

# 養生条件の違いが締固めた石炭灰供試体の一軸圧縮強さおよび体積変化に及ぼす影響

佐野博昭\*・山田幹雄\*\*・太田 実\*\*\*・  
山本三千昭\*\*\*\*

本研究は、各種の条件下で養生を行った石炭灰供試体の一軸圧縮強さおよび体積変化について検討を行ったものである。その結果、養生条件の違いにより石炭灰供試体の一軸圧縮強さおよび体積変化は大きく異なることが示された。このことをふまえ、石炭灰を道路の路盤・路床、埋立および盛土材料等として用いる場合、施工地域の気象や地下水位等を考慮した配合設計や養生日数の確保が必要であることを示した。

**Keywords:** curing condition, compacted fly ash, maturity, unconfined compressive strength, volume change

## 1. まえがき

近年、石炭火力発電所等から石炭灰（主としてフライアッシュ）や排煙脱硫スラッジが多量に排出されている。石炭灰と排煙脱硫スラッジの発生割合は、国内の石炭火力発電所では2:1~20:1の範囲<sup>1)</sup>にあり、その中でも特に3:1~6:1の発生割合が多い。

石炭灰は、通常の土質材料と比較して比重が小さく、また、自硬性を有する等の物理・化学的特性に加えて、適度な水分下で十分な締固めを行えば、日数の経過に伴ってせん断強さの増加および圧縮性や透水性の減少等の工学的特性が変化する性質を有している<sup>2)</sup>。

一方、排煙脱硫スラッジは、硫酸化物(SO<sub>x</sub>)による環境汚染の防止策として導入された排煙脱硫装置から多量に排出されている。排煙脱硫スラッジは、硫酸カルシウム二水和物(二水石膏)とした後、加熱脱水して半水石膏とし、これを石膏ボードや陶磁器型材等に使用するのが一般的であり、現在のところ発生量に見合った量はほぼ消費されているものと考えられる。しかしながら、将来的にみた場合、石炭使用量の増加に伴って石炭灰や排煙脱硫スラッジの発生量は増加し、現在保たれている発生量と消費量との間に不均衡が生じることは十分に予想されるところである。このため、石炭灰および排煙脱硫スラッジの新たな分野での利用方法を検討することは、重要な課題であると考えられる。

このような観点より、石炭灰あるいは排煙脱硫スラッジ等を道路の路盤・路床材料、埋立および盛土材料等として用いる方法が各方面で検討されており、多くの研究

者がこれらの問題に取り組んでいる<sup>3)~6)</sup>。

石炭灰を道路の路盤・路床材料、埋立および盛土材料等として用いる場合の適用性について検討した研究として、鳥居ら<sup>3)</sup>は、石炭灰の強度発現に及ぼす水の影響を検討するために、空気中および水浸養生を行った石炭灰供試体に対して一軸圧縮試験を行い、石炭灰の水浸時における安定性は高いと報告している。また、堀内ら<sup>4)</sup>は、高密度石炭灰スラリーの固化強度に及ぼす養生温度の影響について検討を行い、養生温度の低下に伴って一軸圧縮強さは減少することを示すとともに、一軸圧縮強さに及ぼす養生温度の影響を定量的に把握するために積算温度方式を導入し、一軸圧縮強さと積算温度の間には相関性が認められることを報告している。

一方、排煙脱硫石膏の土質材料としての適用性に関する研究として、長谷川ら<sup>5)</sup>は排煙脱硫石膏の土質材料としての工学的特性を検討した結果、排煙脱硫石膏のみでは盛土材料としての利用価値が小さいこと、排煙脱硫石膏に高炉水さいとセメントを添加することにより路盤材料としての利用が可能であること等を報告している。また、稲松ら<sup>6)</sup>は排煙脱硫石膏をのり面安定処理材として用いた場合の施工性および経済性を検討し、その有効性を確認している。

これらのことより、石炭灰および排煙脱硫スラッジの土質材料としての利用価値は非常に高いものと判断されるが、これらの材料の強度は粒子相互間で進行する化学作用に大きく依存しているため、締固め後の養生条件の違いにより得られる強度は大きく異なることが予想される。

今後、土質材料としての石炭灰あるいは排煙脱硫スラッジの利用をさらに促進させるためにも、施工後の雨水の浸透や地下水位の変動および外気温の変化等に関連した施工地域の自然環境が石炭灰あるいは排煙脱硫スラッジの強度および体積変化に及ぼす影響を詳細に検討

\* 正会員 工修 石川工業高等専門学校助手 土木工学科  
(〒929-03 石川県河北郡津幡町字北中条)

\*\* 正会員 工博 金沢工業大学助教授 土木工学科

\*\*\* 正会員 工博 金沢工業大学教授 土木工学科

\*\*\*\* 正会員 工修 三井建設(株) 技術研究所 主任研究員

表一 試料の物理的特性

試料	土	A石炭灰	B石炭灰	C石炭灰	排煙脱硫スラッジ
比重		2.23	2.22	2.30	2.63
砂分(2~0.074mm)(%)		7.8	12.7	11.6	15.4
シルト分(0.074~0.005mm)(%)		90.6	86.9	85.5	79.8
粘土分(0.005mm以下)(%)		1.6	0.4	2.9	4.8
均等係数		1.50	1.54	2.00	1.80
曲率係数		1.22	1.11	1.09	0.90

表二 試料の化学的特性

試料	土	A石炭灰	B石炭灰	C石炭灰	排煙脱硫スラッジ
シリカ(%)		48.80	51.40	52.20	-
アルミナ(%)		25.60	24.20	21.80	-
酸化第二鉄(%)		7.71	5.32	7.67	-
酸化カルシウム(%)		2.19	10.50	9.12	-
酸化マグネシウム(%)		1.34	1.98	1.28	-
酸化カリウム(%)		1.59	1.16	1.38	-
酸化ナトリウム(%)		0.49	1.61	1.93	-
硫酸カルシウム(%)		-	-	-	16.60
亜硫酸カルシウム(%)		-	-	-	63.10
強熱減量(%)		9.24	0.94	1.08	9.23

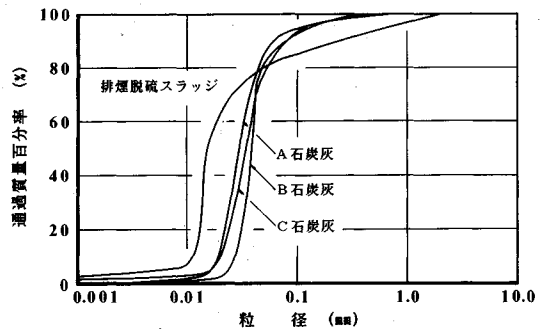
することは工学的に重要な問題であると考えられる。さらに、強度と自然環境との間の関係を定量的に把握することは、施工後の強度を評価する際の重要な要素であると考えられる。

本研究では上記の点に着目し、養生条件の違いが石炭灰供試体の一軸圧縮強さおよび体積変化に及ぼす影響を検討するために、異なる条件下で養生を行った3種類の石炭灰供試体について一軸圧縮試験を行い、石炭灰の土質材料としての適用性について検討を行った。さらに、石炭灰と排煙脱硫スラッジを混合した材料についても同様の試験を行い、これらの材料の土質材料としての適用性についても比較・検討を行った。

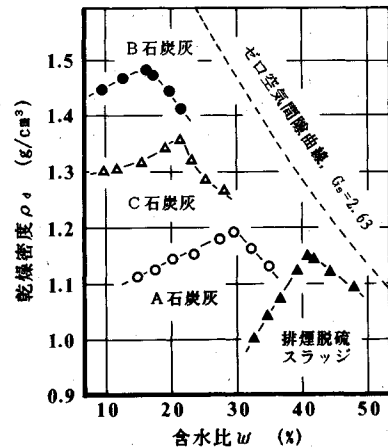
## 2. 試料および実験方法

実験には、異なる石炭火力発電所において発生した3種類の石炭灰(フライアッシュ)および1種類の排煙脱硫スラッジを用いた。試料の物理的特性、化学的特性および粒径加積曲線をそれぞれ表一、表二および図一に示す。

表二より、3種類の石炭灰は化学組成的には酸化カルシウム分がAで2%程度、BおよびCで10%程度とかなり相違していることが特徴的であり、また、排煙脱硫スラッジは大部分が亜硫酸カルシウムより構成されていることがわかる。石炭灰は、いずれも85~90%の



図一 試料の粒径加積曲線



図二 試料の締固め曲線

シルト分を含んでおり、発生場所の違いによる粒度組成の顕著な差は認められない(図一)。

図二に、含水比調整後密封状態で約1時間静置した3種類の石炭灰および1種類の排煙脱硫スラッジの締固め曲線を示す。図より、発生場所の違いにより石炭灰の最適含水比  $w_{opt}$  および最大乾燥密度  $\rho_{d,max}$  は大きく異なることがわかる。また、石炭灰は、最適含水比より湿潤側では含水比の僅かな増加に伴って乾燥密度が急激に減少する傾向が認められ、このことは、施工時の含水比調整や締固め密度の管理の重要性を意味している<sup>7)</sup>。

締固めた石炭灰の強度発現に大きな影響を及ぼす化学成分は酸化カルシウムで、これがシリカやアルミナと化合して強度発現物質を生成するものと考えられている。そのため、酸化カルシウム分の極端に少ない石炭灰では強度の発現が認められない場合も生じる。その場合、石炭灰の強度発現および耐久性を高めるためには、石灰やセメント等の化学安定材を添加することが有効な方法の一つであると考えられる。

今回の実験に用いた3種類の石炭灰のうち、酸化カルシウム分の少ないA石炭灰については強度発現および体積変化に及ぼす化学安定材の影響を検討するために、

表-3 配合条件

石炭灰の種類	シリーズ名	配合割合
A 石炭灰	A-1	石炭灰のみ
	A-2	L <sub>1</sub> =25%
B 石炭灰	B-1	石炭灰のみ
	B-2	L <sub>1</sub> =25%
C 石炭灰	C-1	石炭灰のみ
	C-2	F:S=3:1, L <sub>2</sub> =0%
	C-3	F:S=3:1, L <sub>2</sub> =2%

L<sub>1</sub>=石炭灰の乾燥質量に対する消石灰の乾燥質量の百分率  
 F:S=石炭灰の乾燥質量に対する排煙脱硫スラッジの乾燥質量の比  
 L<sub>2</sub>=石炭灰と排煙脱硫スラッジの合計乾燥質量に対する消石灰の乾燥質量の百分率

表-4 試料の締め特性

シリーズ名	最適含水比	最大乾燥密度
	w <sub>opt</sub> (%)	ρ <sub>d,max</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
A-1	29.4	1.19
A-2	30.4	1.18
B-1	16.3	1.48
B-2	20.0	1.43
C-1	20.8	1.36
C-2	23.8	1.36
C-3	25.0	1.30

化学安定材として比較的取り扱いが容易な消石灰を用いた。また、酸化カルシウム分の多いBおよびC石炭灰についてはその含有量が10%程度とほぼ同程度であることに着目し、B石炭灰については、A石炭灰と同様に消石灰を添加した場合の強度特性、C石炭灰については石炭灰の一部を同発電所より発生した排煙脱硫スラッジで置換し、その混合材料に対して消石灰を添加した場合の強度特性についてそれぞれ比較・検討を行った。なお、C石炭灰と排煙脱硫スラッジの乾燥質量比は、国内の石炭火力発電所におけるそれぞれの発生割合を考慮して3:1とした<sup>1)</sup>。表-3は、実験に用いたこれらの配合割合を示す。

試料を所定の配合割合に調整した後、表-4に示す最適含水比w<sub>opt</sub>、最大乾燥密度ρ<sub>d,max</sub>になるように静的に締め固めることにより供試体を作製した。供試体の形状は、直径5cm、高さ10cmの円柱形である。

供試体作製後、直径、高さおよび質量の測定を行い、供試体をビニール袋で密封した後、以下に示す3種類の異なる条件下で所定の期間養生を行った。

(1) ケース1(基本試験)

A、BおよびC石炭灰の基本的な強度特性を把握するために、温度20°C、湿度90%の恒温室内で0、1、3、7、14、28、56、90、180および360日間空气中養生を行っ

た。なお、空气中養生0日とは、供試体を作製した当日に一軸圧縮試験を行ったことを意味する。

(2) ケース2(水浸試験)

B石炭灰の強度特性に及ぼす水の影響を検討するために、温度20°C、湿度90%の恒温室内で0、1、3、7、14、28、56、90、180および360日間空气中養生を行い、その後、供試体をビニール袋から取り出し、引き続き同恒温室(温度20°C)内の水槽で1、3、7、14、28、56、90、180および360日間水浸養生を行った。

(3) ケース3(恒温試験)

C石炭灰の強度特性に及ぼす養生温度の影響を明らかにするために、ビニール袋に密封した供試体を温度0、10、20、30および40°Cの恒温器内(湿度10~20%)に保管して所定の期間恒温養生を行った。なお、恒温養生日数は石炭灰の強度発現に及ぼす養生温度の影響が比較的短期間において顕著であるという報告例<sup>3),4)</sup>を基に、0、1、3、7、10、14、21および28日間の8種類とした。

各ケースとも所定の期間養生を行った後、直径、高さおよび質量の測定を行い、ひずみ速度ε̇=1%/min<sup>8)</sup>で一軸圧縮試験を行った。なお、空气中および恒温養生終了時の供試体の質量を測定した結果、養生中での供試体の質量は変化していないことが示された。また、空气中、水浸および恒温養生期間中に生じた供試体の体積変化ΔV<sub>a</sub>、ΔV<sub>w</sub>およびΔV<sub>c</sub>は、式(1)~(3)より求めた。

$$\Delta V_a = (V_a(t_a) - V(0)) / V(0) \times 100(\%) \dots \dots \dots (1)$$

$$\Delta V_w = (V_w(t_w) - V_a(t_a)) / V_a(t_a) \times 100(\%) \dots \dots \dots (2)$$

$$\Delta V_c = (V_c(t_c) - V(0)) / V(0) \times 100(\%) \dots \dots \dots (3)$$

ただし、V(0): 供試体作製時の体積 (cm<sup>3</sup>)

V<sub>a</sub>(t<sub>a</sub>): 空气中養生 (t<sub>a</sub>日間) 終了時の供試体の体積 (cm<sup>3</sup>)

V<sub>w</sub>(t<sub>w</sub>): 空气中養生 (t<sub>a</sub>日間) および水浸養生 (t<sub>w</sub>日間) 終了時の供試体の体積 (cm<sup>3</sup>)

V<sub>c</sub>(t<sub>c</sub>): 恒温養生 (t<sub>c</sub>日間) 終了時の供試体の体積 (cm<sup>3</sup>)

3. 実験結果および考察

(1) ケース1(基本試験)

図-3は、A、BおよびC石炭灰を用いた場合の一軸圧縮試験結果について一軸圧縮強さq<sub>u</sub>と空气中養生日数t<sub>a</sub>との関係を示しており、空气中養生日数は対数目盛で表している。

図より明らかのように、一軸圧縮強さの発現状況は石炭灰の種類によって異なり、A石炭灰を用いた場合の一軸圧縮強さはきわめて小さいのに対し、B石炭灰を用いた場合は空气中養生日数の増加に伴って一軸圧縮強さはほぼ直線的に増加し、360日では20kgf/cm<sup>2</sup>(1.96MPa)程度で、A石炭灰の10倍程度の値となっている。

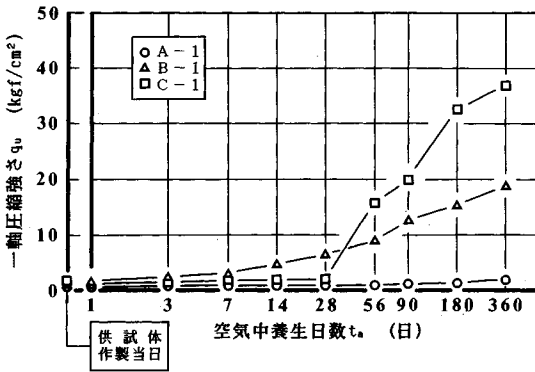


図-3 一軸圧縮強さと空気中養生日数との関係 (ケース1)

これに対し、C石炭灰を用いた場合の空気中養生28日までの一軸圧縮強さの変化傾向はA石炭灰とほぼ同様の傾向を示したが、28日以降空気中養生日数の増加に伴って一軸圧縮強さは急激に増加し、360日ではA石炭灰の20倍程度、B石炭灰の2倍程度の値となっている。

一方、A石炭灰に消石灰を25%添加したA-2試料の空気中養生360日での一軸圧縮強さは90 kgf/cm<sup>2</sup> (8.82 MPa)程度となり、A-1試料を用いた場合の空気中養生360日での値の約45倍となる結果が得られた。

片岡ら<sup>9)</sup>は、締固めた石炭灰の一軸圧縮強さに及ぼす化学成分の影響について検討を行い、一軸圧縮強さは酸化カルシウム分や酸性率  $(SiO_2 + Al_2O_3) / (Fe_2O_3 + CaO + MgO)$  との相関性が高く、酸化カルシウム分が多く、かつ、酸性率が小さいほど一軸圧縮強さは大きくなることを報告している。さらに、保存状態の違いが石炭灰の一軸圧縮強さに及ぼす影響を検討した結果、保存期間が長くなると石炭灰中に含まれている化学成分の変化が認められないにもかかわらず、一軸圧縮強さの増加割合が小さくなることも報告している。また、久楽ら<sup>10)</sup>は、12種類の焼却灰の化学成分と一軸圧縮強さとの関係について検討を行い、酸化カルシウム分が一定でも一軸圧縮強さは異なることを示している。その原因として、保存期間中に生じたカルシウムの劣化を挙げており、焼却灰の強度発現を検討する場合、酸化カルシウム分等の化学的特性のみに着目するだけでは不十分であり、品質の劣化等による他の要因を考慮することの必要性を示唆している。

今回の実験に用いた石炭灰の酸性率は、A、BおよびCの各石炭灰でそれぞれ6.6%、4.2%および4.1%で、酸性率と一軸圧縮強さとの関係は片岡ら<sup>9)</sup>の示した結果とほぼ同様の傾向を示した。しがしながら、BおよびC石炭灰の酸化カルシウム分や酸性率はほぼ同程度であるにもかかわらず、両者の強度発現状況には著しい相違が見られた。今回の実験に用いたB石炭灰とC石炭

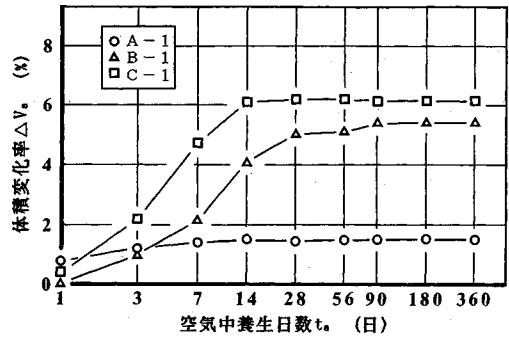


図-4 体積変化率と空気中養生日数との関係 (ケース1)

灰の発生後の経過日数および保存状態はほぼ同程度であること、空気中養生日数の増加に伴う一軸圧縮強さの変化傾向が大きく異なることおよび空気中養生360日でのC石炭灰の一軸圧縮強さがB石炭灰の2倍程度もあることより、上記に示した要因以外にも石炭灰の一軸圧縮強さに大きな影響を及ぼす要因があるものと考えられる。

図-4は、A、BおよびC石炭灰を用いた場合の空気中養生時の体積変化率  $\Delta V_v$  と空気中養生日数  $t_a$  との関係を示したものである。図より明らかなように、A石炭灰は空気中養生1日で1%程度の体積膨張を生じ、それ以降は日数の増加に伴う体積の変化はごく僅かであるのに対し、B、C石炭灰は養生日数14~28日までにA石炭灰の場合の3~4倍の膨張を生じ、それ以降は体積変化はほぼ平衡状態に達する傾向を示し、A石炭灰の場合とは体積変化の起こり方もかなり異なっている。

以上の結果より、石炭灰に含まれる酸化カルシウム含有量の違いにより、空気中養生日数の増加に伴う一軸圧縮強さや体積の変化傾向は大きく異なることは明らかであり、石炭灰の化学的特性は石炭灰の強度発現や体積変化を評価する際の重要な要素の一つであることを示唆しているが、石炭灰の化学的特性がほぼ同程度であっても一軸圧縮強さや体積変化の傾向が大きく異なる結果も得られていることから、今後化学的特性以外の要因についても検討を行うことが必要であるものと考えられる。

## (2) ケース2 (水浸試験)

図-5(a)はB-1試料を用いた場合、図-5(b)はB-1試料に消石灰を25%添加したB-2試料を用いた場合について、所定の期間空気中養生を行った後、水浸養生に移行した場合の一軸圧縮強さ  $q_u$  と水浸養生日数  $t_w$  との関係を示したもので、水浸養生日数は対数目盛で表している。なお、記号Sは空気中養生から水浸養生に移行した直後または水浸養生中に供試体にスレーキングを生じ、一軸圧縮試験が不可能であったことを示している。また、全試料とも水浸後1~3日で飽和度  $S_r$  は90%程度となっ

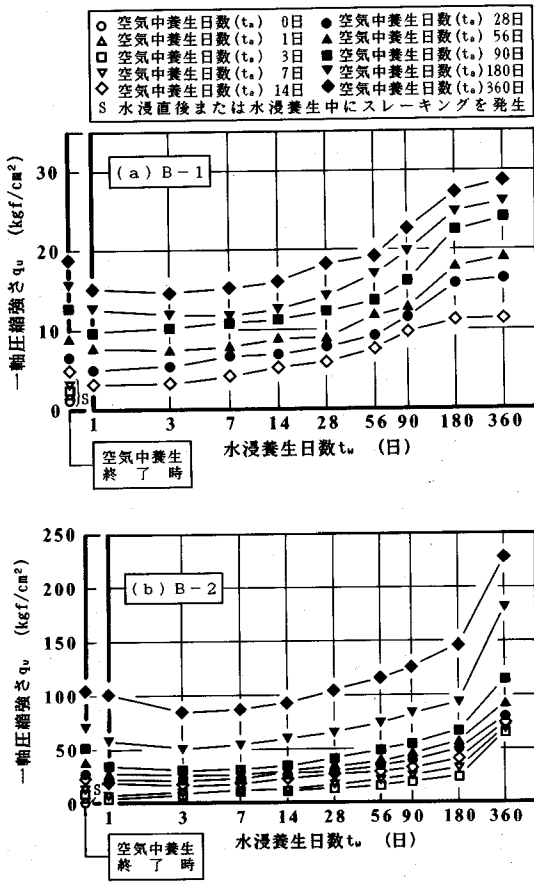
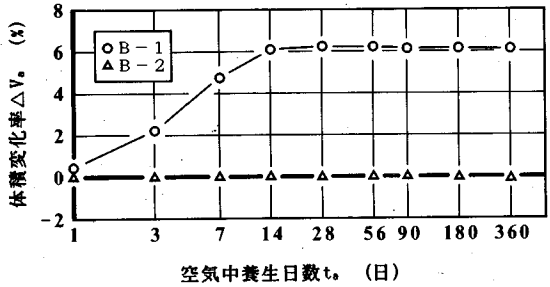


図-5 一軸圧縮強さと水浸養生日数との関係 (ケース2)

た。

図より、B-1 試料は空气中養生を 14 日間、B-2 試料は空气中養生を 3 日間行うことにより、水浸時にスレーキングを生じなくなることがわかる。また、B-1、B-2 両試料とも所定の期間空气中養生を行った後水浸養生へ移行すると、水浸後 1~3 日の一軸圧縮強さは一時的に減少しているが、その後の水浸養生日数の増加に伴って一軸圧縮強さは漸次増加していることがわかる。さらに、水浸後 180 日から 360 日の比較的長期における一軸圧縮強さの変化傾向に着目すると、B-1 試料は水浸養生日数の増加によらずば一定値となっているのに対し、B-2 試料の場合には水浸養生日数の増加に伴って一軸圧縮強さの顕著な増加傾向が認められる。このことは、B-2 試料の場合、消石灰の強度増進効果が長期間を経たのちにおいても継続していることを示すものと考えられる。

上記のことは、石灰安定処理を行った道路の路盤材料の品質規格は 9 日空气中養生、1 日水浸養生時の一軸圧縮強さを考慮している<sup>11)</sup>。これに対し、石灰安定処理の品質規格に準拠しているのが現状である。今回の実験から得られた水浸養生後の一軸圧縮強さの変化傾向を考慮した場合、水浸養生 1 日では一時的に強度の減少を生じ、水浸養生 3 日目においても僅かに強度の減少を生じることが予想される。しかしながら、その後の強度の発現状況を考慮すれば、石灰安定処理の品質規格を適用できるものと考えられる。



養生日数 (日)	水 浸 養 生									
	1	3	7	14	28	56	90	180	360	
空 中	1	S	-	-	-	-	-	-	-	
	3	0.14	0.16	0.18	0.18	0.19	0.16	0.14	0.17	
	7	0.10	0.12	0.10	0.11	0.13	0.13	0.12	0.12	
	14	-0.05	-0.12	-0.12	-0.14	-0.09	-0.12	-0.13	-0.12	-0.11
	28	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.04	-0.04
	56	-0.05	-0.12	-0.12	-0.14	-0.09	-0.12	-0.13	-0.12	-0.11
	90	0.03	0.02	-0.02	0.01	-0.08	-0.05	-0.05	-0.07	-0.10
	180	0.09	0.09	0.10	0.11	0.11	0.12	0.12	0.13	0.15
	360	0.07	0.07	0.04	0.03	-0.01	0.01	-0.01	-0.03	0.09
水 浸	1	-0.01	-0.05	-0.01	-0.02	0.04	0.02	0.01	0.07	0.20
	3	0.90	-0.94	-0.06	-0.05	-0.11	-0.12	-0.14	-0.14	0.18
	7	-0.01	0.00	-0.02	-0.02	-0.02	0.01	-0.01	0.20	0.25
	14	-0.03	-0.02	-0.02	-0.01	-0.02	0.00	0.03	0.11	0.44
	28	0.00	0.02	-0.01	0.16	0.36	0.37	0.40	0.42	0.50
	56									
	90									
	180									
	360									

上段：B-1 試料の体積変化率  $\Delta V_v$  (%)。下段：B-2 試料の体積変化率  $\Delta V_v$  (%)  
S：水浸直後または水浸養生中にスレーキングが発生

図-6 体積変化率と空气中および水浸養生日数との関係 (ケース2)

に定めることにより石灰安定処理を行った道路の路盤材料の品質規格は 9 日空气中養生、1 日水浸養生時の一軸圧縮強さを考慮している<sup>11)</sup>。これに対し、石灰安定処理の品質規格に準拠しているのが現状である。今回の実験から得られた水浸養生後の一軸圧縮強さの変化傾向を考慮した場合、水浸養生 1 日では一時的に強度の減少を生じ、水浸養生 3 日目においても僅かに強度の減少を生じることが予想される。しかしながら、その後の強度の発現状況を考慮すれば、石灰安定処理の品質規格を適用できるものと考えられる。

図-6 は、体積変化率  $\Delta V_v$ 、 $\Delta V_w$  と空气中および水浸養生日数  $t_a$ 、 $t_w$  との関係をそれぞれ示したものである。図より、B-1 試料の場合、空气中養生日数の増加に伴って体積が膨張する傾向を示し、空气中養生 14 日目までに 6% 程度の体積膨張を生じたが、14 日以降における体積の変化はほとんど認められない。これに対し、B-2 試料の場合、供試体作製後の空气中養生日数にかかわらず供試体の体積変化はほとんど認められない。また、B-1、B-2 の両試料に対して所定の期間空气中養生

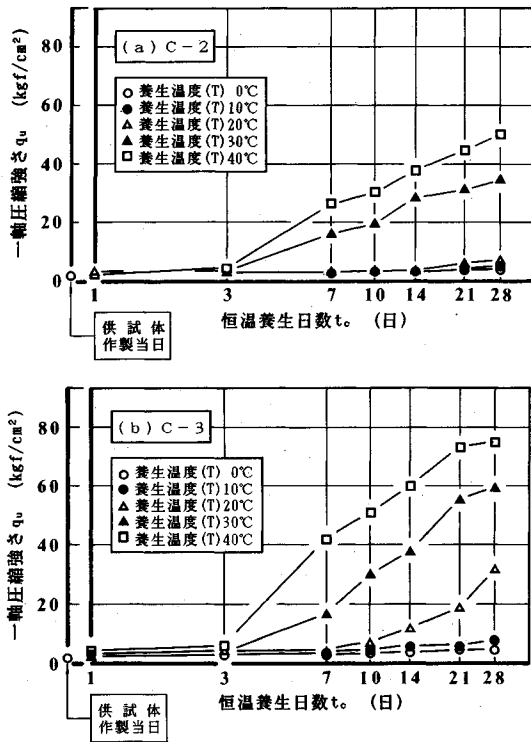


図-7 一軸圧縮強さと恒温養生日数との関係 (ケース3)

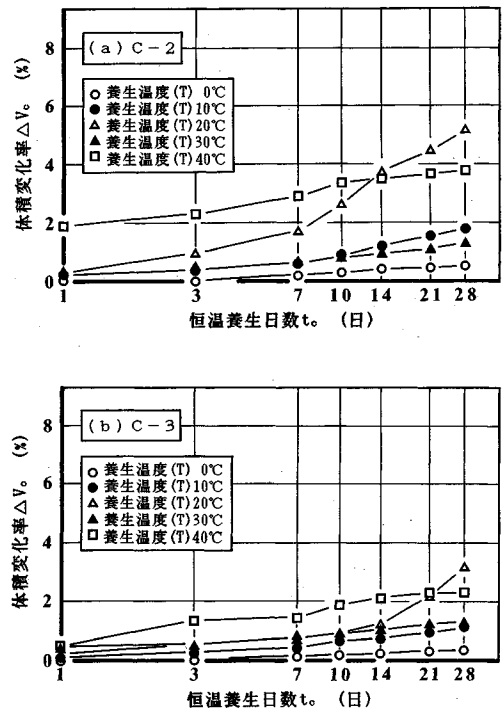


図-8 体積変化率と恒温養生日数との関係 (ケース3)

を行った後、水浸養生に移行した結果によれば、B-1 試料の場合には14日間、B-2試料の場合には3日間空气中養生を行うと、その後の水浸養生日数にかかわらず体積変化はほとんど認められない。このことは、石炭灰に消石灰を添加することにより空气中養生中に生じる体積の変化を、また、所定の期間空气中養生を行うことにより水浸養生中に生じる体積の変化をそれぞれ抑制することが可能であることを示している。

一方、図-3、図-4に示したように石炭灰のみの一軸圧縮強さと体積の変化傾向は、石炭灰中に含まれる酸化カルシウム含有量の違いにより大きく異なり、酸化カルシウム含有量が多い程一軸圧縮強さは大きく、また、体積変化率も大きくなるという結果が得られた。しかしながら、石炭灰に消石灰を添加した場合、図-5、図-6の結果より一軸圧縮強さは増加するが体積変化率は逆に小さくなる傾向が認められ、試料中の酸化カルシウム量と体積変化との関係については逆の傾向が得られた。この原因としては、石炭の種類や燃焼方式等の違いにより石炭灰中の酸化カルシウムを供給する鉱物の形態が異なることによるものと考えられる。

### (3) ケース3 (恒温試験)

図-7 (a) はC-2試料を用いた場合、図-7 (b) はC-2試料に消石灰を2%添加したC-3試料を用いた場合の一軸圧縮強さ  $q_u$  と恒温養生日数  $t_c$  との関係を養

生温度  $T$  をパラメータとして示したものである。

図より、C-2試料の場合、養生温度0~10°Cの条件下では恒温養生日数の増加に伴う一軸圧縮強さの増加はごく僅かであるのに対し、養生温度が30°Cまたは40°Cの高温になると恒温養生3日目までの一軸圧縮強さの変化傾向は0~10°Cの場合とほぼ同様であるが、それ以降は恒温養生日数の増加に伴って一軸圧縮強さはほぼ直線的に増加し、40°C恒温養生28日における一軸圧縮強さは、0~10°Cの場合の10倍程度となっている。また、C-2試料に消石灰を2%添加したC-3試料でもC-2試料とほぼ同様の傾向が認められ、この場合も養生温度の影響を大きく受けていることがわかる。

図-8 (a), (b) は、体積変化率  $\Delta V_v$  と恒温養生日数  $t_c$  との関係を生温度  $T$  をパラメータとして示したものである。図より、C-2、C-3両試料とも養生温度の高さにかかわらず養生日数とともに体積は膨張する傾向を示し、一軸圧縮強さと同様に養生温度の影響を受けていることが明らかである。すなわち、養生温度が0~30°Cの場合、恒温養生1日で体積は僅かに膨張し、その後日数の増加に伴ってさらに僅かに膨張する傾向を示しているのに対し、養生温度40°Cでは養生1日での体積変化率は2%程度で0~30°Cの場合より大きな体積膨張を生じているものの、その後の体積変化率の増加割合は0~30°Cの場合と比較して小さく、恒温養生28日

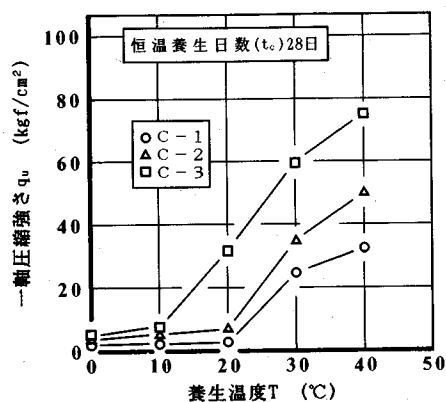


図-9 一軸圧縮強さと養生温度との関係 (ケース 3)

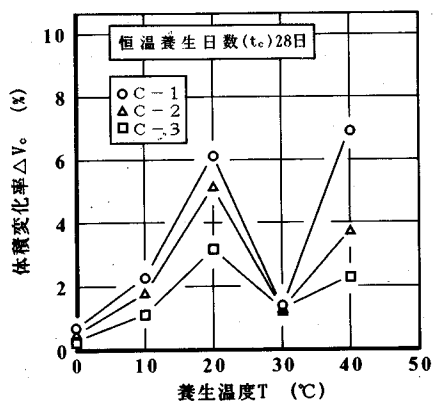


図-10 体積変化率と養生温度との関係 (ケース 3)

での体積変化率は4%程度で、30°Cの場合より小さな値を示している。また、C-2試料に消石灰を2%添加したC-3試料もC-2試料とほぼ同様の傾向を示し、体積の変化傾向は養生温度の影響を受けていることが明らかである。

図-9にC-1、C-2およびC-3試料を用いた場合の恒温養生28日における一軸圧縮強さ $q_u$ と養生温度 $T$ との関係を示す。図より、C-1、C-2両試料は養生温度0~20°Cにおいては養生温度の上昇に伴う一軸圧縮強さの増加はごく僅かであるが、養生温度30~40°Cの高温下では一軸圧縮強さは温度の上昇とともにほぼ直線的に著しく増加しており、一軸圧縮強さに及ぼす養生温度の影響はきわめて大きいことがわかる。これに対し、C-3試料の場合、養生温度0~10°CではC-1、C-2試料とほぼ同様の变化傾向を示しているが、養生温度が20°Cになると一軸圧縮強さは急激に増加し、養生温度40°Cでの一軸圧縮強さは80 kgf/cm<sup>2</sup> (7.84 MPa)程度に及び、10°Cの一軸圧縮強さの10倍程度となっている。

このことより、石炭灰の強度発現に及ぼす養生温度の影響は配合割合の違いにより異なり、石炭灰のみあるいは石炭灰の一部をスラッジで置換した材料では20°C以上、石炭灰の一部をスラッジで置換し、さらに消石灰を添加した材料では10°C以上で養生温度の影響を大きく受け、その結果が一軸圧縮強さに表れているものと考えられる。

図-10は、恒温養生28日における体積変化率 $\Delta V_v$ と養生温度 $T$ との関係を示す。図より、養生温度0~20°Cでは、温度の上昇に伴って体積変化率は増加する傾向が認められるが、養生温度が30°Cになると体積変化率は逆に減少して、配合割合の違いにかかわらず体積変化率は1.5%程度となり、さらに養生温度が上昇し40°Cになると体積変化率は増加する傾向が認められる。このように、養生温度0~40°Cの範囲でおおむね養生温度が高いほど体積変化率が大きくなる傾向は把握でき

たが、30°Cにおいて特異な挙動を示した原因は明らかでなく、今後さらに検討を行う必要がある。

以上の結果より、石炭灰の強度発現や体積変化は配合割合、養生日数、水の有無、温度等の諸要因に影響されることが明らかであるため、このような諸要因と強度との関係を定量的に把握することは、施工後の強度を評価する際の重要な要素であると考えられる。

コンクリート工学の分野では、通常、コンクリートの強度に及ぼす養生条件、特に養生温度の影響を定量的に表すために養生日数と養生温度との積による積算温度方式が用いられている<sup>12)</sup>。また、建築学会 JASS 5では寒中コンクリートに対して積算温度方式が用いられており、この方式により28日コンクリート強度の補正が行われている<sup>13)</sup>。このことより、積算温度方式を石炭灰に対しても適用することが可能となるならば、施工後の外気温の変化に対応した強度の予測や高温養生による早期強度の判定等を行うことが可能になるものと考えられる。

そこで、石炭灰の一軸圧縮強さに及ぼす養生温度の影響を定量的に表すために積算温度方式を用い、一軸圧縮強さ $q_u$ と積算温度 $M$ との関係について検討を行った。なお、積算温度 $M$ は式(4)により求めた。

$$M = t_c \cdot (T + \alpha) \dots \dots \dots (4)$$

- ただし、 $t_c$ : 恒温養生日数 (日)
- $T$ : 養生温度 (°C)
- $\alpha$ : 加算温度 (°C)

加算温度 $\alpha$ はコンクリートの場合養生温度 $T$ が-10°C以下ではセメントの水と反応が停止するという物理的な意味から通常10°Cが用いられている<sup>12)</sup>が、石炭灰についてはこのような基準となる加算温度の値は確立されていないのが現状である。

堀内ら<sup>4)</sup>は、高密度石炭灰スラリーに対して数種類の加算温度を仮定し、一軸圧縮強さと積算温度との相関性を検討した結果、最もよい相関性を示す加算温度の値は

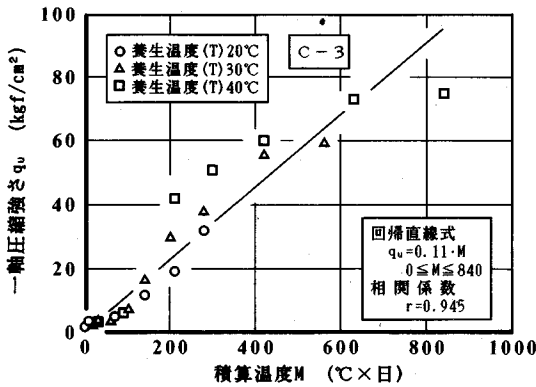


図-11 一軸圧縮強さと積算温度との関係（ケース3）

石炭灰の種類により異なることを示している。

前述のような異なる温度条件下で養生を行ったC石炭灰の一軸圧縮試験結果において、養生温度10°C以下では強度発現がきわめて小さかったことから、ここでは加算温度の値を-10°Cと仮定した。積算温度が正の値となる領域を有意と考えて一軸圧縮強さ $q_u$ と積算温度 $M$ との関係を示すと、図-11のようである。同図より、養生温度20~40°Cの範囲において一軸圧縮強さと積算温度との関係は、1本の直線に回帰できることがわかる。

このような関係を用いることにより養生日数と養生温度から一軸圧縮強さを予測することが可能であると考えられる。

#### 4. 結 論

発生場所の異なる3種類の石炭灰を用いた供試体を種々の条件下で養生を行い、石炭灰中の酸化カルシウム分、養生日数および温度、水の有無等が一軸圧縮強さおよび体積変化に及ぼす影響を調べた結果、おおむねつぎのことが明らかになった。

(1) 締固めた石炭灰供試体の一軸圧縮強さや体積変化率は石炭灰中の酸化カルシウム含有量によって大きく異なり、酸化カルシウム含有量が多い程一軸圧縮強さは大きく、また、体積変化率も大きくなる。

(2) 酸化カルシウム量が10%程度の石炭灰を用いた場合14日間の空气中養生を、同石炭灰に消石灰を添加した場合3日間の空气中養生を行った後水浸養生に移行すると、水浸後1~3日の一軸圧縮強さは一時的に減少するが、その後水浸養生日数の増加に伴って一軸圧縮強さは漸次増加する。

(3) 今回の試験に供した酸化カルシウム量10%程度の石炭灰あるいは石炭灰と石灰を混合した材料を道路の路盤材料として用いる場合、現行の石灰安定処理の品質規格を準用することができる。

(4) 酸化カルシウム量が10%程度の石炭灰に消石灰を添加することにより、空气中養生期間中に生じる体積

の変化を、また、空气中養生を3日間行うことにより水浸養生期間中に生じる体積の変化をそれぞれ抑制することが可能である。

(5) 酸化カルシウム量が10%程度の石炭灰あるいは同石炭灰と排煙脱硫スラッジとの混合材料の一軸圧縮強さは養生温度の上昇に伴って大きくなり、石炭灰のみあるいは石炭灰の一部をスラッジで置換した材料では20°C以上、石炭灰の一部をスラッジで置換し、さらに消石灰を添加した材料では10°C以上で養生温度の影響を大きく受ける。

(6) 養生温度20~40°Cの範囲において一軸圧縮強さと積算温度との関係は、1本の直線に回帰されるのでこの温度範囲においては養生日数と養生温度から一軸圧縮強さを予測することが可能である。

以上のように、石炭灰供試体の一軸圧縮強さおよび体積変化は、石炭灰の種類や養生方法の違いにより大きく異なることが改めて確認された。したがって、施工地域の気象や地下水位等を考慮した配合設計・養生を行えば、石炭灰や排煙脱硫スラッジも土質材料として十分に利用できるものと判断される。その場合、材料を混合してから短時間で運搬、転圧が行われる場合はともかくとして、天候や工程の都合上施工が順延された場合には、保存期間中における化学反応の進行により混合材料の性質が変化し、その締固め特性が変化することが懸念される。石炭灰あるいは石炭灰と排煙脱硫スラッジの混合材料の有効利用をさらに促進させるためには、この点について十分に検討しておくことが必要であり、今後の検討課題としたい。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、長岡技術科学大学小川正二教授および金沢大学鳥居和之助教授には貴重なご助言を賜った。また、石川工業高等専門学校能沢真周技官、金沢工業大学および石川工業高等専門学校卒業生諸氏には、実験および結果の整理に多大なるご協力をいただいた。ここに、深甚なる謝意を表する。

#### 参 考 文 献

- 1) 桑原武・山本三千昭・松村宏隆：石炭灰・スラッジ・消石灰混合材料の特性におよぼすスラッジの影響，土木学会第46回年次学術講演会講演概要集，pp. 1042~1043, 1991.
- 2) 土木学会・エネルギー-土木委員会・新エネルギー技術小委員会：石炭灰の土木材料としての利用技術の現状と将来展望-埋立，盛立，地盤改良-，1990.
- 3) 鳥居和之・川村満紀・柳場重正：締め固めた石炭灰における反応生成物と強度に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，No. 372, pp. 64~74, 1986.
- 4) 堀内澄夫・玉置克之・尾上篤生・山田貞仁：石炭灰の土木材料としての利用に関する研究（その8）高密度スラリーの固化強度特性に及ぼす養生温度の影響，第20回土



- 質工学研究発表会講演集, pp. 1619-1620, 1985.
- 5) 長谷川幸雄・長谷川英明：排煙脱硫石こうの土質工学的物性と路盤材への適用, 土と基礎, Vol. 27, No. 12, pp. 3-10, 1979.
  - 6) 稲松敏夫・今越茂・金田秋雄・渡辺亮一・鳥居和之・山岸一隆：排煙脱硫石こうによるのり面安定処理に関する実用化研究, 土と基礎, Vol. 27, No. 12, pp. 11-16, 1979.
  - 7) 三木五三郎：石炭灰による土地造成の問題点, 材料, Vol. 19, No. 205, pp. 64-68, 1970.
  - 8) 土質工学会編：土質試験法 [第2回改訂版], 1979.
  - 9) 片岡哲之・緒方信英・岡本敏郎・横倉俊幸：締固めた石炭灰の強度特性, 第26回土質工学研究発表会講演集, pp. 1883-1884, 1991.
  - 10) 久楽勝行・三木博史・林義之・増田隆司：下水汚泥焼却灰の土質改良効果の判定手法, 土木学会第44回年次学術講演会講演概要集, pp. 794-795, 1989.
  - 11) 日本道路協会編：アスファルト舗装要綱, 1985.
  - 12) 岡田清・六車照：コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, 1981.
  - 13) 日本建築学会編：建築工事標準仕様書・同解説—JASS 5 鉄筋コンクリート工事, 1986.
- (1992. 3. 10 受付)

## INFLUENCE OF CURING CONDITIONS ON UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH AND VOLUME CHANGE OF COMPACTED FLY ASH

Hiroaki SANŌ, Mikio YAMADA, Minoru OHTA and Michiaki YAMAMOTO

In order to investigate the influence of curing conditions on unconfined compressive strength and volume change of compacted fly ash, unconfined compression tests have been performed on moulded specimens of fly ash under different curing conditions.

It was found that unconfined compressive strength and volume change were affected by curing conditions. Therefore, curing condition is one of the most important factors in considering the strength and the volume change of compacted fly ash.