

簡便な非排水弾塑性構成則を用いた 要素シミュレーション

篠田昌弘¹・澤田亮²・松丸貴樹³

¹(株)複合技術研究所 技術部(前(財)鉄道総合技術研究所に出向)
(〒102-0072 東京都千代田区飯田橋4-6-9-6F)

E-mail:shinoda@igi.co.jp

²鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:sawada@rtri.or.jp

³鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:matumaru@rtri.or.jp

近年、多くの研究機関で許容応力度法を用いた設計法から性能照査型の設計法への移行が進められている。ある限界状態の下で構造物の性能を照査するには定量的な評価が必要となる場合があるが、それには現象を定量的に上手く表現でき、且つ入力パラメーターの少ない実務的な構成則が不可欠となる。本検討で用いた構成則は鵜飼・若井モデルを参考に骨格曲線と履歴曲線双方にHDモデルと同様な双曲線を適用した。また、塑性ポテンシャルには鵜飼・若井モデルと同様にRoweのStress-dilatancy則を適用した。構築した構成則を用いて非排水単調載荷と非排水繰返し載荷を行い、モデルの妥当性を検証した。

Key Words : Constitutive model, Undrained, Cyclic shear

1. はじめに

近年、多くの研究機関で許容応力度法を用いた設計法から性能照査型の設計法への移行が進められている。ある限界状態の下で構造物の性能を照査するには、大きく分けて3つの手法がある。第1に、照査式を用いて簡便に照査する手法である。この手法は従来から用いられてきた安全率の算定式を基本にコードキャリブレーションで得られた安全係数を用いて照査する手法である。第2に簡便な変形量予測式を用いて定量的に照査する手法である。地震時の盛土の照査において例を挙げると、Newmark法が挙げられる。第3に有限要素法や有限差分法などを用いた詳細な数値解析手法が挙げられる。この手法を用いるにあたっては、構造工学や地盤工学に対する十分な知識と数値解析における経験が必要となる。詳細な数値解析手法の長所は、構造物の破壊形態や応力状態などを時々刻々把握することが可能であり、構造物の変形を詳細に検討することができることである。短所としては、入力パラメーターが比較的多く、設定に労力を費やすこと、また、計算時間が比較的に長いこと、

計算コストがかかることなどである。

本研究では、上記の詳細な数値解析手法の短所である入力パラメーターの多さ、設定の煩雑さを解消するために、比較的簡便な非排水弾塑性構成則を提案する。入力パラメーターの個数は極力少なくし、物理的意味がある入力パラメーターを極力採用する。構成則の開発にあたっては、鵜飼・若井モデル¹⁾を参考にした。

2. 弾塑性構成則

(1) 概要

本検討で用いた構成則は鵜飼・若井モデル¹⁾を参考にした。鵜飼・若井モデルではせん断剛性とせん断ひずみの関係と、減衰率とせん断ひずみの関係双方を精度良く再現するために、骨格曲線にはHardin-Drnevich (HD) モデル²⁾と同様に双曲線を適用し、履歴曲線にはMasing則を満足するようにHDモデルを修正した式を適用している。また、繰返し載荷中の体積変化を考慮するために塑性ポテンシャルにRoweのStress-dilatancy式³⁾を適用している。

本検討では、骨格曲線と履歴曲線双方にHDモデルと同様な双曲線を適用した。また、塑性ポテンシャルには鵜飼・若井モデルと同様にRoweのStress-dilatancy則を適用した。なお、本構成則は2次元平面ひずみ状態での構成則であり、奥行き方向は考慮していない。

(2) 降伏関数

a) 定義

本検討で用いた骨格曲線と履歴曲線の降伏関数を以下に示す。

$$f = \tau - \frac{G_0 \gamma}{1 + \frac{G_0 \gamma}{\tau_f}} \quad (1)$$

$$\tilde{f} = \tilde{\tau} - \frac{G_0 \tilde{\gamma}}{1 + \frac{G_0 \tilde{\gamma}}{2\tau_f}} \quad (2)$$

ここで、 f と $\tilde{f}$ は降伏関数、 τ と $\tilde{\tau}$ はせん断応力であり、下記のように定義する。

$$\tau = \sqrt{\left(\frac{(\sigma_x - \sigma_{x0}) - (\sigma_y - \sigma_{y0})}{2} \right)^2 + (\tau_{xy} - \tau_{xy0})^2} \quad (3)$$

$$\tilde{\tau} = \sqrt{\left(\frac{(\sigma_x - \sigma_{xa}) - (\sigma_y - \sigma_{ya})}{2} \right)^2 + (\tau_{xy} - \tau_{xya})^2} \quad (4)$$

ここで、 σ_{x0} と σ_{y0} は载荷初期のx方向とy方向の応力、 σ_{xa} と σ_{ya} は補正後の折り返し点におけるx方向とy方向の応力である。折り返し点の補正の方法に関しては後述する。 γ と $\tilde{\gamma}$ はせん断ひずみであり、下記のように定義する。

$$\gamma = \sqrt{\left\{ (\varepsilon_x - \varepsilon_{x0}) - (\varepsilon_y - \varepsilon_{y0}) \right\}^2 + (\gamma_{xy} - \gamma_{xy0})^2} \quad (5)$$

$$\tilde{\gamma} = \sqrt{\left\{ (\varepsilon_x - \varepsilon_{xa}) - (\varepsilon_y - \varepsilon_{ya}) \right\}^2 + (\gamma_{xy} - \gamma_{xya})^2} \quad (6)$$

ここで、 ε_{x0} と ε_{y0} は载荷初期のx方向とy方向のひずみ、 ε_{xa} と ε_{ya} は折り返し点におけるx方向とy方向のひずみである。式(1)と式(2)の G_0 は式(7)で示すせん断弾性係数である。

$$G_0 = G_{0a} \left(\frac{P}{p_a} \right)^{0.5} \quad (7)$$

ここで、 p は平均有効応力、 p_a は基準となる平均有効応力、 G_{0a} は平均有効応力 p_a でのせん断弾性係数である。式(1)と式(2)中の τ_f は式(8)で示すせん断強度である。

$$\tau_f = c + p \sin \phi \quad (8)$$

ここで、 c は土の粘着力、 ϕ は土の内部摩擦角である。本検討では簡便のため、式(8)の粘着力をゼロとしている。

b) 応力に関する偏微分

弾塑性係数マトリックスを求めるためには、降伏関数の応力に関する偏微分とひずみに関する偏微分を求める必要がある。以下、それぞれの偏微分を示す。式(1)で示した降伏関数の応力に関する偏微分は以下のように算出できる。

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial f}{\partial \sigma_x} \\ \frac{\partial f}{\partial \sigma_y} \\ \frac{\partial f}{\partial \tau_{xy}} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial \tau}{\partial \sigma_x} - \frac{\partial}{\partial \sigma_x} \left(\frac{G_0 \gamma}{1 + \frac{G_0 \gamma}{\tau_f}} \right) \\ \frac{\partial \tau}{\partial \sigma_y} - \frac{\partial}{\partial \sigma_y} \left(\frac{G_0 \gamma}{1 + \frac{G_0 \gamma}{\tau_f}} \right) \\ \frac{\partial \tau}{\partial \tau_{xy}} - \frac{\partial}{\partial \tau_{xy}} \left(\frac{G_0 \gamma}{1 + \frac{G_0 \gamma}{\tau_f}} \right) \end{Bmatrix} \quad (9)$$

式(9)の第2項を整理する。まず、 τ_c を以下のようにおく。

$$\tau_c = \frac{G_0 \gamma}{1 + \frac{G_0 \gamma}{\tau_f}} \quad (10)$$

降伏関数の応力に関する偏微分を求めるためには、式(10)の応力に関する偏微分を求める必要があり、下記のように算出できる。

$$\frac{\partial \tau_c}{\partial \sigma_x} = \frac{p \gamma \left(G_0 p_a + \frac{2 G_{0a}^2 \gamma}{\sin \phi} \right)}{4 p_a \left(p + \frac{G_0 \gamma}{\sin \phi} \right)^2} \quad (11)$$

$$\frac{\partial \tau_c}{\partial \sigma_y} = \frac{p\gamma \left(G_0 p_a + \frac{2G_0^2 \gamma}{\sin \phi} \right)}{4p_a \left(p + \frac{G_0 \gamma}{\sin \phi} \right)^2} \quad (12)$$

$$\frac{\partial \tau_c}{\partial \tau_{xy}} = 0 \quad (13)$$

式(9)のせん断応力の応力に関する偏微分を求めた後に、式(11)から式(13)を式(9)に代入することで、式(1)で示した降伏関数の応力に関する偏微分が求まる。

同様に、式(2)で示した降伏関数の応力に関する偏微分は以下のように求めることができる。

$$\left\{ \begin{array}{c} \frac{\partial \tilde{f}}{\partial \sigma_x} \\ \frac{\partial \tilde{f}}{\partial \sigma_y} \\ \frac{\partial \tilde{f}}{\partial \tau_{xy}} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \frac{\partial \tilde{\tau}}{\partial \sigma_x} - \frac{\partial}{\partial \sigma_x} \left(\frac{G_0 \tilde{\gamma}}{1 + \frac{G_0 \tilde{\gamma}}{2\tau_f}} \right) \\ \frac{\partial \tilde{\tau}}{\partial \sigma_y} - \frac{\partial}{\partial \sigma_y} \left(\frac{G_0 \tilde{\gamma}}{1 + \frac{G_0 \tilde{\gamma}}{2\tau_f}} \right) \\ \frac{\partial \tilde{\tau}}{\partial \tau_{xy}} - \frac{\partial}{\partial \tau_{xy}} \left(\frac{G_0 \tilde{\gamma}}{1 + \frac{G_0 \tilde{\gamma}}{2\tau_f}} \right) \end{array} \right\} \quad (14)$$

同様に、式(14)の第2項を整理する。 $\tilde{\tau}_c$ を以下のようにおく。

$$\tilde{\tau}_c = \frac{G_0 \tilde{\gamma}}{1 + \frac{G_0 \tilde{\gamma}}{2\tau_f}} \quad (15)$$

$\tilde{\tau}_c$ の応力に関する偏微分は以下のように算出できる。

$$\frac{\partial \tilde{\tau}_c}{\partial \sigma_x} = \frac{\tau_f \tilde{\gamma} (G_0^2 \tilde{\gamma} + G_0 p_a \sin \phi)}{p_a (G_0 \tilde{\gamma} + 2\tau_f)^2} \quad (16)$$

$$\frac{\partial \tilde{\tau}_c}{\partial \sigma_y} = \frac{\tau_f \tilde{\gamma} (G_0^2 \tilde{\gamma} + G_0 p_a \sin \phi)}{p_a (G_0 \tilde{\gamma} + 2\tau_f)^2} \quad (17)$$

$$\frac{\partial \tilde{\tau}_c}{\partial \tau_{xy}} = 0 \quad (18)$$

式(14)のせん断応力の応力に関する偏微分を求めた後に、式(16)から式(18)を式(14)に代入することで、式(2)で示した降伏関数の応力に関する偏微分が求まる。

c) ひずみに関する偏微分

式(1)と式(2)で示した降伏関数のひずみに関する偏微分はそれぞれ以下のように算出できる。

$$\left\{ \begin{array}{c} \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_x} \\ \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_y} \\ \frac{\partial f}{\partial \gamma_{xy}} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \frac{\partial f}{\partial \gamma} \frac{\partial \gamma}{\partial \varepsilon_x} \\ \frac{\partial f}{\partial \gamma} \frac{\partial \gamma}{\partial \varepsilon_y} \\ \frac{\partial f}{\partial \gamma} \frac{\partial \gamma}{\partial \gamma_{xy}} \end{array} \right\} \quad (19)$$

$$\left\{ \begin{array}{c} \frac{\partial \tilde{f}}{\partial \varepsilon_x} \\ \frac{\partial \tilde{f}}{\partial \varepsilon_y} \\ \frac{\partial \tilde{f}}{\partial \gamma_{xy}} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \frac{\partial \tilde{f}}{\partial \tilde{\gamma}} \frac{\partial \tilde{\gamma}}{\partial \varepsilon_x} \\ \frac{\partial \tilde{f}}{\partial \tilde{\gamma}} \frac{\partial \tilde{\gamma}}{\partial \varepsilon_y} \\ \frac{\partial \tilde{f}}{\partial \tilde{\gamma}} \frac{\partial \tilde{\gamma}}{\partial \gamma_{xy}} \end{array} \right\} \quad (20)$$

式(19)と式(20)は以下のように整理できる。

$$\left\{ \begin{array}{c} \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_x} \\ \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_y} \\ \frac{\partial f}{\partial \gamma_{xy}} \end{array} \right\} = - \frac{G_0 \tau_f^2}{(G_0 \gamma + \tau_f)^2} \left\{ \begin{array}{c} \frac{\partial \gamma}{\partial \varepsilon_x} \\ \frac{\partial \gamma}{\partial \varepsilon_y} \\ \frac{\partial \gamma}{\partial \gamma_{xy}} \end{array} \right\} \quad (21)$$

$$\left\{ \begin{array}{c} \frac{\partial \tilde{f}}{\partial \varepsilon_x} \\ \frac{\partial \tilde{f}}{\partial \varepsilon_y} \\ \frac{\partial \tilde{f}}{\partial \gamma_{xy}} \end{array} \right\} = - \frac{4G_0 \tau_f^2}{(G_0 \gamma + 2\tau_f)^2} \left\{ \begin{array}{c} \frac{\partial \tilde{\gamma}}{\partial \varepsilon_x} \\ \frac{\partial \tilde{\gamma}}{\partial \varepsilon_y} \\ \frac{\partial \tilde{\gamma}}{\partial \gamma_{xy}} \end{array} \right\} \quad (22)$$

式(21)と式(22)のせん断ひずみのひずみに関する偏微分を求めることで、式(1)と式(2)で示した降伏関数のひずみに関する偏微分を求めることができる。

(3) 塑性ポテンシャル

本検討で用いた塑性ポテンシャルは式(23)と式(24)に示すように鵜飼・若井モデルと同じもの (RoweのStress-dilatancy式) を用いた。

$$g = \frac{\sigma_1^{Kcv}}{\sigma_3} \quad (23)$$

$$\hat{g} = \frac{\hat{\sigma}_1^{Kcv}}{\hat{\sigma}_3} \quad (24)$$

ここで、 g と $\hat{g}$ はそれぞれ骨格曲線と履歴曲線での塑性ポテンシャルであり、 Kcv はダイレタンシー係数である。 Kcv に関しては後に考察を行う。 σ_1 と σ_3 はそれぞれ最大主応力と最小主応力であり、 $\hat{\sigma}_1$ と $\hat{\sigma}_3$ は以下のように算出する。

$$\hat{\sigma}_1 = \tilde{\sigma}_1 + \sigma_{3a} \quad (25)$$

$$\hat{\sigma}_3 = \tilde{\sigma}_3 + \sigma_{1a} \quad (26)$$

ここで、 $\tilde{\sigma}_1$ と $\tilde{\sigma}_3$ は折り返し点を基準にした主応力、 σ_{1a} と σ_{3a} は折り返し点での主応力である。塑性ポテンシャルの応力に関する偏微分は比較的容易なため、ここでは省略する。

(4) 折り返し点の補正

本構成則では、応力-ひずみ関係が履歴曲線に従う場合では、折り返し点における応力を基準にして現在の応力の算定を行う。載荷および除荷中には、応力状態が変化するため、折り返し点も現在の応力状態に応じて変化させる必要がある。鵜飼・若井モデルにおいては、折り返し点の補正に式(27)と式(28)を用いている。

$$\sigma_{xa}^* = \sigma_{xa} + \alpha \quad (27)$$

$$\sigma_{ya}^* = \sigma_{ya} + \alpha \quad (28)$$

ここで、 σ_{xa}^* と σ_{ya}^* は更新された折り返し点である。 α は補正項であり、以下のように算出する。

$$\alpha = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_{1a} + \sigma_{3a}}{2} \quad (29)$$

上記の補正を用いて弾塑性構成則を構築し、非排水繰返し載荷を行った結果、 p - q 平面において、軟化時に原点に向かわない。つまり、土の非排水時の繰返し挙動を適切に表現できないことが分かった。そこで、本研究では上記の補正を主応力の折

り返し点を用いて以下のように修正した。

$$\sigma_{1a}^* = \sigma_{1a} + \sigma_{1a} \cdot \frac{\tilde{\sigma}_1 + \tilde{\sigma}_3}{\sigma_{1a} + \sigma_{3a}} \quad (30)$$

$$\sigma_{3a}^* = \sigma_{3a} + \sigma_{3a} \cdot \frac{\tilde{\sigma}_1 + \tilde{\sigma}_3}{\sigma_{1a} + \sigma_{3a}} \quad (31)$$

ここで、 σ_{1a}^* と σ_{3a}^* は更新された主応力の折り返し点である。本構成則では、式(30)と式(31)で示した補正された主応力の折り返し点を用いて折り返し点での応力の補正も行った。

3. ストレス・ダイレタンシー関係

ここでは、式(23)と式(24)で示したダイレタンシー係数である Kcv の物理的意味について考察を行う。また、簡単のため、鉛直方向の平面ひずみ状態での非排水単調載荷を対象とした。式(23)で示した塑性ポテンシャルの主応力に関する偏微分は以下のように算出できる。

$$\frac{\partial g}{\partial \sigma_1} = Kcv \frac{\sigma_1^{Kcv-1}}{\sigma_3} \quad (32)$$

$$\frac{\partial g}{\partial \sigma_3} = -\frac{\sigma_1^{Kcv}}{\sigma_3^2} \quad (33)$$

各軸方向の塑性ひずみ増分は、流れ則により次のように表すことができる。

$$d\varepsilon_1^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_1} \quad (34)$$

$$d\varepsilon_2^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_2} \quad (35)$$

ここで、 ε_1^p と ε_3^p は塑性最大主ひずみと塑性最小主ひずみであり、 $d\lambda$ は応力状態や載荷履歴に依存する正のスカラー量である。ストレス・ダイレタンシー関係は、塑性体積ひずみ増分 $d\varepsilon_v^p$ と塑性最大せん断ひずみ増分 $d\gamma^p$ の比として表すことができるので、それぞれは以下のように算出できる。

$$d\varepsilon_v^p = d\varepsilon_1^p + d\varepsilon_3^p = d\lambda \left(\frac{\partial g}{\partial \sigma_1} + \frac{\partial g}{\partial \sigma_3} \right) \quad (36)$$

$$d\gamma^p = d\varepsilon_1^p - d\varepsilon_3^p = d\lambda \left(\frac{\partial g}{\partial \sigma_1} - \frac{\partial g}{\partial \sigma_3} \right) \quad (37)$$

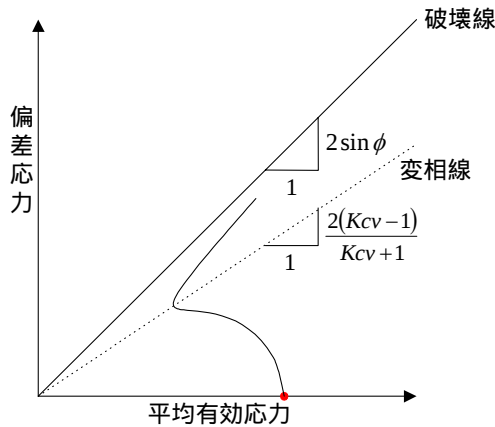


図-1 ダイレタンシー係数と変相線の関係

よって，ストレス・ダイレタンシー関係は以下
のようになる．

$$\frac{d\varepsilon_v^p}{d\gamma^p} = 1 - \frac{2\sigma_1}{\sigma_1 + Kcv \cdot \sigma_3} \quad (38)$$

式(38)がゼロとなったときの p' と q の比が変相角で
あり，以下のように求めることができる（図-1）．

$$\frac{q}{p'} = \frac{2(Kcv-1)}{Kcv+1} \quad (39)$$

平面ひずみ状態での非排水単調載荷中に正のダイ
レタンシーが生じるためには，破壊線以下である
必要があるため，下記の条件を満たす必要がある．

$$\frac{q}{p'} = \frac{2(Kcv-1)}{Kcv+1} < 2 \sin \phi \quad (40)$$

よって，正のダイレタンシーを発揮させる場合に
は， Kcv は以下の条件を満たす必要がある．

$$Kcv < \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (41)$$

4．非排水単調載荷のシミュレーション

(1) 解析条件

提案した構成則を用いて，2次元平面ひずみ状態
における非排水単調載荷を行う．載荷は変位制御
とした．簡単のため，モデルは1cmの正方形の1要
素モデルとした．非排水状態を再現するために，
等体積条件で載荷を行う必要があるため，境界条
件は図-2に示す通りに設定した．入力値を表-1に

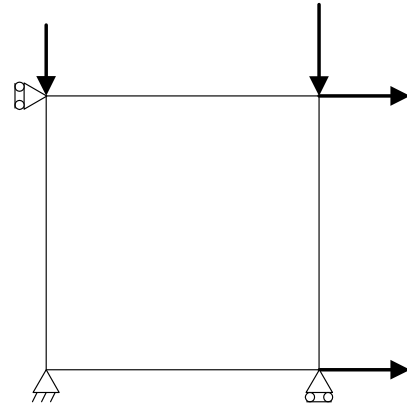


図-2 非排水単調載荷における1要素モデル

表-1 非排水単調載荷における入力パラメーター

No.	γ (kN/m ³)	ϕ (度)	ν	G_a (kPa)	Kcv
1	21.0	30	0.3	21429	2.0
2	21.0	30	0.3	21429	2.2
3	21.0	30	0.3	21429	2.4
4	21.0	30	0.3	21429	2.6
5	21.0	30	0.3	21429	2.8
6	21.0	30	0.3	21429	3.0

注) G_a は $p_a = 29$ kPaでの値とする．

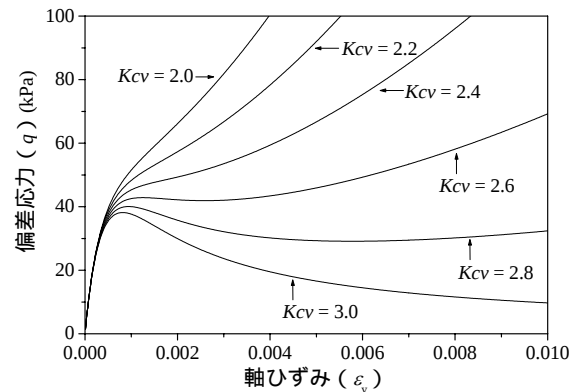


図-3 非排水単調載荷における軸ひずみと偏差応力の関
係に与えるダイレタンシー係数の影響

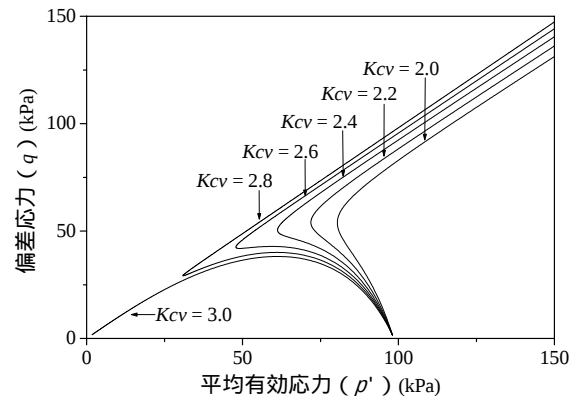


図-4 非排水単調載荷における平均有効応力と偏差応力
の関係に与えるダイレタンシー係数の影響

示す．入力値はダイレタンシー係数のみを変化させて，その他のパラメーターは変化させなかった．

(2) 解析結果

図-3に非排水単調載荷における軸ひずみと偏差応力の関係，図-4に同じ条件下における平均有効応力と偏差応力の関係を示す．図-3と図-4からダイレタンシー係数を2.0から3.0に増加させることで，地盤材料の密度が密な状態から疎な状態を表現できていることが分かる．また，解析条件から土の内部摩擦角が30度であるので p - q 平面での破壊線の水平面からの角度は45度となる．式(40)からダイレタンシー係数が3.0のときに，この破壊線と一致するので正のダイレタンシーは発揮できずに軟化していることが分かる．一方，ダイレタンシー係数が3.0未満の場合には，軸ひずみの進行とともにひずみ軟化挙動からひずみ硬化挙動を滑らかに表現できていることが分かる．以上のことから，ダイレタンシー係数の設定方法は非常に重要であり，今後検討していく必要がある．

5．非排水繰返し載荷のシミュレーション

(1) 解析条件

提案した構成則を用いて，2次元平面ひずみ状態における非排水繰返し載荷を行った．解析条件としては，ダイレタンシー係数の設定と境界条件以外では，単調載荷の場合と同じ条件である．非排水繰返し載荷では，土が密な場合と疎な場合として，ダイレタンシー係数を2.0と2.5の2通り設定した．図-5に境界条件を示す．

(2) 解析結果

図-6に非排水繰返し載荷におけるせん断ひずみとせん断応力の関係，図-7に同じ条件下における平均有効応力とせん断応力の関係を示す．図-6と図-7からダイレタンシー係数の相違により挙動が大きく異なっていることが確認できる．ダイレタンシー係数が2.0の場合では土は比較的密なため，繰返し載荷中のひずみは比較的大きくなく，検討した範囲内では液状化は生じていない．一方，ダイレタンシー係数が2.5の場合では，繰返し回数が約1回で軟化しており，ひずみも大きくなっている．また，単調載荷の場合と同様に繰返し載荷中は応力・ひずみとも滑らかに推移している．さらに，単調載荷の場合と同様に変相線を越える前は負のダイレタンシーによりひずみ軟化が生じており，変相線を越えると正のダイレタンシーが発揮することによりひずみ硬化が生じている．これらの傾向は，定性的に実験結果と一致する．

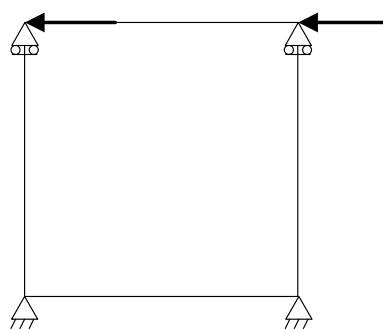


図-5 非排水繰返し載荷における1要素モデル

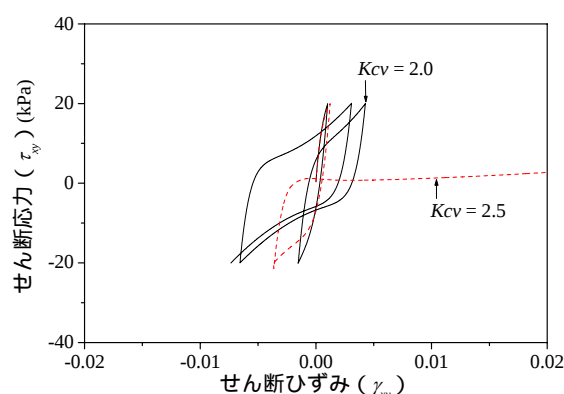


図-6 非排水繰返し載荷におけるせん断ひずみとせん断応力の関係

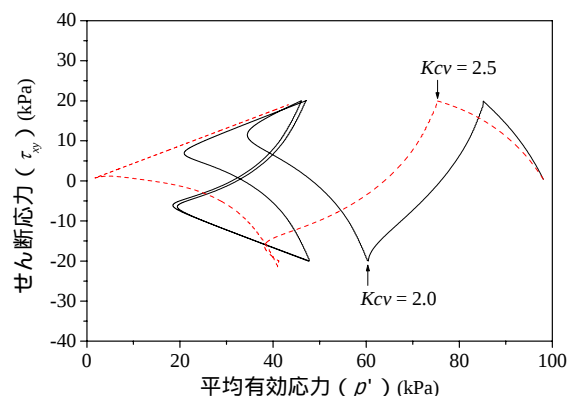


図-7 非排水繰返し載荷における平均有効応力とせん断応力の関係

6．まとめ

鵜飼・若井モデルを参考にして非排水弾塑性構成則の開発を行った．提案する構成則は，従来の構成則の欠点だった入力パラメーター設定の煩わしさを改善しており，比較的容易に入力パラメーターの設定が可能である．本構成則を用いて，1要素モデルにおいて非排水単調載荷と非排水繰返し載荷を行った結果，解析結果は土の挙動を表現で

きることが分かった．今後は本構成則を3次元に拡張し，複雑な載荷条件や地盤条件に対する有効性を確認していきたい．また，本報告で提案した構成則は主に砂を対象とした構成則であるが，今後は土の粘性を考慮した弾粘塑性構成則の開発を行う予定である．

謝辞：本研究は国土交通省からの補助金を受けて得られた研究成果の一部である．

参考文献

- 1) Wakai, A. and Ugai, K.: A simple constitutive model for the seismic analysis of slopes and its application, *Soil and Foundations*, Vol. 44, No. 4, pp. 83-97, 2004.
- 2) Hardin, B. O. and Drnevich, V. P.: Shear modulus and damping in soils, Design equations and curves, *Proc. ASCE*, 98 (SM7), pp. 667-692, 1972.
- 3) Barden, L., Ismail, H. and Tong, P.: Plane strain deformation of granular material at low and high pressure, *Geotechnique*, 19 (4), pp. 441-452, 1969.