

III-356 ダイラタンシーの有効封圧依存性を考慮した岩盤の変形解析

大成建設（株）技術研究所 正会員 里 優

1. はじめに

筆者は、岩石で生ずるダイラタンシーが有効封圧（封圧と間隙水圧の差）に反比例することを明らかにした¹⁾。これを岩盤構造物の安定性向上に役立てていくため、連成解析にダイラタンシーの有効封圧依存を組み入れることを試みた。連成解析とは、岩盤の変形と地下水の流れを、所定の境界条件や初期条件のもとで同時に解く手法であり、地下水で飽和した岩盤に掘削された空洞の安定性を議論する際などに有力なツールとなり得るものである。本論文では、ダイラタンシーの特徴を考慮した岩盤の構成方程式を提案し、これを用いて行った空洞の変形解析の一例を紹介する。

2. 岩盤の構成方程式と連成解析

これまでの研究¹⁾にもとづき、三軸圧縮試験において観測されるダイラタンシーの特徴を示すと次のとおりである。

- (1) 軸差応力の増加にともないクラックの破壊が進行し、この結果、接線ヤング率が低下していくとともにダイラタンシーが生ずる。
- (2) ダイラタンシーひずみは、有効封圧（封圧と間隙水圧の差）に反比例する。

これらの性質は、以下のようにして岩盤の構成方程式に反映させることができる。なお、式を記述するにあたり、平面ひずみ条件を仮定した。

応力に対する偏差ひずみと体積ひずみの非線形性は、いずれもクラックの破壊に原因があり、相互に関連していると考えられる。これを次式で簡単に表現した。

$$\Delta \varepsilon_v^i = \alpha \Delta \varepsilon_s^i \quad (1)$$

$$(\varepsilon_s = \varepsilon_1 - \varepsilon_2, \quad \varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2)$$

ここに、 $\Delta \varepsilon_s^i$ 、 $\Delta \varepsilon_v^i$ は、それぞれ偏差ひずみと体積ひずみの非弾性成分である。また、 α は、非弾性偏差ひずみと非弾性体積ひずみの比を定める係数とする。

非弾性体積ひずみはダイラタンシーによるひずみであるが、これは次式で表現した。

$$\Delta \varepsilon_v^i = \frac{\alpha}{H} \frac{\Delta \sigma_s^3}{\sigma_1 - \phi} \quad (\sigma_s = \sigma_1 - \sigma_2) \quad (2)$$

ここに、 H はダイラタンシーの大きさを定める係数である。

すなわち、非弾性体積ひずみは σ_1 （圧縮を負としているために最小圧縮応力を意味する）と間隙水圧 ϕ の差に反比例し、偏差応力の3乗に比例して発生するとした。

岩盤の構成方程式は、これらに弾性変形を記述する項を加えることで次のように得られる。なお、式を導く手続きの詳細は既報²⁾を参照されたい。

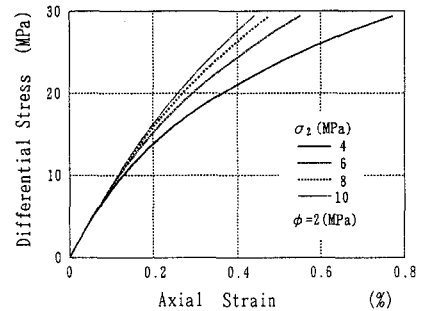


図-1 軸差応力-軸ひずみ線図（排水条件）

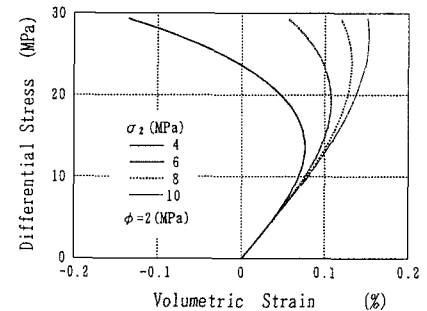


図-2 軸差応力-体積ひずみ線図（排水条件）

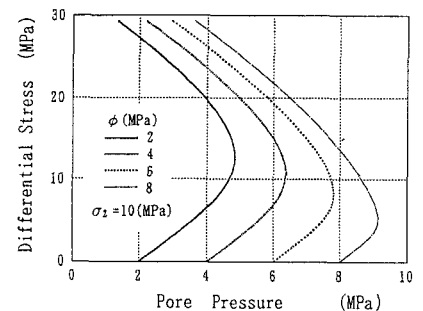


図-3 軸差応力-間隙水圧線図（非排水条件）

$$\Delta \varepsilon_v = \frac{\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_2 + \Delta \sigma_z}{3K_d} - \frac{3\Delta \phi}{K_d} + \frac{\alpha}{H} \frac{\Delta \sigma_s^3}{\sigma_1 - \phi} \quad (3)$$

$$\Delta \varepsilon_s = \frac{\Delta \sigma_s}{G} + \frac{1}{H} \frac{\Delta \sigma_s^3}{\sigma_1 - \phi} \quad (4)$$

$$K_d = \frac{E_d}{3(1-2\nu_d)}, \quad G = \frac{E_d}{2(1+\nu_d)} = \frac{E_u}{2(1+\nu_u)}$$

図-1～図-3に、これらの式を用いて描いた応力-ひずみ、間隙水圧の関係を示す。式中の各定数は下記のとおりである。なお、添え字のdとuは、それぞれ排水、非排水条件での計測値を表すこととする。また、各図では便宜上圧縮を正とした。

$$E_u = 10^4 \text{ (MPa)}, \quad \nu_u = 0.4, \quad \nu_d = 0.2 \\ \alpha = 0.3, \quad H = 10^6 \text{ (MPa}^2\text{)}$$

3. 解析例と考察

等方均質な岩盤内に円孔を「瞬時に」掘削した場合の解析結果を示す。条件は以下のとおりである。

$$\sigma_h = \sigma_v = -10 \text{ (MPa)}, \quad \phi_0 = -5 \text{ (MPa)}$$

$$\text{透水係数: } 10^{-9} \text{ (cm/s)}$$

本解析例では、まず円孔が瞬時に掘削され、非排水状態で応力変化が生ずる。このとき円周方向の応力 (σ_2) が増加し直径方向の応力 (σ_1) が減少するが、岩盤を弾性体とした場合の解（以下、弾性解、図-4）では、この過程で体積変化が生じないため間隙水圧 (ϕ) は初期状態のままである。この結果、円孔近傍（斜線で示した部分）では、最小圧縮応力が間隙水圧を下回る。このような状態は非現実的である。なぜならば、一般に岩盤の引っ張り強度は小さく、間隙水圧が主応力より大きい場合には、容易に引っ張り破壊が生ずると考えられるからである。ダイラタンシーを考慮した解では、最小圧縮応力と間隙水圧が接近していくとダイラタンシーによって間隙水圧が減少していくために、最小圧縮応力が間隙水圧を下回ることはない（図-5）。ただし、このダイラタンシーによって、円孔周囲では弾性解にくらべ大きなひずみが生ずる（図-6、図-7）。

この解析例が示すように、ダイラタンシーの有効封圧依存を考慮することで、含水飽和した岩盤における変形と間隙水圧の相互作用をより現実的に表すことができ、空洞の安定性検討などの精度向上を図ることができる。

参考文献

- (1) 里: 第9回岩の力学国内シンポジウム, 449-454, 1994.
- (2) 里, 他: 資源と素材, 108, 783-789, 1992.

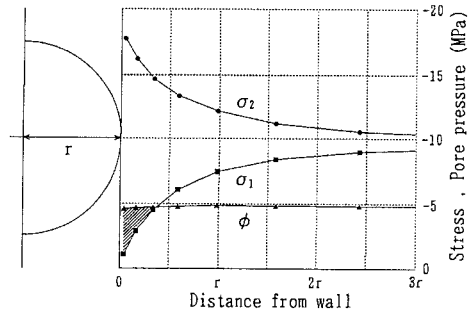


図-4 掘削直後の応力、間隙水圧分布（弾性解）

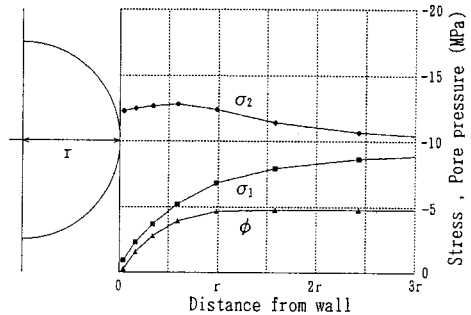


図-5 掘削直後の応力、間隙水圧分布

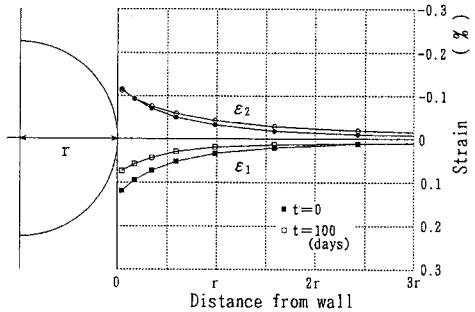


図-6 主ひずみ分布の経時変化（弾性解）

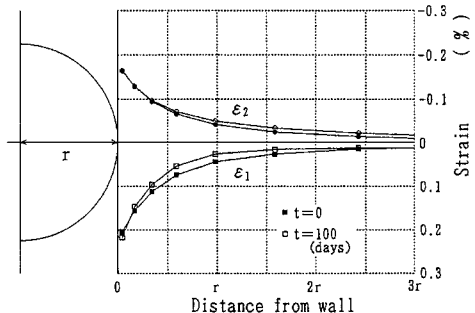


図-7 主ひずみ分布の時間変化