III－582　多次元解析に用いる簡易な構成則　その２　ダイレタンシーの考慮

佐藤工業（株）　正会員　吉田望、辻野修一、中島智樹
東京電力（株）　正会員　矢野康明

1　はじめに

多次元解析では各種の応力経路が想定され、構成則は一般にその全てを満たそうとするので式が複雑であったり、パラメータが多くなったりする。筆者らは目的を限れば簡易な構成則が使えるとの観点から、体積変化とせん断変形を分離し、せん断変形に着目した簡易な構成則を提案した[1)]。そこではダイレタンシーは考慮しなかったが、簡単な応力－ダイレタンシー関係を使って、ダイレタンシーについてもある程度実用的な結果が得られる見通しがついたので報告する。

2　提案する方法の考え方

基本的な手法については前報で示しているが、①せん断成分と体積変化成分が分離できるとする、②ダイレタンシーによる体積ひずみは必要なら別途考慮するの二つの方針を設けている。体積変化に対する拘束圧増分dpは、接線体積係数B、全体積ひずみ増分$d\varepsilon_v$、ダイレタンシーによる体積ひずみ増分$d\varepsilon_{vd}$より、次式で表される。

$$dp = B\left(d\varepsilon_v - d\varepsilon_{vd}\right) \tag{1}$$

前報ではダイレタンシーを考慮しなかったので、$d\varepsilon_{vd} = 0$としたが、ここでは、ダイレタンシーによる体積ひずみは、応力－ダイレタンシー関係を用い、次のようにして計算する。

$$\frac{d\varepsilon_{vd}}{de} = \mu \mp \frac{\sigma_e}{p} \qquad (\text{複号は}d\sigma_e > 0\text{のとき負}) \tag{2}$$

ここで、σ_eは相当応力、eは相当ひずみ、μは材料によって決る定数である。なお、応力、ひずみとも圧縮成分を正にとっている。以上の諸量は与えられたせん断ひずみから計算できる。また、せん断変形では拘束圧の変化は生じないので、以後は拘束圧が既知であるとして計算ができる。

せん断変形に関し、拘束圧依存性を考慮するため、次の無次元量を用いる。

$$\eta = \frac{\sigma_e}{\tau_{\max}}, \quad \xi = \frac{e \cdot G_{\max}}{\tau_{\max}} \tag{3}$$

ここで、G_{max}は微小ひずみ時のせん断弾性係数、τ_{max}はせん断強度である。無次元相当応力－無次元相当ひずみ関係を次のように表す。

$$\eta = \eta(\xi) \tag{4}$$

式(4)には拘束圧が陽な形で入っていない。拘束圧が陽な形で入らない任意の関数形が使えるのが本手法の特徴であり、前報で示したように双曲線モデルやRamberg-Osgoodモデルと言ったよく使われるモデル以外に多くのモデルを使うことが出来る。式(4)より偏差ひずみ増分de_{ij}に対する無次元量

$$d\xi_{ij} = de_{ij}\overline{G}_{\max} / \overline{\tau}_{\max} \tag{5}$$

と接線剛性$g = d\eta / d\xi$を用いれば、増分後の偏差応力s_{ij}は次式により求めることができる。

$$s_{ij} = \left(\eta_{B,ij} + g d\xi_{ij}\right)\tau_{\max} \tag{6}$$

ここで、$\eta_{B,ij}$は増分計算前の偏差応力比である。

除荷以降は、無次元偏差応力比で表した空間上で除荷するたびに、除荷点で以前の記憶曲面に接する新しい記憶曲面を確保していくとする。除荷点からこの記憶曲面の中心を向かうベクトルを応力比として無次元化接線剛性gとすれば丁度相似比が2のMasing則に対応している。他の相似比に対してはこのベクトルを何倍かすればよい。また処女載荷時と除荷・再載荷時で異なる関数形を使えばより実験値とフィットさせることが出来るようになる。

3　計算例

豊浦標準砂を用いた平面ひずみ圧縮試験の結果をシミュレートする。実験の供試体サイズは幅16cm、高さ20cm、奥行き8cmで、空中落下法により作成（初期間隙比e≈0.65）したのち、所定の拘束圧（0.15、0.5、0.8kgf/cm^2）まで等方圧縮した後、平面ひずみ状態で圧縮したものである。図1に点線で実験結果を示す。なお、体積ひずみに関してはひずみの大きいところで側方変位が計測出来なかったので途中までの結果を示している。

解析では、式(4)の関数形として双曲線モデルを用いた。ただし、終局強度については、DuncanとChangによる補正[2)]を行い、破壊以前のフィットをよくしている。すなわち、

$$\eta = \frac{\xi}{1+R_f\xi} \tag{7}$$

ここで、R_fは材料のせん断強度のモデルのせん断強度に対する比である。なお、せん断応力が材料のせん断強度を越えた場合には、$g=0$とし、せん断強度を越える応力を発生しないようにしている。

内部摩擦角ϕ=49°、微小ひずみ時のせん断剛性$G=170(\sigma_m')^{0.47}$、体積弾性係数$K=365(\sigma_m')^{0.47}$ $(\mathrm{kgf/cm^2})$、せん断強度比$R_f=0.89$、変相時の応力比$\mu=0.52$を計算に用いた。この内、ϕ、Gは実験値の平均、Kはポアソン比を0.3として決めた。また、R_f、μは調整パラメータして実験値に合わせるように決めた。図1に実験値との比較を示すが、有効拘束圧、せん断変形が大きく変化する条件下にも関わらず、解析は実験結果とよく一致している。

4　おわりに

ここで提案したモデルは、基本的には、DuncanとChangが提案したモデル[2)]を、繰り返し載荷に適用出来る、任意の関数形が使えるの2点で改良したものであるが、本報で示したダイレタンシーを取り入れることによって彼らが述べていた体積変化に対する予測の悪さを大きく改良することが出来る。なお、ここでは、単調載荷のみを扱ったが、式(2)では、繰返し載荷を受けるとダイレタンシーによる体積ひずみが無限に大きくなり得るので、同じ式が繰り返し載荷の場合に適用出来るかについては問題もありそうなので、今後の検討課題としたい。

参考文献

1) 吉田望、辻野修一、多次元解析に用いる簡易な構成則、第28回土質工学研究発表会、1993年（投稿中）

2) Duncan,J.M. and Chang,C.-Y., Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils, Jour. SM, Proc., ASCE, Vol.96, No.SM5, pp.1629-1653, 1970

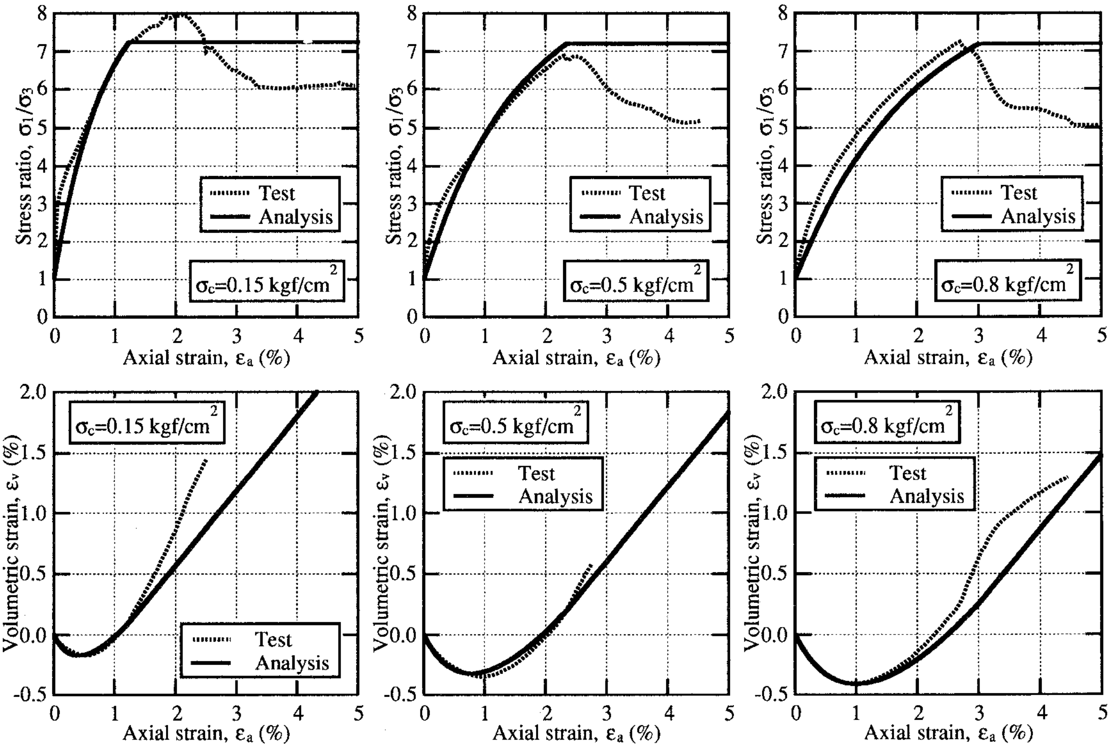

図1 解析と実験の比較