

扁平楕円無支保トンネルを有する脆性地山の破壊実験

Model Study on the Fracture of an Ellipsoidal Tunnel in Brittle Ground

西村 和夫^{*1}・土門 剛^{*2}

Kazuo NISHIMURA and Tuyoshi DOMON

In this paper, several fracture model tests of an ellipsoidal tunnel in a brittle ground were carried out to establish materials for the brittle ground, an apparatus and a loading system. These tests were carried out about four types of tunnel shape including circular. It examined about the device, these materials and plane strain condition of the model. From the result of these model tests, in the most flat ellipsoidal tunnel, a steep stress gradient generated at the spring of this tunnel. A fracture of a wedge block took place at the tunnel crown. On the contrary, the extension of this fracture was stable without reaching to the outside circumference of the model ground.

keywords: model test, brittle fracture, ellipsoidal tunnel, brittle ground

1. はじめに

いわゆるNATMにより施工される山岳や都市トンネルでは、栗形と呼ばれる断面形状が多く用いられている。しかし、第二東名神では、総幅員が3車線に加えて左側路肩、右側側方余裕を有する広いものとなり、トンネル部においても同様の幅員構成が余儀なくされている。また都市域でも歩道付きとなると前述同様、断面幅が大きいものとならざるを得ない。このような状況では、従来の栗形の断面形状では極めて大きな掘削断面となり、余剰空間と建設コストの増加をもたらす。このような理由から、これらのトンネルでは事前の解析・検討に基づいて扁平度（縦横比）が0.65程度の従来よりも扁平な横断面が用いられている。しかし、扁平な断面の施工実績が少ない現状では、これら扁平なトンネルの力学的挙動をさらに検討する必要がある。

このような状況を踏まえて、扁平トンネルの模型載荷実験により、一次支保と二次覆工の条件の違いによる扁平トンネルの安定性の検証と簡便な評価法の研究も必要であると考えている。支保・覆工の違いによる扁平トンネルの安定の評価のためには、素掘りトンネルの破壊状況と再現性を把握しておくことが重要である。

本論文では、脆性的な軟岩地山を対象に、扁平楕円素掘りトンネルの周辺地山の破壊モードの確認、実験に適合する地山材料の選定、破壊がトンネル周辺で安定して進行し、その破壊モードを阻害する模型地盤の外周への亀裂の進行を阻止できる実験装置と載荷方法の確立を目的としている。著者らはこの目的のために、地山材料の再吟味と感圧紙による模型地盤の厚みの管理の導入、実験枠、載荷システムの改良などを行い新たに装置を作製して実験を行った。本論文はこれらの結果得られた材料の選定、楕円トンネルの扁平度の違いによる破壊モードの差、塑性領域の広がる方向の簡便な評価などについての若干の知見をまとめたものである。

*1 正会員 工博 東京都立大学講師 工学部土木工学科
*2 正会員 東京都立大学助手 工学部土木工学科

2. 地山材料および実験装置

1) 地山材料

岩盤模型実験のための地山材料についてはStimpson¹⁾が過去の研究をレビューしているが、主材料の傾向は現在も余り変化はない。トンネル地山としては硫酸バリウムに酸化亜鉛等を加える硫酸バリウム系、ベントナイトモルタルなどのモルタル系、標準砂や珪砂につなぎ材を入れる砂系に大別できる。硫酸バリウム系と砂系は底面摩擦装置で多用されている^{2)~3)}。一方モルタル系は砂系とともにジャッキ载荷の実験で用いられることが多い^{3)~4)}。また、時間依存性を与えるために砂とワックスの混合材料を用いた例もある¹³⁾。

実験では自由水の残留を避けるために標準砂を若干の小麦粉のみで焼成結合させる砂系の地盤材料を選択し、配合試験の結果、標準砂と小麦粉の混合重量比率を1000 : 3とした。

この地山モデルの一軸圧縮試験を6回、三軸圧縮試験を拘束圧ごとに各9回行い、強度、再現性、安定性を確認した。一軸、三軸圧縮試験の応力-ひずみ曲線を図-1、2に示す。一軸圧縮強度は極端に値の低いNo.5を除いて $q_u = 5.93 \text{ kgf/cm}^2$ とした。ほかの物性値は概略、変形係数 $E_{s0} = 1080 \text{ kgf/cm}^2$ 、粘着力 $C = 1.80 \text{ kgf/cm}^2$ 、内部摩擦角 $\phi = 20.0^\circ$ であり、降伏後は $\phi_r / \phi = 1.1 \sim 1.3$ 、 $C_r / C = 0.56 \sim 0.83$ 、軟化ひずみ比¹⁴⁾は2~2.5程度で、本実験では安定した地山の破壊の進行が得られた。なお、参考文献からわかる範囲で求めた軟化ひずみ比は、硫酸バリウム系で1.3~2程度、ベントナイトモルタル系で2前後であった。

2) 地山モデルとトンネル形状

1)で決定した材料強度と、実験規模、载荷能力を勘案して地山モデルは図-3に示すような一辺25cmの正方形とし、水平に設置した。载荷は2軸とし、2側面の片側から载荷、反対側は固定壁とした。また、载荷側のコーナーでの過度の応力集中を避けるために半径2cmの切り欠きを設けた。モデルは、载荷装置に設置するときに削って微調整する(2.3)参照)ため少し厚めに作製した。

トンネルは切り欠き部を除く23cmの正方形の中心に型枠を用いて作製した。形状は図-4に示す建築限界に外接する円と3つの楕円とした。したがって、断面の縦、横の長さ、断面積が異なっているが、断面決定の現状を簡便にモデル化していると考えた。各トンネルの諸元を表-1に示す。なお、楕円の扁平の度合いは正式には扁平率 ε (楕円の長半径を a 、短半径を b とすると、 $\varepsilon = (a - b) / a$)で定義されるが、ここでは扁平度として単に長半径に

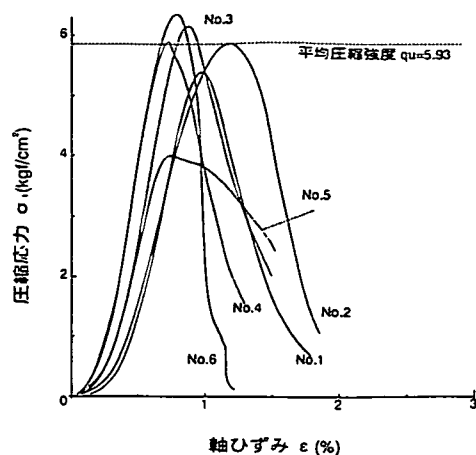


図-1 一軸圧縮試験の応力-ひずみ曲線

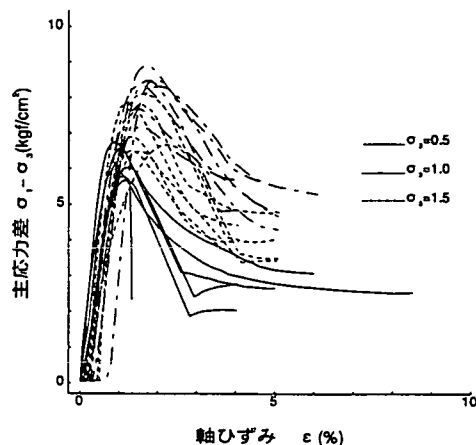


図-2 三軸圧縮試験の応力-ひずみ曲線

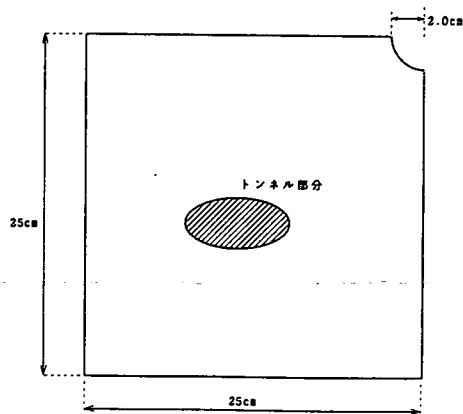


図-3 地山モデル

表-2 実験結果一覧

モデル ディ ブル	クラックの 発生時外圧 (kgf/cm ²)	除荷時の 外圧 (kgf/cm ²)	初クラックの 発生場所 (於 壁面)
A 1	9.01	13.81	右上部
A 2	9.01	12.61	右-側壁部
A 3			
B 1	10.69	13.81	左-側壁部
B 2	9.01	12.61	右-側壁部
B 3			
C 1	9.73	13.81	右-側壁部
C 2	6.61	13.81	右-側壁部
C 3	8.53	9.13	左右側壁部
D 1	13.33	18.00	左右側壁部
D 2	7.81	12.61	右-側壁部
D 3	7.09	13.81	左右側壁部

対する短半径の比、 b/a を用いている。

3) 载荷装置と実験装置

载荷方法にはジャッキによる剛体载荷とゴム袋を用いた液体载荷がある。今回の実験では今までに行った矩形実験槽によるモルタル系地山の剛体载荷、矩形実験槽による粒状体地山と円形実験槽による硫酸バリウム系地山の液体载荷の経験、および地山強度の大きさなどから剛体载荷とした。また、载荷を1軸3本の増圧装置内蔵のエアジャッキで行い、剛体载荷による载荷圧力の不均等を緩和するために载荷板も3分割してゴム板を挟んだ。圧力は元圧で一元的に調整し、配管分岐で2軸6本のジャッキに供給する、等圧状態とした(図-5)。

実験槽は平面ひずみを保持できるように、20mmのアクリル板に10mmの鋼板をあてがい、所々ビス止めして一体的に挙動させて剛性を確保するようにした。破壊の観察は、鋼板に開けた半径90mmの穴からアクリル板を透して行った。また、地山モデルの上下面に各々薄いテフロンシートを二重に置き、押さえのアクリル板との摩擦の低減を計った。さらに、モデルの厚みの調整を感圧紙を挟み込んで行い、上蓋締め付け時の感圧紙の発色状況から拘束接触圧が発色部で0.5~1.0kgf/cm²程度となるよう数回調整を重ねた。

3. 実験結果

1) 実験ケースと破壊挙動の概要

実験ケースを表-2に示す。表中、第2列目のクラッ

表-1 トンネル空洞の緒元

	Aモデル	Bモデル	Cモデル	Dモデル
断面積 $S(a^2)$	223.46	198.44	156.42	129.59
l/S_{max}	1.0	0.85	0.7	0.56
l/S_{min}	1.8	1.53	1.26	1.0
長半径 $a(m)$	8.62	8.80	9.34	11.63
短半径 $b(m)$	8.62	7.18	5.33	3.55
縮小 $a'(cm)$	2.3	2.4	2.5	3.1
縮小 $b'(cm)$	2.3	1.9	1.4	1.0
扁平度 b/a	1.0	0.792	0.56	0.323

(モデル縮小率: 1/370)

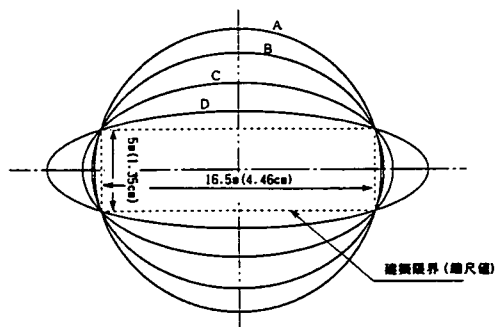


図-4 トンネルモデル形状

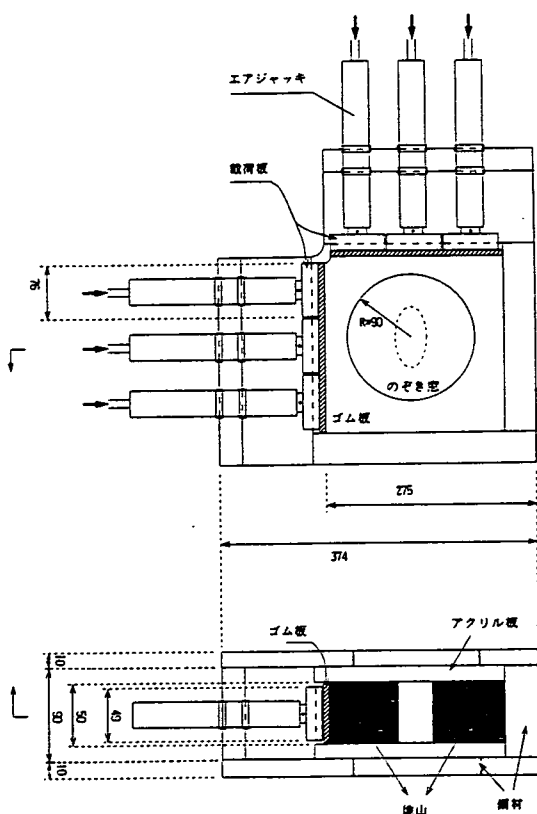


図-5 载荷装置

クの発生時外圧は実験装置ののぞき窓から亀裂の発生を視認したときの外圧である。しかし、後述するが砂粒子が載荷とともに一部結合が解れて細粒化して亀裂の観察を阻害するため、実際亀裂が発生していると思われる外圧より大きな値となっている。実験終了後にモデルの亀裂の観察をするため、載荷はモデルの完全破壊まで行わず、亀裂が安定成長し、載荷圧がまだ上昇中に載荷を中止し、除荷している。第3列の除荷時の外圧はこのときの外圧である。

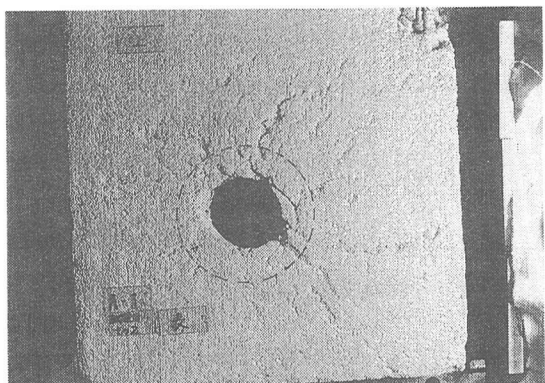
ケースC3はトンネル周辺の面内せん断亀裂の進行途中で面外せん断が発生し、載荷を中断している。D2では最終段階で切欠き部からの亀裂が進行してトンネル周辺の亀裂とつながた。D1は亀裂発生時の外圧力が大きい。この実験ケースではモデル焼成後に天地を逆さにしてモデルを設置している。焼成時に下部になっている部分は上部より粒子の結合度がやや弱いことが感触として認められている。したがって、載荷装置にモデルを設置後、厚み調整のために他のモデルと異なって弱い部分を削り取ることから全体としての強度が上がっていることも考えられるが、外力にして 5 kgf/cm^2 もの差は当然なく、他の何らかの要因によると考えている。なお、D1の破壊の発生、進行状況は他の同じDタイプのモデルと同様であった。

ところで、載荷装置が切り欠き部とその反対側コーナーを結ぶ対角線に対して対称になるよう設計しているが、トンネル空洞は円形を除いて非対称となっている。型枠や実験槽、載荷装置の癖は実験装置に必ずつきまとうものである。そこで、楕円の長軸を 90° 回転させてトンネル空洞を作ったD3のケースで、載荷圧と破壊状況の視認による大まかな確認を行ったが他のモデルと破壊挙動に有意な差は認められなかった。

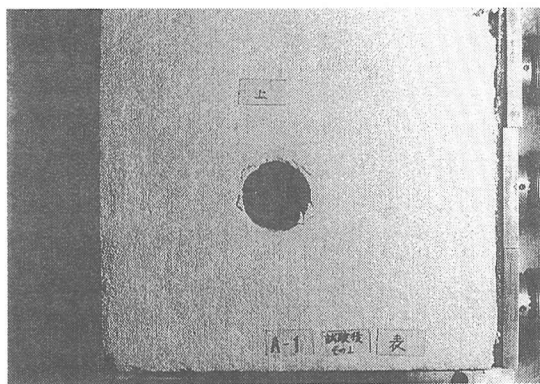
2) 破壊状況

各実験結果の代表例について、トンネル周辺の破壊状況の写真とトンネル内空壁面の亀裂の展開図を以下に示す。展開図は図-6に示すような書式で発生亀裂をスケッチしており、記載の数字は亀裂をのぞき窓から視認したときの外圧の大きさを kgf/cm^2 で表示したものである。

- ①モデルA ($b/a=1.0$; A1の例) : 図-7に内空壁面の展開図を示す。また、写真-1の(2)に除荷後の上蓋をはずした状態を示す。この状態では多くの亀裂は認められないが、1)で述べたように細粒化した砂が表面を覆っているため、それらを慎重に除去したのちの写真が(1)である。以下のモデルでは(1)の写真のみ掲載する。亀裂は天端右肩部から発生し、その後左肩部、右脚部に次々発生した(図-7)。このモデルは真円であるから壁面全体にほぼ一様に亀裂が発生している。右肩部と脚部の亀裂は最終的にはつながって、写真に認められるようにトンネル側壁部でくさび状のせん断破壊領域を形成している。
- ②モデルB ($b/a=0.792$; B2の例) : 図-8に内空壁面の展開図を、写真-2に亀裂の状況を示す。クラックは右側壁部で発生、続いて左側壁部からも発生し、除荷時には全体にわたって発生した(図-8)。しかし、写真を見ると横断面的には亀裂は側壁部内部には進行せず、天端、インバート部方向に進展し、天端部には比較的大きなくさび状のせん断破壊領域が、インバートにも小さなくさび領域が認められる。
- ③モデルC ($b/a=0.56$; C1の例) : 図-9に内空壁面の展開図を、写真-3に亀裂の状況を示す。クラックは右側壁部で発生し、続いて左側壁部からも発生した。のちに天端部を通して左右側壁部を結び、くさび状のせん断破壊領域を形成した。除荷時までには右脚部で表面の大きな剥離が生じた。しかし、モデルBと同様に亀裂は曲率半径の小さい側壁部奥に進行せず、天端、インバート部方向に進展している。
- ④モデルD ($b/a=0.323$; D1の例) : 図-10に内空壁面の展開図を、写真-4に亀裂の状況を示す。クラックは左右側壁部でほぼ同時に発生し、続いて左右側壁部の肌落ちが始まり、後に肌落ち部から地山内部に入り込む形で亀裂が進行した。写真からわかるように天端、インバート部方向に亀裂が進展して、天端部でくさび状の破壊領域が認められる。しかし、内空壁面の亀裂は天端、インバート部ともに少なく、くさび領域が剛体的に切り離されていることがわかる。なお、参考に写真-5にD3の例を示す。
- ⑤共通事項 : 各モデルに共通して展開図では多くの亀裂の走向がトンネル軸方向(図では縦方向)であることから、のちに吟味するが平面内応力が最大および最小主応力であることが推定できる。なお、一部発生している斜め亀裂は二次的に派生したものであることが亀裂の発生順序から判断できる。また、写真で放射状に



(1)



(2)

写真-1 モデルA (A1) のクラック状況

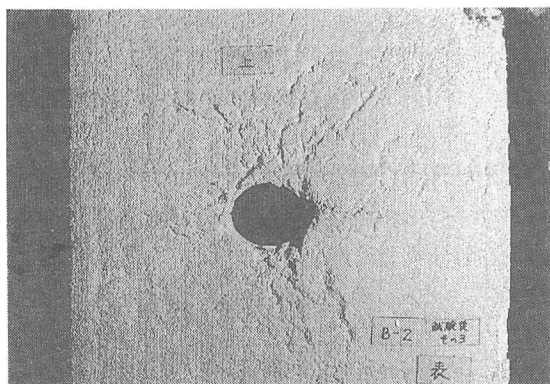


写真-2 モデルB (B2) のクラック状況

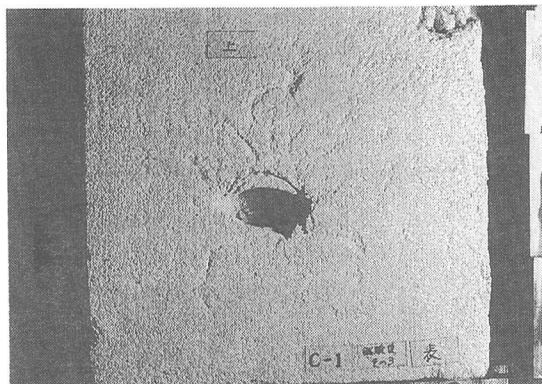


写真-3 モデルC (C1) のクラック状況

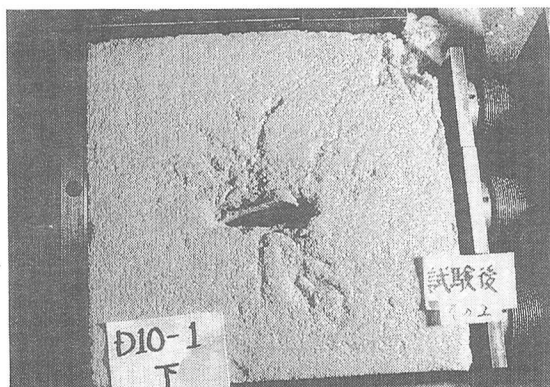


写真-4 モデルD (D1) のクラック状況

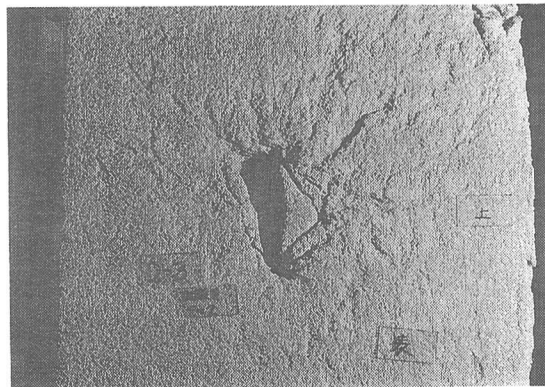


写真-5 モデルD (D3) のクラック状況

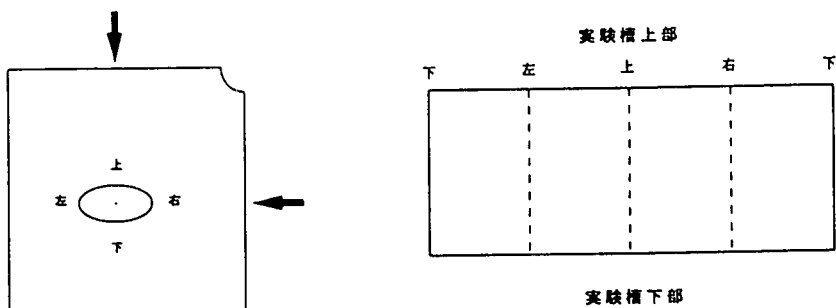


図-6 トンネル内空展開図の書式（上段は載荷途中、下段は載荷終了（除荷）時）

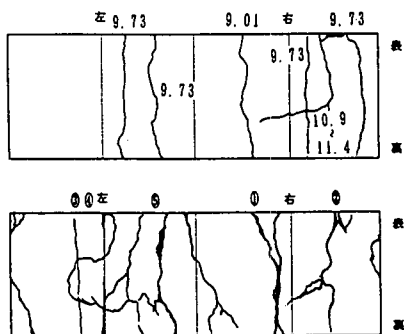


図-7 モデルA（A1）の展開図

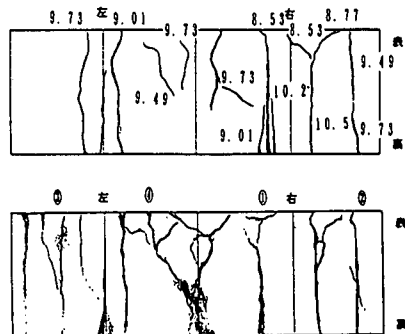


図-8 モデルB（B2）の展開図

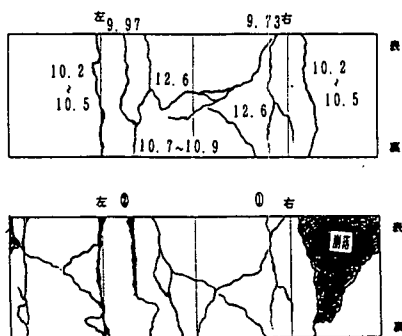


図-9 モデルC（C1）の展開図

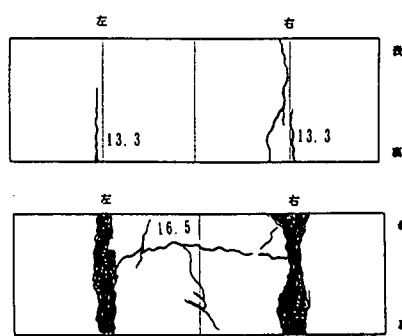


図-10 モデルD（D1）の展開図

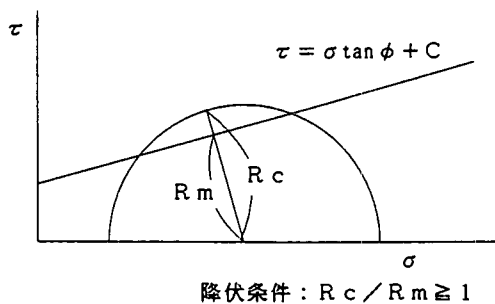


図-12 破壊超過度

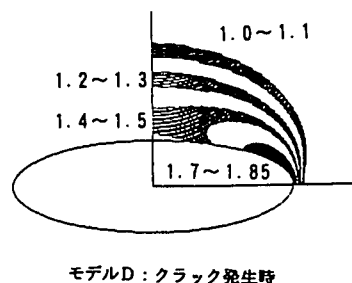


図-13 破壊基準超過領域のコンター図

伸びている亀裂の多くはモデル表面の粒子結合が局部的に破壊してガリ浸食のようになっているところである。これらの位置は、感圧紙の発色状況から判断して押さえの圧力のないところとほぼ一致しており、モデル表面のみが局部的に溝状に破壊したと判断できる。

4. 考察

1) 実験結果

楕円トンネル側壁部の応力集中係数は等圧状態では扁平度 b/a の逆数に比例する。この応力集中係数に応じるように、楕円モデルでは内空の曲線半径が小さいほど亀裂が側壁部に集中する。しかし、その後亀裂は側壁部の地山内部に広がるのではなく、天端部やインバート部の地山へ進行する。このことは、亀裂発生を引き金は曲線半径の小さい側壁部の応力集中であるが、トンネル崩壊は側壁部から発達した亀裂による天端部、インバート部でのくさび状領域の発生であることがわかる。したがって、定性的には扁平トンネルでは崩壊の引き金となる側壁部での破壊の発生を押さえることが、その後には生ずる天端部もしくはインバート部での大きなくさび領域の発生を抑止ために重要であることがわかる。

2) 弾塑性解の適用に関する吟味

弾塑性境界が簡便に求められる円形モデルについて、クーロンの降伏規準を用いているKastner¹⁷⁾の解の塑性領域と亀裂の発生領域とを比較するにあたり、3主応力の大小関係の吟味が必要となる。平面ひずみ状態であった破壊モードには、トンネル軸方向応力 σ_z と、半径方向応力 σ_r 、接線方向応力 σ_θ の大小関係から図-11に示す3つのモードの発生が考えられる¹⁸⁾。平面内応力を降伏規準に適用できるのはモードCの場合のみである。 σ_θ が最大主応力であることは明らかであるが、 $\sigma_r \leq \sigma_z$ となる条件は、降伏規準に平面ひずみである $\varepsilon_z = 0$ の条件を加え、次式で与えられる。なお、 ν はポアソン比である。

$$\frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} - \frac{2 \cos \phi}{1 + \sin \phi} \cdot \frac{C}{\sigma_\theta} \leq \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (1)$$

安全側に考えて左辺第二項を無視すると、実験で用いた材料では、 $\nu \geq 0.33$ が得られる。ポアソン比は既往の類似の実験、およびAydanらの研究¹⁹⁾を参考に類推して、ポアソン比は0.3~0.4前後と考えられること、安全側の計算であることを考えれば、実験で生じる破壊モードはCであることがわかる。なお、塑性の進行に伴ってモードの変化が考えられるが、西村らの研究¹⁸⁾に基づけばこの地山物性ではモードの変化はない。

3) 円形モデルにおける塑性領域の解析解との比較

2)の結果に基づき、Kastnerの解から求められるモデルAの除荷時の外圧での弾塑性境界の半径を写真-1(1)に円で示す。実際の地山材料は降伏後強度劣化することを考えると実験の領域はかなり小さい。同様の現象はせん断ひずみ分布から推測した塑性領域と亀裂発生領域の比較の事例⁸⁾やKastnerの解と亀裂発生領域との比較の事例¹⁰⁾でも認められており、亀裂が塑性化後直ちに発生するのではなく、ある程度強度劣化したのちに生じると考えられる。実験後の観察でも亀裂周辺では地山は劣化していることが認められる。針入度などで定量化することも考えたが、劣化している領域内でも程度が均一でないことから計測は困難と判断した。

4) 塑性領域の解析解による簡便な比較

楕円トンネルの塑性領域の広がる方向の簡便な推定方法として複素関数解析による弾性解析を行った。求められた応力分布をクーロンの降伏規準と比較して、図-12に示す $R_c/R_m (\geq 1)$ を破壊超過度として定義し、コンターで表現した1例を図-13に示す。外圧は目視で亀裂の発生が確認できた時の各モデルの外圧の値とし

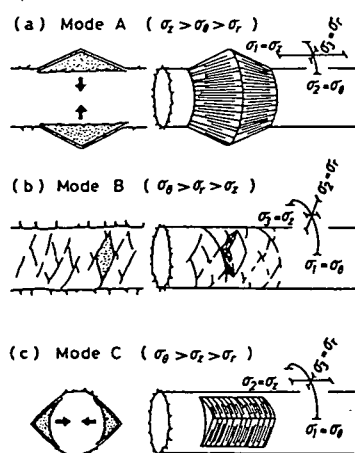


図-11 破壊モード¹⁸⁾

て計算した。この時点で降伏基準を越えている領域が広がっている。例として示したモデルDでは特に側壁部での応力集中が大きく、また応力勾配も大きいため、側壁部奥の地山ではすぐ弾性領域になり、破壊基準を超過した領域は曲線半径の大きい天端部に広がることがわかる。このように、弾性解析でも破壊基準と関連付けることで、破壊領域の広がりを簡便に評価できることがわかる。ただし、今回の実験で用いたような強度劣化する物性を持つ地山では危険側の推定法であることに十分留意する必要がある。

5. まとめ

扁平楕円無支保トンネルを有する脆性地山の破壊実験から以下のことが明らかとなった。

脆性地山として標準砂を少量の小麦粉で焼成結合させたモデルは再現性、安定性、取り扱いの簡便性ともに良好であった。破壊に関しては、トンネル壁面の亀裂は、曲線半径の小さい側壁部で発生するが、亀裂は側壁部奥へ広がらずに天端、インバート部奥へ進行する。その結果、トンネルは、天端部、インバート部のせん断破壊で生ずるくさび状ブロックの発生のために崩壊する。扁平トンネルの崩壊を防ぐには、定性的には側壁部での破壊の始まりを抑止するか、その後の天端部、インバート部での大きなくさび領域の発生を抑止するような支保、覆工が必要であることが推定できる。一方、弾性解析でも降伏基準からの超過度のコンター表現で破壊領域の広がる方向を簡便に評価できるが、危険側の評価であることに十分留意する必要がある。

参考文献

- 1) B. Stimpson : Modelling materials for engineering rock mechanics, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 7, pp. 77-121, 1970.
- 2) 川本脩万・尾原祐三・市原康明 : 底面摩擦模型実験装置および模型材料の力学特性、日本鉱業会誌、99、1139, pp. 1~6, 1983.
- 3) 亀田伸裕・西田 正・御厨誠司 : 浅所陥没の発生機構に関する研究 (第4報)、日本鉱業会誌、99、1145, pp. 543~548, 1983.
- 4) Lin Yun-mei, Hong Yuan-zhen, Zheng Shu-gen and Zhang Ying : Failure modes of openings in a steeply bedded rock mass, Rock Mech. Rock Engng., 17, pp. 113~119, 1984.
- 5) Aydan, Ö. and kawamoto, T. : The stability of slopes and underground openings against flexural toppling and their stabilisation, rock Mech. Rock Engng., 25, pp. 143~165, 1992.
- 6) 相川 明・亀田伸裕・江崎哲郎他 : 不連続性岩盤内空洞の安定機構の実験による解明、第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp. 371~375, 1993.
- 7) 江崎哲郎・亀田伸裕・蔦 宇静・相川 明・三谷泰浩 : 大深度に対応できる底面摩擦模型実験装置の開発、資源と素材、109、No. 7, p. 537~542, 1993.
- 8) 江崎哲郎・蔦 宇静・阿部浩二・大久保達也 : 近接トンネルにおけるロックボルトの補強効果に関する研究、第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp. 356~360, 1995.
- 9) 中原 康・岡林信行・中里吉明・福岡 孝・須藤英明 : NATMに関する研究、鹿島建設技術研究所年報、第26号、pp. 51~56, 1978.
- 10) 中原 康・岡林信行・田沢雄二郎他 : NATMに関する研究 (その2)、鹿島建設技術研究所年報、第27号、pp. 1~6, 1979.
- 11) 佐藤一彦・板倉賢一・菱谷智幸・中垣 薫 : 採掘跡天盤の崩落、沈下に関する模型実験、日本鉱業会誌、103、1187, pp. 17~22, 1987.
- 12) 石島洋二・杉浦高広・中村 章・出口剛太 : 模型試験に関する基礎的研究、資源・素材学会誌、108、No. 3, pp. 173~181, 1992.
- 13) 松井紀久男・島田英樹・一ノ瀬政友・後藤 研 : 石炭鉱山におけるボルト支保システムについて、第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp. 653~658, 1994.
- 14) 久武勝保・渋谷 卓 : 模型実験による軟岩トンネルの膨張特性について、第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp. 520~524, 1995.
- 15) Korbin, G. E. and Brekke, T. L. : Model study of tunnel prereinforcement, Proc. ASCE, GT9, pp. 895~908, 1976.
- 16) 渡辺豊彦・岸野佑次 : 散逸エネルギーを考慮したトンネル周辺岩盤の安定性評価、土木学会論文集、No. 517/Ⅲ-31, pp. 43~52, 1995.
- 17) H. カスナー著、金原 弘訳 : トンネルの力学、森北出版、pp. 38~48, 1974.
- 18) 西村正夫・斉藤敏明・寺田 孚 : 円形トンネル周辺の岩盤挙動に及ぼす軸方向初期地圧の影響、資源・素材学会誌、108、No. 3, pp. 211~219, 1992.
- 19) アイダン・オメル・赤木知之・川本脩万 : スクィーミング地山におけるトンネル壁面変位の簡易予測法について、トンネル工学研究会論文・報告集、第1巻、pp. 165~170, 1991.