

超軟弱な有明粘土の地盤材料化への試み

An Attempt on Geotechnical Utilization of Super Soft Ariake Clay as a Construction Material

南里 勝 (なんり まさる)

佐賀県土木部唐津土木事務所 係長

鬼塚 克忠 (おにつか かつただ)

佐賀大学教授 理工学部

田中 聡 (たなか さとし)

日本地研(株)技術第2部1課

1. はじめに

軟弱な建設発生土または建設汚泥を地盤材料とする試みが、各機関において現在行われている。特に、建設省土木研究所を中心にして実施されている総合プロジェクトにおいては、建設汚泥の利用技術¹⁾について検討されている。

本報文は、有数な軟弱粘土である有明粘土の地盤材料化について、室内試験を基に検討したものである。なお、有明粘土は掘削すると泥状化し、そのままでは地盤材料として利用できない土質性状をもっている。一般に、有明粘土は自然含水比が高く超鋭敏であることから、構造物の基礎とするには軟弱であり、よく地盤改良が行われている。また、建設工事により発生した有明粘土は、有効利用される量が限られており、そのまま捨てられることが多い。一方では、有明粘土は高含水比のため、流失水などにより周辺環境が懸念される。リサイクルの気運が高まる状況では、含水比が高い軟弱土を捨土することはまず不可能である。

有明粘土を抱える有明海周辺地域では、この粘性土を地盤材料とする技術が必要に迫られている。この技術が確立できれば、有明粘土を地盤材料として安定的に供給することが可能となるであろう。

2. 地盤材料化に必要な改良特性

有明粘土などの超軟弱な粘性土を地盤材料とするには、まず高い含水比を低減しなければならない。有明粘土の自然含水比は通常120~180%であり、高い場合には200%にもなる。このため地盤改良などには生石灰がよく使用されている。そこで、生石灰とポゾラン反応を促進するポゾラン材料を用いて、生石灰単独およびポゾラン材料の併用時の改良特性²⁾を検討した。

軟弱な粘性土を改良する場合には、固結化した土の解きほぐし(細粒化)・仮置き時間(固化材混合から締固めまでの時間)・締固め(有無と締固め程度)が改良特性に影響する。すなわち、地盤材料としての品質を考えると「含水比の低減特性」「解きほぐし」「仮置き時間」「締固め(転圧)」の4点について留意すべきである。

2.1 試験方法と試料

試験の概要を図-1に示す。本試験は建設工事で発生

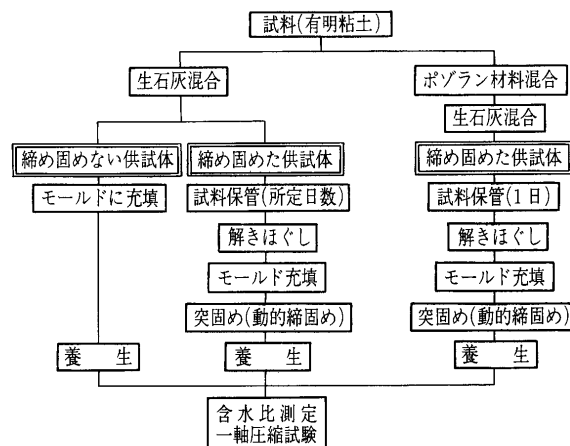


図-1 試験の概要およびフロー

表-1 試料および生石灰の物理化学的特性

物理特性	有明粘土	火山灰	生石灰
自然含水比 (%)	160~180	0.3	—
土粒子密度 (g/cm ³)	2.617	2.660	—
粒度組成 (%)	礫分	0.0	0.0
	砂分	0.8	79.6
	シルト分	31.5	20.2
	粘土分	67.7	0.2
化学成分 (質量比%)	SiO ₂	59.2	62.9
	Al ₂ O ₃	17.5	17.2
	CaO	1.2	5.6
	その他	22.1	14.3

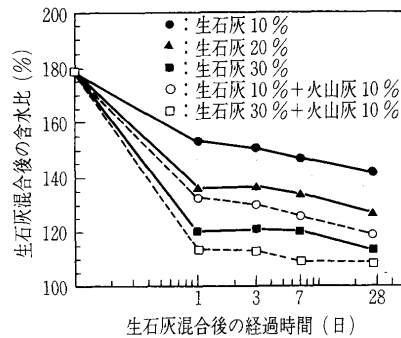
した有明粘土に生石灰を混合する方法、および生石灰とポゾラン材料を併用混合する方法の二つとした。

有明粘土、火山灰および生石灰の物理化学的特性を表-1に示している。なお、生石灰(特号)は市販されているものを使用した。

2.2 地盤材料化の留意点

(1) 含水比の低減特性

生石灰を軟弱粘性土に混合すると、ただちに水和反応が生じ含水比が低減する。著者らは、有明粘土の含水比低減が、特に初期において顕著であることをすでに報告³⁾している。そこで、生石灰混合後の経過時間に対する含水比の変化を図-2に示す。この図は有明粘土の乾燥質量に対して生石灰と火山灰の添加率を変化させたも



図—2 生石灰混合後の経過時間に対する含水比の変化

のである。いずれも混合後1日までに含水比が大きく低減する。その後は水和反応が次第に小さくなり、含水比の低減量が小さくなることを示している。

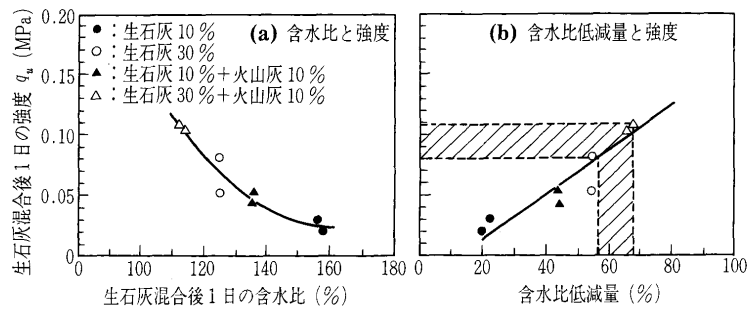
ポゾラン材料として雲仙普賢岳産出の火山灰 (SiO_2 含有量62.9%, Al_2O_3 17.2%) を生石灰と併用した結果、生石灰の単独混合時と同様に含水比低減のほとんどが1日間に進行することが図—2から分かる。生石灰単独と比較すれば、含水比低減量が5~20%多くなっているが、これは乾燥した火山灰の混合によって全体の含水比が低減したことが主な原因である。ところで、表—1に示すように火山灰に含まれる酸化カルシウム (CaO) 量が少ないため、これが水和反応に寄与する程度は小さいと判断した。

軟弱粘性土の地盤材料化について、含水比の低減量をコメントしているケースはあまりみられない。地盤材料化などの事例については、多くの研究が改良強度の増加特性に着目している。著者らは、有明粘土を生石灰で改良すれば、生石灰混合後の1日間に全改良過程における全含水比低減の90%が進行することを明らかにした。この含水比低減量が大きくなれば、固結化が期待できなくても地盤材料として利用できるものと思われる。そこで、地盤材料の可能性を評価するため、改良効果を「含水比低減の効果」と「ポゾラン反応による固結の効果」に分割した³⁾。

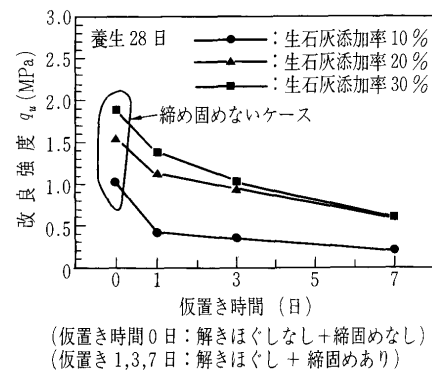
含水比低減による強度増加を把握するため、図—3を描いた。図に示した強度は、生石灰混合後1日の改良強度である。図(a)では、含水比が低減すると改良強度が大きくなることを示している。生石灰の混合後1日では、ポゾラン反応による強度出現がほとんどない状態であり、水和反応による含水比低減のみによって強度増加が生じているとみられる。そこで、同図(b)に含水比低減量と改良強度の関係⁴⁾を示した。地盤材料として必要な強度を設計(利用)基準とすると、仮に設計(利用)基準を0.1 MPaとした場合、含水比を60%低減すれば地盤材料としての利用が可能となる。

(2) 解きほぐし・仮置き時間・締固め(転圧)

地盤材料として建設工事に利用する場合には、固化材混合後に固結化した土を解きほぐすことが多い。そこで、「解きほぐし」と地盤材料特性の関係を調べた。また、固化材混合後の経過時間によっては固結程度が異なるため、解きほぐしの有無と仮置き時間の長短による改良特



図—3 含水比の変化と強度(生石灰混合後1日)の関係



図—4 解きほぐし・締固め・仮置き時間(日)と改良強度の関係

性の変化を検討した。なお、「解きほぐし」する場合は混合から解きほぐしまでの時間を1日と固定して、所定日数の仮置き後に締固めを行った。

図—4は、改良強度(養生28日)と仮置き時間の関係を示している。養生期間中に占める仮置き時間が長くなると、改良強度が小さくなっている。なお、7日強度でも同様な変化を示した。仮置きしている間にもポゾラン反応が進行して固結化するが、この状態が締固めにより解かれて強度が小さくなると考えている。同様な試験を行った根本⁵⁾は、固化材混合から締固めまでの時間が長くなるほど圧縮強度が低下し、さらに締固め密度も小さくなるとしている。この理由として、コンシステンシーが時間と共に変化して締固めが難しくなることを挙げている。

なお、二つの方法で供試体を作成した。一つは「締固めない供試体」として、モールドに試料を詰め床を叩いて大きな間隙がないように作成したものである。一方、「締固めた供試体」は、ランマーを用いて仕事量 $E_c = 549 \text{ kPa}$ (5.6 kgf/cm^2) で突き固めたものである。

ところで、締固めの有無による粒子構造の違いを電子顕微鏡により観察した。口絵写真—6, 7は各供試体(養生7日)の粒子構造の写真であるが、「締固めない供試体」(口絵写真—6)において小さな間隙が多い。二つの写真から締固めの有無によって粒子構造の違いがあることが明らかである。なお、解きほぐしから締固めまでの時間の違いによる構造は観察していないが、この時間が長くなるほど固結化が進行して粒子形状が大きくなること、その結果から締固めを行う時には間隙が大きくなることが想定される。

3. 地盤材料の品質劣化

3.1 品質劣化の挙動

改良土を盛土材として使用する場合には、地盤材料としての品質基準が重要である。自然条件下では、改良特性がしだいに低下することが予想される。今回、基本的な改良特性の変化をつかむため、室内試験での乾燥湿潤の繰返しから、品質劣化の特性を求めることにした。

乾湿繰返しの方法としては、「供試体を恒温室内で3日間空気で養生した後、スレーキングが生じないように徐々に湿潤して4日間水浸する」方法を用いた。これを1サイクルとした。各養生時間(日)の改良強度について、生石灰添加率3ケースを図-5に示す。養生時間に応じて乾湿繰返しのサイクル数を増やしているが、時間が長くなると強度増加が認められる。乾湿繰返しが「ない」場合と「あり」の場合を比べると、強度増加は「あり」の方が小さくなっている。これが水浸によってポゾラン反応の発現度が小さくなっているのか、または水浸による粒子破碎が原因となっているのか、今後解明しなければならない。ただ、改良土ではポゾラン反応が進行するので、自然土に比べて強度低下が小さくなるのではないかと考えている。

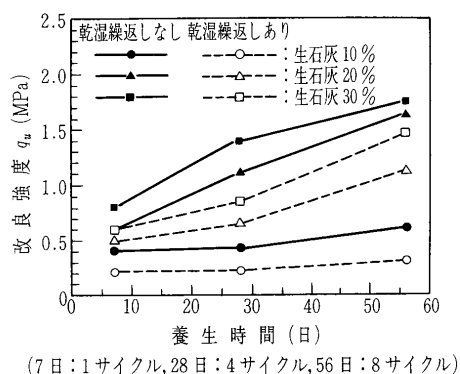


図-5 乾燥繰返しにおける改良強度の時間的変化

3.2 品質劣化の対策

雨水の進入・地下水位の変化などが、土の物理的性状に及ぼす影響は大きい。特に、酸性雨の影響はさらに大きくなると思われる。ところでShaikh⁶⁾はモンモリロナイト粘土鉱物を用いて雨水の浸食性について調べているが、「締め固める」ことによって浸食性を低減できるとしている。今回、実施した乾湿繰返し試験において「締め固め」を条件としているが、長期(56日養生)の試験結果からは強度低下が小さくなっている。これには品質劣化に対する「締め固め」の効果が表れていると考えているが、新たな試験条件の下で詳細な検討を行いたい。

水による品質劣化のほかに、夏場の異常乾燥による劣化が問題となったケースがある。九州地方では1994(平成6)年に雨がほとんど降らない状況が続き、この異常な乾燥状態によって、生石灰改良土を用いた河川堤防の堤体頂部に多数の亀裂が生じる事態となった。この原因として、高温・乾燥による引張り亀裂が考えられて

いる。特に、生石灰改良土ではポゾラン反応の進行によって含水比が低い状態にあるため、高温・乾燥の外的要因が大きく変われば土中の含水状態に大きく影響することが懸念される。この外的要因による品質の低下を抑制するには、熱に対する遮断層を設けて含水状態の変化を小さくする工夫が必要となる。

4. ポゾラン材料の併用による改良特性と設計(利用)基準

4.1 ポゾラン材料の併用による改良特性

軟弱粘性土を効果的に改良する方法として、火山灰・石炭灰(フライアッシュ)などのポゾラン材料を固化材と併用して混合することを著者は提案⁷⁾している。本文では、ポゾラン反応を促進させるためにポゾラン材料の一つである火山灰を用いて、その併用による改良効果について述べる。具体的には、生石灰単独のケースと生石灰の一部を火山灰に置き換えたケースの改良強度を比較している。

生石灰+火山灰の混合量に対する火山灰量の割合(置換率(%))と改良強度の関係を図-6に示した。養生7日での改良強度は、置換率(%)が大きくなる(つまり火山灰が増加する)ほど改良強度が低減している。特に、添加率10%では強度低減が大きい。一方、20~50%では置換率が大きくなって小さい低下量となっている。生石灰の一部を火山灰に置き換えて改良する場合には、「生石灰+火山灰」の添加率を20%以上にするれば、火山灰利用のメリットが出てくる。注目すべき点は添加率30%時がピークとなり、それより添加率を増加しても強度が大きくなることである。この理由は、有明粘土と生石灰それに火山灰(雲仙普賢岳)に含まれる酸化カルシウム量(CaO)とシリカ+アルミナ量($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$)の関係に適量比が存在するためである。本試験では添加率30%が適量比となり、添加率をそれより大きくしてもポゾラン反応に起因する強度増加があまり期待できないことを示している。図に示した改良強度は室内試験の結果であるから、今後は現場施工試験での改良特性についても確認することにして

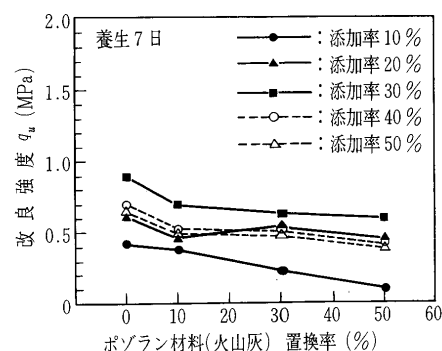
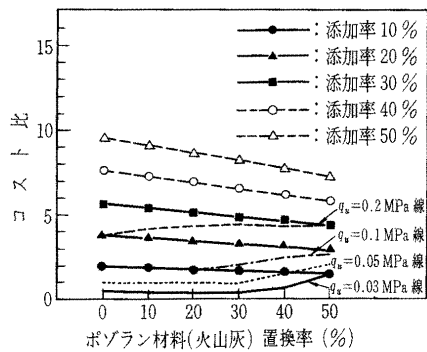


図-6 ポゾラン材料置換率と改良強度の関係(火山灰混合のケース)

4.2 設計(利用)基準の提案

地盤材料として必要な品質基準を設計(利用)基準とした。これは利用用途から「必要強度」を想定し、道路



図—7 ポゾラン材料置換率とコスト比の関係

表—2 利用形態による設計（利用）基準（案）

利用形態	設計（利用）基準
盛土材料	0.20 MPa (2.0 kgf/cm ²)
埋戻し・裏埋め材料	0.05 MPa (0.5 kgf/cm ²)
路床材料	0.10 MPa (1.0 kgf/cm ²)
残土処分	0.03 MPa (0.3 kgf/cm ²)

土工指針⁸⁾・アスファルト舗装要綱⁹⁾などを参考にして設定したものである。この設計（利用）基準を表—2に示した。また、案であり現場施工の改良特性を考慮したものを今後検討する予定である。ここでは、盛土材料に利用する場合には標準的な機種としている21tブルドーザーが走行可能となる強度を想定している。また、路床材料として交通荷重を支持するには、一軸圧縮強さとして0.1 MPa (1 kgf/cm²) の強度が必要であることを示している。

4.3 コスト算定の試み

生石灰単独混合およびポゾラン材料を併用混合した場合の地盤材料化コストを試算した。なお、コストの算定では施工現場での費用を想定するため、図—6の室内試験強度から「室内試験強度：現場強度=3：1」の割合で現場強度を推定した。算定条件は、第1に生石灰混合の費用を「材料費+バックホウ混合費 (=A)」としたことである。第2に、火山灰がダンプトラック (10 t) に直接積み込み可能な場所にあることを想定した。そこで、生石灰と火山灰併用混合の費用を「上記のA+火山灰運搬費 (運搬距離=100 km)」とした。第3に、火山灰の材料費は計上していないことである。有明粘土の乾燥質量1 kgに対する費用を「コスト比」として、その算定結果を図—7に示した。火山灰の置換率が大きくなると、各ケースでだいたいコスト比が小さくなっている。そこで、表—2に示した設計（利用）基準に相応するコスト比を同図に示す。設計（利用）基準が低い場合 (0.03または0.05 MPa) では、火山灰 (ポゾラン材料) の30%混合時が最もコスト比が小さくなること分かった。一方、0.1 MPaでは火山灰の20%混合時にコスト比が最低となり最も経済的となる。さらに、

設計（利用）基準0.2 MPaでは生石灰単独時 (置換率=0%)でのコスト比が最も小さくなっている。この結果設計（利用）基準が大きくなると、火山灰 (ポゾラン材料) よりも生石灰 (固化材) に依存せざる得ないといえる。つまり、大きな強度増加 (ポゾラン反応) を求める場合には、シリカ (SiO₂) やアルミナ (Al₂O₃) よりも酸化カルシウム (CaO) を含む固化材に依存すべきであることを示している。今回の試算は、前記した条件の下で行ったものであり、火山灰の堆積状況や性状さらに運搬距離によってはコスト比が変動する。このため実施段階の算定では、条件によってコスト比が異なることを考慮する必要がある。

5. 結論

有明粘土を地盤材料として有効利用するため、その地盤材料化に必要な特性および品質基準について述べた。本文中に示した四つの留意点に考慮すれば、軟弱な粘性土から効率的に地盤材料を作成することが可能となるであろう。そして、試験結果から地盤材料の品質管理の方法として、室内による乾湿繰返し試験が一つの手法となることを示した。

軟弱な粘性土の地盤材料化を促進するには、現場 (フィールド) 施工時の改良特性が重要である。今後の課題として、現場施工時の改良特性の把握と現場施工に基づいた設計（利用）基準の設定が挙げられる。これからの建設工事においては、他の建設資材と同様に地盤材料の効率的および経済的な作成方法と適正な品質基準が求められることになる。

参考文献

- 1) 小川伸吉・桐越 信・山本博之・大北康治：建設汚泥の再生利用の考え方と技術開発，第31回地盤工学研究発表会講演集，pp. 297~298, 1996.
- 2) 鬼塚克忠・南里 勝・田中 聡：軟弱な建設発生土の有効利用におけるポゾラン物質の効果と問題点，土木学会第50回年次学術講演会講演集，pp. 1420~1421, 1995.
- 3) 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.
- 4) 鬼塚克忠・南里 勝：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，土木学会論文集，No. 547/III-36, pp. 97~106, 1996.
- 5) 根本信行：安定処理土と補強土の締固め，土と基礎，Vol. 38, No. 12, pp. 69~73, 1990.
- 6) Shaikh, A., Ruff, J. F. and Abt, S. R.: Erosion rate of compacted NA-Montmorillonite Soils, ASCE, GE. Vol. 114, No. 3, pp. 296~305, 1988.
- 7) 南里 勝：生石灰とポゾラン材料を用いた軟弱な建設発生土 (有明粘土) の有効利用に関する基礎的研究，佐賀大学博士論文，1997.
- 8) ㈱日本道路協会編：道路土工指針，pp. 47~51, 1989.
- 9) ㈱日本道路協会編：アスファルト舗装要綱，pp. 73~82, 1993.

(原稿受理 1998.1.14)