

トンネル背面地山の吸水膨張

村 山 朔 郎

SWELLING OF GROUND AROUND TUNNEL

By Sakuro MURAYAMA

Synopsis

Rock or soil containing clay mineral can swell due to sucking of water. When a tunnel is constructed through such clayey ground, its lining or support may be acted by ground pressure due to swelling of the ground. As for swelling of the ground around a tunnel following results were obtained.

(1) Swelling zone around a circular tunnel and ground pressure on its lining due to swelling of the ground are obtained analytically. An example of calculated relation of clearance initially left between lining and back ground t and ground pressure on the tunnel lining $(\sigma_r)_{r=a}$ is shown in Fig. 3.

(2) In swelling zone around a tunnel, moisture content of clay is greater than its natural value. Therefore, such swelling zone can be measured as the moisture increasing zone. On an actual railway tunnel through fault clay zone, distribution of moisture content along radial direction was measured by a neutron moisture meter. As shown in Fig. 4, counting rate of the neutron moisture meter is greater than average value in the distance less than 6m from the inside surface of the tunnel lining.

1. 概 要

粘板岩のような粘土鉱物を含む岩石や強く圧密を受けた粘土からなる地盤が吸水膨張することにより地盤災害を発生する例は少ない、新たに切取られた粘板岩斜面の崩壊の原因が地盤の吸水膨張に帰せられる例はすでに前報¹⁾ においてのべたことがある。吸水膨張の影響が顕著にあらわれる例の1つにトンネルの支保工や覆工にかかるいわゆるトンネル土圧がある。

Terzaghi²⁾ は深いトンネルでは膨張土圧が 10kg/cm^2 になることはまれでなく、 20kg/cm^2 程度の土圧が発生したことさえあるとのべている。ここではトンネル背面地山の吸水膨張によるトンネル土圧の発生機構をのべたのち、吸水膨張の発生領域を中性子水分計を用いて実測した結果についてのべる。

2. 粘土鉱物を含む地山の吸水膨張

表記のような地山の圧密、膨張過程は粘土のそれに準じて考えられる²⁾ といわれているが、粘板岩や高度に圧密された粘土の吸水膨張には前報¹⁾ にもべたように、異方性を示すものが多いことが認められている。しかしここでは均質な地山を仮定して等方性な粘土に準じて取扱うこととする。水で飽和した粘土の脱水圧密と吸水膨張とは Fig. 1 のような非可逆過程をたどり、図中の縦軸 e は間げき比、横軸 $\log \sigma_m$ は平均主応力の対数である。粘土がそれまでに受けた平均主応力(先行圧密応力)以上の応力をうけると図のab線のように、半対数紙上で直線経路に沿って圧密される。b点(圧力 σ_{m0})まで圧密した後、粘土に加えていた

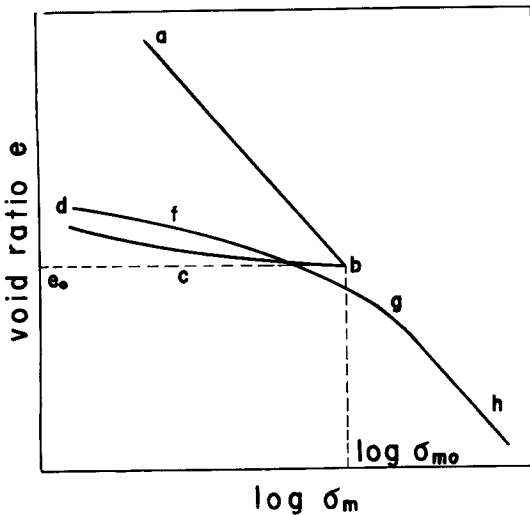


Fig. 1 Relation between water content of clay and mean effective principal stress.

いま地山の粘土は均質とし、自然地山中の水平土圧の鉛直土圧に対する比(静止土圧係数)を仮に1とする。トンネルは半径 a の円形孔で、 a に比して十分大きい土被りのところにあるとする。トンネルが瞬間的に開削されたとすれば、開削直後のわずかの時間中には破壊がまだ生じていないから、地山の全領域は一時的には弾性体とみなされよう。故にまずトンネルのまわりの地山中の応力を、地山の自重の代りに、トンネル中心位置における土被り圧に相当する等方圧をうけた無限弾性平面内の円形孔のまわりの応力として求める。

トンネル中心を原点とし、動径方向に r 、円周方向に θ をとり、それぞれの方向の主応力を σ_r 、 σ_θ とする。これらの応力は、

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \alpha_1 - \alpha_2/r^2 \\ \sigma_\theta &= \alpha_1 + \alpha_2/r^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここに α_1 、 α_2 は積分常数で、次の境界条件によってきめられる。トンネル開削時にはトンネル周壁は無支持であるから、境界条件は、

$$\left. \begin{aligned} r=a \text{ にて} & \quad \sigma_r=0 \\ r \rightarrow \infty \text{ にて} & \quad \sigma_r = \sigma_\theta = \sigma_{m0} \end{aligned} \right\}$$

σ_{m0} はトンネル中心位置における土被りに相当する上載圧力で、粘土の先行圧密応力に一致するものとする。この条件から(2)式は、

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \sigma_{m0} (1 - a^2/r^2) \\ \sigma_\theta &= \sigma_{m0} (1 + a^2/r^2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

上式より、 r なる点の主応力差 σ は次式で与えられる。

$$\sigma = \sigma_\theta - \sigma_r = 2\sigma_{m0}(a^2/r^2) \dots\dots\dots (4)$$

地山の粘土の主応力差に対する挙動は既報のちゅう積粘土の挙動³⁾と同様に、その粘土の上下限降伏値(それぞれ σ_u 、 σ_0)と主応力差 σ との関係で異なり、次のような特性をもつものとする。 σ が $0 < \sigma < \sigma_0$ の範囲の領域は純弾性領域となり、 $\sigma_0 < \sigma < \sigma_u$ の範囲は粘弾性領域となる。また $\sigma_u < \sigma$ の範囲では、クリープ破壊が σ の値が最大であるトンネル壁面から発生して外方に進行し、終極には $\sigma_u < \sigma$ の全域が σ_u の主応

圧密応力を減少すると bcd の経路に沿って吸水膨張をする。これをその後、再び圧密すれば、 $dfgh$ 線のように b 点よりやや下方の g 点を通して ab 線の延長上に復帰する。しかし ab 、 gh 線の直線性は粘土の含水比が塑性限界以下の低含水比になると保たれないようである。

吸水膨張経路は bcd のように近似的に直線とみられるので、その水平となす角の正切を C_e (膨張指数) とすれば、 bcd に沿う体積膨張率 ε_v は次式で与えられる。

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V} = \frac{C_e}{1+e_0} \log_{10} \frac{\sigma_{m0}}{\sigma_m} \dots\dots\dots (1)$$

粘土の地山中にトンネルを掘削したとき、地山中の膨張する領域を厳密に求めることはむずかしいので、ここでは次のような極めて単純な条件のもとにその概況を考察する。

力差をもつ塑性領域となる。故にトンネルに直接する外周には塑性領域が、その外周には粘弾性領域が、さらにそれを取りまいてその外周には弾性領域が生ずる。粘弾性領域と塑性領域の中にある地山がトンネルに向かって流動するために生ずるトンネル土圧についてはここでは除外してもっぱら粘土の吸水膨張による土圧のみを取出して考察する。粘土の流動によって地山の応力状態が変わらないとして、粘弾性領域を弾性領域とみなし、通常の弾塑性領域に関する問題として扱う。そうすれば、トンネルのまわりにできる弾塑性領域の境界線は Fig. 2 のように、トンネルと同心の円となり、その半径を R とする。

$r > R$ なる弾性領域では、 σ_r, σ_θ は (2) 式で示され、式中の α_1, α_2 は次の境界条件によって求められる。

$$r=R \quad \text{において} \quad \sigma_\theta - \sigma_r = \sigma_u$$

$$r \rightarrow \infty \quad \text{において} \quad \sigma_r = \sigma_\theta = \sigma_{m0}$$

ここに σ_u は粘土の上限伏値。この条件を入れて (2) 式を解いた結果は、

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \sigma_{m0} - (\sigma_u/2) (R^2/r^2) \\ \sigma_\theta &= \sigma_{m0} + (\sigma_u/2) (R^2/r^2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

トンネル中心における地山中の鉛直土圧 σ_z は、トンネル掘削前後で不変とし、 $\sigma_z = \sigma_{m0}$ とすれば、弾性領域における平均主応力 σ_m は、

$$\sigma_m = (\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z)/3 = \sigma_{m0} \dots\dots\dots (6)$$

となり、トンネル掘削の前後で増減が生じない。したがって (1) 式から分るように弾性領域には吸水膨張は発生しない。

次に、 $a < r < R$ の塑性領域における σ_r, σ_θ は次式を連立に解き、かつ $r=R$ において弾性領域の応力と連続するようにして求められる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} &= 0 \\ \sigma_\theta - \sigma_r &= \sigma_u \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

よって、

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \sigma_{m0} + \sigma_u \{ \log(r/R) - \frac{1}{2} \} \\ \sigma_\theta &= \sigma_{m0} + \sigma_u \{ \log(r/R) + \frac{1}{2} \} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

また塑性領域における σ_z の掘削にともなう変化は微少であるとして無視し、 $\sigma_z = \sigma_{m0}$ とすれば、この領域中の平均主応力 σ_m は、

$$\sigma_m = \sigma_{m0} + \frac{2}{3} \sigma_u \log \frac{r}{R} \dots\dots\dots (9)$$

上式から明らかなように、 $r < R$ のもとでは $\sigma_m < \sigma_{m0}$ であるから、塑性領域では吸水膨張が発生する。点 r における体積膨張率 ϵ_v は (9) 式を (1) 式に代入して、

$$\epsilon_v = \frac{C_e}{1 + e_0} \log_{10} \left[1 / \left\{ 1 + \frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{\sigma_{m0}} \log \left(\frac{r}{R} \right) \right\} \right] \dots\dots\dots (10)$$

トンネルに支保工または覆工が施されたとき、それらと地山との間に厚さ t だけの間げきが一樣に残されたとする。支保工または覆工は圧縮されないものとすれば、地山は厚さ t の間げきをみたく以上には吸水膨張をすることが許されないから、間げきの体積と吸水膨張量とを等値すれば、次式を得る。

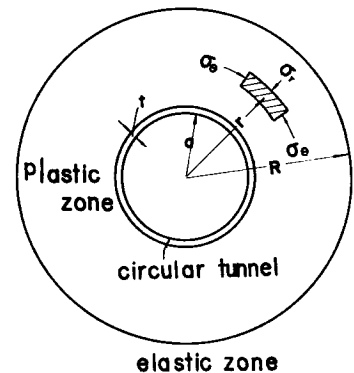


Fig. 2 Cylindrical coordinate around a circular tunnel. R : radius of elastic zone, t : clearance between lining and back ground.

$$2\pi at = \int_a^R 2\pi r \cdot \varepsilon_v \cdot dr$$

これに(10)式を代入して、

$$\frac{t}{a} = \int_1^{\rho} \frac{C_e}{1+e_0} x \log_{10} \left[\frac{1}{1 - \frac{4}{3} k \log \frac{\rho}{x}} \right] dx \dots\dots\dots(11)$$

ここに、 $k = \sigma_u / 2\sigma_{m0}$ 、 $\rho = R/a$ 、 $x = r/a$ 。

上式のうち、 a 、 t は施工条件で決まり、 σ_{m0} 、 C_e 、 e_0 、 k は地山の地形、地質の条件で与えられる。(11)式において、 t を与えれば ρ (または R)が求まり、その R を(8)式に代入すれば σ_r が算出される。トンネルの支保工または覆工にかかる土圧は、 $r=a$ における σ_r すなわち $(\sigma_r)_{r=a}$ であるから、トンネルの施工に際して支保工または覆工の背面にどれほどの間げき量を残すかによってトンネル土圧が左右されることになる。

いま具体的な計算例として、強い膨張土圧でコンクリート覆工が破壊したと推定された某水路トンネルについて上記のような方式で計算を行った結果を次に示す。トンネルは半円のアーチをもつ馬蹄形であるが、これを面積の等しい円形トンネルとみなすことができるとすれば、その半径は $a=1.68\text{m}$ となる。またこの粘土地山の諸常数は、 $e_0=0.257$ 、 $C_e=2.7 \times 10^{-2}$ 、 $k=0.157$ 、 $\gamma=1.8 \text{ t/m}^3$ 、 $\sigma_{m0}=1.8 \times 120(\text{m})=216 \text{ t/m}^2$ (土被り120mをうけた正常圧密粘土とした)である。これらの値を用いて(11)式を解き、 t と $(\sigma_r)_{r=a}$ および R との関係を求めた結果はFig. 3の通りである。このトンネルの建設時の様子の詳細はよく分ら

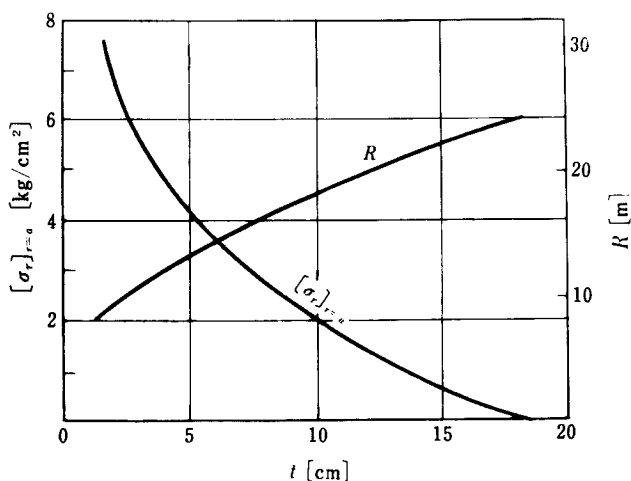


Fig. 3 An example of calculated relation among t , R and ground pressure on a tunnel lining $(\sigma_r)_{r=a}$.

ないが、掘削中は湧水がなく安定した地山であったと伝えられているので、覆工コンクリートは地山にかなりよく密着させて施工され、覆工外周と地山との間げきは非常に少なかったと推定される。トンネル完成後、通水して使用中間もなく覆工の破壊が生じたもので、通水が粘土地山の吸水を促進したものと思われる。覆工の施工時に覆工外周にどの位の間げきが残されていたか分らないが、仮に $t=1\text{cm}$ とすれば、Fig. 3により約 7 kg/cm^2 の膨張土圧が発生することとなる。故にこのトンネルの覆工にかかっていた土圧が地山の吸水膨張に起因する土圧のみであるとしても、それだけでも覆工を破壊させるに足る大きい圧力となることが推定され、背面地山の吸水膨張が覆工の破壊に大きな役割をしたことが察せられる。

3. 中性子水分計による地山の膨張領域の測定

地山の膨張領域の大きさについては前節において理論的に考察したが、実際のトンネルにおいて生じているこの領域の大きさを実測することができれば膨張土圧の推定やトンネルの災害調査の上に非常に有利である。粘土質の地山の膨張には吸水が必要であり、吸水すれば含水量が増加することの現象を利用して、地山の含水比の分布を測定することによって膨張領域と膨張量を知ることができる。しかし大きな膨張土圧を発生するような高度に圧密された粘土や粘土質の岩石は硬いために、軟弱な粘土の採取に用いられるシンウォールサンプラーのような不攪乱状態を保持しながらサンプルを採取することはできない。硬い地盤のサンプル採取には、通常ロータリ式ボーリングが用いられるが、ボーリングに際してはのみ先の冷却とくり粉の排出のために水をボーリング孔に注入する。そのためサンプルの含水比が増大して自然含水比の測定ができない。またたとい無水でボーリングを行った場合でも、のみ先と地山との摩擦熱によりサンプルが乾燥して自然含水比の保持ができない。そこでボーリングサンプルによる含水量の測定に代る方法として、ボーリングによって穿孔した孔に挿入型中性子水分計を入れて直接地山の含水量の変化を求めてみた。

中性子水分計はプローブ内に内蔵された中性子源から放出された高速の中性子が水素の原子核のような軽い原子核に衝突するほどはげしく減速して熱中性子となって散乱する性質を利用して、線源付近に散乱している熱中性子の数を測定することにより間接的に散乱範囲——有効容積 (effective neutron thermalizing volume) ——の単位体積中の水素原子密度 すなわち 含水量 を測定するものである。これは地山の構成物質は無機質の地質であって水素以外の軽い原子核や水以外に水素を含む有機物がないからである。ただし被測定物質中に熱中性子の吸収断面積が大きい Fe, Cl, Mn, B, Cd, Li などの元素が多量に含まれている場合には測定した計数率 (カウント/分) に影響があることが知られている。地山の含水量分布の測定に中性子水分計が有利な点は、ボーリング孔の周囲の含水量がボーリングを行ったために多少変化しても、その変化がボーリング孔全長に一樣に生じていれば、中性子水分計の水分を受感する範囲がボーリング孔周面よりも深い部分に及んでいるから、地山の含水量の絶対値には誤差がでてその相対的な分布状況は正しく測定できるからである。ここで用いた Nuclear Chicago 社製 Model P-19 の取扱書によれば受感範囲は次式の直径 d (inch) をもつ球としてよいとのべている。

$$d = 12 \sqrt[3]{\frac{100(\%)}{w(\%)}} \quad (\text{inch})$$

w : 試料に含有される水の体積百分率

この式によれば、水の体積百分率 100, 20, 10% に対して d (cm) はそれぞれ 30, 51, 65 cm となる。

このような中性子水分計を用いてトンネル背面の含水量分布を測定した地山は、黒雲母花崗岩中に建設された単線鉄道トンネルのうち強土圧を示した断層粘土の部分である。この断層粘土は 1～2 m 程度の幅であるが、その前後は幅 5～6 m 程度の断層破砕帯にはさまれ、断層はトンネル軸と平面的にはほぼ直交している。なおこの土被りは約 200m である。トンネル覆工は、この断層粘土の部分を中心に厚さ約 30cm のコンクリート覆工が破損変形をうけていた。このような強土圧で覆工が破壊されたのはトンネル竣工 (竣工は昭和 4 年) 後間もない頃と伝えられているが正確な記録はない。しかしその後顕著な破壊の進行がみられないなどの状況より判断して、この破壊の原因が厚い断層粘土の吸水膨張に帰せられるよう推定された。

粘土の膨張範囲を測定するため、昭和 38 年 10 月 8 日覆工の側壁を貫いてほぼ水平でやや上向きの方に外径 56mm のビットでロータリーボーリングを注水しつつ行ない、その孔に一端を閉じた導管 (access tube) を挿入埋設した。なお導管は外径 46mm, 厚さ 3mm, 長さ 18m の冷間引抜の炭素鋼管である。ボーリング穿孔後 3 日を経た 11 日に中性子水分計を挿入して計数率を測定したが、測定はブルドーザ工事株式会社に依頼し、同社所有の Nuclear Chicago 社製 Model P-19 の挿入型中性子水分計と同社製の Model 2800A のスケーラーを用い、ブルドーザ工事株式会社の西井功技師によって計測された。なおこのプローブの線源は

5mc の RaBe が使用され、挿入部の外径は 38.1mm、長さ 38cm である。計測はトンネル内面より 50cm 毎に行ない、得られた計数率(カウント/分)は Fig. 4 の実線の通りである。

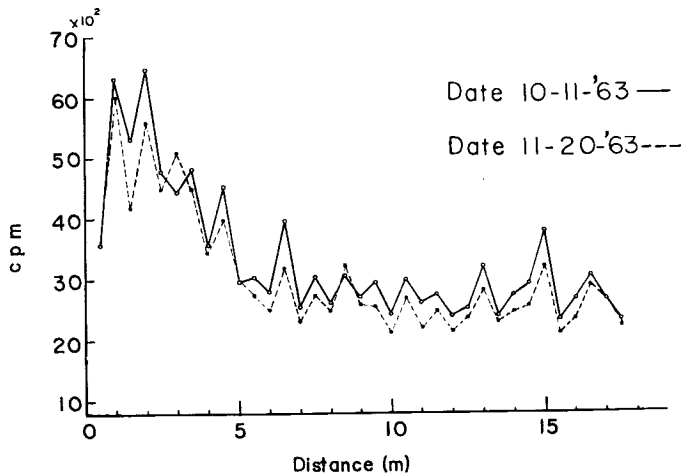


Fig. 4 Counting rate of thermal neutron along access tube penetrated radially from tunnel lining.

もし挿入した導管が地山に密着していれば Fig. 4 で求めた計数率を校正曲線に照合して地山の含水量が求められるはずであるが、導管の外周に空けきが残されているおそれが多い。ボーリング孔は時間が経つとともに周囲の粘土が押し出されてきて、孔が収縮し、導管の周囲に残された空けきが塞がれることは、挿入管にかかる地圧の経時増加を測定した別の試験で認めることができたが、穿孔後3日の経過程度では完全に密着したかどうか不確実である。またボーリング孔周囲の粘土が吸水をするとしても終極状態に達していないおそれがある。もし導管外周の空けきが水で満されていれば含水量は実際の地山の値よりも過大に評価され、逆に空気が満されている場合には過少評価となる。

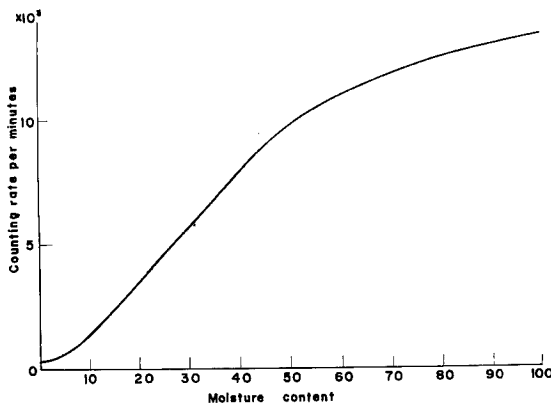


Fig. 5 Calibration curve of a neutron moisture meter.

このような誤差を除くため、ボーリング孔外周の地山粘土が流動と膨張により導管外周の空けきを充填し、かつ孔周の地山の含水量の移動も定安するまで待って第2回目の計測を行うようにした。そのため導管は中に水分が入らないよう密閉してそのまま残し、第1回目の計測より40日を経過した11月20日に前回と同じ方法で同じ測点の計数率を測定した。この結果は Fig. 4 の点線であるが、これによれば、全体の計数率の分布状態はほとんど不変であるが、計数率の絶対値は各点ともわずかに低下している。図示された2回にわたる計測の結果をみれば、ボ

ーリングにより地山の受けた影響や導管と地山の密着状態が導管全長にわたり一様であるとする限りでは、地山の水分が自然状態の地山の平均値より増加した範囲は側壁内面より約 6 m の範囲となっている。故にこの範囲を膨張領域と解てよいと認められる。

中性子水分計の計数率と地山の含水量との関係は、含水量を種々にかえた材料に対して実験的に得られた校正曲線によって求められる。校正曲線は中性子水分計と導管の材質、寸法、構造などに影響されるので、実用に供したものと同型のものを用い、また実験に用いる試料の大きさは有効容積以上の大きさのものでなければならない。ここでは西井功技師により、直径 600mm、深さ 600mm の容器に入れた砂、ベントナイトおよび水を混ぜた試料を用い、容器の中心軸に沿い試料と密着するようにして導管を入れ、Fig. 5 のような校正曲線が求められた。

以上のように、このトンネルでは中性子水分計によって覆工外周の地山に発生している膨張領域の一面を実測することができた。ここではわずか 1 本の導管に対する測定にすぎなかったが、同様の計測をトンネル横断面方向に放射状に行って膨張領域の全体の様相を測定し、一方地山の試料に対しては膨張試験を行ってその力学特性を明らかにしておけば、それらを理論的に組み合わせることによって覆工に作用する膨張土圧の大きさなどの解明が可能になることと思われる。またそれによってトンネルの設計・施工や安全対策の上にも寄与することが多いであろう。

引 用 文 献

- 1) 村山朔郎, 八木則男 “粘板岩の吸水膨張について”, 京大防災研究所年報第 8 号, 1964, pp. 495—506.
- 2) Proctor & White “Rock Tunneling with steel Supports” Youngstown Printing Co., Ohio 1956, p. 71, p. 79.
- 3) 村山朔郎, 柴田 徹 “粘土のレオロジー的特性について” 土木学会誌論文集, 第 40 号, 1956, pp. 1~18.