

シールド工法における長距離施工技術の開発 - 新型テールシールの開発、カッタービット交換方法の開発 -

原 修一* 岡田 英明**

要 旨

シールド工法は、今日に至るまで都市部の社会基礎整備に大きく貢献し、その果たす役割は今後も重要であり続けると考えられる。他方、最近のコスト縮限の社会情勢の潮流は、シールド工法に施工距離の延長を強く要求しており、このためには、長距離対応型の耐久性の高いテールシールの開発と同時に、施工途中でのテールシールとカッタービットの交換技術が必要となる。

従来のテールシールとカッタービットの交換方法は、立坑を設けたり、シールド機周辺の地盤を凍結工法などにより改良を行った後に人力で交換していた。これらの交換方法では経済性的問題があると共に、工期的にも長くなり、また危険な作業を伴うものであった。

本開発はこれらの問題点を解決すべく、長距離対応型の耐久性の高いテールシールの開発と、シールド機内部から安全かつ合理的にテールシールとカッタービットを交換する技術の確立を目指した。

1. 柔軟性テールシールの開発

1.1 はじめに

シールド機の長距離施工においてテールシールの耐久性の問題は、大深度、高水圧下での施工における問題と併せて非常に重要な問題である。これらのテールシールの耐久性に関する問題に対し、現状ではテールシールを多段に配置したり、地盤改良などの補助工法を施した後、テールシールを交換する方法によって問題を解決してきた。ただし、テールシールを多段に配置すると、シールド機長の増大によりカーブ施工が困難になるなどの二次的な問題も発生してくる。

しかしながら、肝心なテールシール自体の開発は、テールブラシの出現以降あまり活発に行われていない。そこで本開発では、テールブラシの出現以降、技術的改良が行われていないゴム材料による、柔軟性があり、耐久性の高いテールシールの開発を行った。

1.2 柔軟性テールシールの概念

図-1に示すように、柔軟で摩耗に強く止水性に優れたゴム材料で構成したテールシールとする。

柔軟なテールシールの後端部の径をセグメント外径よりやや小さくすることにより、ゴム材料の弾性でセグメントにフィットするとともに、テールシールが周りの土水圧によってセグメントを締め付けることによりテールクリアランス部分の止水効率を向上する。

1.3 柔軟性テールシールの効果

- (1)セグメント周りの土水圧によってテールシールがセグメントを締め付け、止水性を高める。
- (2)セグメントの偏芯や曲線施工時の「競り」や「離れ」

にも柔軟に追従しフィットするので止水性が高い。

- (3)従来のシールド機と比較して剛性部シールド機長が短くなる(図-1参照)。

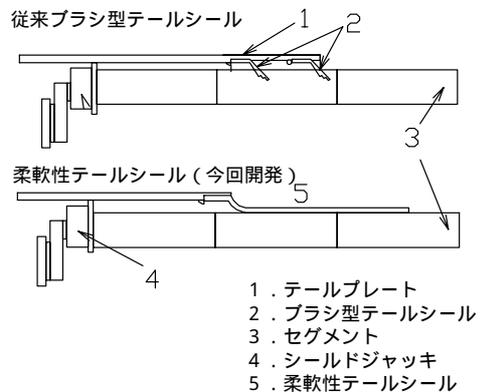


図-1 従来のテールブラシとの比較

1.4 柔軟性テールシールが必要とする特徴

柔軟性テールシールの特徴を得るために以下の項目を考慮し、開発を行った。

- (1)セグメントを締め付けられるように、周方向には伸縮可能でなければならない。
- (2)軸方向に関しては、掘進によって引張力を受けるのでそれに耐えうる強度を持たせる。
- (3)テールシールが軸方向に伸びると、その分周方向は縮まってしまう、必要以上にセグメントを締め付けてしまうおそれがある。よって軸方向の伸びは極力少なくする。

* 技術研究所 ** 機械部

(4) テールシールは直接地山とセグメントと接触して進んでいくので耐摩耗性を持たせる。また、傷が付いたときのために引き裂き強度を持たせる必要がある。

(5) 直接地山に触れているので、少なくとも施工期間中に劣化しない程度の耐薬品性を持たなければならない。

1.5 柔軟性テールシールの構造

柔軟性テールシールの構造を図-2に示す。

柔軟性テールシールは一般的なシールド機に使用する場合、厚さ25mm程度とする。

軸方向には軸方向の強度補強と、軸方向の伸び拘束の目的でワイヤーを埋め込む。軸方向補強用ワイヤーの両端には、引抜け防止金具を設置する。

また、上下面から5mmの場所には、柔軟性テールシールの弾性係数向上の目的と傷の進展防止の目的で、網目状繊維をバイアス方向(軸方向、周方向に対し $\pm 45^\circ$)に埋め込む。バイアス方向に埋め込むことにより柔軟性テールシールの周方向の伸びに対し網目の格子がひし形につぶれるので、周方向への伸びを拘束しない。

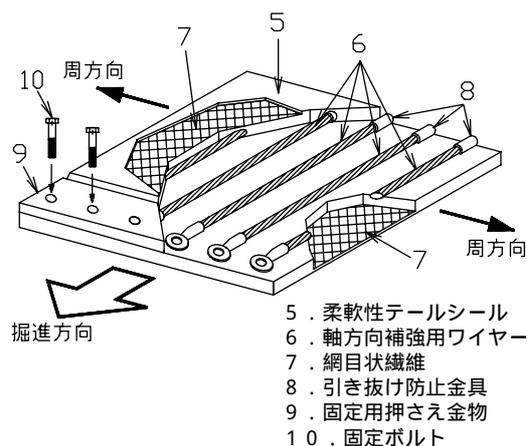


図-2 柔軟性テールシールの構造

1.6 使用材料

柔軟性テールシールの母材に使用するゴム材料は、強度、耐鉱油性、成形性、コスト面などから、NBR(ニトリルブタジエンゴム)を使用する。

軸方向引抜け防止ワイヤーは、5.0mmのステンレスワイヤーを使用する。また、ワイヤーとNBRの付着強度が落ちないようにワイヤー表面を脱脂する。

引抜け防止金具は、SS40材のカシメ金具を使用する。使用材料表を表-1に示す。

表-1 使用材料

材 料	詳 細
ゴム	NBR(ニトリルブタジエンゴム)
網目状繊維	産業用ナイロン6系 MSDS-3(東レ(株))
ワイヤー	5.0mm 7×19 ステンレスワイヤー 引張強度17.15kN(メーカー実測値)
引抜け防止金具	10mm SS40材 クロメートメッキ 角カシメ

1.7 各種実験

図-2、表-1に示す構造、材料の選定に当たり各種実験を行った。

1.7.1 周方向一軸引張試験

(1) 実験目的

柔軟性テールシールの基礎強度試験(一軸引張試験)を行い、応力-歪み曲線、弾性係数、断面変形、傷の進展状況などを調査した。

(2) 実験内容

- ・実験1 NBR単体の一軸引張試験
- ・実験2 NBRに網目状繊維を埋め込んだものの周方向一軸引張試験
- ・実験3 NBRに網目状繊維と軸方向補強ワイヤー埋め込んだものの周方向一軸引張試験

以上の実験内容で、各種3体ずつ引張試験を行った。実験3のテストピースの寸法を図-3に示す。

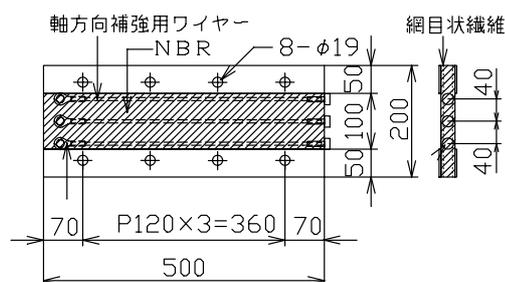


図-3 テストピース寸法

(3) 実験結果

試験状況を写真-1に示す。(写真-1は網目状繊維と軸方向補強用ワイヤー入りのテストピース)

各テストピースの歪み0、10、20、25%時の応力の平均を、図-4に示す。

また、これらの応力歪み線図(歪み0%~25%)の近似直線から、各テストピースの弾性係数を求めた。弾性係数を表-2に示す。

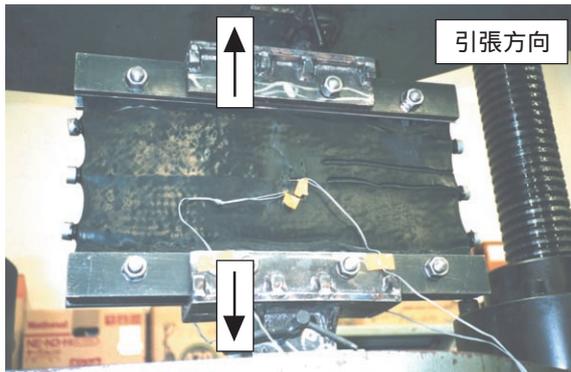


写真 - 1 周方向引張試験状況

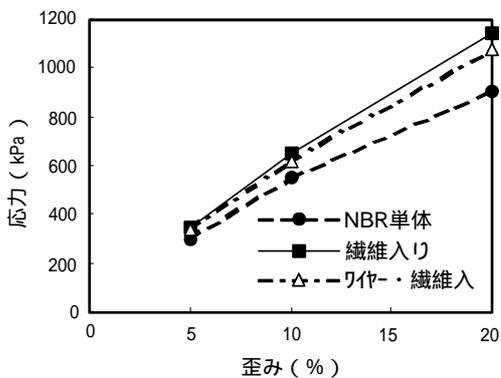


図 - 4 各テストピースにおける応力の平均

表 - 2 弾性係数

テストピース	縦弾性係数(MPa)
NBR 単体	4.16
網目状繊維入り	5.49
ワイヤ・網目状繊維入り	5.26

(4) 考察

実験結果から、NBR 単体のものより、繊維を入れたものの方が強度が高く、弾性係数も高いことがわかる。また、繊維入りの方が、弾性的挙動を示す範囲が広いこともわかった。さらに、実験中の観察から、NBR 単体のテストピースは荷重が大きくなるに連れてテストピース把持用のボルト穴が徐々に大きく開いて行く挙動を示したのに対し、繊維入りテストピースではそのような挙動は見られなかった。柔軟性テールシールの固定方法等を考慮すると、ボルト穴が開いていくことは致命傷になりかねない。繊維を入れることは、強度の面と同時にボルト穴もしくはそれに類似する傷に対して、非常に有効であることが分かった。

繊維入りの柔軟性テールシールに軸方向補強用ワイヤを埋め込むことにより、周方向の強度、弾性係数ともにわずかではあるが低下することがわかった。(図 - 4、表 - 2 参照)これは、引張軸に対しNBRの垂直断面積がワイヤにより少なくなったからだと判断できる。

これらの実験結果から、強度上不利になる点とボルト穴が広がってしまうという致命的な欠点のあるNBR単体での柔軟性テールシール製作は無理と判断した。

また、引張試験中に、テストピースにカッターナイフで傷をつけたが、傷は奥行き方向にも長さ方向にも進展しなかった。

1.7.2 ワイヤ引抜き強度試験

(1) 実験の目的

軸方向補強用に埋め込んだワイヤの引抜き強度を確認し、柔軟性テールシールの軸方向強度を算出する。

(2) 実験結果と考察

ワイヤの引抜き強度は一本当たり 24.8kN であった。これは、長さ 600mm、ワイヤ埋め込み間隔 50mm の柔軟性テールシールを使用した場合、土水圧 1.38MPa の条件の時まで軸方向の掘進力によって破損することなく使用できることになる。(柔軟性テールシールと地山の摩擦係数、柔軟性テールシールとセグメントの摩擦係数は共に 0.3 として計算した。)

1.7.3 耐水圧試験

(1) 実験目的

セグメント外周 1,900 を模擬したスチール製実験装置を使用して柔軟性テールシールに水圧を加え、実際の止水性能を確認する。

なお、柔軟性テールシールの後端部周長は、セグメント外周長より 10% 短いものを使用する。

試験装置を図 - 5 に示す。

(2) 実験結果

水圧 700kPa まで昇圧し、良好な止水性能を確認した。実験状況を写真 - 2 に示す。

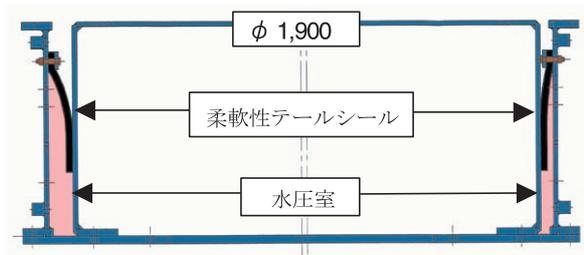


図 - 5 耐水圧試験装置

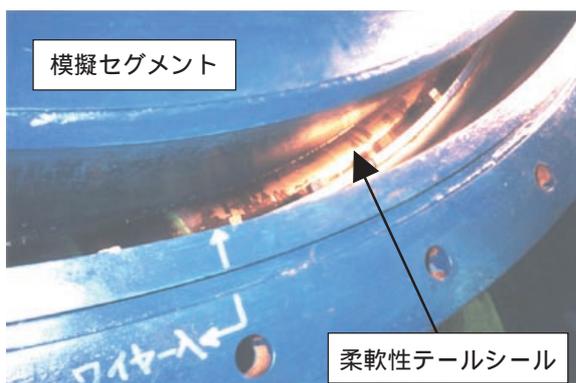


写真 - 2 耐水圧試験状況

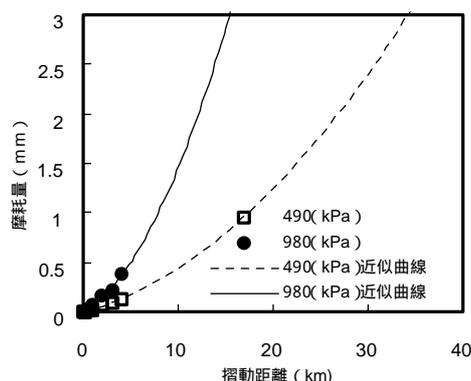


図 - 6 摩耗試験結果

1.7.4 摩耗試験

(1) 実験目的

柔軟性テールシールはセグメントと地山に直接接触しながらシールド機と共に掘進して行く。故に柔軟性テールシールの摩耗は、その止水性能に大きく影響してくる。よって柔軟性テールシールの摩耗試験を行い、柔軟性テールシールの摩耗の面から見た掘進距離の限界を確認した。

(2) 実験内容

柔軟性テールシール摩耗試験装置を使用し、RCセグメントを想定したコンクリート面(表面状態ドライ)に押し付け、摩耗試験を行う。なお、押し付け圧力は980kPa、490kPaの二種類で行った。

摩耗試験装置を写真 - 3 に示す。

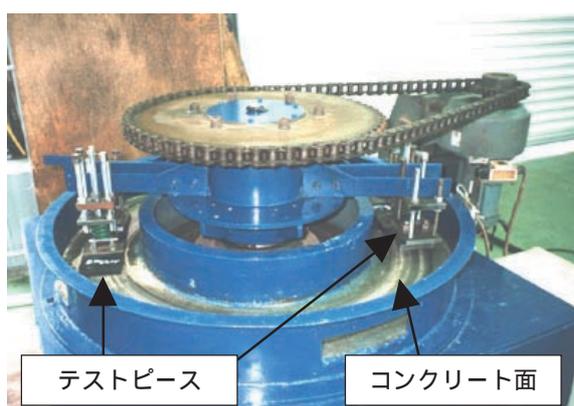


写真 - 3 摩耗試験装置

(3) 実験結果

摺動距離 4km までの柔軟性テールシールの摩耗量から近似二次曲線を引く(図 - 6 参照)。

柔軟性テールシールの表面から3mmの位置に網目状繊維が埋め込まれているので、柔軟性テールシールの摩耗限界を3mmとすると、図 - 6 より土水圧490kPaでは、限界掘進距離約34kmとなり、土水圧980kPaでは限界掘進距離約16kmとなる。

1.8 新型テールシール開発のまとめ

本開発によって、柔軟性テールシールは強度、止水性、耐摩耗性において実施工で使用可能だというデータが得られた。

土水圧にあわせて止水性を確保し、摩耗に強く、さらにシールド機剛体部を短くすることのできる柔軟性テールシールは大深度、高水圧下での長距離施工、急曲線施工に有効なテールシールであるといえる。

2. テールシール交換方法の開発

テールシールの交換方法を図 - 7 に示す。

シールド機テールプレート内部に内径の広い拡径部を作り、通常はインナープレートを設置しておく。

テールシールとシールド機テールプレートの拡径部内を前後にスライド可能なリングとを併せてテールシールユニットとする。テールシール交換時は新規テールシールユニットをシールド機拡径部内で組み立てる。その後シールド掘進と共に、シールドジャッキで新規テールシールユニットをテールシール設置部まで押す。古いテールシールユニットは、新規テールシールユニットに押される形でシールド機から地山へと押し出され地山に置き去りになる。

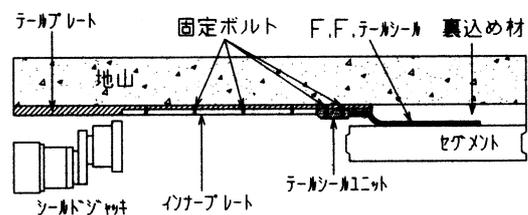
テールブラシの場合も同様に交換を行う。

3. カッタービット交換方法の開発

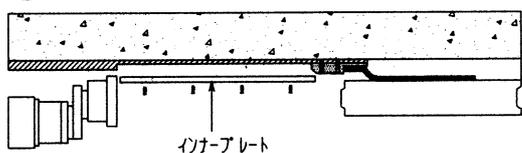
3.1 はじめに

シールド機の長距離施工において、カッタービットの耐久性の問題は非常に重要な問題である。これらのカッ

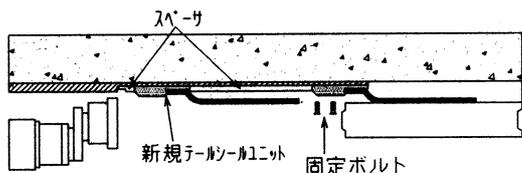
テールシール交換装置



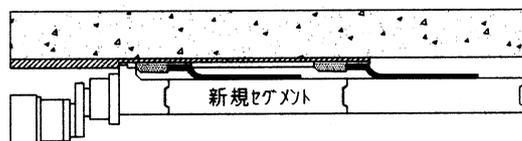
1. イナープレートを取り外す。



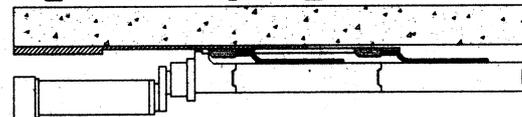
2. 新規テールシールユニットとスペーサを設置し、古いテールシールユニットの固定ボルトを外す。



3. 新規ビゲメントを組み立てる。



4. シールド掘進をすることにより新規テールシールユニットを、後方へスライドさせると同時に古いテールシールを地山に出す。



5. 掘進終了後、新規テールシールユニットを固定しイナープレートを取り付け、交換終了。

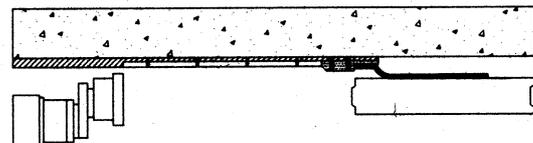


図 - 7 テールシールの交換方法

タービットの耐久性に関する問題に対し、現状では地盤改良などの補助工法を施した後、カッタービットを交換する方法によって問題を解決している。

また、最近では地盤改良などの補助工法なしに、シールド機内から安全にカッタービットの交換を行う方法が多く開発され、実施工でも実証されている。

しかし、これらのカッタービット交換方法は、長期間シールド掘進を停止してカッタービットの交換を行ったり、シールド機内から安全に交換を行うための機構が非常に高価になっているように思われる。

そこで、本開発では、非常に簡便な機構でシールド機内から安全かつ早期にカッタービットを交換できる工法の開発を行った。

3. 2 カッタービット交換方法の概念

カッタービットをカッタースポーク外周方向にスライド可能に設置し、カッタービットが摩耗した場合、中心部から放射状にカッタービットを押し出し、最も摩耗の激しい最外周部のビットから順番に地山に捨てることによりビットの交換を行う。(図 - 8 参照)

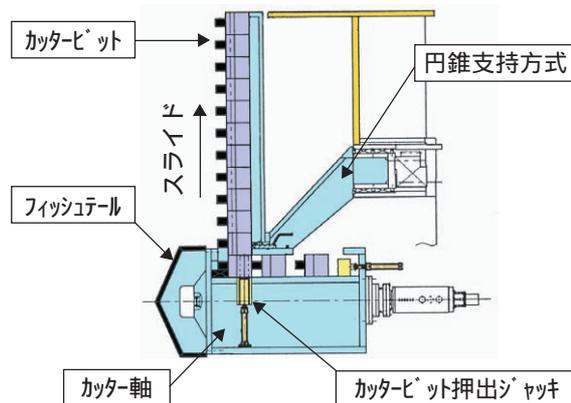


図 - 8 カッタービット交換装置

図 - 8 の方法では、カッター軸内に押出ジャッキを設置しているが、小口径シールド機ではカッター軸内にジャッキを設置することは困難になってくる。そこで、カッタービットスライド機構にカーブを持たせ、シールド機内の押出ジャッキひとつで、カッタービットの押出を可能にした交換装置の開発を行った。(図 - 9、10 参照)

カッタービットの各々は、スポーク内(曲線部、直線部共)にある時はお互いしっかりと連結しあっているが、スポーク先端から地山に出た時は、カッタースポークから容易に外れるように半球体部によって連結されている。(写真 - 4 参照)

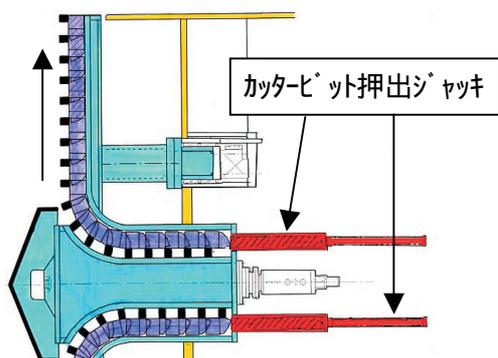


図 - 9 カッタービット押出ジャッキ

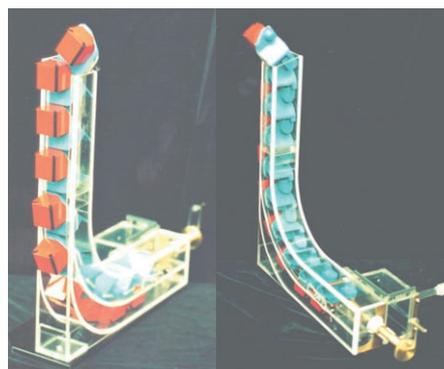


写真 - 5 カッタービットの交換装置モデル

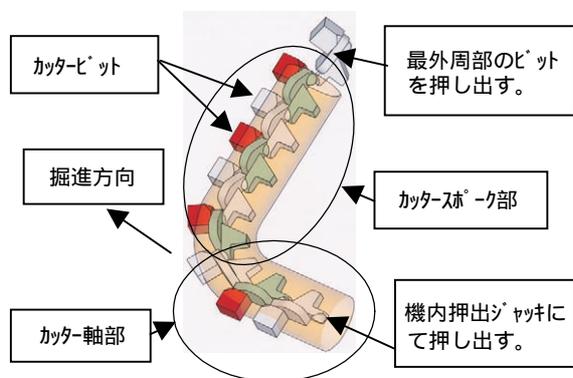


図 - 10 カッタービットスライド機構

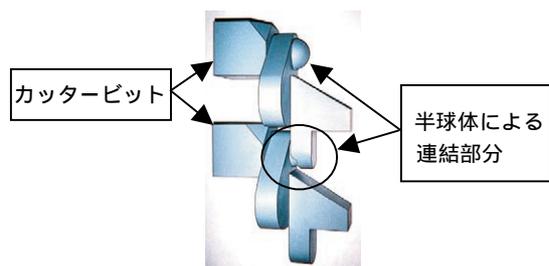


写真 - 4 カッタービットのモデル

3.3 カッタービット交換装置のモデル製作

カッタービット交換装置の1/3スケールのモデルを製作し、カッタービット交換方法の一連の動作を確認した。カッタービット交換装置モデルの写真を写真 - 5 に示す。

3.4 カッタービット交換方法開発のまとめ

簡便な機構でカッタービットの交換が可能であり、さらには地山に併せたカッタービットが供給できる本カッタービット交換方法は、シールド工法長距離化にともない有効な工法になり得ると確信している。

4. あとがき

柔軟性テールシールについては、今までブラシ型テールシールの出現により遠ざけられていたゴム材料に、繊維やワイヤーロープを合理的に組み合わせることにより、高強度と柔軟性を持ち合わせた材料を開発した。今後、長距離施工や急曲線施工、施工性の向上に大きく寄与できるものと確信している。

テールシールの交換方法とカッタービットの交換方法については、細部での問題が多少残っており、実プロレベルでの開発が望まれるが、非常に合理性に富んだものと確信している。

謝辞

最後に、共同開発者である日本鋼管(株)ならびに開発に携わっていただいた協力業者の方々に心から御礼を申し上げます。