

現場打ちの新素材コンクリートを用いた シールド到達工法について

Shield arriving method using New Fiber Reinforced Concrete

矢吹忠平*・小林榮三郎*・田中大樹**・吉田 茂*

Tadahira YABUKI, Eizaburou KOBAYASHI, Hiroki TANAKA, Shigeru YOSHIDA

This report explains the new method of arrival of a shield machine, using New Fiber Reinforced Concrete.

In tunnel construction with shield machine, ground stabilization method (e.g. chemical grouting) for launch or arrival of a shield machine, is generally used. But the cost of the method occupies a fair proportion of whole cost of a construction. We hope that instead of going down safety and handling, we can cut the cost of auxiliary method.

Then, we studied characteristics of lightweight aggregate concrete reinforced with carbon fiber. And we adopted it and make a wall in front of a shaft instead of the grouting for shield arriving at a electric power cable tunnel construction in KISARAZU CHIBA. In this report, we explain the steps, the design and the results of this construction.

Keywords: shield arriving method, omission of ground stabilization method, new fiber reinforced concrete

1. まえがき

従来より、シールドの発進・到達は、セメント系高圧噴射注入工法や薬液注入工法により発進・到達坑口を防護して、立坑内部より坑口こわしを行い実施しているが、近年、発進・到達立坑の土止壁の一部（発進・到達坑口部）にプレキャストの新素材コンクリートを連結し、シールドマシンにより直接切削して発進・到達する工法が採用され始めている。

今回、施工性、経済性より到達立坑の鋼矢板土止壁と立坑本体の間の空間に現場打ちの新素材コンクリート壁を築造し、シールドの到達防護として、初めての施工を実施した。

本報告は、当社地中送電線工事において現場打ちの新素材コンクリートを用いたシールド到達工法の設計施工を行ったので紹介するものである。

* 正会員 東京電力㈱ 地中線建設所 木更津工事事務所

** 正会員 東京電力㈱ 送変電建設本部

2. 工事概要

本工事は千葉県木更津市における基幹地中送電線路用トンネル工事をシールド工法で、行ったものでありセグメント外径 3.75m、土被り 7.5m ～16.5m、掘進距離 2,093m を泥水加圧式シールド工法を用いて施工した。図-1 に工事の概要図を示す。

シールドトンネルの通過地盤は、比較的硬い洪積層（上部下総層群）であり、N値は砂質土で30～50、粘性土で10～25である。

3. 施工手順

シールド到達立坑は、鋼矢板土止壁（床付深さ 13.6m）を用いて施工しており、シールド到達は全体の工程から立坑本体構築・埋戻し完了後とした。

これより、本到達工は立坑本体構築の到達部にあらかじめ開口部を設け、鋼矢板の引抜き撤去後に行うこととした。開口部全面にはシールドマシンで切削可能な新素材コンクリート壁を立坑本体構築に合わせ3ロットに分け現場打ちで築造し、立坑内側にはシールド到達時の泥水飛散防止のための隔壁を設けた。

シールド到達工の施工手順を図-2 に、また、新素材コンクリート壁の配置を図-3 に示す。

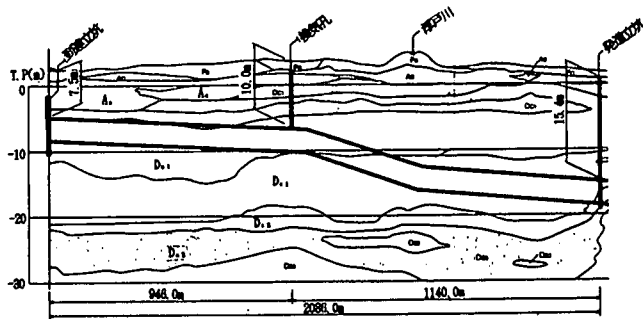


図-1 工事概要図

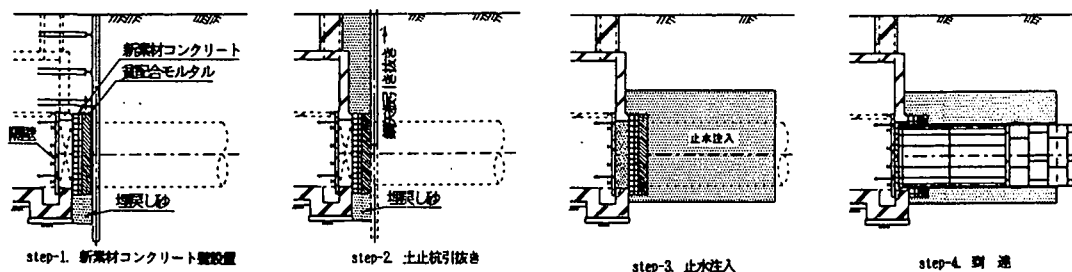


図-2 施工手順

4. 新素材コンクリートを構成する使用材料の検討

4.1 補強筋

従来の鉄筋コンクリートでは、カッタービットへの鉄筋の絡みつき等が生じるため、シールドマシンによる直接切削は困難であった。

従って、今回補強筋の選定に当たっては、炭素繊維、アラミド繊維、ガラス繊維、ビニロン繊維について、切削性、強度および弾性係数等の設計上の課題、実績等について比較検討した。

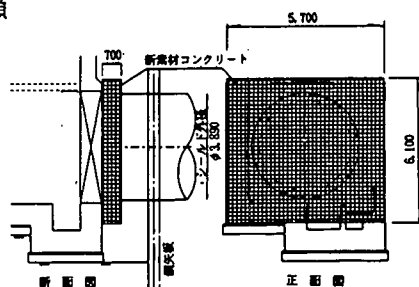


図-3 新素材コンクリート壁配置図

その結果、以下のことが得られた。

- ① シールドのカッタービットで容易に切削できる。
- ② 他の補強筋と比較して弾性係数が鉄筋に近い値を示し、強度についても鉄筋と比百分な値を有する。(図-4、表-1)
- ③ 発進立坑の土止材にプレキャストの芯材として用いられた施工実績があり、良好な結果を得ている。

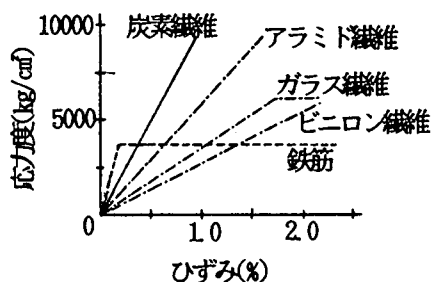


図-4 複合材料の応力ひずみ曲線

従って、以上の結果から本工事に使用する補強筋として炭素繊維を用いることとした。

なお、補強筋の製品形状は、狭隘な現場での組み立て易さを考慮してプレキャストの芯材に用いられているようなより線状の鉄筋状製品でなく、 $2.0\text{m} \times 2.7\text{m}$ を1つのブロックとした平面格子筋を採用した。

4.2 コンクリート

過去に実施された各種コンクリートの切削性試験結果より、シールドマシンカッタービットでの切削に関して以下のことがわかっている。

- ① 切削性能は粗骨材の材質により大きく影響し、普通骨材、スラグ砕石に比べ、軽量骨材が最も優れ、石灰石がこれに次いでいる。
- ② コンクリート強度は低いほど切削抵抗は小さい。

以上のことより、本工事では骨材として軽量骨材(最大粒径20mm)を使用した。

表-1 材料仕様

タイプ	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)
炭素繊維	12,000	1.0×10^6
ガラス繊維	6,000	3.0×10^6
ガラス+炭素繊維	3,700	3.7×10^5
アラミド繊維	5,700	5.7×10^5

5. 許容応力度

今回、仮設時の検討であることから、炭素繊維およびコンクリートの仮設時割増として長期許容応力度の5割増を短期の許容応力度とした。

炭素繊維の長期許容応力度は、過去の実験結果より、通常、最大強度の3割程度とした。

従って、 $\sigma_{ts} = 12,000 \times 0.3 \times 1.5 = 5,400 \text{ kgf/cm}^2$ となる。

また、軽量骨材コンクリートの設計基準強度については、後述の応力度照査結果および切削性の検討結果より、 $\sigma'_{ck} = 180 \text{ kgf/cm}^2$ を用い、許容曲げ圧縮応力度、許容せん断応力度は表-2の値を用いた。

表-2 軽量骨材コンクリートの許容応力度

許容曲げ圧縮応力度 $\sigma'_{ca} \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$	
軽量骨材コンクリート	設計基準強度 $\sigma'_{ck} \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$
	180
許容曲げ圧縮応力度	70

許容せん断応力度 $\tau'_{ca} \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$	
軽量骨材コンクリート	設計基準強度 $\tau'_{ck} \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$
	180
斜め引張鉄筋の計算をしない場合 τ_{al}	2.5

6. 設計・施工検討

6.1 新素材コンクリート壁の部材断面の検討

新素材コンクリート壁に作用する荷重は、図-5に示すとおり施工段階により異なると考えられる。今回この中で最も大きな荷重が作用すると思われる、シールドマシンの切羽圧を用いて部材断面を設計した。

なお、設計切羽圧は、排泥管閉塞時の緊急弁作動圧(20tf/cm²)が生じる時が最も大きくなるため、これを設計上の荷重とした。

	土圧+水圧	注 入 圧	シールド切羽圧
作用 荷 重			
	鋼矢板引抜き～隔壁設置	到達部地盤止水注入	シールド掘進(到達)
作用 荷 重 圧	10.1～12.9 (tf/m ²) $W = K \cdot \gamma \cdot H$ $K = K_a \sim K_o$ $= 0.23 \sim 0.50$ *土圧として主働土圧～静止土圧が作用。	7.8 ～ 18.7 (tf/m ²) $W = \text{〔有効注入圧〕}$ $= \text{〔到達水圧(=7.765tf/m2)〕} + \alpha$ *一般に注入は、50cm程度毎にステップ注入するため、荷重作用幅は50cm程度。	10.0～20.0 (tf/m ²) $W = \text{〔設定切羽圧〕} + \alpha$ $\leq 20 \text{tf/m}^2$ *閉塞時には緊急弁が作用。

図-5 作用荷重

新素材コンクリート部材は、立坑本体と埋戻し土により挟まれてはいるが、立坑本体と鉄筋等によって完全に結合しない構造とした。

従って、断面力の算定モデルは、図-6のように周辺固定支持の円形版と周辺単純支持の円形版の2つのモデルについて断面力算定(許容応力度設計法を使用)を行った。

また、部材断面については、立坑本体構築と鋼矢板土止壁との空間の施工性を考慮し壁厚は70cmとし、主筋は引張鉄筋比が0.2%以上となるよう断面積1.48cm²/本の100mm格子筋(引張鉄筋比 $q=0.25\%$)を使用した。

なお、主筋(炭素繊維筋)とコンクリートの弾性係数比は以下のとおりとした。

$$\begin{aligned} \text{弾性係数比 } n &= E_r \text{ (表-1)} / E_c \\ &= 1.0 \times 10^6 / 1.4 \times 10^5 \approx 7 \end{aligned}$$

表-3に応力度照査結果を示す。

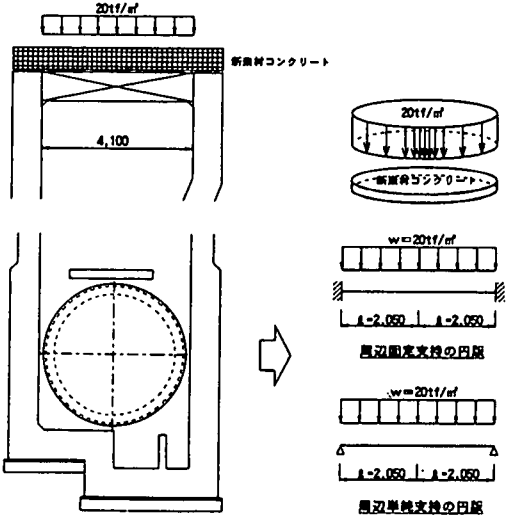


図-6 断面力の算定モデル

6.2 切削時のシールド推力が立坑本体に与える影響

新素材コンクリート壁の切削時に、新素材コンクリート壁を介して立坑本体に伝わる推力の影響について、図-7に示す平面はりモデルによりチェックを行い、立坑本体への影響の無いことを確認した。(表-4)

なお、作用荷重については6.1と同様とした。

6.3 格子状筋の定着長

格子状筋の定着長は、過去に実施された炭素繊維コンクリートの継手性能確認試験結果より、網目寸法の1.5倍程度以上必要であることが報告されている。

実施における適用として、安全率=2として定着長は、格子間隔の3倍とするのが妥当と考えられる。しかし、本工事においては、軽量骨材コンクリートを使用することから、軽量骨材コンクリートの許容せん断応力度、許容付着応力度等が普通コンクリートの70~80%とされていること等を考慮し、定着長として格子寸法の4倍(3倍÷75%)を必要定着長とした。(図-9)

6.4 シールド掘進(切削)速度の検討

過去の室内切削性試験結果よりシールドカッタービットの切り込み深さとカッタービット単位幅当たりの必要切削力の関係は図-10となる。この図における軽量骨材コンクリートの $\sigma_c = 200\text{kgf/cm}^2$ と $\sigma_c = 500\text{kgf/cm}^2$ の関係より $\sigma_c = 180\text{kgf/cm}^2$ の場合の単位幅当たりの切削力と切り込み深さの関係を推定し①式の様になった。

推定式 ($\sigma_c = 180\text{kgf/cm}^2$)

$$F(T/rb) = 2.165(V/N)^{1.841} \quad \text{--- ①}$$

また、カッタートルクと単位幅切削力の関係は以下の様になる。

$$T = \Sigma r(F \cdot b) \quad \text{--- ②}$$

ここに

F : 単位幅切削力 (tf / m)

T : カッタートルク (65tf・m)

r : ビットの平均回転半径 (1.217m)

b : ビット幅 (100mm)

表-3 応力度照査結果

断面力	$+M_{\max}(\text{tf} \cdot \text{m/m})$	16.8
	$-M_{\max}(\text{tf} \cdot \text{m/m})$	- 10.5
	$S_{\max}(\text{tf} \cdot \text{m})$	20.5
発生応力	σ'_c (kgf/cm ²)	58.0
	σ_t (kgf/cm ²)	2,007.0
	τ'_c (kgf/cm ²)	3.6

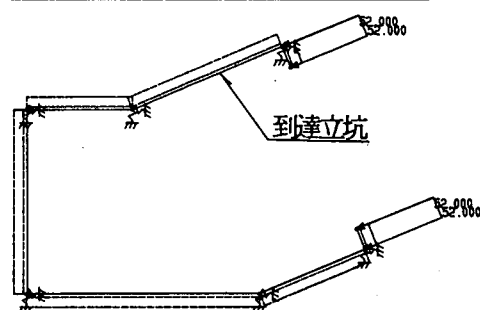


図-7 平面はりモデル図

表-4 応力度照査結果

断面力	$M_{\max}(\text{tf} \cdot \text{m})$	6.19
	$N_{\max}(\text{tf} \cdot \text{m})$	0.03
発生応力	σ_c (kgf/cm ²)	17.0
	σ_s (kgf/cm ²)	926.0

$$\sigma_{c..} = 90\text{kgf/cm}^2$$

$$\sigma_{s..} = 2,000\text{kgf/cm}^2$$

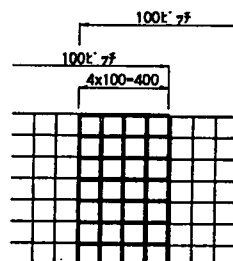


図-9 格子状筋の定着長

N : 面盤回転数 (1.48rpm)

V : 掘進速度 (mm/min)

本現場シールドマシンの常用トルクでの新素材
コンクリート内の最高掘進速度は、式①、②より

$$T = \Sigma r(F \cdot b)$$

$$65 = 51.1 \times 2.165 \times (V / 1.48)^{1.841} \times 0.1$$

$$V = 3.9 \text{ (mm/min) した。}$$

7. 施工結果

新素材コンクリート壁部の掘進経過と掘進データを図-11、表-5に示す。

新素材コンクリート壁を用いたシールド到達はほぼ順調に行われた。

カッタートルクは、常用トルクの5割程度、掘進速度も、最高掘進速度の5割程度にて施工することができた。

しかし、施工中、格子状炭素繊維が最後まで切削されずコンクリートからはぎ取られる場合があり格子状の塊のまま排泥されるため、何度か排泥用レキ取り装置部に閉塞を生じた。

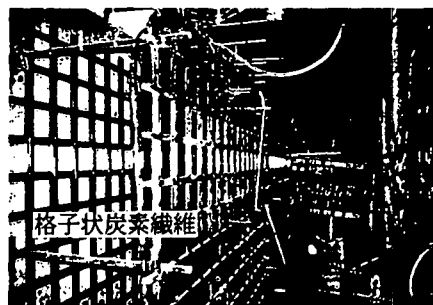


写真-1 新素材コンクリート壁施工状況

8. あとがき

今回、現場打ちの新素材コンクリートを用いた到達工を初めての試みとして行ったが、カッタービットの脱落、新素材コンクリート壁の崩壊、到達立坑への影響等は無く施工可能であった。しかしながら、新素材コンクリート切削時に、格子状炭素繊維筋の塊によるレキ取り装置閉塞が何度か生じるという施工上の問題も明確になった。従って、今後泥水加圧式シールド工法において格子状炭素繊維筋を用いる場合には、礫取り装置の改良が必要であると考えられる。

(参考文献)

- 1) コンクリート標準示方書、コンクリートライブラリ72：土木学会
- 2) 園田 久原 古田：新素材コンクリートを用いたシールドの発進・到達工法 土木学会第47回年次学術講演会
- 3) 藤崎 杉田 中辻：鉄筋に代わるFRP構造材の開発(その1)重ね継手性能確認試験 日本建築学会学術講演会昭和68年

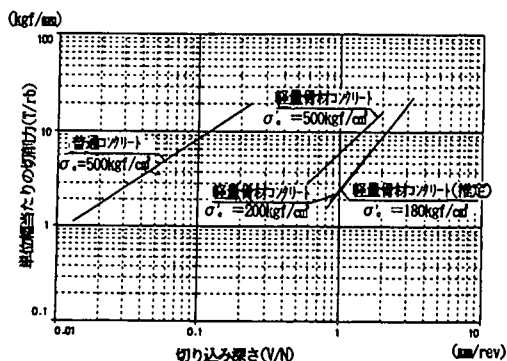


図-10 単位当たりの切削力と切り込み深さ

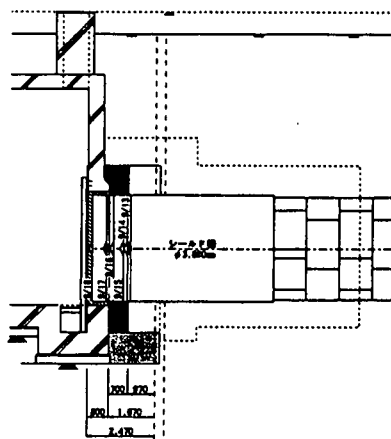


図-11 掘進経過図

表-5 掘進データ

日付	9/14	9/15	9/16	9/17	9/18
掘進延長 (m)	2,091.9	2,092.1	9,092.4	2,092.7	2,093.2
掘進量 (mm)	110	153	350	250	524
掘進速度 (mm/s)	2.1	1.1	1.4	1.5	2.7
切羽圧 (kg/cm²)	0.57	0.70	0.70	0.67	0.55
総推力 (t)	417	602	599	586	552
回転速度 (rpm)	41.4	35.9	37.9	31.6	30.4
回転方向 (rpm)	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48
掘削対象	EP-セメント	新素材コンクリート	新素材コンクリート	新素材コンクリート	新素材コンクリート