

新素材コンクリートを用いた立坑およびトンネルライニング工法 (New Fiber Reinforced Concrete Shaft and Tunnel Lining)の開発

龍田昌毅*・園田徹士**・岸谷 真***・鈴木克博****・遠藤南志*****

Masataka Tatsuta, Tetsushi Sonoda, Makoto Kishiya, Katsuhiko Suzuki, and Nanshi Endo

Our newly developed System (Novel Material Shield-Cuttable Tunnel-Wall System); the departure-arrival part of the shield tunnel wall is to be constructed by using CFRP for main reinforcement, and precast concrete members with limestone for coarse aggregate. The general idea of our system the structure of the wall, tests undertaken to prove its practical value (cutting test, flexural strength test of concrete, verification test) are given in this report.

Keywords: Shield tunnel, shield-cuttable tunnel-wall, CFRP, lime-concrete

1. まえがき

都市機能を拡大発展させるため、地中構造物の役割がますます重要とされている今日、地中環境、地域社会の安全を確保しつつ合理的な地中構造物の構築を行うことがポイントとなってきている。現在、大規模な地中構造物の構築や、トンネル構築においては、すでに連続地中壁工法や密閉型シールド工法により技術的にはほぼ確立されている。しかし、地中での構造物とトンネルの接合や、トンネル相互の連結などについては多くの課題が山積しているのが現状である。本開発は、今後ますます深層化、複断面化が想定されるシールド発進・到達のため、シールドで切削可能な壁体を構築し、シールド直接発進・到達を行う工法開発の状況について報告する。なお、本工法 (NOMST SYSTEM: Novel Material Shield-cuttable Tunnel-wall system) の開発は、新日本製鐵、日本プレスコンクリート、熊谷組、佐藤工業、清水建設、鉄建建設、西松建設、間組、前田建設工業、三井建設、10社の共同により行っている。

*	正会員	新日本製鐵(株)建材開発技術部
**		(株)間組土木本部技術部
***	正会員	(株)熊谷組技術開発本部
****	正会員	佐藤工業(株)土木本部技術部
*****	正会員	日本プレスコンクリート(株)技術開発部

2. 工法概要

2・1 シールド直接発進・到達工法

密閉型シールドは、地下水位の高い地盤中でも補助工法を用いることなくトンネルの掘進ができることから、高水圧・末固結地盤中の都市トンネルの主要工法となっている。しかし、シールドの発進や到達のための立坑は、高強度のコンクリートや鋼材で施工されているため、シールドのカッタで直接切削することは困難である。したがって、一般にはシールドの発進・到達に際し、地盤改良を十分に行って人力により発進・到達部を開口した後にシールドを掘進させている。

本工法は新素材を補強材としたコンクリート部材を図-1に示す立坑の発進・到達部に利用することによりカッタビットによる立坑壁の切削を可能とし、シールドの直接発進・到達を可能とするものです。

なお、シールド発進・到達工法の改良により地盤改良省略¹については、中部電力㈱中央変電建設所、渡辺、伊藤、夏目らがSMW土留壁の芯材を引抜くことでチャレンジし、すでに数件の工事で実施している。

2・2 トンネル分岐・合流部工法

既設トンネルとの結合部や、トンネル分岐部の覆工構造を、シールド機械のカッタで切削可能な素材を利用したセグメント部材とすることにより、トンネル間連絡シールドトンネルや、シールドトンネルの分岐・合流を容易に行うことが可能となる。

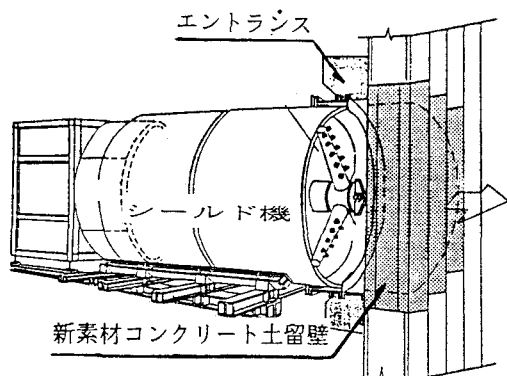


図-1 新素材コンクリート利用の発進口

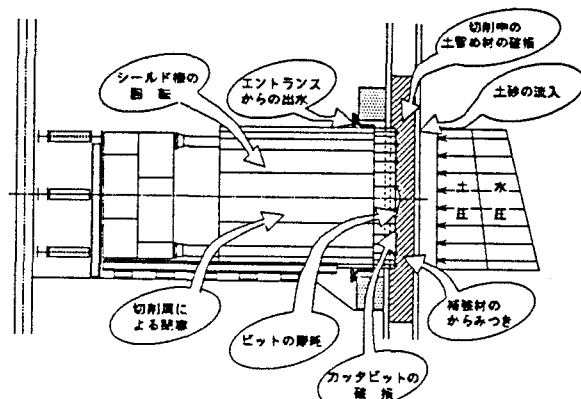


図-2 シールド直接発進の課題

3. シールド直接発進・到達に必要とされる機構

3・1 シールド直接発進の課題

一般的なシールド発進では、地盤改良によって開口部前面の地盤を強化し、開口部解体時には土留に加わる地山圧力は改良された地盤により保持されている。また、地盤改良により地盤の透水性が低減されているため、地下水の開口部からの流入を防止している。シールド直接発進を行うためには、図-2に示すように、エントランスパッキンの止水性の不備によるチャンバ圧力の変化に伴う地盤の崩壊や、地山圧力を受けてる土留材切削による土留の破損、土留材切削に伴うカッタビット摩耗による掘進不能、カッタへの補強材の巻つきによるカッタ回転不能や、土留材切削破片による排土支障など、解決すべき課題は多い。

3・2 シールド直接発進・到達の対策と解決すべき課題

シールド直接発進・到達における前述した多くの課題に対して、現状技術により対策が可能な課題、新たな技術開発により解決すべき課題とを明確にした。表-1に、シールド直接発進に伴う課題と対策について示す。

(a)切羽安定性の向上についての対策は2・1で述べた中部電力㈱の施工例で示される通り、シールド発進時よりチャンバ内の泥水・泥土圧力を地山圧力と同じに保持して掘進することにより坑口前面地山の地盤改良が不要なことが確認されている。また、発進時のチャンバ内の圧力変動防止は、エントラスルームに直結し、自由水面の高さが地山圧力と同等となる位置に設けた圧力調節槽により容易に行える。

(b)土留部材性能の向上は、一般に立坑土留壁が鋼製の芯材や鋼材を補強材として利用している。発進・到達部に、コンクリート部材による土留構造の採用する場合は土留壁の施工上一般部の土留壁厚と同じことが望ましい。そのため、高強度のコンクリートと、高張力の補強材が必要となる。これらの条件に適合した素材の選定が不可欠である。

(c)普通コンクリートのカッタービットによる切削性については、ビットの破損や摩耗が大きいことが判明している。シールド直接発進・到達では、通常用いられているカッタービットで切削が可能で、しかも、ビットの摩耗が少ないコンクリートが必要である。コンクリートのカッタービットによる切削性の要因は骨材によって支配されると考えられるので、切削性の良好な骨材の選定を行なう。

(d)補強材の切削性は、素材の物性によって大きく違うので、カーボン、ガラス、合成樹脂などの性質を把握した選定が必要となる。

(e)坑口工の止水性向上は、エントラスパッキンの多重化など高水圧対策が行なわれ、すでに実績も有る。また、(f)の施工管理については、多くのシールド工事で計測データをフィードバックした情報化施工がすでに実用的に用いられている。すなわち、シールド直接発進・到達を行なうには、高強度でしかも切削性に優れた土留部材の開発が重要と考えた。

表－1 シールド直接発進・到達に伴う課題と対策

課 題	対 策
(a) 切羽安定性の向上	泥水・泥土圧による切羽保持 チャンバー圧力変動の防止装置
(b) 土留部材性能の向上	高強度コンクリートの採用 高張力補強材の採用
(c) フォグリの切削性向上	切削性にすぐれた骨材の選定 びく 摩耗の少ない骨材の選定
(d) 補強材の切削性向上	切削性の良い補強材の選定 切削クズが排土機構の支障とならない補強材の選定
(e) 坑口工の止水性向上	エントラスパッキンの工夫 坑口工のクリップ止めの止水材充填 裏込注入
(f) 施 工 管 理	計測をフィードバックした情報化施工

4. 発進・到達部土留材の素材の選定

4・1 コンクリートの選定

コンクリートのカッタービットによる切削性は粗骨材の物理的性質により決まる。一般に、普通コンクリートには天然骨材が利用され、その圧縮度は1000kgf / cm²～1500kgf / cm²に及び特殊なカッタービットが必要とされる。

一般のカッタービットで効率的にコンクリートの切削を行うには、切削性に優れた骨材を用いたコンクリートの選定が必要である。また、コンクリート強度は骨材強度と関連するため表－2に示す骨材の組合せによりコンクリート強度試験(表－3 試験結果)と、後述する切削試験とを総合的に判断して骨材を選定した。

表－2 コンクリートの選定に用いた骨材

コン ク リ ー ト の 選 定	骨 材	
	粗骨材	細骨材
天然骨材	川砂利	川砂
	石灰石	
人工骨材	メサライト	メサライト
	スラグ碎石	

表－3 コンクリート強度試験結果の例

細骨材	粗 骨 材	W/C	セメント量kg/m ³	圧縮強度σ28
川 砂	メサライト	3.0	583	46.9
川 砂	スラグ碎石	2.5	600	83.0
川 砂	石 灰 石	2.5	600	88.4

人工骨材メサライトを粗骨材に用いたコンクリート強度は $\sigma_{28}=500\text{kgf/cm}^2$ 以下であったが、石灰石、スラグ碎石を粗骨材に用いた場合には、 $\sigma_{28}=800\text{kgf/cm}^2$ の高強度を確認できた。なお、細骨材は川砂が強度的に優れていた。

4・2 補強材の選定

一般のコンクリート構造物では、主に鉄筋がコンクリートの補強材として用いられているのでカットビットによる切削は困難である。

本工法で用いるコンクリート補強材は、補強効果を確実にするため、剛性、引張強度、付着強度などの物性が確保され、しかもカットビットで容易に切断される素材が望まれる。

ここでは、カーボン、ガラス、アラミド、ビニロンなどの繊維の基本的物性を調査し、適用可能と考えられたカーボン繊維とガラス繊維について、後述するコンクリートに埋込んだ切削試験を行い選定した。

図-3 に各種繊維補強プラスチックの代表的物性を示す。

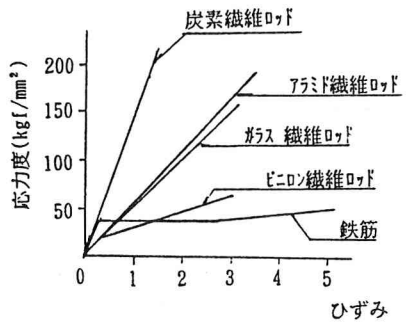


図-3 プラスチックの代表的物性

4・3 切削試験

(a) 無筋コンクリートの切削試験

コンクリート切削試験は、 $500\text{mm} \times 500\text{mm} \times$ 厚さ 200mm の供試体を普通コンクリート ($\sigma_{28}=500\text{kgf/cm}^2$)、人工軽量骨材コンクリート (メサライト $\sigma_{28}=500\text{kgf/cm}^2$)、石灰石骨材コンクリート ($\sigma_{28}=800\text{kgf/cm}^2$)、スラグ碎石骨材コンクリート ($\sigma_{28}=800\text{kgf/cm}^2$) で作成し、切削ビット (巾 10mm 、すくい角 20° にげ角 15° 、チップ材 E-5) を回転して行った。試験結果を図-4 に示す。

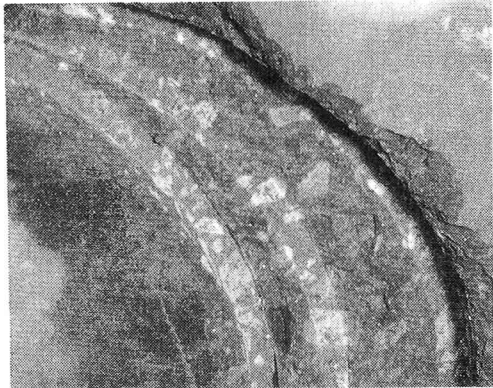


写真-1 川砂・石灰石コンクリートの切削結果

粗骨材にメサライト、石灰石、スラグ碎石を用いたコンクリートの切り込は、普通コンクリートに比較してほぼ10倍であり、切削状況もスムーズであった。メサライト、石灰石の切削ではほとんどビット摩耗が確認できなかったが、普通コンクリート、スラグ碎石コンクリートでは、短時間の切削試験でビットの摩耗が確認された。写真-1 に川砂・石灰石コンクリートの切削状態を示す。

(b) 補強材を埋込んだ供試体の切削試験

比較のための鋼板 (SS41) と、メサライトコンクリートにはカーボン繊維とガラス繊維、石灰石コンク

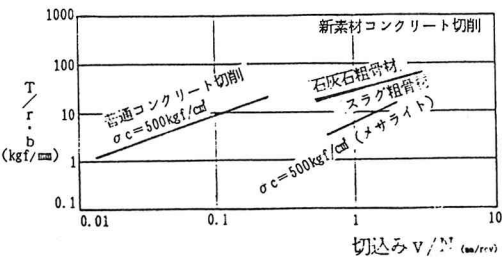


図-4 無筋コンクリート切削試験結果

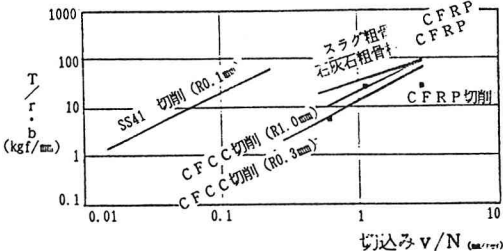


図-5 補強筋埋込み切削試験結果

リート及びスラグコンクリートにはカーボン繊維を補強材として100 mm×100 mmの配置で埋込んだ500mm × 500mm ×厚さ200mm の供試体を製作し、コンクリート強度および切削ビットを無筋コンクリート切削試験と同一条件で補強材入りの切削試験を行った。図-5に示す試験結果は補強材を埋込まないコンクリートの切削状況と大きな差異は見られなかった。カーボン繊維とガラス繊維では、切削速度はほぼ同等であったが切削断面は、カーボン繊維が切断された状況であったのに対して、ガラス繊維では引きちぎられた状況が見られた。切削試験の結果より、①コンクリートの粗骨材は切削性およびビットの摩耗状況より石灰石が適当と判断される。②コンクリート強度は、石灰石を粗骨材とすることにより高強度が確保できる。③補強材としては、カーボン繊維が強度、切削性ともに優れていると判明した。

5. 新素材コンクリート土留壁の開発

5・1 土留壁の構造

立坑の土留工法は一般に連続地中壁・柱列杭、泥水固化壁や鋼製連続地中壁などが用いられる。

本開発では、柱列杭、泥水固化壁の芯材と、鋼製連続壁に使用できる水平継手を持つ壁材のプレキャスト化を目標とした。土留壁は立坑掘削段階で正負の曲げを受けること、鋼製部材とプレキャスト部材の継手及び部材の全長に亘り同一の断面性能が必要とされるので、プレキャスト部材の両端に、鋼材との継手機能を有するカーボン繊維ストランド定着金具を設けた構造とした。

5・2 土留壁の設計

(a) 荷重

シールド発進は、小土被り・小口径では、土留壁に直接坑口を設けて行うが、大土被り・大口径のシールドでは、土留壁内側に構造壁を設け掘削時の支保工を撤去して行われる。そのため、プレキャスト部材の設計荷重は他の土留壁と同様に立坑掘削時の最大荷重とした。なお、大土被り・大口径シールドでは発進・到達口の構造壁は土留壁と同様に補強材を鉄筋に替えカーボン繊維を用いたコンクリート壁体で対処できる。

(b) 断面の設計

高張力のカーボン繊維は、張力材としては高い能力を発揮するが、圧縮材としては高い引張材ほど評価は困難である。そのため、断面設計は単鉄筋構造として行う。しかし、土留部材には正負の曲げが発生するのでカーボン繊維主筋を両側に配置した。

5・3 土留壁材基礎試験

太径（呼び径 ϕ 30 mm）のカーボン繊維の使用や、カーボン繊維の定着方法と設計手法を確認するため、幅23 cm高さ25 cmの断面にカーボン繊維ストランド（37本撚り線、呼び径30 mm）3本を引張・圧縮側に主筋として配置し、せん断補強材として3種類のカーボン繊維ロッドを用いた3本の供試体を製作し、載荷試験を行った。写真-2に破壊状態を示す。

その結果 ①カーボン繊維とコンクリートの歪みは同程度であり、補強材が有効に機能している。 ②破壊モーメントは設計値とほぼ一致した。 ③せん断補強効果は3種類ともに本試験では十分であった。

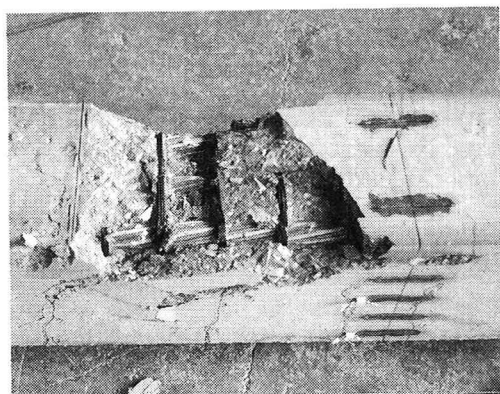


写真-2 載荷試験による供試体の破壊

6. シールド直接発進工法の実証試験計画

シールド直接発進・到達工法に求められる技術的課題について、従来技術で対応可能な部分と、新たに開発が必要な課題とに分けて開発を進めて来た。しかし、シールド直接発進・到達を実施するに当たっては、従来技術と新技術を組合せたシステムとしての総合確認が必要である。このため、鋼製連続壁とカーボン補強プレキャストコンクリート土留壁を組合せた立坑土留壁を構築し、実際のシールド機械を直接発進させる実証試験を計画している。

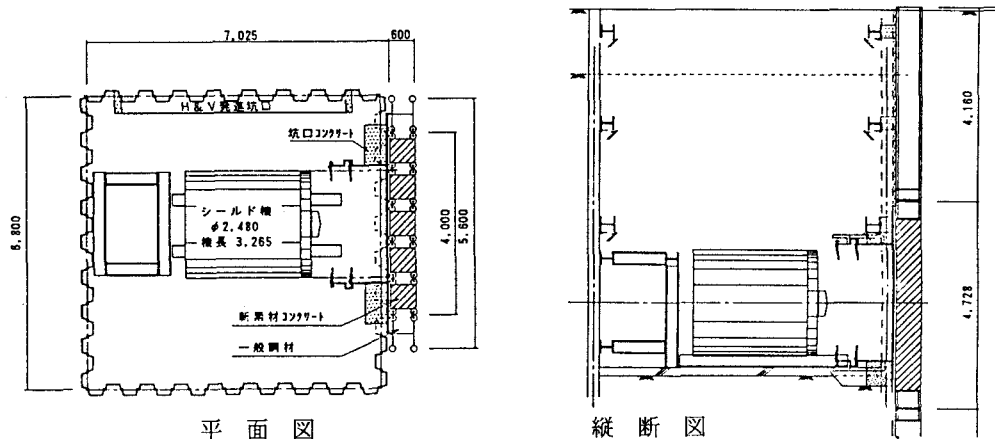


図-6 実証試験計画図

①土留壁施工試験は立坑深さ5.0mを想定した鋼製連続壁との併用を考え、発進口の土留壁構造は水平継手を設けた構造として、施工性を検証する。

②止水構造試験はエントランスパッキンを2重にし、止水材注入装置を設けた鋼製エントランスにより、シールド発進時の止水性能を確認する。

③切削性試験は土留壁背面の地山圧力とチャンバ内の泥水圧力とバランスさせ土留壁に加わる水平荷重を除去した状態でシールド機械により土留壁を切削して行う。試験に用いるカッタビットは800mm掘進を行い摩耗したビットと、一般に用いられる新しいビットを使用する。切削性試験により、到達時を想定した土留壁の切削性、発進時を想定した切削性、土留壁切削によるビット摩耗を検証する。

④土留壁の土留能力は立坑土留壁に地山圧力が作用した状態でシールド発進口の土留壁をシールド機械により切削を行うので、発進口周囲の土留壁の挙動と、土留壁背面の地盤挙動を計測して安全性の検証を行う。

7. あとがき

シールド工法は最も安全な都市トンネル工法として認識されている。一方、シールドの発進・到達時ににおける省力化施工・安全性の確保など開発すべき課題もある。NOMST SYSTEMは東京理科大学松本嘉司教授の着想によるもので、研究会を設立し技術開発に取り組んでいる。

謝辞：本システム技術の開発にあたっては、有識者の方々から貴重なご意見を戴いている。また、中部電力㈱には発進・到達現場をご案内いただいた。なお、試験の実施にあたっては三菱重工業㈱のご協力をいただいている。お礼をもうしあげる次第である。

○参考文献

- 1) 渡辺純・伊藤一男・夏目寿人：シールド発進・到達工法の改良による地盤改良省略，電力土木，No.221 P P. 68～74，1989. 7