

石炭灰有効利用のための土質改良材としての土質試験

Test of soil for utilization of surplus fly ash to subsoil improvement

○ 近藤 寛通 *、木村 稔*、大塚 悟**、新実 佳朗***、堤 博恭****

Hiromichi Kondou* Minoru Kimura* Satoru otuka** Yosirou Niimi*** Hiroyasu Tutumi****

ABSTRACT: In order to utilize coal ashes which are produced from thermal power plants as material to improve defective soil, the important factors and suitable level of addition of coal ashes to soil were found out by using statistic analysis (design of experiment and multiple regression analysis). The analytic results show that the coal ashes themselves have less strength effect, but are effective to create the environment (moisture content, pH) promoting chemical reaction in the soil. Furthermore, it has the catalytic function to promote the effect of quicklime which is main content of ashes. It is almost confirmed that the addition of ashes to soil could be more than 12%.
KEYWORDS: improvement material of defective soil, surplus fly ash, quicklime, gypsum statistics technique.

1. はじめに

我が国の電力産業は、エネルギー源の多様化による電力安定供給の施策に沿って、石炭火力発電所を各地に建設している。平成5年実績では、その発電量は全体の12%を占めるに至ったが、年間450万t¹⁾の石炭灰も発生している。このうち、一部はセメント材料などに有効利用されている²⁾ものの、多くは山間地や海面に埋立て処分している。また、建設省の調査によれば、建設部門でも平成5年度実績で4億3700万m³の建設発生土が搬出され、そのうち再利用量(工事間利用量)は未だ9千5百万m³(21%)³⁾であり有効利用が進んでいるとは言い難い。特に、軟弱な第3、4種建設発生土に限れば再利用率は更に低くほとんどが埋立て処分され、処分場の不足、長距離運搬による建設費の高騰や環境・景観破壊などの問題を招いている。更に、緑豊かな山間地などから大量の新規土砂を埋戻し材料などとして採取している。

これら副産物の運搬・処分と資源採取による環境負荷は典型的な自然破壊の1事例であり、環境への影響が大きな社会問題になっている。このため、これら業種は1991年に制定された「再生資源の利用促進に関する法律(リサイクル法)」では再利用を促進すべき業種に指定され、石炭灰、建設発生土、泥土などの再利用を促している。これら副産物の有効利用に関する問題は環境システムと言う枠組みの中で捉え、その中で如何にリサイクルしていくかが重要になる。本論文では石炭灰を不良な土砂の土質改良材として利用することを目的に室内土質試験により改良要因の分析・選定を試みたのでここに報告する。

2. 石炭灰の再利用の現状

石炭灰は自硬する性質のある高アルカリ物質であり、道路盛土材や農業土壌など土質系材料への適用に関する研究報告がある。石炭灰のうちフライアッシュは一般の土砂に比べてセメントや石灰との反応性が高く、フライアッシュ・コンクリートの長期強度の高さはこの反応性の高さが要因になっている。更に、石炭火力発電での脱硫過程で発生する脱硫石膏はセメントなどを混合するとエトリンジャイトを生成し、地盤の強度

*中部電力(株)土木建築部、**長岡技術科学大学環境・建設工学系、*** (財)新エネルギー財団水力本部、****清水建設(株)名古屋支店土木技術部

をあげることが知られている。

これらの性質を利用すれば不良土の改良材として活用できると考えられ、環境保全、建設費用縮減の面からも一石二鳥である。嘉門⁴⁾、貝沼⁵⁾、高橋⁶⁾、Nontananandh⁷⁾らは室内実験でフライアッシュや脱硫石膏を固化助材として利用できることの研究結果を得ている。しかし、フライアッシュ単独では、石炭灰の添加量と比例して土砂の液性限界も低下して強度の増加が期待できない研究事例⁸⁾もあり、この種の研究事例は極めて限られていると言える。

3. 本研究の考え方

不良土を改良した土（以下「改良土」と言う）の利用を促進するためには、その品質特性として「地盤特性」と「施工性」の両方を保証する必要がある。本論文では生石灰を固化主材、発電所から大量に搬出される石炭灰と石膏を固化助材として軟弱な第3、4種建設発生土、泥土、浚渫土を盛土材や埋戻し材に改良する方法を提案し、その強度特性を室内実験により確認している。この土質改良には多くの要因が影響しあうことから、本研究では統計手法である「実験計画法」を用いて、回数を大幅に減らした実験で統計的に重要要因を絞り込むとともに、「重回帰分析法」を適用して、特性と要因の関係を定量的に把握している。

4. 実験計画による品質特性とその要因分析

4.1. 目標強度

改良土を埋戻材などに適用する場合、施工性と完成後の地盤特性（強度、膨張率など）を保証する必要がある。このうち施工性はトラフィカビリティにより表現でき、通常、コーン指数 q_c 又は一軸圧縮強度 q_u で管理される。一方、地盤特性は一軸圧縮強度、CBRなどの強度や変形係数などにより表現され、これらの間には相関関係がある。図-1、図-2は今回実験で得られた一軸圧縮強度 q_u と CBR、変形係数 E_{50} の関係を示したものである。このことから、一軸圧縮強度 q_u で施工性と地盤特性の両方を代表させられると考え、以下これを使用する。本論文では埋戻し材、路床盛土材に適用し、施工時にダンプ・トラックが走行できる状態を想定して、目標強度を $q_u=2.5\text{kgf/cm}^2$ とした。

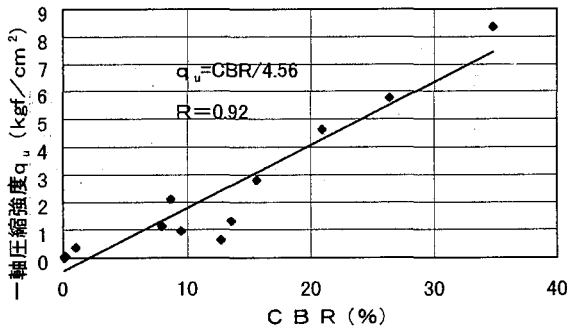


図-1 一軸圧縮強度 q_u と CBR の関係

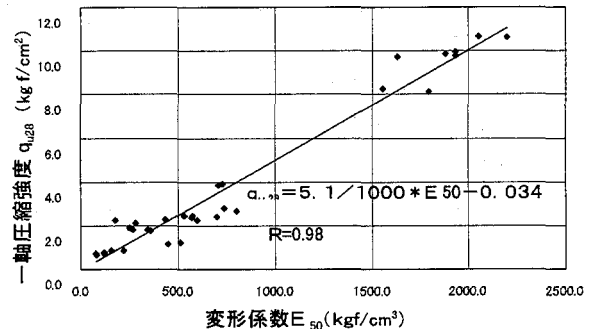


図-2 一軸圧縮強度 q_{u28} と変形係数 E_{50} の関係

4.2. 材料

本実験では、不良土としてシルトから粘性土 (MH) に分類される浚渫土の仮置き土を対象にした。また、過去の知見から^{2), 4), 5), 6), 7), 8), 9), 10)}から改良主材として工業用生石灰、改良助材として工業用二水石膏及び中部電力(株)南火力発電所から日常的に排出される「混合炭フライアッシュ」と改良効果が高いと考えられる CaO 含有量の多い「マッセルブルク炭フライアッシュ」（以下「M灰」と言う）を適用し、改良土の強度に与える効果の度合いと配合水準（添加率）を検討している。図-3、表-1にフライアッシュの粒度分布と化学分析結果、図-4、表-2に不良

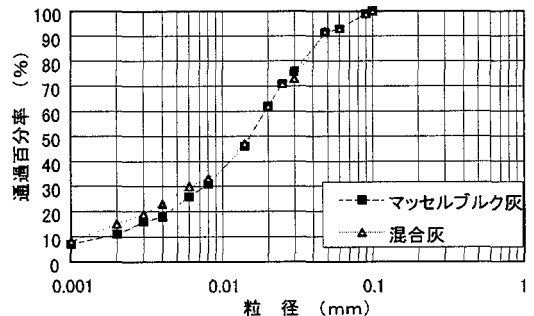


図-3 石炭灰の粒径加積曲線図

土の粒度分布と土質試験結果を示す。

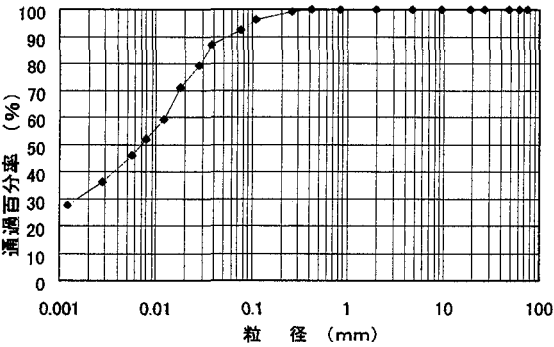


図-4 不良土の粒径加積曲線図

4.3. 特性と要因の抽出

特性（改良土の一軸圧縮強度 q_u ）を左右する要因として、次の①～⑤を選定し、新たに改良時の化学反応に影響すると思われる改良材の「混合手順」⑥と添加材相互の影響（交互作用）⑦を考慮した。

①不良土の初期含水比 W_0 ：生石灰の地盤改良でも元地盤の含水比により強度は大きく変わる。その水準は $W_{01}=50\%$ 、 $W_{02}=75\%$ とする。

②不良土（湿潤重量）に添加する生石灰の重量 L ：生石灰の量は混合土の強度に大きく影響する。また、ポズラン反応などの化学反応を促進させるアルカリ性状下にする効果も高い。その水準は $L_1=1.5\%$ 、 $L_2=3.0\%$

③不良土に添加する石膏の重量 G ：ポズラン反応に不可欠の材料で、少量の石膏の添加は強度を増加させる。水準は $G_1=0.2\%$ 、 $G_2=0.5\%$

④不良土に添加する石炭灰の重量 F ：乾灰は含水比を低下させるうえ、 CaO の多い石炭灰は単独で自硬性がある。更に、生石灰と同様に高 pH 環境にする効果も高い。
 $F_1=3.0\%$ 、 $F_2=6.0\%$ 、 $F_3=9.0\%$ 、 $F_4=12.0\%$

⑤添加する石炭灰種 A ： CaO の含有量の違いにより強度への影響を確認する。その種類は、
 A_1 =混合灰、 A_2 =マゼンラ灰

⑥混合手順 B ：石炭灰単独では強度増加効果は少ないと考えられるが、含水比低下、pH 向上など反応を促進させる環境を整備する効果がある。すなわち、石炭灰の添加順序が強度に影響することも考えられる。

B_1 =石炭灰先行添加、 B_2 =改良材（生石灰、石炭灰、石膏）一括添加

⑦交互作用：添加材相互の効果が影響しあうことが考えられる。この要因相互間の作用として、
 $F \times G$ 、 $F \times L$ 、 $F \times A$ 、 $L \times G$ 、 $G \times A$ 、 $L \times A$ を考慮する。

4.4. 実験計画の割り付け

石炭灰添加率 F は 4 水準とし、そのうち第 1 次効果 F_1 だけの交互作用を考慮して線点図に割り付けた。土と改良材は JSF T 812-1990 に準じてホバート型ミキサーで 5 分間混合し、直径 5cm のモールド充填した。脱型

表-1 フライアッシュの化学成分

化 学 成 分	項 目	混合灰	M 灰
	酸化カルシウム CaO	4.9%	9.7%
	酸化珪素 SiO_2	62.1	54.4
	酸化第 2 鉄 Fe_2O_3	5.2	6.1
	酸化アルミニウム Al_2O_3	21.2	24.0
	酸化マグネシウム MgO	0.8	1.0
	酸化カリウム K_2O	0.8	0.5
	酸化硫黄 SO_3	0.3	0.7
	酸化ナトリウム Na_2O	0.4	不検出
	酸化チタン TiO_2	1.2	1.7
	酸化りん P_2O_5	0.6	0.6
	水素イオン濃度 pH	12.00	12.41
土 質 特 性	土粒子の密度 ρ_s kgf/cm^3	2.22	2.28
	砂分 $75 \mu m \sim 2mm$ %	5	5
	シルト分 $5 \sim 75 \mu m$ %	73	68.5
	粘土分 $5 \mu m$ 未満 %	22	26.5
	平均粒径 D_{50} mm	0.015	0.015
	液性限界 W_L %	30.61	32.04

表-2 実験対象土の土質試験結果

	項 目	採取土
一般	土粒子の密度 ρ_s g/cm^3	2.658
	自然含水比 W_n %	61.6
粒度 分布	礫分 2mm 以上 %	0
	砂分 $75 \mu m \sim 2mm$ %	7.5
	シルト分 $5 \sim 75 \mu m$ %	49.3
	粘土分 $5 \mu m$ 未満 %	43.2
コンス テンシ 特性	液性限界 W_L	56.0
	塑性限界 W_p	27.3
	塑性指数 I_p	28.7
分類	分類名	シルト
	分類記号	MH
強度	一軸圧縮強度 q_u kgf/cm^2	0.03
	変形係数 E_{50} kgf/cm^2	0.33
化学	pH (22.9℃)	9.62
	強熱減量	6.7
化学 成分	SiO_2 (重量法) %	74.4
	Al_2O_3 (ICP 発光法) %	13.7
	Fe_2O_3 (ICP 発光法) %	4.17
	その他 %	7.73

後、ラップで包み養生箱内で試験日まで養生した。表－3に直交表と実験結果を示す。

表－3 直交表と実験結果 特性値：kgf/cm²

因子 列 実験 No	灰 種 A 15	手 順 B 13	生 石 灰 L 4	含 水 比 W 6	石 炭 灰 F 1～3	石 膏 G 8	交互作用						誤 差 e 10	特性値 (qu ₇)		特性値 (qu ₂₈)	
							A × F ₁ 4	A × G 7	A × L 11	F ₁ × G 9	F ₁ × L 5	G × L 12		1 回	2 回	1 回	2 回
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.87	0.89	2.24	2.12
2	2	2	1	1	1	2	2	1	2	2	1	2	2	1.48	1.53	1.82	1.89
3	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1.17	1.14	1.21	1.15
4	1	1	2	2	1	2	1	2	2	2	2	1	2	1.34	1.34	2.80	2.67
5	2	1	1	2	2	1	2	2	2	1	1	1	2	0.49	0.45	0.72	0.78
6	1	2	1	2	2	2	1	2	1	2	1	2	1	0.67	0.67	0.85	0.83
7	1	2	2	1	2	1	1	1	2	1	2	2	2	5.03	4.94	8.14	8.28
8	2	1	2	1	2	2	2	1	1	2	2	1	1	5.98	5.90	9.78	9.75
9	2	2	1	1	3	1	1	2	2	2	2	1	1	1.76	1.59	2.39	2.46
10	1	1	1	1	3	2	2	2	1	1	2	2	2	1.64	1.57	2.27	2.23
11	1	1	2	2	3	1	2	1	2	2	1	2	1	1.16	1.01	2.46	2.42
12	2	2	2	2	3	2	1	1	1	1	1	1	2	1.65	1.65	3.87	3.89
13	1	2	1	2	4	1	2	1	1	2	2	1	2	0.54	0.48	0.65	0.71
14	2	1	1	2	4	2	1	1	2	1	2	2	1	1.23	1.17	1.79	1.81
15	2	1	2	1	4	1	1	2	1	2	1	2	2	5.35	4.94	9.86	9.97
16	1	2	2	1	4	2	2	2	2	1	1	1	1	6.85	6.63	10.66	10.67
合 計														37.20	35.89	61.51	61.63

4. 5. 実験結果の解析

4. 5. 1. 7 日強度

7 日の一軸圧縮強度 q_{u7} に影響を与える各要因の分散を算出した。この時石炭灰の 2 次効果 F_q 、3 次効果 F_c の交互作用は 2 要因 (石炭灰 F と生石灰 L など) 間の繰返しのある二元配置を作り算出した。表－4 に分散分析表、図－5 ～ 図－8 に重要要因の信頼区間を示す。この表から以下の傾向が得られる。

①不良土含水比 W_0 は改良土強度に最も影響を与え、 W_0 が低いほど強度の伸びは著しい。

②生石灰添加率 L は含水比 W_0 と同程度の効果がある。含水比 $W_0 \approx 60\%$ では、生石灰添加率 $L \approx 2.0\%$ 程度で目標強度 $q_u = 2.5 \text{ kg/cm}^2$ が確保できる。

③石膏添加率 G は強度発現効果は低いが、 $G = 0.5\%$ 以上で効果的となる。

④石炭灰添加率 F は石炭灰単独でも、含水比 W_0 、生石灰 L の次に強度発現効果が高い。 $F = 12.0\%$ 以上添加しても強度を増進させることができる。

⑤交互作用 $F \times L$ は寄与率が最も高い。別の実験で石炭灰の単独添加では効果がないことが解っている³⁾。ことから、石炭灰の添加により生石灰の効果が増進されると考えられる。

表－4 一軸圧縮強度 q_{u7} の分散分析表

要因	自由 度 f	変動 S	分散 $V = S/f$	分散比 $F_0 = V/V_e$	純変動 $S' = S - F \cdot V_e$	寄与率 ρ $\rho = S'/ST$	修正 $\rho f'$
A	1	0.109	0.109				
B	1	0.188	0.188				
FI	1	10.101	10.101	48.8 **	9.894	7.5	5.4
	1	(10.101)	(10.101)	(52.1)**	(9.907)	(7.5)	
Fq	1	0.019	0.019				
	1	(0.019)	(0.019)				
Fc	1	18.034	18.034	87.1 **	17.827	13.4	9.6
	1	(18.034)	(18.034)	(93.0)**	(17.840)	(13.4)	
G	1	2.824	2.824	13.6 **	2.617	2	1.4
L	1	47.704	47.704	230.5 **	47.497	35.7	25.7
	1	(47.704)	(47.704)	(245.9)**	(47.510)	(35.7)	
W	1	52.002	52.002	251.2 **	51.795	39	28.1
A×FI	1	0.268	0.268				
A×G	1	0.138	0.138				
A×L	1	0.264	0.264				
G×FI	1	0.083	0.083				
L×FI	1	0.009	0.009				
		(9.860)	(9.860)	(50.8)**	(9.666)	(7.3)	(5.3)
L×Fq	1	---	---				
		(0.027)	(0.027)				
L×Fc	1	---	---				
		(42.149)	(42.149)	(217.3)**	(41.955)	(31.6)	(22.7)
G×L	1	0.426	0.426				
e	1	0.570	0.570				
	(0)	(0.113)	---				
[e]	[10]	[2.074]	[0.207]		(3.109)	2.3	1.7
em	16	0.150	0.009		0.150	0.1	0.1
	[26]	[5.041]	[0.194]		[6.011]	[4.5]	
計	31	132.889			132.889	100%	100%

・()内は L と F の分散分析から算出した値。
・[e] は有意で無い要因をプールした誤差。[e] は実験計画、[em] は 2 元配置

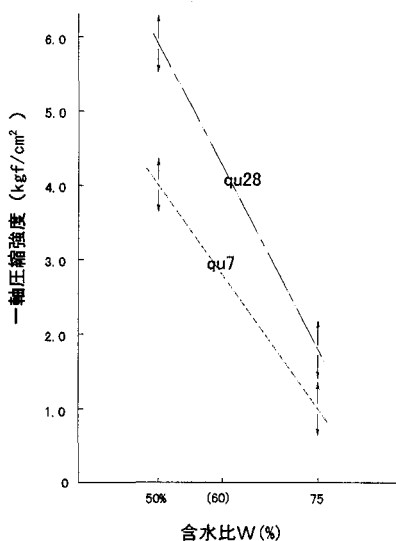


図-7 含水比の信頼区間

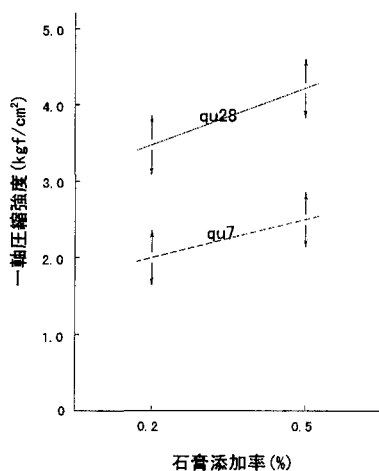


図-7 石膏の信頼区間

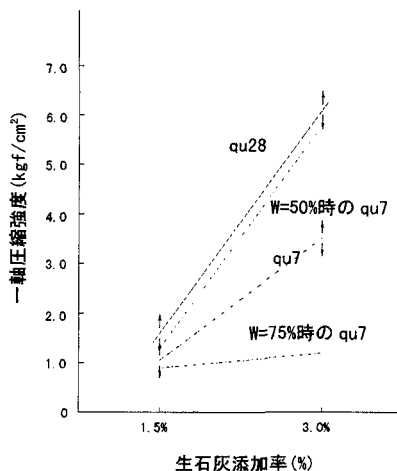


図-6 生石灰の信頼区間

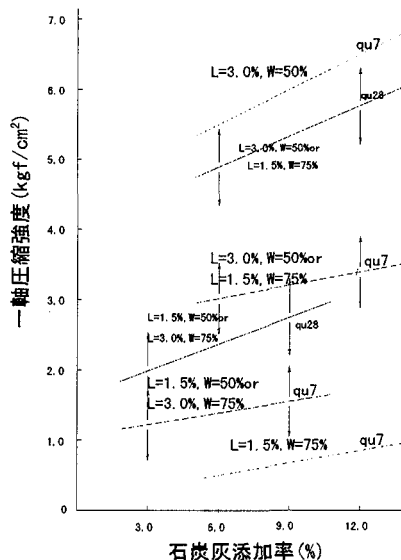


図-8 石炭灰の信頼区間

4.5.2. 28日強度

表-5に分散分析の結果、図-5～図-8に重要要因の信頼区間を示す。得られる傾向は7日強度の結果と概ね同じであるが、相違点は以下の通りである。

- ① 28日強度は7日強度と異なり、生石灰Lの添加量に最も影響され、約3割の寄与率がある。
- ② 不良土含水比 W_0 は生石灰の添加量の次に影響を与えている。強度の伸びは含水比に左右される。
- ③ 石膏と生石灰の交互作用 $G \times L$ が有意なことから、石膏には僅かではあるが生石灰の効果を増加させる働きが認められる。

5. 重回帰分析による解析

5.1. 一軸圧縮強度 q_u

前述と同一データを用いて重回帰分析法で解析した。一軸圧縮強度 q_{u7} 、 q_{u28} の重回帰式は下式であらわされ、寄与率の高い要因は、7日強度では含水比 W_0 、生石灰添加率L、石炭灰添加率F、石膏添加率Gの順であるが、28日強度では生石灰添加率Lの効果の方が含水比 W_0 の効果より大きくなっている。

$$q_{u7} = -0.097 \times W_0 + 1.631 \times L + 0.171 \times F + 1.867 \times G + 2.758$$

$$\text{重相関係数 } R^2 = 0.85$$

$$q_{u28} = -0.16 \times W_0 + 3.01 \times L + 0.31 \times F + 2.32 \times G + 3.70$$

$$\text{重相関係数 } R^2 = 0.87$$

今回使用した不良土の液性限界は $W_L =$

56%であり、 $W_0 > 60\%$ では運搬中に大きな変形を生じると考えられる。不良土含水比として $W_0 = 60\%$ 程度の条件で $q_{u7} = 2.5 \text{ kg/cm}^2$ を確保するためには、石炭灰添加率 $F = 15\%$ 、石膏添加率 $G = 1\%$ とした場合、上記の重回帰式より生石灰の添加量は $L = 1.0\%$ で十分である。

$$L = (2.758 - 5.820 + 2.565 + 1.867) / 1.631 \approx 1.0\%$$

また、この時の改良土の28日強度 q_{u28} の予測値は 4.1 kg/cm^2 が確保できる。

$$q_u = 3.01 - 9.6 + 4.65 + 2.32 + 3.70 = 4.08 \text{ kg/cm}^2$$

5.2. 強度発現環境に与える重要要因

改良土の強度を発現させる環境として、不良土の含水比 W_0 と水素イオン濃度 pH がある。一般的には不良土の含水比を極力低下させ、 pH は極力上昇させるのが有利である。以下に、含水比を低下させる重要要因と pH を上昇させる重要要因について重回帰分析した。

環境整備要因	特性	重回帰式	重相関係数	備考
7日養生後の低下含水比	$W_0 - W_7$	$0.23 \times W_0 + 0.72 \times F + 1.26 \times L - 11.14$	$R^2 = 0.97$	・低下含水量は F, L の量に左右される。
28日養生後の低下含水比	$W_0 - W_{28}$	$0.24 \times W_0 + 0.69 \times F + 1.23 \times L - 11.59$	$R^2 = 0.98$	・ F の方が L より効果的。 ・初期含水量により左右される
混合直後の pH 低下量	$pH_1 - 9.62$	$0.036 \times L - 0.110 \times G + 0.004 \times (W_0 - W_7) + 2.68$	$R^2 = 0.86$	・ L は速効的、長期的に pH を高める。
7日養生後の pH 低下量	$pH_7 - pH_1$	$0.30 \times L - 0.52 \times G + 0.02 \times F - 1.098$	$R^2 = 0.86$	・ G は pH を下げる。 ・ F は7日以降 pH を高める。
28日養生後の pH 低下量	$pH_{28} - 9.62$	$0.43 \times L + 0.03 \times F - 0.62 \times G + 1.25$	$R^2 = 0.90$	・低下含水量 (L, F の量で決まる)は pH を左右する。

5.3. 一軸圧縮強度に影響を与える石炭灰成分の選定

石炭灰は使用する炭種により、構成する化学成分の構成が大きく変わる。石炭灰を改良材として適用する場合には強度発現に有効な成分を把握しておく必要がある。重回帰分析する場合、各成分間の相関係数が高く、多重共線性が生じるため、石炭灰添加率 F に変え各成分毎の添加率を要因として解析して、合算した。

$$q_{u7} = 0.10 \times W_0 + 1.63 \times L + 1.87 \times G + 0.50 \times CaO + 0.08 \times SiO_2 + 0.21 \times Fe_2O_3 + 0.19 \times Al_2O_3 + 2.71$$

$$\text{重相関係数: } R^2 = 0.83$$

CaO は水和反応、 SiO_2, Al_2O_3 はポズラン反応やエトリンジャイト反応による強度増進効果と考えられる。

6. 本分析より得られる知見

実験計画法に基づく室内実験結果および重回帰分析による解析結果をまとめると以下の通りである。

表-5 一軸圧縮強度 q_{u28} の分散分析表

要因	自由度 f	変動 S	分散 V=S/f	分散比 F0=V/Ve	純変動 S'=S-F·Vef	寄与率 $\rho = S'/ST$	修正 $\rho f'$
A	1	0.308	0.308				
B	1	0.551	0.551				
Fl	1	33.782	33.782	155.0 **	33.564	8.8	6.5
	1	(33.782)	(33.782)	(98.2)**	(33.438)	(8.7)	
Fa	1	0.025	0.025				
	1	(0.025)	(0.019)				
Fc	1	41.657	41.657	191.1 **	41.439	10.8	8.0
	1	(41.657)	(41.657)	(121.1)**	(41.313)	(10.8)	
G	1	4.515	4.515	20.7 **	4.297	1.1	0.8
L	1	162.090	162.090	743.5 **	161.872	42.1	31.1
	1	(162.090)	(162.090)	(471.2)**	(47.510)	(42.1)	
W	1	135.795	135.795	622.9 **	135.577	35.3	26.1
A×Fl	1	0.720	0.720				
A×G	1	0.000	0.000				
A×L	1	0.005	0.005				
G×Fl	1	0.008	0.008				
L×Fl	1	1.514	1.514	6.9 *	1.296	0.3	
	1	(39.841)	(39.841)	(115.8)**	(39.497)	(10.3)	7.6
L×Fa	1	---	---				
	1	(0.000)	(0.000)				
L×Fc	1	---	---				
	1	(97.469)	(97.469)	(283.3)**	(97.125)	(25.3)	18.7
G×L	1	2.634	2.634	12.1 *	2.416	0.6	0.4
e	1	0.130	0.130				
	(0)	(0.000)	---				
[e]	[8]	[1.747]	[0.218]	[72.7]**	[3.273]	[0.9]	0.7
em	16	0.044	0.003		0.044	0.1	0.1
	[26]	[8.939]	[0.344]		[10.659]	[2.8]	
計	31	383.778			383.778	100%	100%

・()内は L と F の分散分析から算出した値。

・[e]は有意で無い要因をプールした誤差。[e]は実験計画、[em]は2元は配置。

①不良土の含水比は極力低下させる。その目安は概ね液性限界 W_L 以下と考えられる。

②石炭灰単独での改良効果は少ないが、乾灰の使用時には不良土の含水比低下効果、水素イオン濃度 pH の上昇効果が高く、強度発現のための環境を整える効果が高い。石炭灰添加率は $F=12\%$ 以上添加可能。

③石炭灰の選定基準は SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO の含有量の多い灰種を選定するのが効果的である。

④生石灰は不良土を改良する主材である。

含水低下効果が高いうえ、ポゾラン反応などあらゆる反応の基材となる。また、土砂の含水量の違いにより強度の伸びは大きく異なるうえ、石炭灰の触媒的な働きにより、生石灰の効果を大きく増進させる。添加率は目標強度により決定するが、概ね、 $L=1\sim2\%$ で十分である。

⑤石膏 G の添加は含水比を上昇させ、 pH を低下させる働きがあり多添加は逆効果になる恐れがある。しかし、強度をさらに上昇させる効果がある。石膏添加率は概ね、 $G=0.5\%$ 以上。

⑥中期強度（28日養生）では石膏 G が触媒的な働きをして、生石灰の働きを助ける効果がある。

7. おわりに

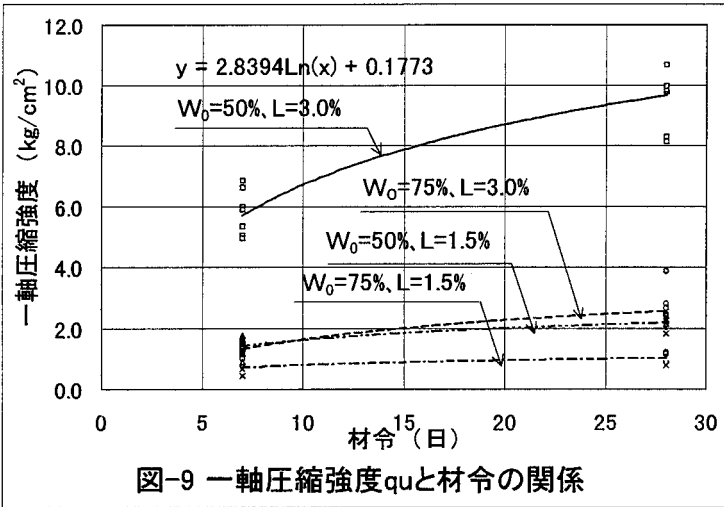
本研究では、不良土の改良材としての石炭灰の効果がほぼ確認できた。中部圏から搬出される第3、4種建設発生土は1,400万 m^3 程度¹¹⁾、泥土や浚渫土は300万 m^3 程度³⁾、石炭灰は38万 t 程度¹⁾である。土質改良材（添加率12%）として石炭灰を全量利用する時の不良土量は160万 m^3 程度である。すなわち、建設発生土有効量利用センター（土砂の需要と供給情報を管理する情報センター¹²⁾と不良土を良質土に改良する施設¹³⁾などの改良土を埋戻し土などに利用するシステムが整備されれば、石炭灰を全量利用することは困難なことではないと言える。

最終の目標は全て廃棄物を利用した改良材の開発である。今後、土質の種別を増やすとともに、生石灰に変え貝殻焼却灰、石膏に変え脱硫石膏や石膏ボードなどを適用した試験も追加して、大量に処分される石炭灰などの電力廃棄物と建設副産物とから改良土を製造する事により、廃棄物処分と土砂採取に伴う環境破壊の防止に貢献できると確信している。

最後に、本論文は名古屋大学の松尾稔教授を座長とする「建設発生土類資源有効利用システム研究会」での成果の一部を発表したものである。この研究過程において、松尾教授及び研究会のメンバーの方々はもとより、統計数理化研究所の柏木助教授、名古屋大学の森川助教授から有益な助言を受けたことに感謝の念を表わすものである。

（参考文献）

- 1) 環境技術協会、日本フライアッシュ協会：石炭灰ハンドブック、1995年10月
- 2) 土木学会、石炭灰を利用した利用技術の現状と将来展望、1990年3月
- 3) 建設省、平成5年度建設副産物実態調査（建設省）、……
- 4) 嘉門雅史、友久誠司、壺内賢一：各種廃棄物のセメント系固化材による有効利用、セメント技術年報、1987年
- 5) 貝沼憲男、高橋守男、篠原俊彦：火力発電所取水路清掃員の土木分野へのリサイクルに関する研究結果について（その1）、1993年1月、電力土木、No237



- 6) 高橋守男、土井洋一、三上博：火力発電所副産物の地盤改良材への利用に関する研究、第1回環境地盤工学シンポジウム、1994年
- 7) Nontananandh, S. et al. (1992): Proc. First National Symp. on Environment Geotechnology (The Japanese Geotechnical Soc.), pp.121-128
- 8) 中部電力㈱、石炭灰を利用した掘削残土処理に関する基礎研究、1993年7月
- 9) 土木安定処理工法委員会、石灰による安定処理工法、1970年6月
- 10) 後藤茂、堀内澄夫、尾上篤夫、石炭灰の土木材料としての利用研究（その2）、土質工学会、1982年6月
- 11) 今井一之、片岡賢一、花木道治：建設発生土の現状と問題点、土木学会、1996年10月
- 12) 林良嗣、木村稔、富田安夫、新実佳朗、原田健二：建設発生土再利用のための地域コーディネーションシステム、土木学会、1996年10月
- 13) 本城勇介、小川俊二、永瀬信一、渡辺浩二：建設発生土類再利用センターの必要性と機能、土木学会