へどろ・軟弱土処理における各種固化材の比較検討*

喜 田 大 三** 久 保 博*** 漆 原 知 則***

Comparative Test for Various Solidificants of Hedoro and Soft Soil

by

Daizo KITA, Hiroshi KUBO and Kazunori URUSHIBARA

(Technical Research Institute, Ohbayashi-Gumi Ltd., Kiyose)

Special solidificants have often been used in recent years for treatment of Hedoro (bottom sediment mud) and soft soil. However, the conditions for application and the effects of such special solidificants are not yet thoroughly understood. Comparison tests of 14 varieties of cement-type solidificants were therefore performed.

(1) The solidificants were found to contain CaO , SiO_2 , Al_2O_3 and SO_3 , and were divided into six groups according to the amounts of these components contained.

(2) A solidificant having a large content of SO_3 (11~13%) produced the highest strength. On the other hand, ordinary portland cement and solidificants of similar composition produced low strengths.

(3) It was observed by means of an X-ray diffractometer and a scanning electron microscope that the formation of ettringite in solidified soil contributed greatly to strength gain.

(Received July 22, 1981)

キー・ワード：へどろ，軟弱土，固化処理，セメント系固化材，エトリンジャイト

1 はじめに

周知のように，土の物理的および力学的な性状を改良する土質安定工法の一つとして，セメントや石灰などを混合する化学的な工法がある。この工法は元来，道路や滑走路などの土質安定に用いられることがほとんどであった。しかし，近年，特に昭和40年代後半から河川や海域の堆積へどろ（底質），また土工事で発生する軟弱掘削残土など，極めて劣悪な性状の土にも適用されることが多くなっている。その主な理由として，これらの劣悪な土は，以前には発生量が少く，海洋や山間への投棄が比較的自由にできたけれども，近年環境への影響が問題となり投棄処分は困難になっている。そのため，劣悪な土でもセメントや石灰で所定強度まで固化処理して，処理土を現地の構造物あるいは仮設構造物の一部に利用する機会が増えている。

ところで，へどろや軟弱掘削土などは非常に高含水比であり，さらにへどろでは有機物を多量含んでいることが多い。そのため，これらの土の固化材として，従来の普通ポルトランドセメントや生石灰などでは充

分な効果が得られない場合がある。このような場合，へどろ・汚泥用，あるいは地盤改良用などとして化学組成および鉱物組成を調整した固化材（以下，特殊固化材という）が用いられることが多い。特殊固化材はセメントメーカーなどから発売されており，その種類は20種類以上である。しかし，それらの特殊固化材の特徴，有効性，および適用条件などに関する検討は個々には行われているが，全体としてはほとんどない。

そこで，筆者らは特殊固化材に関する知識を深め，現場適用の基礎資料を得るため，特殊固化材の強度の特徴，およびその原因について検討を行ったので，以下に報告する。

2 供 試 土

供試土としては，Table I に示す4種類，すなわち①田子の浦港へどろ（田子の浦という），②勝島運河へどろ（勝島という），③霞ヶ浦へどろ（霞ヶ浦という），および④大手町粘土（大手町という）を用いた。

これらの土は，含水比，有機物含有量などがそれぞれ大きく異っている。田子の浦は紙・パルプ工場などからの排水に起因する有機物を多量含む港湾へどろである。勝島は都市の生活排水などで汚染された運河のへどろである。また，霞ヶ浦は富栄養化が進み青粉の

* 原稿受理 昭和56年7月22日

** 正 会 員 (株)大林組技術研究所 清瀬市下清戸

*** (株)大林組技術研究所 清瀬市下清戸

Table I. Properties of soil sample.

	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	Attarberg limit			Specific gravity G_s	Ig-loss (%)	Controlled water content (%)	Liquidity Index IL
				LL (%)	PL (%)	PI				
Ohtemachi	50	49	1	114	52	62	2.61	6	250	3.19
Kasumigaura	38	47	15	113	35	78	2.52	11	250	2.76
Katsushima	36	51	13	120	43	77	2.45	23	230	2.43
Tagonoura	77	12	11	268	54	214	2.34	43	510	2.13

発生が著しい湖沼のへどろである。さらに、大手町はビル建設工事の基礎掘削において発生した粘性土である。

土の固化試験においては、土の含水比は固化強度に大きく影響する因子の一つである。したがって、これらの供試土の含水比の設定基準が問題になったが、ここでは各供試土の水分保持特性に応じて、かなり高い含水比における固化強度を試験することにした。具体的には、各供試土を固形分濃度として5%で水に懸濁させ、静置沈降させてほとんど平衡に達したのちの含水比（土壌学の分野では、これを沈定含水比という）に調製した。各供試土の調製含水比はTable Iのようである。また、これら調製含水比を液性指数 $IL[(w-LL)/PI]$ で表すと、Table I のように 2.1~3.2 であった。

3 供 試 固 化 材

固化材には各種あるが、主なものはセメント系と石灰系である。そのうち、高含水比のへどろや軟弱掘削土の固化に用いられるのは、大部分セメント系である。その理由として、石灰系（特に生石灰を主体としたもの）は消石灰化に伴う含水比低下、およびボゾラン反応などによって土を安定化するものであるが、高含水比土の場合には非常に多量用いなければ効果が少ないこと、一方セメント系は水硬性が著しいので高含水比土でも固化しやすいことなどがあげられる。

したがって、ここではセメント系固化材について試験した。供試したのは14種類である。これら固化材を化学成分で SO_3 含有量 (%) の少い方からA, B, C, …… , Nと表示した（5・1節参照）。なお、Aは普通ポルトランドセメント（以下、普通セメントという）である。

4 試 験 方 法

各供試土を2節に述べた含水比に調製したのち、所定量の固化材を水道水でスラリー状（水/固化材の質量比 0.8）にして添加混合した。固化材添加量は土の湿潤質量に対して、大手町、霞ヶ浦および勝島にはそれぞれ10%、また田子の浦には15%とした。また、土と固化材の混合は、小型のホバート型ソイルミキサーで10分間行った。そして、 $\phi 3\text{ cm} \times h 7\text{ cm}$ の塩ビ製モ

ールドに入れ、密閉状態にして20℃で7日間、28日間および50日間養生したのち、JIS A1216 の方法で一軸圧縮強度を測定した。

つぎに、一部分の固化試料について、粉末法によるX線回折、またCRU法で試料調製したのち走査型電子顕微鏡観察を行った。

5 結 果 と 考 察

5・1 固化材の化学組成と分類

固化材の硬化反応は、その化学組成、鉱物組成および粒径（比表面積）などによって影響される。ここでは、それらのうち特に大きな影響を及ぼすと考えられる化学組成について検討した。

各固化材の化学組成をFig.1に示す。Aは普通セメントであり、B~Nはへどろ・汚泥用あるいは地盤改良用などとして使用されているセメント系の特殊固化材である。

これらの固化材はいずれも CaO および SiO_2 を主体にしており、その他に Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO および SO_3 などを含んでいる。しかし、固化材によって各成分の含有量には差異があり、 CaO は47~65%、 SiO_2 は16~29%、 Al_2O_3 は4~10%、さらに SO_3 は2~19%の範囲にある。そして、ここで注目すべきこととして、特殊化材の SO_3 含有量はいずれも普通セメントのそれを上回っている。すなわち、へどろ・汚泥用あるいは地盤改良用としての効果を高めるために、 SO_3 を増量していることが判明する。なお、これらの SO_3 はX線回折の結果、半水石膏 ($CaSO_4 \cdot 0.5H_2O$) あるいは2水石膏 ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) として含有されていた。

そこで、供試の14種類の固化材を CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 および SO_3 の各含有量によって分類した結果、Fig.1に示すようにⅠ~Ⅵのグループに分けられた。各グループの特徴は以下のようである。

- Ⅰ グループ：普通セメントに類似した化学組成を有する固化材。
- Ⅱ グループ： CaO が非常に少く、 Al_2O_3 および SiO_2 が非常に多い。
- Ⅲ グループ： Al_2O_3 が多く、 SO_3 がやや多い。
- Ⅳ グループ： CaO が少く、 SO_3 が多い。

Fig. 1. Chemical compositions of cement-type solidificants.

Fig. 2. Unconfined compressive strengths of soils solidified by various solidificants. (Curing time: 28 days).

Vグループ: CaO がやや少く, SO₃ がかなり多い.

VIグループ: CaO および SiO₂ が少く, SO₃ が非常に多い.

5・2 各種固化材による一軸圧縮強度

5・2・1 固化材の種類と固化強度 各固化材によって4種類の土を固化した場合の一軸圧縮強度 (q_u 28日) を Fig. 2 に示す. q_u は固化材の種類によってかなり差異があり, 大手町では 3.1~10.4 kgf/cm², 霞ヶ浦では 1.7~7.8 kgf/cm², 勝島では 0.1~2.9 kgf/cm², さらに田子の浦では 0.1~1.1 kgf/cm² の範囲にばらついている. そして固化材添加量一定では, q_u は大手町が最大で, 以下霞ヶ浦, 勝島, 田子の浦の順である. このことは, 固化強度が土の性状の影響をうけ, 特に含水比が増大するほど, また有機物含有量が增大するほど減少することを示唆している.

つぎに, これらの q_u について, A(普通セメント)

の q_u を1とした場合の比率で表示した結果を Fig. 3 に示す. B, C, E など一部の固化材を除き, 特殊固化材の q_u は普通セメントの q_u を上回っている. そして, 普通セメントよりも大きい q_u を示す特殊固化

Fig. 3. Strength ratios with strength by solidificant A as 1. (Curing time: 28 days).

材の場合、普通セメントに対する強度比は田子の浦および勝島では大きい、霞ヶ浦および大手町では比較的小さい。すなわち、今回の供試土において、特殊固化材には普通セメントよりも強度の小さいものも一部あるが、大部分の特殊固化材は普通セメントよりも大きい強度を示し、その強度比は高含水比で有機物の多い土ほど著しい。

5・2・2 養生日数と固化強度 養生日数（7日，28日，50日）に伴う固化強度の増大状況の例として、大手町における固化材A，H，Kの例を Fig. 4 に示す。強度の増大程度はHが最大で、以下A，Kの順である。

Fig. 4. Increases with curing time in solidified strengths by various solidificants for ohtemachi clay.

ところで、養生 a 日から養生 b 日 ($a < b$) までの強度増大は、一般に q_{ub}/q_{ua} あるいは $q_{ub} - q_{ua}$ などによって表示される。しかし、これらの表示法による強度増大の値は、強度の大小に大きく影響され、その影響は q_{ub}/q_{ua} と $q_{ub} - q_{ua}$ とでは相反する関係である。すなわち、小さい強度の領域では、 $q_{ub} - q_{ua}$ が小さくても q_{ub}/q_{ua} はかなり大きい値を示すことがある。また、大きい強度の領域では、 q_{ub}/q_{ua} が小さくても $q_{ub} - q_{ua}$ はかなり大きい値を示すことがある。したがって、いずれの表示法を用いても、強度増大を広い範囲で比較する際、不都合な場合がある。

そこで、小さい強度領域の強度増大から大きい強度領域の強度増大まで、できるだけ一律に比較できる表示法を検討した。その結果、 q_{ub}/q_{ua} と $q_{ub} - q_{ua}$ の中間的な表示法として、ここでは $\{(q_{ub} - q_{ua})/q_{ua}\} \cdot (q_{ub} - q_{ua})$ が適当であると考えられ、これを強度増大率 R と定義した。

強度増大率 R によって表示した各固化土の養生日数に伴う強度増大を Fig. 5 に示す。強度増大率は、有機物の比較的少ない大手町および霞ヶ浦では大きく、また有機物に比較的富む勝島および田子の浦では小さかった。一方、強度増大率を固化材の種類によって比較すると、A（普通セメント）は一般に、大きい強度増

Fig. 5. Strength-increase coefficient with curing time.

大率を示した。また、他の固化材の結果は省略するが、一般に、大きい固化強度を与える固化材は、強度増大率が小さい、すなわち長期強度の上昇が少い傾向が認められた。

5・2・3 固化材の化学組成と固化強度 Fig. 2 に示すように、固化強度はⅠ～Ⅵに分類した固化材グループと概ね対応していることが認められる。

Ⅰグループでは、Dが田子の浦でかなり大きい強度を示すが、全体としてはいずれも小さい強度である。Ⅱグループは最小の強度を与えている。Ⅲグループはいずれの土においてもFが中位の強度、またGが大きな強度を与えている。Ⅳグループでは、Hが有機物の少い大手町および霞ヶ浦でかなり大きな強度を示すが、全体としては中位の強度である。Ⅴグループはいずれの土にも平均的に大きな強度を示し、特にKは大手町を除く3種類の土で最大強度を与えている。最後に、Ⅵグループはいずれの土においても中位の強度である。

このように、固化強度は固化材分類とかなり良好に対応することが認められたので、つぎに固化材の化学

Fig. 6. Correlations between chemical compositions of solidificants and solidified strengths of soils.

組成と強度の関係を検討した。その結果, Fig. 6 に示すように, 化学組成として CaO と SO_3 の影響が特に明りょうであった。図において, 最大の強度を示す K を中心にして大きな強度の V グループがあり, そのすぐ隣に同じく大きな強度の III グループの G が存在している。そして, V グループをとり囲むように中位の強度の III, IV および VI グループが分布している。さらに, これらからかなり離れた位置に小さい強度の I および II グループが分布している。

以上, 今回の試験のみから結論づけはできないが, 固化強度は固化材中の CaO および SO_3 含有量にかなり大きく影響され, 供試した 4 種の土では CaO 58~60%, また SO_3 9~13% の場合に大きな強度を与えることが判明した。

5・3 X線回折による固化強度の検討

固化材の種類による強度の差異の原因を検討するため, X線回折法による鉱物学的検討を行った。Fig. 7 に X線回折図の例として, 田子の浦および霞ヶ浦の生土 (固化材無添加), また 各土の固化材 A および K による固化後の X線回折図を示す。

いずれの土も生土では石英, 長石および粘土鉱物を含んでいる。そして, K による固化土 (養生30日) では 9.1° ($9.73 \text{ \AA}$), 15.8° ($5.61 \text{ \AA}$) および 22.9° ($3.88 \text{ \AA}$) に明りょうなエトリンジャイト (Ettringite,

以下 Et で表す) の回折ピークがみられる。一方, A (普通セメント) による固化土 (養生30日) では, Et のピークは田子の浦でわずかに認められ, 霞ヶ浦では認められない。なお, これらの固化土で Et 以外のセメント水和鉱物のピークは認められなかった。

ところで, Et とは $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ の示性式で表される針状鉱物で, セメントバチルスとも呼ばれ, セメントや石灰を用いた土質安定処理において, 強度増大に大いに寄与することが報告されている。そこで, 固化土中の Et 生成量と強度の関係, 固化材の化学組成と Et 生成量の関係を以下に検討した。

Et 生成量は, ここでは 9.1° の Et 回折線における回折 X線強度を 40 秒間 カウントする方法で測定した (3 回繰返し)。Fig. 8 に固化土中の Et 生成量と強度の関係を示す。図示するように, 田子の浦では, N を除き, 強度は Et 生成量とともに増大している。一方, 霞ヶ浦では, 強度と Et 生成量との関係はそれほど明りょうでない。

また, Fig. 9 に固化材中の SO_3 含有量と固化土中 Et 生成量の関係を示すように, いずれの固化土においても, Et は固化材中の SO_3 含有量が多いほど, 多量生成している。

以上, 高い強度を発現する固化土は Et を多量生成しており, その Et 生成量は固化材中の SO_3 含有量

Fig. 7. X-ray diffraction charts for soils and solidified soils.

Fig. 8. Correlations between SO_3 contents of solidificants and X-ray diffraction intensities for ettringite in solidified soils (curing time: 30 days).

Fig. 9. Correlations between X-ray diffraction intensities for ettringite and unconfined compressive strengths of solidified soils.

が多い（最大19%）ほど増大している。これらのことから、前項で述べたように、Vグループの固化材（J, K, L, M）が相対的に高い強度を発現したのは、それがI～IVグループの固化材に比べて SO_3 を多量含んでおり、セメント水和鉱物に加えて、Etを多量生

成したことよることが判明した。

なお、固化材Nが多量の SO_3 を含み、Etを最も多量生成したにもかかわらず、固化強度が中程度に落ち着いたのは、固化強度においてEtと同様に重要である他のセメント水和鉱物の生成状態が不良であったことによると考えられる。また、霞ヶ浦において、Et生成量がある一定値以上になると、強度がEt生成量に無関係に増大したことも、他のセメント水和鉱物の生成状態の影響などによると推察される。

5・4 走査型電子顕微鏡による強度の検討

固化材による強度差異の原因について、走査型電子顕微鏡（走査電顕）によって検討した。Fig. 10～17に田子の浦、勝島、霞ヶ浦、大手町のそれぞれ生土および固化土の走査電顕写真を示す。なお、各固化土の写真はそれぞれの土で最大の強度を発現したものを例示した。

写真に示すように、固化土中には、Et以外のセメント水和鉱物の粒塊が形成され、それらの間げきを針状結晶のEtが充てんし、さらに粒塊を架橋している。このことから、Etの生成がEt以外のセメント水和鉱物の生成と同様に固化土の強度増大に寄与していることが容易に推察され、前項のX線回折の結果とも一致する。

6 ま と め

近年、へどろや軟弱土の処理するために、専用の特殊固化材が使用されることが多い。これらの特殊固化材を現場適用する場合の基礎資料を得るため、14種類のセメント系固化材について、固化強度の特徴およびその原因などを検討した。供試土は含水比および有機物含有量などのかなり異なる4種類の土である。

(1) 固化材の主成分は CaO (47～65%)、 SiO_2 (16～29%)、 Al_2O_3 (4～10%)、および SO_3 (2～19%) などであり、これらの化学組成の特徴によって固化材をI～VIのグループに分類した。

(2) 固化強度は SO_3 を多量 (11～13%) 含むVグループが比較的大きな強度を発現し、普通ポルトランドセメントおよびそれに類似の化学組成を有するIグループの強度は小さかった。なお、 SO_3 を非常に多量 (19%) 含むVIグループは中位の強度であった。

Fig. 10. Ohtemachi.

Fig. 11. Ohtemachi solidified by solidificant M.

Fig. 12. Kasumigaura.

Fig. 13. Kasumigaura solidified by solidificant H.

Fig. 14. Katsushima.

Fig. 15. Katsushima solidified by solidificant K.

Fig. 16. Tagonoura.

Fig. 17. Tagonoura solidified by solidificant K.

(3) 養生日数に伴う強度の増大程度は、有機物の少ない土の方が有機物に富む土よりも大きかった。そして、固化材別にみると、比較的小さい強度を示す固化材において、強度増大が大きい傾向が認められた。

(4) X線回折および走査型電子顕微鏡によって検討した結果、大きい強度を示す固化土中には、針状のエトリンジャイトが多量生成していた。このエトリンジャイトは、エトリンジャイト以外のセメント水和鉍物や土粒子の粒塊間を充てんし、架橋して、強度増大に重要な効果を及ぼしていた。そして、エトリンジャイト生成量は固化材中の SO_3 含有量とともに増大する

ことから、 SO_3 を多量含む V グループ固化材が大きい強度を発現するのは、エトリンジャイトの生成が大いに寄与しているためである。

(昭和55年6月11日 第15回土質工学研究発表会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 喜田大三, 久保 博, 土と基礎, **29**, 5, 53 (1981).
- 2) 奥村樹郎, 光本 司, 寺師昌明, 第12回土質工学研究発表会講演集, p. 1261 (1977).
- 3) 有泉 昌, 大場正男, セメント技術年報, **XV**, 400 (1961).