

III - 8

砂の供試体の変形の局所化に関する基礎的検討

東北大学 学○ 高村 浩之
東北大学 正 池田 清宏
東北大学 正 市村 強

1. はじめに

地盤材料の平面ひずみ供試体における圧縮せん断変形挙動では、袈裟懸け型やバルジ型などの様々な変形形態が観察されている¹⁾。このような変形形態の多様性に分岐が関与していることが明らかにされてきている。土の分岐は、せん断線形成分岐と拡散型分岐とに大別される。拡散型分岐の数値シミュレーションも行われており、拡散型分岐による変形がせん断線形成を誘発するという仮説も提案されている²⁾。しかし、実験における分岐の発現を特定することは、現状では困難である。そこで本研究では、実験と理想化した分岐解析を比較することにより、両者の整合性を検討するとともに、分岐解析の限界について明らかにすることとする。また比較には、実験から得られた供試体の変形画像に対して、PIV（粒子画像流速計測法）を用いることにより、供試体の変位場の経時変化を求め、供試体内部で起きている局所化のメカニズムを調べる。

2. 実験方法

実験は、図-1の左図のように、豊浦砂を用いて、端面摩擦無し、載荷速度一定、両面排水、側圧一定の条件の下で平面ひずみ圧縮試験を行う。載荷速度は0.10%/min、側圧は49(kPa)で一定とし、計測は30秒毎に行った。供試体の潤潤密度は $\rho_t=1.95(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、間隙比は $e=0.354$ 、飽和度は $S_r=0.928(\%)$ である。供試体の寸法は幅2(cm)、高さ5(cm)、厚さ2(cm)で一定とし、解析は実験と同様に、形状比 $R=H_0/W_0=2.0$ として行った。

3. 分岐解析

分岐解析には、山川ら³⁾の開発した弾塑性有限要素解析法を用いた。完全弾塑性を仮定し、降伏基準はDrucker-Pragerモデルを用いた。解析モデルの境界条件では、図-1より、実験で想定している境界条件と違い、供試体中心部を完全固定としている。これは、実験から得られた画像データを、PIVにより画像解析をした結果、中心部はほぼ変位しないという結果によるものであり、この境界条件は妥当であると判断した。

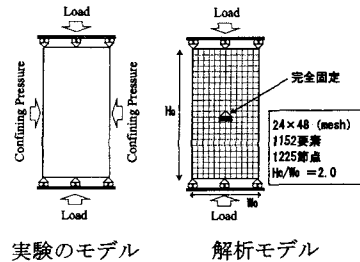


図-1 実験と解析の境界条件の比較

3.1 解析に用いた材料パラメータの算定

平面ひずみ圧縮試験の図-2の結果から、軸ひずみ約1.3%までの25個の計測点を用いて得られた弾性係数 $E=11.5\text{MPa}$ 、摩擦角は $\hat{\theta}=30^\circ$ を用い、ポアソン比 $\nu=0.3$ とした。実験では、供試体に拘束圧を与えることにより形状を保たせているが、本解析では、この拘束圧を与えた状態における供試体の粘着力をみかけの粘着力として与えることを考え、粘着力 $\hat{c}=77.4\text{kPa}$ を用いた。そのため実際の粘着力とは差異があるが、実験とピーク強度が整合するように定めている。 $\hat{\tau}_{y0}$ 、 β_ϕ については、Mohr-Coulombの粘着力 $\hat{c}$ および摩擦角 $\hat{\theta}$ により、

$$\hat{\tau}_{y0} = \frac{6\hat{c} \cos \hat{\theta}}{\sqrt{3}(3 + A \sin \hat{\theta})} \quad (1)$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}}\beta_\phi = \frac{6\hat{c} \sin \hat{\theta}}{\sqrt{3}(3 + A \sin \hat{\theta})} \quad (2)$$

のように決定することができる。 $-1 \leq A \leq 1$ は定数で、 $A=-1$ 、 1 の時に、Drucker-Prager降伏面はMohr-Coulombの降伏面のそれぞれ外側、内側の包絡線となる。ここでは、実験から得られた内部摩擦角を用いた上で、図-2のピーク強度と変形モードが整合するように $A=1$ とし、式(1)、式(2)から、 $\hat{\tau}_{y0}=66.3\text{kPa}$ 、 $\beta_\phi=0.699$ が求められた。以上から得られた材料パラメータを表-1に示す。

E	12(MPa)	$\hat{c}$	0.0774(MPa)
ν	0.3	$\hat{\tau}_{y0}$	0.0663(MPa)
θ	30°	β_ϕ	0.699

表-1 材料パラメータ

4. 適用例

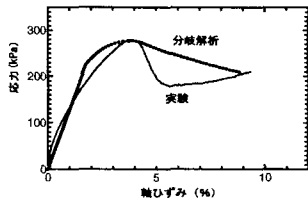


図-2 応力-ひずみ曲線

実験と解析から得られた応力ひずみ曲線を図-2に示す。図-2により、軸ひずみ $\varepsilon=1.8\%$ までは、どちらのグラフもほぼ弾性的に推移し、軸ひずみ $\varepsilon=1.8\%$ からピーク時の軸ひずみ $\varepsilon=3.9\%$ においては、実験によるグラフのほうが、やや緩やかな傾きを示している。応力がピークに達すると、実験では急激に強度が低下するのに比べ、解析では強度は緩やかに低下していく。応力がピークを過ぎてからの強度の変化は、実験では、境界条件が複雑に変化していくため、応力ひずみ曲線は一致しないと考えられる。

次に、この図-2の結果を、実験により得られた変位ベクトル図-3と分岐解析により得られた変位ベクトル図-4の2つの変位ベクトル分布図を用いて、局所変形挙動の考察を行う。なお図-3は、局所変形をPIVにより可視化したものである。図-3と図-4より、軸ひずみ $\varepsilon=1.8\%$ 付近までは、どちらも均質な変形を保っているが、その後、実験では構型への急激な変形が確認できた。これにより、供試体の軟化領域が袈裟切り型に徐々に進展し、実験ではやや傾きが緩やかなグラフになると考えられる。これに対し、解析でも、軸ひずみ約 $\varepsilon=1.8\%$ で横方向への急激な膨張が見られ、グラフの傾きもやや緩やかに推移しており、変形モードはやや一致していると言える。しかし構型ではないのは、設定した材料定数によるものであると考えられる。その後、実験と解析において、軸ひずみ $\varepsilon=3.9\%$ でピークを迎えるが、実験では軟化領域が徐々に袈裟切り型に進展した後、一方向がせん断帯を形成していくのに対し、解析では、軸ひずみ $\varepsilon=3.7\%$ において、変形が瞬間的に小さくなった。これは、この分岐解析では、基本経路から分岐経路の強制的な経路移行のためと考えられる。さらにこのピーク付近以降は、実験において局所的に明らかな切れを伴うせん断帯が生じるため、境界条件が複雑に変化し急激な応力の低下が見られた。一方解析では、連続体であるため、切れる

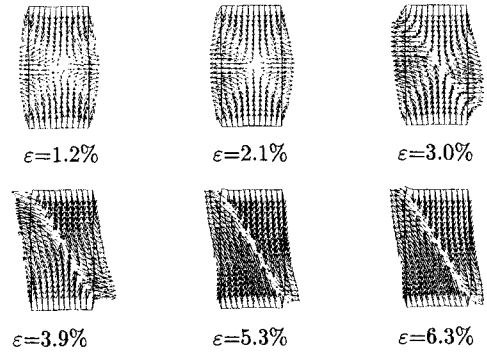


図-3 実験による変位ベクトル図

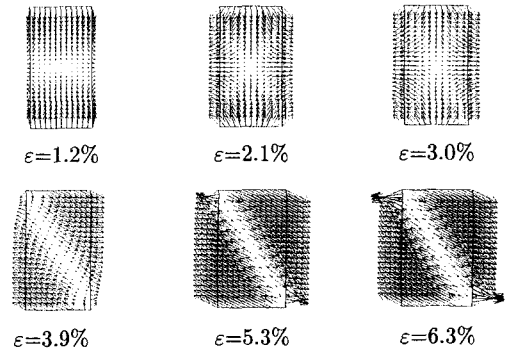


図-4 解析による変位ベクトル図

ことなくせん断帯を形成していく。そのため強度は緩やかな低下を示すとともに、連続体近似としての限界である考えられる。また解析では、切れることなく大きな体積膨張を起こすため、せん断帯は、実際よりも太く表現されている。

5. 結論

本研究により、数値解析での弾性域での応力ひずみ曲線や変形の表現は可能であるが、実験では、分岐後から徐々に不連続体の性質が卓越するため、連続体近似は困難であった。そのため、分岐後は不連続体の性質を考慮した数値モデルの検討が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) Tatsuoka, F., Nakamura, S., Huang, C., and Tani, K.: Strength anisotropy and shear direction in plane strain tests of sand, *Soils and Foundations*, Vol. 30, No. 1, pp. 35-54, 1990.
- 2) Ikeda, K., Yamakawa, Y., and Tsutsumi, S.: Simulation and interpretation of diffuse mode bifurcation of elastoplastic solids, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 23, pp. 239-264, 2003.
- 3) 山川 優樹 他: 圧縮場における弾塑性体の分岐解析とパスジャンプ挙動. 土木学会論文集, No. 701/III-58, pp. 73-86, 2002.