

排水性混合物の弾性評価に関する一考察

日本大学大学院 学生員 滝 沢 孝 充      日本大学 正会員 秋 葉 正 一  
 日本大学 正会員 栗谷川 裕 造      日本大学大学院 学生員 松 島 敏 範

1. はじめに

排水性混合物は表面排水や騒音低減効果を期待するものとして、舗装における施工実績が近年非常に高い。この混合物は密粒度アスファルトに比べ空隙率が高く、力学評価を行なう場合は水の影響も含め、空隙をどのように扱うか迷うところである。そこで、本報告では排水性混合物を弾性体と仮定した場合に評価が可能であるかを多孔質弾性理論を適用して基礎的な検討を行なったので報告する。

2. 解析方法

図-1 に示す 3 次元多孔質弾性円柱において、 $r$ 、 $\theta$ 、および  $z$  方向の応力成分をそれぞれ  $\sigma_r$ 、 $\sigma_\theta$ 、および  $\sigma_z$ 、同様に  $\tau_{rz}$ 、 $\tau_{\theta z}$ 、および  $\tau_{z\theta}$  とするとこれらの関係式は次式の通りとなる。なお、 $r$  および  $z$  方向の変位成分は  $u$  および  $w$  とする。

$$\begin{bmatrix} \hat{a}_r \\ \hat{a}_\theta \\ \hat{a}_z \end{bmatrix} = \frac{1}{2G} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \text{Sym} & 1 & 0 \\ & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_r \\ s_\theta \\ s_z \end{bmatrix} - \frac{Is}{6GK} + \frac{ap}{3K} \quad \dots (1)$$

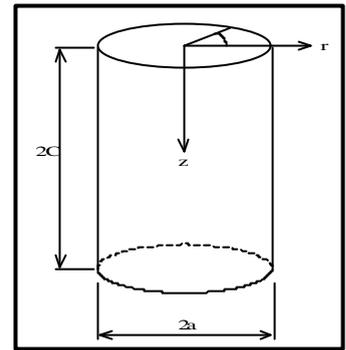


図-1 弾性円柱

表-1 供試体性状

重量 (g)	1231.52	平均飽和度Sr (%)	飽和	不飽和
直径 (cm)	10.065	空隙率V (%)	97.1	74.8
高さ (cm)	19.997	空気空隙率 (%)		35.8
比重Gs	1.205		4.67	27.3

ここで、 $G$ 、 $K$  および  $I$  はせん断弾性係数、体積弾性係数およびラーメ定数をそれぞれ表す。また、 $s_r = \sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z$  であり、 $p$  は飽和状態における間隙水圧である。 $I$  は Biot - Willis 係数で排水条件であれば 0 であり、非排水状態であれば飽和状態に影響され（空気空隙率）1 の範囲である。

つぎに、端面拘束の影響を無視すれば、境界条件は  $r=a$  で  $r=q$  (側圧),  $z=0$  で  $2w=d$  (実測変位) である。また、 $u_0$  を境界未知数とにおいて  $u$  は  $u=u_0(r/a)$  であり、前述の境界条件と式(1)より  $u_0$  は次式の通りになる。

$$u_0 = \frac{a}{G+I} \left( I \frac{d}{2c} + q + ap \right) \quad \dots (2)$$

3. 多孔質材料を用いた実験

3.1 実験方法

ここで、表-1 および表-2 にそれぞれ供試体性状および試験条件を示す。本研究では、硬質ゴムによる多孔質供試体を飽和または不飽和状態に設定し、等方応力状態下において排水および非排水三軸圧縮試験を行なった。また、一般に三軸圧縮試験を行なう場合には、原地盤の性状を把握するために圧密過程を有するが、本研究では多孔質弾性理論により弾性特性を把握することを目的とするために圧密過程を省略した。

3.2 結果および考察

図-2 は、側圧  $q=343\text{kN/m}^2$  における排水および非排水三軸圧

表-2 試験条件

側圧q (kN/m <sup>2</sup> )	245,294,343
変位速度 (mm/min)	1.0

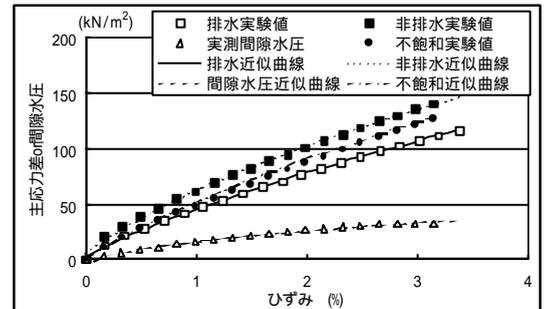


図-2 試験結果および近似曲線

表-3 弾性定数推定結果

単位: GおよびE(kN/m<sup>2</sup>)

(%)	$d$	$E_d$	$G_d$	$E_u$	$E_c$
0.167	0.32	4627.2	1752.7	6569.3	4333.1
0.528	0.30	4118.9	1584.2	5419.3	3828.1
0.883	0.30	3755.1	1444.3	4727.7	3472.0
1.239	0.30	3472.2	1335.5	4247.9	3201.3
1.594	0.30	3244.5	1247.8	3889.7	2984.1
1.950	0.30	3057.2	1175.9	3608.1	2805.7
2.305	0.30	2898.6	1114.9	3379.7	2655.9
2.661	0.30	2763.3	1062.8	3190.5	2527.8
3.022	0.30	2642.4	1016.3	3028.0	2415.1
3.377	0.30	2537.9	976.2	2889.9	2317.4

キーワード 排水性舗装，多孔質弾性理論，三軸圧縮試験，接線弾性係数，ポアソン比  
 連絡先 〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1 日本大学生産工学部 土木工学科

縮試験結果を示したものである．また，同図にはこれらの試験結果から任意のひずみレベルにおける接線弾性係数を算出するために，最小自乗法により求めた近似曲線も示した．これより，実験値と近似曲線の相関性が良好であることが分かる．なお，他の側圧においても同様の傾向が得られた．

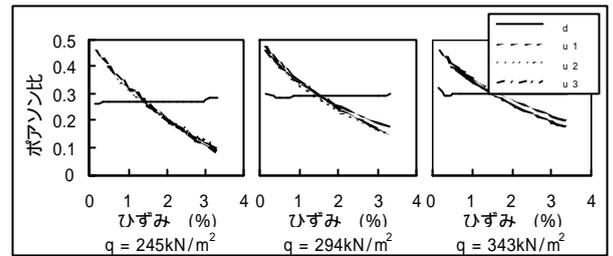


図 - 3 ポアソン比推定結果

つぎに，飽和状態における側圧  $q=343\text{ kN/m}^2$  における近似曲線から接線弾性係数を求めた結果を表 - 3 に示す．ここで，同表における排水ポアソン比  $\mu_d$  は，排水試験により得られた軸ひずみと体積ひずみの関係から求めたものであり，排水せん断弾性係数  $G_d$  は同表の排水ポアソン比と排水接線弾性係数  $E_d$  より算出したものである．また，非排水接線弾性係数  $E_u$  および  $E_c$  は，それぞれ全応力解析および有効応力解析から算出した．これより， $E_d$  と  $E_c$  を比較すると，多少の誤差は見受けられるものの両者間には近似性が認められることから，今回実施した三軸圧縮試験の試験精度には問題はないと考えられる．

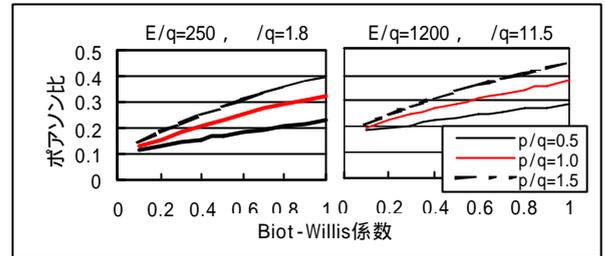


図 - 4 数値解析結果

図 - 3 は，任意のひずみレベルにおける排水および非排水ポアソン比の推定結果である．ここで，非排水試験によりポアソン比を測定することは困難であることから，多孔質弾性理論を適用して推定した．すなわち，図中の  $u_1$  は理論上では間隙中の圧力状態にせん断力は影響を受けないことから，排水および非排水せん断弾性係数は等しいことを考慮し排水せん断弾性係数  $G_d$  を用いて式(3)より， $u_2$  は非排水試験結果のみによりせん断弾性係数を推定するために，非排水全応力接線弾性係数  $E_u$  を用いて式(4)より推定した．

$$\mu_1 = \frac{a - 2\hat{a} \cdot G_d + q + p}{2(\hat{a} \cdot G_d + q + p)} \quad \dots (3)$$

$$\mu_2 = \frac{a - \hat{a} \cdot E_u + q + p}{2(q + p)} \quad \dots (4)$$

また，Biot - Willis 係数 は飽和状態であるため 1.0 とした．これより， $u_1$  と  $u_2$  を比較するとほぼ等しい値を示している．したがって，非排水試験のみでポアソン比の推定が十分可能である．また，両者ともにひずみの増加とともに減少する傾向にあり，排水試験により得られたポアソン比と比較すると，ひずみレベル 1.5% 付近で排水ポアソン比よりも低下する．ここで，間隙圧によるひずみ増分を考慮すれば，非排水ポアソン比の方が排水ポアソン比よりも大きくなることは理論上明確である．よって，高ひずみレベルで推定した非排水ポアソン比に問題が生じている．しかし，この結果は，解析段階において端面拘束の影響を考慮しなかったことが影響していると考えられ，おおむね多孔質弾性理論は適用可能であるといえる．また，同図における  $u_3$  は，不飽和非排水三軸圧縮試験結果から式(4)を用いて算出したポアソン比である．これより， $u_2$  と  $u_3$  を比較すると推定されるポアソン比に大きな差異は認められない．

このことを考察するために，ひずみレベル 1.0% におけるポアソン比と  $\mu$  の関係を数値解析により調べた結果が図 - 6 である．これより間隙水圧が大きいものほど  $\mu$  の増加に対するポアソン比の変化が大きい．したがって，本実験で用いた供試体は透水性が高い供試体で，間隙水圧が小さいことから  $\mu$  の違いによって材料特性値に差異が生じなかったと考えられ，間隙圧の小さい材料の場合は，弾性論によるマクロ的な評価で十分であると言える．

#### 4. 結論

本研究では，多孔質材料の力学評価について基礎検討を行なうために，排水および非排水三軸圧縮試験を実施し，多孔質弾性理論により材料特性値の推定および検討を行なった．その結果，排水性混合物のような大きな間隙を有する材料では間隙圧が生じにくいことから，弾性論による評価で十分であると考えられる．

【参考文献】・ Herbert F. Wang ; Theory of Linear Poroelasticity with Applications to Geomechanics and Hydrogeology , Princeton , 2000