

膨張性粘土質地山におけるトンネル施工に関する研究 (第1報)

—トンネル掘削に伴う地表面の沈下—

大塚 義之
竹林 亜夫
(土木技術部)

§ 1. はじめに

本報告は、千葉県鴨川市の国道128号線嶺岡トンネルの施工に伴う計器測定結果のうち、トンネル掘削と地表面の沈下との関係についてのべたものである。

嶺岡トンネルは、大正14年に完成した国鉄の嶺岡ざい道が膨張性地山に掘られたトンネルの例として挙げられていることからもうかがえるように、当初から悪条件が予想された。

第1に、当地域が後にものべるような地殻変動を受けている破砕帯であって、粘土化のいちじるしい膨脹性地質であること、第2に、当地域が、地すべり地帯にあること、第3に、トンネルの全延長のうち2/3が土かぶり30m以下の浅いトンネルで、地表面に影響を与えやすく、地すべりの誘発に対し注意を払う必要があること、以上3つの条件が予想され、トンネル掘削にあたっては作業の安全および地表面の安全を確保するための施工上の対策が検討された。

このような状態において、対策の当否を判定するためおよび施工上の研究資料を得るため、各種の測定が坑内および坑外でなされるよう計画された。本報告は、それらの結果の一部をとりまとめたものである。

§ 2. 研究の目的

トンネル掘削がおよぼす地表への影響は、当地域におけるような地すべりの誘発原因となるほか、地表面にある構造物に被害をおよぼすことが考えられる。トンネル建設は、将来ますますその数を増すと共に、地表に構造物が存在するような個所に建設される可能性が高まる。このため、トンネル掘削に伴う地表面の影響を予知し、これに対する対策を立てることが必要となる。

本研究は、トンネル掘削において、導坑掘削段階で観測された沈下量から、上部半断面掘削時の沈下量を予知

することを試みたものである。ここに提案する沈下量の予知方法は、いまのところ1つの現場測定例に適用されたものにすぎないが、沈下量の定量的な予知方法として一つの方向を示唆するものと考えられる。

§ 3. 嶺岡トンネルの施工概要

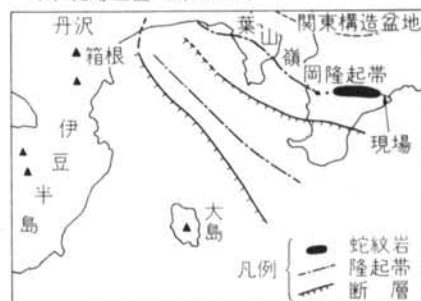
3.1 地質

トンネルの施工地点は、房総半島の嶺岡山地の東端に位置している。嶺岡山地は、従来より丹沢造山運動の一環として考えられてきたが、最近の相模湾を中心とする海底地質調査などの結果から、丹沢造山運動とは別に新たな概念の葉山嶺岡変動が考えられるようになった。

葉山嶺岡変動の概念によれば、嶺岡山地は図-1に示



(1) 現場位置 (1/25000)



(2) 現場付近の地質構造

図-1 現場位置および地質構造概念図

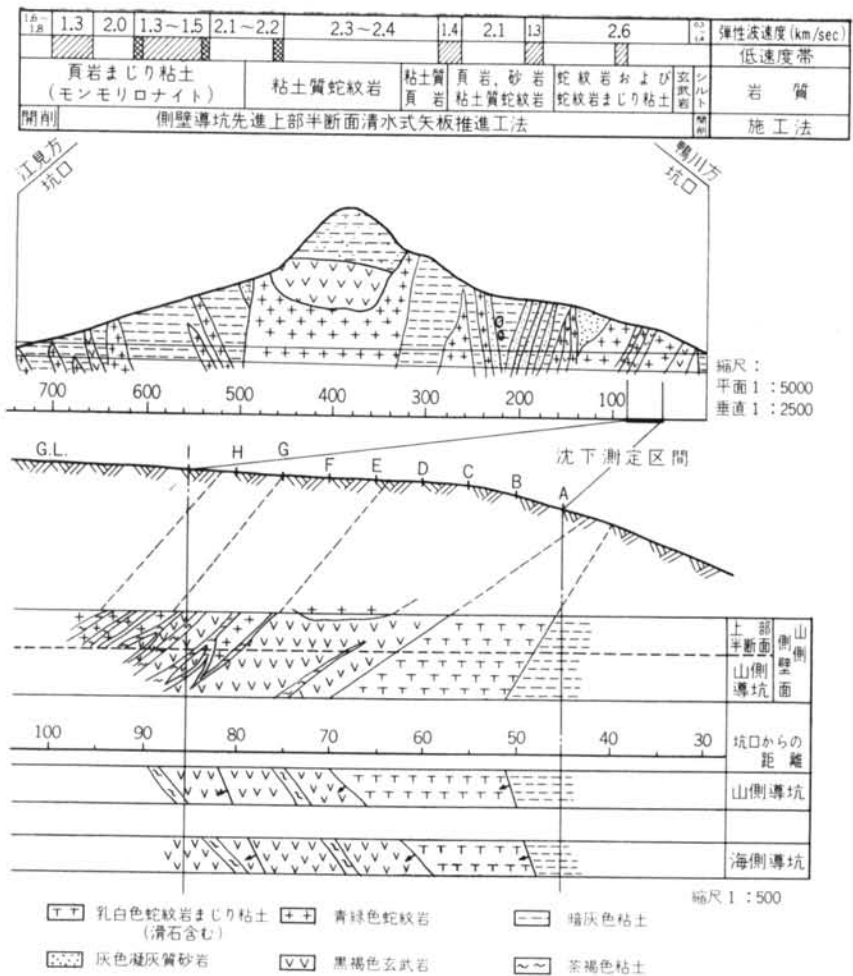


図-2 トンネルおよび測定区間の地質断面図

すように葉山嶺隆起帯の中心であって、隆起帯の南縁には南落ちの正断層（那古構造線）があり現在も活動中と考えられている。嶺岡トンネルは、このような地殻変動の中心的な位置を占める嶺岡山地を南北に横断するように計画されたもので、当初から、トンネル内の地質の変化がはげしく、調査段階で地質の状況を把握することは困難であると予想された。

トンネルを計画する際に行なった地質調査結果を図-2に示す。岩質は主に頁岩と蛇紋岩からなり、いずれも破碎されて、鱗片状になっているか、あるいは粘土化している。いくつかの破碎帯が、弾性波速度の測定から低速度帯として認められているが、これらはいずれも断層によるものと考えられ、粘土化していることが予想された。

また、地形的にみると、典型的な地すべり地形が随所

に認められる。この付近の地すべりは、600~1000 m²程度の地塊を単位として移動しているようである。

3.2 施工

施工方法は、トンネル全区間にわたり側壁導坑先進上部半断面方式である。トンネル断面の掘削順序、および覆工の順序を図-3に示す。

側壁導坑先進上部半断面方式を採用した主な理由は、(1)上部半断面を着工する前に地質

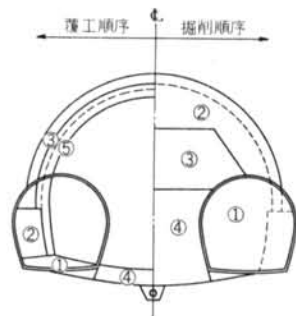


図-3 嶺岡トンネル施工順序 (側壁導坑先進上部半断面方式)

の確認ができる。(2)側壁コンクリートとインバートの一部を先に施工することによって、上部半断面のアーチ支保工を安全に支持することができるなどの理由によるものである。

側壁導坑掘削の結果、(1)破碎性の地山であることが明瞭になった。(2)これからのべるように地表面の沈下がいちじるしく、最大59mmにも達した。(3)地質の膨脹圧と塑性流動による地山の押し出しのため、縫地矢板(45mm厚)が折損し、支保工のほとんどが座屈するなど地圧が大きく作用していることが判明した。このため、上部半断面の施工に、縫地工法を採用することは、作業の安全を保つ上で困難であると判断したため、清水式矢板推進工法をトンネルの全区間にわたって採用することになった。

清水式矢板推進工法は、縫地工法に比べ矢板外周の余掘りの量を少なくすることができ、これによって地山のゆるみ範囲をせばめることとなり、地表面に対する影響を小さくすることができる。また、ゆるみ範囲がせばまることによって支保工にかかる土圧の低減をはかることができるなどの特長をもっている。

清水式矢板推進工法の詳細については文献1)、2)を参照されたい。

§ 4. 地表面沈下量の測定

4.1 測定方法

測定は、水管式沈下計による水位の変動を観測することによった。水管式沈下計および基準タンクの写真を写真一1および写真一2に示す。

測定点の位置は、坑口から45m離れた地表面にA列をトンネル中心線と直角な方向に配列し、以下5mおきにB列……I列の9列58点とX列、Y列の各1点合計60点の水管式沈下計を配置した。各水管式沈下計の基準点となる基準タンクはトンネル中心線より山側へ35m離れた地点に設置した。これらの位置関係と配管の状態を図一4に示す。

測定点の設置は昭和45年12月29日に完了し、沈下量の基準となる0点のよみは、昭和46年1月7日の読みをとることにした。

4.2 測定区間の地質と施工状況

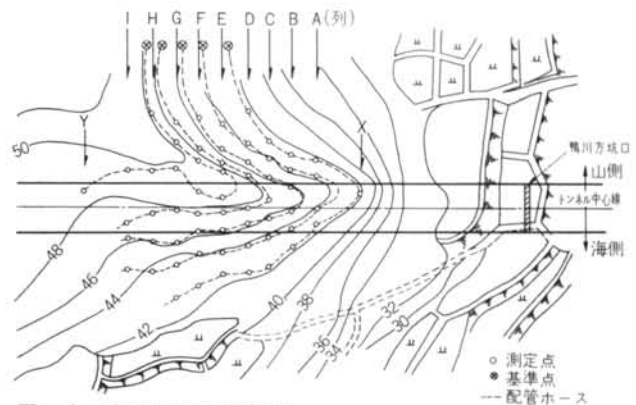
測定区間の地質縦断面図を図一2に示す、すでにのべたように、岩質の変化がいちじるしくそれらの境界はほとんど断層粘土とみられる粘



写真一1 水管式沈下計（直視）



写真一2 基準タンク



図一4 地表面沈下量の測定点

土を間にはさんでいる場合が多い。
また、鏡肌といわれるすべり面が同一岩質内にもみられる。比較的固い頁岩あるいは玄武岩では、圧砕されて肌落ちしてくるものが多い。

切羽面にあらわれる地質の型は、大まかに3つの型に分けることができる。次に、その特徴を簡単にのべる。

(1)45~60m区間：青緑色~暗青色の蛇紋岩を主体とするが、乳白色の滑石の脈を多く含むことが特徴である。このため滑石脈の優っている箇所では、蛇紋岩の礫がとりこまれていくような感を呈する。

(2)60~78m区間：(1)の滑石が優勢な蛇紋岩の上位に玄武岩がのってするのが特徴的である。茶褐色粘土の薄層が78m付近からみられる。

(3)78~90m区間：茶褐色粘土が鱗片状に入り、その中に茶褐色の玄武岩、砂岩等を取りこんでいる。80m付近

	玄武岩*	葉片状粘土質蛇紋岩(緑色)	蛇紋岩質粘土(緑色)	赤褐色粘土(茶褐色)**
真比重 G_s	2.98	2.44~2.75	2.48	2.55
自然含水比 W	7.34	8.12~12.94	12.42	11.86~12.84
単位体積重量 γ_t	2.38~2.53	2.04~2.15	2.12	2.09~2.11
間隙比 e	0.26~0.51		0.32	
一軸圧縮強度 qu	104.80~139.76	4.84~17.19	0.67~1.01	0.62~1.35
変形係数 E	2900~5850	218~910	58~228	71~103
液性限界 LL			30.8	33~54
塑性限界 PL			23.8	16.0~20.8
塑性指数 PI			7.0	12.2~38.0
吸水膨脹 %	—	0.19	—	1.11
モンモリロナイト		+++		+++
イライト		—		—
混合層鉱物		—		—
パイロフィライト		—		+
クローライト		+		—
アンチゴライト		+		++
アナルサイト		+		+

* 32m付近の試料
** 123m付近の試料

表-1 土質試験結果成績表

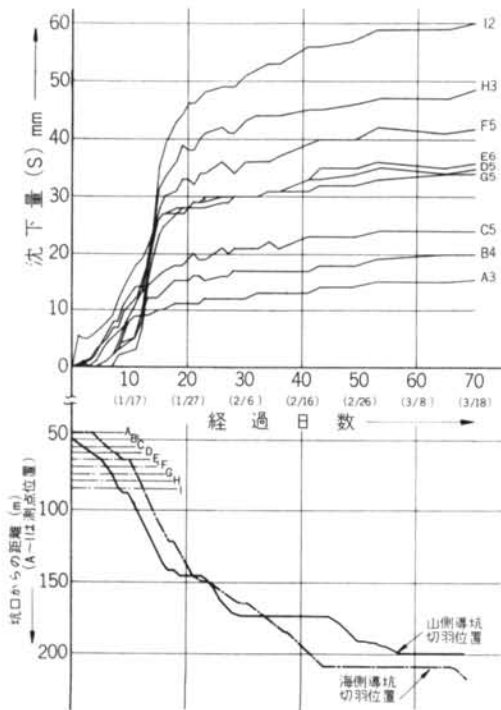


図-5 溝坑掘削時におけるトンネル中心線上の地表面測点沈下量と掘進速度の関係

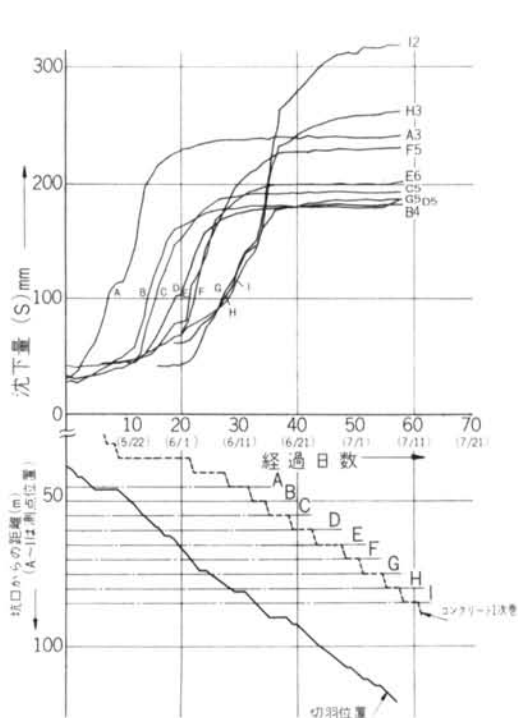


図-6 上部半断面掘削時におけるトンネル中心線上の地表面測点沈下量と掘進速度の関係

では緑灰色の蛇紋岩が優勢だが、85m付近からは、玄武岩と茶褐色粘土が互層状にあらわれる。それぞれは細かい断層線によってきられている。

本区間の地質サンプルの試験結果を表-1に示す。表-1の結果より、茶褐色粘土は、3~6.5t/m²程度の粘着力しかなく、78~90m区間は測定区間の中でも他と比較して、軟弱な地質といえることができる。赤褐色粘土中には膨張性粘土鉱物のモンモリロナイトが含まれ、吸水膨張試験の結果、単位幅当たり1.11%の膨張量が認められた。

測定区間内のトンネル掘削は、導坑先進方式により掘削し、山側、海側の両側壁導坑の掘削経過は、図-5に示すとうりである。支保工はH-125、支保工間隔1.00mの縫地工法である。上部半断面の掘削は導坑より約141日遅れて測定区間に入った。上部半断面の掘削期間は図-6に示す。支保工はH-250、支保工間隔0.70mで、清水式矢板推進工法により施工した。

導坑および上部半断面掘削時の余掘り量は、表-5に示してあるが、導坑では15~40cm、上部半断面では20~80cmの余掘り量が認められた。

当トンネルのように、粘土化された地質に岩塊を混じえるような場合は、矢板を切羽に貫入させることができないので、切羽では先掘を行なう。したがって、岩盤の肌落ちがあり、その結果余掘り量が大きくなるのはやむをえないところと思われる。

§ 5. 測定結果

5.1 側壁導坑掘削時

トンネル中心線にもっとも近い各列における測定点の沈下量を経過日数をパラメーターとして図示すると図-5のようになる。図-5では切羽の進行状況をも理解してもらうために、下半部には坑口から切羽までの距離を

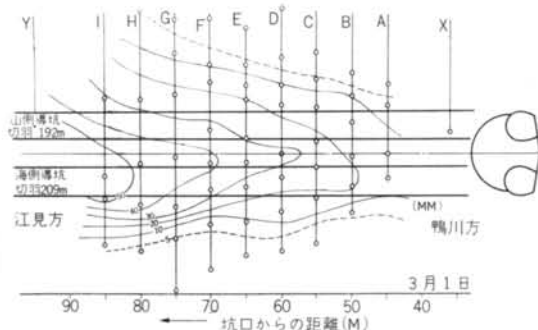


図-7(1) 地表面の等沈下量分布 (縮尺 1/300)

示してある。また、地表における測定列の坑口からの距離を示してあり、切羽の進行曲線と交差する点の期日が、切羽が測定列の直下を通過する時である。これによると、沈下量は、切羽通過後約4日間は急速に増加し、その後は漸増の傾向に向かう。

トンネル中心線から沈下の及ぶ範囲を、図-7(1)の等沈下量分布図に示す。この図は、時間の経過とともに変化するものであるが、ここでは3月1日の記録をもとに描いてある。3月1日の時点では導坑掘削による沈下がおちついて、ほぼ沈下速度が等しくなっている。

図-7(1)は導坑切羽の最終沈下量分布と見てよい。

5.2 上部半断面掘削時

図-6は側壁導坑の場合と同様に上半切羽の位置とトンネル中心線上の地表面の沈下状況を示したものである。これによると、切羽の進行と地表沈下の関係は、A~Dの区間では、導坑掘削の場合の傾向と類似し、切羽通過後4~5日間沈下が急速に進行し、後は1日平均1~2mmの沈下量に落ち着く。E~Hは、切羽通過以前からかなりの影響があらわれて沈下が進行している。

上半掘削中の地表面における等沈下量分布を示すと、図-7(2)、(3)となる。図-7(2)は切羽が測定線に接近している場合を示している。切羽の影響は、測定線の直下を通過しない間はほとんど認められない。切羽前方の地

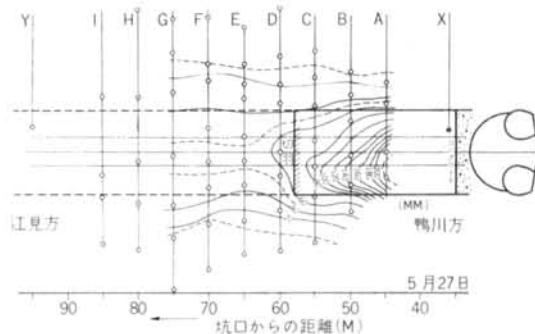


図-7(2) 地表面の等沈下量分布 (縮尺 1/300)

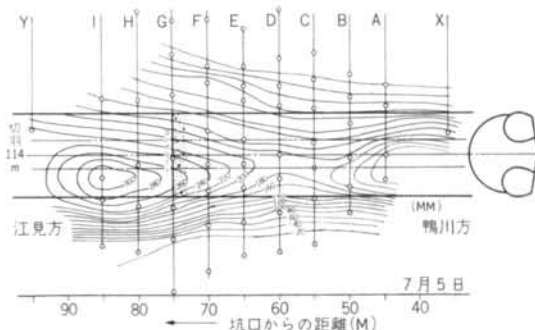


図-7(3) 地表面の等沈下量分布 (縮尺 1/300)

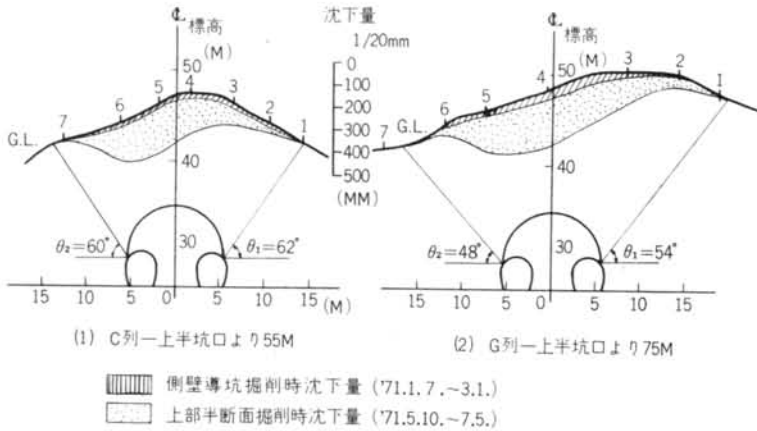


図-8 トンネル横断面方向の沈下影響範囲 (θ_1, θ_2 は沈下の限界角) 表面におよぼす影響範囲は、図-7(2)の場合、約5mである。

図-7(3)は、切羽が通過し、沈下のピークをすぎた時点での等沈下量分布を示している。これと、図-7(1)とをくらべた場合、分布範囲はほとんど同じで、各点における沈下量の差が大きくなっていることがわかる。したがって、側壁導坑の場合の沈下量分布は、導坑掘削時と上半掘削時とでは、ほとんど変わらないということがいえる。

図-7(3)の、C列とG列についてその断面をとると、図-8(1)、(2)に示すようになる。これより地表面で沈下量がほぼ5mになる点と、トンネルアーチ端部とを直線で結び、この直線が水平面となす角を θ とすれば、 θ はほぼ沈下の限界角となる。このようにして、図面上から求めた限界角を表-2に示す。

表-2および図-8のC列とG列とを比較した場合、A列からI列に向かって、限界角は次第に大きくなる。いいかえれば、次第に沈下の分布範囲が広がる。このことは、図-2の地質断面図からも想像できるように、A~D列では主として玄武岩からなり、E~I列では次第に茶褐色粘土のはさみが多くなるといった、地質の相違にもとづくものが原因と考えられる。

§ 6. 実測値の解析

6.1 地表沈下速度の時間変化

前述のような地表沈下現象を実測値に基づいて解析する方法として、1日あたりの沈下量を沈下速度($\Delta S/\Delta t$)と称し、その時間変化について検討した。

いま、測点E-6、F-5の導坑および上半掘削時に

列	導坑掘削時		上半掘削時	
	θ_1°	θ_2°	θ_1°	θ_2°
A	—	79	—	—
B	—	72	68	—
C	68	66	62	60
D	69	68	64	58
E	70	65	59	59
F	71	63	56	51
G	69	61	54	49
H	65	57	—	—
I	—	—	—	—

表-2 各測点列における沈下の限界角

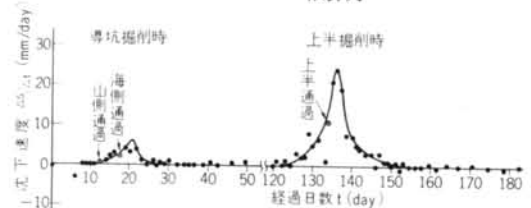


図-9(1) 測点E-6の上半および導坑掘削時の沈下速度の時間変化

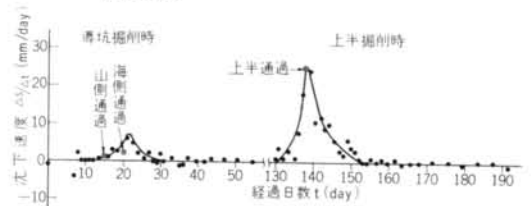


図-9(2) 測点F-5の上半および導坑掘削時の沈下速度の時間変化

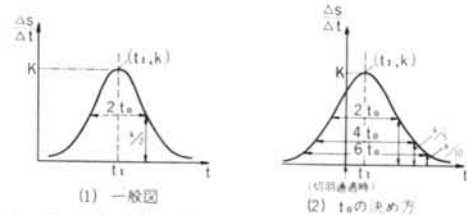


図-10 共鳴曲線のグラフ

における沈下速度の時間変化を図示すると図-9(1)、(2)のとおりである。これによると、地表の沈下速度は、各測点直下を切羽が通過する直後か少し遅れて最大値を示し、その前後で徐々に低減している。また、地表沈下現象が生じている期間は限られていることも判る。

このような傾向は、全測点(60点)について同様のことがいえる。

図-9に示した曲線は、確率曲線または図-10(1)の共鳴曲線に類似している。

いま、図-9(1)の共鳴曲線の式を示すとつぎのようになる。

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{k \cdot t_0^2}{(t-t_1)^2 + t_0^2} \quad \dots(1)$$

ここで、定数 k は最大沈下速度、 t_1 はその時の時刻、 t_0 は沈下継続時間に関する定数となる。この(1)式を実用的にするため、変数 t の原点を切羽通過時点とする。したがって定数 t_1 は切羽通過時点から最大沈下速度を示すまでの期間(日)となる。また、定数 t_0 を決める方法は、図-10(2)に示すように $k/2, k/5, k/10 \dots$ 法と無数にあるが、値としては大差がないので、以下には $k/10$ 法で求めた t_0 を使用する。

いま、測点G-4の測定値と、(1)式から求めた計算値($k/2$ 法、 $k/10$ 法)を図示すると図-11のようになる。

これより、任意な時の地表沈下量の計算値($S_{(t)}$)は(1)式を積分して次式のように求められる。

$$S_{(t)} = \int_{t=T_2}^{t=T_1} \frac{\Delta S}{\Delta t} \cdot dt = \int_{t=T_2}^{t=T_1} \frac{k \cdot t_0^2}{(t-t_1)^2 + t_0^2} \cdot dt$$

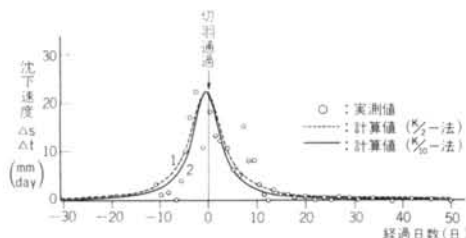


図-11 測点G-4の上半掘削時にける沈下速度の時間変化(実測値と計算値)

測点	実測値 (mm)	計算値 (mm)
A-3	225	304.2
B-4	163	203.7
C-4	120	128.8
D-5	141	142.8
E-6	160	211.7
F-5	178	218.2
G-4	198	196.7
H-2	202	269.6
I-2	248	334.5
平均	181.7	223.3

表-3 上半掘削による最終地表沈下量の実測値と計算値

$$= k \cdot t_0 \left(\tan^{-1} \frac{T_1-t_1}{t_0} - \tan^{-1} \frac{T_2-t_1}{t_0} \right) \dots(2)$$

ただし、変数 T_1 は沈下現象が生じ始めた時点を示し、変数 T_2 は任意な時を示す。

(2)式を用いて、 $T_1=+20, T_2=-15$ としたときのトンネル中心線上の測点の計算値を求め、それと実測値とを上半掘削時について比較すると、表-3のとおりで、計算値が若干大きくなっている。

以上に述べた計算式より、導坑先進の場合の上半掘削による沈下量 $S_{M(t)}$ を求めようとすれば、導坑掘削時の沈下量 S_P に上半掘削時の沈下量 S_u を加えたものとなる。いま、 S_u は(2)式であらわされるから $S_{M(t)}$ は次のようになる。

$$S_{M(t)} = S_P + k \cdot t_0 \cdot \left(\tan^{-1} \frac{T_1-t_1}{t_0} - \tan^{-1} \frac{T_2-t_1}{t_0} \right) \quad \dots(3)$$

つぎに、上記の(1)~(3)式の定数 k, t_1, t_0 について考察を加えよう。

6.2 定数 k, t_1, t_0 の考察

いま、E測線の全測点における沈下速度の時間変化を図示すると図-12のようになる。このような図を他の測線についても描き、定数 k, t_1, t_0 の値を調べる。

k, t_0 はトンネル中心線上でほぼ最大となり、中心線から離れるにしたがい低減している。また、 t_1 はトンネル中心線上でほぼ最小となり、中心線から離れるにしたがって、若干増加している。

このことから、定数 k, t_1, t_0 はトンネル横断方向の平面的位置に関係するところが大きいように考えられるため、本項でこの点からの考察を加えよう。

6.2.1 グランド・アーチ曲線

トンネル掘削による地表沈下現象をトンネル横断方向の平面的問題として考える場合、つぎのような諸要因を考慮する必要がある。

- 土かぶり厚さ
- トンネル中心線からの離れ
- トンネル掘削断面の大きさ
- 土質(岩盤)強度

これらの諸要因をそれぞれ個別に定量化することは現段階では不可能であるため、これまでトンネル工学において半ば経験的に使用されてきたグランド・アーチの概念を用いて、上記の諸要因を包含した形で、次のような座標を提案する。

掘削によって生ずるトンネル周辺のグランド・アーチの形状を図-13に示すような縦長の楕円形と仮定し、そ

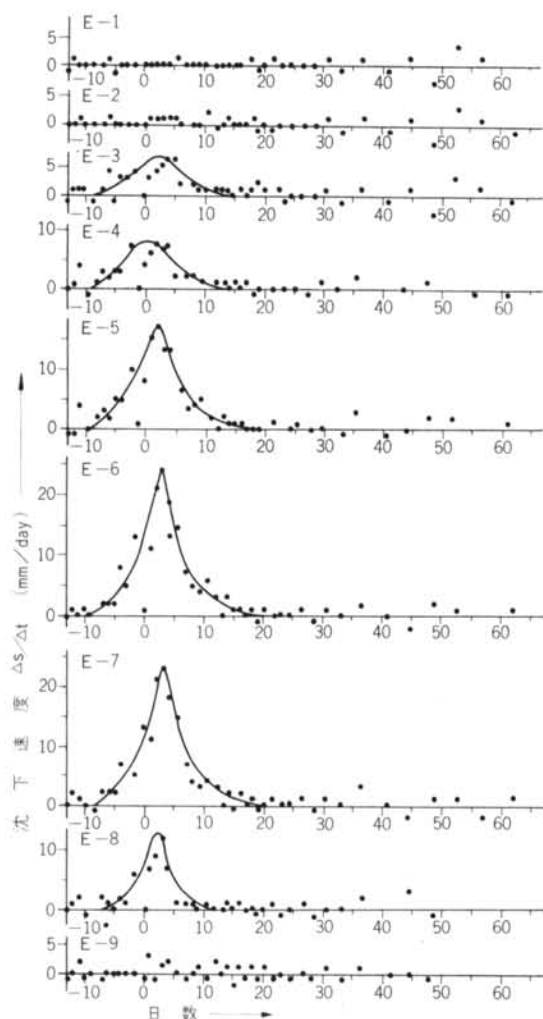


図-12 測点E列の上半掘削時における沈下速度の時間変化
(測点位置は図-5参照)

れがグランド・アーチ定数 ϕ をパラメーターとして図-13のように分散していくものと仮定する。

図-13のような場合の楕円の式は次式で表わされる。

$$\frac{\frac{2}{\beta} \cdot y}{\frac{x_2^2}{\alpha_2^2} + \frac{y_2^2}{\beta_2^2}} = \phi \quad \dots (4)$$

また、楕円の長軸と短軸の比を2:1に定めれば、 $\beta = 2\alpha$ である。したがって、トンネル掘削断面の最大幅(B)を楕円の短軸に等しくとり、トンネル中心線とトンネル最大幅を結ぶ線との交点を楕円の中心にとれば、(4)式は次のようになる。

$$\phi = \frac{\frac{B}{2} \cdot y}{x_2 + \frac{y_2}{4}} = 1 \quad \dots (5)$$

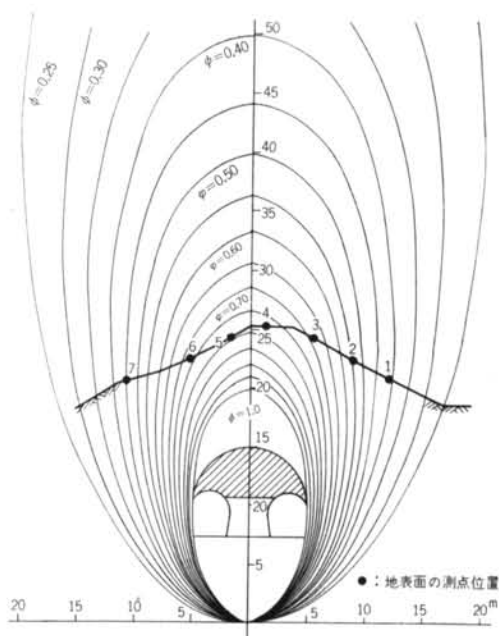


図-13 上半掘削時のグランド・アーチ曲線とグランド・アーチ定数

(5)式はトンネル掘削面に接する楕円を表わす式となり、このとき楕円の中心のY座標は、 $\frac{\beta}{2} = \alpha = \beta$ である。

いま、(5)式の ϕ を1.0, 0.95, 0.90...0.1と変化させて計算した結果は図-13のとうりである。(5)式における ϕ をグランド・アーチ定数と定め、これによる楕円曲線をグランド・アーチ曲線とする。

一定のグランド・アーチ定数によるグランド・アーチ曲線上においては、トンネル掘削による影響が等しくなるはずである。ここでは、 ϕ をパラメーターとするグランド・アーチ曲線を座標として定め、沈下の諸定数がこれらのグランド・アーチ曲線とどのような関係をもっているかをしらべることにする。

導坑掘削の場合は、同様にして、導坑掘削幅の $\frac{1}{2}$ を α とし、(5)式により図化する。当トンネルの場合は側壁導坑方式であるため、それぞれの導坑について(5)式により図化する。両導坑にはさまれた部分では、グランド・アーチ曲線が交差する。これに対しては、導坑相互の干渉を考慮して、図-14のようにその頂部を凸型に修正して用いる。

いま、図-13, 図-14を用いて、全計測点における導坑および上半施工時のグランド・アーチ定数(ϕ, ϕ')を求めると表-4に示すとおりである。

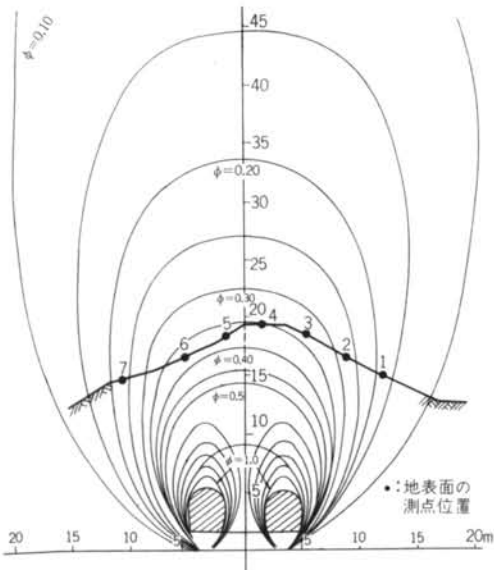


図-14 側壁導坑掘削のグランド・アーチ曲線とグランド・アーチ定数

6.2.2 最大沈下速度 k

最大沈下速度 k (mm/day) がトンネル横断方向の平面でどのような分布をなしているかについて調べるため、実測値より求めた最大沈下速度 (k) と各測点のグランド・アーチ定数 (ϕ, ϕ') の関係を図示すると図-15のとおりである。これによると、導坑および上半掘削時ともに、 L の値は次式に示す範囲に分布している。

$$39.5\phi^2 \geq k \geq 38.8\phi'^2 - 9.3 \quad \dots(6)$$

ただし $k \geq 0$

すなわち、 k の値は、掘削面周辺 ($\phi, \phi' = 1.0$) の時が最大で ϕ, ϕ' の2乗に比例して減少している。

つぎに k が、トンネル掘削時の余掘り量とどのような関連を示しているかを調べてみたい。各測点直下におけるクラウン部の余掘り量と、各測点列より求めた、 $k_{\phi} = 1.0, k_{\phi'} = 1.0$ の値とを表-5に示す。トンネル掘削面周辺の k の値は、導坑掘削の場合は余掘り量の1/3~1/14に、上半掘削の場合には1/6~1/19になっている。

つぎに、 k と地質状況について検討を加えよう。前述のように計測区間の地質は測点A列~D列とE列~I列とで異なり、後者の方が土質強度は弱く、より崩壊性に

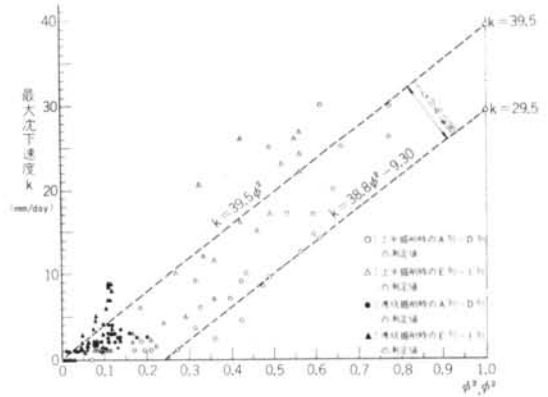


図-15 導坑および上半掘削時の $k \sim \phi^2, \phi'^2$ 図

測点列	測点番号	測点								
		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9
A一列	導坑掘削時 ϕ'	0.31	0.36	0.42	0.45	—	—	—	—	—
	上半 " ϕ	0.60	0.70	0.88	0.87	—	—	—	—	—
B一列	導坑 " ϕ'	0.25	0.33	0.36	0.37	0.40	0.37	—	—	—
	上半 " ϕ	0.52	0.65	0.75	0.81	0.78	0.66	—	—	—
C一列	導坑 " ϕ'	0.17	0.27	0.33	0.35	0.33	0.33	0.24	—	—
	上半 " ϕ	0.41	0.56	0.69	0.78	0.80	0.73	0.46	—	—
D一列	導坑 " ϕ'	0.10	0.21	0.28	0.30	0.34	0.37	0.35	0.22	—
	上半 " ϕ	0.26	0.44	0.57	0.63	0.77	0.77	0.65	0.43	—
E一列	導坑 " ϕ'	0.14	0.23	0.27	0.28	0.31	0.33	0.34	0.29	0.19
	上半 " ϕ	0.32	0.47	0.54	0.60	0.70	0.75	0.72	0.58	0.41
F一列	導坑 " ϕ'	0.12	0.22	0.24	0.31	0.33	0.34	0.30	0.16	—
	上半 " ϕ	0.30	0.46	0.52	0.68	0.74	0.70	0.56	0.34	—
G一列	導坑 " ϕ'	0.13	0.19	0.27	0.33	0.32	0.25	0.11	—	—
	上半 " ϕ	0.31	0.41	0.57	0.75	0.65	0.49	0.28	—	—
H一列	導坑 " ϕ'	0.12	0.28	0.34	0.33	0.21	—	—	—	—
	上半 " ϕ	0.28	0.60	0.75	0.65	0.43	—	—	—	—
I一列	導坑 " ϕ'	0.28	0.33	0.33	0.22	—	—	—	—	—
	上半 " ϕ	0.58	0.72	0.68	0.47	—	—	—	—	—

表-4 導坑および上半掘削時の全計測点のグランド・アーチ定数

測点	余掘り量 h (cm)		$k \sim \phi^2, \phi'^2$ 図から求めた $\phi, \phi'=1.0$ のときの k 値		$k(\phi, \phi'=1.0)/h$		施工状況
	上半掘削時	導坑掘削時	上半 $\phi=1.0$	導坑 $\phi'=1.0$	上半の時	導坑の時	
A一列	42	15	mm/day 38.6	mm/day 15.3	1/11	1/10	
B一列	60	20	47.5	20.0	1/13	1/10	上半切羽一部崩壊
C一列	25	40	26.8	29.3	1/9	1/14	導坑切羽一部崩壊
D一列	25	20	29.0	17.2	1/9	1/12	
E一列	20	15	47.3	29.6	1/4	1/5	
F一列	30	15	46.3	40.7	1/6	1/4	
G一列	80	40	41.3	55.2	1/19	1/7	上半矢板調整 導坑切羽崩壊
H一列	35	20	49.5	70.7	1/7	1/3	上半矢板調整時に一部崩壊
I一列	45	20	81.0	77.5	1/6	1/3	"
平均	40.2	22.8	45.2	39.5	1/6~1/19	1/3~1/14	

表-5 上半および導坑掘削時のクラウン部余掘り量と、 $k \sim \phi^2, \phi'^2$ 図から求めた $\phi, \phi'=1.0$ のときの k 値との比較

富んでいる。図-15では、導坑および上半掘削の場合、いずれも後者の方が大きい。なお図-15に示すようにA列～E列までとF列～I列までとは導坑および上半とも掘進速度が異なっているので、それによる影響も考えられる。

図-15から、導坑掘削時の k を知ることで上半掘削時の k を推定することができる。

6.2.3 定数 t_1 の分布

つぎに、切羽通過から最大沈下速度を示すまでの期間 (t_1) が、どのような分布をなしているかについて調べるため、実測値より求めた t_1 と、各測点のグランド・アーチ定数 (ϕ, ϕ') の関係を示すと図-16のとおりである。この図で t_1 の値が分布範囲を大きく外れている点は切羽を数日間停止したためである。

図-16より、導坑および上半掘削時ともに t_1 の値は次式に示すような範囲に分布している。

$$-8.25\phi + 8.25 \geq t_1 \geq -5.88\phi + 3.90 \quad \dots (9)$$

すなわち、掘削面周辺 ($\phi, \phi'=1.0$) では、切羽通過時に最大沈下速度を示しているが、掘削面から離れるにつれて最大沈下速度を示す時間の遅れは少しずつ大きくなり、(9)式より、 $\phi=0$ の時には3.90～8.25日の遅れとなっている。

この図より、 t_1 の値は、導坑と上半との掘削方法の違い、またトンネル掘進速度および地質状況等の諸要因による影響は小さいものと推察される。

また、導坑および上半掘削時の値が共通した分布範囲を示していることから、 t_1 の値は、導坑掘削時の計測結果から、上半掘削時の値を推定できよう。

6.2.4 定数 t_0 の分布

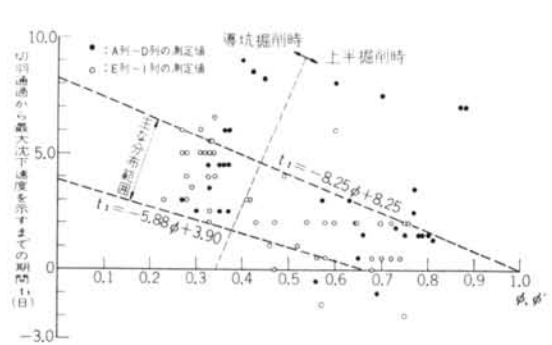


図-16 導坑および上半掘削時の $t_1 \sim \phi, \phi'$ 図

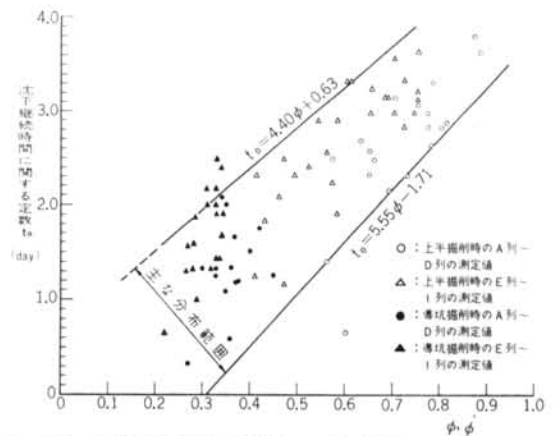


図-17 上半および導坑掘削時の $t_0 \sim \phi, \phi'$ 図

実測値より求めた沈下継続時間に関する定数 (t_0) と、各測点のグランド・アーチ定数 (ϕ, ϕ') との関係を図示すると図-17のとおりである。これによると導坑および上半掘削時ともに、 t_0 の値は、次式に示すような範囲に

分布している。

$$4.40\phi + 0.63 \geq t_0 \geq 5.55\phi - 1.71 \quad \cdots \cdots (10)$$

ただし $t_0 \geq 0$

すなわち、掘削面周辺では沈下継続時間が長く、それより離れるにしたがってグラウンド・アーチ定数に比例して短くなっている。今回の場合、(10)式より、 ϕ 、 ϕ' の値が1.0の時に t_0 の値は、3.84~5.03日になっている。

また、図-17より、 t_0 の値は、施工法、地質状況等の諸要因にどのように影響されているかを調べると、前者による影響は小さいが、後者による影響は大きいと推察される。すなわち、土質強度が弱く、崩壊性に富んでいるE~I列の t_0 は他よりも大きくでている。

導坑および上半掘削時の t_0 がともに共通した分布範囲を示していることから、導坑掘削時の計測結果から、上半掘削時の t_0 を推定することができる。

§ 7. 結語

以上の解析結果より、トンネル掘削による地表面の沈下現象のとらえ方として、測定記録の整理方法、および沈下の予知についていくつかの提案をした。ここで、これらの主な点を要約し、今後に残された問題点を指摘したい。

7.1 結果の要約

(1)実測値から得た沈下速度と経過日数の関係が、共鳴曲線に近似した形状をしめした。これをもとに、共鳴曲線を現わす式に固有の定数をあてはめることによって沈下速度と経過日数との間の関係式を得た。

(2)トンネル掘削により生ずるグラウンド・アーチの概念から、グラウンド・アーチの形状をグラウンド・アーチ定数 ϕ によって変化する楕円曲線と仮定し、地表面の各測点の位置がグラウンド・アーチ定数 ϕ によって表現できる座標を提案した。

(3)グラウンド・アーチ定数 ϕ と、近似計算式の定数 k 、 t_1 、 t_0 との関係は、導坑掘削の場合と上半掘削の場合の

区別なしに、ある一定の範囲に分布することが明らかにされた。これによって、導坑掘削時の地表面沈下を観測することによって、上半掘削時の地表面沈下の性状が推定できることになった。

7.2 今後の問題点

(1)計測区間における地質の相違が沈下性状におよぼす影響は、測点A~Dの各列とE~Iの各列における性状の違いとして認められる。本報告では、両者の相違について定量的な検討を加えていない。このことは、後にものべるような沈下量の測定精度の問題と、岩石試料の室内試験の数量、さらに弾性波等による広域的な地盤の工学的性質の把握が十分でないことによる。

(2)水管式沈下計の精度は ± 1 mm程度の誤差を含むものであったため、導坑掘削時の測定結果から、上半掘削時の沈下性状を予測すると、かなり大きな範囲を示さざるをえない。従って、沈下量の精度は、 $1/2 \sim 1/10$ mm以上のもを使用すれば、予測の精度もより向上させることができる。

(3)グラウンド・アーチ定数 ϕ は、トンネルの掘削幅 B と長軸と短軸の比が2:1である楕円曲線によって固定化された座標として与えられているが、グラウンド・アーチの形状は、地盤の性質、掘削方法の相違等によって変化するはずであり、掘削地盤に適したグラウンド・アーチ曲線の形状を選択する必要がある。このためには、坑内における掘削面周辺の変位量計測等を実施することによってその形状を検討しなければならない。

§ 8. おわりに

嶺岡トンネルにおける現場計測および試験は、土木技術部との共同で行なった。今後、坑内地圧、トンネル掘削と地すべり等の測定結果をまとめていく予定である。

本報告をまとめるにあたり、千葉県土木部鴨川土木事務所および当社嶺岡ずい道作業所の方々の全面的な御協力を頂いた。ここに謝意を表する。

<参考文献>

- 1) 藤井三郎、金岡一夫：“嶺岡トンネル”施工技術(1971.10)
- 2) 緒方司、金岡一夫：“嶺岡トンネルの計画と施工”建設の機械化 No.262(1971.12)