

生石灰とポゾラン材料添加による建設発生土 (有明粘土)の強度発現特性

鬼塚克忠¹・南里 勝²

¹正会員 工博 佐賀大学教授 理工学部土木工学科 (〒840 佐賀市本庄町1番地)

²正会員 工修 佐賀県土木部 (佐賀大学大学院博士後期課程) (〒840 佐賀市内1丁目 1-59)

含水比が高い建設発生土の有効利用を目的として、ポゾラン材料の添加による強度発現を評価する方法を提案する。そのために生石灰と火山灰・下水汚泥焼却灰などを用いて改良効果を検討した。まず含水比低減によって強度増加量を推定できることを述べる。つぎに生石灰と火山灰の添加により強度が増加すること、その改良強度がポゾラン材料の種類によって異なることから、化学構成成分である SiO_2 (シリカ)と Al_2O_3 (アルミナ)量による化学的反応に基づく強度発現特性の評価を試みた。その結果、 $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 量が強度発現特性を表現できるパラメーターとなることを見出した。さらにポゾラン反応の進行度とそれに基づく改良強度が化学構成成分量により異なることを明示する。

Key Words : *soft Ariake clays, pozzolanic materials, quicklime, water content, pozzolanic reaction, silica, alumina*

1. まえがき

有明海沿岸には高い含水比をもつ粘性土が堆積しており、建設工事によって掘削されると泥土化し、その処理に苦慮していることが多い。そのままでは利用できないので、生石灰などによる改良を行って有効利用の試みがなされている。それは経験的、簡易な方法で実施されており、土木材料として積極的な利用を行ってはいない。そこで、高含水比粘性土の多方面な有効利用を目的として、生石灰とポゾラン材料による改良効果の評価方法が必要である。

本論文では生石灰とポゾラン材料による含水比低減性を調べ、その添加量と含水比低減に伴う強度増加との間に相関があることを述べる。なおポゾラン材料として、天然ポゾランである火山灰と廃棄物とされる下水汚泥焼却灰を使用し、ポゾラン材料が改良効果に及ぼす影響を調べた。改良土の強度特性として一軸圧縮強さを用いて強度発現特性を検討した。その結果、化学的反応による強度発現特性について、建設発生土とポゾラン材料の化学構成成分に着目すると有意義な評価方法を得ることができた。

2. 生石灰・ポゾラン材料による強度発現特性

微細な土粒子を含む粘性土に、生石灰と共に反応性が高いポゾラン材料が添加されると、消化・イオン交換・ポゾラン反応などが生じる。そしてポゾラン反応によって反応生成物が生じることになる。この反応生成物はケイ酸石灰水和物(CSH)やアルミン酸石灰水和物(CAH)であり、ポゾラン中の可溶性 SiO_2 (シリカ)や Al_2O_3 (アルミナ)が、それらの生成には鍵となる。またポゾランと呼ばれる材料は、その構成成分に SiO_2 (シリカ)、 Al_2O_3 (アルミナ)などを含むものであり、消化・ポゾラン反応を促進する効果を持っている。このポゾラン材料としては、人工ポゾランである石炭灰・下水汚泥焼却灰・ゴミ焼却灰などの廃棄物と砕石粉・コンクリート破砕粉などの副産物が考えられる。さらに天然ポゾランとして火山灰なども存在する。

つぎに土と生石灰とのポゾラン反応について、既往の研究を以下に示す。大場ら¹⁾は、ポゾラン反応による改良効果は粘土鉱物の SiO_2 、 Al_2O_3 の反応性によるとしている。土のパラメーターと石灰安定処理との関係を記述した Brandl, H²⁾は、粘土鉱物量、活性度A、 Ca^{2+} 量、陰イオン量、pH値、ケイ酸塩係数との間の石灰反応性を検討しているが、

表-1 試料の物理特性

建設発生土名称		有明粘土
自然含水比(%)		160~180
土粒子の密度(g/cm ³)		2.617
コンシステンシー	W _L (%)	133.2
	W _P (%)	46.7
	I _P	86.5
粒度分布	レキ (%)	0.0
	砂 (%)	0.8
	シルト (%)	31.5
	粘土 (%)	67.7

まだ明確な結論は得られていない。ただしSiO₂量は改良効果の有効な基準となり、この量が多いほど一軸圧縮強さが大きくなるとしている。さらに赤色熱帯土の非晶質物質と石灰改良土との関係を論じたQueiroz, J.B.³⁾も土中のSiO₂とAl₂O₃が石灰との反応にとって重要なパラメーターであるとしている。一方、佐野ら⁴⁾は石炭灰を締固めた場合、その強度が粒子相互間で進行する化学作用に大きく依存することから、改良強度が化学成分と締固め後の養生条件に影響されることを示した。また締固めた石炭灰の強度発現について、CaOがSiO₂やAl₂O₃と化合して反応生成物を作ること、CaO量が多いほど一軸圧縮強さが大きくなること、さらに養生中の体積変化率が大きくなることを述べている。

消石灰に2種のフライアッシュ(CaOの含有率14.65%と0.20%)を混合したケースにおいて、その効果を検討した河野ら⁵⁾によると、フライアッシュのCaO分が多い方が改良効果が高いとしている。これはフライアッシュ自身がポゾラン材料であり、CaO分が多い方がポゾラン反応を進行させるのに必要な石灰が長期残存することによる。

ポゾラン材料として用いた下水汚泥焼却灰の土質改良効果について、試験を実施した久楽ら⁶⁾の研究によると、焼却灰の乾灰(乾燥したもの)と湿灰(加湿したもの)を粘性土と砂質土に各々添加したところ、乾灰を用いると吸水作用とポゾラン反応が進行し、強度が大きくなる。

一方、建設発生土やポゾラン材料に有機物量が多く含まれると改良効果が阻害される。これは陽イオン交換の対象となるものが粘土鉱物と有機物である⁷⁾ので、Ca²⁺が有機物に吸着して粘土鉱物とのイオン交換とポゾラン反応が低下すると考えられる。

表-2 粘性土の化学構成成分(単位:%)

粘性土種類	モンモリロナイト (%)	カオリナイト (%)	ハロイサイト (%)	フライッシュ Pb (%)	有明粘土
SiO ₂	74.25	52.28	59.07	43.82	59.24
Al ₂ O ₃	17.11	43.44	35.73	31.64	17.51
CaO	1.83	0.01	0.14	14.65	1.21
Fe ₂ O ₃	1.70	0.65	1.30	4.53	6.39
MgO	2.97	1.45	1.70	1.28	2.26
その他	2.14	2.17	2.06	4.08	13.39

ヘドロなどの高含水比粘性土に対しては、セメント系固化材を用いて改良している場合がある。嘉門ら⁸⁾は、有機物(フミン酸)が多く含まれるヘドロの固化のためには、硬化反応と含水比の低減・塑性改良が有効であるが、その硬化反応に有機物量が影響すると述べている。

以上のように粘性土に生石灰や、ポゾランと考えられる材料を添加すると、これらの化学構成成分であるCaO, SiO₂, Al₂O₃の量が改良効果に影響する。著者らは、このような視点から軟弱な建設発生土の有効利用に関する試験を実施した。

3. 試験方法

(1) 建設発生土の物理化学特性

表-1に示すように、試料の自然含水比が液性限界より高い。さらに粘土分は有明粘土の標準的な範囲である30~65%^{9), 10)}の上限に近く、残りはシルト分となる。このようになり軟弱な粘性土であり、粘土分が多いことからイオン交換反応やポゾラン反応が大いに期待できること、さらに土中水分の消化・吸収により、含水比が低減できることから生石灰による改良を実施した。

化学特性の中で改良効果に影響を与える構成成分はSiO₂やAl₂O₃である。河野ら⁵⁾が用いたモンモリロナイト、カオリナイト、ハロイサイトやフライアッシュと本試験に用いた有明粘土のSiO₂, Al₂O₃を表-2に示した。このSiO₂とAl₂O₃量の合計値が改良特性と関連があることは後述するが、これからSiO₂+Al₂O₃量がカオリナイト>ハロイサイト>モンモリロナイト>有明粘土の順となっている。

表-3 ポゾラン材料の物理化学的性質

ポゾラン材料の種類	火山灰 (V-ash)	下水汚泥 焼却灰 (S-ash)	石炭灰 焼却灰 ⁴⁾	ゴミ焼却灰 焼却灰 ¹²⁾	生石灰	
採取場所	雲仙普賢岳	S市処理場	—	—	—	
含水比 (%)	0.3	3.5	—	—	—	
土粒子密度 (g/cm ³)	2.634	2.551	2.220	1.710	真比重 3.37	
粒度組成 (%)	レキ分	0.0	0.0	0.0	—	
	砂分	79.6	76.7	12.7	—	
	シルト分	12.9	13.6	86.9	—	
	粘土分	7.5	9.7	0.4	—	
化学成分 (wt%)	SiO ₂	62.90	32.76	51.40	42.00	—
	Al ₂ O ₃	17.18	18.71	24.20	12.50	—
	CaO	5.58	10.19	10.50	15.14	96.34
	Fe ₂ O ₃	4.79	6.55	5.32	3.30	—
	MgO	2.29	2.46	1.98	0.78	—
	強熱減量	0.62	6.29	0.94	15.00	—
	その他	6.64	23.04	5.66	11.28	3.66

(2) ポゾラン材料の物理化学特性

建設発生土に混合する火山灰、下水汚泥焼却灰とその他のポゾラン材料および生石灰の物理化学的性質を表-3に示した。これから火山灰のSiO₂量が他のポゾラン材料より多いことが分かる。このことからポゾラン反応に寄与するSiO₂分が火山灰に多く含まれるのであれば、ポゾラン反応の促進に効果があることが推察される。またCaO量については下水汚泥焼却灰が実績のある石炭灰⁴⁾と同等であり、SiO₂やAl₂O₃とのポゾラン反応が期待される。今後、試験に用いた火山灰をV-ash、下水汚泥焼却灰をS-ashと表示する。

(3) 試験条件

強度特性を一軸圧縮強さで評価するため、表-4に一軸圧縮試験の条件を示した。生石灰・ポゾラン材料の添加率は建設発生土(有明粘土)の乾燥質量に対するものである。まず建設発生土にポゾラン材料を添加し、十分な混合後生石灰を添加した。つぎに締固めが可能となるように1日間、温度20±3℃の恒温室内で空气中養生した。なお、今回は締固めを行うことを前提としているので、締固め時を起点に養生時間を設定した。

(4) 締固め方法

改良した建設発生土を転圧して有効利用を図ることを想定しているため、添加材を混合したのち締固めを行う方法とした。その締固め方法は、動的締固

表-4 試験条件

試験種類	一軸圧縮試験
添加材混合	電動ミキサ-10分
添加材率 (土に対する 乾燥質量比)	生石灰(CaO) 10, 30, 50% 火山灰(V-ash) 10% 下水汚泥焼却灰(S-ash) 10%
供試体作成 方法	「動的供試体」 ランマーよる3層 25回突固め 「静的供試体」 圧縮試験機による 締固め
湿潤密度ρ _w	1.30~1.33g/cm ³
養生時間	1, 3, 7, 28日

めによる供試体がモールド(直径5.0cm・高さ10.0cm)に試料を3層に詰め、ランマーで各層25回突固める方法である(ランマー質量1.25kg、落下高さ11.7cm、締固め仕事量E_c=5.6cm·kgf/cm³)。一方、静的締固めによる供試体は動的締固めによる供試体と同等の乾燥密度になるように試料質量を調整し、同じモールドを用いて圧縮試験機によって緩速に締固めた。以後、各々を動的締固め供試体および静的締固め供試体と呼ぶ。動的・静的両締固め供試体とも締固め後は、表-4に示す養生期間中、恒温室内で湿潤箱に入れて保管した。

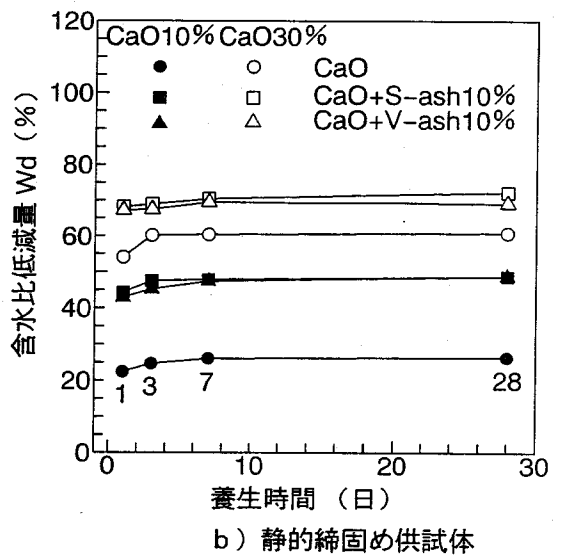
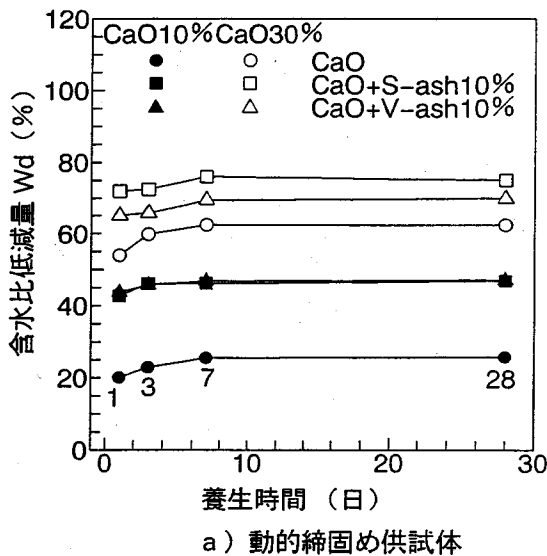


図-1 養生時間と含水比低減量の関係

4. 含水比低減による改良効果

(1) 含水比低減量と強度の関係

建設現場から発生する有明粘土は高含水比であり、有効利用のためにはその含水比を低減させることが最も効果的である。生石灰添加による含水比低減量は添加量を増やすと大きくなるが、あまり多過ぎると水質環境への影響が懸念される。ところで含水比低減による強度増加を把握することは、高含水比の粘性土を利用するためには必要なことである。そこで図-1に養生時間の経過に対して、含水比低減量Wdの挙動を示している。この含水比低減量Wdは、軟弱土の含水比が生石灰およびポズラン材料の消化反応によって低減する量を表している。これから図-1a)b)の各ケースとも1日までに大きな低減があり、3日から7日にかけてはそれが小さくなり、その後は変化していない。

著者ら¹¹⁾は、化学反応から理論的に計算される含水比の変化と実際の試験値から、養生1日の一軸圧縮強さが含水比の低減(生石灰の消化・吸水によるもの)による強度であるとしている。これは1日で理論上、消化反応による含水比低減が終わり、その後はポズラン反応が進行し強度増加の大部分がこの反応によることから提案したものである。また養生1日目の強度を消化反応強度としているが、この強度と含水比低減量(養生1日)の関係を示したのが図-2である。両者に良好な相関があり、含水比低減量Wd(%)より消化反応強度 $q_u(d)$ を決定でき

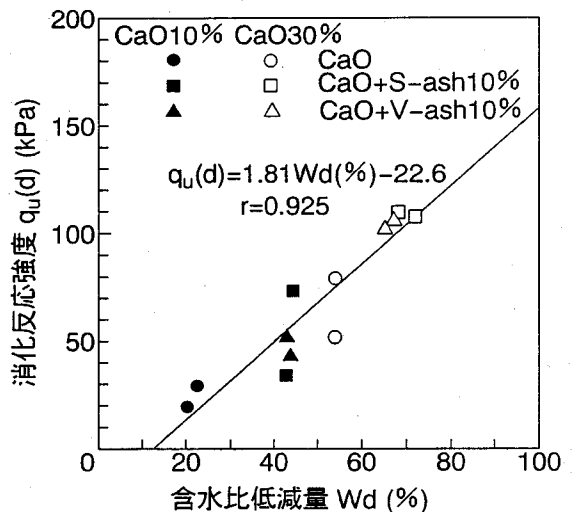
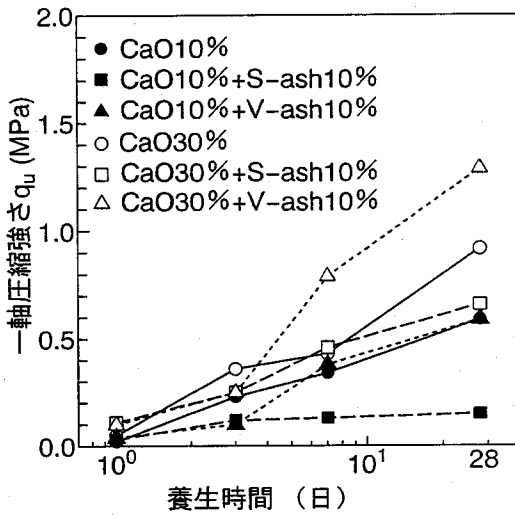


図-2 含水比低減量と消化反応強度の関係

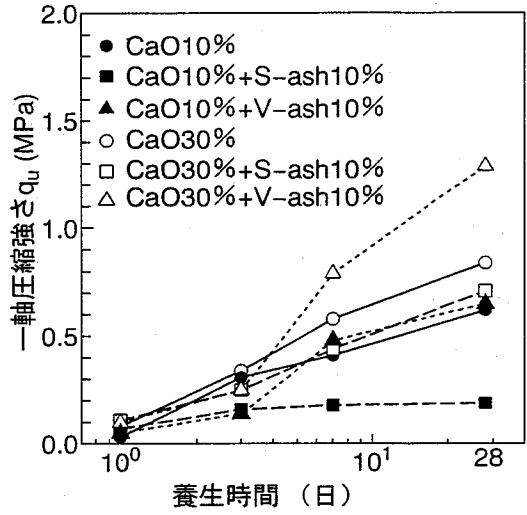
ることを示している。図中の式から、70%の含水比低減量では強度が100 kPa程度となり、消化反応による含水比低減が改良強度の一部を担っている。

(2) 含水比低減に対するポズラン材料の影響

図-1から、ポズラン材料の添加によって含水比低減量が増大することは明らかである。低含水比のポズラン材料を添加したため、相対的に含水比が低減したことが主な要因である。さらに図-2から、



a) 動的締固め供試体



b) 静的締固め供試体

図-3 養生時間と一軸圧縮強さの関係

含水比低減量の増大により消化反応強度の増加が明らかであり、ポズラン材料の添加による強度増加が認められる。

5. 建設発生土・ポズラン材料の化学構成成分と強度特性

(1) 化学構成成分の種類とその量による強度特性の評価

軟弱粘性土（有明粘土）に生石灰を添加したケースとさらにポズラン材料を添加したケースについて、養生時間と一軸圧縮強さの関係を図-3に示した。生石灰のみと下水汚泥焼却灰を添加したケースでは養生時間の全域（1日～28日）で対数表示の養生時間に対し直線的に強度が大きくなる傾向を示している。ただし、生石灰10%と下水汚泥焼却灰10%を添加したケースでは3日以降強度増加が見られない。また、火山灰を添加したケースでは3日までの強度が小さいが、7日になって強度増加が大きくなる。また生石灰10%での28日強度は火山灰の有無は関係なく同等であるが、生石灰30%では火山灰を添加したケースで大きな強度を示している。これらは動的締固め供試体(a)と静的締固め供試体(b)の両者で共通の現象となっている。

つぎに表-2に示した3種の単一粘土鉱物にフライアッシュを添加して求めた一軸圧縮強度特性⁵⁾について、その化学構成成分と強度の関係を図-4に示した。これは表-2の中でポズラン反応生成物の

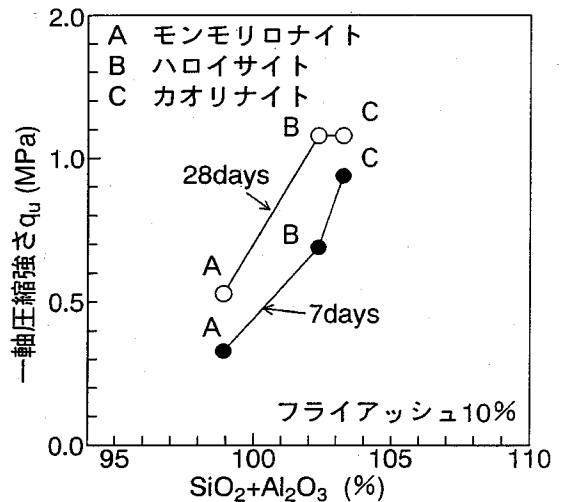


図-4 単一粘土鉱物における $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ と一軸圧縮強さの関係

構成要素となる SiO_2 （シリカ）と Al_2O_3 （アルミナ）に着目し、各単一粘土鉱物とフライアッシュFbの各々の成分比を合計して $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ の値を求めた。これは単純に SiO_2 と Al_2O_3 の成分比に対する強度増加の挙動を捉えるためである。ここでフライアッシュFbの SiO_2 と Al_2O_3 は添加率を各構成成分に掛けて補正した値を用いた。各材料の構成成分の和を図-4の横軸にとった。これが

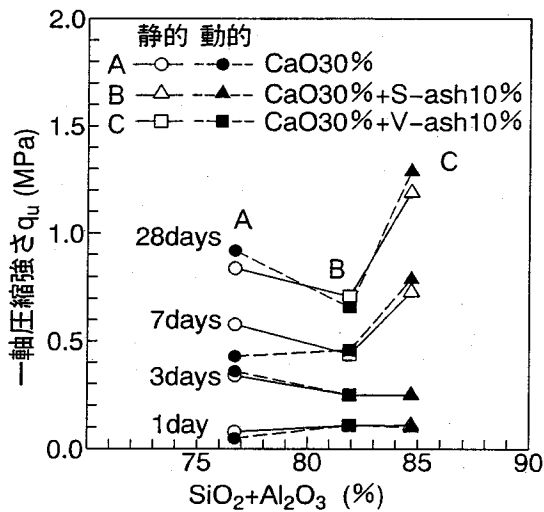


図-5 $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ と一軸圧縮強さの関係 (Ca030%)

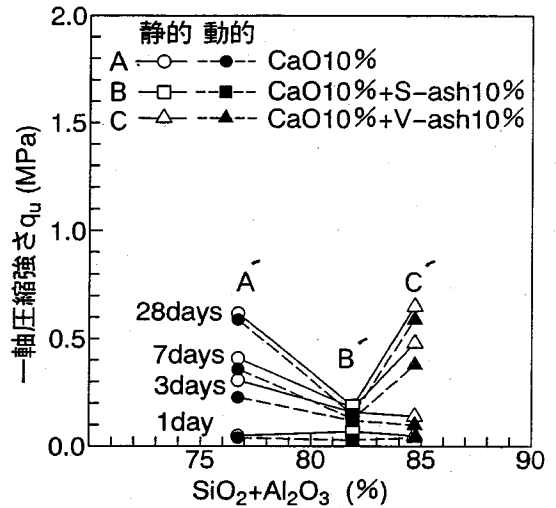


図-6 $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ と一軸圧縮強さの関係 (Ca010%)

ら構成成分 ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$) の和が大きくなると強度が大きくなることが分かる。

建設発生土(有明粘土)に生石灰と火山灰, 下水汚泥焼却灰を添加した試験においても強度増加傾向の違い(図-3)があるが, これは添加した材料の化学構成成分, ポゾラン反応速度および反応生成物の組成と反応量などが影響しているのではないかと考えている。有明粘土とポゾラン材料に含まれる SiO_2 と Al_2O_3 から, $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ の含有量(%)を改良強度特性のパラメーターとして評価する。図-5に示した $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ の含有量(%)は, 有明粘土の化学構成成分比(質量比)と各ポゾラン材料の成分比に添加率を掛けたものを合計している。図-5から養生期間によって, $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ に対する強度の発現が違っている。これは時間の経過に伴って, $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 含有量が多いほどポゾラン反応生成物が増大することによって考えられる。ただ図中のB点は下水汚泥焼却灰を添加したケースであり, この強度低下の原因については5.(3)で詳しく述べる。さらに生石灰量の多少によっても違いが見られる。そこで, 図-6に生石灰添加率が10%のケースを示しているが, 添加率30%のものに比べて $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 量の改良強度への寄与は小さいといえる。

(2) ポゾラン反応の適量関係

塑性限界が一定となる石灰量を石灰定着点としているが, これはイオン交換による土粒子の団粒化に基づいている。これを越えて生石灰が添加されると

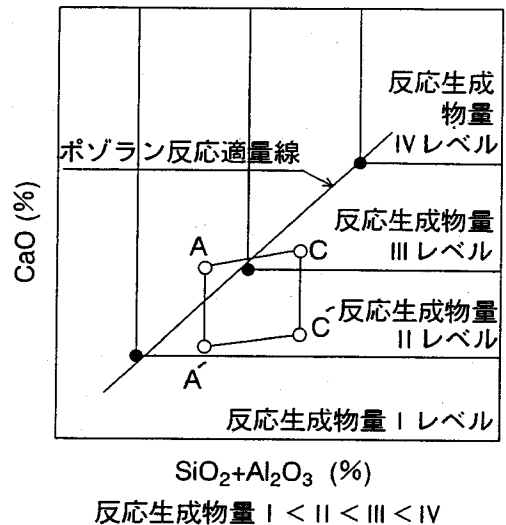


図-7 ポゾラン反応における $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ とCaOの概念図

ポゾラン反応が進行し, ケイ酸石灰水和物やアルミン酸石灰水和物などの反応生成物が生じる。

ポゾラン反応物質であるCaOと $\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3$ には反応を進行させるための適量関係があるのではないかと考え, 図-7にCaOと $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ によるポゾラン反応の概念を示した。反応生成物量には明確な段階があるわけではないが, CaOと $\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3$ 量の両者の増加によって, 反応生成物量が

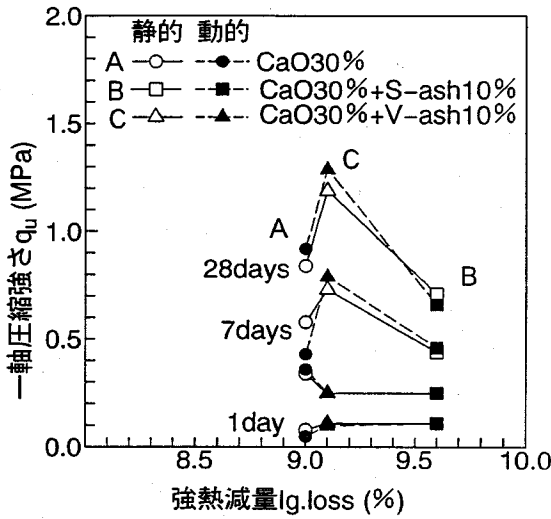


図-8 強熱減量lg.lossと一軸圧縮強さの関係

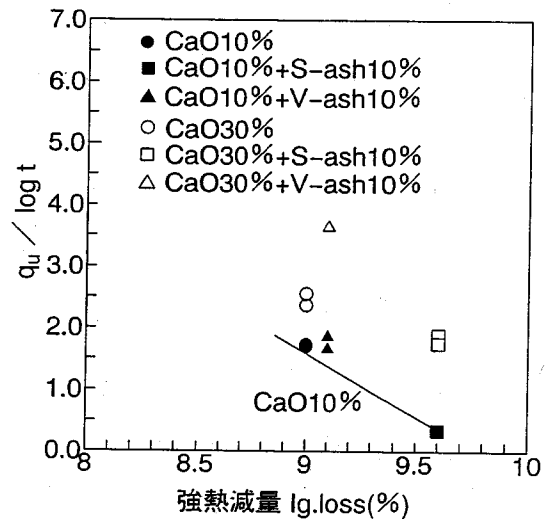


図-9 強熱減量lg.lossと $q_u / \log t$ の関係

多くなることが推測される。図には反応生成物量を4つのレベルに分割して生成物量の増加を表現している。そして各レベル領域の左下角を結ぶ直線が、CaOと $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ の間の適量関係（ポゾラン反応適量線）を示すのではないかと考えている。CaO量と $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 量の相対的な関係がこの線に近いほど、ポゾラン反応の発現度が最も大きくなることを示している。この図は、CaO量が多くても $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 量が少なければ、反応生成物量がCaO量に依存することを示している。

また、各レベルにおけるCaOと $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ による反応生成物量の定量的表現は未だ示すには至っていない。ただ図-5、6のA、A'、C、C'点を図-7に示すと、図中の関係になる。つまりA点は有明粘土に生石灰を添加したケースであり、 $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 量がCaO量に比べて少ないことを反映している。C点は、さらにポゾラン材料を添加したケースで $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 量の増加が反応生成物量の増大をもたらしていると考えられる。またA'とC'点はCaO量が少ないケースであり反応生成物量が相対的に小さいことを示している。

(3) 有機物による改良強度発現の阻害

ポゾラン材料として使用した下水汚泥焼却灰は、CaO含有量が高いことにより改良効果を期待した。しかしながら図-5から判断して、有明粘土に下水汚泥焼却灰を添加すると生石灰単独時よりも強度が小さくなっている。これは有機物量が下水汚泥焼却灰に多いことが強度低下の原因になっているのでは

ないか、改良効果に影響を与える有機物量が2~4%¹³⁾とされているが、有明粘土の強熱減量が8~9%であることから強度増加に大きな阻害を与えていることが考えられる。また、本研究では生石灰量が30%（一部50%）までを主に実施しているが、この添加率の範囲は有明粘土の高有機物性による強度低下と高添加率における改良強度のピーク性状を把握するために実施した。ところで河野ら⁵⁾は、200℃加熱により求めた粘性土の強熱減量を改良効果の予測に用いている。そこで図-8に有明粘土およびポゾラン材料の強熱減量（1,050℃燃焼）の計（ポゾラン材料は添加率で補正している）と一軸圧縮強さの関係を示した。これより下水汚泥焼却灰（600℃燃焼）の添加によって強度が低下している様子が分かる。つぎに養生時間tに対する強度増加率を $q_u / \log t$ で表し、それと強熱減量との関係を表したのが図-9である。 $q_u / \log t$ は強熱減量が大きくなると低下して強度の増加率が小さくなっている。これは粘土鉱物と Ca^{2+} のポゾラン反応量が小さくなっていることを示すものである。とくに低い生石灰添加率（10%）では、強熱減量の影響が大きいと言える。この結果、強熱減量が改良強度の重要なパラメーターとなりうる。

6. ポゾラン反応と強度発現特性

(1) ポゾラン材料による強度発現

ポゾラン反応は可溶性の SiO_2 、 Al_2O_3 と Ca^{2+} それに水があれば生じる。また粘性土に含まれる粘

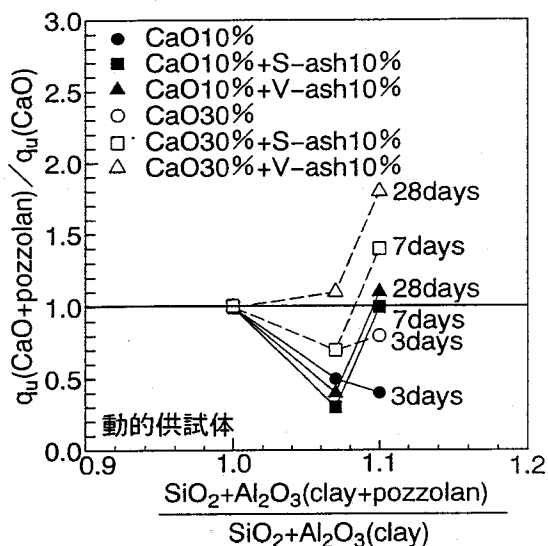


図-10 $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ の増加と強度増加の関係

土鉱物やポズラン材料に含まれる SiO_2 と Al_2O_3 量がポズラン反応による化学的な改良効果を知る目安となる。今回の試験結果より、反応生成物を形成する SiO_2 と Al_2O_3 の増加によって改良土の強度が増加していることが分かった。これは反応生成物による固結化が寄与していると考えられる。この固結化の程度を表すため、ポズラン材料の添加による $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ の含有量の増加に対して一軸圧縮強さの増加程度を調べた。この $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ の増加率と一軸圧縮強さの増加率の関係を示したものが図-10である。図では有明粘土に生石灰のみを添加した試料を基準（各々の比が1）としている。なお、中間点の降下は下水汚泥焼却灰の混合によって強熱減量が大きくなったケースを示している。生石灰10%では $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ の含有量が増加しても強度の増加は殆ど期待できない。一方、生石灰が30%になると7、28日で強度増加が見られ、生石灰と $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ の増加によってポズラン反応がさらに進行していることが分かる。この図は動的締固め供試体のケースを示しているが、静的締固め供試体でも同様である。

(2) 強度発現特性の表現

自然粘性土の固結力は、拡散二重層に基づく粒子間引力、化学物質による固結化、毛細管による吸引力などからなる。また含水比が高い沖積粘土にも大きくはないが固結力が存在している。これに固化材を添加して攪拌すると、当初の固結力が失われるが、

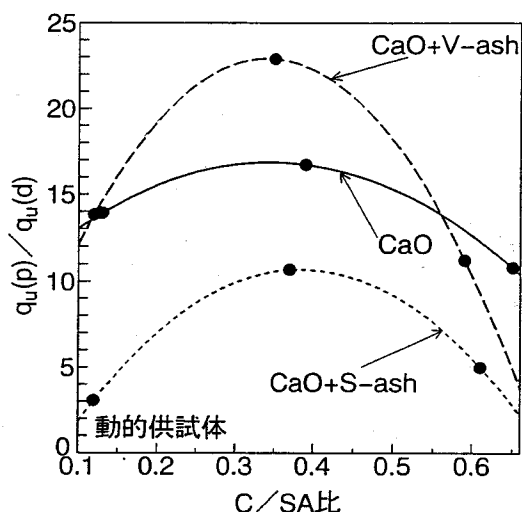


図-11 C/SA比と $q_u(p)/q_u(d)$ の関係

時間とともに固結力が再生する。この大部分が化学的な固結力であり、ポズラン反応生成物に基づいている。固結力に寄与するその他の力は乱れによって失われるか、回復してもかなり小さくなる。このポズラン反応を生起させる SiO_2 、 Al_2O_3 と CaO（生石灰）の関係を図-7に示し、ポズラン反応を発現するためには $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 量と CaO 量に適量比があることを前に述べた。そこで粘性土に生石灰（CaO）のみを添加したケースと生石灰+火山灰（または下水汚泥焼却灰）を添加したケースにおいて、CaO量に対する $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 量の比（CaO量 / ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 量））を求めた。これを C/SA 比とした。

つぎに一軸圧縮強さをポズラン反応強度 $q_u(p)$ と消化反応強度 $q_u(d)$ に分割¹¹⁾して（28日試験強度 $q_u(28) - \text{消化反応強度 } q_u(d) = \text{ポズラン反応強度 } q_u(p)$ ） $q_u(p)/q_u(d)$ を求めた。この比は生石灰とポズラン材料の添加によるポズラン反応強度の発現度と考えた。そしてポズラン反応に着目し、動的締固め供試体について、C/SA比と $q_u(p)/q_u(d)$ の関係を図-11に提案した。この図は $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 量と CaO 量が相互に必要な十分な量にある時最大のポズラン反応強度を示すこと、どちらか一方の量が増減するとその強度が低減することを表している。図の中で、 $q_u(p)/q_u(d)$ のピークを示す C/SA 比の値が図-7での適量線の勾配となる。なお図-11にプロットした点は試験から求めたものであり、生石灰添加率として3ケース

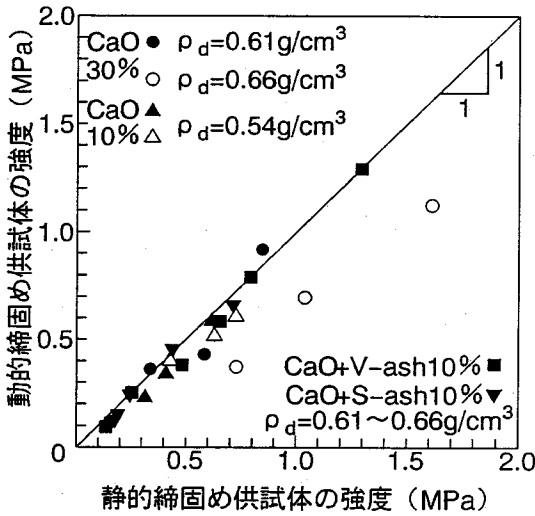


図-12 締固め方法による強度比較

(10, 30, 50%) 行った。図中に示した各曲線は3点から求めたものであるが、これがポズラン反応生成物量とポズラン反応発現度の関係を表現しているのではないかと考えている。さらに試験を積み重ねて精度の良い関係を求めたい。この関係からポズラン反応による強度発現度 $q_u(p)/q_u(d)$ が最大になる時、固結状態が最も大きくなると考えられるので、C/SA比を用いて固結度(固結状態の程度)を評価できると判断した。

7. 締固め方法と改良特性

著者らは、生石灰とポズラン材料で改良した建設発生土の締固め時の強度特性を検討している。その締固めに、今回二つの締固め方法を用いた。動的締固めと静的締固めであり、動的締固め供試体は土工によく使われる振動ローラー等の振動・ローリングによる急速な締固めを想定し、一方静的締固め供試体は載荷盛土による締固めを想定した。この二つの締固め方法による強度特性を比較すると、前掲の図-3と5から強度特性にあまり差がないといえる。ところで動的締固め供試体の土構造がランマーの打撃によってランダム構造が主体となること、一方静的締固め供試体では鉛直方向の圧縮によって土構造が不完全な配向構造が主体となることを想定している。そして自然土における土の構造と強度特性を考慮すると、一般に不完全な配向構造をもつ土の強度が大きいとされることから、静的締固め供試体の強

度が大きくなると考えた。そこで、同じ有明粘土であるが自然含水比、粒度組成の違いにより締固め時の含水比がやや低くなったケースと今回の試験値を図-12に示した。これから、乾燥密度が大きい($\rho_d=0.66g/cm^3$, 試験値○印)と静的締固め供試体の強度が大きくなっている。つまり生石灰改良土の乾燥密度 ρ_d が $0.66g/cm^3$ 程度以上になると、ポズラン材料を添加した場合に比べて反応生成物による強度増加の初期の土構造への依存度が大きくなっていることが推測される。

8. 結論

この研究は含水比が高い建設発生土を多用途に有効利用を図ることが目的である。そのためには含水比の低減や強度の確保が要求される。この点、生石灰が有効とされるが、さらにポズラン材料を添加すると、その含水比低減と強度増加の促進が認められた。ポズラン材料は廃棄物や副産物として産出されることが多いので、その効果が確認されれば有効利用も可能となる。また建設発生土、生石灰とポズラン材料の化学構成成分に着目して、強度発現特性の評価を試みた。この研究で得られた結果を以下にまとめた。なおここに記した強度は一軸圧縮強さである。

(1) 建設発生土に生石灰とともにポズラン材料(火山灰・下水汚泥焼却灰)を添加すると含水比低減量が大きくなり、土材料としての性状が向上する。

(2) 消化反応強度(養生1日強度)と含水比低減量(養生1日)には相関があり、含水比低減量から消化・吸水による強度増加量を推定することができる。

(3) 建設発生土とポズラン材料に含まれる SiO_2 と Al_2O_3 量の合計値 ($SiO_2 + Al_2O_3$) で強度を評価すると、養生時間が長くなるほど $SiO_2 + Al_2O_3$ 量の影響が大きくなる。つまりポズラン反応による生成物が時間とともに増大することを示している。

(4) 建設発生土およびポズラン材料の強熱減量が生石灰改良における強度を左右する要因となることを明らかにした。また養生時間に対する強度増加の程度を表した $q_u/\log t$ は、強熱減量が大きくなると低下していることから、強熱減量の増加に伴い粘土鉱物と CaO とのポズラン反応量が小さくなることを示した。

(5) CaO と ($SiO_2 + Al_2O_3$) の双方の増加によって強度が増大し、ポズラン反応が進行する概念を示した。

(6) 軟弱粘性土の固結はポゾラン反応の発現の結果であり、この発現度となる $q_u(p)/q_u(d)$ (ポゾラン反応強度と消化反応強度の比) を C-SA 比 (CaO 量に対する $SiO_2 + Al_2O_3$ 量の比) によって評価できることを提案した。

(7) 締固めた改良土の特性は、とくに生石灰において、乾燥密度が大きくなると締固め方法により相違する。つまり密度増加に伴って、反応生成物による強度増加の初期の土構造への依存度が大きくなる。

謝辞：本研究にあたっては、東和大学工業化学科の松田広作教授、佐賀県窯業技術センターの中尾浩、志波雄三両氏および佐賀県農業試験研究センターの大塚紀夫氏に貴重な助言をいただいた。また佐賀大学修士課程の田中聡君には試験および試験データの整理を手伝っていただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 大場政男, 喜田大三, 森 麟: 土の物理化学と土質工学への応用, 土と基礎, Vol.34, No.2, pp.73-79, 1986.
- 2) Brandl, H.: Alteration of soil parameter by stabilization with lime, X. ICSMFE, pp.587-594, 1981.
- 3) Queiroz, J.B. de Carvalho: Amorphous materials and lime stabilized soil, X. ICSMFE, pp.761-764, 1981.
- 4) 佐野博昭, 山田幹雄, 太田実, 山本三千昭: 養生条件の違いが締固めた石炭灰供試体の一軸圧縮強さおよび体積変化に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.463/ III -22, pp.45-53, 1993.
- 5) 河野伊一郎, 富田武満, 上村克己, 田辺和康: 石灰とフライアッシュの混合物を用いた粘性土と砂質土の安定処理の相違について, 土木学会論文集, No.469/ III -23, pp.73-81, 1993.
- 6) 久楽勝行, 三木博史, 林善之: 下水汚泥焼却灰の土質改良効果に関する考察, 第24回土質工学会研究会講演集, pp.1941-1942, 1989.
- 7) 日本土壌肥料学会編: 土壌の吸着現象-基礎と応用-, 博友社, p.6, 1981.
- 8) 嘉門雅史, 友久誠司, 澤 孝平: セメント系固化工材によるヘドロの安定処理に関する研究, 材料, 第38巻423号, pp.114-119, 1989.
- 9) 鬼塚克忠: 九州, 沖縄の特殊土, 3. 有明粘土, 土質工学会九州支部編, 九州大学出版会, pp.23-39, 1983.
- 10) Ohtsubo, M., Takayama, M. and Egashira, K.: Relationships of consistency limits and activity to some physical and chemical properties of Ariake clays, *Soils and Foundations*, Vol.23, No.1, pp.38-46, 1983.
- 11) 南里勝, 鬼塚克忠: 軟弱な建設残土の生石灰による改良とそのメカニズム, 土と基礎, Vol.43, No.8, pp.27-30, 1995.
- 12) Anthony, T.C. Goh, Joo-hwa Tay: Municipal solid-waste incinerator fly ash for geotechnical application, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.119, No.5, pp.811-825, 1993.
- 13) 日本石灰協会石灰安定処理委員会編: 石灰による軟弱地盤の安定処理工法, 鹿島出版会, p.18, 1983.

(1995. 9. 27受付)

CHARACTERISTIC OF STRENGTH INCREASING ON SOFT ARIAKE CLAYS IN CONSTRUCTION WORKS USED QUICKLIME AND POZZOLANIC MATERIALS

Katsutada ONITSUKA and Masaru NANRI

To use effectively soft clays in construction works with high water content, a way which estimates the degree of strength increasing is suggested. As a strength of improved soft clays with pozzolanic materials depends on kinds of pozzolanic materials, to estimate the characteristic of strength increasing due to chemical reaction of silica and alumina which are chemical component of pozzolanic materials was tried. As a result, it is found that strength increasing can be expressed by the amount of (silica + alumina). Further, it is pointed out clearly that a degree of pozzolanic reaction and a improved strength differs from the amount of chemical component.