

前田建設工業(株)技術研究所

神藤 健一

正 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。実験では、円形トンネルを素掘りで掘進させ、その掘進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た。その結果、トンネル掘削に伴う応力再配置過程や地圧現象を支配する因子について明らかにできたので報告する。

2 実験方法

実験装置としては、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、締め固めて作製した。実験は、側圧係数が1となるように、鉛直・水平の2方向から载荷した状態で実施した。トンネルは、直径20cmの円形断面で、手掘り掘削した。掘削延長は、37.5cmであり、1掘削長を2.5cmとして、15サイクルに分けて掘削した。1サイクル時間は、掘削時間を約3分、放置時間を約12分、計15分とした。また、測定器の配置は、図-2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。

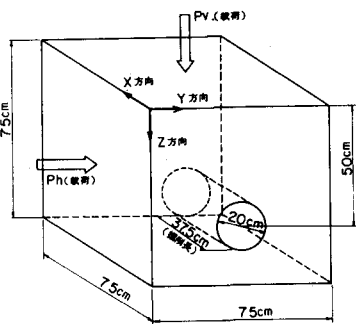


図-1 実験方法の概念図

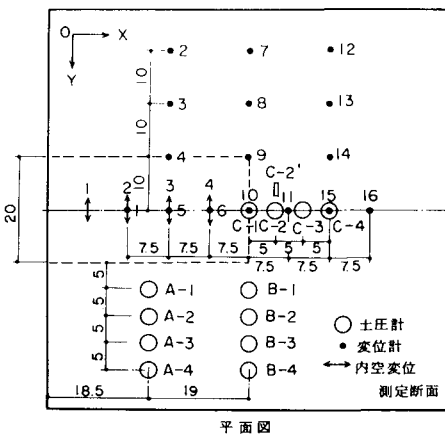
表-1 実験条件一覧表

ケース	1A	2A	3A	4A	5A	6A
地山の材料配合						
ケーキ土 [*] (g)	900	900	900	900	1000	1000
粘土 [*] (g)	ペンタナイト 100	カオリン 100	カオリン 100	カオリン 100	—	—
水(cc)	230	170	170	170	90	90
載重荷件						
載重(kg)	3,200	6,800	14,000	3,200	6,800	14,000
載重圧P(kg/cm ²)	0.57	1.21	2.49	0.57	1.21	2.49
土の一軸圧縮強度qu(kg/cm ²)	0.44	1.06	1.58	0.61	0.28	0.26
変形係数Es(kg/cm ²)	17.5	17.8	42.4	12.4	35.3	50.7
粘着力 [*] C(kg/cm ²)	0.21	0.42	0.62	0.24	0.06	0.07
内部摩擦角 [*] φ(°)	2.0	12.6	14.1	12.3	29.3	33.0
単位体積重量γ(g/cm ³)	1.96	2.12	2.11	2.05	1.55	1.66
含水比w(%)	23.75	17.81	17.44	18.57	10.79	10.78

* ケーキ土：砕石工場で岩石を破砕する際に副産物として得られるシルトサイズの岩粉

3 実験結果および考察

トンネル周辺鉛直応力の経時変化は、図-3のように模式化される。すなわち、トンネル中央線にある鉛直方向土圧計は、トンネルの切羽接近に従って、徐々に増加し、トンネル切羽前方のある位置(A点)で極大値(σ_{max})をとり、切羽位置で0となる。また、トンネルに近い位置にある土圧計は、トンネル前方(B点)で極大値をとった後、切羽通過後、切羽後方のある位置(D点)で極小値(σ_{min})をとり、その後、応力は増加する。一方トンネルから遠い位置の土圧計



平面図

図-2 測定器の配置図

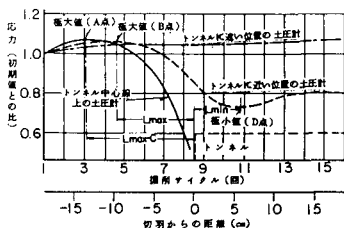


図-3 トンネル周辺応力の変化の模式図

では、初めからゆるやかに増加し、切羽通過後、やや減少するものと、そのまま増加するものがある。このような関係をトンネル周辺応力の等圧線でみた場合、図-4に示すように模式化される。ここで、図-4に示すような位置のトンネル切羽（側壁）からの距離とその位置での応力は、表-2のようにまとめられる。なお、表-2では、実験条件・実験結果とも、バイナンバー（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）によって表示してある。表-2から、実験条件に関するバイナンバーと実験結果から得られたバイナンバーとの関係の1例を、図-5～10に示す。以上のような図表より得られた結果をまとめると、次のとおりである。

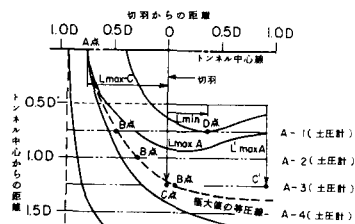


図-4 トンネル周辺応力の等圧線模式図

- ① トンネル掘削に伴う切羽周辺の鉛直応力分布は、切羽から半径程度後方を中心とした楕円形状を呈し、その楕円の長軸方向や離心率は、地山材料の性質（とくに、内部摩擦角）に関係している。
- ② トンネル掘削に伴う周辺地山の応力再配置過程で、図-11に示すような5つの領域が存在し、とくに、トンネル切羽後方で、無支保状態でも応力再増加現象が存在することが明らかになった。
- ③ 土かぶりの大きな軟質地山で、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、プロトジャコフの強度指数というバイナンバーが、有効な指標である。

4 あとがき

ここでは、掘削時のトンネル周辺応力についてだけ述べたが、トンネル掘削時の地中変位・空洞変位等については、次の文献を参照されたい。 神藤・鷲沢：土かぶりの大きい円形素掘トンネルの三次元模型実験、前田技術研究所報 Vol.23, 1982。

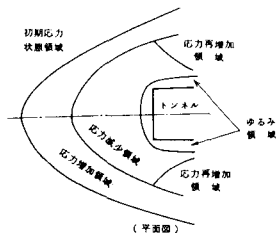


図-11 応力再配置模式図

表-2 バイナンバーによる実験結果一覧表

ケース			1 A	2 A	3 A	4 A	5 A	6 A
実験条件バイナンバー	H/D	幾何学的バイナンバー	1.7	3.1	6.6	16.4	41.7	77.5
	q_u/rH	地山強度比	0.665	0.805	0.609	0.899	0.155	0.103
	C/rH	安定係数の逆数	0.321	0.322	0.237	0.362	0.045	0.028
	$\tan \phi$	内部摩擦角	0.035	0.224	0.251	0.218	0.561	0.648
	$C/rH + \tan \phi$	せん断強度比	0.356	0.546	0.488	0.580	0.606	0.677
	$C/q_u + \tan \phi$	プロトジャコフの強度指数	0.518	0.624	0.641	0.621	0.854	0.920
実験結果バイナンバー	$\sigma_{max} = C$	トンネル中央線上の応力	1.01	1.01	1.03	1.01	1.11	1.09
	$L_{max} = C/D$	の極大値とその位置	2.125	1.5	1.5	1.625	0.5	0.625
	$\sigma_{max} = A$	トンネル側方（切羽面）での応力の極大値とその位置（A断面）	1.02以上	1.01	1.05以上	1.03	1.07	1.07
	$L_{max} = A/D$		1.0以上	0.75	1.0以上	0.5	0.5	0.5
	$\sigma_{max} = B$	同上	1.08以上	1.03	1.05	1.09	1.13	1.11
	$L_{max} = B/D$	（B断面）	1.0以上	1.0以上	0.75	0.5	0.75	0.625
	$\sigma_{max} = A$	トンネル側方（掘削完了時）での応力の極大値とその位置（A断面）	1.15	1.04	1.05	1.10	1.13	1.14
	$L_{max} = A/D$		1.0以上	0.75	1.0以上	0.75	0.75	0.5
	$\sigma_{min} = A$	トンネル側方（A-1）での応力の極小値とその位置	0.76	0.70	0.83	0.65	1.08	1.04
	$L_{min} = D$		0.188	0.563	0.438	0.438	0.688	0.438

* 応力に関しては、初期応力により無次元化している。

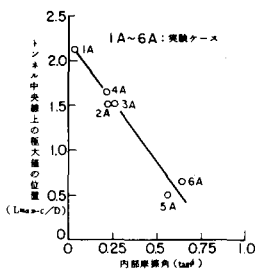


図-5 内部摩擦角と極大値の位置との関係図

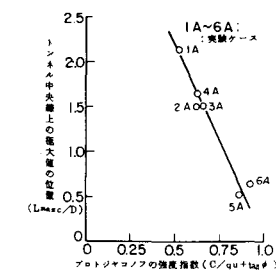


図-6 プロトジャコフの強度指数と極大値の位置との関係図

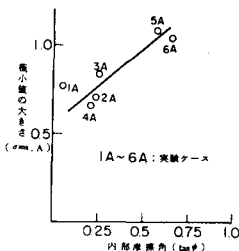


図-9 内部摩擦角と極小値の大きさとの関係図

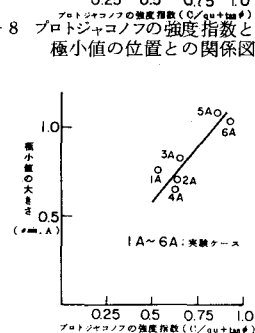


図-10 プロトジャコフの強度指数と極小値の大きさとの関係図