

石炭灰を用いた気泡混合軽量地盤材料

堀内 澄夫 (技術研究所) 安原 一哉 (茨城大学)
小田原 卓郎 (技術開発本部) 佐藤 研一 (茨城大学)
草刈 太一 (土木本部)

§ 1. はじめに

軟弱沖積層や脆弱地盤の利用に際して、発泡スチロール(EPS)や気泡モルタルなどの軽量材を人工地盤材料として使用する例が増えている。EPSは、密度が0.01~0.03 ton/m³と軽量で、圧縮強度も100 kPa程度で比較的高く耐久性に優れているため、道路を初めとして積極的に利用されてきているが、熱や有機溶剤に弱い欠点も持っている¹⁾。

気泡モルタルは、一般にセメントスラリーに泡を混合して製造されており、密度は0.5~0.8 ton/m³とEPSよりかなり重い、化学的、熱的に安定で、強度も配合によって調整できる²⁾。気泡モルタルの最大の長所は現場で製造でき、しかも流動性に優れているため狭い箇所にも充填できる点である。しかし、セメントの発熱による温度上昇が大きく、部材への熱的影響や気泡モルタル自体のクラックの発生などが問題であった。

気泡モルタルの発現強度は、地盤として考えれば充分余裕があるため、セメントの一部を石炭灰で置き換え、発熱量を低減するSFC気泡モルタル(SFC: Special Fly-ash Cement)が検討されている。現在までの検討によって、このSFC気泡モルタルは密度を0.5 ton/m³程度まで低下でき、また地盤として十分な強度を確保できることが判明している。SFC気泡モルタルは実際の現場にも使用され、所定の性能を発揮することが明らかとなってきている³⁾。

一方、材料の物性に関しては未解明の点が多く、気泡モルタルの設計においても圧縮強度から推定しているのが現状である。また、石炭灰は表面積が大きく⁴⁾、リンなどの吸着材として使用できる⁵⁾などの報告があり、石炭灰を多量に添加した場合には気泡モルタルの安定性に大きな影響を及ぼす可能性がある。

SFC気泡モルタルを適用する際に必要となる物性を解明するため、今回6種の石炭灰を使用した室内実験を行った。その結果、石炭灰の種類によって起泡剤の使用

量を変化させる必要があるものの、SFCは気泡モルタル用の硬化材として有効であることが判明した。本文では、このSFC気泡モルタルの一軸圧縮強さとその影響因子、初期強度発現、CBR特性、三軸圧縮特性などについて報告する。

§ 2. 実験方法

表-1に実験に使用した石炭灰(FA)の物性を示す。いずれも豪州炭を中心とする海外炭燃焼灰である。セメントは普通ポルトランドセメント(OPC)、起泡剤は合成界面活性剤(SF)を使用した。また、モルタル増量用の細骨材として火山灰(VA:平均粒径1.8mm、比重2.52)を、混練水(W)として水道水を使用した。

図-1にSFC気泡モルタル(以降、SFCモルタルと略す)の調製方法を示す。各材料は、ホバートミキサ、ハンドミキサによって室内で混練した。SFCモルタルの密度は、改良した泥水用マッドバランスで測定した。表-2に主な配合を示す。石炭灰の種類によって必要とする起泡剤量が異なっている。これは、石炭灰の表面性状によって起泡剤の吸着量が異なるためと考えられる。

一軸圧縮試験用と三軸圧縮試験用の供試体はφ5×h10 cmのプラスチック製モールド、CBR力学試験用はφ15×h15 cmのCBR試験用の鉄製モールドに、それぞれSFC

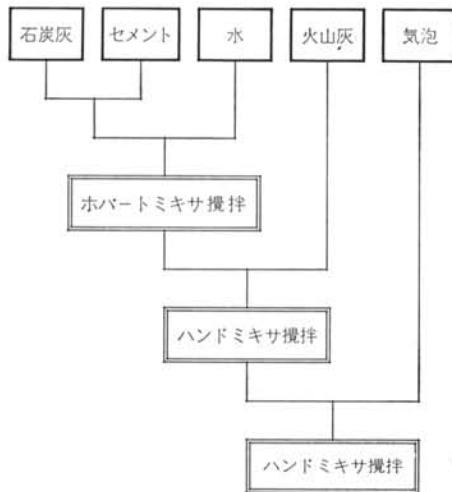
名称	強熱減量 (%)	pH	比重	ブレン値 (cm ² /g)	化学成分 (%) (酸化物の重量に換算)			
					Si-O	Al-O	Fe-O	Ca-O
LB	2.0	4.1	2.11	2400	66.2	26.8	1.0	0.8
TG	5.3	11.0	2.22	2710	58.5	24.1	5.5	2.5
DR	1.5	11.4	2.31	2430	55.5	27.7	7.8	5.3
WA	1.6	11.4	2.25	3980	64.8	23.4	4.1	3.3
UB	1.4	10.8	2.11	3350	76.1	19.1	1.6	1.1
WB	2.1	11.5	2.13	3160	64.0	25.4	4.4	1.4

表-1 石炭灰の物性

モルタルを流し込み作製した。供試体は、ポリエチレンフィルムで上部をラップしたのち、モールドに詰めたまま密封状態で5℃、10℃、20℃の恒温室で養生した。

材料の力学物性は、以下の方法で把握した。なお、水による飽和過程が供試体の物性に影響を与える可能性があり、その影響の度合いが試験によって変化すると考えられたため、すべての試験は不飽和状態で行なった。

- ①発現強度：7時間までをペーンせん断試験で、それ以降は一軸圧縮試験で確認した。一軸圧縮試験は、ひずみ速度0.8%/分で行なった。
- ②圧密試験：材令28, 90日において試料を整形し、そのまま圧密試験を行なった。試験方法はJIS A 1217に従った。間隙比は、試験後の供試体を乾燥～破碎したのち比重を測定し、算出した。
- ③クリープ試験：材令90日において、一軸圧縮状態で荷重を作用させ、クリープ変形を測定した。
- ④CBR試験：材令28, 90日においてJIS A 1211に準



図一 1 SFC気泡モルタルの調製フロー

No	配合量 (kg/m ³ , litre/m ³)						密度 (t/m ³)
	FA	OPC	VA	SF	W	Air	
LB-1	238	159	0	1.6	241	594	0.64
LB-7	193	129	0	1.1	187	680	0.51
LB-8	199	133	142	0.7	184	622	0.66
LB-15	328	218	0	1.3	303	472	0.85
TG-2	280	187	0	2.1	260	553	0.73
DR-2	239	159	0	1.6	221	624	0.62
WA-2	224	149	0	5.5	241	607	0.62
UB-2	230	154	0	3.1	223	616	0.61
WB-2	253	169	0	3.4	245	580	0.67

表一 2 主なスラリー配合

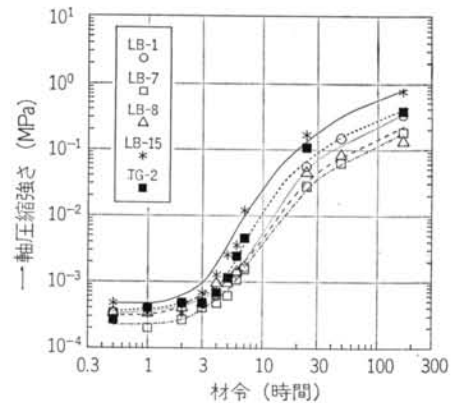
じて試験した。吸水過程は削除した。

- ⑤三軸圧縮試験：材令28, 90日において、UU試験を行なった。側圧は、24.5, 49.0, 98.0, 196 kPaの4段階とし、荷重速度は1%/分とした。
- ⑥非排水繰返し圧縮試験：材令28日において、側圧9.0 kPa、荷重周波数1.0 Hzの条件で、78.0 kPa, 157 kPaの2種類の片振幅繰返し荷重を作用させた。荷重回数は100,000回とした。

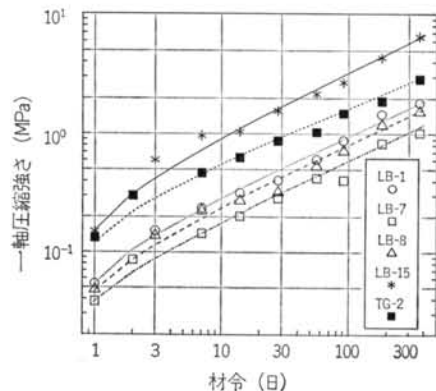
§ 3. 試験結果

3.1 一軸圧縮強さ (qu)

図一 2 に、供試体作成後30分からの初期強度発現を示す。7時間までの発現強度は、ペーン試験によるせん断強度を一軸圧軸強さに換算した値である。図のように、混練後数時間までは顕著な強度発現はないが、3時間～1日間で急速な強度発現があり、それ以降ゆっくりと増加してゆく。材料の初期強度発現は、現場での打継ぎ施



図一 2 材料の初期強度発現



図一 3 材料の長期強度発現

工の点で重要である。仮に、湿潤密度が 0.7 ton/m^3 のSFCモルタルによって盛土する場合を想定すると、材料混練後7時間程度で 10 kPa が発現しており、翌日には 1 m のスラリーを打継げると考えられる。図-3は1年までの長期強度を示している。図のように、強度増加率は配合

などに影響を受けない。

図-4は一軸圧縮試験における応力とひずみの関係である。両者の関係には大きな凹凸が見られるほか、最大応力を過ぎたのちも高い残留応力を示している。こうした特徴は、気泡を取りまく薄い壁によって微細構造が形成されているためと推察される。すなわち、壁が破壊されて形成されたせん断破壊面は表面が粗くなっており、この粗い表面を構成する壁が継続する荷重によって徐々に、さらに深くまで破壊してゆくため、高い残留応力を示す。設計的に見れば、この高い残留強度は所定応力到達後の急激な安定性低下を防止するため、構造物の安全性の維持に有効と考えられる。

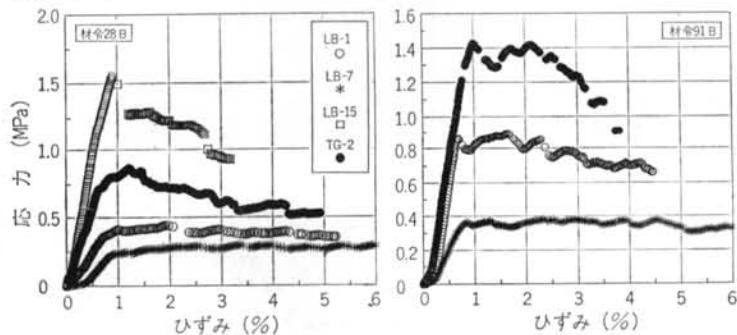


図-4 一軸圧縮試験結果例

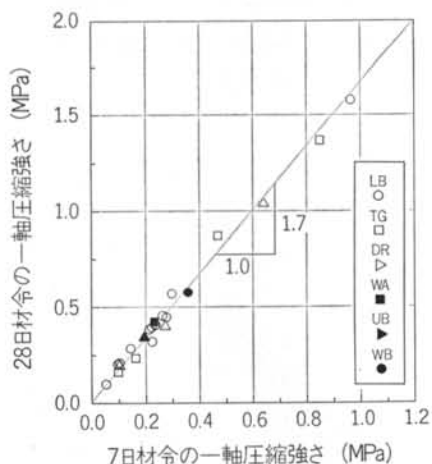


図-5 材令に伴う強度増加

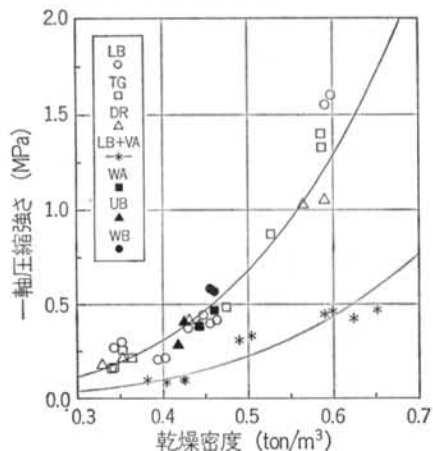


図-6 乾燥密度と発現強度

材令に伴う一軸圧縮強さの増加率を図-5に示す。図から明らかのように、材令28日の一軸圧縮強さは材令7日の約1.7倍で一定となっている。同図には様々な配合の材料をプロットしてある。両者の関係には、材料の密度、石炭灰の種類、火山灰の添加などの影響がなく一定であり、図-3での傾向を裏付けている。

図-6に材令28日における一軸圧縮強さと乾燥密度との関係を示す。一軸圧縮強さは、試料の密度増加に伴って大きく増加しているが、石炭灰の種類は全く影響を及ぼしていない。しかし、細骨材として火山灰を添加したLB-8の強度は無添加の試料よりかなり低い。図-7に石炭灰LBを使用したSFCモルタルの強度発現を比較する。同一密度のLB-1とLB-8とを比較すると、火山灰を添加していないLB-1の強度が高くなっているが、これは表-2に示したように単位セメント量が少ないこと

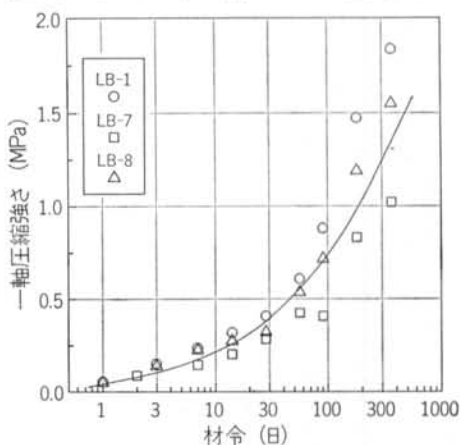


図-7 強度発現への火山灰添加の影響

が原因している。一方、LB-7とLB-8のように単位セメント量が近い試料では、発現強度は火山灰の入っている試料の強度が高い。このように、火山灰の添加は強度発現には悪影響を及ぼさないため、密度増加策として有効

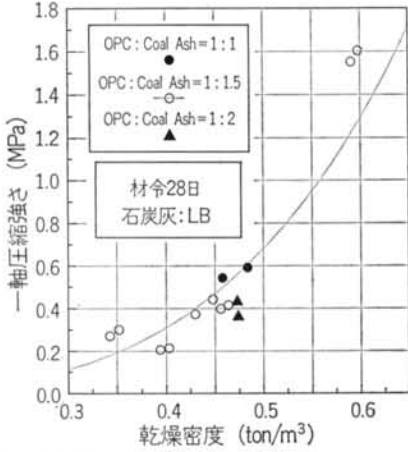


図-8 発現強度に及ぼす石炭灰量の影響

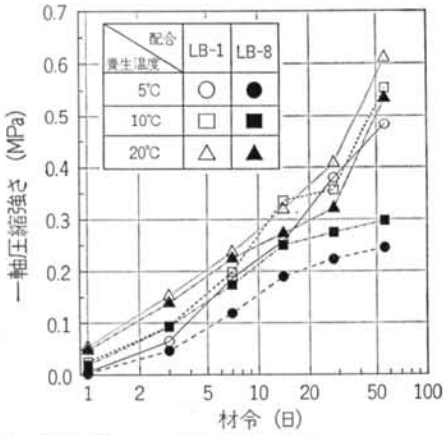


図-9 養生温度による強度発現への影響

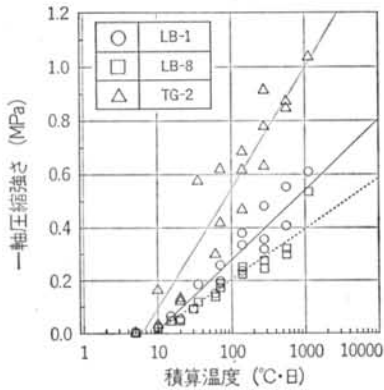


図-10 一軸圧縮強さと積算温度

であると考えられる。

図-8は、石炭灰/セメント比が強度発現に及ぼす影響を示している。同一の乾燥密度で比較すると、セメント量の増加に伴って強度はやや増加しているようであるが、その程度はわずかである。セメント量の影響が少ない原因として、以下の2項目が考えられる。

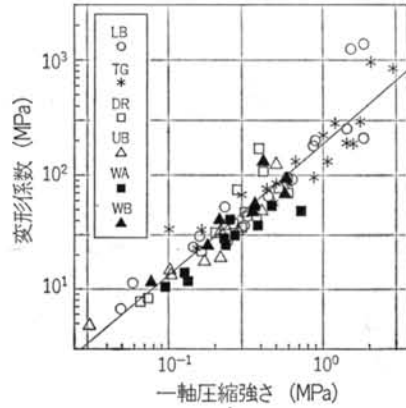


図-11 変形係数と一軸圧縮強さ

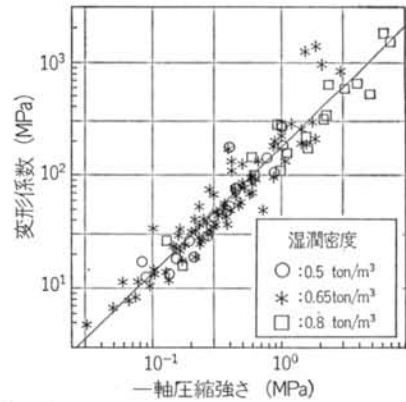


図-12 変形係数に及ぼす密度の影響

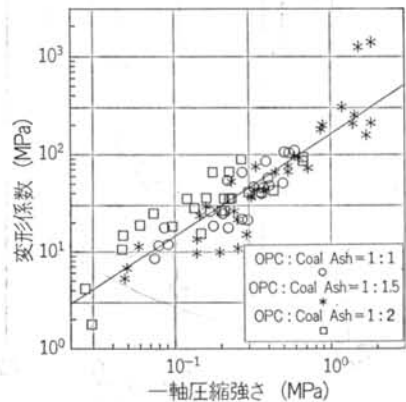


図-13 変形係数に及ぼす石炭灰添加量の影響

(1)石炭灰の高いポゾラン活性⁶⁾によって、強度低下が少ない。

(2)石炭灰はセメントに比較して比重が小さいため、石炭灰での置き換えは固体分の体積増につながる。

いずれにしても、石炭灰利用の価値が見い出せる。

一般に、養生温度の低下はセメント系材料の発現強度を低下させる。図-9は5~20℃で養生した試料の強度を示している。養生温度の低下に伴って強度は低下しているが、その程度は小さい。図-10は一軸圧縮強さと積算温度の関係であり、両者は直線関係にあるが、養生温度の影響の少なさを反映してばらつきが大きい。強度への影響が少なかった理由として、材料を室内温度で混練したことが挙げられる。しかし、SFCモルタルは打設後にかなりの発熱があり³⁾、保温性も高い⁷⁾と考えられるので、低養生温度の影響は打設体の表面部分のみとなる可能性が高い。図-11~13は、一軸圧縮強さと変形係数との関係である。両者は直線的な関係にあるが、石炭灰の種類、密度、石炭灰とセメントの比率は影響を及ぼしておらず、変形係数は一軸圧縮強さの約150倍で一定となっている。変形係数は、材料の微細構造中の壁の物性を反映させていると考えられるが、今回の結果から壁の

物性は石炭灰の種類などによって大きく変化しないことが明らかである。図-14は破壊ひずみと一軸圧縮強さの関係である。一軸圧縮強さが大きくなると、破壊ひずみは減少する傾向を示すが、概略の傾向として1~2%のひずみで破壊している。

材料の強度はセメント、石炭灰と水との化学反応によって発現すると考えられるが、以上のように石炭灰の種類は硬化過程に影響が少ないと推察できる。

3.2 圧密特性

図-15に圧密試験結果の一例を示す。試料は大きな過圧密状態の領域を持ち、一軸圧縮強さの大きかったLB-15などに関しては、今回の試験では圧密降伏応力を特定できなかった。また、過圧密領域での圧縮指数はいずれも小さく、圧密降伏応力付近で急激に間隙比が低下する傾向を示した。

3.3 クリープ特性

図-16に試験結果の一例を示す。図中の括弧内の数字は、一軸圧縮強さに対するクリープ荷重の割合である。試料に一軸圧縮強さの50%に相当する荷重を作用させると、LB-7では急速に変形が進行してゆくのに対してLB-15では殆ど変形していない。両者の違いは、荷重を作用させた直後の初期変形量である。すなわち、一軸圧縮試験における破壊ひずみは、LB-7で1.97%、LB-15で1.14%であり、クリープ試験での初期変形量はそれぞれの破壊ひずみの29%と19%に相当している。この初期ひずみにおける10%の差が、クリープ破壊するか否かを決定していると思われる。

3.4 CBR 特性

CBR 試験結果例を図-17に示す。一軸圧縮試験での応力とひずみの関係と同様、荷重強さは貫入量とともに凹凸を繰り返しながら増加してゆく。この凹凸の存在は

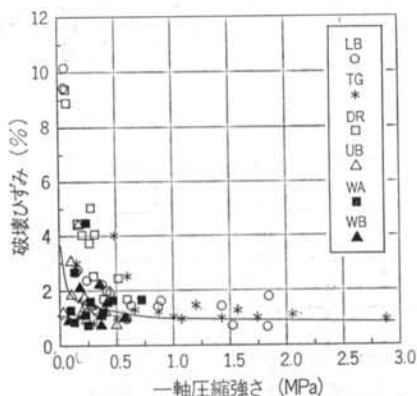


図-14 破壊ひずみと一軸圧縮強さ

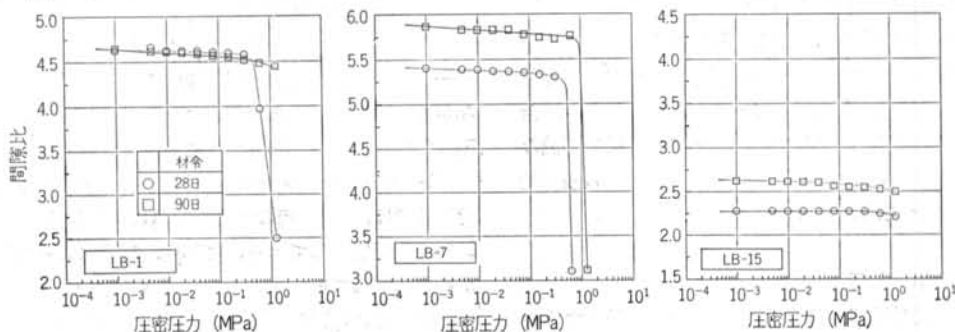


図-15 圧密試験結果

材料の平均的な荷重強さの算定に不都合である。このため、2.5mm貫入時の荷重強さは両者を両対数で近似し、算出した。図-18に2.5mm貫入の荷重強さ、CBR値(CBR)と一軸圧縮強さとの関係を示す。材料の配合、材令などに無関係に、2.5mm貫入時の荷重強さは一軸圧縮強さの約1.5倍で一定となっている。図-18では $CBR/qu=22$ の関係にあるが、両者の関係はセメント混合土での $CBR=98qu^{-4.78}$ や、残土/セメント/気泡での $CBR=25qu^0.9$ (いずれもMPa換算)に比較してやや小さい。これは、SFCモルタルの強度が粘着力に大きく依存しており、また破壊によって生じた破片が気泡部分を埋めるようにして変形が進むためと考えられる。このため、局所的な大荷重が作用する場合には、局所的な大きな変形が生ずる可能性がある。

3.5 三軸圧縮特性

図-19に軸差応力と軸ひずみの関係の一例を示す。一軸圧縮試験結果と同様に、両者の関係には大きな凹凸と残留応力が確認できる。なお、低強度の試料では、鉛直ひずみが15%に達した後も軸差応力が増加する傾向を示した。

図-20にモールの応力円の例を示す。応力円のばらつきは、軸差応力の大きな凹凸の影響と側圧作用時の材料圧縮の影響と考えられる。粘着力の算出には最大軸差応力を使用しているが、これは大きな凹凸の中の瞬間的な応力である場合がある。試料は大きな残留応力を持っており、またその値は比較的安定している。このため、鉛直ひずみが5~10%、10~15%における平均残留軸差応力を計算し、応力円から残留粘着力を求めてみた。図-21は最大軸差応力から算出した粘着力と残留粘着力との関係である。粘着力が0.2MPa以下の場合には70%程度の大きな残留粘着力を示しているが、粘着力が1MPa以上では40%以下に低下して脆くなっていく様子が読み取れる。設計に際して安全を見込むならば、この残留粘着力を採用すべきと考える。

3.6 非排水繰返し圧縮試験

図-22, 23に繰返し载荷回数と変形係数、軸ひずみの関係を示す。载荷回数の増加に伴って変形係数と軸ひず

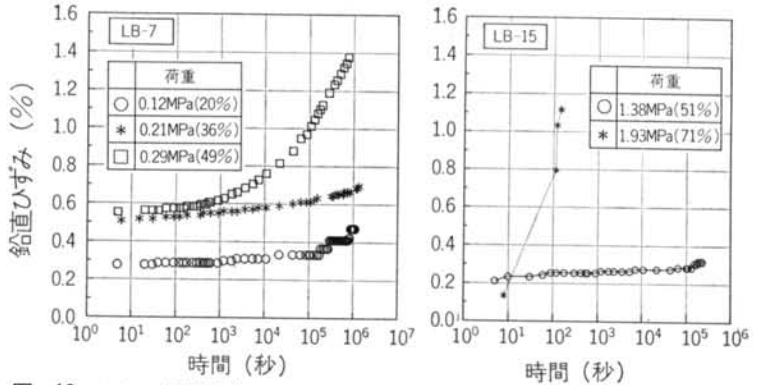


図-16 クリープ試験結果

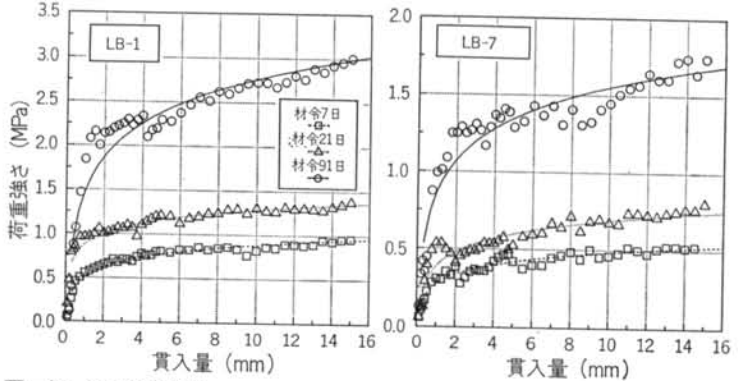


図-17 CBR試験結果

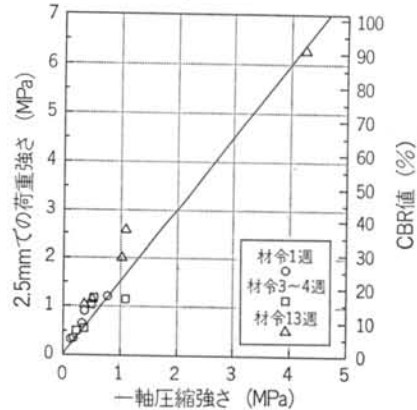


図-18 CBR試験結果と一軸圧縮強さ

みが増加する傾向を示すが、これは弱い部分が徐々に破碎してゆく過程を表わしているものと推察できる。

LB-1の0.16MPa(一軸圧縮強さの33%に相当)の载荷試験では、60000回の载荷で急速に変形係数が低下し、軸ひずみが増加している。これは、载荷によって供試体が劣化し始めているものと判断できる。一方、LB-8では0.16MPaの荷重(一軸圧縮強さの50%に相当)であっても劣化の兆候は見られない。繰返し重荷に対する耐久

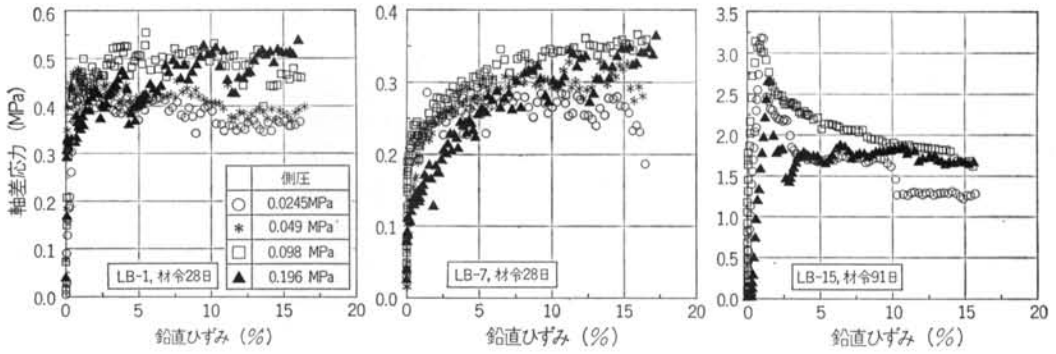


図-19 三軸圧縮試験結果例

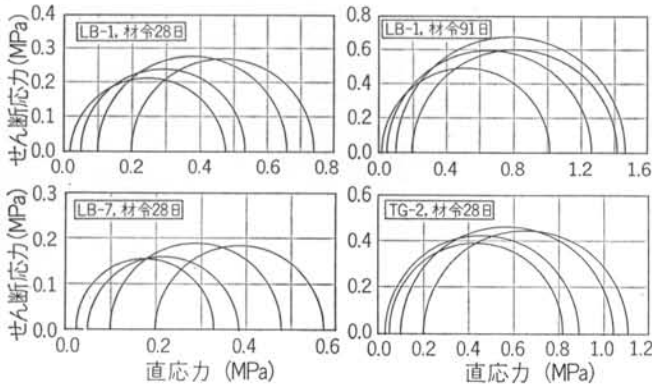


図-20 モールの応力円の例

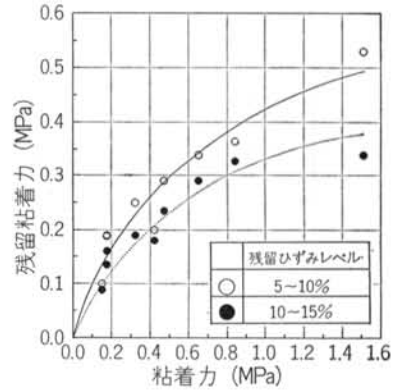


図-21 粘着力と残留粘着力

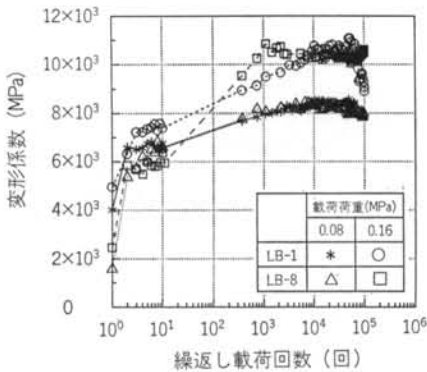


図-22 繰返し載荷回数と変形係数

性は、試料の配合によって影響を受けるものと考えられる。

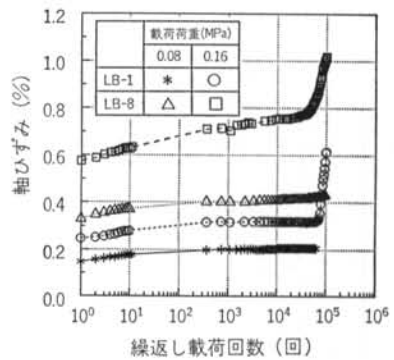


図-23 繰返し載荷回数と軸ひずみ

力は一軸圧縮強さのほぼ50%に相当しており、土と全く異なる組成の気泡モルタルに対しても、モール・クーロンの破壊基準が適用できることを示している。図-6に示したように、SFCモルタルの強度は乾燥密度に依存している。試料の真比重の差は大きくないと考えられるので、材料の壁の粘着力が一定であり、その壁の厚さや単位体積当たりの数によって決定されていると推察できる。

§ 4. 考察

4.1 各試験結果の比較

図-24に粘着力と一軸圧縮強さとの関係を示す。粘着

図-25は圧密降伏応力と一軸圧縮強さの関係である。圧密降伏応力は一軸圧縮強さの1.5倍に相当しており、

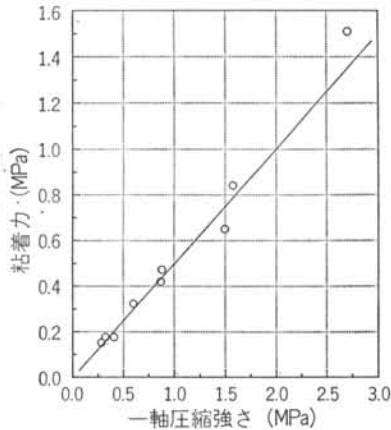


図-24 粘着力と一軸圧縮強さ

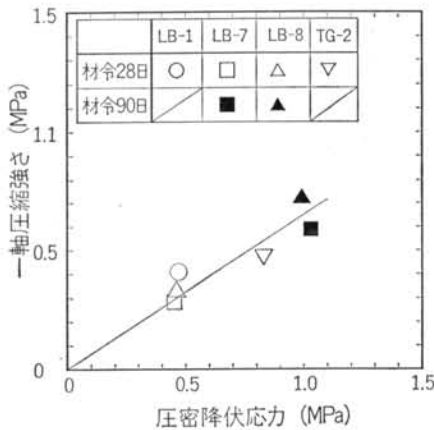


図-25 圧密降伏応力と一軸圧縮強さ

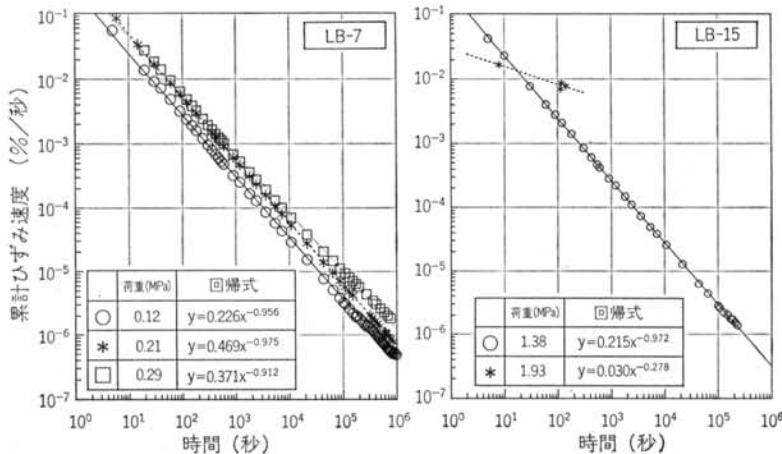


図-26 累計ひずみ速度の時間変化

材令や石炭灰の種類などの影響は見られない。

4.2 SFC モルタルの長期安定性

図-16に示したように、LB-15は一軸圧縮強さの70%のクリープ荷重で2分程度で破壊している。この試料の一軸圧縮試験での破壊ひずみは1.1%であり、クリープ試験での値とほぼ同等である。一方、ひずみ速度に関しては、クリープ試験では0.2%から0.8%のひずみの進行に90秒を要しているのに対して、一軸圧縮試験では0.8%/分であり、クリープ試験の2倍に相当している。両者の強度差は、ひずみ速度の差が原因していると考えられる。

図-26はクリープひずみ量を経過時間で除した値(累計ひずみ速度)と経過時間との関係であり、いずれの試料においても直線的な関係にある。前述のように、クリ

	q_u (MPa)	ϵ_f (%)	P_{cr} (MPa)	P_{cr}/q_u (%)	破壊までの推定時間	
					ϵ_f	1%
LB-1	0.880	1.52	0.11	12.5	1×10^{18} 年	2×10^{14} 年
			0.27	30.7	6×10^{61} 年	5×10^{42} 年
LB-7	0.520	1.97	0.12	23.1	6×10^{13} 年	1×10^7 年
			0.21	40.4	2×10^{17} 年	3×10^8 年
			0.29	55.8	5.4年	21.7時間
LB-8	0.717	2.40	0.09	12.6	6×10^{18} 年	7×10^8 年
			0.22	30.7	2×10^{16} 年	1370年
LB-15	2.705	1.14	1.38	51.0	2×10^{18} 年	2×10^{16} 年
			1.93	71.3	155秒	130秒
TG-2	1.495	1.14	0.24	16.0	3×10^{10} 年	2×10^9 年
			0.61	40.8	2300年	2.4年

(注) q_u :一軸圧縮強さ, ϵ_f :破壊ひずみ, P_{cr} :クリープ荷重

表-3 推定クリープ破壊時間

一軸破壊ひずみは一軸圧縮試験での破壊ひずみと同等であるので、図-26の関係を利用すれば、破壊に至るまでの時間の推定が可能である。推定結果を表-3にまとめる。図-14より、長期材令での破壊ひずみは1%程度となると考えられるので、参考のために破壊ひずみ1%での値も算出してある。表より、一軸圧縮強さの40%以下の荷重であれば破壊に至らないと予想できる。

§ 5. まとめ

石炭灰を大量に混合した気泡モルタルの物性を、一連の室内実験により検討した。その結果、以下の事項が明らかとなった。

(1)混練後3時間～1日間で急速な強度発現があり、それ以降ゆっくりと増加してゆく。

(2)材料は混練後7時間程度で10 kPaが発現し、1m程度の打継ぎが可能である。

(3)材令28日の一軸圧縮強さは、材令7日の約1.7倍で一定である。また、長期強度増加は配合に影響を受けない。

(4)応力とひずみの関係には大きな凹凸が見られるほか、最大応力を過ぎた後も高い残留応力を示す。

(5)増量材としての火山灰の添加は強度発現には悪影響を及ぼさない。

(6)セメント/石炭灰比は強度発現への影響が少ない。

(7)圧密降伏応力は一軸圧縮強さの1.5倍に相当する。

(8)一軸圧縮強さの40%以下の荷重であればクリープ破壊に至らない。

(9)材料のCBR値は一軸圧縮強さの2.1倍であり、セメント混合土などに比較してやや小さい。

(10)粘着力は一軸圧縮強さの50%に相当する。また、粘着力の70%に相当する大きな残留粘着力を持つ。

以上の結果から、石炭灰は気泡モルタルの材料として優れており、軽量地盤材料として土木・建築に広く適用できると結論できる。

§ 6. おわりに

石炭灰は電力関係だけでも年間400万ton以上発生しており、人工島の建設¹⁰⁾など土木分野への利用が進められているが、その利用率は全発生量の40%以下と低い。

石炭灰は、軽量でセメントとの反応性も高いため、気泡モルタルの原料として有効と考え検討した結果、気泡モルタルへの高い適用性が確認できた。

大量に石炭灰を添加した SFC 気泡モルタルは、軽量の盛土・充填材として実際に使用され始めており、その有効性を現場でも確認している。今回の検討結果をもとに、より広い用途に適用し、石炭灰の有効利用に寄与したい。

<参考文献>

- 1) 樋口靖明：“発泡スチロール盛土工法”基礎工 Vol.18, No.12 (1990年) pp.10~20
- 2) 古谷俊明：“軽量盛土材としての気泡モルタル”土と基礎 Vol.37, No.2 (1989年) pp.73~77
- 3) 塩谷平八郎, 堀内澄夫, 古谷俊明, 大石新一郎：“ビル構築における特殊フライアッシュセメント軽量盛土の利用”土と基礎 Vol.40, No.12 (1992年) pp.29~34
- 4) 森滋勝：“石炭灰処理システムと有効利用技術”フジ・テクノシステム (1981年) pp.139~140
- 5) 佐山惣吾, 佐藤三郎：“石炭灰処理システムと有効利用技術”フジ・テクノシステム (1981年) pp.166~172
- 6) 堀内澄夫, 玉置克之, 尾上篤生, 後藤茂：“土木材料としてのフライアッシュの利用”材料技術 Vol.3, No.2 (1985年) pp.35~46
- 7) 小柳治, 森本博昭, 大野定俊：“気泡モルタルの力学的特性について”セメント技術年報 No.32 (1978年) pp.285~289
- 8) セメント系固材研究会：“セメント系固材による地盤改良マニュアル”セメント協会 (1984年) p.45
- 9) 中村洋一, 久保博, 青山憲明, 黒山英伸, 安部克郎：“気泡混合補強土の特性について”第47回土木学会年次学術講演会講演概要集第3部 (1992年) pp.1198~1199
- 10) H. Kawasaki, S. Horiuchi, M. Akatsuka & S. Sano: “Fly-Ash Slurry Island: II” Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 4, No. 2 (1992) pp.134~152

