

軟岩地山を対象とした大断面空洞の設計・施工法と計測結果

Design and construction method of a large scale cavern

reflecting field measurement in sedimentary soft rock

小林 哲* 山本武文** 五嶋博己*** 保岡哲治***

Satoshi KOBAYASHI, Takefumi YAMAMOTO, Hiromi GOSHIMA, Tetuharu YASUOKA

The large scale cavern with the maximum cross sectional area of 420m^2 and the length of 61m, which was used as the settling basin of sewage plant, was planned and constructed in soft rock. The cavern was excavated by side pilot drift method at the arch section and multiple bench cutting method at the rest. After arch excavation, additional reinforcing anchors were installed to support the loosened ground. In this paper, the design and construction method of cavern in soft rock is presented. Also, details of adopted reinforcing anchors and the results of field monitoring are described.

Keywords: large scale cavern, soft rock, field measurement, reinforcing anchor, sewage plant

1. はじめに

国内でのNATMによる地下大空洞の施工事例としては、硬岩地山における地下発電所、石油備蓄工事などがある。一方、軟岩・土砂地山を対象としたNATMによる大空洞の建設は、今後の課題とされていた。

本工事は軟岩地山（一軸圧縮強度 $\text{Max. } q_u=120\text{kgf/cm}^2$ ）を対象とし、最大 420m^2 の大断面空洞（以下：トンネル、掘削幅：19.9m、高さ：21.65m、トンネル延長：L=61m、2トンネル）の建設である。図-2、図-3に工事概要図を示す。

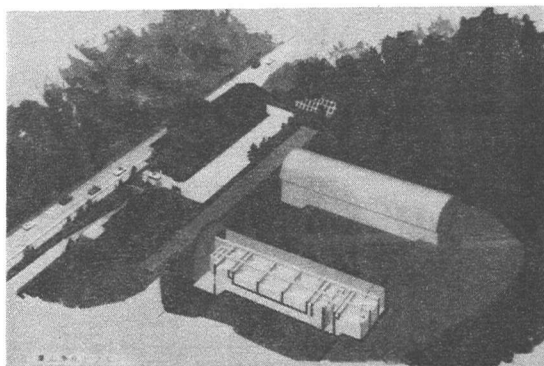


図-1 処理場完成予想図

* 正会員 日本下水道事業団 東京支社 西神奈川工事事務所

** 正会員 ㈱大林組 東京本社 土木技術本部 技術第2部

*** 正会員 ㈱大林組 横浜支店 葉山浄化センター建設工事事務所

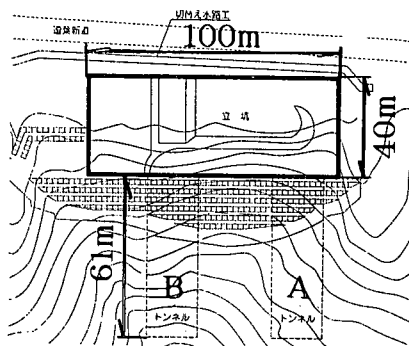


図-2 計画平面図

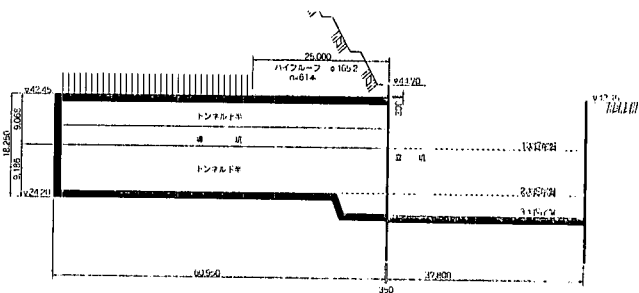


図-3 計画縦断面図

当報告では、当初設計及び施工法の概要を述べると共に、切羽観察や鋼製支保工の軸力等の計測結果を踏まえてトンネル上半アーチ部にグラウンドアンカーを追加施工した経緯を示し、加えて上下半掘削時の計測結果も述べる。

なお、当工事は下水処理場の建設であるが、これは、日本下水道事業団が道路トンネルの工法を応用して開発したトンネル方式処理場（クリーンカプセル処理場）である。この工法は、トンネル内に処理施設の大部分を収納することにより平坦地の少ない地域でも処理場が確保できるものであり、当浄化センターは、この方式で施工された島根県鹿島町の「クリーンセンター鹿島」に次ぐ国内で2番目の施設である。

2. 地質概要

処理場周辺の地質は、新生代新第三紀後期中新生～鮮新世の三浦層群逗子層のシルト岩を主体とし、砂岩、軽石凝灰岩、スコリア凝灰岩を薄層で挟在する。地層はトンネル部で流れ盤を呈し、3条の断層がトンネルと交差する。図-4に2トンネルの地質縦断面図を示す。

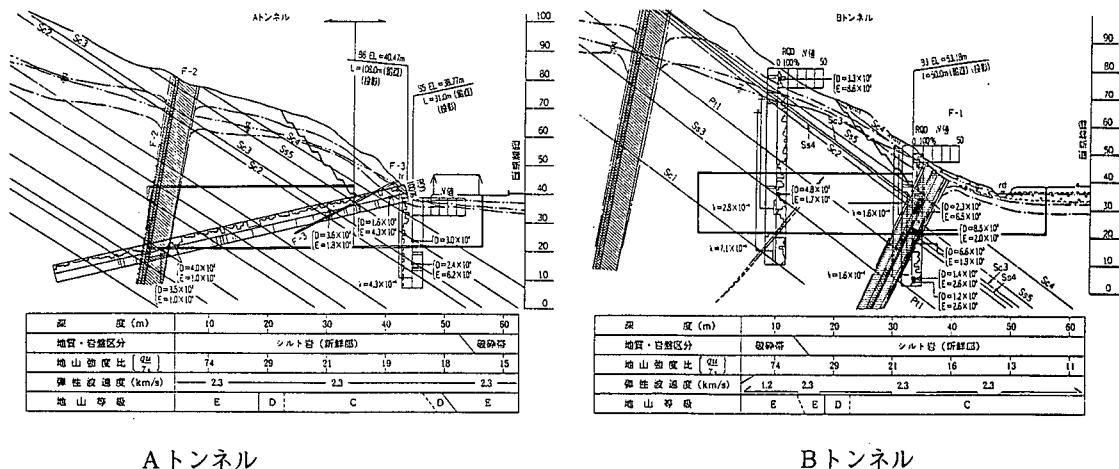


図-4 地質縦断面図

3. トンネル部の安定解析

トンネル部は、国内では皆無の堆積軟岩を対象とする大断面トンネルの掘削となるため、事前にFEMによる安定解析（ステップ解析）を実施した。解析の目的は、掘削地山の安定性確保、施工法・手順の妥当性検証、必要とされる支保の規模、補助工法などに関する検討事項の抽出等にあった。

3・1. 解析条件

トンネル部の設計断面を図-5に示す。この断面を基に施工方法を考慮して図-6の加背割及び施工手順とした。特にアーチ脚部には大きな支保軸力が作用すると考えられるため側壁導坑先進工法とし、下半部は多段ベンチカット工法とした。

表-1 支保パターン

導 坑	吹付けコンクリート $t=10\text{cm}$
	鋼アーチ支保工 $H-100 @1.0\text{m}$
	導坑コンクリート $w=3.1\text{m} \quad h=3.386\text{m}$
上半, 下半	吹付けコンクリート $t=25\text{cm}$
	鋼アーチ支保工 $H-250 @1.0\text{m}$
	覆工コンクリート $t \geq 1.0\text{m}$

* ロックボルトは解析上その効果が顕著に現れないため、解析上では考慮しない。

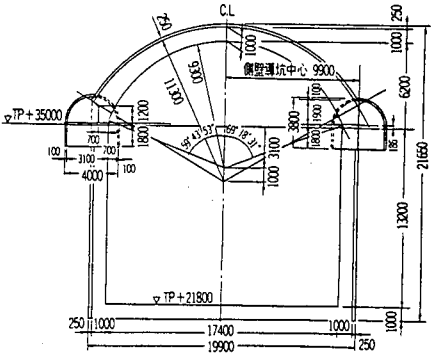


図-5 設計断面

3・2. 解析結果

(a)変位

偏平大断面の掘削となるため、側壁導坑コンクリートを事前に施工しても、上半天端は最終的に45mm、側壁導坑コンクリートは13mmの沈下を示した。

(b)鋼製支保工と吹付コンクリート応力

両部材とも全ステップで圧縮側部材応力となり、最大応力値は上半鋼製支保工に1,850kgf/cm²、下半支保工に900kgf/cm²、上半吹付コンクリートに57kgf/cm²となった。この結果から、これらの部材は主に軸力構造として有効に支保効果を発揮し、妥当な支保規模であると判断した。

(c)地山の局所安全率（図-7）

局所安全率Fsが1.5を下回る領域は、上半2段ベンチ掘削後に発生する。下半2段ベンチ掘削以降では、Fs≤1.0の領域が発生する。この部分は、塑性域の発生及び進展が予想され、グラウンドアンカーによる補強が示唆された。

施工手順

- ① 左導坑掘削
- ② 右導坑掘削
- ③ 左右導坑コンクリート打設
- ④ 上半1掘削
- ⑤ 上半2掘削
- ⑥ アーチコンクリート打設
- ⑦ 下半1掘削
- ⑧ 下半2掘削
- ⑨ 下半3掘削
- ⑩ 下半4掘削
- ⑪ インバート部コンクリート打設
- ⑫ 下半側部コンクリート打設

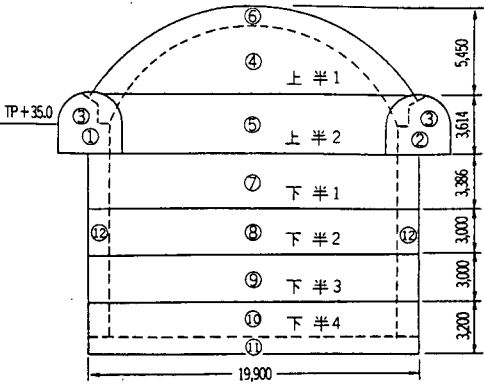
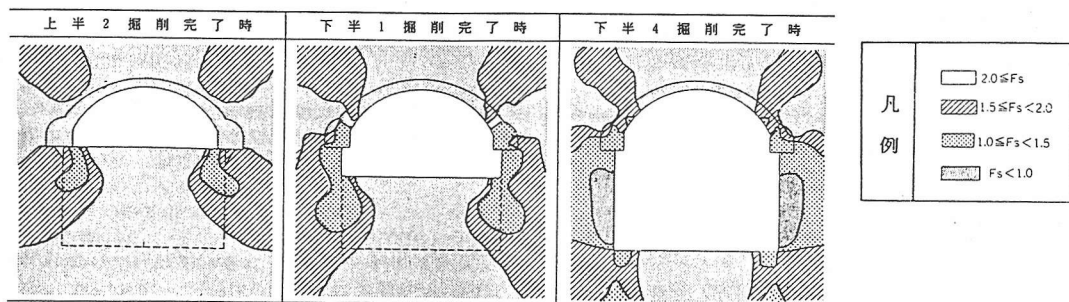


図-6 加背割図



図－7 局所安全率の分布図

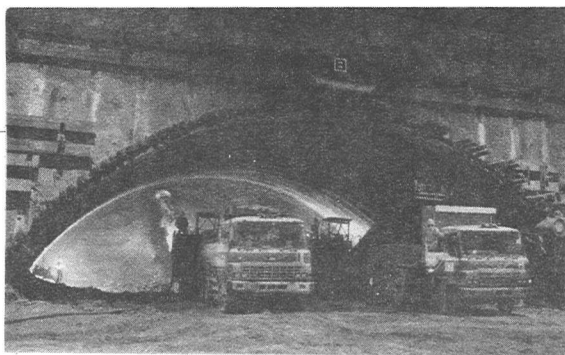
最終的に、適用支保パターンは、解析結果、第二東名神などで提案されているパターン等を参考に決定した。解析時からの増支保は次である（図－11）。

- ①下半部及び妻部へのグラウンドアンカーの配置
- ②トンネル坑口部の土被りの薄い区間へのパイプルーフの配置（延長 $L=25\text{m}$ ）
- ③覆工コンクリートの補強鉄筋の配筋

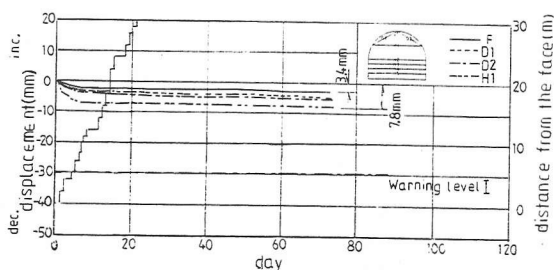
4. トンネル部の施工

4・1. 上半部掘削

上半部は、上半1、2を掘削し、アーチコンクリートを打設した。上半1の断面形状は縦横比27%、掘削断面積 79m^2 の偏平大断面となった。特に、切羽天端部の安定性向上策として、①パイプルーフ区間を含めた全切羽面で鏡吹付けコンクリートを施工し、また、②切羽開放時間の短縮化を目的としロードヘッターS-200を2台配置（写真－1）するなどした。なお、施工中、断層破碎帯の出現により切羽の自立性が損なわれた延長38m（トンネルA： $L=16\text{m}$ 、トンネルB： $L=22\text{m}$ ）区間では、鏡ボルト（FRPボルト）およびウレタンを用いた注入式フォアパイリングを施工した。上半1の計測結果（計測A）を図－8に示す。全計測断面の平均内空変位量は $H=6\text{mm}$ （+；内空側）、平均天端沈下量 $F=4\text{mm}$ （+；沈下）となった。この結果と支保軸力測定結果（鋼製支保工+吹付けコンクリートの合計軸力 $P_{\text{TOTAL}}=79\text{tf/m}$ 、+；圧縮）より、偏平大断面の鉛直下向き荷重は支保部材が有効に支え、側壁導坑コンクリートに伝達していることが判った。



写真－1 上半1掘削状況



図－8 上半1掘削時の計測結果

4・2．上半部の補強

上半支保工脚部に大きな軸力が作用することは事前FEM解析で明らかであった。また、側壁導坑及び上半1掘削結果から、現実の地山は設計で予想したものより亀裂が卓越した岩盤であり、また、断層破碎帯が大規模に存在することが判明した。一方、計測結果から地山の緩み範囲と合計支保軸力より緩み土荷重 $P_1=79\text{tf/m}$ 、これにアーチ・側壁コンクリートの自重 $P_2=56\text{tf/m}$ を加えると、鉛直下向き荷重 $P=135\text{tf/m}$ ($P=P_1+P_2=79+56\text{tf/m}$) が下半1掘削時作用する結果となった。切羽観察の結果より側壁導坑脚部は前述したように亀裂の卓越した岩盤であり、また、下半掘削時は図-9に示す断面形状となるため、想定滑り線上で側壁導坑コンクリートの滑落・回転等の安定性検討を実施した(図-10)。

滑動力； $(W+P) \cdot \sin 30 = 122\text{tf/m}$ W ：想定滑り線上の土塊重量

抑止力； $(W+P) \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi = 42\text{tf/m}$

抑止力を算定する際、亀裂の方向と想定滑り線の方向が一致した場合、粘着成分が期待できず、内部摩擦角も小さくなるため、検討では、粘着力： $C=0\text{tf/m}$ 、内部摩擦角： $\phi=30^\circ$ とした。想定滑り線上での安全率 $F_s=42/122=0.34$ となり、補強対策工が必要となった。補強対策工として、薬液注入工やパイル工等も検討したが、最終的には補強効果が最も期待できる補強グラウンドアンカーを採用した。

補強グラウンドアンカーは、側壁コンクリートに作用する水平力を勘案して、以下の配置・仕様とした。

①アーチ部 設計荷重 130tf/本 @ 1.75m 仰角 45°

②側壁部 設計荷重 60tf/本 @ 2.00m 仰角 15°

アンカー体の選定に当たっては、定着の信頼性、テンドンの固定の確実性等からSEEタイプルアンカーを採用した。

図-11に補強配置図を示す。

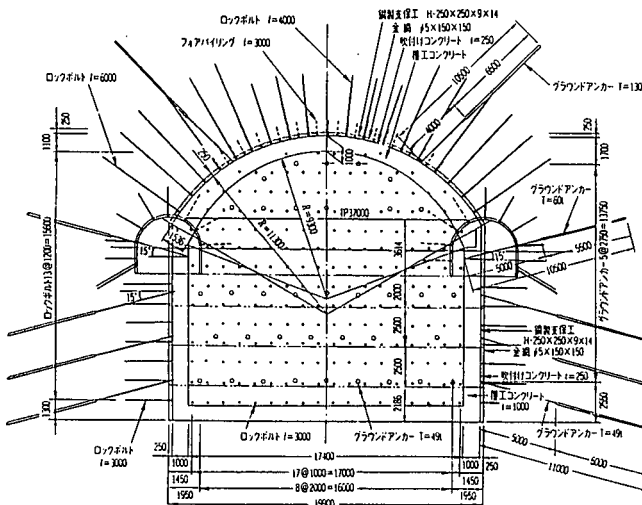


図-11 グラウンドアンカー配置図

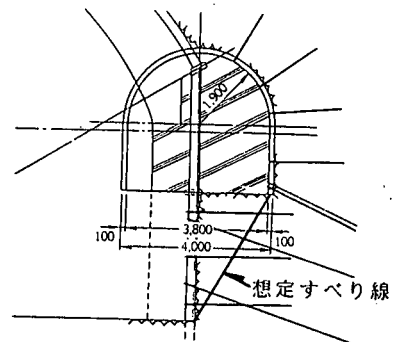


図-9 下半掘削時の断面

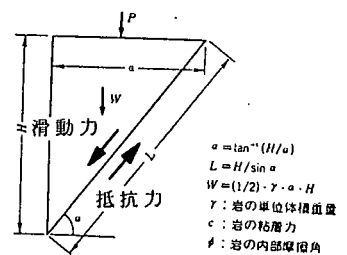


図-10 検討モデル

4・3．下半部掘削

下半掘削は、まず図-12に示すように、トンネル全長にわたってリッパによる各ベンチの段下げ掘削を行なった。その後、掘削は側壁導坑コンクリートの沈下防止から図-13のように両サイドの台形部を千鳥状のブロック順(①→④→⑤→②→③→⑥ブロックの順)に実施した。下半グラウンドアンカーは各ブロック掘削後、速やかに削孔・注入し、定着完了後、反対ブロックを掘進(例えば、4ブロックのグラウンドアンカー緊張・定着後、3ブロックを掘削開始)した。掘削時には、下半鋼製支保工脚部をできるだけ傷めないようにすると共に、鋼製支保工の軸力を確実に掘削盤に伝達する目的で耐圧袋(ブルフレックス)を敷設・注入した。

図-14に下半1掘削時の側壁導坑コンクリートの計測結果を、写真-2に下半3の工事状況を示す。

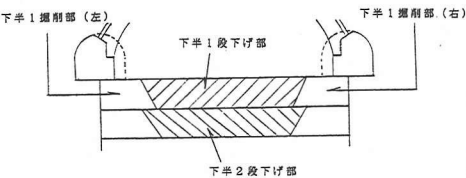


図-12 下半段下げ掘削

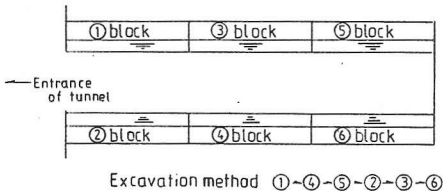


図-13 下半ブロック割図

下半掘削時の計測結果から、次のことが明らかとなった。

- ①下半段下げ時、グラウンドアンカーの緊張力により側壁導坑コンクリートは鉛直上向きに変位（平均変位 $d_1=10\text{mm}$ ）、後続する下半掘削時に下向きに変位（平均変位 $d_2=4\text{mm}$ ）する。
- ②下半掘削時、片側ブロックを掘削すると、掘削ブロック上部の側壁導坑コンクリートは左右同時に沈下する。例えば、1ブロックを掘削すると、1ブロック上部の側壁導坑コンクリートは沈下するが、同時に下部を掘削していない2ブロックのコンクリートも沈下する。
- ③側壁導坑コンクリートの水平内空変位は3～4mm程度（+：内空側）であり、補強グラウンドアンカーの緊張効果が認められる。

5. まとめ

軟岩地山を対象とした大断面トンネルの建設に関して、当工事で得られた知見は次である。

- ①掘削断面が偏平大断面になるにしがたって支保脚部の地耐力対策が重要となり、脚部側壁導坑先進工法等の地耐力確保を最優先にした工法が将来有望と考えられる。
- ②大きな緩み荷重を支保するためには、支保部材は剛な構造が望まれる。よって、材料面では高強度吹付けコンクリートの開発等が必要となる。

<謝辞>葉山浄化センターの建設工事にあたり、ご指導いただいた葉山町の関係者に深甚の謝意を表します。

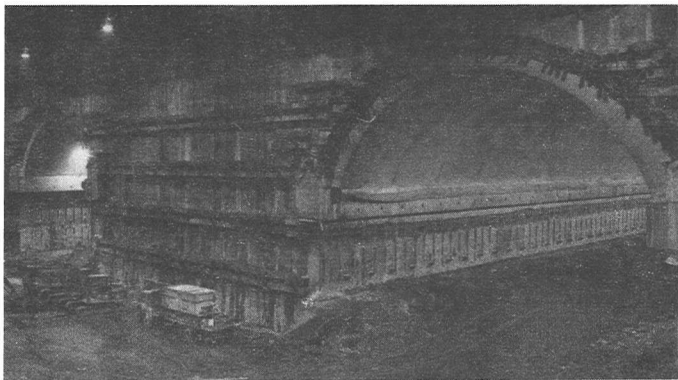


写真-2 下半3の工事状況

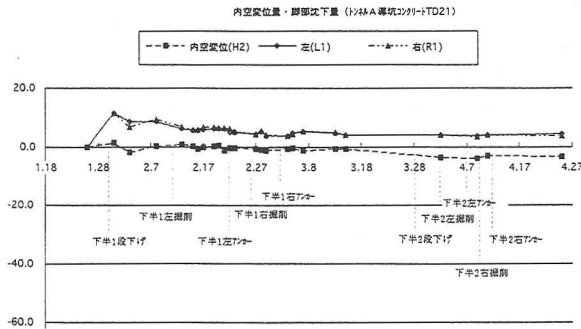


図-14 下半1掘削時の側壁導坑コンクリートの計測結果