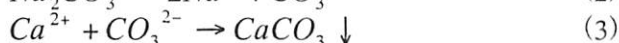
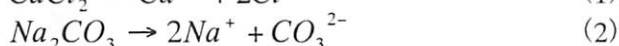


四国地方整備局	正会員	○只信紗也佳
愛媛大学大学院	学生会員	林 和幸
愛媛大学	正会員	安原 英明
愛媛大学	正会員	岡村 未対

1. はじめに 薬液注入工法は、注入するグラウトの粘性が高いため、割裂注入による不均一性が問題となっていた。近年では、水に近い粘性を有するイオン性グラウトの研究が進められており、グラウトの粘性を水に近づけることで、改良径の拡大および注入箇所の低減を図ることができる。その中では、自然地盤の代表的なセメント物質である炭酸カルシウムに着目したものが多く、川崎ら¹⁾は、微生物を用いて砂供試体に炭酸カルシウムを析出させた結果、透水係数が処理前に比べ約1オーダー低下することを確認した。DeJong et al.²⁾は、微生物による炭酸カルシウム析出実験から、強度および剛性の増加を確認している。しかし、炭酸カルシウムがどのようなメカニズムで強度増加に寄与しているのかは明らかになっていない。

そこで、本研究では、無機的に砂供試体に炭酸カルシウムを析出させ、炭酸カルシウム結晶による土粒子相互の固結（以下ボンディングと称して本文中で用いる）の有無による砂の力学特性の違いを、三軸圧縮試験（CD試験）を行い確認することを目的とした。

2. 試験方法 本研究では、炭酸ナトリウムと塩化カルシウムの2物質による化学反応を用いて炭酸カルシウムを析出させた。化学反応式を以下に示す。



供試体（φ50mm×H100mm）は豊浦砂と炭酸ナトリウムを乳鉢で粉碎し75μメッシュのふるいの目を通したものを混合し、所定の密度となるように詰めて作製した。相対密度は、炭酸ナトリウムの質量を含まない砂のみの質量と、所定の拘束圧相当の負圧をかけた状態における供試体体積から求め、いずれのケースも一定（約50%）とした。

三軸圧縮試験装置の概略を図1に示す。供試体下部から、間隙の体積量程度（約80ml）の脱気した塩化カルシウム水溶液を約1時間かけて通水し、供試体内に炭酸カルシウムを析出させた。通水後は、炭酸カルシウムの析出および土粒子への定着を目的とし、24時間の養生期間を設けた。この間、ヤング率と軸ひずみを一定時間おきに測定した。ヤング率は、セル内部のロードセルとキャップ両側のGap sensorから求めた。養生後は脱気した蒸留水を通水し、副産物である塩化ナトリウムを排出すると共に供試体を飽和した後に、三軸圧縮試験を排水条件で行った。 $\varepsilon_a < 1.5\%$ の軸ひずみ域ではGap sensorでの平均値から軸ひずみを求め、 $\varepsilon_a \geq 1.5\%$ の軸ひずみはダイヤルゲージで求めた。試験後の試料の供試体はすべてバットに取り出し、高温炉乾燥機内で一昼夜乾燥させ、炉乾燥後の試料の質量と試験前の砂質量の差から炭酸カルシウムの析出量を算定した。

本研究では、炭酸カルシウム析出および三軸圧縮試験後の試料を用いて、ボンディングを取り除いた再構成試験も行った。試験ケースを表1に示す。case0シリーズは炭酸カルシウムの析出なし、case5シリーズは炭酸ナトリウムを砂質量の5%混合し作製した供試体に1.7mol/lの塩化カルシウム水溶液を通水し、炭酸カルシウムを約3%析出させた。さらにcase5'シリーズでは、case5シリーズの試料を炉乾燥後に425μメッシュのふるいにかき、炭酸カルシウムで固結した土粒子の骨格をばらし、同密度に再構成した供試体の三軸圧縮試験（CD試験）を行った。なお、再構成ケースにおいては養生期間を設けていない。

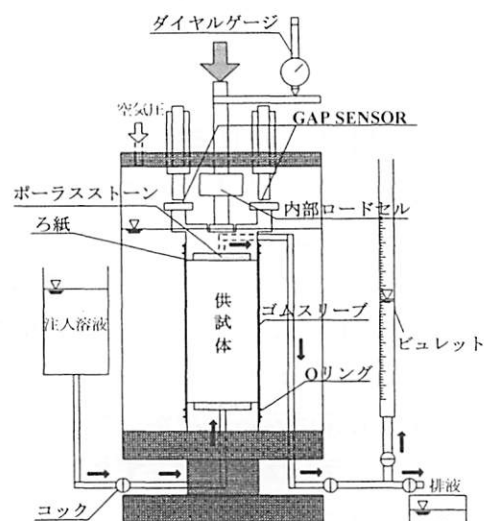


図1 三軸試験機概略図

表1 試験ケース

シリーズ	試験ケース	Na ₂ CO ₃ 混合率 (%)	CaCl ₂ 水溶液濃度 (mol/l)	有効拘束圧 σ _c ' (kPa)	相対密度 Dr (%)	CaCO ₃ 析出率 (%)
case0	case0-30	0	0	30	49.4	0
	case0-50	0	0	50	47.0	0
	case0-100	0	0	100	50.7	0
case5	case5-30	5	1.7	30	47.7	3.191
	case5-50	5	1.7	50	45.6	3.355
	case5-100	5	1.7	100	47.0	3.151
case5'	case5'-30			30	47.8	3.191
	case5'-50			50	46.6	3.355
	case5'-100			100	51.7	3.151

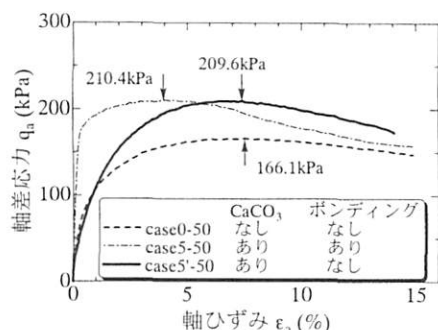


図2 軸差応力-軸ひずみ関係

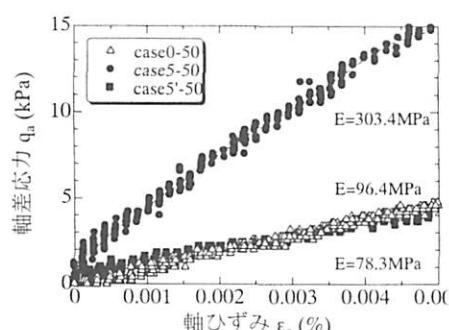


図3 微小軸ひずみ域での軸差応力-軸ひずみ関係

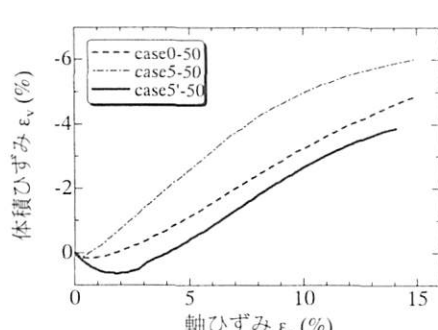


図4 体積ひずみ-軸ひずみ関係

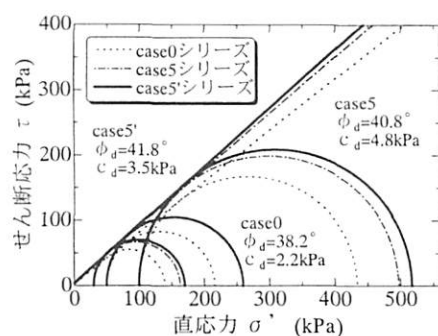


図5 モールの応力円



図6 土粒子表面写真 (case5-50)

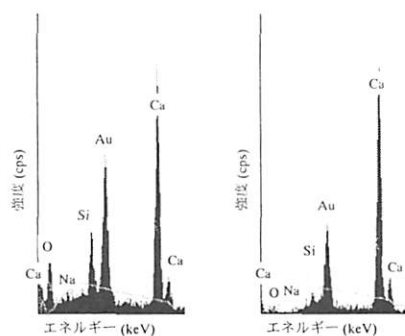


図7 EDX 分析結果 (case5-50)

3. 試験結果 拘束圧 50kPa のケースの軸差応力-軸ひずみ関係を図2に、その微小軸ひずみ域 ($0 < \epsilon_a < 5 \times 10^{-3}\%$) の拡大図を図3に示す。図3から、各々のヤング率を算定すると、ボンディングを取り除いた再構成試験である case5'-50 のヤング率は case0-50 と顕著な差はなかった。一方、case5-50 のヤング率は、炭酸カルシウムを析出させていない case0-50 から 3.1 倍増加しており、これよりボンディングがヤング率の大幅な増加に寄与していると言える。図2より、case5-50 の最大軸差応力は case0-50 に比べ 1.26 倍増加した。また、case5'-50 の最大軸差応力も、case5-50 同様 1.26 倍増加した。case5-50 の曲線は軸ひずみが 1% に達する前に折れ点が生じている。これは、ボンディングの役割を果たしていた炭酸カルシウム結晶の固結部分が壊れた点と考えることができる。図4に体積ひずみ-軸ひずみ関係を示す。case5-50 は case0-50 に比べ、体積圧縮が小さい結果となった。炭酸カルシウム析出により負のダイレタンスが小さくなるということは、非排水状態でせん断した場合の過剰間隙水圧が小さくなることと同義であり、すなわち、液状化抵抗が大きくなると考えられる。また、case5-50 および case5'-50 において、case0-50 と比較するとダイレーション角の増加が確認でき、これが強度増加に寄与していると考えられる。拘束圧 30kPa および 50kPa でも同様の結果が得られた。これらのケースからモールの応力円を描いたものが図5である。内部摩擦角の増加が得られたが、粘着力はいずれのケースでも小さいものであった。

4. 微視構造の観察および元素分析 走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて、炭酸カルシウム析出試料の土粒子表面を観察した写真を図6に示す。土粒子表面には、多くの微細な結晶が付着しているのを確認できる。結晶部分を SEM に付属のエネルギー分散型 X 線分光装置 (EDX) を用いて結晶部分を元素分析した結果 (図7) から、カルシウム (Ca) のピークが発現しており、X 線回折分析においても炭酸カルシウムの析出を確認していることから、これらの結晶は炭酸カルシウムであると言える。炭酸カルシウム結晶によるボンディングが、せん断に伴う変形を抑制し、ヤング率の大幅な増加に寄与したと考えられる。しかし、炭酸カルシウムの結晶は微細であり、土粒子表面に満遍なく付着していたため、その固結部分は小さい変位で破壊し、粘着力の増加は得られなかったと考えられる。

5. まとめ 炭酸ナトリウムと塩化カルシウムの2物質による炭酸カルシウム析出砂および再構成試料の三軸圧縮試験 (CD 試験) から、ボンディングによるヤング率の大幅な増加、および内部摩擦角と圧縮性が改善したことを確認した。粘着力の増加はみられなかったが、これは炭酸カルシウムの結晶が微細で、固結部分は小さい変位で破壊したためであると考えられる。今後、固結部分を強くし、より強度増加を図るには、土粒子の接点部分に大きな炭酸カルシウム結晶の析出が必要である。

参考文献 1) 川崎ら：微生物の代謝活動により固化する新しいグラウトに関する基礎的研究，応用地質，第47巻，第1号，pp.2-12，2006。

2) DeJong, et.al. : Microbially Induced Cementation to Control Sand Response to Undrained Shear, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.132, No.11, November 1, pp.1381-1392, 2006。