

## シールドトンネルの直接発進の実証実験報告

### Experiment of Novel Material Shield-cutable Tunnel-Wall

北川滋樹\* 萩原英樹\*\* 林 敏夫\*\*\* 野本 寿\*\*\*\* 鈴木明彦\*\*\*\*\*

Shigeki KITAGAWA, Hideki HAGIWARA, Toshio HAYASHI, Toshi NOMOTO, Akihiko SUZUKI

In our newly developed system (Novel Material Shield-cutable Tunnel-Wall System, NOMST System), the entrance or exit part of the wall of the shaft for shield tunnel is to be constructed with precast concrete members using CFRP (Carbon Fiber Reinforced plastic) as main reinforcement and limestone as coarse aggregate. Systematically incorporated tests was necessary to develop this system. So, the cutting test of CFRP reinforced concrete(CFRP-RC), the flexural strength test of CFRP-RC, the real scaled verification test in site (the shield starting test in site) were undertaken to prove practical values of the material and the feasibility of this system.

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

#### 1. はじめに

NOMST研究会(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)では、粗骨材に石灰碎石、補強筋にCFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic)を用いることで、シールドのカッタービットで切削可能な高強度の新素材コンクリート壁を開発した。

この壁の適用例として考えられるのは、

- ①シールドの発進・到達立坑の開口予定部にこの壁をエントランスと併用することにより、マシンで直接切削することができる。これにより人力での作業に比べ工期・安全が確保でき、地盤改良も軽減できる。
- ②シールドの復工体にこの壁を用いることにより、トンネル間の連絡トンネル、シールドの地中接合、分岐、合流などの施工が容易になる。

切削部の部材を構築する材料は、高強度で信頼性があり、かつカッタービットで容易に切削可能であることが必要であり、NOMST研究会では、各種材料を用いた強度・切削性の基礎実験・梁の強度試験を経て、実際のシールド機を用いた実大規模の切削実験を実施し良好な結果を得たのでここに紹介する。

\* 正会員 前田建設工業(株)計画推進部      \*\*\*\* 正会員 西松建設(株)技術研究所

\*\* 正会員 清水建設(株)土木本部      \*\*\*\*\*正会員 三井建設(株)土木本部

\*\*\*正会員 鉄建建設(株)技術本部

## 2. 基礎実験

### 2・1 素材の選定

カッタービットによるコンクリートの切削性は主に粗骨材の強度に起因しており、また粗骨材強度はコンクリート強度にも大きく関連している。そこで各種骨材（メサライト、スラグ碎石、石灰碎石）の組合せによるコンクリート強度と切削性・ビットの磨耗の試験を行った。また引張補強材の選定にあたっては、通常用いられている鉄筋はカッタービットによる切削は困難であるため、剛性・引張強度・付着強度などの基本物性が確保でき、しかも切削性に優れた素材が要求される。ここでは、カーボン、ガラス、アラミド、ビニロン等の繊維の物性を調査し、適用可能と考えられたカーボンとガラス繊維について切削性の試験を行った。

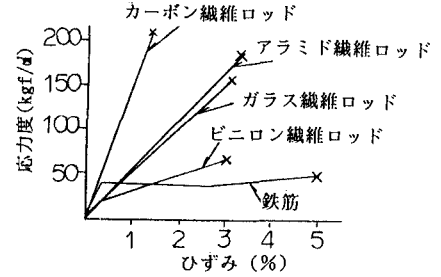


図-1 各種繊維の応力-歪曲線

### 2・2 強度試験・切削試験

強度試験の結果を表-1に示す。切削性試験は、無筋コンクリートと補強材を埋め込んだ供試体について行った。図-3に無筋コンクリート、図-4に補強筋コンクリートの試験結果を示す。

表-1 コンクリート強度試験

| 細骨材 | 粗骨材   | W/C | セメント量<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 圧縮強度 $\sigma_{28}$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |
|-----|-------|-----|-------------------------------|----------------------------------------------|
| 川砂  | メサライト | 30  | 583                           | 469                                          |
| 川砂  | スラグ碎石 | 25  | 600                           | 830                                          |
| 川砂  | 石灰碎石  | 25  | 600                           | 884                                          |

- ①メサライト（軽量骨材）を用いた場合の強度は $\sigma_{28}$   
=500kgf/cm<sup>2</sup>以下であったが、石灰碎石、スラグ碎石を用いた場合は、 $\sigma_{28}$ =800kgf/cm<sup>2</sup>の高強度を確認できた。
- ②メサライトに比べ、スラグ碎石、石灰碎石を用いた場合の切削トルクは大きくなるが、両者の差は認められない。
- ③スラグ碎石に比べ、石灰碎石を用いたコンクリートでは刃先の磨耗はほとんど認められなかった。
- ④切削断面は、ガラス繊維はひきちぎられるのに対し、カーボン繊維は切断される状況であった。

以上の結果より粗骨材には石灰碎石、引張補強材にはカーボン繊維を使用することにした。

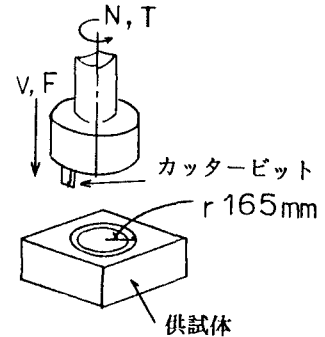
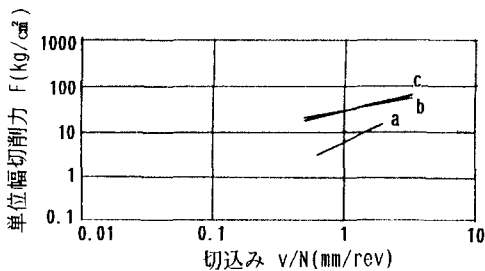
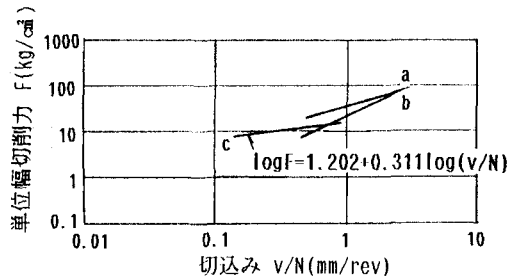


図-2 切削試験装置



- a: 軽量骨材コンクリート(メサライト)  $\sigma_c$  = 500kgf/cm<sup>2</sup>  
 b: 石灰碎石骨材コンクリート  $\sigma_c$  = 800kgf/cm<sup>2</sup>  
 c: スラグ碎石骨材コンクリート  $\sigma_c$  = 800kgf/cm<sup>2</sup>

図-3 無筋コンクリート切削試験結果



- a: 石灰碎石骨材コンクリート+CFRP } ビット幅 10mm  
 b: スラグ碎石骨材コンクリート+CFRP }  
 c: 石灰碎石骨材コンクリート+CFRP — ビット幅100mm

図-4 補強筋コンクリート切削試験結果

3. 実物大梁曲げ試験

3・1 実験概要

次章で述べる実証実験で使用する新素材コンクリート梁の曲げ試験を行った。

(a)使用材料

実験で使用したCFRPストランドの諸元を表-2に示す。石灰石コンクリートの配合を表-3に示す。コンクリート配合は材令28日の設計基準強度 $f_{ck}=700\text{kgf/cm}^2$ に対応したものである。

(b)供試体

供試体は桁高 600mm・部材幅 560mmで、主筋は図-5に示すように公称直径30mmのCFRPストランド（37本より線）を正負6本ずつ配置しており、短期許容モーメントは $80\text{tf}\cdot\text{m}$ となる。主筋の端部には鋼製の定着グリップを取り付け、その先端は鋼板で固定した。またこれらの主筋を取り囲むようにCFRPスターラップ（ $\phi=10\text{mm}$ 、ピッチ 100mm）を配筋した。

(c)載荷方法および計測項目

載荷は2点載荷とし、コンクリート表面・主筋およびスターラップの歪みを測定した。図-6に載荷方法を示す。

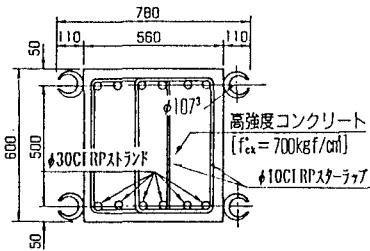


図-5 新素材コンクリート断面図

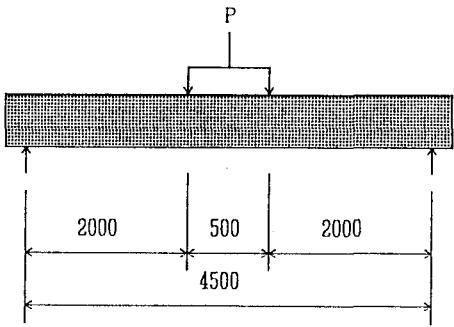


図-6 載荷方法

3・2 実験結果

(a)荷重-変形曲線

荷重-変形曲線を図-7に示す。荷重14.08tfで初亀裂発生、約100tf（コンクリート剥離荷重133.55tfに対して約75%）までは変形が線形域にあたると見なされる。

(b)歪み分布

図-8に、CFRPストランド主筋歪みを実線で、コンクリート側面の歪みを破線線でそれぞれ示す。図中の数字は載荷荷重で、実際の使用域と考えられる29.6tf～101.8tfまでで示している。この間でCFRPとコンクリートの歪みはおおむね中立軸からの距離に比例して直線的に分布しており、平面保持の仮定が成り立つものと考えられる。

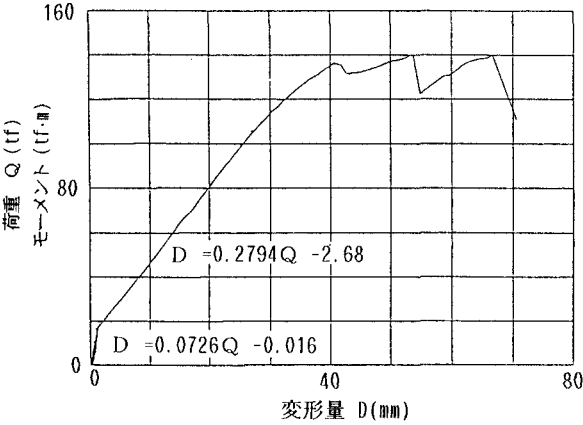


図-7 荷重-変形曲線

### (c)破壊荷重

荷重136.37tfで1回目のピークとなり、再度荷重が増加し140.14tfで最大荷重に達した。この2回目のピーク時に1本のCFRPストランドが破断し、最終ピーク139.08tfで残り5本のCFRPストランドが破断した。コンクリート標準示方書によりRC断面として求めた終局耐力は、実測値とほぼ一致しており、曲げ耐力は従来のRC断面と同様の方法で推定可能といえる。

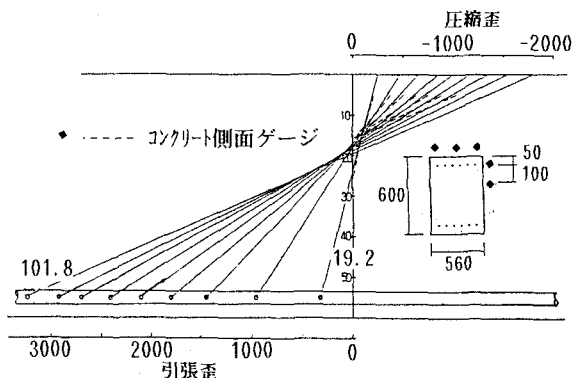


図-8 歪分布

表-4 供試体の破壊荷重

|      | 計算値       | 実測値<br>(コンクリート剥離時) | 実測値<br>(CFRP破断開始時) |
|------|-----------|--------------------|--------------------|
| 破壊荷重 | 136.46 tf | 133.55 tf          | 140.14 tf          |

## 4. 発進実証実験

### 4・1 実験概要

図-9に発進立坑側面図を示す。立坑土留壁は、シールド切削部だけに図-5に示す新素材プレキャストコンクリート部材を用い、それ以外の上部と下部（根入れ部）には鋼製部材を用い、現場でボルト連結・建込み後、周囲を泥水固化した。

シールド機は外径 2,480mm、総推力 600tf、最大カッタートルク45tf・mの泥水加圧式シールドを使用した。カッタービットは一般的地盤で用いられているE5種 100mm幅ビットを使用した。

### 4・2 実験結果

#### (a)掘削特性

図-4に示す補強筋コンクリート切削試験結果と、実証実験でのカッタービットのパス数より切削トルクを推定すると表-5のようになる。算定式を以下に示す。

$$T = F \Sigma r \Delta r$$

T:推定トルク(tf・m) F:単位幅切削力(tf/m)

r:ティースカッターの回転半径

$\Delta r$ :ティースカッターの幅(100mm)

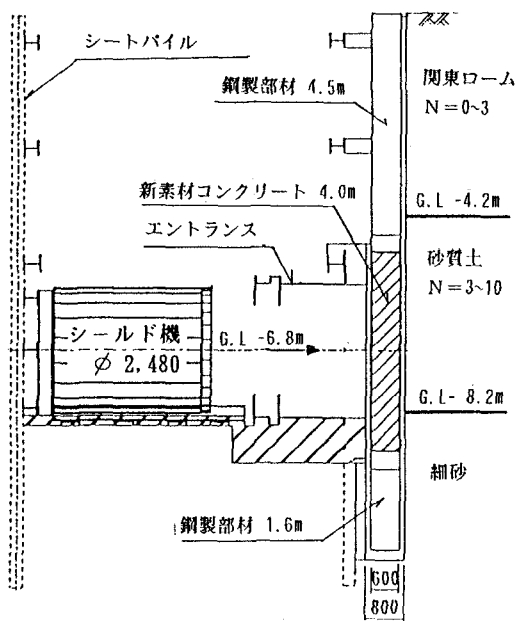


図-9 発進立坑側面図

表-5 切込み量による推定トルク

| 掘進速度<br>(mm/min) | 回転数<br>(rpm) | 切込み量 V<br>(mm/rev) | 単位幅切削力<br>F(tf/m) | 推定トルク<br>T(tf・m) |
|------------------|--------------|--------------------|-------------------|------------------|
| 1.0              | 1.25         | 0.8                | 14.9              | 12.4             |
| 2.0              | 1.25         | 1.6                | 18.9              | 15.3             |
| 3.0              | 1.25         | 2.4                | 20.9              | 17.4             |

実験は表-5を参考に掘進速度 1~3mm/min で制御して掘進した。実験結果を図-10.11 に示す。

## ① 切削性

図-10より推力とカッタートルクには正の相関が見られる。また図-11より掘進速度 1.0~2.0mm/min 時点のカッタートルクが表-5の推定トルクの2倍近くになっている。これは実験では、カッタートルクを発生油圧より算出しており、その中に損失トルクを含んでいるためと考えられる。しかしマシン能力を考えた場合には、掘進速度 1~2mm/minで、カッタートルクが 10~30tf・m (マシン能力の 22~67%) 総推力が 40~110tf (同 3~18%) となり、十分切削可能であった。

## ② 排土性

切削ずりを写真-1に示す。石灰碎石粗骨材は砂状に細かく削れ、CFRPストランドも素線にばらけて長さ 10cm 程度の小枝状に削られ、いずれも 4インチの排泥管で閉塞することなく排出する事ができた。

## ③ 掘削面の状況

掘削面は写真-2に示すように非常に滑らかであり、切削の最終段階でコンクリートがブロック状に破壊するような状況は見られなかった。

## ④ ビットの摩耗

新素材コンクリート壁貫通後のビットの摩耗量は、最外周ビットの平均値で 0.8mmが最大であった。この値は、砂礫層を掘進速度30mm/minで約1000m掘進した場合に想定される平均的摩耗量10mmに対しても非常に小さく、本掘進にほとんど影響の無い事が確認された。



写真-1 切削ずり

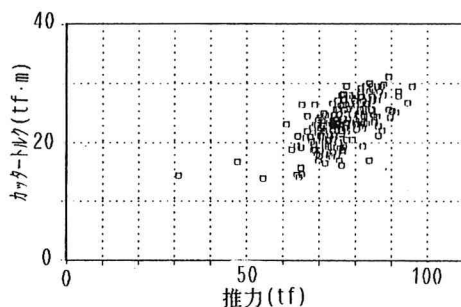


図-10 推力とカッタートルクの関係

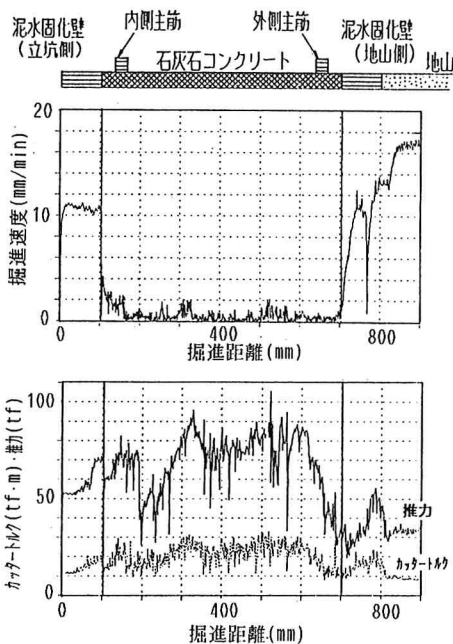


図-11 掘進速度・推力・カッタートルクの変化

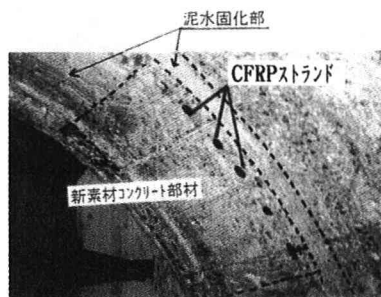


写真-2 掘削面の状況

## (b)土留壁、背面地山の挙動計測

本工法では土留壁の切削性とならんで、土・水圧に対応した切羽圧の管理および、切削に伴う土留壁の挙動や地盤の挙動を十分に把握する必要があるため、土留壁の歪および地山の沈下・水平変位計測を行った。

### ①土留壁の挙動

土留壁の変形を図-12に示す。切削開始から内筋切断時までは、土留壁の変形はほとんど見られない。残

厚が薄くなる外筋切断前及び切断後は、切削部分の地山側へ5mm 程度の腹み出しが確認されたが、この程度の変形量から推定してコンクリートのブロック破壊は無かったと考えられる。

②外筋切断前から地山貫入時までの掘削特性

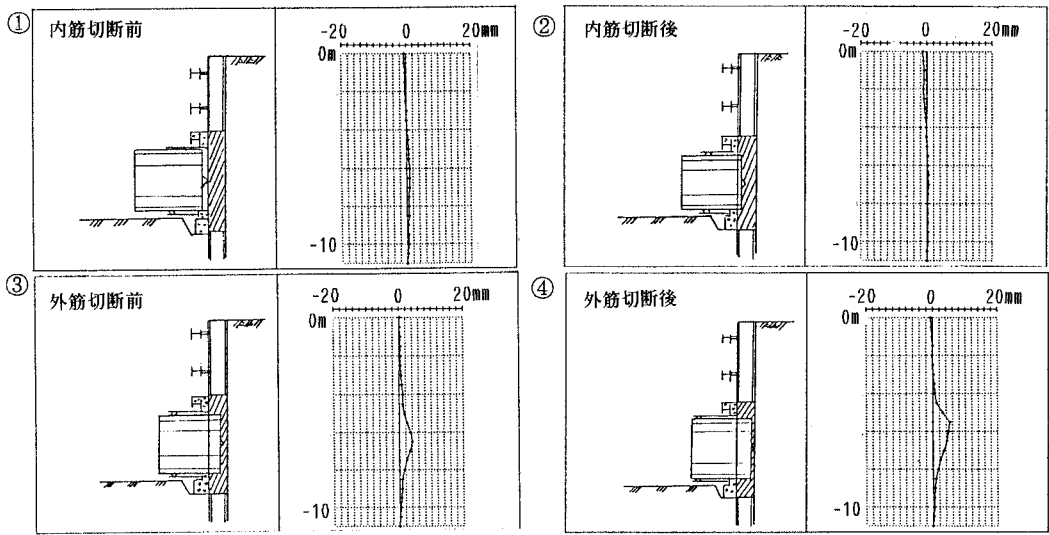
表－6 推力和掘進速度の平均値

| 掘削対象      | 新素材コンクリート | 泥水固化壁   | 地山      |
|-----------|-----------|---------|---------|
| 掘進距離 mm   | 500~599   | 600~699 | 700~799 |
| 推力 tf     | 78.8      | 54.9    | 35.3    |
| 速度 mm/min | 0.7       | 0.5     | 8.3     |

外筋切断前から地山までの推力和掘進速度の結果を表－6に示す。コンクリートのブロック破壊を防止するため、残厚が100mm になった時点で推力を低減し掘進速度を落した。泥水固化壁および地山掘削時の推力は約35tfと小さいが、掘進速度は 8～16mm/minと増加しており、掘削対象物の軟らかさに応じて掘進速度が追従しているのが分かる。

③地盤の挙動

鉛直変位（沈下量）および水平変位は最大 2mm程度のものであった。



図－12 掘進状況と土留壁の関係

5. おわりに

今回の実験で、新素材コンクリートのプレキャスト部材を用いた土留壁の構築、およびシールドのカッタービットによる土留壁の切削といった、ノムストの基本的な性状の確認が行われた。今後はここで得られた各種データをもとに、本工法をより合理的な工法として実施工に取り組む努力をしていきたい。

6. 参考文献

龍田昌毅他：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、第1回トンネル工学研究発表会、1991. 12

園田徹士他：NOMSTの開発 その1～その3、土木学会第47回年次講演会講演概要集第Ⅲ部門 1992. 9

那珂亮一他：CFRPストランドを用いたRC梁の静的曲げ耐荷挙動、土木学会第47回年次講演会講演概要集第Ⅴ部門、1992. 9