

石炭灰の不良土改良材としての適用実験

中部電力株式会社：正会員：近藤寛通、正会員：木村 稔、藤川恵司
清水建設株式会社：正会員：堤 博恭

1. まえがき

経済成長に伴い、中部地方でも4,580万地山 m^3 (全国では4億3,700万地山 m^3 ：平成5年度実績)の建設発生土が搬出されている。その7割は山間地などに埋立処分され、その一方で1,510万 m^3 の新規土砂を採取している。これは搬出側と受入れ側の「土質」、「時期」、「土量」の条件が一致しないためであり、不法投棄、交通渋滞や森林破壊などの環境問題を招いている。

一方、電力の安定供給を図るためエネルギーの多様化が進められており、中部地方でも石炭火力発電所が建設されている。これに伴い55万t以上の石炭灰や石膏が搬出され、その一部はセメント材料などに有効利用されているものの、約7割は埋立処分され同様の問題を招いている。本稿は、石炭灰等を軟弱な建設発生土、泥土、浚渫土(以下「不良土」と言う)の土質改良材として有効利用することの可能性を検討したものである。

2. 不良土改良実験の概要

改良土を利用する場合には施工時のトラフィカビリティを確保する必要がある。ブルドーザーを想定した場合、コーン指数は $q_c \geq 4.0 \sim 7.0 \text{ kgf/cm}^2$ 以上必要であり、改良土強度としては、下記以上を目標に改良する。

$q_u = q_c \times F_s / 5 \geq 1.0 \sim 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ (但し、安全率 F_s)

(1) 土質改良要因の検討

通常、不良土は生石灰やセメントを混合して改良している。これはポツラン反応などによるもので、石炭灰にはこの反応に必要なCa, Si, Alなどの元素が多く含まれているうえ、不良土含水比 W_0 や混合土pHなどの反応を活性化させる環境を整える効果がある。

ここでは、特性として改良土の一軸圧縮強度 q_u 、これを左右する要因として表-1の項目を選定し、個々の要因と交互作用の効果を定量的に把握するため、「実験計画法」と「重回帰分析法」を適用した実験をした。

(2) 実験計画法の割付け

本研究は石炭灰に主眼を置いているため、石炭灰添加率だけは4水準として2水準系の L_{16} の直行表の第1～3列に、その交互作用は1次効果だけを求め、2, 3次効果には他の要因を割付けた。表-1の関係に基づいた線点図を図-2に示す。

3. 実験結果の解析

(1) 実験計画

各要因の分散分析から、95%限界(*)以上となる重要要因を決定した。しかし、石炭灰の3次効果 F_3 が高度に有意(**)になったため、Fに関わる全要因間の二元配置から別途交互作用を算出し合成した。

表-2に分散分析表、図-3～5に重要要因の信頼区間を示す。

(2) 重回帰分析

重回帰分析法を適用して改良土の一軸圧縮強度と改良環境(pH、含水比)に影響を与える重要要因を特定し

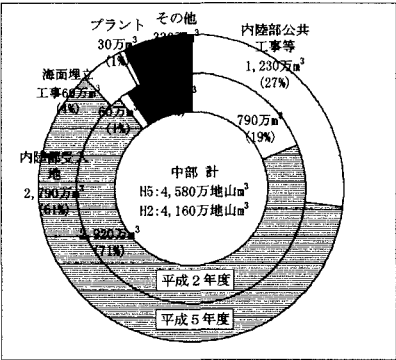


図-1 搬出先別建設発生土利用量

表-1 改良要因と水準

改良要因	記号	水準	水準別内訳	
不良土含水比	W_0	2	$W_{01}=50\%$	$W_{02}=75\%$
生石灰添加率	L	2	$L_1=1.5\%$	$L_2=3.0\%$
石炭灰種	A	2	$A_1=\text{混合灰}$	$A_2=\text{マツダ・ブル灰}$
混合手順	B	2	$B_1=F$ 先行添加	$B_2=\text{一括添加}$
石炭灰添加率	F	4	$F_1=3.0\%$ $F_2=9.0\%$	$F_3=6.0\%$ $F_4=12.0\%$
石膏添加率	G	2	$G_1=0.2\%$	$G_2=0.5\%$
交互作用	$A \times F, A \times G, G \times F, L \times F, L \times G, L \times F \times G, G \times L$			

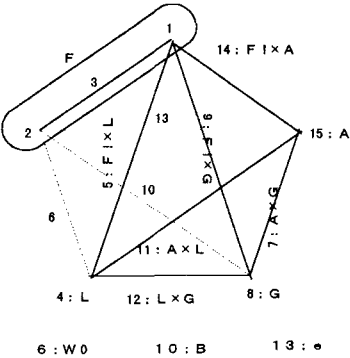


図-2 線点図

た。この時、多重共線性を防止するとともに、95%信頼限界の $t(n, 0.05)$ で検定した。

①強度に影響する重要要因

有意になる要因と改良土強度の予測式は以下の通りである。

$$q_u = 0.10 \times W_0 - 1.63 \times L + 0.17 \times F + 1.87 \times G + 2.56$$

重相関係数 $R^2 = 0.85$

②改良環境影響要因

改良環境として、不良土含水比 W_0 、混合土 pH があり、その予測式は以下の通りである。

$$pH_7 - 9.62 = 0.34 \times L - 4.39 \times G + 2.89 \times F + 1.59$$

重相関係数 $R^2 = 0.88$

$$W_0 - W_7 = 0.23 \times L + 0.72 \times F + 1.26 \times L - 10.67$$

重相関係数 $R^2 = 0.96$

4. 解析結果

解析結果から改良土の強度に影響を与える重要(有意)な要因には以下がある。

(イ) 生石灰添加率 L : 寄与率は $\rho = 31\%$ で強度を左右する最重要要因であるが費用面から極力少なくすべきである。目標強度から、 $F = 1.5 \sim 2.0\%$ 前後である。

(ロ) 不良土含水比 W_0 : 寄与率は $\rho = 26\%$ で生石灰に次いで重要な要因で初期含水比により養生後の強度増進効果は大きく異なる。含水比は極力低下させる必要がある。

(ハ) 石炭灰添加率 F : 寄与率は $\rho = 14.5\%$ で単独の添加の効果は大きくないものの、含水比、生石灰に次いで重要な要因。 $F = 12\%$ 以上添加可能。

(ニ) 交互作用 $L \times F$: 寄与率は $\rho = 26\%$ 。含水比低下、pH 向上などの環境を整え、生石灰の効果を増進させる効果が高い。

(ホ) 石膏添加率 G : 寄与率は $\rho = 1.4\%$ で、僅かではあるが G の添加は強度向上効果がある。過去の知見から鑑み、土砂や石炭灰中のシリカやアルミナ成分などと反応してエトリンジョイト($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaO_4 \cdot 12H_2O$)を生成するためと考えられる。しかし、pH や含水比を悪化させるため、多添加はできない。

5. おわりに

石炭灰は単独でも土質改良効果は期待できるうえ、含水比の低下や pH の向上などの改良環境を整備する効果が高く、生石灰の働きを増加させる。また、石膏は改良環境を悪化させるものの、強度増進効果があり少量添加は効果的であることが解った。発電所からは石炭灰のほか、導水路付着貝(焼却したものは生石灰同等品)、脱硫石膏などの副産物も多く排出されている。すなわち、これら廃棄物と建設発生土のリサイクルの道が開かれることになり、埋立処分、土砂採取に対する環境保全に大きく貢献出来ると考える。

表-1 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 $S=S-f$ V_e	寄与率 % $\rho=S/ST$	修正 ρ'
A	1	0.11	0.11				
B	1	0.19	0.19				
F	F_ℓ	10.10 (10.10)	10.10 (10.10)	48.1 ** (118.8) **	9.89 (10.02)	7.5 (7.5)	5.4
	F_a	0.02 (0.02)	0.02 (0.02)				
	F_c	18.03 (18.03)	18.03 (18.03)	85.9 ** (212.1) **	17.82 (17.95)	13.4 (13.5)	9.6
G	1	2.82	2.82	13.4 **	2.61	2.0	1.4
L	1	47.70 (47.70)	47.70 (47.70)	227.1 ** (561.2) **	47.49 (47.62)	35.7 (35.8)	25.7
W	1	52.00	52.00	247.6 **	51.79	39.0	28.0
$A \times F_\ell$	1	0.27	0.27				
$A \times G$	1	0.14	0.14				
$A \times L$	1	0.26	0.26				
$G \times F_\ell$	1	0.08	0.08				
$L \times F_\ell$	1	0.08 (9.88)	0.08 (9.88)	(116.2) **	(9.80)	(7.4)	(5.3)
$L \times F_a$	(1)	(0.03)	(0.03)				
$L \times F_c$	(1)	(42.15)	(42.15)	(495.9) **	(42.07)	(31.7)	(22.8)
$G \times L$	1	0.43	0.43				
e	1 (0)	0.57 (0.12)	0.57 ---				
[e]	10 (2)	2.08 (0.17)	0.21 (0.09)		3.13 (0.60)	2.3 (0.4)	1.8
e m	16 (24)	0.15 (4.86)	0.01 (0.20)		0.15 (4.86)	0.1 (3.7)	
計	31	132.89			132.89	100%	100%

※但し、() 内は $L \times F$ の二元配置から算出した値。1 次誤差 e と実験間誤差 e_m を検定すると高度に有意であることから、1 次誤差をブーした [e] で検定した。[e] は有意でない要因をブーした誤差を示す。

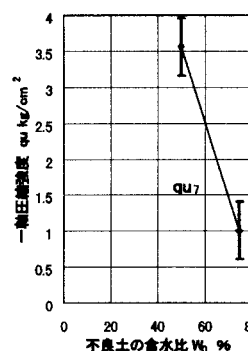


図-3 含水比の信頼区間

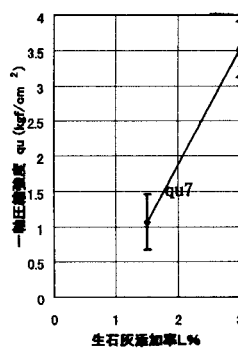


図-4 生石灰の信頼区間

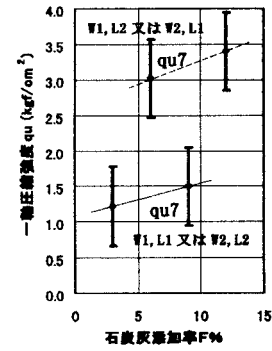


図-5 石炭灰の信頼区間