

# 高温履歴を受けた気泡混合軽量土の応力-ひずみ関係と そのモデルシミュレーション

亀井 健史<sup>1)</sup>, 志比 利秀<sup>1)</sup>, 高嶋 純一<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>島根大学総合理工学部 地球資源環境学科

<sup>2)</sup>島根大学大学院総合理工学研究科 地球資源環境学専攻

## Stress-Strain Relation of Foamed Mixture Lightweight Soil Subjected to High Temperature Histories and Its Model Simulation

Takeshi KAMEI<sup>1)</sup>, Toshihide SHIBI<sup>1)</sup> and Jun-Ichi TAKASHIMA<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Geoscience, Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University

<sup>2)</sup>Department of Geoscience, Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering,  
Graduate School of Shimane University

### Abstract

This paper presents the stress-strain relation of foamed mixture lightweight soil subjected to high temperature histories which are characterized by an initial high temperature. A stress-strain relation that consists of two hyperbolic models was applied to investigate the mechanical behavior of foamed mixture lightweight soil. The material parameters of foamed mixture lightweight soil were estimated by the initial high temperature. Comparisons were made between the experimental data and the model simulations concerning the unconfined compressive loadings, to verify the applicability of results obtained from the model and material parameters adopted. Reasonable agreement was obtained between the observed and the simulated results of stress-strain relation of foamed mixture lightweight soil with high temperature histories.

### 1. はじめに

近年、建設現場では、良質な地盤材料の慢性的な不足や工費の削減、環境に配慮した作業（省スペース、低騒音や建設残土の減量またはその再利用）の必要性が指摘されてきている。このような社会的なニーズを合理的に解決するため、軟弱粘性土地盤上に構造物を建設する際に、一般的に大規模になりがちな地盤改良を必要としない、軽量盛土工法が注目されてきている。この工法には、発泡スチロール（EPS）を始めとして種々の軽量盛土材が用いられている。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、添加するセメント量や混合する気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、強度を有する盛土材となる。したがっ

て、軟弱地盤上に盛土築造する際に、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。一方、硬化後は自立するので、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、表層剥離などの問題点<sup>1)</sup>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、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<sup>2)</sup>。

このような発熱現象は、ダムサイトなどのように一度に大量のコンクリートを打設する場合に認められ、コン

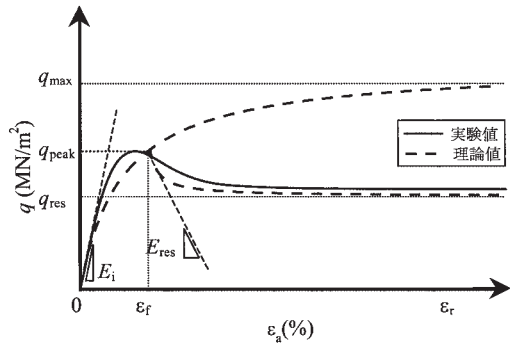


図-1 双曲線モデルによる軸差応力-ひずみ関係のモデル化

クリート工学の分野においてマスコンクリートの現象としてよく知られている<sup>3)</sup>。その現象は、大量にコンクリートを打設することによって、内部で発生した水和熱が外部に放出されずに内部に蓄積され、その結果内部温度が上昇することによって生じる。気泡混合軽量土は、空気を大量に含む材料であることから断熱性が高く<sup>4)</sup>、内部温度が上昇し易いという特徴が予想される。実際、打設直後から24時間程度で、気泡混合軽量土内部において急激に温度が上昇し、60~90℃程度に達することが報告されている<sup>2), 5)~8)</sup>。また、養生初期に80℃以上の高温履歴を受けた気泡混合軽量土供試体の一軸圧縮強さは、通常の養生温度一定条件(20℃)から得られる一軸圧縮強さの20%程度しか得られず、養生期間の増加に伴う強度増加があまり期待できなくなることも指摘されている<sup>9)</sup>。

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<sup>10)</sup>、Cam-clayモデル<sup>11)</sup>などを軽量土に用いた報告例<sup>12)</sup>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良好一致が認められる。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<sup>13)</sup>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よい精度で再現できる。また、矢島ら<sup>14)</sup>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/m<sup>2</sup>~0.3MN/m<sup>2</sup>)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。著者らも、種々の異なる条件下で、この2つの双曲線モデルによって気泡混合軽量土の応力-ひずみ関係のモデル化を試みており、その近似精度が高いことを確認している<sup>15)</sup>。

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、高温履歴を受けた気泡混合軽量土の応力-ひずみ関係のモデル化を試みる。具体的には、3種類の配合条件下で、5通りの初期養生温度で養生した供試体に対して一軸圧縮試験を実施し、その応力-ひずみ関係を明らかにする。応力-ひずみ関係のモデル化を行う際、その入力物性値は、初期養生温度から決定する。最終的に2つの双曲線モデルによる近似式から得られた応力-ひずみ関係とその実験結果と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<sup>13), 14)</sup>。

この方法では、軸差応力( $q$ ) - 軸ひずみ( $\epsilon_a$ ) 関係において最大軸差応力( $q_{peak}$ )となる破壊ひずみ( $\epsilon_f$ )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。

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

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( $q$ )を軸応力( $\sigma$ )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、 $\epsilon_f$ 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。

表-1 試料の配合条件と品質管理基準

	配合条件						品質管理基準		
	水セメント比 (W/C)	セメント C (kg/m <sup>3</sup> )	気泡剤 m <sub>1</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	希釈水 m <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	混練水 m <sub>3</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	水量 W* (kg/m <sup>3</sup> )	湿潤密度 ρ <sub>t</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	フロー値 Flow (mm)	空気量 V <sub>a</sub> (%)
K0-3	0.92	268	1.15	26.45	219	247	0.52±0.1		66.5±5.0
K0-5	0.88	298	1.11	25.53	235	262	0.56±0.1	180±20	64.0±5.0
K0-10	0.82	353	1.03	23.69	264	289	0.64±0.1		59.5±5.0

\* W= m<sub>1</sub>+m<sub>2</sub>+m<sub>3</sub>

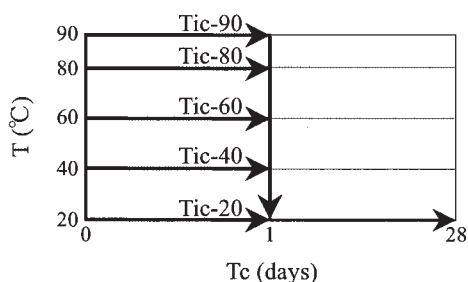


図-2 養生条件

### 3. 試料および実験方法

気泡混合軽量土は、日本道路公団暫定配合表に基づいて3種類の配合条件(K0-3, K0-5, K0-10)のエアミルクを作製した。試料は、空気量、フロー値、作製時の湿潤密度の項目について品質管理試験を行い、各項目の試験値が品質管理基準の範囲内であることを確認した。なお、本研究で用いた配合条件と品質管理基準を表-1に示す。作製した試料をモールドに打設する際、試料とモールドの付着、および試料からの水分の流出を防ぐため、モールド(φ=50mm, H=100mm)およびOHPシートにシリコングリスを薄く塗布し、そのOHPシートをモールド内側に貼り付けた型枠を使用した。また、温度上昇による供試体の体積膨張を抑制するために、モールドに蓋をした後、全体をビニール袋で覆った。試料は、図-2の養生条件に従って乾燥炉内で20~90℃の初期養生温度を与えた。その後、型枠から取り外して両端面を成形し、プラスチック製容器に入れ、恒温室(20±2℃)で打設後28日間の間養生した。養生28日を経た供試体を一軸圧縮試験に用いた。

本研究では、初期高温養生が気泡混合軽量土の応力-ひずみ関係を得るために、一軸圧縮試験を行った。一軸圧縮試験は、ひずみ制御方式で行い、せん断時のひずみ速度は1%/minとした。また、強度・変形特性に及ぼす端面摩擦の影響を軽減するために、一軸圧縮装置の上下加圧板の表面にシリコングリスを薄く塗布した。なお、各配合条件と養生条件において、それぞれ4供試体に対して一軸圧縮試験を実施し、得られた値の中から代表的な2つ実験値を採用した。

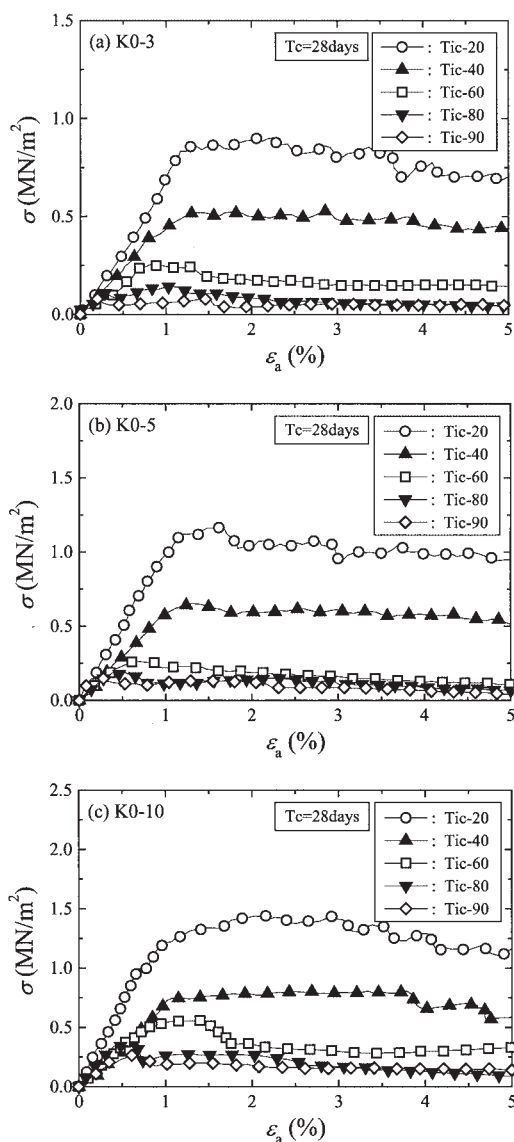


図-3 代表的な応力-ひずみ関係

### 4. 実験結果

一軸圧縮試験から得られた代表的な応力-ひずみ曲線を図-3に示す。図より、応力値(σ)は軸ひずみ量(ε<sub>a</sub>)

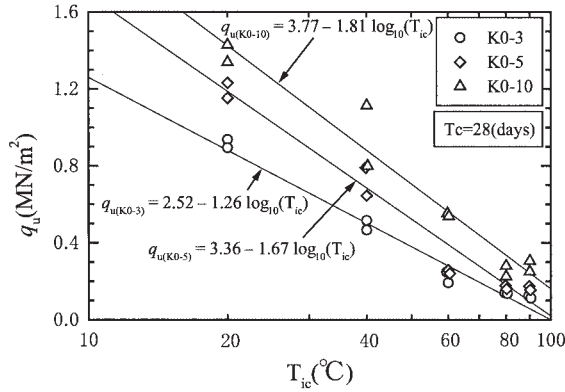


図-4 一軸圧縮強さと初期養生温度の関係

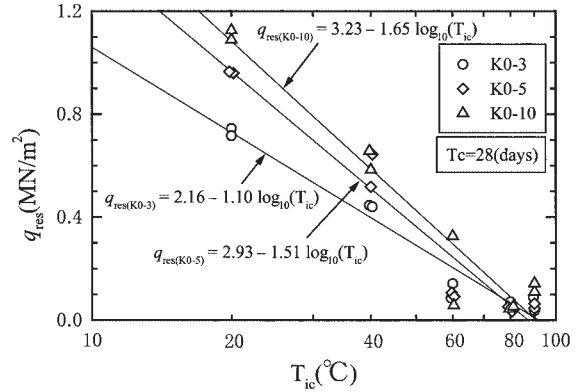


図-7 残留強度と初期養生温度の関係

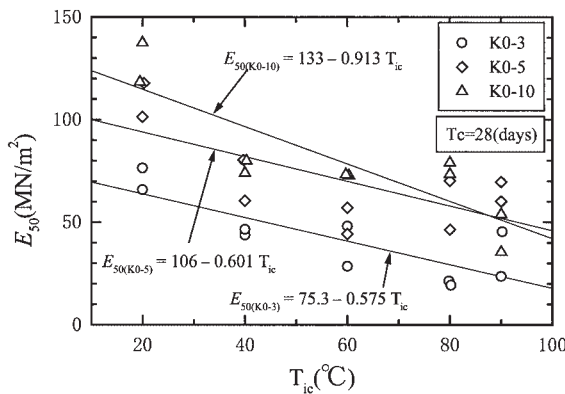


図-5 変形係数と初期養生温度の関係

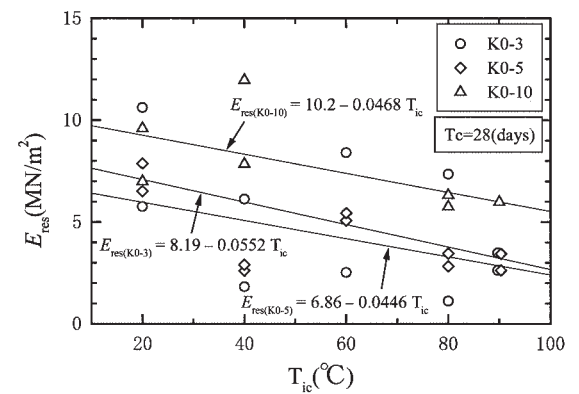


図-8 軟化時の変形係数と初期養生温度の関係

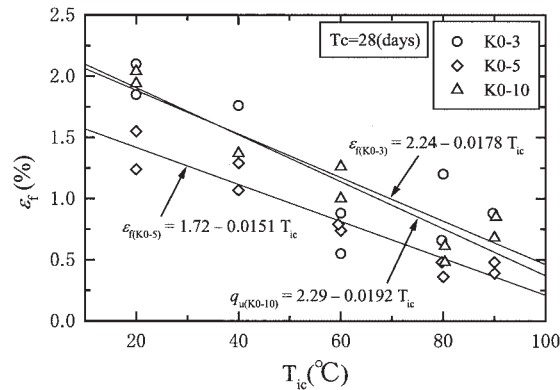


図-6 破壊ひずみと初期養生温度の関係

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徐々に減少してゆき、最終的にはほぼ一定値となり、残留応力状態となることがわかる。このような傾向は、配合条件の違いや初期養生温度の違いによらず、本研究で対象としたほとんどの試料において認められた。また、いずれの配合条件においても、初期養生温度の増加に伴って、一軸圧縮強さ ( $q_u$ )、変形係数 ( $E_{50}$ ) および破壊ひずみ ( $\epsilon_f$ ) が減少する傾向が認められた。

以下、2つの双曲線モデルによる近似式を求めるときに

必要な5つのパラメータの決定を行う。まず図-4は、一軸圧縮強さ ( $q_u$ ) と自然対数表示した初期養生温度 ( $T_{ic}$ ) との関係を示している。図より、 $q_u$ 値は、配合条件の違いによらず、自然対数表示した $T_{ic}$ の増加に伴ってほぼ直線的に減少する傾向が認められる。その関係式は図中に示すとおりとなった。なお、各 $T_{ic}$ においては、設計強度の大きなK0-10の $q_u$ 値が最も大きく、以下K0-5、K0-3の順に小さな値となっている。

変形係数 ( $E_{50}$ ) と $T_{ic}$ との関係を図-5に示す。図より、 $E_{50}$ 値は配合条件の違いによらず $T_{ic}$ の増加に伴ってほぼ直線的に減少する傾向があり、その直線関係は図中に示す関係式となった。また、各 $T_{ic}$ の $E_{50}$ 値は、設計強度の大きなK0-10の場合に大きな値となる傾向が認められた。

図-6は、破壊ひずみ ( $\epsilon_f$ ) と $T_{ic}$ との関係を示している。 $\epsilon_f$ 値と $T_{ic}$ の関係には、ばらつきが存在するが、 $\epsilon_f$ 値は $T_{ic}$ の増加に伴って減少する傾向を示している。このような関係は、本研究で対象とした全ての配合条件において認められた。各配合条件における $\epsilon_f$ 値と $T_{ic}$ との関係を直線近似した際に得られた関係式を図中に付記した。しかしながら、本研究では、配合条件の違いと $\epsilon_f$ 値の間に明瞭な関係を認めることができなかった。

図-7は、残留強度 ( $q_{res}$ ) と自然対数表示した $T_{ic}$ との

表-2 種々の初期養生温度の場合における入力物性値  
(a) K0-3 (W/C=0.92) の場合

K0-3	$q_u$	$E_{50}$	$\epsilon_f$	$q_{max}$	$q_{res}$	$E_{res}$
Tic	(MN/m <sup>2</sup> )	(MN/m <sup>2</sup> )	(%)	(MN/m <sup>2</sup> )	(MN/m <sup>2</sup> )	(MN/m <sup>2</sup> )
20	0.88	63.8	1.88	3.29	0.73	7.09
40	0.50	52.3	1.53	1.35	0.40	5.98
60	0.28	40.8	1.17	0.67	0.20	4.88
80	0.12	29.3	0.82	0.25	0.07	3.77
90	0.06	23.6	0.64	0.09	0.01	3.22

(b) K0-5 (W/C=0.88) の場合

K0-5	$q_u$	$E_{50}$	$\epsilon_f$	$q_{max}$	$q_{res}$	$E_{res}$
Tic	(MN/m <sup>2</sup> )	(MN/m <sup>2</sup> )	(%)	(MN/m <sup>2</sup> )	(MN/m <sup>2</sup> )	(MN/m <sup>2</sup> )
20	1.19	94.0	1.42	10.89	0.97	5.97
40	0.68	82.0	1.12	2.72	0.51	5.08
60	0.39	69.9	0.81	1.24	0.24	4.18
80	0.18	57.9	0.51	0.47	0.06	3.29
90	0.10	51.9	0.36	0.20	0.00	2.85

(c) K0-10 (W/C=0.82) の場合

K0-10	$q_u$	$E_{50}$	$\epsilon_f$	$q_{max}$	$q_{res}$	$E_{res}$
Tic	(MN/m <sup>2</sup> )	(MN/m <sup>2</sup> )	(%)	(MN/m <sup>2</sup> )	(MN/m <sup>2</sup> )	(MN/m <sup>2</sup> )
20	1.42	114.7	1.91	4.01	1.08	9.26
40	0.87	96.5	1.52	2.14	0.59	8.33
60	0.55	78.2	1.14	1.45	0.30	7.39
80	0.33	60.0	0.75	1.16	0.09	6.46
90	0.23	50.8	0.56	1.26	0.01	5.99

関係を示している。図より、自然対数表示した $T_{ic}$ の増加に伴って、 $q_{res}$ 値がほぼ直線的に減少していることがわかる。図中の式は、各配合条件における $q_{res}$ 値と $T_{ic}$ との関係式を示している。また、 $q_{res}$ 値は、設計強度の大きな配合条件の場合ほど大きくなる傾向が認められた。

最後に軟化時の変形係数 ( $E_{res}$ ) と $T_{ic}$ との関係を図-8に示す。図より、 $E_{res}$ 値と $T_{ic}$ の間には若干ばらつきが存在するが、 $E_{res}$ 値は $T_{ic}$ の増加に伴って減少する傾向が認められる。両者の関係を直線近似によって表すと、図中に示した関係式となった。しかしながら、 $E_{res}$ 値はK0-5, K0-3, K0-10の順に大きくなっており、各配合条件との間に明瞭な関係を認めることはできなかった。

### 5. 初期養生温度が異なる気泡混合軽量土の 応力-ひずみ関係のモデル化

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

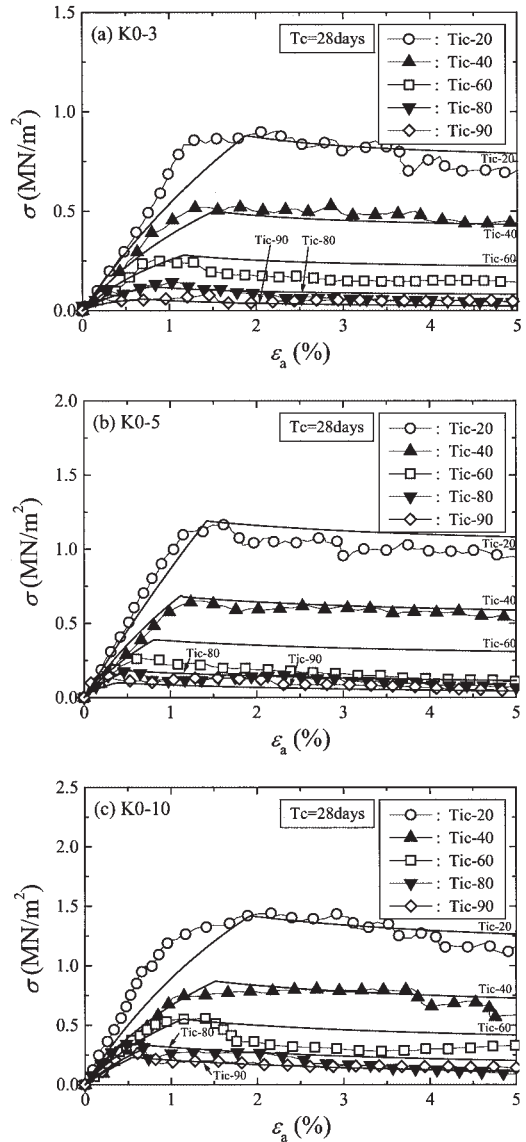


図-9 代表的な応力-ひずみ関係とその双曲線モデル

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<sup>2), 5~8)</sup>。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%程度しか得られていないことが報告されている<sup>8), 9), 15), 16)</sup>。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。

実験結果から得られた関係式から、各配合条件および各初期養生温度における 2つの双曲線モデルによる近似式に用いるパラメータを決定した。得られた結果は表-2のとおりとなった。図-9は、得られたパラメータを用いてモデル化した応力-ひずみ関係と代表的な応力-ひず

み関係との比較を示している。図より、ほとんど配合条件および初期養生温度において、2つの双曲線を用いた近似モデルは、実験結果を非常に高い精度で再現していることがわかる。2つの双曲線を用いた近似モデルと実験結果との間に認められる顕著な違いは、近似モデルが実験結果と比べてK0-5の $T_{ic}=60^{\circ}\text{C}$ の場合の一軸圧縮強さを50%程度過大評価していることが挙げられる程度である。この結果は、図-4からもわかるように、K0-5の $T_{ic}=60^{\circ}\text{C}$ の場合に提案式から得られる $q_u$ 値が実験結果を過大評価していることに起因しており、実験のばらつきが影響していると考えられる。以上のことから、2つの双曲線からなる近似モデルと初期養生温度から決定した物性値を用いることによって、気泡混合軽量土の応力-ひずみ関係を比較的高い精度でモデル化できることが明らかとなった。

## 6. 結論

高温履歴を与えた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、2つの双曲線からなる近似モデルと初期養生温度から決定した物性値を用いることによって、気泡混合軽量土の応力-ひずみ関係を比較的高い精度でモデル化できることを実証した。

## 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：エアーム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) 例えば，近藤奉夫，坂静雄：コンクリート工学ハンドブック，pp.798-799, 朝倉書店，1965.
- 4) 例えば，三嶋信雄，益村公人：FCB 工法，pp.23-65, 理工図書，2000.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) Roscoe, K. H., Schofield, A. N. and Thurairajah, A.: Yielding of clays in states wetter than critical, *Geotechnique*, Vol.13, pp.211-240, 1963.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 亀井健史，志比利秀：気泡混合軽量土における応力-ひずみ関係のモデル化，地盤と建設（掲載予定）.
- 16) 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.
- 17) 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.