

気泡混合軽量土の水和反応に対する指標としての土粒子比重の検討

防災設計工学研究室 山田 正則

指導教官 海野 隆哉

1. はじめに

1.1 背景

気泡混合軽量土（以下、軽量土）は盛土荷重の軽減による軟弱地盤での圧密沈下の抑制などに用いられ、近年、施工実績が増加している改良土の一つである。軽量土において、設計や施工管理には一軸圧縮強さをを用いるのが現状であるが、一軸圧縮強さにはばらつきがみられるために、正確な一軸圧縮強さとして評価するには問題がある。玉尾¹⁾は材齢 14 日における一軸圧縮試験と物理試験を行った結果、含水比分布によって破壊形式が異なるため一軸圧縮強さがばらつくとした。また、下部で含水比が大きい供試体は下部圧縮破壊をおこすため、弱部となる原因が水であるとした。本研究では、供試体内の水分が強度発現にどのように影響を与えるか明確にするためセメントと水が凝結して強度発現する水和反応に着目した。

1.2 水和反応の指標としての物理特性の検討

水和反応の進行率を表す水和度はセメント中の水和したセメントが占める割合によって定義される。水和度の指標として、強度、結合水、ペーストの比重、水和熱が挙げられ、各材齢での変化量から水和度の測定ができる。本研究では、水和度と一軸圧縮強さの関係について検討したいことから、一軸圧縮試験後の供試体で行えるものが望ましい。水和反応後のセメントペーストの比重が軽くなる事が知られている。よって土粒子比重も小さくなる事が考えられる。また、水和反応による変化量が大きいこと、比重試験の供試体は一軸圧縮試験供試体を粉砕して作製するため、試験後に測定できることから土粒子比重の試験を行った。材齢間の土粒子比重の変化を測定し、水和度の指標として評価できるか検討した。

1.3 本研究の目的

本研究では、材齢経過にともなう一軸圧縮強さお

よび土粒子比重の変化量を測定し、簡易的な水和反応の指標としての土粒子比重の減少度合による水和度の定量化を行うことを第 1 の目的とした。また、水和度と一軸圧縮強さの関係を明らかにすることを第 2 の目的とし、各実験を実施し検討を行った。

2. 供試体の作製

本研究では、材齢 28 日での一軸圧縮強さを目標一軸圧縮強さ q_{u28} とし、表 1 に示す $q_{u28}=500\text{kN/m}^2$ 、目標密度 0.68g/cm^3 、空気量 57.8%、水セメント比 1.65 とする基本配合をもとに、母材の構成割合を変化させ、母材を固化材だけで構成した気泡ミルク配合、および基本配合と気泡ミルク配合の中間の母材構成割合になるようにした中間配合の 3 ケースにおいて各試験を行った。玉尾は採取位置を容器下端から 8cm 上昇させることで、より正確な一軸圧縮強さを測定できるとしており、供試体を作製するにあたり全ての配合で採取位置の底上げを行った。表 1 に従い、固化材、粘土、水を練混ぜたものに気泡発泡装置で発泡させた気泡を混入するプレフォーム方式で軽量土を作製し、幅 26cm × 長さ 37cm × 高さ 27cm の容器に打設後、高さ 12.5cm × 直径 5cm のモールドを容器に挿入したものを一軸圧縮試験用供試体とした。供試体は 20 恒温の部屋で湿度 90% のデシケーター内で所定の日数（3, 7, 14, 28 日）になるまで気中養生した。

表 1 配合表

配合名称	粘土 (kg/m^3)	固化材 (kg/m^3)	水 (kg/m^3)	気泡量 (l/m^3)
基本	180	180	297	578
中間	90	239	280	609
気泡ミルク	0	298	262	640

表 2 軽量土の品質

配合名称	目標密度 (g/cm^3)	生比重	目標空気量 (%)	空気量	フロー値 (mm)
基本	0.680	0.656	58	57.5	183
中間	0.610	0.584	63	62.5	175
気泡ミルク	0.560	0.544	64	63.8	183

3. 試験結果および考察

所定材齢の供試体で各試験を実施し、材齢経過における水和反応による各値の変化量を求めた。各値の変化が、最も顕著に表れた気泡ミルク配合の結果を中心に示す。

3.1 一軸圧縮試験

図1に各配合の一軸圧縮強さと材齢の関係を示す。材齢経過ともなう水和反応による強度発現し、一軸圧縮強さが大きくなることが確認された。表2より、目標密度に比べて生比重が小さいため、基本配合における一軸圧縮強さが目標一軸圧縮強さより小さくなった。

3.2 含水比試験

気泡ミルク配合における各材齢での含水比試験の結果を図2に示す。含水比は一軸圧縮試験後の高さ12cmの供試体を4cmごとに分け測定した。上部、中部、下部ともに材齢経過にともない、含水比の減少が確認できた。材齢間の含水比の減少は水和反応によるものであるとすると、材齢間の減少量が非蒸発性の水分である結合水の減少と推測される。

3.3 土粒子比重試験

土粒子比重試験の供試体には一軸圧縮試験の供試体を炉乾燥させ粉末状にすりつぶしたものをを用いた。試験はJIS A 1202土粒子の密度試験に準拠し試験を行った。図3に気泡ミルク配合における部位別の土粒子比重、図4に各配合の材齢と土粒子比重の関係を示す。部位別の結果では、材齢における土粒子比重は、部位によって含水比が異なっても、同一材齢でほぼ等しい値を示した。また、材齢経過にともない、水和反応によって水とセメントが凝結しセメント水和物を生成するため土粒子比重が減少することが確認された。図4より粘土が混合されていても土粒子比重が低下することが確認された。

以上の試験結果をまとめ、図5に土粒子比重と含水比関係、図6に一軸圧縮強さと土粒子比重関係を示す。図5、図6より材齢経過によって変化する含水比、土粒子比重、一軸圧縮強さは線形関係がみられる。材齢に関わらず、セメントが水和反応したときの強度発現による一軸圧縮強さの増大、物理特性の変化量は一定であると考えられ、土粒子比重によ

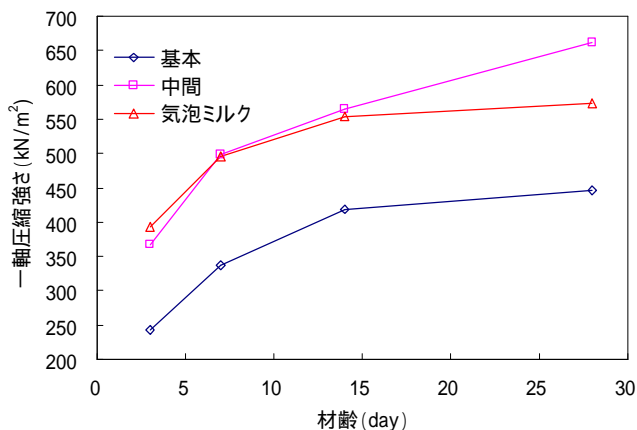


図1 各配合での材齢 - 一軸圧縮強さ関係

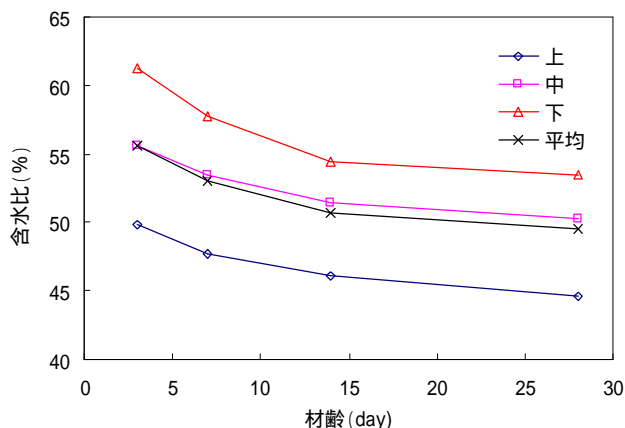


図2 気泡ミルクでの材齢 - 部位別含水比関係

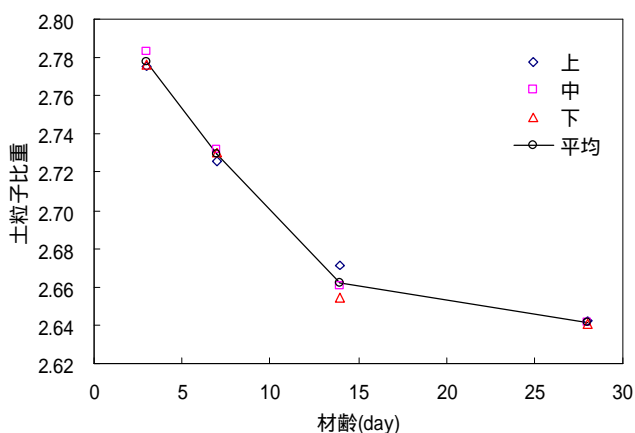


図3 気泡ミルクでの材齢 - 部位別土粒子比重関係

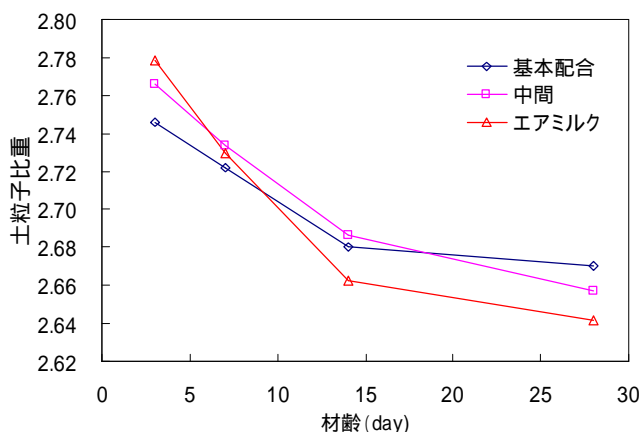


図4 各配合での材齢 - 土粒子比重関係

る水和度の定量化が可能と考えられる。

4. 水和度の算定

水和反応によって土粒子の比重が減少することが確認でき、水和したセメントによる土粒子比重の変化は一定であると考えられる。セメントが 100% 水和したときの土粒子比重が算出できれば、比重差を算定することで水和度を定量的に表すことができると考えた。

水和度 100%のときの土粒子比重 G_{c100} について、セメント質量 100 g の場合、以下のように算出する。なお、算定式による水和度 100%の土粒子比重は気泡ミルク配合におけるものであり、他配合における水和度 100%の土粒子比重は、理論値により算出した土粒子比重 G_{c100} 、粘土の比重 2.7、母材の構成割合から算定した。

初期のセメント比重 G_{c0} は 3.04 であることから、100 g に対するセメント容積は、

$$V'_c = \frac{m'_c}{G_{c0}} = \frac{100}{3.04} = 32.9\text{ml} \quad (1)$$

ここに、

- V'_c : セメントの容積
- m'_c : セメントの乾燥質量
- G_{c0} : 乾燥セメント比重

となる。次に、セメントの水和反応によりセメントの重量の 23% が結合水となり、結合水量は $100 \times 0.23 = 23\text{g}$ となる。セメントの容積と結合水の容積を加えたものが水和固体生成物の容積となるが、水和反応による容積の減少をともなうため、結合水からその 0.254 倍を引いたもの水和固体生成物の容積となる。すなわち、

$$V'_{cs} = V'_c + 0.23 \times m'_c (1 - 0.254) = 50.2\text{ml} \quad (2)$$

ここに、

- V'_{cs} : 水和固体生成物の容積

となり、水和固体生成物の容積 50.2ml となる。

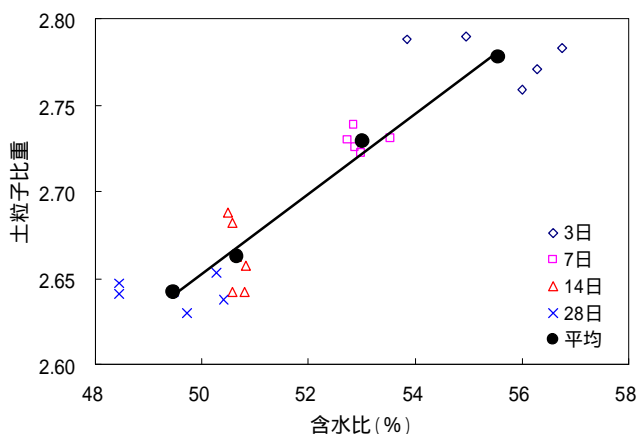


図5 気泡ミルクでの土粒子比重 - 含水比関係

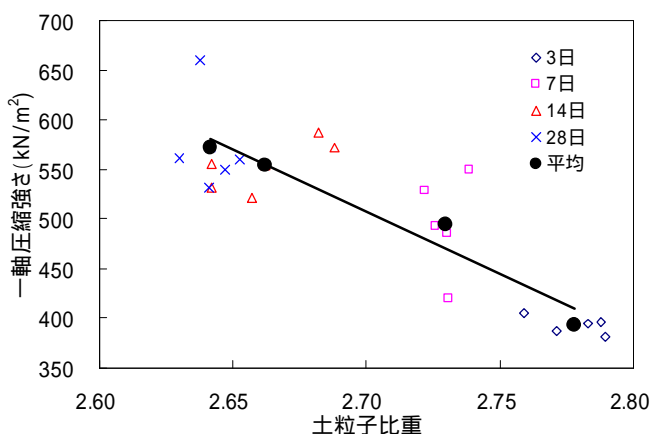


図6 気泡ミルクでの一軸圧縮強さ - 土粒子比重関係

セメントペーストはゲル水や自由水もふくまれるが、ゲル水や自由水は炉乾燥により蒸発するため考慮の必要がないと考えた。よって、水和度 100%の土粒子比重 G_{c100} は、

$$G_{c100} = \frac{m'_c + 0.23m'_c}{V'_{cs}} = \frac{123}{50.2} = 2.457 \quad (3)$$

となる。以上の算出した理論値を用いて、 X 日における水和度算定する。水和度 100%の土粒子比重と水和度 0%の土粒子比重の差を最大比重差 A_{max} とする。水和度 0%の土粒子比重と試験により測定された X 日の材齢での土粒子比重 G_x の差を A_x とすると、 X 日の水和度 B_x は、

$$B_x = \frac{A_x}{A_{max}} \times 100 = \frac{C_0 - G_x}{G_0 - G_{100}} \times 100 \quad (4)$$

ここに、

- B_x : X 日の水和度(%)
- A_x : 材齢 X 日の比重差

G_x :材齢 X日の土粒子比重

A_{max} :最大比重差

となる．式(4)より各配合で水和度を算出した結果を図7に示した．水和度は配合に関わらず，同材齢ではほぼ等しいため，水セメント比，空気量，セメントと粘土の混合割合に影響を受けず一定の速度で反応する．また，上，中，下の含水比の異なる部位で測定したが，ほぼ比重が等しかったため，含水比の大きさによる水和度の差異はないことが確認できた．算出された気泡ミルク配合における水和度と一軸圧縮強さの関係を図8に示す．水和度と一軸圧縮強さはほぼ比例関係を示すことから，水和反応による強度発現を考慮した一軸圧縮強さの推定が可能である．

5. 水和度を用いた局所的な物理特性の検討

図9に基本配合の各高さにおける100cm³中の水と母材の体積を示した．水和速度は含水比に関わらず一定であることから，各高さの骨格のセメンテーションも一定である．上部と下部で母材の体積に1cm³程度の差があり，全体の母材の体積が13 cm³程度であるため，上部と下部で約7%体積に差がある．骨格の強さが一定であることから，上部と下部の体積量が強度の差と考えられ，下部圧縮破壊を起す要因であると推測でき，局所的な強度の特性と考えられ，水和度は考えなくて良いことがわかった．

6. 結論

本研究で得られた知見は以下のとおりである．

- ・ 水和反応により各物理特性，一軸圧縮強さに変化が生じることが確認することができた．
- ・ 材齢間での土粒子比重差により，セメントの水和進行度を示す水和度を定量的に表すことができた．
- ・ 算出された水和度と一軸圧縮強さは，ほぼ比例の関係にあるため，同一配合においては土粒子比重を測定することで一軸圧縮強さの推定ができる．
- ・ 局所的な強度に関していえば，水和度は関係がないため，母材の体積の差が弱部を作る原因である．

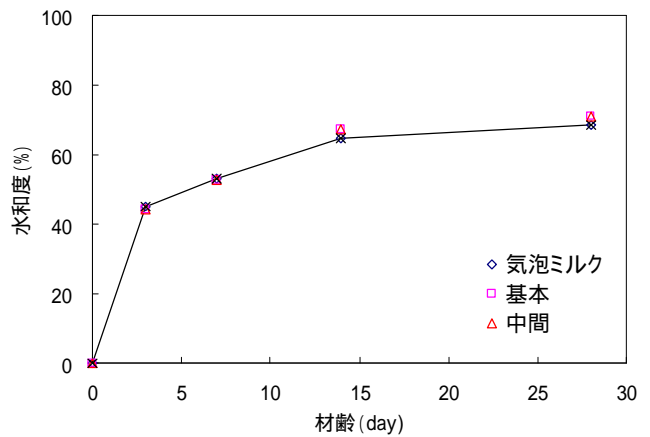


図7 材齢 - 水和度関係

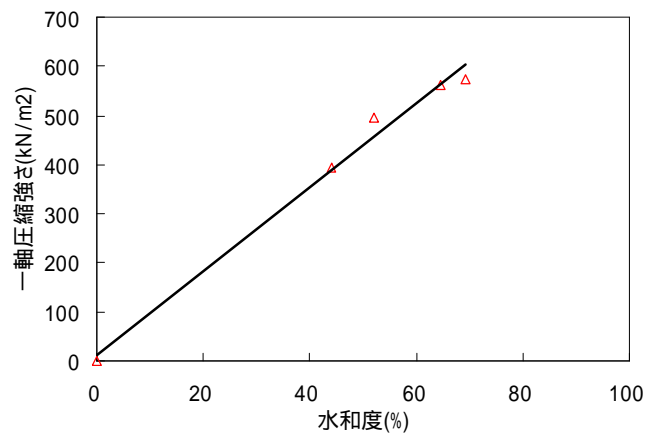


図8 気泡ミルクでの水和度 - 一軸圧縮強さ関係

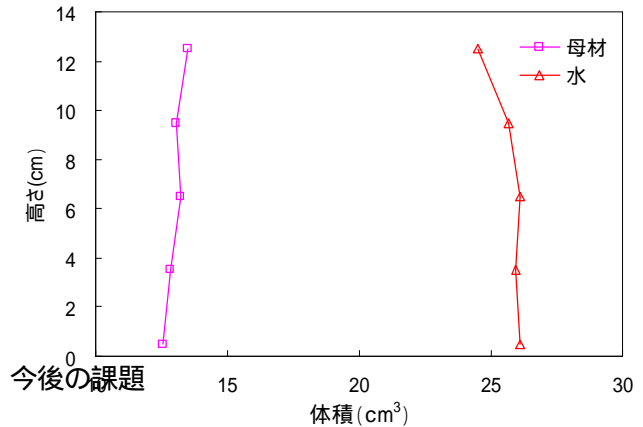


図9 基本配合における体積分布

- ・ 炉乾燥による水和度への影響の検討
- ・ 別配合でのデータの蓄積
- ・ 固化材を変えた配合でのデータの蓄積

【参考文献】

1)玉尾由享：気泡混合軽量土の局所的物理特性に関する研究，長岡技術科学大学大学院，2004