

# 土の物理化学的性質が改良土の 初期性状と強度に及ぼす影響

青山 要<sup>1</sup>・宮森 建樹<sup>2</sup>・脇山 哲也<sup>3</sup>・菊池 大輔<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 住友大阪セメント(株)セメント営業技術部 (〒101-0054 東京都千代田区六番町6-28)

<sup>2</sup>正会員 工博 日本大学理工学部教授 社会交通工学科  
(〒247-8501 千葉県船橋市習志野台7-21-1)

<sup>3</sup>正会員 住友大阪セメント(株)セメント営業技術部 (〒101-0054 東京都千代田区六番町6-28)

<sup>4</sup>正会員 日本大学大学院理工学研究科社会交通工学専攻  
(〒247-8501 東京都千代田区神田駿河台1-8-14)

地中で改良材を攪拌混合した改良土の品質は、事前の配合試験や改良後の強度試験等により評価しているのが一般的である。同配合、同量の改良材を土と攪拌しても、土の粒度組成等により改良土の強度は異なり、施工面ではワーカビリティ、すなわち土の混ざり具合（攪拌不足）が異なり、硬化後の強度のバラツキに影響を及ぼすことがある。筆者らは、ワーカビリティの改善が硬化後の改良土の品質を向上させるものと考え、特に改良対象土の粘土分の影響に着目して、土の物理化学的特性と改良土の初期性状（まだ固まらない改良土）のせん断強さとの相関を検討した。特に土に含まれる粘土鉱物の種類や表面電荷との関係が大きいことが確認され、改良材開発上の知見を得た。

**Key Words :** cement deep mixing method, clay fraction content of the soil, vane shear test, workability, cation exchange capacity, plasticity index, electric charge

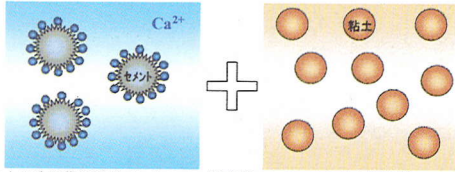
## 1. はじめに

地中で改良材と土を攪拌混合する工法には、セメントまたはセメント系固化材を粉体のまま原地盤と混合する方法と、水と所定の配合でスラリー化した改良材を使用する2種類の方法がある<sup>1)・2)</sup>。地表から深い位置で改良を行う深層混合処理工法やソイルセメントを用いた地中連続壁工法では、一部を除き後者の方法を選択している場合が多い<sup>3)</sup>。深層混合処理工法は、地中で改良対象土と改良材とを攪拌する方式により機械攪拌式と高圧噴射式に大別されている<sup>1)・4)・5)</sup>。改良土の強度については一般に、事前の配合試験を実施して設定している<sup>5)・6)</sup>。機械攪拌式の場合は、改良材の水セメント比(W/C)と時間当りの打設量(吐出量)を対象土に応じて設定するが、噴射攪拌式の場合、打設量は大幅に変更せずに改良材の種類を変更して対応していることが多い。これは、流体の粘性を安定させ、噴射エネルギーの損失を抑えて改良体の有効径を確保するためである<sup>7)・8)・9)</sup>。室内配合試験では、工法により異なる攪拌メカニズムまでを再現できないため、所定の配合で試験用ミキサーを用いて供試体を作製

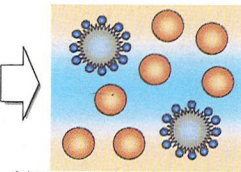
する。このため、現場に比べ攪拌状態が良い状態で供試体を作製され、主に強度試験を重要視している。例えば、財団法人日本建築センターの改良地盤の設計及び品質管理指針<sup>6)</sup>では、土質性状により改良効果に影響を及ぼす要因として、土の塑性指数が大きい土は混合が比較的難しいと述べているが、この評価を行う試験方法については記述されていない。また、財団法人土木研究センターの深層混合処理工法設計・施工マニュアル<sup>1)</sup>においても土質調査の項目で改良対象地盤の化学的性質と物理的性質は改良効果に影響を与える要素であり、改良材の選定や添加量の検討の重要な指標であると述べられているが、配合試験では設計上の強度の指標となる力学試験だけで改良直後から改良土が流体でいられる状態、すなわち「まだ固まらない改良土」のワーカビリティに関する試験については述べていない。他の工法においてもワーカビリティについての評価方法に関する報告は少ない<sup>7)・8)・9)・10)・11)</sup>。

まだ固まらない改良土のワーカビリティとは、一定時間内は流動性を保つことができるということで、特に施工中の攪拌工程では、その時間は長い方が攪拌性は良くなる。流動可能な時間は工法の種類や施

○多価イオンが少ない粘性土(偽凝結しにくい場合)



粘土は陰電荷を帯びているので、陽電荷のセメントと電気的性質により引き合うが陽イオン交換能が小さいため凝集体は形成されにくい。

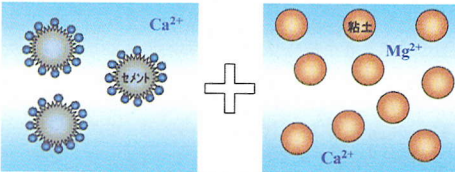


多価イオンが少ないため、カルシウムイオンとの吸着は少なく、時間経過とともに改良材の水和反応により硬化する。

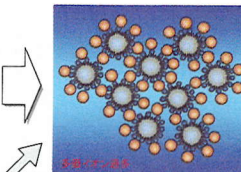


改良土のフロー  
(偽凝結していない状態)

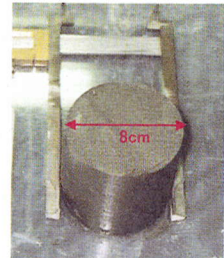
○多価イオンが多い粘性土(偽凝結し易い場合)



粘土は陰電荷を帯びており、陽電荷を帯びているセメントと電気的性質により互いに引き合う。しかし、多価イオンが多く、原子量の大きい陽イオンが存在するので凝集し易くなる。



凝集体はネットワーク化して、土中水を拘束した状態で偽凝結し、極く短時間に改良土は流動性を失う。時間経過とともに、改良材の水和反応により硬化する。



改良土のフロー  
(偽凝結している状態)

図-1 まだ固まらない改良土の偽凝結のメカニズム想定図

工速度により異なる。特に、噴射攪拌工法では混合土の一部をスライム(排土)として地上に排出するため、なるべく流動性を保持している時間は長い方が良い。また、ソイルセメント地中連続壁工法では改良土の攪拌工程完了後においても一定時間流動性を保たないと、芯材を建て込む際に支障を及ぼす場合もあり、配合上の留意事項<sup>12)、13)</sup>として扱っている。本研究では改良対象土によっては、まだ固まらない改良土が極く短時間に流動性を失うことが確認された。筆者らは、この現象を「まだ固まらない改良土の偽凝結」と呼び、改良対象土に含まれている粘土の表面電荷の作用から、偽凝結のメカニズムを想定した。まだ固まらない改良土の流動性および偽凝結は、改良対象土のコンシステンシーと鉱物組成等が大きく影響しているものと考え、改良対象土により異なるまだ固まらない改良土の初期性状および硬化後の強度に及ぼす影響について検討を行ってきた。

粘土分が多く含まれている土の鉱物組成が異なると、土のコンシステンシー特性が大きく異なることが知られており<sup>14)、15)</sup>、土の一次性質(土に固有な性質)<sup>16)</sup>と深く関係があることから、現場から採集した土を使用して、一般に行われている土の物理試験以外に土の粘土分含有率、陽イオン交換容量、電気伝導率、粘土のゼータ電位、X線回折等の室内試験を実施した。この土の物理化学試験結果とまだ固まらない改良土のペンゼン断強さおよび硬

化後の一軸圧縮強さとの相関を検討した。さらに、まだ固まらない改良土の偽凝結のメカニズムを想定し、その対策上の改良材を試作して効果確認を行った。これらの結果から、まだ固まらない改良土のワーカビリティ改善を目的とした改良材の開発に関して、有用な知見を得ることができた。

## 2. 粘土科学からみたまだ固まらない改良土の偽凝結

粘土鉱物は複雑な特性を有する物質<sup>17)</sup>であり、地盤改良前の地山(改良対象土)の多くは粒度構成が異なり、細粒土においても複数の粘土鉱物が含まれていることが多い。まだ固まらない改良土の偽凝結対策を検討するため、土の物理的特性とは別に粘土粒子の表面電荷の作用から偽凝結のメカニズムを図-1に示すように想定をした。改良材のセメントスラリーは、水和反応によりセメント粒子の表面に正の電荷が発生し、お互いにくっつき合って少しでも安定な状態を造ろうとする。特に多価イオンが多い粘性土では、図-1に示す凝集体がネットワーク化して改良土の偽凝結を起こす要因になっているものと考えられる。セメント組成の大半である酸化カルシウムCaOの反応は式(1)のようになり、水和により水酸化カルシウムCa(OH)<sub>2</sub>が生成されることが知られている<sup>18)</sup>。

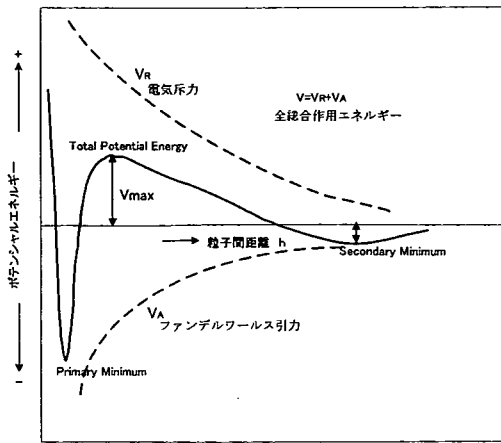
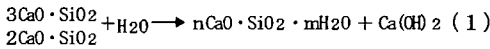


図-2 粒子間にはたらく相互作用のエネルギー<sup>20)</sup>



ここに、 $n$ と $m$ は各分子の数である。

改良土中のセメントの水和によりセメント中のカルシウムイオン $\text{Ca}^{2+}$ を介して粘土が吸着する。土中の多価イオンの種類により、吸着の状態は異なり、多価イオンの少ない土はイオン交換能が低く、改良土の硬化は改良材の水和反応が主になるものと考えられ偽凝結する可能性は小さく、図-1の右上に示す改良土のフロー（多価イオン）の写真のように流動性がある状態になる。（フロー試験は、JHSのシリンダー法に準じて実施したものである。）

土の粒度分布で粘土分が多い場合と少ない場合を比較すると多い方が比表面積は大きく、表面と接している溶液内の物質（水分子やイオンなど）との相互作用から表面電位が量的に増大することを意味する<sup>19)</sup>。すなわち、まだ固まらない改良土の偽凝結は、土の粒度分布とも関係があり、粘土分が多い土の方が偽凝結を起こす可能性が大きくなる。

粘土粒子間の挙動を界面科学的なコロイドの挙動から想定すると図-2のようになる。電荷をもつ2粒子が水中で接近すると、電気二重層の相互作用の電気斥力エネルギー $V_R$ が起きるが、他方の粒子間には普遍的な引力ポテンシャルエネルギー $V_A$ が存在する。両者の代数和として全相互作用 $V$ が求められる<sup>21)</sup>。図-2の粒子間に働く相互作用のエネルギー曲線に示すように、エネルギー障壁 $V_{\text{max}}$ が高いと分散が安定し、低いと凝集が起こりえる状態であるという考え方で、分散力は粒子間に働く引力と斥力の和として得られる。電気斥力ポテンシャルエネルギー $V_R$ についてはいくつかの表現があるが基本的には式(2)で示される<sup>22)</sup>。 $V_A$ および $V$ は

それぞれ式(3)、式(4)に示す。

$$V_R \propto \phi_0^2 \exp(-\kappa h) \quad (2)$$

$$V_A = -A a / 12 h \quad (3)$$

$$V = V_R + V_A \quad (4)$$

ここに、 $V$ ：全相互作用エネルギー、 $V_R$ ：電気斥力エネルギー（電気二重層の相互作用）、 $V_A$ ：ファンデルワールス引力エネルギー（粒子間引力）、 $\phi$ ：表面電位（ $\zeta$ 電位で近似）、 $\kappa$ ：Debye 長さ（拡散電気二重層の厚さ）、 $a$ ：粒子半径、 $h$ ：粒子間距離、 $A$ ：Hamaker 定数である。

DLVO理論では粒子の相互作用に際してはゼータ電位（ $\zeta$ 電位）が変化しないとしている。すなわち、非吸着性の電解質が対象である。しかし、まだ固まらない改良土では改良材が土と接触することにより、溶液の電解質が増えて電気二重層が圧縮され、障壁の高さ $V_{\text{max}}$ が低くなり Primary Minimum（第一極小）へ落ち込んで凝集するものと考えられる。相互作用のポテンシャルエネルギーを $V$ とすると、急速凝集を起こす限界の濃度は、 $V=0$ 、 $dV/dh=0$ となる。Schulze-Hardy（シェルツ-ハーディ）の原子価法則<sup>22)</sup>では、電解質の濃度がある値以上になると凝集するものとして、その濃度は凝集濃度または凝析価<sup>23)</sup>と呼ばれている。凝集濃度は、コロイド粒子と反対側の原子価数の6乗に逆比例して、例えば、原子価が1価、2価、3価の凝集価の比は $1 : (1/2)^6, (1/3)^6$ となる。すなわち、原子価の価数が大きくなるほど凝集濃度は小さくなり、電解質の凝集濃度が小さくても凝集しやすい状態になっているということである。改良材から溶出するカルシウムイオン $\text{Ca}^{2+}$ は2価であるため、土粒子表面の負の電荷量が陽イオン交換反応すると凝集しやすくなる。この現象がまだ固まらない改良土の偽凝結の要因であると考え、改良対象土の負の電荷に相当する陽イオン交換容量と改良土の偽凝結の状態を確認することにより検討できる。

### 3. 試料土と試験概要

#### (1) 試料土

一般的に土の性質を砂質土、粘性土に分けると粘性土は粘着力、圧縮性が大きく、透水性が低く、含水比が高いという性質を持ち、砂質土は内部摩擦角が大きく透水性が高いといった粘性土と異なる性質を持っている<sup>16)</sup>。本研究では、前章で述べたまだ固まらない改良土の偽凝結のメカニズムを明らかに

表-1 試料土のサンプリング場所

採集場所	深度	採集場所	深度
A: 八王子市	GL-5m	M: 三郷市	GL-5m
B: 中野区方南町	GL-30m	N: 足立区六町	GL-3m
C: 久喜	GL-10m	O: 文京区小石川	GL-7m
D: 小山市	GL-8m	P: 栃木市	GL-5m
E: 江東区清澄	GL-5m	Q: 足立区六町c	GL-3m
F: 足立区六町s	GL-3m	R: 港区六本木	GL-9m
G: 宇都宮市	GL-3m	S: 藤岡市	GL-4m
H: 浦和市	GL-4m	T: 所沢市	GL-3m
I: 和光市	GL-10m	U: 大船市	GL-18m
J: つくば市	GL-13m	V: 江東区砂町	GL-4m
K: 大平町	GL-5m	W: 葛生町	GL-8m
L: 台東区東上野	GL-20m		

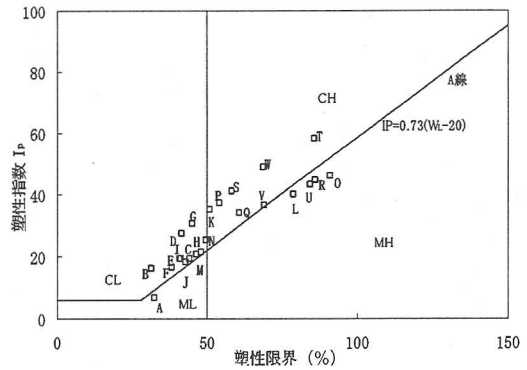


図-4 試料土の塑性図

表-2 試料土の土性値概要

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
Fc	7	9	12	16	19	20	21	21	22	24	28	28	29	30	34	37	40	41	44	49	50	53	59
Fs	22	29	25	23	45	37	31	39	41	71	42	97	71	63	70	57	89	86	74	66	82	99	92
$\rho_t$	1.85	1.91	1.9	1.9	1.83	1.86	1.84	1.72	1.94	1.75	1.81	1.64	1.79	1.79	1.52	1.74	1.74	1.55	1.67	1.83	1.51	1.54	1.64
$\omega_n$	27.8	29	33.8	20.2	40.3	37.3	24.8	47.9	28.8	42.3	30.8	57.5	38.9	43.6	81.1	39.5	48.3	67.9	50.5	37.3	75.9	71.2	61.4
Sr	87.9	95.2	99.8	77.6	100.0	100.1	80.5	97.5	99.7	97.5	87.6	97.9	98.8	100.0	99.4	90.9	99.9	96.8	94.5	99.4	96.4	97.3	99.2

Fc: 土粒子5 $\mu$ m以下含有率 (%)    Fs: 土粒子75 $\mu$ m以下含有率 (%)     $\rho_t$ : 湿潤密度 (g/cm<sup>3</sup>)     $\omega_n$ : 含水比 (%)    Sr: 飽和度 (%)

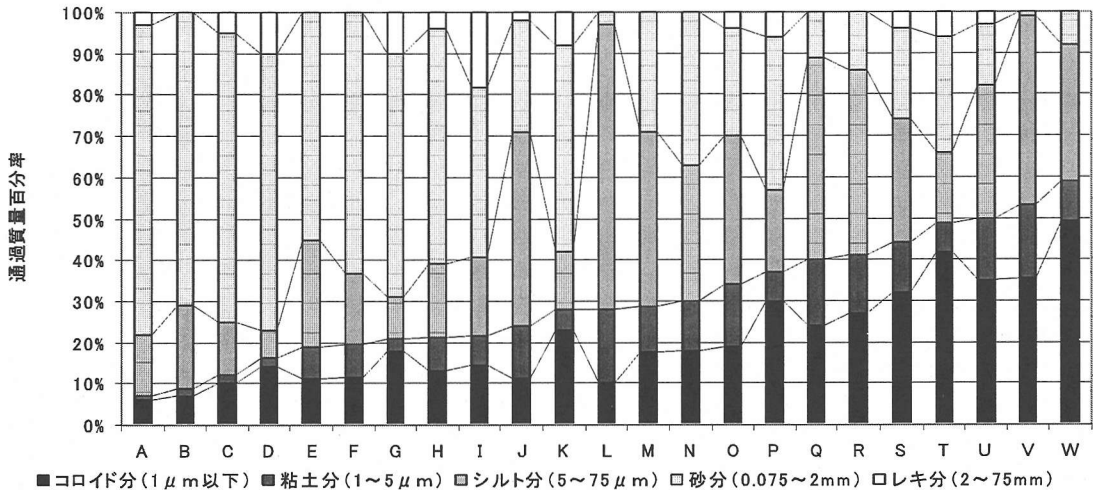


図-3 試料土の粒度構成

するため、中間土<sup>2,4)</sup>、すなわち土質分類で粘性土と砂質土の中間的な土で粒度構成上の砂分 50~80%である土<sup>2,4)</sup>・<sup>2,5)</sup>を現場においてサンプリングして粒度試験を行い細粒分含有率が 20%以上の土を選び試料土とした。試料土のサンプリング場所を表-1、粒度構成を図-3に示し、表-2に試料土の土性値を示す。図-3の粒度構成は、表-4に示す土の粒度試験方法に準じて行った結果から、粘土分以下(5 $\mu$ m以下)の通過百分率累計が小さい試料土から順に示したものであるが、1 $\mu$ m以下のものについてはコロイド分としている。また、図-4

に試料土の液性限界 $W_L$ と塑性限界 $W_P$ から塑性指数 $I_P$ を求め、塑性図を示した。

(2) 試験概要

一般に地盤改良の施工前の調査では、改良対象土の比表面積試験や交換性陽イオン容量試験(陽イオン交換容量の測定)等の試験は行われていないが、含水比試験や粒度試験等の物理試験は行われていることが多い。土のコンシステンシーは土の含水比の変化に基づいており、ペースト状の土に関しては粘土鉱物の組成や粒子形状および比表面積と陽イ

交換容量等から粒子間の相互作用が影響し、粒度分布においては粘土分の含有率が影響しているものと考えられる。また、土の液性限界は繰り返した状態の土粒子と水系が一定の外部応力に対して一定の流動抵抗を示すのに必要な含水量で<sup>2,6)</sup>、土の粒度分布との関係が大きい。土中水と粘土粒子間の物理化学的な相互作用力が支配的な粒子間力は、土の粒度構成上で  $75\mu\text{m}$  以下分の含有量との関係があり、粘土分が増すと液性限界も大きくなるものと考えられる。これらを背景に、本研究では、主にまだ固まらない改良土の偽凝結のメカニズム想定から、土の表面電荷に関係があると想定される陽イオン交換容量、ゼータ電位、電気伝導率の測定を行い、粘土分の比表面積を測定して土の粒度構成から粘土分が支配している比表面積を換算し、陽イオン交換容量と比較した。また、試料土の粘土分含有率を測定し、塑性指数および陽イオン交換容量との相関性について検討した。改良土の試験に用いる改良材の配合は、普通ポルトランドセメントと水とでスラリー化し、 $W/C=75, 100, 125\%$  とした。改良材の体積  $V_m$  と試料土の体積  $V$  との容積比  $V_m/V=0.25, 0.5, 0.75$  として設定した。改良材配合と改良材混入率を表-3に示す。

表-3 改良材の配合と改良土

NO	改良材配合 水セメント比(W/C)	改良材/試料土 $V_m/V$ (容積比)	土 $1\text{m}^3$ 当りの 改良材混入率
1	75%	0.25	20.0%
2		0.50	33.3%
3		0.75	42.9%
4	100%	0.25	20.0%
5		0.50	33.3%
6		0.75	42.9%
7	125%	0.25	20.0%
8		0.50	33.3%
9		0.75	42.9%

改良土の試験は、まだ固まらない改良土と硬化後の改良土について実施した。まだ固まらない改良土については、改良土中の改良材の混入量を正確に把握するため混合攪拌後3時間までのブリーディング試験と改良材の混入により偽凝結を起こす土の傾向を検討するためにベーンせん断強さの経時変化を測定した。特に著しい凝集が見られた海成粘土については、フロー試験と土の表面電荷を想定するために土の分散と凝集の確認試験を実施して、土の表面電荷の特性を利用した改良土の偽凝結防止の改良材開発についての検討を行った。硬化後の改良土については  $20^\circ\text{C}$  の気中養生で材齢7日、28日の一軸圧縮強さを計測した。試料土と改良土について実施した試験を表-4に示す。

表-4 試験一覧表

試料土の試験	試験方法
土の湿潤密度試験	JIS A 1255に準ずる。
土粒子の密度試験	JIS A 1202に準ずる。
土の含水比試験	JIS A 1203に準ずる。
土の粒度試験	JIS A 1204に準ずる。
土の液性限界・塑性限界	JIS A 1255に準ずる。
土の懸濁液の電気伝導率試験	JGS 0212に準ずる。
交換性陽イオン容量試験	JBAS-106-77に準ずる。
	顕微鏡電気泳動法による画像処理
ゼータ電位測定試験	コンパクトゼータ電位測定装置による。
土粒子の比表面積試験	BET 多点法 (ガス吸着法による)
X線回折	X線粉末法による。
土懸濁液の分散、凝集の確認	イオン交換水、各種試薬添加による目視確認
フロー試験(シリンダー法)	JIS A 313-1992に準ずる。
ベーンせん断試験	簡易ベーン試験器による。
ブリーディング試験	JSC-F522に準ずる。
一軸圧縮試験	JIS A 1216に準ずる。

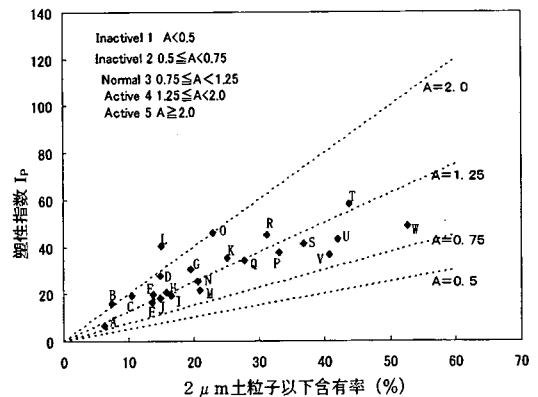


図-5  $2\mu\text{m}$ 以下の土粒子含有率と塑性指数

#### 4. 試験結果と考察

##### (1) 試料土の物理化学的性質

土の物理化学的性質は土粒子に作用する表面作用と重力に依存し<sup>2,7)</sup>、土の流動や変形に対する抵抗性、いわゆるコンシステンシーは土の粒度、粘土鉱物、有機物含有量、交換性陽イオンの種類、間隙水中の塩類の種類と濃度、初期含水比等によって影響を受けるといわれている<sup>1,6), 2,8)</sup>。これらを背景

に、試料土の粘土分含有率と陽イオン交換容量および塑性指数の関係と電気二重層に影響を及ぼす土の表面作用<sup>2,9)</sup>からゼータ電位や電気伝導率の計測を行った。

図-5は、本研究で使用した試料土の  $2\mu\text{m}$  以下の粘土分含有率と塑性指数  $I_p$  との関係を示したものである。図中のAは活性度を示す。Skemptonは、土の活性度Aを式(5)で表し、活性の低い場合は  $A < 0.75$ 、活性の高い場合は  $A > 1.25$ 、中間の  $0.75 < A < 1.25$  の範囲を普通の土というように評価している<sup>3,0)</sup>。

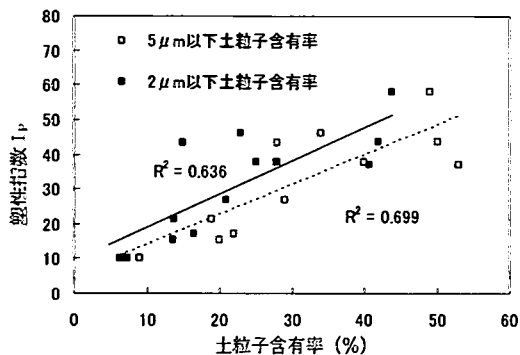


図-6 2 μm 以下, 5 μm 以下の土粒子含有率と塑性指数

$$A = \frac{I_p}{(2 \mu\text{m 以下の粘土含有率, \%)} \quad (5)$$

ここに, A : 土の活性度,  $I_p$  : 液性限界である。

国際土壌学会では, 粘土を 2 μm 以下の土粒子としており<sup>28)</sup>, 日本統一土質分類法および地盤工学会基準, 地盤材料の工学的分類方法では 5 μm としている<sup>26)</sup> ことから, 図-6 では土粒子径が 2 μm および 5 μm 以下の土粒子の含有率と塑性指数の関係を示した。

図-7 については, 改良対象土の土粒子径 2 μm 以下および 5 μm 以下の土粒子の含有率と陽イオン交換容量 CEC との関係を示した。これによると, 試験に用いた試料土においては, 粘土分含有率の増大に伴い塑性指数  $I_p$  は大きくなる傾向を示しており, 陽イオン交換容量についても粘土分の含有率の増大に伴い大きくなる傾向を示している。しかし, 図-7 に示す試料土 U, W のように陽イオン交換容量が大きくても, 必ずしも図-5 に示す活性度が高い ( $A=1.25$  以上) とは限らないこともあり, 活性度だけではまだ固まらない改良土の偽凝結の状態を想定できない。

次に土の比表面積と陽イオン交換容量の関係について検討した。土の比表面積の測定は試料土の 2 μm 以下の土粒子について行ったため, 試料土の全体に 2 μm 以下の土粒子が占めている比率を配慮して粘土分支配率換算比表面積を式 (6) のように定義して算出した。

$$\text{粘土分支配率換算比表面積} = \frac{SS \cdot F_{c2}}{100} \quad (6)$$

ここに, SS : 土粒子 2 μm 以下の比表面積 ( $\text{m}^2/\text{g}$ ),  $F_{c2}$  : 土粒子 2 μm 通過百分率 (%) である。

図-8 に粘土分支配率換算比表面積と陽イオン交換容量との関係を示した。粘土分支配率換算比表面積が大きくなると陽イオン交換容量は大きくなる傾

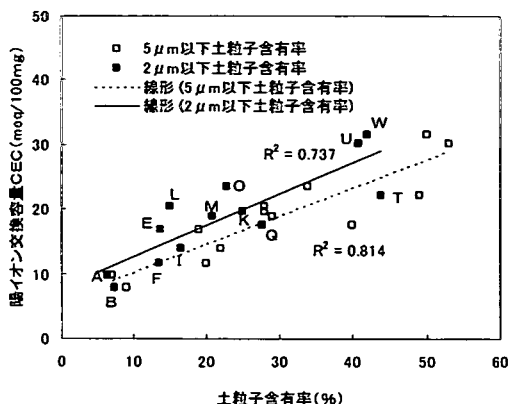


図-7 2 μm, 5 μm の土粒子含有率と陽イオン交換容量

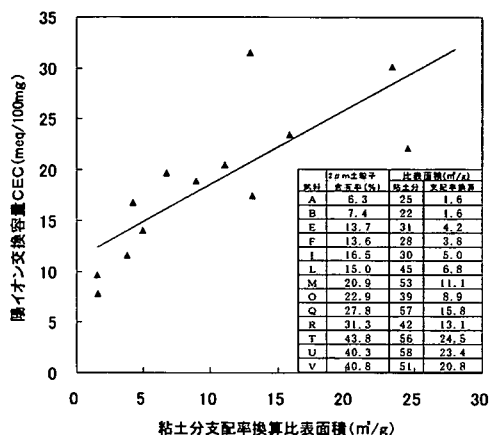


図-8 粘土分支配率換算比表面積と陽イオン交換容量

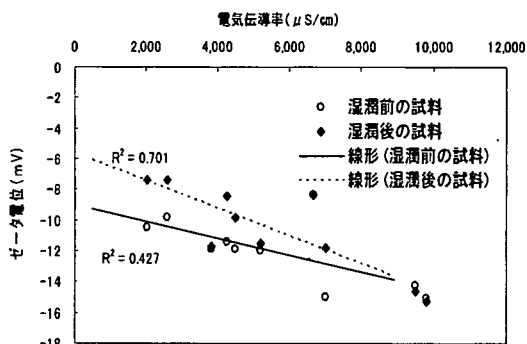


図-9 試料土の電気伝導率とゼータ電位

向がある。粘土分含有率が小さい場合は, 粘土分の比表面積が大きくても, 粘土分支配率換算比表面積は小さくなり, 土の陽イオン交換容量は小さくなるものと考えられる。

図-9 は, 試料土の電気伝導率とゼータ電位の関係を示したものである。湿潤前の試料に比べ湿潤後の試料の方が相関は良く, 検討に際しては湿潤後の



試料土を用いた。

図-10に陽イオン交換容量と電気伝導率との関係を示し比較した。電気伝導率とゼータ電位および陽イオン交換容量は相関性があり、電解質が多く含まれている土はゼータ電位が大きくなり、電気二重層の厚みが大きくなっているものと想定できる。

図-11に Stern (ステルン) モデル<sup>20), 21)</sup>の電位分布の模式図を示す。界面電位の変化は粒子表面に特に陽イオンが吸着される層とそれより外側の拡散層と区別して仮定している。陽イオンは負に荷電している粘土表面に引きつけられるが、Stern 層や他の陽イオンによって反発される<sup>17), 31)</sup>この動的な平衡状態によって陽イオンによる層、すなわち拡散層が形成される。ゼータ電位はこの2つの層の間の接合部付近の電位差と考えられており、粒子と液とが相対的に動くときの境界面(すべり面)の電位で、表面電位そのものではないが粘土粒子の動き易さに大きく関係している<sup>31)</sup>。イオン交換能が大きい改良対象土と改良材が接触すると改良材中の陽イオンが吸着して、しっかりとした Stern 層が形成されているものと想定される。

## (2) 試料土の物理化学的性質と改良土のベーンセン断強さとの関係

図-12は、 $W/C=75\%$ の改良材と試料土の容積比が $V_m/V=0.5$ になるように配合した改良土について、練上り後1時間後までのベーンセン断試験の結果の一部を示したものである。改良材の $W/C$ と $V_m/V$ が等しくても試料土が異なることによりせん断強さの経時変化も変わることが判る。また、試料土UとVでは著しい偽凝結が見られた。粘土の電荷と関係があると想定された試料土U, Vの活性度Aは $0.75 \leq A < 1.25$ のNomal(図-5参照)の範囲であり活性度では、まだ固まらない改良土の偽凝結の状態を想定できない。改良土は改良材の水和反応の影響もあるため、他の因子からの検討も必要であるものと考えられる。

ベーンセン断試験は、本来、土の流動性を確認するための試験ではないが、まだ固まらない改良土の場合、土によっては偽凝結が著しいとフロー試験等では測定できないため、ベーンセン断強さで検討した。地盤改良工法により施工速度や改良深度等が異なるが、改良材が土中で改良対象土と攪拌された後、流動化状態を保つ時間を概ね30分程度であれば良いものと仮定し、混練直後から30分後までのベーンセン断強さを測定した。この測定値と地盤材料の工学的分類方法<sup>26)</sup>という粘土分の土粒子径 $5\mu m$ 以下の含有率との相関を検討し図-13に示した。

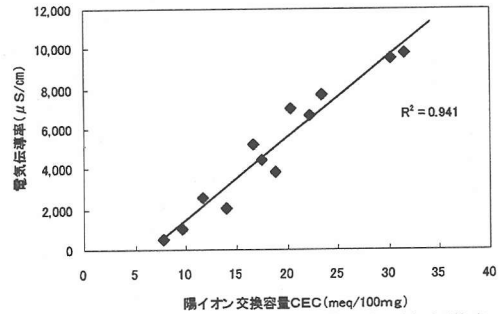


図-10 試料土の陽イオン交換容量と電気伝導率

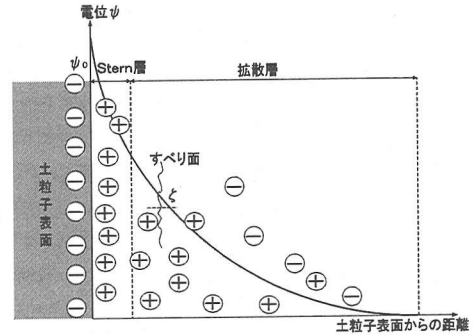


図-11 Sternモデルによる電位分布の模式図

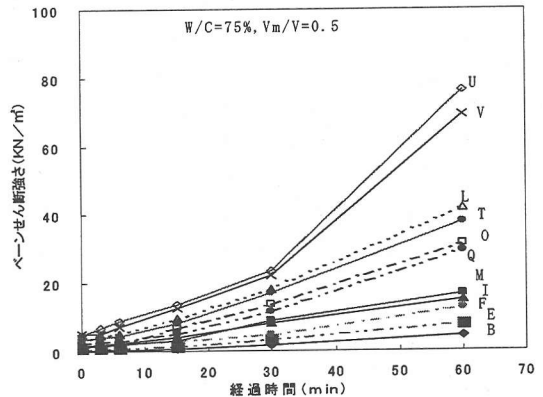


図-12 改良土のベーンセン断強さ

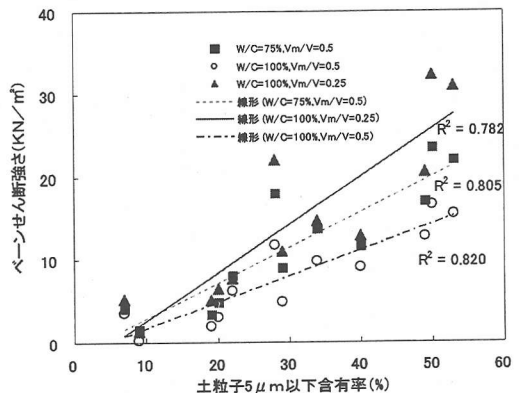


図-13 粘土粒子含有率とベーンセン断強さ

図-13によると改良対象土の $5\mu\text{m}$ 以下の粘土分含有率が多くなるとベーンせん断強さが大きくなっているが、この傾向は、粘土分の含有率だけでなく改良土中の改良材の体積 $V_m$ と改良対象土の体積 $V$ との容積比 $V_m/V$ および改良材の配合 $W/C$ とも関係がある。すなわち、図-14に示すように、改良材の $W/C$ を等しくして、改良材の量 $V_m$ と改良対象土 $V$ との容積比 $V_m/V$ だけを変化させた場合の試験結果にも現れている。試料土の種類ごとに容積比 $V_m/V$ が0.25と0.5の場合を比較すると、土の混入量が多い $V_m/V=0.25$ の方がベーンせん断強さの経時変化量は大きくなっている。モルタルのように粘土分が含まれていない場合、セメントが多く混入している方が凝結の始発は早く、強度は大きくなる傾向であるが、改良土の場合の偽凝結は土の粘土含有量や粘土鉱物の種類との関係が大きく影響しているものと考えられ、改良土中の改良材と改良対象土の容積比 $V_m/V$ だけでは偽凝結の状態を想定できないことが確認された。

まだ固まらない改良土の偽凝結により、ベーンせん断強さが大きくなった試料土U、Vは土粒子径 $2\mu\text{m}$ 以下の粘土分含有率が約40%の海成粘土であり、電解質の量の目安となる電気伝導率は、それぞれ $9500, 9800\mu\text{S/cm}$ と大きく、表-5のX線回折結果からも試料土U、Vの鉱物組成は類似している。このような土は陽イオン交換容量が大きく粘土表面と接している電解質の量も多く、改良材に豊富にあるカルシウムイオンが吸着しやすい環境になっているものと考えられる。イオン半径が大きい土と陽イオンが豊富にある改良材とが混合すると、陽イオンと水分子の極性ととの相互作用により水を引きつける力が弱くなり、粘土表面の負電荷とイオン間の静電気相互作用が強まる<sup>19)</sup>と考えられている。また、イオン交換力は同じ原子価の場合、原子量が大きい方が選択性は高くなり極性をもつ水分子と引き合う $\text{Na}^+$ は $\text{Ca}^{2+}$ や $\text{Mg}^{2+}$ より小さく、 $\text{Na}^+$ が粘土表面と引きつける力は $\text{Ca}^{2+}$ や $\text{Mg}^{2+}$ に比べ小さい<sup>21)</sup>ことが知られている。

まだ固まらない改良土のベーンせん断強さに対して試料土のゼータ電位、電気伝導率、陽イオン交換容量、活性度、塑性指数、粘土分含有率、 $2\mu\text{m}$ 以下の土粒子の比表面積のそれぞれと検討し線形近似した寄与率（相関係数） $R^2$ を図-15に示した。その結果、土の活性度との相関性は認められなかったが土の表面特性に関係のある陽イオン交換容量、電気伝導率との相関が良いことが認められた。特に陽イオン交換容量との相関性は良く、改良材中のカルシウムイオンとの吸着性を示す目安として扱える

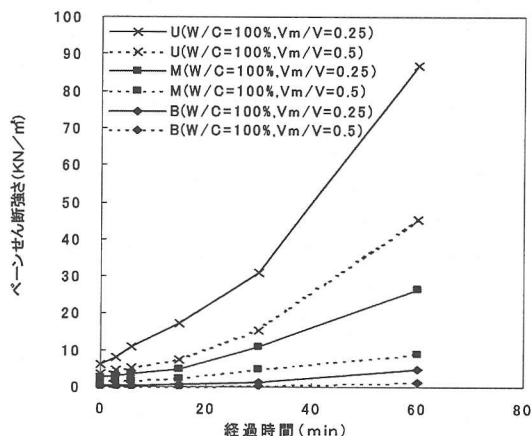


図-14 W/C=100%の改良土のベーンせん断強さ

表-5 土粒子 $2\mu\text{m}$ 以下に含有している主な粘土鉱物

試料土の記号	* ( )内は粘土分含有率	X線回折による粘土鉱物の同定結果
E(14%)、I(17%)		雲母、緑泥石
F(14%)、N(21%)、M(21%)、U(42%)、V(41%)		スメクタイト、雲母、緑泥石
O(23%)		雲母、ハロイサイト、緑泥石
A(6%)		スメクタイト、雲母
R(31%)、T(44%)		ハロイサイト、スメクタイトの痕跡
D(15%)、G(20%)、K(25%)、P(33%)、S(37%)		カオリナイト、雲母、緑泥石

(X線回折の同定結果)

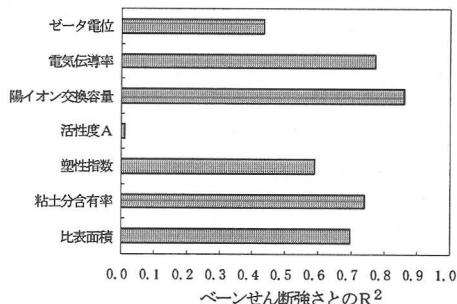


図-15 ベーンせん断強さとの相関係数 $R^2$

ものと考えられる。

### (3) 改良土のブリーディング

細粒分含有率が小さい土が含まれた改良土と細粒分含有率が大きい土が含まれた改良土のブリーディングは、細粒分含有率が小さい砂質土系の土が含まれた改良土の方が発生する可能性が大きい<sup>32)</sup>。本研究に用いた改良材は、 $W/C=75, 100, 125\%$ のセメントミルクであり、ブリーディングはそれぞれ14.6, 25.4, 33.1%であったが、改良材 $V_m$ と改良対象土 $V$ の容積比 $V_m/V=0.25, 0.5, 0.75$ の場合、ブリーディングは発生していない。粘土分が含まれているセメント懸濁液と粘土分が含まれていない場合のセメント懸濁液の粘性は粘土分が含まれている方が大きく、ブリーディング量も小さくなる。



改良土においてもこれと同じように粘土分が影響しているものと考えられる。本研究では、まだ固まらない改良土の偽凝結を改良対象土の表面電位等から検討しているが、改良土のブリーディングについて懸濁液の粘性が影響しているものと仮定すると、まだ固まらない改良土の偽凝結の現象と同じようにブリーディングについても改良対象土の比表面積やイオン交換能等が影響しているものと考えられる。

#### (4) 改良土の硬化後の強度

硬化後の改良土は、材齢 7, 28 日の一軸圧縮試験で評価したが、本文では材齢 28 日のデータを基に説明する。図-16 に改良材の配合を  $W/C = 100\%$  にして容積比  $V_m/V = 0.25, 0.5, 0.75$  にした場合の圧縮強さと粘土分含有量との関係を示した。図-17 は、 $V_m/V = 0.5$  とし  $W/C = 75\%, 100\%, 125\%$  にした場合との強度比較を示す。図-16 と図-17 において試料土 T, U, V を除いて近似直線を描くと粘土分が多くなると一軸圧縮強さは小さくなる傾向を示す。この傾向は、まだ固まらない改良土のベーンせん断強さの傾向と異なり、改良材が多く混入している改良土についてはベーンせん断強さは小さくなるが、硬化後の一軸圧縮強さは増大している。硬化後の改良土においては、改良材の水和が強度発現性に影響しているものと考えられるが、改良土によっては土の化学的特性や鉱物組成の影響もある。例えば、改良材と改良対象土の容積比  $V_m/V$  および改良材の  $W/C$  を等しくした場合、T, U, V は他の試料から比べると近似直線上の値より大きくなっている。この 3 種類の改良対象土の  $2\mu\text{m}$  以下の粘土分含有率はそれぞれ 43.8, 42.0, 40.8% とほぼ同じであるが、試料土 U と V の共通点は海成粘土で陽イオン交換容量も電気伝導率も大きく、図-12 に示すまだ固まらない改良土のベーンせん断強さの経時変化も大きい。しかし、試料土 T を用いた改良土は試料土 U, V を用いたものと比べるとベーンせん断強さは小さい。これらは、改良対象土の鉱物組成による影響であるものと考えられる。すなわち、試料土 U, V は表-5 に示すように粘土の構成層は 2:1 型のスメクナイト、雲母、緑泥石であり、層内における同型イオン交換の結果、陽電荷が不足し粘土粒子が陰電荷を帯びている<sup>27)</sup>ものと考えられる。次項の土の表面作用の確認で後述するが、海成粘土は生成過程から交換性マグネシウムイオン  $\text{Mg}^{2+}$  が大半を占めているものと想定できる。そこでマグネシウムより原子量の大きい改良材中のカルシウムイオンがマグネシウムイオンと入れ替わろうとする同型置換により強固な凝集体が

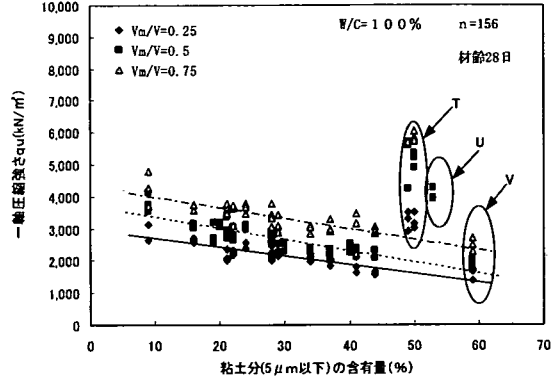


図-16 混合比を変えたときの一軸圧縮強さ

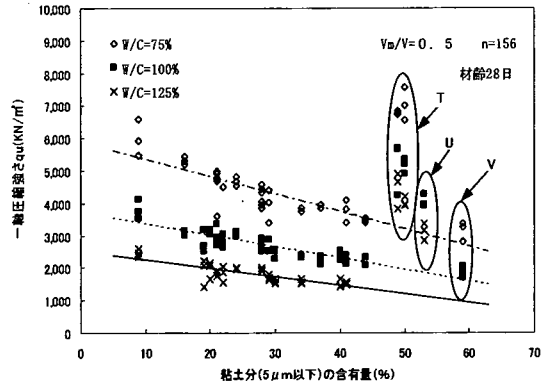


図-17  $W/C$  を変えたときの一軸圧縮強さ

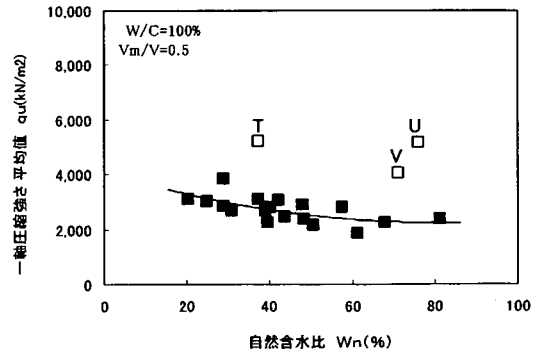


図-18 試料土の含水比と一軸圧縮強さ

形成されたまま硬化したのものとも考えられる。これに対し試料土 T は、表-5 に示すように 1:1 型のハロイサイトと 2:1 型のスメクナイトが含まれている。膨潤度はスメクナイトの方が大きく、水分を取り込む量はハロイサイトの方が少なく<sup>27)</sup> 粒度試験結果では礫分 6%, 砂分 28% である。試料土 T は U, V に比べ砂分以上の含有率が 34% と比較的多い割合で含有されている。そのため、試料土 T の自然含水比は図-18 に示すように U, V に比べ小さくなっているものと考えられる。また、改良対象土に砂分

が多く含まれていると一軸圧縮強さは大きくなるという傾向は他の研究<sup>3,2), 3,3), 3,4)</sup>でも報告されている。本研究に用いた試料土Tは、陽イオン交換容量も大きく改良材中のカルシウムイオン $Ca^{2+}$ と吸着しやすく、砂分が沈降しない状態で硬化しており、砂分量や含水比が強度に反映されたものと考えられ、試料土U, Vとは別の強度発現機構であるものと想定できる。

#### (5) まだ固まらない改良土が偽凝結を起こす土の表面作用の検討

まだ固まらない改良土のベーン試験結果から、極く短時間にせん断強さが大きくなる改良土は、改良材の水和反応の他に改良対象土の特性が偽凝結しやすい環境にしているものと考えられる。この現象が著しく発現される改良土は混入している土の電気伝導率、陽イオン交換容量、ゼータ電位等の表面作用が影響しているものと仮定した。本研究では、偽凝結の現象が顕著に見られた改良土に混入している試料土Vを用いて、コロイド粒子間の相互作用(DO L V理論)と非特異的凝集(Schulze-Hardy凝集)<sup>2,0), 2,2)</sup>から検討した。

海成粘土の分散と凝集の傾向を見るために試料土2gに対してイオン交換水80gを入れ1時間放置して観察した。その結果、写真-1の左端に示すように安定した分散が見られた。コロイド粒子は、pHによって界面電荷が大きく変化する<sup>2,2)</sup>。この現象は静電的な反発力がゼロになりロンドンファンデルワールス引力だけになって、改良土の偽凝結の要因になる可能性もあるため、改良材が混入したときのpH付近でその現象が起きるのかを水酸化カルシウム $Ca(OH)_2$ と水酸化ナトリウム $NaOH$ を用いて観察した。しかし、ほぼ等しいpHでも水酸化カルシウムの場合は凝集したが、水酸化ナトリウムの場合は分散状態でありpHの影響による凝集はなく、まだ固まらない改良土の偽凝結はセメントの水和による水酸化カルシウムの影響であることを写真-1に示すように確認できた。

次にSchulze-Hardy凝集を確認するため、写真-2に示すようにナトリウムイオン $Na^+$ 、カリウムイオン $K^+$ 、カルシウムイオン $Ca^{2+}$ 、マグネシウムイオン $Mg^{2+}$ 、および不溶性カルシウムイオン( $Ca^{2+}$ )のそれぞれのイオンが1000ppmになるように、 $Na^+$ については水酸化ナトリウム $NaOH$ を $K^+$ については塩化カリウム $KCl$ を $Ca^{2+}$ については水酸化カルシウム $Ca(OH)_2$ と塩化カルシウム $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ を、 $Mg^{2+}$ については硫酸マグネシウム $MgSO_4 \cdot 2H_2O$ を( $Ca^{2+}$ )については炭酸カルシ

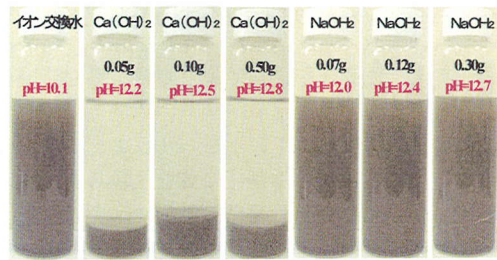


写真-1 土の分散と凝集の確認 (pH調整)

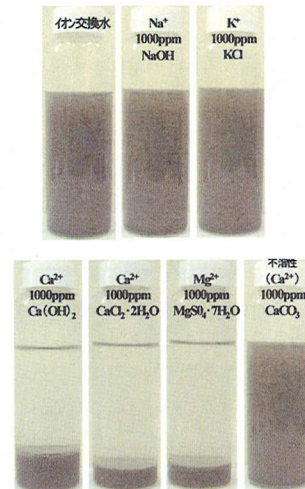


写真-2 イオンの影響確認

ウム $CaCO_3$ を添加して観察した。1価のナトリウムとカリウムは凝集せず、2価のカルシウムとマグネシウムは凝集を起こしたが不溶性のカルシウムは凝集しないことが認められた。

水コロイドに電解質を加え、その濃度がある値以上になると急速に凝集が起き、凝集濃度はコロイド粒子と反対電荷イオンの価数の6乗に逆比例するSchulze-Hardyの原子価法則<sup>2,2)</sup>では、電気二重層の厚さを低下させ $V_{max} = 0$ として、 $V_R$ が小さくなるときに凝集し、凝集濃度 $C_f$ を式(7)のように示している。

$$C_f = 8 \times 10^{-36} \frac{1}{\phi^2 F^2 z^6} \frac{\epsilon RT}{z^6} \propto \frac{1}{z^6} \quad (7)$$

ここに、 $C_f$ :凝集濃度 ( $mol dm^{-3}$ )、 $\phi$ :表面電位(ξ電位で近似)、 $F$ :ファラデー定数、 $z$ :イオンの原子価である。

凝集濃度は、式(7)に示すように原子価の6乗に逆比例することになり、対イオンの原子価が極めて著しく影響し、写真-2に示すように水酸化ナトリウムの $Na^+$ より、水酸化カルシウムの $Ca^{2+}$ の方が凝集している。この凝集はコロイド粒子と電荷

の符号が反対になるイオンの原子価が支配的役割を演じている。すなわち、改良土は改良材に含まれているセメントの水和反応により、カルシウムイオン  $Ca^{2+}$  が溶出して粘土中の高価イオンが引き合い強い偽凝結を示すものと考えられる。

試料土に用いた海成粘土は、海水と接触しつつ堆積し、その生成過程では交換性マグネシウムイオン  $Mg^{2+}$  が大半を占めて<sup>27)</sup>、改良土中では大量のカルシウムイオンが増加して分散場の環境が変化しマグネシウムイオンとの間でイオン交換されるものと考えられる。イオン交換においては、同じ原子価であるが原子量の大きいカルシウムの方が選択性は大きくなる<sup>29)</sup> ため、マグネシウムイオンとカルシウムイオンが入れ替わろうとして、セメント粒子と粘土粒子とが互いに引き寄せられて凝集したものであると考えられる。

### 5. 試験結果に基づく改良材の検討

まだ固まらない改良土が偽凝結を起こす土の表面作用の検討を踏まえ、改良材2種類を試作して、その効果を比較した。本文では、粘土含有量が多く電気伝導率が  $4000\sim 8000\mu S/cm$  の範囲で、尚且つ陽イオン交換容量が大きいものを対象としたものを内陸粘土用と呼び、海成粘土のように多価金属イオン量が多く含まれている可能性が大きく電気伝導率が大きい粘性土を対象としたものを海成粘土用と呼び、前者は試料土Tを用いて、後者については試料土Vを用いて評価した。

試作改良材の検討は、内陸粘土用と海成粘土用について実施した。内陸粘土用としては、マイナス電荷を付与して粒子の静電反発により偽凝結を抑える手法で改良材Aを試作した。海成粘土用としては、静電反発対策だけでなく多価金属イオン対策として多価金属炭酸塩や分散保持を施す素材を原料として加えたものを改良材Bとして試作した。この2種類の試作改良材についてまだ固まらない改良土のベーンせん断試験結果および試料土の物理化学的性質から検討した。

試験に用いた試料土Tは、図-12に示すようにまだ固まらない改良土のベーンせん断試験結果では、海成粘土の試料土U、Vほど大きな経時変化を示していないが、他の試料に比べると大きい方である。また、試料土Tの粘土分のゼータ電位は  $-8.3mV$  で陽イオン交換容量  $22.2meq/100mg$ 、である。一方、海成粘土の試料土Vは、試料土Tに比べゼータ電位、陽イオン交換容量は上回っており、まだ固ま

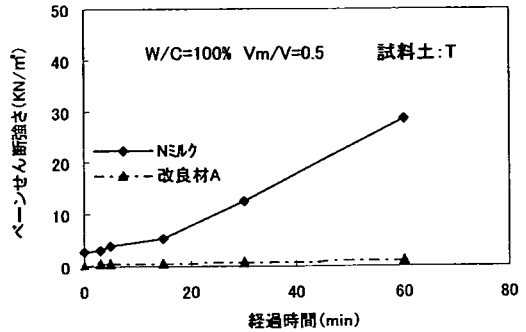


図-19 改良材Aのベーン試験による効果確認

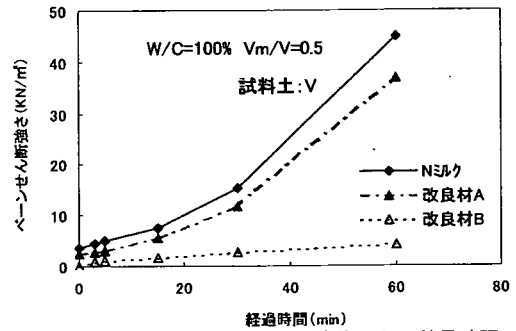


図-20 改良材Bのベーン試験による効果確認

らない改良土のベーンせん断強さも試料土Tに比べ大きな値を示している。試料土Vは試料土Tに比べて異なるのは、電気伝導率が大きい値を示していることで、電解質の多価金属イオンが多く含まれているものと想定できる。試料土Tの電気伝導率は  $5300\mu S/cm$  であり、試料土Vは  $9500\mu S/cm$  となっている。

図-19および図-20はベーン試験による改良効果を確認したもので、試料土はそれぞれ内陸粘土用の改良材Aには試料土Tを海成粘土用の改良材Bには試料土Vを用いて改良土とした。図-19は、試料土Tに対して普通セメントを用いた改良材と(図中ではNミルク)と試作した改良材Aを使用し、改良効果をベーン試験せん断強さで比較したものである。普通セメントを用いたものについては、混合直後から偽凝結してベーンせん断強さの経時変化が大きくなっているが、改良材Aを用いた改良土のベーンせん断強さの経時変化は小さく改善効果を確認することができた。図-20は普通セメントの改良材と改良材Aおよび改良材Bの3種類を試料土Vについて比較したものである。試料土Vは前述にあるように多価イオン量が多いことが想定されており、静電反発効果を期待した改良材Aでは効果がなく、金属イオン対策をした改良材Bの方が有効であった。また、まだ固まらない改良土の流動性を確認するた

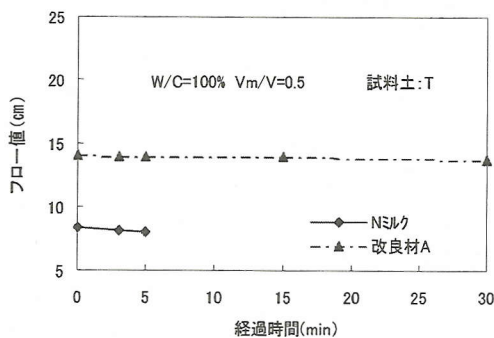


図-2 1 改良材Aのフロー試験による効果確認

め、直径 8cm、高さ 8 cm の JHフローを用いてフロー試験を実施した。結果を図-2 1 および図-2 2 に示す。改良材 A は、図-2 1 に示すように試料土 T においてはフロー試験が測定できる範囲であったが、図-2 2 に示すように試料土 V に使用した場合、ペーンせん断試験の結果と同様に海成粘土については効果が期待できない状態であった。改良材 B をフロー試験の結果から評価すると対金属イオン対策は十分ではなかったが、添加剤素材の添加量や種類をさらに検討することによりフロー値を大きくすることが可能になるものと考えられる。この試作材料の効果確認試験から、想定したまだ固まらない改良土の偽凝結の要因が土の表面電荷の影響であることが確認できた。

## 6. まとめ

本研究では、スラリー系の改良材を用いて地中で攪拌混合する工法において、土の物理化学的性質が改良土に及ぼす影響について検討し、まだ固まらない改良土の偽凝結対策を材料面から検討してきた。結果をまとめると以下のとおりである。

a) まだ固まらない改良土の偽凝結の経時変化を把握するためにペーンせん断試験で評価してきた。その結果、改良材の配合および改良材と改良対象土の容積比により異なるが、改良対象土の粘土分含有率が增大すると改良土のペーンせん断強さも大きくなるが、改良対象土の表面電荷も大きく影響していることが確認できた。

b) 硬化後の改良土の一軸圧縮強さでは、改良土に混入している土の粘土分含有率が大きくなり、一軸圧縮強さは小さくなる傾向を示すが、改良土中の改良対象土の含水比や粒度構成および鉱物組成等により例外もある。

c) まだ固まらない改良土の偽凝結を想定する上で

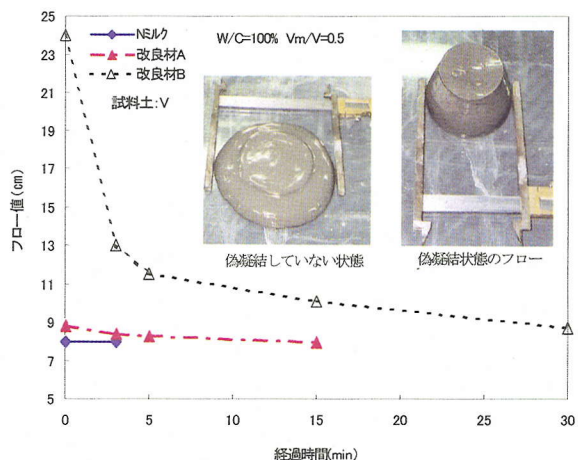


図-2 2 改良材Bのフロー試験による効果確認

塑性指数、陽イオン交換容量、電気伝導率、ゼータ電位から総合的に判断できることを確認した。また、電気伝導率が大きい土は多価金属イオンの影響を受けている可能性もあるので注意しなければならない。しかし、本研究で実施した試験は、一般に施工前の試験で行われていないものが多く実際に活用するためには、土のコンシステンシーの目安としている塑性指数等との相関性についてさらに検討する必要があるものと考えられる。

d) まだ固まらない改良土が偽凝結を起こす改良対象土の対策として、改良材を試作して効果を確認した。その結果、静電反発効果を利用できる土とそうでない土があることが明確になり、海成粘土のように多価金属イオンが多い土は静電反発効果だけでなく、金属イオン対策も必要であることが確認できた。

以上、これらの知見は今後の開発において有用なものであると考えられる。実施工では、改良土の強度の傾向については事前の室内配合試験で確認でき、配合設計時に修正も可能である。むしろ、施工において、まだ固まらない改良土の攪拌性を上げることにより、硬化後の改良土の強度が室内試験の強度試験結果に近づけることの方が設計上に役立つものと考えられる。そのためには、まだ固まらない改良土のワービリティの改良改善が重要項目であると感じられた。

## 参考文献

- 1) 闘土木研究センター:陸上工事における深層混合処理工法設計・施工マニュアル, pp.1-6, pp.69-74, pp.165-172, 1999.
- 2) DJM工法研究会:粉体噴射攪拌工法 技術マニュアル, pp.11-18, 2002.
- 3) 榎並昭:セメント系固化工法, 最近の傾向と課題, 基礎工, Vol.28, No.9, pp.1, 2000.



- 4) 柴崎光弘:噴射・攪拌・混合処理工法の実績と適用上の留意点, 基礎工, Vol.17, No.8, pp.9-15, 1989.
- 5) (株)地盤工学会:地盤工学・実務シリーズ 11 地盤改良効果の予測と実際, pp.207-219, 2000.
- 6) 財団法人建築センター:建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針 セメント系固化材を用いた深層・浅層混合処理工法, pp.179-183, 1997.
- 7) 最新地盤注入工法技術総覧, 第3編ジェットグラウト工法, pp.695-866, 1997.
- 8) 日本ジェットグラウト協会:ジェットグラウト工法(JSG・コラムジェットグラウト)技術資料, 1997.
- 9) クロスジェット研究会:クロスジェット工法技術資料, 1997.
- 10) 國藤祚光:各種地盤の改良強度とセメント配合, 基礎工, VOL.22, No.5, pp.20-25, 1994.
- 11) CDM研究会:セメント系深層混合処理工法CDM工法, 設計と施工マニュアル(設計・施工編), 1992.
- 12) 中澤重一, 佐竹啓一:ソイルセメント柱列壁工法の設計・施工関連基準, 基礎工, Vol.22, No.5, pp.26~35, 1994.
- 13) (株)日本材料学会:ソイルミキシングウォール(SMW)設計施工指針:1988.
- 14) (株)土質工学会:土質工学における化学の基礎と応用: pp.61-63, 1978
- 15) 前田隆:土の物理化学と土質工学への応用:土と基礎, Vol.38, No.9, pp.65-71, 1985
- 16) 嘉門雅史, 浅川美利:土木学会編 新体系土木工学16 土の力学(Ⅰ)土の分類・物理化学的性質, pp.23-33, pp.50-53, pp.87-97, 1988
- 17) 立川博:界面化学からみた粘土鉱物, 粘土科学, 第31, 第2号, pp.91-93, 1991
- 18) (株)セメント協会:セメント系固化材による地盤改良マニュアル, 改良土の特性, pp.18-24, 1994
- 19) 岩田進午, 前田隆:土の物理化学と土質工学への応用 2. 粘土鉱物と土粒子の物理化学的性質, 土と基礎, Vol.33, No.4, pp.80-87, 1985
- 20) 荻野圭三:表面の世界, 裳華房, pp.109-120, 1998.
- 21) (株)日本化学会:コロイド科学, 東京化学同人, pp.44-61, pp.165-190.
- 22) 北原文雄:界面・コロイド化学の基礎, 講談社, pp.91-119, 1994.
- 23) 中垣正幸, 福田清成:コロイド化学の基礎, 大日本図書, pp.68-70, 1976.
- 24) (株)地盤工学会 中間土編集委員会:中間土 砂か粘土か, pp.7-17, 186-200, 1992.
- 25) 倉田進, 藤下利男:砂と粘土の混合土の工学的性質に関する研究, 運輸省港湾技術研究報告書, Vol.11, No.9, pp.389-424, 1961.
- 26) (株)地盤工学会:土質試験の方法と解説 第一回改定版, pp.93-105, pp.213-245, 2000.
- 27) 須藤俊男:粘土鉱物学, pp.229-235, pp.59-312, 1974.
- 28) 日本粘土学会:粘土ハンドブック第二版, 技報堂, pp.3-4, pp.1082-1084, 1994.
- 29) 前野昌弘:粘土の科学, 日刊工業新聞社, pp.45-64, 1993.
- 30) Skempton, A.W.:The colloidal activity of clays, Proc.3rd Inter.Conf.Soil Mech.Found.Eng., Vol.1, pp.55-61, 1953.
- 31) 本田周:画像解析によるコロイド粒子の分布測定, 化学工業, 第62巻, 第7号, pp.387-388, 1998.
- 32) 三井隆, 吉川正, 池田昭彦:細粒分含有率が異なる改良土の室内配合試験による基礎的研究:土木学会論文集, Vol.53/VI-53, pp.117-129, 2001.
- 33) 國藤祚光, 眞嶋光保:ソイルミキシングウォールの材料力学特性に関する研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集第3部, Vol.44th, pp.62-63, 1989.
- 34) 氏家剛, 宮森健樹:粒度構成の異なる改良土に関する基礎的研究, (株)土木学会関東支部編 第27回関東支部技術研究発表会, pp.556-557, 2000.

(2002. 6. 4 受付)

## THE INFLUENCE OF PHYSICO-CHEMICAL PROPERTY ON IMPROVED SOIL CHARACTER

Kaname AOYAMA, Takeki MIYAMORI, Tetuya WAKIYAMA  
and Daisuke KIKUCHI

Portland cement based materials are widely used for enhancing strength of soil mass as in cement deep mixing(CDM) method or other similar methods. However, the strength of improved soil may fluctuate by the workability during CDM method even under a same mixing proportion. The authors studied a correlation between the physico-chemical property of soil and results of the vane shear test after aware of the fact that clay fraction content may cause insufficient mixing of soil. As a result, knowledge on the material development such as a relation among clay minerals and electric charge was obtained.