

東京電力株式会社 電力建設所

正会員

丸山 秀俊 〇高辻 哲

1. よえがき

東京電力株式会社電力建設所においては、海岸埋立地に建設予定の発電所に通ずる進入道路のうち海岸に近い区間にトンネル工法を採用した。

トンネルの仕様は表-1に示す通りで、大型断面で比較的上被りの浅いものである。又、地質は、砂岩、泥岩互層を挟む凝灰質シルト岩(一軸圧縮強度30^{kg/cm²})で構成されている。従って、トンネルの施工にあたり掘削に伴う岩盤の緩みや、緩みの進展によって、支保工や覆工コンクリートに、どの程度の荷重が作用するかが懸念された。

そこで工事の施工に先立って、二次元の有限要素法による「掘削に伴う周辺岩盤の変位、支保工、覆工コンクリートに生ずる応力の解析」を行ない、設計、施工の参考にした。

更に施工中に、掘削岩盤及び覆工コンクリート等に計器を設置して、変位、歪みを測定し解析結果と比較した。本報告は、これらの結果の概要をとりまとめたものである。

表-1 トンネルの仕様

標準断面図	仕 様	
	延 長	仕 様
	掘削断面積	$A = 30.2 \text{ m}^2$
	内空	$A_{in} = 63.4 \text{ m}^2$
	巻 厚	$t = 10 \text{ cm}$
	土 被 り	$H = 12 \text{ m} \sim 30 \text{ m}$
	勾 配	$C = 6.7 \%$

2. 有限要素法による解析

2-1 計算条件

(1) 物性値

解析に先立ってボーリングを実施し、地層、物性値を調べた。その結果をもとに表-2のように推定した。

- ・地表面下5mは表土、以下は一様なシルト岩とした。
- ・変形係数 D_0 は除荷時を考慮して、試験値を100%割増した。
- ・掘削によって岩盤が緩んだり、風化等によって岩質が変化することが考えられるが、その影響をフリー係数 α を3として考慮した。
- ・初期地圧は、地表面が平坦であるので、被り深さに比例するとし、鉛直方向、水平方向相等しいとした。

表-2 解析に用いた物性値

	表 土	シルト岩	覆工コンクリート
変形係数 D_0 ^{kg/cm²}	3×10^2	4×10^3	2×10^5
ポアソン比 ν	0.40	0.375	0.20
せん断強度 τ_c ^{kg/cm²}	0.5	3.0	55
σ_c / τ_c	0.1, 0.5	0.1, 0.5	0.64
フリー係数 α	0.3	0.3 *3	1
β ^{day⁻¹}	1	1	1

(2) 計算断面と支承条件

トンネル断面、荷重共に、左右対称であるので、計算は、右側半断面について行ない、支承は、トンネル中心軸上を上下方向移動ローラー、底面を水平方向移動ローラー、他は変形自由とした。

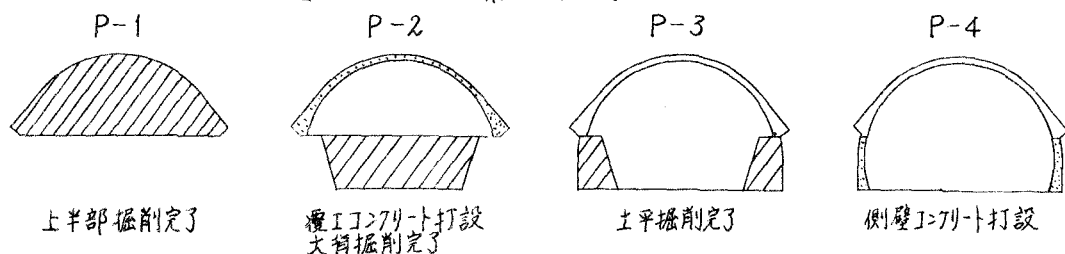
* トンネル壁面より深さ3m以内の領域

(3) 掘削順序

掘削の進行を4段階にわけ、それぞれP-1, -----P-4として解析した(図-1)。

2-2 解析方法

図-1 掘削順序



解析は 電力中央研究所地盤基礎研究室で開発されたプログラムによった。プログラムは、二次元の有限要素法による非線型な解析法で、計算過程を略記すると次の通りである。

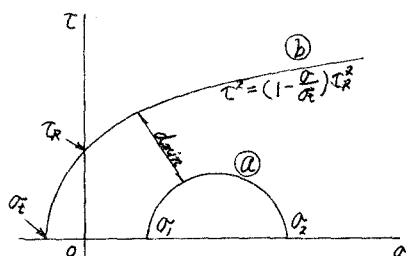
- ①掘削予定面における掘削前の地山の既存の地圧を求める。
- ②既存の地圧に対抗して、掘削予定面が自由面となるのに必要な掘削相当外力を求め、節点外力として掘削予定面に作用させる。
- ③既存の地圧と掘削相当外力のもとで、掘削後の残存岩盤内の応力及び変位を求める。
- ④掘削岩盤の緩み程度が、前項で求めた応力の作用応力円④(図-2)と、岩盤材料の破壊のモールの包絡線⑤との最小距離 d_{min} で表わされると考え、無次元化した次式で表わし、これを計算する。

$$R = f(\text{平均応力}) \times \frac{d_{min}}{\tau_r} = \left| \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2\tau_r} \right|^{1.04} \times \frac{25.8}{\tau_r} d_{min}$$

R は緩み係数と呼ばれ、又 $\tau_r, \sigma_1, \sigma_3$ はそれぞれ、岩盤材料の剪断強度、考えている要素の主応力、を示す。

- ⑤各掘削段階における変形係数 D 、ポアソン比 ν を R の関数として表わし、 D 及び ν を計算する。

図-2 モールの包絡線と d_{min}



2-3 解析結果

(1) 岩盤内の主応力

岩盤内の主応力は、上半掘削によって作用方向が変わり(図-3)、空洞部を包むアーチを形成するような向きになる。この傾向は、掘削段階が進行しても継続する。次に主応力の変化を、同一標高の点(地表下40m、図-3のX-X'軸)を選んで、応力集中係数として表示する(図-4)。掘削面附近の隅角部と、掘削面より5m程度の深さ附近において、応力集中が見られる。

(2) 岩盤の変形

トンネル周辺の岩盤の変形は、トンネル断面を縮小する方向におこる(図-5)。各掘削段階における変形量

図-3 上半掘削後(P=1)の

主応力の計算値

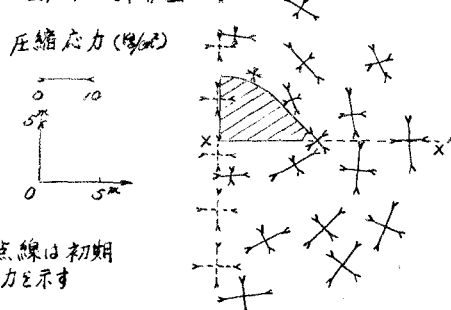


図-4 上半掘削に伴う岩盤の主応力の変化(計算値)

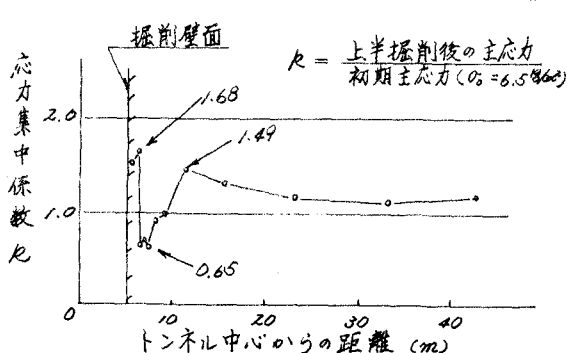


図-5 上半掘削後の
岩盤の変位分布(計算値)

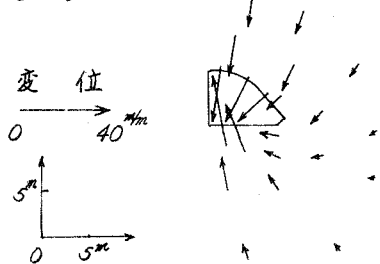
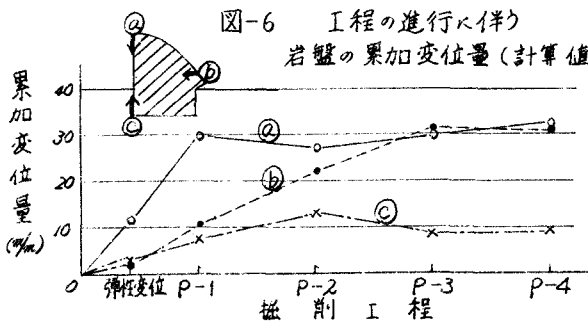


図-6 工程の進行に伴う
岩盤の累加変位量(計算値)



は、図-6に示す通りで、フラウン部の沈下は、上半掘削終了時にほぼ完了するが、スプリング部では、下部断面施工時も引き続き押出しがある。

(3) 緩み領域

工程の進行に伴う緩み領域の進展を、図-7に示す。なおポアソン比 ν の0.45以上を、緩み領域とした。

緩みは、ハンチ部及びスプリング部から起り、掘削の進行に伴って周辺に拡行行くが、完了時においても壁面よりほぼ3m以内の深さに、とどまっている。

(4) 覆工コンクリートの応力

覆工コンクリート内の応力の経時変化を、図-8に示す。アーチ部では、下部掘削時、特に土平部分を掘削する時に曲げモーメントをうけるようで、フラウン上面の引張応力は、 $15 \frac{kg}{cm^2}$ 程度になる。

3. 施工及び計測

3-1 施工

施工は、掘削岩盤が軟岩であり、破砕帯や砂層からの湧水がほとんどないこと、工期短縮、省力化、安全、などを考慮して、ロードヘッダーMRH-S90による機械掘削を採用した。

3-2 計測

施工中及び施工後を通じて、下記の項目について計測を実施した。

- ①地表面の変位 ②掘削岩盤の変位 ③上半支保工の変位 ④覆工アーチ内の応力 ⑤覆工アーチと側壁とのずれ ⑥側壁の押出量

これらのうちから、②、④について示すと、図-9、10のようになる。

なお覆工アーチの応力は、カールソン歪計を用いて測定した値を応力に換算したもので、打設後29日を基準として以後の変化を示してある。なお換算に用いたヤング係数は、 $E = 2.32 \times 10^5 \frac{kg}{cm^2}$ である。

図-7 掘削の進行に伴う緩み領域の進展

凡 例

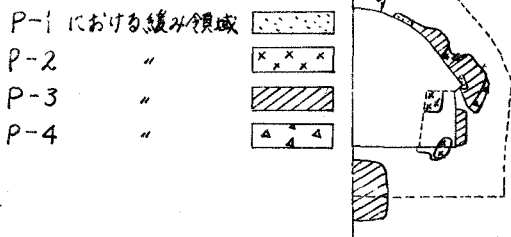


図-8 覆工コンクリートの主応力
(計算値)

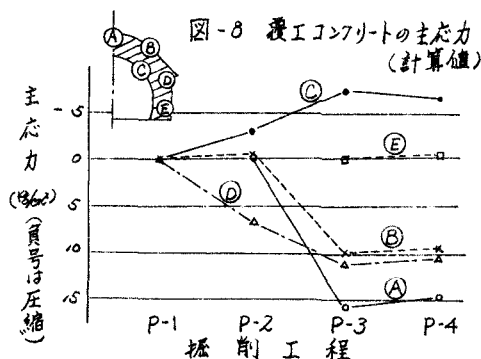


図-9 掘削岩盤の変位量(実測値)

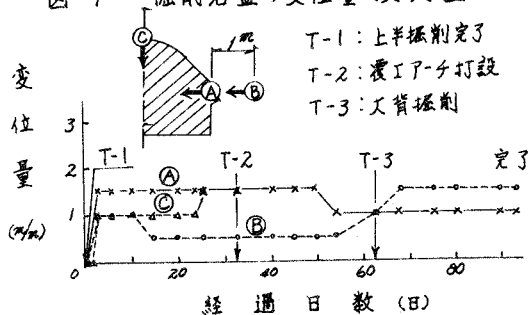
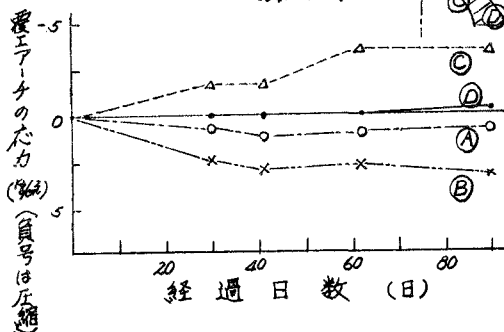


図-10 覆工アーチの応力(実測値)



4. 考察

掘削岩盤の変位、及び覆工アーチの応力について、計算値と実測値を比較したものを表-3に示す。

(1) 岩盤の変位

変位の实測値は微小で、掘削岩盤の変位量はほとんどなかったと考えられる。このように計算値と実測値に差がでた要因については、

①機械掘削を採用して、掘削岩盤を極力乱さなかったため、緩みがほとんど起こらなかった。

②計算に用いた岩盤材料の物性値(とくに変形係数)と

実際の値との値に相違があった。これについては、施工中、掘削岩盤から試料を採取して、試験した結果、変形係数として $D = 2.05 \times 10^{-3} \sim 2.71 \times 10^{-3}$ が得られ、これを用いると計算変位は、 $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$ になると考えられ、実測値にかなり近づく。当地点のような軟岩性の地質では、ボーリング時の泥水等の影響をうけて試料が劣化し易く、試験値が小さくでたと思われる。

③初期地圧、とくに水平方向成分が、過大だった。(計算にあたっては、安全側を考慮して、初期地圧を最大限にとった。)

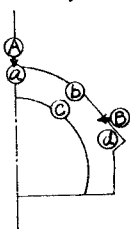
等が考えられる。

(2) 覆工アーチの応力

実測値はいずれも計算値より小さい値であったが、応力の向きは、ほとんど差がない。絶対値の相違については、前項の①、③及びコンクリートの乾燥収縮、温度変化等による測定上の誤差が考えられる。

最後に、本解析の実施にあたって多大の御指導をいただきました電力中央研究所地盤基礎研究室林博士、日比野博士、本島研究員、ならびにトンネル工事の施工、及び計測に協力された大成建設(株)広野作業所の関係者に深く感謝致します。

表-3 計算値と実測値の比較



	位置	計算値①	実測値②	②/①
変位	①	19.3 mm	1.5 mm	0.08
	②	14.0	1.5	0.11
覆工アーチの応力	③	14.7 kg/cm²	0.7 kg/cm²	0.05
	④	8.8	3.3	0.38
	⑤	* -4.6	-2.3	0.50
	⑥	* -1.6	0.2	-0.13

* 負号は圧縮を表す

1) 林 正夫、日比野 敏：地下の掘削にともなう周辺地盤の緩みの進展に関する解析

電力中央研究所報告 NO. 67095

2) 林 正夫、日比野 敏：地下の掘削に伴う地盤内の緩み領域の逐次的発達過程の解析法

第2回岩の力学国内シンポジウム講演集(1967)