

安定処理補助材としての碎石粉の有効利用について

UTILIZATION OF WASTE ROCK POWDER FOR CEMENT STABILIZATION OF SOFT CLAY GROUND

西田一彦*・久保井利達**

By Kazuhiko NISHIDA and Yorimichi KUBOI

1. はじめに

近年、急速な建設土木工事の増加にともない、骨材としての碎石が多用されている。平成元年で4億9千万トンという莫大な量が消費されている。しかし、この碎石工場の生産過程から産出される碎石粉は一種の産業副産物である。この碎石粉とは集塵粉と砕砂製造工程上の産出微粉である。その産出量は全体で2万5千6百トン/月である。その利用は2百トン/月と1%に満たない状況である。未利用の碎石粉は年間に約30万トンとなり碎石生産量の1.2%でほとんど利用されていないし、碎石工場内に埋め戻し処理されている状況である。

さらに、今後天然砂の採取規制等で砕砂への需要がますます増大するものと見込まれている。碎石砂の一原料となるスクリーニングスの生産量との関係を見るとスクリーニングス25万トン/月のうち7万2千トン/月が将来碎石砂の原料となる可能性がある。砕砂製造工程上の産出微粉の原単位を産出すると23%となる。これを今後原料化されると思われる7万2千トン/月で計算すると1万6千トン/月で年間約20万トンの微粉が新たに産出される可能性がある。すると、未利用の微粉と合わせると年間約50万トン/年という膨大な量となる予想がある。¹⁾

このような廃棄物の処分地は減少する一方で、処分をうまくしなければ大気汚染、河川汚染を引起こすなどの事情により、その処理が重要な問題となっている。そこで、資源の活用と環境問題を解決するため産業活動にともない発生する廃棄物を有効利用することが必要である。

この碎石粉の利用研究への取り組みについては各碎石企業でも行なわれているが商品化できるのはわずかである。そして、微粉の処理・再資源化について苦慮しているのが現状である。また各種企業(セメント業界、コンクリート製品業界、生コンクリート業界、アスファルト業界、農業業界、建築材料業界)においても碎石粉の利用は一部であり、その量も少ない。そこで、碎石粉を大量に使用する利用方法を検討するとコンクリート等への補助材料、地盤改良、ペントナイト泥水の代用、充填材、コア材としての利用等が考えられる。

著者等はその施策として碎石粉を土中に埋め戻すという単純な発想から出発し、碎石粉を用いる地盤改良について研究してきた。そして、風化残積土の細粒分の不足する土に対して碎石粉を補助材として混合し、セメント、石灰などを添加することによって次のような改良効果を上げることができていることを明らかにしてきた。²⁾

- (1) 碎石粉自身を石灰で安定処理した場合の強度は添加量が10%以上になると小さくなる。
- (2) 碎石粉をまさ土の安定処理補助材料として用いると長期強度が期待できる。また、石灰、セメント処理のいずれ場合でも一軸圧縮強度は碎石粉の混合量が20%で最大値を示す。
- (3) 細粒分や土の非晶質物質の少ない土に碎石粉を安定処理補助材料として用いると、石灰、セメントの使用量を減らすことができ、コストの減少をはかることができる。

その結果、路盤、盛土および埋立てにおける建設材料として利用することが可能であることを明らかにしている。

同様に、最近、碎石粉と類似の産業廃棄物の有効利用に関する研究が試みられている。例えば、フライアッシュ³⁾、水砕スラグ⁴⁾、コンクリートの微粉末⁵⁾、製紙焼却灰⁶⁾、下水汚泥焼却灰⁷⁾などに関する研究報告がある。これらの碎石粉と類似の産業廃棄物である材料を用いた工法の現状については表-1に示すとおりである。

本研究はセメントで軟弱粘性土を安定処理する混合、補助材料として碎石粉を有効に利用できるかどうかの可能性を探ることを目的としている。そのため、碎石粉の物理的、化学的性質を明らかにする。そして軟弱粘性土・水・セメント・混合補助材料との関係について検討し、安定処理土した土の強度との関係を究明したものである。

2. 地盤改良の機構について

軟弱粘性土を安定処理して改良するには、土の種類によって、石灰、生石灰、セメントなどを添加し固化する方法が一般的である。また混合補助材料を混合して地盤の含水比低下をはかる方法も採られている。

この混合補助材料を用いることによる地盤の含水低下の効果がどの程度であるかを検討する。まず、対象となる軟弱粘性土の初期含水比 ω は含水比 $\omega=0$ の碎石粉、

* 関西大学教授 工学部土木工学科(〒564吹田市山手町3-3-35)、** 和歌山工業高等専門学校助教 土木工学科(〒644御坊市名田町野島77)

表-1 碎石粉と類似の材料による工法と現状

要因 施工法	現 状
路盤材の改良 地下埋設管の 埋戻し材	①石灰安定処理における添加材料としての有効利用 ②ケーキ（湿った碎石粉）の有効利用 ③フライアッシュとコンクリート微粉末の固体化による有効利用 ④ケーキ、フライアッシュなどを用い一部商品化 ⑤下水汚泥焼却灰を用いる土質改良
碎石粉とセメントをパイル状に打設して軟弱地盤を改良	①生石灰系パイル工法による軟弱地盤の鋭敏性改善 ②各種土質地盤におけるソイルセメントコラムの強度改善
碎石粉とセメントを粘土に混合して軟弱地盤を改良	①軟弱粘土の安定処理 ②ため池に堆積するヘドロの安定処理
流動化充填材	①軽量充填材を用いた建築物基礎下間隙の充填 ②充填材として一部製品化
軽量盛土材 軽量骨材	①石灰灰を利用した軽量盛土材（気泡アッシュ） ②発砲スチロール片・砂の混合軽量土
造粒材 ブロック材	①土の造粒化プラントと透水性グラウンドとしての有効利用 ②汚泥焼却灰の土質改良材としての有効利用 ③タイル・ブロック等の製品化

セメントを混入するとその混合土の含水比が低下する。その混合土を構成している水の働きについて考えるとセメントの水和反応に寄与する水分（有効水分）と土粒子と補助材料に拘束される水分（拘束水分）との2種類に分けて考えることができる。これを図-1のモデルを用いて説明する。この図に示す拘束水分のとりえ方として、この拘束水分は軟弱粘性土や混合補助材料の表面や内部空隙に保留される水分であると考えられる。この水分の量は土粒子表面の物理的・化学的性質に依存するものと考えられる。そしてコンクリートでも骨材の表面水の取り扱いを注意しているがその量は少ない。しかし対象が土

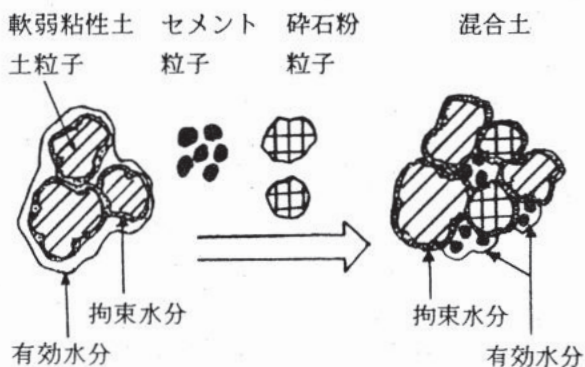


図-1 有効水分と拘束水分のとりえ方

の場合、この拘束水分が必要であるという特殊性を持っている。また、土粒子や混合補助材料の表面ならびに内部空隙には非晶質物質なども含まれていることが多く、その場合は拘束水分が多くなるので検討しなければいけない。

ところで、ポルトランドセメントの完全水和に必要な水量はセメントの重量の35~37%であるとされている。これはセメントの主成分のCaOがセメントの重量の63~67%含有しており、CaO単体の消化理論水量と一致している。しかし、一般には消化理論水の2倍の値を使用するのが普通であり、日本セメント協会によると水セメント比を40~70%としている。水セメント比が70%以上の水があると水和反応熱も低下し、硬化する効力も薄くなる恐れがある。コクリート示方配合によると水分量が単位体積重量の7~10%程度、セメント量が単位体積重量の10~15%程度が良いとされている。しかし、対象が土であると、一般に粘土にはSiO₂成分が40%程度含まれており、SiO₂成分が全量のCaOと反応してCaO-SiO₂-Al₂O₃を精製したと仮定すると、CaOの必要量は40%程度となる。これをセメント量に換算すると乾土重量に対し60%程度となる。この過剰のセメントは強度発現には寄与しないと考えられる。⁸⁾

改良土の一軸圧縮強度は軟弱粘性土の粒子と混合補助材料の粒子の強度の差異によって大きく左右される。また軟弱粘性土の粒子と混合補助材料の粒子とのどちらを粗骨材として考えるかによって、設計配合が大きく変化する。両者の内どれを粗骨材と考えるかの判定の基準として粒度分布図から次のように判定する方法が考えられる。

- (1) 軟弱粘性土の粒子が混合補助材料の粒子より極端に大きい場合、混合補助材料の粒子は細骨材と考えられる。この場合、これまでの研究結果から細骨材としての補助材料の量は20~30%以下となる。⁹⁾
- (2) 軟弱粘性土の粒子が混合補助材料の粒子とはほぼ同程度かそれ以下である場合、混合補助材料の粒子は粗骨材と考えられる。この場合、粗骨材としての補助材料の量に特に規制はない。

ここで言う粗骨材とは改良土の土構造上の骨格あるいは格子となりうる粒子とする。

3 試料の物理的、化学的性質

3.1 試料

実験に使用した試料は方解石を含む硬質砂岩を原石とし、碎石製造過程において産出される碎石粉である。そして、安定処理の対象とする軟弱粘性土は溜池の改修工事で排出されたものである。これを気乾状態で乾燥した後、夾雑物を取り除き2mmのフルイを通過したものである。

3. 2 物理的、化学的性質

これらの試料の物理的性質の強熱減量、比表面積、液性・塑性限界等の諸量を測定した。特に、比表面積の測定にはN₂吸着に基づくB.E.T.法で決定している。一方、試料中に含有する非晶質物質の化学成分は原子吸光分析で分析し、その含有量はHashimoto-Jacksonの方法¹⁰⁾に従って求めた。ただし、この方法で異なることは脱鉄処理において8N-HClを用いて洗浄処理を繰り返すことである。ここで言う非晶質物質(Amorphous materials)とは、酸(8N-HCl)とアルカリ(0.5N-NaOH)の交互の洗浄処理によって溶出する物質である。それで土中に含まれる非晶質物質、また結晶質であっても非結晶質物質と同様、化学的に不安定で溶解性の大きい物質をこれに含めて総称して用いることにする。¹¹⁾有効利用を目的とした碎石粉と軟弱粘性土の物理的性質は表-2に示すとおりである。これから、碎石粉2種類は強熱減量の値は大きいが塑性指数の値は小さいのが特長である。逆に、軟弱粘性土は強熱減量の値は小さいが塑性指数の値は大きい。また、これらの試料は一般の土に比べて比表面積が大おさい。碎石粉2種類の比表面積の差は碎石粉の産出過程の差によるものである。つまり、碎石粉No.1は碎石製造過程でのフルイ分けされた残留物であり、碎石粉No.2は碎石工場から大気中に飛散する碎石粉の粉

表-2 試料の物理的性質

物理的性質 試料	密度 ρ (g/cm ³)	比表面積 Ss(m ² /g)	強熱減量 (%)	液性限界 WL(%)	塑性限界 Wp(%)
碎石粉 No.1	2.727	7.95	9.906	22.51	18.08
碎石粉 No.2	2.737	14.38	9.787	24.62	20.02
軟弱粘性土	2.586	17.58	5.227	59.30	27.61

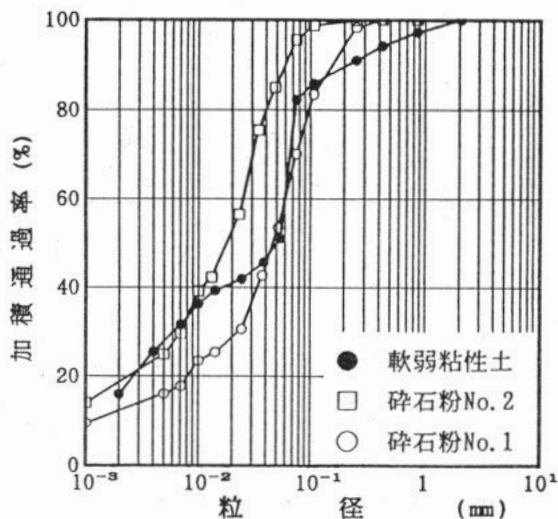


図-2 粒度分布曲線

表-3 試料の化学的性質

非晶質物質 試料	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	合計 (%)	Al ₂ O ₃ SiO ₂
碎石粉 No.1	5.53	3.48	5.20	14.21	0.669
碎石粉 No.2	5.81	4.38	5.16	15.35	0.849

塵を集積したものである。これらの粒度分布曲線は図-2に示すとおりである。この図から碎石粉は軟弱粘性土と粒径が同程度なので、安定処理に利用する場合、改良土の骨格、格子となり得る材料と判断できる。

一方、試料の非晶質物質の化学組成は表-3に示すとおりである。この表から碎石粉も非晶質物質を含んでいることが明らかである。しかし、碎石粉の非晶質物質量は強熱減量の値に比べて少ない。その理由は碎石粉は岩石を機械的に破碎してできたものであるから当然とも考えられる。

碎石粉は方解石を含む硬質砂岩を原石としたものである。その碎石粉No.1のX線回折図を図-3に示す。この結果から碎石粉には鉱物の石英、長石、方解石と粘土鉱物のカオリナイトが含まれていることが明らかである。そして、碎石粉の産出過程で色々な粘土鉱物が混入していないことも明らかである。

碎石粉No.2のX線回折図も同じ形をしており、碎石粉No.2も碎石粉No.1と同様な鉱物を含んでいると言える。このことは碎石粉の産出過程が異なっても碎石粉の化学組成は同じであり、産出過程の相違で比表面積、粒度、非晶質物質に差ができることが明らかである。しかし、この非晶質物質とセメントとの化学反応に関して、非晶質物質のSi, Al, FeとセメントのCaが容易に反応することが原因と報告されているが詳しいメカニズムまでは解明されていない。¹²⁾

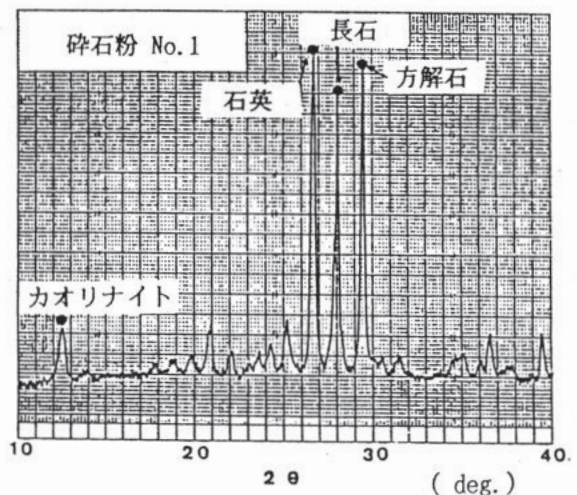


図-3 碎石粉 No.1のX線回折図

4. 軟弱粘性土の安定処理

4. 1. 実験方法

いま、混合補助材料として産業副産物である砕石粉を用いることにする。実験に用いた試料は表-1に示す軟弱粘性土と砕石粉No.1, No.2である。対象とする軟弱粘性土は溜池の改修工事で排出されたものである。これを気乾状態で乾燥した後、夾雑物を取り除き2mmのフルイを通過したものである。これに水を加えて所定の含水比になるように十分攪拌し、湿潤状態にしたものである。そして普通ポルトランドセメントとこれらを種々の割合で混合する。ただし、今回は、軟弱粘性土・セメント・砕石粉・水分との最適配合関係を検討する基礎データを得るため、特にセメント添加率が大きい幅をもつように設定している。そして、セメントおよび砕石粉の重量比は軟弱粘性土の乾土重量に対する割合である。供試体は小型モールド(50φ×100mm)を用いて作製した。試料を混合し十分攪拌したのち気泡を残さぬように3層に分けて充填する。そして各層ごとにブリージングしない程度に振動を加える。流動性が低く振動の効果のない場合は突き棒などによる充填を行なう。そしてへらを用いてモールド上縁を平行に仕上げ、ラップで皮膜をかぶせ、輪ゴムなどで緊結して表面の乾燥を防ぐ。作製後は水の出入りが無いように恒温恒湿槽で養生する。養生日数は7日で養生温度は20℃、湿度95%である。供試体の寸法は直径50mm、高さ100mmとして、脱型した供試体の端面を平滑に仕上げる。圧縮速度1%/mmの下で一軸圧縮試験を行ない、その圧縮強度を求める。

4. 2. 実験結果と考察

機械的エネルギーで破碎された、産業副産物である砕石粉を安定処理土の補助材料と考え、軟弱粘性土にその混合割合を変化させてセメント安定処理を試みた。ただし、この章で示す図においてセメント添加率および砕石粉混合率は大きな値と思えるが、軟弱粘性土の乾土重量に対する割合である。それで、それらの量は軟弱粘性土の単位重量に対する量は小さなものとなる。また、砕石粉No.1を用いても同様な傾向を示しているので砕石粉No.2の場合について示す。

乾燥密度と砕石粉混合率についてこれらの関係を図-4から図-6に示す。この図から、乾燥密度はセメント添加量と砕石粉混合量に支配されていることが明らかである。換言すれば、軟弱粘性土にセメントや砕石粉を加えれば乾燥密度が大きくなる。その値は1.5g/cm³まで大きくなる。しかし、砕石粉の混合量を多くしていくと乾燥密度が下がる傾向があり、砕石粉の混合量に最適値が存在すると予測できる。

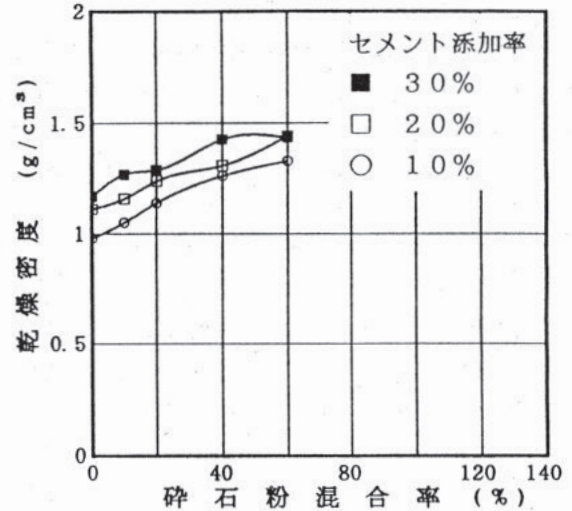


図-4 乾燥密度と砕石粉混合率の関係
軟弱粘性土の含水比 $\omega=50\%$ 、砕石粉 No.2

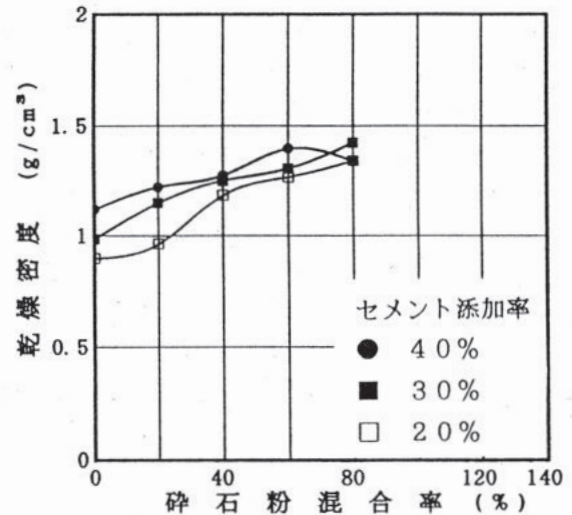


図-5 乾燥密度と砕石粉混合率の関係
軟弱粘性土の含水比 $\omega=60\%$ 、砕石粉 No.2

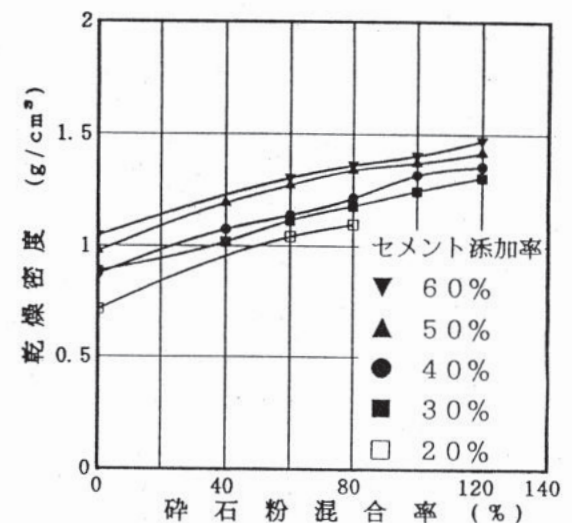


図-6 乾燥密度と砕石粉混合率の関係
軟弱粘性土の含水比 $\omega=80\%$ 、砕石粉 No.2

一軸圧縮試験における応力とひずみの関係を図-7から図-9に示す。この図における砕石粉の混合率は図-4、5、6に対応している。この図から、軟弱粘性土をセメント安定処理するとその一軸圧縮強度は著しく大きくなることから明らかである。また、その処理した供試体は固くなり、対象とした軟弱粘性土の含水比に応じて、ひずみが1%前後で応力は最大値を示す傾向がある。

一軸圧縮強度と乾燥密度についてこれらの関係を図-10から図-12に示す。この図においても砕石粉の混合率は図-4、5、6に対応している。この図から、セメント添加量が少ない場合、乾燥密度が大きくなると一軸圧縮強度も大きくなる傾向がある。そして、対象地盤の含水比が大きくなるほど一軸圧縮強度も大きくなる傾

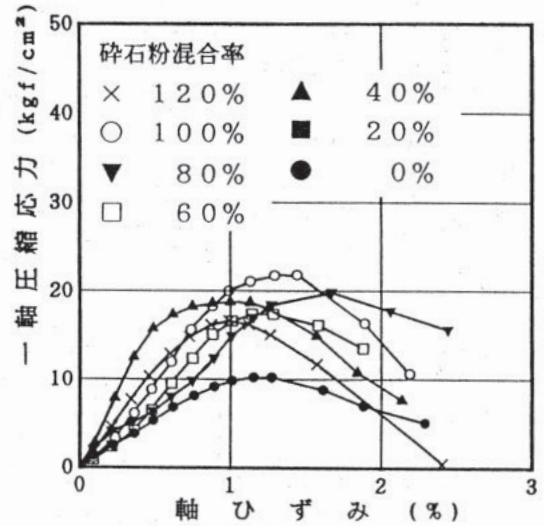


図-9 応力ひずみ特性
軟弱粘性土の含水比 $\omega=80\%$
砕石粉 No.2、セメント添加率30%

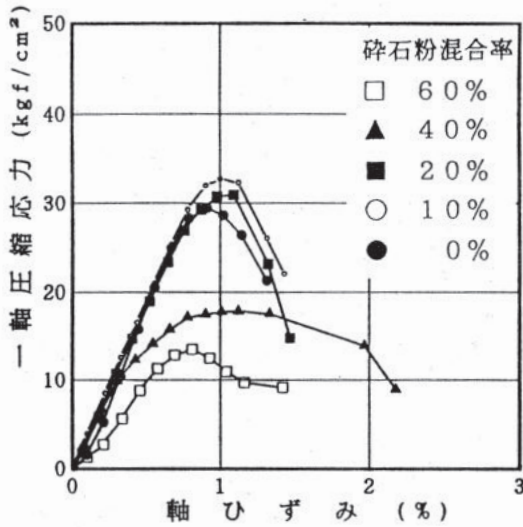


図-7 応力ひずみ特性
軟弱粘性土の含水比 $\omega=50\%$
砕石粉 No.2、セメント添加率30%

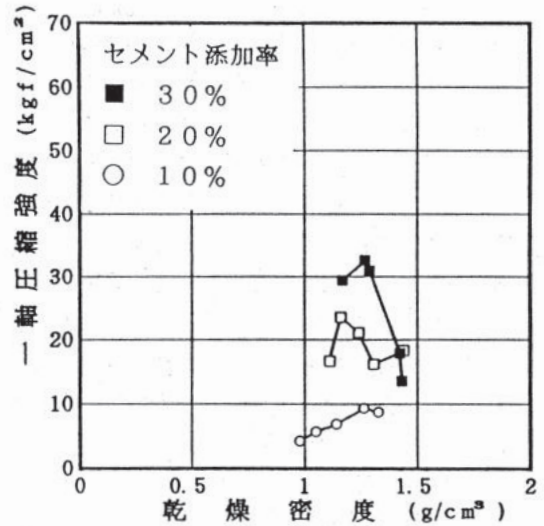


図-10 一軸圧縮強度と乾燥密度の関係
軟弱粘性土の含水比 $\omega=50\%$

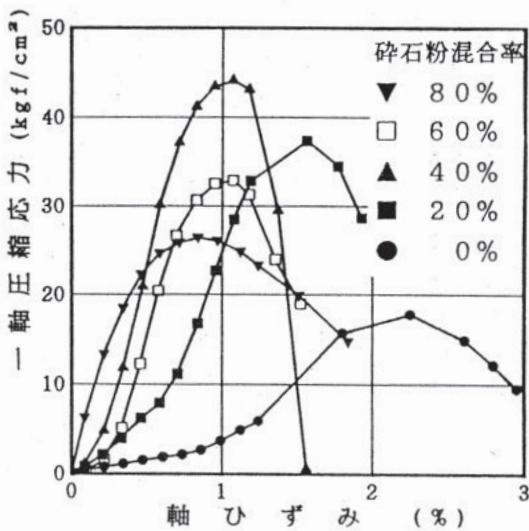


図-8 応力ひずみ特性
軟弱粘性土の含水比 $\omega=60\%$
砕石粉 No.2、セメント添加率30%

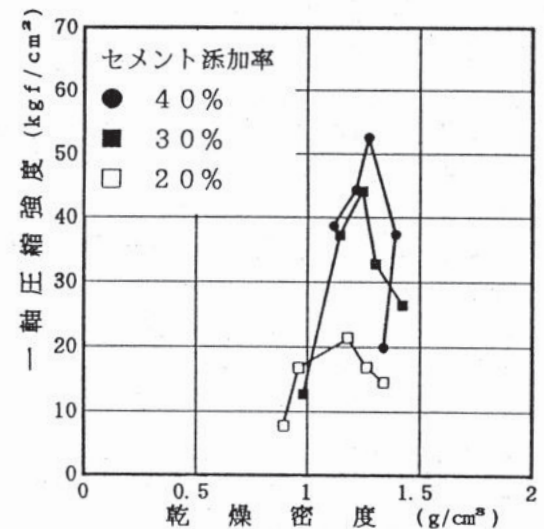


図-11 一軸圧縮強度と乾燥密度の関係
軟弱粘性土の含水比 $\omega=60\%$

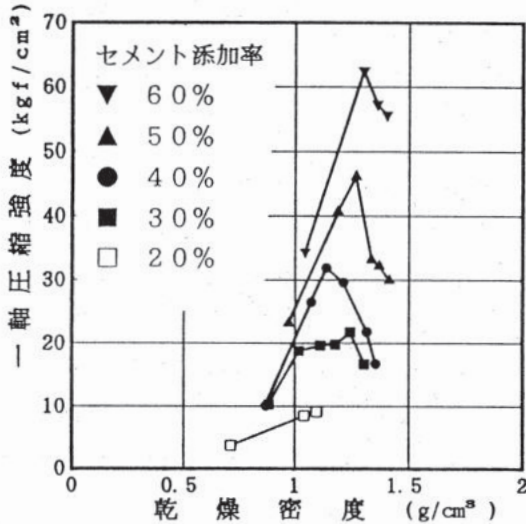


図-1 2 一軸圧縮強土と乾燥密度の関係
軟弱粘性土の含水比 $\omega=80\%$

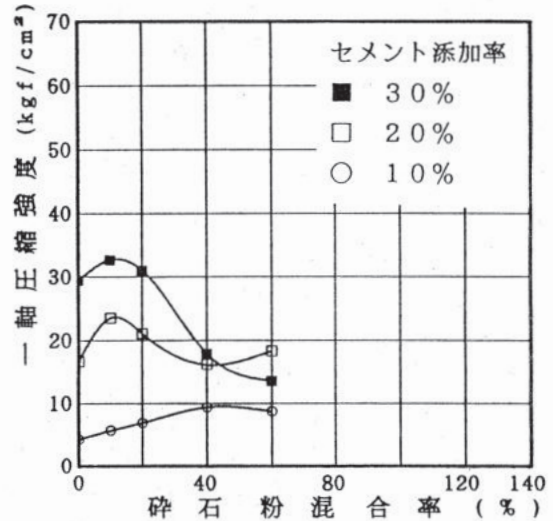


図-1 3 一軸圧縮強土と碎石粉混合率の関係
軟弱粘性土の含水比 $\omega=50\%$

向がある。しかし、セメント添加量が多くなってくると、乾燥密度が大きくなると一軸圧縮強度はかえって減少する傾向がある。このことから、軟弱粘性土をセメント安定処理してもその一軸圧縮強度は乾燥密度だけに支配されているとは思われない。この最大の原因は碎石粉の混合量を多くしていくと、セメントの水和反応に寄与する有効水分の不足を招くことであると考えられる。

一軸圧縮強度と碎石粉混合率についてこれらの関係を図-1 3から図-1 5に示す。この図から、

対象となる軟弱粘性土の含水比が液性限界より小さい場合、セメント添加量が20~30%となると、碎石粉の量が10~20%で一軸圧縮強度がピークとなる。しかし、セメント量が10%以下になると碎石粉の量が40%程度で一軸圧縮強度が最大となる。

対象となる軟弱粘性土の含水比が液性限界と同程度の場合、碎石粉の混合量が20~40%で一軸圧縮強度がピークとなる。混合補助材料の一軸圧縮強度に対する効果があることがわかる。

対象となる軟弱粘性土の含水比が液性限界よりかなり大きい場合、セメント量が30%以上になると碎石粉の混合量が60~80%で一軸圧縮強度にピークを示す傾向がある。セメント量が20%以下になると一軸圧縮強度は碎石粉の混合量に比例して大きくなる傾向を示す。

碎石粉をセメントの安定処理補助材として用いて安定処理した供試体の強度は、同一添加量のセメントのみで安定処理したものの強度に比べて大きな値を示している。このような碎石粉とセメントとの配合比にともなう一軸圧縮強度の変化に基づくと、安定処理土の補助材料としての碎石粉の最適配合比が推定できる。換言するとセメント添加量の少ない場合でも、碎石粉を混合すると供試体の処理効果を高めることができる。

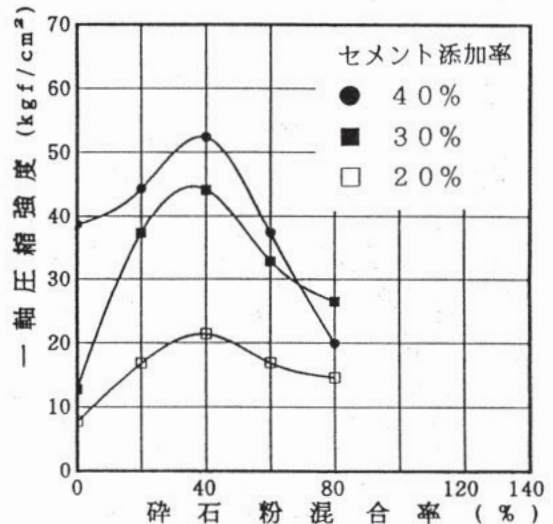


図-1 4 一軸圧縮強土と碎石粉混合率の関係
軟弱粘性土の含水比 $\omega=60\%$

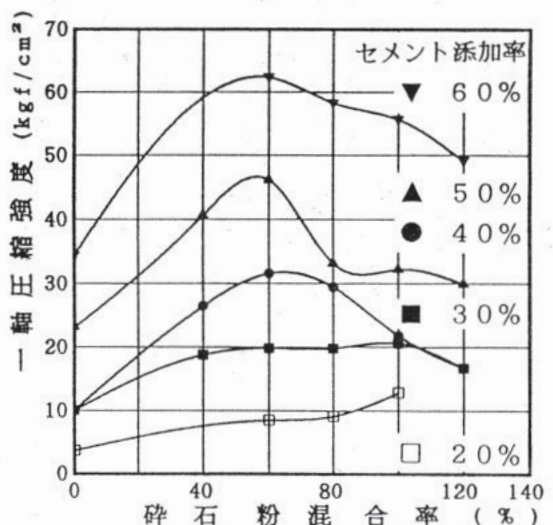


図-1 5 一軸圧縮強土と碎石粉混合率の関係
軟弱粘性土の含水比 $\omega=80\%$

本研究のセメント添加量と実際の施工例のセメント添加量と関係について検討してみる。本研究のセメント添加率から計算されるセメント添加量については表-4に示すとおりである。

軟弱粘性土の安定処理工法における実際の施工例としては、深層混合処理工法が適応される。その施工法における実施例は表-5、6に示すとおりである。¹³⁾ この

表-4 軟弱粘性土 1 m³ に対する
セメント添加量 (kg/m³)

セメント 添加率 %	10	20	30	40	50	60
軟弱粘性土 含水比 ω						
50%	113	226	338	—	—	—
60%	—	203	304	405	—	—
80%	—	168	253	337	421	506

表-5 深層混合処理工法：
陸上工事における施工例¹³⁾

工事種別 項目	宅地造成	河川堤防 工事	共同溝工事	羽田空港工事
対象土 含水比	腐食土 256~639%	腐食土 150%	粘性土 50%	埋土、シルト
セメント 添加量	セメント系固結材 250kg/m ³	セメント系固結材 200kg/m ³	普通ポルトランドセメント 130kg/m ³	普通ポルトランドセメント 上層 90 下層 120
目標一軸 圧縮強度	7.0kgf/cm ²	1.6kgf/cm ²	6.0kgf/cm ²	上層3.0kgf/cm ² 下層6.0kgf/cm ²

表-6 深層混合処理工法：
海上工事における施工例¹³⁾

工事種別 項目	護岸基礎	護岸基礎	護岸基礎	栈橋土留 部基礎
対象土 含水比	粘性土 100%	粘性土 50~150%	粘性土 160%	粘性土 44%
セメント 添加量	普通ポルトランドセメント 140kg/m ³	普通ポルトランドセメント 200kg/m ³ 有機質1400kg/m ³	普通ポルトランドセメント 130kg/m ³	セメント系固結材 180kg/m ³
目標一軸 圧縮強度	6.0 kgf/cm ²	36 kgf/cm ²	36 kgf/cm ²	25 kgf/cm ²

3つの表から、本研究におけるセメント添加率は

対象軟弱粘性土の含水比が $\omega=50\%$ の場合、最大35%である。

対象軟弱粘性土の含水比が $\omega=60\%$ の場合、セメント添加率は最大40%である。

対象軟弱粘性土の含水比が $\omega=80\%$ の場合、セメント添加率は最大45%である。そして、セメント添加量は対象軟弱粘性土に対して400kg/m³であることがわかる。しかし、表-5、6から実際に使用されるセメント添加量は対象軟弱粘性土に対して90kg/m³~250kg/m³の範囲であることがわかる。本研究においても対象軟弱粘性土に対してセメント添加量はこの範囲を含み、妥当な一軸圧縮強度の値を得ている。

以上の結果を踏まえると、セメントの水和反応に寄与する有効水分を考慮に入れて、軟弱粘性土・セメント・有効水分・碎石粉の最適配合設計方法が確立できる可能性を明示することができた。

5. まとめ

産業副産物である碎石粉がセメント安定処理における補助材料として有効に利用できるかどうかの適性について検討した結果、次のような結論を導くことができた。

- (1) 碎石粉を用いると軟弱粘性土の含水比の低下をはかることができる。
- (2) 碎石粉を混合することにより軟弱粘性土の乾燥密度を大きくすることができる。
- (3) 安定処理の対象地盤の含水比とセメント添加量に応じて碎石粉の最適混合量がある。
- (4) 処理効果を上げるためにはセメントの水和反応に寄与する水分の影響を考慮に入れなければならない。
- (5) 産業副産物である碎石粉はセメント安定処理における補助材料として有効に利用できる可能性がある。

以上のことから、セメント添加量の少ない場合でも、碎石粉を混合することにより供試体の処理効果を高めることができる。つまり、セメントの使用量を減らすことができ、コストの減少をはかることができる。そして資源の有効利用と環境保全をはかることができる。

セメントの水和反応に寄与する有効水分を考慮に入れて、軟弱粘性土・セメント・有効水分・碎石粉の最適配合設計方法を検討していくことが今後の課題である。

なお、試料を提供して頂いた近畿碎石協同組合の関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 平成2年度活路開拓調査指導事業報告書：砕石粉有効利用化のビジョン、近畿砕石協同組合、pp. 3-22 (1991)
- 2) 西田一彦、佐々木清一、久保井利達：砕石粉の土質安定処理への有効利用について、材料、Vol. 40, No. 459, pp. 1273-1277 (1991)
- 3) 鳥居和之、川村満紀：路盤・盛土材料としての締め固めたフライアッシュ、土と基礎、Vol. 37, No. 2, pp. 67-72 (1989)
- 4) 友久誠司：特殊土および産業廃棄物の石灰・セメント系安定材による固化処理と強度発現の予測手法に関する研究、京都大学学位請求論文、pp. 151-171 (1989)
- 5) 嘉門雅史、友久誠司、壺内賢一、S. Nontananandh：建設廃材としてのコンクリート微粉末の固化による有効利用について、材料、Vol. 37, No. 422, pp. 8-13 (1988)
- 6) 嘉門雅史、澤孝平、友久誠司：製紙焼却灰のセメント系固化による有効利用、第24回土質工学研究発表会概要集、pp. 1939-1940 (1981)
- 7) 久楽勝行、三木博史、林義之：下水汚泥焼却灰の土質改良効果に関する考察、第24回土質工学研究発表会概要集、pp. 1941-1942 (1981)
- 8) 下田正雄：わかりやすい土木技術、石灰安定処理工法、鹿島出版会、pp. 62-81 (1984)
- 9) 澤孝平：まさ土の粒子破碎特性とその石灰安定処理に関する基礎的研究、京都大学学位請求論文、pp. 107-127 (1981)
- 10) I. Hashimoto and M. L. Jackson: Rapid dissolution of Allophane and Kaolinite-Halloysite after dehydration, 7th, Nat. Conf. on Clays and Clay Minerals, pp. 102-113 (1960)
- 11) 西田一彦、佐々木清一、久保井利達：まさ土の非晶質物質とその特性について、土質工学会論文報告集、Vol. 24, No. 2, pp. 180-190 (1984)
- 12) J. B. Q. Carvalho: Amorphous Materials and Lime Stabilized Soils, Proc. of the X Inter. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering Sweden, Vol. 3, pp. 761-764 (1982)
- 13) 日本材料学会—土質安定材料委員会編：地盤改良工法便覧、日刊工業新聞社、pp. 367-410 (1991)