

締め固めた安定処理土における強度と間隙径分布に関する研究

A STUDY ON THE RELATIONSHIP BETWEEN STRENGTH AND PORE SIZE DISTRIBUTION IN COMPACTED STABILIZED SOILS

鳥居和之*・川村満紀**

By Kazuyuki TORII and Mitsunori KAWAMURA

Recently, chemical soil stabilizations are actively adopted for the improvement of the soft ground on which roads or buildings will be constructed. In addition to traditional stabilizers of Portland cement and lime, the industrial by-products such as fly ash and pulverized blastfurnace slag are also used for the purpose of increasing the effectiveness of cement and lime as a stabilizer and their effective utilization in soil stabilization. The objective of this study is to reveal the mechanisms of strength development of the compacted stabilized soils from a microstructural view-point. The compressive strength, modulus of deformation and pulse velocity of various compacted soils stabilized with cement, lime and lime-fly ash (or pulverized blastfurnace slag) were measured. Their microstructures were also characterized by the SEM observation and pore size distributions obtained by the mercury intrusion porosimeter. The relationships between strength and changes in microstructure in compacted stabilized soils are discussed.

Keywords: soil stabilization, mechanism of strength development, SEM observation, reaction products, pore size distribution

1. ま え が き

近年、土質安定材を添加することにより地盤を改良する化学的土質安定処理が道路の路盤改良や軟弱地盤の改良などに採用される機会が増大している。化学的土質安定処理は土質安定材の水和反応過程での土粒子間の固結や土の物理的・化学的性質の改善により安定処理の効果を期待するものである。土質安定材としては、従来よりセメント、石灰、アスファルトなどが使用されてきており、最近では改良効果の増大や経済性の改善を目的として産業副産物の利用や新しい土質安定材の開発が活発に行われている¹⁾。化学的土質安定処理土の強度発現機構についてはすでに多くの研究がみられ、セメントまたは石灰処理土中での安定材の反応過程および反応生成物の特徴などが明らかにされている²⁾⁻⁷⁾。それらの研究によると、セメント処理土の強度はセメントの水和反応およびセメントと粘土粒子間のポゾラン反応による反応生成物であるセメントゲルが土粒子を連続的に結合することによって発揮され、石灰処理土の強度は石灰と粘土粒子

とのポゾラン反応によって生じる反応生成物による土粒子の結合および土の物理化学的性質の改善によるものとされている。また、セメント（または石灰）とともにフライアッシュ、高炉水砕スラグ粉末および石膏が使用された土質安定処理では、上述のようなセメント（または石灰）による土粒子の結合を基本にして、さらにポゾラン反応の促進（フライアッシュ）、潜在水硬性の発揮（高炉水砕スラグ粉末）およびエトリングイトの生成（石膏）による処理効果などが付け加わる。

締め固め土の構造（土粒子の配列、間隙径分布）は、土の種類や締め固め条件（初期含水比、締め固めエネルギー）により変化することが知られており、締め固め土の強度、透水性などの工学的性質が微視的構造との関係より研究されてきた。締め固めた安定処理土では、安定材の水和反応または土と安定材との相互作用の結果、土粒子間には特殊かつ複雑な構造が形成されているものと考えられる。土粒子間の構造を定量的または定性的に評価する方法についてはいくつか提案されているが、本研究では安定処理土の特殊性を考慮して走査型電子顕微鏡による土粒子間の結合状況の直接的観察と水銀圧入式ポロシメーターによる間隙径分布の測定により締め固めた安定処理土の土粒子構造の評価を試みた^{8),9)}。安定材の添加による土粒子構造の変化を把握することができれば、各種安

* 正会員 工博 金沢大学講師 工学部土木建設工学科
(〒920 金沢市小立野 2-40-20)

** 正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科
(同上)

定処理土の改良原理を統一的に理解することができるとともに試料土に応じた適切な安定材およびその添加量の選択や土質安定処理効果の判断が可能になると考えられる。

一方、雨水の路盤または盛土内部への浸透によって発生する崩壊に対する防止策としては、土に少量の土質安定材を添加して締め固めることによって耐水性を向上させることが経済性の面からも有効であるといわれている。諸外国では乾燥・潤潤試験や水中浸せき強度試験により安定処理土の耐水性が評価されているが、わが国では安定処理土の耐水性についての研究は少なく、その試験方法も確立されていないのが現状である^{10),11)}。安定処理土の耐水性について理解するためには、土質安定材の添加が安定処理土の水浸時の強度や透水性に及ぼす影響について微視的構造との関係より明らかにすることが必要である。

本研究では、代表的な土質安定材として使用されているセメント、石灰、高炉水砕スラグ粉末およびフライアッシュなどを添加した締め固め安定処理土の強度特性、耐水性とこれらの安定処理土の微視的構造の特徴を調べることによって、土質安定材の添加による締め固め安定処理土の強度および耐水性の改善機構について2, 3の考察を加えている。

2. 実験概要

(1) 使用材料および供試体の作成

本研究に使用した試料土(砂質土1種および粘性土4種)の物理的性質を表-1に示す。使用したセメントおよび石灰は普通ポルトランドセメント(N社)および試葉一級水酸化カルシウム(K社)である。石灰とフ

表-1 試料土の物理的性質

	砂質土	粘性土I	粘性土II	粘性土III	粘性土IV
統一土質分類	シルト混じり砂	粘土質シルト	粘土	粘土質砂	砂質シルト
砂分(%)	85.5	14.8	0.2	53.3	41.8
シルト分(%)	11.0	55.3	38.3	18.3	42.8
粘土分(%)	3.5	29.9	61.5	28.4	15.4
塑性指数	NP	12.2	48.6	62.4	NP
$\gamma_d \text{ max (g/cm}^3\text{)}$	1.52	1.32	1.24	1.56	0.77
w opt (%)	21.5	33.4	40.5	23.4	82.2
粘土鉱物	—	鈣質付	鈣質付	心付付	707L

表-2 セメントおよび石灰処理土の締め固め試験結果

	セメント10%添加		消石灰10%添加	
	$\gamma_d \text{ max (g/cm}^3\text{)}$	w opt (%)	$\gamma_d \text{ max (g/cm}^3\text{)}$	w opt (%)
砂質土	1.524	21.4	1.473	23.8
粘性土I	1.365	30.8	1.291	35.3
粘性土II	1.250	40.3	1.193	40.3
粘性土III	1.568	23.6	1.544	23.4
粘性土IV	0.794	80.0	0.733	86.3

ライアッシュ(T火力産、原粉)または高炉水砕スラグ粉末(S社)との混合割合は過去の実験結果より強度発現の良好な3:7(重量比)を選択した^{12),13)}。土質安定材の添加量は試料土の乾燥重量に対して2.5%, 5%および10%である。供試体は直径5cm, 高さ10cmの円柱体であり、締め固め試験(JIS 1210)により求めた表-2に示す最適含水比および最大乾燥密度となるように、静的締め固め(安定処理土試験方法(案), 土質工学会)により作成した¹⁴⁾。供試体の養生条件は温度20°Cにおけるビニール袋中での密封養生である。

(2) 実験方法

安定処理土の力学的試験としては、7日, 14日, 28日および90日の各材令にて一軸圧縮強度, 変形係数(E_{50})および超音波パルス速度(V_p)の測定を行った。超音波パルス法は、コンクリートの非破壊試験によく用いられており、供試体中を通過するパルス速度により強度を推定するものである。一軸圧縮試験はオートグラフを使用してひずみ制御(ひずみ速度:1%/min)で実施した。また、安定処理土の破断面より採取した断片を使用して、常温での真空乾燥を24時間行った粉末試料に対して示差走査熱量測定(DSC), X線回折分析(XRD)により反応過程と反応生成物の特徴を調べるとともに、真空乾燥後、炭素および白金バナジウムで蒸着した試料に対して走査型電子顕微鏡(SEM)により土粒子間の結合状態および反応生成物の形態を観察した。また、安定処理土の強度や耐水性と密接な関係がある安定処理土の間隙径分布を水銀圧入式ポロシメーターにより測定した。水銀圧入式ポロシメーターは、大きな表面張力をもつ水銀が加圧することにより一定の大きさの間隙に侵入する性質を利用して、多孔質物質の間隙量(cc/g, 通常単位重量当たりの間隙の量で表わされる)や間隙径分布を測定する。水銀圧入法を安定処理土に適用する場合には、安定処理土における複雑な形状をもつ間隙を直径

表-3 各種試験の概要

試験項目	供試体および測定試料	試験方法および測定項目
一軸圧縮試験	直径5cm, 高さ10cmの円柱体。密封養生(温度20°C)	静的締め固め(安定処理土試験方法(案), 土質工学会)により作成し、変形係数および超音波パルス速度も同時に測定する。
水中浸せき強度試験(BS 1924)	直径5cm, 高さ10cmの円柱体。密封および水中養生(温度20°C)	14日間密封養生した供試体と7日間密封養生後、7日間水中に浸せきした供試体の強度を比較する。
真空飽水強度試験(ASTM C 593)	直径5cm, 高さ10cmの円柱体。密封養生(温度20°C)	供試体をVacuum Chamber内で30分間真空乾燥後大気圧の条件下で1時間飽水させ、試験前後での強度、含水比を比較する。
走査型電子顕微鏡による観察	供試体破断面より採取した試料、真空乾燥後、炭素および白金バナジウムにて蒸着	土粒子間の結合状態および反応生成物の生成状況を直接観察する。
水銀圧入式ポロシメーターによる測定	供試体破断面より採取した5mm程度の立方体試料、凍結乾燥(-55°Cで48時間)	全孔隙量および間隙径の分布を測定する。

が一定の円筒管状間隙として計算することによる誤差や高圧力下での微細な間隙の破壊などの問題について考慮しておく必要がある。さらに、安定処理土の耐水性は水中浸せき強度試験 (BS 1924) と真空飽水強度試験 (ASTM C 593) により実施した。これらの試験の詳細については表—3 に示す。

3. 締め固めた安定処理土の強度特性

締め固めた安定処理土の 28 日材令および 90 日材令における一軸圧縮強度を表—4 および 5 に示す。セメント処理土の強度はセメントゲルの生成量とその土粒子間の結合力とにより決まり、間隙の少ない砂質土の方が粘性土よりも全体に強度が大きくなり、また粘性土については粘土分が少なく、セメントとの相互作用の大きい粘土鉱物を含むものほど材令の経過に伴う強度の発達が顕著になる。一方、石灰処理土の強度は試料の石灰反応性と関係があり、石灰反応性の大きな粘土鉱物を含む粘性土 II および III では長期材令になるとセメント処理土と同程度の大きな強度が得られる。

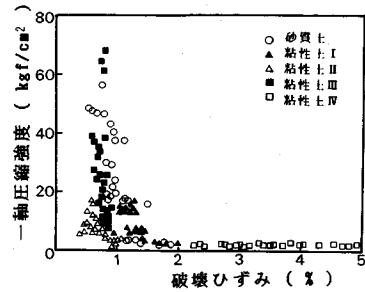
締め固めた安定処理土の一軸圧縮強度と破壊ひずみの関係を図—1 および 2 に示す。締め固めた安定処理土の破壊ひずみは、セメントおよび石灰処理土ともに強度が 5 kgf/cm² 以下では通常の土と同様に大きくばらつくが、強度が 10 kgf/cm² 以上になると砂質土および粘性土ともに破壊ひずみは 0.5~1.5% の範囲にある。締め固めた安定処理土の一軸圧縮強度と変形係数の関係は、

表—4 締め固めた安定処理土の 28 日材令における一軸圧縮強度 (kgf/cm²)

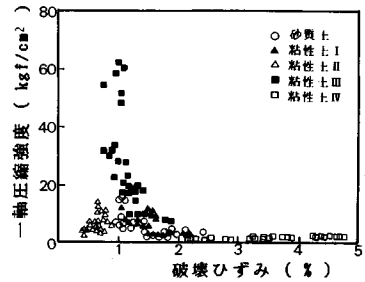
		砂質土	粘性土 I	粘性土 II	粘性土 III	粘性土 IV
セメント	2.5%	3.3	3.5	3.9	10.4	2.4
	5%	18.3	7.1	6.7	18.6	2.5
	10%	47.0	15.5	12.2	37.5	2.7
消石灰	2.5%	4.2	3.4	6.7	18.6	2.7
	5%	6.1	7.1	7.4	31.1	2.4
	10%	7.5	10.8	8.3	32.8	2.4
石灰-フライアッシュ・10%	10.2	4.8	7.5	21.2	2.2	
石灰-高炉スラグ粉末・10%	23.3	4.8	6.7	23.5	2.1	

表—5 締め固めた安定処理土の 90 日材令における一軸圧縮強度 (kgf/cm²)

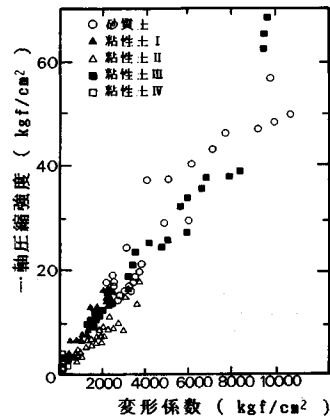
		砂質土	粘性土 I	粘性土 II	粘性土 III	粘性土 IV
セメント	2.5%	3.7	3.5	4.4	11.9	3.0
	5%	20.0	7.9	9.8	24.2	2.6
	10%	56.4	15.9	18.6	64.7	3.0
消石灰	2.5%	4.8	3.6	7.7	22.3	2.2
	5%	8.8	7.7	11.1	56.0	2.4
	10%	15.5	12.2	13.4	60.7	2.4
石灰-フライアッシュ・10%	11.2	5.2	8.5	23.2	2.4	
石灰-高炉スラグ粉末・10%	37.2	5.0	7.7	26.5	2.5	



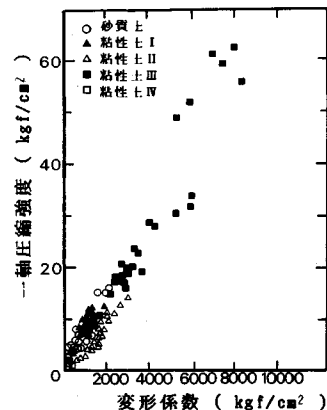
図—1 セメント処理土の一軸圧縮強度と破壊ひずみの関係



図—2 石灰処理土の一軸圧縮強度と破壊ひずみの関係



図—3 セメント処理土の一軸圧縮強度と変形係数の関係



図—4 石灰処理土の一軸圧縮強度と変形係数の関係

図-3 および 4 に示すように試料土の種類により相違するが、30 kgf/cm² 以下の範囲では直線的な関係が存在し、セメント処理土に対して $E_{50}=(130\sim300)q_u$ 、石灰処理土に対して $E_{50}=(120\sim240)q_u$ となる。この比例関係は締め固めを伴わないセメント処理土の結果 ($E_{50}=(130\sim260)q_u$) と大きく異なることはない。すなわち、安定処理土の強度と変形係数の関係は試料土の種類によって相違するが、各試料土に対しては安定材の種類や締め固めの有無にかかわらずほぼ同一の関係が認められる¹⁵⁾。また、安定処理土の迅速な強度推定法としては一般に弾性波 (S 波) が有効であるが、飽和度の小さい処理土では P 波速度からも力学的性質の推定が可能であるとされている¹⁶⁾。超音波パルス速度は処理土の密度および飽和度の影響を受けるために試料土の種類により相違するが、締め固めた安定処理土では内部組織が密実になる過程で、超音波パルス速度は図-5 および 6 に示すように 500~2 000 m/s の範囲にあり、このような範囲内では各試料土に対して強度と超音波パルス速度との間には直線

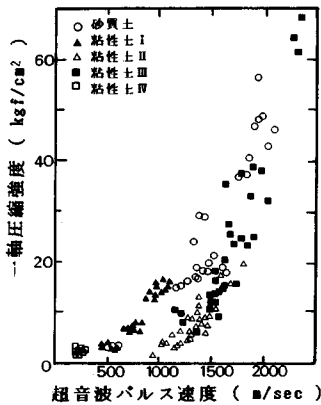


図-5 セメント処理土の一軸圧縮強度と超音波パルス速度の関係

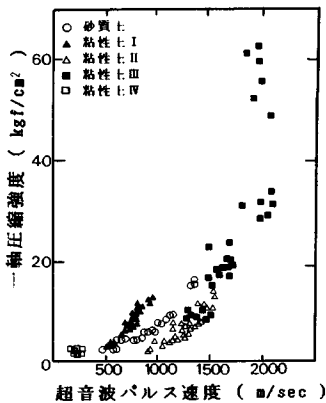


図-6 石灰処理土の一軸圧縮強度と超音波パルス速度の関係

的な比例関係が存在する。

4. 締め固めた安定処理土の耐水性

締め固めた安定処理土を水中に浸せきした後の強度試験の結果を表-6 および 7 に示す。セメント処理土の水中浸せき強度比 (%、密封養生 (14 日) の強度に対する密封養生 (7 日)+水中養生 (7 日) の強度の比率を表わす) はセメント添加量の増加とともに大きくなり、砂質土は粘性土と比較して水浸時の強度低下が小さいことがわかる。また、セメント処理土の水中浸せき強度比は浸せき開始時の強度とも関係している。イギリスでは、セメント処理土が舗装路盤として良好な耐水性を示すと判断されるには浸せき中にクラックや膨張の徴候がなく、80% 以上の水中浸せき強度比が必要であるとされている (セメント処理土の路盤材料としての強度の基準としては 2.8 MN/m² 以上 (7 日強度) が定められている)¹¹⁾。表-6 より、砂質土を使用したセメント処理土で約 10 kgf/cm² (7 日強度)、粘性土を使用したセメント処理土で約 15 kgf/cm² (7 日強度) の強度があればイギリスの耐水性の基準である水中浸せき強度比 80% 以上を満足することがわかる。一方、石灰処理土の水中浸せき強度比は、ボゾラン反応による強度の発現が比較的遅いこともあり、セメント処理土の基準をそのまま適用するのは妥当ではないが、全体として石灰処理土の水中浸せき強度比はセメント処理土の場合よりも低い。また、砂質土を使用した石灰-高炉水砕スラグ (またはフライアッシュ) 処理土 (添加量: 10%) の水中浸せき強度比はそれぞれ 96% および 85% と大きく、さらに水浸により高炉水砕スラグの水和反応およびフライアッシュのボゾラン反応が促進されることから浸せき期間中においても強度の増大が認められる。

締め固めた安定処理土の真空飽水強度試験の結果を図-7 および 8 に示す。真空飽水強度試験の結果は水中浸

表-6 セメント処理土の水中浸せき強度試験の結果

試料土の種類	セメント 2.5%		セメント 5%		セメント 10%	
	7日強度	水浸強度	7日強度	水浸強度	7日強度	水浸強度
砂質土	3.2	2.3 (72)	15.5	16.5 (94)	29.3	36.1 (94)
粘性土 I	3.5	0.9 (28)	6.9	3.6 (53)	13.2	10.3 (74)
粘性土 II	3.1	水浸時に崩壊	6.4	3.3 (47)	8.2	8.0 (92)
粘性土 III	8.1	6.0 (65)	13.8	11.6 (77)	25.9	31.2 (90)
粘性土 IV	2.3	水浸時に崩壊	2.0	水浸時に崩壊	2.6	水浸時に崩壊

() : 水中浸せき強度比。密封養生 (14 日) に対する密封養生 (7 日) + 水中浸せき養生 (7 日) の強度のパーセント

表-7 石灰処理土の水中浸せき強度試験の結果 (kgf/cm²)

試料土の種類	石灰 2.5%		石灰 5%		石灰 10%	
	7日強度	水浸強度	7日強度	水浸強度	7日強度	水浸強度
砂質土	2.1	2.7 (80)	2.4	3.7 (80)	3.2	5.3 (95)
粘性土 I	3.1	1.6 (50)	6.1	4.8 (70)	8.3	6.5 (70)
粘性土 II	4.3	2.3 (43)	4.2	2.5 (48)	4.1	2.7 (47)
粘性土 III	10.2	13.2 (81)	9.0	14.1 (78)	8.6	15.1 (79)
粘性土 IV	2.5	水浸時に崩壊	1.6	水浸時に崩壊	2.2	水浸時に崩壊

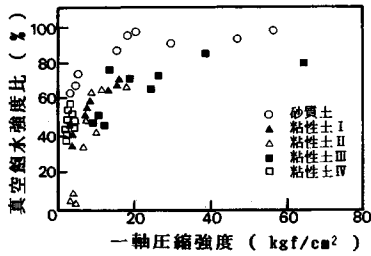


図-7 セメント処理土の一軸圧縮強度と真空飽水強度比の関係

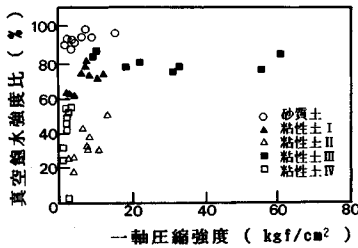


図-8 石灰処理土の一軸圧縮強度と真空飽水強度比の関係

せき強度試験と同様な傾向が認められ、真空飽水強度試験が締め固めた安定処理土の耐水性の早期判定に有効であることがわかる¹⁷⁾。砂質土ではセメント添加量が5%以上になると材令とは無関係に90%程度の真空飽水強度比(%,真空飽水試験の前後での強度の比率を表わす)が得られている。一方、粘性土では強度発現の良好な粘性土Ⅲを除いて真空飽水強度比は70%以下と小さい。セメントの水和反応生成物であるセメントゲルによる粘土団粒間の結合力は砂質土における砂粒子間のものよりも弱く、また親水性を示す粘土鉱物では吸水時に結合力が失われることもあるなどの理由から、セメント処理土の強度が同程度の場合でも粘性土を使用した処理土は砂質土を使用した処理土と比較して水浸による強度の低下が大きくなるものと考えられる。一方、砂質土を使用した石灰処理土では、水分の侵入時に土粒子構造の破壊が生じないために、強度に無関係に90%以上の真空飽水強度比を示している。また、ポズラン反応の過程で間隙の少ない構造が形成されている粘性土Ⅲではセメント処理土の場合と同程度の真空飽水強度比が得られているが、それ以外のものでは強度が小さくなると真空飽水強度比が大きく低下する。以上の結果より、締め固めた安定処理土の耐水性は浸せき時の強度だけでなく試料土の性質とも密接な関係があり、粘性土を使用した処理土では砂質土を使用した処理土よりも耐水性を確保するための強度基準を厳しくする必要があるものと考えられる。

5. 締め固めた安定処理土の構造

砂質土を使用したセメント処理土の走査型電子顕微鏡

写真(以下SEM像と称する)を写真-1~5に示す。写真-1~4に示すように、砂質土を使用したセメント処理土ではセメント添加量が増大するにつれて砂粒子表面に析出するセメントゲルの生成量が増大し、それに伴って局部的であった砂粒子間の結合がしだいに連続的なものへと変化する。また、写真-5に示すように、反応生成物としては繊維状のセメントゲル(C-S-Hゲル、H.F.W. Taylorの分類に従い、非晶質類似のC-S-H生成物をC-S-Hゲルと称する)が主として観察され、これらの生成物により砂粒子間に強固な結合が得られている。しかし、セメントゲルによる砂粒子間の結合は砂粒子どうしの接触部分に限られているために、砂質土を使用したセメント処理土では比較的大きなセメント添加量においても数10 μm 程度の大きな間隙が残存する。このことは図-9に示す間隙径分布の測定によっても示される。すなわち、砂質土を使用したセメント処理土では、20 μm 以上の大きな間隙の量の材令に伴う変化はみられないが、材令が経過するにつれて0.04~5 μm の範囲の間隙の量がしだいに減少し、それに対応して0.04 μm 以下の微細な間隙の量が増大する。このような間隙径分布の細かい径への移行は、図-10に示すようにセメント添加量が増加した場合にも同様にみられる。

Diamond¹⁸⁾、西田¹⁹⁾は締め固めた粘土の間隙径分布が締め固め時の含水比により変化し、特に最適含水比付近での締め固めによって粘土の団粒間の間隙に相当するような

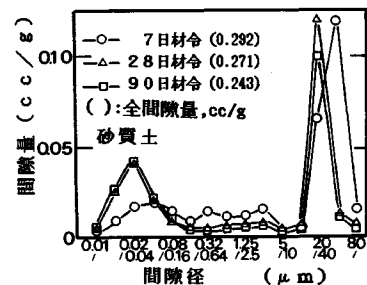


図-9 砂質土・セメント処理土(添加量:10%)の間隙径分布

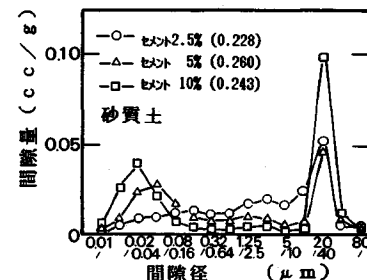
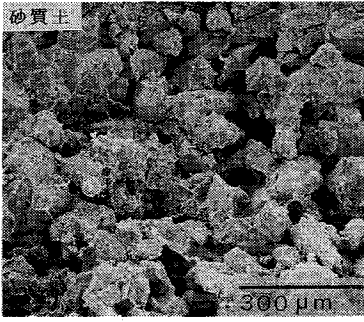
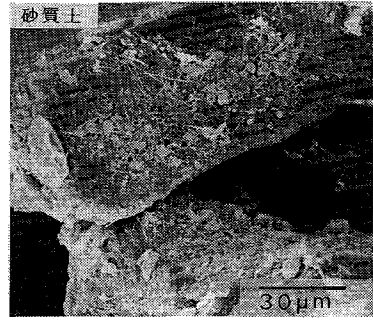


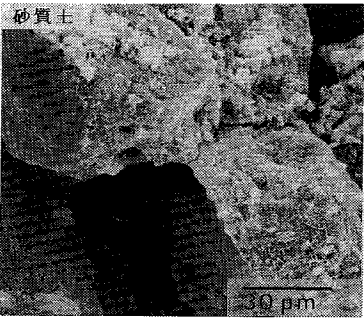
図-10 砂質土・セメント処理土(90日材令)の間隙径分布



写真一1 砂質土・セメント処理土（添加量：10%，28日材令）のSEM像



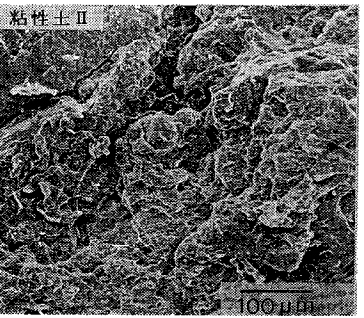
写真一2 砂質土・セメント処理土（添加量：2.5%，90日材令）のSEM像



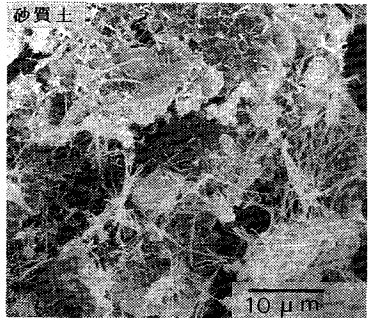
写真一3 砂質土・セメント処理土（添加量：5%，90日材令）のSEM像



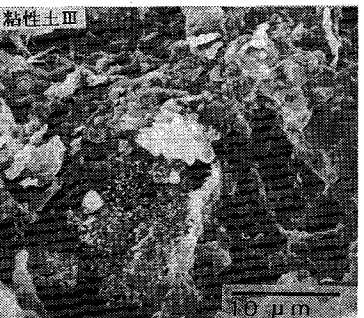
写真一4 砂質土・セメント処理土（添加量：10%，90日材令）のSEM像



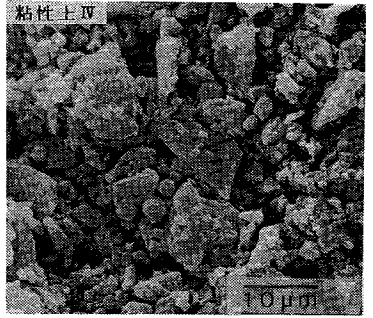
写真一5 砂質土・セメント処理土（添加量：10%，90日材令）のSEM像



写真一6 粘性土II・セメント処理土（添加量：10%，28日材令）のSEM像



写真一7 粘性土III・セメント処理土（添加量：10%，28日材令）のSEM像



写真一8 粘性土IV・セメント処理土（添加量：10%，28日材令）のSEM像

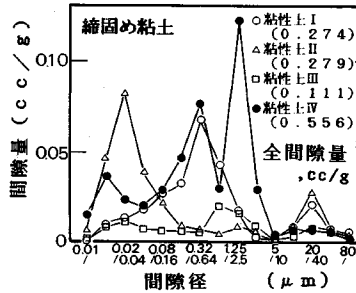


図-11 締め固めた粘性土の間隙径分布

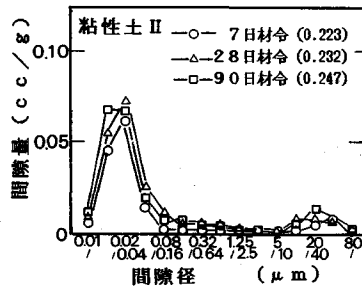


図-12 粘性土 II・セメント処理土 (添加量: 10%) の間隙径分布

数 μm 以上の間隙が消失することを報告している。締め固めた粘土の間隙径分布を図-11 に示す。締め固めた粘土の間隙径分布は粘土より成る団粒内の微細な間隙と団粒間の比較的大きな間隙とに分けられるが、それらの間隙の構成比率は粘性土の種類により相違する。本実験に使用した粘性土については、粘性土 I および IV は粘性土 II および III と比較して粘土の団粒間の間隙に相当する大きな径の間隙の占める割合が多いことがわかる。

粘性土を使用したセメント処理土の SEM 像を写真-6~8 に示す。粘性土においてセメントの添加による処理効果が大きくなるためには、強度の発達に役立つ間隙の少ない粘土粒子の構造が形成されることが必要になる。このため間隙量の大きい粘性土 IV を使用した処理土は間隙量の小さい粘性土 I, II および III を使用した処理土と異なり比較的大きなセメント添加量においても強度の増加がほとんどみられない。粘性土の中でも粘土分の多い粘性土 II を使用したセメント処理土の間隙径分布では、図-12 に示すように数 μm 以上の間隙はほとんど存在せず、材令の経過に伴って間隙径分布が細かい径の方向に移行している状況が認められる。

砂質土を使用した石灰処理土では、図-13 に示す DSC 曲線からも明らかなように粘性土と比較して未反応の石灰が多く残存しているが、写真-9 に示すように石灰と微細な土粒子との間の反応により生じた繊維状の

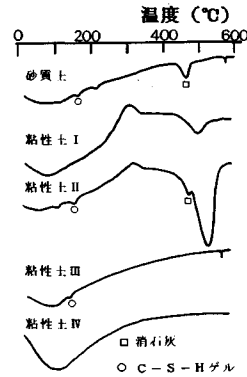


図-13 石灰処理土 (添加量: 10%, 28 日材令) の DSC 曲線

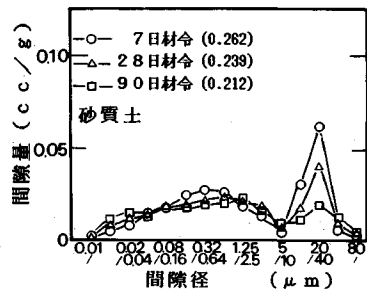


図-14 砂質土・石灰処理土 (添加量: 10%) の間隙径分布

C-S-H ゲルや板状の C_4AH_3 などにより砂粒子間の間隙が充填されている様子が観察される。このため、砂質土を使用した石灰処理土では、図-14 に示すように材令の経過による間隙径分布の変化は顕著ではないが、材令が経過するに伴って $20 \mu\text{m}$ 以上の大きな間隙がしだいに減少している。砂質土を使用した安定処理土ではセメントよりも石灰を添加した方が処理土の透水係数が小さくなることが報告されている²⁰⁾。また、締め固めた処理土の透水性は $1\sim 20 \mu\text{m}$ 程度の大きな間隙の量に比例することも指摘されている²¹⁾。砂質土を使用した石灰処理土ではボゾラン反応の過程で生じた反応生成物により砂粒子間の比較的大きな間隙が充填され、このことが透水性の減少に関与しているものと考えられる。一方、粘性土を使用した石灰処理土では、粘性土 I および IV においては土粒子構造および間隙径分布の変化がまったくみられない。しかし、粘土分の多い粘性土 II を使用した処理土では、図-15 に示すようにセメント処理土の場合と同様に数 μm 以上の間隙はほとんど存在せず、材令とともに $0.1 \mu\text{m}$ 以上の間隙が減少し、 $0.04 \mu\text{m}$ 以下の微細な間隙が増大する (写真-10 参照)。

砂質土を使用した石灰-高炉スラグ処理土の間隙径分布は、図-16 に示すようにセメント処理土に比較的似ており、写真-11 に示すように繊維状の C-S-H ゲルにより砂粒子間が結合されるにつれて、 $0.64 \mu\text{m}$ 以上の

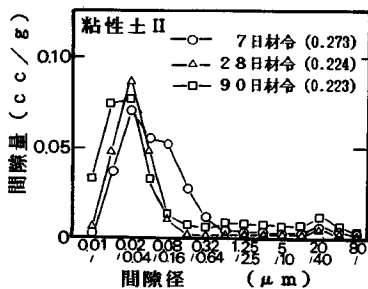


図-15 粘性土Ⅱ・石灰処理土(添加量: 10%)の間隙径分布

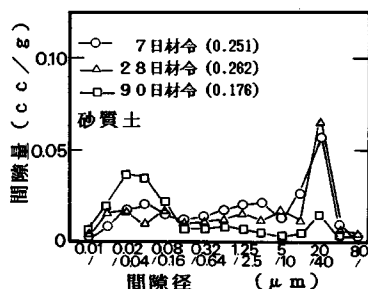


図-16 砂質土・石灰-高炉スラグ処理土(添加量:10%)の間隙径分布

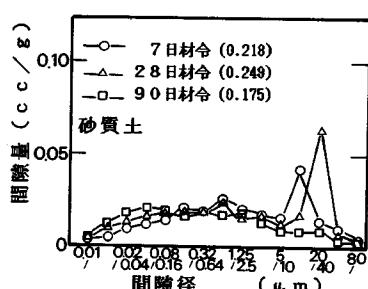


図-17 砂質土・石灰-フライアッシュ処理土(添加量:10%)の間隙径分布



写真-9 砂質土・石灰処理土(添加量: 10%, 90日材令)のSEM像

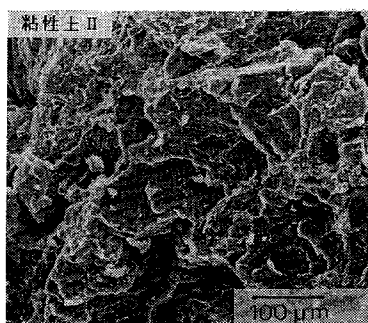


写真-10 粘性土Ⅱ・石灰処理土(添加量: 10%, 28日材令)のSEM像

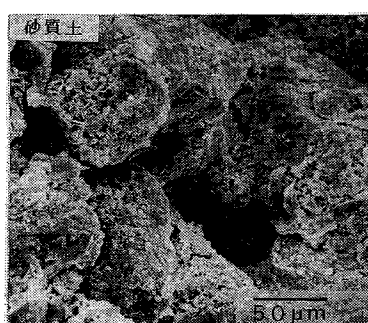


写真-11 砂質土・石灰-高炉スラグ処理土(添加量:10%, 28日材令)のSEM像

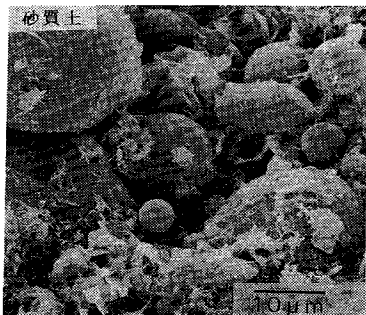


写真-12 砂質土・石灰-フライアッシュ処理土(添加量: 10%, 90日材令)のSEM像

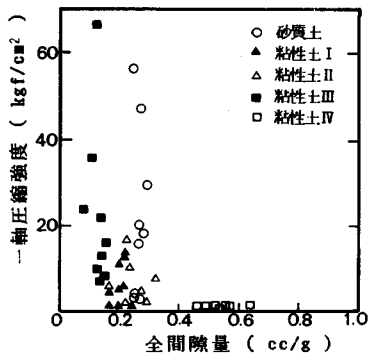


図-18 セメント処理土の一軸圧縮強度と全間隙量の関係

間隙が減少し、 $0.04 \mu\text{m}$ 以下の微細な間隙が増大する。一方、砂質土を使用した石灰-フライアッシュ処理土では、図-17に示すように石灰-高炉スラグ処理土と比較して材令による間隙径分布の変化がかなり小さい(写真-12参照)。

6. 締め固めた安定処理土の強度と間隙径分布との関係

締め固めた安定処理土の間隙径分布は、安定処理土の強度、透水性といった工学的性質と密接な関係があることが知られている。締め固めた安定処理土の強度と全間

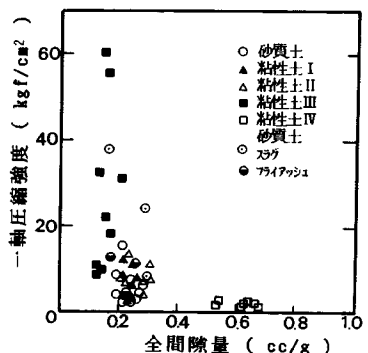


図-19 石灰系処理土の一軸圧縮強度と全間隙量の関係

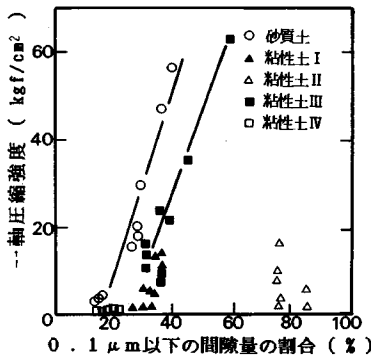


図-20 セメント処理土の一軸圧縮強度と0.1 μm以下の間隙の占める割合の関係

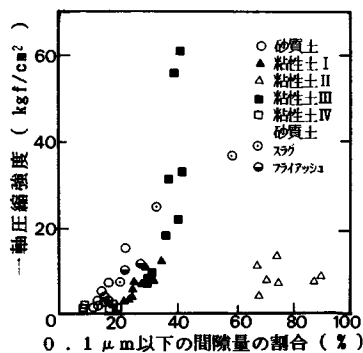


図-21 石灰系処理土の一軸圧縮強度と0.1 μm以下の間隙の占める割合の関係

隙量 (cc/g, 水銀圧入法で測定された全間隙の量を表わす) との関係を示した図-18 および 19 からも明らかなように、セメントおよび石灰系処理土の強度と全間隙量との間には必ずしも明確な関係は存在せず、砂質土では 0.2~0.3 cc/g, 粘性土では 0.1~0.6 cc/g の範囲に全間隙量がある。

一方、前述のように材令の経過に伴って強度の発達が得られる安定処理土では、間隙径分布が細かい径へ移行している状況が認められることから、間隙径分布の細かい径への移行状況を示す指標として 0.1 μm 以下の微細な間隙径が全体に占める割合について検討した。強度の発達が大きなセメント処理土(砂質土および粘性土Ⅲ)に関しては、図-20 に示すようにセメント添加量や材令には関係なく強度と 0.1 μm 以下の微細な間隙径の割合の間には直線的な比例関係が存在し、石灰系処理土に関しても、図-21 に示すように強度と微細な間隙量との間には比例関係が存在する。セメント処理土と石灰系処理土とでは強度発現の原理が相違するにもかかわらず、両者の関係は各試料土に対してほぼ同一であり、間隙径分布の特徴より強度が統一的に表現できる。しかし、図-20 および 21 より明らかなように粘土分の多い粘性

土Ⅱのみが特異な結果を示す。これは、粘性土Ⅱを構成する微細なカオリナイト粘土と関係があり、本実験に使用したカオリナイト粘土では団粒内の間隙に相当する 0.02~0.04 μm の間隙が卓越するためであると考えられる(図-11 参照)。これらの結果より、締め固めた安定処理土では、安定材の水和反応により生成する C-S-H ゲルなどの反応生成物により砂粒子間または粘土の団粒間に存在する比較的大きな間隙がしだいに細分化され、0.1 μm 以下の微細な間隙の量が增大するに従って強度の発達が得られることが明らかになった。

7. 結 論

土質安定処理における安定処理材の選択、配合設計および施工を従来の経験的なものから合理的なものへと発展させるには、土質安定処理の化学的な反応過程およびそれに伴う土粒子間の結合機構を解明することが必須となっている。走査型電子顕微鏡による土粒子間の結合状況の観察と水銀圧入式ポロシメーターによる間隙径分布の測定を中心にして、締め固めた安定処理土の強度を微視的構造との関係より検討した。その結果、締め固めた安定処理土の強度の発達において果たす反応生成物の役割は、土粒子または粘土団粒間の間隙を充填することにより内部組織を密実化することにあることが判明した。

本研究において得られた主要な結果をまとめると次のようである。

(1) 締め固めた安定処理土の破壊ひずみは、強度が 10 kgf/cm² 以上になると砂質土および粘性土とも 0.5~1.5% の範囲でほぼ一定の値になる。締め固めた安定処理土の強度と変形係数の関係は、30 kgf/cm² 以下のばらつきの小さい範囲では安定材および試料土の種類にはあまり影響されず、ほぼ $E_{50} = 200 q_u$ で示される。

(2) 締め固めた安定処理土の超音波パルス速度は、土粒子間が結合され組織が密実化する過程で増大しており、それぞれの処理土に対して強度と超音波パルス速度との間には明瞭な関係が存在する。

(3) 締め固めた安定処理土の耐水性は、浸せき時の強度だけでなく試料土の性質とも密接な関係があり、石灰処理土はセメント処理土よりも、また粘性土を使用した処理土は砂質土を使用した処理土よりもそれぞれ耐水性を確保するための強度基準を厳しくする必要がある。

(4) 締め固めた安定処理土では、安定材の水和反応により生成する C-S-H ゲルなどの反応生成物により強度上の欠陥となりやすい砂粒子間または粘土の団粒間の組織が強化される過程で強度が増大する。

(5) 締め固めた安定処理土の間隙径分布は、安定材の種類とその添加量、試料土の種類および材令により大きく変化し、強度の増大および耐水性の改善が得られる

場合には間隙径分布が細かい径の方向に移行している状況が認められる。

(6) 締め固めた安定処理土の強度は、安定材の種類には関係なく微細な間隙(0.1 μ m以下)の占める割合と密接な関係がある。

謝 辞：本研究を実施するにあたってご協力を頂いた前田建設 K. K. 近堂繁和氏に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 鳥居和之・川村満紀・柳場重正：産業副産物による化学的土質安定処理, コンクリート工学, Vol. 24, No. 2, pp. 8~17, 1986.
- 2) Herzog, A. and Michell, J. K. : Reaction Accompanying Stabilization of Clay and Cement, Highway Research Record, No. 36, pp. 146~171, 1963.
- 3) Michell, J. K. and Jack, S. A. E. : The Fabric of Soil-Cement and its Formation, Proc. of 14th Natio. Conf. on Clay and Clay Minerals, pp. 279~305, 1966.
- 4) Kawamura, M. : Fundamental Studies of the Fabric of Soil-Cement Mixture and its Mechanical Properties, Ph. D. Thesis, Kyoto Univ., 1970.
- 5) Diamond, S. and Kinter, E. B. : Mechanisms of Soil-Lime Stabilization, Highway Research Record, No. 92, pp. 83~92, 1966.
- 6) Ingles, O. G. and Metcalf, J. B. : Soil Stabilization, Butterworths Pty. Limited, 1972.
- 7) 松尾新一郎・宋 永焜：X線および電子顕微鏡による石灰安定処理土の構造的な研究, 土木学会論文報告集, No. 193, pp. 59~68, 1971.
- 8) 嘉門雅史：土の構成式に関する現況総括・2. 粘性土の微視的構造について, 土質工学会論文報告集, Vol. 18, No. 2, pp. 75~79, 1978.
- 9) Diamond, S. : Pore Size Distributions in Clays, Clays and Clay Minerals, Vol. 18, pp. 7~23, 1970.
- 10) Portland Cement Association : Soil-Cement Laboratory Handbook, Portland Cement Association, pp. 16~28, 1971.
- 11) Williams, R. I. T. : Cement-Treated Pavement, Materials, Design and Construction, Elsevier Applied Science Pub., pp. 244~286, 1986.
- 12) 佐藤和義・小西英一郎：改良土の強度発現に及ぼすスラグの効果, セメント技術年報, No. 38, pp. 520~523, 1984.
- 13) 齊藤 聡・白井克巳：普通ポルトランドセメントとスラグ系セメントを用いた改良土の効果特性, セメント技術年報, No. 38, pp. 524~527, 1984.
- 14) 土質工学会・安定処理土基準化委員会：安定処理土試験方法基準(案), 安定処理土の試験方法に関するシンポジウム発表論文集, pp. 1~14, 1980.
- 15) 鳥居和之・川村満紀：深層混合安定処理土の強度と微視的構造, 日本材料学会土質安定材料シンポジウム論文集, pp. 43~48, 1987.
- 16) 喜田大三・久保 博・漆原知則：弾性波試験による安定処理土の強度測定, 第17回土質工学研究発表会講演集, pp. 2569~2572, 1982.
- 17) Dempsey, D. J. et al. : Vacuum Saturation Method for Predicting Freeze-thaw Durability of Stabilized Materials, Highway Research Board, No. 442, pp. 44~57, 1973.
- 18) Diamond, S. : Microstructure and Pore Structure of Impact-Compacted Clays, Clays and Clay Minerals, Vol. 19, pp. 239~249, 1971.
- 19) 西田一彦・青山千彰：締め固め土の間隙構造と水分状態について, 第30回土木学会年次講演会講演概要集, pp. 393~395, 1975.
- 20) 久楽勝行・吉岡 淳・石塚広史：安定処理した砂質土の透水性について, 第18回土質工学研究発表会講演集, pp. 1531~1532, 1983.
- 21) Garcia-Bengochea, I. et al. : Pore Size Distribution and permeability of silty clays, Proc. of A. S. C. E., Vol. 105, GT7, pp. 839~856, 1983.

(1988. 1. 6・受付)