

舗装用土質材料の弾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
 長岡技術科学大学 環境・建設系 正会員 高橋 修
 国土交通省 国総研 空港施設研究室 正会員 八谷好高

1.はじめに 粒状材料を含む土質材料の破壊基準の一つとして松岡らによって提案された空間滑動面（SMP）基準および拡張 SMP 基準¹⁾がある。前者は非粘着性材料、後者は c- 材料の破壊基準であり、その適用性は 3 軸圧縮・伸張試験および 3 主応力制御の 3 軸試験によって確認されている。また Matsuoka ら²⁾は、SMP 基準を粘性土の弾塑性モデルである修正 Cam-Clay モデルに適用し、精度の高い塑性変形推定が可能であることを示した。

本研究の目的は、アスファルト舗装ではわだち掘れ、コンクリート舗装では疲労破壊の促進の要因となる路盤および路床の塑性変形を、弾塑性モデルを用いて解析することである。そこで、本報告では拡張 SMP 基準を採用した修正 Cam-Clay モデルを用いて締固め粘土および粒状路盤材料の 3 軸圧縮試験の弾塑性解析を行い、路盤から路床までの材料に本モデルが適用できるか否かを検討した。

2. 拡張 SMP 基準の修正 Cam-Clay モデルへの適用 拡張 SMP 基準は式(1)で表され、これを平面上にあらわすと図-1 に示すとおりである。

$$\frac{\hat{t}_{SMP}}{\hat{s}_{SMP}} = \sqrt{\frac{9\hat{I}_3}{\hat{I}_1 \cdot \hat{I}_2}} = const. \quad (1)$$

ここに、 \hat{t}_{SMP} 、 \hat{s}_{SMP} は拡張 SMP 上のせん断応力および垂直応力であり、 $\hat{I}_1 \sim \hat{I}_3$ は式(2)で定義する換算応力の 1 次～3 次の不変量である。

$$\hat{s}_{ij} = s_{ij} + s_0 \cdot d_{ij} \quad (2)$$

ここに、 $s_0 (= c \cdot \cot \alpha)$ 、 c : 粘着力、 α : せん断抵抗角) は粘着成分を表すパラメータであり、 d_{ij} はクロネッカーのデルタである。

Cam-Clay および修正 Cam-Clay モデルでは、図-1 に実線で示した拡張 von Mises 基準を降伏条件としている。そのため、拡張 SMP 基準を採用するにはオムスピ形の拡張 SMP 基準を円形になるように応力変換を施す必要がある。応力変換は式(3)、(4)を用いて行う。

$$\tilde{s}_{ij} = \hat{p} \cdot d_{ij} + \frac{\hat{q}_c}{\hat{q}} (\hat{s}_{ij} - \hat{p} \cdot d_{ij}) \quad (3)$$

$$\hat{q}_c = \frac{2\hat{I}_2}{3\sqrt{(\hat{I}_1 \cdot \hat{I}_2 - \hat{I}_3) / (\hat{I}_1 \cdot \hat{I}_2 - 9\hat{I}_3)} - 1} \quad (4)$$

ここに、 \tilde{s}_{ij} は式(2)の換算応力の変換応力、 \hat{p} は換算平均応力、 \hat{q} は換算偏差応力である。

また、応力変換した換算応力を用いた修正 Cam-Clay モデルの弾性ひずみ増分 de_{ij}^e は、Matsuoka らの研究成果を参照すると以下ようになる。

$$de_{ij}^e = \frac{1+n}{E} ds_{ij} - \frac{3n}{E} dp \cdot d_{ij} \quad (5)$$

$$E = \frac{3(1+2n)(1+e_0)}{k} \hat{p} \quad (6)$$

ここに、 n および E は材料のポアソン比および弾性係数、 e_0 は初期間隙比、 k は圧密試験による膨潤指数である。

同様に、塑性ひずみ増分 de_{ij}^p は流れ則に従い、以下のように表される。

$$de_{ij}^p = \Lambda \cdot \frac{\partial f}{\partial \tilde{s}_{ij}} \quad (7)$$

$$\Lambda = d\tilde{p} + \frac{2\tilde{p} \cdot \tilde{q}}{M^2 \tilde{p}^2 - \tilde{q}^2} d\tilde{q} \quad (8)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \tilde{s}_{ij}} = \frac{\mathbf{I} - \mathbf{k}}{(1+e_0)(M^2 \tilde{p}^2 + \tilde{q}^2)} \times \left[\frac{1}{3} \frac{M^2 \tilde{p}^2 - \tilde{q}^2}{\tilde{p}} d_{ij} + 3(\tilde{s}_{ij} - \tilde{p} \cdot d_{ij}) \right] \quad (9)$$

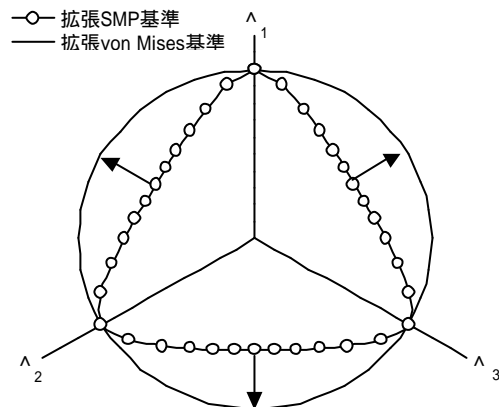


図-1 平面上での拡張 SMP, 拡張 von Mises 基準

Key Words: 舗装用土質材料, 弾塑性解析, 修正 Cam-Clay モデル, 拡張 SMP 基準

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
最大粒径	30mm
含水比	6.8%(最適含水比)
供試体寸法	150mm×300mm
使用ランマ	4.5kgランマ
突固め層数	5層
突固め回数	55回/層
載荷速度	0.5% / min
拘束圧	98, 147, 196kPa

表-2 弾塑性解析条件

材料	M-30	締固め粘土
限界状態線M	1.64	1.30
粘着成分 ₀	128kPa	39kPa
土質定数	0.007	0.07
土質定数	0.001	0.02
ポアソン比	0.3	0.3
載荷条件	₃ =98, 147, 196kPa	p=98, 196, 392kPa

ここに、Mは内部摩擦角によって規定される限界状態線の傾き、₀は粘着成分である。なお、式(2)の粘着成分がゼロの場合は、非粘着性材料を対象とした SMP 基準による修正 Cam-Clay モデルになる。

3. 路盤・路床材料の静的三軸圧縮試験解析 解析に使用した路盤材の静的三軸圧縮試験結果は、土質工学会基準(JSF T 531-1990) 三軸圧縮試験粗粒材料の圧密排水(CD)三軸圧縮試験方法に準拠し、表-1に示す条件で得られたものである。また路床材料に相当する試験結果は、孫ら³⁾の締固め不飽和カオリン粘土のデータを利用した。

解析は $\lambda/(1+e_0) =$, $\nu/(1+e_0) =$ とし、表-2に示す条件で行った。なお、孫らは , ではなく体積ひずみと平均主応力を変数とした , に類似した土質定数を用いていたため、 $e_0=1$ と仮定して締固め粘土の λ および ν の値を求めた。また、路盤材に関しては締固め粘土の値よりも小さくなるように , を選んだ。

図-2, 3は、各々路盤材の主応力差 q と載荷軸方向ひずみ ϵ_1 、体積ひずみ ϵ_v と ϵ_1 の解析結果を示しているが、図-2は粘着成分を考慮しない場合(SMP基準)、図-3は粘着成分を考慮した場合のものである。また、図-4は拡張 SMP 基準を用いた締固め粘土の $q - \epsilon_1$ および $\epsilon_v - \epsilon_1$ 関係の解析結果を示している。なお、路盤材では ϵ_v の実測データが無かったため、 $\epsilon_v - \epsilon_1$ 関係は解析結果のみを示した。その結果、図-2, 4より粘着成分を考慮しない $q - \epsilon_1$ 関係では、解析結果が実測結果を下回っていたのに対し、粘着成分を考慮した結果は実測結果を良く再現していることがわかる。この傾向は締固め粘土の結果

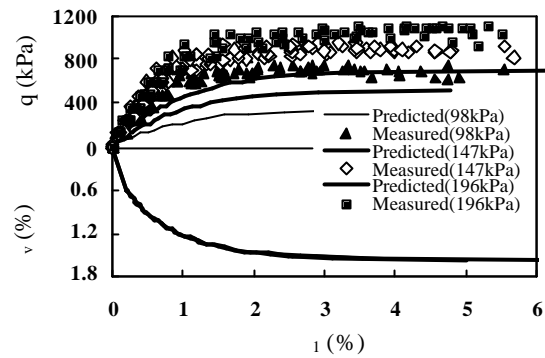


図-2 SMP基準に基づいた路盤材の解析結果

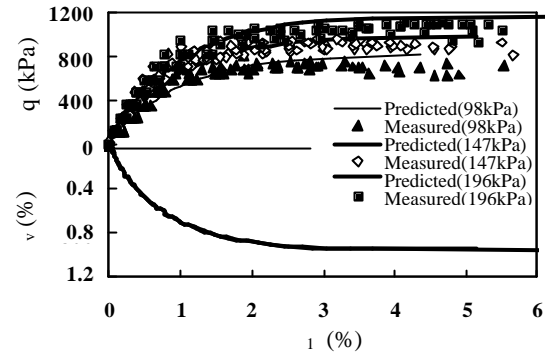


図-3 拡張 SMP 基準に基づいた路盤材の解析結果

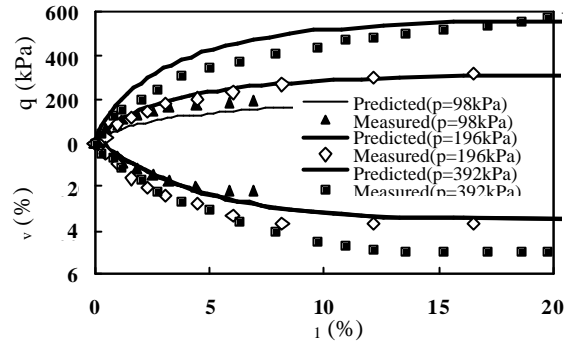


図-4 拡張 SMP 基準に基づいた締固め粘土の解析結果

においても同様で、拡張 SMP 基準を用いた場合には実測結果と解析結果は良く一致したが、SMP基準では解析結果が実測結果を下回っていた。また、 $\epsilon_v - \epsilon_1$ 関係は締固め粘土では実測値に近い値を示したものの、拘束条件の変化に敏感ではなく、全解析結果において粘性土あるいは緩い粒状材に特有の圧縮傾向を示した。通常、密な材料の体積ひずみは初期段階で収縮した後に膨張するが、そのような結果が得られなかった原因として、降伏関数の硬化パラメータの不適合が考えられる。この点に関して、今後は実験データを蓄積し舗装用土質材料の弾塑性挙動を表現できるモデルを構築していきたい。

参考文献 1)松岡・孫：粘着成分を有する摩擦性材料の変形・強度特性の統一的解釈,土木学会論文集, No.436/ -22, pp.163-172,1993. 2)Matsuoka, H., Y. P. Yao and D. A. Sun : The Cam Clay models revise by the SMP criterion, Soils and Foundations, Vol.39, No.1, pp.81-95, 1999. 3)孫ら：拡張 SMP 基準による変換応力と種々の地盤材料の弾塑性モデルへの適用,土木学会論文集, No.680/ -55, pp.211-224,2001.