

排水性混合物の多孔質弾性理論を適用した三次元解析

日大生産工(院) 松島 敏範 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) 加納 陽輔

1 はじめに

排水性混合物は表面排水による走行安全性や走行車両の騒音低減効果を目的とし、近年舗装における施工実績は非常に高いものとなっている。現在、排水性混合物の工学評価はマーシャル安定度試験による経験的な評価が行われているが、力学評価手法が確立していない。排水性混合物は密粒度アスファルトに比べ空隙が非常に大きいことから力学評価を行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。したがって、このような力学評価を把握することができれば、より信頼性の高い排水性舗装の構造設計が容易になる。

そこで、本研究では排水性混合物について一軸あるいは三軸圧縮試験により、力学評価を実施することを目的とした。このため、まず、多孔質な排水性混合物を弾性体と仮定した場合に、評価の助けとなる解析解を導くために、多孔質弾性理論を適用した三次元弾性解析解を誘導した。ここで前述した載荷試験では端面拘束の影響が懸念される。そこで端面拘束が弾性変形に与える影響を数値解析と実験により調べ、本解析結果の信頼性を検証した。つぎに、多孔質弾性体の変形特性に関するいくつかの数値計算を実施し、パラメータの違いが排水性混合物の変形特性に与える影響について検討した。

2 解析方法

図-1に示す多孔質弾性体を想定した軸対称有限円柱において r 、 z 方向の変位を

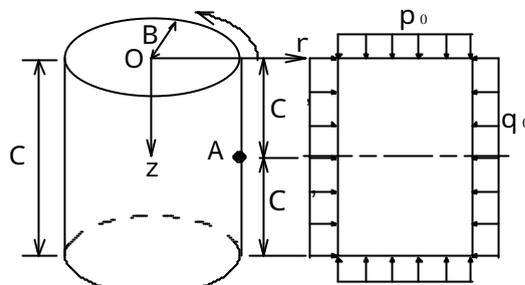


図-1 軸対称有限円柱

それぞれ u 、 v 、 w とする。円柱座標におけるつり合い方程式にフック則の式を適用すれば垂直応力 σ_r 、 σ_z およびせん断応力 τ_{rz} とひずみ ϵ_r 、 ϵ_z 、およびせん断ひずみ γ_{rz} の関係は式(1)で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_z \\ \tau_{rz} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} (2\mu + \lambda) & & \\ & (2\mu + \lambda) & \\ & & (2\mu + \lambda) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_r \\ \epsilon_z \\ \gamma_{rz} \end{bmatrix} - \beta p_p \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

なお式中の μ および λ はラーメの弾性係数である。また、 p_p は空隙の間隙圧、 β はBiot-Willis係数である。 β は排水条件であれば0であり、非排水条件であれば飽和状態に影響され、 $\beta = 1$ (空気間隙率)の範囲である。

本解析は有限 Fourier-Hankel 変換による方法¹⁾で変位成分の解析解を誘導し、式(1)による応力成分を含めた厳密解の誘導を行った。この際の境界条件は、軸方向載荷による端面拘束の影響を考慮した式(2)~(4)の条件で、これにより境界未知数を求めた。

Three-dimensional Analysis which applied Poroelasticity Theory of Drainage Mixture

Toshinori MATSUSHIMA, Shoichi AKIBA, Yuzou KURIYAGAWA and Yosuke KANO

$$z=0 \text{ で } \frac{\partial w}{\partial r} = 0 \quad \alpha k^* u = (1 - \alpha) \tau_{rz} \quad \dots (2)$$

$$\text{任意の } z \text{ で } 2\pi \int_0^B r \sigma_z dr = P \quad (P = B p_0) \quad \dots (3)$$

$$r=B \text{ で } r = q_0 \quad \dots (4)$$

上式中 α は端面の摩擦の程度を表わす係数で 0 から 1 であり 0 であれば端面拘束なし, 1 であれば端面の水平方向変位 u が拘束される. 本解析ではこの α を拘束係数と称す. なお k^* は α を無次元するために導入したパラメータである.

3 端面拘束を考慮した材料評価

3-1 数値結果

ここでは空隙のない有限円柱 ($\nu = 0$) について, 端面拘束の影響を調べる. 図-2は側面の半径方向変位 u の結果である. なお, 図中あるいは以降で用いる記号において, サフィックス 0 は $\alpha = 0$ における結果(基本解)を表している. これより, 端面が拘束されることで高さの中央部に向かっての側面のふくらみが認められており, その形状は弾性円柱の寸法比 ($\lambda = C/B$) や拘束係数 α の大きさによって異なっている. この場合, 側面のふくらみは高さの中央部で必ずしも最大でなく, 円柱の寸法比 $\lambda = 4.0$ では $\alpha = 0.7$ 付近で最大となる. このことは円柱全体で側面に二つのふくらみを有することを意味しており, このような結果は実験的あるいは解析的な研究成果^{3),5)}と同様である.

表-1は端面での軸方向変位 w の結果である. 結果は基本解 w_0 で除している. 表中には文献³⁾による計算結果も示した. なお, 文献³⁾は拘束係数 α を $\alpha = 0$ で端面における r 方向変位が 0, $\alpha = 1$ で自由 ($\alpha =$ 基本解)としており, 本解析条件とは対称であることから, α は本条件の設定に合わせている. これより, 結果は端面における r 方向変位が完全に拘束 ($\alpha = 1$) される場合にほぼ一致しているが, 多少この部分の変位が許される ($\alpha = 0.5$) とわずかであるが軸方向変

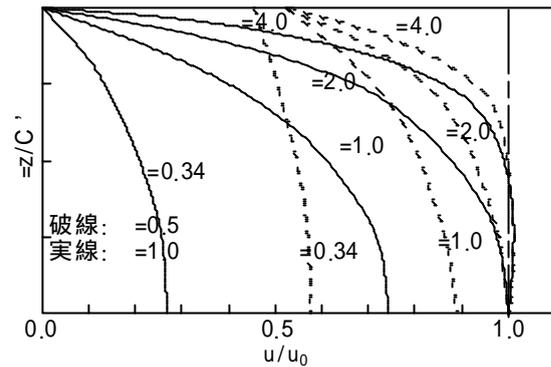


図-2 円柱側面の u の分布 ($\lambda = 0.2, q_0 = 0$)

表-1 载荷端面の軸方向変位 ($\lambda = 0.2, p_0 = 1.0$)

	本解析		文献 ³⁾	
	1.0	0.5	1.0	0.5
4.00	0.9891	0.9948	0.9891	0.9946
2.00	0.9781	0.9896	0.9781	0.9899
1.00	0.9555	0.9791	0.9555	0.9778
0.34	0.9201	0.9535	0.9197	0.9588

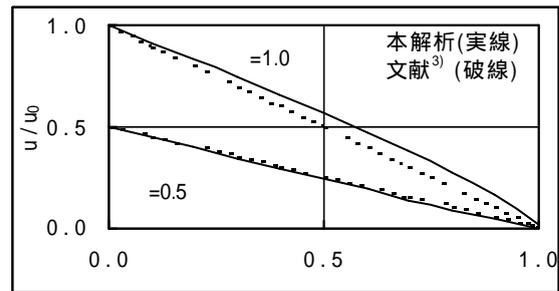


図-3 端面摩擦の u に与える影響 ($\lambda = 0.2, \alpha = 4, q_0 = 0$)

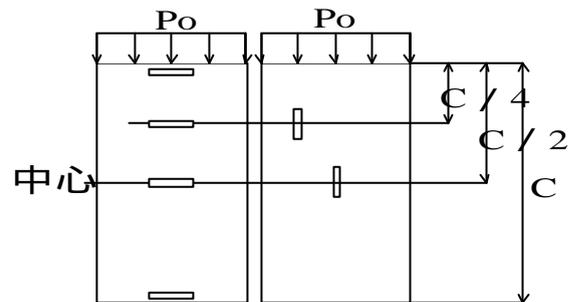


図 4 ひずみゲージ貼付位置

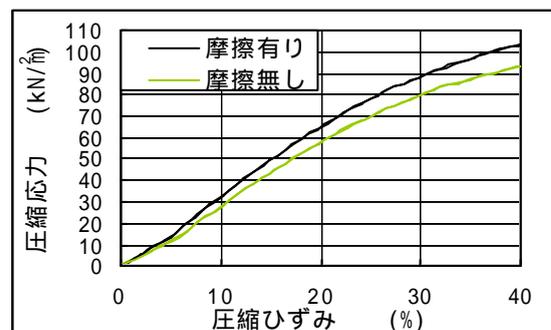


図 5 応力 ひずみ曲線

位に差異が現れる．このような現象は端面拘束に対する境界条件の設定の仕方の違いに起因している．すなわち既往の解析結果では端面における任意の位置の u は δ に正比例するが，本解析結果では境界条件を式(5)で与えているために端面の任意の位置における u と δ が比例関係にない．このことを説明可能な結果として， δ ($= r/B$)が 0.5および 1 において， δ に変化させて u を計算したものが図-3である．

3-2 実験結果

ここでは，硬質ゴムを用いて載荷端面の摩擦を考慮した一軸圧縮試験を実施した．載荷端面の摩擦の状態は，端面に何も施さない状態を摩擦有り，滑剤(ローション)を塗布した場合を摩擦無しとした．また側面のふくらみを把握するために図 4 に示す位置にひずみゲージ(KFG-30-120-C1-11：共和電業社製)を貼付した．

図 5は硬質ゴムの軸方向載荷による応力ひずみ曲線である．これより，同一ひずみにおける応力は摩擦無しの場合が摩擦有りの場合に比べて小さい結果が得られた．

表 2は，摩擦有り，摩擦無しの弾性係数を求めたもので，弾性係数を求める手法にはさまざまなものがあるが，今回は割線弾性係数を用いた．圧縮ひずみ (%)が 10，20，30，40の 4 個所の点で弾性係数を求めたところ，摩擦有り・無しで比較すると，この実験でも摩擦有りの場合が大きくなった．

図 6は供試体の載荷状況を示したものであるが，明らかに端面での側面のふくらみの状態が異なっているのが確認できる．このような結果はひずみゲージによるひずみ測定でも現れている．その結果が図 7である．これより，摩擦有りおよび摩擦無しを比較すると，まず，端面付近では摩擦有りの方が無しに比べひずみが小さく，それ以外では全体的に摩擦無しの方が有りよりもひずみが小さくなる．次に，数値計算で現

表 - 2 弾性係数

	E ₁₀	E ₂₀	E ₃₀	E ₄₀
摩擦有り	0.320	0.325	0.293	0.260
摩擦無し	0.280	0.285	0.267	0.233

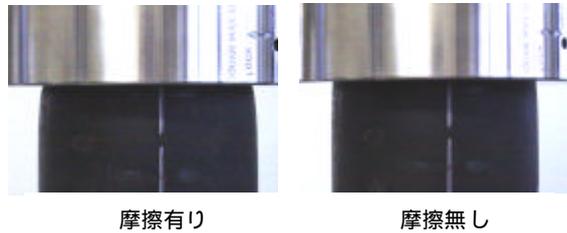


図 - 6 圧縮時の端面状態

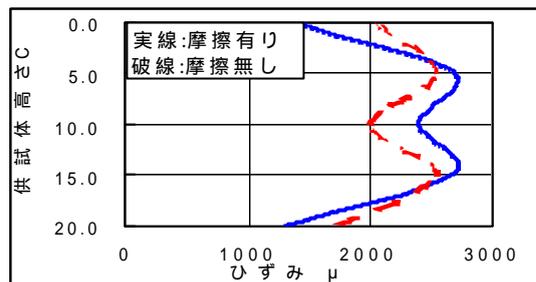


図 - 7 側面のふくらみ

れたような側面における二つのふくらみであるが，両者ともに発現しており，理論的な傾向と一致している．ただし，実測結果は摩擦無しでも二つのふくらみが確認されていることから，これは端面拘束の状態を実験により再現することは不可能であるということを示す結果であると考えられる．

4 多孔質材料を考慮した解析結果

図-8から10は δ の違いが変位やひずみ成分に与える影響，図-11および12は p_0 の違いがひずみ成分に与える影響の結果である．なお， w は軸方向端面，ひずみは図-1におけるA点の計算結果である．また，図中の σ_1 は基本解における主応力差を示している．

図-8の軸方向変位，図-9の軸方向ひずみは δ を増加させることによって減少している．図-11においても p_0 の増加に対する軸方向ひずみの傾向が同様の結果となっている．

図-10および図-12については， $\delta/p_0=1$ ($q_0=0$)では σ_1 あるいは p_0 の増加に対する周方向ひずみの傾向は増加しているが，その他

の条件では p_0 の値が大きくなるにしたがい減少傾向にある。一方 $p_0=2(q_0=1)$ では、あるいは p_0 の増加の伴い、周方向ひずみが引張りから圧縮に変化するようになる。これは、間隙に水と空気が混在している場合、飽和度を表わすような p_0 と空気間隙率を表わす q_0 を増加させるためには、間隙体積を減少させる必要があることに起因している。すなわち、側圧の存在する状態では、円柱が上下・周方向から縮小することで間隙体積が減少するので、軸方向ひずみと同時に周方向ひずみも圧縮側へ移行するものと推察される。以上の結果より、変位・ひずみ成分ともに空隙に関する因子 (p_0 、 q_0) の影響が大きいことがわかる。

5 まとめ

本研究では、排水性混合物の力学評価を目的に、一軸あるいは三軸載荷試験を想定した三次元多孔質弾性解析を実施した。これは端面拘束、飽和状態あるいは間隙圧を考慮した解析解である。その結果、端面拘束が応力-ひずみ関係に影響を与えることが確認できた。また、間隙内の飽和状態あるいは空気間隙率の違いが有限円柱の変形特性に与える影響を数値計算により明らかにした。これにより本解析結果を排水性混合物の力学評価へ応用することの有用性が確認できた。今後は、本解析結果を用いた具体的な評価手法の検討が必要と考えている。

参考文献

- 1) 秋葉他：土木学会論文集 No.484 / -22, pp. 41 ~ 49, 1994.
- 2) 梶田他：土木学会論文報告集 第 166 号, pp. 27 ~ 38, 1969.
- 3) 渡辺：土木学会論文集 No.450 / I - 20 pp. 85 ~ 94, 1992.
- 4) Nomachi, SG.: Memories of Muroran Institute of Tech. Vol.3, No.3, pp. 91 ~ 115, 1960.
- 5) 長松他：日本機械学会論文集 (第 1 部) 36 巻, 288 号, pp. 1276 ~ 1296, 1970.

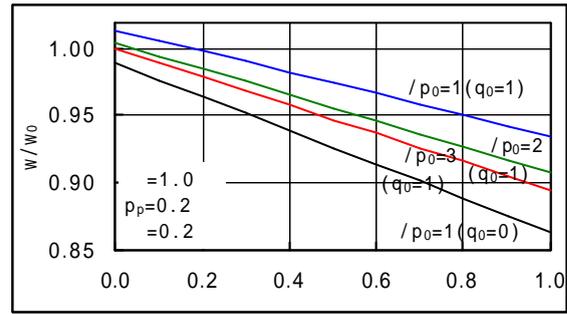


図 - 8 w と z の関係

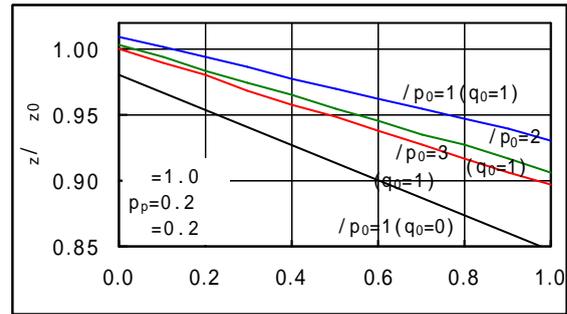


図 - 9 z と z の関係

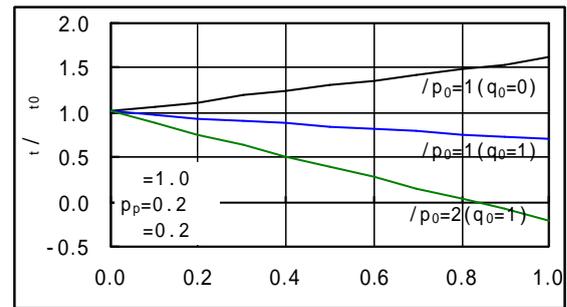


図 - 10 τ と z の関係

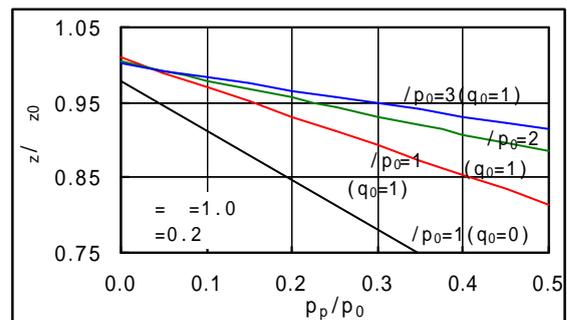


図 - 11 z と p_p の関係

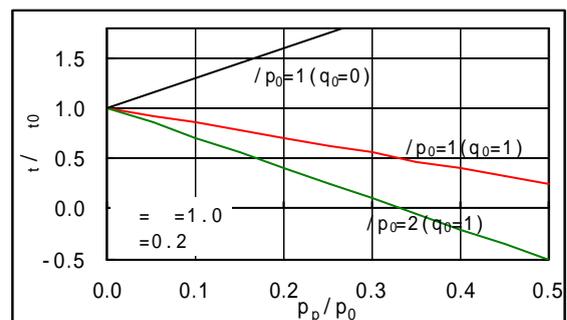


図 - 12 τ と p_p の関係