

前田建設工業（株）技術研究所

神藤 健一

正員 鷺沢 栄紀

1. まえがき

本実験は、土かぶりの大きい軟質地山での切羽進行に伴う地圧現象を明らかにすることを目的とする。前報^{1),2)}では、円形トンネルを素掘りで掘進させる実験（以下、掘削実験と呼ぶ）について述べたが、今回は、円筒を瞬時に引き抜くことをトンネル掘削とみなす実験（以下、引き抜き実験と呼ぶ）を行ない、その掘削に伴う切羽周辺の応力・変位状態が、地山の力学的性質・地山材料・初期応力状態等によって、どのように変化するかを調べて、掘削実験と比較・検討を行なった。その結果のうち、切羽周辺の応力について報告する。

2. 実験方法

実験方法は、縦・横および高さが各々75cm（内側）の立方体鋼製土槽を用いた。模型地山は、表-1に示すような材料配合で混合、締め固め作製した。実験は側圧係数が1となるように、鉛直・水平の2方向から載荷した状態で実施した。掘削は、あらかじめ、供試体作製時に供試体幅の半分まで埋設しておいた鋼製円筒を模型地山から引き抜くことによって行なった。この円筒の引き抜きによって、模型地山に直径16.5cm、奥行37.5cmの円形素掘りトンネルが掘削されたことになる。なお、円筒の先端（切羽に相当する部分）は、閉塞されていて、切羽面は、掘削前に押えられている状態になっている。また、測定器の配置は、図-1に、実験後に実施した土質試験結果は、表-1に示すとおりである。

表-1 実験条件一覧表

ケース		1B	2B	3B	4B
地山の材料配合	ケーキ土 (g)	1,000	1,000	900	900
	粘土 (g)	—	—	ベントナイト 1.00	カオリン 1.00
	水 (cc)	2.00	2.00	2.30	1.70
載荷条件	荷重 (kgf)	3,200	6,800	3,200	6,800
	P (kgf/cm ²)	0.569	1.21	0.569	1.21
土質試験	軸圧縮強度 σ_{cu} (kgf/cm ²)	0.705	0.749	0.296	0.684
	変形係数 E_s (kgf/cm ²)	2.22	2.85	2.03	3.53
	粘着力 c (kgf/cm ²)	0.677	0.408	0.139	0.442
	内摩擦角 ϕ (°)	21.8	20.0	3.68	19.9
結果	単位体積重量 γ (g/cm ³)	1.943	2.077	1.926	2.040
	含水比 (%)	16.53	17.88	24.82	18.94

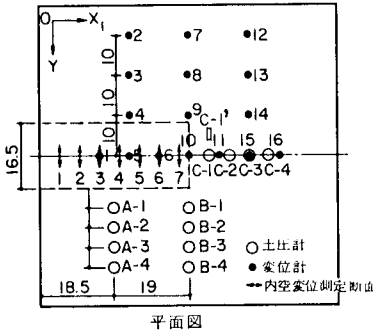


図-1 測定器配置図

ただし

*三軸圧縮試験は、非圧密排水条件下で行なった。

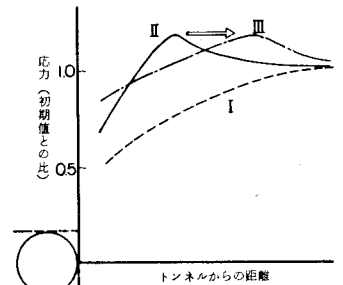


図-2 トンネル周辺応力分布の経時変化による模式図

3. 実験結果および考察

トンネル周辺鉛直応力分布の経時変化をまとめると、図-2のように模式化できる。すなわち、掘削直後の応力分布は、トンネルに近いほど低下率が大きい（図-2のI）。その後、時間の経過に伴って、トンネルに近い部分の応力が回復し、極大値 (σ_{max}) のある応力分布に変化していく（図-2のII）。さらに時間が経過すると、その極大のある位置 (L_{max}) は、トンネルから遠ざかる方向に移動していく過程をたどる（図-2のIII）。ただし、ケース1BのA断面、および、ケース3BのA断面では、以上で述べたような極大値がみられない。これは、ケース1BのA断面は応力増加領域内（極大のある位置の外側）で、および、ケース3BのA断面は応力減少領域内（極大のある位置の内側）で、測定がされているものと考えられる。ここで、各ケースの極大値の大きさと位置は、実験条件と合せて、パイメンバー（現象に関する物理量を選定し、それらの組合せから求めた無次元量）を用いて、表-2にまとめて示す。表-2から実験条件に関するパイメンバーと実験結果から得られたパイメンバーとの関係の一例を図-3～6に示す。これらの関係から、土かぶ

りの大きい軟質地山で、トンネル掘削に伴う地圧現象を予想する場合、内部摩擦角・プロトジャコノフの強度指数等が、有効な指標になると考えられる。また、トンネル周辺応力に関して、前回行なった掘削実験結果と比較すると、次のとおりである（図-7参照）。

① トンネル掘削に伴う切羽周辺の鉛直応力分布は、掘削実験の場合、切羽から半径程度後方を中心として、地山材料の性質によって離心率の異なる円形状を呈し、一方、引き抜き実験の場合、切羽から半径程度後方を中心とした同心円状を呈している。この原因として、掘削実験では、掘削の影響が、粘性土の場合、切羽前方に大きく現われ、砂質土の場合、切羽前方よりも切羽通過後に大きく現われるものと考えられる。

② トンネル掘削に伴う周辺地山の応力再配置過程で掘削実験と同様に5つの領域（初期応力状態領域、応力増加領域、応力減少領域、応力再増加領域、および、強度低下領域が存在し、とくに異なる点は、掘削実験の場合、切羽側方にしか存在しなかった応力再増加領域が、引き抜き実験の場合、応力減少領域内で前方および側方に時間の経過に伴って発生することである（図-7参照）。このように、切羽前方の応力再増加領域が、引き抜き実験では存在し、掘削実験では存在しないのは、掘削実験の場合、トンネルを掘進させる実験のため、応力が再増加する前にその増加するはずの領域の地山を掘削してしまうので、見かけ上、トンネル前方には、応力再増加領域が存在しないことになると考えられる。

4. あとがき

今回の報告は、三次元模型実験のうち、円筒を引き抜く実験についてまとめたものであるが、今後、掘削実験のトンネル掘削完了後のクリープ的な地山挙動、および、ロックボルト支保を用いた実験についてもまとめて報告する予定である。また、今後、これらの実験結果と実際の現場実測データとを比較・検討し、実際のトンネル地圧現象を予測するための有効な指標を見出して行くとともに、切羽進行の影響を考慮した解析方法の確立を目差して行く予定である。

参考文献

- 1) 神藤, 鷲沢: 土かぶりの大きい円形素掘りトンネルの三次元模型実験, 前田建設工業技術研究所報, vol.23, 1982; vol.24, 1983
- 2) 神藤, 鷲沢: 土かぶりの大きい円形素掘りトンネルの三次元模型実験, 土木学会第37回年次学術講演概要集 第3部 III-188, 1982
- 3) 水谷, 猪熊, 石村: トンネル周辺地盤の挙動とトンネル地圧に関する模型実験報告書, 土木研究所資料 第1870号, 昭和58年1月

表-2 バイナシパーによる実験結果一覧表

ケース		1B	2B	3B	4B
実験条件に 関する	H/D	2.08	3.83	2.09	3.90
	$q_u/\tau H$	1.06	0.571	0.392	0.522
	C/ τH	1.02	0.311	0.209	0.337
	$\tan \phi$	0.400	0.364	0.0643	0.362
	C/ $\tau H + \tan \phi$	1.42	0.675	0.273	0.699
実験結果から 得られた バイナシパー	C/ $q_u + \tan \phi$	1.36	0.908	0.597	1.01
	L_{90}/D	0.375	0.250	1.50	0.200
	L_{170}/D	1.50	0.500	1.00	0.200
	$\sigma_{max} \cdot A$	—	1.03	<0.2	1.01
	$L_{max} \cdot A/D$	—	1.411	>1.71	1.11
バイナシパー	$\sigma_{max} \cdot B$	0.95	1.06	0.97	1.01
	$L_{max} \cdot B/D$	1.11	1.41	1.41	1.41

*応力に関しては、初期応力で無次元化している。

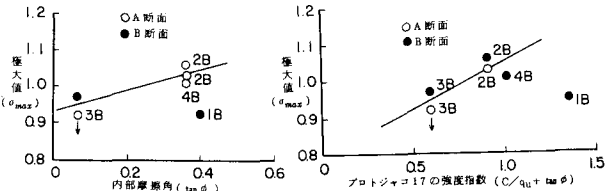


図-3 内部摩擦角と極大値との関係

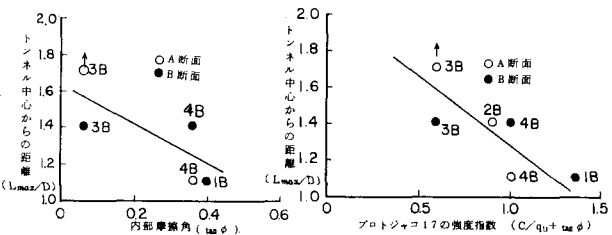


図-4 プロトジャコノフの強度指数と極大値との関係

図-5 内部摩擦角と極大値の位置との関係

図-6 プロトジャコノフの強度指数と極大値の位置との関係

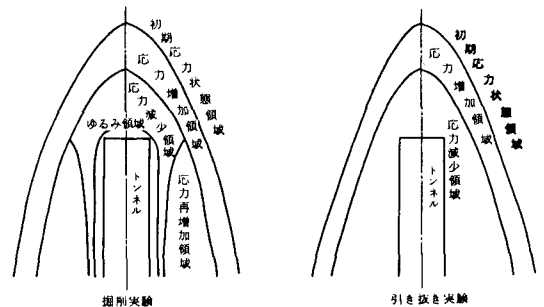


図-7 応力再配置模式図（平面図）