

大深度立坑における接続部地山挙動の評価

THE EVALUATION OF STABILITY AROUND THE CONNECTING SECTION OF DEEP SHAFT

山田文孝*・野村 貢*・山地宏志**・木山 保**

Fumitaka YAMADA, Mitsugu NOMURA, Hiroshi YAMACHI, Tamotsu KIYAMA

Abo ventilation shaft had been excavated in November 1995. It has 7.5m in diameter and 450m in depth below surface, which is one of the largest shaft in Japan. This shaft connects two horizontal tunnel at the bottom, one is for ventilation and other is for drainage. This connecting section has been expected to take a complicated mechanical behavior during excavation. So we had conduct many kinds of laboratory and/or insitu test, a numerical simulation using 3-dimensional Finite Element Analysis, and field measurements in order to estimate stability of this section. This paper presents the typical mechanical behavior of such complicated connecting section.

1. はじめに

安房換気立坑は仕上がり内径 7.5m、深度 450m に達する大型山岳立坑である。その坑底部は、換気水平坑ならびに工事用の水抜坑が三方向から合流する。このように三つの異なる坑道が同一箇所で交差する場合、掘削時の地山挙動は施工順序や各空洞寸法によって支配される複雑なものになる。また、事前のボーリング調査や地下換気所施工時の切羽観察によれば、当該箇所の地質は著しく亀裂の発達した脆弱なものであることが予想され、掘削時の地山安定を保持するためには何らかの補強対策が必要であると判断された。

そこで筆者らは、原位置試験により岩盤物性を、室内試験により初期応力状態を把握したうえで、三次元有限要素法解析による数値シミュレーションを実施して必要な補強工選定を行った。また、施工中、完了後に各種試験、計測を行い実際の地山挙動を評価し、補強工の妥当性を検証した。

本報告では、その概要と、これにより得られた立体接続に関する知見を述べる。

2. 安房トンネル換気立坑の概要

安房トンネルは図-1に示すように、北アルプスを貫き飛騨と信州を結ぶ全長 4,350m の二車線道路トンネルである。安房トンネル換気立坑は、当該トンネル供用後の通行車両による排気ガス排除を目的として当該トンネル中央部に設置されるものである。立坑基地のある安房峠を通る現道（国道 158 号線）は毎年 11 月中旬から 5 月上旬まで積雪により閉鎖される。

* 正会員 三井建設株式会社土木本部土木技術部

** 正会員 三井建設株式会社技術研究所

本立坑の一般部はショートステップ工法で施工した。ショートステップ工法とは、1ステップを1.2～1.5mと比較的短くして、穿孔・発破後直ちに型枠降下して一次ライニング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、坑壁や支保工のゆるみを最小限とし、安全性を高めた工法であり、我が国の立坑掘削の標準工法とされる。立坑底では水平換気坑と水抜坑がそれぞれ直角に合流する三方向接続構造をなし、坑底から18.05mはこ

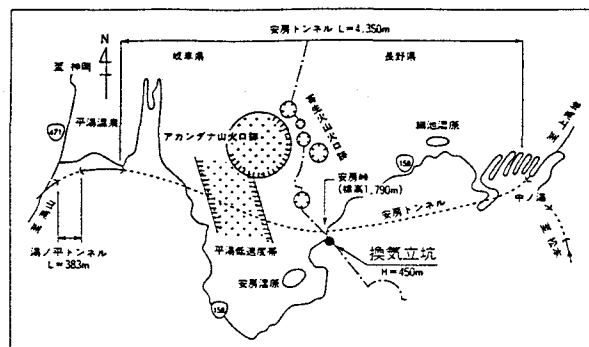
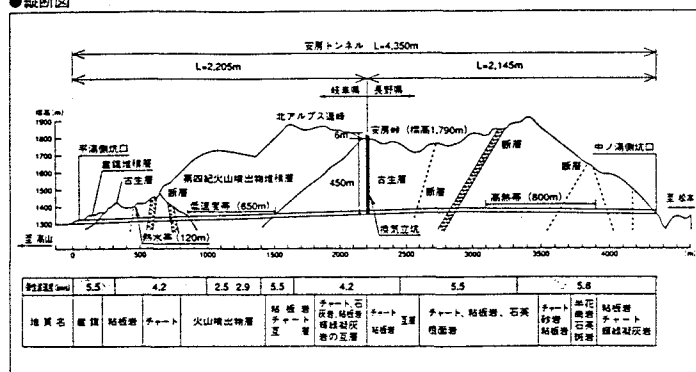


図-1 トンネルおよび立坑位置図

●縦断面



●換気立坑地質概要



図-2 トンネルおよび立坑地質縦断面図

の範囲を接続の影響部分として吹付けコンクリートとロックボルトを主体としたNATMによる施工とした。

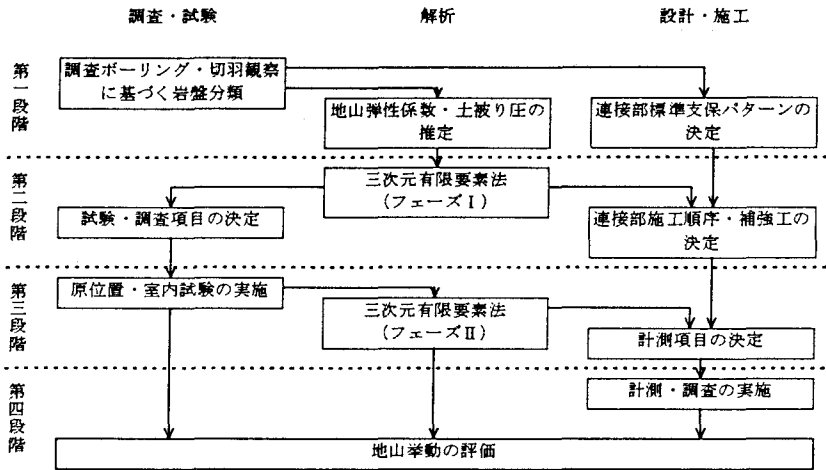
安房トンネル換気立坑を含む安房峠道路は、北アルプスの活火山、焼岳を中心とする火山地帯を横断する路であり、周囲は旧火山群が配列した急峻な山岳地形となっている。安房峠は溶岩流が古生層に接し形成されたもので、基盤岩類と火山噴出物の境界付近は湿地や窪地が存在するやや特異な地形になっている。

立坑部の地質は古生代の砂岩、粘板岩、チャートおよびその互層からなり、亀裂は多いが比較的堅固で、熱水や火山性ガス等の影響は生じなかった。湧水は一時1.0t/minを越えたが、水抜ボーリングを施工し、坑底の水抜坑より排出することで立坑施工への影響を排除することができた。図-2に水平トンネルおよび立坑の地質縦断を示す。

3. 試験・解析・計測の位置づけ

立坑工事においては、水平坑との接続部（接続部）は、鉱山、土木構造物を問わず必ず設置される。本立坑の場合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ことに加えて、造山帯の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。そこで当該工事では、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シミュレーション、岩盤物性と初期応力を求める原位置・室内試験、現場計測を実施し、これらの結果を用いた設計と安定性評価を行った。

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、接続部の標準支保パターンを決定す



図－3 試験、解析、計測の流れ

るとともに、解析に用いる基礎物性値を推定した。第2段階では、当該接続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。この解析結果によって接続部の施工順序、補強工を決定した。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、これを用いて施工時の地山挙動をシミュレートするために三次元有限要素法解析（フェーズⅡ）を実施した。第4段階では、この結果を基に現場計測を実施し、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行なった。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。

4. 試験・解析・計測の概要と結果

4・1 第1段階

水抜用に削孔されボーリングのコアを用いてQシステムによる岩盤分類を行い、接続部の標準支保パターンを決定した。またQ値より地山のおおよその変形係数を5.0GPaとし、コアの単位体積重量より求めた土かぶり圧相当の初期応力を10MPaとした。

4・2 第2段階

第1段階で求めた基礎物性値を用い、ここでは接続部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。その結果、水平坑道が先達した場合には、立坑の到着によって水平坑道天端部の地山に大きなせん断応力域が形成され、立坑が先達した場合には、水平坑道の到着によって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周辺地山にも大きなせん断応力域が形成されることが明らかとなった。この解析結果と施工の合理性を鑑み、実施工では水平工を先達させ、その天端部分を注入ロックボルトで補強することとした。

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。

4・3 第3段階

上記の一連の試験から得た地山物性値と初期応力を、表－2、図－4に示す。これを用いて接続部掘削時の挙動予測解析を実施した。その結果以下の知見が得られた。

表-1 フェーズⅠ解析ケース

先達空洞	初期応力 (MPa)				弾性係数 (GPa)		ポアソン比	
	σ_x	σ_y	σ_z	τ	地山	覆工	地山	覆工
換気立坑	5	5	10	0	5	14	0.3	0.2
換気立坑	10	10	10	0	5	14	0.3	0.2
水平坑	5	5	10	0	5	14	0.3	0.2
水平坑	10	10	10	0	5	14	0.3	0.2
水平坑	15	15	10	0	5	14	0.3	0.2

水抜き坑は既設とし、いずれのケースでも先行させた

表-2 フェーズⅡ入力値一覧

先達空洞	初期応力 (MPa)			弾性係数 (GPa)		ポアソン比	
	σ_1	σ_2	σ_3	地山	覆工	地山	覆工
水平坑	15.1	11.1	6.7	15	21	0.2	0.1

立坑一般部の変位は一樣に立坑中心へ向かうのに対し、立坑接続部では接続部中心へ向かう。同様に先達していた水抜き坑ならびに水平坑の変位は、立坑到達によってトンネル中心方向から接続部中心方向へと向きを変え、変位量も急増する。特に水抜き坑側の変位が大きい結果となった。また水平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った。地山内に発生するせん断応力で見ると、立坑到達の影響は立坑壁面から 9m 程度までに限定され、この範囲を補強することが妥当であると判断された。

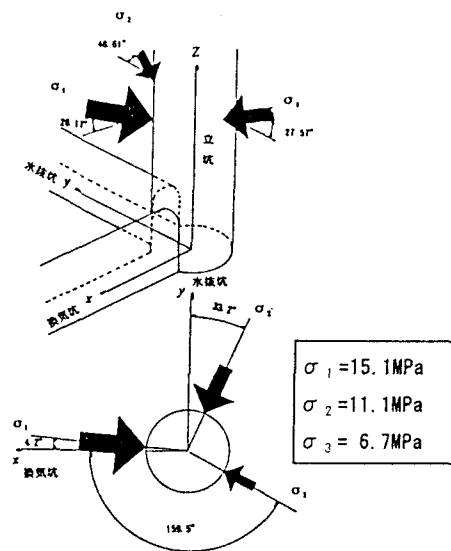


図-4 測定された初期応力分布

4・4 第4段階

第3段階の知見にもとづいて表-3に示す計測を実施した。真空透気試験は接続形状完成後のゆるみ領域分布把握のために実施した。接続部における内空変位計測結果、TD383.8m と TD437.2m における地中変位計測結果、TD437.2m と TD447m におけるロックボルト軸力計測結果をそれぞれ図-5、図-6、図-7に示す。また真空透気試験により明らかになったゆるみ領域を表-4に示す。

図-5ではフェーズⅡの解析で予想された水平坑天端の変位分布傾向は、計測結果にも現れていることが示されている。これは、立坑が掘下がる過程で接続部に縦断方向の地山アーチが形成されるためと考えられる。最大変位量は 25mm と解析結果よりも大きい値となった。

図-6、表-4からは、換気坑側を除くと地中変位、ゆるみ領域ともに接続部の影響を強く受けていると考えられる NATM 区間とショートステップ区間で大差ないレベルにある。このことから、NATM の支保構造が接続部の変形やゆるみを効果的に抑制していると言える。

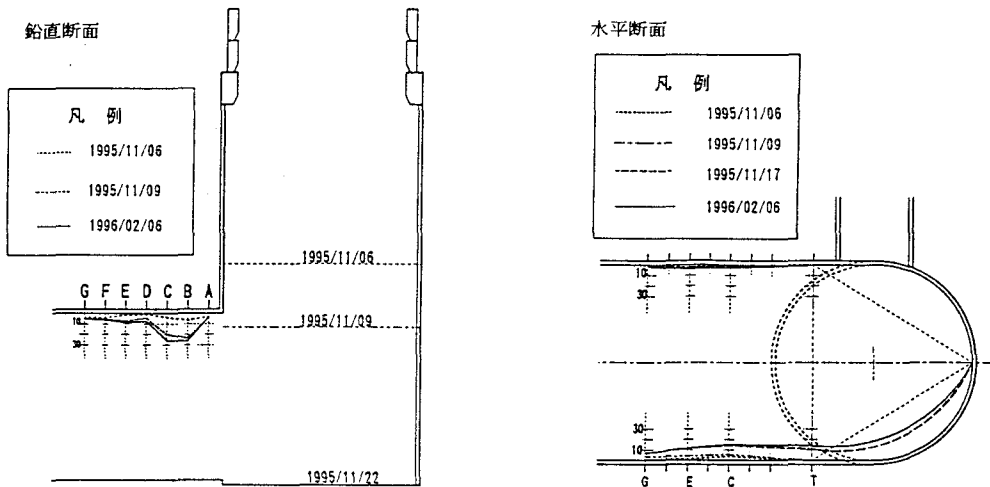
またいずれの計測結果でも、当初予測とは逆に水抜き坑とは反対側の変形が卓越する結果となった。立坑掘削時の観察では、水抜き坑の反対側に亀裂が発達しており、もともと地山性状が悪かったことから、亀裂の開口やすべりといった非弾性的な変形が大きかったと考えられる。これは事前の調査・試験時には予想できなかったことであり、当然解析にも反映されていない。均質地山を仮定した解析の限界がここにあり、事前調査の精度を高めることが必要であろう。

表-3 計測項目一覧

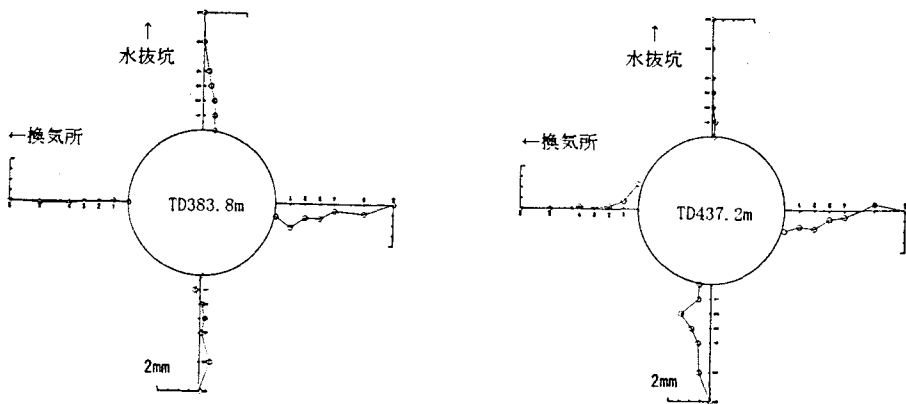
計測位置	計測項目	目的
TD383.8m (ショートステップ区間)	内空変位、地中変位、覆工コンクリート応力、覆工コンクリートせん断変位、真空透気試験	ショートステップ区間での地山・ライニング挙動を把握する。
TD437.2m (NATM区間、円形断面)	内空変位、地中変位、ロックボルト軸力、鋼製支保工応力、吹付けコンクリート応力、真空透気試験	接続影響部の NATM 区間における地山挙動を把握し、TD383.8m の結果と比較する。
TD447m (NATM区間、非円形断面)	内空変位、ロックボルト軸力、鋼製支保工応力、吹付けコンクリート応力、真空透気試験	接続時の安全性を確認するとともに、接続部分の地山挙動を把握する。
TD-5m(水平坑)	内空変位、地中変位、ロックボルト軸力	立坑接続の総論を把握する。

5. おわりに

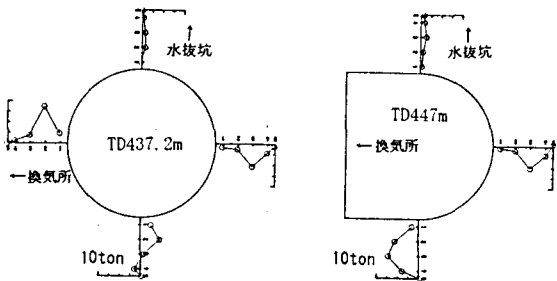
本報告では、これまであまり明らかにされていなかった、三次元的な空洞接続部の挙動を把握すべく各種試験・解析・計測を実施し、その結果をとりまとめた。今後地下空洞の高度化にともない、接続に関する問題は重要となつてこよう。本報告がその一助となれば幸いである。



図－5 接続部の内空変位分布



図－6 地中変位計測結果



図－7 ロックボルト軸力分布

表－4 ゆるみ領域分布（掘削面からの深さ）

測定位置	水抜坑側	換気坑正面	換気坑右	換気坑側
TD383.8m	45	155	247 以上	0
TD437.2m	45	185	205	115
TD447m	205	210	85	—

単位：cm