

トンネル切羽挙動に関する模型実験とその考察

MODEL EXPERIMENTS ON STATIC STABILITY OF A TUNNEL FACE

久武 勝保*・桜井 春輔**・村上 敏夫***・村口 宜史****

Masayasu HISATAKE, Syunsuke SAKURAI, Toshio MURAKAMI, Takashi MURAGUCHI

In order to make clear the mechanisms of the stability and failure phenomena of a shallow tunnel face, three-dimensional static model experiments with different devices have been conducted. The necessary pressure introduced at the tunnel face to prevent the occurrence of failure is theoretically proposed by comparing experimental results with theoretical ones.

Keywords: tunnel face, stability, failure, 3-dimensions, model experiments

1. ま え が き

山岳部の土被りの浅い地盤は、土と岩が混在したり或いは両者の境界領域の力学特性を有する場合がある。このような地盤は、その地質構造や力学特性の多様性、及び建設コストの点からシールド工法を採用するよりも、NATM工法が採用される場合がある。しかし、切羽の安定・不安定を定量的に評価する手法、及び安定化の為に合理的な補助工法の採用については、未だ十分に明らかにされていないのが現状である。

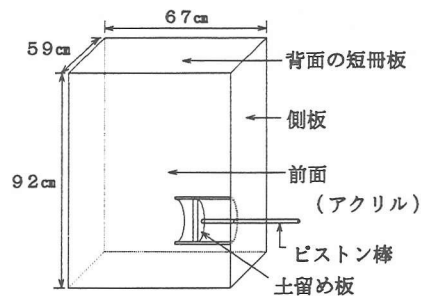
そこで本研究では、切羽周辺の崩壊挙動及び切羽の安定性を検討するために、土かぶりの浅い砂質地盤を想定した静的な3次元模型実験を行い、切羽に設置した土留め板にかかる土圧¹⁾と合力(以下、土留め板合力)を測定し、考察を行うこととする。

2. 模型実験

乾燥砂を用い、表-1に示す2種類の実験を行った。ここに、土かぶり比 H/D (H :地表面と覆工上部までの距離、 D :土留め板の直径)、 ϕ :内部摩擦角、 γ :乾燥砂の単位体積重量である。実験装置は、図-1及び、写真-1に示すように前面がアクリル板のボックスに半円筒のトンネル覆工模型を取り付け、そ

* 正会員 工博 近畿大学助教授 理工学部土木工学科
** 正会員 工博, Ph. D 神戸大学教授 工学部建設学科
*** 正会員 (株)地崎工業 技術開発室
**** 学生員 近畿大学理工学部土木工学科修士課程

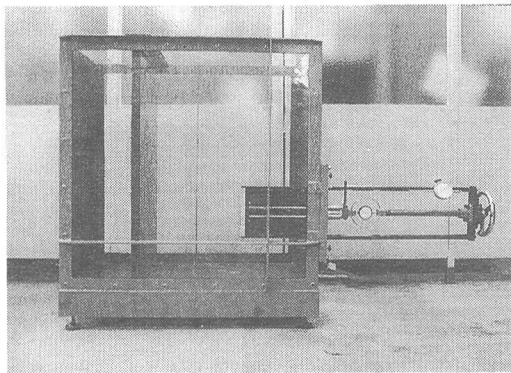
の先端内部に半円形の土留め板をセットし、砂を一定の高さ（30 cm）から落下・堆積させた。また、砂の崩壊状況を明確に捉えるため、黒砂をアクリル板に接する位置に3 cm間隔で水平に堆積させた。



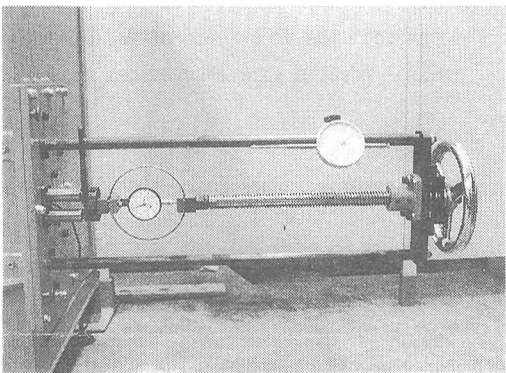
図－1 実験装置の全体図

表－1 実験の種類

実験 種類	トンネル覆工 (cm)		H/D	ϕ (degree)	γ (gf/cm ³)
	外径	内径			
P	14	13	1	38	1.470
			2		
			3		
			4		
F	27	26	1	39	1.621
			2		



写真－1 実験装置全体の写真



写真－2 トンネル覆工模型の写真

2. 1 実験 P（土圧測定）

図－1に示す土留め板に土圧計を2個取り付け、土留め板の坑口側への移動に伴う切羽土圧の変化を測定する。

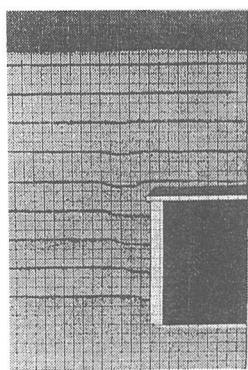
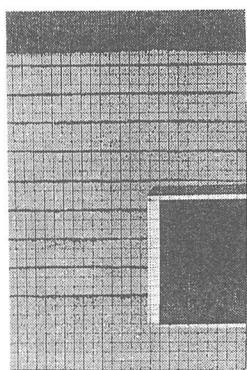
2. 2 実験 F（合力測定）

写真－1に示すように覆工内部先端にセットした土留め板を1mm/minの速さで坑口側に移動させ、写真－2に示す力計で土留め板合力を、またダイヤルゲージで土留め板の移動量を測定する。

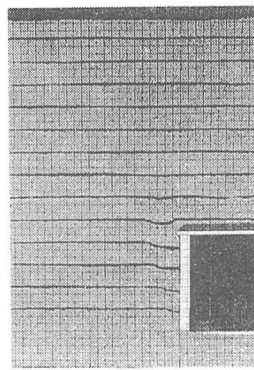
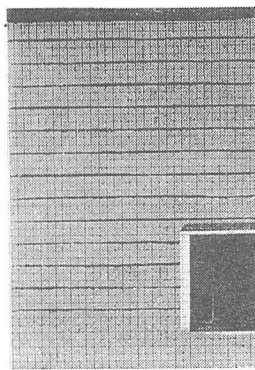
3. 実験結果と考察

実験Pの土留め板の移動に伴う崩壊挙動を写真撮影したものを図－2に示す。ここで、Lは土留め板の移動量である。土留め板の移動に伴い2本のすべり線に囲まれた領域が拡大する。すべり線の1本はトンネル下端から発生し、トンネル天端までは、斜め上に発達し、それより上方ではほぼ鉛直に発達する。他の1本は、覆工上部先端からほぼ鉛直上方に発達する。そして地表面はすり鉢状に沈下する。

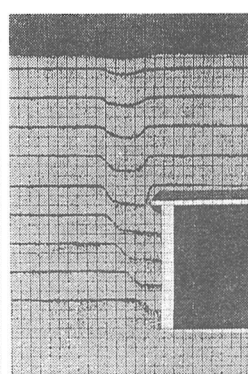
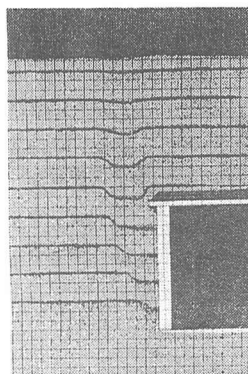
図－3、4、5は土被り比を2、3、4と増加させた結果であり、土留め板の移動によるすべり線の発達過程は土被り比1の場合とほぼ同じ結果となった。



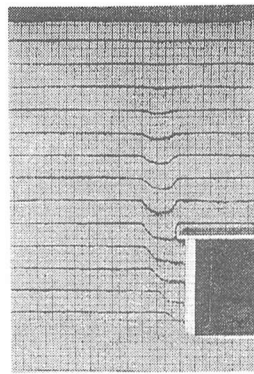
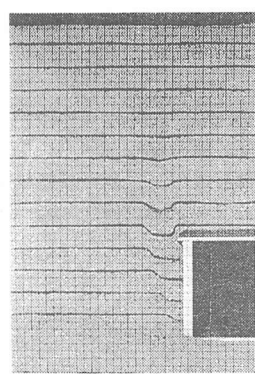
(A) $L = 0 \text{ cm}$ (B) $L = 1/3 \text{ cm}$



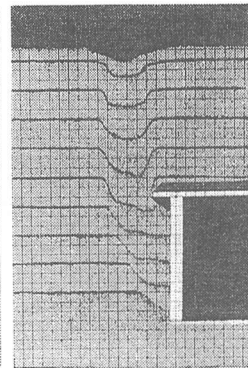
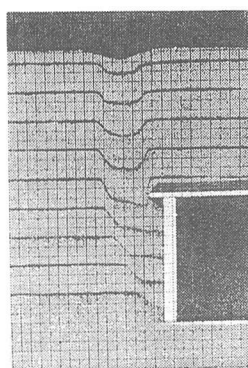
(A) $L = 0 \text{ cm}$ (B) $L = 1/3 \text{ cm}$



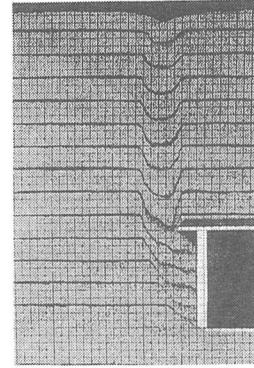
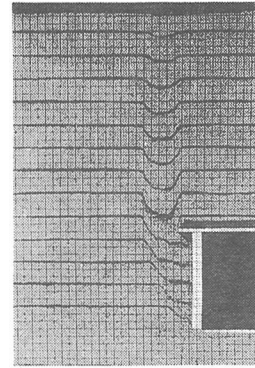
(C) $L = 2/3 \text{ cm}$ (D) $L = 1 \text{ cm}$



(C) $L = 2/3 \text{ cm}$ (D) $L = 1 \text{ cm}$



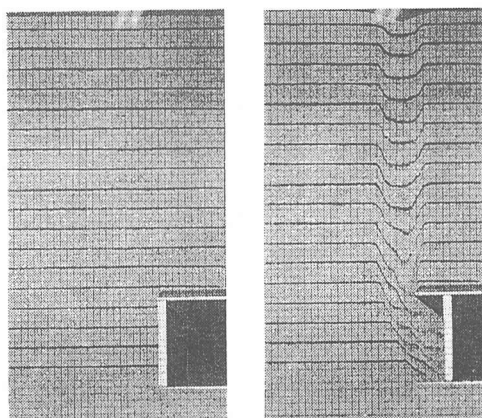
(E) $L = 4/3 \text{ cm}$ (F) $L = 5/3 \text{ cm}$



(E) $L = 5/3 \text{ cm}$ (F) $L = 7/3 \text{ cm}$

図-2 乾燥砂の切羽挙動 ($H/D = 1$)

図-3 乾燥砂の切羽挙動 ($H/D = 2$)



(A) $L = 0 \text{ cm}$ (B) $L = 12/3 \text{ cm}$ (A) $L = 0 \text{ cm}$ (B) $L = 14/3 \text{ cm}$

図-4 乾燥砂の切羽挙動 ($H/D = 3$)

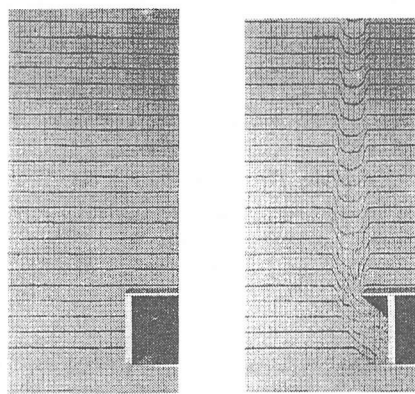


図-5 乾燥砂の切羽挙動 ($H/D = 4$)

図-6は実験Pの土留め板に作用する土圧と土留め板の移動距離の関係を示したものである。これより、土留め板が移動すると土圧は土かぶり比に関係なくほぼ同じ挙動を示した。また、土留め板の微小移動により土圧は急激に減少し、移動距離がトンネル外径の約1~2%で極小土圧を示し、その後はほぼ一定値に収束する。極小土圧を示す時点において、覆工上部0.5Dの領域まで砂の移動が認められた。極小土圧を示した後の最大土圧と土かぶり比の関係を表-2に示す。ここに、P1、P2はそれぞれ土留め板下端より10cmと3cmの位置の水平土圧である。図-7は、表-2の結果を示したものであり、縦軸に土留め板下端からの高さ、横軸に水平土圧を示す。また、図-7中の計算①と②は、地表面が水平な場合のランキンの主働土圧である。ただし計算①は、覆工上部0.5Dに水平な地表面があると仮定し、そこから土圧計までを土かぶりとした結果である。また、計算②は、上部覆工位置に水平な地表面があると仮定した結果である。これらの結果より、計算②の方が実験値とほぼ同じ土圧分布であることがわかる。

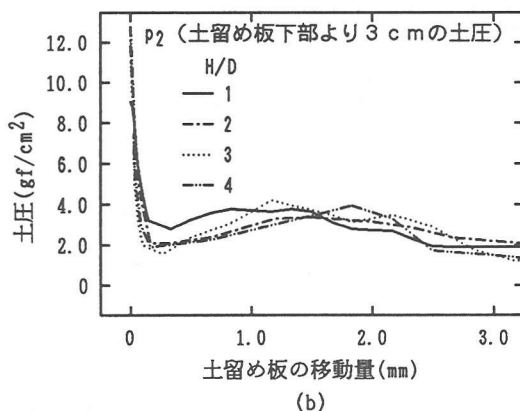
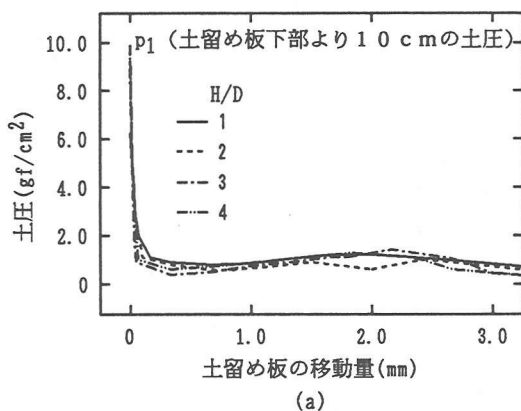


図-6 土圧と土留め板の移動量の関係

表-2 実験Pの結果

土圧 (gf/cm ²)		H/D
土圧計の位置		
P1	P2	
1. 3	3. 8	1
1. 0	3. 4	2
1. 4	4. 2	3
1. 3	3. 9	4

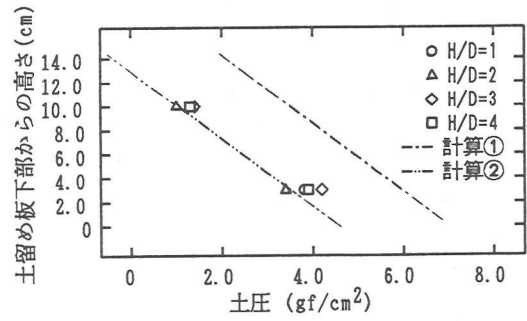
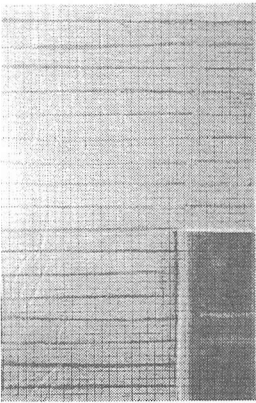
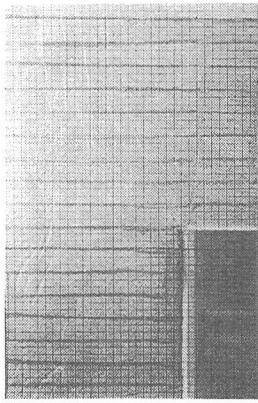


図-7 土留め板に作用する土圧分布

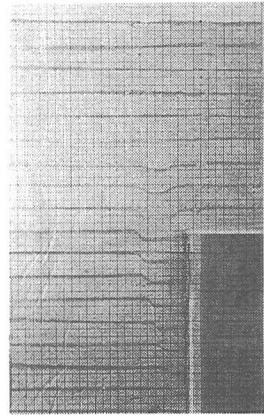
実験Fの土被り比1における土留め板の移動に伴う崩壊挙動を写真撮影したものを図-8に示す。土留め板の移動量による崩壊挙動は、実験Pと同じである。



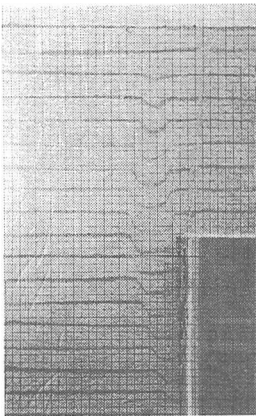
(A) L = 0.0 mm



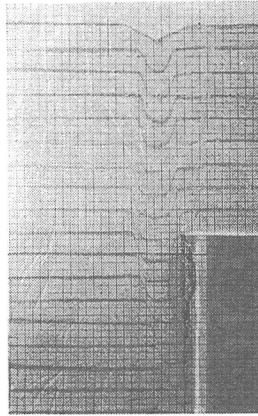
(B) L = 3.0 mm



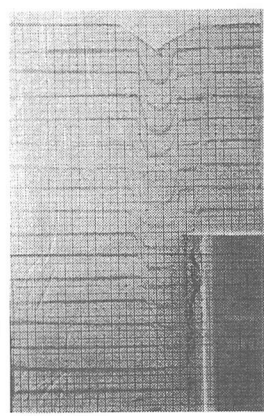
(C) L = 6.0 mm



(D) L = 10.0 mm



(E) L = 16.0 mm



(F) L = 20.0 mm

図-8 乾燥砂の切羽挙動

図-9は実験Fの土留め板合力と土留め板の移動量について示したものである。移動量が1mmに満たないうちに合力は極小値を示し、その後若干変動するものの、ほぼ一定値に収束した。また、土留め板を移動させていない時の合力を比べると、本来なら(b)は(a)の2倍あるべきだが、実験では、1.5倍程しかなかった。これは、土留め板合力を測定する力計が砂を堆積する段階でひずみ、主働土圧状態に移行する途中であると考えられる。しかしその土圧は土留め板移動後の合力の最低値には影響が少ないと考えられる。

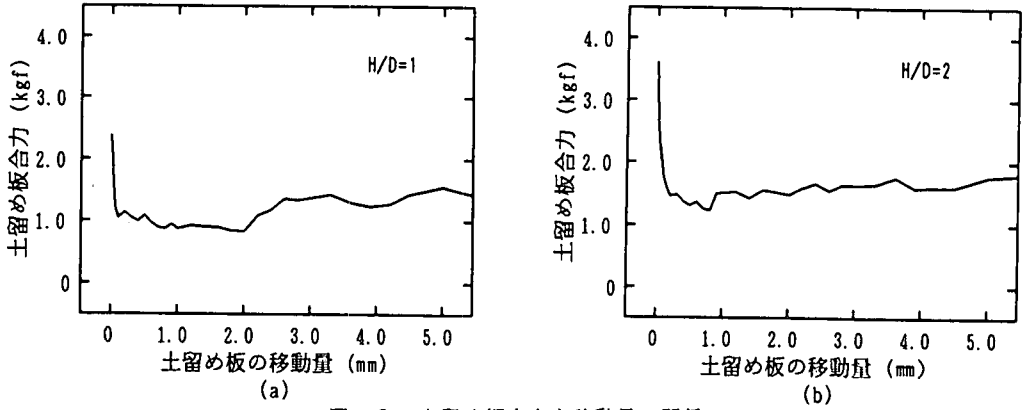


図-9 土留め板合力と移動量の関係

表-3は、実験Pより得られた土留め板中心土圧と図-7の計算①、②に基づいて求めた計算土圧の関係について、また実験Fにより得られた合力と、上記①、②の計算で得られた土圧を土留め板全面にわたって積分して求めた土留め板合力の関係について示したものである。両実験とも計算②の方が実験値に近い値となった。

以上のように、土圧及び合力の測定値は、覆工上端を地表面と仮定して求めたランキン土圧及びその土圧を土留め板全面にわたって積分して求めた合力にほぼ一致した。極小土圧を示した時には、切羽上端から0.5D上部まで砂の移動が認められたにも拘らず実測土圧及び合力は、覆工上端を地表面と仮定して求めたランキン土圧と合力に一致した。この理由は、切羽上部に「おわん」を伏せた様なドーム状のアーチが「3次元」に発生したこと、及び覆工側壁により、砂の流入が抵抗を受けたことによると思われる。従って、覆工の存在を考慮した切羽周辺地盤の3次元崩壊挙動をより詳細な実験や解析により検討することより上記現象がさらに明確になるものと思われる。

4. 結論

- 1) 土留め板の移動に伴い、土圧及び合力は土かぶり比に関係なくほぼ同じ挙動を示した。
- 2) 土留め板の土圧及び合力は、覆工上端を地表面と仮定したランキン主働土圧及び合力に近い値となった。ゆえに、この様にして算出される土圧及び合力以上の値を切羽に与えれば、その安定を保つ事ができると考えられる。

参考文献

- 1) 久武：トンネル切羽の安定・崩壊挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No. 517/Ⅲ-31, pp. 105~115, 1995年

表-3 土留め板の中心土圧と土留め板合力

実験 種類		土留め板の中心に かかる土圧 (gf/cm ²)	土留め板合力 (gf)
P	実験値	2.817	———
	計算①	4.095	———
	計算②	2.275	———
F	実験値	———	1170.00
	計算①	———	2289.53
	計算②	———	1271.99