

バイオセメントを用いる土の安定化 に関する研究

一般社団法人 全国宅地防災技術協会 代表理事・会長 福江 正治

概要

炭酸塩である苦灰石や方解石を主体とするバイオセメント (BC) による地盤改良技術を確立することを目的に、実験的研究を行った。

BC 処理土の強度特性を把握するために、針貫入試験、硬度試験、ポケットペネトロメータ試験等の簡易貫入試験、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験および繰返し非排水三軸試験を実施した。その結果、いずれの試験においても、BC 処理によって強度が増大する傾向が得られた。また、それらについて、砂質土の種類ごとに炭酸塩含有量に対する関係式を求めることができた。一方、一軸圧縮試験では引張り破壊が顕著に現れ、材料としてのせん断強さを表すには不向きであることが判明した。なお、三軸圧縮試験結果から、モール・クーロンの破壊規準が適用できることが分かった。その上で、炭酸塩の質を考慮して、簡易試験から得られる定数と炭酸塩含有量を用いる強度定数の推定式を提案した。

キーワード: 微生物、炭酸塩含有量、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験、簡易試験

1. はじめに

地盤改良の新技术として、環境に優しい微生物の有機物分解作用を利用するバイオセメント (BC) の研究は、2000 年を過ぎたころから始められ、現在では多くの国で行われている^{1,2)}。

本研究の特徴は、国内の土壌から単離した安全な微生物 (NO-A10) を使用し³⁾、微生物を含む材料がほぼ安定的に供給可能であり、またその微生物の能力が国内外の研究で使用しているものに比べて高いことである。

2. BC 技術

BC 技術は石油採掘、石碑や石造り建築物の表面修復、コンクリート構造物の表面被覆技術として研究されてきた⁴⁾。地盤改良を目的としては、上にも述べたように、2000 年を過ぎてからである。それまでの技術は、どちらかと言えば面積を対象にした被覆や壁面を対象にしたものと言える。ところが、地盤改良には土の体積が対象となるので、コスト・技術的に課題が増えた。その意味では、材料が供給可能で、コスト等の問題を解決した技術は少ないと言える。

BC は有機物を水中で微生物に分解させ、生成した CO_2 を使って、炭酸塩 (通常は炭酸カルシウム (CaCO_3)) を土中で生成させる技術である。本研究では、有機物とし

て尿素 ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) を使い、それを分解できるウレアーゼ産生微生物を使用する。実際には、尿素分解酵素 (ウレアーゼ) を触媒として微生物の分解を助ける⁵⁾。なお、ウレアーゼ反応や生物酵素については以前からよく知られている。本研究において、使用する化学反応は次のように表せる。



および



ここで、反応(3)は CaCO_3 が生成した後、マグネシウムイオンと炭酸イオンが CaCO_3 と反応して苦灰石 (ドロマイト: $\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$) を生成する反応を表す。

反応 (2) までは、 1M Ca^{2+} を用いた場合、速ければ 2 時間程度で反応が終了する。そのとき、 1M の CaCO_3 を生成する。すなわち、 1000 cm^3 の溶液中で 100 g の CaCO_3 が生成する。しかし、その反応速度が速すぎると、生成 CaCO_3 に結晶水を含むので、短期の接着材としての能力は低い。一方、数日かけて反応を起こさせると、生成物の固結度が高いことが判明している。なお、反応 (3) は 1~2 ヶ月ほど続く。

3. 試料土と BC 液

本研究では、最終的に 8 種類の砂質土を使用した。

これらの試料特性を明らかにするために、土粒子密度試験、粒度試験、最大・最小密度試験、透水試験、炭酸塩含有量試験を行った。その結果から、表1のように分類した。ただし、ここでの分類は、標準的ではない。

BC液として、ウレアーゼ産生微生物 (NO-A10) と反応液(0.5M Ca²⁺, 0.5M Mg²⁺)の混合液を使用した。微生物濃度は必ずしも一定ではなかったが、概ね光学密度 (OD_{600nm}) で0.1~0.4であった。

以上の土試料と BC 液を使用して、力学試験用の供試体を作製した。簡易貫入試験、三軸圧縮試験および繰返し三軸試験用の供試体は、主として発泡スチロールの箱内で作製し、一軸圧縮試験用の供試体作製には容器としてペットボトルを使用した。

表1 試料土の呼び名と分類名

仮称	分類名	仮称	分類名
ベトナム砂	帯電砂	赤玉入り砂	中砂
粗砂	均等な粗砂	旧遠州珪砂	細砂B
遠州珪砂	細砂A	川砂	組成の良い川砂
6号珪砂	細砂C	シルト混り細砂	シルト混り細砂

4. 簡易貫入試験

本研究では簡易貫入試験として、ASTM International (WK27337) で規格化されているポケットペネトロメータ (図1) 試験、地盤工学会基準として規定されている針貫入試験 (JGS 3432) および土壌硬度試験 (JGS 3431) を行った。試験結果の概要を図2に示す。図におけるデータのばらつきは、主として異なる試料土の結果が含まれているためである。

4.1 ポケットペネトロメータ

ポケットペネトロメータ (PP) は、他の試験器と異なり測定範囲が0~450 kPaに限られている。測定値と炭酸塩含有量の関係は、ほぼ比例する結果となった。図3にその一例を示す。

PP試験による一軸圧縮強さ(UCSp) は、次式で表した。

$$UCSp = aC \quad (\text{kPa}) \quad (4)$$

ここで、 a は比例定数 (kPa)、 C はBC処理によって生じた炭酸塩含有量 (%)である。

4.2 P.P試験による土質と a 値

試料砂の a 値を求めると表2のようになった。やや密な細砂B以外は、液状化対策を想定してゆるぎめにしてある。粒径別にみる限り、ゆるぎ状態の a 値は 細砂 > 中砂 > 粗砂の順に小さくなった。このことより、土質によ



図1 ポケットペネトロメータ

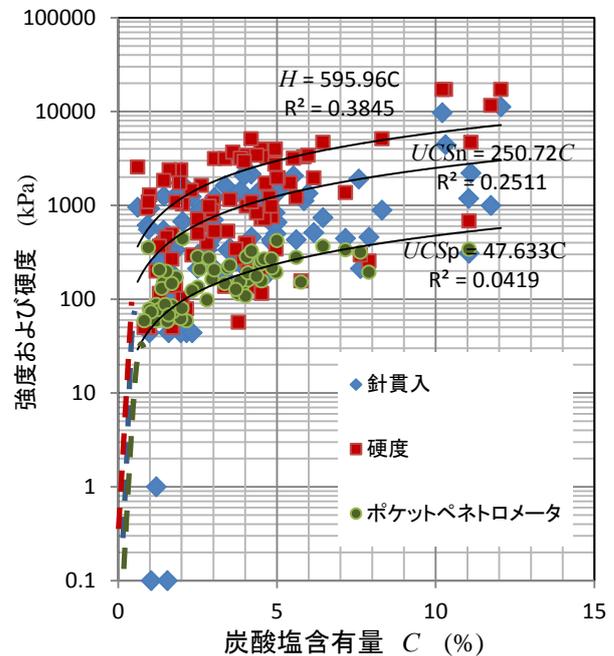


図2 簡易試験の結果

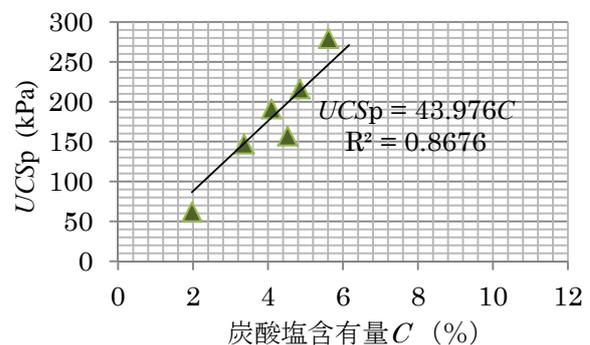


図3 中砂の UCSp と C の関係

表2 試料土の a 値

分類名	a (kPa)	分類名	a (kPa)
ゆるい帯電砂	186	ゆるい細砂B	53.9
ゆるい均等な粗砂	34.5	やや密な細砂B	120
ゆるい細砂A	64.4	組成の良い砂	68.7
ゆるい中砂	44.0		

っておおよその a 値を推定することが可能と思われる。

以上のように、 a 値と粒度特性には関係が認められたので、表 2 と(4)式より、BC 処理土のおおよその強度が推定できることが分った。

4.3 針貫入

針貫入試験によって得られる一軸圧縮強さ (UCS_n) と C の関係について、その結果の例を図 4 に示す。

近似曲線を求める際の初期条件として、 $C=0$ のとき、 $UCS_n=0$ とし、線形関係を仮定すると、図 4 の曲線となる。これは、縦軸が対数であることによる。もし、指数関係を仮定すると、図 4 の直線となる。破線で囲んだ 4 点を無視して近似関係を求めると、指数近似の決定係数 R^2 は 0.9578 と高くなる。なお、破線で囲んだ 4 点については、針貫入試験の特徴で、ゆる詰めで固結が弱い砂において抵抗が急激に下がる現象を示す。

4.4 土壌硬度

図 5 は硬度計による土壌硬度と C の関係を示す。図には想定できる 3 つの近似を示す。それらは、線形、指数、および破線で囲んだデータを除いた指数近似である。

いずれにしても、 C が増加すると、貫入抵抗は増加する。

4.5 各種簡易試験結果の相互関係

(1) H/UCS_n

それぞれの貫入抵抗の関係を調べた結果、ほぼ線形関係が認められた。その結果を表 3 に示す。

6 種類の砂質土について、 H/UCS_n の値は、均等な粗砂を除いて、約 2.0~3.0 であった。なお、粗砂の場合には 0.70 と非常に低い値となった。これについての解釈は、粗砂程度の粒子になると、針の先端が粒子の上面を突いたまま貫入が進み、抵抗が相対的に大きくなったと考えられる。このような効果は、礫になるとさらに顕著になり、測定器にダメージを与えるので、礫については試験を実施しなかった。

(2) $UCSp/UCS_n$ (ただし、 $UCS_n > 100\text{kPa}$)

この関係にも、粗砂が影響したと考えられる。針が粗砂を突いたまま貫入が進み、抵抗が相対的に大きくなったと考えられる。その他は、約 0.5~0.86 と幅広い値となった。ただし、 $UCSp$ が約 100 kPa 以下になると、貫入抵抗は極端に下がり、その影響が現れた。つまり、 $UCSp/UCS_n$ の値は表に示した範囲より大きくなる。また、 $UCSp$ の値は、試験器の測定限界によって 450 kPa 以下となる。

(3) $UCSp/H$ (ただし、 $H > 100\text{kPa}$)

本関係は、やや密な細砂 B と均等な粗砂を除けば、0.20~0.38 の間の値をとった。

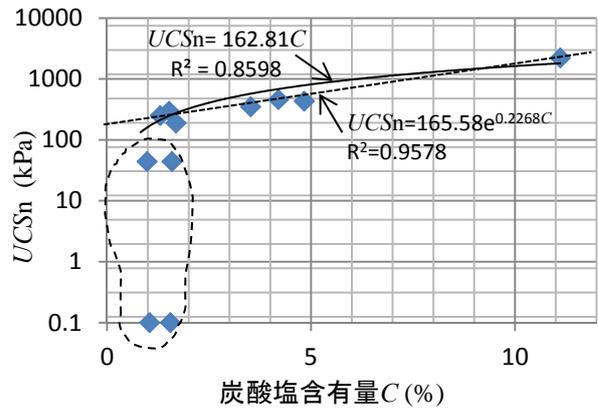


図 4 UCS_n と C の関係の例 (粒度組成が良い砂質土)

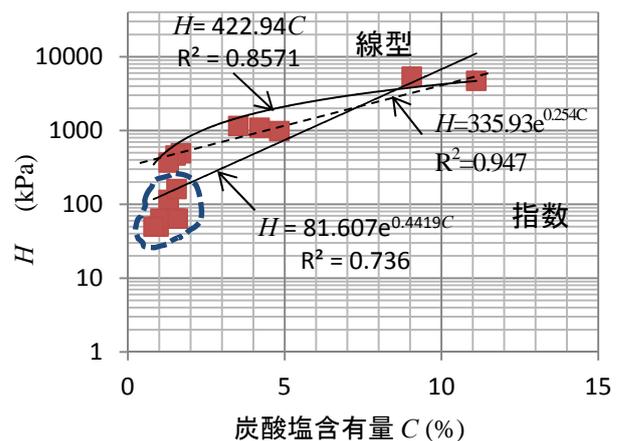


図 5 硬度 H と炭酸塩含有量 C の関係 (粒度組成が良い砂質土)

表 3 各種簡易試験結果の相互関係

	乾燥密度 (t/m^3)	H/UCS_n	$UCSp/UCS_n$	$UCSp/H$
帯電砂	1.4	1.98	0.63	0.38
均等な粗砂	1.3	0.70	0.36	0.48
細砂 A	1.4	1.84	0.49	0.20
中砂	1.26	3.01	0.67	0.27
細砂 B	1.58 (密詰)	-	-	0.53 (密詰)
	1.38	2.67	0.86	0.33
組成の良い砂	1.56	2.29	0.69	0.3

一方、密な細砂 B では 0.53 と高くなった。また、均等な粗砂の場合は 0.48 であった。

以上のように、土質と試験器によって比例定数が変わるので、それぞれの換算係数を用いるのは極めて煩雑と思われる。

5. 三軸圧縮試験

5.1 モール円と破壊規準

代表的な試験結果として、図6に細砂Bの未処理、およびBC処理土2試料について、同時に3試料のモール円を示す。その結果、破壊包絡線は3試料とも直線とみなせた。ただし、 $C=1.74\%$ の供試体（側圧70 kPa）については、モール円が相対的にやや小さく、線形の破壊規準線から下側に外れた。この供試体の C は 1.62% であり、平均値の 1.74% より 0.12% 低かった。したがって、そのことが影響したとも考えられる。

このように、BC処理土の破壊形態はモール・クーロンの破壊規準で表現できた。

本研究では未処理土とBC処理土を区別して、BC処理土に対して“*”を付けてつぎのように表示する。

$$\tau_f^* = c^* + \sigma \tan \phi^* \quad (5)$$

なお、帯電砂および細砂Aについても、ほぼ同様の結果が得られた。

5.2 三軸・一軸圧縮試験および簡易試験の比較

図7に、細砂Bの三軸圧縮試験から得られたモール円と破壊包絡線、一軸圧縮強さ qu 、包絡線から得られる理想的な一軸圧縮強さ qu_{est} 、および簡易試験による $UCSp$ を示す。図のように、 qu のみが異常に低い値となった。このことは、他の試料についても同様であり、 qu は三軸圧縮試験や簡易試験結果と整合性を示さないことが明らかとなった。このように、一軸圧縮試験の結果はモール・クーロンの破壊規準に従わないことを示した。これについては、つぎに議論する。

6. 一軸圧縮試験

(1) 供試体の破壊形態

本研究では、6試料52個のBC処理土をペットボトル内で作製して、原則としてそれをトリミングした供試体について一軸圧縮試験を行った。

圧縮性が極めて高い材料では、荷重を加えた方向に垂直に近い破壊面が現れる。その例に漏れず、ゆる詰め供試体の破壊例を図8に示す。破壊面は、複合的で水平に近いもの、やや縦割りに近いものから成り、それでもブロックとして結合部分は保たれた。したがって、応力ひずみ曲線はいくつものピークをもつ特異な形となった。その試験結果を図のキャプションとともに示す。

その他の供試体についても、同様な破壊形態または縦割れが多く確認された。

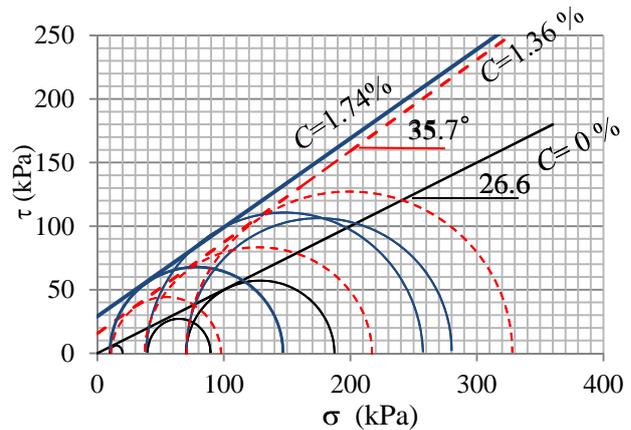


図6 細砂BのUU三軸圧縮試験結果の全応力表示（炭酸塩含有量 C は3供試体の平均値。側圧は、それぞれ10,40および70 kPa）

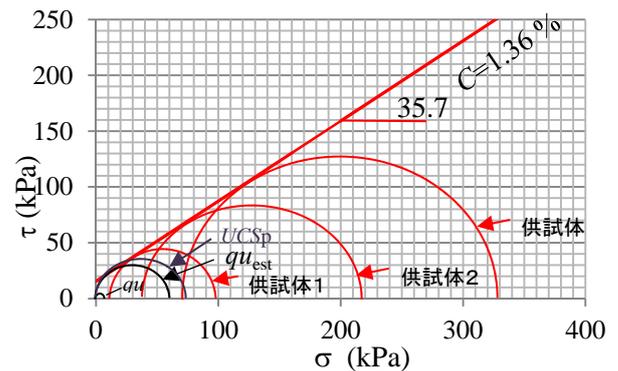


図7 BC処理した細砂Bの三軸圧縮試験と一軸圧縮強さにおける理論と実際

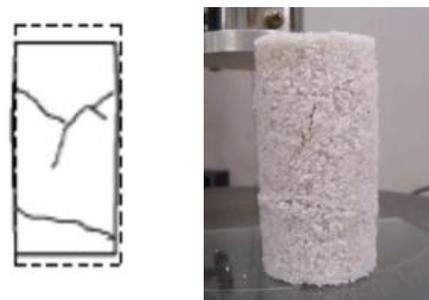


図8 緩詰のBC処理土の進行性微視的破壊 ($qu=11.3$ kPa, $\varepsilon=0.43\%$, $E_{50}=4.24$ MPa, $\rho_s=1.61$ g/cm³)

(2) $UCSp$ と qu の関係

図9にベトナム（帯電）砂の qu , $UCSp$ および C の関係を示す。すなわち、ポケットペネトロメータによる C に関する平均の $UCSp$ を示し、それに加えて qu を C に対してプロットした。 $UCSp$ と C には比例関係が成立するので、 qu と C についても比例すると仮定すれば、片対数グラフ上で $UCSp$ と qu は並行する。

この試料について、 $C=4\%$ の供試体の S 波測定を行った。そのときの qu は 108 kPa であり、S 波速度は 0.748 km/s であった。S 波速度 V_s から考えると qu の測定値が過小と考えられた。そこで、文献⁶⁾ による深層混合処理砂の $V_s - qu$ 関係から回帰式を求め、 V_s から qu を予測したところ、 609 kPa となった。その値を図 9 に罫印でプロットした。その予測値は平均的な qu の 5.64 倍にもなった。また、細砂 B の $UCSp - V_s$ 関係を使って $UCSp$ を推定すると、 673 kPa となり、三軸圧縮試験結果からもそうであったように、 qu のみが相対的に過小となった。

図 9 に示した 2 つの近似曲線は、算術目盛に変えると原点からの直線となる。したがって、 $UCSp/qu$ の値は、それぞれの比例係数の比で表せる。すなわち、その平均の強度比は、 $UCSp/qu = 186/11.2 = 16.6$ となった。

同様に、他の試料について $UCSp/qu$ を求めたところ、土質によって $4.5 \sim 38.3$ まで変化した。以上のことから、実測 qu を BC 処理土の強度特性とするのは適当ではないと思われる。

7. 繰返し非排水三軸圧縮試験

液状化対策を目的として、繰返し三軸試験を行って砂の BC 処理効果を調べた。その結果、繰返し载荷回数 20 回、 $DA=5\%$ で比較したとき、未処理の細砂 C (6 号珪砂) を BC 処理することにより、 C が 1% 増加すると液状化強度比 RL は 0.12 増加した。また、細砂 A では、 RL は 0.07 増加した。

炭酸塩含有量を増やすことによって、さらに液状化強度が増加すると考えられるので、BC 処理による液状化対策が可能と思われる。

なお、遠州珪砂 (細砂 B) については、以前に繰返し三軸試験を行っており、今回より高い RL の増加率、約 $0.3\%/C$ を得ている⁷⁾。

8. BC の品質に関する仮説

本研究を通して、供試体について、高さ方向に炭酸塩の品質が異なる現象が現れた。これは土粒子と結合していない炭酸塩が、新たな BC 液の注入に伴って下方に移動したものと考えられた。

図 10 の左側には指数的に減少する微生物濃度分布、右側には微生物濃度に応じた C の濃度分布を模式的に示す。微生物濃度の例として、単位を OD とした。

図の右は炭酸塩含有量を表し、次のように仮定する。 $C(1)$ は粒子結合に寄与する C であり、量的には少ない。 $C(2)$ は粒子表面に固着した炭酸塩で摩擦抵抗を増大させる。 $C(3)$ は土の強度にほとんど関与しない無結合の炭酸塩とする。なお、図の $C(3)$ については、移動がない場合と移動した場合を示す。それぞれの種類の C の相対比は、いろいろな条件による。 $C(3)$ がほとんど含まれない

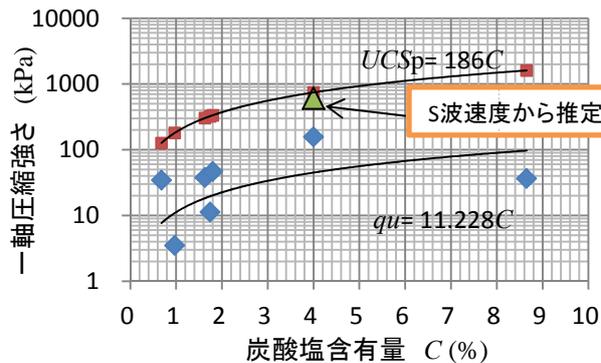


図 9 帯電砂の qu , $UCSp$ および C の関係

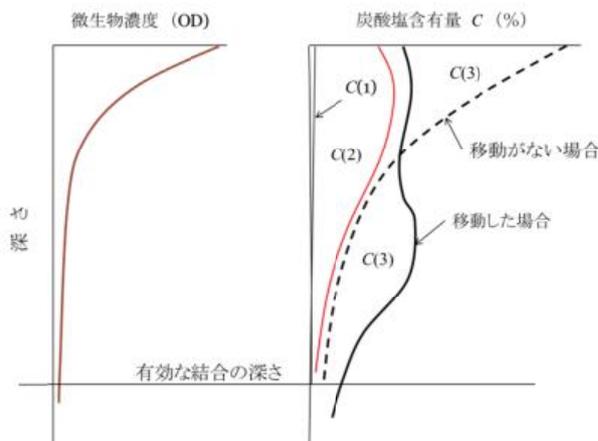


図 10 微生物分布と炭酸塩含有量分布に関する説明図

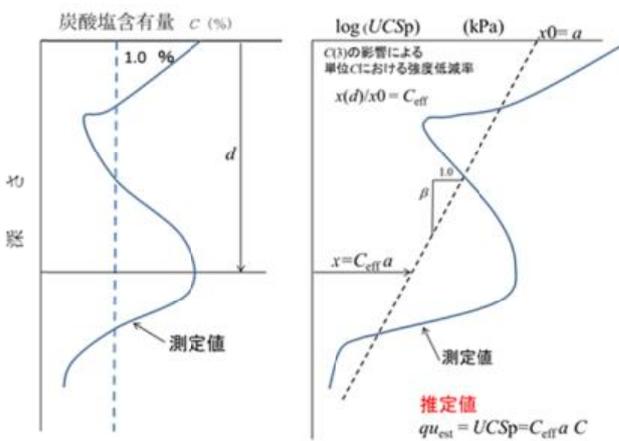


図 11 $C(3)$ による強度低減率モデル

場合もある。また、図に示した δ 有効な結合の深さ δ は多くの要素に関係するが、ここでは供試体として自立するかどうか程度の分け方である。

ここで、重要なことは $UCSp - C$ 関係の意味である。 a 値は $C(1)+C(2)$ に対応させるので、 $C(3)$ が含まれる場合には、(4) 式は強度の過大評価になる。その例を次に示す。

実際に典型的な実験結果の解析を行った結果、図 11 に示すモデルで説明できる。まず、基準となる同一炭酸塩含有量を決める。図では、例として 1% を基準とした。

ここで、 $C(3)$ が多く含まれている深さでは、強度は C から推定されるよりも低いので、次の強度低減比 C_{eff} を定義する。

$$\frac{q}{q_0} = \frac{C}{C_0} \quad (6)$$

ここで、 x は深さに関する単位炭酸塩含有量(1%)当たりの圧縮強さであるから、 $x0$ は a に等しい。なお、試験結果のフィッティングによって、 C_{eff} は深さ方向に指数的に減少することが分った。すなわち、右側の図で $x(d)$ は一定の傾き β をもつ直線となった。

これより、深さ方向の推定圧縮強さ qu_{est} は、次式で表せる。

$$qu_{est} = C_{eff} a C \quad (7)$$

ここに、 C_{eff} は地盤深さの関数である。

この考え方は、土試料の供試体の強度低減に関して、三軸圧縮試験についても使用できる。すなわち、図7の場合に、 qu_{est} と任意の供試体の $UCSp$ の間に次の関係が成立しなければならない。

$$qu_{est} = C_{eff} a C \div UCSp \quad (8)$$

このほか、 C_{eff} は試料の 10% 粒径 (D_{10}) が増大すると、指数関数的に減少することが分かった。なお、 D_{10} は透水係数や粒子比表面積と強く関係するので、それらと C_{eff} の間にも強い相関があることになる。

9. 設計定数

BC 処理土の粘着力 c^* は、包絡線のせん断応力軸の切片であるから、

$$c^* = \frac{q}{q_{est}} \frac{C_{eff} a C}{C} = \frac{1}{2} C_{eff} a C \frac{C_{eff} a C}{C} \quad (9)$$

BC 処理土の内部摩擦角について、ゆるい砂の ϕ^* と C_{eff} の間に次の関係が得られた。

$$\phi^* = (6.8 C_{eff} + 29.6) \pm 2.7 (^\circ) \quad (10)$$

これらの関係式は、 C_{eff} による結果の補正した関係である。 C_{eff} 補正によって、質の悪い炭酸塩含有量を取り除いた評価を行っていることになる。今後、密詰め試料等についても、明らかにしていきたい。

10. 結論

本研究のまとめとして、図12を示す。すなわち、炭酸塩含有量と三軸圧縮試験、簡易試験 ($UCSp$) および S 波速度の間には強い相互関係が認められ、それぞれの試験結果相互間の整合性が認められた。一方、一軸圧縮強さと炭酸塩含有量との関係は認められたが、他の試験結果との整合性は認められなかった。

当初、BC 処理土の一軸圧縮強さと炭酸塩含有量を設計における主要な要素として考えていた。しかし、一軸圧縮試験では、引っ張り破壊が顕著に現れ、土のせん断強さを表すには不向きであることが分かった。

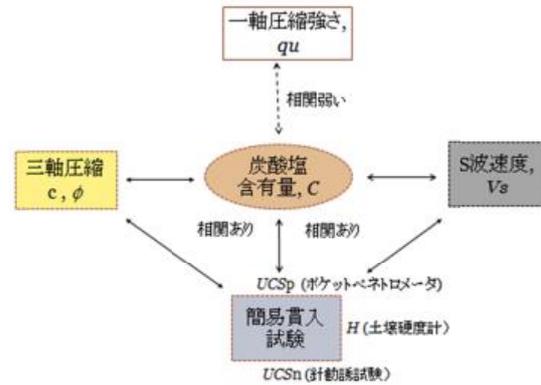


図12 試験結果の整合性について

そこで、強度低減率 C_{eff} を導入して、 $UCSp$ を a 値と C から表すことで、強度定数 c^* および ϕ^* を推定する方法を提唱した。

針貫入試験による換算一軸圧縮強さは、概して過大評価となること、また極めて弱い処理土に対しては過小評価となることが判明した。土壌硬度の設計への適用は、もともと難しいと考えていて、流動化処理土等の土壌硬度と一軸圧縮強さの関係の応用を試みたが、BC 処理土に対しては過小評価になることが分かった。

現段階では、 C_{eff} 、 a 値 および C が、BC 処理土の設計および評価にとって有望な要素である。また、 a 値と C を使用することで、測定限界を超えた $UCSp$ を推定でき、広範囲の c^* の推定が可能となる。

参考文献

- 1) DeJong, J.T., Fritzes, M.B. and Nusslein, K., Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear, *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 132, 11, pp.1381-1392, 2006.
- 2) Whiffin, V.S., van Paassen, L. A., Harkes, M.P., Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique, *Geomicrobiology Journal*, 24, 4176423, 2007.
- 3) Fukue, M., Ono, S., Sato, Y., Cementation of sands due to Microbiologically-induced Carbonate, *Soils and Foundations*, 51,1, pp.83-93, 2011.
- 4) De Muyncka, W., De Beliea, N. and Verstraete, W. (2010) Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review, *Ecological Engineering* 36, pp.1186136.
- 5) Bachmeier, K.L., Williams, A. E., Warrington, J.R. and Bang, S.S., Urease activity in microbially-induced calcite Precipitation, *Journal of Biotechnology* 93, 1716181, 2002.
- 6) 多田秀一・山口悟・西川純、深層混合処理工法の強度評価に関する室内試験、開発土木研究所、月報、No.511、pp.13-18、1995.
- 7) Fukue, M., Makito, K., Tachibana, H., Lechowics, Tsukamoto, K. and Nguyen, H. M., Reduction of liquefaction potential of loose sand by bio-cement, *The 2nd Conf. on Transport Infrastructure with Sustainable Development*, Construction Publisher, pp.245-253, 2016.