高含水粘性土の固化処理において固化強度に及ぼす影響要因*

小 口 深 志**・坂 西 将 徳**

Influential Factor in Hardening Strength of High Water Content Clay
by Cement Type Stabilization

Fukashi OGUCHI and Masanori SAKANISHI

It is longed to improve high water content soil such as mud, slurry, and sediment and to reuse the improved soil effectively because of decreasing the lands for spoil-banks. High water content soil is usually hardened by cement type stabilizer to be reused. Therefore, it is interesting to study on the forecast characteristics of the hardening strength with the object of hardening high water content clay in low strength.

In this study, the strength of cement type stabilized clays was estimated in various clays and various conditions of water contents.

As the result of the research, following were clarified.

1. The relationship between the characteristic W/C (the water/cement ratio) and qu (unconfined compression strength) was scattered widely by w_i (the percentage of moisture content to soil), but the relation between the characteristic W_e/C (the pore water/cement ratio: W_e was output by bleeding water content etc.) and qu was normalized, not being caused by w_i .

2. The relationship between the characteristic W_e/C and qu was scattered widely by the variety of clays, but the relation between the characteristic $W_e/(C + Cp)$ (the pore water/effective cement ratio: Cp was output by soluble silica) and qu was normalized, not being caused by the variety of clays.

1. 緒 言

臨海域や地下における構造物の建設では、工事の大規模化、大深度化がめざましく、これらの構造物の建設には不可欠な、泥水を使用した掘削工事（泥水工事）やヘドロ処理工事等の需要は今後大きく伸びていくものと予想される。

ところで、泥水工事やヘドロ処理工事等で排出される高含水性の粘性土は産業廃棄物の「汚でい」に指定される場合がある。これら「汚でい」の処分場は特に大都市圏で逼迫している一方で、その利用先は非常に限られている。例えば、東京圏における建設汚泥の発生量は500万t/年で、そのうち、減容化・再利用率は約30%と他の建設系廃棄物に比較して低い減容化・再利用率となっている¹⁾。したがって、高含水性の粘性土を材材として利用できるようにセメント系の材料等で固化処理すること

は処分場問題の解決策のひとつとなる。

さて、最近になって、発生土の用途別の利用区分が強度等で規定されるようになり²⁾、固化処理した高含水粘性土の高度利用の道も開かれつつあると同時に、固化強度に関する管理も厳しくなるものと考えられる。

固化処理に関する研究のうち、土を固化する原理や機構に関するものや、固化特性に影響を及ぼす因子に関するものはこれまでに多く行われている。固化特性への影響因子としてはフミン酸等の有機物量³⁾、土の粘土鉱物学的性質^{4,5)}、含水状態^{6,7)}、粒度⁸⁾、コンシステンシー⁹⁾、そして固化材の組成¹⁰⁾ 等が挙げられ、固化強度等に対するこれらの影響の程度について報告されている。

これらの研究は固化特性に対する個々の影響因子に関して詳細に行われたものであるが、固化処理土の強度設計上有用な形にまとめられていない。さらに、液性限界をはるかに超えた高含水粘性土について配合指標と固化強度との関連性をみた例はほとんどない^{11,12)}。

以上の背景をもとに、本研究は泥土、泥水、ヘドロ等の高含水粘性土の低強度固化処理（一軸圧縮強さが約

* 平成5年6月17日本会第90回例会において発表

** 前田建設工業(株)技術研究所
平成5年3月18日受理

10 kgf/cm² 以下で、土質材料として有効利用が可能な程度)において汎用性のある固化強度の予測法を提示することを目的とした。

そして、水/固化材比 (W/C) をより厳密に考慮した、間隙水量/有効固化材量比 (We/Ce) と一軸圧縮強さとの関係を検討し、その配合指標の汎用性を確認した。

2. 予 備 的 検 討

通常、固化材の添加量はスラリー 1 m³ 当たりの添加重量 (単位固化材量: kg/m³) やスラリーに対する重量 % で表示する。しかし、これらの配合指標を用いた場合、土や固化材の諸特性等によって固化強度が大きくばらつくことが経験的に知られている。

一方、コンクリートやモルタル系の材料では、強度と関係する配合指標として水/セメント比 (W/C) が一般的に用いられている。これは W/C と強度との関係が片対数紙上で負の傾きをもった直線となるものである¹³⁾。この基本的な考え方は、水量 (W) は硬化体中の間隙量を間接的に表したものとみなされ、セメント量 (C) が凝結による強度発現を直接的に表現したものである。

そこで、高含水粘性土の固化処理においても水/セメント比の考え方を参考とした。ただし、図1に示すように、固化処理土は土-水-固化材の3成分で構成されると仮定し、土-水-固化材相互の影響を考慮した間隙水量/有効固化材量比 (We/Ce) を採用した。

また、固化材による反応水和物の形態の違いにより、その強度発現性も異なることが予想された。そこで、典型的な形態として、図2に示すように、普通ポルトランドセメントによるカルシウム・シリケート系水和物形成型 (CSH 型) と、高含水土用セメント系固化材によるカルシウム・サルホ・アルミネート系水和物形成型 (Et 型) の2種類に分類した。なお、CSH 型の場合は網目状の比較的緻密な水和物を形成するのに対し、Et 型の場合はエトリンジャイトを代表とする針状の結晶が生成されるため、比較的膨張傾向となることが予想された。

We と Ce による強度予測のために、つぎに示すような定式化を試みた。

$$f = We/Ce \quad (1)$$

$$We = W - Wb - Wc - Wh \quad (2)$$

$$Ce = C - Cb - Cs + Cp \quad (3)$$

$$\log(qu) = A - K \cdot f \quad (4)$$

ここで、

We: 間隙水量

Ce: 有効固化材量

W: 総水量

C: 総固化材量

図1 間隙水量と有効固化材量の位置づけ

図2 CSH型とEt型の固化形態のモデル化

Wb: 完全分離水量 (ブリージング水量とし、ブリージング試験によって求める)

Wc: 強結合水量 (塑性限界に相当する含水量とする)

Wh: 水和水量

CSH 型: $Wh = 0.28 C$

(普通ポルトランドセメント中の各成分から生成する水和水量をもとに、固化材単位量当たりの結合水和水量として0.28¹³⁾を算出)

Et 型: $Wh = 0.43 C$

(固化材中に含まれる SO_3 がすべてエトリンジャイト ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) 生成のために消費されると仮定し、固化材単位量当たりの結合水和水量として0.43を算出)

Cb: 完全分離水への固化材成分 (カルシウム) の溶脱量

Cs: 土 (有機物、交換性陽イオン等) により吸着される固化材成分 (土のカルシウム吸着量をもとに算出)

Cp: 土中の反応性物質質量 (アルカリ下でのシリカ溶出量をもとに算出)

qu: 一軸圧縮強さ

A, K: 定数

3. 実験方法

3.1 土質材料

(1) 試料土の種類 本実験では、標準的な粘土として、市販の木節粘土 (KC), カオリン (KAO), ベントナイト (BT) を、現場発生土として、河川ヘドロ (SH), 泥土圧系シルド掘削土 (IS) を供した。それぞれの土の物性を表 1 に示す。

KC および KAO は石英の他に主要な粘土鉱物としてカオリナイト等を、BT はモンモリロナイトを含んでいる。SH は黒色で強熱減量が最も高く、石英、長石類の他に石臼類を含んでいる。IS は石英、長石類の他に泥しょう材料によると思われるモンモリロナイトを含んでいた。

(2) 土の含水量調整 土により液性を呈し始めるときの含水比 (水の乾燥土に対する重量百分率) が異なる。そこで、市販粘土については液性限界 (土が液性を呈し始めるときの含水比) をもとに含水量を変えて試験を行った。すなわち、各々の土の液性限界を基準とし、液性限界からその十数倍程度の範囲で含水量調整を行った。現場発生土については、発生時点での含水比でそのまま試験に供した。

3.2 固化材

固化材には CSH 型として普通ポルトランドセメント (NP) を、Et 型として高含水土用セメント系固化材 (SF) を用いた。これらの固化材の主な組成を表 2 に示す。固化材の添加量は W/C を基本とし、W/C=5, 10, 20 のケースで試験を行った。

表 1 土質材料の物性

名 称 (採取場所等)	木節 粘土	カオリン	ベントナイト (豊順 浅間 #300)	河川 ヘドロ (砂町)	泥土圧 系シルド掘削土 (板橋)
略 称	KC	KAO	BT	SH	IS
土粒子の密度 (g/cm ³)	2.510	2.727	2.638	2.415	2.673
粒度 礫分(2000 μm以上)(%)	0	0	0	0	0
砂分(75~2000 μm)(%)	0	0	0	0	6
シルト分(5~75 μm)(%)	55	44	59	80	76
特性 粘土分(5 μm以下)(%)	45	56	41	20	18
液性限界 w _L (%)	73	51	370	128	80
塑性限界 w _p (%)	39	28	45	44	17
塑性指数 Ip (%)	34	23	325	84	63
自然含水比 w _n (%)	-	-	-	221	324
pF3非分離水量 (%)	21	35	48	89	21
強熱減量 (%)	14.1	3.7	5.5	20.7	3.3
フミン酸量 (%)	2.39	0.00	0.06	0.82	0.00
pH※	6.1	7.6	9.6	7.9	10.5
陽イオン交換容量(CEC) (me/100g)	31.9	7.2	91.6	24.2	15.3

※土質工学会基準 (JSF T 211-1990) に基づく pH測定法による pH値

表 2 固化材の化学成分

種別	名 称	略称	化学成分 (%)					
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
セメント	普通ポルトランド	NP	22.0	5.1	2.9	63.7	1.5	2.0
セメント系	高含水土用	SF	15.1	7.8	2.1	54.4	0.9	17.8

3.3 試験方法

(1) 練り混ぜ試験 練り混ぜ試験は容量 20 l のホバート型ミキサーを用い、土質工学会の「安定処理土の締固めをしない供試体作製 (JSFT 821-1990)」に準拠し、練り混ぜ、供試体作製、養生、および強度試験等を以下のように行った。

①所定量に計量された土と水をミキサーで 5 分間攪拌する。

②さらに固化材を添加し、10分間攪拌する。

③直径 50 mm, 高さ 100 mm の鋼製二つ割れモールドに固化処理土を詰め、密封する。

④恒温恒湿 (温度 20°C, 湿度 90%) で所定期間養生する。

⑤材令 1, 7, 28 日において一軸圧縮試験を行う。

(2) ブリージング試験 完全分離水量 (Wb) を求める上で、ブリージング量が必要となるため、固化処理土のブリージング試験を行った。試験法は土木学会編「土木材料実験」の「(グラウトの) ブリージング率と膨張率試験」に従った。

また、完全分離水中への固化材成分の溶脱量 (Cb) を求めるために、原子吸光法によってブリージング水中のカルシウム分の定量を行った。

(3) 土のカルシウム吸着量試験 一般に、石灰による土の改質では土が石灰中のカルシウム成分を吸着保持することによって土のコンシステンシーが改良されるといわれている⁹⁾。一方で、土のもつフミン酸等の有機物や交換性の陽イオンは固化材の石灰分を固定化消費するといわれており^{3,9)}、土のカルシウム吸着量の差は固化処理土のコンシステンシーや固化強度に影響を及ぼすと考えられる。

そこで、各種土のカルシウム吸着量を分析し、この結果を配合指標に組み入れることを試みた。分析は飽和水酸化カルシウム溶液 200 ml 中に所定量の湿潤土あるいは乾燥土を添加し、1 時間マグネチックスターラーで攪拌した。これを No. 5C のろ紙でろ過し、ろ液について原子吸光法でカルシウム分の定量を行った。

(4) 土の反応性物質質量試験 土がアルカリ下で溶解する成分のうち、特にシリカ成分は固化材中のアルカリ成分と反応して、カルシウム・シリケート系の水和物ゲル (CSH ゲル) 等を生成するため¹⁴⁾、土による反応性物質質量 (溶解性シリカ量) の違いが強度発現に影響を及ぼすことが考えられた。そこで、各種土の溶解性シリカ量を分析し、この結果を配合指標に組み入れることを試みた。分析は 0.5 N の水酸化ナトリウム溶液 200 ml 中に乾燥土 10 g を添加し、75°C 湯浴中で 1 時間加熱後、3 時間放冷した。この上澄液を 2600 rpm で 5 分間遠心分離し、分離液について原子吸光法でシリカ分の定量を

行った。

4. 間隙水量が固化強度に及ぼす影響

ここでは種々の含水比に調整した木節粘土による固化処理土を対象に、間隙水量が固化強度に及ぼす影響について検討した。

4.1 水／固化材比 (W/C) と一軸圧縮強さ (qu) との関係

固化材に普通ポルトランドセメント (NP) あるいは高含水土用固化材 (SF) を用いた場合の W/C と qu との関係を図3に示す。なお、図中の wi は土の調整含水比を示す。

これより、いずれの固化材を用いた場合でも W/C の増加に伴って qu が減少する傾向を示したが、土の含水比 (wi) による固化強度のばらつきが大きい。したがって、W/C を汎用的な強度予測指標とするのは困難であることが判明した。

4.2 ブリージング量との関係

高含水粘性土を固化する場合、含水比が高くなると、ブリージングにより生ずる完全分離水の量が固化強度に大きく影響を及ぼすと考えられる。完全分離水の量は固化処理土の水中の沈積状態 (固化材による凝集体としての構造) や、水和物の構造等により決定されると考えられる。そこで、ブリージング試験によって求められる完全分離水量 (Wb) を配合指標に組み入れて、固化強度との関係をみた。

木節粘土における固化処理土の含水比とブリージング率との関係を図4に示す。これによると、含水比の増加に伴ってブリージング率は大きくなり、固化材間では高

含水土用 (SF) のブリージング率が小さく、図2に示すような膨張傾向を呈した。ただし、含水比が200%程度 (液性限界の3倍程度) 以下の範囲内では、固化材の種類や W/C によらず、含水比とブリージング率はほぼ線形関係にあり、ブリージング量を予測することは可能であると思われる。

総水量 (W) からブリージング試験で求められた完全分離水量 (Wb)、および2.で検討した強結合水量 (Wc)、水和水量 (Wh) を差し引いたものを間隙水量 ($W_e = W - W_b - W_c - W_h$) として、 W_e/C と一軸圧縮強さとの関係を図5に示す。図5を前掲の図3と比較すると、NP, SF のいずれの固化材の場合においても各含水比による曲線が重なる傾向を示し、指標 W_e/C が土の含水状態によらない形で固化強度と関係付けられることが示唆された。

5. 材料の化学的特性が固化強度に及ぼす影響

4. では1種類の土を対象に土の含水量による影響について検討した。しかしながら、各種土による固化処理土の W_e/C と一軸圧縮強さとの関係を図6にまとめると、両者の関係は土の種類によってばらついている。すなわち、間隙水量だけを考慮した配合指標で、土の種類による影響を除去して正規化することは困難である。そこで材料の化学的特性を有効固化材量 (Ce) という形で評価し、さらに土の種類に対して汎用的な指標を見出すための検討を行った。

5.1 固化材成分の完全分離水中への溶脱

高含水性土において特にブリージング量が大きい場

図3 水／固化材比 (W/C) と一軸圧縮強さとの関係

図4 固化処理土の含水比とブリージング率との関係 (木節粘土)

合、有効固化材成分のブリージング水中への溶脱量が無視できないと推定された。ここでは有効固化材成分をカルシウム分とし、ブリージング水中のカルシウム濃度から固化材成分の溶脱量 (Cb) を求めた。

ブリージング量の大きい木節粘土のケースについてブリージング水中へのカルシウム溶脱率を図7に示す。これによると、W/C の増加 (固化材量の減少) に伴いカルシウム溶脱率は増える傾向にある。カルシウム溶脱量はほぼ水酸化カルシウムの溶解度に律速されているが、いずれのケースにおいてもブリージング水中の水酸化カルシウム濃度は飽和状態で一定のため、カルシウム溶脱率としては固化材量の減少とともに増加する結果となっ

ている。しかし、最も溶脱率が大きいケースでもその溶脱率は5%程度であり、完全分離水中に逸脱する固化材成分はごくわずかであると推定される。このため、有効固化材量にカルシウム溶脱量を考慮した配合指標である $We/(C-Cb)$ と一軸圧縮強さとの関係は、図6の場合と比較してその形状は大きくは変わらず、Cb を配合指標に組み入れて考慮する必要はないと判断された。

5.2 土のカルシウム吸着量

2. および 3.3 (3) で述べた推定に基づき、土のカルシウム吸着量を測定し、強度への影響について検討した。木節粘土 (KC)、カオリン (KAO)、およびベントナイト (BT) について、3.3 (3) の吸着試験で得られたカルシウム平衡濃度と吸着量との関係を図8に示す。これより、液相のカルシウム平衡濃度とカルシウム吸着量は両対数紙上で正の線形関係にあるいわゆるフロイドリヒ型の吸着特性¹⁵⁾を示している。土の種類ではベントナイト > 木節粘土 > カオリンの順に吸着量が大きく、この順位は土の陽イオン交換容量 (表1) における順位と一致する。

しかしながら、有効固化材量に土のカルシウム吸着量を考慮した配合指標である $We/(C-C_s)$ と一軸圧縮強さとの関係は、図6の場合と比較してその形状は大きくは変わらず、高含水粘性土を対象とした場合は C_s を配合指標に組み入れて考慮する必要はないと判断された。

5.3 土の反応性物質

2. および 3.3 (4) で述べた推定に基づき、土の反応性物質 (アルカリ下でのシリカ溶出量をもとに算出) を測定し、強度への影響について検討した。

図5 間隙水量/固化材比 (We/C) と一軸圧縮強さとの関係

図6 各種土における We/C と一軸圧縮強さとの関係

図7 ブリージング水中へのカルシウム溶脱率 (木節粘土)

図8 各種土のカルシウム吸着量

表3 各種土のシリカ溶出量 (NaOH 溶液下)

土の種類	Si溶出量 (mol/kg)
木節粘土 (KC)	0.063
カオリン (KAO)	0
ベントナイト (BT)	2.3
河川ヘドロ (SH)	0.13
シールド掘削土 (IS)	0.83

各種土におけるシリカ溶出量を表3に示す。これより、モンモリロナイトを含んでいるベントナイトおよびシールド掘削土のシリカ溶出量が大きく、カオリンや木節粘土のようなカオリナイト系の粘土鉱物が主成分の土はシリカ溶出量が非常に少ない。

有効固化材量に土の反応性物質量を考慮した配合指標である $We/(C+Cp)$ と一軸圧縮強さとの関係を図9に示す。なお、ここで示した Cp は、溶出したシリカが固化に寄与する場合、強度発現成分である $3CaO \cdot SiO_2$ に相当する量が固化材量に加算されると仮定して算出した。図9と図6を比較すると、図9では普通ポルトランドセメント (NP)、高含水土用固化材 (SF) のどちらの場合もプロット群がひとつの曲線上に集合する傾向にあった。すなわち、土の反応性物質量を考慮した配合指標 ($We/(C+Cp)$) が土の種類によらず、ほぼ一義的に一軸圧縮強さを決定付けられることが示された。特に、モンモリロナイトを含有した土のケース (BT, IS) においてプロットが左に大きく移動し、他のプロット群に接近する傾向が顕著であった。

6. 結 言

高含水粘性土の低強度固化処理において、固化強度の予測指標に関する検討を行い、以下の結論が得られた。

- ① 固化処理土の全水量 (W) からブリージング率より求められる完全分離水量 (Wb)、塑性限界に相当す

図9 各種土における $We/(C+Cp)$ と一軸圧縮強さとの関係

る強結合水量 (W_c), 水和水量 (W_h) を差し引いた間隙水量 ($We=W-W_b-W_c-W_h$) による指標 (We/C) は, 土の含水状態によらない形で強度と関係付けられる。

②土の反応性物質として, アルカリ下での土のシリカ溶出量から算出された C_p による指標 ($We/(C+C_p)$) は土の種類によらず, ほぼ一義的に強度が決定付けられる。これは, 反応性シリカがカルシウム・シリケート系等のゲル生成を促進し, 強度発現に寄与しているためと推定される。なお, 本検討で得られた指標 ($f=We/(C+C_p)$) と7日材令における一軸圧縮強さ (q_u) との関係を前述の式 (4) に従って表すと, 固化の形態別に以下のように回帰された。

$$\text{CSH 型: } \log(q_u) = 0.55 - 0.17 \cdot f, (r = -0.88)$$

$$\text{Et 型: } \log(q_u) = 0.98 - 0.11 \cdot f, (r = -0.84)$$

なお, 本研究では固化処理土の微視的構造の検討を行い, 本結論について検証したが, これについては別に報告を行う予定である。

最後に, 本論文の作成に当たり, 終始ご指導を頂いた京都大学工学部の若松貴英教授に心より謝意を表します。

参考文献

- 建設副産物対策研究会：建設副産物対策ハンドブック, 3～6頁 (1991)
- 総合的建設残土対策研究会：総合的建設残土対策に関する報告書 (1990)
- 大場正男：土木技術資料, 10, 12, 28～33頁 (1968)
- A. Herzog, J. K. Mitchell: Nature, 195, pp. 989～990 (1962)
- J. B. Croft: Geotechnique, 17, 2, pp. 119～135 (1967)
- 喜田大三, 炭田光輝, 久保 博：大林組技術研究所報, 13, 104～108頁 (1977)
- 山田 優, 三瀬 貞, 真嶋光保, 根来日出晴：第17回土質工学研究発表会, 2713～2716頁 (1982)
- 大野 茂, 永山 晃, 熊谷浩二：第16回土質工学研究発表会, 1837～1840頁 (1981)
- 有泉 昌：土と基礎, 25, 1, 9～15頁 (1977)
- 喜田大三, 炭田光輝, 久保 博：大林組技術研究所報, 14, 114～118頁 (1977)
- 小口深志, 坂西将徳, 滝口健一：第27回土質工学研究発表会, 2357～2360頁 (1992)
- 小口深志, 坂西将徳, 滝口健一：前田建設技術研究所報, 33, 133～143頁 (1992)
- Czernin (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, 44頁, 60頁 (1985)
- 二宮敏明, 本多淳裕, 井上善介, 福永 融：土と基礎, 37, 7, 65～70頁 (1989)
- 渡辺紀元, 早川 修：水, 21, 5, 64～72頁 (1979)