

不飽和砂質土供試体における気泡混入水の体積圧縮特性

防災科学技術研究所 正会員○中澤 博志, 田端憲太郎
 東京大学 正会員 濱本昌一郎
 佐藤工業 正会員 永尾 浩一
 基礎地盤コンサルタンツ 正会員 山田 眞一

1. はじめに

近年、液状化対策工法の一つに、液状化層の不飽和化による対策の提案が積極的に行われており、その施工性の確認や効果が実証されつつある。筆者らは、直径 $\phi 10\sim 100\mu\text{m}$ の気泡径を用いたマイクロバブル（以下、MB）に加え、汚染土壌対策に用いられる $\phi 10\text{nm}\sim 10\mu\text{m}$ の微細な気泡であるナノバブル¹⁾（以下、NB）による改良効果について、図-1に示すように、要素試験により液状化強度の増加傾向を確認した²⁾。いずれも気泡混合水を地下水と置換することで対策する工法であるが、人工的に精製される気泡混合水の有する圧縮性等の諸性質について検討された事例は少ない。そこで、脱気水、MB水およびNB水に関し、三軸試験により有効拘束圧一定条件下における不飽和砂質土における背圧の影響や間隙水の圧縮性について調べ報告する。

2. 地盤材料および試験方法

室内試験で用いた地盤材料は飯豊珪砂6号であり、その代表的な物理特性を表-1に示す。この飯豊珪砂6号を空中落下法により相対密度 D_r が概ね60%になるよう $\phi 50\text{mm}\times H 100\text{mm}$ の供試体を作製した。その後、飽和供試体に脱気水、不飽和土については、MB水およびNB水を通水した。なお、水温は室温(22°C)とした。

背圧の影響に関する確認試験に関し、有効拘束圧 $\sigma'_c = 50\text{kPa}$ 一定で、背圧（以下、B.P.）を0, 20, 50, 100, 200, 0, 200, 0, 200および0kPaと変化させ、各ステップにおいてデジタルVTR機材による泡の析出確認、 B 値および弾性波速度(V_s, V_p)測定を行った。各ステップの計測が終了後、本報では割愛するが、 $\sigma'_c = 50\text{kPa}$ (B.P.=0kPa)で圧密非排水三軸圧縮試験を実施した。また、間隙水の性質を把握するため、脱気水、MB水およびNB水について、写真-1に示す真鍮製の圧力容器を用い、容器断面の膨張による体積変化を補正しながら、加圧時の水の体積変化量 ΔV を求め、体積弾性係数 K を直接測定した。なお、VTRからは、泡の析出は確認されなかった。

3. 背圧の影響に関する確認試験結果

図-2に B 値と背圧の関係を示す。図中には、参考値として、飽和過程における豊浦砂供試体から得られたデータも併記した。飯豊珪砂のB.P.の範囲は0~200kPaの範囲であるが、豊浦砂と同様な傾向を示し、B.P.とともに B 値も上昇し、脱気あるいは気泡混合の有無で境界線が存在すること、背圧が大きいと、両者は近接するが、最終的に得られる B 値は初期の飽和度に依存していることがわかる。

図-3に B 値と弾性波速度の関係を示す。図中に示した多孔質弾性理論に基づく V_p の理論曲線は、気乾状態の供試体の弾性波速度計測

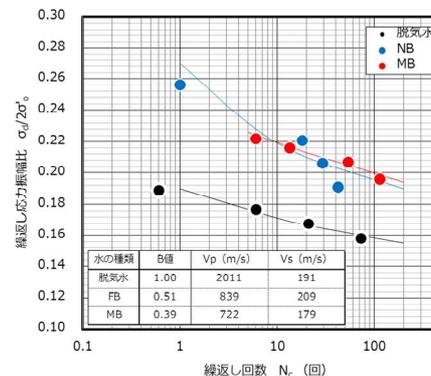


図-1 液状化強度曲線

表-1 試料の物理的性質

項目	単位	飯豊珪砂6号	
土粒子の密度 ρ_d	g/cm^3	2.651	
粒度組成	中砂分	%	72.3
	細砂分	%	27.0
	シルト分	%	0.7
	平均粒径 D_{50}	mm	0.299
	均等係数 U_c	-	1.78
最大間隙比 e_{max}	-	0.876	
最小間隙比 e_{min}	-	0.520	



写真-1 気泡混合水の圧縮試験状況

キーワード 液状化対策, 不飽和化, 体積弾性係数, マイクロバブル, ナノバブル, 弾性波速度

連絡先 〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1 (研) 防災科学技術研究所 TEL 029-863-7308

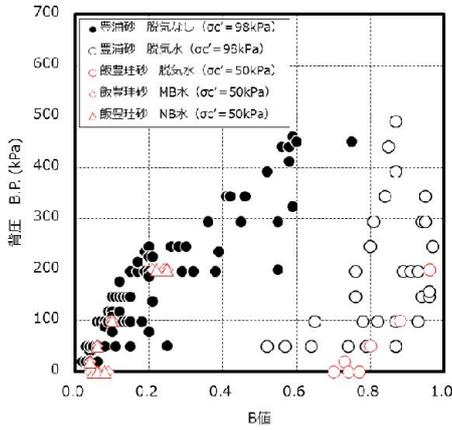


図-2 B値と背圧の関係

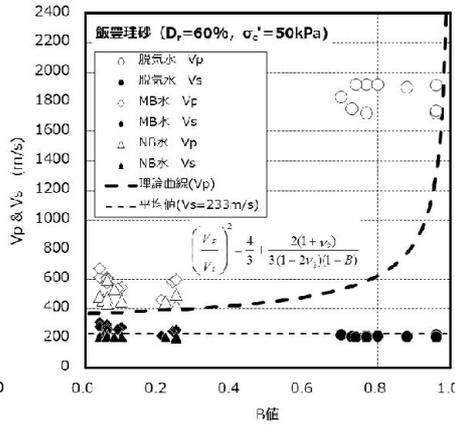


図-3 B値と弾性波速度の関係

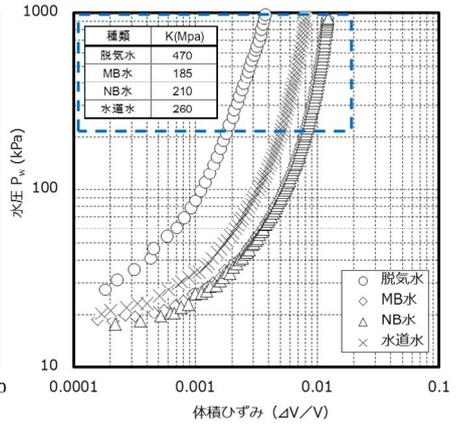


図-4 間隙水の圧縮特性

を行い、 $\sigma'_c = 50\text{kPa}$ における砂骨格の体積弾性係数 $K_b = 167.4\text{MPa}$ とポアソン比 $\nu_b = 0.299$ をそれぞれ用いた。 V_s については供試体密度 ρ に依存するため、 D_r が概ね等しい各ケース間で大きな差異は無いが、 V_p は間隙水の種類により分布範囲に大きな違いが見られる。 B.P.が $0 \sim 200\text{kPa}$ における V_p の特徴として、脱気水は 1800m/s 前後、MB水およびNB水の V_p は脱気水に比べ $1/3$ 以下の値を示すが、理論式との整合は示されている。

4. 間隙水の圧縮試験結果

図-4 に間隙水の体積ひずみ-水圧関係を示し、混合水の圧縮特性について述べる。脱気水と2種類の気泡混合水は、いずれも体積ひずみ ϵ_v の増加に伴い水圧 P_w も増加し、その勾配も大きくなる。通常、水の K_w は 2.2GPa 程度かつほぼ線形と考えられるが、 P_w が 200kPa 以上のある程度安定した領域で求めた脱気水の平均的な K_w は 470Mpa 程度であった。この理由として、作業時に容器中に付着した未確認の泡の影響も否定できない。そこで本報では、初期勾配を除き、線形に近づいている図中の点線部より K_w (気泡混合水は K_{aw}) を求めた。図中に示す表によると、 K の値は脱気水が最も大きく、次いで比較のため試行した水道水、MB水とNB水はほぼ同様かつ最も小さな値を示している。

B.P.あるいは P_w に対する供試体および混合水の体積弾性係数の関係を図-5 に示す。なお、図中の K の値は、飯豊珪砂の弾性波速度に基づき、図-3 中に示す式から算出した値と、図-4 に示す気泡混合水の圧縮試験結果において、 ΔV と P_w の増分から求めた体積弾性係数である。脱気水の K_w については、上述の通り、定量的な議論が難しいが、一般的には非圧縮性流体として扱われることから、 K_b に対し脱気水の K_w は著しく大きな値のはずである。この場合、非排水条件下での土骨格の変形と間隙流体の変形が同時に同じ変化量で起こると考えると、間隙の体積変化分の間隙水圧増分が生じる要因となり得る。一方、MB水やNB水に関しては、 P_w が低い範囲で K_{aw} が K_b を下回っていることから、間隙水圧の変化は小さいものと考えられる。一方、気泡混合水は過飽和状態であるため、 P_w が大きくなるにつれ気泡が潰れていくことから、図-2 の傾向と同様に、次第に脱気水に近い傾向を示すものと推察される。

5. まとめ

今回、気泡混合水の圧縮性に着目した試験を実施し、有効拘束圧一定条件下での背圧の影響を調べ、NB水とMB水について同様な圧縮性を示した。体積弾性係数と相関があるせん断弾性係数には拘束圧依存性があることから、有効拘束圧の影響、また、ダイレイタンスーに対する試験ケースについて検討の余地がある。

参考文献 1) Nagao et al. :In-situ applicability test of soil improvement for housing sites using Micro-Bubbles against soil liquefaction in URAYASU, Japan, 25th International Ocean and Polar Engineering Conference, pp.845-852, 2015. 2) 中澤博志他：気泡混入水による砂質土供試体の液状化強度特性，土木学会第71回年次学術講演会，pp.447-448, 2016.

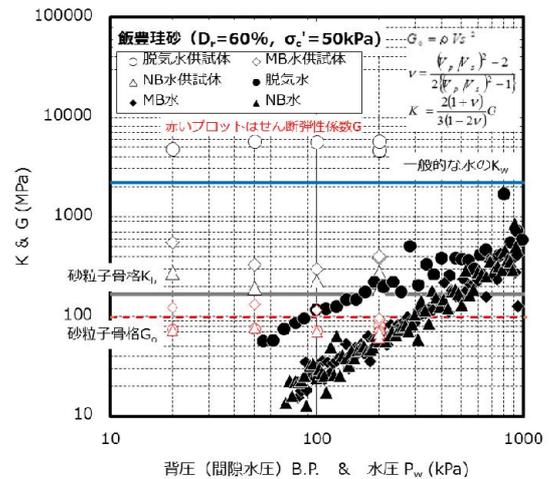


図-5 体積弾性係数の比較