

公害汚泥の固化処理に関する研究 (第1報)

—セメント固化における混合指数の提案とその適用—

喜田大三 辻 博和
久保 博

Studies on Solidification Treatment of Harmful Mud (Part 1) —Proposal for an Index Number of Cement-Mixing in Solidification by Cement and its Application—

Daizo Kita Hirokazu Tsuji
Hiroshi Kubo

Abstract

Mud containing harmful substances or polluting environment is treated by cement-type solidifiers, in order to prevent secondary contamination. To investigate of influence of the degree of cement mixing on cement-solidified strength of very weakened mud, it is proposed to express it by an index number of cement-mixing. On application of this number to laboratory and field tests the following results were obtained. i) The index number of mixing, pM is expressed by $pM = -\log \sigma^2/\sigma_0^2, \sigma^2 \cdot \sigma_0^2$; standard dispersion of distribution of solidifiers in solidified mud after mixing and before mixing, respectively. ii) In a laboratory test, on solidification of one river mud by cement the index number increases with mixing times, and whereas strength increases up to pM of 3 ~ 3.5 with 30% cement, strength increase is almost completely finished at pM of 2.5 with 10% cement. And solidified mud is hard to break by vibration in water at pM above 2.5. iii) In a field test solidified strength of mud by cement increased with an index number of mixing by "MUD-FIX method".

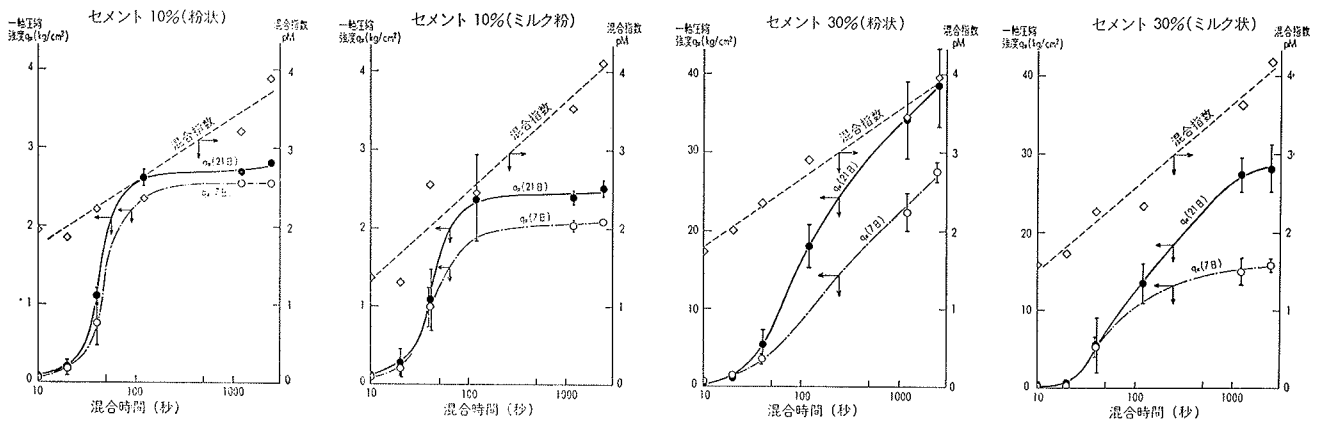
概 要

有害物質を含有あるいは生活環境を汚染する公害汚泥は、二次公害を防止するための1処理法としてセメント系固化剤によって固化処理される。その際、超軟弱汚泥の強度増加に関与する多くの因子のうちからセメント混合状態の影響を調べるため、混合状態の表示法として混合指数pMを提案し室内、現地試験に適用した結果を以下に要約する。i) 混合指数 pMは、 $pM = -\log \sigma^2/\sigma_0^2$ で計算できる。 σ^2 : 固化土中の固化剤分布の標準分散, σ_0^2 : 完全分離状態における固化剤分布の標準分散。ii) 室内試験で某河川汚泥にセメントを混合する際、混合時間とともに混合指数は増加し、セメント添加量30%ではpM3~3.5まで一軸圧縮強度は増大するけれども、セメント10%では pM2.5以上にしても強度は増大しない。また固結土はpM2.5以上において水中振動により崩壊されにくいことが判明した。iii) 現地試験では有害物質を含む某河川汚泥を MUD-FIX 工法(特許出願中)によって処理した結果、汚泥のセメント固化強度は混合指数とともに増大することが確認された。

1. まえがき

産業活動、消費生活に由来する各種廃棄物によって汚染された公害汚泥は、各地の湖沼、河川、海域だけでなく所定の場所に貯留され膨大な量を堆積している。これら汚泥は生物に直接有害な成分を放出あるいは生物の生活環境を悪化させる恐れがあるので社会的に早急な処置が望まれている。そして昭和49年6月に環境庁水質保全局長通達「底質の処理・処分に関する暫定指針」が出され、底質中の有害物質による二次汚染が

発生しないようにするため、その工事方法、工事の監視及び除去した底質の処理、処分方法等が述べられている。その処理法の1つとして、セメント系固化剤および副添加剤によって汚泥を固化して有害物質の溶出を抑制したのち、固化地盤として利用され、または所定の場所に埋立られている。この処理法の大きな目的は、有害成分の溶出防止と超軟弱汚泥の強度増加である。そこで、筆者らは、セメント系固化剤による汚泥中の有害物質の不溶化処理と平行して、その強度増加に関する実験を行ってきたので一部報告する。



図一 混合時間と一軸圧縮強度および混合指数の関係

さて、固化剤による強度増加の効果は、汚泥の性状、固化剤の種類および量、締固めおよび養生方法だけでなく固化剤の混合状態（以下、混合度という）にも大きく影響される。そして、現地におけるセメントおよび石灰安定処理では強度と混合度との関係が特に問題になるけれども、それに関する研究は皆無に等しい。そこで、強度に及ぼす混合度の影響を調べるために、まず混合度の測定ならびに表示の方法を検討し、その方法を公害汚泥のセメント固化の室内および現地試験に適用した。なお、現地試験に採用した汚泥処理工法は MUD-FIX 工法と称し、当社が公害汚泥を固結無害化するために開発したものである（特許出願中）。

2. 混合指数の提案

混合度は混合時間を増すにつれて当然よくなるので、混合時間によって混合度を表示できる。しかし、この方法では時間以外の条件が異なる場合には相互比較が困難である。そこで、土中の固化剤の分布状態に着目し、土と固化剤の2成分系混合体から無作為に一定量試料を多数個採取して固化剤の量を化学分析する。その結果を完全分離状態あるいは完全混合状態と比較して混合度を表示することにした。

さて、混合度は統計的方法によって次のようにして求めることができる。

採取試料中のカルシウム（セメント処理の場合の着目成分）濃度の標準分散 σ^2 は

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

n ; 採取試料の数

x_i ; 採取試料中のカルシウム濃度

\bar{x} ; 仕込みのカルシウム濃度

また、混合前の完全分離状態の標準分散 σ_0^2 は、

$$\sigma_0^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

$$\sigma_0^2 = \frac{1}{n} \{ (1-\bar{x})^2 n \bar{x} + (0-\bar{x})^2 n (1-\bar{x}) \} = \bar{x}(1-\bar{x})$$

混合度は、

$$M = \frac{\sigma^2}{\sigma_0^2}$$

M は完全混合状態で0、完全分離状態で1となる。しかし、この数値は実際上小さすぎて不都合であるので、 M の常用対数に負号を付して混合指数と命名し、記号 pM で表示する。

$$pM = -\log M = -\log \frac{\sigma^2}{\sigma_0^2}$$

したがって、 pM は完全分離状態で0、完全混合状態で $+\infty$ になるけれども、到達可能な混合度があるので実際には有限値となる。

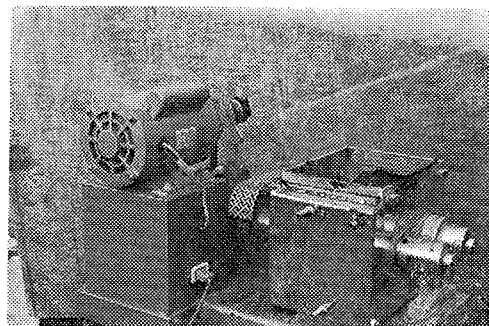
3. 室内試験

3.1. 供試汚泥

某河川に堆積している W_n 189%, LL 58.5%, PL 40.0%, PI 18.5%, G_s 2.563, 有機物11.9%の粘土質シルトを汚泥試料として供試した。

3.2. 試験方法

均一混合した某河川汚泥 1800~2700 g をニーダー(写真1)にとり、普通ポルトランドセメント10%, 30



写真一 ニーダー

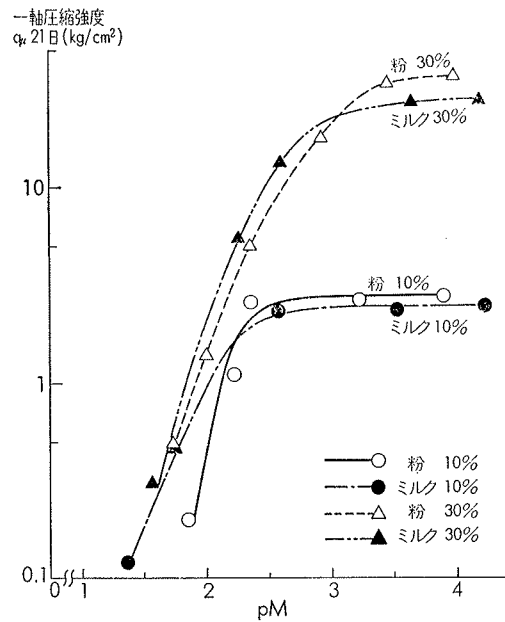
% (重量比) それぞれ粉状およびミルク状 (W/C=0.5) で添加し, 30rpm で10秒, 20秒, 40秒, 2分, 20分, 40分間混合し, モールド試料, 各9個を作製し7日および21日後に一軸圧縮強度を測定した。また, 固化試料の水中での安定性を調べるため, 水中耐振動試験 (一定エネルギーで水中往復振動後に篩残留分を重量測定) を行なったが, その詳細は省略する。

つぎに, 混合度は一軸圧縮試験後の試料を5セクションに分割しその中をさらに細分し乾土として約1gを無作為に各セクションから2個ずつ取出し, カルシウム濃度をEDTA法によって測定し, 2で述べた計算式にしたがって混合指数をpM求めた。

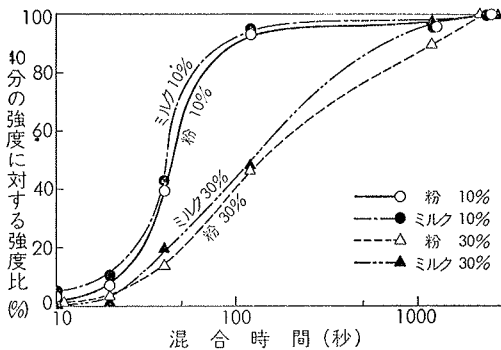
3.3. 室内試験の結果と考察

混合時の観察によれば, 混合開始10~20秒ではセメント粉の所在が肉眼で識別できるが, 40秒~2分になると見かけ上よく混合してくる。さらに20~40分混合すると全体が液状化してくる。

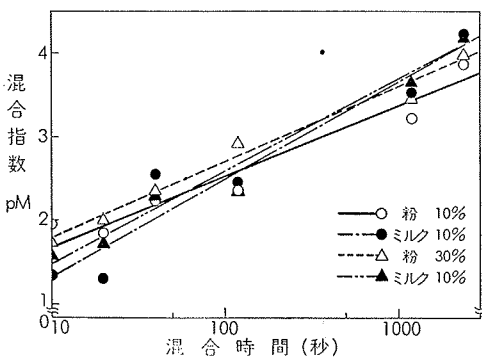
混合時間と一軸圧縮強度および混合指数の関係を図一1に示す。図からわかるように, 強度の増大する傾向にはセメント10%と30%との間に明瞭な差異がある。つぎに, 最大混合時間の40分混合した場合の強度に対する各混合時間の強度化を図一2に示す。これによると, セメント10%の場合には2分で90~95%に達する



図一4 混合指数と強度との関係



図一2 40分混合の強度に対する各混合時間の強度比

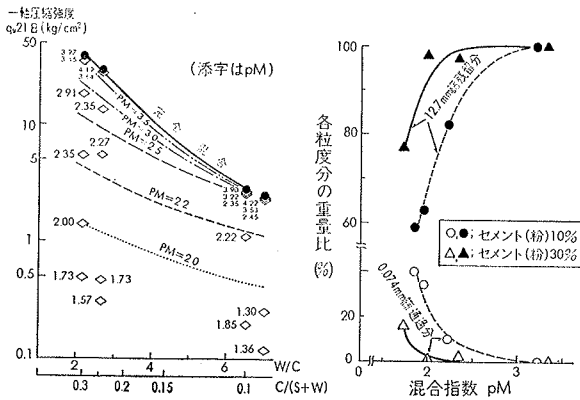


図一3 各混合時間における混合指数の比較

のに対して, セメント30%の場合には2分で45~50%, 20分でようやく90~95%に達する。このことから, セメントが少ない場合には混合は行なわれやすく短時間で完了するため, それ以上混合しても強度は増大しないけれども, セメントが多い場合には混合されにくいいため, 混合するにつれて強度も増大すると考えた。

しかし, 図一1の各混合指数をまとめて図一3に示すように, セメント量およびセメント性状に無関係に混合時間とともに混合指数は同様な傾向で増大し, その値も類似している。このことは, セメント10%の場合には混合度がある値に達するまでは強度は急増するが, ある値以上になると強度は平衡に達することを示唆しており, 前述の推論が正しくないことが判明した。混合指数と強度との関係は, 図一4に示すように, セメント30%ではpM3~3.5, セメント10%ではpM2.3~2.5まで強度は急増し, それ以上になるとほぼ平衡に達することが認められる。

以上の現象について, 次のように考える。一般に, 混合状態がよくなるとBrothmanらが述べているように“2物質相互界面”が増加する。つまり, セメントと土粒子との接触結合面積は増加する。このことはセメント固化土の強度増大に有効に作用する。一方, セメントの混合が進むにつれてセメントは汚泥中の間隙水中に分散され, 水和反応の際のW/Cは大きくなり, 水和物の強度が低下し, ひいては固結土の強度減少に作用する。セメントの固化の混合過程では, これら相反する2つの作用が関与すると推察する。本実験にお



図一5 各種の混合度における W/C と強度の関係
図一6 水中耐振動性と混合指数の関係

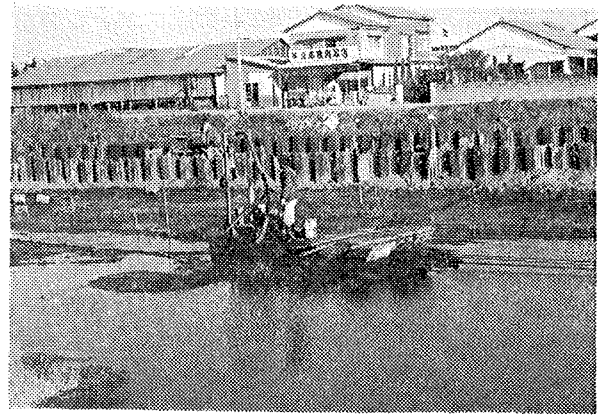
いて、セメント10%の場合 pM2.3~2.5, 30%の場合 pM3~3.5 以下では前者の増大作用が優勢であったけれども、それ以上になると後者の減少作用が前者の増大作用の効果を抑制し強度が平衡を保つと考えられる。なお、各種混合度における W/C と一軸圧縮強度の関係を図一5に示す。この図からも W/C が大きくなると低い混合指数で強度減少作用の影響が大きくなるのに対し、W/C が小さいと高い混合指数に到るまで強度増大作用の方が優勢であることがわかる。

つぎに、各種混合指数のセメント固化試料の水中耐振動試験の一部結果を図一6に示す。図で12.7mm篩残留分は崩壊しにくい部分、0.074mm 篩通過分はセメントによる結合がなかったかあるいは切断され崩壊しやすい部分と考えられる。いずれの試料も混合指数2.5以下では崩壊しやすくなる。このことは、混合不十分な場合、固化土中の微細粒子が水中に分散、拡散し水質を汚染しやすくなることを意味し、公害汚泥の処理という立場からも混合度の重要性を示唆している。

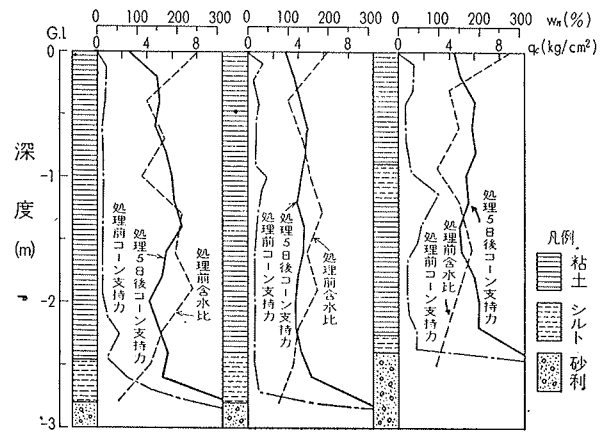
4. MUD-FIX 工法による現地試験

MUD-FIX工法は、高含水の超軟弱な汚泥土を処理船が移動しながら固化剤を特殊装置で注入、混合し所定の深さまで汚泥を固化し無害化する工法である。その処理船を写真一2に示す。

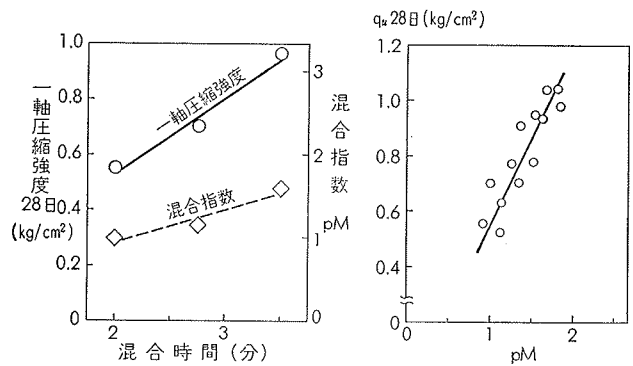
さて、某河川の河口に堆積している図一7に示すような柱状図の有害物質を含む約2.8mの汚泥層をMUD-FIX工法によってセメント固化した。その際のセメント添加量は汚泥重量当り平均10%である。同図に示すようにコーン支持力はセメント処理によって著しく改良され、図示しないが有害物質の溶出も抑制された。この現地で混合度の試験を行なった。その際、船の移動速度を変えることによって3種の混合時間で処理した場合の一軸圧縮強度(28日)および混合指数を図一



写真一2 MUD-FIX 工法・処理船



図一7 柱状図 (代表例)



図一8 現地試験における混合時間と強度および混合指数の関係

図一9 現地試験における混合指数と強度の関係

8に示す。また混合指数と強度との関係を図一9に示す。この図に示すように、両者の間に明瞭な関係が認められ、混合指数とともに強度は直線的に増加していた。なお、MUD-FIX工法による現地試験の詳細は別に報告する予定である。

5. まとめ

公害汚泥の固化処理において、固化強度には多くの

因子が関与する。そのうち固化剤の混合状態は重要視されながら系統的な研究がほとんど行なわれていない。そこで、本報では、混合度の指標として混合指数を提案し、室内および現地試験に適用した。その結果を以下に要約する。

i) 提案した混合指数 pM は次式で計算できる。

$$pM = -\log \frac{\sigma^2}{\sigma_0^2}$$

σ^2 : 固化土中の固化剤を化学分析し、その分布状態を統計処理して得た標準分散, σ_0^2 : 完全分離状態における固化剤分布の標準分散。

ii) 室内試験で含水比 189%, 有機物 11.9% の粘土質シルトの汚泥を供試し、セメント混合度の影響をニードラーを用いて最大混合時間 40 分までの各時間について調べた。セメント 30% では一軸圧縮強度は混合時間とともに大きくなるけれども、セメント 10% では 2 分以上混合しても強度の増大はほとんどない。ところで、混合指数はセメントの量および状態に関係なく混合時間とともに大きくなる。

以上の結果から、セメント 30% では混合指数 pM 3 ~ 3.5 まで強度は増大するが、セメント 10% では pM 2.5 以上にしても強度は増大しないことが判明した。このように、一軸圧縮強度と混合指数との関係がセメ

ント量によって相違する原因について考察を加えた。

iii) 上記の室内試験で得た固結土の水中耐振動性も一軸圧縮強度と同様に混合度の影響を受け、 pM 2.5 以下では水中振動によって固結土は崩壊されやすい。このことは、有害物質を含む粒子による水質汚染防止の立場からも混合指数の有用性を証明している。

iv) 現地試験として、某地河川に堆積している有害物質を含む汚泥を MUD-FIX 工法によって処理した結果、汚泥のセメント固化の強度は混合指数とともに増大することが確認された。

以上、混合度の指標として混合指数を提案し、室内および現地試験に適用し、混合指数が公害汚泥の固化に対して極めて有用であることが判明した。今後、混合指数についてさらに詳細な研究を行なう予定である。

参考文献

- 1) 大山; 化学工学 II (岩波全書)
- 2) 攪拌・捏和・混合 (化学工業社)
- 3) 喜田, 中田; 石灰安定処理土中の石灰量の測定法, 大林組技術研究所報, No. 4, 74 (1970)
- 4) 喜田; 土壌構造と結合物質の作用および改良剤の利用に関する研究, 学位論文, 50 (1961)