

論文 セメント量と細粒分含有率が砂防ソイルセメントの強度特性に与える影響

堀口 俊行*1・嶋 丈示*2・八木澤 一哉*3・黒田 一郎*4

要旨：現地で発生する土砂を骨材として活用する砂防ソイルセメントの圧縮強度、粘着力、せん断抵抗角などの強度特性を調べるために三軸圧縮試験を行ない、これらの強度特性に及ぼす単位セメント量、細粒分含有率の影響について検討したものである。その結果、幅広い範囲の単位セメント量での試験から、セメントの添加量が少ない土砂的強度の領域では、コンクリートの強度の領域とは異なる強度特性を示すこと、土砂的強度からコンクリートの強度への移行するために必要な単位セメント量は、細粒分含有率に依存することを明らかにした。

キーワード：砂防ソイルセメント、現地発生土砂、単位セメント量、細粒分、三軸圧縮試験

1. 緒 言

地形が険しく交通アクセスが困難な山間部に計画されることが多い砂防堰堤の建設では、現場で発生する土砂（現地発生材）の処理が大きな問題となる。また、利用可能なレディミクストコンクリートプラントへのアクセスが悪いために、砂防堰堤の構造材料として必要なコンクリートの製造は現場練りコンクリートの利用が強いられ、建設現場での施工管理が求められる。そこで、コンクリートの骨材を、現地発生土砂で置き換える砂防ソイルセメントは、これらの問題を解決する構造材料として大きな期待が寄せられる。

砂防ソイルセメントに要求される強度は、最小管理強度¹⁾²⁾と呼ばれる軟弱地盤改良に用いる 2.0 N/mm^2 に満たない低強度から砂防堰堤の堤体内部材に用いる比較的高強度（ $2.0\sim 18\text{ N/mm}^2$ ）まで多様である。そのうち堤体内部材に用いる砂防ソイルセメントの強度は土砂の締固めとセメントの水和反応による土砂の固結の相互作用であることが分かっている。その際、単位セメント量が充分多い場合には、通常の骨材を使用したコンクリートと同様に単位セメント量の増加に従って圧縮強度は線形的に延びていくことが期待される³⁾。この領域におけるソイルセメントの力学特性については多くの研究があり、単位セメント量が多く、細粒分が少ないほど一軸圧縮強度が向上することが示されている⁴⁾⁵⁾。

ところで、単位セメント量を少なくしていくと、砂防ソイルセメントの振舞いは土砂のような特性へ近づくが、その状態であってもセメント水和物により粘着力、せん断抵抗角といった土砂の強度特性で表現される強度向上が見込めるものと考えられる。このように砂防ソイルセメントの強度特性は、単位セメント量の減少によってコ

ンクリートの強度特性から土砂的強度特性へと遷移する。しかしながら、コンクリート強度特性と土砂的強度特性の両方の領域を包括して強度特性を調べたデータは乏しく、力学特性については不明確なままである。そのため、最小管理強度¹⁾以下における砂防ソイルセメントの強度管理は経験値の統計処理に依るところが多いのが現状である。

そこで、無添加も含めた広い領域の単位セメント量をパラメータとして、砂防ソイルセメントのコンクリートの強度から土砂的強度に至る幅広い範囲の強度特性を明らかにする必要がある。これまで砂防ソイルセメントのせん断強度に関する研究⁵⁾⁶⁾はあるものの、コンクリートの強度特性から土砂的強度特性への変化過程について調べた既往の研究は乏しく、そのための包含的試験方法も確立されていない。

そこで本研究では、現場発生土砂を利用することを目的として、通常のコンクリート用骨材とは異なって細粒分成分を多く含んだ試料土を骨材として使用した砂防ソイルセメントに対して三軸圧縮試験⁷⁾⁸⁾を行ない、圧縮強度、粘着力、せん断抵抗角などの強度特性に及ぼす単位セメント量や細粒分含有率の影響について検討するものである。

2. 砂防ソイルセメントの強度発現

前述したように、砂防ソイルセメントの強度は土砂の締固めとセメント水和物による固結の相互作用である。これまでの堤体の内部材に使用する砂防ソイルセメントに関する著者らの研究¹⁾²⁾を基に、セメントの量と圧縮強度の関係を整理すると次のように説明できる。

まず、セメントが充分に供給されたコンクリートの強

*1 防衛大学校 システム工学群 建設環境工学科 准教授 博（工）（正会員）

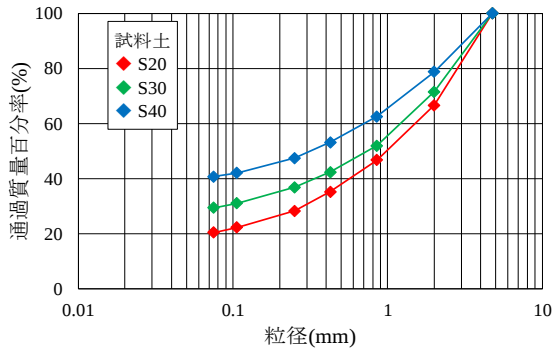
*2 （一財）砂防・地すべり技術センター 研究部 博（工）

*3 （株）土木管理総合試験所 技術第一部門

*4 防衛大学校 システム工学群 建設環境工学科 教授 博（工）（正会員）

表－１ 試料土の一覧

試料土 名称	粒度			最大 乾燥 密度 (g/cm ³)	含水比 (%)
	礫分 (%)	砂分 (%)	細粒分 (%)		
S20	33.3	46.3	20.4	1.8	15.9
S30	28.4	42.2	29.4	1.7	17.8
S40	21.2	38.1	40.7	1.7	21.7



図－１ 試料土の粒度分布

度の領域(1.0N/mm²以上の強度、以降、領域Con)では、単位セメント量Cが大きくなるに従って圧縮強度 f_c' が大きく伸長する。この性質は、既往の研究^{3),4)}で明らかにされた通りであり、現地発生土砂には細粒分の影響によって一般的なコンクリートとは異なる強度発現となることが予想される。

一方、セメントの量が少なく土砂(Soil)的強度の領域(以降、領域So)では、圧縮強度 f_c' は締固めによる強度(即ち、セメント無添加の場合の圧縮強度)と同程度であり、単位セメント量の増加に伴う圧縮強度 f_c' の増加は目立たない。また、材齢7日と28日での圧縮強度の差が見極めにくい。この領域Soでは、セメントによる土砂からの吸水による含水比の低下(粘着力cの向上)と、水和物の生成によるせん断抵抗角 ϕ の向上の両者によって土砂としての強度が増大していると推定される。

領域Conと領域Soの間の遷移(Transition)領域(以降、領域Trn)では、領域Soよりも単位セメント量Cが増えたことによって固結される土砂が増えて、圧縮強度 f_c' は、締固めに依存した領域Soのものよりも増大し、コンクリートの強度の特性に近づいていく。本研究では、圧縮強度 f_c' が、セメント無添加(単位セメント量0.0 kg/m³)での圧縮強度の2倍未満の領域を領域So、2倍以上を領域Trnとした。

3. 試験方法

砂防堰堤で用いられる砂防ソイルセメントは、現場で発生する土砂をそのまま使用する都合上、0.075 mm以下の細粒分を多く含むため、通常のコンクリート用骨材を使用した場合と異なる性状を示す。そこで、材料の変化過程を詳細に調べ、強度特性の違いを明確にすることで適切な品質管理方法を提供することが目的として、単位セメント量だけではなく細粒分含有量もパラメータとすることとした。表－１に、0.075 mm以下の細粒分を含む試料土の一覧を示す。細粒分含有量 F_c の上限は重機走行性の指標⁹⁾から40%とし、細粒分含有量 F_c は20.4%, 29.4%, 40.7%の3段階を設定した。試料土名称の数字はその細粒分含有率 F_c の概略値(20%, 30%, 40%)を表わす。図－１に各試料土の粒度分布を示し、表－１に含水比と最大乾燥密度を併記する。なお、材齢7日および28日ともに、空气中養生²⁾としている。

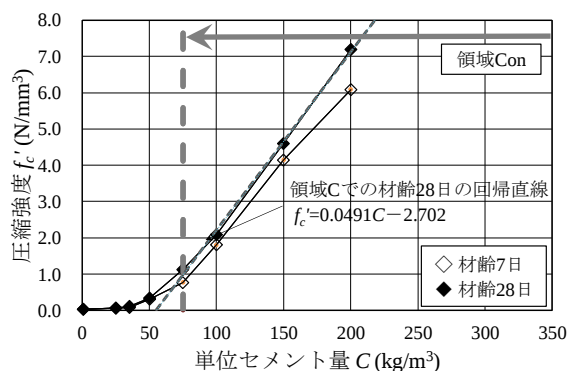
これら3種類の試料土に0～300 kg/m³のセメントを加えて円柱状の砂防ソイルセメント供試体を作成した。表－２に配合の一覧を示す。

これらの供試体を三軸圧縮試験に供したが、着目点は単位セメント量の変化に対する材料の内部変化であり、粘着力c、せん断抵抗角 ϕ を把握することを目的とする。

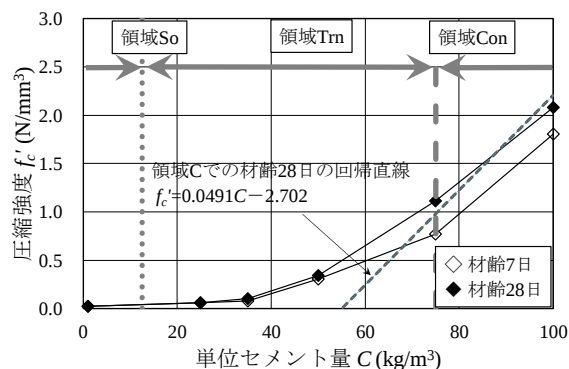
三軸圧縮試験の側圧は一軸圧縮強度を最大値として設定し、三軸試験(UU)¹⁰⁾に準拠して行なった。

表－２ 配合の一覧

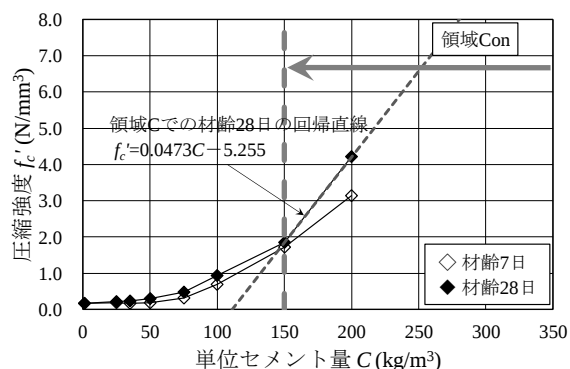
配合名称	試料土	単位セメント量(kg/m ³)	配合名称	試料土	単位セメント量(kg/m ³)	配合名称	試料土	単位セメント量(kg/m ³)
S20-0	S20	0	S30-0	S30	0	S40-0	S40	0
S20-25	S20	25	S30-25	S30	25	S40-25	S40	25
S20-35	S20	35	S30-35	S30	35	S40-35	S40	35
S20-50	S20	50	S30-50	S30	50	S40-50	S40	50
S20-75	S20	75	S30-75	S30	75	S40-75	S40	75
S20-100	S20	100	S30-100	S30	100	S40-100	S40	100
S20-150	S20	150	S30-150	S30	150	S40-150	S40	150
S20-200*	S20	200	S30-200	S30	200	S40-200	S40	200
配合名称: ハイフンの前の記号は試料土、後ろの記号は単位セメント量を表わす			S40-250	S40	250			
* S20-200のケースにおいては、一軸圧縮試験のみ実施した。			S40-300	S40	300			



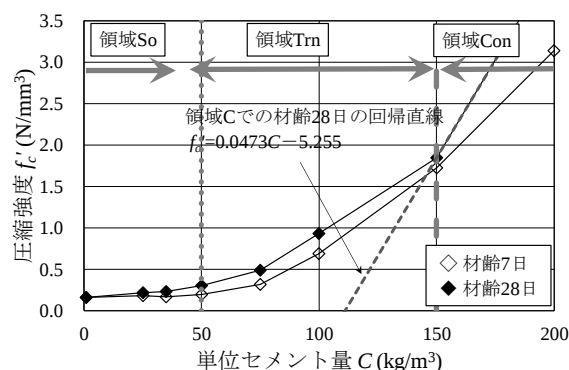
図－2 圧縮強度－単位セメント量関係
(試料土 S20)



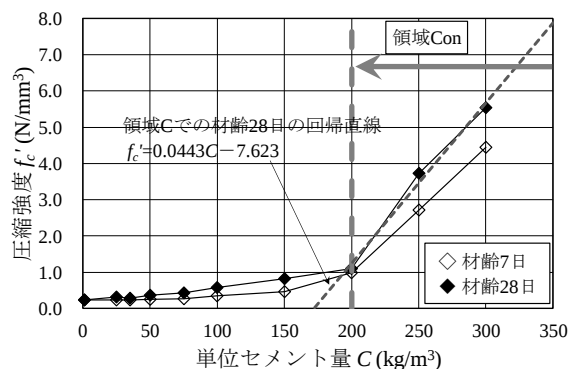
図－5 圧縮強度－単位セメント量関係
拡大図 (材齢 28 日, 試料土 S20)



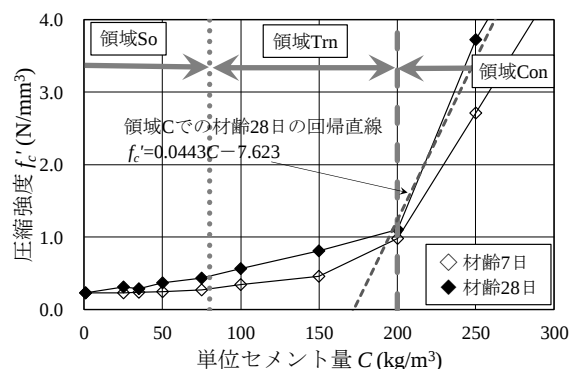
図－3 圧縮強度－単位セメント量関係
(試料土 S30)



図－6 圧縮強度－単位セメント量関係
拡大図 (材齢 28 日, 試料土 S30)



図－4 圧縮強度－単位セメント量関係
(試料土 S40)



図－7 圧縮強度－単位セメント量関係
拡大図 (材齢 28 日, 試料土 S40)

4. 試験結果

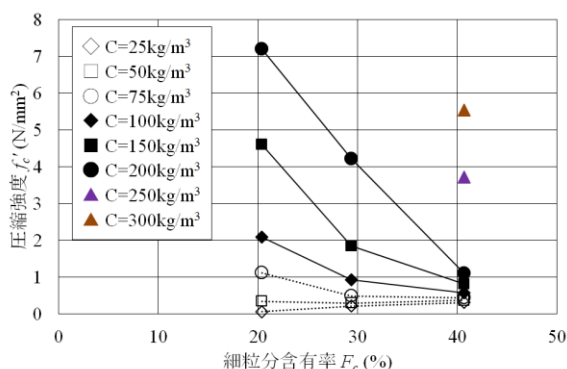
4.1 圧縮強度

図－2～4は、材齢7日と28日における圧縮強度（側圧＝0の一軸） f'_c と単位セメント量 C の関係を試料土ごとにまとめたものであり、図－5～7はそれらの原点付近を拡大したものである。

試料土S20（図－2）では、単位セメント量 C が75kg/m³を超えると単位セメント量 C の増加に伴って圧縮強度 f'_c がほぼ線形に増加し、領域Conとなっている。それよりも単位セメント量 C が少ない領域では、単位セメント量 C の

変化に対して圧縮強度 f'_c の変化が敏感ではなくほぼ横ばいであるが、拡大図（図－5）を見れば、単位セメント量 C が75kg/m³を下回る範囲でも、圧縮強度 f'_c はわずかに右上がりとなっていることがわかる。そこで、拡大図（図－5）では、単位セメント量 C が0kg/m³のときとほぼ同じ強度（2倍未満）を示す領域Soと、それと領域Conとの間に圧縮強度増加勾配がじわじわと大きくなる領域Trnを矢印で分けて示した。

図－3および図－6に示す試料土S30、図－4および図－7の試料土S40でも領域Con、領域Soとその領域Trn



図－８ 圧縮強度－細粒分含有率関係
(材齢 28 日)

表－３ 最小単位セメント量と圧縮強度増分比

試料土 名称	細粒分 含有率 F_c (%)	最小単位 セメント量 C_{min} (kg/m³)	圧縮強度 増分比 R_f (N/mm²)/(kg/m³)
S20	20.4	75	0.0491
S30	29.4	150	0.0473
S40	40.7	200	0.0443

を区分して示した。試料土S30, S40でも領域Conが明確に現われている。しかし、細粒分含有率 F_c が大きいほど領域Conに移行するために混入しなければならない単位セメント量 C が大きくなり、領域Soや領域Trnの範囲が広がっている。これは細粒分が多くなったことで骨材の表面積が大きくなり分散されにくくなることや、セメントへの水分の供給が阻害されることで、水和物の生成が困難になる等の影響が表れたことを示唆している。

一方、圧縮強度 f'_c と細粒分含有率 F_c の関係として図－2～4の結果を整理しなおした図－8を見れば、いずれの単位セメント量においても細粒分含有率 F_c の増加が圧縮強度を損なっていることが判り、文献4)の実験を裏付ける結果となった。

図－2～7は、材齢28日の供試体の領域Conのプロットの回帰直線とその回帰式を併せて示している。表－3に示している回帰式の1次項の係数は、領域Conにおいて単位セメント量 C の増加に対する圧縮強度の増分比を表わしており、これを圧縮強度増分比 R_f と定義した。なお、この表に示す最小単位セメント量 C_{min} は、図－2～4に示す領域Conの下限となる単位セメント量として定義したものである⁹⁾。細粒分含有率 F_c が大きくなるほど必要な最小単位セメント量が大きな値となっている。圧縮強度増分比 R_f は、3種の試料土の間で大きな差異は無いが、細粒分含有率が大きいほど小さい値となっている。これは、細粒分の存在がコンクリートの強度の領域Conでも



写真－１ 破壊性状（配合 S30-25 供試体）



写真－２ 破壊性状（配合 S30-50 供試体）



写真－３ 破壊性状（配合 S30-100 供試体）



写真－４ 破壊性状（配合 S30-200 供試体）

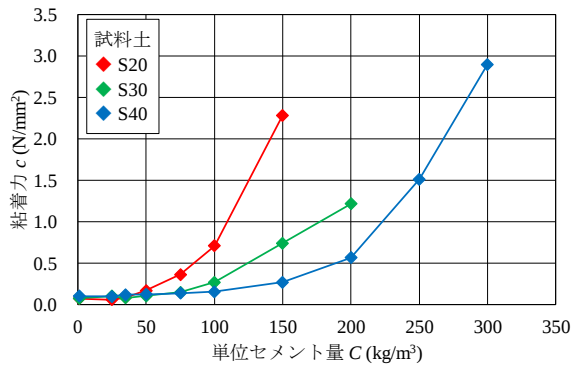
圧縮強度増大を抑制している可能性が伺える。

4.2 破壊性状

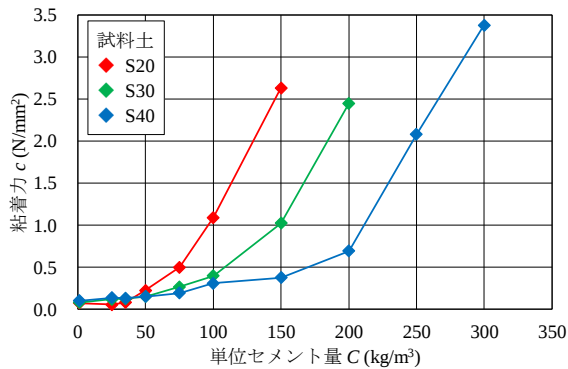
写真－１は、試料土S30の領域So（単位セメント量25kg/m³）の配合S30-25供試体の破壊性状を示したものである。供試体は、樽状に膨らんでいて土砂的な性質を示している。

次に、写真－２、３に同じ試料土S30の配合S30-50供試体（単位セメント量 $C=50$ kg/m³）と配合S30-100供試体（ $C=100$ kg/m³）の破壊性状を示す。図－6を見れば、これらの供試体の単位セメント量 C は、単位セメント量 C の増加に従って圧縮強度が大きくなっている範囲内であるが、破壊性状は樽状であり、領域Trnにあることが確認できる。

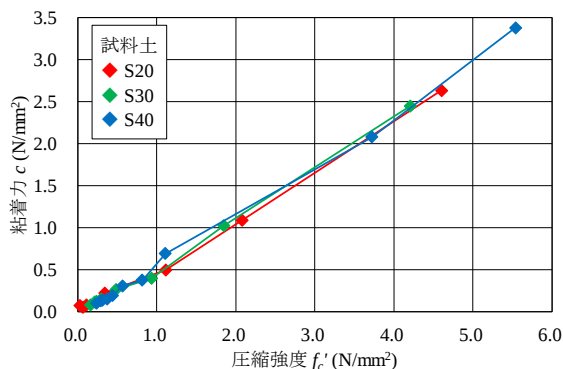
写真－４に領域Conにある供試体の例として配合S30-200（ $C=200$ kg/m³）供試体の破壊性状を示す。この供試



図－ 9 粘着力－単位セメント量関係（材齢 7 日）



図－ 1 0 粘着力－単位セメント量関係（材齢 28 日）



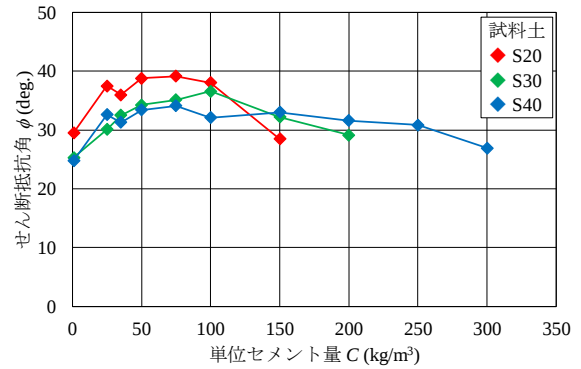
図－ 1 1 粘着力－圧縮強度関係（材齢 28 日）

体は、一般的なコンクリート供試体と同様に割裂することで破壊しており、領域Conにあることが分かる。このことから、定性的であるが3つの領域における破壊性状の違いを示すことができた。

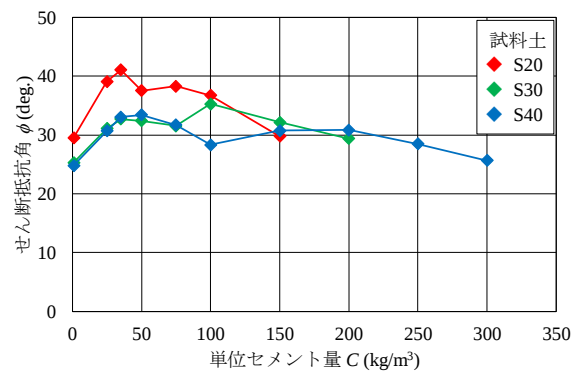
4.3 粘着力

図－ 9, 1 0 に、三軸圧縮試験によって得られた粘着力 c と単位セメント量 C の関係を示す。細粒分含有率 F_c が多いほど粘着力 c の増大が始まるのに必要な単位セメント量 C が多くなることがわかる。粘着力 c の増大が始まって以降の単位セメント量 C の増加に伴う粘着力 c の増大の割合（勾配）は、材齢28日においては試料土の違いに依らずほぼ同じである。

また、粘着力 c と単位セメント量 C の関係（図－ 9, 1



図－ 1 2 セン断抵抗角－単位セメント量関係（材齢 7 日）

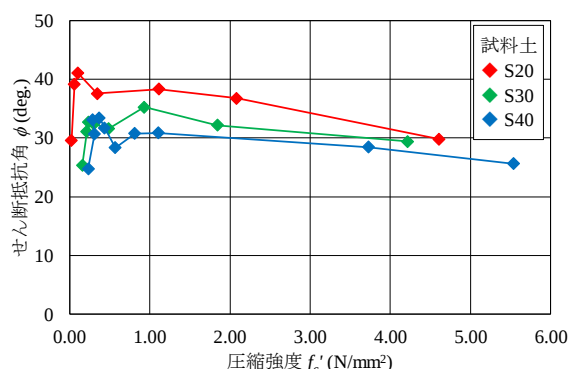


図－ 1 3 セン断抵抗角－単位セメント量関係（材齢 28 日）

0) は、図－ 2 ～ 4 に示す圧縮強度 f'_c と単位セメント量 C との関係に似た性状を示しており、領域Soに相当する単位セメント量 C が小さい領域では伸び悩み、 C がある値を超えるとそれ以降は C の増加と共にほぼ線形的に増大する（領域Conに相当）。そこで、図－ 1 1 に、材齢28日の粘着力 c と圧縮強度 f'_c の関係を示した。そこでは、両者の関係は比例関係であり、しかも3種の試料土のデータがほぼ重なっており、細粒分含有率 F_c の影響を受けていないことが分かる。圧縮強度 f'_c に対する粘着力 c の比率はおよそ0.6で、 F_c に依存せずほぼ一定である。

4.4 セン断抵抗角

図－ 1 2, 1 3 に、三軸圧縮試験から求めたせん断抵抗角 ϕ と単位セメント量 C の関係を示す。領域Soに相当する単位セメント量では、細粒分含有率 F_c が小さい試料土ほどせん断抵抗角 ϕ は大きくなっており、単位セメント量 C が増えるとせん断抵抗角 ϕ は大きくなる。領域Tmに相当するところではせん断抵抗角 ϕ は横ばいとなる。単位セメント量 C が、更に増えて領域Conに入るとせん断抵抗角は減少に転じる。この傾向は、細粒分含有率 F_c が小さいほど顕著である。この結果は、領域Conに相当する単位セメント量で同様の検討を行った研究⁴⁾において、水セメント比が小さくなるほどせん断抵抗角 ϕ が大きくな



図－１４ せん断抵抗角－圧縮強度関係
(材齢 28 日)

ると報告されているが、本実験では単位セメント量 C が大きくなるほどせん断抵抗角 ϕ は減少した。よって、使用した原材料の種類の違いによる影響もあると考えられ、今後実験データの蓄積が望まれる。

図－１４は、これらのデータのうち材齢28日のものを、せん断抵抗角 ϕ と圧縮強度 f'_c の関係として示す。圧縮強度 f'_c が小さいときには細粒分含有率 F_c の大小によってせん断抵抗角 ϕ の差が大きい、 f'_c が大きくなると F_c の違いに依らずせん断抵抗角 ϕ はほぼ 25～30deg. の狭い範囲に収束する。

5. 結 論

本研究では、コンクリートの強度から土砂の強度に至る幅広い範囲の強度特性を明らかにするため砂防ソイルセメントに対して三軸圧縮試験を行ない、圧縮強度、粘着力、せん断抵抗角などの強度特性に及ぼす単位セメント量や細粒分含有率の影響について検討したものである。以下に、得られた知見をまとめる。

- 1) 砂防ソイルセメントの円柱供試体を用いた圧縮試験では、単位セメント量が少ない領域では割裂せずに樽状に膨らむ破壊形態を示した。一方で、単位セメント量が多い場合には通常のコンクリートと同様に割裂して破壊した。
- 2) 細粒分含有率が大きくなると、コンクリートの特性を発揮するのに必要な最小単位セメント量が大きくなる。

3) 領域Soでは、土砂にセメントを混合するとせん断抵抗角 ϕ は大きくなるが、領域Trnでは横ばいとなる。領域Conでは、せん断抵抗角は減少に転じる。この傾向は、細粒分含有率 F_c が小さいほど顕著であることがわかった。

4) 粘着力は、単位セメント量や細粒分含有率に依らず圧縮強度に対してほぼ一定の比率（およそ0.6）を保った。

参考文献

- 1) 嶋丈示, 秋山祥克, 水山高久: INSEM 材の水和反応を保証する最小管理強度の導入, 砂防学会誌, Vol.68, No.2, pp.14-22, 2015
- 2) 砂防ソイルセメント施工便覧, 砂防・地すべり技術センター, 2016
- 3) (社)セメント協会: セメント系固化材による地盤改良マニュアル, 第4版, 技法堂出版株式会社, pp.36-52, 2012
- 4) 三井隆, 吉川正, 池田昭彦, 青山要, 中川浩二: 細粒分含有率が異なる改良土の室内配合試験による基礎的研究, 土木学会論文数 No.693/VI-53, pp.117-129, 2001
- 5) 石川芳治, 矢澤昭夫, 矢島重美, 井原邦明, 安養寺信夫, 高橋宏造: 火砕流堆積土砂を用いたソイルセメントの性質及び施工法に関する現地試験, 砂防学会誌, Vol.49, No.2, pp.28-34, 1996
- 6) 友松靖夫, 大野宏之, 田畑茂清, 牧田一男, 山下勝, 富田陽子, 坂場義雄: 現場発生土をその場に固化・定着させる INSEM 工法の考察とその力学的特性, 砂防学会誌, Vol.50, No.6, pp.17-24, 1997
- 7) 林瑩奎, 前田孝一, 村上雅也: 三軸圧縮試験を利用した若材齢コンクリートの力学的性質に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.577-582, 1998
- 8) 穴吹拓也, 米澤健次, 津田和明, 長沼一洋: 横拘束された超高強度コンクリートの圧縮特性に関する研究, Vol.29, No.3, pp.565-570, 2007
- 9) 道路土工要領平成 21 年度版, 日本道路協会, p.221, 2009
- 10) 地盤材料試験の方法と解説, 地盤工学会, pp.570-572, 2009