

高压湧水下のトンネル工における水抜孔 の効果と注入域の適正規模

EFFECTIVENESS OF DRAIN HOLES AND PROPER DIMENSIONING
OF GROUTING ZONE FOR TUNNELING IN HIGH WATER
PRESSURE ACTING GROUND

足立 紀尚*・田村 武**

By Toshihisa ADACHI and Takeshi TAMURA

1. はじめに

海底トンネルに限らず、定常的な高压湧水を伴う地山内にトンネルを掘削する際に、水の処理がもっとも重要な問題となる。高压湧水がある場合、掘削面から離れて地山内に水抜孔（水抜トンネル）を設け水を抜くと切端や地山が安定することは周知の事実である。水抜孔を開閉して水圧を変化させると地山にいかなる影響を与えるかを調べる試験が青函トンネル竜飛方試験坑で破碎帯を対象に行われた。その結果、水を抜きながら掘削した後水抜きを中止すると支保工に作用する土圧は増加し、トンネル径が縮小することが明らかにされた。

一方、地下水面深くトンネルを開削するとき、トンネル内への湧水を許さないと静水圧に相当する高い水圧が覆工に作用するから巨大な支保工、覆工を必要とする。したがって、地山の透水係数が大きい場合は注入により透水係数を減少させ浸透水量を減じトンネル内に導き、覆工背面の水圧上昇を防止する方法がとられる。しかし、注入はトンネル掘削に多大な時間的、経済的影響を与えるから、地山の力学特性に適した注入域の規模を知って施工することが大切である。

本研究は水抜きの効果を明らかにしかつ注入域の適正規模を推定するために行った解析的研究である。すなわち、水抜孔あるいは注入の効果と関連させて海底トンネルの挙動を一般的に述べながら、青函トンネルで得られたいくつかのデータを定性的に解釈することを目的としている。その手順として、まず地山が有効応力によって表わされる Mohr-Coulomb 型の塑性降伏条件と Non associated flow rule を満足する弾塑性体と考え、トンネル周辺に水抜孔、注入域を配した場合を厚肉円筒平面ひずみ問題として解析する。ついで、青函トンネル試験

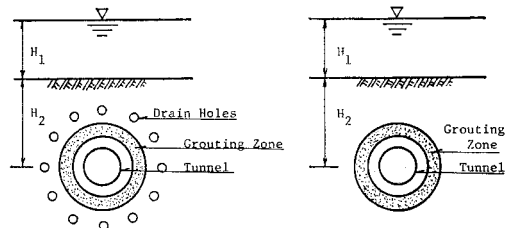
坑で行われた水抜孔の開閉試験結果を解析解を用いて検討し水抜きの効果一般について述べる。最後に青函トンネルの場合を想定して注入域の適正規模の推定を行い、注入を行うことの功罪を明らかにするとともに望ましい注入域形状を提言する。

水と地山の相互作用を扱ったこの種の研究には下河内^{1),2)}、桜井³⁾、工藤⁴⁾の先駆的研究がある。下河内は間隙水圧を考慮するとともに Mohr-Coulomb 型の塑性降伏条件を用いて解析を進め、トンネル覆工の設計手法を論じている。また、桜井もやはり有効応力の立場から地山を粘弾塑性体と考え、トンネル覆工の問題を解析している。一方、工藤は注入域内に塑性域を生じさせないという条件から注入域の規模決定の方法を提案している。本研究もこれら一連の研究の流れに沿ったもので、その特色は解析において、Non associated flow rule に基づく構成関係を用い、解を一般化させるとともに、水抜きの効果、注入域の規模決定などより具体的な問題を対象としていることである。

2. トンネル周辺地山の弾塑性解析⁶⁾

(1) 問題の設定

図一に示す海面下 H_1 の海底から H_2 の被りを残してトンネルを掘削するときの問題を考える。第1は 図



(a) 水抜孔開閉に関する問題 (b) 適正な注入域に関する問題

図一1

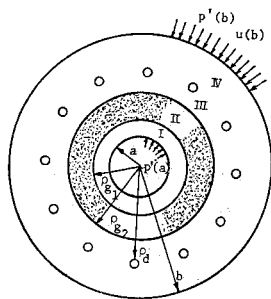
* 正会員 Ph.D. 京都大学助教授 防災研究所

** 正会員 工修 京都大学助手 工学部交通土木工学教室

—1 (a) のようにトンネル壁面から離して複数の水抜きを設けて水を抜きながら掘削し、支保工を建込んだ後水抜きを中止すると地山がいかなる挙動をするかを調べさらに周知の水抜きの効果について検討するものであり、第2は 図—1 (b) に示すごとく注入域を設ける場合、地山の安定に必要な注入域規模を推定しようとするものである。

トンネル周辺地山は決して一様でなく、また重力場にあるから問題を厳密に解析することは容易でない。ここでは以下の仮定を設定して問題を理想化した。

(1) 軸対称厚肉円筒平面ひずみ問題と考える。すなわち、図—2 に示す半径 a のトンネルを内周面、仮想外周面の半径を b とする厚肉円筒問題として解析する。図は $\rho_{g1} \sim \rho_{g2}$ に注入域、半径 ρ_d に水抜きが配列され、トンネル壁面 $r=a$ には支保工反力を想定した内



図—2 解析する境界値問題

圧 $p'(a)$ と水圧 $u(a)$ が、外周面 $r=b$ に外圧 $p'(b)$ と水圧 $u(b)$ が作用するという境界条件を示している。ただし、 $r=\rho_d$ において水抜きが一様な円周線と換算できるものとする。

(2) 間隙水は岩盤の変形と相互作用がなく、その運動は Darcy の法則によるものとする。

(3) 透水係数は地山、注入域またそれらが塑性域となった場合に異なる値をとりうるものとする。

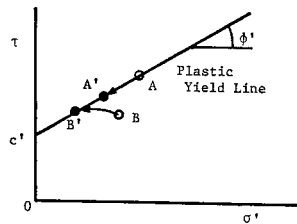
(4) 地山、注入域いずれもその力学挙動は有効応力によって支配される弾塑性挙動であり、同じ力学定数を有するものとする。これは地山の強度・変形特性が注入によって変化しないことを意味する。

(5) 塑性降伏条件は 図—3(a) の Mohr-Coulomb 型の降伏条件によるものとする。また、構成式は Non associated flow rule⁶⁾ によるが、そのために ψ (角度) なる塑性ポテンシャルパラメーターを導入する。これは 図—3 (b) に示す塑性応力状態にある P 点における塑性ひずみ増分 de^p の方向は塑性ポテンシャル面に直交し、その傾き具合によって塑性体積膨脹が規定されるという構成仮説に基づくもので掘削によって地山がゆるむ現象を記述できる構成式を誘導するためである。

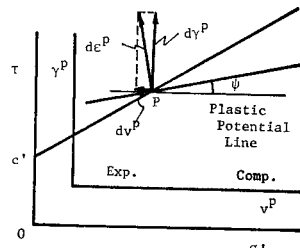
有効応力は Terzaghi の定義によるもので、全応力 σ_{ij} と間隙水圧 u の差として与えられる。

$$\sigma_{ij}' = \sigma_{ij} - u\delta_{ij} \dots \dots \dots (1)$$

水抜きの効果を有効応力の考えに立って定性的に説明しておく。それは 図—3 (a) の降伏条件を考えるとき



(a) 塑性降伏条件

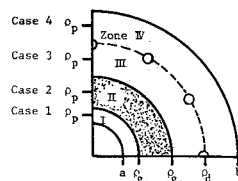


(b) 塑性ポテンシャル面

図—3

抜きながら掘削した場合、図中の A, B 点にあった地山内の2点の応力状態が、水抜を中止すると周辺地山内の間隙水圧の増大、すなわち有効応力が減少して岩盤のせん断抵抗が低下するため A', B' に移行して塑性域の拡大と変形の増加が生ずることになるからである。

解析の便宜上 図—2 あるいは 図—4 に示すように注入域の内側 ($\rho_{g1} \geq r$) を Zone I, 注入域 ($\rho_{g2} \geq r \geq \rho_{g1}$) を Zone II, 水抜きと注入域外周の間 ($\rho_d \geq r \geq \rho_{g2}$) を Zone III, 水抜き外側 ($b \geq r \geq \rho_{g2}$) を Zone IV とする。また、塑性域 ρ_p が上記のどの Zone にあるかによって場合分けを行う。すなわち、 ρ_p が Zone I にある場合を Case 1, Zone II にあるときを Case 2, Zone III を Case 3, Zone IV を Case 4 とする。たと



図—4 塑性域半径位置による場合分け

えば、Case 1 で塑性域は Zone I_p と表示して Zone I と表わす弾性域と区別する。ところで、この種の解析においては、掘削によって生ずる変形はすでに掘削前に生じている変形量を求め、それを差し引く必要があるから、この掘削前の解を求める場合を Case 5 とする。

(2) 水抜効率パラメーターと間隙水圧分布

仮想外周面 $r=b$ に間隙水圧 $u(b)$, トンネル壁面 $r=a$ に $u(a)$ が作用する場合を定常浸透流問題として解析する。まず水抜きによる水抜きの効率を表わすため、水抜き配列位置 $r=\rho_d$ に浸透してくる全流入水量 Q と $r=\rho_d$ で排水する水抜量 Q_d の比の逆数、 $m_d = Q_d/Q$ を水抜効率パラメーターとして導入する。 $m_d=0$ はまった

く水を抜かない場合に、 $m_d=1$ は完全に水を抜く場合に対応する。また、ある所定の位置の水圧を与えて解析する場合のため、 $r=\rho_d$ の水圧 $u(\rho_d)$ と $r=b$ の水圧 $u(b)$ との比を用いた $m_d'=1-u(\rho_d)/u(b)$ なるパラメータも用いる。 $m_d'=1$ は $r=\rho_d$ で完全に水を抜く場合に相当するが、 $m_d'=0$ はまったく水を抜かない場合に対応はしない。

自然地山の透水係数を k_0 、注入域のそれを k_g と表わし、塑性域ではそれらが k_{0p} 、 k_{gp} へ変化するものとする。また、 k_0 との比、 $n_g=k_0/k_g$ 、 $n_{0p}=k_0/k_{0p}$ 、 $n_{gp}=k_0/k_{gp}$ を透水係数パラメータとして用いる。

浸透流、間隙水圧の支配方程式は Zone α に対して次の二式である。

$$\left. \begin{aligned} \text{Darcy's law } v_{r\alpha}(r) &= -\frac{k_\alpha}{w} \frac{du_\alpha(r)}{dr} \\ \text{連続の式 } -Q_\alpha &= 2\pi r v_{r\alpha}(r) \end{aligned} \right\} \dots(2)$$

ここに、 $v_{r\alpha}(r)$ は流速、 k_α は透水係数、 $u_\alpha(r)$ は間隙水圧、 w は水の密度、 Q_α は流量である。式 (2) から $v_{r\alpha}(r)$ を消去すると次式が求まる。

$$r \frac{du_\alpha(r)}{dr} = \frac{wQ_\alpha}{2\pi k_\alpha} = q_\alpha \text{ (一定値)} \dots\dots\dots(3)$$

式 (3) を次の境界条件を用いて積分し、各 Zone の q_α を与えると間隙水圧 $u_\alpha(r)$ が決定される。

$$u_1(a) = u(a), \quad u_W(b) = u(b) \dots\dots\dots(4)$$

ここでは Case 1 と Case 5 の解を与えるが、他の場合に対してもまったく同様に求められる。

a) Case 1 ($a \leq \rho_p \leq \rho_{g1}$)

Zone I_p ($a \leq r \leq \rho_p$) (注入域内側、塑性域)

$$\left. \begin{aligned} r \frac{du_{I_p}(r)}{dr} &= \frac{wQ_{I_p}}{2\pi k_{0p}} = \frac{w(Q-Q_d)}{2\pi k_{0p}} \\ &= n_{0p}(1-m_d)q = q_{I_p} \\ u_{I_p}(r) &= (1-m_d)q n_{0p} \ln \frac{r}{a} + u(a) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(5.1)$$

Zone I ($\rho_p \leq r \leq \rho_{g1}$) (注入域内側、弾性域)

$$\left. \begin{aligned} r \frac{du_I(r)}{dr} &= \frac{wQ_I}{2\pi k_0} = \frac{w(Q-Q_d)}{2\pi k_0} \\ &= (1-m_d)q = q_1 \\ u_I(r) &= (1-m_d)q \left[\ln \frac{r}{\rho_p} + n_{0p} \ln \frac{\rho_p}{a} \right] + u(a) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(5.2)$$

Zone II ($\rho_{g1} \leq r \leq \rho_{g2}$) (注入域内)

$$\left. \begin{aligned} r \frac{du_{II}(r)}{dr} &= \frac{wQ_{II}}{2\pi k_g} = \frac{w(Q-Q_d)}{2\pi k_g} \\ &= n_g(1-m_d)q = q_{II} \\ u_{II}(r) &= (1-m_d)q \left[n_g \ln \frac{r}{\rho_{g1}} + \ln \frac{\rho_{g1}}{\rho_p} \right. \\ &\quad \left. + n_{0p} \ln \frac{\rho_p}{a} \right] + u(a) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(5.3)$$

Zone III ($\rho_{g2} \leq r \leq \rho_d$) (注入域外側、水抜孔内側)

$$\left. \begin{aligned} r \frac{du_{III}(r)}{dr} &= \frac{wQ_{III}}{2\pi k_0} = \frac{w(Q-Q_d)}{2\pi k_0} \\ &= (1-m_d)q = q_{III} \\ u_{III}(r) &= (1-m_d)q \left[\ln \frac{r}{\rho_{g2}} + n_g \ln \frac{\rho_{g2}}{\rho_{g1}} \right. \\ &\quad \left. + \ln \frac{\rho_{g1}}{\rho_p} + n_{0p} \ln \frac{\rho_p}{a} \right] + u(a) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(5.4)$$

Zone IV ($\rho_d \leq r \leq b$) (水抜孔外側)

$$\left. \begin{aligned} r \frac{du_{IV}(r)}{dr} &= \frac{wQ_{IV}}{2\pi k_0} = \frac{wQ}{2\pi k_0} = q = q_{IV} \\ u_{IV}(r) &= q \left\{ \ln \frac{r}{\rho_d} + (1-m_d) \left[\ln \frac{\rho_d}{\rho_{g2}} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + n_g \ln \frac{\rho_{g2}}{\rho_{g1}} + \ln \frac{\rho_{g1}}{\rho_p} + n_{0p} \ln \frac{\rho_p}{a} \right] \right\} \\ &\quad + u(a) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(5.5)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} q &= [u(b) - u(a)] / \left\{ \ln \frac{b}{\rho_d} + (1-m_d) \left[\ln \frac{\rho_d}{\rho_{g2}} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + n_g \ln \frac{\rho_{g2}}{\rho_{g1}} + \ln \frac{\rho_{g1}}{\rho_p} + n_{0p} \ln \frac{\rho_p}{a} \right] \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(5.6)$$

また、

$$\left. \begin{aligned} m_d' &= [1 - u(\rho_d)/u(b)] = \ln \frac{b}{\rho_d} / \left\{ \ln \frac{b}{\rho_d} \right. \\ &\quad \left. + (1-m_d) \left[\ln \frac{\rho_d}{\rho_{g2}} + n_g \ln \frac{\rho_{g2}}{\rho_{g1}} + \ln \frac{\rho_{g1}}{\rho_p} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + n_{0p} \ln \frac{\rho_p}{a} \right] + u(a) \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(5.7)$$

b) Case 5 (トンネル掘削前)

Case 5 はトンネルが削削されていないから、水抜孔の内側で水の流れは生じない。

Zone I, II, III ($r \leq \rho_d$) (水抜孔内側)

$$\left. \begin{aligned} r \frac{du_\alpha(r)}{dr} &= \frac{wQ_\alpha}{2\pi k_\alpha} = 0 = q_\alpha \\ u_\alpha(r) &= (\text{一定}) = u_{IV}(\rho_d) = u(\rho_d) \\ &\quad (\alpha = \text{I, II, III}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(6.1)$$

Zone IV ($\rho_d \leq r \leq b$) (水抜孔外側)

$$\left. \begin{aligned} r \frac{du_{IV}(r)}{dr} &= \frac{wQ_{IV}}{2\pi k_{IV}} = q = q_{IV} \\ u_{IV}(r) &= m_d q \ln r/b + u(b) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(6.2)$$

ここに、

$$q = [u(b) - u(\rho_d)] / m_d \ln \frac{b}{\rho_d} \dots\dots\dots(6.3)$$

また、

$$m_d' = m_d q \ln(b/\rho_d)/u(b) \dots\dots\dots(6.4)$$

以上で各領域における間隙水圧 $u_\alpha(r)$ は求められたが、塑性域半径 ρ_p は未知量であり、次節の応力の解析

を通して決定される。

(3) 弾塑性解析による応力・変位分布

z-軸をトンネル軸線方向にとり、軸対称平面ひずみ問題として扱おうと、変位、ひずみは次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} u_r &= u_r(r), \quad u_\theta = 0, \quad u_z = 0 \\ \epsilon_r &= \partial u_r(r) / \partial r, \quad \epsilon_\theta = u_r(r) / r, \\ \epsilon_z &= 0, \quad \epsilon_{\theta z} = \epsilon_{zr} = \epsilon_{r\theta} = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 u_r は半径方向、 u_θ は接線方向、 u_z は軸方向の変位を表わし、 $\epsilon_r, \epsilon_\theta, \epsilon_z$ はそれぞれの方向のひずみである。また、適合条件式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial}{\partial r} (r\epsilon_\theta) = \epsilon_r \dots\dots\dots (8)$$

微小変位、微小ひずみを仮定すると、全ひずみ ϵ_{ij} は弾性ひずみ ϵ_{ij}^E と塑性ひずみ ϵ_{ij}^P の和で表わされる。

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^E + \epsilon_{ij}^P \dots\dots\dots (9)$$

構成式は偏差応力 S_{ij} 、偏差ひずみ e_{ij} を導入して次式で与えられるものとする。

$$e_{ij}^E = \frac{1}{2G} S_{ij} \dots\dots\dots (10.1)$$

$$e^E = \frac{1}{3K} S' = \frac{1}{3K} (S - u_a(r)) \dots\dots\dots (10.2)$$

$$\epsilon_{ij}^P = A \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}'} \dots\dots\dots (10.3)$$

ここに、 G はせん断弾性係数、 K は体積弾性係数であって g は塑性ポテンシャル関数、 A は比例定数、また偏差応力 S_{ij} 、平均応力 S 、偏差ひずみ e_{ij} 、平均ひずみ e は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} S_{ij} &= \sigma_{ij} - S\delta_{ij}, \quad S = \frac{1}{3} \sigma_{kk} \\ e_{ij} &= \epsilon_{ij} - e\delta_{ij}, \quad e = \frac{1}{3} \epsilon_{kk} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

軸対称平面ひずみ問題におけるつり合い方程式は、

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = \frac{\partial \sigma_r'}{\partial r} + \frac{\partial u_a(r)}{\partial r} + \frac{\sigma_r' - \sigma_\theta'}{r} = 0 \dots\dots\dots (12)$$

である。ここに、 σ_r, σ_θ はそれぞれ半径ならびに接線方向の直応力であり、応力、ひずみとも、圧縮を正とする。

a) 弾性領域の解

特に弾性解析のために、 e, ξ なるひずみパラメーターを用いる。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} e &= \frac{1}{3} (\epsilon_r + \epsilon_\theta + \epsilon_z) = \frac{1}{3} (\partial u_r / \partial r + u_r / r) \\ \xi &= \frac{1}{3} (\epsilon_r - \epsilon_\theta) = \frac{1}{3} (\partial u_r / \partial r - u_r / r) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

構成式を e, ξ で表わすと次のようになる。

$$S_r = 2Ge_r = G(e + 3\xi), \quad \sigma_r' = (G + 3K)e + 3G\xi \}$$

$$\left. \begin{aligned} S_\theta &= 2Ge_\theta = G(e - 3\xi), \quad \sigma_\theta' = (G + 3K)e - 3G\xi \\ S_z &= 2Ge_z = -2Ge, \quad \sigma_z' = (3K - 2G)e \\ S' &= 3Ke, \quad \sigma_{rz} = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

ここに、 S_r, S_θ, S_z は、それぞれ $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ の偏差成分である。

式 (13) を適合条件式 (8) に、式 (14) をつり合い方程式 (12) に代入すると Zone α に対して、次のようになる。

$$\frac{\partial e}{\partial r} - \frac{\partial \xi}{\partial r} = 2\frac{\xi}{r} \quad (\text{適合条件式}) \dots\dots\dots (15)$$

$$(G + 3K) \frac{\partial e}{\partial r} + 3G \left(\frac{\partial \xi}{\partial r} + 2\frac{\xi}{r} \right) + \frac{\partial u_a(r)}{\partial r} = 0 \quad (\text{つり合い方程式}) \dots\dots\dots (16)$$

式 (15)、(16) から e と ξ それぞれに対する微分方程式が求まり、

$$\left. \begin{aligned} (4G + 3K) \frac{\partial e}{\partial r} + \frac{\partial u_a(r)}{\partial r} &= 0 \\ \frac{\partial \xi}{\partial r} + 2\frac{\xi}{r} + \frac{1}{(4G + 3K)} \cdot \frac{\partial u_a(r)}{\partial r} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (17)$$

積分すると弾性域 Zone α に対する e, ξ は次のように求まる。

$$\left. \begin{aligned} e &= \frac{1}{(4G + 3K)} [C_{1a} - u_a(r)] \\ \xi &= \frac{C_{2a}}{r^2} - \frac{q_a}{2(4G + 3K)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

式 (18) を式 (13)、(14) に用いると Zone α の応力と変位は次のように決定される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r' &= \frac{G + 3K}{4G + 3K} [C_{1a} - u_a(r)] \\ &\quad + 3G \left[\frac{C_{2a}}{r^2} - \frac{q_a}{2(4G + 3K)} \right] \\ \sigma_\theta' &= \frac{G + 3K}{4G + 3K} [C_{1a} - u_a(r)] \\ &\quad - 3G \left[\frac{C_{2a}}{r^2} - \frac{q_a}{2(4G + 3K)} \right] \\ \sigma_z' &= \frac{3K - 2G}{4G + 3K} [C_{1a} - u_a(r)] \\ u_r &= \frac{3}{2} \left[\frac{C_{1a} - u_a(r)}{4G + 3K} - \frac{C_{2a}}{r^2} + \frac{q_a}{2(4G + 3K)} \right] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (19)$$

積分定数 C_{1a}, C_{2a} は次節で論ずるとおり境界条件によって決定され、また、 $u_a(r), q_a$ は前節で与えた Zone α における空隙水圧と流量パラメーターである。

b) 塑性領域の解

塑性状態を規定する塑性降伏関数 f と塑性ポテンシャル関数 g は図-3(b) で示したような Mohr-Coulomb 型と仮定する。すなわち、

$$f = (\sigma_\theta' - \sigma_r') - (\sigma_\theta' + \sigma_r') \sin \phi' - 2c' \cos \phi' = 0 \dots\dots\dots (20.1)$$

$$g = (\sigma_{\theta'} - \sigma_{r'}) - (\sigma_{\theta'} + \sigma_{r'}) \sin \psi \dots\dots\dots (20.2)$$

塑性領域では式 (20.1) の降伏条件を常に満足しなければならないから、式 (20.1) を用いてつり合い方程式 (12) の σ_{θ}' を消去すると σ_{r}' と流量パラメーター q_{α} のみの方程式となる。

$$\frac{\partial \sigma_{r'}}{\partial r} - \frac{2 \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \frac{\sigma_{r'}}{r} + \frac{1}{r} \left[q_{\alpha} - \frac{2 c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} \right] = 0 \dots\dots\dots (21)$$

積分することで σ_{r}' が、また、 σ_{θ}' は (20.1) の関係から容易に求まる。

$$\sigma_{r'} = D_{1\alpha} r^{\frac{2 \sin \phi'}{1 - \sin \phi'}} + \frac{1 - \sin \phi'}{2 \sin \phi'} \left(q_{\alpha} - \frac{2 c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} \right) \dots\dots\dots (22)$$

$$\sigma_{\theta}' = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \sigma_{r'} + \frac{2 c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} \dots\dots\dots (23)$$

平面ひずみ条件および構成式 (10.3) と (20.2) により z -方向の塑性ひずみ成分 ε_z^P は生じないから、 $\varepsilon_z = \varepsilon_z^E = 0$ が常に成立し σ_z' は次式で与えられる。

$$\sigma_z' = \frac{3K - 2G}{6K + 2G} (\sigma_{r'} + \sigma_{\theta}') = \nu (\sigma_{r'} + \sigma_{\theta}') \dots\dots\dots (24)$$

ここに、 ν はポアソン比である。

さて、塑性領域における変位 $u_r(r)$ を求めよう。塑性ひずみ増分は構成式 (10.3) と (20.2) を用いて、

$$\dot{\varepsilon}_r^P = -A(1 + \sin \psi), \quad \dot{\varepsilon}_{\theta}^P = A(1 - \sin \psi), \quad \dot{\varepsilon}_z^P = 0 \dots\dots\dots (25)$$

初期条件 ($\varepsilon_r^P = \varepsilon_{\theta}^P = \varepsilon_z^P = 0$) に注意して式 (25) を積分すると、ただちに次の関係が求まる。

$$\varepsilon_r^P = -\frac{1 + \sin \psi}{1 + \sin \psi} \varepsilon_{\theta}^P, \quad \varepsilon_z^P = 0 \dots\dots\dots (26)$$

これは 図-3 (b) の塑性ひずみ増分ベクトル $d\varepsilon^P$ が塑性ポテンシャル面に直交する条件である。この場合、塑性体積ひずみ $3e^P = v^P = \varepsilon_r^P + \varepsilon_{\theta}^P + \varepsilon_z^P$ は次式で表わされ、

$$v^P = -\frac{2 \sin \psi}{1 - \sin \psi} \varepsilon_{\theta}^P \dots\dots\dots (27)$$

$0 \leq \psi \leq 90^\circ$ に対して常に負、すなわち体積膨張を示すことを意味している。式 (9) による ε_r と ε_{θ} 、また、式 (25) の関係を用いると適合条件式 (8) は次式で表わされる。

$$r \frac{\partial \varepsilon_{\theta}^P}{\partial r} + r \frac{\partial \varepsilon_{\theta}^E}{\partial r} = (\varepsilon_r^E - \varepsilon_{\theta}^E) - \frac{2}{1 - \sin \psi} \varepsilon_{\theta}^P \dots\dots\dots (28)$$

積分すると、

$$\varepsilon_{\theta}^P + \varepsilon_{\theta}^E = r^{-\frac{2}{1 - \sin \psi}} \left[H_{\alpha} + \int r^{\frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi}} (\varepsilon_r^E - \varepsilon_{\theta}^E) dr + \frac{2}{1 - \sin \psi} \int r^{\frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi}} \varepsilon_{\theta}^E dr \right] \dots\dots\dots (29)$$

となるが、式中の弾性ひずみ $\varepsilon_r^E, \varepsilon_{\theta}^E$ は $\sigma_{r}', \sigma_{\theta}'$ との間に関係が常に成立する。

$$\varepsilon_r^E - \varepsilon_{\theta}^E = \frac{1}{2G} (\sigma_{r'} - \sigma_{\theta}')$$

$$\varepsilon_{\theta}^E = \frac{1}{4G(3K + G)} [(3K - 4G)\sigma_{\theta}' - (3K - 2G)\sigma_{r}']$$

しかるに、応力は降伏条件を満足するから σ_{θ}' を上の式から消去できるので、結局弾性ひずみは σ_{r}' のみの関数で表わすことができる。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r^E - \varepsilon_{\theta}^E &= -\frac{1}{2G} \left[\frac{2 \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \sigma_{r'} + \frac{2 c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} \right] \\ \varepsilon_{\theta}^E &= \frac{1}{2G(3K + G)} \left[\frac{3G + (3K + G) \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \sigma_{r'} + \frac{(3K + 4G) c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} \right] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (30)$$

この関係を式 (28) に代入して積分すると、ひずみと変位は次のように決定される。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{\theta} &= r^{-\frac{2}{1 - \sin \psi}} [H_{\alpha} + AF_{\alpha}(r) + BF(r)] \\ u_r(r) = r\varepsilon_{\theta} &= r^{-\frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi}} [H_{\alpha} + AF_{\alpha}(r) + BF(r)] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (31)$$

ここに、 H_{α} は積分定数、 $F_{\alpha}(r), F(r), A, B$ は次のような関数ならびに定数である。

$$\left. \begin{aligned} F_{\alpha}(r) &= \left[\frac{D_{1\alpha}}{\left(\frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi} \right) + \left(\frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \right)} \right. \\ &\quad \left. + r \left(\frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi} + \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \right) + \frac{1 - \sin \phi'}{2 \sin \phi'} \right. \\ &\quad \left. \cdot \left(q_{\alpha} - \frac{2 c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} \right) \frac{1 - \sin \psi}{2} r^{\left(\frac{2}{1 - \sin \psi} \right)} \right] \\ F(r) &= \frac{1 - \sin \psi}{2} r^{\frac{2}{1 - \sin \psi}} \\ A &= \left[\frac{3G + (3K + G) \sin \phi'}{G(3K + G)(1 - \sin \psi)(1 - \sin \phi')} \right. \\ &\quad \left. - \frac{\sin \phi'}{G(1 - \sin \phi')} \right] \\ B &= \frac{(3K + 4G) c' \cos \phi'}{G(3K + G)(1 - \sin \psi)(1 - \sin \phi')} \\ &\quad - \frac{c' \cos \phi'}{G(1 - \sin \phi')} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (32)$$

以上で塑性域における応力、ひずみ、変位がすべて決定された。式中の積分定数は $D_{1\alpha}$ と H_{α} の2つである。なお、 $F_{\alpha}(r)$ は $D_{1\alpha}$ と q_{α} が与えられると自動的に確定する r のみの関数である。

(4) 各領域における応力、変位分布

2. (2) に対応する Case 1 ならびに Case 5 の応力、変位を例題的に与えておく。他の Case もまったく同様に求めることができる。

a) Case 1 ($a \leq \rho_p \leq \rho_{g1}$)

Zone I_p ($a \leq r \leq \rho_p$) (注入域内側, 塑性域)

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r' &= D_{I_p} r^{\left(\frac{2\sin\phi'}{1-\sin\phi'}\right)} + \frac{1-\sin\phi'}{2\sin\phi'} \left[q_{I_p} - \frac{2c'\cos\phi'}{1-\sin\phi'} \right] \\ \sigma_{\theta}' &= \frac{1+\sin\phi'}{1-\sin\phi'} \sigma_r' + \frac{2c'\cos\phi'}{1-\sin\phi'} \\ \sigma_z' &= \frac{3K-2G}{6K+2G} (\sigma_r' + \sigma_{\theta}') \\ u_r &= r^{-\left(\frac{1+\sin\psi}{1-\sin\psi}\right)} [H_{I_p} + AF_{I_p} + BF] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(33)$$

Zone I, II, III ($\rho_p \leq r \leq b$)

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r' &= \frac{G+3K}{4G+3K} [C_{1\alpha} - u_{\alpha}(r)] \\ &\quad + 3G \left[\frac{C_{2\alpha}}{r^2} - \frac{q_{\alpha}}{2(4G+3K)} \right] \\ \sigma_{\theta}' &= \frac{G+3K}{4G+3K} [C_{1\alpha} - u_{\alpha}(r)] \\ &\quad - 3G \left[\frac{C_{2\alpha}}{r^2} - \frac{q_{\alpha}}{2(4G+3K)} \right] \\ \sigma_z &= \frac{3K-2G}{4G+3K} [C_{1\alpha} - u_{\alpha}(r)] \\ u_r &= \frac{3}{2} \left[\frac{C_{1\alpha}}{4G+3K} - \frac{C_{2\alpha}}{r^2} + \frac{q_{\alpha}}{2(4G+3K)} \right] r \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(34)$$

ここで, $\alpha = I, II, III, IV$ である. したがって, 境界条件で決定すべき未知数は塑性域で D_{I_p}, H_{I_p} , 弾性域で $C_{1I}, C_{1II}, C_{1III}, C_{1IV}, C_{2I}, C_{2II}, C_{2III}, C_{2IV}$ と塑性域半径 ρ_p の計 11 個である. これに対する境界条件は,

$$\left\{ \begin{aligned} &r=a \text{ で } \sigma_r'(a) = p'(a) \\ &r=b \text{ で } \sigma_r'(b) = p'(b) \\ &r=\rho_d, \rho_{g2}, \rho_{g1}, \rho_p \text{ における } \sigma_r'(r) \text{ と } u_r(r) \\ &\quad \text{の連続} \\ &r=\rho_p \text{ で弾性領域の応力が降伏条件を満足する} \end{aligned} \right.$$

の計 11 個であり, これらを用いると各未知量は次のように決定される.

$$\left. \begin{aligned} C_{1I} &= C_{1II} = C_{1III} = C_{1IV} \\ C_{1IV} &= u_1(\rho_p) + \frac{(4G+3K)}{(G+3K)(1-\sin\phi')} \\ &\quad \cdot \left[D_{I_p} \rho_p^{\left(\frac{2\sin\phi'}{1-\sin\phi'}\right)} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1-\sin\phi'}{2\sin\phi'} \left(q_{I_p} - \frac{2c'\cos\phi'}{1-\sin\phi'} \right) + c'\cos\phi' \right] \\ D_{I_p} &= \left[p'(a) - \frac{1-\sin\phi'}{2\sin\phi'} \right. \\ &\quad \left. \cdot \left(q_{I_p} - \frac{2c'\cos\phi'}{1-\sin\phi'} \right) \right] a^{-\left(\frac{2\sin\phi'}{1-\sin\phi'}\right)} \\ C_{2III} &= C_{2IV} - \frac{1}{2(4G+3K)} \rho_d^2 (q_{IV} - q_{III}) \\ C_{2II} &= C_{2III} - \frac{1}{2(4G+3K)} \rho_{g2}^2 (q_{III} - q_{II}) \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} C_{2I} &= C_{2II} - \frac{1}{2(4G+3K)} \rho_{g1}^2 (q_{II} - q_I) \\ C_{2IV} &= b^2 \left\{ \frac{q_{IV}}{2(4G+3K)} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{3G} \left[p'(b) - \frac{G+3K}{4G+3K} (C_{1IV} - u(b)) \right] \right\} \\ H_{I_p} &= \frac{3}{2} \left[\frac{C_{1I} - u_1(\rho_p)}{4G+3K} - \frac{C_{2I}}{\rho_p^2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{q_I}{2(4G+3K)} \right] \rho_p^{\frac{2}{1-\sin\psi}} \\ &\quad - [AF_{I_p}(\rho_p) + BF(\rho_p)] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(35)$$

なお, 塑性域半径 ρ_p は次式を解くことで求められる.

$$\frac{C_{2I}}{\rho_p^2} - \frac{q_I}{2(4G+3K)} + \frac{(G+3K)}{3G(4G+3K)} \cdot [C_{1IV} - u_1(\rho_p)] \sin\phi' + \frac{c'}{3G} \cos\phi' = 0 \dots\dots\dots(36)$$

すなわち, 式中の $C_{2I}, C_{1IV}, u_1(\rho_p)$ はすべて ρ_p の関数であるから式 (36) は ρ_p のみの方程式である. したがって, 問題の解析は式 (36) によって塑性域半径 ρ_p を決定することから始まる.

b) Case 5

トンネル掘削前の地山の応力, 変位分布も式 (19) で与えられるから, 各定数を境界条件により決定すればよい.

ただし, この場合には 2. (2) で述べたように Zone IV と Zone I, II, III の 2 つに分けて考えればよい.

Zone I, II, III ($0 \leq r \leq \rho_d$)

$$\sigma_r' = \frac{G+3K}{4G+3K} [C_{1III} - u_{III}(\rho_d)] + 3G \frac{C_{2III}}{r^2} \dots\dots\dots(37.1)$$

$$\sigma_{\theta}' = \frac{G+3K}{4G+3K} [C_{1III} - u_{III}(\rho_d)] - 3G \frac{C_{2III}}{r^2} \dots\dots\dots(37.2)$$

$$\sigma_z' = \frac{3K-2G}{4G+3K} [C_{1III} - u_{III}(\rho_d)] \dots\dots\dots(37.3)$$

$$u_r(r) = \frac{3}{2} \left[\frac{C_{1III} - u_{III}(\rho_d)}{(4G+3K)} - \frac{C_{2III}}{r^2} \right] r \dots\dots(37.4)$$

Zone IV ($\rho_d \leq r \leq b$)

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r' &= \frac{G+3K}{4G+3K} [C_{1IV} - u_{IV}(r)] \\ &\quad + 3G \left[\frac{C_{2IV}}{r^2} - \frac{q_{IV}}{2(4G+3K)} \right] \\ \sigma_{\theta}' &= \frac{G+3K}{4G+3K} [C_{1IV} - u_{IV}(r)] \\ &\quad - 3G \left[\frac{C_{2IV}}{r^2} - \frac{q_{IV}}{2(4G+3K)} \right] \\ \sigma_z' &= \frac{3K-2G}{4G+3K} [C_{1IV} - u_{IV}(r)] \end{aligned} \right\} \dots\dots(38)$$

$$u_r(r) = \frac{3}{2} \left[\frac{C_{1IV} - u_{IV}(r)}{(4G+3K)} - \frac{C_{2IV}}{r^2} + \frac{q_{IV}}{2(4G+3K)} \right] r$$

未知量は C_{1III} , C_{1IV} , C_{2III} , C_{2IV} の 4 個, また, 境界条件は以下のとおりである.

$$\left\{ \begin{array}{l} r=b \text{ で } \sigma_r'(b) = p'(b) \\ r=\rho_d \text{ で } \sigma_r'(r) \text{ と } u_r(r) \text{ の連続} \\ r=0 \text{ で } \sigma_r'(0) \text{ その他が確定値をもつ} \end{array} \right.$$

したがって, 未知量は次のように決定される.

$$\left. \begin{array}{l} C_{1III} = C_{1IV} \\ C_{1IV} = u(b) + \frac{4G+3K}{G+3K} \cdot \left[p'(b) - \frac{3G}{2(4G+3K)} \left(\frac{\rho_d^2 - b^2}{b^2} \right) q_{IV} \right] \\ C_{2III} = 0 \\ C_{2IV} = \frac{\rho_d^2}{2(4G+3K)} \cdot q_{IV} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (39)$$

Case 5 の式 (37.4) で与えられる変位 $u_r(r)$ を $u_{r0}(r)$ と記して, 掘削前の地山の変位を表わすことにする. すなわち, トンネル掘削による変位は $[u_r(r) - u_{r0}(r)]$ で与えられる.

3. 水抜の効果

前章で求めた解析解を用いて, まず青函トンネル試験坑で行われた水抜孔開閉試験結果を考察する. ついで, 地山の条件, 具体的には強度定数 c' , ϕ' と水抜効果の関係を検討し, 最後に注入域を設けない場合を例に地山の力学特性と関連づけて効果的な水抜孔の配列位置について述べる.

(1) 水抜孔開閉試験結果の考察

水抜孔を開閉することによる水圧の変化がトンネル周辺地山の力学挙動にいかなる影響を及ぼすかを明らかにするための試験が青函トンネル竜飛方試験坑道で行われた. 試験坑道は海面下 240 m, 被り 200 m に位置する図-5 に示す径 3.2 m, 長さ 25 m のものである. 掘削は注入域 $\rho_g = 5.3$ m と $\rho_d = 6.9$ m に計 16 本の水抜孔

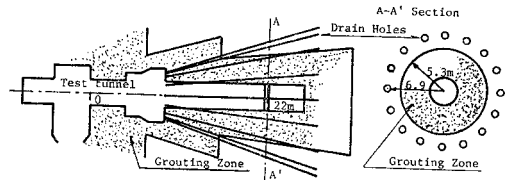


図-5 試験坑の概略図

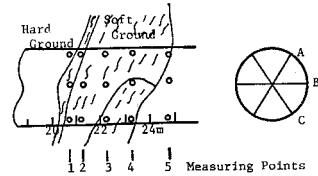


図-6 対象とする破碎帯と計測ピンの計測位置

を設けて水を抜きながら行われ, 支保工を建込んでからある程度荷が落着いた状態に至ったときに水抜を中止した. 図-6 の坑道 22 m 付近の破碎帯を対象に計測支保工と計測ピンによって土圧と径変化を測定したが, 径変化は図に示す 5 断面で A, B, C の 3 方向について計測された. 第 2 断面の径変化の計測結果を図-7 に与えるが, それは切端がその地点を通過後, 約半径分だけ掘進した時点から記録されたものである. 図-8⁷⁾ は地山が弾性体である場合の切端の掘進によるトンネルの径変化を示している. 図からトンネル掘削による変位は切端がその地点に達したときにはその 40%, さらに半径分だけ先に進んだときには 90% 生じることがわかる. このことを考えると, 図-7 の結果は掘削による全変位量の 90% がすでに生じた残りの変化を与えるものであると理解すべきである. したがって, この試験坑の場合掘削による変位量は計測量の 10 倍, 60~70 mm と見込まれる.

さて, 変形がほぼ落着いた状態で水抜孔の半数をまず閉塞し, その後全孔を閉塞したところ, 直径変化として平均 5~7 mm が生じている. しかもこの水抜を中止することによる変位量は再び水抜を開始しても残留する塑性的変形である. この過程で支保工に作用する土圧は水抜孔閉塞直前に 0.4 kg/cm² であったものが閉塞後 1.0 kg/cm² に増加した.

上述の水抜孔開閉によるトンネル周辺地山の挙動を前

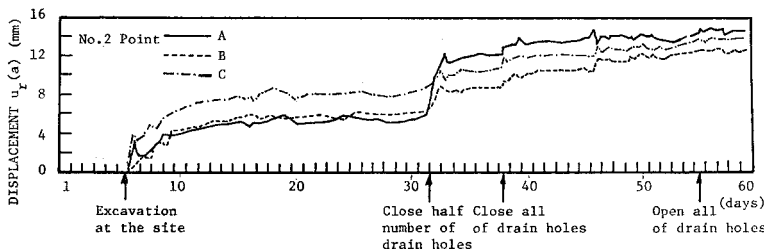


図-7 第 2 断面における径変化計測結果

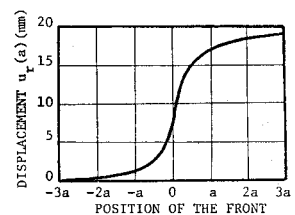


図-8 切端, 進行によるトンネル径変化

章の解析解を用いて検討してみる。ただし、注入域は図-2のようなドーナツ状でなく $\rho_g = a$ の場合に相当している。

仮想外周半径 b を 40 m, 土被りが 200 m, 水中岩石重量を 1 t/m^3 として $p'(b) = 20 \text{ kg/cm}^2$, また, 間隙水圧は $u(b) = 24 \text{ kg/cm}^2$ と定めた。ところがいま一つの問題は図-6に示すように対象とする破砕帯が堅岩にはさまれていることである。図-9^a は堅岩部の軟弱部に与える拘束効果を模式的に示したものである。すなわち, 地山がすべて堅岩であるとすれば掘削により δ_1 の変位が生じ, また, 逆にすべてが軟弱地山であると δ_2 の変位が生ずるべきであるが, 実際には相互作用により δ の変位を計測したことになる様子を表わしている。ここでは堅岩部の拘束効果を作用有効圧 $p'(b)$ を低減させることで表わし, その低減率を $1/3 \sim 1/1.5$, すなわち, $p'(b) = 7, 10, 13.6 \text{ kg/cm}^2$ を用いて解析した。低減率は双方の岩盤の変形係数によって決まるもので, この地山では $1/3 \sim 1/4$ と推定されている。対象地山の材料定数は各種力学試験結果 $E = 3 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$, $\nu = 0.4$, $\phi' = 30^\circ$ と仮定する。ただし粘着力 c' については岩盤せん断試験で求まる値はゆるめられた岩盤に対するものと考え, 実験結果求まる値よりやや大きな範囲で幅をもたせ, 4, 4.5, 5 kg/cm^2 の3通りを用いた。

透水係数は注入域が自然地山の $1/100$, 塑性域になるとそれぞれの5倍に増加するとした。解析の条件は表-1にまとめたが, ここでは水抜効率パラメーターに m_d'

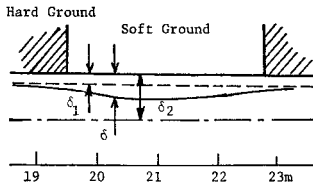
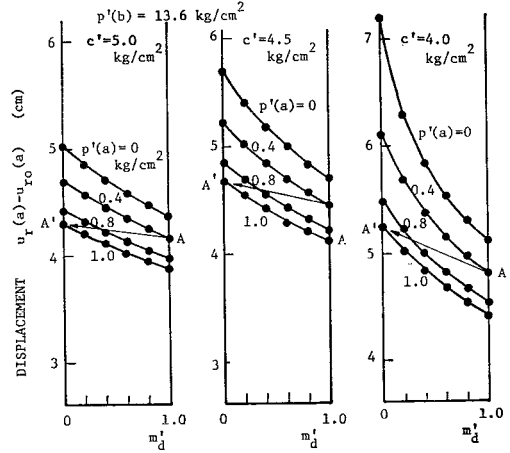


図-9 堅岩部の拘束効果説明図

表-1 解析条件

トンネル半径	(m)	a	1.6 m
仮想外周半径	(m)	b	40.0 m
注入域径	(m)	a_g	5.3 m
水抜孔配列半径	(m)	ρ_d	6.9 m
仮想外周に作用する有効応力	(kg/cm^2)	$p'(b)$	7, 10, 13.6 kg/cm^2
支保工反力	(kg/cm^2)	$p'(a)$	0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 kg/cm^2
仮想外周に作用する間隙水圧	(kg/cm^2)	$u(b)$	24 kg/cm^2
ヤング係数	(kg/cm^2)	E	3 000 kg/cm^2
ポアソン比		ν	0.4
粘着力	(kg/cm^2)	c'	4, 4.5, 5.0 kg/cm^2
内部摩擦角	(度)	ϕ'	30°
塑性ポテンシャルパラメーター	(度)	ψ	0°
透水係数			
自然地山		k_0	k_0
注入域		k_g	$k_0/100$
自然地山→塑性域		k_{gp}	5 k_0
注入域→塑性域		k_{gp}	5 k_g

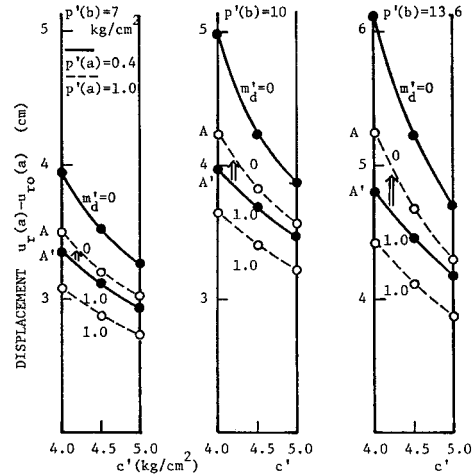


(a) $c' = 5.0 \text{ kg/cm}^2$ (b) $c' = 4.5 \text{ kg/cm}^2$ (c) $c' = 4.0 \text{ kg/cm}^2$

図-10 トンネル径変位と水抜効率パラメーターの関係

を用いた。

図-10に解析結果として掘削による半径変位 $[u_r(a) - u_{r0}(a)]$ と水抜効率パラメーター m_d' の関係を $p'(b) = 13.6 \text{ kg/cm}^2$ の場合について与えており, $p'(a)$ は 0, 0.4, 0.8, 1.0 kg/cm^2 と変化させている。図を用いて実際の挙動と比較してみよう。水抜を中止するまでは $m_d' = 1$ であり, また, 支保工反力 $p'(a)$ は 0.4 kg/cm^2 であったからその状態は図中の A 点に対応する。しかるに水抜を中止すると $m_d' = 0$ となり, また, 支保工反力が 1.0 kg/cm^2 へと増大したからその状態は A' 点に対応しており, この過程で図中の矢印のように変位が増加することになる。変化の様子をより明確にするため図-11を準備した。図は支保工反力 $p'(a)$ が 0.4 kg/cm^2 と 1.0 kg/cm^2 の2通りに対して半径変化と粘着力 c' の関係を $m_d' = 1$ と $m_d' = 0$ の場合をそれぞれ



(a) $p'(b) = 7 \text{ kg/cm}^2$ (b) $p'(b) = 10 \text{ kg/cm}^2$ (c) $p'(b) = 13.6 \text{ kg/cm}^2$

図-11 トンネル径変位と粘着力 c' の関係

与えている。この図から、水抜孔を開閉することによって、実線 ($p'(a)=0.4 \text{ kg/cm}^2$) の $m_d'=1$ から点線 ($p'(a)=1.0 \text{ kg/cm}^2$) の $m_d'=0$ へと矢印のように変位が増加することが理解できる。この結果、2.5~3.5 mm の変位の増加が生ずるのは $p'(b)=10 \text{ kg/cm}^2$ においては $c'=4 \text{ kg/cm}^2$, $p'(b)=13.6 \text{ kg/cm}^2$ では $c'=4.5 \text{ kg/cm}^2$ の場合が対応している。ただし、このいずれの場合にも掘削による全変位量は 40~45 mm であって、先の推定値 30~35 mm より大きい。この値は解析に用いた幾多の仮定、また、計測値からの推定法などに立脚しているから定量的に論ずるには問題がある。しかし、ここで強調したいのは地山が有効応力に基づいた 図-3 に示す降伏条件で規定される弾塑性材料であると考えることで、水抜孔開閉に伴う変形挙動を定性的に説明できるといふことである。

地山が弾性体と考えると、この挙動を説明できないのかどうか、あるいは地山の力学特性によって水抜の効果がいかに変わるかなどを次節で論ずる。

(2) 水抜効果と地山の力学特性

水抜効果が地山の材料定数によっていかに変化するかを例題的解析によって調べてみる。解析に用いた条件は表-2 に示す。図-12 は内部摩擦角 ϕ' を 30° とし粘着力 c' を変化させたときの塑性域半径 ρ_p と水抜効率パラメーター m_d の関係を示している。一方、図-13 は内部摩擦角 ϕ' によってトンネル径変位と粘着力 c' の関係がいかに影響を受けるかを表わしている。これらの図から次の結論が求まる。

(1) 粘着力 c' が大きくなると塑性域(トンネル径変位)が減少し、内部摩擦角 ϕ' が大きくなるとやはり径変位も小さくなる。

(2) 水抜を完全に行う場合 ($m_d=1$) から水抜量を減ずる ($m_d \rightarrow 0$) にしたがって塑性域(径変位)は増大

表-2 解析条件

トンネル半径	(m)	a	1.6 m
仮想外周半径	(m)	b	20.0 m
注入域半径	(m)	ρ_g	5.3 m
水抜孔配列半径	(m)	ρ_d	6.9 m
仮想外周に作用する有効応力	(kg/cm ²)	$p'(b)$	17.7 kg/cm ²
支保工反力	(kg/cm ²)	$p'(a)$	0, 1 kg/cm ²
仮想外周に作用する間隙水圧	(kg/cm ²)	$u(b)$	24 kg/cm ²
ヤング係数	(kg/cm ²)	E	2000 kg/cm ²
ポアソン比		ν	0.4
粘着力	(kg/cm ²)	c'	パラメーター (1~10 kg/cm ²)
内部摩擦角	(度)	ϕ'	パラメーター (30°, 35°, 40°)
塑性ポテンシャルパラメーター	(度)	ψ	0°
透水係数			
自然地山		k_0	k_0
注入域		k_g	$k_0/10$
自然地山→塑性域		k_{0p}	$2k_0$
注入域→塑性域		k_{gp}	$2k_g$

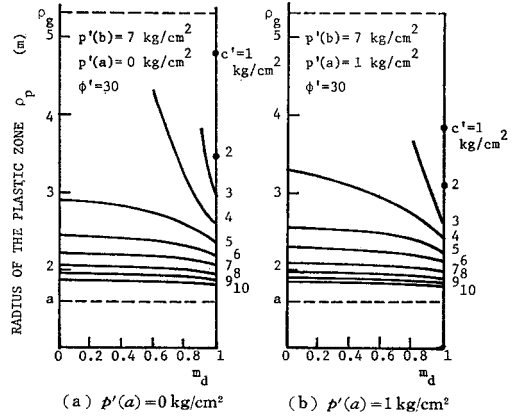


図-12 塑性域半径と水抜効率パラメーターの関係

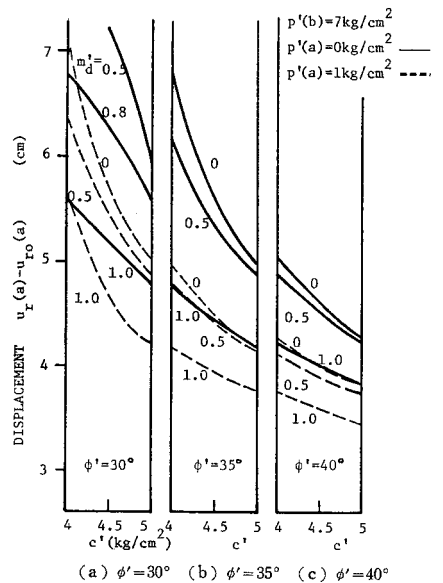


図-13 トンネル半径変位と粘着力 c' の関係に与える内部摩擦角の影響

する。すなわち、水抜によって地山の安定性が増加する。

(3) 粘着力が大きくなると塑性域の変化はわずかとなり、水抜の効果は急激に減少する。このことは地山を弾性体とすると解析上水抜の効果は微々たるものであることを意味している。

(3) 注入域を設けない場合の水抜の効果

図-1 (a) に示す場合で、 $r=\rho_d$ に水抜孔は設けるが注入域がないとき、トンネル開削面からどの程度離れた位置で水を抜いたら効果があるかを試験坑を対象に解析してみた。用いた諸条件は表-3 にまとめておく。もっとも条件の厳しい $p'(b)=13.6 \text{ kg/cm}^2$ で $p'(a)=0 \text{ kg/cm}^2$ の結果を図-14 に与えた。 m_d' は $r=\rho_d$ における水圧 $u(\rho_d)$ の値を与える指標であるから、たとえば

表-3 解析条件

トンネル半径	(m)	a	1.6 m
仮想外周半径	(m)	b	40.0 m
注入域半径	(m)	ρ_g	(3.0 m と仮定)
水抜孔配列半径	(m)	ρ_d	3.2, 4.8, 6.9, 9.6 m
仮想外周に作用する有効応力	(kg/cm ²)	$p'(b)$	7, 10, 13.6 kg/cm ²
支保工反力	(kg/cm ²)	$p'(a)$	0, 0.4, 1.0, 2.0, 3.0 (kg/cm ²)
仮想外周に作用する間隙水圧	(kg/cm ²)	$u(b)$	24 kg/cm ²
ヤング係数	(kg/cm ²)	E	3 000 kg/cm ²
ポアソン比		ν	0.4
粘着力	(kg/cm ²)	c'	3.0, 4.0, 5.0 kg/cm ²
内部摩擦角	(度)	ϕ'	30°
塑性ポテンシャルパラメーター	(度)	ψ	0°
透水係数			
自然地山		k_0	k_0
注入域(なし)		k_g	k_0 (自然地山と等しい)
自然地山→塑性域		k_{0p}	$5 k_0$

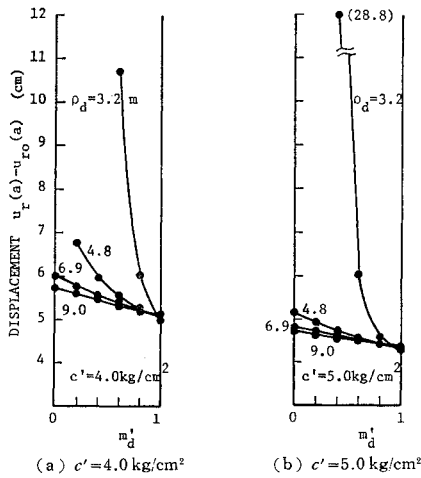


図-14 トンネル半径変位と水抜効果の関係

$\rho_d = 3.2 \text{ m} = 2a$ のとき $m'_d = 1$ は $r = \rho_d$ で間隙水圧が 0 であることを意味し、 $m'_d = 0.4$ は $u(\rho_d) = 0.6 u(b)$ を与えることである。また、 $m'_d = 0$ とすると解析できないので、 $m'_d = 0.02$ を用いたが、 $u(\rho_d) = 0.98 u(b)$ に相当し $r = \rho_d$ にはほぼ $u(b)$ に等しい水圧が作用していることを意味している。この結果はトンネル周辺地山内のどの程度離れた位置まで高い水圧があると地山が不安定（塑性領域の大きさが仮想半径 b を越え、全体の變形が大きくなること）になるかを示すものでもある。たとえば $c' = 4.0 \text{ kg/cm}^2$ の地山では $r = 4.8 \text{ m} = 3a$ に高い水圧があると ($m'_d < 0.2$ に対応) 不安定になるから $u(\rho_d)$ を $0.8 u(b)$ 程度落してやる必要がある。また、 $\rho_d = 3.2 \text{ m} = 2a$ であっても $u(\rho_d) = 0.4 u(b)$ 程度までその位置の水圧を低減するなら安定した状態で掘削できるということである。次章で述べる注入域規模との関係で記憶しておきたいことは $c' = 5 \text{ kg/cm}^2$ の場合にはトンネル半径の 3 倍の位置に $u(b)$ の高圧水があっても $p'(b) = 13.6 \text{ kg/cm}^2$ 程度ของときには安定した地山である

ということである。

4. 注入域適正規模の推定

前章では主として水抜孔の効果を論じたが、本章では注入域に着目して話を進める。論文の当初で述べたように定常的な高い水圧下にあるトンネルでは覆工背面の水圧を減ずるため、トンネル内に水の流入を許す必要がある。しかし、流入量が無制限であってもよいというわけにもいかず、注入により流入量を制限する必要があることもある。ところが、注入域を設けると必然的に注入域外周に高い水圧が作用するからその位置がトンネル開削面に近いと地山の安定性に対しては不利な条件となる。すなわち、注入域の大きさが不十分であるとトンネル近くに高い水圧が作用し、力学的に不安定な地山状態にしてしまうわけである。したがって、地山の安定性と湧水量の制御という相反する要求を満たす経済的な注入はいかなるものであるかを定めることは重要な課題である。

(1) 地山の粘着力 c' と注入域規模の関係

地山の粘着力 c' と注入域規模の関係を調べるため、土被り 100 m、海面下 240 m に位置する $\phi' = 30^\circ$ の地山内のトンネル掘削を対象に解析した。条件は表-4 に与えるとおりであって、注入域半径 ρ_g と粘着力 c' を種々変化させた。

図-15 は半径変位と注入域半径 ρ_g の関係を与えている。図中の点線は $r = 6.9 \text{ m}$ で完全に水を抜いた場合のもので、後の議論に供するため、あわせて示しておいた。さて、掘削直後に支保工反力 $p'(a)$ は期待できないとして話を進める（しかし、実際には三次元的拘束効果があるので、ここで扱うような平面問題の場合にはある程度の $p'(a)$ を与えて解析してもよい）。図-15 によると、この場合安定な状態で掘削するには、 $c' = 4.0 \text{ kg/cm}^2$

表-4 解析条件

トンネル半径	(m)	a	1.6 m
仮想外周半径	(m)	b	20.0 m
注入域半径	(m)	ρ_g	4.3, 4.8, 5.3, 5.8 m
水抜孔配列半径	(m)	ρ_d	6.9 m
仮想外周に作用する有効応力	(kg/cm ²)	$p'(b)$	13.6 kg/cm ²
支保工反力	(kg/cm ²)	$p'(a)$	0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 kg/cm ²
仮想外周に作用する間隙水圧	(kg/cm ²)	$u(b)$	24 kg/cm ²
ヤング係数	(kg/cm ²)	E	3 000 kg/cm ²
ポアソン比		ν	0.4
粘着力	(kg/cm ²)	c'	3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5 kg/cm ²
内部摩擦角	(度)	ϕ'	30°
塑性ポテンシャルパラメーター	(度)	ψ	0°
透水係数			
自然地山		k_0	k_0
注入域		k_g	$k_0/100$
自然地山→塑性域		k_{0p}	$5 k_0$
注入域→塑性域		k_{gp}	$5 k_g$

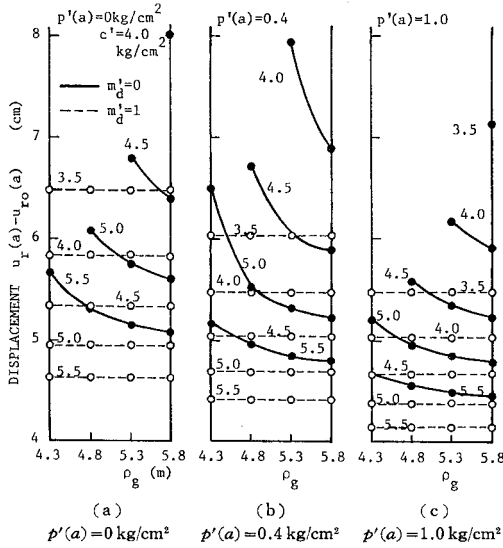


図-15 トンネル半径変位と注入域半径との関係

cm²の地山に対して $\rho_g = 5.8 \text{ m} = 3.6 a$ の注入域を、 $c' = 5 \text{ kg/cm}^2$ の地山では $\rho_g = 4.8 \text{ m} = 3 a$ の注入域を必要とする。

さて、注入域はトンネル半径の3~4倍程度としたいが地山の強度がそれほど期待できない(たとえば $c' = 3.5 \text{ kg/cm}^2$) 場合にどうしたらよいかという問題が生ずることもあろう。このとき水抜の効果もあるというむしのよい話と仮定できるときには、 $p'(a) = 0 \text{ kg/cm}^2$ で点線 ($m_d = 1$) の $c' = 3.5 \text{ kg/cm}^2$ をみると安定した状態で掘削できることがわかる。すなわち、 $\rho_g = 5.8 \text{ m} = 3.6 a$ の注入域を設け、 $\rho_d = 6.9 \text{ m}$ で水を抜きながら掘削し、支保工を建て込み $p'(a) = 1 \text{ kg/cm}^2$ の反力を発揮すれば水抜を中止しても図-15(c)にみられるように安定状態を得ることができるというわけである。

(2) 注入域の透水係数の影響

注入域の透水係数の差異が地山の挙動ならびにトンネルへの流入水量にいかの影響するかを青函トンネルの本坑を想定して解析してみた。用いた諸条件は表-5にまとめている。対象としたトンネルは半径5mであり、土被り130m、海面下190mに位置することから $p'(b) = 13 \text{ kg/cm}^2$ 、 $u(b) = 19 \text{ kg/cm}^2$ を仮定した。解析は注入域の透水係数が自然地山のその1/100に改良される場合と1/10の場合の二通りについて行った。なお、双方とも塑性域では透水係数が5倍になるとした。結果を図-16に半径変位、塑性域径ならびに湧水量を注入域半径 ρ_g との関係で与えている。ただし、湧水量は自然地山の透水係数 k_0 を与えると確定する量として表わしている。この図から求まる結論は、

(1) この場合、注入域が $3 a$ 以上あれば、塑性域半

表-5 解析条件

トンネル半径	(m)	a	5.0 m
仮想外周半径	(m)	b	40.0 m
注入域半径	(m)	ρ_g	パラメーター
水抜孔配列半径	(m)		
仮想外周に作用する有効応力	(kg/cm ²)	$p'(b)$	13.0 kg/cm ²
支保工反力	(kg/cm ²)	$p'(a)$	パラメーター
仮想外周に作用する間隙水圧	(kg/cm ²)	$u(b)$	19 kg/cm ²
ヤング係数	(kg/cm ²)	E	3 000 kg/cm ²
ポアソン比		ν	0.4
粘着力	(kg/cm ²)	c'	5 kg/cm ²
内部摩擦角	(度)	ϕ'	30°
塑性ポテンシャルパラメーター	(度)	ψ	0°
透水係数			
自然地山		k_0	k_0
注入域		k_g	$k_0/100, k_0/10$
自然地山→塑性域		k_{gp}	$5 k_0$
注入域→塑性域		k_{gp}	$5 k_g$

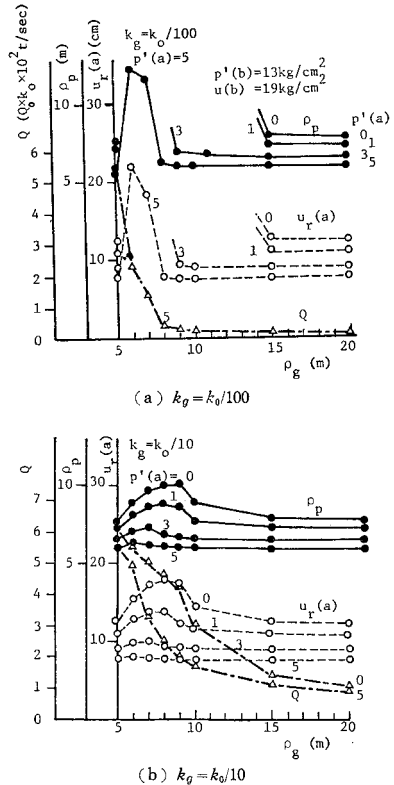


図-16 注入域の透水係数の影響

径と半径変位には透水係数の差異による影響はそれほど顕著に表われていない。

(2) 注入域が不十分なきは、注入域の透水係数が小さいほど地山の不安定性を増す。このことは注入域の透水係数を減じ湧水量を減じようとする場合ほど、十分な注入域半径を必要とすることを物語っている。すなわち、中途半端な注入域(薄い注入域)は設けない場合より危険であることを示している。

ここで解析解としては与えないが、本研究の結果から

の提言は 図-2 に示すようなドーナツ状*の完全な注入域を設けることが力学的には望ましいものであることである。これは 図-17 に示すように同一の注入域半径 ρ_{g2} をもつ場合でもその内部の水圧分布は異なり、 $\rho_{g1} \neq a$ 、ドーナツ型の注入域の場合の方が注入域内部で水圧は小さく、したがって有効応力が大きくなり地山の強度を十分発揮させることができるという理由による。

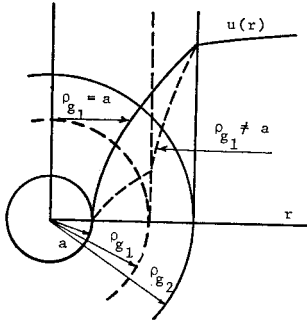


図-17 ドーナツ状の注入域の長所

5. おわりに

水抜による地山安定法、ならびに注入域の適正規模推定のために、水と地山の相互作用を解析した。解析例はすべて青函トンネルを想定したものである。解析は厚肉円筒問題として行ったが、結果を用いてまず試験坑で行われた水抜の効果を説明し、その一般についても論じた。ついで適正な注入域規模の決定を例題的に行った。

* 切羽においては実際上、その前面を囲むように殻状に注入することになるが、二次元モデルを念頭においているので、ドーナツ状という表現を用いた。

その一つの結論は中途半端な注入域を設けることの危険性である。さらに“もっとも力学的に望ましい注入域の形状は 図-2 に示すドーナツ状のものである”が本研究を通して導かれる一提言である。

本研究は筆者の一人足立が土木学会青函トンネル土圧研究委員会の委員として行ったものである。骨子は青函トンネル土圧研究調査報告書に掲載したが、一部解析を一般化してここにまとめた。研究の動機、また資料はすべて上記委員会に参会できたたまものである。ここに岡本舜三同委員会委員長はじめ委員の方々、鉄道建設公団の関係各位に謝意を表するとともに同会委員であり、日頃貴重なお助言をいただいている村山朔郎京都大学名誉教授に厚くお礼を申し上げる。

参考文献

- 1) 下河内 稔：水底トンネルの設計の初歩的な考察，青函トンネル土圧研究調査報告書，土木学会，pp. 151～167，昭和46年。
- 2) 下河内 稔：水底トンネルの静的性質についての考察，土木学会論文報告集，第197号，pp. 93～102，1972。
- 3) 桜井春輔：粘弾塑性地山内の円形トンネル覆工について一問隙水圧を考慮した場合（Ⅰ），（Ⅱ），（Ⅲ）一，青函トンネル土圧研究調査報告書，土木学会，pp. 181～198，昭和46年。
- 4) 工藤 明：注入の設計，青函トンネル土圧研究調査報告書，土木学会，pp. 220～222，昭和46年。
- 5) たとえば，Naghdi, P.M.: Stress-Strain Relations in Plasticity and Thermoplasticity, Proc. 2nd Symp. on Naval Structural Mechanics, Pergamon Press, pp. 121～169.
- 6) 青函トンネル土圧研究調査報告書，土木学会，pp. 402～434，昭和52年。
- 7) 同上，p. 353.
- 8) 同上，p. 358.

(1978.2.24・受付)