

ISSN 0386 - 5878

土木研究所資料第2440号



土木研究所資料

下水汚泥の建設資材としての利用方法

——「建設事業への廃棄物利用技術の開発」——

昭和62年2月

建設省土木研究所
下水道部汚泥研究室

Copyright © (1987) 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、複写は、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。

正 誤 表

土木研究所資料第2440号

下水汚泥の建設資材としての利用方法

頁 数	行, 図表番号	誤	正																				
	目 次	3.7 下水汚泥のスラグの歩道ブロック等への利用…………… 164 3.8 下水汚泥スラグ骨材のコンクリート骨材への利用…………… 173	…………… 163 …………… 172																				
6	下から12行目 10行目	……, 結晶とはスラグ中の <u>化合物</u> が…… ……, 焼却より <u>燃焼温度</u> が……	……, 結晶とはスラグ中の <u>分子</u> が…… ……, 焼却より <u>処理温度</u> が……																				
7	8 行目	この製造方法は成分調整のために添 加材の種類や量……	この製造方法は成分調整のために <u>用いる</u> 添 加材の種類や量……																				
8	表 2.1.1 中	ファイラーの欄 Δ^{*1}	Δ^{*1}																				
13	表 3.1.1 中	<table><tr><th>比 重</th><th colspan="4">粒 度 分 布</th></tr><tr><td><u>Gu</u></td><td>鉄 分</td><td>砂 分</td><td>シルト分</td><td>………</td></tr></table>	比 重	粒 度 分 布				<u>Gu</u>	鉄 分	砂 分	シルト分	………	<table><tr><th>比 重</th><th colspan="4">粒 度 分 布</th></tr><tr><td><u>Gs</u></td><td>礫 分</td><td>砂 分</td><td>………</td><td>………</td></tr></table>	比 重	粒 度 分 布				<u>Gs</u>	礫 分	砂 分	………	………
比 重	粒 度 分 布																						
<u>Gu</u>	鉄 分	砂 分	シルト分	………																			
比 重	粒 度 分 布																						
<u>Gs</u>	礫 分	砂 分	………	………																			
15	表 3.1.2 中	埋戻し (II) の深さ 1328~1842 詳細は表 1.6.2.	(単位: m) 1.328~1.842 詳細は表 3.1.3																				
16	下から 4 行目 下から 1 行目	$\mu\text{m} \sim 2 \text{ mm}$) 礫分の…… なお生石灰含有量は, <u>アルシウム分</u>	$\mu\text{m} \sim 2 \text{ mm}$)、礫分の…… なお生石灰含有量は, <u>カルシウム分</u>																				
20	表 3.1.7 中	<u>測定口</u>	<u>測定口</u>																				
22	図 3.1.8 中	a 工区の「 <u>積に降し時の花散状態</u> 」	a 工区の「 <u>積み降し時の飛散状態</u> 」																				
27	図(参) 1.2中	乾燥密度 γ_d (g/cm ³)	乾燥密度 γ_d (g/cm ³)																				
29	表(参) 2.1中	突固め, $\gamma_b \text{ max}$ (g/cm ³)	突固め, $\gamma_d \text{ max}$ (g/cm ³)																				
33	図 3.2.3 中																						
36	表 3.2.2 中	透水係数 28日の欄 4.12×10^{-2} 5.17×10^{-2}	4.12×10^{-4} 5.17×10^{-6}																				
42	図 3.2.15 中	乾燥密度 ρ_d (kgf/cm ³)	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)																				
45	5 行目	……, 土質改良用添加材を粉粒体のままて <u>仕様</u> できるので……	……, 土質改良用添加材を粉粒体のままて <u>使用</u> できるので……																				
47	図 3.2.22 中	㊦ 22.5%+セ25%	㊦ 22.5%+セ2.5%																				
52	3 行目	よび <u>ピート</u> に対するを対象と……	よび <u>ピート</u> を対象と……																				

頁 数	行、図表番号	誤	正
57	2 行目	……，埋戻し部では <u>締固め</u> がやや困難	……，埋戻し部では <u>締固め</u> がやや困難
103	図 3.4.12 中	すべての「 <u>3 液</u> 」	すべての「 <u>ろ液</u> 」
111	表 3.5.3 中	<u>すべり減量</u>	<u>すりへり減量</u>
112	表3.5.4.標題	<u>一般試験結果一覧表</u>	<u>一般試験の結果</u>
	表3.5.5.標題	<u>修正 C B R 試験結果一覧表</u>	<u>適用性試験の結果</u>
115	表3.5.8.標題	<u>路面性状試験結果</u>	<u>路盤性状試験結果</u>
119	7 行目	……図 3.1.6 に示す。	図 3.5.6 に示す。
120	表3.5.14	<u>207月目</u>	<u>20ヶ月目</u>
122	1 ～ 4 行	……結果を比較すると，……	……結果を比較すると， <u>多少細粒化している傾向があるが，全体としてみた施工前後の変化は，下水汚泥スラグ，粒調碎石ともにはほとんどなかった。(図3.5.7)。</u>
124	下から 4 行目 2 行目	施工の標準マニュアル(案) ……，供給体制の <u>準備</u> を進めるとともに，	施工の標準をマニュアル(案) ……，供給体制の <u>整備</u> を進めるとともに，
145	表－Ⅲ－2 中	項目： <u>含水比</u>	項目： <u>含水量</u>
159	4 行目	<u>安定処</u> することによって	<u>安定処理</u> することによって
	5 行目	<u>沿道住</u> への影響が	<u>沿道住民</u> への影響が
	6 行目	る <u>修繕法</u> として，	る <u>修繕工法</u> として，
163	9 行目	水砕スラグは， <u>高分子素焼却灰</u>	水砕スラグは， <u>高分子系焼却灰</u>
	11行目	<u>塩基度 (CaO/SiO₂)</u>	<u>塩基度 (CaO/SiO₂)</u>
	14行目	セメント；……………	全部を 165 ページ，(3) 研究成果の前に挿入
	18行目	……………	
		……………	
		……………	
165	下から 6 行目	，表 <u>2.3.5</u> の試験結果	，表 <u>3.7.5</u> の試験結果
166		文 章	削 除
167	下から 2 行目	………， <u>圧縮強度</u>	………， <u>圧縮強度</u> ，
	下から 1 行目	を <u>マイクロピッカース硬度</u> ……	<u>マイクロピッカース硬度</u> ……
171	表 3.7.12 中	<u>ピッカース</u>	<u>ピッカース</u>
176	表 3.8.1 中	単位容積重量 <u>(kg/cm³)</u>	単位容積重量 <u>(kg/cm³)</u>
	図 3.8.4 中	縦軸 <u>ス+28</u> ，横軸 <u>CW-3</u>	削 除
178	図 3.8.5 中	ふるいの呼び寸法 <u>(mm)</u>	ふるいの呼び寸法 <u>(mm)</u>
185		6 条 <u>有害物含水量</u>	6 条 <u>有害物含有量</u>
194	解表－2(1)中 (3ヶ所)	単位 <u>kg/cm²</u>	単位 <u>kgf/cm²</u>
195	解表－2(2)中 (2ヶ所)	<u>(kg/cm²)</u>	<u>(kgf/cm²)</u>
		備考欄下段	例
		—	以上

土 木 研 究 所 資 料

下水汚泥の建設資材としての利用方法

——「建設事業への廃棄物利用技術の開発」——

下 水 道 部 汚 泥 研 究 室

室 長 大 嶋 吉 雄

主任研究員 櫻 井 克 信

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

地質化学部コンクリート研究室

室 長 小 林 茂 敏

主任研究員 河 野 広 隆

道 路 部 舗 装 研 究 室

室 長 安 崎 裕 典

研 究 員 吉 兼 秀 典

機 械 施 工 部 施 工 研 究 室

室 長 嶋 津 晃 臣

研 究 員 塚 田 幸 広

建 築 研 究 所

先端技術研究室 檜 野 紀 元

要 旨

下水汚泥の埋立処分が、難しくなっていることから、下水汚泥を建設資材として利用することに対する期待は大きい。

本報告は、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」で得られた成果のうち、下水汚泥の建設資材利用に関する部分をまとめたものであり、下水汚泥焼却灰、溶融スラグや軽量骨材を、盛土及び埋戻し材料、土質改良用添加材、路盤・舗装材及びコンクリート骨材として利用するにあたっての評価及びこれらの成果を基に作成した利用に関する各種基準（案）等について述べたものである。

キーワード：下水汚泥，建設資材，焼却灰，溶融スラグ，軽量骨材，盛土，埋戻し，土質改良，路盤材，コンクリート骨材

序

現在、我が国の下水汚泥発生量は固形物として約100万t／年と見積られている。さまざまな汚泥処理プロセスによって、減量化、安定化されて最終処分された下水汚泥最終処分量は昭和59年度において222万t／年であり、このうち76％は陸上埋立及び海面埋立によって処分され、16％が緑農地への肥料、土壌改良材及び建設資材として利用されている。

埋立適地の減少や自然環境保護に対する関心の高まりなどから、埋立処分はますます困難になり、下水汚泥の有効利用に対する期待は大きいものがある。有効利用のうち、建設資材利用は、現在3.1万tと、全下水汚泥処分量の約1％を占めるにすぎないが、下水道は現在整備途上であり、下水道建設において多量の建設資材を使用していることから、利用にあたっての基準等が明確になれば建設資材利用が増加すると考えられる。

一方掘削残土、コンクリート廃材、廃木材、石炭灰などの各種廃棄物も埋立処分が下水汚泥と同様に困窮している。そこで、建設省では、昭和56年度から60年度まで総合技術開発プロジェクトの一つとして「建設事業への廃棄物利用技術の開発」に取り組んだ。本プロジェクトは、上記の廃棄物を対象に室内試験、現場試験施工、追跡調査等を行い、廃棄物の処理技術や加工された資材の品質基準あるいは使用基準をとりまとめ最終成果としている。

本報告書は、これら成果のうち、下水汚泥の利用に関する研究について、まとめたものであり、これによって、下水汚泥の建設資材利用が促進されることを確信している。しかし、本研究は限られた期間及び材料において検討されたものであるため、今後一層の研究開発及び現場での蓄積も望まれる。

本研究開発は、汚泥研究室の他、土木研究所のコンクリート研究室、施工研究室、土質研究室、舗装研究室及び建築研究所、数多くの公共団体及び企業の協力のもとに実施されたものである。

さらに、本研究開発は、(財)国土開発技術研究センターに設置された建設事業への廃棄物利用技術の開発委員会（委員長 福岡正己東京理科大学教授）、およびその下部組織として設置された地盤・盛土分科会（分科会長 久野悟郎中央大学教授）、路盤・舗装分科会（分科会長 松野三郎 佐藤道路（株）技術研究所長）、土木構造物分科会（分科会長 柳田力（財）土木研究センター常務理事）、建築物分科会（分科会長 西忠雄 東京大学名誉教授）の御指導と御協力によって、実施されたものであり、ここに、関係各位に深く感謝致します。

本研究の汚泥研究室の担当者は、昭和56年度は、石川忠男、岡久宏史、昭和57、58年度は京才俊則、岡久宏史であり、昭和59、60年度は京才俊則、櫻井克信であった。

昭和62年2月

建設省土木研究所研究調整官(前下水道部長) 福井 経一

目 次

1 章 はじめに	1
1.1 下水汚泥の発生、処分の現状	1
1.2 下水道において用いられる主な資材の動向	3
1.3 下水汚泥の建設資材としての利用形態と品質	5
2 章 下水汚泥の建設資材としての利用方法	8
2.1 下水汚泥焼却灰の利用方法	9
2.2 下水汚泥スラグの利用方法	10
2.3 下水汚泥焼成骨材（人工軽量骨材）の利用方法	10
3 章 調査結果の詳細	11
3.1 下水汚泥焼却灰の盛土・埋戻しへの利用	11
3.2 下水汚泥焼却灰の深層混合処理への利用	31
3.3 改良土を用いた埋戻し技術 「改良土を用いた埋戻しの手引き」	53
3.4 高有機質土の適正処理技術	91
3.5 下水汚泥焼却灰、スラグの舗装への利用 「下水汚泥焼却灰等を利用した舗装の設計・施工マニュアル（案）」	108
3.6 下水汚泥焼却灰の路上再生路盤工法への利用	159
3.7 下水汚泥スラグの歩道ブロック等への利用	164
3.8 下水汚泥スラグ骨材のコンクリート骨材への利用 「汚泥スラグ骨材を用いたコンクリートの設計施工指針（案）」	173
3.9 汚泥焼成骨材（人工軽量骨材）の軽量コンクリートへの利用 「軽量コンクリートに用いる汚泥焼成骨材（人工軽量骨材）の品質基準（案）」	199
4 章 今後の課題	229
資 料（発表論文名一覧）	231

1章 はじめに

1.1 下水汚泥の発生、処分の現状

下水汚泥とは、家庭生活や事業活動によって発生した汚泥を下水処理場で浄化する際に、汚水から分離される固形物である。これは、流入下水そのものに含まれていた固形物、及び処理によって増殖した生物等からなっており、図1.1.1に示すように汚泥処理工程を経て最終処分されている。処理段階によって下水汚泥の形態は、生汚泥（濃縮汚泥）、消化汚泥、脱水汚泥（脱水ケーキ）、下水汚泥焼却灰、コンポスト汚泥、汚泥スラグ等に分けられる。

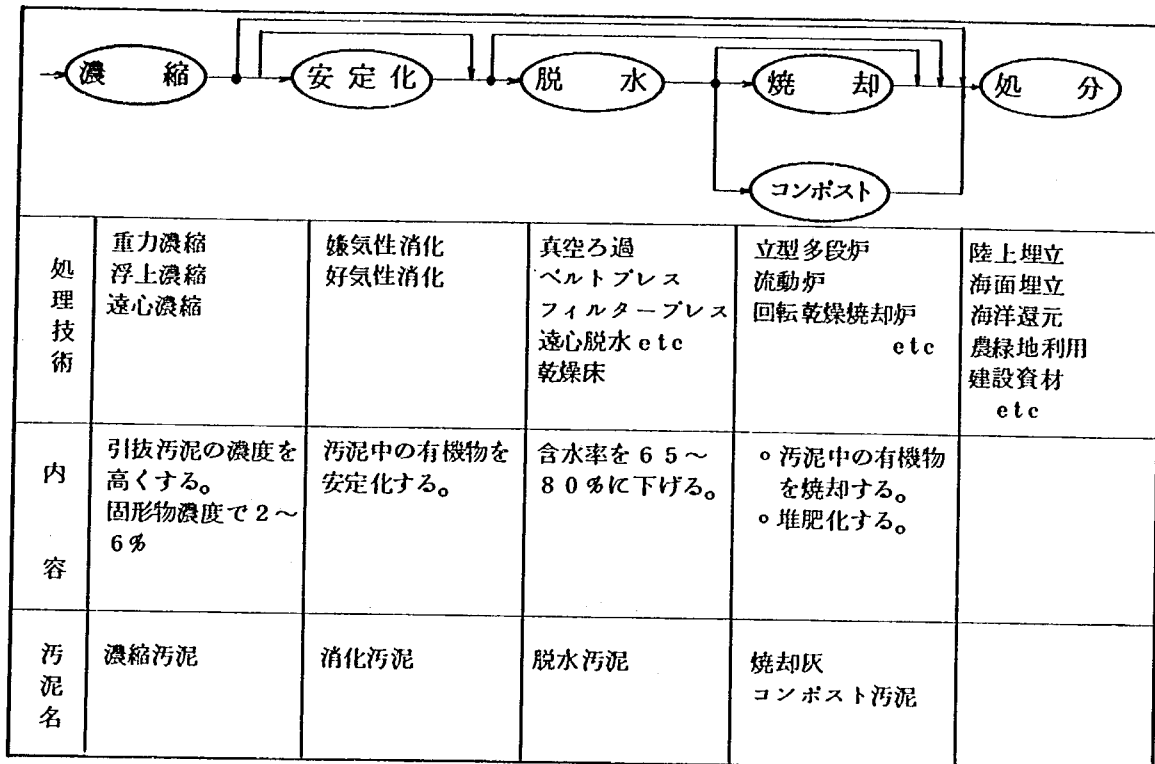


図1.1.1 汚泥処理プロセスの概要

わが国の下水道整備水準は、昭和60年度末で4,333万人の下水を処理し、総人口に対する普及率は約36%である。この結果下水汚泥として発生する固形物は、約100万tにのぼっている。この発生した汚泥は、様々な処理を経て表1.1.1に示すように処分されている。

表1.1.1 下水汚泥の処分状況 (59.4.1～60.3.31)¹⁾

(単位：千m³/年)

処理性状 \ 処分形態	陸上埋立	海面埋立	有効利用	そ の 他	計(%)
脱 水 ケ ー キ	970	430	177	10	1,587 (71)
焼 却 灰	142	140	34	0	316 (14)
乾 燥 汚 泥	8	0	139	0	147 (7)
消化・濃縮汚泥	1	0	0	178	179 (8)
計 (%)	1,121 (50)	570 (26)	350 (16)	188 (8)	2,229 (100)

注) 乾燥汚泥には堆肥化汚泥を含む。

汚泥形態別に見ると、脱水ケーキが最終処分量の7割を占めている。しかし脱水ケーキを焼却するとその量（重量及び容積）は6分の1～10分の1に減少することから、焼却灰として処分される下水汚泥は脱水ケーキ換算でみると、発生汚泥の約半分である。処分方法では、陸上及び海面埋め立てが76％と処分方法の中心となっている。有効利用は全処分量の16％であり、さらに有効利用量に占める建設資材の割合は小さく9％である（表1.1.2）。

表1.1.2 下水汚泥の有効利用実施状況²⁾

（昭和59年4月1日～昭和60年3月31日）

（単位：千m³）

区 分		処理性状	脱 水 ケ ー キ	焼却灰	乾 燥 汚 泥	コンポ ス ト	消 化 汚 泥	計
緑利 農 地用	自治体で実施		170	0	5	87	0	262
	肥料会社等引渡し		7	3	1	46	0	57
	小 計		177	3	6	133	0	319
建設資材等利用			0	31	0	0	0	31
合 計			177	34	6	133	0	350

下水道の普及率の向上、汚濁負荷の増大や処理水質の向上などによって、今後も下水汚泥発生量は増大し続けると考えられる。下水道整備の将来目標は、21世紀初頭における下水道普及率を約90％としていることから、その時点で下水汚泥の発生量も現状の3倍以上になると考えられる。

一方、埋立適地の減少や自然環境保護に対する関心の高まりなどから、埋立処分はますます困難になると考えられる。このような背景から下水汚泥を有効利用することへの期待は大きい。

下水汚泥の有効利用分野としては、①下水汚泥に含まれる有機物に着目した緑地・農地への土壤改良材及び肥料としての利用と、②下水汚泥に含まれる無機物に着目した建設資材への利用とに大きく分類される（図1.1.2）。

前者の汚泥形態は、脱水ケーキ、コンポストが中心となっている。また、後者としては、現在焼却灰がほとんどであり、わずかであるが人工軽量骨材が利用されている。

下水道事業においても多くの建設資材を消費していることから、この研究の成果を受けて、建設資材利用量が増加することが期待される。

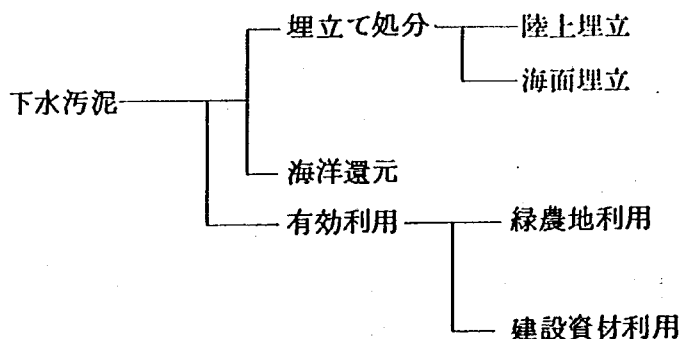


図1.1.2 下水汚泥最終処分方法

1.2 下水道事業において用いられている主な資材の動向

下水道工事においては、表1.2.1に示す様々な資材が用いられている。さらに、このうちの、管材及びコンクリートの使用量（発注ベース）の経年変化を図1.2.1¹⁾及び1.2.2¹⁾に示す。

表1.2.1 下水道事業に用いられる主な資材

	主 な 資 材
二 次 製 品	コンクリート管
	ボックスカルバート（コンクリート製）
	マンホール側塊（ " ）
	雨水ます，汚水ます（ " ）
	セグメント（ " ，鋼製）
	パイル铸铁管，鋼管（ " ， " ）
材 料	コンクリート（捨てコン用，無筋用，鉄筋用）
	鉄（鉄筋，鋼矢板，鉄骨）
	土質改良用添加材（水ガラス，セメント，石灰）
	埋戻土（山砂）

下水道はまだまだ整備途上であり、今後もこれら資材も安定して消費されることが考えられる。

以下、下水汚泥をスラグ化してコンクリート骨材として利用する場合を想定し、需給状況を試算する。コンクリート製品の管材の中から一番使用量の多いヒューム管を選び、ヒューム管の使用延長から骨材量を換算する。ここでは、ヒューム管に使用されている粗骨材の原単位を427.7kg/t、細骨材の原単位を405.8kg/t（全国ヒューム管協会）とし、各管径別のヒューム管の1m当りの重さは、コンクリート製品便覧（ヒューム管）より、便宜的に、管径150～2,000mm未満はB型管、2,000mm～3,000mmまではC型管の重量を参考とした。

これらの数値を使って計算すると、昭和51～56年度のヒューム管の使用総重量及び粗骨材、細骨材の使用量は、表1.2.2のようになる。昭和56年度でみると、粗骨材は約29万t、細骨材は約27万t使用されていることになる。

従って、推進管、セグメント、ボックスカルバート等を含めると、下水道工事に使用されるコンクリート製品中の管材だけで、少なくとも粗骨材、細骨材は、それぞれ30万t以上使用されたと考えてよい（表1.2.2）。昭和56年度以降も、これら管材の消費量は大きく変化していないことから同様な傾向が続いていると考えられる。

さらに、コンクリートとして消費されている量は、846万t（単位体積重量2.4t/m³として換算）であり、ヒューム管総量の10倍以上となっているので、骨材も10倍以上と考えられる。

一方、昭和59年度の汚泥発生量は、固形物量で約100万tである。（昭和59年度の下水道普及率は、34

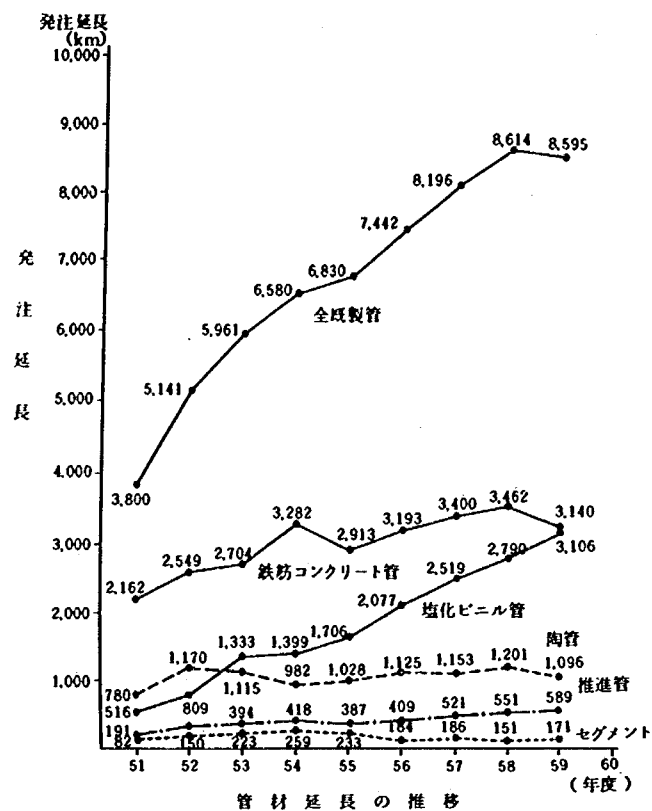


図1.2.1 管材延長の推移

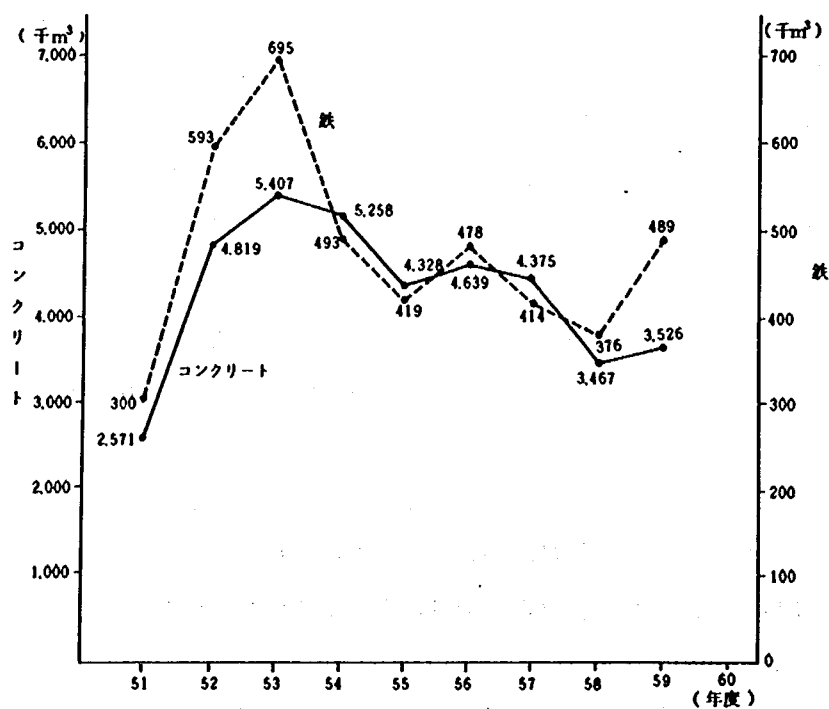


図1.2.2 コンクリート、鉄の発注量の推移

表1.2.2 ヒューム管総重量及び骨材量²⁾

年度	総重量 (t)	骨 材 量 (t)	
		粗 骨 材	細 骨 材
51	496,000	212,000	201,000
52	573,000	245,000	233,000
53	641,000	274,000	260,000
54	707,000	302,000	287,000
55	674,000	288,000	274,000
56	669,000	286,000	271,000

%) この汚泥は、その後消化、脱水、焼却等が行われ、有機成分が減少する反面、脱水調質材として石灰、塩鉄を用いるとその分増加することとなる。このような汚泥量の増減分を考慮して、ここでは、熔融スラグ化することによる発生汚泥固形物量の重量減少率を1/2であると考え、100万tの発生汚泥固形物から約50万tの汚泥スラグが生成されることになる。

従って、ヒューム管及びレディミックスドコンクリートとしての骨材使用量に対して、生成汚泥スラグは非常に少ない。この他、下水汚泥の利用方法には様々のものであるので下水汚泥資材は量的に需要に追いつかないことは生じて、供給過剰ということは考えられない。

1.3 下水汚泥の建設資材としての利用形態と品質

建設資材利用として本研究で検討した下水汚泥焼却灰、下水汚泥スラグ及び人工軽量骨材の加工技術及び特性について、述べる。図1.3.1に、脱水ケーキ以降の処理プロセス及び資材との関係を示す。

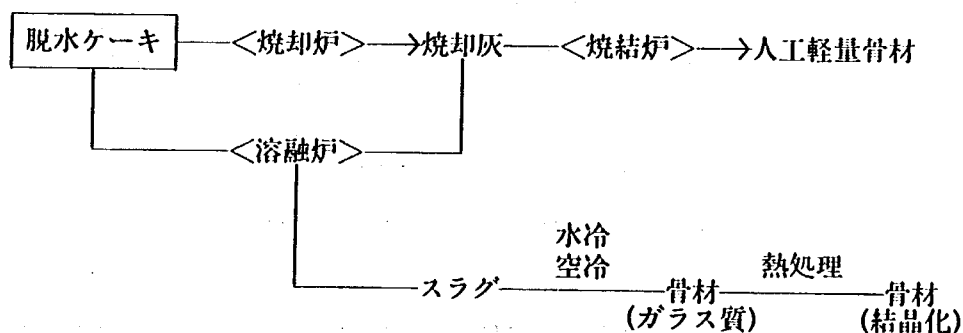


図1.3.1 下水汚泥加工プロセス

i) 下水汚泥焼却灰

下水汚泥焼却灰は、下水汚泥を焼却処理した残滓であり、主成分はケイ素 (Si)、カルシウム (Ca)、鉄 (Fe)、アルミニウム (Al) の4元素の酸化物で、焼却灰中の70～80%を占めている。

下水汚泥焼却灰の組成は①下水の水質、②使用する汚泥調質材の種類や量によって変化する。特に、土質改良用添加材として使用する場合に重要となる石灰成分は、脱水工程で用いる調質材によって左

右される。調質材とは、脱水機に汚泥を投入する前に汚泥の脱水性を高めるために用いる薬品で無機系と有機系とに分けられる。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ている。

調質材として、塩化第二鉄と消石灰を併用した脱水ケーキの焼却灰（以下、石灰系焼却灰という）の石灰成分（CaO として）は重量比で15～50%となっている。これに対して有機高分子系凝集剤をもちいた場合の焼却灰（以下、高分子系焼却灰という）では、これが1～8%である。表1.3.1にこれら下水汚泥焼却灰の成分例を示す。焼却灰の真比重は2.5～3.1であるが、みかけ比重は1前後であり、かつ粒度はシルトから細砂に分布するので、加湿しないで運搬や使用するときには飛散に対する配慮が必要である。

表1.3.1 下水汚泥焼却灰成分測定例

		(単位 %)			
		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
石 灰 系 (12データ)	平均値	33	22	9	13
	変 動	15	9	5	7
		51	33	17	19
高 分 子 系 (9データ)	平均値	5	44	16	13
	変 動	1	38	12	7
		8	50	19	20

ii) 下水汚泥スラグ

下水汚泥を1,300～1,500℃に熱すると、汚泥中の有機物は、熱分解・燃焼し残りの無機物は溶融する。この融液を冷却・凝固させたものが、汚泥スラグである。真比重は、焼却灰と同等である。以下に述べるように、その冷却方法又は結晶化工程の有無によって、その形状や強度は異なるものが製造される。ここで、結晶とはスラグ中の化合物が規則正しく配列していることであり、不規則なままであるものは非品質（ガラス質）と呼ばれる。

溶融は、焼却より燃焼温度が高いため、処理コストは焼却より一般的に高くなると考えられるが、炉の小型化や熱損失の抑制、廃熱による汚泥の前乾燥などの技術開発により、その差は小さくなっている。

- 水砕汚泥スラグ……溶融炉から排出される融液に水を噴射したり、融液を水中に落下させたりして急速に冷却し製造するものである。急速に冷却されるので細粒状かつ非品質な汚泥スラグとなり細骨材として利用される。
- 空冷汚泥スラグ……溶融炉から融液を、空气中に放置することによって冷却製造するもので、除々に冷却されるため塊状になる。除々とはいえ空气中では結晶化に必要な冷却速度（3℃/minより遅いこと）³⁾より、急速に冷却してしまうため結晶化の度合の低い非品質のスラグとなる。この塊状のスラグは必要に応じ粒度調整工程を経て、各種粗骨材として利用される。

c) 結晶汚泥スラグ…スラグの表面性状や強度の改善を図るため結晶化を進めたスラグを結晶汚泥スラグという。結晶化方法には、大きく分けて①結晶化至適の温度に一定時間保持する方法（例えば1,100～1,150℃, 30分間）⁴⁾ と②冷却速度を制御し、それによって結晶化に必要な温度と時間を確保する方法⁵⁾ がある。

iii) 人工軽量骨材

高分子系焼却灰の造粒物を1,100℃～1,150℃の高温にさらすと、その表面は半溶融となり、内部では気泡が発生して造粒物全体が膨張する。これを空气中で冷却すると人工軽量骨材となる。

この製造方法は成分調整のために添加材の種類や量、焼成方法の違いによって数々の方法が考えられるが、本研究では、造粒するときの粘結力を補うために有機物（アルコール醗酵廃液）を若干加え、多段噴流炉を用いて焼成するものを用いた。この方法では無機物の添加がなく、灰を100%原料とするので灰と製品が同量である。

(参考文献)

- 1) 建設省都市局下水道部監修：「日本の下水道－昭和61年－」，日本下水道協会
- 2) 建設省・国土開発技術研究センター：建設事業への廃棄物の利用技術の開発に関する調査報告書（土木構造物分科会），昭和58年3月
- 3) 櫻井克信：成分組成の異なる溶融スラグの骨材試験結果，再生と利用，下水汚泥資源利用協議会，Vol.8, No.30, 1985
- 4) 市川治徳ら：下水汚泥焼却灰の溶融骨材化，第35回年次学術講演会講演概要集，1980
- 5) 上田誠一郎ら：下水汚泥溶融スラグの結晶化についての基礎実験，第19回下水道研究発表会講演集，昭57年

2章 下水汚泥の建設資材としての利用方法

本研究で検討対象とした下水汚泥は、①下水汚泥焼却灰、②下水汚泥スラグ、③人工軽量骨材である。それらの利用用途ごとの評価を、表2.1.1に示す。なお、本表は、限られた期間及び材料において検討されたものであり、今後の技術開発により見直されるべきものもある。

下水汚泥を使用する場合、そのなかに含まれる重金属の挙動について懸念されることがある。そこで、本研究では、浸出水の水質について調査を行っており、その結果水質は「金属等を含む産業廃棄物に係わる判定基準を定める総理府令」の基準値以下のものとなっている。

表2.1.1 下水汚泥の利用法

		地 盤 ・ 盛 土			路 盤 ・ 舗 装					土木構造物	建 築	
		盛 土	土 質 改 良 材	用 添 加 材	埋 戻 し	粒 状 材	安 定 処 理	フ ィ ラ ー	混 合 物 利 用	そ の 他	骨 コン ク リ ー ト 材	コン ク リ ー ト
下水汚泥焼却灰	石 灰 系	○	△☆1	△☆2	△☆3			△☆1			△☆5	
	高 分 子 系	×	×	×							△☆5	
下水汚泥スラグ	空 冷				△＊1	(○)		×			△＊3	
	水 砕				(△＊2)	(△＊2)		×			△＊3	
	結晶粗骨材										○	
	結晶細骨材										○	
	結晶成形材									○		
人工軽量骨材												○
摘 要		① 下水汚泥焼却灰の地盤・盛土への適用性に関する研究 ② 石灰系・下水汚泥焼却灰の深層混合処理への利用技術の開発			下水汚泥焼却灰等を利用した舗装の設計・施工マニュアル(案)					下水汚泥スラグ骨材を用いたコンクリートの設計施工指針(案)		軽量コンクリートに用いる汚泥焼成骨材(人工軽量骨材)の品質基準

凡例 ○……当該項目に利用される材料と同等に使用できるもの
 △……条件付で使用できるもの
 ×……使用できない
 ()……室内実験による評価であり、今後施工実験必要
 □……本総プロでハード面の検討対象としたもの

☆1 比較的低強度への改良に利用可
 ☆2 強度発見が大きすぎる点が難
 ☆3 下層路盤、歩道、自転車道路盤への利用
 ☆4 アスファルト量の増加
 ☆5 細骨材としての混合使用、高強度を要しない二次製品等への利用
 *1 下層路盤、軽交通道路路盤への利用
 *2 下層路盤への利用
 *3 低強度コンクリートへの利用

2.1 下水汚泥焼却灰の有効利用方法

下水汚泥焼却灰については、①盛土材、②土質改良用添加材、③埋戻し材、④路盤材、⑤アスファルトファイラーとしての利用について検討した。

1) 地盤・盛土材料

① 盛土材

石灰系焼却灰は、盛土築造直後に十分な強度が得られ、それ以降も数週間にわたり、強度が増加していくので、強度の面からみると、盛土材として十分利用できる。ただし、石灰系焼却灰でも特に粒度が細かいものについては、施工含水比の調整に注意しないと、転圧がしにくく、また粉じん等の問題が生じやすい。高分子系焼却灰は、全般的に粒子が微細で水で流されたり、風で飛ばされやすく、しかも自硬性もほとんどないことから、強度及び施工の両面から、盛土材としての利用は好ましくない(3.1下水汚泥焼却灰の盛土・埋戻しへの利用参照)。

② 土質改良用添加材

石灰系焼却灰は、土との優れた反応性を有しているため、単独あるいは他の成分と組み合わせることで用いることにより、土質改良用添加材として十分に使用することが可能である。石灰系焼却灰を単独で用いる場合は、軟弱粘性土等に混合することを前提とするが、一般に改良後の強度はそれほど高くないので、使用は低強度改良を目的としたものに限られる。本研究では、粘性土、ビート質地盤の深層混合処理に適用して、期待した成果をあげている(3.2下水汚泥焼却灰の深層混合処理への利用参照)。

セメントや石灰等の他の成分と組み合わせる場合は、その配合によっては一般の土質改良用添加材と比べて遜色のない土質改良効果が得られるので、高強度改良を目的とした使い方が可能である。本研究の成果では、下水汚泥焼却灰と生石灰及び排脱石膏を、CaO成分が60%程度、SO₃成分が12~13%程度となるように配合するとへどろ等の処理にあたって、特殊セメントなみの土質改良効果が期待できる(3.4高有機質土の適性処理技術参照)。

③ 埋戻し材

石灰系焼却灰を埋戻し材として使用する場合は、上記①の盛土材の場合と同様、埋戻し後に大きな強度が発現する。しかし、埋戻し材に要求される再掘削の容易さという観点からすると、単体で使用するあまりにも強度が高くなりすぎるおそれもあるので、埋戻し材として単体で使用するのは好ましくない。むしろ、土質改良用添加材として土と混ぜて使用することが望ましい。高分子系焼却灰は、盛土材の場合と同様の理由で、埋戻し材としての使用は好ましくない。

2) 舗装・路盤材料

① 路盤材

石灰系焼却灰は、石灰の反応により強度が高くなるので、単体で下層路盤材、自転車道、歩道の路盤材として使用できる(3.5下水汚泥焼却灰・スラグの舗装への利用参照)。

② アスファルトファイラー

石灰系焼却灰を標準的なアスファルトコンクリートの配合比で使用すれば、アスファルト舗装

要綱に定める基準値に適合するアスファルト混合物ができる。ただし、このとき最適アスファルト量（OAC）は若干増える傾向にある。すなわち室内試験によると、フィラーとして石粉（石灰岩、火成岩などの粉末）を用いた場合のOACは5.4%，下水汚泥焼却灰の場合は6.1%という結果が得られている。

2.2 下水汚泥スラグの有効利用方法

下水汚泥スラグについては、①路盤材、②コンクリート骨材、③成形板材等への利用について検討した。

① 路盤材

空冷汚泥スラグは天然の骨材と同程度の強度を有しており、所要粒度への調整も可能である。試験施工の結果によると、空冷汚泥スラグは、施工性及び締固め後の安定性が碎石に比べて、幾分劣るという結果が得られている。そこで、単体で使用する場合は下層路盤や自転車道、歩道、構内道路などの軽交通道路の路盤への利用に限られる。なお、空冷汚泥スラグのこれらの特性は、空冷汚泥スラグがガラス質のため、その表面がなめらかであることが原因しており、結晶化によって改善される（3.5下水汚泥焼却灰・スラグの舗装への利用参照）。

② コンクリート骨材

溶融したスラグを空冷または、水砕処理した下水汚泥スラグ骨材はガラス質であるため、これを用いたコンクリートは普通骨材を用いたものと比較して、強度・耐久性ともに劣る傾向にある。このため、下水汚泥スラグ骨材は、比較的低強度のコンクリートへ利用することが推奨できる。なお、下水汚泥スラグ骨材を熱処理し結晶化することによって、骨材の特性が大幅に改善されるので、これを用いたコンクリートの強度や耐久性は、普通骨材を用いたものに比較してもほとんど遜色のないものになる。従って、熱処理した下水汚泥スラグ骨材は鉄筋コンクリートとしても用いることができる（3.8下水汚泥スラグ骨材のコンクリート骨材への利用参照）。

③ 成形板材等

溶融状態のスラグを任意の形状のモールドに受け結晶化させると、高強度のいろいろな形をした板材等が製造できる。本研究では、板材（150mm×150mm×10mm）、立方体（40mm×40mm×40mm）やレモン形（長径35mm×短径20mm）の成形結晶材を製造し、さらに成形板材とコンクリートを組み合わせた歩道ブロックを試作した。この歩道ブロックは、色彩及び強度の面からも十分利用できることが確認された。今後、タイルなど付加価値の高いものへの利用が考えられる（3.7下水汚泥スラグの歩道ブロック等への利用参照）。

2.3 人工軽量骨材の有効利用方法

下水汚泥焼却灰を造粒した後、1100℃～1150℃で熱処理することにより、物性的には概ね従来のJIS A5002（構造用軽量コンクリート骨材）に適合する人工軽量骨材が製造でき、通常の軽量コンクリート造建築物の軽量骨材として利用できる（3.9下水汚泥焼成骨材（人工軽量骨材）の軽量コンクリートへの利用参照）。

3 章 調査結果の詳細

3.1 下水汚泥焼却灰の盛土・埋戻しへの利用

(1) 研究目的

本研究は、下水汚泥焼却灰を対象に、盛土材及び埋戻し材、土質改良用添加材への利用可能性を検討することを目的に実施したものである。

下水汚泥焼却灰は、脱水ケーキを約800℃前後で焼却処理した残滓であり、ケイ素（Si）、カルシウム（Ca）、鉄（Fe）、アルミニウム（Al）の酸化物などからなる。下水汚泥焼却灰は脱水時に用いる調質材により、石灰系と高分子系に大きく分類される。前者は調質材として主に消石灰、塩化第二鉄を、後者は高分子凝集剤を用いたものである。

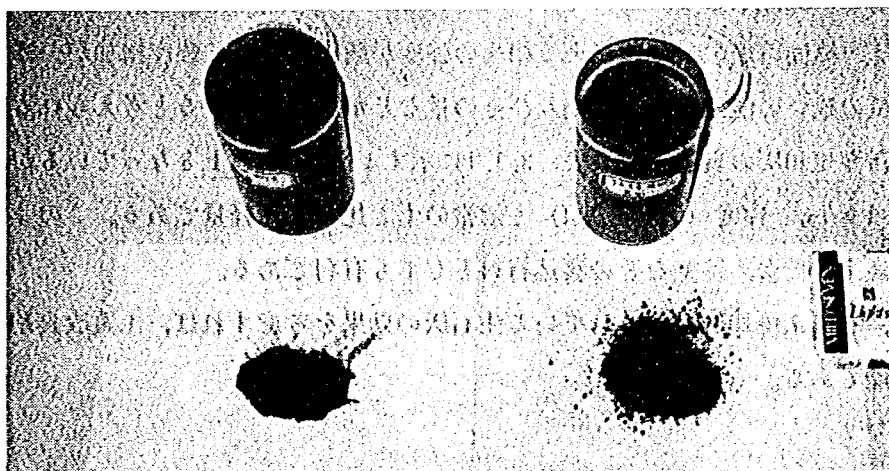
(2) 研究経緯

本研究は、昭和57年度から昭和60年度までの4ヶ年にわたって下記のとおり実施した。

- 1) 昭和57年度において、下水汚泥焼却灰を土工材料として利用する際に必要となる基本的性質（物理的、化学的、力学的な性質）を既存資料より整理し、取りまとめた。石灰系焼却灰は、生石灰の水硬作用による強度効果が期待できることから、盛土や埋戻し材、土質改良用添加材としての利用可能性が高いことが明らかとなった。

また、下水汚泥焼却灰を、使用したときの安全性を確認するため、溶出試験を合わせて行った。その結果、総ての項目において「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」（総令5号）で定める判定基準を下回ることが確められた。

- 2) 昭和58～60年度においては、上記の結果を受け、下水汚泥焼却灰を盛土材及び埋戻し材、土質改良用添加材として用いた試験施工及びその追跡調査を3箇所で行い、その強度、施工性及び安全性を確認した。



焼 却 灰

図3.1.1 下水汚泥焼却灰

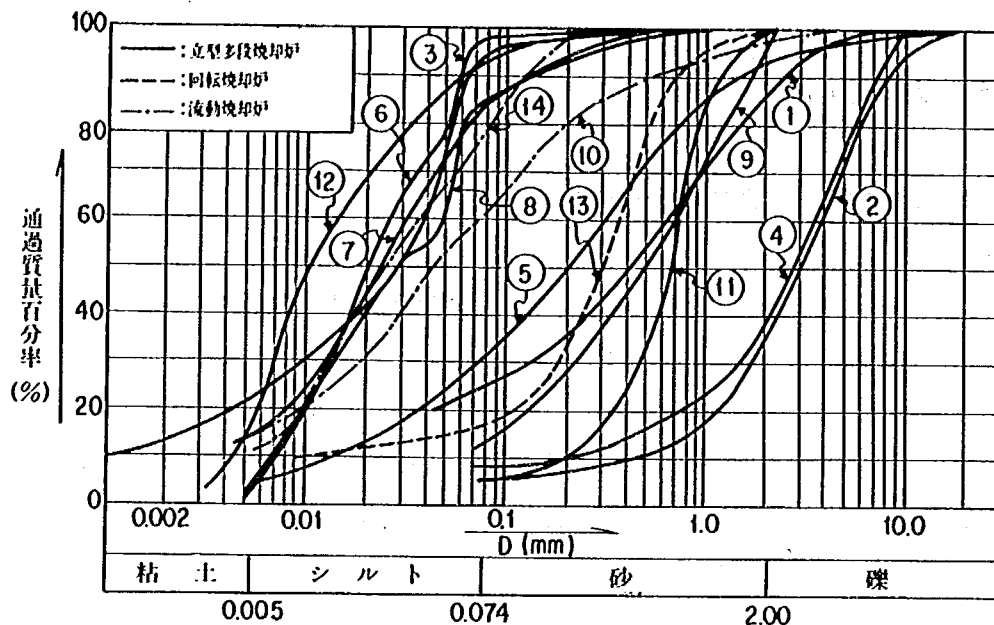


図3.1.2 下水污泥焼却灰の粒度測定例

(3) 研究成果

1) 下水污泥焼却灰の基本的性質

石灰系焼却灰12種類、高分子系焼却灰4種類、計16種類の下水污泥焼却灰の物理的、化学的、力学的性能を既存資料より整理した。

焼却灰の化学成分及び物理的性状を表-3.1.1に示す。脱水時の調質材の影響を受けて、石灰系焼却灰では石灰の含有量が20~40%となっているのに対して、高分子系では数%となっている。

下水污泥焼却灰の粒度の測定例を図-3.1.2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だものである。粒度組成がばらつく原因としては、焼却方式の違い及び焼却以後の加水又は保存による団粒化が考えられる。

強度面では、石灰が多量に含まれる石灰系焼却灰においては、石灰の作用により締固め後相当の強度増加が期待できる。図-3.1.3は一軸圧縮強さ測定例を示したものである。石灰系焼却灰であれば、締固め後の自硬性による相当の強度が期待できる。強度増加が一樣でないのは、石灰の含有量の違いの他、加水の時期及びその量などが影響していると考えられる。

下水污泥焼却灰の真比重は、表-3.1.1に示すように2.5以上となっているが、締固め後の乾燥密度は 1 g/cm^3 程度 (図-3.1.4) と通常の土と比べると軽量である。このことから、軟弱地盤土の高盛土や橋台、擁壁などの裏込材料としても有利である。

また、石灰系焼却灰に含まれている生石灰の効果を考慮すれば、土質改良用添加材としての利用も可能である。

表3.1.1 下水污泥焼却灰の化学的成分及び物理的性状一覧表

No.	種 類	pH 試 験	強熱減量 Li (%)	酸化 第二鉄分 Fe ₂ O ₃	酸化 第一鉄分 FeO	酸化 けい素 SiO ₂	酸化 アルミ ニウム Al ₂ O ₃	生石灰 CaO	酸化 マグネ シウム MgO	マンガン MnO	酸化 チタン TiO ₂	りん酸 P ₂ O ₅	含水比 We(%)	比 重 Gu	粒 度 分 析						三角座 標によ る分類
															鉄分	砂分	シルト 分	粘土分	P74	Uc	
①	石灰系												—	3.050	14	74	(10)	(2)	12.0	—	砂
②	"												(加水)	2.764	66	29.5	(4.5)	(0)	4.5	10.2	砂
③	"												—	2.816	0	2.5	75.5	22	97.5	41.0	シルト質 粘土 ローム
④	"			12.2		31.9	9.3	32.9	0.1			4.9	(水30% 添加)	3.000	63	29	(7)	(1)	8.0	15.6	砂
⑤	"		0.9	15.50		30.06	11.06	29.96	0.45				—	2.958	7	63	(2.5)	(5)	32.0	—	砂質 ローム
⑥	"		9.27		17.48	24.05	9.64	24.98		0.09	0	6.00	—	2.756	0	7	80.5	12.5	93.4	2.1	シルト質 ローム
⑦	"		9.72		12.56	27.88	5.12	28.65		0.33	0	2.9	—	2.860	0	16.5	80.5	3	83.5	4.7	シルト質 ローム
⑧	"												—	2.882	0	16.5	81.5	2	83.8	6.7	シルト質 ローム
⑨	"			9.6		30.2	17.5	30.0	2.6				—	2.970	5	71.0	(18)	(6)	25.0	—	砂質 ローム
⑩	"	12.46	6.9		11.44	32.94	11.23	15.19	8.94	0.14	0.64	4.34	0.3	3.725	1	40	46	13	57.0	—	ローム
⑪	"	11.19	2.3		11.00	14.31	8.89	29.39	5.54	0.15	0.66	5.48	37.1	3.219	0	96	(5)	(0)	4.0	3.3	砂
⑫	"	10.59	6.4		8.88	24.74	10.01	27.86	5.67	0.40	0.58	6.16	0.4	3.080	0	7.5	79.5	13	93.0	3.3	シルト質 ローム
⑬	高分子 系	7.61	5.6										0.4	2.517	0	83	(9)	(8)	12.0	37.0	砂
⑭	"	8.71	1.2		6.79	50.24	12.12	4.48	12.96	0.05	0.65	5.81	6.7	2.739	0	24	65	11	76.0	11.2	シルト質 ローム
⑮	"		1.10	15.54		41.07	18.83	4.52	2.13		0.68	12.48									
⑯	"		2.67	11.75	2.09	39.55	16.41	8.36	2.46			10.10									

() : 推定値 P74 : 74μフルイ通過率 Uc = D₆₀/D₁₀

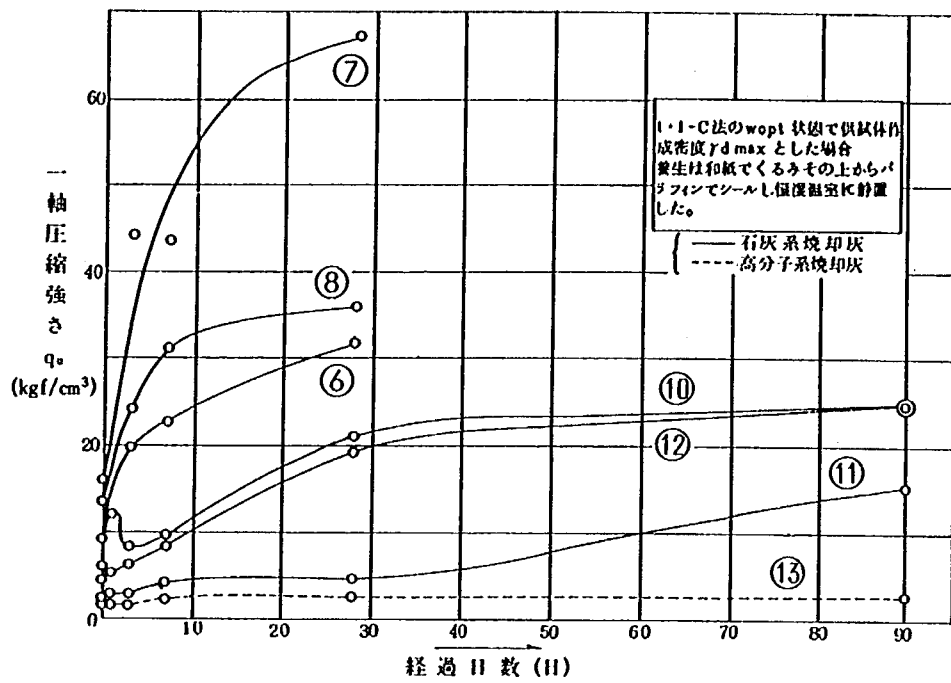


図3.1.3 下水汚泥焼却灰の一軸圧縮強さ

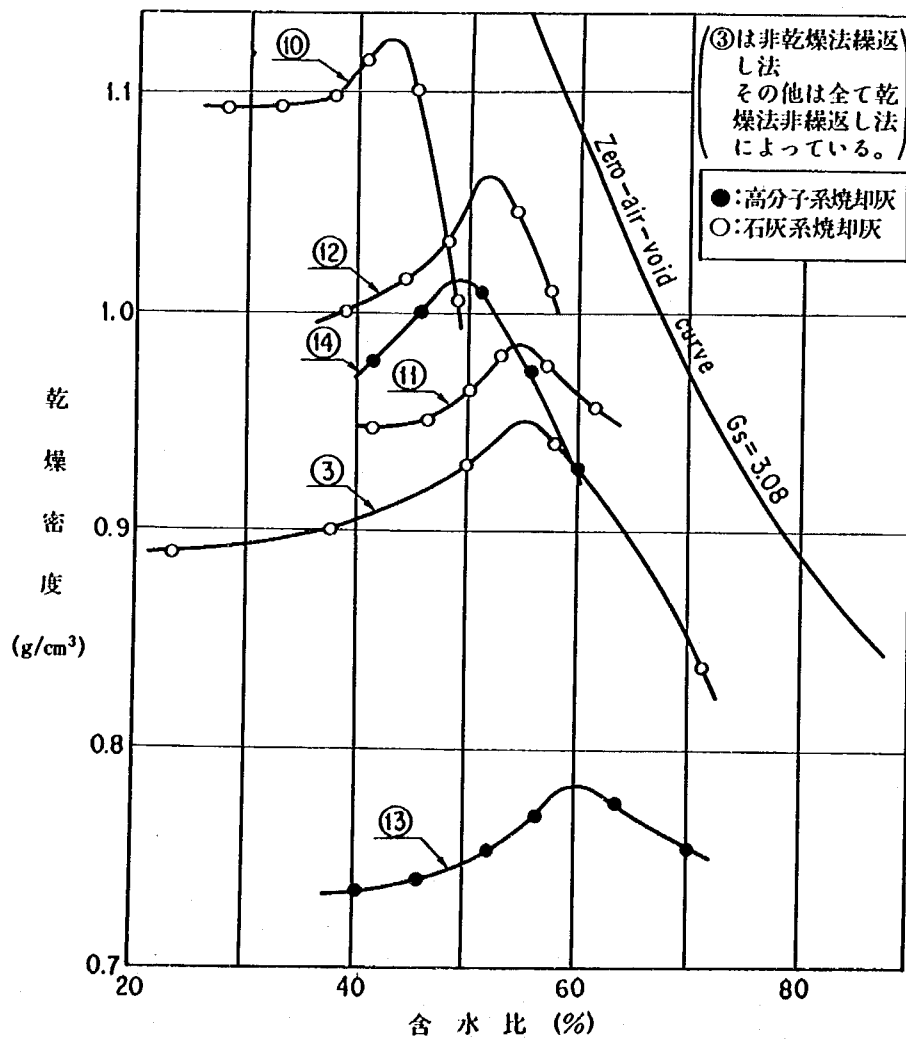


図3.1.4 焼却灰の締固め曲線図

2) 試験施工

a. 試験施工の内容

本研究で実施した盛土及び埋戻しに関する施工試験の概要を表3.1.2に示す。試験施工の材料として、盛土では石灰系焼却灰を、埋戻し（Ⅰ）では石灰系焼却灰、火山灰、山砂を、埋戻し（Ⅱ）では、表3.1.3に示す材料を用いた。なお、土質改良添加材の配合比は「3.4高有機質土の適正処理技術」によって明らかにされた。高有機質土にも効果のある改良添加材の組成（とくに生石灰、石膏の比率）になるように決定した。

表3.1.2 試験施工の概要

種類(施工主体)	試験施工の規模、形状	施工材料、施工場所、施工時期
盛 土 (札幌市)		盛 土 材：石灰系焼却灰 施工場所：豊平川処理場 施工時期：昭和58年11月 撤去 昭和60年10月 転圧方法：タイヤローラー6回以上 まき出し厚 30cm程度
埋戻し(Ⅰ) (札幌市)		埋戻し材：石灰系焼却灰、火山灰 対 照：山砂 施工場所：豊平川処理場 施工時期：昭和58年11月 転圧方法：ランマー転圧 仕 上 り 厚 30cm
埋戻し(Ⅱ) (横浜市)		埋戻し材：石灰系及び高分子系焼却灰 下水汚泥焼却灰を添加した改良土 対 照：山砂、石灰またはセメントを添加した改良土 (詳細は表1.6.2) 施工場所：北部第二処理場 施工時期：昭和59年9月 転圧方法：ランマー転圧 5回 仕 上 り 厚 30cm (敷均し厚 40cm)

表3.1.3 埋戻し(Ⅱ)に用いた材料一覧

No	工区名	名 称	埋 戻 し 材 料	備 考
1	a工区	下水汚泥 焼却灰工区	北二灰 (石灰系)	横浜市北部第二下水処理場
2	b工区	"	金沢灰 (高分子系)	横浜市金沢区焼却施設
3	c工区	"	上部50cm：北二灰，下部50cm：金沢灰	
4	d工区	"	北二灰：金沢灰=50%：50%	(プラント混合)
5	e工区	山 砂 工 区	良質土 (山砂)	横浜市金沢区釜利谷
※ 1				
6	f工区	改良土工区	掘削残土+土質改良用添加材 生石灰：10kgf/m ³ 特殊セメント：50kgf/m ³	不良質残土：横浜市内発生 特殊セメント
※ 2				
7	g工区	改良土工区	掘削残土(1 m ³) + 北二灰(0.2m ³ /m ³) + 補助改良材(30kgf/m ³) 生石灰，北二灰，廃脱石膏 4.5 : 2.5 : 3	廃脱石膏：火力発電所
※ 2				
8	h工区	改良土工区	掘削残土(1 m ³) + 金沢灰(0.3m ³ /m ³) + 補助改良材(50kgf/m ³) 生石灰，金沢灰，廃脱石膏 5 : 2 : 3	
9	i工区	発生土工区	普通土砂 (現地発生土)	

※ 1 横浜市内で一般に使用されている改良土

※ 2 配合割合の決定は，建設省土木研究所でおこなった。

$\text{CaO} : \left(\frac{\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}} \right) \text{等} : \text{SO}_3 = 59 : 28 : 13$

盛土，埋戻し(Ⅱ)においては，重金属の溶出の有無を調査するため，浸透水を採取するための集水ますを設けた。さらに，埋戻し(Ⅱ)では，埋戻し部の沈下量を測定するため，床付け面，管天場より10cm上，埋戻し土部の中間にスクリー式の沈下計を設置した。

盛土は，施工後2年経過した時点で，PS地震探査を実施したのち，ブルドーザーで撤去した。

施工時の転圧方法等を表3.1.2中に示す。詳細については，本節の参考資料に述べた。

b. 試験施工材料

盛土，埋戻し(Ⅰ)に用いた石灰系焼却灰及び埋戻し(Ⅱ)に用いた材料の性状試験結果を表-3.1.4に示す。

盛土，埋戻し(Ⅰ)に用いた下水汚泥焼却灰はストーカ炉において焼却されたもので砂分(74 μm ～2mm)礫分の占める割合が約9割を占めている。一方，埋戻し(Ⅱ)に用いたものは，流動炉によるもので礫分(2mm以上)を含まず，細粒である。特に，高分子系焼却灰は砂分が20%以下と少なく，大部分がシルト分(74 μm)以下の粒子径となっている。

なお，生石灰含有量は，アルシウム分を測定し生石灰に換算したものである。

表3.1.4 試験施工に使用した材料性状

区 分 項 目	盛土、埋戻し (I)	埋 戻 し (II)							
		a	b	d	e	f	g	h	i
		焼 却 灰 (石 灰 系)	焼却灰 (石灰系)	焼却灰 (高分子系)	焼却灰 混合 (石灰系 高分子系)	山 砂	改良土 (含焼却灰)	改良土 (含焼却灰)	改良土 (含焼却灰)
pH試験	—	12.6	8.6	—	—	—	—	—	—
強熱減量 (%)	—	17.0	2.0	—	—	—	—	—	—
含水比 (%)	55.3	48.5	35.3	38.7	18.3	36.7	33.2	24.8	12.3
土粒子の比重	2.981	2.859	2.685	2.760	2.748	2.786	2.819	2.818	2.763
粒 度	2mm以上	39.9	0	0	1.8	31.8	30.0	41.2	39.4
	74 μ m ~ 2mm	48.8	52.6	14.3	20.3	60.7	36.0	38.1	37.0
	74 μ m以下	11.3	47.4	85.7	79.7	37.5	32.2	31.9	21.8
	土質分類		S F	F	F	S F	S F	S F	S F
	土質名	砂	砂質土	細粒土	細粒土	砂質土	砂質土	砂質土	砂質土
塑性指数	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP
突 固 め	OMC	52.0	59.4	44.3	41.2	18.1	28.5	28.6	22.9
	γ_d max g/cm ³	1.052	0.976	1.070	1.125	1.759	1.476	1.462	1.561
修正CBR	64.0	89.0	13.6	25.5	44.4	10.2*	29.3	64.0	75.3
炉形式 加水時期 石灰含有量(CaO換算)	ストーカ炉 ¹ 加水後保管 35%	流 動 炉 ¹ 施工日に加水 石灰系29%, 高分子系10%							

c. 試験施工結果

これら試験施工の結果から、下記に示すような知見が得られた。

① 強度面の評価

盛土体の土研貫入試験結果及び現場 CBR 試験結果を図-3.1.5, 3.1.6に、埋戻し (I) の平板載荷試験結果及び路面のたわみ量を図-3.1.7, 表-3.1.5に、埋戻し (II) の施工管理試験結果及び沈下量を表-3.1.6, 3.1.7に示す。

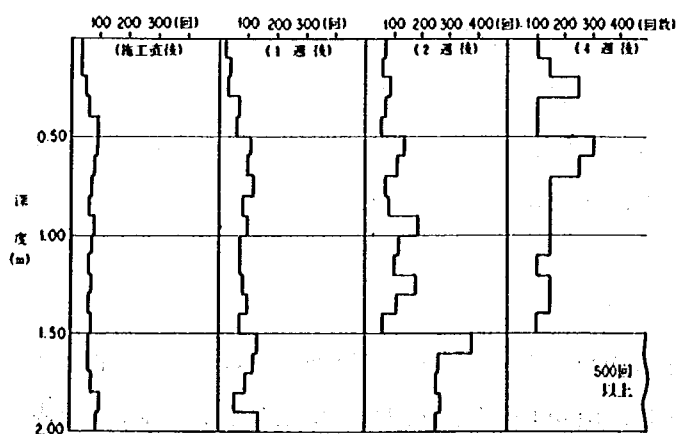


図3.1.5 経時的な土研貫入試験の深度

— 打撃回数の変化

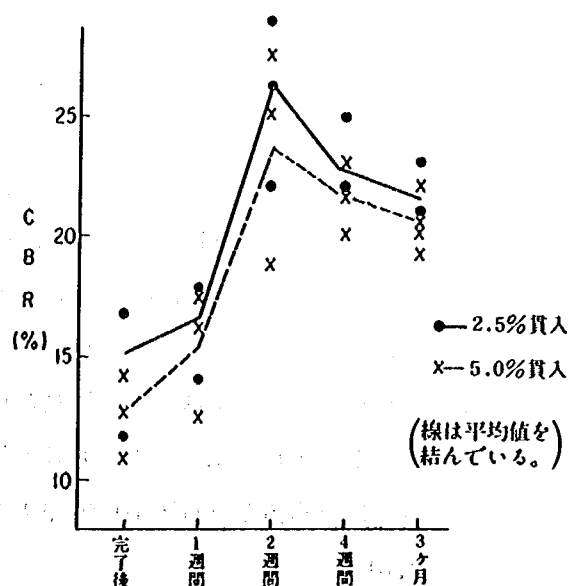


図3.1.6 現場CBRの経時変化 (盛土)

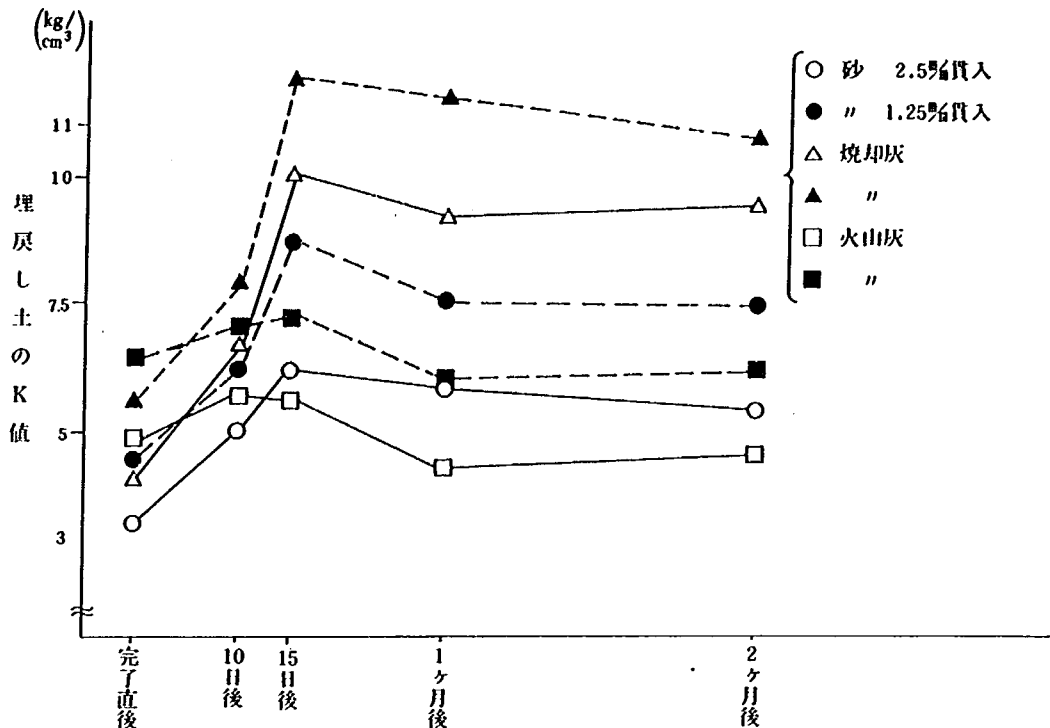


図3.1.7 K値（平板載荷試験）の経時変化（埋戻し（I））

図3.1.5, 3.1.6, 3.1.7に示すように石灰系焼却灰は、含まれる石灰の作用により施工後数週間にわたり強度が増加することが確認された。また、盛土の試験施工において以下の知見が得られた。

イ、P S地震探査で測定した盛土の動的物性値は、概略以下のとおりである。

P波速度 $V_p = 1070 \sim 1180 \text{ m/s}$ （テストピースの $V_p = 1036 \sim 1523 \text{ m/s}$ ）

S波速度 $V_s = 530 \sim 620 \text{ m/s}$

ポアソン比 $\nu_d = 0.298 \sim 0.335$

動的剛性率 $G_d = 4160 \sim 5490 \text{ kg/cm}^2$

動的ヤング率 $E_d = 11120 \sim 14250 \text{ kg/cm}^2$

これらの値から、盛土は洪積世の砂礫～新第三紀の泥質岩程度に相当し、マスとして見た場合は一般的土質の内でも、かなり良好な物性を有すると考えられる。

ロ、ブルドーザー（重量17.1 t o n、排土板付）を用いた撤去工事において、一走行当りの排土厚さは5～10cm程度で、掘削というよりも、削り取るような施工状況が多く、約300m²の盛土全体の撤去に3時間半を要した。

また、埋戻しにおいては、次の知見が得られた。

イ、埋戻し（I）の試験施工における施工直後から2ヶ月後までの路面のたわみ量の追跡調査によると、下水汚泥（石灰系）焼却灰工区は、山砂工区とほぼ同様な変化をしていること（表-3.1.5）

ロ、同試験施工における平板載荷試験の K_{30} 値は、山砂工区を上回ること（図3.1.7）

ハ、埋戻し（Ⅱ）の試験施工における現場 CBR，平板載荷試験及び沈下量等が石灰系焼却灰工区（a工区）は、山砂工区（e工区）と遜色ないこと（表3.1.6，3.1.7）。

これらのことから、石灰系焼却灰、盛土材、埋戻し材としての十分な強度を有することが確認できた。

表3.1.5 路面のたわみ量(ベンゲルマンビーム)の終時的変化 (埋戻し(Ⅱ))

工 区	測 線	弾性たわみ量 d (最大, 平均) 1/100mm							
		直 後		5 日 後		10 日 後		2 ヶ 月 後	
砂 工区	No. 1	188	155.5	152	142.5	174	149	77	69
	" 2	198	171	172	158.8	156	144	85	75
	" 3	166	131.5	144	134	148	135	81	69
	平 均	184	152.7	156	145.1	159.3	142.7	81	71
石灰系 焼却灰 工区	No. 1	144	124.5	154	132	146	132.5	67	53
	" 2	162	128	148	131	142	124.5	64	55.8
	" 3	310	200	172	152	172	143.5	87	62.5
	平 均	205.3	150.8	158	138.3	153.3	133.5	72.7	57.1
火山灰 工区	No. 1	224	166.8	188	151.6	164	139.6	94	59
	" 2	188	122.8	176	136.4	118	131	94	71.6
	" 3	165	130.8	148	129.2	140	124.4	74	59.8
	平 均	192.3	140.1	170.7	139.1	140.7	131.7	87.3	63.5

(注) 測線は、工区毎に等間融、埋設管に対し横断的に設定した。

表3.1.6 埋戻し(Ⅱ)における施工管理試験結果

工 区		a	b	c	d	e	f	g	h	i
試験項目										
現 場 密 度 試 験 (縮 固 め 度 %)		101.8	78.1	* 103.2 80.8	79.1	87.7	93.9	89.8	93.1	91.1
土研式貫入 試 験	貫 入 度 Pd	0.03	0.46	0.05	0.1	0.019	0.03	0.28	0.16	0.26
	10 cm 貫 入 打 撃 回 数	333.8	21.8	192.3	103.0	537.6	329.4	35.1	61.5	38.8
現 場 C B R (%)		91.8	6.7	238.6	3.2	8.7	4.8	8.5	12.0	11.3
平 板 載 荷 試 験 K ₃₀ (kg/cm ³)		91.0	6.0	57.6	8.4	11.6	12.6	9.4	8.0	10.2

*上段 石灰系
下段 高分子系

表3.1.7 沈下量測定結果（埋戻し(II)）

単位：mm

工 区 名		沈下計深さ	施工後3ヶ月	交 通 開 放 後			
				1ヶ月	3ヶ月	6ヶ月	1 年
石 灰 系	a	①	-9.3	-9.3	-9.6	-14.9	-14.6
		②	-7.7	-5.0	-5.3	-9.6	-11.6
		③	-8.3	-5.0	-5.3	-9.6	-10.9
高 分 子 系	b	①	-27.3	-20.0	-19.0	-23.0	-25.7
		②	-148.0	-139.3	-146.6	-153.6	-160.1
		③	-247.3	-248.0	-248.7	-254.4	-264.7
上 部 石 灰 系 下部高分子系	c	①	-20.3	-5.5	-4.3	-7.0	-6.7
		②	-12.7	-12.7	-11.7	-15.0	-17.0
		③	-33.3	-28.6	-27.6	-32.6	-34.9
石 灰 系 50% + 高 分 子 系 50%	d	①	-11.3	-13.0	-21.7	-25.0	-30.0
		②	-14.0	-15.3	-26.0	-31.0	-37.0
		③	-20.0	-22.0	-36.3	-45.3	-55.3
山 砂	e	①	-28.3	-30.0	-31.7	-33.4	-34.1
		②	-6.0	-7.3	-10.6	-13.3	-15.3
		③	-13.3	-15.3	-19.6	-21.3	-25.0
改 良 土	f	①	-1.7	-3.0	-5.0	-8.0	-8.7
		②	1.7	-0.6	-4.9	-7.6	-7.9
		③	-6.7	-8.7	-12.7	-15.4	-15.7
" (含石灰系)	g	①	-1.0	-1.3	-0.6	-0.3	-3.0
		②	-2.0	-2.3	-3.0	-6.7	-11.4
		③	-2.3	-3.0	-4.7	-11.0	-16.3
" (含高分子系)	h	①	-1.7	-1.7	-2.0	-1.0	-2.7
		②	-0.3	-1.0	-1.7	-2.1	-6.1
		③	-1.0	-0.3	-1.3	-5.3	-10.6
発 生 土	i	①	-1.3	-0.6	-1.6	0.7	0.7
		②	-0.3	0.0	-1.7	-5.0	-8.7
		③	-1.3	-1.0	-3.7	-6.0	-10.0
測 定 口			59.12/18	60.2/15	60.4/17	60.7/19	61.1/18

(注) 沈下計の位置は下記に示す。

- (1) 床付け面
- (2) 管天場より40cm上り
- (3) 埋土の中間

下水汚泥焼却灰を一部添加した改良土（g工区，h工区）は，生石灰やセメントを用いた改良土（f工区）及び山砂（e工区）とほぼ同様な物理特性であることが確認できた（表3.1.6，3.1.7）。

一方，埋戻し（II）の試験施工によると，高分子系焼却灰（b工区，c工区の下部）は，締固め度約80%と十分な締固めが出来なかった（表3.1.6）。また，これらの工区では，沈下量は大きいものとなった（表3.1.7）。これは次で述べるように，転圧が十分にできなかったことに起因すると思われる。

② 施工性に対する評価

微粒を多く含む下水汚泥焼却灰は，運搬または施工時に飛散することが考えられたが，試験施工の結果から運搬に先だって加水すれば，飛散を防止できることが明らかとなった。

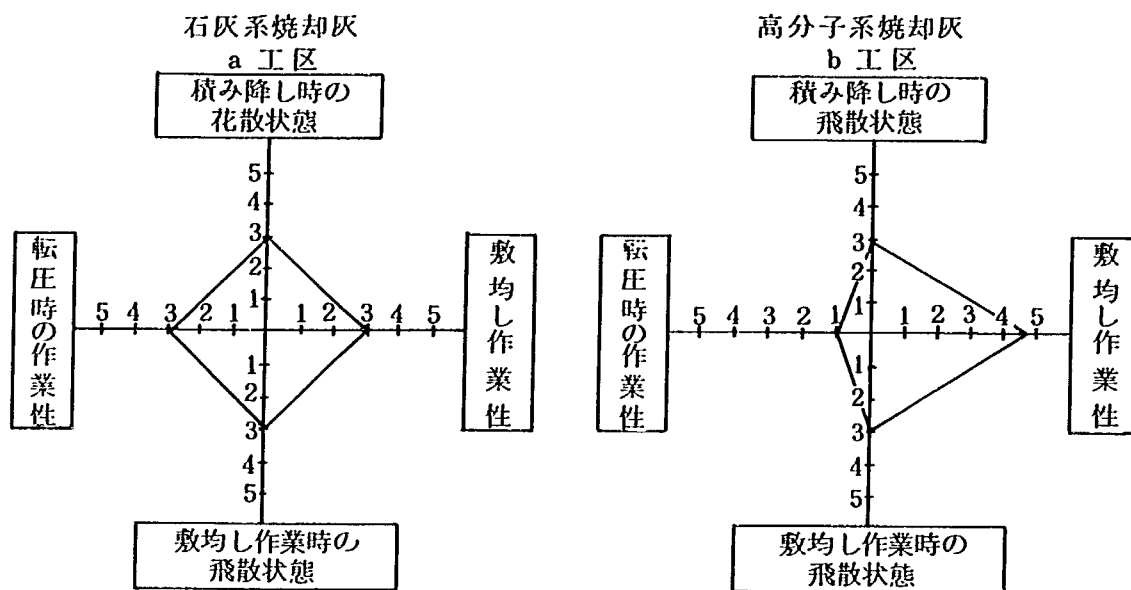
埋戻し（II）の試験施工においては，作業員にアンケートを実施し，積降し時の飛散状態，敷均し作業性，敷均し作業時の飛散状態，転圧時の作業性について，山砂を最良の5点とする5段階

表3.1.8 作業性アンケート結果 —記述式— (埋戻し(Ⅱ))

工 区	項 目	敷 均 し 時	転 圧 時	仕上り表面状態	最適含水比(%) 自然含水比(%)		備 考
					締固め度(%)		
a	石 灰 系 焼 却 灰	・加水調節必要 ・敷均し易い	・転圧機械に付着する ・転圧し始めは、ランマーがもぐるが、2、3回通過すれば問題ない	・かなり締固まったように見える ・おさまりが良い	59.4%	48.5%	・出荷時の含水比は35%程度が上限で、現場での加水調整を要する。 ・ダンプ積載後2時間以上経過すると固粒化して降ろしづらい。
					101.8%		
b	高 分 子 系 焼 却 灰	・加水調節必要 ・敷均し易い	・ランマーでは、もぐってしまい転圧不可、付着有 ・プレートでも、材料がわきへ逃げるだけで転圧ができない	・足で踏むと足跡が付く ・おさまりが悪い	44.3%	35.3%	・出荷時の含水比は35%程度が上限で、現場での加水調整を要する。 ・加水してもなかなか転圧できる状態にならない。
					78.1%		
d	石灰系焼却灰、 高分子系焼却灰 混合	・b工区と同じ	・b工区と同じ	・b工区と同じ	41.2%	38.7%	・前もって、加水調節をして最適含水比に近い状態にしたが、まだなお、転圧しづらく、b工区とほぼ同じようであった。
					79.1%		
e	山 砂	・敷均し易い	・転圧機械へは付着しない ・転圧し易い	・良好	18.1%	18.3%	・標準工区
					87.7%		
f	改 良 土	・一般土と変らない ・特に問題なし	・転圧機械へは付着しない	・良好	28.5%	36.7%	
					93.9%		
g	"	"	・転圧機械へは付着しない ・一般土より良い	・一般土より良い	28.6%	33.2%	
					89.8%		
h	"	"	・転圧機械への付着はないが材料が多少わきへ逃げる	・見た目には、含水比が足りないように感じる ・表面にややクラックが生じる	22.9%	24.8%	
					93.1%		
i	発 生 土	"	・転圧機械へは付着しない	・良好	12.9%	12.3%	・砂質土
					91.1%		

での評価を行った。その結果を表3.1.8、図3.1.8に示す。

石灰系焼却灰及び下水汚泥焼却灰を一部含む改良土はほぼ同等で、すべての項目で“良い”という評価であった。高分子系焼却灰の場合は、ランマーによる締固めが困難で、転圧が不十分となる傾向が認められた。ランマーによる石灰系及び高分子系焼却灰工区の転圧状況を図3.1.9に示す。



下水汚泥焼却灰を添加した改良土（焼却灰を含む）

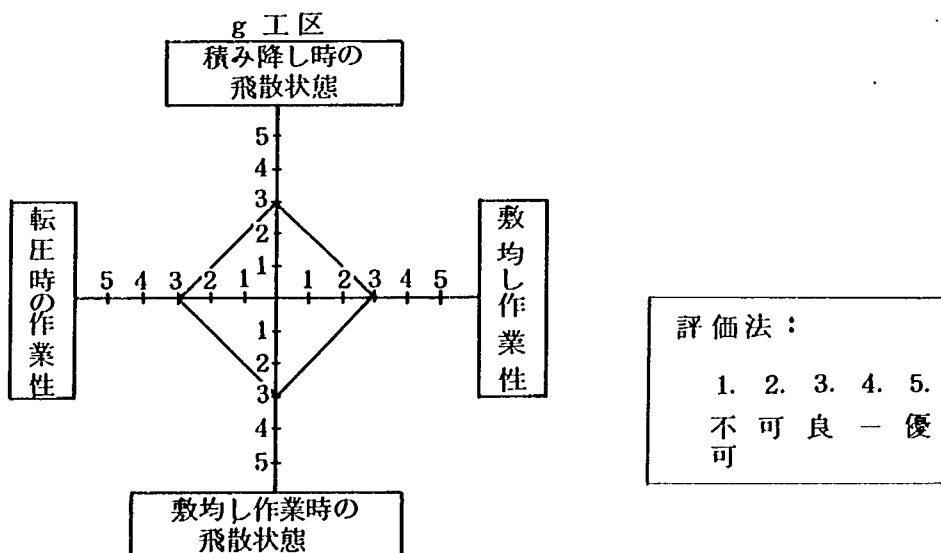
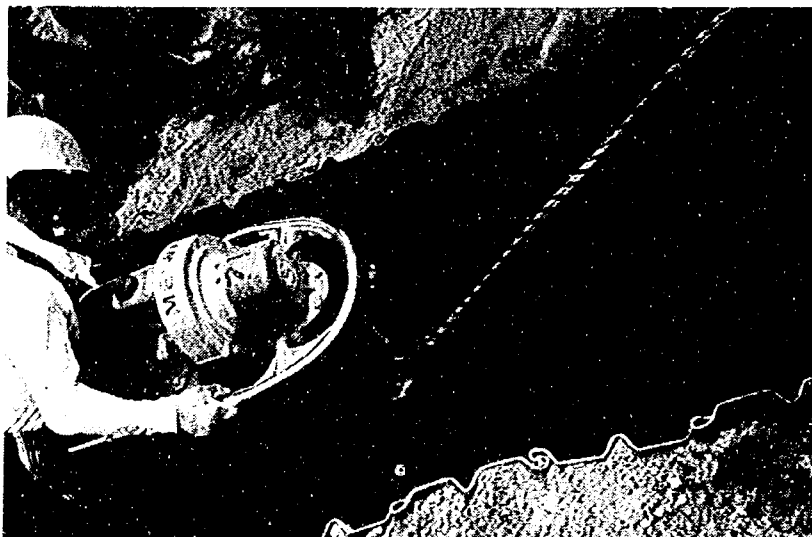


図3.1.8 作業性アンケート結果（埋戻し(II)）



石灰系焼却灰（a工区）



高分子系焼却灰（b工区）

図3.1.9 ランマーによる転圧作業状況（埋戻しⅡ）

③ 安全性に対する評価

盛土及び埋戻し（Ⅱ）の試験施工においては、盛土内及び埋戻し部分の中に採水ますを設け、浸透水を捕集し、その水質の測定を実施した。盛土の試験施工での4試料及び埋戻し（Ⅱ）の試験施工の2試料についての分析結果では、すべての項目において「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」で定める基準値以下であった。表 3.1.9、3.1.10に、盛土及び埋戻し（Ⅱ）における水質測定例を示す。

表3.1.9 浸透水水質分析結果 (盛土)

(施工: 58年11月)

(単位: mg/ℓ)

分析項目	58.12.19	59.4.12	59.7.16	59.11.14 ^{*1}	59.11.28 ^{*2}	定量限界値(ND値)
pH	—	13.4	12.3	9.8	13.3	—
アルキル水銀	ND	—	—	—	ND	0.0005
総水銀	ND	ND	ND	ND	ND	0.0005
カドミウム	ND	ND	ND	ND	ND	0.03
鉛	ND	ND	ND	ND	ND	0.3
有機リン	ND	—	—	—	ND	0.05
六価クロム	ND	ND	ND	ND	ND	0.05
ひ素	ND	ND	ND	ND	ND	0.02
シアン	ND	ND	ND	ND	ND	0.05
PCB	ND	—	—	—	ND	0.0005
銅	0.02	0.21	0.13	0.07	0.34	—
亜鉛	ND	0.03	0.04	0.07	0.02	0.02
ニッケル	ND	ND	ND	ND	ND	0.1
総クロム	ND	ND	ND	ND	ND	0.1
マンガン	0.18	0.02	ND	ND	ND	0.02
鉄	0.2	0.1	0.3	0.4	0.1	0.1

*1 注水前

*2 注水後 (盛土中央部に穴を設け、そこから注水を行い、浸出水を集水した。)

表3.1.10 浸透水水質試験結果 (埋戻し(II))

昭和60年9月10日

(mg/l)

項目	試料名 工区名	Na 1	Na 2	Na 3	Na 4	Na 5	Na 6	基準値	
		a	b	f	g	h	i	溶出試験	排出基準
		石灰系 焼却灰	高分子系 焼却灰	改良土	改良土	改良土	発生土		
全 シアン		ND	ND	ND	ND	ND	ND	1.0(1.0)	1.0
六価クロム		ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.5(1.5)	0.5
水 銀		ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.005(0.005)	0.005
ひ 素		ND	ND	0.004	ND	0.012	0.013	0.5(1.5)	0.5
鉛		ND	ND	ND	ND	ND	ND	1.0(3.0)	1.0
カドミウム		ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.1(0.3)	0.1
pH		10.9	9.5	7.7	8.9	9.6	7.8	—	—

ND: 不検出

溶出基準……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48年)

() 外 海洋投入における基準

() 内 埋立処分における基準

排出基準……一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係る技術上の基準を定める
命令 (昭. 52年)

(4) まとめ

下水汚泥焼却灰を用いた試験施工及びその追跡調査によって、下水汚泥焼却灰の利用に関して、以下のことが明らかとなった。

- ① 石灰系焼却灰は、盛土築造後に十分な強度のものが得られ、それ以降も数週間にわたり強度が増加していくので盛土材として十分使用できる。
- ② 同様に埋戻し材として使用する場合も、大きな強度を発現する。しかし埋戻し材に要求される再掘削の容易さからみると、単体で使用する、あまりにも強度が高くなりすぎるおそれもあるので、埋戻し材として単体で使用するのは好ましくない。むしろ、土質改良用添加材として土と混合して使用の方が望ましい。
- ③ 下水汚泥焼却灰を生石灰および排脱石膏と組み合わせて用いると、比較的高い改良効果が得られることが明らかとなった(3.4高有機質土の適正処理技術参照)。
- ④ 高分子焼却灰は自硬性がほとんどなく、強度および施工の両面から単体では盛土材、埋戻し材としての使用は好ましくない。

下水汚泥焼却灰の有効利用とくに、土質改良用添加材としての利用を促進するためには、下水汚泥焼却灰に含まれる石灰の種類及びその量と施工後の強度との関係を明らかにする必要がある。さらに、石灰は水や二酸化炭素との反応によって変化するので、貯蔵方法についても検討する必要がある。

(汚泥研究室担当)

参考資料

1. 下水汚泥焼却灰の転圧方法の検討

本文中の表 3.1, 2に、盛土及び埋戻し（II）における転圧方法を示した。これらの値は本試験施工に先立って予備試験を行い決定したものである。以下、これら予備試験の概要を述べる。

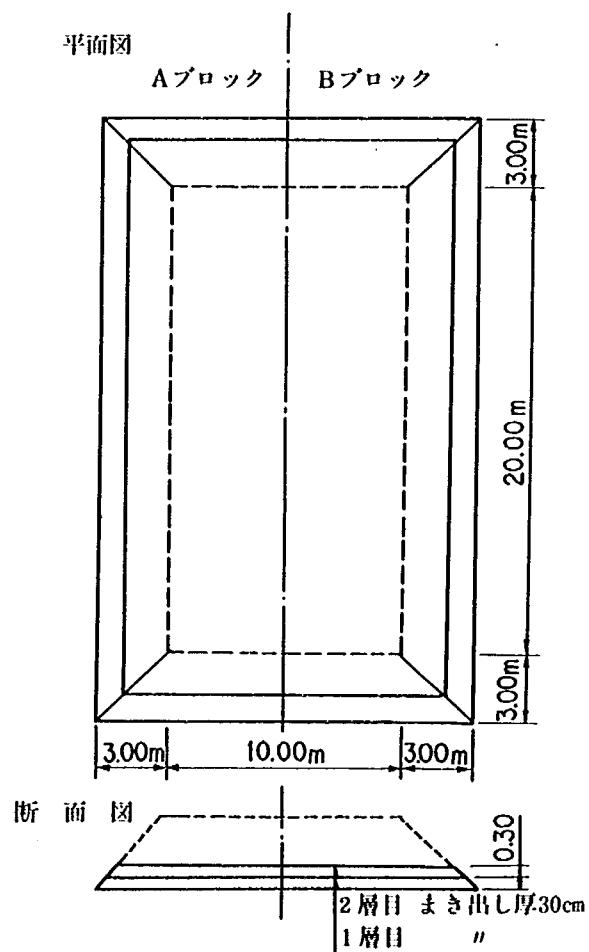
(1) 「盛土」における予備試験

転圧試験は図（参）1.1に示すように幅10m、長さ20mのヤードを設定し、片側5mをAブロックとし、自然含水状態（搬入時の含水比）で、もう一方のBブロックは含水比が5%程度高くなるように加水して転圧を行ったものである。

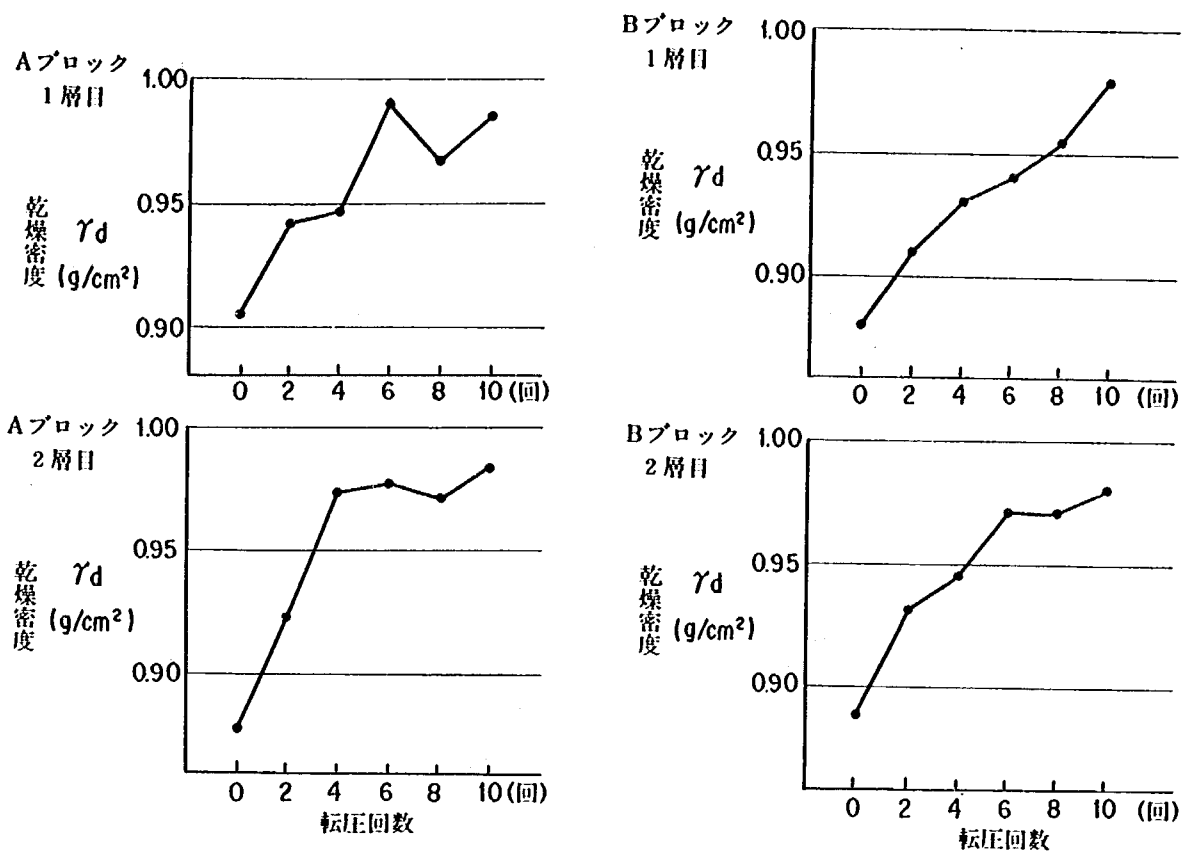
施工はまき出しをブルドーザー（重量11.7t）にて30cmとし、転圧はタイヤローラー（最大重量15.5t）で行った。

転圧回数と乾燥密度の関係を図（参）1.2に示す。

搬入時の含水比で締固めたAブロックでは、転圧回数が6回を超えても密度に大きな変化はなかった。また、乾燥密度 $\gamma_d = 0.950 \text{ g/cm}^3$ は、締高め度90%以上（表 3.1.4 中の盛土の項 $\gamma_d = 1.052 \text{ g/cm}^3$ に対して）となっている。このことから、転圧条件（まき出し厚30cm、転圧回数6回以上）を設定した。含水比が5%高いBブロックでも、ほぼ同様の密度が確保されており、5%程度の加水（少量の雨天時）でも施工可能である。



図(参)1.1 施工平面及び断面（盛土）



図(参)1.2 転圧回数と乾燥密度の関係

(2) 「埋戻し (II)」における予備試験

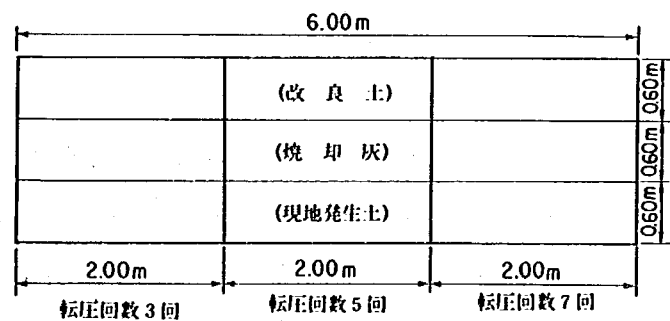
転圧試験は、図 (参) 1.3に示すような幅0.6m、長さ2 mを1ブロックとするヤードを設定し、3種の材料及び転圧回数3条件で実施した。

使用材料

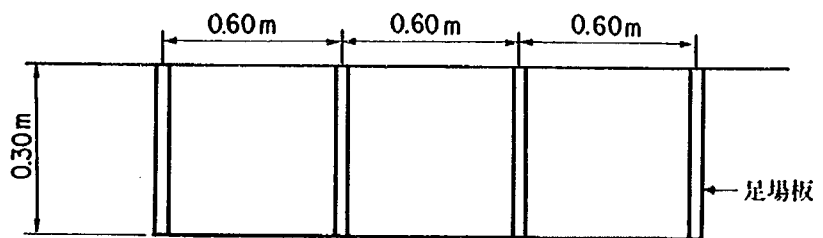
焼却灰：石灰系焼却灰（加湿灰）

改良土：残土+改良用添加材

普通土砂：現地発生土



(平面図)



(断面図)

図(参)1.3 施工平面及び断面 (埋戻し (II))

転圧機械はランマー（圧力1.62 kgf/cm²、打撃数550～650 c.p.m）を用いた。

転圧回数と締固め度の関係を、表（参）1.1、図（参）1.4に示す。3材料とも転圧回数5回を超えても密度は増加していない。

表(参)1.1 現場密度試験結果（呼戻し(II)）

No.	材料の種類	転圧回数	含水比 (%)	湿潤密度 $\gamma_t(g/cm^3)$	乾燥密度 $\gamma_d(g/cm^3)$	最大乾燥密度 (g/cm^3)	締固め度 (%)
1	改良土	3回	38.0	1.713	1.241	1.644	75.5
2		5回	36.7	2.056	1.504		91.5
3		7回	37.7	1.867	1.356		82.5
4	石灰系焼却灰	3回	47.5	1.242	0.842	0.859	98.0
5		5回	43.5	1.425	0.993		115.6
6		7回	41.5	1.401	0.990		115.3
7	現地発生土	3回	15.8	1.922	1.659	1.825	90.9
8		5回	17.7	2.030	1.725		94.5
9		7回	18.0	1.973	1.672		91.6

また、敷均された埋戻し材は転圧によって締固められ、その体積、つまり一層当りの厚さは減少する。仕上り後の厚さに対するこの減少幅の比を、表（参）1.2中の転圧減少比欄に示す。同表に、仕上り厚30cmとしたときの敷均し厚（計算値）を示す。

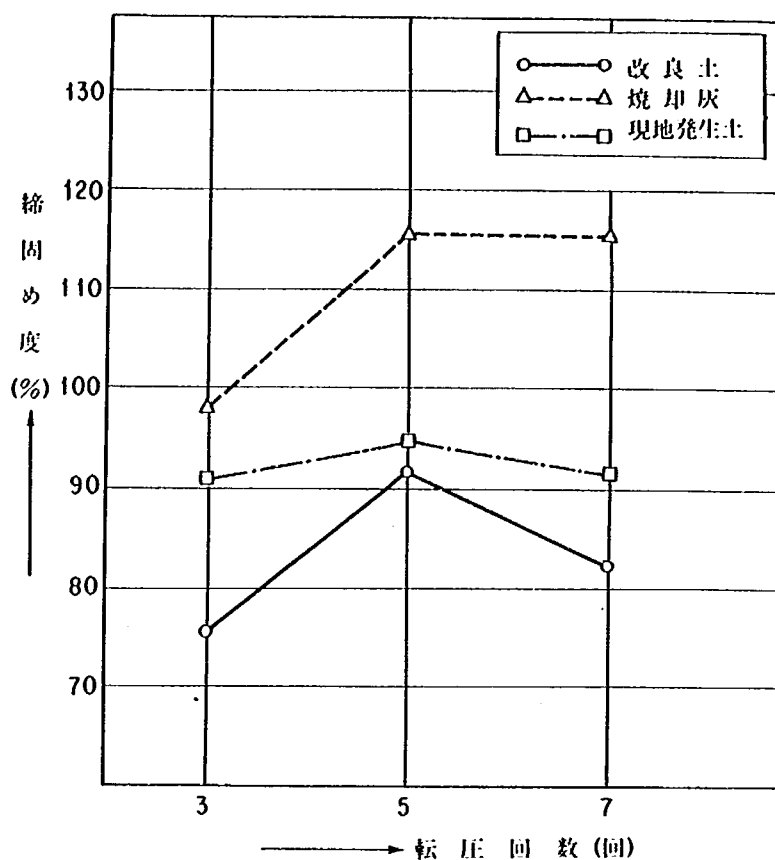
以上のことより、本施工における転圧条件を次のように定めた。

敷均し厚 40～42cm（仕上り厚30cm）

転圧回数 6回以上

表(参)1.2 転圧5回の場合（一層仕上り厚30cmとする）

埋戻し材種類	転圧減少比(%)	余盛厚 (cm)	敷均し厚 (cm)
一般改良土	38.2	11.5	41.5
北 二 灰	35.9	10.8	40.8
現地発生土	32.0	9.6	39.6



図(参) 1.4 転圧回数と締固め度の関係 (埋戻し(Ⅱ))

2. 下水汚泥焼却灰の性状変動

埋戻し(Ⅱ)に用いた焼却灰を採取した焼却炉から排出される焼却灰を対象に、採取日の違いによる

表(参)2.1 下水汚泥焼却灰性状変動

(昭和59年)

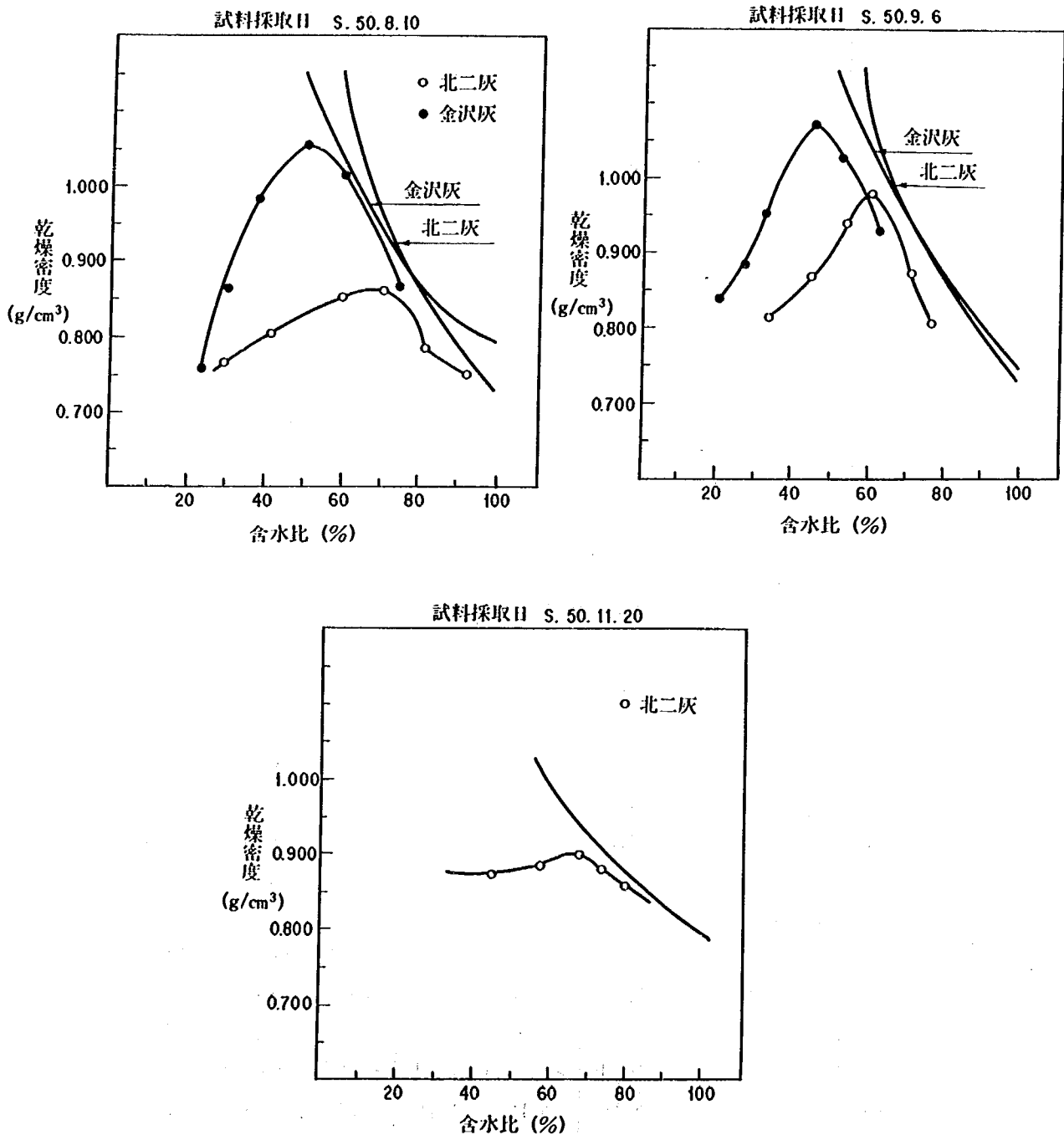
項目		灰名称	石 灰 系 焼 却 灰			高 分 子 系 焼 却 灰		
		採取日	8/10	9/6	11/29	8/10	9/6	11/29
pH試験			12.4	12.6	12.4	8.7	8.6	8.2
強熱減量 (%)			14.2	17.0	17.0	4.9	2.0	2.0
含水比 (%)		※1	29.2	48.6	52.0	23.1	35.3	36.2
土粒子の比重			2.856	2.859	2.842	0.682	2.685	2.640
土 の 粒 度	2 mm以上 (%)		0	0	0	0	0	0
	74μ～2 mm (%)		45.8	52.6	25.4	20.4	14.3	14.5
	74μ以下 (%)		54.2	47.4	74.6	79.7	85.7	85.5
	土質分類		F	S F	F	F	F	F
	土質名		細粒土	砂質土	細粒土	細粒土	細粒土	細粒土
塑 性 指 数			N P	N P	N P	N P	N P	N P
突 固 め	OMC (%)		70.1	59.4	68.0	48.5	44.3	—
	γ _b max(g/cm ³)		0.859	0.976	0.902	1.055	1.070	—

※1 含水比は、焼却処理施設内で防塵のため加水できるように設備されており、任意に含水比は調整が可能である。

物理性状の変動を表(参)2.1に示す。この表のうち9月6日採取分が、本文中の埋戻し(Ⅱ)に用いられた。

pH、土粒子の比重は、石灰系、高分子系のそれぞれでは大差はない。

しかし、粒度については石灰系焼却灰に変化が見られ、粗粒子分(74 μ m $\sim$ 2mm)細粒分(74 μ m以下)それぞれの含有率の差は27%となっている。一方、高分子系焼却灰では、その差が6%と粒度は安定している。



図(参)2.1 締固め特性の変化

3.2 下水污泥焼却灰の深層混合処理への利用

(1) 研究目的

本研究は、各種廃棄物を処理した再生材のうち、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下水污泥焼却灰を深層混合処理へ利用するための技術開発を目的にしている。さらに、下水污泥焼却灰を高含水比粘性土や有機質土などへ攪拌・混合した場合の改良効果（強度発現、含水比の低下）、ならびに深層混合処理へ利用する際の留意点も合わせて明らかにすることになっている。

(2) 研究内容

本研究では、下水污泥焼却灰の深層混合処理における土質改良用添加材としての適用性を検討するため、以下に示すように室内配合試験および現地試験施工を行った。

1) 室内配合試験による検討

下水污泥焼却灰の土質改良用添加材としての利用可能性を調査するために、粘性土（含水比60%程度）およびピート（含水比700%程度）を試料土として室内配合試験を実施した。本配合試験においては、主に深層混合処理への適用性に着目して、「締固めを伴わない」状態で下水污泥焼却灰を攪拌・混合した場合の改良土の物理的特性（含水比、コンシステンシー）、および力学的特性の経時変化を調査した。

なお、下水污泥焼却灰を大量に有効利用する場合、盛土体や表層混合処理における改良材としての適用も十分考えられることから、下水污泥焼却灰単体の強度特性、透水性の経時変化を室内試験により調べるとともに、石灰系焼却灰を粘性土へ「混合・締固めた」場合の改良土の力学的特性についても補足的に検討した。

2) 現地試験施工による検討

室内配合試験により得られた石灰系焼却灰による改良土の強度特性に関する結果を踏まえて、粉体噴射攪拌工法による石灰系焼却灰を用いた試験施工を粘性土地盤（自然含水比60%程度）およびピート地盤（自然含水比600%～700%）の2箇所で行った。試験施工においては、原地盤での改良効果の確認および室内配合試験結果との効果の比較を行うとともに、実用化に際しての問題点を検討した。

(3) 研究成果

1) 下水污泥焼却灰の物性および力学的特性

i) 研究に用いた下水污泥焼却灰単体の種類と物性

本試験に用いた下水污泥焼却灰の種類および化学成分については、表 3.2.1 に示す。この表に示すとおり、室内試験では石灰系焼却灰 3 種類、高分子系焼却灰 1 種類の計 4 種類の下水污泥焼却灰を用いた。

表3.2.1 室内試験に用いた下水污泥焼却灰の種類と物性

項目 試料名	比重	強熱減量 (%)	含水率 (%)	無機成分含有量 (%)					
				CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃
石灰系焼却灰A	2.86	2.2	0.2	34.50	21.70	13.90	1.57	15.10	3.78
石灰系焼却灰B	3.04	1.0	0.1	38.30	17.10	12.70	4.87	15.40	3.31
石灰系焼却灰C	—	—	0.37	31.81	25.80	6.10	2.39	18.50	2.01
高分子系焼却灰	—	—	0.52	9.77	40.58	16.25	1.93	10.19	0.22

注) — ; 測定値なし

また、試験に用いた下水污泥焼却灰の粒度分布を図3.2.1に示す。

図3.2.2には、本研究に用いた下水污泥焼却灰の締固め曲線を示す。この図より、最大乾燥密度 (ρ_{dmax}) は、0.8955t/m³~1.025t/m³の範囲にあり、また、最適含水比 (w_{opt}) については、47.5%~59.0%の範囲にある。なお、今回用いた下水污泥焼却灰のこれらの締固め特性は、概ね既往の調査結果の分布範囲にある。

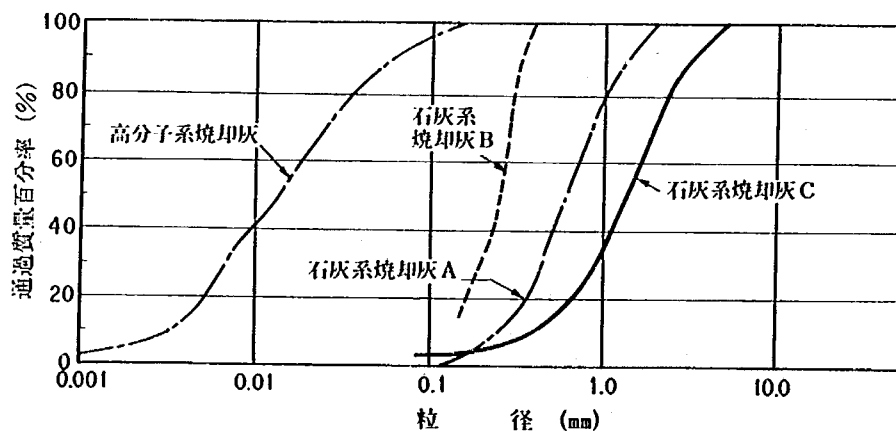


図3.2.1 室内試験に用いた下水污泥焼却灰の粒度分布

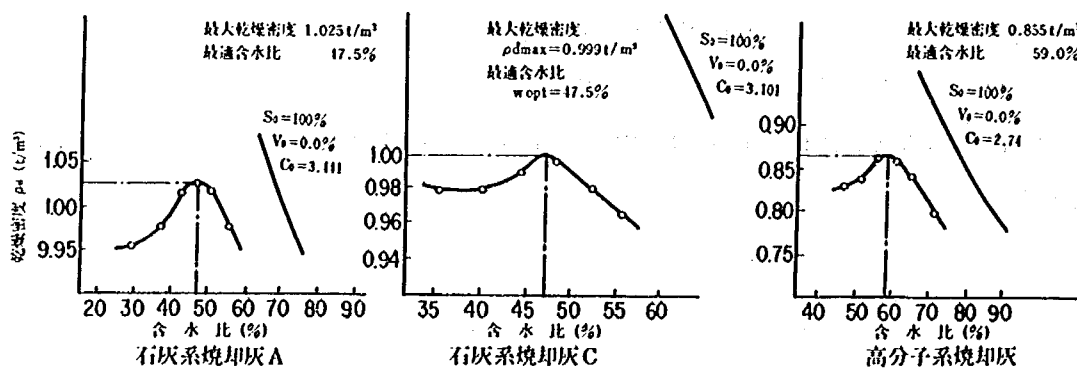


図3.2.2 下水污泥焼却灰の締固め曲線

ii) 下水汚泥焼却灰単体の強度発現

① 一軸圧縮強さと材令の関係 (一軸圧縮試験の結果)

図3.2.3には、石灰系焼却灰および高分子系焼却灰を最適含水比 (w_{opt}) 状態で最大乾燥密度 (ρ_{dmax}) になるように締固めて作製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、石灰系焼却灰の場合は、材令に伴い顕著に強度が増加しているが、高分子系焼却灰の場合は、ほとんど強度増加が認められない。まず、同図において、最適含水比で締固めた石灰系焼却灰については、締固め直

後で一軸圧縮強さ q_u が約 1.0 kgf/cm^2 程度であり、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 10 kgf/cm^2 、90日強度では約 15 kgf/cm^2 程度の値が得られている。すなわち本試験結果から判断すると、石灰系焼却灰自体は、これまでの研究においても報告されているように適度な加湿状態では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。しかしながら、後述する三軸圧縮試験結果では、石灰系焼却灰の自硬性による強度増加の程度は石灰系焼却灰の密度 (締固めの程度) に大きく左右されるという結果を得てい

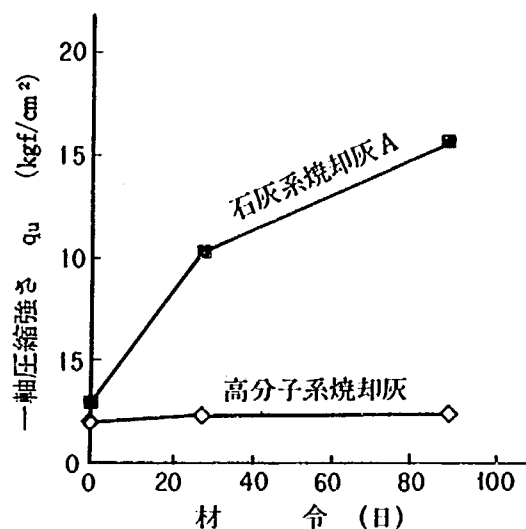


図3.2.3 下水汚泥焼却灰単体の q_u の経時変化 (w_{opt} , ρ_{dmax} で締固めた状態)

る。一方、高分子系焼却灰に関しては、ほとんど一軸圧縮強さの増加が認められない。

以上の結果は、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) を有するが、高分子系焼却灰は、経時的な強度増加はないという性質と符合する。

② 石灰系焼却灰単体の三軸圧縮強度特性

(イ) 応力-ひずみ関係

図3.2.4には、三軸圧縮試験 (UU) における締固め状態の異なる石灰系焼却灰単体の応力-ひずみ曲線の一例を示す。なお、図に示した供試体の条件は拘束圧力 2.0 kgf/cm^2 、材令90日のものである。図より、石灰系焼却灰は、通常の砂の場合と同様に締固めの程度によって応力-ひずみが異なり、強度発現が著しい締固め度100%の条件ではひずみ2%で明確な最大せん断強度が得られているのに対して、締固め度70%の条件では、明瞭なピークは認められない。

また、図3.2.5には、石灰系焼却灰Aの最大せん断応力 τ の経時変化を拘束圧力および締固め度の違いによって比較して示す。この図より、締固め度100%の条件については先に示した一軸圧縮強さと材令の関係と似た傾向が認められるのに対して、締固め度70%の条件についてはほとんど経時的に強度発現が認められない。

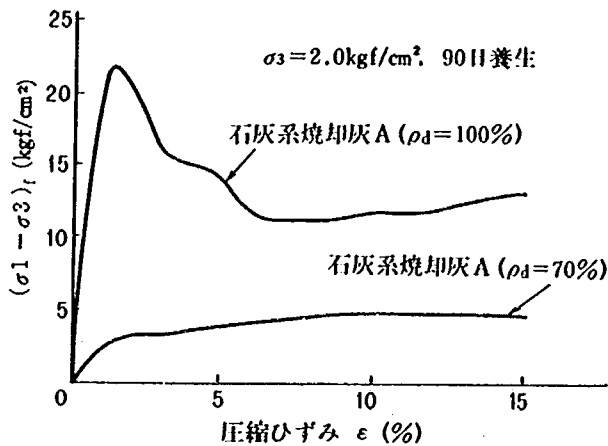


図3.2.4 締固め度の違いによる石灰系焼却灰単体の応力～ひずみ曲線の比較例

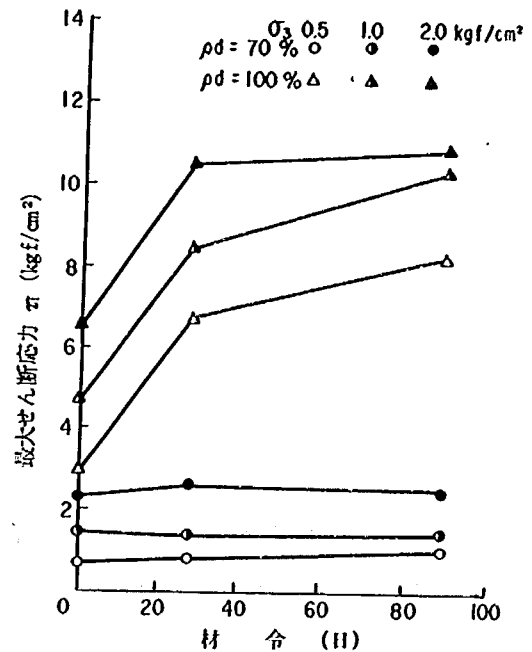


図3.2.5 石灰系焼却灰単体の最大せん断応力 π の経時変化

(ロ) c_u , ϕ_u の経時変化

図3.2.6には、三軸圧縮試験における石灰系焼却灰の粘着力(c_u)の経時変化を示している。この図から、締固め度100%で締固めた石灰系焼却灰の場合は、材令に伴い c_u が大きく増加していることがわかる。この結果は、先に述べた一軸圧縮試験の結果と符合する。しかしながら、締固め度70%で締固めた供試体に関しては、締固め度100%の供試体の強度発現と比べるとほとんど強度発現が認められず、また、材令に伴う強度増加もない。例えば、材令28日において両者の一軸圧縮強さを比較すると、締固め度100%の条件では、約4 kgf/cm²程度の強度発現が得られているのに対して、締固め度70%の条件では、0.1 kgf/cm²程度である。すなわち、石灰系焼却灰の強度発現には、締固めの程度が大きく影響するものと考えられる。

一方、図3.2.7には、三軸圧縮試験における締固めの程度が異なる石灰系焼却灰の ϕ_u の経時変化を示す。この図より、 ϕ_u に関しては c_u と同様に締固め度による差が認められ、締固め度100%の条件では、 $\phi_u=45^\circ$ であり、一方締固め度70%の条件では $\phi_u=30^\circ$ である。しかし c_u の経時変化と異なり、両条件とも材令に伴う ϕ_u の増加は認められない。

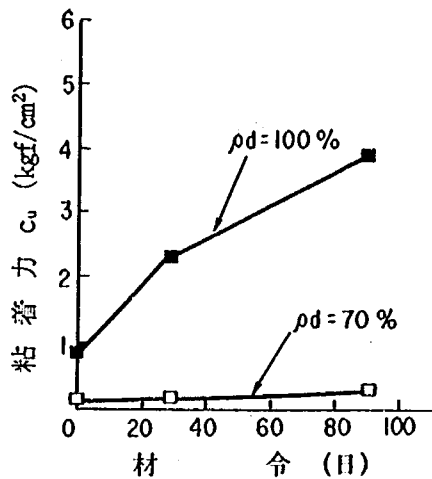


図3.2.6 石灰系焼却灰単体の c_u の経時変化 (締固め度の比較)

※図中の数字は締固め度をさす。

以上の下水汚泥焼却灰等単体の自硬性に関する室内試験の結果から、特に石灰系焼却灰については、顕著な自硬性が見出され土質改良用添加材として利用可能性が高いことが認められた。そこで、後述するような粘性土およびピートに対する室内配合試験を実施した。

iii) 下水汚泥焼却灰単体の透水試験結果

図3.2.8には、各種下水汚泥焼却灰を2種の締固め度(100%, 70%)で締固めた試料の透水係数の経時変化を供試体作成直後、28日後、90日後の3材令において測定した結果を示す。また、表3.2.2には測定結果を一覧にして示す。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、一般的にこの初期透水係数の差がそのまま経時変化に表れてい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石灰系焼却灰A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 $k_0 = 6.47 \times 10^{-4}$, $k_{28} = 5.17 \times 10^{-6}$, $k_{90} = 3.31 \times 10^{-6}$ (cm/sec) であり、初期透水係数 (k_0) と28日後の透水係数 (k_{28})

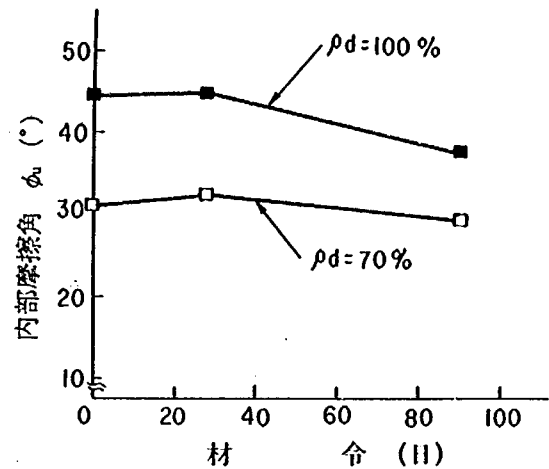


図3.2.7 石灰系焼却灰単体の ϕ_u の経時変化 (締固め度の比較)

※図中の数字は締固め度をさす。

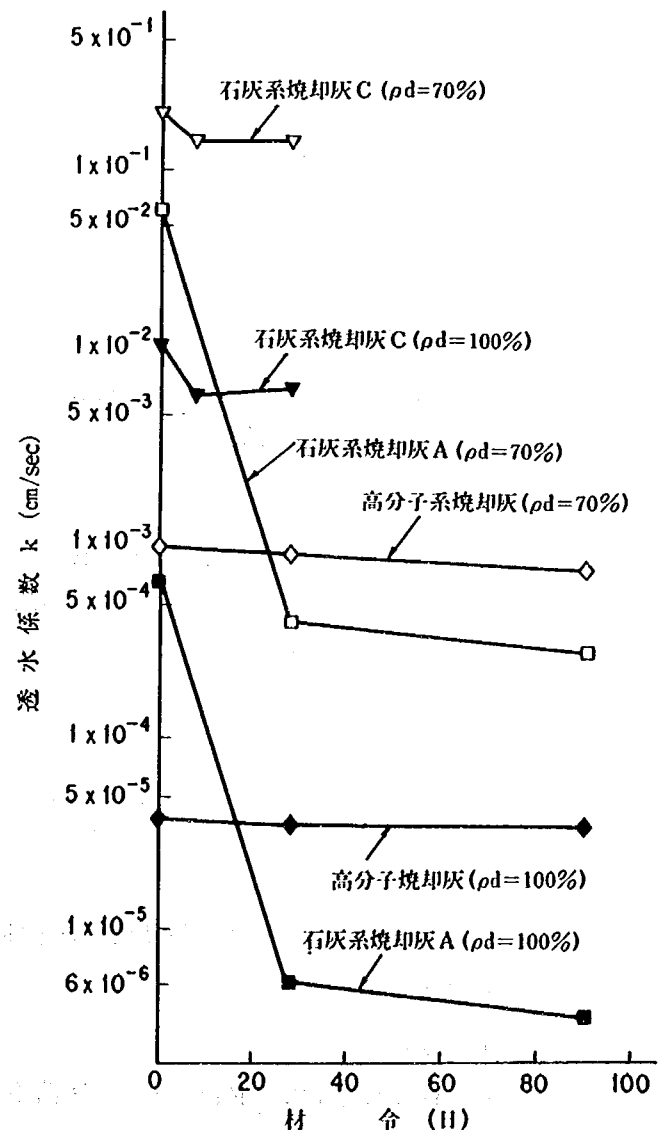


図3.2.8 下水汚泥焼却灰の透水係数の経時変化 (締固め度の比較)

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 $k_0=6.06 \times 10^{-2}$, $k_{28}=4.12 \times 10^{-4}$, $k_{90}=2.78 \times 10^{-4}$ (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} , $\rho_d/\rho_{dmax}=70\%$ の透水係数の減少割合はほぼ一致する。

表3.2.2 下水汚泥焼却灰の透水係数の経時変化

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
石灰系焼却灰 A	70%	6.06×10^{-2}	—	4.12×10^{-2}	2.78×10^{-4}
	100%	6.47×10^{-4}	—	5.17×10^{-5}	3.31×10^{-6}
石灰系焼却灰 C	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}	—
高分子系焼却灰	70%	1.01×10^{-3}	—	9.24×10^{-4}	7.72×10^{-4}
	100%	3.85×10^{-5}	—	3.56×10^{-5}	3.50×10^{-5}

2) 「締固めを伴わない改良土」の力学的特性 (室内配合試験の結果)

i) 試験方法

本試験に用いた下水汚泥焼却灰は、先に表 3.2.1 に示した石灰系焼却灰 A および B である。
また、配合試験に用いた試料土は、表 3.2.3 に示す含水比 60% 程度の粘性土および含水比 600%~700% 程度のピートである。

配合試験における供試体は、石灰系焼却灰またはセメントなどの混合率を変えて、「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)に準拠して作製した。

表3.2.3 室内配合試験に用いた試料土の種類と物性

項目 試料名	比 重 G_s	γ_t (gf/cm ³)	含水比 w (%)	液性限界 w_L (%)	塑性限界 w_p (%)	強熱減量 (%)	pH
粘 性 土	2.66	1.64	60.0	57.5	30.8	4.5	5.9
ピ ー ト	1.72	1.05	600~700	596.3	229.6	71.6	6.7

なお、ここでは石灰系焼却灰の自硬性を見出すために「乾燥砂+セメント」の配合条件についても実施した。

ii) 試験結果

① 石灰系焼却灰の混合率と一軸圧縮強さの関係

図 3.2.9 および図 3.2.10 には粘性土 (含水比 60%) およびピート (含水比 600%) に対して行った室内配合試験結果から、石灰系焼却灰の混合率と「締固めを伴わない改良土」の材令

28日の一軸圧縮強さの関係を示す。なお、以下本文中において混合率とは、土の湿潤重量に対する添加材の重量比率をさす。まず、図 3.2.9 より粘性土に対しては、「石灰系焼却灰B単体」の条件を除いて、石灰系焼却灰の混合率が増加するに伴い、 q_u の値が増加しており、また、セメントを組合せて混合することによりさらに顕著に強度が増加していることが認められる。特に、「石灰系焼却灰A単体」の強度発現は、「砂+セメント5%」の配合条件とほぼ同等である。しかし、「石灰系焼却灰B単体」の条件に着目すると、以下に述べるピートの場合と異なり混合率が25%以上になると q_u が減少する傾向が認められる。これは、石灰系焼却灰中に含有されているCaO成分による吸水作用のため、改良土の含水比の低下割合が大きく、混合直後に土の塑性限界以下の含水比となったためと考えられる。すなわち、下水汚泥焼却灰の混合率が増加するに伴い、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、砂質土の力学的特性に近づいていくものと考えられる。

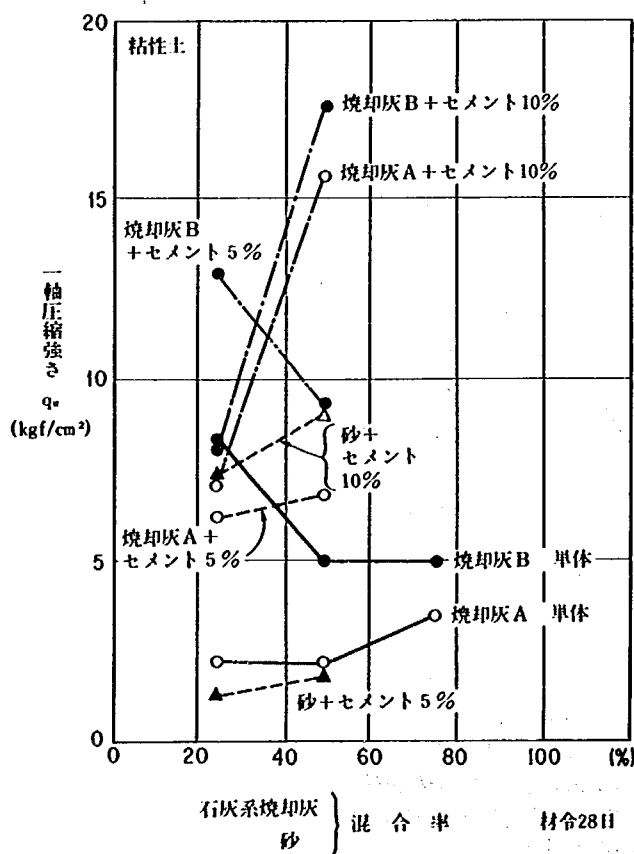


図3.2.9 石灰系焼却灰の混合率と q_u の関係
(粘性土、締固めを伴わない改良土)

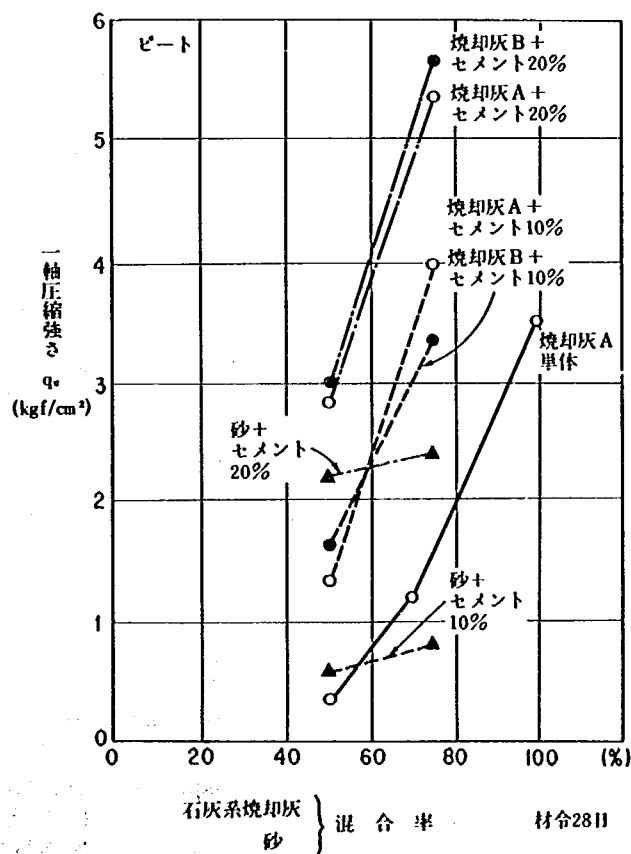


図3.2.10 石灰系焼却灰の混合率と q_u の関係
(ピート、締固めを伴わない改良土)

また、図3.2.10よりピートに対しては、セメントの混合率が一定の条件で石灰系焼却系の混合率を増加させることによる ϕ の増加が顕著に表れており、特に「石灰系焼却灰単体」で混合した配合条件の場合でも混合率の増加に伴う ϕ の増加が認められる。さらに、「石灰系焼却灰+セメント」の配合では、セメント混合率が増加するに伴い ϕ 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。

② 石灰系焼却灰による改良土の三軸圧縮強度特性

(イ) 石灰系焼却灰混合率とせん断強さの関係

三軸圧縮試験における石灰系焼却灰の混合率と最大せん断強さの関係を図3.2.11に示す。この図より、先に述べた石灰系焼却灰の混合率およびセメントを添加することによる強度への影響を確認できるとともに、さらに、この図から、石灰系焼却灰による改良土の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、「石灰系焼却灰A単体」、拘束圧力 2.0 kgf/cm^2 の試験条件では、石灰系焼却灰混合率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、石灰系焼却灰混合率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。

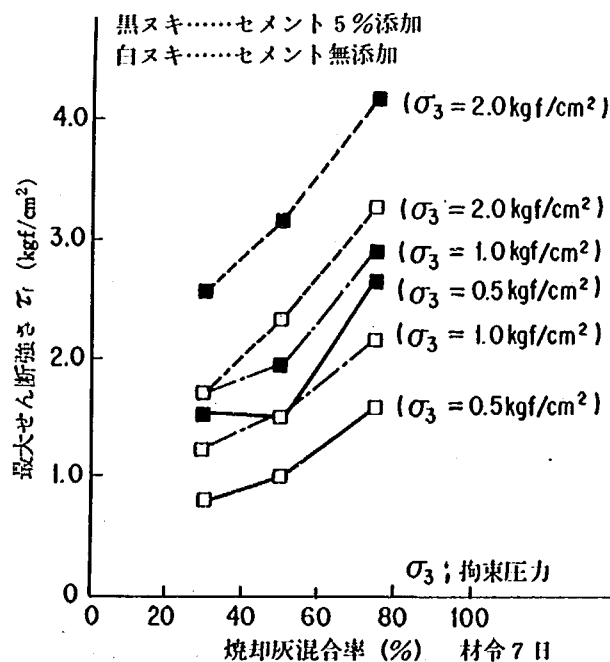


図3.2.11 石灰系焼却灰の混合率と τ_f の関係
(粘性土、石灰系焼却灰A、締固めを伴わない改良土)

(ロ) 石灰系焼却灰混合率と c 、 ϕ の関係

図3.2.12には、石灰系焼却灰の混合率と c_u と ϕ_u の関係を示す。この図より、まず粘着力 c_u に関しては、「石灰系焼却灰A単体」の場合 0.4 kgf/cm^2 から 0.6 kgf/cm^2 の範囲にあり、石灰系焼却灰混合率の増大に伴い c_u の値が増加する傾向が認められる。一方「石灰系焼却灰A+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、石灰系焼却灰混合率50%において最小となっている。

次に ϕ_u に関しては、「石灰系焼却灰A単体」の場合 23° から 34° の範囲にあり石灰系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、「石灰系焼却灰A+セメント」を混合した改良土の ϕ_u は 24° から 33° とほぼ「石灰系焼却灰A単体」の場合と同じの範囲にある。すなわち、「石灰系焼却灰A単体」の配合条件の場合は、混合率の増加に伴い、 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、本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。

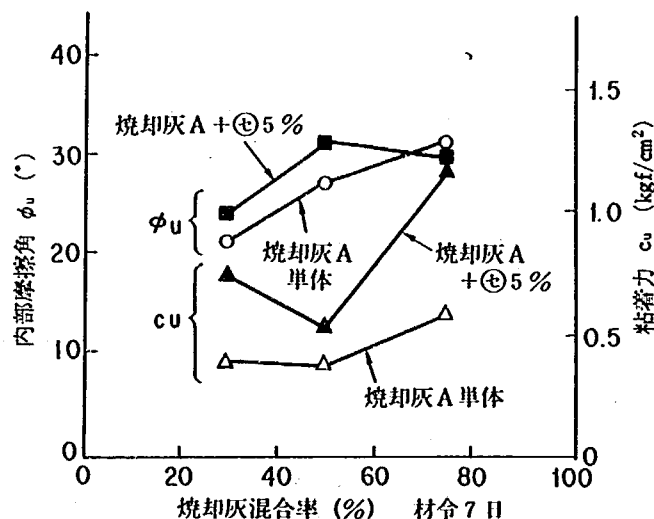


図3.2.12 石灰系焼却灰の混合率と c_u 、 ϕ_u の関係（粘性土、石灰系焼却灰A、締固めを伴わない改良土）

③ 石灰系焼却灰による改良土の含水比の変化

図3.2.13には、「石灰系焼却灰A単体」および「石灰系焼却灰A+セメント」の配合条件で粘性土およびピートに混合した場合の混合前、混合直後、7日、28日、90日における含水比の変化を示す。また、この図より、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、例えばピートの場合、含水比約700%から各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と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、材令と ϕ_u 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、改良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3.2.13に示す「石灰系焼却灰A単体」で添加混合し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ている。

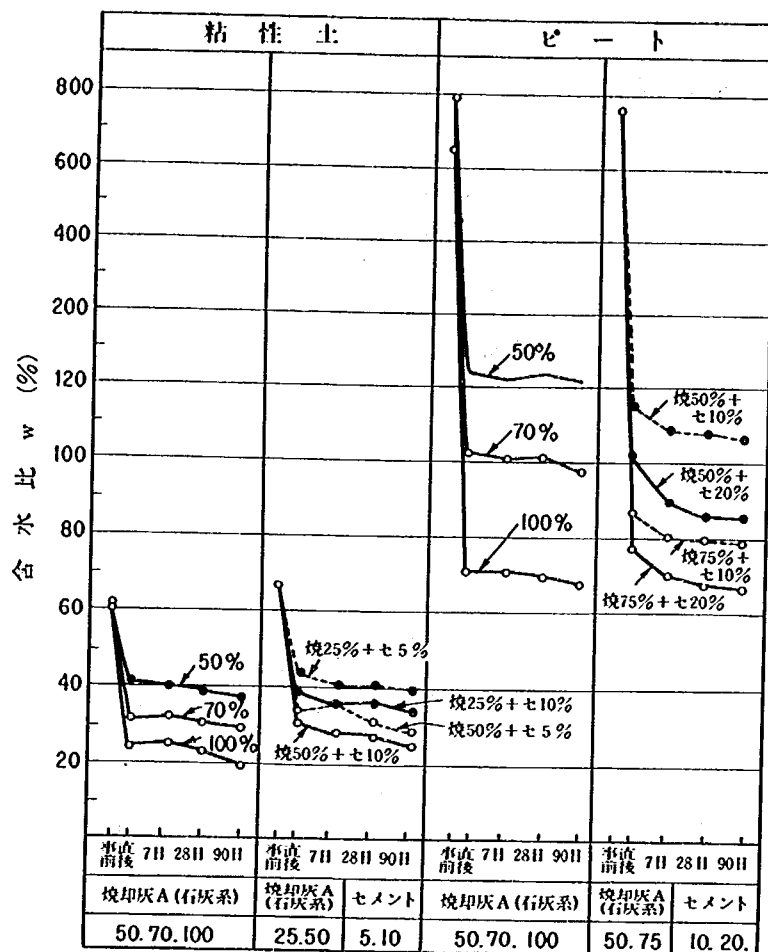


図3.2.13 石灰系焼却灰による改良土の含水比の経時変化

3) 「締固めを伴う改良土」の力学的特性

i) 試験方法

本試験における配合条件は表 3.2.4に示すとおりであり、「石灰系焼却灰A単体」および「石灰系焼却灰A+セメント」の2種の組合せである。また、本試験に用いた試料土は、「締固めを伴わない改良土」の試験に用いた粘性土である。

表3.2.4 配合条件 (締固めを伴う試験)

添 加 材	石灰系焼却灰	セメント
石灰系焼却灰A単体	50%, 75%, 100%	—
石灰系焼却灰A+セメント	50%, 75%, 100%	5%

次に、本試験における供試体は、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。また、本試験では供試体の密度

(締固め程度)が上部と下部とで同程度となるように、改良土を3層に分けて各層毎に所定の落下回数で締固めた。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。

ii) 試験結果

① 石灰系焼却灰混合率と一軸圧縮強さの関係

図 3.2.14は、添加材として「石灰系焼却灰A単体」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)で締固めた場合の石灰系焼却灰の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改良土の一軸圧縮強さが異なるが、各締固め条件とも石灰系焼却灰混合率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、石灰系焼却灰の混合率が増加す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するためと考えられ、この結果は、先に述べた「締固めを伴わない改良土」の一軸圧縮試験結果と同様の傾向である。

また、この図において石灰系焼却灰の混合率が75%付近において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石灰系焼却灰の各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、石灰系焼却灰混合率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、石灰系焼却灰混合率75%において12回/3層と50回/3層と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、「石灰系焼却灰A単体」の配合条件であっても締固めることによって改良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。

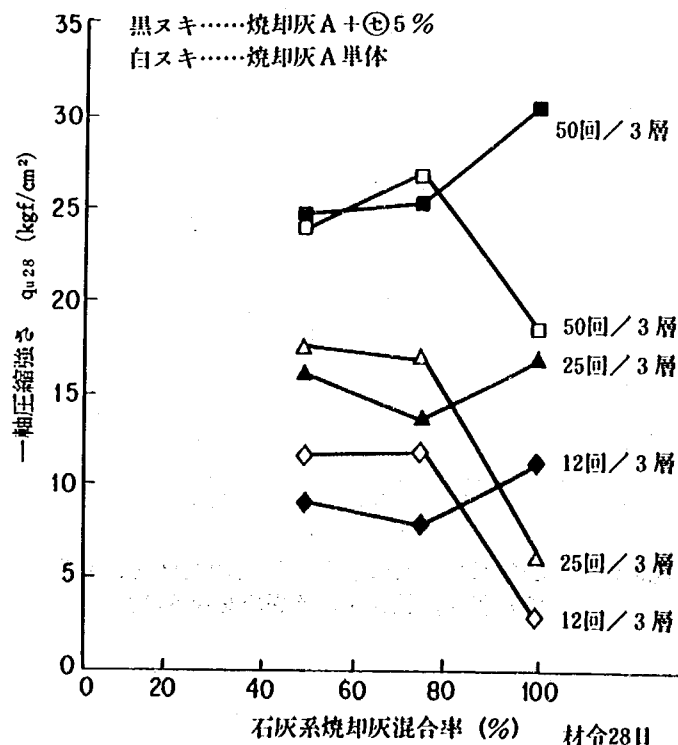


図3.2.14 石灰系焼却灰の混合率と q_u の関係(石灰系焼却灰A、粘性土、締固めを伴う改良土)

一方、同図において、「石灰系焼却灰A+セメント5%」を混合した場合には、上記に示した「石灰系焼却灰単体」の場合と異なり、石灰系焼却灰混合率75%付近で最小となり、全体として凹型を呈している。また、「石灰系焼却灰A単体」の配合条件では焼却灰混合率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。この両者の結果の相違は、セメントの添加によって粒子相互の固結化が進み、強度低下が阻止されたことに起因するものと考えられる。

② 締固め度合が改良土の強度に及ぼす影響

(イ) 締固め度合と乾燥密度の関係

石灰系焼却灰A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図3.2.15に示す。この図より、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、締固め試験結果によると石灰系焼却灰Aの最大乾燥密度(ρ_{dmax})が 1.025 g/cm^3 と小さいため、石灰系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「石灰系焼却灰A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/cm^3 から 1.22 g/cm^3 程度まで低下している。

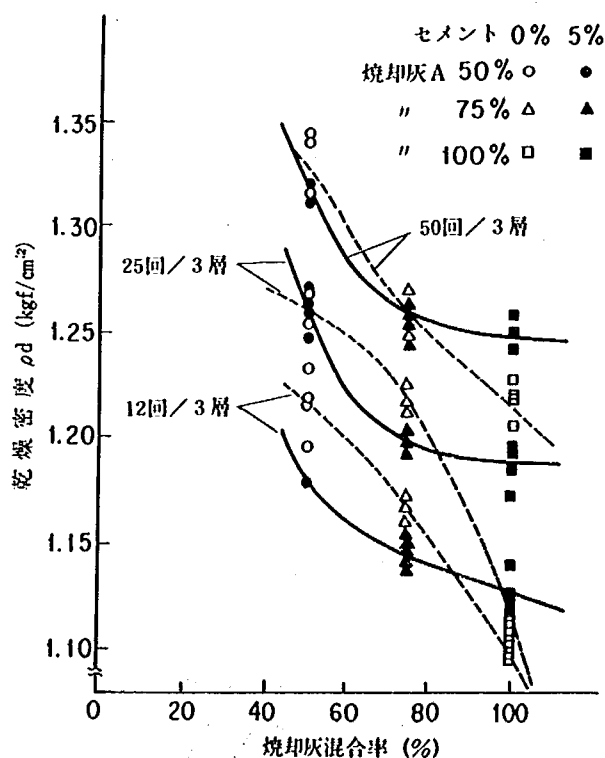


図3.2.15 石灰系焼却灰の混合率と ρ_d の関係 (石灰系焼却灰A, 粘性土, 締固めを伴う改良土)

(ロ) 締固め度合と一軸圧縮強さの関係

図3.2.16, 図3.2.17には、各々「石灰系焼却灰A単体」と「石灰系焼却灰A+セメント」の配合条件における改良土の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「石灰系焼却灰A単体」の配合条件における改良土は、乾燥密度に比例して一軸圧縮強さが増加している。また、この関係において石灰系焼却灰混合率75%と100%の差違は明確ではないが石灰系焼却灰混合率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、「石灰系焼却灰A+セメント」の配合条件における改良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、「石灰系焼却灰A単体」と異なり、石灰系焼却灰の混合率が50, 75, 100%と増大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。

以上の結果から、締固めることによって石灰系焼却灰の混合した改良土の強度を高めることが可能であるとともに、セメント添加の有無によらず締固め回数と改良土の一軸圧縮強さの間には、ほぼ比例関係にあることがわかる。

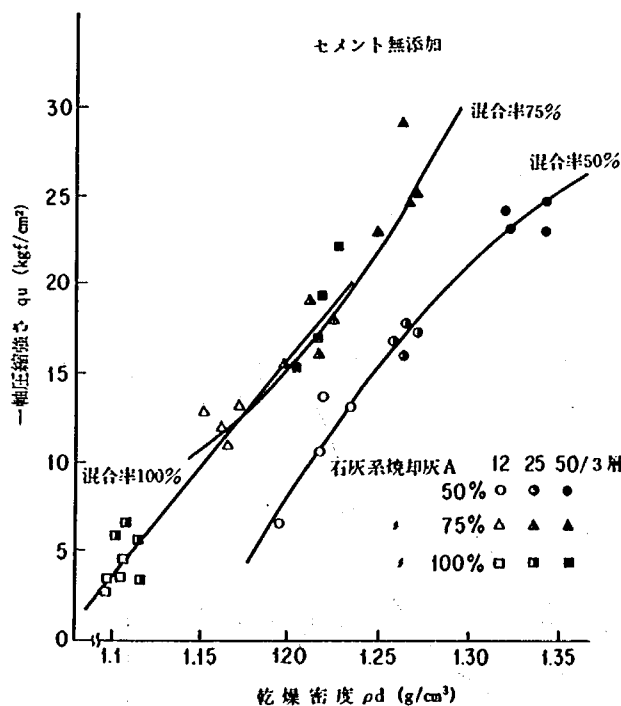


図3.2.16 締固めを伴う改良土の ρ_d と q_u の関係
(粘性土, 石灰系焼却灰A単体添加)

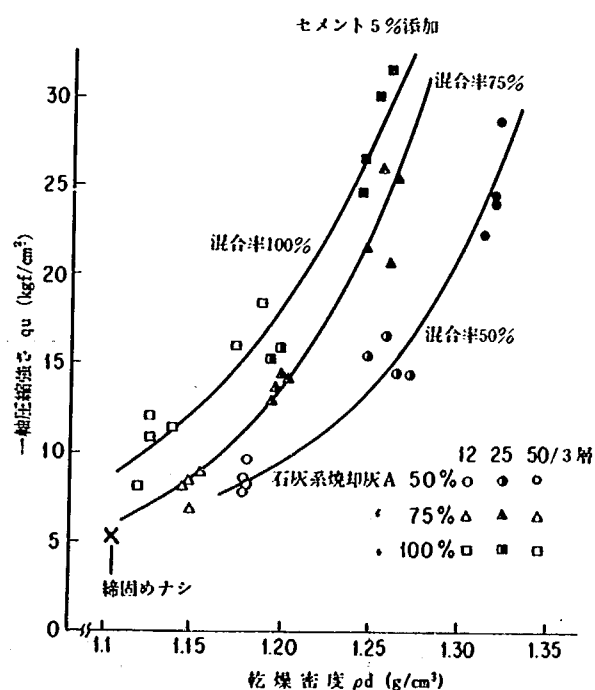


図3.2.17 締固めを伴う改良土の ρ_d と q_u の関係
(粘性土, 石灰系焼却灰A+セメント添加)

4) 下水汚泥焼却灰を用いた現地試験施工

i) 試験施工の概要

室内配合試験により石灰系焼却灰は、土質改良用添加材として適用性が高いことが認められた。そこで、石灰系焼却灰を用いた現地試験を粘性土地盤（自然含水比60%程度）、PEAT地盤（自然含水比600%~700%程度）の2箇所で実施した。なお、各試験施工の概要を表3.2.5に示す。

① 試験施工に用いた下水汚泥焼却灰の種類

各試験施工で用いた石灰系焼却灰の性状を表3.2.5にまとめて示す。また、図3.2.18には、それらの粒度分布を示す。

表3.2.5 現場試験施工の概要

試験施工場所		名古屋市大江ポンプ場敷地	埼玉県与野市
添加材の種類		石灰系焼却灰 普通ポルトランドセメント	石灰系焼却灰 普通ポルトランドセメント
石灰系焼却灰の 成分含有 率 (%)	CaO	35.5	34.5
	SiO ₂	26.0	21.7
	Al ₂ O ₃	7.65	13.9
	MgO	2.14	1.57
	Fe ₂ O ₃	17.4	15.1
	SO ₃	2.90	3.78
改良対象土層		含水比57%~77%の粘性土層	含水比500%程度のPEAT層

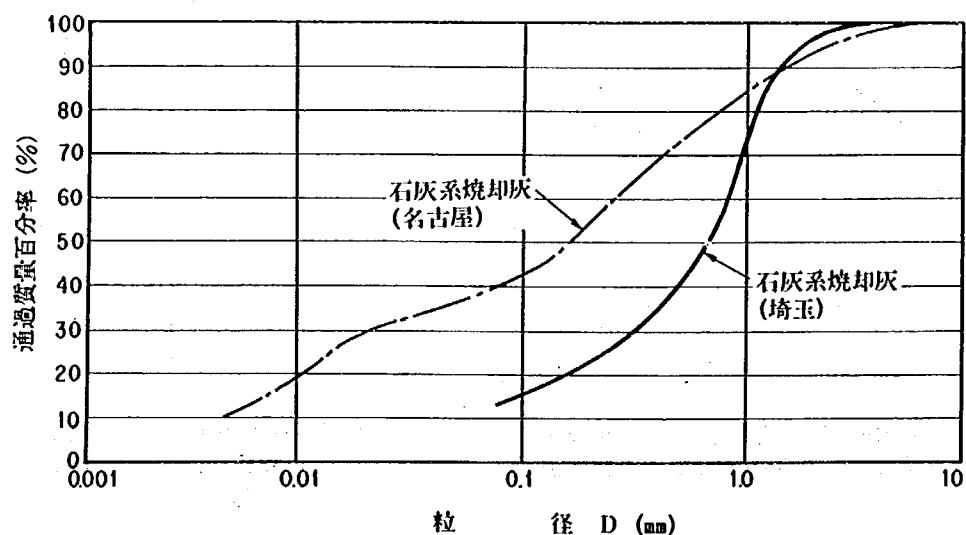


図3.2.18 現場試験に用いた石灰系焼却灰の粒度分布

② 施工方法

各試験施工では、深層混合処理工法として粉体噴射攪拌工法を用い、石灰系焼却灰およびセメントなどの土質改良用添加材を粉粒体のまま土中へ供給し、攪拌混合することにより改良柱体を造成した。粉体噴射攪拌工法を本研究の試験施工に用いた主な理由として次の項目があげられる。

(イ) 本工法では、土質改良用添加材を粉粒体のままで仕様できるので、地盤内に余分な水を加えることなく軟弱地盤の改良が可能である。そのため、下水汚泥焼却灰のような材料をスラリー化する必要がなく処理プラントから搬出された乾燥状態のままで地中に供給することが可能である。

(ロ) 本工法では、土質改良用添加材のサイロから土中の噴射にいたるまで一連のクローズドシステムとなっているため、下水汚泥焼却灰などの粉塵発生が少ない。

(ハ) 図3.2.19に示すように、2種以上の異なった材料を組み合わせることで土質改良用添加材として用いる場合、サイロを設けることにより、各々の添加材の品質を維持できるとともに、供給割合もコントロールできる。

図3.2.19には、本試験施工における施工機械の構成例および改良原理を示す。

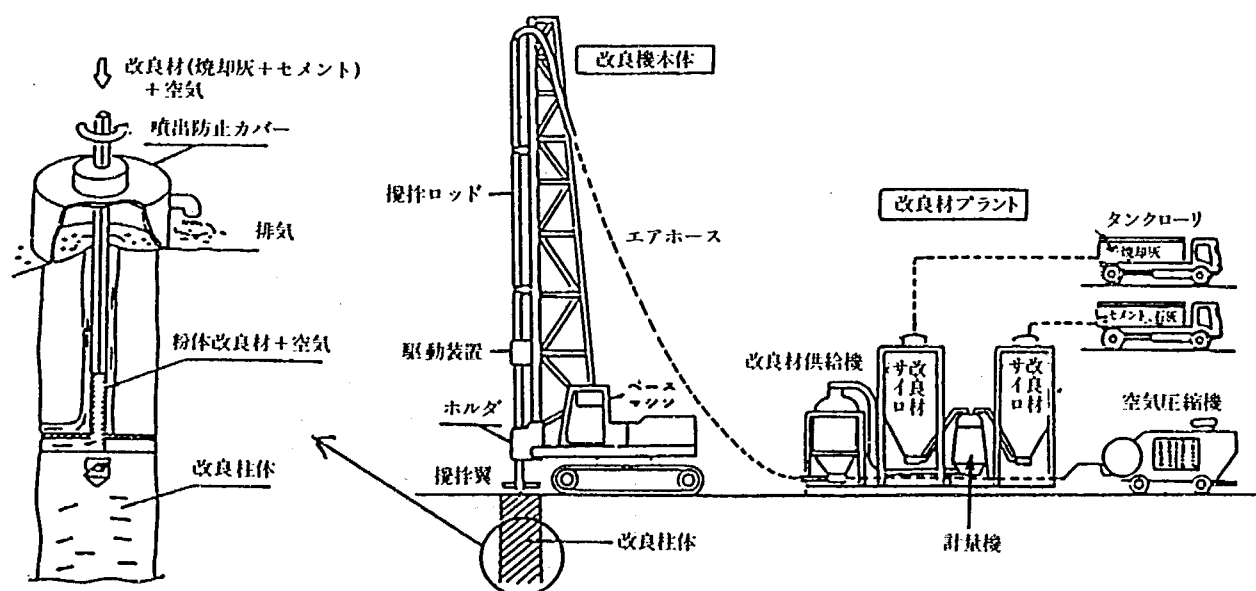


図3.2.19 現場試験施工の概要

ii) 試験施工の結果

① 石灰系焼却灰を用いた粘性土地盤改良試験施工例

(イ) 試験施工の概要

本試験施工は、石灰系焼却灰を深層混合処理の土質改良用添加材として粘性土に混合した場合の改良効果を把握するものである。本試験施工は、名古屋市が実施したものである。

(ロ) 試験施工場所の地盤性状

本試験施工場所の地盤性状は、上部の埋土層と下部の沖積粘性土層より構成されている。上部埋土にはさらに土層1～2mの礫混じり砂質土層と層厚2～3mのシルト、礫、腐植物などの混在した不均一な砂質土層に分けられる。これらの埋土層は粗粒分(74 μ m以上の粒子)が60%近い土質であり、含水比 $w_n=27\sim49\%$ 、N値=3～4の緩い状態となっている。また、下部の沖積粘性土層は全体的に貝殻片を含むシルト層で、各所にシーム状細砂層をはさんでいる。この粘土層は自然含水比 $w_n=57\sim77\%$ 、液性限界 $w_L=44\sim60\%$ と含水比が液性限界を上回っており、 $q_u=0.4\sim0.5\text{kgf/cm}^2$ 、N値=0の非常に軟弱な土質となっている。

(ハ) 室内配合試験結果

図3.2.20, 3.2.21には、土質改良用添加材(石灰系焼却灰, セメント)混合率と一軸圧縮強さの関係を示す。図3.2.20より、「石灰系焼却灰単体」の配合条件の場合、混合率50%までは混合率の増加に伴い q_u の増加が認められる。しかし、混合率が75%, 100%と増加すると逆に q_u が

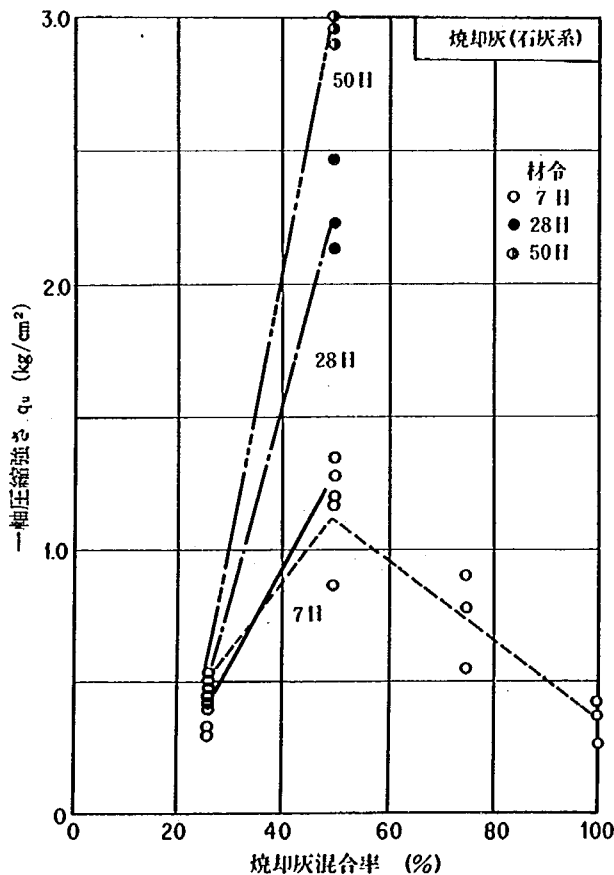


図3.2.20 石灰系焼却灰混合率と q_u の関係
(石灰系焼却灰単体, 名古屋市)

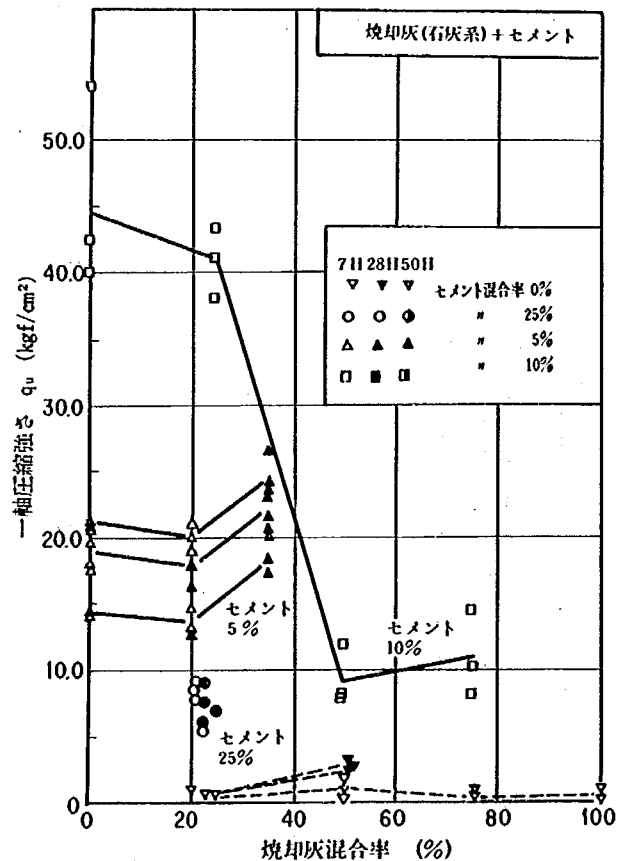


図3.2.21 石灰系焼却灰混合率と q_u の関係
(石灰系焼却灰+セメント, 名古屋市)

減少している。また、「石灰系焼却灰+セメント」の場合においても、図3.2.21から判断すると焼却灰混合率が50%以上の場合において、 q_u が大きく低下している。この原因としては含水比 $w_n=60\%$ 程度の粘性土に対し、石灰系焼却灰やセメントなどの土質改良用添加材の混合率が50%を超えると改良土の含水比は塑性限界を下回ることになり、このように、大量の乾燥粉体を一時に混入することにより、セメント固結反応に使用される水分が不足することになるとともに、改良土の結合力が低下することによるものと考えられる。

(二) 試験施工の結果

図3.2.22には、各改良柱体から28日後に採取した供試体による一軸圧縮強さ q_u の深度分布を示す。「石灰系焼却灰単体」の場合、混合率で25%、50%の順に、また、セメント5%を添加した場合、石灰系焼却灰混合率20%、35%の順に q_u は増加しており、室内配合結果と同じ傾向が認められる。しかし、「石灰系焼却灰22.5%+セメント2.5%」配合の場合のみ、他ケースに比べ著しく低い強度となっている。次に、セメント5%添加の配合条件では強度の発現は大きく、「石灰系焼却灰単体」の配合条件の場合と比較すると約3倍の強度となっている。一般的な深層混合処理の施工においては、攪拌精度の面で現場改良強度が室内配合強度に比べ低下する傾向にある。しかし、改良材混合率が大きく、対象土の体積に比べ添加混合する改良材の体積が大きい場合、本試験施工のように現場強度が比較的大きくなる傾向がよくみられる。その原因としては、現場施工において、投入された改良材の体積分だけ地盤土が改良対象範囲外へ押出され、結果的に、改良土の混合率が所定より大きくなることなどが考えられる。

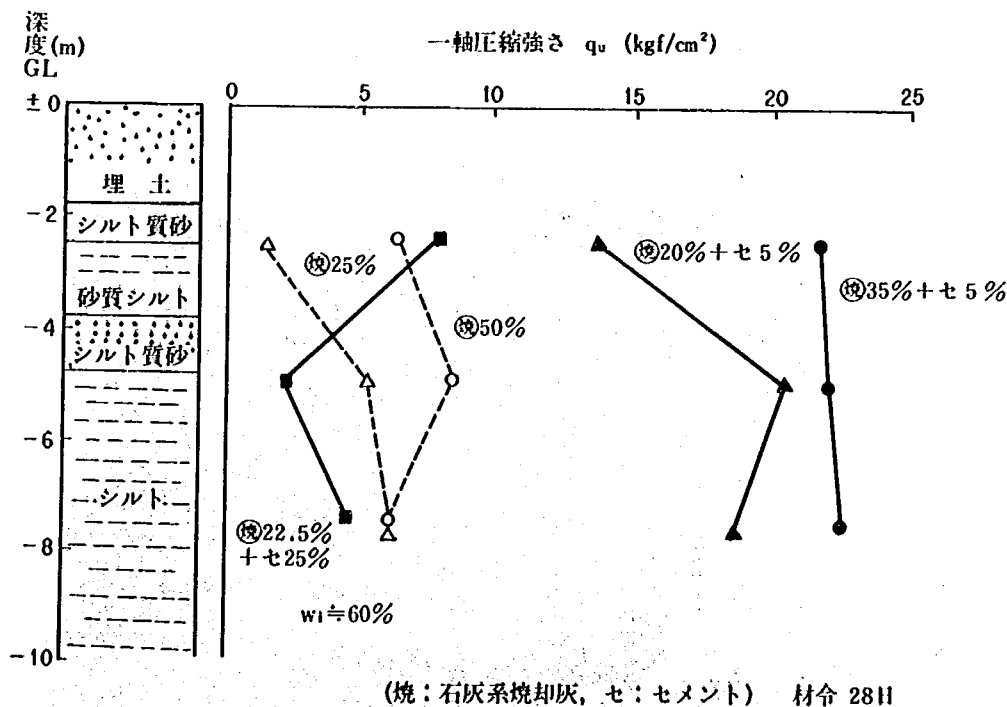


図3.2.22 石灰系焼却灰による粘性土地盤改良結果 (名古屋市)

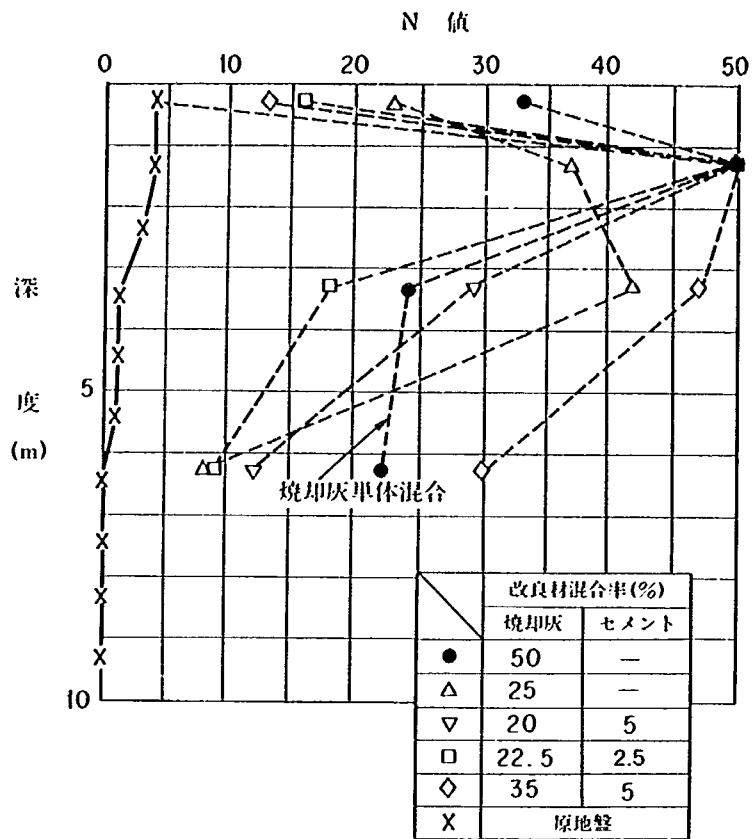


図3.2.23 改良柱体のN値の深度分布
(名古屋市)

次に、図 3.2.23には、各ケースの改良柱体に対する標準貫入試験結果を示す。図より、一軸圧縮強さの分布と同様に「石灰系焼却灰35%+セメント5%」の配合条件の効果が顕著であるほか「石灰系焼却灰単体」の配合条件の場合も十分な改良効果が認められる。なお、写真 3.2.1 には、改良柱体の造成状況を示す。



写真3.2.1 石灰系焼却灰による改良状況 (名古屋市)

② 石灰系焼却灰を用いたピート地盤改良試験施工例

(イ) 試験施工の概要

本試験施工は、石灰系焼却灰の深層混合処理への適応性を検討するため粉体噴射攪拌工法を用いたピート地盤の現場試験施工を実施し、石灰系焼却灰のピート地盤における土質改良用添加材としての適用性を検討するものである。

(ロ) 対象地盤

試験施工における対象地盤は、埼玉県与野市に分布するピート層およびシルト層である。地盤の柱状図を図3.2.24にピート層の性質を表3.2.6に示す。表3.2.6に示すとおり上層のピート層は自然含水比 $w_i = 500$ (%) と高含水比であり、また植物繊維分を多く含んだ状態である。

なお、改良範囲は図3.2.24に示す $GL-0.5m \sim GL-6.5m$ の $6m$ とした。

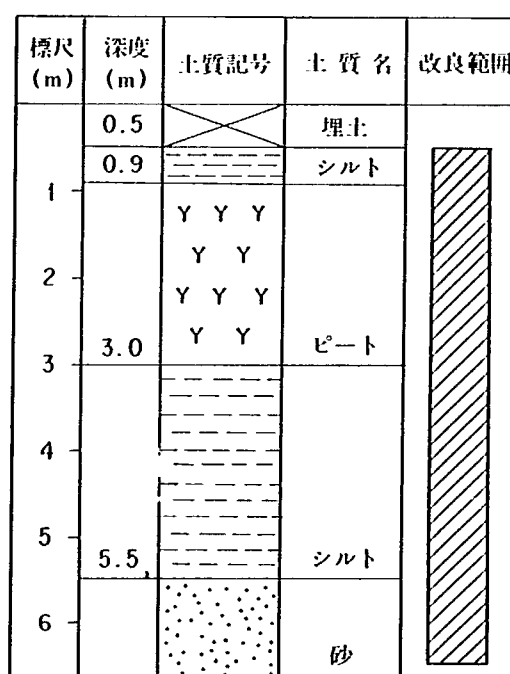


図3.2.24 ピート地盤の土質柱状図
(埼玉県与野市)

表3.2.6 ピート層の性質

粒 度 (%)				比 重 Gs	含水比 w_i (%)	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	強熱減量 Lig (%)
礫 分	砂 分	シルト分	粘土分				
3.7	30.3	43.0	23.0	1.722	500	1.1	71.6

粒度において砂分以上は植物繊維である

(ハ) 室内配合試験結果

石灰系焼却灰を用いたピートの室内配合試験結果を図3.2.25に示す。図3.2.25に示すとおり、石灰系焼却灰混合率の増加とともに一軸圧縮強さが大きくなっている。さらにセメントを添加することにより一軸圧縮強さはさらに大きくなることがわかる。また、「石灰系焼却灰単体」の配

合条件においても混合率70%以上では一軸圧縮強さは1 kgf /cm²以上あり、低強度を目的とした改良では土質改良用添加材として用いても十分な改良効果を得られるものと考えられる。

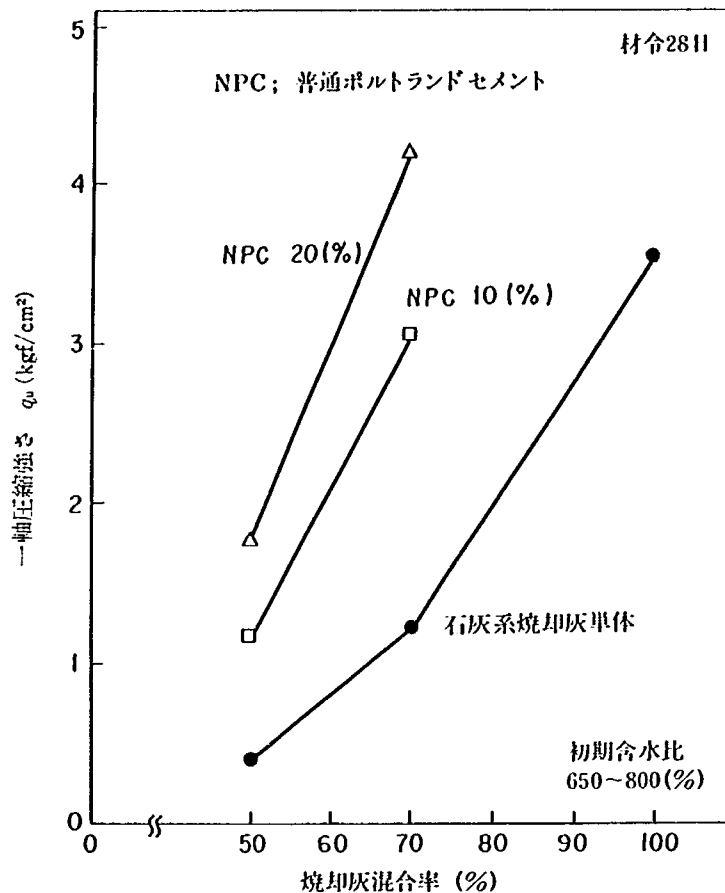


図3.2.25 ピートに対する室内配合試験結果
(埼玉県与野市)

(二) 試験施工の結果

図 3.2.26には、改良施工後28日後のオランダ式二重管コーン貫入試験の結果を示す。図より原位置土では q_c の値が3 kgf /cm²程度であるのに対して、「石灰系焼却灰単体600kg/m³」の配合条件では q_c 約10kgf /cm²以上と現地盤土の3倍程度の強度を発現しており、「石灰系焼却灰単体」の配合条件であっても比較的良好な改良効果が得られていることが確認された。さらにセメントを添加した配合条件においては、現地盤の10~20倍の強度が得られている。次に、図 3.2.27には、石灰系焼却灰添加量（またはセメント添加量）と一軸圧縮強さ、含水比の関係を現場試験施工と室内配合試験の28日材令において比較して示す。図より、改良材添加量が一定である場合、石灰系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、含水比が高いピート地盤においては土質改良効果は主にセメントによる割合が高いことがうかがえる。しかし、「石灰系焼却灰単体」であっても含水比81%と大幅に減少し、さらに一軸圧縮強さが2 kgf /cm²程度発現している。この試験施工から、石灰系焼却灰はピート地盤の深層混合処理における土質改良用添加材としても適用性が高いことが確認された。

改良柱体造成後32日後に掘り出した「石灰系焼却灰200kg/m³+セメント400kg/m³」および「石灰系焼却灰単体600kg/m³」の配合条件における改良柱体の状況を写真3.2.2および写真3.2.3に示す。各条件とも比較的良好な改良柱体が造成されており、特に、石灰系焼却灰単体を混合・攪拌した配合条件においても良好な固結形状で自立していた。

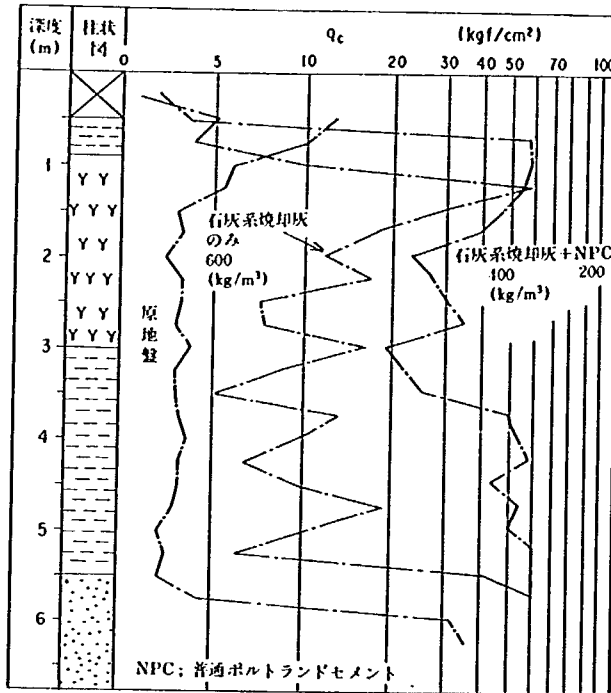


図3.2.26 改良柱体の q_c の深度分布
(埼玉県与野市)

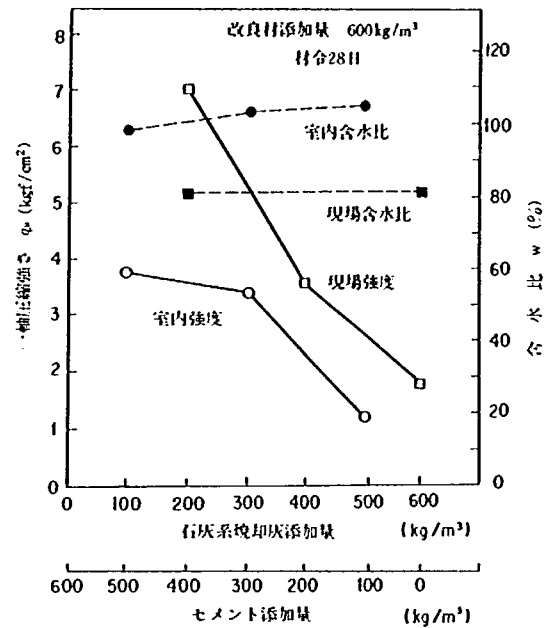


図3.2.27 添加量と q_u , w の関係
(室内配合試験との比較, 与野市)

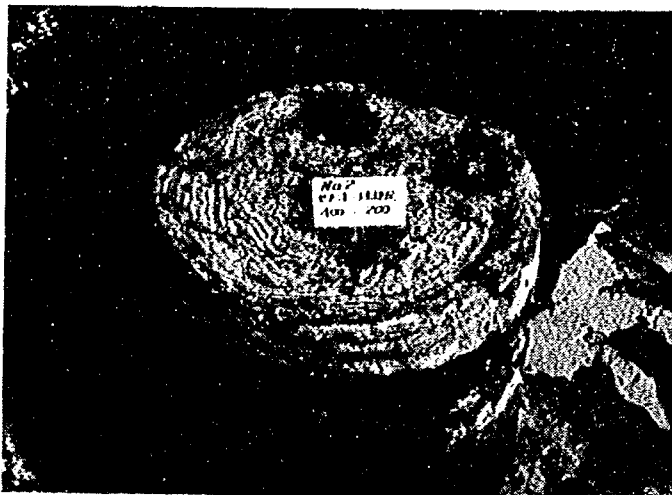


写真3.2.2 「石灰系焼却灰+セメント」
によるビート地盤改良状況
(与野市)



写真3.2.3 「石灰系焼却灰単体」
によるビート地盤改良状況
(与野市)

(4) まとめ

ここでは、下水汚泥焼却灰を対象として下水汚泥焼却灰単体の固化特性、または高含水比粘性土およびピートに対するを対象とした室内配合試験、現地試験施工の結果から深層混合処理における土質改良用添加材としての適用性について述べてきた。以下には、本研究の結果明らかとなった事柄を列挙する。

- ① 石灰系焼却灰は、適度な湿分状態で締固めた場合、自硬性による強度発現が著しく、また、材令に伴い強度が増加することが確認された。また、この強度発現は、締固めの程度に大きく依存していることも明らかとなった。しかしながら、高分子系焼却灰に関しては、ほとんど強度増加が認められなかった。
- ② 石灰系焼却灰を単体の状態で粘性土またはピートに「締固めを伴わない」状態で添加・混合した場合、含水比の低下やコンシステンシーの改善などの効果が得られるとともに、強度も増加することが確認された。また、セメントや石灰などの硬化材と組合せて添加・混合することによりさらに高い強度を発現させることが明らかとなった。
- ③ 石灰系焼却灰を添加・混合した改良土を締固めることにより、強度が増加することが判明し、表層混合処理などの締固めが可能な改良に際しては、十分な強度発現が期待できる。
- ④ 石灰系焼却灰を用いた粉体噴射攪拌工法による現地試験施工の結果、比較的十分な改良効果が得られ、低強度改良を目的とした場合では、深層混合処理における土質改良用添加材として十分利用可能であることが確認できた。しかしながら、現段階ではセメントなどと組合わせて用いた方が適当と考えられる。

以上のように石灰系焼却灰は、深層混合処理における土質改良用添加材として十分適用可能であることが明らかとなったが、下水汚泥焼却灰の品質のばらつき、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る。また、これらの下水汚泥焼却灰の供給体制の整備、品質基準などは、有効利用を図っていく上で重要な課題である。

(施工研究室担当)

3.3 改良土を用いた埋戻し技術^{注)}

(1) 研究目的

各種埋設管や地中構造物の埋戻しには良質の砂を用いるというのが、埋戻しに対する従来からの標準的な考え方であるが、最近では掘削に伴って大量に発生する残土の処分地の確保が困難になりつつあるため、掘削した現場発生土を土質改良して埋戻し材として再利用しようという試みがなされ始めている。

本研究では、こうした背景をうけて、掘削発生土にセメントや石灰などの土質改良用添加材を添加・混合して土性を改善し、良質の砂のかわりに各種埋設管や地中構造物の埋戻し材として利用する技術を開発することを目的とする。このため、改良土の要求品質、埋戻しの施工方法や施工管理方法などについて、現場での試験施工と長期的な挙動の把握にもとづく慎重な検討が必要である。特に本研究では、交通量の多い国道クラスの道路下の埋戻しを対象としたので、長期的な交通荷重の繰返しに対する耐久性に主眼をおいて検討を加えることにした。

(2) 研究内容

昭和57年度に、CBR 試験を改良した室内繰返し載荷試験（10万回載荷）を行い、改良土はCBR 値が比較的小さい場合には、比較的初期の載荷で変形が生じたり、繰返し回数の増加とともに徐々に変形が進行する傾向にあるが、改良土の CBR 値を高めると、そのような傾向が著しく小さくなることを明らかにした。

昭和58年度は、土質改良土を用いた埋戻し箇所の長期的な挙動を検討するために、現場における試験施工とその追跡調査に着手した。4つの試験箇所では、改良土を用いた試験区間と従来どおり良質の砂を用いた試験区間を設けて埋戻し部の沈下量、路面の平坦性、ひび割れ率、たわみ量などの長期的な挙動の追跡を開始した。また、埋戻し材の要求品質についての考え方を整理しておく目的で、各地方公共団体における現行の埋戻し基準を収集して整理するとともに、管を埋設し、保護する立場からみた埋戻し材の要求品質について関係機関へのヒアリングを行って中間的なとりまとめを行った。

59年度は、58年度に施工した試験箇所の追跡調査を継続して実施するとともに、新たな試験箇所を1箇所設けて試験施工を行い、その追跡調査を開始した。また、「改良土を用いた埋戻しの手引」の作成に着手した。

60年度は、上記5箇所の試験箇所を追跡調査を継続するとともに、「改良土を用いた埋戻しの手引」を作成した。

(3) 研究成果

1) 改良土を埋戻しに用いた現場試験施工結果

i) 概要

改良土を埋戻しに用いた場合の長期的な挙動を良質な砂を用いた場合と比較して検討するため、

注) 本研究は、下水汚泥焼却灰の利用を直接の対象としていないが、この成果は焼却灰を添加した改良土を埋戻し材として利用するときに活用できる。

実際の道路に改良土で埋戻しを行った区間と良質の砂で埋戻しを行った区間を設け、その長期的な挙動を追跡した。なお、追跡調査に先立ち、試験施工に用いた改良土と良質の砂の材料試験ならびに試験施工時の施工管理試験を実施した。

ii) 調査項目

試験区間の地盤条件（土質、地下水位、支持力など）をあらかじめボーリングまたは試験掘りにより調査するとともに、試験に用いた改良土と良質の砂の材料試験として、比重試験、粒度試験、含水量試験、締固め試験および変状土 CBR 試験（修正 CBR）を実施した。また、施工管理試験として、現場密度試験、土研式貫入試験および現場 CBR 試験を行った。追跡調査の調査項目は、①埋戻し部の層別沈下量、②路面の平坦性試験による路面の凹凸、③横断形状試験による路面の横断凹凸、④路面観察によるひび割れ率、⑤ベンケルマンビームによる路面のたわみ量、および⑥交通量である。

iii) 試験箇所

試験箇所は、表-3.3.1に示す5カ所である。

表3.3.1 試験箇所一覧

No	工事場所	占用道路	管の種類と諸元	掘削断面	改良土の性質
A	茨城県石岡市	国道355号線	電話線ケーブル径10cm (3条3段)	幅 深さ 0.75m×1.55m	関東ローム +消石灰
B	茨城県真壁郡関城町	国道294号線	電話線ケーブル径10cm (2条2段)	0.70m×1.45m	関東ローム +消石灰
C	大阪市南河内郡狭山町	大阪府道	ガス管 径20cm (鋳鉄管)	0.75m×1.5m	砂質土+ 生石灰
D	堺市小阪	大阪府道	ガス管 径15cm (鋳鉄管)	0.75m×1.5m	砂質土+ 生石灰
E	横浜市鶴見区末広町	東京錦材リサイクル クリンク株式会社 進入道路	PLP鋼管 (口径200mm)	0.80m×1.5m	砂質土+ 生石灰

iv) 試験施工に用いた改良土の品質と強度

今回の現場試験施工で用いた改良土の品質と強度についてまとめると、表3.3.2のようになる。これをみると、サイトC、D、Eで用いた砂質土系の土質改良土は、74μ以下の細粒分含有率が15%程度以下で日本統一土質分類でいえば砂{S}の粒度をもち、締固め度95%における修正CBRが40%を超える値を示す良質の材料で、下層路盤にも利用できる品質を有している。

このような良質の砂質土系の改良土を、通常行われるように、まき出し厚20~30cmで、60~80kgランマーを用いて2往復程度の締固めを行うと、埋戻し部の強度は、表に示すように、現場CBRで6~12%程度、土研式貫入試験値の深度方向の平均で15~45回/10cm程度となる。

一方、サイトA、Bで用いた粘性土系の改良土は、粒度と自然含水比からみると、細粒分の多い砂質土{SF}程度までに品質が改良されており、締固め度95%における修正CBRも20%を超える良好な値を示している。これを上述のような通常の方法で締め固めると、埋戻し部の強度

表3.3.2 現場試験施工で用いた改良土の品質と強度

サイト	改良土の種類	材 料 試 験 結 果				施工管理試験結果	
		-74 μ (%)	W _n (%)	修正CBR (%)	設計CBR (%)	現場CBR (%)	土研式貫入試験 (回/10cm)
A	粘性土系	4.2	35.9	35.0	37.3	9.0 6.1	21 18
B		4.6	46.3	20.0	20.6	6.9 6.6	12 11
C	砂質土系	1.4	10.9	86.0	103.3	12.6 9.8	46 28
D		1.6	11.4	69.0	78.0	8.2 10.1	16 18
E		4.5	7.7	46.0	63.7	5.5	46

注1) 修正CBRは、締固め度が95%のときの値を示す。

注2) 設計CBRは、3層67回の突固め後、6日間室内で養生したのち4日間水浸して求めた値である。

注3) 現場CBRは、埋戻しの施工直後に測定した値である。

は、現場CBRで6～9%程度、土研式貫入試験値の深度方向の平均で10～20回/10cm程度となった。

v) 追跡調査結果

上記の各サイトのうち、代表的な挙動を示していると考えられるサイトAとCの結果の概要を以下に示す。

〈サイトA〉

サイトAにおける埋戻し条件と沈下棒設置および舗装復旧断面を表3.3.3と図3.3.1に示す。

また、図3.3.2～図3.3.4は、サイトAにおいて、仮復旧直後から、舗装表面、路床中間部、管上部、管底部の各点の沈下量を水準測量により測定した結果を示したものである。なお、交通量は、大型車混入率が約20%のC交通に区分される。

表3.3.3 各試験区間の埋戻し条件（サイトA）

区 間	㊶区間	㊷区間	㊸区間	備 考
埋戻し部分				
路 床 部	山 砂	改良土	改良土	各区間は
管 路 周 辺 部	山 砂	山 砂	改良土	延長20m

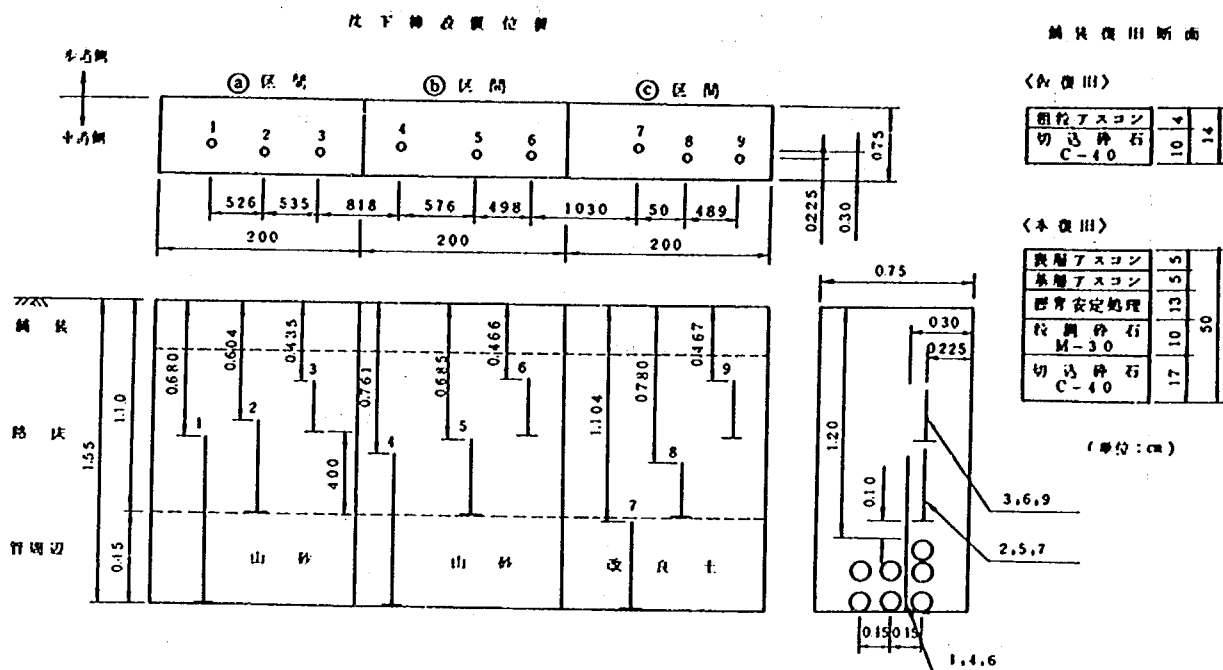


図3.3.1 沈下棒設置位置および舗装復旧断面 (サイトA)

サイトAでは、試験施工のうち交通を開放してから約350日の期間のデータが得られている。この期間中、約100日目に本復旧を行っている。

約100日の仮復旧期間においては、山砂で埋戻しを行った区間（山砂区間）と改良土で埋戻しを行った区間（改良土区間）で20mm程度、また管回りを山砂でその上部を改良土で埋戻した区間（山砂+改良土区間）で10mm程度の沈下が生じているが、これらの沈下のほとんどが管周辺部と路盤部で生じていることが判明した。ただし、（山砂+改良土）の区間では管周辺部の沈下が比較的少ない。

本復旧後は、山砂区間で20mm弱、改良土区間で10～15mm、（山砂+改良土）の区間で10～20mmの沈下が主として路盤部で生じており、いずれの区間においても沈下が漸増する傾向にある。

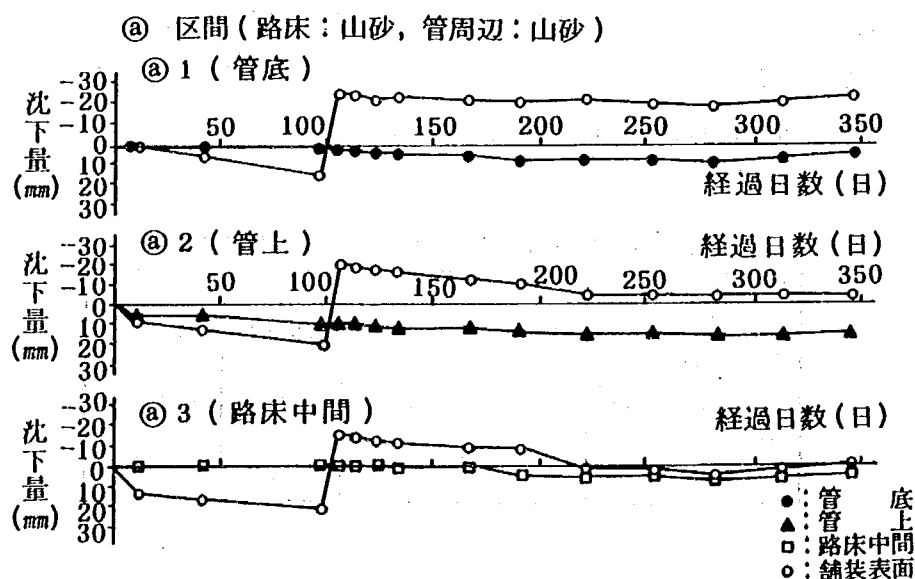


図3.3.2 ①区間の沈下量測定結果 (サイトA)

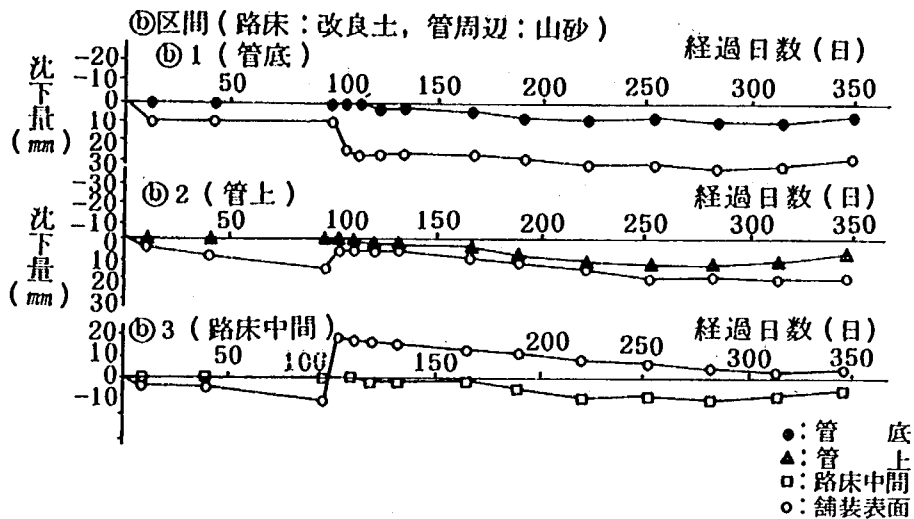


図3.3.3 ㊦区間の沈下量測定結果（サイトA）

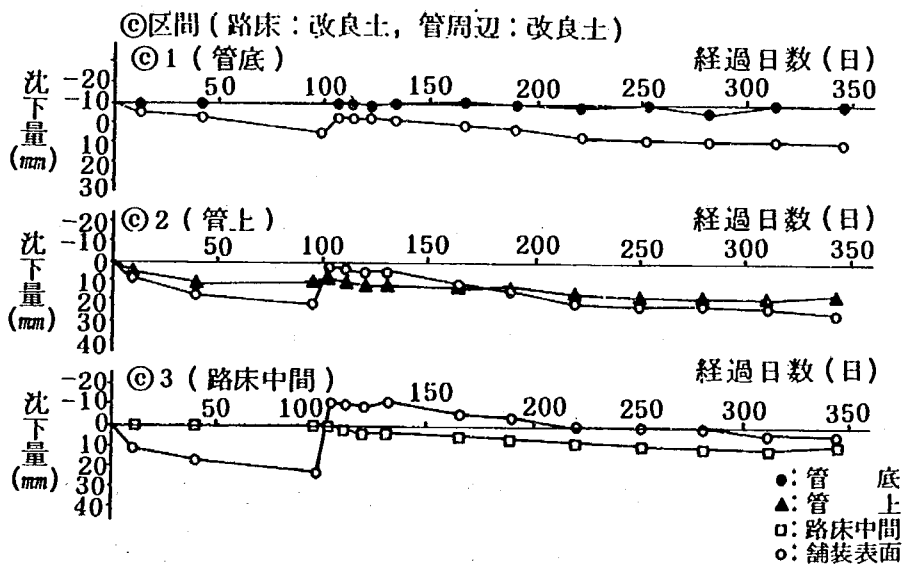


図3.3.4 ㊦区間の沈下量測定結果（サイトA）

以上のようにサイトAでは、いずれの工区においても砕石を用いた路盤部の沈下が大きな比率を占めており、埋戻し部では締固めがやや困難な管周辺部を除いて沈下がほとんど生じていない。

なお、路面の縦断凹凸、横断凹凸、たわみ量などについては、山砂区間と改良土区間とで特に有意な差は認められなかった。

＜サイトC＞

サイトCにおける各試験区間の埋戻し方法を図3.3.5に示す。沈下板は舗装表面から50cm、80cm、110cm、の各深度に設置してある。本復旧時には、表面から深さ10cmまで剥離し、不陸を整正したのち15cmの厚さで基層を舗設した。さらに、交通開放から約1週間後に5cmの厚さで表層を舗設した。なお、交通量は、大型車混入率が約10%のB交通に相当する。

サイトCにおける埋戻し部の沈下量の経時変化を図3.3.6～図3.3.8に示す。

サイトCでは、約240日（うち45日程度が仮復旧期間）の記録が得られている。全沈下量につ

いてみると、山砂区間で30～40mm、改良土区間で20mm、(山砂+改良土)の区間で15～20mm程度の沈下が生じており、改良土を用いた方が山砂より良好な結果を示している。

沈下量の層別の内訳については、いずれの区間においても1.1m以深の管周辺部と50cm以浅の路盤部に沈下が集中しており、サイトAと同様の結果となっている。なお、沈下の発生時期をみると、管周辺部の沈下のほとんどは交通開放から30～90日程度までの間に生じるが、路盤部の沈下は交通開放から約240日を経過した時点でも漸増する傾向にあった。

なお、路面の平坦性試験結果をみると、いずれの区間においても、本復旧直前にはかなり平坦性が低下するが、本復旧時に平坦性が改善されその後はあまり低下しないことがわかる。また、路面の横断凹凸の測定結果から、山砂を用いたa区間で、本復旧までの沈下が比較的大きいことが指摘できる。また、たわみ量試験結果は、各区間でそれほど有為な差が認められなかった。

vi) 追跡調査結果のまとめ

改良土を埋戻しに用いた現場試験施工とその追跡調査の結果から、改良土の埋戻しへの適用性に関して、次のようなことが明らかになった。

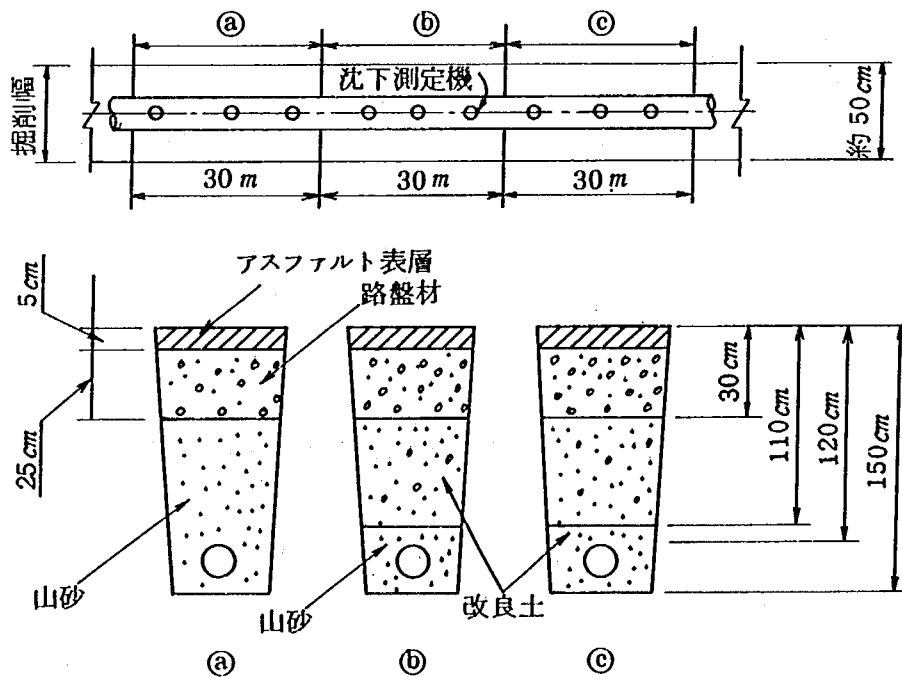


図3.3.5 埋戻し方法 (サイトC)

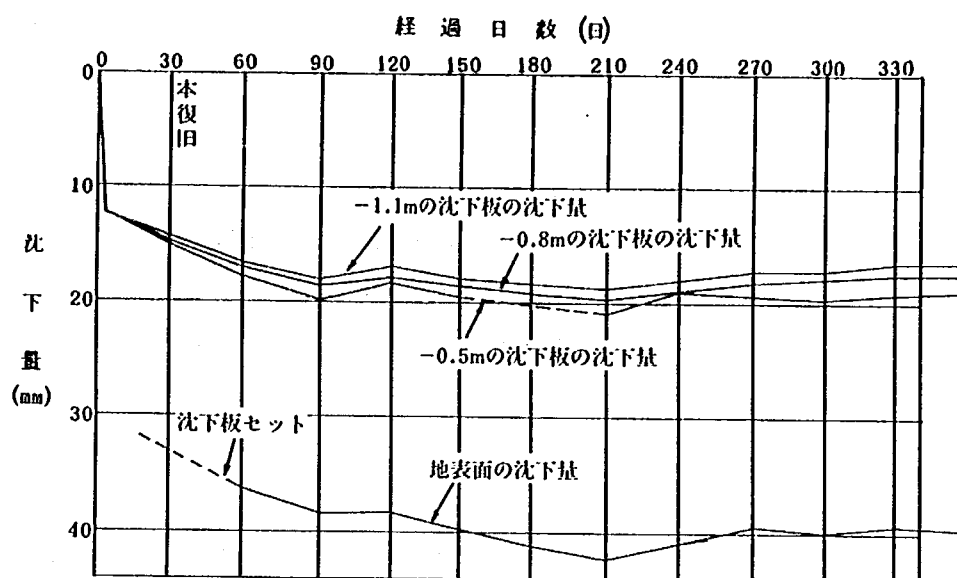


図3.3.6 ②-2区間の沈下量測定結果 (サイトC)

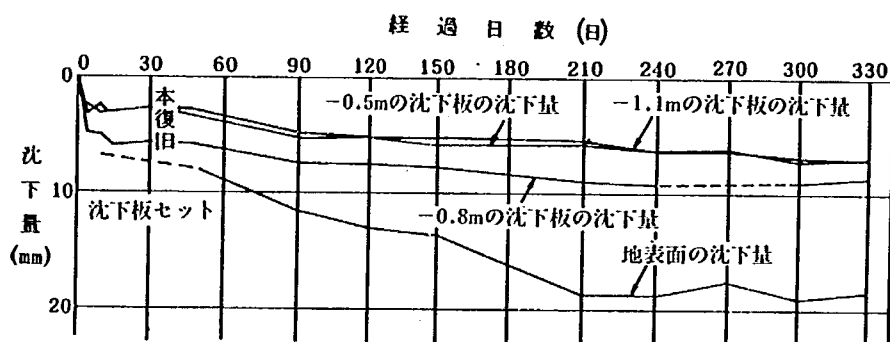


図3.3.7 ②-2区間の沈下量測定結果 (サイトC)

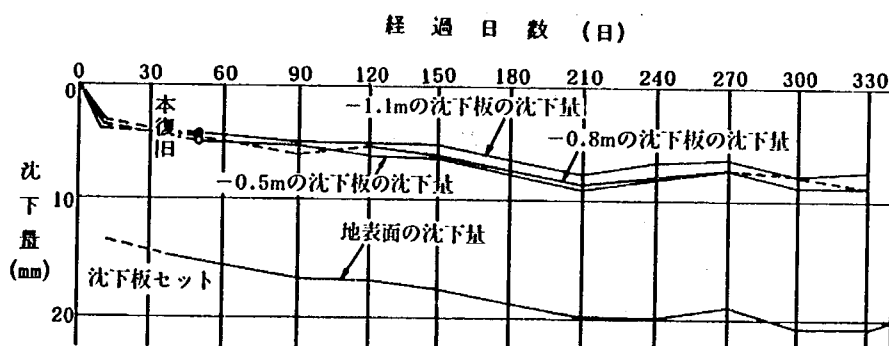


図3.3.8 ③-2区間の沈下量測定結果 (サイトC)

- ① 砂質系の改良土を埋戻しに用いた場合には、良質の砂を用いた場合と同様、路床に相当する埋戻し部ではほとんど沈下を生じていない。交通開放後の沈下は20～30mmとそれほど大きくないが、これらは主として管周辺部と砕石を用いた路盤部で生じているようである。また管周辺部に良質の砂を用いた場合と改良土を用いた場合とを比較しても、有意な差はほとんど認められない。従って、砂質土系の改良土は、良質の砂のかわりとして、十分埋戻しに使えるようである。

② 粘性土系の改良土を埋戻しに用いた場合も、砂質土系の改良土を用いた場合とほぼ同様の結果が得られており、埋戻しへの適用性は高いと考えられる。ただし、交通荷重の大きなところで、しかも改良強度が不十分な場合には、比較的大きな残留沈下を生じるおそれがあるので、改良強度の設定および締固めの管理に十分な注意が必要である。

③ 埋戻しに粘性土のような圧縮性の大きな材料を用いると、交通開放後に著しい沈下を生じる。しかし、交通荷重の影響を特に受ける埋戻しの上部を圧縮性の小さな改良土で置き換えると、埋戻しの下部が粘性土であっても、短期的には沈下の発生をおさえることができる。ただし、長期的には沈下が漸増して行く可能性があるため、さらに観測を継続してこの点を確認する必要がある。

以上のように、改良土を埋戻しに用いる場合、所定の品質を満足する改良土を用いて通常の施工を行っておれば、長期的な挙動からみても、良質の砂と比べて遜色のない結果の得られることが明らかになった。そして、埋戻しに適用が可能な改良土の品質と強度の目安としては、今回の現場試験施工で用いた材料の特性をまとめた表-3.3.2を参考にするのが望ましいといえる。

2) 改良土を用いた埋戻しの手引き

今回作成した改良土を用いた埋戻しの手引きの目次構成は、次のとおりである。

1.	総則
1-1	目的
1-2	適用
2.	発生土の土性判定の目安
2-1	発生土の土性判定の目安
3.	土質改良添加材の選定および添加量
3-1	土質改良用添加材の選定と添加量
4.	改良土の製造
4-1	製造
4-2	製造時の品質管理
4-3	仮置き
4-4	運搬
5.	施工方法
5-1	埋戻し
5-2	「管周辺部」の埋戻し
5-3	「埋戻し部」の埋戻し
5-4	土留め材の撤去
6.	施工管理
付録-1	改良土を埋戻しに用いた現場試験施工結果
付録-2	改良土の繰返し載荷試験にもとづく考察
付録-3	施工実績
	引用文献
	参考文献

1章の総則では、「本手引きは、道路下に各種埋設管を設置するときの埋戻し材料として、発生土に土質改良用添加材を加えて性状を改善した改良土を用いるときの技術的な標準を示したものである」とし、次のような点に留意して本手引きを運用すべきであると、解説でコメントしている。

- ① 改良土を埋戻しに用いる場合の要求品質や目標強度としては、路床や現地盤と同等もしくはそれ以上の地耐力が得られるものであることが望ましいといえるが、現地の土質や地盤条件は場所によって異なるし、埋戻しの深度によっても交通荷重の影響を受ける度合いが異なる。従って、改良土の品質や強度を画一的に定めて埋戻しを行うのではなく、本手引きの付録に示した現場試験施工や過去の実績等を参考にしながら、現地の土質、地盤条件、埋設管の種類や設置深度、交通量等に応じて改良土の要求品質や目標強度を設定するのがよいといえる。
- ② 改良土の強度が高くなりすぎて、再掘削が困難になることのないよう十分注意しておく必要がある。
- ③ 施工管理においても、RI法を利用した密度測定や層厚管理材の活用など新しい管理技術を積極的に取り入れて、従来以上に確実な埋戻しが行われるよういっそうの工夫を図っていくことが望まれる。

1-2の適用では、「本手引きで示した技術的な標準は、路床面以深の埋戻し部に適用する」としている。また、2章では、発生土の土性判定の目安として、次のような考え方を示している。

① 良質土の目安

土質改良を行わなくとも、そのまま埋戻しに使用可能なものを良質土とよぶ。最大粒径が50mm以下、細粒分（74 μ 以下）が25%以下のものがおおむねこれに該当する。

ただし、細粒分が25%以下の場合でも、含水比が最適含水比をかなり上回るなどの理由で、十分な締固めが期待できないと予想される場合は、要改良土として取扱うことが望ましい。

② 不良土の目安

土質改良を行っても埋戻しに使用できないものを不良土とする。

この中には、土質改良効果のあまり期待できない土（ピートや有機質粘性土など）、酸性の強い土やベントナイト、木片、ごみ、がらなどの異物を混入する土が含まれる。

③ 要改良土の目安

土質改良を行えば埋戻しに使用できる土を要改良土とよぶ。この中には、上記の良質土と不良土を除くほとんどすべての土が含まれることになるが、代表的なものとしては細粒分を25%以上含む砂質土、含水比が80%程度以下の粘性土、120%程度以下のロームなどがある。

3章では、「土質改良用添加材の選定と添加量は、現場に応じた改良土の要求品質を満足するように、室内配合試験を行って決定する」とし、解説で次のような目安を示している。

- ① 土質改良用添加材の種類としては、主に石灰系やセメント系の土質改良用添加材が使用されているが、所定の要求品質を満足すれば、下水汚泥焼却灰や石炭灰などを使用することも可能である。

- ② 土質に応じて、土質改良用添加材の種類と添加量を決定するときの目安としては、図 3.3.9 に示すような発生土の含水比と改良土の室内 CBR の関係が参考になる。

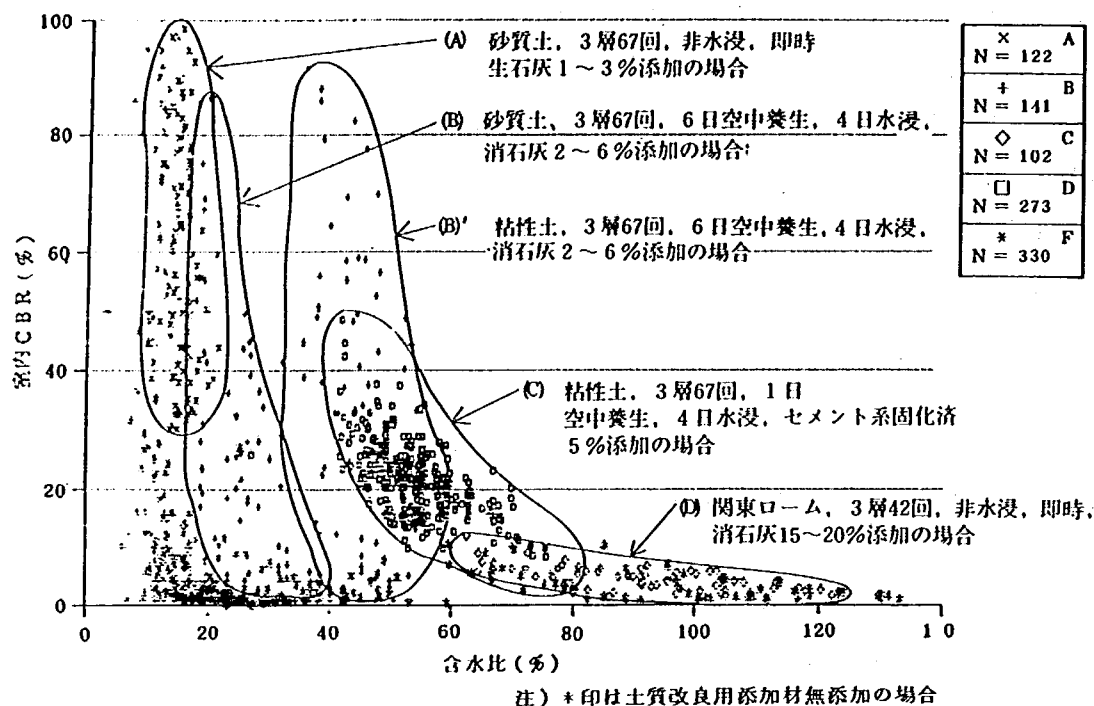


図3.3.9 発生度と含水性と改良土のCBRの関係

- ③ これまでの施工実績によると、現場 CBR と室内 CBR の間におおむね下記のような関係があることが知られている。従って、現場 CBR の目標値が設定されれば、それと対応する室内 CBR のおよその目標値が求められるので、これをもとに改良土の品質管理を行うことも可能である。

$$(\text{現場 CBR}) = (\text{室内 CBR}) \times \alpha$$

ここで、 α の目安としては表-3.3.4を参考にする。

表3.3.4 α の目安

土 質	α の目安	室内 C B R の試験条件
砂 質 土	0.3	3 層 67 回, 非水浸, 即時
粘 性 土	0.7	3 層 67 回, 6 日空中養生, 4 日水浸
関東ローム	0.6	3 層 42 回, 非水浸, 即時注)

注：関東ロームの場合、3 層 6 7 回の突固めを行うと過転圧現象を生じるため、3 層 4 2 回のデータを使用した。

- ④ 上に述べた土質改良用添加材の種類と添加量の目安に従っておれば、再掘削が困難になるほど硬化が進行することは少ないと考えられるが、とくに粘性土や関東ロームを石灰系の土質改良用添加材で改良する場合には、予想以上に硬化が進んで再掘削が困難になった事例も報告されているので注意が必要である。また、最大粒径が 50mm 以上の礫や碎石が含まれると、埋設管に損傷を

与える危険性が高くなったり、締固めなどの作業にも支障をきたすので、埋戻し材にはこれらを含まないものとする。

4～6章では、改良土の製造、埋戻しの施工方法、施工管理を実際に行う際の方法と留意点について、土質改良プラントや転圧機械あるいは施工管理用試験機の実例を紹介しながら解説を加えている。

巻末の付録には、本手引きの基礎データとなった改良土を埋戻しに用いた現場試験施工結果、改良土の繰返し載荷試験結果、施工実績を掲載し、この手引きがこれまでの豊富な試験データの蓄積のもとに作成されたものであることを示している。

(4) まとめ

現場試験施工や室内試験の結果により、改良土は所定の品質を満足するものであれば埋戻し材として十分使える可能性のあることが明らかになったので、「改良土を用いた埋戻しの手引き」を作成して、改良土を埋戻しに適用するときの方法や留意点を取りまとめた。ただし、埋戻しに用いる改良土の品質基準や施工管理基準については、現地の土質、地質条件、埋設管の種類や設置深度、交通量等を考慮して定める必要があるが、まだ明確な設定方法を示すには至らなかったため、今後さらに現場での実績を踏まえた一層の調査研究が望まれる。また、長期間経過後の再掘削性の問題についてもまだ十分な解明がなされていないので、追跡調査の必要があると思われる。

(土質研究室担当)

改良土を用いた埋戻しの手引き

目 次

- 1. 総則
 - 1-1 目的
 - 1-2 適用
 - 2. 発生土の土性判定
 - 2-1 発生土の土性判定の目安
 - 3. 土質改良用添加材の選定および添加量
 - 3-1 土質改良用添加材の選定と添加量
 - 4. 改良土の製造
 - 4-1 製造
 - 4-2 製造時の品質管理
 - 4-3 仮置き
 - 4-4 運搬
 - 5. 施工方法
 - 5-1 埋戻し
 - 5-2 「管周辺部」の埋戻し
 - 5-3 「埋戻し部」の埋戻し
 - 5-4 土留材の撤去
 - 6. 施工管理
 - 付録-1 土質改良土を埋戻しに用いた現場試験施工結果
 - 付録-2 土質改良土の繰返し載荷試験にもとづく考察
 - 付録-3 施工実績
- 引用文献
- 参考文献
- } ……略

1911

1912

1913

1914

1915

1916

1917

1918

1919

1920

1921

1922

1923

1924

1925

1926

1927

1928

1929

1930

1931

1932

1933

1934

1935

1 章 総 則

1.1 目 的

本手引きは、道路下に各種埋設管を設置するときの埋戻し材料として、発生土に土質改良用添加材を加えて性状を改善した改良土を用いるときの技術的な標準を示したものである。

【解説】

- (1) 本手引きは、発生土にセメントや石灰などの土質改良用添加材を加えて性状を改善した改良土を埋戻しに用いるときの考え方と留意点を示したものである。内容としては、下記の4つの項目について記述している。
 - ① 発生土の土性判定
 - ② 土質改良用添加材の選定および添加量
 - ③ 改良土の製造法
 - ④ 埋戻しの施工方法および施工管理方法
- (2) 改良土の埋戻し材料としての適用性については、本手引きの付録に示した現場試験施工のデータや大阪府、横浜市、名古屋市等の地域におけるこれまでの施工実績が示すように、従来のとおり良質の砂で埋戻しをしたものと比較して、沈下や路面性状などの面で障害となるものはなく、良好な結果が得られている。従って改良土は、所定の品質を満足するものであれば埋戻し材料として十分利用できると考えてよい。ただし、地下水位の高い箇所では十分締固めが困難と思われる箇所や軟弱な路床で不同沈下が予想される箇所などでは、改良土を使用するにあたって慎重な配慮が必要である。
- (3) 改良土を埋戻しに用いる場合の要求品質や目標強度としては、路床や原地盤と同等もしくはそれ以上の地耐力が得られるものであることが望ましいといえるが、現地の土質や地盤条件は場所によって異なるし、埋戻しの深度によっても交通荷重の影響を受ける度合いが異なる。従って、改良土の品質や強度を画一的に定めて埋戻しを行うのではなく、本手引きの付録に示した現場試験施工や過去の実績等を参考にしながら、現地の土質、地盤条件、埋設管の種類や設置深度、交通量等に応じて改良土の要求品質や目標強度を設定するのがよいといえる。

なお、この際、改良土の強度が高くなりすぎて再掘削が困難になることのないよう十分に注意しておく必要がある。

また、施工管理においても、R I 法を利用した密度測定や層厚管理材の活用などの新しい管理技術を積極的に取り入れて、従来以上に確実な埋戻しが行われるよう一層の工夫を図っていくことが望まれる。

1.2 適用

本手引きで示した技術的な標準は、路床面以深の埋戻し部に適用する。

【解説】

(1) 路床面以深の埋戻し部は、位置によって次の3つの部分に大別できる (図1.1参照)。

- ① 路床面から約1 mの深さまでの路床に相当する部分
- ② 路床より下で埋設管の上端までの部分
- ③ 管回りの部分

管の埋設深度が比較的浅いものでは、②の部分がなく①と③の部分のみから構成される場合がある。

本手引きでは、上記の①、②、③すべての埋戻し部を適用範囲に含んでいる。

(2) 本手引きを実際に適用するにあたって問題となる埋戻し部の目標強度や管理基準値については、本手引きでは一例を示すにとどめ、画一的な値は特に示していないので、付録に示した試験施工結果や既往の施工実績などを参考にした上で、現場の諸条件にみあった値を設定するものとする。

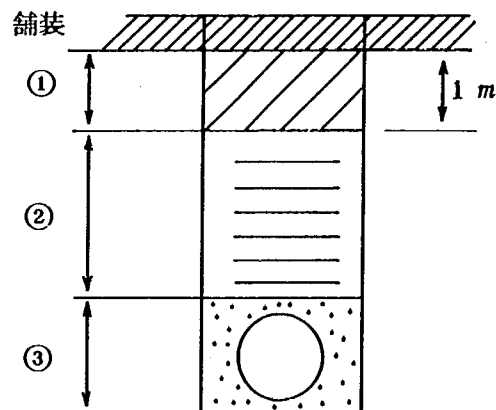


図1.1 埋戻し部の区分

- (3) 埋戻し土として改良土を用いた場合においても、従来どおり良質の砂を用いた場合と同様、埋戻しを完了してから舗装の本復旧を行うまでの間に適当な仮復旧期間を設けるのが通常である。
- (4) 本手引きは現時点における技術の標準を示したものである。従って、本手引きを実際に適用するにあたっては、現場の諸条件やその時点での技術開発状況等を十分に考慮し、弾力的な運用をはかることが望ましい。

2章 発生土の土性判定

2.1 発生土の土性判定の目安

発生土の土性判定は次の目安によって行う。

(1) 良質土の目安

土質改良を行わなくとも、そのまま埋戻しに使用可能なものを良質土と呼ぶ。最大粒径が50 mm以下、細粒分（74 μ 以下）が25%以下のものがおおむねこれに該当する。ただし、細粒分が25%以下の場合でも、含水比が最適含水比をかなり上回るなどの理由で十分な締固めが期待できないと予想される場合は、要改良土として取扱うことが望ましい。

(2) 不良土の目安

土質改良を行っても埋戻しに使用できないものを不良土とする。

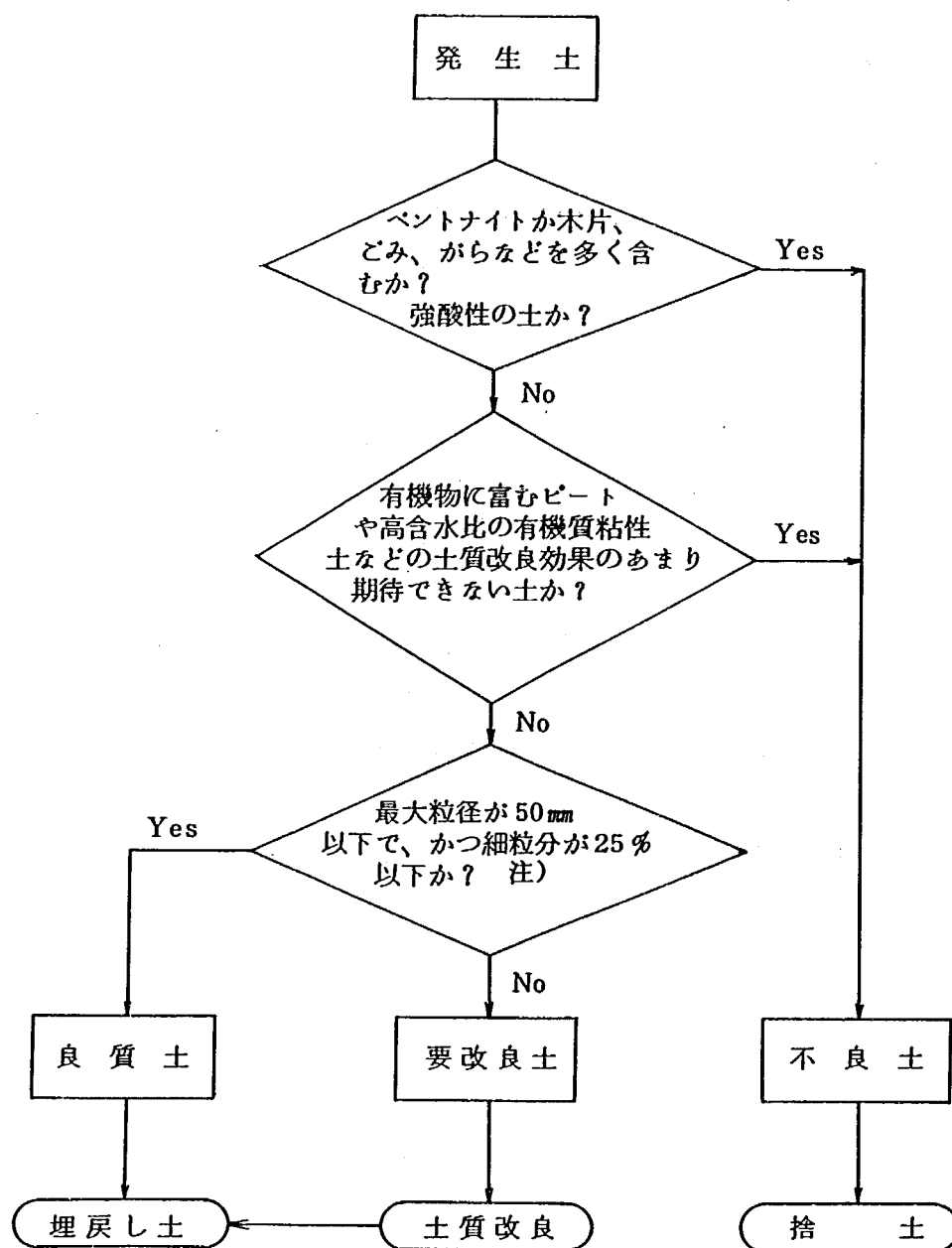
この中には、土質改良効果のあまり期待できない土（ピートや有機質粘性土など）、酸性の強い土やベントナイト、木片、ごみ、がらなどの異物を混入する土が含まれる。

(3) 要改良土の目安

土質改良を行えば埋戻しに使用できる土を要改良土と呼ぶ。この中には、上記の良質土と不良土を除くほとんどすべての土が含まれることになるが、代表的なものとしては細粒分を25%以上含む砂質土、含水比が80%程度以下の粘性土、120%程度以下のロームなどがある。

【解説】

上に述べた発生土の土性判定の考え方をフローで記すと図2.1のようになる。



注) ただし、細粒分が 25% 以下の場合でも、含水比が最適含水比をかなり上回るなどの理由で十分な締固めが期待できないと予想される場合は、要改良土として取扱うことが望ましい。

図2.1 発生土の土性判定の流れ

3 章 土質改良用添加材の選定および添加量

3.1 土質改良用添加材の選定と添加量

土質改良用添加材の種類と添加量は、現場に応じた改良土の要求品質を満足するよう、室内配合試験を行って決定する。

【解説】

土質改良用添加材の種類としては、主に石灰系やセメント系の土質改良用添加材が使用されているが、所定の要求品質を満足すれば、下水汚泥焼却灰や石炭灰などを使用することも可能である。

土質に応じて、土質改良用添加材の種類と添加量を決定するときの目安としては、図3.1に示すような発生土の含水比と改良土の室内 CBR の関係が参考になる。

図3.1は、関東、関西および名古屋で実施されたこれまでの工事実績をもとに作成したものである。土質、含水比、土質改良用添加材の種類、室内土質試験の試験条件、改良土の製造方法などによって室内 CBR が異なるが、おおよその傾向として、発生土の含水比が高くなるほど改良土の室内 CBR が低くなり、所要添加量も多くなるという共通した特徴が認められる。

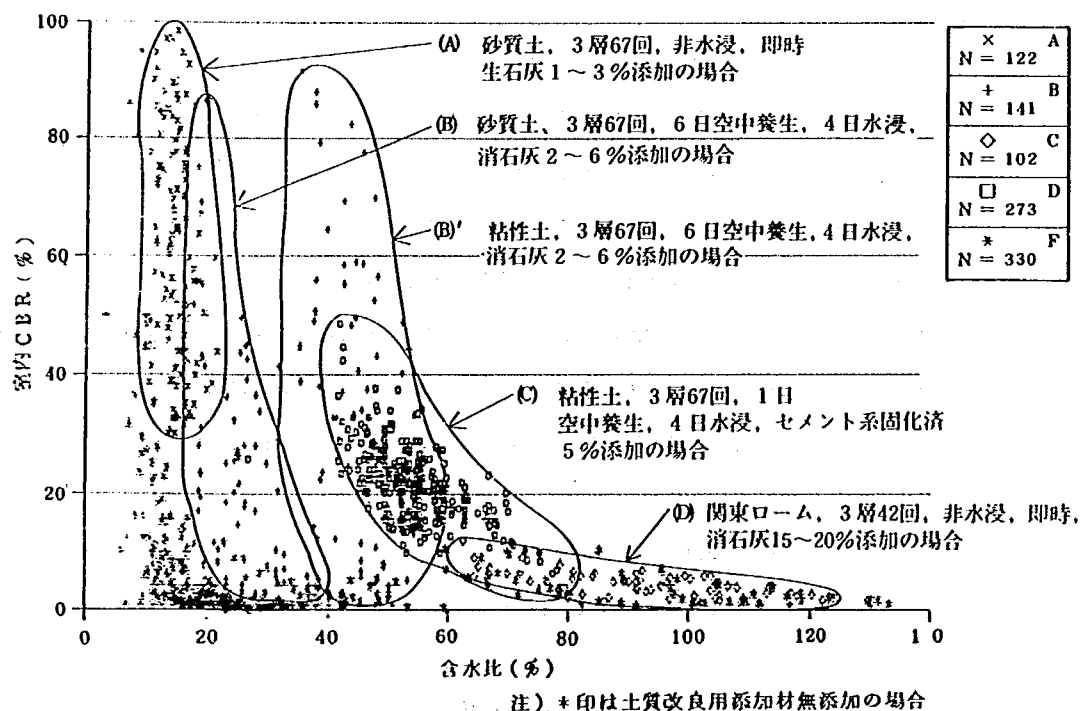


図3.1 発生土の含水比と土質改良土のCBRの関係

また、図3.1から判断すると、発生土はその特徴によっておおむね次の4種類に区分できる。

- ① 含水比が30%以下の砂質土
- ② 含水比が30~50%の粘性土
- ③ 含水比が50~80%の高含水比粘性土
- ④ 含水比が80%をこえるローム

そこで、以下には、この区分に従って各々の土質における土質改良用添加材の種類と添加量の目安を示す。

① 含水比が30%以下の砂質土

含水比が30%以下の砂質土には、湿潤重量比で1～3%の生石灰を添加すると効果がある。この程度の土質改良を行えば室内のCBR（3層67回非水浸、即時）の値はほとんどの場合20%以上になる。^{1), 2), 3), 4)}

② 含水比が30～50%の粘性土

含水比が30～50%の粘性土には、石灰系、セメント系いずれの土質改良用添加材も適用できる。消石灰を用いる場合には湿潤重量比で3～9%の添加量が必要で、これにより室内CBR（3層67回、6日空中養生、4日水浸）の値を10%以上とすることが可能である。^{5), 6), 7)}

③ 含水比が50～80%の粘性土

含水比が50～80%の粘性土になると、セメント系もしくは石灰系とセメント系を混合した土質改良用添加材の使用事例が多い。混合の事例として横浜市では、粘性土に生石灰を2割程度混合した特殊セメントを湿潤重量比で5%程度混合し、室内CBR（3層67回、4日水浸、1日空中養生）が10%以上の改良土を製造している（図3.1の（C）を参照）。

④ 含水比が80%をこえるローム

ロームにはアロフェンという特殊な粘土鉱物が含まれているので、セメント系の土質改良用添加材は適さない。石灰を単独で用いるか、石灰に石膏を2割程度混合したものがロームには適している。

図3.1の（D）の例では、改良土の室内CBR（3層42回、非水浸即時）5%以上を目標にして、これを満足するため湿潤重量比で15%以上の消石灰を添加している。この場合でいねいな締固めを行えば、現場CBRは、3～4%以上の強度が期待できる（表3.1参照）。

なお、これまでの施工実績によると、現場CBRと室内CBRの間におおむね下記のような関係があることが知られている。^{4), 7)} 従って、現場CBRの目標値が設定されれば、それと対応する室内CBRのおおよその目標値が求められるので、これをもとに改良土の品質管理を行うことも可能である。

$$(\text{現場CBR}) = (\text{室内CBR}) \times \alpha \quad (1)$$

ここで、 α の目安としては表3.1を参考にする。

表3.1 α の目安

土 質	α の目安	室内CBRの試験条件
砂 質 土	0.3	3層67回、非水浸、即時
粘 性 土	0.7	3層67回、6日空中養生、4日水浸
関東ローム	0.6	3層42回、非水浸、即時 ^{注)}

注：関東ロームの場合、3層67回の突固めを行うと過転圧現象を生じるため、3層42回のデータを使用した。

ここで、表3.1に示した α の値は、表中に示した室内 CBR の試験条件の下で得られた経験的な値であるので、この点に注意して表3.1を適用しなければならない。また、 α の値は現場における締固めの良否に左右される。表3.1の α の値は、まき出し厚20～30cmで、60～80kgランマーにより2往復程度の入念な締固めを行ったときに得られた値であることにも留意しておく必要がある。

上に述べた土質改良用添加材の種類と添加量の目安に従っておれば、再掘削が困難になるほど硬化が進行することは少ないと考えられるが、とくに粘性土や関東ロームを石灰系の土質改良用添加材で改良する場合には、予想以上に硬化が進んで再掘削が困難になった事例も報告されているので注意が必要である。また、最大粒径が50mm以上の礫や碎石が含まれると、埋設管に損傷を与える危険性が高くなったり、締固めなどの作業にも支障をきたすので、埋戻し材にはこれらを含まないものとする。

4 章 改良土の製造

4.1 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、発生土量などに応じた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4.1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 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 安定した製造能力を継続できること。
- ⑤ 騒音、粉じん等の公害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。

【参考】 改良土の製造方式の例

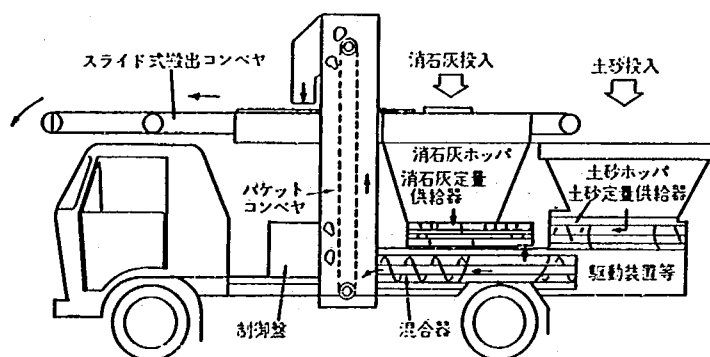
現在行われている改良土の製造方式のいくつかの例を下記に示す。

1) 移動式プラント車による方式

消石灰と土とを攪拌、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。連続式の例を図4.1に、またバッチ式の例を図4.2に示す。

表4.1 土質改良プラントの種類とその特徴

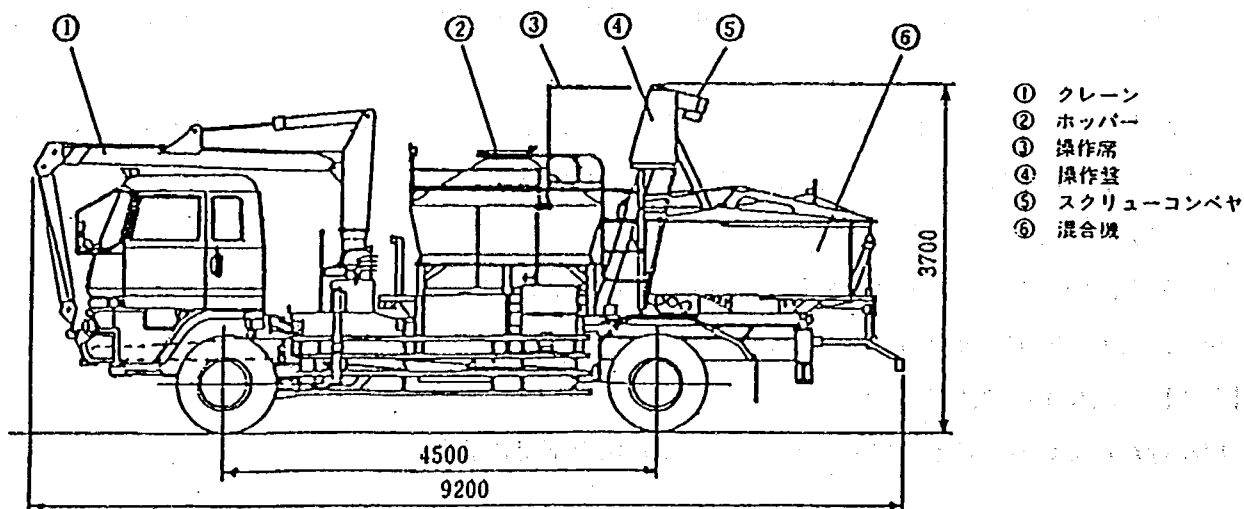
プラントの種類 項目	移動式		定置式	
	バッチ式	連続式	バッチ式	連続式
処理能力	小	小	小～中	小～大
年間取扱い土量	小	小	小～中	小～大
対象残土の土質	粘性土	砂質土	粘性土	砂質土・粘性土
対象残土の含水比	中～大	小	中～大	小～中
改良材	セメント系が中心	石灰系(消石灰)が中心	セメント系が中心	石灰系(生石灰)が中心
設備費用	小	小	小～中	中～大



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	4t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
消石灰ホッパー容量	1.4 m ³ /h

プラント車の仕様

図4.1 移動式プラント車（連続式）



バッチ式土質改良車（能力 15m³/Hr）

図4.2 移動式プラント車（バッチ式）

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よ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。

図4.3～図4.5に連続式のプラントのフローシートを示す。図4.3のプラントでは改良土とともに再生路盤材が製造されている。また、図4.4のプラントでは、その一部がアスファルト合材の再生プラントと兼用となっている。^{8), 9), 10)}なお、図4.4のフローでスーパーサンダーが省かれたプラントもあり、主に再生路盤材が製造されている。図4.5も連続式のプラントの一例である。

これらの連続式プラントでは、土質改良用添加材としていずれも生石灰が用いられている。

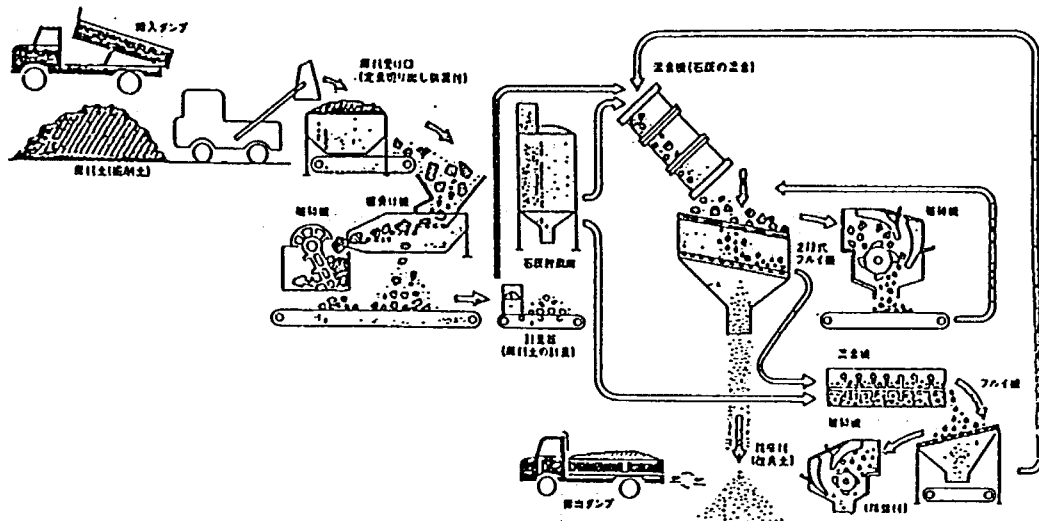


図4.3 定置式プラント（連続式、再生アスコン用再生骨材の製造も可能）

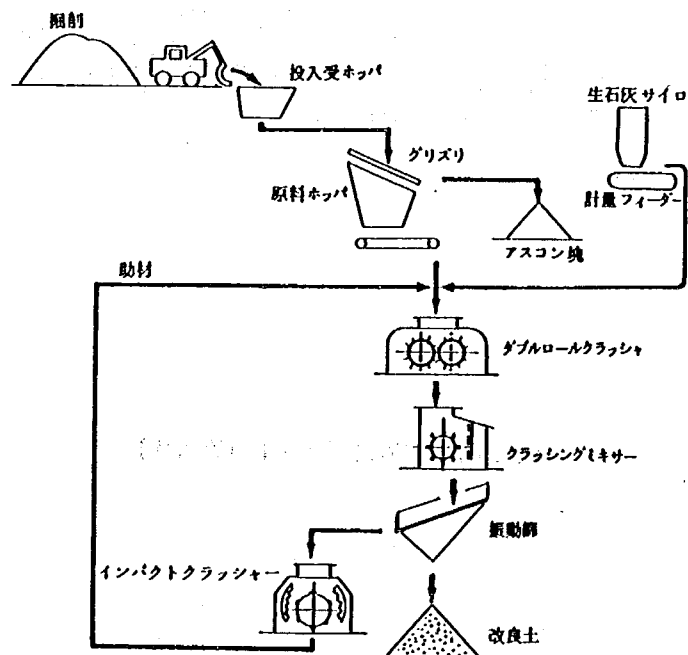


図4.4 定置式プラント（連続式、再生アスコン用再生骨材の製造も可能）

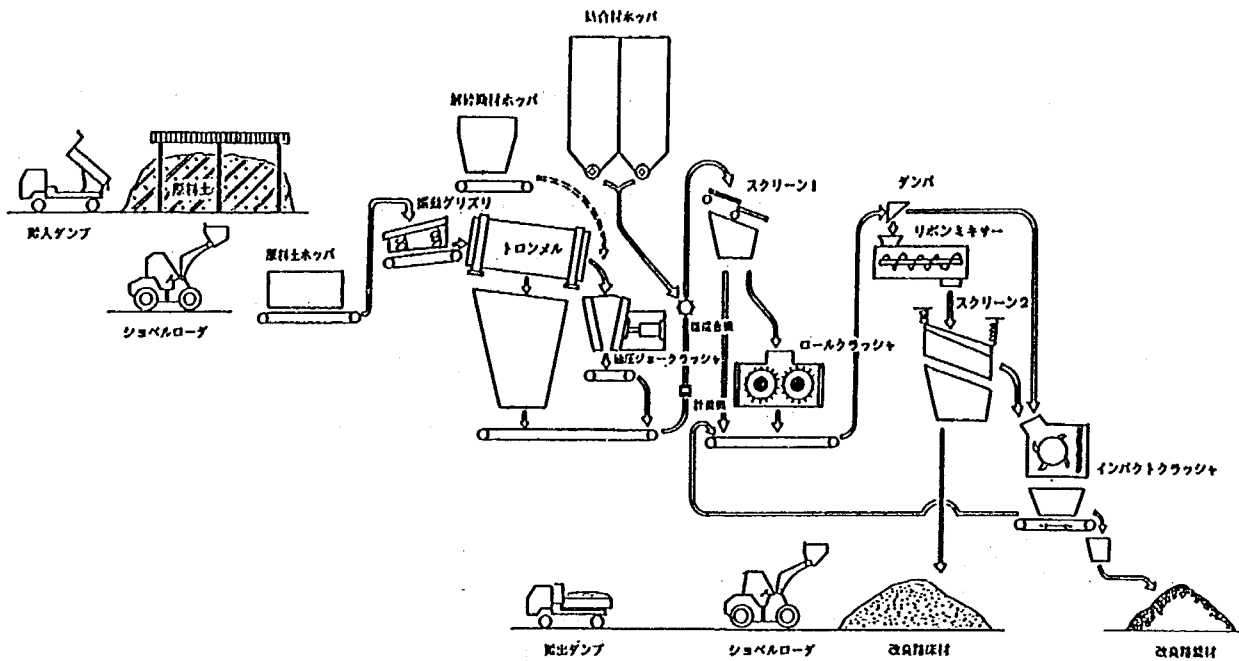


図4.5(1) 定置式プラント（連続式，再生アスコン用再生骨材の製造も可能）

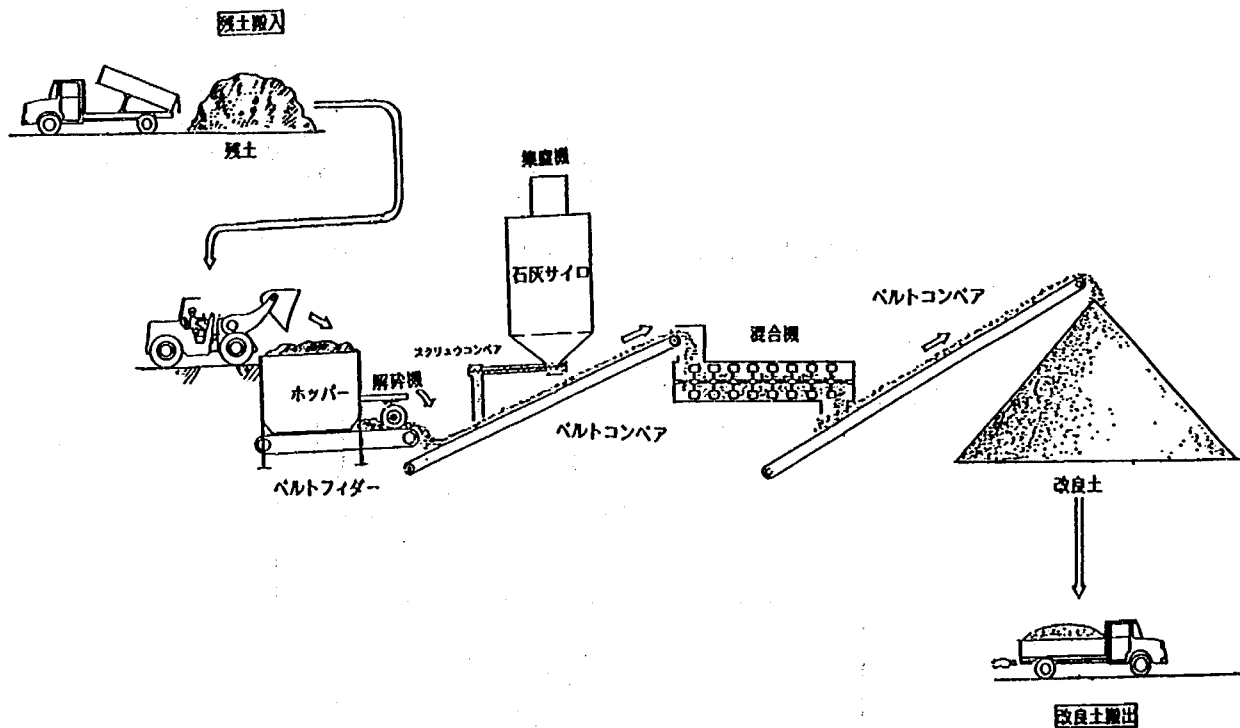


図4.5(2) 定置式プラント（連続式）

また、定置式プラントでバッチ式の例を図4. 6に示す。このプラントでは横浜市の下水道工事の残土処理を行っており、土質改良用添加材としてはポルトランドセメントが主に用いられており、補足的に生石灰が使用されている。

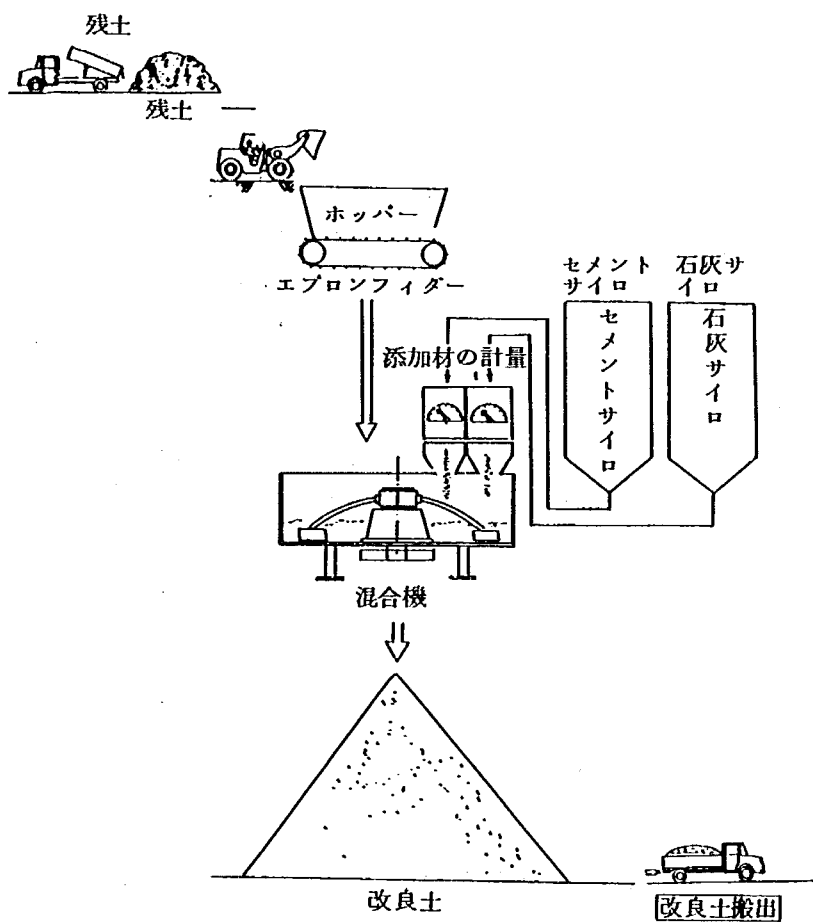


図4.6 定置式プラント (バッチ式)

4.2 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】

試験項目および頻度は以下に示す程度を目安とする。

試験項目	頻度	試験方法等
① 室内CBR	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300m ³ を超える場合 300m 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 含水量	同上	JISA1203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CBR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CBR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CBR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、50mm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。

【参考】

簡易な試験法としては下記のようなものがある。

(1) 簡易な試験法¹¹⁾

一定のエネルギーでモールド内の資料を締固めたときの圧縮量（沈下量）、またはモールド内の締固

表4.2 土性判定試験器の諸元

項 目		諸 元
沈下量試験	試料の最大粒径	10mm
	締固め回数	10回
	ランマー径	50mm
	ランマー質量	2.5kg
	ランマー落下高	300mm
	モールド寸法	60φ-170hmm
貫入試験	貫入ピストン径	8mm
	貫入深さ	7.5mm
	質量	0.125kg
	おもりの落下高	300mm
	モールド寸法	60φ-120hmm
	締固め条件	2.5kgランマー3層5回

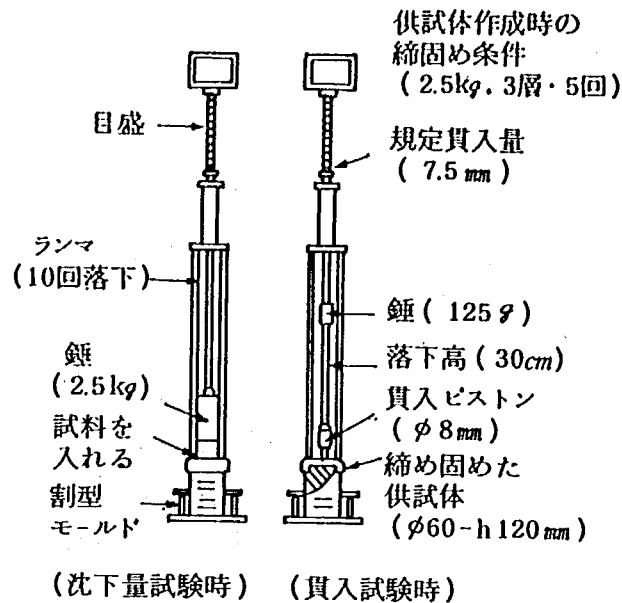


図4.7 土性判定試験器の概要

めた土に貫入ピストンを打撃貫入したときの打撃回数から CBR 値を推定しようとする方法である。

① 器具

表4.2および図4.7のとおり、径6cm、高さ12cmのモールド、径5cm、重さ2.5kgのランマーを用いる。

② 装置手順と判定

(a) 沈下量試験

- ① 突固めランマーに2.5kgのおもりを、そしてモールドにカラーを取り付ける。
- ② モールド内に試料を静かに入れ、モールド上部の余分の土を削り取る。
- ③ モールド上にランマーを装着し、3秒に1回の割合で試料を10回突き固める。
- ④ モールド上面からモールド内の試料上面までの距離を測り、その長さを沈下量とする。

(b) 貫入試験

- ① カラーをモールドに取り付け、試料を入れ、1層ごと5回、3層にして合計15回突き固める。
- ② カラーをモールドから取りはずし、モールド上部の余分の土をストレートエッジにより削り取る。
- ③ モールドを反転し底面に貫入試験用おもりおよび貫入ピストンを取り付ける。
- ④ ランマーわくを片手でおさえ、2秒に1回の割合でおもりを落下させる。
- ⑤ 貫入ピストンを7.5mm貫入させた時の打撃回数を測定する。
- ⑥ 図4.8 (a), (b) の簡易土性判定曲線により、室内 CBR および石灰の所要添加量を推定する。

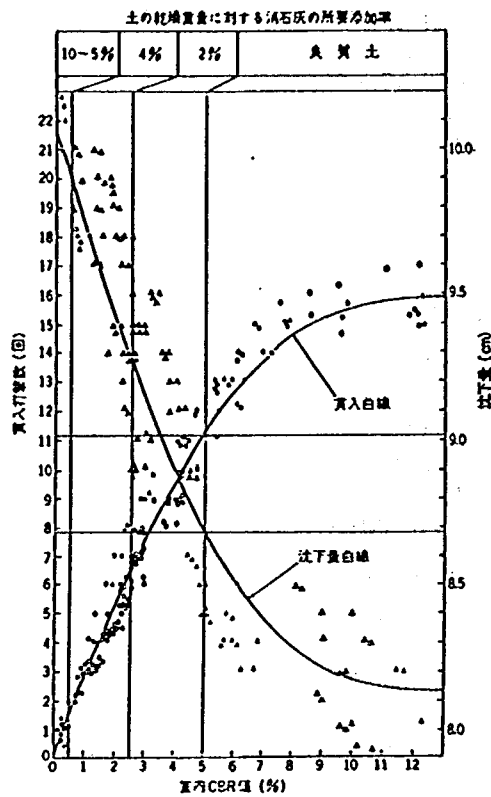


図4.8-(a) 土性判定曲線 (砂質土)

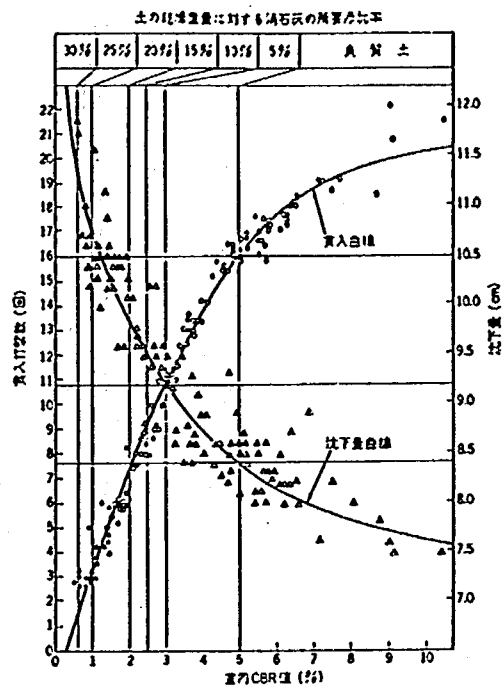


図4.8-(b) 土性判定曲線 (粘性土)

なお、上記沈下試験および貫入試験のうち判定は精度的にみて貫入試験のほうが良いとみなされている。

(2) 促進 CBR 方法¹²⁾

図4.9から、CBR の測定は土の種類、含水比によって差異はあるものの、温度を高めることによって、大幅に短縮でき、現行10日間を要する養生期間が40℃では5日間以内60℃では約1日間で測定可能となる。

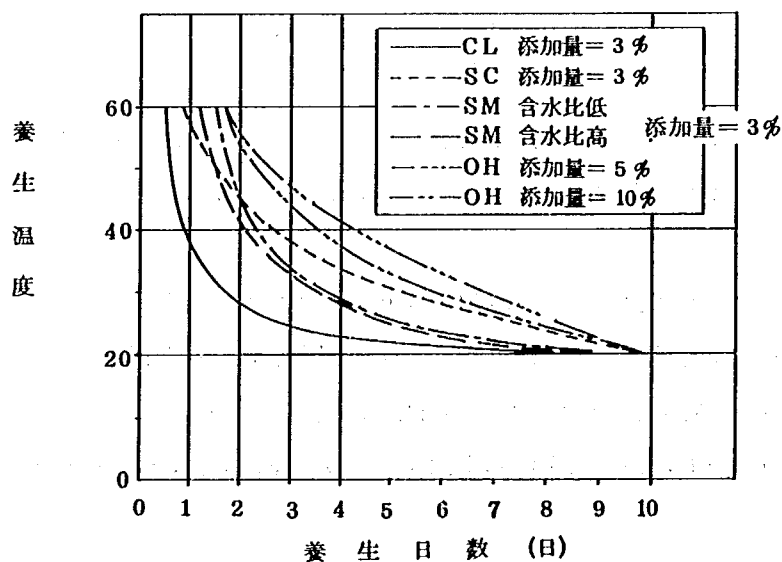


図4.9 20℃、10日標準養生CBRに到達する養生温度と養生日数の関係

4.3 仮置き

改良土をプラントまたは現場周辺のストックヤードで仮置きする場合には、改良土の改良効果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 セメント系改良材を使用した場合には、改良効果が経時的に減少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、シート等で覆っておくことが望ましい。
- 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。

【参考】

改良土をストックヤードで仮置きした場合の改良土の経時変化の例を以下に示す。

(1) 石灰系改良土

図4.10 (a), (b) に砂質系石灰改良土を長期にわたってヤードにストックした場合の品質の経時変化の測定結果を示す。⁴⁾

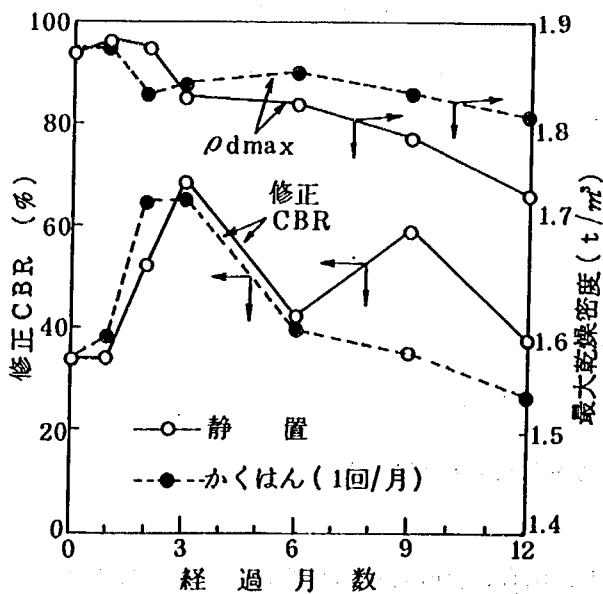


図4.10(a) 修正CBR, 最大乾燥密度の変化

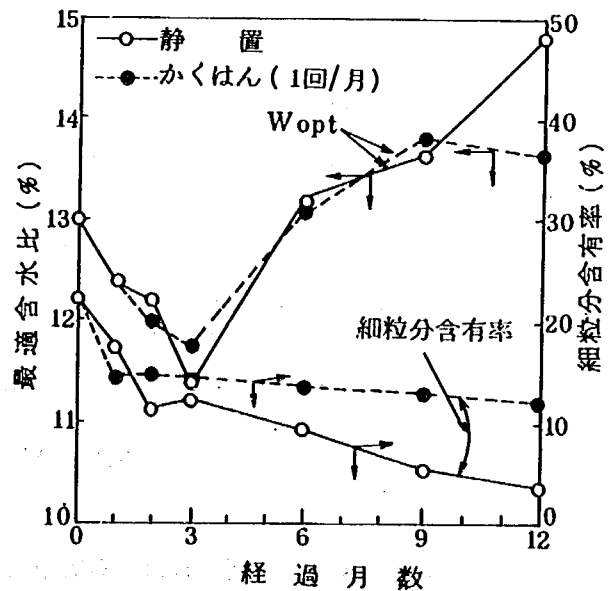


図4.10(b) 最適含水比, 細粒分含有率の経時変化

また、図4.11 (a), (b) には、砂質系および粘性土系の石灰改良土をヤードに放置した場合の強度変化の測定結果を示す。

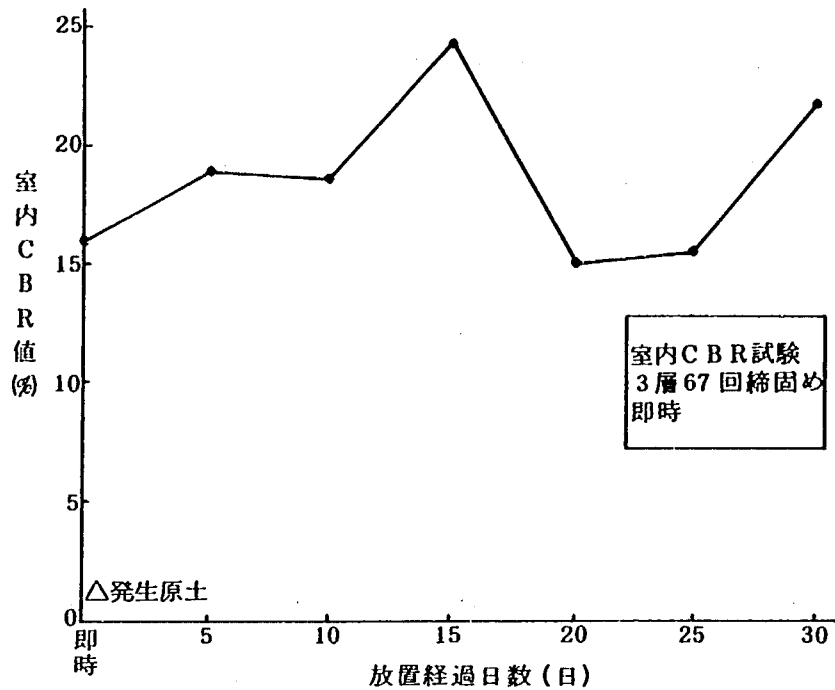


図4.11(a) 砂質系改良土の強度変化

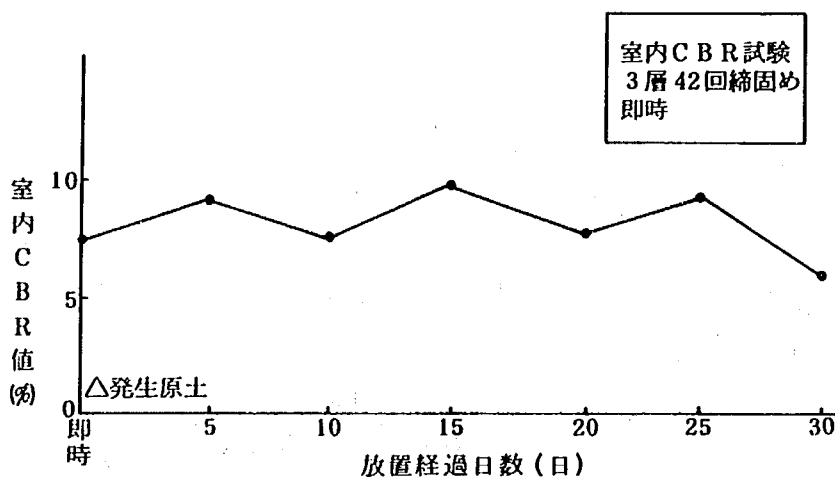


図4.11(b) 粘性系改良土の強度変化

これら実験結果より判断すれば、石灰系改良土の場合には改良後の品質の低下傾向は小さく、かなり長期間のストックが可能といえる。

(2) セメント系改良土

図4.12にセメント系改良材を用いた改良土をヤードに放置した場合の強度変化の測定結果を示す。

この図よりわかるように、セメント系の改良土の場合には、石灰系改良土と違って改良直後から品質が低下する傾向にあるので長期にわたってストックすることには無理があり、なるべく早期に使用することが必要である。

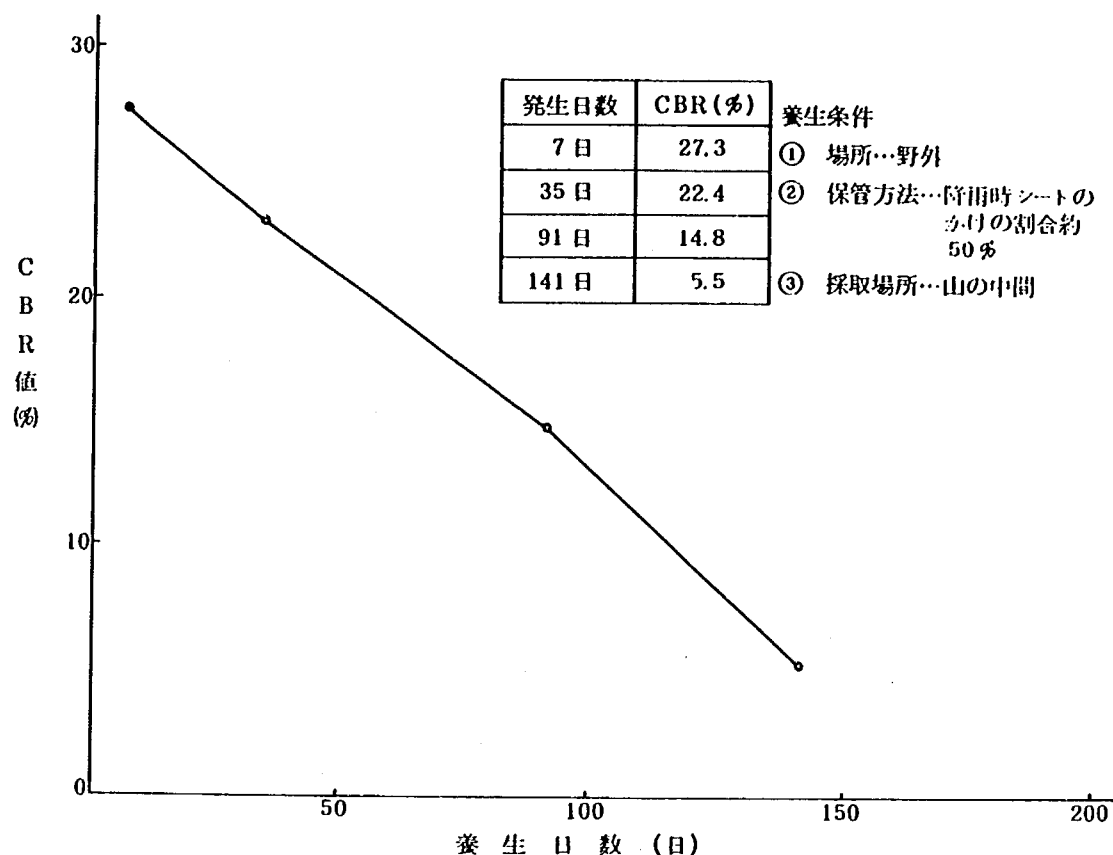


図4.12 粘性土系改良土の強度変化

4.4 運搬

改良土を運搬する場合には、周囲に悪影響を与えないように留意しなければならない。

【解説】

改良土を運搬する場合には、次の事項に留意することが大切である。

- ① 土砂の落ちこぼれ対策
- ② 粉じん対策
- ③ 土砂よごれタイヤによる一般道路のよごれ対策
- ④ 土砂運搬車両が製造設備周辺へ集中することによる交通公害対応と運搬路線の選定

5 章 施工方法⁸⁾

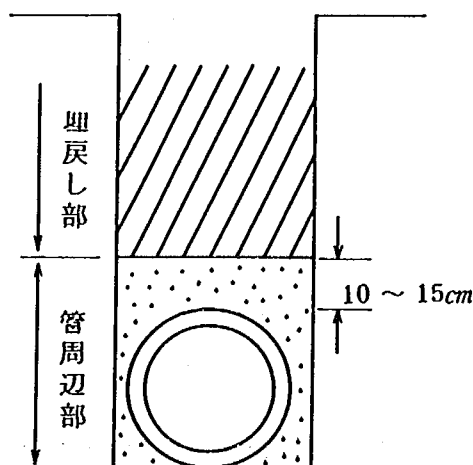
5.1 埋戻し

埋戻しは、「管周辺部」の埋戻しと、その上部の「埋戻し部」の埋戻しに区分されるが、いずれも道路機能を掘削前と同様に回復させるため、十分な締固めが必要である。

【解説】

埋戻しにあたっては、次の点に留意して施工する。

- (1) 「管周辺部」と「埋戻し部」は、管上10～15cmで区分する。
- (2) 管埋設部の埋戻しは、基本的には周辺部の土と同程度の力学的特性を持つ状態に仕上げるのが望ましい。
- (3) 「管周辺部」は特に管の安全性を確保するため、管周辺部を均等に締固めて地盤反力を増大させ、管に発生する垂直応力、曲げ応力を減少させることが重要である。



5.2 「管周辺部」の埋戻し

「管周辺部」の埋戻しは、埋戻し材料を管底、管側部並びに管と管の間に十分廻り込ませ、適切な締固め工具を用いて締固める。

【解説】

「管周辺部」の埋戻しにあたっては、次の点に留意して施工する。

- (1) 埋戻し材料は、管の移動や偏圧を生じさせないように、丁寧に投入する。
- (2) 太径管の管底部には、埋戻し材料が廻り込みにくく、締固め不足が生じやすいため、管下に埋戻し材料を盛り付け、足づき又は突き棒で突固める。
- (3) 管側部の埋戻しの撒き出し厚は最大30cmとする。各層毎に埋戻し材料を均等に敷均らし、管側部の左右に不均衡を生じさせないように入念に締固める。
- (4) 埋設管が小口径の群管の場合は特に材料が廻り込みにくいので、管と管の間2段階程度毎に埋戻し材料を充填し、突き棒等で突固める。管と管の間隔が5cm程度の場合、埋戻し材料の粒径10mm以

下とするのが望ましい。管と管の間の締固めには突き棒又は図5.1に示すような電動式振動締固め機を用いるとよい。

- (5) 埋設管が硬質ビニル管、ポリエチレン管等の場合は、管に傷を付けないため、出来るだけ粒径の小さい埋戻し材料を用いる。
- (6) 生石灰のように発熱作用を伴う添加剤によって改良した埋戻し材料は、管の保護膜等を損傷させる恐れがあるため一定期間養生した後使用する。

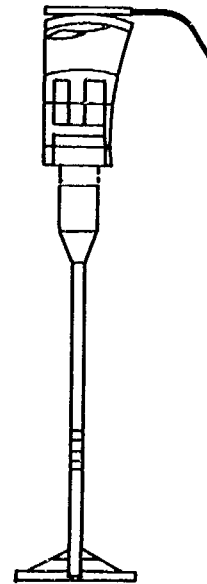
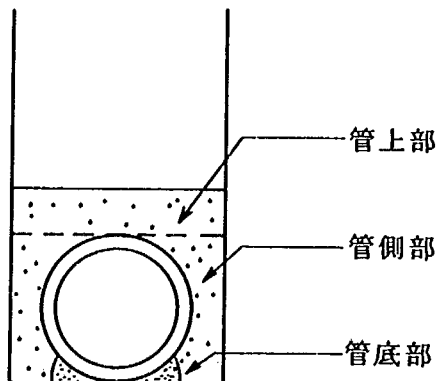


図5.1 電動式振動締固め機

5.3 「埋戻し部」の埋戻し

「埋戻し部」の埋戻しは、各層ごとのまき出し厚を20～30cm（ただし30cmを超えない）とし、均等に敷均した後タンピングランマー、振動コンパクターを用いてよく締固める。

【解説】

「埋戻し部」の埋戻しにあたっては次の点に留意して施工する。

- (1) 埋戻し材料は入力又は機械力により管に影響を与えないように注意しながら投入する。
- (2) 管上30cmまではできるだけ振動コンパクターや木だこを使用する。タンピングランマーを使用する場合は衝撃力の小さい軽量のものを使用する。
- (3) 掘削溝内に地下埋設物が露出している場合は埋戻し後、損傷を生じないように事前に十分点検するとともに適切な防護工を施す。
- (4) 埋戻し後の残土は直ちに搬出処理し、汚れた路面は清掃する。
- (5) 水締めは行わない。

5.4 土留材の撤去

埋戻しがある程度進み、周辺地盤の崩壊の恐れがなくなったら、切梁・腹起しを撤去し矢板を鉛直に引抜く。矢板の引抜き跡は突き棒等を用い十分に充填する。

【解説】

矢板が引抜けられない場合、あるいは、引抜きが他に悪影響を及ぼす恐れがある場合は、道路管理者と協議のうえ適当な位置で矢板を切断し埋殺しする。ただし、木矢板は埋殺しとしない。

6 章 施工管理

改良土の埋戻しに際しては、締固めの程度、支持力等に関して施工管理を行ない、所要の性能が得られていることを確認しなければならない。

【解説】

- (1) 改良土の埋戻しは、5章で述べた方法によって各層ごとに入念に施工されることが大切である。
施工管理は、そのような施工が行われているかどうかを確認するためのもので、各層の締固めの程度あるいは支持力によって評価することが一般に行われている。
- (2) 埋戻しの施工管理の方法は、埋戻し部の施工条件や土質、締固めの方法などを考慮して、現地の条件に応じて決める。とくに、改良土を用いて埋戻す場合は、表層部を締固めるだけで十分な支持力などが得られることもあるので、全層にわたって所定の品質の埋戻しが行われているかどうかを確認できるものがよい。
- (3) 各層の締固め程度を調べる方法としては、現場密度試験、すなわち砂置換法、突き砂置換法、コアカッター法などがある。また、最近では低線源でしかも土質ごとの較正曲線を必要としない、簡便で迅速な測定が可能なRIによる測定器が開発されているので、RIによる密度管理法を活用する方法もある。
- (4) 支持力の評価方法には、現場CBR試験、平板載荷試験、土研式貫入試験等の試験方法があるが、これらのうち土研式貫入試験は、埋戻し内部の締固めの程度まで判定でき、簡便な試験方法である。
- (5) 埋戻しの一定区間ごとに、適当な長さのジオテキスタイルを各層ごとに敷設して、改良土の締固めが十分に実施されているかどうかを確認することも考えられる。

【参考】

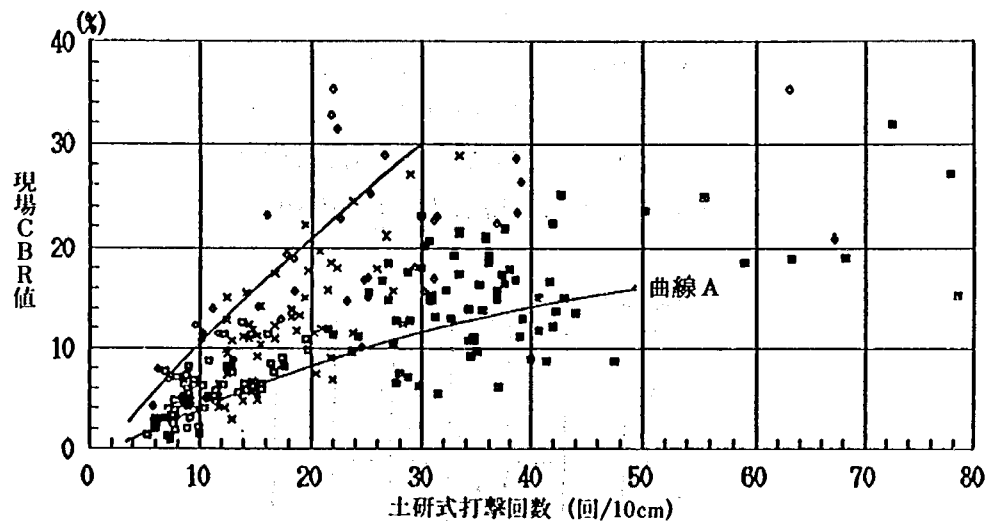
土研式貫入試験による10cm当りの打撃回数（以下、「土研式貫入試験値」と称す）の決定方法の一例は次のとおりである。

- 施工箇所の道路に、土研式貫入試験値について規定がある場合には、その規定に従うこと。
- 埋戻し部の目標強度が現場 CBR 値で与えられている場合には、図6.1に示す関係等から土研式貫入試験値を定めるものとする。

施工管理方法の一例

項 目	目 的	着 眼 点	試 験 方 法	標準的な管理値	頻 度
出来型	設計どおりに仕上がっていることを確認する	仕上がり寸法	寸 法 測 定	+ 2.5 cm以内で規定の高さに仕上がっていること	20 m ² 毎に1回程度を標準とする。
		不 陸	目 視	表面に極端な不陸のないこと	常 時
品 質	十分に締固まっていることを確認する	支 持 力	土研式貫入試験	施工直後において、所要の支持力が得られる回数であること	200 m ² 毎に1回程度を標準とする

注：標準的な管理値および頻度は、工事の種類、規模等を勘案して適正な値に決めること。



凡 例

記号	土 質	土質改良用 添加材	改良方式
□	関東ロームおよび砂質土	消石灰	車載プラント
■	粘性土と砂質土の混合	生石灰	中央プラント
×	主として砂質土	生石灰	中央プラント
◇	粘性土および砂質土	消石灰	車載プラント

図6.1 土研式貫入試験値と現場CBR値の関係

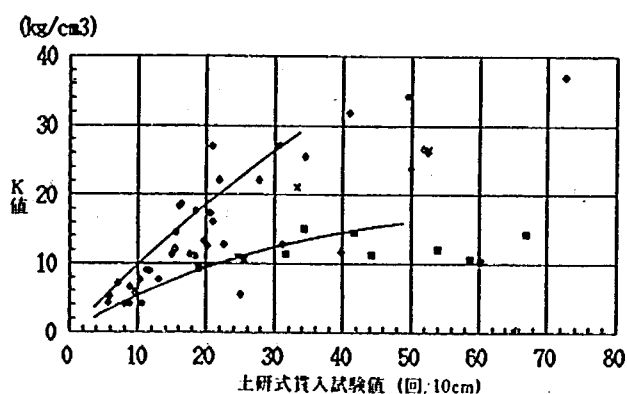
土研式貫入試験値の数値の求め方の一例を示すと、次のとおりである。

図6.1に示すように土研式貫入試験値と現場 CBR 値の相関関係から、安全側をとった曲線Aを用い、例えば、現場 CBR 値として4%必要な場合、曲線Aから所要の土研式貫入試験値=10回と求める。^{12), 13), 14)}

また、埋戻し部の目標強度が平板載荷試験値 (K 値) で与えられている場合には、実際に平板載荷試験を行うか、または、以下に示す方法により K 値を決定する。¹⁴⁾

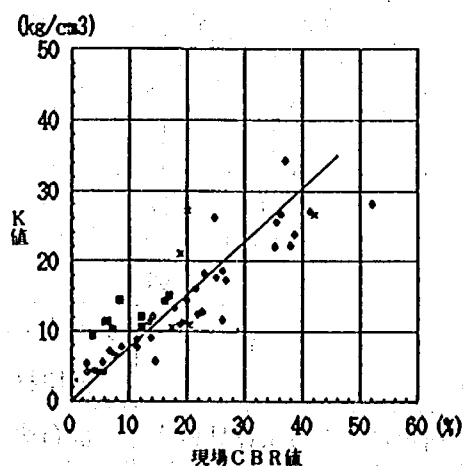
- a) 土研式貫入試験値を得ることができる場合には、図6.2に示す関係等から K 値を定めるものとする。
- b) 現場 CBR 値を得ることができる場合には、図6.3に示す関係から K 値を定めるものとする。

次に、出来型と品質に関する施工管理の方法の一例を下記に示す。この例では、支持力の試験方法として、土研式貫入試験を用いている。



- 凡例
- 粘性土と砂質土の混合で消石灰を用いた場合
 - × 主として砂質土で生石灰を用いた場合
 - ◆ 粘性土と砂質土の混合で、消石灰を用いた場合

図6.2 土研式貫入試験値と K 値の関係



- 凡例
- 粘性土と砂質土の混合で消石灰を用いた場合
 - × 主として砂質土で生石灰を用いた場合
 - ◆ 粘性土と砂質土の混合で、消石灰を用いた場合

図6.3 現場 CBR 値と K 値の関係

引用文献

- 1) 中村；掘削土の再利用について，第27回日本ガス協会技術講演会，1979
- 2) 尾上，中村，迫間；ガス工事に伴う掘削土砂総合的再利用システム，第15回日本道路会議，1983
- 3) 瀬留，尾上；埋設工事（ガス）に伴う掘削残土リサイクルについて，道路工事に伴う掘削残土リサイクルに関する講演会，1984
- 4) 佐々木，小川，渡辺，尾上；道路工事に伴う掘削残土のリサイクルについて，土と基礎29-11 (286)，1981
- 5) 松崎，高橋，金田；ガス導管工事に伴う掘削土の再利用工法の実証工事について，第17回土質工学研究発表会，1982
- 6) 松崎，高橋，金田，安藤；ガス導管埋設工事に伴う掘削土再利用工法の実証工事について（その2）－復旧箇所における路面沈下について－，第18回土質工学研究会，1983
- 7) 河本，伊藤，奥田，高橋；名古屋市道における石灰改良土の埋戻し実証工事について，第15回日本道路会議，1983
- 8) 村井，坂尾，定保，：道路廃材総合再生システム RRS の開発，第15回日本道路会議特定課題論文集 pp. 106～108（論文No. 308），1983
- 9) 村井，坂尾，定保；道路廃材の総合的再生システムについて，第19回土質工学研究発表会発表講演集 pp. 1513～1516（論文No. 595），1984
- 10) 定保，長岡；道路廃材総合再生システムについて，建設機械，Vol. 20, No. 11, 1984 pp. 62～66，1984
- 11) 森本，大石，吾郷；ソイルミキサー車を用いた掘削土再利用工法の開発，土と基礎29-11 (286)，1981
- 12) 松崎，高橋，金田，安藤；ガス導管埋設工事に伴う掘削土再利用工法の実証工事について（その4）－促進 CBR 試験法について（その2）－，第20回土質工学研究発表会，1985
- 13) (財) 国土開発技術研究センター；下水道用硬質塩化ビニール管道路埋設指針，1983
- 14) 定保，村井，下馬；改良土および山砂を用いた埋戻し追跡調査試験，第16回日本道路会議一般論文集 pp. 243～244（論文No. 424），1985
- 15) 坂尾，小竹，桑原；改良土の長期性能試験，第16回日本道路会議一般論文集 pp. 257～258（論文No. 431），1985
- 16) 坂尾，小竹，森川；改良土を用いた埋戻し追跡調査試験，第16回日本道路会議一般論文集 pp. 259～260（論文No. 432），1985

参 考 文 献

1. 佐古, 中村, 端榮, 吉村, 尾上; 掘削土簡易判別法の開発, 第14回土質工学研究発表会, 1979
2. 佐々木, 新野辺, 高野, 佐々木; 残土リサイクルにおける簡易判別法の検討, 第14回土質工学研究発表会, 1979
3. 中村; 掘削土の再利用について, 第27回日本ガス協会技術講演会, 1979
4. 佐古, 和田, 中村, 渡辺, 吉村, 尾上, 塩田; 掘削土再生利用プラントの開発, 第15回土質工学研究発表会, 1979
5. 中村, 尾上, 塩田; 掘削土の再利用について, 第35回土木学会年次学術講演会, 1980
6. 吉村, 尾上, 塩田; 掘削土の再利用について, S. 56年度土木学会関西支部年次学術講演会, 1980
7. 渡辺, 吉村, 尾上, 塩田; 掘削土再生利用プラントの開発 (第2報), 第16回土質工学研究発表会, 1981
8. 尾上; 掘削土再生利用プラントの開発, S. 56年度大阪府技術開発シンポジウム, 1981
9. 尾上, 塩田, 中村; 道路復旧時の路床施工管理方法, 第17回土質工学研究発表会, 1982
10. 高橋, 尾上, 中村, 迫間; 改良土利用のカラー舗装工法, 第18回土質工学研究発表会, 1983
11. 佐古, 尾上, 迫間; Excavated-Soil Recycling Plant, 4th International Recycling Congress, 1984
12. 岡, 尾上, 中村, 迫間; A Comprehensive Soil and Asphalt Wastes Recycling System, 16th World Gas Conference, 1985
13. 佐古, 尾上; 掘削土再生プラントとそのシステムの開発, 第1回廃棄物再利用再資源化に関する国際会議, 1981
14. -; 掘削土の再生利用, 産業と環境 Vol.12 No.6, 1983
15. 岡, 尾上; 掘削土の再生利用, 廃棄物処理研究 Vol.9 No.3 (29), 1983
16. 尾上; 掘削土の再生利用方法について, クリーンジャパン41, 1983
17. 尾上; Methods for Reclaiming and Utilizing Excavated Soil, Clean Japan No.4, 1984
18. 松崎, 高橋, 金田, 安藤; ガス導管埋設工事に伴う掘削土再利用工法の実証工事について (その3) -促進 CBR 試験法について-, 第19回土質工学研究発表会, 1984
19. 村井, 森, 定保, 東海林; 掘削土の再生利用に関する一試験例, 第14回日本道路会議一般論文集 p p. 219~220 (論文No. 424), 1981
20. 村井, 定保, 東海林; 掘削土の再生利用に関する一試験例, 道路建設, No. 423, p p. 60~63, 1983

3.4 高有機質土の適正処理技術

(1) 研究目的

最近、河川や湖沼あるいは港湾などに堆積しているへどろに代表されるような含水比が非常に高く、しかも有機物に富んだ不良土を処分しなければならないケースが増えてきており、こうした不良土にセメント等の土質改良用添加材を混合して土性の改善をはかることが多くなってきている。

その場合、一般に不良土は土質改良を行う際の阻害要因となる大量の水や腐植等を含んでいるため、土質改良用添加材の種類によっては土質改良効果がほとんど期待できなかったり、土質改良効果の高い土質改良用添加材を用いる場合でも、かなりの量の土質改良用添加材を加えなければ改良後の強度がそれほど高くないケースが多い。

本研究では、このような処理上の問題点を有する不良土（高有機質土）の適正処理技術を開発することを目的とする。

(2) 研究の経緯

57年度に、土中の有機物が土質改良効果に及ぼす影響に関する検討と、高有機質土の土質改良効果の簡易判定法に関する予備的実験を行った。その結果、消石灰を用いて土質改良を行う場合には、フミン酸の含有量が土質改良効果を左右する極めて重要な因子の1つになることが明らかになった。一方、普通ポルトランドセメントを用いて土質改良を行う場合には、フミン酸の種類によって土質改良効果を阻害する程度が異なるという結果が得られた。また、フォール・コーン試験を用いることにより、土質改良効果の判定が非常に迅速に、しかも精度よく行える見通しを得た。

58年度は、高有機質土の改良効果の簡易判定法の検討を57年度に引き続いて実施するとともに、普通ポルトランドセメントや消石灰に排脱石膏を加えた土質改良用添加材や、下水汚泥焼却灰に生石灰と排脱石膏を加えた土質改良用添加材を用いて高有機質土の処理に及ぼす土質改良用添加材の化学組成の影響に関する検討を行った。後者の検討では、既往の研究により有機物を含むへどろに対して土質改良用添加材中の CaO と SO_3 の量と土質改良効果の相関が高く、 CaO を60%程度、 SO_3 を12~13%程度含む土質改良用添加材の改良効果が優れていることが明らかにされているので、普通ポルトランドセメントや消石灰に SO_3 成分を多く含む排脱石膏を加えたり、石灰系の下水汚泥焼却灰に生石灰と排脱石膏を加えることによってこのような化学組成をもつ土質改良用添加材を人工的に作製し、これらの改良効果を検討するための一連の土質改良実験を行なった。

59年度は、フォール・コーン試験を用いた土質改良効果の簡易判定法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、従来型のフォール・コーン試験装置に押し込み荷重が加えられるような機能を加えてその適用性を検討した。その結果、改良後の強度が一軸圧縮強さで 2 kg f/cm^2 をこえるようになると、従来型のフォール・コーン試験ではコーンがあまり貫入しなくなり、一軸圧縮強さとの相関性が低下するが、このような場合でも、自重落下のあと一定速度で押し込み荷重を加えて5mm貫入時の押し込み荷重を求めれば、一軸圧縮強さとかなり良い相関の得られることが判明した。また、土質改良効果に及ぼす影響が特に大きいと考えられる自然含水比とフミン酸含有量に着目した簡易土質判別分類手法を検討するため、自然含水比とフミン酸含有量が種々に

異なる35試料を対象に、各種土質改良用添加材を用いた土質改良一斉試験を行った。

60年度は、土質改良用添加材の効果判定のための標準試験法の検討と、吸光光度法を用いたフミン酸含有量の簡易推定法の検討を行った。その結果、前者について一つの試案を提出するとともに、後者においては、フミン酸含有量の概略的な推定に吸光光度法がある程度利用出来ることを明らかにした。

(3) 研究成果

1) 土中の有機物が土質改良効果に及ぼす影響

土中の有機物の一種であるフミン酸が土質改良効果に重要な影響を及ぼしているのではないかと考え、フミン酸含有量と土質改良効果の関係について室内実験による検討を行った。すなわち、実際の各種粘性土からフミン酸を抽出し、これを種々の割合でカオリン粘土に加えた人工試料（含水比61%）に対して、消石灰と普通ポルトランドセメントによる土質改良実験を行った。ここで、消石灰と普通ポルトランドセメントの添加量は、カオリン粘土の乾燥重量に対して5%とし、土質改良効果の判定は、7日養生後の一軸圧縮強さで行った。

その結果、消石灰を用いて土質改良を行う場合には、図-3.4.1(a)に示すように、フミン酸の種類にかかわらず、フミン酸含有量の増加とともに改良土の一軸圧縮強さが著しく低下することが認められ、フミン酸の含有量が土質改良効果を左右する極めて重要な因子の1つになることが明らかになった。

一方、普通ポルトランドセメントを用いて土質改良を行う場合には、図-3.4.1(b)に示すように、フミン酸の種類によって土質改良効果を阻害する程度が異なるという結果が得られた。

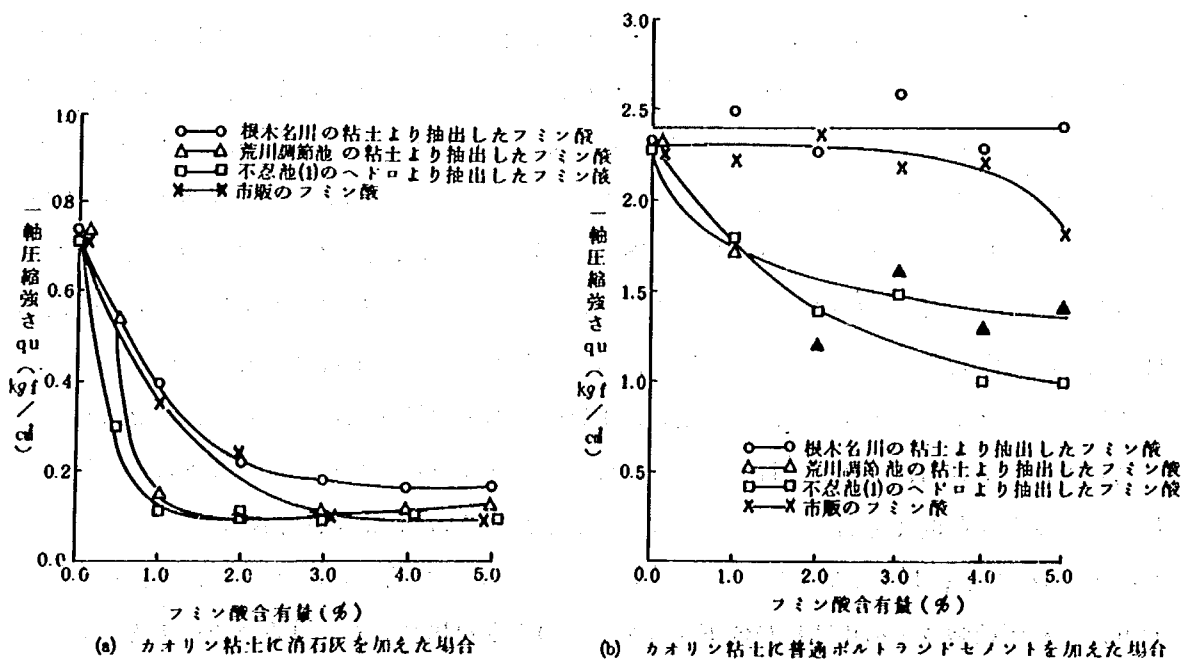


図3.4.1 フミン酸含有量と改良土の一軸圧縮強さの関係

2) フォール・コーン試験を用いた土質改良効果の簡易判定法

土質改良効果を予測するために従来は、実験室で配合された処理土の一軸圧縮試験を行いその強さ q_u によって比較、評価する方法が一般的に用いられている。しかし、この方法には次のような欠点がある。

- ① 改良後の強さがかなり小さいことがありうる高有機質土に対しては、一軸圧縮試験の供試体の準備が困難な場合が多い。
- ② 一般に強度のばらつきが多いので、数多くの供試体を準備する必要があるが、一軸圧縮試験の場合は作製に手間がかかるし、試料の必要量も相対的に多い。
- ③ 数多くの試験条件をこなすためには、試験に要する時間がより短く、操作、データ解析がより容易な試験方法の方がよい。

以上のような短所を補う方法として、液性限界状態に近い土の性状を判定すべく用いられているフォール・コーン試験装置（図3.4.2参照）の利用を試みた。

フォール・コーン試験の土質改良効果の判定への適用性を検討した結果、次のような知見が得られた。

- ① フォール・コーン試験により得られたコーン貫入量 d_c (mm)と一軸圧縮強さ q_u (kgf/cm²)の間には図3.4.3に示すようなかなり良い相関があり、その関係は次式でほぼ近似できる。

$$\log q_u = -1.20 \cdot \log d_c - 0.053$$

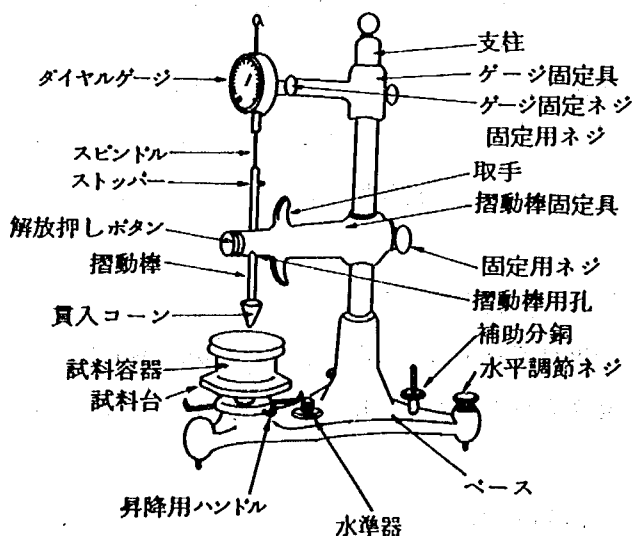


図3.4.2 フォール・コーン試験装置

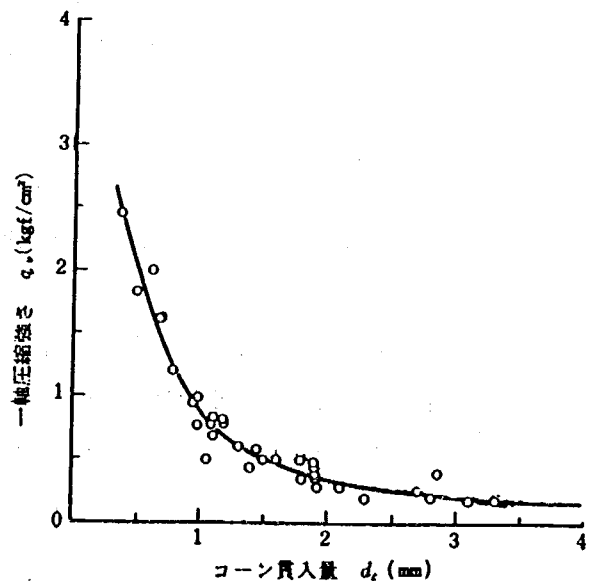


図3.4.3 フォール・コーン試験によるコーン貫入量と一軸圧縮強さの関係

- ② フォール・コーン試験は、一軸圧縮試験との相関が高いうえ、試験に要する試料の量や供試体作製の手間および試験や結果の整理に要する時間が一軸圧縮試験に比べるとかなり少なくてもよい。また、一軸圧縮試験の実施が困難な低強度の改良土についても土質改良効果の判定を行うことができる。したがって、フォール・コーン試験は改良後の強度が比較的低いことの多い高含水比で、しかも有機物に富む粘性土の土質改良効果の判定に適しており、条件を変えた数多くの試験を行う必要がある場合に特に大きな偉力を発揮する。
- ③ 改良後の強度が一軸圧縮強さで 2 kgf/cm^2 を超えるようになると、自重落下ではコーンがあまり貫入しなくなるので一軸圧縮強さとの相関性が低下するが、このような場合でも、自重落下のあと一定速度で押込み荷重を加えて 5 mm 貫入時の押込み荷重を求めれば、図-3.4.4に示すような関係を用いて一軸圧縮強さをかなりの精度で推定することができる。

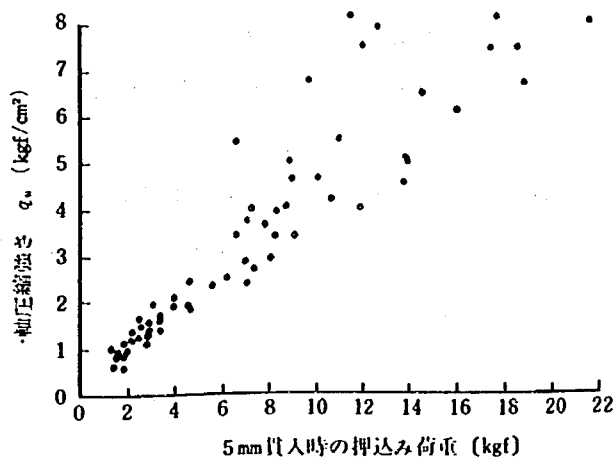


図3.4.4 改良型フォール・コーン試験装置による押込み荷重と一軸圧縮強さの関係

- ④ 以上のことから、フォール・コーン試験装置を一部改良してコーンの自重落下のあと押込み荷重が加えられるような機能を持たせることにより、改良後の強度が低いものからかなり高いものまで含む非常に広範囲の改良土の土質改良効果の判定が簡便に行えることが判明した。

3) 土の含水比とフミン酸含有量に着目した簡易土質判別分類手法

有機物を含む高含水比粘性土の土質改良効果は種々の因子の影響を受けるが、過去に行った実験の結果から判断すると、土中のフミン酸含有量と自然含水比の2つの因子の影響が特に重

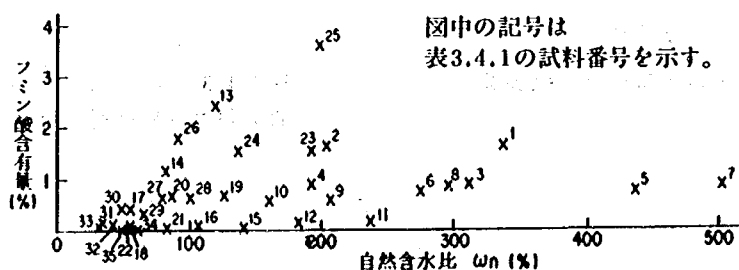


図3.4.5 実験に用いた試料の自然含水比とフミン酸含有量

要であるといえる。そこで、この2つの因子に着目した高含水比粘性土の土質改良効果判定手法を新たに提案することにした。このため、表3.4.1に示すようなフミン酸含有量と自然含水比が種々に異なる35試料を対象に、各種土質改良用添加材による土質改良一斉試験を行った。

実験に用いた試料の自然含水比とフミン酸含有量は、図3.4.5のとおりである。

土質改良用添加材としては下記のものを用い、添加量は各ケースとも80kg/m³とした。

- a) 普通ポルトランドセメント（NPCとする）
- b) 消石灰
- c) 生石灰
- d) NPCに乾燥重量比で1割の石膏を加えたもの（NPC+石膏とする）
- e) 消石灰に乾燥重量比で2割の石膏を加えたもの（消石灰+石膏とする）

供試体の養生日数は各ケースとも1日、3日、7日、28日とし、土質改良効果の判定はフォール・コーン試験によって行った。

図3.4.6～図3.4.10に土質改良用添加材の種類別の実験結果を示す。図において、各プロットの右肩の数値が各試料のコーン貫入量を示している。

また、実線で示したラインは、一軸圧縮強さがほぼ0.5kgf/cm²に相当するコーン貫入量1.5mmのラインである。このラインによって、土質改良効果が期待できる領域と期待できない領域におおむね区分できる。これらの図から、土質改良用添加材の種類別には次のような特徴があることが明らかになった。

表3.4.1 実験に用いた試料の性質

試料名	項目	粒土組成(%)			コンシステンシー(%)			日本統一土質分類	比重Gs	自然含水比Wn(%)	pH(KCℓ)	有機物含有量(%)	フミン酸含有量(%)
		砂分	シルト分	粘土分	WL	Wp	Ip						
1	不忍池(1)のヘドロ①	14.0	69.0	17.0	163.0	65.0	98.0	OH	2.374	336.0	7.1	20.6	1.62
2	" ②	"	"	"	"	"	"	"	"	204.1	"	"	"
3	不忍池(2)のヘドロ①	16.0	58.0	26.0	173.0	82.0	91.0	OH	2.431	312.2	6.2	15.3	0.89
4	" ②	"	"	"	"	"	"	"	"	192.8	"	"	"
5	不忍池(3)のヘドロ①	4.0	72.0	24.0	202.0	83.0	119.0	OH	2.425	438.1	7.3	16.6	0.74
6	" ②	"	"	"	"	"	"	"	"	276.3	"	"	"
7	霞ヶ浦(1)のヘドロ①	4.0	56.0	40.0	228.0	79.0	149.0	OH	2.404	502.5	6.5	10.1	0.83
8	" ②	"	"	"	"	"	"	"	"	296.2	"	"	"
9	霞ヶ浦(2)のヘドロ①	5.0	66.0	29.0	120.0	52.8	67.2	OH	2.598	208.0	5.1	5.5	0.57
10	" ②	"	"	"	"	"	"	"	"	160.3	"	"	"
11	有明海のヘドロ ①	0.5	71.5	28.0	181.0	56.9	124.1	CH	2.600	238.8	7.3	5.7	0.15
12	" ②	"	"	"	"	"	"	"	"	184.4	"	"	"
13	松 江 の 粘 土	0.0	61.0	39.0	121.0	40.0	81.0	CH	2.451	119.5	4.8	10.4	2.41
14	根木名川の粘土	17.0	42.0	41.0	108.0	47.0	61.0	C'H	2.545	81.6	5.5	7.8	1.17
15	羽 田 沖 の 粘 土	0.0	56.0	44.0	130.0	52.0	78.0	CH	2.608	140.9	8.1	9.7	0.04
16	東 京 湾 の 粘 土	13.0	63.0	24.0	94.0	39.0	55.0	CH	2.713	107.1	8.0	4.8	0.07
17	大 洲 の 粘 土	9.0	55.0	35.0	66.0	30.0	36.0	CH	2.714	55.8	5.9	4.3	0.41
18	横 浜 の 粘 土	28.0	36.0	36.0	70.0	29.0	41.0	CH	2.619	55.1	9.0	8.2	0.07
19	揖保川の粘土①	25.0	48.0	27.0	83.0	33.0	50.0	CH	2.555	126.4	7.7	5.7	0.66
20	" ②	"	"	"	"	"	"	"	"	86.1	"	"	"
21	多 摩 川 の 粘 土	23.0	62.0	15.0	51.0	27.0	24.0	CH	2.663	83.2	7.5	3.8	0.05
22	鶴 見 川 の 粘 土	23.0	46.0	21.0	52.0	27.0	25.0	CH	2.658	54.6	7.6	3.0	0.05
23	寺 泊 の 粘 土 ①	21.0	39.0	39.0	226.0	81.0	145.0	OH	2.385	192.7	5.9	16.4	1.54
24	" ②	"	"	"	"	"	"	"	"	136.4	"	"	"
25	白 根 の 粘 土	0.0	26.0	74.0	241.0	80.0	161.0	OH	2.370	198.0	5.2	19.7	3.57
26	金 塚 の 粘 土	5.0	66.0	29.0	100.0	50.0	50.0	C'H	2.551	90.9	5.0	8.7	1.80
27	燕 の 粘 土	7.0	60.0	33.0	83.0	38.0	45.0	C'H	2.651	79.4	6.1	4.9	0.63
28	福 島 湾 の 粘 土	0.0	33.0	67.0	99.0	50.0	49.0	C'H	2.583	101.1	6.6	4.5	0.64
29	吉 田 の 粘 土	2.0	34.0	63.0	89.0	36.0	53.0	CH	2.662	65.0	6.5	3.6	0.32
30	小ヶ谷の粘土	14.0	54.0	32.0	62.0	39.0	23.0	C'H	2.615	49.7	5.3	3.4	0.43
31	旧岩船港の粘土	11.0	57.0	32.0	46.0	25.0	21.0	CL	2.696	35.0	4.5	2.2	0.16
32	新 井 の 粘 土	18.0	41.0	41.0	61.0	30.0	31.0	CH	2.626	43.9	5.5	3.1	0.12
33	新潟流通センターの粘土	46.0	34.0	20.0	51.0	24.0	27.0	CH	2.680	32.6	5.2	2.0	0.10
34	米 山 の 粘 土	6.0	29.0	65.0	131.0	40.0	91.0	CH	2.768	60.3	4.8	1.2	0.0
35	栃 尾 の 粘 土	3.0	52.0	45.0	84.0	36.0	48.0	CH	2.722	49.7	5.5	0.5	0.0

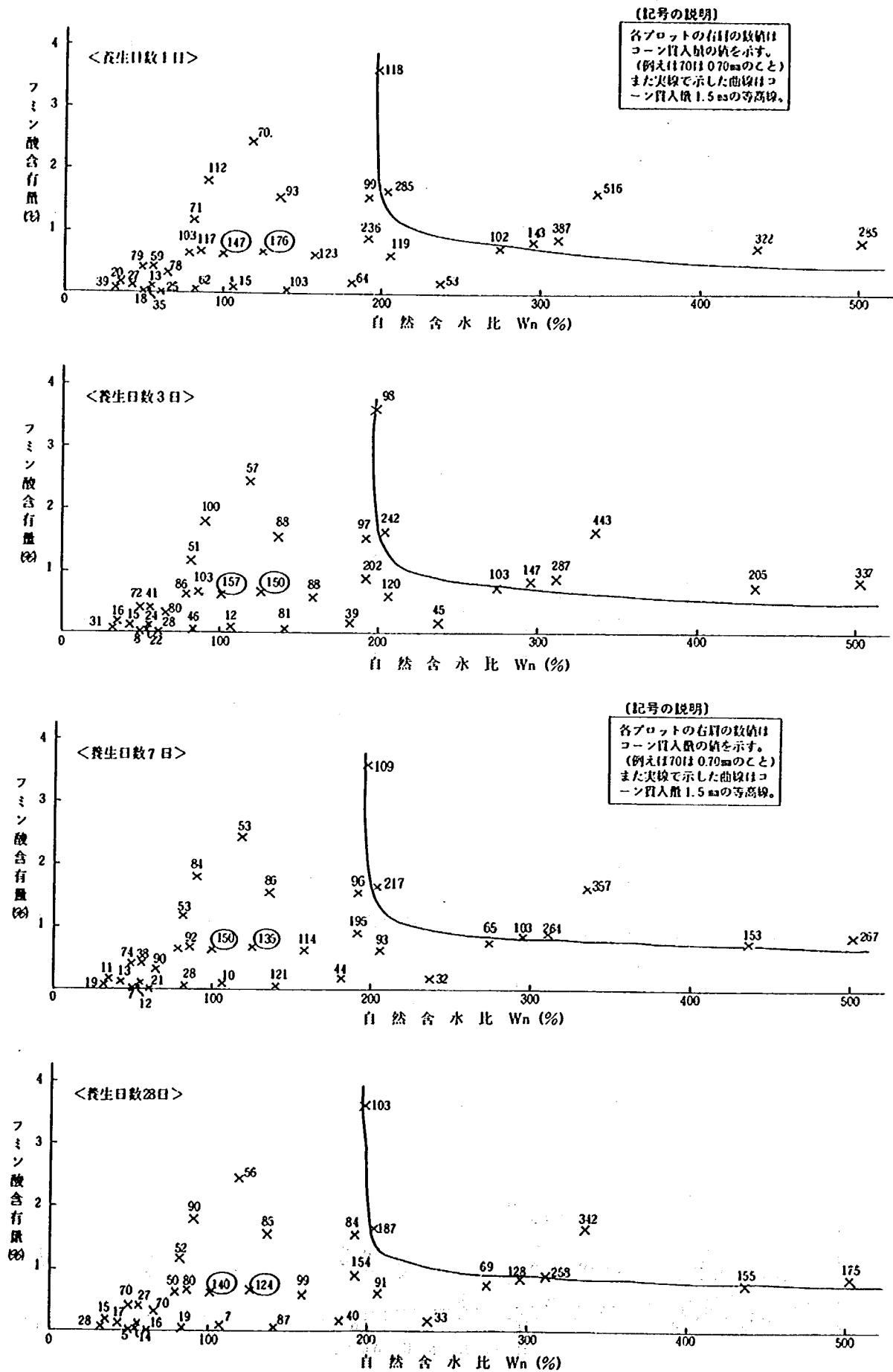


図3.4.6 フォール・コーン試験結果 (NPCの場合)

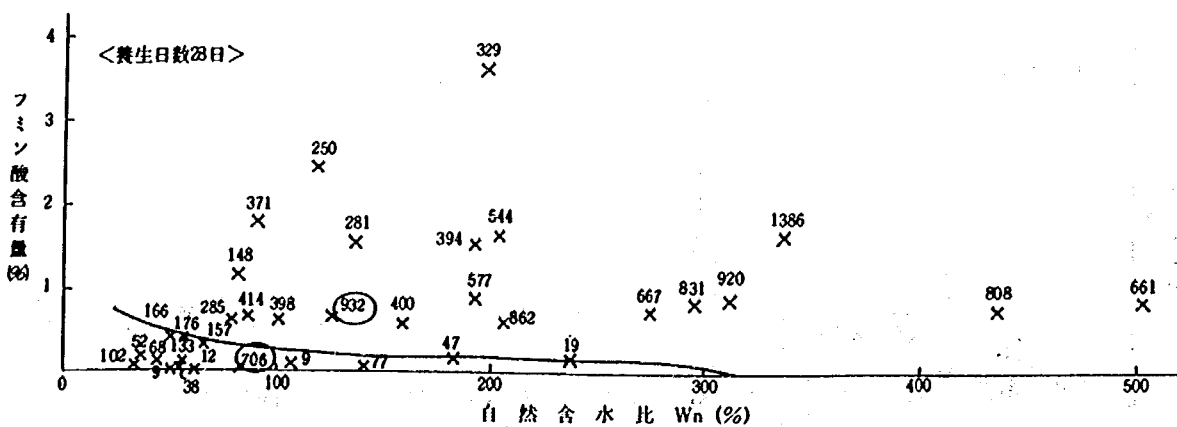
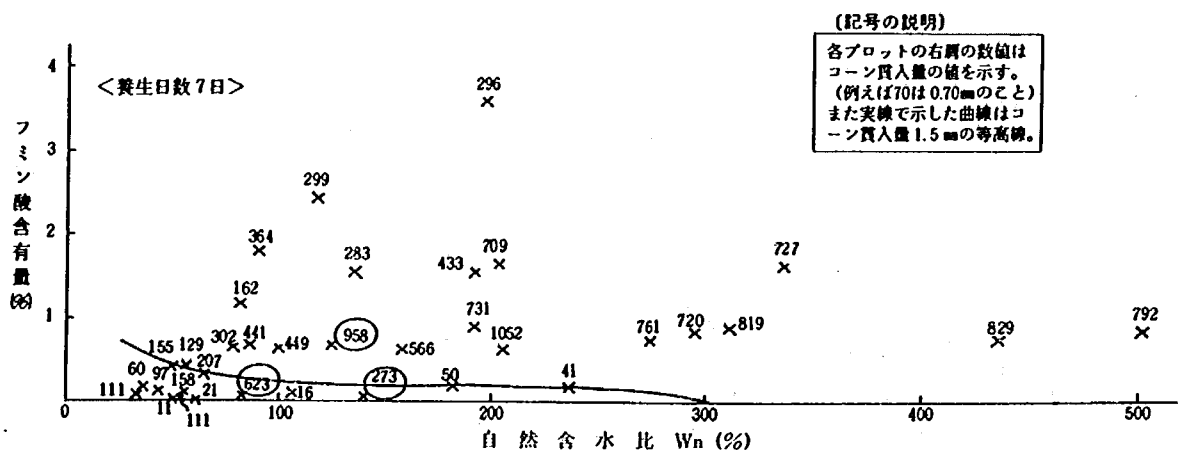
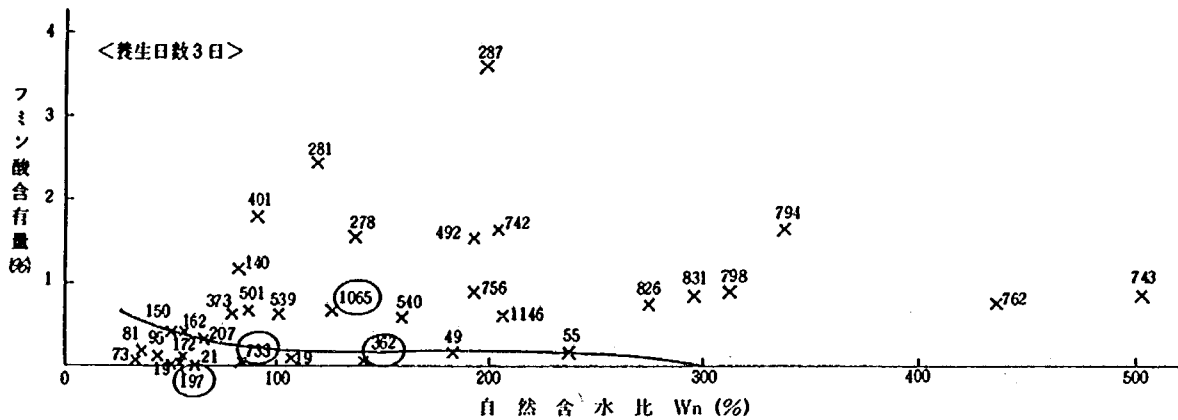
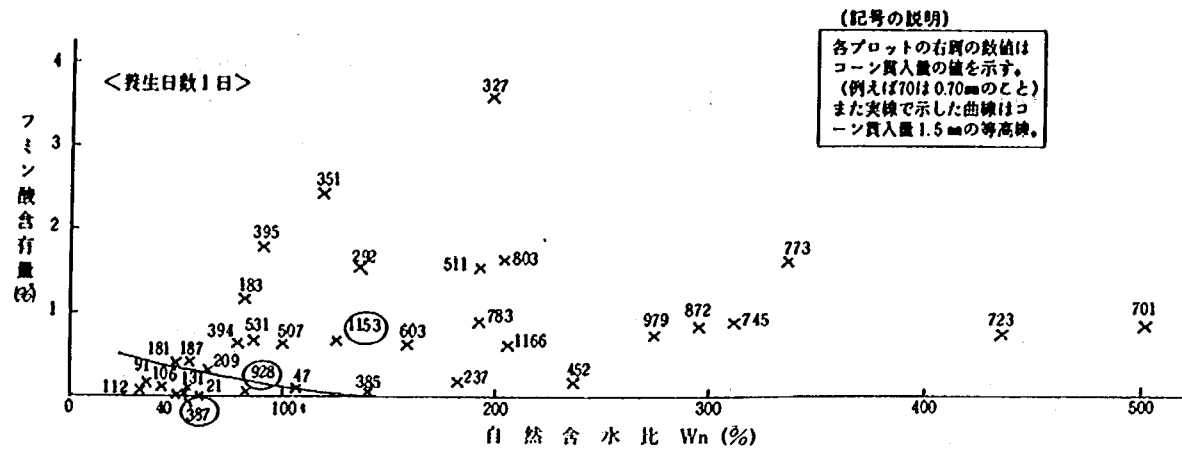


図3.4.7 フォール・コーン試験結果 (生石灰の場合)

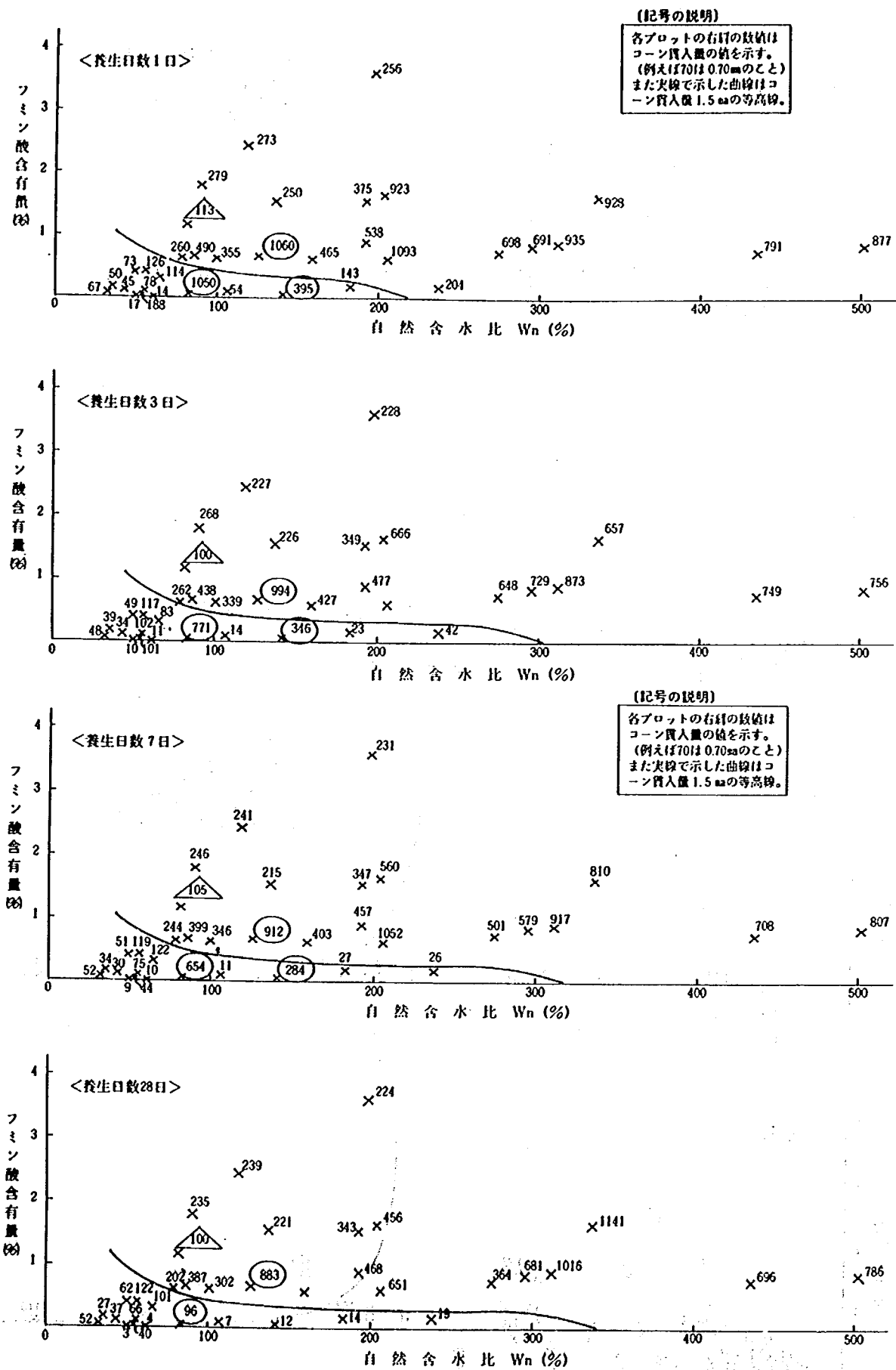


図3.4.8 フォールコーン試験結果 (消石灰の場合)

- ① NPC は、自然含水比が200%程度以下ではフミン酸含有量にかかわらず、また自然含水比が200%程度以上ではフミン酸含有量が1%程度以下の試料に対して土質改良効果が期待できる。
- ② 消石灰と生石灰の土質改良効果が期待できるのは、自然含水比が300%程度以下で、しかもフミン酸をほとんど含まない試料に対してである。
- ③ NPC や消石灰に石膏を加えると、各々単独のものより強度の発現が大きくなり、土質改良効果の期待できる領域が広がる。

以上の結果から、改良後の強度が一軸圧縮強さで 0.5 kgf/cm^2 に相当するコーン貫入量 1.5 mm の境界線をもとに、自然含水比とフミン酸含有量に着目した土質区分として図 3.4.11 が提案できる。図 3.4.11 に示した各ゾーンは、今回の実験結果から判断すると、各種の土質改良添加材に対して表 3.4.2 に示すような適用性をもつと考えられる。

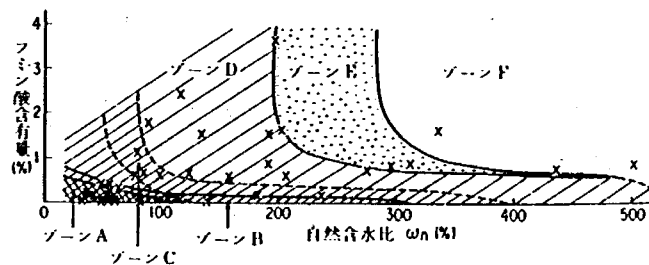


図3.4.11 自然含水比とフミン酸含有量による土質区分

表3.4.2 土質区分に応じた土質改良用添加材の適否

土質区分	土質改良用添加材の適否				
	消石灰	生石灰	消石灰+石膏	NPC	NPC+石膏
ゾーンA	◎	◎	◎	◎	◎
ゾーンB	○	○	◎	◎	◎
ゾーンC	×	○	○	◎	◎
ゾーンD	×	×	×	◎	◎
ゾーンE	×	×	×	×	○
ゾーンF	×	×	×	×	×

<記号の説明>

- ◎ … 短期的にみても強度の発現がよいもの。
- … 短期的な強度の発現はそれほどよくないが、長期的には強度が発現するもの。
- ×

4) 吸光光度法を用いたフミン酸含有量の簡易推定法

本研究では、前述の3)で述べたようにフミン酸含有量と自然含水比に着目した土質改良効果判定法を提案した。これらの一連の研究の中では、フミン酸含有量の測定方法として、図

3.4.12に示すように、アルカリ溶液中での土の放置と酸による中和を繰り返す手順の土中からフミン酸を抽出してその乾燥重量を測定する方法を用いているが、この試験はやや複雑な手間を要するため、フミン酸含有量を知るうえで、より簡便な方法が望まれる。そこで、水質分析等に用いられている吸光光度法によるフミン酸含有量の簡易推定の可能性を検討した。

実験に用いた試料は、表 3.4.3に示すような25試料である。これらの試料について、従来どおりの方法でフミン酸含有量を求めるとともに、吸光光度法により吸光度を調べて、両者の相関を求めた。

その結果、図 3.4.13に示すように、フミン酸含有量と吸光度の間にかなり良い相関があり、土質改良効果に影響を与えるフミン酸含有量の概略的な推定に吸光光度法がある程度利用できることが明らかになった。

表3.4.3 吸光度とフミン酸含有量一覧

試料名	吸光度 (A)	フミン酸 含有量 (%)
1 不忍池 ①	0.743	1.62
2 " ②	0.705	0.89
3 " ③	0.636	0.74
4 霞ヶ浦	0.785	0.83
5 松江	1.374	2.41
6 根木名川	1.209	1.17
7 羽田沖	0.239	0.04
8 東京湾	0.173	0.07
9 大州	0.525	0.41
10 横浜	0.201	0.07
11 多摩川	0.153	0.05
12 鶴見川	0.035	0.05
13 寺泊	1.394	1.54
14 白根	2.810	3.57
15 金塚	1.051	1.80
16 燕	0.740	0.63
17 福島潟	0.630	0.64
18 吉田	0.396	0.32
19 小ヶ谷	0.641	0.43
20 旧岩船港	0.183	0.16
21 新井	0.310	0.12
22 新潟流通センター	0.093	0.10
23 米山	0.036	0.0
24 栃尾	0.006	0.0

※フミン酸含有量は重量比による方法で求めた値

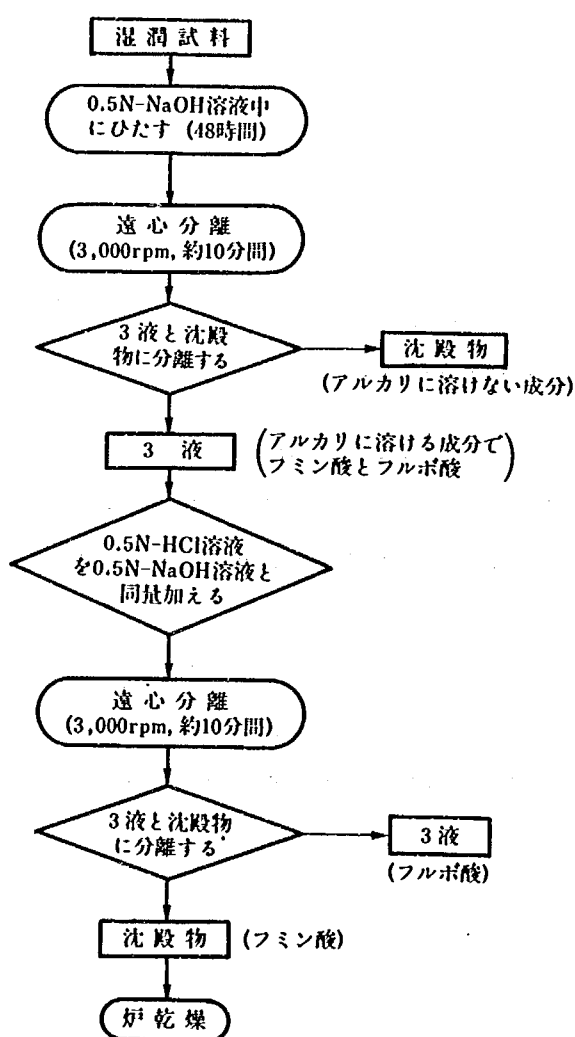


図3.4.12 土中のフミン酸の抽出方法

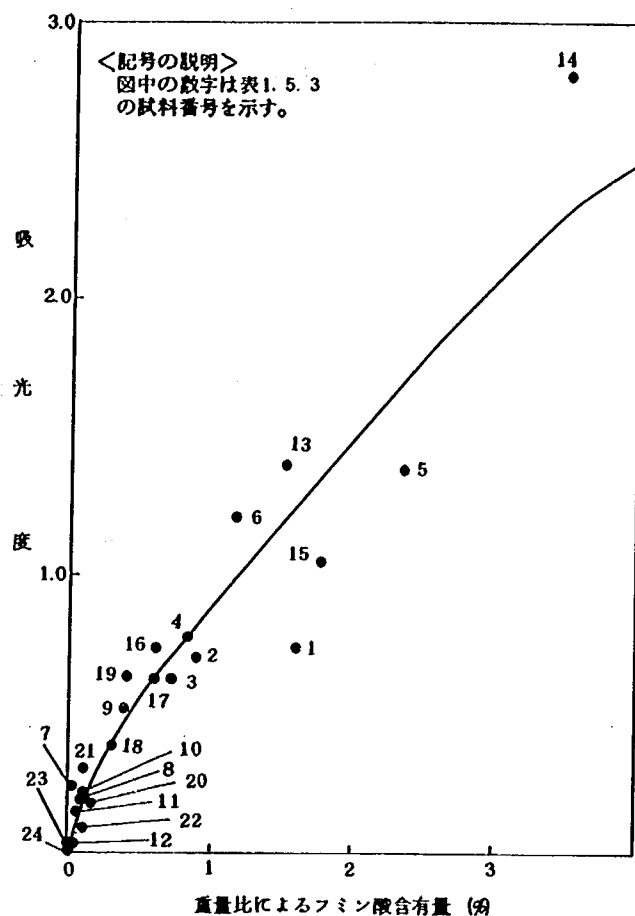


図3.4.13 吸光度とフミン酸含有量の関係

5) 下水汚泥焼却灰、石炭灰、排脱石膏等を利用した土質改良用添加材

フミン酸を多く含む土に対してどのような土質改良用添加材が効果的かを検討するための1つの試みとして、図3.4.14に示すような各種の土質改良用添加材を用いて1)で述べた方法と同様の土質改良実験を行った。

その結果を図3.4.15に示す。これより、NPCと消石灰の各々に適量の石膏を加えたり、下水汚泥焼却灰に生石灰と石膏を加えて化学組成を調整することによって、土中のフミン酸がある程度含まれていても比較的高い土質改良効果の得られることが明らかになった。

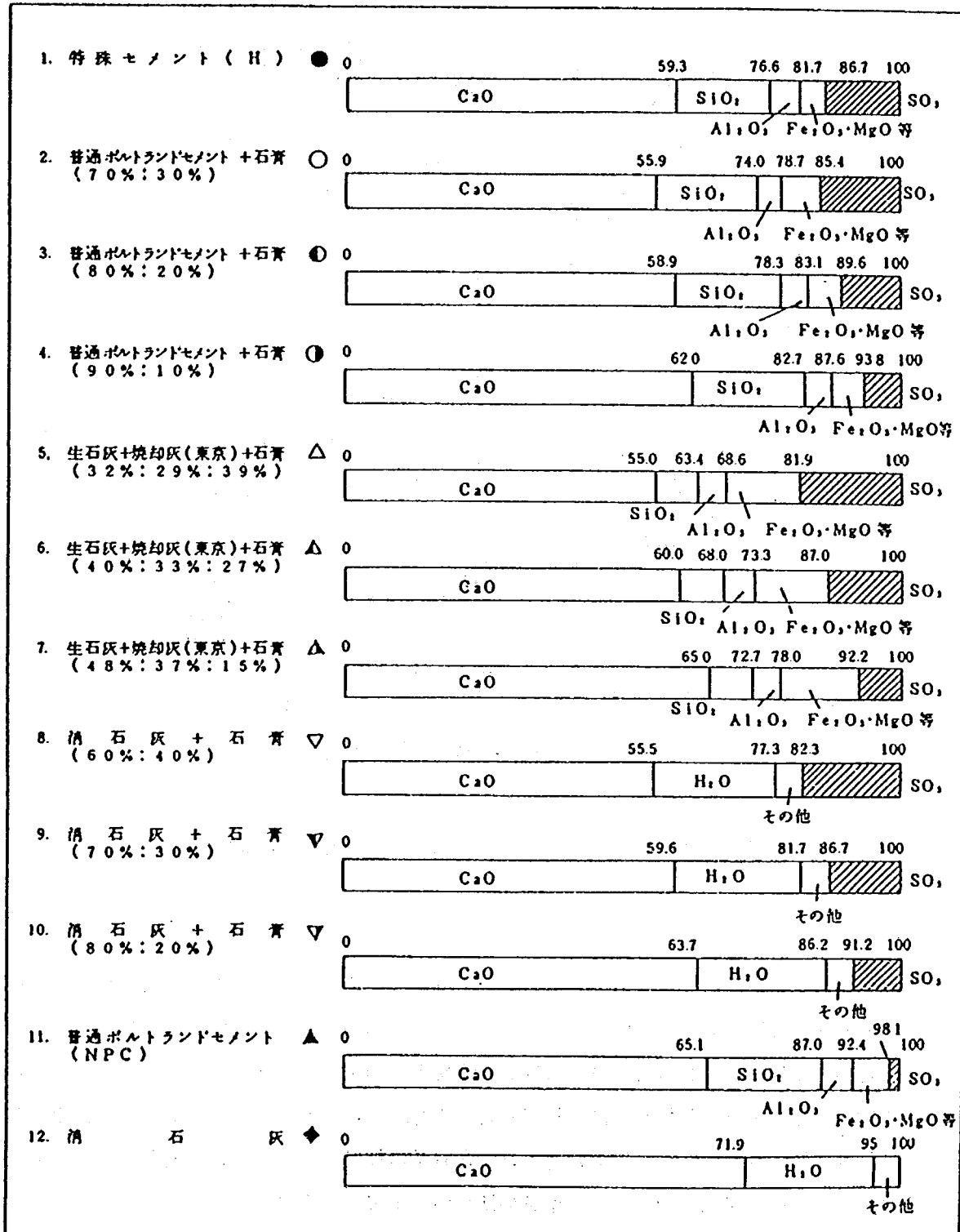


図3.4.14 実験に使用した土質改良用添加材の種類と化学組成

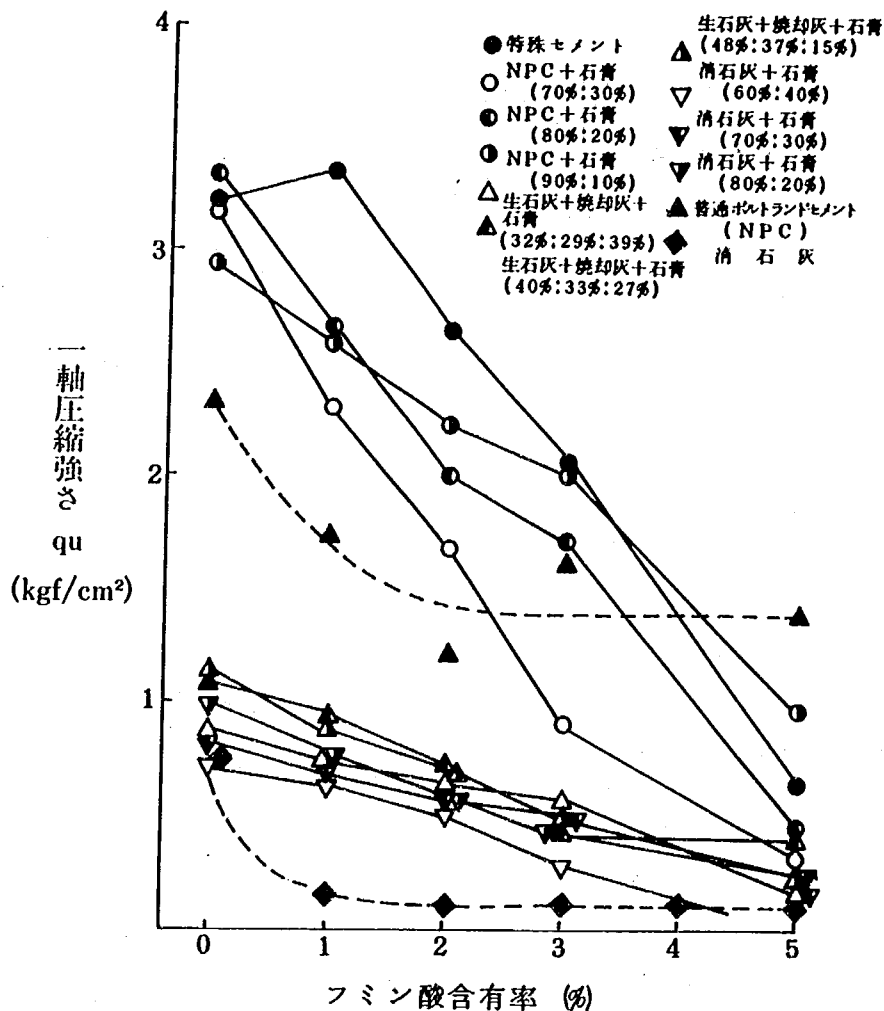


図3.4.15 フミン酸含有率と改良土の一軸圧縮強さの関係

(4) まとめ

河川や湖沼あるいは港湾などに堆積しているへどろに代表されるような不良土（高有機質土）の処理技術の開発の一環として、土中のフミン酸が土質改良効果に及ぼす影響を明らかにするとともに、土の自然含水比とフミン酸含有量に着目した簡易土質判別分類手法ならびにその土質区分にもとづく土質改良用添加材の効果判定法を提案した。また、フォール・コーン試験を用いた土質改良効果の簡易判定法、吸光光度法を用いたフミン酸含有量の簡易測定法を新たに開発するとともに、土質改良用添加材の効果判定のための標準試験法についても提案を試みた。

ただし、土の自然含水比とフミン酸含有量に着目した簡易土質判別分類手法の適用性については、現場における実績等をふまえて今後さらに検討を加えていく必要があると考えられる。また、土中のフミン酸含有量の簡易測定法ならびに土質改良添加材の効果判定のための標準試験法についても、より一層合理的な手法の開発が望まれる。

参 考 文 献

- 1) 箭内寛治, 五味貞夫: フォール・コーン (円スイ貫入) 法で液性限界を求め得るか, 土と基礎, Vol. 13, No. 10, 1965
- 2) 大場正夫: 土中の有機物がセメンティング効果に及ぼす影響, 土木技術資料10-12, 1968
- 3) 北郷繁, 益田栄治: 液性限界測定法に関する実験的研究 (第4報), 土と基礎, Vol. 17, No. 9, 1969
- 4) 喜田大三, 久保博, 添原知則: 汚泥の処理処分に関する研究 (第6報) —セメント系各種固化剤の比較検討—, 第15回土質工学研究発表会, 1980
- 5) Housby, G. T. : Theoretical Analysis of the Fall Cone Test, Geotechnique, Vol. 32, No.2, 1982

(土質研究室)

3.5 下水汚泥焼却灰、スラグの舗装への利用

(1) 研究目的

本研究は、下水汚泥を処理する過程で発生する下水汚泥焼却灰や下水汚泥スラグを対象に、舗装材料の利用可能性を検討することを目的に実施したものである。舗装に用いる材料には所要の品質、強度、耐久性が要求されるが、その確認には、各種室内試験とともに、実際の道路で施工された試験舗装による評価が必要である。今回の検討では、これらの手順を踏まえて下水汚泥焼却灰、スラグから得られる再生路盤材の評価を個々に行ったが、試験舗装を行った個所が下水道施設内に限られていたこと、材料としての生産、供給体制に現状では制約があることなどから、研究成果としては、あくまで下水道施設内での設計、施工に用いることを前提として、検討を進めたものである。

(2) 研究内容

本研究では、舗装材料として求められる各種品質試験、適用性試験を室内で行い、そこでの評価をもとに、利用可能性の高いものを対象に試験舗装を行った。

また、下水汚泥焼却灰（石灰系）については、加熱アスファルト混合物のフィラーへの適用性を室内試験によって確認した。それぞれの評価は以下の通りである。

1) 室内試験結果からみた適用性

室内試験の結果を以下に示す。

(i) 下水汚泥焼却灰（石灰系、高分子系）

表3.5.1 一般材料試験の結果

試 料		(I) 下水汚泥焼却灰	
		a	b
試験項目		石 灰 系	高 分 子 系
比 重 (g/cm³)		3.002	2.612
吸 水 量 (%)		—	—
含 水 量 (%)		1.1	0.7
粒 度 (通過重量百分率%)	ふるい目(mm) 40		
	30		
	25		
	20		
	13		
	5		
	2.5		
	1.2		
	0.6	100	
	0.3	99.9	100
型 性 指 数	液性限界 (W _L)	50.5	48.7
	塑性限界 (W _p)	—	—
	P I	N P	N P
	pH	11.3	8.6
	強 熱 減 量 (%)	2.0	0.6
粘 土 塊 量 (%)		—	—
すりへり減量 (%)		—	—
細粒化試験		—	—

表3.5.2(1) 適用性試験の結果

〈粒 状 材〉

試 料		(I) 下水汚泥焼却灰	
		a	b
試験項目		石 灰 系	高 分 子 系
修 正 C B R	最 適 合 水 比 (%)	52.2	47.0
	最 大 乾 燥 密 度 (g/cm³)	1.105	0.850
	修 正 C B R (%)	140	1
	最 適 合 水 比 (%)①	—	—
	最 大 乾 燥 密 度 (g/cm³)	—	—
	修 正 C B R (%)	86	44
	最 適 合 水 比 (%)	8.1	8.7
	最 大 乾 燥 密 度 (g/cm³)	2.152	2.139
	修 正 C B R (%)	129	30
	最 適 合 水 比 (%)①	—	—
B R	最 大 乾 燥 密 度 (g/cm³)	—	—
	修 正 C B R (%)	115	61

表3.5.2(2) 適用性試験の結果

〈安定処理混合物……素材〉

試験項目	試料		(1) 下水汚泥焼却灰			
	特 性	養 生 日 数 添 加 材 量 (%)	a		b	
			石 灰 系		高 分 子 系	
			7	28	7	28
セメント安定処理 〈一軸圧縮試験〉	最適含水比(%)	—	50.0		49.0	
	①	3	25.4	—	2.83	—
	一軸圧縮強度	5	24.3	32.8	3.85	4.71
	(kg/cm ²)	7	20.6	—	5.93	—
セメント・乳剤安 定 処 理 〈マーシャル 一軸試験〉 ※ 添加材量(%) の表示は, セメント量/乳剤量	最適含水比(%)	—	49		46	
	①	1/7※	13.9	—	2.5	—
	マーシャル	2/6	18.6	24.5	2.9	5.3
	一軸強度	3/5	21.6	—	4.3	—
	(kg/cm ²)	4/4	22.6	—	6.1	—
		5/3	20.9	—	6.6	—
	一次変位量	1/7	24	—	16	—
	(1/100cm)	2/6	12	15	20	29
		3/5	12	—	24	—
		4/4	13	—	21	—
		5/3	11	—	17	—
	残留強度率	1/7	78.5	—	10.0	—
	(%)	2/6	82.2	79.5	31.3	45.0
		3/5	73.8	—	21.3	—
		4/4	82.0	—	40.6	—
		5/3	87.3	—	59.6	—
乳剤安定処理 〈マーシャル 安定度試験〉	安定度	5.5	739		102	
	(kg)	6.0	1,313		—	
		6.5	1,256		130	
		7.0	1,275		—	
		7.5	885		130	
	空げき率	5.5	54.7		57.2	
	(%)	6.0	50.1		58.5	
		6.5	47.8		54.7	
		7.0	50.7		51.8	
		7.5	51.4		52.1	
	フロー値	5.5	24		19	
	(1/100cm)	6.0	17		—	
		6.5	28		16	
		7.0	20		—	
		7.5	21		24	

表3.5.2(3) 適用性試験の結果

〈安定処理混合物……配合材〉

試験項目	試料 セメント・乳剤添加量(%) 特性		(1) 下水汚泥焼却灰					
			a			b		
			石 灰 系			高 分 子 系		
			3	4	5	3	4	5
セメント安定処理 〈一軸圧縮試験〉	最適含水比(%)	—	8.8			8.6		
	一軸圧縮強度 (kg/cm ²)	3	15.1	12.3	17.3	18.5	16.6	27.9
		5	25.7	31.0	32.1	22.0	40.1	42.7
		7	62.3	32.1	65.4	30.4	77.7	33.5
セメント・乳剤安定処理 〈マーシャル供試体を用いた一軸圧縮試験〉 ※ 添加材料の表示は、 セメント量/乳剤量	最適含水比(%)	—	7.4			7.3		
	一軸圧縮強度 (kg/cm ²)	1/7※	4.9	4.7	4.9	3.5	3.8	3.8
		2/6	8.4	6.9	7.2	5.8	7.2	7.5
		3/5	12.5	10.1	9.9	10.8	11.2	9.0
		4/4	19.5	15.8	13.5	20.2	17.1	15.7
		5/3	26.1	20.3	21.0	22.8	29.1	22.2
	一次変位量 (1/100cm)	1/7	19	17	18	24	24	27
		2/6	21	22	18	19.	22	23
		3/5	21	17	15	22.	20	27
		4/4	17	16	15	18.	19	32
		5/3	16	15	18	21.	34	22
	残留強度率 (%)	1/7	67.0	72.6	68.4	71.1	61.9	58.6
		2/6	61.5	62.9	52.3	73.7	63.1	61.1
		3/5	55.0	62.0	57.2	63.6	65.7	55.7
		4/4	53.2	55.9	60.3	60.0	61.4	46.3
		5/3	66.2	62.2	44.8	46.1	36.1	43.7
乳剤安定処理 〈マーシャル安定度試験〉	安定度 (kg)	5.5	405	260	419	430	344	227
		6.0	370	317	485	402	386	272
		6.5	464	319	351	516	452	227
		7.0	410	279	321	373	454	294
		7.5	392	253	463	499	287	265
	空ゲキ率 (%)	5.5	7.5	10.2	410.5	47.5	38.5	12.2
		6.0	7.5	8.4	49.6	46.5	39.2	10.6
		6.5	6.4	7.5	39.4	54.3	47.7	10.6
		7.0	5.1	6.1	38.4	34.6	47.6	9.3
		7.5	4.4	5.3	45.3	43.0	28.7	8.5
	フロー値 (1/100cm)	5.5	37	23	30	34	30	34
		6.0	29	21	28	33	25	32
		6.5	40	28	27	30	31	35
		7.0	29	20	33	33	34	41
		7.5	38	41	25	33	32	30
粒 度 と P I	通過重量百分率(%)	ふるい目 (mm)						
		25	100					
		13	85					
		5	60					
		2.5	39.8					
		0.6	29.6					
		0.3	24.0					
	0.074	13.2						
P I		N P						

一般試験、適用性試験の結果をまとめると表3.5.3のようになる。

これらの結果より、室内試験から判断される下水汚泥焼却灰の適用性は以下の通りである。

- ① 石灰系焼却灰は、粒状材、安定処理いずれの形態でも路盤材料への適用が考えられる。
- ② 高分子系焼却灰は、配合材（4％程度の混入）としてならば路盤材料への適用が考えられる。

表3.5.3 下水汚泥焼却灰の室内試験結果

有害物質の溶出試験		各項目について総理府で定める基準を満足している。
一般試験	比 重	石灰系焼却灰3.0、高分子系焼却灰2.6であり、石灰系焼却灰が若干大きい。
	吸 水 量	粒子が細いため、試料準備の段階で硬化してしまい測定ができなかった。
	含 水 量	石灰系焼却灰、高分子系焼却灰ともに絶乾状態
	粒 度	ファイラー状を呈しており、粒子を指頭でつぶすと砕ける程度の硬さ
	塑性指数 (PI)	N. P.
	pH	約9～13と全て7以上を示し、アルカリ性側にある。
	すべり減量	粒子が細いため、測定ができなかった。
適用性試験	修正 C B R	素材単独では石灰系焼却灰は140％という高い値を示すが、高分子系焼却灰は1％以下である。粒度調整碎石に4％程度混入した配合材では、石灰系焼却灰は129％、高分子系焼却灰は30％程度となる。
	一軸圧縮試験 (セメント安定処理)	石灰系焼却灰は下層路盤材料の規格値（7日強度、10kg/cm ² ）を満足するが、水浸にともなう破壊が一部認められるので、耐久性については試験舗装等行って詳細に検討する必要がある。高分子系焼却灰については、素材のままだとセメント安定処理しても利用は難しい。
	マーシャル安定度試験 (瀝青安定処理等)	石灰系焼却灰については、瀝青安定処理材としてならば路盤への適用が考えられるが、焼却灰を用いた混合物は水浸により崩壊する傾向があるので、耐久性については試験舗装等行って詳細に検討する必要がある。

(ii) 下水汚泥スラグ (空冷, 水砕)

表3.5.4 一般試験結果一覧表

試 料		空 冷 汚 泥 ス ラ グ ※1				水 砕 汚 泥 ス ラ グ ※2			
試験項目									
見 掛 比 重 (g/cm ³)		2.8 5 4				3.1 4 0			
表 乾 比 重 (g/cm ³)		2.8 1 7				2.6 4 4			
か さ 比 重 (g/cm ³)		2.7 9 7				2.4 1 3			
吸 水 量 (%)		0.7 1 (13~5mm) , 0.16 (2.5mm以下)				9.6			
含 水 比 (%) ①		1.4				4 8.6			
粒 度 (通 過 重 量 百 分 率)	ふるい目 (mm)	原粒度	25 回突②	50 回突	75 回突	原粒度	25 回突	50 回突	75 回突
	40	100							
	30	99.0							
	25	93.1							
	20	76.7	100 (100)③	100 (100)	100 (100)				
	13	51.8	75.1 (67.6)	74.1 (67.6)	75.6 (67.6)	100	100	100	100
	5	39.5	51.4 (51.4)	55.9 (51.4)	56.5 (51.4)	98.6	98.8	99.2	99.1
	2.5	34.8	47.4 (45.4)	48.5 (45.4)	49.4 (45.4)	93.6	94.1	94.9	96.1
	1.2								
	0.6	21.9	30.2 (28.6)	31.0 (28.6)	31.7 (28.6)	60.6	69.9	71.5	71.5
	0.3	11.9	19.0 (15.4)	19.1 (15.4)	19.8 (15.4)	24.9	43.7	46.6	48.0
	0.15	6.2	10.1 (8.1)	10.9 (8.1)	11.0 (8.1)	8.2	18.7	22.4	25.5
0.074	3.0	5.3 (3.8)	5.6 (3.8)	5.5 (3.8)	4.3	10.1	12.0	13.8	
塑 指 性 数	液 性 限 界 (W _L)	NP	—			NP	—		
	塑 性 限 界 (W _p)	23.7	—			94.1	—		
	P I	NP	—			NP	—		
ロサンゼルスすりへり量 (%)		3 3.9				—			
単位容積重量 (T/m ³)		2.1 2 4				0.7 0 7			
軟 石 量 試 験 (%)		0				—			
モ ー ス 硬 度		6.5 (正長石と石英の中間)				—			
は く 離 試 験 ④		5 %以下				—			
有 害 物 試 験	有 機 不 純 物 試 験	薄い				薄い			
	粘 土 塊 量	0				0			
	細長, うすっぱら石片	2.3				—			
	粗 骨 材 (%) ⑤	2.0				—			
	細 骨 材 (%) ⑥	2.0				5.5			

※1 大阪府安威川流域下水道産 ※2 川崎市加瀬処理場産

注) ① 試料が屈いた時の含水比

② 細粒化試験: マーシャル試験用モールドに試料を入れ, 片面を所定回数突く

③ 細粒化試験に供した粒度 (20トップ), 川崎スラグは原粒度を使用

④ 試料自体が黒いため肉眼観察後さらに手の感触で判断

⑤ 40~5mm 5~10は重複

⑥ 10~0.3mm 5~10は重複

表3.5.5 修正CBR試験結果一覧表

試 料	空 冷 汚 泥 ス ラ グ	水 砕 汚 泥 ス ラ グ	水 砕 汚 泥 ス ラ グ + 補 足 材 ①
試験項目			
最 適 含 水 比 (%)	6:1	21.0	9.3
最大乾燥密度 (g/cm ³)	2.366	1.278	2.038
修 正 C B R (%)	114	46	110

注) ① M-30粒度 水砕スラグ使用率21%

一般試験、適用性試験の結果をまとめると表3.5.6 のようになる。

これらの結果より、室内試験から判断される下水汚泥スラグの適用性は以下のとおりである。

- ①空冷汚泥スラグは、上層路盤（粒度調整路盤、瀝青安定処理路盤、セメント安定処理路盤）、下層路盤への適用が素材単独、配合材いずれの形態でも考えられる。
- ②水砕汚泥スラグは、素材単独では下層路盤（粒状路盤、セメント安定処理路盤）、配合材としてならば上層路盤（粒度調整路盤、セメント安定処理路盤）への適用が考えられる。

表3.5.6 下水汚泥スラグの室内試験結果

有害物質の溶出試験		各項目について総理府で定める基準を満足している。
一般試験	比 重	空冷汚泥スラグ2.9, 水砕汚泥スラグ3.1であり、一般骨材に比べて大きい。
	吸 水 量	水砕汚泥スラグは多孔質であるため吸水量が非常に大きい。
	含 水 量	空冷汚泥スラグは絶乾状態、一方水砕汚泥スラグは49%と大きい。
	粒 度	空冷汚泥スラグは40～13mmが約50%を占める粗い粒度、水砕汚泥スラグは2.5mm以下が95%を占める細かい粒度である。
	塑性指数 (PI)	N. P.
	pH	アルカリ分の溶出が問題にすることはないので特に確認は行わなかった。
	すりへり減量	空冷汚泥スラグは34%で、表層、基層用の骨材には使用できない。
適用性試験	修正 C B R	空冷汚泥スラグは114%, 水砕汚泥スラグは46%であり、粒度調整碎石(M-30)に水砕汚泥スラグを20%程度配合したものは110%である。
	一軸圧縮試験 (セメント安定処理)	空冷スラグ及び配合材として水砕汚泥スラグを用いたものは、上層路盤の基準値を満足する。水砕汚泥スラグ単体のものは下層路盤の基準値ならば満足する。
	マーシャル安定度試験 (瀝青安定処理等)	空冷汚泥スラグは安定度が低めであるものの、瀝青安定処理材としてならば上層路盤への適用が可能である。

2) 試験舗装からみた適用性

下水汚泥焼却灰、下水汚泥スラグを対象に以下の3箇所試験舗装を行い、施工性、供用性の評価を行った。

(i) 横浜市金沢下水処理場内試験舗装

a) 概要

室内試験結果では、下水汚泥焼却灰（石灰系）及びクリンカーアッシュ（石炭灰）は、材質的には、安定処理（素材、配合）はもちろん、粒状材（素材、配合材）の形態でも路盤材として利用し得ると結論された。路盤材としての利用の可能性が指摘されたこれらの材料について、横浜市が59年1月に金沢下水処理場においてその試験施工を行い、施工性、供用性等について調査を実施した。試験施工位置を図3.5.1に示す。

試験施工区間の工区別断面構成を図3.5.2に示す。

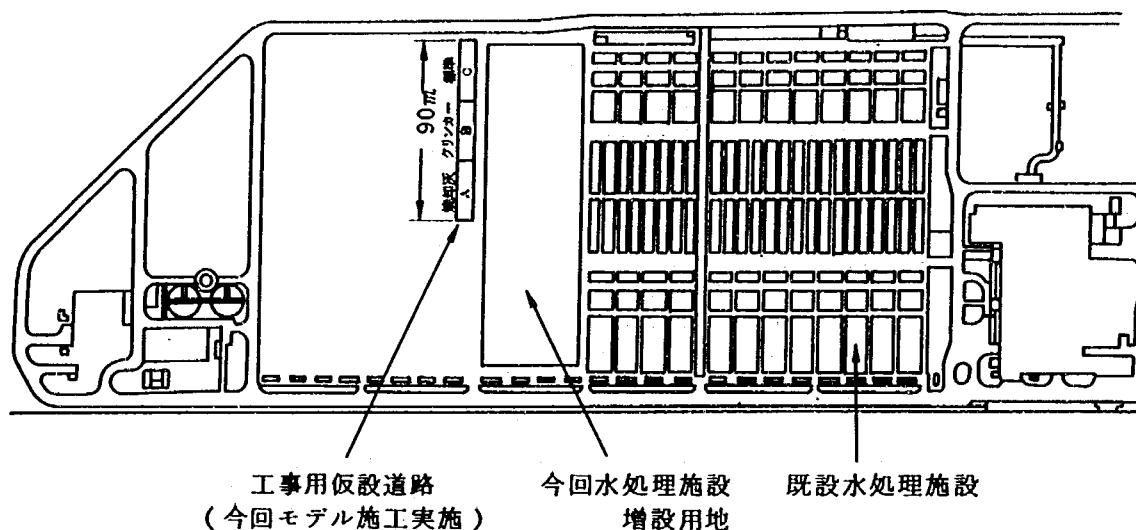


図3.5.1 モデル路盤試験結果

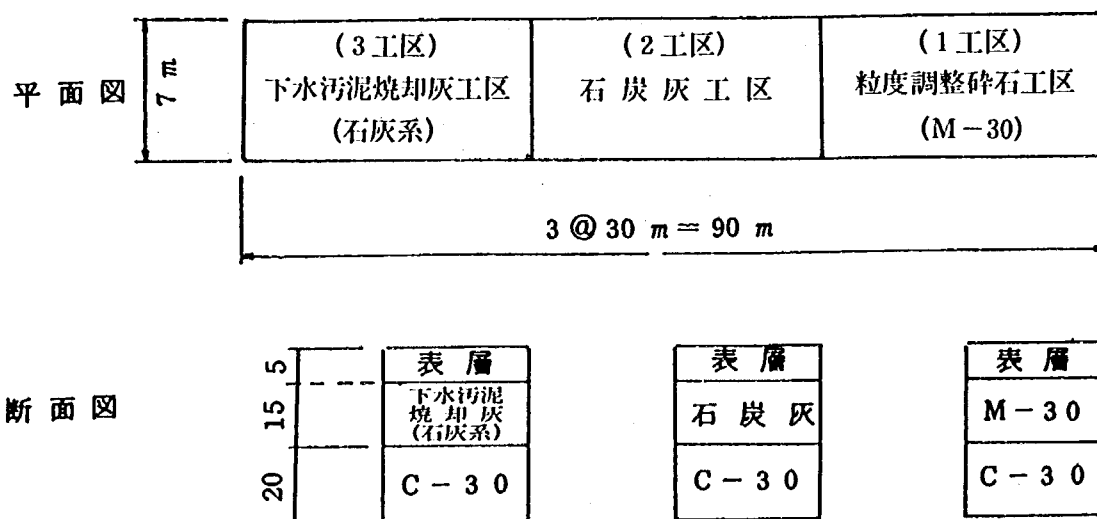


図3.5.2 断面構成 (cm)

b) 追跡調査結果

これら3工区に対して施工後2年目の追跡調査として、路面性状調査、現場密度、現場CBR、平板載荷、一軸圧縮等の路盤性状試験を行った。

表3.5.7 に横断凹凸、縦断凹凸、ひびわれ率、たわみ量の測定結果をそれぞれ示す。

表3.5.7 路面性状調査の結果

工 区	横断凹凸 (mm)		縦断凹凸 (mm)		ヒビワレ率 (%)	たわみ量 (mm)	
	左 側	右 側	左 側	右 側		左 側	右 側
1 (砕 石)	4	5	1.67	3.24	0.8	0.624	0.743
2 (石炭灰)	5	4	0.87	1.52	0.4	1.097	1.273
3 (焼却灰)	2	4	2.42	2.70	0.9	0.572	0.776

縦断凹凸では、右車線が左車線に比べて路面の荒れ具合が大きいようである。また、工区別では石炭灰、砕石、焼却灰の順に荒れ具合が大きくなっていることがわかる。

ひびわれ率は、縦断凹凸同様石炭灰、砕石、焼却灰の順に大きくなっている。

たわみ量測定では、右車線の方が左車線に比べてたわみ量が大きいたことがわかる。また、工区別では焼却灰、砕石、石炭灰の順にたわみ量が大きくなっていることがわかる。

横断凹凸はいずれの工区も5mm以下で問題はない。

試験舗装区間は工事用仮設道路であることから、その交通量は、水処理施設の工事終了後大巾に減っており現状ではほとんどないような状態である。

したがって路面性状の変化もほとんどみられないが、強いて評価を行えば、焼却灰工区、石炭灰工区とも粒調砕石工区とほぼ同等の供用性状をしめしている。たわみ量については、石炭灰工区が若干大きくなっているが、これは2工区が現場の入口になっており特に大型車の通行が多かったためではないかと思われる。

表3.5.8 に現場CBR等の路盤性状試験結果を示す。

表3.5.8 路面性状試験結果

工 区	現 場 密 度		土研式貫入	現場 CBR	平板載荷	一軸圧縮
	湿潤密度 g/cm ³	含水比 %	打撃回数 回	CBR 値 %	地盤係数 kg/cm ²	qu kg/cm ²
1 (砕 石)	1.97	4.1	585	232	49.8	—
2 (石炭灰)	1.12	21.0	45	40	36.6	—
3 (焼却灰)	1.30	74.2	306	244	71.9	21.8

各強度試験結果をみると、粒調碎石工区及び焼却灰工区ともに大きな強度を示している。石炭灰工区は前述した影響からか強度が低く、少なくとも粒調砕碎工区と同等には評価できないと判断される。

c) 考察

試験舗装区間は工事用仮設道路であったため現在ではほとんど車両が通っていないので、交通条件はかなり緩和されている。供用性の評価を行うには十分な交通量ではないが、とりあえず路面性状調査結果並びに路盤性状試験の結果をもとに、各工区に使用した材料の現状における供用性、耐久性を評価してみる。

下水汚泥焼却灰は、路面性状、強度性状ともに粒調碎石と同等の供用性、耐久性を有していると思われる。特に平板載荷試験、現場CBR試験の結果からわかるように、強度はかなり高く、かつ水硬性を有している路盤なので、この特徴をいかした使い方を検討していくことが望まれる。

石炭灰は、路面性状としては粒調碎石と同等以上の評価が現状では可能であるが、強度は低いので、総合的に判断すれば、クラッシャーランとほぼ同程度の評価が期待できるであろう。しかし、今回の試験舗装区間は通過交通量が比較的少なかったので、今後は、交通条件がより厳しい個所で再度試験舗装を行い耐久性の確認を行う必要がある。

(ii) 横浜市北部第二下水処理場内試験舗装

a) 概要

下水汚泥焼却灰を下層路盤に用いた場合の施工性、耐久性の調査を行うために、石灰系の焼却灰と、高分子系の焼却灰とを用いた路盤材料の試験施工を実施した。北部第二下水処理場の全体及び試験工区的位置を図3.5.3に示す。

路盤材料の施工断面は、図3.5.4に示す通りで、A～C工区(40m/工区)の3工区で実施し、クラッシャーラン、及び石灰系、高分子系の焼却灰を下層路盤材として使用した。

試験内容としては、各焼却灰の化学成分分析、一軸圧縮試験(室内)、路床の地質調査、各材料の性状試験をはじめ、施工性を調査するための施工管理試験および作業性のアンケート等を行っている。

なお、現地の試験施工は横浜市が59年11月～12月に行ったものである。

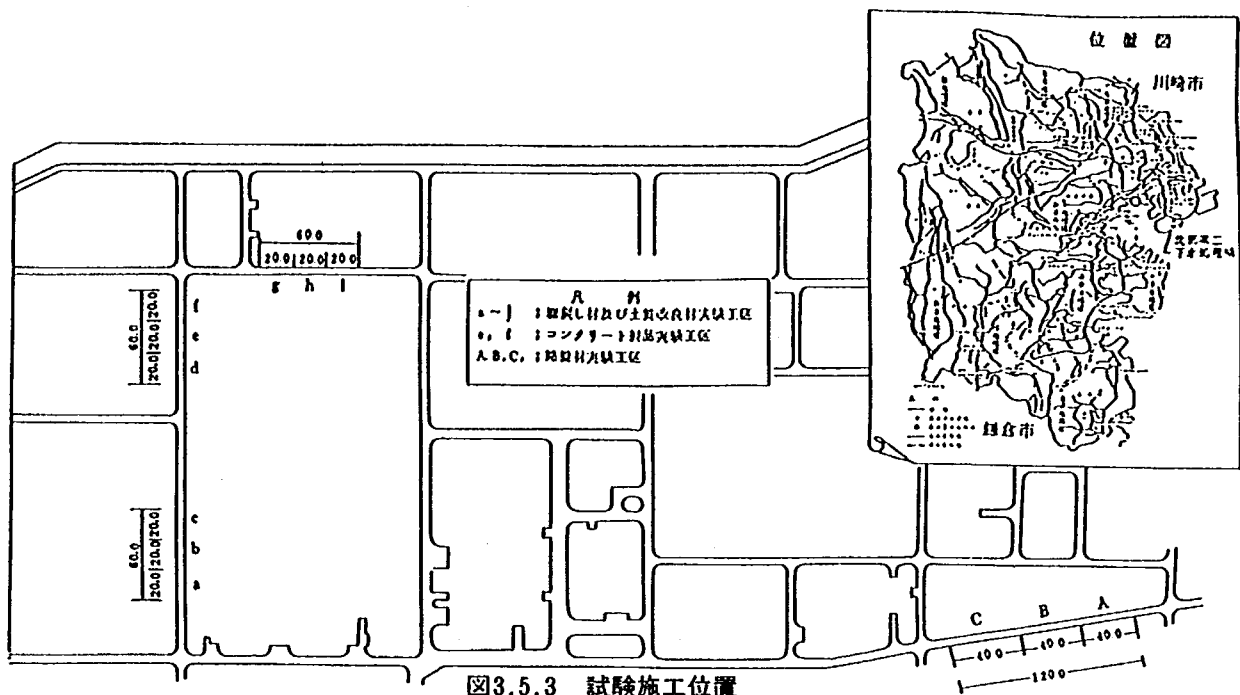


図3.5.3 試験施工位置

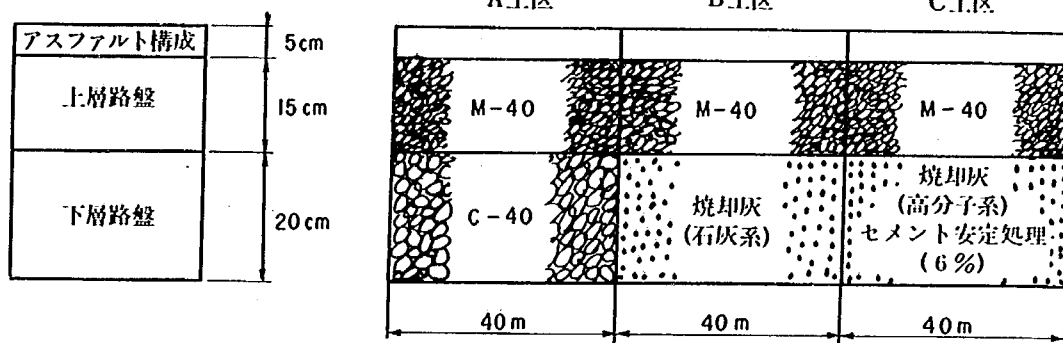


図3.5.4 断面構成

b) 追跡調査及び考察

これらの3工区に対して、追跡調査としては、路面性状調査（横断凹凸、縦断凹凸、ひびわれ率）、交通量調査、たわみ量測定を行っているが、施工後1年目の調査結果を各工区ごとにまとめると以下になる。

表3.5.9 路面の横断凹凸測定結果

測定 No.	工 区 名		
	A	B	C
1	5.3	3.0	4.3
2	3.0	2.5	4.3
3	3.3	4.5	4.8
平均	4.0	3.3	4.4

単位(mm)

表3.5.10 路面の縦断凹凸測定結果

測定 位置	工 区 名		
	A	B	C
R	1.15	1.87	1.75
L	2.44	1.67	1.79
平均	2.30	1.77	1.77

単位(mm)

表3.5.11 ひびわれ調査結果

項 目		工 区 名		
		A	B	C
①線状ひびわれ	m ²	0 0	—	—
②網状ひびわれ	m ²	8080	—	—
③ひびわれ面積 ①+②	m ²	8 80	—	—
④測定対象区間面積	m ²	204	204	204
ひびわれ率 ③ / ④ × 100	%	39.2	—	—

表3.5.12 交通量調査

単位(台)

月	トレーラ	大型車 (11t以上)	中型車 (4t以上)	小型車 (乗用車)	計	
3	274	3,910	690	4,990	9,864	21日
4	130	674	907	6,909	8,620	30日
5	40	558	743	5,034	6,375	31日
6	227	712	912	6,581	8,432	30日
7	253	3,588	1,101	7,688	12,630	31日
8	302	3,713	1,231	7,969	13,215	31日
9	298	2,172	1,439	9,342	13,251	30日
計	1,524	15,327	7,023	48,513	72,387	
月平均	236	2,457	1,059	7,272	11,015	
日平均	7	75	34	237	353	

表3.5.13 たわみ量測定結果

項 目		工 区 名		
		A	B	C
たわみ量	mm	1.03	0.70	0.91

単位(mm)

以上施工後1年目の追跡調査から判断される耐久性の評価では、B、C工区とも、ひびわれ率0%、わだち掘れ量3～4mmと良好な供用性を保っている。

施工性については、B工区の石灰系焼却灰はクラッシャーランとはほぼ同等の施工性を有したが、C工区の高分子系焼却灰は、細粒分が多いため敷均し時、転圧時に平坦性を確保することが難しく、作業性に劣るところが見られた。

(iii) 大阪府北部流域下水中央処理場内試験舗装

a) 概 要

大阪府では下水汚泥スラグを用いた路盤の強度特性および施工性の調査を目的として、59年3月に、北部流域下水道中央処理場内において試験施工を行った。中央処理場内の施工位置の概略を図3.5.5に示す。

試験区間は、粒調碎石路盤と下水汚泥スラグ（空冷）路盤（各々延長50m）の2工区よりなり、その各々の断面構成を図3.1.6に示す。

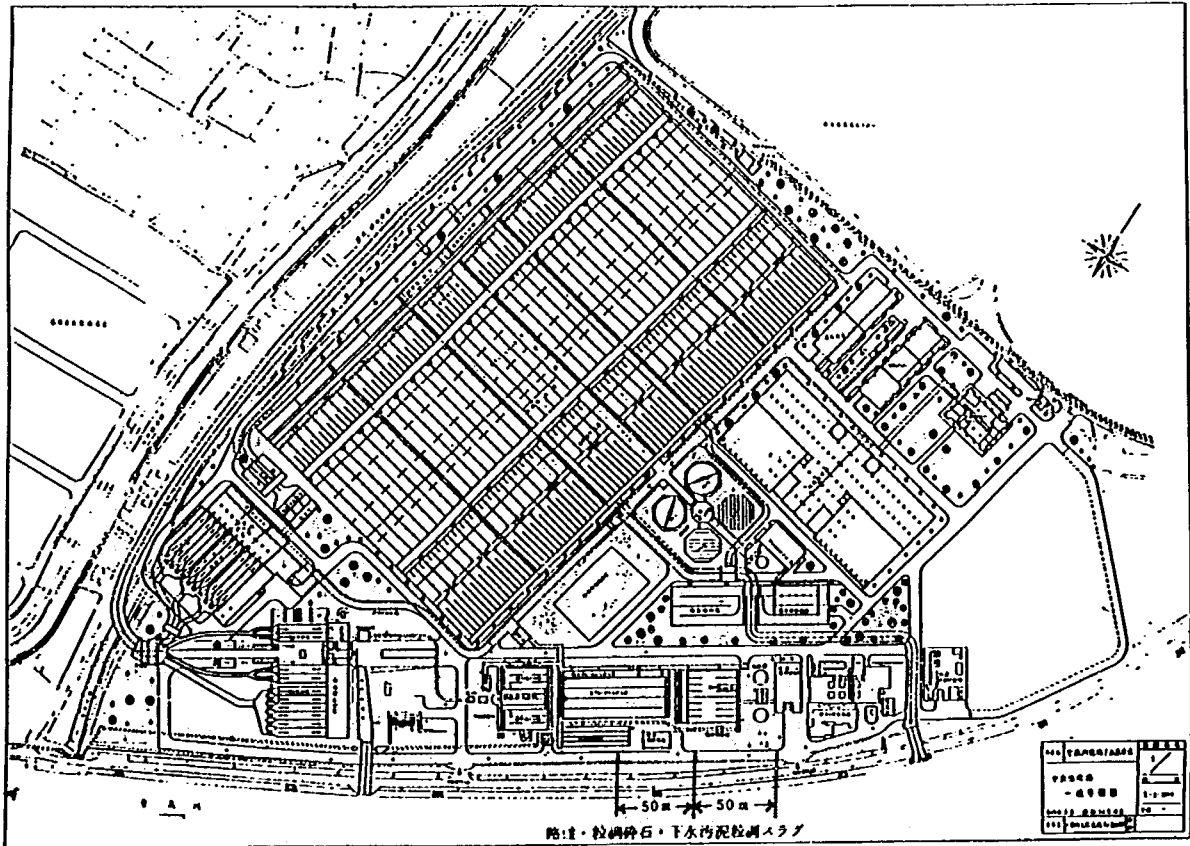


図3.5.5 試験施工位置

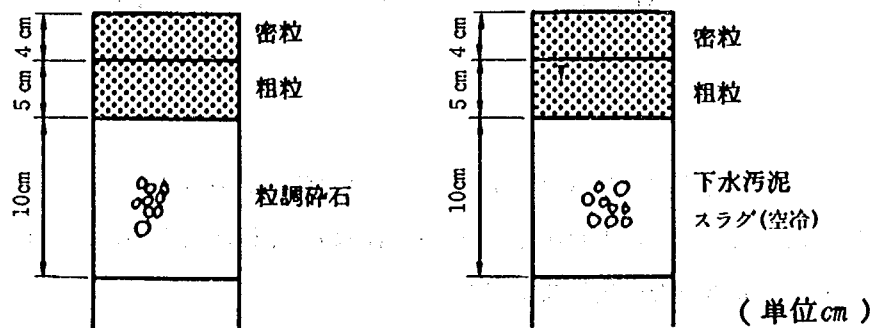


図3.5.6 断面構成

b) 追跡調査結果

昭和60年9月から11月にかけて施工後1年半目の追跡調査として以下のような項目を実施した。

- ・路面性状調査（平坦性試験，MCI等）
- ・ベンケルマンたわみ量試験
- ・現場から採取した路盤材の性状調査（単位体積重量，密度，粒度等）

各調査結果の概要を以下に示す。

① 路面性状調査

路面性状に関する調査結果を表3.5.14に示す。参考のため施工直後（S59.3）、施工後6ヶ月目（S59.9）の性状も示した。

表3.5.14 路面性状の調査結果

		調査時期		施工直後 S59.3	6ヶ月目 S59.9.26	207月目 S60.11.19
単位						
路面性状	下水汚泥スラグ(空冷)	ひびわれ率		%	0	0
		平坦性	I. W. P.	mm	—	1.779
			O.W.P.		2.372	2.18
		横断凹凸	最大値	mm	—	6.0
			平均値		—	3.7
			$\sqrt{V}$		—	1.52
		PSI		—	4.34	
		MCI		—	8.73	8.33
	粒調碎石	ひびわれ率		%	0	0
		平坦性	I. W. P.	mm	—	2.767
			O. W. P.		2.986	2.30
		横断凹凸	最大値	mm	—	6.0
			平均値		—	3.9
			$\sqrt{V}$		—	1.17
		PSI		—	4.29	
		MCI		—	8.68	7.89

平坦性，横断凹凸，維持管理指数（MCI）とも良好な状態である。

特に，維持管理指数については下水汚泥スラグ(空冷)の施工箇所の方が粒調碎石の施工箇所よりも高い値となっており，より良好な供用性状を示している。

② ペンケルマンたわみ量試験

表3.5.15 表層のペンケルマンたわみ量試験

工 種	測 点	最大沈下量(mm)	条 件
下水汚泥スラグ (空 冷)	No. 5 + 8.0	0.6	
	No. 6 + 4.0	0.4	
	No. 7 + 2.0	0.4	
粒 調 砕 石	No. 7 + 18.0	0.35	
	No. 8 + 15.0	0.5	
	No. 9 + 10.0	0.9	

たわみ量は溶融スラグ、粒調砕石とも平均的には 0.5~0.6mm 程度で良好な状態である。

③ 現場から採取した路盤材の性状調査

調査結果を以下に示す。

表3.5.16 現場密度試験

施工ヶ所	工 種	測 点	密度 (g/cm³)	基準密度(g/cm³)	締固め度(%)
中央処理場	空冷汚泥スラグ	No. 5 + 10.0	2.317	2.321	99.8
		No. 6 + 10.0	2.421	2.321	104.3
	粒 調 砕 石	No. 8 + 10.0	2.266	2.257	100.4
		No. 9 + 10.0	2.335	2.257	103.5

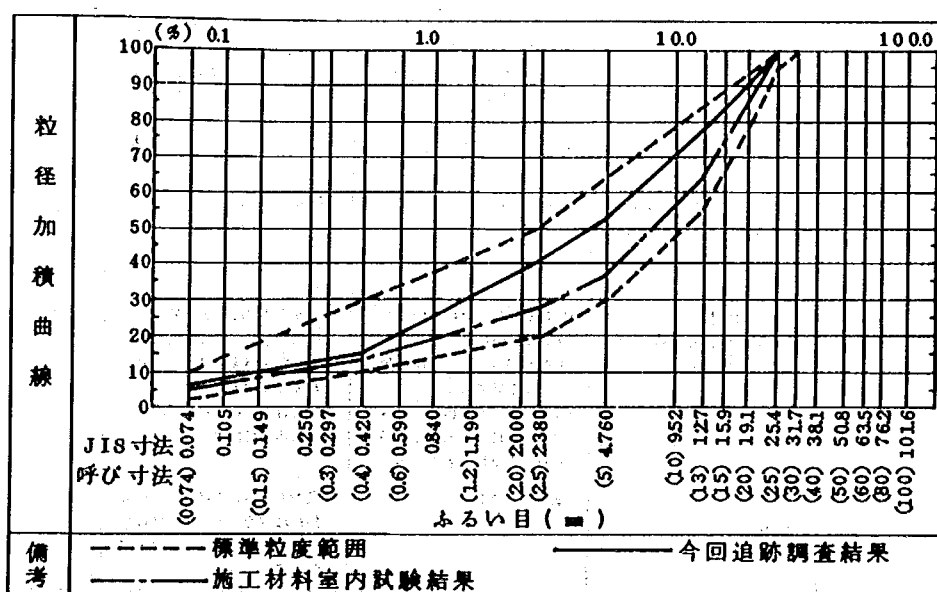


図3.5.7 下水汚泥スラグの粒度分布の変化

使用材料の施工前における粒度試験結果と、追跡調査により得られた結果を比較すると、下水汚泥スラグは施工前後でほとんど変化はなかった(図3.5.7)。

施工後の変化を詳しくみると、下水汚泥スラグ、粒調碎石ともに粒度曲線が上限側に推移しており、細粒化している傾向がうかがえる。

c) 考 察

試験舗装区間は、処理場の構内ということであり、ほとんど交通量のないところであったので、一概に供用性の評価はできないが、路面性状調査、現場から採取した路盤材の性状調査の結果から強いて判断すると、施工後20ヶ月での評価としては、下水汚泥スラグを用いた路盤と粒度調整碎石を用いた路盤との間には差異は認められなかった。

その他特筆される事としては、表層部と上層路盤との密着性は碎石よりも下水汚泥スラグの方が良かったこと、下水汚泥スラグ路盤では、若干水硬性が認められたこと等が上げられる。

(3) 研究成果

1) 下水汚泥焼却灰、スラグの路盤材料としての評価

室内試験、試験舗装の結果をもとに、下水汚泥焼却灰、スラグを舗装材料として利用した場合の技術的評価を表3.5.17のようにとりまとめた。

表3.5.17 下水汚泥再生路盤材の評価

			路 盤 材 料				
			基本的な考え方	室 内 試 験	試験施工及び追跡調査	評 価	備 考 (アスファルト混合物)の利 用
下 水 汚 泥	焼 却 灰	石 灰 系	○有害物質の溶出がないこと	○粒状材(素材・配合材)、安定処理(⑦)のいずれの形態でも使用可能	○加湿の時期・量を調整することにより、表均し、転圧の作業性は確保でき、飛散の問題も生じない。追跡調査の結果も、とくに問題は生じていない。	○十分な施工管理を行うことにより、粒状材・安定処理のいずれの形態でも使用可能と考えられる。	・アスファルト混合物のフィラーとして利用可能。 但し、最適アスファルト量は若干多くなる。
		高 分 子 系	○品質のバラつきがないこと ○経時的な安定性があること	○配合材の形態で利用可能	○セメント安定処理をして、下層路盤に用いた試験施工では、石灰系と同様であるが、細粒分が多いため作業性は劣る。しかし、その後の追跡調査では、とくに問題は生じていない。	○単珠での使用は施工性・強度上からみて使用は難しい。 ○配合材の形態または安定処理を行うことにより、下層路盤への使用は可能であると考えられる。	同 上
	汚 泥	水 冷		○素材単独では下層路盤材、配合材では上、下層路盤材として、粒状材、安定処理いずれも可能	○試験施工なし。	○試験施工を行い、施工性を確認した上で使用可能。	・吸水量が大きいアスファルト混合物への使用は不適
		空 冷		○上、下層路盤材としての利用が粒状材、安定処理のいずれの形態でも可能	○材料のかみ合いが十分でないため転圧時にローラーのわだち跡が残ったり、路盤が動くことが確認された。 ○コファソンプの調査では表層アスコンにすのこが入った例がみられ、作業性は若干劣る。	○一般道路では下層路盤として使用できる。自転車道や歩道等の軽交通道路では、路盤としても使用できる。 ○配合材の形態なら上層路盤への適用が可能である。	・すりへり減量が大きいアスファルト混合物への使用は不適
		結 晶 化		○なし	○試験施工なし。	○量的な問題がなければ、材質的には空冷スラグより優れており、路盤材としては使用可能と考えられる。	

i) 下水汚泥焼却灰（石灰系）

粒度が均一なので締固めに難があるが、水硬性が高いので、粒状材（素材、配合材）、安定処理いずれの形態でも路盤材料として使用可能と考えられる。特に、一般道路の上層路盤を除けば、単体でも通常の材料と同等の評価が可能である。

施工性についても、加湿の時期、量を調整すれば、飛散の問題も生じることなく一定の作業性が確保できる。

また、本材料は粒度が細かく一定の安定性を有していることから、アスファルト混合物のフィラーとしても使用できる。ただしこの場合アスファルトの使用量は多くなる。

ii) 下水汚泥焼却灰（高分子系）

石灰系焼却灰と同様粒度が均一で細かいが水硬性は特になく、強度が低いので、単体での使用は難しい。配合材の形態あるいは安定処理を行えば、下層路盤までならば使用が可能である。

また、石灰系焼却灰と同様、アスファルト混合物のフィラーとしても使用できる。ただしアスファルトの使用量は多くなる。

iii) 下水汚泥スラグ（水砕）

粒度は25mm以下が95%を締める細かい粒度である。多孔質であるため吸水量は非常に大きいですが、強度は修正CBRで30以上は確保できる。試験施工を行っていないので施工性の評価はできないが、下層路盤までならば単体でも使用可能であり、配合材の形態ならば上層路盤として使用可能である。

なお吸水量が大きいため、アスファルト混合物のフィラーには使用できない。

iv) 下水汚泥スラグ（空冷）

粒度は40～13mmが約50%占める粗い粒度、すりへり減量が若干大きいですが、強度は修正CBRで80程度は確保できる。

強度からみれば、粒状材、安定処理のいずれの形態でも上・下層路盤材としての利用が考えられるが、試験施工によれば、材料のかみあいが悪く転圧がしにくい傾向があるので、単体の場合は、一般の道路の下層路盤、自転車道・歩道等の軽交通道路の路盤への適用が望ましい。

なお、すりへりの減量が大きいため、アスファルト混合物のフィラーには使用できない。

2) 下水汚泥再生路盤材を利用した舗装の設計・施工マニュアル（案）

下水汚泥焼却灰（石灰系焼却灰）並びに下水汚泥スラグ（空冷汚泥スラグ）を対象に、これらを舗装に利用した場合の設計施工マニュアル（案）を作成した。マニュアル（案）における適用、設計の基本的な考え方は以下の通りである。

a) 本マニュアルは下水汚泥焼却灰並びに下水汚泥スラグ（以下、下水汚泥焼却灰等という）を用いて道路の路盤の設計・施工を行う場合に適用する。

b) 下水汚泥焼却灰等を利用した路盤の実績は交通量の少ない下水処理場等の構内舗装に限られており、また、下水汚泥の発生量と路盤材料としての必要量とのバランスという観点も考慮して、これらを利用した舗装は、当面、下水道施設内の構内道路に適用するのが望ましい。

なお、これ以外の一般道路に適用する場合には、交通条件が厳しくないところを対象に、下水汚泥焼却灰等の供給が十分確保できることを確認した上で試験的にとりこんでいくとよい。

c) 本マニュアルで対象とする下水汚泥焼却灰等は、車道の下層路盤、自転車道や歩道舗装の路盤に適用するものとする。

石灰系焼却灰は、下水の処理によって発生する汚泥を塩化第二鉄、消石灰等の無機調質材を用いて凝集脱水し、含水率70～75%程度にしたものを約800～900℃の温度で焼却し灰化したものである。粒度が均一なので締固めは難しいが、水硬性が高いので、単体でも車道の下層路盤、自転車道・歩道舗装の路盤に適用できる。

空冷汚泥スラグは、下水汚泥を1,300～1,500℃の高温で熱し、溶融した後取り出してこれを空冷して得られるスラグである。天然の骨材と同程度の強度を有しており、所要の粒度への調整も可能であるが、上層路盤に使用する場合は施工性並びに締固め後の安定性に若干問題があるので、ここでは、当面石灰系焼却灰と同様、車道の下層路盤、自転車道・歩道舗装の路盤に限定して適用する。

なお、空冷スラグを粒度調整したものは一般の粒度調整碎石に近い品質が確保できるので、施工等に十分注意すれば、構内舗装の路盤には使用できる。この場合は、構内舗装設計標準（（社）営繕協会昭和60年）を参考にするとよい。

下水汚泥焼却灰等を利用した舗装の設計・施工マニュアル(案)

目 次

第I章 総 則

I-1 概 説

I-2 下水汚泥焼却灰等の路盤への適用性

第II章 石灰系焼却灰

II-1 設 計

II-2 材 料

II-3 施 工

II-4 品質管理と検査

第III章 空冷汚泥スラグ

III-1 設 計

III-2 材 料

III-3 施 工

III-4 品質管理と検査

付 録

(4) まとめ

本研究で行った室内試験、試験舗装の結果、下水汚泥から生成される下水汚泥焼却灰（石灰系）、下水汚泥スラグ（空冷）については、路盤材料への適用性が確認された。また、これらについては、設計、施工の標準マニュアル（案）という形でとりまとめることができた。なお、今回の研究は、あくまで下水道施設内の適用を対象としたものであるが、品質、耐久性等の観点からは、一般道路への適用も十分考えられる。今後は、下水汚泥焼却灰、スラグの生産、供給体制の準備を進めるとともに、一般道路への適用についても、試験舗装という形で引き続き検討をすすめていくことが望まれる。

下水汚泥焼却灰等を利用した舗装の 設計・施工マニュアル(案)

目 次

第Ⅰ章 総 則

Ⅰ－１ 概 説

Ⅰ－２ 下水汚泥焼却灰等の路盤への適用性

第Ⅱ章 石灰系焼却灰

Ⅱ－１ 設 計

Ⅱ－２ 材 料

Ⅱ－３ 施 工

Ⅱ－４ 品質管理と検査

第Ⅲ章 空冷汚泥スラグ

Ⅲ－１ 設 計

Ⅲ－２ 材 料

Ⅲ－３ 施 工

Ⅲ－４ 品質管理と検査

付 録

第Ⅰ章 総 則

Ⅰ－Ⅰ 概 説

- (1) 本マニュアルは下水汚泥焼却灰(石灰系焼却灰)並びに下水汚泥スラグ(空冷汚泥スラグ)(以下、下水汚泥焼却灰等という)を用いて道路の路盤の設計・施工を行う場合に適用する。
- (2) 下水汚泥焼却灰等を用いて道路の路盤の設計、施工及び検査を行う場合には、下水汚泥資材の特性を理解した上で行わなければならない。

【解 説】

- (1) 本マニュアルは、昭和56年度から建設省が実施した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」の研究成果をもとに、とりまとめたものである。
- (2) 本マニュアルの適用範囲は、道路の路盤とした。ここでいう道路とは、道路法上の道路をはじめとして、その他の各種の道路(構内道路および農道等)を含むものとする。
- (3) 下水汚泥焼却灰等を利用した路盤の実績は交通量の少ない下水処理場等の構内舗装に限られており、また、下水汚泥の発生量と路盤材としての必要量とのバランスという観点も考慮して、これらを利用した舗装は、当面下水道施設内の構内道路に適用するのが望ましい。
これ以外の一般道路に適用する場合には、交通条件があまり厳しくないところを対象に、下水汚泥の必要量が十分確保できることを確認した上で試験的にとりこんでいくとよい。
- (4) 本マニュアルに記述していない一般的事項については、「アスファルト舗装要綱」(財団法人日本道路協会、昭和53年)、「セメントコンクリート舗装要綱」(同、昭和59年)、「簡易舗装要綱」(同、昭和54年)等に従うものとする。
- (5) 下水汚泥には、各種形態があるが、建設事業への利用可能な形態としては、脱水汚泥、焼却灰さらにはこれらを利用目的に合うように加工した固化汚泥、コンポスト、汚泥スラグ、軽量骨材等が考えられる。このうち焼却灰や汚泥スラグは、路盤材料として粒調碎石やクラッシャーランに近い力学的性状が期待できる。

したがってここでは、これら下水汚泥焼却灰(石灰系焼却灰)並びに下水汚泥スラグ(空冷汚泥スラグ)(以下、下水汚泥焼却灰等という)を対象に路盤に利用した場合の設計・施工マニュアルについてまとめたものである。

1-2 下水汚泥焼却灰等の路盤への適用性

本マニュアルで対象とする下水汚泥焼却灰等は、車道の下層路盤、自転車道や歩道舗装の路盤に適用するものとする。

【解説】

- (1) 下水汚泥焼却灰のうち石灰系焼却灰は、下水の処理によって発生する汚泥を塩化第二鉄、消石灰等の無機調質材を用いて凝集脱水し、含水率70～75％程度の脱水汚泥としたものを約800～900℃の温度で焼却し灰化したものである。粒度が均一なので締固めは難しいが、水硬性が高いので、単体でも車道の下層路盤、自転車道・歩道舗装の路盤に適用できる。
- (2) 下水汚泥スラグのうち空冷汚泥スラグは、下水汚泥を約1,300～1,500℃の高温で熱し、溶解した後取り出してこれを空冷して得られるスラグである。天然の骨材と同程度の強度を有しており、所要の粒度への調整も可能ではあるが、上層路盤に使用の場合は施工性並びに締固め後の安定性に若干問題があるので、ここでは、当面石灰系焼却灰と同様、車道の下層路盤、自転車道・歩道舗装の路盤に限定して適用する。空冷汚泥スラグを粒度調整したものは、一般の粒度調整碎石に近い品質が確保できるので、施工等に十分注意すれば構内舗装の路盤にも使用できる。この場合は構内舗装設計標準(Ⅱ)営繕協会、昭和60年)を参考にするとよい。
- (3) 本マニュアルでは、石灰系焼却灰、空冷汚泥スラグとも単体で路盤材として利用する場合を中心に扱うが、その他の高分子系焼却灰、水砕汚泥スラグについても他の材料と混合して使用すれば(以下配合材という)路盤材への適用が考えられる。

このように高分子系焼却灰、水砕汚泥スラグを配合材として使う場合は、実績等を参考にしながら試験的にとりくむとよい。
- (4) 下水汚泥中には流入下水に含まれる重金属が濃縮されているが、これらは本マニュアルで対象としている石灰系焼却灰、空冷汚泥スラグの場合には微量であることから問題ないことが確認されている。

なお、石灰系焼却灰には30～50％の生石灰(CaO)が含まれるので、適用にあたっては、植生等を与えるアルカリ分の影響について生石灰を使用するときと同様の配慮が必要である。
- (5) 石灰系焼却灰は路上再生路盤工法の安定処理材料の一部として使用することもできる。扱いの詳細は付録1に示す。
- (6) 結晶化を進めた汚泥スラグは、強度の増加、表面性状の改善により、路盤材としての材料特性は大幅に改善される。結晶化に関する実験結果を付録2に示す。

第Ⅱ章 石灰系焼却灰

Ⅱ－１ 設計

１．概 説

石灰系焼却灰を用いた路盤の設計は、アスファルト舗装要綱に示される方法と手順に準じて行うものとする。

【解 説】

- (1) 石灰系焼却灰を用いた路盤の設計は、アスファルト舗装要綱、セメントコンクリート舗装要綱および簡易舗装要綱等に示される方法と手順に準じて行うものとする。
- (2) この章は、石灰系焼却灰をアスファルト舗装の路盤に使用する場合を対象にアスファルト舗装要綱に基づいて定めたものであり、その他の舗装に使用する場合は、それぞれの要綱に基づいて設計するものとする。
- (3) 路盤は、舗装の構造全体の中でその構成が決定されるものであり、石灰系焼却灰を用いて路盤を設計する場合も、交通量、路床土の支持力および入手可能な材料などの調査結果をもとに設計しなければならない。
- (4) 本章で取扱う下水汚泥焼却灰は、天然骨材に見られない水硬性を有しており、十分な管理のもとで製造されたものは、路盤材として使用できる。

２．調 査

調査は、交通量、路床の支持力等必要な項目について行うものとする。

【解 説】

- (1) 設計に先立ち、次の項目について現地調査、既存の資料の調査を行う。
 - ① 土質調査：路床土の結成 C B R、土質、地下水並びに湧水の状況等
 - ② 交通量調査：大型車交通量等
 - ③ 材料調査：品質、生産・供給能力、運搬距離等
 - ④ 気象調査：凍結深さ等
 - ⑤ その他の調査：地形、地質、自然環境、道路に隣接する施設等
- (2) 石灰系焼却灰は、製造場所が限定されているので、生産・供給量、運搬距離・経路等についても調査するとよい。

3. 等値換算係数

石灰系焼却灰を用いた路盤の等値換算係数は、0.25の値を用いるものとする。

【解 説】

- (1) 石灰系焼却灰を用いた路盤の等値換算係数は、室内試験並びに試験舗装の追跡調査の結果とアスファルト舗装要綱の値を参考に設定したものである。
- (2) 実験の結果から下層路盤に素材単体の形態で使用した石灰系焼却灰は、① 修正CBRが30%以上を確保できること、② 水硬性があり、一軸圧縮強度は28日強度で60kg/cm²程度以上の性状を示したことから、下層路盤の石灰安定処理、クラッシャーラン等と同等に評価でき、等値換算係数の値を0.25としたものである。

4. 路盤の設計

石灰系焼却灰を用いた路盤の断面構成は、路床、交通量の条件、施工条件、経済性等を考慮して決めるものとする。

【解 説】

- (1) 路盤は、経済的でしかも力学的に釣り合いのとれた構成とするために、通常、下層路盤と上層路盤とに分けられるが、石灰系焼却灰単体の形態では下層路盤に用いる。
- (2) 路盤の設計に当っては、経済的で合理的な焼却灰の使用形態（単体又は配合材）について品質、供給能力および単価等の面から十分な検討を加える必要がある。
- (3) 人家連担区域等の路盤や構造物の裏込め等に焼却灰を使用する場合は風、交通車両等による舞い上げ、飛散を防ぐために、加湿するなどの配慮が必要である。

II-2 材 料

1. 概 説

路盤に用いる石灰系焼却灰は、本マニュアルで示す修正CBRおよび溶出試験の規定に適合したものでなければならない。

【解 説】

- (1) 本マニュアルにおける路盤に用いる石灰系焼却灰は、その品質規定は、修正CBRの他に産業廃棄物特有の項目である溶出試験を設けた。

実験に用いた焼却灰からの重金属の溶出は、未検出又は極微量で「有害な産業廃棄物に係る判定基準」に定める値以下であったが、安全性の面から品質規定の項目に加えた。なお、付録3に溶出試験の結果を示す。

- (2) 石灰系焼却灰は、ごみ、有機物などの有害物を含まないもので非塑性でなければならない。
- (3) 石灰系焼却灰は、約30%の生石灰 (CaO) を含有するため加水により発熱し自硬する。そのため、石灰系焼却灰は、貯蔵段階での水硬性の発現を防ぐため水分を含んではならない。

2. 修正CBR

路盤に用いる石灰系焼却灰の修正CBR(%)は、30以上の値を満足するものでなければならない。

【解説】

- (1) 路盤に用いる石灰系焼却灰の修正CBR値は、室内試験及び試験舗装結果と既往資料から決めた値である。
- (2) 修正CBRの試験は、アスファルト舗装要綱の付録4-1（路盤材料の修正CBR試験方法）によるものとする。

修正CBRは、最大乾燥密度の95%に担当するCBRとする。

II-3 施工

1. 概説

石灰系焼却灰を用いた路盤の施工は、アスファルト舗装要綱等に表示される下層路盤の施工方法に準じて行うものとする。

【解説】

- (1) 石灰系焼却灰を用いた路盤の施工は、アスファルト舗装要綱、セメントコンクリート舗装要綱、簡易舗装要綱及びアスファルト舗装工事共通使用書解説等に表示される下層路盤の施工方法と基本的には同じである。

ただし、粒径が細かいため、施工にあたっては事前に適宜散水し、含水量の調整・管理を行うことが必要である。締固めは、最適含水比付近で十分に転圧する。

- (2) 石灰系焼却灰は水硬性があるため、施工に先立って行う散水時期については、慎重に配慮しなければならない。

2. 材料の貯蔵

- (1) 石灰系焼却灰は、1日の発生量が限られるため、使用に当っては舗装の施工規模に見合う量を貯蔵しなければならない。

(2) 焼却灰の貯蔵に当っては、飛散、吸水による変質等を避けなければならない。

【解 説】

- (1) 石灰系焼却灰の貯蔵は、吸水、飛散を避けるために、サイロ貯蔵や袋詰めするなどして、適切な貯蔵管理、施工管理が行えるよう配慮しなければならない。
- (2) ごみ、どろ、有害物などの有害量の混入は、焼却灰の水硬性等を阻害することがあるので注意しなければならない。

3. 材料の敷きならし

石灰系焼却灰の敷きならしは、事前に含水量の調整を施したのち行う。敷きならし厚さは、締固め後の一層の仕上り厚さが所定の値となるようにしなければならない。

【解 説】

- (1) 石灰系焼却灰は、ブルドーザ、モータグレーダあるいは人力等によって所定の状態に敷きならす。
また、この時の敷きならし厚さは、十分に締固めるために一層の仕上り厚の限度を20cm以下（下層路盤）とすることが望ましい。
- (2) まき出し厚は、仕上り厚のほぼ1.15倍程度にするとよい。下層路盤の設計厚が(1)の値を超える場合は、二層以上に分けて敷きならし、締固めるとよい。
- (3) 含水量の調節は、袋詰めのものにあつては、施工現場の路上に敷きならした後適宜散水し、ブルドーザ、モータグレーダ等を用いて混合することによって行う。一方、施工現場近く等に山積みされたものにあつては、ミキサ又はパワーショベル等の掘削機等を用いて混合し調節する。
- (4) 敷きならした材料は、締固めないで放置すると飛散、吸湿団粒化や降雨による流出等が生じることがあるので、必ずその日のうちに締固めを完了しなければならない。

4. 締 固 め

石灰系焼却灰は、最適含水比付近の適正な含水量で、所定の締固め度が得られるように十分に締固めなければならない。

【解 説】

- (1) 締固めは、タイヤローラと鉄輪ローラとを組合せて行うとよい。敷きならした材料は、ブルドーザであらかじめ仮転圧を行い、次にタイヤローラで転圧した後、整正し、鉄輪ローラで転圧して、所定の締固め度が得られるまで十分に締固める。
- (2) 適正な含水量とは、JIS A 1210（突固めによる土の締固め試験方法）によって求めた最適含水比付近の含水比で、施工上支障がなく十分に締固め得る含水比をいう。
- (3) 石灰系焼却灰は、汚泥の種類、処理する季節等によって生石灰（CaO）含水量の変動が考えられる。そのため、最大乾燥密度、最適含水比が異なることがあるので、工事に先立って試験を行い、これらを確認しておくといよい。
- (4) 下層路盤を仕上げた状態で一時放置する場合は、水分の蒸発等を防ぐためにアスファルト乳剤PK-3を1～2ℓ/m²散布するとよい。
- (5) アスファルト乳剤を散布した後、一時交通解放する場合は、粗目砂を0.3～0.5 m³/100m²程度散布する。

II-4 品質管理と検査

1. 概 説

石灰系焼却灰を用いた路盤の施工にあたっては、品質および出来形の管理を行い、完成した路盤は検査を受けなければならない。

【解 説】

- (1) 品質および出来形の管理は、設計図書に合格し、舗装を経済的に作るために行うものである。
- (2) 検査は、設計図書に定められた条件を満足する路盤ができているかどうかを確認するために行うものである。
- (3) 石灰系焼却灰を用いた路盤の施工にあたっては、一般の路盤と同様に、その工事の開始に先立って材料や機械が適正なものであるかどうかを確めるために、また品質および出来形を管理するうえで必要な基準値を得るために基準試験を実施する。
- (4) 本マニュアルにおける品質管理の限度や検査の合格判定値は、現場試験データを基にアスファルト舗装要綱等示された合格判定値を参考にして定めたものである。

2. 基準試験

工事を始める前、あるいは材料や配合を変更する前には、石灰系焼却灰が所要の品質を有しているかどうかを確認しなければならない。

また、管理や検査のために必要な基準値を決定するための試験もあらかじめ実施しておかなければならない。

【解 説】

- (1) 基準試験は、材料が所定の品質を満足しているか否かを確めるため、管理や検査に必要な基準値を得るために行う試験である。石灰系焼却灰の基準試験は表Ⅱ-1に示すとおりであり、ロットごとに行うものとする。
- (2) 基準試験は、発注者からの承諾が得られれば、製造者の試験成績表によって確認することができる。

表Ⅱ-1

項 目	試 験 方 法	備 考
含 水 量	J I S A 1203	自然含水比の測定(突固め用)
突 固 め	J I S A 1210	最大乾燥密度 最適含水比の決定
C B R 一軸圧縮強さ	アス要綱付録4-1 J I S A 5015	修正C B Rの測定 水硬性の確認

3. 品質および出来形の管理

設計図書に合格する路盤を経済的に作るために、品質および出来形の管理を行わなければならない。

【解 説】

- (1) 品質および出来形の管理を行うにあたって、次の基本的な注意事項を守る必要がある。
 - ① 作業手順の標準化に努め、品質管理および出来形管理のための十分な体制をつくる。
 - ② できるだけ簡便で結果が早く得られる方法で、工事中継続して測定し、異常が速やかに発見できるようにする。自動記録操作による軽量値がある場合は、それを利用する。
 - ③ 日常の品質管理試験結果および出来形の測定結果にもとづいて必要があれば、施工方法に修正を加える。
- これらのためには、管理の目的を十分理解し、試験および測定に用いる装置や器具の整備点検を行い、誤差をできるだけ小さくすることや、試験、測定によって得られた結果を速やかに整理しておくことが大切である。

表II-2 品質管理項目と頻度および標準的な管理の限界

工種	項 目	試 験 方 法	頻 度	標 準 的 な 管理の限界	不満足な場合の処置 お よ び 参 考 事 項
下 層 路 盤	含水量	J I S A 1203	観察により異常 が認められたと き随時	—	含水量が多い場合は、曝気し て乾燥、乾いている場合は敷 きならし中に散水。
	粒 度	J I S A 1204	観察により異常 が認められたと き随時	—	もとの材料を調査し、必要に 応じ現場配合を修正する。
	密度*	アスファルト舗装 要綱付録 4-2	1,000m ² に1回	93%以上	締固め作業を継続する。局 部的な含水比過大または材料の 不良箇所は置き換える。

〔注1〕 表II-2に示す項目と頻度および標準的な管理の限界は、中規模工事を対象としている。中規模工事とは、アスファルト混合部が3,000t以上を目標に、工事の重要度、道路の環境、その他の条件を検討のうえその都度定める。

〔注2〕*小規模工事については、*印のついた項目のみについて行い、その頻度および標準的な管理の限界は、本表を参考に適宜決定する。

- (2) 品質基準は、一般に表- II - 2 によって管理するとよい。路盤の密度試験は、アスファルト舗装要綱付録4-2の現場における土の乾燥単位体積重量試験方法により、1000m²に1回の測定を標準とする。
- (3) 出来形管理に用いる管理基準は、特記仕様で示される場合を除き、一般に表- II - 3 に示す項目と頻度で実施するものとする。

表II-3 出来形測定の頻度と管理の限界

工 種	項 目	頻 度	標準的な管理の限界
下層路盤	基 準 高	20mごと	±4 cm以内
	厚 さ	20mごと	-4.5cm
	幅	40mごと	-5 cm

4. 検 査

完成した路盤が設計図書を満足するものであるか否かを判定するために、審査を行わなければならない。

【解 説】

- (1) 路盤は、舗装の完成後には不可視部分となるところであるから、検査にあたっては、発注者も公正な態度で臨み、試料の採取、測定および試験などには、よくこれに精通し熟練した者を配置するか、信用ある機関を利用するなど万全を期さなければならない。
- (2) 検査は品質および出来形について検査するとともに、基準試験の結果をもとに、使用材料が設計図書の規格を満足していることを確認する。
- (3) 合格、不合格の判定は1ロットごとに行うが、1ロットの大きさは各工事とも10,000m²以下とする。

(4) 検査は、現地路盤の抜取検査または管理データを用いて行う。以下ではアスファルト舗装要綱に基づき、石灰系焼却灰路盤の品質および出来形について検査対象項目と合格判定値の例として、抜取り検査による場合を表Ⅱ-4、表Ⅱ-5に、管理データを用いる場合を表Ⅱ-6、表Ⅱ-8に示す。

1) 抜取り検査による場合

表Ⅱ-4 品質の合格判定値の例(抜取り検査の場合)

適用工事 工 項		I (中規模以上の工事)			II (小規模の工事)		
		$\bar{X}_{10}$	$\bar{X}_6$	$\bar{X}_3$	$\bar{X}_{10}$	$\bar{X}_6$	$\bar{X}_3$
下層路盤	締固め度② %	95以上	96以上	97以上	—	—	—

(注) ① 対象となる工事は交通量がアスファルト舗装要綱のCおよびD交通に相当するような区間で施工するもので、相当量の工事量(たとえば表層、基層の加熱アスファルトの混合物の量で約3,000トン以上のもの)があり、昼間に施工する場合を標準とする。

② 路床の状態、使用材料の性状等により、これによりがたい場合には監督職員と協議したものによる。

品質は、表Ⅱ-4に示す合格判定値に合格するものでなければならない。10個の測定値の平均($\bar{x}_{10}$)が合格判定値 $\bar{X}_{10}$ の範囲内になければならない。ただし、3個の測定値により判定する場合は、その平均($\bar{x}_3$)が合格判定値 $\bar{X}_3$ の範囲内であればよいものとする。 $\bar{X}_3$ の範囲外に出た場合は、さらに3個の測定値を加えて6個の平均($\bar{x}_6$)を求め、これが合格判定値 $\bar{X}_6$ の範囲内であればよいものとする。

表Ⅱ-5 出来形の合格判定値の例(抜取り検査の場合)

適用工事 工 種		I (中規模以上の工事)		II (小規模の工事)	
		個々の測定値	10個の測定値の平均 $\bar{X}_{10}$	個々の測定値	10個の測定値の平均 $\bar{X}_{10}$
下層路盤	高 さ	±4 cm以内		±5 cm	
	幅	—5 cm以内		—5 cm	
	厚 さ	—4.5cm以内	—1.5cm以内	—4.5cm	—1.5cm以内

(注) 対象となる工事は交通量がアスファルト舗装要綱のCおよびD交通に相当するような区間で施工するもので、相当量の工事量(たとえば表層、基層の加熱アスファルトの混合物の量で約3,000トン以上のもの)があり、昼間に施工する場合を標準とする。

出来形は、表Ⅱ-5に示す合格判定値に合格するものでなければならない。高さおよび幅については、個々の測定値が合格判定値以内にならなければならない。

厚さは、個々の測定値が、10個に9個以上の割合で合格判定以内にあるとともに、10個の測定値の平均($\bar{x}_{10}$)が合格判定値 $\bar{X}_{10}$ 以内にならなければならない。

2) 管理データによる場合

表II-6 品質の合格判定値の例 (管理データによる場合)

工 種	適 用 工 事 項 目	I (中規模以上の工事)	II (小規模工事)
		個々の測定値	個々の測定値
下層路盤	締固め度(%) ①	93%以上	—

(注) ① 路床の状態、使用材料の性状等により、これによりがたい場合には、監督職員と協議したものによる。

締固め度の検査は以下の手順で行う。

① 乱数表を用い管理データから規定の検査用試料 (n 個) を抽出する。

(表層・基層のとき, $n = 15$, 路盤のとき, $n = 14$)

② これらの検査用試料の平均値 $\bar{x}$ と不偏分散 V を求める。

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n}$$

$$V = \frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \cdots + (x_n - \bar{x})^2}{n - 1}$$

③ 次式を満足すれば合格とする。

$$x - k\sqrt{V} > \text{個々の測定値の合格判定値 (表-II-6)}$$

ここに k は、合格判定係数である。(路盤のとき, $k = 0.94$)

(注) 管理データが規定の試料数 (表層, 基層のとき $n = 15$, 路盤のとき $n = 14$) に満たない場合は、その管理データの全部を用いて、平均値 $\bar{x}$ 、不偏分散の平方値 $\sqrt{v}$ を求め、同様の方法で合否を判定する。この場合の合格判定係数 (k) は、表II-7に示す。

なお, n , k は次式から求めたものである (JIS Z 9004参照)。

$$n = \left(1 + \frac{k^2}{2}\right) \left(\frac{K\alpha + K\beta}{Kp_0 - Kp_1}\right)^2 \quad k = \left(\frac{Kp_0 K\beta + Kp_1 K\alpha}{K\alpha + K\beta}\right)$$

ここに Kp は、規準正規分散における確率 p の点で

添字 α は、生産者危険率 (5%)

ρ は、生産者危険率 (10%)

P_0 は、望ましいロットの不良率

P_1 は、望ましくないロットの不良率

表II-7 合格判定係数-(k)-(α=0.05, β=0.10)

管理データ数 n	路 盤		
	合格判定係数 k	望ましいロット の不良率 P ₀	望ましくないロ ットの不良率 P ₁
5	1.37	0.7	30.0
6	1.25	1.5	30.0
7	1.17	2.3	30.0
8	1.12	3.0	30.0
9	1.06	4.0	30.0
10	1.03	4.6	30.0
11	1.01	5.1	30.0
12	0.98	5.8	30.0
13	0.97	6.3	30.0
14	0.94	7.0	30.0
15	—	—	—

表II-8 出来形の合格判定値の例（管理データによる場合）

適用工事 工 種 項 目		I (中規模以上の工事)	II (小規模の工事)
		個々の測定値	個々の測定値
下層路盤	高 さ	±4 cm以内	±5 cm以内
	幅	—4 cm "	—5 cm "
	厚 さ	—4.5 cm "	—4.5 cm "

出来形のうち、高さおよび幅については、管理データのすべてが表-II-8に示す個々の測定値の合格判定値以内になければならない。

厚さについては、乱数表を用い管理データから14個の検査試料を抽出し、これらの検査試料の平均値 $\bar{x}$ と不偏分散Vを求め、 $\bar{x} - k\sqrt{V} >$ 個々の測定値の合格判定値（表-II-6）を満足すれば合格とする。ここで、kは合格判定係数であり、k=0.94とする。

第Ⅲ章 空冷汚泥スラグ

Ⅲ－１ 設 計

１．概 説

空冷汚泥スラグを用いた路盤の設計は、アスファルト舗装要綱に示される方法と手順に準じて行うものとする。

【解 説】

- (1) 空冷汚泥スラグを用いた路盤の設計は、アスファルト舗装要綱、セメントコンクリート舗装要綱、簡易舗装要綱、構内舗装設計標準等に示されている方法と手順に準じて行うものとする。
- (2) この章は、空冷汚泥スラグをアスファルト舗装に使用する場合を対象にアスファルト舗装要綱に基づいて定めたものであり、その他の舗装に使用する場合は、それぞれの要綱に基づいて設計するものとする。
- (3) 路盤は、舗装の構造全体の中でその構成が決定されるものであり、空冷汚泥スラグ路盤を設計する場合も、交通量、路床の支持力および入手可能な材料などの調査結果をもとに設計しなければならない。

２．調 査

調査は、交通量、路床の支持力等必要な項目について行うものとする。

【解 説】

- (1) 設計に先立ち、次の項目について現地調査、既存の飼料の調査を行う。
 - ① 土質調査：路床上の設計 C B R、土質、地下水の状況、湧水の状況等。
 - ② 交通量調査：大型車交通量等。
 - ③ 材料調査：品質、生産能力、運搬距離等。
 - ④ 気象調査：凍結深さ等。
 - ⑤ その他の調査：地形、地質、自然環境、道路に隣接する施設等。
- (2) 空冷汚泥スラグは製造場所が限定されるので、生産量、運搬経路等についても調査するとよい。

3. 等値換算係数

アスファルト舗装要綱に基づいて設計する場合の下層路盤の等値換算係数は、修正CBRが30以上の材料について0.25とする。

【解 説】

- (1) 空冷汚泥スラグを用いた路盤の等値換算係数は、大阪府における試験施工の結果とアスファルト舗装要綱を参考に設計したものである。
- (2) 下層路盤に使用するスラグの等値換算係数は、切込碎石や砂利と同等に評価できると考え、その値を0.25と定めた。ただし、この場合の材質は路盤用高炉スラグと同様に修正CBRを30以上とした。
- (3) 試験施工の結果では、ベンゲルマンたわみ、K値などによって判断される支持力については十分な値が得られるものの、空冷汚泥スラグの交通供用中における塑性変形の有無などに関してはデータが得られていない。

したがって、空冷汚泥スラグを上層路盤に使ったり、交通量の多い場所の下層路盤に使ったりするときには、別途に検討する必要がある。

4. 路盤の設計

空冷汚泥スラグを用いた路盤の断面構成は、路床、交通量の条件のほか施工条件および経済性等も考慮して決めるものとする。

【解 説】

- (1) 空冷汚泥スラグは、一般道路では下層路盤に適用する。空冷汚泥スラグを用いた下層路盤の設計は、天然骨材による路盤設計の場合と同じでよい。ただし、空冷汚泥スラグの種類、品質、特徴、入手先および単価等についても、検討を行い、経済的な設計を心掛けるとよい。
- (2) 空冷汚泥スラグは自転車道、歩道舗装および構内舗装などの路盤にも使用できる。設計はアスファルト舗装要綱、構内舗装設計標準に示される方法と手順に準じて行うものとする。

III-2 材 料

1. 概 説

路盤に用いる空冷汚泥スラグは、本指針で示す修正CBRおよび溶出試験の規定に適合したものでなければならない。

【解 説】

- (1) 本マニュアルにおける下層路盤に用いる空冷汚泥スラグの品質規定には修正CBRの他に産業廃棄物特有の項目である溶出試験を設けている。溶出に用いた空冷汚泥スラグからの重金属の溶出は未検出または極く微少で「有害な産業廃棄物等に係わる判定基準」に定める値以下であったが、安全性の面から品質規定の項目に加えた。なお、付録3に溶出試験の結果を示す。
- (2) 空冷汚泥スラグはごみ、どろ、有機物などの有害量を含まないものでなければならない。
- (3) 空冷汚泥スラグは、ガラス質の部分があるので、突固め、転圧による粒度分布変化について調査している（図-III-1、2参照）。

この結果、支障となるような破碎は認められていない。

- (注) 空冷汚泥スラグを、構内舗装の路盤に用いる場合には修正CBR、溶出試験の他に簡易舗装要綱に規定するクラッシャーランあるいは粒度調整碎石の所要品質に適合したものでなければならない。

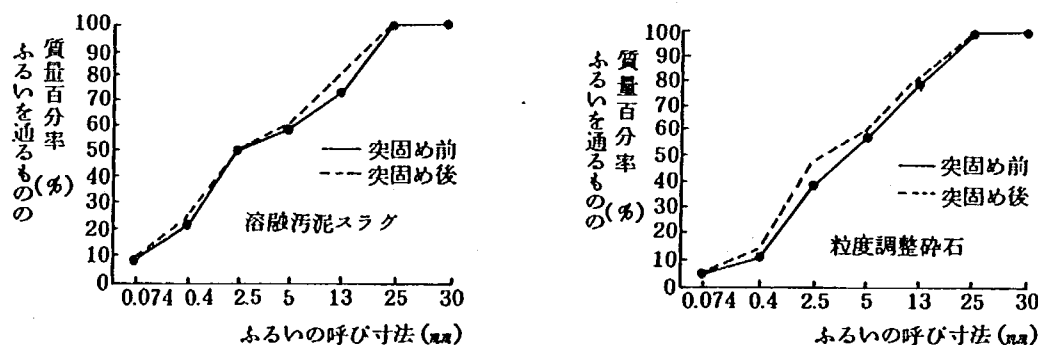


図-III-1 原試料と室内CBR試験後の粒度変化

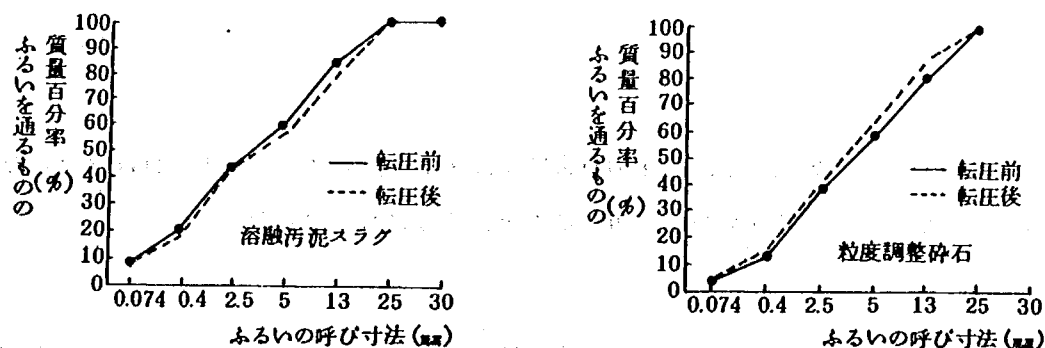


図-III-2 試験施工使用材料と転圧後試料の粒度変化

2. 修正CBR

下層路盤に用いる空冷汚泥スラグの修正CBRは30以上の値を満足するものでなければならない

【解 説】

(1) 修正CBRの試験は、アスファルト舗装要綱の付録4-1（路盤材料の修正CBR試験）によるものとする。

修正CBRは、最大乾燥密度の95%に相当するCBRとする。

(注) 空冷汚泥スラグを構内舗装の路盤に用いるときには、修正CBRが60以上、また表Ⅲ-Ⅲ-1に示す粒度に適合するものでなければならない。

表Ⅲ-Ⅲ-1 構内舗装路盤用空冷汚泥スラグの粒度

ふるいを通るものの質量百分率(%)			
30	20	5	2.5
95~100	55~85	15~45	5~30

Ⅲ-3 施 工

1. 概 説

空冷汚泥スラグを用いた路盤の施工は、アスファルト舗装要綱等に表示されるクラッシュランおよび粒度調整碎石の施工方法に準じて行うものとする。

【解 説】

(1) 空冷汚泥スラグを用いた路盤の施工は、アスファルト舗装要綱、セメントコンクリート舗装要綱、簡易舗装要綱およびアスファルト舗装工事共通使用書解説等に表示されるクラッシュランおよび粒度調整碎石の施工方法と基本的には同じであり、これらを準じて、敷きならし時の材料分離に注意し、締固めは最適含水比付近で十分に転圧する。

(2) 路盤の転圧完了後、表面が湿った状態であるうちに、プライムコートを施工するとよい。

2. 路床の整備

空冷汚泥スラグの施工に先立って、路床の有害物を除去し不陸整生を行なわなければならない。路床に異常を発見した際は、すみやかに適切な処置を施さなければならない。

【解 説】

(1) 路床が所定の形状に仕上っていないと、その上の路盤の厚さに過不足を生じるので、入念に不陸整生を行う必要がある。

- (2) 路床の異常には、軟弱な高含水量のこねかえし、湧水、滞水および部分的な沈下などがあり、これらに対しては、常に注意を払い、発見した場合には原因を調査し、排水施設を新たに設けるとか、セメント等で安定処理をするなどの処置をとるとよい。

3. 材料の敷きならし

敷きならしにあたっては、材料が分離しないように行い、敷きならし厚さは、締固め後の一層の仕上り厚が所定の値となるようにしなければならない。

【解 説】

- (1) 路盤用空冷汚泥スラグは、ブルドーザ、モータグレーダあるいは人力等によって材料の分離を起さないようにして所定の形状に敷きならす。
- (2) まき出し厚は、仕上り厚のほぼ1.2倍程度にするとよい。
- (3) 敷きならした材料は、必ずその日のうちに締固めを完了するようにしなければならない。作業中の降雨に対しては、敷きならした材料を転圧し終えてから作業を中止するのがよい。
- (4) 日時をおいて打ち足す場合は、既設の密に仕上げられた面をかきほぐしてから新しい材料を打ち足すとよい。

4. 締 固 め

路盤に用いる空冷汚泥スラグは、適正な含水量で所定の締固め度が得られるように十分に締固めなければならない。

【解 説】

- (1) 締固めは、タイヤローラとロードローラとを組み合わせで行うとよい。敷きならした材料は、ロードローラでひととおり軽く転圧した後、再び整形し、原則として、横断勾配の低い所から高い所へ転圧して、所定の締固め度が得られるまでに十分に締固める。
- (2) 適当な含水量とは、JIS A 1210 (突固めによる締固め試験方法) によって求めた最適含水比よりやや湿潤側の含水比で、施工上支障がなく十分締固め得る含水量のことである。
- (3) 路盤に用いる空冷汚泥スラグは、空冷汚泥スラグの種類や配合等によって最大乾燥密度や最適含水比が大きく異なることがあるので、工事に使用する以前に試験結果を確認しておくといよい。
- (4) 路盤を仕上げた後は、表面保護のため、できるだけ早くプライムコートを施工するとよい。路盤が適度に含水し、タイヤローラで転圧すると表面にわずかに水がにじみ出る程度のとき、プライムコート用アスファルト乳剤を散布浸透させるのがよい。散布量は、 2 l/m^2 が標準である。
- (5) プライムコートを散布した後、交通開放する場合は、粗目砂を $0.3\sim0.5\text{ m}^3/100\text{ m}^2$ 程度散布し、タイヤローラでひととおり転圧しておくといよい。しかし、表層や基層の舗設の際は、余剰の砂を掃き取るようにしなければならない。

Ⅲ－４ 品質管理と検査

１．概 説

空冷汚泥スラグを用いた路盤の施工にあたっては品質および出来形の管理を行い、完成した路盤は検査を受けなければならない。

【解 説】

- (1) 品質および出来形の管理は、設計図書に合格し、舗装を経済的に作るために行うものである。
- (2) 検査は、設計図書に定められた条件を満足する路盤ができているか確認するために行うものである。
- (3) 空冷汚泥スラグを用いた路盤の施工にあたっては、一般の路盤と同様にその工事の開始に先立って、材料や機械が適正なものであるかを確めるために、また品質および出来形を管理するうえで必要な基準値を得るために、基準試験を実施する。
- (4) 本マニュアルにおける品質管理の限界や検査の合格判定値は、路盤に用いる空冷汚泥スラグ独自の値を設けず、アスファルト舗装要綱等示された合格判定値に準ずることとした。これは通常の施工方法で行われた空冷汚泥スラグを用いた路盤の品質管理例では、アスファルト舗装要綱に示された品質管理限界を十分満足しているからである。

２．基準試験

工事を始める前に、あるいは材料や配合を変更する前には、空冷汚泥スラグが所要の品質を有しているかどうか確認しなければならない。

また、管理や検査のために必要な基準値を決定するための試験もあらかじめ実施しておかなければならない。

【解 説】

- (1) 基準試験は、路盤材料が所定の品質を満足しているか否か、配合の決定、施工機械の性能や制度の確認および、管理や検査に必要な基準値を得るために行う試験である。空冷汚泥スラグの品質に関する基準試験は表－Ⅲ－２に示すとおりであり、ロットごとに行うものとする。
- (2) 路盤に用いる空冷汚泥スラグの粒度、修正CBRは製造者による試験成績表で確認してもよい。
- (3) これまでの実績により、使用を予定している材料が品質規定を満足することが明らかである場合は、発注者の承諾により製造者の試験成績表によって確認することができる。

表－Ⅲ－２ 路盤用溶融スラグの基準試験

項 目	試 験 方 法	目 的
含 水 比	JIS A 1203	自然含水比の決定
突 固 め	JIS A 1210 2.5b 法	最大乾燥密度および 最適含水比の決定
C B R	アスファルト舗装 要綱付録 4－1	修正 C B R を求める

(注) 空冷汚泥スラグを構内舗装の路盤に用いる場合には、上記の項目の他に粒度を加えねばならない。試験方法は簡易舗装要綱を参照すること。

３．品質および出来形の管理

設計図書に合格する路盤を経済的に作るために、品質および出来形の管理を行わなければならない。

【解 説】

- (1) 品質および出来形の管理を行うにあたって、次の基本的な注意事項を守る必要がある。
 - ① 作業手順の標準化に努め、品質管理および出来形管理のための十分な体制をつくる。
 - ② できるだけ簡便で結果が早く得られる方法で、工事中継続して測定し、異常が速やかに発見できるようにする。自動記録装置による計算値がある場合は、それを利用する。
 - ③ 日常の品質管理試験結果および出来形の測定結果にもとづいて、必要があれば施工方法に修正を加える。これらのためには、管理の目的を十分理解し、試験および測定に用いる装置や器具の整備点検を行い、誤差をできるだけ小さくすることや、試験、測定によってえられた結果を速やかに整理しておくことが大切である。
- (2) 品質管理基準は、一般に表－Ⅲ－３によって管理するとよい。路盤の密度試験は、アスファルト舗装要綱付録 4－２の現場における土の乾燥単位体積重量試験方法により、1000m³に 1 回の測定を標準とする。
- (3) 出来形管理に用いる管理基準は一般に検査基準と施工能力を考慮して特記使用で示される場合を除き、表－Ⅲ－４に示す項目と頻度で実施するものとする。

(注) 空冷汚泥スラグを構内舗装の路盤に用いるときの品質管理と出来形管理については、簡易舗装要綱を参照するとよい。

表-III-3 品質管理項目と頻度および標準的な管理の限界

工種	項目	試験方法	頻度	標準的な管理の限界	不満足な場合の処置および参考事項
下層路盤	含水量	JIS A 1203	観察により異常が認められたとき随時	—	含水量が多い場合は、曝気して乾燥、乾いている場合は敷きならし中に散水。
	粒度	JIS A 1204	観察により異常が認められたとき随時	—	もとの材料を調査し、必要に応じ現場配合を修正する。
	密度*	アスファルト舗装要綱付録 4-2	1,000m ² に1回	93 %以上	締固め作業を継続する。局部的な含水比過大または材料の不良箇所は置き換える。

(注1) 表-III-3に示す項目と頻度および標準的な限界は、中規模工事を対象としている。

中規模工事とは、アスファルト混合部が3,000以上を目標に、工事の重要度、道路の環境、その他の条件を検討のうえその都度定める。

(注2) 小規模工事については、*印のついた項目のみについて行い、その頻度および標準的な管理の限界は、本表を参考に適宜決定する。

表-III-4 出来形測定の頻度と管理の限界

工種	項目	頻度	標準的な管理の限界
下層路盤	基準高	20mごと	±4 cm 以内
	厚さ	20mごと	-4.5 cm
	幅	40mごと	-5 cm
上層路盤	厚さ	20mごと	-2.5 cm
	幅	100mごと	-5 cm

(注) 空冷汚泥スラグを構内舗装の路盤に用いるときの品質管理と出来形管理については、簡易舗装要綱を参照するとよい。

4. 検査

完成した路盤が設計図書を満足するものであるか否かを判定するために、検査を行わなければならない。

【解説】

- (1) 路盤は、舗装の完成後は不可視部分となるところであるから、検査にあたっては、発注者も受注者も公正な態度で臨み、試料の採取、測定および試験などには、よくこれに精通し熟練した者を配置するか、信用ある機関を利用するなど万全を期さなければならない。
- (2) 検査は品質および出来形について検査するとともに、基準試験の結果をもとに、使用材料が設計図書の規格を満足していることを確認する。

- (3) 合格、不合格の判定は1ロットごとに行うが、1ロットの大きさは各工事とも10,000㎡以下とする。
- (4) 検査は、現地路盤の抜き取り検査または管理データを用いて行う。以下では、アスファルト舗装要綱にもとづき空冷汚泥スラグ路盤の品質および出来形についての検査対象項目と合格判定値の例として、抜き取り検査による場合を表Ⅲ-5、表Ⅲ-6に、管理データを用いる場合を表Ⅲ-7、表Ⅲ-9に示す。

1) 抜き取り検査による場合

表Ⅲ-5 品質の合格判定値の例（抜き取り検査の場合）

工 項 種 目	Ⅰ （中規模以上の工事） ^①			Ⅱ （小規模の工事）		
	$\bar{X}_{10}$	$\bar{X}_6$	$\bar{X}_3$	$\bar{X}_{10}$	$\bar{X}_6$	$\bar{X}_3$
下 層 締固め度② 路 盤 %	95以上	96以上	97以上	—	—	—

品質は、表Ⅲ-5に示す合格判定値に合格するものでなければならない。10個の測定値の平均（ $\bar{x}_{10}$ ）が合格判定値 $\bar{X}_{10}$ の範囲内になければならない。ただし、3個の測定値により判定する場合は、その平均（ $\bar{x}_3$ ）が合格判定値 $\bar{X}_3$ の範囲内であればよいものとする。 $\bar{X}_3$ の範囲外に出た場合は、さらに3個の測定値を加えて6個の平均（ $\bar{x}_6$ ）を求め、これが合格判定値 $\bar{X}_6$ の範囲内であればよいものとする。

表Ⅲ-6 出来形の合格判定値の例（抜き取り検査の場合）

工 種 項 目	適用 工 事	Ⅰ （中規模以上の工事）		Ⅱ （小規模の工事）	
		個々の測定値	10個の測定値 の平均 $\bar{X}_{10}$	個々の測定値	10個の測定値 の平均 $\bar{X}_{10}$
下層路盤	高 さ	±4 cm 以内		±5 cm	
	幅	— 5 cm "		— 5 cm	
	厚 さ	— 4.5 cm "	— 1.5 cm 以内	— 4.5 cm	— 1.5 cm 以内

出来形は、表Ⅲ-6に示す合格判定値に合格するものでなければならない。高さおよび幅については、個々の測定値が合格判定値以内にならなければならない。

厚さは、個々の測定値が、10個に9個以上の割合で合格判定以内にあるとともに、10個の測定値の平均（ $\bar{x}_{10}$ ）が合格判定値 $\bar{X}_{10}$ 以内にならなければならない。

2) 管理データによる場合

表-III-7 品質の合格判定値の例 (管理データによる場合)

工 種	適用工事 項 目	I (中規模以上の工事)	II (小規模工事)
		個々の測定値	個々の測定値
下層路盤	締固め度(%)	93%以上	—

締固め度の検査は以下の手順で行う。

- ① 乱数表を用い管理データから規定の検査用試料 (n 個) を抽出する。

(表層・基層のとき, $n=15$, 路盤のとき, $n=14$)

- ② これらの検査用試料の平均値 $\bar{x}$ と不偏分散 V を求める。

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n}$$

$$V = \frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \cdots + (x_n - \bar{x})^2}{n-1}$$

- ③ 次式を満足すれば合格とする。

$$x - k\sqrt{V} > \text{個々の測定値の合格判定値 (表-III-7)}$$

ここに k は, 合格判定係数である。(路盤のとき, $k=0.94$)

(注) 管理データが規定の試料数 (表層, 基層のとき $n=15$, 路盤のとき $n=14$) に満たない場合は, その管理データの全部を用いて, 平均値 $\bar{x}$, 不偏分散の平方値 $\sqrt{v}$ を求め, 同様の方法で 合否を判定する。この場合の合格係数 (k) は, 表-II-7 に示す。

なお, n , k は次式から求めたものである (JIS Z 9004 参照)。

$$n = \left(1 + \frac{k^2}{2}\right) \left(\frac{K\alpha + K\beta}{Kp_0 - Kp_1}\right)^2 \quad k = \left(\frac{Kp_0 K\beta + Kp_1 K\alpha}{K\alpha + K\beta}\right)$$

ここに Kp は, 規模正規分散における確率 p の点で

添字 α は, 生産者危険率 (5%)

β は, 生産者危険率 (10%)

P_0 は, 望ましいロットの不良率

P_1 は, 望ましくないロットの不良率

表-III-8 合格判定係数-(k)-(α=0.05 β=0.10)

管 理 データ数 n	路 盤		
	合格判定 係数k	望ましいロ ットの不良 率 P ₀	望ましくな いロットの 不良率P ₁
5	1.37	0.7	30.0
6	1.25	1.5	30.0
7	1.17	2.3	30.0
8	1.12	3.0	30.0
9	1.06	4.0	30.0
10	1.03	4.6	30.0
11	1.01	5.1	30.0
12	0.98	5.8	30.0
13	0.97	6.3	30.0
14	0.94	7.0	30.0
15	—	—	—

表-III-9 出来形の合格判定値の例（管理データによる場合）

工 種	適用工事 項 目	I (中規模以上の工事)	II (小規模の工事)
		個々の測定値	個々の測定値
下層路盤	高 さ	± 4 cm 以内	± 5 cm 以内
	幅	— 4 cm "	— 5 cm "
	厚 さ	— 4.5 cm "	— 4.5 cm "

出来形のうち、高さおよび幅については、管理データのすべてが表-III-9に示す個々の測定値の合格判定値以内になければならない。厚さについては、乱数表を用い管理データから14個の検査用試料を抽出し、これらの検査用試料の平均値 $\bar{X}$ と不偏分散 V を求め、 $\bar{X}-k\sqrt{V}>$ 個々の測定値の合格判定値（表-III-6）を満足すれば合格とする。ここで、 k は合格判定係数であり、 $k=0.94$ とする。

付 録

- 付録－１ 石灰系焼却灰の路上再生路盤工法への適用性
- 付録－２ 結晶化を進めた汚泥スラグの材料特性
- 付録－３ 石灰系焼却灰，空冷汚泥スラグの溶出試験結果

付録－１ 石灰系焼却灰の路上再生路盤工法への適用性

石灰系焼却灰を配合材として路上再生路盤工法に用いたものを対象に試験舗装を実施し、その供用性を通常の工法と比較することによって適用性の検討を行った。この結果、以下のような項目に留意すれば、路上再生路盤工法に石灰系焼却灰を配合材として使用することは可能と判断された。

- (1) 焼却灰の使用量が増えるに従い、配合設計の基準値を満たすためには、セメント量が増え、アスファルト乳剤量が減る傾向がある。そのため、経済性や耐久性を考慮すると、焼却灰の使用量は２％以下とするのが望ましい。
- (2) 二種類の粉体（セメントと焼却灰）を添加することから、積算上、従来の再生工法より、敷きならし、混合、転圧が２回となり多少割高となる。
- (3) 配合設計用の供試体作製においては、焼却灰の使用量が僅かであっても、吸水量の影響を過敏に受け、含水量調整用の水添加後より突固めまでの時間が異なると、締固め密度に差異が生じる。したがって、含水量調整用の水を添加した際には、突固めまでの時間は一定になるようにし、なるべくすみやかに混合・突固めを行う必要がある。
- (4) 配合材の形態としては、運搬、取り扱い、施工性を考慮すると、袋詰めが望ましく、バラものを使用する場合は、特殊運搬車両の開発が必要である。
- (5) 焼却灰は、単位体積重量が小さく、粒度はフィラーに近いので、風が吹くと飛散しやすいので、敷均にあたっては、粉塵対策を十分に行わなければならない。また、混合時も同様である。
- (6) 二種類の粉体（セメントと焼却灰）を二層に敷きならすため、二層目の敷きならし量（厚）の確認が困難である。また、含水量調節のための散水によって、焼却灰が泥状化し、均一な混合が得られ難い。そのため、予め焼却灰の一次混合を行い、整正仮転圧を行った後、セメントを敷きならし、散水、混合するとよい。

付録－２ 結晶化を進めた汚泥スラグの材料特性

１）スラグの結晶化理論

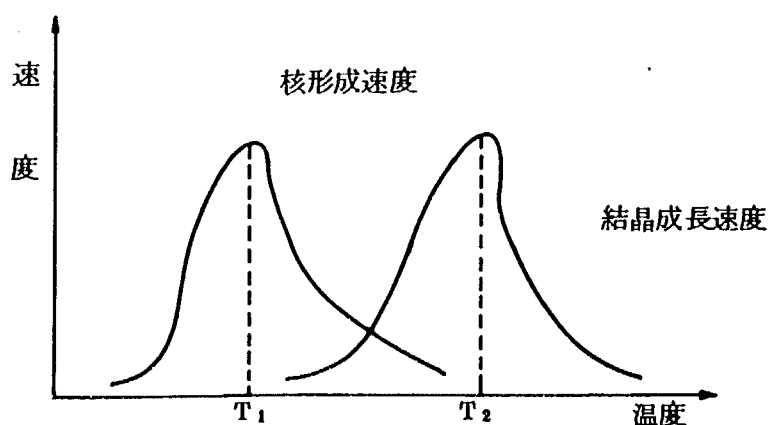
汚泥無機物を高温溶解した後急冷するとガラス塊状の固体が出来る。この固体は内部に歪みを蓄積した状況になり、強い圧力には耐えがたく骨材としての適用幅はせまい。

そこで、その状態を改良する為には溶解物の冷却方法または冷却後の熱処理方法に一定の条件を設定することが必要となる。

汚泥無機分が高温溶解されると無機分を公正する Si 、 Fe 、 Ca 、 Mg 、 K 、 P などの元素は複雑な化合物を形成し、急速に冷却されるとガラス質の均一混合物になる。一般的に冷却されて固形物となる化合物は条件が整えば化合物の分子が一定の間隔に積み重なり成長する結晶化という現象を生じ、外部から加わる力に対し非結晶均一体の場合より強い抵抗を示す。

一般に、無機分が溶解した状態から結晶化する場合には、まず結晶核が形成され、その核を中心に成長する。この核の形成速度と結晶成長速度とは温度に対して付図－１に示すような分布を持つ。理想的には T_1 の温度で核を形成させ、 T_1 より高温の T_2 で結晶を成長させるのが望ましい。しかし、このように一度温度を下げて核を形成させ、再び温度を上げて結晶を成長させるということは、エネルギー的には大きなロスである。従って最適ではないにしても両速度分布の重なり合った温度範囲で、適切な時間保持することにより結晶化を行う法が得策であろう。

以上のように、結晶化を支配する因子は、溶解対象物の組成の他に、温度と結晶化時間とがある。このことを工業的に実現する為には冷却温度勾配を制御する方法と一旦固化したスラグを熱処理する方法がある。ここでは、以下に熱処理法についての考察を行う。



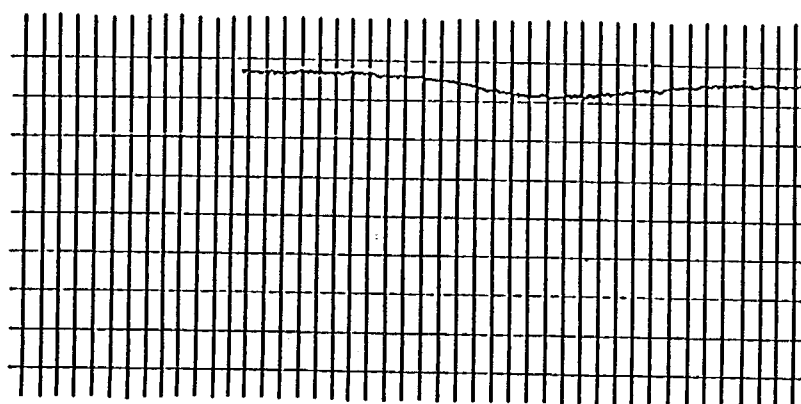
付図－１ 結晶化パターン

2) 熱処理温度と外力に帯する強度の変化

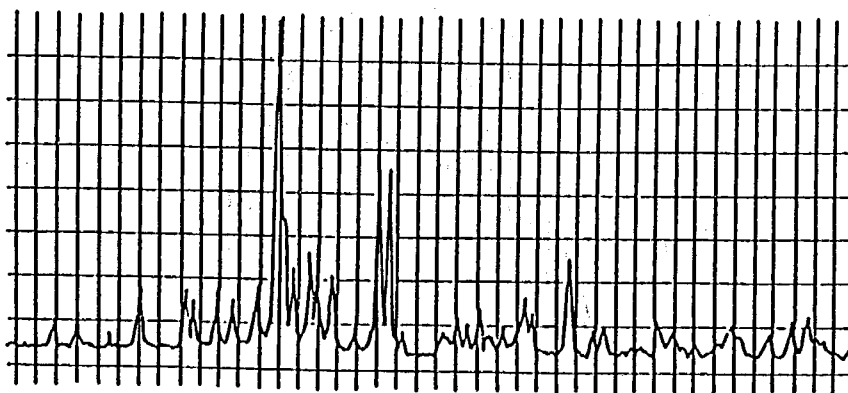
付図-2, 付図-3 にX線回折により求めた結晶の生成状態を示す。

付図-2 は空冷により冷却されたガラス質のスラグを800℃で30分間保存したものであり、結晶物質が生成していない。

これに対し付図-3 は 1,100℃で同様30分間保存したもので多くの結晶が生じている。ピークの位置から判定すると結晶化している化合物は $2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$, $5\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$, $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$, $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$, $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2$ などであると推測される。

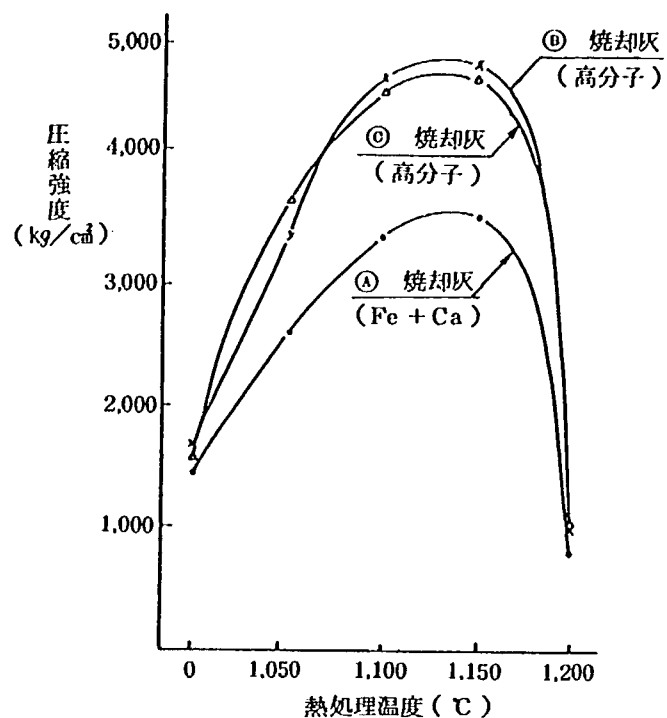


付図-2 X線回折チャート (空冷スラグを800℃で30分間保存)

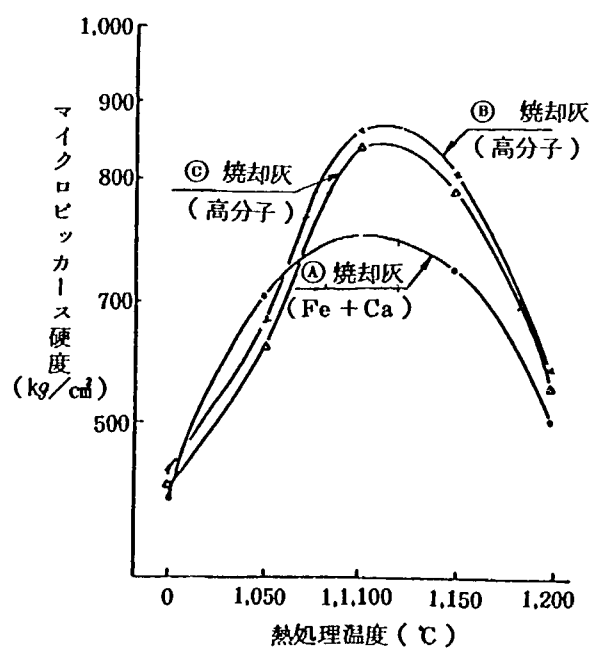


付図-3 X線回折チャート (空冷スラグを1,100℃で30分間保存)

付図-4 は熱処理高温度と圧縮強度の関係を示したものであり、付図-5 は同様の条件で処理したときの硬度の変化を示したものである。



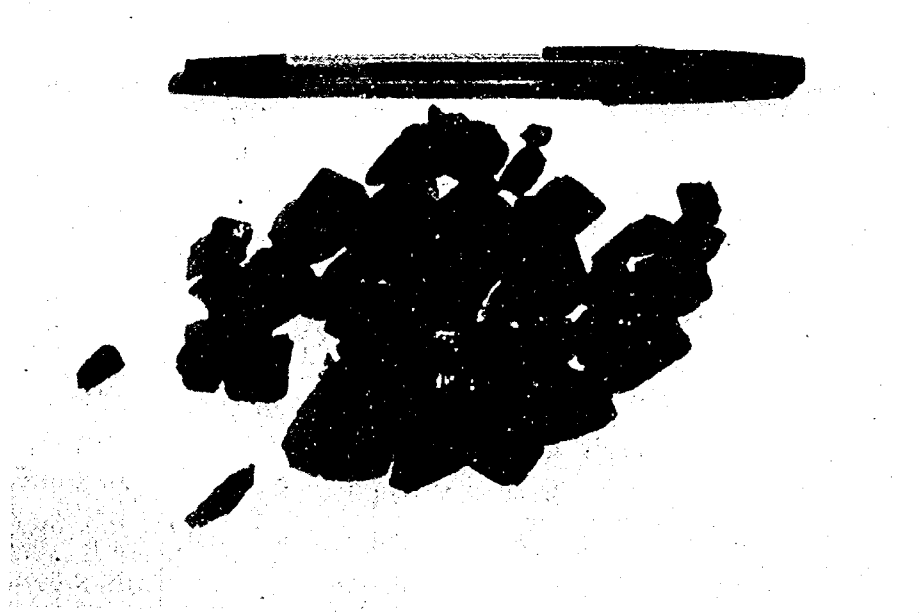
付図-4 熱処理温度と圧縮強度の関係



付図-5 熱処理温度とマイクロビッカース硬度の関係

3) 表面性状の変化

汚泥スラグ骨材の表面性状も結晶化により、非常に滑らかなものから普通碎石と同様なものへと変化する。



結晶化前



結晶化後

付図-6 表面性状の違い

付録－3 石灰系焼却灰，空冷汚泥スラグの溶出試験結果

下水汚泥中には流下下水に含まれる重金属が濃縮されるので，舗装材料として用いる場合には，これら有害物質に対する安全性が確認されていなければならない。総理府令第5号「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」の第1条，埋立処分に係る判定基準に従い有害物質の溶出試験を行った結果を以下に示す。

(i) 下水汚泥焼却

単位：mg/ℓ

分析項目	試料	下水汚泥焼却灰	判定基準	試験の 検 限 界	分析方法②
		石 灰 系 高分子系			
アルキル水銀化合物		不 検 出 不 検 出	不検出	0.0005	59号付表4-1
水銀又はその化合物		不 検 出 不 検 出	0.005以下	0.0005	59号付表 3
カドミウム又はその化合物		不 検 出 不 検 出	0.3以下	0.002	JIS K 0102 55-2
鉛 又 は そ の 化 合 物		不 検 出 不 検 出	3.0以下	0.02	JIS K 0102 54-2
有 機 リ ン 化 合 物		不 検 出 不 検 出	1.0以下	0.01	59号付表 1
六 価 ク ロ ム 化 合 物		不 検 出 不 検 出	1.5以下	0.05	JIS K 0102 65-2-1
ひ 素 又 は そ の 化 合 物		不 検 出 0.28	1.5以下	0.01	JIS K 0102 61-1
シ ア ン 化 合 物		不 検 出 不 検 出	1.0以下	0.01	JIS K 0102 38-1-2, 38-3
P C B		不 検 出 不 検 出	0.003以下	0.0005	JIS K 0093

(注1) 分析機関：(財)千葉県環境技術センター

(注2) 分析方法は，昭和48年環境庁告示第13号，同59号付表他関連JISによった。

(ii) 空冷汚泥スラグ

単位：mg/ℓ

試料名 分析項目	大阪スラグ 川崎スラグ			判定基準	試験の 検出限界	分 析 方 法 (出 典)	分 析 方 法 (概 略)
	5～13mm を 破 砕	5mm以下	5mm以下				
カドミウム	0.001以下	0.001以下	0.001以下	0.3以下	0.002	JIS K0102 55	溶出 原子吸光光度法
シアン	0.01以下	0.01以下	0.01以下	1.0以下	0.1	JIS K0102 38	溶出 ピリジン・ピラゾロン
有機リン	0.1以下	0.1以下	0.1以下	1.0以下	0.1	環境庁告示 第41号(1982)付表1	溶出 ガスクロマトグラフ法
鉛	0.01以下	0.01以下	0.01以下	3.0以下	0.01	JIS K0102 54	溶出 原子吸光光度法
六価クロム	0.01以下	0.01以下	0.01以下	1.5以下	0.02	JIS K0102 65・2	溶出 ジフェニルカルバジド法
ヒ素	0.01以下	0.01以下	0.01以下	1.5以下	0.002	JIS K0102 61	溶出 ジチオカルボミン酸法
総水銀	0.0005以下	0.0005以下	0.0005以下	0.005以下	0.0005	環境庁告示 第41号(1982)付表3	溶出 還元気化原子吸光光度法
アルキル水銀	不検出	不検出	不検出	不検出	0.0005	環境庁告示 第41号(1982)付表4	溶出 ガスクロマトグラフ法
P C B	0.0005以下	0.0005以下	0.0005以下	0.003以下	0.0005	環境庁告示 第41号(1982)付表5	溶出 ガスクロマトグラフ法

(注) 分析機関：(社)環境技術研究所

(1) 研究目的

本研究では、下水汚泥焼却灰（石灰系）、石炭灰（シンダーアッシュ＋フライアッシュ）について、路上再生路盤工法への適用可能性を検討することを目的に、各種室内試験、試験舗装を実施し、現状における評価をまとめたものである。

石灰系焼却灰、石炭灰を配合材として用いた路上再生路盤工法の試験舗装並びに追跡調査を以下のよう
に実施し、その施工性、適用性、耐久性の評価を行った。なお、試験断面の設計にあたっては、
室内試験により焼却灰、石炭灰を用いたもので配合設計を行い、その最適な配合量を設計した（焼却
灰 2 %、石炭灰 3 %）。

試験舗装は、図-3.6.1に示すような断面で9工区に分けて実施した。

- a) 施工日時：昭和58年2月
b) 施工場所：栃木県真岡市
c) 施工断面：以下のとおり（施工延長 $6 \times 70 + 3 \times 50 = 570\text{m}$ ）



ii) 追跡調査

試験舗装に対する追跡調査は、施工後定期的に実施し、焼却灰・石炭灰を利用した路上再生路盤工法の供用性、耐久性、適用性の検討を行った。調査は施工後11ヶ月、施工後21ヶ月、施工後33ヶ月と3回行ったが、3回目の調査では、路面調査だけではなく、各工区の開削調査並びに切取断面の観察も行い、これらの結果も合わせて総合的な評価を行った。

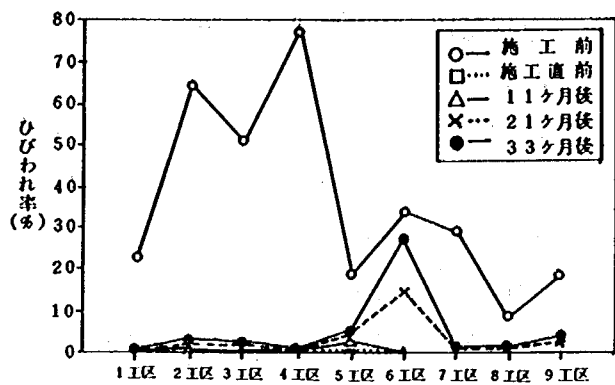


図3.6.2 ひびわれ率の工区比較

a) 路面調査結果からの評価

路面性状にかかわる追跡調査結果のうち、ひびわれ率、横断凹凸量、供用性指数 (PSI) の変化をみたのが図-3.6.2~3.6.4である。

試験舗装施工後33ヶ月経過時における追跡調査結果から、次のようなことが言える。

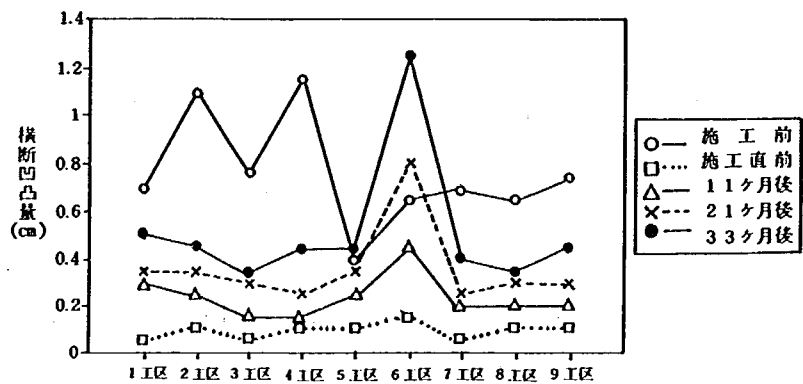


図3.6.3 横断凹凸量の工区比較

① 追跡調査結果から各工区のPSIを算出すると、第六工区が2.5を下回っており何らかの維持修繕を要する時期に達しているが、全体としては良好な供用性を示している。

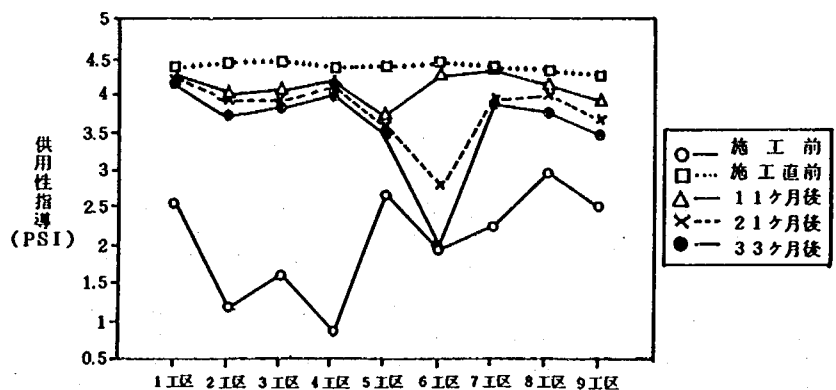


図3.6.4 供用性指数の工区別比較

② 石灰系焼却灰および石炭灰利用工区すなわち2工区、3工区ならびに8工区、9工区に関しては、特に問題となる点はなかった。

なお、石灰系焼却灰および石炭灰の自硬性については、現段階では判断し難い。

b) 切取断面観察結果からの評価

試験舗装施工後33ヶ月経過時における切取断面観察結果から次のようなことが言える。

- ① 2工区および8工区の石灰系焼却灰については、他工区と比較し大差なかった。
- ② 3工区および9工区の石炭灰を使用した切取断面については、上部、下部の混合性が他工区と比較して劣るようだった。

- ③ 1工区, 4工区, 5工区, 6工区, 7工区については, 一般的に行われている現場と同じような仕上りであった。

(3) 研究成果

以上のことから, 石灰系焼却灰および石炭灰を利用した再生工法の各工区は, 従来工法に比較し大差はなく, 全体として良好な併用性を示している。

これより, 石灰系焼却灰および石炭灰の使用量それぞれ2%ないし3%は, 施工後, 供用性からみて妥当なものでなると考えられる。

試験舗装から得られた評価より, 路上再生路盤工法でこれら再生材を配合材として使用した場合の設計, 施工上の留意事項をまとめると以下のようになる。

i) 設計上の留意事項

- ① 二種類の粉体(セメントと石灰系焼却灰ならびに石炭灰)を添加すると, 敷均し, 混合, 調整, 転圧等がそれぞれ2回となり, 従来の再生工法より積算上, 多少割高となる。
- ② 石灰系焼却灰および石炭灰は, その使用量が僅かであっても吸水量の影響を過敏に受けることから, 配合設計用の供試体作成においては, 含水量調整用の水を添加してから突固めまでの時間は一定になるようにし, なるべく, すみやかに混合・突固めを行う必要がある。
- ③ 石灰系焼却灰および石炭灰は, その使用量が増えるに従い, 配合設計の基準値を満たすための最適セメント量は増え, 一方, 最適アスファルト乳剤量は減る傾向がある。経済性や耐久性を考慮すると, 路上再生路盤工法での焼却灰及び石炭灰の最適な使用量は, 石灰系焼却灰は2%, 石炭灰は3%までが望ましい。

ii) 施工上の留意事項

- ① 配合材の形態としては, 運搬, 取扱い, 施工法を考慮すると, 袋詰めが望ましく, バラものを使用する場合は, 特殊運搬車両等の開発が必要である。
- ② これらの廃棄物は, 単位体積重量が小さく, 粒度はファイラーに近いので, 風が吹くと飛散し易いので, 敷均しあるいは混合の際に, 粉塵対策を十分におこなわなければならない。
- ③ 二種類の粉体(セメント石灰系焼却灰および石炭灰)を二層に敷均すため, 二層目の敷均し量(厚)の確認が困難である。また, 含水量調整のために行う散水によって, 石灰系焼却灰および石炭灰は泥状を呈し, 均一な混合が得られ難い。そのため, あらかじめ焼却灰および石炭灰は一次混合を行い, 整正仮転圧後, この上にセメントを敷均し, 散水・混合するとよい。

(4) まとめ

室内試験から決定した石灰系焼却灰および石炭灰の配合量それぞれ2%, 3%は、試験舗装による供用性から判断して特に問題となることはなく、その妥当性が確認された。

しかしながら、今回の配合では、両者とも増量材的に混入されたもので、石灰系焼却灰や石炭灰が混入することによって添加剤の使用量（セメント・アスファルト乳剤）が節約されるものではなく、これらを混入することによる経済的なメリットは少ない。

また、石灰系焼却灰や石炭灰などを本工法に実際に適用する場合には、技術的な検討意外にも、下記のような基本的な事項についても合せて検討しておくことが必要である。

- ① 品質の経時的な安定性が確認されていること
- ② 必要量の安定した供給が可能であること
- ③ 経済的であること

(舗装研究室担当)

3.7 下水汚泥スラグの歩道ブロック等への利用

(1) 研究目的

下水汚泥の溶融スラグの資材化に関しては、碎石、砂等の代替品としての各種骨材への利用が研究の中心となっている。本研究は、付加価値の高い資材としての開発可能性を探るため、汚泥スラグが製造過程で、液状となることを生かして、スラグの成形や着色についての検討することを目的に実施したものである。

(2) 研究内容

本研究は、①成形実験、②着色（成形）実験、③成形板材を用いた歩道ブロック製作実験からなっている。これらに用いた試料を表3，7，1に示す。水砕スラグは、高分子系焼却灰を溶融水砕したものである。実験①には、両者を、②には焼却灰を、③には水砕スラグを用いた。実験①の結果によると両者から成形したスラグには、大きな差はなかった。溶融に際しては、塩基度（ CaO/SiO_2 ）が溶融温度及び融液の粘性に影響を与えるので、所定の塩基度（0.6 ～ 1.3）にするため、焼却灰を使用する場合は生石灰を加えた。

セメント；ポルトランドセメント

骨材；5～25mm，荒砂，細砂

水；水道水

水セメント比；50%以下

養生；28日（水中 at 20℃）

表3.7.1 実験供試材料

試料区分		高分子系焼却灰	水 砕 ス ラ グ
分析項目			
水分	%	<0.5	<0.5
SiO ₂	wt %	40.78	34.40
Al ₂ O ₃		17.67	14.40
Fe ₂ O ₃		12.95	5.53
CaO		7.33	20.90
TiO ₂		1.01	0.85
MgO		2.61	1.50
K ₂ O		1.57	1.65
Na ₂ O		1.10	1.85
P ₂ O ₅		11.20	3.40
lgloss, その他		3.78	—
CaO/SiO ₂		0.18	0.60

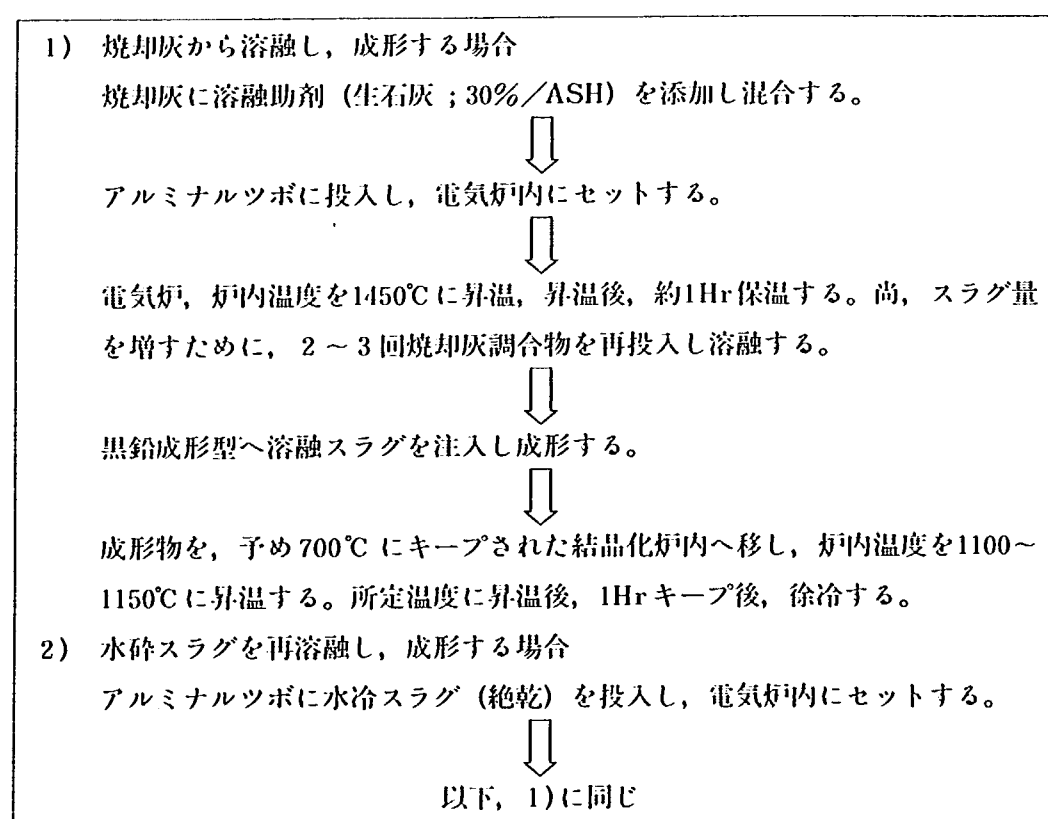
(注) 分析方法（湿式化学分析方法）

成形実験における操作条件を表-3.7.2 に、操作手順を表-3.7.3に示す。

表3.7.2 実験条件

溶 融 助 剤	(生石灰30%/ASH一定)灰のとき
着色剤(金属酸化物)	(5～10%/ASH)
溶 融 温 度	1450℃
溶 融 時 間	1Hr
成 形 型	カーボン成形型 150 [□]
成形型保持温度	約200℃
結 晶 化 温 度	1100～1150℃
結 晶 化 時 間	1Hr

表3.7.3 成形実験の操作手順



- ① 成形実験 …………… 成形形状は、150mm×150mm×10mmの板材、一辺25～50mmの立方体及びレモン形である。板材、立方体とも、ダイヤモンドカッターによって形状を整えた。
- ② 着色（成形）実験 …………… 素地を着色するために、溶融時に着色材を添加し、よく混合した。着色剤としては、表-3, 7, 4に示す金属酸化物を用いた。

溶融する際に用いたルツボは、アルミナルツボの他、カーボンルツボ及びグラファイトルツボを用いた。

表3.7.4 着色剤と用いた金属酸化物

金属酸化物 名 称	発 色 性	
	酸化条件	還元条件
酸化コバルト	コバルト 青色	コバルト 青色
酸化ニッケル	褐 色	褐 色
酸化銅	青 色	青 緑
硫化カドミウム	無 色	黄 色
カドミウムセレン	無 色	赤 色

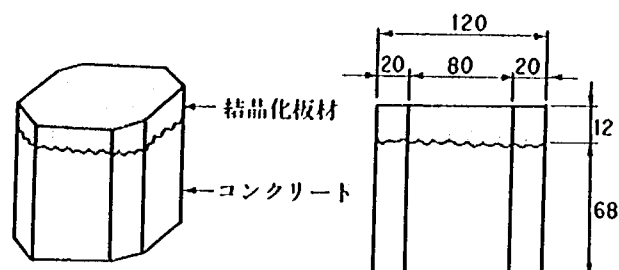


図3.7.1 歩道ブロック形状

③ 歩道ブロック実験 …………… 成形結晶板材とコンクリートを付着させ、図 3.7.1 に示す歩道ブロックを製作した。スラグの付着面には、コンクリートとの付着をよくするため波形を付けた。その他のブロック製作条件は、以下のとおり。

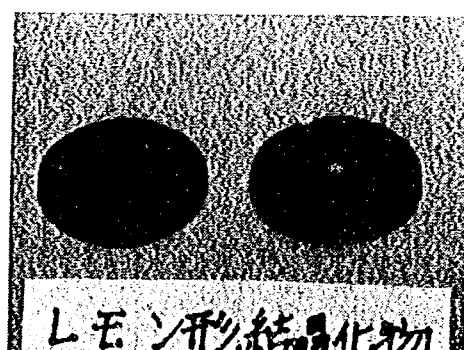
(3) 研究成果

1) 成形実験成果

- ① 供給材料から低粘性の融液が得られ、成形性並びにカーボン成形型からの離型性は良好であった。また、結晶化の進んだ各形態のスラグが得られた。
- ② 今回実験で得られたサンプルの写真を図3.7.2に示す。



成形板材 (125[□])



レモン形結晶化物

図3.7.2 結晶成形物

③ 成形スラグの抗折強度、圧縮強度測定結果をそれぞれ表 3.7.5, 3.7.6に示す。両者ともコンクリート等に比べ非常に高い値となっている。ただ、抗折強度試験のNo 2, No2' (同一成形からのテストピース) の値が他に比べ低い値となっているが、これは製造工程における気泡混入が原因と考えられ、装置化の段階で改良することができると考えられる。一方、JIS A 5304 歩道用コンクリート平板では $\alpha = 40\text{kg}/\text{cm}^2$ であり、表 2.3.5 の試験結果は十分にこの値を上回っている。

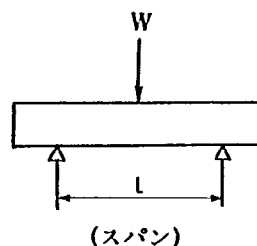
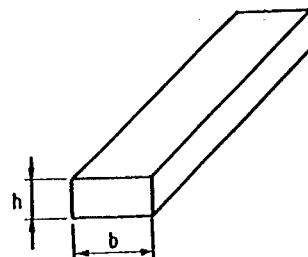
圧縮強度は、試料サイズ一辺 2.5cmで、約4500kg/cm²とかなり高い数値が得られている。試料サイズ一辺 3 cm以上では、30TON荷重で破壊しなかったが、一辺 2.5cmのデータと同等の数値が得られると推察される。(アムスラー万能試験機 Max 30 TON)

一方、通常のコンクリート平板では $ck = 210\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度であり、表3.7.6の値は十分この値を上回っている。

表3.7.5 抗折強度試験結果

成形板材結晶物					
No.	b cm	h cm	ℓ cm	W kg	σ kg/cm ²
1	2.95	1.0	10.0	225	1144
2	3.40	1.0	10.0	43	190
2'	3.05	1.0	10.0	60	295
3	2.90	1.0	10.0	190	983
5	3.05	0.95	10.0	400	1968
6	2.90	0.95	10.0	420	2173
7	2.95	1.0	10.0	330	1680
8	3.00	1.0	10.0	360	1800
$\bar{X}$	—	—	—	—	1280

$$\sigma = \frac{M}{Z} = \frac{\frac{W \ell}{4}}{\frac{1}{6} b h^2}$$

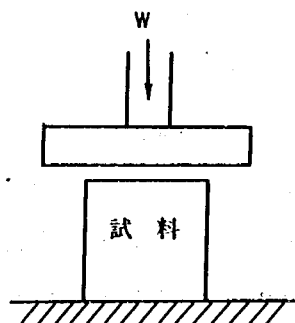
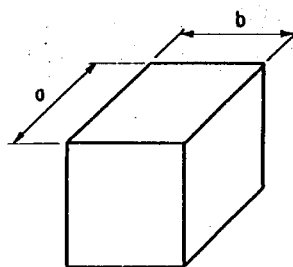


圧縮強度は、試料サイズ一辺2.5cmで約4,500kg/cm²とかなり高い数値が得られている。試料サイズ一辺3cm以上では、30TON 荷重で破壊されなかったが、一辺2.5cmのデータと同等の数値が得られると推察される。(アムスラー万能試験機 Max 30 TON)

一方、通常のコンクリート平板では $\sigma = 210 \text{ kg/cm}^2$ 程度であり、表3.7.6の値は十分この値を上回っている。

表3.7.6 圧縮強度試験結果

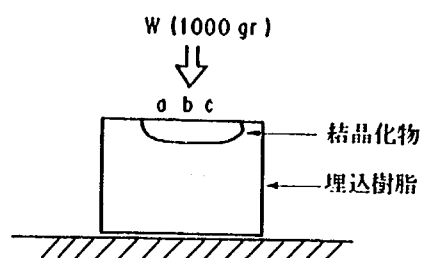
成形板材結晶物				
No.	a cm	b cm	W kg	σ kg/cm ²
1	2.5	2.5	28500	4560
2	3.0	3.0	>30000	>3330
3	3.5	3.5	>30000	>2450
4	3.5	3.5	>30000	>2450
5	4.0	4.0	>30000	>1875
6	4.0	4.0	>30000	>1875
7	4.0	4.0	>30000	>1875
$\bar{X}$	—	—	—	—



- ④ マイクロビッカース硬度は、各サンプルとも約 $800\text{kg}/\text{cm}^2$ とかなりの高硬度であった。

表3.7.7 ビッカース硬度

成形板材結晶物				
No.	a	b	c	a, b, c $\bar{X}$
1	795	805	810	803
2	835	840	840	838
3	790	780	785	785
4	795	800	800	798
5	815	815	820	816
6	845	850	845	846
7	805	810	810	808
$\bar{X}$				813



2) 着色実験結果

- ① 金属酸化物添加条件時に於けるスラグの溶融性並びに成形，離型性は，酸化物無添加条件に比べて大きな差はない。各酸化物10%添加条件では，スラグ粘性がやや高くなる傾向が見られたが，成形，離型性に与える影響は殆んど無く良好であった。
- ② 焼却灰に各金属酸化物を5～10%添加した結果（テストNo.1～3，14，15），各条件に於ける着色性は，ガラス状態並びに結晶化物共に，特に優れた着色は得られず，殆んど無添加条件に近い結果を示している。

焼却灰にNiO 2 10%添加し，グラファイト並びにカーボンルツボで溶融した結果（テストNo.5～7）では，各々緑色系の着色ガラスが得られたが，結晶化後の着色は良好な結果は得られなかった。（テストNo.5，7は結晶せず）これは，溶融時にスラグ中の鉄が還元され，分離沈降し，スラグ中の鉄の含水量が少なくなったことによると考えられる。

- ③ 着色成形結晶材の強度は，着色剤を添加しないものと同程度となった。抗折強度，圧縮強度をマイクロビッカース硬度の測定結果をそれぞれ表3.7.9，3.7.10，3.7.11に示す。

表3.7.8 着色化実験結果

テスト No	試料	配合割合%/ASH		溶融溶器	溶融 区分	溶融成形物の 色 (ガラス)	成形結晶 物の色	備考
		生石灰	着色剤					
1	焼却灰	30	NiO ₂	アルミナルツボ	電気炉	黒色	茶褐色	
2	"	30	CaO, 5	"	"	"	"	
3	"	30	CuO, 5	"	"	"	"	
4	"	30		"	"	"	茶色	
5	"	30	NiO ₂ , 10	グラファイト	高周波炉	くすんだ緑色	結晶せず	鉄裂
6	"	30	"	カーネルツボ	"	淡緑	淡緑	"
7	"	30		グラファイト	"	くすんだ緑色	結晶せず	"
8	"		CdSe, 10	アルミナルツボ	電気炉	こげ茶色	結晶せず	
9	"		CdSe, 10 ZnO, 8	"	"	"	"	
10	7のガラス		CdSe, 10	"	"	"	"	
11	"		CdSe, 10 ZnO, 8	"	"	"	"	
12	5のガラス		CdSe, 10 ZnO, 8	"	"	"	"	
			C, 5					
13	"		CdSe, 10 ZnO, 8	"	"	"	"	
			C, 5					
14	焼却灰	30	NiO ₂ , 10	"	"	黒色	茶褐色	
15	"	30	CuO, 10	"	"	"	薄褐色	

表3.7.9 着色板材の抗折強度

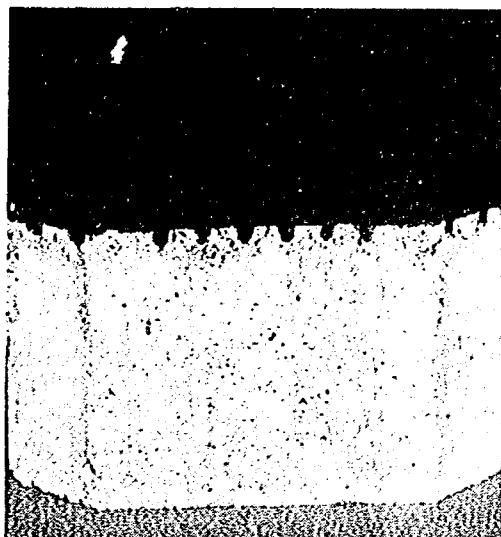
成形着色板材結晶物					
No.	b cm	h cm	ℓ cm	W kg	σ kg/cm ²
1	3.00	1.0	10.0	190	950
2	3.00	1.0	10.0	200	1000
3	2.95	1.0	10.0	215	1094
4	3.00	1.0	10.0	140	700
5	3.00	1.0	10.0	250	1250
6	2.95	1.0	10.0	220	1120
7	3.00	1.0	10.0	180	900
8	3.00	1.0	10.0	270	1350
$\bar{X}$	—	—	—	—	1045

表3.7.10 着色板材の圧縮強度

成形着色板材結晶物				
No.	a cm	b cm	W kg	σ kg/cm ²
1	3.0	3.0	>30000	>3330
2	3.5	3.5	>30000	>2450
3	3.5	3.5	>30000	>2450
4	4.0	4.0	>30000	>1875
5	4.0	4.0	>30000	>1875
6	4.0	4.0	>30000	>1875
7	4.0	4.0	>30000	>1875
$\bar{X}$	—	—	—	—

表3.7.11 着色板材のビッカース硬さ

成形着色板材結晶物				
No.	a	b	c	a, b, c $\bar{X}$
1	780	790	780	783
2	800	810	810	806
3	810	815	815	813
4	810	810	815	811
5	830	815	820	821
6	795	800	800	798
7	820	815	815	816
$\bar{X}$	—	—	—	807



3) 歩道ブロック実験結果

- ① 図3.7.3に示すような歩道ブロックが、製造できた。
- ② この歩道ブロックは、スラグ板材とコンクリート付着強度も十分あるので、歩道ブロックとして使用できる。

歩道ブロックの付着性を見るためのせん断試験及び引張試験結果によると、せん断強度は44kg/cm²、引張強度は10kg/cm²であり、破壊面は結晶化板材とコンクリートの境界面である。せん断試験による破壊状況を図3.7.4に示す。圧縮強度は590kg/cm²と同時に行った標準コンクリート供試体の強度350kg/cm²と比べ、かなり高い数値が得られた。このとき結晶化板材は破壊されず、コンクリート部分が破壊された。

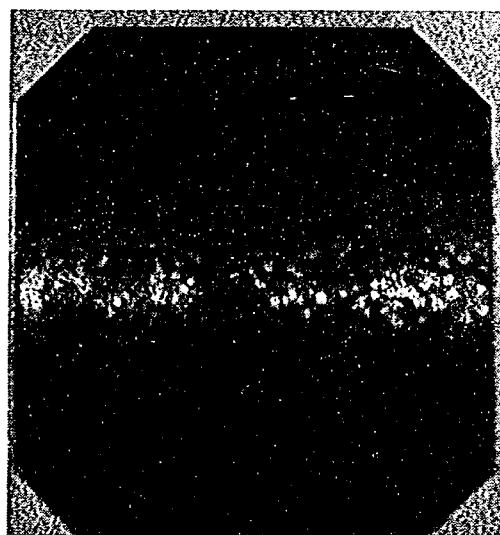
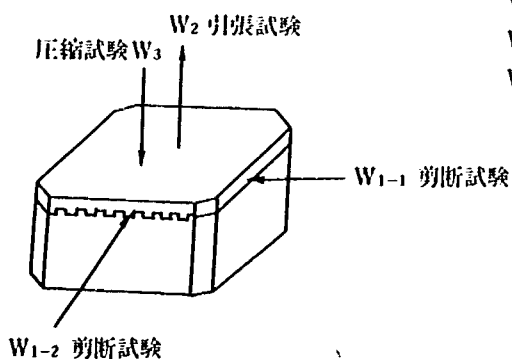


図3.7.3 歩道用ブロックの供試体

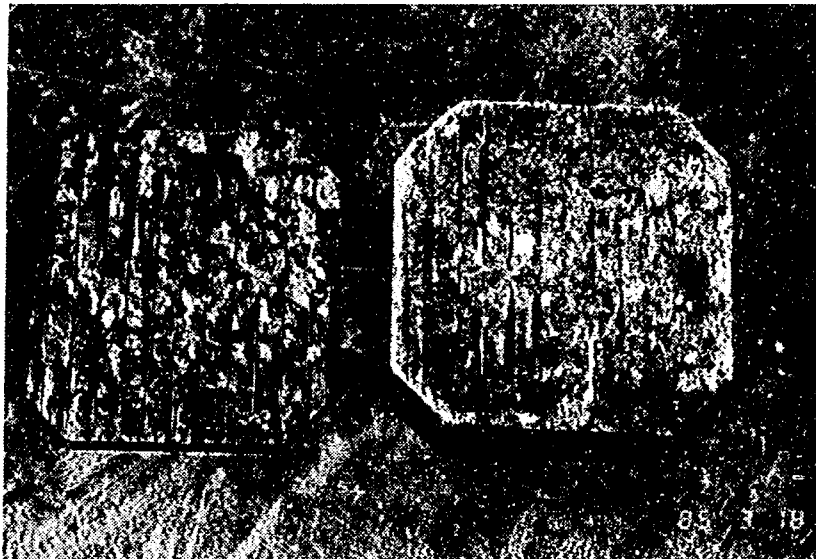
$$\sigma = \frac{W}{A} \dots \dots \text{kg/cm}^2$$



W_{1-1,2} : 剪断荷重
W₂ : 引張荷重
W₃ : 圧縮荷重



(b) 波方向载荷破断状况



(c) 波直角方向载荷破断状况

图3.7.4 剪断试验结果

(4) まとめ

下水汚泥スラグより付加価値の高い資材への適用性をさぐるため、成形及び着色に関する実験を行った。

表3.7.12 他材料との硬度、圧縮強度比較

区 分 \ 項 目	硬 度		圧 縮 強 度
	モー ス	ビッカース kg/cm^2	kg/cm^2
成形板材結晶物	6 ~ 7	813	4500
成形着色板材結晶物	6 ~ 7	807	>3300
砕 石	5 ~ 6	650	—
大 理 石	3	110	730
ミカゲ石	7	1120	1650
が い し	6 ~ 7		3000~4000
陶器(衛生陶器など)	6 ~ 7		2000~3000

- ① 非常に強度の高い、板材（150mm×150mm×100mm）、立方体（40mm×40mm×40mm）やレモン形（長径35mm×短径20mm）が製造できることが確認できた。
- ② 成形板とコンクリートを組み合わせた歩道ブロックは、強度的に十分利用できることが確認できた。下水汚泥スラグは、様々な形態に加工でき、その製品も歩道ブロック、タイル等に使用できることが確認できた。
- ③ 素地から着色については、効果的な方法を見つけることが出来なかった。製造コストと予想される製品価格からみると、現状の処分に要する費用を勘案しても、これらの成形材の製造は、現在においては、下水道事業者にとって魅力ある汚泥スラグの利用方法ではない。

しかし、長期的には、処分に要する費用も今後増大し続けると考えられること、製造技術等の開発による低コストが期待できること、このような成形材は、“下水汚泥”に付きまとうイメージを変える効果があると考えられることなどから、今後もこれら成形材としての利用を検討する必要がある。

さらに、今後は、下水汚泥からでも造れる資材の製造技術の開発から、下水汚泥からしか造れない資材を目指した開発を、積極的に行う必要がある。

(舗装研究室 汚泥研究室 担当)

3.8 下水汚泥スラグ骨材のコンクリート骨材への利用

(1) 研究目的

下水汚泥を土木建築用材料として用いる方法については下水汚泥焼却灰、人工軽量骨材、下水汚泥スラグ骨材等について検討がなされている。ここでは下水汚泥を燃焼し、熔融スラグ化し、これをコンクリート用骨材として利用することを目的として調査研究を行った。

(2) 研究内容

検討項目は、使用可能性の検討、骨材としての品質調査、下水汚泥スラグ骨材を用いたコンクリートの品質調査、下水汚泥スラグ骨材を用いたコンクリートの設計施工指針（案）の作成などである。

(3) 研究成果

1) 下水汚泥の土木構造物への利用可能性の検討

下水汚泥の処理方法のひとつとして、汚泥を燃焼させ、減容する方法がある。この研究では、まずこの減容した灰、あるいはスラグ等を有効に利用する場合に、どのようなかたちで利用するのが合理的かを検討した。

下水汚泥の燃焼灰には CaO 、 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 が80%以上含まれているが、これらの成分はポルトランドセメントや高炉スラグ等と共通の成分である。こうした成分をもつものの有効な利用方法としては、次のようなものが考えられる。

(a) 焼却灰

焼却灰独自での使用は好ましくないが、在来のセメント原料に適量添加して使用することは可能である。

(b) 軽量骨材

焼却灰を適当な方法で造粒及び焼成すると、外部は造殻し、人工軽量骨材と同様のものとなる。

これを粒度調整すれば、一般軽量骨材及び構造用の軽量骨材として利用できる可能性がある。

(c) 熔融スラグ

処理方法によっては天然骨材と同程度の強度を有し、コンクリート用骨材として利用可能である。

このうち現在の土木構造物の現状等を考慮して、汚泥スラグをコンクリート用骨材として用いるのが最も可能性があると考え、以下コンクリート用骨材としての利用に関する調査研究を行うこととした。

2) 汚泥スラグ骨材およびそれを用いたコンクリートの特性

汚泥スラグ骨材は、原料となる下水汚泥の成分、処理方法、熔融方法、破碎方法等によって品質が大きく変動することが考えられる。このため、今回の研究ではいくつかの地域で得られ、異った方法の処理を受けた骨材について、骨材そのものの特性と、それを用いたコンクリートの特性を調査した。

(a) 大阪府の調査結果

大阪府では、汚泥スラグの再利用に関して、舗装関係への利用、コンクリートへの利用などを目的として、一連の試験調査を行ってきた。ここでは、その内の56年度、57年度に行われた水砕スラグ、空冷スラグの物理試験、モルタル試験、コンクリート試験について、その概略を述べることにする。

まず、56年度に行った水砕スラグ細骨材5種類の物理試験の結果、次のようなことが判明した。

- ① 比重はいずれのスラグも山砂に比べて約1割高く、JIS A5012（コンクリート用高炉スラグ細骨材）、JIS A5004（コンクリート用砕砂）、土木学会基準値のすべてを満足している。
- ② 吸水率は、スラグがガラス質であるため、非常に小さい値であり、すべての基準値を満足している。
- ③ 粒度は、そのままでは単粒度となっており、粒度の基準値を満足しない。このため使用にあたっては粒度調整が必要である。

次に、これらを用いたモルタルの強度試験を行った結果を図3.8.1に示す。配合条件は $W/C = 50\%$ 、フロー値 190 ± 5 mmである。この結果から、水砕スラグを用いたモルタルは、山砂を用いたモルタルに比べて、圧縮強度、曲げ強度ともに約6割～7割程度の強度しかないことが判明した。

この原因が、比較に用いた山砂との粒度分布の差によるものではないかとの推測から、山砂を各スラグ砂の粒度に合わせて、強度の比較試験を行った結果を図3.8.2に示す。

この図からも、粒度調整をした場合でも水砕スラグを用いたモルタルは強度が低く、山砂を用いたものに比べて、圧縮強度で約7割、曲げ強度で約8割程度であることがわかった。

このことから推察して、モルタル試験での山砂と比較しての低強度の原因は材料や粒度に起因するよりも、スラグ表面のセメントペーストとの付着が弱いことや、スラグ自体の強度不足等によるものと考えられる。

次に空冷した汚泥スラグを粗骨材とした場合のコンクリートの強度発現についての実験結果を図3.8.3に示す。用いた空冷汚泥スラグ粗骨材は、比重、吸水率、単位容積質量、実積率、すりへり減量等の物理試験の結果では、いずれもすべてコンクリート用碎石の基準値を満足しているものであった。

しかしながら、これを用いたコンクリートの平均の強度発現は、一般碎石を用いた場合の8割程度にしかならなかった。

(b) 大阪市での調査結果

前述の大阪府の調査を同様に大阪市でも、空冷および水砕スラグ細骨材と空冷したスラグ粗骨材を用いたコンクリートの特性を調査している。

骨材の特性に関する試験からは、スラグ細・粗骨材ともに粒形が悪く実積率が低い結果となった。また、スラグ粗骨材ではすりへり減量が大きく、碎石のJIS規格値である40%程度となった。また骨材のアルカリシリカ反応性試験の結果、化学法では空冷スラグは有害域に入ったものの、モルタルバー法ではいずれの骨材も無害と判定されている。

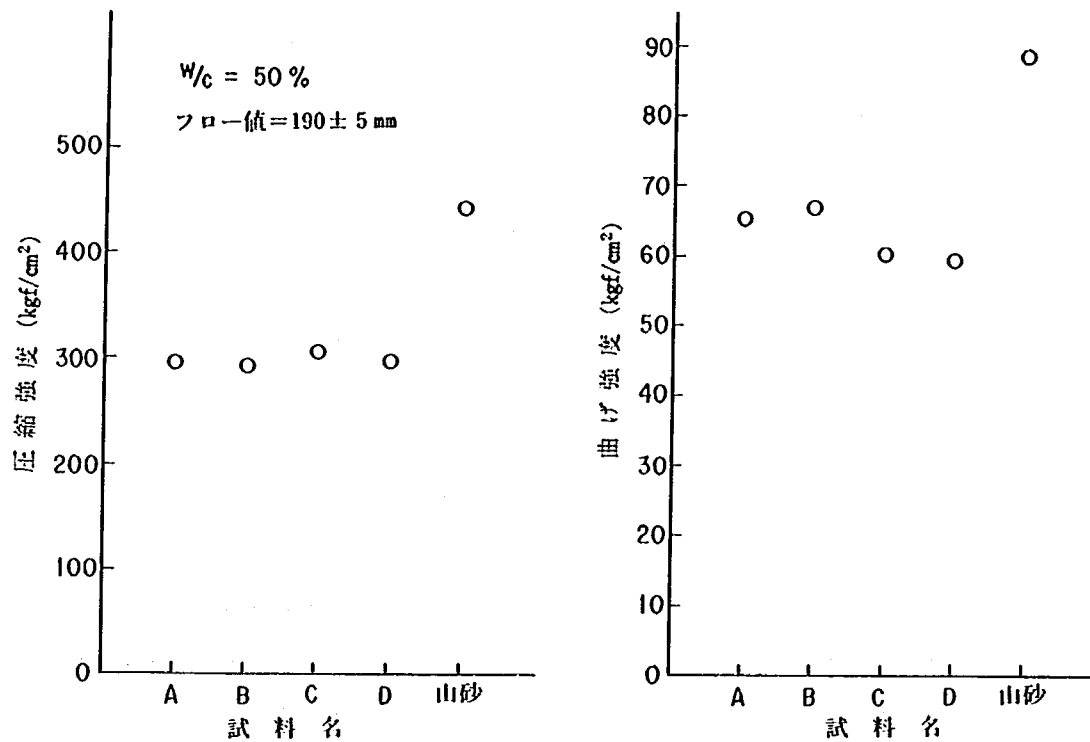


図3.8.1 水冷スラグ砂を用いたモルタルの強度（粒調なし）

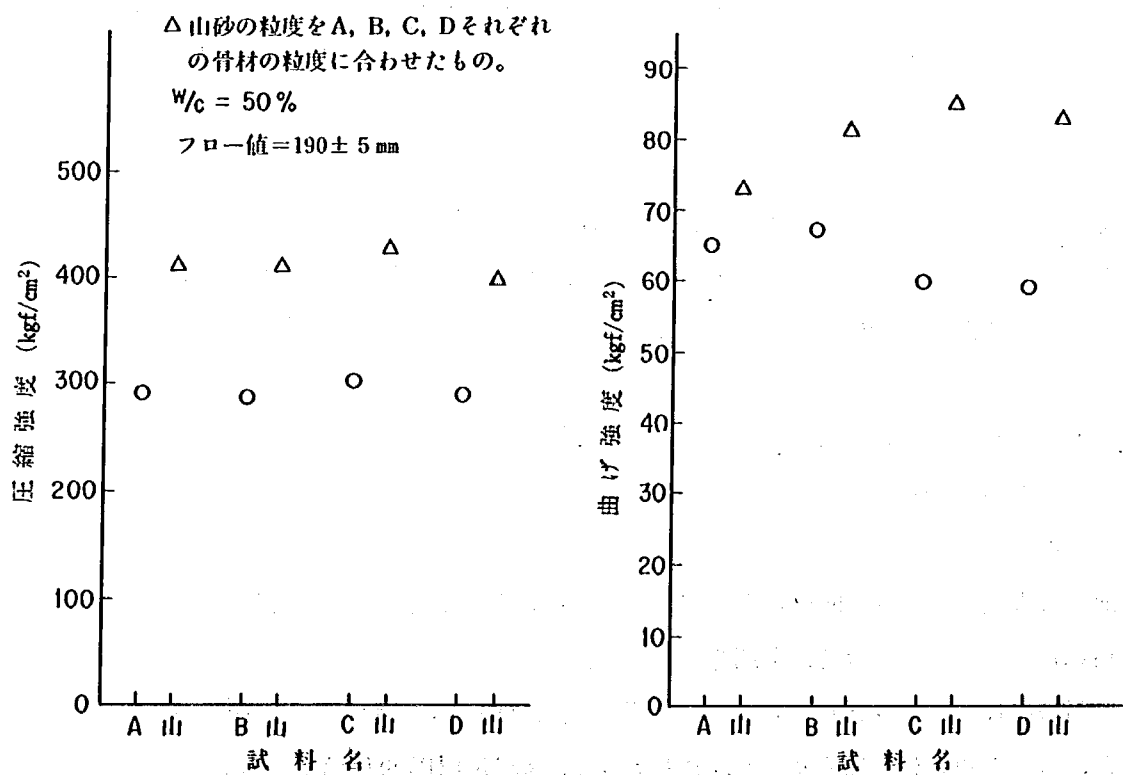


図2.3.29 水冷スラグ砂を用いたモルタルの強度（粒調あり）

配合試験の結果、特にスラグ細骨材を用いると単位水量が大きくなる傾向がみられた。またスラグ細骨材を用いた場合は、比較した川砂を用いた場合に比べ、約2倍あるいはそれ以上のブリージングを生じ、しかもブリージングの速度が非常にはやいことも判明した。

圧縮強度試験の結果、スラグ骨材を用いたコンクリートの圧縮強度は、碎石、川砂を用いた場合に比較して1～19%低下し、スラグ粗骨材を用いた場合の方が低下率が大きかった。

引張強度、曲げ強度および弾性係数と圧縮強度の関係は、通常のコンクリートと同様であった。

乾燥収縮は、スラグ骨材を用いた場合に乾燥初期の収縮は小さいものの、長期の収縮は通常のコンクリートと同程度のものではあった。凍結融解に対する耐久性も特に低下する傾向はみられず、良好であった。

(c) 東京都での調査結果

ここでは、水砕スラグ骨材のガラス質であることによる欠点を低減するために、結晶化処理を行った細骨材を用いたコンクリートを用い、その特性について調査を行った。

用いた骨材は結晶化処理を行わない骨材（以下ガラス質スラグと呼ぶ）、熱処理により結晶化処理を行った骨材（以下結晶スラグと呼ぶ）、および比較用の川砂である。

表3.8.1に細骨材の試験結果を示す。結晶スラグ、ガラス質スラグともに川砂と比較すると、これまで述べてきたスラグと同じような傾向を示す。しかしながら、結晶スラグとガラス質スラグを比較すると吸水率は前者が大きく、骨材破碎値は後者の方が大きいなど異なる点がみられる。

これらを用いたモルタルによる試験の結果、表3.8.2に示すようにガラス質スラグ骨材を用いたモルタルの強度は川砂のそれに比較して約6割程度となっているのに比較して、結晶スラグ骨材を用いた場合には約8割程度まで改善されていることがわかる。

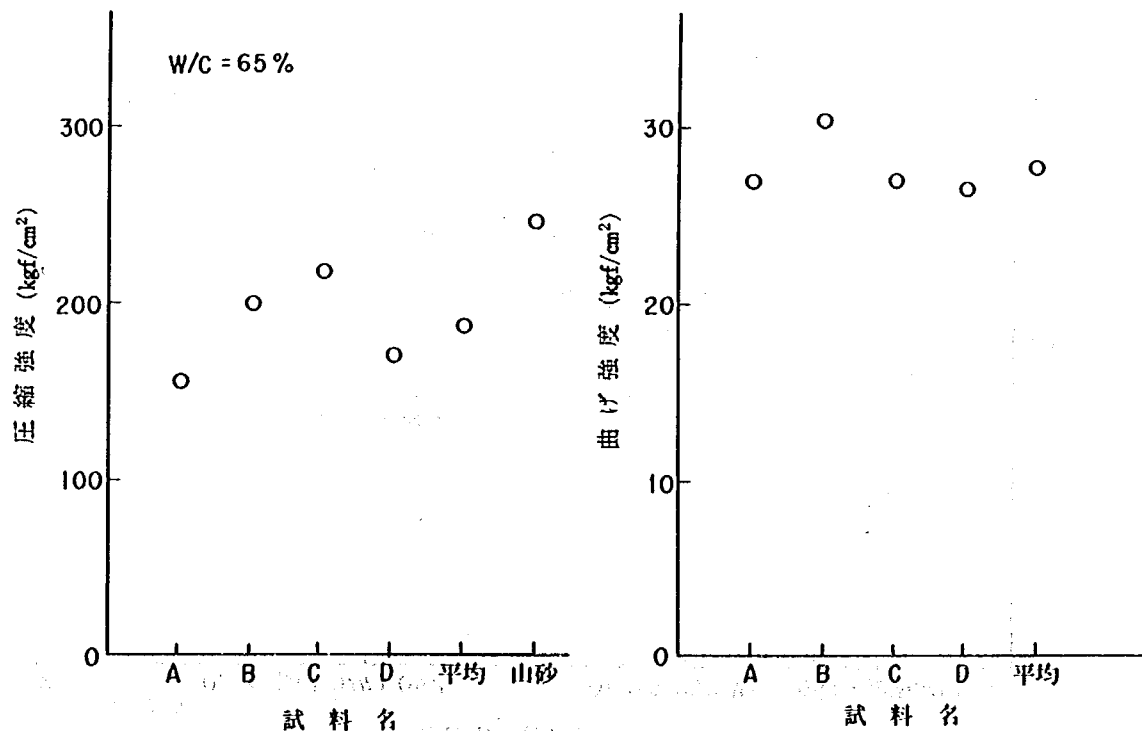


図3.8.3 空冷スラグ粗骨材を用いたコンクリートの強度

表3.8.1 細骨材の試験結果

種 別 試験項目	結 晶 ス ラ グ	ガラス質スラグ	川 砂
表 乾 比 重	2.73	2.79	2.62
絶 乾 比 重	2.67	2.76	2.58
吸 水 率(%)	2.3	1.0	1.4
単位容積重量(kg/m ³)	1416	1466	1715
実 積 率(%)	53.0	53.2	66.1
洗い試験で失われるもの(%)	0.1	0.2	1.4
安定性試験損失重量(%)	2.0	2.6	5.2
骨材破碎値(%)	28.4	37.4	6.8
骨材衝撃値(%)	20.4	27.3	8.1

表3.8.2 モルタルの試験結果

種 別 項 目	配 合 (g)			フロー (mm)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	
	セメント	水	細骨材		材令7日	材令28日
ガラス質スラグ	800	400	2050	192	245	330
結 晶 ス ラ グ	800	400	1550	195	302	414
川 砂	800	400	1520	194	345	517

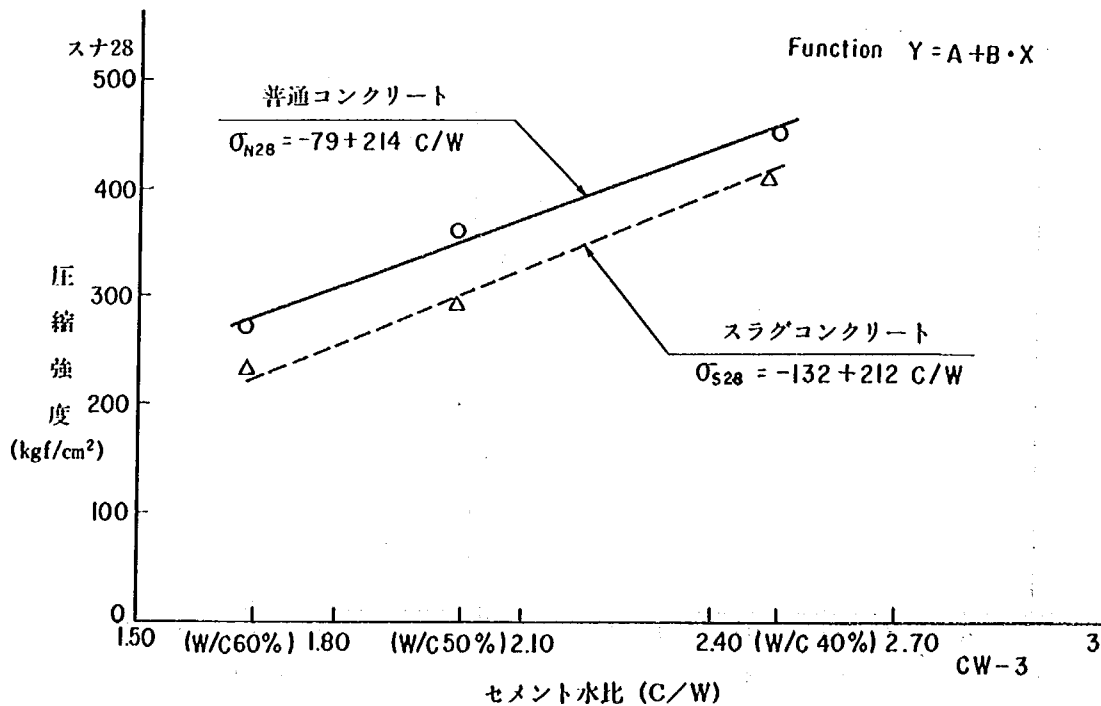


図3.8.4 セメント水比と圧縮強度

結晶スラグ細骨材を用いたコンクリートの配合試験では単位水量は川砂のそれに比較して多少多目になった。コンクリートの強度試験でも図3.8.4に示すように、結晶化の効果はみられるものの川砂に比較して強度が出にくい結果となっている。

(d) 土木研究所の調査結果

溶融スラグ骨材の品質は、成分の他に冷却方法にも大きく支配されることが明らかになったため、コンクリートの現行品質規定を満たすためには、冷却技術の改良も必要と考えられる。このため、冷却方法を変えた数種類の骨材について骨材特性、コンクリート特性を調べ、品質改良効果を明らかにすることを目的とした実験を行った。

表3.8.3 実験に用いた骨材の製造加工方法

骨 材	製 造 ・ 加 工 方 法
スラグ粗骨材 (A)	コークスベッド炉→空冷→破碎
〃 (B)	スラグ粗骨材 A →再熱処理 (1100℃, 40分間)
〃 (C)	コークスベッド炉→空冷→破碎→熱処理 (750℃, 4 時間)
〃 (D)	同 上 (880℃, 4 時間)
スラグ細骨材 (A)	アーク式溶融炉→水砕
〃 (B)	旋回流式溶融炉→水砕→再熱処理 (920℃, 25分間)

実験に用いたスラグ骨材は、粗骨材4種と細骨材2種である。この他に比較用に普通碎石および川砂を用いた。スラグ骨材の製造加工工程を表3.8.3に示す。スラグ粗骨材Aは、空冷したもので、ほぼガラス質のものであると考えられる。スラグ粗骨材Bは、Aと同じものを再熱処理したもので、結晶化が進んでいると考えられる。スラグ粗骨材CとDはA、Bとは別の汚泥から得られたもので、骨材表面が再溶融する温度が約 900℃と比較的低いものであったので、再熱処理温度を 880℃および 750℃としたものである。骨材C、Dについて、X線回折により結晶化の程度を調べた結果、骨材Cはほとんどガラス質であり、骨材Dでも結晶率はそれほど高くなく、バックグラウンドが高く、明確な結晶のピークは得られなかった。(X線回折では結晶した物質では、その物質に応じた何本かのピークをもったX線チャートが得られるが、ガラス質のものではピークのないならかな山状のチャートが得られる。)

これらの骨材の物理試験結果を表3.8.4に示す。スラグ粗骨材AとBを比較すると、再熱処理によって結晶化すると、安定性やすりへり減量が改善されることがわかる。スラグ粗骨材CとDを比較すると熱処理温度の高いスラグ粗骨材Dの方が同様にすりへり減量が改善されており、結晶度が高いと考えられる。

表3.8.4の物性以外に、コンクリートの配合に大きな影響を与えるものとして、粒度および粒形がある。特に、一般にガラス質のぜい性的な骨材では破碎時に鋭角に割れる等して、形が悪くなり、また、適当な粒度分布が得にくくなる傾向がある。汚泥スラグ骨材でも同様のことがいえ、破碎し

表3.8.4 骨材の試験結果

	表 乾 比 重	吸水率 (%)	安定性 (%)	すりへり 減 量 (%)	洗 い 損 失 (%)	単位容 積重量 (kg/ℓ)	実積率 (%)	破砕値 (%)	塩分含 有 量 (%)
スラグ粗骨材A	2.86	0.19	8.5	33.7	0.15	1.72	60.3	27.7	—
スラグ粗骨材B	2.88	0.79	3.9	21.3	0.16	1.69	59.1	18.1	—
スラグ粗骨材C	2.58	0.5	0.49	38.5		1.51	58.7		
スラグ粗骨材D	2.46	1.1	1.08	34.3		1.46	59.7		
普 通 砕 石	2.68	0.6	0.8	10.1	—	1.60	60.0	9.4	—
J I S 5005	2.5以上	3.0以下	12.0以下	40以下	1.0以下				
スラグ細骨材A	2.27	15.05	32.7	—	2.65	1.07	54.2	—	0.059
スラグ細骨材B	2.69	2.4	4.73		0.53				
川 砂	2.60	2.23	5.9	—	1.85	1.59	62.5	—	0.003

たものでは、角ばった形状を持ち、骨材の粒形としては決して良くないものであった。また、水砕した細骨材でも粒形はあまり良くなく、また、図3.8.5に示すように、特に、スラグ細骨材Bでは細粒分の少ない単一粒度に近い粒度分布となっている。このため、単位水量が増えたり、ブリージングの多いフレッシュコンクリートとなることが予想された。

表3.8.5にW/C=50%，スランプ6～9 cm，空気量4.5～6.0%の条件で試験練りの上決定したコンクリートの配合例を示す。

グループIとIIとでは用いたセメント等の条件が異なるため、一律には比較できないが、グループIで見ると、スラグ粗骨材を用いる範囲では単位水量は普通砕石を用いた場合と同じであった。

一方、スラグ細骨材を用いた場合には単位水量が4%ほど増加している。これは先にも述べたが、細骨材の粒形が影響しているものと考えられる。グループIIでも同様にスラグ粗骨材を用いても単位水量に変化がないが、粒度分布の良くなかったスラグ細骨材Bを用

いた場合には単位水量が20%も増加している。こればかりでなく、スラグ細骨材Bを用いた場合には、硬化コンクリートにとって好ましくないエントラップドエアが非常に多く、AE剤を用いなくとも所定の空気量に達したため、AE剤を全く用いていない。このため、凍結融解耐久性を向上させる微細な空気泡が連行されていないと考えられ、凍結融解耐久性の低下が予想された。

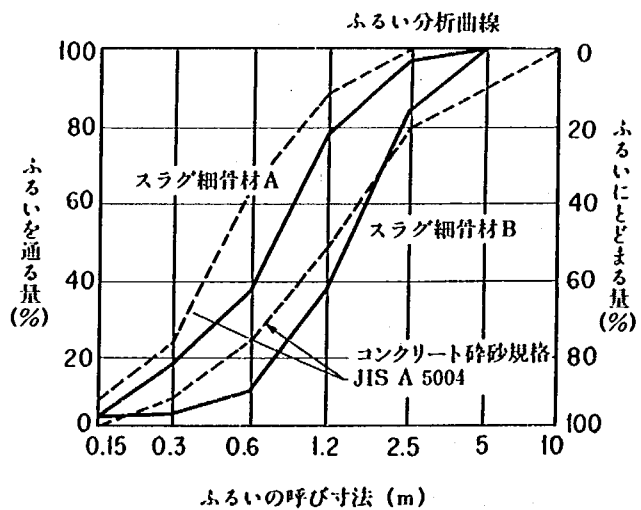


図3.8.5 細骨材（スラグ砕砂）の粒度

表3.8.5 骨材の組合せと試験結果

	配 合	組 合 せ 粗 骨 材：細 骨 材	単 位 量 kg/m^3				圧縮強度 (kgf/cm^2)	曲げ強度 (kgf/cm^2)
			水	セメント	粗 骨 材	細 骨 材		
I	1	普通碎石：川 砂	167	334	1103	689	355	44
	2	スラグA：川 砂	166	332	1161	720	270	37
	3	スラグB：川 砂	167	334	1161	715	370	47
	4	普通碎石：スラグA	174	348	1049	620	289	39
II	5	普通碎石：川 砂	172	344	954	810	428	53
	6	スラグC：川 砂	172	344	925	810	375	46
	7	スラグD：川 砂	172	344	886	810	409	54
	8	普通碎石：スラグB	206	412	792	884	313	54

図3.8.6 に配合1から配合4までの骨材の組み合わせで、水セメント比を変化させた場合の圧縮強度および曲げ強度を示す。空冷したスラグ粗骨材Aを用いた配合2と水砕したスラグ細骨材Aを用いた配合4では、いずれも普通骨材を用いた場合より、かなり低い圧縮強度しか得られていない。これは骨材そのものがぜい性的で、かつ表面がなめらかなためと考えられる。しかし、再熱処理したスラグ粗骨材Bを用いた配合3では、かなり改善されており、普通骨材を用いた場合よりむしろ高い強度が得られている。図3.8.7 に示す曲げ強度についてもほぼ同様の傾向が得られているが、

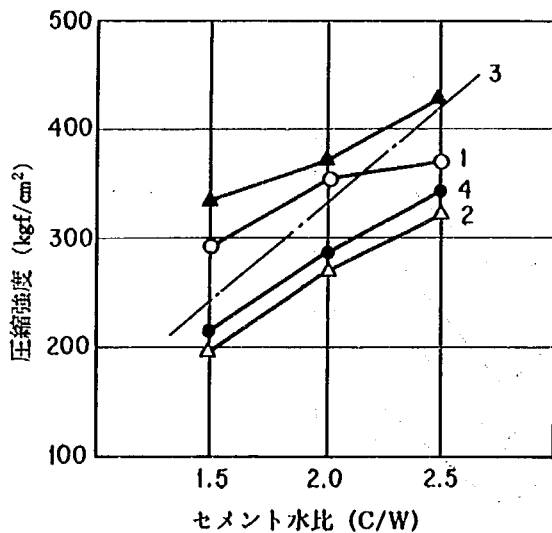


図3.8.6 圧縮強度試験結果

強度推定式 (セメント協会)
 $(\sigma_{c28} = -24 + 178 \cdot C/W)$

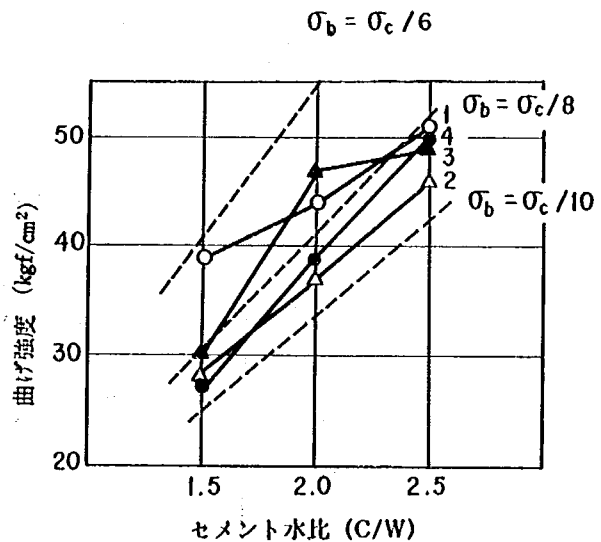


図3.8.7 曲げ強度試験結果

配合3ではセメント水比の小さいところで曲げ強度が低い値となっているが、この原因は不明である。

図3.8.8, 3.8.9, 3.8.10に配合5から配合8までの圧縮および曲げ強度試験結果、動弾性係数の試験結果を示す。圧縮強度については、汚泥スラグ水砕砂Bを用いた場合が最も強度発現がわるく、汚泥スラグ粗骨材Cを用いた場合でも天然骨材に比べて2割程度低い強度になっている。しかし、

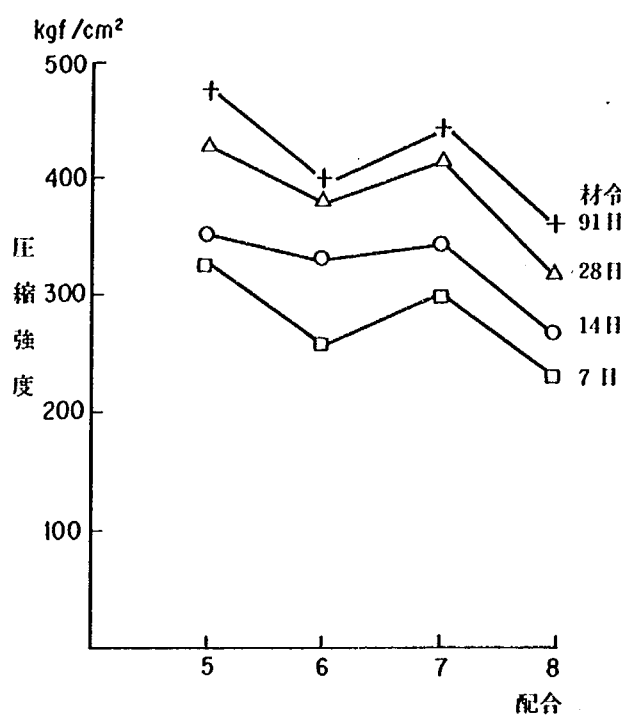


図3.8.8 配合ごとの圧縮強度

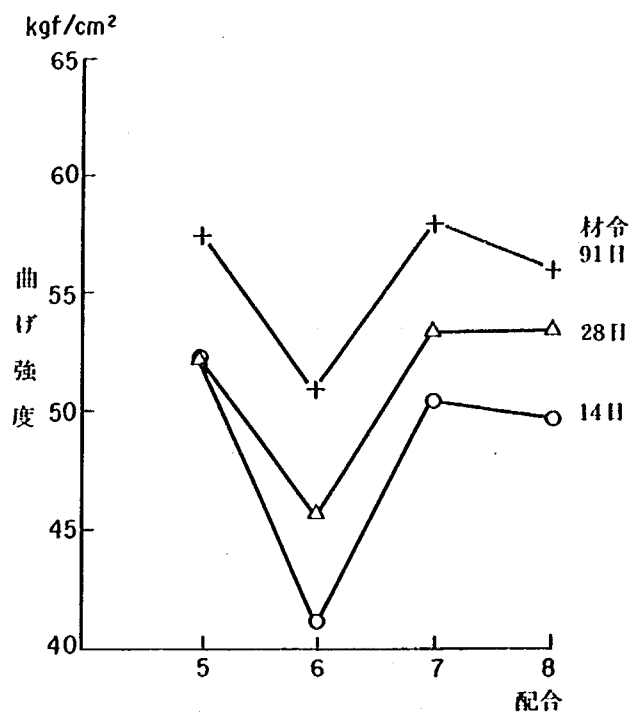


図3.8.9 配合ごとの曲げ強度

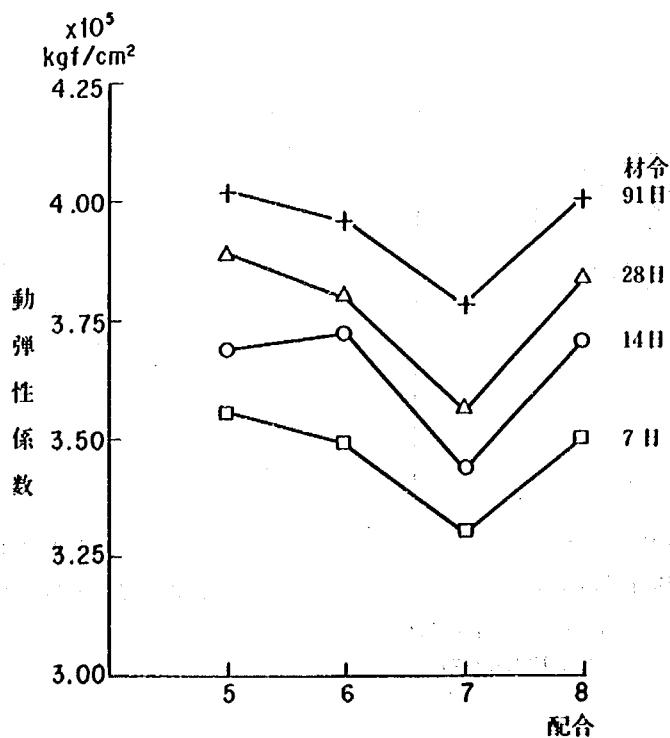


図3.8.10 配合ごとの動弾性係数

汚泥スラグ粗骨材Dでは熱処理の効果がかなり明確に出ており、天然骨材を用いたものより、わずかに低いただけとなっている。曲げ強度についてみると、圧縮強度と傾向が異なり、配合6で最も強度が低くなっている。配合7、8については、配合5とほとんどかわらないものになっている。配合6の曲げ供試体の破面を観察したところ、粗骨材表面で付着破壊をしている部分が多く、低強度の原因は骨材のガラス質の滑かな表面の特性によるものと考えられる。

動弾性係数については、配合5、6、8はほとんど同じ結果になったが、配合7のみが低いものとなっている。しかし、配合5に比較しても低下率は10%にも満たず、実用上は問題ないものと考えられる。

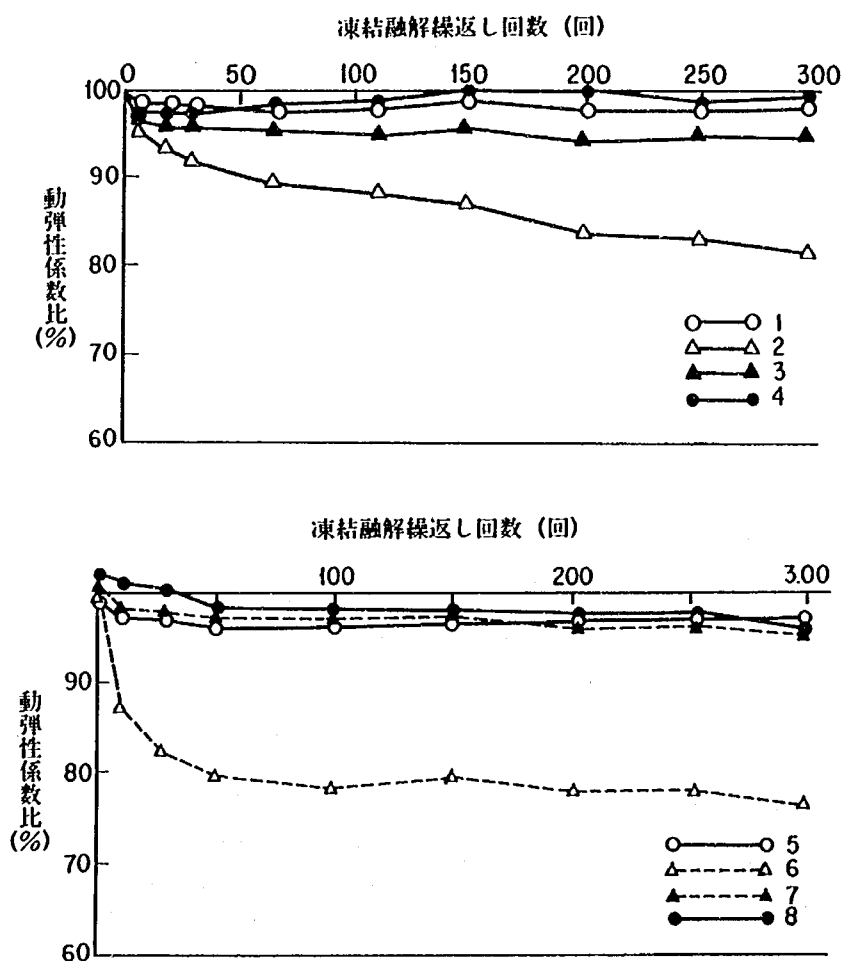


図3.8.11 凍結融解試験結果

図3.8.11に各配合のコンクリートの凍結融解耐久性試験結果を示す。グループI、IIともに細骨材に汚泥スラグ骨材を用いた場合には、凍結融解耐久性の低下はほとんど見られず、川砂を用いた場合とほぼ同じ傾向を示している。また結晶化させた汚泥スラグ骨材を用いた場合にも、十分凍結融解耐久性があるといえる。しかし、粗骨材に汚泥スラグ骨材AとCという結晶化していない骨材を用いた場合には凍結融解耐久性の低下がみられる。しかしながら、低下の程度は小さく、実用上は問題にならない程度であろう。

ここで配合2と6の凍結融解耐久性指数の低下パターンについてみると、一般の耐久性の劣る天

然骨材を試験した場合のパターンと異なる点がみられる。すなわち、後者のパターンは、ある凍結融解繰返し回数から劣化が始まると、コンクリートの内部の構造がゆるむため、加速度的に劣化が進行することが多い(図3.8.12)。ところが、特に配合6では、約50サイクルから劣化が停止して

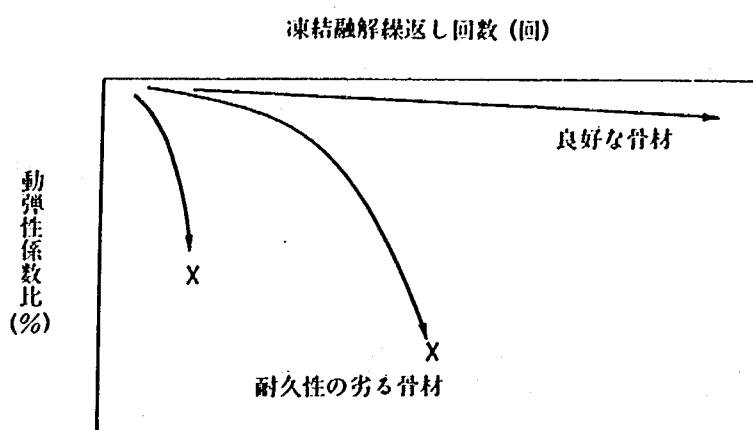


図3.8.12 一般的骨材の耐久性劣化傾向の模式図

いるようであり、こうしたパターンは一般の骨材にはあまり見られないものである。この原因については今のところよくわからない。

汚泥スラグ粗骨材C、Dおよび汚泥スラグ細骨材Bについては、骨材のアルカリ反応性を試験するために、「骨材のアルカリ反応性試験—化学法—建設省暫定案」を行った。この結果、これらの汚泥スラグ骨材はアルカリ骨材反応性に関しては無害であると判定された。

(e) 下水汚泥スラグ骨材を用いたコンクリートの設計施工指針(案)の作成

下水汚泥スラグ骨材の品質やそれを用いたコンクリートの品質の検討をもとに、下水汚泥スラグ骨材を用いたコンクリートの設計施工指針(案)を作成した。目次および特に留意すべき条項を以下に示す。

まず、目次を右に示す。1条の適用の範囲の中で、下水汚泥スラグ骨材は実構造物での使用事例が少ないことを考慮して、当面用いるコンクリートは下水道施設に用いるものに限る、資料を蓄積して行くこととした。また、始めは比較的低強度のコンクリートから用いることを推奨している。

2条では、冷却方法等により、呼び方の異なる骨材について詳細に説明を加えた。

3条および7条では、下水汚泥スラグの一般的性質から、溶融冷却処理方法により骨材

目 次	
1章	総 則
1条	適用の範囲
2条	定 義
2章	下水汚泥スラグ骨材
3条	総 則
4条	下水汚泥スラグ骨材の品質
5条	粒 度
6条	有害物含有量
3章	下水汚泥スラグ骨材の製造
7条	下水汚泥スラグ骨材の製造
4章	下水汚泥スラグ骨材を用いたコンクリートの品質
8条	下水汚泥スラグ骨材を用いたコンクリートの品質
5章	下水汚泥スラグ骨材の取扱い
9条	下水汚泥スラグ骨材の運搬および貯蔵
6章	配 合
10条	総 則
11条	A Eコンクリートの空気量
7章	練混ぜ、運搬、打込みおよび養生
12条	総 則
8章	品質管理および検査
13条	総 則
9章	設計計算における一般事項
14条	総 則

としての物質がどう変化するか、またどのような手法を用いれば、良質の骨材が得られるか等を解説した。さらに、骨材の規格値については4条、6条で次のように規定した。

4条 下水汚泥スラグ骨材の品質

(1) 下水汚泥スラグ骨材は、表－1の品質を満足するものでなければならない。

表－1 下水汚泥スラグ骨材の品質

種別 項目	下水汚泥スラグ細骨材	下水汚泥スラグ粗骨材
吸水率	3%以下	3%以下
安定性	10%以下	12%以下
実積率	53%以上	55%以上

なお、吸水率試験は粗骨材については JIS A 1110、細骨材については JIS A 1109、安定性試験は JIS A 1122、実積試験は JIS A 1104 に準ずるものとする。

(2) すりへりを受ける部材に用いる下水汚泥骨材のすりへり減量は40%以下でなければならない。
すりへり試験は JIS A 1121 による。

(3) 化学的あるいは物理的不安定な下水汚泥スラグ骨材は、これを用いてはならない。ただし、その使用条件等により、試験結果等から有害な影響をもたらさないものであると認められた場合には、これを用いてもよい。

6条 有害物質含有量の限度

(1) 洗い試験で失われるものの限度は、表－3の値とする。

表－3 有害物の含有量の限度

種別		下水汚泥スラグ細骨材	下水汚泥スラグ粗骨材
条件			
洗い試験で失われるもの	コンクリートの表面がすりへり作用を受けるもの	5%以下	1%以下
	その他の場合	7%以下	1%以下

(2) その他の有害物の含有量については、責任技術者の指示を受けなければならない。

(4) まとめ

以上の調査研究の結果、下水汚泥スラグは再生処理次第でコンクリート用骨材として十分に活用できることが判明した。今後より良質な骨材を経済的に生産できる手法の開発と、実際のコンクリートでの使用実績の蓄積を行っていく必要があると考えられる。

(コンクリート研究室、担当)

汚泥スラグ骨材を用いたコンクリートの 設計施工指針（案）

目 次

1 章 総 則

1 条 適用の範囲

2 条 定 義

2 章 汚泥スラグ骨材

3 条 総 則

4 条 汚泥スラグ骨材の品質

5 条 粒 度

6 条 有害物含水量

3 章 汚泥スラグ骨材の製造

7 条 汚泥スラグ骨材の製造

4 章 汚泥スラグ骨材を用いたコンクリートの品質

8 条 汚泥スラグ骨材を用いたコンクリートの品質

5 章 汚泥スラグ骨材の取扱い

9 条 汚泥スラグ骨材の運搬および貯蔵

6 章 配 合

10 条 総 則

11 条 A E コンクリートの空気量

7 章 練り混ぜ、運搬、打ち込みおよび養生

12 条 総 則

8 章 品質管理および検査

13 条 総 則

9 章 設計計算における一般事項

14 条 総 則

100

1 章 総 則

1 条 適用の範囲

- (1) この指針は、汚泥スラグ骨材を用いる無筋および鉄筋コンクリート構造物の設計および施工についての基準を示すものである。この指針に示されていない事項は、土木学会コンクリート標準示方書によるものとする。
- (2) この指針は下水道施設に用いる無筋および鉄筋コンクリートについて定めるものとし、他の構造物については諸条件を加味したうえでこの指針を準用するものとする。

1 条 解説

この指針は、汚泥スラグ骨材を下水道施設等の土木構造物のコンクリートに使用する場合を対象として定めたものである。

現在、我国では下水道の整備普及とともに汚泥の発生量は年々増加している。こうした汚泥は昨今の社会情勢から減量化、資源化が求められている。資源化の手法としては汚泥をコンポスト化するなどして緑農地へ肥料として用いる方法と、汚泥脱水ケーキを直接あるいは灰にした後に焼成して造った汚泥スラグを土木建築材料として活用する方法の2つが有望視されている。

汚泥スラグを土木建築用材料として用いる方法については焼却灰、人工軽量骨材、汚泥スラグ等について既に地道な研究が積重ねられて来っており、最近では汚泥スラグを用いて比較的良質なコンクリートを作るための手法についてもその実用化の目途がつく段階に至っている。この指針は、廃棄物処理問題の解消と資源の有効利用の早期実現のために作成したものであるが、以下に述べる観点から、当面、下水道施設内で使用されるコンクリートを中心として汚泥スラグを骨材に用いる場合の設計施工法の基準を示すものである。

一般に汚泥スラグは原料となる汚泥の特性および溶融、冷却、処理方式により、コンクリート資材としての特性に大きな差を生じる。特に、熱処理が骨材としての特性に与える影響は大きく、このため良質の骨材を得るためにはかなり大きな経費を要する。しかし、汚泥スラグ骨材の使用はその単価のみでなく、前述した社会的要請をも考慮した総合的な判断に基づいて決定するのが望ましい。

この指針では、適用されるコンクリートは無筋コンクリートおよび鉄筋コンクリートを対象としている。しかしながら、汚泥スラグ骨材を用いたコンクリートについては使用実績がないこと、長期の安定性について十分には検討されていないこと、鉄筋コンクリート構造物での試験施工例がほとんどないこと等を考慮して、当面、現場打ちの無筋コンクリートでは設計基準強度が $160\text{kgf}/\text{cm}^2$ 以下、鉄筋コンクリートでは設計基準強度が $210\text{kgf}/\text{cm}^2$ 以下の比較的低強度のもの、あるいは、取換え可能な工場製品等から試験施工的に使用し、実績を蓄積していくことが望ましい。なお、安定した供給体制が確立していないことから、当初は主として下水道施設内で使用されることを想定している。供給体制が整い、品質の安定した骨材が十分に流通するようになり、また、コンクリートの品質に関する資料の蓄積が行なわ

れば、より広い範囲の強度範囲や対象構造物等で応用されるべく検討するのが適切である。

2 条 定 義

この指針に用いる用語を次のように定義する。

汚泥スラグ骨材：下水汚泥に含まれる無機物を燃焼させ、溶融炉で融解したスラグ溶液を冷却・凝固させ、必要に応じて破碎・ふるい分けを行ったコンクリート骨材。

水砕汚泥スラグ骨材：溶融状態のスラグを水で急速に冷却した汚泥スラグ骨材。細骨材として利用される。非品質でガラス状。

空冷汚泥スラグ骨材：溶融状態のスラグを大気中に放置して冷却し、破碎工程等を経た汚泥スラグ骨材。主に粗骨材として利用される。非品質でガラス状。

結晶汚泥スラグ骨材：非品質でガラス状の汚泥スラグの結晶化の度合いを高めた汚泥スラグ骨材。

2 条 解 説

汚泥スラグ骨材について

下水汚泥を 1,300～1,500℃に熱すると、汚泥中の有機物は、熱分解、焼却し、残りの無機物は融解する。この融液を冷却・凝固させたものが、汚泥スラグ骨材である。以下に述べるように、その冷却方法または、結晶化工程の有無によって、その形状や強度は大きく異なるものが製造される。

汚泥スラグ骨材は、汚泥中の成分比、溶融炉の形式・運転条件によっても、その特性は変化する。

水砕汚泥スラグ骨材について

溶融炉から排出される融液に、水を噴射したり、融液を水中に落下させたりして急速に冷却し製造するものである。急速に冷却されるので細粒状かつ、非品質な汚泥スラグとなり、コンクリート細骨材として利用される。

その形状は、スラグ温度、水量、水圧などの製造条件によって異なる。

水で急冷するところから、急冷汚泥スラグということもある。

コンクリート骨材に利用するにあたっては、水冷方法によっては細粒分が不足気味となるので粒度調整が必要となることがある。

空冷汚泥スラグ骨材について

溶融炉から排出される融液を、空気中に放置することによって、冷却製造するものである。徐々に冷却されるため、塊状となる。

高炉スラグの場合は、空気中で冷却すると、結晶化の進んだスラグとなる。しかし、汚泥の溶融スラグの場合、現状では融液の量が非常に少なく、結晶化に必要な冷却速度（3℃/minより遅いこと）より、急速に冷却してしまうため、結晶化の度合いの低い非品質のスラグとなる。

コンクリート用粗骨材としては、この塊状のスラグを破碎機により破碎して、粒度調整する。

結晶汚泥スラグ骨材について

水砕スラグ、空冷スラグは非品質でガラス状のため、表面は平滑で、強度も不十分な場合がある。こ

これらの問題は、これらの非品質のスラグを結晶化することによって解決される。結晶化を進めたスラグを結晶汚泥スラグ骨材という。

結晶化方法には、大きく分けて、①結晶化至適の一定温度に一定時間保つ方法（例えば 1,100～1,150℃、30分間）と②冷却速度を制御し、それによって結晶化に必要な温度と時間を確保する方法がある。

結晶化の度合いは、X線回折で調べることができる。また、その数量的な表現としてはピークの大きさの和を用いる方法が提案されている。

2 章 汚泥スラグ骨材

3 条 総 則

汚泥スラグ骨材は、それを用いたコンクリートに所要の品質が得られるものでなければならない。また、コンクリートの品質に悪影響を及ぼす物質の有害量を含まず、品質のばらつきの少ないものでなければならない。

3 条 解説

下水汚泥が高温で溶融することは汚泥焼却が開始された昭和40年代前半に知られていた。汚泥の溶融処理は焼却処理より大幅に減容できることや、溶融物が骨材として利用できる可能性があるためここ数年積極的な調査研究が行なわれている。

汚泥スラグの主成分は SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 CaO が70～80%を占めており、この他に MgO 、 K_2O 、 Na_2O その他の微量成分が含まれている。有機物は焼却・溶融の段階ですべて消失している。これら無機物は1,000℃程度で軟化し、1,300～1,500℃で溶融状態となる。スラグの化学成分により、この温度はかなりの幅があり一般に CaO の石灰分が多いと溶融温度は高く、粘性は下がる傾向にあり、逆に SiO_2 や Na_2O 、 K_2O が多いと溶融温度が低く粘性が高くなる傾向にあるが、これだけでなく他の成分等の条件により熱的性質は複雑に変化する。このような条件があるため、溶融炉より取り出し易いように粘性を下げるために、実務的な溶融温度条件を見つけ出すことが重要となる。化学成分は、熱的性質の他にも骨材としての性質にも影響する。

この他、溶融後の冷却条件はスラグの骨材としての性質に大きく影響し、急冷するとガラス状となり骨材そのものがぜい性的となり、またセメントペーストとの付着がよくないためコンクリートの圧縮強度、曲げ強度、耐凍結融解耐久性等を低下させる原因となる。前述のような方法により結晶化を進めると、全体的には骨材としての性質は向上する。

重金属等の溶出についてはスラグを溶融しさえすれば法令（注）にもとづく溶出試験や強酸および弱アルカリ下での溶出は認められない。ただし、含有量の比較的多い鉄については完全還元状態での溶融方法で得られたガラス状スラグの場合、スラグ表面に鉄の微粒子が露出しこれが酸化されることにより骨材表面に赤さびを生ずることがある。

(注) 準用する法令

・判定基準：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48. 2.17. 総令・5）

・検定方法：産業廃棄物に含まれる金属等の検討方法（昭和48. 2.17 環告・13）

4 条 汚泥スラグ骨材の品質

(1) 汚泥スラグ骨材は、表－1 の品質を満足するものでなければならない。

表－1 汚泥スラグ骨材の品質

種別 項目	汚泥スラグ細骨材	汚泥スラグ粗骨材
吸 水 率	3%以下	3%以下
安 定 性	10%以下	12%以下
実 積 率	53%以上	55%以上

なお、吸水率試験は粗骨材については JIS A 1110、細骨材については JIS A 1109、安定性試験は JIS A 1122、実績試験は JIS A 1104 に準ずるものとする。

(2) すりへりを受ける部材に用いる汚泥スラグ骨材のすりへり減量は40%以下でなければならない。
すりへり試験は JIS A 1121 による。

(3) 化学的あるいは物理的に不安定な汚泥スラグ骨材は、これを用いてはならない。ただし、その使用条件等により、試験結果等から有害な影響をもたらさないものであると認められた場合には、これを用いてもよい。

4 条 解説

汚泥スラグ骨材は溶融冷却後、破碎されて骨材とされ、必要に応じて結晶化の熱処理等が行なわれる。

一般には、汚泥スラグ骨材は硬質であるが、処理の過程でポーラスになる場合がある。このため過度にポーラスになったものを除くために吸水率、安定性を表－1 のように定めた。また破碎処理の際に破碎が適切でないと、粒形が悪く、扁平なもの等が発生し、フレッシュコンクリートのワーカビリティに悪影響を及ぼす可能性がある。このため、骨材の実積率を表－1 のように定めた。

骨材の化学的安定性に関する事項として、アルカリ骨材反応がある。汚泥スラグ骨材はコンクリートに用いた実績も少いので、アルカリ骨材反応を生じた事例もない。ただし、すべての骨材が無害であるという保証もないので、重要なコンクリート構造物に汚泥スラグ骨材を用いる場合には、アルカリ骨材反応に対して無害であることを試験によって確認するか、あるいはアルカリ骨材反応の抑制対策を講じて使用しなければならない。対策としては次のようなものである。

① 骨材のアルカリシリカ反応性試験化学法あるいはモルタルバー法で無害と認められた骨材のみを用いる。

② セメントに JIS R 6501 ポルトランドセメントに示される低アルカリ形セメントを使用する。

③ セメントに JIS R 5211 高炉セメントに適合する高炉セメント（B種またはC種）、もしくは混和

材を混合したセメントでアルカリ骨材反応抑制効果の確められたものを用いる。

- ④ コンクリート中の 1 m³に含まれる総アルカリ量を Na₂O 換算で 3.0kg 以下にする。

5 条 粒 度

- (1) 汚泥スラグ骨材の粒度は表-2 の範囲を標準とする。

表-2 汚泥スラグ骨材の粒度範囲

ふるいの呼び寸法 (mm) 骨付の大きさ (mm)	ふるいを通るものの重量百分率															
	100	80	60	50	40	30	25	20	15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15
粗骨材	25 - 5	—	—	—	—	100	95-100	—	30-70	—	0-10	0-5				
	20 - 5	—	—	—	—	—	100	90-100	—	20-55	0-10	0-5				
	15 - 5	—	—	—	—	—	—	100	90-100	40-70	0-15	0-5				
	10 - 5	—	—	—	—	—	—	—	100	85-100	0-40	0-10				
細骨材	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100	90-100	80-100	50-90	25-65	10-35	2-10

ふるい分け試験は、JIS A 1102によるものとする。

- (2) 汚泥スラグ細骨材の粗粒率の変動は、コンクリートの配合を定めるときに用いた粗粒率に比べて、0.20以上変動してはならない。

5 条 解説

- (1) 汚泥スラグ骨材の粒度については普通骨材と基本的には同様と考えてよい。汚泥スラグ骨材は粒度が単一粒度となりやすいことから、一般の骨材等と混合して用いることも考えられるが、この場合も混合した骨材全体の粒度は表-2 に示す範囲のものであればよい。
- (2) 汚泥スラグ骨材の場合も粒度の変動は小さくするようにしなければならない。しかし、粒度の変動が大きくコンクリートの配合を決めるときに用いた骨材に比べて、粗粒率が細骨材で0.20以上変動した場合には一般の骨材を用いたときと同様、コンクリートのワーカビリティが変動するので配合を改めなければならない。

6 条 有害物質含有量の限度

- (1) 洗い試験で失われるものの限度は、表-3 の値とする。

表-3 有害物の含有量の限度

		汚泥スラグ細骨材	汚泥スラグ粗骨材
洗い試験で失われるもの	コンクリートの表面がすりへり作用を受けるもの	5 %以下	1 %以下
	その他の場合	7 %以下	1 %以下

- (2) その他の有害物の含有物については、責任技術者の指示を受けなければならない。

6 条 解説

コンクリートの品質に悪影響を及ぼす汚泥スラグ骨材の有害物として考えられるのは破砕の際に生じる微粉末が主なものである。微粉末そのものは、一般骨材を洗い試験した場合に失なわれる粘土、シルト等と異なり、コンクリートの品質に重大な影響を及ぼすものではなく、有効利用の立場からは可能な限り使用するのが望ましい。このため、碎石、砕砂の基準と同様の扱いとした。

この他に汚泥スラグ骨材中の鉄分がコンクリートの表面を汚す可能性も考えられるため、特に美観を要求される場合には検討を要する場合があるが、コンクリートの物理的特性には影響はないと考えてよい。

汚泥スラグ骨材の化学分析結果の判断や、微量成分等による影響等についての判断は責任技術者によることとした。

3 章 汚泥スラグ骨材の製造

1 条 汚泥スラグ骨材の製造

汚泥スラグ骨材は、所要の品質を有する汚泥スラグ骨材が得られるような装置を用いて製造する。

7 条 解説

汚泥スラグ骨材の製造において、その品質に関与する項目は次の3つである。

① 汚泥の無機成分組成、とくに塩基度 (CaO/SiO_2 の比)

これが大きく影響するものとして、次の2つが考えられる。

a. 溶融温度や溶融炉内温度は、汚泥が十分に融解し、かつ融液を炉からスムーズに排除できるよう融液の粘性を下げ、流動性を確保する範囲のものが選ばれる。汚泥を融解する温度は幅があり、その温度の違いによって、エネルギー消費や炉部材の消耗が異なるので溶融温度は低いほど望ましい。溶融温度は、組成によって異なり、とくに大きな影響を与えるのが塩基度である。各種の報告によると、溶融温度の低減の観点からは塩基度の適性範囲は 0.6～1.3 であり、塩基度がこの範囲になり汚泥は、シリカ分や石灰分を添加し、この範囲になるよう成分調整を行なうことが提案されている。

b. 結晶化の難易——③結晶化の b. 参照

② 溶融設備の方式

現在までに開発されている溶融炉を解表-1 に示す。汚泥スラグ骨材の品質に影響する要因としては、a. 溶融雰囲気—還元雰囲気または酸化雰囲気の違い、b. 溶融スラグ中のガスの保持量がある。前者は、3 条解説でも述べたように、骨材表面の赤サビ量への影響や成分化合物（酸化物か還元物か）の違いによる強度への影響が考えられ、後者は、スラグ骨材中の空隙の多少による強度への影響が考えられる。

③ 結晶化

3条解説にも示したように、汚泥スラグのコンクリート用骨材としての性質は、スラグの結晶状態に大きく依存し、結晶化したもののほうが品質がよい。結晶化には、先にも述べたように、2つの方法が提案されているが、基本的には汚泥スラグを結晶化至適温度に、必要時間保持することである。

a. 結晶化至適温度に保持する方法——いったん固化したスラグを再び結晶化至適温度に一定時間保持（例えば、1,100～1,150℃、30分間）することにより結晶化する方法。

b. 冷却速度を制御する方法——溶融炉から排出された融液を保温容器に受け、結晶化至適温度範囲内を一定の冷却速度（例えば、3℃/min以下）で冷却させることにより結晶化を進める方法。ただし、塩基度によって至適冷却速度が異なる。

なお、結晶化に要するエネルギー源として、溶融時の廃熱が利用できる。

結晶化スラグの品質改善の例を解表－2に示す。

解表－1 溶融プロセスの概要

プロセス名	溶融方式・対象汚泥	稼動場所
1. アーク式溶融炉	炉内にある炭素棒電極と炉底にあるベースメタルに通電し、アーク放電によって発生する熱で溶融する。 溶融対象：乾燥汚泥または焼却灰	川崎市加瀬処理場 (乾燥汚泥)
2. コークスベット型溶融炉	乾燥汚泥とコークスを交互に炉内に投入し通気性の確保とエネルギーの供給を行い溶融する。 溶融対象：乾燥汚泥、焼却灰	大阪府安威川流域 下水道
3. 旋回流焼却溶融炉	円筒状の炉の外周にそった旋回流を汚泥と空気で作成させ、炉内滞留時間を長くとり、完全燃焼させ溶融する。 溶融対象：乾燥汚泥	—
4. 表面溶融回転炉	乾燥汚泥を炉芯に対し、ドーナツ型に配置し、着火すると炉内上部の壁が加熱されて一種の反射炉を形成し溶融する。 溶融対象：乾燥汚泥	富山県小矢部川流域 下水道(建設中)

解表-2(1) 結晶化によるスラグ物性の改良例

圧縮強度

単位kg/cm²

区分 熱処理温度 サンプル	ガラス状スラグ	熱処理スラグ (結晶化スラグ)				サンプルの CaO, SiO ₂ 組成の条件
	熱処理なし	1,050℃	1,100℃	1,150℃	1,200℃	
A	1,440	2,600	3,400	3,580	790	CaO/SiO ₂ 1.04
B	1,670	3,400	4,700	4,800	990	" 0.86
C	1,570	3,700	4,570	4,690	1,000	" 0.93

抗折強度

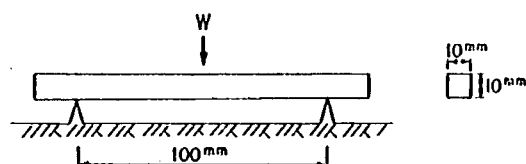
単位kg/cm²

区分 熱処理温度 サンプル	ガラス状スラグ	熱処理スラグ (結晶化スラグ)				サンプルの CaO, SiO ₂ 組成の条件
	熱処理なし	1,050℃	1,100℃	1,150℃	1,200℃	
A	820	980	1,120	1,270	520	CaO/SiO ₂ 前表に同じ
B	890	1,640	1,820	1,900	640	"
C	880	1,620	1,800	1,820	620	"

(備考) 抗折強度試験は、ミハレス抗折試験機を用いて下記の試験方法で実施した。

テストピース 10mm×10mm×120L (切り出しサンプル)

支持スパン 100mm



マイクロビッカース硬度

単位kg/cm²

区分 熱処理温度 サンプル	ガラス状スラグ	熱処理スラグ (結晶化スラグ)				サンプルの CaO, SiO ₂ 組成の条件
	熱処理なし	1,050℃	1,100℃	1,150℃	1,200℃	
A	640	806	855	828	703	CaO/SiO ₂ 前表に同じ
B	662	785	940	905	746	"
C	648	765	930	890	732	"

熱膨張

区 分		軟化点(℃)	熱膨張係数 (1/d)	備 考
A	ガラス状スラグ	750	10.2×10^{-6}	(1) 結晶化の熱処理温度と時間 (1,150℃, 30分) (2) サンプルのCaO, SiO ₂ 組成 の条件は、前表に同じ
	結晶化スラグ	1,130	10.2×10^{-6}	
B	ガラス状スラグ	750	9.1×10^{-6}	
	結晶化スラグ	1,090	9.5×10^{-6}	
C	ガラス状スラグ	750	9.5×10^{-6}	
	結晶化スラグ	1,100	10.0×10^{-6}	

解表-2(2) 結晶化によるスラグ物性の改良例
化岩石との物理特性比較

項目 サンプル	比重	硬 度		圧縮強度 (kg/cm ²)	備 考
		モース	マイクロビッカース (kg/cm ²)		
熱処理スラグ A	3.14	6 ~ 7	828	3,580	サンプルのCaO, SiO ₂ 組成の条件及び熱処理条件は前表に同じ。
〃 C	3.06	6 ~ 7	890	4,690	
砕 石	2.62	5 ~ 6	650	—	
大 理 石	2.64	3	110	730	
ミ カ ゲ 石	2.60	7	1,120	1,650	

4 章 汚泥スラグ骨材コンクリートの品質

8 条 汚泥スラグ骨材コンクリートの品質

- (1) 汚泥スラグ骨材コンクリートは、所要の強度、耐久性、水密性、作業に適するワーカビリティ等をもち、品質のばらつきの少ないものでなければならない。
- (2) 汚泥スラグ骨材コンクリートは、適当な空気量を有する A E コンクリートでなければならない。

8 条 解説

(1) 汚泥スラグコンクリートの強度、耐久性、水密性等は構造物の設計において基準とした値を満足しなければならないことは当然である。汚泥スラグコンクリートの品質は汚泥スラグ骨材の品質に大きく影響されるが、一般のコンクリートと同様に十分に行きとどいた施工がなされなければ必要な品質を得ることはむずかしくなる。

強度について

汚泥スラグを用いたコンクリートの強度特性は、用いた汚泥スラグの品質、特に結晶度に大きく影響される。圧縮強度については、ガラス質の骨材を用いると普通骨材を用いた同じ水セメント比のコンクリートに比較して強度が低くなるが、結晶化すると改善され、普通骨材に比較してむしろ強度が高くなるものがある。曲げ強度や引張強度に関しては、ガラス質のものではかなり劣り、結晶化したものでは改善されるが、圧縮強度に比較すると改善されにくい傾向にある。これは骨材の表面の特性によるものと考えられる。したがって一般のコンクリート同様、使用にあたっては事前に試験を行うのがよい。

耐久性について

汚泥スラグ骨材を用いたコンクリートの凍結融解に対する耐久性は、適当な空気量を有し、骨材の結

品化が十分なものではほとんど問題がないが、ガラス質のものでは一般的な骨材に比較して劣る傾向にある。ただし、厳しい条件でなければ問題ない場合もあるので、やはり試験を行うのが良い。

ワーカビリティについて

汚泥スラグ骨材を用いたコンクリートのワーカビリティは骨材の粒度分布が良好であれば、普通の碎石等とそれほど異なるものではなく、ブリージング等も、特段大きくなるものではない。しかしながら、粒度分布が適切でないとワーカビリティは低下し、空気量等の管理も厳しくなる。こうした場合には、他の骨材等との混合使用も有効である可能性があるので試験を行うのがよい。

5 章 汚泥スラグ骨材の取扱い

9 条 汚泥スラグ骨材の運搬および貯蔵

汚泥スラグ骨材を取扱うときは、破碎しないよう、大小粒が分離しないよう、異種の骨材、ごみ、雑物等が混入しないようにしなければならない。

9 条 解説

汚泥スラグ骨材の運搬および貯蔵に当たっては普通骨材と同様の取扱いの注意を要する。

6 章 配 合

10 条 総 則

- (1) 汚泥スラグ骨材コンクリートの配合は、所要の強度、耐久性および水密性をもち、作業に適するワーカビリティをもつ範囲内で単位水量をできるだけ少なくするよう、原則として試験によってこれを定めなければならない。
- (2) 汚泥スラグ骨材コンクリートは原則として A E 効果のある混和剤を用いる。

10 条 解説

- (1) 汚泥スラグ骨材を用いたコンクリートの配合においても、普通コンクリートと同様に、硬化コンクリートの品質を向上させるために作業に適する範囲でできるだけ単位水量を少なくしなければならない。汚泥スラグ骨材はガラス質なため、一般の骨材に比較して、破碎の際に特異な形状となる場合がある。このため、普通骨材を用いた一般的配合とかなり異なることが考えられるため適切な配合を決定するために試験を行うことが必要である。
- (2) 汚泥スラグ骨材を用いたコンクリートにおいても適切な耐凍結融解耐久性を得るためには A E コンクリートとすることが適当である。また A E コンクリートとすることによって単位水量を減ずることも可能となり硬化コンクリートの品質向上にも効果がある。

11各 AEコンクリートの空気量

- (1) 汚泥スラグ骨材を用いたAEコンクリートの空気量は粗骨材の最大寸法，その他に応じてコンクリート容積の4～6％を標準とする。
- (2) AEコンクリートの空気量試験は，JIS A 1118または JIS A 1128によるものとする。

11条 解説

- (1) 汚泥スラグ骨材を用いた場合にも耐候性を確保するためには普通コンクリートと同様に4～6％の空気量とすることが必要である。しかしながら汚泥スラグ細骨材を用いる場合には骨材の粒形によってエントラップトエアがかなり高くなることもあるため空気量を若干高く設定する必要がある場合がある。この場合には実験により適切な空気量を設定するのが望ましい。
- (2) 空気量の試験には，JIS A 1118まだ固まらないコンクリートの空気量の容積による試験方法またはJIS A 1128まだ固まらないコンクリートの空気量の圧力による試験方法のいずれを用いてもよい。

7章 練りませ，運搬，打込みおよび養生

12条 総 則

汚泥スラグ骨材コンクリートの練りませ，運搬，打込みおよび養生は，均等質で所定の品質を有するコンクリートが得られるよう，これらを行わなければならない。

12条 解説

汚泥スラグ骨材を用いたコンクリートの練りませ，運搬，打込みおよび養生は，一般のコンクリートと同様に考えてよい。

8章 品質管理および検査

13条 総 則

汚泥スラグ骨材コンクリートの品質管理および検査は，JIS A 5308に準じて行うものとする。

13条 解説

汚泥スラグ骨材を用いたコンクリートの品質管理および検査はJIS A 5308レデーミクストコンクリートに示された方法と同様に考えてよい。

ただし、汚泥スラグ骨材をレデーミクストコンクリートに用いる場合でも、汚泥スラグ骨材はJIS A 5308に適合しないので、これを用いてつくったコンクリートはJISの規格外品となる。このことに対しては、製造者、購入者の双方があらかじめ確認しておく必要がある。

9章 設計計算における一般事項

14条 総 則

汚泥スラグ骨材を用いたコンクリート構造物の設計計算に関する一般事項は、試験により確かめるのを原則とする。

14条 解説

汚泥スラグ骨材を用いたコンクリートの物性は、一般のコンクリートと異なることがあるので、原則として試験により定めるものとする。

3.9 汚泥焼成骨材（人工軽量骨材）の軽量コンクリートへの利用

(1) 研究目的

本プロジェクトでは、主として、汚泥焼却灰を造粒型人工軽量粗骨材として用いる頁岩代替用として使用することを検討の対象とした。具体的な材料としては通常のロータリーキルンで焼成した軽量粗骨材（以下“LG”と略す）、下水汚泥およびこの焼成灰を混合して造粒し移動炉床式の焼成炉で自然焼成した軽量粗骨材（以下“SLG”と略す）、汚泥焼却灰を粉碎・造粒・乾燥させて噴流式焼成炉で焼成した軽量細骨材（以下“LS”と略す）が研究の対象である。これらについては、基礎研究の蓄積もある。今回は、これまで未確認項目であるアルカリ骨材反応性および耐久性について基礎的な実験を行い、考察した。

(2) 研究内容

“LS”のアルカリ骨材反応性についての試験は、JASS5NT-201（骨材の反応性試験方法）—モルタルバー法—に準じて行った。セメント中のアルカリ量は Na_2O 等価量で0.6%、1.2%とし、養生材令に伴うモルタルの膨張量を測定してその反応性を評価することとした。今回は材令4週までの測定を行った。この結果アルカリ骨材反応性についてはこれを全く無視し得ることが分った。この点については、材令が大きくなってからも更に考察を加えることとしている。また、塩分をあらかじめ含んだコンクリート試験体により、鉄筋腐食電位の測定や乾湿くり返しによる鉄筋腐食試験ならびに骨材自体の塩素イオン吸着状況分析などの基礎的な検討を行った。更に鉄筋コンクリート試験体の自然ばくろ試験を行った。

鉄筋腐食電位の測定の結果、“LS”・“SLG”は塩分吸着効果があり、塩分環境下での耐久性については全く問題ないことが分った。この骨材自体の塩素イオン吸着状況については、更にセメントペースト及び塩分分析を行うことにより考察を加えることとしている。また、乾湿くり返しによる鉄筋腐食試験からは、特に耐久性上問題となるというような結果は出ていない。

表3.9.1 建設省住宅局人工軽量骨材の使用基準・性能判定基準による評価（参考）

	調合No	骨材の組合せ	判 定 評 価 項 目									
			単位セメント量(kg/cu)		スランプ (cm)		空気量 (%)		圧縮強度(kgf/cm ²)		引張強度(kgf/cm ²)	
			規格値	試験値	規格値	試験値	規格値	試験値	規格値	試験値	規格値	試験値
試験用	1	LS+LG	A→ 400 ± 6	402	15 ± 2	16.5	5 ± 1.5	4.5	320 以上	508	20以上から 0.06 T _f (16.2)以上	35.6
	2		B→ 350 ± 6	351	21 ± 1	21.2	5 ± 1.5	4.9	230 以上	426	〃	29.2
比較用	3	既存の MS+MG (認定済)	400 ± 6	400	15 ± 2	16.5	5 ± 1.5	5.0	320 以上	459	〃	35.3
	4		350 ± 6	350	21 ± 1	21.0	5 ± 1.5	5.2	230 以上	389	〃	26.2

・ 既存の造粒型人工軽量骨材（細・粗骨材）

(3) 研究成果

これまで行った研究結果を総合して、軽量コンクリートに用いる汚泥焼成骨材（人工軽量骨材）の

品質基準（案）を作成し提案することとした。以下にこの概要を示す。

1) 骨材の品質規定

汚泥焼成軽量骨材は、表3.9.2の規定に適合するほか、以下に示す規定に適合しなければならない。

① 有害物質

汚泥焼成軽量骨材は、「産業廃棄物に含まれる金属等の検定方法」（昭和48年環境庁告示第13号）による溶出試験合格しなければならない。

② アルカリ骨材反応

アルカリ骨材反応の恐れのある汚泥焼成骨材は、JASS 5NT-201「骨材の反応性試験方法」によるアルカリ骨材反応試験を行い、膨張量が規定値以下であることを確認しなければならない。

2) コンクリートの品質

汚泥焼成軽量骨材を用いた構造用軽量コンクリートの品質は、表- 3.9.3に示すJIS A 5002（構造用軽量コンクリート骨材）の規定に適合するものとし、且つ下記のコンクリート品質規定に適合しなければならない。

表3.9.2 品 質

項 目	品 質 規 定
強熱減量	2%以下 註)
三酸化硫黄 (SO ₂ として)	0.5 %以下
塩 化 物 (NaClとして)	0.01%以下
有機不純物	試験溶液の色が標準色より濃くないこと
粘 土 魂	1%以下

表3.9.3 コンクリート用骨材区分

項 目	品質規定
骨材の絶乾比量	MまたはH
骨材の実積率による区分	A
コンクリートの圧縮強度による区分	300以上

① 単位容積重量

汚泥焼成軽量骨材を用いた構造用軽量コンクリートの気乾単位容積重量は、2.0 t/m³以下とする。

② フリージング量

設計基準強度が 225kgf/cm²をこえる場合、フリージング量が 0.5cc/cm³以下であること。

③ 圧縮強度、引張強度および付着強度

圧縮強度、引張強度および付着強度は、表 3.9.4に示すA, B, CおよびDの4種類の基準調合によるコンクリートを用い、表3.9.5に示す規定に適合するものとする。

表3.9.4 コンクリート試験のための基準調合

調合記号	単位セメント量 (kg/m ³)	スランプ (cm)	空気量 (%/V _ℓ)
A	400±6	15±2	5±1.5
B	350±6	15±2	5±1.5
C	400±6	21±1	5±1.5
D	350±6	21±1	5±1.5

表3.9.5 軽量コンクリートの品質

項目	調合記号	A	B	C	D	備考
28日圧縮強度F… (kgf/cm ²)						
設計基準強度 150まで		—	—	200以上	150以上	
180まで		—	—	230以上	180以上	
210まで		—	—	260以上	210以上	
225まで		—	—	275以上	225以上	
240まで		290以上	270以上	280以上	230以上	
270まで		320以上	270以上	280以上	230以上	
28日引張強度… (kgf/cm ²)		20以上 かつ 0.06F以上	—	—	20以上 かつ 0.06F以上	
28日付着強度(変位量 0.2の時)(kgf/cm ²)		1F/15以上 かつ ($9 + \frac{2F}{75}$)以上	—	—	1F/15以上 かつ ($9 + \frac{2F}{75}$)以上	当分の間参 考値とする
上 段						
下 段		1F/10以上 かつ ($13.5 + \frac{1F}{25}$)以上	—	—	1F/10以上 かつ ($13.5 + \frac{1F}{25}$)以上	

(建築研究所担当)

軽量コンクリートに用いる 汚泥焼成骨材の品質基準(案)

目 次

1. 適用範囲
2. 定 義
3. 骨材の品質規定
4. コンクリートの品質
5. 試験方法

汚泥焼成骨材を用いた軽量コンクリートの
諸特性と使用上の注意

1. 適用範囲

- (1) この基準は、鉄筋コンクリート造および鉄骨鉄筋コンクリート造の建物ならびに建築物の部分に汚泥焼成軽量骨材を用いた軽量コンクリートを使用する場合に適用する。
- (2) 設計基準強度は $90\text{kgf}/\text{cm}^2$ をこえ $270\text{kgf}/\text{cm}^2$ 以下で、かつ、使用する汚泥焼成軽量骨材について設定された設計基準強度の最大値以下とする。

2. 定義

構造用軽量コンクリートに用いる汚泥焼成軽量骨材とは、下水汚泥もしくは下水汚泥焼却灰を主原料として焼成された人工軽量骨材であり、JIS A 5002（構造用軽量コンクリート骨材）に適合する骨材で、細骨材および粗骨材とも表面はガラス質の表皮殻で覆われ破砕面を有しないものをいう。更に粗骨材においては浮粒率10%以下であること。

3. 骨材の品質規定

汚泥焼成骨材は、表1の規定に適合するほか、以下に示す規定に適合しなければならない。

(1) 有害物質

汚泥焼成骨材は、「産業廃棄物に含まれる金属等の検定方法」（昭和48年環境庁告示第13号）による溶出試験に合格しなければならない。

(2) アルカリ骨材反応

アルカリ骨材反応の恐れのある汚泥焼成骨材は、モルタルバー法によるアルカリ骨材反応試験を行い、膨張量が規定値以下であることを確認しなければならない。試験方法は、JASS5 NT-201「骨材の反応性試験方法」による。

凍結融解に対する抵抗性を特に必要とするコンクリートに用いる場合には、凍結融解に対する抵抗性を確かめなければならない。

表1 品 質

強熱減量	2%以下(註)
三酸化硫黄 (SO ₂ として)	0.5%以下
塩化物 (NaClとして)	0.01%以下
有機不純物	試験溶液の色が標準色より濃くないこと
粘土魂	1%以下

表1の強熱減量の註

JIS A 5002（構造用軽量コンクリート骨材）に規定する人工軽量骨材の強熱減量の上限は1.0%であ

り、通常の粘土・頁岩を原料とし、ロータリーキルンで焼成された骨材は、概ねこの規格値を満足させる。但し原材料をフライアッシュや汚泥焼却灰主原料とした場合や自燃方式で焼成する場合は、この1.0%以下という規格値を満足させることは困難な場合が多い。

ASTM C 330 ,DIN 4226,BS 3797 における構造用軽量コンクリート骨材の強熱軽量の規格値は、5%以下となっている。本品質基準では、欧米の5%以下という規格値は天然軽量骨材をも対象としているので、2%以下というややきびしい値とした。

4. コンクリートの品質

汚泥焼成骨材を用いた構造用軽量コンクリートの品質は、表2 に示すJIS A 5002 (構造用軽量コンクリート骨材) の規定に適合する骨材を用い、下記のコンクリート品質規定に適合しなければならない。

表2 コンクリート用骨材区分

骨材の絶乾比重	MまたはH
骨材の実積率による区分	A
コンクリートの圧縮強度による区分	300以上

(1) 単位容積重量

汚泥焼成骨材を用いた構造用軽量コンクリートの気乾単位容積重量は、2.0 t/m³以下とする。

(2) ブリージング量

設計基準強度が225 kg/cm²をこえる場合、ブリージング量は0.5 cc/cm³以下とする。

(3) 圧縮強度、引張強度および付着強度

圧縮強度、引張強度および付着強度は、表3 に示すA, B, C, およびDの4種類の調合を用い、各設計基準強度に応じ表4 の規定に適合しなければならない。

(4) 長さ変化率

BおよびC調合の材令91日における長さ変化率は、それぞれ 9×10^{-4} および 10×10^{-4} 以下とする。

(5) クリープ係数

載荷3年におけるクリープ係数は、2.5 以下とするが当分の間は参考値とする。

表3 コンクリート試験のための基準調合

調合記号	単位セメント量 (kg/m ³)	スランプ (cm)	空気量 (%/V _ℓ)
A	400 ± 6	15 ± 2	5 ± 1.5
B	350 ± 6	15 ± 2	5 ± 1.5
C	400 ± 6	21 ± 1	5 ± 1.5
D	350 ± 6	21 ± 1	5 ± 1.5

表4 軽量コンクリートの品質

項 目 \ 調合記号	A	B	C	D	備 考
28日圧縮強度 F… (kgf/cm ²)					
設計基準強度 150まで	—	—	200以上	150以上	
” 180まで	—	—	230以上	180以上	
” 210まで	—	—	260以上	210以上	
” 225まで	—	—	275以上	225以上	
” 240まで	290以上	270以上	280以上	230以上	
” 270まで	320以上	270以上	280以上	230以上	
28日引張強度… (kgf/cm ²)	20以上 かつ 0.06 F 以上	—	—	20以上 かつ 0.06 F 以上	
28日付着強度 (変位量 0.2mmの時) (kgf/cm ²)	1 F/10以上 かつ ($9 + \frac{2F}{75}$) 以上	—	—	1 F/15以上 かつ ($9 + \frac{2F}{75}$) 以上	当分の間参 考値とする
上 段					
下 段	1 F/10以上 かつ ($13.5 + \frac{1F}{25}$) 以上	—	—	1 F/10以上 かつ ($13.5 + \frac{1F}{25}$) 以上	
長さ変化率(乾燥収縮) (材令91日)	—	9×10^{-4} 以下	10×10^{-4} 以下	—	
クリープ係数 (載荷 3 年)	2.5以下	—	—	2.5以下	当分の間参 考値とする

5. 試験方法

コンクリート品質規定のための試験は、5.1 および5.2 に規定する材料および方法による。

5.1 材 料

- (1) セメント：JIS R 5210 (ポルトランドセメント) に規定する普通ポルトランドセメントで、JIS R 5201 (セメントの物理試験方法) によって試験したセメントの28日圧縮強さが $400 \pm 30 \text{ kgf/cm}^2$ のもの。
- (2) 川砂：軽量粗骨材を試験するときに用いる川砂の品質は、JIS A 5002 (構造用軽量コンクリート骨材) 5・13・6 に規定するものとし、川砂はできるだけ表面乾燥飽水状態に近い状態として使用する。
- (3) 軽量骨材：3 に規定する軽量骨材の品質の規定に合格するもので、できるだけ表面乾燥飽水状態

に近い状態として使用する。

(4) 水：清浄で飲用に適するもの。

(5) 混和剤：標準的なAE剤（天然系レジン型）を使用する。

5.2 試験方法

(1) ブリージング量：JIS A 1123（コンクリートのブリージング試験方法）によって測定する。ただしコンクリートは調合CおよびDとする。

(2) 空気量：JIS A 1116（コンクリートの単位容積質量試験方法および空気量の質量による測定方法—質量方法）またはJIS A 1118（まだ固まらないコンクリートの空気量の容積による試験方法—容積方法）による。

(3) スランプ：JIS A 1101（スランプ試験方法）による。

(4) 気乾単位容積重量：直径15cm、高さ30cmの圧縮強度試験用供試体を7日間水中養生したのち、材料令91日まで温度 $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\%$ の恒温恒湿室内に放置して重量を測定し、容積で除してもとめる。ただしコンクリートは調合A、B、CおよびDとする（設計基準強度 225 kgf/cm^2 以下のものについては調合AおよびBは除く）。

(5) 28日圧縮強度：JIS A 1132（コンクリートの強度試験用供試体の作り方）およびJIS A 1108（コンクリートの圧縮強度試験方法）による。ただしコンクリートは調合A、B、C、およびDとする（設計基準強度 225 kgf/cm^2 以下のものについては、調合AおよびBは除く）。

(6) 28日引張強度：JIS A 1132(前出)およびJIS A 1113（コンクリートの引張強度試験方法）による。供試体は試験時まで $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ の水中で養生する。ただしコンクリートは、調合AおよびDとする。

(7) 28日付着強度：ASTM C 234 に準じた水平鉄筋の引抜試験による。使用する鉄筋は、JISG3112（鉄筋コンクリート用棒鋼）に規定する異型鉄筋D-19とする。鉄筋の周囲は、径6mmの鋼線を直径約10cmのらせん状に巻いたものを埋込んでコンクリートを補強する。鉄筋は水平に上下2段に埋込み、鉄筋の中心から下のコンクリート打込み深さは、それぞれ22.7および7.5 cmとする。供試体は試験時まで $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ の水中で養生する。

鉄筋の切りは、引抜方向と反対の端で測定し、その変位置が0.20mmになったときの付着強度を測定するが、同時に最大付着強度の試験値も参考として求める。

(8) 長さ変化率（乾燥収縮）：JIS A 1124（モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法—ダイヤルゲージ方法）またはJIS A 1125（モルタルおよびコンクリートの長さ変化方法—コンパレーター方法）により、91日の長さ変化の値より求める。試験室は温度 $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\%$ とする。ただし、コンクリートは調合BおよびCとする。

(9) クリープ：JIS A 1132（前出）により作成した供試体を28日水中養生の後、圧縮強度の $1/3$ の荷重による圧縮クリープを少なくとも3年まで測定する。同時に測定する収縮測定用の供試体は、クリープ供試体と同一形状のものでなければならない。また試験室は温度 $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ 湿度 $60 \pm 5\%$ とする。

試験結果は供試体2個または3個の平均値で示す。また、コンクリートは調合AおよびDとする。

汚泥焼成軽量骨材を用いた軽量コンクリートの諸特性と使用上の注意事項

1. 汚泥焼成軽量骨材

1) 粗骨材 (LG)

a. 製法

汚泥焼成粗骨材 (LG) は、東京都の下水処理場から発生した下水汚泥を焼却して得られた焼却灰を、通常我国で使用されている造粒型の人工軽量骨材の原料である頁岩の一部代替として、通常の工程で造粒・焼成された人工軽量骨材である。

図1の製造工程図に示す様に、焼却灰を頁岩中に混合し、押し出し成型法によって造粒した粒子を、既存の人工軽量骨材の製造システムを使用しロータリーキルンにより約1,150℃で焼成する。なお、焼却灰と頁岩の化学成分を表1に示す。

b. 性質

焼却灰を一部混入 (10~20%) したLGの性質は、頁岩を原料とする人工軽量粗骨材と同様であり、建設省の構造用人工軽量骨材の認定基準に合格している。以下にその特徴を示す。

① 有害物

有害物 (重金属を含む) の溶出は、LGの表面、LGを粉砕した状態、コンクリートの混練り水、洗浄水、硬化コンクリートの表面および硬化コンクリート中からのいずれも規定値以下であり、通常使用されている骨材およびコンクリートとの差はほとんど認められない。又、JIS A 5002 (構造用軽量コンクリート骨材) に規定する有害物の試験に全て合格している。

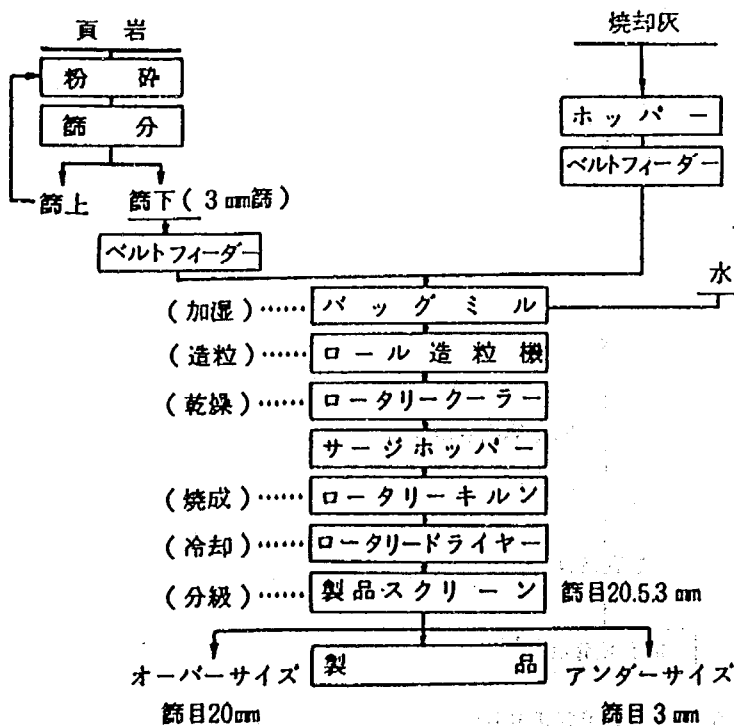


図1 試作軽量粗骨材焼成工程図

表1 下水汚泥焼却灰と頁岩の化学成分

	焼却灰 Σ (%)	焼却灰 σ _n (%)	頁 岩 (%)
SiO ₂	39.55	4.90	64.30
Al ₂ O ₃	16.41	1.35	16.34
Fe ₂ O ₃	11.75	0.73	1.34
FeO	2.09	0.48	3.23
P ₂ O ₅	10.10	2.43	—
CaO	8.37	1.76	1.20
MgO	2.46	0.11	1.23
Na ₂ O	1.84	0.51	1.94
K ₂ O	1.36	0.27	2.55
SO ₃	0.84	0.22	0.65
C	0.67	0.12	0.66
CO ₂	0.13	0.07	1.75
Cl	0.05	0.05	—
Total	95.60		95.19
Ign. Loss	2.67	0.96	7.34

※Σは平均値、σ_nは標準偏差

② 骨材強度

コンクリートに使用する骨材の強度特性は、コンクリートの強度特性に密接に関連している。軽量粗骨材の強度特性の測定方法は種々あるが、BC 812に規定するDetermination of the ten percent fines valueによるのが一般的である。この試験によるLGの破砕強度の範囲は9～10tであり、これに対し市販人工軽量粗骨材は8～11tの値を示しており、ほとんど市販品と同等である。LGはJIS A 5002の規定ではMA 417の骨材であり、400kgf/cm²以上の高強度コンクリート用に十分使用することが出来る。

③ 比重

比重はJIS規格ではM級（1.0 以上1.5 未満）であり、これ迄の製造実績では 1.29 ± 0.05 で製造されている。又浮粒率は5%以下である。

④ 粒度

現在製造されているLGの骨材寸法はJISに規定する15～5mmであるが、20～5mmも製造できる。粒度調整は粗粒率 6.35 ± 0.3 で管理できる。

2) 細骨材 (LS)

a. 製法

LSは東京都下水道局が開発した製法によって製造された人工軽量細骨材であり、スラジライトと名付けられている。

原料は汚泥焼成灰であり、有機バインダーを使用し、パンペレーターによって造粒している。焼成工程および焼却炉を図2および図3に示す。

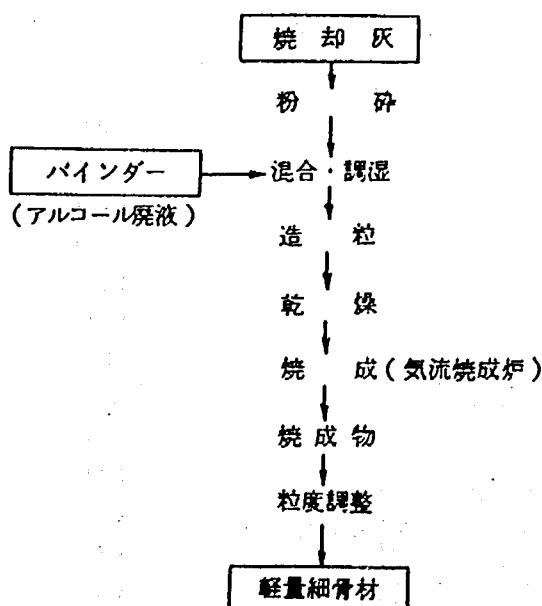


図2 スラジライト焼成工程図

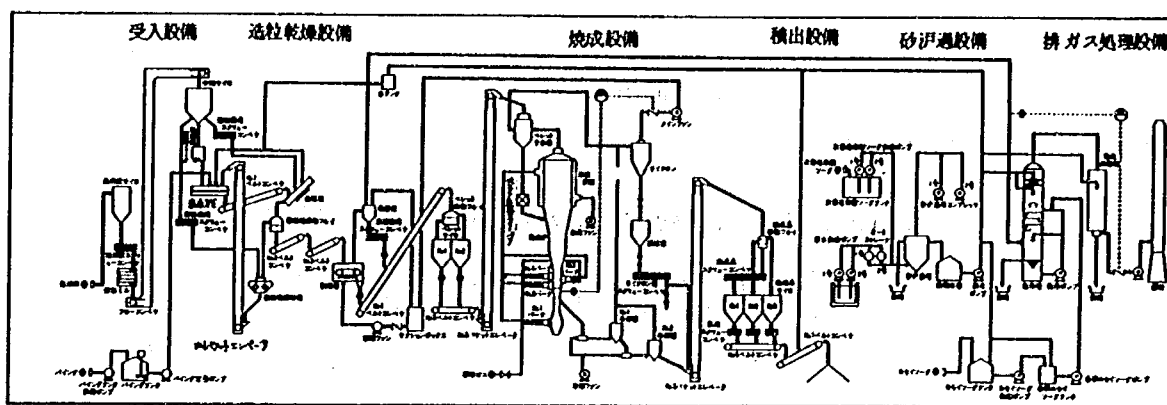


図3 スラジライト製造プラント設備フロー

スラジライト (LS) は造粒品のため、0.6 mm以下の微粒分が欠落しているのでモルタルやコンクリート用の細骨材として使用する場合は、他の微粒分で補う必要がある。

b. 性質

① 有害物

LSの有害物はLGと同様であり、JIS A 5002の試験にも合格している。

② 強度

LGの強度は表2に示すがその値は粒子一箇ずつをミハエリス式強度試験機により圧潰して求めたものである。この値は市販人工軽量細骨材よりかなり低い値を示しているが、これは試験したLSの比重がかなり小さいことになるものである。例えば径2.5 ~ 3.5 mmのLSの比重は1.21であるのに対し市販人工軽量細骨材は1.60とかなり重いものである。現在ではLSの比重は1.6位のものも製造されており、この種の骨材の強度は市販品と同等であると考えられる。しかしこの軽いLSを使用したコンクリートでもその圧縮強度は、JIS A 5002の区分では、最高の400kgf/cm²以上を示しており、通常の使用範囲では市販人工軽量細骨材と何ら遜色はない。

③ 粒度

LSは造粒型であるので、現在は0.6 mm~3.6 mmの範囲で使用目的に応じて製造できる特徴を有している。従って使用目的によっては粒度を調整する必要がある。

表2 LSの細孔容積、比表面積および圧潰強度

項 目	細 孔 容 積 (cm ³ /g)	比 表 面 積 (m ² /g)	圧 潰 強 度	
			軽 量 細 粒 材 (kgf/粒)	市販の軽量細骨材 (kgf/粒)
0.6~1.2mm	0.505	0.681	1.7 (±0.57)	1.8 (±0.73)
1.2~1.7mm	0.506	0.748	4.1 (±1.73)	4.7 (±1.97)
1.7~2.5mm	0.643	1.016	4.8 (±2.10)	7.9 (±3.10)
2.5~3.4mm	0.729	0.416	5.3 (±2.17)	9.7 (±4.03)
細粒材各粒度等量混合	0.683	0.733	ミハエリス強度試験機により1粒ずつの圧潰強度を測定20粒の平均値を表示した。 ()内は標準偏差、なお比重は表3参照。	
市販細骨各粒度等量混合	0.333	4.437		
備 考	水銀圧入法	窒素添着法		

④ その他の性質

L Sの各粒径毎の細孔容積および比表面積を表2に吸水率、絶乾比重、単位容積重量および実績率を表3に、又比熱を表4に示す。

表3 LSの吸水率、絶乾比重、単位容積重量および実績率

試料	項目	吸水率 24時間(%)	絶乾比重	単位容積重量 (kg/l)	実績率 (%)
0.6~1.2mm		8.4	1.57	0.944	60.1
		15.4	1.64	0.954	58.2
1.2~1.7mm		9.0	1.47	0.875	59.5
		11.9	1.66	0.938	56.5
1.7~2.5mm		8.5	1.35	0.812	60.1
		13.2	1.61	0.921	57.2
2.5~3.5mm		9.2	1.21	0.716	59.2
		11.1	1.60	0.902	56.4
混 合 品 (各サイズ等量混合)		8.8	1.40	0.868	62.0
		12.9	1.63	0.977	59.9
測定方法	JIS A 1134		JIS A 1104		

上段…軽量細粒材，下段…市販軽量細骨材

表4 L S の 比 熱

(単位: cal/g·deg)

試料 番号	軽 量 細 粒 材					対 比 材 料	
	0.6~1.2	1.3~1.7	1.8~2.5	+2.5	No.1~No.4 等量混合品	パーライト 等量混合品	市販軽量細 骨材等量混 合品
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7
Temp (°C)							
20	0.175	0.174	0.174	0.176	0.175	0.169	0.183
40	0.185	0.184	0.184	0.185	0.184	0.178	0.192
60	0.194	0.193	0.192	0.194	0.193	0.186	0.200
80	0.201	0.200	0.199	0.202	0.201	0.193	0.208
100	0.208	0.207	0.206	0.210	0.208	0.200	0.215
120	0.215	0.214	0.215	0.217	0.214	0.207	0.222
140	0.220	0.220	0.221	0.223	0.220	0.212	0.228
160	0.224	0.225	0.225	0.227	0.225	0.217	0.232
180	0.227	0.228	0.228	0.230	0.228	0.222	0.235
200	0.230	0.232	0.231	0.232	0.230	0.226	0.237
220	0.232	0.234	0.233	0.234	0.232	0.230	0.239
240	0.234	0.236	0.235	0.236	0.234	0.232	0.241
260	0.235	0.237	0.237	0.238	0.236	0.234	0.242
280	0.238	0.239	0.239	0.240	0.238	0.236	0.244
300	0.238	0.241	0.240	0.242	0.240	0.238	0.246

(cal/g·deg)

2. 人工軽量骨材の取扱上の留意点

1) 汚泥焼成粗骨材 (LG)

LGの取扱い方法は、市販されている人工軽量粗骨材と全く同様である。

2) スラジライト (LS)

LSは製造上の都合で現在粒径3.0 ~1.7 mmおよび1.7 mm以下の2種類で出荷されており、各々比重、吸水率が異なるのでコンクリート混練時の計量の際に注意する必要がある。又粒子の形状が完全な球型であるから、野積みには不適當であり、かつ隙間からこぼれ易い。

3. 汚泥焼成骨材コンクリートの種類と性質

コンクリートの記号

- ① LG+LS : 試作軽量粗骨材とスラジライトの組合わせによるコンクリート。
- ② LG+LS・S : 試作軽量粗骨材とスラジライトおよび粒度調整のために加えた細目砂の組合わせによるコンクリート。
- ③ G+LS・S : 普通粗骨材とスラジライトおよび粒度調整のために加えた細目砂の組合わせによるコンクリート。
- ④ LG+S : 試作軽量粗骨材と普通砂の組合わせによるコンクリート。
- ⑤ MG+LS・S : 市販人工軽量粗骨材とスラジライトおよび粒度調整のために加えた細目砂の組合わせによるコンクリート。
- ⑥ MG+S : 人工軽量粗骨材と普通砂の組合わせによるコンクリート。
- ⑦ MG+MS : 人工軽量粗・細骨材の組合わせによるコンクリート。
- ⑧ G+S : 普通粗・細骨材の組合わせによるコンクリート。

1) フレッシュコンクリートの性質

a. 単位水量とスランプの関係

単位水量とスランプの関係は、単位セメント量、セメントの種類、コンクリート温度、骨材の種類と粒度、細骨材率、混和剤の種類と量、AE空気量等によって種々様々に変化する。更に混練後の経過時間、ミキサの種類等によっても大きく変化し、施工方法、例えばポンプ圧送によって大幅にスランプが低下する場合もある。

ここでは、 $F_c=210\text{kgf/cm}^2$ 、所要スランプ15cmでAE減水剤を使用した各種コンクリートのセメント種別、コンクリート温度別の標準単位水量を表5に示す。

b. ブリージング

コンクリートのブリージングの傾向は、早強セメントの使用の場合は普通セメント使用のコンクリートより約半分に低下し、又コンクリート温度30℃の場合は、20℃の時のブリージング量の約半分となる。

表5 各種コンクリートの標準単位水量

セメント	コンクリート 温度 (°C)	骨 材 の 組 合 せ		単位セメント量 (kg/m ³)	単位水量 (kg/m ³)
		粗 骨 材	細 骨 材		
普通ポルトランドセメント	20	LG	LS・S	340	162
		LG	S	"	165
		G	LS・S	"	170
		G	S	"	175
	30	LG	LS・S	340	169
		LG	S	"	172
		G	LS・S	"	177
		G	S	"	183
早強ポルトランドセメント	20	LG	LS・S	320	165
		LG	S	"	168
		G	LS・S	"	173
		G	S	"	178
	30	LG	LS・S	320	172
		LG	S	"	175
		G	LS・S	"	180
		G	S	"	185

注) Gは砕石2505

LS・SおよびSの0.3mm通過量20~25%

2) 硬化コンクリートの性質

a. 強度特性

(1) 圧縮強度

セメント種別の各種コンクリートのC/Wと圧縮強度の関係は、表6の式で表わされる。若材令のコンクリートでは、C/Wの影響よりは養生温度の強度発現に与える影響の方が大である。図4に初期材令における材令と圧縮強度との関係を、又図5にマチュリーチーと圧縮強度の関係を示す。

(2) 圧縮強度と引張強度

圧縮強度と引張強度との関係は図6に示す通りで、コンクリート種別に関係なくその関係式は $F_t = 1.8 + 0.075 F_c$ で示される。

b. 弾性特性

コンクリートの弾性係数は圧縮強度と単位容積重量とに密接に関連している。その関係を図7に示すが、実験式より算定した各種コンクリートの圧縮強度100, 200, 300 および400kgf/cm²における弾性係数を表7に示す。この値はACIの算定式より計算した値とほとんど変わらない。

ポアソン比は図8に示す様に、コンクリート種別間に差は認められない。低強度或いは若材令におけるコンクリートの方が低いポアソン比を示している。

表6 C/Wと圧縮強度との関係

セメント 種 別	骨材の組合せ		F_T (kg/cm ³)	F_c (kg/cm ³)
	粗骨材	細骨材		
普通 ポルト メント	LG	LS・S	-30+150C/W	-120+226C/W
	LG	S	-50+154C/W	-124+233C/W
	G	LS・S	-62+175C/W	-100+230C/W
	G	S	-94+184C/W	-87+225C/W
早強 ポルト メント	LG	LS・S	-50+185C/W	23+175C/W
	LG	S	-70+195C/W	29+180C/W
	G	LS・S	15+160C/W	30+188C/W
	G	S	14+162C/W	20+195C/W

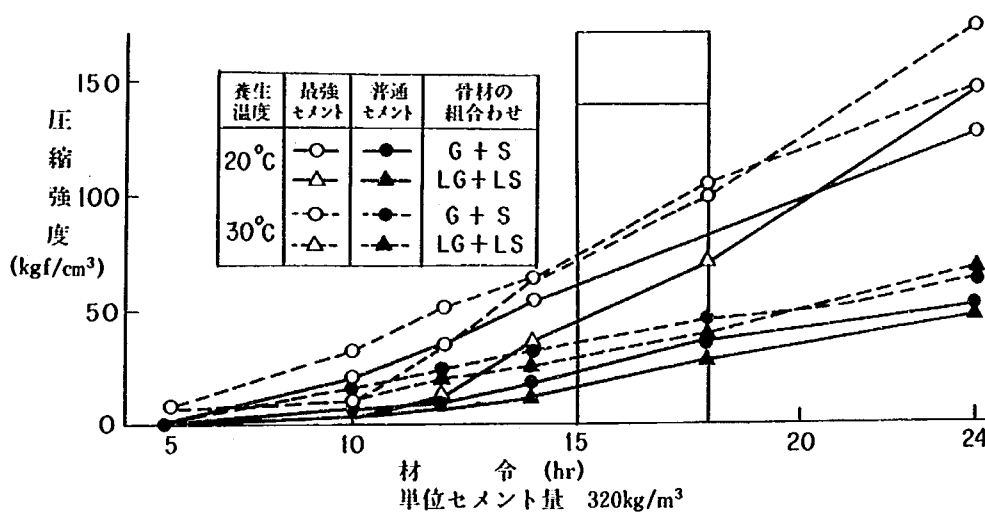


図4 初期材令における圧縮強度

c. 乾燥収縮

硬化乾燥に伴う収縮量は、図9に示す様に軽量コンクリートの方が、普通コンクリートより少なく、材令1年目の値は普通コンクリートの $\times 10^{-4}$ に対し軽量コンクリートではその値の54~67%とかなり小さい値になっている。

d. 熱的性質

熱特性は表8に示す通りである。軽量コンクリートの線膨張係数は普通コンクリートより小さい値を示す。LG+LSを使用したコンクリートの熱的特性は、市販人工軽量骨材コンクリートと同様な傾向を示す。

断面温度上昇試験結果の一例を図10に示す。早強セメントの方が当然発熱量が高く、温度上昇が大である。又細・粗骨材共軽量骨材を用いたコンクリートが最も断熱温度上昇が大である。表9に各種コンクリートの断熱温度上昇式を示す。

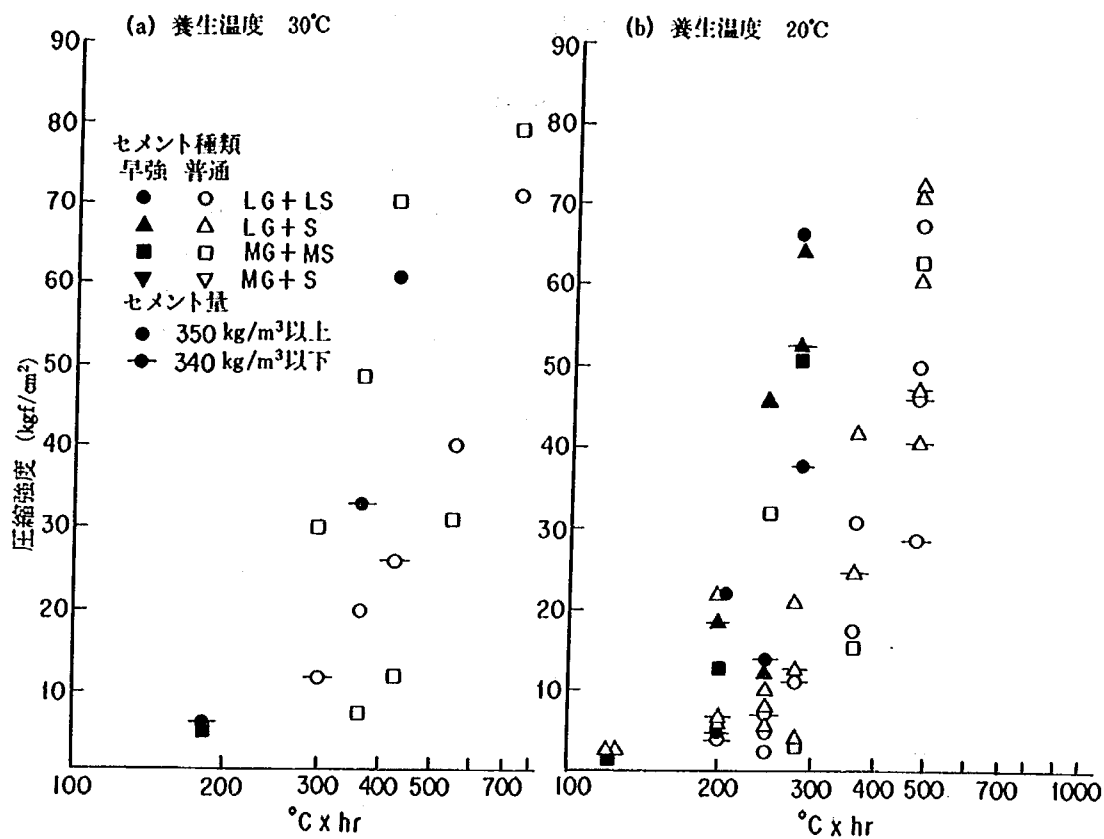


図5 マチュリチーと初期圧縮強度

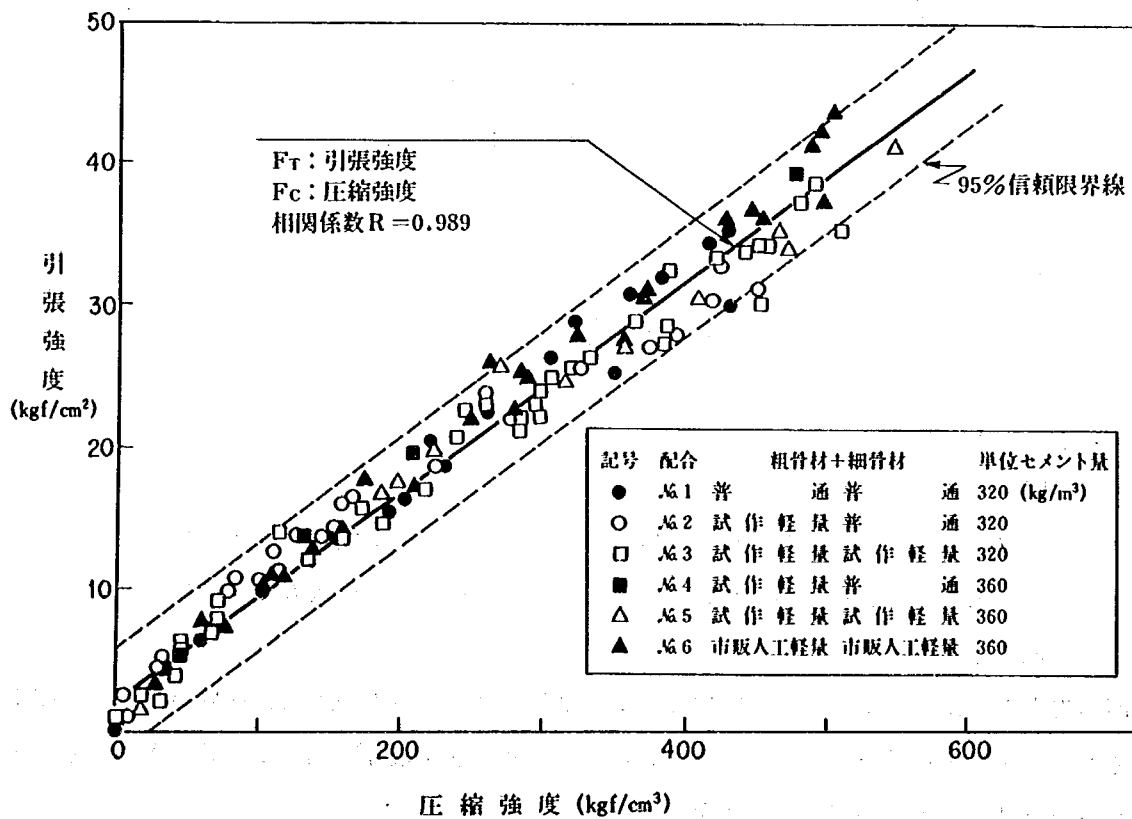


図6 圧縮強度と引張強度との関係

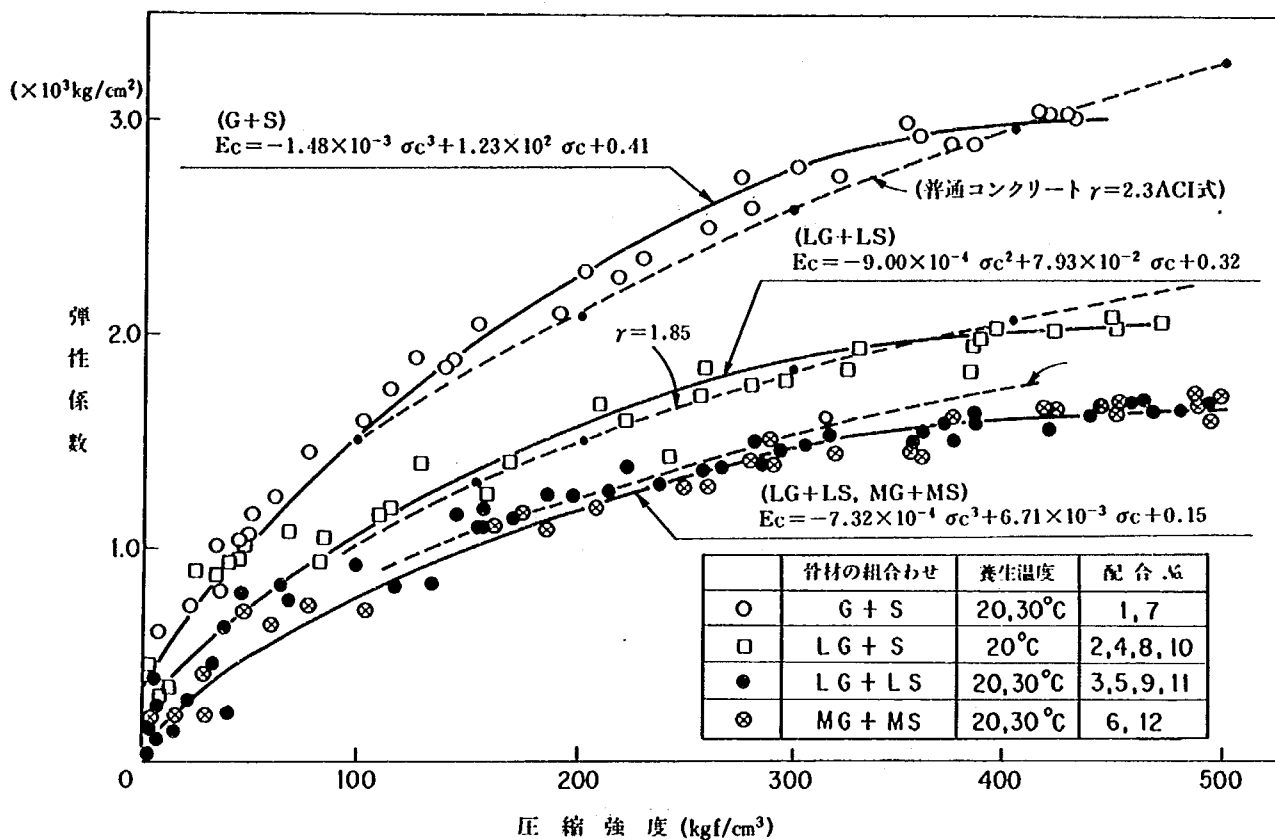


図7 圧縮強度と弾性係数との関係

表7 実験式から求めた弾性係数(×10⁵)kg/cm²

種 類		圧縮強度 (kgf/cm²)			
		100	200	300	400
普通コンクリート (G+S) (A)	Ec	1.50	2.29	2.79	2.99
	A/A	1.0	1.0	1.0	1.0
軽量骨材コンクリート (LG+S) (B)	Ec	1.02	1.54	1.89	2.05
	B/A	0.68	0.67	0.68	0.68
軽量骨材コンクリート (LG+LS;MG+MS) (C)	Ec	0.74	1.20	1.50	1.66
	C/A	0.49	0.52	0.53	0.56

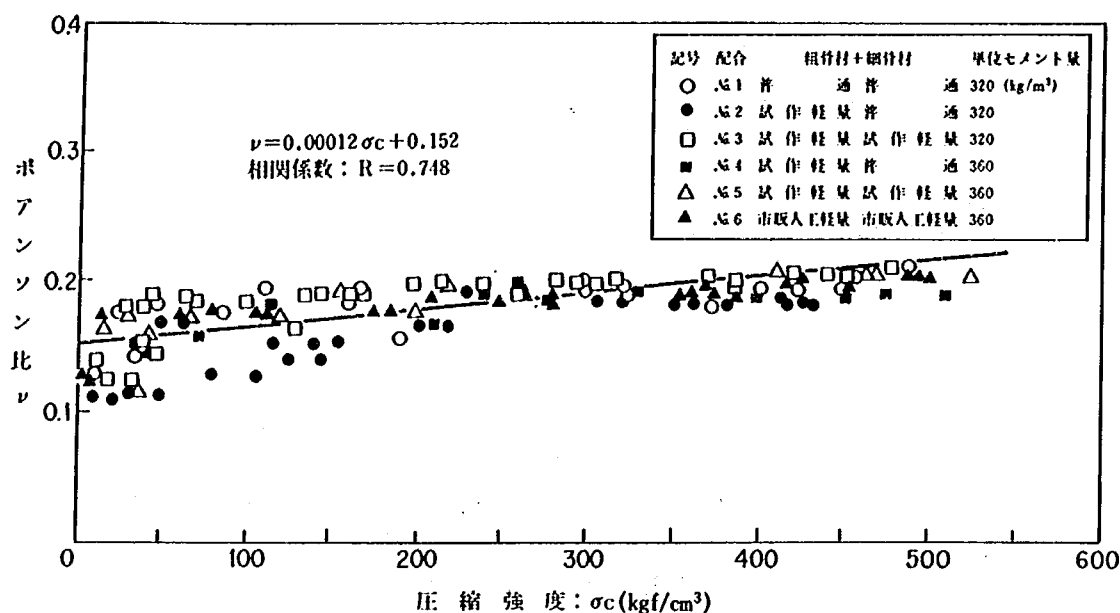


図8 圧縮強度とポアソン比の関係

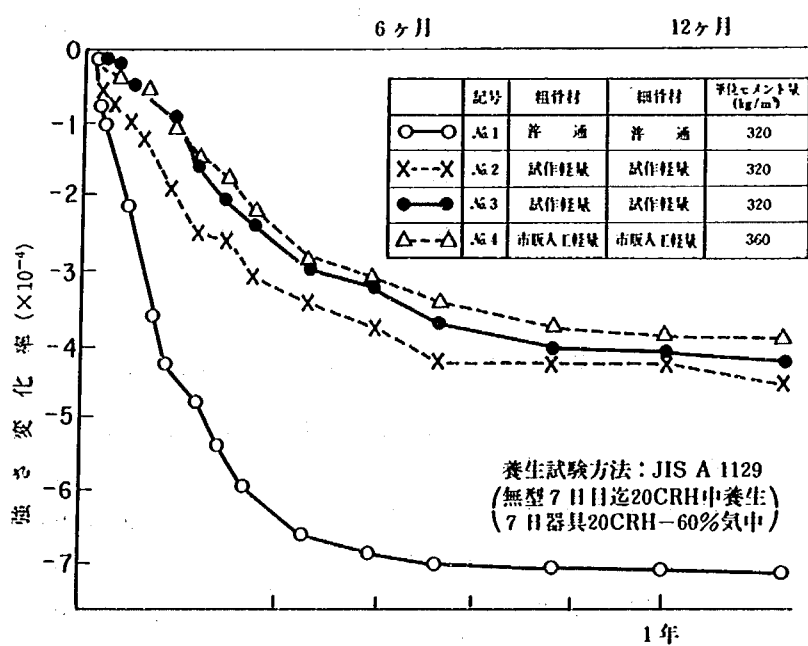


図9 材令と乾燥収縮

c. 耐摩耗性

摩耗性の試験結果を表10に示す。普通コンクリートに比べ摩耗深さは、軽量コンクリートの方が大きい、実用上は差しつかえない。

表8 人工軽量骨材コンクリートの熱的特性

試験項目 試験材令 配合No.	線膨張係数 ($\times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$)		熱伝導率 ($\text{kcal}/\text{m}\cdot\text{h}^{\circ}\text{C}$)	比熱 ($\text{kcal}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$)	単位容積重量 (kg/l)		熱拡散率 (m^2/h)
	7日	28日	28日	28日	7日	28日	
G+S	8.4 10.1 (9.4) 9.7	10.4 11.1 (10.4) 9.8	2.06 1.92 (2.00) 2.01	0.24 0.21 (0.23) 0.25	2.30 2.30	2.30	0.0035
LG+S	7.6 8.2 (7.9) 7.8	8.7 7.8 (8.5) 9.1	1.37 1.43 (1.37) 1.32	0.37 0.29 (0.38) 0.38	1.86 1.86	1.86	0.0020
LG+LS	7.6 6.9 (7.2) 7.0	7.2 7.7 (7.2) 6.8	1.08 1.12 (1.12) 1.17	0.40 0.42 (0.43) 0.47	1.65 1.66	1.66	0.0016
MG+MS	6.3 6.8 (6.4) 6.0	7.8 6.7 (7.1) 6.9	1.11 1.10 (1.14) 1.21	0.42 0.37 (0.41) 0.45	1.74 1.74	1.74	0.0016

()内の値は平均値を示す。

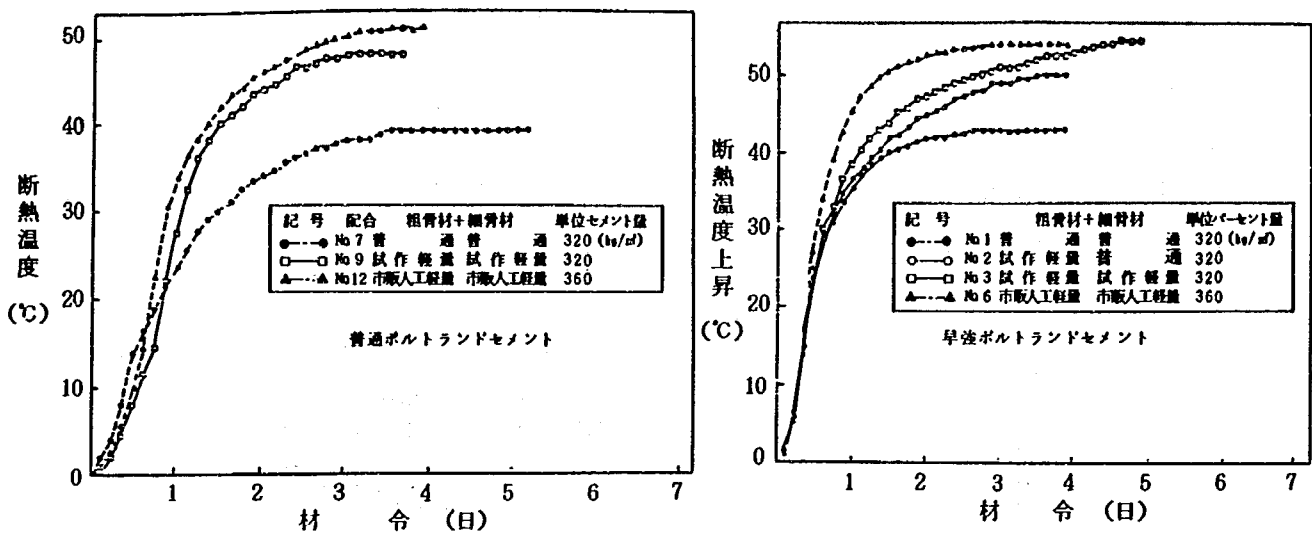


図10 断熱温度上昇試験結果 (一例)

表9 断熱温度上昇式

セメントの種類	骨材の組み合わせ		$T=K(1-e^{-\alpha t})$		$T=K\{1-(1+\alpha t)e^{-\alpha t}\}$	
	粗骨材	細骨材	K	α	K	α
早強ポルトランドセメント	G	S	43.41	1.400	42.45	3.100
	LG	S	50.41	1.181	47.92	2.841
	LG	LS	52.95	1.111	51.10	2.649
	MG	MS	55.12	1.352	53.71	3.010
普通ポルトランドセメント	G	S	40.08	0.818	38.35	1.907
	LG	LS	51.48	0.729	48.81	1.730
	MG	MS	53.07	0.816	50.72	1.911

表10 摩耗試験結果

配 合 (骨材の組合せ)	減 耗 品 (mg/mm ²)	摩 耗 深 さ (mm)
(G+S)	1.10	0.48
	1.24(1.10)	0.54(0.48)
	0.96	0.43
(LG+LS)	1.20	0.37
	1.37(1.28)	0.84(0.78)
	1.26	0.77
(MG+MS)	1.38	0.79
	1.40(1.32)	0.82(0.76)
	1.17	0.67

()内の数値は平均値を示す。

4. アルカリ骨材反応

1) 試験方法

LSおよびMSをJASS 5N「原子力発電所施設鉄筋コンクリート工事(案)」の3.2 で定める細骨材の粒度になるように調整し、JASS 5N 201「骨材の反応性試験方法(案)」に準じて、セメント中のアルカリ濃度をNa₂O等価量で0.6 %および1.2 %として実験した。

2) 結果

材令6カ月迄の試験結果を図11に示す。LSおよびMSとも、アルカリとの膨張反応量は、規格値の0.1 以下に比べ極めて低い値を示した。

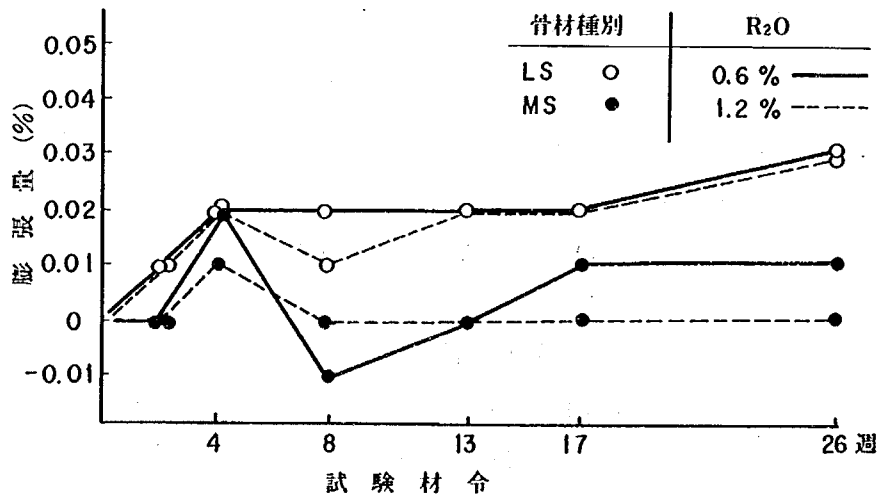


図11 試験材令と膨張量との関係

5. ポンプ圧送性

1) 人工軽量骨材の事前吸水率 (Presoaking又はSaturation Ratio)

軽量骨材は、内部に多量の空隙を有するため、十分に吸水していない骨材を使用するとポンプ圧送中の圧力によって吸水し、コンクリートの流動性を損い、場合によってはポンプ配管閉塞の原因となる。

これを避けるため現在市販されている人工軽量骨材は、その製造工場で十分吸水させた後に、生コン製造工場等に出荷されているのが通常である。現在市販品の出荷時吸水率の目安は粗骨材で25%、細骨材で15%以上となっている。

粗骨材の使用時の吸水率が20~28%の粗骨材を用いたコンクリートのポンプ圧送時の増加吸水率（圧送直後のコンクリート中の骨材の吸水率－使用時吸水率）は、平均で0.5 %であり、この吸水によって生じるコンクリートの有効水量の減少は約3 ℓで、これによるスランプの低下は約1 cmにすぎず良好なポンプ圧送性を示した。又15%程度吸水したスラジライトの30kg/cm²の水中加圧による吸水率の増加は約1.9 %であり、これは同程度吸水した市販人工軽量細骨材の圧力吸水率とほぼ同等である。しかし、使用時吸水率が13.6%のLGを使用した試作軽量骨材コンクリート（LG+S）については、ベーススランプ15cmを21cmに流動化しても、ポンプ圧送が不可能となり、閉塞した。この閉塞したコンクリートの中から採取した骨材について吸水率を測定した所元の13.6%から18.8%までに増加していた。したがって加圧吸水率は5.2 %で、それによる有効水量の減少は約26 ℓ/m³であり、その結果管内で閉塞したコンクリートの有効水量は166 - 26 = 140 ℓ/m³と考えられ、コンクリートの流動性が全く失われたわけである。

又、吸水率20%以上のスラジライトを一部使用したコンクリートの圧送性は、普通骨材を使用したコンクリートとほとんど同等であり良好であった。

2) 軽量骨材コンクリートのポンプ圧送に対する注意事項

軽量コンクリートの長距離ポンプ圧送を円滑に行うためには、次の基本事項を守る必要がある。

- ① 出来るだけ大きい口径の配管を使用する。最低でも5 B（125 A）管を使用する。
- ② 流動化コンクリートを使用する。（スランプ20cm以下の場合）
- ③ セメントを含めた微粒分（0.3 mm以下）の量は最低450 kg/m³とする。
- ④ ポンプから配管へのテーパ管は出来るだけ低スロープの管とする。
- ⑤ ベント管は出来るだけ使用を減らし、フレキシブルホースは出来るだけ短いものを使用する。

3) 硬練り軽量コンクリートの管内圧送抵抗

硬練り人工軽量骨材コンクリートは、流動化剤を用いることによってポンプ圧送可能である。図12にベーススランプ8 cmおよび12cmの硬練りコンクリートを1.5 cmおよび18cmに流動化した場合の圧送量と管内圧力損失との関係をしめした。

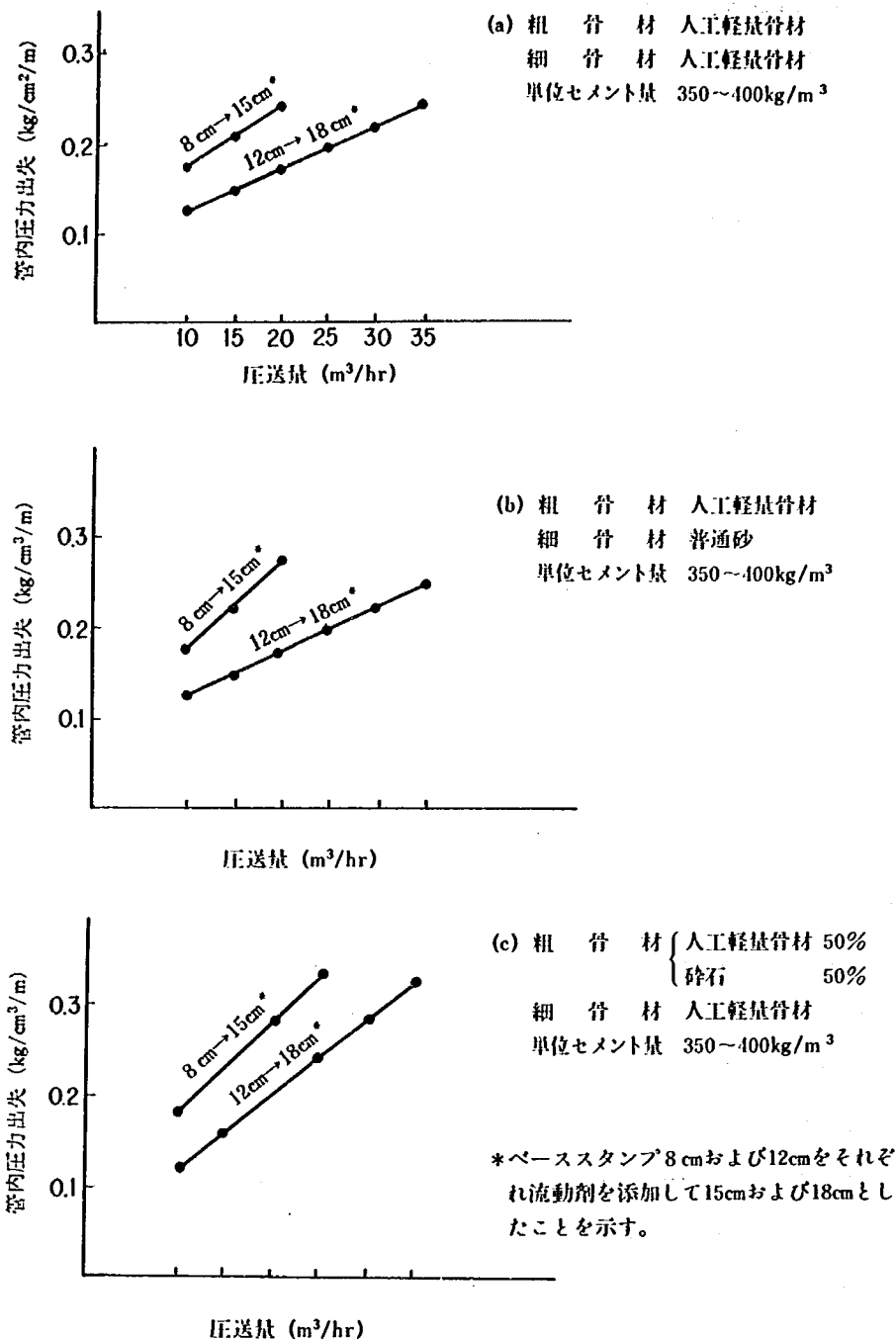


図12 スランプ・圧送量と管内圧力損失との関係 (管径125A)

4) 軽量モルタルの品質と圧送性

a. スラジライトモルタルと他種モルタルの品質

スラジライトは現状では微粒分が欠落しているが、良質の微粒分を使用することにより、コンクリート用骨材としてはもとより、モルタル用の良質な骨材として使用出来る。表11にスラジライトおよびスラジライトに微粒分を粒度調整用に混合した骨材の品質を示す。微粒材料の粒度は、この表中に示したものよりフライアッシュの場合はサンドアッシュ等のより粗目の石炭灰を、山砂の場合は更に細目のものを使用することが出来る。

図13に、単位容積一定の場合と同一W/Cで同一フロー値のスラジモルタルと川砂およびメサ

ライトモルタルの比較試験結果を示す。又長さ変化の試験結果は表12に示す通りで、これらの試験結果に示されるように、スラジライトは秀れた軽量モルタル用骨材である。

b. スラジモルタルの圧送性

図14に示す配管で圧送試験を行った各種モルタルの配合および圧送試験結果を表13に示すが、川砂又はメサライトを使用したモルタルとスラジライトモルタル間に品質の差は認められない。

但し、ポンプ圧送用の場合は、15%程度の吸水したスラジライトを使用しなければならない。

表11 混合細骨材の物理試験結果

微粉の種類	混合割合(%)		比重 ¹⁾	吸水率(%)	圧力吸水率(%)	粒度分布(残留%)						粗粒率 F.M
	スラジライト	微粉				5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	
フライアッシュ	70	30	1.84 (2.03)	10.2	2.4	0	2	42	67	68	68	2.47
	80	20	1.80 (2.02)	12.2	2.5	0	2	49	78	79	79	2.87
	85	15	1.75 (1.98)	13.0	2.7	0	2	52	83	84	84	3.05
山 砂	60	40	2.09 (2.28)	8.9	1.7	0	3	36	62	81	98	2.80
	70	30	1.99 (2.19)	10.1	1.9	0	3	42	71	85	98	2.99
	77	23	1.90 (2.12)	11.5	2.0	0	2	48	80	90	99	3.19
大 井 川 ²⁾	—	—	2.58 (2.62)	1.5	1.4	1	14	40	62	77	91	2.85
メサライト ²⁾	—	—	1.62 (1.88)	16.0	1.9	0	3	32	60	79	91	2.65
スラジライト (1:2)	100	0	1.72 (1.98)	15.1	1.9	0	3	62	99	100	100	3.64

※ 1) 絶乾比重で示す。()は表乾比重を示す。

2) 対比骨材の試験値を示す。

表12 長さ変化試験結果

細骨材		配 合		長さ変化率(×10 ⁻⁵)			
微粉の種類	混合割合(%)	W/C(%)	S/C	7日	28日	56日	100日
川 砂		53	3.0	6.0	10.9	12.7	13.7
人工軽量骨材(メサライト)			2.2	4.0	9.8	11.9	13.0
フライアッシュ	20		2.3	4.7	9.5	11.4	12.0
山 砂	30		2.6	5.3	11.0	13.0	14.0
石 粉	20		1.6	6.8	14.9	17.5	18.6
焼 却 灰	20		1.1	8.5	18.0	21.7	23.3

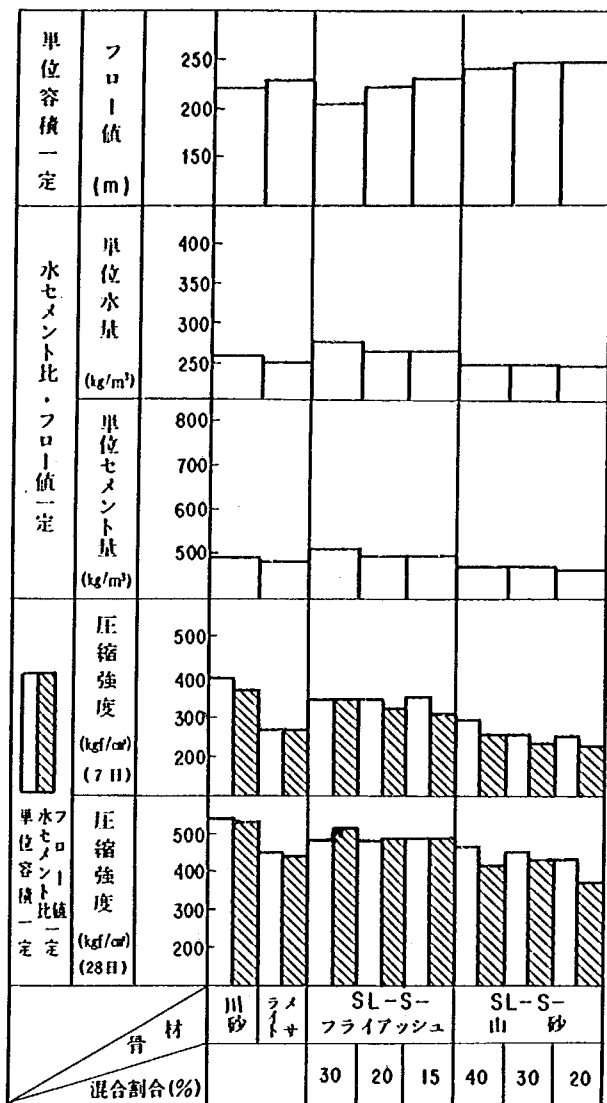


図13 混合細骨材とモルタルのフロー値、単位量および圧縮強度の関係

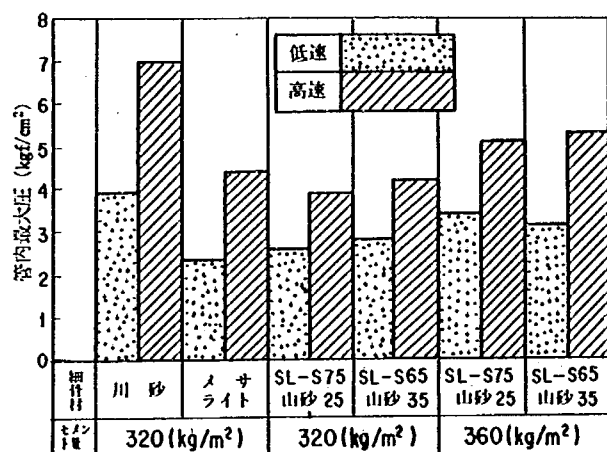


図15 配合の種類と管内圧力の関係

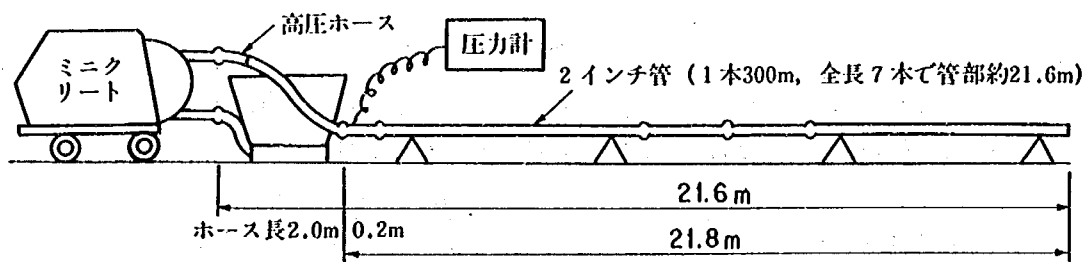


図14 モルタルの圧送試験配管図

表13 モルタルのポンプ圧送性試験結果

No	配合セメントの単位量 (kg/m ³)	細骨材	配 合								フロー値 (mm)			単位容積重量 ¹⁾ (kg/m ³)			ブリー ジング (圧送前)		管内圧力 (kg/cm ²)		モルタル の吐出量 (m ³ /h)		圧 縮 強 度 (kgf/cm ²)					
			W /C (%)	S/C		単 位 量 (kg/m ³) ¹⁾				圧送前	低 速	高 速	圧送前	低 速	高 速	率 (%)	量 (g/cm ³)	低 速	高 速	低 速	高 速	圧送前		低 速		高 速		
				容 積 比	重 量 比	セメ ント	水	細骨材 川砂又は 軽骨材	ポゾ リス No.70													7日	28日	7日	28日	7日	28日	
1	320	川 砂	51.6	3.23	2.66	506 (160)	261	1,347 (516)	—	1,265 ¹	240	225	224	2,190 (2.9)	2,194 (2.7)	2,199 (2.5)	4.0	0.14	4.0	7.0	3.2	6.4	335	469	333	447	347	453
2		人工軽質 骨材 (メサライト)	54.7	3.34	2.03	483 (153)	264	980 (521)	—	1,208 ¹	244	234	234	1,845 (1.2)	1,855 (0.6)	1,860 (0.4)	7.7	0.27	2.4	4.4	3.3	6.4	287	433	281	413	288	455
3		SL-S(75) 山砂 (25)	48.7	3.50	2.39	485 (153)	236	808 (408)	350 (133)	1,212 ¹	245	236	234	1,984 (2.6)	1,984 (2.6)	1,985 (2.4)	5.4	0.14	2.6	3.9	3.3	6.7	292	423	290	420	286	431
4		SL-S(65) 山砂 (35)	50.2	3.44	2.28	488 (154)	245	687 (316)	482 (183)	1,220 ¹	236	223	223	1,977 (3.9)	1,933 (3.6)	1,989 (3.4)	4.5	0.09	2.8	4.2	3.3	6.5	286	421	283	420	285	429
5	360	SL-S(75) 山砂 (25)	44.7	2.96	2.05	544 (173)	243	770 (388)	334 (127)	1,360 ¹	236	226	220	1,917 (4.9)	1,956 (4.4)	1,962 (4.2)	2.6	0.15	3.4	5.1	3.3	6.5	321	453	319	462	322	467
6		SL-S(65) 山砂 (35)	46.1	2.88	2.03	547 (173)	252	652 (328)	459 (175)	1,360 ¹	239	232	229	1,990 (3.7)	1,990 (3.7)	1,990 (3.7)	3.9	0.18	3.2	5.3	3.2	6.5	320	469	324	469	328	469

注) *1 () 内は絶対容積を示す。

2 () 内は単位容積量より求めた容気量を示す。
(モルタルの練り上り温度19~19.5℃)

6. 「汚泥焼成骨材品質基準」によるコンクリート品質試験結果

1) 試験項目と試験方法

a. 試験項目

試験項目は、軽量コンクリートに用いる汚泥焼成骨材の品質基準に規定する試験項目のうち、圧縮強度、付着強度、クリープ係数について試験する。

b. 試験方法

試験方法は全て「汚泥焼成軽量骨材品質基準」に規定する方法による。

2) 使用材料

a. セメント

セメントは、比重3.16の普通ポルトランドセメントを用いる。

b. 骨材

汚泥焼成軽量細骨材は、5~2.5 mmの大粒（表乾比重1.80、吸水率17.2%）と2.5~0.6 mmの小粒（表乾比重1.78、吸水率14.0%）をそれぞれ1：1で混合使用する。

微粒分としては、比重1.93の石炭灰を細骨材量の15%V O ℓ（内割）を混合して用いた。

粗骨材のうち汚泥焼成軽量骨材は、表乾比重1.4、吸水率6%のものを、砕石は表乾比重2.64、吸水率0.06%のものをを用いた。

c. 混和剤

Vinsol Resinを規定の空気量となる様に使用量を調整して用いた。

3) 調合と結果

用いた調合は、「汚泥焼成軽量骨材品質基準」に規定するA、B、CおよびDの4調合のうちAおよびDの2調合を用いた。粗骨剤は汚泥焼成軽量骨材（LG）と碎石の2種とし、細骨材は汚泥焼成軽量細骨材（スラジライト）+石灰灰の1種とした。

表14に、試験に用いた4種のコンクリートの調合とその結果を示す。

4) コンクリート品質

a. 圧縮強度

材令7日および28日における圧縮強度の測定結果を表15に示す。

b. 付着強度

材令28日における付着強度試験結果を表16に示す。

c. クリープ係数

材令27日における全ひずみ (ϵ_{at})、乾燥収縮 (ϵ_{st})、クリープひずみ

($\epsilon_{ct} = \epsilon_{at} - \epsilon_e - \epsilon_{st}$) およびクリープ係数 ($\phi_t = \epsilon_{ct} / \epsilon_e$) を表17に示す。

表14 コンクリートの調合とその結果

調 号 記 号		粗 骨 材 種 類	水 セ メ ン ト 比 (%)	細 骨 材 率 (%)	単 位 水 量 (kg/m³)	容積計量(ℓ/m³)			重量計量(kg/m³)			混 和 材 量 (cc/m³)	ス ラ ン プ (cm)	単 積 位 重 容 量 (kg/lit)	空気量(%)			
						セ メ ン ト	細 骨 材		セ メ ン ト	細 骨 材					重 量 法	圧 力 法		
							LS 大	LS 小		石 灰 石	LS 大						LS 小	石 灰 石
L	A	LG	43.8	45.0	177	128	125	125	44	404	225	223	86	84	15.8	1,619	4.0	4.6
	D		52.2	51.1	184	112	143	143	51	352	258	254	97	75	20.6	1,597	4.4	5.0
G	A	砕 石	43.3	44.9	175	128	125	125	44	404	225	223	86	135	13.8	2,068	4.0	3.6
	D		52.1	51.1	183	111	143	143	50	351	256	253	96	84	20.4	1,988	4.9	4.6

表15 圧縮強度試験結果(kgf/cm²)

材令	番号	L-A	L-D	G-A	G-D
7 日	1	273	183	318	216
	2	269	188	323	218
	3	262	186	323	217
	平均	268	186	321	217
28 日	1	414	318	444	335
	2	404	302	461	334
	3	412	310	435	322
	平均	410	310	447	330

表16 付着強度試験結果(kgf/cm²)

		番号	L-A	L-D	G-A	G-D
上 段	0.2 mm	1	47.8	29.4	78.3	50.1
		2	44.2	32.6	75.2	42.7
		3	53.9	38.1	61.1	49.9
		平均	48.6	33.4	71.5	47.6
	最 大	1	109.4	87.7	143.3	108.9
		2	113.3	88.6	138.3	114.7
		3	91.6	100.3	125.0	114.2
		平均	104.8	92.2	135.5	112.6
下 段	0.2 mm	1	70.2	40.2	82.6	60.3
		2	50.1	46.8	79.6	62.8
		3	54.8	44.7	78.6	67.2
		平均	58.4	43.9	80.3	63.4
	最 大	1	125.6	91.1	144.7	119.1
		2	117.6	102.6	142.4	123.9
		3	128.3	98.0	147.2	125.0
		平均	123.8	97.2	144.8	122.7

表17 クリープ試験結果(材令27日)

調 合	全 ひ ず み ϵ_{at}	軌 燥 収 宿 ひ ず み ϵ_{st}	弾 性 ひ ず み ϵ_e	ク リ ー プ ひ ず み ϵ_{ct}	ク リ ー プ 係 数 ϕ_t
L-A	180	21	92	67	0.73
L-D	189	36	84	70	0.83
G-A	163	33	74	56	0.76
G-D	160	42	61	57	0.94

5) 結果の考察

- 圧縮強度，設計基準強度270kgf/cm²に対して，規格値を十分に満足する。
- 付着強度は，上・下段の鉄筋とも設計基準強度270kgf/cm²に対し，規格値を十分に満足している。
- クリープ特性については，まだ若材令であるので今後の測定に待つ必要がある。

4 章 今後の課題

本研究で開発された下水汚泥の建設資材利用技術は、まだ十分に確立したものではなく、これらを広く一般へ普及するには、以下に述べるような課題が残されている。

(1) “下水汚泥資材”の品質管理技術の確立

流入下水の質の変動や汚泥処理工程での調質材の使用量の変動、焼却灰の貯蔵方法などにより、石灰系焼却灰の強度発現の源となる生石灰 (CaO) の含有量が、現状では大きく変化している。同様に、汚泥スラグ骨材の特性も成分変動や熔融炉操作条件の変化により大きく変化する。

今後、これらを、建設資材として供給する場合には、利用用途に合致するよう品質を制御することが必要であり、このためには、①現状での品質の変動を掌握し、②要求品質に適合した資材を生産する技術を確立する必要がある。

(2) 使用実績の蓄積および指針等への反映

本研究では、数多くの試験施工を実施し、“下水汚泥資材”を利用したときの強度や耐久性等について十分な検討を加えてきており、その上で使用分野を限定するといった安全側の利用方法を提案している。

今後は、実際の工事において広く使用実績を積み重ね、“下水汚泥資材”に対する信頼感を獲得するよう努めることが必要である。また、こうした実績をふまえて標準的な技術基準を作成し、それらの成果を、道路土工指針や舗装要綱などの既存の各種指針に反映させていくことが望まれる。

(3) 下水汚泥の建設資材利用を推進するための体制づくり

以上述べたような点が克服されても、下水汚泥を資材として利用するためには、様々な施設、例えば貯蔵施設や土質改良プラントが必要となる。

これらの施設の設置、運営を効率的に行うためにも、適切な体制の整備が不可欠である。

下水汚泥の建設資材利用を推進するためには、これら課題の克服とともに、新たな利用用途の開拓を続ける必要がある。

資料（発表論文名一覧）

研究発表会又は雑誌等で発表（予定含む）してきた本研究に関する論文名を以下に示す。

1. 全体に関する文献

- 1) 櫻井克信, 塚田幸広, 河野広隆, 吉兼秀典: 下水汚泥の建設資材化に関する実証的研究, 衛生工学研究論文集, Vol.23, 土木学会, 1987
- 2) 櫻井克信: 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」の成果, 再生と利用, Vol.9, No.35, 下水汚泥資源利用協議会, 1986
- 3) 京才俊則: 下水汚泥の建設資材利用技術の現状と課題, 月刊下水道, Vol.7, No.2, 1984年2月
- 4) 京才俊則: 汚泥の建設資材化の動向, 下水道協会誌, Vol.21, No.243, 1984年8月

2. 下水汚泥焼却灰の利用に関する文献

- 1) 大場康久: 焼却灰の埋戻し材・路盤材への利用, 土木施工, 11月臨時増刊, Vol.27, No.15, 山海堂, 1986
- 2) 久楽勝行, 三木博史: 改良土を用いた埋戻し技術の開発, 土木技術資料, Vol.29, No.4, 1987年4月
- 3) 嶋津晃臣, 塚田幸広, 岩瀬真二: 石炭灰・下水汚泥焼却灰等の深層混合処理への適用性, 土木技術資料, Vol.29, No.4, 1987年4月
- 4) 安崎裕, 吉兼秀典: 下水汚泥再生材の舗装への適用性, 土木技術資料, Vol.29, No.4, 1987年4月
- 5) 建設省土木研究所施工研究室: 石炭灰・下水汚泥焼却灰等の深層混合処理への適用性, 土木研究所資料第2304号, 1986年3月
- 6) 嶋津晃臣, 塚田幸広, 岩瀬真二: 土質安定処理への汚泥焼却灰の利用に関する室内試験, 第19回土質工学研究発表会講演集, 土質工学会, 1984年6月
- 7) 岩瀬真二, 塚田幸広, 嶋津晃臣: 汚泥焼却灰を用いた高有機質土の現場改良実験, 土木学会第39回年次学術講演会講演概要集, 土木学会, 1984年10月
- 8) 久楽勝行: 建設残土の土質改良技術の現状, 日刊建設, Vol.25, 1981
- 9) 関一雄, 久楽勝行, 三木博史, 松井清: 下水汚泥の圧密特性, 第37回土木学会年次学術講習会, 1982
- 10) 久楽勝行: 建設事業への廃棄物利用技術の開発（建設省総合技術開発プロジェクト）の動向について, 再生と利用, Vol.6, No.22, 1983
- 11) 久楽勝行, 飯島尚, 小林茂敏, 京才俊則, 松下行雄: 研究者からみた下水汚泥の建設資材化, 再生と利用, Vol.6, No.22, 1983
- 12) 久楽勝行, 三木博史: 土質改良した掘削残土の埋戻しへの利用に関する一考案, 第15回日本道路会議特定課題論文集, 1983
- 13) 久楽勝行: 下水汚泥の利活用（盛土, 地盤, 舗装路盤, 骨材化等）, 第216回建設技術講習会テキスト, 1984

- 14) 久楽勝行：建設廃材の再利用—背景と問題点及び今後の動向—，月刊建設，Vol.29，1986
 - 15) 久楽勝行：建設産業廃棄物の有効利用，建設廃棄物に関する問題，土木学会関東支部編，1985
 - 16) 久楽勝行：産業廃棄物の再利用，土木学会誌，Vol.70，1985
 - 17) 久楽勝行，三木博史：改良土を用いた埋戻し技術の開発，第40回建設省技術研究会報告，昭和61年度
 - 18) 久楽勝行：建設残土の処理とその有効利用，土木施工，11月臨時増刊，Vol.27，No.15，1986
 - 19) 万波一郎：土質改良プラントの事例，土木施工，11月臨時増刊，Vol.27，No.15，1986
 - 20) 尾上暉隆：改良土による埋戻しの施工事例，土木施工，11月臨時増刊，Vol.27，No.15，1986
 - 21) 岡田芳樹，久楽勝行，三木博史：土中のフミン酸が土質改良効果に及ぼす影響，第38回土木学会年次講演会，1983
 - 22) 岡田芳樹，久楽勝行，三木博史：土中のフミン酸が土質改良効果に及ぼす影響，第38回土木学会年次講演会講演概要集，第3部，PP.307～308，1984
 - 23) 久野悟郎，桜井裕一：軟弱粘性土のセメント系固化材による改良，第15回日本道路会議特定課題論文集，PP.85～87，1983
 - 24) 久楽勝行，三木博史，岡田芳樹：土中のフミン酸が土質改良効果に及ぼす影響，土木技術資料，Vol.26，No.8，PP.3～8，1984
 - 25) 三木博史，久楽勝行，岡田芳樹：土中のフミン酸が土質改良効果に及ぼす影響(第2報)，第39回土木学会年次講演会講演概要集，第3部，PP.307～308，1984
 - 26) 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法，土木技術資料，Vol.27，No.10，PP.33～39，1985
 - 27) 久楽勝行，三木博史，工藤浩一郎：吸光度法によるフミン酸含有量の簡易推定，第21回土質工学研究発表会講演集，PP.1933～1934，1986
 - 28) 久野悟郎，久楽勝行，三木博史，岡田芳樹：土中のフミン酸と自然含水比に着目した軟弱粘性土の土質改良効果判定手法，土木技術資料，Vol.29，No.1，PP.31～36，1987
3. 下水汚泥スラグの利用に関する文献
- 1) 櫻井克信：成分組成の異なる溶融スラグの骨材試験結果，再生と利用，Vol.8，No.30，下水汚泥資源利用協議会，1985
 - 2) 北井克彦，小林信博，大津茂：汚泥溶融スラグの路盤材への利用，土木施工，11月臨時増刊，Vol.27，No.15，山海堂，1986
 - 3) 京才俊則，河野広隆，櫻井克信：下水汚泥スラグ骨材のコンクリートへの利用技術の開発，土木技術資料，Vol.29，No.4，1987年4月

下水汚泥の建設資材としての
利用方法

ISSN 0386-5878

土研資料第2440号

昭和62年2月(1987)

要 旨

大 嶋 吉 雄 ・ 櫻 井 克 信

下水汚泥の埋立処分が、難しくなっていることから、下水汚泥を建設資材として利用することに対する期待は大きい。本報告は、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」で得られた成果のうち、下水汚泥の建設資材利用に関する部分をまとめたものであり、下水汚泥焼却灰、溶融スラグや軽量骨材を、盛土及び埋戻し材料、土質改良用添加材、路盤・舗装材及びコンクリート骨材として利用するにあたっての評価及びこれらの成果を基に作成した利用に関する各種基準(約)等について述べたものである。

キーワード：下水汚泥，建設資材，焼却灰，溶融スラグ，軽量骨材，盛土，埋戻し，土質改良，路盤材，コンクリート骨材

郵便はがき

四十円切手
を貼って
さい

305-□□

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

建設省土木研究所

下水道部汚泥研究室

御中

No. _____

No. _____

配布先氏名

○

配布先住所

土木研究所資料第2440号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印