

気泡混合軽量土の局所的物理特性に関する研究

防災設計工学研究室 玉尾 由享
指導教官 海野 隆哉

1. はじめに

気泡混合軽量土(以下、軽量土)は盛土荷重の軽減による地盤沈下の抑制、擁壁などに作用する土圧の軽減などに効果があることから、近年、施工事例が増えている改良土である。この軽量土の設計や品質管理において一軸圧縮強さをを用いているのが現状である。しかし軽量土供試体を用いて一軸圧縮試験を行った場合、土とは異なる力学挙動や破壊形式を示すことから、正確な一軸圧縮強さを評価するには問題があると考えられる。しかし、このような軽量土特有の性質について報告された事例は少ないことから、本研究では軽量土供試体の物理特性が力学挙動や破壊形式に与える要因を求めることを目的として、供試体に対して各種物理試験および力学試験を行い検討した。

2. 基本配合の軽量土に対する一軸圧縮試験

表1に目標密度 0.68g/cm^3 、水セメント比(W/C)1.65、空気量(Air)57.8%の軽量土の配合(以下、基本配合という)を示した。使用材料は、粘土に住友大阪セメント(株)製のスミクレー、固化材にタフロック、起泡剤にサン・オリエン化学(株)製の動物性蛋白質系起泡剤のグルフォームNo.200を用いた。一軸圧縮試験で用いた供試体は粘土・固化材・水を練り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混合し、練り混ぜ後の軽量土を幅 26cm ×長さ 37cm ×高さ 14cm のプラスチック容器に打設した後、直径 5cm ×高さ 12.5cm のモールドを挿入し、硬化後にモールドから脱型する方法で作製した。なお、物理試験用供試体も同じ容器内で作製した軽量土を用いた(図1)。脱型後は外気に触れないようラップで覆い、恒温恒湿状態で14日間養生し、試験を行った。

写真1に軽量土の一軸圧縮試験後に見られる破壊形式の一例を示した。基本配合では45本中40本(約90%)でBのような下部での圧縮破壊を生じた。このことから、供試体の下部が弱部となって局所的に破壊していることから供試体の要素性が失われており、その他の破壊形式とは異なって全体的な破壊を呈していないため、一軸圧縮強

さの適切な評価を行えないと考えられる。

図2に応力-ひずみ曲線の一例を示した。ほとんどの供試体でひずみ硬化型の挙動を示し、平均一軸圧縮強さは 414kN/m^2 であった。

次に破壊形式と力学挙動の検討を行うために、配合を変化させた軽量土を作製し試験を行った。

表1 配合表(1 m^3 あたり)

配合名称	粘土(kg)	固化材(kg)	水(kg)	気泡量(l)
基本配合	180	180	297	578

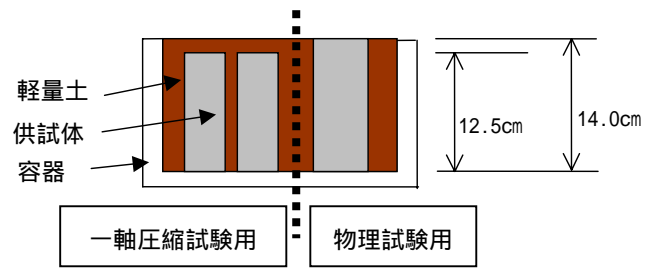


図1 一軸圧縮試験用、物理試験用供試体作製位置

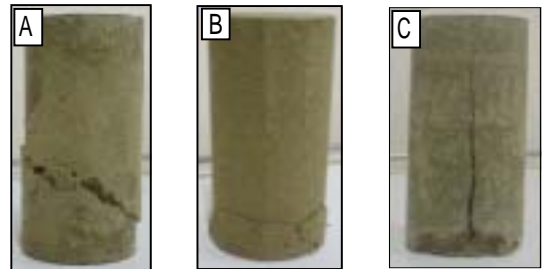


写真1 軽量土の破壊形式

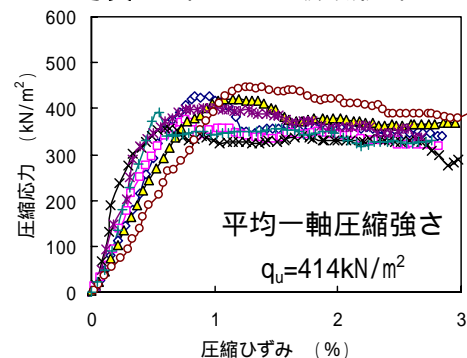


図2 応力-ひずみ曲線

3. 配合を変えた軽量土の一軸圧縮試験

表2に基本配合を元に水セメント比を変えた配合(W/Cシリーズ)と、空気量を変えた配合(Airシリーズ)の配合表を示した。この配合表に従い、

先に述べた方法で軽量土を作製した。次にこれらの軽量土に対して行った一軸圧縮試験の結果について述べる。

供試体の破壊形式に着目すると、W/C が小さい場合は、局部圧縮破壊以外にもせん断破壊や割裂破壊などが確認された。一方、W/C が大きくなると局部圧縮破壊が数多く確認された。

図3にW/Cシリーズの応力-ひずみ曲線を示した。水セメント比の小さい軽量土供試体では一軸圧縮強さが大きくなり、ひずみ硬化-軟化型の挙動を示したが、水セメント比が大きくなるほど一軸圧縮強さは小さくなり、ひずみ硬化型の挙動が多く確認された。以上のことから単位体積重量の小さな配合ほど圧縮破壊を生じ、一軸圧縮強さが小さくなることがわかった。Air 配合でも同様の結果が得られたことから、破壊形式・強度・変形特性にバラツキを与える要因として、供試体内の骨格を構成する母材と間隙の比が供試体内の位置によって変動するためではないかと考え、供試体の鉛直方向の湿潤密度分布を測定することとした。これと同時に含水比、材料の体積にも注目し、測定を行った。

表2 配合表 (1m³当り)

配合名称	粘土 (kg)	固化材 (kg)	水 (kg)	気泡量 (l)
W/C1.3	212	212	275	578
W/C1.5	194	194	286	578
W/C1.8	167	167	304	578
W/C2.0	156	156	312	578
Air20%	340	340	561	200
Air40%	255	255	420	400
Air65%	149	149	246	650
Air70%	127	127	210	700

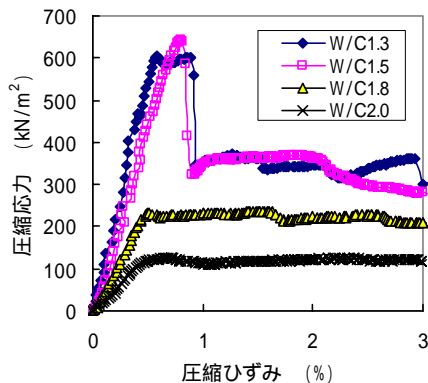


図3 W/Cシリーズの応力-ひずみ曲線

4. 軽量土内の物理特性

4-1 湿潤密度試験と含水比試験

試験はJIS A 1225『土の湿潤密度試験方法』に記載されているパラフィン法に従って行い、密度の測定には電子比重計(写真2)を用いた。また、これと同時にJIS A 1203『土の含水比試験』に従い、含水比の測定も行った。試験で用いた軽量土は一軸圧縮試験用供試体と同バッチで作製した物理試験用供試体を使用した。そして一軸圧縮試験同様、材齢14日で試験を行った。湿潤密度試験と含水比試験で使用したサンプルは物理試験用供試体から高さ1cmごとの碎片より取り出した。試験結果の一例としてAir65%配合の湿潤密度試験および含水比試験の結果を図4に示す。

湿潤密度については、全断面の結果が $\rho_t=0.55$ (g/cm³)付近に分布していることがわかる。つまり湿潤密度からは軽量土供試体の破壊形式に影響を与える要因を見出せないことがわかった。これに対し、含水比は軽量土下部において急激に増加する傾向にあることが分かった。これは下部で局部圧縮破壊する軽量土に共通して見られた傾向であった。



写真2 電子比重計

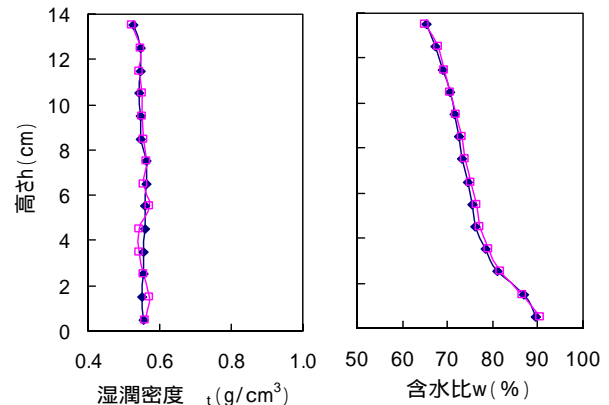


図4 Air65%配合の湿潤密度および含水比の分布

4-2 軽量土内の各材料の体積分布

軽量土内の各材料の体積分布を算出するために必要となるパラメーター ρ_s を得るため、JIS A

1202『土粒子の密度試験』に従って試験を行った。なお、試料の脱気には真空デシケーターと真空ポンプ（負圧：-100kPa）を用いた。試験によって得られた土粒子の密度 ρ_s と、4-1の湿潤密度 ρ_t と含水比 w の結果から、試料の体積を $V=100(\text{cm}^3)$ とした場合の各材料の体積（水 V_w 、母材 V_s 、空気 V_a ）を算出した。計算に使用した式は以下のとおりである。

$$\rho_d = \frac{\rho_t}{1 + \frac{w}{100}} \quad (\text{式 1})$$

ここで ρ_t : 湿潤密度 (g/cm^3)
 w : 含水比 (%)

$$V_w = m_w = V \cdot \rho_t - V \cdot \rho_d \quad (\text{式 2})$$

$$V_s = \frac{\rho_d}{\rho_s} \cdot V \quad (\text{式 3})$$

$$V_a = V - (V_w + V_s) \quad (\text{式 4})$$

図5に算出した Air65%配合の各材料の体積を示した。空気の体積に注目すると、軽量土下部で上部よりも空気量が少ない傾向にある。これは全配合で共通して見られた傾向であった。理論的に考えて、空気が少ない部位では骨格が密な状態にあり、その他の部位と比較すると高い強度を持つと考えられる。しかし実際に一軸圧縮試験を行った場合、下部において圧縮破壊を生じ、理論とはまったく異なった挙動を示した。このことから、空気の体積分布が破壊形式に与える影響は少ないと考えられる。そこで母材と水の関係、つまり含水比によって破壊形式の検討を行うこととした。

そこで図6に各配合の一軸圧縮試験で見られた破壊形式から、圧縮破壊とその他の破壊に分類し破壊形式別の含水比分布を示した。圧縮破壊を生じた場合、供試体下部（0.5~2.5cm）の含水比 W_b が中部（5.5~8.5cm）での値 W_m の 1.10 倍であり、せん断や割裂破壊を生じた場合は 0.99 倍であったことから、下部の含水比が中部よりも高い場合に圧縮破壊が生じる可能性が高いと考えることができる。なお、ここで供試体中部の含水比を基準とした理由は、配合から算出した軽量土の理論

含水比が中部の値とほぼ一致するためである。

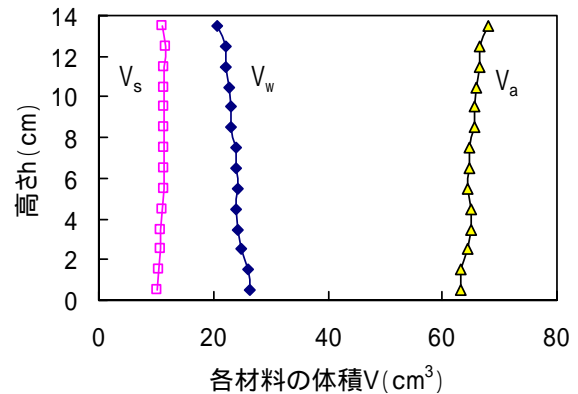


図5 Air65%配合の各材料の体積分布

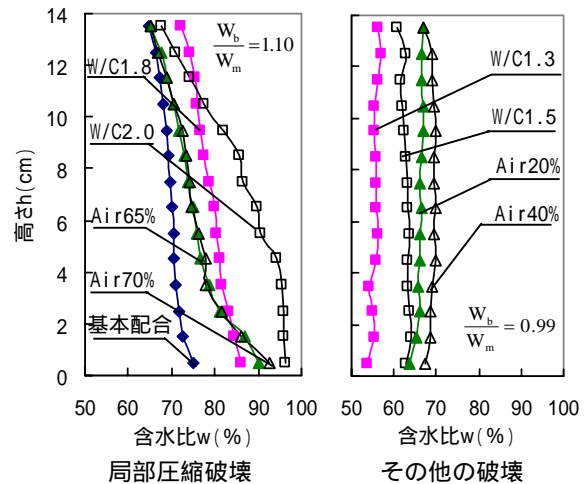


図6 破壊形式別の含水比分布

5. 供試体採取位置を変化させた軽量土

5-1 供試体作製方法

一連の研究では、図1に示したように容器の最下端付近の部位を含んで供試体を作製していた。しかしこれまでの結果より、単位体積重量の小さな軽量土を作製する際、図1の方法では含水比の影響を受けることで弱部が存在すると考えられる。そのため一軸圧縮試験を行っても供試体下部で圧縮破壊が見られ、適切な一軸圧縮強さの評価を行うことはできないと考えられた。そこで供試体採取位置を容器の最下端から6cm上げて一軸圧縮試験用供試体を21本と物理試験用供試体を作製（以下、底上げ供試体）し、検討を行った（図7）。なお、ここで使用した軽量土は基本配合にしたがって作製したものである。

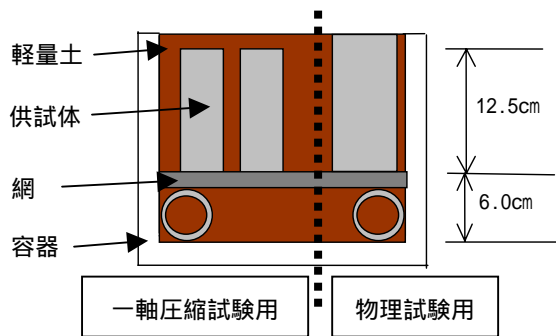


図7 底上げ供試体の採取位置

5-2 一軸圧縮試験

図8に底上げ供試体の応力-ひずみ曲線を示した。基本配合と異なる点として、ひずみ硬化-軟化型の挙動が多く見られ、平均一軸圧縮強さが499kN/m²となったことが挙げられる。これに対し、基本配合の平均一軸圧縮強さは414kN/m²であったことから、底上げによって変形特性が変化し、強度も1.21倍になったことが伺える。また、底上げ供試体に対し一軸圧縮試験を行った結果、基本配合とは異なる破壊形式を示した。基本配合では90%の供試体において下部での圧縮破壊を生じたが、底上げ供試体は圧縮破壊が33%、せん断や割裂破壊が67%となったことが確認された。

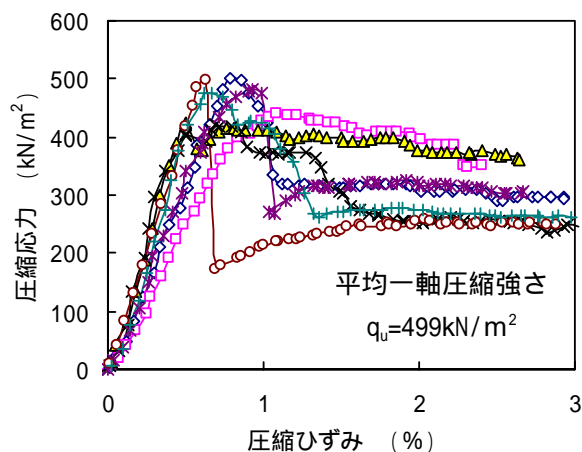


図8 底上げ供試体の応力-ひずみ曲線

5-3 含水比試験

4-2より、含水比の分布傾向によって軽量土供試体の破壊形式が分類できることが明らかとなったことから、基本配合と底上げ供試体の含水比を図9に示した。底上げ供試体の含水比は基本配合と異なり、下部において急激な上昇をする様子は見られず、供試体下部での含水比は中部の値に比べ1.02倍であることがわかった。若干含水比

が供試体下部で高い値となるため圧縮破壊が完全に生じなくなることはなかったが、せん断や割裂破壊を多くの供試体で生じるようになったと考えられる。

底上げ供試体についての見解を述べる。

一軸圧縮試験により圧縮破壊が減り、せん断や割裂破壊が増えたこと、応力-ひずみ曲線で見られる挙動が変化し、一軸圧縮強さが増加したこと、下部における含水比の急激な増加が見られないことから、底上げによって含水比の不均衡の部分を軽減でき、より適切な一軸圧縮強さの評価ができるようになったと考えられる。

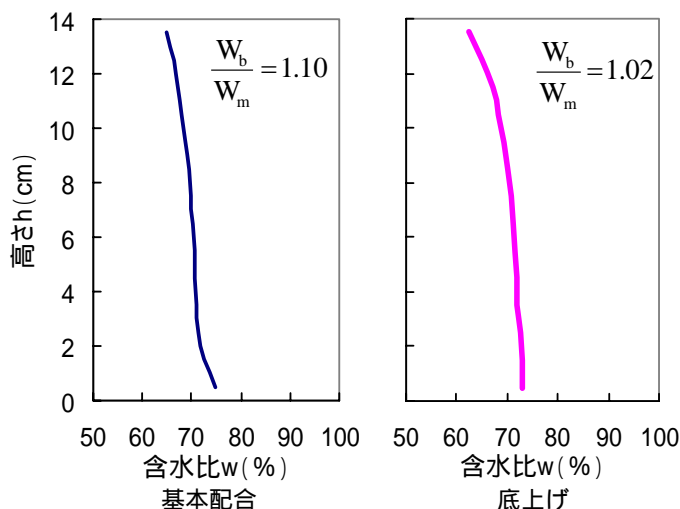


図9 基本配合と底上げ供試体の含水比分布

6. 結論

含水比の分布から軽量土供試体の破壊形式を分類できることがわかった。また、底上げを行うことで含水比の影響を少なくすることができ、より適切な一軸圧縮強さの評価が可能になると考えられる。

しかし、今回の研究で用いた配合は水セメント比と空気量をそれぞれで変化させたものであり、これらを同時に変化させた配合を行っていないこと、さらに本研究では容器に打設した軽量土に対して試験を行ったものであることから、配合ケースの拡張と、実際に施工される軽量土に対する検討を行うことの2点が今後の課題である。

【参考文献】

- 1) 軽量地盤材料の物理評価に関する研究委員会：軽量地盤材料の開発と適用に関するシンポジウム発表論文集，社団法人 地盤工学会，2000。