

2. 2. 実験方法

実験は手順上、次の3段階に分け実施した。

- (1)初期載荷試験・・・245kNまで段階的に載荷し計測機器が正常に作動しているか確かめる。
- (2)掘削試験・・・・・・初期載荷状態のまま塩ビ管を重機で静かに引抜き、トンネル掘削時の地山応力挙動を把握する。
- (3)再載荷試験・・・・・・29kNあるいは98kNの重錘により破壊するまで再載荷を行う。

2. 3. 計測方法

地山変位および応力挙動は、図-2に示すように予め盛土内に配置し埋設した土圧計とアクリル製歪計により捉えた。トンネル内の変形・破壊状況は、観察用鋼管内から写真、ビデオ撮影により観察した。また切羽進行(掘削)位置を把握するため、塩ビ管引抜き変位をワイヤーゲージにより計測した。初期載荷試験では静的計測、掘削および再載荷試験では0.3秒間隔の動的計測を行った。

3. 実験結果と考察

3. 1. 初期載荷試験

最大約245kNの載荷で、鋼板の変位は±10mm以内に収まっており、盛土へのめり込みはみられなかった。

載荷荷重による土圧の増加を図-3に示す。土圧は各測点とも線形的に増加しており、その増加率は鉛直・水平方向ともにトンネルに近い程大きい。図-4は縦方向および横方向の土圧分布について、実測値と理論値とを比較したものである。この理論値はニューマーク法¹⁾で求めた値(土圧係数は0.5)であり、盛土の形状は考慮していない。鉛直土圧の実測値は、LD1を除き載荷面での換算応力の0.8~1.0倍でほぼ一定であり、トンネル付近では理論値を大きく上回る。水平土圧は、LD1, 2を除き、±10%内で理論値と一致している。

載荷荷重に対するアクリル製歪計の出力値は、縦方向(YA, YB, YC)については上方で大きく下方に向かい値が小さくなるが、各測点ともにほぼ単調な圧縮傾向を示し。横方向(XA)については測点位置によるバラツキがみられるものの、引張傾向を示し、盛土の変形に対応しているようにみえる。

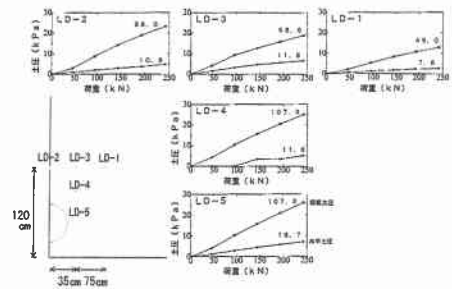


図-3 初期載荷における各測点の鉛直および水平方向の土圧変化
(図中の数値は載荷1kN当たりの土圧増分(平均値)を示す)

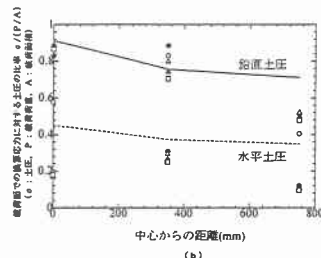
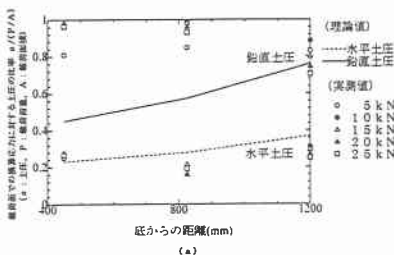


図-4 縦方向(a)および横方向(b)の土圧分布(実測値は点で、理論値は折れ線で図示)

3. 2. 掘削試験

変形・破壊については、塩ビ管引抜き時に坑口付近に管の端部が当たり一部盛土が崩れたものの、トンネル内部は完全に自立し、亀裂等は発生しなかった。

図-5は切羽進行に伴う土圧変化の一例である。各測点とも、切羽の接近・通過に伴い土圧は急減し（図中A→B）、その後切羽が遠ざかるにつれてある程度土圧が復元する（B→C）傾向がある。このときの土圧の変化量（図中 σ_{ab} 、 σ_{bc} ）と、計測断面から変化点（A、B、C）までの距離とを、各測点について表-1に一括する。切羽通過時の土圧の急減は、各測点とも0.5・D（Dは掘削径で約50cm）手前から0.5～1.5・D後までの区間に生じる。鉛直方向はトンネル直上と側壁部で約18kPa、水平方向はトンネル肩部で約17kPa

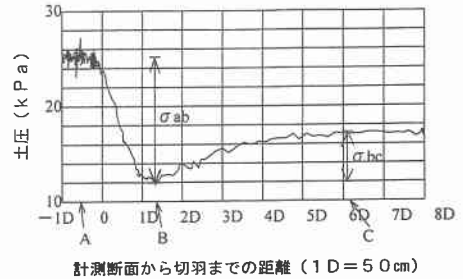


図-5 掘削試験における土圧変化の一例
(LD-4Y)

の最大値をとり、ともにトンネルから測点が離れるにつれて土圧の低減量が小さくなる。一方、切羽が計測断面から3.5～7・Dだけ離れるとほぼ一定値に復元するが、位置や復元量については各測点でバラツキがあり、際立った傾向はみられない。

表-1 切羽位置と土圧変化の一覧（土圧変化量 σ_{ab} 、 σ_{bc} 。
変化位置A、B、Cは図-5を参照されたい）

	σ_{ab} [kPa]	σ_{bc} [kPa]	A	B	C	B-A	C-B
LD-1 X	5.29	12.74	-0.5・D	1・D	7・D	1.5・D	6・D
Y	5.68	30.38	-0.5・D	1・D	6・D	1.5・D	5・D
LD-2 X	32.63	16.95	-0.5・D	0.5・D	4.5・D	1・D	4・D
Y	184.24	19.60	-0.5・D	1.5・D	3.5・D	2・D	2・D
LD-3 X	31.65	18.42	-0.5・D	1.5・D	5.5・D	2・D	4・D
Y	93.10	20.87	-0.5・D	1.5・D	5・D	2・D	3.5・D
LD-4 X	172.97	19.60	-0.5・D	1.5・D	5.5・D	2・D	4・D
Y	130.34	49.00	-0.5・D	1.5・D	6・D	2・D	4.5・D
LD-5 X	98.00	12.25	-0.5・D	1.5・D	6.5・D	2・D	5・D
Y	188.65	85.75	-0.5・D	1・D	7・D	1.5・D	6・D

アクリル製歪計の歪変化は、土圧変化とよく対応しており、横方向（XA）を除き、切羽の接近・通過に伴って計測断面の0.5・D手前から0.5～2.5・D後の区間で引張側に急変していた（圧縮からの解放）。

一般に、トンネル掘削に伴う周辺地山の変位挙動は、掘削直前（約1D手前）から直後（約2D後）にかけて急変し、その後収束するが²⁾、上記の応力・歪挙動はこの現象によく対応している。

3. 3. 再載荷試験

29kNの重錘を載荷したが（全載荷荷重270kN）、トンネル内の変化は見られなかった。次に重錘を98kNにして載荷したところ（全載荷荷重350kN）、載荷直後に計測断面付近のトンネル天端が小崩落し、ズリが円孔の半分位を埋めた。その際、両側壁部に縦断方向の亀裂が2～3mはいった（写真-1）。その後、約30分経過したところで、大きな破壊音とともに崩落し、掘削ズリが円孔をほぼ完全に埋めてしまった（写真-2）。天端の崩落は、トンネル中央部より20、30cmの円錐状に発生していた。

本試験における土圧変化の一例を図-6に示す。土圧は荷重増加に伴い単調に増えるが、鉛直方向は側壁部、水平方向では肩部の増加が顕著であった。350kN載荷時に大きな崩落が発生した際には、各測点で土圧の低減がみられ、鉛直方向で最大22kPa（側壁部）、水平方向ではLD1を除く各測点

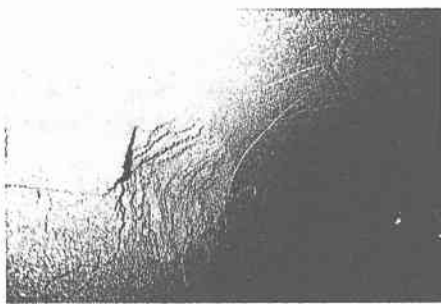


写真-1 側壁部の破壊状況（載荷荷重350kN）
縦断方向に亀裂が発生し、一部剥離。



写真-2 350kN載荷後数分後の大崩落
天端部が崩落しズリが坑内を埋める。

で約7kPa低減した。

アクリル製歪計は鉛直方向（YA, YB, YC）で載荷・崩落時ともに全測点で圧縮歪を記録した。逆に、水平方向（XA）は全測点で引張歪となった。

側圧係数0.5前後の場合の円形トンネルでは、応力集中の著しい側壁部にせん断破壊が生じ、これにより複雑な進行性破壊過程に至ると考えられているが³⁾、上記の挙動はこれらの現象に似ている。

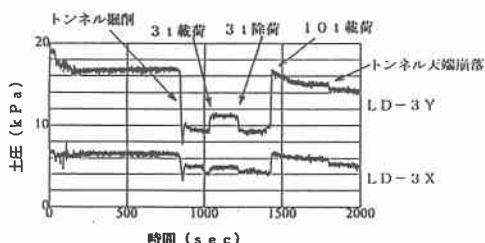


図-6 再載荷試験における土圧変化
の一例（LD-3XY）

4. まとめ

本研究では、盛土地山におけるトンネル掘削模型実験を行い、実験の計測方法の妥当性を大略確認するとともに、地山内の土圧変化と変形破壊挙動の関わりについて調べ、次のような結果を得た。

- (1)埋設した土圧計とアクリル製歪計では、初期載荷において盛土の変形応力挙動に対応したもっともらしい出力傾向がみられた。
- (2)トンネル掘削時の周辺地山の応力・歪変化は、切羽の約1・D手前から2・D後の区間において、地山内の土圧の急減や歪の急変として捉えられ、一般的な地山挙動によく対応していた。
- (3)上載圧の増加によるトンネルの破壊は、側壁部の亀裂、天端部の崩落として現れ、側圧係数0.5前後の場合の円孔の破壊形態に酷似していた。

今後、本実験を応用し種々のトンネル応力解析を実施するには、土圧・歪計の性能（地山挙動をどこまで捉えられるか）、支保建込みの可能性や大型化、2次元ないしは3次元のFEM弾塑性解析との比較などについても検討を加える必要がある。

謝辞 実験時には、計測技販株式会社の方々に多大なご協力を戴きました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1)土木学会：わかり易い土木講座6 土質工学，p.261～275，1991。
- 2)土木学会：トンネル標準示方書（山岳工法編）・同解説，p.197～199，1996。
- 3)E.Hoek & E.T.Brown：岩盤地下空洞の設計と施工，p.155～160，土木工学社，1985。