

009

土 木 研 究 所 資 料

石炭灰・下水汚泥焼却灰等の
深層混合処理への適用性

昭和61年 3 月

建設省土木研究所
機械施工部施工研究室

Copyright © 1986 by P.W.R.I.

All right reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の承認を得ずしてこれを行ってはならない。

石炭灰・下水汚泥焼却灰等の深層混合処理への適用性

施工研究室 室長 嶋津晃臣

研究員 塚田幸広

岩瀬真二

要 旨

石炭灰、下水汚泥焼却灰及びコンクリート粉等の廃棄物を土質改良用添加材として深層混合処理への有効利用を図るため、高含水比粘性土、有機質土を対象とした室内配合試験及び現場試験施工を実施しその適用性、問題点を検討した。その結果、石炭灰・下水汚泥焼却灰は土質改良用添加材として十分有効利用可能であることが明らかとなった。

キーワード：石炭灰、下水汚泥焼却灰、土質改良、深層混合処理、配合試験、試験施工

はじめに

近年、建設工事に伴う土砂、コンクリート廃材および下水処理場からの汚泥など、毎年大量の廃棄物が発生している。これらは従来、主として海面埋め立て、または宅地造成などに処分されてきたが、最近では、埋め立て計画の減少や、環境汚染の防止から、特に大都市周辺においては適当な地域に処分地を得ることが年々困難となってきた。また、エネルギー転換に伴い大量に発生することが予想される石炭灰の処理なども今後の大きな課題となってくることが考えられる。

このような状況を考慮すると、建設廃材、石炭灰、下水汚泥焼却灰などの廃棄物を適切な処理を行うことにより、建設事業に有効に利用することができれば処分地の確保の問題と合せて、省資源の観点から大変有意義なことであると考えられる。

そこで、建設省総合技術開発プロジェクト「建設事業への廃棄物利用技術に関する研究」の課題の一つである「深層混合処理への廃棄物利用技術の開発」では、各種廃棄物の中から石炭灰、下水汚泥焼却灰などの土質改良用添加材として利用可能性が高いと考えられる材料に着目し室内配合試験、現場試験施工などを実施して、これら石炭灰・焼却灰等を用いた際の改良効果並びに問題点を検討した。

本報告書では、今後これらの石炭灰・焼却灰等の固化効果を期待して深層混合処理などの用途へ用いる際の手引き書として、本プロジェクトの試験結果を紹介するとともに、深層混合処理への利用方法などをまとめている。

本文は、次の項目より構成されている。

- ① 石炭灰、下水汚泥焼却灰の基本的性質
- ② 土質改良用添加材としての適用性に関する検討（室内配合試験による検討）
- ③ 深層混合処理への適用性に関する検討（現場試験施工による検討）
- ④ 石炭灰・下水汚泥焼却灰等による深層混合処理の調査・施工の概要と留意点

なお、ここでは深層混合処理工法として、「粉粒体供給方式」を主体に述べている。また、石炭灰・焼却灰等の土質改良効果については、対象土質の性状は勿論のこと廃棄物の種類、他の改良材（セメント、石灰など）との組合せ、混合割合などにより大きく異なる。その点については、まだ十分なデータが蓄積されておらず、ここでは、本プロジェクトにおいて得られた室内配合試験結果に基づき述べている。

さらに、サンドコンパクションパイルやバーチカルドレーンなどの物理的な軟弱地盤改良工法の材料としての利用方法も十分考えられることから、ここでは本プロジェクトにおいて得られた「石炭灰・焼却灰等単体の力学的特性」に関する試験結果を記載してあるので参考にされたい。

以下には、本文中で用いた記号をまとめて示す。

w : 土の含水比

w_n : 自然含水比

w_i : 室内配合試験における初期含水比

γ_d : 土の乾燥単位体積重量

γ_t : 土の湿潤単位体積重量

ρ_d : 土の乾燥密度

ρ_t : 土の湿潤密度

q_u : 一軸圧縮強さ

$q_{u,i}$: 室内配合試験における混合処理土の一軸圧縮強さ

$q_{u,f}$: 現場における混合処理土の一軸圧縮強さ

$q_{u,n}$: 室内配合試験における材令 n 日の混合処理土の一軸圧縮強さ

$q_{u,n}$: 現場における材令 n 日の混合処理土の一軸圧縮強さ

q_{cn} : 材令 n 日の処理土のコーン貫入強さ

ε : ひずみ

ε_f : 破壊ひずみ

E_{s0} : 変形係数

σ_t : 引張り強さ

$\sigma_{t,n}$: 材令 n 日の混合処理土の引張り強さ

G_s : 土の比重

G_o : 廃棄物の比重

a_m : 添加材の混合率

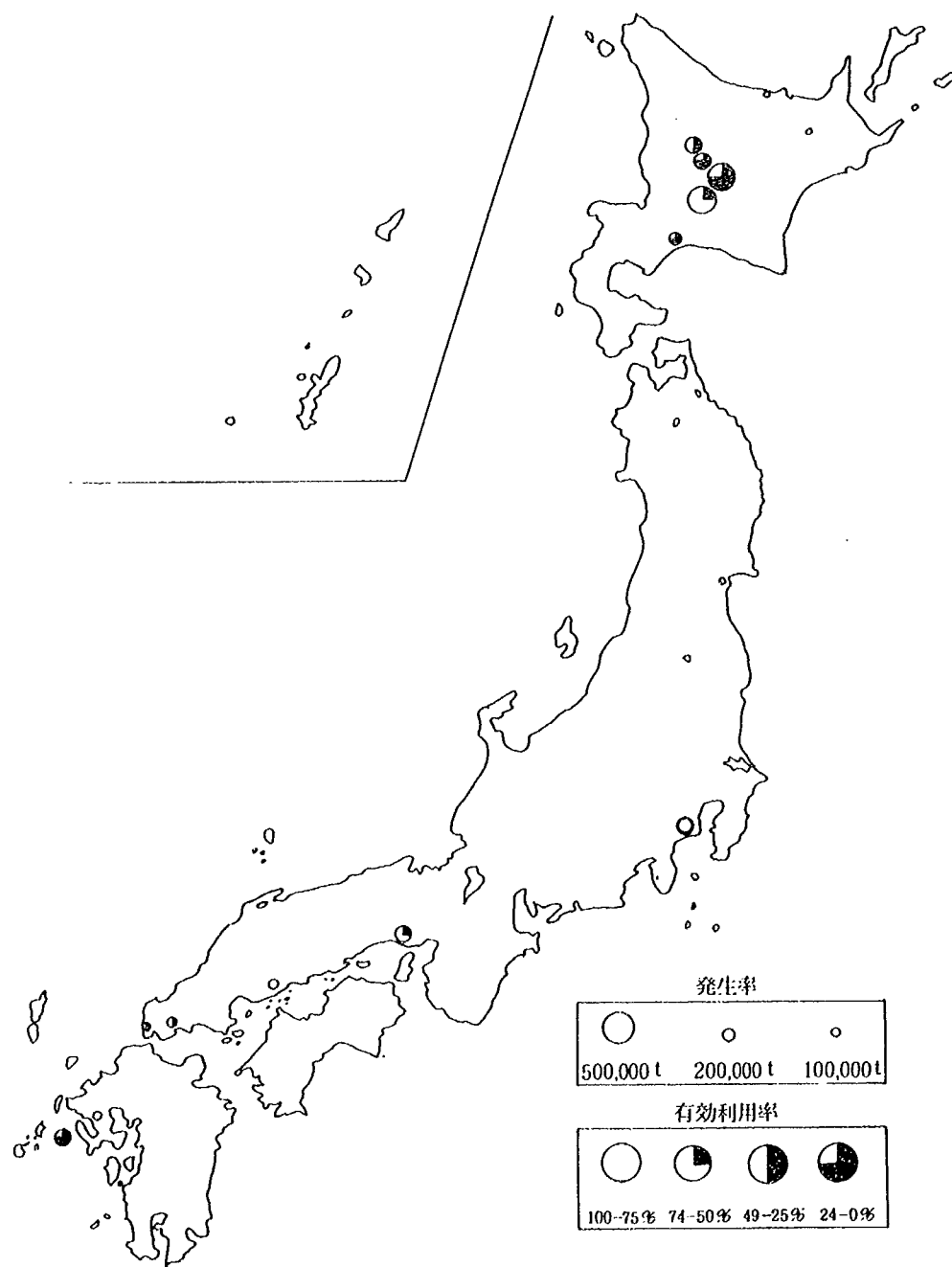
T_c : 材令

目 次

はじめに	
1. 石炭灰・下水汚泥焼却灰の基本的性質	1
1-1 石炭灰	1
1-2 下水汚泥焼却灰	8
2. 土質改良用添加材としての適用性に関する検討（室内配合試験による検討）	16
2-1 「締固めを伴わない混合処理土」の基本的特性に関する検討	16
2-1-1 室内配合試験の方法と条件	16
2-1-2 室内配合試験結果	23
(1) 配合試験Ⅰ（石炭灰、コンクリート粉を対象）	23
(2) 配合試験Ⅱ（石炭灰、下水汚泥焼却灰を対象）	46
(3) 配合試験Ⅲ（下水汚泥焼却灰、コンクリート粉を対象）	72
2-2 「締固めを伴う下水汚泥焼却灰混合処理土」の力学的特性に関する検討	88
2-3 石炭灰・焼却灰等単体の力学的特性のおよび透水性に関する検討	95
3. 深層混合処理への適用性に関する検討（石灰系焼却灰によるピート質地盤の改良）	112
3-1 試験施工の概要と条件	112
3-2 試験施工の結果	116
4. 石炭灰・下水汚泥焼却灰等による深層混合処理の調査・施工の概要及び留意点	122
4-1 調 査	122
4-1-1 事前調査	122
4-1-2 事後調査	127
4-2 施 工	128
4-2-1 施工概要	128
4-2-2 施工機械	131
4-2-3 施工方法とその手順	135
4-2-4 施工管理	138
4-2-5 施工および改良材に関する留意点	139
参 考	141
参考Ⅰ. フミン酸含有量の試験方法	141
参考Ⅱ. 有害物質（重金属）の含有量測定方法及び測定結果例	142
あとがき	145

表一 1. 1 石炭灰・脱硫石膏の発生量の見通し (万 t / 年)

種 別	59年度推定	64年度推定	69年度推定
石 炭 使 用 量	1,992	2,286	3,466
石 炭 灰 発 生 量	360	410	620
脱 硫 石 膏 発 生 量	110	120	180



図一 1. 2 石炭灰の発生地と有効利用率

1-1-3 石炭灰および石膏の取扱い性

ここでは現状の石炭灰および石膏の取扱い性についてまとめてみる。

- ① フライアッシュとシンダーアッシュは、ほぼセメントと同様に取扱うことが望ましい。輸送は一般にタンク車（バラ積み）あるいは袋詰め（40kg紙袋または0.5～1.0大コンテナバック）で行なわれる。ただし、土工に用いる場合や廃棄処理する場合は散水湿潤化（ $w = 20\%$ ）飛散を防止した上でバラ積みトラック輸送するケースが多く、まれにはスラリー化しパイプライン輸送することもある。

なお、乾燥フライアッシュは風によって粉塵化しやすく、また、空気が混入すると粉流体となりやすく、注意する必要がある。他方、湿潤フライアッシュは長時間経過すると、固結や変質（既成灰化）するので、留意する必要がある。

- ② クリンカーアッシュは一般に湿潤砕砂状で排出されるため、バラ積みトラック輸送するケースが多く、その取扱いは軽質の砂と同様に行うことができる。

- ③ 他方石膏は、一般にセメントよりやや粗粒粉で湿潤状態（ $w = 20 \sim 30\%$ ）で排出され、バラ積みトラック輸送やコンテナバック（1～2 m³）詰めトラック輸送されている。また、これら湿潤石膏は乾燥すると団粒化しやすい。

1-1-4 石炭灰及び石膏の諸性状

(1) 石炭および石膏の産状

石炭灰は写真-1.1に示すようにガラス玉状の乾燥微粉末（フライアッシュ・シンダーアッシュ）と溶岩塊状（最大径20～30cm：クリンカーアッシュ）で産出し、溶岩塊状のものは破碎され湿潤砕砂状で排出される。

鉱物学的には石英(Quartz)・ムライト(Mullite)が主であり、磁鉄鋼(Magnetite)・石灰(Lime)なども若干混在する。

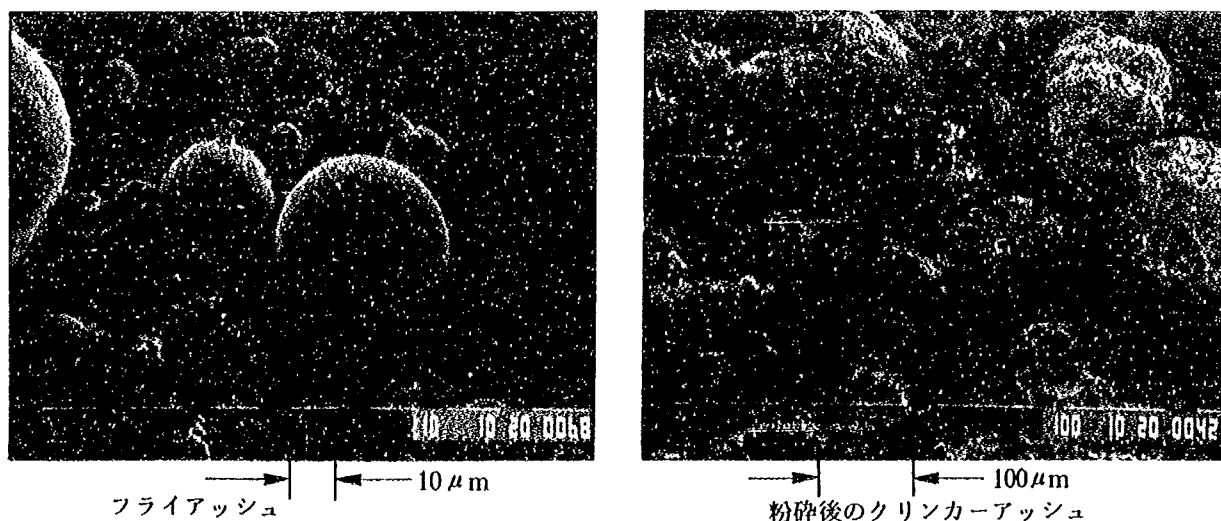
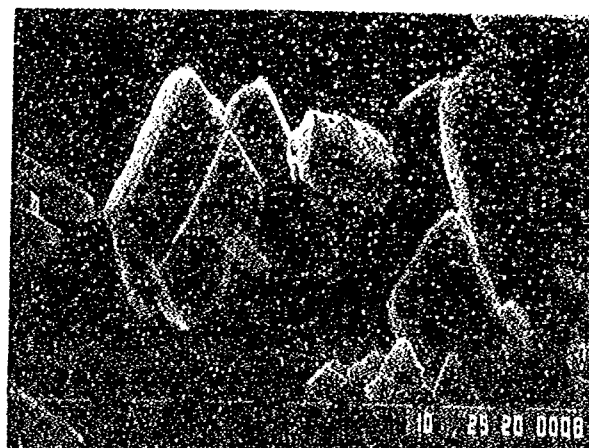


写真-1.1 石炭灰の形状(例)

他方、石膏はセメント粒より若干粗目で一般にはスラリー状で産出するが、脱水工程を経て湿潤状($w = 20 \sim 30\%$)で排出されている。その形状は脱硫条件等によって異なり、針状、板状・粒状のものがある。(写真―1.2 参照)鉱物的には文字どおり石膏(Gypsum)で、石炭灰が若干混在する場合もある。

(2) 石炭灰および石膏の化学的性質

石炭灰の構成化学成分は表―1.2(a), (b)に示すとおりで、主成分はシリカとアルミナであり、鉄・カルシウムなどを若干含んでいる。また石炭の未燃分も数%混在するが、近年は低温燃焼や揮発分低位炭の導入により増加の傾向にある。



写真―1.2 石膏の形状(例)

表―1.2(a) 石炭灰の構成化学成分

炭 種	国 内 炭	外 国 炭
成 分		
SiO (%)	50 ~ 55	40 ~ 75
Al ₂ O ₃ (%)	25 ~ 30	15 ~ 35
Fe ₂ O ₃ (%)	4 ~ 7	2 ~ 20
CaO (%)	4 ~ 7	1 ~ 10
MgO (%)	1 ~ 2	1 ~ 3
K ₂ O (%)	0 ~ 1	1 ~ 4
Na ₂ O (%)	1 ~ 2	1 ~ 2

(公害と対策 VOL 16 No 1)

表―1.2(b) 各種物質の構成化学成分

成分	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ FeO (%)	CaO (%)	MgO (%)
フライアッシュ	56.6	26.4	5.8	3.8	1.7
ポルトランドセメント	22.2	5.1	3.2	65.4	1.2
コンクリート	62.4	8.9	—	16.5	1.2
高炉スラグ	33.4	14.5	0.4	41.0	6.0
転炉スラグ	10.9	1.5	20.7	42.0	7.2
山 土	59.6	22.0	—	0.4	0.8
粘土(日本)	60~75	—	5~8	10~25	—

(注) * Fe₂O₃, ** FeO (公害と対策 VOL 16 No 1)

他方、脱硫石膏の構成化学成分は表―1.3に示すとおりで、主成分の比率はほぼ2水石膏の理論式どおりとなっている。なお、表中に示した圧縮強度は140℃で焼成した場合の値である。また、主成分の分布幅は化合水が19.52~20.88、酸化カルシウムが31.13~32.92、無水硫酸が43.09~46.18である。また、石炭灰の主成分も若干混在し、シリカが0.0~1.7%である。

表―1.3 脱硫石膏の物性と構成化学成分
(21試料の平均値)

比 重	2.53	pH	7.2
粉 末 度 (cm ² /g)	2 250	酸化アルミニウム(%)	<0.17
圧縮強度 (kg/cm ²)	68	二酸化ケイ素 (%)	<0.50
付 着 水 分 (%)	6.4	酸化第二鉄 (%)	0.10
化 合 水 (%)	20.1	硫化物硫黄 (%)	<0.09
酸化カルシウム (%)	32.4	塩 素 (%)	<0.02
無 水 硫 酸 (%)	45.5	遊 離 酸 (%)	<0.011

(石膏問題現況調査研究委員会)

(3) 石炭灰の物理的性質

石炭灰の物理的性状では表―1.4に示すとおりで、比重は一般の土砂より若干低目である。フライアッシュの粉末度はセメントと同程度であるが、クリンカーアッシュは砕砂機によりかなり異なることがあるものの砂粒程

度のものが多い。また、その分布例は、図-1.3に示すとおりである。なお、シンダーアッシュはフライアッシュの粗粒部に分布するものが多い。

表-1.4 石炭灰の比重・粉末度コンシステンシー

灰 種	比 重	粉 末 度				コンシステンシー (PI)
		比表面積 (cm^2/g)※	88 μ 残 (%)	44 μ 残 (%)	平均粒径 (μm)	
フライアッシュ シリニアッシュ	2.06 ~ 2.45	2,650 ~ 5,250	0.2 ~ 13.3	1.4 ~ 26.8	12.5 ~ 39	測 定 不 可
クリンカー アッシュ	"	—	75 ~ 93	—	250 ~ 2,000	"

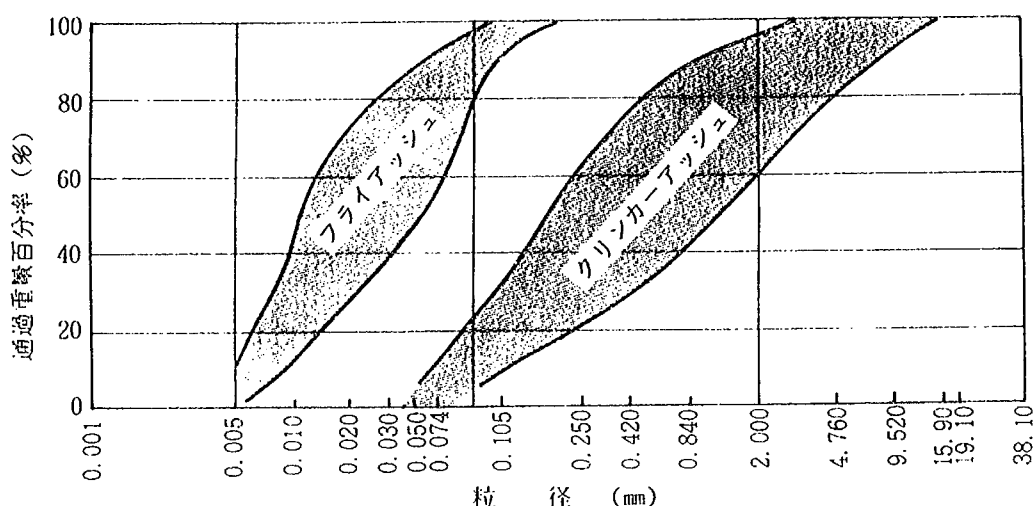


図-1.3 フライアッシュおよびクリンカーアッシュの粒度分布例

(4) フライアッシュの工学的性質

フライアッシュの突固め曲線の例は図-1.4に示すとおりで、乾燥密度 ρ_d は $1.10 \sim 1.4 \text{ t/m}^3$ に分布し、最適含水比も $20 \sim 36\%$ と灰質によってかなり異なっており、炭質・燃焼温度・風代（既成灰化）の影響が見られる。

また、フライアッシュの三軸圧縮試験によるせん断強さの測定例は図-1.5に示すとおりで、灰種によってあまり大差のない強度特性となっており、またかなり大きいせん断抵抗を示す。

フライアッシュによる造成地盤の特性値を表-1.5に示す。この地盤の造成方法は振動ローラ方式、ブルドーザー転圧方式、高濃度スラリー化搬出方式の3とおりで行ったものである。その結果、地盤強度（ N 値・CBR・密度）は、高濃度スラリーで搬出し盛立てた時が最も大きく、次に振動ローラ転圧時、ブルドーザー転圧時となっている。前者の場合はキピラリーリアクションが作用し、また中者の場合はダイレクタンシーリアクションが作用し、予想外の格差が生じたものと考えられる。また、透水係数は、高濃度スラリーの場合に $1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ とほぼ不透水性を示すが、通常の転圧の場合は 1×10^{-3} と細砂層程度となっている。

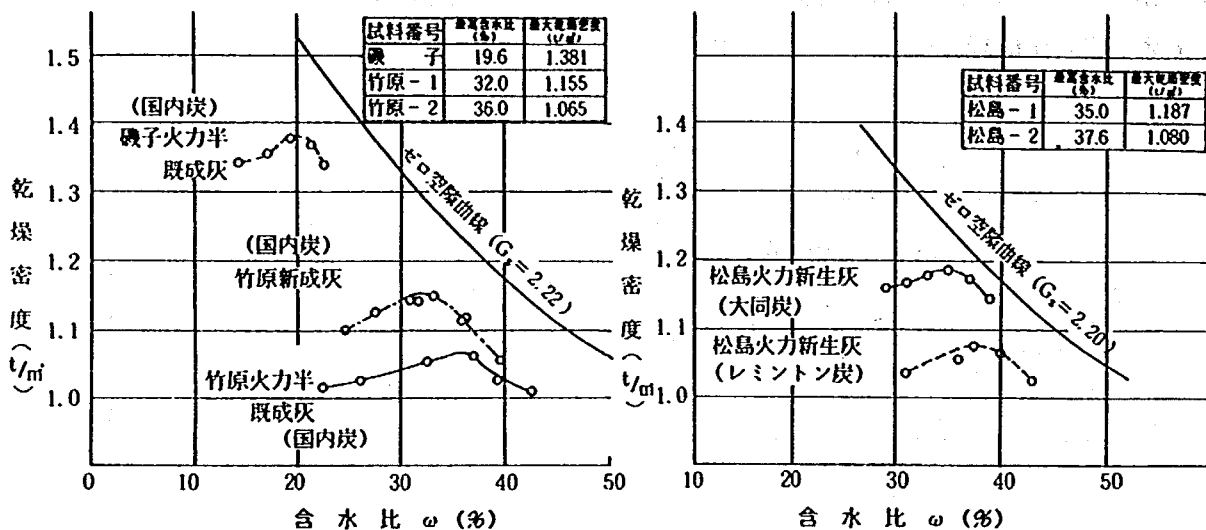


図-1.4 フライアッシュの突固め曲線の例 (電源開発(株)資料)

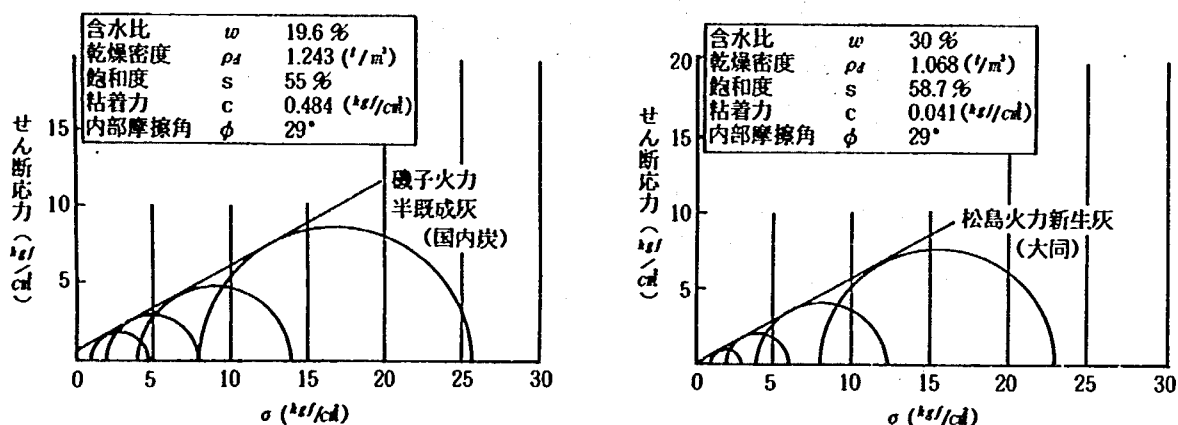


図-1.5 フライアッシュの三軸圧縮試験結果の例 (電源開発(株)資料)

表-1.5 石炭灰の地盤成立試験例 (電源開発(株)磯子火力・国内炭灰)

項 目	振 動 ロ ー ラ ー 転 圧 時						ブ ル ト ー ザ ー 転 圧 時					高濃度スラリー撤出時		
振 動 数 F (r. p. m.)	1700	2400												
転 圧 回 数 N (回)	6	2	6			10	2	6			10	な し		
まき出し厚さT (cm)	20	40	20	40	60	40	40	20	40	60	40	70~80	70~80	70~80
N 値 (回)	7.3	4.3	7.0	6.7	6.7	9.0	6.7	7.0	5.0	5.0	3.7	9.7	9.7	13.7
C B R (%)	23.4	21.4	26.1	29.3	26.0	20.0	24.9	16.0	18.4	18.8	12.9	35.8	41.5	39.5
透 水 係 数 (cm/s)	1.58×10 ⁻⁵	1.97×10 ⁻⁵	2.02×10 ⁻⁵	1.91×10 ⁻⁵	1.72×10 ⁻⁵	1.66×10 ⁻⁵	2.73×10 ⁻⁵	1.38×10 ⁻⁵	2.16×10 ⁻⁵	2.54×10 ⁻⁵	3.36×10 ⁻⁵	7.34×10 ⁻⁵	3.5×10 ⁻⁵	6.5×10 ⁻⁵
乾 燥 密 度 (t/m ³)	1.13	1.12	1.17	1.16	1.14	1.17	1.14	1.17	1.17	1.17	1.17	1.32	1.32	1.29
含 水 比 (%)	16.3	19.2	18.8	19.1	17.7	19.1	19.2	18.8	19.1	17.7	19.1	35.8	30.2	27.9
灰 の 状 態	半 既 成 灰						半 既 成 灰					新 生 灰		

(石炭技術研究所資料)

1-1-5 石炭灰の固結原理

石炭灰の微粉末（フライアッシュ・シンダーアッシュ）は比表面積が大きく、かつガラス化が進んでいるため、ポゾラン活性を示す。ここでは、石炭灰の固結の原理として現在考えられている事柄について触れてみる。

①セメントおよび石灰とのポゾラン反応（図-1.6(a) 参照）

フライアッシュ（ SiO_2 , Al_2O_3 ）は適度のアルカリおよび湿分下において SiO_3^{2-} や $\text{Al}_2\text{O}_4^{2-}$ が溶出し、セメント鉱物の水和反応（ $\text{C}_3\text{S} \cdot \text{C}_2\text{S} \rightarrow \text{CSH} + \text{Ca}(\text{OH})_2$ ）によって生じる Ca^{2+} と次のようなポゾラン反応を示す。また、消石灰や生石灰の Ca^{2+} とも同様の反応を示す。

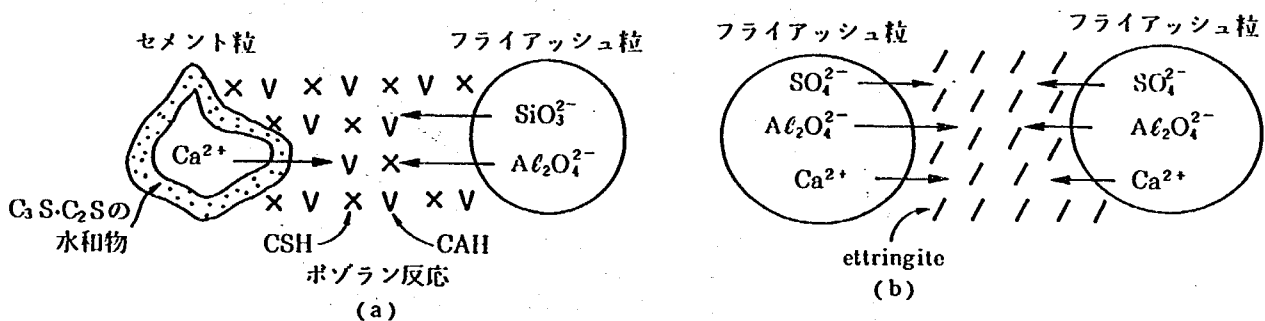
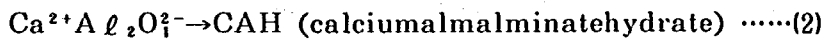
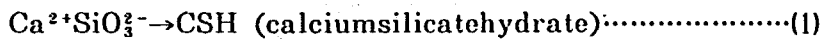
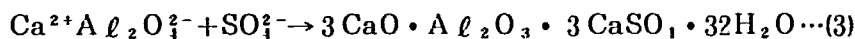


図-1.6 石炭灰の団結原理

②自硬ポゾラン反応（図-1.6(b) 参照）

フライアッシュは数%のカルシウム（ CaO ）と石膏（ CaSO_4 ）を含有するため、適度の湿分下で Ca^{2+} と SO_4^{2-} が生じ、適度のアルカリ下でフライアッシュの $\text{Al}_2\text{O}_4^{2-}$ と次のような反応を示し、自硬する場合がある。



その程度はフライアッシュ中の Ca や SO_4 含有量に起因する Ettringite 生成量やフライアッシュ粒子間の空隙の多少によって異なるようである。なお、この反応はセメントとの場合も若干見られるといわれている。

なお、フライアッシュの自硬性による強度増加例を図-1.7に示す。図より適度の湿潤度が介在する条件では、材令とともにポゾラン反応によって強度が増大していることが明らかである。

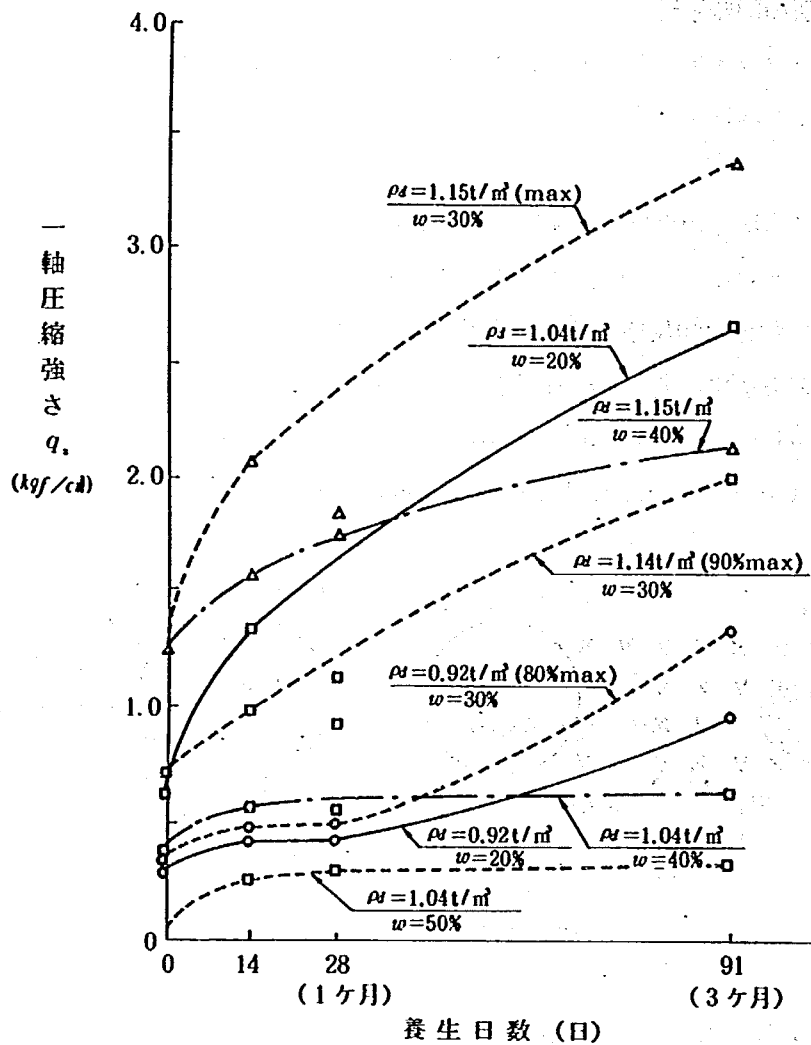


図-1.7 各種含水比状態にあるフライアッシュの一軸圧縮強さと養生日数との関係 (電源開発(株)資料)

1-2 下水汚泥焼却灰

1-2-1 下水汚泥処理の概要

下水汚泥とは、生活や事業の活動によって汚された水を、下水処理場で清浄な水に加工する際に分離される有機物を多く含む泥状のものをいう。

これは、汚水を静置することによって分離された「汚泥」と、汚水に溶解している物質を生物処理によって除去する際に増殖した微生物を分離した「汚泥」からなっている。

水処理から分離された直後の汚泥は、含水率 99% 程度とほとんどが水という状態である。これを適性に処分するためには、水分を下げての減量化や有機物の安定化を図る処理が必要となる。図-1.8 に汚泥処理の一般的なフローを示す。

下水汚泥脱水においては、脱水機に汚泥を投入する前に汚泥の凝集性を高めるため、薬品で調整を行う。この薬品は、無機系と有機系に分けられる。前者としては、硫酸第一鉄と過酸化水素等も用いられるが、塩化第二鉄と消石灰を併用する例が多い。後者としては各種有機高分子凝集剤が用いられ

る。これら凝集剤の添加量は、汚泥性状によって異なるが通常、汚泥乾燥固形物当たり、塩化第二鉄と消石灰併用の場合でそれぞれ5～7%，30～40%，有機高分子凝集剤で1％前後である。これら凝集剤は焼却炉において酸化され、消石灰は生石灰に、有機高分子凝集剤はほぼ二酸化炭素ガスと水蒸気になる。

濃縮 安定化 脱水 焼却 処分 コンポスト					
処理技術	重力濃縮 浮上濃縮 遠心濃縮	嫌気性消化 好気性消化	真空ろ過 ベルトプレス フィルタープレス 遠心脱水など 乾燥床	立型多段炉 流動層1炉 回転乾燥焼却炉 など 空気吹込式 機械式	陸上埋立 海面埋立 海洋還元 農緑地利用 建設資材 など
内容	引抜汚泥の濃度を高くする。 固形物濃度で2～6%	汚泥中の有機物を安定化する。	含水率を65～80%に下げる。	・汚泥中の有機物を焼却する。 ・堆肥化する。	
汚泥名	生汚泥 (濃縮汚泥)	消化汚泥	脱水汚泥 (脱水ケーキ)	焼却灰 コンポスト汚泥	

図-1.8 下水汚泥処理プロセスの概要

下水汚泥焼却に用いられている焼却炉は、多段焼却炉、流動焼却炉、回転乾燥焼却炉（ロータリーキルン）、階段炉床式焼却炉などであるが、前二機種の設置が多い。以下、簡単に多段焼却炉と流動焼却炉の二機種の構造を説明する。

多段焼却炉（以下、多段炉という）の構造を図-1.9に示す。

脱水ケーキは、炉頂部から投入され、センターシャフトと一しょに回転するかき寄せアームに取り付けられたティースによって、炉内で順次下段へ落下されていく。その間に脱水ケーキは、下方からの燃焼ガス

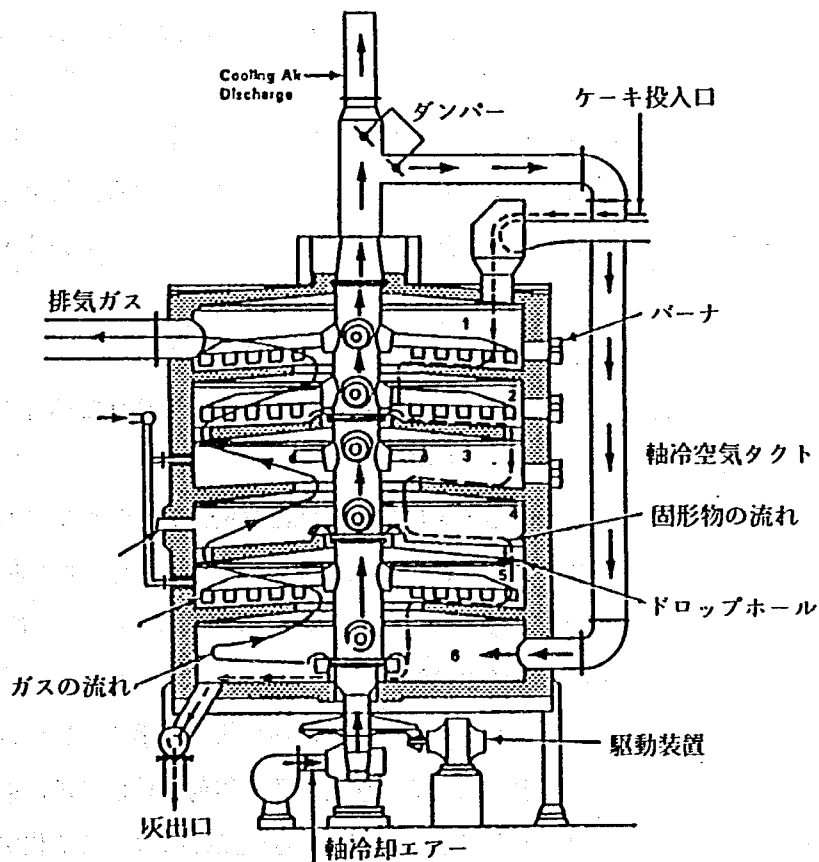


図-1.9 多段焼却炉の構造図

と合流接触して乾燥された後、燃焼、冷却され焼却灰は最下段より炉外へ排出される。

流動焼却炉（以下、流動炉という）の構造を図-1.10に示す。ウィンドボックスから吹き込まれる空気により、流動状態になっている加熱状態の流動媒体（一般にけい砂使用）に、脱水ケーキを投入する。脱水ケーキは、瞬間的に燃焼し、焼却灰と燃焼ガスとはフリーボード部を経て炉頂部より排出される。焼却灰は後段に設けられた集じん装置によって捕集される。

両方式とも、燃焼温度は、800℃前後で運転される。

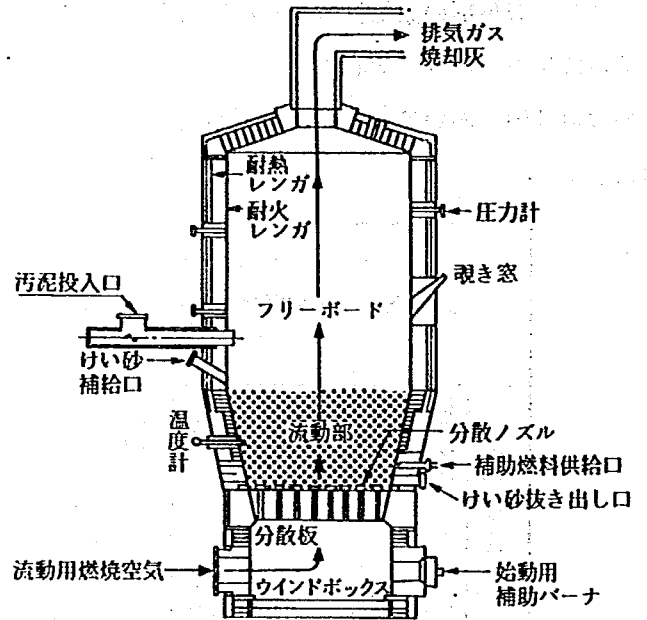


図-1.10 流動焼却炉の構造

1-2-2 下水汚泥焼却灰の発生量

わが国で、昭和59年度末現在、下水道で処理している人口は4,128万人で、総人口に対する普及率は34%である。

下水処理の結果発生する下水汚泥の量は、年間100万t（固形物ベース、1983年度）である。この汚泥は、前述のような処理を経て処分されている。現在では、発生下水汚泥脱水ケーキのうち、約55%が焼却されており、今後は埋立て処分地の減少等から、焼却処理される下水汚泥量は増加するものと考えられる。

昭和57年度の焼却灰の発生量を地域毎に示すと、図-1.11のとおりである。図に示すとおり焼却灰の発生量が、東京都、神奈川県、愛知県、大阪府、京都府に集中している。これは、これらの地域が下水道普及率が高く、下水汚泥発生量が多いこと、埋立て処分地が不足していることによると考えられる。

1-2-3 下水汚泥焼却灰の取扱性

下水汚泥焼却灰は、後述するように微粉末である。埋め立て処分に当たっては飛散防止のため、加湿した後、バラ積みで運搬している。

しかし、生石灰の水和反応等を期待する地盤改良材等への利用に当たっては、加湿する前の焼却灰を運搬することになる。この運搬は、ほぼセメントと同様に取り扱い、タンク車（バラ積み）、あるいは袋詰め（40kg紙袋、または0.5～1.0tコンテナバック）で行う必要がある。

1-2-4 下水汚泥焼却灰の特性

下水汚泥焼却灰（以下、焼却灰という）の物理的、化学的な性質は以下の条件によって異なる。焼却灰の成分組成は、①下水の水質や②使用する凝集剤の種類や量によって、焼却灰の粒径は、①焼却灰の成分組成、②焼却炉の形式や③焼却炉の運転条件によって変化する。また、同一下水処理状においてもこれらの因子は、変化するもので、焼却灰の組成や粒度分布も変化する。

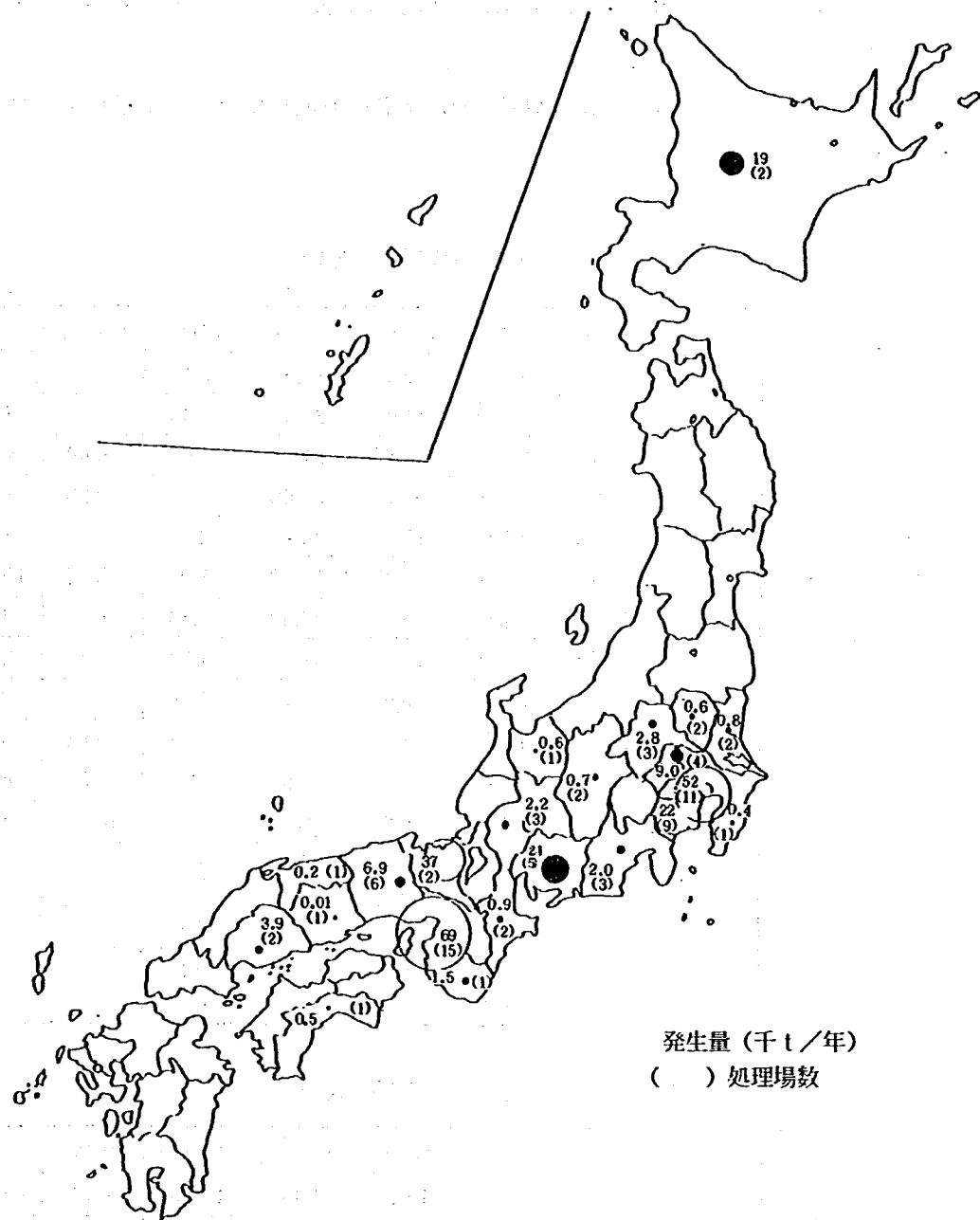


図-1.11 汚泥焼却灰の発生の現状 (発生量及び焼却実施処理場数)
(昭和57年～昭和58年のデータ)

(1) 化学的性質

1) 化学的成分

焼却灰の成分組成の測定例を表-1.6に示す。後述するように、焼却灰の土質改良効果(固化作用)は主として、生石灰成分の働きによる。焼却灰中の石灰含有量に大きな影響を与える要因は、凝集剤の種類によるので、表-1.6ではこれに着目して次のように分類している。

- 石灰系焼却灰…凝集剤として塩化第二鉄及び消石灰を用いたもの。
- 高分子系焼却灰…凝集剤として有機高分子凝集剤を用いたもの。
- その他…凝集剤として上記以外のものを用いたもの、または上記ものを焼却時に混合しているもの。

(例えば、硫黄酸化物の発生抑制のため、高分子系脱水ケーキを焼却する際に石灰を添加しているなど。)

焼却灰の主成分は、CaO、SiO₂、Al₂O₃、FeOであり、それぞれ酸化物として重量比を求めると、これらの成分で70～85 %を占めている。

表-1.6 (a) 石灰系焼却灰成分例

NO	pH	ig-loss	Fe ₂ O ₃	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	その他	計
58-4			12.2		31.9	9.3	32.9	0.1	4.9	91.3
5		0.9	15.56		30.06	11.06	29.96	0.45		87.99
6		9.27		17.48	24.05	9.64	24.98		6.09	91.51
7		9.72		12.56	27.88	5.12	28.65		3.23	87.16
9			9.6		30.2	17.5	30.0	2.6		89.9
11	12.46	6.9		11.44	32.94	11.23	15.19	8.94	5.12	104.22
12	11.19	2.3		11.00	14.31	8.89	29.39	5.54	6.29	88.91
59-A				6.62	9.25	10.7	51.5	1.74	8.67	88.48
E				11.7	22.4	6.96	36.1	1.70	7.34	86.2
G				16.8	15.2	7.17	38.4	5.31	9.65	92.53
I				10.8	18.1	5.9	40.5	2.66	10.55	88.51
K				12.8	13.5	6.55	38.0	1.24	10.2	82.29
		計 データ数	<u>37.36</u> 3	<u>57.36</u> 5	<u>190.05</u> 8	<u>79.82</u> 8	<u>274.55</u> 8	<u>23.5</u> 8		
		平 均	12.5	11.5	23.8	10.0	34.3	2.9		
		変動幅	9.6 15.6	6.6 16.8	9.3 31.9	5.9 17.5	15.2 51.5	0.1 8.9		

表-1.6 (b) 高分子系焼却灰成分例

NO	pH	ig-loss	Fe ₂ O ₃	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	その他	計
58-13	8.71	1.2		6.79	50.24	12.12	4.48	12.96	6.51	103.01
a		1.10	15.54		41.07	18.83	4.52	2.13	13.16	96.35
b		2.67	11.75	2.09	39.55	16.41	8.36	2.46	10.10	93.39
59-C				12.1	44.6	19.0	4.15	1.87	12.49	94.21
D				6.68	49.6	12.2	3.32	0.79	19.96	92.55
F				12.0	46.6	18.7	3.71	2.13	12.74	95.88
H				7.05	40.9	17.5	8.10	2.78	16.53	82.34
J				17.9	38.5	15.5	1.26	3.5	12.36	89.02
N-1		1.66	14.88		43.64	15.34	4.96	2.18	17.34	100.00
		計 データ数	<u>30.42</u> 2	<u>62.51</u> 6	<u>394.7</u> 9	<u>145.6</u> 9	<u>42.86</u> 9	<u>30.8</u> 9		
		平 均	15.2	10.4	43.9	16.2	4.8	3.4		
		変動幅		6.7 17.9	38.5 50.2	12.2 19.0	1.26 8.36	0.79 12.96		

表-1.6 (c) その他成分例

NO	pH	ig-loss	Fe ₂ O ₃	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	その他	計
58-14	10.59	6.4		8.88	24.74	10.01	27.86	5.67	7.14	100.29
59-L				16.5	27.3	10.3	17.7	1.51	13.87	87.18
J				12.8	13.5	6.55	38.0	1.24	10.23	82.32
Y-1		4.4	6.0		3.3	8.4	28.6	1.6	5.02	57.32
		計	6.0	38.18	68.84	35.26	112.16	10.02		
		データ数	1	3	4	4	4	4		
		平均	6.0	12.73	17.21	8.82	28.04	2.51		

表-1.7 排除方式による焼却灰の成分比較例

排除方式		合 流 式				分 流 式				合 流 式			
凝集剤系		高 分 子 系				高 分 子 系				石 灰 系			
		最小	最大	平均	標準偏差	最小	最大	平均	標準偏差	最小	最大	平均	標準偏差
分 析 項 目	Ig, loss	0.1	2.1	0.67	0.58	0.0	3.5	0.75	0.85	0.0	12.6	2.71	2.69
	SiO ₂	32.9	48.0	41.81	7.89	27.8	44.6	35.81	4.11	8.0	24.5	15.58	4.51
	Al ₂ O ₃	13.7	17.1	15.24	0.86	12.5	17.7	15.25	11.09	5.5	10.9	7.73	1.52
	Fe ₂ O ₃	4.9	7.2	6.08	0.59	4.6	17.4	6.50	2.68	10.8	15.4	13.43	1.26
	CaO	2.5	10.7	5.72	1.46	5.4	16.0	11.99	2.72	27.0	44.9	35.17	5.71
	MgO	2.9	6.5	4.78	0.87	0.5	10.7	3.67	2.14	0.2	4.3	2.55	1.27
	K ₂ O	1.1	4.7	2.70	0.93	1.4	4.2	2.50	0.69	0.4	1.4	0.83	0.33
	Na ₂ O	1.2	14.1	7.57	2.89	0.5	8.9	1.79	1.60	0.3	2.2	0.88	0.47
	P ₂ O ₅	4.3	18.4	9.51	2.57	6.7	21.2	15.70	4.27	1.8	6.6	5.06	1.28
合 計		86.7	100.9	96.46	4.00	86.3	99.6	74.16	3.99	78.8	93.5	83.75	4.25

出典：下水汚泥の建設資材化に関する調査報告書（昭和59年度）建設省、日本下水道事業団

2) pH

pHについての測定例は少ないが、生石灰の含有量によって中性のものから強アルカリ性のpH 12.5のものまである。

3) 強熱減量

強熱減量は1～10%であり、有機物の他、水分とか炭酸カルシウム(CaCO₃)から生石灰(CaO)への変換によるものを含んでいる。

(2) 物理的性質

1) 比 重

焼却灰の真比重 G_s は、2.52～3.72（14 試料の平均による）と広範囲にある。一般には石灰系焼却灰の真比重が、鉄分の含有量が多いことなどから、高分子系焼却灰より高くなっている。

2) 粒度組成

焼却灰の粒径加積曲線の例を図-1.12に示す。焼却灰は礫分を主体とするものから砂、シルトを

主体とするものまで変化に富んでいる。図中の試料No 2およびNo 4は、焼却後加水したもののため団粒化が進んだ結果と考えられる。

図-1.12において焼却方式に着目すると、多段炉の焼却灰には粗粒分を多く含むものがある。前段で述べたように、流動炉では流動媒体の砂によって破碎されるが、多段炉の場合、脱水ケーキが造粒された上、燃焼することによって粗粒灰が形成されやすい。

しかし、下水汚泥焼却灰の礫分は粒子間の結合が弱く、締固め等による外力が加われば容易に細粒化する傾向がある。

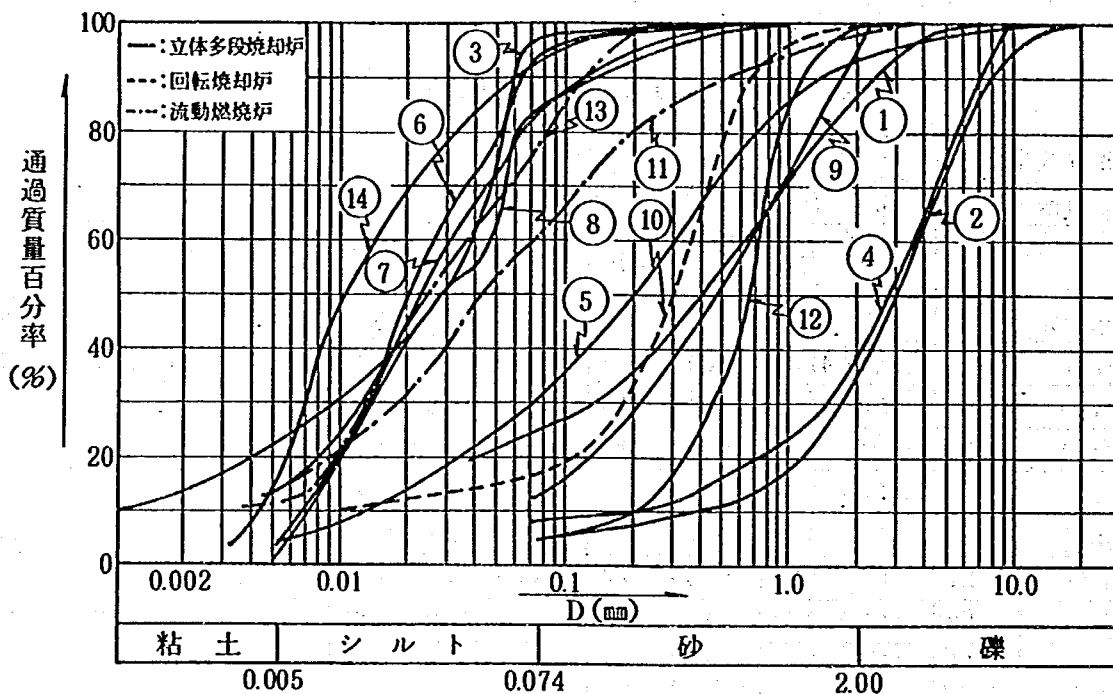


図-1.12 焼却方式の違いによる粒度加積曲線

3) コンシステンシー

焼却灰のコンシステンシーに関する報告例は少ないが、次のようなことがいえる。

液性限界(w_L)に関しては50~65%を有するものと試験ができないものに二分され、同様に塑性限界(w_p)についても40~60%と非常に高いものと試験できないものに分けられる。塑性指数(I_p)は4~13と低く、砂質土の特性値と似ている。しかし、それぞれの試験値の絶対値が沖積の粘性土のように大きいことから、細粒分(シルト分)が卓越していると考えられる。

(3) 力学的性質

1) 締固め曲線

締固め曲線の例を図-1.13に示す。

この場合、焼却灰は、最大乾燥密度 $\rho_{max} = 0.777 \sim 1.118 \text{ g/cm}^3$ 、最適含水比 $w_{opt} = 39.5 \sim 66.0$ %の範囲にある。

真比重と違い、最大乾燥密度については、石灰系および高分子系の差は一定の傾向としては認められない。

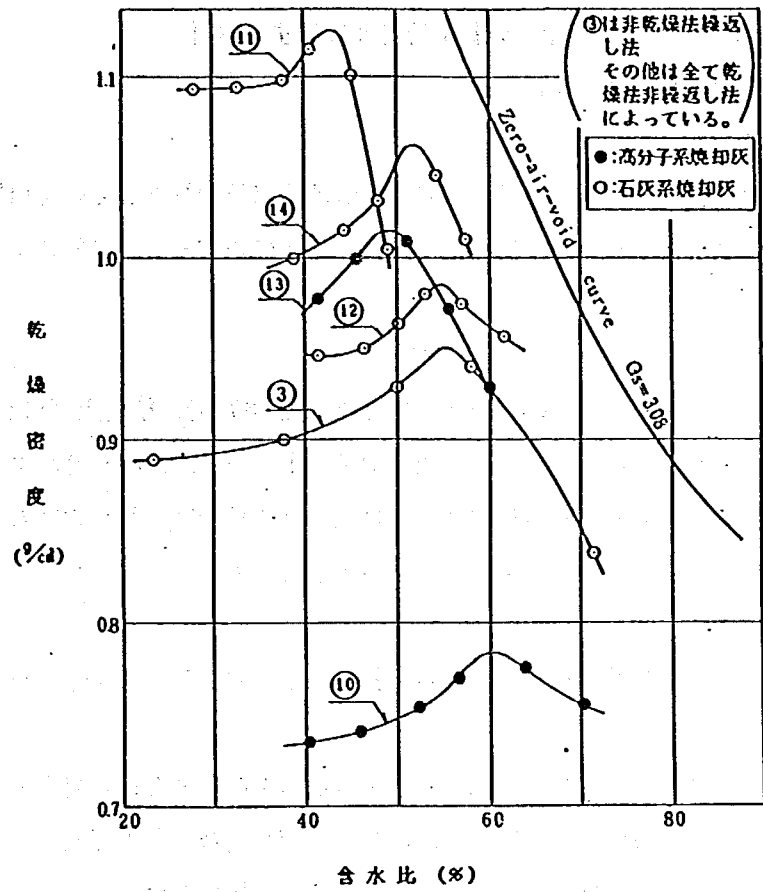


図- 1.13 焼却灰の締固め曲線の例

2. 土質改良用添加材としての適用性に関する検討 (室内配合試験による検討)

2-1 「締固めを伴わない混合処理土」の基本的特性に関する検討

2-1-1 室内配合試験の方法と条件

(1) 各配合試験の目的

石炭灰、下水汚泥焼却灰およびコンクリート粉の土質改良用添加材としての適用性を検討するために、室内配合試験を実施した。なお、室内配合試験は、以下に述べるように配合試験Ⅰ、Ⅱ、Ⅲに大別される。

1) 配合試験Ⅰ

室内配合試験Ⅰでは、試料土としてのピート（自然含水比 560 %）、粘性土（自然含水比 60 %）の 2 種類の土質を用い、各々の土に対して、石炭灰とセメント、石灰、排脱石膏および、コンクリート粉体とを組合せた配合条件のもとで基本的な強度特性（一軸圧縮強度、割裂強度および養生中の含水比変化など）を調査した。以下に配合試験Ⅰの着目点をまとめて示す。

- ① 石炭灰のもつ自硬性
- ② 石炭灰にセメントおよび石灰を加えた場合の養生日数、およびセメント、石灰などの混合割合による強度変化
- ③ 上記条件にさらに排脱石膏を加えた場合の養生日数および排脱石膏の混合割合による強度変化
- ④ 石炭灰とコンクリート粉体という廃棄物だけを組合せた場合の利用可能性
- ⑤ 各種配合条件での吸着および固化反応過程における含水比の変化

2) 配合試験Ⅱ

- ① 配合試験Ⅰに引続き石炭灰を対象とするとともに、新たに下水汚泥焼却灰（石灰系）を対象とした室内配合試験を行い石炭灰・石灰系下水汚泥焼却灰の改良効果を把握する。
- ② 石灰系下水汚泥焼却灰を用いたピート質地盤における深層混合処理試験施工結果（第 3 章参照）と室内試験結果との比較を行う。

3) 配合試験Ⅲ

配合試験Ⅰ、Ⅱに引続き廃棄物の深層混合処理への適用性を調べるために、下水汚泥焼却灰（石灰系）およびコンクリート粉を対象とした室内配合試験（締固めを伴わない混合処理土の検討）を行い改良効果に関するデータの補充を図る。また、混合処理土に対する三軸圧縮試験（UU試験）を行い拘束圧力下における「締固めを伴わない混合処理土」の力学的特性を把握する。

(2) 各配合試験に用いた廃棄物の種類

これまでに各配合試験配合試験Ⅰ、Ⅱ、Ⅲにおいて対象とした石炭灰・焼却灰等の種類および化学成分を整理すると以下の表－2.1～表－2.2のようになる。なお、表中に示した※印は後述する「2－3 石炭灰・焼却灰等単体の力学的特性および透水性に関する検討」で使用した材料である。

表－2.1 各配合試験に対象とした廃棄物

配合試験	石炭灰		下水汚泥焼却灰					コンクリート粉	
	国内炭	国外炭	埼(石)	東(石)	東(高)	広(石)	札(石)	微粒	粗粒
Ⅰ	◎	◎						◎	
Ⅱ	◎		◎	◎					
Ⅲ	※		◎		※	◎	※	◎	※

注) 埼；埼玉，東；東京，広；広島，札；札幌を示す。石；石灰系焼却灰，高分子系焼却灰を示す。なお，この他に配合試験Ⅰには排脱石膏も対象とした。

※は後述する廃棄物単体の透水性・力学的試験に使用

表－2.2(a) 各廃棄物の化学成分

配合試験No	試料名	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O	SO ₃	含水率
Ⅰ, Ⅱ	石炭灰(国内炭)	5.02	52.83	21.92	0.86	6.18	0.65	0.40
Ⅰ	石炭灰(国外炭)	4.65	54.92	23.68	—	10.05	—	0.20
※	コンクリート粉(粗粒)	7.97	73.06	7.27	0.76	2.68	0.22	3.82
Ⅰ, Ⅲ	コンクリート粒(微粒)	24.00	12.00	—	—	—	—	—
Ⅲ	焼却灰Ⅰ(石灰系；広)	44.55	9.40	5.01	2.30	12.01	4.19	0.25
Ⅱ, Ⅲ	焼却灰Ⅱ(石灰系；埼)	34.50	21.70	13.90	1.57	15.10	3.78	0.20
※	焼却灰Ⅲ(高分子系；東)	9.77	40.58	16.25	1.93	10.19	0.99	0.52
※	焼却灰Ⅳ(石灰系；札)	31.81	25.80	6.10	2.39	18.50	2.01	0.37
Ⅱ	焼却灰(石灰系；東)	38.30	17.10	12.70	4.87	15.40	3.31	0.20

※は後述する廃棄物単体の力学的試験に使用

表－2.2(b) 排脱石膏の化学組成

		(%)				
試料	成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O	MgO	CaO
	排脱石膏(A発電所)	0.63	0.21	0.24	0.19	39.07

排脱石膏の粒度分布は，0.074mm通過質量百分率100%とかなり微粒状である。

(3) 試料土の種類と性質

本室内配合試験に用いた試料土は、岡山県児島湖（粘性土Ⅰ）、埼玉県渡良瀬遊水地（粘性土Ⅱ）より採取した粘性土および埼玉県与野市より採取したピートである。配合試験Ⅰ、Ⅱでは粘性土Ⅱ、ピートを対象とし、配合試験Ⅲでは粘性土Ⅰ、Ⅱ及びピートを用いている。

各試料土の主な物理的特性を表-2.3に示す。

表-2.3 試料土の主な物理的性質（室内配合試験）

項 目	粘 性 土 Ⅰ	粘 性 土 Ⅱ	ピ ー ト
比 重	2.61	2.66	1.72
自 然 含 水 比 (%)	84.60	59.20	650~750
塑 性 限 界 (%)	32.00	30.80	229.60
液 性 限 界 (%)	88.50	26.70	596.30

(4) 各配合試験における配合の組合せと着眼点

1) 配合試験Ⅰ

表-2.4 配合試験Ⅰの添加材の組合せ

No	添加材の組合せ	No	添加材の組合せ
1	石炭灰（国内炭）	5	石炭灰（国内）+コンクリート粉体
2	石炭灰（国外炭）	6	石炭灰（国内）+排脱石膏+ポルトランドセメント
3	石炭灰（国内）+ポルトランドセメント		
4	石炭灰（国内）+生石灰		

なお 表-2.4の組合せの着眼点は次に示すとおりである。

(a) 石炭灰単体（No 1, 2）

このケースでは、石炭灰だけを添加し石炭灰の自硬性に着目して石炭灰の混合割合、着生日数による改良効果を調べ、その利用可能性を調べるものである。なおNo 1では国内炭（A発電所）、No 2では国外炭（B発電所）を用い、国内炭と国外炭の改良効果の比較をする。

(b) 石炭灰+セメント、生石灰（No 3, 4）

このケースでは、石炭灰を国内炭にしぼり、これに、従来から深層混合処理などに多く利用されているポルトランドセメントおよび生石灰を混合させ、その混合割合による強度などの変化を調べる。

(c) 石炭灰+コンクリート粉体（No 5）

このケースでは、石炭灰（国内炭）とコンクリートを微粉化したコンクリート粉体の2種類の廃棄物を混合し、石炭灰のCaO成分とコンクリート粉体の未水和部分Ca(OH)₂に着目し、その強度発現について調べる。

(d) 石炭灰+石膏+セメント (No.6)

このケースは、ケースNo.3における(石炭灰+ポルトランドセメント)の組合せに排脱石膏を混合させたものである。図-2.1は(石炭灰+セメント+排脱石膏+水)の組合せによる硬化体の圧縮強度試験結果の報告例であるが、フライアッシュ 65~80%, セメント 15~25%, 石膏 5~15% における圧縮強度が 280 kgf/cm²程度とかなり高い強度が発現している。このような高い硬化性を有した材料は、石炭灰を土質安定処理へ利用する際の有効な方法となると考えられ、本研究では各材料の混合割合、養生日数などによる強度含水比の変化について調べる。

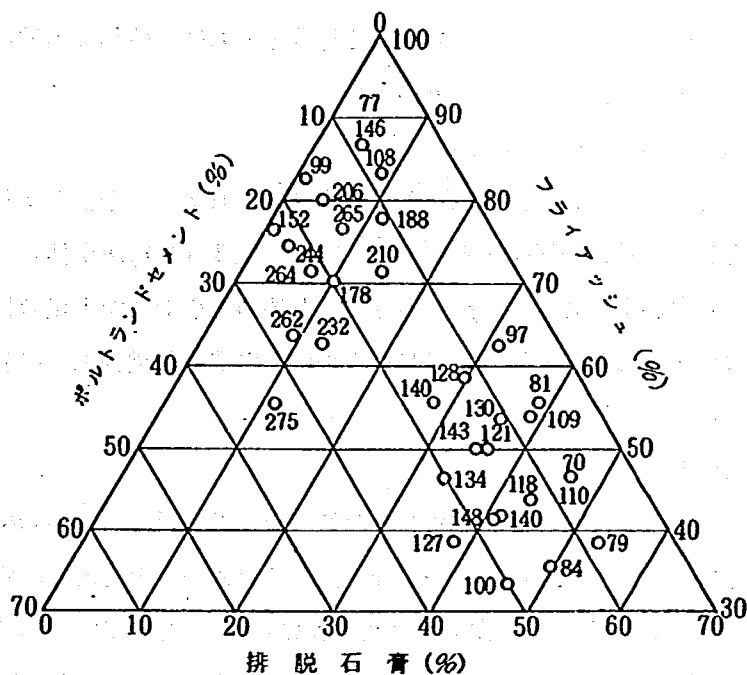


図-2.1 FGCにおける各成分と圧縮強度との関係
(材令28日, 単位kgf/cm²)
(石炭灰の有効利用に関する研究
試験研究成果報告書より)⁽¹⁾

2) 配合試験Ⅱ

配合試験Ⅱにおける添加材の組合せおよび組合せの着眼点を表-2.5に示す。

表-2.5 配合試験Ⅱの添加材の組合せ

No.	添加材の組合せ	組合せのポイント
1	石炭灰+セメント	・石炭灰の増量材としての効果
2	焼却灰(粗)単体	・焼却灰の種類による効果の差
3	焼却灰(細)単体	・石灰灰単体との効果の比較
4	焼却灰+セメント (粗, 細)	・No.1, No.5 との比較において増量材としての効果
5	洗 砂+セメント	・No.1, No.4 との比較

各添加材の組合せにおける着眼点は以下のとおりである。

(a) 石炭灰+セメント (No.1)

この条件は配合試験Ⅰの配合条件に加え、更に石炭灰の大量処分(有効利用)の立場から石炭灰の

混合量を増加させ、一方セメントの混合量を減じた配合である。そこで本条件では石炭灰を大量に高含水比粘性土に混合した場合の含水比低下による改良効果を把握するとともに、セメントとの組合せにおける石炭灰の増量材としての効果を焼却灰とセメントを組合せたNo 4 およびNo 5 の条件と比較するものである。

(b) 焼却灰単体 (No 2, No 3)

この条件では、主に焼却灰を単体で高含水比粘性土に混合した場合の含水比低下による強度発現を見出すとともに、焼却灰のCaO成分による自硬性を把握するものである。更にこの条件では配合試験Ⅰで実施した石炭灰単体における改良効果の比較を行うとともに、焼却灰の種類（主に粒度組成の違い）による改良効果の差異を把握するものである。

(c) 焼却灰（粗粒，細粒）+セメント (No 4)

この条件では石炭灰とセメントを組合せたNo 1，および砂とセメントを組合せたNo 5 との比較において焼却灰の増量材としての効果を調べるとともに、No 2, No 3（焼却灰単体）との比較を行い、セメントの助剤としての効果および必要強度を発現させるための最小セメント量の目安を見出すものである。また本条件では第3章において述べる「ビート地盤での現場試験施工」における配合を決定することも目的としている。

(d) 洗砂+セメント (No 5)

この条件はNo 1, No 4 の条件における石炭灰および焼却灰の増量材としての効果を見出すとともに更に含水比低下または自硬性による改良効果を比較検討するためのものである。すなわち自硬性については本条件における洗砂の場合、その作用が考えられないため一定量のセメントに対して等量の石炭灰，焼却灰を混合した場合の自硬性による改良効果を砂と比較することが可能であると考えられる。

(5) 各配合試験の配合条件

表-2.6, 2.7, 2.8 には各々配合試験Ⅰ, Ⅱ, Ⅲの配合条件を示す。

表-2.6 配合試験Ⅰの配合条件

No	添 加 材	記 号	混合率 (%)	添加材中の石炭灰混合比率 W_f / W (%)	$\frac{G}{G+P}$ (%)
1	石炭灰 (国内)	F ₁	50, 70	100	
2	石炭灰 (国外)	F ₂	50, 70	100	
3	石炭灰+ポルトランドセメント	F ₁ +P	(粘性土) 30%	25, 50, 75	
4	石炭灰+生石灰	F ₁ +L		25, 50, 75	
5	石炭灰+コンクリート粉	F ₁ +C		25, 50, 75	
6	石炭灰+ポルトランドセメント +排脱石膏	F ₁ +P +G	(ビート) 50%	25	10, 20, 30
				50	10, 20, 30
				75	10, 20, 30

ここで、W : 添加材総重量, W_f : 石炭灰重量, G : 石膏重量, P : ポルトランドセメント重量

表-2.7 配合試験Ⅱの配合条件（添加材の混合率）

No.	組 合 せ	土質 添 加 材				粘 性 土 (%)			
		石炭灰	焼却灰	洗 砂	セメント	石炭灰	焼却灰	洗 砂	セメント
1	石炭灰+セメント	50, 75 100	—	—	10, 20	25, 50 75	—	—	5, 10
2, 3	焼却灰単体*（粗, 細）	—	50, 75 100	—	—	—	25, 50 75	—	—
4	焼却灰+セメント	—	50, 75	—	10, 20	—	25, 50	—	5, 10
5	洗砂+セメント	—	—	50, 70	10, 20	—	—	25, 50	5, 10

混合率：試料土の湿潤重量に対する重量割合

*焼却灰単体（細粒）については粘性土のみ

表-2.8 配合試験Ⅲの配合条件

添加材の種類	廃棄物の混合率	セメント混合率	試料土	備 考
焼却灰Ⅰ単体	25%, 50%, 75%	—	粘性土Ⅰ	一軸圧縮試験 （7日, 28日, 50日 養生）
焼却灰Ⅰ +セメント	10%	10%		
	25%	10%, 20%		
	50%	10%, 20%		
	75%	10%, 20%		
セメント単体	—	10%, 20%	粘性土Ⅱ	一軸圧縮試験 （7日, 28日, 90日 養生）
コンクリート粉 +セメント	25%	5%, 10%		
	50%	5%, 10%		
	50%	10%, 20%		
	75%	10%, 20%		
焼却灰Ⅱ単体	30%, 50%, 75%	—	粘性土Ⅱ	三軸圧縮試験 （7日養生）
焼却灰Ⅱ +セメント	30%, 50%, 75%	5%		

注）ここで混合率とは、土の湿潤重量に対する添加材重量の比率をさす。

(6) 供試体作成方法

本試験では、供試体を、「締固めを伴わない安定処理土の試験方法(案)」（土質工学会）に準拠して作製した。以下に作製方法を述べるとともに図-2.2には、そのフローを示す。

- ① 試料は粗大爽雜物を取り除いた後、均一含水比になるようホバート型ソイルミキサーを用いて十分混合し、含水比を測定する。
- ② 試料の含水比が設定含水比より高い場合は、空気乾燥させ、また低い場合には水を加え均一含水比になるように充分混合する。
- ③ バッチ内の試料中央部に添加材を入れ10分間攪拌混合する。なお、混合土がバッチの内面や攪拌翼に付着して混合状態が不完全となる恐れのある場合には、ヘラを用いて混合土を切り返すなどの適切な補助操作を加える。また攪拌混合後、含水比を測定する。

④ 直径 5 cm, 高さ 10 cm の塩ビ管モールドに混合処理された土を直ちに充てんし、ブリージングしない程度に振動を加える。流動性が低く、振動の効果のない場合には、試料 4～5 層に分けて入れ突き棒で充てんする。

⑤ 充てん後、水分の出入を許さないようにポリエチレンで被膜・密封し、恒温室（ $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ ）にて養生する。

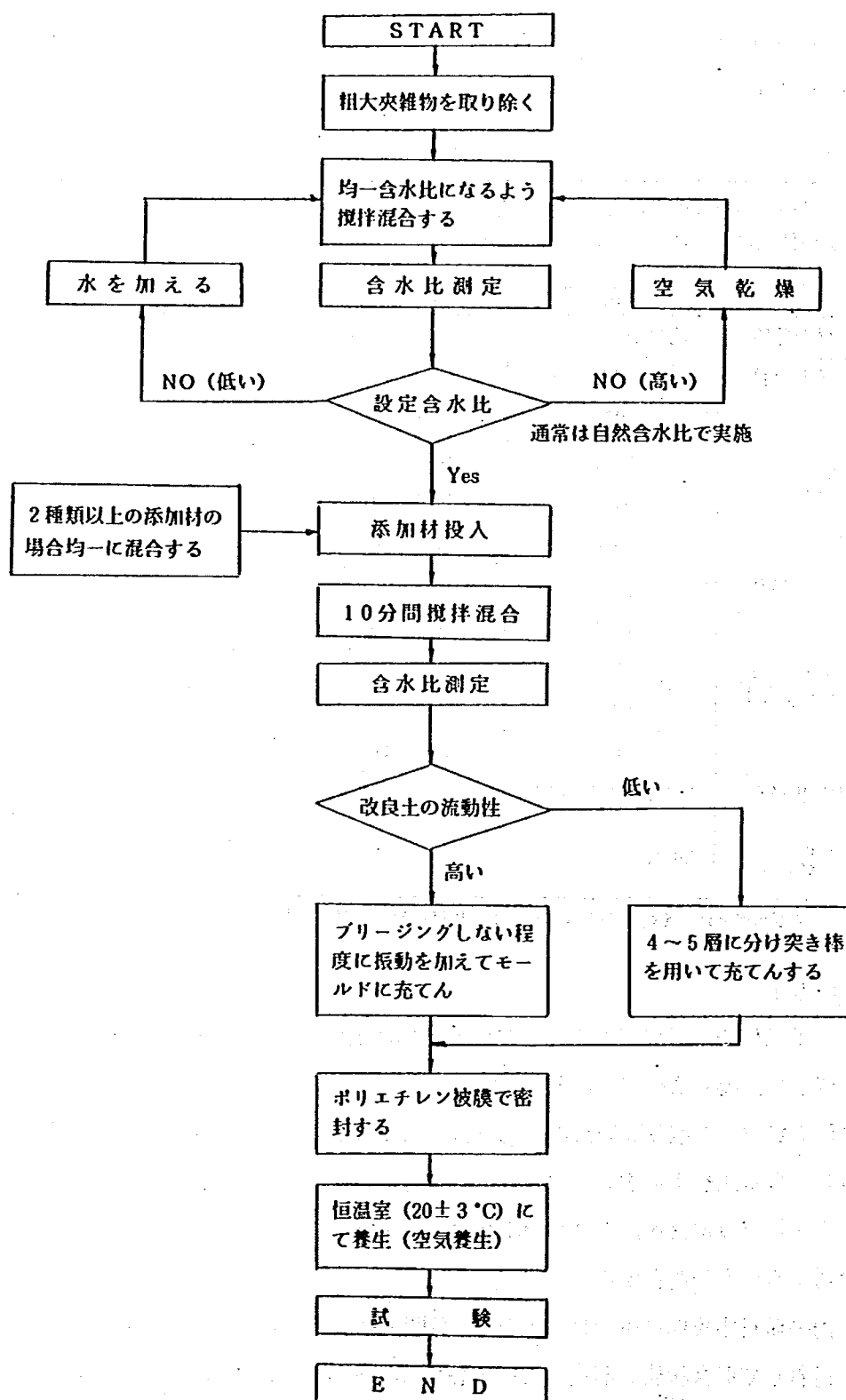


図-2.2 「締固めを伴わない混合処理土」供試体作製方法フロー

(7) 養成条件

ポリエチレンで被膜した供試体はすべて室温 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ の恒温室に静置し、所定の養生日数まで室内養生させた。

2-1-2 室内配合試験結果

(1) 配合試験 I (石炭灰, コンクリート粉を対象)

1) 一軸圧縮強度 (q_{α} : α 養生日数)

本項においては、養生後行った一軸圧縮強度 (q_{α}) 試験結果を各添加材別に、養生日数、混合比と関連させて述べることにする。

(a) 石炭灰 (国内炭 (F_1), 国外炭 (F_2))

図-2.3~図-2.5には、石炭灰単体をピートおよび粘性土に添加した場合の養生日数に伴う一軸圧縮強さの変化を示す。これらの図より、ピートのような高含水比 ($w_i = 560\%$) でかつ空隙の比較的大きな土質については、混合比 50%; 70% 添加してもほとんど養生日数に伴う強度の増加はみられず、90日後の q_{90} の値も $0.2 \sim 0.3 \text{ kgf/cm}^2$ と改良前の強度とほとんど変わっていないことがわかる。一方、粘性土については、国内炭、国外炭とも養生日数とともに q_{α} が増加する傾向が認められ、混合率が 50% のものに比べ 70% のものの方が大きな強度を発現する傾向が見られる。例えば、混合率が 70% の国内炭に着目すると 7 日強度 (q_{7}) と 90 日強度 (q_{90}) とでは約 3 kgf/cm^2 程度の強度増加があることがわかる。

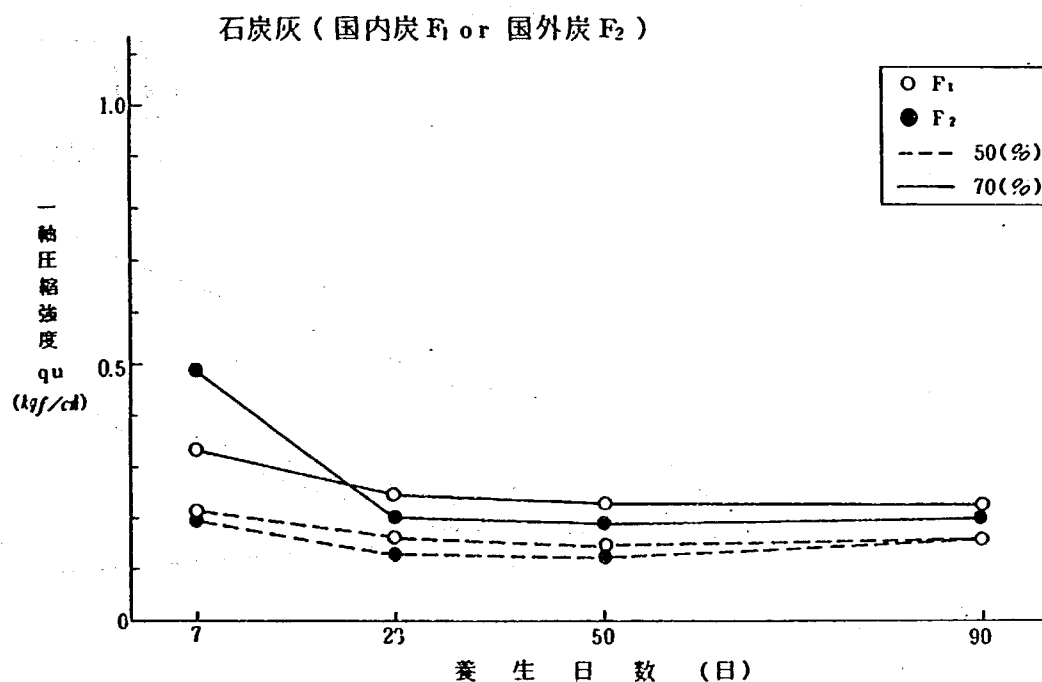


図-2.3 q_{α} と養生日数の関係 (ピート)

また図-2.5より、国内炭と国外炭の改良効果の比較を行うと、全体に国内炭の方が各養生日数で一軸圧縮強さが高く発現していることがわかる。これは、前述した石炭灰の物性のうち、 CaO 含

有量が国外炭に比べ国内炭の方が大きい値を示していたことによるものと考えられる。

図-2.4, 図-2.6 に一軸圧縮強さと混合率の関係を示す。これらの図よりピート, 粘性土とも全体にばらつきが大きい, 混合率に伴って強度が増加する傾向が見られる。

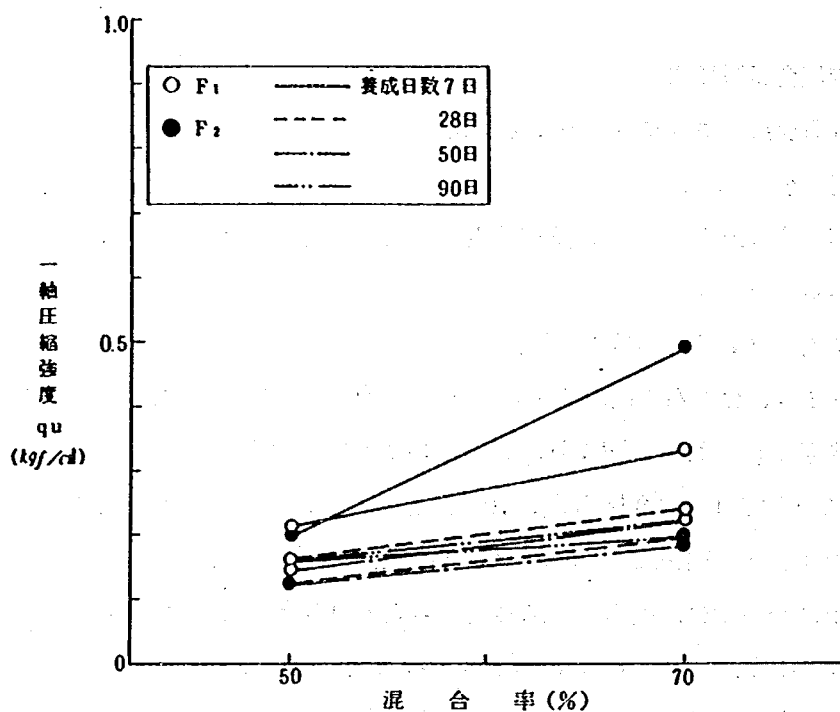


図-2.4 q_u と混合率の関係 (ピート)

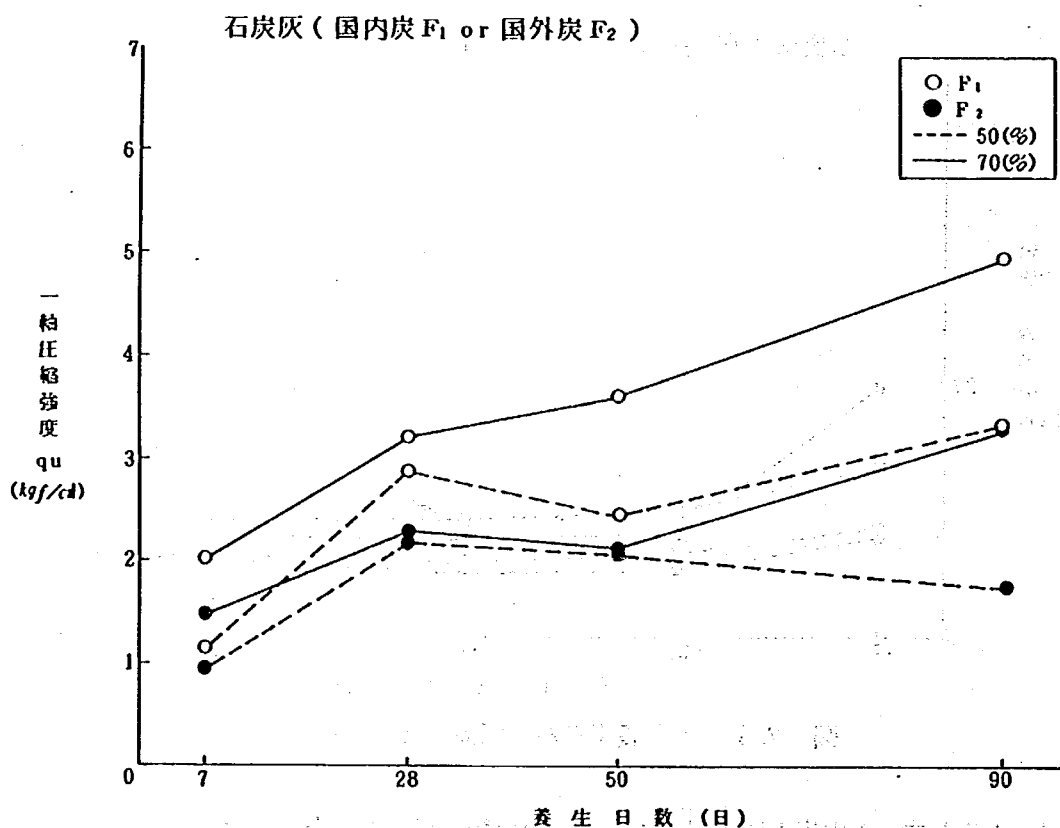


図-2.5 q_u と養生日数の関係 (粘性土)

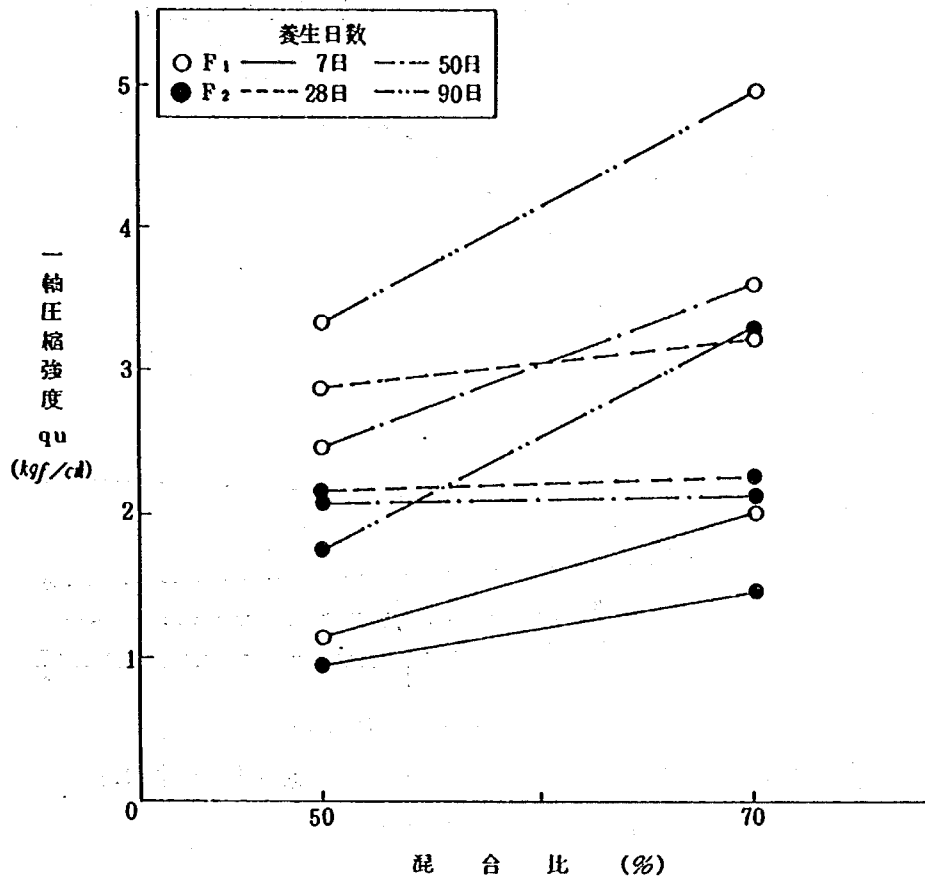


図-2.6 q_u と混合率の関係(粘性土)

(b) 「石炭灰(国内炭(F_1))+ポルトランドセメント(P)」

図-2.7, 図-2.10に石炭灰とポルトランドセメントを組合せた場合の一軸圧縮強さと養生日数の関係を示す。この図において、ピートおよび粘性土とも石炭灰の混合率(WF/W)が小さいものほど養生日数に伴う強度増加が顕著に見られ、ピートについては $WF/W = 25\%$ で $q_{u7} = 4\text{kgf/cm}^2$ から $q_{u5} = 11\text{kgf/cm}^2$, また粘性土では $q_{u7} = 26\text{kgf/cm}^2$ から $q_{u50} = 65\text{kgf/cm}^2$ と50日強度が7日強度の約3倍程度増加している。しかし $WF/W = 75\%$ については、両土質とも養生日数による強度の伸びが鈍く、7日強度と50日または90日強度を比較するとほとんど変化していないことがわかる。

図-2.8, 図-2.11に、各々ピート及び粘性土における一軸圧縮強さ(q_u)と石炭灰混合率(WF/W)の関係を示す。これらの図において全添加量(ピートでは50%, 粘性土では30%)のうち石炭灰の混合率が増えるに従い、 q_u が減少しており、ピート、粘性土とも $WF/W = 75\%$ では、全体に q_u の値が低く、改良前の強度とほとんど変化していない。なお、これらの図において、 $WF/W = 0\%$ とは、ポルトランドセメントのみを添加し、 $WF/W = 100\%$ とは、石炭灰のみを添加した条件を示す。

(c) 「石炭灰(F_1))+生石灰」

図-2.9, 図-2.12に各々ピート及び粘性土に対して石炭灰と生石灰を組合せて添加した場合の一軸圧縮強さ(q_u)と WF/W の関係を示す。これらの図からポルトランドセメントの場合と同様に q_u の値が $WF/W = 25\% > 50\% > 75\%$ の関係になっているが養生日数による差はあまり見られず、図-2.7,

図-2.10全体的にポルトランドセメント添加の場合と比べて強度発現が低いことがわかる。

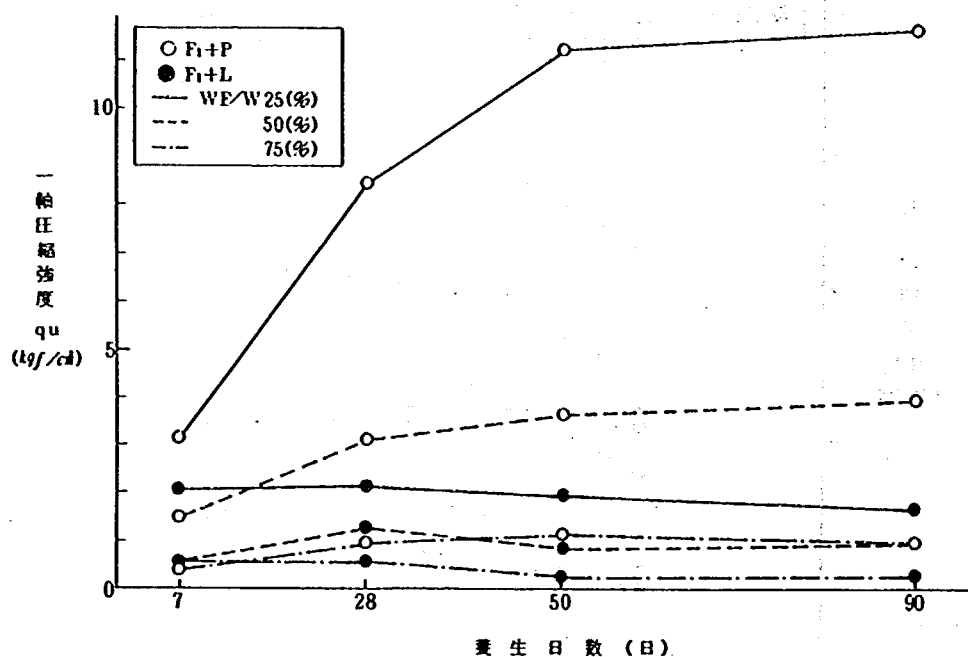


図-2.7 「石炭灰+セメント」, 「石炭灰+生石灰」における q_u と養生日数の関係 (ピート)

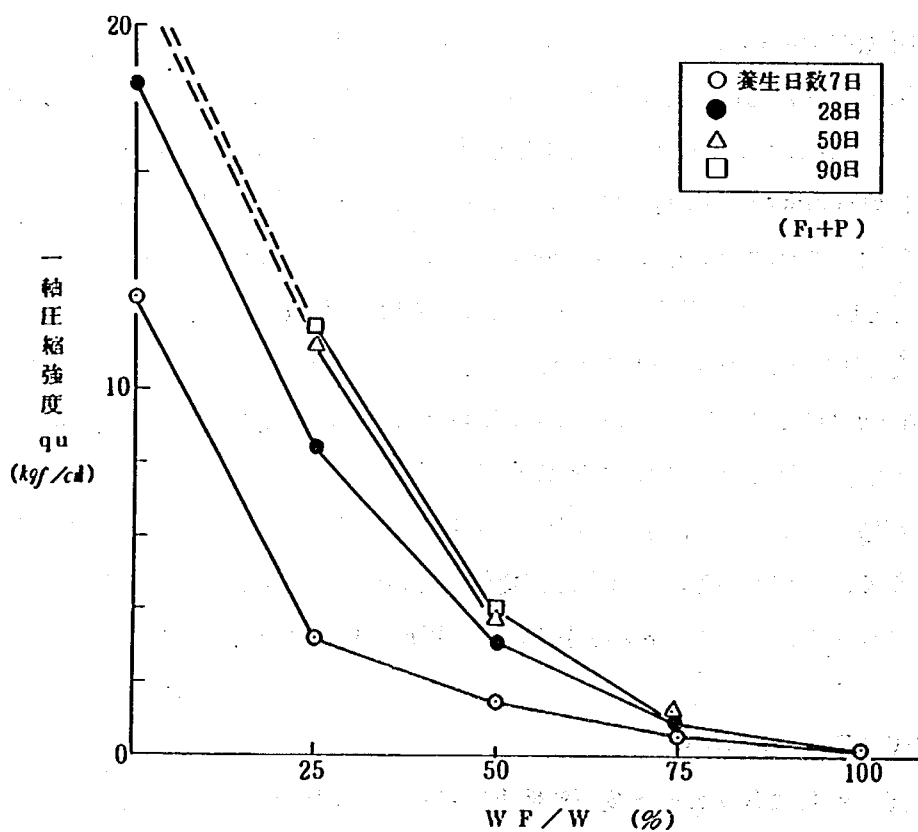


図-2.8 「石炭灰+セメント」における q_u と WF/W の関係 (ピート)

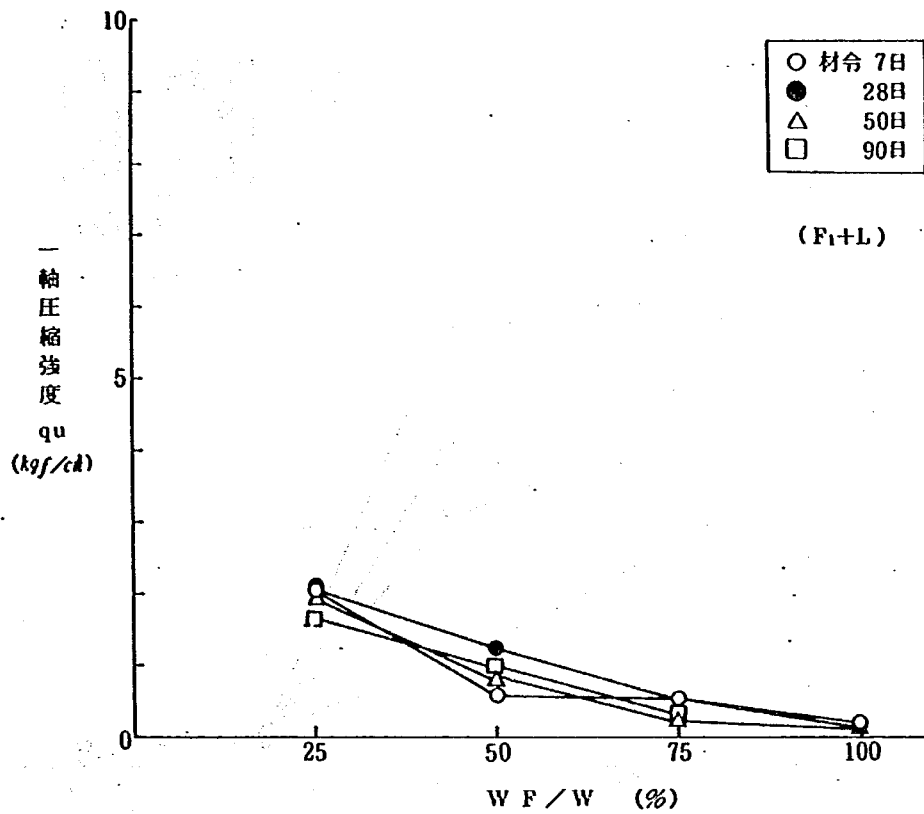


図-2.9 「石炭灰+生石灰」における q_u と WF/W の関係 (ピート)

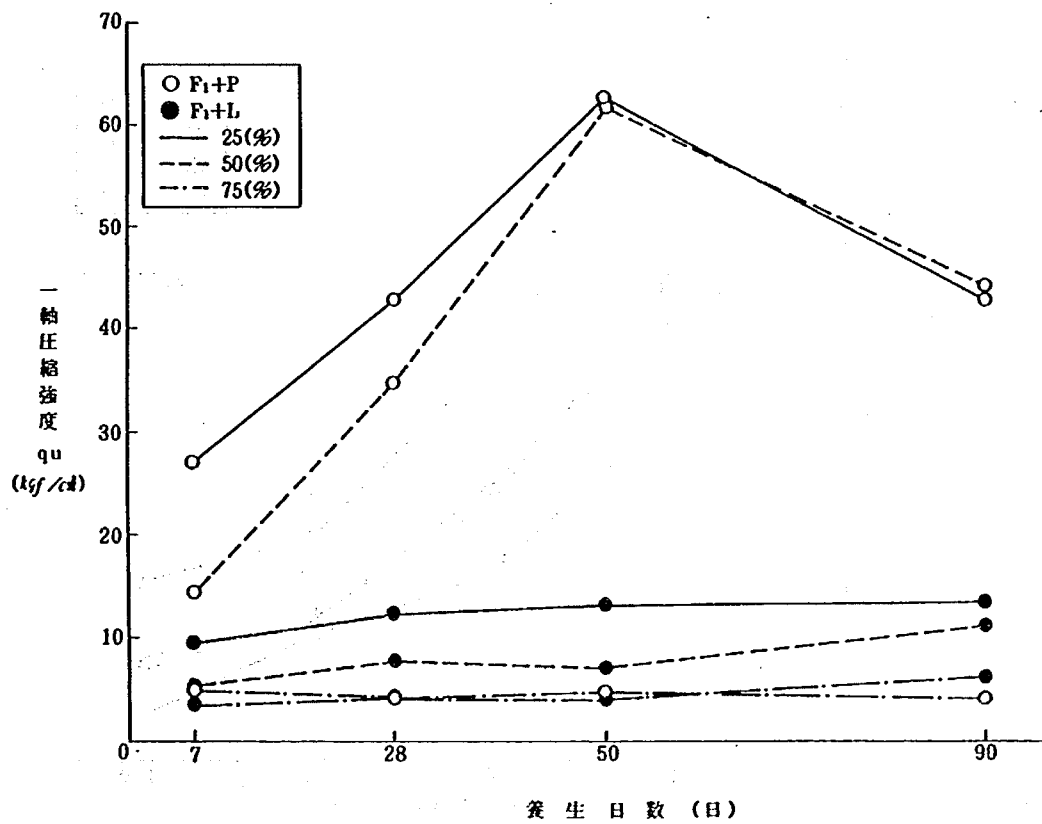


図-2.10 「石炭灰+セメント」, 「石炭灰+生石灰」における q_u と養生日数の関係 (粘性土)

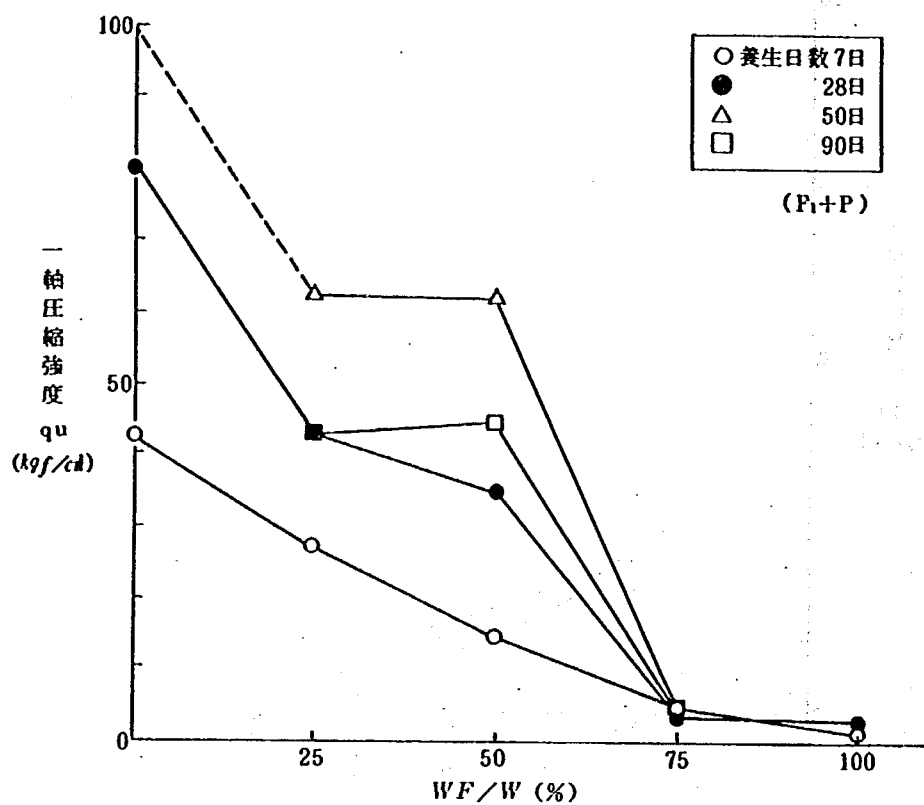


図-2.11 「石炭灰+セメント」における q_u と WF/W の関係 (粘性土)

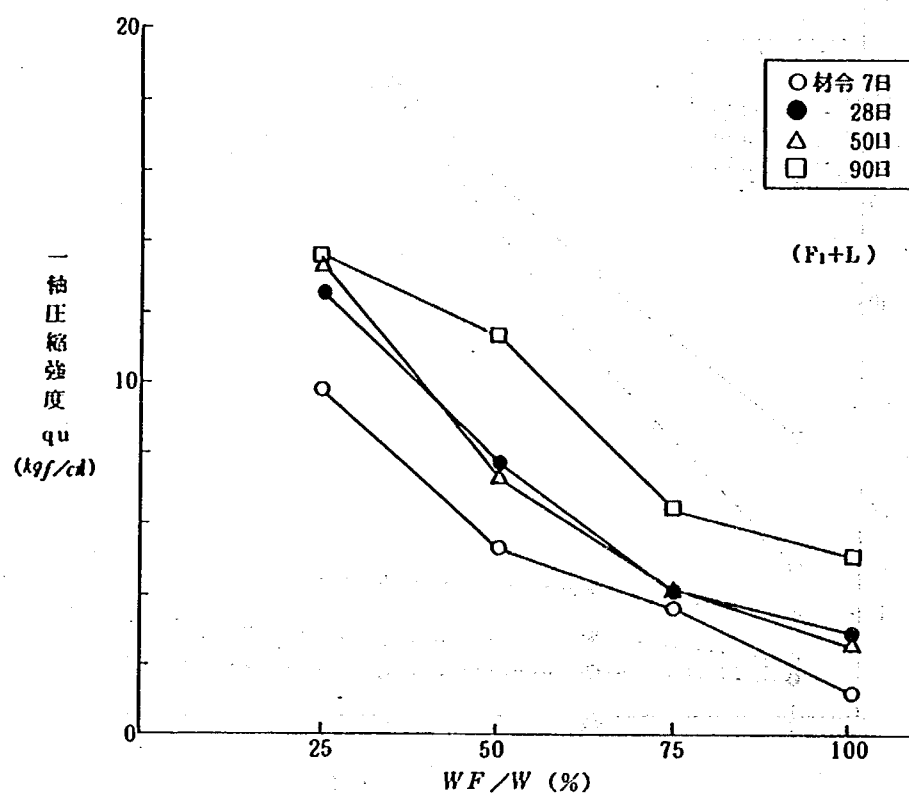


図-2.12 「石炭灰+生石灰」における q_u と WF/W の関係 (粘性土)

(d) 「石炭灰+ポルトランドセメント+排脱石膏」

図-2.13, 図-2.15に「石炭灰(F₁)+ポルトランドセメント+排脱石膏」の配合でピート及び粘性土に添加した場合の q_u と養生日数の関係を示す。これらの図より、各配合とも養生日数経過に伴ない強度が増加する傾向が認められる。また、例えば $WF/W = 25\%$ で、ピートでは前述したポルトランドセメントと同様の傾向が得られているが、粘性土ではそれより大きく石炭灰25%, セメント45%, 石膏30%配合では $q_{u,50} = 100 \text{ kgf/cm}^2$ とかなり高い強度が発現している。

なお、石膏による強度の発現の特徴は、一般に次のように考えられている。

- ・石炭灰にセメントと水が反応した場合、ポゾラン反応の他にセメントゲルを生成し、更に石膏を加えることにより“エントリンジャイト”と呼ばれる針状結晶が生成し、これが土粒子間を結合する働きをする。
- ・“エントリンジャイト”は、生成時に試料中の水分を多量に消費することや、一般にセメントの水和反応を阻害するといわれている有機物があっても生成反応が進む。

図-2.14, 図-2.16にはポルトランドセメントと排脱石膏の比率($\frac{G}{G+P}$)と q_u の関係を示す。これらの図より、ピートでは q_u の値が比較的小さい範囲では $G/G+P = 10\%$ 付近に q_u のピークが認められ、また粘性土では $G/G+P = 30\%$ 付近に q_u のピークが認められる。このように排脱石膏を利用する場合、最適な排脱石膏混合率が存在するものと考えられ、これらの石膏の最適混合率については、以下に示す図-2.17~2.19の報告例にも述べられている。

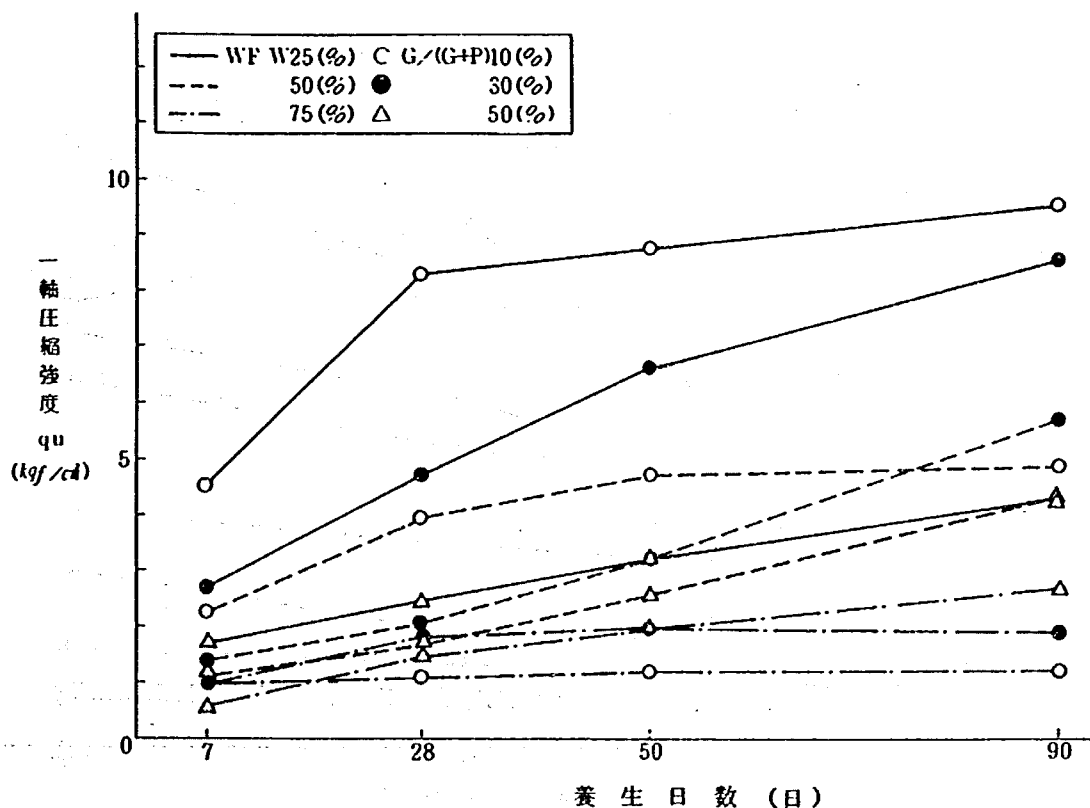


図-2.13 「石炭灰+石膏+セメント」における q_u と WF/W の関係 (ピート)

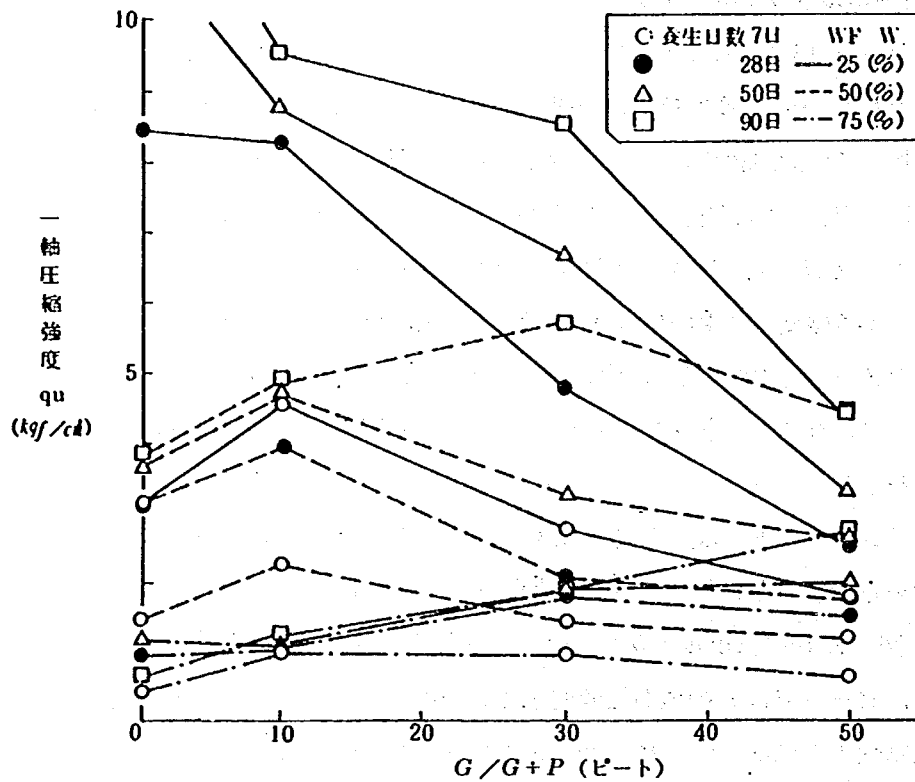


図-2.14 「石炭灰+石膏+セメント」における q_u と $G/(G+P)$ の関係 (ピート)

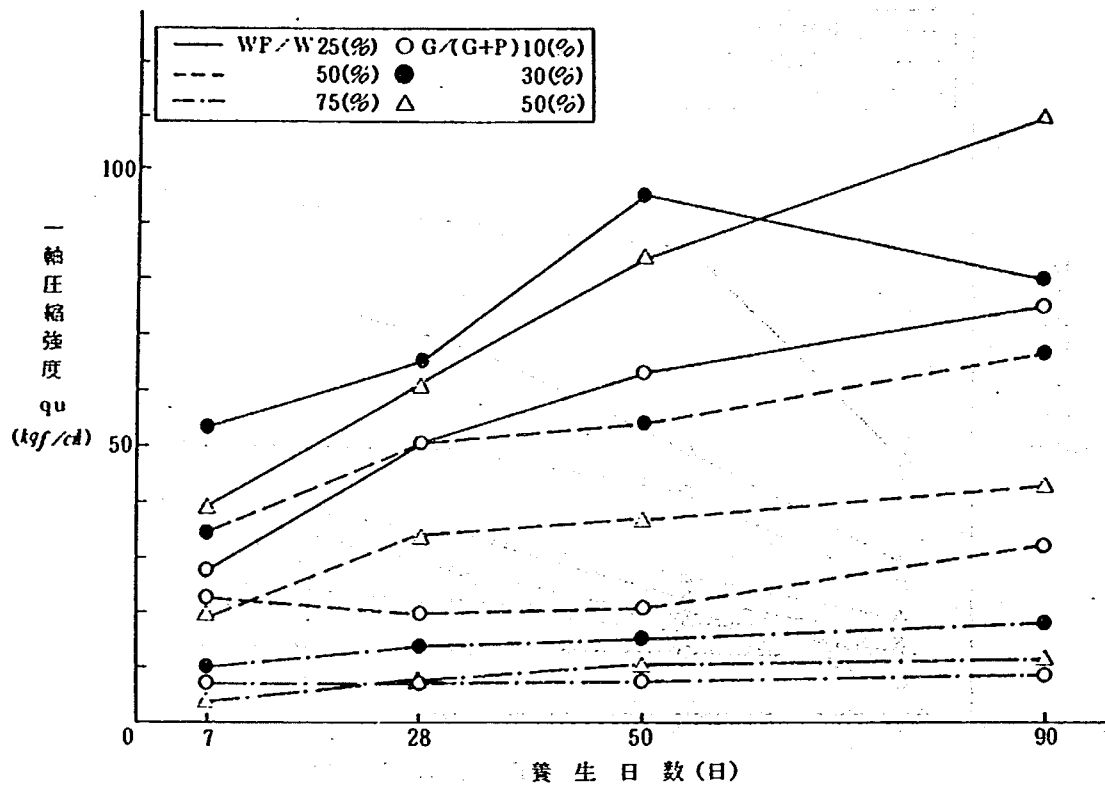


図-2.15 「石炭灰+石膏+セメント」における q_u と養生日数の関係 (粘性土)

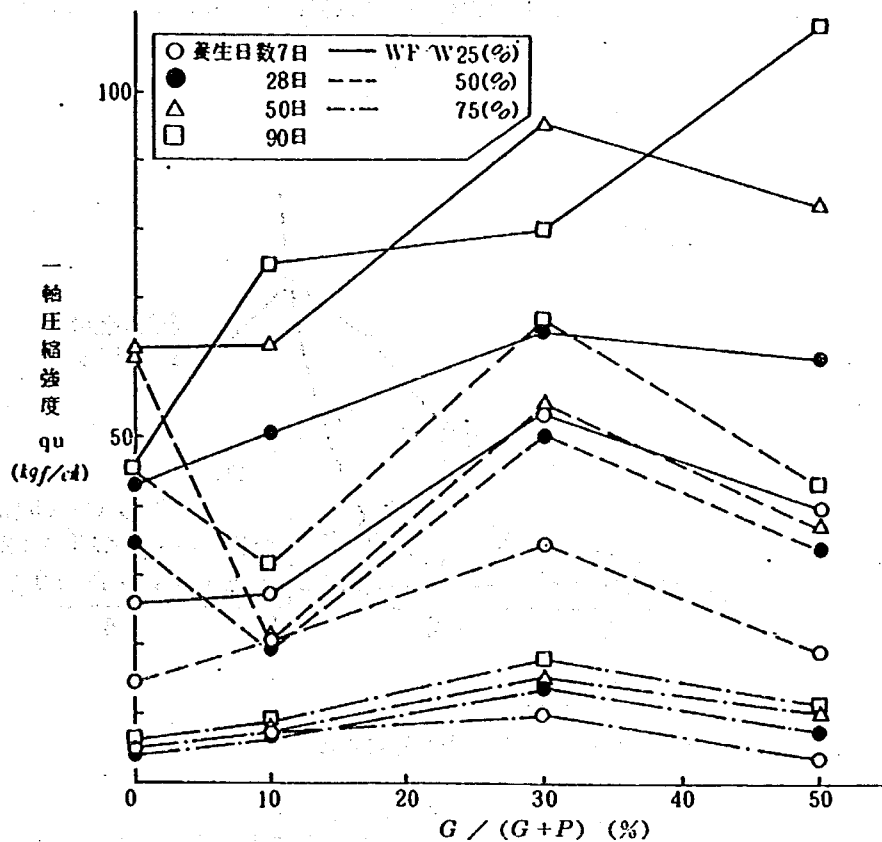


図-2.16 「石炭灰+石膏+セメント」における q_u と $G/(G+P)$ の関係 (粘性土)

図-2.17は、石炭灰と、ポルトランドセメント、排脱石膏、水を混合して得られる硬化体（F G C硬化体と呼ばれている）の各セメント量に対する最適な排脱石膏混合率（ $G/(G+C)$ ここで、 G ：排脱石膏 C ：ポルトランドセメント）を示した例である。

図-2.18には有機質土にセメントと焼石膏を添加して得られた硬化体の圧縮試験の報告例を示している。ここでは、合計混合率（セメント+焼石膏）が増加すると最適混合率のピークが合計混合割合の大きい方に移動し、ほぼ30%付近に漸近すると報告している。

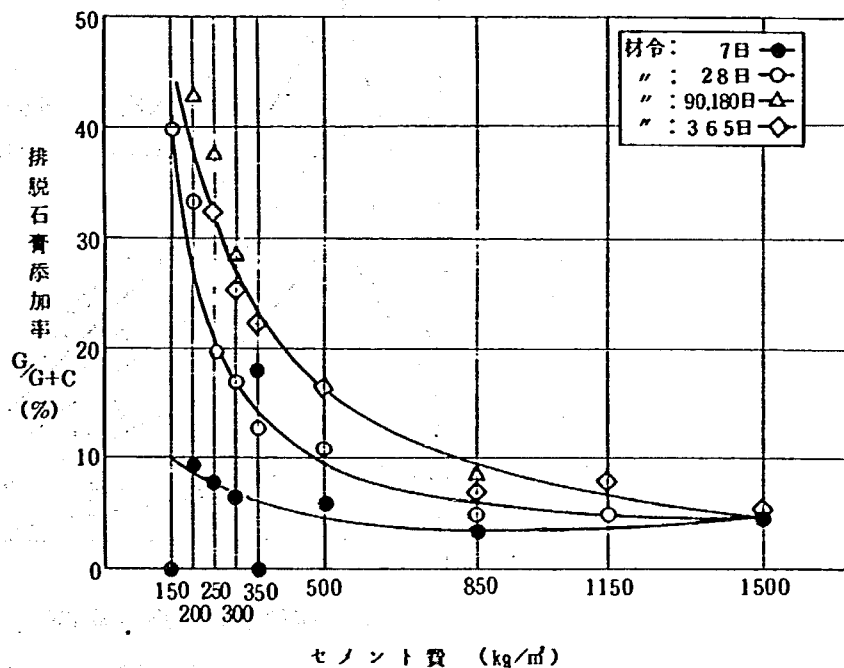


図-2.17 FCC硬化体のセメント量と材令別最適石膏添加率の関係（「石炭灰+セメント+排脱石膏」の硬化単体の例）

図-2.19は、図-2.17と同様な組合せの硬化体の圧縮試験例であり、ここにおいても最適な排脱石膏混合率の存在が認められている。

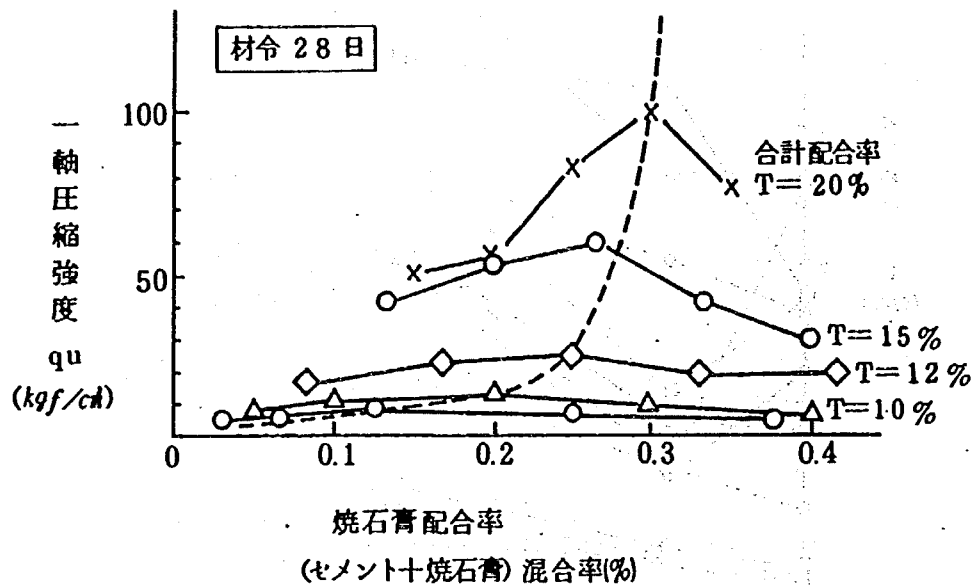


図-2.18 最適混合率と一軸圧縮強さの関係
(「セメント+焼石膏」を有機質土へ添加した例)

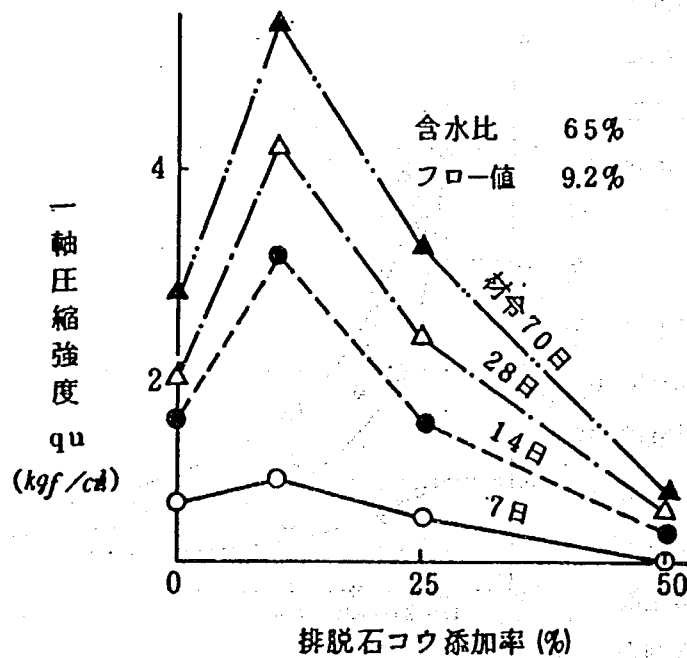


図-2.19 一軸圧縮強さと排脱石膏添加率の関係
(「石灰灰+セメント+排脱石膏」を添加した例)

(e) 「石炭灰+コンクリート粉体」

図-2.20, 図-2.22には, 「石炭灰+コンクリート粉体」を組合せた場合 q_s と養生日数の関係を示す。これらの図より締固めを伴わない場合 q_s の養生日数による増加は認められず, また図-2.21, 図-2.23における q_s と WF/W の関係においてもほとんど WF/W の影響が認められない。すなわち, これらの結果から, 「石炭灰+コンクリート粉体」の配合では固化作用がかなり劣り, 高強度を期待する場合には, 別な助剤(例えばセメント, 生石灰など)の添加が必要であると考えられる。

また, コンクリート粉体の深層混合処理への再利用方法としては, 現在, ピートなどの空隙率が高い土質の改良の際, 増量材または骨材として用いられている砂の代替方法が考えられる。

2) 一軸圧縮強さ q_s と E_{50} , ε_f の関係

図-2.24~図2.29には, 一軸圧縮試験から得られた, q_s , E_{50} , ε_f について $E_{50} \sim q_s$, $q_s \sim \varepsilon_f$, $E_{50} \sim \varepsilon_f$ の関係を示す。

(a) $q_s \sim E_{50}$ の関係

図-2.24, 図-2.25は, 各配合におけるピート処理土および粘性土処理の q_s と E_{50} の関係を示しており, この曲線は, データーのおおよその中央値と考えられる。なお, ピートの場合には, $q_s > 1 \text{ kgf/cm}^2$ の範囲で, $E_{50}/q_s = 100$ の関係が認められるが, $q_s < 1 \text{ kgf/cm}^2$ の範囲では, $E_{50}/q_s = 50$ の関係に近いと考えられる。

(b) $\varepsilon_f \sim q_s$ の関係

図-2.26にピート処理土の $\varepsilon_f \sim q_s$ 関係を示す。参考として同試料を用いた配合試験から得られたデーターの範囲を示すが, 本試験結果とほぼ等しいものになっていることがわかる。また図-2.27に, 粘性土の場合について示す。図中に示す範囲は, 海成粘土のセメント処理土についてのデーターであるが, ほぼ, 本試験結果におけるデーターと一致している。

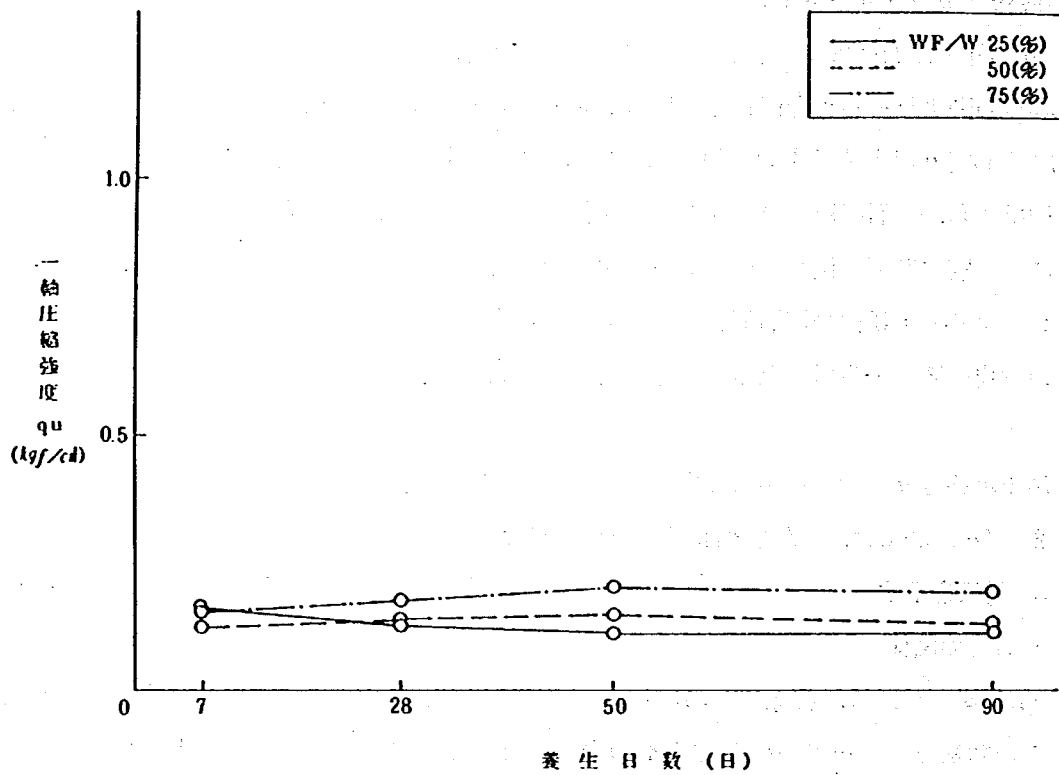


図-2.20 「石炭灰+コンクリート粉」における q_u と養生日数の関係 (ピート)

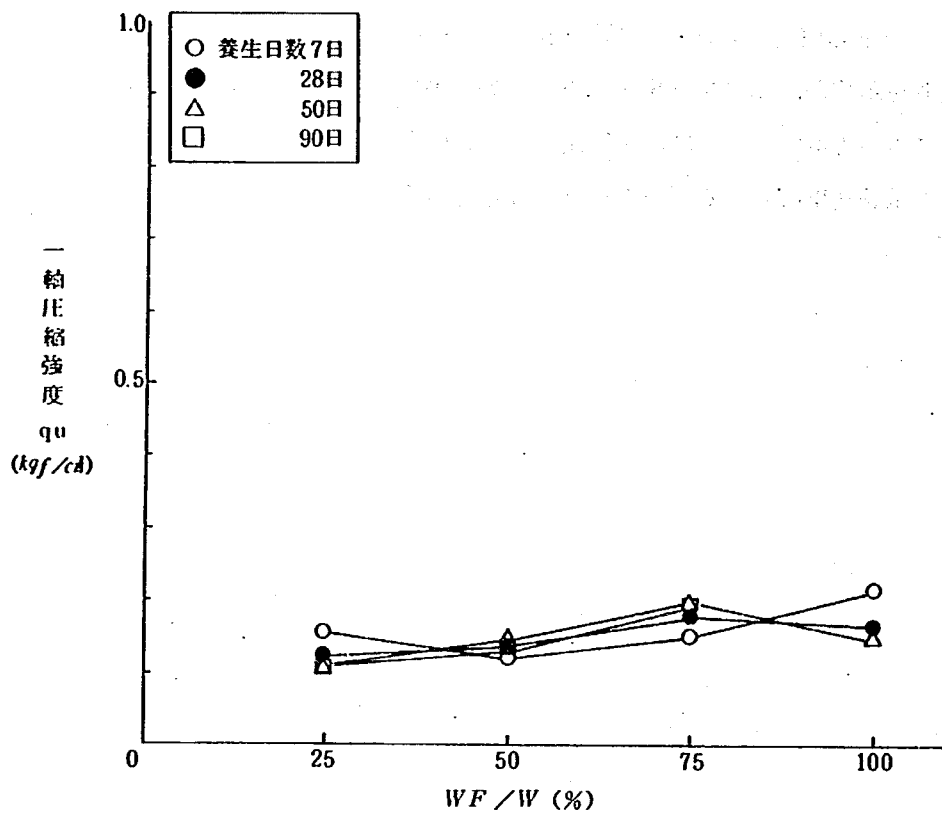


図-2.21 「石炭灰+コンクリート粉」における q_u とWF/Wの関係 (ピート)

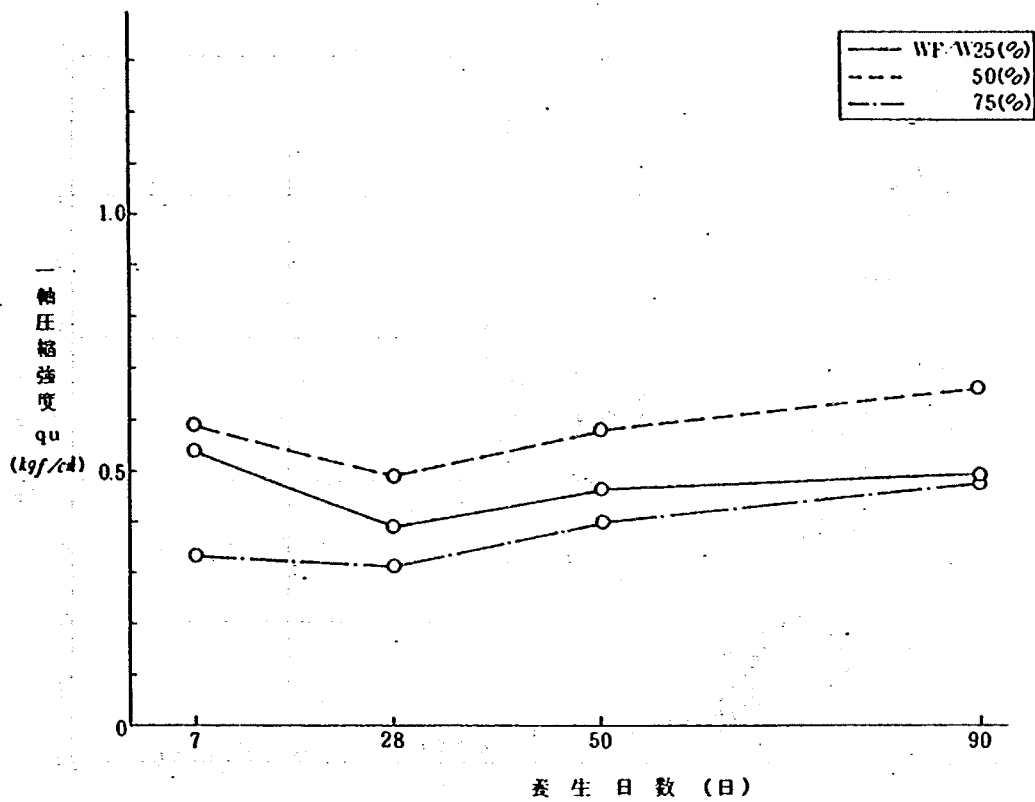


図-2.22 「石炭灰+コンクリート粉」における q_u 養生日数の関係 (粘性土)

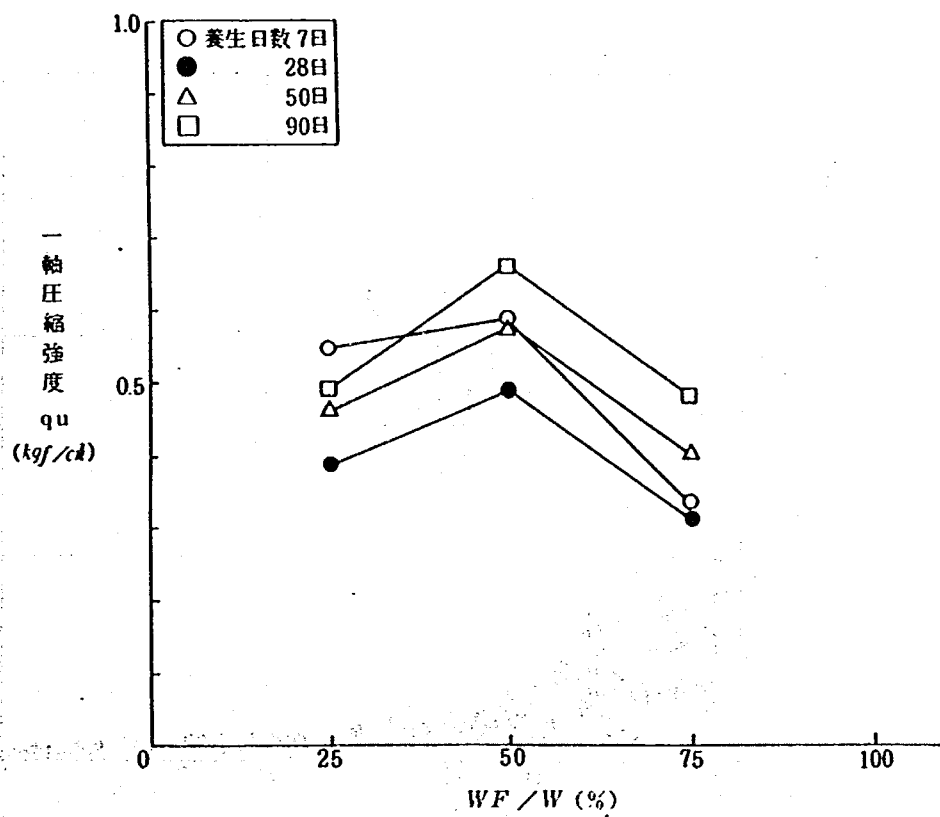


図-2.23 「石炭灰+コンクリート粉」における q_u と WF/W の関係 (粘性土)

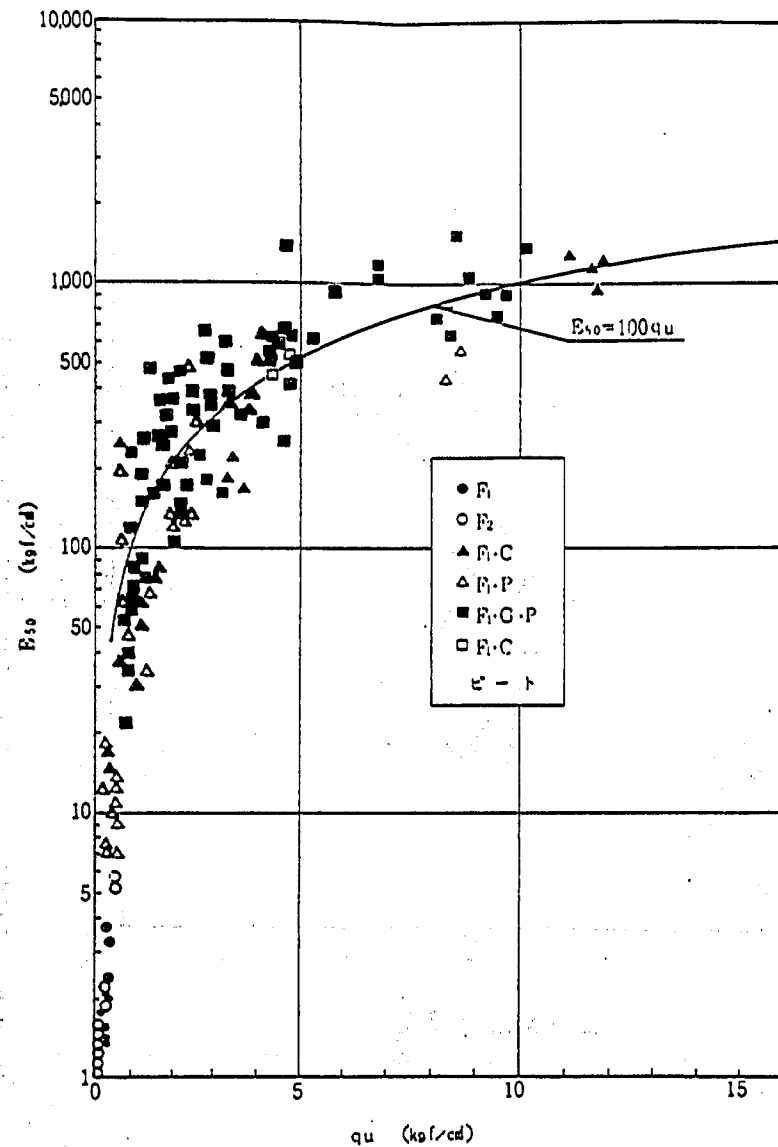


図-2.24 E_{50} と q_u の関係 (ピート)

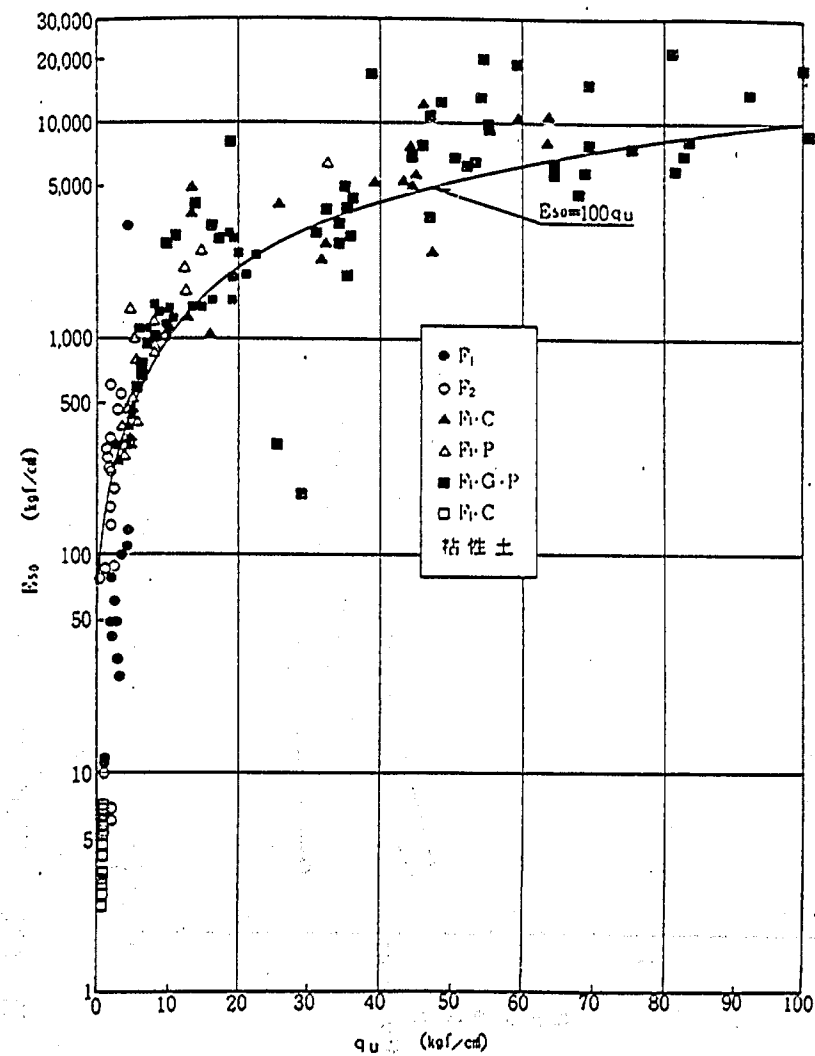


図-2.25 E_{50} と q_u の関係 (粘性土)

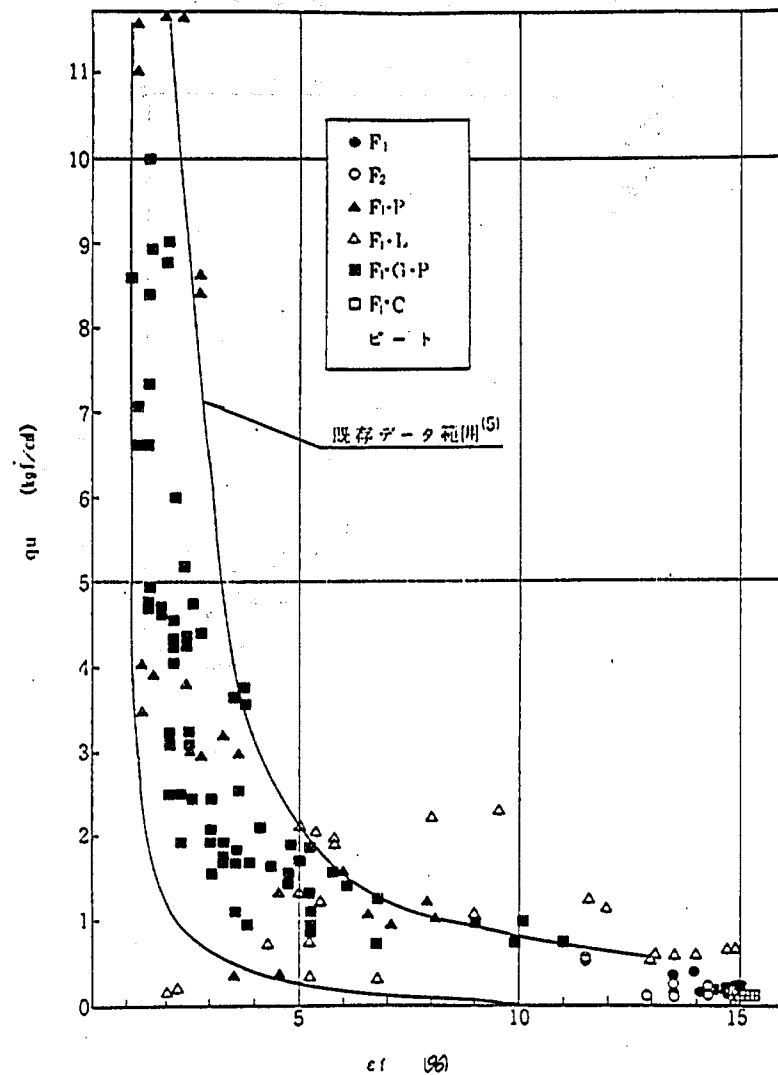


図-2.26 q_u と ϵ_r の関係 (ピート)

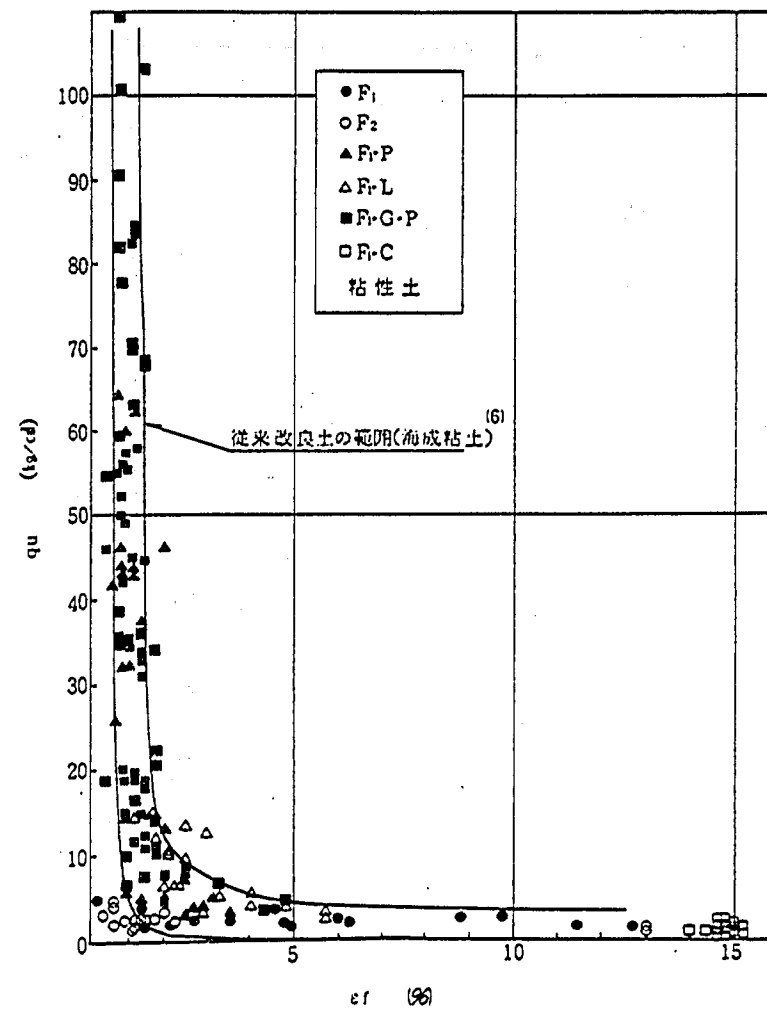


図-2.27 q_u と ϵ_r の関係 (粘性土)

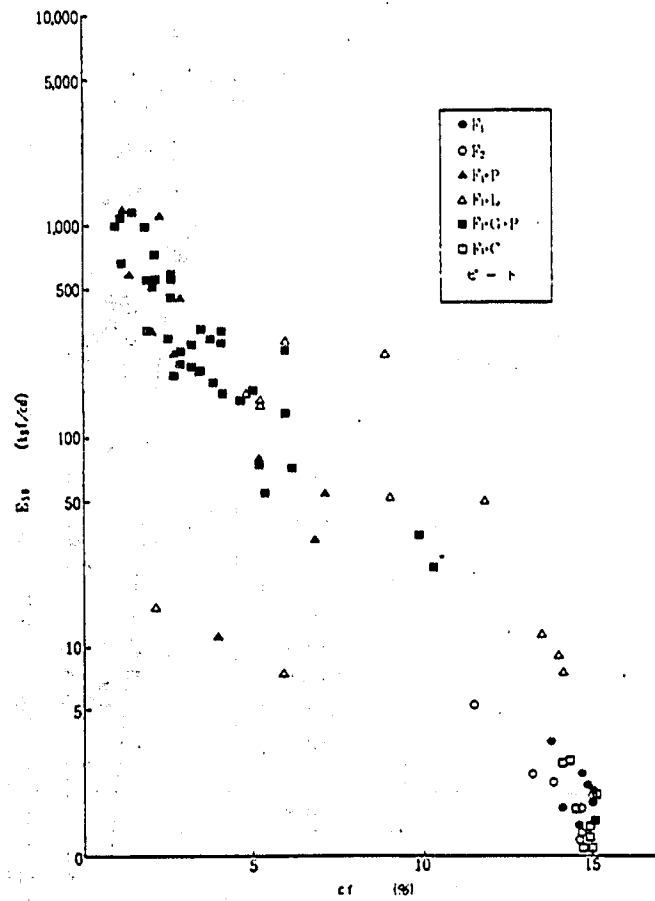


図-2.28 E_{50} と ε_f の関係 (ピート)

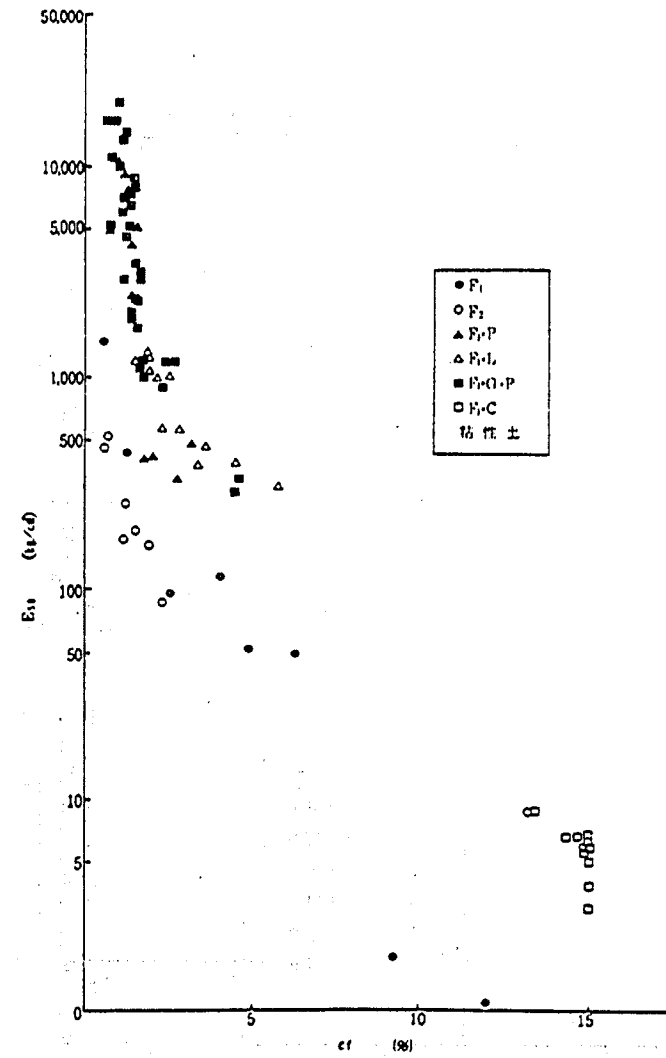


図-2.29 E_{50} と ε_f の関係 (粘性土)

3) 割裂試験

図-2.30, 図-2.31に引張り強度 σ_t が増加しており, 例えば7日強度と50日強度を比較すると $\sigma_{t50} = 2 \sim 3 \sigma_{t7}$ 程度の値を示している。しかし, その他の配合条件では, 養生日数による変化はあまり見られずかつ σ_t が低い値を示していることがわかる。

なお, 割裂試験に用いた配合は, F_1P , F_1L , F_1C , F_1GP とも $WF/W = 50\%$ に設定し, F_1GP においては $G/G+P = 30\%$ とした。また F_1 , F_2 は混合比 $= 50\%$ である。

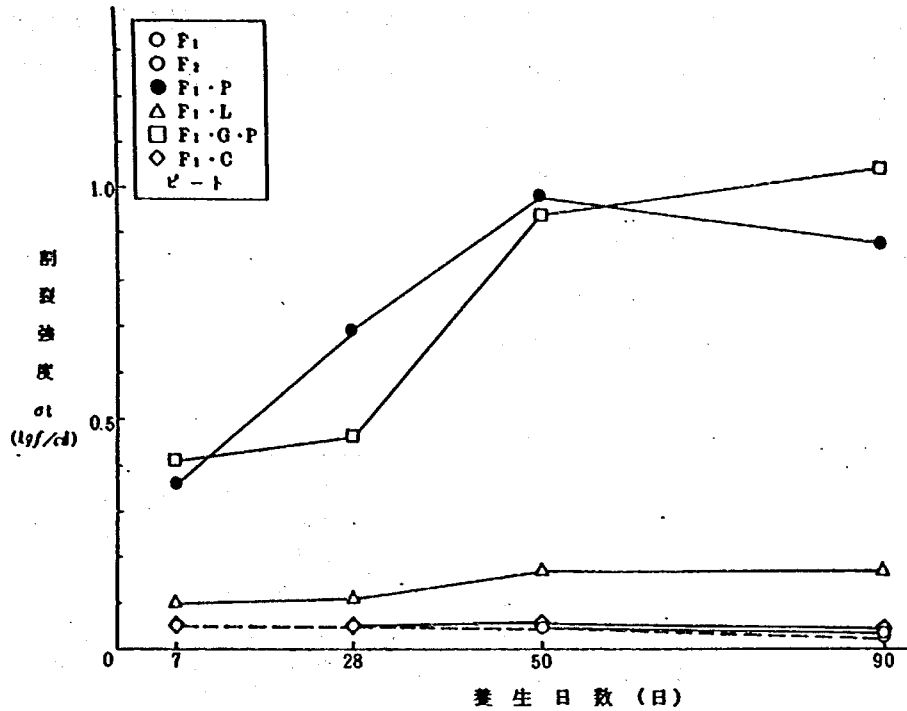


図-2.30 σ_t と養生日数の関係 (ピート)

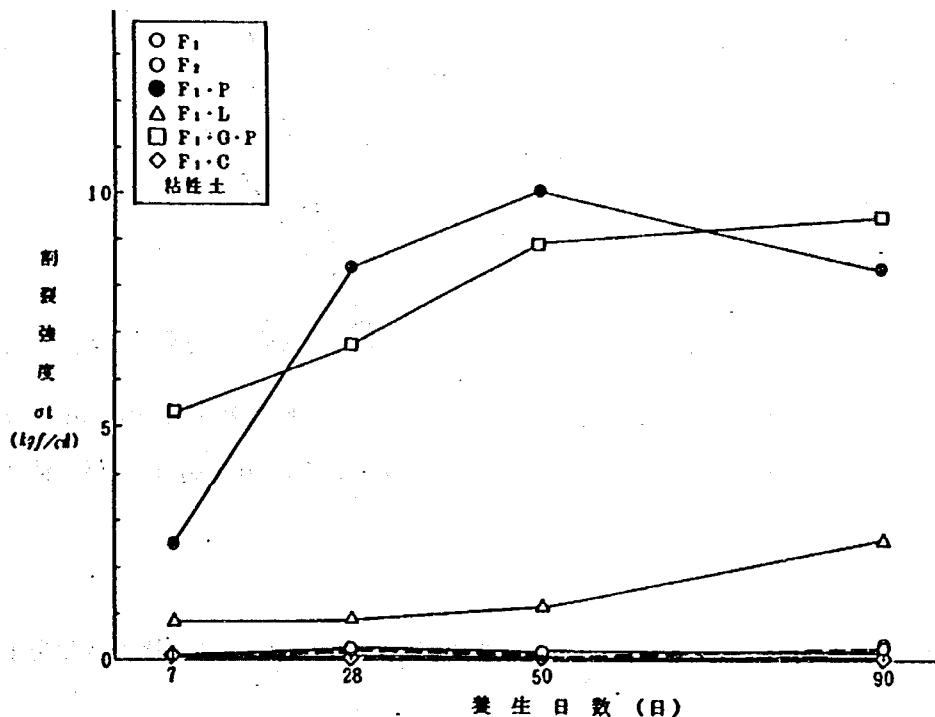


図-2.31 σ_t と養生日数の関係 (粘性土)

図-2.32, 図-2.33には各々ピート、粘性土に添加・混合した場合の σ_t と q_u の関係を示す。図より配合条件に関係せず、ピートの場合には $\sigma_t/q_u = 1/4$ 粘性土の場合には $\sigma_t/q_u = (1/4 \sim 1/8)$ の範囲にあることがわかる。このように q_u が低強度域では、 $\sigma_t/q_u = 1/4$ の関係があるが、強度が大きくなるに従い σ_t/q_u の値は $1/8$ に近づくものと考えられる。

なお、一般には、引張強度 σ_t 一軸圧縮強度は q_u の $1/5 \sim 1/10$ にあると言われており、本試験結果もこれとほぼ同様の結果になっている。

注) 割裂試験は円柱形の供試体にPの線荷重を加えた時、供試体の中心軸を含む鉛直面に一様な引張応力が発生することを利用して引張強度を求める間接的な方法で引張強度は次式にて求められる。

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi t D}$$

ここに

P : 線荷重

t : 供試体厚さ

D : 供試体直径である。

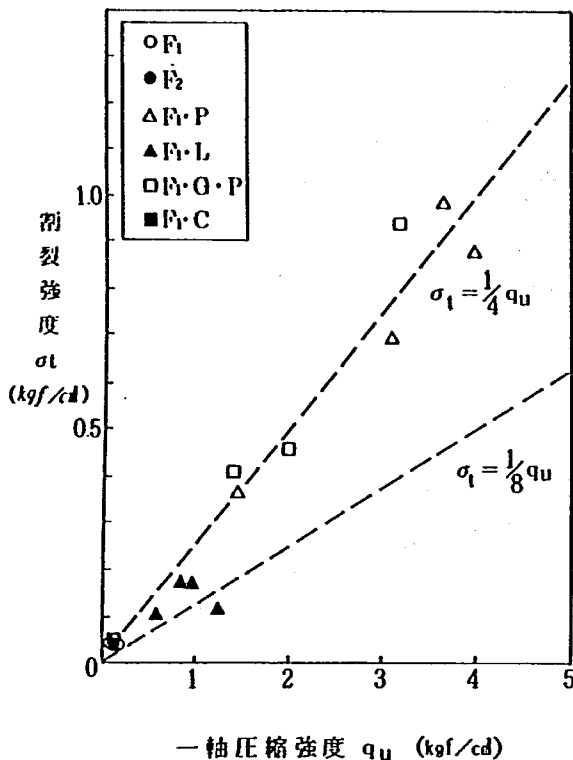


図-2.32 $\sigma_t \sim q_u$ の関係 (ピート)

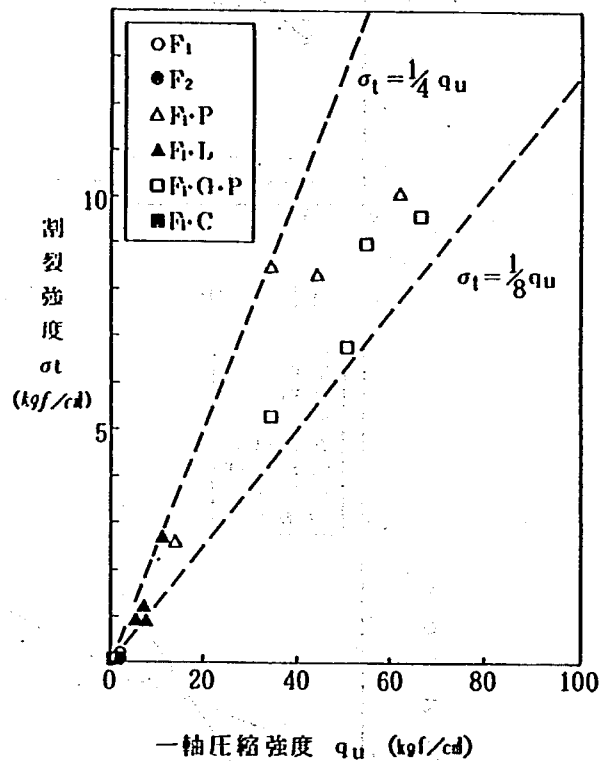


図-2.33 $\sigma_t \sim q_u$ の関係 (粘性土)

4) 養生に伴う含水比の変化

図-2.34～図-2.41は、各配合条件における養生日数の経過に伴う含水比の変化を示したものである。

ここではミキサーによる混合攪拌(10分間)直後測定した含水比を基準とし、各養生日数経過後の

含水比との差を“低下含水比”として表わしたものである。

これらの図において、各試料に含水比のばらつきが大きく配合条件による明確な差および強度との関係を見い出すことができないが、養生日数90日においてピートでは5%～25%程度、粘性土では、3%～16%程度の低下が認められる。

また、各配合とも、含水比の低下は、7日または28日まで認められるが、28日以後（50日、90日）ではほとんど変化していない。なお、特に、図-2.36、図-2.37において、F₁L（石炭灰+生石灰）の含水比の低下がF₁P（石炭灰+ポルトランドセメント）に比べてかなり小さな値を示しているが、これは、混合攪拌時に既に生石灰による大部分の吸水および反応が終了されたためと考えられる。

5) 配合試験Ⅰのまとめ

配合試験Ⅰの結果を列举すると次のようになる。

- ① 締固めを伴わない状態で石炭灰だけを固化材として用いた場合、高強度の改良土は得られない。
- ② 石炭灰にポルトランドセメントおよび、生石灰を加えた配合条件では、固化作用は主にポルトランドセメント、生石灰による影響が大きい。
- ③ 添加材重量を一定として石炭灰の混合割合を変化させた場合、石炭灰混合割合の増加に伴ない、強度の低下が認められたが、高強度を期待しない場合 $WF/W = 50\%$ までの利用可能性は高いと考えられる。
- ④ 石炭灰、セメント、排脱石膏の組合せにおいて、ピートでは $G/G+P = 10\%$ 粘性土では $G/G+P = 30\%$ に最適な配合が認められ、これは、他の文献などの結果とも一致する。
- ⑤ 強度特性（ E_{50} 、 ϵ_r など）は、従来の改良土における結果と同様の傾向にあり、例えば $E_{50} \approx 100q_u$ の関係が得られた。
- ⑥ 割裂試験の結果、配合条件によらず $\sigma_r = (1/4 \sim 1/8) q_u$ の関係が得られ、改良土の従来の試験結果と同様の傾向が認められた。
- ⑦ 各配合とも、7日または28日まで含水比の低下が認められるが、それ以降はほとんど変化していない。
- ⑧ 配合試験Ⅰに用いた試料土に対しては、高強度を期待する場合、「石炭灰+セメント」、「石炭灰+セメント+石膏の組合せが適しているという結果を得た。

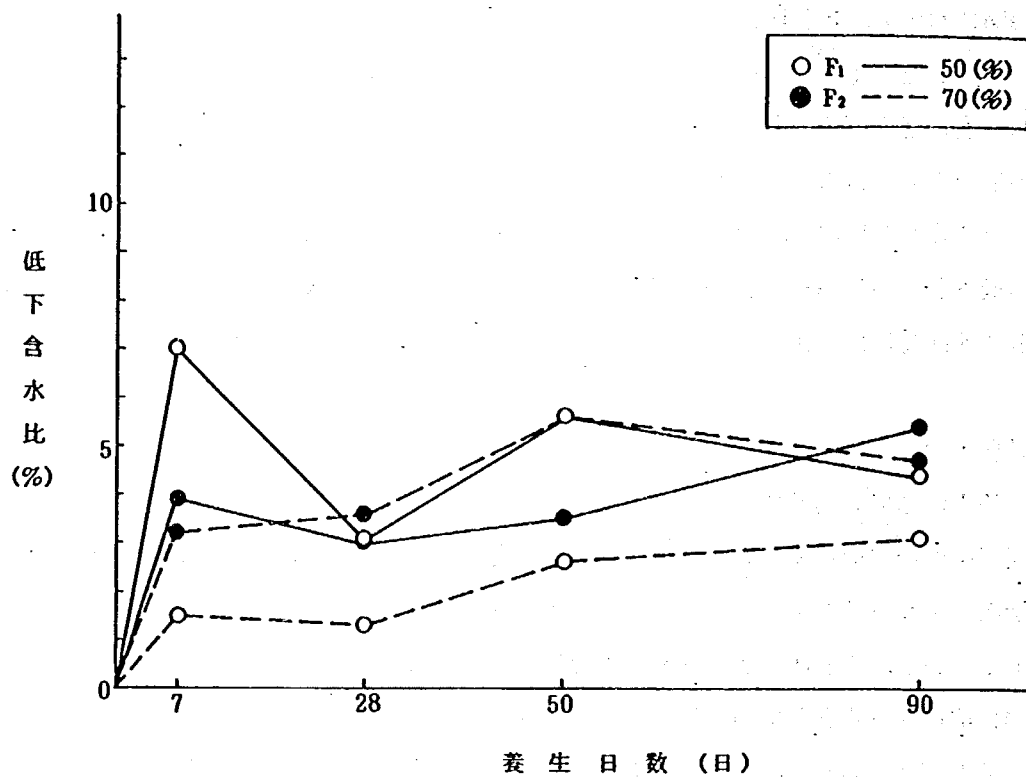


図-2.34 「石炭灰単体」における低下含水比と養生日数の関係（PEAT）

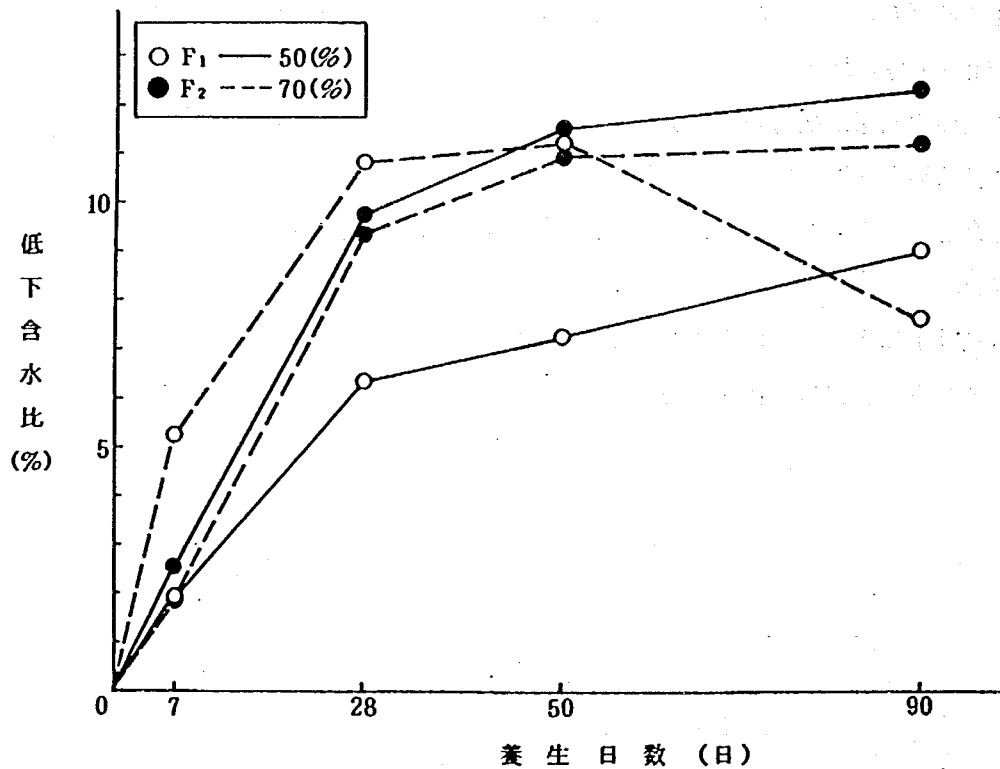


図-2.35 「石炭灰単体」における低下含水比と養生日数の関係（粘性土）

石炭灰+セメント or 生石灰 (F₁P・F₁L)

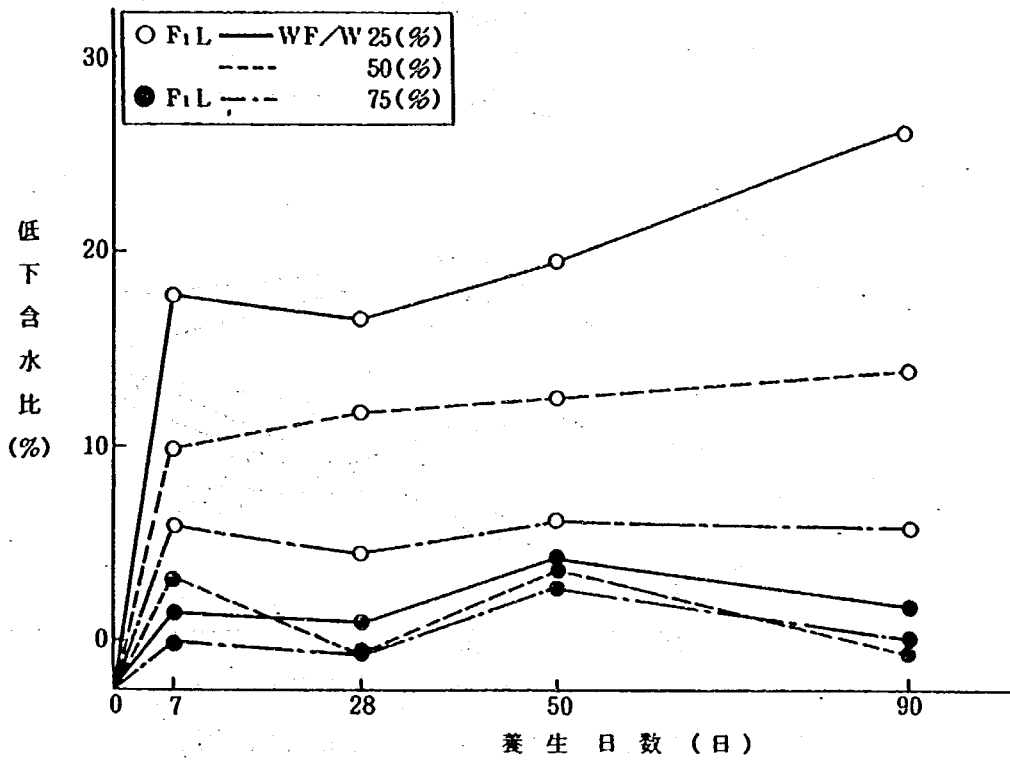


図-2.36 「石炭灰+セメント」, 「石炭灰+生石灰」における
低下含水比と養生日数の関係 (ピート)

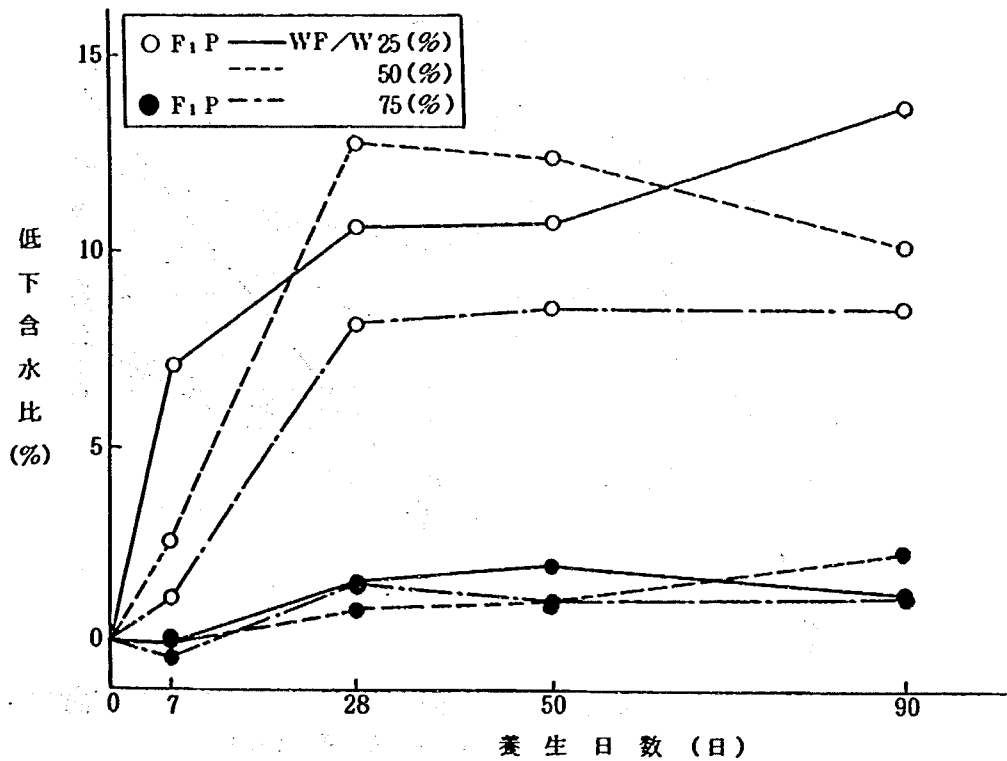


図-2.37 「石炭灰+セメント」, 「石炭灰+生石灰」における
低下含水比と養生日数の関係 (粘性土)

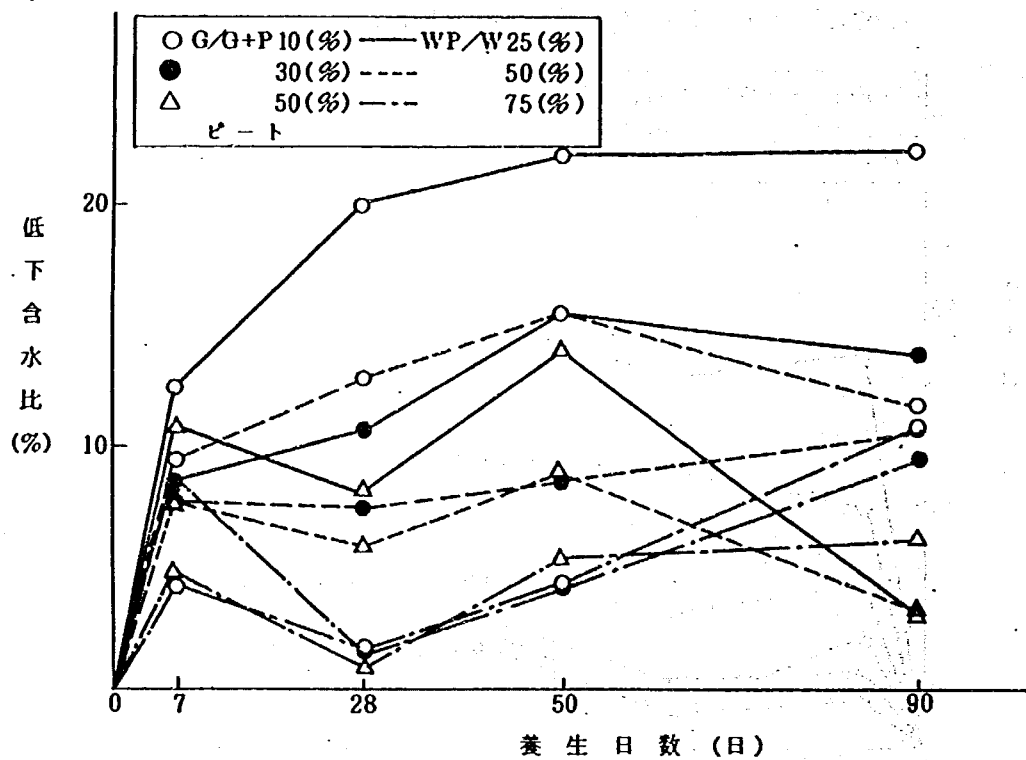


図-2.38 「石炭灰+石膏+セメント」における低下含水比と養生日数の関係 (ピート)

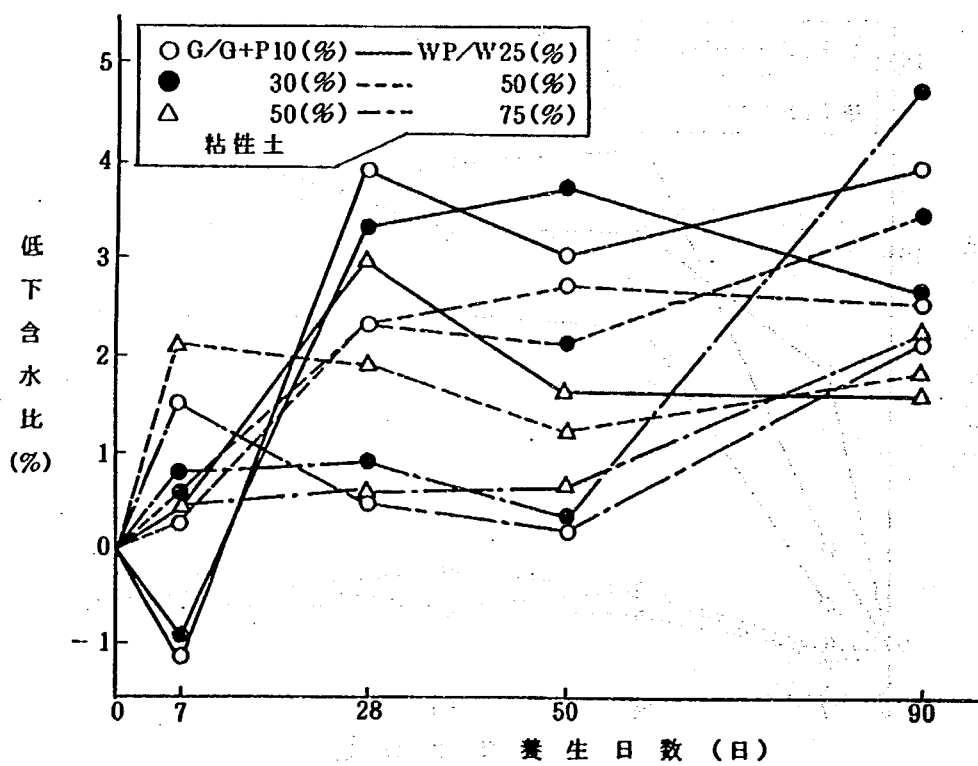


図-2.39 「石炭灰+石膏+セメント」における低下含水比と養生日数の関係 (粘性土)

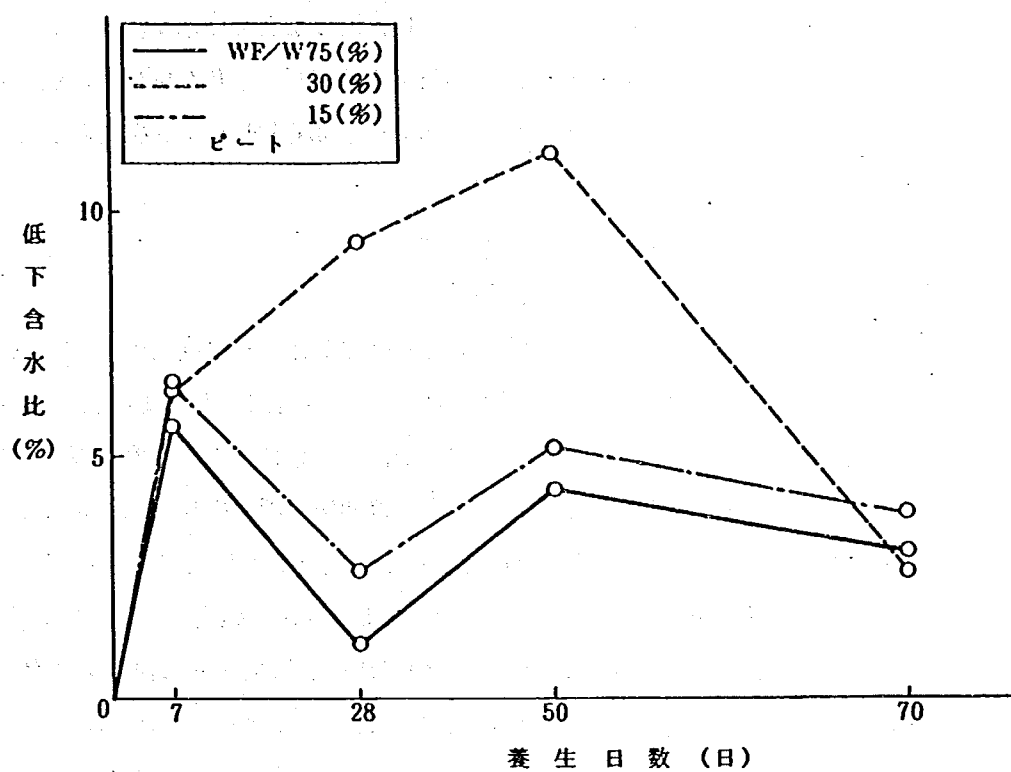


図-2.40 「石炭灰+コンクリート粉」における低下含水比と養生日数の関係(PEAT)

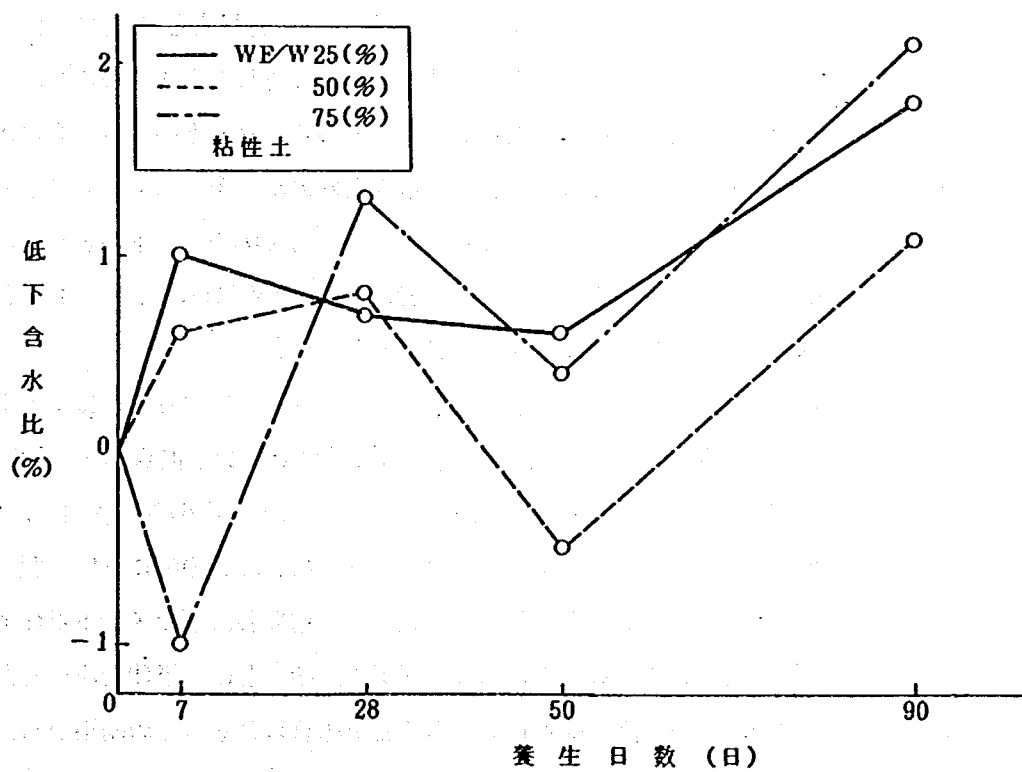


図-2.41 「石炭灰+コンクリート粉」における低下含水比と養生日数の関係(粘性土)

(2) 配合試験Ⅱ（石炭灰、下水汚泥焼却灰を対象）

配合試験Ⅱの結果を表-2.9, 表-2.10, および表-2.11にとりまとめて示す。表-2.9には石炭灰に関する配合試験Ⅰの結果も合せて石炭灰及び、焼却灰を単体でピート及び粘性土に混合した場合の試験結果を示し、また表-2.10, 表-2.11には、石炭灰・焼却灰とセメントを組合せてピートおよび粘性土に混合した場合の試験結果をそれぞれ示す。

1) ピートに石炭灰・焼却灰を添加した場合の強度発現

(a) 石炭灰・焼却灰の混合率と一軸圧縮強さの関係

図-2.42, 図-2.43には、ピートにおける各種廃棄物の混合率と7日強度($q_{.7}$)および28日強度($q_{.28}$)との関係を示す。これらの図より焼却灰に関しては、各材例とも粒度組成の違い(粗粒, 細粒)による顕著な改良硬化の際を見出すことはできないが、若干細粒の方の強度発現が大きいようである。また、両焼却灰ともセメント混合率が一定の場合、焼却灰の混合率を増加させることによる $q_{.}$ の増加が顕著に表われており、特に、焼却灰単体でピートに混合した場合でも混合率の増加に伴う $q_{.}$ の増加が認められ、混合率100%では $q_{.7} = 3.5 \text{ kgf/cm}^2$ まで強度まで強度が発現している。また、焼却灰とセメントを組合せた配合においても、セメントの混合率が増加するに伴い $q_{.}$ の値が増加しており、その増加割合は、セメントの混合率とほぼ比例関係にあることがうかがえる。

次に石炭灰に関しては、焼却灰と比較した場合石炭灰の混合率を増加させても顕著な強度の増加が認められず、セメントを10%および20%混合しても顕著な強度の増加が得られないようである。

これらの焼却灰および石炭灰による改良固化を砂と比較すると、焼却灰の場合では砂とセメントを組合せた配合よりかなり大きな強度が発現しており、ピートに焼却灰を混合すると乾燥状態の材料を添加することによる含水比低下に伴う強度増加のみならず、増量材・骨材としての作用およびCaO成分などによる吸水固化作用が働いているためと考えられる。これに対して石炭灰の場合、ピートにおいては、砂とセメントを組合せた配合より改良固化が下回っており、ピートのような高含水比の土に対しては、増量材としての作用および固化作用などによる改良効果が発現しにくいものと考えられる。石炭灰に関するこの結果は配合試験Ⅰとほぼ同じ傾向にあり、石炭灰をピートのような高含水比の土に添加しある程度の改良効果($q_{.} = \text{数 kgf/cm}^2$ 以上)を期待するためには、セメントなどの固化材の添加量を増加させるか、排脱石膏などとの組合せが必要であろう。

しかし、石炭灰も含めてこれらの廃材をセメントと組合せてピートに添加することによる有効性、または添加することによる‘逆効果、がないことは図-2.44に示すセメント混合率と一軸圧縮強さ(材令28日)の関係からも明らかである。この図は各添加材のうちセメントのみに着目し、石炭灰、焼却灰などの添加材を‘被改良材、とみなし整理したものである。なお、この図において配合試験Ⅰで実施した配合のうち「石炭灰+セメント+排脱石膏」の条件での結果およびセメント単体でピートに混合した室内配合試験結果を付記してある。この図より石炭灰、砂などは、単体で添加した試験結果の近傍に位置し焼却灰の場合、その上位に位置していることが認められる。この結果から、石炭灰をセメントと組合せてピートに添加してもセメントの固化作用を妨げるなどの‘逆効果、はなく、また焼却灰をセメントと組合せた場合には、セメント単体に比べてかなり有効であるものと考えられる。

表-2.9 室内配合試験Ⅱ結果(1) (石炭灰・焼却灰を単体で用いたケース)

試料	添加材の組合せ	添加材混合率=添加材重量/土の湿潤重量(%)				試料含水比(%)		材 令														
		石炭灰(国内産)	石炭灰(国外産)	焼却灰(粗)	焼却灰(細)	試料含水比(%)		7 日					28 日					90 日				
						初期	混合直後	σ_1 (g/cm ²)	w (%)	q_u (kgf/cm ²)	ε_1 (%)	E_{50} (kgf/cm ²)	σ_1 (g/cm ²)	w (%)	q_u (kgf/cm ²)	ε_1 (%)	E_{50} (kgf/cm ²)	σ_1 (g/cm ²)	w (%)	q_u (kgf/cm ²)	ε_1 (%)	E_{50} (kgf/cm ²)
ビ ト	石炭灰 (国内産)	50				555.1	121.1	1.282	118.2	0.21	14.9	1.8	1.285	122.3	0.16	15.0	1.6	1.256	118.3	0.16	14.1	1.6
		70				555.0	95.7	1.334	91.9	0.34	13.8	3.4	1.344	96.7	0.25	14.7	2.4	1.328	94.9	0.23	14.9	2.2
	石炭灰 (国外産)		50			559.9	126.1	1.316	119.4	0.20	14.9	1.7	1.317	124.8	0.13	14.7	1.3	1.304	122.0	0.16	14.6	1.6
			70			556.2	93.3	1.379	85.5	0.49	11.4	5.4	1.393	94.2	0.20	13.9	1.9	1.374	92.1	0.20	13.2	2.1
	焼却灰 (粗 粒)			50		735.9	132.1	1.279	128.5	0.32	7.27	9.94	1.308	130.9	0.38	6.14	14.61	1.329	124.6	0.54	6.85	21.69
				70		795.4	102.2	1.361	100.2	1.33	5.02	55.3	1.363	100.6	1.21	5.28	67.6	1.350	97.0	1.26	4.81	68.7
				100		656.0	71.0	1.326	71.2	3.48	1.35	444.5	1.338	70.2	3.55	1.29	411.6	1.315	67.9	3.66	1.59	354.4
粘 土	石炭灰 (国内産)	50				57.6	33.1	1.819	31.0	1.15	12.1	11.2	1.809	26.7	2.86	9.25	27.7	1.774	25.0	3.34	4.0	114.6
		70				58.7	31.5	1.791	26.3	2.02	4.9	51.8	1.678	23.3	2.52	2.42	93.4	1.701	21.4	4.95	0.7	154.5
	石炭灰 (国外産)		50			58.7	35.9	1.881	30.5	0.95	13.2	8.6	1.773	27.3	1.32	2.36	82.6	1.781	25.5	1.76	1.3	283.4
			70			57.0	30.6	1.860	26.5	1.47	1.2	168.0	1.878	23.7	2.27	1.56	189.4	1.686	21.8	3.28	0.8	507.7
	焼却灰 (粗 粒)					50.0	40.0	1.664	39.9	2.36	2.53	230.3	1.630	38.6	3.01	2.01	364.4	1.582	37.1	3.78	1.24	554.8
						60.2	30.8	1.288	31.1	1.47	1.09	161.8	1.312	29.4	2.12	0.79	362.1	1.282	26.9	2.75	0.75	478.5
						61.0	24.7	1.248	25.2	3.02	0.98	345.9	1.230	23.0	3.46	0.81	480.1	1.197	19.3	3.85	0.64	846.1
	焼却灰 (細 粒)				25	57.6	40.5	1.752	37.3	7.43	2.94	729.9	1.753	37.3	8.42	2.07	1,502.0	1.715	34.6	10.56	1.34	1,536.1
					50	58.2	28.2	1.359	25.0	5.18	0.53	1,332.1	1.342	25.3	5.09	0.42	1,269.0	1.333	21.5	4.85	0.45	1,382.7
					75	57.5	20.8	1.260	18.4	4.36	0.32	1,550.5	1.251	18.4	5.04	0.47	1,325.5	1.202	14.5	3.94	0.47	1,163.6

*)配合試験Ⅰのデータ

表-2.10 室内配合試験Ⅱ結果(2) (石炭灰・焼却灰とセメントを組合せたケース)

試 料	添加材 の 組合せ	添加材混合率=添加材重量 /土の湿润重量(%)					試験含水比 (%)		材 令														
		石炭 灰	焼却 灰(粗 粒)	焼却 灰(細 粒)	砂	セ メント	初期	混合 直後	7 日					28 日					90 日				
									σ_1	w	q_u	ϵ_f	E_{50}	σ_1	w	q_u	ϵ_f	E_{50}	σ_1	w	q_u	ϵ_f	E_{50}
									(g/cm ²)	(%)	(kgf/cm ²)	(%)	(kgf/cm ²)	(g/cm ²)	(%)	(kgf/cm ²)	(%)	(kgf/cm ²)	(g/cm ²)	(%)	(kgf/cm ²)	(%)	(kgf/cm ²)
ビ ト	石炭灰 + セメント	50					662.8	116.8	1.303	110.8	0.120	14.1	1.3	1.329	112.0	0.15	14.7	1.7	1.348	108.5	0.164	14.7	20.2
		75				10	652.1	86.9	1.390	82.9	0.208	14.9	2.0	1.390	84.5	0.24	13.5	4.8	1.421	80.9	0.384	14.6	5.5
		100					683.3	69.5	1.420	67.5	0.378	14.7	3.3	1.438	67.8	0.497	14.0	2.6	1.462	64.9	0.732	13.3	9.5
		50					678.4	102.7	1.356	98.9	0.173	14.6	1.9	1.358	99.9	0.225	13.9	2.7	1.388	95.7	0.312	13.8	5.4
		75				20	694.0	79.9	1.409	76.8	0.276	14.8	2.6	1.419	77.5	0.396	13.2	4.7	1.442	73.3	0.727	12.5	13.7
		100					685.2	64.5	1.473	61.5	0.515	13.7	4.9	1.468	60.8	1.038	11.0	13.7	1.479	55.0	1.84	6.38	61.5
	焼却灰 (粗粒) + セメント		50			10	749.8	115.4	1.371	108.4	1.25	5.13	129.5	1.372	108.7	1.340	6.63	120.0	1.406	106.9	1.18	5.50	104.3
			75				757.6	86.4	1.472	80.4	3.70	3.50	445.5	1.440	80.0	3.98	3.88	510.3	1.437	78.8	3.53	3.50	307.9
			50			20	750.1	101.3	1.425	89.1	1.91	5.00	201.1	1.407	85.9	2.83	6.13	287.2	1.413	85.2	2.23	6.38	138.9
			75				754.1	77.6	1.484	70.6	4.83	3.63	634.9	1.484	67.8	5.49	4.13	621.5	1.483	66.2	4.30	3.38	332.0
	焼却灰 (細粒) + セメント			50		10	763.5	105.5	1.381	98.9	1.56	7.13	103.1	1.393	97.5	1.67	8.38	119.5	1.388	98.0	1.59	7.88	119.0
				75			778.2	78.6	1.443	73.4	3.24	5.14	222.1	1.450	72.3	3.38	5.75	241.4	1.450	73.4	2.61	5.50	155.0
				50		20	775.2	100.8	1.422	90.1	2.40	5.25	267.7	1.423	86.7	2.95	5.50	413.7	1.440	85.9	4.54	3.88	395.3
				75			674.1	76.6	1.491	63.8	5.22	4.50	396.9	1.482	60.5	5.71	5.38	419.5	1.487	60.9	5.44	3.63	500.4
	砂 + セメント				50	10	663.2	117.1	1.356	112.1	0.536	10.5	22.0	1.365	111.9	0.613	10.4	30.4	1.392	106.8	0.615	10.8	26.3
					75		650.4	86.5	1.461	83.1	0.750	9.4	37.7	1.441	84.1	0.83	9.1	35.9	1.478	82.4	0.810	9.1	39.2
					50	20	650.8	102.6	1.404	95.5	1.45	6.5	68.3	1.406	95.4	2.24	5.2	192.0	1.393	90.6	1.80	3.78	204.2
					75		652.2	78.9	1.495	73.9	1.50	4.75	153.0	1.472	74.4	2.44	3.75	501.4	1.499	69.5	2.63	2.75	241.5

表-2.11 室内配合試験Ⅱ結果(3) (石炭灰・焼却灰とセメントを組合せたケース)

試料	添加材の組合せ	添加材混合率=添加材重量 / 土の湿潤重量(%)					試験含水比 (%)		材 令														
		石炭灰	焼却(粗)灰	焼却(細)灰	砂	セメント			7 日					28 日					90 日				
							初期	混合直後	ρ_i (g/cm ³)	w (%)	q_u (kgf/cm ²)	ε_f (%)	E_{50} (kgf/cm ²)	ρ_i (g/cm ³)	w (%)	q_u (kgf/cm ²)	ε_f (%)	E_{50} (kgf/cm ²)	ρ_i (g/cm ³)	w (%)	q_u (kgf/cm ²)	w (%)	E_{50} (kgf/cm ²)
粘性土	石炭灰 + セメント	25					65.7	42.7	1.676	41.8	2.30	5.38	117.8	1.680	41.4	2.48	4.75	210.1	1.691	40.7	3.27	4.63	208.5
		50				5	65.6	32.2	1.718	32.5	3.50	2.88	347.8	1.713	32.4	4.00	2.88	279.1	1.718	31.0	4.36	2.50	317.9
		75					65.0	26.8	1.739	26.4	6.84	2.38	697.9	1.713	26.3	7.82	2.75	449.0	1.776	25.2	9.04	2.00	1,001.5
		25					65.5	40.6	1.718	39.0	6.84	2.75	928.3	1.707	38.7	7.70	2.13	577.6	1.712	38.3	12.72	2.13	1,541.7
		50				10	67.3	32.4	1.762	31.4	7.71	1.75	1,447.3	1.745	30.9	9.86	2.25	793.2	1.738	30.4	11.99	1.50	1,619.0
		75					66.6	27.0	1.773	26.1	8.50	1.50	1,000.7	1.757	25.6	12.64	1.88	403.1	1.721	22.0	18.44	1.50	2,896.6
	焼却灰(粗粒) + セメント		25			5	66.8	43.0	1.724	41.0	5.53	2.75	485.2	1.717	41.1	6.13	2.88	471.6	1.699	39.2	7.39	3.00	440.0
			50				66.3	32.7	1.489	36.0	9.01	0.95	1,169.3	1.421	30.1	6.88	0.75	1,049.4	1.384	28.0	6.74	0.88	1,141.5
			25			10	66.8	38.4	1.764	35.9	9.89	1.70	1,103.9	1.695	35.6	13.99	0.88	2,791.6	1.692	33.5	16.12	1.88	1,102.1
			50				67.0	30.5	1.529	28.0	13.64	0.70	3,313.2	1.441	27.2	9.25	0.88	1,415.4	1.438	24.9	10.76	1.25	1,288.6
	焼却灰(細粒) + セメント			25		5	66.6	42.2	1.771	38.8	7.01	2.13	1,164.0	1.764	38.1	7.23	1.63	2,106.7	1.793	38.7	7.96	2.13	876.0
				50			66.4	31.1	1.680	28.0	18.06	0.73	5,746.6	1.572	26.7	15.70	1.13	2,004.7	1.621	26.9	14.02	0.86	2,004.6
			25		10	66.6	39.7	1.796	36.8	6.86	1.75	866.5	1.782	35.4	8.16	1.63	1,524.4	1.834	35.4	12.42	2.50	985.2	
			50			66.2	30.3	1.734	28.1	17.48	0.75	4,216.3	1.676	26.7	17.56	1.00	1,488.6	1.682	26.4	20.04	1.63	2,709.1	
砂 + セメント				25	5	66.3	43.7	1.758	42.9	1.17	5.63	53.1	1.741	42.8	1.32	5.13	69.0	1.753	42.2	1.69	6.00	91.4	
				50		66.2	34.3	1.844	33.5	1.92	5.50	124.1	1.832	33.2	2.10	4.75	143.0	1.846	32.6	2.77	5.13	160.4	
				25	10	66.2	40.6	1.776	39.5	5.56	3.13	677.2	1.766	39.3	7.39	3.13	481.9	1.766	38.3	10.35	3.00	587.0	
				50		65.7	32.4	1.853	31.6	6.22	2.63	592.5	1.847	31.6	9.28	3.13	515.3	1.854	30.0	12.67	2.50	1,077.2	

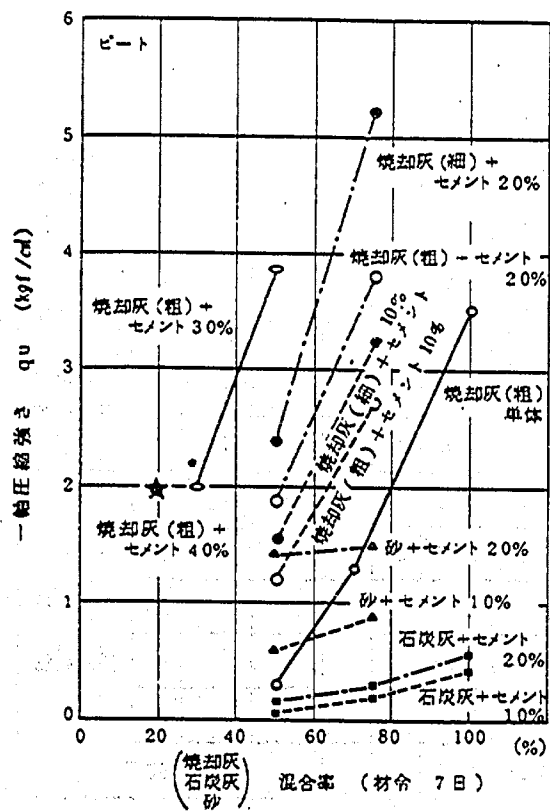


図-2.42 石炭灰・焼却灰の混合率と
 q_u の関係

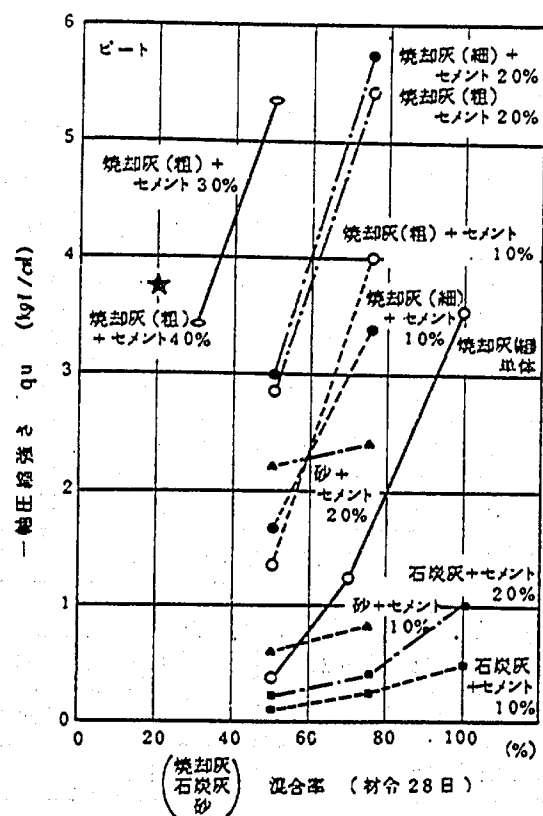


図-2.43 石炭灰・焼却灰の混合率と
 q_u の関係

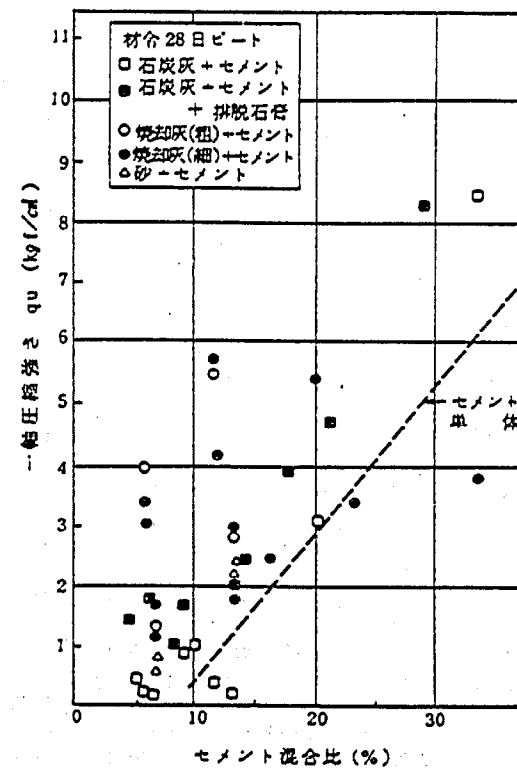


図-2.44 セメント混合率と q_u の関係
(材令28日, ピート)

(b) 材令と一軸圧縮強さの関係

図-2.45, 図-2.46, 図-2.47には, それぞれ石炭灰, および焼却灰にセメントを組合せた条件における混合処理土の材令と一軸圧縮強さの関係を示す。これらの図より, まず石炭灰とセメントを組合せてピートに混合した場合では, 石炭灰 100% にセメントを 20% を組合せて混合した条件以外は明瞭な材令に伴う強度増加が認められず, 図-2.48に示すように $q_{28}/q_{7} \approx 1$, $q_{90}/q_{7} \approx 1$ となっている。また砂とセメントを組合せた配合条件では, 石炭灰の場合と同様にセメントを 20% 組合せた配合以外は材令に伴う強度増加が少ないようである。

次に焼却灰とセメントを組合せて混合した場合には, 図-2.46に示すとおり初期強度 (7 日強度が他の添加材と比べて大きくほぼ 2 倍以上となっている。しかし, 材令 28 日までの若干の強度増加は認められるものの, その後の強度増加は少ない。また, 焼却灰の粗粒と細粒の差異は, 前述したように若干細粒の焼却灰の方が強度発現が大きいようであるが, これは初期強度の影響が大きく, 材令に伴う強度変化はほぼ等しいことがうかがえる。この結果は, 図-2.48における q_{28}/q_{7} , q_{90}/q_{28} の関係からも明らかであろう。

更に, 石炭灰および焼却灰のピートにおける長期的な自固結性(自硬性)を見るために, 図-2.49には石炭灰, 焼却灰を単体でピートに混合した場合の混合処理土の材令と一軸圧縮強さの関係を示す。なおこの図において, 石炭灰のデータは配合試験 I のものを用いており, 初期含水比が配合試験 II の場合 650~750% であるのに対し, 配合試験 I の場合 500% 程度と異なっている。この図より, 石炭灰, 焼却灰とも材令 7 日の強度にかなりの差があるものの材令 90 日までは, 材令に伴う強度増加はほと

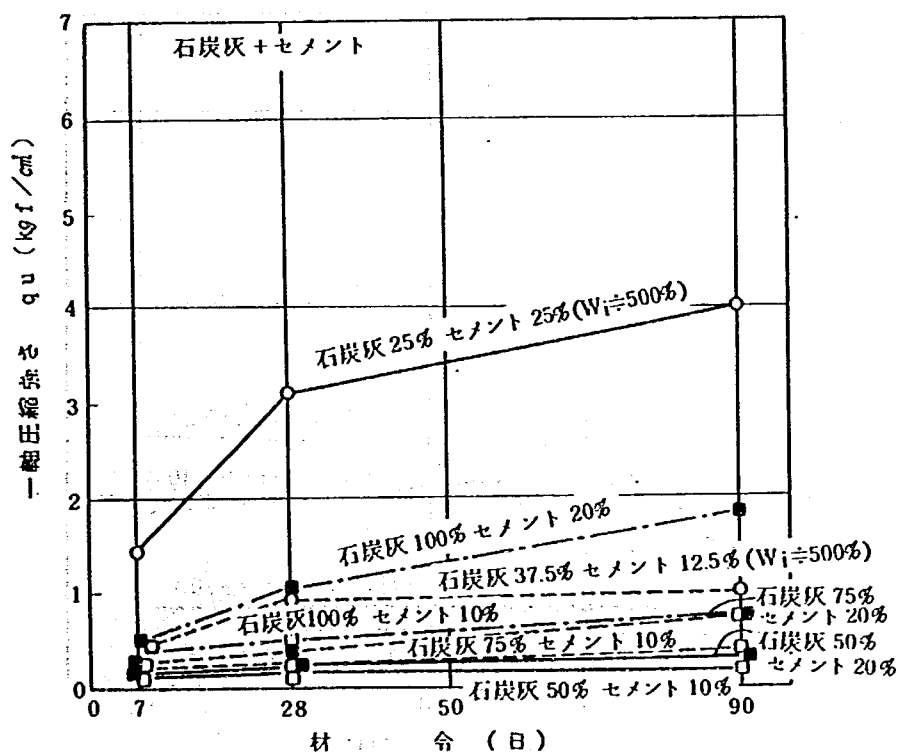


図-2.45 石炭灰+セメントにおける材令と q_s の関係 (ピート)

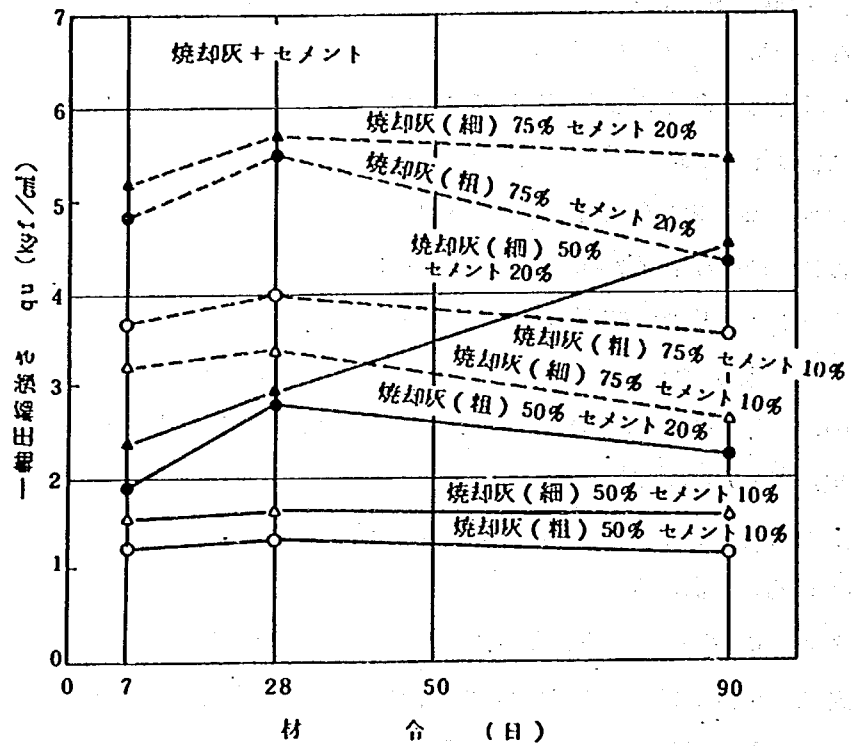


図-2.46 焼却灰+セメントにおける材令と q_u の関係(ピート)

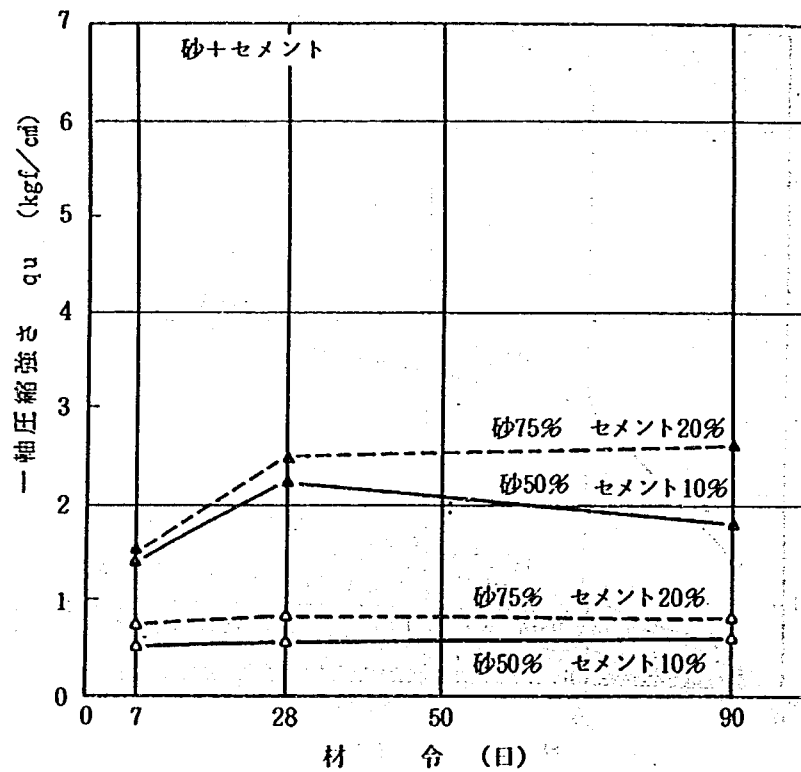


図-2.47 砂+セメントにおける材令と q_u の関係(ピート)

んど認められず、ピートにおいては長期的な自硬性による強度増加を見出すことができなかった。すなわち、このことは石炭灰、および焼却灰を単体で用いた場合、ピートにおいて7日以前のかかなり早期の段階に含水比低下などの効果を発現するものと考えられる。

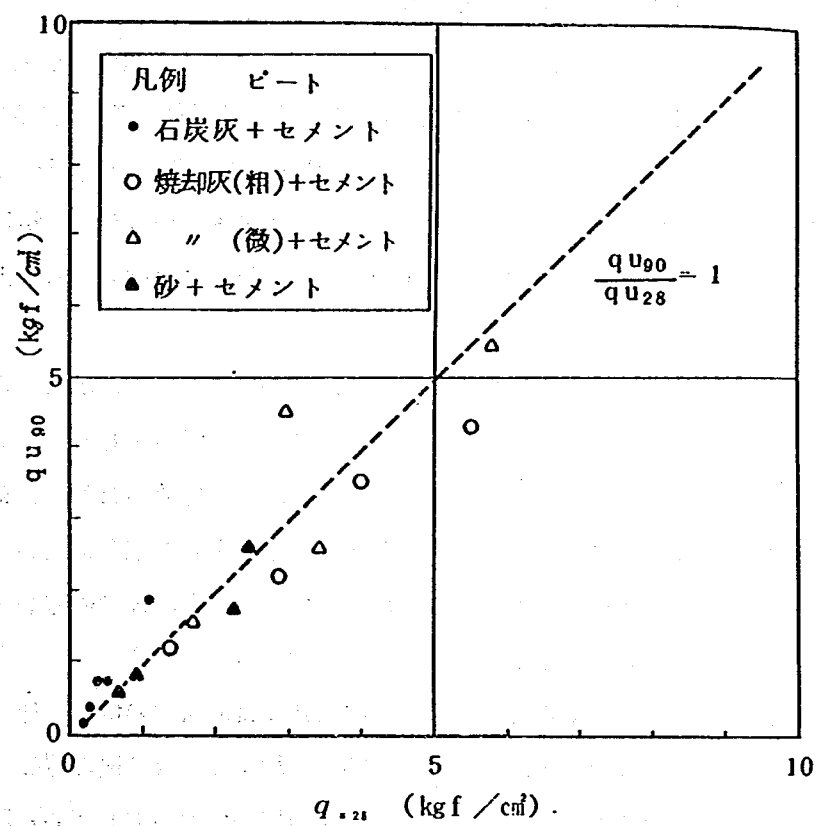
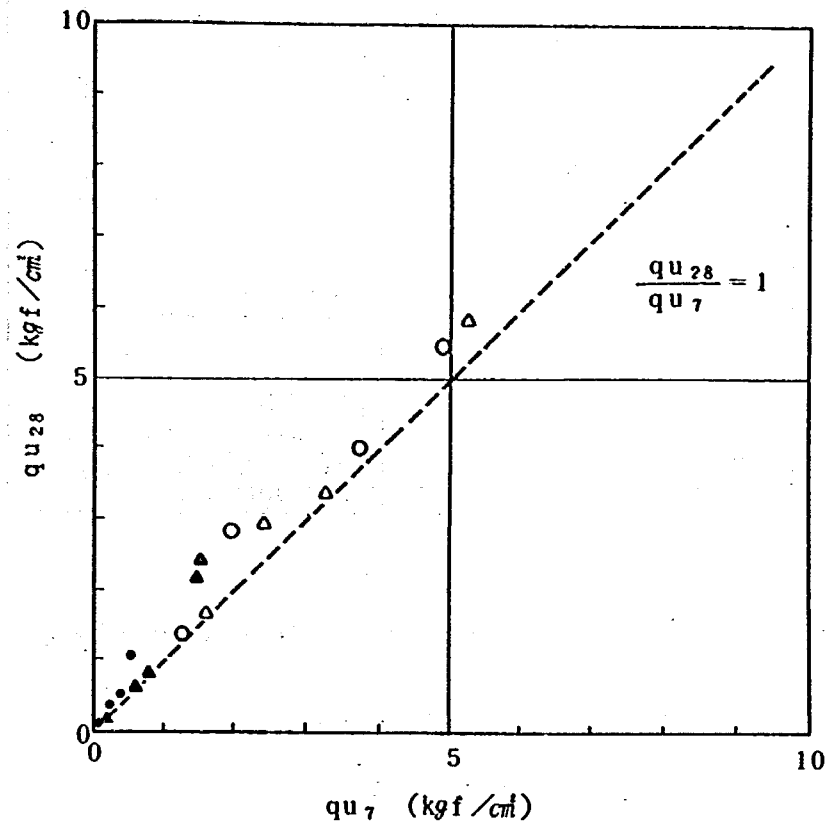


図-2.48 $q_{u7} \sim q_{u28} \sim q_{u90}$ の関係 (ピート)

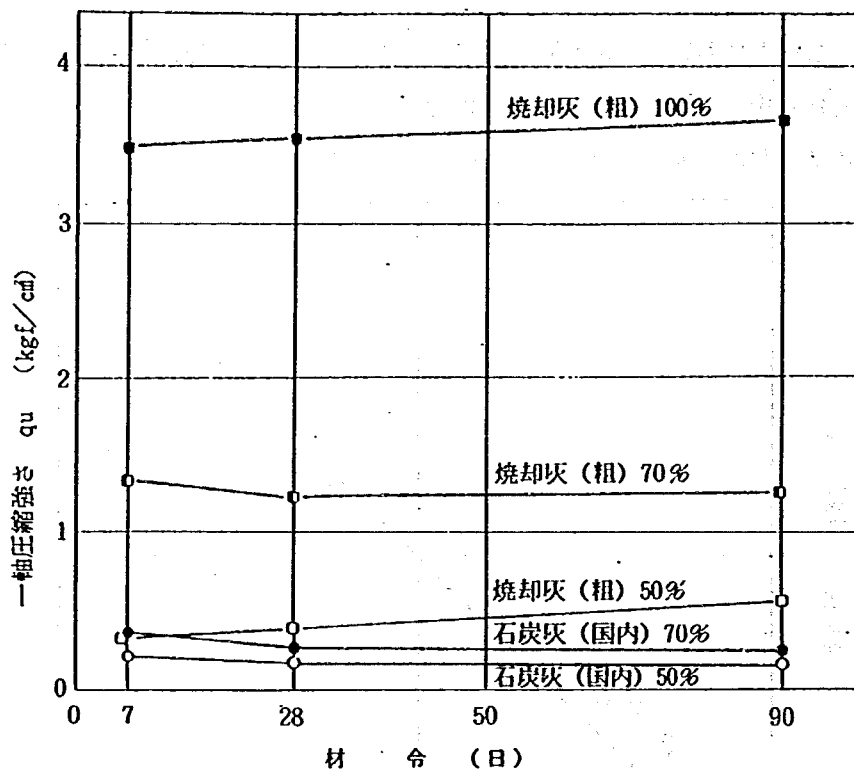


図-2.49 石炭灰，焼却灰を単体で用いた場合の改良土の材令と q_u の関係（ピート）
（石炭灰については配合試験Ⅰのデータ）

2) 粘性土に石炭灰・焼却灰を添加した場合の強度発現

(a) 石炭灰・焼却灰の混合率と一軸圧縮強度の関係

図-2.50，図-2.51には粘性土における各種廃棄物の混合率と7日強度(q_{7d})および28日強度(q_{28d})との関係を示す。これらの図より粘性土の場合，焼却灰単体を除いて前述したピートと同様に石炭灰・焼却灰の混合率が増加するに伴い q_u の値が増加していることが認められる。しかし，焼却灰の違いによる顕著な差異はピートにおいて見出すことができなかったが，粘性土においてはその差が明瞭に表われており，焼却灰（細粒）の方が焼却灰（粗粒）に比べて強度が大きく発現していることがわかる。

また，ピートにおける結果と比較して異なる点として，この他に次のことがあげられる。

第1に，ピートの場合，石炭灰とセメントを組合せた配合の強度発現がわずかであったのに対して，粘性土の場合石炭灰の混合率が増加するに伴い着実に強度の増加が認められる。また，その強度発現は砂とセメントを組合せた配合より大きく焼却灰とセメントを組合せた配合に近い結果が得られている。このことは，一つにピートと粘性土の自然含水比を比較した場合，後者の方がかなり小さいこと，また，試料土と添加材の混合のしやすさが影響しているものと考えられる。

第2に，焼却灰単体の場合についてみると，ピートの場合には混合率の増加に伴い強度の増加がみられたが，粘性土においては，混合率を25%，50%，75%と増すにつれて逆に減少する傾向がみられる。また同様の結果は，焼却灰にセメントを組合せた一部の配合においても認められる。このような現象の原因の一つとして，焼却灰の場合，前述したピートにおいても認められたようにCaO成分に

起因すると考えられる吸水作用のため含水比の低下割合が大きく、特に含水比が60%程度以下の粘性土においては混合直後に塑性限界(w_p)以下の含水比となったためと考えられる。このような現象は、室内配合試験において生石灰を含水比 100%程度以下の粘性土に大量 (20%程度以上)に混合した際、混合直後試料土がパサパサの状態となり、供試体作製が困難となり q_u 値がかなり小さくなる現象と似ている。

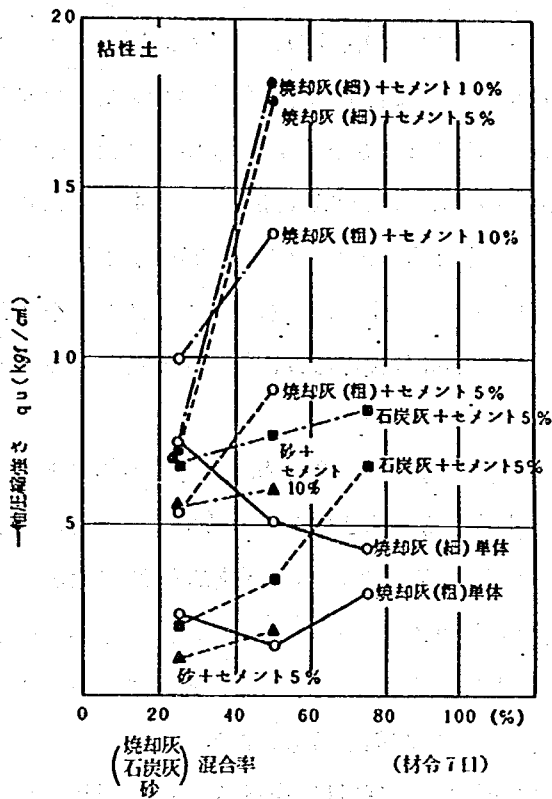


図-2.50 石炭灰・焼却灰の混合率と q_u の関係 (粘性土)

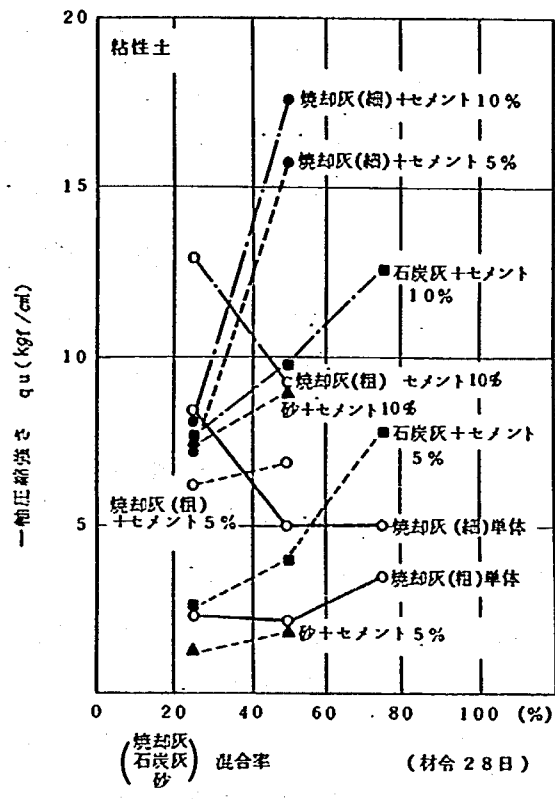


図-2.51 石炭灰・焼却灰の混合率と q_u の関係 (粘性土)

すなわち、室内配合試験において焼却灰単体を含水比が低い粘性土に混合した場合、かなり低い混合率においてもその改良効果が減ずるという結果を生じることが推測される。

なお、焼却灰にセメントを組合せた配合においてこのような現象が見られないのは、上記のような影響以上にセメントによる土粒子との固結作用が大きいためと考えられる。

また、図-2.52に示すように石炭灰、焼却灰などの添加材を「被改良材」とみなし、セメントの混合率と一軸圧縮強さの関係に整理すると、各配合ともセメントを単体で粘性土に混合した場合と比較して大きな強度の発現が認められる。このことは、石炭灰、焼却灰などの材料をセメントと組合せて用いて粘性土と混合してもセメントの固結作用が妨げることがないものと考えられ、このような結果は前述したピート

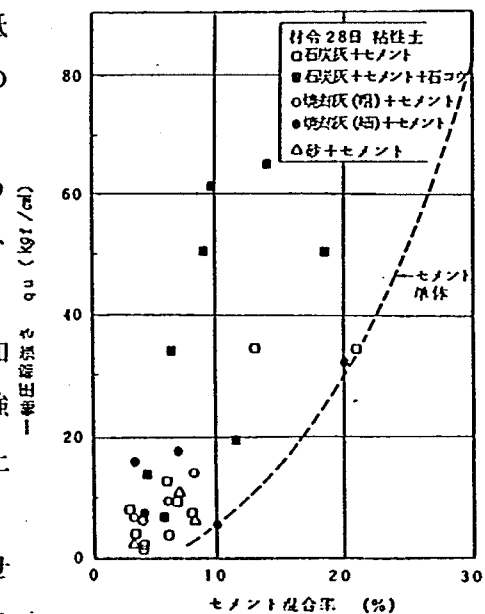


図-2.52 セメント混合率と q_u の関係 (材令28日、粘性土)

の場合と同様である。

なお、同図には配合試験Ⅰで対象とした石炭灰にセメントと排脱石膏を組合せた配合における試験結果も付記してある。

(b) 材令と一軸圧縮強さの関係

図-2.53, 図-2.54, 図-2.55には、それぞれ石炭灰、焼却灰および砂にセメントを組合せた条件における混合処理土の材令と一軸圧縮強さの関係を示す。これらの図より、まず石炭灰とセメントを組合せて粘性土に混合した場合では、セメントの混合率によって材令に伴う強度の増加割合が異なるが、各配合とも増加する傾向にあることが認められる。特にセメントを20%添加した配合ではその伸びは著しく石炭灰75%, セメント10%を組合せた配合では、7日強度 8.5kgf/cm^2 にあるのに対し90日強度では焼く 18.5kgf/cm^2 と2倍以上の強度増加が認められる。また、図-2.55に示す砂とセメントを組合せた配合と比較しても類似した傾向を示している。このように、石炭灰とセメントを組合せた配合条件はピートの場合と異なり、粘性土においては、かなり良好な改良効果が期待できるものと考えられる。

次に焼却灰とセメントを組合せた配合では、ピートと同様に材令7日での強度が他の添加材と比べて大きく、「石炭灰+セメント」、「砂+セメント」と比較すると約2倍近くの値を得ている。しかし、材令に伴う強度増加は焼却灰の混合率によってその傾向が異なる。例えば焼却灰25%添加した場合では、セメントの混合率によって異なるが、強度増加が認められるのに対して焼却灰50%を混合した場合では材令に伴う伸びは認められない。この結果は、先に混合率と q_v の関係において述べたように、材令に伴う含水比低下による粘性土の粘着力の減少に起因するものと考えられる。

更に石炭灰および焼却灰の粘性土における長期的な自固結性（自硬性）を見るために、図-2.56に石炭灰、焼却灰を単体で粘性土に混合した場合の混合処理土の材令と一軸圧縮強さの関係を示す。なお、石炭灰に関しては配合試験Ⅰの試験結果を用いてある。この図において、焼却灰（細粒）を50%, 70%混合した条件を除いて石炭灰、焼却灰とも材令90日までは着実に材令に伴う強度が認められる。この結果はピートの場合と異なった性状である。また、この図において石炭灰単体の場合、焼却灰単体と材令90日において同程度の改良効果が得られている。

以上のことから、本試験における粘性土に対しては、焼却灰の場合、初期強度が高いがその後の材令に伴う強度増加の割合が小さく、一方石炭灰の場合、その強度発現は材令に伴って徐々に生ずるものと考えられる。

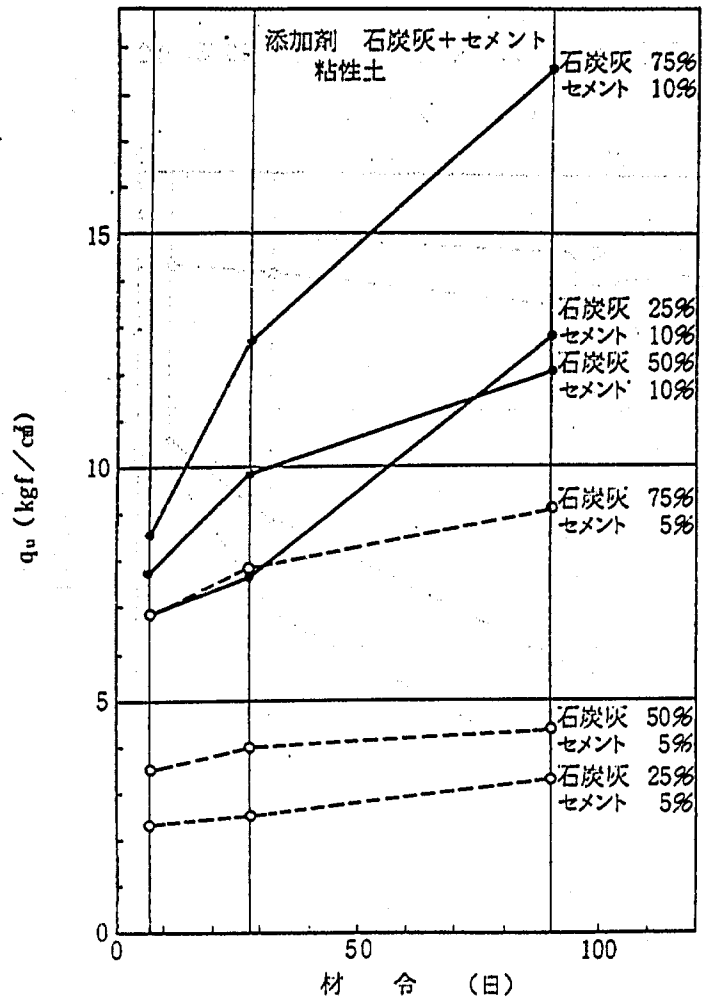


図-2.53 「石炭灰+セメント」における
材令と q_u の関係 (粘性土)

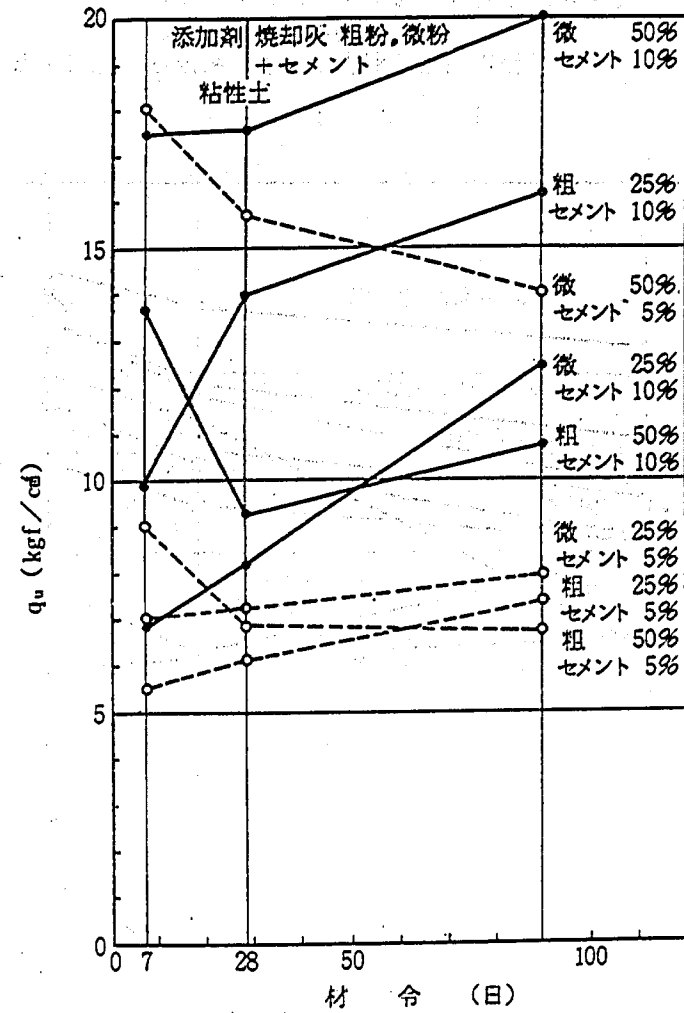


図-2.54 「焼却灰+セメント」における
材令と q_u の関係 (粘性土)

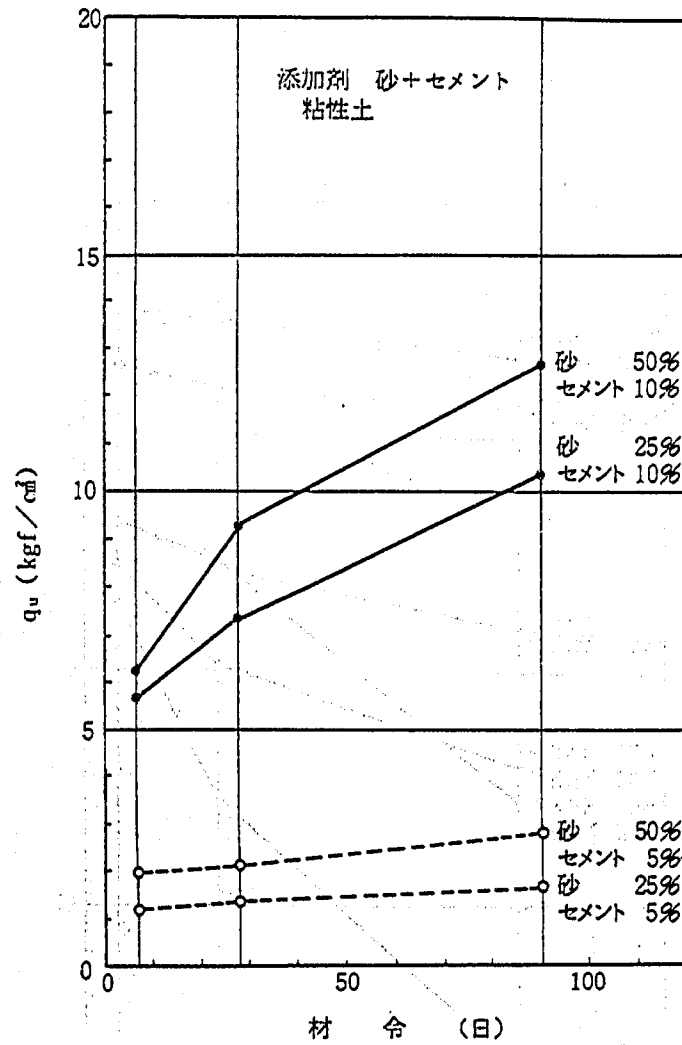


図-2.55 「砂+セメント」における材令と q_u の関係

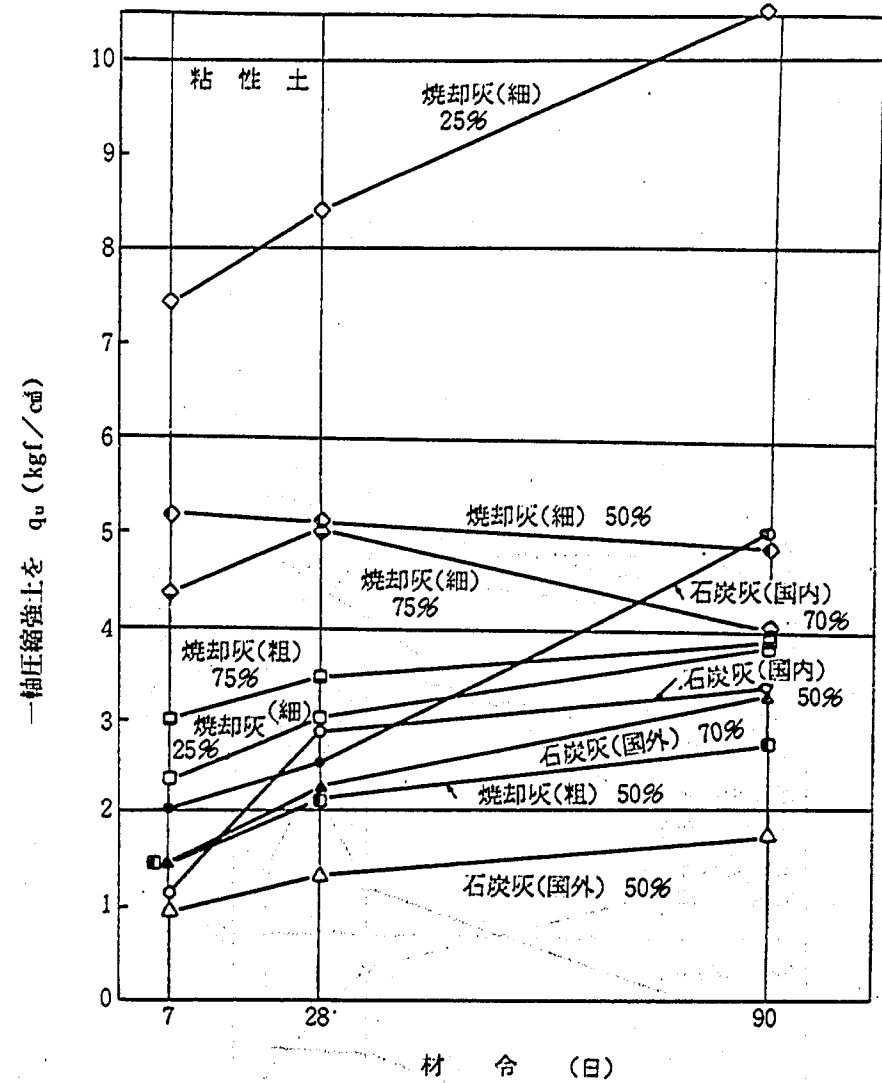


図-2.56 石炭灰、焼却灰単体を用いた場合の材令と q_u の関係
(石炭灰については配合試験 I のデータ)

3) 混合処理土の含水比変化

(a) 混合処理土の含水比の経時変化

図-2.57には石炭灰、焼却灰を単体でピートおよび粘性土に混合した場合の混合前、混合直後、7日、28日、90日における混合処理土の含水比の変化を示す。

また、図-2.58には石炭灰、焼却灰および砂をセメントと組合せて、混合した場合の含水比の経時変化を示す。これらの図より、各配合とも添加材の混合率に応じて60%~120%程度まで大きく低下している。一方、材令に伴う含水比の変化割合は、ピート、粘性土とも混合直後の含水比の低下に比べてわずかであるが、材令に伴い含水比が徐々に低下していることが認められる。このような材令に伴う含水比の低下は、先に述べた材令 $\sim q_s$ の関係と比較的良好な対応があることが認められ、含水比の低下は混合処理土の強度発現に大きく結びついているものと考えられる。例えば、図-2.57に示す石炭灰、焼却灰単体で用いた配合条件における含水比の低下の様子に着目するとピートの場合、材令に伴う含水比の低下がほとんど認められず、一方、粘性土の場合には、材令に伴う含水比の低下が認められ、これは、図-2.49および図-2.56に示した材令と q_s の関係との間に相関があると言える。また同図において当然のことながら石炭灰・焼却灰の混合率の増加に伴い含水比が着実に減少しており、石炭灰・焼却灰単体で用いる場合には、この初期段階における含水比の低下の程度が強度または改良効果に大きく反映されているものと考えられる。

しかし、含水比に関するこれらの結果は、限られた量の試料土の対象とした室内配合試験での結果であり、実際の深層混合処理などの改良工法に関しては、周辺の土中水などの影響もあるものと考えられる。このことに関しては、原位置における調査・確認が必要である。なお、第3章において述べるピート層を対象とした試験施工結果では、焼却灰を単体でピート層に混合しても周辺の土中水の影響も少なく室内配合試験結果と同様の結果を得ている。

(b) 計算による含水比低下に関する検討

図-2.59、図-2.60には含水比の変化量（以下減水量と称する）の計算値と混合直後および材令90日の実測値とを比較した結果をピート、粘性土に分けて示す。ここで計算値は「セメントの水和反応を考慮しない場合」と「セメントの水和反応を考慮した場合」とに分けて次式により算出した。

(a) セメントの水和反応を考慮しない場合

$$\Delta W_1 = w_o - \frac{w_o}{1 + (a_a + a_c) \times (w_o + 1)} \quad \dots\dots\dots(1)$$

(b) セメントの水和反応を考慮した場合

$$\Delta W_2 = w_o - \frac{\{w_o - 0.24 a_c (w_o + 1)\}}{1 + (a_a + 1.24 a_c) (w_o + 1)} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 ΔW_1 ; セメント水和反応を考慮しない場合の含水比の変化量

ΔW_2 ; セメント水和反応を考慮した場合の含水比の変化量

w_o ; 試料土の初期含水比

a_a ; 石炭灰、焼却灰、砂の混合比

a_c ; セメントの混合比

なお、混合比 = $\frac{\text{添加材重量}}{\text{土の湿潤重量}}$ である。

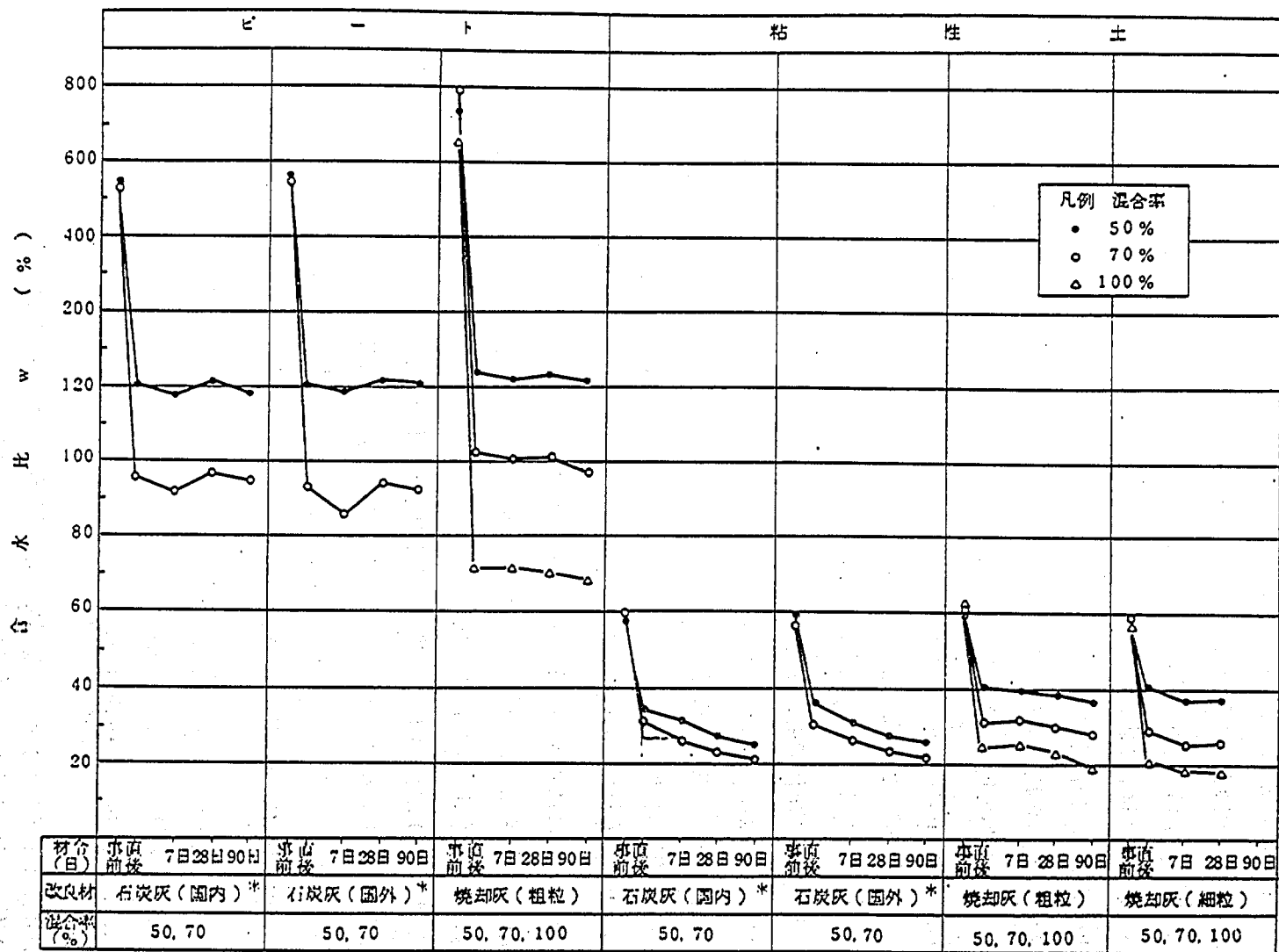


図-2.57 石灰灰、焼却灰を単体で用いた場合の含水比の経時変化
(*は、配合試験 I のデータ)

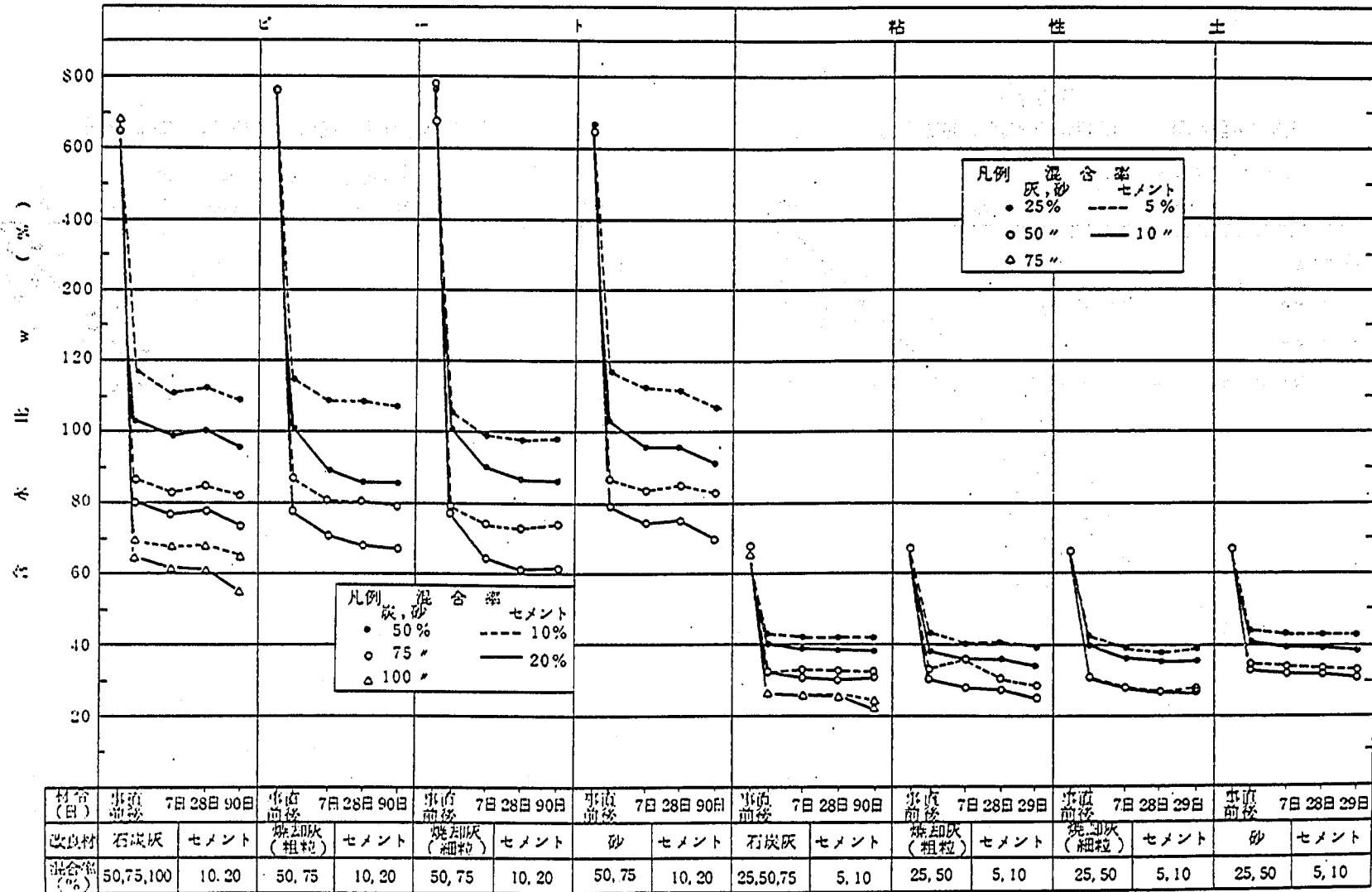


図-2.58 石炭灰、焼却灰をセメントと組合せて用いた場合の含水比の経時変化

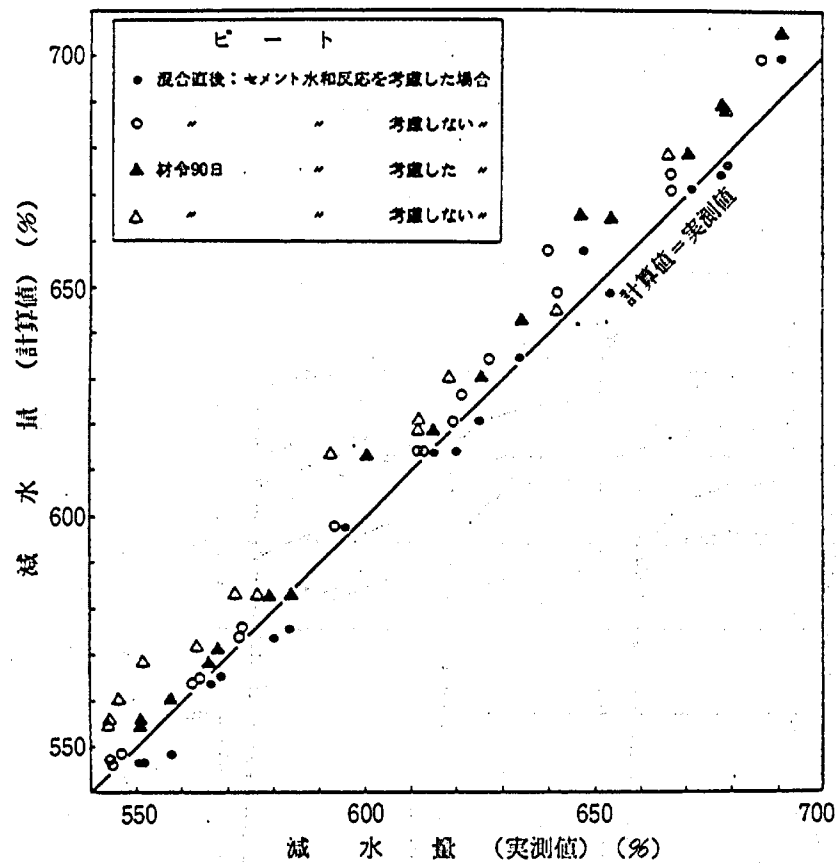


図-2.59 減水量の計算値と実測値の関係 (ビート)

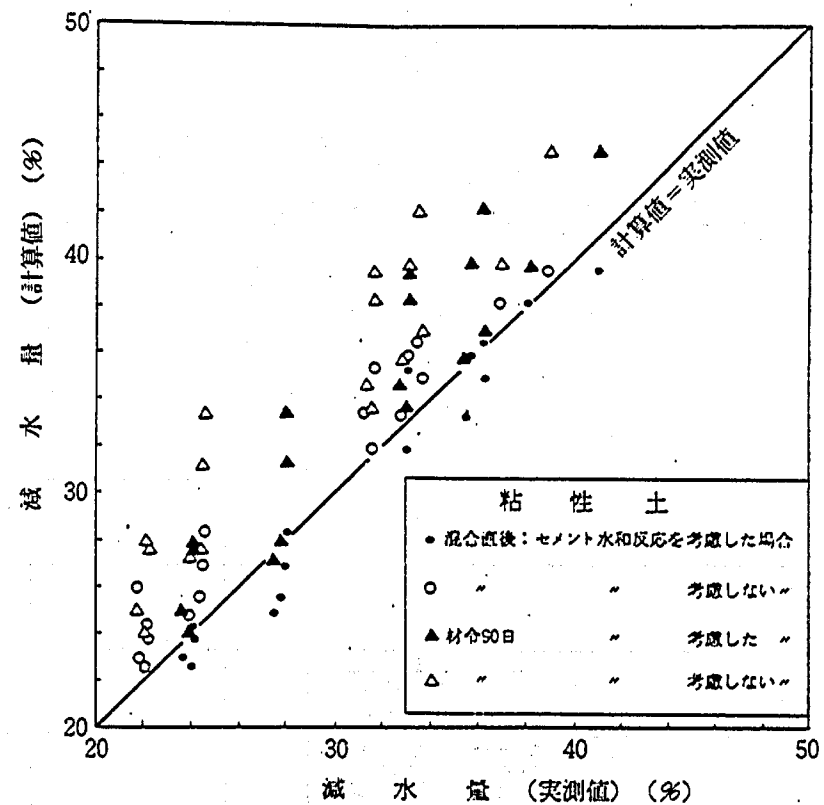


図-2.60 減水量の計算値と実測値の関係 (粘性土)

(参考) (1)式および(2)式の誘導

(1) 式の誘導

$$w_o = \frac{W_w}{W_s}, (W_w = \text{const}) \dots\dots\dots ①$$

$$w' = \frac{W_w}{W_s + W_a + W_c} \dots\dots\dots ②$$

$$a_a = \frac{W_a}{W_s + W_w} \dots\dots\dots ③$$

$$a_c = \frac{W_c}{W_s + W_w} \dots\dots\dots ④$$

ここで, w_o ; 試料土初期含水比

w' ; 改良土の含水比

W_s, W_w ; 単位体積内の土粒子および水の重量

W_a, W_c ; 単位体積内の廃材およびセメントの重量

①, ②より

$$\begin{aligned} w' &= \frac{w_o W_s}{W_s + W_s + W_c} \\ &= \frac{w_o}{1 + \frac{W_a + W_c}{W_s}} \dots\dots\dots ⑤ \end{aligned}$$

また, ③, ④において

$$\begin{aligned} \frac{W_a}{W_s} &= a_a (1 + \frac{W_w}{W_s}) = a_a (1 + w_o) \\ \frac{W_c}{W_s} &= a_c (1 + \frac{W_w}{W_s}) = a_c (1 + w_o) \dots\dots\dots ⑥ \end{aligned}$$

∴ ⑥を⑤へ代入すると

$$w' = \frac{w_o}{1 + (a_a + a_c)(1 + w_o)} \dots\dots\dots ⑦$$

∴ 減水量 ΔW_1 は,

$$\Delta W_1 = w_o - w' = w_o - \frac{w_o}{1 + (a_a + a_c)(1 + w_o)} \dots\dots\dots ⑧$$

(2) 式の誘導

セメント重量の24%の水分量がセメントの水和反応に寄与し, その分セメント水和物が生成されると仮定すると,

左欄②式において

$$\begin{aligned} w'' &= \frac{W_w - 0.24 W_c}{W_s + W_a + 1.24 W_c} \\ &= \frac{W_w - 0.24 a_c W_s (1 + w_o)}{W_s + W_a + 1.24 W_c} \\ &= \frac{w_o - W_s - 0.24 a_c W_s (1 + w_o)}{W_s + W_a + 1.24 W_c} \\ &= \frac{w_o - 0.24 a_c (1 + w_o)}{1 + \frac{W_a}{W_s} + 1.24 \frac{W_c}{W_s}} \dots\dots\dots ⑨ \end{aligned}$$

⑨に⑥を代入すると,

$$\begin{aligned} w'' &= \frac{w_o - 0.24 a_c (1 + w_o)}{1 + a_a (1 + w_o) + 1.24 a_c (1 + w_o)} \\ &= \frac{w_o - 0.24 a_c (1 + w_o)}{1 + (a_a + 1.24 a_c)(1 + w_o)} \dots\dots\dots ⑩ \end{aligned}$$

∴ 減水量 ΔW_2 は,

$$\begin{aligned} \Delta W_2 &= w_o - w'' \\ &= w_o - \frac{w_o - 0.24 a_c (1 + w_o)}{1 + (a_a + 1.24 a_c)(1 + w_o)} \dots\dots\dots ⑪ \end{aligned}$$

また、次表は実測値と上記算出方法によって求めた計算値の平均値と標準偏差値について示したものである。

表-2.12 減水量の実測値と計算値の比較

試料土		実 測 値 - 計 算 値 (%)			
		混合直後減水量との比較		材令90日減水量との比較	
		$\Delta W_0 - \Delta W_1$	$\Delta W_0 - \Delta W_2$	$\Delta W_{90f} - \Delta W_1$	$\Delta W_{90f} - \Delta W_2$
ピー ト	平 均 値	4.6	-2.7	13.8	6.5
	標 準 偏 差 値	4.7	5.2	6.1	5.4
粘 性 土	平 均 値	1.7	-0.6	4.9	2.6
	標 準 偏 差 値	1.1	1.2	2.2	2.2

ここで、 ΔW_0 : 混合直後減水量 (実測値)
 ΔW_{90f} : 材令90日減水量 (実測値)
 ΔW_1 : セメント水和による減水量を考慮しない場合 (計算値)
 ΔW_2 : " " " 考慮する場合 (計算値)

この表によれば、実測値と計算値の差が最小となるものは、ピート、粘性土とも ($\Delta W_0 - \Delta W_2$) の場合である。これは、混合直後および材令の初期における実測された含水比がセメント水和による減水量を考慮した場合の計算値にほぼ一致し、このことは、図-2.59および図-2.60からうかがうことができる。一方材令90日での実測減水量は、いずれも計算値 ΔW_1 、 ΔW_2 より大きな値を示しており、このことは材令に伴いセメントの水和反応の他に石炭灰や焼却灰などの吸水、水和反応がある程度生じていることも考えられよう。

図-2.61には、材令90日における実測減水量とセメント水和反応を考慮した場合の計算値の差 ($\Delta W_{90f} - \Delta W_2$) と90日強度 (q_{90}) の関係を示す。この図よりピート、粘性土の両試料土とも ($\Delta W_{90f} - \Delta W_2$) が増加するに伴い、 q_{90} が増加する傾向が認められる。これは混合処理土において、セメント水和反応以外のたとえば粘土鉱物と廃材の中に含まれているCaO成分などのボゾラン反応の減水により強度の発現が生じたものと考えられる。

以上、混合処理土の減水量と強度発現について検討を加えてきたが、定性的な関係はみられるものの、バラツキの幅が大きく、現状では、このような含水比変化から添加材の硬化反応の進行度合を定量的に推定することは困難であると思われる。そこで、含水比変化は養生が順調であるか否かの判断指標として現状では用いることが妥当であると考えられる。

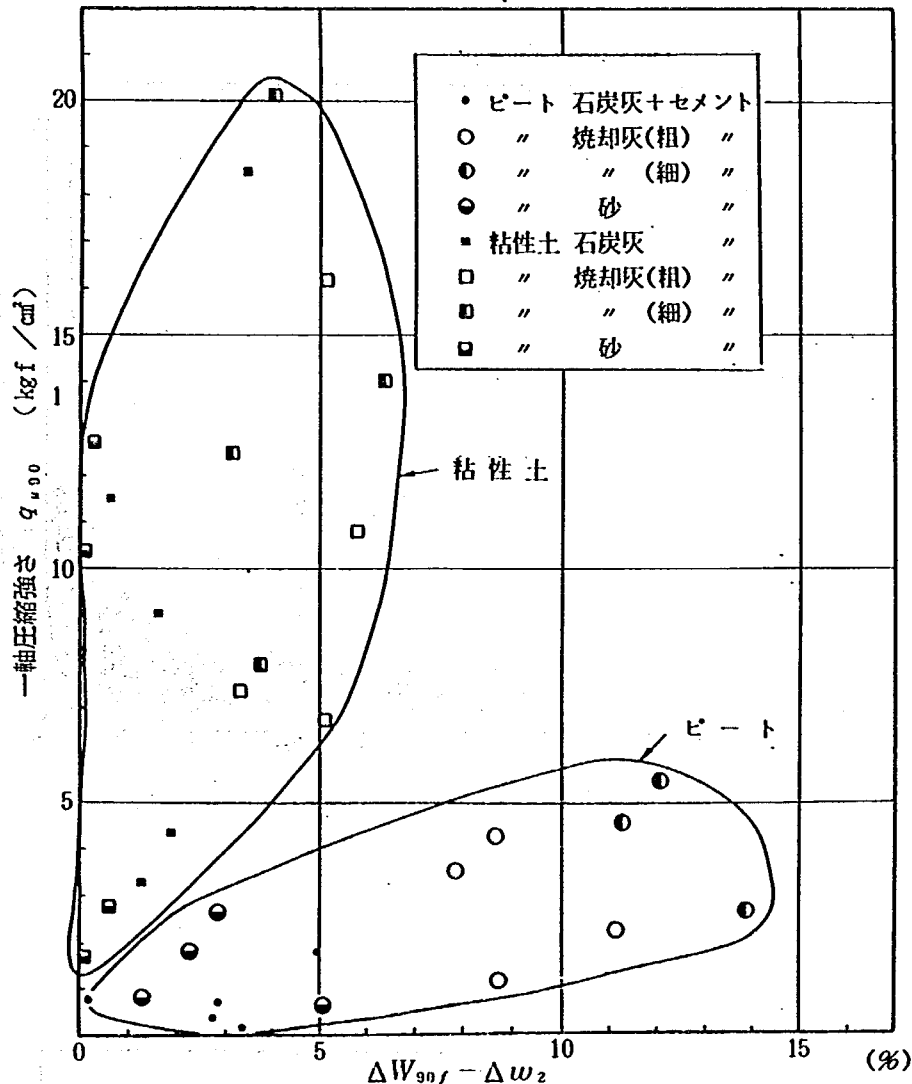


図-2.61 $(W_{90f} - \Delta W_2)$ と q_u の関係

4) 混合処理土の力学的特性

(a) 破壊ひずみ (ϵ_f) と一軸圧縮強さ (q_u) の関係

図-2.62, 図-2.63には各種添加材をPEAT, 粘性土にそれぞれ配合した条件における混合処理土の破壊ひずみ (ϵ_f) と一軸圧縮強さ (q_u) を示す。なおこの図において一部配合試験Ⅰの結果も付記してある。この図よりPEATの場合には、「石炭灰+セメント」, 「石炭灰+セメント+排脱石膏」および「砂+セメント」などの配合と比較して「焼却灰+セメント」の配合では破壊ひずみ (ϵ_f) がやや大きくなる傾向にあるのがわかる。これは焼却灰の見掛け比重が小さくPEATに混合したときには混合処理土の空隙部がより大きくなり、圧縮時のひずみを吸収する部分が多くなるためと考えられる。一方粘性土の場合には、従来のデータの範囲と比較しても、おおむね同じ範囲に入るようである。このように焼却灰を混合した場合のPEAT, 粘性土において異なる結果については、両試料土の間隙比の違いによるものと考えられる。

(b) 一軸圧縮強さ (q_u) と変形係数 (E_{50}) の関係

図-2.64, 図-2.65には、それぞれPEAT, 粘性土の改良土の q_u と E_{50} の関係を示す。これらの

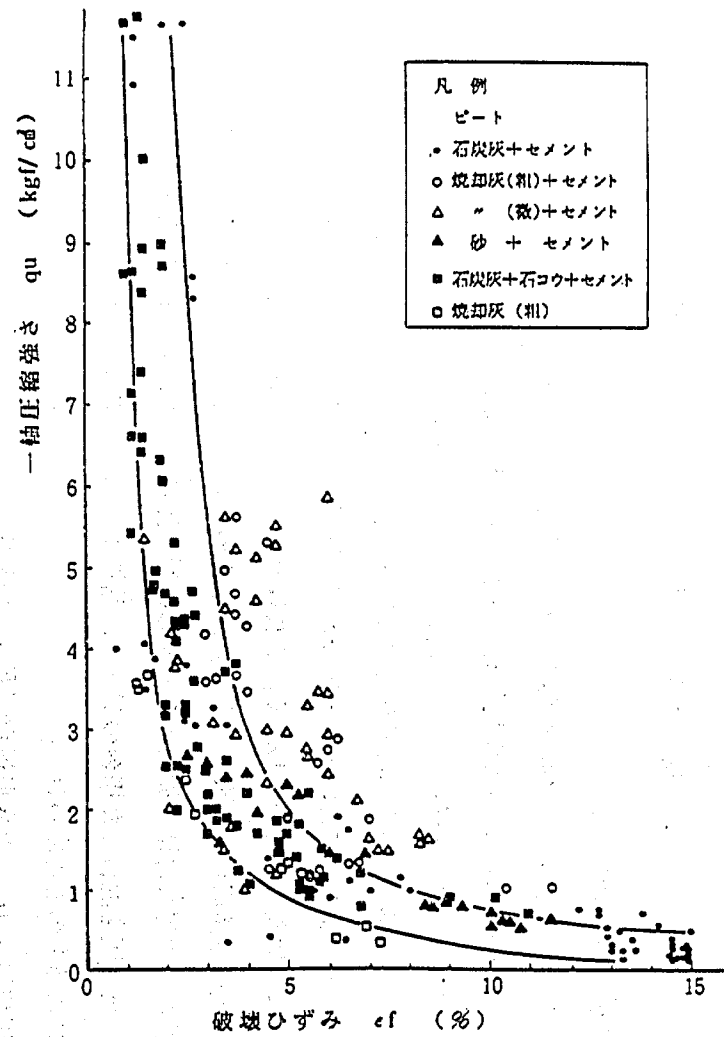


図-2.62 ϵ_f と q_u の関係(ビート)

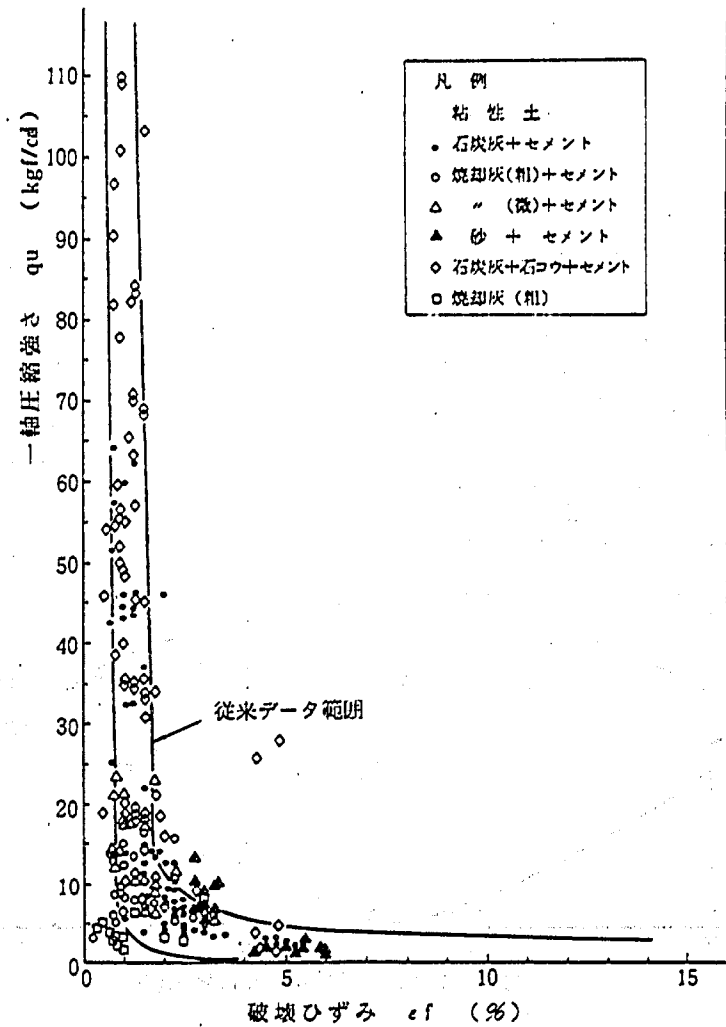


図-2.63 ϵ_f と q_u の関係(粘性土)

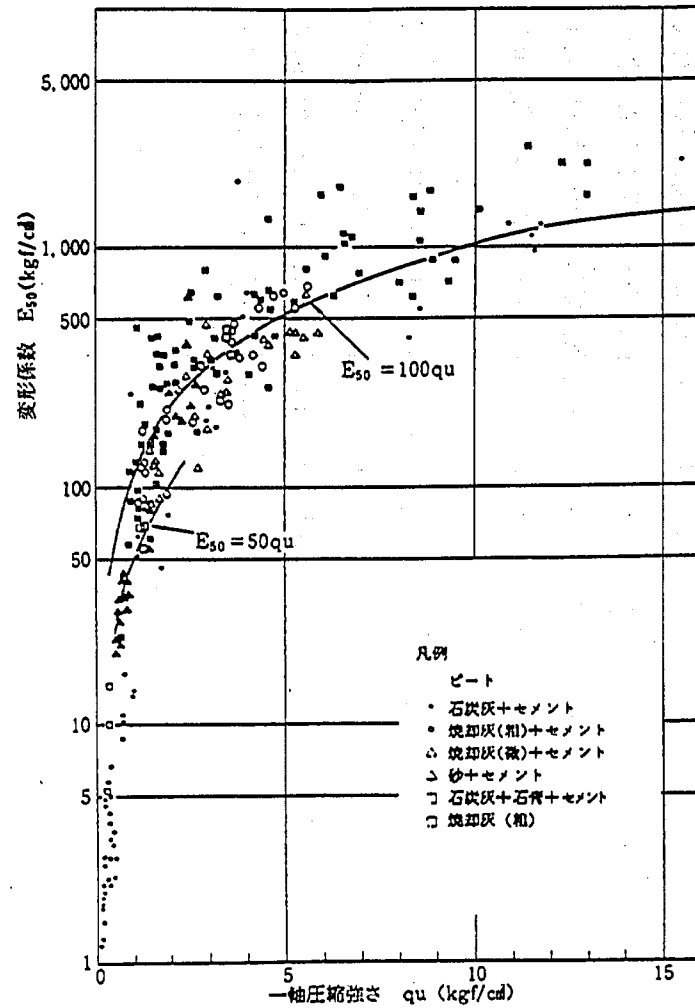


図-2.64 q_u と E_{s0} の関係(ピート)

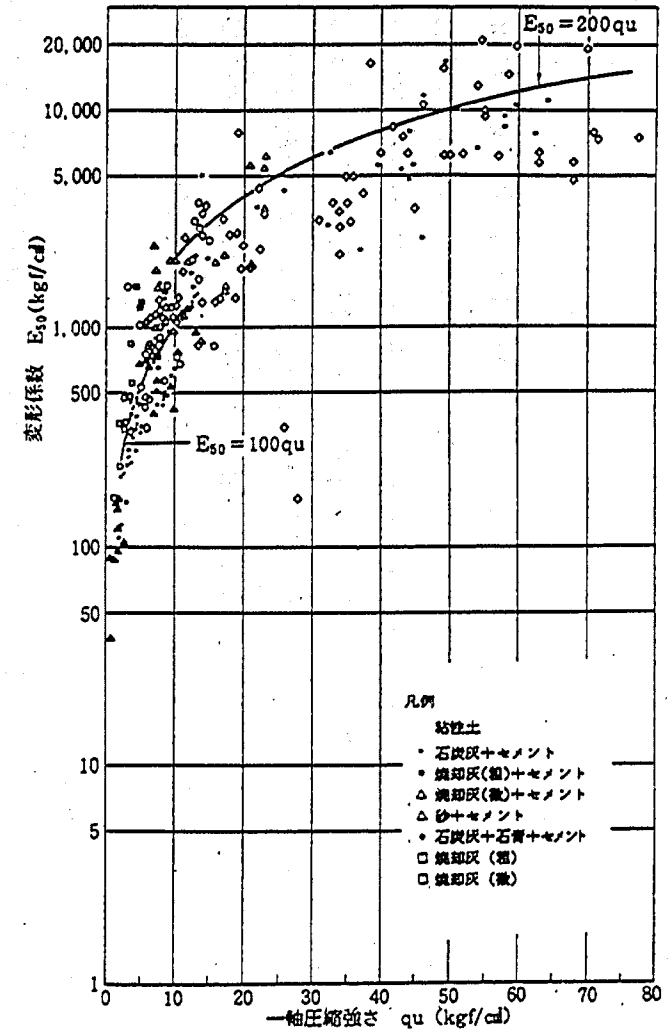


図-2.65 q_u と E_{s0} の関係(粘性土)

図より、 q_u が 2 kgf/cm^2 程度以下の範囲においては、 $E_{s0} = 50q_u$ 、また q_u が 2 kgf/cm^2 から 10 kgf/cm^2 の範囲では $E_{s0} = 100q_u$ 、さらにそれ以上の強度では $E_{s0} = 200q_u$ 関係がある。以上のことは、従来データとおおむね一致する。

5) フォールコーン貫入試験

(a) フォールコーン貫入試験の目的と方法

フォールコーン貫入試験は、総プロの課題の一つである「高有機質土の適正処理技術の開発」の一環として改良効果の簡易判定手法として取上げられた手法である。本研究においても各種廃材の改良効果を判別する一つの手段として、上記研究成果を考慮しフォールコーン貫入試験を実施した。

本試験で用いたフォールコーン貫入試験装置は先端角 60° 、コーン質量 60 gr の真ちゅう製のコーンを有したものである。本試験では、前述した室内配合試験においてミキシングした配合処理土をアルミ製の容器に詰め、密封した後 $20\pm 3^\circ\text{C}$ の恒温室にて養生させ供試体を作製した。また混合処理土の材令を1日、3日、7日と設定し、材令7日の結果については先に述べた同じ配合条件の一軸圧縮強度 q_u との比較を試みた。

(b) フォールコーン貫入試験結果

表-2.13には、ピートおよび粘性土におけるフォールコーン貫入試験結果を一覧にして示す。また、図-2.66には、ピートにおける各種配合条件での材令とフォールコーン貫入量(d_c)との関係を示す。なおこの図において、廃材の混合率を50%と一定にして示している。この図よりピートの場合各配合とも材令に伴ない貫入量(d_c)の値が減少しており、また各材料を比較すると焼却灰、砂、石炭灰の順で貫入量が大きくなっていることがわかる。貫入量大きいものほど一軸圧縮強度が小さいと単純に考えると前述した材令と q_u の結果と符号する。

また、図-2.67には粘性土における材令と d_c の関係を示す。なお、この図においては廃材の混合率を25%と一定にして示してある。この図より、図-2.66に示すピートの場合ほど各配合における顕著な差は認められず、特に石炭灰とセメントを組合せた配合条件では焼却灰(粗粒)とセメントを組合せたものとほぼ同等の結果になっており、粘性土においてもフォールコーン貫入試験結果と一軸圧縮試験結果との良い対応が認められる。

以上のようにフォールコーン貫入試験結果と一軸圧縮試験結果とは比較的良い対応があると考えられる。そこで図-2.68は、フォールコーン貫入量(d_c)と材令7日における一軸圧縮強度(q_u)の関係を両対数表示で示したものである。この図よりピート、粘性土とも d_c と q_u の間には比較的良好な相関が認められる。なお同図において d_c 値が小さくなる(これに対して q_u 値が大きくなる)に従って回帰直線の傾きが小さくなっていくことがうかがえる。

表-2.13 フォールコーン貫入試験結果

添加材 の 組合せ	ビ　　ト										粘　　性　　上													
	添加材混合率(%)					材　　令					材令7日の 一軸圧縮数 q_{u7} (kgf/cm ²)	添加材混合率(%)					材　　令					材令7日の 一軸圧縮数 q_{u7} (kgf/cm ²)		
	石炭 灰	焼却(粗 灰)	焼却(細 灰)	砂	セメ ント	1　　日		3　　日		7　　日		石炭 灰	焼却(粗 灰)	焼却(細 灰)	砂	セメ ント	1　　日		3　　日		7　　日			
d_c ($\sqrt{100mm}$)	w (%)	d_c ($\sqrt{100mm}$)	w (%)	d_c ($\sqrt{100mm}$)	w (%)	d_c ($\sqrt{100mm}$)	w (%)																	
焼却灰 (粗粒)	50					—	168.0	135.6	113.0	130.8	0.32													
	70					—	43.0	100.9	23.0	100.5	1.33													
	100					—	45.0	72.2	26.0	70.4	3.48													
石炭灰 + セメント	50					520.2	114.3	449.4	114.6	324.8	112.3	0.21	25				5	75.7	40.5	40.2	23.7	14.4	40.3	2.30
	75				10	376.9	86.7	290.8	84.6	192.0	81.5	0.12	50				5	45.4	32.2	20.7	30.6	6.0	31.0	3.50
	100					251.0	68.5	192.5	67.0	130.7	65.3	0.38	75					28.5	26.1	13.0	25.0	1.3	24.6	6.84
	50					426.3	120.8	317.8	101.0	200.0	96.4	0.17	25				10	45.5	39.2	19.6	35.9	4.9	37.8	6.84
	75				20	331.7	77.7	249.8	76.8	165.6	74.4	0.28	50				10	34.0	29.9	14.3	27.9	1.6	30.1	7.71
	100					254.3	62.3	181.3	61.7	90.4	58.4	0.52	75					12.4	25.2	11.8	23.7	4.6	23.8	8.50
焼却灰 (粗粒) + セメント	50				10	94.0	—	63.5	112.1	52.8	112.2	1.25		25			5	30.3	—	28.9	41.3	13.4	40.7	5.53
	75					30.6	—	35.9	86.1	24.9	82.0	3.70		50			5	38.9	—	33.3	30.9	18.8	29.7	9.01
	50				20	62.0	—	55.1	92.5	41.0	92.0	1.91		25			10	32.5	—	19.8	36.4	13.2	35.3	9.89
	75					31.7	—	24.4	73.8	17.1	73.3	4.83		50			10	27.4	—	25.2	28.4	4.1	26.7	13.64
焼却灰 (細粒) + セメント			50		10	64.9	—	56.4	101.7	38.9	101.6	1.56			25		5	40.7	41.2	23.2	40.4	5.4	37.3	7.01
			75			41.2	—	34.6	73.6	19.7	76.5	3.24			50		5	20.0	30.9	18.8	28.9	3.8	26.2	18.06
			50		20	83.2	—	58.9	96.9	25.2	91.9	2.40			25		10	29.6	38.4	14.2	37.1	4.9	36.1	6.86
			75			38.9	—	20.9	68.7	18.8	66.7	5.22			50		10	37.0	31.0	13.3	28.7	4.6	26.8	17.48
砂 + セメント				50	10	395.5	119.1	282.9	112.9	163.7	110.4	0.54			25		5	100.0	42.6	75.2	40.7	37.2	41.5	1.17
				75		333.8	86.0	178.8	85.4	112.9	81.1	0.75			50		5	65.9	32.9	43.9	32.8	17.3	33.0	1.92
				50	20	281.6	101.5	150.0	94.9	84.2	93.7	1.45			25		10	45.5	39.4	27.7	36.6	3.1	38.1	5.56
				75		222.4	79.4	95.9	77.0	73.3	76.7	1.50			50		10	33.8	30.6	17.9	29.6	10.0	30.6	6.22

注) d_c : コーンの平均貫入量, w : 平均含水比

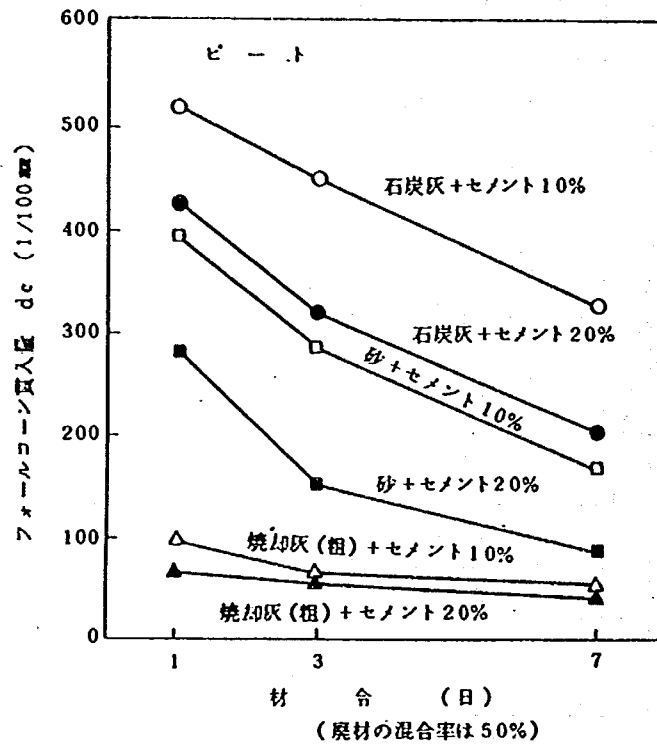


図-2.66 材令と d_c の関係 (ピート)

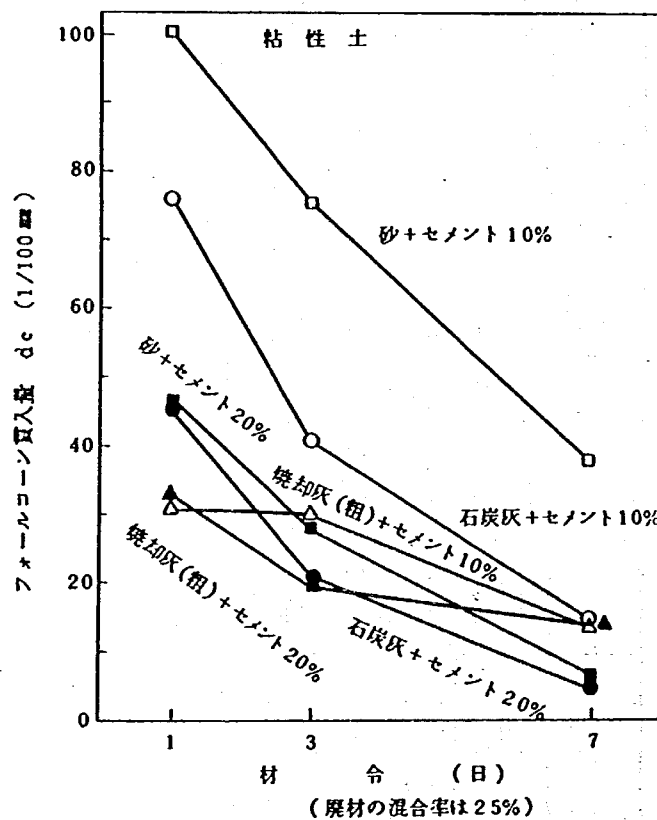


図-2.67 材令と d_c の関係 (粘性土)

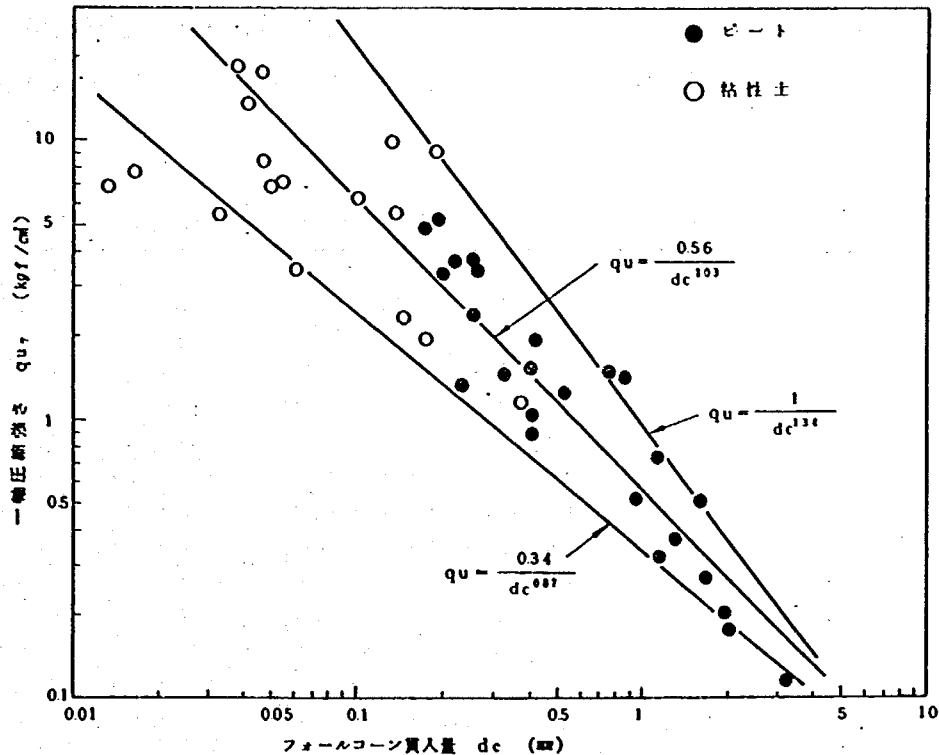


図-2.68 d_c と q_{u1} の関係

6) 配合試験結果Ⅱのまとめ

配合試験Ⅱの結果を列挙すると次のようになる。

- ① 石灰系焼却灰は単体でピート，または粘性土と混合しても混合後の含水比低下による強度増加が大きく，さらにセメントと組合わせることにより比較的高い強度が発現が認められた。
- ② 焼却灰をピートに混合した場合，初期材令における強度の発現が大きい，長期的な自硬性による強度増加は本試験では認められなかった。しかし粘性土の場合，若干ではあるが自硬性による強度増加が認められた。
- ③ 焼却灰混合処理土の力学的特性は他の添加材に比べて，破壊ひずみが若干大きくなる傾向がみられ，セメント固化処理土などと比較して原地盤の力学的特性に近い性質を示し，低強度の地盤改良材料として適用性が大きい。
- ④ 石炭灰をピートに混合しても特に強度発現性が良好であるという結論は得られなかったが，添加混合することにより，土の物理的性質（単位体積重量，含水比，コンシステンシー）が改良される。
- ⑤ 石炭灰をセメントと組合わせて粘性土に混合した場合には，比較的良好な改良効果が得られ，その効果は，焼却灰の場合に近い結果が認められた。さらに材令に伴う強度増加も認められた。
- ⑥ フォールコーン貫入試験は，簡単に初期の材令における改良土の固結性状を把握するのに有効な手段であり，更にピート，粘性土などの土質条件にかかわらずコーン貫入量と一軸圧縮強さの間には，比較的良好な相関が認められた。

(3) 配合試験Ⅲの結果（下水汚泥焼却灰、コンクリート粉を対象）

表-2.14および表-2.15には、焼却灰Ⅰ、コンクリート粉による室内配合試験結果（配合試験Ⅲの結果）を一覧にして示す。以下においては、焼却灰およびコンクリート粉による改良結果を述べることにする。

表-2.14 焼却灰を用いた室内配合試験結果（配合試験Ⅲ）

試料土	添加材の組合	添加材混合率(%)		初期含水比(%)	適合直後w(%)	7日養生					28日養生					50日養生				
		焼	セメ			w %	ρ_i g/cm ³	q_u kgf/cm ²	e_f %	E_{50} kgf/cm ²	w %	ρ_i g/cm ³	q_u kgf/cm ²	e_f %	E_{50} kgf/cm ²	w %	ρ_i g/cm ³	q_u kgf/cm ²	e_f %	E_{50} kgf/cm ²
		焼	セメ			w %	ρ_i g/cm ³	q_u kgf/cm ²	e_f %	E_{50} kgf/cm ²	w %	ρ_i g/cm ³	q_u kgf/cm ²	e_f %	E_{50} kgf/cm ²	w %	ρ_i g/cm ³	q_u kgf/cm ²	e_f %	E_{50} kgf/cm ²
粘性土Ⅰ	焼却灰単体	25	—	87.7	57.7	56.9	1.62	0.55	3.1	76.6	55.6	1.61	2.54	1.3	567.4	53.9	1.53	2.94	1.1	417.9
		50	—	89.3	42.5	41.4	1.49	2.40	0.4	2332.0	40.3	1.51	5.52	0.5	1661.0	38.6	1.50	6.18	0.6	1568.0
		75	—	89.4	34.1	32.9	1.29	2.08	0.4	1138.0	31.6	1.27	3.43	0.4	1143.0	30.0	1.28	4.85	0.6	1199.0
	焼却灰+セメント	10	10	85.1	59.5	54.1	1.59	22.52	0.7	4655.0	50.3	1.59	33.88	0.7	6775.0	52.6	1.60	39.12	0.7	6883.0
		25	10	89.4	50.3	45.7	1.60	22.30	1.4	3491.0	44.7	1.56	30.07	0.6	5943.0	43.8	1.57	35.20	0.5	6537.0
		25	20	89.1	44.9	39.5	1.65	33.05	0.5	7671.0	37.2	1.69	57.69	0.6	11076.0	36.6	1.69	80.92	0.7	13932.0
		50	10	87.7	38.7	35.1	1.52	9.71	1.1	1972.0	34.2	1.52	11.76	0.5	2874.0	32.8	1.52	15.72	0.6	4178.0
		50	20	87.1	35.6	29.5	1.49	15.50	0.8	4770.0	27.2	1.52	24.9	0.5	8021.0	27.3	1.48	30.89	0.4	7957.0
		75	10	88.6	31.2	27.9	1.31	6.25	0.6	1598.0	26.9	1.28	7.11	0.4	3736.0	25.0	1.28	6.25	0.4	1790.0
		75	20	87.7	29.1	24.5	1.27	7.64	0.9	1498.0	23.3	1.38	17.31	0.6	3357.0	21.6	1.31	16.16	0.5	4396.0
	セメント単体	—	10	86.0	69.4	65.5	1.53	11.70	0.7	2792.0	63.4	1.55	23.09	0.7	4694.0	63.4	1.54	28.50	0.6	6629.0
		—	20	86.6	60.6	54.4	1.61	28.70	0.9	4712.0	51.7	1.60	52.9	0.6	10071.0	51.4	1.59	53.50	0.6	10303.0

表-2.15 コンクリート粉を用いた室内配合試験結果（配合試験Ⅲ）

試料土	添加材の組合	添加材混合率(%)		初期含水比(%)	適合直後w(%)	7日養生					28日養生					50日養生				
		焼	セメ			w %	ρ_i g/cm ³	q_u kgf/cm ²	e_f %	E_{50} kgf/cm ²	w %	ρ_i g/cm ³	q_u kgf/cm ²	e_f %	E_{50} kgf/cm ²	w %	ρ_i g/cm ³	q_u kgf/cm ²	e_f %	E_{50} kgf/cm ²
		焼	セメ			w %	ρ_i g/cm ³	q_u kgf/cm ²	e_f %	E_{50} kgf/cm ²	w %	ρ_i g/cm ³	q_u kgf/cm ²	e_f %	E_{50} kgf/cm ²	w %	ρ_i g/cm ³	q_u kgf/cm ²	e_f %	E_{50} kgf/cm ²
粘性土	コンクリート粉単体	25	5	58.6	42.3	41.3	1.74	0.40	3.9	24.4	39.8	1.73	0.57	4.21	32.6	40.4	1.72	0.96	4.4	84.7
		25	10	59.4	38.5	36.9	1.73	1.40	2.0	121.5	32.6	1.71	2.09	1.6	262.8	33.4	1.67	3.71	0.8	834.4
		50	5	60.0	34.2	32.8	1.73	1.55	4.0	78.9	35.5	1.76	6.02	1.3	931.3	35.4	1.75	11.5	0.9	2900.0
		50	10	59.1	32.4	30.6	1.73	3.72	1.6	363.3	29.9	1.67	7.33	0.7	—	31.1	1.61	11.3	0.6	3259.8
ビート	コンクリート粉+セメント	50	10	657.5	123.8	115.5	1.35	0.20	12.8	3.19	114.5	1.37	0.28	10.8	5.92	114.4	1.38	0.32	9.5	10.2
		50	20	685.6	109.9	99.9	1.39	1.03	6.3	69.0	95.5	1.40	1.62	3.3	—	94.6	1.37	1.86	1.0	291.6
		75	10	713.4	96.7	90.0	1.42	0.23	10.0	4.52	90.4	1.45	0.31	10.3	6.89	88.2	1.47	0.41	10.8	10.5
		75	20	648.7	85.2	78.9	1.45	1.32	3.7	128.8	76.3	1.42	2.00	1.2	—	75.9	1.40	3.77	0.7	836.4

1) 下水汚泥焼却灰混合処理土の強度発現（焼却灰Ⅰ）

(a) 焼却灰混合率と一軸圧縮強さの関係

図-2.69には、室内配合試験結果における焼却灰混合率と28日材令における一軸圧縮強さの関係を示したものである。これらの図より必ずしも焼却灰混合率の増加に伴い一軸圧縮強さが単調に増加するとは言えず、ある混合率において一軸圧縮強さの最大値を示す傾向が認められる。

例えば、焼却灰とセメントを組合わせた配合においては焼却灰混合率10%付近に、また、焼却灰単体のみを添加した配合においては50%付近に一軸圧縮強さの最大値が認められる。このような焼却灰混合率と一軸圧縮強さの関係は、同図に一例を併記したように配合試験Ⅱにおいても同様の結果が得られている。

すなわち、配合試験Ⅱの結果も加味して考えると、焼却灰混合率を高めるに伴い試料土の含水比が低下し、さらに大量に添加するとパサパサの状態になり、ひいては供試体が自立しなくなる。このような状態の供試体を拘束圧のない一軸圧縮試験を行い q_u 値で評価するとその改良効果が減じて評価されることになる。このような現象は生石灰を含水比100%未満の粘性土に大量に添加した場合にも見受けられる。なお、このような考えは、後述する三軸圧縮試験結果においてはこのような現象は認められず、拘束圧力が作用している状態であれば焼却灰混合率を高めるに伴い単調に強度が増加していることから理解できよう。

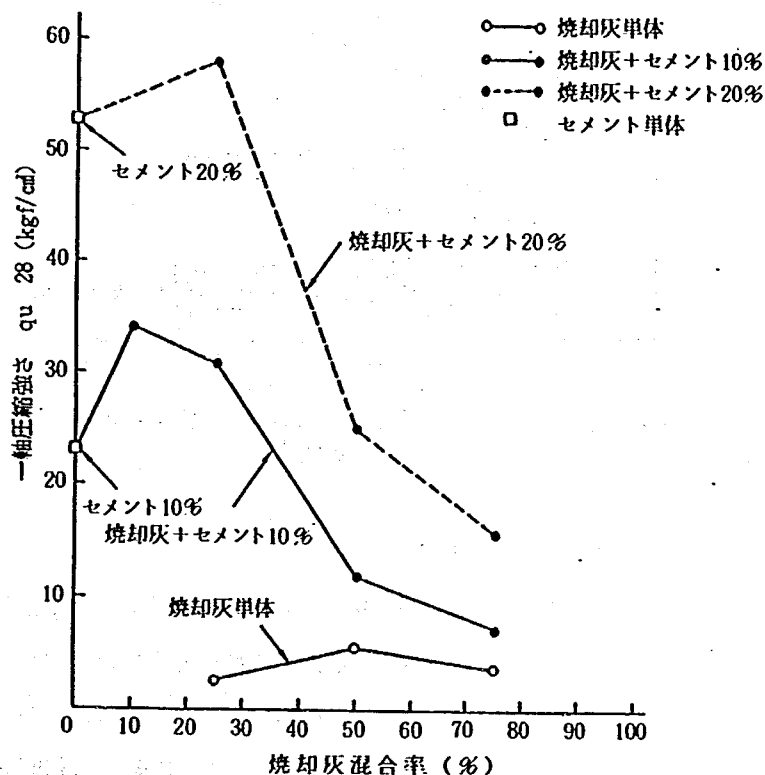


図-2.69 焼却灰混合率と q_u の関係 (材令28日)

(b) 養生に伴う一軸圧縮強さの関係

図-2.70は、焼却灰混合処理土の養生に伴う一軸圧縮強さの変化を示したものである。この図により、焼却灰単体であっても混合率50%において50日養生で 6kgf/cm^2 程度の強度が得られており、さらに7日養生での強度と比較しても若干ではあるが強度増加が認められる。すなわち、焼却灰Ⅰ（石灰系）の場合、配合試験Ⅱに用いた焼却灰（焼却灰Ⅱ；石灰系）と同様にCaO成分の影響による自硬性があると判断される。さらに、同図においてセメント添加による強度増加が著しく、例えば、焼却灰25%、セメント20%配合の場合50日強度で 81kgf/cm^2 もの値が得られている。

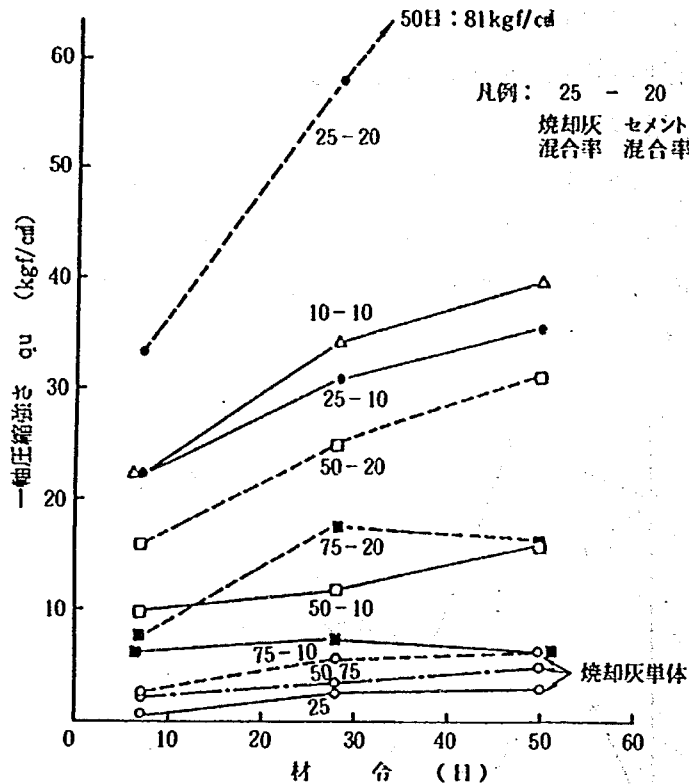


図-2.70 焼却灰混合処理土の材令（養生日数）と q_u の関係（粘性土）

2) コンクリート粉混合処理土の強度発現

図-2.71には、コンクリート粉（微粉）をピートに混合攪拌した場合の材令と一軸圧縮強さ関係を示す。この図より、コンクリート粉を試料土の湿潤重量に対して50%および75%混合し、かつセメントを10%添加してもさほど一軸圧縮強さの増加は認められない。しかしながら、セメント20%添加した場合は、材令に伴う強度が明確に認められる。今回の試験結果から判断すると、セメントの固化作用の影響が大きく、また、コンクリート粉はピートに対しては材料自体の自硬性はほとんど認められず、コンクリート粉を用いる場合はセメントなどの固化材との組合わせが必要であると言える。なお、同図には、配合試験Ⅱで実施した「砂+セメント」の配合における材令と一軸圧縮強さの関係を併記しており、今回の結果と比較すると似た傾向が認められる。すなわち、この比較結果からもコンクリート粉は、自硬性がなく、ピート質土に用いる場合には、増量材として考える方が妥当であろう。

次に、図-2.72には、コンクリート粉（微粉）を粘性土に混合攪拌した場合の材令と一軸圧縮強さの関係を示す。この場合、先に述べたピートの場合と異なり、各配合において長期的な強度増加が認められる。この強度増加は、コンクリート粉の自硬性の影響か、セメントの固化作用の影響から判別できないが、コンクリート粉25%と50%の結果を比較して50%混合の方が強度発現が大きいことからコンクリート粉が含水比低下に有効に作用し、これがセメントの強度発現に結びついているということは言えそうである。なお、このような傾向は、配合試験Ⅱの「砂+セメント」の場合でも認められている。

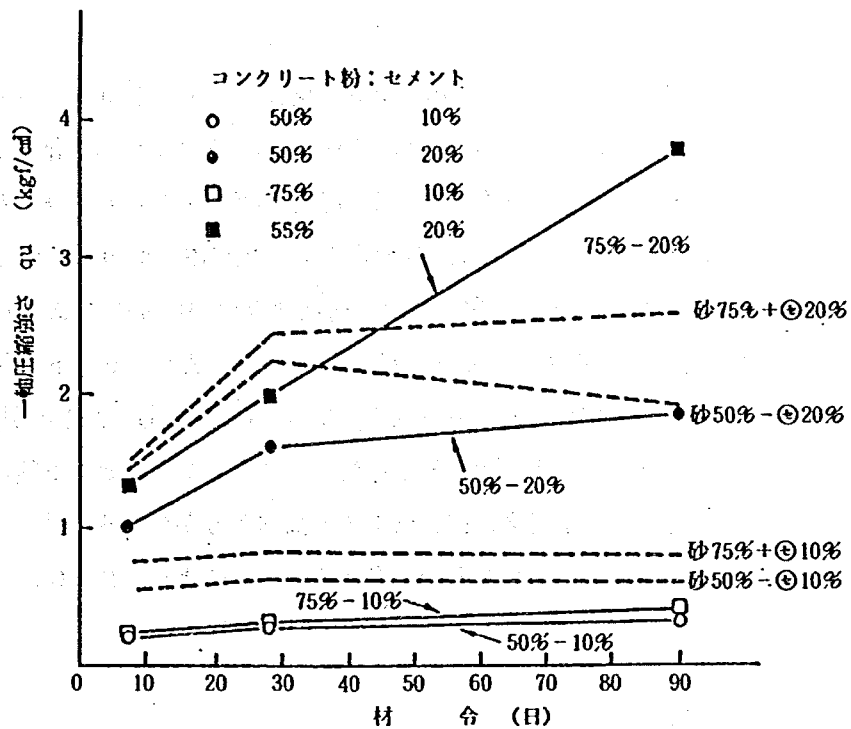


図-2.71 コンクリート粉混合処理土の材令と q_u の関係(PEAT)

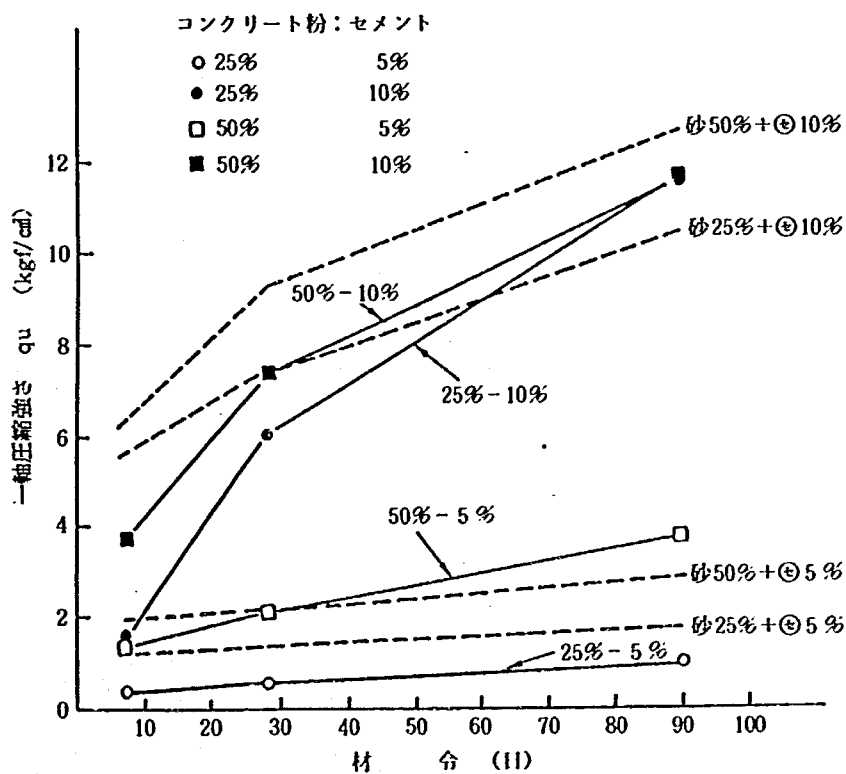


図-2.72 コンクリート粉混合処理土の材令と q_u の関係(粘性土)

3) 混合処理土の含水比の変化

(a) 混合処理土の含水比の経時変化

図-2.73には、「焼却灰単体」、「焼却灰+セメント」及び「セメント単体」の配合で粘性土Ⅰに混合処理した場合の混合前、混合直前、7日、28日、50日における含水比の変化を示す。

また、「コンクリート粉+セメント」の配合でピートおよび粘性土Ⅱに混合処理した場合の含水比の経時変化を図-2.74に示す。これらの図より、各配合とも添加材混合直後において含水比の低下割合が大きく、例えば「焼却灰単体」75%の配合では、初期含水比が約90%であったものが混合直後では34%と粘性土Ⅰの塑性限界付近まで含水比が低下している。また、ピートに対する「コンクリート粉+セメント」の配合においては、初期含水比が650%~710%であったものが85%~120%まで大きく低下している。一方、材令に伴う含水比較の経時変化については、ピート粘性土Ⅰおよび粘性土Ⅱに対する配合とも徐々ではあるが材令に伴い低下する傾向がうかがえる。材令に伴う含水比の低下割合は、一軸圧縮強さの経時変化に対するものと考えられ、このような結果は、配合試験Ⅰ、Ⅱにおいても得られている。

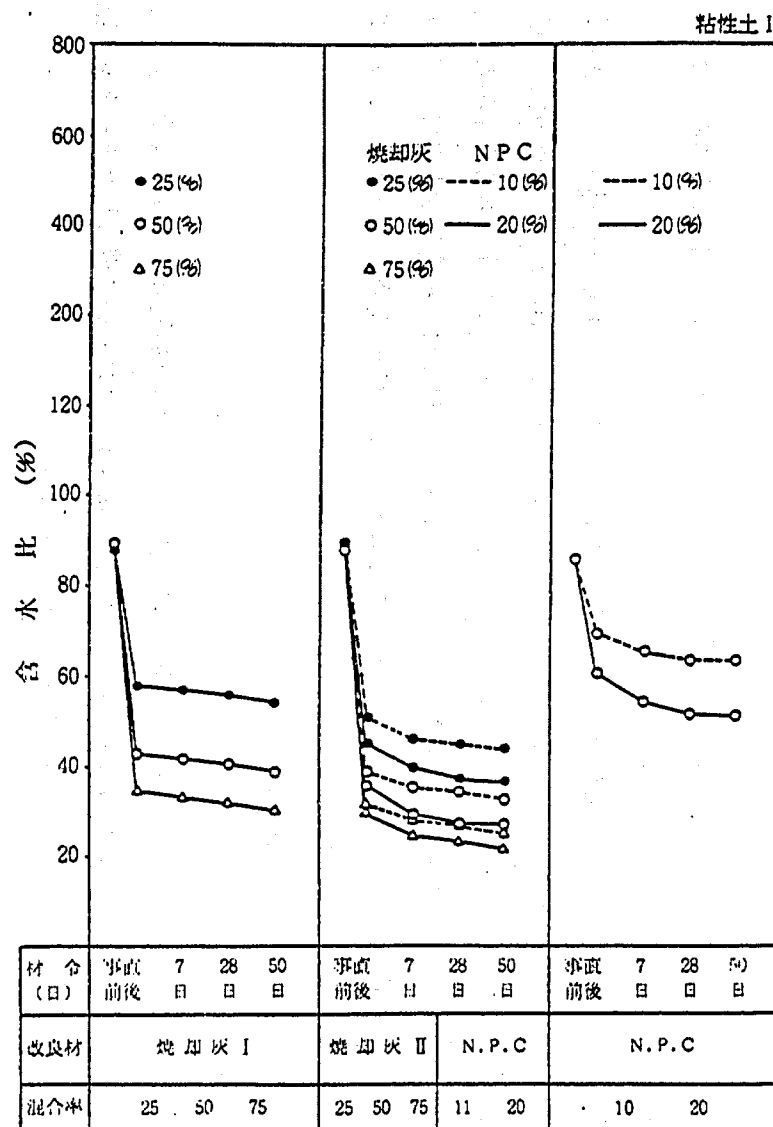


図-2.73 焼却灰混合処理土の含水比経時変化
(粘性土 I, 焼却灰 I)

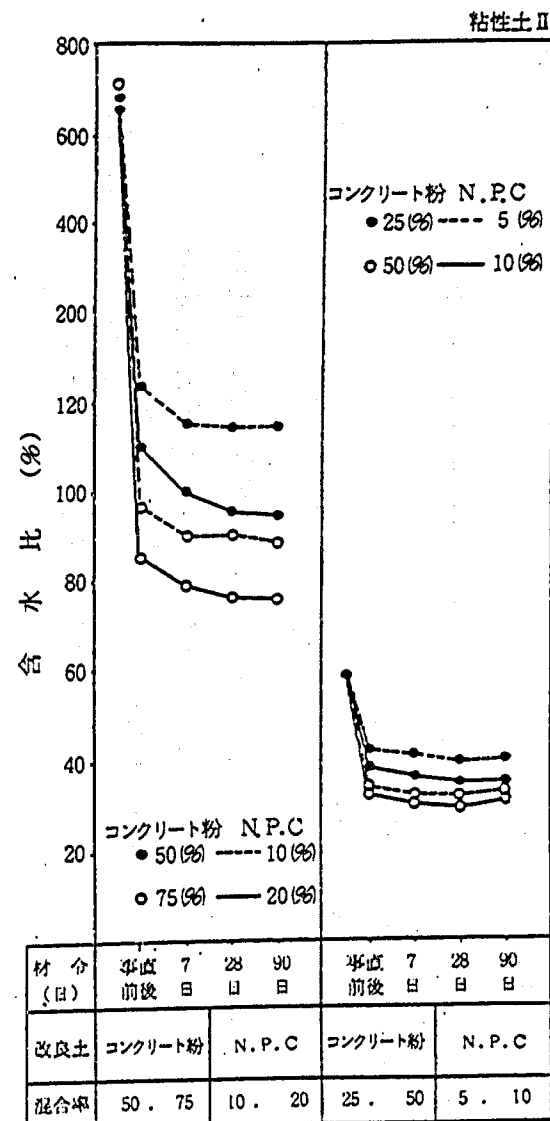


図-2.74 コンクリート粉混合処理土の含水比
経時変化 (ビート, 粘性土 II)

(b) 含水比低下に関する試算

図-2.75および図-2.76には、それぞれ含水比の変化量（以下、減水量と称す）の計算値と混合直後および材令28日後の実測値とを比較した結果を粘性土（Ⅰ、Ⅱ）とピートに分けて示す。ここで計算値は「セメントの水和反応を考慮しない場合」と「セメントの水和反応を考慮した場合」とに分けて次式より算出した。なお、これらの図には、配合試験Ⅱで得られた試験結果も付記している。

(a) セメントの水和反応を考慮しない場合

$$\Delta W_1 = w_0 - \frac{w_0}{1 + (a_s + a_c) \times (w_0 + 1)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

(b) セメントの水和反応を考慮した場合

$$\Delta W_2 = w_0 - \frac{[V_0 - 0.24a(w_0 + 1)]}{1 + (a_s + 1.24a_c)(w_0 + 1)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 ΔW_1 ; セメント水和反応を考慮しない場合の含水比の変化量

ΔW_2 ; セメント水和反応を考慮した場合の含水比の変化量

w_0 ; 試料土の初期含水比

a_s ; 石炭灰、焼却灰、砂の混合ピート

a_c ; セメントの混合比

なお、混合比 = $\frac{\text{添加材重量}}{\text{土の湿潤重量}}$ である。

これらの図より、ほ配合試験Ⅱと同様の結果が得られており、セメントの水和反応を考慮した場合の計算値が概ね実測値に対応するものと考えられてる。

さらに、図-2.77には、材令90日（焼却灰に関しては、材令50日）における実測減水量（ ΔW_m ）とセメントの水和反応を考慮した場合の計算値（ ΔW_c ）の差（ $\Delta W_m - \Delta W_c$ ）と一軸圧縮強さの関係を配合試験Ⅱの結果も付記して示す。この図より、ピート、粘性土の両試料土ともこの差が大きくなるに伴い一軸圧縮強さが増加する傾向が認められ、すなわちこの結果は、混合処理土において、セメント水和反応以外の例えば、粘土鉱物と廃棄物中に含まれているCaO成分などのポズラン反応の減水により強度の発現が生じているものと考えられる。

4) 混合処理土の力学定数の相関

(a) 破壊ひずみ（ ϵ_f ）と一軸圧縮強さ q_s の相関

図-2.78および図-2.79には、各々ピートおよび粘性土に対する試験結果における破壊ひずみと一軸圧縮強さの関係を示す。これらの図においては、配合試験Ⅰ、Ⅱにおいて得られたデータも付記しているが、概ね今回の結果も同様の分布範囲にあると言える。

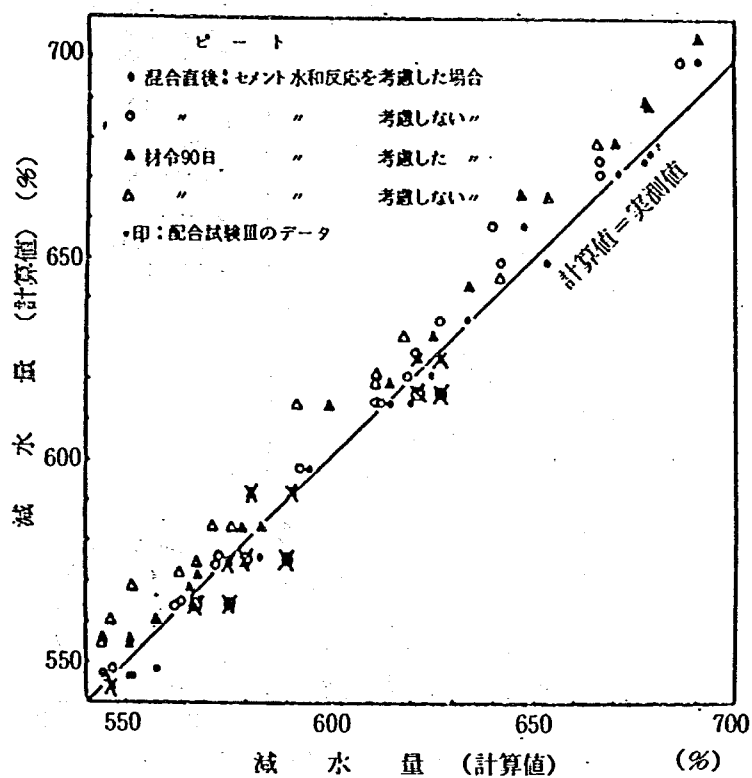


図-2.75 減水量の計算値と実測値の関係
(ビート)

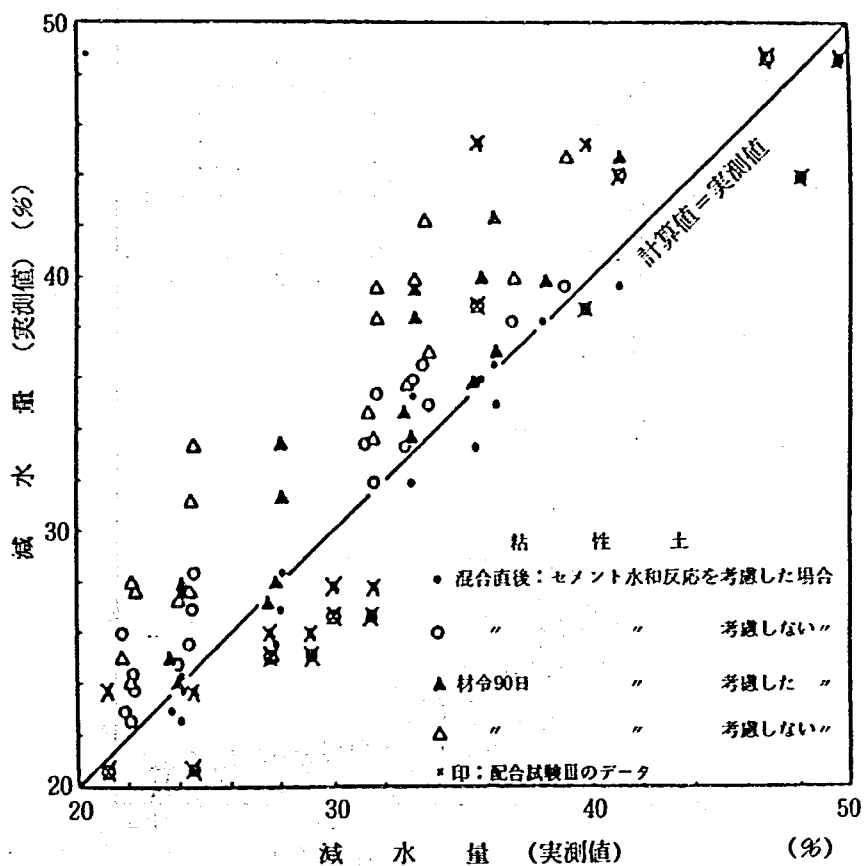
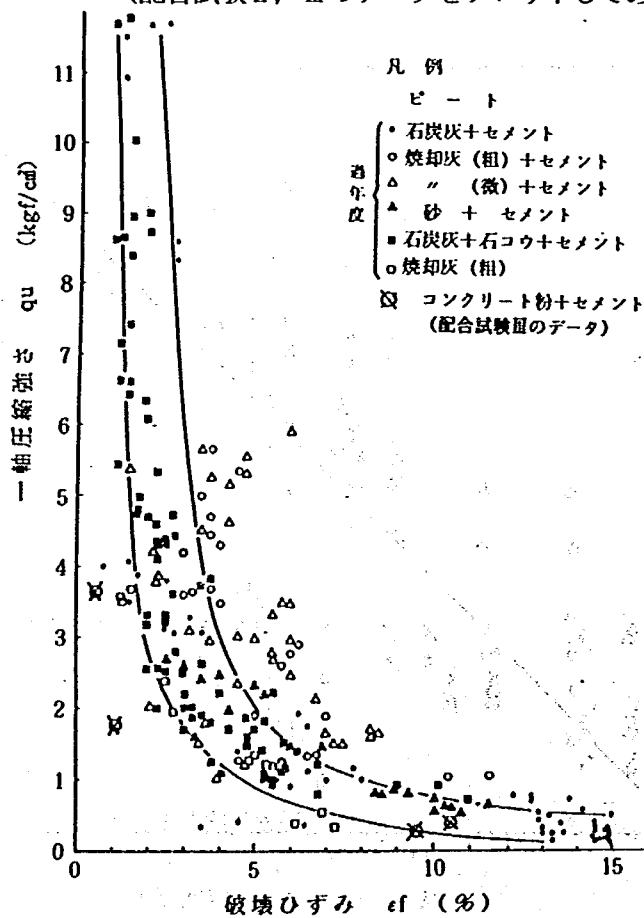
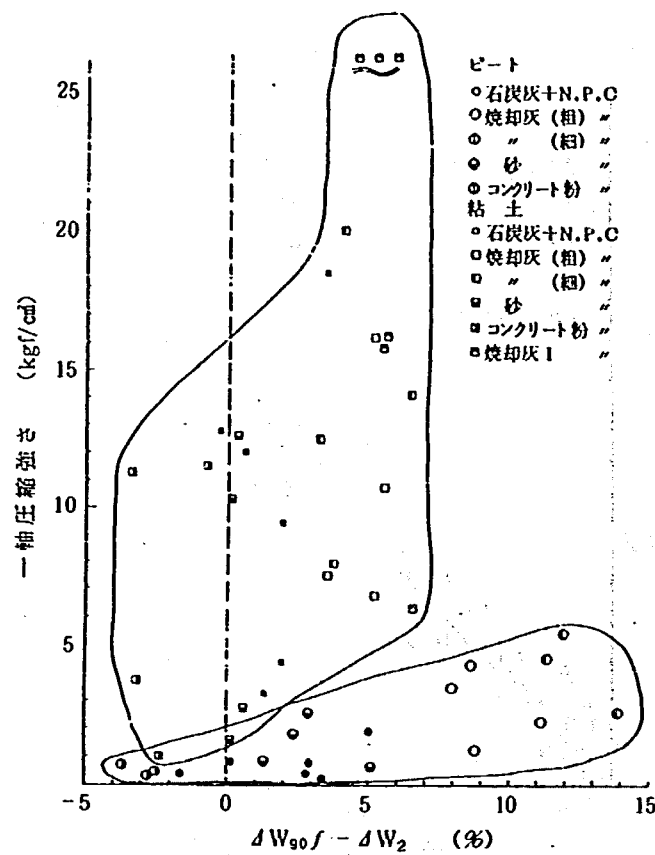


図-2.76 減水量の計算値と実測値の関係
(粘性土)



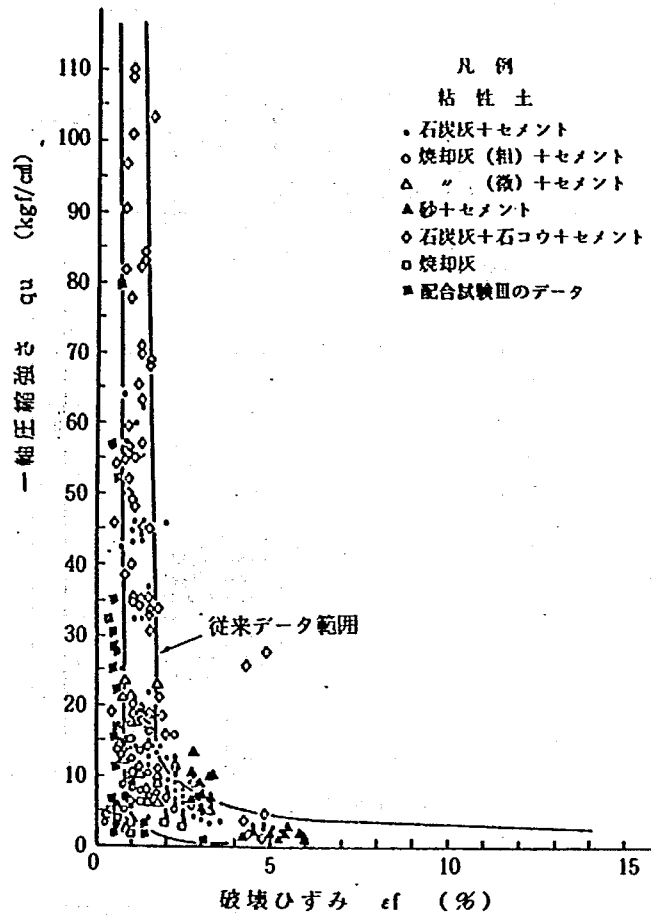


図-2.79 ϵ_f と q_u の関係 (粘性土)

(b) 弾性係数 (E_{s0}) と一軸圧縮強さ q_u の相関

図-2.80および図-2.81には、各々ピートおよび粘性土に対する試験結果における弾性係数(E_{s0})と一軸圧縮強さの関係を示す。これらの図においては、配合試験Ⅰ、Ⅱで得られたデータも付記しているが、破壊ひずみと一軸圧縮強さの関係と同様に概ね今回も結果も他の配合試験の相関とほぼ同様であると言える。

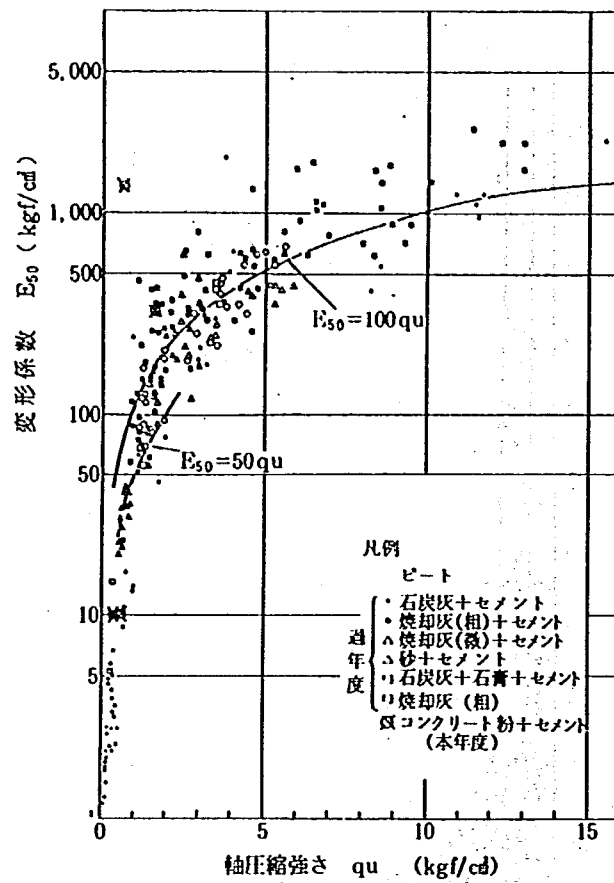


図-2.80 E_{50} と q_u の関係(ピート)

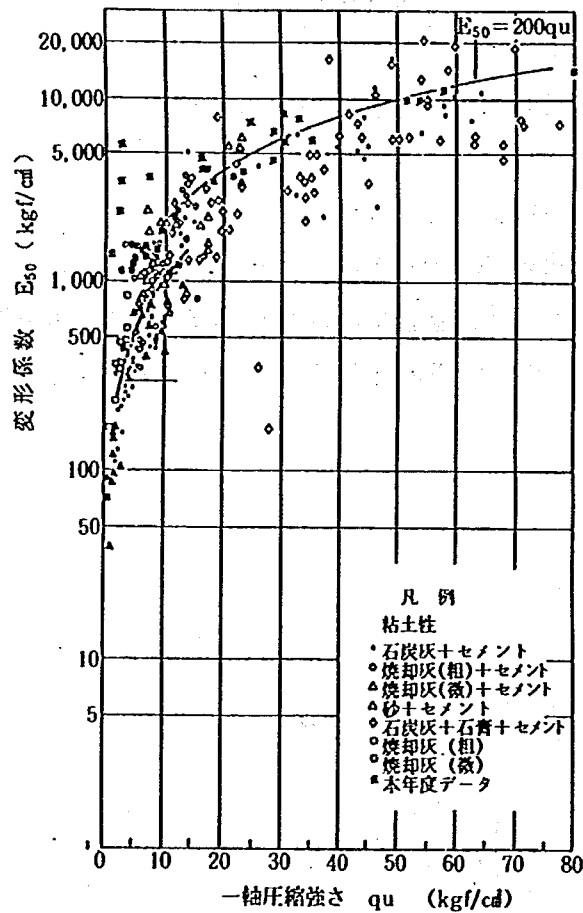


図-2.81 E_{50} と q_u の関係(粘性土)

5) 三軸圧縮 (UU) 試験における焼却灰混合処理の力学的特性

表-2.16には、焼却灰混合処理土(焼却灰; 焼却灰Ⅱ, 試料土; 粘性土Ⅱ)の三軸圧縮(UU)試験結果を一覧にして示す。以下に各々の要因関係について述べることにする。

(a) 下水汚泥焼却灰混合処理土の応力・ひずみ関係

図-2.82には、「焼却灰単体」を添加した混合処理土の各焼却灰混合率における軸差応力と圧縮ひずみの関係を示す。この図より混合処理土の応力～ひずみ関係において各条件とも拘束圧力による影響が表れており、拘束圧力が大きくなるに伴い一定のひずみに対して軸差応力が大きくなることがわかる。しかし、各条件とも応力～ひずみ曲線に明確なピークが認められず15%ひずみにおいて最大せん断強さが得られている。

表-2.16 締固めを伴わない混合処理土の三軸圧縮試験結果一覧表

養生 日数 (日)	混合率(%)		三 軸 圧 縮 試 験 (UU試験)								
	焼却灰	セメント	側 圧 σ_3 (kgf/cm ²)	軸差応力 $\sigma_1 - \sigma_3$ (kgf/cm ²)	平均主応力 σ_m (kgf/cm ²)	最大せん断応力 τ (kgf/cm ²)	含水比 W(%)	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	飽和度 S_r (%)	粘着力 C_u (kgf/cm ²)	内部摩擦角 ϕ_u (度)
7	30	0	0.5	1.602	1.034	0.801	38.1	1.273	52.9	0.38	21.9
			1.0	2.522	1.841	1.261	38.3	1.303	55.0		
			2.0	3.451	3.150	1.726	38.0	1.299	51.5		
		5	0.5	3.085	1.528	1.513	34.5	1.310	51.0	0.73	24.4
			1.0	3.492	2.161	1.746	35.0	1.312	54.6		
			2.0	5.131	3.710	2.566	31.4	1.313	51.1		
	50	0	0.5	2.070	1.190	1.035	30.2	1.163	39.9	0.37	27.9
			1.0	3.055	2.018	1.528	30.0	1.166	39.9		
			2.0	4.723	3.574	2.362	30.2	1.165	40.0		
		5	0.5	3.095	1.532	1.518	27.9	1.262	42.8	0.53	31.6
			1.0	3.921	2.307	1.961	28.1	1.239	42.9		
			2.0	6.345	4.115	3.173	28.0	1.260	42.8		
	75	0	0.5	3.223	1.574	1.612	23.5	1.140	32.4	0.59	31.8
			1.0	4.375	2.458	2.188	23.6	1.158	33.0		
			2.0	6.564	4.188	3.282	23.3	1.150	32.7		
		5	0.5	5.424	2.308	2.713	21.8	1.236	34.7	1.19	30.4
			1.0	5.849	2.950	2.925	21.9	1.217	34.0		
			2.0	8.381	4.794	4.191	22.0	1.251	35.6		

注) ここで混合率とは試料土の湿潤重量に対する割合をさす。

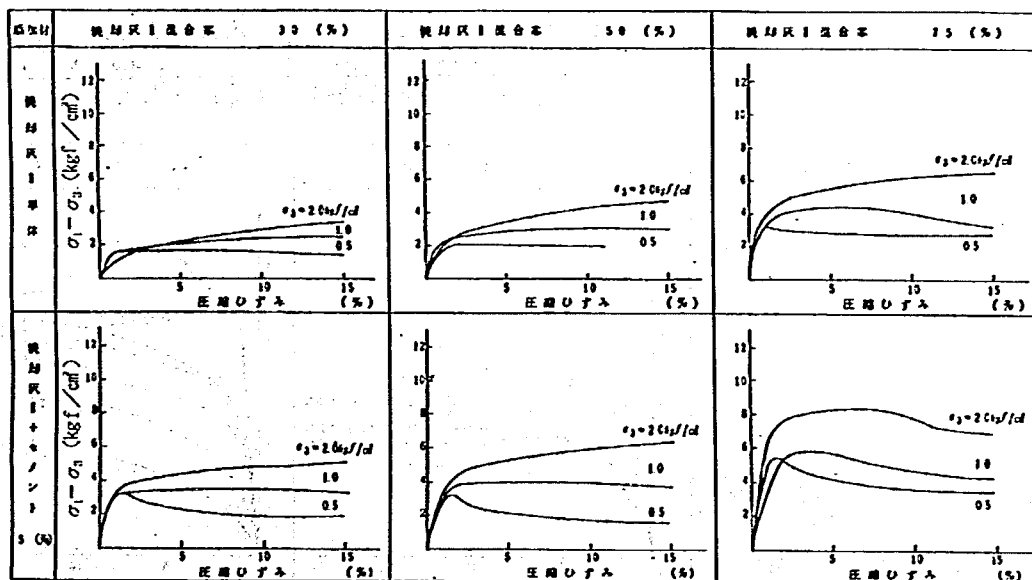


図-2.82 三軸圧縮 (UU) 試験における応力～ひずみ曲線一覧図(1) (焼却灰混合別)

また同図には、「焼却灰+セメント」の条件での各配合における軸差応力と圧縮ひずみの関係を併記して示している。この図より、上記の「焼却灰単体」の場合と同様に各条件とも拘束圧力の影響が表れている。しかしながら、「焼却灰単体」の場合と異なり応力～ひずみ関係においてピークが認められる。例えば、「焼却灰 75%+セメント 5%」の配合においては、1%～3%のひずみで最大値を示しているのがわかる。これらの結果は、セメントを添加することによる強度の増加に伴い小さいひずみ状態で破壊するためであり、先に述べた一軸圧縮試験結果における一軸圧縮強さ (q_c) と破壊ひずみの関係と対応するものと考えられる。なお、三軸圧縮試験結果においては、拘束圧力の影響により一軸圧縮試験結果と異なり破壊後の急激な強度減少が認められない。

また、上記の結果を拘束圧力別に整理すると図-2.83のようになり、さらに、拘束圧力別に「焼却灰単体」と「焼却灰+セメント」を比較すると図-2.84のようになる。図-2.84において、各拘束圧力とも配合による影響が明確に表れており、概ね焼却灰混合率を増加することによる強度増加が認められるとともに、セメント添加による強度増加を読み取ることができる。

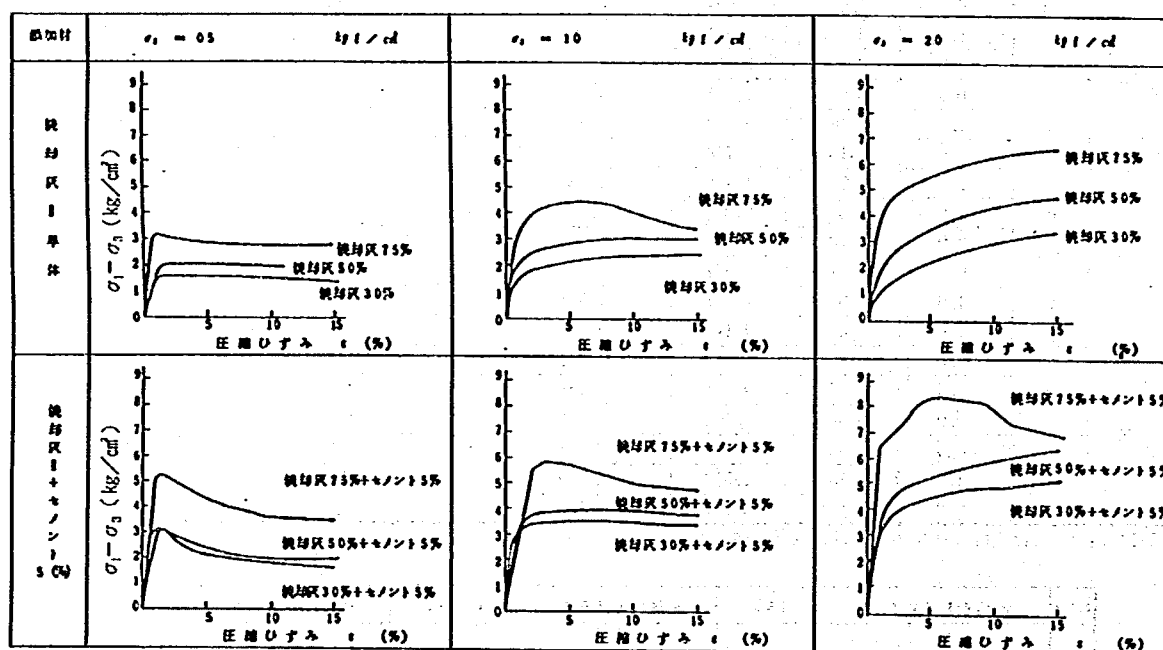


図-2.83 三軸圧縮 (UU) 試験における応力～ひずみ曲線一覧図(2) (拘束圧別)

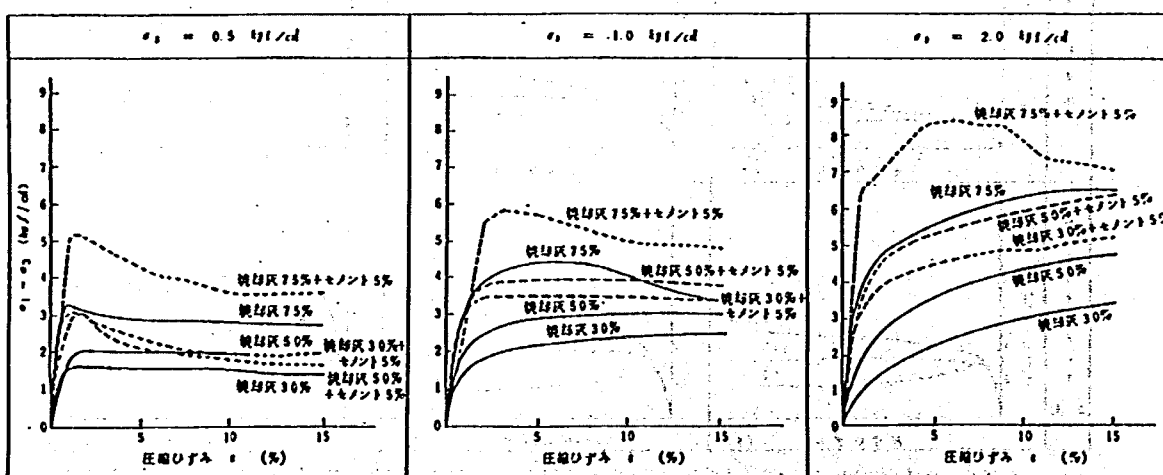


図-2.84 三軸圧縮 (UU) 試験における応力～ひずみ曲線一覧図(3) (拘束圧別)

(b) 下水汚泥焼却灰混合率とせん断強さの関係

図-2.85には、焼却灰混合率と最大せん断強さの関係を示す。この図より、上記で述べた焼却灰混合率およびセメント添加の強度への影響を確認できるとともに、さらに、この図から最大せん断強さは焼却灰混合率にほぼ比例して増加することがわかる。例えば、「焼却灰単体」、拘束圧力 2.0 kgf/cm^2 の試験条件では焼却灰混合率 30%、50%、75%に対して 1.7 kgf/cm^2 、 2.4 kgf/cm^2 、 3.3 kgf/cm^2 とほぼ比例関係にあり、焼却灰混合 30%と75%の最大せん断強さを比較すると約2倍となっている。

また、図-2.86には、最大軸差応力と破壊時の平均主応力の関係を示し、さらに図-2.87には、セメント添加の有無による最大せん断面応力の比較図を示す。図-2.87より、三軸圧縮試験においては、セメント添加による影響が明確に表れており、また、セメント添加による強度差は拘束圧力および焼却灰混合率によらずほぼ同じ値（約 1.2 kgf/cm^2 ）を示している。すなわち、この差がセメントの固化作用の影響と考えることができよう。

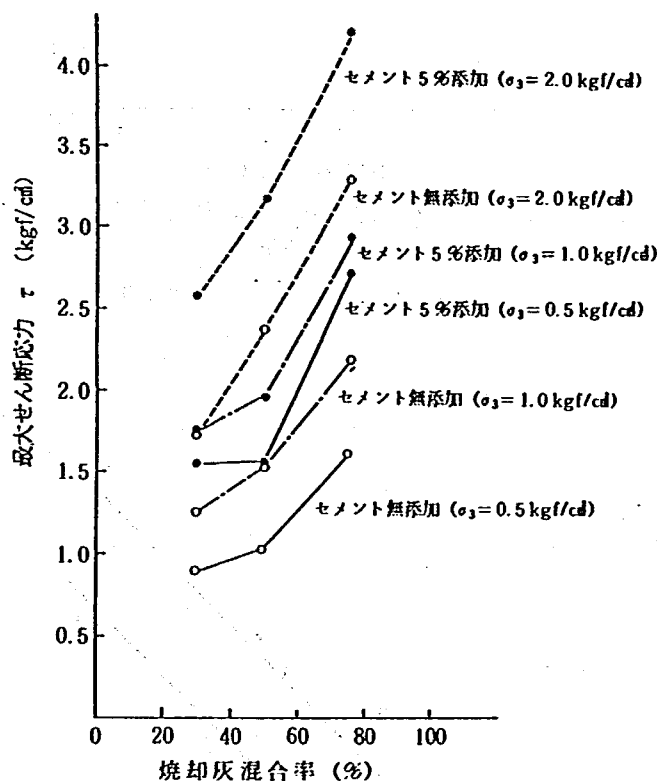


図-2.85 焼却灰混合率と最大せん断応力の関係
(締固めを伴わない混合処理土)

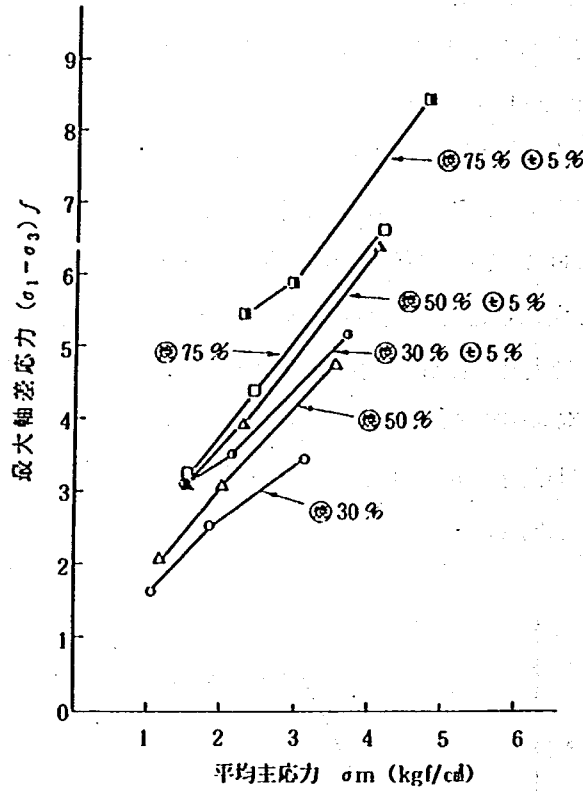


図-2.86 平均主応力 (σ_m) と最大軸差応力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) f の関係
(締固めを伴わない混合処理土)

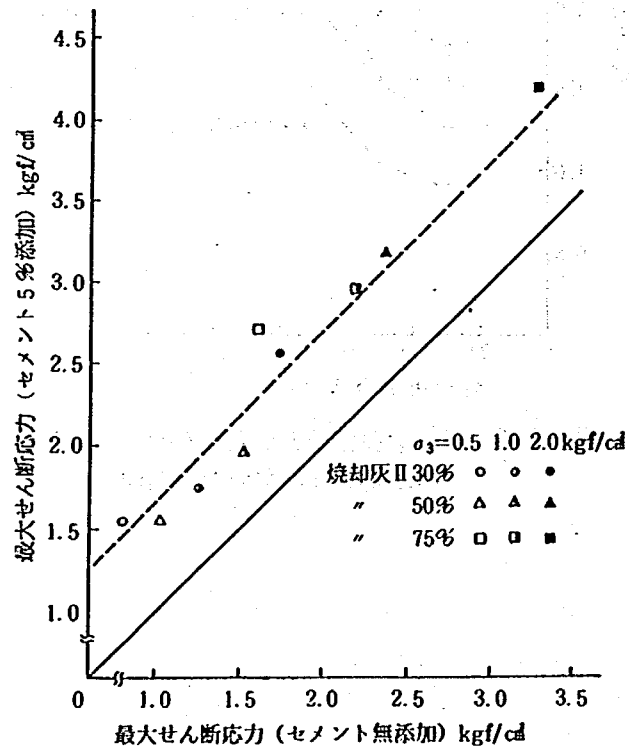


図-2.87 「焼却灰単体」混合土と「焼却灰+セメント」混合土の最大せん断応力の比較

(c) 下水汚泥焼却灰混合率と c_u , ϕ_u の関係

図-2.88には三軸圧縮試験の結果より得られた各配合におけるモールの応力円図を示すとともに、この図より求められた内部摩擦角 (ϕ_u) によび粘着力 (c_u) の値を付記した。

さらに、図-2.89、図-2.90には、それぞれ焼却灰混合率と ϕ_u , c_u の関係を示す。これらの図よりまず ϕ_u に関しては、「焼却灰単体」の場合 23° から 34° の範囲にあり焼却灰混合率の増大に伴い ϕ_u が増加する傾向にある。また、「焼却灰+セメント」を混合した処理土の ϕ_u は 24° から 33° とほぼ「焼却灰単体」の場合と同じ範囲にあるが「焼却灰単体」と異なり混合 50% で最大となっている。

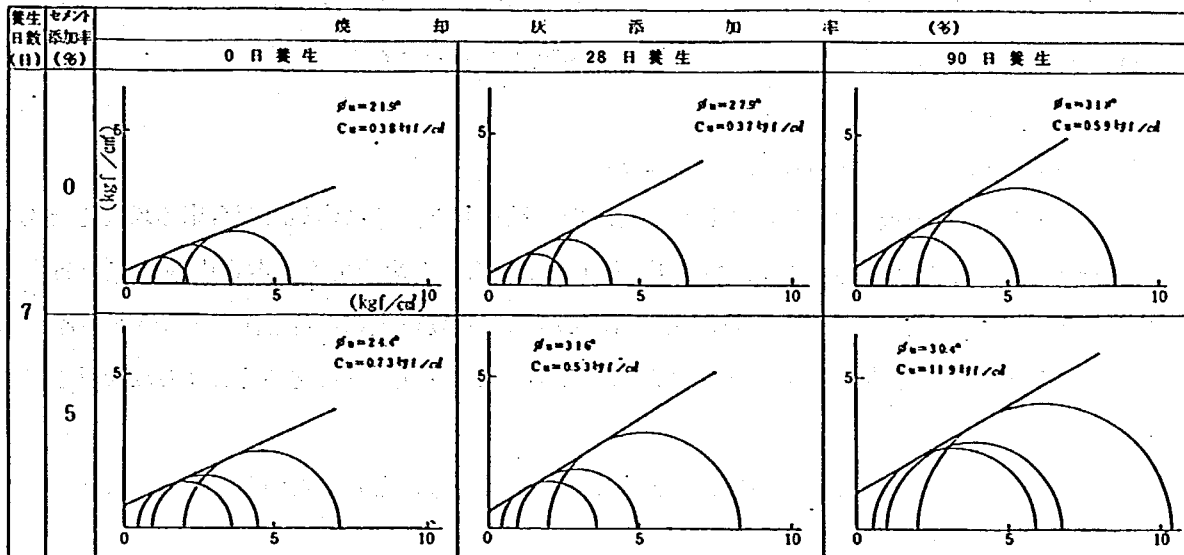


図-2.88 締固めを伴わない混合土のモール応力円一覧図

(焼却灰；焼却灰Ⅱ，試料土；粘性土Ⅱ， $W = 60\%$)

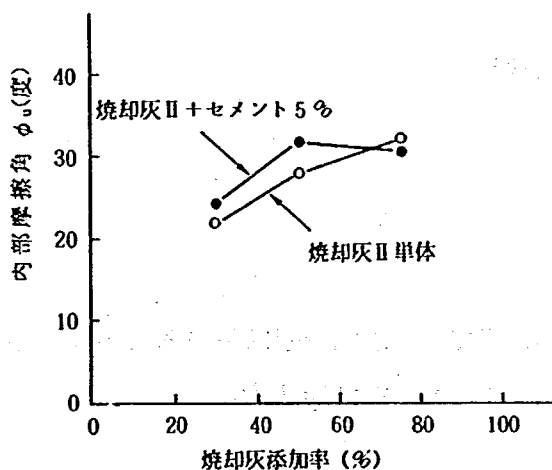


図-2.89 焼却灰混合率と ϕ_u の関係
(締固めを伴わない混合土)

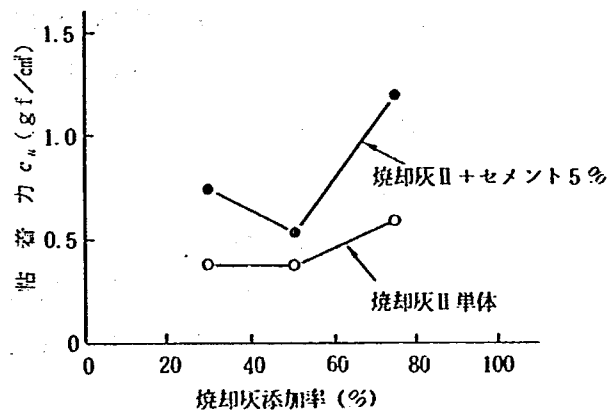


図-2.90 焼却灰混合率と c_u の関係
(締固めを伴わない混合土)

次に、粘着力 c_u に関しては「焼却灰単体」の場合 0.4kgf/cm^2 から 0.6kgf/cm^2 の範囲にあり、 ϕ_u とほぼ同様に焼却灰混合率の増大に伴い増加する傾向が認められる。一方「焼却灰＋セメント」の配合に関しては、 c_u の値が 0.7kgf/cm^2 から 1.2kgf/cm^2 の範囲にあり、 ϕ_u の場合と対照的に焼却灰混合率 50% において最小となっている。

これらのことから「焼却灰単体」の場合は、焼却灰混合率の増大に伴い、 c_u 、 ϕ_u の値が徐々に増加する傾向にあるが、セメントを添加すると必ずしも単調に増加せず試験結果においては、焼却灰混合率 50% 付近で極値が得られている。これは、「焼却灰単体」の場合、焼却灰の添加の影響で土のコンシステンシーの変化しさらに c_u (焼却灰の自硬性による影響)、 ϕ_u (粒状体の焼却灰添加の影響) が増加するが、セメントを添加した場合は、より強固になりすぎ、通常土で扱うような c および ϕ での評価の適否を今後検討する必要があることを示唆するものと考えられる。

6) 配合試験Ⅲのまとめ

配合試験Ⅲの結果を列挙すると次のようになる。

① 焼却灰(石灰系)を粘性土に添加した場合、配合試験Ⅱと同様に焼却灰混合率の増加とともに混合処理土の強度が増加する。また、焼却灰単体のみで混合した場合でも、混合率 50% で 6kgf/cm^2 の強度が得られた。しかしながら、焼却灰混合率が 100% 程度以上になると含水比の低下が著しく、一軸圧縮試験では改良強度が急激に低下する。なお、セメントを組合わせることにより改良強度を増大できる。

② コンクリート粉は、自硬性がほとんどなく土質改良用添加として用いる場合は、セメントなどとの組合わせが必要である。

③ 「締固めを伴わない焼却灰混合処理土」の三軸圧縮試験の結果、焼却灰混合率の増加、拘束圧力の増加に伴いせん断強度が増大する傾向が認められ、①に述べたような混合率 100% 付近における急激な強度低下は認められなかった。

2-2 締固めを伴う混合処理土の力学的特性に関する検討

(表層混合処理等への適用性に関する検討)

2-2-1 室内配合試験方法

(1) 試料の種類と性質

1) 試験に用いた廃棄物の種類と性状

本検討において対象とした廃棄物は、埼玉県 b 下水処理場で産出された焼却灰の 1 種であり、石灰系焼却灰に属する。この焼却灰の化学成分については、先に、表-2.2 に示した。

2) 試料土の種類と性質

本検討に用いた試料土は、埼玉県渡良瀬遊水地より採取した粘性土Ⅱ ($w=60\%$) である。

(2) 配合条件、試料体作製方法および養生条件

1) 配合条件

本検討における配合条件は、表-2.17 に示すとおりであり、「焼却灰単体」および「焼却灰＋セ

メント」の2種の組合せである。

表-2.17 配合条件（締固めを伴う混合処理土）

添 加 材	焼 却 灰	セ メ ン ト
焼却灰Ⅱ単体	50%, 75%, 100%	—
焼却灰Ⅱ+セメント	50%, 75%, 100%	5%

注) ここで混合率は試料土の湿潤重量に対する比率を示す。

2) 供試体の体の作製方法

供試体は、基本的には「締固めによる安定処理土の一軸圧縮試験方法（案）」（土質工学会基準）のうちプランジャー法に準拠して作製したが、この方法では供試体の密度（締固め程度）が上部と下部とでは異なり、下部が非常に緩くなり供試体の自立が困難となるため、本試験では図-2.91に示すように混合処理土を3層に分けて各層毎に所定の落下回数で締め固めた。

なお、本供試体作製時の締固め条件は、ランマー重量2.5kg、落下高さ30cmの条件で落下回数を12, 25, 50回と変化させて作製した。

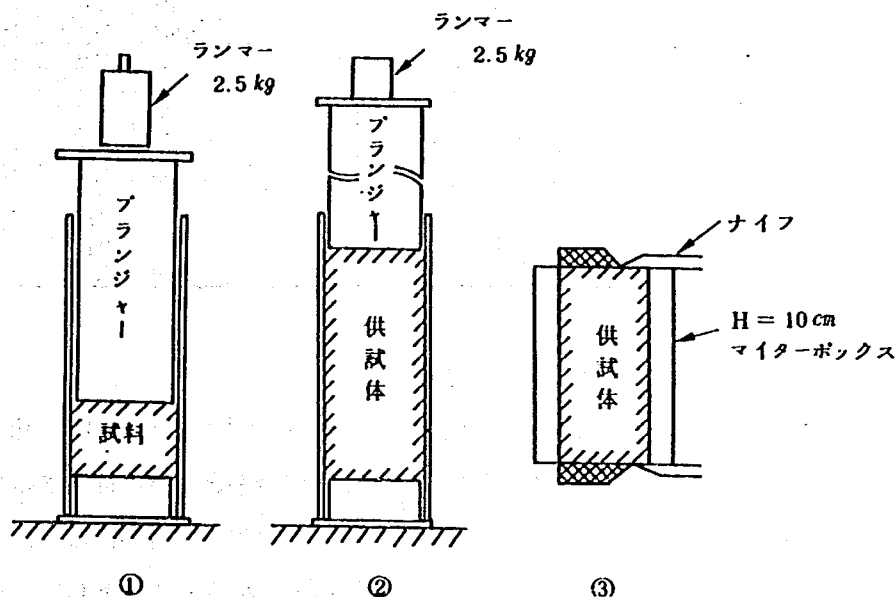


図-2.91 締固めを伴う混合処理土の供試体作製方法

3) 養生条件

上記の方法で作製した供試体を高さ10cmに成形してシールを行い、恒温室（ $20 \pm 3^\circ\text{C}$ ）にて7日、28日間養生した。

2-2-2 室内配合試験結果（締固めを伴う混合処理土の力学適特性に関する検討）

前項においては、主に深層混合処理工法への適用性に関して締固めを伴わない混合処理土の力学的特性について述べてきたが、この項においては表層混合処理などへの適用性に着眼して焼却灰混合後に締固めを伴う混合処理土の力学的特性について調査した結果について述べる。なお、表-2.18には、本試験結果の一覧を示す。

表-2.18 締固めを伴う混合処理土の一軸圧縮試験結果

添加材	添加材 (%)	締固め率 (回/層)	養生日数 (日)	一軸圧縮試験					添加材	添加材 (%)	締固め率 (回/層)	養生日数 (日)	一軸圧縮試験				
				圧縮試験 q_u (kgf/cm ²)	変形係数 E_{50} (kgf/cm ²)	含水比 W (%)	湿潤密度 ρ_w (g/cm ³)	飽和度 S_r (%)					圧縮試験 q_u (kgf/cm ²)	変形係数 E_{50} (kgf/cm ²)	含水比 W (%)	湿潤密度 ρ_w (g/cm ³)	飽和度 S_r (%)
焼却灰	50	12	7	6.365	994.5	30.3	1.559	61.0	焼却灰 + セメント	50	12	7	7.961	1326.8	28.2	1.510	57.9
			28	13.511	2251.8	30.2	1.587	66.0				28	8.294	1595.0	27.7	1.506	57.9
		25	7	10.480	2381.8	29.2	1.573	63.6			25	7	9.621	1924.2	27.4	1.502	56.3
			28	12.965	2315.2	29.1	1.593	65.0				28	8.469	1628.7	26.0	1.486	53.5
		50	7	15.982	2497.2	30.0	1.610	69.8			50	7	14.581	2700.2	27.2	1.608	63.4
			28	16.777	2207.6	29.8	1.632	68.9				28	14.625	2812.5	27.6	1.623	65.1
	75	12	7	17.182	2863.7	29.7	1.648	70.0		75	12	7	16.653	3469.4	27.2	1.602	63.0
			28	17.729	2951.8	29.3	1.635	68.4				28	15.531	2987.3	26.8	1.583	61.0
		25	7	22.943	3823.8	30.1	1.745	78.6			25	7	24.253	3789.5	27.2	1.677	68.6
			28	24.032	3133.1	30.0	1.713	75.7				28	22.374	3995.4	27.3	1.671	68.3
		50	7	24.546	4091.0	28.9	1.730	75.6			50	7	24.540	4382.1	27.2	1.676	68.5
			28	23.076	3196.4	29.2	1.707	74.1				28	28.781	4171.2	26.8	1.674	67.8
	100	12	7	11.943	2211.7	23.0	1.429	45.8		100	12	7	8.242	1373.7	22.1	1.395	42.7
			28	12.626	2338.1	23.2	1.420	45.6				28	8.394	1824.8	21.9	1.400	42.7
		25	7	13.095	2518.3	22.5	1.437	45.6			25	7	8.841	1841.9	21.3	1.400	41.8
			28	10.978	2744.5	22.3	1.427	41.8				28	6.842	977.5	20.5	1.373	39.4
		50	7	19.079	3289.5	22.5	1.486	48.4			50	7	14.333	2388.9	21.9	1.469	46.4
			28	15.409	3210.2	24.6	1.495	51.9				28	13.472	2082.1	21.9	1.457	45.7
焼却灰	50	12	7	17.971	3591.2	23.0	1.508	50.4	焼却灰 + セメント	50	12	7	13.029	2102.1	20.7	1.441	43.1
			28	16.043	3646.1	22.1	1.487	47.8				28	14.508	4030.0	21.0	1.452	44.1
		25	7	22.889	3946.4	23.6	1.544	53.5			25	7	20.615	3554.3	21.4	1.529	49.0
			28	24.521	4640.9	23.3	1.561	51.1				28	21.587	3854.8	22.1	1.520	49.6
		50	7	28.935	5564.4	22.7	1.548	52.4			50	7	25.537	5803.9	20.7	1.525	47.7
			28	24.959	4799.8	22.8	1.559	53.2				28	25.922	5891.4	21.6	1.525	49.1
	75	12	7	3.492	727.5	17.0	1.294	31.2		75	12	7	11.351	1493.6	18.1	1.345	34.6
			28	3.335	667.0	17.3	1.289	31.4				28	9.074	1374.8	18.1	1.323	33.7
		25	7	4.396	732.7	16.3	1.289	30.0			25	7	10.808	2349.6	16.8	1.315	31.5
			28	2.641	488.9	17.3	1.288	31.4				28	12.042	2800.5	17.4	1.323	32.7
		50	7	3.346	507.0	17.5	1.314	32.7			50	7	15.769	2815.9	17.7	1.410	36.9
			28	5.473	912.2	17.9	1.316	33.4				28	15.229	2719.5	17.8	1.405	36.8
焼却灰	50	12	7	6.483	1350.6	17.4	1.302	32.1	焼却灰 + セメント	50	12	7	18.337	4366.0	17.4	1.394	35.7
			28	5.904	1017.9	17.4	1.297	31.9				28	15.935	3983.8	17.6	1.381	35.5
		25	7	19.362	3338.3	18.3	1.413	39.8			25	7	26.403	3771.9	18.1	1.469	40.3
			28	16.850	3510.4	18.3	1.442	39.7				28	24.457	4367.3	18.1	1.468	40.3
		50	7	15.297	3642.1	17.0	1.410	36.2			50	7	30.075	6015.0	17.6	1.471	39.6
			28	22.022	4587.9	17.6	1.444	38.7				28	31.530	5436.2	16.9	1.471	38.5

(1) 下水汚泥焼却灰混合率と一軸圧縮強さの関係

図-2.92は、添加材として「焼却灰Ⅱ(石灰系)単体のみ」を粘性土に混合し3種の締固め条件(12回/3層, 25回/3層, 50回/3層)で締固めた場合の焼却灰混合率と一軸圧縮強さの関係を示したものである。この図より、締固めの程度によって一軸圧縮強さが異なるが各締固め条件とも焼却混合率50%, 75%ではあまり変化がなく、100%において一軸圧縮強さが急激に低下していることがわかる。これは、焼却灰混合率が非常に多くなると土の含水比が低下するばかりではなく土自体の粘着力も低下し拘束状態にない一軸圧縮試験で調べる限り強度が小さく見積られるものと考えられ、この傾向は先に述べた「締固めを伴わない混合処理土の一軸圧縮試験結果」においても同様に認められた。

また、この図において僅かではあるが焼却灰混合率75%付近に一軸圧縮強さのピークが認められ、全体に上に凸型を呈している。

さらに、締固め度合で比較してみると各焼却灰混合率とも締固め回数が多いほど一軸圧縮強さが大きくなっており、焼却灰混合率75%, 締固め回数50回/3層の条件での材令28日における一軸圧縮強さは約26kgf/cm²の値が得られている。また、焼却灰混合率75%において12回/層と50回/層との一軸圧縮強さを比較すると約2倍の強度増加となっている。すなわち本試験結果から判断すると、「焼却灰単体」であっても締固めることによって混合処理土の強度をかなり高めることが可能であると考

えられる。

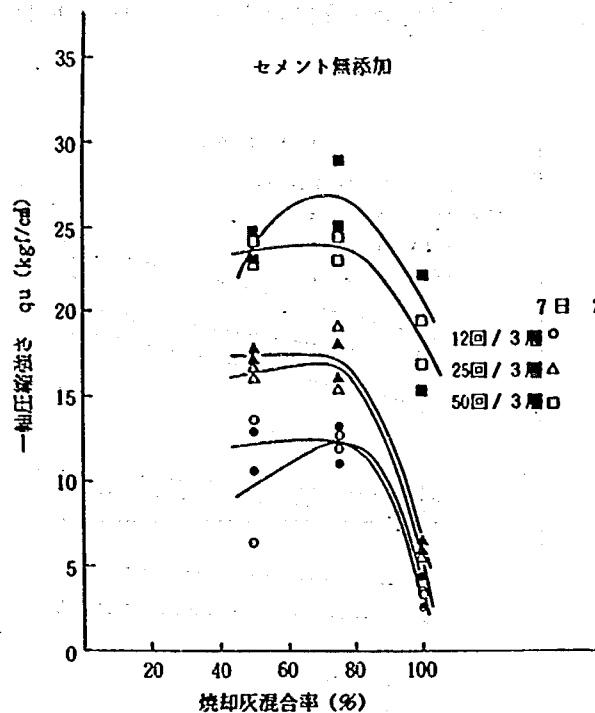


図-2.92 焼却灰混合率と q_u の関係
(締固めを伴う混合処理土、セメント無添加)

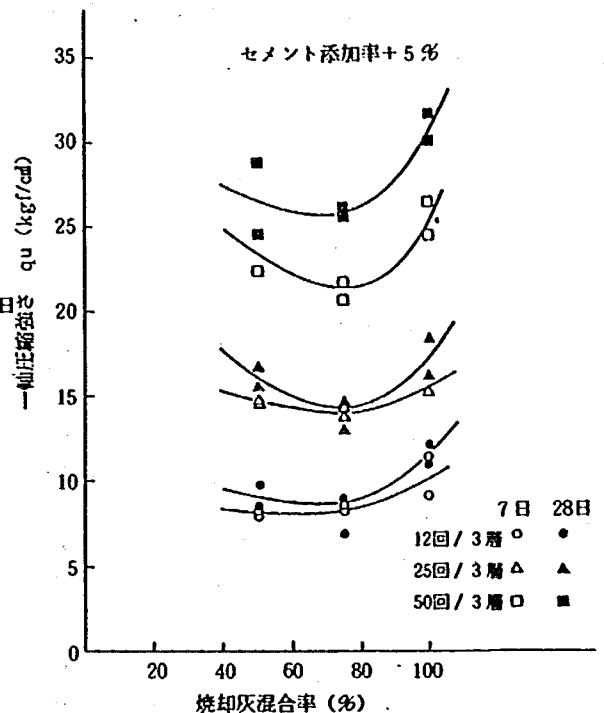


図-2.93 焼却灰混合率と q_u の関係
(締固めを伴う混合処理土、セメント5%添加)

図-2.93には、「焼却灰+セメント5%」の配合条件で粘性土に混合して前述の締固め条件で締固めた場合の焼却灰混合率と一軸圧縮強さの関係を示す。この図においては、上記に示した「焼却灰単体」の場合と異なり焼却灰混合率75%付近で最小となり、全体として凹型を呈している。また、「焼却灰単体」では焼却灰混合率100%において急激な一軸圧縮強さの低下が見られたがこの条件ではその傾向は認められない。この結果の相違は、セメントの添加によって強度低下が阻止されたこと、また、供試体作成時の影響も十分考えられるが現段階では明確なことは言えない。

しかしながら、「焼却灰Ⅱ+セメント」の場合においても締固め回数が多いもののほど一軸圧縮強さが大きく得られるという特性は「焼却灰単体のみ」の場合と同様であり、焼却灰混合率100%、締固め50回/3層での28日強度は約30kgf/cm²の値が得られている。これを締固め回数12回/3層の条件のものと比較すると約3倍である。

(2) 養生に伴う一軸圧縮強さの経時変化

図-2.94および図-2.95には各々「焼却灰Ⅱ単体」と「焼却灰Ⅱ+セメント」の配合における材令と一軸圧縮強さの関係を示す。これらの図より、各条件における供試体の一軸圧縮強さがばらついているが、全体的に締固め回数が多い条件の方が材令に伴う強度増加が若干大きいように思える。例えば、「焼却灰Ⅱ+セメント」の配合において7日材令と28日材令における一軸圧縮強さの直線勾配が締固め回数に応じて急になっている。すなわち、この傾向は、混合処理土は締め固めることにより初期材令における強度増加は勿論のこと、その影響がある材令にまで及んでいるものと考えられ、

焼却灰のように長期自硬性を有する材料に対して「締固め」は早期強度発現（自硬性による）に大きく寄与するものと考えられる。なお、本試験結果においては7日材令強度に対する28日材令強度は両配合とも概ね1～1.2倍にある。

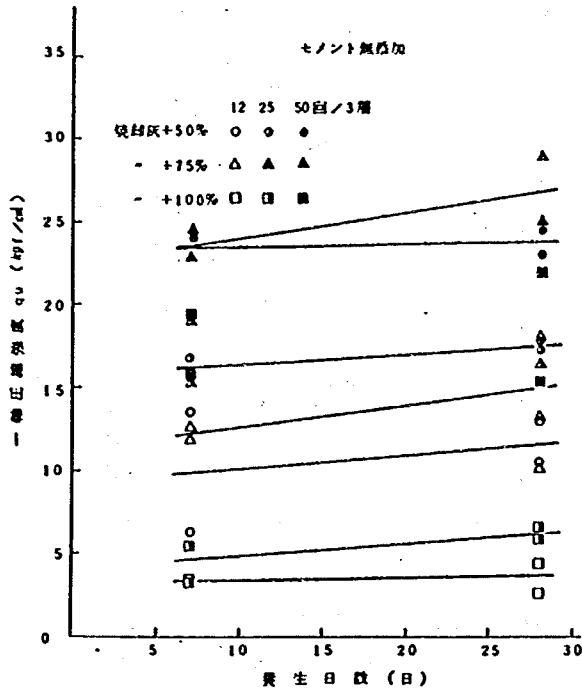


図-2.94 「焼却灰単体」配分における材令と q_u の関係
(締固めを伴う混合処理土)

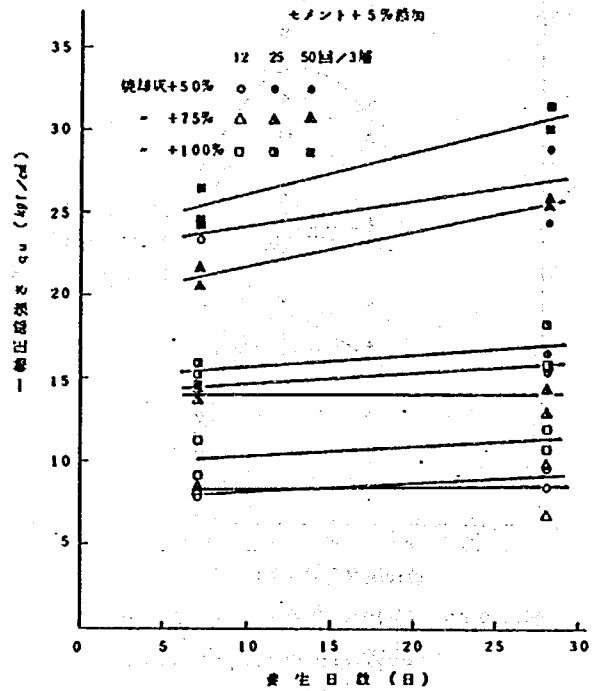


図-2.95 「焼却灰+セメント5%」配分における材令と q_u の関係
(締固めを伴う混合処理土)

(3) 締固め度合が混合処理土の強度に及ぼす影響

1) 締固めの度合と乾燥密度の関係

図-2.96には、焼却灰を混合・締固めた場合の焼却灰混合率と乾燥密度の関係を示したものである。図より、焼却灰混合率が増加するに伴い乾燥密度が低下しており、また、締固め回数に対応して乾燥密度が増加していることがわかる。これは、後述する締固め試験によると焼却灰の最大乾燥密度(ρ_{dmax})が1.025 g/cm³と小さいため、焼却灰の混合率を増加するに伴い乾燥密度が低下するものと考えられる。例えば「焼却灰単体」で粘性土の湿潤重量に対して100%混合した場合の乾燥密度は、締固め程度によって異なるが約1.1 g/cm³から1.22 g/cm³程度まで低下している。さらに、「焼却灰単体」と「焼却灰+セメント」とを同図において比較すると、「焼却灰単体」の場合締固め程度によらず焼却灰混合率が50, 75, 100%と増大するに伴い単調に乾燥密度が低下しているが、「焼却灰+セメント」の場合は、焼却灰混合率75%以上ではあまり低下していない。

次に、図-2.97には、上記の結果を横軸に締固め回数をとり整理して示す。

この図より前述したように、締固め回数が増大するに伴い乾燥密度が増加する傾向を読み取ることができよう。この増加の傾向は、「焼却灰単体」で100%混合した場合を除いてほぼ締固め回数に比例している。

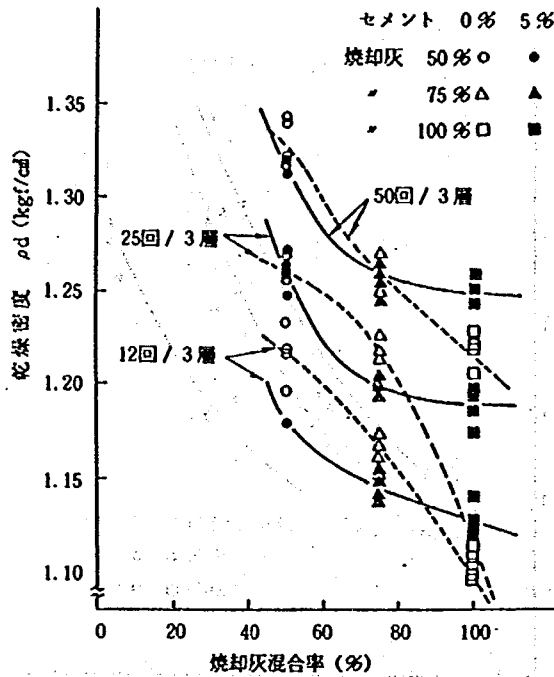


図-2.96 焼却灰混合率と乾燥密度 (ρ_d) の関係 (締固めを伴う混合処理土)

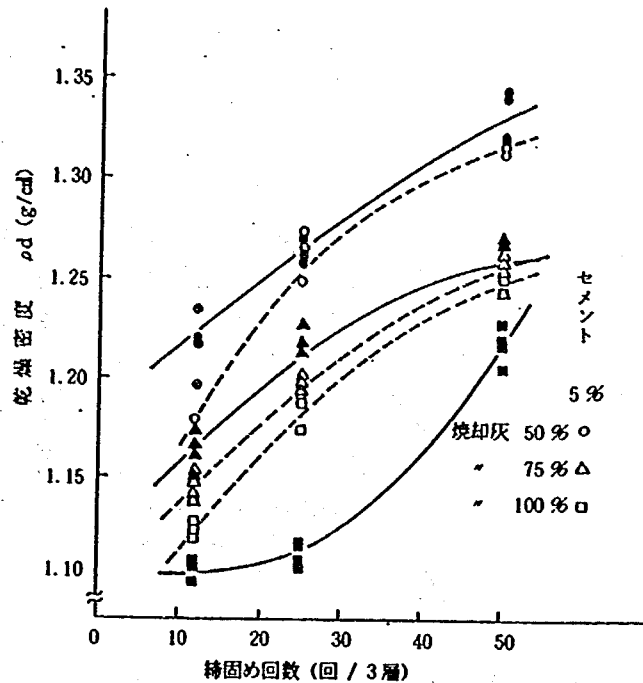


図-2.97 締固め回数と乾燥密度 (ρ_d) の関係 (締固めを伴う混合処理土)

2) 締固め度合と一軸圧縮強さの関係

図-2.98, 図-2.99には, 各々「焼却灰単体」と「焼却灰+セメント」の条件における乾燥密度と一軸圧縮強さの関係を示す。これらの図より, まず「焼却灰単体」の条件における混合処理土は, 乾燥密度に比例して一軸圧縮強さが増加している。また, この関係において焼却灰混合率 75%と 100%の差違は明確ではないが焼却灰混合率 50%と比較すると同じ乾燥密度に対して混合率 75%と 100%の方が約10kgf/cm²程度一軸圧縮強さが大きくなっている。

一方「焼却灰+セメント」の配合条件における混合処理土の場合も同様に乾燥密度の増大に伴い一軸圧縮強さが増加しているが, 「焼却灰単体」と異なり, 焼却灰混合率が 50, 75, 100%と増加していくに従って一軸圧縮強さが増加していることが明確に認められる。

上記の結果を横軸に締固め回数を取り整理すると, 図-2.100, 図-2.101のようになり, セメント添加の有無によらず締固め回数が混合処理土の一軸圧縮強さに及ぼす影響が大きく, ほぼ比例関係にあることがわかる。

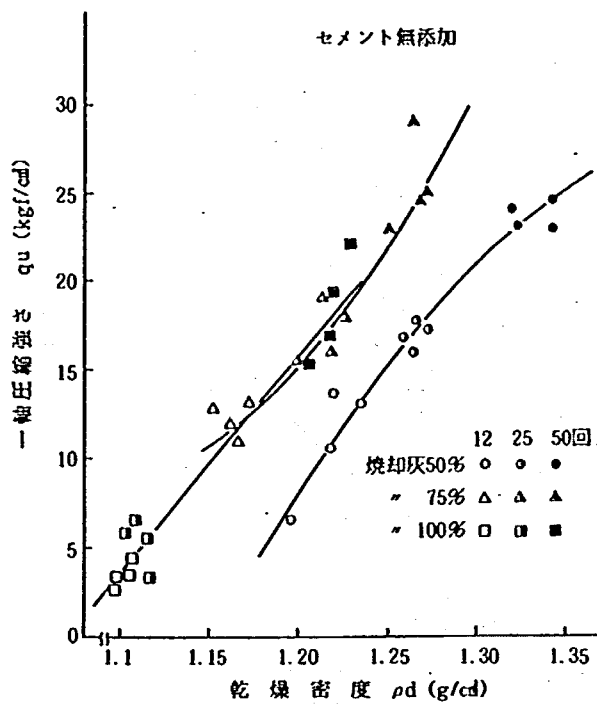


図-2.98 乾燥密度 (ρ_d) と q_u の関係
(セメント無添加)

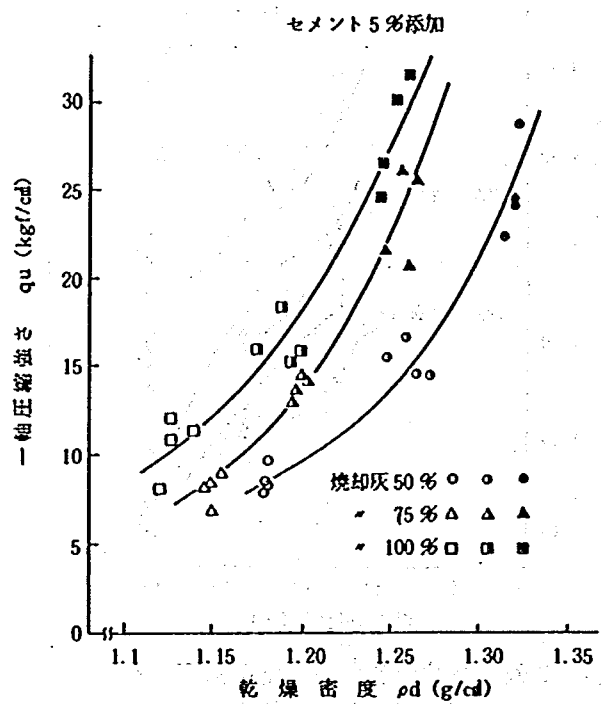


図-2.99 乾燥密度 (ρ_d) と q_u の関係
(セメント5%添加)

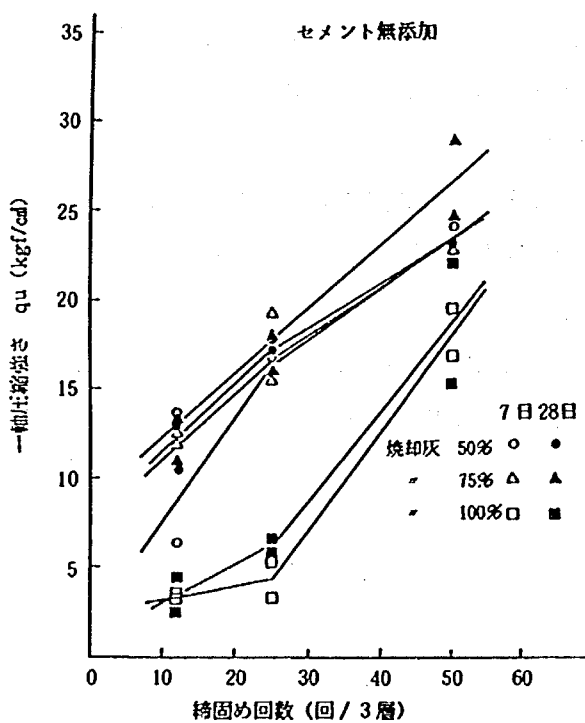


図-2.100 締固め回数と q_u の関係
(セメント無添加)

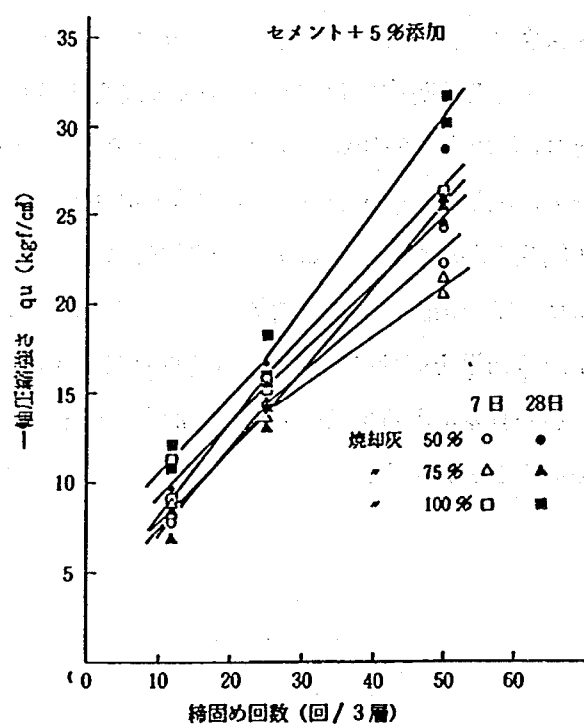


図-2.101 締固め回数と q_u の関係
(セメント5%添加)

なお、図-2.102には、混合・締固めた混合処理土の一軸圧縮強さ (q_u) と E_{50} の関係を示すが、「締固めた」の条件においても「締固めを伴わない」条件と同様に q_u と E_{50} の間には、ほぼ $E_{50} = (100 \sim 200)q_u$ の相関が得られている。

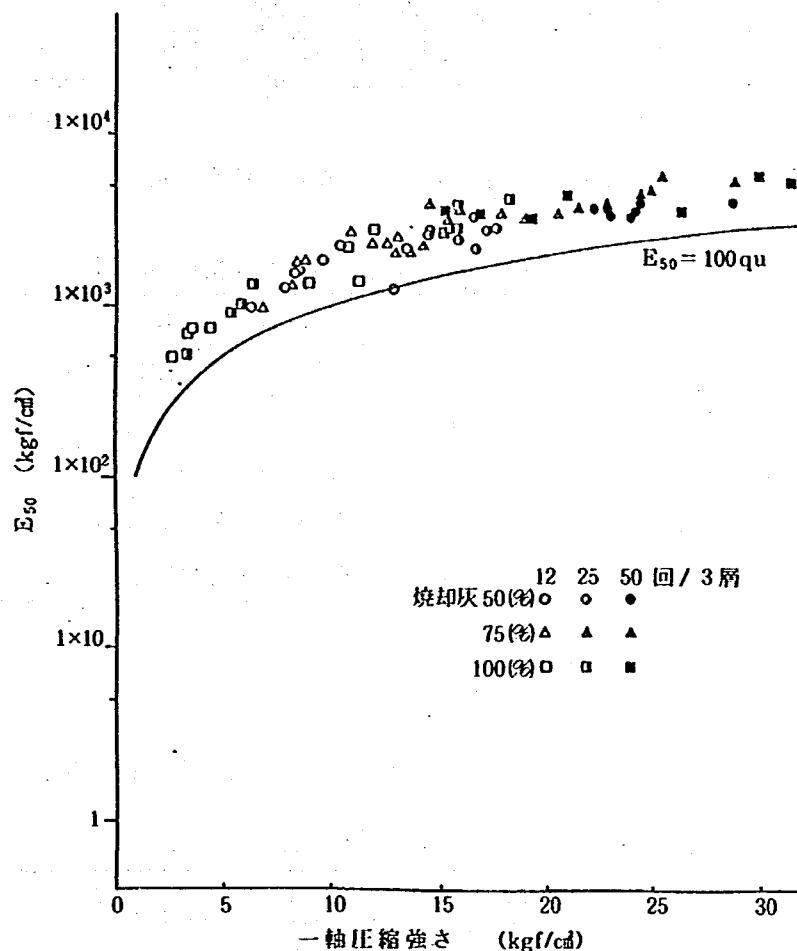


図-2.102 $q_u \sim E_{50}$ の関係 (締固めを伴う混合処理土)

2-3 石炭灰・焼却灰等単体の力学的特性および透水性に関する検討 (室内試験による検討)

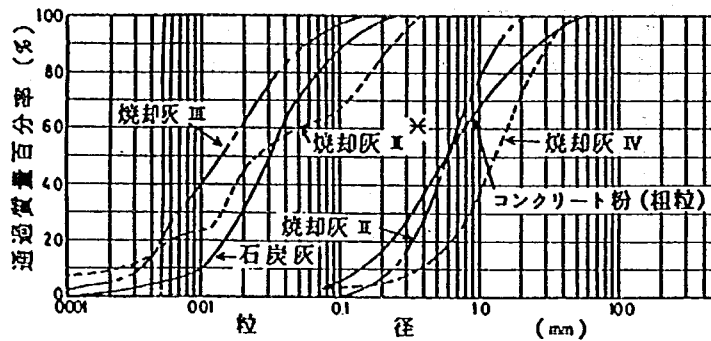
本検討は、石炭灰、コンクリート粉および焼却灰などの材料を深層混合処理以外の深層地盤改良工法 (コンパクションパイル、ドレーンなど) への有効利用する際の適用性、問題点を検討するための基礎資料を得ることを目的に、これら廃棄物の突き固め特性、養生に伴う透水特性、強度特性 (一軸圧縮試験、三軸圧縮試験による) の変化を調べたものである。

2-3-1 試験条件および試験方法

(1) 試験に用いた廃棄物

本試験に用いた廃棄物は表-2.19に示すとおり、石炭灰1種、コンクリート粉1種および下水汚泥焼却灰3種の計5種の試料である。このうち焼却灰に関しては、石灰系焼却灰 (埼玉県、札幌市産出) 2種、高分子系焼却灰 (東京産出) 1種である。

または、表-2.19に示す試料の粒度組成、化学成分については図-2.103および表-2.2に示してある。



注) *は焼却灰 II を
解した状態

図-2.103 試験に用いた廃棄物の粒度分布

表-2.19 廃棄物単体の検討に用いた廃棄物の種類

試料名	試料の種類
石炭灰	シンダーアッシュ (国内炭)
コンクリート粉	粗粒状
焼却灰 II	石灰系 (埼玉産)
焼却灰 III	高分子系 (東京産)
焼却灰 IV	高分子系 (札幌産)

(2) 試験項目および試験方法

本試験における試験項目の一覧を表-2.20に示す。以下に、これらの試験方法について述べる。

表-2.20 試験項目一覧表 (廃棄物単体の検討)

試験項目	試料	供試体の 作製条件	供試体の 要請条件	試験方法	成果
比重	石炭灰 1種 コンクリート粉 1種 焼却灰 3種			J I S A 1202	試料の比重を明らかにする。
粒度	石炭灰 1種 コンクリート粉 1種 焼却灰 3種			J I S A 1204	試料の粒度を明らかにする。
突き固め	石炭灰 1種 コンクリート粉 1種 焼却灰 3種			J I S A 1210	$w-\gamma, d$ 曲線から $w_{0.1}$ などを求める。
透水	石炭灰 1種 コンクリート粉 1種 焼却灰 3種	突き固め 度2条件 設定する	養生日数 0, 28, 90日	J I S A 1218 (定水位法)	養生に伴う透水 係数の変化を求 める。
一軸圧縮	石炭灰 1種 コンクリート粉 1種 焼却灰 3種	$w_{0.1}$ で 突き固め る	養生日数 0, 28, 90日	J I S A 1216	養生に伴う一軸 圧縮強さの変化 を求める。
三軸圧縮	石炭灰 1種 コンクリート粉 1種 焼却灰 2種	突き固め 度2条件 設定する	養生日数 0, 28, 90日	UU試験 拘束圧3条件	養生に伴う C_u ϕ の変化を求め る。 突き固め度の影 響を調べる。

① 比重試験

5種類の試料の比重をJIS A 1202により求める。

② 粒度試験

5種類の試料の粒度をJIS A 1204による求める。

③ 突き固め試験

5種類の試料に対しJIS A 1210 (1-1法)により突き固め試験を行う。

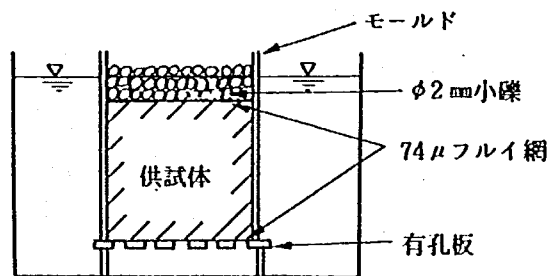


図-2.104 透水用供試験体概念図

④ 透水試験 (図-2.104参照)

透水試験における供試体の作製手順は、以下の示すとおりである。

① 突き固め試験により求めた最適含水比較 ($w_{o,i}$) になるように廃棄物の含水比を調整する。

② 試料を $\phi = 10\text{cm}$, $H = 12.7\text{cm}$ のモールド内に所定の密度 (ρ_{dmax} , $\rho_d / \rho_{dmax} = 70\%$) になるように試料の重量をあらかじめ計量する。

③ 計量した試料を4層に分けてモールド内で締め固める。

④ 締め固め終了後モールドを74 μ フルイ網を載せた有孔板上に設置し、上部にも74 μ フルイ網を載せる。さらに $\phi 2\text{mm}$ 程度の小礫をフィルターの代わりに詰める。

⑤ 以上の手順で作製した供試体を下図のように所定の期間水中にて養生する。

所定の養生期間後、供試体の透水係数をJIS A 1218における定水位法試験により求める。

養生期間は、0日(供試体作成直後)、28日、90日(焼却灰Ⅳについては0日、7日、28日)の3条件とし、各養生日数に対して1試料当たり1供試体について透水試験を行う。

2-3-2 室内試験結果

(I) 試料の物理的性質および締め固め特性

1) 物理特性

(a) 比重

廃棄物の比重試験の結果、焼却灰Ⅱ、焼却灰Ⅳ(石灰系)は、 $G_s = 3.41$ 、 3.10 と他の廃棄物に比べて大きな値を示しているが、高分子系である焼却灰Ⅲは、 $G_s = 2.71$ と小さく、両焼却灰の比重に関しては差がある。また、石灰灰は、 $G_s = 2.19$ と他の廃棄物に比べて格段に小さい。一方、コンクリート粉では、 $G_s = 2.685$ とほぼ同一粒径をもつ砂質土と同じ値を示している。

(b) 粒度分布

粒度分布を図-2.103に前掲したが、石炭灰および焼却灰Ⅲでは、砂分はそれぞれ19%と7%であり、細粒分が多くその内でもシルト分が卓越している。また、焼却灰Ⅳおよびコンクリート粉の場合、ほぼ粗粒土の範囲に分布している。さらに、焼却灰Ⅱでは、比重計による分析結果とフルイ分け結果とでは全く異なった結果となっているが、比重計による結果は試料調整中に粒子(固まり)が解かれ

たためと考えられる。なお、後述する透水試験および三軸圧縮の結果からみるとフルイ分け試験による分布の方が妥当と判断される。

2) 締固め特性

図-2.105には、石炭灰、コンクリート粉、焼却Ⅱ～Ⅳの各廃棄物の締固め曲線を示す。また、図-2.106には、各廃棄物の焼却灰特性を比較するため一覧にして示す。これらの図より、最大乾燥密度 (ρ_{dmax}) はコンクリート粉、石炭灰、焼却灰の順であることと、焼却灰Ⅱと焼却灰Ⅳ (両焼却灰とも石灰系) が比較的似た締固め特性を示していることがわかる。さらに、今回試験に用いた焼却灰に関しては、これまでの調査結果 (図-2.107) と比較して概ね一般的に分布範囲にあることがわかる。さらに、図-2.108に焼却灰に関して最大乾燥密度 (ρ_{dmax}) と最適含水比 (w_{opt}) の関係を既往の研究結果と本結果とを比較して示すと、本試験に用いた焼却灰は、概ね一般的な焼却灰の最大乾燥密度 (ρ_{dmax}) と最適含水比 (w_{opt}) の関係の分布内に入っていることがわかる。

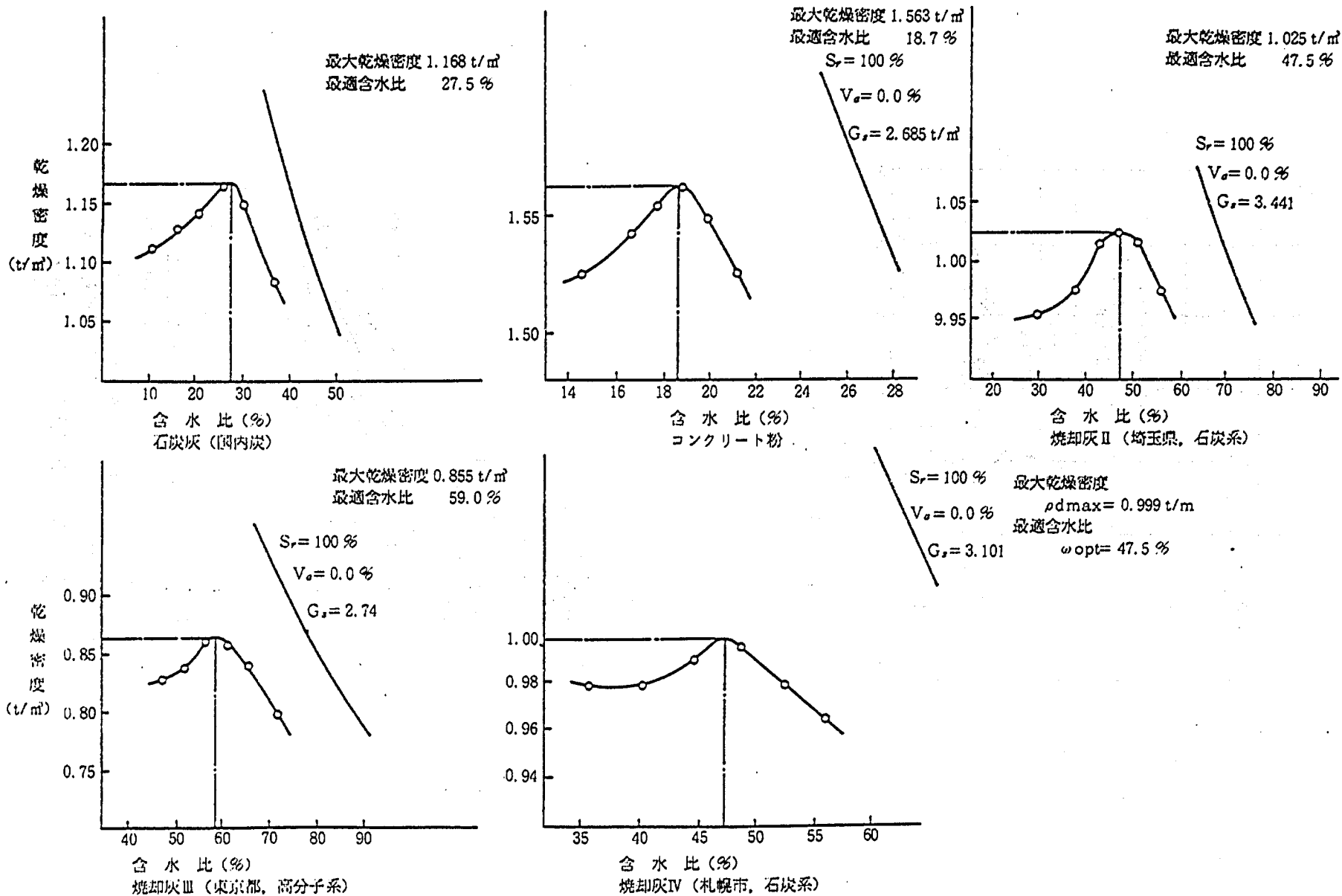


図-2.105 各廃棄物の締固め曲線

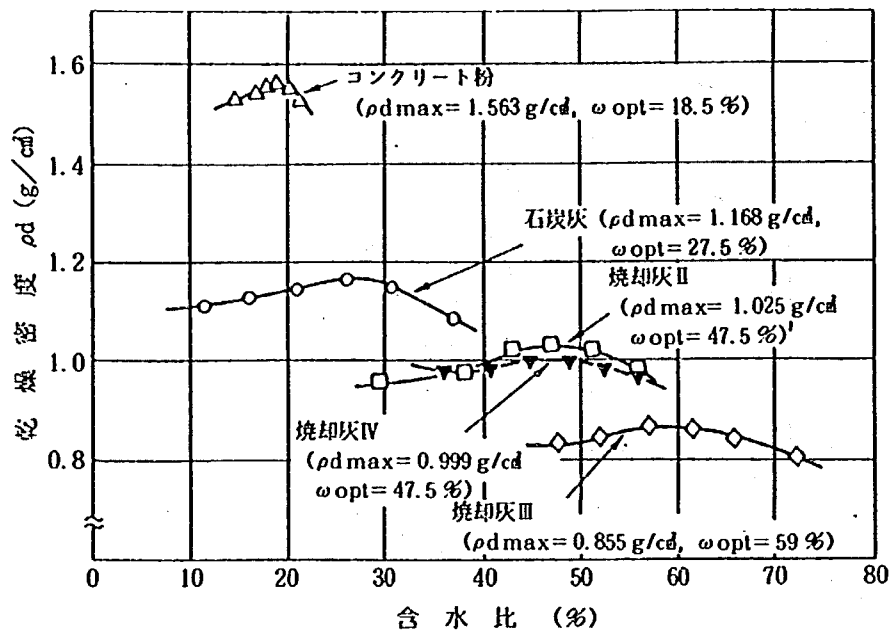


図-2.106 締固め曲線比較図

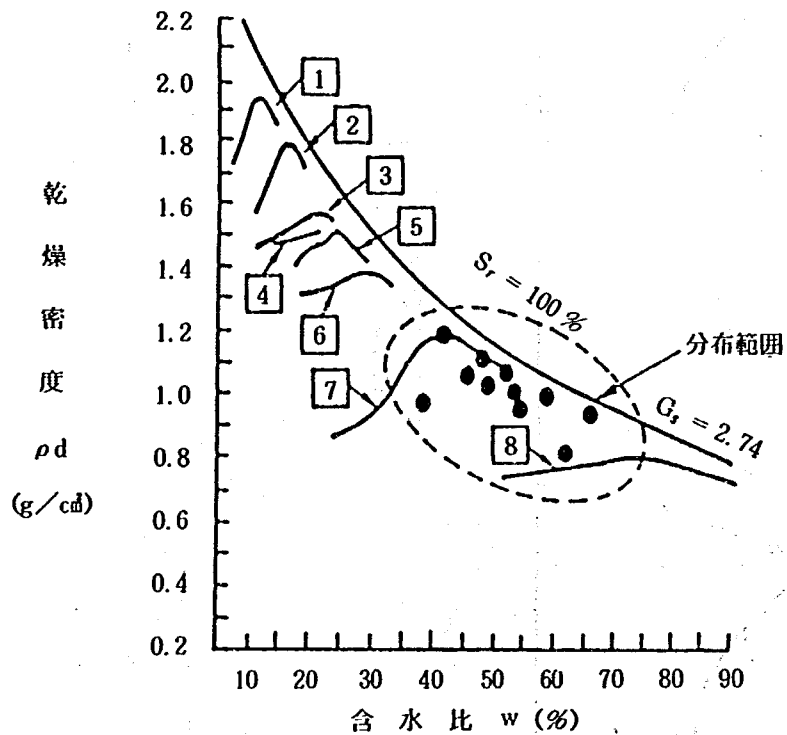


図-2.107 代表的な土および焼却灰の締固め曲線の例
(昭和57年度 地盤盛土分科会報告書)

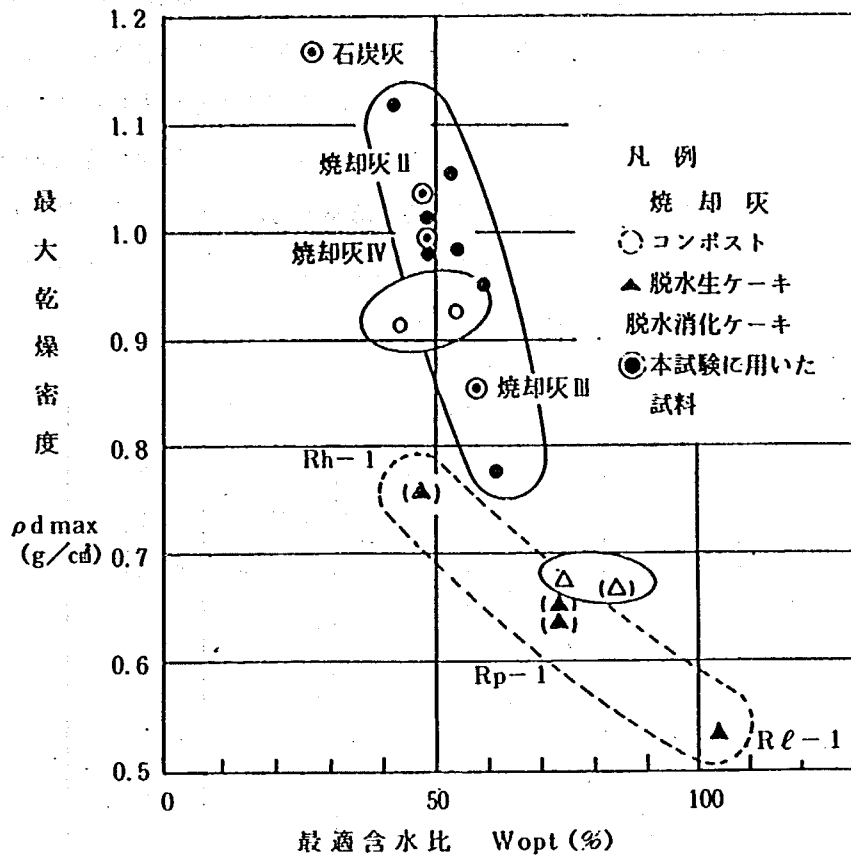


図-2.108 最大乾燥密度と最適含水比
(下水汚泥の資源化に関する調査報告書に加筆)

(2) 一軸圧縮強さと材令の関係

図-2.109には、各種廃棄物を最適含水比 (w_{opt}) 状態で最大乾燥密度 (ρ_{dmax}) になるように締め固めて作成した供試体の一軸圧縮強さ (q_u) の経時変化を示したものである。この図より、材令に伴い一軸圧縮強さが顕著に増加している廃棄物とほとんど強度増加が認められない廃棄物とに分けることができる。前者は石炭灰、焼却灰Ⅱ（石灰系）であり、後者はコンクリート粉、焼却灰Ⅲ（高分子系）、焼却灰Ⅳ（石灰系）である。

以下に、各廃棄物ごとに材令に伴う一軸圧縮強さの経時変化について整理してみる。

① 石炭灰

最適含水比で締め固めた石炭灰は、締め固め直後で一軸圧縮強さ (q_u) が約 1.1 kgf/cm^2 であり、その後養生日数の経過に伴い顕著に q_u が増加している。例えば、28日強度では約 14 kgf/cm^2 、90日強度では 18 kgf/cm^2 の値が得られている。また、養生日数に伴う強度増加の傾向は、後述する三軸圧縮 (UU) 試験結果とも符号する。

すなわち本試験結果から判断すると、石炭灰自体はこれまで多くの石炭灰に関する研究においても指摘されているように十分な自硬性を有し、さらに材令に伴い強度が長期的に伸びて行くことが確認された。

(参考) 石炭灰の自硬性 (水硬性) に関する研究は、これまで各方面で行われており、一般には石炭

灰に含有されている酸化カルシウム (CaO) とシリカ (SiO_2) および酸化アルミニウム (Al_2O_3) による化学反応 (ポゾラン反応) のため適度な湿分があれば自硬する潜在性を有すると言われている。

しかしながら、後で三軸圧縮 (UU) 試験結果においても述べるように石炭灰の自硬性による強度増加の程度は、石炭灰の密度 (締固めの程度) に大きく左右され、石炭灰単体をその自硬性を期待して用いる場合には、密度、含水比など施工管理が必要であると考えられる。さらに、砂の代替として軟弱地盤上の盛土材として用いる場合には自硬に伴う剛性の増加による盛土の不同沈下、応力集中によるクラックの発生などに留意する必要があると言える。

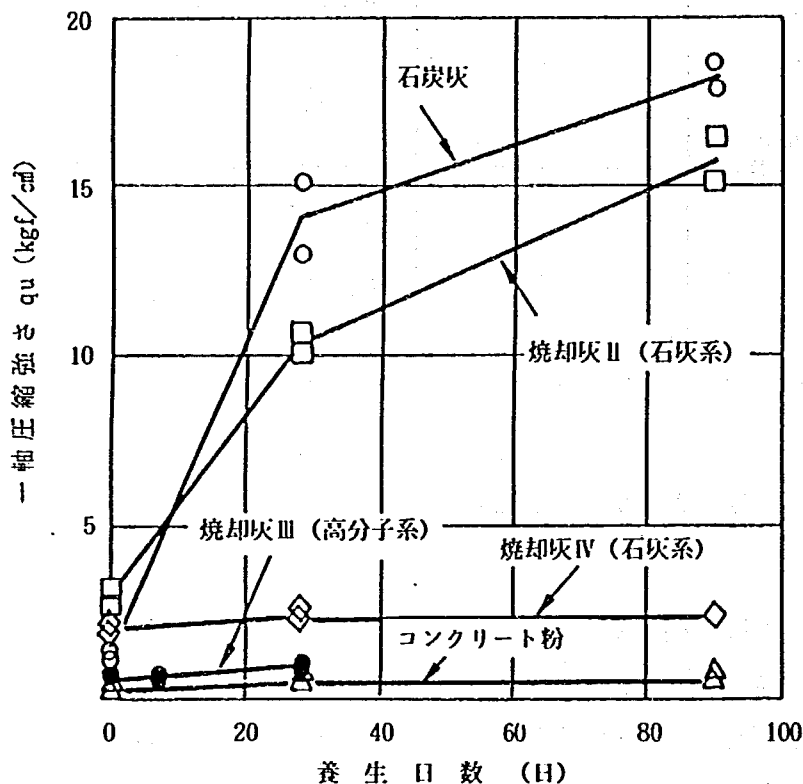


図-2.109 各種廃棄物の材令と q_u の関係
(締固め条件 ρ_{max})

なお、図-2.110には、これまでに石炭灰に関して他の機関および文献などで発表されている試験結果例 (一軸圧縮強さと材令の関係) と本試験結果を比較して示す。これらの図において、石炭灰の種類、締固め条件などの違いにより直接一軸圧縮強さの絶対値を比較することはできないが、概ね石炭灰の材令に伴う強度増加の定性的な傾向を読み取ることができる。

② 焼却灰 (Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ)

各種焼却灰に関しては、焼却灰Ⅱ (石灰系) において石炭灰と同様に顕著な一軸圧縮強さの材令に伴う増加が認められるのに対して、焼却灰Ⅲ (高分子系) 焼却灰Ⅳ (石灰系) においては、ほとんど一軸圧縮強さの増加が認められない。

一般に石灰系焼却灰は、灰中の CaO 含有量が多いため適度な湿分の条件では顕著な自硬性 (長期的な強度増加) を有し、一方高分子系焼却灰は、経時的な強度増加はないという性質を有すると言わ

れている。

本試験結果から判断する限り、焼却灰Ⅳを除いてその他の2種の焼却灰に関しては、上記の焼却灰の一般的性質と符合する。なお、焼却灰Ⅳの試験結果については、灰の状態、灰の生成過程などが起因していると考えられるが、試験材令が28日と他の供試体と比較して短かったことから今後追加試験を実施して原因を究明する必要がある。また、コンクリート粉は、焼却灰Ⅲと同様に材令に伴う一軸圧縮強さの増加はほとんど認められない。

図-2.111には、これらの試験結果より得られた一軸圧縮強さ (q_u) と E_{50} の関係を示す。

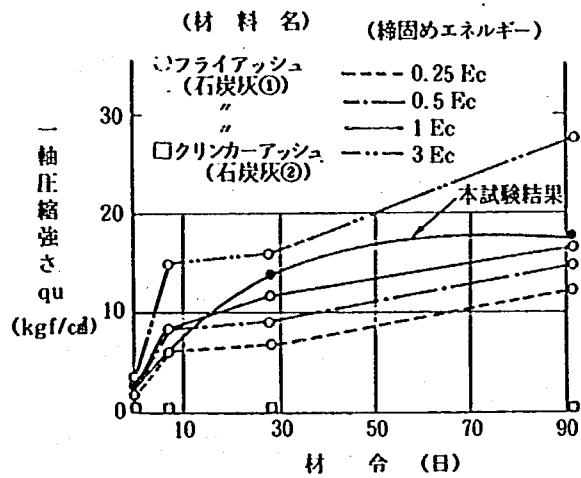


図-2.110 石炭灰の一軸圧縮強さの経時的変化 (既往研究結果との比較)

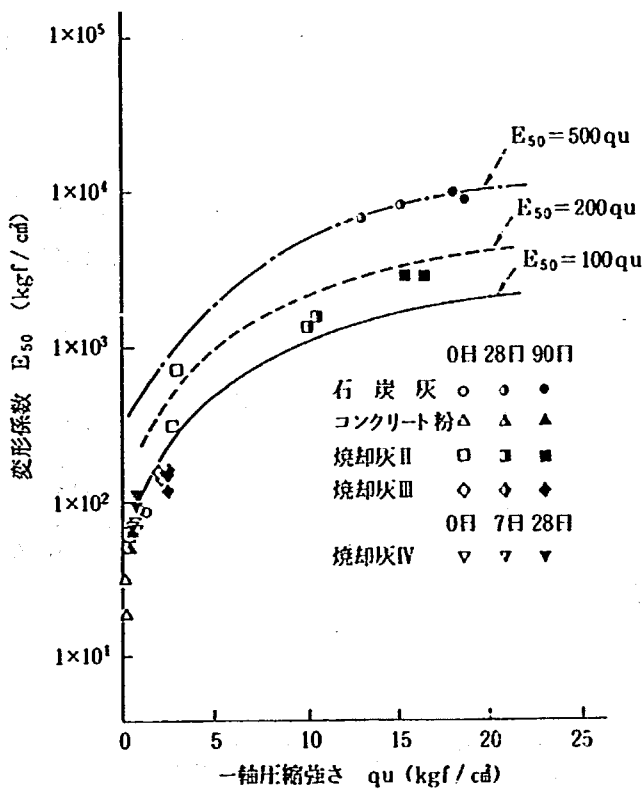


図-2.111 廃棄物単体の q_u と E_{50} の関係

(3) 三軸圧縮試験による廃棄物の力学的特性

1) 応力～ひずみ関係

図-2.112には、三軸圧縮(UU)試験における各廃棄物の代表的な応力～ひずみ曲線を示す。この図は、拘束圧力 2.0kgf/cm^2 、材令90日のものである。この図より、各廃棄物とも通常の砂の場合と同様に締固め度によって応力～ひずみ曲線に変化を生じており、特に強度発現の著しい石炭灰、焼却灰Ⅱに関しては、100%締固め度と70%締め度の供試体の変形特性が極端に異なっていることがわかる。

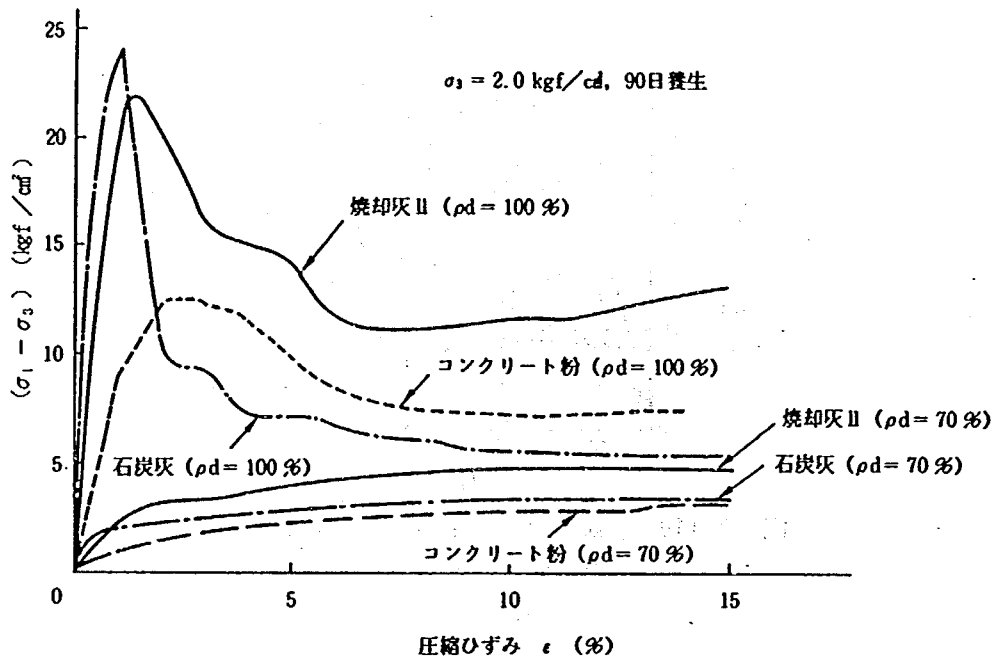


図-2.112 締固め度の違いによる各種廃棄物の応力～ひずみ曲線

d) c , ϕ と材令の関係

図-2.113には、各廃棄物の ϕ の経時変化を示す。この図より、各廃棄物とも締固め度によって ϕ の値が大きく異なるが、材令に伴う増加はあまり認められず、逆に、28日材令と90日材令における

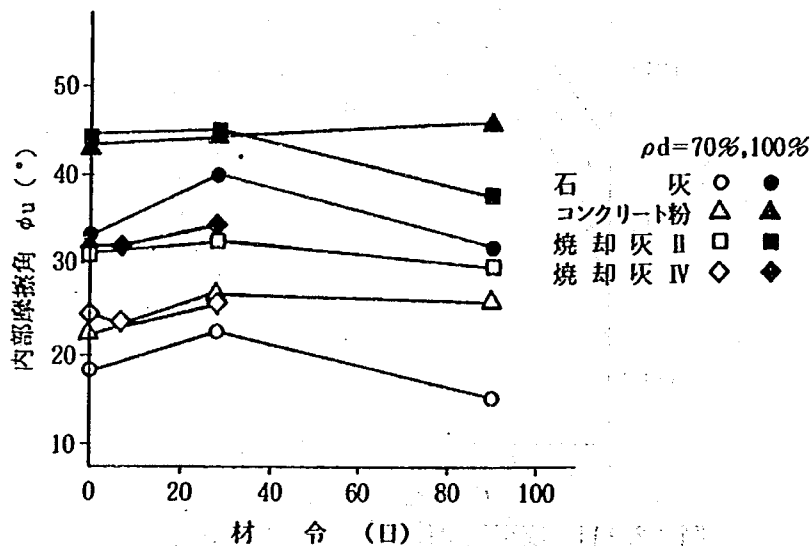


図-2.113 材令と ϕ の関係(廃棄物単体)

ϕ_u を比較すると低下する傾向がうかがえる。

なお、この傾向は図-2.114に他の試験結果を示すが同様に ϕ_u の材令による低下が報告されており、本試験結果と似た結論を得ている。

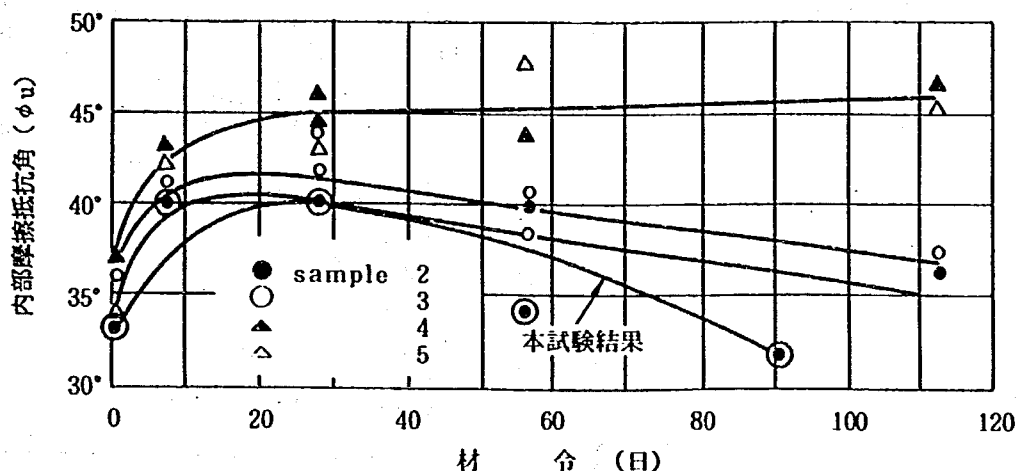


図-2.114 内部摩擦抵抗角 (ϕ_u)と材令との関係 (既往研究との比較)

また、図-2.115には、粘着力 (c_u)の経時変化を示すが、100 %で締固めた石炭灰、焼却灰Ⅱの場合は大きく材令とともに変化しているが、その他の条件のものはあまり変化が認められない。この関係は、先に述べた図-2.109の一軸圧縮強さと材令の関係に符合している。

さらに、図-2.116および図-2.117には各廃棄物の最大せん断強さ (τ_f)と材令の関係を、強度発現が著しい廃棄物 (石炭灰、焼却灰Ⅱ)とあまり強度の発現が認められない廃棄物 (焼却灰Ⅳ、コンクリート粉)に分けて示す。

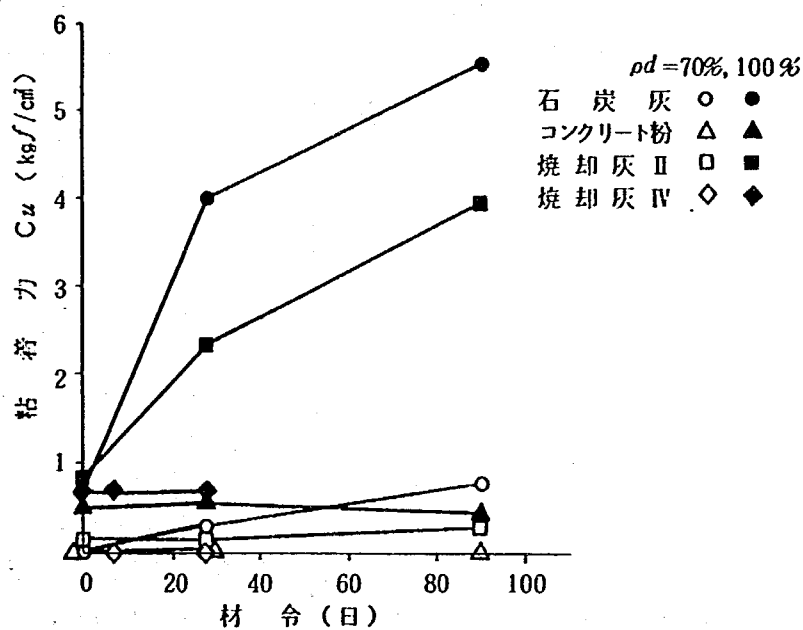


図-2.115 材令と c_u の関係 (廃棄物単体)

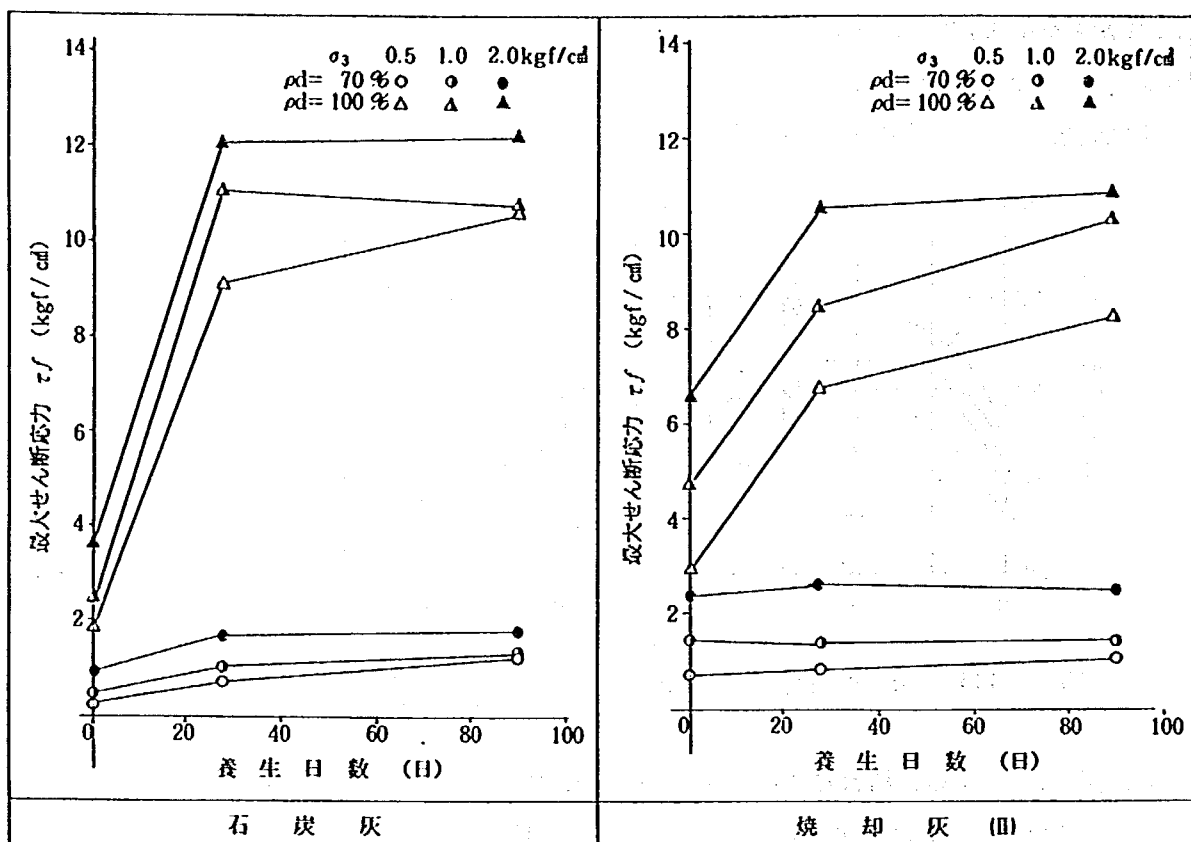


図-2.116 石炭灰、焼却灰Ⅱの τ_f の経時変化(三軸UU試験)

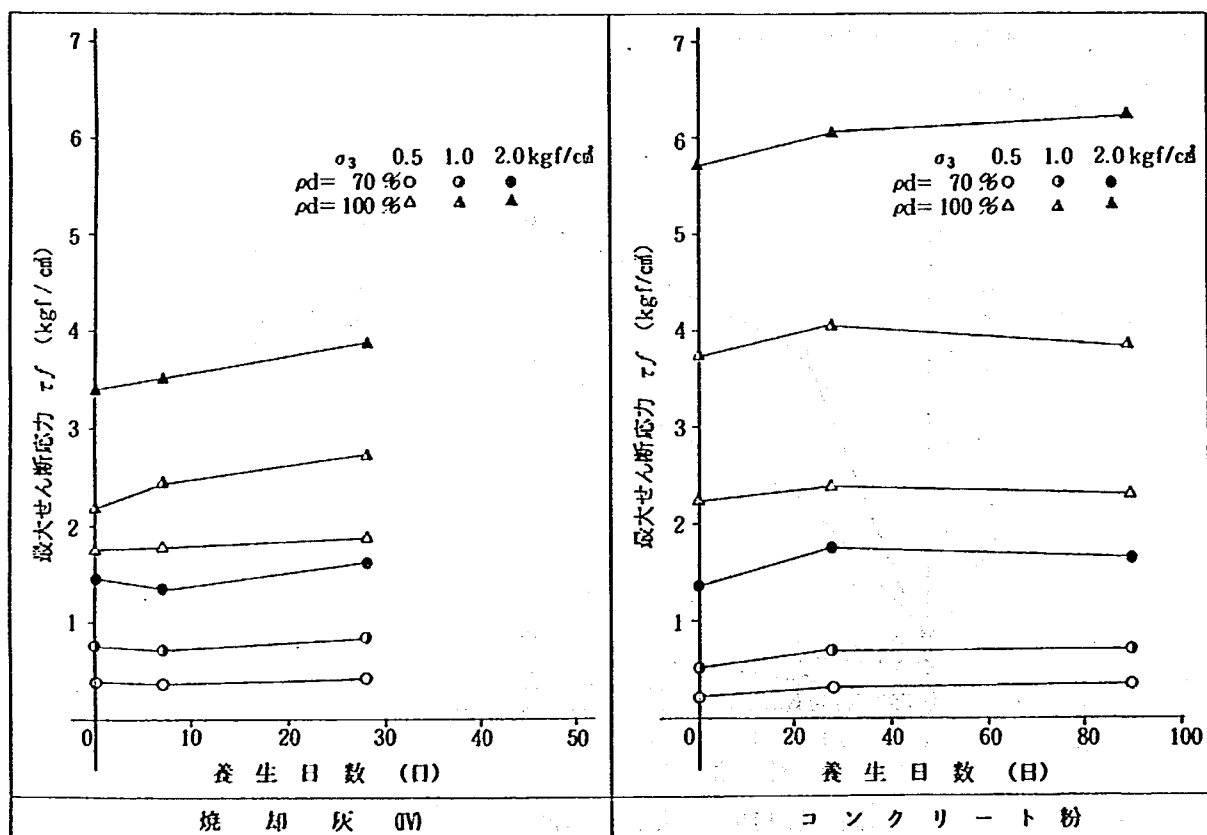


図-2.117 焼却灰Ⅳ、コンクリート粉の τ_f の経時変化
(三軸UU試験、なお、焼却灰Ⅳは28日材令まで)

(4) 各種廃棄物の透水試験結果 (材令による変化)

1) 透水係数と材令の関係

図-2.118には、各種廃棄物を2種の締固め度 (ρ_{dmax} , $\rho_d/\rho_{dmax}=70\%$) で締固めた試料の透水係数の経時変化を供試作成直後、28日後、90日後の3材令において測定した結果を示す。図より、各試料とも供試体の締固め度合に応じて透水係数に大きな差異を生じており、全般的にこの初期透水係数の差が各材令の差にそのまま表われる傾向がうかがえる。例えば材令に伴い顕著な透水係数の変化が認められる焼却灰Ⅱについて、各締固め度でその経時変化を比較すると ρ_{dmax} で締固めた試料の透水係数は $k_0=6.47\times10^{-4}$, $k_{28}=5.17\times10^{-6}$, $k_{90}=3.31\times10^{-6}$ (cm/sec) であり、初期透水係数 (k_0) と28日後の透水係数 (k_{28}) を比べると約2オーダー減少している。一方 $\rho_d/\rho_{dmax}=70\%$ で締固めた試料の透水係数は $k'_0=6.06\times10^{-2}$, $k'_{28}=4.12\times10^{-4}$, $k'_{90}=2.78\times10^{-4}$ (cm/sec) であり、初期透水係数 (k'_0) と28日後の透水係数 (k'_{28}) を比べると約2オーダー減少しており、 ρ_{dmax}

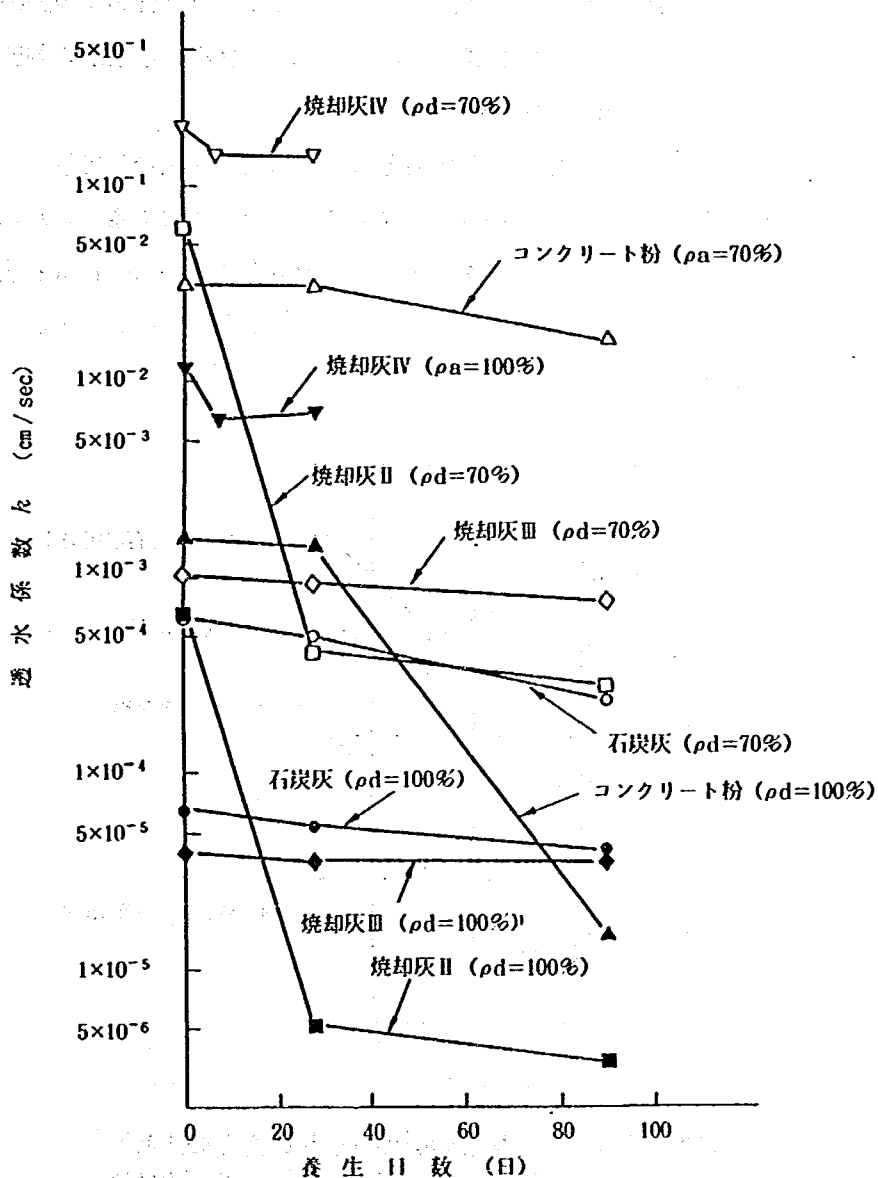


図-2.118 各種廃棄物の材令に伴う透水係数の変化

$\rho_s / \rho_{smax} = 70\%$ の透水係数の減少割合はほぼ一致する。この傾向は、コンクリート粉を除く他の試料についても言えるようである。

これらの透水係数の経時変化について以下に各廃棄物毎にまとめて示す。なお、以下において ρ_{smax} で締め固めた試料の透水係数は h_0 (0は材令)、 $\rho_s / \rho_{smax} = 70\%$ で締め固め試料の透水係数は h'_0 (0は材令)で示すことにする。

① 石炭灰

石炭灰に関しては、70%締め固め度で締め固めた試料の透水係数 h' は、 $h'_0 = 6.20 \times 10^{-4}$ 、 $h'_{28} = 4.89 \times 10^{-4}$ 、 $h'_{90} = 2.33 \times 10^{-4}$ (cm/sec) および100%締め固め度で試料の透水係数は $h_0 = 6.62 \times 10^{-5}$ 、 $h_{28} = 5.37 \times 10^{-5}$ 、 $h_{90} = 3.99 \times 10^{-5}$ (cm/sec) の値が得られている。このように石炭灰に関しては、締め固め度によって初期透水係数 (h'_0 , h_0) において1オーダーの差が生じているものの、材令に伴う透水係数の減少割合は焼却灰Ⅱと比較して顕著ではない。また、このように本透水試験結果において石炭灰の透水係数の顕著な経時変化は得られなかったが、先に示した100%締め固め度の石炭灰の q_s と材令の関係においては顕著な q_s の増加が認められており、これらの結果から判断すると石炭灰に関しては透水係数と q_s とはあまり相関がないと言える。

なお、図-2.119には山本らによる既往の研究結果と本試験結果とを比較して示す。この図より、初期透水係数に差異が生じているものの透水係数の経時変化は似た様子にあることがわかる。

以上の結果より、フライアッシュおよびシンダーアッシュの分布にはいる細粒な石炭灰は初期透水係数が通常サンドドレーン工法において使用されている砂に比べてかなり低いことからドレーン材として適用性に関しては問題があると言える。

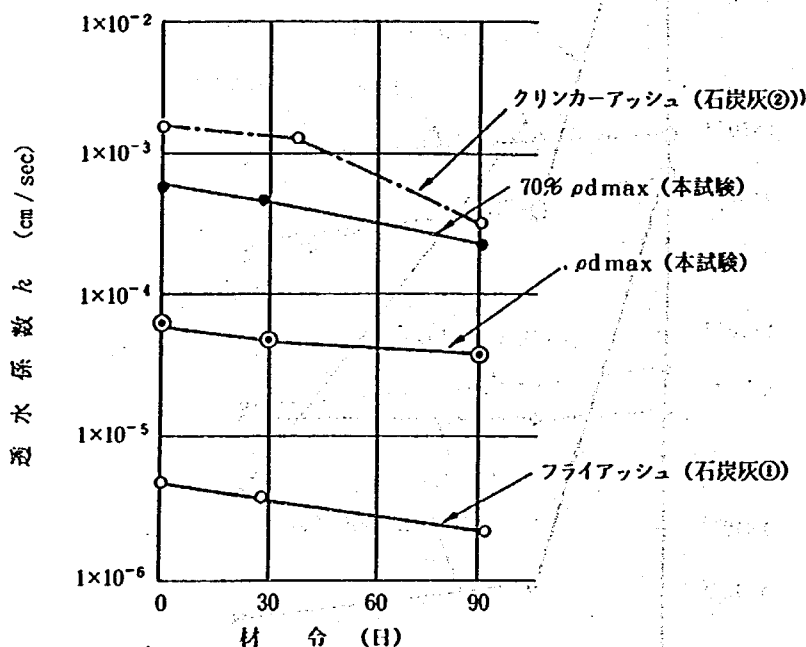


図-2.119 透水係数と材令の関係 (既往研究との比較)
(山本康博他；石炭灰の物理的・工学的性質
について、一部加筆)

② 焼却灰

各種焼却灰の透水係数の経時変化については、表-2.21のような値が得られている。この表または図-2.118からその傾向を列挙すると以下のようになる。

表-2.21 各種焼却灰の透水係数の比較

試料灰	締固め度 ρ_d / ρ_{dmax}	透 水 係 数 k (cm/sec)			
		0 日	7 日	28 日	90 日
焼却灰Ⅱ (石炭灰, 埼)	70%	6.06×10^{-2}	—	4.12×10^{-4}	2.78×10^{-4}
	100%	6.47×10^{-4}	—	5.17×10^{-6}	3.31×10^{-6}
焼却灰Ⅱ (高分子系, 東)	70%	1.01×10^{-3}	—	9.24×10^{-4}	7.72×10^{-4}
	100%	3.85×10^{-3}	—	3.56×10^{-3}	3.50×10^{-3}
焼却灰Ⅳ (石灰系, 札)	70%	2.02×10^{-1}	1.45×10^{-1}	1.44×10^{-1}	—
	100%	1.26×10^{-2}	6.41×10^{-3}	6.90×10^{-3}	—

① 各種焼却灰の初期透水係数を比較すると焼却灰Ⅳ>焼却灰Ⅱ>焼却灰Ⅲの順で透水性がよく、これは各焼却灰の図-2.103に示した粒度組成と関係しているものと考えられる。

② 焼却灰Ⅱ(石炭系統)は、材令に伴い顕著な透水係数の減少が認められ、その減少割合は本試験において28日養生において著しい。また、この透水係数の減少の割合は、先に示した100%締固め度の試料の一軸圧縮強さの強度増加と似ている。

すなわち、焼却灰Ⅱに関しては、石炭灰と異なり焼却灰自体の自硬の程度が透水係数の変化に大きく影響していると言える。

③ 焼却灰Ⅳ(石灰系)は、粒度組成が他の焼却灰に比べて粗いため初期透水係数が大きく100%締固め度においても 1×10^{-2} cm/sec程度の透水係数が得られているが、石灰系であるにもかかわらず材令に伴う透水係数の減少はあまり見られない。この結果は、先に示した一軸圧縮強さと材令の関係とも符合する。しかし焼却灰の場合、その種類によっては自硬性は比較的長期にわたることがあり、本試験のように28日程度では養生日数が短く、さらに長期観測が必要であるといえる。

④ 焼却灰Ⅲ(高分子系)は、細粒であるため初期透水係数が低い。しかし材令に伴う透水係数の変化は焼却灰Ⅳと同様にあまりみられない。このような結果は、これまで他の研究においても同様の結果が得られており、高分子系焼却灰の一般的傾向であると言える。

⑤ 焼却灰のドレーン材としての適用性を考える場合、粒度組成、初期透水係数(締固めの程度)および自硬性の程度を十分考慮する必要があるが、本試験に用いた焼却灰に関しては、焼却灰Ⅳが比較的適用性が高い材料と考えることができる。また、焼却灰Ⅱのように28日材令までに急激に透水係数の減少する材料はあまり好ましくないのは当然のことである。

③ コンクリート粉

コンクリート粉に関しては、70%締固め度において初期透水係数が 2×10^{-2} cm/secと比較的大きく、材令に伴う透水係数の減少も僅かである。一方100%締固め度においては、 1.5×10^{-3} cm/sec程度で

あり他の材料と比較すると大きい材令 90 日において透水係数が急激に低下している。この急激な低下は、透水試験供試体の低部の網が目詰まりを起こしたためと考えられ、一般的にはコンクリート粉は 70% 締固め度の供試体のようにより材令に伴い変化をしないと考える方が妥当であろう。

これらの結果から、コンクリート粉はドレーン材として適用性が高く、今後さらに粒度組成の粗い材料での検討が必要であると考えられている。

以上の各種廃棄物の透水試験結果から概略判断すると、焼却灰Ⅳおよびコンクリート粉はドレーン材としての適用性が高いが、石炭灰、焼却灰Ⅱ、および焼却灰Ⅲに関してはその適用性には問題があると言える。

2) 廃棄物の透水係数と初期間隙比の関係

図-2.120には、初期間隙比と各材令における透水係数の関係を示す。この図より、当然の結果ながら各廃棄物とも初期間隙比較大きいもの（締固め度が小さい）ほど透水係数が大きいことがわか

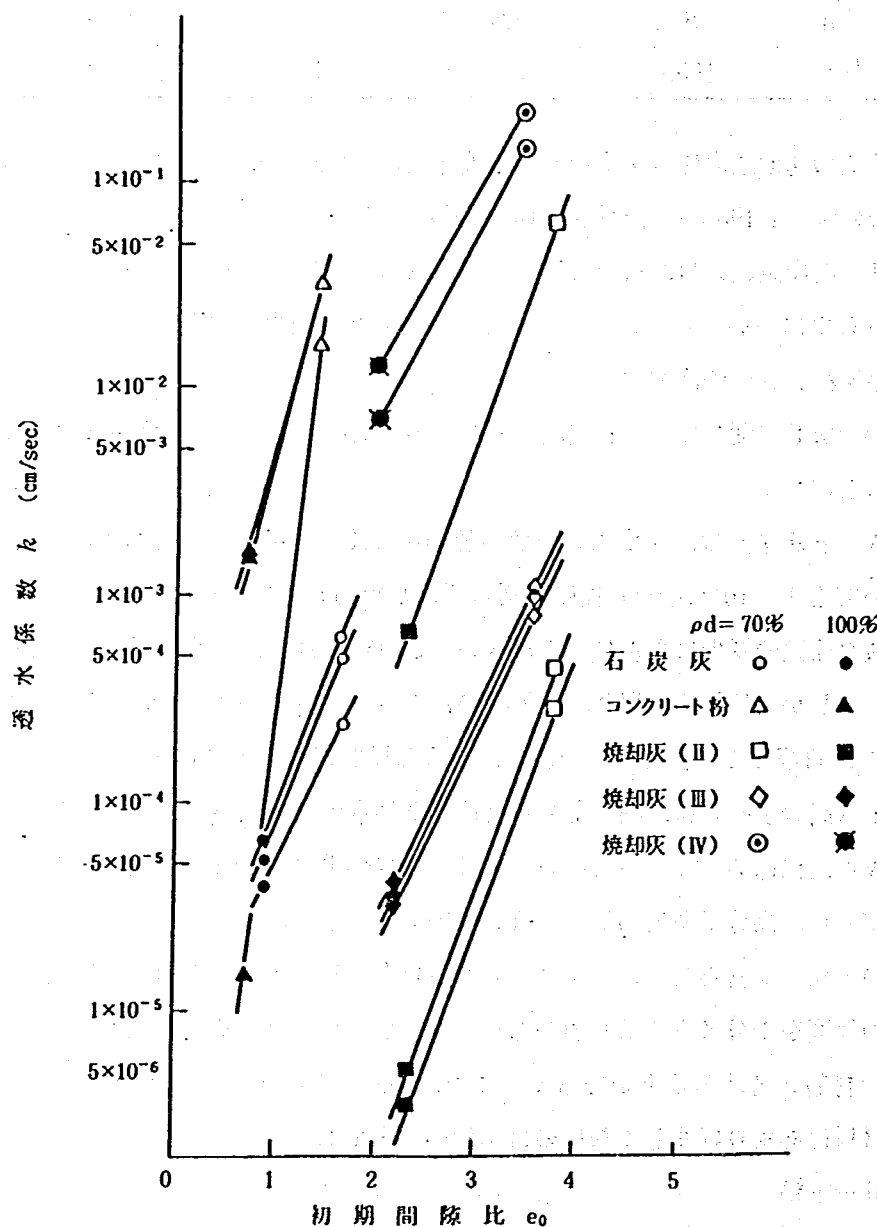


図-2.120 初期間隙比 (e₀) と透水係数の関係

る。また、石炭灰、焼却灰Ⅱ、焼却灰Ⅳに着目してみると概ねその勾配が等しいことがうかがえる。

また、図-2.121 焼却灰に関する既往の研究結果と初期透水係数の関係を比較して示すが、ほぼ同様の傾向にあり概ね傾斜で示した範囲内に分布するものと考えられる。

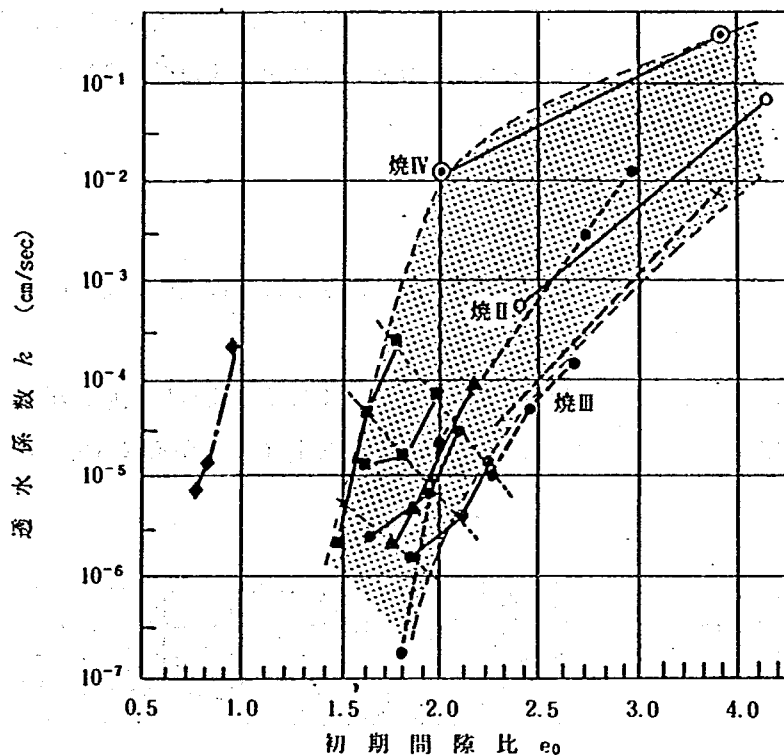


図-2.121 初期間隙比 e_0 と透水係数の関係 (既往研究との比較)

3. 深層混合処理への適用性に関する検討 (石灰系焼却灰によるピート質地盤の改良)

3-1 試験施工の概要と条件

本試験施工は、埼玉県与野市におけるピート層を対象として、焼却灰（石灰系）を粉体噴射攪拌工法（DJM工法）により原位置土と混合・攪拌させることによる改良効果を調べるとともに、室内配合試験結果との比較を行うものである。

(1) 試験施工の方法と条件

1) 廃棄物の種類

本試験施工では、粗粒状の焼却灰（石灰系焼却灰、埼玉県A処理場産）を用いた。

2) 試験施工箇所の地盤性状

本試験施工箇所およびその周辺の地盤性状は、図-3.1に示すように洪積砂層（Ds）を基盤とし、下位から粘性土層（Ac）、腐植土層（Ap）および表土・盛土（Ts）からなっている。

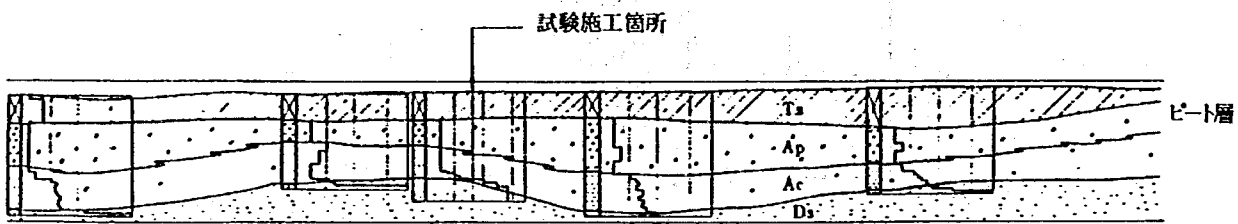
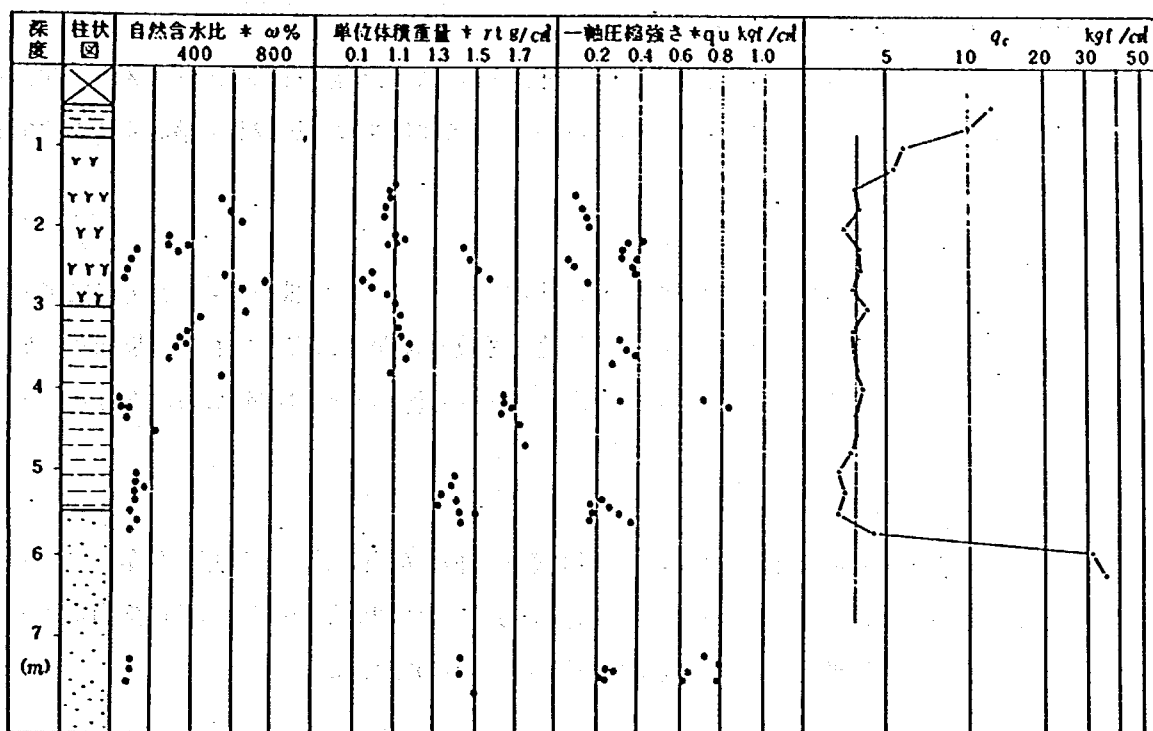


図-3.1 試験施工箇所周辺の地盤状況

また、図-3.2には既存のボーリング調査結果と本試験施工に先だって実施したオランダ式二重管コーン貫入試験結果を示す。この図において上層のピート層はボーリング箇所によって各々の値が大きくばらついているが、これは道路盛土あるいは埋土などの上載荷重を受けて圧密による強度増加の差が表われているためと考えられる。

事前のオランダ式二重管コーン貫入試験結果から原位置の強度を推測する q_u 値は約 $0.1 \sim 0.2 \text{ kgf/cm}^2$ ($q_c = q_u / 10$), $c_u = 0.1 \sim 0.15 \text{ kgf/cm}^2$ ($c_u = q_u / 2$)である。また原位置の含水比は改良柱体造成後、試験料を採取して測定した結果 $w_u \approx 500\%$ の値を得ており、上記の q_u と w_u を比較すると図-3.3からおおむね妥当な値であると考えられる。また、図より粘性土層は $q_u = 0.2 \text{ kgf/cm}^2 \sim 0.3 \text{ kgf/cm}^2$ であり、また自然含水比 w_u は約 100% であることがわかる。なお、ダッチコーンの値において上層のピート層と下層の粘性土層の有意な差は認められない。

図-3.3 試験施工箇所の概略の柱状図の改良範囲を示す。



※ 既存ボーリング結果

図-3.2 試験施工箇所およびその周辺の土質調査結果

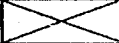
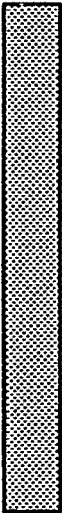
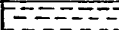
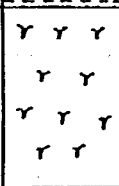
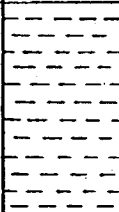
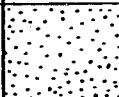
標尺 (m)	深度 (m)	土質記号	土質名	改良範囲
	0.5		埋 土	
	0.9		シルト	
1	3.0		有機質土	
2				
3				
4				
5	5.5		粘 性 土	
6			砂	

図-3.3 柱状図と改良範囲

3) 配合条件

本試験施工における配合条件は、表-3.1に示す3条件を設定した。なお、各ケースとも全混合率（ここで混合率とは原位置土の湿潤重量に対する改良材の重量比率を示す）を60%（約600kgf/cm³）

と一定とした。各配合のポイントを以下に示す。

配合No 1 ……焼却灰 (20%) + セメント (40%)

この配合は、現在周辺地区での改良工事において用いられている配合 (砂 20% + セメント 40%) に対応するものであり、焼却灰の増量材、または骨材としての作用を砂と比較して検討するものである。

配合No 2 ……焼却灰 (40%) + セメント (20%)

この配合は、上記No 1 の配合に対して焼却灰の量を増やし、セメントの量を減らしたものである。室内配合試験結果からこの配合では $q_u = 2 \text{ kgf/cm}^2$ 程度の強度発現が認められており、焼却灰を低強度改良 ($q_u = \text{数 kgf/cm}^2$) を目的とした深層混合処理へ利用する際の一つの有効な方法となるものと考えられる。

配合No 3 ……焼却灰 (60%)

この配合は、焼却灰を深層混合処理へ大量に利用する上で他の配合と比べて理想的な条件であるがNo 1, No 2 の配合条件と比較して高い改良強度を期待することはできず、焼却灰の地中応力下での自硬性による強度発現や含水比低下による強度増加を期待するものである。

表-3.1 試験施工における配合条件

No.	添加材の組合せ	混合率 (%)		配 合 の ポ イ ン ト
		焼却灰	セメント	
1	焼却灰 + セメント	20	40	・「砂20% + セメント40%」との改良効果の比較を行う。
2	〃	40	20	・焼却灰の混合量をNo 1 に比べて増加させた場合の改良効果を調べる。
3	焼 却 灰 単 体	60	—	・焼却灰の自硬性、含水比低下による改良効果を調べる。

注) 各配合条件とも材料の混合量は 600 kgf/cm^2 と一定である。

4) 施工方法

本試験施工では深層混合処理工法として粉体噴射攪拌工法 (DJM工法) を用い、添加材を粉粒体のまま土中へ供給し、攪拌混合させることにより改良柱体を造成した。

(a) 施工システム

図-3.4 に本試験施工における施工システムを示す。

また、表-3.2 には本試験施工において使用した機械設備の仕様一覧を示す。

(b) 施工手順

本試験施工では改良材 (焼却灰、セメント) を引抜時に噴射させ混合・攪拌する改良方式を用いた。

5) 改良効果確認のための試験項目

本試験施工では、改良後の効果を確認するために次表の項目について設定を行った。

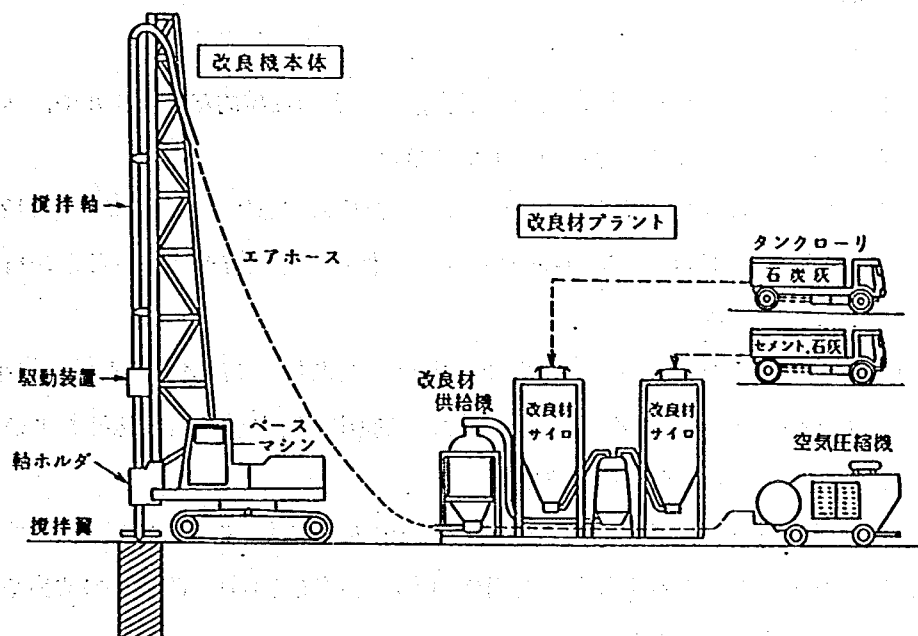


図-3.4 粉体噴射工法（DJM工法）による施工システム

表-3.2 DJM工法機械設備仕様一覧（試験施工時）

No	名 称	規 格	数 量	備 考
1	改 良 機 械 本 体	DJM-1037型 37kW	1 台	トルク1ton・m,単軸機
2	改 良 材 供 給 機	2000E 3.7kW	1 台	容量2ton
3	改良材サイロ（横型）	SHR-308 20.5kW	1 台	容量30ton（セメント用）
4	改良材サイロ（縦型）	5.5kW	1 台	容量20ton（焼却灰用）
5	発 電 機	175kVA	1 台	完全防音型
6	エアーコンプレッサー	10.5m ³ /min	2 台	
7	スクリーコンベア	3.7kW	4 台	
8	ホ ッ パ ー 計 量 器	秤量300kg	2 台	
9	受 ホ ッ パ ー		1 台	

表-3.3 改良効果確認のための試験項目

項 目	実施ケース	備 考
オランダ式貫入試験	No 2, 3	施工前の q_c 値との比較（28日後）
サ ン プ リ ン グ	全ケース	$q_u, E, \epsilon, \gamma, w$ を測定（各深度毎）（28日後）
杭頭堀出しによる観察	〃	形状、品質などを観察

3-2 試験施工の結果

(1) 施工状況

本試験施工では、各ケースとも改良材の供給、混合攪拌などの機械的なトラブルや、スモーキング（粉塵）を生ずることなく、ほぼ計画通りの施工ができた。

本試験施工において所定の改良材供給（50kgf/分）のための空気圧はNo 1, No 2 では2.8kgf/cm², No 3 では3.5kgf/cm²であり、粗粒状の焼却灰単体を土中に供給するにはセメントなどの材料より若干高い空気圧が必要なのである。

引上げ時の攪拌軸の回転速度は各ケースとも30~40 rpmであり、また引上げ速度は、図-3.5に示すとおりおおむね0.18m/minである。図-3.5は、試験施工時の引き上げ速度および50cm当りの改良材投入量を各深度ごとに示したものである。

これらの結果から、焼却灰などの材料を粉粒体のまま土中に供給し、または混合・攪拌するにあたって、通常の改良材（セメント、生石灰など）と同様の方法で可能であり、改良機の改良や特殊な機械設備を必要としないという結論を得た。

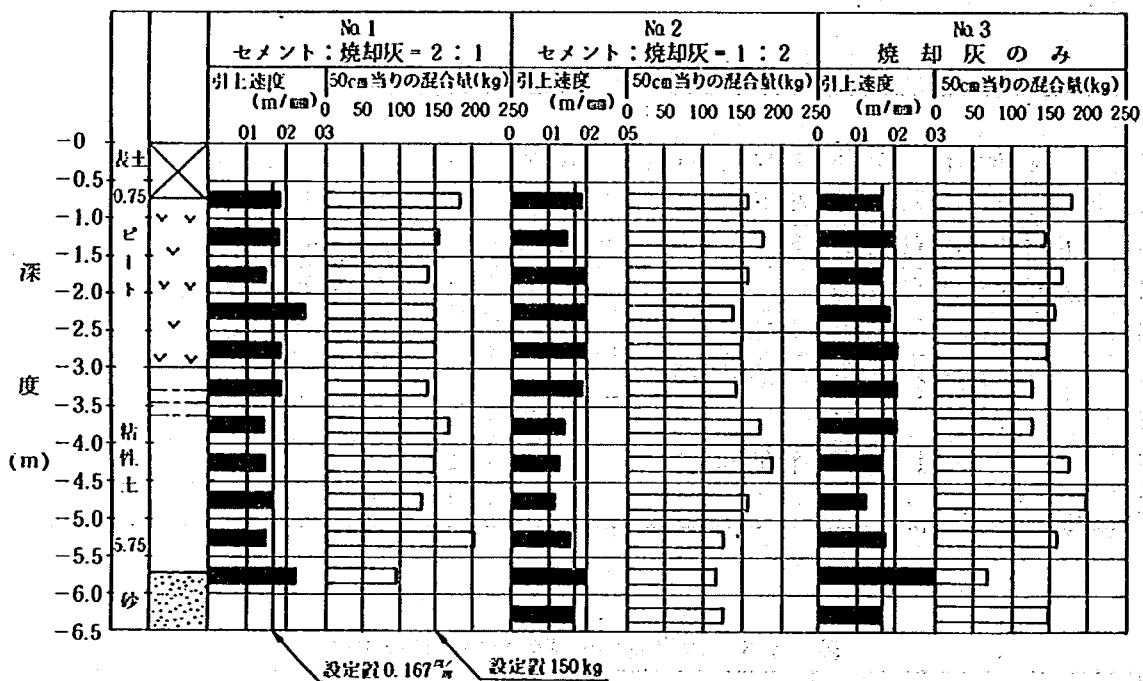


図-3.5 引上げ速度と50cm当り混合量（実測値）

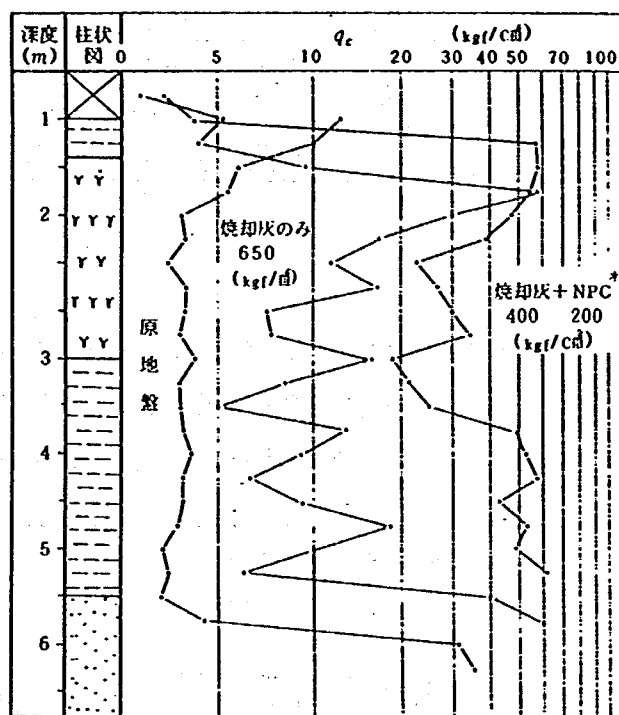
(2) 改良柱体の強度特性

1) オランダ式二重管コーン貫入試験結果

図-3.6には改良造成28日後におけるオランダ式二重管コーン貫入試験結果を示す。この図においては改良前、No 2（焼却灰40%、セメント20%）およびNo 3（焼却灰単体60%）の結果を比較して示してある。この図より原位置土では q_c 値が3kgf/cm²程度であるのに対し、No 3ではばらつきが

あるものの約 10kgf/cm^2 と原位置土の 3 倍程度の強度が発現しており、焼却灰単体であっても比較的良好な改良効果が得られることが認められる。また、No 2 の条件では q_c 値が $20\sim 60\text{kgf/cm}^2$ であり、原位置土に比べて $10\sim 20$ 倍程度強度の発現が認められる。

以上のオランダ式二重管コーン貫入試験結果から、焼却灰単体を混合攪拌した条件であってもある程度の改良が可能であり、またセメントなどの固化材を組合せることにより更に強度の増加を図ることができものと考えられる。このような結果は、室内配合試験結果および後述するコアサンプルによる一軸圧縮試験においても確認されている。



* NPC : 普通ポルトランドセメント

図-3.6 オランダ式二重管コーン貫入試験結果

2) コアサンプルによる一軸圧縮結果

表-3.4 には各ケースの材令 28 日におけるコアサンプルの室内試験結果を示す。この表よりピート層における各ケースの q_c 値および含水比 (w) の平均値は、No 1 では $\overline{q_c} = 6.97\text{kgf/cm}^2$ 、 $\overline{w} = 80.5\%$ 、No 3 では $\overline{q_c} = 1.76\text{kgf/cm}^2$ 、 $\overline{w} = 81.4\%$ である。なお、No 2 のピート層におけるサンプリング結果は十分でなく、No 2 の改良効果の評価は前述したオランダ式二重管コーン貫入試験結果および杭頭部掘出しによる観察結果を用いて行うことが妥当であると考えられる。

表-3.4 コアサンプルの室内試験結果 (材令28日)

No	ピー ト 層				粘 性 土 層				配 合
	q_u (kgf/cm ²)	w (%)	E_{50} (kgf/cm ²)	ρ_t (g/cm ³)	q_u (kgf/cm ²)	w (%)	E_{50} (kgf/cm ²)	ρ_t (gr/cm ³)	
1	5.915	88.0	1,848.4	1.452	13.246	74.1	3,311.5	1.361	セメント400 kgf/m ³ 焼却灰200 kgf/m ³
	11.791	60.6	2,03.9	1.457	-	-	-	-	
	3.222	93.0	322.2	1.244	-	-	-	-	
平均	6.976	80.5	1,401.7	1.384	13.246	74.1	3,311.5	1.361	
2					3.718	76.5	715.0	1.363	セメント200 kgf/m ³ 焼却灰400 kgf/m ³
					-	-	-	-	
					-	-	-	-	
平均	-				3.718	76.5	715.0	1.363	
3	2.367	75.5	369.8	1.386	0.879	81.9	46.3	1.398	焼却灰600 kgf/m ³
	1.637	81.8	204.6	1.395	-	-	-	-	
	1.260	87.0	85.1	1.371	-	-	-	-	
平均	1.755	81.4	219.8	1.388	0.879	81.9	46.3	1.398	

(a) ピート層における試験結果

図-3.7には、ピート層における焼却灰添加量およびセメント添加量と平均一軸圧縮強さ ($\bar{q}_u$)、平均含水比 (w) の関係を現場試験結果と室内配合試験結果を比較して示す。なおこの図においてNa 2の q_u 値は $q_u = q_c / 10$ の関係から前述した q_c の値より推定した値を用いている。この図より改良添

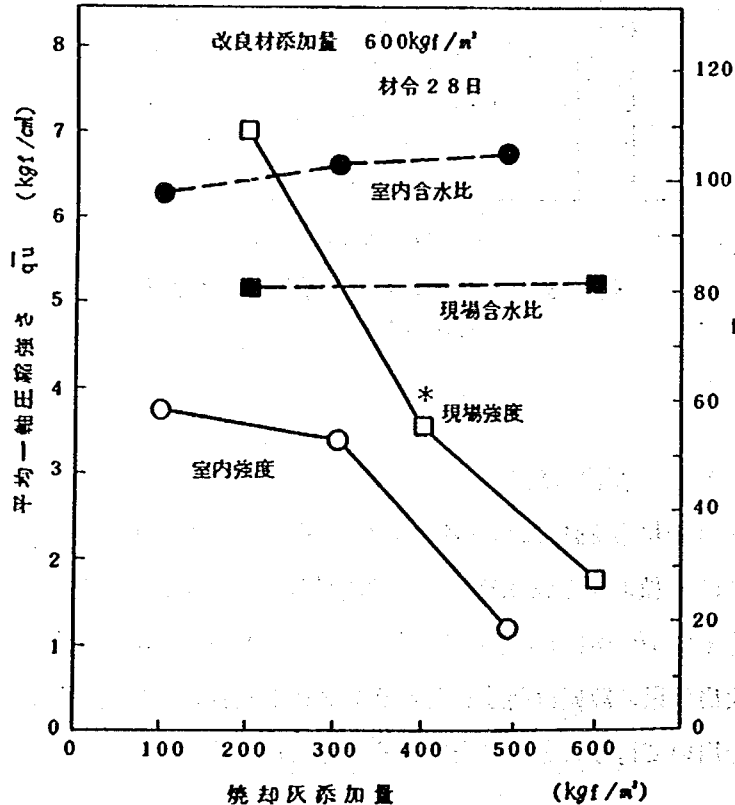


図-3.7 添加量～平均一軸圧縮強さ～平均含水比 (ピート層)
(*Na 2は、 q_c 値から推定した値である。)

加量が一定である場合、焼却灰添加量の増大とともに一軸圧縮強さが減少しており改良効果は主にセメントによる割合が大きいことがわかる。この結果は現場試験、室内試験とも一致している。またNo 1, No 3とも平均含水比 w が原位置土の含水比 w_0 500%から80%程度まで大幅に低下しており、この結果もほぼ室内配合試験結果と一致する。以上のことから、室内配合試験結果と現場試験とは比較的良い一致を示しており、一般に言われている現場強度の室内強度に対する低減は本試験結果においては見られない。

図-3.7において現場試験での焼却灰単体で用いた条件に着目してみると、平均一軸圧縮さ(q_u)が1.76kgf/cm²、平均含水比(w)が81.4%および平均密度(ρ_t)が1.388g/cm³と原位置土の性状($q_u=0.1\sim0.2$ kgf/cm², $w \approx 500\%$, $\rho_t=1.01$ g/cm³)と比較すると焼却灰単体であっても十分の改良効果が発現しているものと考えられる。また図-3.7において現場試験結果と室内配合試験結果を比較すると、初期の含水比(室内では650~800%, 現場では約500%)の影響があるものの比較的良い対応が認められる。このことから粉粒体の焼却灰を粉体噴射攪拌工法のような深層混合処理工法を用いて機械的に原位置土と攪拌混合することにより、周辺の土中水の影響をあまり受けることなく限定された範囲内(攪拌翼径)でこれら材料の特性を生かすことが可能であることがわかる。

図-3.8には、室内試験結果からNo 1, No 3のピート層における各供試体(各ケース3供試体)の一軸圧縮強さ(q_u)と含水比(w)の関係を示したものである。この図において各ケースにおける q_u と w の間には比較的良い相関があり、 w の増加に伴い q_u が減少していることがわかる。これらの結果は一般的なセメントなどの改良材を用いた場合と同様の傾向を示しており、図-3.8からもある所定の強度を発現させる場合含水比の影響は無視できない重要な因子であるとともに改良柱体の強度のバラツキと原位置土の含水比のバラツキの間には強い相関があるものと考えられる。更に図-3.8から含水比の比較を行うことによって q_u の推測もある程度可能であると考えられる。

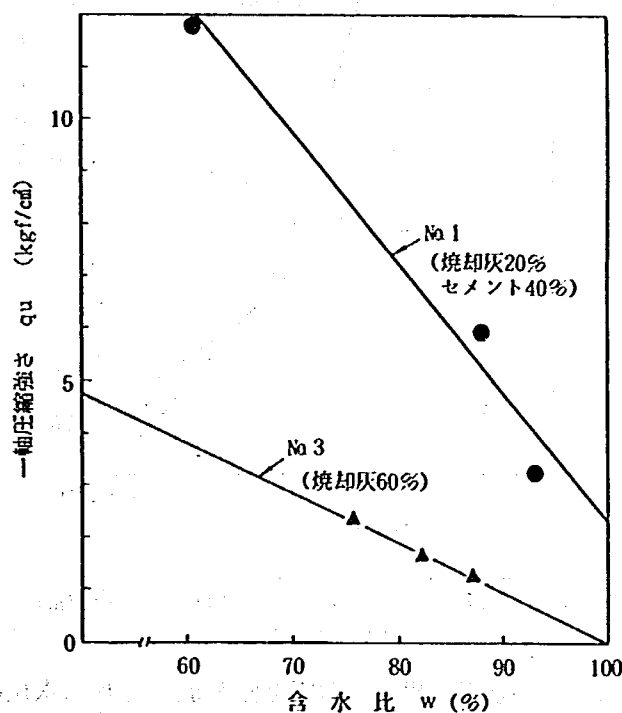


図-3.8 各供試体の q_u と w の関係(ピート層)

(b) 粘性土層における試験結果

図-3.9には下層の粘性土層における焼却灰添加量およびセメント添加量と平均一軸圧縮強さ (q_u), 平均含水比 (w) の関係をピート層における結果を併記して示したものである。この図において前述したピート層の場合と同様の全混合量一定条件では, 焼却灰混合量が増大するとともに一軸圧縮強さが減少しており, 更にこれに対応して含水比が増加していることがわかる。すなわち粘性土層においてもセメント量によって改良効果が大きく影響されることがわかる。また q_u をピート層と比較すると原位置土の含水比に大きな差があるにもかかわらず, No. 1 を除いて No. 2, No. 3 ではほぼ等しい値を示している。この結果は, 土の物性に起因する攪拌時の練混ぜやすさ (原位置土と添加材の混合のしやすさ) によるものと考えられるとともに施工の影響が表われているこめと考えられる。

3) 杭頭部堀出しによる改良柱体の観察結果

写真3.1～3.4は, 改良施工約30日後杭頭部を堀出した際の各改良柱体の形状および観察結果を示したものである。この表に示すとおり, 各ケースとも比較的形の整った円柱状を呈しており, また改良柱体の直径もほぼ攪拌翼径 (80cm) とほぼ等しい状態であった。特に, No. 3 (焼却灰単体) の条件においても周辺の未改良部分と明らかに強度が異なり, 人力による比較的荒い堀削作業を行っても十分良好な形状の改良柱体を堀出すことができた。

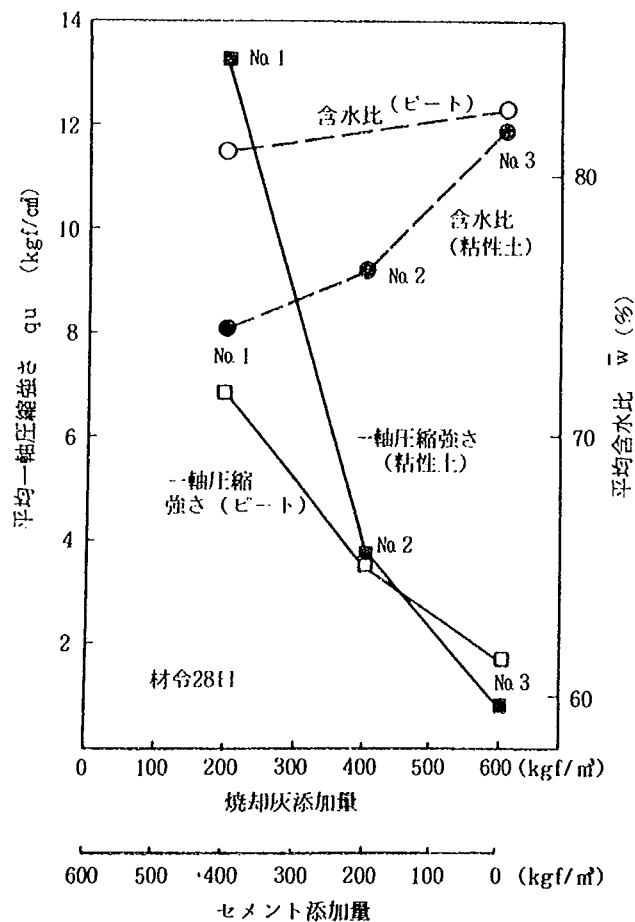
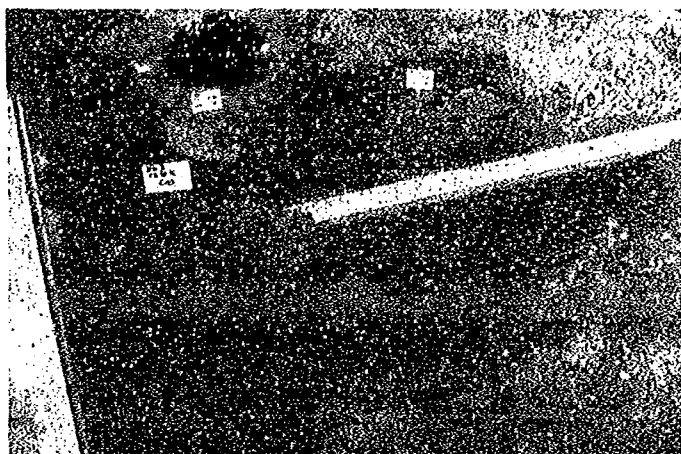


図-3.9 添加量～平均一軸圧縮強さ q_u ～平均含水比 w (粘性土層)



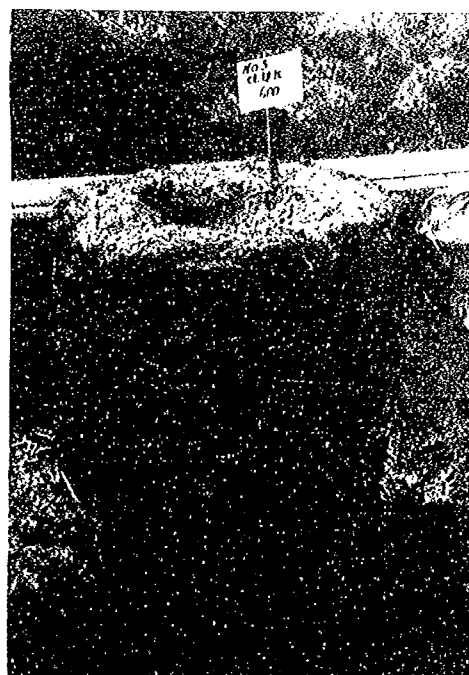
写真－3.1 掘出し後の改良柱体の全体状況



写真－3.2 No. 1 改良柱体
(セメント400kgf/m³, 焼却灰200kgf/m³)



写真－3.3 No. 2 改良柱体
(セメント200kgf/m³, 焼却灰400kgf/m³)



写真－3.4 No. 3 改良柱体
(焼却灰600kgf/m³)

4. 石炭灰・下水汚泥焼却灰等による深層混合処理の調査・施工の概要及び留意点

4-1 調査

4-1-1 事前調査

事前調査は、軟弱地盤の性質や深層混合処理工法の改良形式・改良率、改良強度など設計に必要な条件を決定する上で基本となるものであるから慎重に行なう必要がある。

深層混合処理工法を実施する場合に必要な事前調査は、図-4.1に示すように(1)原位置試験、(2)土質試験(物理・化学試験)、(3)石炭灰・焼却灰等の物性試験、(4)室内配合試験、(5)試験施工に大別される。これらの各試験のうち(1)、(2)の試験は、軟弱地盤での工事の際、通常実施されるものであるが、(4)、(5)は、深層混合処理工法などの化学的地盤改良工法特有の試験である。また、(3)の試験は廃棄物に関する試験項目である。

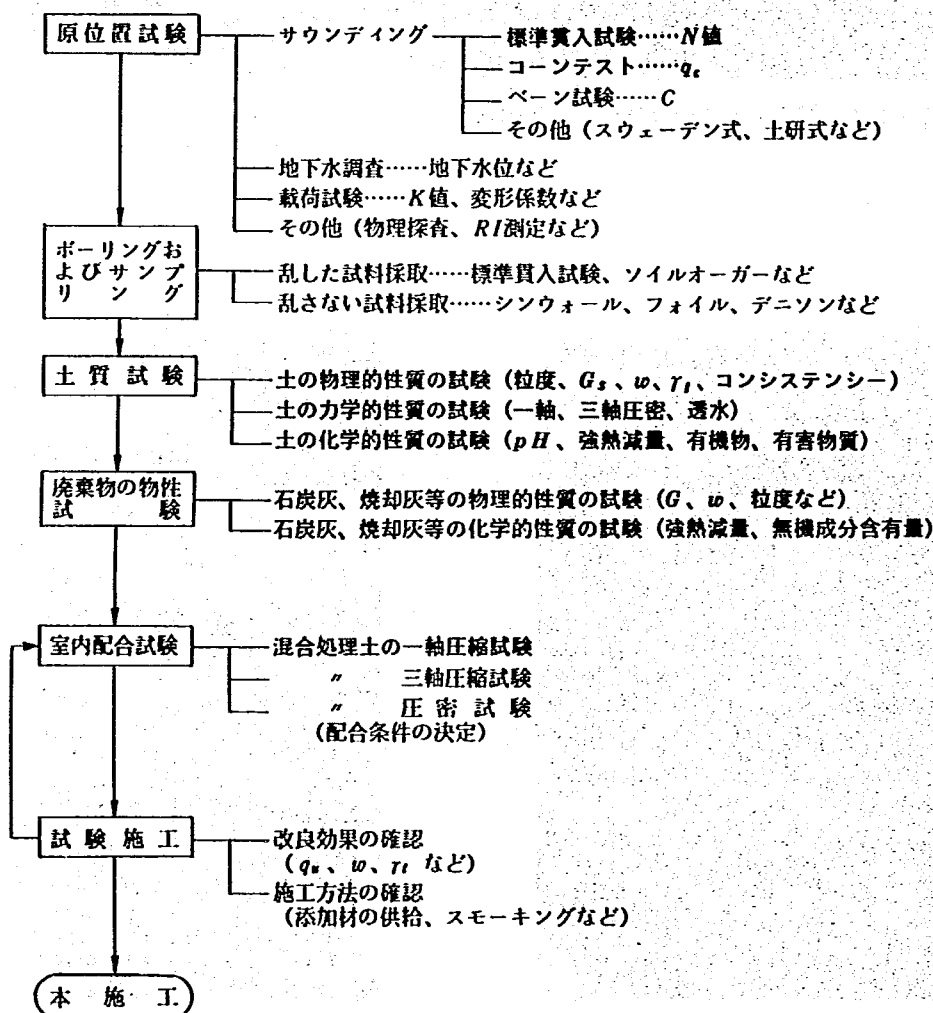


図-4.1 事前調査

以下に各試験における試験項目および試験方法について述べる。

(1) 原位置試験

原位置試験は、改良工事の対象となる軟弱層の深さ、厚さ、広がり、基盤層までの深さなどをとら

え地盤の成層状態を把握する目的で行うものである。調査方法には、サウンディングとサンプリングとがあり、サウンディングには標準貫入試験やオランダ式コーン貫入試験およびスウェーデン式サウンディングなどがある。特に軟弱層の厚さや土層構成が複雑な地盤においては、サウンディングを実施し、軟弱層の分布をある程度正確に把握しておく必要がある。また、サンプリング試料は、次の項目の土質試験用の試料とするとともに室内配合試験用の試料とする。なお、調査は、一般的に50m～200mの間隔で行う。

また、既往の土質調査結果などの資料も十分に活用できるので収集するとよい。以上のサウンディングあるいはサンプリング結果から対象地盤の土層を区分し、土層断面図を作成する。

(2) 土質調査

深層混合処理工法を実施するのに先だって改良対象土の土性を十分把握しておく必要がある。事前調査段階における土質試験は①土の物理的性質試験、②土の化学的性質試験、③土の力学的性質試験に大別できる。

これら試験における試料土は、シンウォールサンプラーなどにより深度毎に採取したものを用いる。なお、上記①、②については、乱した試料でもかまわないが、③については、乱さない試料を用いるものとする。また、先に述べように深層混合処理工法による改良強度は、対象土の物理・化学的性質に大きく影響されるため、原位置試験の結果、対象地盤の土質が複雑であったり、高含水比粘性土や有機質土が介入している場合には、このような土層を見逃すことのないように留意する必要がある。

なお、軟弱地盤における土質調査の詳細に関しては、「土質調査法」（土質工学会編）、「道路土工－土質調査指針」や「道路土工－軟弱地盤対策工指針」（日本道路協会編）及びその他の専門書に記載されているので参照されたい。

以下には、深層混合処理工法において一般に行なわれている「土質試験」項目について紹介するが、石炭灰や下水汚泥焼却灰などの材料を用いる場合にも、これら準拠して行なうとよい。

表－4.1には、「土質試験」の項目を示す。

表－4.1 土 質 試 験 項 目

性 質	試 験 項 目	試 験 方 法
物 理 的 性 質	土粒子の比重	JIS A 1202
	含水比	JIS A 1203
	湿潤密度	JIS A 1214, JSF T 33-36
	粒度分布	JIS A 1204, JSF T 22
	コンシステンシー	JIS A 1205, JIS A 1206
化 学 的 性 質	pH	JSF T 7
	有機物含有量	JSF T 8, JSF T 9
	フミン酸含有量	参考 I 参照
力 学 的 性 質	一軸圧縮強さ	JIS A 1216
	三軸圧縮強さ	土質工学会基準（案）
	その他 圧密特性	ペーン試験 JIS A 1217

① 土の物理的試験

原位置土の物理的性質に関する試験項目には、比重（ G_s ）、含水比（ w ）、湿潤密度（ ρ_i ）、粒度分布、コンシステンシーがある。なお、工事規模によってはこの表に示す全項目について試験を実

施する必要がないが、これらの項目のうち最低限原位置地盤における深度方向の含水比の分布状態を把握しておく必要がある。

② 土の化学的試験

表-4.1に示したように土の化学的試験項目としてpH試験、有機物含有量試験がある。繰り返して述べているように深層混合処理工法の改良原理は原位置土と改良材との化学的固結作用に基づくため、これらの値を把握しておくことが望ましい。

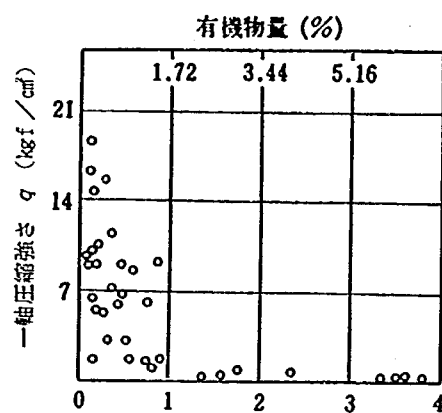


図-4.2 有機炭素含有量の影響 (Thompson, 1966)

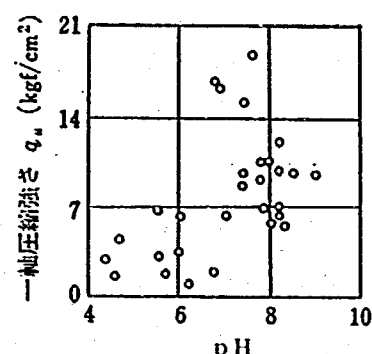


図-4.3 対象土のpHの影響 (Thompson, 1966)

これまでセメントまたは石灰などの改良材を用いた室内配合試験結果によると、図-4.2、図-4.3に示すように原位置土が酸性の土ほど、また土中の有機物含有量が多い土ほど同量の添加量に対して改良強度の発現が小さい傾向にあることが知られている。このことは、石炭灰や下水汚泥焼却灰を深層混合処理に用いる場合も同様である。なお、高有機質土の場合pH、有機物含有量試験のほかにフミン酸含有量も測定しておくことが望ましい。

③ 土の力学的試験

一般的に行われる現位置地盤の力学的試験として、一軸圧縮試験、圧密試験などがある。また、必要に応じて三軸圧縮試験を行う。

(3) 石炭灰・焼却灰等の物性試験

石炭灰・焼却灰等の物性に関する試験項目を表-4.2に示す。

石炭灰または焼却灰は、産出場所、産出日によってそれらの物性および品質が異なる。そのためこれらの材料の物性・品質に関しては可能な限りチェックする必要がある。

これらの項目のうち、酸化カルシウム (CaO) 成分、シリカ (SiO_2)、アルミナ (Al_2O_3) の含有率および石灰成分の活性度 (焼却温度、灰中の湿分など) が混合処理土の強度発現に大きく影響することから表に示した無機成分含有量試験を行うことが望ましい。

さらに、粉粒状で深層軟弱地盤中へ供給する場合、現状の改良機械では、最大粒径が5mm以上の粒径の材料の供給は困難であるとされている。すなわち材料の粒度は、材料の供給が可能かを検討するために必要なものである。なお、石炭灰・焼却灰中に含まれる有害物質の測定項目および方法に関し

ては、「参考」に記載したので参照されたい。

表-4.2 石炭灰・焼却灰等の物性試験項目

性 質	試 験 項 目	試 験 方 法
物 理 的 性 質	比重	JIS A 1202に準ずる。
	単位体積重量	JIS A 1214 "
	含水比	JIS A 1203 "
	ブレン値	
	粒度分布（最大粒径）	JIS A 1204, JIS T 22
化 学 的 性 質	強熱減量	JIS T 8, JIS T 9
	pH	
	無機成分含有量	
	CaO, SiO ₂ , Al ₂ O ₃	
	Fe ₂ O ₃ , MgOなど	

(4) 室内配合試験

室内配合試験は、深層混合処理工法の設計または現場施工に先だって、改良材の種類（石炭灰・焼却灰等とセメントなどとの配合比率）、混合量を決定するためのものである。室内配合試験方法は、「締固めを伴わない安定処理土の試験方法」（土質工学会基準案）に準じて実施する。また、表層混合処理工法など締固めを伴う地盤改良工法の場合は、「締固めによる安定処理土の一軸圧縮試験方法」（土質工学会基準）に準拠すればよい。

以下に、室内配合試験方法の手順を述べる。試験手順は、次の①～⑥からなり、図-4.4にそのフローを示す。

① 配合試験の計画

室内配合試験を実施するにあたって、改良材の種類および混合量の概略の目安を設定する必要がある。特に石炭灰・焼却灰等の場合、セメントおよび石灰との組合せが考えられることから石炭灰・焼却灰と他の材料との混合割合を数条件設定する必要がある。なお、既往の結果を利用すると合理的な配合試験計画を立てることができる。

② 試料土の採取、保存

改良対象となる範囲内の地盤を代表する各土層より、配合試験に必要な量の試料土を採取する。採取された試料土は、試験実施までの間にその物理的あるいは化学的变化を極力小さくするように保存する。

③ 試料土の調整と改良材の種類

試験は、通常採取した原地盤の自然含水比状態で実施する。試験実施までの過程で含水比が変化している場合には、自然含水比に調整する。改良材は現地で実際に使用するものを用いる。

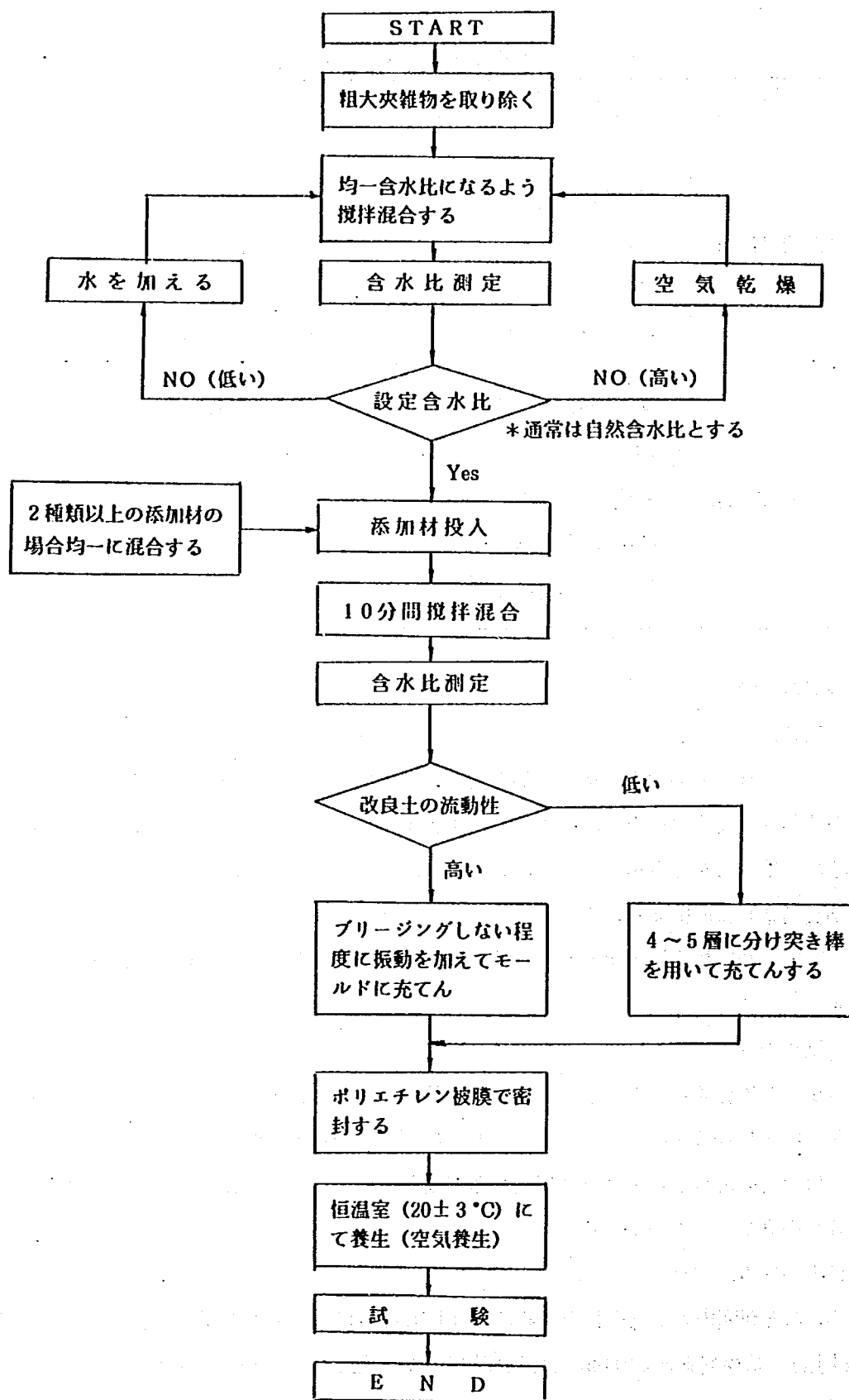


図-4.4 供試体作製方法フロー

④ 混合

試料土と改良材の混合には、ソイルミキサーを用いて10分間混合する。へらを用いて混合土を切り返すなどして混合状態が完全となるようにする。

⑤ モールドへの充填

混合処理された試料土は、直ちに2つ割モールドへ充填する。気泡を残さぬために、ブリージングしない程度に振動を与える。流動性が低く振動の効果のない場合は、突棒などにより充填する。

⑥ 養生

充填したモールドは、水分の出入りがないように湿潤状態でかつ $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ の一定温度で力学的試験実施までの間養生する。

通常、材令を7日、14日、28日に設定することが多い。

⑦ 力学的試験

室内配合試験における改良効果の判定は、通常一軸圧縮試験によることが多い。一軸圧縮試験は、JIS A 1216に規定する方法に準じて行なう。

また、必要に応じて三軸圧縮試験、引張試験などを実施する場合がある。

(5) 試験施工

深層混合処理工法は、主に改良材と原位置軟弱土との化学的固結作用による地盤改良工法であるから、前章において述べたように、改良土の強度は、原位置土の性質(特に自然含水比、有機物含有量)、改良材の種類、改良材の混合量、混合度合などの影響を大きく受ける。そのため以下に挙げるような原因から、原位置における改良強度の発現が小さい、またはばらつきが大きいなど室内配合試験における結果と大きく異なることがある。

- ① 改良範囲が広い場合または改良範囲の延長が長い場合は、部分的に地盤構成、土質性状が大きく異なることがよくあり、室内配合試験において対象とした土質より高含水比であったり有機物を多く含む土質であることがある。この場合同量の改良材では室内配合試験結果に比べて強度が小さく、またばらつきが大きくなる傾向にある。
- ② 原位置軟弱土と改良材の攪拌・混合が十分に行われない場合、または改良材の供給に支障をきたした場合は改良強度が小さく、または、ばらつきが大きい。
- ③ 添加材の品質のばらつきが大きい場合、改良体の品質のばらつきも大きくなる。(特に石炭灰・焼却灰等の品質のばらつきの大きいと考えられる材料の場合)これらの点を確認するために、本施工の前に事前に検討した改良材の種類、混合量などの施工条件を用いて試験打ちを行うことが望ましく、試験施工の結果によっては、混合量などの施工条件の見直しが必要になる。

4-1-2 事後調査

事後調査は、地盤改良の結果が設計を満足しているかどうかを確認するために実施するものである。調査方法としては、以下にあげるものがある。

- ① チェックボーリングなどによる改良効果確認
- ② 改良柱体の頭部掘出しによる確認

③ 構造物、盛土などの築造時の動態観測による改良地盤全体の評価

以上の方法のうち、通常は①のチェックボーリングによるコアの一軸圧縮変化またはサンプリング試料観察を行う場合が多い。

なお、石炭灰または焼却灰単体の配合で実施した場合は、それほど大きな強度が発現しないため、静的コーン貫入試験なども有効な手段と考えられる。

図-4.5には、従来のセメントを用いた施工事例における改良効果の整理方法を示す。石炭灰・焼却灰による改良の場合も、このような整理方法を参考にし改良前と改良後を比較することが望ましい。

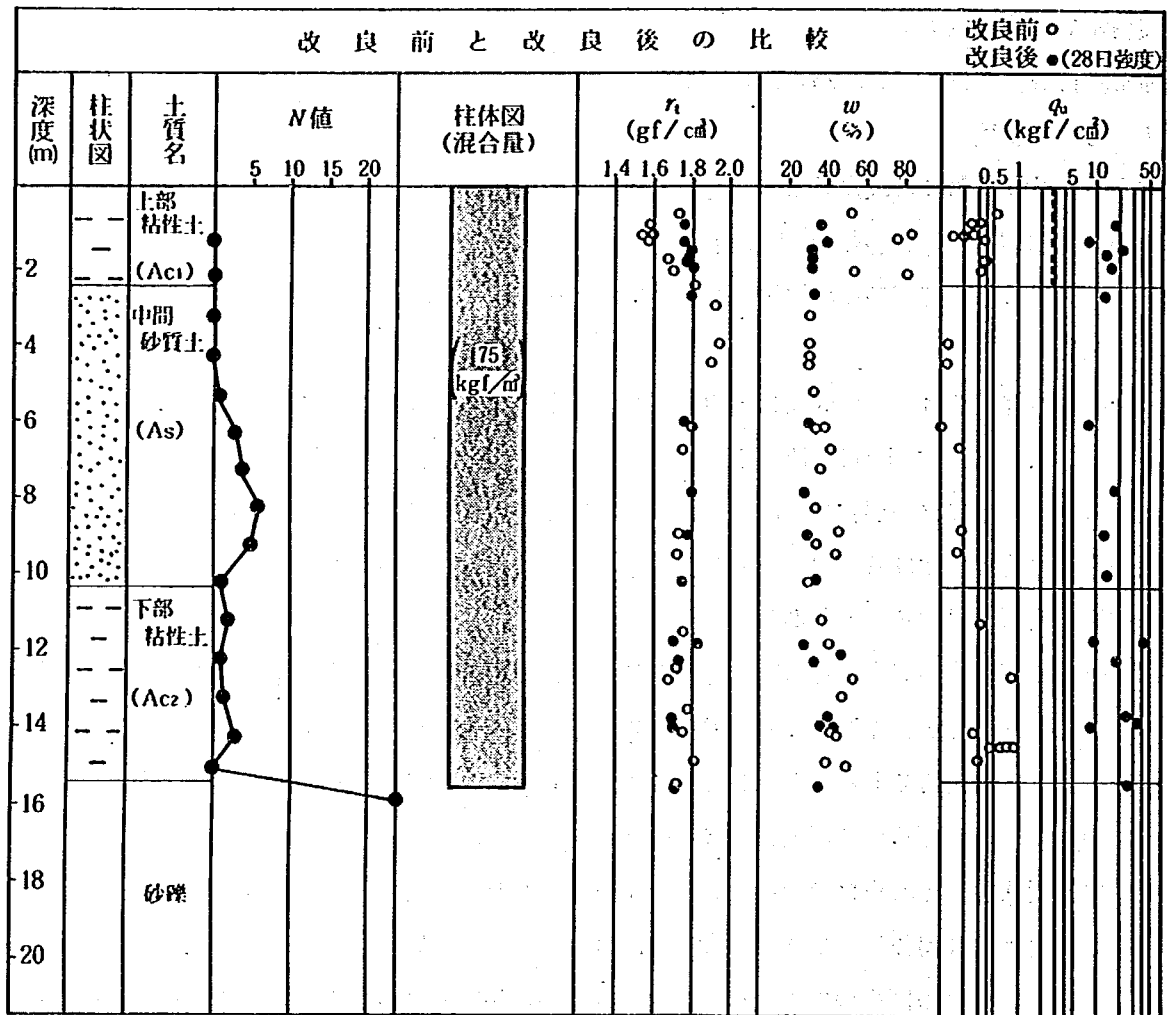


図-4.5 改良効果の比較例（整理方法例）

4-2 施 工

4-2-1 施工概要

深層混合処理工法は、地中に供給された石灰やセメントなどの安定材と地中の原位置土を機械的方法で攪拌混合し、化学的な固結作用により軟弱地盤を強化するものである。表-4.3(1), (2)に示すように改良材の地中への供給・吐出方法の違いにより機械式攪拌と高圧ジェット攪拌に大別される。また、改良材の性状により「粉粒体供給方法」と「スラリー供給方式」に分けられる。ここでは前述し

表-4.3(1) 深層混合処理工法の攪拌方式による分類

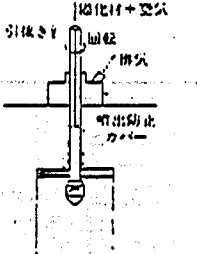
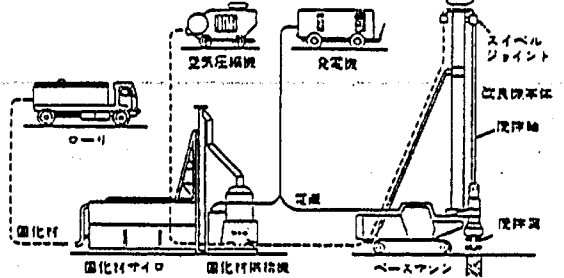
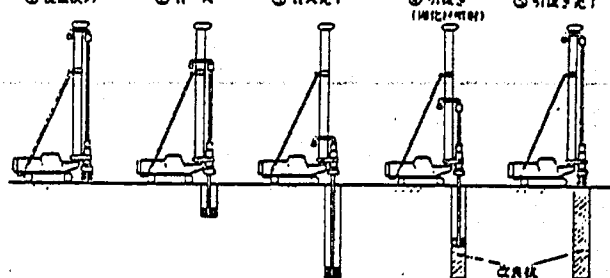
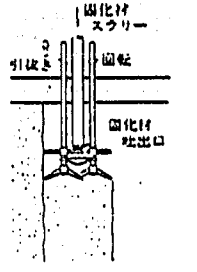
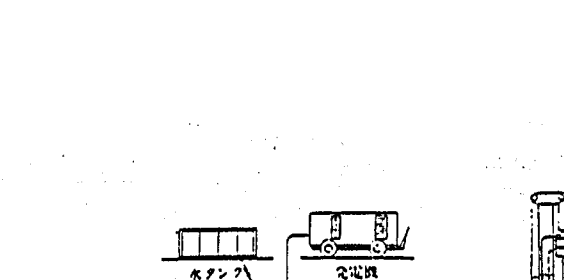
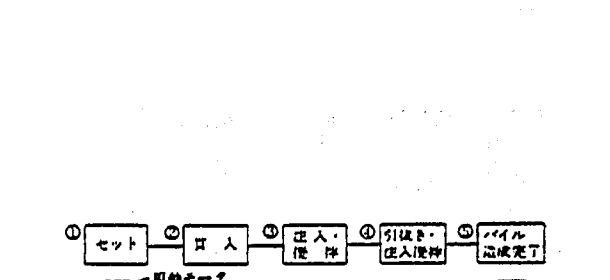
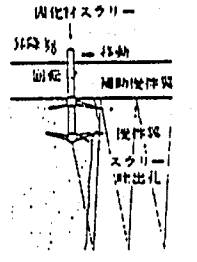
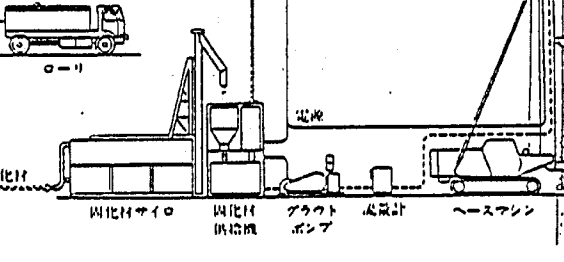
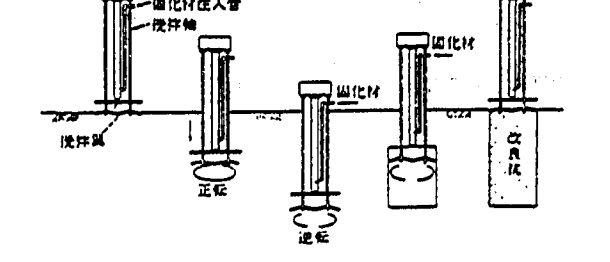
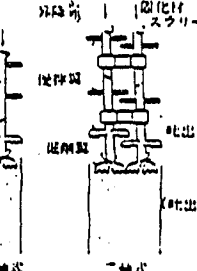
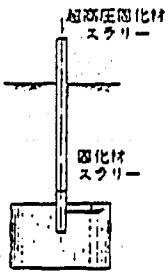
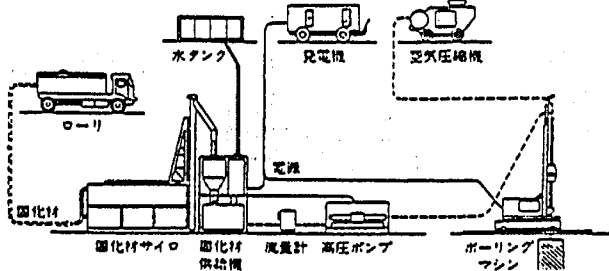
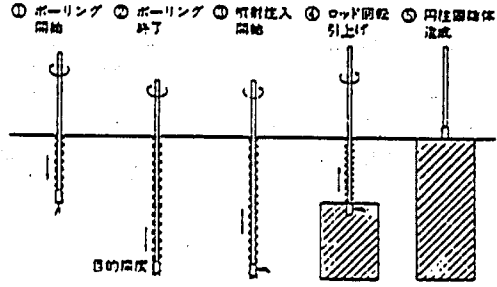
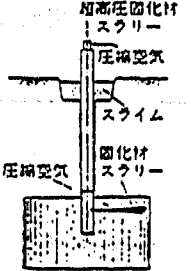
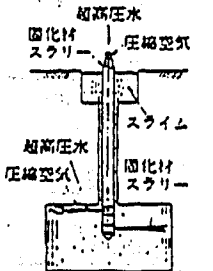
	方式	攪拌部先端	施工機械の構成	施工手順
機械式攪拌工法	粉体混合方式	 引抜き、回転、排気、吐出防止カバー (粉体混合方式)	 固化材、固化材サイロ、固化材供給機、ベースマシン、スキャッフポイント、攪拌軸、攪拌翼	 ①位置決め ②下入 ③下入完了 ④引抜き(固化材噴射) ⑤引抜き完了
	DLM系方式	 引抜き、回転、固化材スラリー、固化材吐出口	 水タンク、固化材、固化材サイロ、固化材供給機、ベースマシン、攪拌軸、攪拌翼	 ①セット ②下入 ③下入完了 ④引抜き(固化材噴射) ⑤引抜き完了
	HCM系方式	 引抜き、回転、固化材スラリー、補助攪拌翼、攪拌翼、スラリー吐出孔	 固化材、固化材サイロ、固化材供給機、ベースマシン、攪拌軸、攪拌翼	 ①セット ②下入 ③下入完了 ④引抜き(固化材噴射) ⑤引抜き完了
工法	MIP系方式	 引抜き、回転、固化材スラリー、吐出口 一軸式、二軸式		 ①セット ②下入 ③下入完了 ④引抜き(固化材噴射) ⑤引抜き完了

表-4.3(2) 深層混合処理工法の攪拌方式による分類

	方式	攪拌部先端	施工機械の構成	施工手順
高圧ジェント攪拌工法	スラリー 噴射方式			
	スラリー・エア 噴射方式			
	水・エア、 スラリー 噴射方式			

たように、機械的攪拌方式で粉粒体を供給する方式の一つである粉体噴射攪拌工法（以下、D J M工法）を例にして述べることにする。

4-2-2 施工機械

D J M工法の施工機械の構成は図-4.6に示すように、攪拌翼、攪拌軸、スィベルジョイント、駆動モーター、リーダー、クローラー式ベースマシン（2軸施工機械の場合）より成る改良機本体と改良材貯蔵サイロ、粉体圧送ホース、改良材供給機より成る改良プラントで構成されている。また、複数種類の改良材を組合せて使用する場合には、それぞれの改良材サイロと粉粒体混合装置が必要とされる。

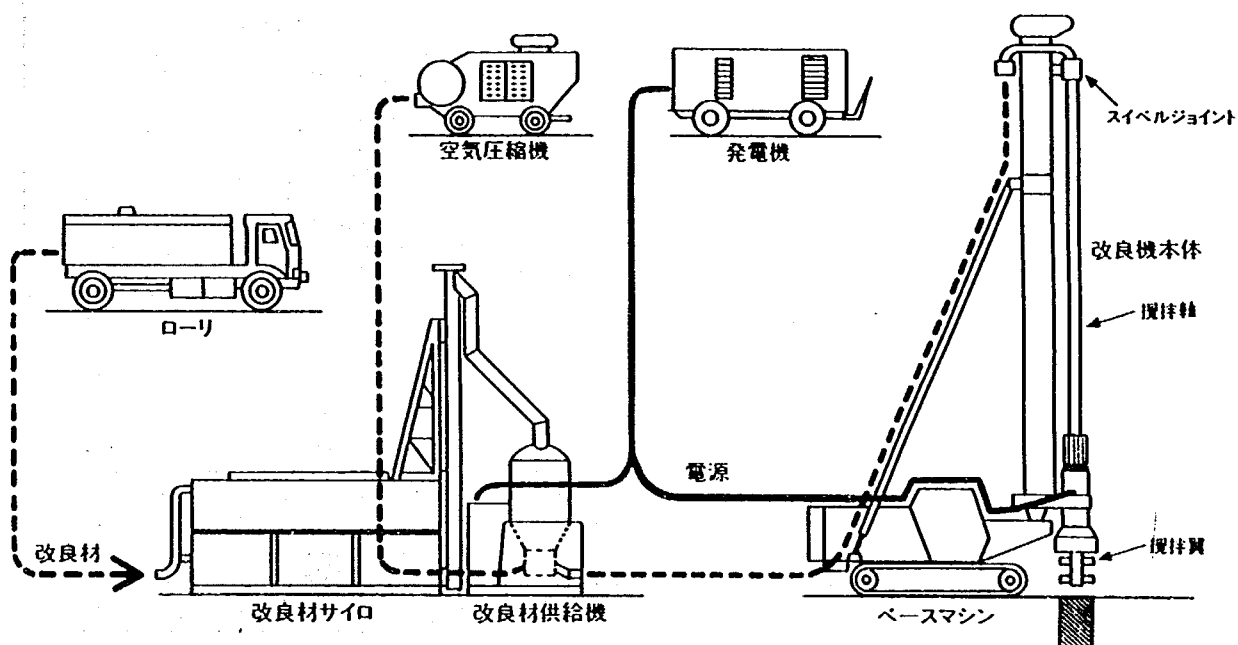


図-4.6 D J M工法施工機械（D J M工法技術マニュアルより）

なお、施工機械には前述したように、1軸型と2軸型があり、両施工機械の仕様については、表-4.4に示す。また、以下にそれぞれの構成機械について簡単な説明を加える。

表-4.4 DJM工法の標準施工機械の主要な仕様例 (DJM工法技術マニュアルより)

機 種		DJM1037型	DJM2050型	DJM2070型	DJM2090型
改 良 機 本 体	攪拌軸数	1本	2本	2本	2本
	軸間距離mm	—	1200~2000	1000, 1200, 1500	1000, 1200, 1500
	改良深度m	標準10(最大15)	標準15(最大20)	標準20(最大23)	標準25(最大30)
	攪拌軸 回転速度rpm	5~50	16.5~54	24 (50Hz) 48 (50Hz)	32 (50Hz) 63 (50Hz)
	攪拌軸 最大トルク kgf・m	1,000	1,760	2,000 (50Hz) 1,670 (60Hz)	2,520 (50Hz) 2,100 (60Hz)
	原動機 — 駆動方式	電動機 — 油圧	ディーゼル — 油圧	走行, 昇降 ディーゼルー油圧	
	原動機 出力	37kW	155 PS	攪拌 電動機歯車減速	
				130 PS	130 PS
	走行形式	スキッド式	クローラ式	クローラ式	クローラ式
	全装備重量kgf	9,000	40,500	59,000	80,000
改 良 材 ト	接地圧 kgf/cm ²	0.23	0.63	0.85	1.05
	改良材供給機	2.0 m ³ ×1台	2.0 m ³ ×2台	2.0 m ³ ×2台	2.0 m ³ ×2台
	施工管理計器	1式	1式	1式	1式
附 属 機 器	改良材サイロ	20~30m ³ 1基	20~30m ³ 1基	30m ³ 1基	30m ³ 1基
	空気圧縮機	10.5 m ³ /min 1台	10.5 m ³ /min 2台	10.5 m ³ /min 2台	10.5 m ³ /min 2台
	発動発電機	100KVA 1台	75KVA 1台	250KVA 1台	350 KVA 1台 125 KVA 1台

(1) 改良機本体

① 攪拌翼

DJM工法において通常使用される攪拌翼は、図-4.7に示すような2段翼の形状のものである。この攪拌翼は、上段翼と下段翼部に改良材吐出口を有し、攪拌翼の回転方向を反転することにより改良材吐出位置を切換えることができる。また、改良材吐出口を有する吐出翼は改良材の吐出または軟弱土との混合をより効果的に行うために、図に示すような特殊な形状をしている。この点は、他の深層混合処理機械の攪拌翼と大きく異なっており、DJM工法の特徴の一つとなっている。

② 攪拌軸

攪拌軸は正方形断面を成しており、攪拌軸が回転することにより軸外周囲と地盤の間に空隙部ができやすい形状となっている。このため改良材搬送エアの地表部への排出が容易になっている。また、攪拌軸の内部に改良材供給管が取付けられており、攪拌軸最上端でスィベルを介して改良材供給機から耐圧ゴムホースで連結されている。

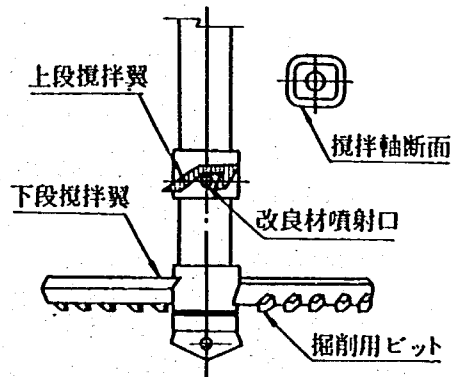
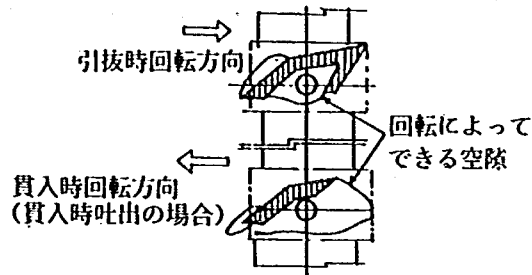


図-4.7 DJM工法攪拌翼（土研式攪拌翼）の例

③ 駆動装置

2軸型施工機械は電動モーターを2基装備し、減速機を介して攪拌軸の回転数を高速、低速の2段切換えとしている。また、駆動モーターは本体下部に位置し、重心を低くした状態で施工機械の移動ができる。一方、1軸型施工機械は油圧式ボーリングマシンを改造したもので、電動モーターで油圧ユニットを駆動している。

④ ベースマシンとリーダー

2軸型施工機械はクローラー型のベースマシンに搭載されており、自由な旋回、走行が可能となっている。また、攪拌装置（攪拌翼、攪拌軸）の上昇下降はベースマシンのウィンチ動力で行うようになっている。1軸型施工機械は油圧式ボーリングマシンをベースとしており、スキッド装置により移動できる。

(2) 改良材プラント

① 改良材供給機

改良材供給機は図-4.8に示すようにブロータンクとテーブルフィーダー（フィードホイール）の組合せにより構成された「空気搬送式粉体圧送機」で

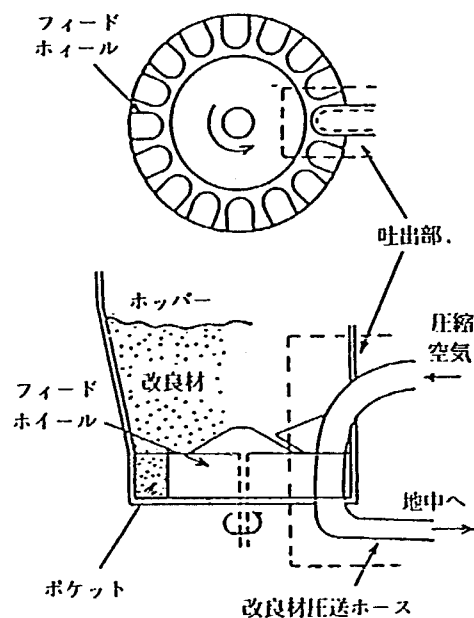
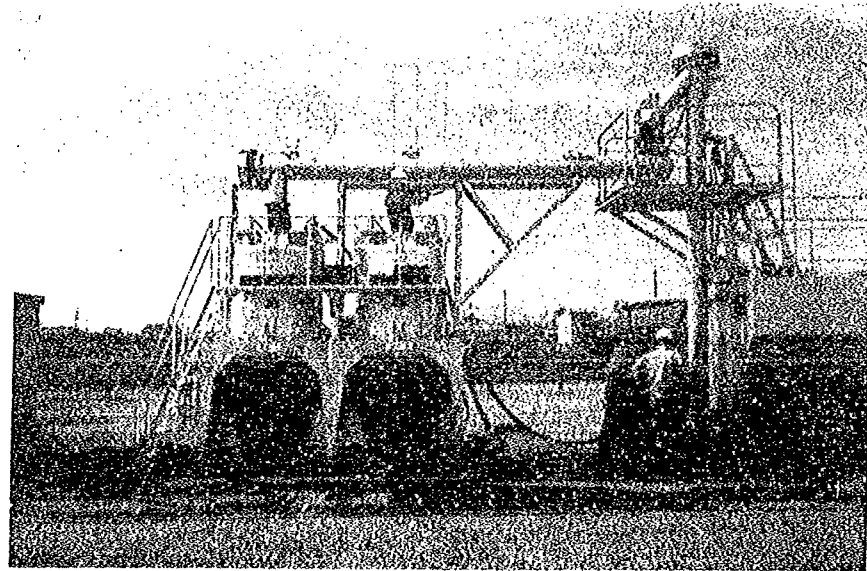


図-4.8 改良材供給機構の機構略図

ある。DJM工法で、通常使用されるブローマートは、写真－4.1に示すタンク容量2 m³、実用最大吐出能力120kg/分程度のものである。

② 改良材圧送用ホース

内径 50 mmの耐圧ゴムホースが使用されている。



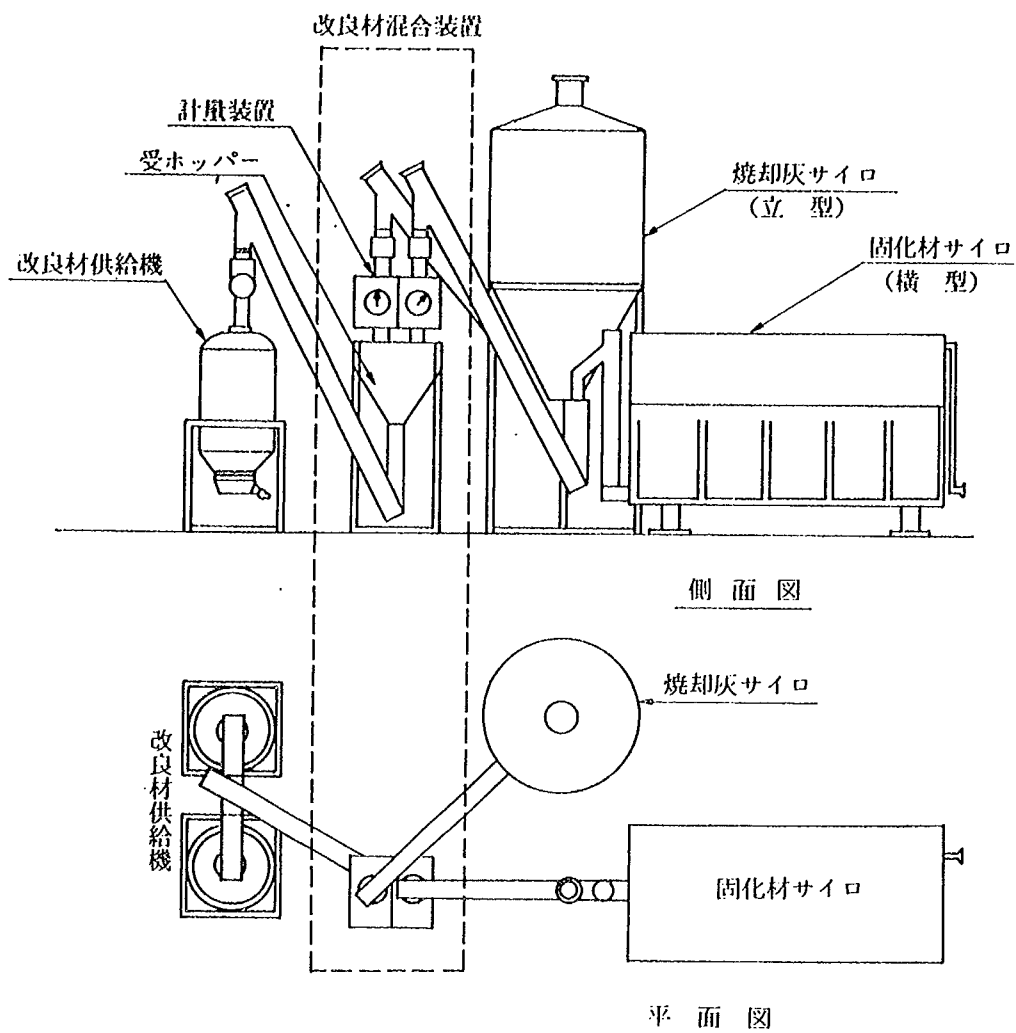
写真－4.1 改良材供給機の例（DJM工法）

③ 改良材混合装置

従来のようにセメントや石灰のように改良材を単一種類で使用する場合には必要とされないが、セメントなどの材料と石炭灰・焼却灰といった粉粒体の材料など複数の改良材を配合して使用する場合には、従来の深層混合処理プラントに加えて複数材料の混合装置が必要となる。図－4.9には、石灰系焼却灰による粘性土地盤改良試験施工（名古屋市）において使用した混合装置の一例を示す。ここでは、改良材供給機の手前に、複数個の計量装置を有する材料受けホッパーを設けている。複数種類の改良材を同時に、このホッパー内に通すことにより改良材の混合を行なっている。

④ 改良材サイロ

改良材の貯蔵用サイロは20～30 t容量の立型あるいは横型サイロが使用されている。サイロから改良材供給機への改良材への引出しはスクリーコンベアにより搬送され、粉じん発生を防止するため、貯蔵、引出し、供給などの搬送機構は完全密閉型となっている。



図－4.9 改良材混合装置の例

4－2－3 施工方法とその手順

(1) 施工方法

深層混合処理工法では改良材の供給や吐出の方法が各工法によって異なり、つぎのような方法がある。

- ① 改良材を貫入中に吐出し、引上時は攪拌のみを行う方式。（貫入時吐出方式）
- ② 改良材を貫入中に吐出不いで、引上時に吐出と攪拌を行う方式。（引抜き時吐出方式）
- ③ 改良材を貫入時、引上時とも吐出し攪拌を行う方式。（貫入・引抜き時吐出方式）

DJM工法の場合、通常施工においては主に、②の方法で施工され、原地盤の土層が比較的均一で、貫入の容易な場合、鋭敏比が高い地盤では①の方法で施工されることもある。また、土質状態によっては①の方式が強度発現が良好な場合もある。

(2) 工法手順

図－4.10に改良材供給フローを、また図－4.11に打設手順を示すとともに、施工手順について簡単に述べる。

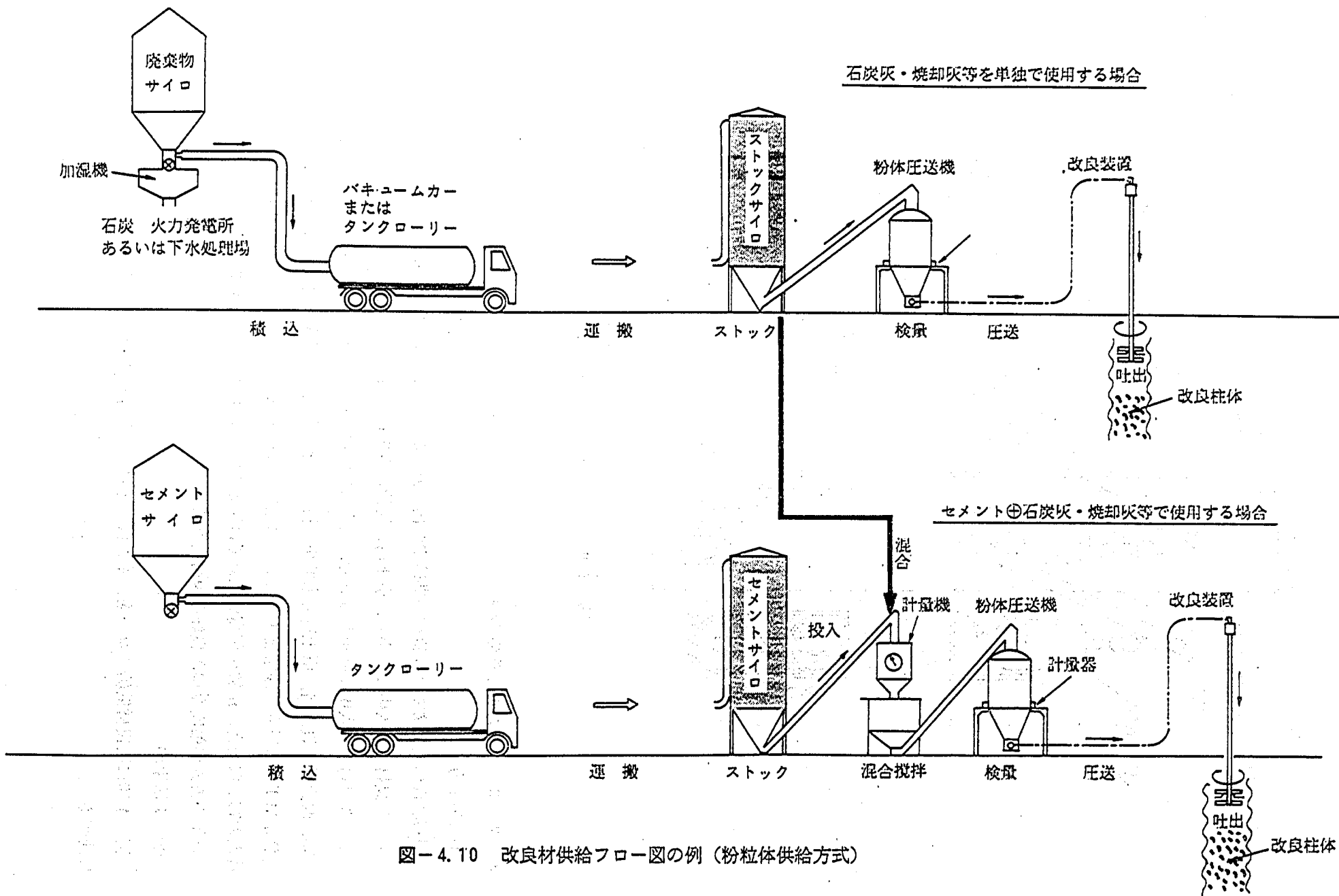


図-4.10 改良材供給フロー図の例（粉粒体供給方式）

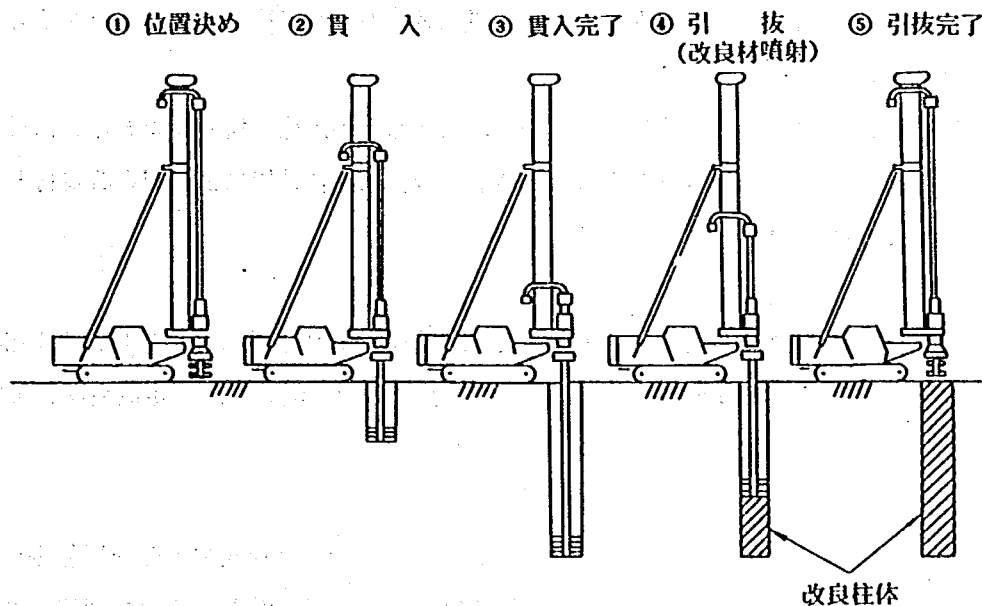


図-4.11. 打設手順（引抜き吐出の例）

i) 改良材の運搬及び貯蔵

① 改良材の輸送

セメントなどの改良材は、基地において積出し、基地から空気圧送式またはスクリーコンベア式のタンクローリーで、施工現場まで輸送するのが一般的である。石炭灰・焼却灰においても、石炭火力発電所、下水汚泥焼却炉などの処理施設から乾燥状態で排出されるかぎり、タンクローリーまたはバキューム車による輸送が可能である。

② 改良材の搬入と貯蔵

セメントなどの材料と石炭灰・焼却灰等材料はそれぞれ別々に搬入され、あらかじめ決められたサイロに搬入する。このときサイロの容量は、最低1日の施工で使用するだけの容量が必要である。

ii) 改良

① 打設位置決め

施工機械を改良柱体の打設位置へセットする。この位置決め方法としては、

- (a) トランシットとテーピングによる方法
- (b) トランシットと光波距離計による方法
- (c) 自動位置決めシステムによる方法

があり、陸上工事では、主に(a)の方法が使用されている。(b), (c)の方法は位置決めの困難な海上工事に使用されている。

② 貫入

攪拌翼を回転（正回転）させながら、攪拌装置を下降させて貫入開始する。貫入時には高トルクを必要とするため、攪拌翼回転数は低速回転（50Hzで、約30rpm）で行う。

なお、貫入時に改良材を吐出して施工する場合には貫入速度の変動が改良材投入量の変動に直接影

響するので、改良材投入量の精度を確保するために貫入速度を一定保持するよう注意する必要がある。

③ 改良材の供給

改良材の供給は図-4.10に示すように、セメント、石灰などの固化材料サイロあるいは石炭灰・焼却灰材料サイロからスクリーコンベアより引出され、改良材混合装置により混合改良材とされた後、改良材供給機から改良機本体へと供給される。

④ 改良材吐出

攪拌翼の先端羽根が所定改良深さより、下段翼と上段翼の間隔分の長さ（下部吐出口と上部吐出口の距離）だけ上部に達すると、下段翼側の吐出口からの改良材吐出を開始し、所定改良深さまで貫入時吐出を行なう。

⑤ 改良柱体の造成

下段翼の吐出口より改良材を吐出させながら所定深度へ達すると、攪拌翼の回転を反転させて、改良材吐出を上段翼側の吐出口へと切り換える。改良材吐出量と攪拌翼の引上げ速度を調整しながら改良柱体の造成を開始する。このとき引き上げ速度は、改良材の所要吐出量と攪拌翼回転数とから決められる。

⑥ 造成完了と施工機械の移動

所定深度までの改良柱体造成が完了すると改良材の供給を停止し、攪拌翼およびエアコレクター（搬送エア収集装置）を引上げて、つぎの打設位置へ移動する。

4-2-4 施工管理

深層混合処理工法では出来上がりの状態を直接目で観察しながら施工することができないので、施工管理は計器管理（図-4.12参照）を主体として行う。ここで、施工管理項目の主なものをあげると次のようである。

(1) 改良前

① 打設位置

陸上工事ではトランシットやテーピングにより位置決めを実施している。また、海上工事では自動位置決めシステムを使用する場合が多い。

② 攪拌軸の鉛直性

施工機械のリーダーにトルクバランス方式傾斜計を装備して計測する。

(2) 改良柱体造成中

① 施工機械先端深度

攪拌装置の貫入深度をドラムの回転に変え、そのドラムに装備したポテンシオメーターから電氣的に深度変化を取り出し自動連続記録する。

② 改良材投入量

改良材吐出量は改良材供給機のタンク内の改良材残重量をロードセルで検出して、指示記録される。

③ 貫入・引上げ速度

ベースマシンの昇降ウィンチの回転数から貫入・引上げ速度を演算して表示する。

④ 攪拌翼回転数

駆動装置部にタコジェネレータを装備し、攪拌軸回転数を検出表示する。

⑤ 駆動トルクおよび貫入・引上げ荷重

必要に応じて、駆動モーターの電流や油圧から駆動トルクの演算あるいは貫入・引上げ荷重の計測を行なうこともできる。

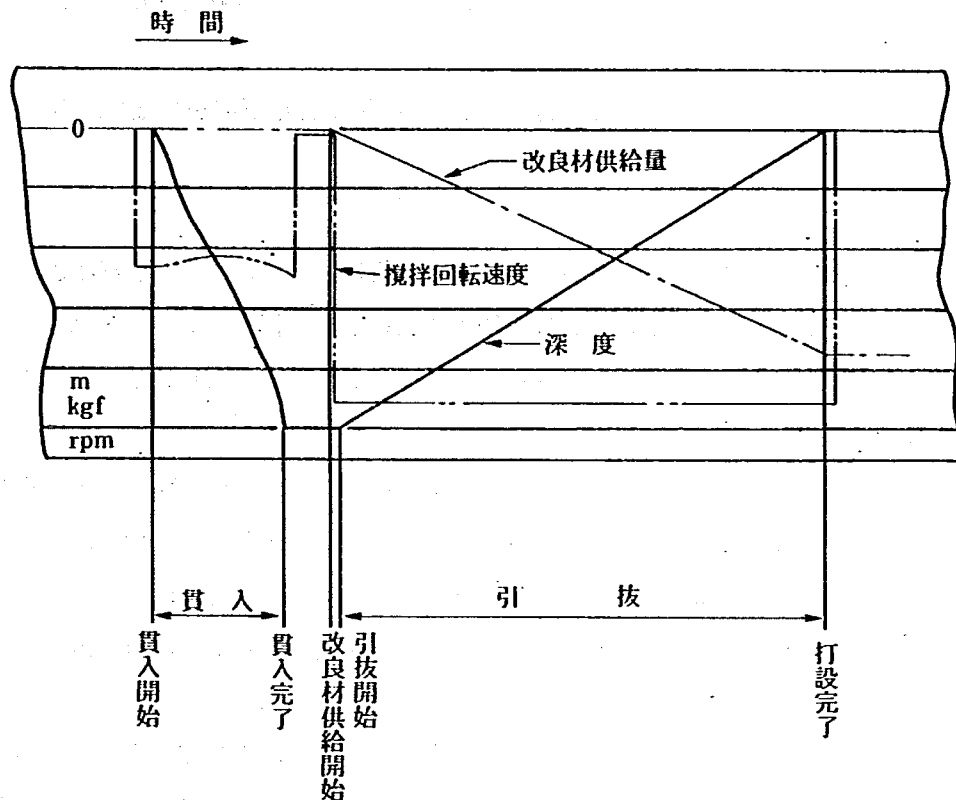


図-4.12 施工管理オシロ模式図

4-2-5 施工および改良材についての留意点

(1) 施工について

① 施工に当って、攪拌翼の貫入速度、引上げ速度、攪拌翼回転数などの施工機械の運転条件は、原位置軟弱土と改良材の攪拌混合性に直接影響し、改良土の強度と品質のバラツキに関係するので十分な施工管理が必要である。

② 現行の施工機械では改良材の吐出量を瞬時に変更することは不可能であり、また、吐出量の変更可能な範囲は狭く限られている。施工途中で投入量の大幅変更の必要がある場合には、引上げ速度の変更により改良材投入量の調節を行うことが多い。特に、石炭灰・焼却灰等の材料を改良材として使用する場合には、多量の材料を地中に投入することが考えられ、引上げ速度を極度に小さくする必要があり、施工能率が低下することがある。

③ 攪拌混合性だけを考えると、貫入時吐出を行なえば、貫入時と引上げ時の攪拌回数を加算する

ことによって引上げ吐出に比べ2倍となり、改良土の品質が向上することが考えられる。しかしながら、つぎのような施工上の問題点が残されている。

④ 原地盤の強度が均一でない場合、貫入速度を一定に保持することが困難となり、正確な改良材投入量とすることができない。

⑤ 深層混合処理では、始めに攪拌翼により地盤土を適度な粒徑にほぐして、次いで、ほぐされた土粒子中に改良材を添加し、攪拌混合して改良することが前提となっている。地盤が硬質で土粒子が十分ほぐされず、大粒徑の状態ですらにセメントがまぶされた状態では、十分な改良効果が期待できないことがある。

⑥ 貫入時吐出で施工する場合、原位置軟弱土と改良材の固結反応が急速で、改良機の引上げが困難となることがある。

(2) 改良材について

石炭灰、焼却灰等を深層混合処理工法の改良材として使用に際しては次のような注意が必要である。

① 石炭灰、焼却灰等を単独で深層混合処理工法の改良材として使用するケースは少なく、一般にはセメントや石灰などの固化材料と混合して使用されることが多いと考えられる。それにはつぎの2つのケースが考えられる。

② 工事現場に混合装置を搬入し、石炭灰・焼却灰等の材料とセメント・石灰等の固化材料を混合した後、その場で使用する。このとき、粉粒体相互の完全混合を目指す例は少なく、単にY字管を通過させることにより簡単に混合する場合が多い。試験的に使用する場合などでは、粉体用スティックミキサーやモルタルミキサーによる使用例もあるが、混合が困難となることがある。

また、石炭灰等の材料を混合する場合、材料中の含有水分に十分配慮する必要がある。すなわち、石炭灰・焼却灰等の材料中の水分とセメントや石灰が混合直後に水和反応して、混合プラントや改良材供給機の中で固結し、配管内のつまりの原因となるので、水分がある場合には事前に乾燥するなどの前処理が必要となる。

③ 石炭灰等の材料と固化材料を工場あるいは他の場所で、事前に混合しておいて、完全混合された粉粒状改良材を現場へ搬入して使用する。このとき、石炭灰等材料と固化材料の比重や粒度分布などの物理的性質が同じであるならば、比較的問題は少ないが、物理的性質が大きく異なる場合には、改良材サイロや地中への供給経路の途中で材料分離が発生し、結果として改良土の品質不良となる可能性がある。

④ 一般に、石炭灰・焼却灰等の材料は、セメントや石灰などの工業製品とは異なり、工業規格の制約を受けていないので、排出される時の物理的性質や化学組成などの品質のばらつきがあると考えられる。したがって、改良材として使用する場合は、事前調査の項で述べたように、比重、単位体積重量、粒度分布、含有水分量について定期的にチェックすることが必要となる。さらに、必要に応じて石炭灰・焼却灰等材料の粉碎、乾燥などの前処理が必要となる場合も考えられる。

参 考

参考Ⅰ フミン酸含有の試験方法

参考Ⅰ-1 試験器具類

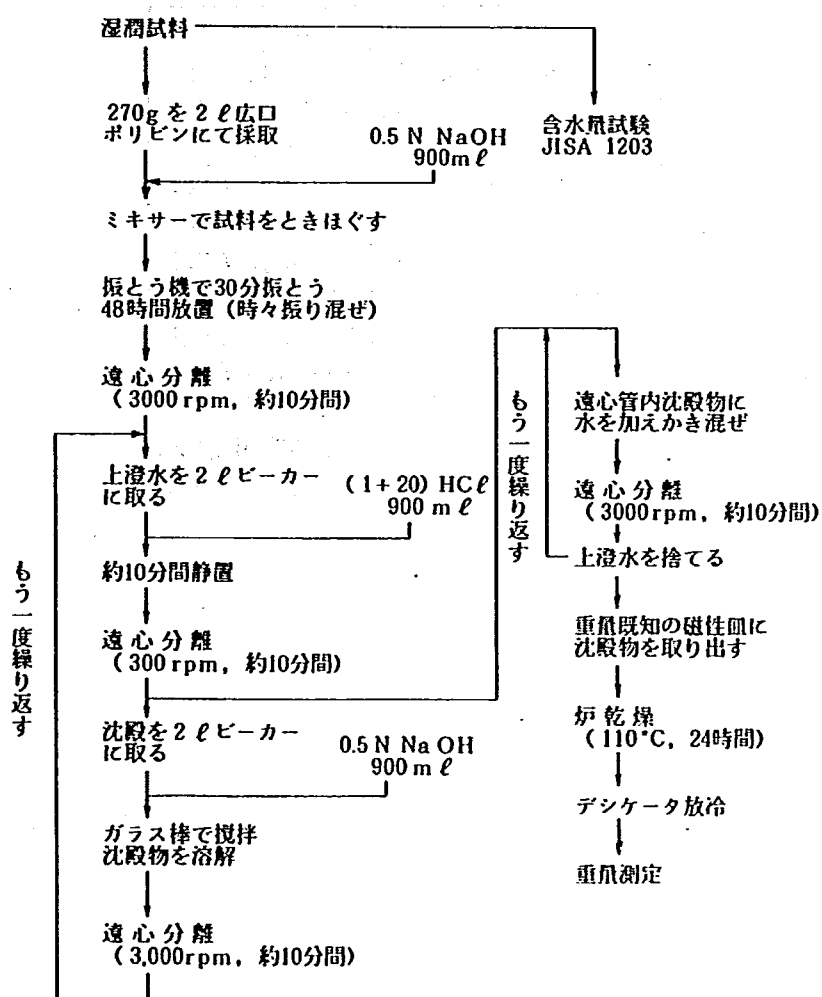
本試験に必要な器具類は参表-1に示すとおりである。

参表-1 試験器具類

機 具 名	型 式	機 具 名	型 式
恒 温 乾 燥 炉		蒸 発 皿	
直 示 天 秤		ポリエチ製広口瓶	2ℓ
化 学 天 秤		メスシリンダー	ガラス製1ℓ
遠 心 分 離 機		ス プ ー ン	ステンレス
デ シ ケ ー タ	ガラス製	ビ ー カ ー	
ミ キ サ ー		水酸化ナトリウム	
振 と う 機		塩 酸	

参考Ⅰ-2 試験方法

試験は参図-1に示す手順に従って実施する。



参図-1 フミン酸含有量試験のフロー

参考Ⅱ 有害物質（重金属）の含有量測定方法及び測定結果例

参考Ⅱ-1 重金属の測定方法

石炭灰や下水汚泥焼却灰には、重金属成分が含まれることから、建設資材としてこれらを利用した場合、環境中への溶出が懸念される場合がある。

しかし、重金属は、自然土壤中や各種建設資材にも含まれており、ただ、重金属が含まれているというだけでなく、環境への影響という点で判断する必要がある。

現在、石炭灰・焼却灰の建設資材利用に関する基準は明確にされていない。しかし、特殊肥料として汚泥を農業利用するときの基準及び、埋立に関する基準があるのでその概要を述べる。特殊肥料の基準には④含有基準と、⑤溶出基準がある。後者の溶出基準は、陸状埋立て基準と同じものである。

④ 含有基準 …… 乾物 1 kgにつき、ひ素 50mg以下及び水銀 2 mgであること。

測定方法は肥料分析法による。

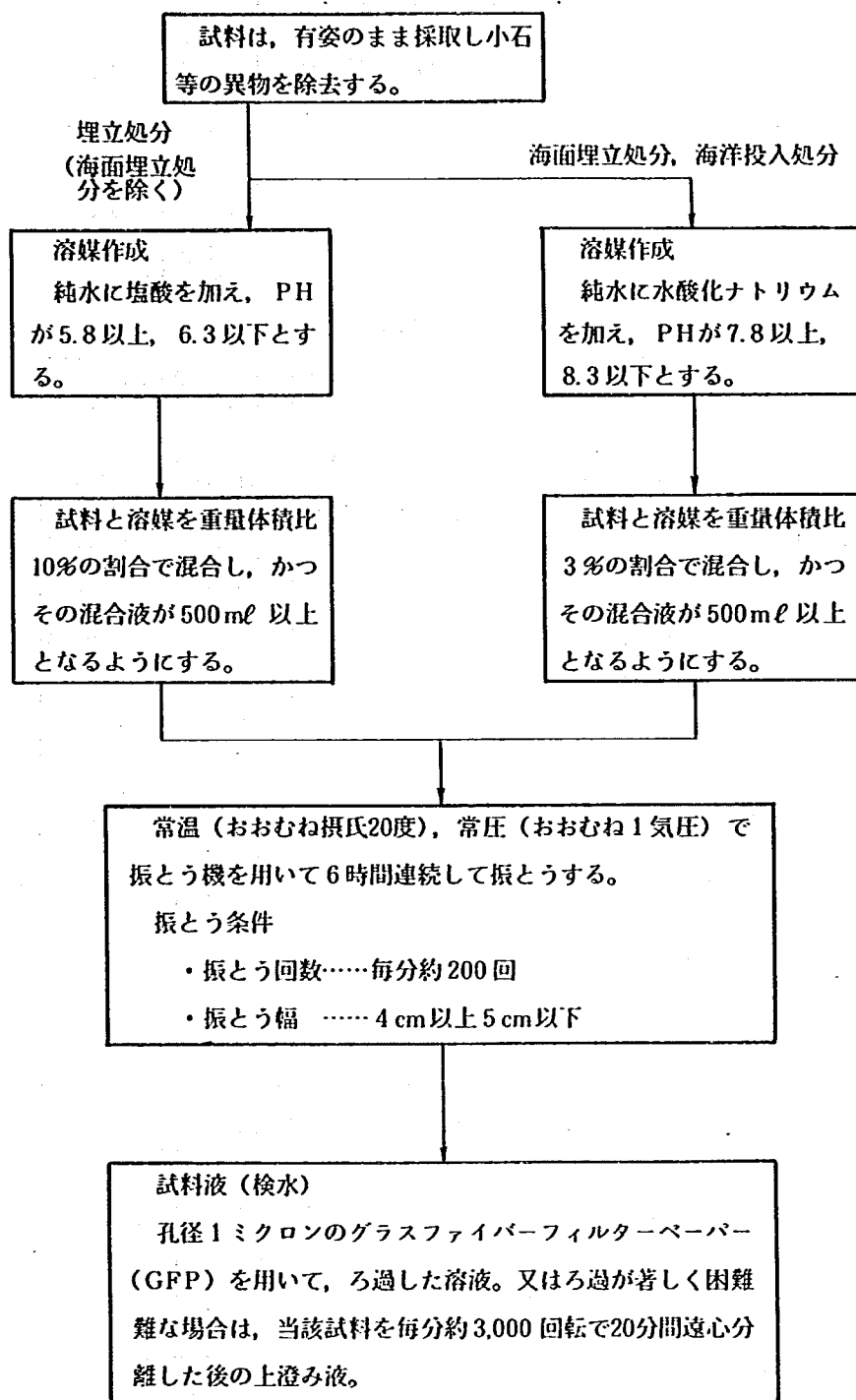
⑤ 溶出基準 …… 陸上埋立てに係わる判定基準を参表-2に示す。

測定方法は、産業廃棄物に含まれる金属等の検定方法（昭和 48年 2月17日、環境庁告示第 13号）による。

参表-2 埋立処分にかかわる判定基準

項 目	基 準 値
アルキル水銀化合物	不 検 出
水銀又はその化合物	0.005mg/ℓ以下
カドミウム又はその化合物	0.3 mg/ℓ以下
鉛 又 は そ の 化 合 物	3 mg/ℓ以下
有機りん化合物	1 mg/ℓ以下
六価クロム化合物	1.5 mg/ℓ以下
ひ素又はその化合物	1.5 mg/ℓ以下
シアン化合物	1 mg/ℓ以下
P C B	0.003mg/ℓ以下

（参表出典）金属等を含む産業廃棄物に関する判定基準を定める総理府令，（昭和48年 2月17日，総理府令第 5号）



参図－2 溶出試験方法

(産業廃棄物に含まれる有害物質の検定方法
(環境庁告示第13号))

参考Ⅱ-2 深層混合処理へ適用した下水汚泥焼却灰等の溶出試験

参表-3 試料の種類

3章で述べた深層混合処理へ適用した石灰系焼却灰の安全性を確認するために、参表-3に示す試料中の有害物質含有量試験、及び溶出試験を行った。結果を参表-4、参表-5に示す。なお、焼却灰単味及び現場施工における“上”の土質は現場から採取したピートであり、現場施工における“下”の土質は現場から採取したシルトである。

結果によると、焼却灰単味、混合物ともすべての試料で判定基準を満足している。

試料		混合率(%)		
		焼却灰	セメント	砂
室内実験	0		40	20
	1	20	40	
	2	40	20	
	3	60		20
現場施工	0		40	
	1	20	40	
	2	40	20	
	3	60		

参表-4 溶出試験結果

分析項目	シアン (mg/l)	カドミウム (mg/l)	ヒソ (mg/l)	アルキルHG (mg/l)	T-HG (mg/l)	ナマリ (mg/l)	クロム(6+) (mg/l)	ORG-P (mg/l)	PCB (mg/l)	T-クロム (mg/l)
単味										
ASH	<0.1	<0.005	<0.02	<0.0005	<0.0005	<0.05	<0.02	<0.1	<0.0005	0.14
SANO	<0.1	<0.005	<0.02	<0.0005	<0.0005	<0.05	<0.02	<0.1	<0.0005	<0.01
CEMENT	<0.1	<0.005	<0.02	<0.0005	<0.0005	<0.05	1.00	<0.1	<0.0005	1.90
SOIL	<0.1	<0.005	<0.02	<0.0005	<0.0005	<0.05	<0.02	<0.1	<0.0005	<0.01
室内実験										
0	<0.1	<0.005	<0.02	<0.0005	<0.0005	<0.05	<0.02	<0.1	<0.0005	0.12
1	<0.1	<0.005	<0.02	<0.0005	<0.0005	<0.05	<0.02	<0.1	<0.0005	0.32
2	<0.1	<0.005	<0.02	<0.0005	<0.0005	<0.05	<0.02	<0.1	<0.0005	0.16
3	<0.1	<0.005	<0.02	<0.0005	<0.0005	<0.05	<0.02	<0.1	<0.0005	0.02
現場施工										
0-上	<0.1	<0.005	<0.02	<0.0005	<0.0005	<0.05	<0.02	<0.1	<0.0005	0.01
0-F	<0.1	<0.005	<0.02	<0.0005	<0.0005	<0.05	<0.02	<0.1	<0.0005	0.01
1-上	<0.1	<0.005	<0.02	<0.0005	<0.0005	<0.05	<0.02	<0.1	<0.0005	<0.01
1-F	<0.1	<0.005	<0.02	<0.0005	<0.0005	<0.05	<0.02	<0.1	<0.0005	<0.01
2-上	<0.1	<0.005	<0.02	<0.0005	<0.0005	<0.05	<0.02	<0.1	<0.0005	<0.01
2-F	<0.1	<0.005	<0.02	<0.0005	<0.0005	<0.05	<0.02	<0.1	<0.0005	<0.01
3-上	<0.1	<0.005	<0.02	<0.0005	<0.0005	<0.05	<0.02	<0.1	<0.0005	<0.01
3-F	<0.1	<0.005	<0.02	<0.0005	<0.0005	<0.05	<0.02	<0.1	<0.0005	<0.01
判定基準*	<1	<0.30	<1.5	不検出	<0.005	<3	<1.5	<1	<0.03	
分析方法	JISK0102 38.12.38.2	同左 55.2	同左 61.1	環境省59号付表4	同左 付表3	JISK0102 54.2	同左 65.2.1	環境省59号付表1	同左 付表5	JISK0102

* 金属等を含む産業廃棄物に係る判定基準を定める総理府令

* 昭和46年環境庁告示

参表-5 含有量試験結果

分析項目	シアン (PPM)	カドミウム (PPM)	ヒソ (PPM)	アルキルHG (PPM)	T-HG (PPM)	ナマリ (PPM)	クロム(6+) (PPM)	ORG-P (PPM)	PCB (PPM)	T-クロム (PPM)
単味										
ASH	<1	<0.05	11.0	<0.01	<0.01	4.1	1.6	<1	<0.01	31
SAND	<1	0.07	0.5	<0.01	<0.01	<0.2	<1	<1	<0.01	107
CEMENT	<1	0.10	15.0	<0.01	<0.01	6.7	10.0	<1	<0.01	21
SOIL	<1	0.22	7.4	<0.01	0.12	26.2	<1	<1	0.03	208
室内実験										
0	<1	0.10	9.5	<0.01	0.01	5.5	<1	<1	0.02	83
1	<1	0.14	10.0	<0.01	0.02	7.9	<1	<1	0.01	123
2	<1	0.11	9.0	<0.01	0.01	12.2	<1	<1	0.01	117
3	<1	0.07	8.9	<0.01	0.02	2.7	<1	<1	0.01	194
現場施工										
0-上	<1	0.07	9.4	<0.01	<0.01	17.3	<1	<1	0.01	50
0-F	<1	0.07	9.8	<0.01	<0.01	17.3	<1	<1	0.01	69
1-上	<1	0.06	12.0	<0.01	0.02	3.8	<1	<1	0.59	58
1-F	<1	0.08	11.1	<0.01	0.03	3.3	<1	<1	0.01	55
2-上	<1	0.09	10.5	<0.01	0.03	4.8	<1	<1	0.02	126
2-F	<1	0.07	11.3	<0.01	0.03	5.0	<1	<1	0.04	31
3-上	<1	0.06	10.1	<0.01	<0.01	3.0	<1	<1	0.03	248
3-F	<1	0.07	10.8	<0.01	0.03	3.6	<1	<1	0.01	44
分析方法	前処理後 JISK0102	底質 調査法	同左	同左	同左	同左	同左	前処理後 調査法 第59号付表1	底質 調査法	同左

* 昭和46年環境庁告示第59号付表1

あ と が き

ここでは、石炭灰、下水汚泥焼却灰、およびコンクリート粉などの土質改良用添加材として利用可能性が高い材料に関して、高含水比粘性土およびピート質土を対象とした室内配合試験、現場試験施工の結果から深層混合処理への適用性について述べてきた。

その結果、石炭灰、下水汚泥焼却灰ともセメント・石灰との組合わせにおいて十分な改良強度が得られるとともに単体で添加・混合した場合においても含水比の低下やコンシステンシーの改善などの効果があることが明らかとなった。しかしながら、本文中においても述べたように石炭灰・下水汚泥焼却灰等の品質のばらつき、固結の原理、耐久性などに関するデータの蓄積はこれからのことであり、深層混合処理への適用に関しても同様である。本報告では、総プロの中から得られた結果によるものであるが、今後の研究成果を基にさらに修正・追加を図って行きたいと考えている。また、これらの材料の供給体制の整備、品質基準の整備などは、有効利用を図って行くうえで不可欠の課題であると考えられる。

最後に、本研究を行なうにあたって、(財)国土開発技術研究センター内に組織された「建設事業への廃棄物利用技術の開発委員会、地盤・盛土分科会」(分科会長・久野悟郎中央大学教授)において分科会長、各委員および幹事の方々から調査の進め方、取りまとめ方など貴重な御意見をいただいた。また、「石炭灰の性質」については安田稔氏(電源開発株式会社)、「下水汚泥焼却灰の性質」については桜井克信氏(汚泥研究室)および「深層混合処理の施工」については松下正憲氏(不動建設株式会社)、さらに試験施工については、与野市、名古屋市、横浜市、電源開発株式会社の関係者の協力によるものである。ここに心からお礼申し上げる次第である。

石炭灰・下水汚泥焼却灰等の
深層混合処理への適用性

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第2304号
昭和61年 3月(1986)

施工研究室
嶋津晃臣 塚田幸広 岩瀬真二

要 旨

石炭灰、下水汚泥焼却灰及びコンクリート粉等の廃棄物を土質改良用添加材として深層混合処理への有効利用を図るため、高含水比粘性土、有機質土を対象とした室内配合試験及び現場試験施工を実施し、その適用性、問題点を検討した。その結果、石炭灰・下水汚泥焼却灰は土質改良用添加材として十分有効利用可能であることが明らかとなった。



キーワード：石炭灰、下水汚泥焼却灰、土質改良、深層混合処理、配合試験、試験施工

郵便はがき

下を40
さは円切
い。て手

305



茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

建設省土木研究所
機械施工部施工研究室
御中

No. _____

土研資料2304号

No. _____

配布先氏名



配布先住所

○

土木研究所資料第2304号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印

○