

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

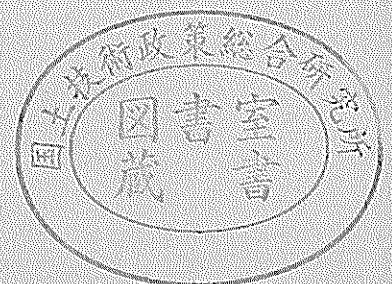
REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 13

NO. 2

JUNE 1974

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第13巻 第2号 (Vol. 13, No. 2), 1974年6月 (June 1974)

目 次 (CONTENTS)

1. 石灰による深層混合処理工法 (第3報)
… 奥村樹郎・寺師昌明・光 本 司・吉田富雄・渡辺光男…… 3
(Deep-Lime-Mixing Method for Soil Stabilization (3rd Report)
…………… Tatsuro OKUMURA, Masaaki TERASHI, Tsukasa MITSUMOTO,
Tomio YOSHIDA and Mitsuo WATANABE)
2. 軽量ブロックによる土圧低減工法…………… 善 功 企・沢口正俊・
中瀬明男・高橋邦夫・篠原邦彦・橋本光寿…… 45
(A Method to Decrease Active Earth Pressure by Applying the Light-weight Blocks
as Back-filling
…… Kouki ZEN, Masatoshi SAWAGUCHI, Akio NAKASE, Kunio TAKAHASHI,
Kunihiko SHINOHARA and Kouji HASHIMOTO)
3. 砂層の振動性状…………… 荒井秀夫・岩淵守義・中沢定男・北島誠治…… 65
(Vibrational Properties of Sand Layers
…………… Hideo ARAI, Moriyoshi IWABUCHI, Sadao NAKAZAWA and
Seiji KITAJIMA)

1. 石灰による深層混合処理工法 (第3報)

奥村 樹郎*・寺師 昌明**・光本 司**
吉田 富雄**・渡辺 光男**

要 旨

石灰による深層混合処理工法は、港湾地域でしばしば遭遇する軟弱粘性土地盤を対象として、通常の地盤改良工法に依る場合を一桁上回る改良効果を短期間で達成する新工法である。第1報、第2報を通じて、筆者等は本工法の基本原理を紹介し、陸上施工ならびに海上施工の可能性を報じた。

その後、深層混合処理機—4号機—を製作し、西宮沖で2回目の海上試験工事を実施した。4号機では実用機の設計を念頭に、各種機械的データを収集するための計測面を充実すると共に、ワンマンコントロールの試みを行なった。4号機による西宮沖試験工事では、水深6m前後の海底粘性土地盤を7m改良し、処理後60日前後で 2 kg/cm^2 を超える一様な強度増加を挙げることが出来た。

今回の試験工事の結果、本工法施工上の基本的な問題点は全て解決された。また、室内配合試験結果から概略ながら現地改良効果を推定する方法が提案された。

* 土質部 地盤改良研究室長

** 土質部 地盤改良研究室

1. Deep-Lime-Mixing Method for Soil Stabilization (3rd Report)

Tatsuro OKUMURA* · Masaaki TERASHI** · Tsukasa MITSUMOTO**
Tomio YOSHIDA** · Mitsuo WATANABE**

Synopsis

When treated with lime at the laboratory, the soft clayey soils commonly existing in Japanese harbour area show a great increase in strength and also much improvement of their consolidation characteristics. Making use of these advantages of lime-soil mixture, the authors developed the Deep-lime-mixing method for soil stabilization (D.L.M. method) in order to stabilize thick and soft clay layers in situ. In the first and second reports they studied the basic mechanism of the chemical reaction between lime and soil, and also described the results of the site experiments executed on land and in the sea. Although the model D.L.M. machines (model-2 and model-3) used in these experiments were not yet highly sophisticated, D.L.M. method could attain a considerably great increase in strength compared with the conventional soil stabilization methods.

Subsequently, they developed the new D.L.M. machine (model-4) for marine works, with a view to improving the inadequacy of the previous models. In the case of the model-4, various measuring devices were equipped to obtain mechanical data so as to design more practical machine, and an attempt to explore a one-man operating system was made. They executed the third site experiment on the soft deposit 6m below the water surface using the model-4. During the experiment, model-4 worked well, and could stabilize the deposit of 7m in thickness below the sea bottom. About 60 days after treatment with quick lime, an average increase in the unconfined compression strength was 2 kg/cm² and the increase in strength was uniform throughout the treated depth.

In conclusion, the basic problems concerning the practical use of D.L.M. method have almost been solved by this experiment. The authors are also suggesting in this paper the rough method of estimating the stabilizing effects at site using laboratory data.

* Chief of the Soil Stabilization Laboratory, Soils Division

** Member of the Soil Stabilization Laboratory, Soils Division

目 次

要 旨	3
1. ま え が き	7
2. 石灰処理の原理と処理効果	7
2.1 基本原理	7
2.2 石灰混合処理土の改良効果	8
2.3 石灰処理の深層改良への適用	10
3. 深層混合処理工法の開発経過	11
3.1 概 説	11
3.2 室内模型実験ならびに陸上試験工事	11
3.3 羽田沖海上試験工事	14
3.4 実用性の確認	19
4. 西宮沖試験工事	19
4.1 概 説	19
4.2 深層混合処理機—4号機—	19
4.3 試験地ならびに処理対象土特性	26
4.4 試験工事実施方法	28
4.5 試験工事結果	29
4.6 深層混合処理機に関する考察	31
4.7 改良効果に関する考察	31
5. 現地処理効果の推定方法	39
5.1 概 説	39
5.2 室内配合試験結果と現地強度の関連	39
6. 今後の課題	41
7. 結 論	43
8. あ と が き	44
謝 辞	44
参考文献	44
記 号 表	44

1. まえがき

我国では、狭少な国土の平野部分に、その産業と人口の大部分が集中している。この様な平野部では軟弱な沖積層が多く、土木工事に際してしばしば問題となる。殊に港湾地域においてはこの傾向が著しく、軟弱層の厚さが数十米に達する場合も稀ではない。ちなみに、港湾関係の工事で地盤改良に費される金額は全工事費の1割以上を占めている(奥村; 1971)¹⁾。このため多種多様な地盤改良工法が発達、普及している。一方、今後の大規模な港湾工事や海洋開発に於いては今まで以上に軟弱地盤対策の重要性が増すものと思われる。また、この場合には、環境保全、大きな改良効果、工期短縮、大水深下の施工等が要請されるであろう。しかし従来の諸工法をもって、この様な条件に充分に対処することは出来ない。このため、従来工法の改善と共に、積極的な新工法の開発が必要である。

地盤改良研究室では昭和42年度以来、このような情勢に対処する可能性をもつ、石灰による化学的地盤改良工法の開発研究を進めてきた。“石灰による深層混合処理工法”がこれで、昭和46年度からは特別研究課題として研究を継続している。本工法は、従来の工法に比較して強度増加が一倍大きく、圧密沈下量が一倍小さく、この改良効果発現に要する期間が数週間という短期間であり、しかも煩雑な施工管理が不要となる特徴を有している。このような、新しい工法の開発に当たっては

- (1) 処理機械装置を含む現場における施工方法の確立
- (2) 処理土特性の把握と設計方法の確立
- (3) 処理土の経時的変化、新工法実施による環境問題の検討

の3点を柱として、同じ比重を置いて研究を進めることが望ましい。しかし、実際問題としては、(2)の内の概略の処理効果の把握と、(1)の施工可能性の確認が先行する必要がある。このため、当研究室では先ず我国の沖積粘土に対して石灰混合処理がどの程度の効果を有するかを検討し(中瀬, 他; 1968, 柳瀬; 1968)²⁾³⁾、続いて室内模型実験を昭和45年度まで実施し工法としての可能性を確認した(奥村, 他; 1972)⁴⁾。その後、昭和46年度からは上記の(2)項、(3)項に関する施設の整備と実験データの集積を行ない乍ら、(1)項の問題に主力を注ぎ陸上、海上それぞれ1回の試験工事を実施し(奥村, 他; 1972⁵⁾、

奥村, 他; 1972⁶⁾ 奥村, 他, 1972⁷⁾⁸⁾⁹⁾、また昭和48年3月には西宮沖で2回目の海上試験工事を実施した。この結果、施工方法に関する基本的な問題は全て解決され、現在、海面下60mに至る大深度改良を目標として実用機の諸元を検討している。このため、本文では従来の開発経過と併せて西宮沖の試験結果を報告し、一連の施工方法に関する研究の最終報告とする。(2)項、(3)項の研究経過は別報で紹介する。

なお、本工法は“軟弱粘性土の固体状安定剤混合による地盤改良工法”として特許申請中であったが、昭和49年1月、国有特許(特許第716060号)として確立した。

2. 石灰処理の原理と処理効果

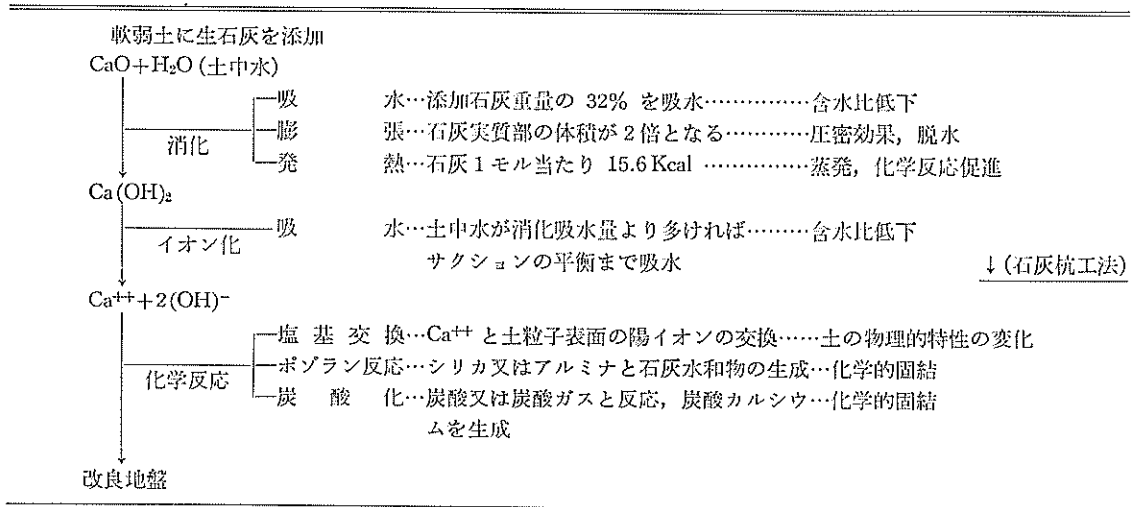
2.1 基本原理

石灰混合による地盤改良は、古くは二和土、三和土として用いられ、近年では道路や滑走路の路床、路盤の改良に用いられており、決して目新しいものではない。そのため、石灰処理の原理は従来より数多くの研究者によって究明が試みられ、我国でも例えば伊東(1969)¹⁾、日本石灰協会(1970)²⁾、奥村, 他(1972)³⁾⁴⁾によって、取り括められている。こうして、石灰と粘性土の間に生ずる化学反応の概略の機構、反応生成物の種類等も知られているが、土の特性を知って改良効果を精度良く推定する段階には至っていない。ここでは、生石灰を安定剤として用いた場合の改良の基本原則を、表-1にしたがって簡単に説明する。

生石灰(CaO)を土中に添加すると、土中水を吸水して消石灰(Ca(OH)₂)となる。この消化反応は発熱反応であり、この過程で石灰の実質部分の体積は約2倍となる。この消化を終えた段階では、消石灰は乾燥状態にあって極めて高いサクションを有している。従って、周辺の土と平衡状態に達するまでは更に吸水を続ける。以上の反応で石灰を加えられた土は脱水されて含水比が低下する。また地中の拘束された状態で石灰を添加すれば、更に石灰の膨張による圧密作用も期待出来る。

次に、消石灰は土中水の中でCa⁺⁺とOH⁻に分離、イオン化する。ここでCa⁺⁺は粘土鉱物の表面に吸着されていた他の陽イオンと交換反応を起こし、OH⁻は土中水のpHを高める。この陽イオン交換の結果、粘土鉱物周囲の吸着水の性質が変化することによって土の物理的特性が改善される。陽イオン交換で消費されるCa⁺⁺

表-1 石灰処理の基本原理



の量は、土の初期の pH や粘土鉱物組成によって様々である。しかし、このイオン交換に消費される量以上に石灰を添加すれば、石灰はアルカリ雰囲気の中で、粘土鉱物を構成するシリカ、アルミナと反応して石灰水和物を生成する。これはポゾラン反応と呼ばれるもので、セメントの硬化反応とほぼ同様の反応である。石灰処理による土の化学的固結は主にこの反応に依ると言われているが、この反応の速度や大きさは粘土の種類によって大巾に異なる。また、余剰の Ca^{++} は土中の炭酸もしくは炭酸ガスと反応して炭酸カルシウムを生成する。

以上が石灰処理の基本原理である。石灰の有する改良機能は数多いが、イオン化までの諸作用は石灰と土中水間の反応に起因するのに対して、その後のイオン交換、ポゾラン反応等は石灰と粘土鉱物との間の反応に起因する点に相違がある。このため、後者の反応を促進するためには、 Ca^{++} と粘土鉱物の接触面積を大きくすること、すなわち強制混合が不可欠の要素となる。

なお、本文では、ポゾラン反応開始に至る石灰の消費を陽イオン交換によるものとして説明したが、これを消石灰分子の物理的吸着反応とする説もあり (Diamond and Kinter; 1966)⁹⁾、今後の検討の余地が残されている。

2.2 石灰混合処理土の改良効果

石灰混合処理による改良効果の大部分は、陽イオン交換、ポゾラン反応の大小によって定まると言われている。これ等の反応は前述のように石灰と粘土の間の化学反応であるから、(1) 石灰の品質、(2) 粘土の鉱物学的特

性や化学的特性、(3) 石灰と粘土の混合条件によって左右される。このため、土の物理的性質あるいは力学的性質といったような通常の土質試験結果から改良効果を予測することは困難である。従って、改良効果を知るためには対象となる土を一定の基準にそって室内配合試験を実施する必要がある。実際に筆者等も各地粘土の改良効果を比較する必要上、室内配合試験方法 (未発表資料)¹⁰⁾ にしたがって、石灰粒径、混合方法、混合時間、養生条件等をコントロールして実験を行なっている。

しかし、土の鉱物学的あるいは化学的特性を知って、処理効果を予測出来れば実用上極めて便利である。このため、この方向の研究もなされている (Thompson; 1966)¹¹⁾ が、実用段階に達するには程遠く相当量のデータの集積が必要であろう。筆者等も、各地の粘性土を用いて上記室内配合試験によって、各種ファクターと改良効果の関連について調査しているので、或る程度のデータの集積を待って中間報告を行なう予定である。ここでは、幾つかの実験例によって処理土の改良効果を紹介する。

石灰の品質の相違と改良効果の関係を図-1 に示す。一般には、製品としての生石灰中の酸化カルシウム含有量が大きい程、また粒径が小さい程改良効果大きい。しかし、工業用生石灰中の酸化カルシウム含有量は JIS によって規定されており、粒径は石灰購入の際の指示によって如何様にも調整出来る。従って、實際上問題となるのは、石灰製造過程の焼成温度によって左右される活

石灰による深層混合処理工法 (第3報)

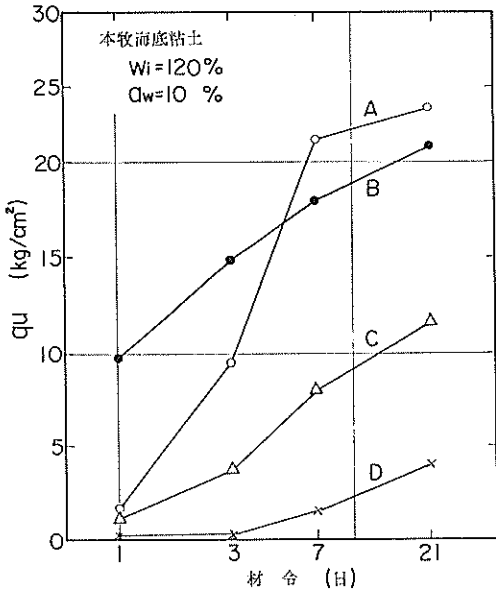


図-1 石灰活性度と改良効果

活性度の相違である。図-1 に活性度の異なる 4 種の製品による改良効果を処理後の一軸圧縮強度を尺度として示す。A, B の製品は比較的低い温度 (1000°C 内外) で焼成された活性度の高い生石灰であり、C, D の順に焼成温度の高い活性度の低い生石灰の例である。A と D を比較すると処理後 21 日の強度で実に 6 倍の開きがあり、石灰処理を行なう場合に石灰品質の選定が如何に重要であるかを示している。

改良効果に影響を与える要素の内、石灰品質 (1) を活性度を参考に選定し、混合条件 (3) を室内配合試験方法にしたがって規定すれば、残る問題は粘性土の諸特性 (2) となる。前述のように、これは極めて難しい問題であるため、ここでは各地の粘性土をほぼ自然含水比に調整し同一の石灰混合比 $a_w=10\%$ で処理した場合の材令に伴う強度増加を紹介する (図-2)。図示の様に、類似した条件下で室内配合試験を実施しても、粘性土の種類によって大幅に改良効果が異なる。しかし、いずれの場合も通常用いられている地盤改良工法による改良効果と

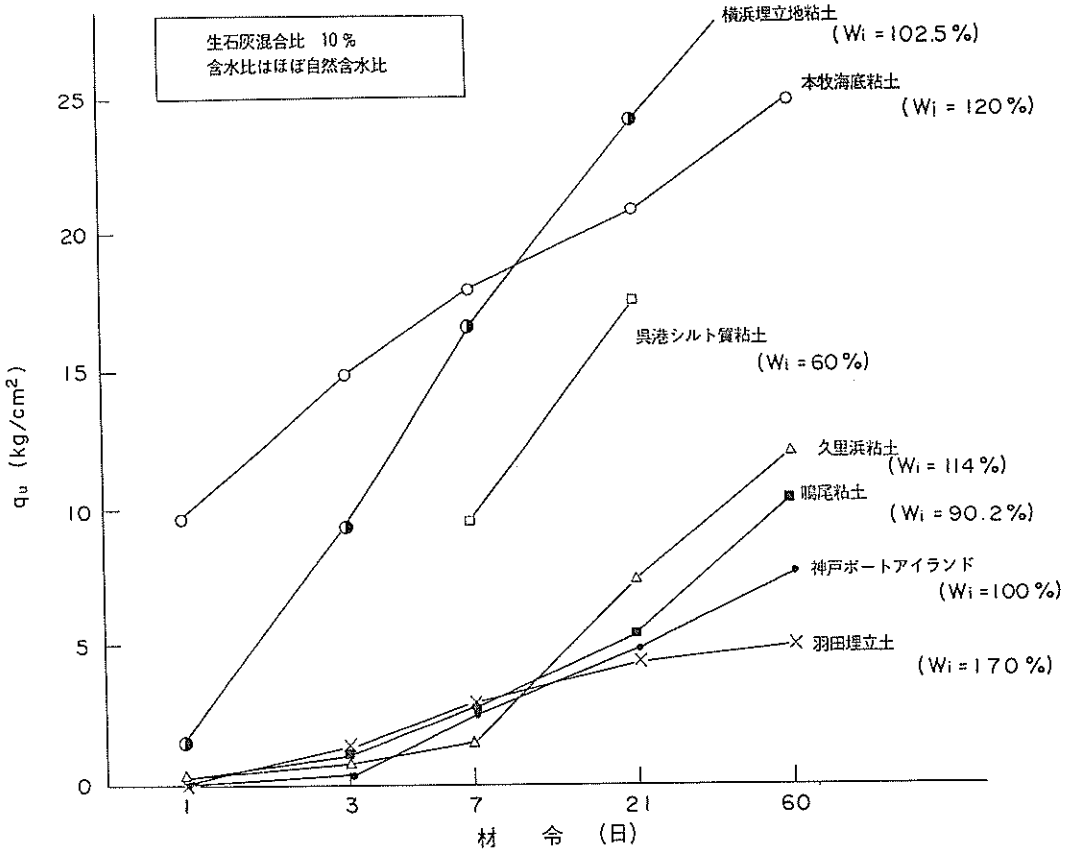


図-2 各地粘性土の改良効果

比較すれば、極端に大きい強度増加を示している。このことから、現場でも適切な混合処理を実施出来るとすれば、我国の沖積粘土は概ね石灰処理に適していると言えよう。また、この試験結果から分かるように、石灰混合処理による強度増加量は材令の対数にほぼ比例しており、実用上は処理後3週間程度で充分な改良効果が發揮される。一方、ここでデータは紹介しないが、石灰混合比 a_w と強度増加の間の関係をみると、一般に a_w の大きいほど強度増加も著しい。しかし、極端に a_w を大きくすると強度増加の伸びは小さくなり、場合によっては低下する。この限界は土の種類によって異なり、対象とする粘性土毎に適正な a_w が存在する。但し、この石灰混合比には経済性からの制約もあり、実用的には 20% 程度の石灰混合比を上限と考えておけば良いであろう。

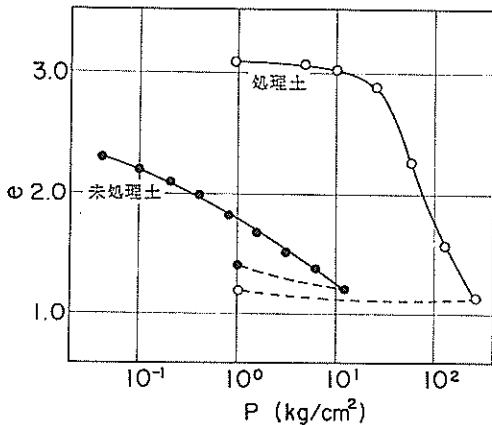


図-3 代表的 $e-\log P$ 曲線 (本牧海底粘土; $w_i=120\%$, $a_w=10\%$, $T_c=21$ 日)

同様に室内配合試験方法にしたがって作成した供試体を用いて圧密特性の検討も行っており、別報で報告を予定している(奥村, 他; 1974)¹²⁾。図-3 に処理土と未処理土の代表的 $e-\log P$ 曲線を紹介する。同図からも分かるように、石灰処理によって圧密降伏応力が極めて大きくなり沈下量の低減されることが予想される。一連の試験結果によると、圧密降伏応力は同一材令の処理後の q_w 値よりやや大きくなり、圧密降伏応力以下では未処理の場合に比べて圧密係数は 10 倍以上に、体積圧縮係数は 1/10 程度に改善される傾向が認められる。

図-4 に初期含水比と一週強度との関係を示す。石灰処理による改良効果は液性限界 (W_L) ないし、それよりやや低い初期含水比で最大となる。含水比がこれより低くなると改良効果は急激に減少するが、 W_L より高い含

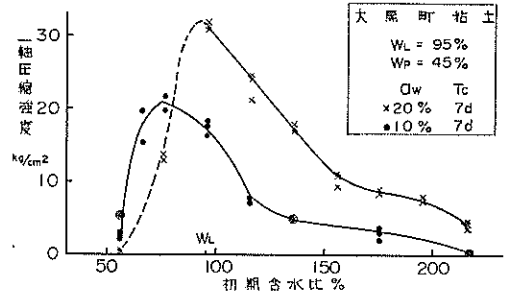


図-4 土の初期含水比と改良効果

水比では効果は漸減している。他の粘性土についても類似した傾向が認められている。一方、通常の沖積粘土の自然含水比は液性限界の9割程度であるから、石灰処理に最適と言える。また、埋立土等にしばしば見られる高含水比の超軟弱地盤にも効果が期待出来る。

この他にも石灰処理効果に関しては、例えば pH が小さい場合や有機物の多い場合には効果が悪く、また養生温度が低いと短期強度の発現が遅れるという様な特徴、ある種の添加剤を微量用いることによって更に大きな改良効果を得られるというような特徴もある。このような処理土特性の詳細は別報に譲る(奥村, 他; 1974)¹³⁾。

2.3 石灰処理の深層改良への適用

2.1 に石灰工法全般の基本原則を紹介し、2.2 で石灰混合処理土の特徴を概観した。この石灰の特性を利用して深層に至る地盤改良を行なう試みは、筆者等の知る限り、3 つに大別される。

第一は、生石灰を適当な間隔で杭状に打設する石灰杭工法である。この工法は、生石灰の有する改良機能の内、消化に際する吸水、膨張作用と、消化後の吸水作用による周辺土の圧密を期待するものである。本工法は、従来の圧密促進工法と異なり、沈下が少なくまた上載荷重が不要であるという特徴から、近年陸上工事に実績を挙げつつあるが、混合処理を行わないため、石灰の化学的固結効果は殆んど發揮されず、極めて含水比の高い地盤や海中工事には不適當である。また、圧密促進工法の一つとされながら、載荷重に相当する圧密圧力を推定する方法が確立されていないため、現状では地盤改良効果を精度良く予測することが困難である。しかし、事前に試験工事を実施して、その使用目的と使用方法を誤らなければ優れた工法の一つであり、当研究室でも一連の室内実験を実施している。

第二は、液状の消石灰を高压で地盤中に圧入する工法

で、高圧の消石灰スラリーが土中で拡がり周辺の土と化学反応を生ずることによって地盤の強度が増加すると考えるものである。これは石灰杭工法とは逆に、化学的固結の効果のみを期待するもので、Lundy and Greenfield (1968)¹³⁾、Higgins (1969)¹⁴⁾ 等によって検討されたが十分な成果は挙げられなかった。前に指摘したように、化学的固結を期待するためには混合が不可欠の要素であるから、高圧圧入のみで十分な効果が挙げられないのは、むしろ当然である。筆者等は、消石灰スラリーの高圧圧入と混合を併用する方向で本工法を検討中である。

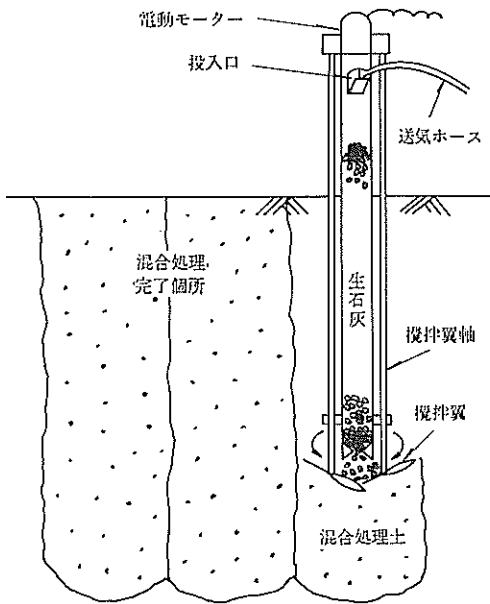


図-5 深層混合処理工法模式図

第三は、生石灰を杭状に打設すると同時に、周辺土と混合する方法で、これが当研究室独自に開発中の“石灰による深層混合処理工法”である。本工法では、生石灰の有する改良機能をすべて発揮させることが出来るため、強度増加、沈下低減効果共に上述の2工法より大きく、更に改良効果の発現も早い。2.2 に述べた石灰混合処理土の改良効果は、本工法に対応するものである。図-5 に模式的に示すように、本工法では中空のケーシングから地中に生石灰を供給すると同時に、周辺土と強制的に攪拌混合を行なうものである。

なお、ここで攪拌翼の中間で生石灰の代りに消石灰スラリーを圧入すれば、第二の工法を改善出来る。

3. 深層混合処理工法の開発経過

3.1 概 説

前章に述べた石灰の有する優れた地盤改良機能を深層に適用するため、従来より室内模型試験、陸上および海上の試験工事各々1回を終了し今日に至っている。今回西宮沖で実施した試験工事に触れるまえに、従来の開発経過 (奥村, 他; 1972¹⁵⁾)¹⁶⁾ を紹介する。

3.2 室内模型実験ならびに陸上試験工事

2.2 に記したように、我国の沖積粘土は概ね石灰反応性が良好であり、混合処理を実施すると通常的地盤改良工法による効果をはるかに超える強度増加があり、また沈下低減の効果も大きい。しかし、この処理土の特徴はあくまで十分な混合条件、養生条件下の室内配合試験を通して得られる特徴である。従って、本工法を実用化するためには、現場に近い処理条件下でも大きな改良効果の得られることを確認することが大前提となり、次いで現場の実用に耐える処理機を開発することが必要である。

深層混合処理工法を実用化するために想定した深層混合処理装置は図-5 に示した形のものである。この深層混合処理装置に要求される機能は基本的には、粘土との化学反応に必要な量の生石灰を地中に供給することと、地中で石灰と粘土を強制的に攪拌混合することの2点である。室内模型実験に用いた1号機は、中空鋼管を中心にして一対の攪拌軸をガイドさせ、生石灰はこの中空鋼管内を空気圧の補助を加えて自重で落下させる単純なものとした (図-6)。

1号機を用いた室内模型実験は、内径 102 cm、深さ 105 cm の土槽内で実施した。この実験槽内には、粗大な夾雑物を除去し完全にリモールドした含水比 110%~120% の本牧海底粘土を充テシ、1号機を用いて数ケースの石灰処理試験を実施した。前述のような、単純な模型装置を使用したため、深度方向に一樣に石灰を供給出来ないことを始めとして不十分な面が多かった。しかし、5% から 10% 程度の石灰混合比で混合処理を行なって、一週間後には一軸圧縮強度 $q_u=6 \text{ kg/cm}^2$ もの改良効果を挙げたケースもあり、本工法実用化の可能性を知ることが出来た。なお、この室内模型実験では安定剤として消石灰を使用したケースについても、一部実験を行なった。この試験結果では、生石灰と消石灰の相違による当然の帰結ではあるが、消石灰の場合には短期強度の発現が遅れることが知られた。しかし、混合条件さえ

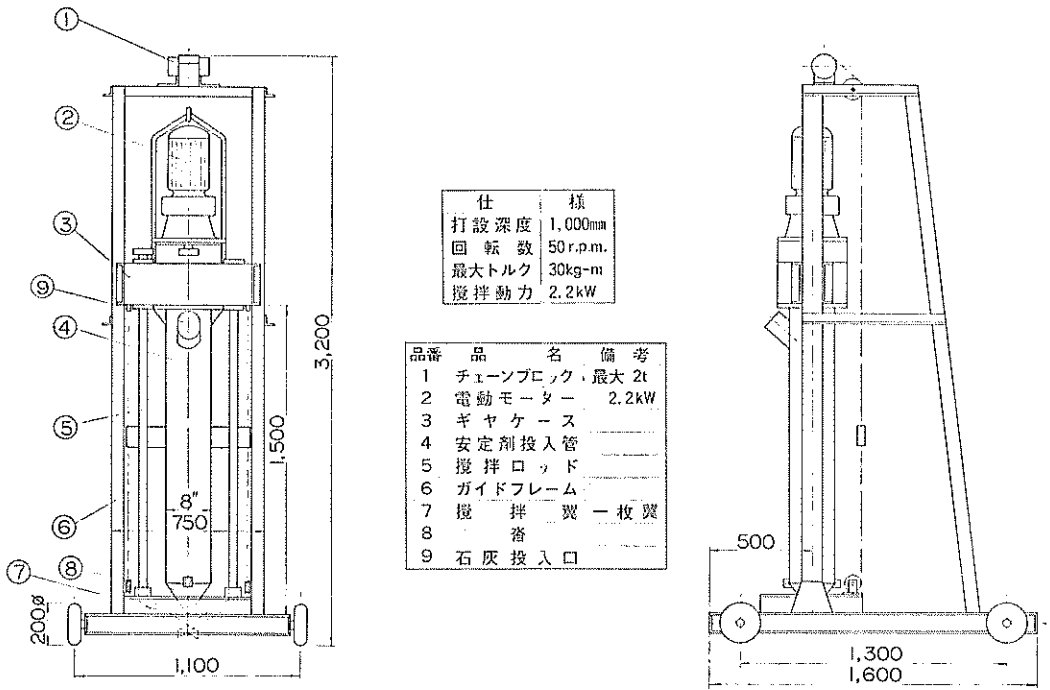


図-6 深層混合処理機—1号機

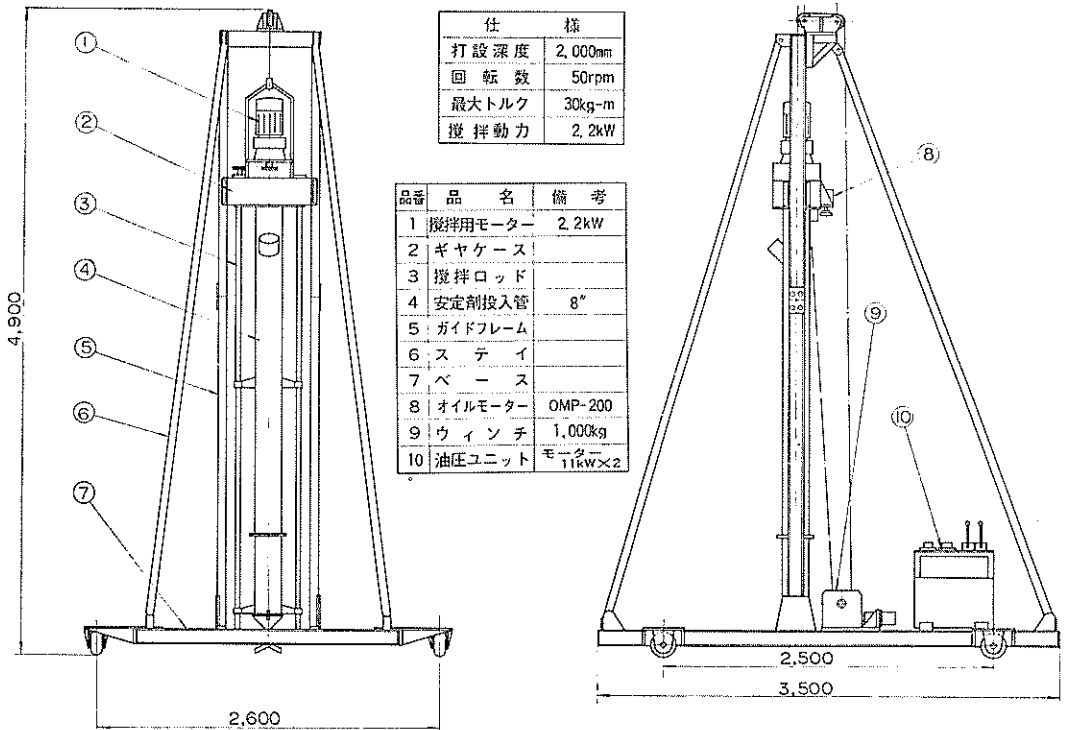


図-7 深層混合処理機—2号機—

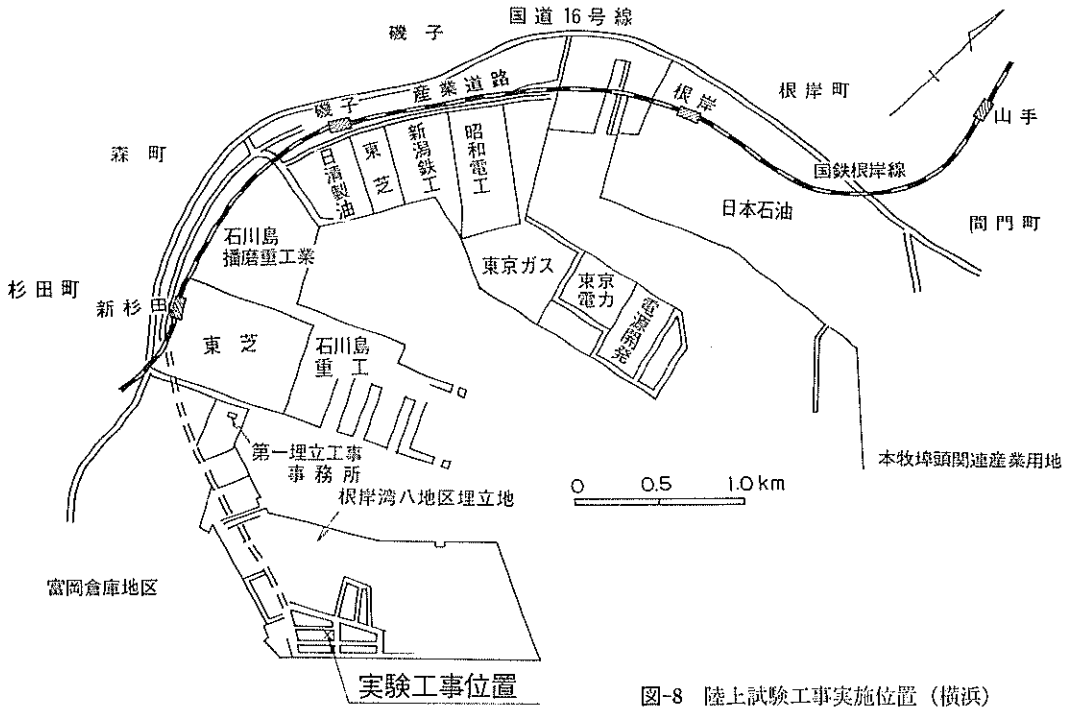


図-8 陸上試験工事実施位置 (横浜)

良ければ消石灰あるいは消石灰スラリーを安定剤として用いても大きな効果の得られることが知られている。

1号機では石灰供給量のコントロールが不可能なこと、模型実験では改良可能な深度が高々1m程度で実験内容にも限界のあることから1号機を改造して2号機を製作し横浜の埋立地内で野外試験を実施した。2号機では1号機の打設管を延長して改良深度を2mとすると共に、打設管の昇降を手動から油圧モーターによるチェーン駆動とした。更に、1号機では不可能であった石灰供給量のコントロールを行なうために各種方式を比較検討した結果、スクリーフィーダー方式を採用した。スクリーフィーダーは、アースオーガーに類似した螺旋状の形状の物で、これを中空鋼管内に組み込み、その回転数変化によって管内の石灰速度をコントロールするものである。このスクリーフィーダーを介して、鋼管(打設管)先端に作用する土圧を打ち消す推力を石灰に与えることが出来れば、任意の量の石灰を地中に供給出来る訳である。図-7に2号機の全体図を示す。

試験地(図-8)は、埋立後間もなく、含水比が90%~120%程度、静的コーン貫入試験による貫入抵抗 $q_c \approx 0.5 \text{ kg/cm}^2$ 程度の極めて軟弱な地盤であった。なお、静的コーン貫入抵抗 q_c と一軸圧縮強度 q_u の間には、一

般に $q_c = 5q_u$ なる関係がある。試験地粘性土(横浜埋立土)の物理、化学的特性を表-2に示し、室内配合試験結果の例を図-9に示す。

表-2 横浜埋立土の物理、化学的特性

砂分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)	G_s	L.L. (%)	P.L. (%)	P.I.	有機物含有量 (%)	pH (H ₂ O)	pH (KCl)
9.9	44.6	45.5	2.73	78.8	39.1	39.7	2.95	8.3	7.8

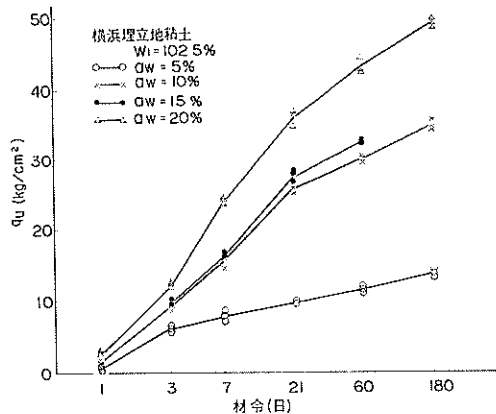
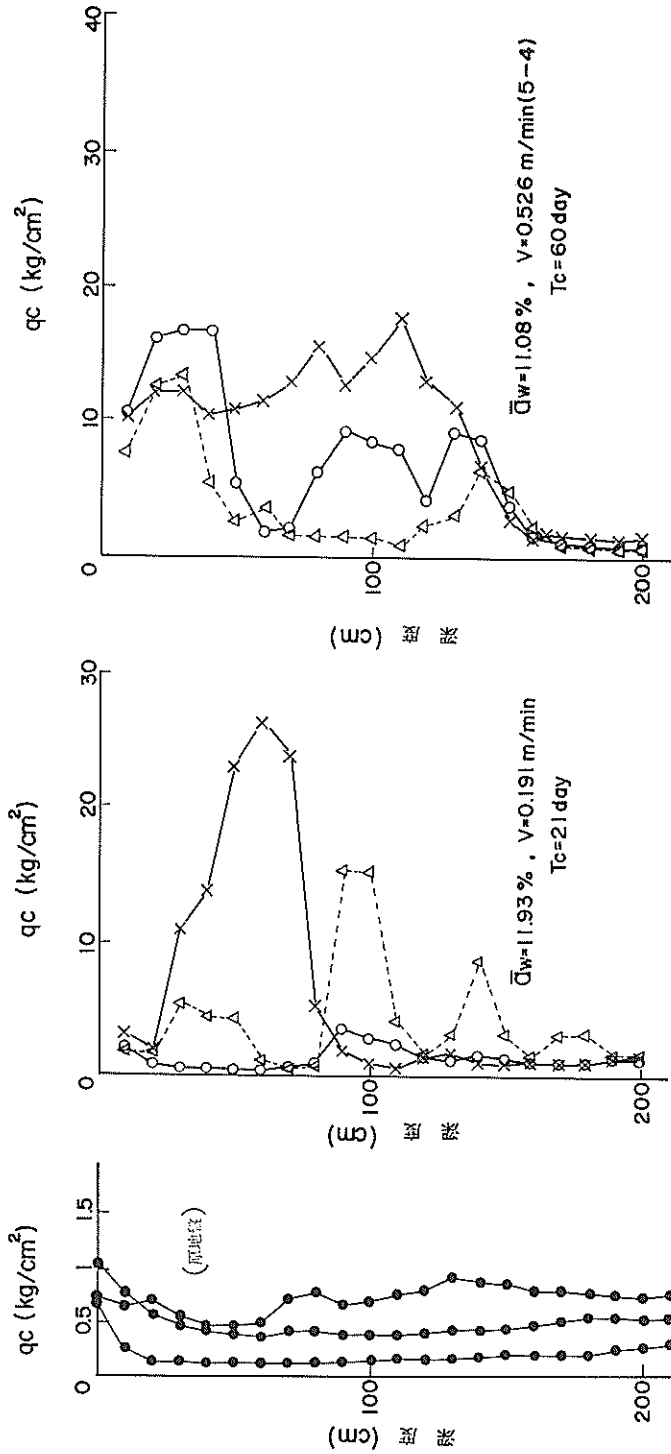


図-9 横浜埋立土室内配合試験結果



(処理後)

図-10 混合処理前後の地盤強度

(処理前)

処理後の強度試験結果の2例と処理前の地盤強度をあわせて図-10に示す。処理試験は総数で61本、処理後の静的コーン貫入試験は125本実施した。本試験工事では、2mまでの改良を予定していたが、図-10に示す様に改良効果の発現は一様とは言い難く、全ケースの内約6割では改良深度が、1.5m~1.6m、残りのケースでは1m~1.2mに留まった。これは、フィーダーより石灰に与える推力の不足によるもので石灰供給の失敗と言って良い。また一回の処理区域内の攪拌混合の一様性に関しては、図-10を含む殆どどのケースで用いた1枚羽の攪拌翼では不十分であり、一部で実施した3枚羽の攪拌翼の優れていることが知られた。しかし野外試験で、改良前に $q_c=0.5\text{ kg/cm}^2$ (q_u 換算 0.1 kg/cm^2)の地盤を、21日ないし60日で図示の様に q_c 値 $5\sim 10\text{ kg/cm}^2$ (q_u 換算 $1\sim 2\text{ kg/cm}^2$)の強度増加は確保することが出来た。

以上の様に1号機と2号機を用いて行なった室内模型実験と埋立地で実施した野外試験によって、室内配合試験で知られていた石灰処理土の特徴は現場条件下でも発揮され、短期間で著しい改良効果を挙げることが認められた。従って、機械装置に改良を加えて一様な石灰供給と十分な強制混合を可能にすれば、陸上工事に關しては本工法を実用化出来る段階となった訳である。しかし、筆者等の最終的に目標とするところは港湾工事への適用、すなわち海底軟弱地盤改良技術の開発である。このため、次の段階として海上工事の可能性の検討を開始した。

3.3 羽田沖海上試験工事

海上工事を前提とする陸上工事の場合とは異なる多くの問題が生ずる。改良の必要な粘土層厚に水深が加えられるため深層混合処理機は必然的に大型化する。大型化した処理装置の打設方法、作業船形式の選定、処理装置の打設管への石灰投入方法の検討等である。しかし、一番大きい問題は、安定剤である生石灰が周知の通り水と急激に反応して発熱、膨張する性質を有することである。この性質のために、仮に生石灰が打設管内で吸水すると、石灰の地中への供給が極めて困難になる。更に混合前に吸水すると、表-1に示した改良機能の一部が失われて改良効果が低減される。

この様な多くの問題を考慮し設計、製作したのが海上試験用としては初めての3号機である。図-11に、3号機の本体部分を示す。3号機本体は、杭打船のリーダーをガイドとして昇降する形式とした。また、この本体部分の他に、油圧ユニット、処理装置昇降用の専用ウイン

チ、コンプレッサー、石灰を本体へ投入するためのベルトコンベアーを船上施設として分離整備した。更に、打設管昇降中に管内へ海水等の流入することを防ぐためと、スクリューフィーダーより石灰へ与えられる推力を補助するために、管内に空気圧を加えることとした。このため、打設管は水密構造とし先端部には遠隔操作で開閉する水密蓋を設けてある。また、攪拌の一様性を確保するために2号機の経験を生かして攪拌翼は3枚羽(写真-1)とした。



写真-1 3枚羽攪拌翼 (3号機)

3号機による初めての海上試験工事は、羽田沖(図-12)の東京都土砂処理場内の粘性土を対象として実施した。同土砂処理場内には、東京港内各地の航路浚渫土砂が主に投棄されており均質なものである。試験地の粘性土を本文では便宜上、羽田埋立土と呼ぶことにする。羽田埋立土の液性限界 W_L は100%前後であるのに対して、処理対象となるG.L.-6.0mまでの含水比平均値は約170%と著しく高含水比であり、更に平均強度は静的コーン貫入抵抗値 $q_c=0.25\text{ kg/cm}^2$ と小さく、いわゆる超軟弱地盤であった。また、前述のように羽田埋立土は不均質であるため、深度毎の試料を採取し、物理試験(表-3)とX線回折による粘土鉱物の同定(表-4)を行なった。羽田埋立土は統一土質分類によると深度によらずCHと分類され、深度方向の比重 G_s の差は実験誤差の程度である。粒径加積曲線(図-13)には、強いて言えばG.L.-2mまでと、G.L.-2m以上の深度とで微妙な差が認められ、塑性指数にもその傾向が認められる。しかし、これは常識的には均質と判断出来る範囲である。また、pH値に深度方向の差は認められない。一方、鉱物組成からは、G.L.-2mを境として微妙な差が認められる。

深度毎の試料を同一条件で室内配合試験した結果を図-14に、表層部の試料に対して各種条件で室内配合試

品番	品名
1	攪拌用電動モーター
2	ギヤーケース
3	フィーダー用オイルモーター
4	石灰投入用ホッパー
5	引き上げ用ブロック
6	押し込み用ブロック
7	打設管
8	打設管ガイド
9	攪拌ロッド
10	攪拌翼
11	ウィンチ

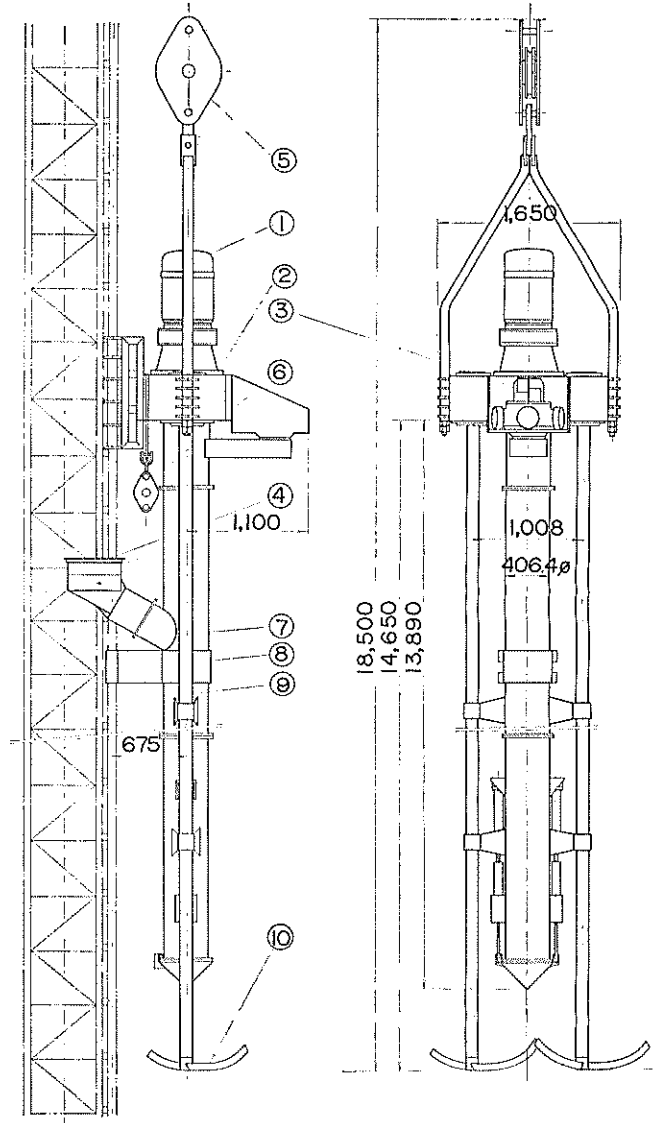
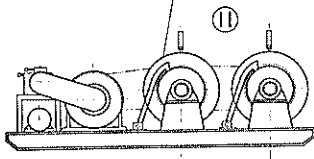


図-11 深層混合処理機—3号機—

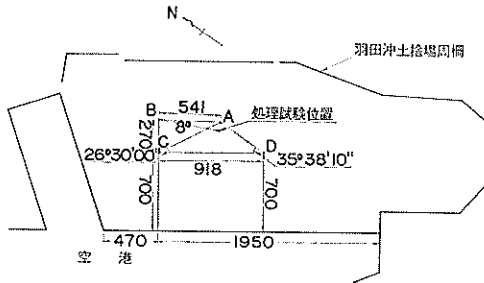


図-12 海上試験工事実施位置 (羽田)

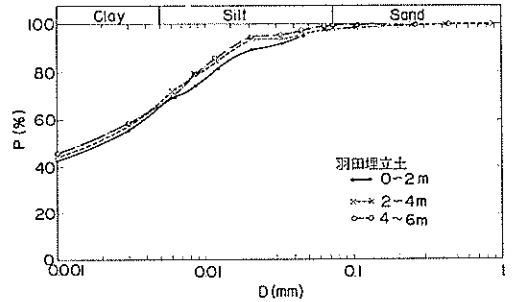


図-13 羽田埋立土の粒径加積曲線

石灰による深層混合処理工法 (第3報)

表-3 羽田埋立土の物理特性

深度 (m)	比重 G_s	液性限界 w_L (%)	塑性限界 w_P (%)	塑性指数 I_P	砂分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)	有機物含有量 (%)
0~2	2.75	99.1	39.7	59.4	1.0	33.0	66.0	4.8
2~4	2.76	108.2	46.2	62.0	2.2	30.3	67.5	4.5
4~6	2.76	106.8	43.0	63.8	0.9	32.6	66.5	2.9

表-4 羽田埋立土鉱物組成

深度 (m)	非粘土鉱物			粘土鉱物				
	石英	長石	クリストパライト	カオリナイト	モンモリロナイト	クロライト	雲母	加水ハロイサイト
0~2	○	○	?	○	○	○	○	△
2~4	○	○	△	○	○	×	○	?
4~6	○	○	○	○	○	×	○	×

但し ○…存在 ?…有無不明 △…少量存在 ×…なし

験した結果を図-15 に示す。上述の様な土質の微妙な相違が改良効果では図示のような明瞭な差となって表われている。このことから改良土の改良効果を土の物理的特性や力学的特性から推定することの難しさが分かり、室内配合試験をその都度実施する必要性が認められる。また、図-15 より羽田埋立土では、石灰混合比 2% 程度では強度増加は皆無であり、ポソラン反応の開始に必要な石灰量に達していないことが分かる。一方、添加する石灰の混合比 a_w を 15% 以上にしても、それ以上の強度増加は小さく、羽田埋立土の石灰処理に当たっては石灰混合比 15% が最も効率的な処理方法と考えられる。また、図-2 と図-14 を比較すると羽田埋立土の改良効果は、他の地域の粘性土に比べてやや小さい。これは、粘土の種類の違いもあるが、それ以上に処理前の含水比が石灰処理に最適な W_L を大きく超えていることによるものと考えられる。この様に、数多くの室内配合試験を行えば処理対象土の石灰処理に対する特徴を知ることが出来る。

処理後の強度試験結果の 2 例と処理前の地盤強度をあわせて図-16 に示す。前述のように羽田埋立土は余り改良効果の良い方ではないが、同図にも示すように、十分に攪拌されたケースでは、処理後 60 日の強度を深度方向に平均すると静的コーン貫入抵抗で $q_c=10 \text{ kg/cm}^2$ 、一軸圧縮強度に換算すると $q_u=2 \text{ kg/cm}^2$ もの強度増加を示した。なお、地表面から約 1m は当初から改良を予定せず、打残した部分であるが、攪拌翼等に付着して上昇した石灰、あるいは作業船より海中に落ちた石灰によ

って改良されているのが認められる。

羽田沖の試験工事では空気圧のコントロールを手働で

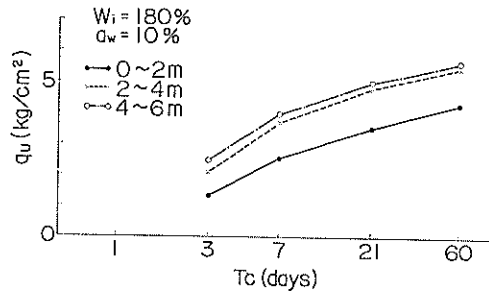


図-14 深度別処理効果 (羽田埋立土)

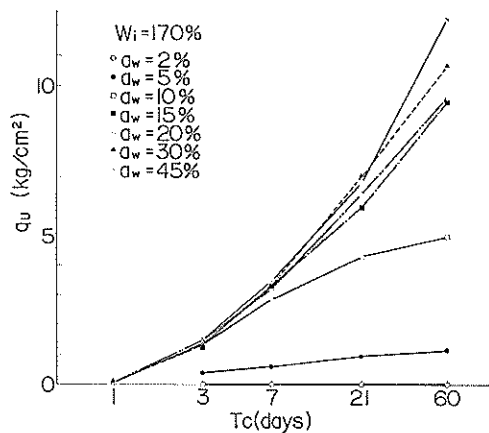
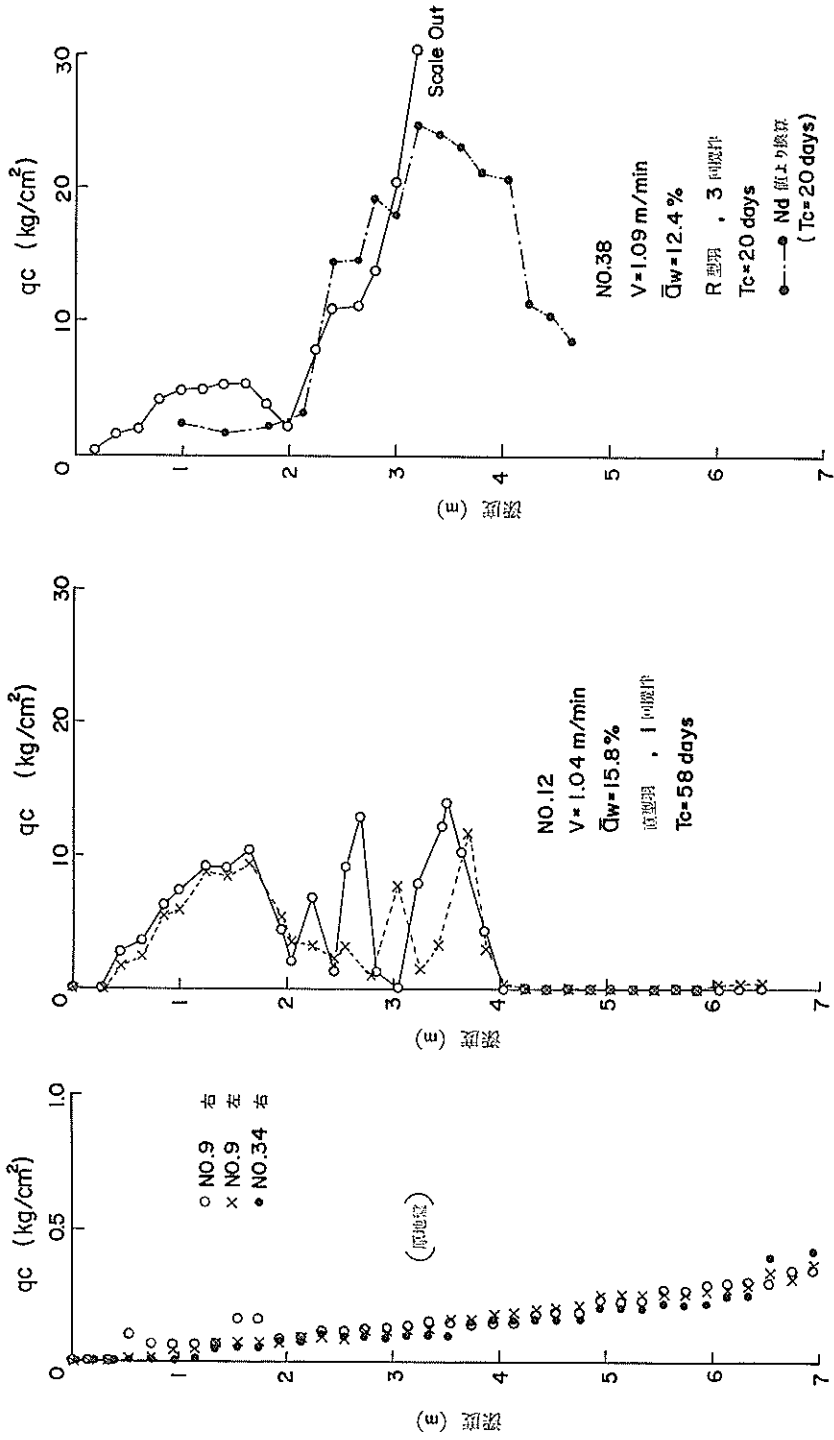


図-15 羽田埋立土室内配合試験結果



(処理後)

図-16 混合処理前後の地盤強度 (海上試験工事)

(処理前)

行っていたため、深度に対応して適切な空気圧を加えることは出来なかった。しかし、改良後の強度増加の傾向や大きさから石灰を乾燥状態のまま地中に供給することに成功したものと考えられる。一方、今回の試験工事も石灰供給の一様性を満足させることは出来なかった。しかし、上述の試験結果から判断して全般的に言って羽田沖海上試験で海上施工の可能なことが認められると共に、へドロ状の超軟弱地盤に対しても木工法の有効であることが確認された。

3.4 実用性の確認

1号機から3号機に至る深層混合処理機械装置の開発と、併行して実施した実験工事によって

- 1) 対象が陸上であるか海上であるかを問わず、深層混合処理工法の実用化は可能である。また、従来の工法では対処不可能と思われる様な超軟弱地盤でも短期間で改良し大きな改良効果を挙げ得ることが知られた。
- 2) 深層混合処理機械装置については、要求される機能を満足させるための機構の基本的な姿を3号機の製作、実験実施を通して知ることが出来た。
- 3) 実験対象とした地盤が極めて軟弱であったため、強制混合に要するトルクや処理装置の昇降に要する力等に関しては殆んど制約を受けなかった。その反面、将来、一層大型の実用機を製作する際の参考とすべき機械的なデータがあまり収集出来なかった。
- 4) 1号機から3号機までの処理機で、石灰供給の一様性を確保することは出来なかったが、石灰供給の及んだ深度は着実に伸びており、打設管開口部の土圧を完全に空気圧でキャンセルし、必要ならフィーダー回転数を制御することによって、この一様性は満足される

という見通しを得た。

以上のように、幾つかの問題点は残されたが、石灰による深層混合処理工法の実用性は確認された。

なお、参考のために、1号機から3号機に至る実験機の諸元を表-5に紹介する。なお、比較のため次章に述べる4号機の主要な諸元も併示する。

4. 西宮沖試験工事

4.1 概 説

深層混合処理工法の現地試験は、前章に記したように極めて軟弱な地盤を対象として実施され、工法開発の状況は3.4に記すような状態にあったが、昭和48年3月に西宮沖において2回目の海上試験工事を実施した。

この試験工事は、従来の開発で残されていた問題の解決を主目的として行なわれ、先ず港湾技術研究所で従来の1号機から3号機までの経験を生かして、深層混合処理機—4号機—を製作した。また、試験工事は4号機を用いて、港湾技術研究所の技術的指導の下に、運輸省第三港湾建設局関西国際空港調査室によって実施されたものである。

4.2 深層混合処理機—4号機—

深層混合処理機—4号機—の計画にあたっては、従来の実験機で残された課題の検討と同時に、最終目標を海面下50m以上の改良におく実用機設計のために機械的データを収集することにも重点がおかれた。また、従来の実験工事等で対象としてきた超軟弱地盤ではなく少なくとも正規圧密の完了した粘土地盤の改良を想定することとした。この様な想定にたつと、実用機のスケールは3号機の4~5倍にはなり、処理機の受ける外力も一桁以

表-5 深 層 混 合 処 理 機 諸 元

	1号機	2号機	3号機	4号機
対 象	室内模型実験	陸上野外試験	海上試験工事	海上試験工事
改 良 深 度	G.L.—1.0m	G.L.—2.0m	W.L.—10m	W.L.—15m
1回の処理面積	0.4m ²	0.4m ²	2m ²	2m ²
攪 拌 動 力	電動機 3馬力	電動機 3馬力	電動機 40馬力	油圧モーター 100馬力
石灰供給動力	ナ シ	(フィーダー) 油圧駆動 15馬力	油圧モーター 30馬力	油圧モーター 50馬力
打設管昇降	手動チェーンブ ック	(チェーン駆動)	油圧ウインチ 10t×1m/min	油圧ウインチ 25t×2m/min
打設管加圧	空気圧(制御ナシ)	ナ シ	空気圧手動制御	空気圧連動制御
計測機器	ナ シ	ナ シ	石灰面ゲージ(失敗) 管内空気圧	(4.2) 参 照

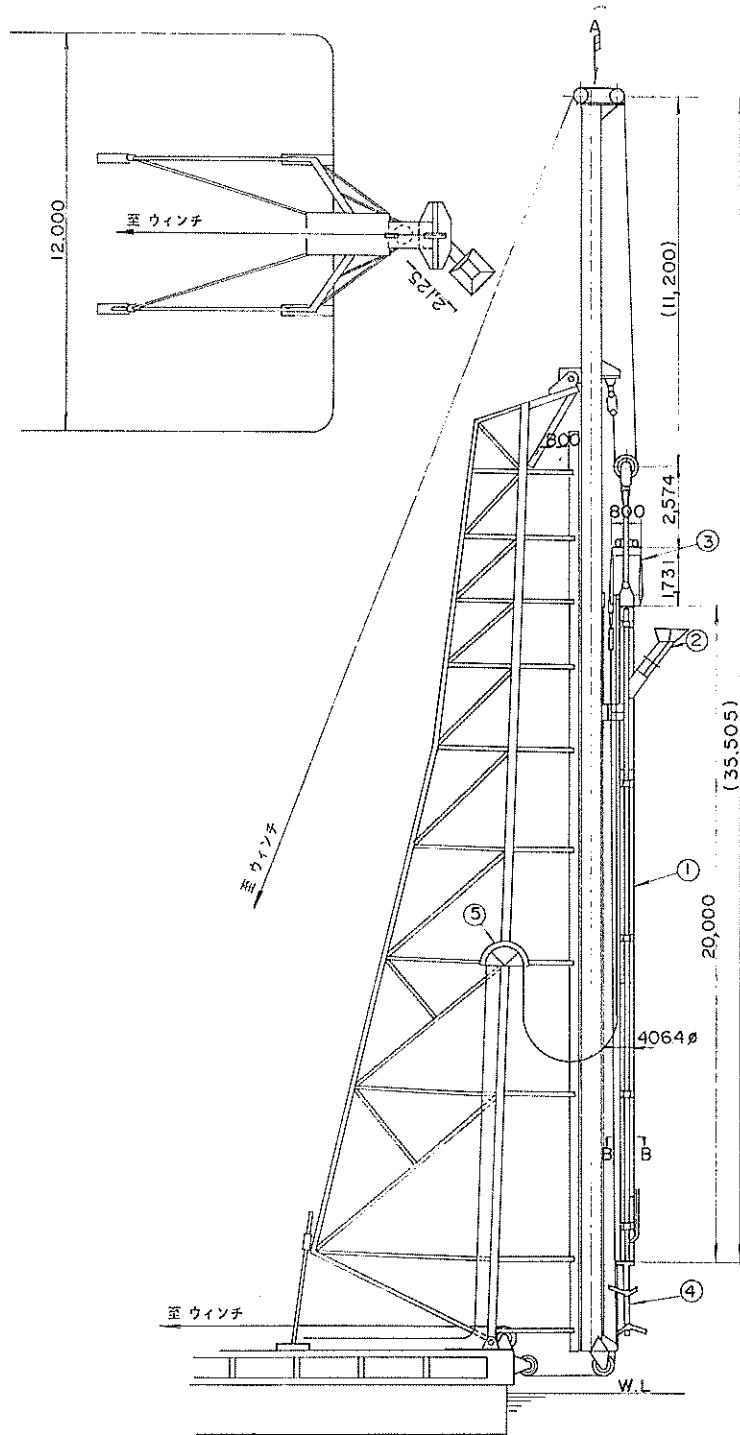


図-17 深層混合処理機—4号機—全体図

石灰による深層混合処理工法（第3報）

上大くなるものと考えられる。又、従来の実験機では改良効果の把握が主目的であったため、処理装置の使用上の便利さ等は犠牲にしてきたが、実用化の段階では使用上の便利さ、施工管理の方法等も検討の必要がある。このため、実験機4号機の設計並びに4号機を用いて行なう実験の目的として、下記の項目を選定した。

- 1) 正規圧密に近い地盤条件下の海上工事の可能性の検討
- 2) ワンマンコントロールを前提とした操作方法の検討

- 3) 施工管理上必要な項目の測定方法の比較検討
- 4) 実用機の諸元決定に必要な機械的データの収集

以上、選定した項目を達成するために港湾技術研究所機材部の協力を得て4号機を設計した。しかし、2), 3), 4) 項の目的を達成するために計測関係を重点的に整備した結果、攪拌能力を従来の経験から必要とされる能力の1/3程度に抑えざるを得なかった。なお、処理機械の製作は(株)神戸製鋼所に発注した。以下に、4号機の諸元を紹介する。

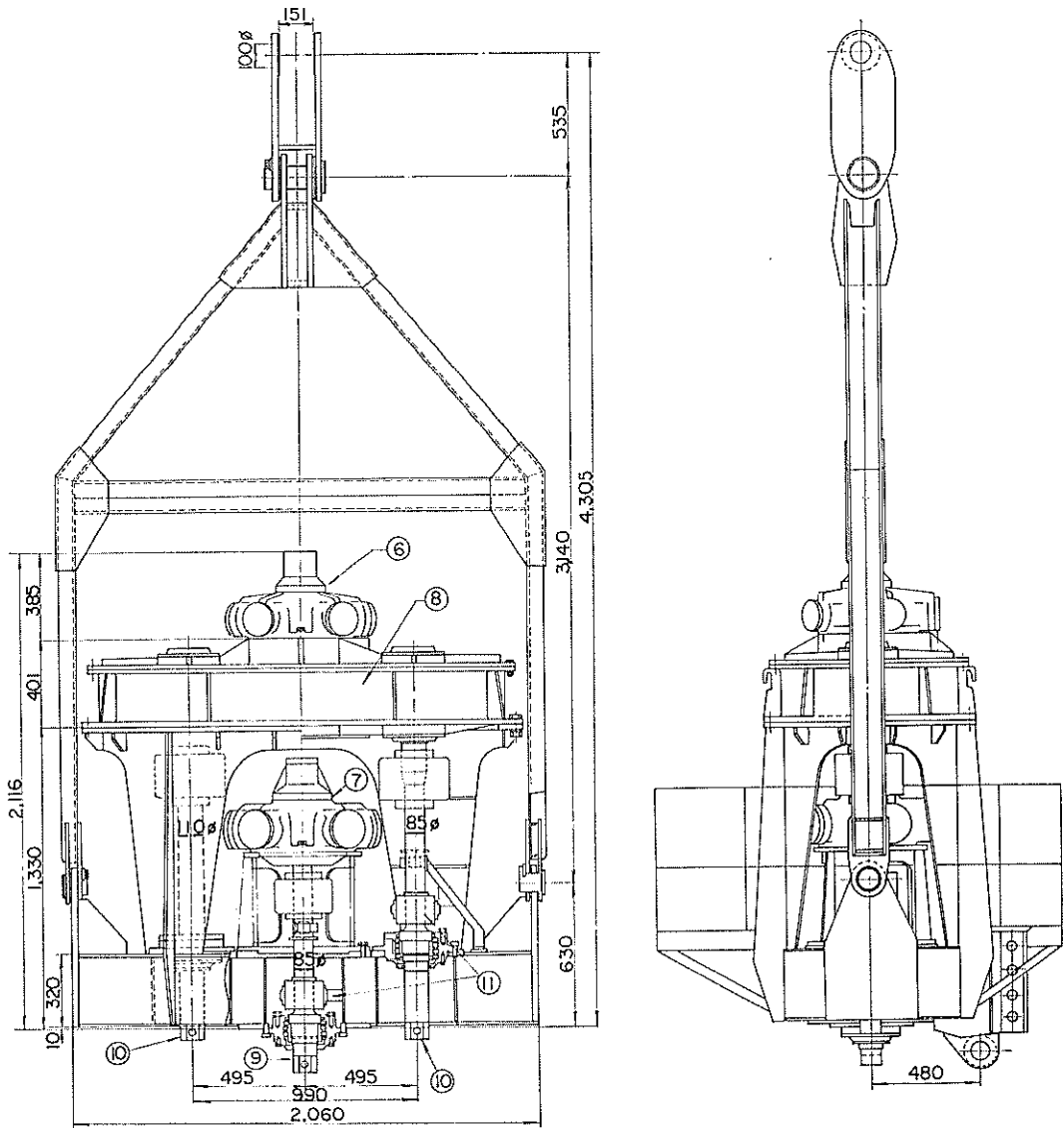


図-18 4号機, 上部本体

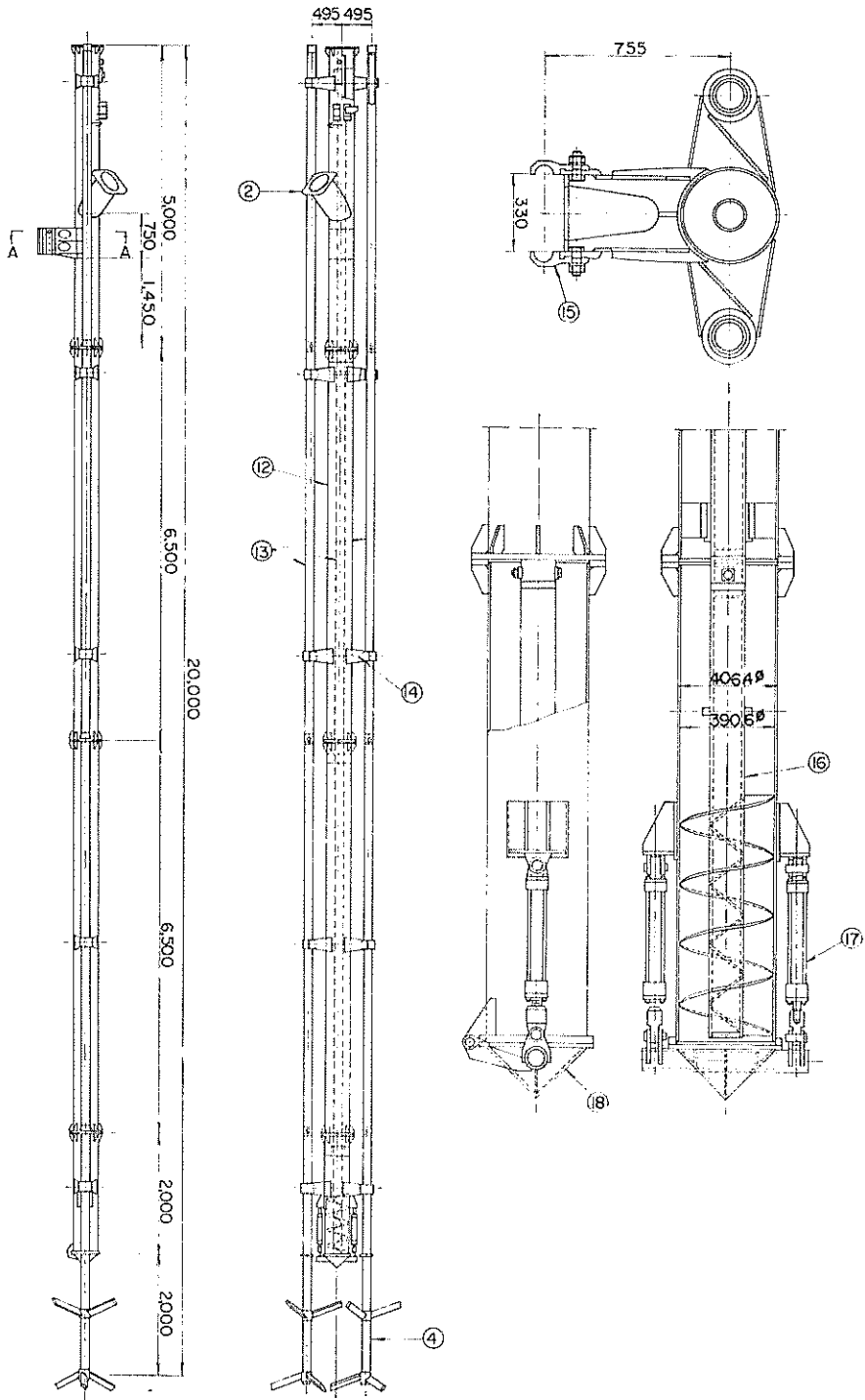


图-19 4号機，下部本体

石灰による深層混合処理工法 (第3報)

4号機は、杭打船の櫓のリーダーを利用して2ヶ所でガイドされ専用ウインチにより昇降するもので、全て油圧駆動とし油圧源は船上に置き、その間を高圧ホースで接続する型式とした(図-17)。4号機の構成は、実際に石灰を内蔵し土中に貫入する下部本体①と下部本体中に石灰を投入するためのホッパー②、下部本体の各部を駆動する油圧モーター等を搭載する上部本体③、土中で石灰と粘土を強制混合する攪拌翼④、更に動力源、制御系統、本体を昇降するために必要な専用ウインチ等の船上施設より成るものである。上部本体の詳細を図-18に、下部本体の詳細図を図-19に示す。なお、本装置の主要な諸元は1号機から3号機の諸元と比較のため已に表-5に示した。

(1) 上部本体(図-18)

上部本体(駆動部分)は、鋼板溶接製のボックス構造で、下部本体各部を駆動する油圧モーター、管内空気圧調整用のバルブ、攪拌トルク、フィーダートルク計測機器等を搭載する部分である。石灰供給用スクリューフイーダー軸は油圧モーターにより直接駆動する方式とし、強制混合用の攪拌軸は油圧モーターより歯車減速機を介して駆動する型式となっている。

ラジアルピストン形油圧モーター

強制混合用; 100 PS, 100 r.p.m., 最大トルク
720 kg-m (⑥)

石灰供給用; 50 PS, 60 r.p.m. 以下可変, 最大トルク
600 kg-m (⑦)

歯車減速機 (⑧);

減速比 1/2, 入力軸 100 PS, 100 r.p.m.

石灰供給フィーダー用出力軸 (⑨)

強制混合用出力軸 (⑩)

フィーダー軸, 攪拌軸トルク検出用スリップリング
(⑪)

鋼板製架体(本体上昇用と下降用の2ヶ所のウインチ
ロープ取付部, 櫓のリーダーへのガイドを備える)

その他計測機器搭載

(2) 下部本体(図-19)

下部本体は、図-19に示す様に石灰の通路となる打設管を中心にして構成されており、この部分が地盤中へ貫入して石灰混合処理を行なう部分である。最上段の打設管は上部本体と接続される部分で、ここに石灰投入用ホッパーと、櫓のリーダーへのガイドが設けられている。最下段の打設管には、スクリューフイーダーを内蔵し、油圧シリンダーによって開閉する蓋を設けてある。な

お、打設管には最大 3 kg/cm^2 までの加圧を行なうため、継手、蓋に耐熱、耐アルカリのガスケットを使用している。又、全ての打設管の内部にはフィーダー軸の軸受けを、外側には攪拌軸の軸受けを備えている。

打設管 (⑫); STK41, $\phi 406.4 \text{ mm}$, 肉厚 7.9 mm

全長; 20 m ($l=5 \text{ m}$; 1本, $l=6.5 \text{ m}$; 2本, $l=2 \text{ m}$;
1本)

攪拌軸 (⑬); STKM15A, $\phi 139.8 \text{ mm}$, 肉厚 13 mm

全長; 20 m, 1対 ($l=5 \text{ m}$; 1対, $l=6.5 \text{ m}$; 2対
 $l=2 \text{ m}$; 1対)

フィーダー軸 (⑭); STKM15A, $\phi 139.8 \text{ mm}$, 肉厚

13 mm, 全長 18 m ($l=5 \text{ m}$; 1本, $l=6.5 \text{ m}$; 2本)

攪拌軸軸受け (⑮)

フィーダー軸軸受け; 各打設管に内蔵

ガイド (⑯); リーダーへの取付部

スクリューフイーダー (⑰); $\phi 380 \text{ mm}$, 全長 1,880 mm

3種(ピッチ 150 mm 6巻, ピッチ 200 mm 5巻,
ピッチ 250 mm 4巻 各1本)

攪拌翼 (⑱); $\phi 1175 \text{ mm}$, 中心軸 STKM15A, $\phi 139.8 \text{ mm}$

3種; 曲線形一段羽, 全長 1120 mm 1対

曲線形二段羽, 全長 2120 mm 1対

直線形二段羽, 全長 2120 mm 1対(図示)

油圧シリンダー (㉑); 水密蓋開閉用 1対

水密蓋 (㉒)

その他; 計測機器, 油圧シリンダー用配管等

(3) 船上施設

上述の下部本体に駆動部分である上部本体を取り付け一体としてウインチで吊り、櫓のリーダー上を滑動させて改良工事が実施される。船上には、ウインチ、動力源、配電盤等の本体に組み込む必要のない部分が配置される。

油圧ウインチ; 本体吊上用専用ウインチ 1台

本体押込用専用ウインチ 1台

巻上荷重 12.5 ton, 巻上速度 0~4 m/min(可変)

ブレーキ(吊上用のみ) 15 ton

ラジアルピストン型油圧モーター, 各1台

石灰供給用ポンプユニット

3 相交流誘導電動機; 440 V, 60 HZ, 55 KW

油圧ポンプ; アキシアルピストン可変容量型

強制混合用ポンプユニット

3 相交流誘導電動機; 440 V, 60 HZ, 110 KW

油圧ポンプ; アキシアルピストン固定容量型

ウインチ用ポンプユニット

3 相交流誘導電動機; 440 V, 60 HZ, 15 KW
油圧ポンプ; アキシシャルピストン可変容量型

シリンダー及びサーボ用ポンプユニット

3 相交流誘導電動機; 440 V, 60 HZ, 5.5 KW
シリンダー用油圧ポンプ; ベーン定容量型
サーボ, パイロット用油圧ポンプ; 2 連ギヤ型

共通油タンク; 容量 2000 l

油クーラー; ファン空冷式, 1.5 KW

電磁制御盤; 各ポンプユニット, 計測操作盤への配電盤であり, 同時に各アクチュエータの始動, 停止を行なう。

計測操作盤; 攪拌翼回転数, フィーダー回転数, 打設管昇降速度, 管内空気圧, 管内の石灰面位置と石灰面下降速度をメーター表示すると共に自記記録用出力端子を備える計測盤である。また, ウインチの操作, 管内空気圧の設定, 石灰供給速度の設定を行なう操作盤でもある。

上記電磁制御盤と計測操作盤を船上の同一個所に配置すれば, ワンマンコントロールが可能となる。

本体深度 対 管内空気圧連動制御機器

ウインチロープ速度より本体深度を検出, 別途検出される管内空気圧とを比較して, コントロールバルブの開閉信号を出し規定の圧力に調節する装置で, 計測操作盤に組み込まれる。使用に際しては, 改良予定の最大深度に対応する空気圧を計測操作盤上で設定すれば, 海面で大気圧となる様に直線的に空気圧をコントロールする。手動操作も可能である。

石灰面速度 対 フィーダー回転数制御機器

重錘式石灰面ゲージより検出される石灰面速度と設定石灰面速度を比較して, フィーダー回転数を増速ないしは減速し石灰供給量を一定に保つ。使用に際しては, 計測操作盤上で石灰面速度を設定すれば良い。尚, 連動を解除すれば計測操作盤上のスイッチで手動によりフィーダー回転数をコントロールすることも可能である。

(4) 計測装置

前述の様に, 今回の実験機 4号機では施工管理上必要な項目の検出, 実用機の諸元決定のために必要な項目の検出を試みるため計測機器を充実した。この計測結果の一部は前項の計測操作盤で直読出来る様にメーター表示し, 又, 一部は連動制御を行なうための入力信号として

用いた。更に全てのデータを自記記録し得る様に計測操作盤の背面に出力端子を設けた。

重錘式石灰面ゲージ; これは地中に必要量の安定剤の石灰を供給しているか否かを検出する機器で, 打設管内の石灰面の位置と, その移動速度を検出するものである。この項目は実用機においても, 施工管理上測定する必要があるため, 下記の静電容量型石灰面ゲージと併用し比較検討した。

この機器は, トルクモーターの特性を利用して重錘を吊り下げ, 低電圧印加状態でワイヤーに張力を与え重錘を石灰面の移動に追従させ, 高電圧印加で巻き取る型式である。石灰面の位置の計測に当たっては巻き上げドラムの積算回転数をポテンシオメーターで検出し, 石灰面下降速度の計測に当たっては巻き上げドラムの回転数をタッチロールを介して回転検出器で検出し速度に変換する。前述の連動制御には, この速度信号を用いる。構成は単相トルクモーター, リレー型サイジャスター, ポテンシオメーター, 回転数検出器 (パルス信号), 回転変換器, ドラム, ワイヤー, 重錘より成る。

静電容量型石灰面ゲージ; これは, 打設管内に電極ケーブルを設置しておき, 管内の石灰量変化による静電容量変化から石灰面の位置を検出するもので速度の検出は行なわない。

大機工業(株)製, レベル連続指示計

攪拌軸回転数検出機器; 石灰と周辺粘土の強制混合が順調に行なわれているか否かを検討すると共に, 攪拌の負荷状態をある程度推定出来る。この項目も施工管理上, 必要と考えられる。構成は, 回転検出器と回転変換器より成る。

フィーダー軸回転数検出器; 石灰供給量とフィーダー回転数の関係を求め, 実用機製作の参考とする。実用機では必ずしも必要としない。構成は同上。

攪拌軸トルク検出器; 強制混合用攪拌翼に作用する軸トルクを検出し地盤強度との関連を求め, 実用機製作の資料とする。測定方法は, 攪拌軸表面に貼付した4枚のストレインゲージのブリッジをスリップリングを介して歪計に接続し読みとる。この歪量に, 既知の攪拌軸の断面寸法, 弾性常数を用いて換算したトルクを求めることとなる。

歪ゲージ, スリップリング

動歪計, ペンレコーダー

フィーダー軸トルク; 石灰を供給中にスクリーフィ

ーダーに作用するトルクを検出し、実用機製作の資料とする。測定方法、測定機器は攪拌軸トルク検出の場合と同じである。

ウインチロープ速度および打設管深度の検出；

ウインチロープ速度は、石灰処理中に処理機の昇降する速度を代表するもので、混合条件と密接に関連しており、施工管理上必要である。また、ウインチロープ速度を積分すれば打設管先端開口部の深度を知ることが出来る。この深度に対応する水圧＋土圧に等しい空気圧を管内に加えることによって石灰の供給を円滑にすると共に打設管内への浸水を防ぐことが出来る。従って、深度の信号を用いて前述の管内空気圧の連動制御を行なう。この連動制御は実用機でも必要である。

ロープ速度および打設管深度の検出方法は重錘式石灰面ゲージと同じであり、構成する機器も重錘式石灰面ゲージの単相トルクモーターを除けば同一である。

管内空気圧検出機器；上記の目的で管内に加える空気圧を検出するもので、施工管理上必要であると共に、上記連動制御に際するフィードバック信号となる。構成は圧力変換器と自動平衡式指示計より成る。なお、圧力測定は打設管上部と下部の2ヶ所で行なった。

本体引上荷重および押し込み荷重検出機器；

これは、引上用と押し込み用のウインチロープに作用する張力を測定し、処理装置寸法、地盤強度の関連を求めて実用機の専用ウインチ設計の参考資料とするものである。構成はロードセル（各1）と動歪計（各1）より成り、ペンレコーダーに記録させる型式とした。

（5） 関連施設

配線、配管；船上施設相互並びに船上施設と本体間の電気配線ならびに油圧、空気圧の配管。

発電機（使用期間中借上げ）

コンプレッサー（使用期間中借上げ）

石灰投入用クレーン（使用期間中借上げ）

4号機の詳細は以上の通りである。なお4号機の杭打船への取付状況を写真-2に、打設管先端部の攪拌翼（曲線型1段羽）と水密蓋を写真-3に、船上のポンプユニット、ウインチ等の配置状況を写真-4に、電磁制御盤と計測操作盤を写真-5に示す。



写真-2 4号機全容

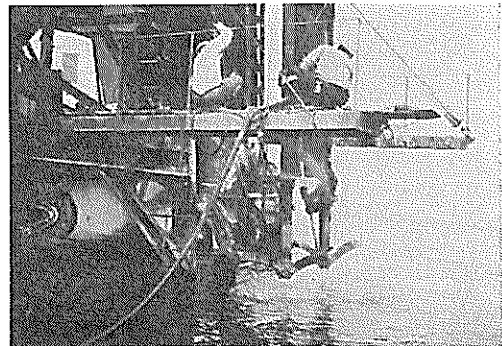


写真-3 4号機先端部

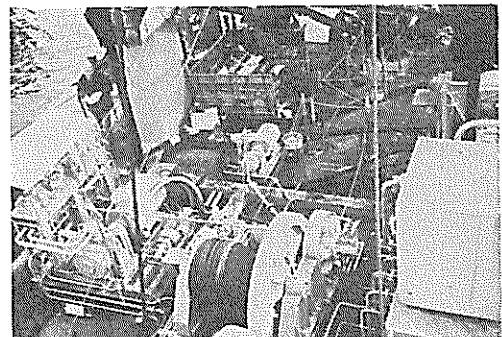


写真-4 船上施設（4号機）

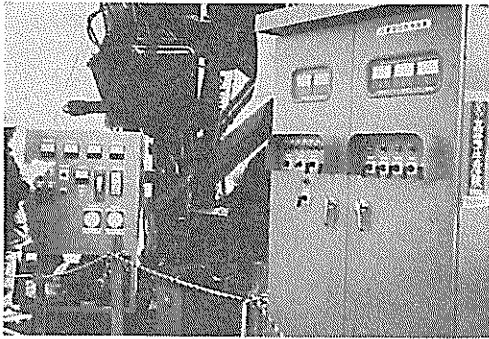


写真-5 電磁制御盤(右)と計測操作盤(左)

4.3 試験地ならびに処理対象土特性

海上試験工事は西宮沖(図-20)の海底粘性土地盤を対象として実施された。試験実施地点の粘性土を本文中では鳴尾粘土と呼ぶことにする。図-21に鳴尾粘土の自然含水比分布を、図-22に強度分布を海底地盤を基準とした深度に対して示し、図-23には深度毎の粒径加積曲線を示す。また、表-6には深度毎の物理試験結果を、表-7には鳴尾粘土中の鉱物組成を示す。

従来の試験工事で対象としてきた超軟弱地盤と異なり、今回の試験地の強度は比較的大きい。図-22で直線

近似すると、一軸圧縮強度は $q_u = 0.28 Z$ (t/m²) となり、正規圧密状態の粘性土に近い強度分布を呈している。羽田沖試験工事の例でも判るように、土質の微妙な相違によっても石灰安定処理効果は変化するため深度別に調査した粒度組成(図-23)、物理特性(表-6)によると、鳴尾粘土も深度方向に均質とは言い難い。試験地付近では、20年前程に捨土されたことがあると言われており、G.L. 0~4mはその影響が及んでいるものと推察される。X線回折を中心とした鉱物組成の定量結果(表-7)によっても、G.L. 3~4mに比較的多量の非粘土鉱物が含まれており、捨土の影響を裏付けている。なお、鉱物組成に関するこのデータは東京工業大学地質学教室の小坂丈子助教授に依頼して得られたもので信頼性の高いものである。しかし、複雑な構成の一般の土中から粘土鉱物を精度良く定量することは現在の学問レベルでは困難であり、このデータに示す重量パーセントもあくまで推定値の域を出ないことに注意されたい。

鳴尾粘土は深度方向に不均質であるため、改良効果も深度によって相違するものと考えられる。このため、ボーリングによって採取された試料土を用いて深度毎に室内配合試験を実施した。室内配合試験にあたって、初期含水比は各深度の自然含水比とし生石灰混合率は土粒子

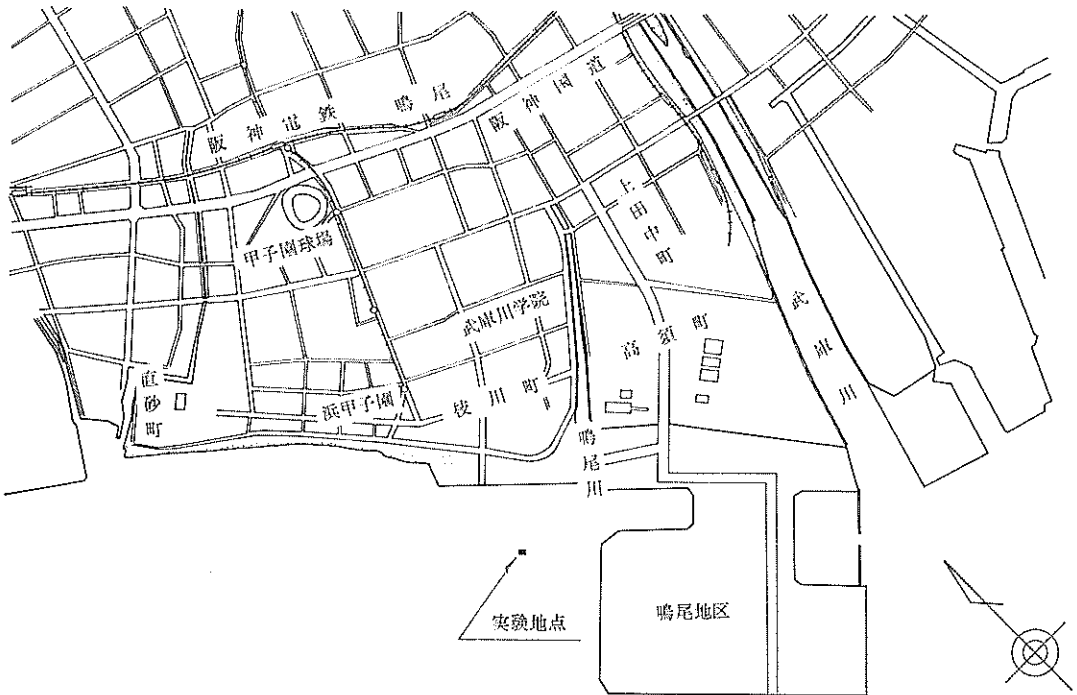


図-20 海上試験工事实施位置(西宮)

石灰による深層混合処理工法 (第3報)

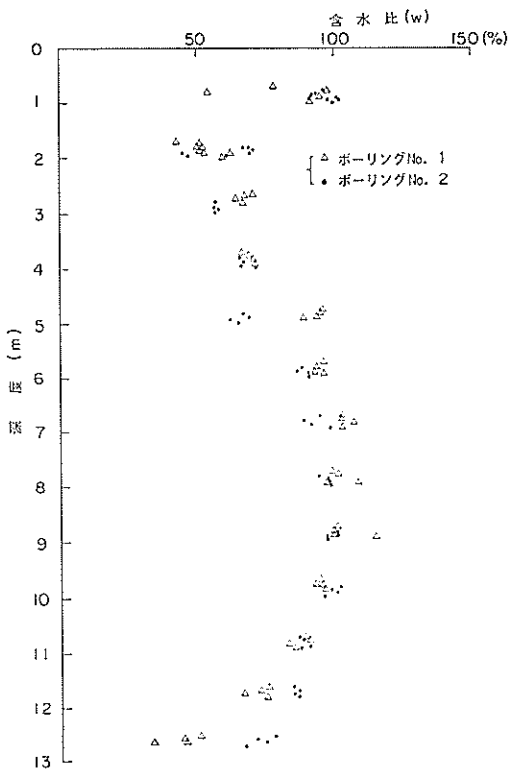


図-21 鳴尾粘土自然含水比分布

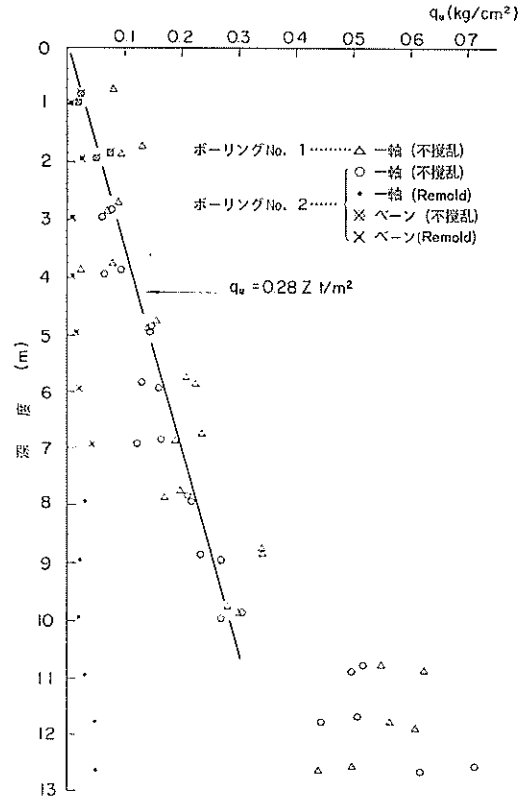


図-22 鳴尾粘土初期強度分布

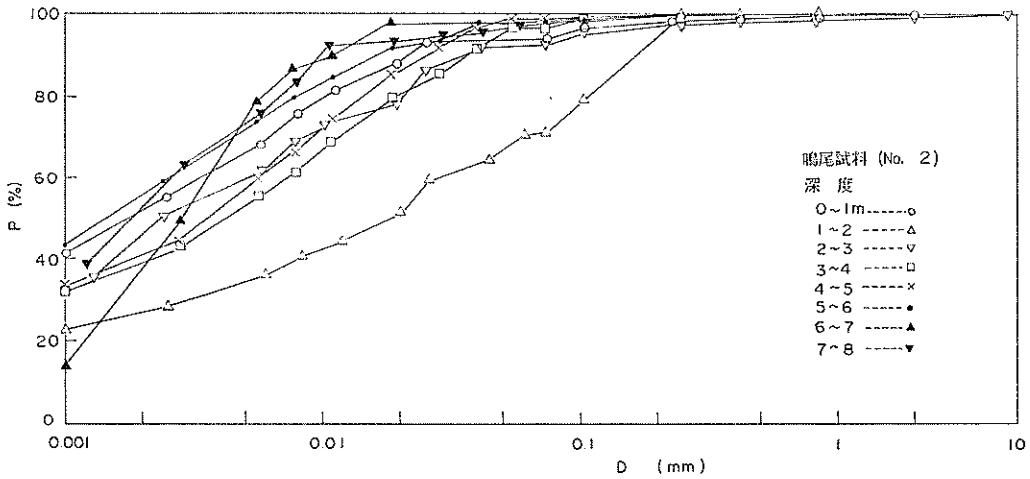


図-23 深度別粒径加積曲線 (鳴尾粘土)

表-6 鳴 尾 粘 土 物 理 特 性

深 度 (m)	砂 分 (%)	シルト分 (%)	粘 土 分 (%)	比 重 G_s	L.L. (%)	P.L. (%)	P.I.	分 類 名
0~1	6.3	27.8	65.9	2.74	85.4	31.2	54.2	CH
1~2	7.7	33.2	59.1	2.74	109.6	35.6	74.0	CH
2~3	29.0	37.0	34.0	2.68	43.1	23.4	19.7	CL
3~4	3.9	43.2	52.9	2.71	58.0	27.7	30.3	CH
4~5	0.9	42.1	57.0	2.74	58.2	29.1	29.1	CH
5~6	2.0	26.1	71.9	2.73	83.0	31.4	51.6	CH
6~7	2.3	24.2	73.5	2.74	99.4	35.3	64.1	CH
7~8	2.2	24.3	73.5	2.73	104.8	34.4	70.4	CH
8~9	1.7	22.5	75.8	2.70	112.1	37.3	74.8	CH
9~10	2.2	23.8	74.0	2.73	113.7	35.8	77.9	CH

表-7 鳴尾粘土鉱物組成推定値(重量%)

深 度(m)	鉱 物						
	石 英	長 石	ク リ ス ト バ ラ イ ト	モ ン モ リ ロ ナ イ ト	雲 母	カ オ リ ン (含 ク ロ ラ イ ト)	
1~2	13	6	0.6	22	14	19	
3~4	21	13	2	24	12	15	
5~6	12	5	1	21	9	15	
7~8	13	5	1.2	19	11	12	

実質部分に対する重量百分率で 10% とした。材令に伴う強度増加を一軸圧縮試験により求めた結果を図-24 に示す。試料土を大量に採取することが出来なかったため、十分なデータではないが、深度によって改良効果が異なる。このように、深度方向に改良効果の異なる地盤で本工法を実用に供する場合は、改良効果の最も低い深度で所要強度を発揮する様に配慮すべきであろう。但し、ここでは試験工事結果を検討するための資料として室内配合試験を実施している訳であるから、深度方向の平均的強度増加を知られば良い。図-24 より、鳴尾粘土の室内配合試験による平均的強度増加は材令 21 日で $q_u \approx 4.5 \text{ kg/cm}^2$ 、材令 60 日で $q_u \approx 9.5 \text{ kg/cm}^2$ である。他の地域の粘性土と比較すると、羽田の場合と同様に鳴尾粘土の改良効果も必ずしも良好とは言えない。また、ここではデータは省略したが、石灰を 15% 混合すると改良効果は、およそ 25% 増加することが知られている。

4.4 試験工事実施方法

改良工事に際しての船団は、4号機を搭載した杭打船、発電機、コンプレッサー、生石灰および4号機ホッパーへ石灰を投入するためのクローラークレーンを積載する

台船1隻、石灰運搬用の台船1隻、通船1隻より構成された。改良工事の方法を施工順序に従って紹介する。

- i) 打設位置決定; 観測台より打設管を視準して杭打船を所定位置に移動する。
- ii) 打設管内加圧; 打設管内を予じめ加圧しておき、海水の流入を防ぐ。
- iii) 攪拌翼始動
- iv) 打設管下降; 攪拌によって地盤強度を低下させながら打設管を改良予定深度まで降ろす。
- v) 管内減圧, 石灰投入; フレキシブルコンテナ(1t 詰め)をクローラークレーンで吊り上げ、ホッパーより必要量の生石灰を打設管内に投入する。
- vi) 管内加圧; 地中への石灰供給を補助するため、および打設管先端の土圧を打ち消すため、改良予定深度に於ける全応力に相当する圧力で管内を加圧する。
- vii) 打設管先端の蓋を開放
- viii) フィーダー始動
- ix) 打設管上昇; フィーダー始動と同時に打設管を上

石灰による深層混合処理工法 (第3報)

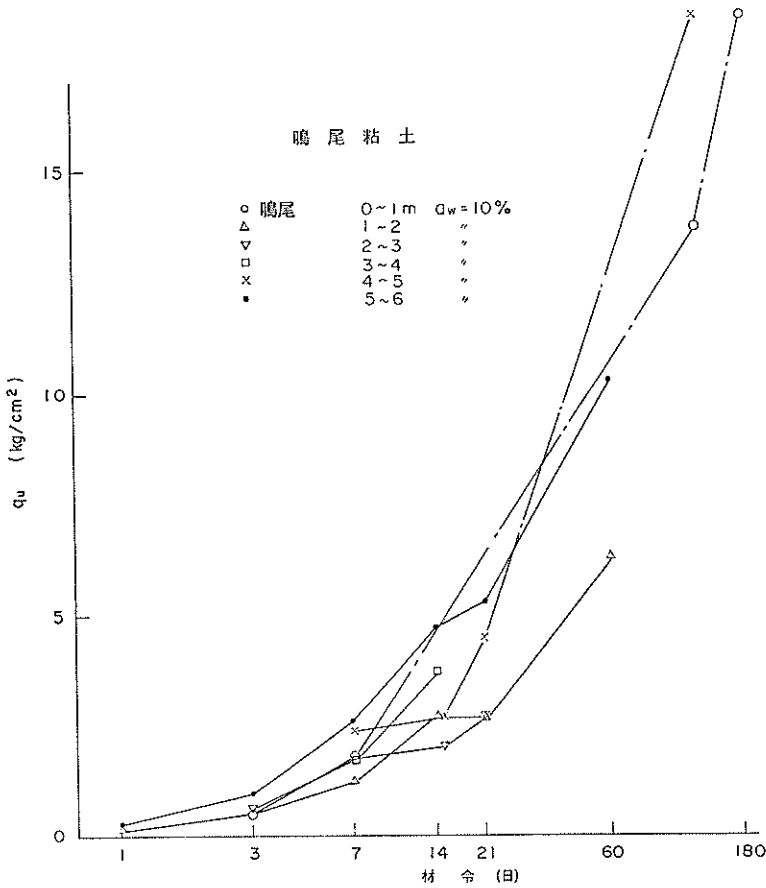


図-24 鳴尾粘土室内配合試験結果

昇させる。なお、上昇の過程で管内圧は自動的に減圧され海面で大気圧に等しくなる。また、この上昇の間に排出された石灰は周辺の粘性土と強制的に攪拌される。

- x) フィーダー停止、打設管先端の蓋を閉じる。
- xi) 攪拌翼停止；攪拌翼下端が海底面を離れたら攪拌を終了する。
- xii) 打設管上昇停止

改良工事の1部は攪拌を3回行なったが、この場合には、工程 x) に続いて iv) と同様に打設管を下降させ、そのまま再び上昇させて工程 xi) に移る。こうして、改良工事の1サイクルが完了し次の地点へ杭打船を移動することとなる。

なお、前節に記した計測項目に関する機械的データは改良工事施工中に全て自記記録される。

試験工事の状況を写真-6~写真-9 に示す。写真-6 の中央は打設管を下降中の杭打船、左がクローラークレーン、発電機等搭載の台船、右は改良効果の判定に使用した鋼製槽である。写真-7 は工程 v) で、作業員がフレキシブルコンテナを開封し石灰を投入する状況である。写真-8 は、試験工事の間リリースした発電機 2 台とコンプレッサーを、写真-9 は機械的データの自記記録の状況を示すものである。

4.5 試験工事結果

試験工事は、表-8 に示す 12 種類のケースに関して実施し、打設総数は約 60 本であった。今回の試験工事結果は 2 つに大別される。1 つは、大阪湾内の比較的強度の大きい地盤を対象とした場合の本工法の可否の判定である。そして 1 つは、施工管理上必要な測定方法の試行結果ならびに実用機製作のための機械的データの取得で

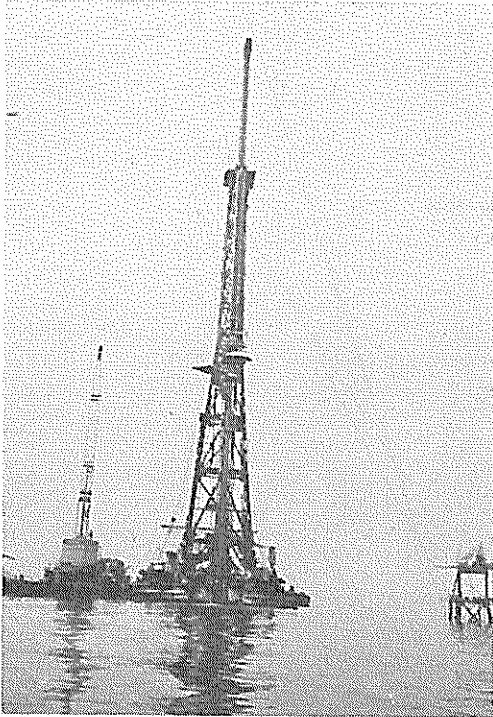


写真-6 試験工事状況

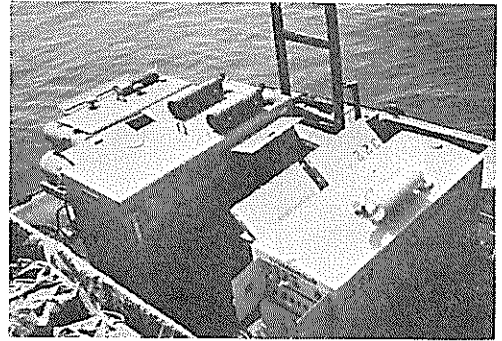


写真-8 発電機とコンプレッサー

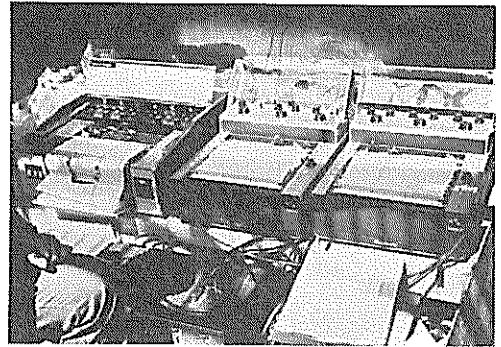


写真-9 機械的データの自記記録

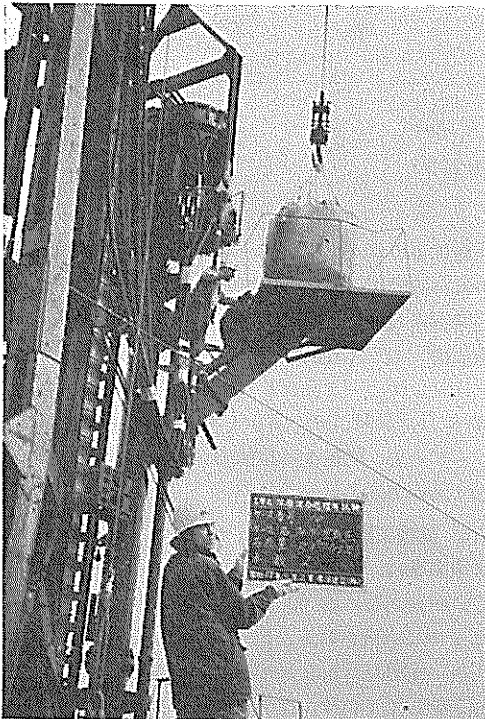


写真-7 石灰投入状況

ある。

前者に関しては、処理後 21 日で強度判定試験を、処理後 60 日で強度判定試験とサンプリングを実施した。強度判定には、当初は静的コーン貫入試験を中心として静的コーン貫入の不可能な場合に限り鉄研式大型動的コーン貫入試験を実施することとしていた。しかし、予期した以上の改良効果があり 21 日で殆どどのケースについて静的コーンの貫入は困難となった。又、地盤強度が大きくなったため動的コーンもロッド部の摩擦抵抗が大きくなり 21 日強度試験に関しては満足すべきデータを得ることが出来なかった。このため、60 日強度判定試験は 1m 動的コーン貫入後 1m ボーリングするという繰返して、ロッド部の摩擦抵抗を除去して実施した。動的コーン貫入試験より得られる N_u 値を一軸圧縮強度 q_u に換算して図-25 に示す。サンプリングについても、通常のシンウォールサンプリングによる不攪乱試料の採取は困難となったため、デニソン式サンプラーを用いて試料を採取した。この試料に関しては、力学試験を実施してもあまり意味がないため視察による混合状態の確認と化学分析を実施した。

後者に関しては、全ての実験ケースに関して図-26 に

石灰による深層混合処理工法（第3報）

表-8 試 験 ケ ー ス

Case No.	攪拌翼種数	搅回	拌数	打設管昇降速度 (m/min)	石灰混合比目標 (%)	石灰最大粒径 (mm)
1	1R	1		1.0	15	13
2	1R	1		1.0	10	13
3	1R	1		1.0	20	13
4	1R	1		1.0	15	13
5	2S	1		1.0	15	13
6	2R	1		1.0	10	13
7	2S	1		1.0	10	13
8	1R	1		0.5	15	13
9	1R	1		2.0	15	13
10	1R	3		1.0	5	13
11	1R	1		1.0	15	35
12	1R	1		1.0	10	35

但し 1R は 1 段 R 羽を意味する

示す様な記録が得られている。

4.6 深層混合処理機に関する考察

今回試みた多くの計測項目の中で、実用機に於ける施工管理上も必要と考えられるものは、石灰面の位置の検出、ウインチロープ速度と打設管位置の検出、管内空気圧の検出、そして攪拌翼回転数の検出であろう。この内、石灰面位置の検出を例外として、他の項目はすべて安定した測定を実施することが出来た。石灰面の位置と速度の検出に用いた重錘式石灰面ゲージは、処理工事中に重錘を吊るワイヤーが振動し試験工事開始後間もなく破損した。このため石灰面速度の検出は不可能となった。石灰面位置に関しては、別途に設けた静電容量型石灰面ゲージが晴天時には正常に作働し、殆どどのケースで石灰面位置の確認は行なうことが出来た。しかし、静電容量型石灰面ゲージには湿気に弱いという欠点があり、再検討の必要がある。

ワンマンコントロールを前提とした2系統の連動操作の内、空気圧対深度の連動制御は成功したが、石灰面速度対フィーダー回転数の連動制御は、上述の様に石灰面速度の検出に失敗したため不可能となった。このため、今回の試験工事では、石灰混合率を変えるためにはフィーダー回転数を手働で変更して設定する必要がある。しかし、空気圧対深度の連動が成功した結果、フィーダー回転数を一定値に設定するだけで石灰供給の一様性は確保出来ることが静電容量型石灰面ゲージの記録より判明している。従って深層混合処理装置のワンマンコント

ロールを実現するためには後者の連動制御は不要であり、施工条件に応じてフィーダー回転数を任意に変化させ得る機能を持たせることと、数種類のフィーダーを準備することのみで充分であることが判った。

以上の項目を含めて機械的データは、図-26 に例示した様に自記記録されており、攪拌トルクと地盤強度の関係に関しては貴重なデータが得られている。また、その他のデータも実用機諸元を決定する際の参考資料として有効に活用出来るものと思われる。

今回の試験工事の結果、杭打船の櫓をガイドとする型式の海上用深層混合処理機械装置に関しては、ほぼ完成したと言って良い。このため、海面下 15 m ないし 20 m 程度を処理対象とする実用機の開発については目途が得られた。一方、今回の実験機では駆動軸が長尺化したため一部共振の問題が生じ、また軸受けに大きな負荷の加わることが判明し、4号機より更にスケールの一回り大きな処理機を現在と全く同様な型式で製作することには疑問が生じた。この点に関しては6章で議論する。

4.7 改良効果に関する考察

今回の試験工事では表-8 に示した様に、施工条件を 12 種類に変化させて改良を行なった。60 日強度判定試験結果を示した図-25 には、攪拌翼の回転数を一点鎖線で示し、処理した範囲を矢印で併示してある。強度増加の認められる範囲と矢印の範囲が良く一致していることから、従来の試験工事で絶えず問題として残されてきた石灰供給の連続性が達成されたことが認められる。また、前述の

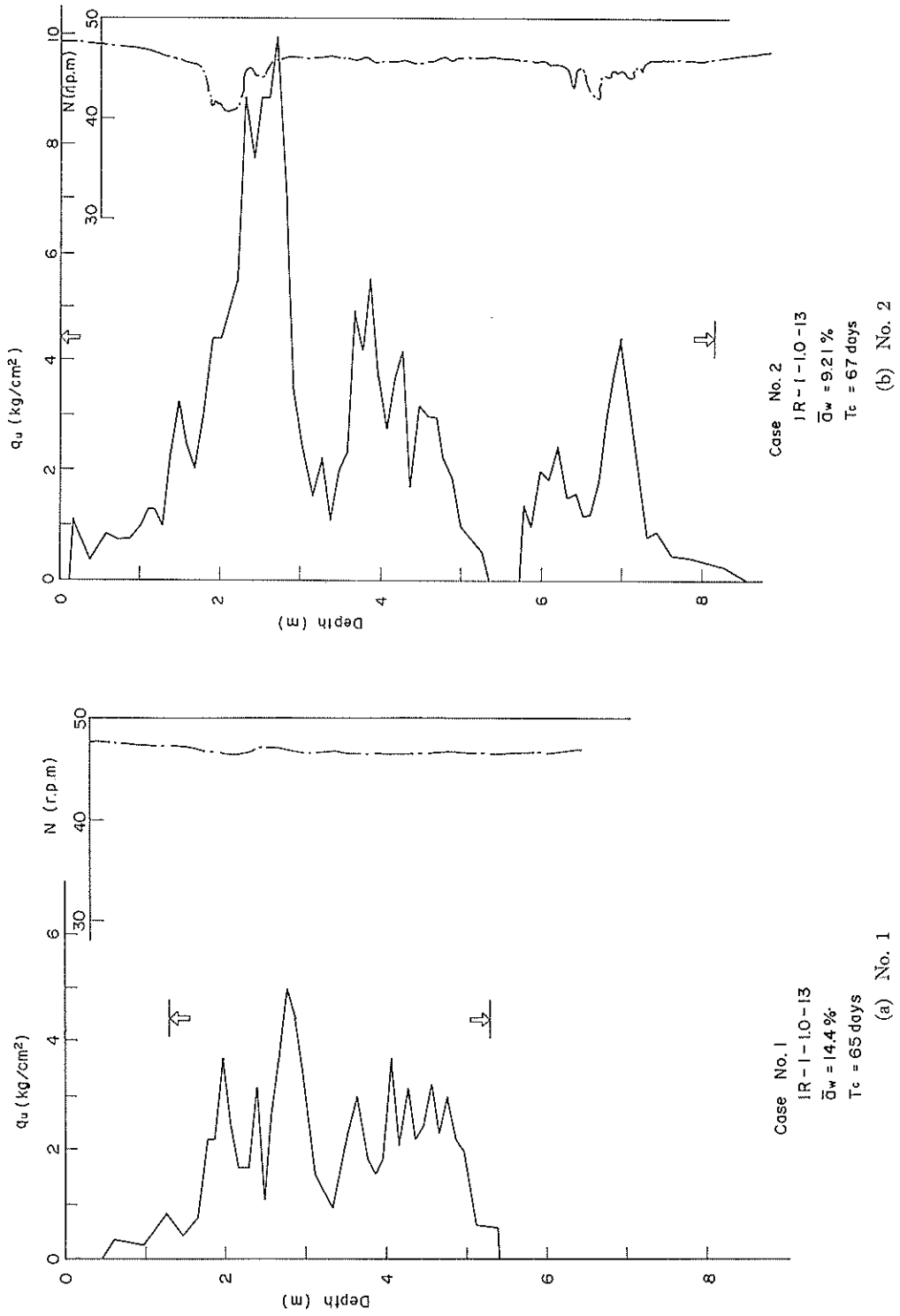
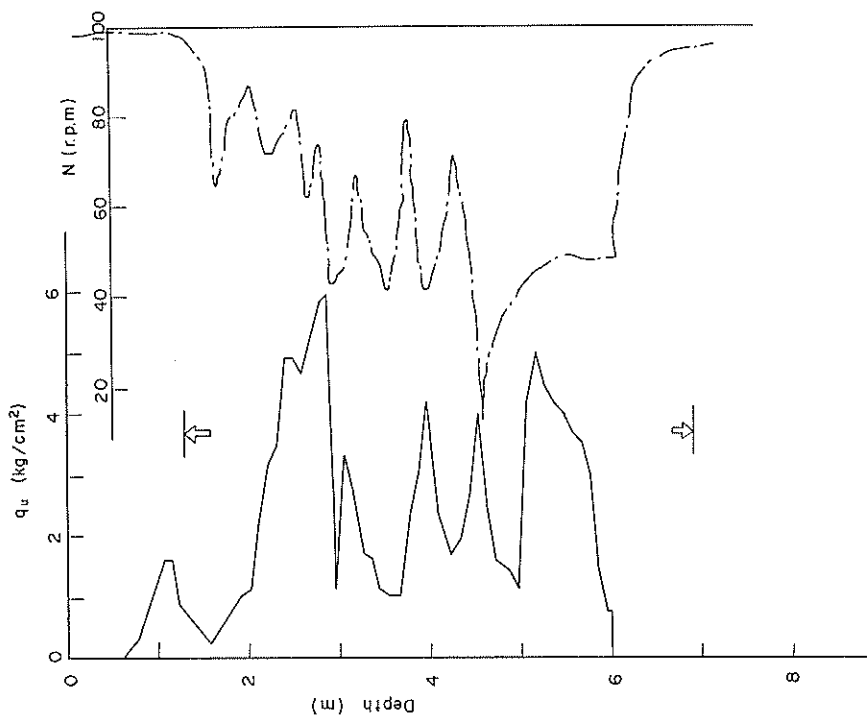
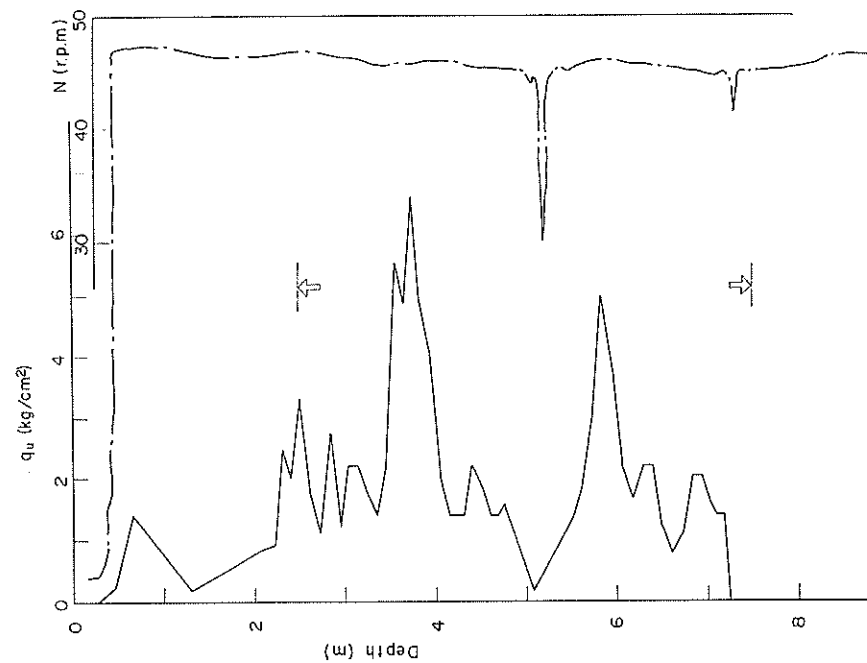


图-25 処理後強度分布



Case No. 3
 1R-1-10-13
 $\bar{a}_w = 18.2\%$
 $T_c = 67$ days
 (c) No. 3



Case No. 4
 2R-1-10-13
 $\bar{a}_w = 12.4\%$
 $T_c = 67$ days
 (d) No. 4

図-25 処理後強度分布

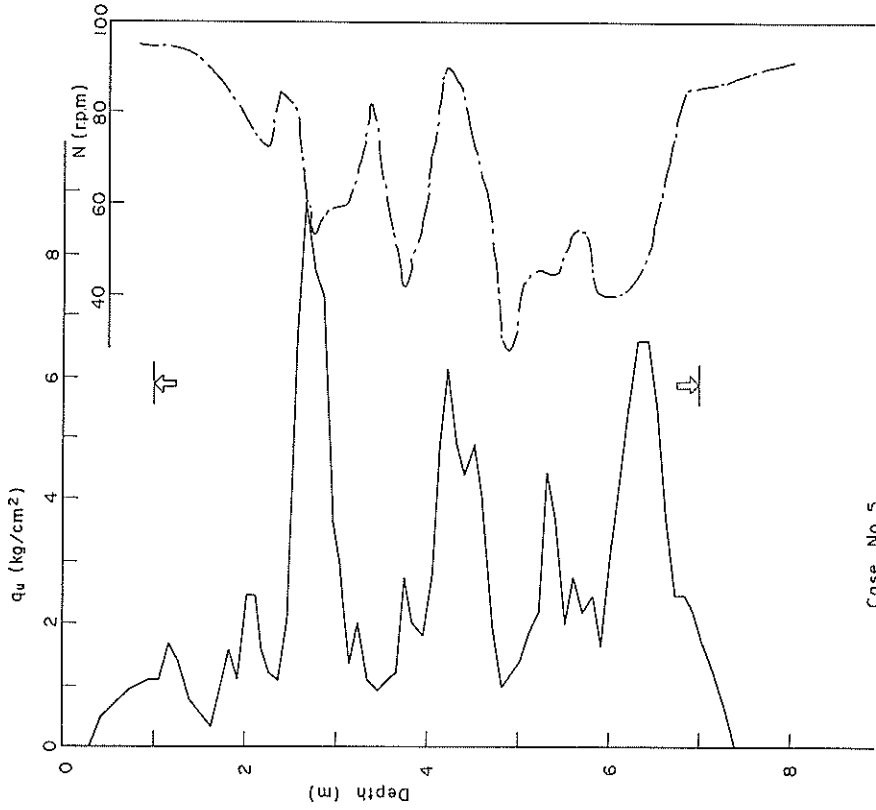
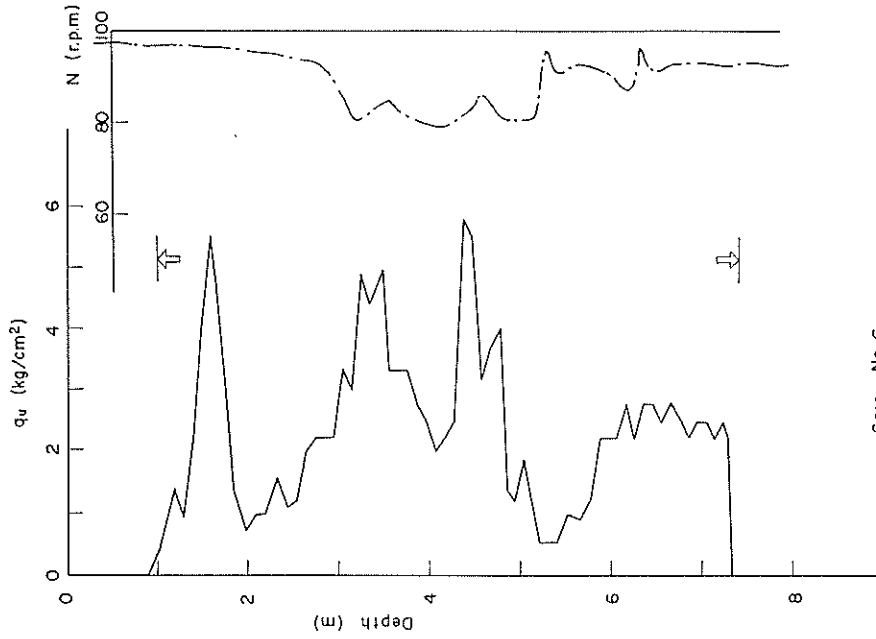
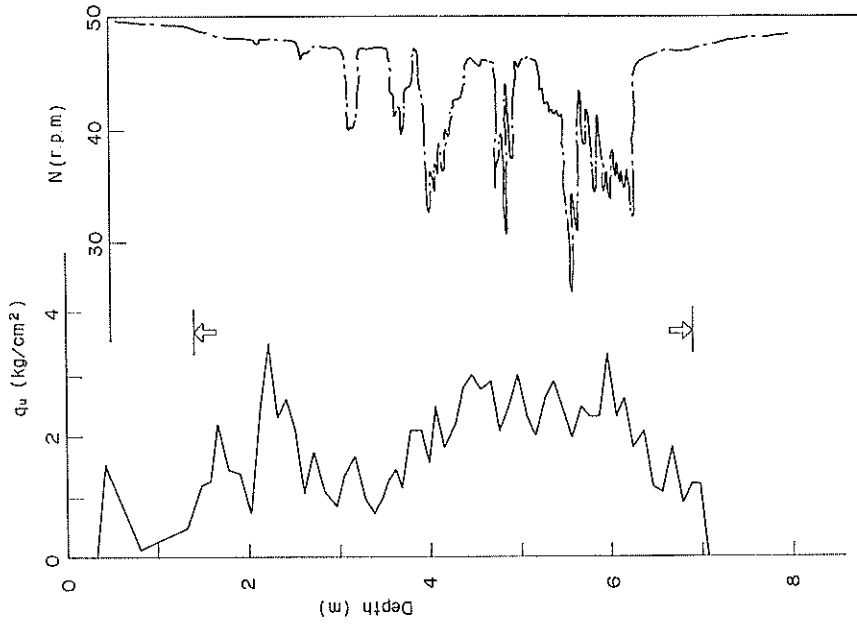
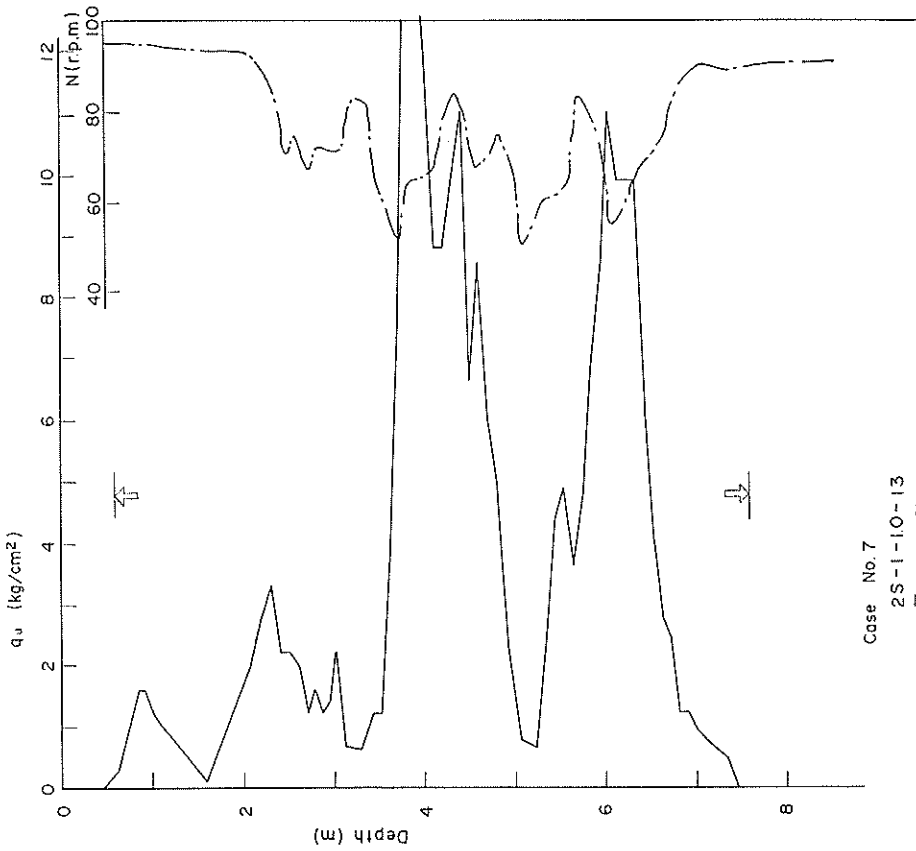


圖-25 処理後強度分布

石灰による深層混合処理工法 (第3報)

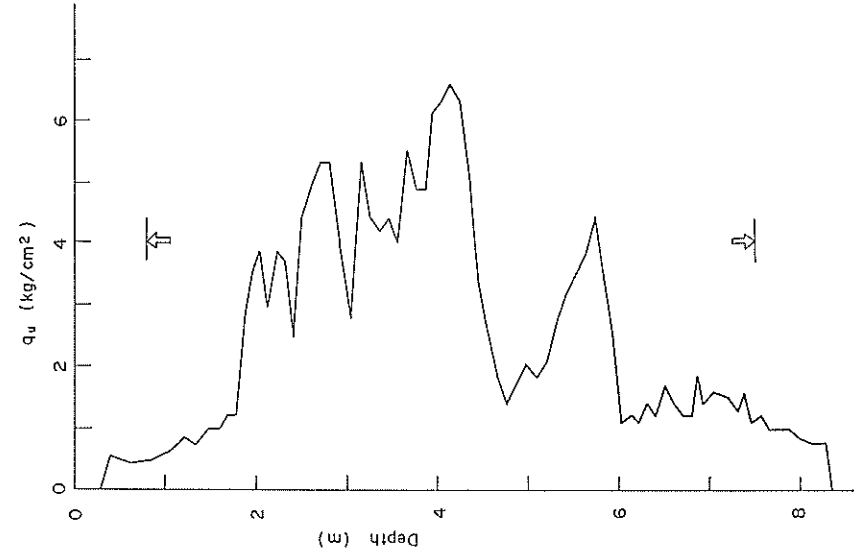


Case No. 7
 2S-1-10-13
 $\bar{\alpha}_w = 9.02\%$
 $T_c = 67$ days
 (g) No. 7

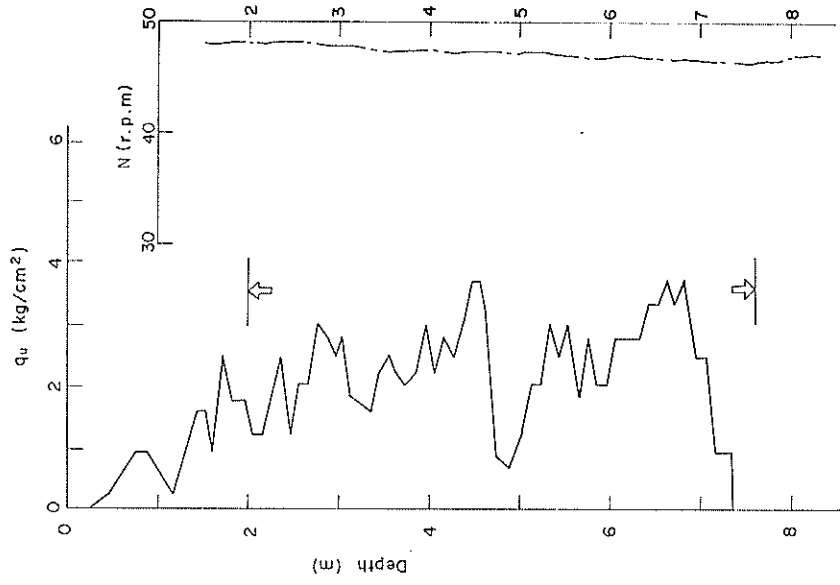


Case No. 8
 1R-1-0.5-13
 $\bar{\alpha}_w = 14.4\%$
 $T_c = 64$ days
 (h) No. 8

図-25 処理後強度分布



Case No. 10
 IR-3-10-13
 $\bar{\alpha}_w = 4.56\%$
 $T_c = 70$ days
 (j) No. 10



Case No. 9
 IR-1-20-13
 $\bar{\alpha}_w = 12.9\%$
 $T_c = 63$ days
 (i) No. 9

図-25 処理後強度分布

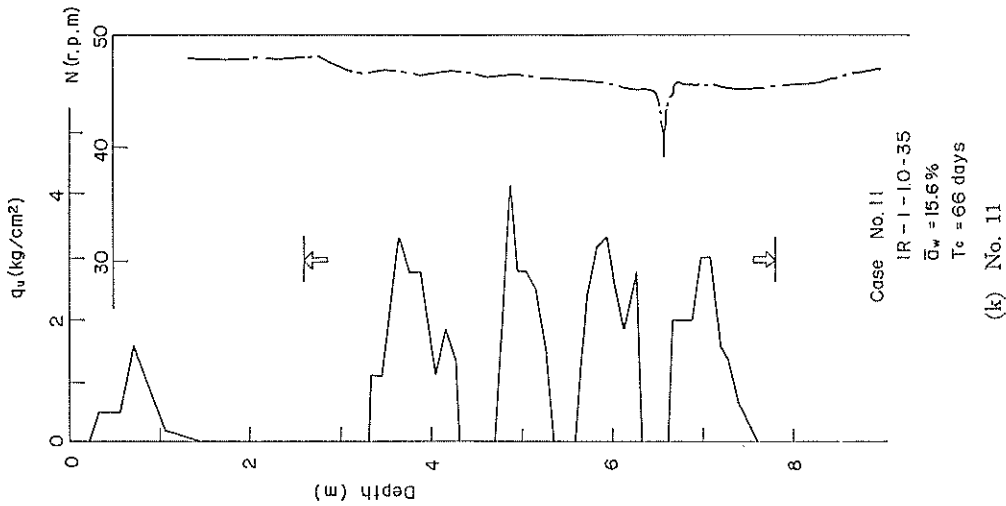
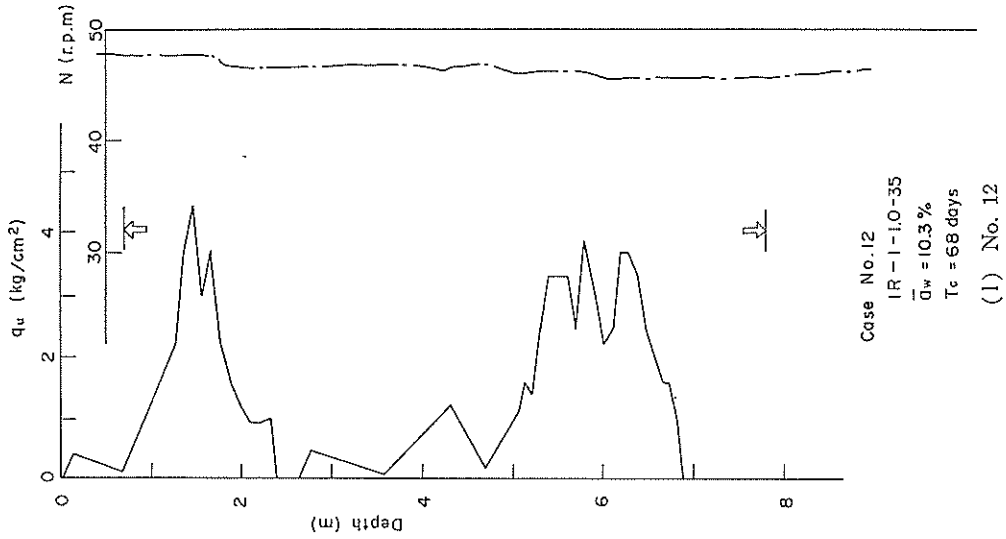


図-25 処理後強度分布

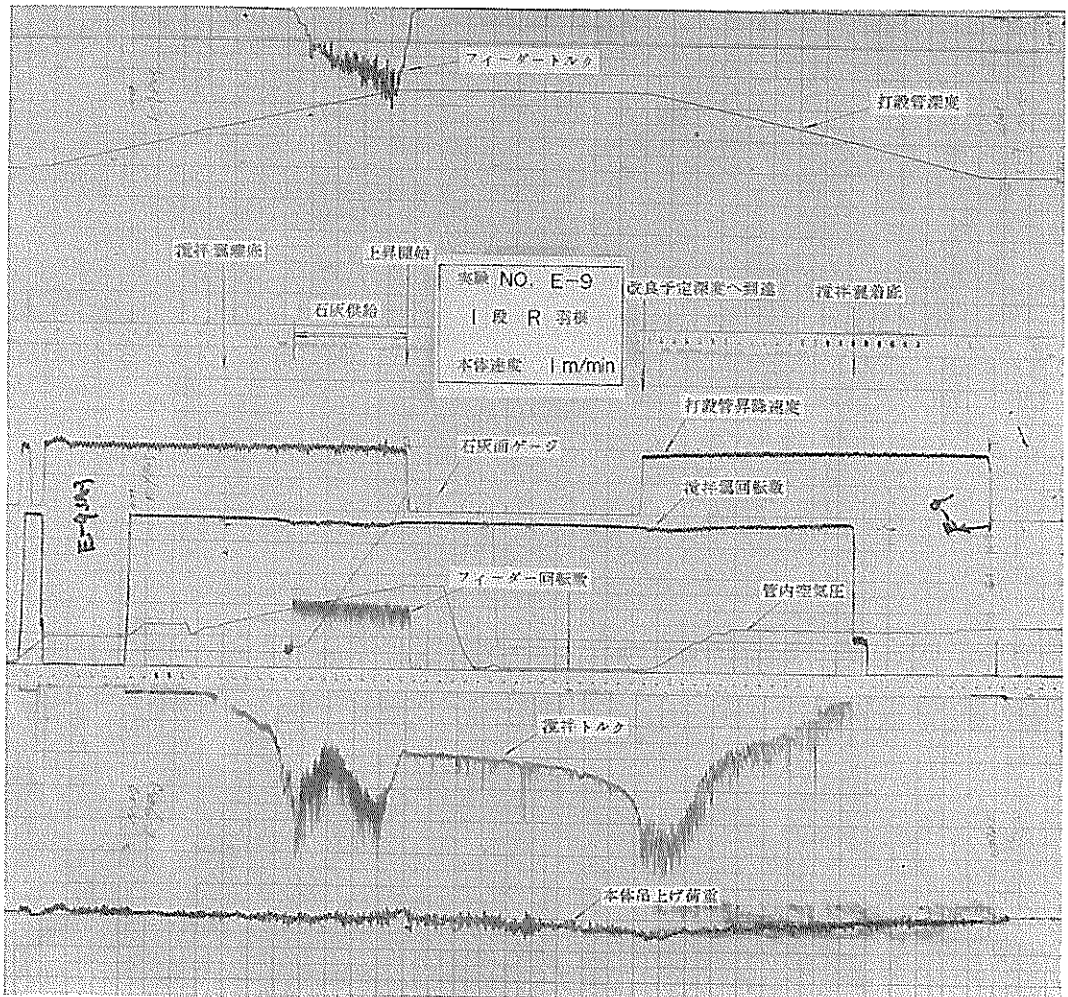


図-26 機械的データ例

静電容量型石灰面ゲージの記録より石灰供給量も一様であったと考えて良い。一方、前節で述べた様に攪拌能力を必要以下に抑えざるを得なかったため、攪拌時のトルクが常用トルクを超え、回転数が設定の 50 rpm より低下していることが認められる。なお、同図に示す回転数は一段羽を基準として表示しているため、2 段羽を使用したケースでは上段と下段の回転数の合計として 100 rpm を 1 段羽 3 回攪拌のケースでは 3 回の合計として 150 rpm を正規の値として表示してある。この様に回転数が低下し予定した 施工条件を満足していないことと、4.3 に示した様に深度方向に改良効果が異なるために、同図を用いて直ちにケース間の改良効果の差を議論することは困難である。図-25 の改良後強度分布を深度方向に平

均して表-9 に示す。又同表には攪拌回転数の平均値、処理中の打設管の速度を併示する。表-9 より使用生石灰の粒径による改良効果の差は一目瞭然で、小粒径 (13 mm, max) の石灰を用いた方が改良効果は大きい。大粒径 (35 mm, max) の生石灰を用いたケース No. 11 と No. 12 を除けば、いずれのケースでも、60 日で $q_u \geq 2 \text{ kg/cm}^2$ 以上という大きな改良効果を挙げている。なお、強度判定試験には前述の様に鉄研式の大形動的コーンを用いた。この動的コーンの打数の N_d と標準貫入試験の N 値は等価であり、 N 値と一軸圧縮強度 q_u との間には $q_u = N/2.72$ なる関係 (柳瀬; 1969)¹⁵⁾ が知られている。また、この関係は羽田海上試験工事の際に、幾つかの例ではあるが妥当であることが知られている。図-25 に示し

石灰による深層混合処理工法（第3報）

表-9 処 理 実 績 一 覧 表

ケース No.	攪拌翼回転数 N	引上げ速度 v (m/min)	生石灰最大粒径 (mm)	平均石灰混合率 \bar{a}_w (%)	改良効果平均値 q_u (kg/cm ²)
1	46.7	0.99	13	14.4	2.16
2	45.3	0.93	13	9.21	2.41
3	45.2	0.95	13	18.2	2.13
4	62.2	1.10	13	12.4	2.16
5	64.8	0.96	13	12.4	3.47
6	89.4	0.95	13	9.58	2.36
7	78.0	0.97	13	9.02	3.83
8	44.0	0.46	13	14.4	1.95
9	47.3	1.87	13	12.9	2.22
10	142.0	0.96	13	4.36	2.83
11	46.0	0.95	35	15.6	1.53
12	46.4	0.96	35	10.3	1.28

た強度分布はこの関係により換算した値である。ちなみに、表-9 に示したような強度増加を、仮に従来の圧密促進工法を用いて達成しようとする、水中の場合なら30m に近い盛土が必要となり、煩雑な施工が予想される。このことから、本工法の利点の一端を知ることが出来る。

5. 現地処理効果の推定方法

5.1 概 説

前述のように、本工法実施によって如何に改良効果が大きいとは言え、本工法の現地に於ける改良効果を概略でも推定することが出来なくては工法の実用化は出来ない。すなわち、各種工法の比較設計の段階から、その都度試験工事を行なって確認することは困難だからである。少なくとも、工事計画をたてるために充分なだけの、概略の目安を知る必要がある。この場合に、室内配合試験結果を判断の基準とすることが必要である。しかし、従来の試験工事結果と、室内配合試験結果の比率は大きく変動しているように見える。各試験に用いている石灰はほぼ同様な品質のものであり、地中であるから養生条件にもそれ程大きな差はないと考えられるから、上記比率の大きな変動の原因は混合条件の相違によると考えられる。次節に、この混合条件の定量化の一つの試みを行なう。

5.2 室内配合試験結果と現地強度の関連

深層混合処理工法の根本は石灰と粘土鉱物の間の化学反応であるから、一般に処理効果は混合条件が良い程大

きい。今、理想的な条件で混合処理が実施された場合に得られる仮定の強度を Q とし、室内配合試験あるいは現地試験で得られる強度を q とし、両者の間に次の関係が成立すると仮定する。

$$Q:q = \alpha_0 \cdot C_0 : \alpha \cdot C \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 C 及び C_0 は数値的に評価出来る係数で、 α 及び α_0 は評価困難な条件に関わる係数を意味する。また、 α_0 及び C_0 は理想的な条件を示す仮想的な係数であって、後述の様に、その数値は必要ない。上式の意味するところは、実際に得られる強度は理想強度に比例するもので、その比例常数が評価可能な係数 C と評価困難な係数 α の積として表わし得ると仮定するものである。

ここで評価可能な要因としては改良に用いる石灰の化学的性質、粒径、強制混合の程度であり、評価困難な要因としては、攪拌翼の形状差、養生条件等が考えられる。しかし、現在評価困難な要因も将来研究が進みデータが集積されれば漸次その評価が可能となり、現象のすべてを解明することも出来るであろう。また、ここでは全ての要因を正比例関係で処理しているが、将来はより高次の係数を用いて現象に忠実な解析が行なえるかも知れない。

現在までに実施した試験工事では、工業用生石灰特号で活性度の高い生石灰を選定して使用しているから、生石灰による影響は、石灰粒子の比表面積(表面積/体積)で定まるものと考えれば、混合条件は石灰粒径 d (mm) に反比例する。強制混合の程度は、攪拌翼回転数 N

(rpm), 混合時間 T (min), 攪拌翼枚数 n , 攪拌翼の鉛直断面積 a (cm²) に比例し, 混合対象となる土の重量 W (kg) に反比例すると考えられる。従って係数 C は次式で表わされよう。

$$C = \frac{NTna}{dW} \dots\dots\dots(2)$$

ここで, 室内配合試験に関するものに l , 現地試験に関するものに f なるサフィックスを付けて表わし, 評価困難な未知係数 α_f/α_l を新たに β とおけば, (1) 式より現地処理強度と室内配合試験結果の関係式として次式が導かれる。

$$q_f = \beta \cdot (C_f/C_l) q_l \dots\dots\dots(3)$$

(3) 式を変形すると

$$(C_l/C_f) q_f = \beta q_l \dots\dots\dots(4)$$

となり, 室内配合試験強度 q_l と現地試験結果 q_f から, 未知係数 β を求めることが出来る。但し, q_l, q_f は静的コーン貫入抵抗値 ($5 \cdot q_u$) の形で表わす。

(4) 式を用いて, 従来の試験工事結果を全て整理すると図-27 が得られる。この結果から判明することを括めると以下の様である。

i) 1), 2) 式で表わされる正比例の関係に問題が無い訳

ではないが, 実際の現象をかなりの程度まで説明するのに役立つ。すなわち, 現地試験の結果と室内配合試験結果の間の大きな開きが, 上記の整理方法をとることによってかなり狭くなった。攪拌方法の等しい1号機, 2号機の結果は未知係数 β で 10~50 の範囲に, 同様に攪拌方式に殆んど差のない3号機, 4号機の結果は未知係数 β で 50~180 の範囲に収まっている。

- ii) 上述の様に, 攪拌翼形状の変化した陸上用処理機と海上用処理機の間に明瞭な差が現われ, また4号機の場合には, ケース毎に攪拌回転数, 引き上げ速度, 石灰粒径に大きな開きがあっても, β 値が上記の範囲に収まったことから, 今回の仮定がある程度妥当であったことを示している。
- iii) 上記仮定がある程度妥当であることが認められたため, 攪拌効率に影響する要素が判明し, 処理機の改善に役立てることが出来る。
- iv) 本工法を実用に供する場合には, 室内配合試験結果から現地強度を推定する途が開けた。勿論, 現段階では精度の良い推定は困難であり, β を確定するためには, 更に多くのデータを必要としようが, 少なくとも概略の目安を得ることが出来る様になった。

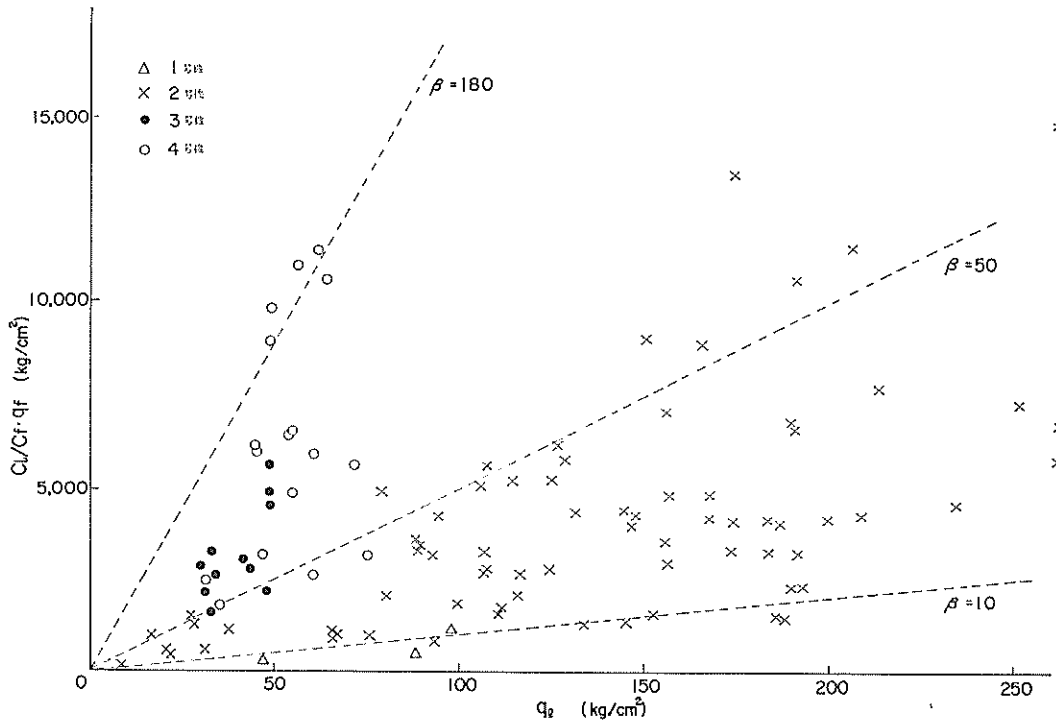


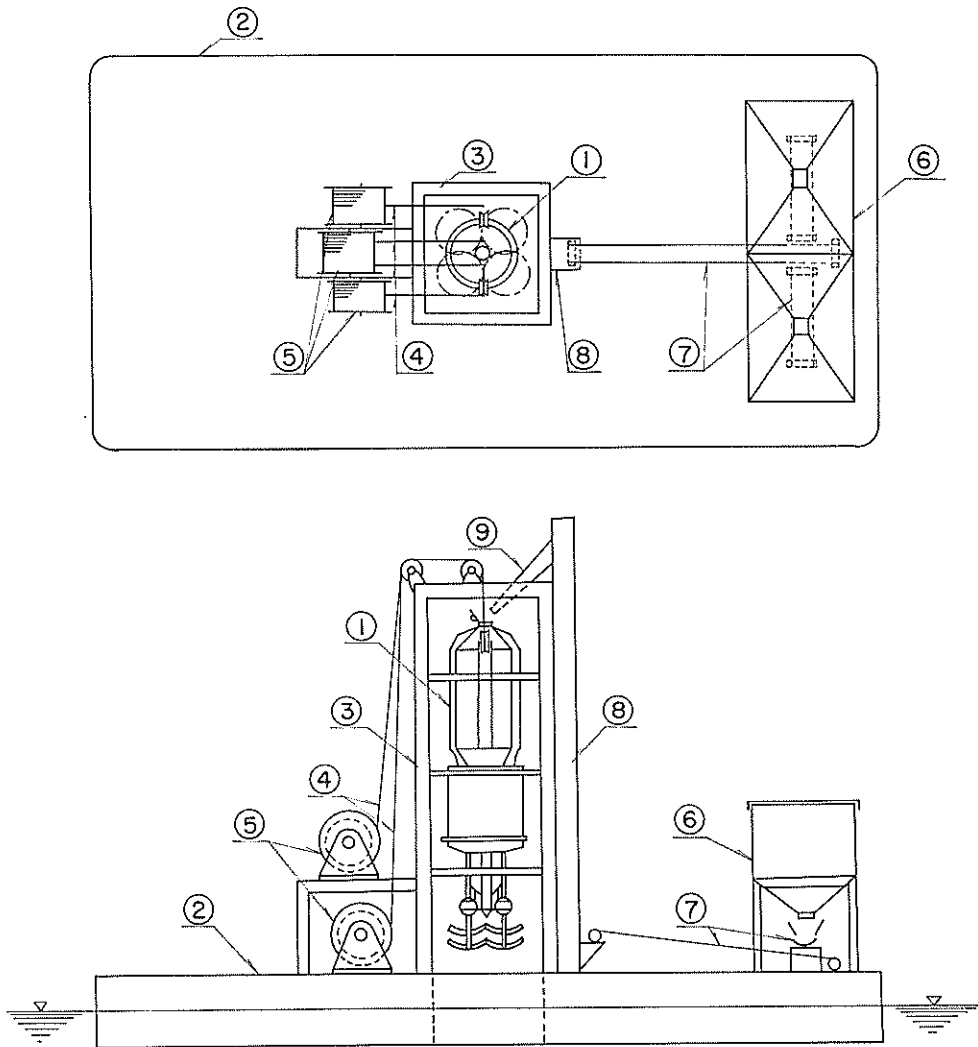
図-27 室内配合試験と現地強度の関係

6. 今後の課題

前章までに記したように4号機の製作と西宮沖試験工事の結果、海面下15m~20m程度の範囲までの粘性土地盤を改良するに際しての処理機械装置あるいは施工上の問題はほぼ解明された。残された課題は石灰供給量の検出方法を改善して施工管理の徹底を画ることである。また、現場の施工実績を重ねながら混合効率を更に向上させることが出来れば本工法の一層の経済性につながる。この様に、処理装置および施工方法に関しては目途

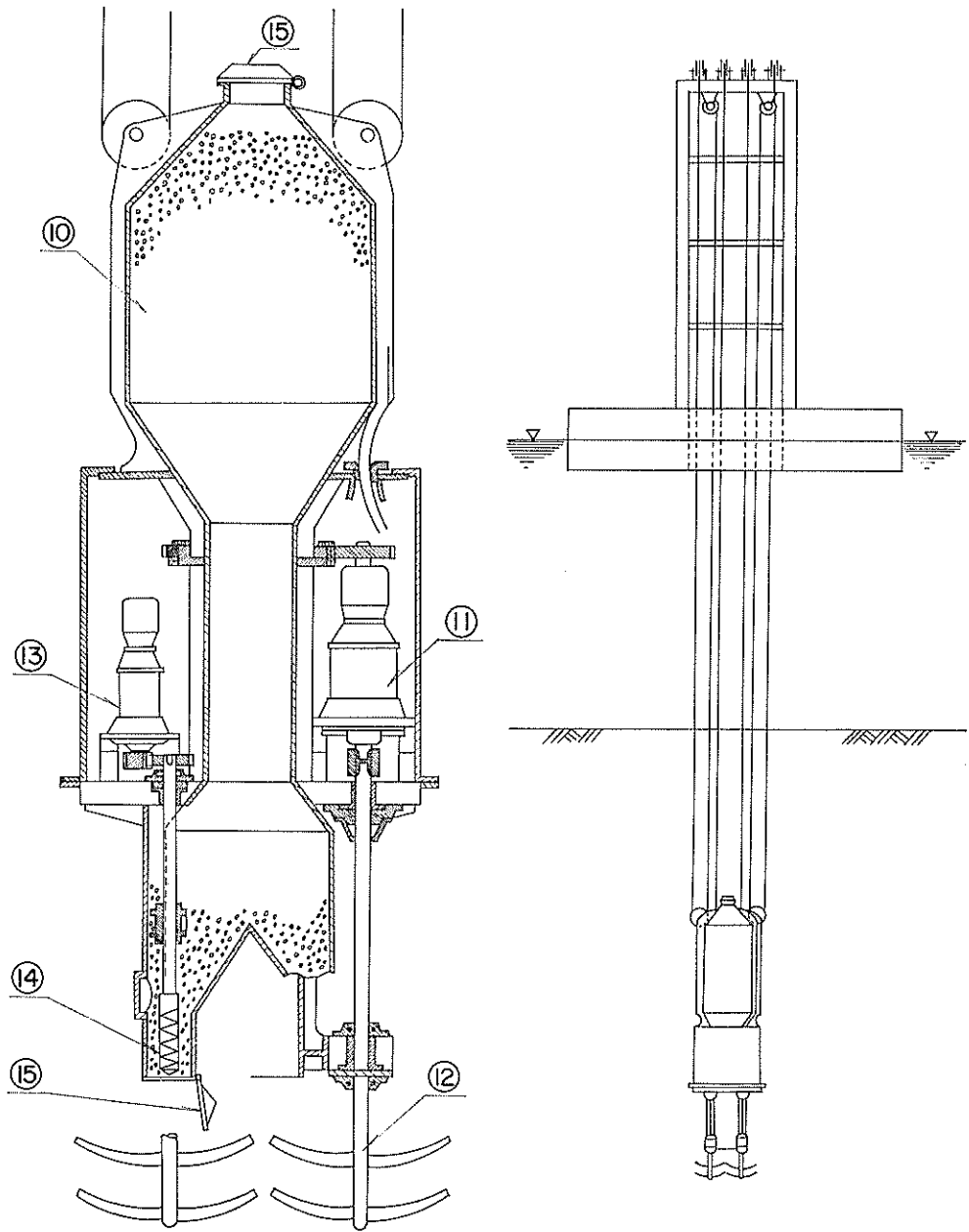
が得られているが、まえがきにも記したように、新工法の実用化に当っては残る2つの問題がある。

1つは設計方法の確立の問題である。前節に記したような形で、室内配合試験結果と現地で発揮される改良効果の関連付けが確立されれば、全面改良を行なう場合は比較的簡単である。すなわち、石灰処理土で強制置換を行なうようなものであるから、処理土の力学的特性を確実に把握すれば良い。しかし、2.2に紹介したように、改良効果の極めて大きい本工法を実施する場合には、全面改良の必要はなく、帯状あるいは杭状の改良で充分で



(a) 全体図

図-28 自沈式深層混合処理機（5号機）



(b) 詳細図

(c) 施工想像図

図-28 自沈式深層混合処理機 (5号機)

ある。この様な部分的改良を行えば、人為的に複合地盤が形成されることとなるが、その挙動には不明な点が多い。このため、港湾技術研究所では各種施設の整備を行ない、処理土の特性ならびに複合地盤の挙動解明に着手している。

また、もう1つの問題である処理土の経時的变化と環境問題についても、2年前より調査が開始されている。

以上の残された問題の検討終了をまてば、海面下15mないし20m程度を対象とする通常の港湾工事に当たって本工法を実用化することが出来る。

一方、大規模港湾工事、海洋開発に関連して、海面下50mあるいは60mといった更に大深度の改良を目的とする場合にも、処理機の基本的な部分（石灰の供給方法と強制混合方法）は、一貫して開発してきた4号機の構成で対処しうる。しかし、この場合に杭打船のリーダーをガイドとして単に4号機のスケールを拡大するだけでは処理装置として成立たない。これには幾つかの理由が挙げられる。

- i) 攪拌、石灰供給のための駆動軸が長尺化して構造上危険になると共に、駆動軸周面摩擦と軸受け部の機械ロスの増加により不必要に大きな馬力が要求される。
- ii) 大水深化の施工で従来同様に杭打船のリーダーにガイドさせる型式をとると、下端を地盤に固定し上端に大きな作業船を固定した不安定な形となり、波浪による船体動揺に起因する力をすべて細長い処理装置で耐える必要がある。また、櫓の高さが極めて大きくなり、作業船自体も極端な大型化が避けられない。

このため、図-28に示すような自沈式深層混合処理装置を考案し現在開発に着手している。同図によって本装置を簡単に説明する。(a)図は全体の平面図ならびに立面図である。①は自沈式深層混合処理装置本体で、4号機2組を一体化したような型式で、石灰供給口2ヶ所、攪拌翼2対を備える。②は作業船で、石灰の仮置き、電源、ウインチその他関連装置一切を搭載する。③は処理装置を収納する槽であるが、従来の処理装置と異なり、処理装置本体と槽の間にガイドは無い。本体と台船の間には、処理装置を吊下げるワイヤー、空気圧ホースそして電気用ケーブル又は油圧ホース(④)などフレキシブルなもののみが介在する。このため、台船から本体へ不自然な力は作用しない。⑤はワイヤー、ケーブル等の巻取用ウインチである。⑥は石灰貯蔵ビン、⑦はベルトコンベヤー、⑧はバケットエレベーター、⑨はシュートで、⑥～⑨によって処理装置本体へ石灰を投入する。処理装

置本体の詳細は(b)図による。⑩は石灰収納部で、一回の処理に必要な石灰を収納する。⑪は攪拌用モーター、⑫は攪拌翼、⑬は石灰供給用モーター、⑭はスクリーフィーダーである。図示の様に駆動軸を短かくすることによって、前述(i)の問題点を回避する。⑮は水密性の蓋である。なお、(c)図に自沈式深層混合処理装置による施工状態を示す。

以上のように、この装置の基本的部分は従来の考え方に基いており、4号機で得られた機械データを参考に諸元の検討を行なっている。残された大きな問題は自沈させるために処理装置に付与すべき重量と、処理装置貫入の鉛直性維持の問題である。勿論、型式の変化に伴ない他にも付随的に検討を要する問題はあるが短時日での開発が可能であろう。なお、この自沈式深層混合処理装置についても国有特許を申請しており、開発に当たっては4号機の製作を受託した経験を有する(株)神戸製鋼所と共同研究を実施している。

7. 結 論

まえがきにも述べたように、新工法の開発に当たって研究を要する項目は大別すると3つに分けられる。

- (1) 処理機械装置を含む現場に於ける施工方法の確立
- (2) 処理土特性の把握と設計方法の確立
- (3) 処理土の経時的变化、新工法実施による環境問題の検討である。

この一連の報告では、(1)の問題の検討を中心として研究を継続してきたが、4号機の試作と西宮沖に於いて実施した試験工事に至る一連の実験で、現地に於ける改良効果の発現と現場施工の目途を得ることが出来た。以下に得られた結論を記す。

- i) 室内配合試験で得られる石灰処理土の優れた特性は程度の差こそあれ、陸上、海上を問わず現場条件下でも得られる。
- ii) 1号機から3号機にかけて残されていた処理機械の問題点が4号機で解決され、石灰の地中への様な供給が可能となった。
- iii) 一貫して開発してきた処理機の構成で、将来さらに大型の処理機を検討する場合にも、その基本的な部分（石灰供給と強制混合方法）が確立された。
- vi) 4号機によって海面下15mの改良実績を挙げ、通常の港湾工事への本工法の適用の目途が得られた。
- v) ワンマンコントロールならびに施工管理方法に関

して見通しが得られた。

- vi) 4号機で多くの機械的データの集積が行なわれ、更に大水深下、大深度の改良を目的とする処理機械の検討に着手することが出来た。
- vii) 地盤改良の設計方法に関わることであるが、室内配合試験結果と現場で得られる強度の間の関連が認められ、現地強度の概略の推定が可能となった。

このように、本工法実施上の問題は、基本的には全て解決された訳で、(2)、(3)の項目の検討終了をまてば、本工法は実用出来る段階となった。

8. あとがき

本報文では、筆者等の開発している“石灰による深層混合処理工法”の処理機ならびに施工面の問題点を解明した。また、室内配合試験と現地で得られる改良効果に概略の関係を見出すことが出来た。また、今後の課題として触れた様な設計方法が確立されると、

(i) 地盤改良効果が極めて大きく、(ii) 改良速度が早いため工期が短縮出来て、(iii) 通常の粘性土地盤から超軟弱地盤に至るまで適用範囲が広く、(iv) なおかつ、比較的安価であるため、大規模な地盤改良工事への適用が期待出来る。また、港湾工事を前提として開発研究が進められているが、4号機の様な型式の処理機を湿地ブルドーザー等に搭載すれば、陸上での施工を行なうことにも問題は無いものと考えられる。

謝 辞

筆者等が、本研究を実施してくる各段階で数多くの方々の協力を受けた。今回も、4号機の設計に当たっては、当研究所の菊地機械課長、渋谷技官を始めとする機材部各位に協力戴いた。また、西宮沖試験工事の実施には第三港湾建設局関西国際空港調査室ならびに尼崎港工事々務所の各位があたられ、また同じく試験工事に際して、土質試験課堀江技官、当研究室の研修生三沢久詩氏（不動建設）、芳田利春氏、久野義行氏（東洋建設）には多大の協力を受けた。ここに、関係各位に対し深甚なる謝意を表する。

(1974年4月1日受付)

参 考 文 献

- 1) 奥村樹郎：最近の地盤改良工法について、第22回直轄港湾技術研究会資料、No. 15、1971年11月、44p

- 2) 中瀬明男、他：関東ローム及び成田層砂の土質試験、港湾技研資料、No. 47、1968年、pp. 35-88
- 3) 柳瀬重靖：生石灰による沖積粘土の安定処理について（第一報）、港湾技研報告、Vol. 7、No. 4、1968年、pp. 85-132
- 4) 奥村樹郎、他⁹⁾：石灰による深層混合処理工法（第1報）、港湾技研報告、Vol. 11、No. 1、1972年、pp. 67-106
- 5) 奥村樹郎、他⁹⁾：石灰による深層混合処理工法（第2報）、港湾技研報告、Vol. 11、No. 4、1972年、pp. 103-121
- 6) 奥村樹郎、他⁹⁾：石灰による深層混合処理工法について、昭和47年度港湾技術研究所講演会講演概要、1972年、pp. 3-1~3-49
- 7) 伊東範雄：生石灰による地盤改良、日刊工業新聞社工業技術ライブラリー 17、1969年、150p
- 8) 日本石灰協会土質安定処理工法委員会：石灰による土質安定処理工法、山海堂、1970年、213p
- 9) Diamond, S. and Kinter, E.B.: Mechanisms of Soil-Lime Stabilization, Public Roads, February 1966, pp. 260-265
- 10) 奥村樹郎、他：室内配合試験方法、港湾技研土質部未発表資料
- 11) Thompson, M.R.: Lime Reactivity of Illinois Soils, Proc. ASCE, Vol. 92, SM-5, 1966年
- 12) 奥村樹郎、他：生石灰による沖積粘土の安定処理について（第二報）、港湾技研報告発表予定、1974年
- 13) Lundy, H.L. JR. and Greenfield, B.J.: Evaluation of Deep In-Situ Stabilization by High-Pressure Lime-Slurry Injection, Highway Research Record, No. 235, 1968年 pp. 27-35
- 14) Higgins, C.M.: Lime Treatment at Depth-Final Report, Louisiana Dept. of Highway Research and Development Section, 1969年
- 15) 柳瀬重靖：沖積粘土層におけるサウンディング、港湾技研報告、Vol. 8、No. 1、1969年、pp. 37-58

記 号 表

- a_w : 土の乾燥重量に対する石灰混合百分率
- T_c : 養生期間（材令）
- q_c : 静的コーン貫入抵抗値
- q_u : 一軸圧縮強度
- N_d : 動的コーン貫入試験、打撃数
- C : 石灰成分、粒径、攪拌方法によって定まる混合効率係数
- α : 上記以外の条件を示す未知係数
- o : 混合処理の理想的条件を示す脚付
- l : 室内配合試験を代表する脚付
- β : α_1/α_2