

京都大学大学院 正会員 岡二三生
京都大学大学院 正会員 小高猛司
京都大学大学院 学生員 ○高戸順一

1. はじめに 地下空間の有効利用は経済、文化の発展において非常に重要である。さらに最近では、その合理性、環境への配慮も求められている。そこで本研究では、日本全域に分布し、最近特に地下掘削の施工対象となることが多い軟岩(泥岩)地盤内に長方形断面の矩形空洞を掘削することを想定し、その安定性を足立・岡による軟岩のひずみ軟化型弾塑性構成式¹⁾を組み込んだ水-土骨格連成弾塑性有限要素解析により検討する。

2. 解析条件 有限要素解析は2次元平面ひずみ条件下で行い、4節点アイソパラメトリック要素を用いている。間隙水圧は要素中心で定義し、連続式の離散化は差分法で行う赤井・田村²⁾の手法に基づいて行っている。表-1 は解析に用いた材料定数である。これは、風化が進んだ礫岩や砂岩を想定したパラメータであり、拘束圧 98kPa で非排水三軸圧縮試験をすると図 1 に示すような応力～ひずみ関係となる。図 2 は、本研究で想定した地盤の初期の諸元を示したものである。

解析は以下の順番に行った。STEP1: 図 2 の地盤内に、中心深さ 24 メートル、幅 4 メートル、高さ 2 メートルの矩形空洞を掘削する。STEP2: 地表面から 16 メートルの層厚の地盤を掘削し、土被りを浅くする。STEP3: STEP1で掘削した矩形空洞を所定の大きさの矩形断面に掘削し拡大する。STEP4: 空洞内の水を排出する。これら一連の解析では、基本的に幅 4 メートル、高さ 2 メートルの矩形空洞を基準として、その安定性を評価しようとするものである。そのために、STEP2の掘削においては、土被りが急激に浅くなった場合の安定性を検討することを目的としている。また、STEP3においては、STEP2の状態での矩形空洞はどの程度安全かを検討することを目的として、断面を拡大してゆく。一般に、地表面から上載荷重を載荷することにより所定断面の安定性を評価しようとする解析も見受けられるが、本来、重力場で崩壊するトンネルの問題には、さらなる荷重による崩壊は実際のメカニズムを考える上で不合理である。また、STEP3では空洞拡大を応力解放率 1%/step, 100 ステップで行い、その後過剰間隙水圧の消散を待つ。時間 step は一貫して 1000sec/step で行う。この段階においては、水位は地表面にあることを想定し、空洞内は水で満たされているとする。最後の STEP4においては、空洞内の水を強制的に排水し、空洞内を静水圧から大気圧になった場合の安定性を評価する。以下に解析結果を述べるが、STEP2の掘削では、矩形空洞に全く変位等の変化がなかったために、STEP3以降の結果について述べる。

表 1: モデル地盤の材料定数

ヤング率 $E(MN/m^2)$	200.0
ポアソン比 ν	0.33
水中単位体積重量 $\gamma'(kN/m^3)$	12.8
透水係数 $k(cm/sec)$	10^{-5}
ひずみ硬化-軟化パラメータ G^*	612.2
ひずみ硬化-軟化パラメータ M_f^*	1.0
塑性ポテンシャルパラメータ $b(kPa)$	160
過圧密境界面パラメータ $\bar{M}_m$	0.95
過圧密境界面パラメータ $\sigma_{mb}(MPa)$	1.47
応力履歴パラメータ τ	0.04

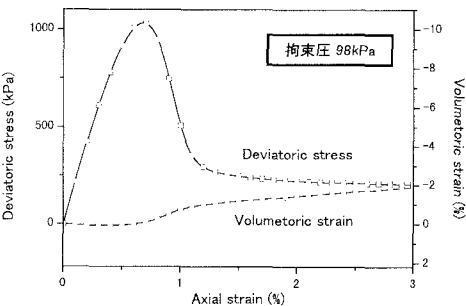


図 1: 非排水 3 軸試験のシミュレーション

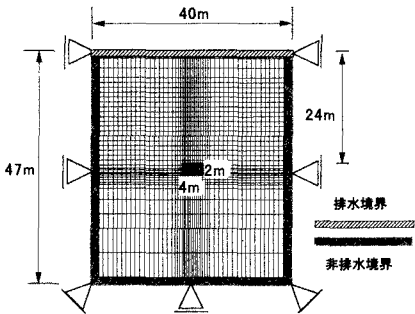


図 2: 解析メッシュおよび境界条件

3. 解析結果 図3は、STEP3において空洞断面を14×7mまで掘削した場合の過剰間隙水圧、応力履歴比、せん断応力、塑性せん断ひずみの変化を、掘削直後と過剰間隙が完全に消散した後を比較して示したものである。空洞拡大のための掘削を行っても空洞付近、特に天盤、側壁部分にはほとんど過剰間隙水圧が発生しておらず、掘削に伴う除荷により、空洞の直下にわずかに負の過剰水圧が発生するのみである。地盤の透水係数を 10^{-5}cm/sec としており、粘性土に比べて大きいため、掘削で生じた過剰間隙水圧も短時間で消散しやすく、さらには上部掘削で排水距離が短くなったことも重なり、地表付近と空洞壁面では間隙水圧はそれほど発生しなかったと考えられる。したがって、本解析で想定した矩形空洞では、過剰間隙水圧の消散に伴う地盤の不安定化は生じにくいと考えられる。図4および図5は、STEP3における大空洞掘削時の地表面沈下量とSTEP4における空洞内の水を排出したときの地表面沈下量をそれぞれ示したものである。STEP2の上部掘削により地表面は隆起するが、図4および5の数字は、隆起後の地表面を基準面にしたときにそれから生じる沈下量である。両図を比較すると全く一致し、空洞内の水を排水することは空洞の安定性にほとんど影響を及ぼさないと判断できる。

なお、図6に空洞内の水を排水した時の全ヘッ드의分布図を示す。空洞内壁近傍のみのヘッ드가低下しているのみで、それ以外の部分に大きな変化は現れていない。ただし、このシミュレーションは地盤内に潤沢に水があり、空洞内から排水しても常に境界外から水が供給される場合を想定していることに注意する。空洞からの排水に伴い、地下水位が急激に低下する場合には、上載圧の変化があるために別の結果となる。

4. まとめ 今回の解析においては、空洞断面の拡大掘削を行っても過剰間隙水圧はほとんど発生せず、間隙水圧の消散に伴う地盤の不安定化はほとんど生じないことが確認された。また、空洞内の水を排水することによる周辺地盤の更なる沈下などの問題はこの地盤では起こらないことが確認できた。最後に、今回の解析に用いた境界では、空洞断面の大きさに比べ境界幅が小さくその影響があると考えられる。境界を遠くにとった場合も計算したが、その結果より本解析は安全側であったことを付け加えておく。

参考文献 1)足立紀尚・岡二三生:軟岩のひずみ軟化型弾塑性構成式, 土木学会論文集, 第445号, III-18, pp.9-16, 1992.
2)赤井浩一・田村武:弾塑性構成式による多次元圧密の数値解析, 土木学会論文報告集, No.262, pp95-104, 1978.

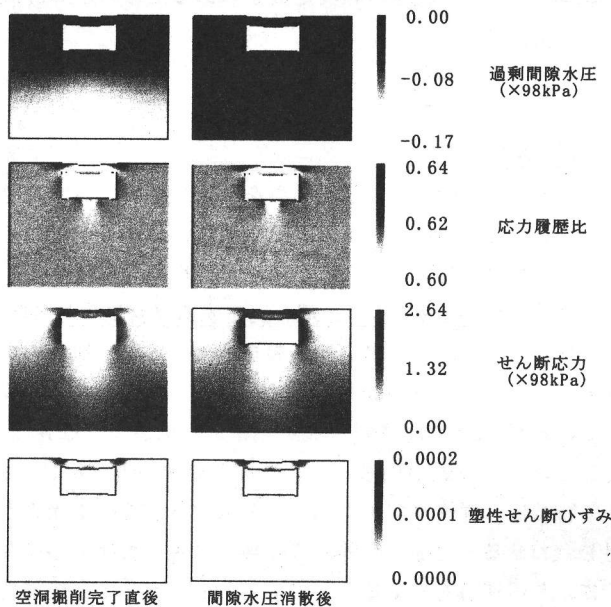


図3: 空洞断面径14×7mの場合のシミュレーション結果

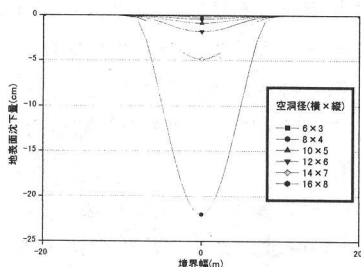


図4: 各掘削段階における地表面沈下量

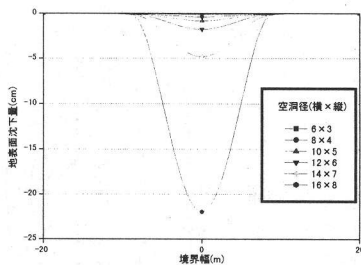


図5: 空洞内排水時の地表面沈下量

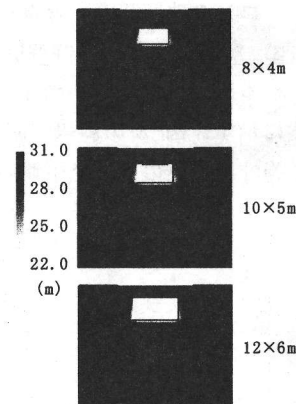


図6: 空洞内排水時の全水頭分布