

気泡を添加したスラリー状混合土の力学特性

松井 秀岳^{*1}・石井 裕泰^{*1}・立石 章^{*1}・堀越 研一^{*1}・木暮 瞳^{*2}・渡辺 崇弘^{*3}

Keywords : soil from construction, backfilling, improved soil, dynamic characteristics, shear wave velocity

建設発生土, 埋戻し, 改良土, 動的特性, せん断波速度

1. はじめに

土・水・固化材および気泡を混合しスラリー状にした気泡混合土は、現地発生土を利用できること、ポンプ圧送による打設が可能であること、転圧が必要であることなど、施工上の利点を多く有している。また、気泡を含む分軽量であるため、地中構造物に作用する土圧を低減できる等、設計上の利点もあり、地中構造物や配管の埋戻し等に利用されている¹⁾。

一方で、その力学特性、特に動的な変形特性の検討事例は限定的で、重要構造物周辺への適用を想定した知見の蓄積は工学的に有用であると考えられる。

そこで、粒径の揃った砂を母材とするスラリー状気泡混合土を対象に、基本配合検討と各種力学試験を行った。基本配合検討では、所定の流動性や材料分離抵抗性を満足する配合を特定するとともに、固化材量 C と一軸圧縮強さ q_u 、せん断波速度 V_s の関係を明らかにした。また、各種力学試験では、圧縮強さや変形係数などの静的力学特性、せん断波速度や動せん断弾性係数などの動的力学特性について調べ、セメント改良土の既往の知見との比較を行うとともに、拘束圧依存性やひずみ依存性について考察した。

2. 基本配合検討

2.1 使用材料

スラリー状気泡混合土の母材には、掘削工事で発生した粒径の揃った砂を用いた。供試体作製方法 JGS 0821-2009 に基づき、9.5mm ふるい通過分のみを使用した。ふるい通過試料の粒度分布と土粒子密度を図-1

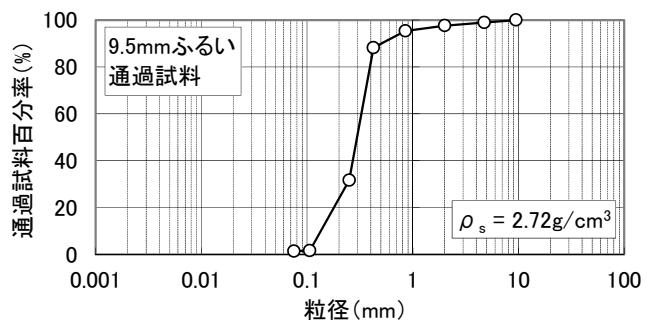


図-1 砂の粒度分布と土粒子密度

Fig.1 Grain size distribution curve and particle density of sand

に示す。固化材は、市販の高炉セメント B 種を用いた。また、未固結状態の流動性と材料分離抵抗性を調整する添加材として、ベントナイト（クニゲル V2）、分散剤（ジオスパーK）、気泡（フローリック FA100 を水道水で 20 倍に希釈し、発泡倍率 25 倍で作製）を用いた。

2.2 配合検討

現地発生土を流動化させて使用する類似材料の施工事例¹⁾、技術資料²⁾を参照し、フロー値（JH フロー）160～200mm、ブリーディング率 1%以下を配合の目標値とした。検討では、50～350kg/m³ の間で任意に設定した量の固化材と、砂、水、添加剤を混練し、未固結の状態でフロー値を確認した。さらに、目標フロー値を満足したものについて、混練から 24 時間後のブリーディング率を測定した。また、一部の配合で、混練した材料を $\phi 50\text{mm} \times H100\text{mm}$ のモールドに入れ、湿空養生にて供試体を作製し、一軸圧縮試験、無拘束条件の超音波速度測定を実施した。

2.3 検討結果

表-1に、検討結果の一覧を示す。今回検討した添加量の範囲において、ベントナイト+分散剤を用いた配合（No.1～No.5）ではブリーディング率 1%以下を満足できなかった。また、気泡量を 300L/m^3 以上とした

*1 技術センター土木技術研究所地盤・岩盤研究室

*2 東京支店土木工事作業所

*3 土木本部土木設計部

表-1 配合検討結果一覧
Table.1 Results of trial mixtures

No.	配合						未固結時の性状			固結時の性状	
	固化材 kg/m ³	砂 kg/m ³	水 kg/m ³	ペントナイト kg/m ³	分散剤 kg/m ³	気泡 L/m ³	フロー値 mm	未固結 湿潤密度	ブリーディング率 %	σ_{28} MN/m ²	V_{s28} m/s
1	200	1,283	475	20	0	0	180	—	4.00	—	—
2	50	1,496	449	20	1	0	163	—	3.10	—	—
3	300	1,329	426	20	1	0	193	—	2.60	—	—
4	300	1,370	411	20	1	0	172	—	2.70	—	—
5	300	1,346	418	25	1	0	196	—	1.31	10.8	1,732
6	100	1,318	303	0	0	200	165	1.67	2.87	1.07	988
7	150	1,118	257	0	0	300	172	1.46	0.47	1.74	1,110
8	300	982	255	0	0	300	172	1.52	0.67	6.62	1,492
9	350	955	248	0	0	300	159	1.53	0.55	8.51	1,638
10	100	1,146	264	0	0	300	183	1.43	1.09	0.633	844
11	100	1,060	244	0	0	350	192	1.30	0.61	0.520	777
12	130	1,129	260	0	0	300	183	1.43	1.06	1.33	1,050
13	150	1,104	245	0	0	300	177	1.44	0.27	1.58	939
14	190	1,000	270	0	0	300	181	1.44	0.49	2.77	1,195
15	240	967	266	0	0	300	183	1.46	0.33	5.32	1,423

* 砂は乾燥重量。水は全水量（砂含水分+加水分の全量）。

* 土粒子密度は、No.1～No.12で事前調査の結果である 2.84g/cm³を、No.13～15では No.12 の検討が終了した後に改めて実施した試験の結果である 2.72g/cm³を用いた。

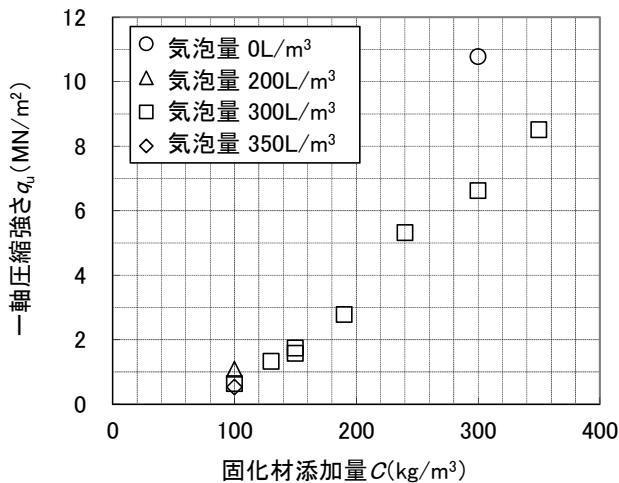
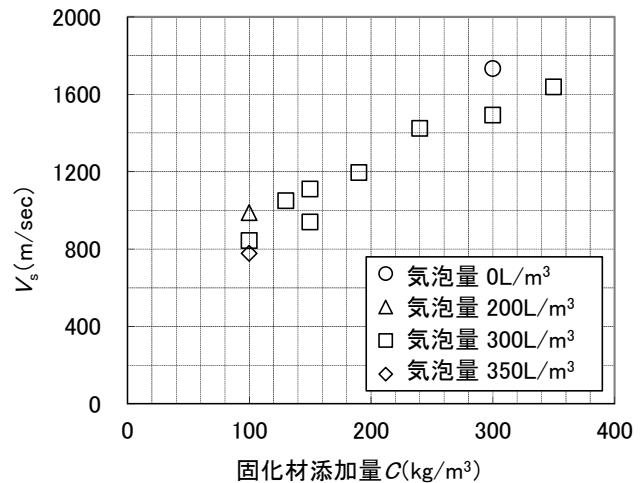
(a) C-q_u関係(b) C-V_s関係図-2 固化材添加量と一軸圧縮強さ、 V_s の関係

Fig.2 Relationships of cement content with unconfined compression strength and shear wave velocity

配合 (No.7～No.15) では、固化材添加量 $C=150\text{kg}/\text{m}^3$ 以上 (No.7～9, 11, 13～15) で、ブリーディング率を 1%以下に抑えることができた。

図-2に固化材添加量 C と一軸圧縮強さ q_u 、せん断

波速度 V_s の関係を示す。ここでは、ブリーディング率 1%以上の配合も含めて、得られた結果全てをプロットした。複数の固化材量で結果を得た気泡量 300L/m³ の配合では、固化材添加量が多いほど、一軸圧縮強さ、

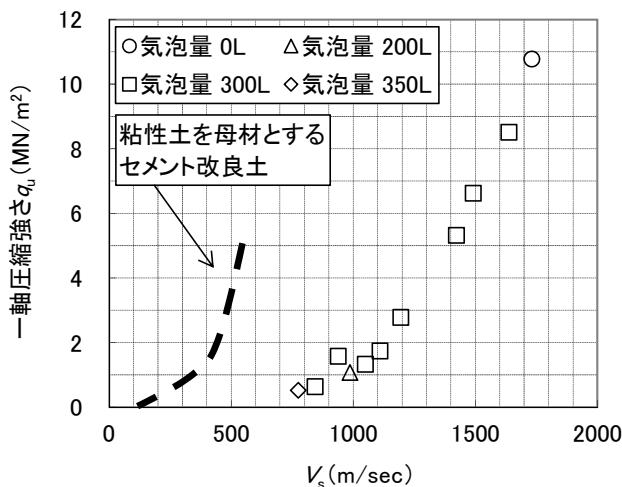
図-3 V_s と一軸圧縮強さの関係

Fig.3 Relationship between unconfined compression strength and shear wave velocity

V_s とともに大きくなる傾向を確認できた。また、異なる気泡量で結果を得た固化材量 $100, 300\text{kg}/\text{m}^3$ のケースでは、気泡量が多いほど q_u が小さく、 V_s は遅くなつた。

図-3に V_s と一軸圧縮強さの関係を示す。セメント改良土に関する既往の知見³⁾では、 V_s と一軸圧縮強さがひとつの傾向線上に分布することがわかつており、気泡を含む今回の材料でも同様の傾向を確認することができた。また、粘性土を母材とする気泡を含まないセメント改良土で得られた知見⁴⁾(図-3中破線)と比較すると、同程度の強度水準では、今回検討した材料のせん断波速度のほうが大きいことも分かった。

3. 物理・力学特性試験

3.1 概要

配合検討において、目標としたフロー値とブリーディング率を満足した配合のうち、No.13～15を用いて静的・動的力学特性の拘束圧依存性・ひずみ依存性を調べるための試験を実施した。

表-2に試験項目と規格を示す。いずれも拘束条件下で実施する試験であり、先行して実施したNo.13は有効拘束圧 $\sigma_c' = 0.05, 0.1, 0.2, 0.4\text{MN}/\text{m}^2$ の4水準、材齢28日で試験を実施した。追って実施したNo.14, 15では、より詳細に拘束圧の影響を確認するために、有効拘束圧 $\sigma_c' = 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.4\text{MN}/\text{m}^2$ の6水準で実施した。また、試験工程の都合により、材齢37日で試験を実施した。

3.2 超音波速度測定

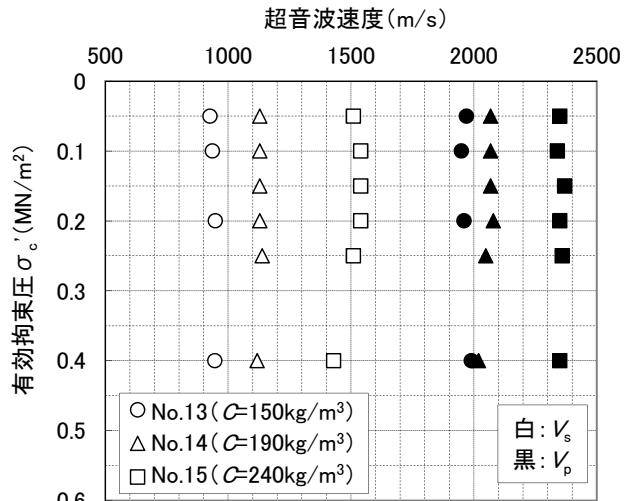
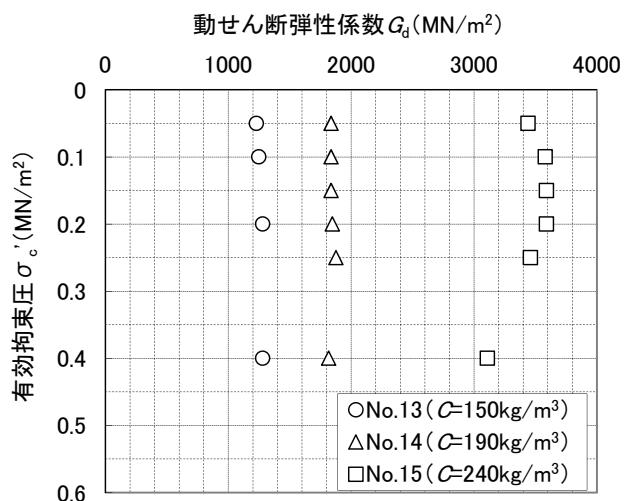
3.2.1 試験方法

供試体を三軸セルにセットし、背圧を作成させて通

表-2 試験項目
Table.2 Test conditions

試験項目	規格・基準
超音波速度測定（拘束条件）	JIS 2110-2009
非排水三軸圧縮試験（CU）	JGS 0523-2009*
変形特性を求めるための繰返し三軸試験	JGS 0542-2009

* 試験機械の制約により、試験に用いた供試体の寸法は規格外の $\phi 50\text{mm} \times H50\text{mm}$ 。

(a) V_s, V_p と有効拘束圧の関係

(b) 動せん断弾性係数と有効拘束圧の関係

図-4 超音波速度測定の結果
Fig.4 Results of measurement of ultrasonic velocity

水後、所定の有効拘束圧で圧密させ、供試体両端に設置した振動子で S 波、P 波の透過時間を計測した。背圧は後述の 3.3.1 と同様の経緯で、No.13 で $0.4\text{ MN}/\text{m}^2$ 、No.14, 15 で $0.1\text{ MN}/\text{m}^2$ を作用させた。各配合で 1 つの供試体を用いて、有効拘束圧 $\sigma_c' = 0.05\text{ MN}/\text{m}^2$ から計測を開始し、順次拘束圧を上げて計測を実施した。供試体高さを S 波、P 波の透過時間で除して V_s, V_p を求

めた。また、測定時の湿潤密度と V_s から動せん断弾性係数を算定した。

3.2.2 試験結果

図-4に超音波速度測定の結果を示す。固化材量が多いほど超音波速度は大きい。また、ややばらつきはあるものの、 V_s 、 V_p ともに拘束圧に伴う変化は小さく、その平均値は、無拘束圧で測定した結果（表-1に記載）と同等の値となった。

3.3 非排水三軸圧縮試験

3.3.1 試験方法

供試体を三軸セルにセットし、背圧を作用させて通水後、所定の有効拘束圧で圧密させ、非排水状態で軸圧縮力を作用させ、その時の軸圧縮力、軸変位量、間隙水圧を計測した。No.13では、通水過程でB値を上げるために背圧を0.4MN/m²まで作用させたが、B値は0.81～0.86までしか上がらなかった。長期間の水浸においても独立した気泡が残る本材料の特性を考え、No.14、15では背圧を一律0.1MN/m²とし、B値上げる操作およびB値の計測は実施していない。

3.3.2 試験結果

図-5に圧縮強さ（主応力差の最大値）と有効拘束圧の関係を示す。一軸圧縮強さやせん断波速度（図-2）と同様に、固化材量が多いほど圧縮強さが大きいことがわかる。また、ややばらつきがあるものの、超音波速度と同様に、拘束圧の変化に伴う強度の増減傾向は見られなかった。

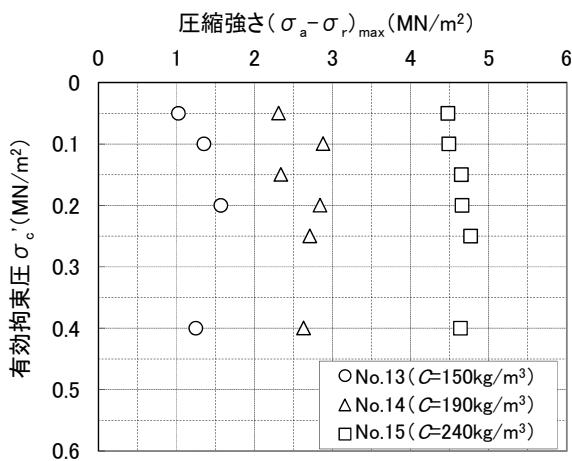


図-5 圧縮強さと有効拘束圧の関係

Fig.5 Relationship between compression strength and confining pressure

3.4 変形特性を求めるための繰返し三軸試験

3.4.1 試験方法

供試体を三軸セルにセットし、背圧を作用させて通水後、所定の有効拘束圧で圧密させ、非排水条件で周

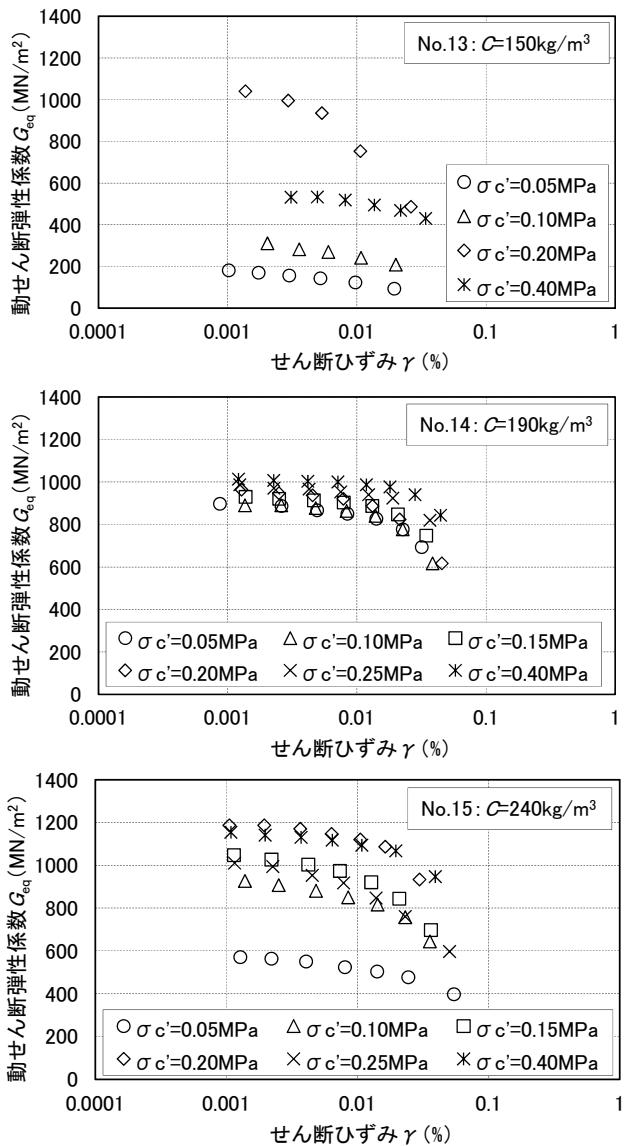


図-6 動せん断弾性係数とせん断ひずみの関係
Fig.6 Relationships between dynamic shear modulus and shear strain

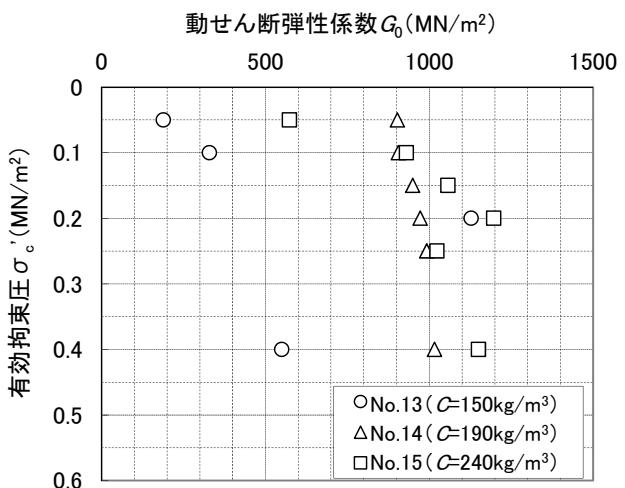


図-7 有効拘束圧と動せん断弾性係数の関係
Fig.7 Relationship between confining pressure and dynamic shear modulus

波数 0.25Hz の正弦波荷重を作用させた。この時の軸差応力と軸ひずみを記録し、5 および 10 回目の繰返しサイクルにおける、動せん断弾性係数、履歴減衰率、それに対する片振幅軸ひずみを整理した。試験時の背圧は、3.3.1 と同様の経緯で、No.13 では $0.3\text{MN}/\text{m}^2$ 、No.14, 15 で $0.1\text{MN}/\text{m}^2$ とした。

3.4.2 試験結果

図-6 にせん断ひずみと動せん断弾性係数の関係を示す。条件で程度は異なるが、せん断ひずみの増加に伴い、動せん断弾性係数が低下する傾向が見られる。

図-7 に、微小ひずみ領域での動せん断弾性係数 (G_{eq}) と γ の関係を近似した曲線から求めた、せん断ひずみ $10^{-4}\%$ の動せん断弾性係数) と拘束圧の関係を示す。全体的に固化材量が多いほど動せん断弾性係数は大きくなっているように見えるが、値のばらつきが大きく、特に拘束圧との関係は定性的な評価も難しい。超音波速度測定の結果から得られた動せん断弾性係数(図-4)と比較すると、微小ひずみ領域の動せん断弾性係数が小さく、この差の一因として端面の接触不良(ベディングエラー⁵⁾)が考えられる。軸変位をペデスタルの変位で計測していること、試験対象が土質より硬質な改良土であることなど、今回の試験はベディングエラーが起こりやすい状況にあり、結果のばらつきもベディングエラーによる可能性が考えられる。

図-8 には、微小ひずみ領域の値で正規化した動せん断弾性係数とせん断ひずみの関係を示す。正規化した動せん断弾性係数は、No.13 の有効拘束圧 $\sigma'_c = 0.4\text{MN}/\text{m}^2$ の結果を除いて、拘束圧によらず 1 つの傾向線上にあることがわかった。あわせて、図-8 には H-D モデルで求めた近似曲線を示す。近似曲線は、材料のひずみ依存性をよく再現している。自然体積試料を用いた試験では、 $G/G_0 \sim \gamma$ の関係はベディングエラーの影響を受けないという報告⁶⁾があり、今回検討した材料も同様の傾向を示したものと思われる。

図-9 には、履歴減衰率とせん断ひずみの関係を示す。No.13 の有効拘束圧 $\sigma'_c = 0.4\text{MN}/\text{m}^2$ の結果を除いて、拘束圧によらず 1 つの傾向線上に分布しており、H-D モデルで精度よく近似することができた。

3.5 試験結果の考察

今回実施したスラリー状気泡混合土の試験では、拘束圧による強度・剛性の増加・減少傾向が見られなかった。セメント改良土では強度・剛性の拘束圧依存性が報告^{7)~9)}されており、その傾向は拘束圧と土粒子間の接着強さによって以下のように説明されている。

- 拘束圧が土粒子間の接着強さを超えるまでは接着強

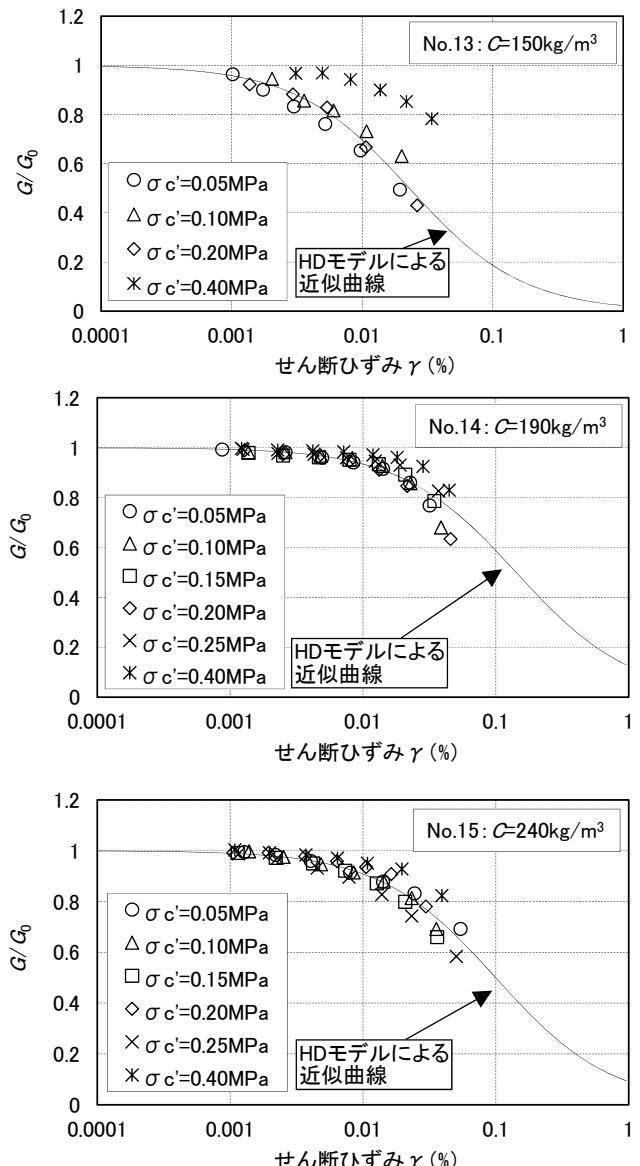


図-8 G/G_0 とせん断ひずみの関係
Fig.8 Relationships between G/G_0 and shear strain

さに由来する一定の強度・剛性を発揮する。

- 拘束圧が接着強さと同等程度になると接着が損傷し強度・剛性の低下が起こる。
- さらに拘束圧が増加すると今度は高密度化によって土粒子表面における分子レベルの再結晶化が進み、強度・剛性が向上する。
- 土粒子間の接着が損傷する際には、拘束圧載荷に伴って軸ひずみの急増(3%程度)が見られる。

今回実施した一連の試験では、拘束圧作用時(圧密時)の軸ひずみは最大でも 0.3% であり、前述のセメント改良土の報告で見られた 3% 程度の軸ひずみに比べて小さく、土粒子間の接着が損傷しなかつたため、拘束圧の変化に対する強度・剛性の増減が見られなかつたと考えられる。強度水準が低い配合や、適用深度が

深く高い拘束圧が作用する箇所で採用する際は、土粒子間接着の損傷に伴う強度・剛性の低下が懸念されるため、それらを考慮した試験条件の設定が重要となる。

4. まとめ

スラリー状気泡混合土を用いた配合検討、各種力学試験を実施し、その結果から以下の知見を得た。

- 1) 複数の固化材添加量について、所定の流動性、材料分離抵抗性を満足する配合を明らかにした。
- 2) 気泡を 300L/m^3 添加した配合では、固化材量の増加にあわせてせん断波速度 V_s 、一軸圧縮強さ q_u が大きくなることがわかった。また、せん断波速度 V_s と一軸圧縮強さ q_u の関係は、配合や材齢によらず 1 つの傾向線上に分布することを明らかにした。
- 3) V_s 、 V_p 、動せん断弾性係数、拘束条件下の圧縮強さは、今回検討した拘束圧の範囲では、拘束圧によらず概ね一定の値となった。
- 4) 動的変形特性のひずみ依存性は、H-D モデルで精度よく近似することができた。

今回試験に使用した材料は気泡量一定のものであり、気泡量の異なる配合で作製した混合土の拘束圧依存性・ひずみ依存性は今後の検討課題である。

参考文献

- 1) 久野悟郎、流動化処理工法研究機構：土の流動化処理工法 [第二版]、2007.
- 2) ハイグレードソイル研究コンソーシアム：気泡混合土工法技術資料、2005.
- 3) 浅香美治、坂本忠、天利実：配合試験により作製したセメント改良土のせん断波速度と圧縮強度の関係、第45回地盤工学研究発表会、pp.589-590、2010.
- 4) 浅香美治：セメント系改良土のせん断波速度に基づく強度推定値と圧縮試験結果の比較、第46回地盤工学研究発表会、pp.637-638、2011.
- 5) 龍岡文夫、木幡行宏：ベディングエラー、土と基礎、Vol.42、No.9、pp53-55、1994.
- 6) 地盤工学会・地盤工学ハンドブック編集委員会：地盤工学ハンドブック、社団法人地盤工学会、1999.
- 7) 濱谷啓、三田地利之、小澤裕：セメント混合砂の変形・強度特性における時硬性および拘束圧履歴依存性、土木学会論文集報告集、No.687、III-56、pp.249-257、2001.
- 8) 坂中宜文、谷崎誠二、矢島寿一、永岡高、丸尾茂樹：流動化処理土の動的変形特性に関する研究、鉄建技術研究報告、No.10、pp39-44、1996.
- 9) 榎並昭、山田雅一：砂質土改良土の動的変形特性、第27回地盤工学研究発表会、pp.935-936、1992.

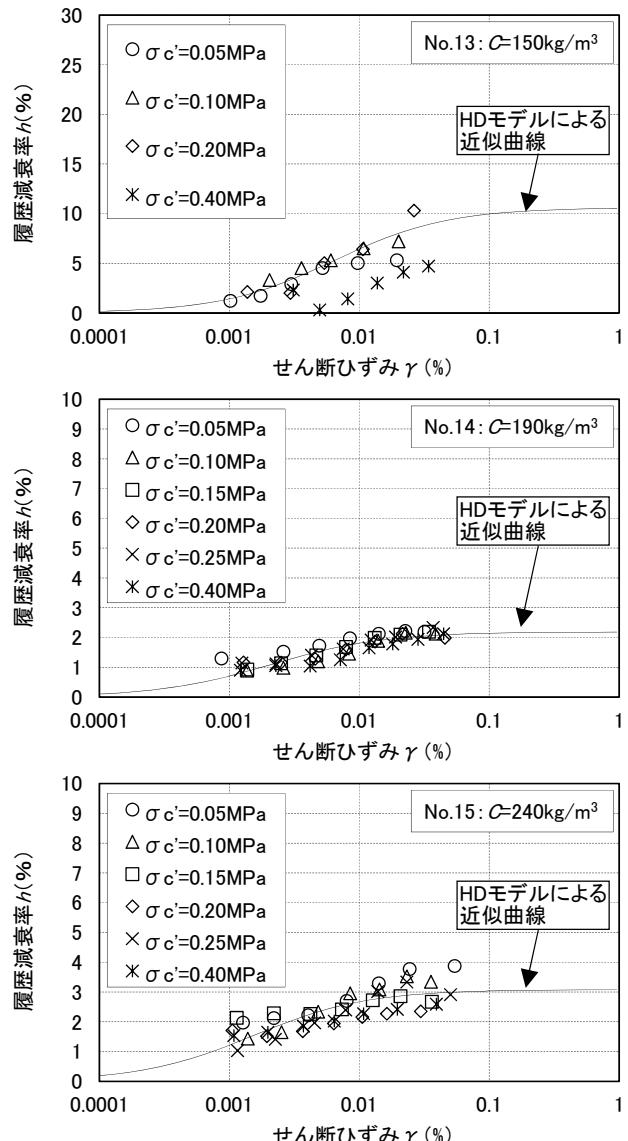


図-9 履歴減衰率とせん断ひずみの関係
Fig.9 Relationships between damping rate and shear strain