

土 木 研 究 所 資 料

下水汚泥焼却灰の土質改良材としての 利用マニュアル（案）

平成2年11月

建設省土木研究所
汚 泥 研 究 室
土 質 研 究 室

Copyright © (1990) by P.W.R.I.

All rights 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、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

下水汚泥焼却灰の土質改良材としての 利用マニュアル（案）

建設省土木研究所

下水道部汚泥研究室

前室長	大嶋 吉雄*
室長	佐藤 和明
前主任研究員	櫻井 克信**
研究員	増田 隆司
	白石 隆

機械施工部土質研究室

室長	久楽 勝行
主任研究員	三木 博史
研究員	林 義之

名古屋市下水道局

建設部計画課技術開発係

係長	鎌田 修
技師	日比野雅司***
技師	長野 健示

* 現：日本下水道事業団業務部援助課長

** 現：山梨県土木部下水道課技術指導監

*** 現：建設部第一工事事務所

要 旨

本マニュアルは、現在、大部分が廃棄物として処理されている下水汚泥焼却灰を、土質改良材として利用する場合の技術的な標準を示したものである。

キーワード：下水汚泥焼却灰，石灰系焼却灰，土質改良材，土質改良効果，改良土

ま え が き

下水道の普及に伴い、下水処理によって発生する下水汚泥も年々増大する傾向にある。そして、汚泥処理の結果として毎年大量の下水汚泥焼却灰が発生している。現在、下水汚泥焼却灰は他の多くの廃棄物同様、陸上・海面埋立等の方法により処分されているが、処分地の減少や周辺環境への影響等により、埋立等の処分が困難になってきている。したがって、下水汚泥焼却灰を建設資材として有効に利用することができれば、処分地の確保の問題や資源の再利用による省資源化という観点からも非常に得策である。

このような観点から、建設省土木研究所では昭和61～63年度の3ヶ年間にわたり名古屋市下水道局と共同で下水汚泥焼却灰の土質改良材としての利用方法の調査研究を行ってきた。

ここに示す「下水汚泥焼却灰の土質改良材としての利用マニュアル(案)」は、その成果をまとめ、下水汚泥焼却灰の土質改良材としての品質評価方法や利用方法に関しての技術的な標準を提案したものである。

今後、本マニュアルが活用され下水汚泥焼却灰の土質改良材としての利用が普及していくこと期待するとともに、より信頼性の高い下水汚泥焼却灰の利用技術の開発が望まれる。

平成2年11月

建設省土木研究所

下水道部 汚泥研究室

機械施工部土質研究室

名古屋市下水道局

建設部計画課技術開発係

目 次

まえがき	
1章 総 則	1
1-1 目 的	1
1-2 適 用	1
1-3 用語の解説	2
2章 下水汚泥焼却灰の性状	4
2-1 物理的特性	4
2-2 化学的特性	6
2-3 成分組成の季節変動	8
3章 下水汚泥焼却灰の品質と土質改良効果	10
3-1 一般的な留意事項	10
3-2 下水汚泥焼却灰の水和特性	10
4章 下水汚泥焼却灰の土質改良材としての利用方法	18
4-1 配合設計	18
4-2 単体での利用方法	21
4-3 生石灰等との混合による利用方法	29
4-4 土質に応じた最適添加量の目安	34
5章 改良土の製造と使用上の留意点	36
5-1 下水汚泥焼却灰の貯蔵方法	36
5-2 改良土の製造	36
5-3 製造時の品質管理	38
5-4 改良土の仮置き	39
5-5 改良土の使用上の留意点	39
付録-1 名古屋市下水処理場内における現場試験施工例	40
付録-2 名古屋市道における現場試験施工例	46
付録-3 一軸圧縮試験方法	55
付録-4 室内CBR試験方法	59
付録-5 フォール・コーン試験方法	67
付録-6 現場CBR試験方法	73
付録-7 下水処理システムの概要	76

1 章 総 則

1-1 目 的

本マニュアルは、下水汚泥焼却灰を土質改良材として利用する場合の技術的な標準を示したものである。

〔解 説〕

1) 下水汚泥焼却灰には、大別すると石灰系焼却灰と高分子系焼却灰がある。石灰系焼却灰は焼却前の脱水時に消石灰、塩化第二鉄等の凝集剤を添加したものである。石灰系焼却灰はCaOとしての重量比で20～50%程度のカルシウムを含んでおり、このカルシウムによる吸水発熱反応やボゾラン反応等によって土質改良効果の発揮されることが、建設省の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の開発」（昭和56～60年）でも明らかにされている。したがって、所定の品質を満足するものであれば土質改良材として十分利用できると考えてよい。

しかし、実際への適用にあたっては、下水汚泥焼却灰の品質の評価方法や品質管理手法および土と混合する際の配合設計法などを十分に確立しておく必要がある。本マニュアルは、このような観点から、下水汚泥焼却灰の品質と土質改良効果の関係や土質改良材として利用する場合の配合設計の方法および取扱い上の留意点などについて基本的な考え方をとりまとめ、下水汚泥焼却灰を実際に土質改良材として利用する際のマニュアルとしたものである。

2) 内容は下記の5つの項目からなる。

- ① 下水汚泥焼却灰の性状（2章）
- ② 下水汚泥焼却灰の品質と土質改良効果（3章）
- ③ 下水汚泥焼却灰の土質改良材として利用方法（4章）
- ④ 改良土の製造と使用上の留意点（5章）

各項目とも、昭和61年度から昭和63年度までの3ケ年間、建設省土木研究所と名古屋市下水道局が共同で実施した研究の成果を盛り込んで記述されている。将来、本マニュアルを参考にして各所でデータの蓄積がなされ、それをもとにより信頼性の高い技術が育ち、普及していくことが望まれる。

1-2 適 用

本マニュアルで示した技術的な標準は、原則として土質改良効果の期待できる石灰系焼却灰に適用する。また、下水汚泥焼却灰を用いて土質改良した改良土は、主として下水道管、ガス管等の埋戻し材として利用する。

〔解 説〕

- 1) 下水汚泥焼却灰のうち石灰系焼却灰は、本マニュアルの3, 4章に記述した室内土質試験結果や、付録に示した名古屋市の現場試験施工事例が示すように吸水性や水硬性を有している。しかし、高分子系焼却灰は少量しかカルシウムを含まないので、土質改良効果はあまり期待できない。したがって、本マニュアルでは原則として石灰系焼却灰を適用の対象とする。
- 2) 下水汚泥焼却灰を用いて土質改良した改良土の利用方法としては、当面、下水道事業のなかでの利用を優先的に考えており、下水道管理設に伴って発生する掘削残土を土質改良し、管の埋戻し材として再利用するという方法での利用が最も需要が多いものと予想される。そこで、この観点からの記述を中心としているが、他の利用方法（例えば、盛土材としての利用など）に、このマニュアルを適用することを妨げるものではない。
- 3) 本マニュアルは、溶出試験等により安全性を確認した下水汚泥焼却灰に適用するものとする。
- 4) 本マニュアルは現時点での技術をもとに記述したもので、将来の技術の進展に応じ、弾力的な運用を図ることが望ましい。

1-3 用語の解説

本マニュアルで使用する用語の使い方は、以下の解説に示すとおりとする。

〔解 説〕

本マニュアルで使用する用語の解説を、以下に述べる。

下水汚泥焼却灰	脱水した下水汚泥を焼却炉で800℃程度で燃焼することにより、汚泥中の水分が蒸発し、有機分が燃焼したのちに残存する無機分（灰分）のことを言う。
石灰系焼却灰	脱水時に凝集剤として塩化第二鉄、凝集助剤として消石灰等を添加して得られた脱水汚泥を焼却して得られる灰で、カルシウム含有率が高い。
高分子系焼却灰	脱水時の凝集剤として、高分子凝集剤を添加した脱水汚泥を焼却して得られる灰で、けい素の含有率が高い。
凝集剤	汚泥中の微細な浮遊固形物やコロイド状物質を凝集させてフロックにする目的で添加する薬品をいう。一般に、塩化第二鉄、高分子凝集剤を使用する。
凝集助剤	汚泥を脱水するに先立ち、フロックを大きくしたり、フロック形成の核になったりする作用を目的として添加する薬品をいう。一般的に消石灰を使用する。
乾灰	下水汚泥焼却炉から取り出した直後の下水汚泥焼却灰で、加湿による影響を

受けていないものをいう。なお、乾灰の含水比は概ね0%である。

湿灰

加湿や吸湿により水分を吸収し、性状が変化した下水汚泥焼却灰をいう。土質改良材として利用する場合、湿灰は吸水発熱作用が減少すると同時に水和反応性にも影響を与え、土質改良効果が減少する。

CaOとしてのカルシウム含有量

下水汚泥焼却灰の成分組成を表す方法としては、カルシウム、けい素、鉄、アルミニウム等の含有成分をすべて酸化物の形態に変えて分離し、その重量を測定し、個々の酸化物の重量を測定された全酸化物の重量の合計に対する百分率で表すのが一般的である。CaOとしてカルシウム量は、下水汚泥焼却灰に含まれる全カルシウムをカルシウムの酸化物である酸化カルシウムとして分離し、その重量を測定し、全酸化物の重量に対する百分率で表したものである。

f-CaO

遊離の酸化カルシウムのことで、他の物質と反応して化合物を形成していないものをいう。

水和速度

下水汚泥焼却灰の灰粒子と水分子が化学反応を起こし結合し、水和熱を発生するが、そのときの水和熱による上昇温度をいう。

アルカリ刺激

水酸化カルシウム、石膏等は水和反応における刺激剤として知られている。刺激材は、水和反応において触媒的な作用を持つとともに、自ら反応物となる場合もある。すなわち、これらのアルカリを添加することにより水和反応が促進されることをアルカリ刺激という。

土質改良材

一般的には土質安定処理用の石灰・セメント系の固化材を言うが、本マニュアルにおいては下水汚泥焼却灰を主体に考えている。

土質改良効果

改良対象土に土質改良材等を混合することにより土が補強・安定化し強度が発現するが、改良前の土と比較して強度の増加の大小の程度を表すもの。

吸水発熱反応

本マニュアルにおいては下水汚泥焼却灰中に含有されるカルシウムが改良対象土中の水と反応する際の反応熱によって土の含水比が低下し、強度を発現する反応をいう。

ポゾラン反応

それ自体には水硬性のない土中の珪酸化合物が、カルシウム化合物との反応で、珪酸石灰水和物などを生成し、凝結硬化して強度を発現する反応である。

2 章 下水汚泥焼却灰の性状

2-1 物理的特性

下水汚泥焼却灰を土質改良材として利用する場合，比重，粒度分布，含水比，強熱減量等の物理的特性を把握しておくことが望ましい。

〔解 説〕

下水汚泥焼却灰は下水の処理によって発生する汚泥を脱水した後，800℃程度で焼却したものである。

脱水時に添加する凝集剤の種類により，消石灰，塩化第二鉄を添加した石灰系焼却灰，高分子凝集剤を添加した高分子系焼却灰に分類される。

下水汚泥焼却灰は石灰系，高分子系の違いの他にも，炉の種類，焼却温度等によっても物理的特性に違いが生ずる。本マニュアルでデータを示す焼却灰の炉形式及び焼却温度は表2-1のとおりである。

表2-1 本マニュアルでデータを示す焼却灰の焼却炉形式と焼却温度

	A 灰	B 灰	C 灰	D 灰	E 灰	F 灰	G 灰	H 灰	I 灰	J 灰	K 灰	L 灰
炉 形 式	流動炉	多段炉	流動炉	多段炉	多段炉	流動炉	多段炉	多段炉	多段炉	流動炉	流動炉	多段炉
焼却温度(℃)	850	800	850	800	700	750~ 800	800	800	800	820	850	850~ 900
f-CaO(%)	2.2	<0.1	<0.1	<0.1	0.6	0.5	<0.1	<0.1	<0.1	1.6	5.6	<0.1

(1) 比重

比重の測定は土質試験法に準ずるものとする。下水汚泥焼却灰の比重は表2-2に示すように，通常2.5～3.5程度であり，炉形式，焼却温度による傾向はあまり見られない。

表2-2 下水汚泥焼却灰の比重

	A 灰	B 灰	C 灰	D 灰	E 灰	F 灰	G 灰	H 灰	I 灰	J 灰	K 灰	L 灰
比重	3.72	3.06	2.53	3.20	2.79	3.29	3.04	3.36	3.64	3.35	2.58	3.24

(2) 粒度分布

粒度分布の測定は土質試験法に準ずるものとする。焼却直後の加湿・吸湿等の影響を受けていない灰（以下，乾灰と呼ぶ。）の粒度分布を図2-1に示す。この図に示すように粒度分布は灰により細粒のものから粗粒のものまで多様であるが，多段炉の焼却灰は粗粒のものが多く。

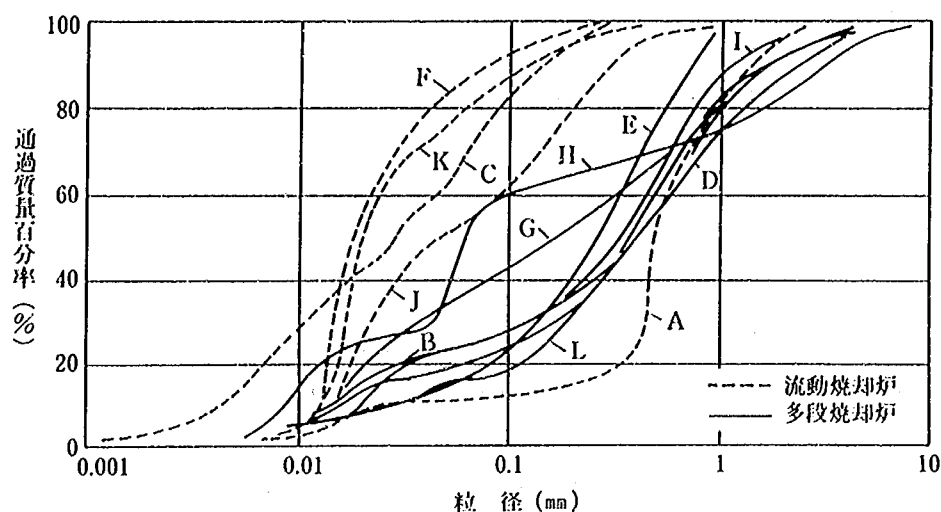


図 2 - 1 乾灰の粒度分布

(3) 含水比

含水比の測定は土質試験法に準ずるものとする。乾灰の含水比は表 2 - 3 に示すようにほぼ 0 % であり、飛散防止のための加湿や保管等による吸湿により大きくなる。したがって、含水比は焼却灰の吸湿状態を表す指標といえる。

表 2 - 3 乾灰の含水比

焼 却 灰	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
含水比(%)	0.0	0.4	0.6	0.4	5.0	0.04	0.6	0.2	0.0	0.1	0.6	0.06

(4) 強熱減量

強熱減量の測定は、土質試験法よりも温度の低い下水試験方法 (600℃, 1 時間) に準ずるものとする。乾灰の強熱減量は表 2 - 4 に示すように、通常 1 % 以下であるが、焼却温度が低い場合、数 % となる場合がある。

また、石灰系焼却灰の中には吸湿により強熱減量が増加するものがある。これは、焼却灰中の酸化カルシウムが水酸化カルシウムに変化すること、あるいは、焼却灰中のカルシウム化合物が水と反応し、結晶水を含む水和物を生成することによるものである。

表 2 - 4 乾灰の強熱減量

焼 却 灰	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
強熱減量(%)	0.0	3.1	0.6	1.4	6.8	0.14	2.1	1.0	0.6	0.0	0.2	0.36

2-2 化学的特性

下水汚泥焼却灰を土質改良材として利用する場合、その効果に影響を及ぼすカルシウム等の化学分析を行うことが望ましい。

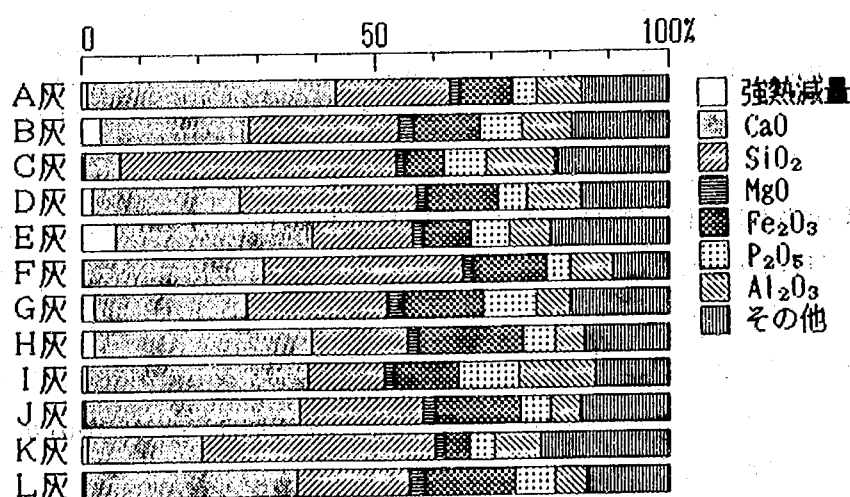
〔解説〕

下水汚泥焼却灰を土質改良材として利用する場合、成分中のカルシウム等が土質改良効果に影響を及ぼす。したがって、化学分析を行い、その成分（ CaO 、 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 MgO 等）を測定しておくことが望ましい。

化学分析の試験方法は JIS R 5202（ポルトランドセメントの化学分析方法）、JIS R 9011（石灰の化学分析方法）、JIS M 8815（石炭灰及びコークス灰の分析方法）等のいずれかの方法に準じて行うものとする。

石灰系焼却灰の組成の特徴は次のとおりである（図2-2、図2-3参照）。

- ① カルシウムの含有率は、脱水時の消石灰の添加率の違いにより CaO として20～50％程度である。
- ② 脱水時に塩化第二鉄を添加しているため、鉄の含有率は Fe_2O_3 として10％程度である。
- ③ けい素の含有率は排除方法により異なるが、 SiO_2 として15～35％程度である。



ただし、C灰は高分子系焼却灰

図2-2 本マニュアルでデータを示す石灰系焼却灰の組成

（JIS R 5202 による。ただし、 P_2O_5 は土壌養分分析方法）

なお、参考までに、高分子系焼却灰の組成について述べると次のとおりである（図2-4参照）

- ① 脱水時に有機系高分子凝集剤を添加するだけであるので、成分組成は、流入下水の組成に近いものである。

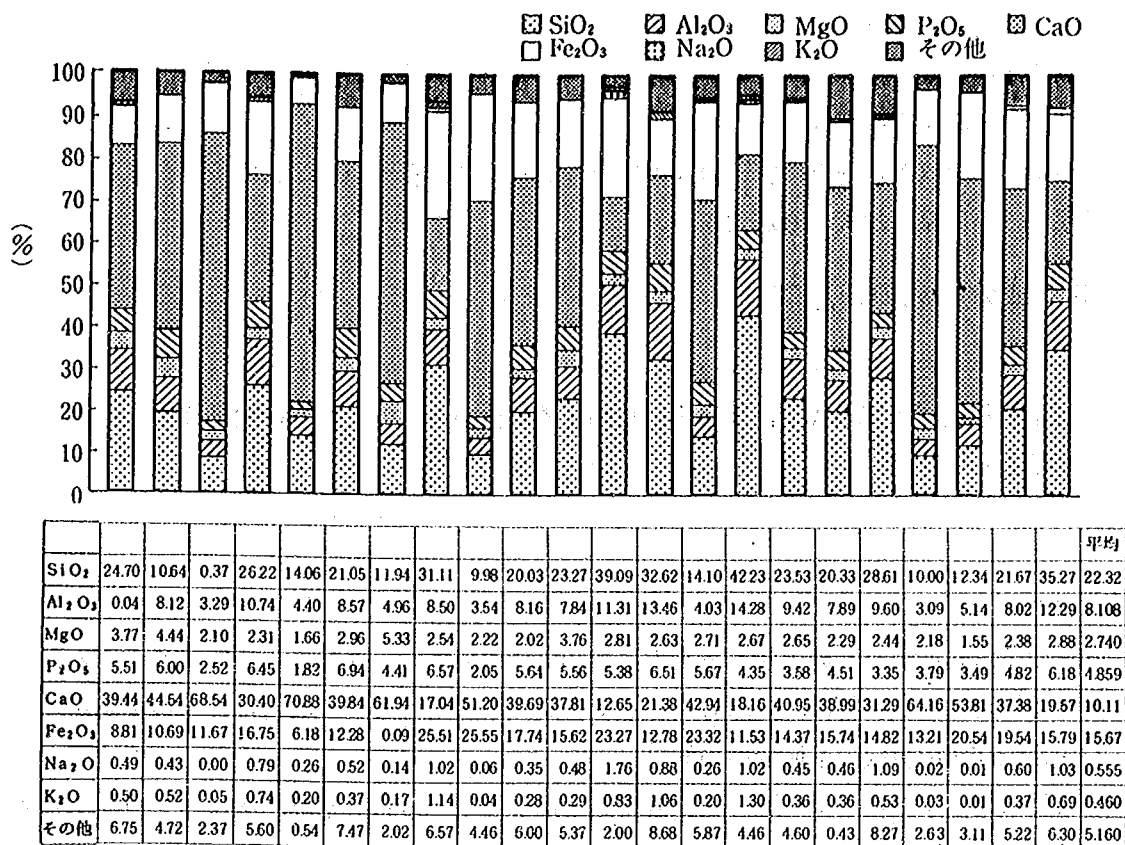


図 2 - 3 石灰系焼却灰の組成 (J I S M 8815)¹⁾

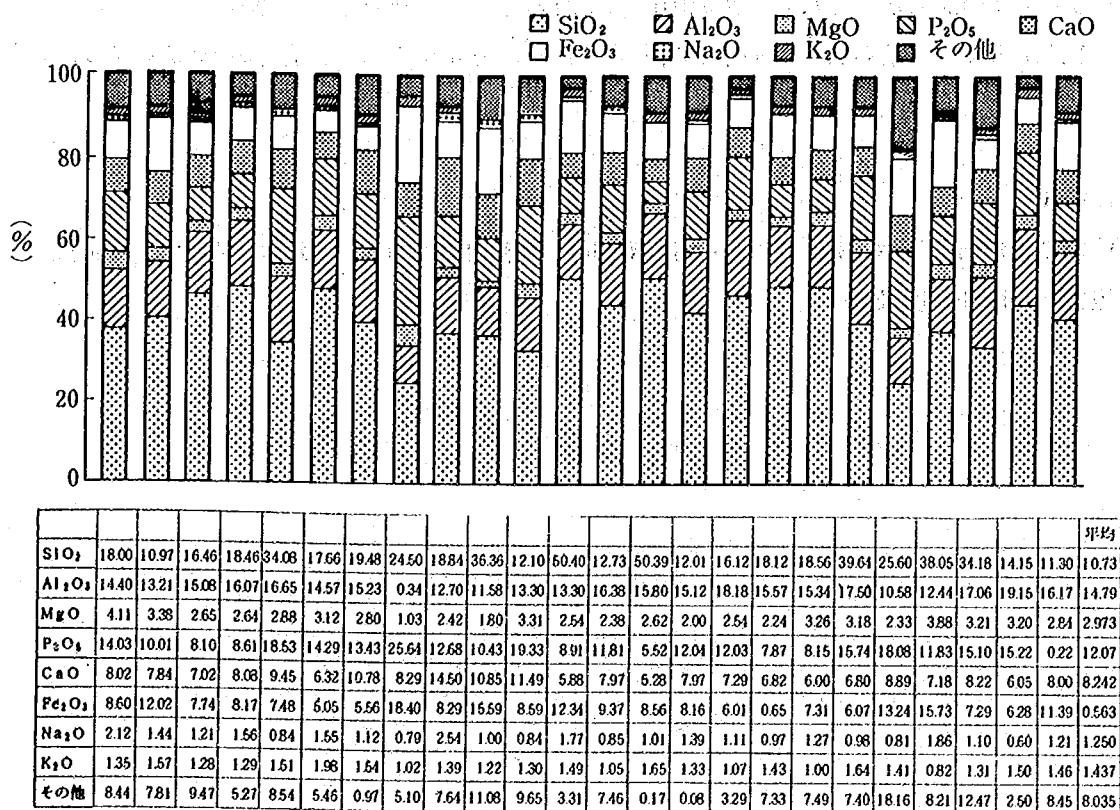


図 2 - 4 高分子系焼却灰の組成 (J I S M 8815)¹⁾

② カルシウムの含有率は、石灰系焼却灰に比べ少なく、 CaO として5～10%程度である。

③ 石灰系焼却灰に比べて、けい素、アルミニウム、リンなどの含有率が高く、けい素は SiO_2 として、25～50%程度となる。

以上の様に、土質改良効果に影響の大きいカルシウムは、石灰系焼却灰に多く含まれており、土質改良効果は、石灰系焼却灰の方が大きい。

2-3 成分組成の季節変動

石灰系焼却灰の成分組成は、季節的に変動する場合があるので、その変動範囲を把握しておくことが望ましい。

〔解説〕

1) 同一の下水処理場から発生する下水汚泥焼却灰においても、季節によってカルシウムの含有率が変動する場合がある。特に、排除方式として合流式を採用している場合は、その変動が大きい。

2) 石灰系焼却灰の組成の季節変動の例

名古屋市内下水処理場（排除方式：合流式）から発生する石灰系焼却灰に含まれる主要成分の変動（調査期間：昭和63年7月～平成元年7月）を図2-5に示す。このなかでカルシウムの含有率は、一般的に夏季に少なく冬季に多い傾向があり、 CaO として27～44%であった。この変動は、降雨によって土砂の流入が多くなり、汚泥中に含まれる無機分（けい素）が増加する。その結果、汚泥の脱水性がよくなり消石灰の添加率が減少するため、カルシウムの含有率が少なくなると考えられる。

〔参考文献〕

- 1) 建設省都市局下水道部，日本下水道事業団：汚泥溶融プロセスの省エネルギー化に関する調査報告書，昭和63年3月

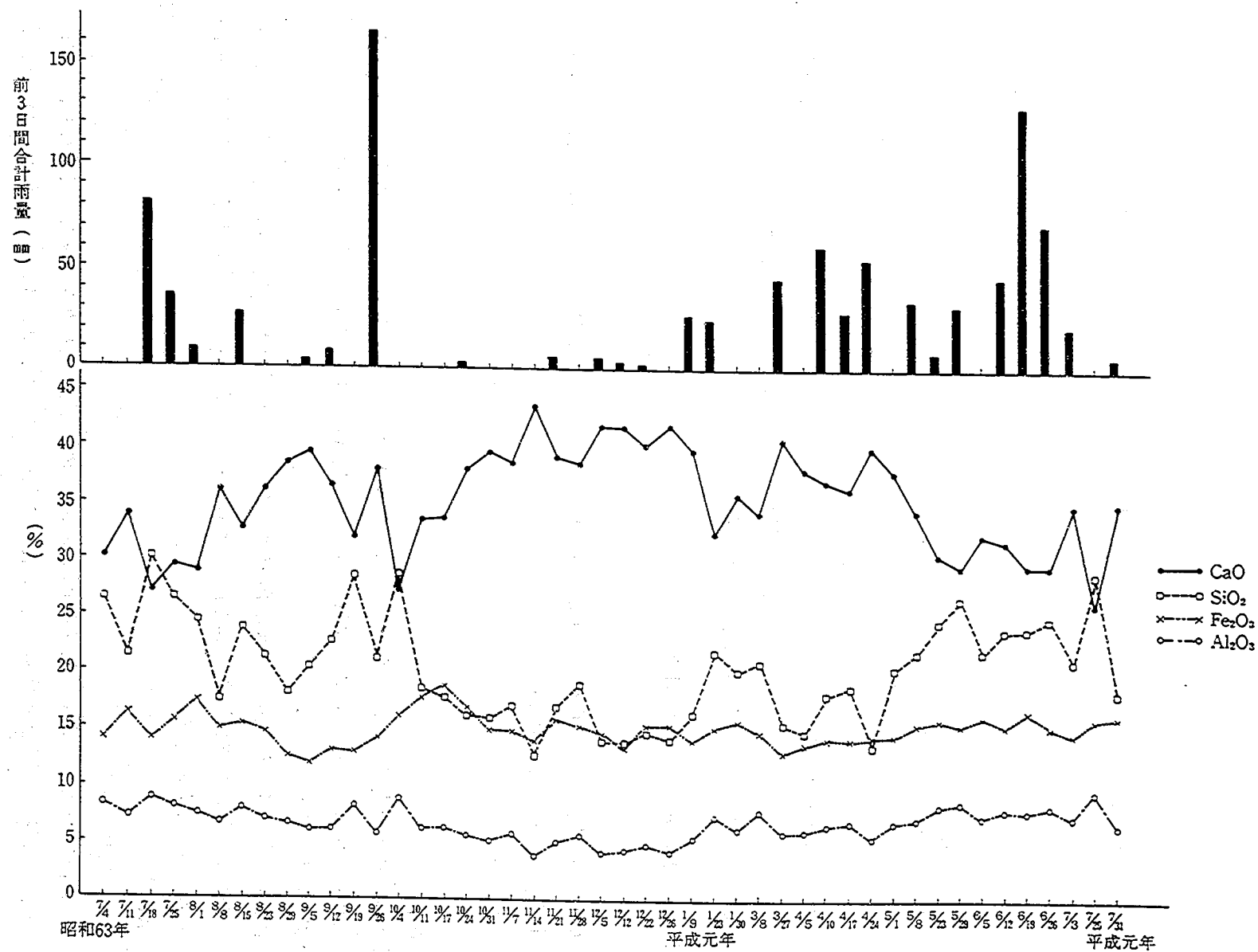


図 2 - 5 石灰系焼却灰主要成分の変動

3 章 下水汚泥焼却灰の品質と土質改良効果

3-1 一般的な留意事項

下水汚泥焼却灰は、焼却後及び使用前にその品質（物理・化学的特性）を把握しておくことが望ましい。

〔解 説〕

乾灰の品質は汚泥の性状・焼却条件等により変化する。2-3で述べたように同一処理場から発生する焼却灰についても、季節的な変動を生じる。焼却灰の品質は土質改良効果を左右するので、焼却後にその品質を把握しておくことが望ましい。

また、下水汚泥焼却灰（特に石灰系焼却灰）は水分が存在すると水和反応を起こし、その品質が変化する。したがって、飛散防止のための加湿や保管による吸湿の影響で、下水汚泥焼却灰の品質変化が考えられる場合は、使用前に再度品質を把握することが望ましい。

3-2 下水汚泥焼却灰の水和特性

下水汚泥焼却灰を土質改良材として使用する場合は、その水和特性により焼却灰の品質を評価した上で利用することが望ましい。

〔解 説〕

下水汚泥焼却灰の土質改良効果は、灰の吸水作用と水和に伴う硬化作用とにより生じる。吸水作用はすべての乾灰が有するが、水和反応性は灰によって異なる。したがって、水和反応性の大小が土質改良効果を左右するといえる。

下水汚泥焼却灰の水和は灰粒子と水分子が化学反応を起こし結合する現象である。この現象は、①水和反応時の発熱量、②水和による結晶水量、等により把握できる。これらの方法による焼却灰の品質評価の考え方を以下に述べる。

(1) 水和速度試験

① 試験方法

試料 300 g と蒸留水（25℃）400 cc を市販の魔法瓶に入れガラス棒でよく攪拌し、一定時間経過後温度上昇を測定する。通常、測定時間は、1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30 分とする。

② 試験結果の例

乾灰を室温30℃、湿度95%の状態 で保管し、上述の水和速度試験を行い保管による品質変化

を調査した。図3-1に保管日数と温度上昇の変化を示す。ここで、温度上昇は試験開始から30分後のものである。乾灰の温度上昇は、大きいもので20~30℃となる。これらの灰は水と混合することにより急激に水和反応を起こし、発熱したものと考えられる。各灰とも保管日数の増加により温度上昇は減少する。これは、保管中に吸湿により徐々に水和が進行したためと考えられる。

また、乾灰の状態でも温度上昇が小さい灰でも、アルカリを添加することで温度上昇が大きくなるものがある。図3-2は乾灰に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を10%添加した場合と添加しない場合の温度上昇の差を示したものである。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 添加により温度上昇が増大した灰は、アルカリ

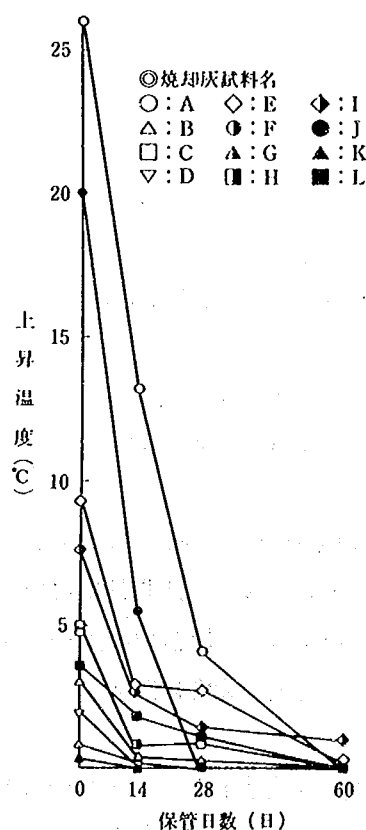


図3-1 温度上昇の変化

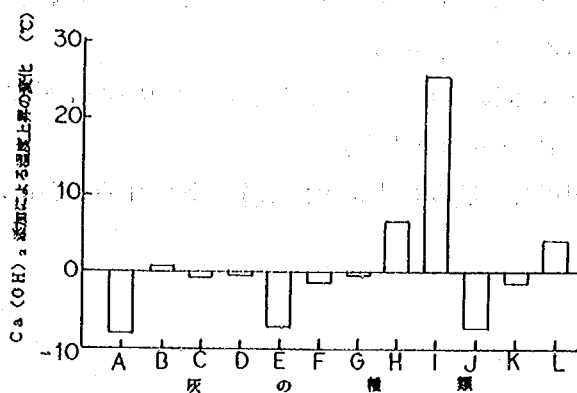


図3-2 アルカリ添加による温度上昇の変化

による刺激を受けてカルシウム化合物の水和が促進されたものと考えられる。

以上述べたように、焼却灰単体及びアルカリ添加のいずれかの条件で温度上昇の大きい灰は、水和反応が活発であり、土質改良効果も大きいと考えられる。

水和速度試験の結果をもとに、焼却灰（乾灰）単体での温度上昇及び $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 添加時の温度上昇を説明変数とし、被説明変数を焼却灰（乾灰）を添加した改良土のフォールコーン試験における貫入強度として、重回帰分析を行った。なお、対象土としては粘性土及び砂質土の2種類を用いた。

重回帰分析の結果、重相関係数は粘性土で $R=0.694$ 、砂質土で $R=0.917$ となり、特に、砂質土においては水和速度試験の結果を用いて精度よく土質改良効果が予測できることがわかる。なお、この場合の回帰式は次のとおりである。

$$\text{粘性土: } y_c = 0.228 x_1 + 0.164 x_2 + 6.334 \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

$$\text{砂質土: } y_s = 0.245 x_1 + 0.159 x_2 + 1.811 \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

ここで、

y_c : 粘性土に焼却灰（乾灰）を10%添加した場合のフォールコーン試験における5mm貫入時の貫入強度（kgf）

y_s : 砂質土に焼却灰（乾灰）を5%添加した場合のフォールコーン試験における5mm貫入時の貫入強度（kgf）

x_1 : 焼却灰（乾灰）単体での水和速度試験における30分後の温度上昇（℃）

x_2 : 焼却灰（乾灰）に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を10%添加した時の水和速度試験における30分後の温度上昇（℃）

図3-3, 4に回帰式による計算値と実測値の関係を示す。この図からも、粘性土においてはややばらつきがみられるが、砂質土においては非常に良い相関があることがわかる。

したがって、土質改良材として利用する場合の添加率を決定するための資料として、使用した焼却灰の水和速度試験結果と改良土の強度に関するデータを蓄積することが有効と考えられる。

また、図3-5, 6は水和速度試験結果とそれぞれの焼却灰（乾灰）を添加した改良土のフォールコーン試験における貫入強度の関係を示したものである。ここで、水和の指標としては水和速度試験における焼却灰単体での温度上昇と $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を10%添加した場合の温度上昇を乗じた値（以下、この値を $T(^\circ\text{C}^2)$ とする。）を用いた。これらの図から T の値と貫入強度の間には良い相関があることがわかる。

なお、 $\ell_n T$ と貫入強度の間の相関係数は粘性土で $r=0.781$ 、砂質土で $r=0.795$ であった。ただし、 $T < 1$ の場合は $\ell_n T$ を0とした。

これらの結果から、現場等で簡易に土質改良効果を判定する場合には、 T 値が有効に使えるものと考えられる。

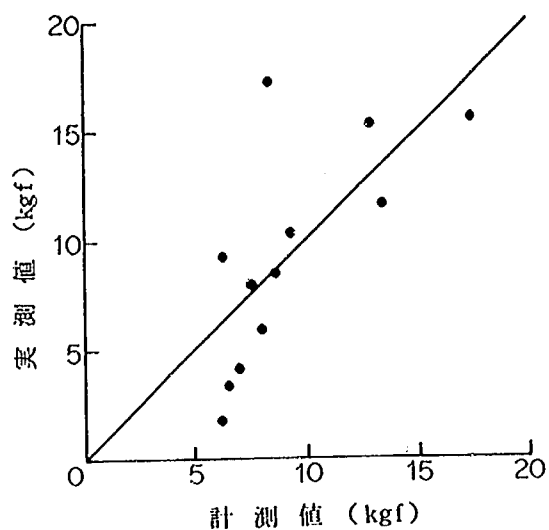


図 3-3 回帰式による計算値と実測値の関係 (粘性土)

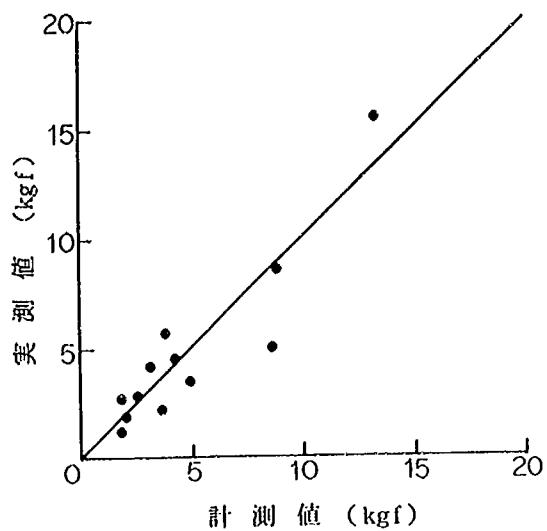


図 3-4 回帰式による計算値と実測値の関係 (砂質土)

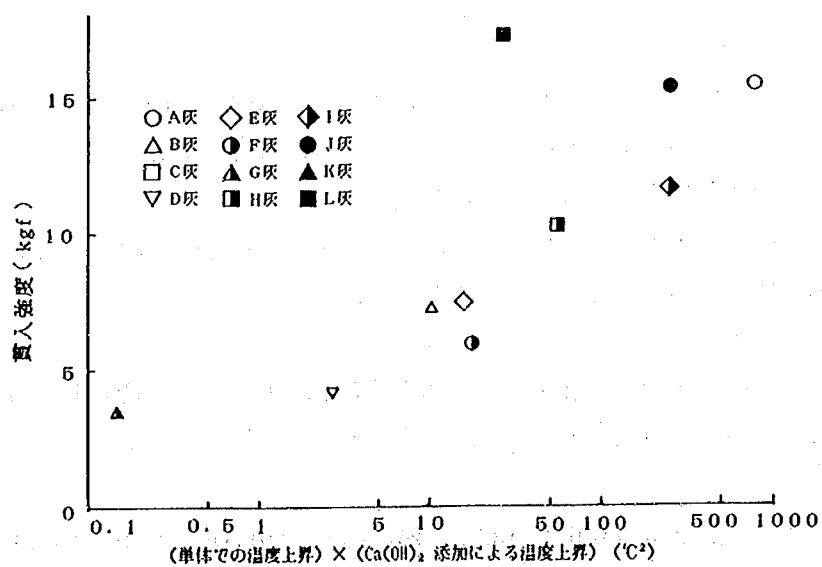


図 3-5 水利速度と貫入抵抗の関係 (粘性土)

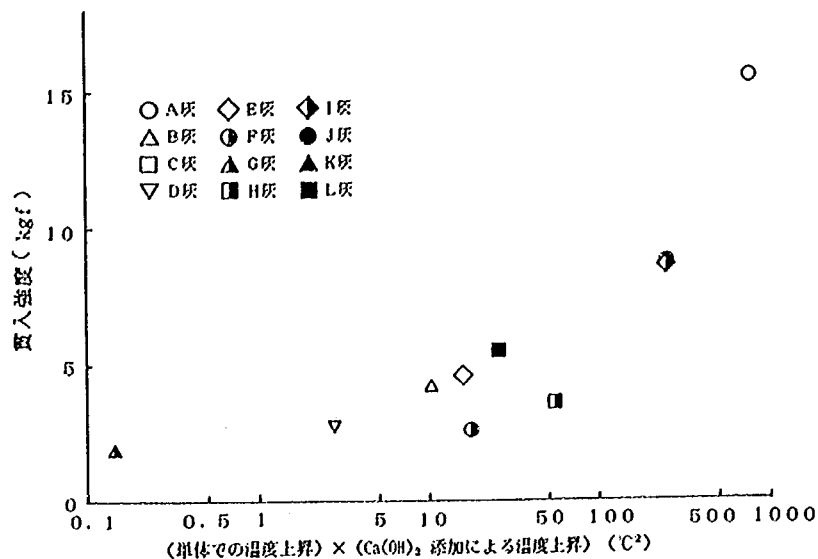


図3-6 水和速度と貫入抵抗の関係(砂質土)

(2) 強熱減量の変化

乾灰時の強熱減量は2-1で述べたように焼却条件により若干異なるが、保管により増加した量は焼却灰中の酸化カルシウムの水酸化カルシウムの変化及びカルシウム化合物の水和による結晶水の生成によるものと考えられる。そこで、水和速度試験時と同様の条件で保管した灰の強熱減量を測定し、乾灰の強熱減量と比較した。表3-1に保管による含水比及び強熱減量の変化を示す。強熱減量の変化は大きく分けて次の3種類になる。

- ① 保管前(乾灰)は1%以下と小さいが、吸湿による含水比の増加とともに増加する。
- ② 保管前(乾灰)から大きく、保管による変化は小さい。
- ③ 保管前後とも小さい。

①に属する灰は、灰中の酸化カルシウムが水酸化カルシウムに変化したり、カルシウム化合物が水和反応を起こし結晶水を生成したと考えられる。したがって、土質改良効果も大きいと考えられる。

図3-7, 8に強熱減量の変化(〔30℃, 湿度95%で60日保管時の強熱減量〕-〔乾灰の強熱減量〕)とそれぞれの焼却灰(乾灰)を添加した改良土のフォールコーン試験における貫入強度の関係を示す。これらの図から、強熱減量の変化と土質改良効果の間にも水和速度試験と同様に良い相関があることがわかる。

表 3 - 1 含水比及び強熱減量変化

	保管前	14 日後	28 日後	60 日後
A 灰	0.0 0.0	2.4 2.1	5.0 4.8	6.0 6.5
B 灰	0.4 3.1	1.2 4.4	2.5 4.3	3.6 5.0
C 灰	0.6 0.6	0.6 0.8	0.7 0.5	0.6 0.6
D 灰	0.4 1.4	1.4 2.3	2.7 2.2	3.3 2.9
E 灰	5.0 6.8	3.3 8.0	4.0 4.9	4.4 5.7
F 灰	0.0 4 0.1	0.6 0.7	1.1 0.6	1.4 1.5
G 灰	0.6 2.1	1.8 2.6	3.5 2.5	4.1 2.9
H 灰	0.2 1.0	1.6 6.1	3.4 3.3	3.7 3.5
I 灰	0.0 0.6	0.8 1.8	2.1 2.3	4.2 4.9
J 灰	0.1 0.0	2.2 4.4	4.0 3.7	4.3 4.9
K 灰	0.6 0.2	0.5 2.6	0.8 0.2	0.9 0.4
L 灰	0.0 6 0.3	0.7 2.8	2.2 1.1	3.3 2.0

上段：含水比(%)，下段：強熱減量(%)

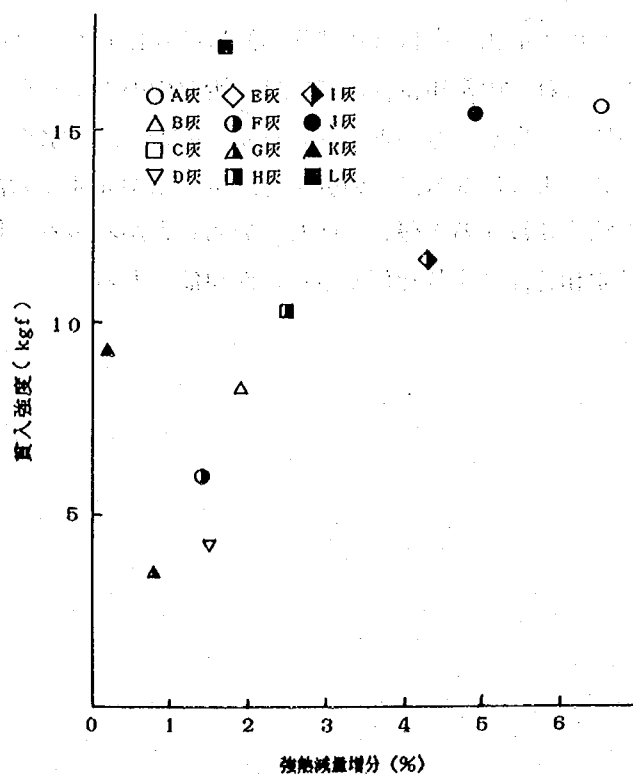


図 3 - 7 強熱減量増分と貫入抵抗の関係 (粘性土)

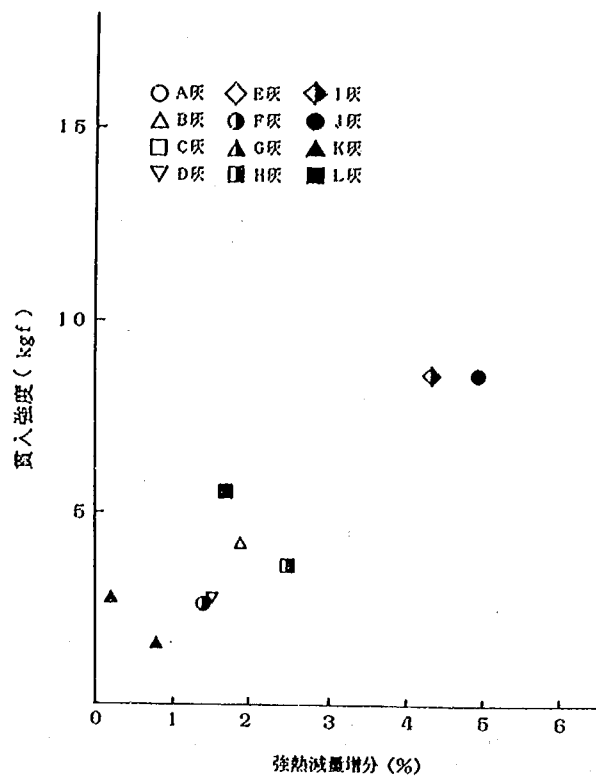


図 3 - 8 強熱減量増分と貫入抵抗の関係 (砂質土)

(3) 水和特性による下水污泥焼却灰の分類

下水污泥焼却灰は先に述べた水和速度試験及び強熱減量の変化で表される水和特性により土質改良効果に影響を与える。これらの水和特性の違いは、污泥中のカルシウム含有量、焼却炉の形式及び焼却温度等の違いにより生じるものと考えられる。そこで、下水污泥焼却灰を水和特性により分類すると、表 3 - 3 のようになる。この分類と表 4 - 2 で示す下水污泥焼却灰の品質と土質改良材としての分類方法を比較すると概ね対応していることがわかる。したがって、下水污泥焼却灰の土質改良効果は水和特性により評価することが可能である。

表 3 - 2 下水汚泥焼却灰の水和特性による分類

		グループ ①	グループ ②	グループ ③	グループ ④
焼却灰の種類		A, J	H, I, L	F, (K)	B, D, (E), G
特 性	焼却温度	高い(800℃以上)	高い(800℃以上)	低い(800℃以下)	低い(800℃以下)
	Ca含有率	高い(35%以上)	高い(35%以上)	低い(30%以下)	低い(30%以下)
	強熱減量	保管日数の増加とともに増加する。これは、焼却灰中のCa化合物の水和が進んだためと思われる。	保管日数の増加とともに増加する。これは、焼却灰中のCa化合物の水和が進んだためと思われる。	保管日数の増加とともに、やや増加する。	保管前から大きく、保管後もあまり変化がない。焼却温度が低いため、未燃分が残存していたと考えられる。
	水和速度	単体で急激に温度上昇が認められる。Ca(OH) ₂ を添加するとやや水和が抑制される。	単体では温度上昇小さいが、Ca(OH) ₂ を添加すると温度上昇は大きくなる。	単体及びCa(OH) ₂ 添加のいずれの場合も若干の温度上昇がある。	単体及びCa(OH) ₂ 添加のいずれの場合も温度上昇は小さい。
	Caの形態	大部分はCaOを含む化合物である。この化合物は、水を加えることで容易に反応し、Ca(OH) ₂ を生成する。また、少量のf-CaOが含まれている。	CaOを含む化合物であり、水を加えることで徐々に水和反応が進む。また、この反応はアルカリを添加することで刺激を受け、急激に変化する。	大部分はCaOまたCa(OH) ₂ を含む化合物であるが、水和反応は起こりにくく、アルカリによる刺激も小さい。また、ごく少量のf-CaOが含まれているものと考えられる。	CaOまたはCa(OH) ₂ を含む化合物であるが、水和反応は起こりにくく、アルカリによる刺激も小さい。
炉形式		流動床焼却炉	多段焼却炉	流動床焼却炉	多段焼却炉

4章 下水汚泥焼却灰の土質改良材としての利用方法

4-1 配合設計

下水汚泥焼却灰を土質改良材として用いて改良土を製造する場合、室内配合試験を行って添加量を決定しなければならない。

〔解説〕

1) 下水道管、ガス管等の埋戻し材に使用する場合の改良土の目標強度の目安を、表4-1に示す。

表4-1 下水汚泥焼却灰を用いた改良土の目標強度

改良の目標	目標強度	備考
埋戻し材としての利用	室内CBR値=10%	3層67回締固め後 6日空中養生、4日水浸 後のCBR値

なお、埋戻し材以外の用途（盛土材等）に使用する場合の改良土の目標強度は、一軸圧縮強さで、 $q_u = 0.5 \sim 1.0 \text{ kg/cm}^2$ 程度を目安とする。

2) 室内配合試験方法は、室内CBR試験（JIS A 1211）を基本とする（本マニュアルの付録-4参照）。ただし、図4-1～図4-3に示すような試験結果相互の関係を利用して、一軸圧縮試験（JIS A 1216）（本マニュアルの付録-3参照）やフォール・コーン試験（本マニュアルの付録-5参照）を用いてもよい。

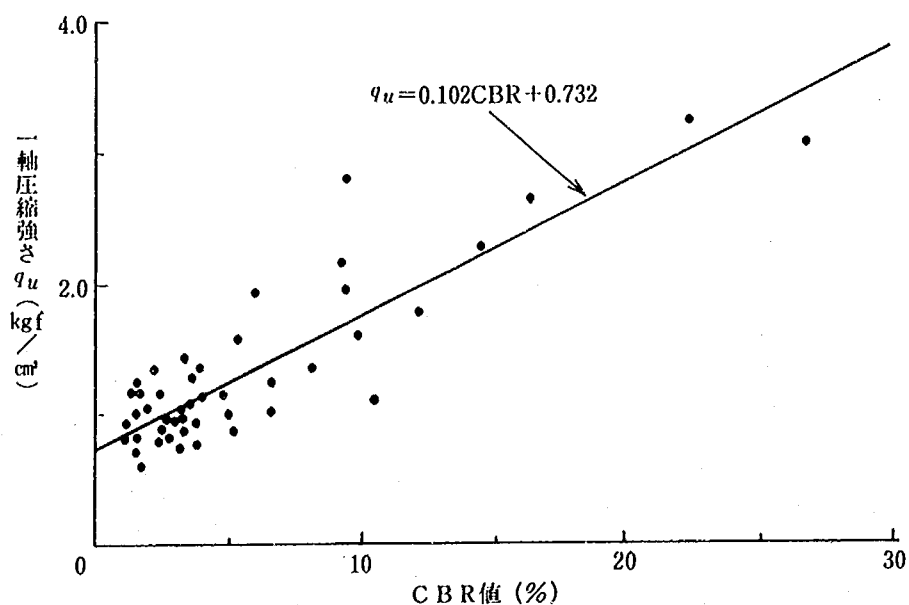


図4-1 下水汚泥焼却灰を用いた改良土のCBR値と一軸圧縮強さの相関関係の例

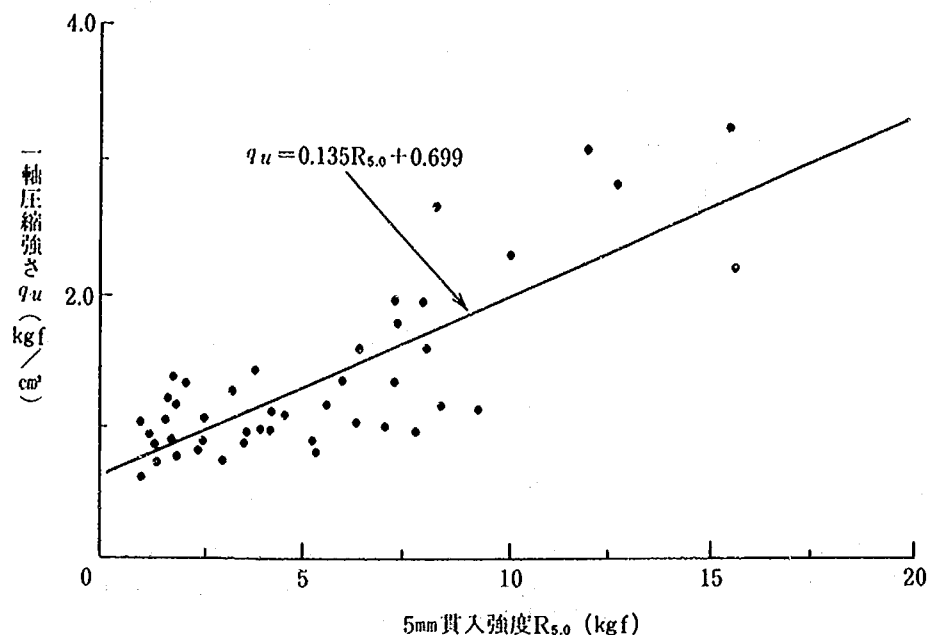


図4-2 下水汚泥焼却灰を用いた改良土のフォール・コーン貫入抵抗と一軸圧縮強度 q_u の相関関係の例

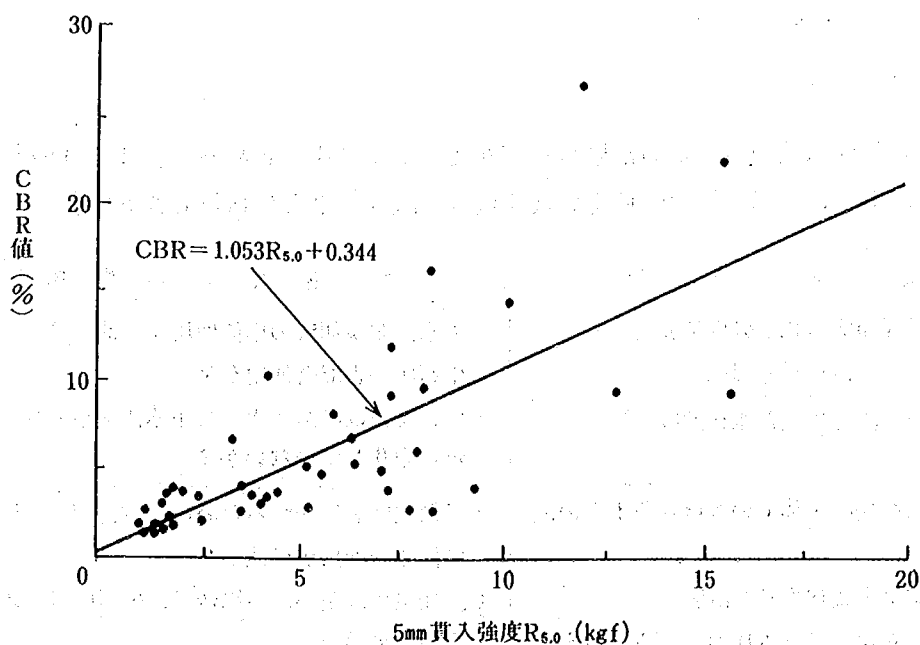


図4-3 下水汚泥焼却灰を用いた改良土のフォール・コーン貫入抵抗とCBR値の相関関係の例

3) 配合設計にあたっては、上記1)で述べた改良土の目標強度を満足するような土質改良材の添加量を上記2)の室内試験によって決定する。

なお、これまでの経験によると現場では室内強度の5割程度の強度発現しか期待できないことが多いので、室内配合試験の際の目標強度は室内CBR値10%、現場CBR値5%程度に相当することを念頭においておく必要がある。

4) 3章で述べた水和速度と土質改良効果の関係ならびに4-2に述べる下水汚泥焼却灰のカルシウム量と土質改良効果の関係を総合的に判断すると、表4-2に示すような下水汚泥焼却灰の品質と土質改良効果の判定法が提案できる。したがって、使用する下水汚泥焼却灰の土質改良効果を、表4-2をもとに判定しておくことが望ましい。

表4-2 下水汚泥焼却灰の品質と土質改良材として分類方法の一例

		グループⅠ	グループⅡ	グループⅢ	グループⅣ
注1) 下水汚泥焼却灰の種類		A, J, I	H, L	B, D, E, F, K	C, G
特徴	土質改良効果 (強度発現)	大	中	中	小
	保管による 強度低下	大	中	中	小
	土質改良材としての 利用方法の検討	焼却灰単体での 使用が可能である と思われる。	焼却灰単体でも使用可能であるが添加量を多く する必要有り。他の土質改良材と混合して使用 することも可能であると思われる。	他の土質改良材 と混合使用が適 当と思われる。	
備考	C a O 量 注2)	35%以上		35%以下	
	注3) アルカリ刺激を 加えた水和速度	200℃ ² 以上	20~200℃ ²	20℃ ² 以下	

注1) 前述、図2-2に示す試料名参照

注2) 図4-7参照

注3) 前述、図3-5, 6参照

5) 配合設計に必要な試験項目と試験結果から判断できる事項をまとめると表4-3のとおりである。

表4-3 配合設計に必要な試験項目と試験結果より判断できる事項

試 験 項 目	判 断 で き る 事 項
下水汚泥焼却灰の化学分析試験 (カルシウム含有量の把握)	• 下水汚泥焼却灰の単体使用が可能か? 生石灰等と混合使用か?
アルカリ刺激を加えた水和速度試験	• 保管または吸湿によって下水汚泥焼却灰の品質が変化していないか?
下水汚泥焼却灰単体での改良対象土との混合試験 ① 添加量を変化させた試験 ② 改良対象土の含水比および添加量を変化させた試験	• 目標強度を達成するために下水汚泥焼却灰の単体での利用が可能か? (添加量に制限がある場合は、生石灰等との混合使用の検討) • 土質および含水比に応じた添加量の決定
下水汚泥焼却灰と生石灰等の改良対象土との混合試験 ① 混合比・添加量を変化させた試験 ② 改良対象土の含水比および混合比・添加量を変化させて試験	• 土質および含水比に応じた生石灰等との混合比、下水汚泥焼却灰と生石灰の合計添加量の決定

4-2 単体での利用方法

下水汚泥焼却灰のうち土質改良効果が大きいものは、改良土の目標強度を満足することができる場合は、単体で土質改良材として利用することができる。

〔解 説〕

- 1) 以下に示すような下水汚泥焼却灰は単体で土質改良材として利用できると考えられる（前述、表4-2参照）。
 - ① 下水汚泥焼却灰のCaOとしてのカルシウム含有量35%以上のもの。
 - ② 下水汚泥焼却灰のアルカリ刺激を加えた水和速度が20～200℃²以上のもの。
- 2) 下水汚泥焼却灰を単体で土に加えるときの添加量は、一回の混合で加えられる量の限度や環境への影響等を考慮して決定する。
- 3) 改良土の目標強度としては、前述の表4-1に示した値を目安とする。
- 4) 単体で添加した場合の土質改良効果の例

① 下水汚泥焼却灰の添加量と土質改良効果の関係

表4-4に示す化学成分をもつ乾灰と湿灰を、液性限界に含水比を調整した粘性土（ $w_L=62.5\%$ ）と砂質土（ $w_L=31.0\%$ ）のそれぞれに添加量を変化させて添加した場合の改良土の強度発現の関係を図4-4に示す。また、その改良土の養生日数と強度発現の関係を図4-5に示す。

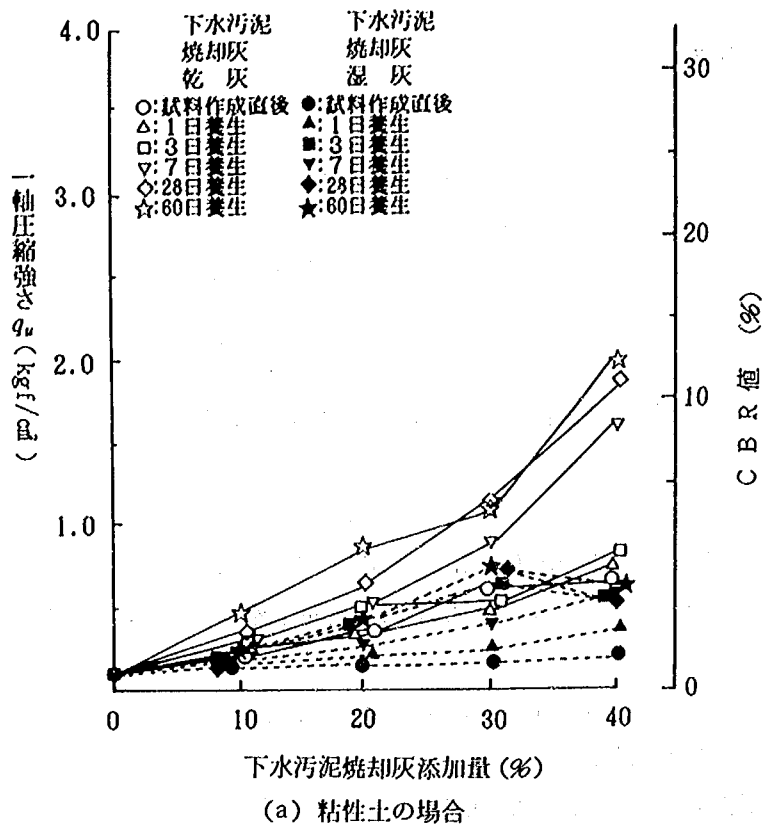
これら図から、下水汚泥焼却灰の添加量と強度発現の関係は、乾灰、湿灰ともに添加量が多くなるほど強度が大きくなっている。ただし、砂質土に乾灰を添加した場合は、添加量が過大になると強度の低下が認められる。したがって、砂質土に乾灰を添加する場合は、添加のしすぎに注意する必要がある。

乾灰と湿灰の強度発現の関係は、吸水作用とポゾラン反応の両方の効果がある乾灰の方が、吸水作用のほとんどない湿灰に比べるとかなり大きな強度の発現を示していることから、土質改良材として下水汚泥焼却灰を使用する場合は、極力乾灰の状態の下水汚泥焼却灰を使用した方が望ましいといえる。

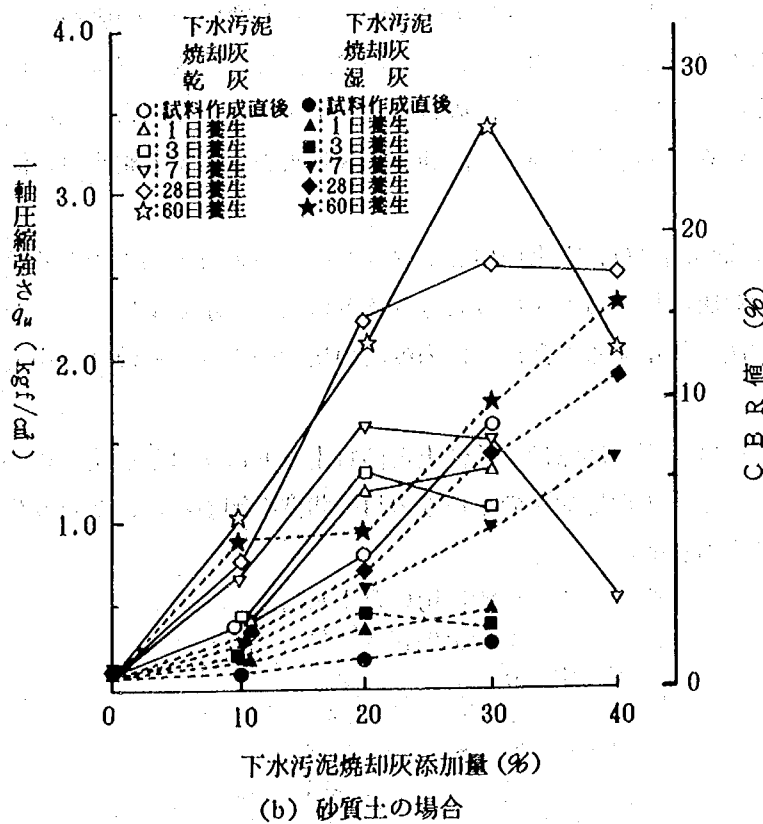
改良土の養生日数と強度発現の関係は、粘性土と砂質土ともに7日養生までの間の強度の伸びが大きい。したがって、下水汚泥焼却灰の改良土の目標強度を知るには、7日養生後の結果が、一つの目安となると考えられる。

表4-4 試験に用いた下水汚泥焼却灰の化学成分

化 学 分 析	(%)
強 熱 減 量	4.7
不 溶 残 分	21.4
CaO	28.1
SiO ₂	22.6
Al ₂ O ₃	8.2
Fe ₂ O ₃	18.7

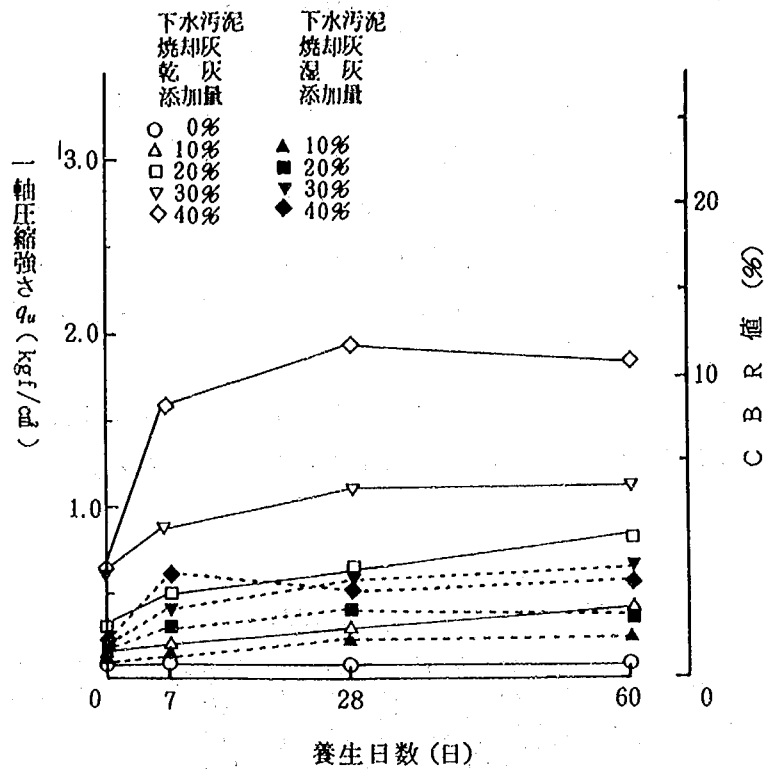


注) 図中の CBR 値は前述,
図 4-1 に示した一軸圧縮強さとの相関値



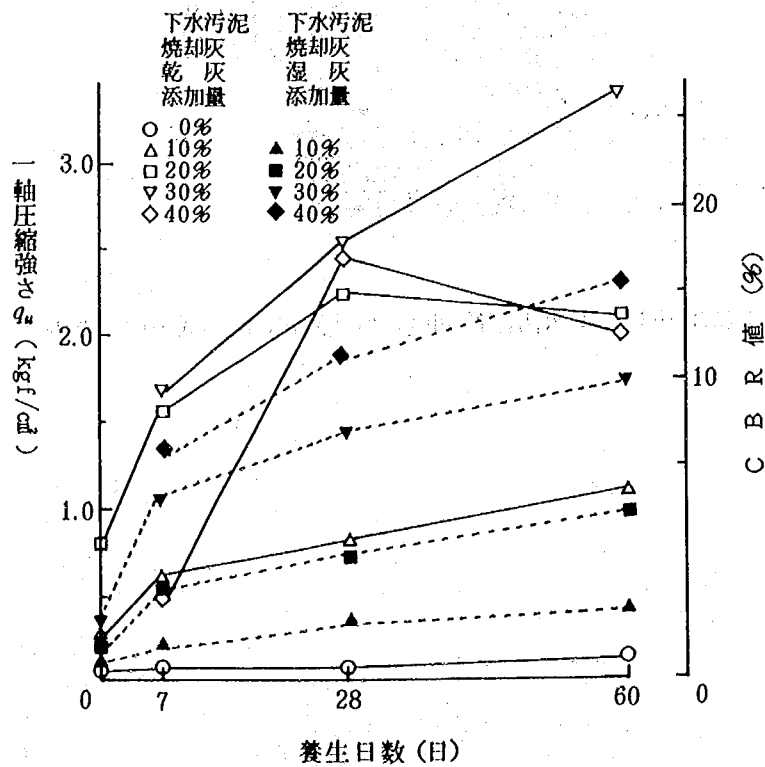
注) 図中の CBR 値は前述,
図 4-1 に示した一軸圧縮強さとの相関値

図 4-4 下水汚泥焼却灰の添加量と改良土の一軸圧縮強さ q_u の関係



(a) 粘性土の場合

注) 図中の CBR 値は前述,
図 4-1 に示した一軸圧縮強さとの相関値



(b) 砂質土の場合

注) 図中の CBR 値は前述,
図 4-1 に示した一軸圧縮強さとの相関値

図 4-5 下水汚泥焼却灰改良土の養生日数と一軸圧縮強さ q_u の関係

② 下水汚泥焼却灰のカルシウム (CaO) 量と土質改良効果の関係

図4-6に示すような化学成分の異なる12種類の下水汚泥焼却灰(乾灰)を、自然含水比状態の粘性土($w_n = 24.6\%$)および砂質土($w_n = 31.0\%$)に混合した。なお、下水汚泥焼却灰の添加量は、粘性土の乾燥重量に対する重量百分率で10%、砂質土で5%とした。

その結果を、下水汚泥焼却灰の成分中において土質改良効果にもっとも影響すると考えられるカルシウム(CaO)量と改良土の一軸圧縮強さ q_u の関係を整理したものを図4-7に示す。この図より、下水汚泥焼却灰中のカルシウム量が多いほど改良土の強度発現が大きいことがわかる。

したがって、3章でも述べたように下水汚泥焼却灰中のカルシウム量を計測することにより、その下水汚泥焼却灰の土質改良効果を知ることが可能であると考えられる。

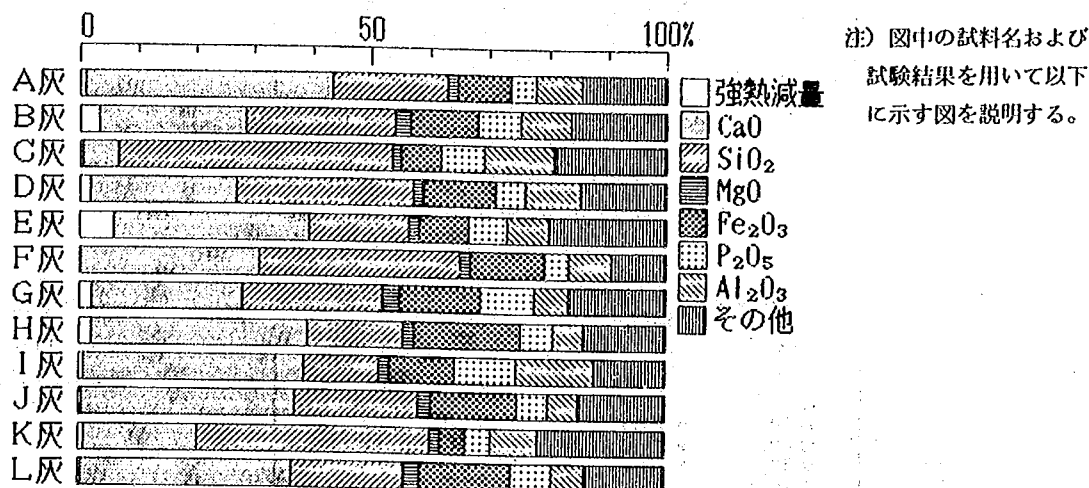


図4-6 試験に用いた下水汚泥焼却灰の強熱減量, 化学成分の一覧表

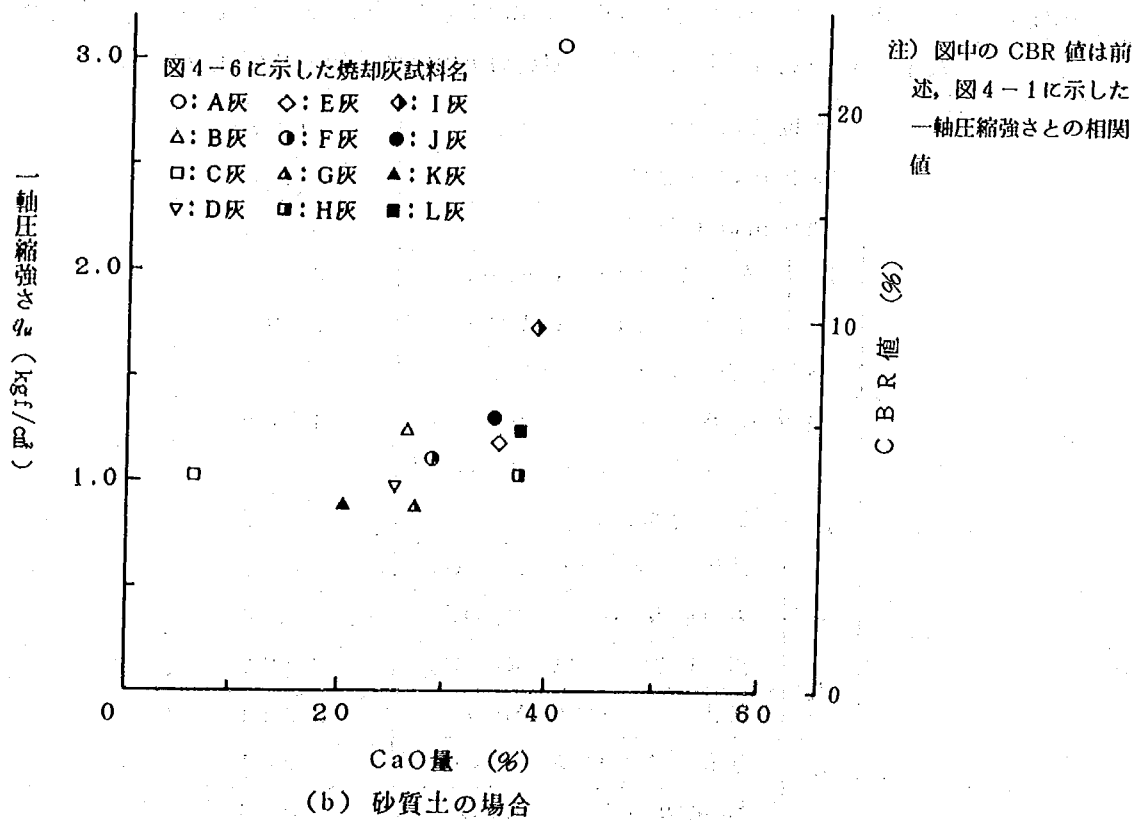
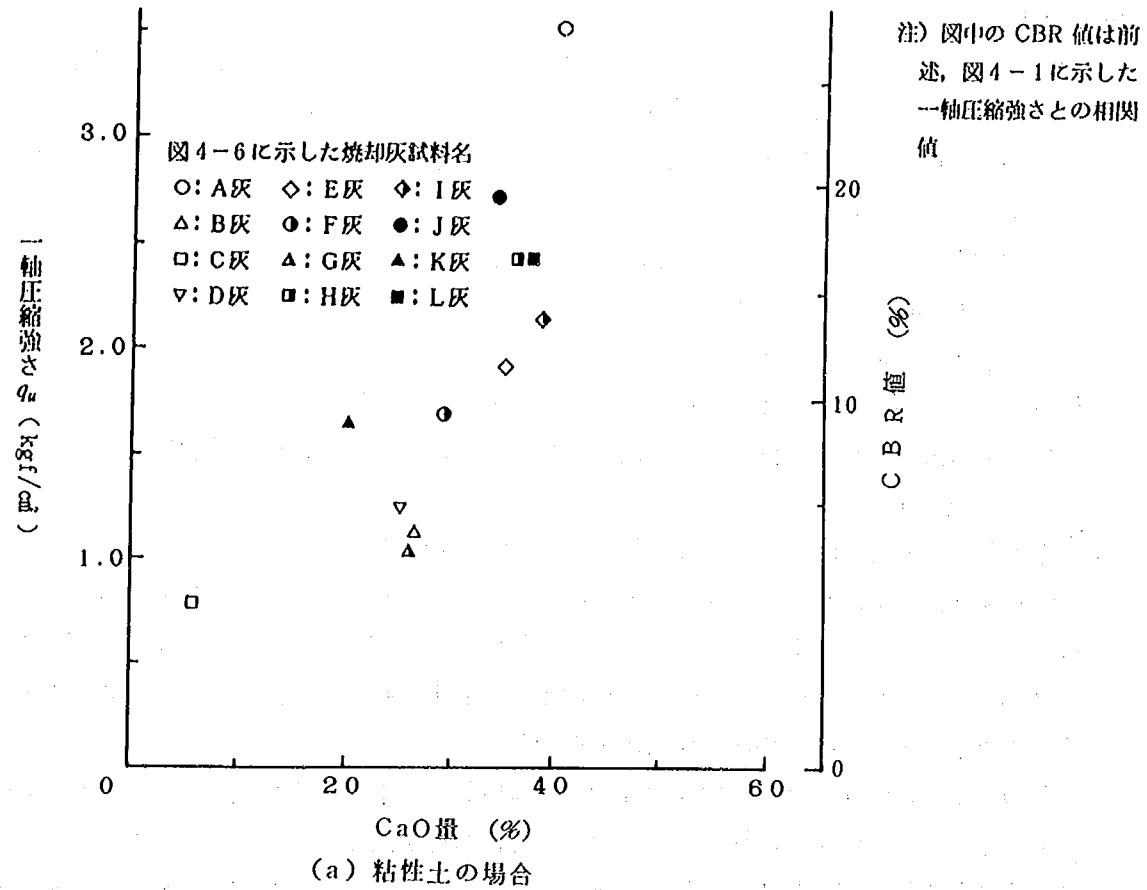


図4-7 下水汚泥焼却灰中のカルシウム (CaO) 量と28日養生後の改良土の一軸圧縮強さ q_u の関係

㉔ 下水汚泥焼却灰の保管による品質変化と土質改良効果の関係

前述の、図4-6に示したものと同一12種類の下汚泥焼却灰（乾灰）を、採取直後および $30 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度95%の高温多湿の状態に14, 28, 60日間それぞれ保管し、一定の保管日数を経過したのち粘性土、砂質土と混合した。なお、下水汚泥焼却灰の添加量は、粘性土の乾燥重量に対する重量百分率で10%、砂質土で5%とした。

その結果を、下水汚泥焼却灰の保管日数と28日養生後の改良土の一軸圧縮強さ q_u の関係として図4-8に示す。この図より、下水汚泥焼却灰中のカルシウム量が35%以上あり、土質改良材として単体での利用も可能であると考えられる下水汚泥焼却灰（図中、A灰、J灰、I灰）では、保管日数の増加とともに強度発現が大きく低下する傾向が顕著であることが認められる。したがって、下水汚泥焼却灰単体での土質改良効果の大きい下水汚泥焼却灰ほど保管時の品質変化に注意する必要がある。

④ 土の含水比の違いに着目した添加量と土質改良効果の関係

同じ物理特性（粒度分布、統一土質分類など）をもつ土においても、含水比の違いによって土質改良効果にも違いが生じる。そこで、自然含水比状態の粘性土（ $w_n = 36.8\%$ ）と砂質土（ $w_n = 27.1\%$ ）のそれぞれの土を乾燥または加水し含水比を変化させたものに、表4-5に示す化学成分の下汚泥焼却灰を添加量を変えて混合した。

その結果を、図4-9に土の含水比の違いに応じた下水汚泥焼却灰の添加量とCBR値の関係として示す。この図より、粘性土、砂質土とも含水比が高くなるにしたがって同一強度を得るために必要な下水汚泥焼却灰の添加量が増加することがわかる。そして、これらの結果にもとづき、後述の4-4で述べるような土質に応じた下水汚泥焼却灰の最適添加量の目安が得られる。

表4-5 試験に用いた下水汚泥焼却灰の物理性状と化学成分の一覧表

採取時の含水比（％）		0.08
水和後のpH値		11.65
塑性指数（ I_p ）		N. P
比重	乾燥 JIS A 5201	2.956
	水和後 JIS A 1202	2.896
最適含水比（％）		46.0
最大乾燥密度（ g/cm^3 ）		1.000
化学成分（％）	二酸化ケイ素 SiO_2	26.54
	酸化カルシウム CaO	32.36
	酸化アルミニウム Al_2O_3	8.88
	五酸化りん P_2O_5	4.94
	酸化第二鉄 Fe_2O_3	13.96
	酸化マグネシウム MgO	2.21
	酸化ナトリウム Na_2O	0.61
	酸化カリウム K_2O	0.74
	三酸化イオウ SO_3	4.36
	強熱減量	5.01

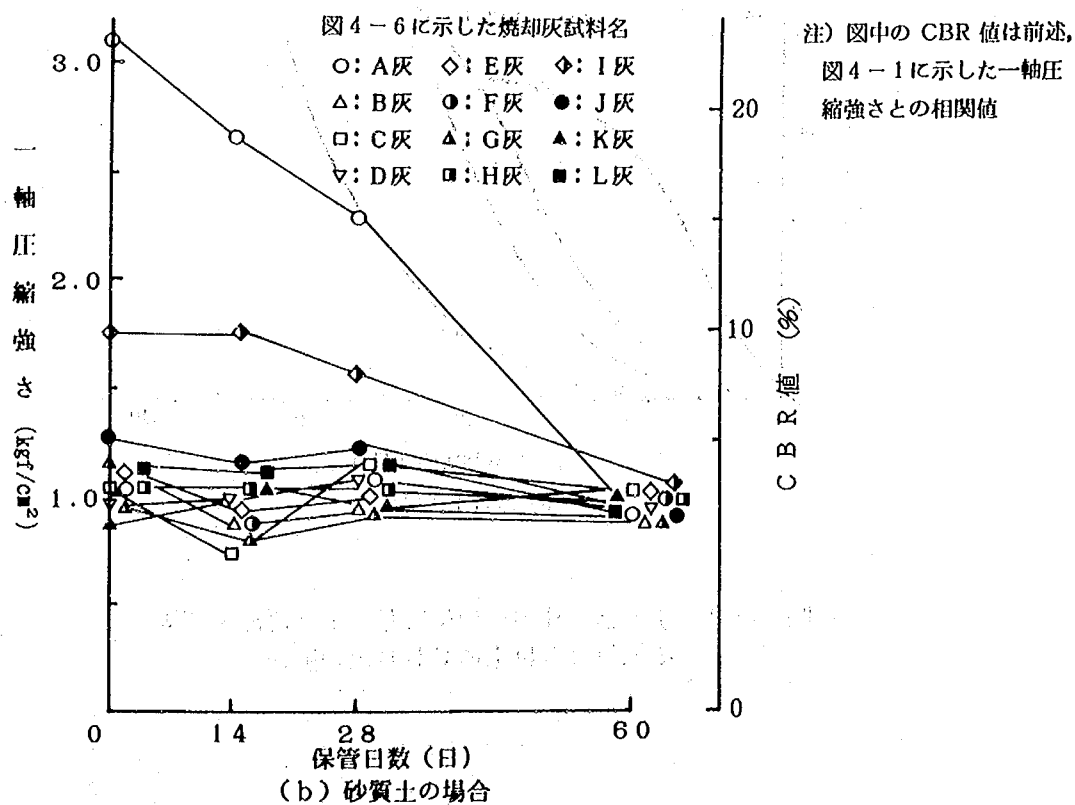
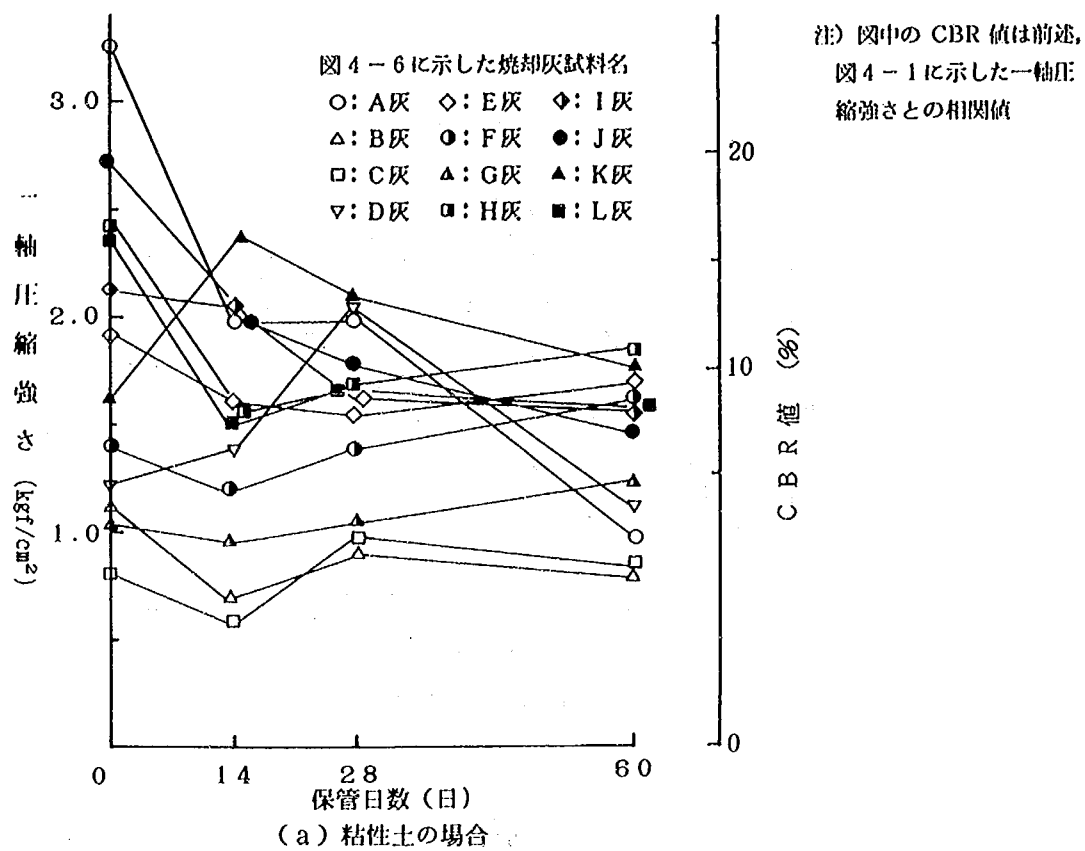


図 4-8 下水汚泥焼却灰の保管日数と 28 日養生後の改良土の一軸圧縮強さ q_u の関係

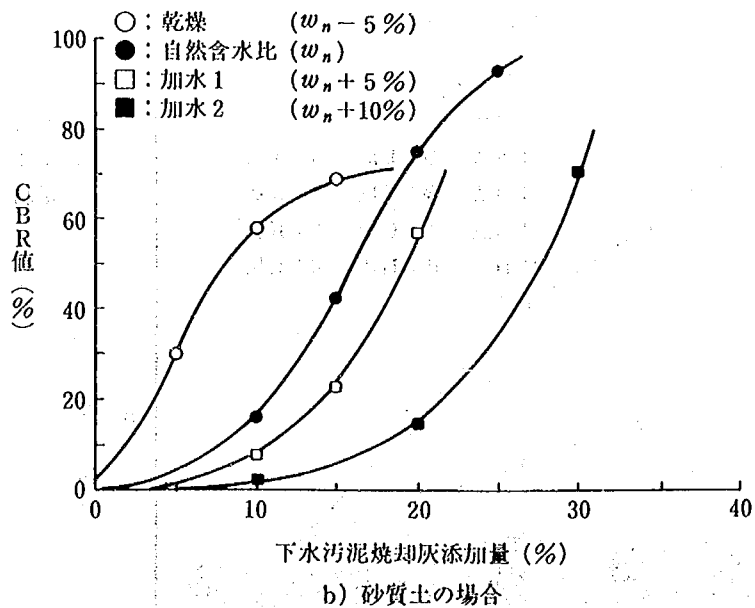
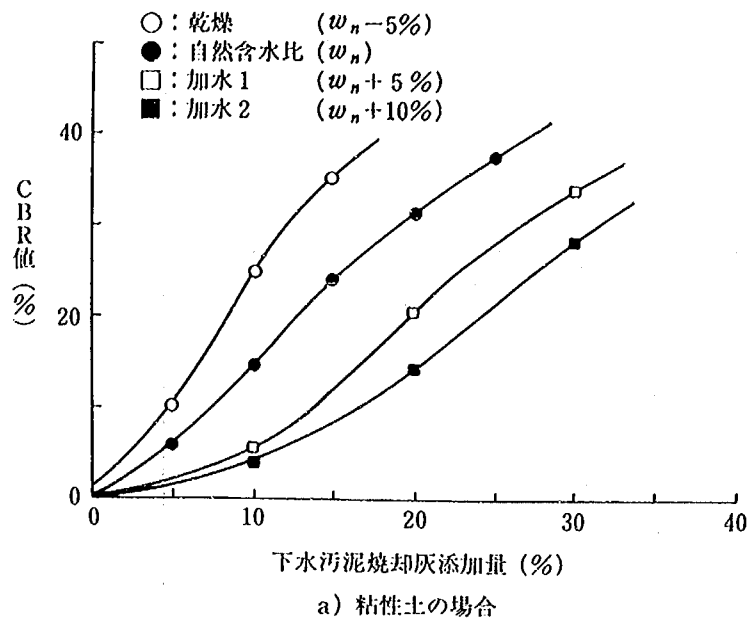


図4-9 土の含水比の違いに応じた下水汚泥焼却灰の添加量と改良土のCBR値の関係

4-3 生石灰等との混合による利用方法

下水汚泥焼却灰は、生石灰等の土質改良材と混合して使用すると、土質改良効果が飛躍的に向上する。したがって、単体での使用が難しい場合は、生石灰等との混合による利用を検討することが望ましい。

〔解 説〕

1) 以下に示すような下水汚泥焼却灰は土質改良材として生石灰等と混合して添加することが望ましいと考えられる（前述、表4-2参照）。

- ① 下水汚泥焼却灰のCaOとしてのカルシウム含有量35%以下のもの。
- ② 下水汚泥焼却灰のアルカリ刺激を加えた水和速度が20～200℃²以下のもの。
- ③ 保管等によって下水汚泥焼却灰の土質改良効果が低下していると考えられるもの。
- ④ 改良対象土の含水比が高く、下水汚泥焼却灰単体では目標強度を得るための添加量が過大になってしまうもの。

2) 生石灰等との混合使用による土質改良効果の例

① 生石灰と下水汚泥焼却灰を混合した添加量と土質改良効果の関係

種々の物性をもつ土に、生石灰と下水汚泥焼却灰を混合して使用した場合の添加量と土質改良効果の関係をj知るため、表4-6に示した物性をもつ粘性土2種類（CH、CL）と砂質土2種類（SC、SM）の計4種類に、生石灰と表4-7に示すような性状の下水汚泥焼却灰を表4-8に示した混合比で添加し、それぞれの土と混合した。その結果を、図4-10に下水汚泥焼却灰と生石灰をあわせた添加量とCBR値の関係として示す。この図より、下水汚泥焼却灰は生石灰と混合して使用するとCBR値が大きく増加する傾向にあり、下水汚泥焼却灰と生石灰の混合比が20：1と少量の場合においても、生石灰と下水汚泥焼却灰の合計添加量が6～7%程度でCBR値が10%程度の強度が発現している。したがって、単体では目標とする強度が得られない下水汚泥焼却灰においても、生石灰等を少量でも混合して添加すると大きな強度発現が期待できると考えられる。

表4-6 試験に用いた土の物性

対象 ^{注1} 土質	含水比 (%)	pH	コンシステンシー			CBR (%)	通 過 百 分 率 (%)				
			w_L	w_P	I_P		4.76	2.00	0.42	0.15	0.074
CH	40.6	5.11	52.2	23.3	28.9	1.6	100	99.8	99.1	96.9	91.7
CL	32.0	6.04	40.7	20.2	20.5	1.2	98.8	96.5	86.5	72.5	55.6
SC	29.4	5.87	37.5	24.4	13.1	0.8	96.5	94.4	87.5	46.3	31.6
SM	24.6	8.04	—	—	—	0.6	99.5	98.2	55.4	19.2	15.3

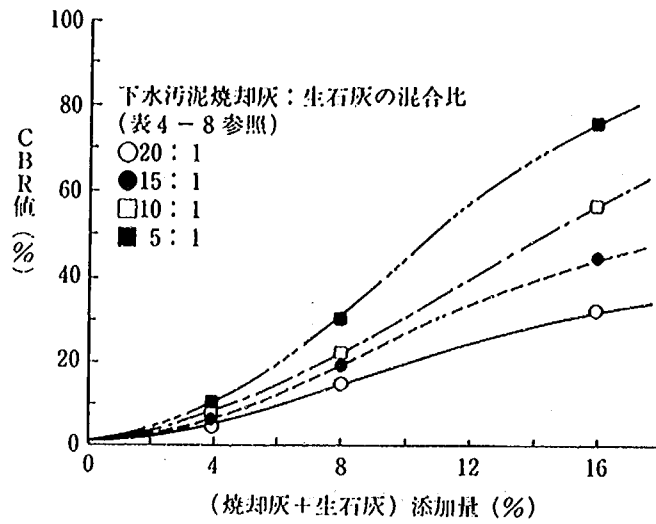
注1) 日本統一土質分類による土質分類

表4-7 試験に用いた下水汚泥焼却灰の物理性状と
化学成分の一覧表

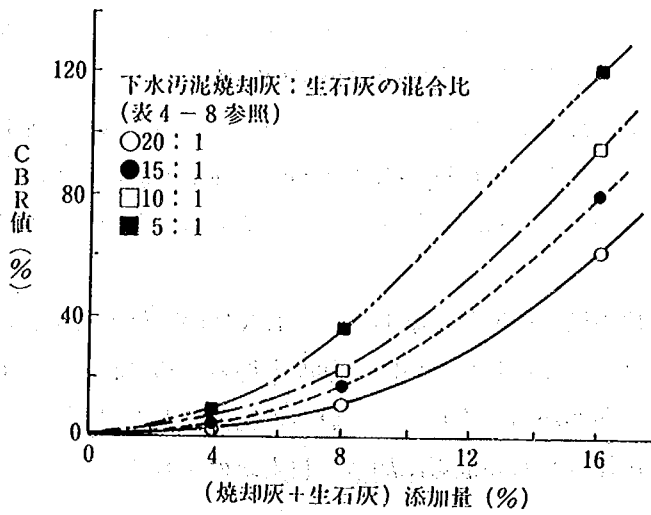
採取時の含水比 (%)		0.06
水和後のpH値		11.85
塑性指数 (I_p)		N. P
比 重	乾燥 JIS A 5201	2.959
	水和後 JIS A 1202	2.893
最適含水比 (%)		45.5
最大乾燥密度 (g/cm^3)		1.086
化 学 成 分 (%)	二酸化ケイ素 SiO_2	14.55
	酸化カルシウム CaO	41.42
	酸化アルミニウム Al_2O_3	4.71
	五酸化りん P_2O_5	6.79
	酸化第二鉄 Fe_2O_3	15.43
	酸化マグネシウム MgO	2.88
	酸化ナトリウム Na_2O	0.57
	酸化カリウム K_2O	0.30
	三酸化イオウ SO_3	5.95
	強熱減量	6.84

表4-8 下水汚泥焼却灰と生石灰の土の
乾燥重量に対する添加量

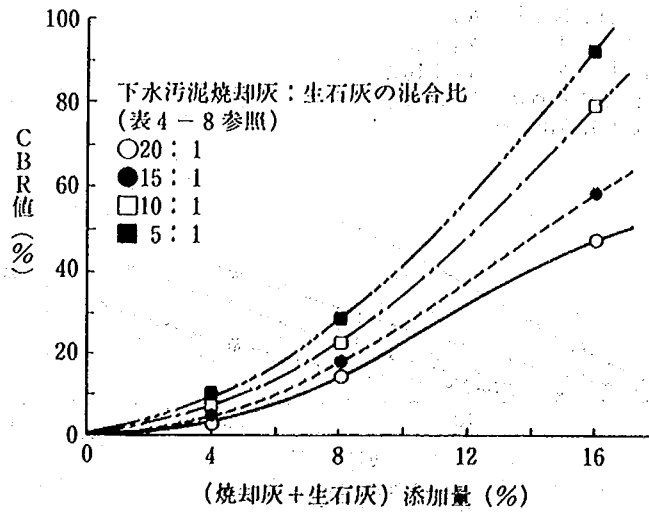
混 合 比		改良材 種 別	添 加 量 (%)		
焼却灰	生石灰		4	8	16
20	1	生石灰	0.19	0.38	0.76
		焼却灰	3.81	7.62	15.24
15	1	生石灰	0.25	0.50	1.00
		焼却灰	3.75	7.50	15.00
10	1	生石灰	0.36	0.73	1.45
		焼却灰	3.64	7.27	14.55
5	1	生石灰	0.67	1.33	2.67
		焼却灰	3.33	6.67	13.33



a) 粘性土(CH)の場合



b) 粘性土(CL)の場合



c) 砂質土(SC)の場合

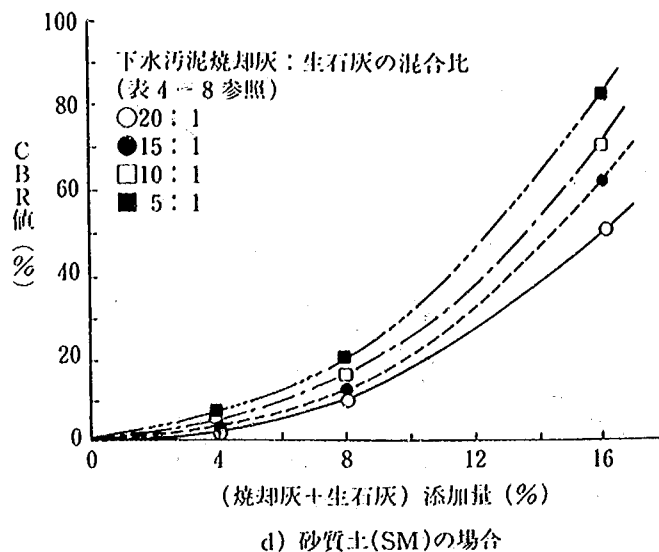
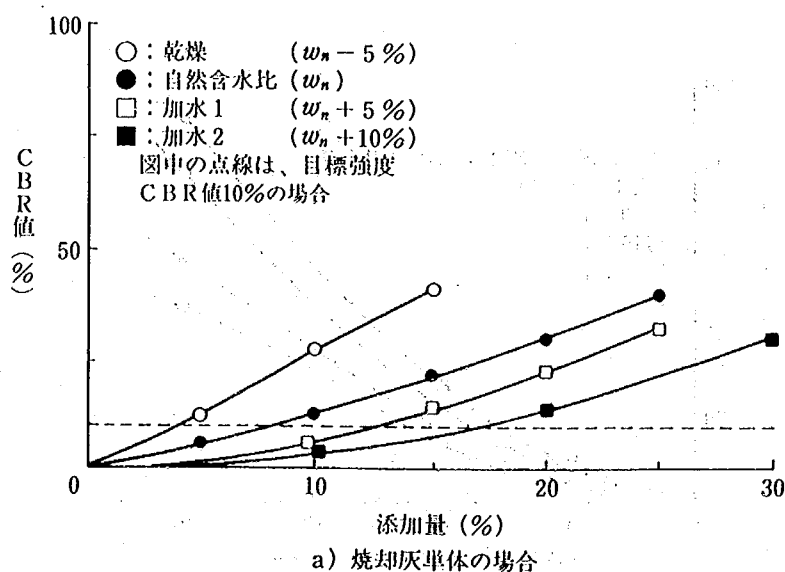


図 4-10 下水汚泥焼却灰と生石灰をあわせた添加量と改良土の CBR 値の関係

② 土の含水比の違いに着目した添加量と土質改良効果の関係

同じ物理特性（粒度分布，統一土質分類など）をもつ土においても，含水比の違いによって土質改良効果に違いが生じる。そこで，自然含水比状態の粘性土（ $w_n = 36.8\%$ ）を乾燥または加水し含水比を変化させたものに，生石灰と前述，表 4-7 のものと同じ下水汚泥焼却灰を混合して添加した。

その結果を，土の含水比の違いに応じた添加量と CBR 値の関係として，図 4-11 に示す。この図より，土の含水比が高くなるにしたがい同一強度を得るために必要な生石灰や下水汚泥焼却灰の添加量が増加することがわかる。そして，これらの結果にもとづき，後述の 4-4 で述べるような土質に応じた下水汚泥焼却灰の最適添加量の目安が得られる。



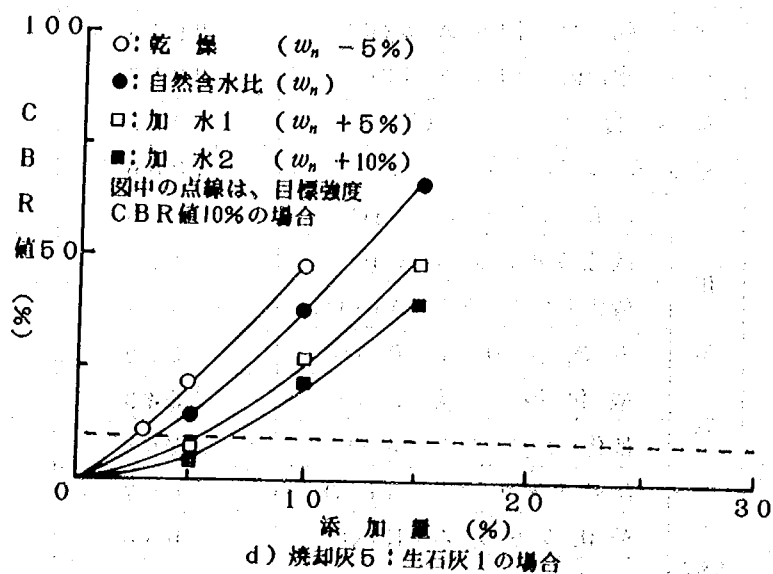
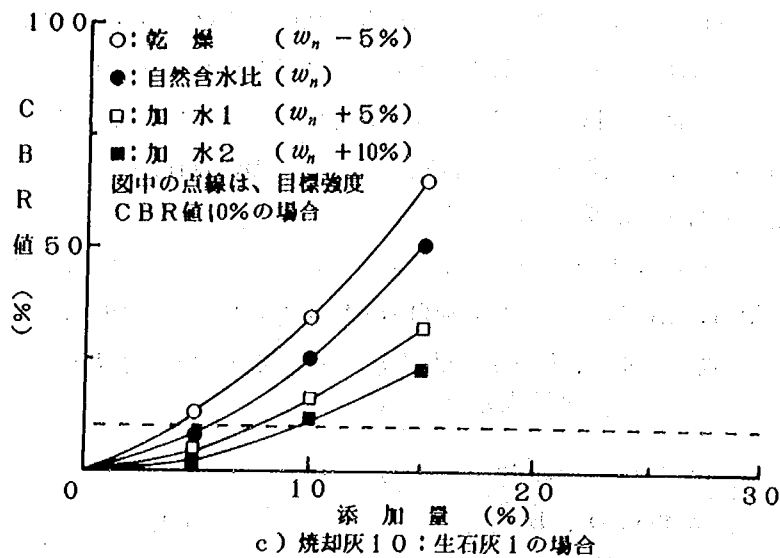
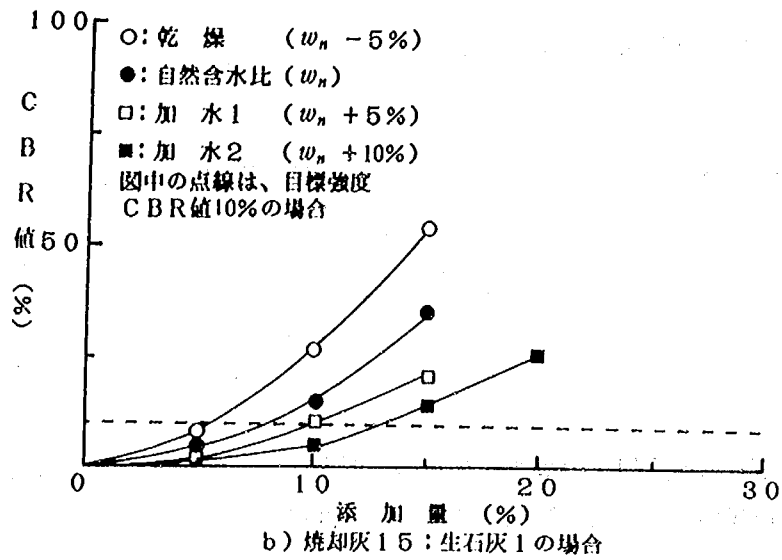


図4-11 土の含水比の違いに応じた下水汚泥焼却灰と生石灰の添加量と改良土のCBR値の関係

4-4 土質に応じた最適添加量の目安

下水汚泥焼却灰を用いた土質改良材の土質に応じた最適添加量の目安として、これまでのいくつかデータが蓄積されてきているので、配合設計にあたってはそれらを参考にすることが望ましい。

〔解説〕

1) 土質に応じた下水汚泥焼却灰の最適添加量の一例として、名古屋市下水道局で得られた土の含水比と室内CBR値10%とした場合を満足するのに必要な下水汚泥焼却灰ならびに生石灰の合計添加量の関係を、図4-12に示す。

図中には、表4-9に示すような性状の下水汚泥焼却灰を単体で利用した場合（前述、図4-9参照）と、下水汚泥焼却灰と生石灰を前述、表4-5に示した15:1, 10:1, 5:1の混合比であわせて使用した場合（前述、図4-11参照）の両方の結果を整理している。

これらの図から、添加量の上限を15%と仮定すると、土の含水比が40~50%程度以上になると生石灰との混合使用を検討する必要があることがわかる。

なお、これは下水汚泥焼却灰の最適添加量と土質および目標強度の関係の整理方法の一例であり、それぞれの用途、使用方法に場合に応じて独自のもので結果を整理することが望ましい。

表4-9 試験に用いた下水汚泥焼却灰の物理性状と化学成分の一覧表

採取時の含水比 (%)		0.06
水和後のpH値		11.85
塑性指数 (I_p)		N. P
比重	乾燥 JIS A 5201	2.959
	水和後 JIS A 1202	2.893
最適含水比 (%)		45.5
最大乾燥密度 (g/cm^3)		1.086
化学成分 (%)	二酸化ケイ素 SiO_2	14.55
	酸化カルシウム CaO	41.42
	酸化アルミニウム Al_2O_3	4.71
	五酸化りん P_2O_5	6.79
	酸化第二鉄 Fe_2O_3	15.43
	酸化マグネシウム MgO	2.88
	酸化ナトリウム Na_2O	0.57
	酸化カリウム K_2O	0.30
	三酸化イオウ SO_3	5.95
	強熱減量	6.84

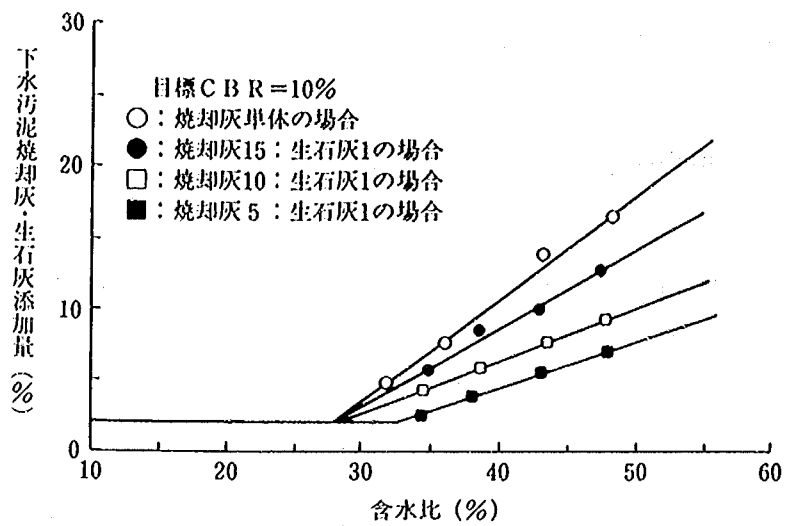


図 4 - 12 目標強度 C B R 値 10% の場合の下水汚泥焼却灰と生石灰の最適添加量と土質 (含水比) の関係

5 章 改良土の製造と使用上の留意点

5-1 下水汚泥焼却灰の貯蔵方法

下水汚泥焼却灰を土質改良材として利用する場合は、原則として乾灰を使用することとし、湿気を帯びないように貯蔵することが望ましい。

〔解 説〕

安定した土質改良効果を得るためには、乾灰を使用することが望ましい。したがって、土質改良材として利用するまで乾燥状態で貯蔵することとする。

- ① 下水汚泥焼却灰の貯蔵場所は、風雨を避けることができるような屋内に設けるかサイロ等を使用する。
- ② 下水汚泥焼却灰の貯蔵場所と改良土製造場所との距離が遠く離れている場合は、二箇所間の輸送にはタンクローリー等を用いる。

5-2 改良土の製造

改良土の製造にあたっては、工事場所、発生土質、発生土量等を考慮して最適の改良方法を決めることが必要である。

〔解 説〕

改良土の製造にあたっては、既往の実績や経済性などを考慮に入れて、工事場所、発生土質、発生土量等に応じて最適な改良土の製造方式ならびに設備を決定することが大切である。改良土の製造方式には、移動式プラント車によるものと定置式プラントによるものがある。現時点におけるそれぞれの方式によるプラントの一般的な特徴を述べると、表5-1のようになる。

なお、改良土の製造設備や製造方式を決める際には、次の事項に留意する必要がある。

- ① 下水汚泥焼却灰および土質改良用添加材と土との混合が均一に行えること。
- ② 改良しようとする土の性質が変化した場合には、添加材の増減を容易に行うことにより対応できること。
- ③ 改良しようとする土に含まれるゴミ、木片、有機物等を除去し、ガレキ（アスファルト塊、コンクリート塊）を除去もしくは破碎できる設備を有していること。
- ④ 安定した製造能力等を継続できること。
- ⑤ 騒音、粉じん等の公害等に対する対策が十分に図られていること。
- ⑥ 作業上の安全対策が図られていること。

表5-1 土質改良プラントの種類とその特徴

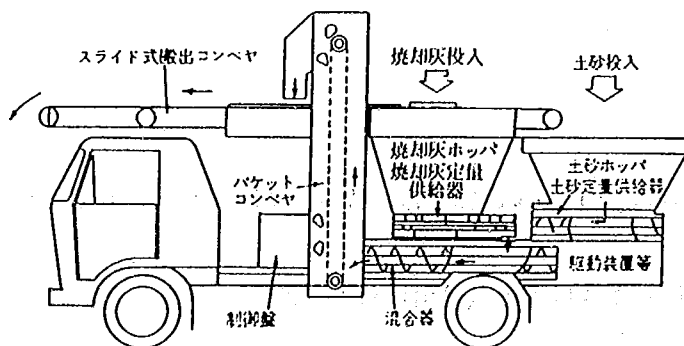
項 目	プラントの種類	移 動 式	定 置 式
処理能力		小	小 ～ 大
年間扱い土量		小	小 ～ 大
対象残土の土質		粘性土，砂質土	粘性土，砂質土
対象残土の含水比		小 ～ 大	小 ～ 大
改良材		下水汚泥焼却灰 セメント系 石灰系	下水汚泥焼却灰 セメント系 石灰系
設備費用		小	小 ～ 大

〔参 考〕

改良土の製造方式の例

1) 移動式プラント車による方式

下水汚泥焼却灰と土を攪拌・混合する装置を具備した現場混合プラント車に土を搬入して現場で土質改良を行う方式である。現場混合プラント車としては、連続式とバッチ式とがある。なお、連続式の例を図5-1に示す。



項 目	諸 元
全 長	7,240 mm
全 幅	2,170 mm
全 高	3,710 mm
トラックシャーシ	4 t 車(普通)
処 理 能 力	0~20 m ³ /h
土砂ホッパー容量	1.0 m ³ /h
焼却灰ホッパー容量	1.4 m ³ /h

プラント車の仕様

図5-1 移動式プラント車（連続式）

2) 定置式プラントによる方式

定置式プラント方式は建設残土をプラントを有する工場へ運搬し処理するので、現地混合に比べると経費は高くなるが、工場管理により均一な品質の良い改良土が得られる利点がある。定置式プラント方式には、連続式とバッチ式とがある。なお、連続式の例を図5-2に示す。

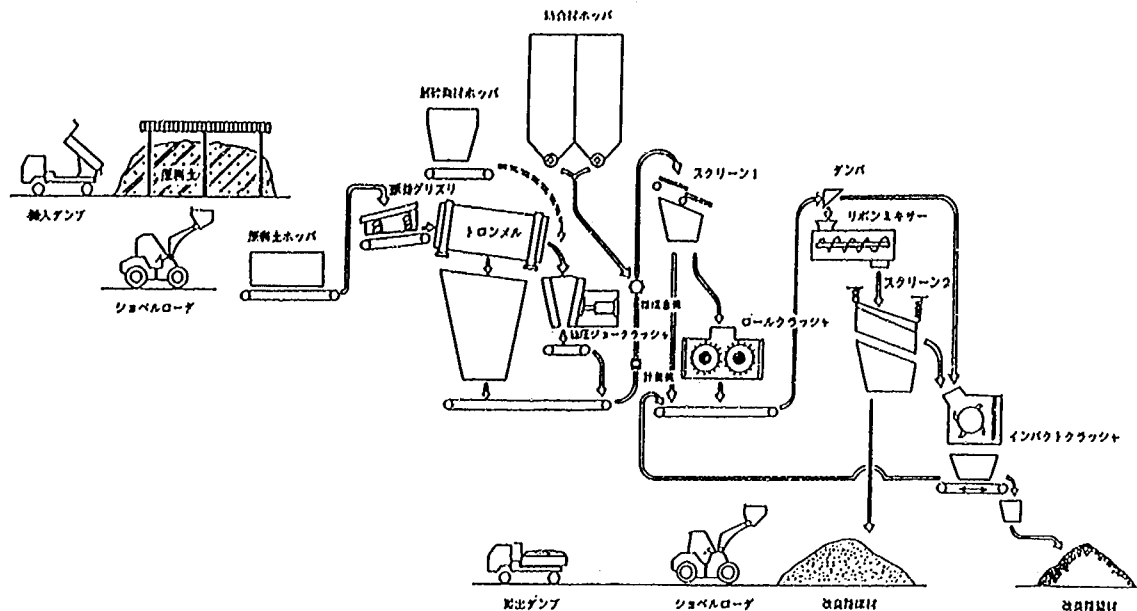


図 5 - 2 定置式プラント（連続式）

5 - 3 製造時の品質管理

製造した改良土は、所定の頻度で試料を採取し、所要の品質が得られていることを確認しなければならない。

〔解 説〕

- 1) 製造した改良土の品質管理のための試験項目および頻度は、改良土を埋戻し材として利用する場合は、以下に示す程度を目安とする。

表 5 - 2 製造した改良土の試験項目および頻度

試験項目	頻 度	試 験 方 法 等
①室内 C B R	Ⅰ) 1 日の製造量が 300m ³ 以下の場合 1 日 1 回以上 Ⅱ) 1 日の製造量が 300 m ³ 以上の場合 300 m ³ に 1 回以上	アスファルト舗装要綱に従い、3 層 67 回 6 日空中 4 日水浸の条件の試験を行うか、これと対応づけられた 3 層 67 回または 42 回、非水浸即時の条件の試験を行う。
②含 水 比	同 上	J I S A 1 2 0 3 による。
③最 大 粒 径	同 上	フルイ分け試験による。

注 1) ①については室内 C B R を行うことを原則とする。ただし、土質や混合条件等によって簡便な試験により室内 C B R との相関が十分に得られるような場合には、その方法を室内 C B R 試験に準じて用いてもよい。

注 2) ③についてはプラントの処理工程上、50 mm 以下の基準を満足していることが明らかな場合は、省略しても良い。

2) 改良土を埋戻し以外の用途に用いる場合も、上記の目安に準拠する。

5-4 改良土の仮置き

改良土をプラント内またはストックヤードで仮置きする場合には、改良土の品質の持続性および改良土が周辺に与える影響について留意しなければならない。

〔解説〕

改良土をストックヤードで仮置きする場合には、次の事項を考慮して改良土の品質の低下や周辺への影響を少なくすることが大切である。

- ① 下水汚泥焼却灰や土質改良用改良材を使用した場合には、品質が経時的に劣化する傾向にあるので、なるべくストック期間を短くする。
- ② 降雨による含水比の増加、日光による含水比の低下を防止するために、屋根、シート等で覆って置くことが望ましい。
- ③ 風による粉じんの飛散対策を考える。
- ④ 大量に改良土を仮置きする場合には、ストックヤードからの降雨時の排水のpHが異常に高くないように注意する。

5-5 改良土の使用上の留意点

下水汚泥焼却灰を用いて製造した改良土を各種の用途に使用する場合には、それぞれの用途別に定められている技術基準等によらなければならない。

〔解説〕

- 1) 改良土の利用に関してこれまで定められている技術基準等を列挙すると、表6-3のようになる。したがって、改良土の使用にあたっては、これらの基準類で定められている目標強度や配合設計法、および施工方法によらなければならない。

表6-3 改良土の用途別の技術基準額

改良土の用途		関係する技術基準額
埋戻し材としての利用		「改良土を用いた埋戻しの手引き」(建設省総合開発プロジェクト「建設事業への廃棄物利用技術の開発」の成果の一つ)
参 考	路床材としての利用	・アスファルト舗装要綱 (路床安定処理工法) ・日本道路公団土木工事試験方法 (KODAN A 1211)

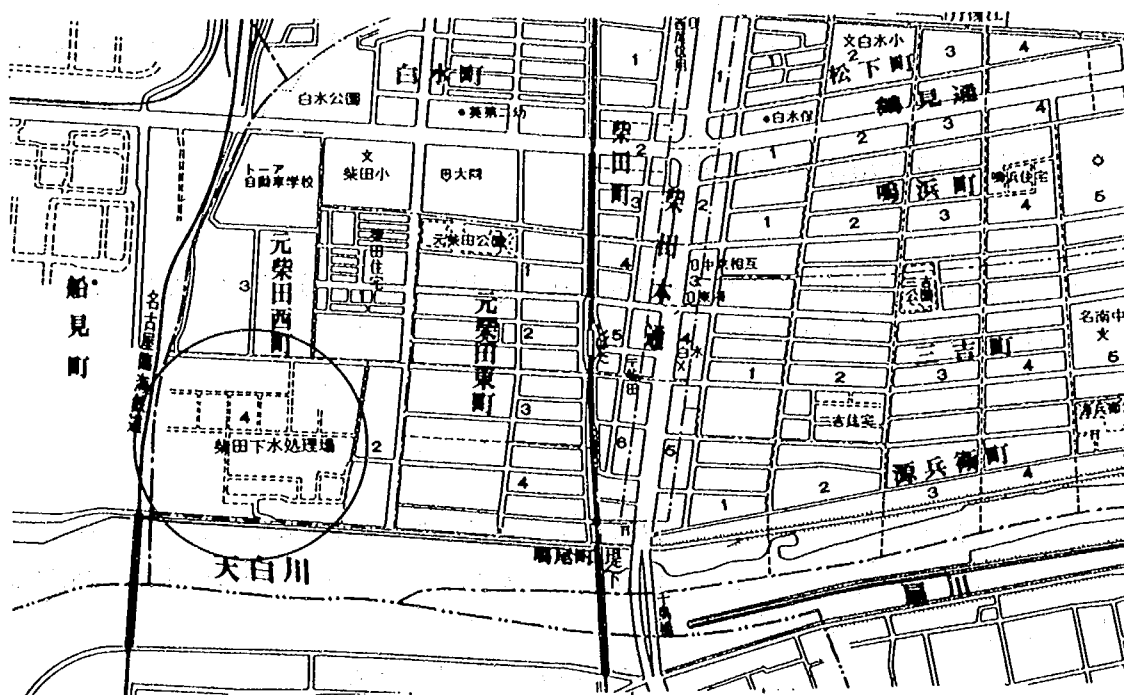
付録一 1 名古屋市下水処理場内における現場試験施工例

1-1 概要

現場での焼却灰改良土の改良効果を検討するため、名古屋市柴田下水処理場構内（付図1-1に示す）において試験施工を実施した。なお、試験施工では、付図1-2に示すような、2種類の焼却灰改良土工区（原料土として砂質土系、粘性土系の使用）と比較のための対照土工区として従来の埋戻し材として使用されている山砂土工区と生石灰改良土工区を設けた。

試験内容は、埋戻し材の材料試験、各土工区における路床、路盤、路面の強度試験、沈下量測定などを行うとともに、改良土による地下水への影響を調べるための地下水の水質調査を行った。また、焼却灰改良土が植物に及ぼす影響調査として、焼却灰改良土を柴田下水処理場構内の植樹帯に埋戻し、周辺土壌のpHの経時的変化も同時に調査した。

なお、焼却灰改良土と生石灰改良土の製造は、東邦ガス㈱上野改良土センターで実施した。

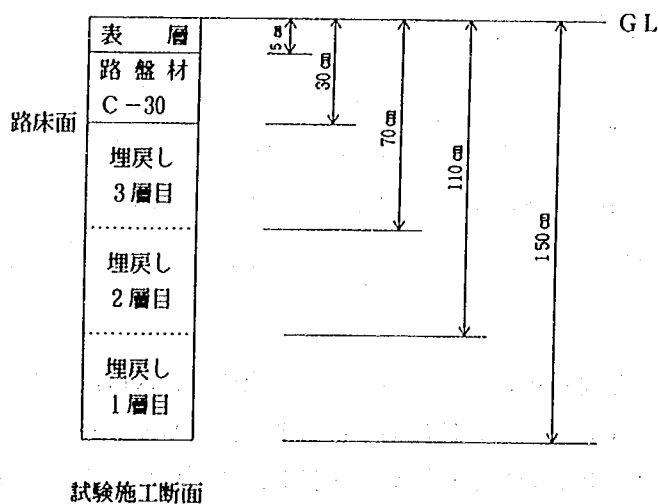
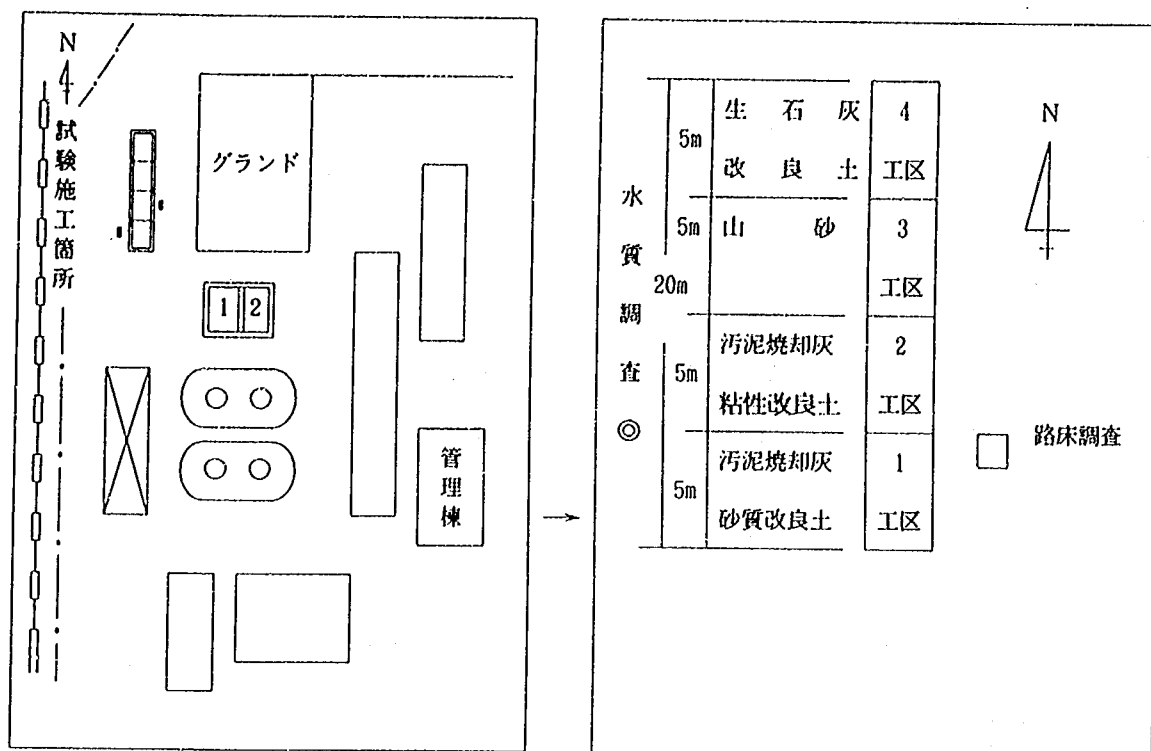


付図1-1 柴田処理場構内位置図

1-2 試験結果

(1) 材料試験

埋戻し材として使用した焼却灰改良土（砂質土系、粘性土系）、山砂、生石灰改良土の性状を付表1-1に示す。なお、表には焼却灰改良土の原料土である砂質土と粘性土の性状についてもあわせて示す。



付図 1-2 試験施工の工区削りと施工断面

焼却灰改良土を製造するにあたり、焼却灰の添加量は室内試験結果をもとに C B R=20% を目標に設定したが、実際には目標値よりも高いものとなった。

(2) 路床、路盤の強度試験

施工時および施工約 1 年後の路床、路盤の強度試験結果を付表 1-2 および付図 1-3 に示す。

路床の締固め度は、施工時および施工後 1 年において、いずれの工区も 92% と同程度であり、埋戻し材による施工性の差異はほとんどないものと考えられる。

付表 1-1 埋戻材の土質性状

埋め戻し材料		添加量 (%)	W _n (%)	W _{opt} (%)	r _d max (g/cm ³)	pH	I _p	修正 C B R (%)	通 過 百 分 率 (%)					
									19.1	9.52	4.76	2.00	0.42	0.074
原料土	砂質土	—	16.1	10.4	1.960	—	9.3	※ 10.8	94.3	81.5	72.6	62.2	37.8	21.2
	粘性土	—	31.6	15.2	1.746	—	22.1	※ 0.7	95.9	87.4	83.4	77.9	62.1	52.7
焼却灰	砂質土	2.0	12.5	11.3	1.928	9.6	N.P	33.5	98.7	90.4	80.6	70.2	45.1	26.6
改良土	粘性土	24.0	19.4	16.5	1.732	9.2	N.P	33.5	98.9	88.1	83.4	73.7	50.8	33.1
山	砂	—	14.1	12.3	1.884	7.0	N.P	14.0	100	99.1	98.5	97.4	57.6	26.3
生石灰改良土		1.5	12.9	13.2	1.918	9.6	N.P	32.0	97.5	81.4	69.5	58.3	37.3	19.4

注) ※は4日水浸C B R, 修正C B Rは最大乾燥密度の95%における値

付表 1-2 路床, 路盤の強度試験結果

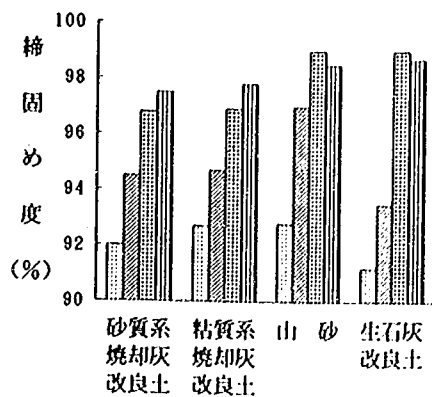
工区	埋戻し材	試験日	路床面 含水比 (%)	締固め度 (%)		土 研 式 貫入抵抗 回/10cm	現 場 C B R (%)	K ₃₀ 値 (kg/cm ²)	
				路床面	路盤面			路床面	路盤面
1 工 区	砂質系 焼却灰 改良土	施工時	13.9	92.2	96.7	16.3	11.1	6.1	26.8
		1年後	14.5	94.4	97.5	35.4	22.6	19.0	33.7
2 工 区	粘質系 焼却灰 改良土	施工時	19.2	92.8	97.0	10.4	7.9	4.7	30.6
		1年後	19.4	94.7	97.7	24.9	14.6	12.0	35.7
3 工 区	山 砂	施工時	17.8	92.8	99.0	16.4	4.8	1.4	16.6
		1年後	18.2	96.9	98.7	24.5	10.7	8.0	18.0
4 工 区	生石灰 改良土	施工時	13.0	91.5	99.2	12.2	14.9	5.1	24.7
		1年後	14.5	93.7	99.0	23.5	19.7	14.6	24.8

また、焼却灰改良土工区の路床面の土研式貫入抵抗と現場C B Rは、施工1年後には施工時の約2倍まで、またK₃₀値は約3倍までに上昇しており、かなりの強度上昇がみられた。なお、いずれの工区においても現場C B Rは25%以下におさまっており、再掘削性は特に問題はなかった。

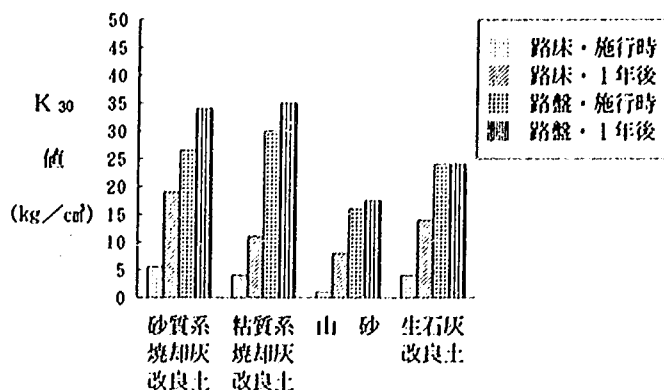
(3) 沈下量

仮復旧1ヶ月後、本復旧6ヶ月後、および本復旧約1年後の路床と路面の沈下測定結果を付表1-3および付図1-4に示す。なお、ここで、路床の沈下量は路床に埋め込んだ沈下棒をレベル測量し求め、路面沈下量はプロフィールメーターにより路面形状を測定する方法で沈下量を求めた。

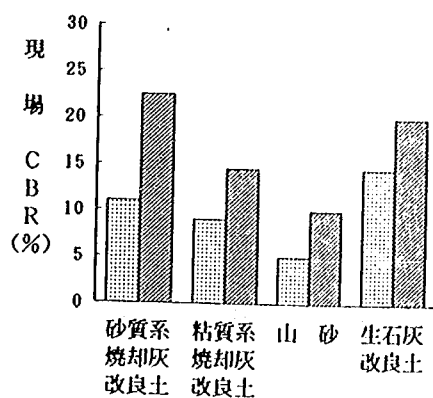
その結果、路面沈下量はいずれの工区も15mm以上発生した。これは、試験施工箇所においては大型交通荷重がかかるよう配慮したため、このような沈下が生じたものと考えられる。なお、焼却灰改良土工区と山砂工区の路床・路面の沈下量を比較すると、焼却灰改良土工区は路床・路面の沈下量は共に少なく良好な結果が得られた。



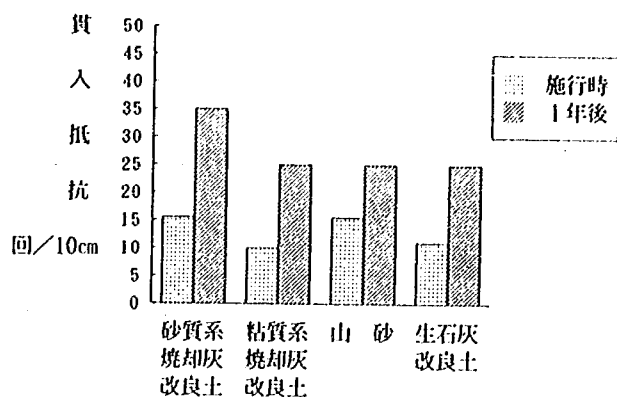
a) 締固め度の変化



b) K₃₀ 値の変化



c) 現場CBRの変化

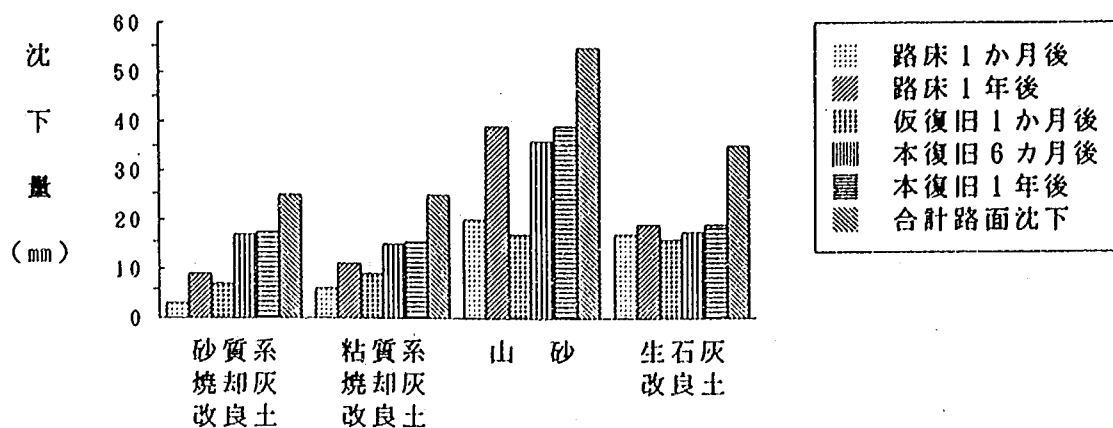


d) 土研式貫入抵抗の変化

付図1-3 路床、路盤の強度試験結果

付表1-3 路床、路面の沈下量測定結果

工 区	測 点	仮復旧1か月後		本復旧6か月後		本復旧約1年後		1年間の 合計路面 沈下量
		路 床	路 面	路 床	路 面	路 床	路 面	
1工区 汚泥焼却灰 砂質改良土	No. 1	3.0	6.0	—	16.0	6.0	17.5	23.5
	No. 2	3.0	8.0	—	18.0	9.0	18.0	26.0
	No. 3	3.0	8.0	—	18.0	10.0	18.0	26.0
	平 均	3.0	7.3	—	17.3	8.3	17.8	25.1
2工区 汚泥焼却灰 粘質改良土	No. 1	5.0	7.0	—	18.0	7.0	18.0	25.0
	No. 2	6.0	5.0	—	16.5	11.0	16.5	21.5
	No. 3	10.0	16.0	—	13.5	15.0	14.0	30.0
	平 均	7.0	9.3	—	16.0	11.0	16.2	25.5
3工区 山 砂	No. 1	17.0	17.0	—	38.0	34.0	39.0	56.0
	No. 2	20.0	17.0	—	37.0	39.0	41.0	58.0
	No. 3	24.0	18.0	—	37.0	45.0	39.5	57.5
	平 均	20.3	17.3	—	37.3	39.3	39.8	57.1
4工区 生 石 灰 改 良 土	No. 1	19.0	17.0	—	17.0	20.0	18.5	35.5
	No. 2	22.0	16.0	—	20.0	23.0	20.0	39.0
	No. 3	11.0	16.0	—	16.5	13.0	18.0	34.0
	平 均	17.3	16.3	—	17.8	18.7	18.8	35.1



付図1-4 路床、路面の沈下量測定結果

(4) 地下水の水質試験

施工前と施工後1年間の地下水の水質試験を行ったが、施工前後で地下水質に特に変動はなく、重金属類の溶出もみられなかった。

(5) 植物への影響調査

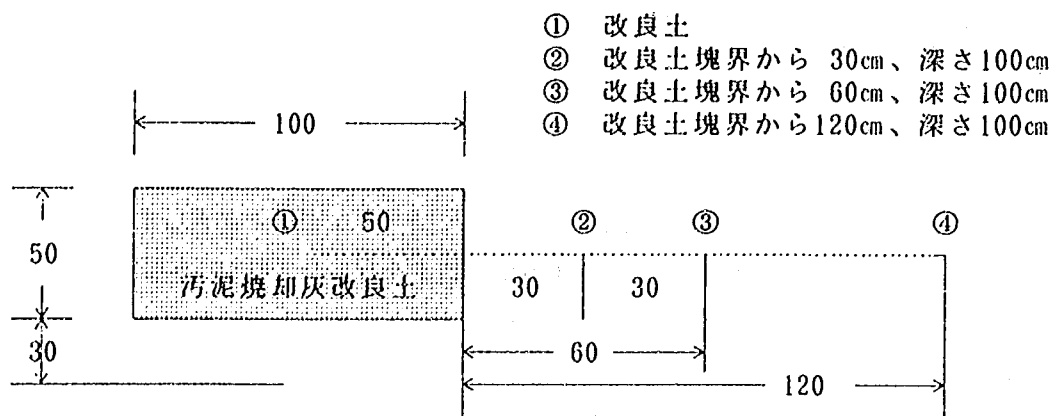
焼却灰改良土を柴田処理場構内の植樹帯の一部に埋戻し、付図1-5に示す位置で土壌を採取し、pH値を測定した。その結果を付表1-4、付図1-6に示す。

これらの結果より、どの位置の土もpH値は、ほとんど変化のない状態で推移し、この点においては焼却灰改良土が隣接土壌に及ぼす影響はまったくないと考えられる。

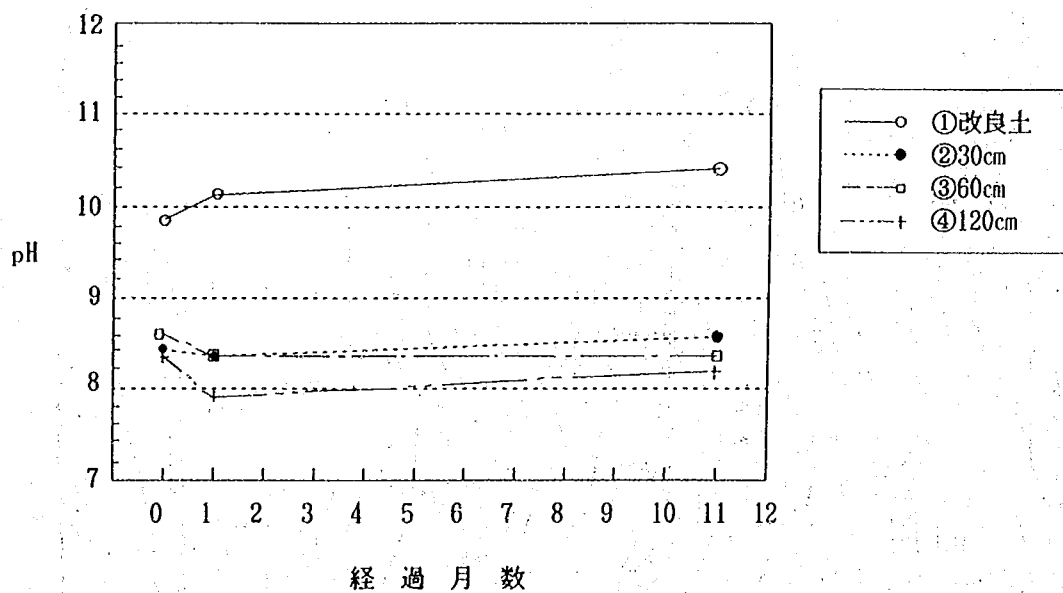
したがって、焼却灰改良土を埋設管等の埋戻し材として利用する場合、舗装面から浸透する雨水によって路床土に用いた焼却灰改良土よりアルカリ性の物質が地下水等に流出して周辺に影響の可能性はないといえる。

付表1-4 pH値の測定結果

採取位置	埋戻し時	埋戻し1ヶ月後	埋戻し11ヶ月後
①	9.94	10.13	10.33
②	8.35	8.30	8.49
③	8.48	8.28	8.33
④	8.29	7.99	8.24



付図1-5 採取位置図



付図1-6 pH値の経時変化

1-3 まとめ

焼却灰改良土は、山砂や生石灰改良土と比較し、併用性、耐久性は同等以上であり、施工性や再掘削性等においても大きな問題はなく、埋戻し材として十分使用できるものと考えられる。

付録一2 名古屋市道における現場試験施工例

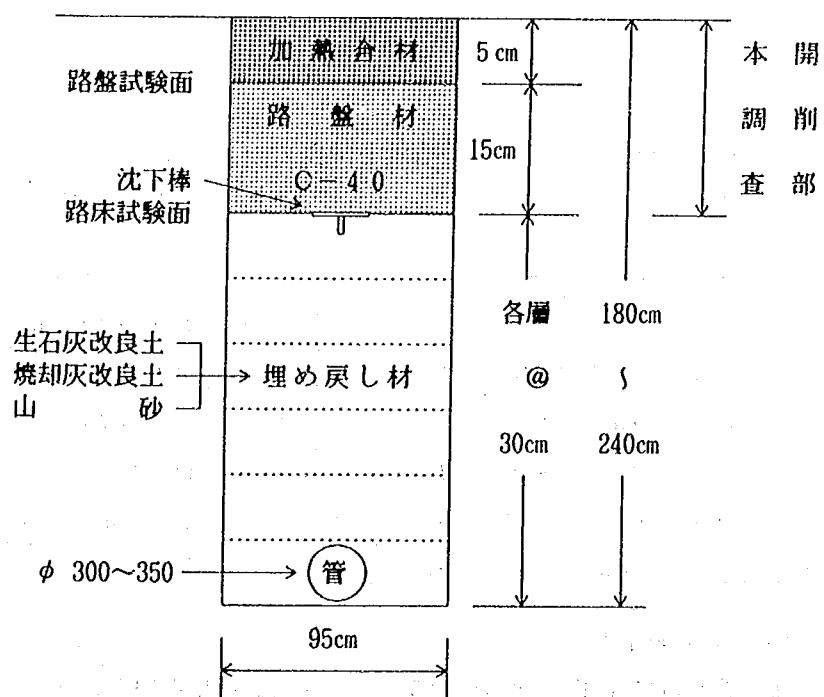
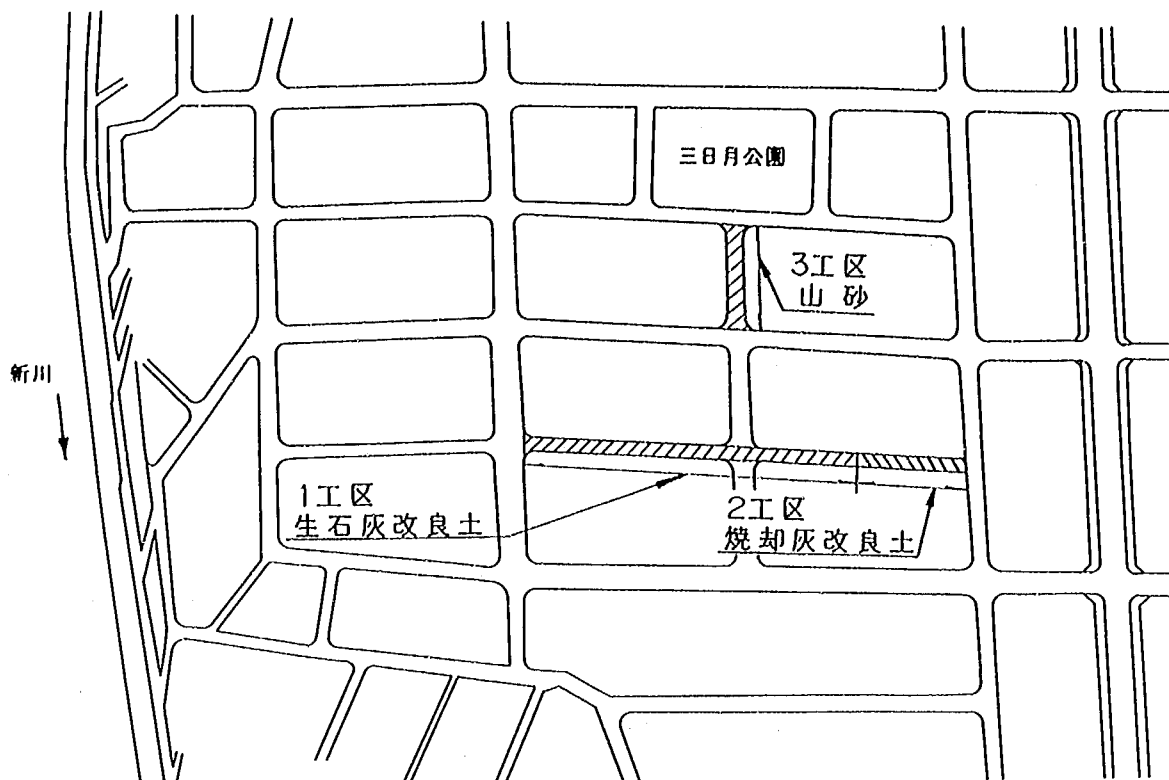
2-1 概要

名古屋市柴田処理場内での試験施工結果をもとに、付図2-1に示す名古屋市中川区一色新町地内の名古屋市道において下水管の埋戻しに関する試験施工を行った。なお、埋戻し材として焼却灰改良土、山砂、生石灰改良土の3種類を使用し、付図2-2に示すような標準施工断面でそれぞれの工区を設けた。

試験内容は、埋戻し材の材料試験ならびにそれぞれの埋戻し材を用いた工区の路面沈下量、路盤・路床の強度特性の変化を1年間にわたって追跡調査を行った。



付図2-1 施工位置図(名古屋市中川区一色新町地内)

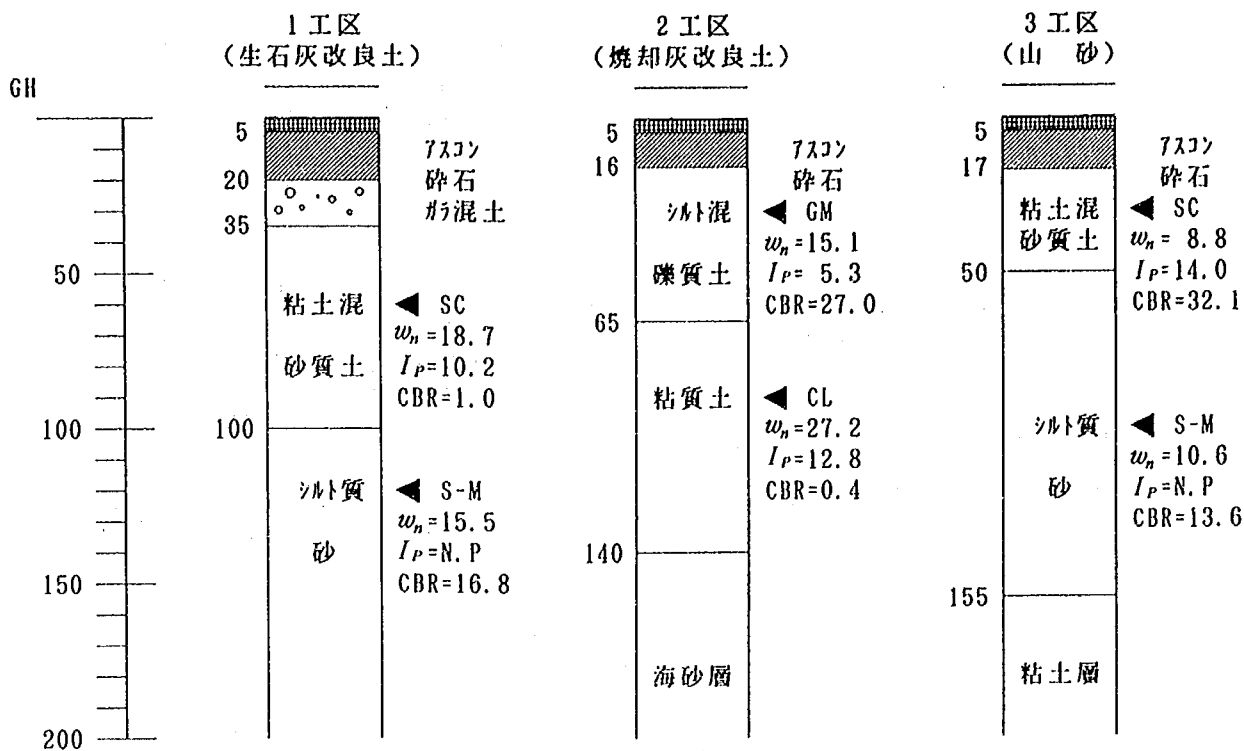


付図 2-2 試験施工の工区割りと標準施工断面

2-2 試験結果

(1) 試験箇所の周辺土質

施工時に調査したそれぞれの工区の周辺土質柱状図を付図2-3に示す。



付図2-3 土質柱状図

(2) 材料試験

使用した埋戻し材の材料および性状試験結果を付表2-1に示す。

付表2-1 焼却灰改良土、生石灰改良土、山砂の性状

埋め戻し材料	添加量 (%)	w_n (%)	w_{opt} (%)	r_{dmax} (g/cm ³)	pH	I_P	修正 CBR (%)	通過百分率 (%)					
								19.1	9.52	4.76	2.00	0.42	0.074
生石灰改良土	1.5	13.3	11.5	1.946	11.3	9.0	19.3	97.6	82.5	71.0	59.2	34.9	16.6
焼却灰改良土	5.0	14.3	10.5	1.922	9.4	12.0	21.4	98.6	87.7	77.5	67.5	47.3	30.8
山砂	—	3.7	8.1	2.048	7.2	N.P	44.5	98.4	83.3	63.8	43.2	19.3	6.0
路盤材(C-40)	—	3.3	6.0	2.370	8.1	N.P	63.0	72.7	55.0	33.1	21.0	15.4	7.9

注) 修正 CBR は最大乾燥密度の95%, 4日水浸における

(3) 路床、路盤の現場試験結果

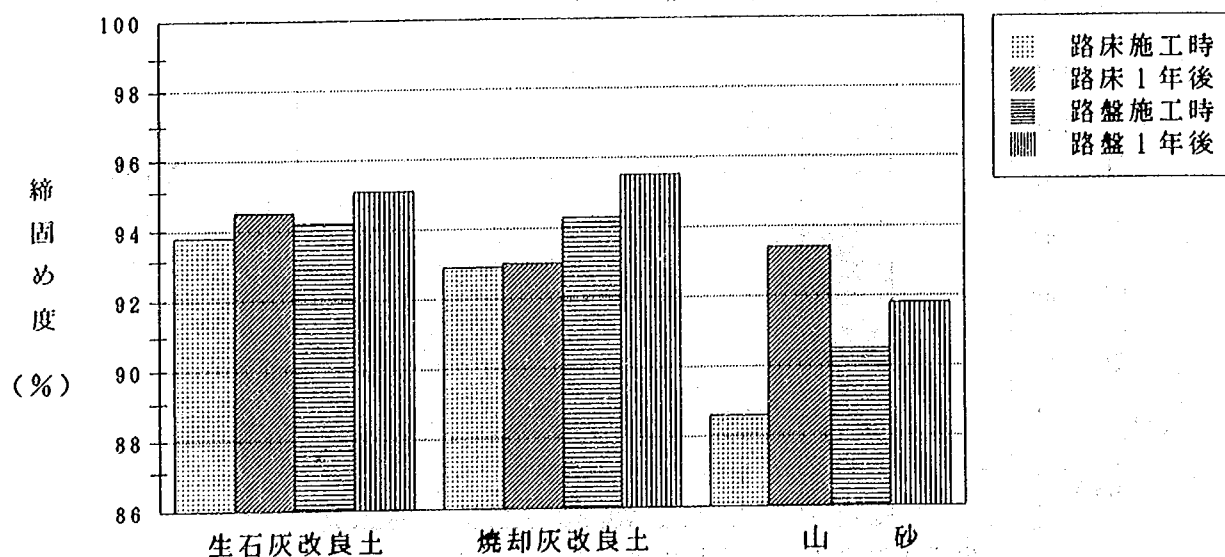
各工区の施工時及び経時1年後の路床、路盤の現場試験結果を以下に示す。

① 締固め度

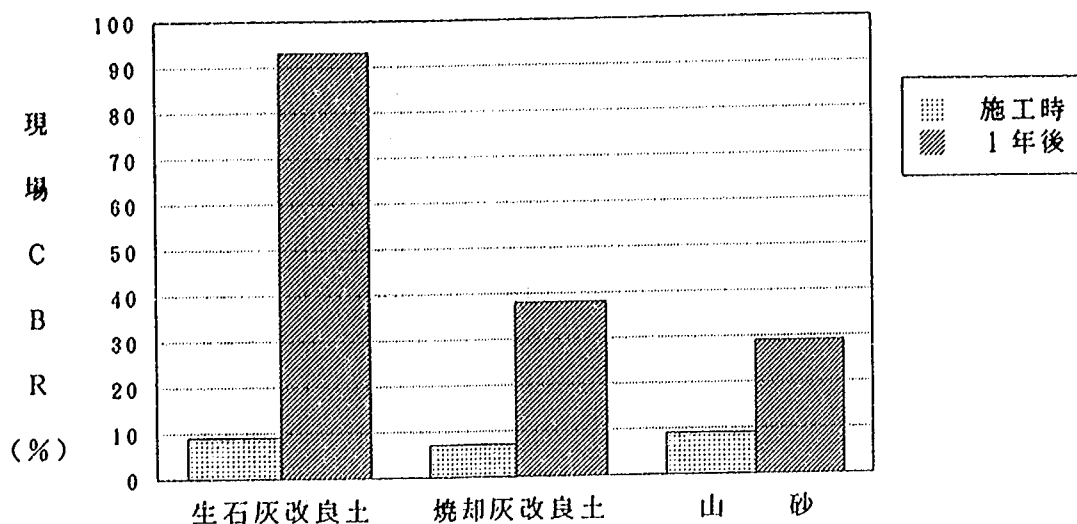
路床および路盤の締固め度の結果を、付表2-2ならびに付図2-4に示す。路床の締固め度(最大乾燥密度に対して)は施工時には山砂工区が90%を下回ったのに対して、生石灰、焼却灰の改良土工区は、93%前後のほぼ同程度の締固め度を示した。また、時間経過によ

付表 2 - 2 路床・路盤の試験結果

工 区	埋 戻 材	試 験 時	No	路床面 含水比 (%)	締 固 め 度 (%)		土 研 式 貫入抵抗 回/10cm	現 場 C B R (%)	K ₃₀ 値 (kg/cm ³)	
					路床面	路盤面			路床面	路盤面
1 工 区	生 石 灰 改 良 土	施 工 時	1	13.5	92.8	95.4	25.4	9.5	6.8	18.3
			2	13.2	94.5	93.1	23.3	8.7		
			平 均	13.4	93.7	94.3	24.4	9.1		
		1 年 後	1	13.4	93.9	95.8	157.5	88.3	56.6	59.0
			2	14.2	95.3	94.6	146.0	100.0		
			平 均	13.8	94.6	95.2	151.8	94.2		
2 工 区	焼 却 灰 改 良 土	施 工 時	1	13.6	90.7	93.7	26.7	6.8	7.6	17.2
			2	12.9	95.0	95.0	24.6	6.2		
			平 均	13.3	92.9	94.4	25.7	6.6		
		1 年 後	1	15.2	91.5	94.8	41.9	36.9	41.6	43.3
			2	14.6	94.8	96.2	39.5	39.3		
			平 均	14.9	93.2	95.5	40.7	38.1		
3 工 区	山 砂	施 工 時	1	4.2	86.7	90.2	12.0	9.9	8.4	11.8
			2	4.5	90.6	90.7	18.5	7.8		
			平 均	4.4	88.7	90.5	15.3	8.9		
		1 年 後	1	5.4	92.4	92.6	33.4	25.7	20.7	32.4
			2	4.9	94.6	91.1	33.4	30.6		
			平 均	5.2	93.5	91.9	33.4	28.2		



付図 2 - 4 締固め度の変化



付図 2-5 現場 CBR の変化

る密度増加は、生石灰、焼却灰の両改良土工区が 1%以内と僅かな増加であったのに対して、山砂工区は約 5%の高い増加を示した。

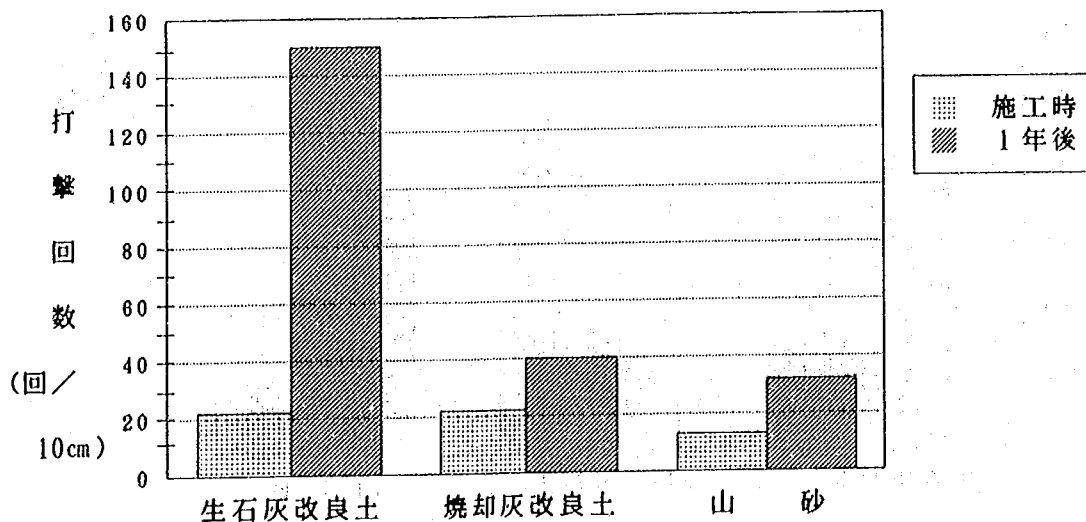
路盤の締固め度は山砂工区で低く、生石灰、焼却灰改良土工区より 4%程度下回ったが、経時による密度増加はいずれの工区においても 1~2%以内の同程度であった。

② 現場 CBR 試験

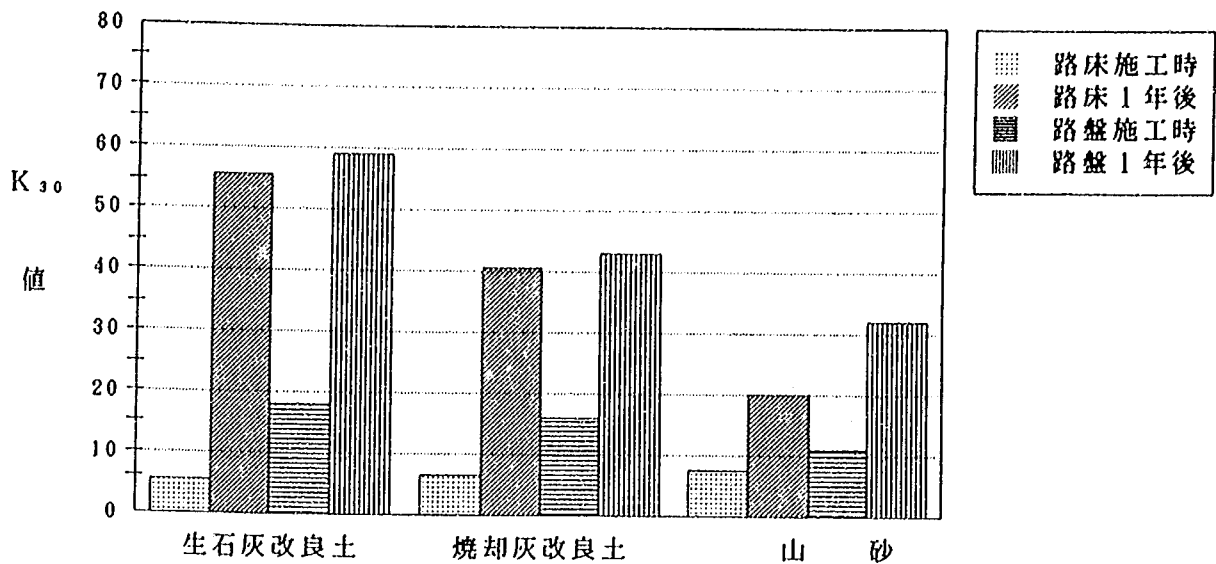
現場 CBR 試験の結果を、付図 2-5 に示す。この結果より、現場 CBR 値は、施工時においては焼却灰改良土工区は低い値であったが、経時 1 年後では 3 倍以上の強度増加を示し、その目標強度である CBR 値 20% を満足し、ほぼ 1 か月養生後の室内 CBR と同程度の結果を得た。

③ 土研式貫入試験

土研式貫入試験の結果を、付図 2-6 に示す。路床面下 50 cm 間における貫入抵抗値 (10 cm 貫入に要する打撃回数) は、生石灰改良土工区では大幅な強度の増加を示したが、焼却灰改良土工区と山砂工区は 2 倍程度の強度増加であった。



付図 2-6 貫入抵抗の変化



付図 2 - 7 平板載荷 K_{30} の変化

④ 平板載荷試験

平板載荷試験の結果を、付図 2 - 7 に示す。路床の K_{30} 値は、施工時には 3 工区とも 7 kg/cm^3 前後と同程度であったが、経時 1 年後においては、生石灰、焼却灰の改良土工区で 40 kg/cm^3 以上と大幅な増加傾向を示し、山砂の 2 倍以上となった。

路盤の K_{30} 値は生石灰、焼却灰の改良土工区の場合、施工時では路床 K_{30} 値の約 2 倍を示し、1 年経過後では路床とほぼ同値であった。

(4) 路面沈下量の測定結果

路面沈下量は、横断プロファイルメーターで路面形状を経時に測定した結果を、付表 2 - 3 および付図 2 - 8 に示す。図から明らかなように、1 年間の路面沈下量は生石灰改良土と焼却灰改良土が同程度の 7 mm と僅かであったのに対し、山砂はその約 4 倍の発生量となった。また、付図 2 - 9 に沈下量の経時的変化を示す。この図より、生石灰、焼却灰改良土はほぼ 1 ~ 2 か月間で沈下が抑まっているが、山砂は 6 か月間、沈下が漸増しているのがわかる。

(5) 路床の沈下量測定結果

施工時及び経時 1 年後に測量した路床面の高さより、路床沈下量を求めた。その結果を付表 2 - 4 及び付図 2 - 10 に示す。この結果より、山砂の沈下量が他の工区より大きいことがわかる。なお、それぞれの工区における沈下は、路床の沈下が大きく影響していると考えられる。

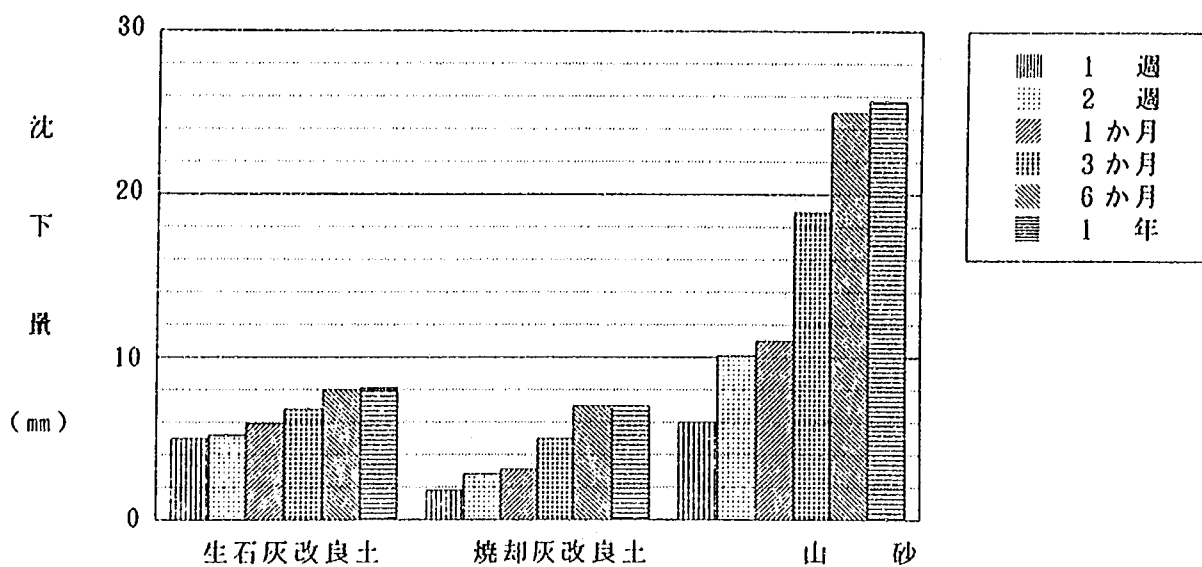
(6) 試験施工のまとめ

試験結果より、焼却灰改良土は山砂よりも締固めが容易であり、現行の施工方法においても十分埋戻し材として利用できると考えられる。また、焼却灰改良土は施工時の初期強度は山砂及び生石灰改良土と同等であるが、時間が経過にともなう強度発現のメカニズムは、山砂が圧縮沈下の密度上昇によって土粒子相互の摩擦抵抗力を高めるのに対して、焼却灰改良土は時間が経過しても密度上昇や沈下量が小さい。したがって、焼却灰改良土は生石灰改良土と同様に含有石灰による化学的な結合力によって強度を増していることがわかった。なお、山砂の場合は圧縮沈下が

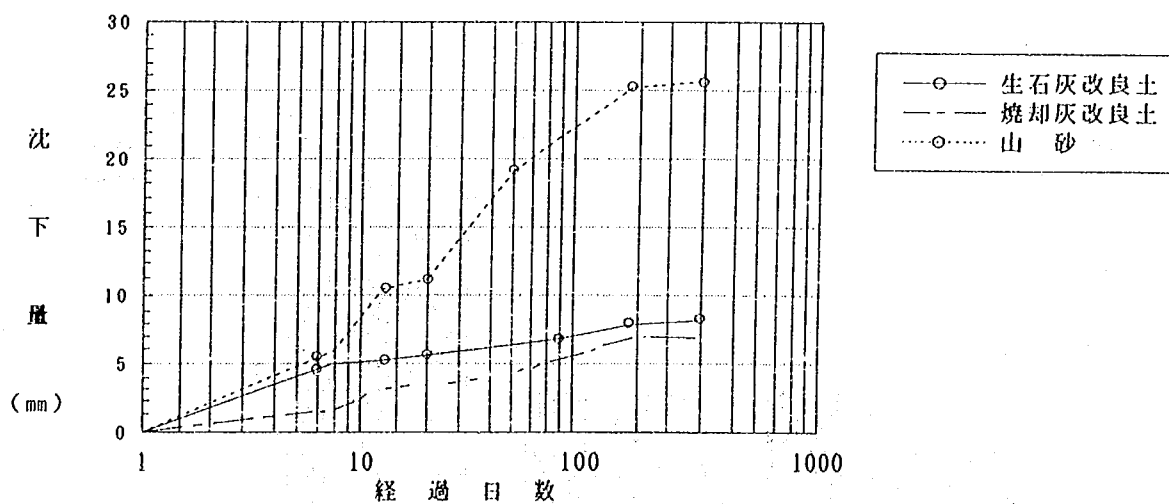
付表 2 - 3 路面沈下量の測定結果

(単位: mm)

工 区	経 時	区 分	測 定 位 置			平 均
			No 1	No 2	No 3	
生 石 灰 改 良 土	1 週	幅 平 均	6.4	4.1	4.7	5.1
		中 央 値	4.0	3.5	3.0	3.5
	2 週	幅 平 均	6.6	4.5	4.9	5.3
		中 央 値	4.5	4.0	3.0	3.8
	1 か 月	幅 平 均	6.9	4.9	5.3	5.7
		中 央 値	4.5	4.5	4.0	4.3
	3 か 月	幅 平 均	7.4	6.6	6.7	6.9
		中 央 値	7.0	7.0	5.0	6.3
	6 か 月	幅 平 均	8.7	7.7	7.7	8.0
		中 央 値	5.2	7.6	6.2	6.3
	1 年	幅 平 均	8.8	8.0	7.8	8.2
		中 央 値	5.3	7.8	6.4	6.5
焼 却 灰 改 良 土	1 週	幅 平 均	1.8	1.7	1.2	1.6
		中 央 値	1.0	1.5	1.5	1.3
	2 週	幅 平 均	1.9	3.0	3.7	2.9
		中 央 値	1.0	3.0	4.5	2.8
	1 か 月	幅 平 均	3.3	3.0	4.0	3.4
		中 央 値	3.5	3.0	5.0	3.8
	3 か 月	幅 平 均	5.1	4.9	5.2	5.1
		中 央 値	5.1	5.0	5.8	5.3
	6 か 月	幅 平 均	6.1	6.9	8.2	7.1
		中 央 値	8.0	6.8	6.9	7.2
	1 年	幅 平 均	6.1	7.0	8.2	7.1
		中 央 値	8.0	6.8	6.9	7.2
山 砂	1 週	幅 平 均	5.1	5.6	7.0	5.9
		中 央 値	4.0	5.5	6.0	5.2
	2 週	幅 平 均	10.5	10.6	10.2	10.4
		中 央 値	10.0	11.0	10.0	10.3
	1 か 月	幅 平 均	11.4	10.6	11.3	11.1
		中 央 値	10.0	10.5	10.0	10.2
	3 か 月	幅 平 均	18.4	17.8	20.4	18.9
		中 央 値	19.0	19.5	22.0	20.2
	6 か 月	幅 平 均	24.3	23.5	27.6	25.1
		中 央 値	26.0	27.5	32.5	28.7
	1 年	幅 平 均	24.4	24.3	27.8	25.5
		中 央 値	26.0	28.0	32.8	28.9



付図 2-8 路面沈下量の発生量



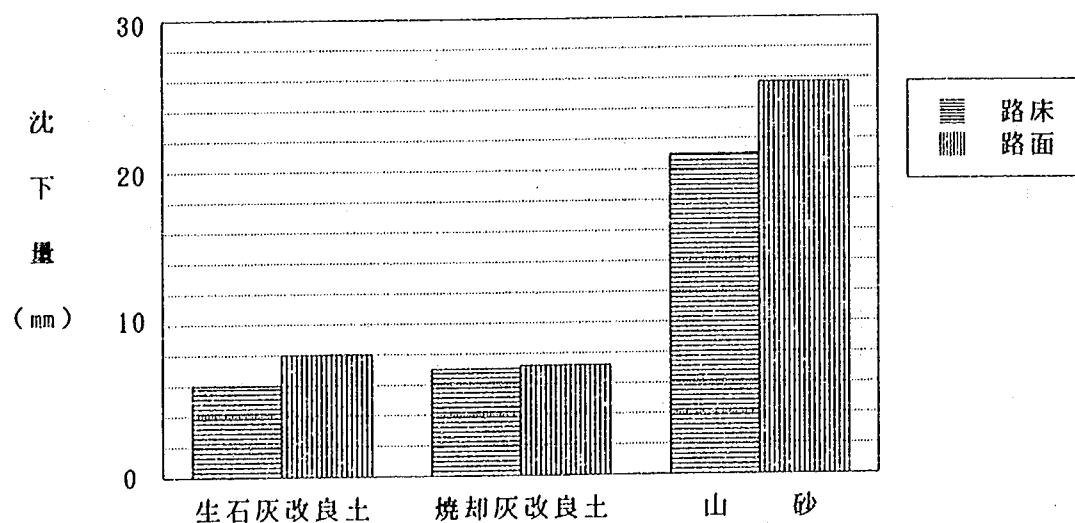
付図 2-9 路面沈下量の経時変化

長時間（6か月以上）漸進し、発生量も大きくなるが、焼却灰改良土の場合は1～2か月までに支持力が増して安定化し、沈下の発生を抑止するものと考えられる。

附表 2 - 4 路面沈下量測定結果

工区	材 料	測 点	測定高さ (mm)		沈 下 量 (mm)	
			施工時 ①	1 年後 ②	① - ②	平均値
1	生 石 灰 改 良 土	No 1	909	902	7	6.3
		No 2	901	893	8	
		No 3	914	910	4	
2	焼 却 灰 改 良 土	No 1	176	170	6	7.0
		No 2	182	175	7	
		No 3	198	190	8	
3	山 砂	No 1	928	910	18	21.0
		No 2	928	907	21	
		No 3	918	894	24	

路床沈下の基準点 K B M = 1000 mm (1 M) とした。



付図 2 - 10. 1 年後の路床・路面沈下量

4. 総 評

本調査結果より、下水道埋設管工事等に伴って発生する掘削残土に下水汚泥焼却灰を添加混合することにより、埋戻し材として十分利用できることがわかった。そして、焼却灰改良土は施工性、供用性、耐久性等は現行の山砂以上であり、生石灰改良土と同等といえる。

付録一3 一軸圧縮試験方法

一軸圧縮試験方法は、以下に示す JIS A 1216 にしたがって試験を行うものとする。

土の一軸圧縮試験方法

Method for unconfined compression test of soils

1. 適用範囲

この規格は、側圧を受けない状態で自立する供試体の一軸圧縮強さを求める試験方法について規定する。主として乱さない粘性土を対象とするが、練返した試料又は締固めた土や砂質土などの自立する供試体にも準用できる。

備考 1. この規格の引用規格を、次に示す。

JIS A 1203 土の含水比試験方法

2. この規格の中で〔 〕を付けて示してある単位及び数値は、国際単位系 (SI) によるものであって、参考として併記したものである。

2. 用語の定義

この規格で用いる主な用語の定義は、次のとおりとする。

一軸圧縮強さ 側圧を受けない供試体の最大圧縮応力。

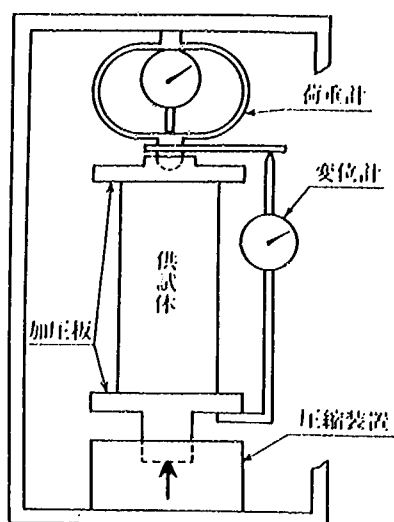
3. 試験器具

3.1 一軸圧縮試験機 一軸圧縮試験機は、ひずみ制御式圧縮装置、荷重計及び変位計から構成され、次に示す条件を満たすものとする (付図 3-1 参照)。

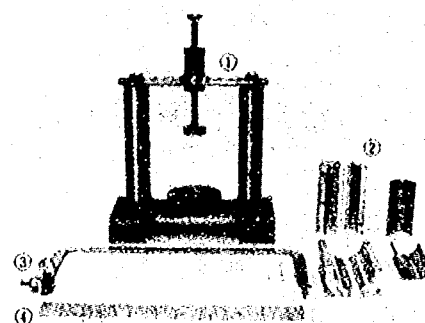
- (1) 供試体の高さの15%までの圧縮ひずみを連続的に与え得るように、一定速度で作動するものとする。荷重計、上部加圧板、供試体、下部加圧板及び圧縮装置のそれぞれの中心軸は、同一線上にあるものとする。
- (2) 供試体の最大圧縮力の $\pm 1\%$ の許容差で圧縮力が測定できるものとする。荷重計は、プルービングリング又は電氣的に荷重を指示できるもので、容易の異なるもの20~200 kgf (0.2~2 kN) を複数用意しておき、予想される一軸圧縮強さに応じて使い分ける。
- (3) 供試体の高さの $\pm 0.1\%$ の許容差で圧縮量が測定できるものとする。変位計は、測定範囲が20 mm 以上で、最小目盛が $\frac{1}{100}$ mm のダイヤルゲージ又はこれと同等以上の特性をもつ電気式変位計とする。

3.2 供試体作製器具 供試体作製器具は、次のとおりとする (付写真 3-1 参照)。

- (1) トリマ
- (2) マイタボックス マイタボックスは、二つ割りにできて、その内径が供試体の直径よりわずかに大きいものとし、両端が平行で、かつ軸方向に対して直角なものとする。
- (3) ワイヤソー及び直ナイフ ワイヤソーに使用する鋼線の直径は0.2~0.3 mm程度とする。直ナイフは、鋼製で片刃の付いた長さ25 cm以上のものとする。



付図3-1 ひずみ制御式一軸圧縮試験機の例



①トリマ ②マイタボックス
③ワイヤソー ④直ナイフ

付写真3-1 供試体作製器具の例

3.3 その他の器具 その他の器具は、次のとおりとする。

- (1) ノギス
- (2) ストップウォッチ又は時計
- (3) はかり はかりは、感量0.1 gのものとする。
- (4) 含水比測定器具 含水比測定器具は、JIS A 1203の3.(試験器具)に規定するものとする。

4. 供試体

4.1 供試体の形状と寸法 供試体の形状は円柱とする。その直径は、3.5 cm又は5.0 cmを標準とし、高さは直径の1.8～2.5倍とする。

備考 供試体の寸法は、試料の状態に応じて、試料を代表する試験を行える寸法を選び。

また、土の種類や試料の状態によっては、サンプリングチューブからとり出した試料を、そのままの直径で端面の成形を行い供試体としてもよい。

4.2 供試体の作製 供試体の作製は、以下の手順に従って、試料の含水比を変化させないように手際よく行う。また、試料に乱れを与えないように十分に注意しなければならない。

- (1) 試料は、サンプリングなどによって乱された部分を取り除き、供試体の直径、高さより余裕をもった大きさのものを用意する。
- (2) 供試体側面は、所定の直径の円柱になるよう、トリマ、ワイヤソー、直ナイフなどを用いて成形する。トリマを用いて成形する場合、試料にねじれや圧縮力を与えないように注意する。
供試体の成形は、通常ワイヤソーを用いて試料を削り取るが、試料が硬い場合には直ナイフを用いる。
- (3) 供試体の端面は、両端面が平行で、かつ軸方向と直角になるよう、マイタボックス、ワイヤソー、直ナイフなどを用いて成形する。
- (4) 供試体の平均高さ(H_0)及び平均直径(D_0)を求める。供試体の高さ及び直径は、複数箇所

をノギスなどで最小読取り値 0.1 mm までばかり、それぞれの平均値とする。

(5) 供試体の質量 (m) をはかる。

(6) 供試体の成形の際に、削り取った土の中から代表的試料を取り、含水比を求め供試体の含水比とする。圧縮後の供試体を炉乾燥して含水比を求める場合、削り取った土の測定は省略してもよい。

5. 試験方法

試験は、次の手順に従って行う。この場合、供試体の成形後、できるだけ速やかに試験を開始する。

- (1) 供試体を一軸圧縮試験機に設置する。供試体を下部加圧板の中央に置き、供試体に圧縮が加わらないように上部加圧板を密着させる。その後、変位計、荷重計の原点を調整する。
- (2) 毎分 1 % の圧縮ひずみが生じる割合を標準として、連続的に供試体を圧縮する。
- (3) 圧縮中は、圧縮量 (ΔH) と圧縮力 (P) を測定する。圧縮量と圧縮力の測定間隔は、応力-ひずみ曲線を滑らかに描くことのできる程度とする。連続記録をしない場合は、圧縮力の最大値までは圧縮量 0.2 mm、それ以降は 0.5 mm を超えない間隔が望ましい。
- (4) 圧縮力が最大となってから、引き続きひずみが 2 % 以上生じるか、圧縮力が最大値の $\frac{2}{3}$ 程度に減少するか又は圧縮ひずみが 15 % に達したら圧縮を終了する。
- (5) 供試体の変形、破壊状況などを観察、記録する。圧縮終了後の供試体の変形・破壊の状況は、それらの状態が最も顕著に見える方向から観察し、記録する。

また、すべり面が見られる場合は、その傾きが最も急に見える方向から観察を行い、おおよその角度が読み取れる程度に記録する。供試体の不均質状況や異物の混入状況などについても、観察し、記録する。

6. 計算

計算は、次のとおり行う。

- (1) 供試体の圧縮ひずみは、次の式によって算出する。

$$\epsilon = \frac{\Delta H}{H_0} \times 100$$

ここに、 ϵ : 供試体の圧縮ひずみ (%)

ΔH : 圧縮量 (cm)

H_0 : 圧縮する前の供試体の高さ (cm)

- (2) 圧縮ひずみが ϵ のときの圧縮応力は、次式によって算出する。

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \times \left(1 - \frac{\epsilon}{100} \right)$$

$$A_0 = \frac{\pi D_0^2}{4}$$

ここに、 σ : 圧縮応力 (kgf/cm²) { kN/m² }

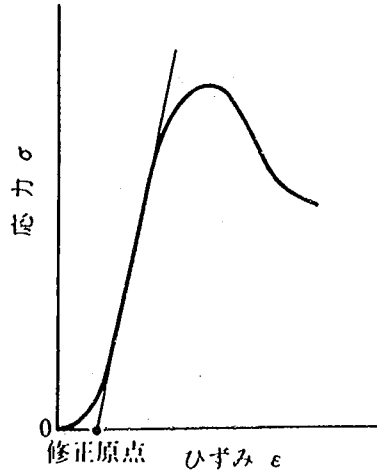
P : 圧縮ひずみが ϵ のときに供試体に加えられた圧縮力 (kgf) { kN }

A_0 : 圧縮する前の供試体の断面積 (cm^2)

D_0 : 圧縮する前の供試体の直径 (cm)

(3) 圧縮ひずみを横軸に、圧縮応力を縦軸にとって応力—ひずみ曲線を図示する。

(4) 圧縮ひずみが15%に達するまでの圧縮応力の最大値を応力—ひずみ曲線から求めて一軸圧縮強さ (q_u) とし、このときのひずみを破壊ひずみとする。応力—ひずみ曲線の初期の部分に付図 3-2 のような変曲点が生じる場合は、曲点以降の直線部分を延長し、横軸との交点を破壊ひずみの算出の修正原点とする。



付図 3-2 応力—ひずみ曲線の初期の部分に変曲点が生じる場合の補正方法

参考 変形係数は、次の式によって算出する。

$$E_{50} = \frac{\frac{q_u}{2}}{\varepsilon_{50}} \times 100$$

ここに、 E_{50} : 変形係数 (kgf/cm^2) { kN/m^2 }

q_u : 一軸圧縮強さ (kgf/cm^2) { kN/m^2 }

ε_{50} : 圧縮応力 $\sigma = \frac{q_u}{2}$ のときの圧縮ひずみ (%)。応力—ひずみ曲線の初期の部分に付図 3-2 のような変曲線が生じる場合は、6.(4)と同様の補正を行う。

7. 報 告

- (1) 供試体の直径、高さ、質量及び含水比
- (2) 供試体の破壊状況
- (3) 圧縮応力—ひずみ曲線
- (4) 一軸圧縮強さ及び破壊ひずみ

付録一4 室内CBR試験方法

室内CBR試験方法は、以下に示すJIS A 1211にしたがって試験を行うものとする。

CBR試験方法

Test method for the California Bearing Ratio (CBR) of soils in laboratory

1. 適用範囲

この規格は、モールド内に突固めた土の供試体及びモールド内に採取した乱さない土の供試体のCBRを求める試験方法について規定する。ただし、モールド内に突固めた供試体のCBR試験の場合は、37.5mmふるいを通過した土を対象とする。

また、この試験は、安定処理した土にも適用できる。

備考1. この規格の引用規格を、次に示す。

JIS A 1201 土質試験のための乱した土の試料調整方法

JIS A 1203 土の含水比試験方法

JIS A 1210 突固めによる土の締固め試験方法

JIS A 8801 標準ふるい

2. この規格の中で〔 〕を付けて示してある単位及び数値は、国際単位系（SI）によるものであって、参考として併記したものである。

2. 用語の定義

この規格で用いる主な用語の定義は、次のとおりとする。

CBR 所定の貫入量における荷重強さの、その貫入量における標準荷重強さに対する百分率。

3. 試験方法の種類

試験方法の種類は、供試体の状態によって、次の2種類とする。

- (1) 締固めた土のCBR試験
- (2) 乱さない土のCBR試験

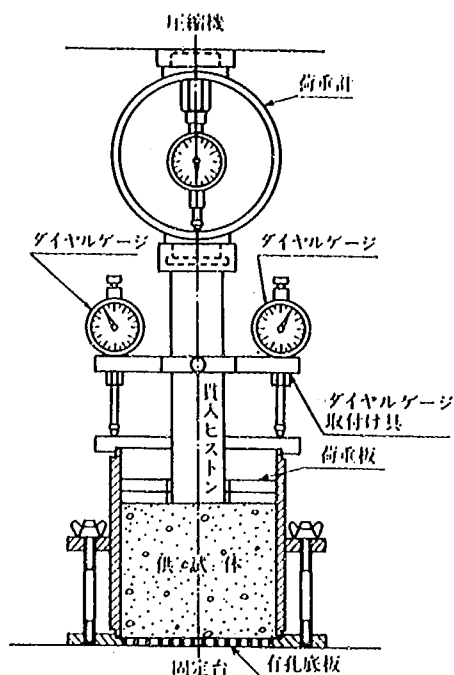
4. 試験装置及び器具

4.1 締固めた土のCBR試験装置及び器具

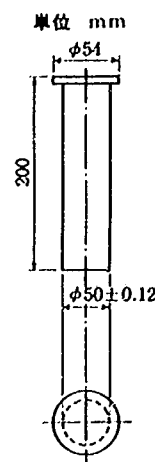
締固めた土のCBR試験装置及び器具は、次のとおりとする。

- (1) CBR試験機 CBR試験機は、載荷装置は、荷重計、貫入ピストン及び貫入量測定装置から構成され、次の条件を満たすものとする。試験機及び貫入ピストンの例を付図4-1及び付図4-2に示す。

- (a) 載荷装置 載荷装置は、CBRの大きさに応じて十分な能力のものを用いることとし、載荷能力は5000kgf〔50kN〕以上を標準とする。貫入速さは、1mm/minの一定速度で連続的に与えることができるものでなければならない。

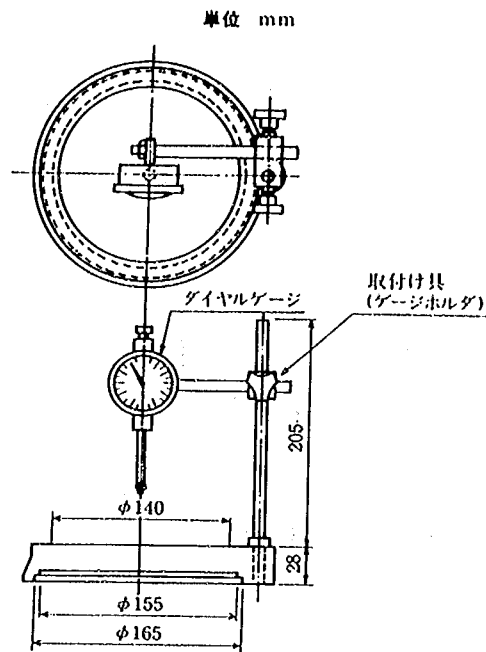


付図4-1 CBR試験機の例

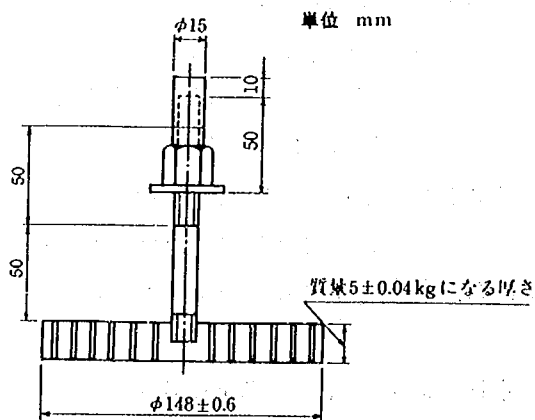


付図4-2 貫入ピストンの例

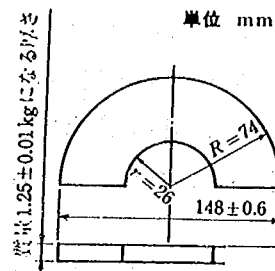
- (b) 荷重計 荷重計は、プルービングリング又は電氣的に荷重を指示できるもので、予想される最大荷重の ± 1 %程度の許容差で荷重が測定できるものとする。容量の異なるもの500～5000 kgf { 5～50 kN }を複数用意しておき、最大荷重に応じて使い分ける。
- (c) 貫入ピストン 貫入ピストンは、直径 50 ± 0.12 mmの鋼製円柱形のものとする。
- (d) 貫入量測定装置 貫入量測定装置は、最小目盛 $\frac{1}{100}$ mm、最大20 mmまで測定できるダイヤルゲージ又はこれと同等の性能をもつ電気式変位計とする。
- (2) 膨張量測定装置 膨張量測定装置は、供試体の吸水膨張量を最小目盛 $\frac{1}{100}$ mm、最大20 mmまで測定できる変位計(ダイヤルゲージ)及びその取付け具(ゲージホルダ)からなる。測定装置の例を付図4-3に示す。
- (3) 供試体作製器具
- (a) 15 cm モールド、カラー、スペーサディスク及び4.5 kg ランマ これらの器具は、JIS A 1210の4.(試験器具)に規定するものとする。
- (b) 有孔底板 有孔底板は、孔の直径が2 mm以下のものとする。
- (4) その他の器具
- (a) 軸付き有孔板 軸付き有孔板は、付図4-4に示すような直径 148 ± 0.6 mm、孔の直径2 mm以下、質量 5 ± 0.04 kgの黄銅製のものとする。
- (b) 荷重板 荷重板は、付図4-5に示すように質量 1.25 ± 0.01 kgの鉛製のもの4個を用意する。
- (c) 試料押出し器、混合器具及び直ナイフ これらの器具は、JIS A 1210の4.(試験器具)に規定するものとする。
- (d) はかり はかりは、感量10 gのものとする。
- (e) ふるい ふるいは、JIS Z 8801に規定する標準網ふるいで呼び寸法37.5 mmのもの



付図 4 - 3 膨張量測定装置の例



付図 4 - 4 軸付き有孔板の例
とする。



付図 4 - 5 荷重板の例

(f) 含水比測定器具 含水比測定器具は、JIS A 1203 の 3. (試験器具) に規定するものとする。

(g) 水槽 水槽は、底板付きモールドが入り、供試体が水浸できるものとする。

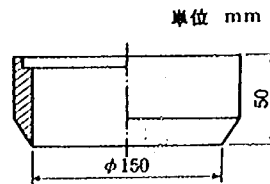
(h) ストップウォッチ又は時計

(i) ろ紙

4.2 乱さない土の CBR 試験装置及び器具

乱さない土の CBR 試験装置及び器具は、次のとおりとする。

- (1) CBR試験機 CBR試験機は、4.1(1)に規定するものとする。
- (2) 膨張量測定装置 膨張量測定装置は、4.1(2)に規定するものとする。
- (3) 供試体作製器具 供試体作製器具は、4.1(3)に規定するもの以外に、次のものを用意する。
 - (a) カッターリング カッターリングは、付図4-6に示すような内径15 cm、高さ約5 cmの片刃の付いた鋼製のものとする。
 - (b) ジャッキ及び反力装置



付図4-6 カッターリングの例

- (4) その他の器具 その他の器具は、4.1(4)に規定するものとする。ただし、ふるい及び混合器具は除く。

5. 試料

締固めた土のCBR試験に用いる試料は、次のとおり準備する。

なお、乱さない土の場合には、特別な準備は必要としない。

- (1) 土を試験の目的によって、JIS A 1201の5.(試料の含水比調整)に規定する非乾燥法又は空気乾燥法によって調整した後、37.5mmふるいでふるい分けたものを試料とし、その含水比(w_0)を求める。土が非常に湿ってふるいを通過させることができない場合は、特に目立つ粗大な粒子を手で取り除く程度でよい。試料は、約5 kgずつ必要組数用意する。
 - (2) 試料の含水比を試験の目的に応じて自然含水比又は最適含水比で調整し、その含水比(w_1)を求める。ただし、自然含水比の場合には w_0 を w_1 としてよい。最適含水比に調整する場合、最適含水比と試料の含水比との差違がCBR試験結果に有意な差を生じるようであれば、改めて試料調整を行う。
- 参考 通常、設計CBRを求めるときは、自然含水比で試験を行い、修正CBRを求めるときには、最適含水比で試験を行う。
- (3) 試料の含水比が変わらないように保存する。

6. 供試体の作製

6.1 締固めた土の供試体

締固めた土の供試体は、次のとおり作製する。

- (1) モールドと有孔底板の質量(m_1)をはかる。
 - (2) カラーと有孔底板を結合したモールドにスペーサディスクを入れ、その上にろ紙を敷く。
 - (3) 5.で準備した試料を用いて、JIS A 1210の表1の突固め方法の呼び名E及びJIS A 1210の5.(試料)の(2)、(3)及び(4)によって供試体を作製する。
- 参考 突固め回数は、試験の目的に応じて変更する。設計CBRを求めるときの突固め回数

は、通常各層67回である。修正CBRを求めるときの突固め回数は、各層17回、42回及び92回の3種類である。

- (4) モールドと有孔底板の外部に付いた土をよくふき取り、スペーサディスクを取り外す。
- (5) ろ紙を有孔底板の上に敷き、供試体を静かに転倒し、有孔底板に再び固定して、全体の質量 m_2 をはかる。

6.2 乱さない土の供試体

乱さない土の供試体は、次のとおり作製する。

- (1) モールドと有孔底板の質量(m_1)をはかる。
- (2) 現場の代表的な箇所にカッタリングを付けたモールドを、反力装置とジャッキを用いて注意深く押し込み、試料を採取する。

備考 モールドを押し込むことができない場合は、次のいずれかの方法で試料を採取する。

モールドと供試体のすき間は、溶かしたパラフィンなどを用いて充てん(填)する。

- (1) 土の組織を緩めないように周囲を掘り、直径約15cmの円柱形に削りながらモールドをかぶせて採取する。
- (2) 十分な大きさの土塊を採取して、直径約15cm、高さ約17cmの円柱形に成形し、これにモールドをかぶせてもよい。
- (3) スペーサディスクが入るように、スペーサディスクその他の器具を用いて試料を押し出し、モールドの縁の面に合せて直ナイフで試料の両端面を成形し、供試体を作製する。
- (4) ろ紙を有孔底板の上に敷き、供試体を静かに転倒し、有孔底板をモールドに固定する。
- (5) モールドと有孔底板の外部に付いた土をよくふき取り、全体の質量(m_2)をはかる。
- (6) 削り落とした試料を用いて含水比(w_1)を求める。

7. 試験方法

7.1 吸水膨張試験

吸水膨張試験は、次のとおり行う。

- (1) 供試体の上面にろ紙を置き、その上に軸付き有孔板を載せる。
- (2) これらを水槽内に水浸し、付図4-7に示すようにモールドの縁に膨張量測定用のゲージホルダと変位計を設置する。水浸後の膨張量の測定時間は、1h、2h、4h、8h、24h、48h、72h及び96hとする。ただし、膨張量が一定に落ち着いた場合は、水浸を途中で中止してもよい。
- (3) 水中からモールドを取り出して軸付き有孔板を載せたまま静かに傾け、たまっている水を除き、約15分間静置する。ろ紙を除いてから全体の質量(m_3)をはかる。

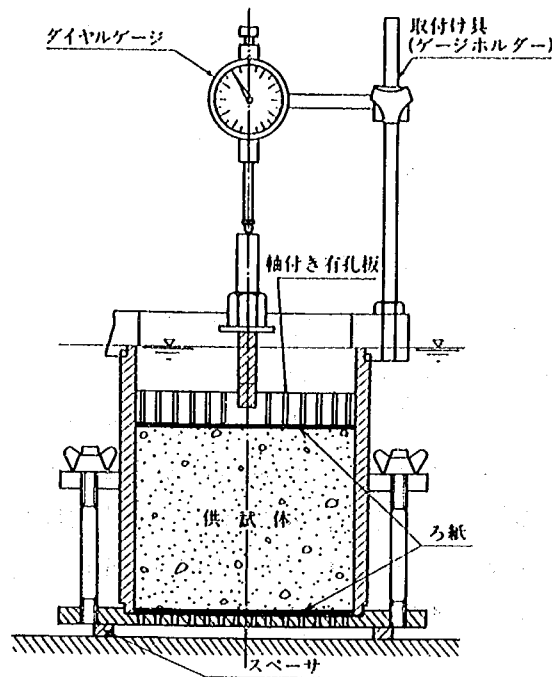
7.2 貫入試験

貫入試験は、次のとおり行う。

- (1) 貫入ピストンの断面積を求める。
- (2) モールドに入った供試体の上に、荷重板を4個載せる。
- (3) 載荷装置の貫入ピストンと供試体の中心線が一致するように供試体を載荷装置に設置し、供

試体とピストンを密着させるために 5 kgf { 0.05 kN } 以下の荷重を加える。このときの荷重計及び貫入量測定装置の読みを初期値とする。

- (4) 貫入ピストンを 1 mm/min の速さで貫入させ、貫入量が 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm, 2.5 mm, 3.0 mm, 4.0 mm, 5.0 mm, 7.5 mm, 10.0 mm 及び 12.5 mm のとき、荷重計の読みを記録する。貫入量が 12.5 mm になる前に荷重計の読みが最大値に達したときは、そのときの荷重計の読みと貫入量を記録しておく。
- (5) 試料押出し器を用いてモールドから供試体を押し出し、含水比 (w_2) を求める。



付図 4 - 7 吸水膨張試験の例

8. 計 算

次のとおり行う。

- (1) 供試体の湿潤密度及び乾燥密度は、次の式によって算出する。

$$\rho_t = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

$$\rho_d = \frac{\rho_t}{1 + \frac{w_1}{100}}$$

ここに、 ρ_t : 供試体の湿潤密度 (g/cm^3)

ρ_d : 供試体の乾燥密度 (g/cm^3)

m_1 : モールドと有孔底板の質量 (g)

m_2 : 供試体とモールド及び有孔底板の質量 (g)

V : モールドの容量 (2209 cm³)

w_1 : 供試体の含水比 (%)

(2) 供試体の膨張比は、次の式によって算出する。

$$r_e = \frac{d_e}{h_0} \times 100$$

ここに、 r_e : 供試体の膨張比 (%)

d_e : 供試体の吸水膨張試験終了時の膨張量 (mm)

h_0 : 供試体の最初の高さ (125mm)

参考 吸水膨張試験後の供試体の乾燥密度と平均含水比は次の式によって算出する。

$$\rho'_d = \frac{\rho_d}{1 + \frac{r_e}{100}}$$

$$w' = \frac{\rho'_t}{\rho'_d} - 1 \times 100$$

$$\text{ただし、} \rho'_t = \frac{m_3 - m_1}{V \left(1 + \frac{r_e}{100} \right)}$$

ここに、 ρ'_d : 吸水膨張試験後の供試体の乾燥密度 (g/cm³)

w' : 吸水膨張試験後の供試体の平均含水比 (%)

m_3 : 吸水膨張試験後の供試体とモールド及び有孔底板の質量 (g)

ρ'_t : 吸水膨張試験後の湿潤密度 (g/cm³)

(3) 貫入試験で読み取った荷重を貫入ピストンの断面積で除して荷重強さを求め、荷重強さ一貫入量曲線を描く。荷重強さ一貫入量曲線の初期の部分に付図 4-8 の曲線②のような変曲点が生じる場合は、変曲点以降の直線部分を延長し、横軸との交点を貫入量の修正原点とする。

なお、荷重強さを荷重で表してもよい。この場合は荷重一貫入量曲線という。

(4) 貫入量 2.5mm における荷重強さを荷重強さ一貫入量曲線から求め、2.5mm における標準荷重強さをを用いて CBR を次の式によって算出する。

$$CBR = \frac{q}{q_0} \times 100$$

ここに、 q : 貫入量 2.5mm における荷重強さ (kgf/cm²) { MN/m² }

q_0 : 貫入量 2.5mm における標準荷重強さ (kgf/cm²) { MN/m² } (付表 4-1 参照)

備考 貫入試験結果を荷重で整合した場合は、2.5mm における標準荷重を用いて CBR を次の式によって算出する。

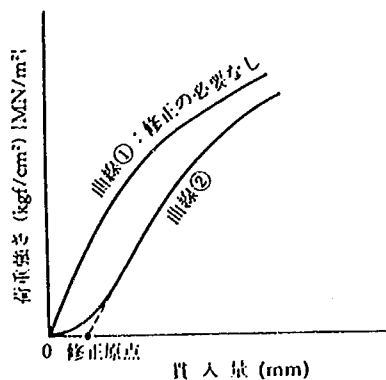
$$CBR = \frac{Q}{Q_0} \times 100$$

ここに、 Q : 貫入量 2.5mm における荷重 (kgf) { kN }

Q_0 : 貫入量 2.5mm における標準荷重 (kgf) { kN } (付表 4-1 参照)

(5) 貫入量 5.0mm における CBR を同様に求め、CBR が貫入量 2.5mm のものよりも大きい場合

には、必要に応じて、改めて供試体を作り直して試験を行う。ただし、再び同じ結果を得たときは、貫入量 5.0mm のときの C B R を採用。



付図 4-8 荷重強さ・貫入量曲線

付表 4-1 標準荷重強さ及び標準荷重の値

貫入量 mm	標準荷重強さ kgf/cm ² { MN/m ² }	標準荷重 kgf { kN }
2.5	70 { 6.9 }	1 370 { 13.4 }
5.0	105 { 10.3 }	2 030 { 19.9 }

9. 報 告

試験結果については、次の事項を報告する。

(1) 締固めた土の C B R 試験

- 試料準備の方法（非乾燥法、空気乾燥法）
- 供試体の含水比及び乾燥密度 最適含水比で供試体を作製した場合、試料の準備に空気乾燥を用いたときは、空気乾燥前の含水比と最適含水比、非乾燥法を用いたときは、自然含水比と最適含水比も併せて報告する。
- 膨張比
- 貫入試験後の含水比
- C B R 及びそれに対応する貫入量
- その他特記すべき事項 採取試料の 3.75mm 以上の土粒子の質量百分率を報告することが望ましい。

(2) 乱さない土の C B R 試験

- 供試体の含水比及び乾燥密度
- 膨張比
- 貫入試験後の含水比
- C B R 及びそれに対応する貫入量

付録ー5 フォール・コーン試験方法

1) フォール・コーン試験方法

改良土の配合試験方法としては、一軸圧縮試験やCBR試験を用いるのが一般的であるが、以下に述べるフォール・コーン試験によって求まるフォール・コーン貫入強度が、一軸圧縮強さ q_u やCBR値と比較的良好な相関をもつので、概略の配合設計の際には、より簡便なフォール・コーン試験を用いて改良土の配合試験を行うことも可能である。

フォール・コーン試験方法には、従来のフォール・コーン試験装置を用いて試験を行う方法と、従来のフォール・コーン試験装置を改良した改良型フォール・コーン試験装置を用いて試験を行う方法があり、室内配合試験の目標強度等によって試験方法を決定する。試験方法の概要を以下に述べる。¹⁾

① フォール・コーン試験

(a) 試験装置

フォール・コーン試験装置は付図5-1に示すような構造をもつ。先端部の貫入コーンは先端角度60度の円すい形で、真チュウ製のものである。この貫入コーンと摺動棒を合わせた落下部の質量は60 gとなっている。

(b) 供試体

供試体を詰める容器の大きさには特別の規定はないが、フォール・コーン試験を土の液性限界の判定に用いる場合の試料容器の寸法は直径6 cm、深さ3 cm程度が適当であるとしている。そこで今回の実験では、これに近い寸法をもつ市販のステンレス製の容器（直径が上部で6.8 cm、下部で4.6 cm、深さが3.4 cmのもの）を用いた。

この容器の中に下水汚泥焼却灰と混合した直後の土を詰め、表面を平滑にならしたあと所定の養生を行って供試体とする。

(c) 試験手順

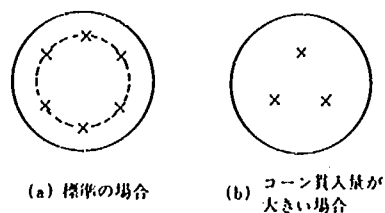
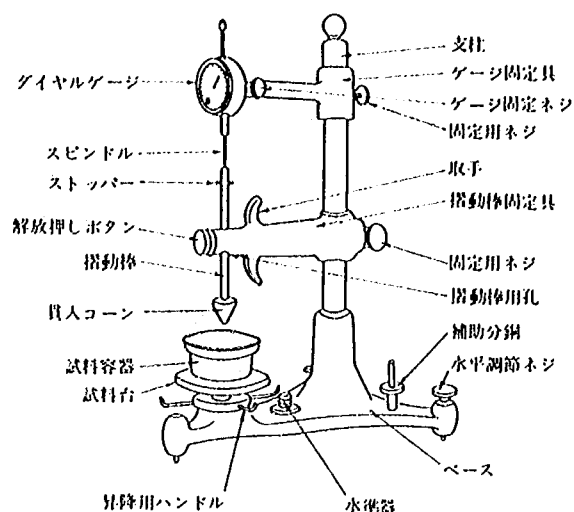
試験手順

- ① 供試体を試料台に乗せ、貫入コーンの先端が試料の表面に接触する位置にセットする。
- ② ダイヤルゲージで摺動棒上端の初期高さを読む。
- ③ ダイヤルゲージのスピンドルを固定したあと、解放押しボタンによって落下部を解放し、貫入コーンを自重で試料中に貫入させる。
- ④ この状態で5秒間放置したあと、解放押しボタンを離すことによって落下部を固定する。
- ⑤ ダイヤルゲージのスピンドルを静かに下げて摺動棒の上端にセットし、その時のダイヤルゲージの読みと初期値との差からコーン貫入量 dc を1/100 mmの精度で測定する。

以上の操作を付図5-2(a)に示すような6箇所で行う。ただし、試料が軟らかくてコーン貫入量が5 mmを越える場合には、付図5-2(b)に示すように測定箇所を中央にずらして測定回数を3箇所とする。なお、測定後には試料の含水比の測定を行う。

(d) 結果の整理

試験結果は、1箇所ごとのコーン貫入量とその平均値のほか、供試体作製時の湿潤密度と含水比および試験時の含水比を付表5-1のように整理する。



付図5-1 フォール・コーン試験装置

付図5-2 フォール・コーン試験の測定位置

付表5-1 フォール・コーン試験結果の整理例

土質改良用添加材	養生期間(日)	コーン貫入量(1/100mm)							湿潤密度 (g/cm ³)	作成時 含水比 (%)	試験時 含水比 (%)
		1	2	3	4	5	6	平均			
A	1	308	318	309	314	289	307	308	1.510	64.6	63.2
	3	299	281	271	303	279	288	287	1.534	64.6	62.4
	7	268	280	250	278	277	259	268	1.507	64.6	62.5
B	1	307	298	294	319	301	305	304	1.501	65.1	64.3
	3	332	320	321	300	332	348	326	1.504	65.1	64.2
	7	327	337	321	338	309	321	326	1.533	65.1	64.3
C	1	198	190	191	207	207	185	196	1.536	65.3	63.7
	3	182	173	187	178	184	204	185	1.527	65.3	63.8
	7	153	165	161	157	168	162	161	1.498	65.3	63.2
D	1	118	108	115	130	105	117	116	1.551	64.7	62.8
	3	125	152	112	115	114	107	121	1.436	64.7	63.2
	7	131	102	108	111	105	121	113	1.530	64.7	63.8
E	1	211	215	218	225	232	216	220	1.503	63.5	63.9
	3	221	217	207	221	223	223	218	1.493	63.5	62.5
	7	184	190	179	219	176	206	192	1.503	63.5	62.3

(e) コーン貫入量と一軸圧縮強さの関係

フォール・コーン試験と一軸圧縮試験の相関を調べるため、土質や下水汚泥焼却灰の添加量および養生日数の異なる各種の土質改良土について、フォール・コーン試験用の供試体と一

軸供試体を同じ条件で作製・養成したあと、両者の試験結果の比較を行った。

その結果得られたコーン貫入量 dc と一軸圧縮強さ qu の関係を示したものが図 5-5 である。付図 5-3(a) は両者の関係を算術目盛で整理したもの、一方付図 5-3(b) は同じデータを両対数で整理し直したものである。これをみると、コーン貫入量 dc と一軸圧縮強さ qu との間にはかなり良い相関があり、 dc が 1 mm 以上の場合には dc の減少による qu の増大の程度は比較的小さいが、 dc が 1 mm を下回るようになると dc の減少に応じて qu が急激に増大する傾向にあることがわかる。そして、この関係は次式すなわち付図 5-3(b) 中の実線で示した直線関係ではほぼ近似できる。

$$\log qu = 1.20 \cdot \log dc - 0.053 \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに、 qu : 一軸圧縮強さ (kgf/cm²)

dc : コーン貫入量 (mm)

なお、Houlsdy の研究によると、コーン貫入量 dc と粘性土のせん断強さ qu との間には次式のような関係のあることが明らかにされている。

$$Cu = qu/2 = P/(F \cdot dc^2) \quad \cdots \cdots (2)$$

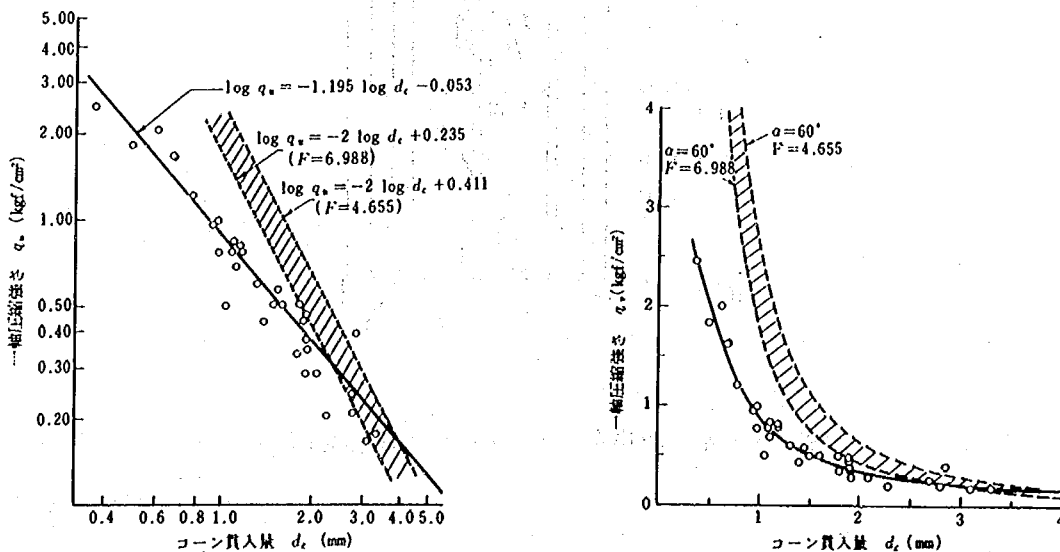
ここに、 Cu : 土の非排水せん断強さ (kgf/cm²)

P : 落下部の重量 (kgf)

dc : コーン貫入量 (cm)

F : 貫入コーンの先端角と表面の粗度によってきまる係数で、貫入コーンの先端角が 60 度の場合には 4.655 ~ 6.988 の範囲にあるとしている。

付図 5-3(a), (b) 中には (2) 式による qu と dc の関係を破線で併記したが、この結果を今回の土質改良土に対して得られた関係と比べると、 dc が 2 mm を超える範囲では両者はかなりよく一致しているのに対し、 dc が 2 mm 以下になると両者の開きがかなり大きくなっていることがわかる。このことから、 dc が 2 mm を超えるような軟らかい土質改良土では一般の軟弱粘性土とはほぼよく似た性状を有すると考えられるのに対し、 dc が 2 mm 以下の値をもつ比較的硬



付図 5-3 フォール・コーン試験によるコーン貫入量と一軸圧縮強さの関係

い改良土になってくるとコーンの貫入機構を左右する流動性や圧縮性の面で粘弱粘性土とはかなり異なる性状を示しはじめることが推察される。

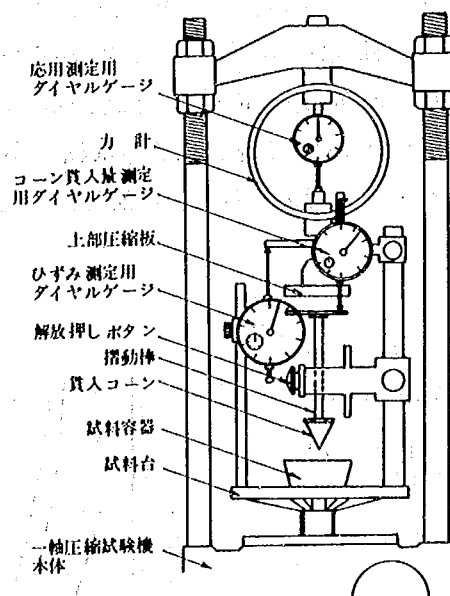
② 改良型フォール・コーン試験

フォール・コーン試験は改良後の強度がそれほど高くない場合に威力を発揮する試験である。改良後の強度が一軸圧縮強さで 2 kgf/cm^2 程度以上になると、前述、付図 5-3 に示したように、コーン貫入量と一軸圧縮強さの相関性が低下し、コーン貫入量から一軸圧縮強さを推定することが困難になる。

そこで、この点を補い、フォール・コーン試験の適用範囲を改良後の強度が高い場合にまで広げることを目的として、従来のフォール・コーン試験装置を一部改良し、コーンの自重による貫入量が一軸圧縮強さで 2 kgf/cm^2 以上にほぼ対応する 0.5 mm 以下となる場合に、その状態から 1 mm/min の貫入速度で押込み荷重を加えられる機能をついかけた。そして、押込み荷重を加えて貫入量が 5 mm に達したときの荷重を読みとると、この値が一軸圧縮強さとかなり良い相関をもつことが判明したので、以下にその概要を述べる。

(a) 試験装置

本装置は、付図 5-4 に示すように、従来型のフォール・コーン試験装置を一軸圧縮試験用の載荷装置に取り付けたもので、自重によってコーンを貫入させたのち、 1 mm/min の貫入速度で押込み荷重を加えられるようにしたものである。



付図 5-4 改良型フォール・コーン試験装置

(b) 試験手順

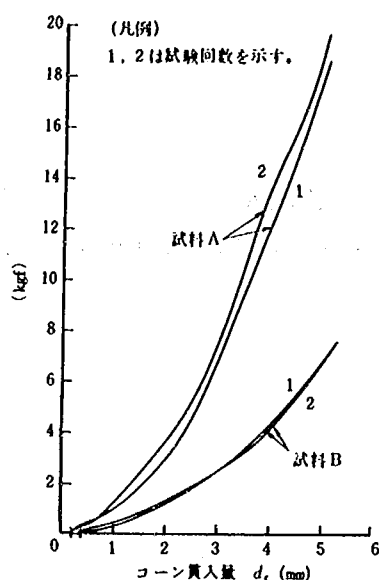
試験手順は次のとおりである。

- ① 従来型のフォール・コーン試験の試験手順に従って、自重によるコーン貫入量を求める。
- ② コーン貫入量が 0.5 mm 以下であれば、試料台を上昇させ、摺動棒の上端が上部圧縮板に接触するよう調整したのち、力計の応力測定用ダイヤルゲージと歪測定用ダイヤルゲージの零調整を行う。
- ③ コーン貫入量測定用ダイヤルゲージのスピンドルを固定したあと、解放押しボタンによって落下部を解放した状態で押込み荷重の载荷装置のスイッチを入れる。
- ④ 1 mm/min の貫入速度で押込み荷重を加え、一定の押込み量ごとに押込み荷重を測定する。測定は、押込み量が 5 mm に達するまで行う。

以上の操作を一供試体あたり 2 箇所で行う。

(c) 結果の整理

試験結果は、付図 5-5 に示すように、押込み荷重とコーン貫入量の関係で整理し、この図からコーン貫入量が 5 mm のときの押込み荷重を読みとって報告する。なお、図中のコーン貫入量の中には押込み荷重を加える前に生じた自重によるコーン貫入量を含めるものとする。

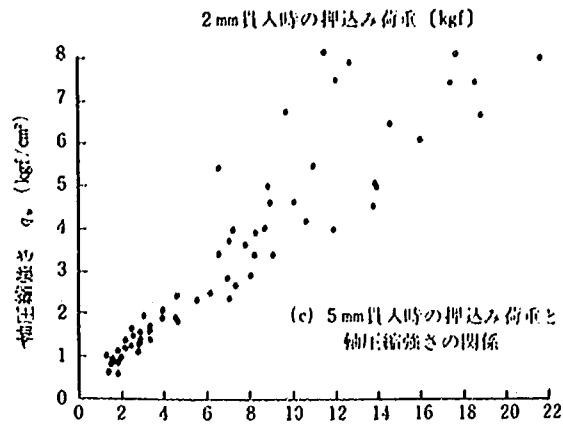


付図 5-5 改良型フォール・コーン試験による
押込み荷重とコーン貫入量

(d) 5 mm 貫入時の押込み荷重と一軸圧縮強さ関係

付図 5-6 は、土質や下水汚泥焼却灰の添加量および養生日数が異なる各種の土質改良土の供試体について得られた改良型フォール・コーン試験における 5 mm 貫入時における押込み荷重と一軸圧縮強さの関係を示したものである。

従って、改良後の強度が一軸圧縮強さで 2 kgf/cm² を超えるような場合でも、改良型のフォール・コーン試験を行って 5 mm 貫入時の押込み荷重を求めれば、付図 5-6 の関係を用いて一軸圧縮強さを推定することが可能であるといえる。



付図 5 - 6 改良型フォール・コーン試験装置による
押込み荷重と一軸圧縮強さの関係

〔参考文献〕

- 1) 久野悟郎, 久楽勝行, 三木博史, 岡田芳樹: フォール・コーン試験による土質改良効果の簡易判定手法, 土木技術資料, Vol 27, No. 10, pp. 33~39, 1985

付録一6 現場CBR試験方法

現場CBR試験方法は、以下に示すJIS A 1222したがって試験を行うものとする。

現場CBR試験方法

Test method for the California Bearing Ratio (CBR) of soils in place

1. 適用範囲

この規格は、原位置の土のCBRを求める試験方法について規定する。この試験は、安定処理した土にも適用できる。

備考1. この規格の引用規格を、次に示す。

JIS A 1203 土の含水比試験方法

JIS A 1211 CBR試験方法

2. この規格の中で{ }を付けて示してある単位及び数値は、国際単位系(SI)によるものであって、参考として併記したものである。

2. 用語の定義

この規格で用いる主な用語の定義は、次のとおりとする。

CBR 所定の貫入量における荷重強さの、その貫入量における標準荷重強さに対する百分率。

3. 試験装置及び器具

試験装置及び器具は、次のとおりとする。

(1) 現場CBR試験機 現場CBR試験機は、載荷装置、荷重計、貫入ピストン及び貫入量測定装置から構成され、次の条件を満たすものとする。試験機の例を付図6-1に示す。

(a) 載荷装置 載荷装置は、CBRの大きさに応じて十分な能力のものを用いることとし、載荷能力5000 kgf { 50 kN }以上のスクリュージャッキ又はオイルジャッキを使用する。貫入速度は、1 mm/minの一定速度で連続的に与えることができるものでなければならない。

(b) 荷重計 荷重計は、プルービングリング又は電氣的に荷重を指示できるもので、予想される最大荷重の±1%程度の許容差で荷重が測定できるものとする。容量の異なるもの500~5000 kgf { 5~50 kN }を複数用意しておき、最大荷重に応じて使い分ける。

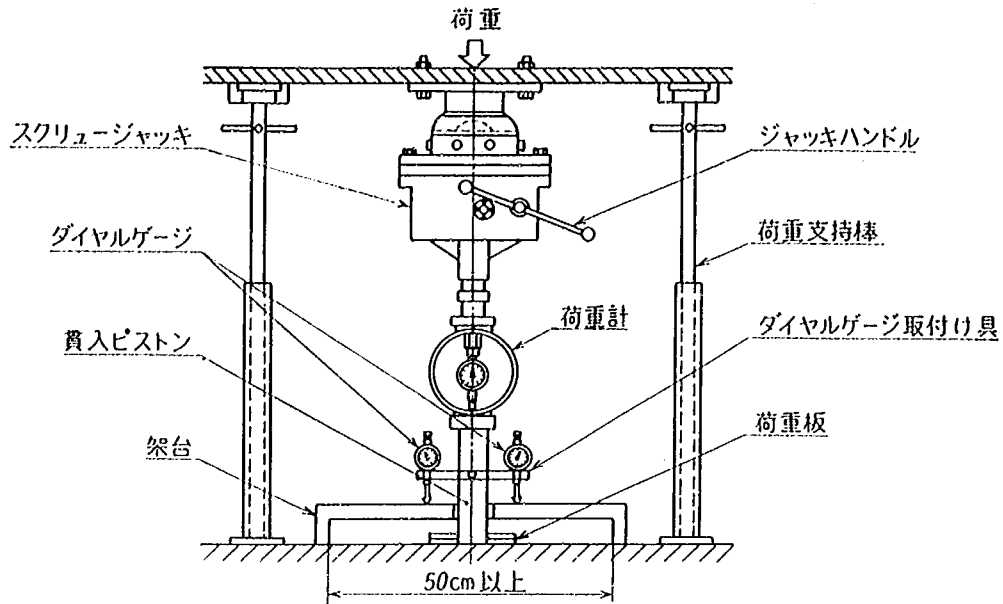
(c) 貫入ピストン 貫入ピストンは、直径 50 ± 0.12 mmの鋼製円柱形のものとする。

(d) 貫入量測定装置 貫入量測定装置は、変位計、その取付け具及び架台からなる。変位計は、最小目盛 $\frac{1}{100}$ mm、最大20 mmまで測定できるダイヤルゲージ又はこれと同等の性能をもつ電気式変位計とする。

(2) 反力装置 反力装置は、予想される荷重に十分対応できるものとし、ダンプトラックなどを用いる。

(3) その他の器具

(a) 荷重板 荷重板は、JIS A 1211の4.(試験装置及び器具)に規定するもの4個を用意



付図 6 - 1 現場 C B R 試験機の例

する。

- (b) スコップ、ハンドスコップ及び直ナイフ 直ナイフは、鋼製で片刃の付いた長さ 25 cm 以上のものとする。
- (c) ストップウォッチ又は時計
- (d) 乾燥砂
- (e) 含水比測定器具 含水比測定器具は、JIS A 1203 の 3. (試験器具) に規定するものとする。

4. 試験方法

試験方法は、次のとおりとする。

- (1) 貫入ピストンの断面積を求める。
- (2) 試験箇所の表面を直径約 30 cm の水平な面に仕上げ、乾燥砂を薄く敷きならす。
- (3) 試験装置を組み立て、試験面に荷重板を 4 個載せる。
- (4) 貫入ピストンを試験面に密着させるために 5 kgf { 0.05 kN } 以下の荷重を加える。このときの荷重計及び貫入量測定装置の読みを初期値とする。
- (5) 貫入ピストンを 1 mm/min の速さで貫入させ、貫入量が 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm, 2.5 mm, 3.0 mm, 4.0 mm, 5.0 mm, 7.5 mm, 10.0 mm 及び 12.5 mm のとき、荷重計の読みを記録する。貫入量が 12.5 mm になる前に荷重計の読みが最大値に達したときは、そのときの荷重計の読みと貫入量を記録しておく。
- (6) 貫入試験の終了後、ピストン貫入部付近から試料を採取して含水比 (w) を求める。

5. 計算

計算は、次のとおり行う。

- (1) 貫入試験で読み取った荷重を貫入ピストンの断面積で除して荷重強さを求め、荷重強さ一貫入量曲線を描く。荷重強さ一貫入量曲線の初期の部分に付図 6-2 の曲線②のような変曲点が生じる場合は、変曲点以降の直線部分を延長し、横軸との交点を貫入量の修正原点とする。

なお、荷重強さを荷重で表してもよい。この場合は、荷重一貫入量曲線という。

- (2) 貫入量 2.5 mm における荷重強さを荷重強さ一貫入量曲線から求め、2.5 mm における標準荷重強さをを用いて CBR を次の式によって算出する。

$$CBR = \frac{q}{q_0} \times 100$$

ここに、 q : 貫入量 2.5 mm における荷重強さ (kgf/cm²) { MN/m² }

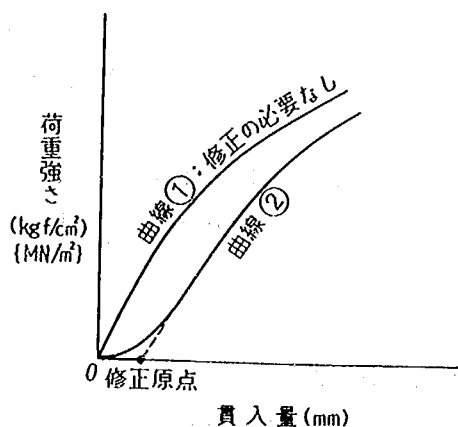
q_0 : 貫入量 2.5 mm における標準荷重強さ (kgf/cm²) { MN/m² } (付表 6-1 参照)

備考 貫入試験結果を荷重で整理した場合は、2.5 mm における標準荷重を用いて CBR を次の式によって算出する。

$$CBR = \frac{Q}{Q_0} \times 100$$

ここに、 Q : 貫入量 2.5 mm における荷重 (kgf) { kN }

Q_0 : 貫入量 2.5 mm における標準荷重 (kgf) { kN } (付表 6-1 参照)



付表 4-1 標準荷重強さ及び標準荷重の値

貫入量 mm	標準荷重強さ kgf/cm ² { MN/m ² }	標準荷重 kgf { kN }
2.5	70 { 6.9 }	1370 { 13.4 }
5.0	105 { 10.3 }	2030 { 19.9 }

付図 6-2 荷重強さ一貫入量曲線

- (3) 貫入量 5.0 mm における CBR を同様に求め、CBR が貫入量 2.5 mm のものよりも大きい場合には、必要に応じて、改めて試験を行う。ただし、再び同じ結果を得たときは、貫入量 5.0 mm のときの CBR を採用する。

6. 報告

試験結果については、次の事項を報告する。

- (1) 試験箇所の含水比
- (2) CBR 及びそれに対応する貫入量

付録一 7 下水処理システムの概要

下水処理システムは水処理系と汚泥処理系に大別できる。一般的な下水処理のフローは付図 7-1 に示す各プロセスから構成されている。これらの各プロセスの概略は以下のとおりである。

1. 水処理施設

(1) ポンプ棟

市街地からの雨水や家庭からの汚水は管渠を通して収集される。この下水を汲上げて後続の水処理施設に送るための施設である。

(2) 沈砂池

流入下水中の土砂をはじめとする大きな固形物を除去するための施設である。

(3) 最初沈殿池

下水をゆっくり流し、下水中の沈殿しやすい固形物を沈殿するための施設である。この際の流速は 30 cm/分以下程度である。

また、沈殿した汚泥は最初沈殿池汚泥として汚泥処理施設に送られ、処理される。

(4) エアレーションタンク

最初沈殿池で沈殿しやすい固形物を除去された下水はエアレーションタンクに流入する。この下水は、最終沈殿池から返送される好気性微生物を含んだ汚泥（活性汚泥）と混合され、6～8 時間程度エアレーションされる。

エアレーションにより、下水中の有機物は活性汚泥に吸着され、さらに、吸着された有機物は、活性汚泥中の好気性微生物の栄養源として、酸化及び同化される。これらの反応により増殖した活性汚泥は沈降性のよいフロックを形成する。

(5) 最終沈殿池

エアレーションタンクでエアレーションされた混合液は、最終沈殿池で沈降分離される。

上澄液は処理水として消毒後放流される。沈殿した汚泥は微生物を多く含んだ活性汚泥と呼ばれ、その一部は再びエアレーションタンクに返送される。

残りの汚泥は余剰汚泥として汚泥処理施設に送られる。

(6) 消毒タンク

最終沈殿池で分離された上澄液は河川等に放流する前に塩素または塩素化合物を用いて消毒される。消毒タンクは上澄液と塩素等を接触するための設備である。

2. 汚泥処理設備

(1) 汚泥濃縮タンク

水処理によって発生する汚泥は希薄であるため、その後の汚泥処理を容易にするために濃縮される。汚泥の濃縮の方法には、重力式、浮上式、遠心式があり、一般的には重力により沈降圧密させる重力式が多く用いられる。

しかし、濃縮性の悪い場合は浮上式、遠心式を利用した機械濃縮を用いる。

(2) 嫌気性消化タンク

嫌気性消化とは、汚泥を嫌氣的な状態に保つことにより、嫌気性微生物の働きを利用して汚泥中の有機分を分解、ガス化することである。その結果、汚泥は減量化されるとともに安定化される。また発生するガスには多量のメタンガスが含まれており、このガスを利用した消化タンクの加温や発電等が可能である。

(3) 汚泥脱水機

汚泥の脱水は汚泥中の水分を除去し、容積を減らすとともに、汚泥のもつ熱量を効率的に利用できる状態にすることである。

脱水方法としては、機械による脱水が主流であり、現在、加圧脱水機、真空脱水機、ベルトプレス脱水機及び遠心脱水機が用いられている。脱水前には、一般的に汚泥を凝集させて脱水性を高める目的で凝集剤や凝集助剤と呼ばれる薬品を添加する。加圧脱水機と真空脱水機は、凝集剤として塩化第二鉄、凝集助剤として消石灰を用いる場合が多い。これらの脱水機から発生する汚泥はカルシウムを多量に含んでおり、この汚泥を焼却した場合、カルシウム分の多い石灰系焼却灰が得られる。

また、ベルトプレス脱水機、遠心脱水機は凝集剤として有機高分子凝集剤を用いる。

脱水により、汚泥中の水分は、60～80 %程度まで減少する。

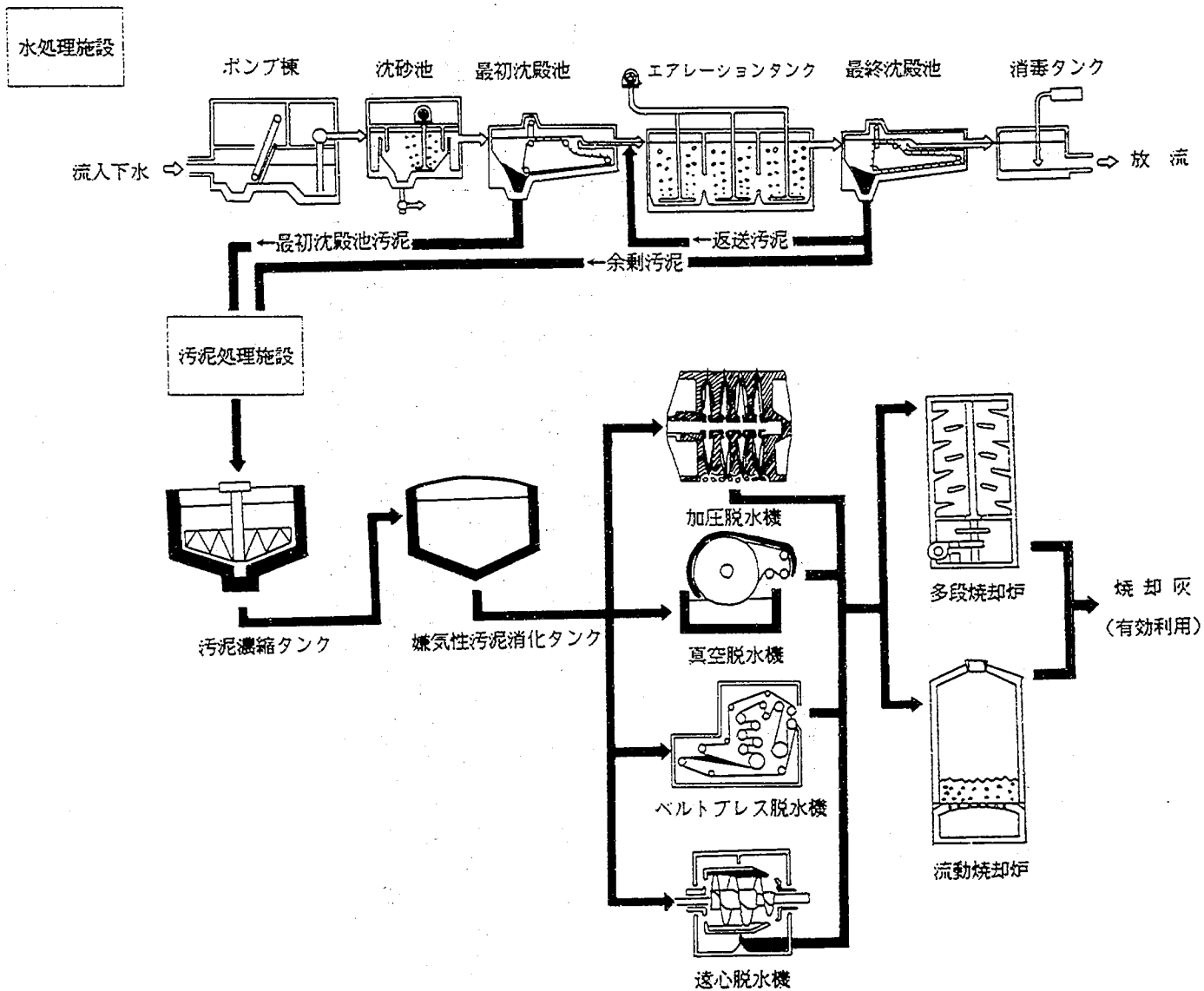
(4) 汚泥焼却炉

脱水された汚泥はそのまま埋立処分することも可能であるが、近年では埋立処分地の減少や資源の再利用の観点から焼却を行い減量、減容化、安定化する場合が増えている。

焼却炉の型式としては、多段焼却炉、流動焼却炉、回転乾燥焼却炉、階段式ストーカ炉等がある。焼却温度は炉の種類により若干異なるが通常 800℃程度である。

焼却炉の中では、汚泥中の水分は蒸発、有機分は燃焼し、無機分が焼却灰として残る。焼却灰の形状は炉の種類、焼却条件によって異なるが、一般的に多段焼却炉から発生する焼却灰は粒径が大きく、流動焼却炉から発生する焼却灰は微粉なものが多い。

これらの焼却灰は現在のところ大部分が埋立処分されているが、本マニュアルで紹介した土質改良材をはじめ、ブロック、タイル等の原料として有効利用が進められている。



付図 7 - 1 下水処理のフロー

下水汚泥焼却灰の土質改良材としての
利用マニュアル（案）

建設省土木研究所 下水道部汚泥研究室

前室長 大嶋 吉雄*
室長 佐藤 和明
前主任研究員 櫻井 克信**
研究員 増田 隆司
白石 隆

機械施工部土質研究室

室長 久楽 勝行
主任研究員 三木 博史
研究員 林 義之

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第2908号
平成2年11月(1990)

名古屋市下水道局 建設部計画課技術開発係

係長 鎌田 修
技師 日比野雅司***
技師 長野 健示

* 現：日本下水道事業団業務部援助課長

** 現：山梨県土木部下水道課技術指導監

*** 現：建設部第一工事事務所

要旨 本マニュアルは、現在、大部分が廃棄物として処理されている下水汚泥焼却灰を、土質改良材として利用する場合の技術的な標準を示したものである。

キーワード：下水汚泥焼却灰、石灰系焼却灰、土質改良材、土質改良効果、改良土

郵便はがき

いは41
って
下手を
下さ

3 0 5 - □ □

茨城県つくば市大字旭一番地
建設省土木研究所
汚泥研究室
御中

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第2908号

下水汚泥焼却灰の土質改良材としての
利用マニュアル（案） 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名

印

土木研究所資料第2908号