

砕石粉を混合補助材として用いた粘性土の セメント安定処理効果

久保井利達¹・西田一彦²

¹正会員 和歌山工業高等専門学校助教授 環境都市工学科 (〒644-0023和歌山県御坊市名田町野島77)

²正会員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科 (〒564-0073吹田市山手町3-3-35)

本研究はセメントで軟弱粘性土を安定処理する場合、混合補助材として砕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行ったものである。その結果、次のようなことが明らかとなった。

1)対象粘性土の含水比の値にかかわらず、一軸圧縮強度と配合含水比に対するセメント添加率の比は反比例の関係にある。2)配合含水比に対するセメント添加率の比から最適なセメントの添加量と砕石粉の混合量が決定できる。3)最適な砕石粉の混合率とセメント添加率は2つの実験式の直線の交点として、図上から求めることができる。4)対象粘性土の含水比およびセメント添加率にかかわらず、一軸圧縮強度は配合含水比の値35%前後でピークを示す。この値は粘性土の塑性限界値の約1.2倍程度の値にほぼ一致している。

Key Words : waste rock powder, cement stabilization, soft clay, unconfined compressive strength, plastic limit, water content

1. はじめに

近年、急速な建設工事の増加にともない、骨材としての砕石が多用されている。近年で4億9千万 t/年という莫大な量が消費されている。しかし、この砕石工場の生産過程から産出される砕石粉は一種の産業副産物である。この砕石粉とは集塵粉と砕砂製造工程上で産出される微粉である。その産出量は全体で30万7千 t/年である。そのうち有効利用されるのは2千400 t/年と1%に満たない状況である。未利用の砕石粉は年間に約30万 t/年となり砕石生産量の1.2%で、砕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。砕石砂の原料となるスクリーニングス（砕石をつくる場合に生ずる粒径2.5mm以下の細かい部分）の生産量との関係を見るとスクリーニングス300万 t/年のうち86万4千 t/年が将来砕石砂の原料となる可能性がある。そのうち23%が砕石粉となる。これを今後原料化されると思われる86万4千 t/年を23%として計算すると年間約20万 t/年の砕石粉が新たに産出される可能性がある。未利用の砕石粉と合わせると年間約50万 t/年という膨大な量となる予想がある¹⁾。

一方、この砕石粉の処分をうまくしなければ大気汚染、河川汚染を引起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、この砕石粉を有効利用することが必要である。この砕石粉の有効利用への取り組みについては各砕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、砕石粉の処理・再資源化について苦慮しているのが現状である。砕石粉の利用は一部分であり、その量も少ない。そこで、砕石粉を大量に使用する利用方法を検討するとコクリート等への補助材料、地盤改良、ベントナイト泥水への代用、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砕石粉を土中に埋め戻すという単純な発想から出発し、砕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が不足する土に対して砕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を明らかにしてきた²⁾。

- (1) 砕石粉自身を石灰で安定処理した場合の強度は石灰添加量が10%以上になると小さくなる。
- (2) 砕石粉をまき土の安定処理補助材料として用いると長期強度の増加が期待できる。また、石灰、セメント処理のいずれの場合でも一軸圧縮強度は砕石粉の混合量が20%で最大値を示す。
- (3) 細粒分や土の非晶質物質が少ない土に砕石粉

表-1 試料の物理的性質

物理的性質 試料	土粒子 密度 g/cm ³	比表面積 m ² /g	強熱 減量 %	液性 限界 WL %	塑性 限界 WP %	統一 土質 分類
碎石粉	2.737	14.38	9.79	24.62	20.02	ML
粘性土	2.586	17.58	5.23	59.3	27.61	CH

(比表面積はN₂吸着に基づくB.E.T.法による測定)

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できる。

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。

ところで、土質安定工法においては突固めを用いるセメント安定処理の配合設計方法は明示されているが、理論的なセメント安定処理の配合設計方法は明示されていない。また、上記廃棄物等を混合補助材料として用いて粘性土を改良する場合の設計指針は、未だ示されていない。したがって、各種混合補助材料を用いる場合の配合は、実験者が各種配合比で実験し、その強度との関係から最適配合比を得ているのが現状である。

本研究は一例としてセメントで粘性土を安定処理する場合の混合補助材料として碎石粉を有効に利用するために、その最適配合比を理論的に明らかにするものである。さらに本研究では、土の特殊性を考慮して、粘性土に含まれる水分をセメントの水和反応に寄与する水分と土粒子と碎石粉に拘束される水分とに分けて考えている。この考えに基づいて、粘性土・水・セメント・碎石粉との関係について、それらの最適配合比を理論的に導き、安定処理土の一軸圧縮強度との関係を究明したものである。

2. 試料の物理的、化学的性質

(1) 試料

実験に使用した碎石粉は京都府亀岡市で産出される方解石を含む硬質砂岩を原料としたもので、碎石工場から大気中に飛散する碎石粉を集積したものである。そして、安定処理の対象となる粘性土は和歌山県日高郡内の溜池の改修工事で排出される軟弱な粘性土である。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。

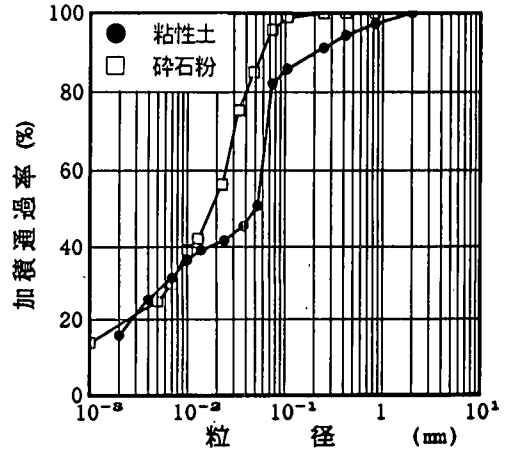


図-1 粒度分布曲線

(2) 物理的、化学的性質

これら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。比表面積はN₂吸着に基づくB.E.T.法により決定している。

碎石粉と粘性土の物理的性質を表-1に示す。これから、碎石粉は900°Cでの強熱減量の値は大きいと塑性指数の値は小さいのが特徴である。逆に、粘性土は強熱減量の値は小さいと塑性指数の値は大きい。試料の碎石粉は一般の土に比べて比表面積が大きい。この理由として、碎石粉は機械的な破碎によって土粒子が細粒化したものであり当然とも考えられる。

これらの粒度分布曲線を図-1に示す。この図から碎石粉は粘性土と粒径が同程度の大きさであることがわかる。また、その材質は安定なものであり、これを土質改良に使用してもさしつかえないと考えられる。

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⁸⁾に従って求めている。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。そのため土中に含まれる非晶質物質、または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⁹⁾。土粒子は風化の進行にともなって化学的に不安定な非晶質物質が多くなる。また、人工的に細粒化されれば粒子の比表面積が増大し、表面や内部の不安定な物質が容易に溶出されやすい状態になるから非晶質物質が多くなる。そして試料の非晶質物質の化学組成は表-2に示すとおりである。この表から碎石粉も非晶

表-2 試料の化学的性質

試料	非晶質物質				合計	Al ₂ O ₃	
	Fe ₂ O ₃ %	Al ₂ O ₃ %	SiO ₂ %	合計		SiO ₂	
砕石粉	5.81	4.38	5.16	15.35	0.849		

質物質を含んでいることが明らかである。しかし、砕石粉は強熱減量の値が大きいかかわらず、非晶質物質量の値は少ない。その理由は砕石粉は岩石を機械的に破碎してできたものであるからである。そして、この強熱減量の値は有機物でなく、ほとんど結晶水と考えられる。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説明されていない¹⁰⁾。

その砕石粉のX線回折図を図-2に示す。この結果から砕石粉には一次鉱物の石英、長石、方解石と粘土鉱物のカオリナイトが含まれ、また、X線回折角 $2\theta = 5^\circ$ 近傍にみられる二次鉱物のハロサイトなどの粘土鉱物が含まれていないことが明らかである。砕石粉の産出過程でその他の色々な粘土鉱物が混入していないことも明らかである。

以上の砕石粉の物理化学的性質から、砕石粉は土の工学的分類では{W}の記号で表記される廃棄物に属する。しかし、これを日本統一土質分類法で調べると、砕石粉はシルト {ML} に相当する細粒土である¹¹⁾。ところで、シルトは単体で土質材料として、路床、路体に使用すると施工上問題となるとされている。これらのことから、砕石粉は単体で土質材料として用いることは困難である。しかし、砕石粉は粒子は小さいが粒子の強度は大きく、有機物などの不純物が少なく、化学成分も安定している。そして砕石粉の浸出液もpHが中性である。また砕石粉は比表面積が大きく、かつ非晶質物質を含んだ材料と言える。

このような性質を有する砕石粉を土質材料として有効に利用しようと考えた。安定処理において、一軸圧縮強度を大きくするには比表面積が大きく、かつ非晶質物質を多量に含んだ土を混入すると効果があると考えられる。それで砕石粉を安定処理の混合補助材として用い、粘性土のセメント安定処理について、その効果を検討してみる。

3. 粘性土の安定処理

(1) 実験方法

実験に用いた試料は表-1に示す粘性土と砕石粉である。粘性土は水を加えて所定の含水比(表-1に示す粘性土の液性限界を基準とし、W=50%, 60%, 80%)になるように十分攪拌し、湿潤状態にしたも

表-3 深層混合処理工法：陸上工事における施工例¹²⁾

項目	工事種別 宅地造成	河川堤防 工事	共同溝工 事	羽田空港 工事
対象土	腐植土	腐植土	粘性土	埋土・シルト
含水比(%)	256-639	150	50	
セメント種類	セメント系	セメント系	普通ポルトランドセメント	普通ポルトランドセメント
添加量(kg/m ³)	固化材 250	固化材 200	130	上層 90 下層 120
目標一軸圧縮強度(MPa)	0.7	0.16	0.6	上層 3.0 下層 6.0

表-4 深層混合処理工法：海上工事における施工例¹²⁾

項目	工事種別 護岸基礎	護岸基礎	護岸基礎	棧橋土留部基礎
対象土	粘性土	粘性土	粘性土	粘性土
含水比(%)	100	50-150	160	44
セメント種類	普通ポルトランドセメント	普通ポルトランドセメント	普通ポルトランドセメント	セメント系固化材
添加量(kg/m ³)	140	200 有機質土 400	130	180
目標一軸圧縮強度(MPa)	0.6	3.6	3.6	2.5

表-5 本実験における粘性土1m³に対するセメント添加量(kg/m³)

実験のセメント添加率(%)	10	20	30	40	50	60
粘性土の含水比 W=50%	113	226	338	-	-	-
粘性土の含水比 W=60%	-	203	304	405	-	-
粘性土の含水比 W=80%	-	168	253	337	421	506

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。実験におけるセメントおよび砕石粉の質量比は粘性土の乾燥土質量に対する割合である。土質改良する場合、対象土1m³に対するセメント量で示すのが一般的である。そこで、この表示法による粘性土の安定処理工法における深層混合処理工法の実施例を、表-3,4に示す¹²⁾。表-3,4から実際に使用されるセメント添加量は対象粘

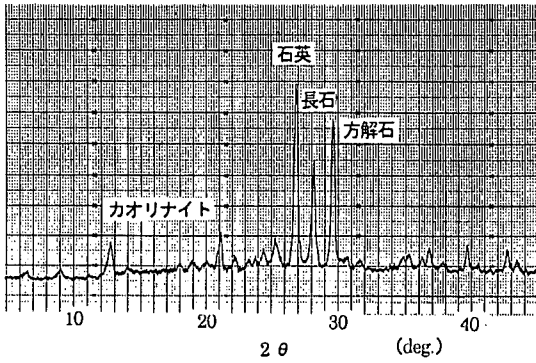


図-2 砕石粉のX線回折図

性土に対して $90\text{kg}/\text{m}^3 \sim 250\text{kg}/\text{m}^3$ の範囲であることがわかる。本研究においてセメント添加量は実際の施工例のセメント添加量を考慮して表-5のように決定した。

供試体は小型モールド ($50\phi \times 100\text{mm}$) を用いて作製した。試料を混合し十分攪拌した後、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。作成後は水の出入りがな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°C 、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。一軸圧縮試験は圧縮速度 $1\%/\text{min}$ の下で行ない、その圧縮強度を求めた。

(2) 実験結果

乾燥密度と砕石粉混合率についてこれらの関係を図-3示す。この図から、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。しかし、セメント量や砕石粉の混合量を増加させても乾燥密度の増加には限界がみられる。その値は $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ まで、初期状態の密度の1.5-2.0倍近くまでである。

一軸圧縮強度と乾燥密度についてこれらの関係を図-4に示す(この図においても砕石粉の混合率は図-3に対応している)。一般に土の一軸圧縮強度は乾燥密度に比例すると考えられている。この図からも、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。しかし、セメント添加量が多い場合、セメント量が一定の下で砕石粉の混合量を増加していくと一般的に乾燥密度は大きくなるが、一軸圧縮強度はピークを持つ傾向がある。このことから、粘性土をセメントと砕

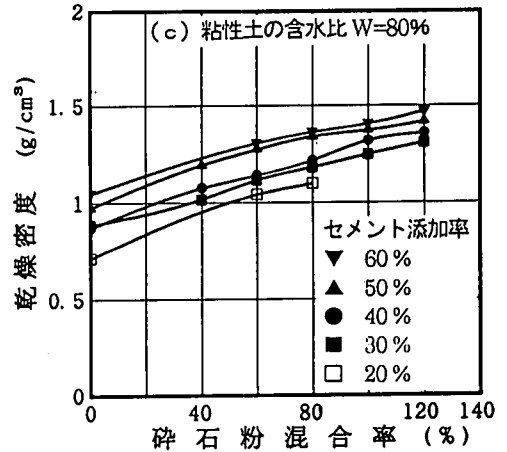
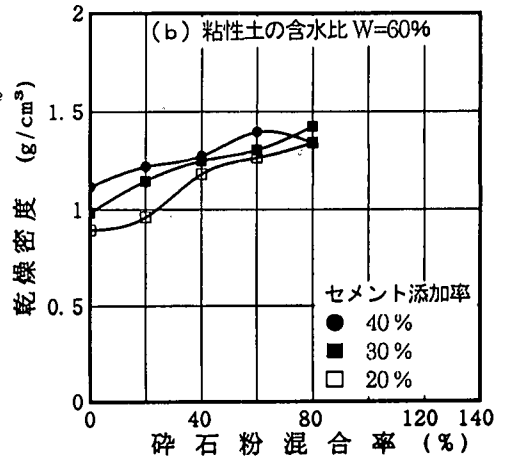
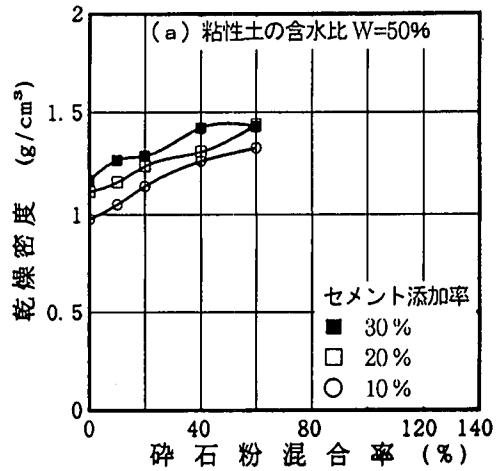


図-3 乾燥密度と砕石粉混合率の関係

石粉で安定処理した供試体の一軸圧縮強度は乾燥密度だけに支配されないと考えられる。一軸圧縮強度がピークを示した後、減少することの最大の原因は

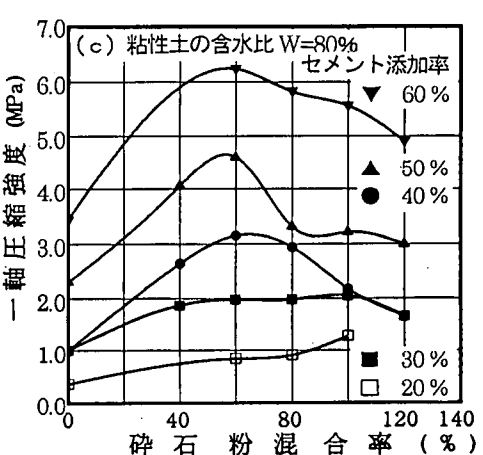
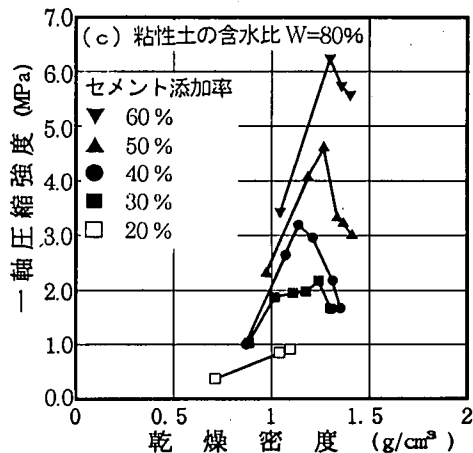
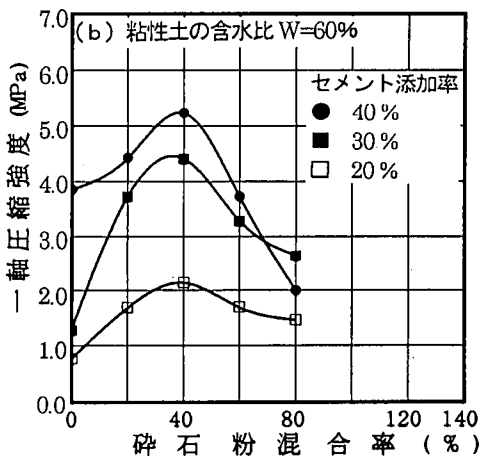
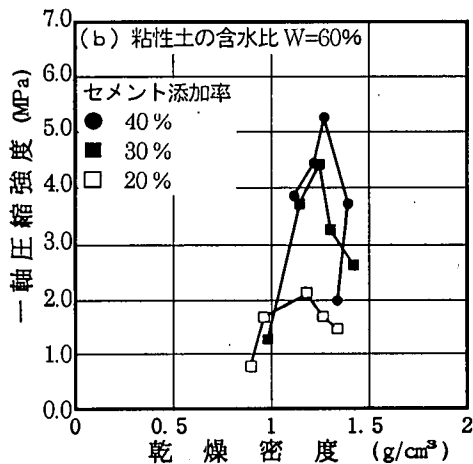
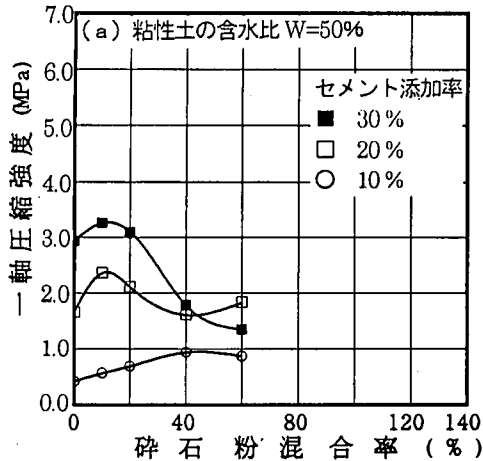
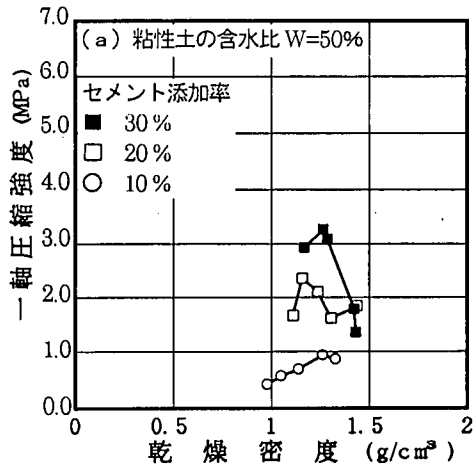


図-4 一軸圧縮強度と乾燥密度の関係

図-5 一軸圧縮強度と碎石粉混合率の関係

碎石粉の混合を増加していくと碎石粉に吸着される水分が多くなり、セメントの水和反応に寄与する水分の不足を招くことによるものと考えられる。しかし、一定量のセメントを用いて粘性土を安定処理する場合、碎石粉を補助材として用いた供試体の強度

は、碎石粉を用いない供試体の強度に比べて大きな値を示している。

一軸圧縮強度と碎石粉の混合率との関係を図-5に示す。これらの図から、各供試体の一軸圧縮強度はセメント添加量が増加するほど大きくなることが明

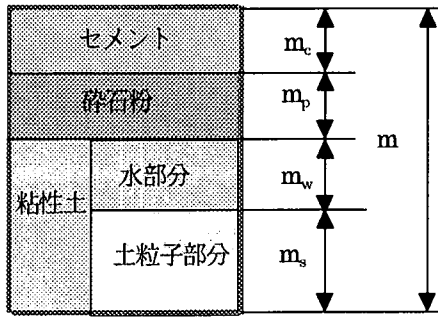


図-6 混合土の構成要素モデル

らかである。また砕石粉を混入することにより一軸圧縮強度が増加する傾向にあるが、砕石粉の混合量がある値でピークを示した後、減少する場合もみられる。つまり、砕石粉に最適混合量があることがわかる。この一軸圧縮強度の減少する原因は供試体中の細粒分量(粒径が75 μ m以下の細粒部分)が過剰の状態となっている¹³⁾ことによるものと考えられる。また、砕石粉の混合量を増加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も、その原因であると考えられる。

一軸圧縮強度について実際の施工例の目標一軸圧縮強度と比較してみる。表-3,4から実際に使用されるセメント添加量に対して目標一軸圧縮強度0.6~3.6MPaであり、実験による一軸圧縮強度も図-5から妥当な値を得ていることがわかる。

(3) 改良土の構成要素モデルでの考察

粘性土を補助材を用いてセメントで安定処理する場合、補助材を用いることによる地盤の水分低下の効果が、どの程度であるかを検討する。

コンクリートの配合計算はコンクリート1 m^3 の中に占めるそれぞれの構成要素が占める容積の比率で表すが、その容積部分を質量に換算した場合の割合で表している。このモデルでは、安定処理した混合土の全体の質量を1と考えて、その中に占めるそれぞれの構成要素の質量に対する割合で計算している。粘性土に混合補助材ならびにセメントを混合した改良土の構成モデルの図-6を用いて説明すると次のとおりである。

混合土の質量	: $m = m_s + m_w + m_p + m_c$
粘性土の土粒子の質量	: m_s
粘性土の水の質量	: $m_w = W \times m_s / 100$
セメントの添加量	: $m_c = a \times m_s / 100$
砕石粉の混合量	: $m_p = b \times m_s / 100$
粘性土の含水比	: $W = 100 \times m_w / m_s$
セメント添加率	: a

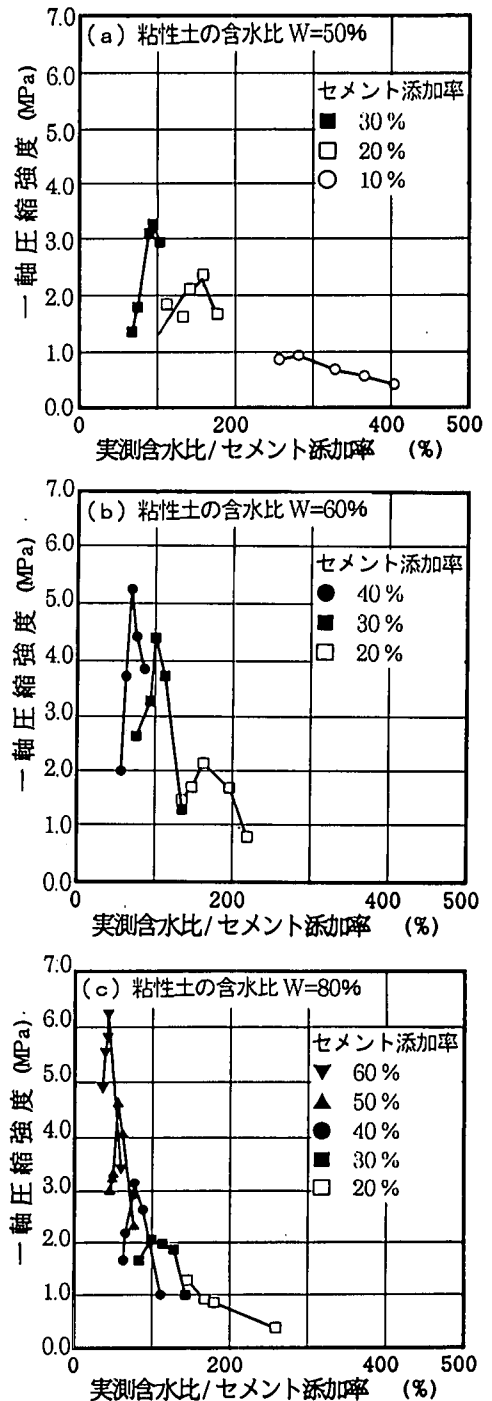


図-7 一軸圧縮強度と実測含水比/セメント添加率の関係 (Wm_c/a)

碎石粉の混合率 : b
 混合土の実測含水比 : Wmc
 混合土の配合含水比 : Wnc

$$Wnc = \frac{100 \times m_w}{m_s + m_c + m_p} = \frac{100 \times w}{100 + a + b} \quad (1)$$

ここでいう実測含水比とは粘性土にセメントと碎石粉を混入して安定処理した供試体を、7日養生後実測した含水比である。また、配合含水比とは粘性土にセメントと碎石粉を混入して、供試体を作成するとき、水和反応前の状態の含水比である。この実測含水比と配合含水比の差は水和反応の一部に使用される水分である。

(4) 混合土の実測含水比と配合含水比の値に対するセメント添加率の比の評価

構成モデル図-6において対象となる粘性土に碎石粉、セメントを混入すると、混合土の含水比は低下する。しかし、セメント添加率一定の下で碎石粉混合率を変化させても水分量は不変であるので混合土の水セメント比は一定である。したがって、混合土の実測含水比 (Wmc) と配合含水比 (Wnc) および、水セメント比に相当するこれらの値に対するセメント添加率 (a) の比の項目で評価する方法を検討する。

一軸圧縮強度と実測含水比に対するセメント添加率の比 (Wmc/a) についてこれらの関係を図-7に示す。この図で一軸圧縮強度とWmc/aについて検討してみる。粘性土の含水比が一定の場合、各セメント添加量における一軸圧縮強度のピーク点とピーク点を結ぶと曲線で近似できる。これから含水比が異なっても対象粘性土のセメント安定処理における、目標一軸圧縮強度値が与えられれば、水セメント比に相当するWmc/aを決定することができる。

また図-7(a), (b), (c) に示す一軸圧縮強度とWmc/aについてのこれらの関係をまとめて図-8に示す。この図に示す一つの実験式(2)が得られる。これから対象粘性土の含水比の値にかかわらず、一軸圧縮強度とWmc/aは反比例の関係にあることがわかる。図中に示す式(2)は

$$y = A \times X^B \quad (2)$$

定数 A = 176
 指数 B = -0.96
 相関係数 R = 0.83
 である。

同様に一軸圧縮強度と配合含水比に対するセメント添加率の比 (Wnc/a) についてのこれらの関係をまとめて図-9に示す。図から、一つの実験式が得られる。これから対象軟弱粘土の含水比の値にかかわらず一軸圧縮強度とWnc/aは反比例の関係にあるこ

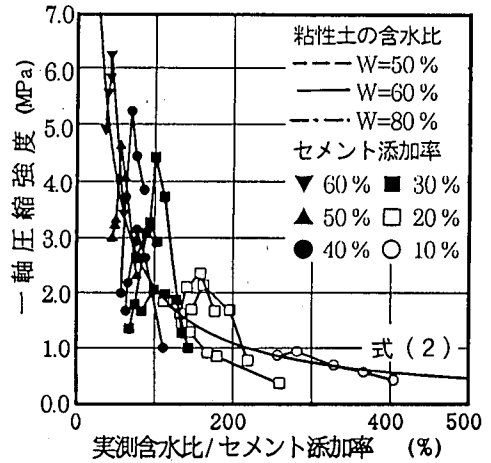


図-8 一軸圧縮強度と実測含水比/セメント添加率の関係 (Wmc/a)

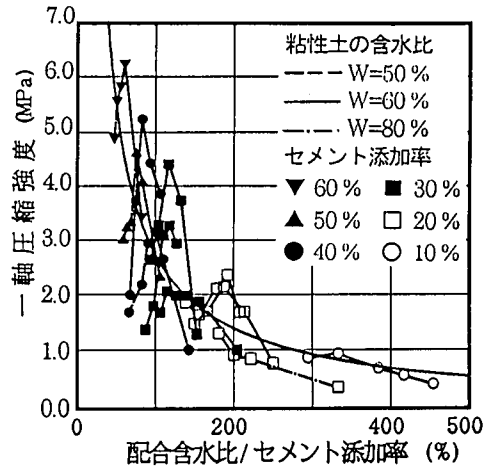


図-9 一軸圧縮強度と配合含水比/セメント添加率の関係 (Wnc/a)

とがわかる。図中に示す曲線は粘性土にセメント、碎石粉を混入した直後の含水比、すなわち、配合含水比を用いて一軸圧縮強度とWnc/aの関係を図に描いて得られたものである。この曲線は図-8に示す実験式と同じ形の $y = C \times X^D$ で表現できる。そしてその係数は、

定数 C = 275
 指数 D = -1
 相関係数 R = 0.84

である。この式から、対象粘性土の含水比の値に関係なく、セメント安定処理における、目標一軸圧縮強度値が与えられれば、水セメント比に相当するWnc/aを決定することができる。この値を用いるとセメント安定処理の配合計算に利用できる可能性が得られた。

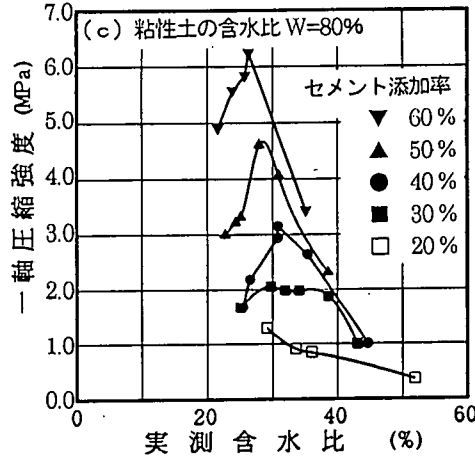
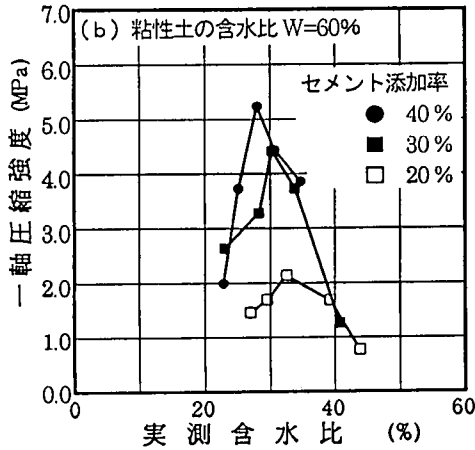
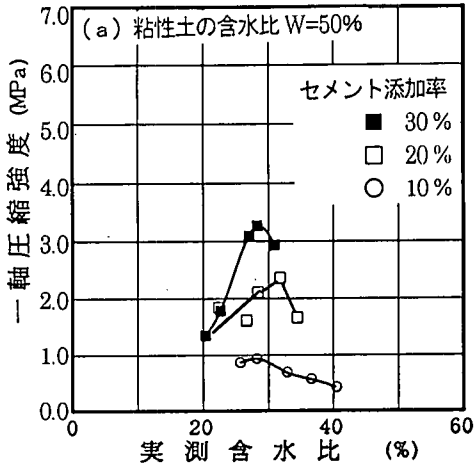


図-10 一軸圧縮強度と実測含水比の関係

(5) 一軸圧縮強度と含水比の関係

一軸圧縮強度と含水比についてこれらの関係を図-10に示す。この図から、対象粘性土の含水比の値にかかわらず、一軸圧縮強度は測定含水比30%前後で

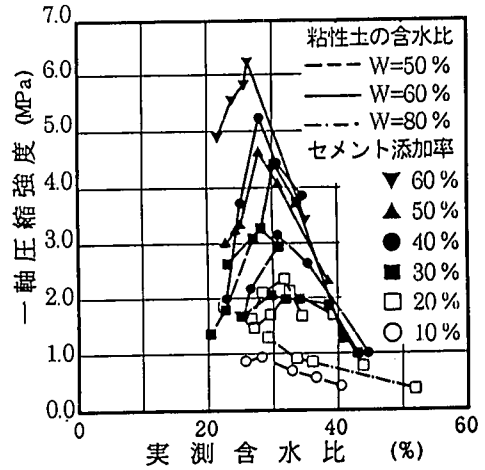


図-11 一軸圧縮強度と実測含水比の関係

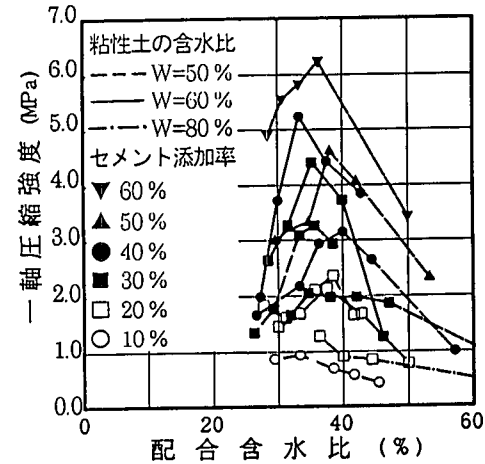


図-12 一軸圧縮強度と配合含水比の関係

ピークを示す傾向がある。次に、一軸圧縮強度と実測含水比 (W_{nm}) についてこれらの関係をまとめて図-11に示す。この図から、対象粘性土の含水比およびセメント添加率の値が変化しても、一軸圧縮強度は実測含水比 (W_{nm}) 30%前後でピークを示すことがわかる。この実測含水比 (W_{nm}) に注目すると、この値は表-1に示す粘性土の塑性限界値とほぼ一致している。自然状態において、土粒子は表面の物理化学的性質に依存する拘束水分量を持っている。この水分は粘性土の表面や内部空隙に保留される水分であり、土粒子に強く吸着しており、セメントの水和反応に寄与しにくい状態にあるものと推察される。このことから、一般に土をセメント安定処理する場合、粘性土や混合補助材に対するこの拘束水分量を前もって見積もっておく必要がある。この拘束水分は塑性限界に関係していると考えられる。

配合含水比 (W_{nc}) を用いて同様な図を描いてみ

ると、図-12に示すとおりである。対象粘性土の含水比およびセメント添加率の値が変化しても、一軸圧縮強度は配合含水比 (Wnc) 35%前後でピークを示す。この値は粘性土の塑性限界値の約1.2倍程度の値とほぼ一致している。この実測含水比と配合含水比との差の水分はセメントの水和反応に使用され、結晶水として取り込まれたと考えられる。したがって、配合含水比は粘性土の塑性限界値の約1.2倍程度の水分になるように見積もる必要がある。これによってセメントの水和反応に必要な水分が得られると考えられる。

4. セメントの完全水和反応に必要な水分量

(1) 水和反応に必要な水分量

セメント安定処理の配合方法にコンクリートの配合設計を参考にして検討する。コンクリートの配合計算はコンクリート 1 m³の中に占めるそれぞれの構成要素が占める容積の質量に対する割合である。コンクリート示方配合によるとコンクリートの中の水分量がコンクリート 1 m³の単位体積質量の7~10%程度、セメント量が単位体積質量の10~15%程度が適切とされている¹⁴⁾。そのセメントと水の関係について検討すると、完全水和に必要な水量はセメントの質量の35~37%であるとされている¹⁵⁾。そして、一般にはこの水量の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%の値としている。さらに水セメント比が70%以上の値にな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と考えられる。

これらのことから、本研究では、安定処理した混合土の全体の質量を1と考えて、その中に占めるそれぞれの構成要素の質量に対する割合で計算している。さらにセメント量は内割り計算しているのので、上記、コンクリートにおける数値を参考にできると考えられる。

(2) セメント添加率と碎石粉の混合率

粘性土のセメント安定処理において、水とセメントの関係に焦点を当て粘性土に碎石粉とセメントを混入する場合、セメント添加率a、碎石粉の混合率bを求めてみる。4. (1)で記述したポルトランドセメントの完全水和反応に必要な水分量はセメントの添加量 ($m_s = a \times m_g / 100$) の35~37%とされているので、ここでは混合土の配合含水比 (Wnc) を35%とすれば、セメントの完全水和反応に必要な水分量を最低限確保できることになる。したがって、式(1)にWnc=35%を代入すると、セメントの添加率を示すことのできる

$$a = -b + 2.857 \times w - 100 \quad (\%) \quad (3)$$

が得られる。

また、4. (1)で記述したセメント添加量 ($m_s = a \times m_g / 100$) が混合土の質量 ($m = m_s + m_g + m_c + m_p$) の10~15%とされているので、ここではセメント添加量を混合土の質量の10%とすると、

$$(m_s + m_g + m_c + m_p) \times 0.1 = m_s$$

$$m_s \times (100 + w + a + b) = 10 \times a \times m_g \quad \text{の関係からセメントの添加率を示す}$$

$$a = \frac{100 + w + b}{9} \quad (\%) \quad (4)$$

が得られる。

実際の補助材の混合率の決定方法は式(3)、(4)の直線の交点であるから、図上から求められる。以上で粘性土に補助材を用いてセメントで安定処理する場合、コンクリートの配合設計と同様に補助材とセメントの最適配合量が決定できる。

今、式(3)と式(4)を用いて、セメント添加率と碎石粉混合率を求めてみる。以下にその例を示す。

粘性土の含水比：Wが50%の場合、
式(3)にw=50%を代入すると、セメントの添加率を示す

$$a = -b + 42.857 \quad (\%) \quad (5)$$

が得られる。

式(4)にw=50%を代入すると

$$a = \frac{150 + b}{9} \quad (\%) \quad (6)$$

が得られる。

式(5)と(6)式から、
セメント添加率 a=19.3%
碎石粉の混合率 b=23.5%
が得られる。

同様に、粘性土の含水比：Wが60%の場合、
式(3)から

$$a = -b + 71.428 \quad (\%) \quad (7)$$

式(4)から

$$a = \frac{160 + b}{9} \quad (\%) \quad (8)$$

が得られる。

式(7)と式(8)から、
セメント添加率 a=23.3%
碎石粉の混合率 b=48.3%
が得られる。

同様に、粘性土の含水比：Wが80%の場合、
式(3)から

$$a = -b + 128.5 \quad (\%) \quad (9)$$

式(4)から

$$a = \frac{180+b}{9} \quad (\%) \quad (10)$$

が得られる。式(9)と式(10)から、
セメント添加率 $a=30.9\%$
砕石粉の混合率 $b=97.7\%$
が得られる。

これらの関係は図-13に示す。図に示すプロットの数字は粘性土の含水比50%,60%,80%の場合、各セメント添加率と砕石粉混合率の位置における一軸圧縮強度値を示す。図に示す式(5), (7), (9)の直線が粘性土の各含水比において、配合含水比(W_{nc})を35%にする各セメント添加率と砕石粉混合率の最適値を示す位置である。

また、4. (1)で記述したセメント添加量が混合土の質量の15%として計算すると、

粘性土の含水比: W が50%の場合、
セメント添加率 $a=28.9\%$
砕石粉の混合率 $b=13.9\%$
が得られる。

粘性土の含水比: W が60%の場合、
セメント添加率 $a=34.7\%$
砕石粉の混合率 $b=36.7\%$
が得られる。

粘性土の含水比: W が80%の場合、
セメント添加率 $a=46.3\%$
砕石粉の混合率 $b=82.2\%$
が得られる。

粘性土の含水比が50%,60%,80%におけるプロットの内、一軸圧縮強度の最高値は式(5), (7), (9)の直線上にほぼ一致している。このことから、これらの式の妥当性が証明できる。これらの式の直線から離れた位置でのセメント、砕石粉の配合の場合、一軸圧縮強度が小さい値となる。

(3) 模式図による水分量の考察

図-12において混合土の配合含水比が35%よりかなり小さくなると、セメントの完全水和反応に必要な水分量が不足し、この不足水分量を粘性土と砕石粉の含水量から補足しようと作用する。このことは土の塑性限界における水分の拘束力より、セメントの水和反応による吸水力の方が強いためである。

この結果、粘性土や砕石粉の表面や内部空隙に保留される水分が吸収され、粘性土や砕石粉の表面や内部に空隙が生じる。そのため、一軸圧縮強度試験を行なうと、粘性土や砕石粉の表面や内部空隙の部分が弱点となって、この部分からひび割れが生じ、一軸圧縮強度が小さい値となる。逆に、混合土の配合含水比が35%よりかなり大きくなると、セメントの完全

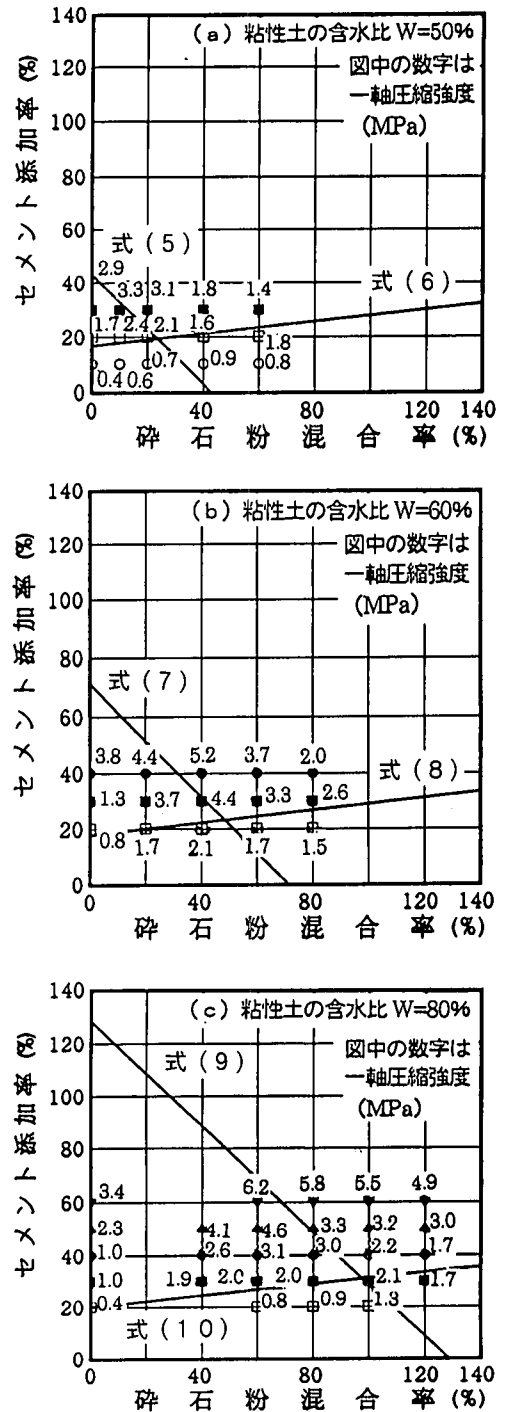


図-13 セメント添加率と砕石粉混合率の関係

水和反応に関与しない過剰の水分が生じる。この水分がセメントと粘性土や砕石粉との結合を阻害するよう作用し、各粒子が遊離する現象が生じ、一軸圧縮強度が小さい値になる原因の一つとなる。

このことからを模式図で説明すると図-14に示す

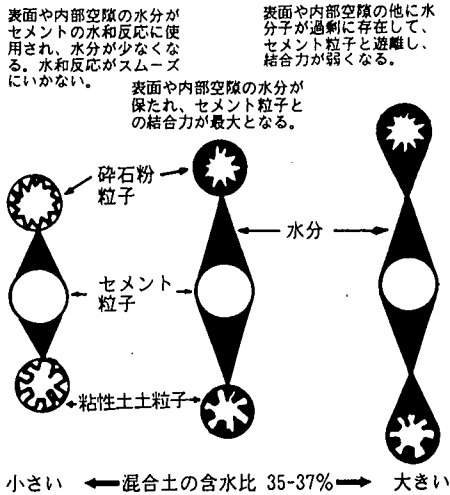


図-14 セメント、土粒子、碎石粉、水との関係の模式図

とおりである。これらのことから粘性土にセメント、碎石粉を混入して安定処理する場合、セメントの完全水和反応に要する水分量をセメントの添加量の35%を最低限確保できるように混合土の配合含水比を35%にするとよい。このことは図-12に示す結果および図-14の関係ともよく一致している。そしてセメントの添加量が混合土の質量の10%の場合、図-13に示す各式の交点について、上記の値を検討すると、例えば、粘性土の含水比が50%、60%、80%と異なっても、セメント添加量は約 $190\text{kg}/\text{m}^3$ である。その場合の一軸圧縮強度は約 2.0MPa を示している。

以上の結果から、本研究での最適配合設計方法は、一般の土にも適用できることは明らかである。ただし、拘束水分量についてはそれぞれの土の種類と状態に応じて、今後検討していかなければならない。また、セメント安定処理における、目標一軸圧縮強度値が与えられれば、 W_{nc}/a を決定することができ、この値を用いて、最適なセメント添加量と碎石粉混合量を求める最適配合設計方法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をセメント安定処理に用いることによる地盤の含水低下と強度発現の効果が、どの程度であるかを検討した結果、次のような結論を導くことができた。

- (1) 碎石粉を用いると粘性土の含水比は低下する。
- (2) 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。
- (3) この実験の場合、セメントの水和反応に必要な

水分を考慮に入れると、粘性土にセメント、碎石粉を混入して混合土の含水比が35-37%になるように配合すると良い結果が得られる。

- (4) 一軸圧縮強度と配合含水比に対するセメント添加率の比は反比例の関係にある。
- (5) セメント安定処理における目標一軸圧縮強度値が与えられれば、配合含水比に対するセメント添加率の比を決定することができる。
- (6) 配合含水比に対するセメント添加率の比から最適なセメント添加量と碎石粉混合量を決定できる。
- (7) 安定処理の対象地盤の含水比とその塑性限界を測定するだけで、セメント安定処理における目標一軸圧縮強度値を得るために最適なセメント添加量と碎石粉混合量を決定できる。
- (8) 混合した改良土の構成モデルから、配合含水比とセメント添加量の関係からセメント添加量と碎石粉混合量を求める最適条件式を理論的に導いた。
- (9) 二つの条件式の解は、すなわち二つの直線の交点から、セメント添加率と碎石粉の混合率が求められる。また、この式からも一軸圧縮強度を最大にするためのセメント添加率と、碎石粉混合率の最適値が決定できることを示した。

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同時に解消しうる一方法を提示することができた。

碎石粉の有効利用とともに、他の産業廃棄物や建設材料に不向きな土の特性を調べて、セメントの水和反応に寄与する水分を考慮に入れた、安定処理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。

謝辞： 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：石粉有効利用化のビジョン、近畿碎石協同組合、pp.3-22, 1991.
- 2) 西田一彦, 佐々木清一, 久保井利達：まさ土の非晶質物質特性と石灰安定処理効果, 材料, Vol.37, No.422, pp.1273-1277, 1988.
- 3) 鳥居和之, 川村満紀：路盤・盛土材料としての締固め

- 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講演集, 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講演集, pp.1941-1942, 1981.
 - 8) Hashimoto, I. and Jackson, M.L.: Rapid Dissolution of Allophane and Kaolinite - Halloysite after Dehydration, 7th. Nat. Conf. on Clays and Clay Minerals, pp.102-113, 1960.
 - 9) 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.
 - 10) Carvalho, J.B.Q.: Amorphous Materials and Lime Stabilized Soils, Proc. of the X Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Sweden, Vol. 3, pp.761-764, 1982.
 - 11) 西田一彦,久保井利達:碎石粉の工学的性質とその有効利用について,土の判別と工学的分類に関するシンポジウム発表論文集,土質工学会, pp.165-170, 1993.
 - 12) 日本材料学会一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.
 - 13) 澤孝平:まさ土の粒子破碎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.
 - 14) コクリート標準示方書・施工編・土木学会,平成8年制定, pp.1-66, 1996.
 - 15) 近藤泰夫,谷本冶三郎,岸本進:新編土木工学講座8,土木材料学, pp.103, 128-163, 1978.

(1997.8.4 受付)

EXPERIMENTAL STUDIES ON CEMENT STABILIZATION OF SOFT CLAY UTILIZING WASTE ROCK POWDER AS A SUPPLEMENTAL MATERIAL

Yorimichi KUBOI and Kazuhiko NISHIDA

This study investigates the possibility of utilizing the waste rock powder as a supplemental material for cement stabilization of soft clay ground. The results of the study are summarized as follows: (1) there is an optimum mixing proportion of the waste rock powder for the cement stabilization, (2) the unconfined compressive strength varies in inverse to the ratio of designed water content to cement content, (3) the unconfined compressive strength has the highest value in every case when the waste rock powder and cement are mixed with the soft clay at a designed water content around 1.2 times the plastic limit, (4) the corresponding content of waste rock powder and cement can be estimated upon the previously selected value of designed water content, (5) the optimum content of waste rock powder and cement can be decided for various values of the water content of clay using the experimental equations.