

低拘束圧下での軟岩挙動を考慮した地下空洞掘削解析

○ 東京大学 学生員 古家 義信
東京大学 正 員 堀井 秀之

1. はじめに

軟岩地盤内において NATM 工法による大断面空洞掘削を行うにあたり、これまでの実績から経験的に空洞挙動を予測することは困難である。軟岩を弾性体と仮定した掘削解析では空洞挙動を適切に再現することはできず、軟岩の適切なモデル化が必要であると考えられるが、本研究では低拘束圧下での軟岩力学特性に着目して空洞掘削解析を行った。

具体的には、神奈川県鶴見川流域にある恩廻公園調節池トンネル現場^{1),2)}における計測結果を解析で再現することによって、掘削時における空洞挙動のメカニズムおよびロックボルトの支保効果を明らかにすることを目的とする。

2. 軟岩内大断面空洞挙動の支配的メカニズムの推定

図-1 は恩廻公園調節池トンネルでの NATM による掘削順序を示したものである。図-2 に上半内空変位における計測結果と弾性掘削解析結果を示す。横軸は図-1 における掘削順序を示しており、掘削ステップ x.5 は切羽が断面に到達したときを、掘削ステップ x.0 は切羽が断面から十分離れたときを示す。掘削ステップ 4 から 5 にかけて、計測結果で

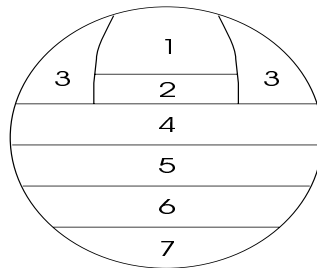


図 1 NATM 掘削順序

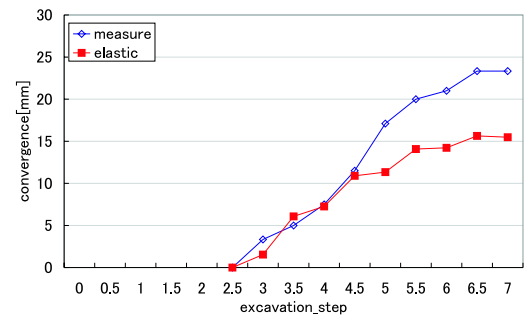


図 2 上半内空変位（弾性解析）

はそれまでのステップ以上に変位が増加するが、弾性解析ではこの傾向を再現できていない。

また、現場では変位対策工として導入されたロックボルトに軸力が 4～8 tf 程度しか作用しないにも関わらず変位が抑制されたことが報告されている。このような空洞挙動を解析で再現することは、軟岩を弾性体と仮定した解析では不可能であり、軟岩の力学挙動を適切に考慮したモデルの構築が必要であると考えられるが、本研究では以下の検討から、低拘束圧下における軟岩の力学挙動に着目した。

原位置採取試料による三軸圧縮試験では拘束圧が 0.2MPa 以下のときに、せん断ではなく割裂で破壊した供試体が見られ、そのときの強度はせん断に比べて低く、破壊後に急激に応力が低下することが特徴的であった。要素試験での割裂破壊は、供試体端面の境界条件や供試体内部の乱れなどの影響が低拘束圧下において顕著に現れたものと考えられるが、実現場における空洞周辺の軟岩は掘削により乱され、掘削後に低拘束圧状態となることから、三軸圧縮試験の供試体と同様の挙動をすることが推定される。従って、空洞掘削解析においても空洞周辺の軟岩において低拘束圧下での軟岩挙動を考慮する必要があると考えられる。

3. 軟岩構成則モデルの提案と掘削解析結果

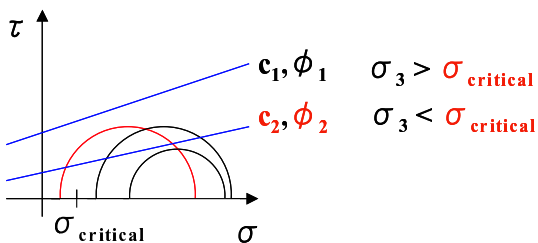


図 3 破壊基準

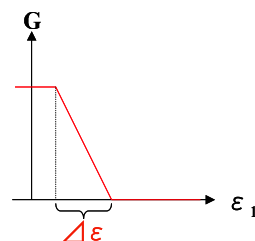


図 4 せん断剛性モデル

低拘束圧下での挙動を考慮した軟岩構成則モデルを次のように提案する。まず、破壊までは等方線形弾性体を仮定し、破壊基準を 2 つ設定する（図-3）。一方は拘束圧が $\sigma_{critical}$ 以上のときにせん断に対する破壊基準であり、もう一方は拘束圧が $\sigma_{critical}$ より低いときの割裂に対す

キーワード：軟岩, 低拘束圧, 大断面空洞, NATM, ロックボルト

〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 TEL:03-3841-7455 FAX:03-3841-7496

る破壊基準として強度を低く設定したものである。低拘束圧下での破壊基準が満たされた後、せん断剛性を最大主ひずみの関数として図-4のように低下させる。一方、体積圧縮係数は一定とする。

提案した軟岩構成則モデルを用いて掘削解析を行った。図-5に上半内空変位における計測結果および解析結果を示す。低拘束圧下での軟岩挙動を考慮することによって、掘削ステップ4から5に見られる変位の増大傾向を解析で再現することが可能となった。なお、ここでは図-3および図-4に示すパラメータの値として、 $\sigma_{critical}=0.15MPa$ 、 $c_2=4kgf/cm^2$ 、 $\phi_2=16.8^\circ$ および $\Delta\epsilon=0.15\%$ を用いているが、これら

は解析パラメータについて感度解析を行った内の、計測結果と比較的に良く一致しているものである³⁾。

4. ロックボルトの支保効果

ロックボルトの支保効果を検討するために、変位対策工としてロックボルトを空洞側壁部に導入した掘削解析を行った。図-6は弾性解析においてロックボルトに作用する軸力分布を、図-7は提案したモデルを用いた解析でロックボルトに作用する軸力分布を示す。弾性解析ではロックボルトに20tf近くの軸力が作用するが、提案した軟

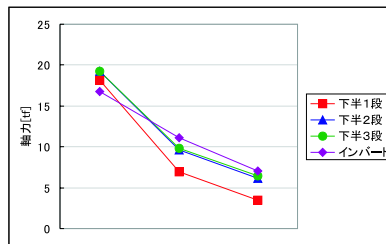


図 6 ロックボルト軸力分布（弾性解析）

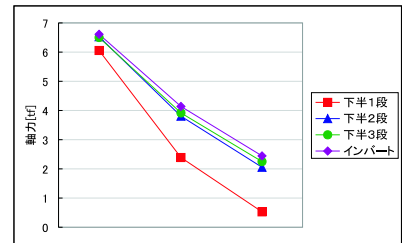


図 7 ロックボルト軸力分布（低拘束圧モデル）

岩構成則モデルを用いた解析では7tf弱の軸力が作用しており、この結果は現場での報告とほぼ一致する。

図-8に、上半内空変位についての解析結果を示す。ロックボルトを導入することで変位が抑制されており、弾性解析結果と提案したモデルを用いた解析結果とがほぼ一致している。

図-9は低拘束圧下で破壊した領域を示し、図-10は拘束圧 $0.2MPa$ 以下の領域をコンターで示したものであるが、ロックボルトが配置された付近では掘削後も拘束圧が維持され、低拘束圧下での破壊が起こらないことが分かる。以上の検討よりロックボルトの支保メカニズムは、掘削後も空洞側壁部の軟岩に拘束圧を維持することで、割裂破壊に伴う強度の低下を防ぎ、空洞の安定性を確保すると考えられる。

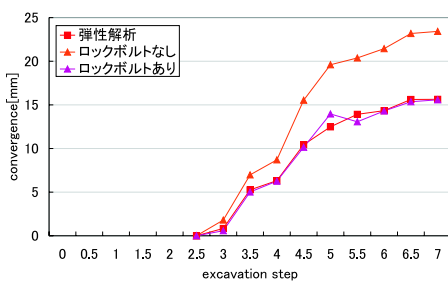


図 8 上半内空変位の比較

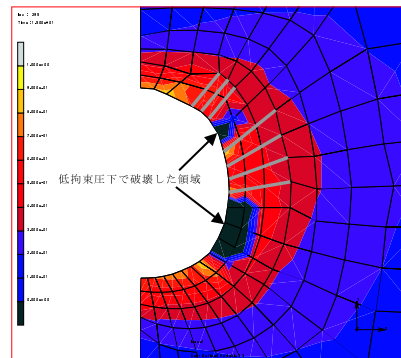


図 9 低拘束圧下で破壊した領域

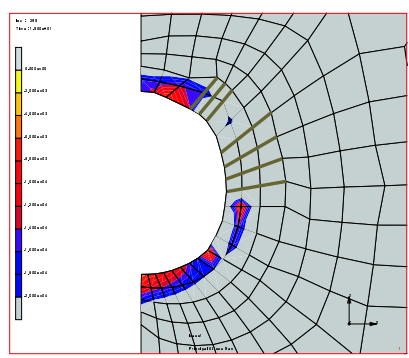


図 10 拘束圧 $0.2MPa$ 以下の領域

5. まとめ

低拘束圧下での軟岩挙動を考慮することで、空洞挙動を部分的に解析で再現することができた。現段階では、空洞挙動を解析で完全に再現するには至っていないが、空洞挙動に影響を及ぼすメカニズムをさらに明らかにすることで、より精度の高い空洞挙動予測の実現が可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 日村博, 行田立大, 山崎武則, 五嶋博己: $254m^2$ の超大断面都市 NATM 鶴見川恩廻公園調節池, トンネルと地下, 第 31 巻 10 号, pp.37-48, 2000
- 2) 日本トンネル技術協会: 恩廻公園調節池特別委員会 第 2 回資料, 1999
- 3) 古家義信: 低拘束圧下での軟岩挙動を考慮した地下空洞掘削解析, 東京大学修士論文, 2001