

(53) トンネル掘削に伴う周辺地山の挙動に関する模型実験
— 圧力下の掘削試験 —

鉄道技術研究所 正会員 ○川上 義輝
鉄道技術研究所 正会員 朝倉 俊弘

1. はじめに

昭和54年度以降実施した軟岩における小型模型実験によると、砂質地山と泥質地山では孔壁周辺の地山の破壊機構に違いがあり、内空変位量に大きな差があることがわかった。^{1)・2)} 実際のトンネル掘削においても、土被りが大きい軟質な地山にトンネルを掘削すると、その地山が砂質な場合と泥質な場合では、内空変位量が大きく異なることが認められており、今までの実験結果と傾向が一致する。^{3)・4)}

本研究は、一連の実験のうち、主としてトンネル掘削時の応力再配分について、砂質地山と泥質地山の違いを調べたものである。また、有限要素法による三次元弾性解析を行って、実験結果との対比を試みた。

2. 模型実験⁵⁾

2. 1 実験方法

実験装置は図1に示すように、圧力函、掘削機、载荷装置および周辺土圧・地中変位測定装置よりなる。圧力函は40×40×40cmの内法寸法を有し、土圧計および地中変位計をセットした後、その函の中に貧配合モルタル等の模擬地山を填充する。

実験は、初期地圧を想定して二軸载荷方式により模擬地山に土被り相当圧を加え（側圧比＝1）、この状態を維持しながら円孔（直径10cm）を掘削し、埋め込んだ土圧計により切羽の進行に伴う周辺地山内応力変化を、地中変位計により孔壁の押し出し量をそれぞれ測定した。

実験に使用した模擬地山の物性ならびに実験ケースは表1の通りである。砂質地山としては貧配合のモルタルを用い、泥質地山はセッコウとケイソウ土を主材料としているが、いずれも一軸圧縮強度が1.0MPa程度になるように配合している。载荷圧は最大土被り150m程度を想定して0.75～3.0MPaとしたが、泥質地山では载荷圧1.5MPa以上

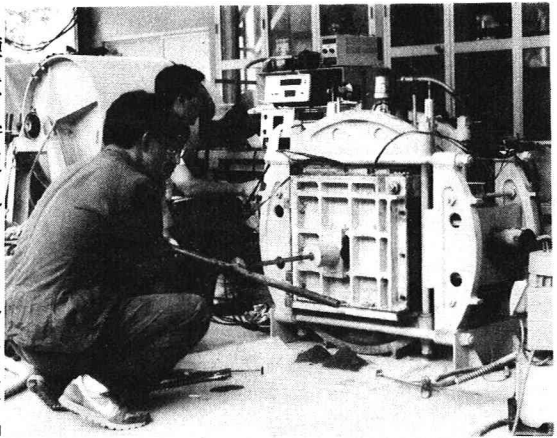


図1 実験装置

表1 模擬地山の物性と実験ケース

とすると初期载荷時ですでに著しい地山の変形を生じ実験の遂行が不可能となるため、载荷圧0.75MPa, 1.25MPa, 1.50MPaについて実験を実施した。

実験No.	想定地山	地山物性値				载荷圧 P (MPa)	地山強度比 σ/P	地山せん断強度比 $c/P + \tan\phi$
		σ (MPa)	c (MPa)	ϕ (°)	E (MPa)			
1	砂質地山	1.27	0.31	38.9	520	0.75	1.69	1.22
2	"	1.26	0.32	37.9	430	1.50	0.84	0.99
3	"	1.13	0.29	36.6	530	3.00	0.38	0.84
4	泥質地山	1.07	0.42	14.6	540	0.75	1.43	0.82
5	"	1.31	0.50	16.2	490	1.25	1.05	0.69
6	"	1.28	0.49	16.0	500	1.50	0.85	0.61

2. 2 実験結果と考察

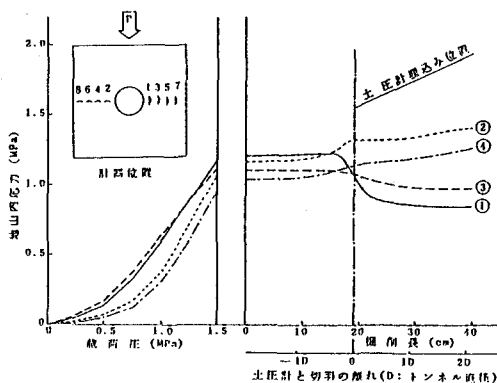
(1) 地山内応力

図2はそれぞれ砂質地山および泥質地山での初期
 載荷時と掘削時の地山内応力を示したものである。
 なお、初期載荷圧はいずれも1.5MPaのものである。

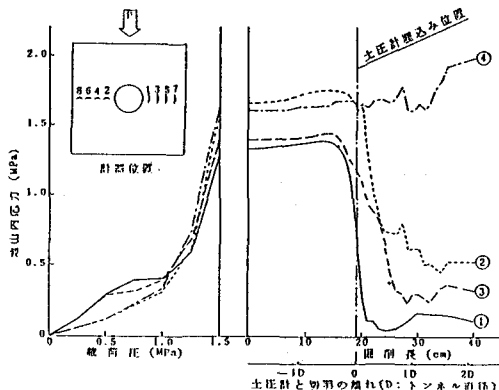
初期載荷時の地山内応力は、模擬地山と圧力函内
 面の摩擦の影響により必ずしも一致していないが、
 土圧計埋め込み位置を切羽が通過することによって、
 全般には半径方向応力①③は減少し、接線方向応力
 ②④は増加する。ただ、泥質地山の載荷圧 1.25MP
 a および1.5MPaの実験では②の接線方向応力が切羽
 通過後減少した。これは②の土圧計埋め込み位置ま
 で地山の破壊が進行したものと考えられる。

図2の接線方向応力に着目し、初期載荷終了後の
 応力変化量の分布を等応力線図で示したものが図3
 である。図3から見ると、砂質地山 (No.1, No.2) で
 は、トンネル周辺の接線方向応力はすべて増加し、
 地山の破壊を示す応力減少域は認められない。また、
 トンネル近傍の応力集中は泥質地山に比較して少な
 く、周辺に広く応力が分担されている。

一方、泥質地山 (No.4) では応力減少領域は発生し
 ていないが、トンネル近傍への応力集中がみとめら
 れる。また、掘削中に円孔周辺の流動的な破壊によ

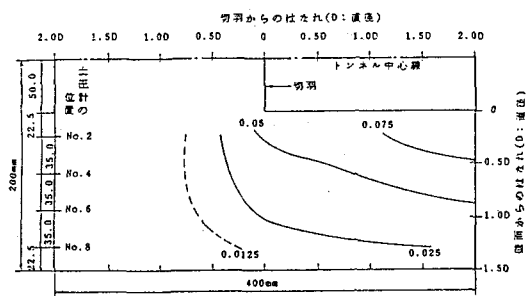


(a) 砂質地山 (No.2)

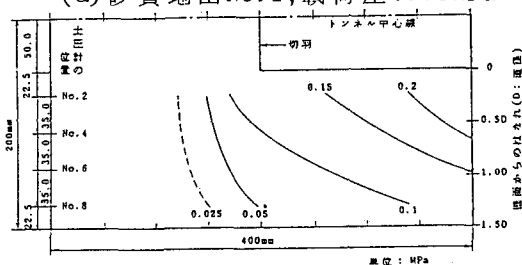


(b) 泥質地山 (No.6)

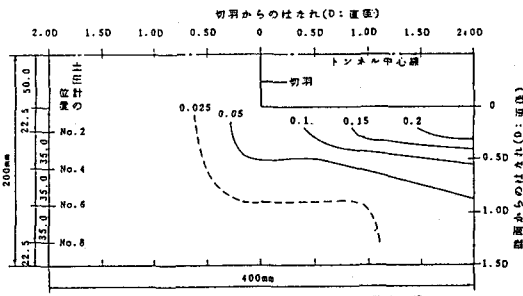
図2 初期載荷時と掘削時の地山内応力



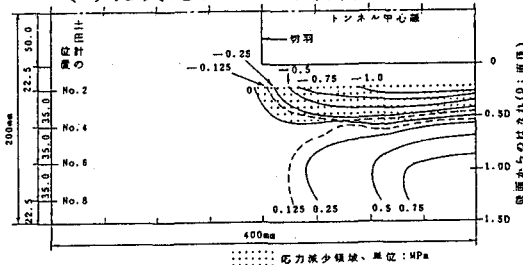
(a) 砂質地山 No.1, 載荷圧 0.75MPa



(b) 砂質地山 No.2, 載荷圧 1.5MPa



(c) 泥質地山 No.4, 載荷圧 0.75MPa



(d) 泥質地山 No.6, 載荷圧 1.5MPa

図3 応力変化量の分布図

り大きく孔壁が押し出されたNo.6の実験では、壁面から0.5 D付近まで応力の減少領域があり、壁面付近の塑性化に伴って壁面から1.0 D付近より奥に応力増加の最大値がある。

これらの結果から、泥質地山においてはトンネル近傍での接線方向応力の集中と、それにより、地山の破壊基準を越えた場合の塑性化、およびそれに伴う応力値の減少といった地山の破壊過程が実験においてよく現われている。一方、砂質地山においては、接線方向応力のトンネル近傍への集中傾向は泥質地山と比較して緩やかである。

(2) 試験体の破壊状況と地中変位

掘削後の円孔周辺の破壊状況を図4に示した。なお載荷圧はいずれも1.5MPaのものである。砂質地山では目視で確認できるような破壊は現れていないが、泥質地山の試験体では円孔の側部と下部にくさび状のせん断クラックが発生しており、また、塑性流動により内空側に大きく押し出されている。

切羽進行に伴う地中変位は、砂質地山ではほとんど微小であり、泥質地山では地山強度比約1.0 以下では切羽通過後大きく変位が現れた。最終変位量は表2に示すとおりである。

今回の実験結果を見ると、地山強度比が一定の場合でも、砂質地山と泥質地山では変形量および地山の破壊状況に大きな差があることが確認された。したがって、軟質な材料により構成される地山では、地山評価の指標としては、地山強度比だけでなく地山の材料特性を考慮して、地山せん断強度比も併せて考慮する必要があると考えられる。(表1参照)

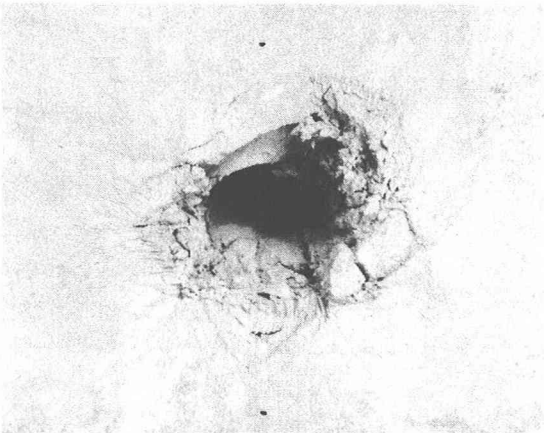
3. 三次元解析

トンネル模型実験のトレースを目的として、有限要素法による三次元解析を行い、掘削に伴うトンネル周辺の応力変化と変形量について比較検討した。解析は三次元構造解析用有限要素法プログラムを用いて直接載荷法により行った。解析に用いた地山物性および載荷重等の解析条件は表3のとおりである。

表3 解析条件

ケース No.	想定地山	単位体積重量 γ (g/cm ³)	側圧係数 K_0	弾性係数 E (MPa)	ポアソン比 ν	載荷圧 P (MPa)
1	砂質地山	2.1	1.0	500	0.2	1.0
2	泥質地山	2.1	1.0	500	0.3	1.0

(a) 砂質地山 (No.2)



(b) 泥質地山 (No.6)

図4 試験体の破壊状況

表2 最終変位量

実験No.	想定地山	載荷圧 (MPa)	最終変位量 (mm)
1	砂質地山	0.75	0
2	〃	1.50	0.04
3	〃	3.00	0.08
4	泥質地山	0.75	0.01
5	〃	1.25	1.15
6	〃	1.50	7.89

(1) 地山内応力

図5はトンネル掘削時の地山内応力を示したものである。なお、初期荷重圧はいずれも1.0MPaである。

計測位置を切羽が通過することにより、半径方向応力は減少し接線方向応力は増加している。また、接線方向応力の増加量および半径方向応力減少量は孔壁に近いほど大きく、実験結果と同様な傾向を示している。砂質地山と泥質地山は応力値にほとんど差は認められない。

(2) 切羽進行に伴う変位量

図6は切羽進行と変位量の関係を示したものである。実験との対比を行うために砂質地山 (No.2, 荷重圧1.5MPa) と泥質地山 (No.5, 荷重圧1.25MPa) の実験結果も併せて載せてある。

解析結果の変位量は泥質地山の方がわずかに多いが、変位の傾向はほとんど同じである。一方、実験結果では砂質地山 (No.2) の方が泥質地山 (No.5) に比べて地山強度比 (σ/P) が小さいにもかかわらず、小さい変位量に留まっている。また、泥質地山では切羽通過後0.3D付近までは計算値に近い変位量を示したが、その後地山の塑性化により、変位量が大きくなっている。今後は、材料の非線形性を考慮した弾塑性解析等により実験結果の検証を深度化させていきたい。

4. まとめ

今回実施した実験の結果から、トンネル掘削時の地山内応力再配分について、砂質地山と泥質地山ではその分布状態に明らかな違いが認められた。

なお、今回の実験結果は三次元解析を含む三次元的挙動を考慮したトンネル設計に反映させたいと考えている。

5. 参考文献

- 1) 吉川他；トンネル掘削に伴う周辺地山の挙動に関する模型実験，第37回年講Ⅲ-186(1982)
- 2) 朝倉他；地山物性の差によるトンネル周辺地山の挙動に関する模型実験，第37回年講Ⅲ-187(1982)
- 3) 吉田；津軽海峡線（本州方）の未固結な砂質地山におけるNATMの施工実績および逆解析について，第21回鉄道建設公団技術研究会記録，1985
- 4) 吉村他；ロックボルトが破断，篠ノ井線第一白坂トンネル，トンネルと地下Vo1, 11, 6, 1980
- 5) 川上他；トンネル掘削に伴う周辺地山の挙動に関する模型実験（その2）-応力再配分に関する地山物性の影響-，第41回年講Ⅲ-368(1986)

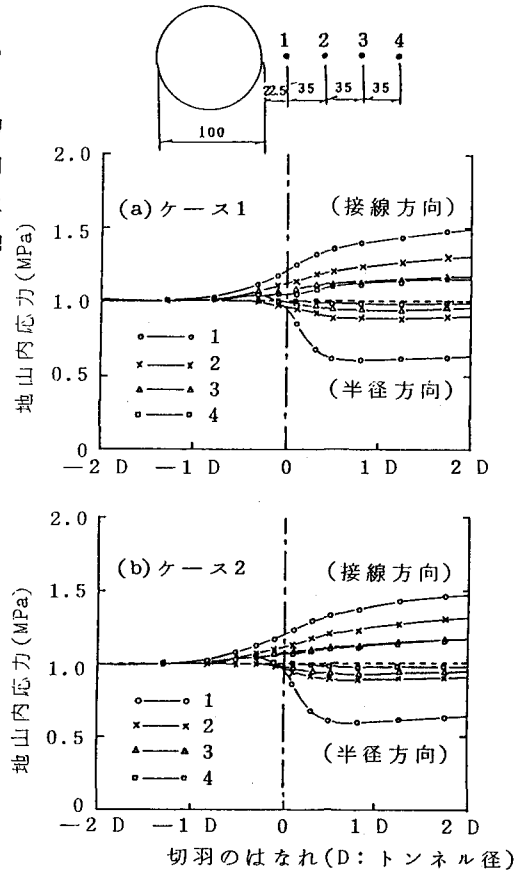


図5 掘削に伴う応力変化

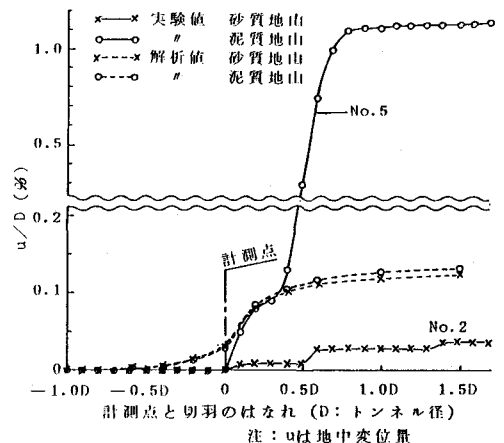


図6 切羽進行に伴う変位量

(53) Experimental Study on Behavior of Rock Surrounding Tunnel
Caused by Excavation — Excavation Test under Loading —

Yoshiteru KAWAKAMI *

Toshihiro ASAKURA *

Abstract

In soft rock tunnelling the convergence values are different between sandy rock tunnels and clayey rock ones. A series of experiments by authors show similar result.

In this study experiments using sandy material and clayey one as rock are made to examine the difference in their behaviors caused by tunnelling. Furthermore a numerical analysis by finite element method using a three-dimensional elastic analysis program is made.

As a result, the following become clear.

- (1) In the case of clayey material a plastic displacement occurs caused by stress concentration near the tunnel.
- (2) Displacement of tunnel wall before rock failure occurs in test is similar to displacement obtained by the 3-dimensional elastic analysis. After rock failure occurs the displacement in test is very large compared with the result of the analysis.
- (3) In the case of sandy material the rock surrounding the tunnel does not fail even if its competence factor is less than 1.0 .
- (4) Displacement of tunnel wall in the test of sandy material is very small compared with the result of the analysis.

* JNR Railway Technical Research Institute