鏡ボルトによるトンネル切羽の補強効果の数値解析検証(その3)

- 遠心模型実験のシミュレーション -

大林組 技術研究所 正会員 杉江茂彦 〇鈴木和明

高橋真一

1. はじめに

トンネル掘削を対象とした遠心模型実験¹⁾を有限要素法(FEM解析プログラムGRASP3D)^{2)、3)}で シミュレートし、数値解析によるトンネル周辺の地山挙動の再現性ならびに鏡ボルトによる切羽地山の安定 性の向上効果を調べたので報告する。

2.実験概要

空洞を設けた模型地山に遠心力を与えることによりトンネル掘削時の地山の応力変化を模擬した。模型地山のサイズは幅80cm×高さ40cm×奥行き20cmである。空洞は図-2に示すように土被り20cm、直径10cm×長さ30cmの半円筒形状である。ここで、切羽該当部付近には無支保部を設けた。それ以遠については支保工を模擬したアクリル型枠を設けた。模型地山は市販のカオリン粘土に普通ポルトランドセメントを100kg/m³の割合で混合したものを7日間養生させて作成した。遠心加速度は80Gまでを25分間かけて一定の割合で上昇させた。3.解析モデル

(1) 地盤の力学モデル

模型地山の粘着力Cと土被り圧、の関係を図-1に示す。粘着力は一軸圧縮強度 qu 値の2分の1をプロットしたものである。ここで、一軸試圧縮試験はセメント改良土を土槽に打設した際にモールド充填した供試体、ならびに遠心載荷の実験後に土槽の各深度から採取した試料の両方について行った。同図から遠心載荷過程で経験した土被り圧に応じて、模型地山の粘着力が深さ方向に増したことがわかる。本FEM計算では図-1に示す粘着力と土被り圧の関係を計算ソフト内で与えることにより、遠心載荷過程の粘着力の変化を考慮した。この粘着力を用いてMohr-Coulombの破壊基準により地山要素のせん断破壊を判定した。ここで内部摩擦角は零(=0)とした。引張り破壊に対しては最小主応力が引張り側の値となった要素を破壊と判定した。破壊と判定された要素については変形係数を1/100に低減させた。

模型地山の破壊前の変形係数は先の一軸圧縮試験の結果をもとに E=5000KN/m²とした。湿潤単位体積重量は

t=1.74gf/cm³、ポアソン比は =0.45とした。

(2) F E M メッシュと遠心載荷過程のモデル化

模型地山の解析モデルを図 - 2 に示す。モデルの底面と 各側面については面と直角方向の変位を拘束した。トンネ ルを模擬した空洞部のうちアクリル型枠部にはアクリルの 剛性を与えたシェル要素を設けて支保効果を考慮した。実 験では切羽部の鏡ボルトをアルミ棒(2mm、長さ20cm)で 模擬しているが解析ではトラス要素を配置した。遠心載荷 過程は遠心加速度を10Gずつ増加させ、80Gまでを8段階に 分けて計算した。各段階では10G分に相当する要素自重を逐 次加えた。











20

10

0

0

-10

.

15

鏡ボルトの軸ひずみ量

10

図 - 5

切羽からの計測位置(cm)

20

ò

切羽面の押出量

ģ

参考値

þ

線形弾性解析 鏡ボルトなし



10

。 画 写 写

20

鏡ボルトあり

鏡ボルトなし -□-- 実験値

-○-- 実験値 -●-- 解析値

_____解析值

図 - 4

切羽周辺地山の破壊状況を図 - 3 に示す。遠心加速度 5 0 G 時の実験写真と解析結果 (Mohr-Coulomb の破壊 判定基準による局所安全率コンター)である。鏡ボルトがない場合の実験では遠心加速度40G時に切羽の下 |端からクラックが生じ始めた。50Gになると同図(a)に示すようにクラックが切羽の下端から上端に半円形 状につながった。解析においても安全率1.0を下回る領域(破壊領域)が切羽地山に半円形状に生じ、実験と 同様の状況が得られた。鏡ボルトがある場合の同図(b)を見る。実験写真では切羽地山の中央付近にクラックが 生じる程度に留まっている。切羽上半部に至るすべり面の形成はない。解析においても鏡ボルトがない場合に 比べて破壊領域が縮小している。特に上段の鏡ボルトの位置では破壊域が生じておらず、鏡ボルトを模擬した トラス要素が下方からの破壊域の進展を遮断する効果を発揮したものと考えられる。

切羽中央の押出し変位量を図-4に示す。実験結果の鏡ボルトあり(○)と鏡ボルトなし()を比べると、 切羽にクラックが発生した遠心加速度40G~50Gあたりから差が生じはじめている。鏡ボルトによってク ラックの切羽上方への成長が抑制されたためと考えられる。解析結果(鏡ボルトあり()),鏡ボルトなし()) においても実験で得られた押出し変位、ならびに鏡ボルトの変位抑制効果が比較的うまく再現されている。し かしながら鏡ボルトなしの実験())では55G 以後において押出し変位が急増している。クラックの幅が大 きくなったためである。連続体モデルのFEMではこの領域の地山挙動のシミュレートは難しい。参考値とし て弾性FEM解析値を鎖線で加えた。弾性解析では鏡ボルトの有・無による差は明確に得られなかった。

鏡ボルトの軸ひずみ量を図-5に示す。加速度40Gと50G時の値である。実験値を白抜き、解析値を黒 塗りでプロットしている。実験では切羽面から7 cm 程離れた位置でピークを示し、それ以遠では減少している。 解析値においても同様の傾向が得られた。また定量的にも実験と解析で比較的近い結果が得られた。 5.おわりに

トンネル掘削を対象とした遠心模型実験をFEMでシミュレートし、実験での地山挙動ならびに破壊状況を 比較的うまく再現できた。また、切羽に鏡ボルトを設けることにより、切羽周辺地山の安定性が向上すること が実験・解析から得られた。

(参考文献)

- 1) 高橋真一・杉江茂彦:低土被リトンネルの掘削を模擬した遠心模型実験(その2),トンネル工学報告集、第14巻、pp.1-6,2004
- 2) Ohta, H., lizuka, A., Omote, Y. and Sugie, S.: 3-D analysis of soil/water coupling problems using elasto-viscoplastic constitutive relationships, Proc. 7th Int. Cof. Computer Methods and Advances in Geomechanics, Vol.2, pp.1191-1196, 1991
- 3) 杉江茂彦・飯塚敦・太田秀樹:三次元土/水連成FEM解析における種々の離散化と計算精度・効率、構造工学シンポジウム論文 集、第18巻、pp.33-38,1993