

地下水を考慮した大深度地下空洞の安定解析

ANALYSIS OF STABILITY FOR DEEP UNDERGROUND CAVERN

CONSIDERING THE EFFECT OF GROUND WATER

秋山伸一*、中村 創*、篠川俊夫*、山本松生*

Shinichi AKIYAMA, Hajimu NAKAMURA, Toshio SHINOKAWA, Matsuo YAMAMOTO

A method for the stability analysis of the underground cavern considering the effect of the ground water is proposed. Firstly, pore water pressure is calculated by the steady-state seepage analysis. Secondly, the pore water pressure is applied to the ground as external force. Computing time by the present method is shorter than the one by the coupled stress-flow analysis, because the number of unknowns is fewer in the computation by the present method, and unsteady analysis is not necessary. Therefore, it is a practical method to estimate the stability of the underground structure in the steady-state condition.

keywords : deep underground cavern, grouting zone, stress and deformation analysis, seepage analysis, finite element method

1. はじめに

近年、都市部の大深度地下空間利用が脚光を浴びるにつれ、このような地下空間建設に対する技術開発が強く求められている。都市部に大深度地下空間を建設するとなると、主に、地下水を多量に含んだ未固結地山が建設の対象になると考えられる。地下水位以下にある構造物の設計を行う際、構造物の建設による地下水環境への影響や、その保全についても考慮する必要がある。また、構造物の安定性についても、土圧だけではなく間隙水圧も考慮された応力状態の下で判断するほうがより適切であると考えられる。このような状況の下では、地下水挙動の予測と構造物安定性の評価を統一的に捉えることが望ましい。

上記のような立場から開発された解析手法のひとつに、大西・村上¹⁾による地盤の応力・変形と浸透流の連成解析法がある。この方法は、応力・変形と浸透流を連成させることにより両者を統一的に把握できること、さらに、地盤の飽和領域と不飽和領域をも統一的に扱えるといった点で優れた方法であると考えられる。しかしながら、連成解析では膨大な計算量を必要とするために、実際の設計に取り入れるには難しい場合もあると思われる。

以上のような観点から、本報告では地下水による浸透流を外力とした有限要素法による地下構造物の安定解析手法を提案する。ここでは、まず本解析手法の定式化および手法の検証結果を示し、次に地下空洞の周囲にグラウト領域を設けた場合の掘削解析を行い、地下水挙動の変化および構造物の安定性の変化を調べ、本解析手法の有効性について考察する。

* 正会員 佐藤工業㈱ 中央技術研究所

2. 解析手法

2. 1 有限要素法による定式化

対象とする地盤は土骨格と水によって構成されているものとする。このうち、土骨格の力の釣り合い式は次式である。

$$\sigma_{ij,j} + F_i = 0 \quad (1)$$

ここに、 σ_{ij} は全応力を、 F_i は物体力を示す。また、 i, j などの添字は直交座標系における方向を示すものとする。(1)式の全応力は有効応力と間隙水圧の和として次式で定義する。

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + \chi \delta_{ij} \hat{u} \quad (2)$$

ここに、 σ'_{ij} は有効応力を、 $\hat{u}$ は間隙水圧を示し、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタを示す。 χ は飽和領域では $\chi = 1$ 、不飽和領域で $0 < \chi < 1$ なる値を取るパラメータである。ところで、 χ は飽和度 S_r を用いて、便宜的に $\chi = S_r$ として用いられることがある²⁾。これは、不飽和領域で χ がどのような値を示すのか不明なこと、および飽和度 S_r も $0 < S_r \leq 1$ なる値を取ることに起因していると考えられる。そこで、本報告でも $\chi = S_r$ として以後の解析を行う。さて、土骨格を線形弾性体とすると構成式は次式で示せる。

$$\sigma'_{ij} = c_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{ij} = 1/2 \times (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (4)$$

ここに、 ε_{ij} はひずみを、 u_i は変位を示し、 c_{ijkl} は剛性係数を示す。また、地下水の浸透が定常状態にあると仮定すると、飽和・不飽和浸透流の方程式³⁾は次式で示される。

$$[k(\phi) h_{,i}]_{,i} = 0 \quad (5)$$

ここに、 h は位置水頭と圧力水頭 ϕ の和で定義される全水頭を示す。 $k(\phi)$ は透水係数を示し、飽和領域では一定、不飽和領域では圧力水頭 ϕ に対応する値を取る。

次に、上式から本解析手法を有限要素法により定式化すると、以下のようになる。

$$\int_{\Omega} \sigma'_{ij} \delta \varepsilon_{ij} d\Omega - \int_{\Omega} F_i \delta u_i d\Omega - \int_{\Gamma} p_i \delta u_i d\Gamma - \int_{\Omega} \chi \hat{u} \delta u_i d\Omega = 0 \quad (6)$$

$$\int_{\Omega} k(\phi) h_{,i} \delta h_{,i} d\Omega - \int_{\Gamma} k(\phi) h_{,n} \delta h d\Gamma = 0 \quad (7)$$

ここに、 Ω は解析の対象となる領域を、 Γ は領域の境界を示す。 p_i は、有効応力によって与えられる表面力を示し、 n は境界 Γ における法線を示す。(6)式は有効応力によって定義された地盤の応力・変形を表す有限要素式であるのに対し、(7)式は地盤内の浸透流を表す式である。(7)式からは、地下水の全水頭、流量、間隙水圧等が求められる。このうち、間隙水圧 $\hat{u}$ を(6)式に代入することにより、地盤内の変位、応力が求まる。

2. 2 応力・変形と浸透流の連成解析法との関連性

ここでは、2. 1で示した解析手法を大西・村上¹⁾によって示された応力・変形と浸透流の連成解析手法と比較し、連成解析法との関連性および本解析法の位置づけについて述べる。連成解析法では、浸透流は非定常状態を対象としており、次式で示されている。

$$[k(\phi) h_{,i}]_{,i} - \varepsilon_{ii,t} S_r - c(\phi) h_{,t} = 0 \quad (8)$$

ここに、 $c(\phi)$ は比水分容量を示し、 ε_{ii} はひずみを、 t は時間を示す。(8)式では第2項がひずみ成分によって表されている。すなわち、地下水の浸透は地盤の変形によって影響されることを示している。従って、連成解析では(8)式から得られる有限要素式と(6)式を連立させて解くことにより、地盤の応力・変形と浸透流が同時に求まることになる。ところで、本解析手法では地下水の浸透は定常であると仮定している。そこで(5)式と(8)式を比べると、(8)式の第2および3項を除いたものが(5)式であることがわかる。つまり、本解析手法で扱う地下水の浸透は、地盤の変形の影響を受けないことがわかる。従って、本解析手法では(7)式から求められる間隙水圧を(6)式の外力項とすることによって地盤内の応力・変形が求められるのである。

以上のことから、本解析手法は、連成解析法において定常浸透流を扱う場合の方法に一致することがわかる。また、連成解析法は地盤の応力・変形と浸透流が相互に影響を及ぼしあうことを前提とした解析法であるのに対し、本解析手法は、地盤の応力・変形が地下水の浸透によって支配されることを前提として展開された解析法と捉えることもできる。

2. 3 地下空洞掘削解析への適用

2. 1で述べた解析手法の考え方は新しいものではなく、既に、類似の方法を用いて、例えば斜面の解析⁴⁾を行っているものもある。しかし、このような方法を用いて地下空洞の掘削解析を行った例はほとんど見られない。そこで、地下空洞掘削解析を行うための本解析手法の適用方法について概略を述べる。

地下空洞掘削前は、地盤には物体力として土骨格と地下水の自重が作用し、初期応力状態となっている。この状態では地下水の流れはないので、間隙水圧は静水圧に等しい。次に、空洞が掘削されると、空洞壁面に沿って初期応力が解放されるとともに、地下水は空洞に向かって流れ出し、時間が充分経過したところで、その流れは一定となる。このようなことから、解析では、まず静水圧をも考慮した初期応力解析を行い、続いて浸透流解析、および応力・変形解析を行う。応力・変形解析に用いる間隙水圧には、初期状態の静水圧から浸透流解析より得られる定常浸透状態の水圧を差し引いた間隙水圧の変化分を用いる。

以上に述べた適用法からわかるように、本解析手法を用いた掘削解析では、地下水流れのない初期状態と流れが一定な定常状態を対象としており、初期状態から定常状態へと移行する間の過渡的な非定常状態を考慮していない。非定常状態を考慮せずに定常解析を行うことの妥当性については次章で検討する。

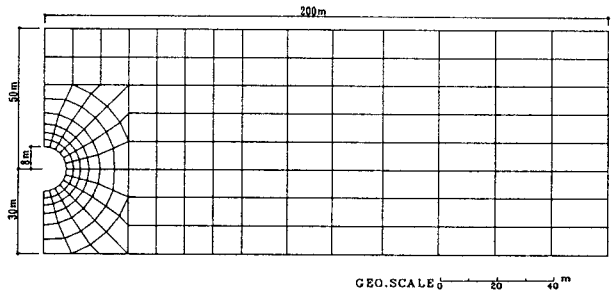
3. 解析手法の検証

ここでは、本解析手法と先の連成解析法を用いた地下空洞の掘削解析を行い、連成解析法による非定常解析から見た本解析手法の妥当性について検討する。

一様地盤内地下50m に半径8mの円形の地下空洞を掘削する場合の地盤の応力・変形挙動および地下水挙動についての解析を行う。図

－1に解析モデルを、表－1に解析に用いる地盤の物性値を示す。解析モデルでは地盤と地下空洞が左右対称であることからそれらの半分を解析の対象とした。境界条件はモデルの側方境界で水平方向を固定し、底面境界で鉛直方向を固定した。また、右側の境界では地下水面を地表面上で固定した。掘削前の初期状態では地下水面は地表面上にあるとした。

解析結果を図－2に示す。連成解析では地下空洞掘削後3～4日程度で地下水の浸透流が定常状態になったことから、ここでは4日後の結果を示す。図－2より、本解析手法による結果は連成解析によるものとほとんど一致していることがわかる。これらの結果は、前章で述べたように、定常状態の場合、本解析手法が連成解析法と一致することに対応する。ところで、連成解析では、初期状態から、地下水が流れ始める非定常状態、さらに流れが一定になる定常状態へと移行変わる一連の様子を解析するので、定常状態の結果は非定常状態の影響を強く受けることも考えられる。したがって、本解析手法と連成解析法の結果が常に一致するとは



図－1 解析モデル

表－1 地盤の物性値

飽和単位体積重量	1.90g/cm ³
間隙比	0.90
自然含水比	25%
ヤング率	1,000kg/cm ²
ポアソン比	0.35
粘着力	0kg/cm ²
内部摩擦角	35°
透水係数	1×10 ⁻³ cm/sec

言えない。しかし、図-2に示したように、両者の解析結果が一致することから判断して、連成解析から得られる定常状態の結果は、非定常状態の影響よりも、初期状態の影響を強く受けるものと考えられる。

以上の結果から、本解析手法は妥当な解析結果を与えるものであり、特に、地下水を考慮した構造物の長期的な安定性を検討する上で有効な方法であると考えられる。

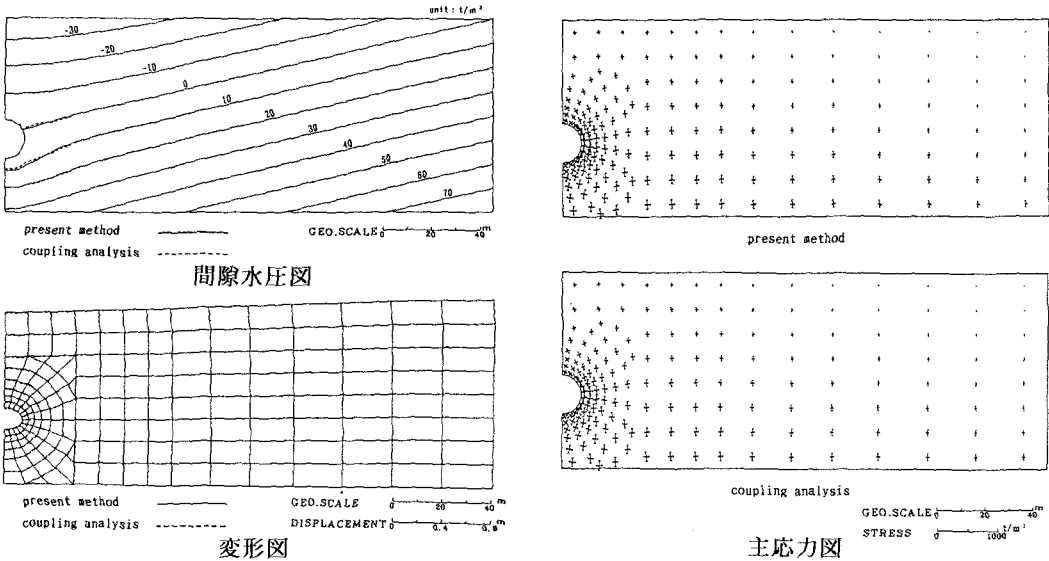


図-2 検証結果

4. 安定解析

地下水面以下の地点に空洞を建設する場合、空洞壁面から湧水が発生したり、都市部では大幅な地下水位の低下も予想されるため、これらを抑制する対策も講じなければならない。地下水位低下を抑える止水工法のひとつとして、地下空洞周囲にグラウトを行い、難透水層を設ける方法がある。ここでは、グラウト領域の透水係数に着目し、先に展開した解析手法を用いて地下空洞の掘削解析を行い、グラウト領域の透水係数の変化が、地下水の挙動および地下空洞の安定性に与える影響について調べる。

解析モデルのうち、地下空洞の形状、地盤材料の諸定数、空洞掘削前の地下水位、および解析領域、境界条件は前章で示したものと同一である。一方、グラウト領域は図-3に示すように設ける。ここで、グラウト領域では諸定数のうち透水係数のみを変化させ、その他は地盤の定数と同一の値を用いる。グラウト領域の透水係数を表-2に示す。このうち、case1はグラウトをしない場合のモデルを示している。

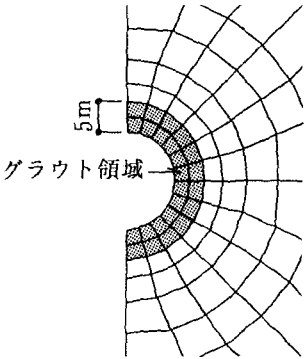


図-3 グラウト領域

表-2 グラウト領域の透水係数

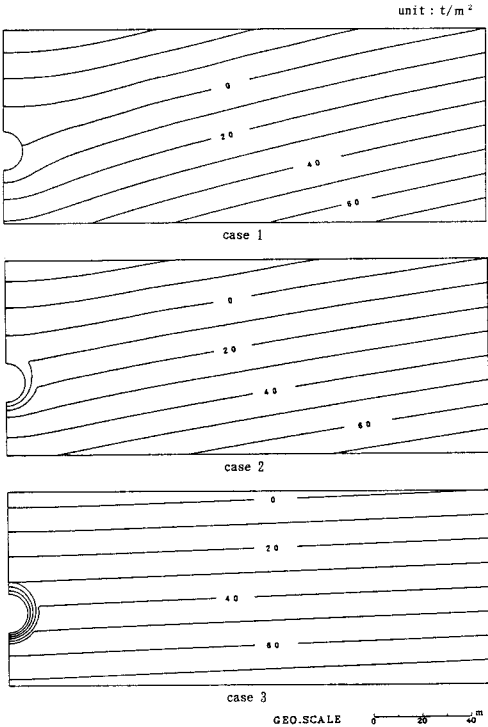
	透水係数 (cm/sec)
case 1	1×10^{-3}
case 2	1×10^{-4}
case 3	1×10^{-5}

解析結果を図-4～7に示す。図-4に示した間隙水圧の等高線図では、水圧 0 t/m²が地下水面を表している。図-4より、地下水の低下量は、グラウトをしないcase1で最も多く、グラウト領域の透水係数が小さくなる程、低下量も少なくなる。一方、グラウト領域では、透水係数が小さくなるにつれ、間隙水圧の変化が大きくなる。これらの結果から、透水係数が 1×10^{-3} cm/secの地盤に対してグラウト領域の透水係数が 1×10^{-5} cm/sec以下であれば地下水の低下をかなり抑えることができると考えられる。

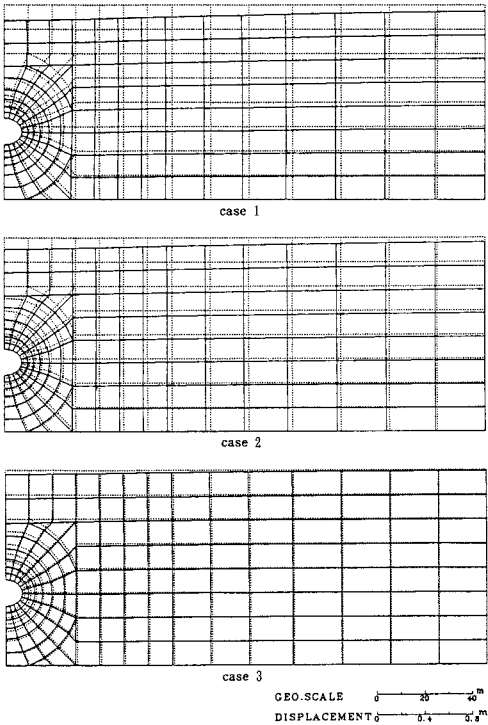
図-5に変形図を示す。ここからまず、地下水低下量が多くなる程、地表面沈下も大きくなることがわ

かる。この結果から、しばしば社会問題として取り上げられる地下水の汲み上げによる地盤沈下と同様の現象を、本解析手法によっても表せるものと思われる。次に、空洞の変形を見ると、地下水の低下量が多い程、天端沈下も大きい。これは、地下水低下による間隙水圧の減少に伴い有効応力が増加するため、地盤は収縮する方向に向かって変形することになり、その結果、空洞天端では沈下が顕著に現れるものと考えられる。さらに、空洞底盤の変形は、地下水低下量が少ない程、浮き上がりが大きい。これは、地下水の低下量が少ないと、大きな間隙水圧が空洞の下側から揚圧力として作用するためであると考えられる。

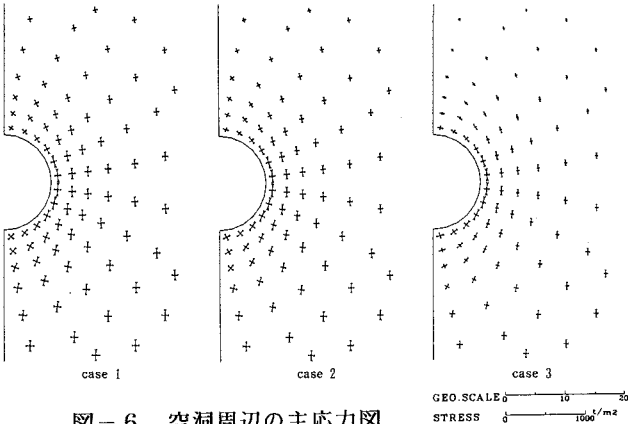
図－6 に示した空洞周辺の主応力の分布を見ると、地下水の低下量が多くなるにつれ、主応力の絶対値も全体的に大きくなるのがわかる。これは、間隙水圧が減少することによって有効応力が増加するためである。ここでは、さらに空洞近傍の応力状態を調べてみる。表－3 に空洞の天端、側壁および底盤の主応力値を示す。表－3 より、地下水低下量が少なくなるにつれ、最小主応力は減少し、しかもその減少量は最大主応力の減少量に比べて大きいことがわかる。このような結果は、地下水位が高くなるにつれ、空洞



図－4 間隙水圧図



図－5 変形図



図－6 空洞周辺の主応力図

表－3 空洞周辺の主応力値

	case 1	case 2	case 3
天端	32.18	25.12	8.96
	34.12	26.06	11.20
側壁	58.72	54.39	47.51
	117.25	115.40	112.20
底盤	59.00	55.60	49.19
	64.74	64.14	64.30

上段：最小主応力 (単位：t/m²)

下段：最大主応力

周辺の応力状態が不安定な方向に向かうことを示しているものと考えられる。これを確かめるために、図-6の結果から、Mohr-Coulombの降伏条件に基づく安全率を算出した。その結果を図-7に示す。図-7より、地下水の低下量が少なくなるにつれ、応力的に不安定な状態は、空洞側壁部付近のグラウト領域から次第に周辺地盤に広がる様子がわかる。

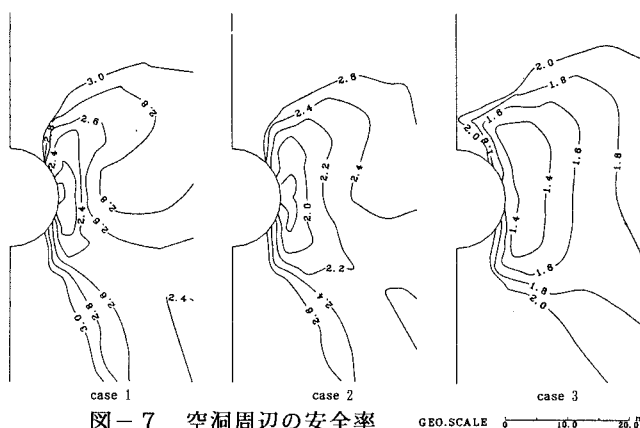


図-7 空洞周辺の安全率

以上の結果は、足立・田村⁵⁾も

指摘しているように、止水グラウトは地盤の透水係数を下げることにより、地下水の低下を抑えることができるが、同時に、空洞周辺の応力状態は不安定な方向に向かうことから、グラウト領域の幅や強度についても考慮する必要があることを示唆している。

5. おわりに

本報告では、都市部の大深度地下空洞を対象として、地下水を考慮した安定解析手法を示し、数値解析を行った。その結果をまとめると、主に以下ようになる。

- (1) 本解析手法は、大西・村上による応力・変形と浸透流の連成解析法において定常浸透流を扱う場合の方法に一致する。
- (2) 本解析手法は、地下水位以下に建設される構造物の長期的な安定性を評価する上で有用な方法である。
- (3) 地下水の低下や湧水を抑えるためにグラウトを行う際、グラウト領域の透水係数のみならず、その領域の幅や強度についても検討する必要がある。

最後に、本解析手法は、定式化から明らかなように、地下水の浸透流を外力として扱い、応力・変形解析を行う手法である。したがって、既存の応力・変形解析コードと浸透流解析コードを用いることにより、比較的容易に解析を行えるので、今後、本解析手法を実用面で展開して行くつもりである。

6. 参考文献

- 1) 大西有三・村上 毅：有限要素法による地盤の応力・変形を考慮した浸透流解析、土木学会論文報告集 298号、pp. 87~96、1980. 6.
- 2) 大西有三・大津宏康：トンネル掘削にともなう地盤と地下水の変動に関する数値解析、第13回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp. 116~119、1981.
- 3) 赤井浩一・大西有三・西垣 誠：有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析、土木学会論文報告集、264号、pp. 87~96、1977. 8.
- 4) 山田壽政・小島義孝・速水博秀：地山応力に対する間隙水圧の影響、地すべり、28-1、pp. 1~8、1991.
- 5) 足立紀尚・田村 武：高圧湧水下のトンネル工における水抜孔の効果と注入域の適正規模、土木学会論文報告集、280号、pp. 87~98、1978. 12.