

排水性混合物の力学評価に関する一検討

日大生産工(院) 滝 沢 孝 充 日大生産工 秋 葉 正 一
 日大生産工 栗谷川 裕 造 日大生産工(院) 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の弾性評価が多孔質弾性理論を適用することで可能か否かを検討したので報告する。

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 、 θ 、および z 方向の応力成分をそれぞれ σ_r 、 σ_θ 、および σ_z 、同様に τ_{rz} 、および τ_{zr} とするとこれらの関係式は次式の通りとなる。

$$\begin{bmatrix} e_r \\ e_\theta \\ e_z \end{bmatrix} = \frac{1}{2G} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{Sym} & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \sigma_z \end{bmatrix} - \frac{\lambda\sigma}{6GK} + \frac{\alpha p}{3K} \quad \text{式(1)}$$

なお、 r および z 方向の変位成分は u および w とする。

ここで、 G 、 K および λ 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、 $\sigma = \sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z$ であり、 p は飽和状態における間隙水圧である。 α は Biot-Willis 係数といい、間隙圧の低減係数を表す。排水条件の場合、間隙中の圧力は生じないため $p = 0$ であり、非排水状態であれば飽和状態に影響され、 $\alpha = 1$ (空気間隙率)

1 の範囲となる。つまり、間隙中に空気と水が混在する不飽和状態において多孔質弾性理論により弾性評価を行なうためには、Biot - Willis 係

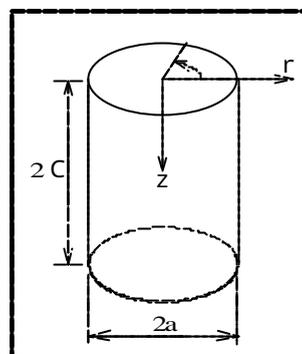


図-1 円柱弾性

数の推定が必要不可欠となる。次に、端面拘束の影響を無視すれば、境界条件は $r = a$ で $\tau_{rz} = q$ (側圧)、 $z = 0$ で $2w = d$ (実測変位) である。また、 u_0 を境界未知数とおけば、水平変位 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。

$$u_0 = \frac{a}{G + \lambda} \left(\lambda \frac{d}{2c} + q + \alpha p \right) \quad \text{式(2)}$$

3. 三軸圧縮試験

3.1 供試体性状および実験方法

本研究では多孔質弾性理論の適用性および有用性について検討するにあたり排水性アスファルト混合物による供試体を用いた場合に多少の性状の違いが結果の解釈に影響を与える可能性があることを考慮して、弾性材料である硬質ゴムによる多孔質供試体を作成し用いた。供試体性状および試験条件は表-1 表-2 に示す通りである。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実施した。なお、排水三軸圧縮試験(以下、排水試験)によ

り体積変化量を測定し、非排水三軸圧縮試験（以下、非排水試験）より間隙水圧の測定を行った。

また、一般に土質材料では三軸圧縮試験により体積変化量または間隙水圧を測定する場合、圧密過程を要するが、本研究では圧密変形量を無視できる排水性混合物の弾性特性の把握を目的とするために圧密過程を省略した。

3.2 飽和供試体

3.2.1 試験結果および考察

図-2 は一例として側圧 $q = 343\text{KN/m}^2$ における排水および非排水試験結果を示したものである。この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、最小二乗法により近似曲線を求めた。これより、実験値と近似曲線との相関性が良好であることが分かる。なお、これらの傾向はその他の側圧においても同様の傾向である。

つぎに、側圧 $q = 343\text{KN/m}^2$ による両試験結果の近似曲線から接線弾性係数を算出した結果を表-3 に示す。ここで、同表における排水ポアソン比 α_d は、排水試験より得られた軸ひずみ (dh/h) と体積ひずみ (dV/V) から式(3)により算出した。また、排水せん断弾性係数 G_d は同表の排水ポアソン比 α_d と排水接線弾性係数 E_d より算出した。

$$\alpha_d = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \left(\frac{dV/V}{dh/h} \right) \right\} \quad \text{式(3)}$$

また、同表における非排水接線弾性係数 E_u は全応力解析により、 E_c は有効応力解析により算出した。排水および非排水接線弾性係数を比較すると、排水接線弾性係数 E_d と非排水有効応力接線弾性係数 E_c は、多少の誤差は見受けられるもののこの程度の差異は実用上問題にならないと考えられることから、両者には近似性が認められる。ここで、排水試験では過剰間隙水圧が生じないために、排水試験により求められた応力が有効応力である。なお、これらの傾向は他の側圧においても同様の傾向である。また、変位制御で排水

表-1 供試体性状

重量 (g)	1231.52	平均飽和度 S_r (%)	飽和	97.1	不飽和	74.8	
直径 (cm)	10.065	空隙率 V (%)				35.8	
高さ (cm)	19.997	空気空隙率 (%)				0.99	9.2
比重 G_s	1.205						

表-2 試験条件

側圧 q (KN/m^2)	245, 294, 343
変位速度 (mm/min)	1.0

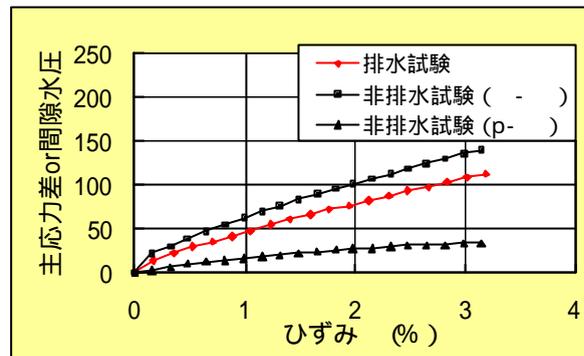


図-2 飽和排水・非排水試験結果
($q = 343\text{KN/m}^2$)

表-3 接線弾性係数

単位 : EおよびG (KN/m^2)

ポアソン比 (%)	排水試験結果			非排水試験結果	
	α_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

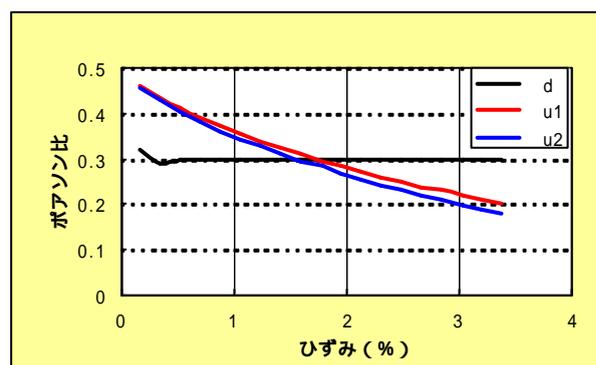


図-3 ポアソン比推定結果

試験を行なう際に変位速度が速すぎると、排水が間に合わず過剰間隙水圧を生じてしまい、試験精度に信頼性がなくなる可能性がある。よって、 E_d と E_c が近似したことから本研究で設定した変位速度はほぼ適切であったと考えられる。

3.2.2 ポアソン比推定結果

排水および非排水試験結果より得られた任意のひずみレベルにおけるポアソン比の推定結果の一例を図-3 に示す。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。なお、排水試験より推定したポアソン比を ν_a 、非排水試験より推定したポアソン比を ν_u と表記している。また ν_u について、まず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(4)により推定したのが ν_{u1} である。また、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(5)より推定したものが ν_{u2} である。

ここで、式(4)および式(5)中の ν_a は主応

$$\nu_{u1} = \frac{s_a - 2e \cdot G + q + \alpha p}{2(eG + q + \alpha p)} \quad \text{式(4)}$$

$$\nu_{u2} = \frac{s_a - e \cdot E + q + \alpha p}{2(q + \alpha p)} \quad \text{式(5)}$$

力差である。また、Biot - Willis 係数 ν_a は飽和状態であるため 1.0 とした。これより両ポアソン比を比較すると、 ν_{u1} および ν_{u2} はほぼ等しい値を示している。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 ν_a よりも低下する。ここで、応力 - ひずみ関係が線形関係であるとした場合、間隙圧は全ての方向に等しく働くので、これ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ことになる。しかし、この問題点は解析段階で端面拘束の影響を考慮しなかったことが原因であると考えられ、ひずみレベル 1.5% 以下では理論上の関係と一致していることから、今後端面拘束

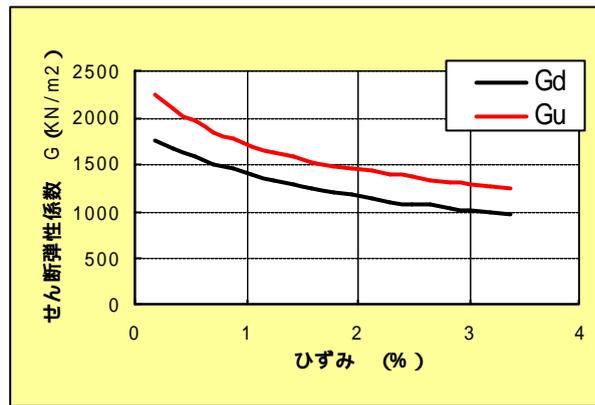


図-4 せん断弾性係数

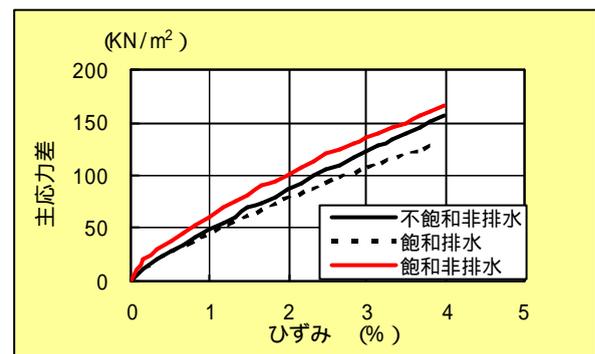


図-5 不飽和非排水試験結果

($q = 343 \text{KN/m}^2$)

の影響を考慮した解析を行えば多孔質弾性理論を用いて推定された非排水ポアソン比 (ν_u) が排水ポアソン比 (ν_a) を下回る可能性がなくなるのではと考えている。また、これらの結果より、 ν_{u1} と ν_{u2} がほぼ一致していることから、非排水試験のみでポアソン比の推定が十分可能であると推察される。

図-4 は非排水試験結果を用いて推定された ν_{u2} と E_u により算出したせん断弾性係数 G_u と排水試験により得られたせん断弾性係数 G_d を比較した一例である。前述したように、理論上の排水および非排水せん断弾性係数は等しくなるが、本研究で推定された排水および非排水せん断弾性係数に差異が生じている。しかし、排水および非排水試験結果を用いて推定された排水および非排水せん断弾性係数の差異はどのひずみレベルにおいても同程度である。したがって、両者の差異は仮に試験精度に問題がないとすれば、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る。よって、端面拘束の

影響を考慮したより厳密な解析を行なうことにより、推定される排水および非排水せん断弾性係数は等しくなる可能性があることから多孔質弾性理論は適用可能であると考えられる。

4. 不飽和供試体

表-1 および表-2 に示す条件下で不飽和非排水試験を実施し、飽和度の違いが推定される非排水ポアソン比へ与える影響について検討した。図-5は、側圧 $q = 343\text{KN/m}^2$ で実施した不飽和非排水試験結果の応力-ひずみ関係を示したものである。なお、同図には飽和条件下における排水および非排水試験結果も示した。これより、非排水試験により得られた全応力を比較すると、同一のひずみレベルにおいて飽和度が減少することにより全応力が低下している。この結果は、間隙中の圧力が減少したためと考えられ、本研究で実施した不飽和非排水試験の試験精度に特に大きな問題は無いものと考えられる。なお、この傾向はその他の側圧に関しても同様である。

次に、飽和供試体と同様に、非排水接線弾性係数を用いて式(5)より不飽和状態における非排水ポアソン比 ν_2 の推定を行った。その結果を図-6に示す。同図には飽和条件下における推定結果も示す。なお、不飽和状態における非排水ポアソン比 ν_2 は $0.7 \sim 0.8$ の範囲で変化させて推定した。これより、不飽和状態および飽和状態で推定結果に大きな差異が認められない。

このことを考察するため、式(5)を用いてひずみレベル 1.0%におけるポアソン比と ν_2 の関係を数値解析により調べた結果が図-7である。これより、間隙水圧が増加するほど ν_2 の増加に対するポアソン比の変化量が大きくなるのが分かる。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 ν_2 の違いによって材料特性値に差異が生じなかったと思われる。

5. まとめ

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

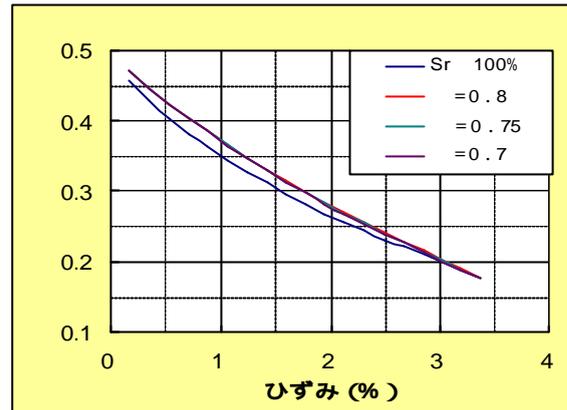


図-6 不飽和ポアソン比推定結果

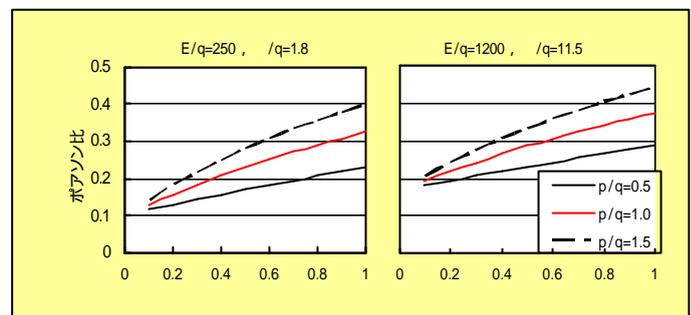


図-7 数値計算

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、端面拘束による影響の検討が必要であるが、多孔質材料の力学特性を把握する場合、おおむね多孔質弾性理論が適用可能であると考えられる。しかしながら、透水性が高く間隙水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ことが確認できた。ただし本実験で用いた多孔質供試体の空隙率が一般に配合設計される排水性混合物のそれと比べかなり高い状態のものであることから、今後の検討課題として実際の混合物と同程度の空隙を有する供試体により、同様の検討を実施するとともに端面拘束の影響を考慮した解析を実施し、排水性混合物への適用に拡大することで多孔質弾性理論による弾性評価手法の有用性および信頼性を高める必要がある。

【参考文献】Herbert F.Wang;Theory of Linear Poroeasticity with Applcations to Geomechanics and Hydrogeology Princeton 2000