタービット間切羽部の安定に関する研究

申 請 者

森 仁 司

H i t o s h i M o r i

平成 5 年 1 1 月

泥水式シールド工法は、切羽を泥水により加圧して切羽の安定を確保しながら掘削し、掘削したずりは、泥水とともに流体輸送して坑外に搬出する工法である。また、本工法は、地下水面下の砂質地盤に対して多く使用され、自立性の乏しい切羽地盤の掘進を行うことから、切羽安定のための泥水圧の管理と泥水の品質管理が施工上重要な問題となっている。

泥水式シールド工法における砂質地盤での切羽安定機構は、従来の考え方では、泥水圧により切羽面に完全な不透水性の泥膜が形成され、泥水圧が地下水圧と土圧に対抗するというものであった。すなわち、泥水圧と地下水圧の差圧がそのまま全部土圧に対抗できる有効泥水圧と考えられきた。しかし、切羽面は、実際には概ね15～45秒毎にカッターで切削されるので、泥水はある程度切羽地盤に浸透し、切羽地盤の間隙水圧は初期地下水圧より上昇することになる。このため、有効泥水圧がその分減少することになり、切羽安定上の問題点となる。

そこで、泥水式シールドの掘進に伴う地盤の過剰間隙水圧の発生メカニズムについての詳細な調査研究を行い、シールド機の掘進速度やカッター回転数などの施工条件が過剰間隙水圧の発生におよぼす影響を明確にするとともに、その過剰間隙水圧の発生量の算定法を提示した。その結果、切羽有効泥水圧が、地盤条件および泥水性状によって極めて小さくなることが示された。また、掘進時に切羽に作用するカッター圧が大きいことが明らかにされたので、切羽の作用土圧は、ほとんどカッター圧のみにより支持できることが解明された。しかし、このカッター圧の直接作用しないカッタービット間切羽部は、有効泥水圧が非常に小さい場合があるので、この安定を考慮する必要性がわかってきた。この状況を踏まえて、カッタービット間切羽面の安定に必要な有効泥水圧について調査し、さらに、この圧力を確保するための泥水性状のあり方についても研究したものである。

本論文は、全五章から構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第一章では、本研究に関する既往の研究について概観し、従来の砂質地盤における泥水式シールドの切羽安定理論の問題点を明確にし、本研究の位置付けを明らかにするとともに研究の目的およびその内容の概略について述べている。

第二章では、砂質地盤において泥水式シールドを掘進させた場合、泥水の切羽地盤への浸透現象とこの浸透に基づく切羽地盤の過剰間隙水圧発生メカニズムおよびその発生量の算定法について述べている。ここでは、実際の泥水式シールドと同等のメカニズムの模型シールドを、カッター回転数、シールド掘進速度、泥水圧等を変化させて土槽中を掘進する動的実験と時間的に短い切削インターバル内の泥水の浸透状況を正確に把握するための静的泥水浸透実験を行った。その結果、カッターにより切羽面が15～45秒間隔で切削されるため泥水圧と地下水圧の差圧によって、泥水はほとんど切羽面に付着せずそのまま地盤へ浸透する。この泥水が前方の間隙水を押し出すことによって地下水に流動が生じて、切羽面での発生流速に比例して切羽地盤の過剰間隙水圧は発生し、有効泥水圧は減少する。この過剰間隙水圧

の発生量は、発生地下水流速を決める差圧、泥水性状、地盤の透水係数、排水距離によって変化することを明らかにしている。

泥水の切羽への浸透形態は、二種類に大別され、泥水の浸透速度がシールド掘進速度よりも速い場合は、泥水浸透ゾーンが形成され、泥水の浸透速度が遅い場合は、泥水浸透ゾーンは形成されない。また、泥水浸透ゾーンを形成する場合は、泥水浸透速度は、浸透距離の伸びとともに減少するので、浸透距離は次第に一定の状態に保たれる。この状態での過剰間隙水圧発生量を決める切羽面での発生地下水流速は、シールド掘進速度に等しくなることを示した。泥水浸透ゾーンを形成しない場合は、カッター切削インターバルにおける泥水の浸透分はすべて切削除去されその繰り返しとなる。この時の泥水の浸透速度は、泥水の浸透係数と切羽間隙水圧および切削インターバルによって決まり、その算定式を提示した。

この算定式と一般的な地盤の排水条件を考慮した有限要素法をもとに、現場のシールド切羽に生ずる過剰間隙水圧発生量を予測した結果、従来ほとんど考慮されていなかった切羽地盤の過剰間隙水圧の発生量は一般に大きく、特に透水性の小さい砂層の場合、通常の泥水では有効泥水圧としては非常に小さくなることを明らかにした。また、透水性の小さい地盤におけるシールド切羽付近の間隙水圧の現場測定結果からも、有効泥水圧はごくわずかなであることを立証した。さらに、現場の施工記録からも、泥水式シールドにおいては、切羽土圧に対抗する泥水圧効果が極めて小さく、切羽の全体的な安定は、ほとんどカッター圧に依存していることを明らかにした。

第三章では、過剰間隙水圧の発生により有効泥水圧がごくわずかな状態であり、しかもカッター圧が直接作用しないカッタービット間の切羽面の安定メカニズムと必要な有効泥水圧について明らかにしたものである。有効泥水圧によってビット間部の切羽面の崩壊を防止できなければ、カッター圧が確実に切羽地盤内に拡散伝播されなくなり、切羽全体の安定も崩れる可能性がある。

ビット間の切羽面は、カッター切削により泥膜がほとんどない状態であるが、この部分の安定に必要な押さえ圧の大きさを求めるには、静的な泥水加圧実験が泥膜が形成され切羽面での有効泥水圧が明確なため容易である。しかし、その値には、泥膜による別の安定効果が付加されている可能性が考えられる。この泥膜による付加的安定効果を調査するために、泥膜のない切羽面を水加圧する場合と泥膜を作った切羽面を水加圧する場合の実験を行い、切羽面の押さえ圧および崩壊状況の相違を比較検討した。その結果、必要押さえ圧は、泥水加圧が最も小さくなり、ビット間の切羽面の崩壊状況はすべり崩壊となった。また、すべり面形状は、対数らせ線で近似できるものであった。水加圧の場合の崩壊は、切羽粒子の継続落下によるものであり、泥膜・水加圧の場合は、泥膜破損の後に生じる粒子の継続落下による。泥膜・水加圧より泥水加圧の必要押さえ圧が小さいのは、切羽面の変形により泥膜が破損したとき、破損部に泥水が浸透して粒子落下を防止するためである。それゆえ、カッター切削を受ける切羽面は泥水浸透により粒子の継続落下は生ぜず、すべり崩

壊となるので、必要押さえ圧は、静的な泥水加圧と同等と考えられる。このことから、切羽表面の砂粒子の継続落下を防止できれば、ビット間切羽部の必要押さえ圧を小さくできることを示し、泥水加圧の持つ優位性を明らかにした。

実際のシールド機におけるビットの配置から生じる最大のビット間切羽部の安定については、ビットによる加圧力の切羽面内部への拡散伝達が生じるので、ビット間部のすべり破壊は切羽面浅層部に限定される。したがって、この部分の安定に必要な押さえ圧に相当する有効泥水圧を確保する必要がある。この有効泥水圧は、ビット間切羽高さが大きい程大きくなるが、比較的わずかであることを明らかにした。

第四章では、カッタービット間切羽部の安定に必要な有効泥水圧を確保するための泥水性状とその判定方法について述べている。

ビット間切羽部の安定のための有効泥水圧を確保するには、泥水浸透速度を小さくして切羽地盤の過剰間隙水圧の発生量を小さくする必要がある。過剰間隙水圧の発生量は、泥水圧、泥水性状、地盤の透水係数および排水距離によって変化するが、地盤の透水係数と排水距離は、地盤条件によりあらかじめ決まるので、泥水圧または泥水性状によって発生量を制御することになる。泥水圧は、ある程度の範囲なら調節は容易にできるのに対して、使用している泥水性状は、簡単に変化させることは困難であり、作泥時および掘進時を通じて、過剰間隙水圧の発生量を小さくして必要有効泥水圧が確保できるように品質管理することが重要となる。ここでは、ベントナイト泥水をベースに各種の粒径の泥水添加材を加えた泥水を用いて、シールド掘進時の過剰間隙水圧の発生量とこれらの泥水の持つ現行管理項目上の値を比較検討した。その結果、泥水管理基準に適合し、ほぼ同一値を示す泥水において過剰間隙水圧の発生量にかなりの差が生じることが示され、現行の泥水管理項目だけでは、カッター切削を受ける切羽面の安定に必要な泥水性状の判定は困難であることを明らかにした。

そこで、過剰間隙水圧の発生量は、切削インターバルの泥水浸透速度に支配されるので、この浸透速度に関係する地盤間隙径と泥水粒子径に着目し、シールド掘進時の泥水性状をグラウトビリティ比（Groutability Ratio, GR）を用いて評価した。このGRの値が、14～16の泥水を使用した場合が最も過剰間隙水圧の発生量が小さくなり、この値よりどちらにずれても過剰間隙水圧の発生量は大きくなることを示している。また、技術者の経験的判断に頼ることの多かった現行の現場泥水配合の決定方法に対して、泥水のGR値を用いた新しい理論的泥水配合の決定方法を提案した。さらに、GR値を適正に管理すれば、泥水浸透速度は小さくなるので、泥水の切羽地盤への浸透量を減少させ逸泥や地下水汚染の防止にも役立つことを示した。

第五章では、本研究で得られた成果をとりまとめている。