

セメント・水砕を用いた深層混合処理工法による 海底軟弱堆積土地盤の改良について（第1報）

内 藤 幸 雄

Consolidation of the Soft Clayey Soils Deposited on the Sea Beds by the Deep Chemical Mixing Method with the Mixture of Cement and Granulated Slag (1st Report)

Yukio NAITO

The deep mixing method, which is one of the method of improving the basic foundation, is that of hardening the soft clayey soils which have been deposited on the sea beds by stirring and mixing with the some materials of hardening.

This study presents a new method that the mixture of adequate quantities of the special cement and the granulated slag are used for delaying the hardening speed of the mixed clayey soils, instead of using the well-used materials of hardening such as the cement slurry and quicklime. It is believed that this new method is useful for the design of the basic foundation and makes the construction of the marine base much more reliable.

1. まえがき

日本における港湾施設や臨海施設はそのヒンターランドとの関係から湾内や内海に設置される場合が多い。ところがこの湾内や内海の海底は殆んど軟弱な厚い沖積層からなっているので、これらの施設の築造には地盤の改良が必要である。

これらの軟弱地盤の改良方法として従来用いられていた工法は主として(a)砂による置替工法, (b) Sand Compaction Method, (c) Sand Drain Method などであるが、近年、これらの方法は次の幾つかの問題のため実施が困難になってきている。すなわち、置替工法は掘削粘土の処分や掘削に伴う海の濁りが公害を引き起こしている。Sand Compaction Method は振動や騒音に対して苦情が出たり、盛上った土の処分に困っている。また Sand Drain Method は工期が長いなどの欠点を持っている。それにこの三工法共改良地盤の一軸圧縮強度が 1 kg/cm^2 程度と低く、最近の大型化した構造物の基礎としては、強度的にも十分応じ得るとはいえなくなっている。

このような幾つかの隘路を打開するためには、もはや上述の物理的改良工法には自ら限度があり、前々から新しい工法が望まれていたわけである。これに答えるものとして最近登場したのが深層混合処理工法^{1),2),3)}という化学的な改良工法であり、1970年頃から運輸省の港湾研究所を中心に研究が進められていたものである。そして昭和

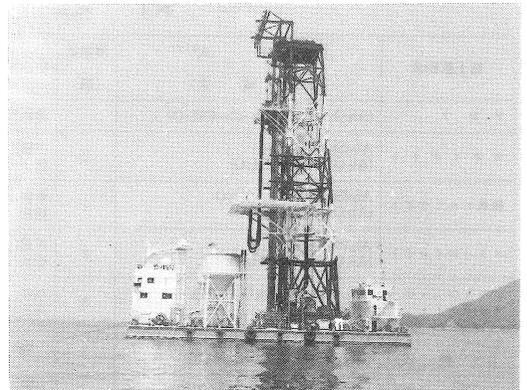


写真1 深層混合処理機の全景

50年には実際に現場で使用され始め、昭和54年末には100箇所の施工例をみるに至っている。

深層混合処理工法は固結剤を深層地盤に供給し、攪拌・混合して地盤の固結化を図る工法である。固結剤としては当初はもっぱら生石灰が使用されていたが、現在では殆んどセメントスラリーが使用されている。本研究はこのセメントにさらに水砕を加えることにより改良土の固結化速度の制御を図り、この工法による基礎の設計・施工を、より有利なより確実なものにしようとするものである。

2. 軟弱粘性土の固化

運輸省港湾研究所の技研資料⁴⁾によれば、日本の港湾地

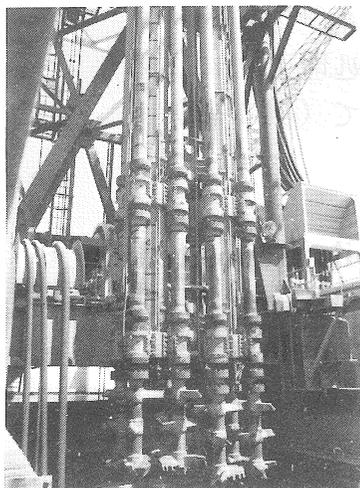


写真2 処理機の攪拌翼部分

域における土の工学的諸係数は次のとおりである。すなわち、含水比は50%~150%程度であり、液性限界は夫々の含水比の10%増である。塑性限界は含水比の夫々に対し28%~55%である。また間ゲキ比は10%~40%程度であり、これに対し液性限界は夫々44%~160%である。

塑性限界は間ゲキ比の夫々に対して22.5%~57%である。次に粘土含有量を示せば10%~70%程度である。しかしこの場合は、粘土含有量と含水比や液性限界、塑性限界などとの相関関係は必ずしも認めることはできない。これは粘土の堆積過程すなわち、粘土の圧密進行状況や粒子表面の性質の差などの影響が大きいからである。しかし、全体としてはやはり或程度の相関関係があり、例えば上記の粘土含有量に対し含水比は夫々40%~120%程度である。砂の含有量は含水比、液性限界、塑性指数などの指数に殆んど影響を及ぼさない。それはこれらの指数が粘土あるいは、粘土・シルトの粒子の特性や粒子に付着した水によって左右されるからである。しかし、含水比のみは砂の含有量が30%以上になるとわずかではあるがその含有量の増加に伴い減少する傾向を示している。

上記港湾技研の資料によれば日本の港湾地域の土は殆んど粘性土である。従ってこの土の土質特性はまたこの含有粘土の量および特性に支配されることになる。その含有粘土の特性は含有粘土鉱物により左右されるので、粘性土中の主な粘土鉱物の一般性状を表1⁵⁾に示し、またこ

表1 地盤中のおもな粘土鉱物の一般性状

| 粘土鉱物名 | 化学式 ⁶⁾⁷⁾ (組成式) | 層構造 (層) | 結晶系、形状 | 単位粒子の大きさ ⁸⁾ | 層間距離 ⁷⁾ (Å) | イオン交換量 ⁷⁾⁹⁾ (meq/100g) | 比重 ⁶⁾ | 備考 (化学組成の補記) |
|-------------------|--|------------|--------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------------------|------------------|-------------------------------|
| アロフェン | $(Al_2O_3 \cdot (1 \sim 2)SiO_2 \cdot (4 \sim 6)H_2O)$ | | 非晶質、球状 | 35~55 Å | 22~70 | 20~40 | 2.3~2.6 | |
| カオリナイト | $Al_2(Si_2O_5)(OH)_4 ; (Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O)$ | 2 | 三斜、六角板状 | 0.05~2 μ (厚さ0.01 μ) | 7.2 | 3~15 | 2.61~2.65 | |
| 加水ハロイサイト | $Al_2(Si_2O_5)(OH)_4 \cdot 2H_2O (Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 4H_2O)$ | 2 | 単斜、棒状、球状 | 棒状は不定 球状は0.05 μ | 10.1 | 40~50 10~40 | 2.1 | |
| メタハロイサイト | $Al_2(Si_2O_5)(OH)_4 (Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O)$ | 2 | 単斜、棒状、球状 | 棒状は不定 外径0.04~0.2 μ | 本文参照 | 5~10 | | |
| ナトリウム・モンモリロナイト | $(Al_{1.67}Mg_{0.33})Si_4O_{14}(OH)_2 \cdot nH_2O \cdot Na_{0.33}$ | 3 | 単斜、無定形薄板状 | 0.02~0.2 μ 厚さ20 Å | 15 | 80~150 | 2.7~2.8 | |
| モンモリロナイト (一般式) | $Mx \cdot (Al_{1-x} \cdot Mg_x)Si_4O_{20}(OH)_4 \cdot nH_2O (M : Na, K, Ca)$ | 3 | 同上 | 同上 | 15 | 80~150 | 2~3 | |
| パーミキュライト (蛭) | $Mx(Mg \cdot Fe)_6(Si_{8-x} \cdot Alx)O_{20}(OH)_4 \cdot yH_2O$ | 3 | 単斜、柱状、葉片状 | 2 μ、厚さ数十 Å | 14.2 | 100~150 | 2.4 | M : Mg, Ca など x=1~1.4, y≠8 |
| イライト | $Kx(Al, Fe^{2+}, Fe^{3+}, Mg)y \cdot (Si, Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$ | 3 | 単斜、板状 | 0.1~1 μ 厚さ30 Å くらい | 10 | 20~30 | 2.7 | x = 1~0.5 y ≧ 2 |
| セリサイト | $Kx(Al, Fe^{2+}, Fe^{3+}, Mg)y(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot H_2O$ | 3 | 単斜、六角板状 | 0.1~数 μ 厚さ~100 Å | | きわめて少 | 2.78~2.88 | x = 1~0.5 y = 2 白雲母に近い |
| 白雲母 | $K_2Al_4(Si_6 \cdot Al_2)O_{20}(OH)_4$ | 3 | 単斜、板状 | 大きいものもある | | きわめて少 | 2.8~3 | |
| クロライト (緑泥石) | $(Mg_{6-x-y} \cdot Alx \cdot Fe_y)(Si_{4-x} \cdot Al_2)O_{10}(OH)_8$ | 3+1 (複) | 単斜または斜方、板状 | 0.05~2 μ 厚さ50 Å~0.1 μ | 14 | 10~40 | 2.6~3.3 | |
| パイロフィライト (葉蠟石) | $Al_2Si_4O_{10}(OH)_2 (Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O)$ | 3 | 単斜、葉片状 | | 9.3 | ほとんどなし | 2.84 | |
| アンチゴライト | $Mg_3Si_2O_5(OH)_4 (3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O)$ | | 単斜、薄片状、短冊状など | (大きいものもある) 数 μ 以下 | | | 2.62 | |
| クリソタイル | $Mg_6Si_4O_{11}(OH)_6 \cdot H_2O (3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O)$ | | 単斜、棒状など | 数十 μ のものもある | | | 2.36~2.5 | |

(注1) Si⁴⁺ (イオン半径0.4 Å) にO²⁻ (イオン半径1.4 Å) 4個からなるとき、各O²⁻の中心を線で結ぶと正四面体となる。Si⁴⁺は各O²⁻の間に挟まれている。

(注2) 平面に4個のO²⁻を四角に置き、その凹の上に1個、凹に1個のO²⁻を置き、各O²⁻の中心を線で結ぶと正八面体となる。Al³⁺ (イオン半径0.5 Å) は各O²⁻の間に挟まれている。

の表中の主な粘土鉱物と $\text{Ca}(\text{OH})_2$ との反応性状を示せば次のとおりである。

アロフェンはX線では非晶質で $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (比) が変動している。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ との反応性に富んでいて反応生成物は主として C_2ASH_8 ¹⁰⁾ である。

カオリナイトは六角板状だが結晶度により整形度が異なる。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ との反応はその結晶綾から起りCSH系^{11)~13)}や C_4AH_{13} ¹³⁾ を生成し、さらには C_2ASH_8 ¹²⁾ など認められたりする。

ハロイサイト、メタハロイサイトはともに広い意味でカオリナイト族である。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ との反応性はカオリナイトより大きい。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ との反応生成物には C_2ASH_8 ¹⁴⁾ がカオリナイトの場合より生成しやすいとされている。

モンモリロナイトはペントナイト、酸性白土の主要な粘土鉱物である。モンモリロナイトの $\text{Ca}(\text{OH})_2$ との反応に関する研究は内外に多くみられるが、その結果は必ずしも一致していないようである。反応生成物としてはCSH, C_4AH_{13} ¹⁵⁾ が認められている。また Al_2O_3 が多い場合には C_4AH_{13} の生成が認められる。

イライトはその結晶にもよるが一般に反応性は小さい。クロライトは反応速度が小さい。

粘性土に石灰を添加すると粘性土の土質特性が著しく改善されることは、これまでの多くの実験や施工例で明らかである。この改善機構についての通説としてはイオン交換、凝集化、ポゾラン反応および炭酸化が取上げられてきた。しかし、Caを交換性イオンとする土でも、また凝集化された粘土を持つ土でも安定処理を要するものが多く、炭酸ガスとの接触がなくとも強度増進があるなど、安定化機構の考え方の訂正が必要となっている。土の塑性限界の増加は限定された石灰添加量までであることに注目して、Iowa大学のDavidson一門は石灰保持(Lime retention)反応説を発展させた。Davidsonなどの研究^{16),17),18),19),20)}によればモンモリロナイト粘土が Ca^{++} で飽和されていても石灰保持はみられる。 Na^+ で飽和されていても Na^+ は溶出しがたく、石灰保持点では添加した石灰は $\text{Ca}(\text{OH})_2$ として存在しない。このように Ca^{++} は粘土表面に集まり、粒子が電氣的に引き合ってフロックを生じ、粘土はシルトとして行動する。 Ca^{++} の過剰が粘土の表面に集り、一部は層間に侵入し、さらに多量の Ca^{++} が表面に吸着されて存在する。この現象を詳細に研究するためにPL、粘度、PHなどと石灰量との関係およびX線、DTA、イオン交換能などの測定を行った。測定結果によると、石灰保持点でPH、粘度およびPLが最大となり、この点の後ではじめて消石灰は遊離状態で存在し、Na粘土とCa粘土の石灰保持量の差は陽イオン交換量に近いことをみだしている。これらのことからPHが高

くなると粘土鉱物のエッジにあるSi-OH群の解離度が大きくなり、イオン交換量は増大する。つまり石灰保持反応の内容はPH依存性陽イオン交換反応により高PH領域で粘土表面に吸着された Ca^{++} が粒子を結合し、粘度を大きくし、PLを高めると結論している。

これに対してDiamond, Kinterは上記のように粘土表面に無制限に石灰が集まれば、粘土の負荷電の減少が起らねばならずDavidsonなどの考えは不自然であるとして、石灰の物理的吸着説^{21),22)}を提出している。すなわち、図1に示すようにモンモリロナイトと石灰の反応では、

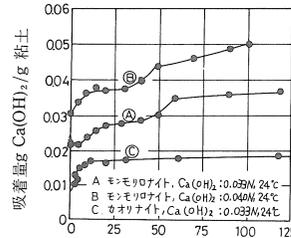


図1 石灰の吸着速度

Ca^{++} および OH^- は反応液中から等量ずつ減少し、反応直後には可逆的に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ は浸出可能で、5分後には石灰保持量に近い約3%が吸着され、反応体はX線でもDTAでも遊離石灰を認めないし界面電位も変化なく、反応熱も殆んどない。さらに数日を経過すれば浸出量は少なく不可逆的である。石灰保持容量に近い3%の石灰量は粘土表面に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の1分子膜が生成したことと相当し、時間の経過と共に不可逆化するのはいくつかのケイ酸石灰塩またはアルミ酸塩水和物の生成に関連すると考えた。このような実験結果から Ca^{++} の過剰集積によるこの石灰保持反応の解釈は難点を持つと考え、さらに物理的吸着と保持反応を結びつけて説明を行っている。

すなわち、電解質である $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の添加により粘土粒子表面の電気二重層は変化し、粒子間の反発力が小さくなり凝集してフロックを造る。このフロックの中で粒子はその表面の負電荷とエッジの陽電荷のけんいんのために近接粒子は接着してカードハウス構造またはダブルT構造を形成する。この粒子の接触部では表面に吸着されて存在する $\text{Ca}(\text{OH})_2$ とエッジに露出する $\text{Al}(\text{OH})_3$ の間で C_4AH_{13} を生成し、弱い結合が起る。この結合体は粒度分析では安定であるが、やや反応がおそく強い結合力を示すCSHの生成するまで可逆的に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ は水に浸出され、それに伴い粘土粒子間の集合構造は破壊される。

3. 粘性土の固結材による固化および固化速度

ソイルライムが時間経過と共に強度を発生するのは主としてポゾラン反応によるものである。しかし、強度の発生速度や最終強度の大きさは石灰の品質や粘土の温度、

含水比，粘土鉱物の種類や含有量などに左右されることはすでに良く知られているところであるが，以下固結材の種類として石灰の他にセメントや水砕を加えた場合を含めて粘性土の固化様相をもう少し詳細に述べてみる。

粘性土の固化はそれに混入される石灰の活性度および量により左右される。また石灰の粒度および混練度により固化程度に差が生じる。

粘性土の固化程度はその含有粘土鉱物の種類および量により左右される。すなわち，粘土鉱物の種類によっては石灰と反応しないし，また反応する粘土鉱物（例えばハロサイト・モンモリロナイト・カオリナイト・アロフェンなど）でもその含有量が少ないと固結強度は低いことになる。

粘土鉱物が固化するに必要な石灰の量は粘土鉱物の種類によっても違うが，前述のとおり粘土鉱物量の2～3%以上は必要であるとされている。しかし石灰の量が多ければ多い程固結強度が強いというわけではなく8%²³⁾程度以上は余り効果はないようである。(但し15%²⁴⁾以下なら石灰の多い方が，いくらかでも大きい強度を示すともされている。)

含有粘土鉱物量が少なくシルトや細砂の含有量が多い粘性土の場合は，その粘土鉱物が石灰に対して反応性のものであっても，石灰を使用するだけでは粘性土の固化強度を高めることはできない。この場合は石灰の代りに

セメントを使用するのが有効であると考えられる。なぜならばセメントはその水和反応に関連して発生するCa(OH)₂により粘土鉱物と反応する他に含有シルト・細砂を骨材としてモルタルを造ることができるからである。

粘性土はその含水比の大小によって強度が異なるものであるが，同じ量の固結材を混入した場合にも同様に，含水比の大きいものは弱く，含水比の小さいものは固化強度が大きい。

粘性土の固化速度は温度に左右される。固結材の種類に関係なく温度の高い粘性土の方が固化速度は大きい。

粘性度の固化速度が温度により左右されることはすでに述べたとおりであるが，またそれは同じ温度でも，固結材の種類により左右される。例えば固結材として石灰を用いた場合とセメントを用いた場合の固化速度の比較では，一般に石灰の方が早い。普通セメントと低熱セメントの比較では普通セメントの方が早く，低熱セメントと低熱セメント・水砕では低熱セメントの方が早いことになる。海底沖積軟弱地盤改良の設計・施工に際しては，この場所が海底であり，また層厚が厚いなどの理由から適当な固化速度が望まれるわけである。

4. 各種固結材による軟弱粘性土の固化

各種固結材といってもここで取り上げているのは次の4種類である。すなわち，それはi) 生石灰，ii) 普通

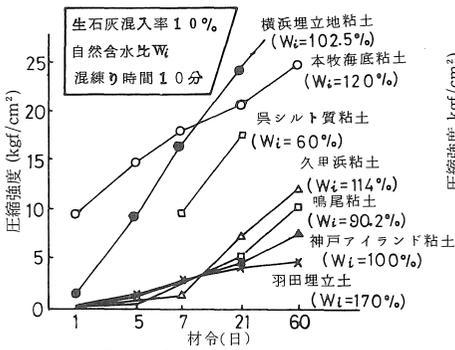


図2 各地粘性土の改良効果

表2 各地粘性土試料の分類特性

| 試料名 | 砂分 (%) | シルト分 (%) | 粘土分 (%) | G _s | L.L. (%) | P.L. (%) | I _p (%) | 有機物含有量 (%) | P ^H (H ₂ O) (KC) |
|---------|--------|----------|---------|----------------|----------|----------|--------------------|------------|--|
| 横浜埋立土 | 9.9 | 44.6 | 45.5 | 2.73 | 78.8 | 39.1 | 39.7 | 2.95 | 8.3 7.8 |
| 羽田埋立土 | 1.0 | 33.0 | 66.0 | 2.75 | 99.1 | 39.7 | 59.4 | 4.8 | 8.0 7.6 |
| 久里浜粘土 | 5.8 | 33.2 | 61.0 | 2.73 | 104.7 | 33.3 | 71.4 | 4.8 | 8.5 7.8 |
| 大黒町粘土 | 6.5 | 36.5 | 57.0 | 2.73 | 96.1 | 37.8 | 58.3 | 3.96 | 7.8 7.7 |
| 本牧海底粘土 | 7.0 | 40.5 | 52.5 | 2.71 | 92.3 | 46.9 | 45.4 | — | — |
| 長浦湾粘土 | 10.0 | 50.0 | 40.0 | 2.71 | 86.0 | 35.0 | 51.0 | — | — |
| 川崎粘土 | 1.1 | 38.4 | 60.5 | 2.71 | 87.7 | 39.7 | 48.0 | — | — |
| 中防粘土 | 1.2 | 52.3 | 46.5 | 2.68 | 72.6 | 34.2 | 38.4 | — | — |
| 呉シルト質粘土 | 8.4 | 54.6 | 37.0 | 2.66 | 52.4 | 28.2 | 24.2 | — | — |
| 鹿島B粘土 | 11.7 | 49.8 | 38.5 | 2.72 | 85.2 | 39.8 | 45.4 | — | — |
| 鹿島C粘土 | 17.5 | 55.5 | 27.0 | 2.71 | 73.4 | 35.3 | 38.1 | — | — |
| 鳴尾粘土 | 2.0 | 26.1 | 71.9 | 2.73 | 83.0 | 31.4 | 51.6 | — | — |
| 神戸粘土 | 1.2 | 36.8 | 62.0 | 2.72 | 91.1 | 32.9 | 58.2 | — | — |

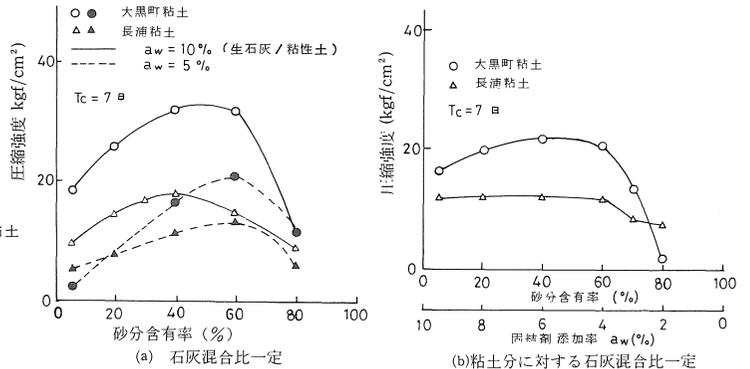


図3 粒度組成の影響¹⁾(人為的に砂を加えた試料による実験)

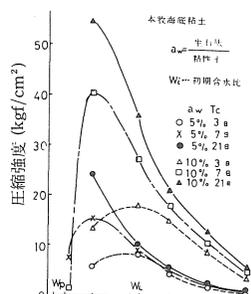


図4 初期含水比が処理効果に及ぼす影響

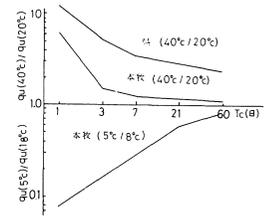


図5 標準温度との比較^{2,4)}

セメント, iii)普通セメント+水砕, iv)低熱セメント+水砕である。また,ここで述べるのは主としてそれらを用いての実験結果を中心としたものである。但しiv)の場合は現在実験中で,予測にふれるのみである。

i) 固結材として生石灰使用の場合

粘性土に生石灰を混入した場合の強度発現はその大部分が粘性土中のシリカ, アルミナなどと生石灰が化学反応することに起因するものであることはすでに述べたところであるが,このことに関連して1967年以来運輸省港湾研究所における幾多の研究があるので,その中から幾つかの実例を上げてみる。表2²⁴⁾は試料の分類特性を示したものである。図2は生石灰10%混入時の各種粘性土の強度発現状況を示したものである。図3²⁵⁾は生石灰混合による粘性土の固化に際し,粘性土の粒度組成が固化におよぼす影響について,長浦粘土と大黒町粘土の2種の海成粘土について実験したものである。この場合,人為的に砂を加えしかも砂含有量の異なる試料土を作成している。図4²⁴⁾は粘性土の初期含水比が固化効果におよぼす影響を示すものである。図5²⁴⁾は粘性土の温度が標準温度(20°C前後)より高い場合と低い場合の固化状況を示したものである。

ii) セメント使用の場合

セメントは粘性土の固結剤として生石灰に優る幾つかの利点を持っている。すなわち,生石灰が固結材の役目を有効に果し得るのは,その対称粘性土が生石灰に対し反応性の粘土鉱物を含有する場合に限られるのに対し,セメントは総ての粘性土の固化に役立つ性能を持っている。それは生石灰による固結が殆んどポゾラン反応に限られるのに対し,セメントはポゾラン反応の他に自硬性を持っているからである。その外セメントは生石灰より取扱が便利であり,またセメントは生石灰より反応速度が遅いので,それだけ固化改良固所の連続性を保つ施工を可能とし,基礎機能増加に有効である。以上の他にも幾つかの利点があり現在では生石灰に代ってセメントが使用される場合が多くなっている。セメントスラリーを使用する深層混合処理工法については1974年頃から幾つかの研究があるが,ここでは竹中技術研究所の研究結果を中心に紹介することにする。

A 試料

表3²⁵⁾は室内試験に用いた各試料の土質性状

B 改良土の物理的性質²⁶⁾ (図6, 7)

a) 含水比 (図6.1, 6.2)

図6.1, 図6.2は固結材の添加率と含水比の変化状況を示す。

b) 単位体積重量 (図7.1, 7.2)

図7.1, 図7.2は固結材の添加率と単位重量の変化状

況を示す。

表3 室内改良土に用いた各試料の土質性状

| 試料名 | | 東京港 | 坂出 | 品川(A) | 品川(B) | むつ小川原 | 有明 |
|--------------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 物理定数 | | | | | | | |
| 土粒子比重 G_s | | 2.644 | 2.672 | 2.747 | 2.691 | 2.374 | 2.550 |
| 自然含水比 ω (%) | | 102.7 | 82.3 | 76.5 | 87.4 | 288.3 | 167.0 |
| コンシステンス特性 | 液性限界 W_L (%) | 93.1 | 79.3 | 62.6 | 77.9 | 172.5 | 121.5 |
| | 塑性限界 W_P (%) | 35.8 | 29.0 | 23.1 | 32.5 | 73.6 | 52.5 |
| | 塑性指数 I_P (%) | 57.3 | 50.3 | 39.5 | 45.4 | 98.9 | 69.3 |
| 粒度特性 | 砂分(74~2000 μ) (%) | 0.0 | 12.5 | 19.0 | 19.0 | 44.0 | 1.0 |
| | シルト分(5~74 μ) (%) | 41.0 | 39.5 | 28.0 | 51.5 | 30.5 | 73.0 |
| | 粘土分(5 μ 以下) (%) | 59.0 | 48.0 | 53.0 | 29.5 | 25.5 | 26.0 |
| 有機物含有量(重クロム酸法) (%) | | — | — | — | — | 10.9 | 8.89 |

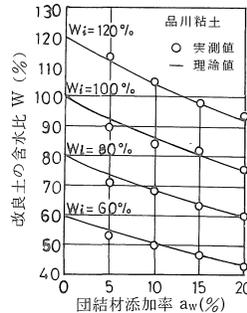


図6.1 室内改良土の含水比, 固結材添加率, 初期含水比の関係

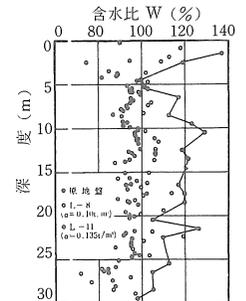


図6.2 現位置改良土の含水比測定例

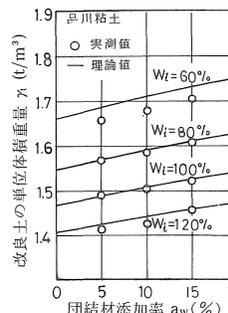


図7.1 室内改良土の単位体積重量, 固結材添加率, 初期含水比の関係

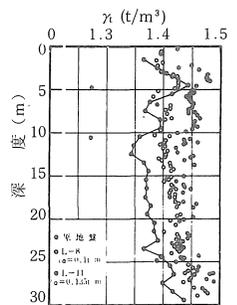


図7.2 現位置改良土の単位体積重量測定例

C 改良土の力学特性²⁶⁾

図8は砂分含有率が, また図9は初期含水比が夫々改

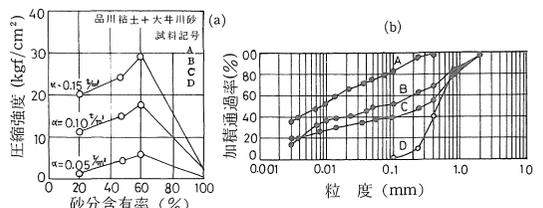


図8 砂分含有率と改良土の圧縮強度の関係

良土の一軸圧縮強度におよぼす影響を示したものである。

図10は深度方向に対する一軸圧縮強度の分布を, また表4は各地の粘土試料を用いた改良土の一軸圧縮強度を示

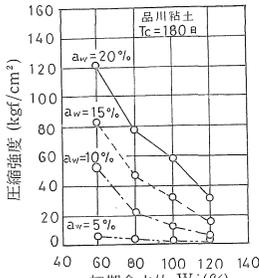


図9 初期含水比と改良土の圧縮強度の関係

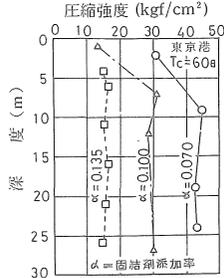


図10 深度方向に対する圧縮強度の分布 (東京港室内改良土)

表4 各地の粘土試料を用いた改良土の圧縮強度

| | 硬化剤添加率 a_w (%) | 試料の初期含水比 W_L (%) | 圧縮強度 ($K_g f/cm^2$) | | |
|---|------------------|--------------------|-----------------------|------------|------------|
| | | | $T_c=7$ 日 | $T_c=28$ 日 | $T_c=60$ 日 |
| 東 | 10.3 | 108.5 | 8.2 | 12.1 | 15.8 |
| | 10.8 | 122.1 | 9.1 | 11.7 | 14.5 |
| | 11.1 | 129.4 | 8.3 | 10.6 | 12.0 |
| | 11.4 | 135.7 | 9.0 | 11.7 | 13.4 |
| 京 | 15.9 | 108.8 | 28.3 | 35.0 | 41.1 |
| | 17.3 | 126.4 | 31.0 | 39.8 | 38.6 |
| | 17.9 | 134.2 | 27.3 | 39.5 | 44.2 |
| | 19.3 | 104.1 | 44.7 | 60.0 | 67.8 |
| 湾 | 19.9 | 110.9 | 41.5 | 60.6 | 74.6 |
| | 20.6 | 117.6 | 25.6 | 33.5 | 39.8 |
| | 21.0 | 122.3 | 36.7 | 49.0 | 55.9 |
| | 21.6 | 128.5 | 35.8 | 49.2 | 59.9 |
| 品 | 22.3 | 136.1 | 31.8 | 42.2 | 49.1 |
| | 22.9 | 142.6 | 32.3 | 40.3 | 41.8 |
| | 30.8 | 124.0 | 33.9 | 52.9 | 57.6 |
| | 32.3 | 134.9 | 56.2 | 68.6 | 77.3 |
| 川 | 33.4 | 142.8 | 46.1 | 63.3 | 68.7 |
| | 34.3 | 149.5 | 44.4 | 55.9 | 63.3 |
| | 10.0 | 60.0 | 22.2 | — | 40.2 |
| | 10.0 | 80.0 | 12.9 | — | 21.3 |
| 熊 | 10.0 | 100.0 | 7.1 | — | 10.3 |
| | 10.0 | 120.0 | 2.4 | — | 4.2 |
| | 15.0 | 60.0 | 43.2 | — | 68.7 |
| | 15.0 | 80.0 | 30.3 | — | 51.0 |
| 本 | 15.0 | 100.0 | 16.0 | — | 26.8 |
| | 15.0 | 120.0 | 6.7 | — | 12.0 |
| | 20.0 | 60.0 | 64.3 | — | 100.0 |
| | 20.0 | 80.0 | 42.0 | — | 74.6 |
| 有 | 20.0 | 100.0 | 25.1 | — | 48.0 |
| | 20.0 | 120.0 | 12.1 | — | 25.4 |
| | 8.5 | 75.4 | 18.2 | — | 27.0 |
| | 8.9 | 83.1 | 13.9 | — | 21.7 |
| 明 | 9.8 | 102.6 | 9.6 | — | 14.6 |
| | 17.0 | 80.5 | 52.1 | — | 83.4 |
| | 17.8 | 88.5 | 42.5 | — | 77.6 |
| | 19.7 | 108.5 | 35.7 | — | 72.6 |
| 有 | 25.6 | 85.6 | 64.3 | — | 107.2 |
| | 26.7 | 93.8 | 49.1 | — | 101.3 |
| | 29.5 | 114.4 | 62.2 | — | 97.5 |
| | 11.0 | 123.0 | 4.8 | 8.1 | 9.3 |
| 有 | 16.5 | 123.0 | 12.2 | 20.9 | — |
| | 12.0 | 143.0 | 5.1 | 7.5 | 9.3 |
| | 18.0 | 143.0 | 10.5 | 18.3 | 23.0 |

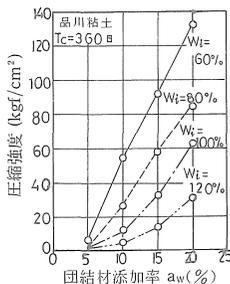


図11 固結材添加率と改良土の圧縮強度の関係

したものである。なお図11は固結材の添加率と一軸圧縮強度の関係を示したものである。

改良土の物理的, 力学的特性²⁶⁾についての試験内容の記

載は以上一部にとどめたが、現在竹中技研で明らかになっていることがらをまとめて挙げれば下記のとおりである。

- ①改良土の含水比は改良前に比較して減少する。
- ②改良土の単位体積重量は改良前に比較してわずかに増加する。
- ③改良土の透水系数は改良前に比較して小さくなる。
- ④試料の初期含水比が増大するにつれて改良土の一軸圧縮強度は減少する。
- ⑤固結材添加率が增大するにつれて改良土の一軸圧縮強度は増大する。

⑥材令60日程度までは、改良土の一軸圧縮強度は材令の対数に比例し、それ以後も徐々に増大する。

⑦供試体の大きさ、縦横比、載荷速度の一軸圧縮強度におよぼす影響は他の材料と大差がない。

⑧改良土の静的変形係数 E_s 、動的変形係数 E_d と一軸圧縮強度 q_u との間には、 $E_s = (280 \sim 550)q_u$ 、 $E_d = (450 \sim 1000)q_u$ なる関係がある。

⑨改良土の静的ポアソン比 ν_s 、動的ポアソン比 ν_d は一軸圧縮強度 q_u の増加と共に減少するが、 $q_u = 10 \sim 80 \text{ kg/cm}^2$ の範囲においては概略、 $\nu_s = 0.30 \sim 0.45$ 、 $\nu_d = 0.30 \sim 0.45$ で両者はほぼ等しい。

⑩改良土の一軸圧縮強度 q_u に対する単純引張り強度 σ_t の比 σ_t/q_u は q_u の増大とともに減少するが、 $q_u = 10 \sim 80 \text{ kg/cm}^2$ の範囲においては $\sigma_t/q_u = 0.30 \sim 0.15$ なる関係がある。

⑪改良土の単純引張強度は割裂試験より得た引張強度より大きい。

⑫一面せん断試験より、改良土せん断強度 τ_f は垂直応力 σ_N が大きくなるにしたがっておよそ $q_u/2$ になる。

⑬一面せん断試験より、改良土の一軸圧縮強度 q_u に対する垂直応力 $\sigma_N = 0$ におけるせん断強度 τ_{00} の比は q_u が増大するとともに減少し、 $q_u = 10 \sim 80 \text{ kg/cm}^2$ の範囲においては $\tau_{00}/q_u = 0.45 \sim 0.30$ である。

⑭高圧下における改良土の $e - \log p$ 曲線の圧縮指数は、圧密圧力が p_y 以下では非常に小さく、 p_y を越える範囲ではかなり大きな値を示す。

iii) セメントと水砕の併用の場合

生石灰もしくはセメント使用による深層混合処理工法で改良した軟弱海底粘性土の物理化学的および力学的特性は粘土とコンクリートの中間のものであることが、これまでの研究で明らかになってきている。それで軟弱粘性土地盤を構造物の基礎目的で改良する場合、強度的見地より地盤全体を一様に改良する必要はなく、部分改良で充分であるということになる。部分改良の形としては、さきにも述べたとおり群柱式、壁式、格子壁式などが考

表5 深層混合処理工法の分類^{1), 27)-32)}

| 工法名 | 固結剤 | 施工方法・機械 | でき上がり形状 |
|----------|----------|------------------------|------------|
| 深層混合処理工法 | DLM | 生石灰(消石灰) 鉛直昇降プロペラ攪拌 | 杭状(壁状, 全面) |
| | CMC | セメントモルタル セメントスラリー | 杭状(全面) |
| | DCM | セメントスラリー | 壁状, 全面(杭状) |
| | DCCM | セメントスラリー | 壁状(全面, 杭状) |
| 噴射攪拌工法 | セメントスラリー | 高圧噴射による攪拌 | 杭状(壁状, 全面) |

表6 粘土の物理的性質 (大黒埠頭)

| 自然含水比 (%) | 比重 | アッターベルグ限界 | | |
|-----------|-----------|-----------|-------------|-------|
| | | 液性限界 (%) | 塑性限界 (%) | 塑性指数 |
| 103~119 | 2.72~2.77 | 87~106 | 30~44 | 46~60 |
| 粒度特性 | | 土質分類 | | |
| 砂分 (%) | シルト分 (%) | 粘土分 (%) | 三角座標 | 統一分類 |
| 13~20 | 50~65 | 25~35 | 粘土シルト質粘土ローム | CH |

表7 実験結果

| 種類 | セメント添加率 (%) | 材令(日) | 圧縮強度 (kgf/cm ²) 養生20°C | | | | | | 圧縮強度 (kgf/cm ²) 養生10°C | | | | | |
|----------|-------------|-------|------------------------------------|------|------|------|------|------|------------------------------------|------|------|------|------|------|
| | | | 1 | 3 | 7 | 14 | 28 | 91 | 1 | 3 | 7 | 14 | 28 | 91 |
| | | | 普通ポルトランドセメント | 10 | 2.04 | 3.38 | 4.17 | 5.88 | 6.51 | 7.97 | 0.64 | 1.67 | 3.73 | 5.55 |
| | 15 | 2.05 | 9.09 | 12.6 | 15.3 | 18.1 | 20.2 | 1.12 | 4.08 | 9.72 | 11.8 | 13.1 | 14.2 | |
| | 20 | 2.34 | 12.4 | 18.8 | 21.1 | 23.3 | 28.6 | 1.24 | 4.19 | 12.5 | 18.8 | 21.4 | 24.7 | |
| | 25 | 2.95 | 14.1 | 27.0 | 32.2 | 37.3 | 43.9 | 1.45 | 4.13 | 11.7 | 18.1 | 21.9 | 24.4 | |
| | 30 | 2.78 | 14.6 | 35.9 | 39.2 | 46.5 | 53.4 | 1.70 | 4.32 | 12.9 | 18.7 | 23.8 | 28.4 | |
| C種高炉セメント | 15 | 1.02 | 1.68 | 2.36 | 3.23 | 5.64 | 7.97 | 0.46 | 1.17 | 1.93 | 3.04 | 4.08 | 5.87 | |
| | 20 | 2.60 | 4.28 | 7.99 | 9.65 | 12.7 | 20.3 | 0.78 | 1.97 | 5.53 | 7.05 | 8.92 | 14.5 | |
| | 25 | 3.19 | 8.24 | 12.2 | 14.8 | 20.4 | 28.5 | 0.93 | 2.84 | 6.48 | 9.39 | 11.5 | 18.6 | |
| | 30 | 4.66 | 11.9 | 20.1 | 25.7 | 32.9 | 47.5 | 1.03 | 3.67 | 12.4 | 18.2 | 22.7 | 33.4 | |

| 添加率 (%) | セメント : 水砕 | 材令(日) | 圧縮強度 (kgf/cm ²) 養生20°C | | | | | | 圧縮強度 (kgf/cm ²) 養生10°C | | | | | |
|---------|-----------|-------|------------------------------------|---------|------|------|------|------|------------------------------------|------|------|------|------|------|
| | | | 1 | 3 | 7 | 14 | 28 | 91 | 1 | 3 | 7 | 14 | 28 | 91 |
| | | | 10 | 80 : 20 | 1.41 | 2.33 | 3.34 | 4.13 | 5.10 | 5.36 | 0.50 | 1.39 | 2.23 | 2.93 |
| 20 | 40 : 60 | 1.63 | 3.63 | 3.87 | 6.37 | 9.66 | 12.3 | 0.80 | 1.60 | 3.88 | 5.66 | 7.44 | 12.6 | |
| | 60 : 40 | 2.01 | 6.82 | 12.2 | 15.7 | 20.0 | 25.7 | 1.01 | 2.69 | 8.86 | 10.8 | 12.7 | 22.7 | |
| | 80 : 20 | 3.30 | 12.1 | 16.8 | 20.8 | 25.9 | 29.8 | 1.29 | 3.74 | 13.6 | 18.5 | 18.6 | 28.6 | |
| 30 | 20 : 80 | 1.10 | 2.91 | 3.17 | 5.92 | 10.1 | 19.1 | 0.45 | 1.00 | 2.58 | 4.13 | 5.90 | 18.4 | |
| | 40 : 60 | 4.66 | 14.7 | 15.2 | 22.8 | 34.4 | 47.3 | 2.23 | 7.04 | 12.6 | 19.6 | 24.1 | 35.4 | |
| | 60 : 40 | 4.99 | 21.6 | 26.5 | 32.9 | 40.6 | 54.7 | 2.17 | 7.67 | 18.9 | 25.4 | 34.2 | 43.4 | |
| | 80 : 20 | 4.34 | 21.1 | 33.5 | 39.3 | 44.1 | 53.1 | 2.05 | 5.08 | 10.2 | 15.7 | 20.8 | 26.0 | |

(初期含水比 130%)

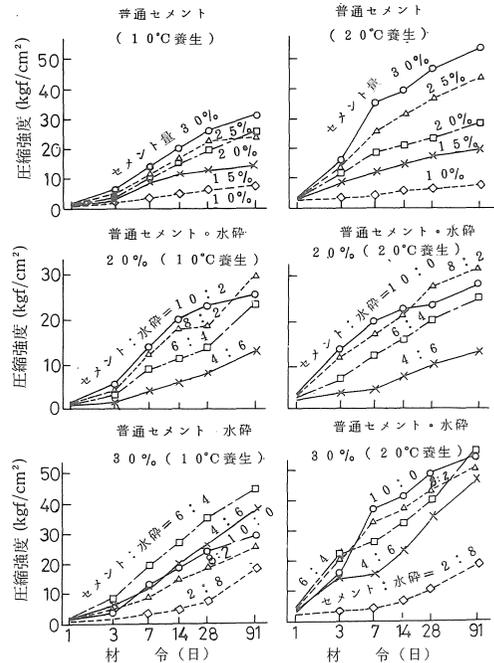


図12 固結材、養生温度及び、材令が圧縮強度におよぼす影響

えられる。群柱式はそれ自体の施工は最も容易でしかも確実であるが、軟弱層厚が一般に30~40mと厚いため、複合基礎として扱うには設計々算が非常に複雑であり困難である。また必ずしも経済的とはいえない。壁状の場

合は一応の設計案³³⁾はあるが、壁の施工継手を何時でも完全に施工し得るとは限らない。格子壁状は基盤設計上は最も有利であるが、これまでの固化速度では交叉部の施工は殆んど不可能である。これら施工上の欠点を補うためにはその初期における固化速度を遅らすことが大切である。この目的達成のために固化材としてセメント・水砕混合物の使用を試みたのが本実験である。表6は実験に使用した大黒埠頭沖粘土の物理的性質であり、図12、表6は実験結果³⁴⁾を示したものである。

iv) 低熱セメントと水砕の併用の場合

大黒埠頭沖粘土、含水比130%，セメント+水砕の使用量30%（粘土の乾燥重量に対し）、セメント・水砕比2：8の場合、供試体の圧縮強度は養生温度20°Cにおいて1日、3日、7日、14日、28日、91日に対し夫々1.1, 2.91, 3.17, 5.92, 10.1, 19.1 kg/cm²であり、養生温度10°Cに対し夫々0.45, 1.00, 2.58, 4.13, 5.90, 18.4 kg/cm²であり、また270日強度は25 kg/cm²であった。それで格子壁状基礎施工の可能性について1つの目安は得たわけであるが、初期強度をこの程度に押えたままで、長期強度をもっと高められないものか、固結材の使用量をもっと減らせられないものか、また他の粘性土に対してはどのような結果を現わすかなどを引続き調べる必要があるかと考え、現在この目的で実験中である。実験の1つの方向としては、これまで使用してきた普通セメントの代りに低熱セメントを使用することにしていく。その理由はC₃Sを主体とした普通セメントよりC₂Sを主体としたセメントの方が初期水和反応の速度が遅く、それだけ初期強度を低く押え得ると考えたからである。ただC₂SはC₃Sに比べて水和反応の際生成するC_a(OH)₂の量が半分以下となるので、対称粘性土の如何によってはポゾラン反応に必要なC_a(OH)₂の不足をきたす心配もあるので、場合によってはその対策を考えなければならないかも知れない。いずれにしても只今実験中で、後の機会に第二報として報告する予定である。

5. あとがき

深層の海底軟弱地盤を化学的に改良するこの深層混合処理工法は研究され初めてから10年、現場施工開始から5年程度の歴史しか持っていない。当然のことながら最初は固るかどうかが関心事であったが、今やこの固化機能の内容が基礎の設計・施工にどのように対応できるかが大関心事になっている。現在の処まだ期待される設計への、また精度の高い完全な施工への対応などで不十分な点が多いが、これらの未解決の問題が1日も早く解決され、我が国の自然環境からも社会環境からも今後ますます多用されて行くであろう本工法が、より経済的なよ

り安全なものになることが切に望まれるわけである。

尚本研究は本学森野助教授、西野助手を初め多くの方々との多大な御援助により進められているものであり、ここに謹んで厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 奥村, 光本, 寺師, 酒井, 吉田; 石灰による深層混合処理工法(第1報), 港研報告, 11(1), 67—106, 1972.
- 2) 奥村, 寺師, 光本, 酒井, 吉田; 石灰による深層混合処理工法(第2報), 港研報告, 11(4), 103—121, 1972.
- 3) 奥村, 寺師, 光本, 吉田, 渡辺; 石灰による深層混合処理工法(第3報), 港研報告, 13(2), 3—44, 1974.
- 4) 松本, 小川; 港湾地域における土の工学的諸係数の相関性について(第1報), 港研報告, No71, 1969.
- 5) 笠井順一; 地盤改良の化学, セメントコンクリートNo391, 12, 1979.
- 6) 窯業協会編, 窯業工業ハンドブック, 138, 技報堂.
- 7) 窯業協会誌, 73, 2—3, No835, 1955.
- 8) 日本粘土学会編, 粘土ハンドブック, 48, 技報堂.
- 9) 日本粘土学会編, 粘土ハンドブック, 95—96, 技報堂.
- 10) 有泉昌; セメント技術年報, XIII, 399, 1959.
- 11) J.L.EADES, R.E.GRIM; Highway Research Baarel Bullutin No262, 51—63, 1960.
- 12) 浅川, 万波, 呉羽; 第11回土質工学研究発表会, 1976.
- 13) 川村, 榎場, 杉浦, 中野; 土木学会論文集, No169, 9, 31, 1969.
- 14) 有泉, 藤崎; セメント技術年報, X, 182, 1956.
- 15) W.KRONERT, H.F.SCHWIETE, K.WETZEL; Naturwissens-chaften, 51, 16, 381, 1964.
- 16) D.T.Davidson, R.L.Handy; Highway Engineering, Handbook, Mc Graw-Hill, 1959.
- 17) J.L.Lagueros, R.L.Handy, L.L.Reign; Bull.HRB, No349, 51, 1962.
- 18) G.H.Hilt, D.T.Davidson; Bull.HRB, No262, 20, 1960.
- 19) C.Ho, R.L.Handy; Highway Research Record, 29, 55, 1963.
- 20) D.E.Pietsch, D.T.Davidson; Bull.HRB, No335, 11, 1962.
- 21) S.Diamond, E.B.Kinter; Public Roads, 33, 260, 1966.
- 22) S.Diamond, E.B.Kinter; Highway Research Record, 92, 83, 1965.
- 23) 有泉昌; 石灰安定処理の機構, 土と基礎, 25(1), 9, 1977.

- 24) 寺師, 奥村, 光本; 石灰処理土の基本的特性に関する研究(1), 港研報告, 16(1), 8, 10, 13, 16, 20, 1977.
- 25) 柳瀬, 光本, 酒井, 金井; 沖積粘土に対する生石灰処理の適用性について, 第7回港研研究発表会講演概要, 57-63, 1969.
- 26) 川崎, 新名, 斉藤, 馬場崎; セメント系改良土の工学的特性に関する研究, 竹中技研報告 19(4), 145, 146, 151, 152, 163, 1978.
- 27) 寺師昌明; 港湾における化学的地盤改良工法, 昭和52年度港湾技術研究所講演会講演集, 63-100, 1977.
- 28) 黒住, 森田, 斉藤; 石灰粉体または粒体による深層軟弱地盤の改良工法, 土と基礎, 22(5), 19-23, 1974.
- 29) 堤, 根井, 田中; 粘性土攪拌固結工法(CMC工法), 土木技術, 31(7), 61-69, 1976.
- 30) 斉藤, 新名, 馬場崎, 中村, 川崎; セメント系硬化剤による深層混合処理工法に関する研究(その3)——深層混合処理機による陸上実験および海上実験——, 第12回土質工学研究発表会講演集, No338, 1333-1336, 1977.
- 31) 東亜建設工業㈱技術開発部, 新地盤改良工法, 深層連続混合処理工法実験報告, 作業船No.108, 47-55, 1976.
- 32) 八尋, 吉田, 西; 高速水噴流を利用した地下工法の開発研究——柱状固結体による地盤改良の施工効果——, 第12回土質工学研究発表会講演集, No326, 1285-1288, 1977.
- 33) 西中川, 浅井, 鈴木, 新名, 川崎; セメント系硬化剤による深層混合処理工法に関する研究(その5)——壁状改良地盤の設計法について——, 第12回土質工学研究発表会講演集, No340, 1341-1344, 1977.
- 34) 内藤, 森野, 西野; 海底軟弱堆積土のセメント・水砕による固化, 土木学会第34回年次学術講演会講演概要集(第5部), 211-212, 1979.

(受理 昭和55年1月16日)