

# 石炭灰の土質改良材への適用に関する実験的研究

松尾 稔<sup>1</sup>・木村 稔<sup>2</sup>・近藤 寛通<sup>3</sup>・堤 博恭<sup>4</sup>

<sup>1</sup>FD-会員 工博 名古屋大学総長 (〒464-0814 名古屋市千種区不老町)

<sup>2</sup>正会員 工修 中部電力株式会社 中央送変電建設所 (〒461-0006 名古屋市東区東新町1番地)

<sup>3</sup>正会員 中部電力株式会社 土木建築部 (〒461-0006 名古屋市東区東新町1番地)

<sup>4</sup>正会員 清水建設株式会社名古屋支店 土木技術部 (〒460-8580 名古屋市中区錦1丁目3番7号)

大量に搬出される建設発生土、泥土、浚渫土などの建設副産物や石炭灰、脱硫石膏などの電力副産物は品質などの制約で十分に利用されずに埋立・処分され、資源・環境面で大きな社会問題になっている。

このうち、石炭灰は昔から自硬性のあることが知られている。本研究では、石炭灰及び石膏を低品質な土砂の土質改良材として利用することを目的に、改良要因とその効果の度合い、最適な配合を把握した。その解析手法として統計手法（実験計画法と重回帰分析法）を適用し、少ない実験回数で不良土の初期含水比  $w_0$ 、生石灰添加率  $L$ 、石炭灰添加率  $F$ 、交互作用  $L \times F$ 、石膏添加率  $G$  が不良土改良の重要要因であることを確認するとともに、その添加量の範囲を絞り込んだ。

*Key Words: recycle use of soil, soil quality improvement, fly ash, quicklime, desulfurized gypsum, statistical analysis*

## 1. まえがき

わが国では生活水準の向上に伴い、大量の産業副産物が排出され、その処分が大きな社会問題になっている。すなわち、産業副産物の処分に伴う環境影響や処分地不足と遠距離化、不法投棄あるいは資源・エネルギー枯渇などの問題である。

建設省の調査では、社会資本の整備に伴い建設産業から平成7年度実績<sup>1)</sup>で、4億4,600万地山<sup>3</sup>の建設発生土と1,441万<sup>1</sup>の建設汚泥が搬出され、その多くが山間地や海面に埋立処分されている。その一方で、土砂資源として山間部などから新しい土砂や砂（以下「新規土砂」と言う）を採取しており、残土の処分と新規土砂の採取の両方で、生態系破壊などの多大な環境影響を及ぼしている。

また、電力の安定供給とエネルギー源の多様化を進める電力産業でも、石炭火力発電所から年間450万<sup>1</sup>（平成6年度実績）を超える石炭灰と相当量の脱硫石膏を排出<sup>2)</sup>している。その一部はセメント原料や石膏ボードなどに有効利用しているものの、約半数は処分され建設副産物と同じ問題を招いている。

これらの問題に対処するため、1991年に「再生資源の利用促進に関する法律（リサイクル法）」が制定され、副産物の利用促進を図っている。しかし、これら副産物に関する諸問題の解決は、「環境システム」と言う大きな枠組みの中で捉え、環境影響評価、情報の登録、最適配分などの諸システムや改良施設の構築などの技術課題を解決していく必要がある。

本論文では、利用されずに処分されている不良土を、同じ副産物である石炭灰や石膏を利用して良質な土砂資源に改良するシステムの確立を目的に、

室内土質試験により改良要因の分析を試みた。

## 2. 目標とする改良強度の決定

不良土を改良して利用する時には、その品質を保証する必要がある。不良土は改良施設に運搬され、「施工特性」と「地盤特性」を保証した土質に改良した後、土砂資源として再利用することになる。すなわち、施工特性としてダンプなどが走行できるトラフィカビリティーなど、地盤特性として、各用途に応じた地盤強度の確保が重要な課題になる。

### (1) 改良土に要求される施工特性

通常、施工時のトラフィカビリティーはコーン指数  $q_c$  で評価しており、条件の最も厳しいダンプ走行を想定すれば、 $q_c \cong 1,000 \sim 1,500 \text{ KN/m}^2$  以上を確保する必要がある。コーン指数  $q_c$  と一軸圧縮強度  $q_u$  の間には、概ね、 $q_c \cong 5.0 \times q_u$  の相関が目安になることから、一軸圧縮強度  $q_u \cong 200 \sim 300 \cong 250 \text{ KN/m}^2$  以上を保証する必要がある。

### (2) 改良土に要求される地盤特性

改良土を盛土材、路盤材、埋戻材などに利用する時には、その施設の用途に応じた地盤強度を確保する必要がある。通常、CBR 値が多く適用されている。

改良土の用途形態として、規格の最も厳しい道路路床を想定した時には、名古屋市の基準では CBR10% 以上と規定している。CBR 値と一軸圧縮強度  $q_u$  の間には、概ね、 $\text{CBR} \cong 4.5 \times q_u$  の相関があることから、 $q_u \cong 220 \text{ KN/m}^2$  以上を確保する必要がある。

### (3) 目標とする改良土強度

前述の施工面と用途面の検討から、改良土の品質は一軸圧縮強度  $q_u$  で評価できる。すなわち、改良土の利用を前提とする場合、最も厳しい条件を保証せざるを得ないことから、改良土の強度として、一軸圧縮強度  $q_u \cong 250 \text{ KN/m}^2$  以上を確保することを目標とした。

## 3. 実験の計画

本研究では不良な土砂を専用施設に運搬して改良した後、新規工事で再利用するシステムを想定している。また、改良土を用いた施工では整地・転圧時に団粒化した土塊が一旦破壊されるため、長期に改良効果が継続する石灰系改良材を用いた改良方法が適している。石灰系改良材には石灰単体の他、石膏、フライアッシュ、酸化鉄、ドロマイト石灰などとの混合物を用いて強度向上、費用低減を図っている例<sup>9)</sup>も報告されている。さらに、石炭火力発電所から大量に排出される石炭灰や排気ガスの処理に用いた脱硫石膏はセメントや石灰との反応性が高いうえ、強度増進効果のあることが嘉門<sup>4)</sup>、貝沼<sup>5),6)</sup>、高橋<sup>7)</sup>、Nontananandh<sup>8)</sup>らの研究で知られている。しかし、その一方で、石膏添加量には最適値があり、配合量によっては長期材令で強度が低下することも報告<sup>9)</sup>されている。さらに、堀内などの研究<sup>10)</sup>で、石炭灰と石膏の混合物に関しても石膏添加量には最適値があることが知られている。

本研究では、生石灰とフライアッシュ（石炭灰の大部分を占める細粒灰。以下「石炭灰」と言う）および石膏の混合物を改良材とし、不良土の改良要因とその重要度、添加量の最適値などを調べることを目的に実験を計画した。

### (1) 実験に用いた不良土試料

改良を必要とする土砂は、建設省の建設発生土分類による第3、4種建設発生土および泥土、浚渫土などの軟弱で細粒な粘土やシルトであり、そのままでは利用できないことは自明である。しかし、これら不良な土砂の多くは  $74 \mu\text{m}$  以下の細粒土で、粘土鉱物も多く含む特徴がある。石灰やセメントによる改良では、これら細粒土を化学的に安定化かつ団粒化させる改良方法であり、細粒な粘土鉱物の存在が重要な要因<sup>9)</sup>になる。

今回の実験では、不良土試料として、粘土とシルトをほぼ半々に含む日本統一土質分類法のMHに分類される河口の浚渫土を用いた。図-1、表-1に示すとおり、この試料は自然含水比が高い。水素イオ

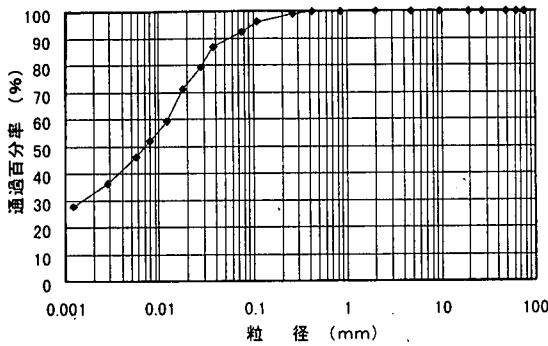


図-1 実験対象土の粒径加積曲線

表-1 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 $\rho_s$ $\text{g/cm}^3$	2.658
	自然含水比 $w_n$ %	61.6
粒度分布	礫分 2mm 以上 %	0
	砂分 75 $\mu\text{m}$ ~ 2mm %	7.5
	シルト分 5 ~ 75 $\mu\text{m}$ %	49.3
	粘土分 5 $\mu\text{m}$ 未満 %	43.2
コンシテンシ特性	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 $q_u$ $\text{KN/m}^2$	3.0
	変形係数 $E_{50}$ $\text{KN/m}^2$	33.0
化学	pH (22.9°C)	9.62
	強熱減量 %	6.7
化学成分	$\text{SiO}_2$ (重量法) %	74.4
	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (ICP 発光法) %	13.7
	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ (ICP 発光法) %	4.17
	その他 %	7.73

ン濃度 pH が高い、有機物を多少含む（強熱減量）、シリカ分が多いなどの特徴が揚げられる。

## (2) 実験に用いた石炭灰試料

火力発電所では熱効率が最大になるように数種類の石炭を混合して燃焼している。この恒常的に排出される一般的な石炭灰（以下、「混合灰」と言う）と、単独で用いることは少ないが、改良効果が高いと思われる Ca 元素を多く含むマッセルブルク（石炭の産地名）灰を適用して、石炭灰種の違いによる改良の効果も把握した。図-2、表-2 に示すとおり、今回使用した石炭灰は密度が非常に小さく、水素イオン濃度 pH が 12 前後の高アルカリの物質で、

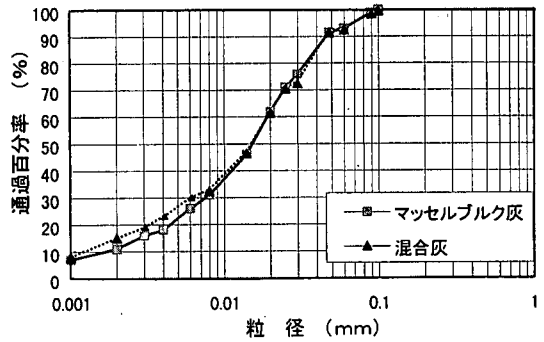


図-2 石炭灰の粒径加積曲線図

表-2 フライアッシュの化学成分

項目		混合灰	マッセルブルク灰	
化学成分	酸化カルシウム $\text{CaO}$ %	4.9	9.7	
	酸化珪素 $\text{SiO}_2$ %	62.1	54.4	
	酸化第 2 鉄 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ %	5.2	6.1	
	酸化アルミニウム $\text{Al}_2\text{O}_3$ %	21.2	24.0	
	酸化マグネシウム $\text{MgO}$ %	0.8	1.0	
	酸化カリウム $\text{K}_2\text{O}$ %	0.8	0.5	
	酸化硫黄 $\text{SO}_3$ %	0.3	0.7	
	酸化ナトリウム $\text{Na}_2\text{O}$ %	0.4	不検出	
	酸化チタン $\text{TiO}_2$ %	1.2	1.7	
	酸化りん $\text{P}_2\text{O}_5$ %	0.6	0.6	
	残留炭素 C %	2.6	1.3	
	水素イオン濃度 pH	12.00	12.41	
	物理的性質	灰粒子の密度 $\rho_s$ $\text{g/cm}^3$	2.22	2.28
		灰粒 度	砂分 75 $\mu\text{m}$ ~ 2mm %	5.0
シルト分 5 ~ 75 $\mu\text{m}$ %			73.0	68.5
粘土分 5 $\mu\text{m}$ 未満 %			22.0	26.5
平均粒径 $D_{50}$ mm		0.015	0.015	
液性限界 $w_L$ %	30.61	32.04		

液性限界  $w_L$  が非常に低く、粒径の 7 割はシルトに相当している特徴がある。

また、その構成元素は土砂とほぼ同じ粘土鉱物で構成されており、ポソラン活性の高いシリカ ( $\text{SiO}_2$ ) が大半を占めている。さらに、その反応に大きな影響を与えるアルミナ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) や  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、改良効果の高い  $\text{CaO}$  も多く含む特徴がある。また、マッセルブルク灰は混合灰に比して、 $\text{SiO}_2$  が少ない分、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  が多く、微細粒径の粘土分が多いなど、不良土との反応性の高さがうかがえる。

## (3) 改良要因と解析手法の決定

石灰や石炭灰を用いた不良土改良のメカニズムは

表-3 改良要因と実験の水準

要因	記号と水準内訳	
不良土含水比	$w_{01} = 50\%$	$w_{02} = 75\%$
石炭灰種	$A_1 = \text{混合灰}$	$A_2 = \text{マッセルブルク灰}$
石炭灰添加率	$F_1 = 3.0\%$	$F_2 = 6.0\%$
	$F_3 = 9.0\%$	$F_4 = 12.0\%$
生石灰添加率	$L_1 = 1.5\%$	$L_2 = 3.0\%$
石膏添加率	$G_1 = 0.2\%$	$G_2 = 0.5\%$
添加手順	$B_1 = \text{先行添加}$	$B_2 = \text{一括添加}$
交互作用	$A \times F_i, A \times G, A \times L, F_i \times G, F_i \times L, G \times L$	

数多くの要因が影響しており、不明な点も多い。

本研究では過去の知見<sup>2)~14)</sup>から、不良土の改良要因として、表-3に示す6要因とこれらの交互作用を6個選定した実験を計画した。また、重点とする石炭灰添加量の要因は4水準、それ以外の要因は2水準で変化させた。

このように多くの要因を考慮して、通常の総当たりの実験を行うと膨大な実験回数になる。このため、少ない実験回数で重要要因が絞込め、その重要度が算出できる統計的手法(実験計画法と重回帰分析法)を適用した実験を計画した。

実験計画法は目的変数の分散を最大にする要因を選別する手法である。それに対し重回帰分析は、後述する式(4a)の目的変数  $y$  の予測値と実測値の誤差を最小にする説明変数の係数  $x_i$  を決定する手法である。しかし、解析手法に違いがあっても、両手法はほぼ同じ結果が得られるはずであり、実験結果の検証と精度の向上が可能になる。

#### (4) 実験の割付け

本研究の主目的は不良土の改良材として石炭灰の有効性を確認することである。このため、生石灰と石膏には工業製品を用いて、極力、実験誤差を排除するとともに、2水準系の直行表を1部改良した表-4に示す  $L_{16}(4^1 \times 2^{12})$  の直交表の各列に、表-3の各要因を割付けて、16回の実験を計画した。この場合、石炭灰  $F$  の自由度は3であり3つの列番が必要になるが、田口の方法<sup>15)</sup>に則り、交互作用の大部分の情報が集まる第1次効果  $F_i$  だけを考慮した実験とした。残る第2, 3次効果  $F_j, F_k$  は別途、修正計

表-4 実験割付け表

列番	123	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
因子	石炭灰 F	生石灰 L	$F_i \times L$	含水比 $w_0$	$A \times G$	石膏 G	$F_i \times G$	誤差	$A \times L$	$G \times L$	混合順 B	$A \times F_i$	灰種 A
実験 No	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
	3	1	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
	4	1	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
	5	2	1	1	2	2	1	2	2	1	1	2	2
	6	2	1	1	2	2	2	2	1	2	2	1	1
	7	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2	1	1
	8	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	2	2
	9	3	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2
	10	3	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	1
	11	3	2	1	2	1	1	2	1	2	1	2	1
	12	3	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
	13	4	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	1
	14	4	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	2
	15	4	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	2
	16	4	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	1

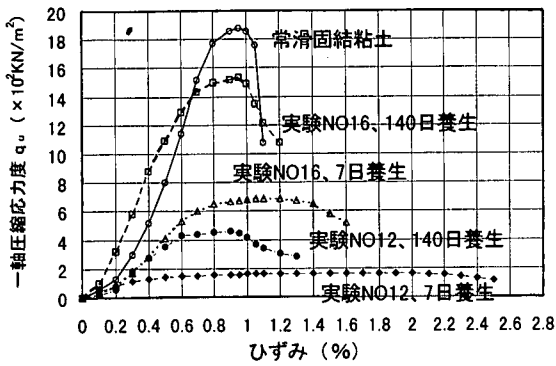
算で算出するものとし、空いた列番には不良土含水比  $w_0$ 、改良材添加手順 B、誤差  $e$  の要因を割付けた。例えば、表-4の No. 8の実験では不良土含水比  $w_0$  と石炭灰混合手順 B には、第1水準の  $w_{01} = 60\%$ 、 $B_1 = \text{先行添加}$ 、その他要因には第2水準の  $A_2 = \text{マッセルブルク灰}$ 、 $L_2 = 3.0\%$ 、 $F_2 = 6.0\%$ 、 $G_2 = 0.5\%$  を各列番に割付けた。さらに、考慮した前述以外の要因(外気温や実験の修熟度など)による誤差を排除するため、16回の実験順序はランダムに決定した。

不良土と改良材(生石灰+石炭灰+石膏)はホバート型ミキサーで5分間混練した後、JSF T 812 に準じて、 $\phi 5\text{cm}$  のモールドに充填した。供試体はラップで包み、養生箱内で7日、28日、70日、140日間養生した後、一軸圧縮試験により16<sup>実験</sup>  $\times$  4<sup>材料</sup>  $\times$  2<sup>供試体</sup> = 128 データを得た。同時に、含水比  $w_0$ 、水素イオン濃度 pH、密度  $\rho$  も合わせて測定した。

## 4. 実験の結果と解析

### (1) 実験結果

供試体の一軸圧縮強度試験では、図-3の一軸圧縮応力-ひずみ曲線に示すように、改良効果の小さ



※ 常滑粘土：愛知県知多半島に広く分布する第三紀鮮新世の常滑層から採取した堆積軟岩

図-3 土質別の一軸圧縮応力度  $q_u$  とひずみの関係

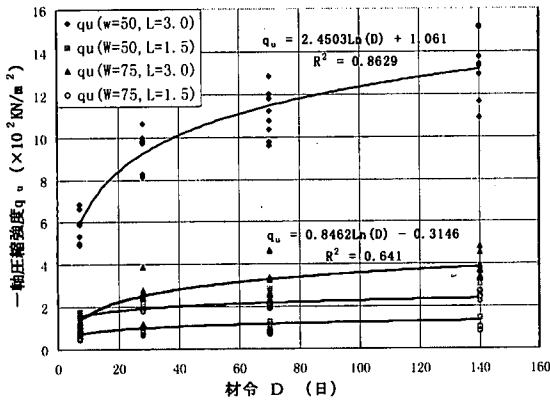


図-4 材令別の一軸圧縮強度  $q_u$  の経時変化

い配合(例えば, 実験 No12:  $L=3.0\%$ ,  $w_0=75\%$ ,  $F=9.0\%$ ,  $G=0.5\%$ , 材令 7 日)は軟弱な土砂と同じ変化を示している。しかし, 改良効果の高い配合(例えば, 実験 No16:  $L=3.0\%$ ,  $w_0=50\%$ ,  $F=12\%$ ,  $G=0.5\%$ , 材令 140 日)では, 材令が増えるに従い固結粘土(図-3の常滑粘土)に似た破壊形状を示している。この場合, 最大応力は多少小さいものの, 初期応力時のひずみが固結粘土と同程度であることから, 改良土の粒子間の結合力は相当大きいと考えられる。

図-4に不良土含水比  $w_0$  と生石灰添加率  $L$  で層別した時の材令別一軸圧縮強度  $q_u$  の経時変化グラフを示す。これより, 初期含水比  $w_0$  を極力低く, かつ生石灰添加率  $L$  を多くした時の改良土の強度は著しく伸びており, その相関も  $R^2=0.863$  と高い。このことから, 含水比  $w_0$  と生石灰添加率  $L$  が不良土を改良する時の重要要因であることが分かる。

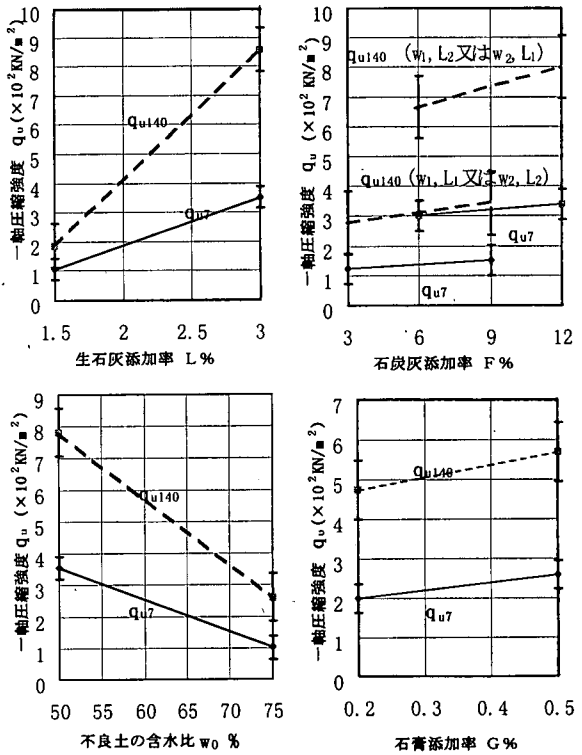


図-5 重要要因の一軸圧縮強度  $q_u$  の信頼区間

## (2) 実験計画法による解析

実験計画法では要因および要因間の交互作用の重要度を特性値(改良土の強度)データの分散から分析することができる。すなわち, これらの  $F$  値(各要因別の分散と誤差分散の比)が有意(5%の  $F$  値以上)となるものを重要要因として, 生石灰添加率  $L$ , 石炭灰添加率  $F$ , 不良土の初期含水比  $w_0$ ,  $L$  と  $F$  の交互作用, 石膏添加率  $G$  を選定した。また, それぞれの重要度は寄与率  $\rho$  (各要因の純変動と総変動の比)から判断した。

図-5に重要要因の水準毎の一軸圧縮強度  $q_u$  とその信頼区間のグラフを示す。生石灰添加率  $L$  と不良土含水比  $w_0$  のグラフは勾配が急で, 水準の違いによる効果は明瞭である。石炭灰添加率  $F$  では  $L$  と  $w_0$  の水準の組み合わせが異なる実験のため, グラフには明確な効果が現れていない。石膏添加率  $G$  では多少の強度増進効果が認められる。

選定された重要要因の寄与率の変化は図-6のとおりであり, これから以下のことが分かる。

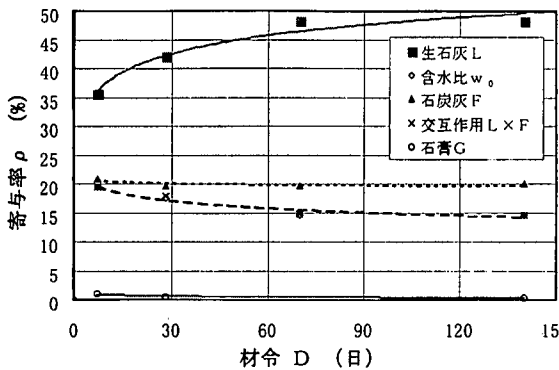


図-6 強度向上要因別の寄与率  $\rho$  の経時変化

- ① 生石灰の添加は不良土改良の最も重要な要因であり、その重要度(寄与率: 図中の■印)は材令が増えるに従い約35%から50%にまで増加している。
- ② 石炭灰添加の寄与率(▲印)は全材令を通して約20%あり2番目に重要な要因である。これは、石炭灰中の  $\text{CaO}$  の働きに加え、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  などのポソラン性粘土鉱物と生石灰の反応性が高いためと考えられる。
- ③ 生石灰と石炭灰の交互作用  $L \times F$  の寄与率(×印)は初期段階では20%であるが、材令とともに15%まで低下している。これは後述のように、石炭灰の添加により高アルカリに改善された混合土が時間経過とともに中性化するためと考えられる。
- ④ 図-5からも分かるとおり、不良土の初期含水比  $w_0$  が低い時には改良土の強度は著しく伸び、石灰と石炭灰の添加量の次に重要な要因である。その寄与率(◇印)は交互作用  $L \times F$  とほぼ同じで、15~20%あるうえ、初期材令ほどその効果は高い。
- ⑤ 石膏(○印)の添加の効果は有意ではあるが、その寄与率は1~2%程度と低く、改良土強度を多少向上させるだけである。その原因として、石膏は単独で強度増加に寄与しているわけではなく、石灰との交互作用—エトリンジタイト生成反応—によっている<sup>14)</sup>ためと考えられる。すなわち、今回の実験レベルでは、石灰/石膏比に大きな差がないため、その有効性が隠れてしまったものと推察される。

### (3) 重回帰分析法による解析

重回帰分析法は一軸圧縮強度  $q_0$  などの特性値を目

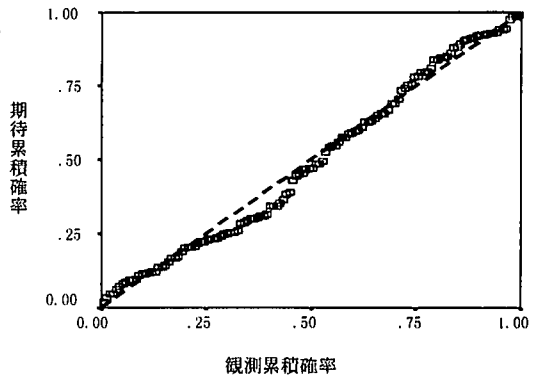


図-7 標準化された残差の回帰の正規確率プロット

的変数  $y$  とし、説明変数  $x_i$  (例えば、表-3 の要因のデータ) を用いて、式(4a)に示す一次多項式で表す手法であり、要因相互の交互作用は算出されない。その予測式の当てはまりの良さは、調整済み決定係数  $\hat{R}^2$  (単位などの影響を去除いた決定係数)、重要要因の影響力は標準偏回帰係数  $\beta$  (対象としている説明変数  $x_i$  以外の説明変数の影響を去除いた  $y$  と  $x_i$  間の偏回帰係数で、平均0、分散  $1^2$  に標準化している) で表現することができる。

$$y = b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_i \cdot x_i + b_0 \quad (4a)$$

$y$ : 目的変数

$x_i$ : 説明変数

$b_i$ : 偏回帰係数

#### a) 改良強度の推定式の提案

実験で得られた128個のデータを用いた重回帰分析から、有意(5%の  $t$  値以上)となる重要要因を選定した。すなわち、各要因が今回の水準の範囲内にある時には、式(4b)に示す4要因が改良土の一軸圧縮強度  $q_0$  を左右する重要要因であり、その当てはまりの良さは  $\hat{R}^2 = 0.786$  と高い。

$$q_0 = 3.21 \times L - 0.15 \times w_0 + 0.32 \times F + 0.02 \times D + 2.74 \quad (4b)$$

調整済み決定係数  $\hat{R}^2 = 0.786$

但し、 $q_0$ : 一軸圧縮強度 ( $\times 10^2 \text{ KN/m}^2$ )

$L$ : 生石灰添加率 (不良土重量比 %)

$w_0$ : 不良土の初期含水比 (%)

$F$ : 石炭灰添加率 (不良土重量比 %)

$D$ : 混合土養生日数 (日)

図-7に示すとおり、実測値と予測値の残差のグラフでは、45°の敷居線にほぼ乗っており、残差が

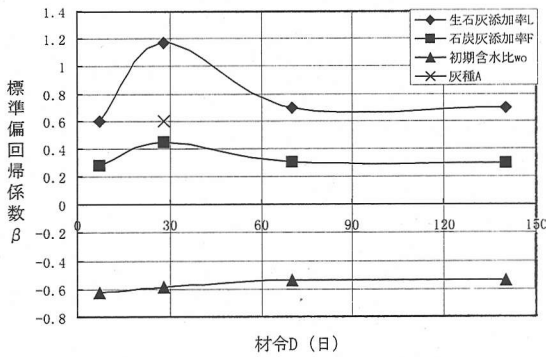


図-8 強度向上要因別の重要度の経時変化

正規分布に従っていることが分かる。これより、今後、水準の範囲を広げた場合の確認実験が必要であるものの、今回実験の水準の範囲内では、式(4b)から任意の材令での改良土の強度を推定できることが検証できる。

#### b) 標準偏回帰係数 $\beta$ からの分析

重回帰式の要因毎の重要度は標準偏回帰係数  $\beta$  の大小で判断することができ、その経時変化は図-8に示すとおりである。

- ① 改良土の強度を向上させる最も重要な要因は生石灰添加率  $L$  である。前述(2)の実験計画法では材令の増加に伴い寄与の割合も増加していたが、本分析では、養生30日程度の初期材令でその効果は一番高くなり、それ以降は一定である。石炭灰の効果も同様の傾向が見られる。
- ② 実験計画法の結果と異なり、2番目の重要要因は  $\beta = -0.6$  の不良土の初期含水比  $w_0$  であり、生石灰添加率と同程度の重要度がある。また、その重要度は全期間を通して一定であり、改良前に含水比を極力、低下させておくことが重要になる。
- ③ 3番目の重要要因は  $\beta = 0.3$  の石炭灰添加率  $F$  であり、30日材令で重要度が多少増加する以外は、ほぼ一定している。
- ④ 灰種Aは30日材令だけで有意になり、それ以外の材令では重要な要因とは云えない結果となった。これは、CaO含有の多いマッセルブルク灰の方が効果的であり、石炭灰のもつ自己硬化性が、石炭灰に含まれるCaO成分と高い相関がある<sup>14)</sup>ことに起因していると考えられる。
- ⑤ 実験計画法の解析結果と異なり、石膏添加の効

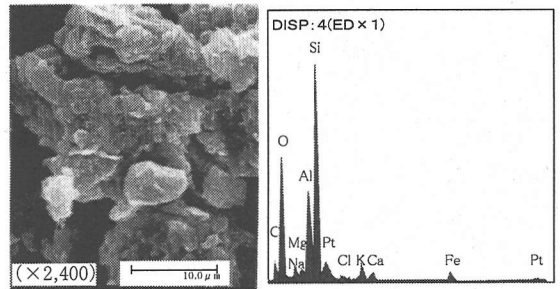


図-9 不良土の電子顕微鏡写真と蛍光X線分析

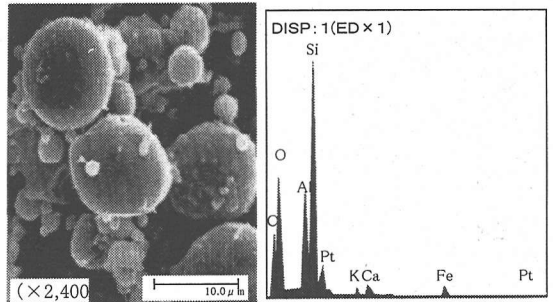


図-10 石炭灰の電子顕微鏡写真と蛍光X線分析

果は有意水準5%では取込まれず、有意水準10%でやっと有意になった。これより、石膏の効果は小さいことが分る。

#### (4) 改良土構成元素の確認

改良効果の高いNo16 ( $w_0=50\%$ ,  $L=3.0\%$ ,  $F=12\%$ ,  $G=0.5\%$ )の改良過程における混合土の構成元素を電子顕微鏡写真(以下、「写真」と言う)と蛍光X線分析(対象物表面薄層の構成元素の比率を調べる分析法。以下、「X線分析」と言う)で確認した。

##### ① 不良土：図-9

写真から不良土は10~30  $\mu\text{m}$ の角張った粒子が多く占めており、x線分析からその構成元素はSi, Al, Fe, Mgなどの粘土鉱物に加え、泥濁化しやすいNaなどの親水性元素も含まれている。

##### ② 石炭灰：図-10

写真から石炭灰の粒径は2~10  $\mu\text{m}$ 程度であり、燃焼時の影響で完全な球形を呈している。x線分析から石炭灰も土砂と同じSi, Al, Feなどの粘土鉱物からなる材料であるが、燃焼時のカーボンが多い、親水性元素は含まれないなどの違いがある。ただし、ptはx線分析時の蒸着成分である。

##### ③ 改良土(養生20日)：図-11

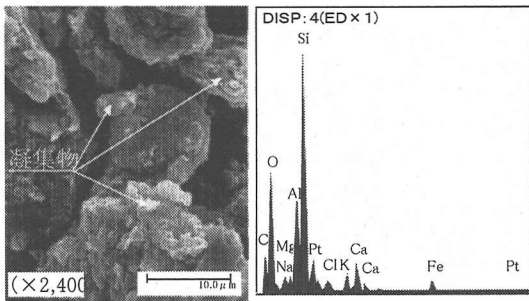


図-11 材令 20 日の電子顕微鏡写真と蛍光 X 線分析

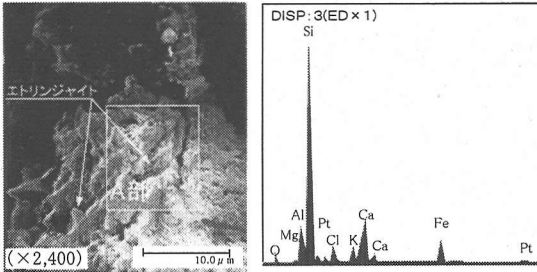


図-12 材令 130 日の電子顕微鏡写真と蛍光 X 線分析

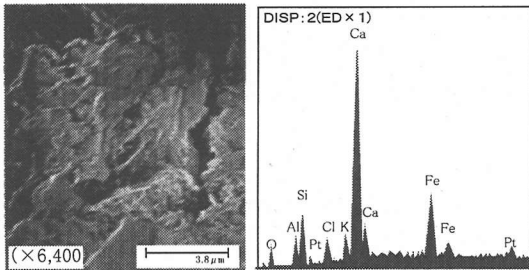


図-13 A 部の拡大電子顕微鏡写真と蛍光 X 線分析

不良土に改良材を添加して混合すると、材令の初期ではポゾラン反応などによると思われる凝集物質が粒子表面に多少、生成されつつある。しかし、x線分析では Ca, Cl が多少増加している他には親水性元素 Na の量にも大きな変化はなく、反応は余り進んでいないのが分かる。

④ 改良土（養生 130 日）：図-12

養生日数が長くなると、写真では粒子表面のほとんどを凝集物質が覆って相当に改良が進んでおり、エトリンガイトと思われる針状物質も見える。また、x線分析より、Si が最も多くの比率を占めているうえ、20 日養生に比して、Ca, Fe, Al の比率が増えていることから、⑤に述べる Ca 系塩基性の凝集物質の混合物が多く生成していると推察される。さらに、親水性元素 Na が Ca イオンと

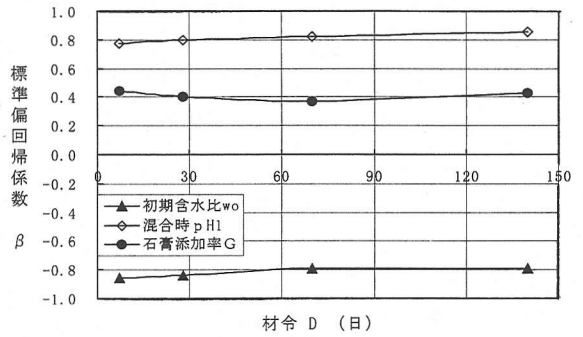


図-14 土質改良の環境要因の重要度経時変化

完全に置換されており、水を含んでも泥濘化しない疎水性の高い土砂に改良されていると思われる。

⑤ 130 日養生日の凝集物質：図-13

写真は④の凝集物質だけの拡大写真である。x線分析から凝集物質は大部分を Ca が占め、Fe, Si, Al, Cl, K 元素の順に構成されている。これは Ca 塩基が関与した珪酸石灰水和物 (CaO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 系化合物)、アルミン酸石灰水和物 (CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O 系化合物)、酸化鉄石灰水和物 (CaO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O 系化合物) などの安定したポゾラン物質やエトリンガイト生成物質と考えられる。

5. 改良促進を図る環境要因の解析

前述の x 線分析から、不良土の改良は主に生石灰の Ca 元素によるポゾラン反応によると考えられる。

この反応は適量の反応水と高い水素イオン濃度（概ね pH ≥ 11 以上）の環境下で促進される。これを確認するため、新たに、低品質土の初期含水比  $w_0$ 、改良材を添加・混合した直後の pH<sub>1</sub>、養生材令 D を説明変数に加えて重回帰分析した。

式 (5a) に示すように、不良土の改良では、極力、低品質土の初期含水比  $w_0$  は低く、混合土の pH<sub>1</sub> は高く維持することが重要になり、予測式の当てはまりの良さは、 $\hat{R}^2=0.759$  と高い。

$$q_u = 72.673 \times \text{pH}_1 - 0.221 \times w_0 + 9.855 \times G + 0.019 \times D - 887.389 \quad (\times 10^2 \text{ KN/m}^2) \quad (5a)$$

調整済み決定係数  $\hat{R}^2=0.759$

一方、予測式に取込まれた要因の重要度を示す標準偏回帰係数  $\beta$  の経時変化は図-14 に示すとおりで



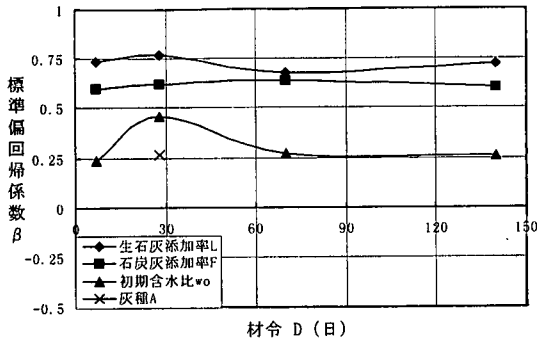


図-15 含水比低下要因別の重要度経時変化

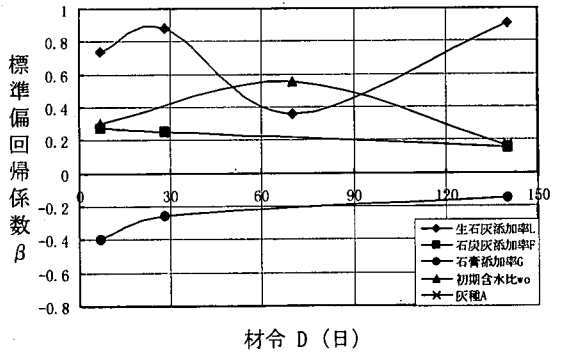


図-16 pH向上要因別の t 値の経時変化

ある。これより、初期含水比 $w_0$ と混合土の $pH_1$ の標準偏回帰係数は $\beta \pm 0.8$ であり、全材令を通して改良土強度に最も影響する要因であることが解る。

引続き、改良時の環境要因である混合土の含水比 $w_0$ の低下と $pH$ の向上に、表-3に示す各要因がどの程度効果があるかを、同じデータを用いて分析した。

### (1) 混合土含水比 $w_0$ の低下要因の分析

生石灰は水和反応とその時の発熱作用により大量の水を消費・蒸発させる。更に、石炭灰も多少の $CaO$ を含むうえ、乾灰は高い吸水効果が期待できる。

これら改良材により、混合土の含水比低下効果を、含水比低下量 $(w_0 - w_0')$ を目的変数として、改良要因との間で重回帰分析した。

式(5b)の予測式に示すとおり、有意となる要因は不良土の生石灰添加率 $L$ 、石炭灰添加率 $F$ 、初期含水比 $w_0$ 、灰種 $A$ (標準灰: $A=0$ 、マッセルブルク灰: $A=1$ )であり、予測式の当てはまりの良さは、 $\hat{R}^2 = 0.952$ と非常に高い。

$$w_0 = 0.779 \times w_0 - 0.712 \times F - 1.311 \times L - 0.488 \times A + 10.880 \quad (\%) \quad (5b)$$

調整済み決定係数  $\hat{R}^2 = 0.952$

ただし、 $w_0$ : D材令での混合土の含水比

図-15に予測式に取込まれた要因の重要度 $\beta$ の推移を示す。これより、生石灰と石炭灰の添加が最も混合土の含水比を低下させ、全材令を通して同程度の効果がある。また、初期含水比 $w_0$ を極力、低くしておくことが重要なことは当然であるが、材令30日程度の早い時期に生石灰の影響が最も高くなる。これより、この時期に生石灰によるポゾラン反応が活発になり、多量の水を固定化していることが分る。

### (2) 混合土 pH の向上要因の分析

生石灰、石炭灰は $pH \approx 12$ 前後の材料であり、混合土の $pH$ を向上させることは当然である。土質改良では、混合土を $pH \geq 11$ 程度のアルカリ性の環境に維持することが重要であり、養生材令 $D$ 日目の混合土の $pH_0$ は下記の予測式で表すことができる。

$$pH_0 = 0.372 \times L + 0.006 \times w_0 + 0.022 \times F - 0.530 \times G - 0.008 \times D + 10.793 \quad (5c)$$

調整済み決定係数  $\hat{R}^2 = 0.765$

式(5c)より、石膏の添加 $G$ と養生日数 $D$ は負の偏回帰係数となり、混合土の中性化に効果的である。しかし、石膏を添加し過ぎると混合土が中性化して、文献9)、10)の結果と同じように、改良土の強度が低下する原因となると考えられる。

図-16に、予測式に取込まれた要因の重要度 $\beta$ の経時変化グラフを示す。これより、混合土の $pH$ 上昇に最も効果のある要因は、初期および長期材令では生石灰の添加率 $L$ であり、中期(約70日)材令では低品質土の初期含水比 $w_0$ である。また、石炭灰の添加率も全材令を通して0.2~0.4の効果がある。

しかし、30日材令では初期含水比 $w_0$ が、70日材令では石炭灰添加率 $F$ と石膏添加率 $G$ が重要要因として取込まれていない。今後、この材令により要因の重要度が変化する原因の解明も必要である。

## 6. 改良土特性の検討

図-17に示すように、今回試験した改良土の一軸圧縮強度 $q_u$ /CBRの間には、下式に示す回帰関係が認められた。

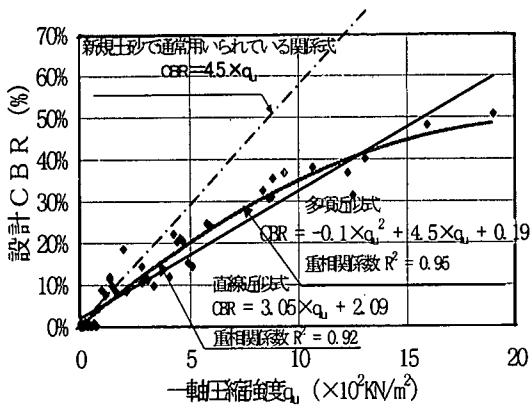


図-17 一軸圧縮強度  $q_u$  と CBR の関係

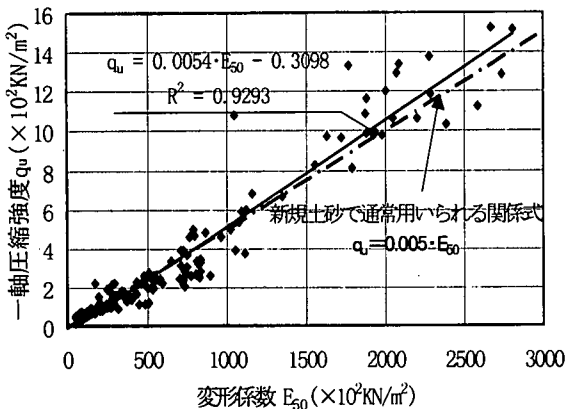


図-18 一軸圧縮強度  $q_u$  と変形係数  $E_{50}$  の関係

直線近似の時:  $CBR = 3.1 \times q_u + 2.1$  (6a)

多項式近似の時:  $CBR = 0.1 \times q_u^2 + 4.5 \times q_u + 0.19$  (6b)

新規の土砂を締固めた試料では、通常、 $CBR = 4.5 \times q_u$  の関係式が用いられている。この関係式と比較した場合、式 (6a)、式 (6b) の近似式では勾配が小さいうえ、多項式近似では  $q_u$  の伸びに伴い CBR 値の伸び率が低下する。これは改良土の一軸圧縮強度  $q_u$  が JSF T 812 の充填方法に則って製作した供試体のデータであることから、荷重が大きくなった時の改良土の沈下量は、十分締固めた試料の沈下量に比して大きくなると考えられる。しかし、図-18 の一軸圧縮強度  $q_u$  / 変形係数  $E_{50}$  の関係では、通常の土砂と同じ  $q_u = 0.005 \times E_{50}$  の関係が認められることから、改良土の変形特性は、概ね、新しい土砂に近い土質特性を持つと考えられる。

## 7. 改良材の配合等の提案

以上、多くの知見が得られた。すなわち、生石灰と石炭灰、石膏を用いた不良土の改良では式 (5b) および (5c) を用いて改良材の含水比  $w_0$  の低下効果と pH の上昇効果を予測して、土質改良の環境を管理するとともに、式 (4b)、(5a) から改良土強度を推定することができる。以下に低品質土を改良する時の配合の目安を提案する。

### (1) 不良土改良の前提

不良土を専用施設で改良する実務段階を想定した場合、採算性等から以下の事項を前提とする。

- ① 改良効果を高めるには、不良土の初期含水比  $w_0$  を極力低下させておく必要がある。しかし、細粒土の含水比低下には多くの費用と時間を要することから、初期含水比  $w_0$  は概ね、液性限界  $w_L$  (今回実験では、 $w_0 = 56\%$ ) 程度を目安にする。
- ② 不良土の強度発現には、混合土の養生が必要になる。しかし、用地の制約や採算性などの制約から、7日程度の養生で出荷せざるをえない。
- ③ 副産物である石炭灰と石膏の添加量は、改良効果が最大になる範囲内で多く添加して、生石灰の添加量を減らすのが得策である。さらに広い水準での確認実験が必要であるが、今回の実験では、石炭灰を  $F \geq 12\%$  以上、石膏を  $G \geq 0.5\%$  以上、添加できることが確認されている。

### (2) 生石灰添加量の検討

ポソラン物質やエトリンガイト物質などの凝集物質は Ca 系塩基からなることから、石灰は不良土の改良に不可欠の主材である。しかし、本研究では、石炭灰や石膏の添加により生石灰の反応性が高くなり、石灰の添加量を大幅に減らせることが分かった。

石炭灰と石膏を  $F=12\%$ 、 $G=0.5\%$  添加し、不良土の初期含水比  $w_0 = 50\%$  とした時、改良土 (養生 7日) の目標強度、 $q_u \geq 250 \text{ kN/m}^2$  を確保するには、式 (4b) に代入して、生石灰添加率  $L = 1.1\%$  となる。この量は生石灰だけで改良した時の添加量、3~5% に比して大幅に減少させることができる。



Vol. 39, pp. 1-9, 1984. 4.

- 11) 中部電力(株) : 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.
- 12) 堀内澄夫 : 石炭灰の水域埋立てへの利用に関する研究, 学位論文, 1996年3月.
- 13) 土木学会 : 石炭灰の土木材料としての利用技術の現状と将来展望, 1990年3月.
- 14) Horiuti, S. Tamaoki, K. and Yasuhara, K. : Coal Ash Slurry for Effective Underwater Disposal, Soils and Foundations, Vol135, No. 1, pp. 1-10, 1995.
- 15) 田口玄一 : 第3版実験計画法, 丸善, 1992.

(1997. 9. 11 受付)

## EXPERIMENTAL ANALYSIS ON THE USE OF FLY ASH TO IMPROVE SOIL QUALITY

Minoru MATSUO, Minoru KIMURA, Hiromichi KONDO and Hiroyasu TSUTSUMI

By-products of the construction industry, such as mud and dredged earth, and of electricity generation, such as fly ash and desulfurized gypsum, have for many years not been recycled. owing to their poor quality, and this brings about a serious environmental concern. This research focusing on the use of fly ash and gypsum to revitalize poor quality soils has revealed several factors affecting the quality improvement processes. The key factors, found by analysis of variance and multiple regression are the proportion of water initially present, the proportions of added quicklime and fly ash, the interaction between them, and the proportion of added gypsum. The research has also found the appropriate quantities of the materials to be added.