

弾塑性解析に基づいた路床材料の永久変形解析に関する研究

東京農業大学大学院 学生会員 ○大野 敦弘
 東京農業大学 正会員 竹内 康
 石川工業高等専門学校 正会員 西澤 辰男

1. はじめに

アスファルト舗装のわだち掘れは維持修繕の主原因であり、適切な維持管理を行うには精度の高い予測が望まれる。わだち掘れは一般に舗装を構成する各層の永久変形の総和であると捉えられている。そのため舗装を構成する各層の永久変形特性を把握することが信頼性の高い設計へと繋がる。農道のように舗装厚の薄い軽交通道路では、わだち掘れによる破損が多く見られ、これは主として路床の永久変形の影響であると言われている。そのため本研究では、CBRを変化させた路床材料について行った静的・繰返し三軸圧縮試験結果を用い、永久変形解析方法としてCam-Clayタイプの弾塑性解析モデルの適用性について検討するとともに、このモデルを組み込んだ3D-FEMプログラム(DynPave3D)を用いてわだち掘れシミュレーションを行った。

2. 弾塑性解析モデル

本研究で解析に使用した弾塑性解析モデルは竹内らにより提案されたモデル(改良ESMP-Cモデル)である。これは、修正Cam-Clayモデルをベースとしたもので、硬化パラメータ等の改良によって繰返し塑性が再現可能なモデルである。改良ESMP-Cモデルでは、塑性ひずみ増分は以下の式で求めることができる。

$$d\varepsilon_{ij}^p = \Lambda \cdot \frac{\alpha - \beta}{M^2 \tilde{p}^2 + \tilde{q}^2} \cdot \frac{\tilde{p}}{3} \left[\frac{M^2 \tilde{p}^2 + \tilde{q}^2}{p^2} \delta_{ij} + 9\eta_{ij}^* \right] \quad (1)$$

$$\eta_{ij}^* = \left(\frac{\tilde{\sigma}_{ij} - \tilde{p} \delta_{ij}}{\tilde{p}} \right) - \beta_{ij} \quad (2a) \quad \beta_{ij} = f(\phi_b, b_r) \quad (2b)$$

表1 三軸圧縮試験の条件(CD条件)

試験タイプ	静的試験	動的試験
突き固め層数	5層	5層
突き固め回数	25回	25回
供試体寸法	φ50*100 mm	φ100*200 mm
拘束圧	40,60,80kPa	40,60,80kPa
載荷速度	0.5%/min	1Hz
載荷波形	単調載荷	ハーパーサイン波
載荷回数		20000回
軸圧		98kPa

表2 同定された土質定数

粘着成分(kPa)	σ_0	167.94
限界状態線の勾配	M	0.57
$\lambda/(1+e_0)$	α	0.005
$\kappa/(1+e_0)$	β	0.0033
回転硬化パラメータ	br	100
回転限界角(°)	ϕ_b	30
ポアソン比	ν	0.35
材料定数	δ	3
限界体積ひずみ(%)	$\varepsilon_{v(CS)}^p$	3.2

α, β はそれぞれ圧縮指数, 膨潤指数および初期間隙比から算出される土質定数, p, q は平均主応力および偏差応力, p_0, M は初期間隙比に対応する応力および限界状態線の傾きである。 β_{ij} は回転硬化を示す変数で、載荷に伴い増化する。 ϕ_b は回転限界角であり、 b_r は材料定数である。

また、繰返し回数が多くなるにつれて塑性ひずみ増分が減少するように、静的解析によって解析される塑性体積ひずみの最大値 $\varepsilon_{v(CS)}^p$ と、材料定数 δ で表される式(3)の硬化関連パラメータを導入し、関連流動則から得られる Λ を式(4)より求めている。

$$\gamma = \frac{\varepsilon_{v(CS)}^p}{\varepsilon_{v(CS)}^p - \delta \cdot \varepsilon_v^p} \quad (3a) \quad a = \left(\gamma + \frac{\partial \gamma}{\partial \varepsilon_v^p} \varepsilon_v^p \right) \quad (3b)$$

$$\Lambda = \frac{1}{a} d\tilde{p} + \frac{2\tilde{p} \cdot \tilde{q}}{a(M^2 \tilde{p}^2 - \tilde{q}^2)} d\tilde{q} \quad (4)$$

3. 三軸圧縮試験

本研究では事前に土の基本的性質および CBR と供試体間隙比の関係を把握している粘性土(土粒子密度 2.77g/cm³, 液性限界 57.5%, 塑性限界 47.5%)を使用し、静的・繰返し三軸圧縮試験を実施した。表1に供試験体作成条件および載荷条件を示す。

静的試験ではCBR-T_A法とのマッチングを行うため、供試体間隙比と $M, c, \phi, \varepsilon_{v(CS)}^p$ の関係を求め、動的試験では復元弾性係数を求めた。 ϕ_b, b_r は一般に用いられる値を、 β は復元弾性係数と間隙比から算出した。 δ 及び α はフィッティングパラメータであり、繰返し三軸圧縮試験の結果をFEMで最もよく再現するパラメータを採用することになる。

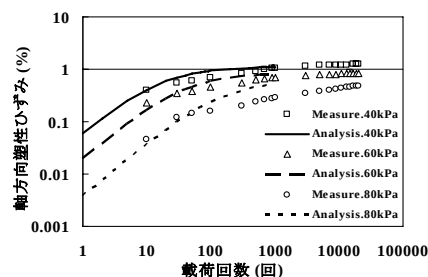


図1 繰返し三軸圧縮試験の解析

キーワード わだち掘れ 繰返し三軸圧縮試験 弾塑性解析 有限要素法 T_A法

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

ここで、 δ に関しては繰り返し三軸圧縮試験において載荷回数 20000 回での軸方向塑性ひずみに一致する値、 α に関しては曲線の形状を最も一致する値を採用した。表 2 に最適含水比時の同定されたパラメータを、図 1 に同定されたパラメータを用いて繰り返し三軸圧縮試験の供試体の挙動を再現したものである。

適切なパラメータを選択することにより、要素としての繰り返し挙動を再現可能であると言える。しかし、拘束圧が大きくなるにつれて載荷回数 100 回を超えたあたりから解析結果と実測結果が離れてくる。この理由として δ を決定した回数の決定方法に問題があったと考えられる。今回は実験データの都合上 20000 回としたが回数を増し、すべての拘束圧での軸方向ひずみが収束した時点で δ を決定するほうが良いと考えられる。更に精度を向上させるために今回の実験とは異なる材料、応力状態の繰り返し試験を実施し材料定数の決定方法について検討を行う必要がある。

4. アスファルト舗装の弾塑性有限要素解析

農道などの軽交通道路では路床の永久変形の影響がわだち掘れに及ぼす影響が大きいと経験的に知られている。しかし、その永久変形特性は理論的に把握されているとは言えない状況である。そこで要素試験で求められたパラメータを用いてアスファルト舗装の弾塑性有限要素解析を行い、路床の永久変形特性について理論的に検討を行った。解析に用いた舗装断面は土地改良事業計画設計基準・設計「農道」基準書・技術書のIV交通量の舗装構成例であり、その舗装厚は経験的手法である T_A 法に基づいて設計されている。

本研究では路床の永久変形に着目していることから表層および路盤を弾性体であると仮定し解析を行った。As 層の弾性係数を 8000MPa、上層路盤・下層路盤の弾性係数をそれぞれ 400MPa、200MPa とし、荷重条件を 49kN、19.6kN、9.8kN の 3 通りで解析を行った。路床の CBR の変化は同一材料での CBR 試験の値と供試体の間隙比の関係、供試体間隙比と c, ϕ, β の関係から推定した。解析に用いた構造条件および材料定数を表 3 に示す。図 2 は設計 CBR が 2 の時の舗装断面の路床上面の変位応答を示したものである。図中の

ラインは徐荷時の変位を結んだものである。

本モデルによってアスファルト舗装下部の路床の繰り返し載荷に伴う永久変形がシミュレートできていることがわかる。また、荷重が大きくなると変形量の振幅および永久変形量が大きくなるという経験的な傾向と一致している。

次に、荷重条件が一定(49kN)で路床の設計 CBR が異なった場合の路床上面の永久変形を図 3 に示す。支持力の最も大きな CBR8 の時が大きく進行する結果となった。従来の舗装設計の概念は路床の支持力が大きければ舗装厚を小さくするというものである。このことから CBR8 の断面では荷重分散能力が小さく、路床上面に発生した応力が他の断面と比較して大きくなったこと、剛性が大きい地盤は応力・ひずみの水平方向の分散域が支持力の小さなものに比べ狭くなることから、局所的に永久変形が進行したことが原因として考えられる。このことより、設計 CBR8 の T_A 法による断面は荷重分散能力が若干不足しているものと言える。図 4 は輪荷重と 20 回載荷後の路床上面の永久変形量の関係である。図から輪荷重が大きくなるとともに、前述の特徴が大きく現れることがわかる。

以上のことから、より信頼性の高いわだち掘れ予測のためには従来の荷重分散の概念に加えて永久変形の進行の傾向や荷重支持特性などを理論的に把握することが必要である。

5. 今後

本研究では弾塑性有限要素法を用いてわだち掘れ解析を行った。しかし、有限要素法特有の計算量の多さから載荷回数に限界があった。20 回載荷に約 3 時間の時間を要するため、50 万輪の載荷を再現しようとするならば 9 年の時間を必要としてしまう。そのため少ない載荷回数で永久変形を再現する工夫について検討する必要がある。

表 3 As 舗装の解析条件

設計CBR	2	4	6	8
表層厚	10	10	10	10
上層路盤厚	30	25	15	15
下層路盤厚	35	25	25	15
σ_0 (kPa)	162.7	173.3	193.9	212
M	0.25	0.49	0.7	0.9
α	0.0074	0.0055	0.0042	0.003
β	0.0057	0.0038	0.0025	0.0013

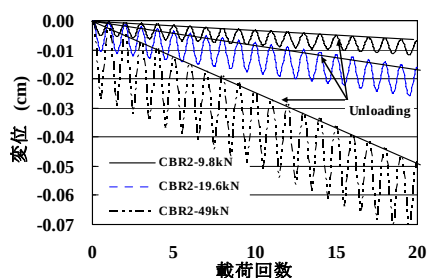


図 2 路床上面の変位(CBR2)

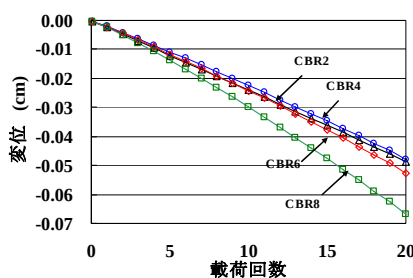


図 3 CBR と路床永久変形の関係

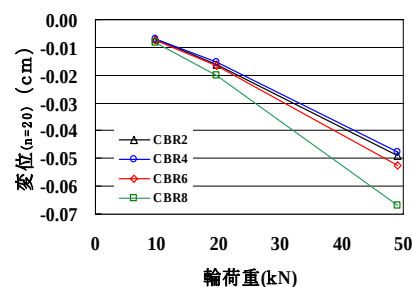


図 4 永久変形量と荷重の関係