

III-381 青函トンネル海底中央部の計測について

日本鉄道建設公団 青函建設局 計画課

正会員 ○平野邦彦

同上

吉岡鉄道建設所長

正会員

佐藤 昭

同上

東京支社

工事第二課長

正会員

川原敏明

1. はじめに

海底部の工事では、注入を行ない止水ゾーンを形成した後、掘削を行なっている。海底部の軟岩層では掘削により一端、大きな変形が生じた場合、止水ゾーンが崩れ多量の浸透水によりトンネルが崩壊に至る可能性もある。そこで、掘削の安全を確保し安定した構造物とするため、トンネルの解析と種々の計測を実施し、慎重に施工管理を行ないつつ工事を進めた。本報告は、種々の計測の評価と内空変位に着目した要因分析により設計・施工の妥当性を検討したものである。尚、本報告の対象区間は、本坑貫通点を掘す最終掘削区（ $L=800m$ ）である。

2. 地質と施工概要

海底中央部の地質は、新第三紀新世の黒松内層に属し、岩相は固結度の低い凝灰岩類の薄層を挟む砂質泥岩からなる軟岩である。砂質泥岩は、 $\sigma_c=20\sim40\text{kg/cm}^2$ の範囲にあり、凝灰岩類は一般に $\sigma_c=10\sim20\text{kg/cm}^2$ にすぎず、かつ透水性が高いこと等が不良地山の要因となっている。図-1にトンネルの標準断面と施工順序を示す。本坑は新幹線・複線型のトンネルで掘削断面積は約 $90m^2$ である。掘削工法は①軟弱な地層であること、および②注入切羽が2ヶ所となることにより充分な注入ゾーンの形成が可能なサイロット工法を標準工法として採用した。

3. 計測の評価

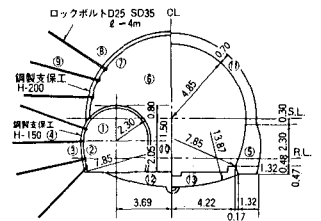
3-1 計測結果 A計測として、上半内空変位（20m毎）、側壁コンクリート内空変位（1スパン毎）等を行なった。B計測断面として3断面を設定した。測定項目は、①地山内変位（本坑内および先進専坑からの計測）②ロックボルト軸力③鋼アーチ支保工軸力④吹付コンクリート応力である。この他に、⑤孔内水平載荷試験⑥坑内弾性波試験も行なった。計測の結果、明らかになった主なものは、以下の通りである。（図-2、3 参照）

a) 地山変位収束切羽距離は、専坑掘削時20~30m、上半掘削時10~20mである。最終変位に対する発生割合は専坑掘削時60~80%、上半掘削時90%以上で、大背掘削の影響はほとんどない。ロックボルト軸力も同じ傾向である。図-2 ロックボルト軸力分布

b) ゆりみ領域は、専坑部で1~3m、上半部で2~3m程度であり、ロックボルト4mは適正長と判断される。

c) 専坑ロックボルトは、内空変位抑制効果が特に高い。一部降伏点軸力を超えたため、増しロックボルトを施工した。

d) 鋼アーチ支保工には、大きな軸力が発生しており有効な支保部材といえる。降伏点以上の



1	専坑掘き
2	吹付コンクリート（厚10.9m）
3	吹付コンクリート（厚20cm）
4	ロックボルト4m 2本
5	鋼アーチ支保工
6	上半掘き
7	吹付コンクリート（厚10.9m）
8	吹付コンクリート（厚20cm）
9	ロックボルト4m 6本
10	大背掘き
11	アーチコンクリート
12	インバート掘き
13	インバートコンクリート

図-1 標準断面と施工順序

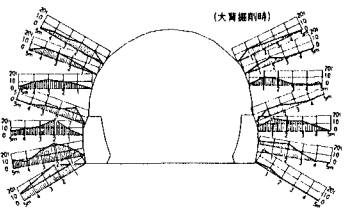


図-2 ロックボルト軸力分布

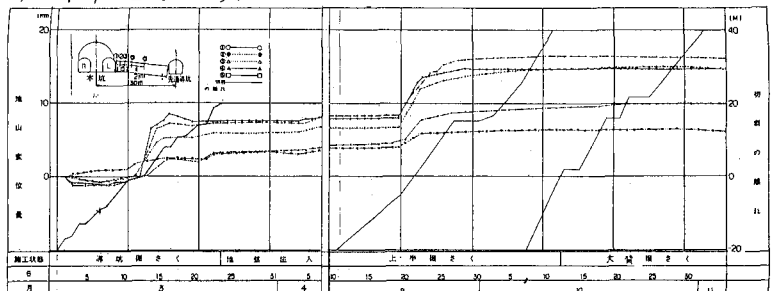


図-3 地山変位経時変化（先進専坑からの計測）

軸力も計測されたが、吹付コンクリートとの一体化により圧屈等の変状は観察されなかった。上半支保工も2ヒンジアーチと仮定すると側圧係数は、0.7~1.3となる。

e) 地山の变形係数は、孔内水平載荷試験では、 $6,000 \sim 7,500 \text{ kg/cm}^2$ 、地山内変位測定解析では、 $7,400 \text{ kg/cm}^2$ である。

3-2 解析値と計測値

事前設計の妥当性の検討と施工管理への適用を目的としてFEM解析を行なった。地盤注入による止水ゾーンの形成、剛性の高い支保部材の適用により地山の塑性化は些少と考え地山は弾性体であると仮定した。解析手段として、掘削解放力を切羽の進行に応じて分割する応力解放法を用いた。

解析入力値は、表-1のように岩石試験試験と、上述のB計測結果より、大きな差はないと思われる。表-2、3に示すように、解析値と計測値は、一部差異の大きなものもあるが、支保部材軸力、内空変位とも比較的良く一致している。これにより、解析手法は概ね妥当であると共に、支保パターンも有効であると判断される。

3-3 計測による管理手法

B計測による管理の他に、掘削段階毎にFEM解析により求めた内空変位（上半、側壁コンクリート）を基に管理基準値および切羽停止条件を設定し、内空変位による日常の現場管理を行なった。施工中、亀裂発生帯において管理基準値を超え切羽停止基準に合致したため、切羽を停止し対策工を行なった。

4、数値化工類による支保効果の分析

トンネルの掘削による地山の挙動は、支保効果、地山性状、施工状況等様々な要因によって影響を受ける。計測の結果は、これら全ての要因が複合されたものと考えられる。そこで、地山挙動を表わす指標としてトンネルの変形挙動（側壁コンクリートの内空変位）に着目し、それを外圧基準として数値化工類による要因分析を行なった。要因および範ちゅうは、表-4に示す通りである。解析は、6ケース行ない、その結果を図-4、表-5に示す。検討ケースより、次のような結論がえられた。

a) 地山の变形挙動に対する支保要因と地山要因の支配関係は、ほぼ同等である。

b) ロックボルトの効果は高く、特に導坑に施工したロックボルトの効果は高い。ロックボルト軸力測定結果からも同様の結論がえられている。

c) 吹付コンクリートの効果は、上半部で高い結果となっている。

d) 地山要因のうち「亀裂状況」の相関が特に高い。切羽観察項目では、特に亀裂に留意すべきである。

e) 地盤注入の影響は小さい。均一な注入が行われたと考えられる。

5、おとがき

海底中央部工事は軟弱岩盤におけるものとしては懐調に推移した。計測管理を主体に施工管理を行い安全に施工することができた。地山は、計測の結果、弾性的挙動を示しており、剛性の高い支保工により地山変位、塑性域もわずかに押さえられ、設計・施工法は妥当であったと考えている。

表-1 地山の物性値

項目	解析入力値	岩石試験結果
単位体積重量 γ (kg/cm^3)	1.8	1.8
一軸圧縮強度 σ_c (kg/cm^2)	35	25~37
変形係数 μ (kg/cm^2)	7,000	7,340 ~ 10,800
ポアソン比 ν (kg/cm^2)	0.33	0.33
粘着力 c (kg/cm^2)	0.5	0.4
内部摩擦角 ϕ	35	35
側圧係数 λ	0.8	—

表-2 解析値と計測値(支保部材軸力)

位置	支保部材	最大軸力 (tf)	
		解析値	計測値
導坑	ロックボルト	2.3	3.0 (19)
	吹付コンクリート	1.5	3.5
上半	ロックボルト	1.6	1.2 (8)
	吹付コンクリート	1.5	2.1 (14)
下半	鋼製支保工	23.0	19.9 (67)

※ () 内は平均値

表-3 解析値と計測値(内空変位)

測定項目	最終変位値 (mm)	
	解析値	計測値 (平均)
側壁コンクリート 水平変位 (内側)	13	11
側壁コンクリート 垂直変位	5	10
上半内空変位	15	10
上半天端沈下	9	7

表-4 要因および範ちゅう一覧

要因区分	要因 (Item)	範ちゅう (Category)			
		a	b	c	d
支保パターン	1 上半吹付コンクリート	10mm (切羽)	20mm (20mm ~ 30mm 間)	20mm (切羽)	—
	2 上半ロックボルト	なし	8本 (導坑)	8本 (切羽)	8本 (切羽)
	3 導坑ロックボルト	なし	4本 (導坑)	4本 (切羽)	8本 (4本×2区)
地山性状	4 地山	導坑	導坑	導坑	導坑
	5 地下水状況	なし	地下水	地下水	地下水
	6 亀裂状況	なし	Ⅰ ~ Ⅲ	Ⅰ ~ Ⅲ	Ⅰ ~ Ⅲ
	7 圧縮強度	20kg/cm ² 程度	20~30kg/cm ²	30kg/cm ² 程度	—
	8 粘着力	Ⅰ ~ Ⅲ	Ⅰ ~ Ⅲ	Ⅰ ~ Ⅲ	Ⅰ ~ Ⅲ
	9 注入切羽 (位置)	±10mm以内	±10mm以外	—	—

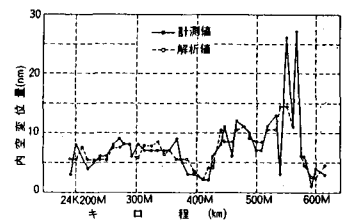


図-4 解析値と計測値の比較(ケース1)

表-5 解析結果

外的基準		水平変位			垂直変位		
CASE		1	2	3	4	5	6
支保パターン	導坑	0.818	0.620	0.654	0.762	0.655	0.971
	上半吹付コンクリート	0.504	0.532	—	0.517	0.849	—
	上半ロックボルト	0.556	0.293	—	0.360	0.374	—
地山性状	導坑ロックボルト	0.698	0.442	—	0.492	0.530	—
	地山	0.901	—	0.145	0.065	—	0.154
	地下水状況	0.079	—	0.051	0.378	—	0.476
地山性状	亀裂状況	0.676	—	0.602	0.556	—	0.606
	圧縮強度	0.162	—	0.209	0.428	—	0.416
	粘着力	0.142	—	0.272	0.287	—	0.230
注	注入切羽	0.311	—	0.287	0.329	—	0.329