

## 論文

## 軽量安定処理土の密度管理について

林 泰弘\*・鈴木 敦巳\*\*・北園 芳人\*\*\*

Density control for Light-weight Stabilized Soils

Yasuhiro HAYASHI, Atsumi SUZUKI and Yoshito KITAZONO

## 1. はじめに

港湾地域での浚渫によって発生する土砂は処分地の不足から有効利用が必要となっている。その利用法の一つとして沿岸域の埋め立て材としての使用がある。しかしながら、浚渫土は高含水比で軟弱なため良質な埋め立て材とは言い難く、更に、このような地域では原地盤も軟弱である場合が多い。そのため、埋め立て後の圧密沈下が大きな問題となっている。その対策として圧密を促進するサンドドレーン、サンドコンパクション、地盤を固化するセメント安定処理等が利用されるが軟弱な原地盤層が厚い場合には工事費が膨大となり、あるいは、その工期も長期化する。

しかし、造成地盤の利用法として駐車場、道路、公園など比較的小さな荷重しか想定されない場合には、上記のような大がかりな改良を必要としない、軽量安定処理は、土を固化するとともに軽量化を施すものであり、必要最小限の支持力を確保すること及び軽量化により地盤に与える荷重を軽減することで盛土や構造物の重量に起因する沈下や地盤破壊等を抑制する工法である。そのため、処理量も軽減され、また、工期も短縮されるため早期に利用開放できるという特長を持つ。

このような軽量安定処理土の配合設計においては、処理土の強度と密度の両方を満足する配合を決定する必要がある。密度を小さくする方法としては発泡ビーズや気泡をセメント等の固化材とともに混入<sup>1)</sup>して、処理土中にとどめる方法が多く取り入れられている。本研究で

は気泡を用いた軽量安定処理工法の開発を行っており、処理土の強度は、間隙比を指標にして推定することができるという結果が得られた<sup>1)</sup>。しかし、もう一つの目標値である密度をコントロールをすることは用いる気泡の性状の不安定さのため、混合開始時の量と実際に混入された量との間に差が生じる。この差は、処理中あるいは処理後にさまざまな影響で気泡が消失するためにおこるものと考えられる。本報では、この気泡の消失(以下、「消泡」と呼ぶ)をあらかじめ推定することが密度管理を行う上で重要であると考え、消泡に及ぼす要因の抽出を中心に密度管理の方法について提案する。

## 2. 試料及び安定材の諸元

今回の試料はいずれも熊本港付近から浚渫され埋め立てに用いられたものである。しかしながら、採取地点、採取時期の違いから表-1のように物理特性に違いが見られた。埋立地盤では時間の経過により圧密によって含水比が低下し、それに伴い湿潤密度等も変化すると考えられるが、ここでは、試料採取時のものを示している。また、この時の飽和度はいずれもほぼ100%であった。採取時点での含水比は液性限界以上でかなり高含水比であり、塑性指数や粒度組成はバラエティーに富んでいるため、この軽量安定処理の幅広い適応が確認できる。尚、これらは日本統一土質分類を用いるとCH, MH, SMの3種類に分類できる。

また、処理効率には試料の抵抗力が問題となってくる。そこでこの抵抗力をトルクレンチ式簡易型ペーンを用いることでせん断強度( $\tau_0$ )として求めた。実際の地盤では含水比の変動が大きいので、試料を広範囲の含水比に調整してせん断強度を測定した。含水比は絶対的な指標であるため、試料の特性を考慮することができ土の

平成8年9月25日受付

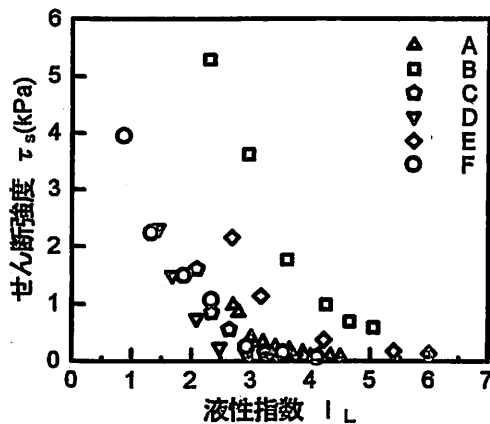
\* 助手, 環境システム工学科

\*\* 教授, 環境システム工学科

\*\*\* 助教授, 環境システム工学科

表-1 試料の物理特性

試料名 (分類)	含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	間隙比	液性限界 (%)	塑性指数	液性指数	粒度組成 (%)		
							砂分	シルト分	粘土分
A(CH)	95.0	1.44	2.63	57.8	21.9	2.7	3.8	59.7	36.5
B(CH)	54.7	1.62	1.58	54.4	21.0	1.0	19.0	58.7	22.3
C(MH)	68.6	1.59	1.86	50.5	17.0	2.1	35.2	40.2	24.8
D(MH)	67.7	1.58	1.83	53.8	19.5	2.7	23.1	61.3	15.6
E(SM)	50.0	1.66	1.42	38.6	6.8	2.7	57.3	25.2	17.5
F(SM)	48.2	1.72	1.35	31.3	4.6	4.7	55.5	31.6	12.9

図-1 試料の液性限界 ( $L_L$ ) とせん断強度の関係

やわらかさを示す指標である液性指数 ( $L_L$ ) を用いて表わすことにする (図-1)。試料 A, C, D, F は似た傾向を示しているが、試料 E, B はこれらとは異なる。しかし、いずれの試料においても、 $L_L$  の増大とともに  $\tau_s$  は指数関数的に減少し、ある程度の  $L_L$  以降ではほとんど抵抗性を示さなくなる。

安定材は、セメントミルクに気泡を混合したもの (気泡セメントミルク, Air Cement Milk 以下, ACM と呼ぶ) を用いた。今回用いた ACM の配合は、セメント: 水: 気泡 = 1: 1: 0.1 (質量比) に調整したものである。

気泡は、動物性蛋白質を原料とした発泡液を水で 4 倍に希釈したものを約 150kPa の圧縮空気とともに塩ビパイプ ( $\phi = 2\text{mm}$ ,  $L = 5\text{mm}$ ) の詰まった管の中を通過させることによって発泡させたシェービングフォーム状のものであり、密度は  $0.031\text{g/cm}^3$  である。セメントは普通ポルトランドセメント、水は水道水を用いた。

### 3. 試験方法

処理土の密度を決定する要因を把握するために、試料を液性指数 ( $L_L$ ) を指標に調整したのに対しそれぞれ ACM の添加率を変化させたものを混合して作成した軽量安定処理土の特性を調べた (表-2)。A~E については自然含水比を基準に、水と土が著しく分離しないような範囲で加水し、飽和度はほぼ 100% であった。試料 F は採取時からかなり時間が経過しており、含水比が著しく低下していた。加水調整後も自然含水比以下の範囲で行い、その飽和度は 80~92% であった。

表-2 配合試験条件

試料名 (分類)	試料の液性指数	ACM 添加率 P (%)
	$L_L$	
A(CH)	2.7, 3.0, 3.5, 4.0	5~30
B(CH)	1.0, 1.3, 1.5, 1.7, 1.9, 2.2	5~30
C(MH)	2.1, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0	5~30
D(MH)	1.7, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0	10~30
E(SM)	2.7, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0	5~30
F(SM)	1.0, 2.0, 3.0, 4.0	10~30

ACM の添加率 (P) は試料の乾燥質量に対する ACM に含まれるセメント質量の百分率で表し、表に示した範囲で 5% きざみとした。これらの条件による処理土供試体は次のようにして、各条件毎に 5 本ずつ作成した。

まず、試料を各条件の含水比になるように調整し、所定の配合で別途作成した ACM を所定量混合し、均一になるまで手で攪拌混合した。処理土は塩ビモールド ( $h = 10\text{cm}$ ,  $d = 5\text{cm}$ ) にタンピング充填しそのまま約 1 日養生し、脱型が可能な強度であることを確認して脱型し、質量と寸法の測定を行った。その後含水比が変化ないようにポリエチレンフィルムで密封し恒温 ( $20 \pm 3^\circ\text{C}$ ) 養生し、処理後 6 日目に封を切り同温で 1 日水没養生した<sup>1)</sup>。所定の養生が終了後、再び質量を測定した。

強度を調べるために万能試験機を用いてひずみ速度1% / minで一軸圧縮試験を行った。試験終了後、供試体の含水比測定を行った。

4. 試験結果と考察

4.1 ACM 混合による湿潤密度の変化

まず、表-2の組み合わせのうち、日本統一土質分類に基づいた異なる3種類(試料A(CH), 試料C(MH), 試料E(SM))の試料を自然含水比( $w_n$ )のまま用いて行った配合試験の結果を図-2.1に、加水して $I_L=3.5$ に調整した試料を用いた配合試験の結果を図-2.2に示す。図中の記号は処理土の実験データを用いたものであるが、軽量安定処理土は多孔材料のため水没によって吸水し湿潤密度が変化すると考えられるため、ここでは水没前の密度として算出した。

曲線は試料及びACMともに質量・体積が変化しないものと仮定して混合処理後の湿潤密度を以下の関数で計算できる。

$$\rho_t = f(P, w_0) \quad (1)$$

但し、 $w_0$ : 未処理試料の含水比

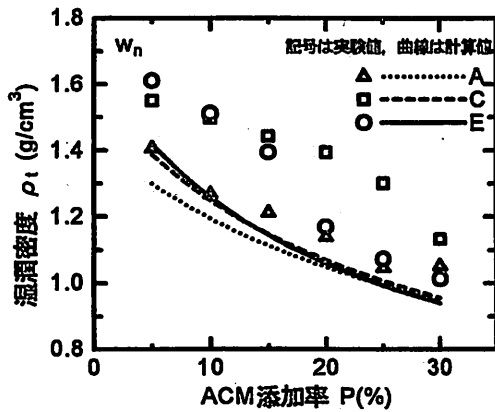


図-2.1 Pと $\rho_t$ の関係( $w_n$ )

計算値と実験値との差が試料によって異なり、特に含水比が低い(図-2.1)ほうがその差は大きい。また、Pが小さい処理土ほどその差は大きい。計算値と実験値が一致しないのは軽量安定処理土を構成する要素のうち、気泡は不安定な材料であるために混合中に消泡する可能性が大きいためである。しかし、試料の含水比が高くなることでその気泡の変化が少なくなるために計算値に近づいてゆくと考えられる。

この計算上と実験値の湿潤密度の違いを、計算上の湿潤密度に対する実験の湿潤密度の割合を湿潤密度比と

して示したのが図-3である。自然含水比の試料C, Eでは湿潤密度比が大きくなる場合も存在するが $I_L=3.5$ まで加水することによって、ばらつく幅が小さくなり湿潤密度比で1.1程度であることがわかる。

しかしながら、直接湿潤密度の変化を左右する要因は気泡であることから、この比率はACMの配合条件によって変化すると考えられる。気泡が変化しなければ式(1)のようにACMの添加率を設定すれば処理土に含まれる空気量も決定できるが、消泡が考えられるためACMの添加率をセメントミルクの添加率( $P'$ )と気泡添加率とに分離して以下の式に置き換える。気泡添加率は処理土に含まれる空気体積の全体積に対する割合として空気量率( $v_a$ )を用いる。

$$\rho_t = f(P', w_0, v_a) \quad (2)$$

この $v_a$ をコントロールすることで処理土の湿潤密度

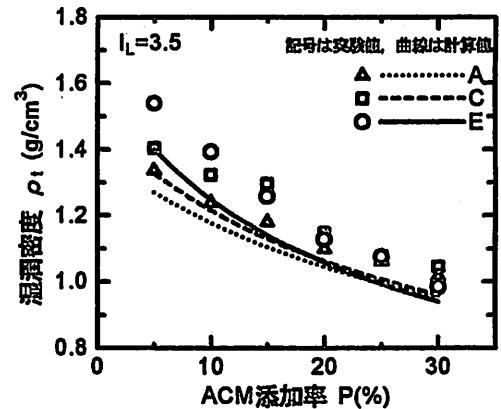


図-2.2 Pと $\rho_t$ の関係( $I_L=3.5$ )

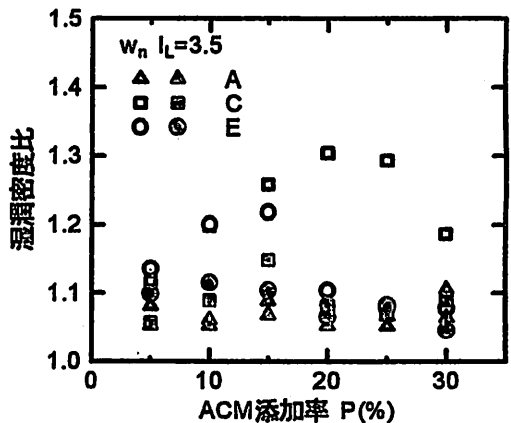


図-3 Pと湿潤密度比の関係

は変化させることができるが、そのためには消泡する度合いを把握しておく必要があることから、次に消泡について考察してゆく。

#### 4.2 混合処理時の消泡

セメントミルクに気泡を混合して ACM を作成した時点ではその密度は計算どおりであることが確認されていることから、消泡は ACM と土との混合を始めたときから起こっていると考えられる。この混合時の消泡量は式(1)のように体積を用いて消泡率という指標を用いて表わすものとする。

$$\text{消泡率} = \frac{(V_{ca} + V_a) - V_{ca}}{V_{ca} + V_a} \times 100 (\%) \quad (3)$$

但し、 $V_{ca}$  : ACM に含まれる空気量

$V_a$  : 試料に含まれる空気量

$V_{ca}$  : 処理土に含まれる空気量

この式が示す消泡率とは ACM に含まれる空気量(気泡)の減少分だけでなく、元来处理土に含まれる空気量の減少も加味している。これは、試料が飽和していない場合には混入した気泡だけではなく、土に元来含まれていた空気も処理中に変化すると思われるためである。つまり、式(3)で示す消泡率は、「試料に元来から含まれる空気」及び「ACM に含まれる空気」の合計が混合時にどれほど消滅したかを平均減少率として表わしたものである。

消泡率に影響を与える要因の一つとして混合処理時の試料の特性が考えられる。この試料の特性のうち硬軟を表わす指標として液性指数が挙げられる。その液性指数には混合処理中は試料の持つ水分だけでなく、非常に

多くの水を含む ACM の水分も考慮すべきであると考えられ ACM 中の水分のうちセメントの拘束水を除いた分が液性指数に寄与するものとして、混合時液性指数( $L'_l$ )で表わすことにした。ただし、混合処理中はセメントの水和反応が進行しないと仮定した。

この  $L'_l$  と消泡率の関係を試料 A, C, E について図-4.1~4.3 に示す。ACM の添加率が同じ場合でも異なる  $L'_l$  となる点が存在するのは、用いた試料の含水比の違いによるものである。試料 A (図-4.1) では、ACM の添加率 (P) が 5% のものは非常に消泡率が高いものの、それ以外のものについては  $L'_l$  や P の変化に関係なく 10~30% の間に分布していることが分かる。試料 C (図-4.2) では、P による違いは見受けられず  $L'_l$  の増加に伴い直線的に消泡率が低下しているが、 $L'_l > 4.0$  ではあまり変化が見られない。試料 E (図-4.3) でも P による違いは見受けられず、全体的な傾向としては右下がりであるが、 $L'_l > 5.0$  では消泡率はほぼ横ばいである。この3つの図から消泡率は ACM の添加率とは無関係に  $L'_l$  によって変化していることがわかる。

そこで、6種類全ての試料について ACM の添加率による区別をせずに  $L'_l$  と消泡率の関係を示したものを図-5 に示す。試料 A, B など塑性指数の高いものは比較的低い  $L'_l$  で消泡率が低下し一定になるが、塑性指数の低いものは高い  $L'_l$  でなければ消泡率は低下しない。しかしながら試料 F については低い  $L'_l$  から非常に低い消泡率となり他の試料とは異なる性質を示している。これは他の5試料は含水比調整後の飽和度が概ね100%であったのに対し、試料 F は試料調整後も

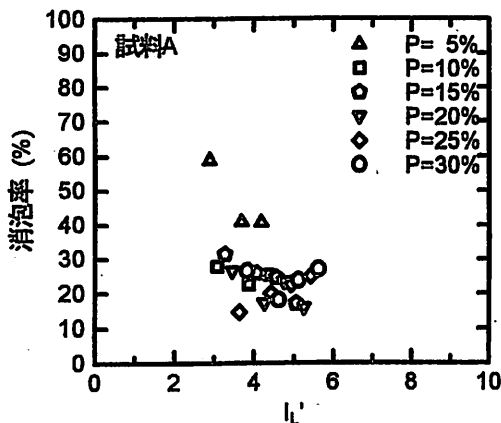


図-4.1  $L'_l$  と消泡率の関係 (試料 A)

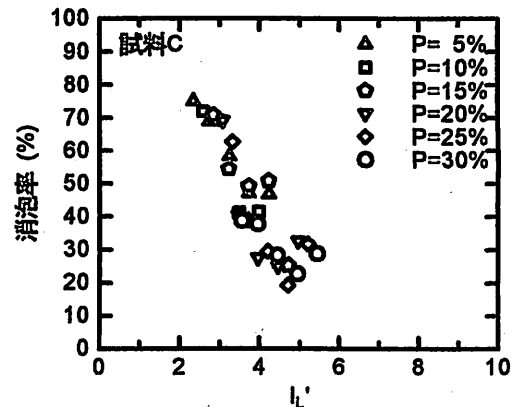


図-4.2  $L'_l$  と消泡率の関係 (試料 C)

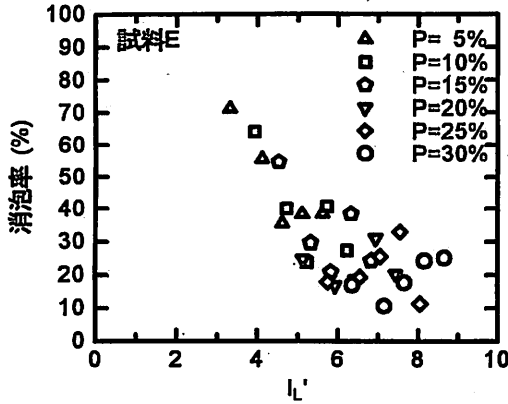


図-4.3  $L'$  と消泡率の関係 (試料E)

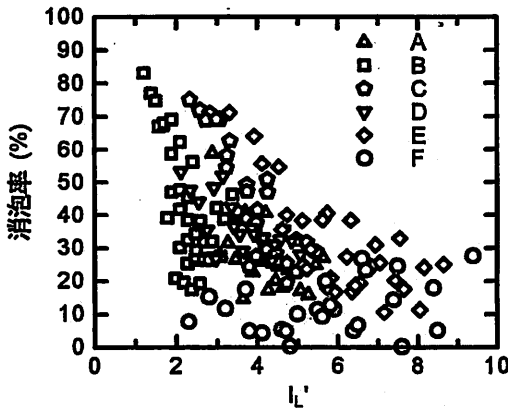


図-5  $L'$  と消泡率の関係 (全試料)

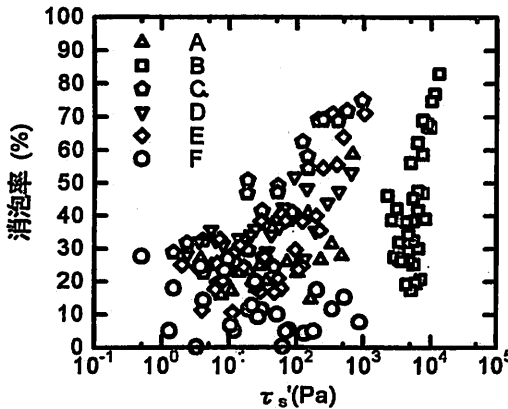


図-6  $\tau_s$  と消泡率の関係

飽和度が80~92%であったことが影響していると考えられる。このように、 $L'$  を用いることでACMの添加率の影響を土の含水状態の変化として整理することができたが、試料間の物理特性の違いによる影響は別途考慮しなくてはならない。

そこで、図-1で示した $L_L$ と $\tau_s$ の関係を用いて試料の力学特性との関連性を考察する。ここでは混合状態でのせん断強度を用いるため、 $L_L$ を $L_L'$ に置き換えて利用する。これにより得られたせん断強度 $\tau_s'$ と消泡率の関係を図-6に示す。試料Bは他の試料と別の傾向を示しているが、これは図-1の結果で試料Bだけが同じ $L_L$ でも大きなせん断強度を示していたためである。図-5、図-6の相関係数はそれぞれ0.49、0.43となっており、試料の液性指数、せん断強度と消泡率の関連付けはあまり有効でないと考えられる。

次に処理土中の空気量と消泡率との関係を考察する。試料にACMを混合を開始した時の空気量(試料とACMに含まれる空気量の合計であり全く消泡していないと仮定)を用い空気量率( $v_a'$ )を計算で求め、消泡率との関係を示したものが図-7である。ばらつきはあるものの(相関係数 $r=0.57$ )試料の違いに関わらず一つの傾向が見出せる。消泡率が非常に小さく、他の試料とは異なる傾向を示していた試料Fも同じ傾向で表わすことができ、空気量の影響も十分に考慮しなくてはならないと考えられる。

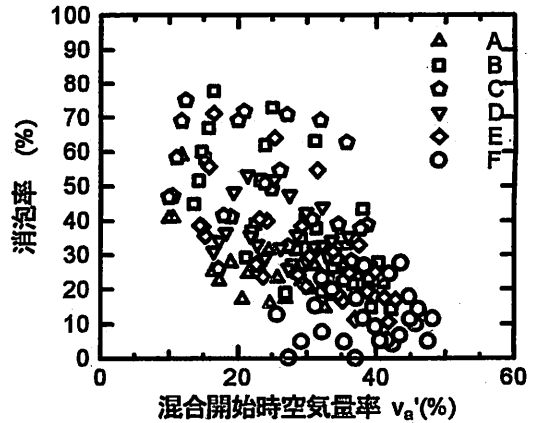


図-7  $v_a'$  と消泡率の関係

これらのことから軽量安定処理土は水、空気両方の要因を同時に考慮する必要があることがわかる。そのため、間隙比を指標として用いることにする。ここで用いる間隙比は、混合開始直後における試料とACMの間

隙比を合成し、消泡がないものとして算出した混合開始時間隙比 ( $e'$ ) とする。この  $e'$  と消泡率との関係を図-8 に示す。 $e'$  の増加に伴って消泡率が低下しており、 $e'$  が小さい部分では試料により消泡率は広い範囲に分布し図-7と同様の傾向を示しているが、これも試料 F は特異な傾向を示している。この  $e'$  は絶対的な指標であるため、それぞれの試料の相対的な指標として試料の物理特性を良く表わすパラメータである液性限界を用い、その時の隙比 ( $e_L$ ) を用い (ただし、その時の試料は飽和状態であると仮定した)、 $e'/e_L$  を指標として消泡率の関係を検討する (図-9)。これまで検討した他のパラメータに比較してよい相関 (相関係数  $r=0.66$ ) が得られ、試料による違いも小さくなっている。この  $e_L$  は軽量安定処理土の強度を推定するときにも有効であり、処理土の隙比  $e_c$  を  $e_L$  で除した  $e_c/e_L$  を用い

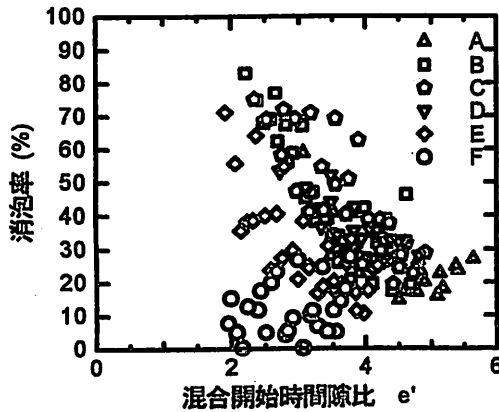


図-8  $e'$  と消泡率の関係

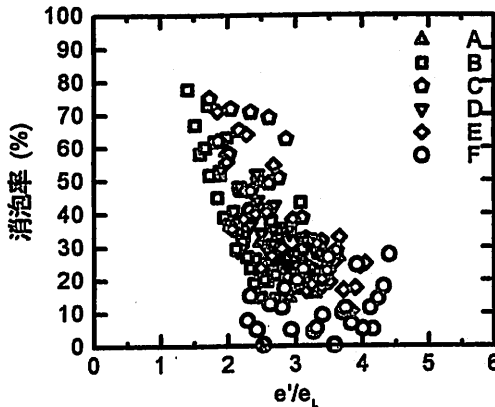


図-9  $e'/e_L$  と消泡率の関係

ると一軸圧縮強度との関係が、試料によらず一つの回帰曲線で表わすことができることも示した<sup>1)</sup>。これらのことより軽量安定処理土は液性限界状態での隙比を用いて、試料間の相対的な隙比で強度及び密度の推定が可能であることがわかった。

### 4.3 養生圧力による消泡

4.2 で示した「消泡」は気泡が土との混合による抵抗力を受けることによって空気を覆う膜が破壊されるといったイメージで捉えてきた。しかし、ACMとして作成されたときには大気圧下であるが (この時の消泡率は0%)、土と混合されることによって土圧を受け、その圧力によって気泡部の体積が圧縮減少することも考えられる。そのような観点から、軽量盛土材の養生圧力を変化させた供試体における密度を測定した結果として「軽量盛土材について養生圧力を大きくした場合、ボイルの法則によく似た傾向で気泡の体積が減少し、密度が上昇する」という報告もなされている<sup>2)</sup>。今回の試験では、初期の養生は気中であり特に加圧していないため、養生中の気泡に与える増加圧力は処理土の自重のみである。そこで、混合開始時 (消泡率=0%として算出) の処理土湿潤密度 ( $\rho_i'$ ) と消泡率の関係を図-11 に示す。密度が小さい (気泡に与える自重による圧力が小さい) ものほど消泡率が小さくなる傾向は見られる。しかし、この自重による鉛直増加荷重による体積減少量をボイルの法則を用いて算出し、消泡率を計算したものと処理厚との関係を図-12 に示した。この図からは、室内実験で行うような数~数十 cm のオーダーではほとんど影響がないことがわかる。そのため、自重による消泡率への影響は室内配合試験では無視できる。ただし、実際の地

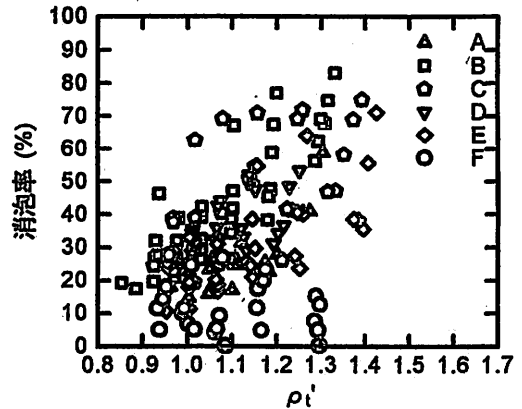


図-11  $\rho_i'$  と消泡率の関係

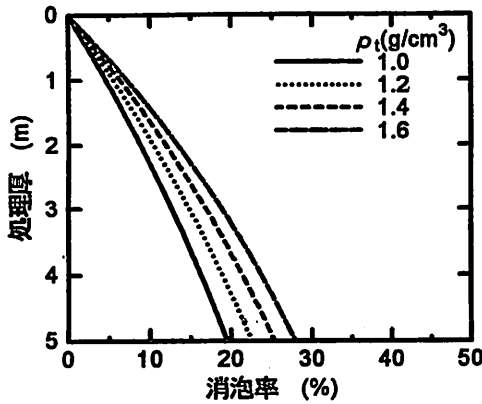


図-12 消泡率と処理厚の関係

盤において改良深さが数mにも及ぶ場合や何らかの圧力を受ける場合には、混合時の消泡に加えて養生時の消泡も考慮しなくてはならない。

5. 密度管理における配合設計方法

軽量安定処理土の配合設計では強度・密度という2つの目標値に対して配合設計を行う必要があるが、本報で得られた結果から特に密度管理に主眼を置いた配合設計法の流れを図-13のように提案する。

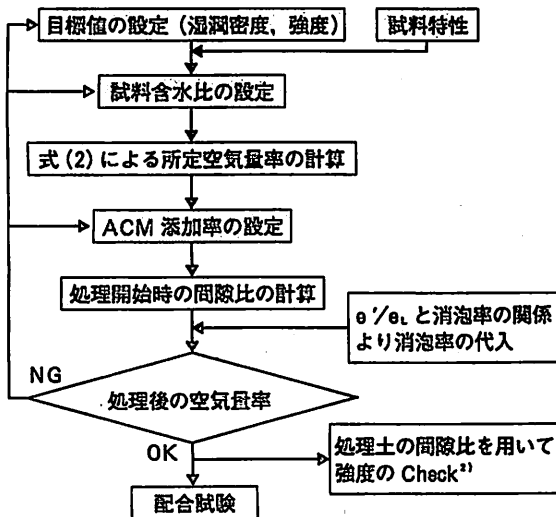


図-13 密度管理のための配合設計方法フローチャート

このフローチャート上で配合設計のために与えなければならない条件は網掛け部分である。まず、処理地盤や使用目的が決定されれば目標値(湿潤密度・強度)が設定され、対象地盤の土質特性が与えられる。その試料の含水比を設定することで、式(2)を用いて目標とする湿潤密度を得るための空気量率が算出される。次にACMの添加率を設定し、混合時の間隙比を算出する。この間隙比と液性限界時の間隙比を用いることで消泡率を推定し、それによって処理後の空気量率を得ることが可能になる。処理後の空気量率が所定の空気量率を満足しているかどうかをチェックし、もし満足していなければACMの添加率を変更して再検討する。また処理後の間隙比を用いて強度のチェックも行う。ACMの添加率を変更しても目標値が得られない場合は試料の含水比の見直しを行って再検討を行うが、それでも目標値が満足できない場合には目標値の見直しが必要となる。

この方法での配合設計による密度管理では、消泡率が処理中の間隙比で支配されるため、試料の含水比とACMの添加率をうまく組み合わせることで消泡率を最小限に抑さえ、より経済的な配合量を決めることができると考えられる。

6. まとめ

今回の試料の含水比を変化させた配合試験の結果から、以下のことがわかった。

- ・軽量安定処理土の湿潤密度を決定する要因は、未処理試料の湿潤密度と処理土の空気量率であり、その空気量率の算出には消泡率を考慮しなくてはならない。
- ・混合処理時の消泡率は、未処理試料の含水比及び気泡の混入量によって変化する。また、その消泡率はばらつきが大きい。混合開始時の間隙比を液性限界時の間隙比で除すこと( $e'₀/eₐ$ )で、試料の物理特性によらず $e'₀/eₐ$ と消泡率の間に比較的高い相関性が得られる。
- ・混合処理後も処理土の養生中に高い圧力が及ぼされる場合には、気泡が圧縮され体積が減少するため密度が増加する。ただし、室内実験レベルではその量は無視できる。
- ・試料の含水比とACMの添加率をうまく調整することで、消泡率を抑えた経済的な配合設計が可能であると考えられる。

## 参考文献

- 1) セメント協会編：セメント系固化材による地盤改良マニュアル [第二版]，セメント協会，1994
- 2) 林 泰弘，鈴木敦巳，北園芳人：軽量安定処理土の一軸圧縮特性，熊本大学工学部研究報告第43巻2号，pp 1-7，1996. 8
- 3) 財団法人道路協会：舗装試験方法便覧，丸善，pp 199-202，1995
- 4) 笠井寿太郎，土田孝，水上純一他：軽量盛土・埋立材料に及ぼす養生条件の影響について，第28回土質工学研究発表会，pp 2669-2672，1993