

粒状路盤材料の繰返し塑性解析に関する基礎的研究

東京農業大学 生産環境工学科 正会員 竹内 康
 国立石川高専 環境都市工学科 正会員 西澤辰男
 東京農業大学 生産環境工学科 正会員 小梁川雅
 日本道路(株) 技術研究所 正会員 遠藤 桂

1.はじめに 交通荷重が繰返し作用することによって路盤や路床に塑性変形が生じ、コンクリート舗装では路盤反力の低下による疲労破壊の促進、アスファルト舗装ではわだち掘れの原因となる。筆者の一人は、拡張 SMP 基準を採用した修正 Cam-Clay モデルの硬化パラメータおよび硬化関数を改良した弾塑性解析モデル(以下本モデル)を提案し、路盤・路床材料およびアスファルト混合物への適用性について検討した¹⁾。しかし、繰返し塑性問題への適用性については検討していない。そこで、本研究では塑性ひずみ増分算出に関して若干の修正を加えることで、本モデルの繰返し塑性解析への適用性について検討することを目的としている。なお、繰返し塑性の検討に用いるデータは、粒状路盤材料(M-30)の繰返し三軸圧縮試験結果(CD 条件)で、レジリエントモジュラスの測定と同様の方法で測定されたものである。

2.塑性ひずみ増分算出に関する修正 本モデルにおける塑性ひずみ増分は、関連流動則より式(1)で算出される。

$$d\epsilon_{ij}^p = \Lambda \frac{\partial f}{\partial \tilde{\sigma}_{ij}} = \Lambda \left\{ \frac{b}{3} \delta_{ij} + 3(\tilde{\sigma}_{ij} - \tilde{p} \delta_{ij}) \right\} \quad (1)$$

ここに、 $\tilde{\sigma}_{ij}$ は拡張 SMP 基準に則って応力変換および座標変換を施した応力であり、 $\tilde{p}$ はその平均主応力、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタである。また、 Λ は次式で求められる非負の係数である。

$$\Lambda = - \frac{b \cdot d\tilde{p} + 2\tilde{q} \cdot d\tilde{q}}{a \cdot b \cdot c} \quad (2)$$

$$a = \frac{M^4}{M_f^4} \cdot \frac{M_f^4 - (\tilde{q}/\tilde{p})^4}{M^4 - (\tilde{q}/\tilde{p})^4} \quad (3)$$

$$b = \frac{\partial f}{\partial \tilde{p}} = 2M^2 \tilde{p} - M^2 \left\{ \tilde{p}_0 \exp \left(\frac{H}{\rho - \gamma} \right) \right\} \quad (4)$$

$$c = \frac{\partial f}{\partial H} = -M^2 \tilde{p} \tilde{p}_0 \frac{1}{\rho - \gamma} \exp \left(\frac{H}{\rho - \gamma} \right) \quad (5)$$

ここに、 M_f は限界状態線の傾き、 M は体積ひずみ増分の変相点に関する土質定数で、 ρ および γ は等方圧密試験結果を $\ln V \sim \ln p$ で整理した場合の圧縮指数および膨潤指数である。また、 H は次式で求められる硬化パラメータである。

$$dH = a \cdot d\epsilon_v^p \quad (6)$$

式(6)に示したように、塑性体積ひずみの増加に伴い硬化パラメータは増加することになる。いま、 $M_f = M$ とした場合、 $a > 0$ 、 $c < 0$ であるので、 Λ が非負であるためには b は 0 以上でなければならない。この条件を満足する H の値は、式(4)より次のように求めることができる。

$$H \leq (\rho - \gamma) \ln \left(2 \frac{\tilde{p}}{\tilde{p}_0} \right) \quad (7)$$

繰返し解析を行った場合、体積ひずみの増加に伴う硬化の限界値(H が収束する値)を式(7)によって規定することで、繰返し塑性解析が可能になるものと考えられる。具体的には、式(7)右辺を H_{lim} と置くと、硬化パラメータの限界値を次のように定義した。

$$H > H_{lim} : H = b_h \cdot H_{lim} \quad (8)$$

ここに、 b_h は式(8)によって $H \rightarrow H_{lim}$ と変換された場合の H の不連続性(ジャンプ)を緩和するためのパラメータで、 $0 < b_h \leq 1$ の値をとる。

3.路盤材料の繰返し三軸圧縮試験解析 解析に使用した路盤材の繰返し三軸圧縮試験結果は、舗装試験法便覧別冊「3-3-2T 路盤材・路床土のレジリエントモデュラス試験方法」に基づき、表-1 に示す条件で得られたものである。なお、本試験によって測定された塑性ひずみは、載荷回数 $N=10$ の値を 0 としている。また、同材料で測定したレジリエントモデュラスを試験法便覧の方法で整理した結果は式(9)に示す通りである。

$$M_r = 6.1226\theta^{0.6984} \quad (9)$$

ここに、 M_r : レジリエントモジュラス(MPa)、 θ : 主応力

Key Words : 粒状路盤材料, 繰返し三軸圧縮試験, 弾塑性解析, 修正 Cam-Clay モデル

連絡先 : 〒156-8502 東京都世田谷区桜丘 1-1-1 TEL : 03-5477-2342 FAX : 03-5477-2620

表-1 静的三軸圧縮試験の条件

使用材料	M30粒度調整碎石
含水比	4.8%(最適含水比)
供試体寸法	φ150mm×300mm
使用ランマ	電動式コンパクタ
突固め層数	5層
突固め回数	15秒/層
載荷波形	ハーバーサイン波
載荷周波数	1Hz
載荷回数(N)	20 000回
拘束圧(σ_3)	20, 40, 60, 80kPa
軸圧(σ_1)	98kPa

表-2 弾塑性解析条件

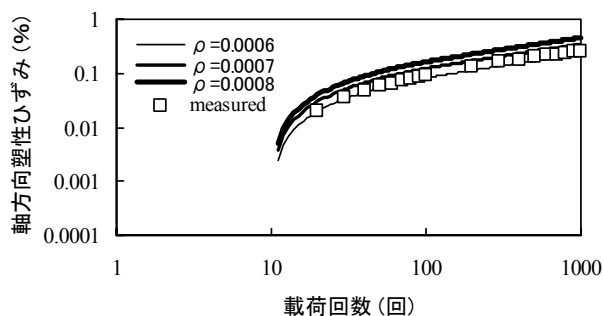
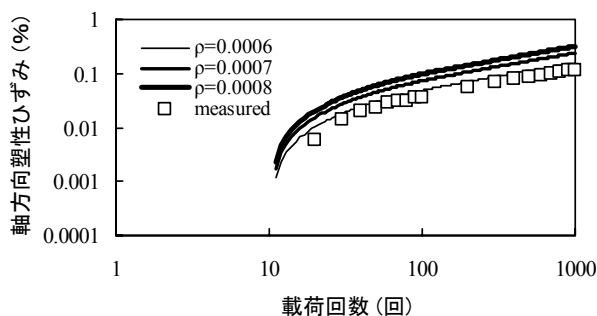
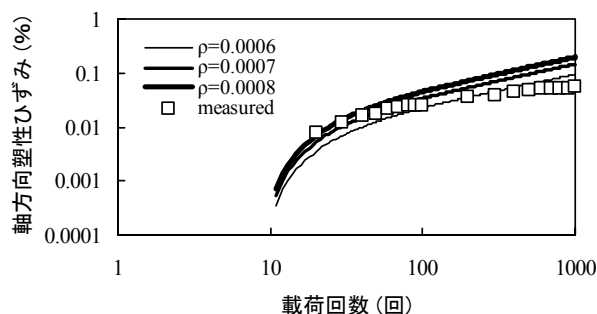
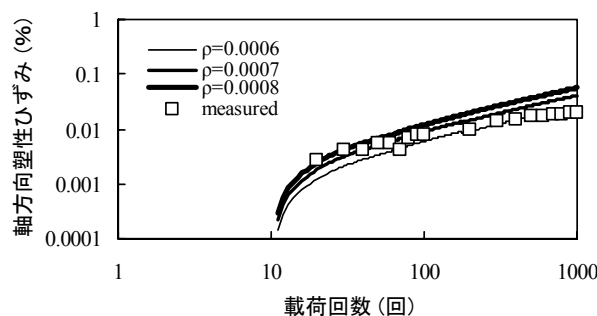
限界状態線 M_f	1.64
土質定数 M	1.4
粘着成分 σ_0	128kPa
圧縮指数 ρ	0.0006~0.0008
膨潤指数 γ	0.0004
ポアソン比 ν	0.3
b_h	0.9

和(kPa)である。

表-2 に解析条件を示す。膨潤指数 γ は式(9)の M_r を弾性係数、ポアソン比を 0.3 として逆算した。また、圧縮指数 ρ 以外の土質定数は同規格の材料を用いた静的三軸圧縮解析で用いた値²⁾を利用した。なお、 b_h の値は今回の実験条件を含む幾らかの解析条件下で検討したところ、0.9 程度で良好な結果が得られたことから、 $b_h = 0.9$ に固定した。圧縮指数 ρ はフィッティングパラメータとし、表-2 に示した範囲で変動させ、その影響について検討することとした。

解析結果と実測結果の関係を図-1～4 に示す。繰返し塑性解析は表計算ソフトを用いて行い、解析結果は実測結果と同様に載荷回数 $N=10$ での塑性ひずみで正規化した。なお、実測結果は同条件で行った 3～4 本の供試体での平均値である。

軸圧が 98kPa と一定であるため、拘束圧が大きくなるにしたがい、載荷に伴う塑性ひずみは小さくなる傾向にある。また、図-1～4 からわかるように、 $\rho=0.0006, 0.0007$ のときの解析結果と実測結果は良く一致しており、拘束状態の変化による塑性ひずみの変化を再現できていることがわかる。静的三軸圧縮試験では $\rho=0.0007, \gamma=0.001$ で再現できた²⁾ものが、繰返し試験では $\rho=0.0006\sim0.0007, \gamma=0.0004$ とオーダが異なることがわかった。 ρ, γ とともに等方圧密試験結果から求めるものであるが、 γ は静的試験では $q-\varepsilon_1$ 関係の初期勾配から、繰返し試験では M_r の回帰式から求めたもので、 ρ は何れの場合もフィッティ

図-1 $\sigma_3=20\text{kPa}$ での解析結果と実測結果の関係図-2 $\sigma_3=40\text{kPa}$ での解析結果と実測結果の関係図-3 $\sigma_3=60\text{kPa}$ での解析結果と実測結果の関係図-4 $\sigma_3=80\text{kPa}$ での解析結果と実測結果の関係

ングパラメータである。今回の実験と静的試験の材料は同一ではないが、規格が同じであるため、 ρ, γ のオーダが異なるとは考え難い。これについては再度検討する必要があるが、本モデルを用いて弾塑性解析を行う場合には、特に ρ はフィッティングパラメータとして捉えるのが良いと思われる。

参考文献 1)竹内康：舗装材料の弾塑性解析モデルに関する基礎的研究，土木学会舗装工学論文集，Vol.7，pp.24-1～24-9,2002.
2)竹内康，高橋修，八谷好：舗装用土質材料の弾塑性解析に関する基礎的研究，土木学会第56回年次学術講演会概要集5部，pp.919-920,2002.