

汚泥の処理処分に關する研究 (第7報)

—固化強度に及ぼす養生温度の影響—

喜田大三 辻博和
久保博 炭田光輝

Studies on Treatment and Disposal of Mud (Part 7)

—Influence of Temperature on Solidified Strength of Mud—

Daizo Kita Hirokazu Tsuji
Hiroshi Kubo Mitsuteru Sumida

Abstract

As is generally known, hydration of cement and pozzolanic reaction are influenced by temperature. In this connection, the influence of temperature on strength of solidified mud was examined. Samples of three muds from ① Arakida, ② Katsushima and ③ Tagonoura were solidified under temperature conditions of 5°C, 20°C and 40°C, and strengths were examined at the ages of 7 days and 28 days. The results were as follows. (1) ① and ② gained strength with increase in temperature and this trend was more marked the larger the quantity of solidifier, or when Mud-fixer was added. (2) The strength of ③ did not increase with increase in temperature. (3) Through examinations by scanning electron microscope and upon chemical analysis, it was speculated that the increases of strength with ① and ② were due to formation of cement hydration products and crystallization of ettringite, and the failure to gain strength with ③ was due to hindering of hydration and ettringite crystallization by organic matter dissolved from the mud.

概 要

セメントの水和反応やポズラン反応は温度上昇とともに増進するので、汚泥をセメントおよびセメント・石膏（マッドフィクサー）で固化する際にも、温度効果が期待される。そこで、①非汚泥の荒木田土、②都市下水で汚染された河川底泥の勝島ヘドロ、③バルブ廃液で汚染された港湾底泥の田子の浦ヘドロの3種類の土を供試し、養生温度 5°C, 20°C, 40°C, 養生日数 7日・28日において、一軸圧縮強度を測定した。その結果、以下のことが判明した。(1)①, ②では、強度は温度とともに増大し、その程度は固化剤が多いほど、またマッドフィクサー（セメント：石膏＝8：2）でとくに顕著であった。そして、温度の影響は7日・28日いずれでも同程度であった。(2)③では、温度を上昇させても、強度は停滞または減少した。(3)走査型電子顕微鏡観察および土からの溶出 Al_2O_3 、有機物の測定によって、温度に伴う強度増大はセメント水和物やエトリンジャイトの生成・結晶発達を増進、また温度に伴う強度の停滞・減少は高温でアルカリ溶出される有機物がセメント水和物やエトリンジャイトの結晶発達を妨害するためと推察された。

1. まえがき

周知のように、ソイルセメントやソイルライムの強度はコンクリートなどの場合と同様に、養生温度の影響を著しくうける¹⁾²⁾。すなわち、養生温度が上昇すると、水和反応・ポズラン反応などが旺盛となり、とくに初期強度が顕著に増大する。したがって、これらの工事では、夏期と冬期による温度差を考慮した設計・施工を行わなければならないことがある。

ところで、上述のような養生温度の影響は汚泥の固化処理においても現われることが予測される。しかし、汚泥の場合には、ソイルセメントやソイルライムで対象とする陸上土の場合に比べて、その性状は複雑で多岐にわたっており、また使用する固化剤もセメントに助剤を添加したものが多く、硬化反応は必ずしも同じでない。したがって、養生温度の影響は従来のソイルセメントやソイルライムの場合と異なることも考えられ、不明な点が多い。

そこで、汚泥の固化処理に及ぼす養生温度の影響に関する基礎的な室内試験を行なった結果、有益な知見が得られたので、以下にその一部を報告する。

2. 試料と試験方法

2.1. 試料

供試土は表一に示すように、①非汚泥の荒木田土(以下、荒木田という)、②都市下水で汚染された河川底泥の勝島ヘドロ(以下、勝島という)、および③パルプ工場廃液等で汚染され有機物がとくに多い港湾底泥の田子の浦ヘドロ(以下、田子の浦という)の3種類である。

また、固化剤はセメントおよびマッドフィクサー(セメントに排膿石膏を混合したもの)を用いた。

2.2. 試験方法

試料を予め 5℃, 20℃, 40℃の各恒温器に放置して温度平衡に達せしめたのち、取出して所定量の固化剤を粉状で添加混合した。そして、モールドに詰め密閉して、再び恒温器に入れ7日間および28日間養生して、土質工学会基準に従って一軸圧縮試験を行なった。

3. 試験結果

図一1および2に、一軸圧縮強度(以下、強度または q_u という)と養生温度(以下、温度という)ならびにマッドフィクサーのセメント・石膏比の関係を示す。

(1) 荒木田, 勝島の場合

これらの土では、固化剤添加量, セメント・石膏添加比, 養生日数がいずれの場合にも、強度は温度の上昇に伴って増大した。この温度上昇に伴う強度増大の程度について、つぎのことがいえる。

1) 固化剤が多い場合

の方が少ない場合に比べて顕著である。

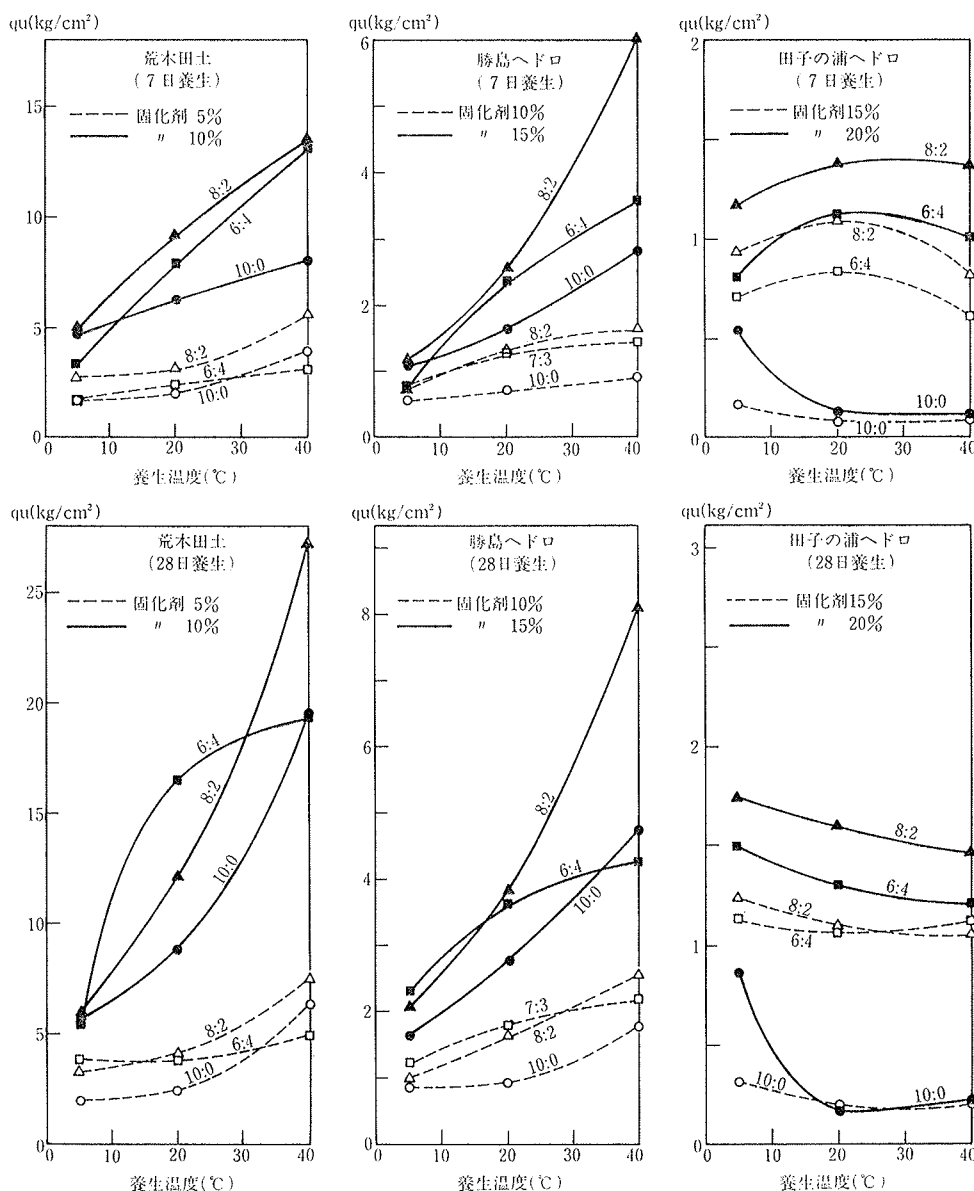
2) セメント・石膏比 8:2 の場合にとくに顕著である。

3) q_u 7日, q_u 28日いずれの場合も温度の影響は同程度である。ただし、セメント・石膏比が6:4の場合、 q_u 28日で温度の影響がやや減少した。

なお、温度による強度増大がとくに顕著なものは、荒

供試土	含水比 (%)	粘土 (%)	シルト (%)	砂 (%)	LL (%)	PL (%)	PI	Gs	強熱減量 (%)	土質分類
荒木田土	63	38	55	7	44	21	33	2.61	5.5	CL
勝島ヘドロ	280	36	51	13	120	43	77	2.45	22.5	OH
田子の浦ヘドロ	350	73	14	13	236	58	178	2.40	39.5	CH

表一 供試土の性状



図一1 一軸圧縮強度 q_u と養生温度, セメント・石膏比の関係 (その1)

木田では、マッドフィクサー (8:2) を10%添加した q_u 28日の場合で、5°Cで6.0 kg/cm²、20°Cで12.2 kg/cm²、40°Cで27.3 kg/cm²と、5°Cから40°Cへの上昇によって q_u は4.6倍も増大した。また、勝島では、マッドフィクサー (8:2) を15%添加した q_u 7日の場合で、5°Cで1.2 kg/cm²、20°Cで2.6 kg/cm²、40°Cで6.1 kg/cm²と、5°Cから40°Cへの上昇によって q_u は5.1倍も増大した。

さらに、図-2に示すように、セメント・石膏添加比には最適比が存在し、このことは温度が高いほど顕著であった。その最適比は荒木田、勝島のそれぞれマッドフィクサー10%添加の q_u 28日において、6:4~7:3と石膏がやや多い比となったが、概ね8:2が最適であった。筆者ら³⁾は先に、マッドフィクサーのセメント・石膏添加比に最適比が存在することを報告したが、上述の結果はその比が温度条件によって、それほど変動しないことを示唆している。

(2) 田子の浦の場合

セメント (10:0) の添加では、強度は5°Cから20°Cへの温度上昇によって減少し、20°Cから40°Cへの上昇によってほぼ一定であった。また、マッドフィクサー添加では、強度は、 q_u 7日において、20°Cで僅かながら最大値を示したけれども、全体的に見ると温度上昇によってほとんど影響をうけなかった。

これらの結果は前述の荒木田、勝島の場合と相反する結果である。すなわち、田子の浦では、温度を上昇させても、強度は停滞または減少し、従来、ソイルセメント、ソイルライムで一般に知られていた挙動と全く異なる結果が認められた。

なお、図-2に示すように、セメント・石膏最適添加比は勝島、荒木田

の場合と同様、8:2であった。

4. 考察

4.1. 荒木田、勝島における強度増大の原因

(1) 鉱物学的手法による検討

まず、マッドフィクサー添加の場合について述べる。マッドフィクサー添加では、セメントの水和反応だけでなく、 $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ の示性式で表わされる針状鉱物のエトリンジャイト (以下、Et という) が強度増大に有効に作用する。そこで、温度に伴う強度増大に対しても、Et が関与することが予測されたので、このことを走査型電子顕微鏡によって調べた。その結果を写真-1~4に例示する。

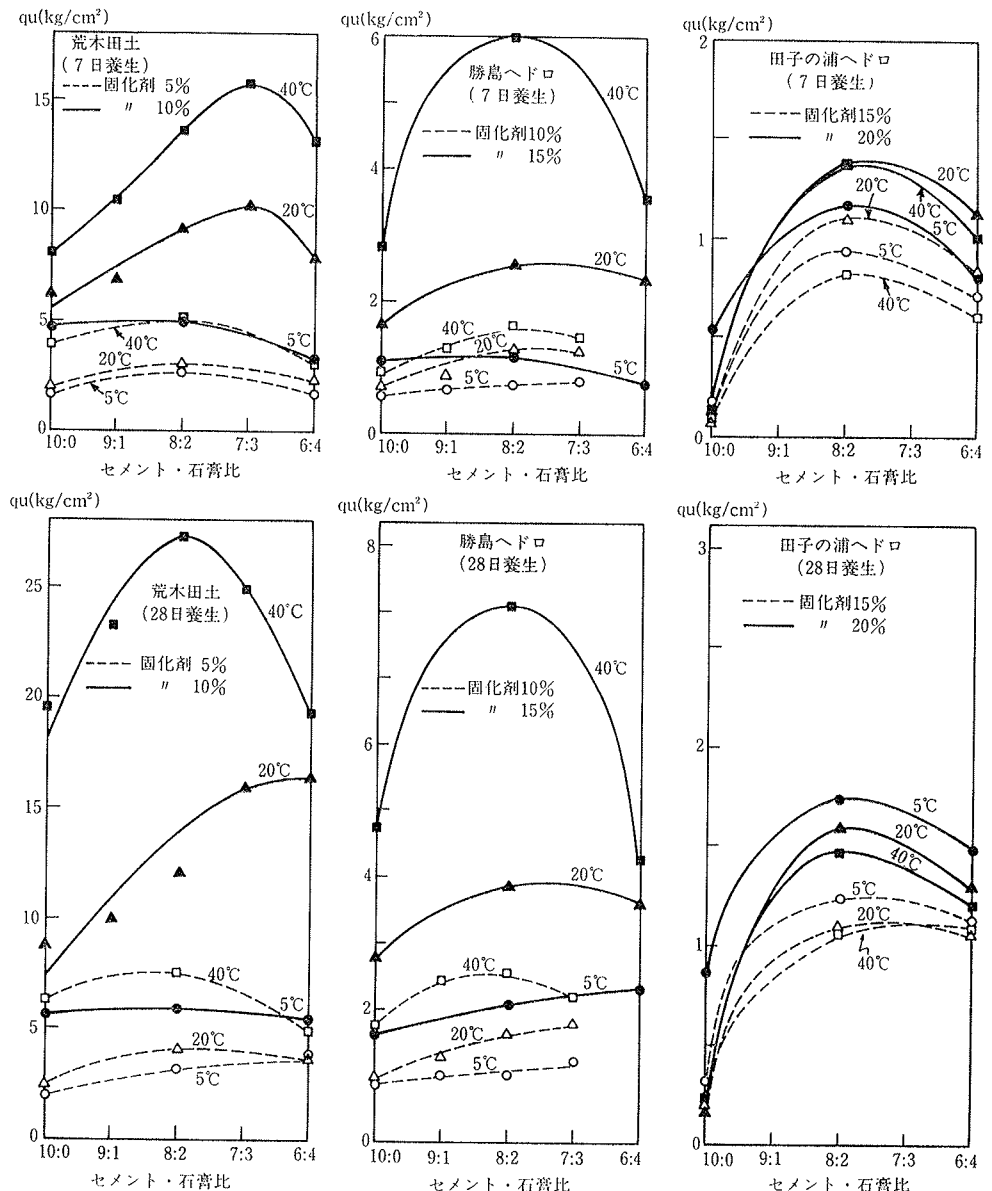


図-2 一軸圧縮強度 q_u と養生温度、セメント・石膏比の関係 (その2)

写真に明瞭に示されるように、5°Cでは粒子を被覆しているマッドフィクサーの表面からEtの針状結晶が僅かに伸びているにすぎない(写真-2)。ところが、20°CではEtの結晶は1~2μの長さまで成長し、その量も増大している(写真-3)。さらに、40°Cになると、その結晶はいよいよ大きく成長し、長さ5μ程度となり、粒子間の充填・結合に有効に働いている様子がうかがわれる(写真-4)。なお、これらの針状結晶がEtであることは、X線回析でも確認された。以上の結果は、マッドフィクサー固化泥の強度が温度によって著しく増大する原因がセメントの水和反応の促進、セメント水和物結晶の成長だけでなく、Etの生成状況、すなわちEtの量および結晶度の差異によることを示唆している。

一方、セメント添加の場合を写真-5~6に示す。マッドフィクサー添加の場合ほど明瞭ではないが、40°Cでは5°Cに比べて、セメント水和物による粒子塊がやや大きくなっている。これらのことから、温度上昇に伴ってセメント水和物の結晶度が高くなり強度増大したものと考えられる。

(2) 化学的手法による検討

EtはCaO 13%, Al₂O₃ 38%, CaSO₄ 33%, H₂O 46%, (重量比)で構成されるが、その中のAl₂O₃はとくに添加しない限り、大部分土中から溶出するもので供給され

る。そこで、土中からの溶出Al₂O₃量に及ぼす温度の影響を調べるため、一定濃度の苛性ソーダ溶液を用いて溶出Al₂O₃量を測定した。その結果、図-3に示すように、溶出Al₂O₃量は養生温度の上昇に伴って明瞭に増大した。この試験は、溶出条件がマッドフィクサー添加の場合と同一ではないので、詳細は不明である

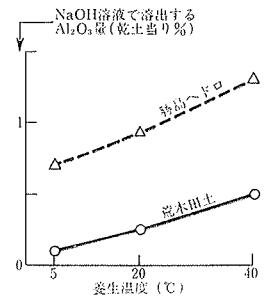


図-3 一定濃度 NaOH 溶液に浸漬した原泥から溶出する Al₂O₃ と温度の関係

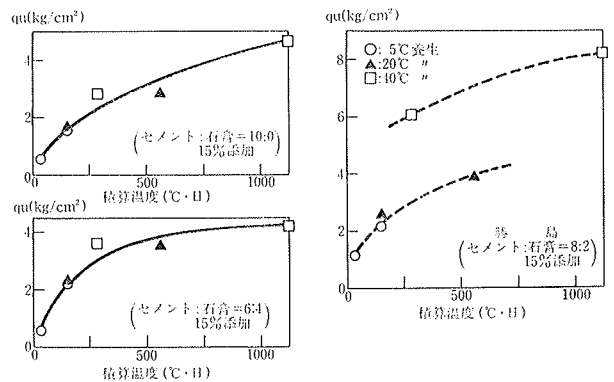


図-4 積算温度と一軸圧縮強度 qu との関係

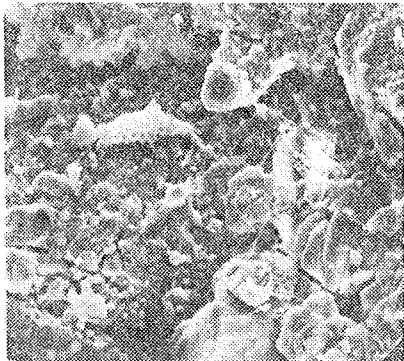


写真-1 固化剤無添加(3000倍)

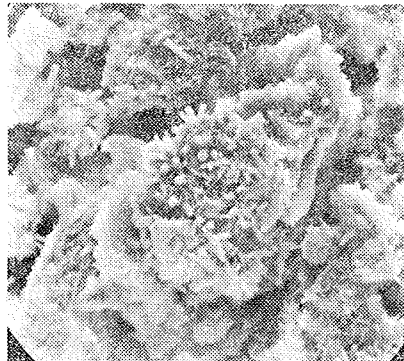


写真-2 マッドフィクサー(8:2)15% 5°C養生(3000倍) qu=2.1kg/cm²



写真-3 マッドフィクサー(8:2)15% 20°C養生(3000倍) qu=3.9kg/cm²



写真-4 マッドフィクサー(8:2)15% 40°C養生(3000倍) qu=8.2kg/cm²

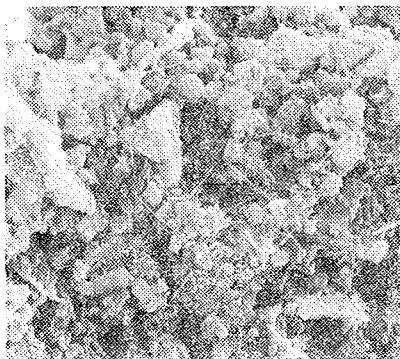


写真-5 セメント15%, 5°C養生 (1500倍) qu=1.5kg/cm²

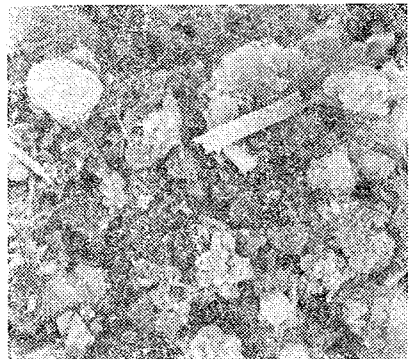
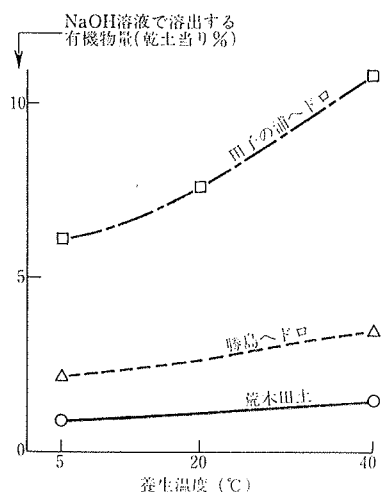


写真-6 セメント15%, 40°C養生 (1500倍) qu=4.7kg/cm²

(写真-1~6 勝島ヘドロの固化剤無添加および添加の走査型電子顕微鏡写真, 固化剤添加後の養生日数は28日)



図一5 一定濃度 NaOH 溶液に浸漬した原泥から溶出する有機物と温度の関係

が、温度上昇に伴って、土中からアルカリ溶出される Al_2O_3 量が増大することが判明した。これらのことから、マッドフィクサー 固化泥における温度に伴う Et 生成量増大の原因は、温度上昇に伴って土中から溶出する Al_2O_3 の増大によることが推察された。

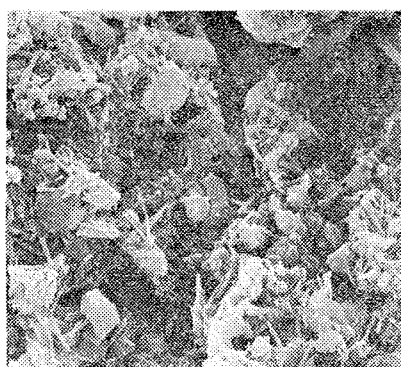
なお、3. で述べたように、温度に伴う強度増大はマッドフィクサー量が多い方が顕著であった。このことは、マッドフィクサーが少ない場合、温度上昇に伴う Al_2O_3 溶出は旺盛であっても、Et 生成に必要な CaO, $CaSO_4$ が不足するためと考えられる。

(3) 積算温度による検討

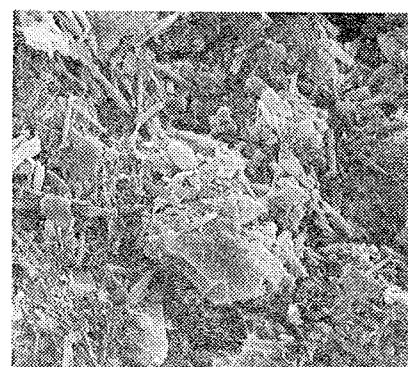
積算温度(温度と日数の積)と強度の関係を図一4に示す。例えば、勝島では、セメント・石膏比が10:0および6:4の場合、両者は比較的明瞭な対応を示したが、一方8:2の場合、5℃・20℃と40℃では全く異なる曲線を示した。この傾向は荒木田でも同様であった。以上の結果は、セメント・石膏比8:2の場合、とくに Et 生成が強度に大きく関与し、その Et 生成はセメント水和に比べて温度の影響を強くうけることを示唆している。なお、筆者らはマッドフィクサー(8:2)固化泥を5℃、20℃、40℃で最大60日まで養生したが、この場合にも積算温度と強度の関係は28日養生までの傾向が継続した。

4.2. 田子の浦における強度停滞・低下の原因の検討

田子の浦は有機物を非常に多く含んでいる。一方、セメントの水和に有機物が有害なことはよく知られている。そこで、温度に伴う有機物の溶出状況を、一定濃度苛性ソーダ溶液を用いて調べた結果を図一5に示す。図示するように、田子の浦は有機物が非常に多く、しかもその量は5℃から40℃への上昇によって1.8倍に増大



写真一7 5℃養生(1500倍)
 $qu=1.7kg/cm^2$



写真一8 40℃養生(1500倍)
 $qu=1.5kg/cm^2$

(写真一7~8 田子の浦へドロのマッドフィクサー(8:2)20%添加、28日養生の走査型電子顕微鏡写真)

した。また、写真一7~8に示すように、マッドフィクサー添加によって、5℃、40℃いずれでも Et の結晶は認められるが、その結晶状態は大差ない。これらのことから、田子の浦では、温度上昇に伴ってアルカリ溶出される有機物量が増大し、セメントの水和、Et の結晶生成を妨害するため、強度が停滞または低下したものと推察される。

5. あとがき

上述のように、汚泥をセメントあるいはセメント・石膏(マッドフィクサー)で固化する際、温度上昇とともに強度(7日、28日)は一般に顕著に増大したが、有機物が極めて多い汚泥では停滞または減少した。

これらの結果は実際の工事に関して、以下のような知見を与えると考える。固化剤混合泥の下層は固化剤の反応熱によって通常30~40℃になっており、一方、表層は水温・気温の影響をうけて、とくに冬期には5~10℃に低下する。したがって、表層部の強度確保を目的とする場合、施工時期の温度条件を考慮した設計施工を行なう必要がある。なお、その際、有機物を多量含む汚泥では温度上昇が強度低下を招くこともあるので注意を要する。

参考文献

- 1) 梶井, 白井: セメント技術年報, No. 14, (1961)
- 2) 三木, 山内: 土質安定の理論と実際, オーム社, (1959)
- 3) 喜田, 久保, 炭田: 大林組技術研究所報, No. 14, (1977)
- 4) D. J. Maclean, P. T. Sherwood: 5th Internat., Conf. Soil Mech., Vol. 11, (1961)