

(110) 土被りの浅いトンネルの掘削時の切羽周辺地山挙動に関するモデル実験

神戸大学工学部	正会員	桜井	春輔
近畿大学理工学部	正会員	久武	勝保
神戸大学大学院	学生会員	○川嶋	幾夫
神戸大学工学部	学生会員	射場	康平

A Model test for deformational behaviour of the ground around the face of a shallow tunnel

Shunsuke SAKURAI, Kobe University
Masayasu HISATAKE, Kinki University
Ikuo KAWASHIMA, Kobe University
Kohei IBA, Kobe University

Abstract

In the case of designing a shallow tunnel, it is important to evaluate deformational behaviour of the ground near tunnel. Many model tests have already been carried out to investigate deformational behaviour of a shallow tunnel during excavation. In the model tests, the methods of simulating tunnel excavations are usually achieved making crown or tunnel surface moved out. The authors have proposed a method simulating tunnel excavations by reducing air pressure applying on tunnel surfaces. In order to investigate the deformational behaviour of the ground around tunnel face, however 3-D effect must be taken into account in model tests. In this paper, therefore we carry out 3-D model tests in which a method simulating tunnel excavations by the proposed method is adopted.

1. はじめに

最近、未固結の土砂地山に、土被りの浅い大断面のトンネルをNATM工法によって掘削する例が増加してきた。このようなトンネルでは、切羽の安定性が問題になる。そのため、トンネル掘削にともなう、トンネル切羽周辺地山の挙動を明らかにすることが必要となる。

これまで、トンネル掘削にともなう、トンネル周辺地山の变形挙動を調べることを目的にして、多くのモデル実験が行われてきた。しかしながら、これらの実験はそのほとんどが、平面ひずみ状態を仮定し、トンネルの横断面を対象にした2次元のモデル実験であり、トンネル切羽周辺の3次元的地山の挙動を対象にしたモデル実験は、実験装置の作成が困難なことから、あまり行われてこなかった。そのなかで、著者の一人は、トンネル軸に沿うクラウンを含む鉛直面を境にして、トンネルが対象であることに着目し、トンネル軸に沿う鉛直面によって隔てられる右（あるいは左）半分を考えることで、3次元的な変形が観察できるモデルを作成し、実験を行った^{1, 2)}。

ところで、これまでのモデル実験では、トンネルの覆工は、トンネルの掘進によって増加する土圧を受けて変形することから、トンネル覆工の天端を沈下させたり、トンネル覆工を収縮させることで、トンネルの掘削をシミュレートしてきた。そして、その装置として落し戸やトンネル直径可変装置が用いられてきた。著者らは、これらの実験のような変位境界の条件によってではなく、圧力境界の条件によりトンネル掘削をシミュレートする方法を考え、そのための装置を作

成し、実験を行ってきた³⁾。

そこで、本研究では、トンネル切羽周辺地山の挙動を調べるため、圧力境界の条件によってトンネルの掘削をシミュレートする3次元のモデル実験装置を開発し、実験を行い、トンネル掘削にともなうトンネル切羽周辺地山の变形挙動について考察する。

2. 実験装置の概要

実験は、縦80cm、横200cm、高さ80cmの土槽内にトンネルモデルを設けた図-1に示す実験装置を用いて行った。この実験装置は、直径20cmの亚克力筒を縦方向に半分に切断したものをトンネル覆工のモデルとし、その内側にエアバックを設けて、その圧力を土被り圧から減少する過程で掘削をシミュレートするものである。エアバックには、コンプレッサーにより発生させた空気圧をレギュレータで減圧し、さらに低压用のレギュレータで減圧して作用させた。なお、このとき作用している空気圧は、ビューレットを用いて水頭として測定した。この装置において、図の手前側にあたる壁面は亚克力板とし、変形を観測できるようにした。地山材料には豊浦標準砂を用いた。また、標点としてプラスチックビーズを壁面に沿うように設置した。

モデルの作成にあたっては、トンネルの切羽面から地表面まで届く薄板を型枠として設け、モデル作成中に地山材料がトンネル内に入り込まないようにした。そして、空中落下によって地山材料を1槽2.5cmずつ盛りたて、そのつど標点を設置した。なお、標点と壁面との摩擦を減じ、標点が地山の变形に従い容易に移動するよう、標点の壁面と接する方の端面にはグリースを薄く塗布した。また、エアバックの圧力は地山の盛りたて中においては、そのときの土被り圧と等しくし、トンネル内に地山材料が入り込まないように留意した。地山の盛りたて後、標点を移動させないように型枠を上方に取り除いてモデルを作成した。

通常、トンネルの切羽の掘削より遅れて覆工の閉合が行われるために、切羽面は覆工より前方になる。一般に、切羽面と覆工との距離は施工の効率上はできるだけ離れたほうがよいが、逆に短いほど切羽の安定はよい。そのため、切羽面から閉合された覆工までの距離は、切羽周辺地山の变形挙動および切羽の安定性を検討する場合に欠くことのできない重要な要因である。そこで、この影響を調べるため切羽面から覆工が離れたモデルの作成ができるように工夫した。

掘削は、レギュレータを用いてエアバックの圧力を徐々に減じることで、シミュレートした。このとき、变形前後に撮影した写真（四つ切プリント）から、デジタイザーを用いて標点位置を読み取り、それぞれの標点における変位量を計算した。さらに、標点を節点に見立てた有限要素を仮定し、その内部の変位を節点変位（標点の変位）をもとにして補間し、ひずみ分布図を作成した。

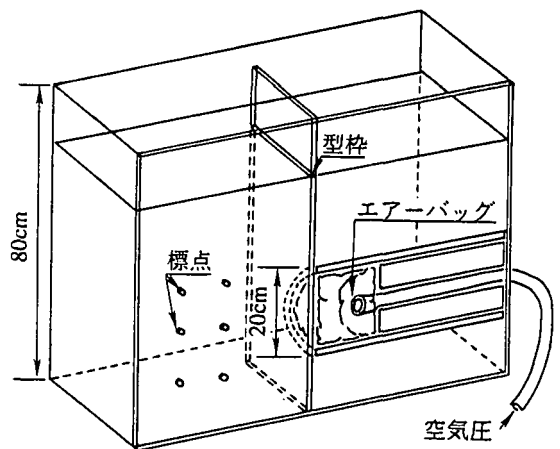
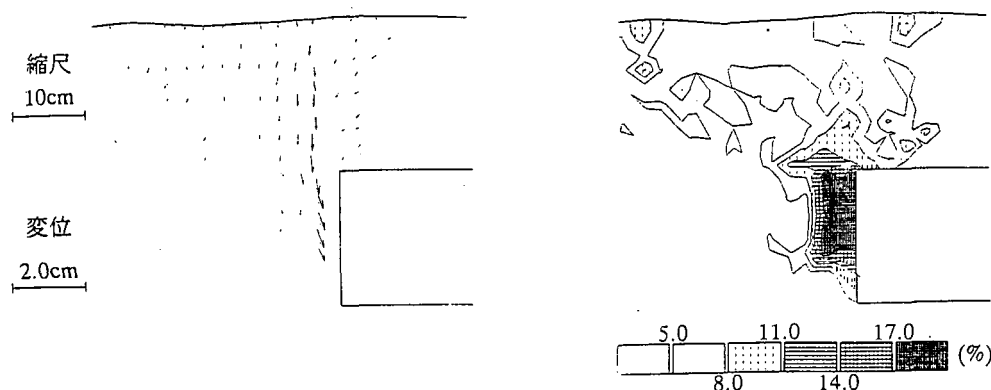


図-1 実験装置の概要

3. 実験結果

図-2(a)に、土被りが1D (D:トンネル直径) で、切羽面まで覆工がある場合の、変形前後の標点の変位ベクトル図を、図-2(b)にそれより求めた最大せん断ひずみ分布図を示す。(a)より、変位ベクトルは、切羽のすぐ前方からその上方の領域で大きく、また、その近傍の領域においてはそれよりもかなり小さいが、切羽に向かう方向に変位していることがわかる。また、(b)のせん断ひずみの分布図から、切羽からその上方に伸びるくさび型のせん断ひずみの大きなゾーンが観察される。そのゾーンよりもせん断ひずみの集中の程度は小さいが、切羽から前方の地表面に至る方向にせん断ひずみの集中した層が見られ、また切羽から後方の地表面にもややせん断ひずみの発達がある。このことから、トンネル掘削により、まず切羽の近傍において前方上方の領域が、切羽面に落ちるような挙動が起こり、それに伴い、その周辺の部分が、そこに移動するような挙動が起こるものと推察できる。この変形挙動の特性は、村山ら⁴⁾が、トンネルの横断面を対象にした落し戸によって掘削をシミュレートした2次元のモデル実験の結果から考察したトンネル周辺地山の変形挙動に一致するものと考えることができる。ただし、切羽周辺地山のトンネル軸に沿う鉛直面における変形挙動では、切羽後方の地山の変形は少なく、変形領域の形状はその特性を反映したものになっている。

図-3には、土被りが1Dで、切羽面から覆工が離れたケースについて示す。この場合も、(a)に変位ベクトル図、(b)に最大せん断ひずみ図を示す。このケースでは、覆工を施していない天端付近から、その上方の地山のくさび型の領域が、トンネル内に落ちるような変形挙動が発生していることが見て取れる。この変形領域の広がり、村山らの落し戸の実験⁴⁾による変形領域の広がりによく似ているが、トンネルの切羽面の一部がそのくさび型の領域に入っているところが、落し戸実験と異なっている。また、この場合においても、図-2のケースとほぼ同じ位置に、トンネル切羽の下部から、切羽前方地山の地表面に至るせん断ひずみの発達が観察される。このことから、切羽面から覆工が離れた場合には、覆工を施していない天端付近の地山がトンネル内に落ちるような変形が卓越するが、切羽下部からその前方の地表面にわたる領域が切羽にすべり落ちるような変形モードもあることがわかる。



(a)変位ベクトル図

(b)最大せん断ひずみ分布図

図-2 切羽面まで覆工のあるケース (土被り1D)

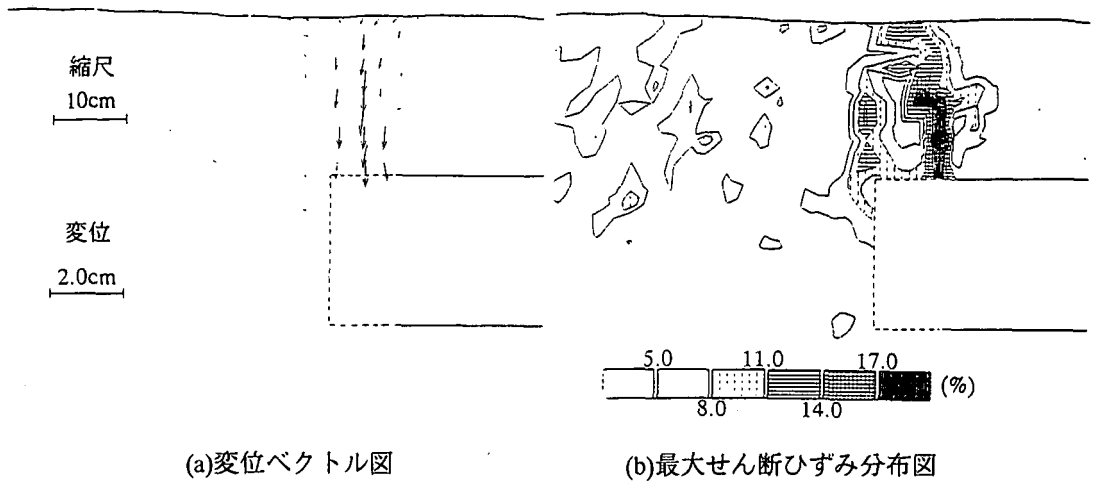


図-3 切羽面から覆工が離れたケース（土被り1D）

4. まとめ

ここでは、トンネル掘削にともなう、トンネル切羽周辺地山の变形挙動を調べるために新たに、モデル実験の装置を作成し実験を行った。そして、次のような成果を得た。

- ① 圧力境界の条件により掘削をシミュレートできる3次元のモデル実験装置を開発した。
- ② この実験装置では、切羽面からトンネル覆工までの距離がある場合も対象にできる。
- ③ トンネル軸に沿う鉛直面上においては、トンネル掘削により、切羽前方上方の領域がトンネル内に落ちるような挙動が発生し、それに伴い、切羽からその前方の地表面までの広い領域において、トンネル内にすべり落ちるような挙動が発生する。
- ④ 切羽面から覆工までの距離がある場合には、覆工を施していないトンネルの天端付近がトンネル内に落ちるような挙動が卓越するが、この場合においても、切羽下部からその前方の地表面までの領域においてトンネル内にすべり落ちるような変形モードがある。

参考文献

- 1) 久武勝保・村上敏夫：地盤の連続体、不連続体挙動のCEM統一解析，第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.7-12，1994年
- 2) 久武勝保・村上敏夫・谷山徳二・江藤剛治：トンネル切羽の動的崩壊挙動の高速ビデオ撮影とそのCEM解析，第29回土質工学研究発表会講演概要，1994年
- 3) 桜井春輔・川嶋幾夫・川端康祝・皿海章雄：土被りの浅いトンネルの力学的挙動に関するモデル実験，土木学会論文集，第487号，pp. 271～274，1994年
- 4) 村山朔郎・松岡元：砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第187号，pp. 95～108，1971年