

トンネルの掘削に伴うカブリの薄い未固結地山の変形挙動に関する考察

日本鉄道建設公団 寺戸 幸雄

〇木村 宏

はじめに、トンネルの掘削にともなうトンネル周辺の変形挙動に対する研究は、FEM解析等の解析を用いた研究、現場計測に基づく研究に分けられるが、土砂地山を対象とした研究は、地山自体に解析には扱いにくい要素が多く、現場計測も地山の特殊性と局地性が障害となって、総合的な研究例は少ないのが現状である。ここでは、成田層群に掘削した取捨T($L=217\text{m}$, 土被り $7\sim 10\text{m}$)での現場計測を基にして表題について考察した。

1. 地質状況と掘進方法 本トンネルが掘削される地質は、成田層群と呼ばれる砂質水平堆積層で、一部に凝灰質シルト～粘土を互層に含み、 N 値は $10\sim 30$ である。地質は全区間均一とみなせ、飽和した比較的ゆるい状態で、ク라운より 1m 上方に地下水面がある。主な物性値は、表1に示す。計測は、坑口から続く斜面が平坦部になり約 25m 入った地点で行なわれた。掘削断面、縦断面、支保手

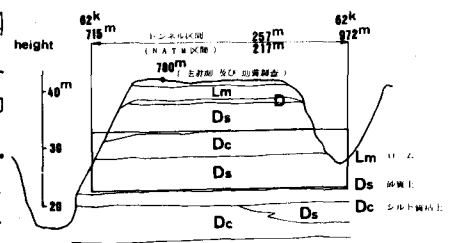


図1 取捨T地質断面図

表1 物性値

試料採取 位置	土質分類	含水率 (三軸圧縮より)	飽和力 (三軸圧縮より)	粘着力	内部 摩擦角	傾き比	含水比	飽和度	
-3.75 m ～-4.50 m	粘土	1.97	96.1	350.1	0.43	16.2	1.32	51.7	98.8
-5.50 m ～-7.40 m	粘土質の 細砂	0.14	18.9	366.3	0.10	37.0	0.83	19.7	77.1
-10.00 m ～-11.00 m	砂質 シルト	0.89	43.7	262.9	0.26	29.0	1.24	43.2	97.8
-15.50 m ～-16.40 m	シルト質 細砂	0.99	34.8	344.6	0.35	32.0	0.90	26.7	94.0
-21.50 m ～-23.00 m	シルト質の 粗砂	1.35	58.0	649.8	0.20	37.0	1.12	34.1	97.4
		kgf/cm^3	kgf/cm^3	kgf/cm^2	kgf/cm^2	degree			%

kgf/cm³ kgf/cm³ kgf/cm³ kgf/cm³ degree % %

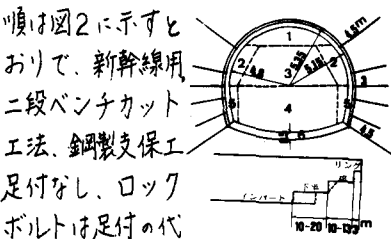


図2 掘削断面、縦断面、支保手

用とするところに特徴がある。下半の掘削は3つに分割され、大背は掘削機械のスロープ、土平は千鳥で掘削し、下半掘削による支保の沈下を軽減する方法を採用した。

2. 計測項目 計測は、図3に示す配置で、表2に示す項目を実施した。

表2 計測項目と計測機器

計測項目	計測機器
地表面沈下測定	レベル
地中変位測定 (坑内、地表)	エクステンソメータ 傾斜計
内空変位測定	レベル コンバージェンスメジャー

3. 変形特性とその考察

3.1 地表面沈下 1) トンネル掘進に伴い地表面沈下は、上半切羽が2D以上計測地点以前にある時点より先行隆起が生じ、 $0.19\sim 0.48D$ まで近づいた時点より沈下に転じる。上半切羽が計測地点に達するまでに、斜面の影

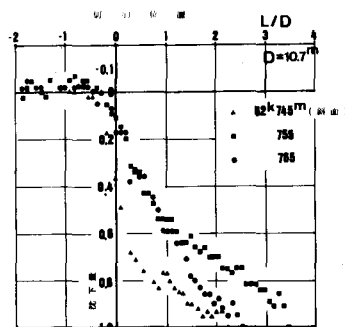


図4-1 上半切羽の進行にともなう地表面沈下 (1)

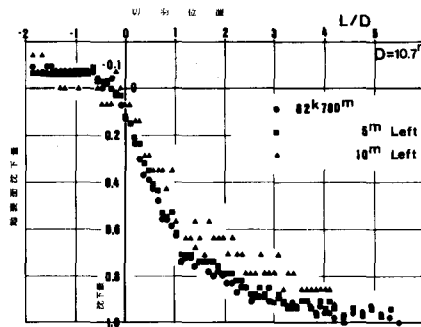


図4-2 上半切羽の進行にともなう地表面沈下 (2)

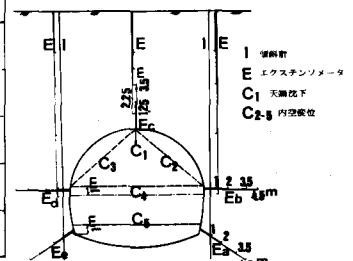


図3 計測機器配置

響がなければ、この沈下量は変位収束値の9~25%にも達する。

その後、上半の切羽の通過に伴い急激な沈下が見られるが、

2D以上離れるにしたがい収束の傾向を示し、2.24~5.51D離れて収束を見た。ここで Dは上半の直径10.7mである。

(図4a, 表3)

2) トンネル横断方向の変位も上述の傾向を示すが、先行隆起の変位収束値に対する割合は、CLからの距離にあまり関係せず、変位が沈下に転じる時点と収束までの時間が、CLから離れるにつれて遅れる傾向がある程度である。掘削の影響範囲はCLより1~1.5Dである。(図4b, 図5) なお、1で示した掘削方法では地表面沈下は、下半及びインバートの掘削にほとんど影響されず、上半の進行に支配される。(図6)

3) トンネルの切羽位置

(上半、下半、インバート)とトンネル縦断方向

の地表面沈下の関係を示すと図7のようになる。

これにより、上半切羽の

0.28D前方までの地山は

掘削により空洞側に引かれ、既に切羽の通過した

部分とは弾性的な連続性を保っている。下半切羽の通過後、この連続性は失われ、独自の安定状態に入ると解することができる。

3.2 地中変位 1) クラウン直上部の地中の鉛直変位の絶対値は、地表面沈下とほぼ同じ傾向を示す。しかし、トンネルの掘進にともない地中では地表面より小さい変位しか示さず、地表面との距離が最小となるのは、上半切羽が測点の0.28D手前に達した時点である。この時点から、切羽が計測地点を通過し、0.28D離れるまでの間に地表面との距離が急激に大きくなる。この傾向はクラウンに近ければ近いほど強いが、3.5m離れるとこの傾向はほとんどなくなる。(図8)

2) クラウン近傍では、上半の切羽通過後0.28D離れた後、相対変位が回復する現象が見られる。(図8)

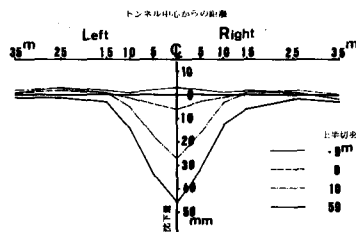
これは、トンネルの掘進にともない地山内の空隙が減少し、上半切羽の通過に伴い急激に空隙が増大し、以後の応力再配分によりわずかに回復するためと考えられる。

このことは、坑内からの地中変位計測によりクラウンとその上方 1~3mの間の距離が上半切羽通過後0.5mm程度縮む(図9)ことから確認できた。さらに、地表面沈下同様、下半、インバートの掘削は、クラウン上方の地中変位にほとんど影響を及ぼしていない。(図8)

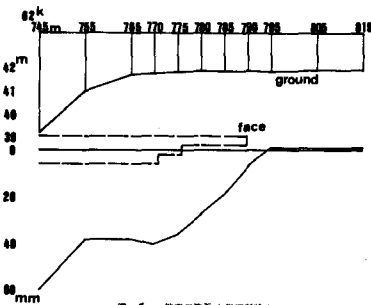
3) 図10によれば、未固結工砂地山では、和泉層実側値、解析値に比較して、クラウン直上の変位の収束

表、3 地表面沈下特性値

測定位置	62K 745m	755	765	770	775	780	785	790	795	805	815
変位収束位置 L/D	2.24	3.45	2.52	3.73	4.30	5.51	5.04	3.27	2.99	2.06	2.90
変位収束値 C/mm	59	44	42	46	46	46	52	59	65	55	48
変位開始位置 -L/D	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.37	0.37	0.37	0.48
先行変位量 d/C	0.37	0.11	0.17	0.09	0.15	0.13	0.13	0.11	0.13	0.20	0.25
最大先行隆起量 d'/C	0.02	0.07	0.05	0.04	0.07	0.09	0.04	0.03	0.05	0.02	0.02

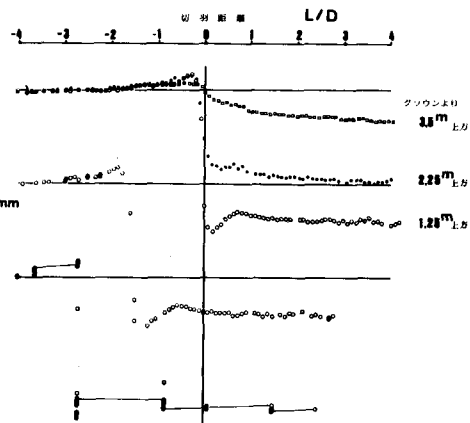


図、5 トンネル掘進による地表面沈下の影響範囲 (掘削方向)



図、7 地表面沈下 (断面形状)

図、8 クラウン直上における地中変位 (地表面沈下との相対変位)



には長い期間を要し、切羽周辺地山は急激な変形作用を受け、その割合は、和泉層の例よりもはるかに大きく、解析例に近い形となる。支保のシエル効果を含めた切羽の半ドーム効果は、切羽

前方0.28D以遠に対しては非常に有効に作用し、掘削による応力再配分を切羽のごく近傍に限定するが、更なる切羽の接近により、その効果は和泉層の例に比べても著しく減少する。仮に切羽の半ドーム効果を和泉層と同じと仮定すれば、支保部材によるシエル効果は、掘削の切羽前方に対する影響範

囲を1/2以下にするとみなすことができよう。(表3、図10)

4) トンネル中心より6.85m左右の地中変位測定結果(図11)によれば、トンネルの掘進による地中変位は、クラウン上方では概ね同じ傾向を示すが、クラウン下方1.5mでは、地表面沈下(クラウンより9m)の1/2、5.5m下(ほぼSL)では、約1/3になる。

5) 坑内からの地中変位測定によれば、クラウン部を除き壁面の内空への変位が地中の変位よりも大きく、その値も1.87mm~3.72mmと小さく、周辺地山の塑性化はほとんど発生していないとみなせる。しかし、クラウン部では、天端沈下量よりも地中の鉛直変位が大きく、2)で述べたことを裏付けている。(図12)

6) 坑内からの地中変位計の測点と地表面からの地中変位計の測点をクラウン上方1.25mで重ねた測定結果によれば、坑内からの変位量が10~13mm程度大きくなっている。(図13) これは、地表からの測定は地山全体の変形を反映するのに対し、坑内からの測定が天端沈下に支配されることによると考えられ、地表面からの変位は、下半、インバートの掘削に影響されないのに対し、天端沈下がこれらの掘削に著しい影響を受けたことによると考えられる。しかし、図14のように、上半切羽通過後、収束変位量に対する各切羽位置での変位量の割合は、地表面からの測定とほぼ一致している。このことから、天端付近の地山の鉛直変位は、切羽が到達するまでにすでに30%変位が完了していると考えても良いだろう。

7) 地表から設置した傾斜計とエクステンソメータは水平距離で50cm離れているが、これを同一点の測定値とみなし図示すれば、図15のようになり、上半切羽が近づいても、ローム層、凝灰質粘土層、細砂層とも、クラウン直上を除き、トンネルより離れる方向に変位する。上半切羽通過後、シルト質細砂、ローム凝灰質粘土はトンネル側に変位方向と変

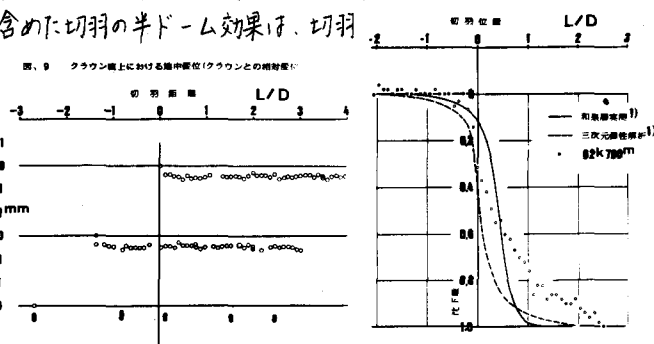


図 9 クラウン直上における地中変位(クラウンとの相対値)

図 10 クラウン直上変位比較

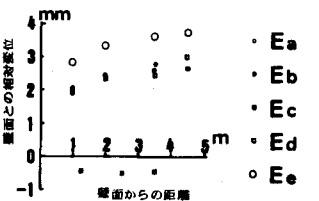
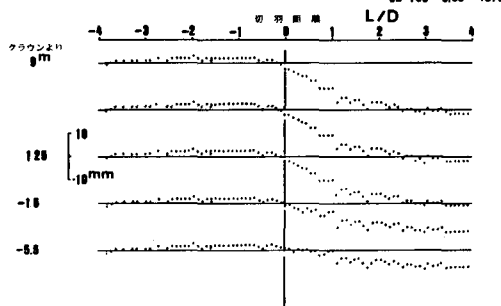


図 12 坑内からの地中変位

図 13 クラウン直上の地中変位(1)

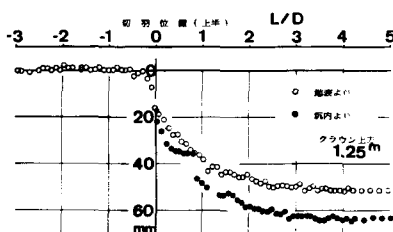


図 14 クラウン直上の地中変位(2)

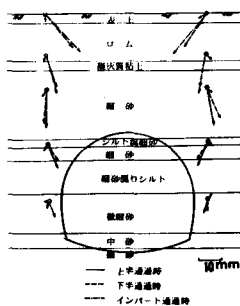


図 15 地中変位ベクトル

え、下半切羽が近づくにつれて、変位量は大きくなる。インバートの掘削が完了し、切羽が遠く離れるにつれて、細砂層も変位方向を鉛直方向に変える傾向が見られる。このことから、表土、ローム層は横断的にも一体となったはりとしての挙動を示すものの、クローン直上の細砂層は一体となった挙動を示さないことがわかる。

3.3 内空変位 1) 天端沈下は、上半切羽の進行に対してはもろろんのこと、インバートの施工の方法、たとえば、計測位置とどれだけ離れた位置で、一度に何m掘削施工するかによって著しく影響を受けることがある。ここでは、A→Bへの20mのインバート施工により、7~10mm程度の天端沈下が生じたことを示している。(図16) しかしながら、C→D, E→F, G→Hのように8~15mの施工ではほとんど影響を受けていない。

2) 1で述べた掘進方法では、下半の掘削は天端沈下に何ら悪影響を及ぼさないことがわかる。

(図16)

3) コンバージェンス値は、斜測線(C₂, C₃)及びC₄, C₅とも5~10mm(最大18mm)程度で著しく小さく、天端沈下同様、下半の掘削による影響は全く見られないうし、また、インバートの掘削による影響も全く見られないという良い。(図17a, b)

4. まとめ

これらのことから、被りの薄い未固結地山でも地表面、地中ともトンネル上半切羽がほんの直前(0.3D程度)まで近づかないぎりぎり悪影響を受けることはなく、めたかも、切羽前方地山と縦断的なはりを形成するような挙動を示す。その際、支保部材により形成される円筒形のシェルは、地表、地中変位が発生する切羽位置を計測断面に近づけ、掘削による地山の乱れの範囲を限定する効果を十分発揮することがわかった。

おわりに

本文では、トンネルの掘進にともなう被りの薄い未固結地山の变形特性についてできるだけ一般的に把握できるよう注意を払って調査を行ってきた。地表面沈下、内空変位の結果は、計測を行なった地山全体に対して一般的に言えることと考える。一方、地中変位の結果に対する解釈は、62×780mでの計測結果に基づいたもので一般性を有していると言いが、1で述べた地質状況を考えれば、同種の地山に対して共通性が見いだせる。今後、隣接地での同種の計測により、さらに一般的な特性の把握に努めたいと考える。

参考文献 1) Hata, S., Tanimoto, C., Kimura, K.; Field Measurement and Consideration on Deformability of the Izumi-Layers, Rock Mechanics, Suppl. 8, 1979

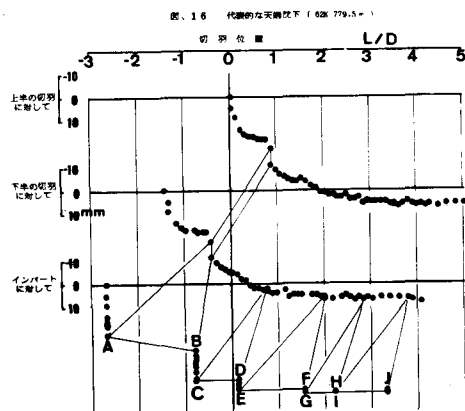


図. 17-a 内空変位 (例 61K 779.5 = 斜測線)

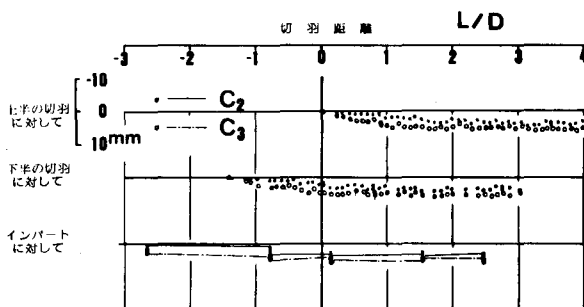
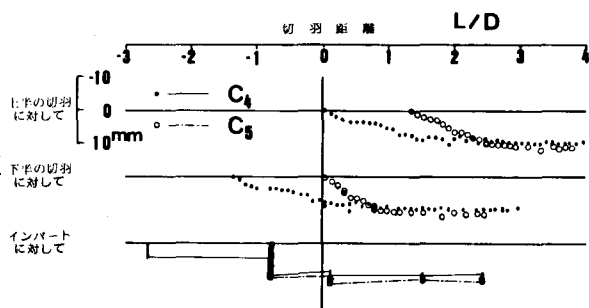


図. 17-b 内空変位 (例 61K 779.5 = 水平測線)



Field Measurement and Consideration on Deformability of soft
sedimentary, thin overburden soil in Tunnel excavation.

by Y. Terado and K. Kimura

In designing and excavating for tunnel, it is the most important to understand deformability of mediums around tunnel. When excavating soft sedimentary, thin overburden soil ground, we must know well about it to key operations safe and efficient.

We intended to grasp common characteristics when excavating a tunnel. This tunnel is excavated in soft sedimentary, thin overburden, cohesionless soil. Dimensions of supporting systems are minimized considerably.

Several kinds of field measurements were done with borehole-inclinometer and extensometer.

In conclusion we can recognize as follows

- 1、An upheaval of ground surface in front of tunnel face occurs with the advance of excavation.
It becomes 2~9 % of total settlement.
- 2、Supporting systems with shotcrete, steel-ribs, and rockbolts have an effect to limit a zone badly influenced by excavation. It may be in about 0.3 D above the crown and in about 0.3 D ahead of top heading, where D is equal to 10.7 m, which means a diameter of a cross section.
- 3、When making full use of an longitudinal arch effect of supporting systems, ground settlement is under the control of advancing top heading.
A transverse range in 1~1.5 D from center is affected by excavation.
- 4、Thin as overburden is, if it is 10 m in thickness, a medium ahead and behind of top heading, above crown behaves as one body. But this quality is weak considerably in cohesionless soil.
- 5、Sudden relative displacement of a zone close above crown and ground surface occurs when top heading reaches.
Afterwards it recovers in small quantities with the advance of excavation.
- 6、It is recognized that about 30% of total displacement at the crown occurs by the time top heading reaches and displacement is measured.