

大深度山岳立坑における連接部の設計・計測と地山挙動評価

山田惇人¹・山田文孝²・野村貢³・大西有三⁴

¹フェロー会員 工博 三井建設株式会社安全環境部長 (〒103-0014 東京都中央区日本橋蛎殻町1-36-5)

²正会員 工博 三井建設株式会社土木事業本部土木技術部 (〒261-0023 千葉市美浜区中瀬 1-9-1)

³正会員 株式会社工藤設計事務所 (〒166-0011 東京都杉並区梅里 1-19-12)

⁴フェロー会員 Ph.D 工博 京都大学教授 工学部地球工学科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

大口径・大深度山岳立坑の坑底連接部においてNATMが採用された。その設計・計測方法を紹介するとともに、計測結果に基づいて設計手法の妥当性と地山挙動の評価をおこなった。その結果三次元有限要素法や各種原位置・室内試験を利用した設計手法の妥当性と計測の有効性が確認された。また立坑におけるショートステップ工法とNATMは力学的に本質的な違いがないこと、一次覆工の変形により壁面近傍の一部が安定化すること、連接部では立坑壁面から数m手前で水平坑の変位が最大になり、水平坑側壁への荷重増加が大きいこと、などの知見を得た。

Key Words : vertical shaft, junction, design, field measurement

1. はじめに

近年道路トンネルの長大化にともなって、換気用立坑の大型化、大深度化が進んでいる。また地下揚水発電所や高レベル放射性廃棄物処分場のアクセス立坑など大規模山岳立坑の需要は今後とも少なくないと考えられる。

従来山岳立坑は、主に厚肉の場所打ちコンクリート支保を用いたショートステップ工法が一般的であった。しかし近年では吹付けコンクリートとロックボルトを主要な支保メンバーとした、いわゆるNATMの採用例が山岳立坑の分野でも増えつつある^{1), 2), 3)}。

山岳トンネルにおいては、種々の計測を実施してその結果を設計施工にフィードバックすることがNATMの根幹をなすと言っても良い。ところが立坑NATMにおいては標準的な計測項目はおろか、計測方法すら一般化されていない。また立坑周辺の地山挙動は水平トンネルとは根本的に異なることが予想されるが、大深度山岳立坑掘削時の地山挙動を明らかにした報告は少ない^{4), 5)}。山岳立坑一般について掘削時の挙動を評価するためには、本来水平トンネルのように数多くの計測結果を収集してその結果を総合的に比較検討することが望ましい。しかし山岳立坑における計測結果が公開されている例は水平トンネルと比較して極めて少ないため、数少ない計測結果をもとに議論を進めざるを得ない。

本報で紹介する山岳立坑は大部分がショートステップ

工法により施工されたが、坑底部付近は立坑・水平換気坑・水平水抜坑の3方向連接となるため、吹付けコンクリートとロックボルトを用いたNATMが採用された。

これまでに坑底連接部の設計手法と計測の概略が報告されているが^{6), 7), 8)}、本報では各種原位置試験と三次元有限要素法解析を援用した連接部設計方法、各種現場計測の方法と計測結果を詳しく紹介する。さらに事前の設計段階における三次元有限要素法解析では表現できなかった掘削過程や計測によって明確になったゆるみ領域などを考慮した事後解析と、計測結果とを比較することで、立坑ならびに坑底連接部の地山挙動に関して考察をおこなった。

2. 安房トンネル換気立坑の概要

安房トンネル換気立坑は、全長4,350mの道路トンネル中間地点に設けられた仕上がり内径7.5m深さ450.7mの大規模山岳立坑である。

地質は図-1に示すように、チャート・粘板岩を主体とし一部に砂岩・石灰岩を挟む在来濃帶の中・古生層である。全体的に亀裂は多いが比較的堅固で、熱水や火山性ガスの影響は生じていない。ただしボーリング調査の結果、坑底付近を含む4ヶ所では破碎帯をともなった比較的脆弱な地質が予想された。湧水は一時1.0m³/minを

深度 (m)	岩質	地質状況	深度 (m)	覆工(cm)		支保工	備考
				一次	二次		
0~100	砂岩	破碎著しく縞状コア やや風化する。 コアは柱状～縞状	5~100	30		H12580.75	ショートステップ
			20~50	30		H12580.75	
100~200	チャート	部分的に破碎も、一般に硬質 破碎が寄り	50	30		H12581.50	
			84				
200~300	石灰岩 砂岩 チャート 粘板岩 互層	一部破碎するが、 岩質は非常に硬質	109	40	30	H12581.50	
			123	50	30	H12580.75	
300~400	チャート	破碎著しくコア採取不能	184	40	30		
			214	50	30	H12580.75	
400~450	粘板岩 チャート 互層	棒状コア主体できわめて堅硬	289	40	30		ショートステップ
			318	50	30	H12580.75	
450	粘板岩	破碎されコア採取不能部あり 岩質は硬質	349	40	30	H12581.50	
			419	40	30		
450		破碎されコア採取不能部あり 岩質は硬質	432	50	30	H12580.75	
			450	20	90	H15081.50	カウグメント4m

図-1 地質概要と立坑の設計支保パターン

越えたが、水抜ボーリングを通じて坑底の水抜坑へ排出可能な量であった。

立坑底では図-2に示すように水平換気坑と水抜坑がそれぞれ直角に合流する三方向連接構造をなす。連接部附近では事前の水抜ボーリングや地下換気所施工時の切羽観察によって地山状況は良くないと判断された。また地下深部に位置することから偏圧成分を含んだ大きな初期応力下に置かれていることが予想された。

本立坑は坑底部付近を除いてショートステップ工法で施工された。ショートステップ工法とは、一掘進長を1.2~1.5mと比較的短くとり、穿孔・発破後直ちに型枠降下して一次覆工コンクリートを打設する工法である。坑壁の露出を少なくすることにより地山のゆるみを最小限に抑制できる工法であり、我が国の立坑掘削の標準工法とされる。支保構造は一次覆工コンクリート厚を40cm、50cmとした支保パターンを基本とし、地質状況に応じてH-125のリング支保工を1.5mないし0.75mピッチで適宜導入するものである。二次覆工はt=30cmの無筋コンクリートが採用されている。

三方向連接をなす坑底部18.05mでは、掘削形状に対する自由度の高い吹付けコンクリートとロックボルトを主体としたNATMが採用された。この区間では同時に各種計測を実施した。複雑な掘削形状や予期せぬ地山条件の変化に起因する地山の不安定化に対し、計測結果を支保設計や施工に即座にフィードバックするNATMの考え方を採用して同区間の安定を担保することを意図したものである。

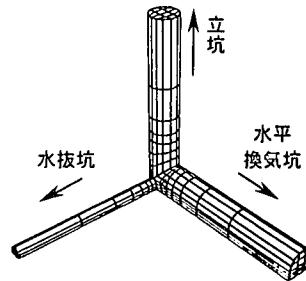


図-2 立坑底連接部概要

3. 坑底連接部のNATM設計・計測

(1) 設計・計測の考え方

山岳立坑の標準工法とされるショートステップ工法は厚肉の一次覆工コンクリートの高い剛性で地山荷重に対抗する工法である。一次覆工コンクリートには一般に30cm~50cmの厚さが採用されているが、ほとんどの場合詳細な力学的検討はなされていない。一方薄肉の吹付けコンクリートとロックボルトを主要な支保メンバーとしたNATMでは、水平トンネルの支保設計を参考しているケースが多い。たとえばトンネル標準示方書¹⁾では、立坑の支保設計は水平トンネルの設計に準ずるとし、立坑の特殊性を考慮して水平トンネルに比べて支保部材を1~2ランク上げて設計するものとしている。

いずれの工法とも支保設計は一般に実績に基づき、かつかなり安全側の設計がなされている。これは切羽通過後では追加の補強工が困難であるといった施工上の特殊性によるものであるが、立坑周辺の力学的挙動、特に支保構造に作用する荷重条件が明確にされていないために力学的検討が難しいことも一因となっていると考えられる。

当該立坑では坑底連接部においてNATMが採用されたが、前述のように地質条件や初期応力に関してかなり厳しい条件が予想されたため、従来のように実績だけによる設計法では不十分であると判断された。そこで設計施工の各段階において、三次元有限要素法を用いた数値解析、岩盤物性と初期応力を求める原位置・室内試験、および現場計測を実施し、これらの結果を用いた設計と構造物の安定性評価をおこなった。

立坑のNATMも水平トンネルにおけるNATMと同様にある程度の変形を許容しつつ地山自身の耐荷力に期待するという設計思想に則っていると考えられる。したがって各種計測を実施してその結果を設計施工にフィードバックすることは、実績から設計された支保構造の健全性評価や妥当性確認のためにはぜひとも必要であると考えられる。特に当該立坑連接部のように複雑な掘削形状を有する構造物の場合は予期せぬ地山条件の変化が施工の安全性ならびに構造物の安定性に及ぼす影響が大きいた

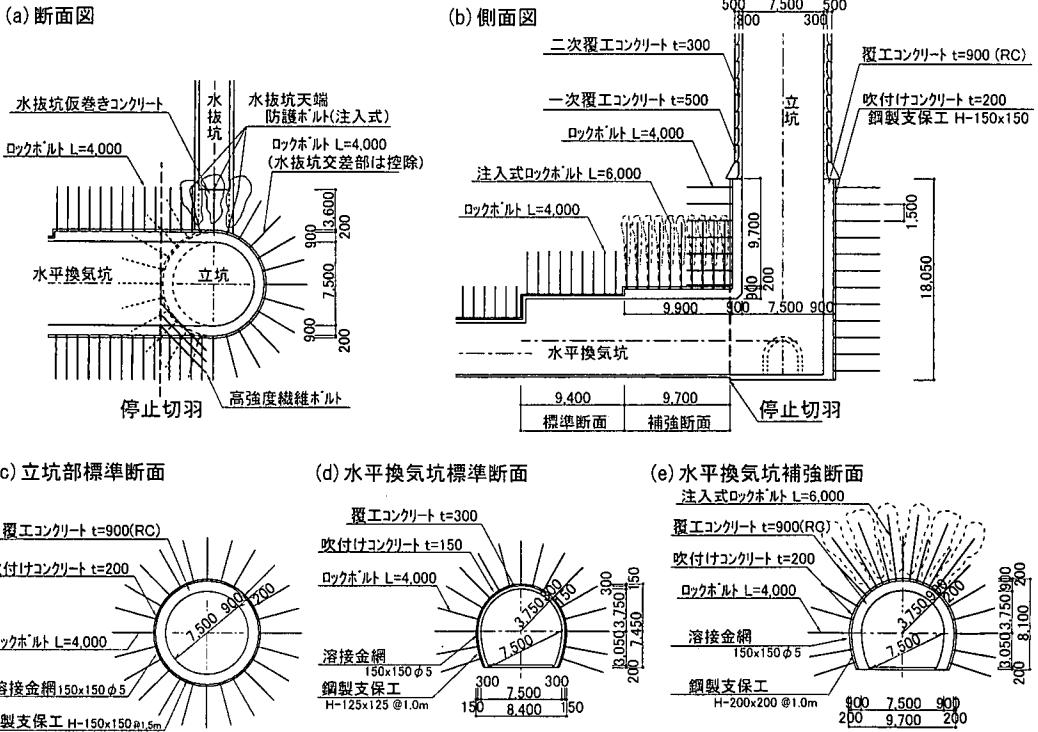


図-4 立坑底連接部の支保構造

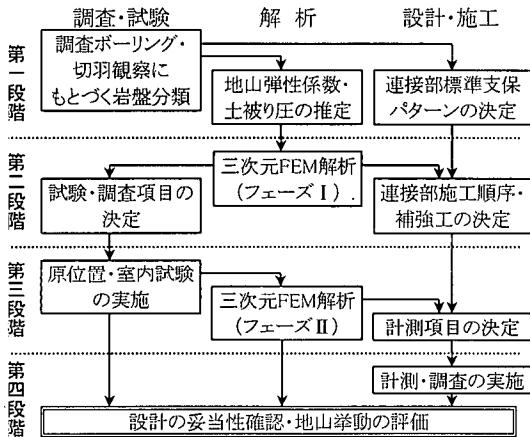


図-3 試験、解析、計測の流れ

めに計測の重要性は増す。さらに立坑は施工例が少ないこともあり、計測結果から立坑周辺地山の挙動を評価することは今後の支保設計の合理化につながるものと考えられる。

(2) 連接部設計の流れ

図-3に実際の設計・施工段階とこれら各種試験、解析、計測との関連を整理したフロー図を示す。以下に各段階の詳細を述べる。

a) 第1段階

第1段階では、主にボーリング結果にもとづいた岩盤分類を用いて、連接部の標準支保パターンを決定するとともに解析に用いる基礎物性値を推定した。

前出の水抜ボーリングのコアから求めた坑底連接部附近におけるBartonのQ値は0.016であった。この値と掘削径9.3mのトンネル交差部という条件で、推奨支保として厚さ150mm～200mmの金網補強吹付けコンクリートを得た⁹⁾。同様にBieniawskiのRMRは33と計算され、直径10mの馬蹄形断面トンネルの支保として、厚さ100mm～150mmの金網補強吹付けコンクリート、長さ4～5mで1～1.5m間隔のパターンロックボルト、および1.5m間隔の軽量リブを得た¹⁰⁾。

この結果と既往の施工実績を勘案し、立坑連接部の標準支保パターンを図-4(c)のように決定した。

また上記Q値およびRMRより、地山のおおよその弾性係数を5.0GPaとし¹¹⁾、コアの単位体積重量より求めた土被り圧相当の初期応力を10MPaとした。

b) 第2段階

第2段階では、当該連接部の挙動を支配する諸元を抽出し必要な試験・調査項目を選定することを目的として、三次元有限要素法解析(フェーズI)を実施した。またこの結果から連接部の施工順序、補強工を決定した。

第1段階で求めた基礎物性値を用い、ここでは連接部

表-1 三次元有限要素法解析(フェーズI) 解析ケース・解析条件

解析ケース	先行到達坑道 ^{*1}	初期応力(MPa) ^{*2}					
		σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{zx}
	立坑	-5	-5	-10	0	0	0
	立坑	-10	-10	-10	0	0	0
	水平換気坑	-5	-5	-10	0	0	0
	水平換気坑	-10	-10	-10	0	0	0
	水平換気坑	-15	-15	-10	0	0	0
解析条件		弾性係数(GPa)		ボアソン比		厚さ(mm)	
	地山	5		0.3		—	
	一次覆工コンクリート(ショートステップ区間)	14		0.167		400	
	吹付けコンクリート(立坑の坑底から18.05mおよび水平換気坑)	14		0.167		200	

*1 水抜坑は既設とし、いずれもケースでも先行させた。

*2 初期応力は引張を正で表す。XYZ軸は図-5参照。

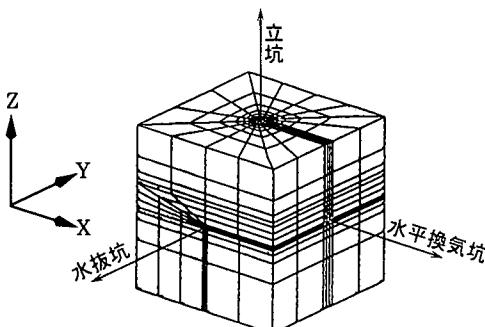


図-5 解析メッシュ外観

の掘削に顕著な影響を及ぼすと考えられる坑道掘削順序と初期応力分布をパラメータとして、表-1に示す各ケースの解析を実施した。使用した解析メッシュの外観を図-5に示す。なお各坑道は逐次掘削として掘削段階を正確にシミュレートすることが望ましいが、計算時間が膨大になることから水抜坑、水平換気坑、立坑、連接部をそれぞれ一括掘削とし、掘削時に70%，覆工時に30%の応力が解放されるものとした。その結果、以下の知見を得た。

- ・水平換気坑が先達した場合、立坑の到着によって水平換気坑天端に20MPaの最大せん断応力が、立坑壁面から約5m区間に生じる。これは円形トンネルの弾性解で予想される初期応力相当のせん断応力(約10MPa)の二倍に達する。

- ・立坑が先達した場合、水平換気坑の到着によって10～30mの高さにわたって立坑の一次覆工応力が激増するとともに、水平坑換気坑先達のケースよりも最大せん断応力増加域が広く形成される。

- ・いずれの場合も水抜坑天端では周辺に比べて沈下量が大きい。

この解析結果と施工の合理性を鑑み、水平換気坑を図-4に示す停止切羽まで先達させることとした。また同

表-2 三次元有限要素法解析(フェーズII) 解析条件

先行到達坑道	初期応力(MPa)					
	σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{zx}
立坑	-13.8	-8.1	-11.0	-1.4	1.6	-2.3
主応力は図-6を参照						
		弾性係数(GPa)		ボアソン比		厚さ(mm)
地山		15		0.2		—
一次覆工コンクリート(ショートステップ区間)		21		0.167		400
吹付けコンクリート(立坑の坑底から18.05mおよび水平換気坑)		21		0.167		200

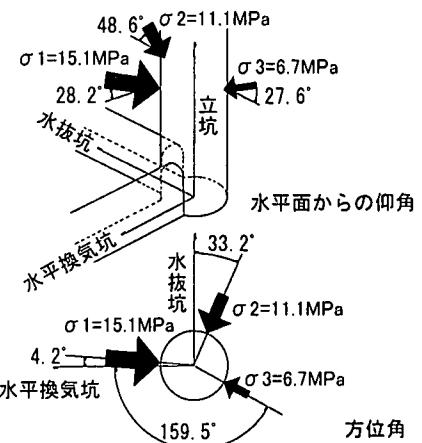


図-6 測定された初期応力(主応力分布)

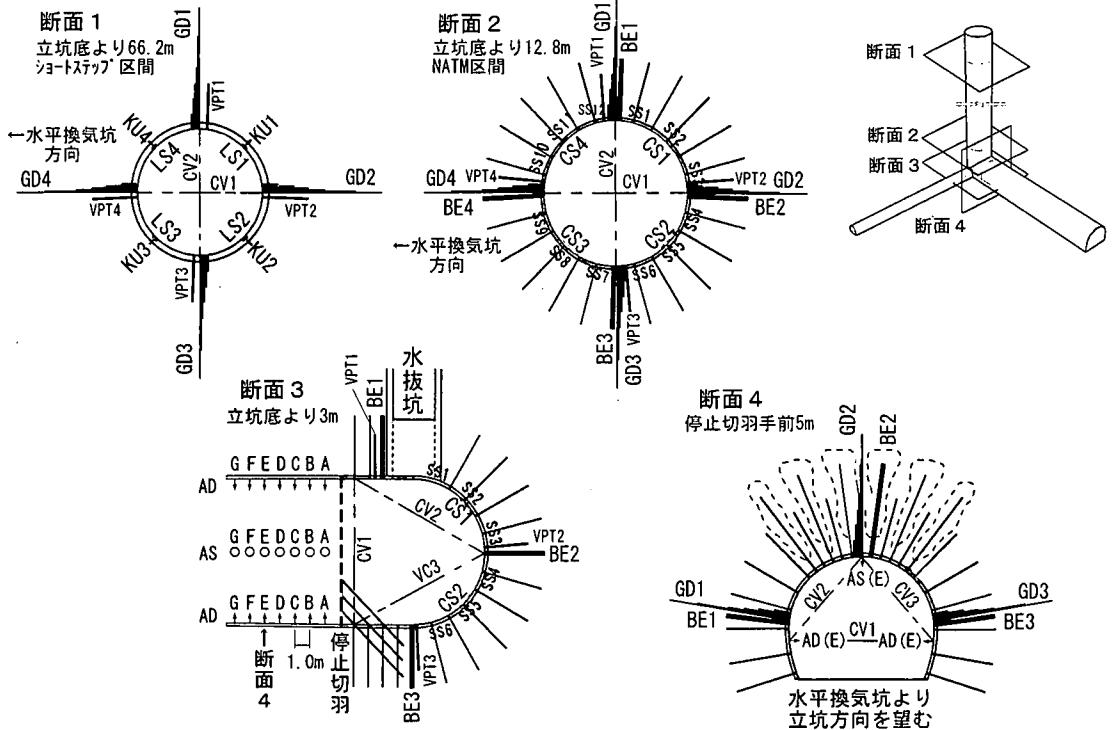
図に示されるように、水平換気坑・水抜坑の天端部分を注入式ロックボルトで補強するとともに、水平換気坑の支保構造をランクアップした。さらに水平換気坑の休止切羽から斜め前方に高強度繊維ボルトを打設して切羽補強とした。なお水平換気坑の補強範囲は1D区間(Dは立坑の掘削径、立坑掘削壁面から9.7mの区間)とした。

また側圧の変化に対して周辺地山のせん断応力が敏感に変化することから原位置の初期応力状態を把握することが必要であり、さらに信頼性を高めるために孔内載荷試験と多段階三軸圧縮試験を実施して地山の強度・変形特性を調査することとした。

c) 第3段階

第3段階では、前段階の知見をもとに原位置と室内における試験を実施した。またその結果(表-2、図-6)を基に再度三次元有限要素法解析(フェーズII)を実施した。解析メッシュはフェーズIと同一とし、フェーズIの結果を受けて水平換気坑を先達させることとした。また掘削過程はフェーズIと同様に水抜坑、水平換気坑、立坑、連接部をそれぞれ一括掘削とし、掘削時に70%，覆工時に30%の応力が解放されるものとした。

この解析では実際の掘削過程、ロックボルトや注入などの支保構造、破碎帯などの地質構造、掘削によるゆる



CV:内空変位, GD:地中変位(測点深度は1m, 2m, 3m, 4m, 6m, 8m), LS CS:コンクリート応力, BE:ロックボルト軸力(測点深度は0.5m, 1.5m, 2.5m, 3.5m, 4.0m。ただし断面4のBE2のみ深度6.0mも測定), SS:鋼製支保工応力, KU:コンクリートせん断変位, AD:水平絶対変位, AS:天端沈下, VPT:真空透気試験(ゆるみ領域調査)

図-7 各計測断面における計器配置

みなど多くの省略・単純化がなされており、得られる結果は限定的なものにならざるを得ない。このため計測値との直接比較や支保量の決定といった定量的な議論は困難であるが、測定された地山物性と初期応力に対して三次元的な形状を持つ接続部周辺地山の挙動を概略評価し、先に決定した補強工の妥当性を確認することは可能であると考えた。解析の結果、以下の知見を得た。

- ・先達していた水抜坑ならびに水平換気坑の変位は、立坑到達によって急増する。特に水抜坑側の変位が大きい。
- ・水平換気坑天端の変位は立坑との境界より1m程度離れた位置で最大となる。
- ・立坑到達後水平換気坑周辺地山に発生するせん断応力は、立坑壁面から4m付近までは天端で10MPa以上と比較的大きいが、最大せん断応力域が徐々に肩部へと遷移し約9mで立坑到達による影響がほとんど無くなる。

以上より、水抜坑天端と水平換気坑の補強は合理的であり、第2段階で設定した補強範囲（立坑壁面から9.7m）は妥当であると判断された。

d) 第4段階

第4段階では、実施工と現場計測を実施し、設計の妥当性を検証するとともに、実際の地山挙動の評価をおこなった。現場計測の詳細は次節で述べる。

(3) 現場計測

a) 計測目的と計測項目

計測の主目的は設計の妥当性・構造物の健全性評価であり、さらに施工中の安全管理にもその結果を利用した。

前節で述べた第3段階の結果を受けて、計測位置・計測項目を図-7のように決定した。各計測断面は上述の目的のほかに各施工段階において以下のような判断材料を提供する。

- ・断面1：NATMへの工法変更の可否の判断。
- ・断面2：接続の可否の判断。
- ・断面3：接続部における支保構造の安定性判断。
- ・断面4：水平換気坑における支保構造の安定性判断。

立坑における計測では、その特殊性ゆえに水平換気坑の計測方式をそのまま適用することが困難な場合がある。以下に、主に内空変位測定に関して述べる。

立坑では切羽の進歩により計測断面が相対的に上昇するため適当な足場が必要であることと、施工機械・ワイヤーロープなどの障害物が多いことから、コンバージェンスメジャーを用いた内空変位測定はきわめて困難である。非接触で内空変位を測定する方法はいくつか考案されている¹²⁾が、水平トンネルで一般的に用いられる光波測定器は伏角（仰角）が大きいと精度が落ちる、超音波

表-3 壁面変位の管理値と対応

ショットステップ*	NATM	管理レベル	対応と対策
5.7mm	6.5mm	レベルI	地山は弾性状態にあると考えられる。現状パターンを継続してよい。
		レベルII	収束傾向チェックし、必要ならば増しボルト、増し吹付けコンクリートを考慮する。
20.3 mm	23.3mm	レベルIII	トンネル掘削に困難が発生するとされるレベルである。必要なら切羽を止めて対策、今後の施工法を検討する。

表-4 支保部材荷重の管理値と対応

項目	管理値	対応と対策
ロックボルト軸力	ボルト耐力以下 (176 kN以下)	本数・長さの検討
コンクリート応力	基準強度/4以下 (4.5N/mm ² 以下)	増し吹きまたは 増しボルトの検討
鋼製支保工応力	140N/mm ² 以下	増し吹きまたは 増しボルトの検討

用いた測距器もmm単位の精度は確保できないなどの問題が残る。またインバー線を内蔵したゴムチューブを立坑壁面に取り付けて円周方向の収縮量を測定する、あるいは光ファイバーによるひずみ計測を同様におこなうなどのアイディアがあるが実現されてはいない。

今回はコンバージェンスマジャーを用い、吊り足場を上下することで可能な限りの測定をおこなうこととした。なお立坑掘削に先だって掘削が完了し測定空間が確保されている水平換気坑では、立坑掘削の影響を詳細に把握することを意図して、天端沈下と側壁の絶対変位を、光波測定器を用いて1m間隔で測定することとした。

他の項目はすべて電気式センサを用いた自動計測とし、できるだけ高頻度の計測をおこなった。

b) 計測管理

立坑を含む接続部の計測管理は、水平トンネルと同様の手法を用いた。変位量に関しては直接ひずみ評価法¹³⁾により表-3に示す壁面変位の管理基準を決定した。内空変位測定には上述の困難が予想されたことから、変位計測は地中変位測定を主体とし、内空変位は参考値として位置付けた。

支保部材の荷重・応力に関しては、各々の耐力より表-4のように決定した。

計測頻度は、電気式のものについては設置当初はなるべく密に3~6時間ピッチ、その後1回/日~1回/週とした。内空変位・天端沈下は1回/日~1回/週とした。

4. 計測結果と地山挙動評価

(1) 立坑区間の計測結果

以下に立坑区間の断面1と断面2における計測結果について述べる。

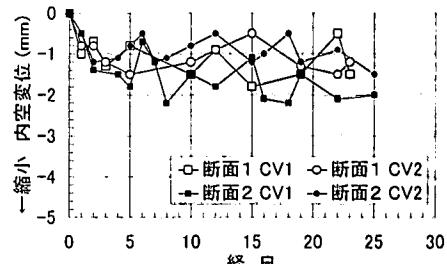


図-8 立坑部における内空変位経時変化

a) 変位

断面1は極めて堅硬なチャートの中に位置し、ショットステップ区間でも最も軽微な支保構造（一次覆工厚40cm、鋼製支保工なし）が採用されている。一方断面2は破碎帯を含む粘板岩層に位置し地質は脆弱である。断面2ではH-150の大型鋼製支保工が採用されているがショットステップ区間に比べて支保剛性は相対的に小さく、比較的大きな変形が予想された。

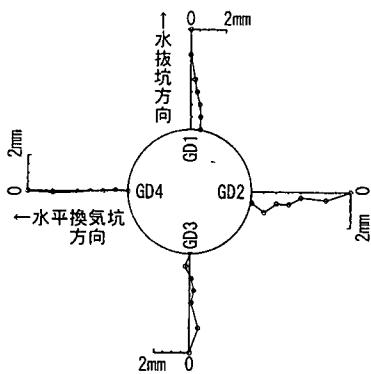
図-8に立坑区間の断面1および断面2における内空変位経時変化を示す。内空変位はいずれの断面でもほぼ2mm以下と非常に小さい。図-9に同断面の地中変位分布（収束値）を示す。両断面とも水平坑道と逆側で変位が大きいが、最大でも1.5mm以下と変位量としては小さい。断面2のほうが変位量は若干大きいが、地質状況の違いにもかかわらずその差はわずかである。最大の変位を示す位置は壁面から1~2m奥にある。壁面での変位はおおむね1mm以下で、内空変位と整合的である。位置による違いは地質条件の違いに起因すると推定される。

図-10に最も大きな変位を示した測線の経時変化を示す。いずれも切羽通過後10m程度で収束に向かう。ただし断面2に比べて断面1がより早く収束する傾向にある。

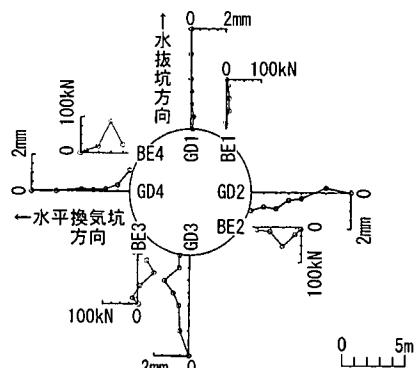
b) 荷重

表-5にコンクリート応力の最終値を示す。ショットステップ区間の断面1では断面2よりも応力値が大きく、最大値は6.5N/mm²と、断面2の最大値3N/mm²の2倍程度である。この値は管理基準値の4.5N/mm²を超えていて、有害なクラックなどは観察されなかつたので特に対策は施していない。また経時変化を図-11に示す。内空変位と同様にいずれも切羽通過後10m程度で収束に向かうが、断面2に比べて断面1がより急激に収束する傾向にある。またいずれの断面でも、切羽が3m程度進行したところで一度応力の緩和が見られ、その後また増加に転じている。

図-9には断面2のロックボルト軸力分布（収束値）を地中変位とともに示す。軸力は最大でも86kNと管理値の約1/2にとどまっている。軸力の分布はボルト中央附近で最大を示し、ボルト長が適切であったと判断できる。また地中変位と整合的で、特に壁面近傍で変位が小さい。

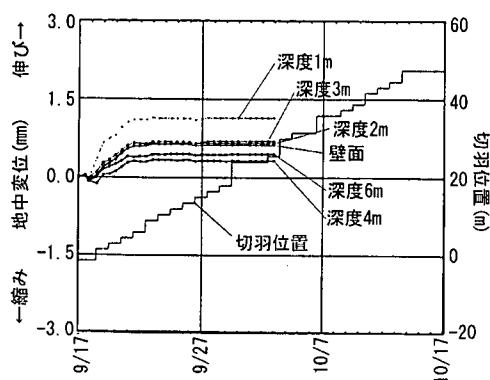


断面1 (ショートステップ区間)

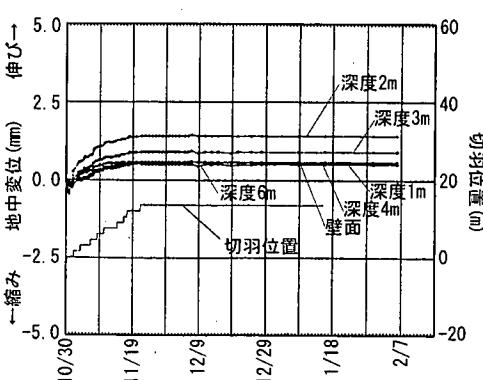


断面2 (NATM区間)

図-9 立坑部における地中変位・ロックボルト軸力分布 (最終, 伸び方向が正)

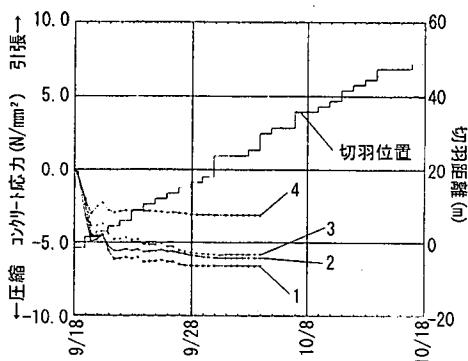


断面1 (ショートステップ区間) GD2



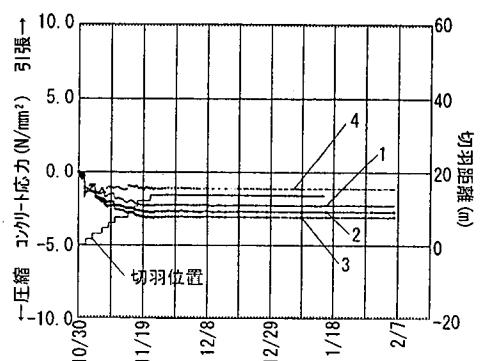
断面2 (NATM区間) GD3

図-10 立坑部における地中変位経時変化 (凡例は立坑表面からの深さ)



断面1 (ショートステップ区間)

図-11 立坑部におけるコンクリート応力経時変化 (応力測定位置は表-5に同じ)



断面2 (NATM区間)

図-11 立坑部におけるコンクリート応力経時変化 (応力測定位置は表-5に同じ)

測線3では約50kNの圧縮力が測定されている。断面は円形であるが軸力分布は一様ではなく、地質条件の違いの影響を受けていると考えられる。

鋼製支保工応力に関しては次節、連接部に関連して述べる。

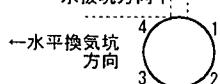
c) せん断変位

せん断変位とは、ショートステップ区間の一次覆工コ

表-5 断面1, 2におけるコンクリート応力

測定断面	1	2	3	4
断面1	-6.46	-3.06	-5.74	-5.94
断面2	-2.21	-2.65	-3.04	-1.07

(単位: N/mm², 引張が正)



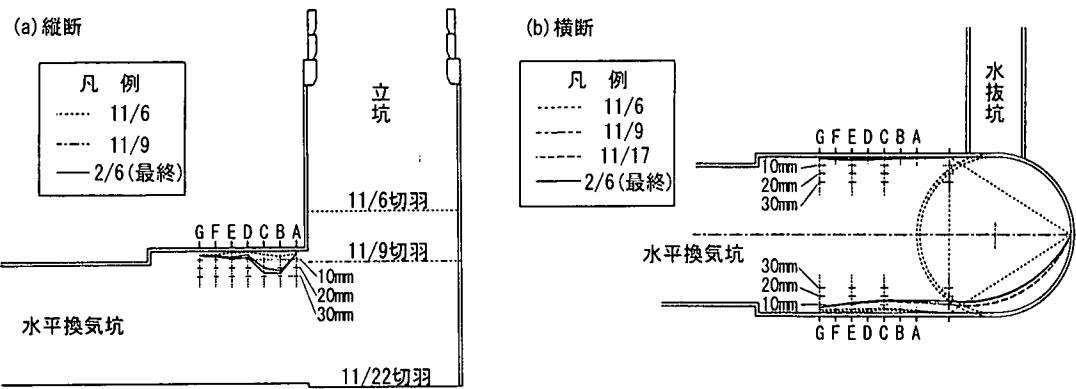


図-12 連接部水平絶対変位・天端沈下分布図（変位は実際の50倍のスケールで表現）

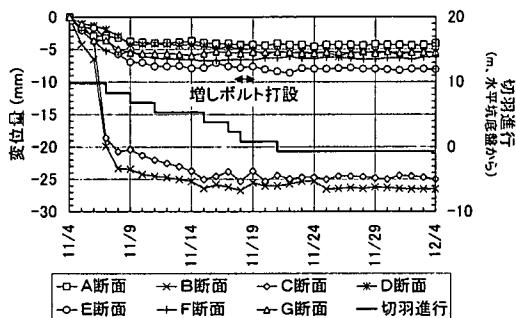


図-13 水平換気坑天端沈下経時変化（位置は図-12に同じ）

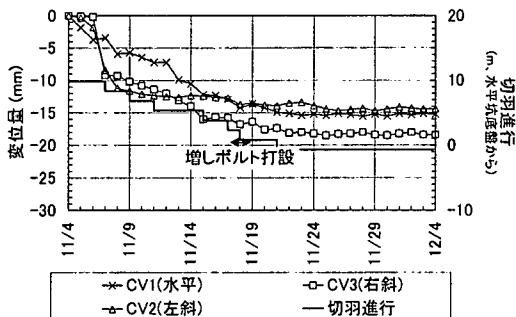


図-14 水平換気坑内空変位経時変化（C断面）

ンクリートと地山間の鉛直方向のずれを意味する。ショートステップ工法では若材令で脱型するため、NATM区間との境界部でコンクリートが地山との摩擦のみで安定することを確認する必要があったが、測定の結果そのような変位は発生しないことが確認できた。

(2) 連接部の計測結果

以下に連接部の断面3と断面4における計測結果について述べる。

a) 変位

坑底連接部では、H-125と比較して相対的に剛性の高いH-150の鋼製支保工を採用しているものの、リングが

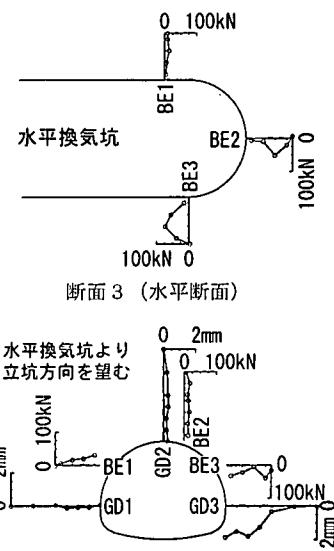


図-15 連接部における地中変位・ロックボルト軸力分布
(最終、伸び方向が正)

閉合しないために変位が大きくなることが予想された。

坑底連接部の水平絶対変位、天端沈下の分布を図-12に示す。また図-13および図-14に天端沈下とC断面における内空変位の経時変化を示す。

天端沈下の分布を見ると、交点から1.5～2.5m付近(B断面およびC断面)が最も大きく沈下し、26.5mmと26mmの沈下となっている。また側壁部の水平絶対変位では右側壁の押し出しが大きい。経時的な変化は、連接部が開口する時点(11月6日～7日)で急激に変形が生じはじめ、切羽の進行とともに変形は継続する。変位の大きいB,C断面では収束が遅く、11月18日頃までほぼ直線状に変位が増加する。内空変位にも同様な傾向が現れている。

図-15の最終地中変位分布(断面Eにあたる)に示されるように、右側壁では深さ4mより手前で変位が大き

表-6 断面3における吹付けコンクリート応力

測定断面	1	2
断面3	-4.88	-5.85

(単位:N/mm², 引張が正)

表-7 鋼製支保工に発生した応力

	測定位置	応力	測定位置	応力
断面2	1	-71.0	7	-43.1
	2	-78.5	8	-62.8
	3	-47.4	9	-75.4
	4	-62.6	10	-70.9
	5	-59.6	11	-51.1
	6	-55.6	12	-58.9
断面3	1	-40.9	4	-62.6
	2	-50.6	5	-15.4
	3	-50.5	6	-24.2

(単位:N/mm², 引張が正)

い、内空変位や天端沈下に収束傾向が見られなかつたこともあり、対策工として水平換気坑右側壁に増しボルト(L=6m, 1断面当たり2本)を打設した。その結果変形は収束に向かつた。また変位量自体は1mm程度と小さいものの断面4の天端では立坑接近にともないとも下がり的な挙動が観測された。

b) 荷重

表-6に示す断面3の吹付けコンクリート応力は4.8~5.9N/mm²と大きく、断面が閉合している断面2の倍以上の値である。この値は管理基準値の4.5N/mm²を越えているが、クラックなどの異常を呈することなしに収束した。

最終状態のロックボルト軸力分布を図-15に示すが、変位と同様に水平換気坑右側壁の軸力が大きい、坑底からわずか3m上にある断面3においても70kNを超える軸力が発生している。断面4の測線3では3.5m~4m位置でも軸力が発生しており、ロックボルト長の不足を示す結果である。

表-7に断面2および3の鋼製支保工応力を示す。いずれも応力レベル的には管理基準値の1/2~1/3程度に止まっている。しかしその分布状態は、完全に円形な断面2においてすら均等ではない。鋼製支保工応力は断面2、断面3とともに同レベルにあつた。

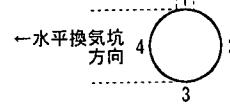
c) ゆるみ領域

立坑の長期安定性を評価するため、完成形状において真空透気試験¹⁴⁾によるゆるみ領域評価を実施した。真空透気試験は、ボーリング孔中で実施する一連の吸引式透気試験から岩盤内の透気係数分布を求め、透気係数の相

表-8 ゆるみ領域の分布(掘削面からの深さ)

測定断面	1	2	3	4	平均
断面1	0.45	1.55	2.47以上	0	(1.1)*
断面2	0.45	1.85	2.05	1.15	1.4
断面3	2.05	2.10	0.85	—	1.7

(単位:m)



*測線3は2.47m以上だが仮に2.47mとした時の平均

→水平換気坑 方向 4

3

2

1

→水平換気坑 方向 10

3

2

1

→水平換気坑 方向 9

4

3

2

1

→水平換気坑 方向 8

5

4

3

2

1

→水平換気坑 方向 7

6

5

4

3

2

1

→水平換気坑 方向 11

12

11

10

9

8

7

6

5

4

3

2

1

→水平換気坑 方向 12

1

→水平換気坑 方向 1

1

表-9 軸対称有限要素法解析の条件一覧

ショートステップ			
	弾性係数 (GPa)	ボアソン比	厚さ (m)
地山	15.0	0.2	—
ゆるみ領域	1.5 ^{*1}	0.35 ^{*1}	1.1
一次覆工コンクリート	21	0.167	0.4
NATM			
	弾性係数 (GPa)	ボアソン比	厚さ (m)
地山	15.0	0.2	—
ゆるみ領域	1.5 ^{*1}	0.35 ^{*1}	1.4
吹付けコンクリート+ 鋼製支保工(H-150)	16.6 ^{*2}	0.167	0.2
初期応力(MPa)			
σ_x	σ_z	τ_{xz}	σ_θ
11.5	10.5	0	10.5

*1 パラメトリックスタディにより決定(これ以外は条件固定).
 *2 吹付けコンクリートと鋼製支保工の弾性係数を断面積で比例配分.

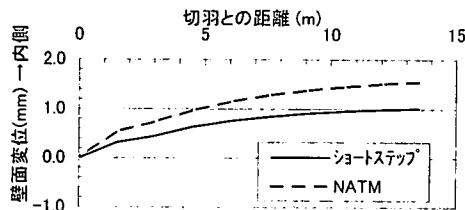
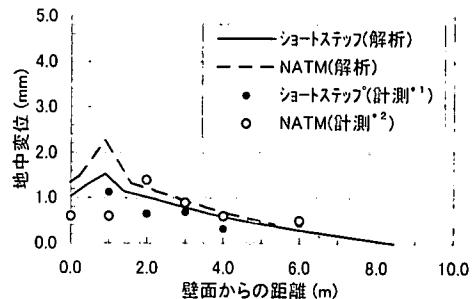


図-16 軸対称有限要素法解析結果 (壁面変位)

- 立坑部の考察であり形状が軸対称である,
- コンクリート応力の緩和現象はショートステップ・NATMともにほぼすべての計測点で観測されており(図-11)、当立坑では普遍的な現象であると推定される,
- 三次元的不均一性を考慮するには地質構造・ゆるみの鉛直方向の分布など不確定要素が多くある,
- といった理由から、ここでは計算量の少ない軸対称有限要素法解析を採用し、逐次掘削解析により掘削過程を忠実に再現することとした。

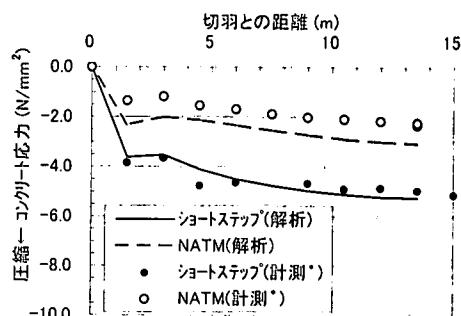
解析はショートステップ工法、NATMそれぞれについて実施した。解析条件を表-9に示す。地山は均質な線形弾性体とし、変形係数は事前解析と同一とした。ゆるみ領域は測定結果(表-8に示す平均値)を用いて計測結果と合うように変形係数を健全地山の1/10と決定した。値はショートステップとNATMで同一とした。また一次覆工コンクリートの弾性係数は一定とし、ロックボルトは省略した。解析領域は上下側方とともに掘削径の5倍とした。解析は一様の初期応力を与えた後、40m区間を掘削(解放率70%)、一次覆工打設(解放率30%)、以降は逐次掘削とし、1.5m区間の一次覆工打設と同時に直下の1.5m掘削をおこない、これを10回繰り返すこととした。

なお比較の対象とした計測値は、コンクリート応力に関しては各断面とも4測点の平均値、地中変位に関しては前述の特徴を最も良く表している測線とした。



*1 NATMの計測値は断面2 GD3
 *2 ショートステップの計測値は断面1 GD2

図-17 解析値と計測値の比較 (地中変位分布)



* 計測値は4測点の平均を示す

図-16は壁面変位の経時変化である。変位を抽出した位置は実際の内空変位測定位置と同様、1段工区間の中間位置としている。また横軸には切羽距離をとっている。変位は切羽距離10m程度でほぼ収束し、その値はショートステップで1.0mm、NATMで約1.5mmである。

図-17は壁面変位抽出位置と同じ断面の水平方向変位分布(最終値)である。壁面から1m程度奥で変位の最大値を示す。変位量はNATMが2.4mmと、ショートステップより若干大きい。変位量、変形モードは計測結果と概ね一致している。

図-18にコンクリート応力の経時変化を示す。解析値は円周方向応力である。ショートステップの解析値は計測値とよく一致している。またNATMではロックボルトを省略したことによる影響が若干大きくなっているが、傾向は合致している。最終値はショートステップでNATMの2倍程度の約5N/mm²であり、計測値に現れた切羽進行にともなう応力の緩和現象が良好に表現されている。

さてこれらの計測および解析結果を見ると、ショートステップ工法、NATMともに地山は同じような変形挙動を示していることがわかる。ただ一次覆工の剛性差によってNATMでは変形量が約1.5~2倍となり、一次覆工に発生する応力が約1/2となっている。したがって硬岩である程度の変位が許容される場合には、地山の安定が損なわれない限り、薄肉のライニング構造を持つNATMは

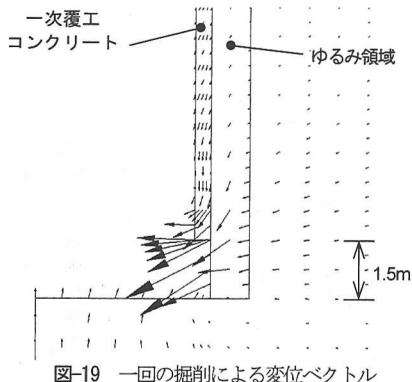


図-19 一回の掘削による変位ベクトル

力学的により合理的な支保構造であるといえよう。ただし変位を許容することは壁面近傍のゆるみを助長することにつながる。岩石ブロックの抜け落ちなど不連続面に起因する不安定要因に対してはキープロック解析などを用いた検討が別途必要となろう。

図-19はショートステップにおける一掘進(1.5m)時の変位ベクトルを表したものである。掘削による変形は一次覆工下端で大きく、下端に鋼製支保工を設置するのが力学的に有利であることが分かる。また一次覆工の半径方向変位は上方に向け単調に減少するのではなく、一次覆工下端から約1.5mの位置でわずかに外向きに変位、その上で再び内向きに変わるというように、波打った変形を示す。これは背面地山がゆるんでいることで反力が十分とれず、一次覆工下端が大きく内向きに変位した反動が現れたものと考えられる。円形の一次覆工は外向きに変位すると円周方向に引張ひずみが生じる。図-18のように円周方向のコンクリート応力が一時やや緩和されるのは、このような変形モードによるものと推定される。

一方、周辺の地山はいずれも内向きの半径方向変位成分を持つ。したがって一次覆工背面、特にゆるんで剛性の低下した地山は、内向きに変位することで円周方向に圧縮されるとともに外向きに変位する一次覆工に押され半径方向にも圧縮されることになる。すなわち、掘削により一旦ゆるんだ一次覆工背面地山が、上述した一次覆工の変形によってゆるみ領域内においても効果的に三軸状態に保たれているものと考えられる。このような一次覆工とゆるみ領域の総合作用による半径方向の変形モードは地中変位計測結果にも現れており、立坑の安定性を向上させる一因となっているものと考えられる。

NATM区間の計測断面2はショートステップ区間の計測断面1に比べて地質が脆弱なため大きな変形が予想された。しかしゆるみ領域こそ若干大きかったものの、実際に計測された変位は前述のようにショートステップ区間と大差ないレベルであった。これは一部には上述の総合作用の働きと見ることもできよう。

この事後解析では事前の三次元解析と異なり掘削過程

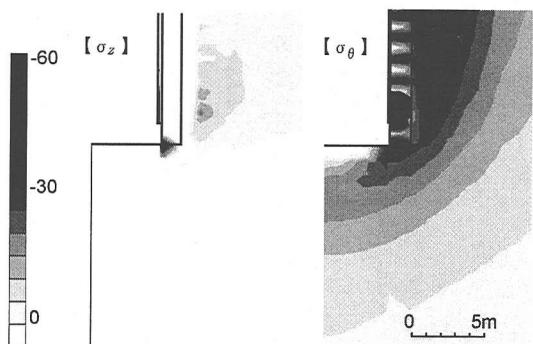


図-20 $\sigma_z \cdot \sigma_\theta$ 増分分布 (単位: N/mm²)

とゆるみを考慮し、立坑掘削にともなう実際の現象をより詳細に評価できたものと考えられる。

(2) 連接部

本立坑の坑底連接部では、水平換気坑右側壁の変位が大きいことを計測によって把握し、有効な対策を実施して安定を保つことができた。

この予想外の変位増大は右側壁の不良地質が主因と判断できるが、立坑と水平坑の連接という特殊な条件の影響も考えられる。水平トンネル同士の分岐・合流の場合、支保構造の一部欠損やゆるみ荷重に加え、後から掘削するトンネルの側壁近傍における円周方向応力増加が既存トンネルに対して鉛直方向の荷重として作用するために、鉛直方向の補強が重視される。一方トンネル軸方向の応力変化はほとんど意識されない。これに対して水平坑に立坑が連接する場合、立坑掘削による円周方向応力増加が既存水平坑に対して側壁の水平方向荷重として作用し、立坑軸方向の応力変化は鉛直方向荷重として作用するという違いがある。この場合後から掘削する立坑の円周方向応力増分と軸方向(鉛直方向)応力増分を比較することが求められる。立坑掘削において両者を比較した場合、円周方向応力増分が大きいと予想されるが、これは図-20に示す軸対称解析結果からも確認できる。

当工事では連接にあたって事前解析の結果と施工の安全性を考慮して水平坑の天端補強を重視した。しかし水平坑が待ち受ける場合には、上記のように水平坑側壁に大きな水平方向荷重が加わる可能性があり、側壁の補強も重要であることを示唆している。

水平換気坑天端沈下に関しては、事前の三次元解析では壁面から約1mの位置で最大の沈下を示すことが予想された。しかし実際には立坑壁面から1.5~2.5m手前で最大の沈下が生じた。変形のモード自体は同じであるが、位置を正しく予想できなかった。

今後は、地質状況、補強工も含めた支保構造、施工過程等を考慮した連接部の三次元事後解析を実施し、各因子の影響評価等、事前解析の予測精度向上とより合理的

な支保設計に向けた各種検討をおこなうことが必要であると考える。

6. おわりに

本立坑の大部分はショートステップ工法により施工されたが、坑底部付近は複雑な連接構造をなすために吹付けコンクリートとロックボルトを用いたNATMが採用された。本報ではその設計手法を紹介し、また坑底連接部付近で実施した現場計測の方法と結果を述べた。

実施工においては、

- ・三次元有限要素法解析や各種試験に基づいた設計の妥当性が計測によって確認できた。
- ・計測結果を実施工にフィードバックすることで、連接部において有効な対策を適切に導入することができ、NATMの有効性が明らかとなった。

また立坑ならびに坑底連接部特有の地山挙動に関して以下のような知見を得た。

- ・立坑ではショートステップ工法、NATMとも地山は本質的に同様な変形挙動を示す。したがってNATMの薄肉ライニング構造はより合理的な支保構造であるといえる。
- ・立坑の掘削により一次覆工下端は大きく内側に変位し、やや上の位置で若干外向きに変位する。この挙動が地山を効果的に三軸状態に保ち、立坑の安定性を向上させる。
- ・立坑と水平坑の連接では、天端のみならず側壁の補強も重要である。

立坑の断面が大規模化・複雑化している現在、NATMによる立坑の施工が増えてくるものと考えられる。本報がその一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書[山岳工法編]・同解説, p270, 1996.
- 2) 竹内修、福島晴夫：扁平立坑をNATMで掘る、トンネルと地下, vol.15, No.10, pp.15-22, 1984.
- 3) 糸川健児、工藤恭久、横井義一、太田実：NATM立坑と小口径TBMで湧水激しい層群に挑戦、トンネルと地下, Vol.27, No.10, pp.851-861, 1996.
- 4) 西村哲治、山上光憲、橋本由紀夫、岡師満：立坑施工で地下発電所工事の地山挙動を予測する、トンネルと地下, Vol.27, No.11, pp.945-955, 1996.
- 5) 木梨秀雄、杉原弘造、吉岡尚也、畠浩二：立坑掘削に伴う岩盤内のひずみ変化、第48回土木学会年次学術講演会講演概要集第3部, pp.1424-1425, 1993.
- 6) 小原誠二、野村貢、木山保、山地宏志：立坑連接部の解析的設計と計測による評価、トンネル工学研究論文・報告集, Vol.6, pp.129-134, 1996.
- 7) 小原誠二、野村貢、岡野成敏、山地宏志：山岳立坑掘削時挙動に関する一考察、第1回岩盤工学シンポジウム論文集, pp.111-115, 1996.
- 8) 山田文孝、野村貢、山地宏志、木山保：大深度立坑における連接部地山挙動の評価、第28回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.139-143, 1997.
- 9) Barton, N., Lien, R. and Lunde, J.: Engineering classification of rock mass for design of tunnel support, *Rock Mechanics*, Vol.6, No.4, pp.183-236, 1974.
- 10) Bieniawski, Z. T.: Rock mass classification in rock engineering, *Proc. Symposium on Exploration for Rock Engineering*, pp.79-106, 1976.
- 11) Bieniawski, Z. T.: Determining rock mass deformability - Experience from case histories, *Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 15, pp.237-248, 1978.
- 12) 池川洋二郎、伊藤洋、大西有三：岩盤変位の遠隔モニタリング装置の開発、土木学会論文集、第624号／III-47, pp.183-190, 1999. など
- 13) 櫻井春輔：トンネル工事における変位計測結果の評価法、土木学会論文報告集, No.317, pp.93-100, 1982.
- 14) 中山昭彦、山田文孝、打田靖夫、川谷健、櫻井春輔：岩盤ゆるみ評価のための真空透気試験、土木学会論文集, No.575／III-40, pp.9-24, 1997.

(2000.11.27 受付)

DESIGN, FIELD MEASUREMENT AND STABILITY EVALUATION OF CONNECTING SECTION IN LARGE VERTICAL SHAFT

Yoshito YAMADA, Fumitaka YAMADA, Mitsugu NOMURA and Yuzo ONISHI

Shotcrete-and-rockbolts method (NATM) has been adopted around the bottom section of a large vertical ventilation shaft. It connects two horizontal tunnels and makes complex shape in this section. In this paper we have introduced a design method of NATM using three-dimensional FEM analysis and in-situ test and a method of field measurements in a shaft. According to the result of field measurement we have examined about a reliability of the design method and have discussed about a difference of support mechanism between short-step method and NATM, a distinctive deformation mechanism around a shaft and a specific behavior of ground around connecting section of the shaft.