

地下水低下工法による砂質地山におけるトンネル切羽の安定

STABILITY OF CUTTING FACE BY DEWATERING IN SANDY SOIL GROUND

國見 宏*・河野伊一郎**・西垣 誠***

By Hiroshi KUNIMI, Ichiro KOHNO and Makoto NISHIGAKI

Quasi-3-dimensional seepage of groundwater was analyzed using the finite element method, to investigate the behavior of groundwater level in and around a tunnel during excavation utilizing the dewatering method. The simulated results agree well with the observed patterns of the groundwater distribution. In addition, effectiveness of water level control by distributed well points was analyzed using an unsteady 2-dimensional saturated-unsaturated model applied to the vertical plane across the tunnel cutting face. The results indicated that, by installing well points as excavation proceeds, the water content and, thus, the stability of the cutting surface can be effectively controlled.

Keywords: tunnel, ground water, stability of cutting face

1. ま え が き

NATMの対象は当初、一部の施工例を除いて山岳トンネルに限られていたが、最近になって都市トンネル、すなわち土砂層におけるトンネル掘削にまで広がる状況になった。わが国の都市域は帯水土砂層が多いことを考えると切羽自立安定性の判断、評価法の確立を急がねばならないが、これに関する研究例は比較的少ない。

切羽面の安定を保つためには地下水の排水を行うことは一般的だが、問題は排水により、砂質地盤では切羽面が乾燥しすぎてせん断強度が低下し、自立性が悪くなることがある。これは、切羽の安定が地山のせん断強度に左右されるためである。地山のせん断強度は含水比によって変化する。したがって地山には最大せん断強度を発揮する最適な含水比が存在すると考えられる。そのため、本論文は、地下水低下工法を採用したトンネルにおける地下水低下状況および切羽面における土中水分の経時的変化を求め切羽の安定性について検討した。

研究対象は千葉県国分川分水路トンネルで、地質の分

布状況は、第四紀洪積世の成田砂層が広く分布し、地下水位も高い地盤である。

まず、成田砂の物理的・力学的性質を求め、不飽和土の水分特性から Van-Genuchten の方法を適用して不飽和透水係数を推定した。次に、準三次元浸透解析コードを用い、現地でのディープウェル、ウェルポイントの設置をそのまま地下水挙動解析の中に組み込み解析した。その平面的な地下水位の解析結果をもとにして、トンネル切羽面の水分移動を定量的に把握するため、鉛直二次元飽和-不飽和浸透解析コードを用いて、土中の水分変化を解析した。一方不飽和土の含水比と粘着力、内部摩擦角の関係を求め、地下水の排水と切羽安定について考察を加えた。

2. 土砂地山の安定

山岳トンネル掘削において、最も重要なのは、切羽の自立性であり、地山の力学的性質（せん断強度等）および物理的性質（均等係数、細粒分含有率、含水比）、土被り、地下水などにより切羽の自立性が左右される。すなわち、自立性いかにによっては、設計、施工法が大きく異なり、トンネル建設の経済性、安全性、工期に大きく影響を及ぼすことになる。一方土砂地山の切羽の安定は、トンネル周辺地山の応力と密度、内部摩擦角、粘着

* 正会員 清水建設(株)技術研究所副所長

(〒135 江東区越中島 3-4-17)

** 正会員 工博 岡山大学教授 工学部土木工学科

(〒700 岡山市津島中 3-1-1)

*** 正会員 工博 岡山大学助教授 工学部土木工学科(同上)

力、粒度分布、含水比に大きく左右される。土砂トンネルでは、地下水の有無は特に重要な問題である。

切羽崩壊の原因は、地下水がある場合に、掘削する際に生じる動水勾配により有効応力が低下するため、地山のせん断強度が低減して、流動化現象を起こす場合と、掘削によって生じた地山応力の増分に耐えきれなくなつて、破壊に至る場合とがある。

切羽の自立性が得られない場合には、地山の土質特性、地下水の状態、周辺の状況等を十分に考慮したうえで、これに適した補助工法を選ぶことが重要である。ここでは補助工法の1つである地下水低下工法に注目し、掘削地盤の地下水挙動、切羽面における含水比変化に基づくせん断強度の変動と切羽の安定性について検討する。

不飽和土のせん断強度は含水比によって変化する。特に粘着力は、不飽和土になると、サクシヨンが見掛けの粘着力として作用するため、せん断強度が増加する。

見掛けの粘着力は、含水比により増減するので、これを最大にする含水比を求めることが、切羽の安定性検討のために必要となる。地山の含水比は、地下水位や地下水低下後の経過時間によって変動するが、これを地下水低下工法等による施工管理で人為的にコントロールすることは可能である。ディープウェル、ウェルポイントの運転や休止時期の調整により、切羽の水分量を管理するのは、切羽の安定に最適な含水比、すなわち最大の粘着力が得られるようにするためである。

3. 地山内の含水率分布の予測

土砂地山にトンネルを掘削する場合の問題点は、掘削時の切羽の自立性、地下水対策、地表面沈下、近接構造物対策および環境へ与える影響等である。地下水がある場合に切羽を安全に施工するためには、排水、止水等により地下水を切羽から排除することが必要であるが、排水の場合水位の低下が広域におよび地山の沈下や周辺構造物に対する影響等の問題が生じる。ここでは地下水低下工法による周辺およびトンネル部の水位低下を調べるために、有限要素法による広域地下水の準三次元浸透解析¹⁾を用いて解析を行う。すなわち三次元地盤内を流れる浸透に関して、鉛直方向の流れの成分が微小であるとして無視する Dupuit-Forchheimer の仮定を用いると、ダルシーの運動方程式と連続の式より次の方程式を得る。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(T_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} + q \quad (i, j=1, 2) \dots \dots (1)$$

ここに、 h ：全水頭、 T ：透水量係数、 S ：貯留係数、 q ：降雨などにより流入する量や、揚水などにより流出する流量

この基礎方程式をもとにした本解析手法の最大の特徴

は、透水量係数および貯留係数が、全水頭の関数として示される準三次元的解析であるという点である。

解析条件は、解析領域、境界条件、初期条件、対象地盤の帯水層定数、ディープウェル、ウェルポイントの位置と揚水流量である。

次にウェルポイントによる地下水制御効果を判定するために、有限要素法による鉛直二次元飽和・不飽和浸透解析コードを用い、トンネル切羽周辺の土中水分の経時的变化を解析する。飽和・不飽和領域を考慮に入れた鉛直二次元浸透解析²⁾を支配する基礎方程式は、次式のように書き表わされる。

$$\{C(\psi) + \beta S_s\} \frac{\partial \psi}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{ij} \frac{\partial \psi}{\partial x_j} + k_{ij} \right) = 0 \dots \dots (2)$$

$$C(\psi) = \frac{\partial \theta}{\partial \psi}, \quad S_s = \frac{\partial n}{\partial \psi}$$

$$\beta = \begin{cases} 0: \text{不飽和領域} \\ 1: \text{飽和領域} \end{cases}$$

ここに、 S_s ：比貯留係数、 $C(\psi)$ ：比水分容量、 n ：間隙率、 θ ：体積含水率、 k ：透水係数、 ψ ：圧力水頭

この解析コードは全水頭を位置水頭と圧力水頭の和として取り扱い、飽和領域では圧力水頭が正、不飽和領域では圧力水頭が負としているので、自由水面は圧力水頭が零の点を連ねた面であるとしている。

切羽周辺における含水率の分布は、対象土に対するサクシヨンと含水量との関係、すなわち P^F -水分曲線より求める。

4. 実際の工事への適用

3. で述べた、有限要素法による準三次元浸透解析と鉛直二次元飽和・不飽和浸透解析を用い、解析値と実測値を比較した。研究対象は、国分川分水路トンネルである。

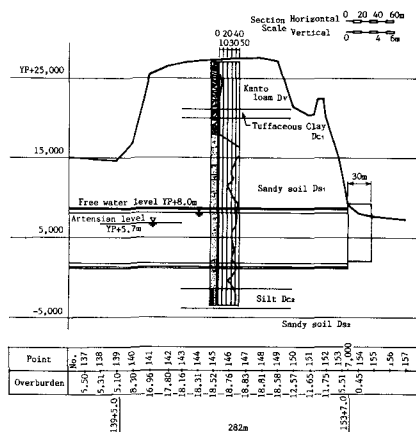


Fig. 1 Soil Profile.

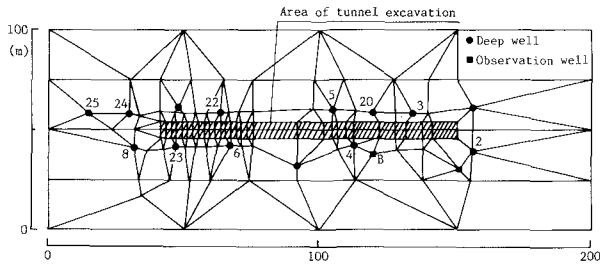


Fig. 2 Finite Element Model for Surrounding Tunnel.

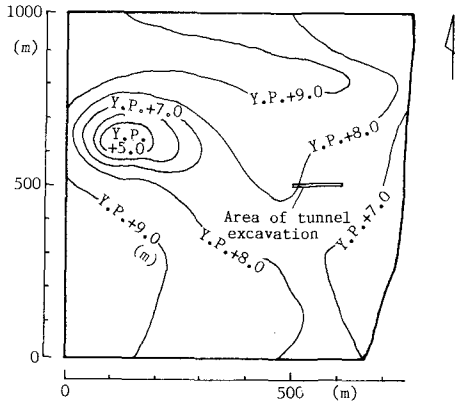


Fig. 3 Initial Groundwater Level Obtained by Observation (Sept. 1983).

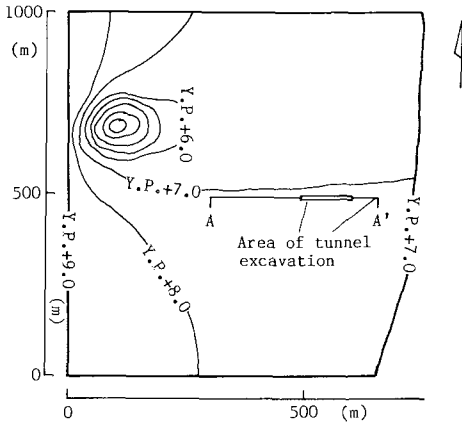


Fig. 4 Analytical Result of Groundwater Level at Initial Steady State.

(1) 対象地区の地質と解析領域について

トンネルが掘削される付近の地質は、Fig. 1 に示すように上層から関東ローム (D_v)、上部洪積砂層 (D_{s1})、洪積粘土層 (D_{e2})、下部洪積砂層 (D_{s2}) に分けられる。これらの地層は、ほぼ水平に堆積している。ここで掘削対象となったのは D_{s1} 層である。

この領域は西側に坂川、江戸川、東側を国分川に囲まれている。西側、北側、南側の境界は水位低下工法によ

Table 1 Soil Properties.

Test item	Value	
Gradation	Gravel %	2.0
	Sand %	94.0
	Silt %	3.0
	Clay %	2.0
D_{60} (mm)	0.2	
D_{30} (mm)	0.13	
D_{10} (mm)	0.08	
$U_c = D_{60}/D_{10}$	2.50	
ρ_d min. t/m^3	1.091	
ρ_d max. t/m^3	1.444	
Void ratio e	0.849~1.448	

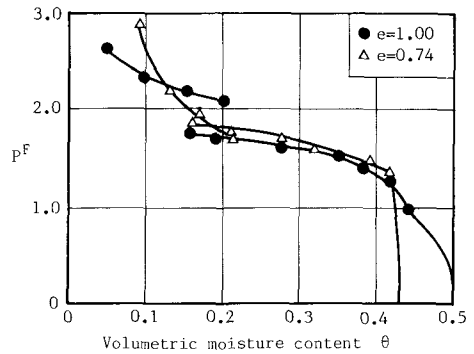


Fig. 5 Water Retention Curve.

り地下水の影響が及ばない範囲を境界とし、南北はトンネル坑口部より500mの地点を境界とし、西側はトンネルの掘削方向に当たるため、坑口部より600mの地点を境界とし要素分割を行った。ここで問題としているのは広域の地下水位よりも、トンネル周辺およびトンネル内の地下水位なのでこの付近の要素分割を細かくし、Fig. 2 に示す。

解析領域の境界条件には、水頭が既知と、流量が既知の場合の2種類がある。東側境界の国分川は河川であるので水位を固定した。また施工前の観測井および民家の井戸の水位観測結果により作成された等水頭線図 (Fig. 3 参照) をもとにして西側の境界から、東側の境界に向かって地下水面に勾配をつけて水位を固定した。また北側、南側の境界を不透水性の境界とした。

Fig. 3 により西側境界を Y.P. +9 m、国分川河川水位を Y.P. +7 m と初期水位を与えた。また領域の左上で地下水位が低くなっているが、これは既存の揚水が原因で地下水位が低くなっていると考えられるため、この点の水位を実測より Y.P. +1.0 m として固定した。境界条件や内部条件を修正して数値解析した結果を Fig. 4 に示す。この Fig. 4 は実測値 (Fig. 3) と比較的良く一致している。この解析結果を初期条件としてトンネル掘削を考慮した非定常解析を行った。

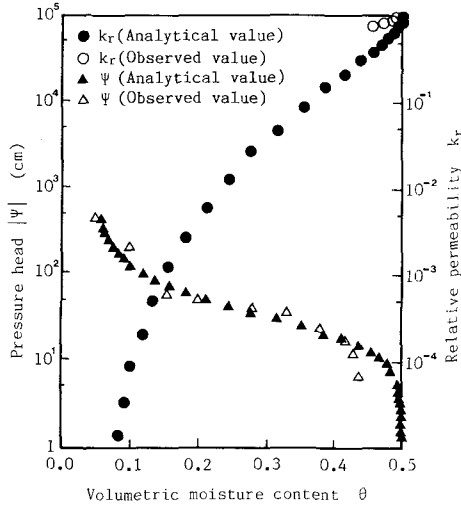


Fig. 6 Partial Saturated Coefficient of Permeability (Void ratio 1.00).

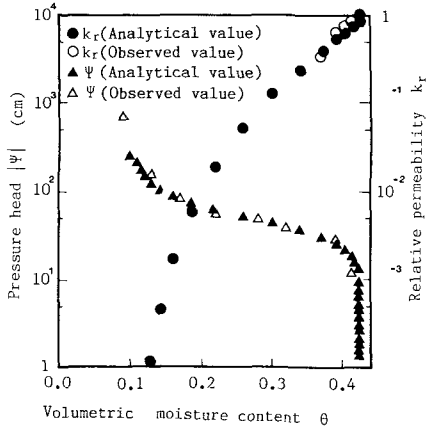


Fig. 7 Partial Saturated Coefficient of Permeability (Void ratio 0.74).

(2) 成田砂の物理的性質

成田砂層の物理試験結果を Table 1 に示す。三角座標による土の分類は砂で、粒径 0.1~0.4 mm, $U_c < 4\sim5$ なので粒度分布が悪い。鉛直二次元飽和-不飽和浸透解析を行うにあたり、成田砂層より採取された不攪乱試料を用いて P^F 値と体積含水率の関係を土柱法および改良型加圧板法³⁾によって室内実験より求めた。その結果を Fig. 5 に示す。

不飽和透水係数は加圧型透水試験⁴⁾によって求めた実験値と、Van-Genuchten⁵⁾の指定方法を併用して定めた。体積含水率-比透水係数を Fig. 6, Fig. 7 に間隙率の異なる 2 つの試料について示す。この Van-Genuchten の方法を用いた解析結果は、加圧型透水試験機によって求めた不飽和透水係数の実験値と、 $e=0.74$ の場合はよく一致しているが、 $e=1.00$ の場合は実際の実験値より少し

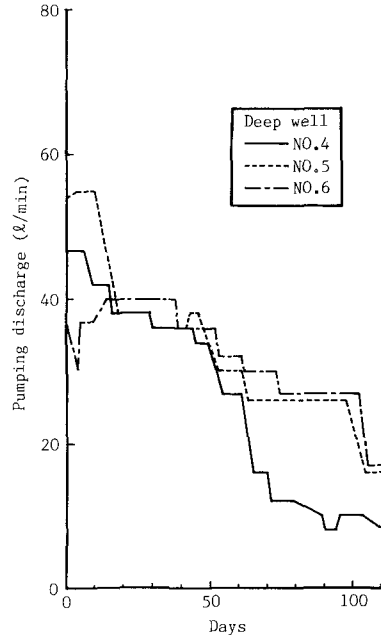


Fig. 8 Time Variation of Pumping discharge.

小さい値となっている。

(3) 対象地盤の帯水層定数

本解析で特に問題となるのはトンネル周辺および坑内の地下水位である。地質は第四紀洪積世の砂層を主体とする成田層が広く厚く分布し、成田層の上層に関東ロームが最大 10 m, 平均 5~7 m の厚さで覆っている。地下水は高く、クラウン付近 Y.P. +8.0 m に位置している。さらにトンネル底盤より 2~3 m 下に固結粘土・シルト層からなる不透水層があり、その下は砂層である。地下水低下工法を計画するに際し、対象層の透水係数、貯留係数を把握するために揚水試験を実施した。このときの結果をもとにして Jacob の方法により求めた水理定数は、透水係数が $k=7.0 \times 10^{-3}$ cm/s で、貯留係数が $S_y=0.07$ である。

(4) 地下水位低下の現状

揚水試験から得られた帯水層定数を用いて、Theis の非定常の地下水位低下計算によりディープウェルを 25 m ピッチの千鳥に側壁より 3.6 m 離して 29 本配列し揚水した結果、トンネル上半底盤より約 2.0 m 下まで水位低下 (Y.P. +2.5 m) が図れたが、インパート下方の不透水層によりディープウェルの設置深度に限界があるためインパート底盤まで低下させることができなかった。したがってウェルポイントをインパートに千鳥両側 1.8 m ピッチで打設し、インパート底盤より 80 cm 程度下まで地下水位を低下させた。以上のように地表からディープウェル、坑内からウェルポイントで目標水位まで低下させることができた。ディープウェルの揚水量と

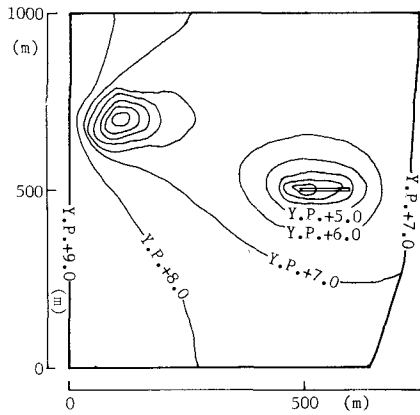


Fig. 9 Analytical Result (after 20 days).

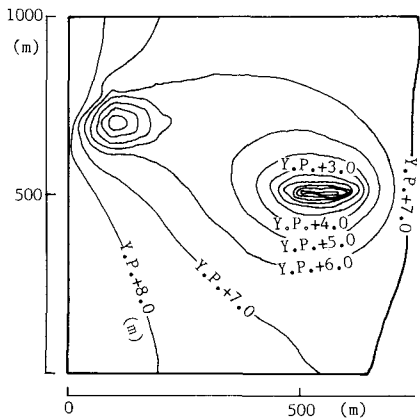


Fig. 10 Analytical Result (after 97 days).

経時変化を Fig. 8 に示す。

(5) 準三次元浸透解析

(1)~(4) で説明した解析条件を用いて有限要素法による準三次元浸透解析を行った。ウェルポイントの境界条件は掘削するまでは普通の条件として扱い、ウェルポイントを設置後に初めて水位固定条件とした。またウェルポイントの先端位置が経時的に進行するため、この影響を解析中に考慮した。またディープウェルの揚水流量が Fig. 8 のように時間的変化をしているため、この変動も考慮して解析した。なお、定流量揚水の境界条件であるディープウェル内の水位が、ポンプの位置より低くなるとディープウェルの境界条件を水位固定条件に変更できるようにした。また、ディープウェルの周囲の地下水水位が、ディープウェル内の固定水位より低くなる場合に、ディープウェルを水位一定条件のまま固定すると、ディープウェルが注水井のようになる。この不都合を回避するために、揚水流量が負になると、ディープウェルの水位固定条件を自動的に取り除くようにして、実際の現象に対応した数値解析手法を用いた。この解析結果

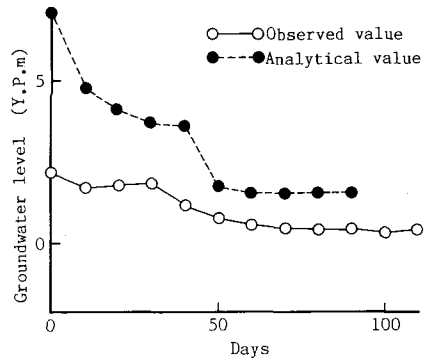


Fig. 11 Comparison of Groundwater Level (site A).

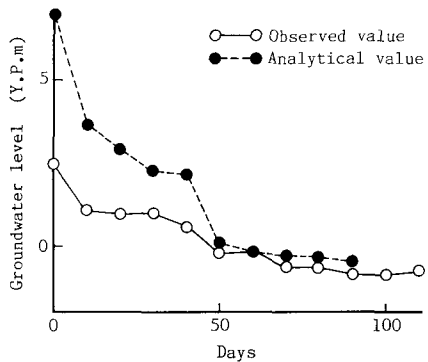


Fig. 12 Comparison of Groundwater Level (site B).

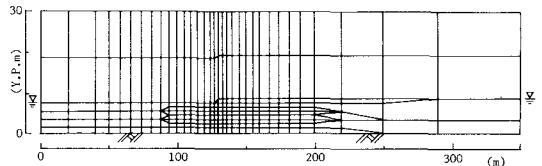


Fig. 13 Finite Element Model of Analytical Area (Profile).

を Fig. 9, Fig. 10 に示す。また Fig. 11, Fig. 12 には Fig. 2 の A, B 点での観測における地下水の経時的変動の実測値と解析値を対比して示した。ここで初期の計算値が高いのは、初期条件とした日時より以前に試験的なものであったが部分的な揚水を行ったためその影響が現われていると考えられる。東側境界に近い A 点での地下水水位高が、実測値より全体的に高くなっている原因は、東側境界の国分川を定水位境界としたが、この境界がトンネル坑口部より約 150 m の距離にあるため、実際よりも過大かん養境界となったためと考えられる。しかし数十日以降の実測値は解析結果と比較的一致していると考えられる。

(6) 飽和・不飽和浸透解析

a) 地下水低下による土中水分の変動解析

トンネル切羽周囲での水分量の変化を予測する目的で、ウェルポイントの設置を考慮して、有限要素法によ

る飽和-不飽和浸透解析を行った。

解析領域は、トンネル中心線に沿って Fig. 4 の A-A' に示す坑口部より掘削進行方向に 300 m、逆方向に 50 m とした。また鉛直方向は、不透水層より上方 30 m とした。この解析領域の要素分割図を Fig. 13 に示す。

準三次元浸透解析結果では、Fig. 14 に示すように 80 日以降境界の地下水位がほとんど変化しないので、これを初期条件とし、両端の地下水位を Y.P. +4.5 m, Y.P. +5.6 m で固定した。また、ウェルポイントが、坑口部より 50 m の地点まで設置されているので、坑口

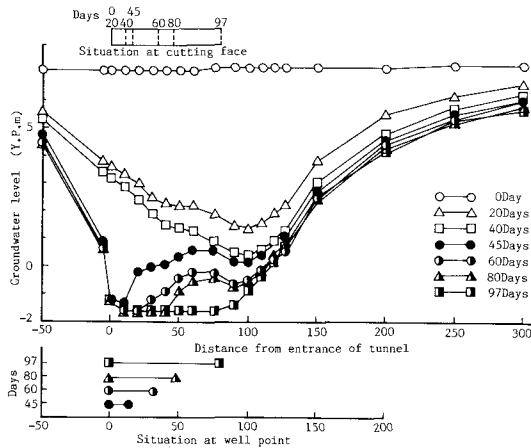


Fig. 14 Groundwater Level by Quasi-Three Dimensional seepage Analysis.

より 50 m までを Y.P. -1.6 m に固定して、初期条件のための定常解析を行った。解析結果を Fig. 15 に示す。次にこの解析結果をもとにして切羽周辺の水分量の経時的变化を調べるために、坑口より 80 m 地点までを Y.P. -1.6 m に固定し 20 日後の非定常解析を行った。解析結果を Fig. 16 に示す。また鉛直断面の水分量の経時的变化を Fig. 17 に示す。トンネル掘削に伴ってウェルポイントを設置していくと、切羽面が経時的に乾燥していくのがわかる。その度合は切羽面に近い方が大きい。また、Y.P. +1.5 m 以上では $\theta=0.14$ で一定であり、水分量の経時的变化はみられなかった。これはディープウェルによって地下水位が低下してしまっていることによる。切羽で採取した試料で含水量試験を行った。含水

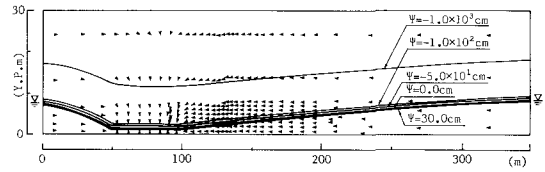


Fig. 15 Analytical Result at initial Steady State.

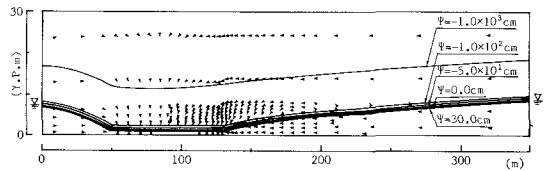


Fig. 16 Analytical Result (after 20 days).

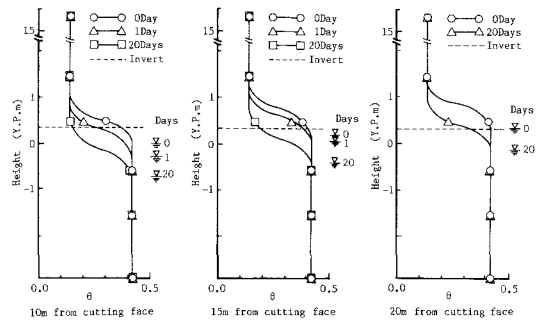
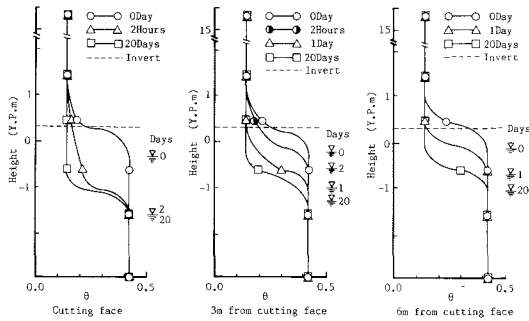


Fig. 17 Time Variations of Volumetric Moisture Content.

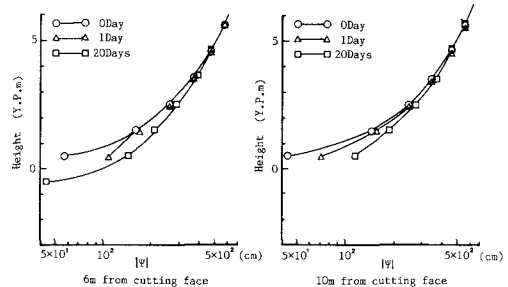
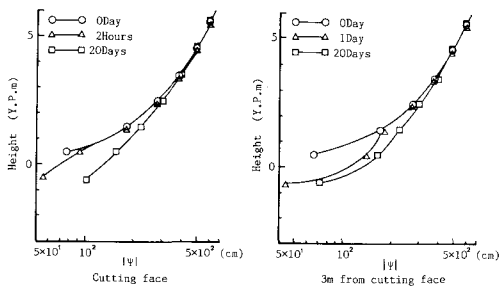


Fig. 18 Time Variations of Suction.

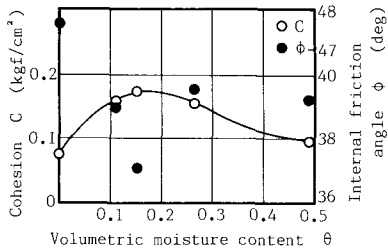


Fig. 19 Relationship between θ , c and θ , ϕ .

比は9.6~20.0%で平均12.6%であった。砂層は乾燥しすぎても、また水分量が多すぎても切羽の自立性が悪くなる。したがって地下水位を低下させて切羽の安定を図るためには水分量を考慮した地下水低下工法を実施することが重要である。

b) 土中水分とサクシオン

土中水は、粒子表面の粘着力、間隙中の気液の界面に生じる毛管力、土中水に含まれる溶質による浸透圧などによって保持されているが、物理的にはこれらに抗して土中水を引き出すのに必要な力がサクシオンと考えてよい。サクシオンは砂に見掛けの粘着力を發揮させ、せん断抵抗力を増大させる。飽和・不飽和浸透解析より得た切羽面と10m地点までの鉛直断面におけるサクシオンの経時の変化を Fig. 18 に示す。これより、自由水面が下がるにつれ、また自由水面より鉛直上方に離れるに従いサクシオンは増加する。しかし、切羽より10m地点までは、サクシオンの経時の変化は切羽面からの距離に依存しない。さらに Fig. 17 と比較すると土中水分が少なくなるとサクシオンが増大することがわかる。

c) 不飽和土の含水比と粘着力

不飽和土の三軸試験を行い、含水比と粘着力、内部摩擦角の関係を求めた結果を、Fig. 19 に示す。Fig. 19 より、最大の見掛けの粘着力をもつ体積含水率は $\theta=0.15$ の付近であり、切羽の体積含水率をこの程度になるように管理すれば、切羽が最も安定しやすい状態になる。このときの見掛けの粘着力は、0.18 kgf/cm² である。内部摩擦角に関しては明確な差異はみられない。

(7) 地山の安定解析

不飽和状態の中で、最も見掛けの粘着力が大きい状態に土の体積含水率を管理しても、その状態で切羽が安定であるかどうかを検討しなければならない。したがって、村山式により切羽安定解析を行った。村山は切羽の安定をその無支持面と同じ高さを有する二次元の帯状の無支持に対するアーチングの問題として解析を行っている。Fig. 20 に示すように、切羽前面に生ずるすべり面の形状は、切羽無支持面下端を通り、切羽頂部の位置で垂直方向となる対数らせんと考え、この対数らせんは、曲線上の任意の点における曲線への垂直と動径とのなす角が

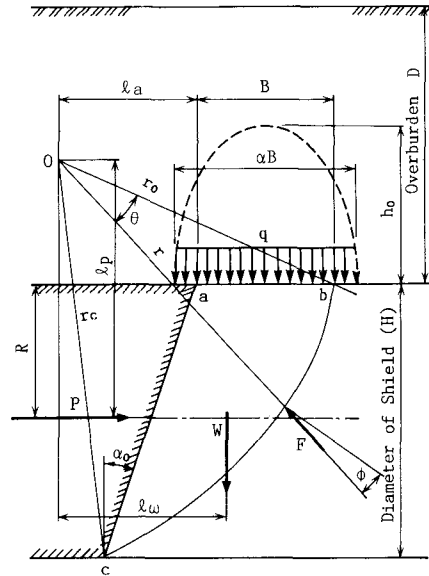


Fig. 20 Cutting Face Pressure for Sliding Surface.

常に地山の内部摩擦角 ϕ であるような、らせんで次式⁶⁾で示される。

$$r = r_0 e^{\alpha \tan \phi} \dots \dots \dots (3)$$

対数らせんの中心Oのまわりの各力のモーメントのつり合いから、切羽押え力は次式で求められる。

$$P = \frac{1}{l_p} \left\{ W \cdot l_w + q \cdot B \left(l_a + \frac{B}{2} \right) - \frac{C}{2 \tan \phi} (r_c^2 - r_0^2) \right\} \dots \dots \dots (4)$$

ただし

$$q = \frac{\alpha B (\gamma - 2C/\alpha B)}{2K \tan \phi} [1 - \exp(D/\alpha B) \tan \phi] \dots \dots (5)$$

ここで、式(4)、(5)中の記号は Fig. 20 に示す。

なお土被り D が B に比して大きいとき、ほぼ $D > 1.5B$ ならば近似的に

$$q = \frac{\alpha B (\gamma - 2C/\alpha B)}{2K \tan \phi}$$

ここに、 γ :土の単位体積重量、 ϕ :土の内部摩擦角、 C :土の粘着力、 D :土被り、 r_0, r_c :対数らせんにおける b, c 点の動径、 K :経験的係数でテルツァーギの実験によれば $K=1 \sim 1.5$ で一般に $K=1$ を使用、 α :係数で実験によれば $\alpha \approx 1.8$ が適当と考えられる。

ここで、式(4)で求める P が $P \leq 0$ の場合は切羽は安定することになり、 $P > 0$ の場合は切羽は安定せず、何らかの切羽面への押え力が必要となる。

トンネル土被り $D=20$ m、単位体積重量 $\gamma=2.0$ t/m³、内部摩擦角 $\phi=39^\circ$ とし、トンネル径(切羽面の開放高さ)をパラメーターに粘着力と必要押え力の関係を Fig. 21 に示した。

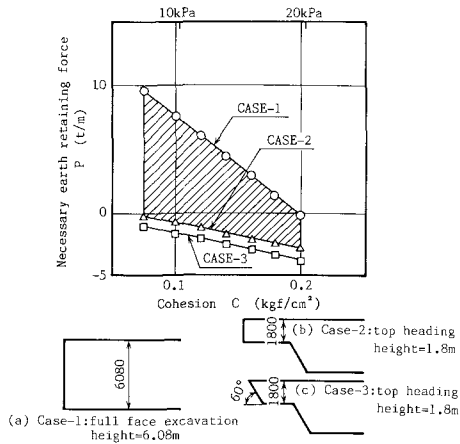


Fig. 21 Relationship between Cohesion and Necessary Earth Retaining Force.

CASE-1 は、トンネル上半を等価な断面積で置き換え、トンネル径を求めた場合であり、CASE-2 は、リング部の高さをトンネル径とした場合、CASE-3 はCASE-2 にリング面の傾斜を考慮した場合である。

実施工では、核部掘削による影響が切羽面に及ぼすと考えられるので、CASE-1 と CASE-2 の間と考えられる。したがって、Fig. 21 より $P < 0$ となる粘着力は $C = 0.075 \sim 0.2 \text{ kgf/cm}^2$ の間になり、この範囲で切羽の安定と不安定の境界が存在する。したがって、この範囲のこの粘着力は、砂質土の含水比の微妙な変化によって変化するため、切羽面の含水比をコントロールすることがきわめて重要であることがわかる。切羽の安定性を向上させるために、本トンネルでは、観測井による地下水位を測定し、切羽の進行に合わせた揚水管理を実施した。また掘削は、鉄矢木先打ちによるリングカット方式 (CASE-3) で切羽に傾斜をつけ、一部では、鏡吹付けコンクリートなどの対策工を実施した。しかし3か所で小崩壊が発生したものの、切羽の自立が困難な未固結砂層にもかかわらず順調に工事を進めることができた。

5. 結 論

砂地盤におけるトンネル切羽の安定を図る目的で施工した地下排水工法の効果を明らかにするため、基礎実験と浸透解析を行い実測値と比較した。すなわち成田砂の物理的性質を調べ、不飽和透水係数を求め、それらの実験データをもとにして、トンネル掘削時における地下水位低下を準三次元浸透解析によって求めるとともに、そ

の水位低下による切羽周辺の水分量の変化を飽和-不飽和浸透解析した。

以下に本研究で得られた結果を述べる。

(1) 準三次元浸透解析による解析結果を、地下水位の経時的変動を実測した結果と比較したところ、両者はよく一致した。

(2) トンネル中心線の鉛直二次元浸透解析により、トンネル切羽周辺の地下水挙動によって、ウェルポイント設置後、切羽面の水分量は低下する。その低下の度合は、切羽面に近い方が大きい。また切羽面において、Y.P. +1.5 m 以上では水分量の経時的変化はみられなかった。

(3) 不飽和土の三軸試験結果から体積含水率と粘着力の関係性を求めた。その結果、最大の見掛けの粘着力を発揮する最適な体積含水率は本試料では $\theta = 0.15$ 付近であり、このときの粘着力は $c = 0.18 \text{ kgf/cm}^2$ である。

(4) 一方、村山式により切羽の安定解析を行った。その結果粘着力 $0.075 \sim 0.2 \text{ kgf/cm}^2$ の間において、切羽の安定、不安定の境界が存在するため、見掛けの粘着力の発揮を期待するために切羽における含水比をコントロールすることが重要であると考えられる。

本研究で得られた成果は以上であるが、準三次元浸透解析において、周囲の境界条件のデータが少なく、地表より推定を行ったが、今後広域地下水を問題とする場合は、影響圏までの地下水調査と計測が必要である。本研究が今後 NATM の発展の一助になれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 河野伊一郎・西垣 誠：有限要素法による広域地下水の準三次元浸透解析，岡山大学工学部土木工学教室，1983。
- 2) 赤井浩一・大西有三・西垣 誠：有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析，土木学会論文報告集，第264号，pp.87~96，1977。
- 3) 河野伊一郎・西垣 誠・川崎 元・家治川勝：不飽和土の力学的性質に関する実験的研究，第39回土木学会年次学術講演会講演概要集，pp.33~34，1984。
- 4) 河野伊一郎・西垣 誠：室内透水試験法に関する2，3の考察，土質工学会論文報告集，Vol.22，No.4，pp.181~190，1982。
- 5) Van Genuchten, R. : A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Sci. Soc. Am. J., Vol.44, pp.892~898, 1980。
- 6) 土質工学会：シールド工法と土質，pp.24~25，1984。

(1989.12.18・受付)