

海底下における NATM 施工の合理化の研究

金沢工業大学大学院 学生員 ○三村 聡*1
 金沢工業大学 正会員 土屋 敬*1
 北陸電力(株)原子力土木部 小笠原 功*2
 北陸電力(株)志賀原子力発電所建設所 黒川 健治*3

1 はじめに

志賀原子力発電所2号機の増設に伴う取水路は、延長約 400m、土被り 20~40m、掘削断面積約 60m²の NATM による海底トンネルであり、安全性の高い設計・施工が要求されると同時に経済性も求められる。現場では、各種計測を行い十分な安全性を確認しながら、合理性、経済性を求めロックボルトの省略の検討が行われた。本文は、施工の合理性と経済性の面から実施したロックボルトの省略を土被りの異なる 2 断面(施工が終了した断面と、未施工最大土被りの断面)をとりあげ、解析によって検討した結果について述べる。

2 解析概要

2.1 解析断面 1 土被り 22.0m

図 1 に解析モデルを示す。立坑基点 27.2m の地点(解析断面 1)において、図 2 に示すロックボルト上半 11 本、下半 4 本の CaseA の断面を対象に計測を実施しており、その値を用いて、地山のクリープ特性を考慮した掘削時解析のできる非線形弾性解析(NATMFEM)により逆解析を行った。地山物性値を表 1、支保工物性値を表 2 に示す。表 1 の右欄が逆解析により求められた物性値である。初期変形係数 D_0 は設定値の 1/10 であり、ポアソン比は天端沈下/水平変位より 0.31 と求められた。CaseA については現場計測、解析ともに安全性が十分に認められたので、合理化の検討をすることとした。合理化案として、図 3 に示す天端のロックボルトを 7 本抜いた CaseB(上半 4 本、下半 4 本)、図 4 に示す全てのロックボルトを省略した CaseC を挙げ解析を行った。解析ステップは表 3 の通りである。

2.2 解析断面 2 土被り 39.4m + 水深 2.0m

解析断面 1 で検討した合理化案を施工に反映させるために未施工区間における順解析を行い安全性の検討を行った。

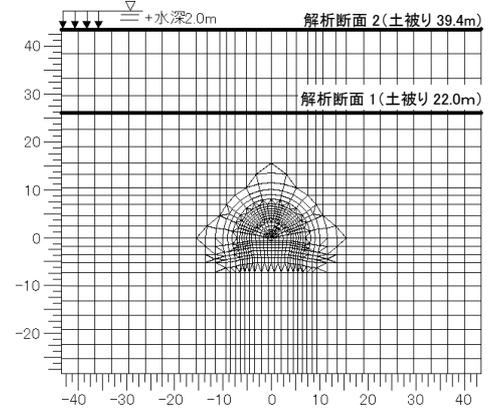


図 1 解析モデル

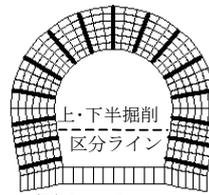


図 2 CaseA

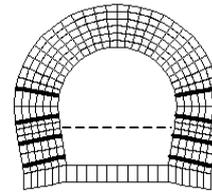


図 3 CaseB

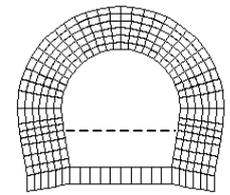


図 4 CaseC

表 1 地山物性値

	試験による 設定値	逆解析値
単位体積重量 γ_t (kN/m ³)	22.7	-
変形係数 D_0 (N/mm ²)	3100	320
ポアソン比 ν_0	0.24	0.31
弾性限界 R_{el}	0.3	-
非線形指数 n	6	-
粘着力 c (N/mm ²)	0.81	-
内部摩擦角 ϕ	55	-
引張強度 σ_t (N/mm ²)	0.5	-

表 2 支保工物性値

鋼製支保工	弾性係数 E (kN/mm ²)	210
	断面積 (cm ²)	40.14
吹付コンクリート	許容応力 (N/mm ²)	210
	部材厚さ (cm)	20
	弾性係数 E (N/mm ²)	3400
ロックボルト	許容応力 (N/mm ²)	10.5
	ボルト径 (mm)	24
	許容耐力 (tf)	100

表 3 解析ステップ

工程	作業	所要日数	累積日数
予備計算			
Step1	上半掘削	0.3	0.3
Step2	A計測開始(上半H鋼建込、吹付コンクリート施工)	0.2	0.5
Step3	上半H鋼、吹付効果発現(上半ロックボルト施工)	0.5	1.0
Step4	上半ロックボルト効果発現	0.5	1.5
Step5		3.5	5.0
Step6	上半掘削45m終了、下半掘削計測位置手前まで到達	3.5	8.5
Step7		7.4	15.9
Step8	下半掘削	0.3	16.2
Step9	A計測開始(下半H鋼建込、吹付コンクリート施工)	0.2	16.4
Step10	下半H鋼、吹付効果発現(下半ロックボルト施工)	0.5	16.9
Step11	下半ロックボルト効果発現	0.5	17.4
Step12	下半掘削45m終了	2.4	19.8
Step13	次 サイクル上半掘削5D終了	10.6	30.4
Step14	次 サイクル上半掘削45m終了	13.0	43.4
Step15	次 サイクル下半掘削45m終了	7.8	51.2

キーワード：海底トンネル, NATM, 施工の合理化

連絡先：*1〒921-8501 石川郡野々市町扇が丘 7-1 TEL076-248-1100(代) FAX076-294-6713
 *2〒930-8686 富山市牛島町 15-1 TEL076-441-2511 FAX076-433-9964
 *3〒925-0161 羽咋郡志賀町字赤住 1 TEL0767-32-4690 FAX0767-32-5096

3 解析結果

安全性は主に①吹付コンクリート応力②鋼製支保工応力③ロックボルト軸力④地山破壊接近度 R について検証した。

3.1 解析断面 1

3つの Case の吹付コンクリート応力(天端), 鋼製支保工応力(天端)を図 5, 6 に示す。これらを見るとわずかに CaseB・C の応力が増加しているが, 許容値を下回っている。上半・下半部については, 応力の増加は見られず, 許容値を下回ることを確認した。また, ロックボルトは CaseB の下半部において最大軸力 36 (kN) となり, 許容値を下回った。下半側壁の R を図 7 に示す。CaseC の下半側壁で 0.38 となり CaseA・B の 0.41 と比較するとわずかに低下するが弾性限界 R_{EL} (弾性限界とは地山の弾性領域と非線形領域の境界の R の値であり, 本地盤では岩質から, $R_{EL}=0.3$ である) までまだ余裕がある。以上より, 天端のロックボルトは, 解析上(割目のない均質地盤条件)支保工としてほとんど寄与していないことが分かる。また, 側壁部のロックボルトは, 側壁部の R を改善する効果を持っていることが分かる。図 8 は CaseB におけるトンネル周辺地山の R をコンターで示したものである。これから分かるように下半側壁の R が最も低い。上半下部, 下半部のロックボルトは最弱点部の側壁を直接補強しているものであり, 少しでも R を改善していると判断できる。したがって, 側壁部のロックボルトは残すのが合理的である。その上で, 経済性も考慮すると, 最も合理的であるのは CaseB となる。

3.2 解析断面 2

ロックボルトパターンは CaseA・B とし, 解析において用いた物性値は解析断面1の値を用い安全性の検証を行った。その結果(最終ステップの値)を表 4 に示す。CaseA・B を比較するとほとんど支保工の応力, R に差がないことが分かる。これは, 天端のロックボルトを抜いてもさほど支保工の応力, R には影響を与えないことを示している。したがって, この断面においても合理性を考えると CaseB が妥当である。CaseB の安全性については, 吹付コンクリート応力, ロックボルト軸力ともに許容値を下回り安全性は確保された。上半の鋼製支保工の応力が 237 (N/mm²) となり許容値を超えている。しかし, 許容値と比較してさほど大きな値ではなく, 鋼製支保工には繰り返し荷重が加わっているわけではないので部材の疲労は考慮しなくてもよいこと, および健全な吹付コンクリートによって拘束されていることから安全性は確保されるものと考えられる。一方, 掘削直後の R が下半側壁で 0.25 となり R_{EL} をわずかに下回っているが, その後構築される支保工で地山が保持されるので問題ないと考えられる。したがって, CaseB でも安全性は確保されるものと考えられる。

4 まとめ

現場では実測値から十分な安全性が確認されたため, ロックボルトの省略について, 土被りの異なる 2 断面をとりあげ解析によって検討を行った。これにより以下の結果が得られた。

- ①土被り 22.0m の解析断面 1 では, 最も合理性に優れるパターンは天端の 7 本を省略した CaseB である。
- ②最も土被りの厚い(土被り 39.4m)解析断面 2 でも CaseB で安全性が確認された。

以上より, 天端のロックボルトの省略についてトンネルの各断面で安全性が確認され, 合理化が妥当であると判断された。これにより現場では実際に天端のロックボルトを 7 本省略して施工を行い安全性も保たれた。また, 天端のロックボルトを省略することにより, 天端からの海水の滴り防止にも役立ち作業環境の改善につながった。

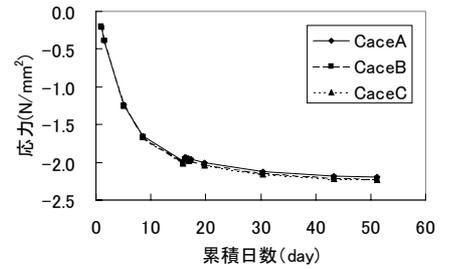


図 5 吹付コンクリート応力(天端)

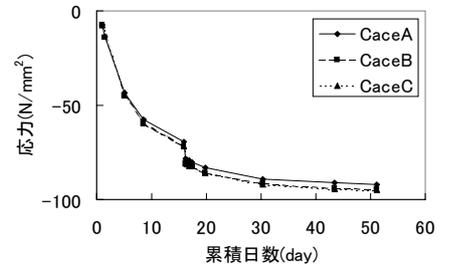


図 6 鋼製支保工応力(天端)

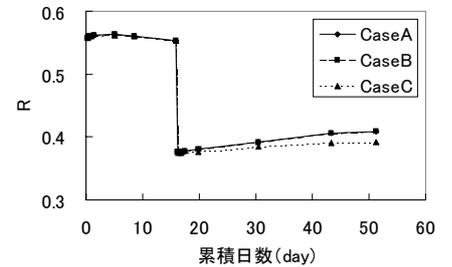


図 7 破壊接近度 R(下半側壁)

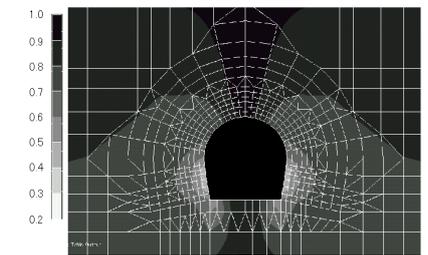


図 8 CaseB の破壊接近度 R の分布

表 4 解析断面 2 の結果

		天端	上半	下半
吹付コンクリート応力 (N/mm ²)	CaseA	2.6	3.8	1.2
	CaseB	2.8	3.8	1.2
鋼製支保工応力 (N/mm ²)	CaseA	160.9	234.2	71.0
	CaseB	166.1	236.9	71.0
ロックボルト軸力 (kN)	CaseA	84.2	37.1	59.8
	CaseB	-	-	58.7
地山破壊接近度 R	CaseA	0.92	0.43	0.26
	CaseB	0.88	0.43	0.25