

繰返し三軸圧縮試験に基づく未固結粒状路盤材の塑性変形予測モデルについて

神戸大学大学院工学研究科 学生員 ○宮根 正充

神戸大学 工学部 学生員 中村 渡

神戸大学 都市安全研究センター 正会員 吉田 信之

1. 目的

アスファルト舗装のわだち掘れを評価するためには、舗装を構成する全層の塑性変形特性を把握する必要がある。そこで、著者らは養生を行わない未硬化状態の HMS (水硬性粒度調整鉄鋼スラグ) 路盤材を用いて長期繰返し三軸圧縮試験を実施している。本報では、これまで得られた試験結果に基づいて塑性変形予測モデルについて検討する。

2. 試験概要

試験に用いた HMS 路盤材は JIS A5015 を満足するものであり、その締固め特性を表-1 に示す。供試体は直径 100mm、高さ 200mm の寸法であり、最適含水比に調整した試料(20mm 以上を除外した尖頭粒度)を締固め度 95% になるように突き固めて供試体の作製を行った。供試体作製後、養生せず未硬化状態で試験に供した。

三軸圧縮試験装置および試験方法は、既報¹⁾と同じであるが、計測項目として三軸セル内の供試体中央部に設置したリング型変位計により供試体の側方変位の計測を追加している。試験は、所定の有効拘束圧で圧密したのち、载荷時間 0.1 秒・休止時間 0.9 秒のハーバーサイン波で繰返し载荷を行うものである。応力経路¹⁾は図-1 と同じであるが、3 応力点(⑬,⑭,⑮)については経路外に設定している。図中には圧密排水三軸圧縮試験(JGS0524-2000)から求めたせん断破壊基準線($c'=80.0\text{kPa}$, $\phi'=57.7^\circ$)も示している。各载荷応力点の初期有効拘束圧 σ_{co} 、载荷時の平均有効主応力 p 、繰返し偏差応力 q を表-2 にまとめて示す。繰返し载荷回数は、破壊が生じない限り全て 10 万回である。

3. 試験結果と考察

結果の一例として载荷応力条件⑰の各水平ひずみと载荷回数の関係を図-2 に示す。水平方向累積塑性ひずみは载荷回数が増加するとともに増加する傾向があり、最終的(本研究では 10 万回時)に生ずる累積塑性ひずみの 80% 以上を発生させるには载荷回数が約 6 万回必要であり、その後一定値に収束する傾向がある。なお、ここには示していないが、この傾向は全ての载荷応力条件によって同じである。図-3、4 に一例として、所定の载荷回数での水平方向累積塑性ひずみと偏差応力 q および平均有効主応力 p の関係を示す。図より、水平方向累積塑性ひずみは q および p に依存しているのがわかる。ここには示していないが、軸方向累積塑性ひずみにおいても同様のことが言える²⁾。そこで、ここでは各载荷回数でのそれぞれの累積塑性ひずみ $\varepsilon_a^p, \varepsilon_r^p$ は次

式に示す平均有効主応力 p と偏差応力 q のべき関数で表現できるとした²⁾。 $\varepsilon_a^p = A \cdot \frac{q^B}{p^C}$, $\varepsilon_r^p = a \cdot \frac{q^b}{p^c}$ - (1)

図中には、全载荷応力条件での所定の载荷回数における水平方向累積塑性ひずみを q と p で線形重回帰分析をした結果も曲線で示している。決定係数 r^2 は载荷回数の増加とともに減少はするが全体的には 0.8 程度と比較的高い値

表-1 締固め特性

自然含水比 $W(\%)$	7.78
最適含水比 $W_{opt}(\%)$	13.3
最大乾燥密度 $\rho_{dmax}(\text{g/cm}^3)$	2.22
比重	3.396

表-2 各载荷応力条件

応力条件	$\sigma_{co}'(\text{Mpa})$	$q(\text{MPa})$	$p'(\text{Mpa})$
①	0.088	0.206	0.157
②	0.108	0.147	0.157
③	0.117	0.117	0.156
⑧	0.068	0.147	0.117
⑨	0.098	0.117	0.137
⑩	0.078	0.117	0.117
⑪	0.049	0.117	0.088
⑫	0.088	0.147	0.137
⑬	0.078	0.236	0.157
⑭	0.049	0.206	0.118
⑮	0.039	0.236	0.118

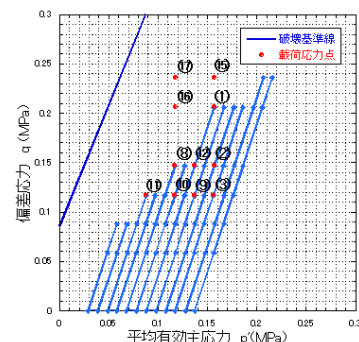


図-1 応力経路と载荷応力点

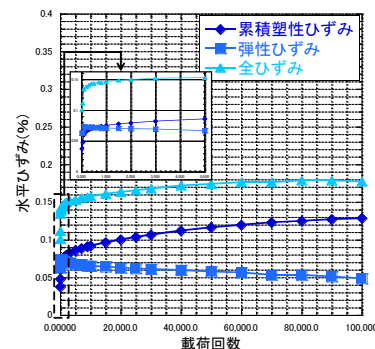


図-2 水平ひずみと载荷回数の関係

キーワード HMS, 塑性ひずみ, 繰返し三軸圧縮試験, 塑性変形予測モデル

連絡先 〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1 神戸大学都市安全研究センター TEL078-803-6437

であった。

さらに、各実験パラメータ A,B,C および a,b,c と載荷回数の関係を示したのが図-5, 6 である。図より、各実験パラメータは、多少バラツキはあるが載荷回数の増加とともに減少している傾向が見られる。そこで、ここでは各実験パラメータを次式で近似した。

$$a = \frac{d\sqrt{N}}{\sqrt{N}+e}, b = \frac{1}{f+g \cdot N^h}, c = \frac{1}{i+j \cdot N^k} \quad (2)$$

ここで、d,e,f,g,h,i,j,k は水平方向累積塑性ひずみに対する回帰定数である。軸方向についても全て同じ式により回帰した(回帰定数は D,E,F,G,H,I,J,K)。表-3 に両方向の累積塑性ひずみについて各回帰定数と相関係数を示す。表より回帰定数 C と c の相関係数が他よりも低く、また図-5, 6 の拡大図より載荷回数 1,000 回までの近似度が低いことがわかる。これは、重回帰分析を行った際の所定の載荷回数でのデータ数や載荷応力条件数の少なさに起因する実測値のバラツキによるものと考えられる。

図-7 に軸方向累積塑性ひずみの式(1)に軸方向の回帰定数を用いた式(2)を導入した結果を実験結果とともに示す。図の各実験線が回帰曲線を表しており、累積塑性ひずみの増加傾向をうまく示しているのがわかる。実測値との相関係数は 0.97 以上の高い値となった。しかし、図-7 の拡大図より載荷初期から実測値と回帰曲線による近似値には差が生じており、載荷初期の軸方向累積塑性ひずみの増加傾向を過大評価しているのがわかる。ここでは示していないが、水平方向累積塑性ひずみの式(1)に水平方向の回帰定数を用いた式(2)を導入した結果においても軸方向と同様に水平方向累積塑性ひずみの増加傾向を回帰曲線でもよく表現できるが、載荷初期の水平方向累積塑性ひずみの増加傾向を過小評価しているのを確認している。

4. 結論および今後の課題

本報では、未硬化状態の HMS 締固め供試体での繰返し三軸圧縮試験に基づいて、累積塑性ひずみを平均有効主応力と偏差応力のべき関数で表現し、各実験パラメータを載荷回数の関数で近似した累積塑性変形予測モデルを提案した。ある載荷回数時のある応力条件下での軸方向および水平方向の累積塑性ひずみの算出が可能となったが、近似度を上げるためにはさらなる工夫が必要であることも分かった。

最後に、試料入手に際し神鋼スラグ製品(株)の藏本氏にはお世話になりました。ここに記して謝意を表します。

参考文献 1)宮根・吉田：長期繰返し三軸圧縮試験における応力比が未硬化 HMS 路盤材の塑性変形特性に及ぼす影響について，土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集，CD，V-043，pp.83-84，2009。

2)宮根他：繰返し三軸圧縮試験による未硬化 HMS 路盤材の累積塑性ひずみについて，土木学会平成 23 年度関西支部年次学術講演会講演概要集，2011(投稿中)。

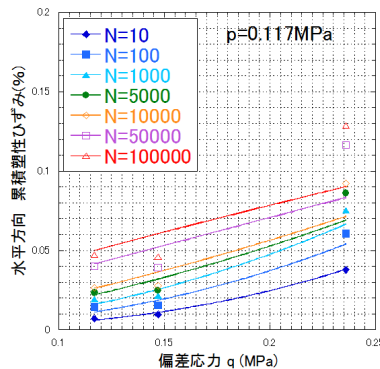


図-3 水平方向累積塑性ひずみと

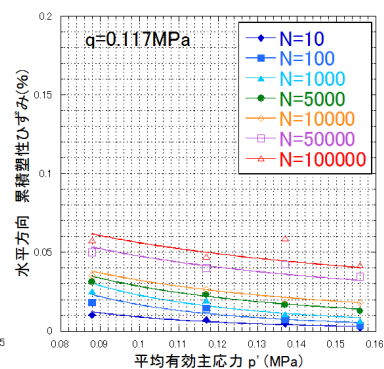


図-4 水平方向累積塑性ひずみと

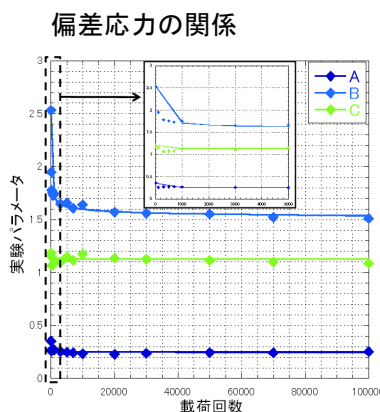


図-5 軸方向実験パラメータと

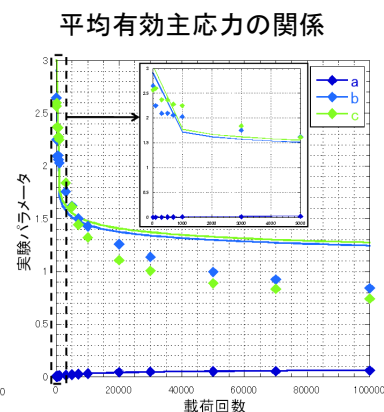


図-6 水平方向実験パラメータと

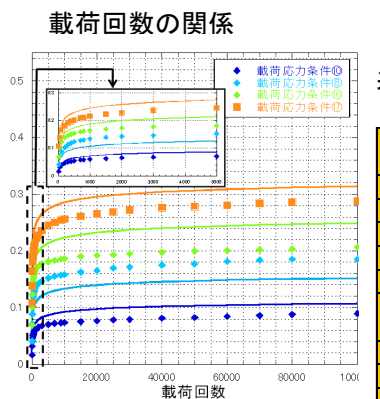


図-7 軸方向累積塑性ひずみと

載荷回数の関係

載荷回数の関係

表-3 式(2)による回帰結果

実験 パラメータ	軸方向 回帰定数			相関 係数r
	D	E		
A	0.242	-0.999		0.957
B	0.706	-0.484	H	0.998
			I	
C	0.877	-0.137	-0.871	0.665
実験 パラメータ	水平方向 回帰定数			相関 係数r
	d	e		
a	0.111	252.3		0.991
b	4.929	-4.704	h	0.910
			i	
c	5.030	-4.819	-0.0124	0.843