

セメント混合・加圧脱水処理による高含水粘性残土の改良に関する実験的研究

曾我部博¹・相原篤郎²・山田清臣³・斎藤聰⁴・山崎之典⁵

¹正会員 東京都下水道局長 (〒163-01 東京都新宿区西新宿 2-8-1)

²正会員 東京都下水道局 計画部技術開発課係長 (〒163-01 東京都新宿区西新宿 2-8-1)

³正会員 工博 日本大学教授 理工学部土木工学科 (〒101 東京都千代田区神田駿河台 1-8)

⁴正会員 工博 (株)竹中工務店 技術研究所主任研究員 (〒270-13 千葉県印旛郡印西町大塚 1-5)

⁵日本セメント株式会社 中央研究所建材研究部部長 (〒135 東京都江東区清澄 1-2-23)

掘削された高含水比の軟弱な粘性土やシールド工事から発生する余剰泥水などを、埋戻し材や路盤材として利用できる土質改良技術を開発した。この技術は、土と土質改良材(セメント)をそれぞれスラリーの状態で混合し加圧脱水して改良土とするもので、次いで用途に合わせてこの改良土を粒状に解砕・分級するものである。本論文では、この土質改良の原理と、室内試験により改良土の脱水特性、強度特性および材料特性を明らかにし、都市における新たな建設資源として評価した。

Key Words: cement stabilized soil, soft clay, slurry, high pressure dewatering, back filling material

1. はじめに

都市基盤施設の整備や更新などにともなつて大量の残土が発生するが、この処分を的確に行うことが建設事業において重要な要素になっている。建設残土は、その処分地の不足や運搬に伴う公害など社会問題となっていることから、平成3年には「再生資源の利用の促進に関する法律」が制定され、平成6年には「建設発生土利用技術マニュアル」¹⁾が建設省においてとりまとめられるなど、その発生抑制とともに再生利用が求められている。また、建設発生土の資源化は砕石や山砂の採取を抑制することから、平成5年に制定された「環境基本法」でいう「自然環境が適正に保全されるよう、大気、水、土壌等の自然的構成要素が良好な状態に保持されること」にもつながるものである。

建設発生土の資源化技術の開発に関しては、近年軟弱な粘性土系の発生土等にセメント系固化材と泥水(または水)を加えて混合し流動性と自硬性を持たせ、締固めを必要としない流動化処理土の技術開発²⁾が行われており、また発生土を乾燥した後、1,200~1,500°C程度で熔融処理してスラグ化し、破砕分級装置により細粒材とする研究³⁾などが進められている。

東京都下水道局では、下水道の整備に伴って大量の建設残土が発生することから、砂質土系の残土については

生石灰により安定処理する技術の開発を行い、昭和63年より下水道管の埋戻し材として利用している⁴⁾。しかし、高含水の軟弱な粘性土やシールド工事などからのベントナイトを含まない泥土・泥水(以下本論文では「軟弱粘性土」と称する)は、安定処理が困難であることなどから、専らそのまま最終処分されている。

筆者らは、このような軟弱粘性土の改良に関し、砕石あるいは砂の代替材とすることなどを旨として、軟弱粘性土にセメントを添加し、加圧脱水して改良するセメント混合・加圧脱水処理法を提案してきた^{5)~7)}。

本論文では、このセメント混合・加圧脱水処理法(以下、「本法」と呼ぶ)の特徴について述べた後、改良の原理について考察する。次いで、脱水改良土の脱水特性、強度特性および材料特性を検討し、本法が軟弱粘性土の資源化技術として有効であることを明らかにする。

なお、本論文では、加水などしてスラリー状とした土を「ソイルスラリー」、セメントに加水しスラリー状としたものを「セメントスラリー」、この両者を混合したものを「ソイルセメントスラリー」、これを加圧脱水した脱水ケーキを「脱水改良土」、そして粒状に解砕(圧縮、曲げ、せん断などの力を加えて原料の大きさを小さくすること)したものを「粒状改良土」と呼ぶこととする。また、セメント添加率 a_w は、土粒子質量に対するセメント質量の百分率を示すものとする。

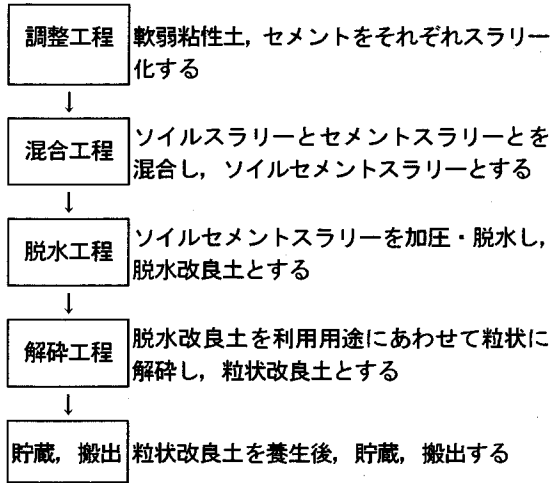


図-1 セメント混合・加圧脱水処理法の基本的フロー

2. セメント混合・加圧脱水処理法の特徴

軟弱粘性土に土質改良材(セメント)を粉体のまま均質に混合することは困難であることから、これを解決する方法として、本法では土とセメントをそれぞれスラリーの状態に混合し、均質なソイルセメントスラリーとする。そして、それを加圧脱水して密実化した脱水改良土とし、利用用途にあわせて粒状に解砕、分級し、養生を行う。本法の基本的なプロセスは、図-1のとおりである。

従来、軟弱粘性土を脱水固化する場合、PAC(ポリ塩化アルミニウム)などを使用し、 $5\text{kgf/cm}^2(0.49\text{MPa})$ 程度の圧力で行われている。この方法によると脱水時間は約60~90分程度、得られる脱水ケーキの含水比は50~120%、液性指数は0.5~0.9、一軸圧縮強さは $0.3\sim 2.0\text{kgf/cm}^2$ と報告されている⁹⁾。

本法が、従来の固化技術と異なるのは、一般的な普通ポルトランドセメントを使用し、高い圧力で脱水するところにある。試料土の厚み、ろ室容量にもよるが、セメント添加率 $a_w=10\sim 20\%$ 、脱水圧力 $40\text{kgf/cm}^2(3.92\text{MPa})$ の場合、脱水時間は10~20分程度と大幅に短縮され、脱水直後の脱水改良土は含水比で30~40%、一軸圧縮強さは $20\sim 40\text{kgf/cm}^2(1.96\sim 3.92\text{MPa})$ となる。この結果、含水比の高い軟弱粘性土が極めてハンドリングの良い材料となり、建設資材として利用が可能となるものである。

なお、本実験で用いた試料土の土質性状を表-1に示す。試験は土質工学会基準により行った。これらの試料土はいずれも沖積土で、採取地の地名をとって、川崎土、錦糸町土、大手町土、浮間土と呼ぶこととする。川崎土は神奈川県川崎港の海底面下数mの海底土であり、他の試料土は東京都内の陸上土である。大手町土は、他と比較して砂分の含有量が大きくなっている。

表-1 試料土の土質性状

項目	試料土名称			
	川崎土	錦糸町土	浮間土	大手町土
自然含水比 w (%)	102.3	69.4	83.0	36.2
土粒子の密度 ρ_s (g/cm^3)	2.633	2.620	2.631	2.660
液性限界 w_L (%)	71.8	47.5	82.7	38.5
塑性限界 w_p (%)	34.4	29.1	39.9	23.3
塑性指数 I_p	37.4	18.4	42.8	15.2
粒度組成	砂分含有率 (%)	4	11	3.1
	シルト分含有率 (%)	45	55	46.6
	粘土分含有率 (%)	51	34	50.3
強熱減量 (%)	10.9	7.36	9.13	7.44

3. セメント混合・加圧脱水処理法の改良原理

本法でセメント混合土の脱水時間が短縮されることおよび高強度の改良土が得られるのは、セメントの添加により土粒子が凝集し、フロックが形成され透水係数が増大する脱水助剤効果とセメンテーションおよび高圧脱水による密実化と考えられる。この土質改良原理を明らかにするため、以下の検討を行った。

(1) セメントの脱水助剤効果の検討

セメントの脱水助剤効果は、セメント成分の溶解により陽イオンが生成して粘土粒子が凝集することによるものか、あるいはセメント粒子が粘土粒子の間に加わる粒子効果によるものかについて、これらを明らかにするため、粘性土の懸濁液を作製して沈降試験を行った。

a) 実験概要

試料土は含水比を110%に調整した浮間土を用い、凝集効果を確認するため、懸濁液となるよう含水比を1,000%とした。表-2の5ケースについて、各ケースとも約860mlの水を用意し、約800mlの水で懸濁液を作成しておき、残りの約60mlの水と添加材を混合したものを各懸濁液に加え、小型のハンドミキサーで5分間攪拌した後、目盛り部の高さが約305mmの1,000mlのメスシリンダーに注いだ。注ぎ終わった時点から沈降状況の観測開始とし、1,440分経過時まで観測した。

b) 実験結果と考察

懸濁液中の粒子が凝集し沈降するときには、これらと上澄液の間に明瞭な境界面が現れ界面沈降状態となることから⁹⁾、界面沈降状況を中心として観察した。図-2に120分経過時までの界面沈降結果とその近似曲線を示す。

ケース1のソイルスラリーの場合、10分頃より界面沈降状態となり最終界面は水面から約210mmとなった。ケース2のセメント5%添加とケース4の消石灰4.5%添加についてはほぼ同様の沈降状況であった。ケース3のセメント20%添加では、初期の段階から界面沈降状態となり、10分頃より沈降が遅くなり、120分後には沈降は止まり、

表-2 沈降実験条件

ケース	試料	添加材添加率
1	粘性土	—
2	粘性土+セメント	5%
3	〃 + 〃	20%
4	〃 + 消石灰	4.5%
5	〃 + 珪石	20%

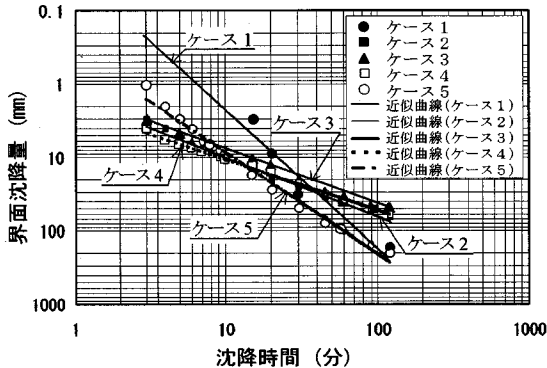


図-2 界面沈降量と沈降時間との関係

最終の沈降量は50mmであった。ケース2~4で沈降時間と沈降量について、両対数で相関関係が認められた。ケース5は、粘性土に粗粒子であるセメント粒子(0.3~90 μm 程度)と同径の珪石粉を添加したものである。これは粒子効果による粘土粒子の凝集を確認するため、開始10分頃まではセメント添加のケースと類似した沈降を示したが、それ以降はケース1と同様の沈降状況となった。なお、セメントおよび消石灰を添加したケースでは上澄部は清澄であったが、ケース1と5では微粒子の浮遊が認められた。以上のことからすると、粘性土にセメントを混合するとセメントからCa, Na, K等の陽イオンが溶出し、これにより粘性土に含まれる粘土等のコロイド微粒子が凝集し、フロックができたと考えられる。コロイド微粒子はフロックに取り込まれて粘性土を間隙の多い凝集体にし、目詰まりが少なくなり水も移動しやすくなる。これを裏付けるようにセメントおよび消石灰を添加したケースでは沈降界面には水の抜け出したことによる小孔(水道)が生成した。写真-1はケース3の最終界面状況で、セメントによる粘土粒子の凝集作用は、脱水助剤として大きな効果を上げていることがわかる。

(2) セメント水和物の観察および同定

軟弱粘性土の構成鉱物とセメントが反応して改良土の強度の発現する内容を明らかにするため、X線回折によるセメント水和物の同定および走査形電子顕微鏡を用いて粘土粒子間の架橋状況を調査した。

a) 実験概要

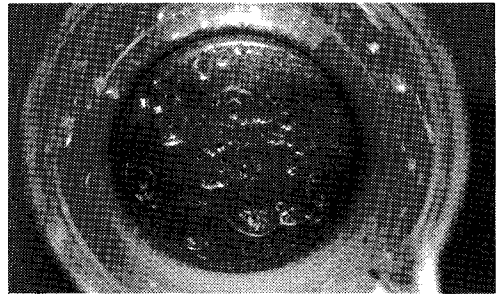


写真-1 セメント添加懸濁液最終界面状況

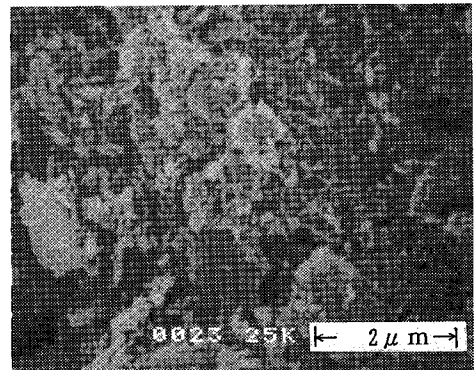


写真-2 脱水改良土SEM像

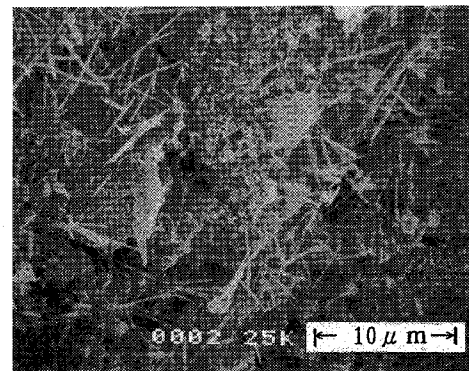
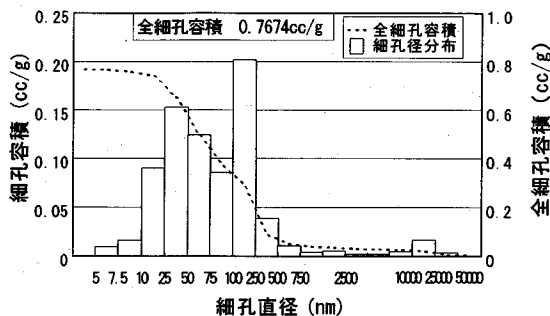


写真-3 脱水改良土内部の針状結晶

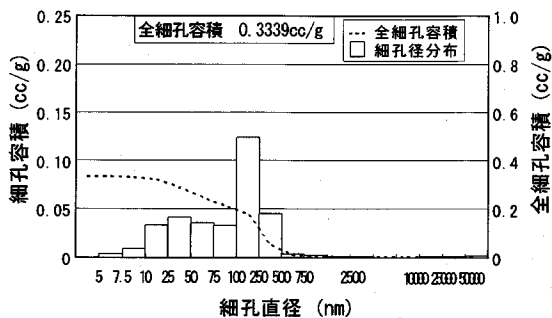
脱水改良土は、含水比を250%とした浮間土に普通ポルトランドセメントを20%添加(水セメント比60%)、脱水圧力40 kgf/cm^2 (3.92MPa)で作製した。分解能は9nmである走査形電子顕微鏡によりSEM像の観察を行い、またX線回折装置により水和物の同定を行った。

b) 観察および実験結果

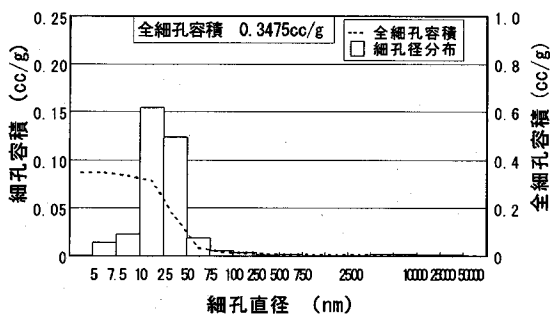
材令28日まで水中養生した脱水改良土の走査形電子顕微鏡観察結果の一例を写真-2と3に示す。脱水改良土には密実な組織が形成されていることが認められ(写真-2)、また、エトリンガイト様の針状結晶が観察された(写真-3)。X線回折により、浮間土の構成鉱物として石



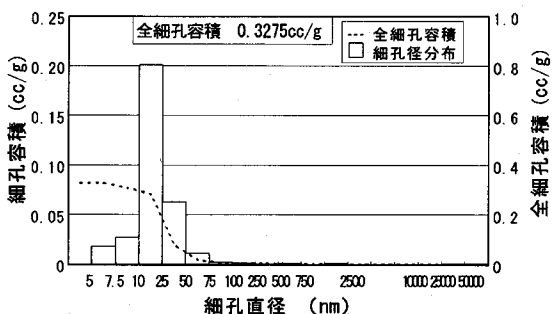
(a)セメント添加率 20%-無加圧(材令 7日)



(c)セメント無添加-脱水圧力 40kgf/cm²(材令 7日)



(b)セメント添加率 20%-脱水圧力 40kgf/cm²(材令 7日)



(d)セメント添加率 20%-脱水圧力 40kgf/cm²(材令 28日)

図-3 細孔径分布と細孔容積

英, 長石, イライト, 白雲母およびハロイサイトを同定した。また、セメント水和物としては、C-S-H (カルシウムシリケート水和物) およびエトリンガイトに相当するピークが認められた。これらのことから、セメント水和物は、土粒子間隙に生成して脱水改良土の結合性を高め、強固な骨格を形成し、改良土の強度、性質を改善しているといえる。

(3) 高圧脱水効果の検討

a) 細孔径分布測定

加圧脱水は強制した圧密現象と捉えることができる。加圧(載荷)により間隙水が排出され、間隙が減少して密実(圧密)化し、含水比も低下することにより高強度化するものと考えられる。そこで、加圧・無加圧それぞれの固結体内部の微視的組織を明らかにするため、水銀圧入式ポロシメータにより細孔径空隙の分布測定を行った。測定圧力範囲は約 0.08~207MPa、細孔直径測定範囲は約 7.5nm~300 μm である。試料は浮間土を用い、含水比を無加圧では 110%、40kgf/cm²(3.92MPa)加圧では 250% に調整し、セメントの添加率は無添加および 20% 添加として改良土を作製し、所定材令まで養生後、5mm 角に破碎してアセトン浸漬を 3 回繰り返して、48 時間真空乾燥した。

b) 細孔空隙について

図-3(a)はセメント添加率 20%-無加圧の場合、図-

3(b)はセメント添加率 20%-40kgf/cm²(3.92MPa)で加圧脱水した場合の、それぞれの細孔径分布、細孔容積である。図-3(a), (b)から、加圧脱水により、脱水改良土の全細孔容積は半分以下に減少し、細孔径も 75nm 以上の細孔が消失して、主な分布範囲も 7.5~2,500nm から 7.5~75nm に移行していることがわかる。

図-3(c)にセメント無添加-脱水圧力 40kgf/cm²(3.92MPa)の場合の細孔径分布、細孔容積を示す。図-3(b), (c)は脱水圧力はともに 40kgf/cm²(3.92MPa)で全細孔容積はほぼ同じである。この両図から、セメントを添加した効果として、細孔径の主な分布範囲が 7.5~500nm から 7.5~50nm に移行し、50~750nm の細孔が消失して 10~50nm の細孔が増大しており、特にそのピークは 10~50nm の極めて狭い範囲となっていることが注目される。全細孔容積はほぼ同じであることから、セメントの添加により間隙がセメント水和物により架橋され、より細小化したものと判断される。材令の違い-7 日と 28 日-による細孔径分布、細孔容積を比較すると、セメント 20% 添加-脱水圧力 40kgf/cm²(3.92MPa)で作製した改良土について、図-3(b), (d)から、全細孔容積が減少し、また 25~75nm の細孔が減少していることから、間隙がセメント水和物により充填されたものと判断される。セメントの水和に必要な水量は、セメントの重量に対して 40%といわれている¹⁰⁾ことから、水セメント比(W/C)が 40%を越える場合には水和に要する水量以上の水

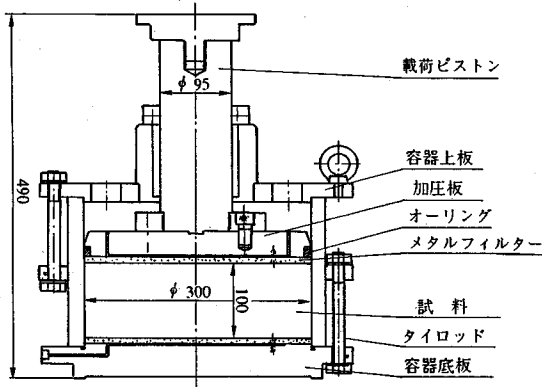


図-4 大型圧密容器

は、余剰水としてその水の占めている部分は空隙となり、セメント粒子間の距離も広がる¹¹⁾とされている。粘性土にセメントを添加し加圧脱水することにより間隙量が大幅に減少するが、注目すべきことは間隙寸法がより小さくなっていることである。

以上のことから、軟弱粘性土を加圧脱水する場合にセメントを添加すると、含水比の低下とセメントの水和に不要な水分の除去およびセメント水和物による間隙量の減少と間隙がより細小化することにより、密実な高強度の脱水ケーキが作製されることが明らかとなった。

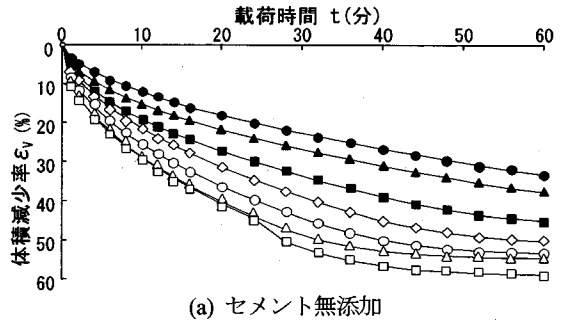
4. セメント混合土の加圧脱水特性

本法における脱水効率、土の厚み、セメントの種類と添加率および載荷（脱水）圧力に左右されるものと想定される。土の厚みは改良後の利用用途と生産量に係ることとなる。また、脱水圧力の増加は装置が大型化することから、実用的な圧力を設定することが必要となる。

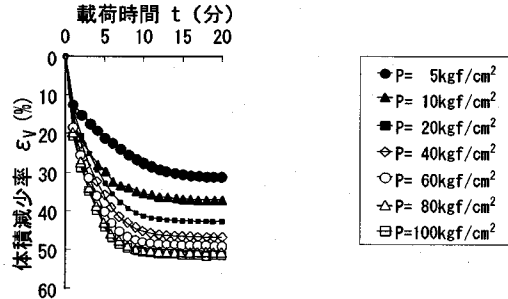
このような観点から、土の種類、セメントの種類・添加率、載荷圧力・載荷継続時間をパラメータとしてセメント混合土の加圧脱水特性の検討を行った。

(1) 実験概要

図-4 に加圧脱水に使用した大型圧密容器を示す。この容器による供試体は、直径 30cm、初期高さ最大 10cm である。高い圧力で載荷するので、圧密容器の加圧板の側面から試料が噴出しないようにオーリングを用いている。載荷装置の最大荷重は 70t(686kN)、最大載荷圧力は約 100kgf/cm²(9.8MPa)である。載荷重の測定にはロードセル、鉛直変位の測定には 1/1,000mm 精度の変位計を使用した。実験に用いた土は表-1 に示すとおりで、使用したセメントは普通ポルトランドセメント(OPC)および高炉セメントB種(PS C)である。



(a) セメント無添加



(b) セメント 20%添加

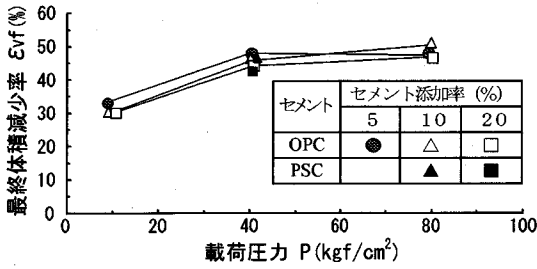
図-5 載荷圧力と載荷時間、体積減少率の関係

供試体の作製について、セメント添加率は 0.5, 10, 20% とし、川崎土と錦糸町土は自然含水比、浮間土は 110%、大手町土は 60%に含水比を調整してソイルスラリーとし、これらと水セメント比 (W/C) 60%のセメントスラリーとを 5 分間混合後、大型圧密容器にセットした。無加圧($p=0\text{kgf/cm}^2$)の試料については、土質工学会基準「安定処理土の締め固めをしない供試体の作製方法」(JSF-T-821-1990)により作製した。各供試体への載荷圧力はそれぞれ 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100kgf/cm²(0.49, 0.98, 1.96, 3.92, 5.88, 7.84, 9.8MPa)とし、載荷時間はセメント添加では 20 分間、セメント無添加では比較対照のため 60 分間とした。セメント添加土の「圧密(脱水)終了時間」は、載荷(脱水)時間 20 分時の沈下量を 100%とした時の 99%の沈下量になった時間とし、その時の体積減少率を最終体積減少率(ε_v)とした。急速載荷により直に所定の圧力に達することから載荷圧力は一定として、時間経過に伴う鉛直変位量を測定し、体積減少率 ε_v (=鉛直変位量 S/供試体初期高さ h₀)を算出した。また、脱水直後の改良土から供試体採取して含水比、湿潤密度を測定した。

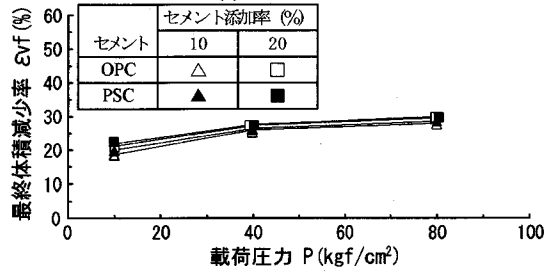
(2) 実験結果および考察

a) 載荷圧力と体積減少率、圧密終了時間

図-5 は、川崎土について載荷圧力ごとに、セメント無添加土とセメント混合土の載荷時間と体積減少率の関係を示したものである。



(a) 浮間土



(b) 大手町土

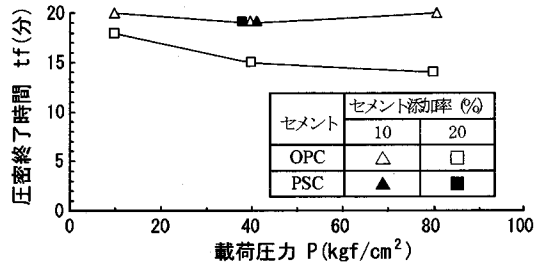
図-6 載荷圧力と最終体積減少率との関係

図-6 および 7 は、浮間土と大手町土についてセメントの種別・添加率ごとに、載荷圧力と最終体積減少率 (ϵ_{vf}) および圧密終了時間との関係を示したものである。

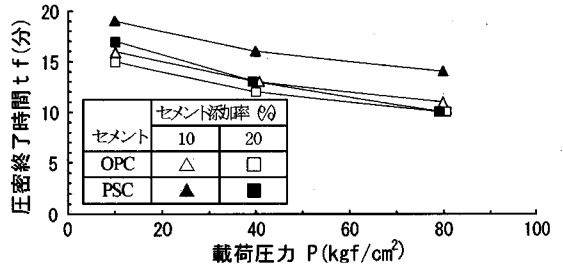
セメント混合土の圧密終了時間は、第3章で述べたセメントの脱水助剤効果によりセメント無添加の場合と比較して大幅に短縮する。載荷圧力の増加と共に最終体積減少率は増大するが、載荷圧力 40kgf/cm^2 (3.92MPa) 以上においてはその増加率は徐々に小さくなる。脱水改良土の最終体積減少率に及ぼすセメント添加率の影響は少ない。また、普通ポルトランドセメント(OPC)および高炉セメントB種(PSC)の間には顕著な差がみられない。圧密終了時間は、セメント添加率および載荷圧力の両者に依存するが、それらの影響の度合いは、浮間土のPSCの場合を除き、細粒分が多い土ではセメント添加率の方が大きく、細粒分が少ない土では載荷圧力の方が大きい傾向にある。このことは、セメント添加率の増大につれ、セメントからのCa, Na, K等の陽イオンが増大するので、粘性土の場合は凝集効果が高まり圧密終了時間が短縮されるが、砂質土ではこれらの陽イオンによる凝集効果が少ないので圧密終了時間の短縮はわずかであると考えられる。

b) 載荷圧力と湿潤密度, 含水比

脱水直後の脱水ケーキの状態での脱水改良土について、載荷圧力と含水比の関係を図-8に、載荷圧力と湿潤密度の関係を図-9に示す。これらの図から、脱水改良土の含水比および湿潤密度は、載荷圧力が0から $10\sim 20\text{kgf/cm}^2$ ($0.98\sim 1.96\text{MPa}$) の範囲では大きく変化しているが、 40kgf/cm^2 (3.92MPa) 以上の範囲での変化の度合い



(a) 浮間土



(b) 大手町土

図-7 載荷圧力と圧密終了期間との関係

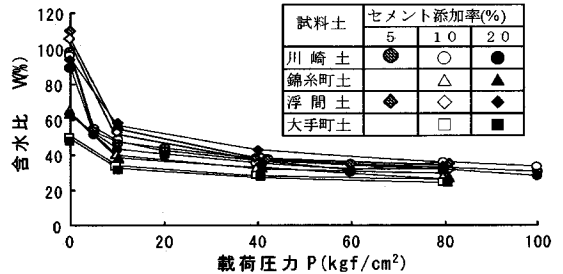


図-8 載荷圧力と含水比との関係

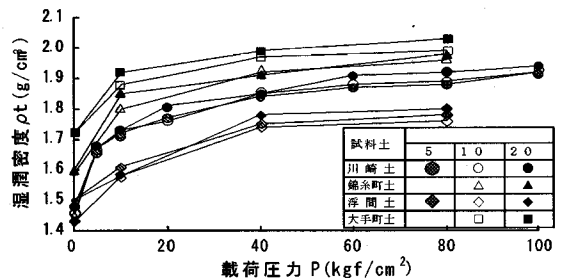


図-9 載荷圧力と湿潤密度との関係

小さいことが分かる。脱水改良土の含水比は、載荷圧力の増加と共に減少して、載荷圧力が 40kgf/cm^2 (3.92MPa) 以上ではほぼ $30\sim 40\%$ の比較的狭い範囲にある。

5. 脱水改良土の強度特性

(1) 実験概要

本法による脱水改良土の強度に及ぼす基本的な因子

表-3 セメントの種類の違いによる脱水改良土の強度の比較

試料土の種類	セメント添加率 $a_w(\%)$	$Q_u(psc)/Q_u(opc)$	
		$p=0(\text{kgf/cm}^2)$	$p=40(\text{kgf/cm}^2)$
浮間土	10	0.37	0.7
	20	0.64	0.5
大手町土	10	0.47	0.7
	20	1.39	0.8

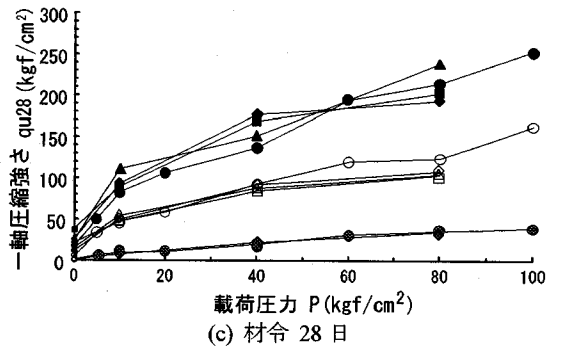
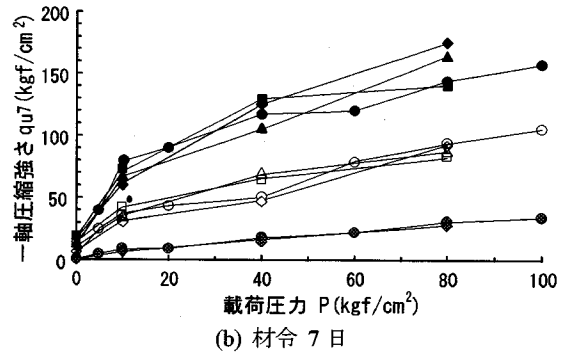
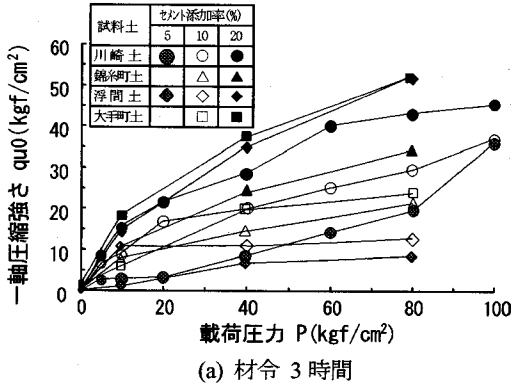


図-10 載荷圧力と脱水改良土の一軸圧縮強さとの関係

は、土質性状と添加するセメントの種類・添加率、載荷(脱水)圧力であると考えられる。そこで脱水改良土の強度特性を明らかにするため、得られた脱水改良土から材令3時間、7日、28日にコアを圧縮と直角方向に抜き取り、端面を整形して直径2cm、高さ4cmの供試体を10~12本作成し、一軸圧縮試験(土工学会基準)を行った。なお、脱水ケーキの養生は水中養生とした。

(2) 実験結果と考察

a) セメントの種類が強度に及ぼす影響

表-3に同一セメント添加率および同一材令28日で、ポルトランドセメント(OPC)およびB種高炉セメント(PS C)を用いて作製した浮間土と大手町土の脱水改良土の一軸圧縮強さ q_u の比較を示す。なお、同表には無加圧の場合のセメント改良土の試験結果も合わせて示す。

同表から、加圧なしの場合で、細粒分の少ない大手町土で作成した脱水改良土の一部ではB種高炉セメントの方が効果的な場合もあるが、加圧した場合には4ケースとも普通ポルトランドセメントの方が効果的であった。このことから、今回実験に用いた試料土と粘土鉱物組成が近いと想定される首都圏の粘性土を対象とする場合には、ポルトランドセメントの方が効果的であると

判断される。

b) セメント添加率および載荷圧力が強度に及ぼす影響

図-10にセメント添加率と載荷圧力を変えて作製した脱水ケーキの一軸圧縮強さの関係を示す。同図の q_{u0} 、 q_{u7} 、 q_{u28} はそれぞれ材令3時間、7日、28日における脱水ケーキの一軸圧縮強さである。

同図から、セメント混合土は加圧脱水処理することによって、その強度が著しく増大することがわかる。例えば、載荷圧力が $40\text{kgf/cm}^2(3.92\text{MPa})$ の場合、加圧なしと比較した一軸圧縮強さ q_{u28} は約4~16倍にもなっている。このことは、第3章改良原理で明らかのとおり、加圧脱水がセメント混合土の強度を増大させる極めて有効な手段であることを示すものである。

また、材令7日および28日における脱水改良土の一軸圧縮強さは、図-10(b)および(c)から土の種類によらず、セメント添加率および脱水(載荷)圧力により、ほぼ決まることがわかる。この傾向は、図-10(a)から材令3時間の時点で現れているといえる。

c) セメント改良土の含水比と強度との関係

載荷圧力が脱水ケーキの一軸圧縮強さに及ぼす影響度合いは、載荷圧力が $20\text{kgf/cm}^2(1.96\text{MPa})$ 程度までは著しく大きく、 $20\text{kgf/cm}^2(1.96\text{MPa})$ 以上においても大きな増加率を示している。この $20\text{kgf/cm}^2(1.96\text{MPa})$ 以上の載

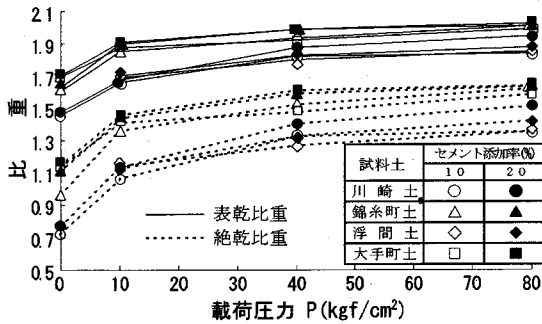


図-11 絶乾比重および表乾比重と載荷圧力との関係

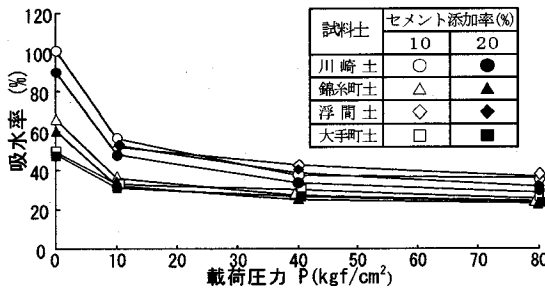


図-12 載荷圧力と吸水率との関係

荷圧力における強度増加率は、図-9の含水比の低下と対照的で、わずかの含水比の低下が脱水改良土の強度を増大させている。

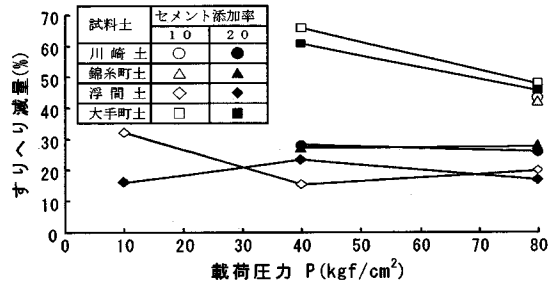
6. 粒状改良土の材料特性の検討

本法による粒状改良土の利用用途として、骨材あるいは砕石の代替材としての使用が考えられることから、その基本的な材料特性として、比重・吸水率、すり減り減量、破碎率、スレーキング、乾湿繰り返し、耐海水性およびCBRを取り上げ、検討を行った。

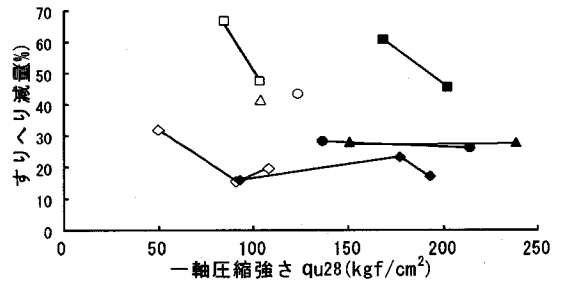
(1) 実験概要

セメントは一部の試験を除いて普通ポルトランドセメントを使用し、前掲の4種類の試料土により作製した粒状改良土に対し、比重、吸水率およびすり減り減量についてはJIS規格、破碎とスレーキングおよび乾湿繰り返し試験については日本道路公団基準、CBR試験については日本道路協会基準に従って実施した。

粒状改良土が塩水化した地下水中や海水中で使用されることを想定して以下の手順で耐海水性試験を行った。脱水直後の改良土を水道水で7日水中養生後2cm角のサイコロ状にカットし、これを200mlの海水を入れたプラスチック容器中で水中養生を続けた。この容器を1週間に1度、5分間振とう後、粒状改良土の表面をふきとり質量を測定し、この操作を繰り返した。なお、海



(a) すり減り減量と載荷圧力との関係



(b) すり減り減量と一軸圧縮強さの関係

図-13 すり減り減量と載荷圧力および一軸圧縮強さ

水は4週間毎に新鮮なものに取り替えた。

CBR試験に用いた粒状改良土は浮間土から作製したもので、M-30は粒度調整砕石の呼称であるが、ここではアスファルト舗装要綱(日本道路協会)での粒度範囲になるよう粒度を調整した粒状改良土を砕石と同様に呼ぶこととした。

(2) 実験結果および考察

a) 比重・吸水率

図-11に粒状改良土の絶乾比重および表乾比重と載荷圧力との関係を示す。図-12に粒状改良土の吸水率と載荷圧力との関係を示す。

絶乾比重は載荷圧力と共に増大し、載荷圧力40kgf/cm²(3.92MPa)では1.27~1.61の範囲にある。吸水率は載荷圧力と共に減少し、載荷圧力40kgf/cm²(3.92MPa)では25~42%の範囲にある。このことから、絶乾比重と吸水率との関係は載荷圧力に対してほぼ一義的に逆のパターンとなっている。他の天然あるいは人工骨材での絶乾比重は、砕石で2.5~2.7、天然軽量骨材で0.9~1.9、人工骨材で1.2~1.3である。吸水率は、砕石で0.5~2%、天然軽量骨材で15~50%、人工骨材で2~5%である¹²⁾。

これらからすると、粒状改良土の絶乾比重は砕石に比較して小さく、吸水率は砕石に比較して大きく、天然軽量骨材に近いといえる。

b) すり減り減量

図-13にすり減り減量と載荷圧力および一軸圧縮強

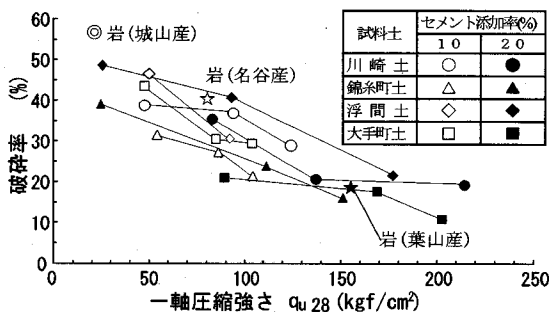


図-14 破碎率と一軸圧縮強さとの関係

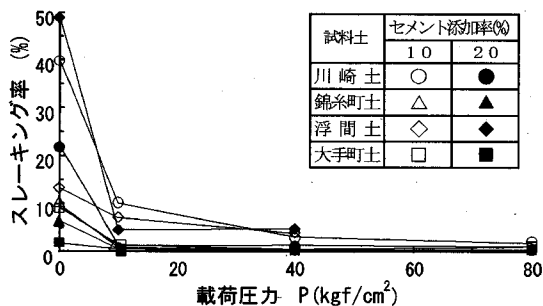


図-15 載荷圧力とスレーキング率との関係

さとの関係を示す。同図から、粒状改良土のすり減り減量は試料土およびセメント添加率によって異なっていることがわかる。

大手町土のように砂分が比較的多い粒状改良土では、その一軸圧縮強さが大きくても、すり減り減量は40%を超えている。これは、砂質土系の粒状改良土は粒径の大きい土粒子が多いことから土粒子間隙が大きく、セメント水和物が架橋しにくいため、土粒子の結合が弱く、繰返しの衝撃力に対して弱いと判断される。

粘性土系の粒状改良土で、セメント添加率 $a_w=20\%$ では多くの機関で採用している材料基準のすり減り減量35~40%以下を満足している。ただし、粒状改良土の強度を増大しても必ずしもすり減り減量の大幅な低下には結びついていない。

c) 破碎, スレーキング, 乾湿繰返し

図-14 に粒状改良土の破碎率と粒状改良土の一軸圧縮強さの関係を示す。また、日本道路公団試験所の脆弱岩の例¹³⁾も合わせて示す。同図から、粒状改良土の一軸圧縮強さが増大するにつれ破碎率は減少し、破碎率は一軸圧縮強さにより概略決まると判断される。また粒状改良土は、同図に示すように盛土材として現地で調達する脆弱岩などの破碎率の範囲にある。

図-15 に載荷圧力と粒状改良土のスレーキング率の関係を示す。同図より、セメント混合土は加圧脱水によりスレーキングが大幅に改善されることがわかる。

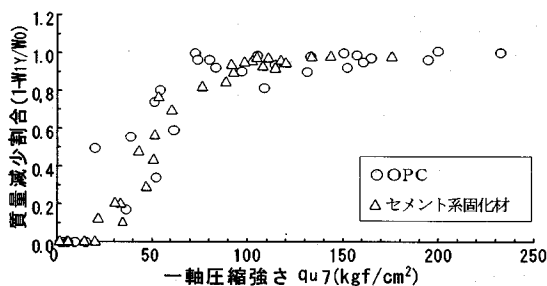


図-16 粒状改良土の耐海水性

表-4 CBR試験結果

粒状改良土	最適含水比 Wopt(%)	修正 CBR (%)	CBR(%) (突固め回数92回,42回のCBRの平均値)
M-30 相当 (aw=10%)	40	51	81
M-30 相当 (aw=20%)	39	70	133

乾湿繰返し試験は、材料に一定荷重をかけた状態で100℃乾燥、20℃水浸を繰返し、測定した軸ひずみから細粒化の進行を評価するもので、セメント添加率 $a_w=10\sim20\%$ 、脱水圧力 $10\sim80\text{kgf/cm}^2$ (0.98~7.84MPa) で作製した改良土は、最初の乾湿繰返しで2~4%程度の軸ひずみが生ずるもののそれ以降5%を越えることはなかったことから、細粒化しにくい材料であるといえる。

日本道路公団ではスレーキングを起こしやすい材料はスレーキング率30%以上、乾湿繰返し試験の軸ひずみでは5%以上としている¹⁴⁾ことから、本法で作製する粒状改良土のスレーキングは問題ないといえる。

d) 耐海水性

図-16 に耐海水性試験における粒状改良土の供試体の質量減少割合 $=1-w_{1Y}/w_0$ (ここに w_{1Y} :1年後の供試体質量, w_0 :材令7日の供試体質量) と海水浸漬前の材令7日の供試体の一軸圧縮強さ $qu7$ の関係を示す。この質量減少は、サイコロ状の粒状改良土が海水に劣化されると表面からぜい弱化し、劣化部が海水中に徐々に溶け出して行くことによって生ずる。同図から、一軸圧縮強さの増加と共に供試体の質量減少割合が小さくなることがわかる。このことは、材令7日の一軸圧縮強さが 70kgf/cm^2 (6.86MPa) 程度以上では海水中での粒状改良土の劣化はほとんどないことを示している。

e) CBR試験

表-4 に載荷圧力 40kgf/cm^2 (3.92MPa) で作製した脱水改良土を解砕してM-30相当に粒度調整した粒状改良土のCBRについて試験結果を示す。同表から、セメント添加率 $a_w=10\%$ でも修正CBRは51%であり、各機関が示す下層路盤の材料規定基準値である修正CBR 20~30%以上を満たしている。

7. 結論

本研究では、軟弱粘性土にセメントを混合し、加圧脱水処理する改良技術は、建設資材化技術として有効であることを検証した。主な検討結果は次のとおりである。

(1) 土質改良原理

セメントは、その凝集効果により脱水助剤として土の脱水を促進して密実化に大きく寄与し、またセメント自身の硬化により強度の高い改良土となる。高圧脱水は間隙の絶対量を減少させ、セメント水和物の生成により間隙の細小化が進み、より密実化する。

(2) セメント混合土の脱水特性と強度特性

セメント混合土の脱水時間は、セメント添加率・脱水(載荷)圧力の増大により速められる。ただし、その効果は土によって異なっており、細粒分が多い土ではセメント添加率の影響の方が大きく、粗粒分が多い土では脱水(載荷)圧力の影響が大きい。

脱水改良土の一軸圧縮強さは、土の種類によらず、セメント添加率、脱水(載荷)圧力、材令によってほぼ決まる。今回対象とした土では、使用するセメントとして、脱水改良土の強度の点からB種高炉セメントよりも普通ポルトランドセメントの方が優れていた。

(3) 粒状改良土の材料特性

比重・吸水率は天然軽量骨材に類似する。すり減り減量は、セメント添加率 20%の粘性土系の改良土では 35%以下であるが、砂質土系の改良土ではすり減り減量が大きい。破碎率は一軸圧縮強さとほぼ一義的な関係にあり、一軸圧縮強さが増大するにつれ破碎率は減少する。脱水改良土のスレーキング率は 10%以下、乾湿繰返し試験の軸ひずみも 5%以下であることから、盛土材に使用しても材料の細粒化の問題は生じないといえる。

粒状改良土を海水中または塩水化した地下水下で用いる場合、耐久性の観点からは材令 7 日での一軸圧縮強さは 70kgf/cm^2 (6.86MPa) 以上とする必要がある。

CBR 試験より、セメント添加率 10~20%、圧力 40kgf/cm^2 (3.92MPa) で作製した粒状改良土は、下層路盤材として修正 CBR 値を得ることが確認された。

参考文献

- 1) 建設発生土利用マニュアル検討委員会:建設発生土利用技術マニュアル,建設省大臣官房技術調査室 監修,1994.
- 2) (社)セメント協会:セメント系固材による地盤改良マニュアル,技報堂出版,pp191~199,1994.
- 3) (財)エンジニアリング振興協会:建設汚泥溶解処理によるリサイクルシステムの研究開発調査研究報告書(平成4年度),1993.
- 4) 小山隆紹:東京都の建設残土対策について,月刊下水道 vol.15, No.3, pp.17~20, 1992.6.
- 5) 山田清臣, 中野徹, 斉健一, 斎藤 總:セメント添加土の加圧による強度特性,第25回土質工学研究発表会, pp.1963~1964, 1990.
- 6) 斎藤總, 山田清臣, 出倉正和, 斉健一, 峯岸大介:建設汚泥・残土の有効利用に関する研究(その 1)セメント混合土の加圧脱水特性,土木学会第46回年次学術講演会論文集,第3部, pp1092~1093, 1991.
- 7) 山田清臣, 森田吉見, 相原篤郎, 斎藤總, 瓜生俊次, 藤井義文:高圧脱水による建設発生土の処理,第4回技術研究発表会論文集,アーバンインフラテクノロジー推進会議 pp137~144, 1993.
- 8) 喜田大三, 炭田光輝, 辻博和ほか:泥水シールド工法における砂の除去に関する研究,第17回土質工学研究発表会講演集, pp.1053~1056, 1982.
- 9) 岡田和男編著:下水汚泥の処理処分,環境公害新聞社, pp66~67, 1983.
- 10) W.チュルニン著, 徳根吉郎訳:建設技術者のためのセメント・コンクリート化学, pp.58~67, 技報堂出版, 1969.
- 11) 高橋茂:水和反応生成物と硬化組織,セメント・コンクリート, No.545, July, pp.41~48, 1992.
- 12) 建設材料研究会:コンクリート用材料の物性・購買・管理,技術書院, pp.35, 1983.
- 13) 大住明夫・今川史郎:スレーキング試験の一考察,試験所報告書(昭和52年度),日本道路公団試験所, pp.1~11, 1978.

(1995. 5. 23 受付)

STUDY ON HIGH PRESSURE DEWATERING METHOD OF CEMENT-STABILIZED SOFT CLAY

Hiroshi SOGABE, Atsuo AIHARA, Kiyoomi YAMADA,
Satoshi SAITO and Yukinori YAMAZAKI

We developed a soil stabilization technology to utilize high water content excavated soft clay and excess slurry resulting from the shield method as back filling materials or base course materials. This technology consists of following processes, mixing the soil slurry with cement slurry, dewatering the mixture with a filter press, and crushing and classifying the stabilized soil in accordance with various uses. This study was carried out to make clear the principle of stabilization mechanism, and also the dewatering characteristics of cement-mixed soil, the strength characteristics of dewatered cakes made from mixed soil, and the other mechanical properties of the granulated cakes in laboratory. These result lead to the conclusion that the stabilized soil can be one of the most useful civil engineering materials for earth work.