

気泡混合軽量土における応力-ひずみ関係のモデル化

Modeling of Stress-strain Relationships for Foamed Mixture Lightweight Soil

亀井健史 Takeshi KAMEI

(島根大学総合理工学部)

志比利秀 Toshihide SHIBI

(島根大学総合理工学部)

本研究では、2つの双曲線からなる応力-ひずみ関係近似モデルの気泡混合軽量土への適用性について検討している。気泡混合軽量土の試験条件としては、混入する母材の違い、水セメント比および高温履歴の影響の違いを対象とした。その結果、本研究で用いた2つの双曲線による近似モデルは、種々の異なる実験条件下で得られた応力-ひずみ関係を比較的よく表現できるモデルであることを実証した。また、モデル適用の際に用いられる物性値の簡便な決定法についても提案している。

キーワード：応力-ひずみ関係、温度効果、軽量土、ひずみ軟化 (IGC : D06, M05)

1. はじめに

軟弱地盤上に構造物を安全に築造するには、基本的に地盤改良を行って基礎地盤を強化するか、上部構造物を軽量化するかのどちらかに分けられる。しかしながら、昨今の社会情勢のなかでは地盤改良を行うよりも基礎地盤の耐力に見合った上部構造物を造ることが経済的であるとの観点から軽量化された土などを盛土材として利用する軽量盛土工法が盛んに行われるようになってきた。

この軽量盛土工法に用いられる軽量盛土材には、発泡スチロール (EPS) を始めとして種々の材料がある。その中でも高速道路の建設などに利用され、最近注目を集めている軽量盛土材として、気泡混合軽量土 (Foamed Mixture Lightweight Soil) がある。この気泡混合軽量土は、セメント、地盤材料、水および起泡剤から作製されることから、添加するセメント量や混合する起泡剤等を適宜調整することによって使用目的に応じた流動性や軽量化率、強度を有する盛土が可能となる。したがって、軟弱地盤上への盛土築造する際に、盛土材として気泡混合軽量土を用いれば、総沈下量や不同沈下を抑制することが可能となる。さらに気泡混合軽量土で築造された土構造物は施工後その強度が増加し自立することから、橋台や擁壁などの裏込め材として利用する場合には、構造物に作用する土圧の軽減にも繋がる。また、その流動性や自硬性から、締固めが困難な場所への埋め戻し材や充填材などとしても用いられている。

上記したような気泡混合軽量土の特徴から、その施工実績は近年確実に増加している。しかしながら、気泡混合軽量土を施工する際には、打設用型枠からの気泡混合軽量土の漏出や盛土面でのクラックの発生、表層剝離などの問題点¹⁾に留意する必要がある。また、気泡混合軽量土打設時には、セメント水和熱の発生に伴い内部の温度が急激に上昇し、打設後1日程度で60℃~90℃程度に達することが報告されており^{2)~6)}、このような多量の

熱の発生が気泡混合軽量土の一軸圧縮特性に大きな影響を及ぼす可能性が指摘されている²⁾。

一方、軽量土を用いた土構造物の変形・破壊状態を予測するためには、材料的非線形性を考慮した力学モデルが必要となる。このような観点から、弾塑性モデルや Duncan-Chang モデル⁷⁾、Cam-clay モデル⁸⁾などを軽量土に用いた報告例⁹⁾がある。これらの力学モデルから得られる応力-ひずみ関係は、拘束圧が大きく、ひずみ硬化する場合には、実験結果との間に比較的よい一致が認められる。しかしながら、拘束圧が小さく、ひずみ硬化後軟化する場合には、応力値がピーク値に達した後のひずみ軟化挙動をこれらの力学モデルから予測することは難しい。一方、プラダンら¹⁰⁾は、発泡ビーズ系混合軽量土を対象として、ひずみ硬化後軟化挙動を示す場合の力学モデルを2つの双曲線モデルによって近似する方法を提案している。この方法は、ひずみ硬化軟化挙動を示す材料の応力-ひずみ関係を非常に高い精度で再現できる。また、矢島ら¹¹⁾は、この2つの双曲線モデルで近似する方法を気泡混合軽量土の応力-ひずみ関係に適用し、母材が粘性土で初期間隙比 (1.7~2.8) と一軸圧縮強さ (0.1MN/m²~0.3MN/m²) が特定の範囲の場合には良好な結果が得られることを報告している。以上のことから軽量土の力学モデルに関しては、特定の条件下である程度予測可能であるのに過ぎず、また施工現場において認められる温度上昇の影響などは考慮されていないのが現状である。

そこで本研究では、2つの双曲線モデルによって近似する方法を用いて、種々の条件下で得られる気泡混合軽量土の応力-ひずみ関係のモデル化を行う。具体的には、石炭灰やシルト、粘土のように異なる地盤材料を母材とした気泡混合軽量土をそれぞれモデル化し、実験結果との比較を行うことにより、母材の違いによらず応力-ひずみ関係が近似できることを確認する。また配合条件(水セメント比)や初期養生温度が異なる気泡混合軽量土の

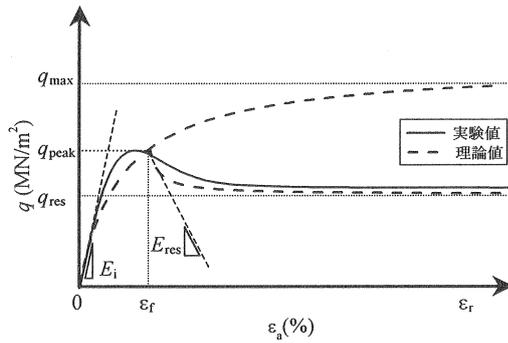


図-1 双曲線モデルによる軸差応力-ひずみ関係のモデル化

応力-ひずみ関係のモデル化を行う。その際、モデル化に用いる入力物性値については、それぞれ水セメント比や初期養生温度から決定する。2つの双曲線モデルによる近似式から得られた応力-ひずみ関係と実験結果を比較検討することによって、本近似式の気泡混合軽量土の応力-ひずみ関係への適用性を検討する。

2. 双曲線モデルによる気泡混合軽量土の応力-ひずみ関係のモデル化

気泡混合軽量土や発泡ビーズ混合軽量土の応力-ひずみ関係は、図-1の実線に示すように、軸ひずみ値の増加に伴い応力値が急激に増大しピーク値に達する。軸ひずみがさらに増加すると、応力値は徐々に減少してゆき、最終的にはほぼ一定値となる。このようにひずみ硬化後軟化を示す応力-ひずみ関係を2つの双曲線モデルにより近似する方法が提案されている^{10), 11)}。

この方法では、軸差応力 (q) - 軸ひずみ (ϵ_a) 関係において最大軸差応力 (q_{peak}) となる破壊ひずみ (ϵ_f) までは、次式を用いて近似する。

$$q = \frac{q_{max} E_i \epsilon_a}{q_{max} + E_i \epsilon_a} \quad (0 < \epsilon_a < \epsilon_f) \quad (1)$$

ここで、 E_i は変形係数を表している。また、 q_{max} は応力-ひずみ関係から外挿して得られる軸差応力を表し、次式で求められる。

$$q_{max} = \frac{q_{peak} E_i \epsilon_f}{E_i \epsilon_f - q_{peak}} \quad (2)$$

一方、破壊ひずみ以降の応力-ひずみ関係は、次式で表される。

$$q = q_{peak} - \frac{(q_{peak} - q_{res}) E_{res} (\epsilon_a - \epsilon_f)}{(q_{peak} - q_{res}) + E_{res} (\epsilon_a - \epsilon_f)} \quad (\epsilon_a > \epsilon_f) \quad (3)$$

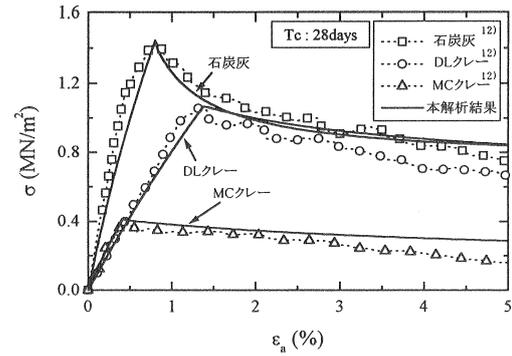


図-2 各種母材を用いた場合の応力-ひずみ関係とその双曲線モデル

表-1 各種母材を用いた場合の入力物性値 (Tc = 28days)

材料	q_u (MN/m ²)	E_{50} (MN/m ²)	ϵ_f (%)	q_{max} (MN/m ²)	q_{res} (MN/m ²)	E_{res} (MN/m ²)
石炭灰	1.43	240	0.79	5.82	0.75	105
DLクレー	1.07	90	1.38	7.73	0.67	14
MCクレー	0.41	120	0.41	2.46	0.16	5

ここで、 E_{res} は軟化時の変形係数を、 q_{res} は残留軸差応力を表している。本研究では、実務の設計においては一軸圧縮試験結果が用いられることが多いことやモデルを簡略化するため、一軸圧縮試験結果に限定して応力-ひずみ関係をモデル化する。したがって、軸差応力 (q) を軸差応力 (σ) に、最大軸差応力 (q_{peak}) を一軸圧縮強さ (q_u) に、変形係数 (E_i) を変形係数 (E_{50}) に置き換えることとする。したがって、5つの入力物性値 q_u 値、 E_{50} 値、 ϵ_f 値、 q_{res} 値、 E_{res} 値を得ることにより、応力-ひずみ関係を求めることが可能となる。

3. 種々の母材を用いた気泡混合軽量土の応力-ひずみ関係

種々の母材を用いた気泡混合軽量土の応力-ひずみ関係を2つの双曲線モデルによって近似し、工学的に十分な精度でモデル化可能かを検討する。既に著者らの一人によって、石炭灰、シルト、粘土などの母材を用いた気泡混合軽量土の一軸圧縮試験が実施されており、図-2はその際に得られた応力-ひずみ関係を示している¹²⁾。図より、母材の違いによらず応力-ひずみ関係は、前述したようなひずみ硬化後軟化を示す関係となっている。しかしながら、母材の種類の違いによって一軸圧縮強さ (q_u) や変形係数 (E_{50}) といった一軸圧縮特性に大きな違いが認められる。したがって、双曲線モデルによって近似するために必要な5つの入力物性値を各母材ごとに求める必要がある。応力-ひずみ関係から、これらの入力物性値を求めると表-1のとおりとなった。なお表中には、これらの入力物性値から式 (2) を用いて計算される

表-2 水セメント比と養生 28 日における一軸圧縮特性の関係 ($0.9 \leq W/C \leq 1.1$)¹³⁾

$q_u = -7.45 (W/C) + 9.82$	(MN/m ²)
$E_{50} = -1090 (W/C) + 1430$	(MN/m ²)

表-3 種々の水セメント比を用いた場合の入力物性値 (S/C = 1.0, Tc = 28days)

W/C	q_u (MN/m ²)	E_{50} (MN/m ²)	ϵ_f (%)	q_{max} (MN/m ²)	q_{res} (MN/m ²)
0.9	3.12	449	0.84	8.08	0.56
1.0	2.37	340	0.84	6.53	0.56
1.1	1.63	231	0.84	5.54	0.56

q_{max} 値もあわせて示している。

最終的に、表-1 の入力物性値から応力-ひずみ関係を 2 つの双曲線モデルによって近似すると、図-2 の実線となる。本解析から得られた応力-ひずみ関係と実験から得られた関係を比較すると、2 つの双曲線モデルから近似した応力-ひずみ関係は実験結果を非常によい精度で再現していることがわかる。以上は、入力物性値を実験から得られた応力-ひずみ曲線から決定したが、以下入力物性値を水セメント比等の既知の情報から決定することによって応力-ひずみ関係をモデル化する。

4. 水セメント比が異なる気泡混合軽量土の応力-ひずみ関係

先述したように気泡混合軽量土は、添加する固化材や混合する起泡剤の量、すなわち配合条件を調整することにより、使用目的に応じた流動性や軽量化率、強度を得ることができる。したがって、配合条件から気泡混合軽量土の応力-ひずみ関係が推定できることが実用上望ましい。そこで、配合条件をパラメータとして、気泡混合軽量土の応力-ひずみ関係のモデル化を試みる。ここでは、土セメント比 (S/C) が 1.0 で、品質管理規準を満足させる水セメント比 (W/C) を 0.9 から 1.1 まで変化させた 3 種類の配合条件において作製した気泡混合軽量土の一軸圧縮試験結果を対象とした¹³⁾。その応力-ひずみ関係を図-3 に示す。図より、応力値は軸ひずみ量の増加に伴い増大し、ピーク値を経た後急激に低下し、最終的にはほぼ一定値に近づいており、気泡混合軽量土においてよく認められる応力-ひずみ関係を示している。W/C 比の違いが応力-ひずみ関係に及ぼす影響に着目すると、W/C 比の低下に伴い、一軸圧縮強さ (q_u) および変形係数 (E_{50}) とともに増加する傾向が認められるが、破壊ひずみ (ϵ_f) は 0.8%~1.0% 程度の値となった。また、軸ひずみ量が十分大きくなった状態における残留軸差応力 (q_{res}) は W/C 比によらずほぼ一定の値となった。

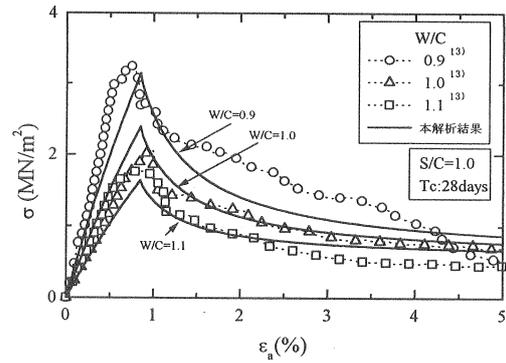


図-3 異なる W/C 比を用いた場合の応力-ひずみ関係とその双曲線モデル

ここでは、W/C 比の値から、双曲線モデルに用いる入力物性値の決定を試みた。著者らの一人が行った既往の研究により、 q_u 値および E_{50} 値と W/C 比の関係は直線近似することが可能であり、その関係式は表-2 のとおりとなる¹³⁾。つぎに、 ϵ_f 値は、W/C 比との間に明瞭な関係が認められず、0.8% から 1.0% 程度の値でばらつくことから、その平均値を用いることとする。また、 q_{res} 値は W/C 比によらずほぼ一定値となることから、 q_{res} 値についてもその平均値を用いることとする。軟化時の変形係数 (E_{res}) に関しては、 E_{50} 値と同様 W/C の減少に伴って増加する傾向が認められるので、本研究では E_{50} 値で代用した。その結果、双曲線近似に用いる入力物性値は表-3 に示すとおりとなった。

得られた入力物性値を用いてモデル化した応力-ひずみ関係を図-3 の実線として示した。図より、2 つの双曲線モデルから得られた応力-ひずみ関係は、実験値とほぼよい対応性を示している。なお、W/C = 1.0 の場合にはピークの応力値が実験結果を僅かに過大評価し、W/C = 1.1 の場合には僅かに過小評価する結果となった。これは、実験結果のばらつきの影響や q_u 値と W/C 比の関係に直線近似を適用したことが主要因と推察される。入力物性値の決定法を他の配合条件の場合にも拡張し、広範な配合条件に対応できるようになれば、設計、施工等への実用性が高まるものと考えられる。

5. 初期養生温度が異なる気泡混合軽量土の応力-ひずみ関係

近年気泡混合軽量土地盤施工時における動態観測や土槽モデル実験の結果、その内部の温度が打設後数日間のうちに 60℃~90℃程度にまで上昇していることが明らかとなった^{2)~6)}。このような報告を受け、気泡混合軽量土内部の温度上昇がその一軸圧縮強さに及ぼす影響が検討されており、その結果、初期養生温度の増加に伴って一軸圧縮強さが大きく減少し、養生初期に 90℃ 近い高温履歴を受けた試料の一軸圧縮強さは、常温 (20℃) で養生した試料の一軸圧縮強さの 70% 程度から 20% 程度し

表-4 初期養生温度と養生 28 日における一軸圧縮特性の関係 (W/C=0.71)

$q_u = -0.03 \text{ Tic} + 2.99$	(MN/m ²)
$E_{50} = -7.10 \text{ Tic} + 743$	(MN/m ²)

表-5 種々の初期養生温度の場合における入力物性値 (W/C = 0.71, Tc = 28days)

Tic	q_u (MN/m ²)	E_{50} (MN/m ²)	ϵ_f (%)	q_{max} (MN/m ²)	q_{res} (MN/m ²)
20	2.39	601	0.75	5.09	1.00
40	1.79	459	0.75	3.73	0.98
60	1.19	317	0.75	2.38	0.32
80	0.59	175	0.75	1.07	0.10
90	0.29	104	0.75	0.46	0.08

か得られていないことが報告されている^{6), 14) ~16)}。したがって、初期養生温度の違いが一軸圧縮特性に及ぼす影響を考慮した応力-ひずみ曲線をモデル化することは非常に重要な問題となる。

初期養生温度が異なる気泡混合軽量土の応力-ひずみ曲線のモデル化を試みる。対象としたのは、水セメント比 (W/C) が 0.71 の条件 (エアミルク) の下で作製され、20℃から 90℃の 5 通りの初期養生温度 (Tic) で 1 日間養生した後、28 日目まで 20℃で養生した供試体である。図-4 は、その一軸圧縮試験から得られたの応力-ひずみ曲線を示している¹⁴⁾。図より、他の条件で作製した気泡混合軽量土と同様に、応力値 (σ) は軸ひずみ量 (ϵ_a) の増加に伴い急激に増加し、ピーク値に達する。σ値はピーク値を経た後急激に減少し、最終的にはほぼ一定値となり、残留応力状態となっている。Tic = 80℃の場合には、ピーク値を経た後のσ値の減少傾向が僅かに緩やかであったが、これは実験のばらつきによるものと考えられる。

本研究では、Tic の値から、双曲線モデルに用いる入力物性値の決定を試みた。著者らの一人が行った既往の研究により、 q_u 値および E_{50} 値と Tic の関係は直線近似することが可能である¹⁴⁾。その関係式は、より広範囲な初期養生温度条件下に対応するため、Tic が 10℃から 90℃の範囲の q_u 値や E_{50} 値の結果に基づいて提案されている。しかしながら、今回対象とした Tic の範囲が 20℃から 90℃であることから、ここでは、その範囲の結果に基づいて関係式を提案しなおす (表-4)。つぎに、 ϵ_f 値は、Tic との間に明瞭な関係が認められず、0.3%から 1.3%程度の値でばらつくことから、その平均値を用いることとする。軟化時の変形係数 (E_{res}) に関しては、 E_{50} 値と同様 Tic の増加に伴って減少する傾向が認められるため、本研究では E_{50} 値で代用した。一方、 q_{res} 値に関しては、Tic = 20℃, 40℃の場合には、その q_u 値の 50%程度、Tic = 60℃~90℃の場合には、その q_u 値の 20%程度となったが、明瞭な関係が得られなかった。そこで q_{res} 値の Tic

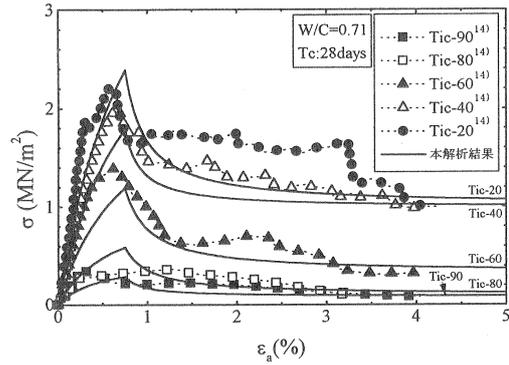


図-4 種々の初期養生温度における応力-ひずみ関係とその双曲線モデル

からの推定は今後の課題とし、ここでは q_{res} 値を実験結果から求めることとした。表-5 に双曲線近似に用いる入力物性値を示す。

図-4 は、得られた入力物性値を用いて予測した応力-ひずみ関係と実験結果を比較検討している。2つの双曲線モデルから得られた応力-ひずみ関係は、実験結果と比較すると、実験から得られた応力-ひずみ関係を比較的よい精度で再現しているといえる。なお、Tic = 20℃, 80℃の場合にピークの応力値が僅かに大きな値となったが、これは、実験結果のばらつきの影響と考えられる。その結果、関係式から得られる Tic = 20℃, 80℃の場合の q_u 値 (表-6) が実験値より大きな値 (実験値では、それぞれ 2.20MN/m², 0.36MN/m²) となったものと推察される。種々の Tic に対する q_u 値のデータをさらに蓄積し、Tic から q_u 値をより正確に求めることが可能となれば、高温履歴を経た場合の応力-ひずみ関係をさらに精度よくモデル化できるものと考えられる。

6. まとめ

異なる母材を用いた場合および水セメント比や初期養生温度を種々変化させた条件下で気泡混合軽量土の応力-ひずみ関係のモデル化を試みた。その結果、本研究で対象としたいずれの条件に対しても、本研究で用いた2つの双曲線モデルから得られた応力-ひずみ曲線は、実験結果と比較的よく一致することが明らかとなった。

謝辞

本研究の一部は、独立行政法人日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(C)No.17560444 (代表者亀井健史)の補助を受けて行われた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 都築敏樹：エアミルクの道路盛土への適用例，基礎工，Vol.18, No.12, pp.102-109, 1990.
- 2) 日本道路公団：気泡混合軽量土を用いた軽量盛土工法の設計・施工指針，pp.1-58, 1996.

- 3) 日本道路公団東北支社仙台技術事務所：橋台背面土圧軽減に関する追跡調査報告書，144p.，1999.
- 4) 新井恵一，渡辺将之，山科敏章，石田誠幸：FCBを用いた橋台部の背面土圧の軽減について，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，pp.199-202，2000.
- 5) 大久保元正，菊池信夫，小浪岳治：気泡混合土と一体化する壁面材の安定性について，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，pp.203-206，2000.
- 6) 前川晴義，亀井健史，山崎裕之，松田哲夫，北川勝明：養生温度の違いが気泡混合軽量土の一軸圧縮特性に及ぼす影響，第48回地盤工学シンポジウム平成15年度論文集，pp.53-60，2003.
- 7) Duncan, J. M. and Chang, C.: Nonlinear analysis of stress and strain in soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.96, No.SM5, pp.1629-1653, 1970.
- 8) Roscoe, K. H., Schofield, A. N. and Thurairajah, A.: Yielding of clays in states wetter than critical, *Geotechnique*, Vol.13, pp.211-240, 1963.
- 9) 軽量地盤材料の物性評価に関する研究委員会：第3章 軽量地盤材料への構成則の適用，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，pp.23-46，2000.
- 10) プラダンテージ，濃添泰成：発泡ビーズ系軽量混合土の構成式，第33回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.121-122，1998.
- 11) 矢島寿一，荻迫栄治，鶴ヶ崎和博，規矩大義，安原一哉：過圧密土としての軽量土の構成式とその適用性（その1）—双曲線モデル—，過圧密粘土および過圧密地盤の力学シンポジウム発表論文集，pp.1-6，2000.
- 12) 亀井健史，松尾和俊：気泡混合軽量土への石炭灰の有効利用，土木学会論文集，No.764/III-67, pp.247-254, 2004.
- 13) 亀井健史，前川晴義，堀切保則：気泡混合軽量土の一軸圧縮特性に及ぼす水セメント比と養生日数の影響，土木構造・材料論文集，No.18, pp.169-176, 2002.
- 14) 亀井健史，前川晴義，堀切保則：気泡混合軽量土の一軸圧縮特性に及ぼす初期養生温度の影響，地盤と建設，Vol.20, No.1, pp.35-42, 2002.
- 15) 亀井健史，前川晴義，堀切保則：気泡混合軽量土打設に伴う温度履歴が一軸圧縮特性に及ぼす影響，土木構造・材料論文集，No.19, pp.25-32, 2003.
- 16) 亀井健史，松尾和俊，前川晴義，志比利秀：石炭灰を混入した気泡混合軽量土の一軸圧縮強さに及ぼす初期高温養生の影響，土木構造・材料論文集，No.20, pp.111-118, 2004.

(2005年7月29日 受付)