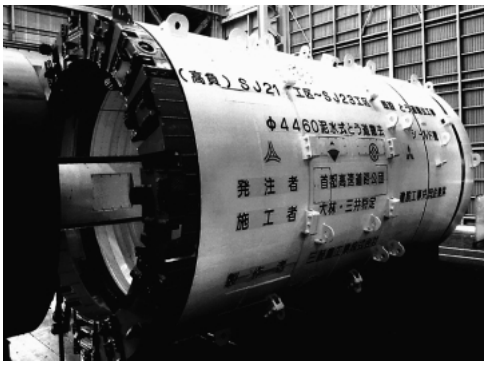
特　集　論　文

既設トンネルを埋め戻す“とう道撤去シールド”の開発（バックフィルシールド工法）



Development of Tunnel Removal Shield（Back Fill Shield Method）

井　上　年　史　　田　中　淳　一　　井　口　泰　男

シールド工法により築造されたトンネルで，老朽化等により不要となったものを撤去する新工法として，既設トンネルの掘削，解体撤去，土砂充てんの一連した作業が安全確実に機械的に実施できるバックフィルシールド機の製品化を行った．ここでは，本工法に適用したとう道撤去シールドの概要及び施工手順・実用化に当たってのテスト結果について報告する．

1. は　じ　め　に

昭和40年代後半より地下空間の有効利用が進められているが，地下構造物の中には供用が完了したもの，老朽化により使用停止となったものなどが数多く残置されている．本工法は，シールド工法により築造されたこれらのトンネルを安全，確実に撤去するために開発された工法である．

ここでは，大林・三井（高負）SJ 21～SJ 23既設とう道撤去特定建設工事共同企業体が施工する首都高速道路公団向け首都高中央環状新宿線のとう道撤去シールドの概要と施工手順について述べるとともに，実用化に向けての実験結果について報告する．

2. シールド機概要

既設トンネルはセグメントと呼ばれる鋼製円弧形状の分割壁体を組み合わせて形成されている．シールド機はセグメントの周囲を掘削しながら推進し，セグメントをシールド機内で解体した後，シールド機後部で充てん材を注入してトンネルを埋め戻して掘進を行う．以下にシールド機概要及び撤去方法について記載する．

2. 1　シールド機概要

とう道撤去シールド機は**図1**に示すように既設セグメントの周囲の地山を掘削するカッタ装置，シールド機を推進させるための推進装置，既設セグメントを解体するためのエレクタ装置及びシールド機を推進させるけん引装置より構成されている．

(1) カッタ装置

既設セグメント外面の地山及び裏込め材（トンネル構築時にセグメントと掘削された地山との隙間を埋める充てん材）の掘削を行うために，カッタフェースは円環形状とし，地山及び裏込め材の掘削を行うディスクカッタ，カッタビットと，トンネルの線形に合わせてシールド機の方向制御を可能とするアウターカッタ及びセグメントの表面を切削成形するインナーカッタを装備している．

(2) シールド機本体

シールド機本体は，前胴，中胴，後胴より構成されており，前胴と中胴間及び中胴と後胴間は，トンネル線形に合わせてシールド機本体を屈曲可能とする中折れ装置によって連結した三胴構成のシールド機である．

前胴部にはカッタ装置と，掘進中及びセグメント解体中

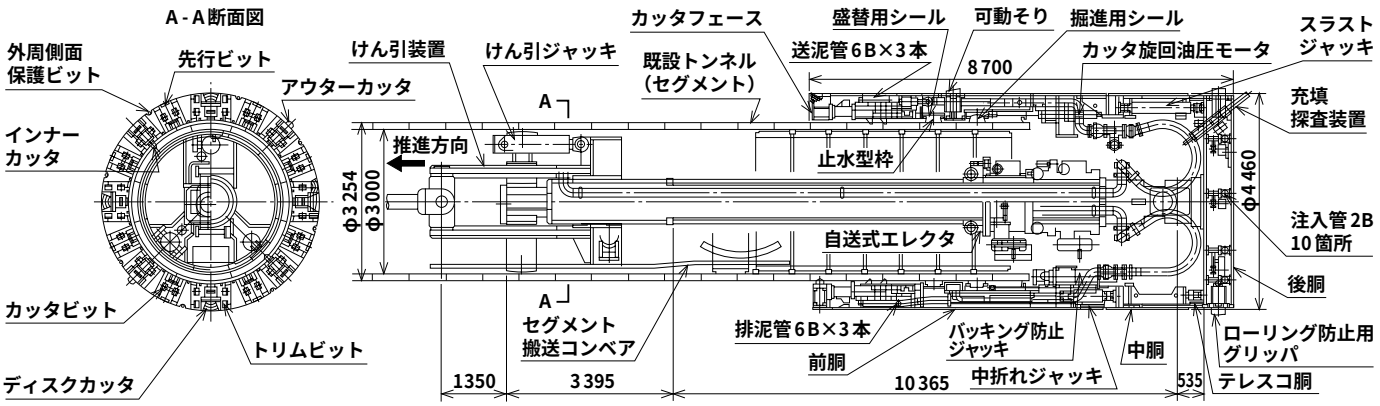


図1　とう道撤去シールド機全体図　　各装置の配置を示す．

にシールド本体とセグメント外周間の止水を行うためのシール装置を装備している．

また，推進装置として，後胴の背面から作用する土水圧に対してシールド機が押し出されるのを防止するバッキング防止ジャッキを前胴に装備している．

中胴には後胴を基準として前胴を推進させるためのスラストジャッキを装備する．

(3) エレクタ装置

シールド機前胴部内側は，既設のセグメントを１ピース毎に解体し，シールド機前方に搬送するエレクタ装置を装備している．

(4) けん引装置

シールド機を推進させるために，後胴部を固定し，その後胴部を基準として前胴部を推進させた後，次に後胴部を前胴側に引き寄せて掘進を行う．このとき，後胴部が前胴の推進反力により後退しないよう後胴部をエレクタビーム，けん引装置，けん引ロッドを介して既設セグメントに固定した反力受け装置に支持する．また，後胴部の引寄せは，エレクタビームの前方に設置したけん引装置により行う．

2．2　とう道撤去方法

(1) 掘進準備［**図２**(a)］

●掘進時にセグメントとシールド間の止水を行う掘進用シールを拡張し，盛替用シールを収縮開放する．

●バッキング防止ジャッキをセグメントに押し付けて前胴を固定する．

●けん引装置を既設セグメントに固定し後胴部を固定する．

●切羽への泥水循環を行った後，カッタを回転する．

(2) 前胴掘進［図２(b)］

●スラストジャッキを伸長させて掘進する．

●スラストジャッキの伸長と同調させて，バッキング防止ジャッキの縮みを行う．

●掘進用シールは止水性確保のために，シールリングジャッキをバッキング防止ジャッキと同調させて，セグメント外周に固定残置する．

(3) 後胴推進［図２(c)］

●けん引装置により後胴の推進を行いながら，後胴背面部に充てん材を注入する．

●後胴の推進とスラストジャッキの縮みを同調させることにより，後胴推進時の前胴の移動を防止する．

●セグメントとシールド間の止水を行う盛替用シールを加圧拡張し，掘進用シールを収縮開放してシールリングジャッキにより切羽側に移動させ加圧拡張し止水を行う．

(4) セグメント解体［図２(d)］

●後胴の推進に使用したけん引装置の盛替えを行う．

●解体用エレクタによりセグメントを１ピース毎に解体し，エレクタにより前方へ搬送する．

3．開発時の課題と対策

本工法に用いられるシールド機の課題としては，

●シールド機外径を小径化し，経済性を確保すること．

●施工中の止水性が確保されること．

が挙げられ，これらを解決し，実機適用を図ることとした．

3．1　シールド機外径

シールド機の外径を決定するカッタ装置は，シールド掘進時の掘削土量の低減，トンネル埋め戻し材低減のために，極力小径化する必要がある．一方，カッタフェースに作用する掘削荷重に対しては，通常のシールドの円盤状カッタフェースと異なり常に偏荷重が作用するため，カッタフェースに近い位置に支持機構を設ける必要がある．これらのことより，カッタフェースを支持する軸受けをシールド機の前方に配置

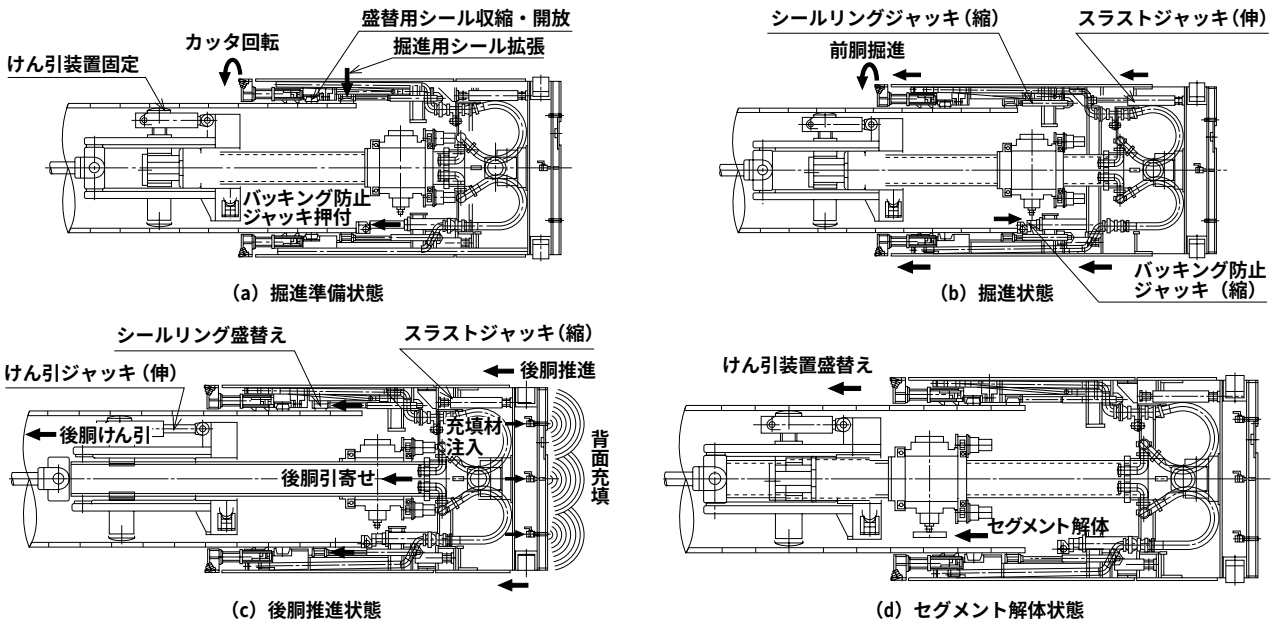


図２　シールド掘進方法

し，また，駆動部はシールド機内後方に配置することにより，通常の構造ではシールド外径φ5 600 mmとなるが，外径φ4 460 mmとシールド外径の小径化を実証した．

3.2 止　水　性

本工法における施工時の出水は，工事不可能な状態となることが予測されるため，シール構造は，追従性の高い加圧型シールを選定した．

(1) 要素実験概要

実験は，2段階で行った．第1ステップとして，形状と材質の異なる止水シールについて，追従性能の確認を行い，追従性が高い形状を選定する．第2ステップとして第1ステップで選定した形状・材質のシールについてφ1 500 mmの止水実験装置を用いて，止水性能，耐久性について実証実験を行った．

(2) 要素実験方法

追従実験は**表1**に示す追従性があり，突起物を包み込むように面接触することを考案した3種類の形状と材質の異なる1種類の供試体で実施し，シールを加圧状態で接地面までの隙間とシール内圧力について変化させ，突起物に対する追従量の計測を行った．

止水実験は**図3**(a)及び図3(b)に示す実験装置を用いて，シール対象物を清水とし，シールド機とセグメントの間隔が同心状態（隙間50 mm）と，50 mm偏心状態（隙間0～100 mm）で実施しシール部からの漏水量の計測を行い，止水性を確認する．また，突起物に対する止水実験は，同心状態で清水と，さらに2種類の止水材を用い，止水材の効果についても実験を行った．

耐久性実験は，止水シールを加圧保持，開放を繰り返し行い，シールの形状について比較確認する．

(3) 実験結果

(a) 追従試験

シール形状を決定するために突起物に対する追従性を確認した結果，シール表面とシールしゅう動面のクリアランスが100 mmのとき，**図4**に示すように供試体2のベローズ型シールが最もシール隙間面積が少なく追従性が高いことが分かった．漏水量は式（2）より隙間面積に比例して増加するため，最も突起に追従しシール隙間が少ないベローズ型シールを採用することとした．なお，供試体4矩形シールは収縮時の出代が大きいため，不採用とした．

【漏水量推定】

シールと突起物間すきま面積：A

$$A = \frac{1}{2} B1 \times H1 \qquad (1)$$

漏水量：Qw（L/min）

$$Qw = C \times A\sqrt{2 \times g \times H} \times 60 = C \times A\sqrt{2 \times g \times \frac{\Delta P}{\gamma}} \times 60 \qquad (2)$$

ここで，

C：流量係数

g：重力加速度

ΔP：すきま前後差圧

γ：水の比重量

表1　供試体一覧

供試体番号	No.1	No.2	No.3	No.4
シール断面形状	L型シール	ベローズ型シール		矩形型シール
略　図	チューブ 止水シール	チューブ 止水シール		チューブ 止水シール
シール形状				
シール材料	NBR（ニトリルゴム）			
硬　度	低	低	高	低

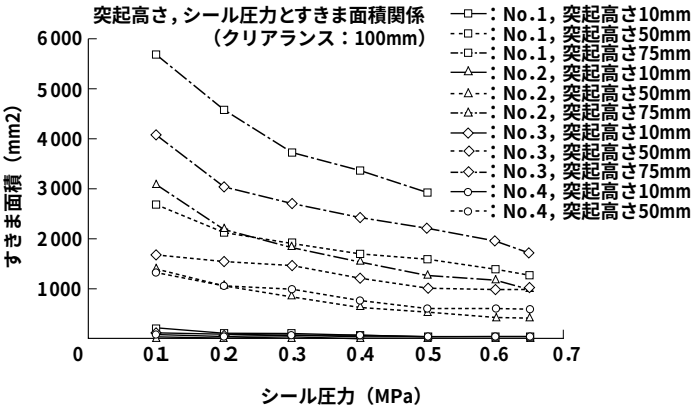
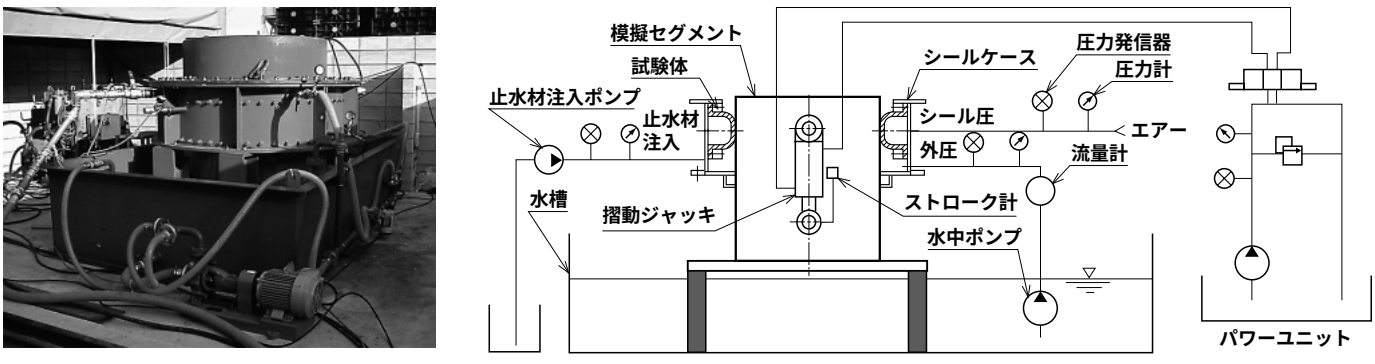
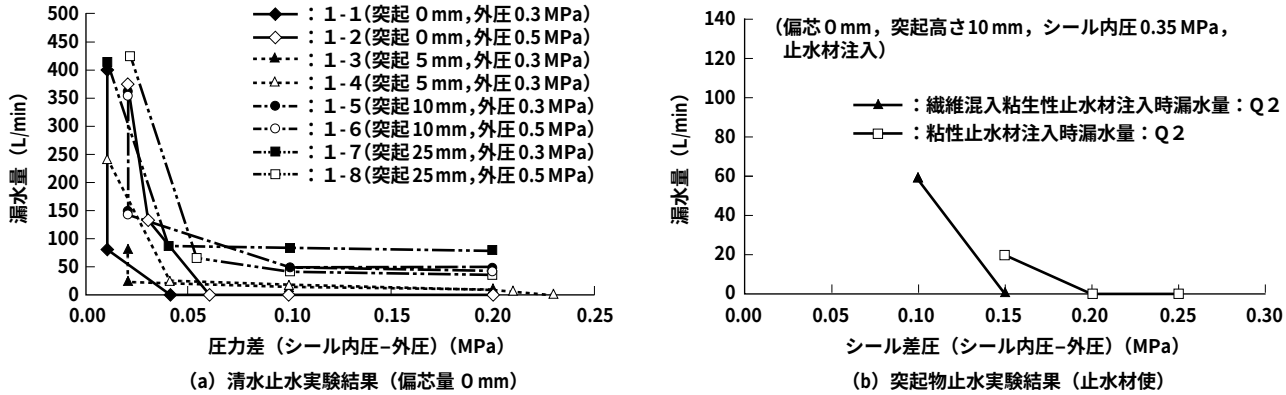


図4　追従試験結果　シール形状を決定した根拠．



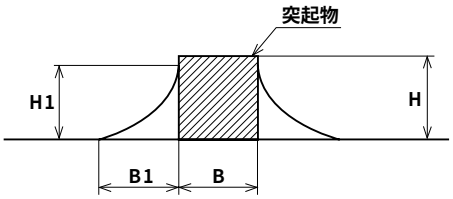
(a) 止水実験装置全体図　　(b) 止水実験装置システム

図3　実験装置　(a)はφ1500mm止水実験装置の全体．(b)は実験装置のシステム構造．



(a) 清水止水実験結果（偏芯量 0 mm）　(b) 突起物止水実験結果（止水材使）

図5　止水実験　（a）は同心状態での漏水量計測結果．（b）は止水材を用いた同心状態での漏水量計測結果．



（b）止水試験

止水試験はベローズ型シールを採用して実施した．清水時の止水性は突起が無い状態で，シール内圧が外圧より0.03～0.06 MPa以上高ければ**図5**(a)に示すように漏水は生じない．偏心状態も同様な結果であった．しかし，突起がある場合には，シール自体の差圧では止水できないため，止水材を併用する必要がある．止水材の効果は図5(b)に示すように，粘性止水材を用いた場合には，突起高さ10 mmでシール内圧が外圧より0.2 MPa以上高ければ止水可能で，また，繊維を混入した止水材を用いた場合には，突起高さ10 mmでシール内圧が外圧より0.15 MPa以上高ければ止水可能であることを確認した．

（c）耐久試験

実使用状態の2倍の2 000回の加圧拡張，開放収縮繰返し試験を行った結果，同心及び偏心状態とも，加圧時におけるシールのはみ出し量が増加し，開放直後は元の形状に復元せず残留傾向にあることが分かった．しかし，長時間放置するとほぼ元の形状に復元した．

また，シール表面とセグメント外周面の接触によるシールの磨耗状況を確認するために，セグメント外周面の状態を模擬したサンドペーパによる磨耗実験を行った結果，しゅう動距離当たりの磨耗率は1×10^{-3}（mm/min）であった．この値を元に実施工時におけるシールの磨耗量を推定すると磨耗による損傷の可能性が少ないことが判明した．

（4）実機展開

実験結果より，セグメントとシールド間の止水を行うためのシール装置としては，ベローズ型シールで対応可能であると考えられる．ただし，実施工では，シール面となるセグメント表面が実験と異なり凹凸が激しく，また想定以上に粗いことが十分考えられるため，シール装置は**図6**に示すように，掘進用シールと盛替用シールの2列装備する．

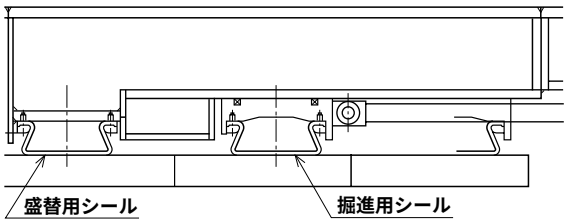


図6　シール部構造図　実機に採用したシール構造．

セグメント外面とのしゅう動による損傷を避けるため，掘進用シールは，掘進時にセグメント外面に固定残置できるようにシールド機の掘進に応じて移動する構造とし，盛替え用シールは，シールド機が停止した状態でのみ拡張し，掘進用シール盛替え時の止水を図る．

4. ま　と　め

バックフィルシールド工法は，既設トンネル壁を撤去しながら掘進を行う，従来と全く異なる工法である．実用化に当たり，従来のシールド技術では対応困難であったセグメントとシールド間のシール装置について前記実験を実施し，実用可能なことを検証した．

なお，実機は平成14年秋から稼動するが，稼動状況フォローを含めてとう道撤去シールドの玉成を図る予定である．

最後に本機の製品化に当たって，多大なご協力を頂いた首都高速道路公団及び，大林・三井（高負）SJ 21～SJ 23既設とう道撤去特定建設工事共同企業体に厚く謝意を表する．

井上年史
神戸造船所
建設機械部
設計課長

田中淳一
神戸造船所
建設機械部
設計課

井口泰男
神戸造船所
建設機械部
設計課