

軟質地盤のトンネル掘削による地表沈下の予測解析

電力中央研究所 ○日比野 敏 駒田 広也
徳江 俊秀 本島 睦
九州電力株式会社 永島 英起

1 序

軟質地盤にトンネルを掘削する場合の地表沈下予測の数値解析を行なった。地表沈下に影響を与える要因は種々考えられるが、ここでは(1)トンネル掘削、(2)地下水面と浸透流、(3)地下水面の変化にともなう地盤圧縮の3項をとりあげ検討した。検討にさいしては有限要素法を利用した数値解析により各種現象をシミュレーションして地表沈下の予測を行なった。

2 周辺地盤の地質と物性値（○地点の場合）

ボーリング調査結果によれば、トンネル周辺の地盤は第三紀に属しかなり軟質である。礫岩、砂岩および泥岩が主であり、それらは層状に分布し若干の傾斜を有している。礫岩層は風化が進み固結度も極めて低い。これに対し、泥岩層は固結度が高く透水性も低い。地下水位は地表下約4mである。ボーリングコア（直径約120mm）について1軸圧縮試験と物理試験、ボーリング孔において透水試験とプレシオメータによる変形試験が行なわれた。これらの試験結果より地盤の各層の諸物性値を表-1に示すように推定し、3節以降の計算に用いた。

3 解析上の仮定および計算のケース

(a) 解析上の条件と仮定：トンネルは山岳トンネルを掘削する方式で、トンネル掘進機などを用いて掘削する場合について検討する。トンネルの形状は図-2に示す通りで、全断面で掘削しついでライニングコンクリートを打設する。トンネル直上の土被りは約23mである(図-1)。トンネル掘削による影響の検討にさいしては、トンネル掘削後14日後にライニングコンクリートが打設されるものとした。地下水面と浸透流の影響の検討にさいしては、トンネルは素掘りの状態に放置した場合を想定した。またトンネルより約100m離れたところでポテンシャル値を固定した。初期地圧は上載荷重相当分が静水圧的に作用しているものと仮定した。そして各種計算は2次元平面ひずみ状態について行なった。

(b) 計算のケース：ボーリング結果によれば地盤は層状構造をなし各層は傾斜している。したがって、位置によりトンネル周辺の地盤条件は異なってくる。そこで代表的に図-1に示すような2ケースについて検討することにした。トンネル周辺の地盤は、ケース1では比較的固結度のよい泥岩の場合であり、ケース2は固結度のあまりよくない礫岩と砂岩の場合である。なお図-1において、トンネル中心線に関し地盤は軸対称であるので、左半分ケース1、

表 - 1 計算に用いた諸物性値

		表土	礫岩	砂岩	泥岩	インクリト
弾性係数 E_0 (10^8)		0.1	0.4	0.8	10	200
ポアソン比 ν_0		0.43	0.4	0.4	0.38	0.20
フリップ 係数	α	0.8	0.8	0.8	0.5	1.0
	β ($1/\text{day}$)	0.016	0.016	0.016	0.016	0.02
破壊係 数	せん断強度 τ_0 (10^8)	0.1	0.15	0.2	6.3	55
	σ_c / τ_c	1	0.667	0.6	0.556	0.364
	a	1.2	1.5	1.5	1.5	1.333
	単位体積重量 (g/cm^3)	2.3	2.3	2.3	2.3	22
透水係数 k_s ($\%$ sec)		—	10^{-4}	3×10^{-4}	10^{-5}	—
飽和度 S_r (%)		—	85	85	85	—
間隙比 e		—	0.5	0.5	0.5	—

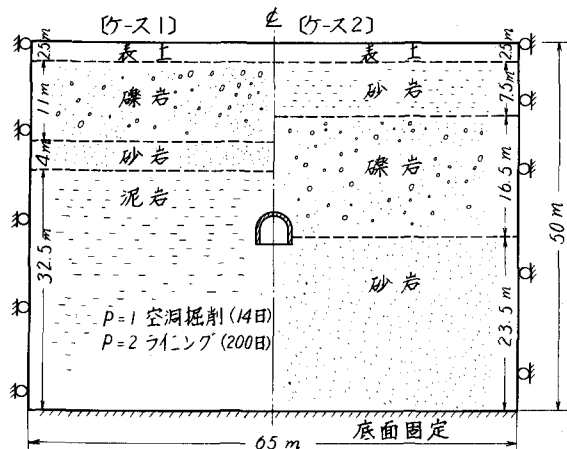


図-1 境界条件および2ケースの地盤条件

右半分にケース2の地盤条件を示した。計算結果についても同様な表現を用いた。

4 検討事項および計算結果の主なもの

地表沈下に影響を与える要因は種々考えられるが、地盤が軟弱であることおよび地下水位が地表面に近いことなどを考慮して、今回はつぎの3つについて検討する。(1)トンネル掘削による影響、(2)地下水面の変化と浸透流による影響、(3)地下水面の変化にともなう地盤圧縮の影響

4-1 トンネル掘削による影響

(a) 解析手法の概略：初期地圧、地盤の物性、地質条件、掘削工程、地盤の非線型な変形特性や破壊特性などを考慮して、掘削によって生ずる地盤の変形やライニングコンクリートの応力などを推定する。地盤の非線型な変形特性は、破壊の包絡線とモールの応力円との最短距離をパラメータ¹⁾にして表現し掘削解析で用いる。その詳細は文献にゆずる。

(b) 主要な計算結果：掘削によって生ずるライニング内応力を図-2に示す。ケース1の泥岩中にトンネルを掘削する場合には、応力はライニング全体にかなり一様な圧縮応力（負号）状態となっている。一方、ケース2の礫岩と砂岩層内に掘削する場合には、ライニングのアーチ部には引張り応力（正号）と圧縮応力が発生し曲げを受けていると思われるので注意を要する。図-3には掘削によって生ずる周辺地盤の鉛直変位の分布を示す。ケース1の場合にはトンネル直上の地表面の沈下は約0.5mmであるが、ケース2の場合には約3.5mmと約7倍の沈下量となっている。トンネルの通過する位置の地質条件の違いにより、地表沈下が大きく異なることがわかる。

4-2 地下水面の変化と浸透流による影響

(a) 解析手法の概略：地下水面は地表下約4mのところであり、トンネルを掘削するとトンネル内へは漏水が生じ、地下水面は低下する。そこでこの漏水および地下水面の変化を、非定常浸透流解析により求める。地盤中の浸透流の方程式は水頭値 H に関して次式で表わされる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) = 0$$

ここで k_x 、 k_y はそれぞれ x 、 y 方向の透水

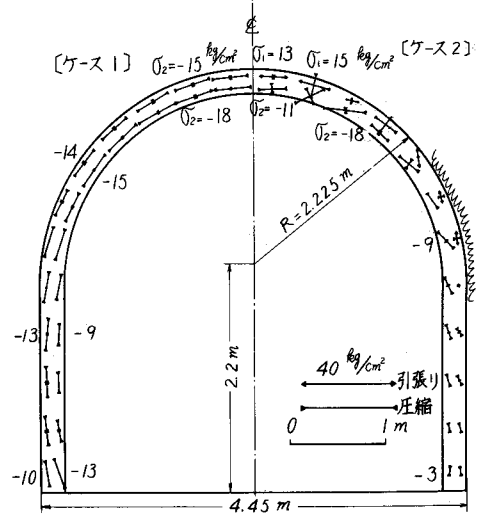


図-2 掘削後のライニング内の応力

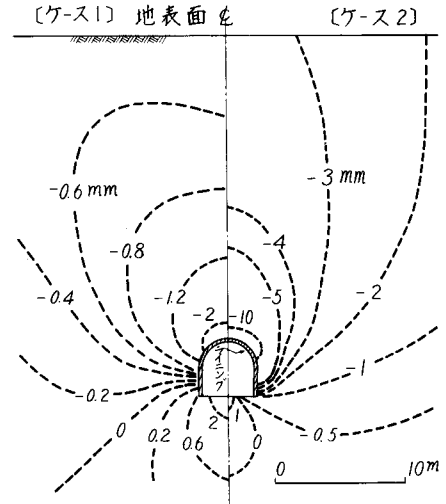


図-3 掘削による地盤の鉛直変位

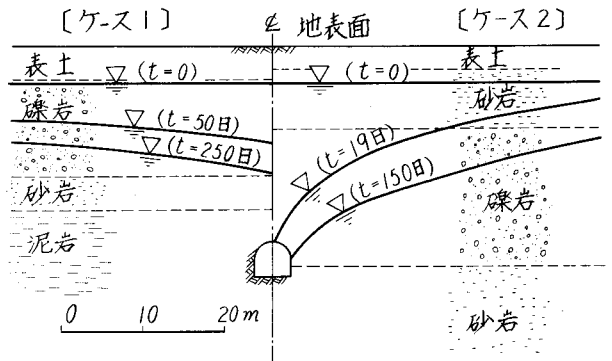


図-4 地下水位の経時変化

係数である。トンネル壁面と地下水面では水圧 $p = 0$ の条件下で、各時刻における水頭分布を有限要素法で求める。そして各時刻における浸透領域および地下水面や漏水量を求める。

つぎに地盤中に浸透流が存在すると、水と土粒子面との間に粘性抵抗が働くため、土粒子は変位することになる。そして、流れの場の土の単位体積に作用する上述の浸透力は、その点における動水勾配に水の単位体積重量 γ_w を乗じた物体力として次式で与えられる。

$$X = -\gamma_w \frac{\partial H}{\partial x}, \quad Y = -\gamma_w \frac{\partial H}{\partial y}$$

この物体力を有限要素の節点力に変換して、浸透流による地盤の変位を求める。

(b) 主要な計算結果：地下水面の変化を図-4に示す。泥岩中にトンネルを掘削したケース1の場合、トンネル掘削後250日でトンネル直上において約10m水位が低下した。一方、礫岩と砂岩層内に掘削したケース2の場合、掘削後19日で地下水位がトンネルの位置まで低下した。泥岩の透水係数は 10^{-5} cm/sec であるのに対し、礫岩、砂岩は 10^{-4} cm/sec と透水係数が大きいことによるものと思われる。図-5にはケース1の地下水位と漏水量の経時変化を示す。掘削初期ではトンネル内への漏水量は 0.33 l/min/m (ケース2では約 1.6 l/min/m) である。ケース2の場合の約 $1/5$ である。ポテンシャル分布をケース1については掘削後250日、ケース2については150日後について示すと図-6のようになる。つぎにこれらのポテンシャル分布の勾配より、地盤中に作用する浸透力を求め、この浸透力による地盤の変位を求めると図-7を得る。ケース1の場合トンネル直上の地表面では約0.5mmの沈下を生じている。この値は4-1のトンネル掘削により生じた地表沈下量とほぼ同程度のものである。一方、地下水位がトンネルの位置にまで達したケース2では、浸透流によって地盤は隆起する。これは浸透流の方向が上向きのために生ずる現象である。しかしながらつぎに述べる地盤

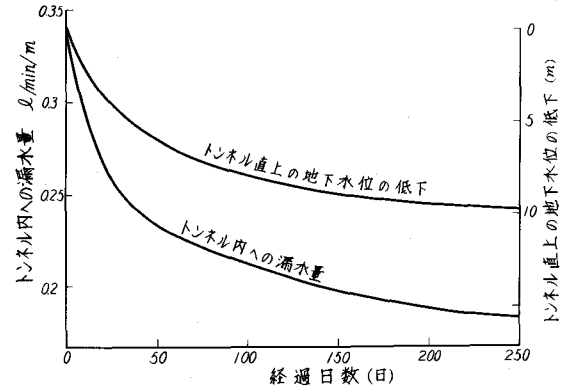


図-5 漏水量、地下水位と経過日数との関係(ケース1)

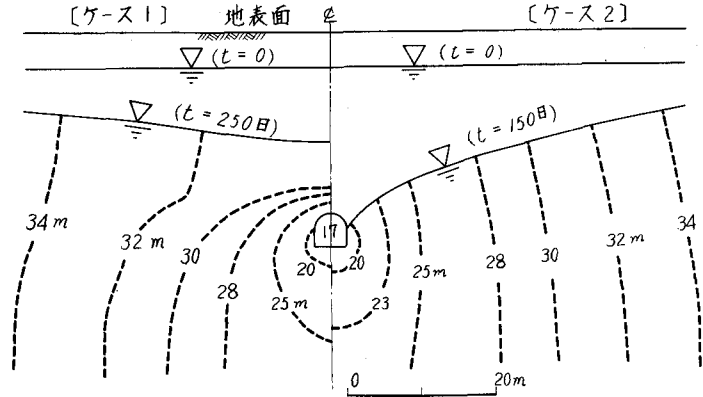


図-6 ポテンシャル分布

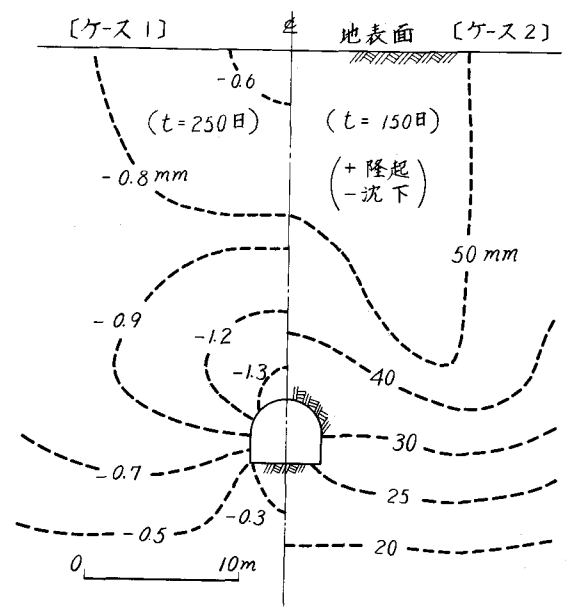


図-7 浸透流による地盤の鉛直変位

圧縮による沈下が大きく、この浸透流による隆起は相殺される。

4-3 地下水面の変化に伴う地盤圧縮の影響

当初地下水面下にあった地盤が、地下水面の低下によって地下水面上に位置するようになった場合、この地下水面の変動範囲に存在する地盤の密度は増加し、その結果地盤は圧縮されることになる。その密度変化はつぎのように考えられる。地下水面低下以前には地下水面下にあるのでその地盤の密度 γ' は

$$\gamma' = \gamma_t - \gamma_w = (G_s - \gamma_w) / (1 + e)$$

ここで γ' は浮力を考慮した土の密度、 γ_t は現場密度（飽和状態）、 G_s は土の真比重、 γ_w は水の密度（ $\approx 1 \text{ g/cm}^3$ ）、 e は間隙比である。

地下水面低下後地下水面上に位置するようになるとその地盤の密度 γ は

$$\gamma = (G_s + S_r \cdot e \cdot \gamma_w) / (1 + e)$$

となる。ここで S_r は飽和度である。したがって地下水面低下による密度の増分 $\Delta\gamma$ は、

$$\Delta\gamma = \gamma - \gamma' = (1 + e \cdot S_r) \gamma_w / (1 + e)$$

となる。ここでは飽和度を100%と考えると上式より $\Delta\gamma = \gamma_w$ となる。つまり、地下水面変動部分に位置する地盤の密度は、地下水面の低下によって γ_w だけ増加することになる。以上の条件を用いて地盤圧縮の計算を行なった結果を図-8に示す。トンネル直上の地表面で、ケース1の場合には約17mm、ケース2の場合には約95mmの地表沈下が生ずることが認められる。これらの値は前述のトンネル掘削および浸透流による地盤変形に比べ非常に大きく、今回の検討範囲では、地表沈下へ影響する3つの要因のうちで最も影響が大きいことがわかる。

上述の3つの要因によるトンネル直上での地表沈下は、表-2のようになり、最終的な沈下量はケース1では約18mm、ケース2では約4倍の73mmとなる。以上の検討によりトンネル掘削による地表沈下を少なくするためには、今回の場合、地下水面の変動を極力少なくすることが必要である。そしてそのためには掘削工法としては山岳工法よりはシールド圧気工法などの採用が考えられる。

5 結 論

軟弱地盤にトンネルを掘削する場合の地表沈下量の推定計算を行なった。地表沈下の要因として、(1)トンネル掘削、(2)地下水面変動による浸透流、(3)地下水面変動に伴う地盤圧縮をとりあげ検討した。そして今回の検討範囲ではつぎのことがわかった。(a)地表沈下に及ぼす影響としては上記の3つの要因のうちでは地盤圧縮の影響が最も大きい。したがって地下水位の低下を極力少なくすることが肝要である。(b)要因のうち地盤圧縮とトンネル掘削の影響は地表面が沈下する方向に作用するが、浸透流の影響はポテンシャルの分布形状により隆起する方向の場合もある。(c)地質や地盤物性の違いにより地表沈下が大きく左右されるので事前の十分な調査が肝要である。

6 文 献

- 1) 林・日比野：地下の開削に伴う周辺地盤の緩みの進展に関する解析，電中研報告 67095，1968。
- 2) 駒田・金沢：フィルダムの貯水池水位急降下時の非定常浸透流解析および安定解析，土木学会論文集，第240号，1975。
- 3) 川本・駒田・宮口：堤体および基礎における浸透流の有限要素解析について，土と基礎，第18巻，第12号，1970。

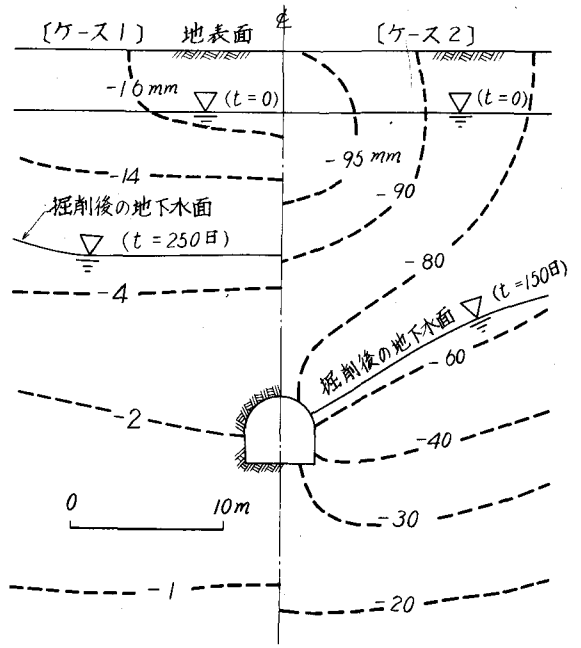


図-8 地下水面低下に伴う地盤圧縮による鉛直変位

表-2 地表面の沈下量 (mm)

	掘削による沈下	浸透流による沈下	地盤圧縮による沈下	合計
ケース1	0.5	0.5	17	18
ケース2	31	-53	95	73

Estimation of Surface Settlement Induced by Tunnelling in a Soft Ground

Satoshi HIBINO, Hiroya KOMADA
Toshihide TOKUE, Mutsumi MOTOZIMA
Civil Engineering Laboratory, Central Research
Institute of Electric Power Industry,
Abiko-shi, Chiba, Japan
Hideki NAGASHIMA
Kyushu Electric Power Co. Ltd.

Tunnelling a soft ground under a district of a city has often caused damage to buildings. It is, therefore, very important to estimate surface settlement induced by tunnelling in a soft ground.

Among many causes which induce surface settlement, the authors have examined three factors especially in this paper, which are 'tunnelling', 'seepage flow' and 'dewatering compression'. Here we mean by the word 'dewatering compression' as follows, a ground is compressed due to increase of density of the ground when a water level is lowered. Numerical simulation of the phenomena mentioned above has been carried out under considering non-linear deformability of ground materials and unsteady seepage flow. Finite element method has been adopted in the simulation.

Main results obtained are as follows.

(1) The most powerful factor which affects surface settlement is 'dewatering compression' in those cases we examined. The amount of surface settlement induced by dewatering compression has reached about three times of that induced by tunnelling or seepage flow.

(2) In order to prevent settlement, therefore, some excavation method, such as shield method with pressed air, which admits little leakage of water due to excavation should be adopted.

(3) Both tunnelling and dewatering compression always result in surface settlement. Seepage flow, however, causes settlement or heaving according to the condition of the water table.

(4) The conditions of geology or mechanical properties of a ground around a tunnel greatly affect surface settlement. In our cases examined here, the amount of surface settlement in the case of a ground being conglomerate is four times of that in the case of mudstone.