

(49) トンネル交差部における3次元的地山挙動について

日本道路公団 正会員 滝野侃一 山田憲夫
大成建設 正会員 木村洋行 ○竹田直樹

1. はじめに

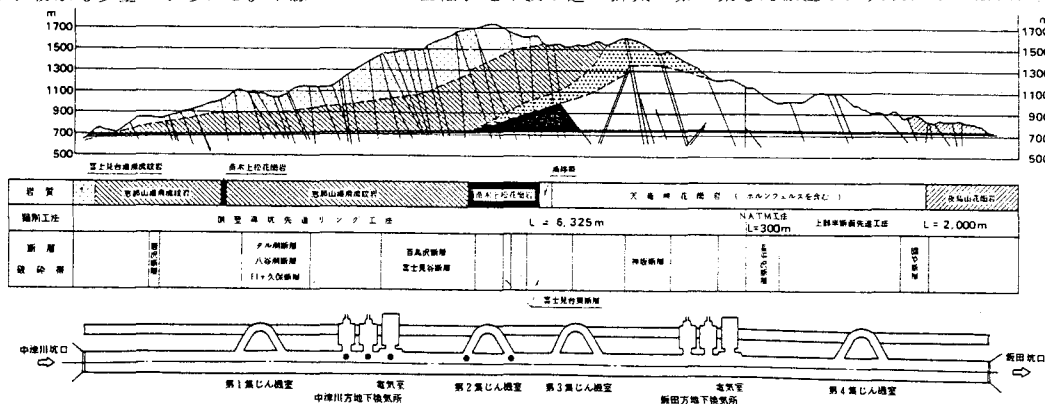
恵那山トンネル二期線の換気方式は集じん機付立坑送・排気縦流換気方式を採用している。このため、本線トンネルと同等の断面を有する集じん機室、地下換気所、電気室が必要となり、これらの連絡トンネルが本線トンネルと交差する。このような大断面トンネルの交差部の施工においては、従来のトンネル設計法では対処しきれない次のような問題点がある。

- 1) トンネル支保は、シエルの一部を切欠く構造となる。(3次元構造)
- 2) 岩盤の地質は複雑な3次元構成である。(3次元構造)
- 3) 岩盤は脆弱で非線形性を有する。(非線形性)
- 4) 岩盤と支保構造の複雑な相互作用が存在する。(相互作用)

このような問題点を克服し、交差部の施工を無事完了するために、施工・計測・解析の各システムが有機的に結合されなければならない。本報告では、恵那山トンネル交差部の施工にあたり、実施したシステムの概要と、工事実施中の計測結果から明確になった岩盤の挙動について述べる。また、システムの問題点と今後の対応について検討を加える。

2. 恵那山トンネル交差部の概要

恵那山トンネル(L=8,625m)全線中交差部は、図-1に示すように14ヶ所あり、そのうち対象とする交差部は中津川方地下換気所の送・排気、電気室、第2集塵機室の送・排気の計5ヶ所である。地質的には、地下換気所、電気室が濃飛流紋岩中に位置し、第2集塵機室は苗木-上松花崗岩に属している。濃飛流紋岩は、苗木-上松花崗岩の貫入に伴い熱水変質作用を受け、キレツが著しく発達し脆弱である。一方、苗木-上松花崗岩は遷移帯付近で風化が進みマサ化している。各交差部の地質特性は、地下換気所の場合が、土被り約700mで、顕在的、潜在的なキレツの発達が著しく、ブロック状あるいは細片状に割れやすい。電気室は土被りが約700mで、地質は地下換とほぼ等しいが、地下換との間に、幅30mにおよぶ断層群がある。さらに断層に沿って多量の湧水がみられる。第2集じん機室は土被りが約1,000mで、マサ化が激しく、とりわけ送気側はその度合いが強い。このため、切羽が自立せず、湧水も多量にみられる。本線トンネルの半径は、地下換の送・排気・第2集じん機室の排気坑部分では、約5.8m



電気室、第2集じん機室の送気坑拡大部分では約7.2 mである。一方、交差トンネルでは約5.8 mである。本線トンネルと交差トンネルの掘削方式は、側壁導坑先進上部半断面工法によった。

3. システム概要

1) システムフロー

システムは、解析・計測・施工の各システムから構成されている。その内容を図-2に示す。各システムは、有機的に結合され、フィードバックが可能である。またシステムは、地下換気所、電気室、第2集じん機室と順次適用され、そのたびごとに、修正改良が加えられた。

2) 計測システム

計測は、岩盤と支保の3次元の挙動を知ることができるよう配慮した。第2集じん機室の例を図-3に示す。計測項目は、天端沈下、内空変位、同絶対変位、支保工応力、PCボルト軸力、ロックボルト軸力、地山内変位、地山内歪、覆工コンクリート歪である。内空変位等手動による測定以外はすべて自動計測を行なっている。自動計測のハードウェアはif-800を中心にして構成されている。測定値はモデムを通じて、約4 km離れた事務所へ転送され、生データファイルに一度保存される。つづいて、生データに各種の校正係数を乗じて、その結果を演算データファイルに保存後、技術者の要求に応じて、図表としてアウトプットされる。図表の種類としては、数表、分布図、経時変化図があり、それぞれハードコピー、プロッターで出力可能である。このシステムのソフトウェアは、現場で結果を速断できる1次処理を目的としている。

3) 解析システム

解析は、対象構造物が3次元構造であるために、3次元モデルを使用する必要がある。しかし、ロックボルト、支保工、覆工コンクリートから構成される複雑な支保構造を考慮して、3次元解析を行なうことは容易ではない。したがって、全体の岩盤の挙動については、3次元弾性有限要素解析を実施する。そして、2次元の有限要素モデルに地盤バネを介して、3次元解析によって得られた変位量を入力し、詳細に検討を行なう。ここに、3次元弾性解析はもちろん3次元構造を2次元構造にリダクションする際における種々の問題点が存在する。それらは、岩盤の巨視的弾性係数、初期応力、地盤バネの設定などである。これらについては、計測結果との対応によって順次解決を画ってゆく方針である。電気室の3次元モデルの例を図-4に示す。このモデルでは、近接している断層も考慮されている。2次元の解析モデルを図-5に示す。

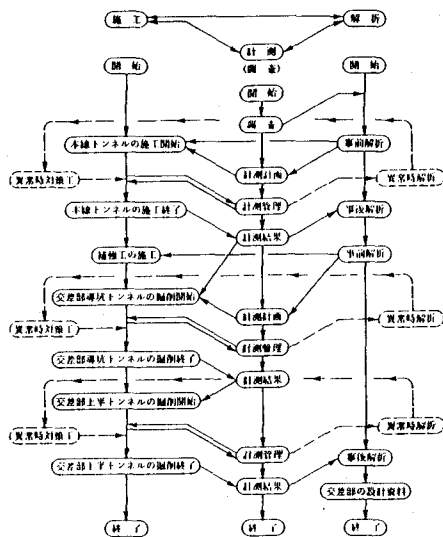


図-2 交差部のシステムフロー

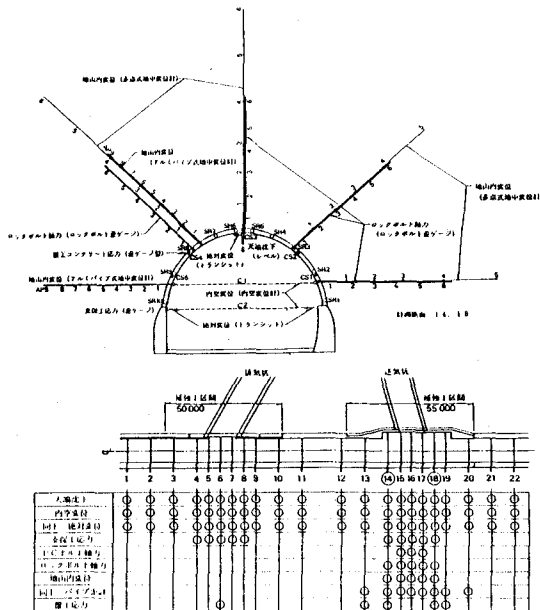


図-3 計測システム

4) 施工システム

施工は解析システムと計測システムにサポートされて実行されてゆく。施工システムのうち、支保構造の構成は次のような機能分担をするように計画されている。鋼製支保工、鋼繊維コンクリートは一体としてシエル構造を形成させる。鋼製支保工は、2次元的な部材であるが、シエルの剛性を高め、鋼繊維コンクリートはシエルの剛性を増すだけでなく、トンネル軸方向に応力を伝達させる機能を期待する。ロックボルトは形成されたシエルと空洞周辺の岩盤を固定し、岩盤の変位を拘束する機能を期待する。PCボルトは、シエル自体と周辺の岩盤を健全な空洞深部の岩盤に固定する機能を期待している。以上の考えで支保構造が施工された後に、交差部のトンネル掘削が、計測管理のもとに、側壁導坑から始められる。

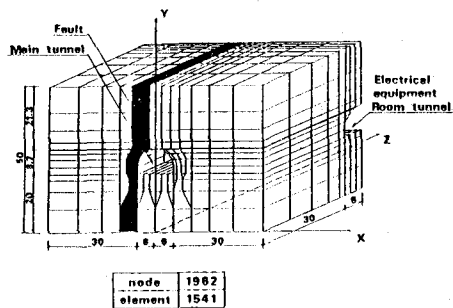


図-4 3次元解析モデル(電気室)

4. システムの適用結果

システムの適用によって、地下換、電気室、第2集じん機室の施工は、順調に進み、第2集じん機室送気坑の一部の工事を残すのみとなった。施工期間中に計測システムを通じて、各支保の機能が徐々に明らかにされている。また、施工システムのうち、第2集じん機室では、計測、解析システムを通じて修正が加えられた。これは、支保工に過大な応力が発生し、さらに鋼繊維コンクリートにクラックが発生したためである。修正工として交差部に薬液注入(LW)、交差部のアーチ切欠部に、吹付けコンクリートを施工した。その結果、大きな変状が発生させることなく施工が進行した。

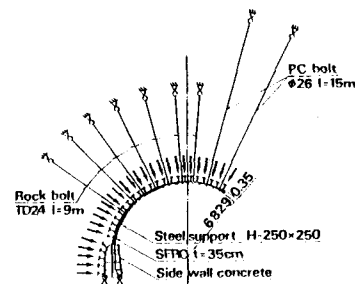


図-5 2次元解析モデル(地下換気所)

計測結果の例を示す。図-7は地下換気所の内空変位を示したものであり、傾向としては、中央部付近で変形が大きく、約20mm内空側に変形する3次元的な挙動を示している。また送気坑の交差部付近の断層帯の存在の影響は変形量の増大、分布形状の非対称性として表われている。電気室、第2集じん機室も同様の傾向がある。さらに、交差トンネルが本線トンネルと斜交している条件も、計測値に影響を与えている。その他に、第2集じん機室の送気坑と排気坑の中間部が交差トンネルの方へ引張られるような傾向があり、双設空洞の相互干渉による影響がみられる。このように、周辺の岩盤は、掘削による応力変化に対して、きわめて、鋭敏で、その影響範囲も広い。図-8は第2集じん機室排気坑の側壁導坑掘削時の支保工応力の経時変化である。この図から、応力集中はシエル切欠部に近接する断面8の交差部側の脚部で最も大きく、その値は3,000kg/cm²にも達している。これは、切欠部の支保部材の剛性低下による応力再配分と、新たなゆるみの発生による応力増加が考えられる。応力増分としては交差部で切断される部材では、曲げ応力が発生するものの、軸応力の増加がめだつ。応力集中のはげしい8断面の脚部では軸応力の増加が支配的である。また側壁導坑の切羽が交差部から3D以上離れても、応力の増加は続き、

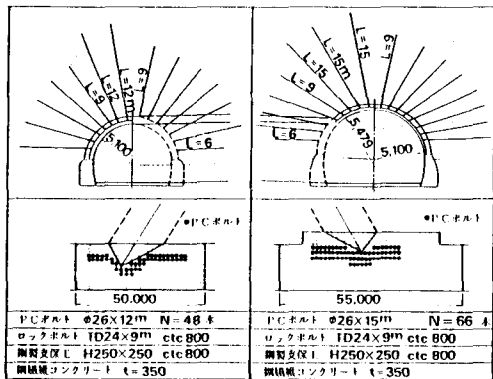


図-6 第2集じん機室の支保構造

影響がみられる。このように、周辺の岩盤は、掘削による応力変化に対して、きわめて、鋭敏で、その影響範囲も広い。図-8は第2集じん機室排気坑の側壁導坑掘削時の支保工応力の経時変化である。この図から、応力集中はシエル切欠部に近接する断面8の交差部側の脚部で最も大きく、その値は3,000kg/cm²にも達している。これは、切欠部の支保部材の剛性低下による応力再配分と、新たなゆるみの発生による応力増加が考えられる。応力増分としては交差部で切断される部材では、曲げ応力が発生するものの、軸応力の増加がめだつ。応力集中のはげしい8断面の脚部では軸応力の増加が支配的である。また側壁導坑の切羽が交差部から3D以上離れても、応力の増加は続き、

掘削の影響がきわめて広いことが示されている。とくに第2集じん機室では、排気坑の掘削を開始するとともに送気坑側で応力の増加がみられる。ロックボルトの軸力は地下換気所では引張力が作用しており、その値は20t以上にも達している。また、一本のロックボルトの中で最大軸力の発生する深度は、おおむね4.5～6.0 m 近辺となっている。しかし、圧縮と引張力の軸力が交替しているボルトもあり、岩盤は、単に内空側のみへ移動しているのではない。これらの傾向は、電気室、第2集じん機室で顕著であり、岩盤内の歪を測定したところ、トンネル内空方向と同等の歪が、トンネル周方向、軸方向にも発生していることが判明した。また、第2集じん機室のP.Cボルトの軸力は引張領域が7 m 以深に発生している。以上の測定結果から、岩盤のゆるみは、岩盤深部まで達しており、岩盤の変形挙動も内空側への移動だけでなく、3次元的に複雑に挙動していることが推定される。地山内変位計の計測結果にもこれらの様子が表われている。

5. 問題点と今後の対応

計測値から岩盤は複雑な3次元的挙動を示している。したがって解析値でおよその挙動が予測できるものの、解析値と整合しない現象も明確になってきた。たとえば、支保工応力の軸応力が卓越する現象、ロックボルトに軸方向と垂直な方向にせん断的な力が作用する現象である。これらは2次元モデル化のプロセスにまだ問題があるのではないかと考えられる。また、地質状況が計測値に与えている影響をどのように解析に考慮してゆくかという困難な問題点もある。その他、交差トンネルの斜交、掘削の影響が及ぶ範囲の問題と多くあるが、逆解析を通じて、解析法、定数の改良に努めてゆくつもりである。それと同時に、計測値の2次処理を行なって岩盤の挙動をより明確にしてゆく考えである。

6. 参考文献

- ① 竹田等、マイクロコンピュータを利用したトンネルの自動計測システム、第8回電気機械利用に関するシンポジウム。
- ② Takino et' al. 3-Dimensional Ground Behavior at Tunnel Intersection, Field Measurements in Geomechanics 1983.

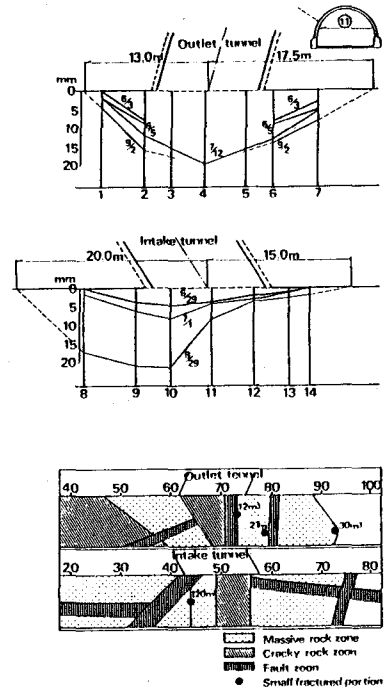


図-7 内空変位の平面分布図(地下換気所)

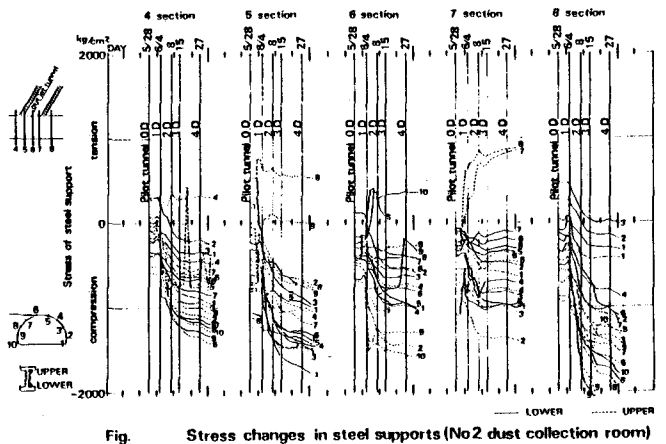


図-8 鋼製支保工の応力経時変化(第2集じん機室導坑掘削時)

(49) 3-DIMENSIONAL GROUND BEHAVIOR AT TUNNEL INTERSECTIONS

Nihon Doro Kodan	Kannichi Takino
"	Norio Yamada
Taisei Corp.	Hiroyuki Kimura
"	Naoki Takeda

On the Enasan Tunnel project phase II 2-lane highway tunnel of 8625m length, longitudinal flow ventilation system with vertical intake and outlet tunnels have been employed.

In order to apply the longitudinal flow ventilation system, it is necessary to install an underground ventilation room, electrical equipment room and dust collection room beside the main tunnel. These rooms are linked to the main tunnel by connecting tunnels, which have the same cross-section as the main tunnel. For connecting tunnel construction work, part of the already built main tunnel's supporting structure must be eliminated in the area where the connecting tunnel and main tunnel intersect, which will yield a cantilevered and extremely unstable state in the excavation of connecting tunnels.

This report outlines the reinforcing work executed prior to the construction in the intersection area, measurement implemented for safety, the results of these, and the method of numerical analysis considering 3-dimensional effects for the evaluation of measurement results.