

既設トンネルと斜交して新設トンネルを施工する場合の数値解析的検討

Numerical consideration for excavating new tunnel diagonally crossing with existing one

北海道開発土木研究所
北海道開発局 室蘭開発建設部
北海道開発局 室蘭開発建設部
室蘭工業大学
(株)ダイヤコンサルタント

正 員 岡田慎哉 (Shin-ya Okada)
荒野 広 (Hiroshi Arano)
福田裕紀 (Hironori Fukuda)
フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
○正 員 杉浦高広 (Takahiro Sugiura)

1. はじめに

2000年3月の有珠山噴火によって、国道230号線の洞爺湖温泉街～虻田町市街地間は通行不能となった。北海道開発局は、その代替として三豊トンネル（洞爺湖側）と青葉トンネル（虻田町側）からなる新ルートを決し、その建設を行うこととなった。図-1に青葉トンネルの平面位置図を示す。

各トンネル掘削において、地質条件や安全性、経済性を検討の結果、青葉トンネルは北海道電力（株）の虻田発電所への導水路トンネルと斜交する形で計画された。しかしながら、両トンネルが斜交する高低差は約11mであり、か

つ土かぶり約72mであるため、トンネル掘削時の岩盤のゆるみによって導水路トンネルに付加的な応力が発生することが懸念された。そのため、北海道開発局では地山地形およびトンネル交差角度、トンネルの各施工段階を考慮して三次元有限要素法による詳細な解析を行うとともに、各補助工法の妥当性について検討を行うこととした。ここに、その検討結果の一部を報告する。

本論文では、補助工法としてAGFのトンネル断面内導入角度（以下、単に導入角度）およびそのグラウト注入厚を変化させた場合の計4ケースの解析を実施し、主に青葉トンネル天端部変位、北電導水路トンネル底部変位、北電導水路トンネル発生応力に着目して各工法の妥当性についての検討を行った。なお、本解析には、構造解析用汎用プログラムABAQUSを使用している。

2. 解析仮定

2.1 解析モデル

図-2に有限要素モデルにおける解析対象範囲を、図-3

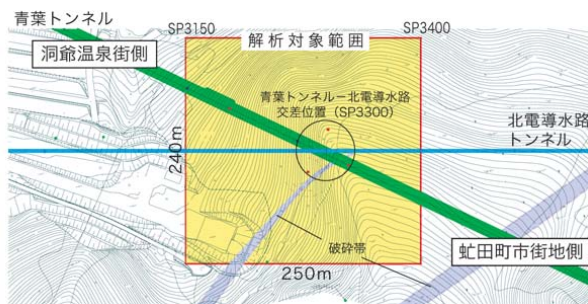


図-1 青葉トンネル平面位置図

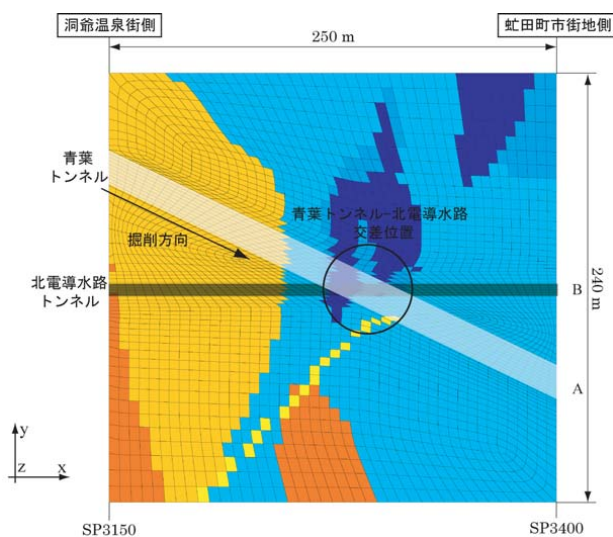


図-2 解析対象範囲

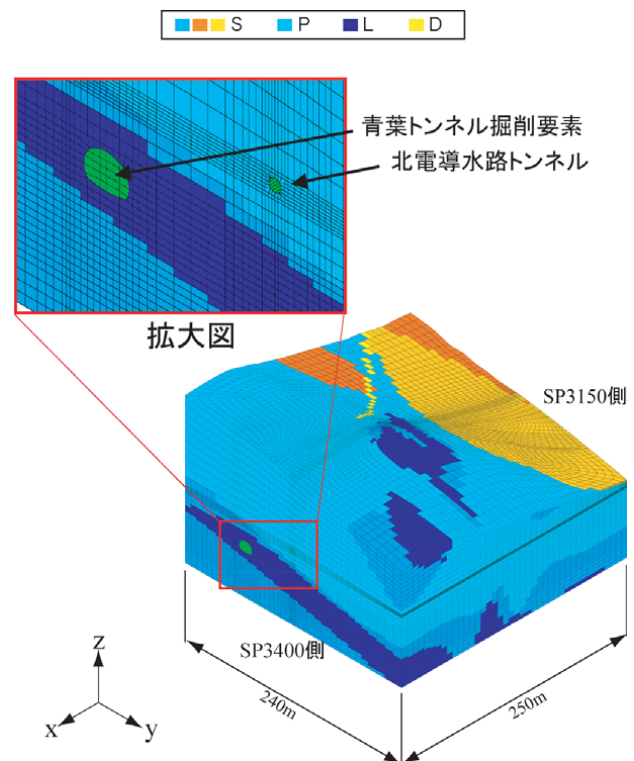


図-3 解析モデル

表-2 解析ステップと掘削距離の関係

解析ステップ		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SP		3200	3210	3220	3230	3240	3245	3250	3255	3260	3265	3270	3275
掘削距離	各ステップ	50	10				5						
(m)	累計	50	60	70	80	90	95	100	105	110	115	120	125
解析ステップ		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
SP		3280	3285	3290	3295	3300	3305	3310	3315	3320	3325	3350	3400
掘削距離	各ステップ	5										25	50
(m)	累計	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	200	250

表-1 使用物性値一覧

	単位体積質量 ρ (g/cm ³)	変形係数 E (MPa)	ポアソン比 ν	厚さ (mm)
地質 S	1.60	300	0.35	
地質 P	2.00	1,200	0.30	
地質 L	2.40	8,000	0.25	
地質 D	1.50	80	0.40	
青葉トンネル	2.35	20,600	0.20	600
北電導水路トンネル	2.35	20,600	0.20	350
グラウト	2.35	9,310	0.20	1,000

表-3 解析ケース一覧

解析ケース	解析の概要	AGF 導入区間
Case1	AGF 無し	
Case2	120° の AGF を考慮	SP3270~SP3350 (導入長さ 80m)
Case3	180° の AGF を考慮	
Case4	180° の AGF を考慮 (グラウト厚 1.5m)	

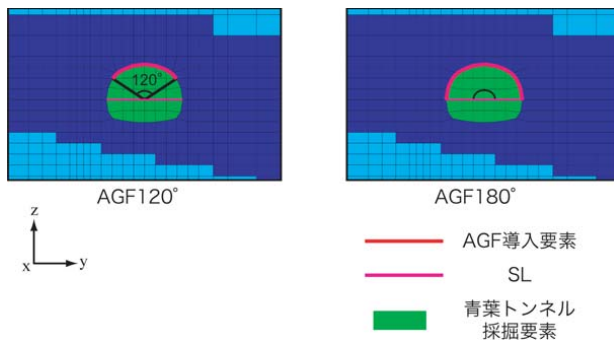


図-4 AGF 導入角度

には本解析モデルの要素分割状況を示している。解析対象範囲は、北電導水路方向に SP3150~SP3400 の 250m、北電導水路直角方向に 240m とした。境界条件は、底面の 1 点のみを完全固定とし、その他の底面をすべて垂直方向に拘束した。使用要素は地質要素をすべて 8 節点固体要素とし、コンクリート要素およびグラウト要素は 4 節点板要素でモデル化した。解析において地山、コンクリートおよびグラウトを全て弾性体と仮定している。トンネルコンクリートの材料物性は両トンネルで同一と仮定した。なお、本解析における総節点数および総要素数は、それぞれ

160,270, 154,254 である(但し、AGF 要素を除く)。地質区分に関しては、比較的類似の物性を有するものを統一し、同一の物性を割り当てることにより、大きく 4 種類に修正区分している。表-1 に使用物性値一覧を示す。

2.2 解析フロー

表-2 に解析ステップと掘削距離の関係を示す。解析は、現在の応力状態を適切に表現するため、実工程を模擬して段階的に計算を進めており、以下に示す通りである。

- (1) 北電導水路トンネルを削除した状態(素堀り状態)で自重解析を実施し、各節点に作用する外力を算定。
- (2) 外力による地山の変形量を評価し、自重が作用した状態で現状の地形となるように、北電導水路の素堀り状態を再現。
- (3) 北電導水路にコンクリート要素を追加して考慮する。このときの北電導水路コンクリートの発生応力は零レベルであることを確認。
- (4) 青葉トンネル掘削部要素を削除し、自重解析を実施。
- (5) 掘削部にコンクリート要素を付加し、巻き付けコンクリートの剛性を考慮。
- (6) 未掘削部に対して所定の AGF 要素を導入 (AGF 導入の場合のみ)
- (7) 青葉トンネルが貫通するまで (4)~(6) を繰り返し実施

2.3 解析ケース

表-3 に解析ケースの一覧を示す。本研究では、AGF を導入した場合と導入しない場合を比較するため、AGF を導入しない場合 1 ケースと AGF を導入した場合の 3 ケース、計 4 ケースの解析について検討を実施している。AGF 導入区間はすべてトンネル交差位置を含む SP3270~SP3350 の区間としており、それぞれ AGF の導入角度とグラウト注入厚を変化させた場合について解析を実施している。図-4 に AGF 導入角度についての図を示す。

3. 解析結果

3.1 青葉トンネル天端部変位分布

図-5 に、掘削距離 150m 時点および解析終了時(掘削距離 250m)における青葉トンネル掘削方向の天端部変位分布を示す。(a) 図より、150m 掘削時点に着目すると、掘削距離 120m(SP3270)の地点付近までは、すべての解析ケースにおいて AGF が導入されないことより、等しい変位分布となっている。また、Case2~Case4 に着目すると、AGF を導入した初期の段階でトンネル天端部の変位が AGF 無

表-4 各解析終了時における変位および応力

AGFの有無	No.	解析ケース	青葉トンネル 頂部変位 (mm)	北電導水路 トンネル底部変位 (mm)	北電導水路 トンネル発生応力 (MPa)
無し	Case1	300MPa	25.13	11.01	3.10
有り	Case2	AGF120	18.31	9.97	2.62
	Case3	AGF180	15.05	8.25	2.00
	Case4	AGF180 (t=1.5)	13.87	7.84	1.82

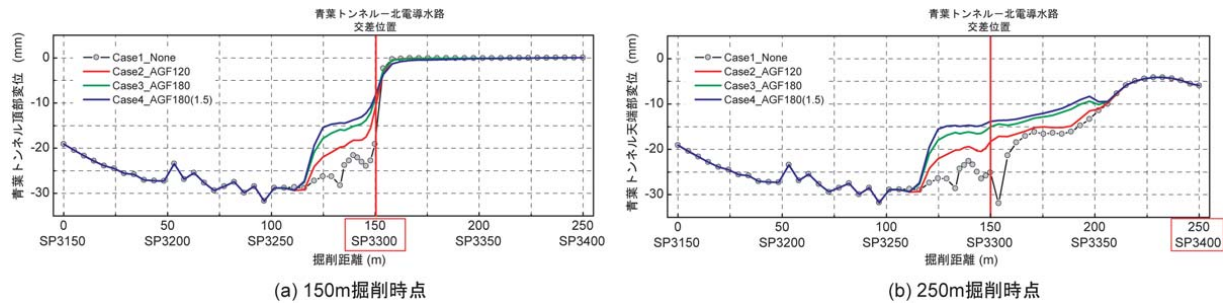


図-5 青葉トンネル天端部変位分布

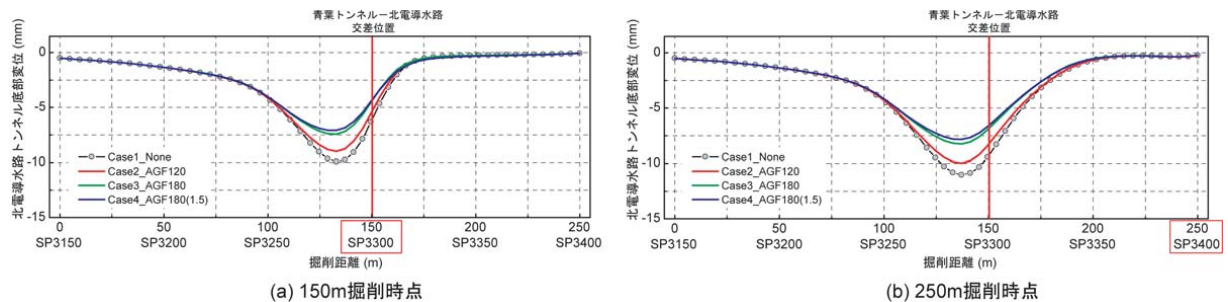


図-6 北電導水路トンネル底部変位分布

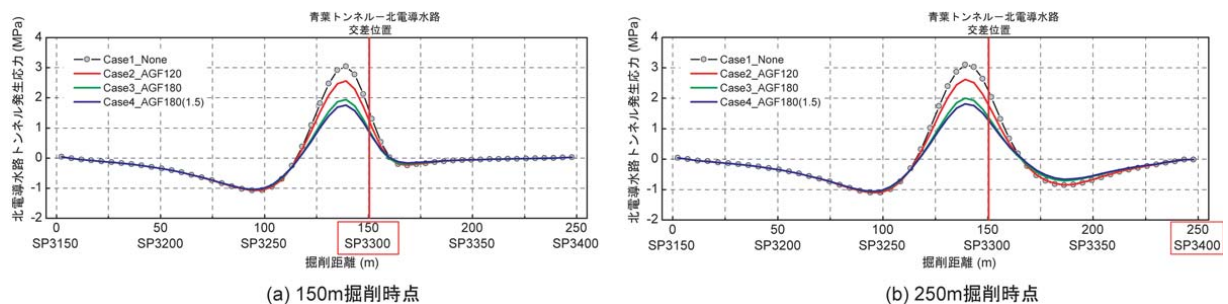


図-7 北電導水路トンネル発生応力分布

しである Case1 に比較して小さくなっていることが確認できる。

また、(b) 図において、AGF が導入されていない Case1 に着目すると、青葉トンネルと北電導水路トンネルの交差位置である SP3300 近傍において、天端部変位が局所的に -30mm 以下の変位を示している。これは、前述したようにトンネル交差部近傍において、破砕帯が存在していることに起因しているものと考えられる。しかしながら、AGF を導入した 3 ケースについては、Case1 で発生した天端部変位の卓越部が平滑化されていることがわかる。

さらに、AGF を導入した 3 ケースにおける Case2 と Case3

に着目すると、より広角に AGF を導入した場合にトンネル掘削時の変形が抑制されており、Case3 と Case4 を比較すると、グラウト注入厚を大きくすることで変形が抑制されていることがわかる。

以上より、本解析の範囲内では、AGF を導入する場合には、AGF を導入しない場合に比較して、トンネル掘削時の変形が抑制されかつ局所的に卓越する変位を平滑化する効果があることを確認できた。また、AGF を導入する場合は、より広角でグラウト注入厚を大きくすることでトンネル掘削時に発生する天端部の変位を抑制可能であることが明らかになった。

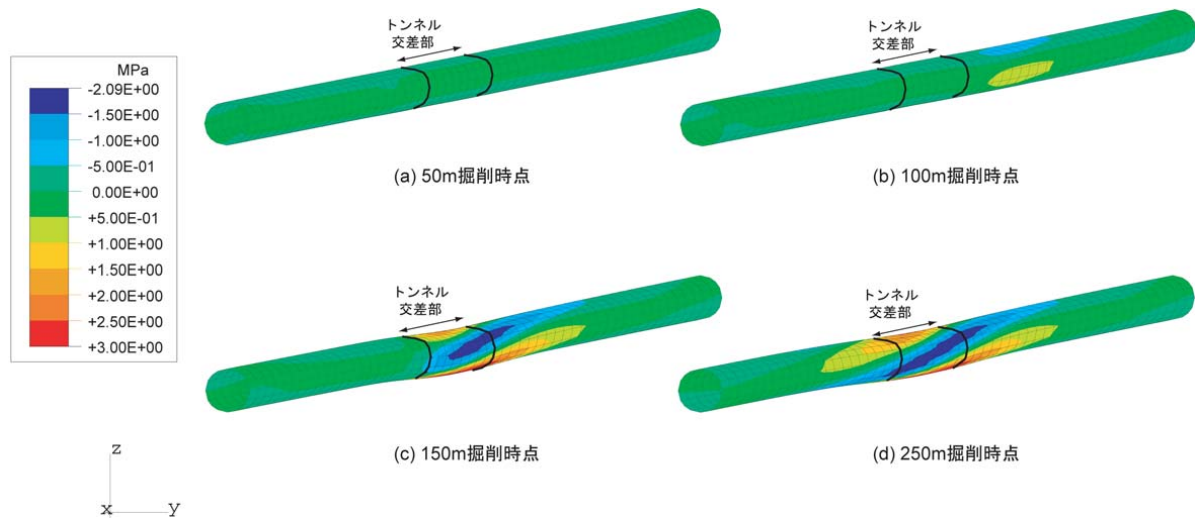


図-8 北電導水路トンネルの周方向応力分布 (Case1)

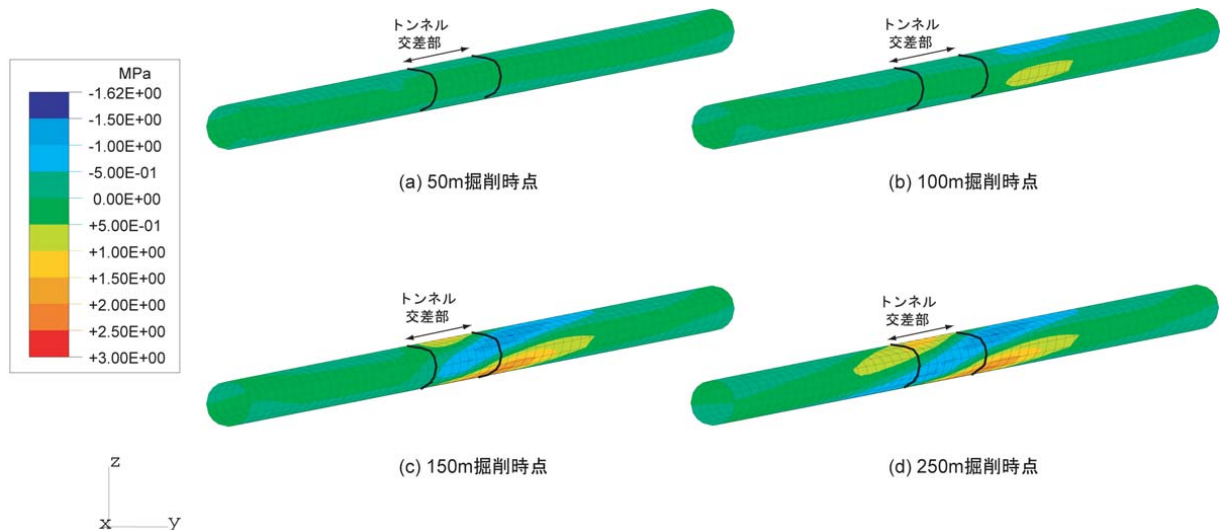


図-9 北電導水路トンネルの周方向応力分布 (Case4)

3.2 北電導水路トンネル底部変位および発生応力分布

図-6 および図-7 には、それぞれ掘削距離 150m と 250m の時点における北電導水路トンネル進行方向の底部変位分布および発生応力分布を示している。両図に着目すると、前項における結果と対応しており、青葉トンネル天端部に発生する変位が小さくなることで、青葉トンネル上部に位置する北電導水路トンネルの変形および発生応力も減少していることがわかる。

表-4 には、各解析における変位と応力を一覧にして示している。なお、北電導水路トンネルで発生した変位および応力は、解析終了時における最大変位を示している。また、青葉トンネル天端部における変位については、解析終了時の SP3300 地点における変位値である。表からも、より広角でグラウト注入厚が大きいほど、変位および応力の発生が低減することがわかる。

3.3 鉛直方向応力分布

図-8 および図-9 には、AGF を用いない場合である Case1 と AGF を広角で施しグラウト注入厚が 1.5m とした Case4 の掘削距離 50, 100, 150, 250m の時点における北電導水

路トンネルの周方向応力分布を示している。図より、150, 250m 掘削時点において Case4 の場合が Case1 の場合より応力が大きく低減していることがわかる。

4. まとめ

本解析範囲内で得られた結果を整理すると、以下のようになる。

- (1) AGF を導入することにより、AGF を導入しない場合に比較して、トンネル掘削時の変形が抑制されかつ局所的な大変位を平滑化する効果があること
- (2) AGF を導入する場合は、より広角かつグラウト注入厚を大きくすることでトンネル掘削時に発生する天端部の変位を抑制可能であること
- (3) 青葉トンネル天端部に発生する変位が小さくなることで、青葉トンネルの上部に位置する北電導水路トンネルの変形及び発生応力も小さくなることがわかった。

謝辞：本数値解析を実施するにあたり、保木和弘氏（当時室蘭工業大学修士課程、現（株）構研エンジニアリング）に多大な援助を頂いた。ここに記して謝意を表する。