

上半中壁分割工法における中壁の役割について

THE ROLES OF CENTER DIAPHRAGM IN UPPER HALF VERTICAL SUBDIVISION METHOD

高嶋紀義*・時岡忠弘**・池添賢治**・関 順一***

Noriyosi TAKASIMA, Tadahiro TOKIOKA, Kenji IKEZOE, and Jun'ichi SEKI

The upper half vertical subdivision method is one method of excavating flat and large diameter tunnels in the unstable ground. This method has the advantages ; the upper half is divided into two faces right and left to improve the stability of the tunnel face by reducing the one cycle excavation width, and the tunnel crown can be stabilized by removing the center deaphragm after the upper half arch is formed.

In this paper, the roles of center deaphragm are considered from the view point of the tunnel stability, based on the results of FEM analysis and field measurements.

Keywords : center diaphragm, tunnel support, tunnelling method, NATM

1. まえがき

上半中壁分割工法は、自立性の悪い地山における偏平・大断面トンネルの施工法の1つとして、上半断面を左右に2分割し、先進坑と後進坑とを交互に同時掘進する工法である(図-1)。この工法の特徴として、

- ① 1回の掘削幅を小さくするので切羽の自立性が向上し、施工時の安全性が高いこと。
- ② 上半アーチを形成してから中壁を撤去するので地山の安定性が向上し、地山変形の抑制効果が大きいこと。

などがある¹⁾。しかし、左右を掘削した後撤去するまでの中壁の役割は、まだ十分には裏付けられていない。今回、東北電力第二山郷発電所の水圧管路工事に本工法を採用して、中壁の挙動計測を行い、中壁の役割について考察したので報告する。

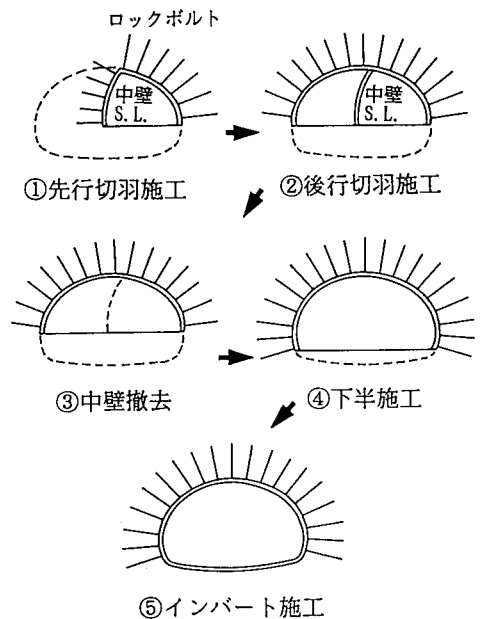


図-1 上半中壁分割工法の概要図

* 東北電力株式会社 第二山郷発電所建設所
** 前田建設工業株式会社 東北支店
*** 正会員 前田建設工業株式会社 技術研究所

2. 工事概要

第二山郷発電所は、阿賀野川の既設山郷発電所のダムを利用し、最大使用水量 $170\text{ m}^3/\text{s}$ 、最大有効落差 15.93 m 、最大出力 $22,900\text{ kW}$ の水力発電所である。この発電所の水圧管路トンネルは、延長 92.6 m であり、既設屋外変電所の直下（土被り高約 26 m ）を通過する（図-2）。

地質は、第三紀中新世堆積岩で、最上部約 $10\sim 14\text{ m}$ 間が砂質泥岩（ $C_L\sim C_M$ 級、 $q_u = 80\sim 180\text{ kgf/cm}^2$ ）、その下約 19 m 間が上部凝灰岩（ $D\sim C_L$ 級、 $q_u = 10\sim 30\text{ kgf/cm}^2$ ）、最下部が下部凝灰岩（ $C_L\sim C_M$ 級、 $q_u = 70\sim 100\text{ kgf/cm}^2$ ）である。トンネルのSLは、上下の凝灰岩の境界付近に位置している。これらの凝灰岩は、比較的亀裂が少ない均質な地山であるが、モンモリロナイトを多く含み、スレーキングしやすいものである。

水圧管路トンネルのトンネル掘削（延長 84.1 m ）は、上流の呑口部より変断面部（延長 9.5 m ）、標準部（掘削径 9.7 m 、延長 46.3 m ）、漸拡部（掘削径 $9.7\sim 13.6\text{ m}$ 、延長 28.3 m ）に分けられる。発電所側から掘削する標準部の掘削工法には上半リングカット工法を、漸拡部は掘削断面が $105\sim 160\text{ m}^2$ と大断面であることや地上の施設への影響を極力少なくすることなどより上半中壁分割工法を採用した。また、発電所側の坑口部には、立坑掘削に伴うゆるみの影響が予想されたこと、掘削径が 13.6 m と大きいことなどから、補助工法としてパイプルーフ工（ $\phi 76\text{ mm}$ 、 $q = 7.5\sim 11.4\text{ m}$ 、間隔 50 cm ）を用いた。掘削工法の選定に際し、サイロット工法などとの工法比較を行うと共に、FEM解析により地表沈下、支保応力などを事前検討した。この結果、中壁の鋼製支保工に大きな曲げモーメントは発生するが中壁撤去後の上半アーチ支保は十分安全であると考えられたので、観察・計測により中壁の挙動を綿密に監視しながら施工することにした。漸拡部の支保パターンと施工順序を図-3に示す。

水圧管路トンネルの掘削は、発電所立坑側の漸拡部より機械掘削で行った。土被りの小さい川側を先進坑としてロードヘッダー（RH-90）にて掘削した。先進坑を 10 m 先行させて、後進坑と交互に掘削し支保を施工した。両坑が標準断面部に到達して上半掘削を完了した後、中壁の撤去を慎重に行った。そして、標準断面、変断面部の上半を掘削した後、下半を2段に分けて大型ブレイカにて掘削した。上半掘削時の切羽の自立性は、小崩壊もなく安心感の持てるものであった。中壁の撤去に際しては、鋼製支保工の応力状況を監視しながら、まず中壁上部の吹付けコンクリートをはつり、次に計測支保工前後の支保工を逐次撤去した。この結果、後進坑掘削から中壁撤去までの間、吹付けコンクリート・鋼製支保工にクラックや座屈などの変状は見られなかった。

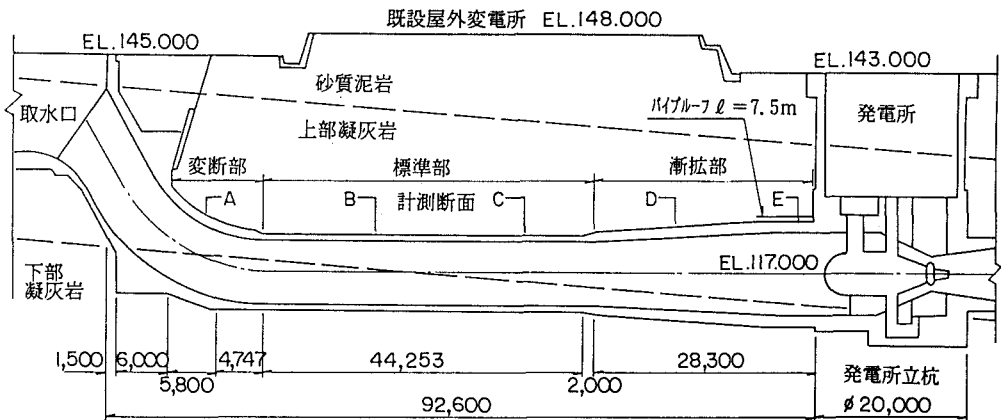


図-2 水圧管路トンネル縦断面図

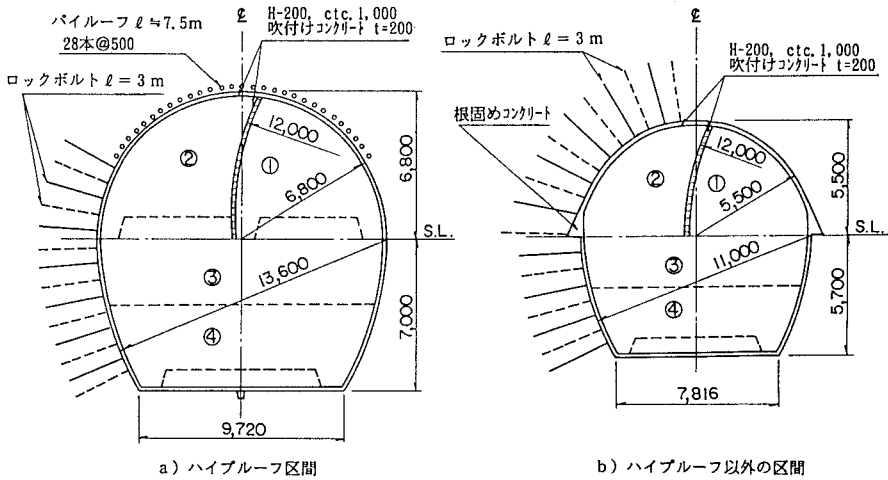


図-3 漸拡部の支保パターン，施工順序図

3. 中壁の挙動予測

上半中壁分割工法の適用性を検討する為に，発電所立坑より4 m入った大断面地点と標準断面へ移行する地点の2断面について，弾性FEM解析を数ケース行った．この内，本工法における挙動予測に用いたケースの岩盤物性を表-1に示す．このケースでは，岩盤の変形係数を岩石試験結果の下限値に近い値とした．上部凝灰岩は採取されたコアの状態によってa，b，cの3層に分けた．初期応力は自重計算で求め，切羽到達時の応力解放率を50%とした．支保部材のモデルとして，ロックボルトはトラス材 ($E = 2.1 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$) とした．外壁部の吹付けコンクリートと鋼製支保工は，一体化して背面地山の受働圧を受けることからトラス材 ($E = 1.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$) とした．中壁については，後進坑掘削後地山の受働作用がなくなることから，吹付けコンクリートを軸力のみ伝達するトラス材，鋼製支保工を曲げモーメントも伝達するビーム材と別々のモデルにした．図-4に解析モデルを示す．

大断面地点のトンネル変形の解析結果を図-5に示す．天端沈下は掘削段階①（先進坑掘削）から掘削段階②（後進坑掘削）へ進捗する時の増加が大きく，掘削段階③（下半掘削）以降の増加が小さい．側壁のはらみ出しは，掘削段階③以降多少増加しているが，天端沈下に比べて約37%と小さい．図-6に各掘削段階における吹付けコンクリート軸力分布を示す．上半アーチ肩部の軸力が大きく，掘削に伴って増加している．中壁部は掘削段階①から②（後進坑掘削）で著しく減少している．図-7に中壁部の鋼製支保工の軸力分布

表-1 挙動予測解析に用いた岩盤物性

No	名称	変形係数 (Kgf/cm ²)	ポアソン比	単位体積重量 (tf/cm ³)	参考：一軸圧縮強度 (Kgf/cm ²)
1	泥岩	20,000 ($1.1 \sim 19.1 \times 10^4$)	0.3	2.0 (2.2~2.3)	C ₁ ~C ₄ 級 (75~482)
2	上部 緑色 凝灰岩	a	0.3	2.0	
3		b	0.3	2.0	
4		c	0.3	2.0 (1.9~2.1)	D~C ₁ 級 (13~28)
5	下部 緑色凝灰岩	20,000 ($1.6 \sim 9.9 \times 10^4$)	0.3	2.0 (2.1)	C ₁ ~C ₄ 級 (71~101)

注：()内の値は岩石試験結果

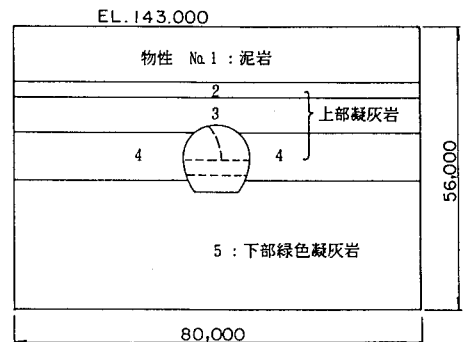


図-4 大断面地点解析モデル図

と曲げモーメント分布を示す。掘削段階①から②で軸力が減少し、曲げモーメントが大きく増加している。各支保部材の最大断面力と応力を表-2に示す。中壁部の鋼製支保工の発生応力は大きい、吹付けコンクリート、ロックボルトの応力には、まだ余裕のあることがわかる。

この解析結果および過去の施工実績より、中壁部の支保には後進坑掘削後大きな曲げモーメントは発生するが、上半アーチ完成後は中壁の中間支柱的役割が次第に減少しても外壁の支保で十分にトンネルの安定を確保できると予測した。

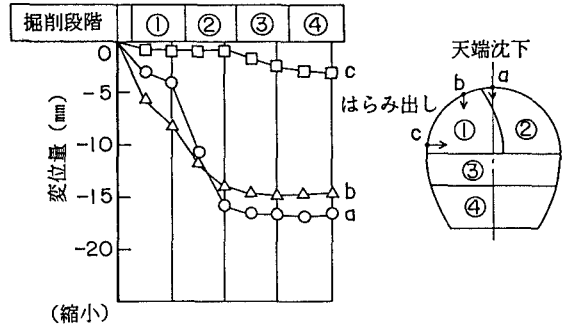


図-5 トンネル変形の解析結果 (大断面地点)

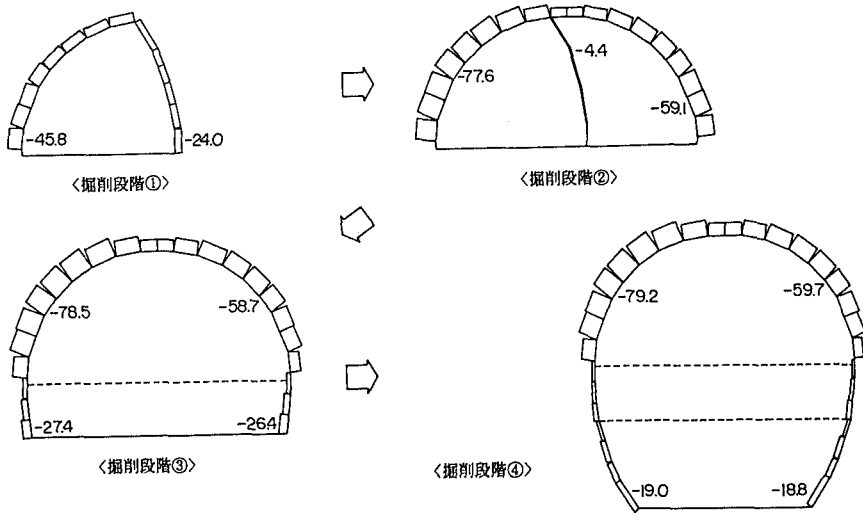
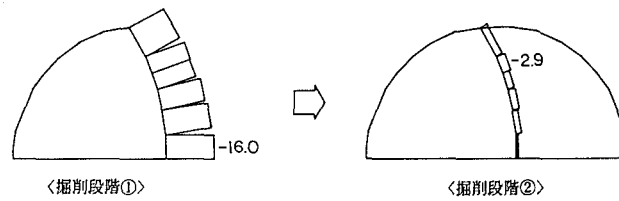
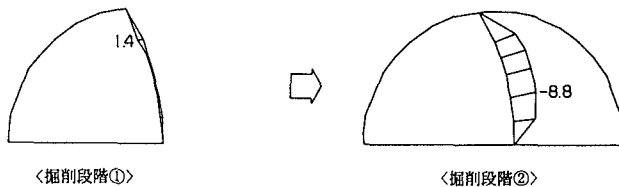


図-6 吹付けコンクリート軸力の解析結果 (大断面地点) 単位: tf



a) 軸力分布図 (中壁部) 単位: tf



b) 曲げモーメント分布図 (中壁部) 単位: tf・m

図-7 鋼製支保工断面力の解析結果 (大断面地点)

表-2 支保部材に生じる最大断面力と応力の解析結果 (大断面地点)

引張: 正

ロックボルト	吹付けコンクリート		鋼製支保工 (中壁H200)		
軸力 (tf)	軸力 (外壁) (tf)	軸力 (中壁) (tf)	軸力 (tf)	曲げモーメント (tfm)	曲げ応力 (kgf/cm ²)
7.35 (左側側壁)	-79.19 (-39.6kgf/cm ²)	-23.98 (-12.0kgf/cm ²)	-2.46 (-38.7kgf/cm ²)	-8.85 (±1,875kgf/cm ²)	1836, -1914

4. 計測結果

水圧管路トンネルに5つの計測断面を設け(図-2), この内, 本工法の漸拡部には発電所立坑より約18mと3m地点に計測断面D, Eの2断面を設けて, 内空変位, 天端沈下, 鋼製支保工応力, ロックボルト軸力等を測定した。

トンネル変形と鋼製支保工断面力の計測結果を図-8に示す。天端沈下は後進坑の掘削に伴う増加が大きいが, 中壁撤去時に急激な増加はなく, その後半掘削までの間漸増している。下半掘削に伴う増加はD断面よりE断面の方が大きい, 掘削完了後はいずれも隆起に転じている。内空変位は, 下半掘削に伴う増加が大きいが天端沈下に比べて変位が小さい。E断面の鋼製支保工の断面力分布を図-9に示す。図-8, 9より, 中壁部鋼製支保工の曲げモーメントは②後進坑掘削から③中壁撤去に伴って急増していることがわかる。外壁部の支保工は後進坑の掘削に伴って内曲げ方向に戻っているが, 中壁撤去に伴う変化は小さい。鋼製支保工の軸力は掘削段階に従って増加しており, FEM解析で見られた後進坑掘削後の中壁部の軸力低下を生じていない。しかし,

中壁撤去に伴う外壁部の軸力増加は小さい。中壁部鋼製支保工の撤去前の計測結果(軸力25tf, 最大曲げモーメント4.5tf・m)をFEMの解析結果(軸力2.9, 曲げモーメント8.8tf・m)と比較すると, 軸力が大きく, 曲げモーメントが小さい挙動を示していることがわかる。

中壁撤去時の挙動をまとめると, 吹付けコンクリートはつり, 隣接支保工切断などの撤去作業に伴って中壁部支保工の曲げモーメントは増加しているが, トンネル変形や外壁部支保工の断面力が急激に増加することとはなく, その増加も収束値に比べると小さかったといえる。

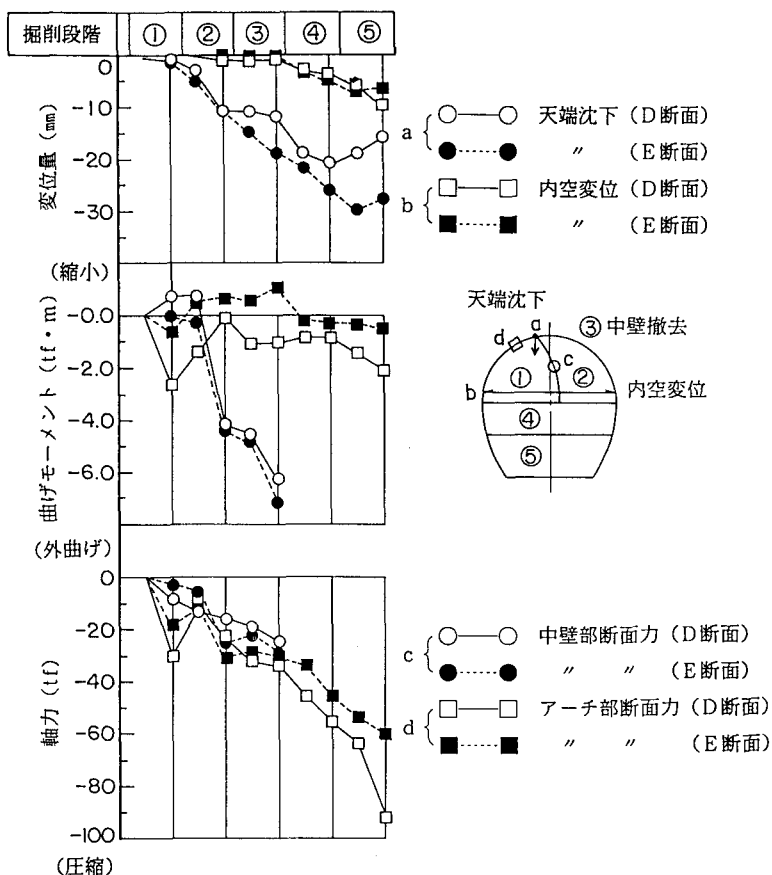


図-8 トンネル変形, 鋼製支保工断面力の計測結果 (D, E断面)

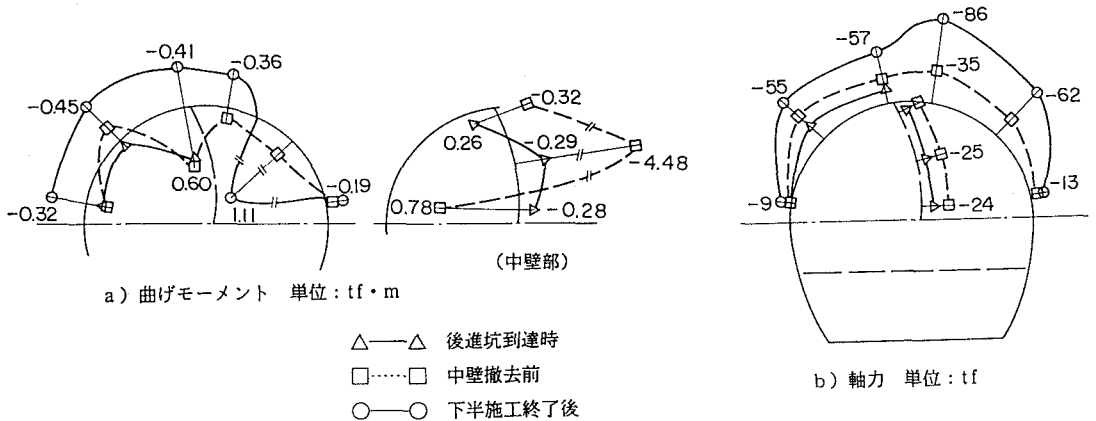


図-9 鋼製支保工の断面力分布の計測結果 (E断面)

5. 考察

上半中壁の役割として、次の2点が考えられる。

- ① 先進坑側壁の地山を後進坑掘削まで支保する。
- ② 上半アーチの支保耐力が十分出現するまで、上半アーチを支保する。

比較的土圧が小さくて切羽の自立性の確保が主要な目的の場合には、②の役割が不要な為に後進坑切羽で掘削と同時に中壁を撤去することが可能になる(例えば、吹付けコンクリート、ロックボルト支保の中壁の場合など)。作用土圧が大きい場合には、②の役割が必要となるので中壁を中間支柱的に働かせることになる。この時には、後進坑の吹付けコンクリートの強度が十分発現するまで中壁を機能させ、その後中壁の負担している支保力を撤去に伴って上半アーチに逐次伝達して、上半アーチを完成させることになると考えられる。

今回の解析、計測結果より、中壁は後進坑掘削までの支保(役割①)として機能した後、後進坑掘削後は曲げモーメントの大きい中間支柱として上半アーチを支保していること(役割②)が確認された。しかし、中間支柱としての支保力は、撤去に伴う外壁支保工の断面力の増加が小さいことから、上半アーチの支保力に比べて小さいものであったと推定される。したがって、中壁部に曲げモーメントによる変状は生じなかったが、仮に後進坑の掘削に伴って変状が発生しただとしても、上半アーチの支保力が増加すると共に中壁の中間支柱の役割りを軽減し得るので、トンネルの安定確保には問題なかったものと考えられる。

今回の対象地山は軟岩であり、土砂地山や崖錐では中壁部の挙動が異なることも考えられるが、本報告が、3車線道路トンネルなど今後の超大断面トンネル軸の適用の参考になれば幸である。

6. 参考文献

- 1) 関 順一・岡田正之・井上博之・三輪俊彦：偏平大断面トンネルへの上半中壁分割工法の適用性，前田技術研究所報，Vol.28，pp.37～45，1987
- 2) 関 順一・岡田正之・井上博之・三輪俊彦：上半中壁分割工法における地山挙動，第19回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.336～340，1987.2
- 3) 高橋 宏・銭谷清司：第二山郷発電所水路トンネルの設計・施工について，電力土木，No.230，pp.89～97，1991.1