

# 汚泥の処理処分に関する研究 (第8報)

——圧密脱水を併用した汚泥固化処理の検討 (その1)——

喜 田 大 三 辻 博 和  
久 保 博

## Studies on Treatment and Disposal of Mud (Part 8)

——Examination of Solidification Treatment with Consolidation after Mixing of Solidifier (1)——

Daizo Kita Hirokazu Tsuji  
Hiroshi Kubo

### Abstract

Solidification treatment is very effective for stabilizing mud in a short period of time. However, it is often very costly because much solidifier is required. Accordingly, solidification treatment consisting of consolidation after mixing of solidifier was examined using bottom sediment containing much organic matter (ignition loss 42%) as the mud sample. (1) The required quantity of solidifier, "Mud-fixer", in order to stabilize mud to obtain unconfined compressive strength ( $q_u$ ) of  $1 \text{ kg/cm}^2$  at 30 days after mixing was 30% in case of only mixing Mud-fixer, but this was decreased to only 7% by consolidating with a load of  $0.2 \text{ kg/cm}^2$  after mixing of Mud-fixer. (2) In this treatment,  $q_u$  was decreased more the longer the time after mixing Mud-fixer until consolidation. However, through the addition of 4% retarder to Mud-fixer, the decrease in  $q_u$  was reduced in case of consolidating 1 to 2 days after mixing Mud-fixer.

### 概 要

汚泥を短時間に所要強度まで改良する際、固化処理は非常に有効である。しかし、多量の固化剤を要して不経済となる場合もある。そこで、固化時に圧密脱水を併用する工法（以下、固化時圧密併用処理という）を開発し、その基礎試験を行なった。その結果、例えば、有機底泥の田子の浦ヘドロ（含水化440%、強熱減量42%）で、以下のような結果が得られた。(1)固化剤マッドフィクサー（以下、MF剤という）混合30日後の一軸圧縮強度  $q_u$  30日で  $1 \text{ kg/cm}^2$  を得るのに必要なMF剤量は、固化のみでは約30%にも達したが、荷重  $0.2 \text{ kg/cm}^2$  で圧密する固化時圧密併用処理では僅か7%で十分であった。なお、荷重  $0.2 \text{ kg/cm}^2$  の圧密のみでは、 $q_u$  は  $0.13 \text{ kg/cm}^2$  であった。(2)固化時圧密併用処理では、MF剤混合から載荷までの時間が長くなるほど、 $q_u$  は低下した。そこで、この対策として、遅延剤の使用を検討した結果、遅延剤をMF剤に対して4%添加することによって、MF剤混合から載荷までの日数が1~2日間の場合の  $q_u$  は大幅に改善できた。(特許出願中)

### 1. まえがき

河川・湖沼・港湾に堆積している底泥（ヘドロ）や建設工事で発生する排泥などの汚泥を処理する方法は各種あるが、土木工事において大量の汚泥を処理する場合、一般に土木的圧密脱水処理（以下、圧密脱水という）あるいは化学的固化処理（以下、固化という）が採用されている。これらの方法の中で、固化は高含水で極めて軟弱な汚泥を短時間に所要強度まで改良する場合、非常に

有効である<sup>1)</sup>。

ところで、固化は汚泥の性状、とくに汚泥の含水量や有機物量の影響を強くうけるので、所要強度を確保するために多量の固化剤を必要とし、不経済となることがある。また、圧密脱水は微細粒子に富む汚泥では所要強度を確保するために、非常に長期間を要する。

そこで、筆者らは固化が困難な汚泥の処理法を種々検討した結果、固化処理時に圧密脱水を併用する方法が極めて優れた効果を発揮することを見出した。本報では、

その基礎的な室内試験の一部を報告する。なお、本研究の成果を応用した汚泥処理工法に関して、特許を出願中である。

## 2. 供試材料と試験方法

### 2.1. 供試材料

供試汚泥を表一に示す。田子の浦ヘドロはパルプ工場廃液などで汚染された有機底泥で、含水比440%，粘土分 (<5 μ) 77%，強熱減量42%である。一方、荒木田土は沖積粘土であり、粘土分38%，強熱減量6%で有機物は少ない。なお、荒木田土の自然含水比は約30%であったが、汚泥状とするため加水して含水比を70%に調製した。

また、固化剤としては、セメント・石膏系のマッドフィクサー（以下、MF 剤という）を供試した。

### 2.2. 試験方法

固化、圧密脱水および両者を併用した方法によって、下記の4種処理方法の試験を行なった。

- ① 固化のみ (MF 剤8.5%，9日・30日養生)
- ② 固化 (MF 剤8.5%)→圧密脱水 (0.2 kg/cm<sup>2</sup>, 2日)→脱型 (7日・28日養生)
- ③ 圧密脱水のみ (0.2 kg/cm<sup>2</sup>, 12日)
- ④ 圧密脱水 (0.2 kg/cm<sup>2</sup> 12日)→固化 (MF 剤8.5%, 9日・30日養生)

これらの処理方法の中で、本報において最も中心的に試験を行なった②について、以下に詳述する。

MF 剤に加水してミルク状 (W/C=1) としたものを汚泥に添加し、約5分間十分に混合した。そして、このMF 剤混合泥を再圧密容器 (φ10 cm, h=20 cm) に入れて、直後に、あるいは所定時間放置後に、所定の圧密荷重で沈下が落ち着くまで載荷した。その際、設定した荷重

| 供試土     | 含水比 (%) | 粘土 (%) | シルト (%) | 砂 (%) | LL (%) | PL (%) | PI  | Gs   | 強熱減量 (%) | 土質分類 |
|---------|---------|--------|---------|-------|--------|--------|-----|------|----------|------|
| 田子の浦ヘドロ | 440     | 77     | 12      | 11    | 233    | 56     | 177 | 2.61 | 42.2     | CH   |
| 荒木田土    | 70      | 38     | 55      | 7     | 44     | 21     | 23  | 2.34 | 5.5      | CL   |

表一 供試土の性状

は0.1, 0.2および0.4 kg/cm<sup>2</sup> であるが、0.2および0.4 kg/cm<sup>2</sup> では荷重を段階的に増大させた。圧密脱水した試料は脱型して、密閉し20℃恒温室で所定期間養生後、土質工学会基準に従って一軸圧縮試験を行なった。

## 3. 結果と考察

### 3.1. 固化処理時の圧密脱水併用の効果

図一に、各種処理方法 (2.2. で述べた①～④) による処理泥の一軸圧縮強度 (以下、強度または qu という) および含水比を測定した結果を示す。

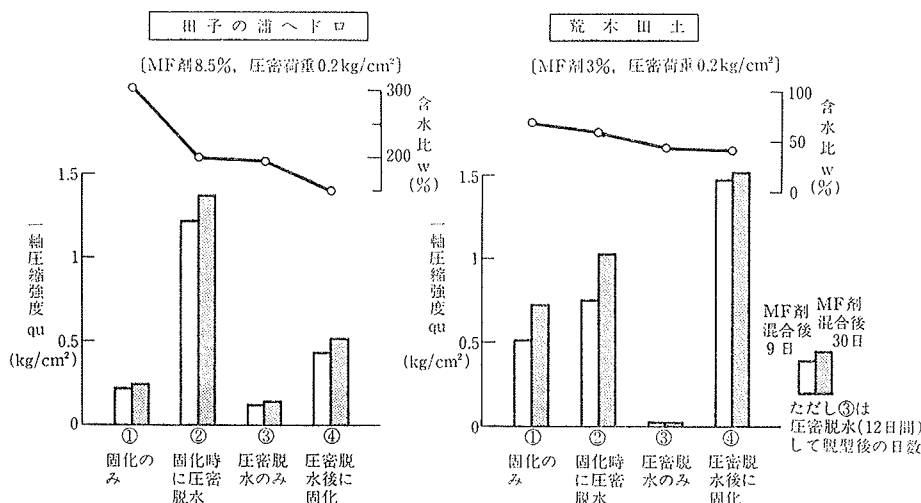
まず、田子の浦ヘドロの場合について述べる。図示するように、MF 剤混合30日後の強度は、①では0.25 kg/cm<sup>2</sup> であった。これに対して、②は1.37 kg/cm<sup>2</sup> と、①に比べて5.5倍も大きな強度を示した。また、③は僅か0.14 kg/cm<sup>2</sup> の強度にすぎなかった。さらに、②の固化、圧密脱水の順序を逆にした④は0.51 kg/cm<sup>2</sup> の強度であった。

これらの結果から明らかなように、①～④の各処理方法の中で、②の固化処理時に圧密脱水する方法 (以下、固化時圧密併用処理という) は他の方法に比べて非常に大きな改良強度を示した。

また、各処理泥の含水比は、①で301%，②で198%，③で194%，④で150%であった。以上の結果において、とくに注目すべきことは、②、④いずれも固化と圧密脱水を併用しているが、②は④に比べて2.7倍も大きな強度を

を発現したことである。このことは、処理泥の含水比を考慮しても通常の固化強度に対する考え方と矛盾している。すなわち、本試験では、高含水比の②の方が低含水比の④よりも大きな強度を発現した。

これらのことについて、以下のように考える。圧密脱水後に MF 剤混合した④では、圧密脱水は含水比低下の効果のみである。これに対して、



図一 処理法の相違による強度の比較

MF 剤混合後に圧密脱水した②では、MF 剤混合によって綿毛化構造を形成している状態で圧密脱水するため、圧密脱水は MF 剤が土粒子の接着・結合に有効に働くような構造形成に寄与し、④の含水比低下による効果を上回る効果をもたらしたものと推察される<sup>3)</sup>。

一方、荒木田土では、図-1に示すように、②は①、③のいずれよりも大きな強度を示した。しかし、その程度は田子の浦ヘドロの場合に比べて少なく、また②が④よりも小さな強度となり、この点では田子の浦ヘドロと逆の結果となった。

このことは、つぎのような理由によると考えられる。荒木田土は含水量、有機物量が田子の浦ヘドロに比べて少なく、通常の固化①によって大きな強度が得られやすく、しかも硬化速度が速いため、②の処理において圧密沈下が僅かしか生じなかったことによると考えられる。ちなみに、②の処理における圧密沈下量は田子の浦では36%、荒木田では5%であった。

以上の結果から明らかなように、固化時圧密併用処理は、高含水で有機物が多く、固化が困難な汚泥に極めて有効である。そこで、固化時圧密併用処理の効果が顕著に認められた田子の浦ヘドロについて、以下に詳細な検討を行なった。

### 3.2. 固化時圧密併用処理の強度に及ぼす MF 剤添加量、圧密荷重の影響

田子の浦ヘドロの固化時圧密併用処理において、MF 剤添加量および圧密荷重が  $q_u$  に及ぼす影響を図-2および図-3に示す。

図-2に示すように、圧密荷重なし（固化のみ）では、MF 剤を増加させても  $q_u$  の増大は僅かであるのに対して、圧密脱水を併用すると、MF 剤添加量とともに  $q_u$  は著しく増大する。例えば、除荷後28日養生の  $q_u$  28日は、圧密荷重なしでは MF 剤を15%混合しても  $0.3 \text{ kg/cm}^2$  であるのに対して、荷重  $0.1 \text{ kg/cm}^2$  で圧密脱水併用すると、MF 剤4.3%で  $0.3 \text{ kg/cm}^2$ 、MF 剤8.5%で  $0.8 \text{ kg/cm}^2$  となる。また、 $q_u$  28日目で  $1 \text{ kg/cm}^2$  を得るのに必要な MF 剤添加量は、圧密荷重なしでは約30%にも及ぶけれども、荷重  $0.1 \text{ kg/cm}^2$  で圧密脱水併用すると10%、荷重  $0.2 \text{ kg/cm}^2$  では7%、荷重  $0.4 \text{ kg/cm}^2$  では5%と減少する。なお、図-2に示すように、 $q_u$  28日/ $q_u$  7日はほとんどの場合、1.1~1.2であった。

また、図-3に示すように、 $q_u$  は MF 剤添加量が同

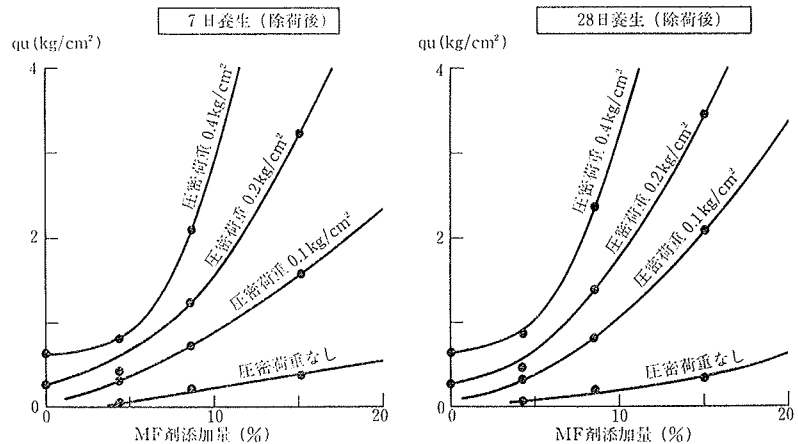


図-2 田子の浦ヘドロにおける MF 剤添加量・圧密荷重と一軸圧縮強度  $q_u$  の関係 (その1)

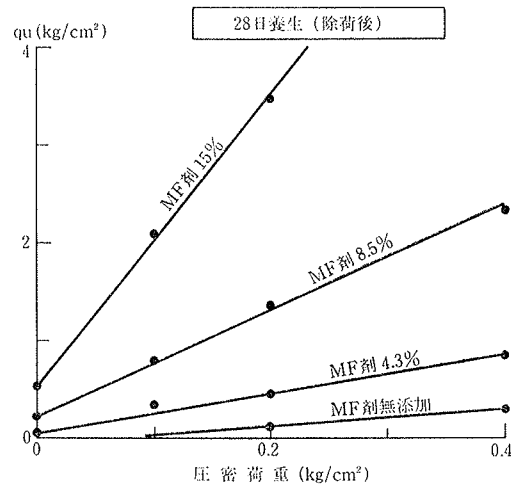


図-3 田子の浦ヘドロにおける MF 剤添加量・圧密荷重と一軸圧縮強度  $q_u$  との関係 (その2)

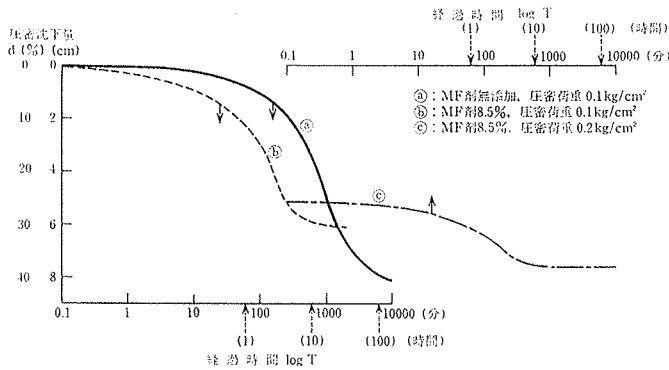
一の場合、圧密荷重の増大によって直線的に増大することが認められた。

### 3.3. 固化時圧密併用処理における圧密沈下

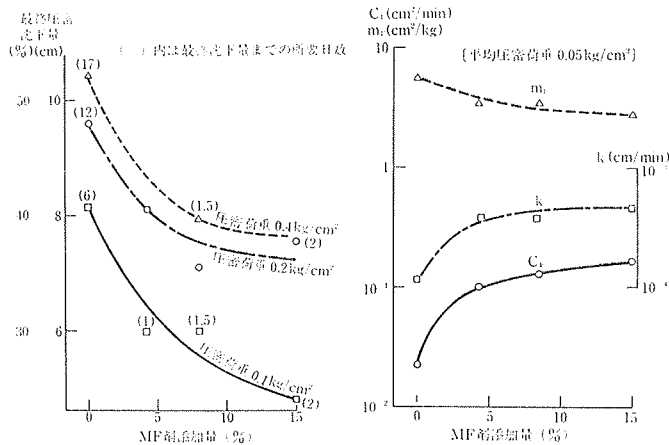
固化時圧密併用処理における圧密沈下曲線 ( $d - \log T$  曲線) を図-4に例示する。沈下曲線から明らかなように、MF 剤を添加した場合の圧密沈下は、無添加の場合に比べて初期に大きな沈下を示し、しかも短時間で終了した。そして、MF 剤を添加した場合、二次圧密がほとんどなかった。

つぎに、最終沈下量とその所要日数に及ぼす MF 剤添加量の影響を図-5に示す。図示するように、最終沈下量は MF 剤添加量増大とともに減少した。また、圧密の所要日数は MF 剤添加によって著しく短縮され MF 剤添加の場合、最大2日であった。

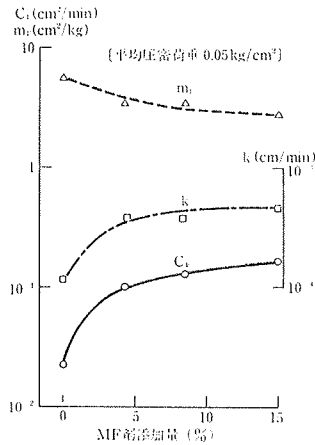
また、図-6に示すように、平均圧密荷重  $0.05 \text{ kg/}$



図一4 固化時圧密併用処理における圧密沈下曲線例



図一5 最終圧密沈下量ならびにその所要日数に及ぼすMF剤添加量の影響



図一6 圧密係数  $C_v$ , 体積圧縮係数  $m_v$ , 透水係数  $k$  に及ぼすMF剤添加量の影響

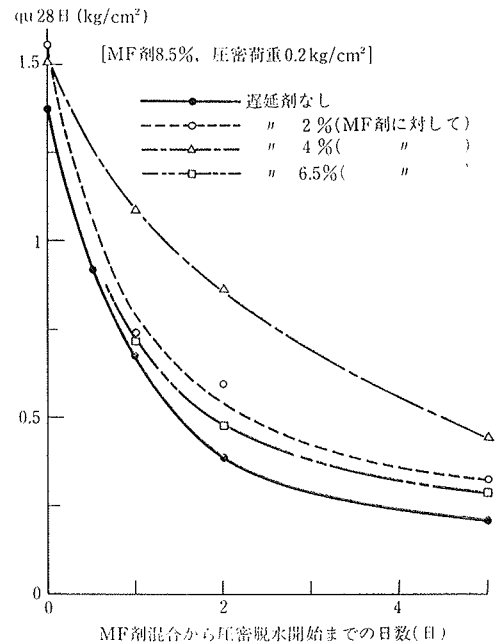
$cm^2$  における圧密係数  $C_v$  はMF剤添加によって、著しく増大した。

これらの結果について、以下のように考える。MF剤を添加した場合、汚泥は凝集状態となり脱水されやすくなるため、MF剤無添加の場合に比べて、初期の圧密沈下が大きくなる。しかし、時間の経過とともにMF剤の硬化によって汚泥の強度が増すため、圧密沈下は短時間で終了すると考えられる。

### 3.4. 固化時圧密併用処理においてMF剤混合から圧密脱水開始までの時間が強度に及ぼす影響

固化時圧密併用処理では、圧密併用の効果を発揮するために、MF剤が未硬化の初期段階に圧密脱水しなければならない。このことは、本処理を実際工事に適用する際、障害となる。例えば、MUD-FIX 工法 I, III<sup>2)</sup>によって原位置や処分地で汚泥を固化し、圧密脱水する場合、MF剤混合から圧密脱水を行なうまでかなりの時間を要するものと思われる。

そこで、このことについて試験を行なった。図一7に、MF剤混合から圧密脱水開始までの放置時間が強度に及ぼす影響を示す。なお、図一7には、強度低下の対策と



図一7 MF剤混合から圧密脱水開始までの放置日数が強度に及ぼす影響および遅延剤の効果

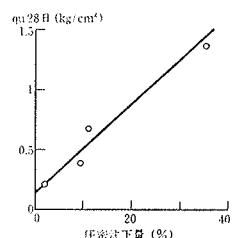
して凝結遅延剤を添加した場合の強度も併記しており、これについては3.5.で述べる。

図示するように、MF剤を8.5%混合して0.2  $kg/cm^2$  の荷重で圧密脱水する場合において、MF剤混合直後に圧密脱水した  $qu_{28日}$  は1.37  $kg/cm^2$  であった。しかしMF剤混合から圧密脱水開始までの放置時間を1日にすると0.67  $kg/cm^2$ 、2日にすると0.38  $kg/cm^2$ 、そして5日にすると0.2  $kg/cm^2$  と、強度は放置時間の増大に伴って著しく減少した。

また、この場合の圧密沈下量も放置時間の増大とともに著しく減少した。そこで、圧密沈下量と  $qu$  との関係性を調べた結果、図一8に示すように、両者の間には直線的関係が認められた。このことは、圧密脱水開始までの放置時間に伴う強度の低下が圧密沈下の抑制によることを示唆していると考えられる。

### 3.5. 固化時圧密併用処理においてMF剤混合から圧密脱水開始までの時間放置による強度低下の対策

前節で述べたように、強度はMF剤混合から圧密脱水開始までの時間放置によって低下した。そこで、その対策として、凝結遅延剤（以下、遅延剤という）の添加を検討した結果を図一7に示す。なお、使用した遅延剤は一般のコンクリート用として市販の



図一8 MF剤混合から圧密脱水までに時間を放置した場合の圧密沈下量と強度の関係

ものである。

図示するように、遅延剤添加によって、時間放置による強度低下は大幅に改善された。そして、遅延剤の効果がとくに顕著に認められたのは、MF 剤に対して遅延剤を4%添加した場合であった。このことは、図-9によって、さらに明瞭に示される。MF 剤混合直後に圧密脱水した場合の  $q_u$  28日を100とすると、1日放置および2日放置後の  $q_u$  28日は、遅延剤無添加ではそれぞれ50、28であった。これに対して、遅延剤を4%添加の  $q_u$  28日はそれぞれ79、63であった。

これらのことから、固化時圧密併用処理において、MF 剤混合から圧密脱水開始までに時間を要する場合、あるいは圧密脱水に長時間を要する場合など、強度低下は避けられないけれども、その程度は適正量の遅延剤を添加することによって、かなり改善できることが判明した。

なお、圧密沈下量は遅延剤添加量の増大とともに増大した。しかし、図-9に示すように、遅延剤添加量には最適添加量が存在した。このことは、遅延剤が過剰になると、MF 剤の硬化を妨害したことによると考えられる。

#### 4. まとめ

汚泥が高含水で有機物を多く含む場合、固化処理は多量の固化剤を必要とし、不経済になることがある。そこで、このような汚泥を経済的に処理する方法として、固化剤混合後に圧密脱水を行なう「固化時圧密併用処理」を開発し、その基礎試験を行なった。結果を以下に要約する。

(1) 田子の浦ヘドロ (含水比 440%, 強熱減量 42%) と荒木田土 (含水比70%, 強熱減量 6%) を用いて、固化、圧密脱水および両者併用による改良強度の比較を行なった。その結果、とくに田子の浦ヘドロにおいて固化時圧密併用処理の効果が顕著であった。例えば、マッドフィクサー (以下、MF 剤という) を添加して一軸圧縮強度 (30日)  $1 \text{ kg/cm}^2$  を得るために必要な MF 剤量は、固化のみでは30%にも及んだけれども、MF 剤混合後に  $0.2 \text{ kg/cm}^2$  で圧密脱水すると、僅か7%であった。このことは、MF 剤混合で綿毛化構造となった汚泥を圧密脱水することによって、圧密脱水がMF 剤の土粒子間接着、結合に有効に働くような構造形成に寄与したためと

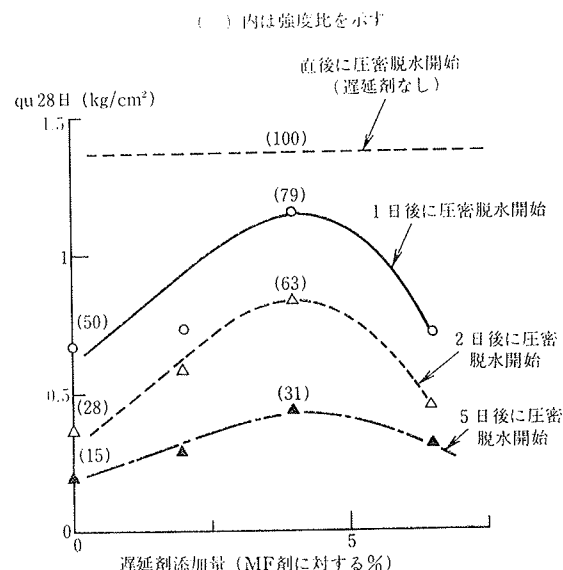


図-9 MF 剤混合から圧密脱水開始までの日数放置による強度低下を防止するための遅延剤の効果

考えられる。なお、 $0.2 \text{ kg/cm}^2$  の圧密脱水のみでは、強度は  $0.13 \text{ kg/cm}^2$  にすぎなかった。

(2) 固化時圧密併用処理の圧密沈下量は、MF 剤無添加の場合に比べて、やや減少した。しかし、MF 剤の脱水促進効果のために、圧密沈下はとくに初期に著しく、2日程度で終了した。

(3) 固化時圧密併用処理では、MF 剤混合から圧密脱水開始までの放置時間とともに強度は低下した。このことは、MF 剤の硬化が圧密脱水を抑制するためである。そこで、この対策として、凝結遅延剤の添加を検討した結果、MF 剤に対して凝結遅延剤を4%添加することによって、上述の強度低下をかなり改善できた。

なお、筆者らは「固化時圧密併用処理」に関して、その現場適用を含めて研究を継続し、有益な知見を得ている。その結果については、追って報告する。

#### 参考文献

- 1) 喜田：ヘドロのシュンセツ・処理処分，土と基礎，Vol. 26, No. 1, (1978)
- 2) 喜田，久保，炭田，辻：汚泥の固化処理に関する研究 (第4報)，大林組技術研究所報，No. 14, (1978)
- 3) 山崎，山内監訳：土質工学の基礎，鹿島出版会