

Ⅲ－36

粒状要素法による空洞周辺地盤の解析とそのエネルギー的考察

東北大学 学生員 ○鈴木淳志
東北大学 正 員 岸野佑次

1. まえがき 地盤中に空洞を掘削する際に問題となる周辺地盤のゆるみのメカニズムを調べるに当たって、連続体的アプローチにおいてはモデル化が困難であると考えられる。ここでは、周辺地盤の不均一性を考慮するために粒状要素法¹⁾を用いたシミュレーション解析を行ない、さらにこの解析結果に基づいて変形場の不均一性を表す量や散逸エネルギー²⁾を中心に考察を行った。

2. 粒状要素法モデルおよび解析方法 粒状要素法を用い、図-1に示すパッキングを初期状態とする。中央部円領域を掘削される領域とし、これに中心が含まれる粒子が関与する接触点において、ばね剛性を一定の割合で落とすことによって掘削をシミュレーションする。このとき、初期状態からの剛性の低下の割合を、剛性低下率と呼ぶこととする。

1) 解析モデル 粒子間の接触剛性はバネ定数 k_n (法線方向), k_t (接線方向) および接線方向粘着力 c によって表される。ここで、粒子間の接触力 P_n (法線方向), P_t (接線方向) はそれぞれ

$$\text{If } P_n < -c, \text{ then } P_n = 0.$$

$$\text{If } |P_t| > (P_n + c) \tan \phi, \text{ then } |P_t| = (P_n + c) \tan \phi.$$

を満たすものとする。解析に用いた諸定数を表-1に示す。

2) 境界条件 拘束圧 p は全ステップにわたって、等方かつ一定であるとする。

3) 内空歪と内空応力 空洞部粒子に接している粒子を壁面粒子とよぶ。この壁面粒子の半径方向の変位を求め、その平均を空洞の半径で除して得られる歪を内空歪とよぶ。また、空洞部粒子と壁面粒子との間の接触力の半径方向成分を平均して求めた応力を内空応力とよぶ。

4) 変形の標準偏差³⁾ ゆるみのメカニズムを調べるために、次に定義する変形の標準偏差を用いる。図-2に示すように、領域の平均的な歪 e より求められる粒子(中心の位置ベクトル x)の平均的変位ベクトル $\bar{u}$ と実変位ベクトル u の差 Δu を残差変位ベクトルとよぶ。変形の標準偏差は次式で与えられる。

$$D_i = \frac{2}{N_i (\varepsilon_x + \varepsilon_y)} \sqrt{\sum_{a=1}^{N_i} (\Delta u)^i \Delta u} \quad (1)$$

ここに、和は各領域毎にとるものとし、 N_i はその領域に含まれる粒子の個数である。

5) 散逸エネルギー 掘削の進行に伴い、粒子間の滑りによってエネルギーの散逸が起こる。粒子間の接線方向相対変位を Δu_t とすると(図-3)

$$\Delta u_t = (\Delta x - \Delta x') \cdot t + r \Delta \omega + r' \Delta \omega' \quad (2)$$

となる。 Δu_t から弾性的な相対変位を差し引いたものが非弾性的な相対変位となる。これを Δu_d とすればある接触点Cにおける散逸エネルギーの増分 Δd_c は接触力の接線方向成分を p_t として

$$\Delta d_c = p_t \Delta u_d \quad (3)$$

と表される。したがって領域全体における散逸エネルギーの増分は、領域の面積を A_i として、

$$\Delta E_{di} = \frac{1}{A_i} \sum_c \Delta d_c$$

となる。

3. 解析結果とその考察 紙面の都合からここに図は掲載していないが、粒子の変位ベクトル分布を示す図からは、剛性の低下が進むにつれて変位ベクトルの方向が中心方向からずれた、より不均一な分布となっていることがわかる。

図-4に解析を行った最終状態(剛性低下率95%)に至るまでの過程と、内空ひずみが1.0, 2.3, 3.1, 4.5%となるステップから空洞部粒子の剛性を元の値にまで戻したと

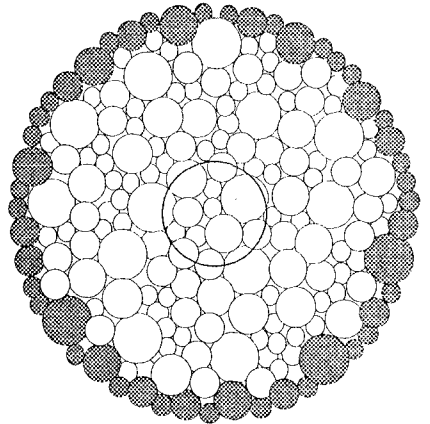


図-1 初期パッキング

表-1 解析に用いた諸定数

粒 径	0.5, 0.75, 1.0, 1.25cm
粒 子 数	189
粒子単位重量 (水中重量)	1.5gf/cm ²
粒 子 間	法線方向 1000kgf/cm
バネ定数	接線方向 700kgf/cm
粒 子 間 摩 擦 角	25°
粘 着 力	2.0kgf
1ステップ当りの剛性低下率	0.5%
空洞部分半径	3.0cm
拘 束 圧	2.0kgf/cm ²

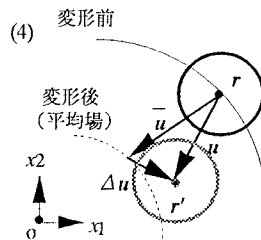


図-2 変形の分散

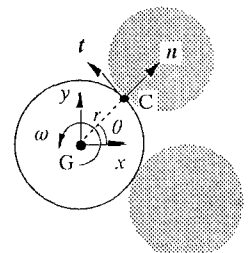


図-3 壁面粒子に作用する力

きの内空応力、内空ひずみ曲線を示す。同図より、内空ひずみが大きくなると内空応力レベルが初期値に達しても内空ひずみは零とはならず、残留ひずみが観察される。このことから空洞周辺の地盤において力学的に不可逆な状態が生じたことがわかる。また、内空ひずみが1%付近においてグラフの傾きが大きく変化しているが、図-5においてこれに対応する内空ひずみレベル以降で散逸エネルギーの全エネルギーに対する割合が増加している。このことから、ある内空ひずみレベルを越えると急に不可逆な状態に移行するといえる。

図-6にはリング状に5つの領域に分割したときの各領域における、変形の標準偏差の値、ならびに散逸エネルギーの単位面積当たりの割合と、内空ひずみの関係を示した。(a)より周辺地盤のゆるみには、主として空洞部に近い領域における不均一な変形が大きな影響を与えることがわかる。したがって、このような不均一性を伴う問題の解析には離散モデルが有効であり、従来の連続体的アプローチを補完するものであると考えることができよう。また、(b)においては今回用いたモデルの粒子数が少なかったことが各領域に含まれる接触点数の差に大きな影響を与えたためと思われるが、内側から3番目の領域で最も多くの散逸エネルギーが発生したことを示すものとなっている。しかし、傾向としてはやはり空洞部に近い領域においてエネルギーの散逸が大きくなっていると言えよう。また、内空ひずみ1%付近から散逸エネルギー密度が急激に増えている。このことから、単位面積あたりで発生する散逸エネルギーの量が増加することによって周辺地盤が不可逆な状態になると考えることができよう。

4. あとがき 本文においては、粒状体モデルにより掘削に伴う空洞周辺地盤の解析を行い、変形の標準偏差を用いることによって、不均一な変形がゆるみに与える影響等について調べた。今回は省略したが粒子間の摩擦角と粘着力を変化させた場合についての解析も行っている。これと併せて、今後さらに多くの粒子数のモデルで解析を行なって実際の地盤内の空洞と対比するなどして、種々の検討を進めたいと考えている。

参考文献 1) 岸野佑次：新しいシミュレーション法を用いた粒状体の準動的挙動の解析、土木学会論文集、Vol.406/III-11, pp.97-106 (1989)。

2) Kishino, Y.: Quasi-static Simulation of Liquefaction Phenomena in Granular Materials, Proceedings of the Second International Symp. for Science on Form, pp. 157-174(1990)。

3) 岸野佑次、渡辺豊彦、鈴木淳志：空洞掘削に伴う不均一変形場の粒状要素解析、構造工学論文集、Vol.41A, (1995)

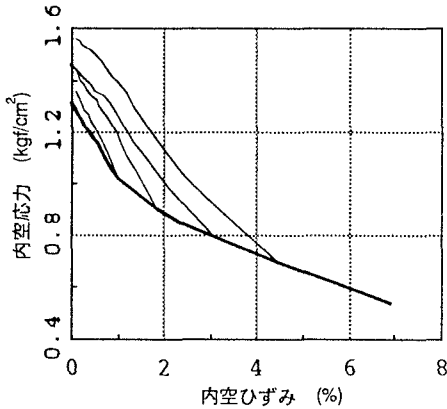


図4 内空応力-内空ひずみ曲線

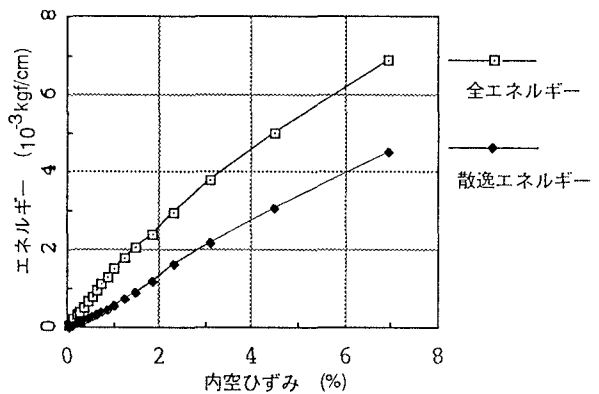
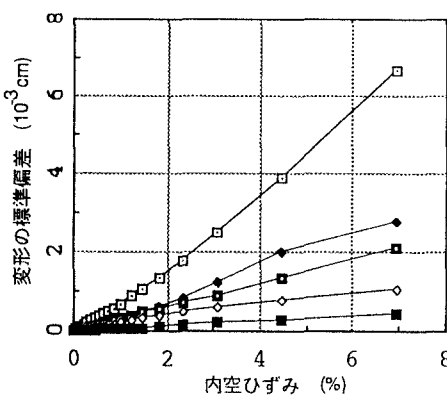
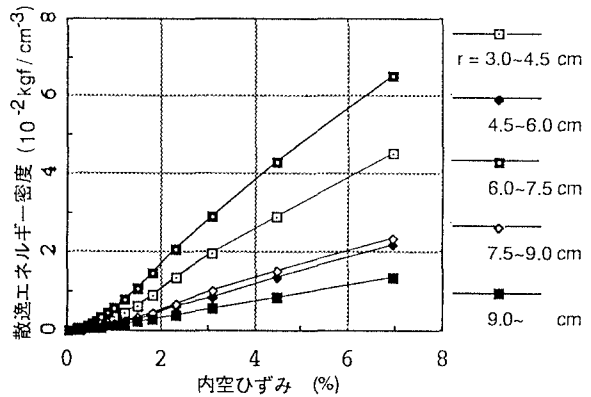


図5 全エネルギーと散逸エネルギー



(a)



(b)

図6 分割された領域における変形の標準偏差と散逸エネルギー