

III-139 アーチ作用のメカニズムとトンネル土圧について

京都大学防災研究所 正員 村山朝郎

〃 〃 松岡 元

・佐藤工業 K.K.(元京大生) 〃 ・深尾元昭

我々は二の数年來トンネル土圧の発生機構の解明とその計算法の確立を目的として研究を続けしてきたが、¹⁾ニニでは地盤中の局部沈下部上方に形成されるアーチ作用 (arch action; arching) のメカニズムを明確に規定し、アーチ作用との関係においてトンネル側壁部の内方へのはらみ出しやトンネル直上地盤の地表掘削・盛土がトンネル土圧におよぼす影響について実験的に検討した。また、二の考え方に従ってトンネル土圧の現場測定データを検討した。

1. アーチ作用のメカニズム

写真-1, 2 は降下床(落し戸)に直結されたカメラで撮影したものであり、静止して鮮明に写っている部分が降下床と一体となって鉛直降下する地盤の領域であって、1次領域と名づける。二の1次領域の形状は地盤の粒径および粒子配置、降下床の降下量などによっても多少変動するものであるが、ほぼ正三角形に外接する円弧状アーチで近似される。^{2), 2)}写真-3は光弾性材料の丸棒($\phi 6.2, \phi 10 \text{ mm}$)の積層体を

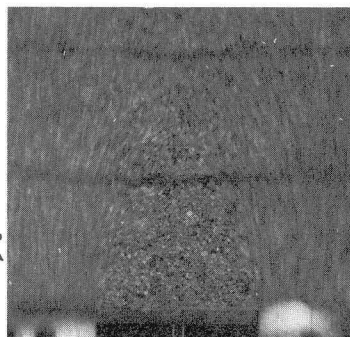


写真-1 1次領域(砂)

を用いて行なった降下床模型の光弾性実験の写真であって、降下床をまたぐアーチ状の粒子間力の伝達線が形成されるのがみられる。

二の写真より、力がほとんど伝達されなくなったアーチ以下の部分はほぼ1次領域の形状と一致するようである。写真-4はガラス板の間に流動パラフィンで飽和させた砂を入れ底板の一部をはがしたものであるが、1次領域に対応する部分がきれいにぬけてアーチが形成されるのがみられる。なお、流動パラфинは砂粒子の運動を緩慢にするために加えたものである。また図-1

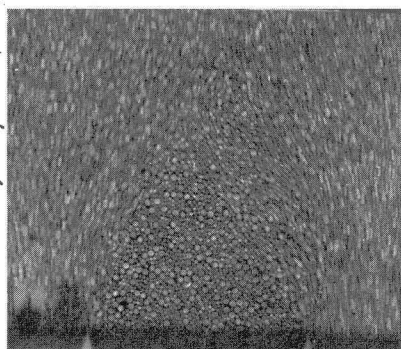


写真-2 1次領域(アルミ棒積層体)
 $\phi 6.3 \text{ mm}$

³⁾は Z. Getzler が地盤を弾性体と仮定し差分法 (finite difference method) によって求めた主応力の軌跡であるが、アーチ状の最大圧縮主応力線が認められ、二の図からは判読しにくい。それに直交する方向には引張主応力が発生すると述べられている。もし地盤が土であれば引張には抵抗できないので、力を受け持てず落下するであろう。

以上の二とより、降下床上のアーチ作用の発生機構を考察すれば次のようになる。降下床の降下により1次領域はその物理的意味から直ちにそれと同一の沈下があるので、1次領域外周部の土粒子は一斉に1次領域に追従しよう

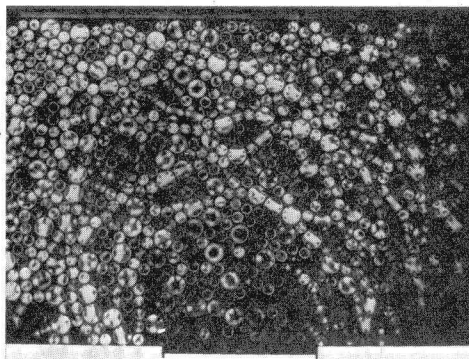


写真-3 アーチ状の粒子間力の伝達状況

とする。その結果、アーチ状の1次領域外周部に沿って一時的な土粒子の閉そく状態が生じ、いままど真下に伝達されていた力の大部分はその伝達方向を1次領域外周部に求め、アーチ状の粒子向きの伝達線が形成されるものと考えられる。さらに一般的に記述すれば、アーチ作用という現象は降下床を降下させるという境界条件より規定されるアーチ状の最大圧縮主応力線の形成と解釈するこじができる。したがって地盤材料の構成方程式と境界条件が与えられれば決定されるものである。ただし砂質土などの不連続体の場合はアーチ状の最大圧縮主応力線下の部分がゆがみアーチを形成することがあるので、これを特にアーチ作用と呼び出したものと考えられる。

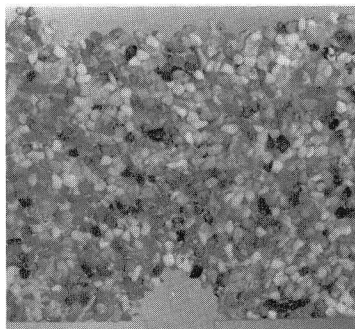


写真-4 完全なアーチの形成

2. トンネル側壁部の内方へのはり出しの影響

以前に降下床周辺部が降下床に対して相対的に沈下する場合、ゆがみの沈下であっても非常に敏感に降下床に作用する荷重(降下床土圧と仮称する)に影響をおよぼすことを述べ、トンネル現場でよくいわれる「地山をゆるめるな」という言葉のトンネル土圧の発生機構上もつ意味について考察した^{1),4)}。ここでは、トンネル側壁部の内方への水平変位はトンネル周辺部の沈下を意味する(写真-5参照)こと、

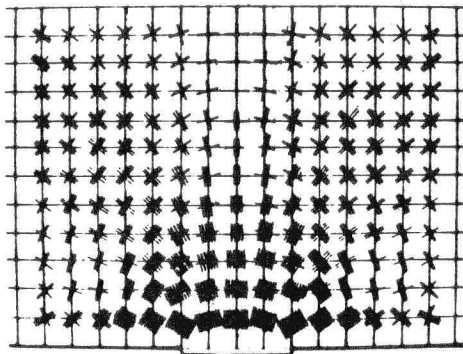


図-1 アーチ状の最大圧縮主応力軌跡(Gatzler⁵⁾による)

および近年トンネル現場でこの水平変位の測定がなされるようになったこと⁵⁾に着目して、降下床上に写真-5に示すような側壁部が内側へ変位可能な四角形のトンネル模型を置きアルミ棒積層体(φ1.6, φ3 mm)を地盤材料として模型実験を行なった。図-2に示すように、まが四角形のトンネル模型をのせた降下床を降下量 $\delta = 5 \text{ mm}$ まで降下させたのち(このとき壁面摩擦のためトンネル模型は浮き上り降下床土圧 P は消滅した)、トンネル模型の側壁部を内方へ δ_H 水平変位させる。図-2より、 δ_H の増加にともなって降下床土圧 P は急激に増加し土被り重量($\delta=0$ のときの P)をも超えるのがみられる(トンネル模型頂部に作用する荷重は降下床に伝達される機構になっている)。これは $\delta=5 \text{ mm}$ の降下量によつて形成されたアーチ状の粒子向きの伝達線の支点的役目をはしているトンネル模型の左右の地盤をゆるめたためと考えられる。したがって、実際のトンネルにおいても側壁部の内方への変位量とトンネル土圧とは密接に関連するものと考えられ、地山をこのようにゆるめることは土圧の増大をまねくと推察される。

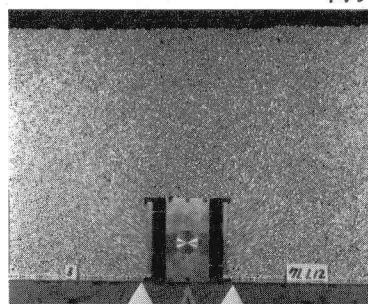


写真-5 トンネル側壁部の内方変位

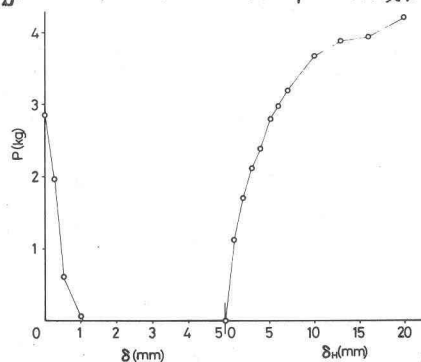


図-2 $P \sim \delta, P \sim \delta_H$ 関係

3. トンネル直上地盤の地表面掘削・盛土の影響

近年、地下鉄網の発達にともなって既設トンネルに近接して

掘削、盛土等の攪乱が与えられる場合が多くみられる。ここでは、1, 2 述べたアーチ作用のメカニズムに照して、降下床の降下により最小値に達した降下床土圧が、降下床直上の地表面掘削、地表面盛土によってどのように変化するかをアルミ棒積層体を地盤材料とした模型実験によって検討してみた。図-3は降下床を $\delta = 5 \text{ mm}$ まで降下させた状態で地表面を徐々に削り取った場合の降下床土圧の値を示したものである。この図から判断すれば、大きな掘削等の攪乱を与えない限り地表面の掘削は降下床土圧の値にあまり大きな変化を与えないようであり、掘削が進んで掘削深さ ΔD が約 18.8 cm (図中で矢印で示す) になり土

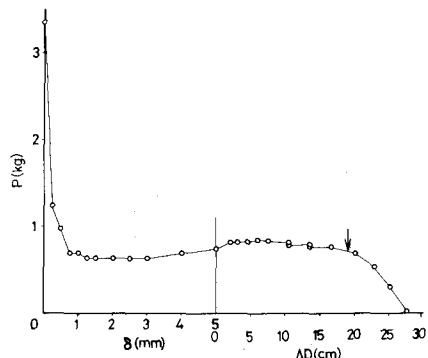


図-3 地表面掘削の影響; $P \sim \delta$, $P \sim \Delta D$ 関係

被りが1次領域の高さ(降下床幅 $B = 10 \text{ cm}$ のときは約 8.7 cm)まで薄くなれば急激に減少し始めるのがみられる(この図の初期の土被り D は 27.5 cm である)。また図-4は降下床を $\delta = 3.5 \text{ mm}$ まで降下させた状態で地表面上に仕切り壁(厚さ 5 cm の盛土)をし、その後再び降下床を 0.25 mm 降下させた場合の降下床土圧の変化を示している。この図より地表面盛土をすればその盛土荷重の何割かが降下床土圧として作用するが、降下床のわずかの降下により再びもとの値にもどることがわかる。このことは写真-3に示すような光弾性実験でも確かめられたことである。おなわち、降下床の降下により発生したアーチ状の光弾性縞は、上載荷重の増加によって一部乱れ、1次領域内に達する部分が多くなるが、その後の降下床の降下によって再び明確なアーチ状の光弾性縞が形成されるのが観察された。このようなことは、アーチ作用が非常にデリケートな現象であることを示している。

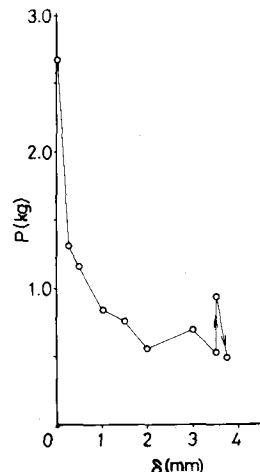
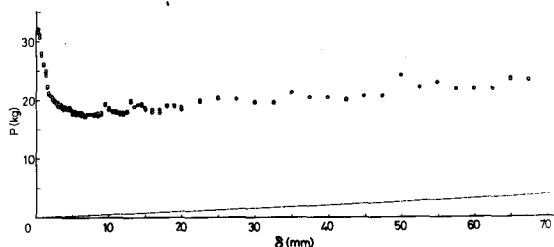


図-4 地表面盛土の影響; $P \sim \delta$ 関係

4. 降下床幅の広い場合の降下床模型実験

参考文献1)に詳説したように、降下床に作用する荷重は近似的には1次領域の重量であると仮定しても大きな誤差はないようである。このことはアルミ棒積層体(降下床幅 B が最大 20 cm まで)およびゆる詰め乾燥砂(降下床径が最大 20 cm まで)についての降下床模型実験データが確かめられている。



地盤材料の粒径と降下床幅の関係はアーチ作用に影響を及ぼす1つの要因にはいると考え、ここでは降下床幅をさきに $B = 50 \text{ cm}$ まで拡大して同様の降下床模型実験を行った。その結果を図-5に示す。降下床土圧 P は降下床 A 降下にもなつて急激に低下し最小値に達した後は、降下床上のくぼみにたまたアルミ棒の重量を差し引けばほぼ一定値を保つことがわかる。これらのことは $B = 10 \text{ cm}$ 程度の通常の場合とほぼ同じ傾向である。ただし、 $B = 50 \text{ cm}$ の場合は通常の場合と比べて降下床土圧を最小にする降下量 δ の値が少々大きいようである。この降下床土圧の測定値(最小値)は約 16.5 kg であり、これに対して1次領域の重量を計算すれば 16.585 kg となり、両者はよく一致する。以上のことから、降下床幅の広い降下床の場合でも粒径の小さな砂の場合

合でも、降下床土圧はほぼ同様のメカニズムに基いて規定されているようである。

5. トンネル土圧の現場測定データの検討

トンネル土圧は、本来ならば地山材料の構成方程式を決定し、それをそれぞれの境界条件に合わせ解くことによって算定すべきである。しかしながら、自然物であるトンネル地山の地質構成は非常に複雑でその構成方程式を決定することは現状では極めて困難であり、またその境界条件も施工法等により著しく異なるものであるから厳密な意味でトンネル土圧を算定することはほとんど不可能に近い。そこでトンネル掘削によっても降下床のような単純な局所沈下が生ずるものと仮定し、降下床土圧との関連においてトンネル土圧の推定式を導き現場測定データと比較してみた。降下床土圧と同様にトンネル土圧も近似的に1次領域の自重に等しいものと仮定すれば、1次領域は正三角形に外接する内弧アーチで、トンネルの上半部は半円に近似できるので(図-6 参照)、トンネル土圧(=作用荷重) P は次式であらわされる。⁴⁾

$$P = 0.62 \gamma B^2 L - \pi/8 \gamma B^2 L \quad \text{ここで } \gamma: \text{地山の単位体積重量, } B:$$

トンネル掘削幅, L : 奥行き長さである。したがって、

トンネル土圧の換算死荷重高さ H は、

$$H = P / \gamma B L = 0.23 B \quad \text{となる。}$$

図-7 は支保工の両脚に入れた支柱式ロードセルの測定値から計算した H と上半掘削幅 B の関係でプロットしたものである。

比較的砂質的な地山(砂礫、砂質岩、シラス等)のトンネルを選んだが、×印のプロットは土砂(ローム)の地山である。図中の直線は $H = 0.23 B$ を示すが、この

5箇所のトンネル(図中にプロットの印の違いで示す)における8個の測定データとはほぼ良好な対応を示している。このデータだけから全2のトンネルにおいて上述の単純なメカニズムを規定することは早計であるが、砂質的な地山で適切な施工を行なった場合のトンネル土圧の一つの目安になりえないかと考えている。今後の現場測定データの蓄積を待たない。

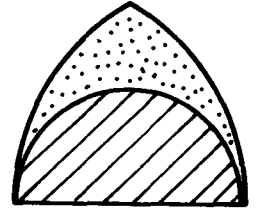


図-6 1次領域とトンネル上半部

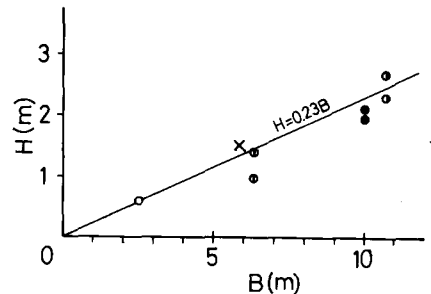


図-7 トンネル土圧の換算死荷重高さ H ~ 掘削幅 B の関係

謝辞 光弾性実験に関してご協力をいただいた京大・土木・丹羽研究室の方々に感謝致します。

参考文献 1) 村山朔郎・松岡元: 砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集第187号, 1971, pp. 95-108. 2) 村山朔郎・松岡元: 粗粒土地盤の局所沈下現象について, 土木学会論文報告集第172号, 1969, pp. 31-41. 3) Getzler, Z., Gellert, M. and Eitan, R.: "Analysis of Arching Pressures in Ideal Elastic Soil", Proc. A.S.C.E. SM4, 1970, pp. 1357-1372. 4) 村山朔郎・松岡元: トンネル土圧と地山の变形について, 土木学会第23回年次学術講演会講演概要集第III-108, 1968, pp. 275-276. 5) 高橋彦右: トンネル土圧の測定方法と現況, 第3回トンネル工学シンポジウム, 1966, pp. 17-28. 6) 島田隆夫・飯塚全: トンネルの掘削に伴う地表沈下測定例について, 第4回トンネル工学シンポジウム, 1969, pp. 15-34.