共同研究報告書
整理番号第 312 号

下水汚泥焼却灰の建設資材利用高度化のための焼却灰改質方法と安全性評価に関する共同研究(2)報告書

(加圧振動成形による灰硬化体の製造)

平成 16 年 3 月

独立行政法人土木研究所
栗田工業株式会社

Copyright © (2005) by P.W.R.I.

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

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

共同研究報告書
第312号 2004年3月

下水汚泥焼却灰の建設資材利用高度化のための焼却灰改質方法と安全性評価に関する共同研究(2)報告書

リサイクルチーム　上席研究員　鈴木穣＊
主任研究員　南山瑞彦＊＊
研究補助員　宮本綾子
＊　現、水質チーム　上席研究員
＊＊　現、国土技術政策総合研究所　下水処理研究室　室長

栗田工業株式会社　江川由修
宮原健一

要旨

下水汚泥焼却灰を多量に配合したコンクリート製品を開発することを目的として、灰の前処理方法と成型方法の最適化、灰および灰硬化体の物性調査と環境安全性に関する検討を実施した。灰硬化体の強度は原料となる灰により異なったが、灰から溶出する硫酸イオンが影響している可能性があり、二水石膏等の薬品を配合することにより強度が向上することがわかった。灰硬化体からの六価クロムの溶出は、硝酸カルシウム等の添加により防止できた。灰硬化体の圧縮強度向上のためには加圧振動成形が有効であったが、この方法を用いた場合、耐久性を改善するために混和剤等の配合について検討することが必要であることが示された。

キーワード：下水汚泥焼却灰、建設資材利用、コンクリート製品、重金属溶出

まえがき

下水道の普及に伴い下水汚泥の発生量は年々増加し、産業廃棄物総排出量の約 20%に達している。その一方で、埋立処分地はひっ迫しており、また、循環型社会の形成のためにも廃棄物の減量化および有効利用が求められている。

下水汚泥の有効利用用途として、従来は緑農地利用が主だったものの、平成 7 年以降は建設資材利用が上回るようになり、現在ではセメント原料化がその多くを占めている。しかし、将来的にはセメント原料化による利用量の拡大は難しく、新たな利用技術の開発が必要である。

下水汚泥の 74%は焼却処分されており（平成 15 年度）、その有効利用先としてはコンクリート製品への適用があげられるが、強度等の問題から可能な配合量は限られたものとなっている。

平成 13 年度から平成 15 年度にかけて、独立行政法人土木研究所と栗田工業株式会社の 2 者で、下水汚泥焼却灰を多量に配合したコンクリート製品を開発するために、焼却灰の前処理方法の最適化、製品の成型方法の検討、安全性評価に関する共同研究を行った。本報告書は、その共同研究について成果をとりまとめたものである。

— 目 次 —

第１章　建設資材の用途に応じた焼却灰有効利用法の検討 1
１－１　本共同研究の背景 1
１－２　本共同研究の目的 5
１－３　本共同研究の検討内容 6
第２章　製法に関する検討 9
２－１　灰前処理方法の検討 9
２－１－１　はじめに 9
２－１－２　転動ミルの評価 10
２－１－３　振動ミルの評価 12
２－２　成形方法の検討 21
２－２－１　はじめに 21
２－２－２　成形方法の比較（加圧成形、加圧振動成形） 22
２－２－３　低強度の要因調査と強度改善策の検討（加圧成形、加圧振動成形） ... 24
２－２－４　少量成形試験法による検討（φ10cm×H20cm 型枠による加圧振動成形）
..... 33
第３章　灰および灰硬化体の物性に関する検討 56
３－１　はじめに 56
３－２　転動ミルにより粉砕処理を行った灰の物性 56
３－３　加圧振動成形法による灰硬化体の物性 60
第４章　安全性に関する検討 71
４－１　はじめに 71
４－２　原料の化学組成と溶出挙動 72
４－３　灰硬化体の溶出挙動と六価クロム溶出対策 74
４－３－１　灰硬化体の溶出挙動 74
４－３－２　還元剤の検討 75
４－３－３　セメント種類の検討 77
４－３－４　カルシウム系薬品の検討 78
４－４　低 pH 溶出条件（アベイラビリティ試験）における灰硬化体の溶出挙動 79

第５章　総合評価 89
５－１　まとめ 89
５－２　今後の課題 89

第１章　建設資材の用途に応じた焼却灰有効利用法の検討

１－１　本共同研究の背景

下水道の普及に伴い、下水処理によって発生する汚泥量は年々増加している。図 1-1　下水汚泥の発生量の経年変化[1)]　によると、下水道普及率 65%となった 2002 年には、発生汚泥量は約 210 万 DSt／年に達している。

これらの下水汚泥の多くは、従来、廃棄物として埋立処分されてきたが、埋立処分地の逼迫や循環型社会の形成といった観点から、減量化および有効利用への取組みが強く求められている。表 1-1　下水汚泥の処理および処分の状況[1)]　によると、下水汚泥の処理性状としては、焼却灰等に減量化される割合が発生した汚泥全体の 74%と最も高く、また、有効利用については、発生した汚泥全体の 60%に達していることが示されている。

下水汚泥の有効利用用途としては、図 1-2　汚泥の最終安定化先の構成率[1)]　に示されているように、近年は建設資材としての有効利用の割合が多くなっており、なかでも、図 1-3 汚泥の有効利用の推移[1)]　に示されているように、セメント原料として利用される割合が急激に増加している。

建設資材としての有効利用は、従来、焼成レンガ化や溶融スラグ化による検討が多く、実績も豊富であるが、近年はこれらの方法による有効利用量の伸びは少ない。これらの有効利用方法は、高温で処理するプロセスを経るため、イニシャルコスト、ランニングコストが高くなる傾向にあることがその要因と考える。

一方、セメント原料としての有効利用は、脱水汚泥、乾燥汚泥、焼却灰等、下水汚泥の処理性状を問わないこと、また多くの場合、埋立処分料金と同等程度のコストで有効利用可能であること、等が有効利用量拡大の要因と考える。

セメント産業は、高炉スラグや石炭灰等、従来より廃棄物等をセメント原料として利用してきた経緯があるが、近年は特に積極的に廃棄物等の受け入れを行っている。平成 13 年には、「循環型社会の構築に向けたセメント産業の役割を検討する会」により、セメント産業がさらに廃棄物等の利用を拡大するための提言が取りまとめられている。このなかで、法制度上の改善や新技術の開発・導入等の条件整備と地域の理解の進展が図られることを見込んで、平成 11 年度の廃棄物等利用水準(311kg／t-セメント)を平成 22 年度までに 400kg／t-セメントに引き上げる、というセメント産業としての努力目標が示された。

この努力目標とされる廃棄物等利用水準は、原料とされる廃棄物等の多くが、図 1-4　セメントの原料構成[2)]　に示した石灰石以外の原料成分を代替するために利用されていることを考慮すると、ほぼ限界に近い水準に設定されているものと推定する。

しかし、図 1-5　セメント産業における廃棄物等の有効利用状況[2)]　に示した通り、最近の廃棄物等利用水準は、平成 22 年度に設定した努力目標に対して前倒しで迫る勢いで上昇

している。これは、原料として利用する廃棄物等の受入量増大と同時に、建設投資の減少を背景としてセメント生産量が減少した結果によるものと考える。

セメント産業に対する廃棄物の有効利用先としての期待は今後も高まるものと考えられるが、原料として受け入れられる廃棄物量には限界があることから、将来的にセメント原料としての廃棄物受入が制限される可能性が考えられる。このため、下水汚泥焼却灰についても、現在依存しつつあるセメント原料化以外の新たな有効利用先が求められている。

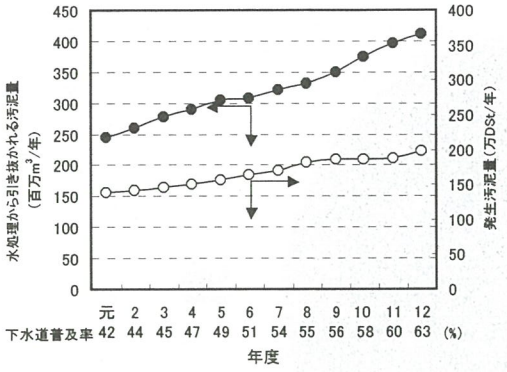


図1-1　下水汚泥の発生量の経年変化
（再生と利用,Vol.26,No.98,2003/1の図-1）

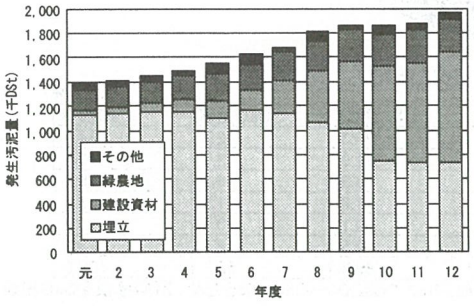


図1-2　汚泥の最終安定化先の構成率
（再生と利用,Vol.26,No.98,2003/1の図-7）

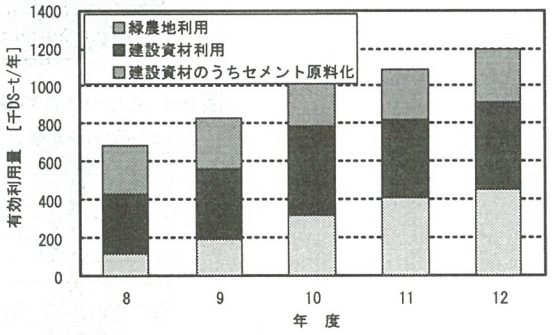


図1-3　汚泥の有効利用の推移
（再生と利用,Vol.26,No.98,2003/1の図-8）

（単位：千DS-t）

処分形態 / 処理性状	埋立処分（陸上・海面）	有効利用	その他	計	（%）
脱水汚泥	103	43	5	151	8%
焼却灰等	624	900	41	1,565	79%
乾燥汚泥等	11	248	1	261	13%
消化・濃縮汚泥（液状汚泥）	0	0	0	0	0%
計	738	1,191	47	1,977	
（%）	37%	60%	2%		

（注）焼却灰等は、焼却灰・溶融スラグを、
乾燥汚泥等は、乾燥汚泥・コンポスト（堆肥化汚泥）・炭化汚泥を示す。

表1-1　下水汚泥の処理および処分の状況　再生と利用,Vol.26,No.98,2003/1の表-2

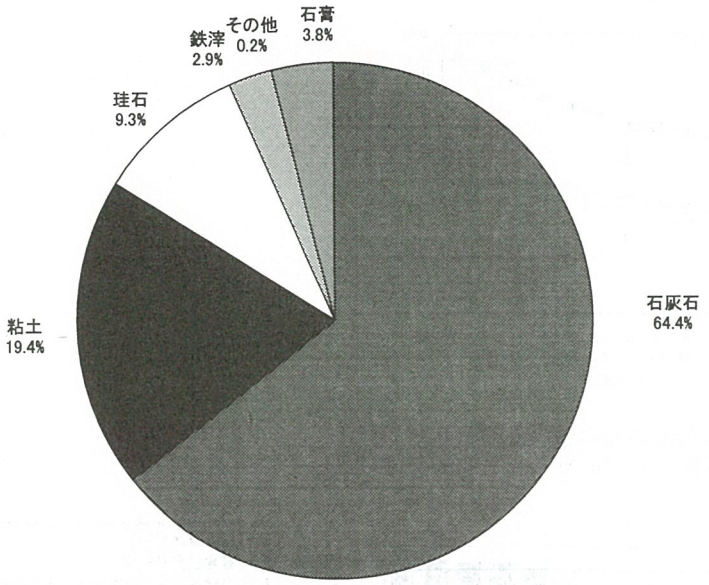


図1-4 ｾﾒﾝﾄの原料構成:H14年度

単位:%

石灰石の組成換算 注)	CaCO3換算	CaO換算	CaO換算
石灰石	76.3	42.7	64.4
粘土	12.9	12.9	19.4
珪石	6.2	6.2	9.3
鉄滓	1.9	1.9	2.9
その他	0.1	0.1	0.2
石膏	2.5	2.5	3.8
合計	99.9	66.3	100.0

注) 石灰石はｾﾒﾝﾄの焼成ﾌﾟﾛｾｽでCaCO3→CaOとなるため、原料構成をCaO組成で換算した。

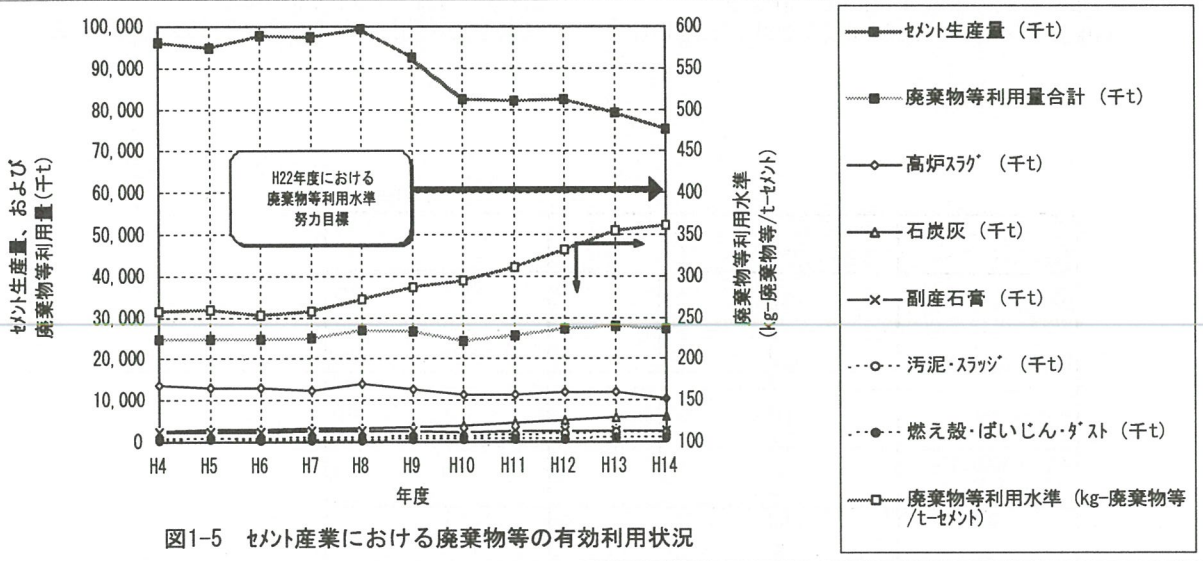


図1-5 ｾﾒﾝﾄ産業における廃棄物等の有効利用状況

項目	(単位) 年度	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14
ｾﾒﾝﾄ生産量	(千t)	96,212	94,886	97,641	97,496	99,267	92,558	82,569	82,181	82,373	79,119	75,479
廃棄物等利用量合計	(千t)	24,718	24,545	24,683	25,097	26,986	26,600	24,371	25,584	27,359	28,061	27,238
高炉ｽﾗｸﾞ	(千t)	13,550	13,103	12,860	12,486	13,892	12,684	11,353	11,449	12,162	11,915	10,474
石炭灰	(千t)	2,546	2,767	2,872	3,103	3,402	3,517	3,779	4,551	5,145	5,822	6,320
副産石膏	(千t)	2,212	2,192	2,286	2,502	2,522	2,524	2,426	2,567	2,643	2,568	2,556
汚泥・ｽﾗｯｼﾞ	(千t)	622	757	785	905	930	1,189	1,394	1,744	1,906	2,235	2,286
燃え殻・ばいじん・ﾀﾞｽﾄ	(千t)	474	510	367	487	441	543	531	625	734	943	874
廃棄物等利用水準	(kg-廃棄物等/t-ｾﾒﾝﾄ)	257	259	253	257	272	287	295	311	332	355	361

１－２　本共同研究の目的

下水汚泥焼却灰(以下、灰とする)を、低コストで建設資材へ有効利用する方法として、これまでにコンクリート製品への有効利用が検討されている[3)、4)、5)]。

しかし、灰の配合量を多くすると製品強度が低下するため、コンクリート製品に対する灰配合割合は数%程度であり、有効利用できる灰の量が少ないという課題があった。

本共同研究以前に、灰の前処理と加圧成形法の組合せ(以下、加圧成形法とする)により、灰配合割合を高めた硬化体(以下、灰硬化体とする)の作製を検討している。灰硬化体においては、灰の配合割合を高めるために、粗骨材や細骨材を配合せず、前処理した灰を最も多く配合している。灰硬化体は、骨材を使用しない点で一般的なコンクリートやモルタルとは異なるため、灰を多量に配合したセメントペーストと位置付けられる。旧製法においては、成形した灰硬化体の用途を、レンガやインターロッキングブロックといった既存の舗装ブロック等の代替として検討を進めた。その結果、表 1-2　加圧成形法における検討結果に示す成果を得ており、これらにより、舗装ブロック等への適用が可能との見通しを得た。

加圧成形法において、高い灰硬化体強度が得られた理由として、以下の可能性が推定された。

①前処理として、転動ボールミル(一般的には、単にボールミルと称するが、後述する振動ミルとの対照から、以下、転動ミルとする)による灰の粉砕処理を行うことにより、粒子内部の空隙が低減して灰粒子が高密度化した結果(図 1-6 に、粉砕処理による灰粒子高密度化のイメージ　を示す)、灰硬化体としても高密度化した。

②成形法として、19.6N/mm2 の面圧で加圧成形することにより、セメント水和物の結合力を高めることができた。

しかし、加圧成形法においては、以下の課題があった。

①前処理方法に関する課題：

使用した転動ミルの粉砕処理条件(ex:粉砕時間)と処理灰のかさ密度との関係、および処理灰のかさ密度と灰硬化体物性(ex:圧縮強度)との関係が十分把握されていないため、粉砕処理において多くのコストを要するにもかかわらず、所定の灰硬化体物性を得るための最適な灰の粉砕処理条件が明らかでない。

②成形方法に関する課題

加圧成形を行うため、単純な形状の製品に用途が限定され、製品あたりの灰配合割合を高めても、コンクリート製品としての灰有効利用量が制約される。また、振動等により締め固めを行う一般的なコンクリート製品よりも設備コストが高くなる。

③安全性に関する課題

灰硬化体から六価クロムの溶出が観察されたため、塩化カルシウムを対セメント10w/w%程度添加する方法により六価クロム溶出を防止できたが、この方法では塩素による鉄筋の腐食が懸念されるため、灰硬化体の用途が無筋コンクリート製品に限定

される。また、灰硬化体から溶出する六価クロムの由来および溶出挙動に影響を与える要因が十分把握されていない。

よって、本共同研究においては、上記課題の解決策を検討し、灰をコンクリート製品として多量かつ安全に有効利用するための新製法の開発を目的とする。

１－３　本共同研究の検討内容

本節では、本報告書の構成について述べる。以下に各章の概要を示す。

第１章では、本共同研究の背景として下水汚泥焼却灰有効利用の現状について概観し、従来の灰有効利用に向けた取組み経緯を踏まえて本共同研究の目的について述べ、本共同研究における検討内容について全体を俯瞰する。

第２章では、製法に関する検討として、製造プロセスに沿って、まず灰前処理方法の検討内容について、次いで成形方法の検討内容について述べる。

灰前処理方法の検討内容としては、2種類の微粉砕機(転動ミルおよび振動ミル)について、操作条件と灰のかさ密度との関係を評価した結果について示す。

成形方法の検討内容としては、検討開始初期に灰の入手先によって灰硬化体の強度が低下することが判明したことを受け、強度低下原因の調査と強度改善対策の検討結果について示し、次いでコンクリート製品の製造方法として加圧成形法より一般的な製法であり、加圧成形法と同様に即時脱型が可能な加圧振動成形法において、各種配合条件が強度に及ぼす影響について検討した結果を示す。

第３章では、転動ミルにより粉砕処理した灰の粉体物性について、および加圧振動成形法により成形した灰硬化体のコンクリート関連の材料物性等について検討した結果を示す。

第４章では、安全性に関する検討として、まず灰硬化体の主要な原料である灰とセメントについて各々の化学組成と溶出挙動の調査結果を示し、次いで灰硬化体の溶出挙動調査結果から灰の入手先によらず六価クロムの溶出対策が必要であることが明らかになったことを受け、薬品の配合等により灰硬化体の六価クロム溶出対策を検討した結果について述べる。そして、六価クロム溶出防止効果を示した配合条件で灰硬化体を作製し、低 pH 溶出条件における溶出挙動を把握するために行ったアベイラビリティ試験の結果について示す。

第５章では、本共同研究を通じて得た知見についてまとめ、今後の課題について述べる。

表1-2　従来の手法における検討結果

配合	灰の種類	高分子系下水汚泥焼却灰			
	重量配合比 (灰配合割合59%)	灰	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	水	含水比(%)
		100	40	29.4	21
製法	灰前処理条件	転動ﾐﾙにより、ﾀｯﾌﾟかさ密度1.3g/cm3前後まで粉砕処理を行った。			
	製造ﾌﾟﾛｾｽ	灰前処理→計量・混練→ﾌﾟﾚｽ成形(面圧19.6MPa)→養生			
物性	品質項目	試験結果	品質規格	引用	
	曲げ強度(N/mm2)	7.3	4.9	ｲﾝﾀｰﾛｯｷﾝｸﾞﾌﾞﾛｯｸ舗装技術協会	
	圧縮強度(N/mm2)	43	32	ｲﾝﾀｰﾛｯｷﾝｸﾞﾌﾞﾛｯｸ舗装技術協会	
	耐凍害性	異常なし　注1)	ー	JIS A 1435　注2)	
	耐磨耗性	異常なし　注3)	ー	JIS K 7204	
	ｽﾍﾞﾘ抵抗(BPN)乾	66	40≦	ASTM E303	
	ｽﾍﾞﾘ抵抗(BPN)湿	72	40≦	ASTM E303	
安全性	環告46号溶出試験	試験結果	土壌環境基準	備考	
	総水銀	＜0．0005	0．0005	六価ｸﾛﾑ溶出対策として、塩化ｶﾙｼｳﾑを対ｾﾒﾝﾄ10%添加した。	
	ｶﾄﾞﾐｳﾑ	＜0．001	0．01		
	鉛	＜0．005	0．01		
	六価ｸﾛﾑ	＜0．02	0．05		
	砒素	＜0．005	0．01		
	ｾﾚﾝ	＜0．01	0．01		

注1）相対動弾性係数の低下は認められなかった。
注2）気中凍結水中融解法、200ｻｲｸﾙ
注3）同等条件で試験を行った市販ｲﾝﾀｰﾛｯｷﾝｸﾞﾌﾞﾛｯｸと比較して有意差なし。

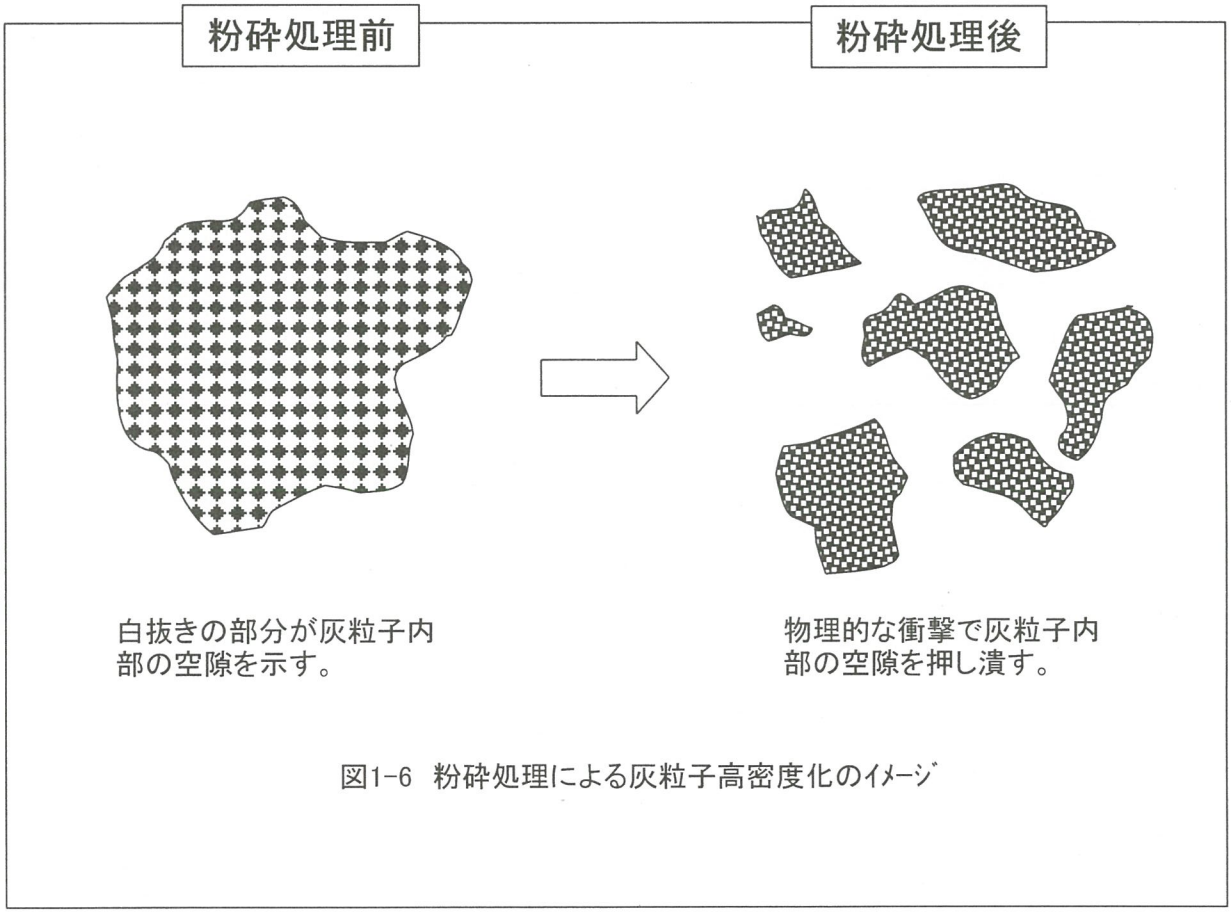


図1-6　粉砕処理による灰粒子高密度化のｲﾒｰｼﾞ

第１章の参考文献

１）高橋一彰，下水汚泥処理および有効利用の変遷と現状、再生と利用、
Vol.26、No.98、pp.98-102(2003)
２）社団法人セメント協会　セメントハンドブック 1998 年度版～2003 年度版
３）金子憲治,管谷悌治,下水汚泥焼却灰のコンクリート二次製品への利用，再生と利用,Vol.24,No.93,pp.70-77(2001)
４）山本豊,汚泥焼却灰を使用した製品用コンクリートの配合技術と基礎的特性,第 36 回下水道研究発表会講演集,pp.917-919(1999)
５）小柳洽,小澤満津男,本田恵佑,野崎真司,下水汚泥焼却灰の溶出と焼却灰を混入したモルタルの諸性質,第 52 回セメント技術大会講演要旨,pp.424-425(1998)

第２章　製法に関する検討

２－１　灰前処理方法の検討

２－１－１　はじめに

第１章１－２で述べたように、従来の手法において、灰配合割合を高めても高い灰硬化体強度が得られた理由として、転動ミルを使用した灰の前処理により灰粒子内部の空隙が低減し、結果として灰硬化体が高密度化した、との可能性が推定された。

しかし、従来の手法では、使用した転動ミルの粉砕処理条件(ex:粉砕時間)と処理灰のかさ密度との関係、および処理灰のかさ密度と灰硬化体物性(ex:圧縮強度)との関係が十分把握されていないため、粉砕処理において多くのコストを要するにもかかわらず、所定の灰硬化体物性を得るための最適な灰の粉砕処理条件が明らかでない、という課題があった。

よって、まず転動ミルの操作条件と処理灰のかさ密度との関係について検討を行った。

また、転動ミルは数時間単位の粉砕時間を要するため、より効率的な灰の前処理方法を見出す目的で、転動ミルの 10～20 倍の粉砕速度を有するとされている振動ミルについて評価を行った。

２－１－２　転動ミルの評価

１）目的

転動ミルにおける操作条件が、処理灰のかさ密度に与える影響を把握する。

２）試験

バッチ式転動ミルを使用し、操作条件として(1)ボール径の影響、(2)灰充填率[注)]の影響、について検討を行った。一定時間毎に処理灰のサンプリングを行い、ルーズかさ密度およびタップかさ密度を測定した。

注）　ボール充填層空隙に対する灰仕込量の体積割合。

図 2-1-1 に、バッチ式転動ミル外観概略図　を示す。

図 2-1-2 に、ドラム内におけるボールの挙動　を示す。

表 2-1-1 に、バッチ式転動ミルの一般的な操作条件　を示す。

表 2-1-2 に、使用したバッチ式転動ミルの基本仕様と操作条件設定例　を示す。

表 2-1-3 に、使用したボールの基本仕様　を示す。

表 2-1-4 に、使用した灰の粉砕前かさ密度測定結果　を示す。

表 2-1-5 に、バッチ式転動ミルの設定操作条件　を示す。

(1)ボール径の影響

灰充填率を 100%一定とし、ボール径をφ100mm、φ50mm、φ20mm の 3 水準として粉砕処理を行った。

(2)灰充填率の影響

ボール径をφ100mm 一定とし、灰充填率を 75%、100%、125%、150%の 4 水準として粉砕処理を行った。

３）結果および考察

(1)ボール径の影響

表 2-1-6 および図 2-1-3 に、ルーズかさ密度の経時変化(ボール径の影響)　を示す。

粉砕処理時間前半(120 分以内)においては、ボール径が小さい場合、ルーズかさ密度は一旦減少する傾向を示した。ボール径が小さいほどルーズかさ密度の減少量は大きかった。

粉砕処理時間後半(120 分以降)においては、いずれのボール径もルーズかさ密度は増加する傾向を示した。粉砕処理に伴うルーズかさ密度の増加量は、ボール径φ20mm よりもφ50mm やφ100mm の方が大きかったが、φ50mm とφ100mm とを比較した場合、ボール径の影響について明確な傾向は認められなかった。

表 2-1-7 および図 2-1-4 に、タップかさ密度の経時変化(ボール径の影響)　を示す。

タップかさ密度は、いずれのボール径でも、粉砕処理時間の経過に伴って増加した。粉砕

処理に伴うタップかさ密度の増加量は、ボール径が大きい傾向を示した。ただし、粉砕処理時間前半(120 分以内)では、ボール径φ50mm とφ100mm のタップかさ密度増加量は、ほぼ同程度であった。

粉砕時間後半(120 分以降)になると、ボール径φ20mm と 50mm は、タップかさ密度の増加量がやや頭打ちになる傾向を示した。

今回行った粉砕処理のように、粉砕処理前の時点で粒径が数 mm 以下であるような原料を粉砕する操作は、微粉砕に相当する。転動ミルを使用して微粉砕を行う場合、一般的には、使用するボール径を小さくしてボール表面積を大きくすることにより、より速く細かい粒径の被粉砕物が得られるとされている。今回は、粒径ではなくかさ密度を粉砕程度の指標としたところ、ボール径は大きい方がかさ密度が増加する傾向を示した。これは、ボール径の大きい方が衝突時の粉砕エネルギーが大きいため、灰粒子を圧密する効果が高かったことによるものと考える。

(2)灰充填率の影響

表 2-1-8 および図 2-1-5 に、ルーズかさ密度の経時変化(灰充填率の影響) を示す。

粉砕処理時間前半(120 分以内)においては、いずれの灰充填率でも、ルーズかさ密度はほぼ一定の値を示した。

粉砕処理時間後半(120 分以降)においては、灰充填率が小さいほどルーズかさ密度は増加する傾向を示した。ただし、粉砕処理に伴うルーズかさ密度の増加量は、灰充填率 125%と 150%ではほぼ同等であった。

表 2-1-9 および図 2-1-6 に、タップかさ密度の経時変化(灰充填率の影響) を示す。

タップかさ密度は、いずれのボール径でも、粉砕処理時間の経過に伴って増加した。粉砕処理に伴うタップかさ密度の増加量は、灰充填率が小さいほど大きかった。ただし、灰充填率 125%と 150%では、タップかさ密度の増加量はほぼ同等であった。

灰充填率が低いほどかさ密度が大きくなる傾向を示した。これは、灰充填率が低い場合、ボールの衝突による粉砕エネルギーを少ない灰で受け取ることになるため、灰単位量あたりの粉砕エネルギーが大きかったことによるものと考える。また、灰充填率が高い場合、ボール充填層空隙より過剰に存在する灰がボールの衝撃を吸収するクッションの様に作用することにより、かさ密度の増加を抑制しているものと考える。

(3)粉砕処理に伴うかさ密度の増加について

一般的に、固体粒子に対して粉砕処理を行った場合、粒子径の減少に伴いかさ密度は減少する。一方、灰の場合、操作条件により一時的にルーズかさ密度が減少する場合があるものの、粉砕処理に伴ってかさ密度は増加する傾向を示した。

これは、粉砕処理によって灰粒子の粒子径が減少すると同時に、灰粒子内部の空隙が減少していることによるものと考える。

２－１－３　振動ミルの評価

１）目的

振動ミルにおける操作条件が、処理灰のかさ密度に与える影響を把握する。

２）試験

バッチ式振動ミルを使用し、操作条件として(1)ボール径およびロッド径の影響、および(2)振動数の影響、について検討を行った。原灰は、２－１－２において転動ミルの評価に使用したものと同じ原灰を使用した。一定時間毎に処理灰のサンプリングを行い、タップかさ密度を測定した。

図 2-1-7 に、振動ミルと転動ミルのドラム内におけるボールの挙動比較　を示す。

表 2-1-10 に、転動ミルと比較した振動ミルの特徴および一般的な操作条件　を示す。

表 2-1-11 に、使用したバッチ式振動ミルの基本仕様　を示す。

(1)ボール径およびロッド径の影響

表 2-1-12 に、使用したボールおよびロッドの仕様　を示す。２－１－２に示したように、転動ミルで高いタップかさ密度を得るためには、一般的な粒径細分化を目的とする場合と異なり、ボール径を大きくすることが有効であった。このため、振動ミルで一般的に使用されているボール径よりも大きいφ38mm のボールも評価に加えた。また、粉砕媒体の重量を大きくする観点から、ロッドについても評価を行った。

(2)振動数の影響

振動ミルを一般的な粒径細分化を目的として使用する場合、振動数を大きくすることにより、処理速度が向上する。ここでは、振動数がタップかさ密度に与える影響を検討した。

３）結果および考察

(1)ボール径およびロッド径の影響

表 2-1-13 に、試験操作条件および結果を示す。

振動ミルにおいても、ボール径が大きい程、灰のタップかさ密度は大きくなる傾向を示した。

ロッドの場合、ボールよりも重量が大きいにも関わらず、灰のタップかさ密度はボールの場合よりも小さくなる傾向を示した。

ボールよりも重量が大きいロッドにおいて、ボールより低いタップかさ密度となったのは、ロッドの形状からロッド間が線で接触するため、点で接触するボールと比較して灰に与える粉砕の衝撃が小さくなったものと考える。

(2)振動数の影響

表 2-1-14、図 2-1-8 に、試験操作条件および結果を示す。

粒径細分化を目的とした場合と同様に、振動数が大きい程、タップかさ密度は大きくなる傾向を示した。

(3)転動ミルと振動ミルの粉砕速度比較

２－１－２に示した転動ミルの検討結果と２－１－３で得られた振動ミルの検討結果から、両者の粉砕速度比較を行った。振動ミルの試験機は転動ミルに比較して小型のため、転動ミルの試験機に合わせてスケールアップして比較した。スケールアップは、ドラム容量、およびボール仕込量の 2 つの基準から計算した。ただし、ボール径を揃えて比較していないため、この観点からは正確な比較ではない。

表 2-1-15 に、転動ミルと振動ミルの粉砕速度比較結果　を示す。

振動ミルの粉砕速度は、転動ミルに比較して、ミル容量を基準とした場合は 12.4 倍、ボール仕込量を基準とした場合には 6.2 倍となった。振動ミルは、粒径を小さくする観点だけではなく、タップかさ密度を高くする観点からも転動ミルより大きい粉砕速度を得られることが示された。粉砕速度が大きくなると装置の設置スペースが小さくなるため、装置本体以外にも防音対策コストが軽減されるメリットがある。

しかし、２－１－３で主に使用したφ38mm のボールは、振動ミルで一般的に使用されているボール径よりも大きいため、ドラム内面におけるライニングの摩耗が懸念される。振動ミルにおいてφ38mm のボールを使用した実績がほとんど無いため、今後、ライニングの寿命とコストについて検討する必要がある。

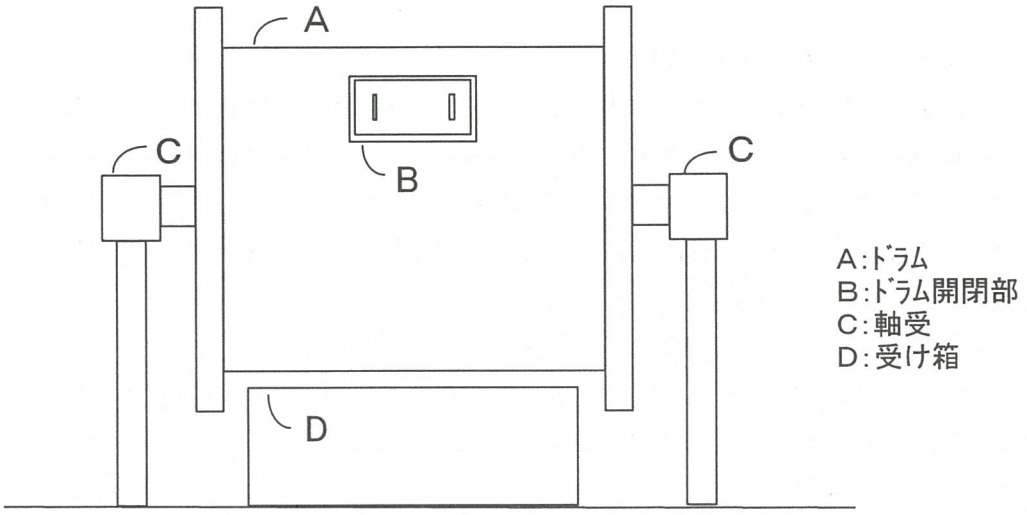


図2-1-1　ﾊﾞｯﾁ式転動ミル外観概略図(駆動設備除く)

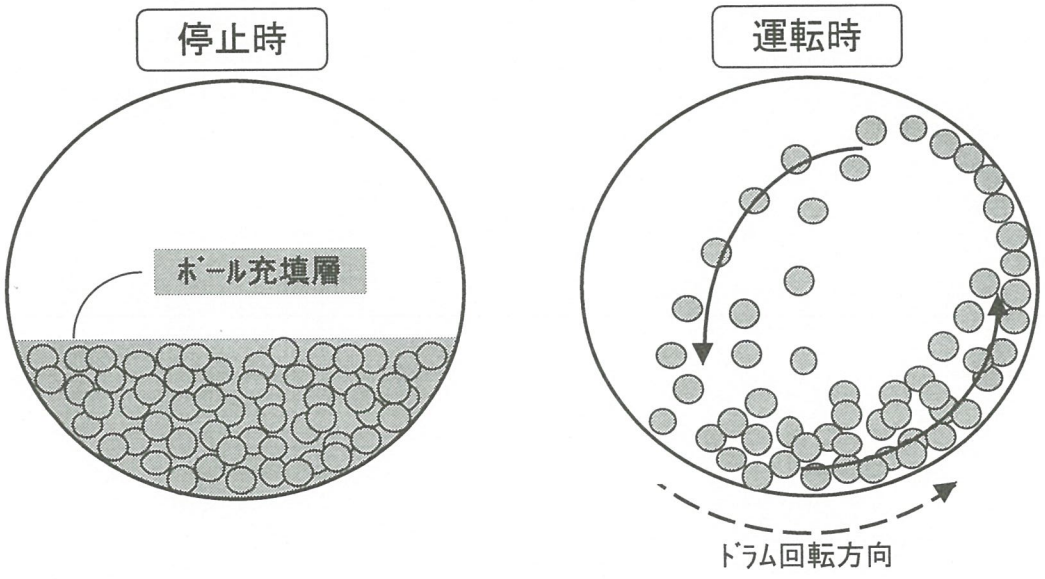


図2-1-2 ﾄﾞﾗﾑ内におけるﾎﾞｰﾙの挙動(ﾄﾞﾗﾑ断面図)

表2-1-1 ﾊﾞｯﾁ式転動ミルの一般的な操作条件

1. ﾄﾞﾗﾑ回転数	臨界回転数 注)の65～80%程度 粗粉砕の場合、高速回転により衝撃粉砕を主体とした粉砕を行う。 細粉砕の場合、低速回転により磨砕を主体とした粉砕を行う。 注) ﾄﾞﾗﾑの回転によって生じる遠心力により、ﾎﾞｰﾙがﾄﾞﾗﾑ内壁に押しつけられﾎﾞｰﾙが落下しなくなる時の回転数。 $Nc=42.3/D^{1/2}$ Nc:臨界回転数(rpm)、D:ﾄﾞﾗﾑ内径(m)
2. ﾎﾞｰﾙ径	原料の大きさに応じて20～100mm程度。多くは複数径を混合して使用。 細粉砕の場合、小径ﾎﾞｰﾙを増やしﾎﾞｰﾙ表面積を大きくすることにより粉砕効率が向上する。
3. ﾎﾞｰﾙ仕込量	ﾄﾞﾗﾑ容量の30～50%程度
4. 原料仕込量	ﾎﾞｰﾙ充填層空隙容量相当分程度。

表2-1-2 使用したﾊﾞｯﾁ式転動ミルの基本仕様と操作条件設定例

項目	数値	備考
a. ﾄﾞﾗﾑ内径(mm)	1,100	
b. ﾄﾞﾗﾑ長さ(mm)	1,000	
c. ﾄﾞﾗﾑ容量(L)	950	
d. ﾎﾞｰﾙ充填層容積(L)	380	→d／c＝40(%)とした場合
e. ﾎﾞｰﾙ充填層ﾎﾞｰﾙかさ密度(kg/L)	4.485	→ﾎﾞｰﾙ径φ＝100(mm)の場合 cf.表2-1-3
f. ﾎﾞｰﾙ仕込量(kg)	1,704	→ﾎﾞｰﾙ径φ＝100(mm)の場合 cf.表2-1-3
g. ﾎﾞｰﾙ密度(kg/L)	7.65	→表2-1-3より
h. ﾎﾞｰﾙ容積(L)	223	→ﾎﾞｰﾙ径φ＝100(mm)の場合 cf.表2-1-3
i. ﾎﾞｰﾙ充填層空隙(L)	157	→ﾎﾞｰﾙ径φ＝100(mm)の場合 cf.表2-1-3
j. 灰かさ密度(kg/L):ﾙｰｽﾞ	0.60	→表2-1-4より
k. 灰仕込量(kg/ﾊﾞｯﾁ)	71	→灰充填率75%の場合 cf.表2-1-5 条件1
l. 臨界回転数(rpm)	40.3	
m. 回転数(rpm)	32.0	
n. 臨界回転数に対する割合(%)	79.3	
o. 電動機出力(kW)	15	

表2-1-3 使用したﾎﾞｰﾙの基本仕様

1)ﾎﾞｰﾙ材質・種類	鋳鉄製ﾛｰｸﾛﾑﾎﾞｰﾙ	2)ﾎﾞｰﾙ密度(kg/L)		7.65
3)ﾎﾞｰﾙ径φ(mm)		100	50	20
4)ﾎﾞｰﾙ充填層ﾎﾞｰﾙかさ密度(kg/L)		4.485	4.587	4.680

表2-1-4 使用した灰の粉砕前かさ密度測定結果(H13・12・26ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ灰Y)

原灰ﾌﾚｺﾝNo.	No.1	No.2	No.3	No.4	Ave
ﾙｰｽﾞかさ密度(kg/L)	0.579	0.604	0.611	0.612	0.602
ﾀｯﾌﾟかさ密度(kg/L)	0.927	0.981	0.987	0.980	0.969

1.測定機器名　ﾎｿｶﾜﾐｸﾛﾝ㈱製ﾊﾟｳﾀﾞｰﾃｽﾀｰPT-E型
2.測定条件　ﾙｰｽﾞかさ密度:ﾌﾙｲ目710μm、ﾚｵｽﾀｯﾄ(振動数調節つまみ)4.5目盛
ﾀｯﾌﾟかさ密度:ﾀｯﾌﾟ回数180回、ﾀｯﾌﾟﾘﾌﾄ18mm

表2-1-5 ﾊﾞｯﾁ式転動ミルの設定操作条件 ﾎﾞｰﾙ充填層容積／ﾄﾞﾗﾑ容量＝ 40 %とする

	条件1	条件2	条件3	条件4	条件5	条件6
1)ﾎﾞｰﾙ径(mm)	100	100	100	100	50	20
2)灰充填率(%) 注)	75	100	125	150	100	100
3)ﾎﾞｰﾙ仕込量(kg)	1,704	1,704	1,704	1,704	1,743	1,778
4)灰仕込量(kg/ﾊﾞｯﾁ)	71	95	118	142	92	89

注) ﾎﾞｰﾙ充填層空隙に対する灰仕込量の体積割合。

表2-1-6 ルース゛かさ密度の経時変化(ボール径の影響)

条件	ボール径 (mm)	灰充填率 (%)	粉砕処理時間(min)						
			0	30	60	90	120	180	240
2	100	100	0.59	0.59	0.60	0.60	0.61	0.65	0.71
5	50	100	0.59	0.56	0.54	0.58	0.64	0.69	0.71
6	20	100	0.59	0.48	0.49	0.54	0.59	0.63	0.65

↑ cf.表2-1-5

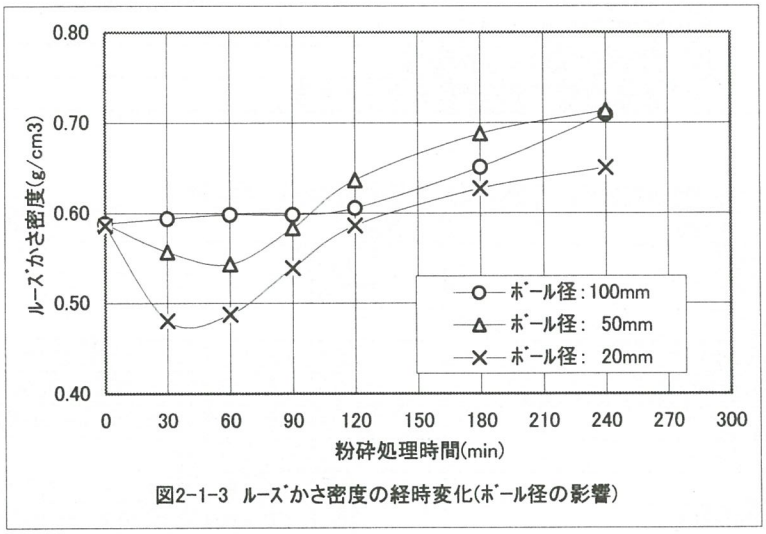


図2-1-3 ルース゛かさ密度の経時変化(ボール径の影響)

表2-1-7 タップ゛かさ密度の経時変化(ボール径の影響)

条件	ボール径 (mm)	灰充填率 (%)	粉砕処理時間(min)						
			0	30	60	90	120	180	240
2	100	100	0.96	1.04	1.11	1.15	1.19	1.26	1.31
5	50	100	0.96	1.07	1.11	1.16	1.20	1.23	1.25
6	20	100	0.96	1.01	1.04	1.07	1.10	1.11	1.13

↑ cf.表2-1-5

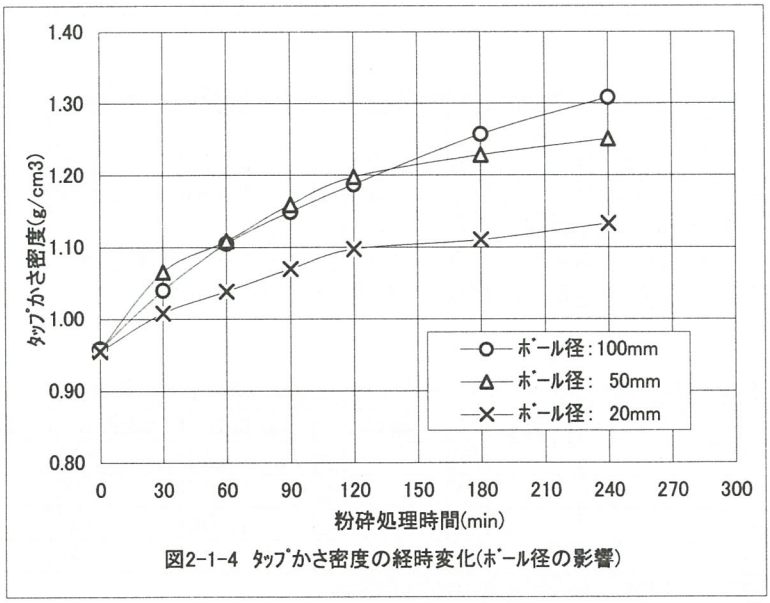


図2-1-4 タップ゛かさ密度の経時変化(ボール径の影響)

表2-1-8 ルース゛かさ密度の経時変化(灰充填率の影響)

条件	ボール径 (mm)	灰充填率 (%)	粉砕処理時間(min)						
			0	30	60	90	120	180	240
1	100	75	0.55	0.58	0.58	0.60	0.62	0.72	0.75
2	100	100	0.59	0.59	0.60	0.60	0.61	0.65	0.71
3	100	125	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.63	0.64
4	100	150	0.60	0.61	0.62	0.61	0.61	0.61	0.64

↑ cf.表2-1-5

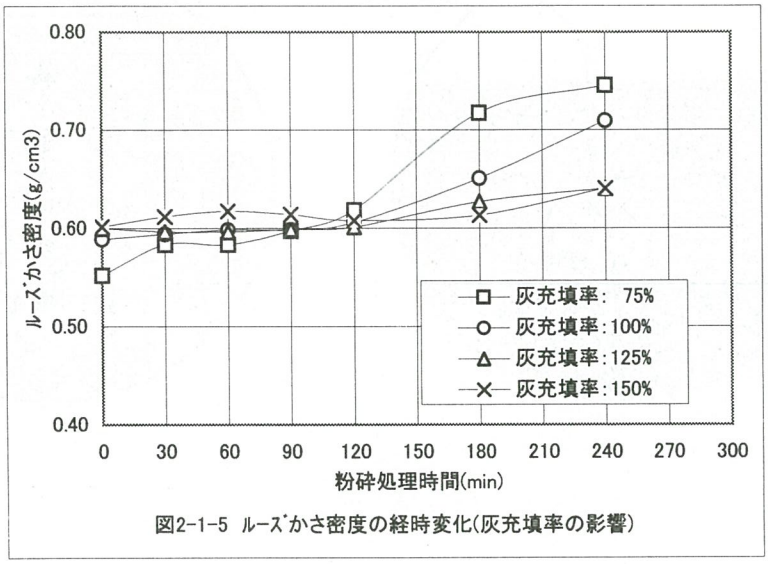


図2-1-5 ルース゛かさ密度の経時変化(灰充填率の影響)

表2-1-9 タップ゛かさ密度の経時変化(灰充填率の影響)

条件	ボール径 (mm)	灰充填率 (%)	粉砕処理時間(min)						
			0	30	60	90	120	180	240
1	100	75	0.93	1.04	1.11	1.17	1.21	1.30	1.35
2	100	100	0.96	1.04	1.11	1.15	1.19	1.26	1.31
3	100	125	0.97	1.03	1.09	1.13	1.17	1.23	1.25
4	100	150	0.97	1.04	1.09	1.13	1.16	1.21	1.26

↑ cf.表2-1-5

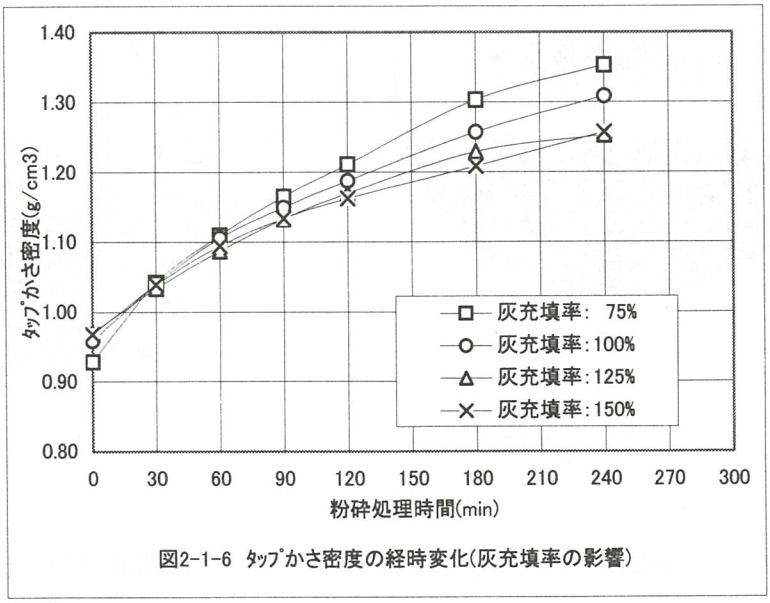


図2-1-6 タップ゛かさ密度の経時変化(灰充填率の影響)

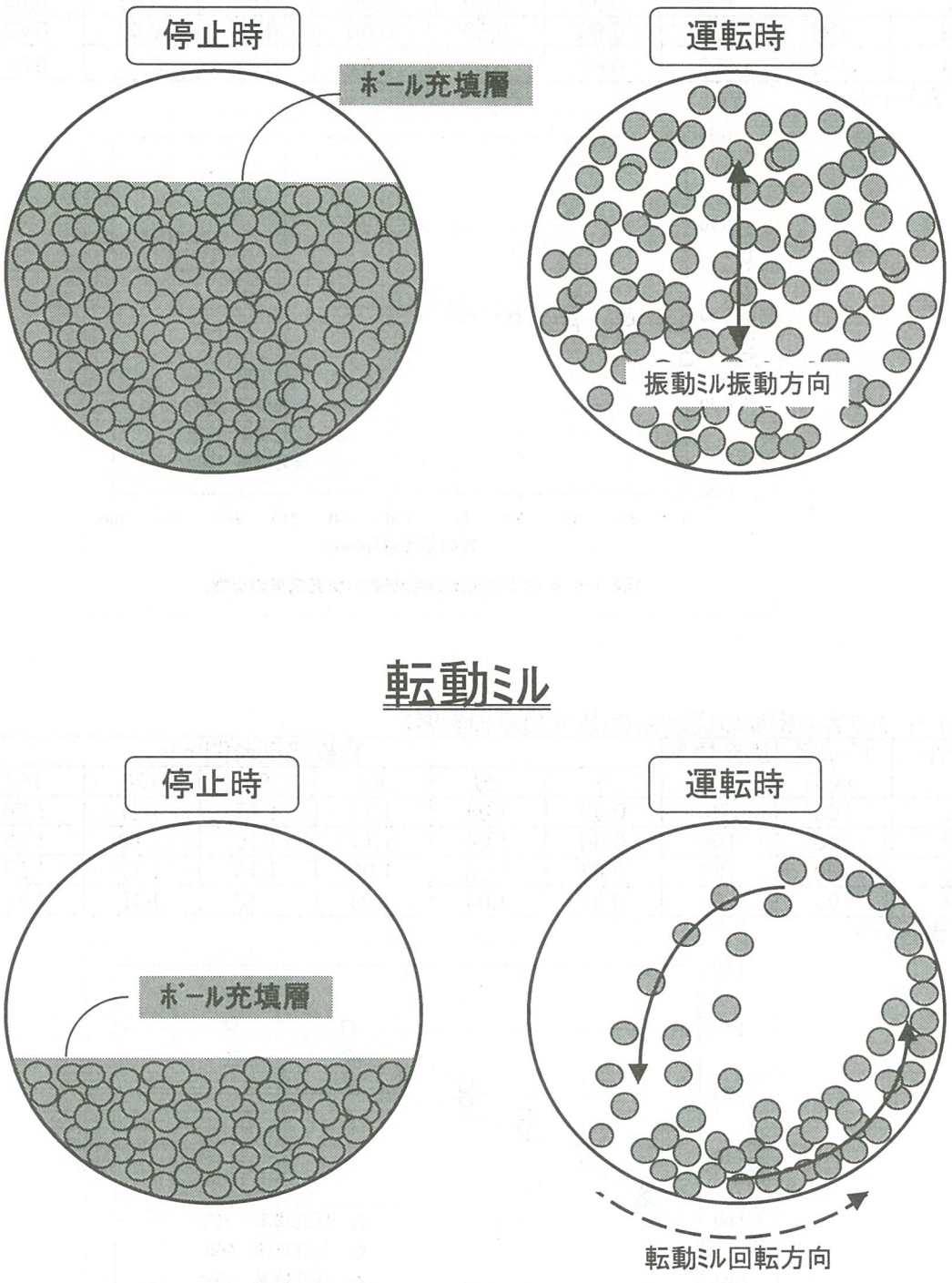


図2-1-7　振動ミルと転動ミルのﾄﾞﾗﾑ内におけるﾎﾞｰﾙの挙動比較(ﾄﾞﾗﾑ断面図)

表2-1-10　転動ミルと比較した振動ミルの特徴および一般的な操作条件

1. ﾒﾘｯﾄ	・転動ミルよりも粉砕速度が10～20倍速い。 →装置がｺﾝﾊﾟｸﾄになり、設置面積が少なくて済む。
2. ﾃﾞﾒﾘｯﾄ	・振動に起因する機械工学的な制約から、大型化が難しい。 →1台あたりの処理量は、転動ミルの方が大きくとれる。
4. ﾎﾞｰﾙ径	・原料の大きさに応じて5～25mm程度。通常、単一径で使用する。 →転動ミルの場合、5～100mm程度。多くは複数径を混合して使用。
5. ﾎﾞｰﾙ充填層	・ミル容量の80～90%程度 →転動ミルの場合、ミル容量の30～50%程度。
6. 原料仕込量	・ﾎﾞｰﾙ充填層の空隙容量相当分程度。 →転動ミルと同様の考え方。
7. 振動数	・1,000～1,500vpm程度。
8. 振幅	・7～8mm程度。

表2-1-11　使用したﾊﾞｯﾁ式振動ミルの基本仕様

項目			数値	備考
a. ﾄﾞﾗﾑ内径(mm)			140	
b. ﾄﾞﾗﾑ長さ(mm)			208	
c. ﾄﾞﾗﾑ容量(L)			3.2	
d. ﾎﾞｰﾙ充填層容積(L)			2.56	→d／c＝　80　(%)で設定
e. ﾎﾞｰﾙ充填層ﾎﾞｰﾙかさ密度(kg/L)			4.5	
f. ﾎﾞｰﾙ仕込量(kg)			11.5	ﾛｯﾄﾞの場合も同じ仕込量とする。注1)
g. ﾎﾞｰﾙ密度(kg/L)			7.8	
h. ﾎﾞｰﾙ容積(L)			1.48	
i. ﾎﾞｰﾙ充填層空隙(L)			1.08	
j. 灰かさ密度(kg/L)	ﾙｰｽﾞ→		0.59	ﾀｯﾌﾟ→ 0.95
k. 灰仕込量(g/ﾊﾞｯﾁ) 注2)			641	ﾛｯﾄﾞの場合も同じ仕込量とする。
l. 振動数(vpm)	960	1,200	1,440	ｲﾝﾊﾞｰﾀｰにより可変
m. 振幅(mm)	8.4	8.2	8.2	ﾄﾞﾗﾑ内にﾎﾞｰﾙ、灰、等がない場合の測定値。
n. 加速度(G)	4.4	6.8	9.5	ﾄﾞﾗﾑ内にﾎﾞｰﾙ、灰、等がない場合の測定値。
o. 電動機出力(kW)			0.4	

注1)　ﾛｯﾄﾞの場合、実際には径によって若干の過不足有り(cf.表2-1-12)。
注2)　振動ミルにおける灰充填率は、いずれの試験条件でも100%とした。

表2-1-12　使用したﾎﾞｰﾙおよびﾛｯﾄﾞの仕様

項目	ﾎﾞｰﾙ			ﾛｯﾄﾞ		
1)材質	ｸﾛﾑ鋼			一般鋼		
2)径(φ:mm)	12.7	19.7	38	19	25	32
3)長さ(mm)	—	—	—	190	191	192
4)仕込量(kg)	11.5	11.5	11.5	11.7	11.4	10.8
5)仕込数(個、本) 注1)	1,375	368	51	28	16	8
6)重量(g/個、g/本) 注2)	8.4	31.2	225	418	713	1,348
7)重量比(—) 注3)	1	3.7	27	50	85	161

注1)　φ12.7及びφ19.7のﾎﾞｰﾙ個数は、計算値。他は実数値。
注2)　5)／6)による計算値。
注3)　φ12.7ﾎﾞｰﾙの重量を基準とした。

表2-1-13 試験操作条件および結果(ﾎﾞｰﾙ径およびﾛｯﾄﾞ径の影響)

試験操作条件	条件1	条件2	条件3	条件4	条件5	条件6
1)ﾎｰﾙorﾛｯﾄ	ﾎｰﾙ	ﾎｰﾙ	ﾎｰﾙ	ﾛｯﾄ	ﾛｯﾄ	ﾛｯﾄ
2)径(mm)	φ12.7	φ19.7	φ38	φ19	φ25	φ32
3)振動数(vpm)	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200
4)粉砕時間(min)	24	24	24	24	24	24
結果:ﾀｯﾌﾟかさ密度(g/cm3)	1.02	1.08	1.18	1.00	1.02	1.05

表2-1-14 試験操作条件および結果(振動数の影響)

試験操作条件	条件7	条件8	条件9	条件10	条件11	条件12
1)ﾎﾞｰﾙorﾛｯﾄﾞ	ﾎﾞｰﾙ	ﾎﾞｰﾙ	ﾎﾞｰﾙ	ﾎﾞｰﾙ	ﾎﾞｰﾙ	ﾎﾞｰﾙ
2)径(mm)	φ38	φ38	φ38	φ38	φ38	φ38
3)振動数(vpm)	1,440	1,440	1,440	1,200	960	960
4)粉砕時間(min)	6	12	24	48	24	48
結果:ﾀｯﾌﾟかさ密度(g/cm3)	1.09	1.15	1.22	1.20	1.09	1.13

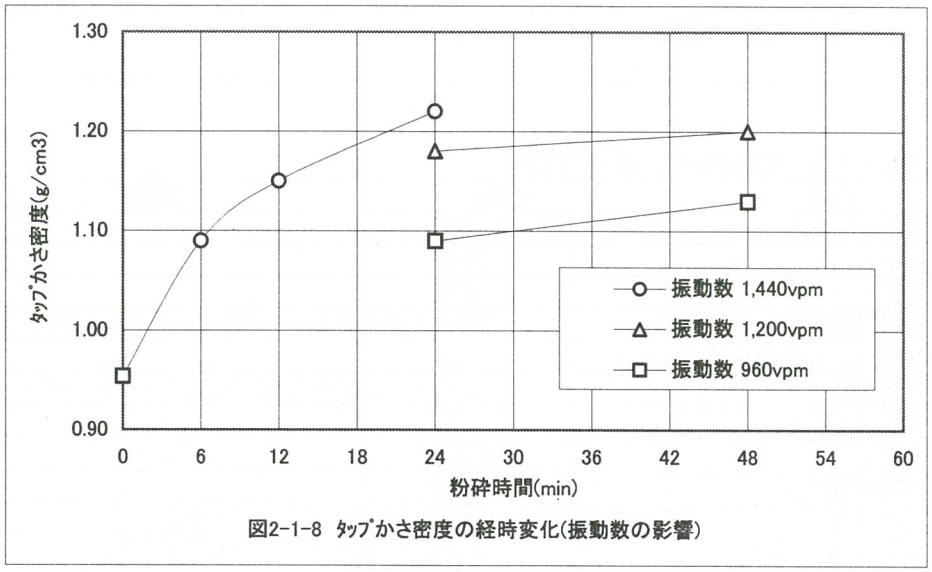


図2-1-8 ﾀｯﾌﾟかさ密度の経時変化(振動数の影響)

表2-1-15 転動ミルと振動ミルの粉砕速度比較結果

ミル比較項目		試験機ﾃﾞｰﾀ 注1)		振動ミルスケールｱｯﾌﾟ計算結果	
		転動ミル 注2)	振動ミル 注3)	a基準	b基準
a. ﾄﾞﾗﾑ容量	(L)	950	3.2	950	475
b. ﾎﾞｰﾙ仕込量	(kg)	1,704	11.5	3,411	1,704
c. 灰仕込量	(kg)	95	0.641	190	95
d. 粉砕時間 注4)	(min)	148	24	24	24
e. 粉砕速度	(kg/h)	38.4	1.60	476	238
f. 粉砕速度比	(—)	1.0	—	12.4	6.2
g. ﾎﾞｰﾙ径	(mm)	100	38		
h. ﾎﾞｰﾙ充填層割合	(v/v%)	40	80	←対ﾄﾞﾗﾑ容量	
i. 灰充填率	(v/v%)	100	100	←対ﾎﾞｰﾙ充填層空隙	
j. ﾎﾞｰﾙかさ密度	(kg/L)	4.5	4.5		
k. 灰ﾙｰｽﾞかさ密度	(kg/L)	0.6	0.6		

注1) 粉砕処理によりﾀｯﾌﾟかさ密度が1.22になるまでの粉砕速度(kg/h)を比較した。
注2) 表2-1-7 条件2のﾃﾞｰﾀを使用した。注3) 表2-1-14 条件9のﾃﾞｰﾀを使用した。
注4) 転動ミルの粉砕時間は、粉砕時間120分と180分のﾃﾞｰﾀから直線補間して求めた。
振動ミルの粉砕時間とﾀｯﾌﾟかさ密度の関係は、ｽｹｰﾙｱｯﾌﾟしても変化しないものとした。

２－２　成形方法の検討

２－２－１　はじめに

第１章１－２で述べたように、従来の手法において、高い灰硬化体強度が得られた理由として、19.6N/mm^2 の面圧で加圧成形することにより、セメント水和物の結合力を高めることができた、との可能性が推定された。

しかし、この手法では、用途が単純な形状の製品に限定され、製品あたりの灰配合割合を高めても、コンクリート製品としての灰有効利用量が制約される、また、振動等により締め固めを行う一般的なコンクリート製品よりも設備コストが高くなる、という課題があった。

そこで、コンクリート製品の製造方法として従来の手法より一般的な製法であり、従来の手法と同様に即時脱型が可能な加圧振動成形法に着目し、加圧振動成形法による灰硬化体の成形について検討を行った。

表 2-2-1 に、第２章２－２で使用した灰等の粉砕履歴･性状　を示す。

以下、各検討で使用した灰は、表 2-2-1 に示した略号で表記する。また、使用した灰を含めて硬化体を示す場合、灰を示す略号(ex：灰 H)に続けて硬化体と表記(ex：灰 H 硬化体)する。

２－２－２　成形方法の比較（加圧成形、加圧振動成形）

１）目的

加圧成形法と加圧振動成形法との成形条件の相違が、灰硬化体の強度に与える影響を把握する。

２）試験

従来の手法の検討において主に使用した灰Ｈと、本共同研究開始後に新たにサンプリングおよび粉砕処理を行った灰Ｙの 2 種類の灰を使用して、(1)加圧成形法による成形試験、および(1)の試験結果に基づいて(2)加圧振動成形法による成形試験を行った。

表 2-2-2 に、成形試験方法の比較表　を示す。

３）結果

(1)加圧成形法による成形試験

表 2-2-3 に、加圧成形法による試験結果　を示す。

図 2-2-1 に、供試体密度の経日変化(加圧成形試験)　を示す。

図 2-2-2 に、圧縮強度の経日変化(加圧成形試験)　を示す。

灰Ｙは、水／粉体比 28%の場合、所定の荷重に達する前に型枠から原料が漏れた。このことから、加圧成形法における灰Ｙの最大水粉体比は 26%程度と推定した。

灰Ｈは、混練後原料の造粒状態から、経験的に加圧成形法における最大水粉体比は 24%程度と推定した。

灰Ｙ硬化体の供試体密度は、灰Ｈ硬化体の場合と比較して大幅に低下した。

灰Ｙ硬化体の圧縮強度は、灰Ｈ硬化体の場合と比較して大幅に低かった。

灰Ｈ硬化体の圧縮強度は、材齢 14 日から 28 日にかけて低下する傾向を示した。

(2)加圧振動成形法による成形試験

表 2-2-4 に、加圧振動成形法による成形試験結果　を示す。

図 2-2-3 に、供試体密度の経日変化(加圧振動成形試験)　を示す。

図 2-2-4 に、圧縮強度の経日変化(加圧振動成形試験)　を示す。

灰Ｙ、灰Ｈのどちらも、加圧成形法において推定した最大の水／粉体比より水を多くした方が、より締め固まり易い(型枠に充填され易い)傾向を示した。

加圧成形法の場合と同様に、灰Ｙ硬化体の供試体密度は、灰Ｈ硬化体の場合と比較して大幅に低下した。

供試体密度の低下は、灰Ｙ硬化体、灰Ｈ硬化体のどちらも、水／粉体比が小さい条件の方が大きかった。

加圧成形法の場合と同様に、灰Ｙ硬化体の圧縮強度は、灰Ｈ硬化体の場合と比較して大幅

に低かった。

圧縮強度は、灰Y硬化体、灰H硬化体のどちらも、水／粉体比が小さい条件の方が低かった。

4）考察

加圧振動成形法の場合、加圧成形法において推定した最大の水／粉体比より水を多くした方が、より締め固まり易い傾向を示したことから、加圧振動成形法の方が加圧成形法よりも締め固めるエネルギーが小さいものと考えられる。

成形方法によらず、灰Y硬化体の方が灰H硬化体よりも圧縮強度が低くなった要因としては、灰Y硬化体の方が供試体密度の減少量も大きいことから、水和反応の進行が遅い、または何らかの理由で水分の蒸発が促進された結果、水和反応を進行させることが出来なくなった、等の可能性が考えられる。

一方、今回の養生条件は開放系で気中養生としたため、供試体中の水分が失われやすい環境といえる。よって、水分が失われにくい養生方法を検討し、その条件で灰Y硬化体の圧縮強度を把握する必要があると考える。

２－２－３　低強度の要因調査と強度改善策の検討（加圧成形、加圧振動成形）

２－２－２において、加圧成形法および加圧振動成形法による成形試験を行ったところ、灰Ｙ硬化体は、いずれの成形法でも灰Ｈ硬化体より低い強度を示した。

このため、当初計画を追加変更し、灰Ｙ硬化体が灰Ｈ硬化体よりも低強度となった要因の調査と強度改善策について検討を行った。

灰入手先および配合条件による強度の相違を評価する硬化体の成形方法としては、次の理由から加圧成形法とした。

① 加圧振動成形法の場合、1 成形条件あたり約 70kg の灰を必要とするため、サンプリングした灰の量で検討する成形条件が制約される。

② ２－２－２において検討した 2 種類の灰は、加圧成形法および加圧振動成形法のいずれでも硬化体の強度が類似した傾向を示しているため、加圧成形法で評価することにより、加圧振動成形法における強度の傾向を推定可能と考えられる。

③ 加圧成形法は、加圧成形法で検討してきた経緯があるため、試験方法として実績がある。

ただし、見出された強度改善策の有効性については加圧振動成形法により確認を行った。

加圧成形法で評価する灰Ｙ硬化体の強度改善目標は、２－２－２の加圧振動成形法による予備試験において灰Ｈ硬化体が十分な強度を示しているためことから、灰Ｈ硬化体と同等強度をとした。

（1）養生方法の検討

1）背景

２－２－２において、灰Ｙ硬化体は、灰Ｈ硬化体と比較して 4w 密度、4w 強度ともに大幅に低い値を示した。

２－２－２において開放系で気中養生したことから、セメントの水和反応に必要な水分が蒸発した結果、灰Ｙ硬化体が低密度、低強度となった可能性が考えられる。

2）目的

養生時における水分蒸発抑制が硬化体の強度に与える影響を把握する。

3）試験

(1)灰Ｙ硬化体について、以下の養生方法を比較した。

①開放系気中養生　：脱型後 1～2d まで積み重ねたプラボックス内で養生し、その後、開放系に移した。

②準開放系気中養生：脱型後 14d まで積み重ねたプラボックス内で養生し、その後、開放系に移した。

③密閉系気中養生　：脱型後 0d の供試体をポリ袋に密閉して気中養生を行った。

④水中養生　　：脱型後 0d でポリ袋に密閉して気中養生した供試体を、脱型後 1d から水中養生を行った。

(2)密閉系気中養生において、灰Ｈ硬化体と灰Ｙ硬化体の強度発現挙動を比較した。

4）結果

(1)図 2-2-5、図 2-2-6 および表 2-2-5 に、供試体密度の経日変化、圧縮強度の経日変化、養生方法の検討結果(1)　を各々示す。

気中養生において養生期間中の水分蒸発を抑制することにより、灰Ｙ硬化体の強度は増加する傾向を示した。水中養生は、密閉系気中養生より若干強度が劣った。

(2)図 2-2-7、図 2-2-8 および表 2-2-6 に、供試体密度の経日変化、圧縮強度の経日変化、養生方法の検討結果(2)　を各々示す。

密閉系気中養生において、灰Ｙ硬化体は、灰Ｈ硬化体と比較して 1w 強度において大きく劣った。

5）考察

4）(2)より、灰Ｙ硬化体は、脱型後 1w の水和反応が灰Ｈ硬化体よりも遅延されている可能性が考えられる。

予備試験で灰Ｙ硬化体が低強度となった原因として、初期水和反応の遅延と水分蒸発が相乗的に作用した可能性が考えられる。

（2）灰水洗処理の検討

1）背景

灰H硬化体と灰Y硬化体の強度が異なる要因として、灰の化学組成の相違が各々の灰硬化体におけるセメントの水和反応の進行に影響を与えている可能性が考えられる。

灰の化学組成が灰硬化体の強度に影響を与えると仮定した場合、灰硬化体強度への影響が大きいと推定される灰の化学成分として、①灰を構成する主要成分、②灰から水側に溶出し易い成分、等が考えられる。

灰硬化体強度への影響が大きい灰の化学成分を絞り込む上で、上記②は灰を水洗処理することにより影響を少なくすることが可能と考えられる。

2）目的

灰に含まれる溶出成分の多少が硬化体の強度に与える影響を把握する。

3）試験(灰の水洗処理)

100Lステンレスタンクに灰35kgと水道水75kgを投入、混合、静置し、上澄水40～45kgを水道水と置換する操作を9回繰り返した。

上澄水除去後、105℃で乾燥し、塊状の灰を解砕、850μmアンダーに分級後、成形操作に使用した。

4）結果

表2-2-7に、灰水洗処理前後の環告46号溶出試験結果　を示す。

水洗灰の46号溶出液における電気伝導率は、水洗前に対して灰Hは26.4%、灰Yは7.2%に低下した。

図2-2-9、図2-2-10および表2-2-8に、供試体密度の経日変化、圧縮強度の経日変化、灰水洗処理の検討結果　を各々示す。

水洗灰H硬化体と水洗灰Y硬化体は、ともに未洗の灰Y硬化体と同様の強度発現傾向を示した。特に水洗灰H硬化体は、未洗の灰H硬化体と比較して1w強度が大幅に劣った。

5）考察

灰からの溶出成分中に、硬化体の1w強度発現に影響を与える成分が含まれているものと考えられる。

灰からの溶出成分の中でも、灰Yよりも灰Hに多く含まれる成分が硬化体の1w強度発現に影響を与えているもの可能性が高いと考えられる。

表2-2-7より、①硫酸イオン、②カルシウムイオン、③カリウムイオン、④ナトリウムイオン、等の中に、硬化体の 1w 強度発現に影響を与えている成分が含まれているものと推定する。

（3）薬品配合の検討

1）背景

（2）灰水洗処理の検討結果より、硬化体の 1w 強度発現に影響を与える可能性のある成分が絞り込まれた。

これらの成分を灰Yに対して配合することにより、灰Y硬化体の強度改善が見込まれる。

2）目的

灰Yに薬品を配合することにより、灰Y硬化体の強度改善を検討する。

3）試験

灰Yに配合する薬品として、以下を検討した。

(1)硫酸カルシウム 2 水和物(二水石膏)、(2)硫酸カリウム

(3)硝酸カルシウム 4 水和物、(4)水酸化カルシウム(消石灰)

4）結果

(1)硫酸カルシウム 2 水和物(二水石膏)について

図 2-2-11、図 2-2-12 および表 2-2-9 に、供試体密度の経日変化、圧縮強度の経日変化、薬品配合の検討結果(1)　を各々示す。

二水石膏の配合により、灰Y硬化体の強度は大幅に増加した。

(2)硫酸カリウム

図 2-2-13、図 2-2-14 および表 2-2-10 に、供試体密度の経日変化、圧縮強度の経日変化、薬品配合の検討結果(2)　を各々示す。

硫酸カリウムの配合により、灰Y硬化体の強度は増加する傾向を示した。

(3)硝酸カルシウム 4 水和物、(4)水酸化カルシウム(消石灰)について

図 2-2-15、図 2-2-16 および表 2-2-11 に、供試体密度の経日変化、圧縮強度の経日変化、薬品配合の検討結果(3)(4)　を各々示す。

硝酸カルシウム 4 水和物は、対灰内割 2.0%の配合では灰Y硬化体の強度にあまり影響を与えなかった。

消石灰は、対灰内割 2.0%の配合において、灰Y硬化体の 4w 強度を低下させた。

5）考察

4）(1)、(2)より、灰に含まれる溶出成分の中でも、硫酸イオンによる強度改善効果が大きいと考えられる。

硫酸イオンが灰硬化体の強度発現に寄与するメカニズムは明かではないが、硫酸イオンの供給により、セメントの水和反応に関与する成分のバランスが調整されている可能性が考えられる。

（4）新規に入手した灰についての検討

1）背景

灰硬化体の強度に影響を与える要因として、従来の手法においては主にタップかさ密度に注目していたが、2－2－2において灰Y硬化体が低い強度を示した結果、灰の物理的な物性以外に、化学的な物性に対する考慮も必要とされることが判明した。

これまで灰Hおよび灰Yの2種類について灰硬化体の強度に影響を与える要因を調査した結果、硫酸イオンの存在が灰硬化体の強度に大きく影響を与え、成形試験時に二水石膏を配合することで灰硬化体の強度が改善されることが示された。

そこで、二水石膏配合による強度改善効果の有効性を、新規に入手した灰について確認した。

2）目的

新規に入手した2種類の灰について、灰Hおよび灰Yとの強度発現挙動を比較する。

3）試験

新規に入手した灰に対してボールミルによる粉砕処理を行い、得られた処理灰((1)灰Ⅰ、(2)灰T）の各々に対して、二水石膏配合の有無を比較した配合条件で、灰硬化体の成形試験を行った。

4）結果

(1)灰Ⅰについて

図 2-2-17、図 2-2-18 および表 2-2-12 に、供試体密度の経日変化、圧縮強度の経日変化、新規入手灰の検討結果(1)　を各々示す。

灰Ⅰ硬化体は、薬品配合がない場合、灰Y硬化体より 4w 強度が大幅に劣った。二水石膏を対灰内割 5.0%配合することにより、灰H硬化体を上回る強度を示した。

(2)灰Tについて

図 2-2-19、図 2-2-20 および表 2-2-13 に、供試体密度の経日変化、圧縮強度の経日変化、新規入手灰の検討結果(2)　を各々示す。

灰T硬化体は、薬品配合がない場合、灰Y硬化体より 4w 強度が大幅に劣った。二水石膏を対灰内割 5.0%配合することにより、灰H硬化体を上回る強度を示した。

5）考察

4）(1)、(2)より、灰Y硬化体の強度改善策として検討した二水石膏の配合は、薬品配合なしでは低強度となる灰に対して、有効な強度改善策となるものと考えられる。

（5）加圧振動成形法による確認

1）背景

２－２－３（1）～（4）において、灰の入手先により灰硬化体の強度発現挙動が異なる要因について検討し、薬品の配合により灰硬化体の強度改善が可能であることを確認した。

ただし、２－２－３（1）～（4）においては、灰のサンプル量に制限があること等の理由から、灰硬化体の成形方法を加圧成形法によって行った。

よって、ここでは２－２－２で成形試験を行った加圧振動成形法において、薬品配合による灰硬化体の強度改善効果を確認した。また、灰のタップかさ密度が圧縮強度に与える影響についても同時に検討した。

2）目的

① 加圧振動成形法において、薬品配合による強度改善対策の有効性を確認する。

② 加圧振動成形法において、灰のタップかさ密度が圧縮強度に与える影響を検討する。

3）試験

タップかさ密度が異なる2種類の灰(灰Y高、灰Y中)を使用し、各々について二水石膏配合の有無を比較した配合条件で、灰硬化体の成形試験を加圧振動成形法により検討した。強度改善のための薬品としては、２－２－３（4）において3種類の灰で強度改善効果が確認された二水石膏を使用した。

成形した供試体については、供試体密度、圧縮強度、外観、等を評価した。

表 2-2-14 に、試験装置および試験方法の概要　を示す(後述する少量成形試験法についても併せて示している)。

表 2-2-15 に、使用した材料および配合条件を示す。

4）結果

表 2-2-16、図 2-2-21 に、供試体密度の経日変化を示す。

表 2-2-17、図 2-2-22 に、圧縮強度の経日変化を示す。

表 2-2-16、図 2-2-21 および表 2-2-17、図 2-2-22 において、比較のため、２－２－２における加圧振動成形法の試験結果を転載した。

(1) 薬品配合による強度改善対策の有効性について

図 2-2-22 に示した通り、二水石膏を配合した条件の圧縮強度は、各々二水石膏を配合していない条件と比較して大幅に上回った。

(2) 灰のタップかさ密度が圧縮強度に与える影響について

図 2-2-22 に示した通り、二水石膏配合有の条件における圧縮強度は、灰のタップかさ密度が大きい程、大きくなる傾向を示した。一方、二水石膏配合無の条件における圧縮強度

は、灰のタップかさ密度及び供試体密度が異なるにも関わらず、同程度であった。また、２－２－２で検討した灰 H は、灰Y高や灰Y中よりも灰のタップかさ密度が大きく、図2-2-21に示した通り供試体密度も最も高かった。しかし、灰 H の灰硬化体における圧縮強度は、図 2-2-22 に示した通り、二水石膏を配合した灰Y高や灰Y中の灰硬化体よりも低かった。

(3)外観について

表 2-2-18 に、外観の観察結果　を示す。

いずれの配合条件でも水ジワ(脱型後、型枠と接していた供試体の表面に観察される葉脈状の外観不良)が発生していた。一般の即時脱型製品に観察されるものと同等程度の水ジワであったが、流し込み製品や加圧成形法による供試体と比較すると、外観の面では劣っていた。

脱型後の変形(材齢 7 日)については、二水石膏を配合していない Run1、Run3 が各々収縮、膨張と反対の傾向を示した。二水石膏を配合した Run2 及び Run4 は、二水石膏を配合していない Run1 及び Run3 よりも変形率の絶対値が小さかった。

二水石膏を配合した Run2 及び Run4 では、特定箇所(63L 直方体型枠側面のｲﾝｻｰﾄ周辺において、厚さ方向〔底面および打設面に対して垂直方向〕)にクラックの発生が認められた。

４）考察

(1) 薬品配合による強度改善対策の有効性について

二水石膏の配合による強度改善策は、加圧振動成形法においても有効と考える。

(2)灰のタップかさ密度が圧縮強度に与える影響について

灰Yにおいて、二水石膏を配合した条件では、灰のタップかさ密度を高くすることにより灰硬化体の圧縮強度が高くなる傾向が示された。しかし、二水石膏を配合しない場合や灰の入手先が異なる場合には、灰のタップかさ密度と圧縮強度について単純な相関関係は認められない。灰を多量に配合した硬化体の圧縮強度については、灰のタップかさ密度以外に、配合する薬品や灰の入手先(硫酸イオン溶出量等の化学組成)、等の要因による影響を考慮する必要があると考える。

(3)外観について

水ジワは、脱型前に、型枠と供試体の接触面に余剰な水分が存在するために発生しているものと考える。加圧振動成形法の場合、加圧成形法と比較して、型枠への充填性を向上させるためにある程度水／粉体比を高くする必要があるため、水ジワは発生し易い傾向にある。水ジワに対しては、水／粉体比・面圧・振動加速度の調整、離型剤の検討、等による改善策を検討する必要がある。

脱型後の変形(材齢 7 日)に影響を与える主な要因としては、収縮については水分の蒸発、膨張については自重による水平方向への変形、が挙げられる。Run1 の収縮および Run3

の膨張についても各々前述の要因によるものと推定するが、両者の変形挙動の相違について現時点では明かではない。二水石膏を配合した Run2 および Run4 で変形率の絶対値が小さいのは、二水石膏を配合しない場合より、初期の硬化速度が大きいためと考える。脱型後の変形は製品の寸法精度に影響する問題であり、配合条件とコンシステンシーに関する十分な検討が必要と考える。

特定箇所でクラックが発生する原因は、現時点では明かではない。図 2-2-22 に示した通り、二水石膏配合の有無によって材齢 7 日の圧縮強度に大きな差があり、変形やクラックについても、材齢 7 日の時点で二水石膏配合の有無による挙動の相違が生じている。よって、材齢 7 日までの強度や水和熱の発現挙動、長さ変化、等を特定箇所とそれ以外の箇所で検討することにより、クラックの発生原因を解明できる可能性があると考える。クラックの発生は耐久性に直接影響する問題であり、十分な検討が必要と考える。

２－２－４　少量成形試験法による検討（φ10cm×H20cm 型枠による加圧振動成形）

２－２－３において、灰入手先により灰硬化体の圧縮強度が低強度となる要因を調査した結果、灰に含まれる溶出成分(硫酸イオン)が灰硬化体の圧縮強度に大きく影響を与えており、二水石膏等の薬品を配合することにより強度の改善が可能であることが示された。

一方、加圧振動成形法による灰硬化体の成形においては、上記の要因や加圧成形法で着目していた灰のタップかさ密度を含めた基本的な配合条件が、供試体のコンシステンシー(変形や流動に対する抵抗性の程度)および灰硬化体の圧縮強度に与える影響について明らかにされていない。

よって、加圧振動成形法における配合条件として、以下について検討を行った。

① 水／粉体比の影響

② 灰／セメント配合比、灰のタップかさ密度の影響

③ セメント／二水石膏配合比、灰のタップかさ密度の影響

また、２－２－２および２－２－３（５）で検討した加圧振動成形法の場合、１成形条件あたり約 70kg の灰を必要とするため、サンプリングした灰の量から検討する成形条件数の制約を受ける問題があった。

そこで、まず 1 成形条件あたり少量の灰で加圧振動成形法の評価を実施できる少量成形試験法について予備検討を行い、上記の加圧振動成形法における配合条件の検討は少量試験法により行った。

（１）少量成形試験法の予備検討

１）目的

少量の試料で加圧振動成形法の評価を実施できる試験方法を検討する。

２）試験

既存の超硬練りコンクリート試験法[1)]を参考として、加圧振動成形法を少量の試料で簡易に評価できる試験装置を試作し、試験方法について予備検討を行った。

(1)試験装置について

表 2-2-14(既出)に、試験装置及び試験方法の概要　を２－２－３（５）で検討した加圧振動成形法と比較して示す。

成形試験後の試料を強度測定用の供試体として利用し易いように、型枠としてφ10cm×H20cm 円柱形状型枠(以下、φ10×H20 型枠とする)を使用した。

成形によって締め固まる前の試料体積を考慮し、φ10×H20 型枠の上部にカラーを取り付けた。

テーブル振動機の上面にタップを立て、カラーとφ10×H20 型枠を型枠固定板で挟み込み、タップにネジ止め固定した。

２－２－２および２－２－３で検討した加圧振動成形法の場合、試料の上面から圧力と振動を加えるが、少量成形試験法では簡略化のため試料の上面にウェイトを載せることでこれに替えることとした。

テーブル振動機の加速度は、インバーターにより加圧振動成形法の加速度に近くなるよう設定した。

(2)試験方法について

3 段階の水／粉体比で少量成形試験を行い、材齢 10 日で重量、寸法測定、および圧縮強度試験を行った。

表 2-2-19 に、少量成形試験法の予備検討条件と結果　を示す。

Run1 の配合条件を、２－２－３（５）における表 2-2-15,Run4 と同等に設定した。

Run3 は加圧成形法の検討における水／粉体比に、また Run2 は Run1 と Run3 との中間の水／粉体比とした。

Run2 及び Run3 は、水／粉体比以外の配合条件を Run1 と同等とした。

３）結果

Run1 及び Run2 において、表 2-2-15,Run4 で検討した加圧振動成形法と比較して同等以上の供試体密度および圧縮強度を得た。

Run3 は、供試体密度も圧縮強度も極端に低くなった。

4）考察

Run1 及び Run2 の結果は、表 2-2-15,Run4 と配合条件が同様でも養生条件や材齢等の試験条件が異なるため単純には比較できない。しかし、試料上面からの加圧をウェイトで簡略化した方法でも、供試体密度および圧縮強度から試料の締固めは２－２－３（５）における加圧振動成形法と同等程度に達成されていると考えられる。よって、今回検討した少量成形試験法により、加圧振動成形法の評価を実施可能と考える。

Run3 は、振動による成形を行うには水／粉体比が低すぎ、締固めが十分行われなかったものと考える。

（2）水／粉体比の影響

1）目的

加圧振動成形において、水／粉体比(以下、W/P：Water/Powder とする)がコンシステンシー、供試体密度、圧縮強度に与える影響を把握する。

2）試験

表 2-2-20 に、少量成形試験装置および試験方法の概要　を示す。

3）結果

代表的な挙動として、「灰」100 に対する「セメント+二水石膏」の重量配合比を 40 で一定、セメント／二水石膏重量配合比を 70／30 で一定とした場合について、図 2-2-23 に、W/P と供試体密度および硬度指数の関係　を示す。

供試体密度は、W/P の増加に伴ってある W/P まで増加した後、横ばいになる傾向を示した。また硬度指数は、供試体密度と同様にある W/P まで増加したが、その後 W/P の増加に伴って減少する傾向を示した。このように、供試体密度や硬度指数といったコンシステンシーの評価指標によると、配合条件毎にコンシステンシーが大きく変化する W/P が存在した。

代表的な挙動として、「灰」100 に対する「セメント+二水石膏」の重量配合比を 40 で一定、セメント／二水石膏重量配合比を 70／30 で一定とした場合について、図 2-2-24 に、W/P が圧縮強度に与える影響　を示す。

圧縮強度は、ある W/P で急激に増加した後、W/P の増加に伴って徐々に減少する傾向を示した。このように、強度発現のために最低限必要となる W/P(以下、minW/P とする)が存在し、コンシステンシーが大きく変化する W/P と一致していた。

4）考察

minW/P でコンシステンシーが大きく変化したり圧縮強度が急激に増加したりするのは、minW/P より低い W/P 領域では主に灰等の粉体粒子内部に吸収されていた水分が、minW/P 近辺で粉体粒子内部に吸収できなくなり、粉体粒子間を架橋させる水分として作用し始めたことによるものと考える。

（3）灰/セメント配合比、灰のタップかさ密度の影響

1）目的

加圧振動成形において、灰／セメント配合比および灰のタップかさ密度が圧縮強度に与える影響を把握する。

2）試験

表 2-2-20 に、少量成形試験装置および試験方法の概要　を示す。

ただし、セメント／二水石膏重量配合比は 70／30 で一定とした。また W/P は、配合条件毎にコンシステンシーを評価して minW/P を把握し、minW/P+3%の条件で成形試験を行った。

タップかさ密度が圧縮強度に与える影響を検討するための参考として、灰以外に粉砕珪砂(タップかさ密度：約 1.5g/cm3)を使用した成形試験を行った。

3）結果

図 2-2-25 に、灰／セメント配合比が圧縮強度に与える影響　を示す。

原灰Ｙから灰Ｙ高までのいずれのタップかさ密度においても、「灰」100 に対する「セメント+二水石膏」の重量配合割合が増加するのに伴って圧縮強度は増加した。ただし、灰Ｙ中は、「灰」100 に対する「セメント+二水石膏」の重量配合割合 60～80 において、圧縮強度が横ばいとなる傾向を示した。

また、原灰Ｙから灰Ｙ中にかけては、灰タップかさ密度が高いほど圧縮強度が増加したが、灰Ｙ中と灰Ｙ高とでは、圧縮強度の差はほとんど見られなかった。

粉砕珪砂は、灰Ｙ高よりもタップかさ密度が高いにもかかわらず、圧縮強度は原灰Ｙと同等程度であった。

4）考察

従来の手法の検討において、粉砕処理によって灰のタップかさ密度を高めることが灰硬化体の圧縮強度を増加させるのに有効との仮説を得ていた。

しかし、本仮説の適用性は限定的であり、タップかさ密度を一定以上に高くしても硬化体の圧縮強度の増加には寄与しないこと、また粉砕珪砂のように化学組成の異なる粉体については、タップかさ密度の高さが圧縮強度に直接影響を与えないこと、等が明らかになった。

また、灰Ｙ中と灰Ｙ低との間ほどのタップかさ密度の差であれば、灰／セメント配合比の調整により、同等程度の圧縮強度に調整可能と考える。

（4）セメント／二水石膏配合比、灰のタップかさ密度の影響

1）目的

加圧振動成形において、セメント／二水石膏配合比および灰のタップかさ密度が圧縮強度に与える影響を把握する。

2）試験

表 2-2-20 に、少量成形試験装置および試験方法の概要　を示す。

ただし、「灰」100 に対する「セメント+二水石膏」の重量配合比は 40 で一定とした。

タップかさ密度が圧縮強度に与える影響を検討するための参考として、灰以外に粉砕珪砂(タップかさ密度：約 1.5g/cm3)を使用した成形試験を行った。

3）結果

図 2-2-26 に、セメント／二水石膏配合比が圧縮強度に与える影響　を示す。

原灰Ｙから灰Ｙ高までのいずれのタップかさ密度においても、「セメント+二水石膏」100 に対する「二水石膏」の重量配合割合 30 の場合に圧縮強度はピークを示した。ただし、灰のタップかさ密度が低くなるほど、「セメント+二水石膏」100 に対する「二水石膏」の重量配合割合 30 における圧縮強度のピークはブロードになった。

また、原灰Ｙから灰Ｙ高にかけては、灰タップかさ密度が高いほど圧縮強度が増加したが、灰Ｙ中と灰Ｙ高とでは、圧縮強度の差は少なかった。

粉砕珪砂は、灰とは挙動が異なり、「セメント+二水石膏」100 に対する「二水石膏」の重量配合割合 0 の場合に圧縮強度は最も高い値を示し、「セメント+二水石膏」100 に対する「二水石膏」の重量配合割合が高くなるほど圧縮強度は減少した。

4）考察

粉砕珪砂において、「セメント+二水石膏」100 に対する「二水石膏」の重量配合割合が高くなるほど圧縮強度が減少するのは、相対的にセメントの重量配合割合が少なくなっているため理解し易い現象と考える。

一方、灰において、「セメント+二水石膏」100 に対する「二水石膏」の重量配合割合 30 の場合に圧縮強度がピークを示す要因については明らかではないが、灰の化学組成によってセメント／二水石膏配合比に最適値が存在する可能性が考えられる。

灰のタップかさ密度が低くなるほど圧縮強度のピークがブロードになったことから、灰の粉砕処理については、タップかさ密度を高めて灰硬化体の圧縮強度を増加させる効果の他に、表面積の増加により灰の化学的な活性を高めて灰硬化体の圧縮強度を増加させる効果についても可能性が考えられる。

第２章の参考文献

1)社団法人 日本コンクリート工学協会,超硬練りコンクリート研究委員会報告書,pp.79-100(1998･6)

表2-2-1　第2章2－2で使用した灰等の粉砕履歴･性状

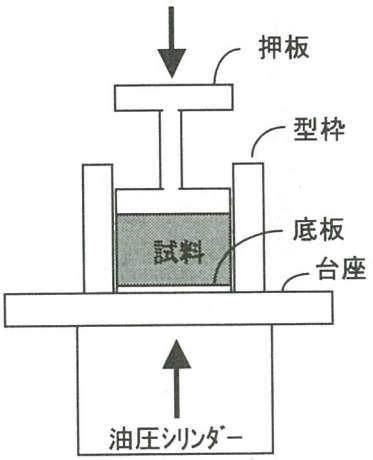
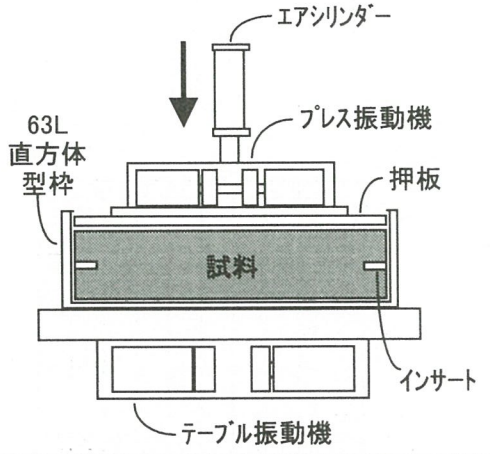
No.	灰略号 注1)	ﾎﾞｰﾙﾐﾙ仕様 φミル内径(mm)×Lミル長さ(mm)	ﾎﾞｰﾙ仕込量 (kg)	ﾎﾞｰﾙ径 (mm)	充填率 (%)　注2)	ミル回転数 (対臨界%)	粉砕時間 (h)	ﾀｯﾌﾟかさ 密度(g/cm3)
1	灰H	注3)	注3)	注3)	注3)	注3)	4	1.35
2	灰Y(灰Y高)	φ1,100×L1,000	1,704	100	75	79.3	3	1.31
3	灰Y中	φ1,100×L1,000	1,704	100	100	79.3	2	1.22
4	灰Y低	φ1,100×L1,000	1,704	100	125	79.3	1	1.11
5	原灰Y	―	―	―	―	―	―	0.97
6	灰I	φ900×L750	856	100	100	71.8	4	1.34
7	灰T	φ900×L750	856	100	100	71.8	4	1.32
8	粉砕珪砂 注4)	φ900×L750	856	100	100	71.8	4	1.51

注1)　灰入手先およびﾀｯﾌﾟかさ密度によって略号を区分した。単に灰Yとした場合、灰Y高を指すものとする。
注2)　ﾎﾞｰﾙ充填層空隙に対する灰および5号珪砂仕込量の体積割合(ﾙｰｽﾞ状態)。
注3)　灰Hは、原灰に対して2回粉砕操作を行っている。以下に操作内容を示す。

粉砕操作	ﾎﾞｰﾙﾐﾙ仕様 φミル内径(mm)×Lミル長さ(mm)	ﾎﾞｰﾙ仕込量 (kg)	ﾎﾞｰﾙ径 (mm)	灰充填率 (%)	ミル回転数 (対臨界%)	粉砕時間 (h)
1回目	φ1,500×L1,200	1,700	50～75	320	78.2	2
2回目	φ1,200×L800	2,000	40～75	78	77.7	2

注4)　5号珪砂に対して粉砕処理を行った。粉砕前のﾙｰｽﾞかさ密度は、灰の場合0.4～0.6g/cm3程度であるのに対して、5号珪砂の場合1.6g/cm3であった。
よって、充填率が灰の場合と同様の100%でも、重量での仕込量は灰に対して2.7～4倍となった。

表2-2-2　成形試験方法の比較表

項目	加圧成形法	加圧振動成形法
概略図		
原料配合	・使用原料(2－2－3以降、配合条件により薬品を使用する) 灰　：粉砕処理した下水汚泥焼却灰 ｾﾒﾝﾄ：普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ 水　：水道水 ・灰：ｾﾒﾝﾄ＝100：40　重量配合比 ・水／粉体比＝水／(灰、ｾﾒﾝﾄ、等の水以外の粉体原料の合計)　重量百分率	
混練方法	・使用したﾐｷｻｰ：55L水平二軸強制練りﾐｷｻｰ ・混練量：50kg ・混練手順 1)灰及びｾﾒﾝﾄを投入し3分間乾式混合 2)水を所定量の半分投入し2分間湿式混練 3)ﾐｷｻｰを停止し、内壁付着分を掻き落し 4)残りの水を投入し、1分間湿式混練 5)排出	
型枠への給材及び成形方法	定量(約2.5kg)の試料を一括投入し、所定の荷重(面圧19.6N/mm2)となるまで加圧する。	ﾃｰﾌﾞﾙ振動機を稼働させながら3層程度に分割して投入する。各層投入毎にﾌﾟﾚｽ振動機で締め固めを行い、型枠が一杯になるまで試料を投入する。 面圧約0.1N/mm2　注1) ﾃｰﾌﾞﾙ振動機の加速度5.8G　注2)
脱型方法	手動油圧ｼﾘﾝﾀﾞｰにより押し抜き脱型する。	型枠をひっくり返して自重で脱型する。
脱型後試料の寸法・容積	1)寸法：縦20cm×横10cm×厚さ約6cm →ﾌﾞﾛｯｸ形状。厚さは水/粉体比等、配合により変化する。 2)容積：約1.2L	1)寸法：縦56cm×横56cm×厚さ20cm →正確には型枠の底面より開口部側が広くなっている。 2)容積：約63L
養生方法	開放系で気中養生	
強度測定	ﾌﾞﾛｯｸ形状のまま強度測定用供試体として曲げ強度の測定を行う。曲げ強度測定後の一方のﾌﾞﾛｯｸ断片を強度測定用供試体として圧縮強度の測定を行う。	脱型から1～2週経過後、直径10cm×高さ20cmの形状にｺｱ抜きした試料を強度測定用供試体として圧縮強度測定を行う。

注1)　ﾌﾟﾚｽ振動機停止、ｴｱｼﾘﾝﾀﾞｰ稼働時の測定値
注2)　ﾃｰﾌﾞﾙ振動機に型枠を設置し、試料を入れない状態で、型枠の中央で測定した値

表2-2-3 加圧成形法による成形試験結果

試験No.	灰	水粉体比 (%)	供試体密度(g/cm3)				圧縮強度(N/mm2)		
			1	7	14	28	7	14	28
1	灰Y	24	1.97	1.88	1.79	1.76		17.2	17.1
2		28	1.97	1.87	1.75	1.71		13.6	14.5
3	灰H	22	1.98	1.94	1.93	1.90		41.9	31.5
4		24	1.98	1.94	1.92	1.90	32.3	37.3	30.8

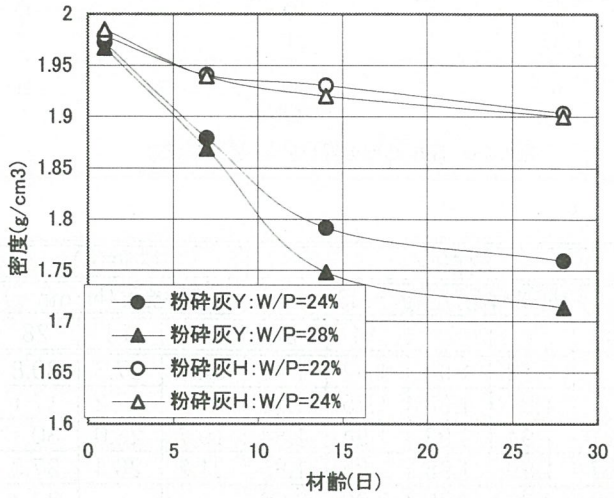


図2-2-1 供試体密度の経日変化(加圧成形法)

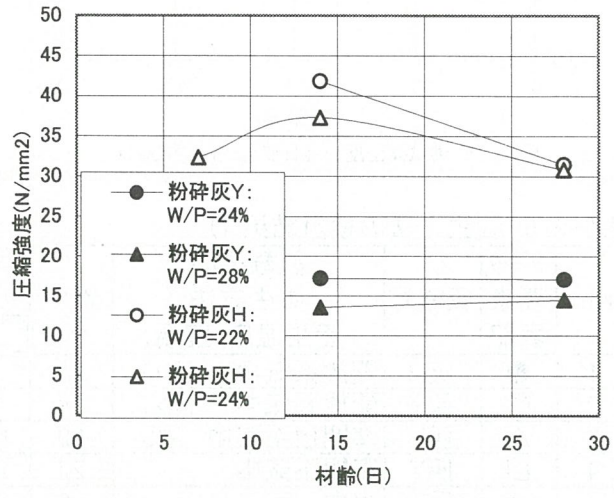


図2-2-2 圧縮強度の経日変化(加圧成形法)

表2-2-4 加圧振動成形法による成形試験結果

試験No.	灰	水粉体比 (%)	供試体密度(g/cm3)		圧縮強度(N/mm2)	
			14	28	14	28
1	灰Y	26	1.84	1.67		8.1
2		28	1.86	1.75	9.0	16.0
3	灰H	24	1.94	1.79		16.9
4		26	1.92	1.86	27.1	32.3

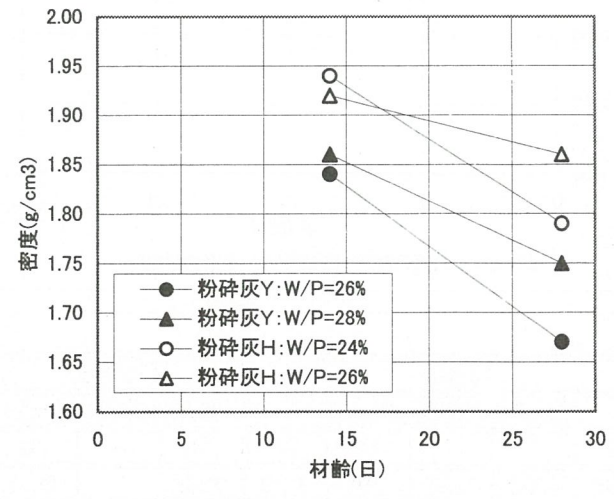


図2-2-3 供試体密度の経日変化(加圧振動成形法)

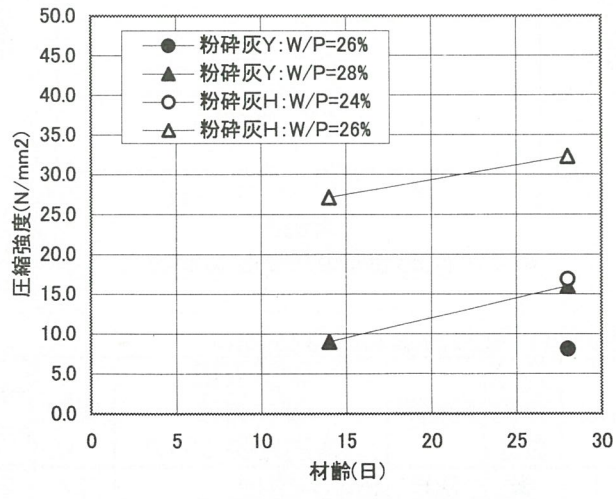


図2-2-4 圧縮強度の経日変化(加圧振動成形法)

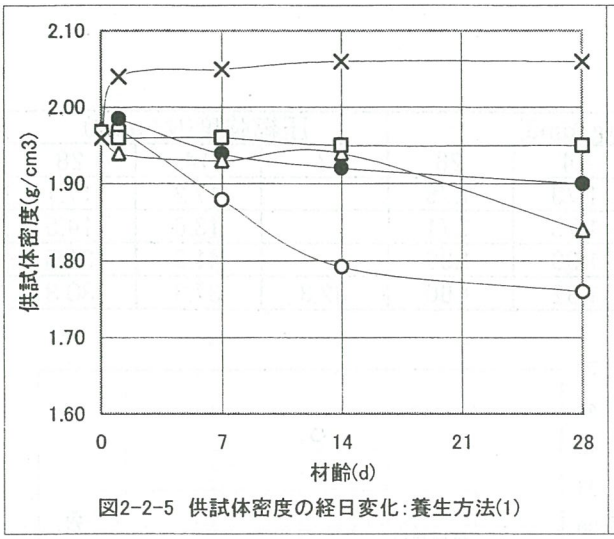


図2-2-5 供試体密度の経日変化:養生方法(1)

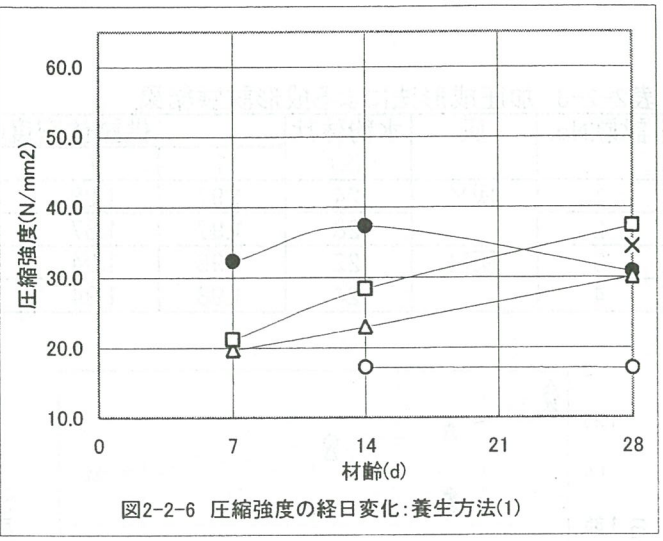


図2-2-6 圧縮強度の経日変化:養生方法(1)

表2-2-5 養生方法の検討結果(1)

No.	ﾃﾞｰﾀ要素表記	灰略号	試験要因 養生方法 (養生温度:室温)	W/P (%)	材齢(d) 供試体密度(g/cm3) 0	1	7	14	28	材齢(d) 圧縮強度(N/mm2) 7	14	28
1	●	灰H	開放系気中　注1)	24		1.98	1.94	1.92	1.90	32.3	37.3	30.8
2	○	灰Y	開放系気中　注2)	24		1.97	1.88	1.79	1.76		17.2	17.1
3	△	灰Y	準開放系気中　注3)	22	1.97	1.94	1.93	1.94	1.84	19.7	23.0	30.1
4	□	灰Y	密閉系気中	22	1.97	1.96	1.96	1.95	1.95	21.2	28.4	37.3
5	×	灰Y	水中	22	1.96	2.04	2.05	2.06	2.06			34.4

注1) 表2-2-3 試験No.4のﾃﾞｰﾀ。脱型後1dまで、積み重ねたﾌﾟﾗﾎﾞｯｸｽ内で養生し、その後開放系に移した。
注2) 表2-2-3 試験No.1のﾃﾞｰﾀ。脱型後1dまで、積み重ねたﾌﾟﾗﾎﾞｯｸｽ内で養生し、その後開放系に移した。
注3) 脱型後14dまで、積み重ねたﾌﾟﾗﾎﾞｯｸｽ内で養生し、その後開放系に移した。

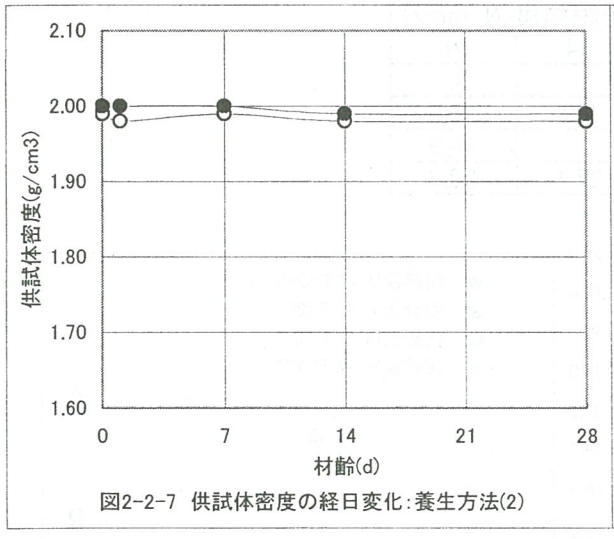


図2-2-7 供試体密度の経日変化:養生方法(2)

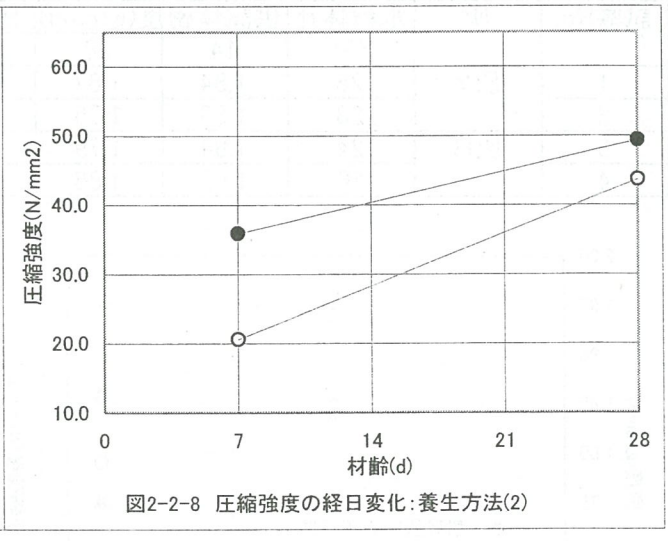


図2-2-8 圧縮強度の経日変化:養生方法(2)

表2-2-6 養生方法の検討結果(2)

No.	ﾃﾞｰﾀ要素表記	灰略号	試験要因 養生方法 (養生温度:20℃)	W/P (%)	材齢(d) 供試体密度(g/cm3) 0	1	7	14	28	材齢(d) 圧縮強度(N/mm2) 7	14	28
1	●	灰H	密閉系気中	22	2.00	2.00	2.00	1.99	1.99	35.9		49.4
2	○	灰Y	密閉系気中	23	1.99	1.98	1.99	1.98	1.98	20.6		43.7

表2-2-7　灰水洗処理前後の環告46号溶出試験結果

項　　目	試料名				水洗前溶出量の差（灰H－灰Y）
	水洗前 灰H	水洗後 水洗灰H	水洗前 灰Y	水洗後 水洗灰Y	<順位>
ｶﾄﾞﾐｳﾑ　(mg/L)	0.001 未満		0.001 未満		0.0
全ｼｱﾝ　(mg/L)	検出せず		検出せず		－
鉛　(mg/L)	0.005 未満		0.005 未満		0.0
六価ｸﾛﾑ　(mg/L)	0.04 未満		0.04 未満		0.0
砒素　(mg/L)	0.038		0.042		0.0
総水銀　(mg/L)	0.0005 未満		0.0005 未満		0.0
ｾﾚﾝ　(mg/L)	0.015		0.19		-0.2
ふっ素　(mg/L)	0.2 未満		1.0		-0.8
ほう素　(mg/L)	0.6		2.5		-1.9
ｶﾙｼｳﾑ　(mg/L)	674	60.3	255	6.7	419.0 <②>
ﾏｸﾞﾈｼｳﾑ　(mg/L)	45.0	11.2	45.8	2.3	-0.8
鉄　(mg/L)	0.1 未満		0.1 未満		0.0
ｱﾙﾐﾆｳﾑ　(mg/L)	2.0 未満		2.0 未満		0.0
硫酸ｲｵﾝ　(mg/L)	1700	280	652	20	1048.0 <①>
全りん　(mg/L)	6.08	3.94	2.30	5.90	3.8 <⑤>
M-ｱﾙｶﾘ度　(mg/L)	7.2	4.4	14.6	6.4	-7.4
ﾅﾄﾘｳﾑ　(mg/L)	76	57	41	11	35.0 <④>
ｶﾘｳﾑ　(mg/L)	83	58	20	2.5	63.0 <③>
ｼﾘｶ　(mg/L)	20.7	12.2	23.1	14.3	-2.4
塩化物ｲｵﾝ　(mg/L)	9.4	3.3	8.1	3.3	1.3 <⑥>
ｱﾝﾓﾆｱ性窒素　(mg/L)	0.3	0.4	4.1	0.6	-3.8
硝酸ｲｵﾝ　(mg/L)	1.4 未満		1.4 未満		0.0
亜硝酸ｲｵﾝ　(mg/L)	1.0 未満		1.0 未満		0.0
pH	7.0（21℃）	7.1（25℃）	7.7（21℃）	7.5（25℃）	
電気伝導率　(mS/m)	307	81.2	152	10.9	
溶出残分 注1)　(w/w%)	97.1	含水率(%)　注3)	99.7	含水率(%)　注3)	
浮遊物　注2)　(w/w%)	0.1 未満	9.3	0.1 未満	6.7	

注1）溶出前乾燥固形分重量に対する遠沈後沈殿分乾燥重量の割合
注2）溶出前乾燥固形分重量に対する遠沈後浮遊分乾燥重量の割合
注3）105℃乾燥後、塊状の灰を解砕し、850μmｱﾝﾀﾞｰに分級した状態における含水率

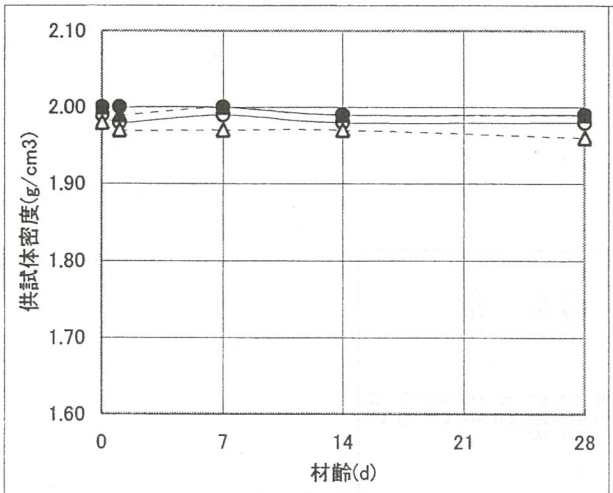


図2-2-9 供試体密度の経日変化:灰水洗処理

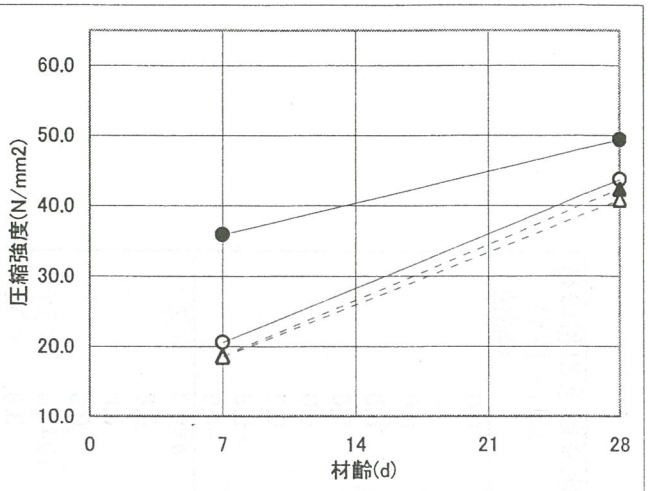


図2-2-10 圧縮強度の経日変化:灰水洗処理

表2-2-8 灰水洗処理の検討結果

No.	ﾃﾞｰﾀ要素表記	灰略号	試験要因 灰水洗処理 (密閉系気中養生:20℃)	W/P (%)	材齢(d) 供試体密度(g/cm3) 0	1	7	14	28	材齢(d) 圧縮強度(N/mm2) 7	14	28
1	●	灰H	水洗処理なし 注1)	22	2.00	2.00	2.00	1.99	1.99	35.9		49.4
2	▲	灰H	水洗処理あり	25	2.00	1.99	2.00	1.99	1.99	18.7		42.4
3	○	灰Y	水洗処理なし 注2)	23	1.99	1.98	1.99	1.98	1.98	20.6		43.7
4	△	灰Y	水洗処理あり	24	1.98	1.97	1.97	1.97	1.96	18.5		40.8

注1) 表2-2-6 No.1と同じﾃﾞｰﾀ。

注2) 表2-2-6 No.2と同じﾃﾞｰﾀ。

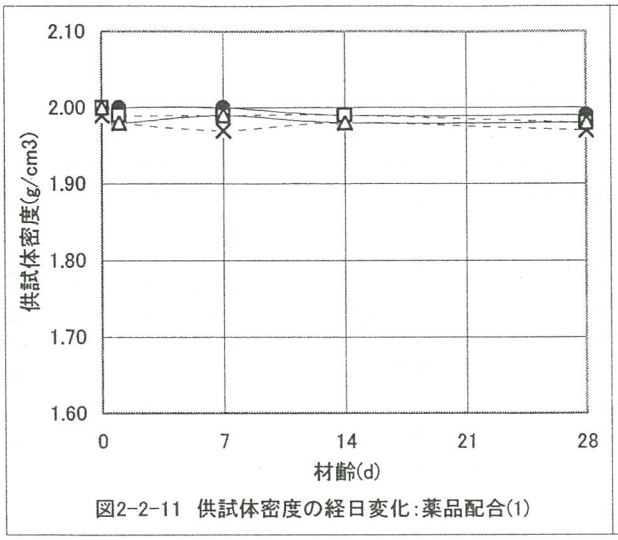


図2-2-11 供試体密度の経日変化:薬品配合(1)

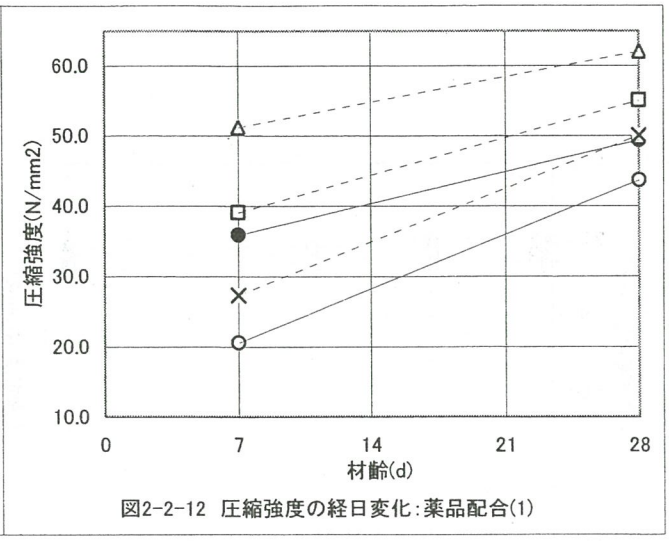


図2-2-12 圧縮強度の経日変化:薬品配合(1)

表2-2-9 薬品配合の検討結果(1)

No.	データ要素表記	灰略号	試験要因 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$配合 (密閉系気中養生:20℃)	W/P (%)	材齢(d) 供試体密度(g/cm3) 0	1	7	14	28	材齢(d) 圧縮強度(N/mm2) 7	14	28
1	●	灰H	薬品配合なし 注1)	22	2.00	2.00	2.00	1.99	1.99	35.9		49.4
2	○	灰Y	薬品配合なし 注2)	23	1.99	1.98	1.99	1.98	1.98	20.6		43.7
3	△	灰Y	対灰内割 10.0%	23	2.00	1.98	1.99	1.98	1.98	51.2		62.1
4	□	灰Y	対灰内割 5.0%	24	2.00	1.99	1.99	1.99	1.98	39.1		55.1
5	×	灰Y	対灰内割 1.8%	23	1.99	1.98	1.97	1.98	1.97	27.4		50.1

注1) 表2-2-6 No.1と同じデータ。 注2) 表2-2-6 No.2と同じデータ。

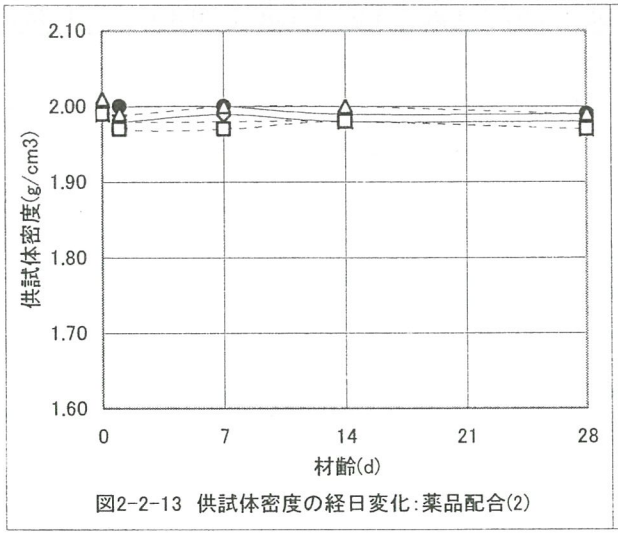


図2-2-13 供試体密度の経日変化:薬品配合(2)

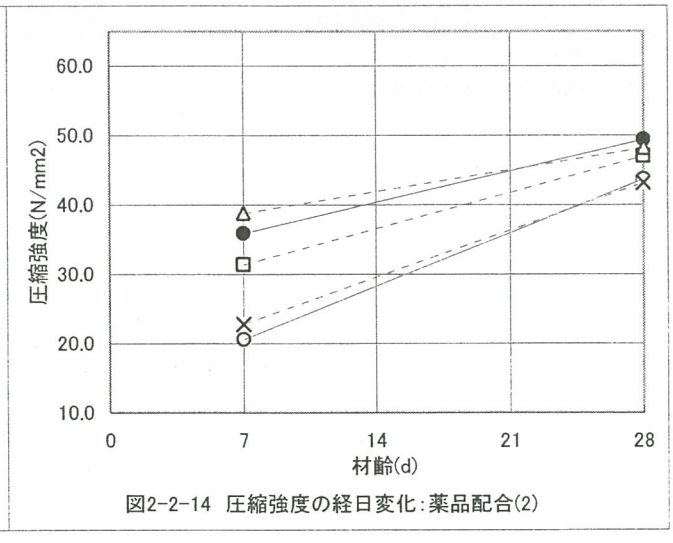


図2-2-14 圧縮強度の経日変化:薬品配合(2)

表2-2-10 薬品配合の検討結果(2)

No.	データ要素表記	灰略号	試験要因 K_2SO_4配合 (密閉系気中養生:20℃)	W/P (%)	材齢(d) 供試体密度(g/cm3) 0	1	7	14	28	材齢(d) 圧縮強度(N/mm2) 7	14	28
1	●	灰H	薬品配合なし 注1)	22	2.00	2.00	2.00	1.99	1.99	35.9		49.4
2	○	灰Y	薬品配合なし 注2)	23	1.99	1.98	1.99	1.98	1.98	20.6		43.7
3	△	灰Y	対灰内割 2.00%	23	2.01	1.99	2.00	2.00	1.99	38.8		48.2
4	□	灰Y	対灰内割 1.00%	23	1.99	1.97	1.97	1.98	1.97	31.4		47.0
5	×	灰Y	対灰内割 0.14%	23	1.99	1.98	1.98	1.98	1.97	22.8		43.2

注1) 表2-2-6 No.1と同じデータ。 注2) 表2-2-6 No.2と同じデータ。

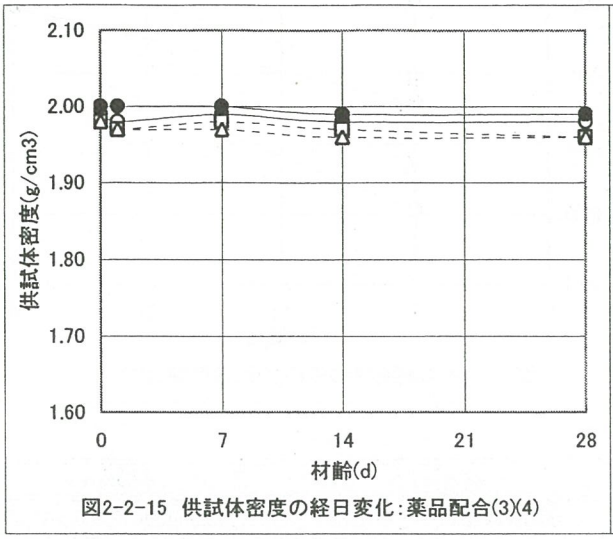


図2-2-15 供試体密度の経日変化:薬品配合(3)(4)

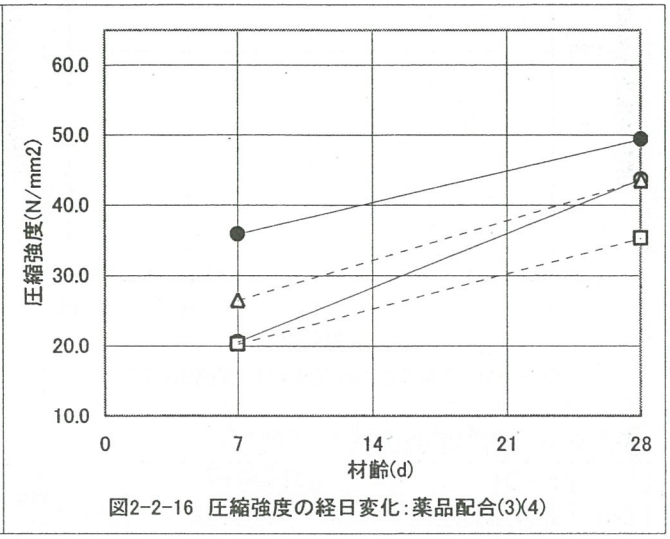


図2-2-16 圧縮強度の経日変化:薬品配合(3)(4)

表2-2-11 薬品配合の検討結果(3)(4)

No.	データ要素表記	灰略号	試験要因 Ca塩配合 対灰内割2.0% (密閉系気中養生:20℃)	W/P (%)	材齢(d) 供試体密度(g/cm3) 0	1	7	14	28	材齢(d) 圧縮強度(N/mm2) 7	14	28
1	●	灰H	薬品配合なし 注1)	22	2.00	2.00	2.00	1.99	1.99	35.9		49.4
2	○	灰Y	薬品配合なし 注2)	23	1.99	1.98	1.99	1.98	1.98	20.6		43.7
3	△	灰Y	$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	23	1.98	1.97	1.97	1.96	1.96	26.5		43.5
4	□	灰Y	$Ca(OH)_2$	23	1.98	1.97	1.98	1.97	1.96	20.3		35.3

注1) 表2-2-6 No.1と同じﾃﾞｰﾀ。

注2) 表2-2-6 No.2と同じﾃﾞｰﾀ。

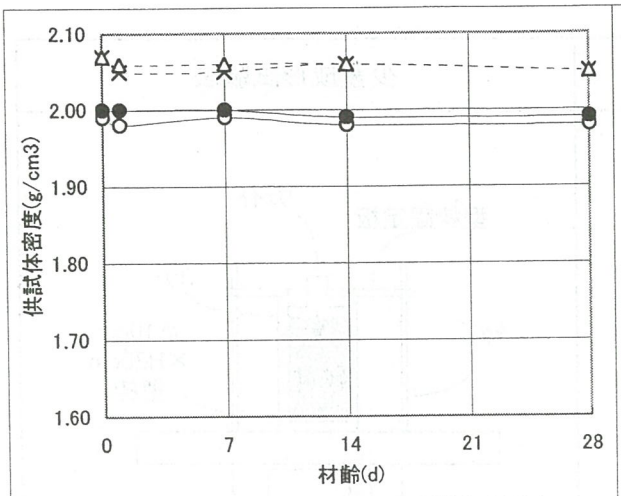


図2-2-17 供試体密度の経日変化:新規入手灰(1)

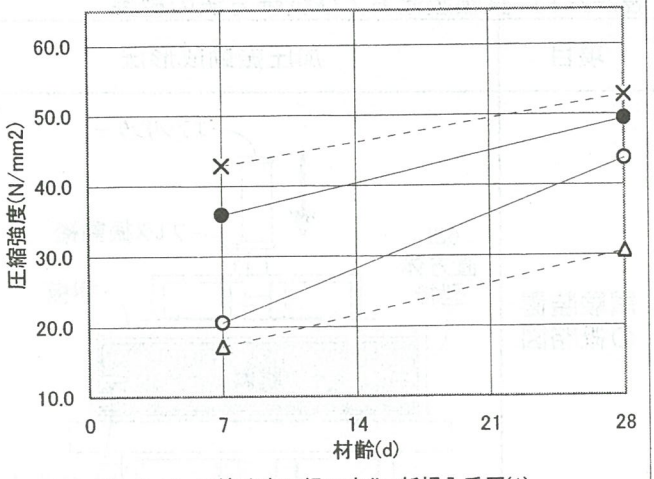


図2-2-18 圧縮強度の経日変化:新規入手灰(1)

表2-2-12 新規入手灰の検討結果(1)

No.	データ要素表記	灰略号	試験要因 灰I、$CaSO_4 \cdot 2H_2O$配合 (密閉系気中養生:20℃)	W/P (%)	材齢(d) 供試体密度(g/cm3) 0	1	7	14	28	材齢(d) 圧縮強度(N/mm2) 7	14	28
1	●	灰H	薬品配合なし 注1)	22	2.00	2.00	2.00	1.99	1.99	35.9		49.4
2	○	灰Y	薬品配合なし 注2)	23	1.99	1.98	1.99	1.98	1.98	20.6		43.7
3	△	灰I	薬品配合なし	22	2.07	2.06	2.06	2.06	2.05	17.2		30.6
4	×	灰I	対灰内割 5.0%	22	2.07	2.05	2.05	2.06	2.05	42.9		52.8

注1) 表2-2-6 No.1と同じデータ。 注2) 表2-2-6 No.2と同じデータ。

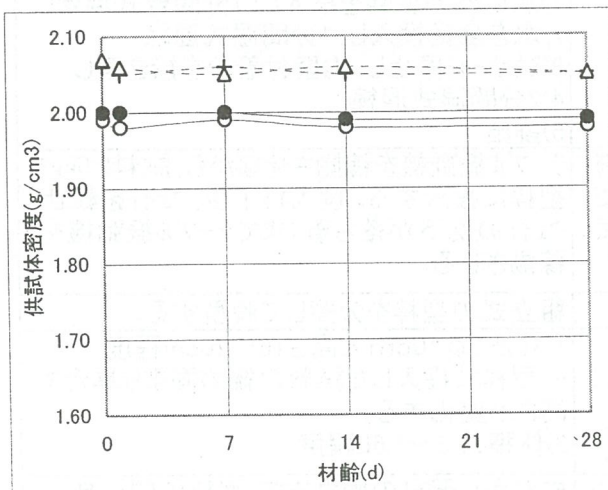


図2-2-19 供試体密度の経日変化:新規入手灰(2)

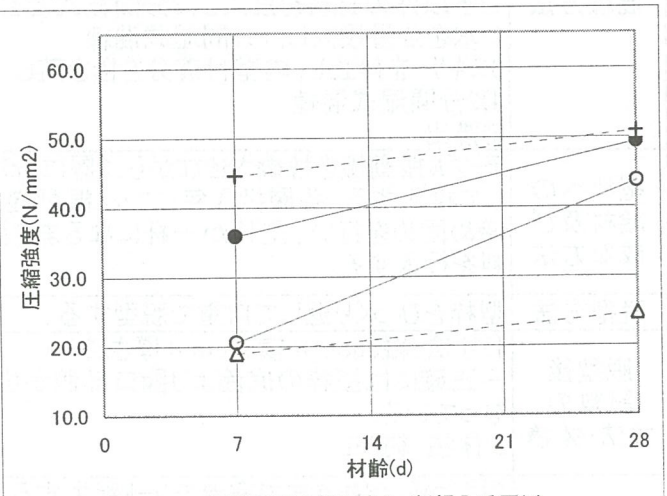


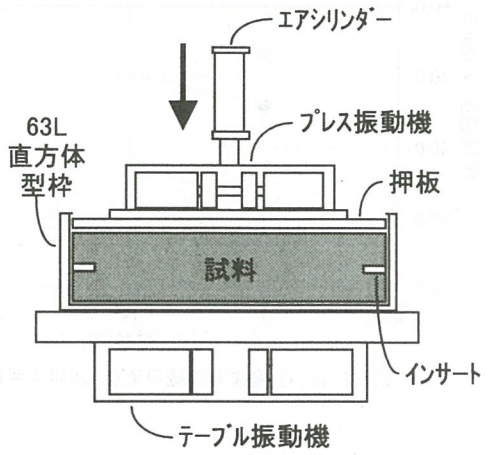
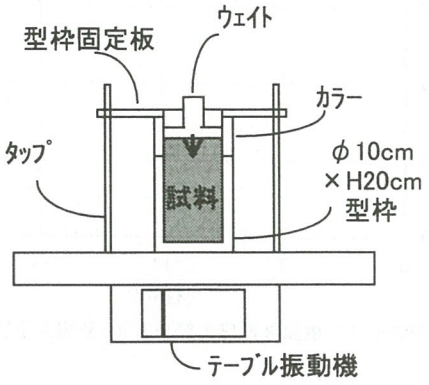
図2-2-20 圧縮強度の経日変化:新規入手灰(2)

表2-2-13 新規入手灰の検討結果(2)

No.	データ要素表記	灰略号	試験要因 灰T、$CaSO_4 \cdot 2H_2O$配合 (密閉系気中養生:20℃)	W/P (%)	材齢(d) 供試体密度(g/cm3) 0	1	7	14	28	材齢(d) 圧縮強度(N/mm2) 7	14	28
1	●	灰H	薬品配合なし 注1)	22	2.00	2.00	2.00	1.99	1.99	35.9		49.4
2	○	灰Y	薬品配合なし 注2)	23	1.99	1.98	1.99	1.98	1.98	20.6		43.7
3	△	灰T	薬品配合なし	22	2.07	2.06	2.05	2.06	2.05	19.0		24.7
4	+	灰T	対灰内割 5.0%	22	2.06	2.05	2.06	2.05	2.05	44.6		50.9

注1) 表2-2-6 No.1と同じデータ。 注2) 表2-2-6 No.2と同じデータ。

表2-2-14　試験装置および試験方法の概要

項目	加圧振動成形法	少量成形試験法
試験装置の概略図		
試料上面にかかる圧力	約0.1N/mm^2 :プレス振動機停止、エアシリンダー稼働時の測定値	0.0047N/mm^2 :ウェイト重量からの計算値、VC試験注)と同等の圧力とした。
テーブル振動機の加速度	5.8G:テーブル振動機に型枠を設置し、試料を入れない状態で、型枠の中央で測定した値	6.3G:テーブル振動機に型枠を設置し、試料を入れない状態で、型枠の中央で測定した値
混練方法	・使用ミキサー:55L水平二軸強制練りミキサー ・混練量:45kg/バッチ ・混練手順 1)水以外の材料を投入し、3分間乾式混合 2)水を全量投入し、1分間湿式混練 3)ミキサーを停止し、内壁付着分を掻き落し 4)2分間湿式混練 5)排出	・使用ミキサー:20Lモルタルミキサー ・混練量:2.6kg/バッチ ・混練手順 1)水以外の材料を投入し、1分間乾式混合 2)水を全量投入し、1分間湿式混練 3)ミキサーを停止し、内壁付着分を掻き落し 4)2分間湿式混練 5)排出
型枠への給材及び成形方法	テーブル振動機を稼働させながら、3層に分割して投入する。各層投入毎にプレス振動機で締め固めを行い、型枠が一杯になるまで試料を投入する。	テーブル振動機を稼働させながら、試料2.5kgを型枠に投入する。投入終了後、ウェイトを載せ、ウェイトの沈下が落ち着くまでテーブル振動機を稼働させる。
脱型方法	型枠をひっくり返して自重で脱型する。	組立式の型枠を分解して脱型する。
脱型後試料の寸法・体積	1)寸法:縦56cm×横56cm×厚さ20cm →正確には型枠の底面より開口部側が広くなっている。 2)体積:約63L	1)寸法:φ10cm×高さ16～20cm程度 →型枠に投入した試料の締め固まり具合で高さが変化する。 2)体積:1.3～1.6L程度
養生方法	脱型からコア抜きまで室温でシート養生する。コア抜きした試料は、気温20℃、相対湿度80%の恒温恒湿室で養生する。	成形から翌日の脱型まで、型枠の開口部をポリ袋で覆って型枠ごと気温20℃の恒温室で養生する。脱型後の試料は、ポリ袋に密封した後、同じ恒温室で養生する。
強度測定	脱型から約1週経過後、直径10cm×高さ20cmの形状に試料をコア抜きする。所定期間後、コア抜きした試料を供試体として圧縮強度測定を行う。	所定期間後、脱型後の試料を供試体として圧縮強度測定を行う。高さが20cmに満たない供試体は、係数により高さ20cmの強度に換算する。

注)　VC試験:超硬練りコンクリートのコンシステンシー(変形や流動に対する抵抗性の程度)試験方法。
超硬練りコンクリートを使用してダムや道路を施工する場合の品質管理等で用いられる。

表2-2-15　使用した材料および配合条件

使用した材料	灰Y高	ﾀｯﾌﾟかさ密度1.31g/cm^3					
	灰Y中	ﾀｯﾌﾟかさ密度1.22g/cm^3					
	ｾﾒﾝﾄ	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ					
	薬品	二水石膏					
	水	水道水					
配合条件	RunNo.	灰種類	配合重量比			W/P 注1) (%)	
			灰	ｾﾒﾝﾄ	薬品		
	Run1	灰Y高	100	40	0	28	←注2)
	Run2	灰Y高	100	30	10	28	
	Run3	灰Y中	100	40	0	32	
	Run4	灰Y中	100	30	10	32	

注1)　水粉体比：W=水、P=粉体=(灰+ｾﾒﾝﾄ+薬品)
注2)　Run1は、表2-2-4、試験No.2と同等の配合条件

表2-2-16　供試体密度の経日変化

	RunNo.	材齢(日)				
		0	7	14	28	
供試体密度 (g/cm3)	Run1	1.99	1.95	1.83	1.77	←cf. 1と同等の配合条件
	Run2	1.95	1.91	1.88	1.83	
	Run3	1.89	1.85	1.68	1.63	
	Run4	1.88	1.83	1.76	1.70	
	cf. 1	—	—	1.86	1.75	←注1)、Run1と同等の配合条件
	cf. 2	—	—	1.92	1.86	←注2)

注1)　表2-2-4、より転載。試験No.2、灰Y高、W/P=28%、ﾀｯﾌﾟかさ密度1.31g/cm3
注2)　表2-2-4、より転載。試験No.4、灰H、W/P=26%、ﾀｯﾌﾟかさ密度1.35g/cm3

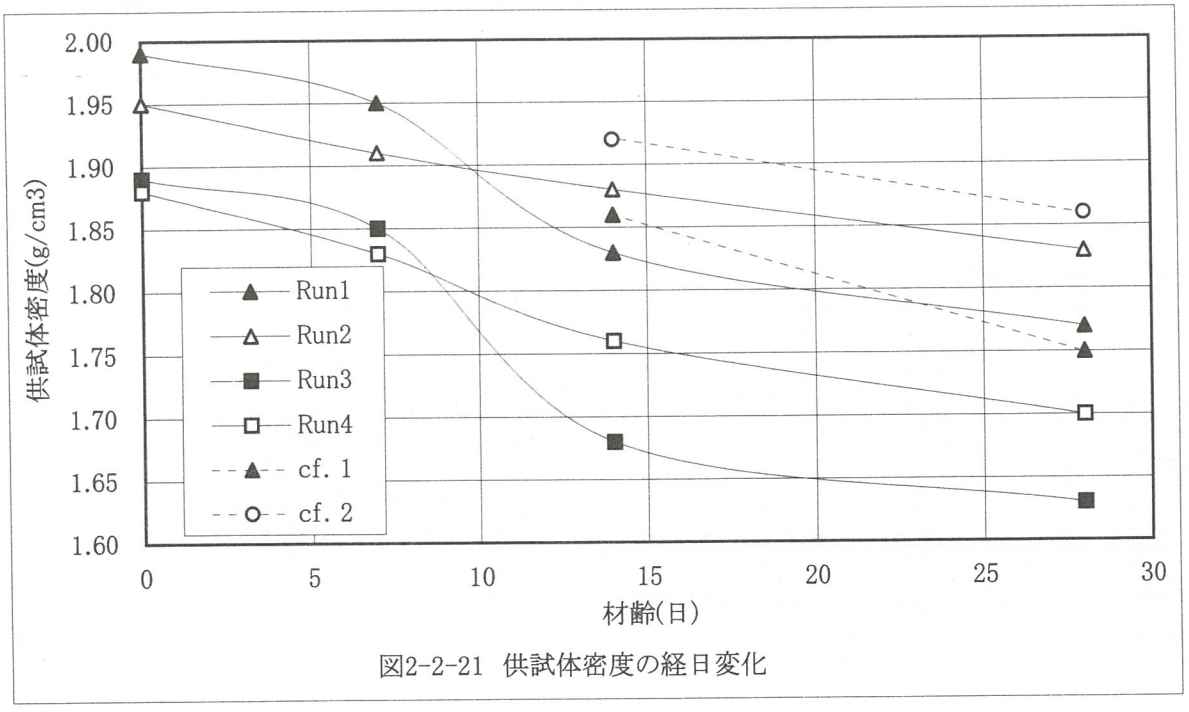


図2-2-21　供試体密度の経日変化

表2-2-17　圧縮強度の経日変化

	RunNo.	材齢(日)			
		7	14	28	
圧縮強度(N/mm2)	Run1	7.2	16.4	21.1	←cf. 1と同等の配合条件
	Run2	31.7	45.0	47.5	
	Run3	7.6	15.6	21.3	
	Run4	30.0	34.6	36.4	
	cf. 1	—	9.0	16.0	←注1)、Run1と同等の配合条件
	cf. 2	—	27.1	32.3	←注2)

注1)　表2-2-4、より転載。試験No.2、灰Y高、W/P=28%、ﾀｯﾌﾟかさ密度1.31g/cm3
注2)　表2-2-4、より転載。試験No.4、灰H、W/P=26%、ﾀｯﾌﾟかさ密度1.35g/cm3

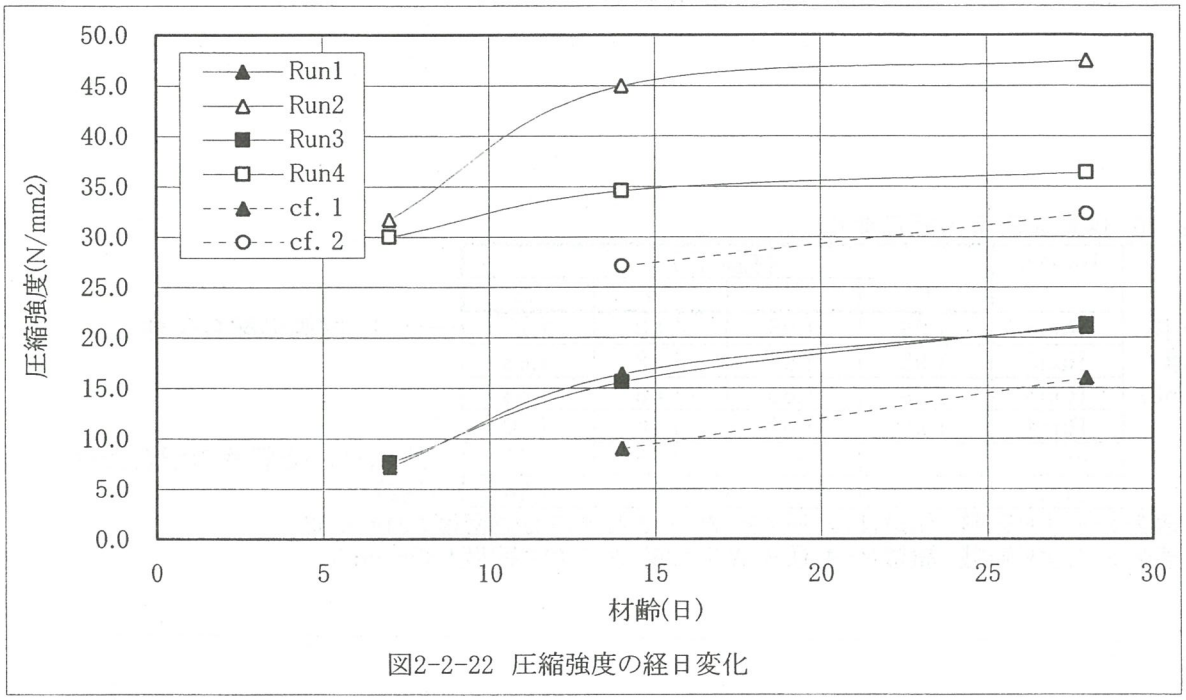


図2-2-22　圧縮強度の経日変化

表2-2-18　外観の観察結果

RunNo.	水ｼﾞﾜ	変形量(mm) 注1)	変形率(%) 注2)	ｸﾗｯｸ発生状況　注3) 材齢(日)			
				0	7	14	28
Run1	あり	-1.48	-0.27	なし	なし	なし	なし
Run2	あり	0.32	0.06	なし	0.15mm	0.15mm	0.15mm
Run3	あり	2.10	0.38	なし	なし	なし	なし
Run4	あり	0.60	0.11	なし	0.15mm	0.15mm	0.25mm

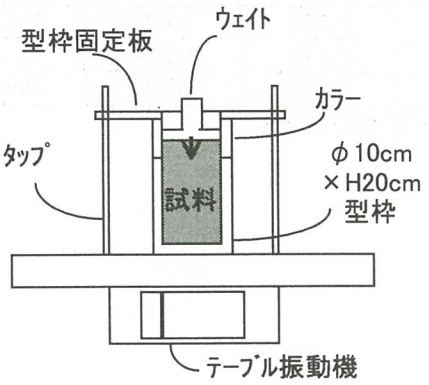
注1)　材齢7日で測定した供試体の変形量＝供試体寸法－型枠内面寸法。脱型後の供試体が、硬化する過程で自重により側面部に膨らみを生じているかどうかの目安としている。
変形量がﾏｲﾅｽになる場合は、供試体が収縮していることを意味している。
注2)　変形率＝変形量／型枠内面寸法×100
注3)　ｸﾗｯｸの数値は、ｸﾗｯｸ発生箇所で最も幅が大きい部分をｸﾗｯｸｹﾞｰｼﾞを使用して測定した値。

表2-2-19 少量成形試験法の予備検討条件及び結果(材齢10日)

RunNo.	W/P (%)	重量 (g)	直径 (cm)	高さ (cm)	供試体密度 (g/cm3)	圧縮強度 (N/mm2)
Run1 注1)	32.0	2,478	10.04	16.630	1.88	38.9
Run2	29.5	2,470	10.04	17.065	1.83	41.6
Run3	27.0	2,237	10.04	20.001	1.41	2.1

注1) 表2-2-15、Run4と同等の配合条件

表2-2-20 少量成形試験装置及び試験方法の概要

試験の目的	1. ｺﾝｼｽﾃﾝｼｰ[注1)]の評価　2. 圧縮強度測定用供試体の作製
少量成形試験装置の概略図（弊社試作）	
試料上面にかかる圧力	0.0047N/mm^2：ｳｪｲﾄ重量からの計算値、VC試験[注2)]と同等の圧力
ﾃｰﾌﾞﾙ振動機の加速度	6.3G：ﾃｰﾌﾞﾙ振動機に型枠を設置し、試料を入れない状態で、型枠の中央で測定した値
混練方法	・使用ﾐｷｻｰ：20Lﾓﾙﾀﾙﾐｷｻｰ ・混練量：2.1kg/ﾊﾞｯﾁまたは2.6kg/ﾊﾞｯﾁ ・混練手順 1) 水以外の材料を投入し、「低速」で1分間乾式混合 2) 「低速」のまま30秒で水を全量投入し、「高速」で1分間湿式混練 3) ﾐｷｻｰを停止し、撹拌羽根及び内壁への付着分を掻き落し 4) 「高速」で2分間湿式混練 5) ﾐｷｻｰを停止し、全量を排出
型枠への給材	ﾃｰﾌﾞﾙ振動機を稼働させながら、4分間で試料2.0kgまたは2.5kgを型枠に投入する。
成形方法	給材終了後、ｳｪｲﾄを載せ、ｳｪｲﾄの沈下が落ち着くまでﾃｰﾌﾞﾙ振動機を稼働させる。
ｺﾝｼｽﾃﾝｼｰの評価指標	1) 低W/P域：成形後の供試体密度(g/cm3) 2) 高W/P域：成形直後、型枠側面の拘束を維持したまま、供試体の上面及び底面を測定面として、山中式土壌硬度計(標準型)により測定された硬度指数(ﾊﾞﾈの縮長)の平均値(mm)
脱型方法	成形翌日、組立式の型枠を分解して脱型する。
脱型後試料の寸法･体積	1)寸法：φ10cm×高さ16～20cm程度 →型枠に投入した試料の締め固まり具合で高さが変化する。 2)体積：1.3～1.6L程度
養生方法	成形から翌日の脱型まで、型枠の開口部をﾎﾟﾘ袋で覆って型枠ごと気温20℃の恒温室で養生する。脱型後の試料は、ﾎﾟﾘ袋に密封した後、同じ恒温室で所定期間養生する。
圧縮強度の測定方法	所定期間後、脱型後の試料を供試体として圧縮強度測定を行う。高さが20cmに満たない供試体は、係数により高さ20cmの強度に換算する。 ｷｬｯﾋﾟﾝｸﾞ方法は、ｱﾝﾎﾞﾝﾄﾞｷｬｯﾋﾟﾝｸﾞとする。

注1) 変形や流動に対する抵抗性の程度
注2) VC試験：超硬練りｺﾝｸﾘｰﾄのｺﾝｼｽﾃﾝｼｰ試験方法。
超硬練りｺﾝｸﾘｰﾄでﾀﾞﾑや道路を施工する場合の品質管理等で用いられる。

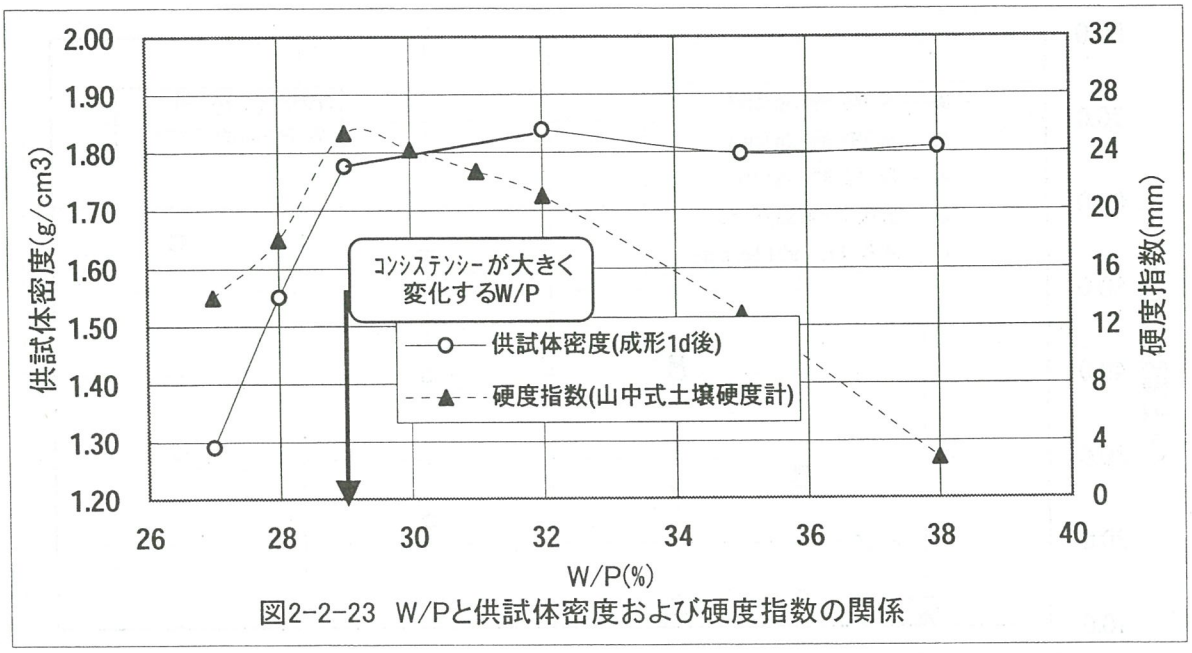


図2-2-23 W/Pと供試体密度および硬度指数の関係

配合条件	灰	灰/(OPC+G)	OPC/G
	灰Y中	100/40	70/30

OPC:普通ポルトランドセメント
G:二水石膏

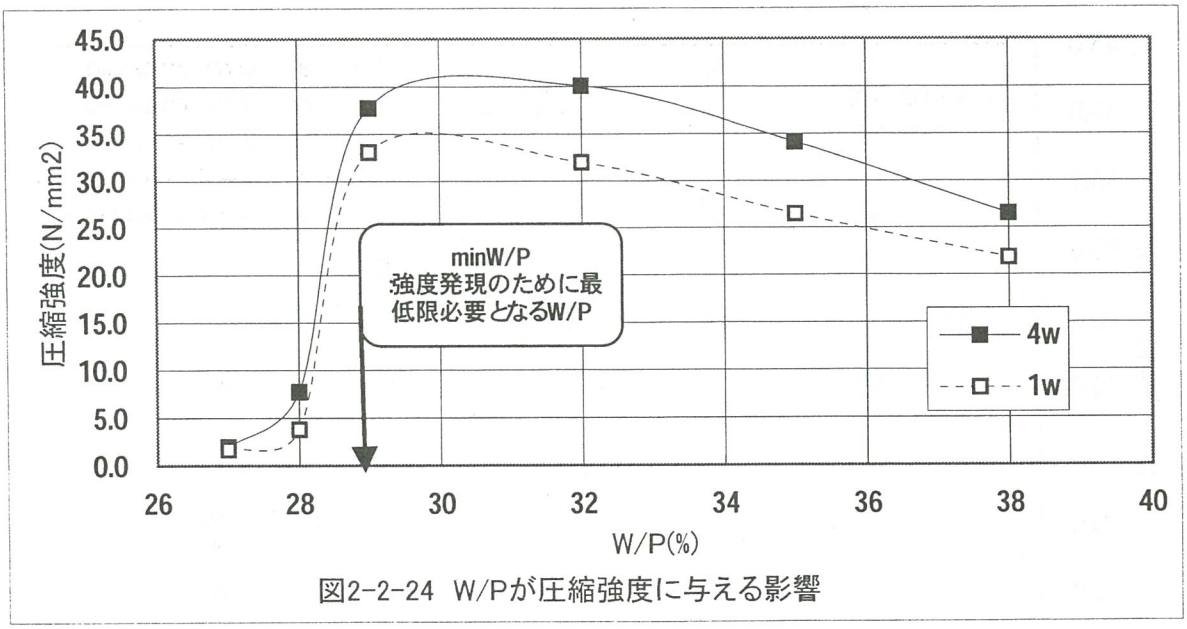


図2-2-24 W/Pが圧縮強度に与える影響

配合条件	灰	灰/(OPC+G)	OPC/G
	灰Y中	100/40	70/30

OPC:普通ポルトランドセメント
G:二水石膏

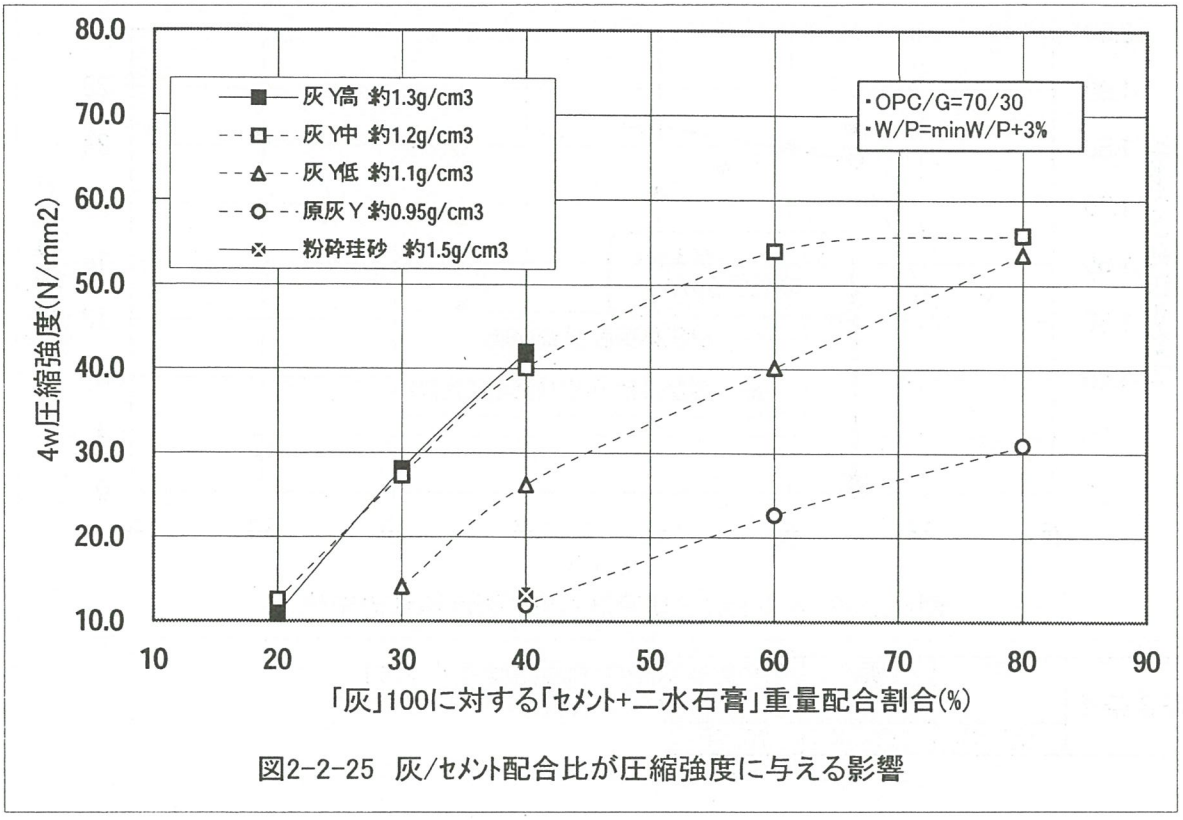


図2-2-25 灰/セメント配合比が圧縮強度に与える影響

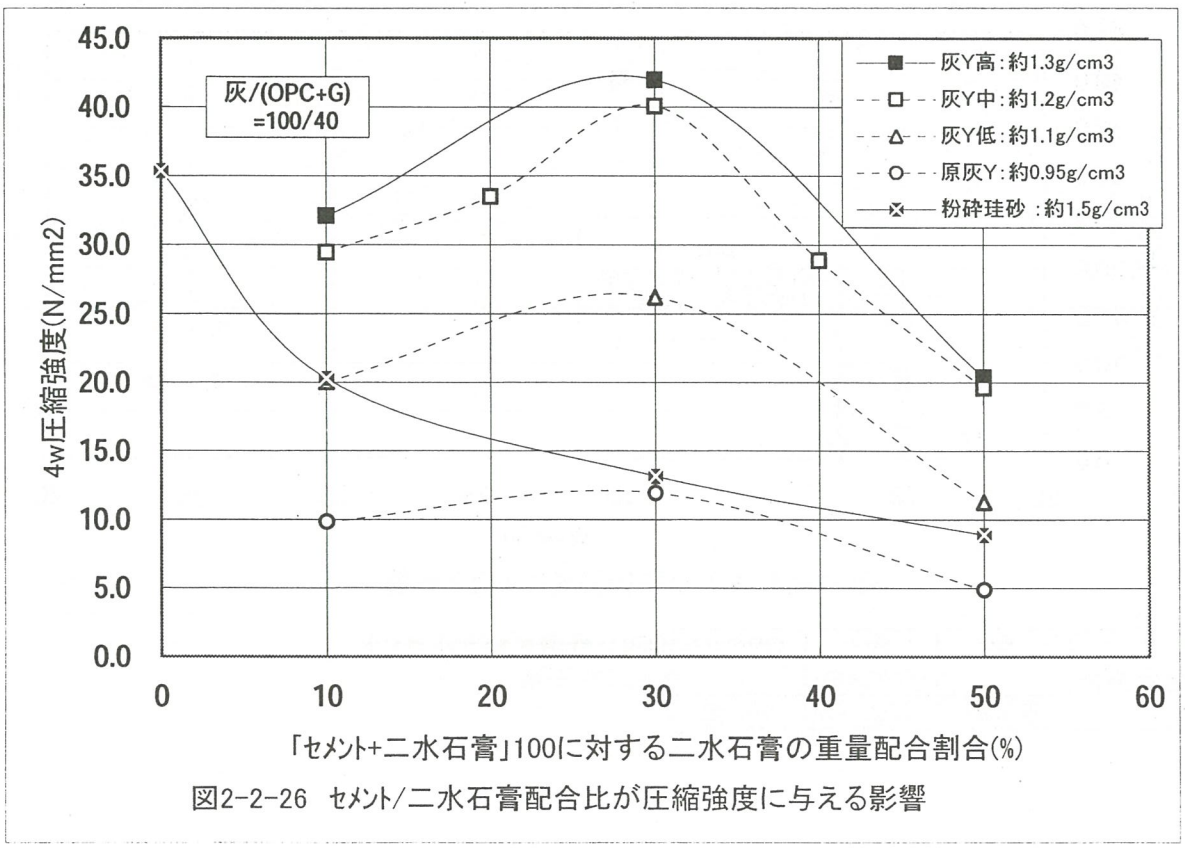


図2-2-26 セメント/二水石膏配合比が圧縮強度に与える影響

第３章　灰および灰硬化体の物性に関する検討

３－１　はじめに

第２章では、灰前処理方法および成形方法について検討を行い、各々において転動ミルにより粉砕処理した灰および加圧振動成形法により成形した灰硬化体を得た。

本章では、転動ミルにより粉砕処理した灰の粉体物性について、および加圧振動成形法により成形した灰硬化体のコンクリート関連の材料物性等について検討を行った。

灰については、表 2-2-1 第２章２－２で使用した灰等の粉砕履歴・性状　に示した中から、タップかさ密度に注目して、①原灰Ｙ、②灰Ｙ低、③灰Ｙ中、④灰Ｙ高、および参考として⑤粉砕珪砂、の計５サンプルを検討した。

灰硬化体については、図 2-2-24 から図 2-2-26 のいずれにおいても圧縮強度のﾃﾞｰﾀを使用した表 3-1-1 に示す配合条件で検討した。

灰の粉体物性に関する各試験および灰硬化体のコンクリート関連の材料物性等に関する各試験は、㈱太平洋コンサルタントに委託した。灰硬化体の供試体作製にあたっては、粉体原料を提供し、テーブルバイブレーターおよび型枠固定治具は、第２章２－２－４において検討した少量成形試験法で使用したものを㈱太平洋コンサルタントに持ち込み、少量成形試験法に準じて成形試験を行った。

灰硬化体に関する各試験は、試験項目毎に供試体形状および試験開始までの養生条件が異なるため、表 3-1-2 に、供試体形状および養生条件　にまとめて示す。

３－２　転動ミルにより粉砕処理を行った灰の物性

（１）粒子密度測定

１）試験

粒子密度測定は、JIS A 5201「セメントの物理試験方法」に準拠した。

２）結果および考察

粒子密度測定結果を表 3-2-1 に示す。

本試験結果から、灰および粉砕珪砂の粒子密度は 2.54～2.70g/cm^3 であった。普通ポルトランドセメントの粒子密度が 3.16g/cm^3 前後であり、混合セメントで 2.97～3.12g/cm^3 程度であるのに比較して、やや低い値を示した。

灰の粒子密度は、粉砕処理によって一旦低下し、粉砕処理の進行に伴い徐々に回復する挙動を示した。

表 2-2-1 に示した通り、粉砕珪砂のタップかさ密度は他の灰よりも高い値を示したが、粒子密度では灰 Y 高と同等程度であった。

表 3-2-1　粒子密度測定結果

試料名	粒子密度 (g/cm^2)
原灰Y	2.70
灰Y低	2.54
灰Y中	2.61
灰Y高	2.66
粉砕珪砂	2.67

（2）粒度分布測定

1）試験

粒度分布測定は、日機装社製マイクロトラック粒度分布装置「HRA9320-X100」を用いて、レーザー回折法（溶媒:エタノール）により行った。

2）結果および考察

粒度分布測定結果を表 3-2-2 に示す。

灰の 50%粒径は、粉砕処理の進行に伴って減少した。

粉砕珪砂の 50%粒径は、灰 Y 中と灰 Y 高の間の値を示した。

普通ポルトランドセメントの 50％粒径が 10～20 μm 程度であるのに比較して、粉砕処理した灰および珪砂は同等程度であった。

表 3-2-2　粒度分布測定結果

試料名	粒度分布 (μm)		
	10%粒径	50%粒径	90%粒径
原灰Y	4.9	28.6	86.3
灰Y低	3.6	22.2	82.7
灰Y中	2.7	16.5	91.7
灰Y高	2.1	12.3	106.0
粉砕珪砂	2.5	15.0	80.1

（3）比表面積測定

1）試験

比表面積測定は、JIS A 5201「セメントの物理試験方法」およびBET法により行った。比表面積（BET法）測定は、Micromeritics社製比表面積測定装置「Flow Sorb II 2300」（1点式直読表面積測定法）を用いて行った。なお、試料は両試験方法ともに、105℃乾燥機中で乾燥したものを比表面積測定用試料とした。

2）結果および考察

比表面積測定結果を表 3-2-3 に示す。

比表面積は、一般的に粉体の粒径が小さいほど大きい値を示す。

本試験結果から、灰および粉砕珪砂の比表面積は、5540～9720cm²/g（BET法では2210～8860 cm²/g）であった。

ポルトランドセメントの比表面積が3100～4500cm²/g程度であるのに比較して、灰は大きい値を示し、粉砕処理が進行するに伴って増加した。

（2）粒度分布測定において、普通ポルトランドセメントと粉砕処理した灰および珪砂の50%粒径が同等程度であったことから、灰の比表面積は、粒子内部の空隙に由来する表面積も含んでいるものと考える。

表 3-2-3　比表面積測定結果

試料名	比表面積 (cm^2/g)	BET比表面積 (cm^2/g)
原灰Y	6710	6950
灰Y低	7600	7790
灰Y中	8540	8860
灰Y高	9720	8700
粉砕珪砂	5540	2210

（4）細孔径分布測定

1）試験

細孔径分布測定は、Micromeritics 社製水銀圧入式ポロシメーター装置「AUTOPORE Ⅱ 9220」を用いて細孔径分布の測定を行った。なお、試料は乾燥させたものを細孔径分布測定用試料とした。

2）結果および考察

細孔径分布測定結果を表 3-2-4 および図 3-2-1 に示す。

灰の累積細孔容積は、粉砕処理の進行に伴って減少した。これは、灰粒子内部の空隙が、粉砕処理によって減少しているためと考える。

表 3-2-4　細孔径分布測定結果

試料名	累積細孔容積 (ml/g)	平均細孔直径 (4V/A) (μm)	かさ密度 (g/ml)	空隙率 (%)
原灰Y	0.832	0.662	0.739	61.5
灰Y低	0.648	0.243	0.891	57.7
灰Y中	0.596	0.200	0.969	57.8
灰Y高	0.523	0.119	1.063	55.6
粉砕珪砂	0.446	0.202	1.173	52.3

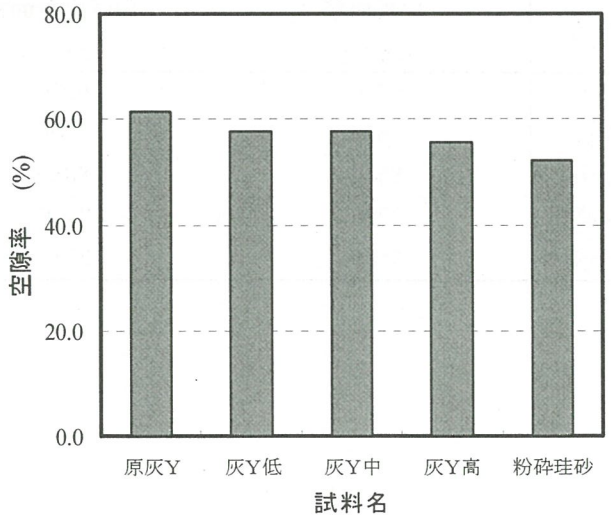


図 3-2-1　細孔径分布測定結果（空隙率）

３－３　加圧振動成形法による灰硬化体の物性

（１）凝結試験

１）試験

凝結試験は、JIS A 1147「コンクリートの凝結時間試験方法」に準拠した。

２）結果および考察

凝結試験結果を表 3-3-1 に、経過時間と貫入抵抗値との関係を図 3-3-1 に示す。

本試験結果から、灰硬化体の始発時間（貫入抵抗値：3.5N/mm²）は 1 時間 20 分であり、終結時間（貫入抵抗値：28.0N/mm²）は 11 時間 5 分であった。コンクリートの凝結時間は配合、硬化時の温度および湿度等によって異なるが、参考文献 [2]によれば、水セメント比 55%、硬化時の温度 20℃の場合では、約 6 時間で 3.5N/mm² となり、約 8 時間で 28.0N/mm² となる。

表 3-3-1　凝結試験結果

試料名	始発		終結	
	始発時間 (時間：分)	貫入抵抗値 (N/mm^2)	終結時間 (時間：分)	貫入抵抗値 (N/mm^2)
灰硬化体	1:20	3.5	11:05	28.0

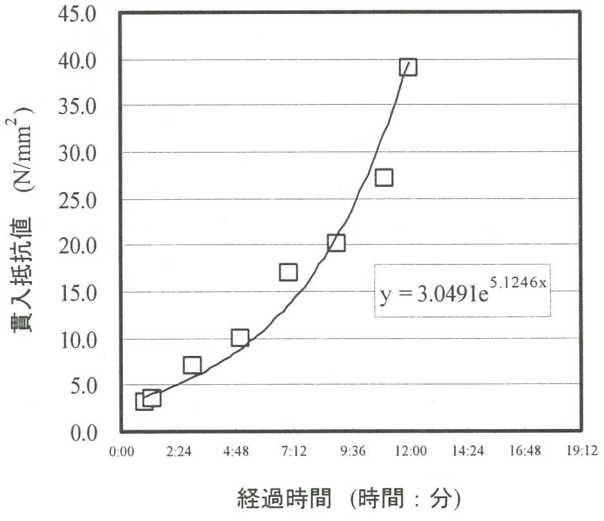


図 3-3-1　経過時間と貫入抵抗値との関係

（2）一軸圧縮試験

1）試験

一軸圧縮強度は、JIS A 1216「土の一軸圧縮試験」に準拠して、材齢 1、3、6 および 24 時間について行った。

2）結果および考察

一軸圧縮試験結果を表 3-3-2 に示す。なお、材齢 24 時間については、一軸圧縮試験機の許容範囲を超える可能性があったため、圧縮強度試験機により試験を行った。

表 3-3-2　一軸圧縮試験結果

試料名	材齢 (h)	一軸圧縮強さ (kN/m^2)
灰硬化体	1	234
	3	331
	6	440
	24	11800

（3）圧縮強度および静弾性係数試験

1）試験

圧縮強度試験は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠して、材齢 7 および 28 日について行った。

静弾性係数試験は、JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準拠して、材齢 28 日について行った。

2）結果および考察

圧縮強度および静弾性係数試験結果を表 3-3-3 に、材齢と圧縮強度との関係を図 3-3-2 に示す。

本試験結果から、水中養生を行った場合の圧縮強度は、材齢 7 日で 38.1N/mm^2、材齢 28 日で 45.3N/mm^2 であり、材齢の経過に伴い圧縮強度は増加し、その増加量は 7.2N/mm^2 であった。気中養生を行った場合の圧縮強度は、材齢 7 日で 27.4N/mm^2、材齢 28 日で 21.8N/mm^2 であり、材齢の経過に伴い圧縮強度は減少し、その減少量は 5.6N/mm^2 であった。これは、気中養生を行っている過程における供試体の乾燥によるものと考える。

表 3-3-3　圧縮強度および静弾性係数試験結果

試料名	材齢	養生条件	圧縮強度 (N/mm^2)	静弾性係数 (×10^{4}N/mm^2)
灰硬化体	7日	水中養生	38.1	-
		気中養生	27.4	-
	28日	水中養生	45.3	1.40
		気中養生	21.8	0.92

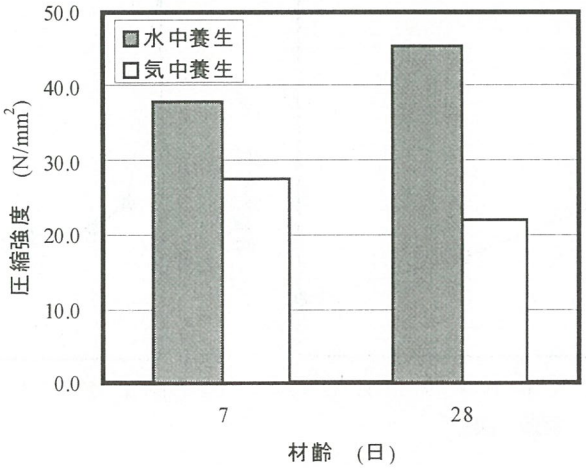


図 3-3-2　材齢と圧縮強度との関係

（4）長さ変化試験

1）試験

長さ変化試験は、JIS A 1129-1「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法－第 1 部：コンパレーター方法」に準拠して、材齢 1、2、4、8 および 13 週について行った。

2）結果および考察

長さ変化試験結果を表 3-3-4 に、材齢と長さ変化との関係を図 3-3-3 に、材齢と質量変化との関係を図 3-3-4 に示す。

本試験結果から、灰硬化体の材齢 13 週における長さ変化率は、-0.085%であった。参考文献 1)によれば、コンクリートの乾燥収縮は、水セメント比 55%の場合、材齢 13 週における長さ変化率は、約-0.00055%である。コンクリートの乾燥収縮は、主としてコンクリートを構成するセメントペーストが乾燥により収縮することに起因し、コンクリート中の骨材は、セメントペーストの乾燥収縮を拘束し、コンクリートの収縮を小さくする作用があると言われている。灰硬化体の長さ変化率が大きな値を示したのは、骨材を含まないことによる影響が大きいと考える。

表 3-3-4　長さ変化試験結果

試料名	試験項目	材齢　(週)					
		0	1	2	4	8	13
灰硬化体	長さ変化率　(%)	0.000	-0.046	-0.055	-0.060	-0.074	-0.085
	質量変化率　(%)	0.0	-11.8	-13.2	-13.6	-14.5	-15.1

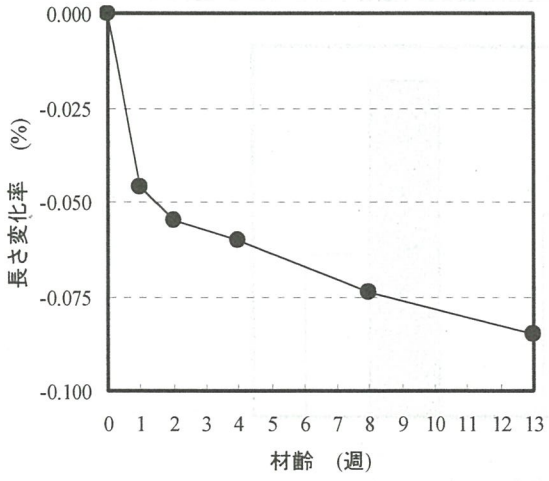


図 3-3-2　材齢と長さ変化との関係

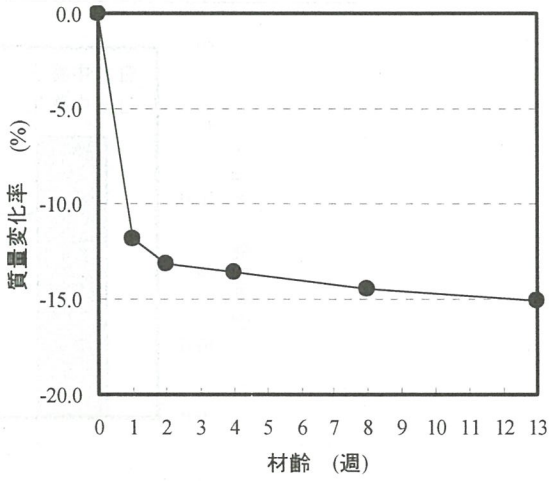


図 3-3-3　材齢と質量変化との関係

（5）凍結融解試験

1）試験

凍結融解試験（水中凍結水中融解：A 法、気中凍結水中融解：B 法）は、JIS A 1147「コンクリートの凍結融解試験方法」に準拠した。

2）結果および考察

凍結融解試験（水中凍結水中融解：A 法、気中凍結水中融解：B 法）結果を表 3-3-5 に示す。

本試験結果から、凍結融解試験の水中凍結水中融解（A 法）および気中凍結水中融解（B 法）ともに凍結融解サイクル数 30 回において、スケーリングによる供試体崩壊のため試験継続不可能となり試験を終了した。

表 1-2　従来の手法における検討結果　に示した通り、従来の手法による加圧成形法では B 法に類似した試験法で凍結融解を 200 サイクル行っても異常なしであったのに対して、加圧振動成形法による灰硬化体は、圧縮強度では加圧成形法と同等程度(cf.表 1-2 および表 3-3-3)であるにもかかわらず、大幅に耐凍害性が劣る結果となった。

加圧振動成形法は、加圧成形法と比較して、練り混ぜおよび成形時に自然に取り込まれた気泡（エントラップトエア：不規則な形状で 1～数 mm の比較的大きく、凍結融解の繰返し作用によって、劣化を生じさせる原因となる気泡）を多く含んでいるものと推定される。従って、AE 剤等を用いて、連行させた独立した微細な気泡（エントラップトエア：球状またはそれに近い形状で 50～500μm 程度の連行した気泡）を適当量存在させる必要があると考えられる。エントラップトエアは、自由水の凍結による大きな膨張圧を緩和する働きをし、自由水の移動を可能にするため、AE 剤等の使用により凍結融解の繰返し作用に対する抵抗性を増大させる効果が期待される。

表 3-3-5　凍結融解試験結果

試験項目			凍結融解サイクル数（回）										
			0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
A法	一次共鳴振動数	(Hz)	1519										
	供試体質量	(g)	7809		供試体崩壊のため試験継続不可能となり試験中止								
	相対動弾性係数	(%)	100.0										
	質量減少率	(%)	0.0										
B法	一次共鳴振動数	(Hz)	1518										
	供試体質量	(g)	7815		供試体崩壊のため試験継続不可能となり試験中止								
	相対動弾性係数	(%)	100.0										
	質量減少率	(%)	0.0										

（6）促進中性化試験

1）試験

促進中性化試験は、JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」に準拠して、材齢1、4、8、13および26週について行った。

2）結果および考察

促進中性化試験結果を表 3-3-6 に示す。

本試験結果から、材齢 4 週においてすべての供試体の測定面が中性化したため、試験継続不可能となり試験を終了した。これは、供試体作製時の締固め不足により気泡が多く存在してしまい、透気性が大きくなったためと考えられる。これを改善するためには、AE 減水剤等の使用により、水セメント比を小さくし、セメント粒子をよく分散させ、十分な締固をすることによって灰硬化体を緻密にする必要があると考える。

表 3-3-6　促進中性化試験結果

No.	試験項目	材齢（週）				
		1	4	8	13	26
1	平均中性化深さ (mm)	28.7	試験中止			
2		29.4				
3		26.4				
供試体3個の平均値 (mm)		**28.2**				

（7）透水試験

1）試験

透水試験用供試体は、寸法φ15×10cm の円柱供試体を試験用供試体とした。供試体は側面から加圧水の流出を防ぐために、エポキシ樹脂を側面に塗布した後、透水試験に供した。

透水試験は、インプット法に準拠して、試験期間 5 日間、試験圧力 24.5N/cm² の条件とし、試験期間終了後の供試体を割裂し、透水部分の深さを測定し、平均浸透深さを求めて、拡散係数および透水係数を算出した。

2）結果および考察

透水試験結果を表 3-3-7 に示す。なお、次式(1)および(2)によって、拡散係数および透水係数を算出した。本試験結果から、灰硬化体の透水係数は 1756.69×10⁻¹²cm/sec であった。上述のごとく、供試体作製時の締固め不足による気泡が、透気性を大きくさせたためと考えられ、促進中性化試験と同様に、AE 減水剤等の使用により、水セメント比を小さくし、セメント粒子をよく分散させ、十分な締固をすることによって灰硬化体を緻密にする必要があると考える。

表 3-3-7　透水試験結果

試料名	平均浸透深さ D (cm)	拡散係数 βi^2 $\times 10^{-2}$(cm²/sec)	透水係数 K $\times 10^{-9}$(cm/sec)
灰硬化体	9.5	3.82	1.76

計算式

$$\beta i^2 = a \frac{D^2}{4 t \xi^2} \quad \cdots\cdots (1)$$

$$K = \rho \frac{qD}{tAP} \quad \cdots\cdots (2)$$

βi^2 ： 拡散係数 (cm²/sec)
a ： 水圧を加えた時間に関する係数 $a = t^{3/7}$
D ： 平均浸透深さ (cm)
t ： 水圧を加えた時間*1 (sec)
ξ^2 ： 水圧の大きさに関する係数 (24.5N/cm² : 0.594)

K ： 透水係数 (cm/sec)
q ： 供試体に圧入された水量 (cc)
D ： 浸透深さ (cm)
t ： 水圧を加えた時間 (sec)
A ： 流水に直角な面積*2 (cm²)
P ： 水圧 (24.5N/cm²)
ρ ： 水の密度 (kg/cm³) 20℃ : 0.009982

*1：ここでの水圧を加えた時間とは、432000sec である。

*2：ここでの流水に直角な面積とは、78.5cm² である。

（8）X線回折測定

1）試験

X線回折分析は、理学電機社製X線回折装置「RINT2500」を用いて行った。なお、試料は材齢28日経過後、粉砕および乾燥したものをX線回折分析測定用試料とした。

2）結果および考察

X線回折測定により検出された鉱物名回折強度を表3-3-8に示す。

灰硬化体におけるセメント水和物として、エトリンガイトが生成していることが示された。

ﾘﾝ酸カルシウムが生成していることから、セメントの水和反応に伴って生成する水酸化カルシウムと灰に含まれる酸化リンと結合している可能性が考えられる。また、炭酸カルシウムは、灰硬化体の中性化が進行したために生成したものと考える

表3-3-8　X線回折測定結果　（単位：cps）

鉱物名 / 試料名	ｴﾄﾘﾝｶﾞｲﾄ $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$	ﾘﾝ酸カルシウム $Ca_3(PO_4)_2$	石英 $SiO2$	長石類	炭酸カルシウム $CaCO_3$	酸化第二鉄 Fe_2O_3
灰硬化体	2258	2919	9238	2258	1937	2359

（9）比表面積測定

1）試験

比表面積（BET法）測定は、Micromeritics社製比表面積測定装置「Flow Sorb II 2300」（1点式直読表面積測定法）を用いて行った。なお、試料は材齢28日経過後、粗砕してアセトンに浸漬し水和停止した後、試料の中心付近を取り出し、さらに粉砕して粒径600μm～2mmのものを105℃に調整した乾燥機中で乾燥したものを比表面積測定用試料とした。

2）結果および考察

比表面積（BET法）測定結果を表3-3-9に示す。

表3-3-9　比表面積（BET法）測定結果

試料名	BET比表面積 (m^2/g)
灰硬化体	27.1

(１０)細孔径分布測定

１）試験

細孔径分布測定は、Micromeritics 社製水銀圧入式ポロシメーター装置「AUTOPORE Ⅱ 9220」を用いて行った。なお、細孔径分布測定の試料採取は、材齢 28 日経過後、供試体（寸法：4×4×16cm）の中心部から約 5mm 角に切断したものを測定用試料とした。また、切断した測定用試料は、アセトンに 2 時間浸漬後、室内にて 24 時間風乾し、さらに真空凍結機にて 1 週間乾燥させた。

２）結果および考察

細孔径分布測定結果を**表 3-3-10** および**図 3-3-4** に示す。

本試験結果から、灰硬化体の空隙率は 37.8%であった。細孔直径 0.0030～400.000μm の範囲では、0.080～0.100μm の細孔直径が最も多く、空隙率は 5%であった。

表 3-3-10　細孔径分布測定結果

試料名	累積細孔容積 (ml/g)	平均細孔直径 (4V/A) (μm)	かさ密度 (g/ml)	空隙率 (%)
灰硬化体	0.247	0.016	1.530	37.8

空隙率 (%) = 累積細孔容積 × かさ密度 × 100

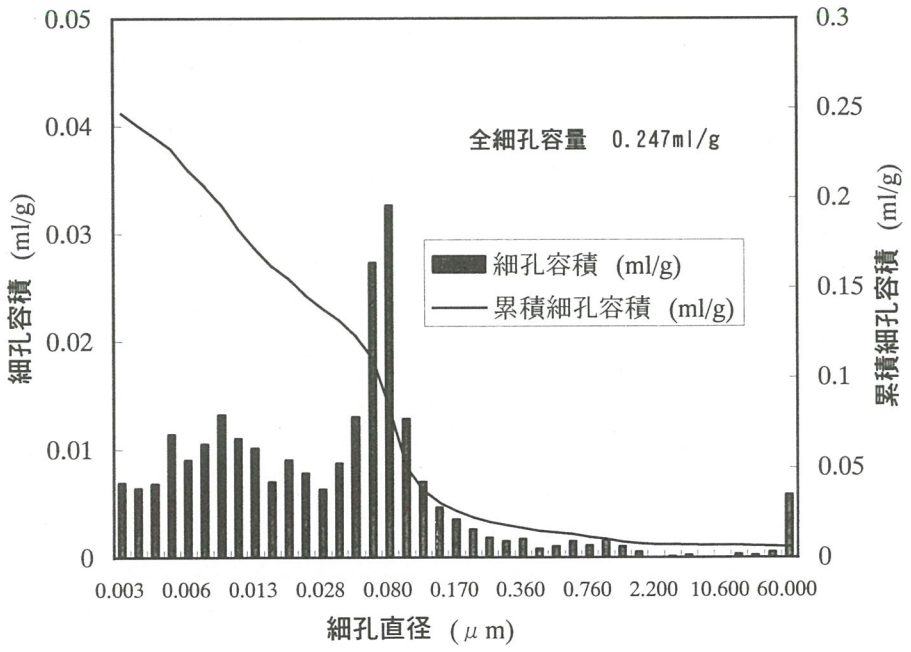


図 3-3-4　細孔径分布測定結果

第３章の参考文献

1)　太平洋セメント社、低熱ポルトランドセメント【技術資料】
2)　太平洋セメント社、図表で見るコンクリートの基礎知識

表3-1-1　供試体に使用した灰硬化体の配合

原材料種類	灰Y中	セメント	水	合計	W/P (%)
配合比	100	40	44.8	184.8	32.0
配合割合 (%)	54.7	21.6	23.6	100	

表3-1-2 供試体形状および養生条件

試験項目	供試体形状	養生条件(成形翌日脱型後、試験開始まで)
圧縮強度試験	φ5cm×H10cm	20℃水中養生および20℃気中養生(湿度60%)、材齢7および28日
長さ変化試験	W4cm×H4cm×L16cm	20℃水中養生1週間
凍結融解試験	W10cm×H10cm×L40cm	20℃水中養生4週間
促進中性化試験	W10cm×H10cm×L40cm	20℃水中養生4週間後、20℃気中養生(湿度60%)4週間
透水試験	φ15cm×H10cm	20℃水中養生材齢28日、20℃気中養生(湿度60%)2週間
X線回折測定	W4cm×H4cm×L16cm	20℃水中養生材齢28日
比表面積測定	W4cm×H4cm×L16cm	20℃水中養生材齢28日
細孔径分布測定	W4cm×H4cm×L16cm	20℃水中養生材齢28日

第４章　安全性に関する検討

４－１　はじめに

従来の手法の検討において、灰Ｈを使用した灰硬化体から六価クロムの溶出が観察されたため、対策を検討した結果、塩化カルシウムを対セメント 10w/w%程度添加する方法により灰硬化体からの六価クロム溶出を防止することができた。しかし、この方法では塩素による鉄筋の腐食が懸念されるため、灰硬化体の用途が無筋コンクリート製品に限定される課題があった。また、灰硬化体から溶出する六価クロムの由来および溶出挙動に影響を与える要因が十分把握されていないという課題があった。

本章では、まず灰硬化体の主要な原料である灰とセメントについて各々の化学組成と溶出挙動を調査し灰硬化体から溶出する六価クロムの由来および溶出挙動に影響を与える要因について検討した。次いで灰硬化体の溶出挙動を調査し、その結果から灰の入手先によらず六価クロムの溶出対策が必要であることが明らかになったため、薬品の配合等による灰硬化体の六価クロム溶出対策を検討した。そして、六価クロム溶出防止効果を示した配合条件で灰硬化体を作製し、低 pH 溶出条件における溶出挙動を把握するためにアベイラビリティ試験を行った。

４－２　原料の化学組成と溶出挙動

１）目的

灰硬化体の主要な原料である灰とセメントについて、各々の化学組成と溶出挙動を把握すること。

２）試験

(1)試料

1)灰：灰H、灰Y、灰Ｉ、灰Tの原灰および粉砕処理した灰

2)セメント:普通ポルトランドセメントおよび４－３－３　セメント種類の検討で使用する各種セメント

参考として、5 号珪砂、粉砕珪砂についても試験を行った。

(2)試験項目および方法

1)原料の主要成分化学組成

：以下の手順により行った。

①105℃で試料を乾燥させる。

②600℃で強熱後、酸で溶解する。

③溶解液をろ過し、ろ液中の各成分濃度を ICP 発光分析装置で測定する。

④ろ過残差を酸不溶解分(主にシリカ分)とする。

⑤強熱減量、酸不溶解分は重量分析で測定する。

⑥炭酸は別途重量分析により測定する。

2)原料中の微量有害成分含有量

：重金属類については底質調査方法、ダイオキシン類については平成 4 年 7 月 厚生省告示 第 192 号「特別管理一般廃棄物及び特別管理産業廃棄物に係る基準の検定方法(別表第一)」

3)原料からの溶出成分

：平成 3 年環境庁告示第 46 号「土壌汚染に係る環境基準について」

なお、各種セメントについては溶出時間 10 分間での溶出試験を追加し、普通ポルトランドセメントについては、さらに溶出時間を 1、3、7 日間とした溶出試験を行った。

３）結果および考察

1)原料の主要成分化学組成

表 4-2-1 に、原料の主要成分化学組成　を示す。

灰を構成する主要成分は、酸不溶解分(主にシリカ)、酸化リン、酸化カルシウム、酸化鉄であったが、灰の入手先により構成割合は異なっていた。

2)原料中の微量有害成分含有量

表 4-2-2 に、原料中の微量有害成分含有量　を示す。

重金属類の含有量は、分析を行ったのが土壌汚染対策法施行前であったため、底質調査方法により分析したが、ここでは分析結果を土壌汚染対策法における基準値と比較した。そのため、シアンやクロム等については比較する物質形態が異なることや、土壌汚染対策法に基づく含有量分析を行った場合に、分析結果が異なる可能性があることを考慮する必要がある。

灰に含まれる重金属類としては、入手先によらず鉛が基準値に近い値を示し、一部の灰では基準値を超えていた。他の重金属類については、ほとんどが基準値を大きく下回った。

灰に含まれるダイオキシン類は、いずれの入手先でも基準値に対して非常に低いレベルであった。

3)原料からの溶出成分

表 4-2-3 に、原料からの溶出成分　を示す。

灰については、入手先によらず砒素、セレンが基準値を超えて溶出した。ただし、入手先によって基準値を超える程度は異なっていた。また、入手先によっては、総水銀、ふっ素、ほう素が基準値を超えて溶出した。

セメントについては、アルミナセメント 2 号を除いたいずれのセメントでも六価クロムが基準値を超えて溶出した。セメントからの六価クロムの溶出量は、普通ポルトランドセメントが最も多く、高炉セメント B 種、ジオセット 200 の順に少なくなった。

後述するように灰硬化体からは六価クロムが溶出したが、この六価クロムはセメントに含まれる六価クロムが溶出したものと考える。

表 4-2-4 に、各種セメントにおける溶出成分の経時変化を示す。

アルミナセメント 2 号を除いたいずれのセメントでも、溶出時間 10 分間において六価クロムが溶出していた。

普通ポルトランドセメントについて、溶出時間 6 時間を超えて経時変化を調査したところ、溶出時間 1 日以降において六価クロム溶出量が大幅に減少し、同時に硫酸イオン溶出量も大幅に減少していた。

六価クロムは硫酸イオンと同様に 2 価の陰イオンであるクロム酸イオンとして存在していることから、セメントの水和反応に伴って硫酸イオンがエトリンガイトやモノサルフェート等のセメント水和物に取り込まれる際、同時に六価クロムもセメント水和物に取り込まれているものと考える。

したがって、灰硬化体からの六価クロム溶出対策について検討する際も、灰硬化体から溶出する硫酸イオンの挙動に注目し、硫酸イオンの溶出が少なくなるような対策を検討する必要があると考える。

４－３　灰硬化体の溶出挙動と六価クロム溶出対策

４－３－１　灰硬化体の溶出挙動

１）目的

灰硬化体からの溶出成分について、配合条件が溶出挙動に与える影響を把握すること。

２）試験

第２章で作製した、4w 強度測定後の加圧成形法による灰硬化体を供試体として、平成３年環境庁告示第 46 号「土壌汚染に係る環境基準について」により溶出試験を行った。

３）結果および考察

表 4-3-1 に、灰硬化体および粉砕珪砂硬化体からの溶出成分　を示す。

薬品の配合が無い場合、灰硬化体からは、入手先によらず基準値を超えて六価クロムが溶出した。

硝酸カルシウムを配合した場合、灰硬化体からの六価クロム溶出は抑制できた。これは、加圧成形法において検討した塩化カルシウムの配合による六価クロム溶出対策と比較して、配合した薬品が水溶性のカルシウム塩であり、陰イオンが１価である点が共通している。

また、消石灰を配合した場合、灰硬化体からの六価クロム溶出をある程度抑制できた。

しかし、強度を向上させるために有効であった二水石膏等の硫酸イオンを含む薬品を配合した場合は、基準値を超えて灰硬化体から六価クロムが溶出した。これは、配合する薬品に硫酸イオンが含まれるために硫酸イオンが過剰になり、セメント水和物に取り込まれない硫酸イオンが生じた結果、セメント水和物への六価クロムの取り込みも行われなかったことによるものと考える。

粉砕珪砂硬化体からの六価クロム溶出量は基準値未満であった。

六価クロム溶出量が基準値未満であった 2 試料(硝酸カルシウムを配合した灰硬化体、粉砕珪砂硬化体)は、他の試料と比較して硫酸イオンの溶出量が少なかった。

４－３－２　還元剤の検討

４－３－１において、灰硬化体の強度向上のためには有効であった硫酸イオンを含む薬品が、六価クロム溶出抑制のためには有効でないことが示された。

よって、灰硬化体からの六価クロム溶出抑制方法として、セメント水和物に六価クロムを取り込ませる考え方では無く、六価クロムを還元剤により無害化する可能性について検討した。

１）目的

還元剤の配合による灰硬化体からの六価クロム溶出防止効果を把握する。

２）試験

(1)試料

還元剤として、以下の薬品を検討した。

①チオ硫酸ナトリウム５水和物：$Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$　（以下、チオ硫酸ナトリウムとする）

②硫酸鉄(Ⅱ)7 水和物：$FeSO_4 \cdot 7H_2O$　（以下、硫酸第一鉄とする）

③ハイドロサルファイトナトリウム：$Na_2S_2O_4$（以下、ハイドロサルファイトとする）

(2)試験方法

①については、4w 強度測定後の加圧成形法による灰硬化体を供試体として、平成３年環境庁告示第 46 号「土壌汚染に係る環境基準について」により溶出試験を行った。

②および③については、成形装置による成形を行わず、所定の配合条件の原料をポリ袋に入れて手作業で塊状に成形した灰硬化体を供試体として、①と同様に溶出試験を行った。

３）結果および考察

①については、表 4-3-2 に、チオ硫酸ナトリウムの効果　を示す。

成形から 14 日後の溶出試験結果では、チオ硫酸ナトリウム添加量対セメント 0.5～1.0%で、比色法による六価クロム溶出量が基準値を下回った。しかし、溶出液の pH がｱﾙｶﾘ性のとき全クロムが検出されていることから、実際には六価クロムは溶出しているものと考える。

比色法による六価クロム溶出量が低下している試料では、ヨウ素消費量も同時に検出されることから、まだ酸化されずに残留していたチオ硫酸ナトリウムが、比色法による分析操作の過程で検液を酸性にしたとき、六価クロムを還元しているものと推定する。

成形から 99 日後の溶出試験結果においても、残留しているチオ硫酸ナトリウムが比色法による六価クロム溶出量の分析に影響を与えているものと考える。

結論として、チオ硫酸ナトリウムによる六価クロム溶出防止効果は不十分と考える。

②および③については、表 4-3-3 に、硫酸第一鉄およびハイドロサルファイトの効果　を示す。

硫酸第一鉄およびハイドロサルファイトによる六価クロム溶出防止効果は不十分であった。

いずれの試料においてもヨウ素消費量が定量下限未満であることから、どちらの還元剤も六価クロムを還元する前に酸素等により自身が酸化され、還元剤としての機能を失っている可能性が考えられる。

４－３－３　セメント種類の検討

１）目的

各種セメントによる灰硬化体からの六価クロム溶出防止効果を把握する。

２）試験

(1)試料

以下のセメントを検討した。

① 高炉セメントＢ種（以下、高炉セメントとする）

② アルミナセメント２号（以下、アルミナセメントとする）

③ ジオセット200（以下、ジオセットとする）

(2)試験方法

各々のセメントについて、成形装置による成形を行わず、所定の配合条件の原料をポリ袋に入れて手作業で塊状に成形した灰硬化体を供試体として、平成３年環境庁告示第46号「土壌汚染に係る環境基準について」により溶出試験を行った。

３）結果および考察

表 4-3-4 に、各種セメントを使用した灰硬化体における溶出挙動　を示す。

高炉セメントの六価クロム溶出防止効果は不十分であった。

アルミナセメントの六価クロム溶出防止効果は十分であった。

ジオセットは、養生期間10日間では基準値を超えて六価クロムが溶出したが、養生期間34日では基準値以内に六価クロム溶出量を抑制できた。

４－３－４　カルシウム系薬品の検討

１）目的

二水石膏と他のカルシウム系薬品を併用した配合による灰硬化体からの六価クロム溶出防止効果を把握する。

２）試験

(1)試料

以下のカルシウム系薬品を検討した。

① 硝酸カルシウム４水和物（以下、硝酸カルシウムとする）

② 炭酸カルシウム

③ 消石灰

(2)試験方法

各々の薬品について、成形装置による成形を行わず、所定の配合条件の原料をポリ袋に入れて手作業で塊状に成形した灰硬化体を供試体として、平成３年環境庁告示第46号「土壌汚染に係る環境基準について」により溶出試験を行った。

３）結果および考察

表4-3-5に、硝酸カルシウム配合時の溶出挙動を示す。

二水石膏と硝酸カルシウムを、二水石膏≦硝酸カルシウムとした配合で六価クロム溶出防止効果は十分であった。

表4-3-6に、炭酸カルシウム配合時の溶出挙動を示す。

炭酸カルシウムの六価クロム溶出防止効果は不十分であった。

表4-3-7に　消石灰配合時の溶出挙動　を示す。

二水石膏と消石灰を、二水石膏＜＜消石灰とした配合で六価クロム溶出防止効果は十分であった。

表4-3-8に　消石灰／硝酸カルシウム配合時の溶出挙動を示す。

二水石膏、消石灰、硝酸カルシウムを、二水石膏＝（消石灰＋硝酸カルシウム）かつ消石灰≦硝酸カルシウムとした配合で六価クロム溶出防止効果は十分であった。

４－４　低 pH 溶出条件（アベイラビリティ試験）における灰硬化体の溶出挙動

１）目的

六価クロム溶出防止効果を示した配合条件で作製した灰硬化体について、低 pH 溶出条件における溶出挙動を把握する。

２）試験

(1)試料

以下の配合条件(重量配合比)における灰硬化体について検討した。

① 灰Ｙ中／普通ポルトランドセメント／二水石膏／硝酸カルシウム
＝100／28／6／6、W/P＝29%

② 灰Ｙ中／普通ポルトランドセメント／二水石膏／硝酸カルシウム
＝100／28／0／12、W/P＝26%

③ 灰Ｙ中／普通ポルトランドセメント／二水石膏／消石灰／硝酸カルシウム
＝100／28／6／1.5／4.5、W/P＝32%

④ 灰Ｙ中／普通ポルトランドセメント／二水石膏／消石灰／硝酸カルシウム
＝100／28／6／3／3、W/P＝32%

(2)試験方法

①および②については、4w 強度測定後の加圧成形法による灰硬化体を供試体として、アベイラビリティ試験を行った。

③および④については、成形装置による成形を行わず、所定の配合条件の原料をポリ袋に入れて手作業で塊状に成形した灰硬化体を供試体として、アベイラビリティ試験を行った。

３）結果および考察

表 4-4-1 に　アベイラビリティ試験結果　を示す。

土壌環境基準に対して六価クロム溶出防止対策を行った①～④の配合で、アベイラビリティ試験において最も六価クロム溶出量が少なかったのは①の配合であった。

いずれの試料においても、pH=7 に維持した溶出操作により、六価クロム、砒素、セレン、ほう素が溶出した。また、続いて行った pH=4 に維持した溶出操作では、カドミウム、鉛、クロム、砒素、ふっ素、ほう素が溶出した。

pH=7 に維持した溶出操作と pH=4 に維持した溶出操作の両方で溶出した重金属類の合計溶出量は、多い順から、ふっ素、ほう素、クロム、カドミウムまたは砒素、セレンであった。

表4-2-1 原料の主要成分化学組成

項目		試料名 No.1 原灰H	No.2 原灰Y	No.3 原灰I	No.4 原灰T	No.5 普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	No.6 5号珪砂
試料採取月日		1999/2/17	2001/12/26	2002/8/20	2002/8/23	2002/3/19	2002/8/5
外観		茶色	茶色	茶色	うす茶色	灰色	白灰色
CaO	(w/w%)	14.7	11.0	11.1	9.0	70.3	Trace
MgO	(w/w%)	3.4	2.3	3.5	3.3	1.0	0.6
Fe2O3	(w/w%)	7.0	8.6	7.8	3.1	2.7	1.1
CuO	(w/w%)	Trace	Trace	Trace	Trace	Trace	Trace
ZnO	(w/w%)	Trace	Trace	Trace	Trace	Trace	Trace
MnO	(w/w%)	Trace	Trace	Trace	Trace	Trace	Trace
Al2O3	(w/w%)	16.4	14.4	17.2	14.9	5.7	1.1
酸不溶解分	(w/w%)	25.5	50.7	35.0	42.7	21.3	95.4
SO3	(w/w%)	3.9	1.6	1.2	0.8	2.6	Trace
P2O5	(w/w%)	28.9	13.6	28.4	27.8	Trace	Trace
CO2	(w/w%)	Trace	Trace	Trace	Trace	Trace	2.0
強熱減量	(w/w%)	Trace	Trace	Trace	Trace	Trace	Trace
Na2O	(w/w%)	1.8	0.7	Trace	Trace	Trace	Trace
K2O	(w/w%)	3.1	0.6	1.2	1.3	Trace	Trace
ｼﾘｶ 注)	(w/w%)	16.7	34.8	22.3	35.0	20.6	88.0
SUM:CaO～K2O		104.7	103.5	105.4	102.9	103.6	100.2

注) 酸不溶解分に含まれるｼﾘｶ

表4-2-2 原料中の微量有害成分含有量

項目		試料名 No.1 原灰H	No.2 原灰Y	No.3 原灰I	No.4 原灰T	No.5 普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	No.6 5号珪砂	汚染土壌における対策基準 注1) (mg/kg)	測定方法 注2)
ｶﾄﾞﾐｳﾑ	(mg/kg)	9	5 未満	5 未満	6	5 未満	5 未満	150	底Ⅱ 6
ｼｱﾝ化合物	(mg/kg)	5 未満	5 未満	5 未満	9	5 未満	5 未満	50 as 遊離CN	底Ⅱ 14
鉛	(mg/kg)	110	190	100	110	52	25 未満	150	底Ⅱ 7
酸溶出ｸﾛﾑ	(mg/kg)	360	290	88	79	67	10 未満	250 as Cr6+	底Ⅱ 12.2
ひ素	(mg/kg)	31.3	12.8	19.9	15.7	7.2	14.7	150	底Ⅱ 13
総水銀	(mg/kg)	0.05 未満	0.31	0.05 未満	0.17	0.05 未満	0.05 未満	15	底Ⅱ 5.1に準拠
ｾﾚﾝ	(mg/kg)	0.57	5.4	5.9	2.3	0.48	0.4 未満	150	JIS K 0102 67.2
ふっ素	(mg/kg)	120	160	560	320	260	400	4,000	JIS K 0102 34.1
ほう素	(mg/kg)	60	110	60	86	39	12	4,000	JIS K 0102 47.3
強熱減量	(%)	0.6	0.5	0.7	0.6	0.8	0.4	—	底Ⅱ 4
ﾀﾞｲｵｷｼﾝ濃度	(ng/g)	ND	ND	0.032	0.031	—	—	汚染土壌における	注3)
ｼﾞﾍﾞﾝｿﾞﾌﾗﾝ濃度	(ng/g)	ND	ND	ND	0.040	—	—	環境基準 (pg-TEQ/g) / 調査基準 (pg-TEQ/g)	
ｺﾌﾟﾗﾅｰPCB濃度	(ng/g)	0.0030	0.0008	0.0046	0.0081	—	—		
ﾀﾞｲｵｷｼﾝ類毒性当量 (ng-TEQ/g)		0	0	0.0000032	0.00000023	—	—	1,000 / 250	

注1) 「土壌汚染対策法施行規則第18条第2項」で定める土壌に含まれる特定有害物質の量
注2) 底:底質調査方法
注3) 平成4年7月 厚生省告示 第192号「特別管理一般廃棄物及び特別管理産業廃棄物に係る基準の検定方法(別表第一)」

表4-2-3 原料のからの溶出成分

項　目	試料名 No.1 原灰H	No.2 原灰Y	No.3 原灰I	No.4 原灰T	No.5 灰H	No.6 灰Y高	No.7 灰I	No.8 灰T	No.9 普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	No.10 高炉ｾﾒﾝﾄB種	No.11 ｱﾙﾐﾅｾﾒﾝﾄ2号	No.12 ｼﾞｵｾｯﾄ200	No.13 5号珪砂	No.14 粉砕珪砂	土壌環境基準 (mg/L)
ｶﾄﾞﾐｳﾑ (mg/L)	0.001 未満	0.001 未満	0.001 未満	0.001 未満	0.001 未満	0.001 未満	0.001 未満	0.001 未満	0.001 未満	0.001 未満	0.001 未満	0.001 未満	0.001 未満	0.001 未満	0.01
全ｼｱﾝ (mg/L)	検出せず	検出せず	検出せず	検出せず	検出せず	検出せず	検出せず	検出せず	検出せず	検出せず	検出せず	検出せず	検出せず	検出せず	N.D.(0.1)
鉛 (mg/L)	0.005 未満	0.005 未満	0.005 未満	0.005 未満	0.005 未満	0.005 未満	0.005 未満	0.005 未満	0.009	0.005 未満	0.005 未満	0.005 未満	0.005 未満	0.005 未満	0.01
六価ｸﾛﾑ (mg/L)	0.04 未満	0.04 未満	0.04 未満	0.04 未満	0.04 未満	0.04 未満	0.04 未満	0.04 未満	0.64	0.45	0.04 未満	0.16	0.04 未満	0.04 未満	0.05
砒素 (mg/L)	0.068	0.066	0.013	0.23	0.038	0.042	0.017	0.19	0.005 未満	0.005 未満	0.005 未満	0.005 未満	0.005 未満	0.012	0.01
総水銀 (mg/L)	0.0005 未満	0.0016	0.0005 未満	0.0005 未満	0.0005 未満	0.0005 未満	0.0005 未満	0.0005 未満	0.0005 未満	0.0005 未満	0.0005 未満	0.0005 未満	0.0005 未満	0.0005 未満	0.0005
ｾﾚﾝ (mg/L)	0.029	0.25	0.17	0.72	0.015	0.19	0.12	0.17	0.002 未満	0.002 未満	0.002 未満	0.002 未満	0.002 未満	0.002 未満	0.01
ふっ素 (mg/L)	0.3	2.0	1.0	0.7	0.2 未満	1.0	0.5	0.3	0.2 未満	0.2	0.2 未満	0.3	0.8	0.9	0.8
ほう素 (mg/L)	0.7	2.7	1.8	2.6	0.6	2.5	1.9	2.4	0.2 未満	0.2 未満	0.2 未満	0.2 未満	0.2 未満	2.9	1
ｶﾙｼｳﾑ (mg/L)	534	328	200	70	674	255	160	37	1400	1100	910	770	7	8	
ﾏｸﾞﾈｼｳﾑ (mg/L)	28.7	33.8	6	4	45.0	45.8	28	51	0.06	0.04	0.05	0.04	1.2	2.4	
鉄 (mg/L)	0.1 未満	0.1 未満	0.1 未満	0.1 未満	0.1 未満	0.1 未満	0.1 未満	0.1 未満	0.01 未満	0.01 未満	0.04	0.01 未満	0.1 未満	0.1	
ｱﾙﾐﾆｳﾑ (mg/L)	2.0 未満	2.0 未満	2.5	2.0 未満	2.0 未満	2.0 未満	2.0 未満	2.0 未満	0.01 未満	0.01 未満	0.12	0.06	2.0 未満	2.0 未満	
硫酸ｲｵﾝ (mg/L)	1360	724	604	368	1700	652	494	308	1200	1100	11	460	5.8	6.6	
全りん (mg/L)	4.32	1.68	0.25	8.5	6.08	2.30	0.77	21	0.03 未満	0.03 未満	0.03 未満	0.03 未満	0.04	0.12	
M-ｱﾙｶﾘ度 (mg/L)	5.6	13.0	37.6	18.0	7.2	14.6	29.0	33.6	1500	1200	1700	1500	15.6	35.4	
ﾅﾄﾘｳﾑ (mg/L)	106	50	46.2	34.7	76	41	30.9	22.7	43	37	2.5	19	0.63	1.73	
ｶﾘｳﾑ (mg/L)	63	15	60	54	83	20	49	43.8	200	96	18	97	1.20	9.0	
ｼﾘｶ (mg/L)	7.6	20.9	1.3	24.0	20.7	23.1	4.3	44.8	1 未満	2	8	1 未満	3.4	17	
塩化物ｲｵﾝ (mg/L)	7.2	10.1	4.0	4.1	9.4	8.1	3.2	3.5	7.7	9.6	0.4	2.4	1.0 未満	1.3	
ｱﾝﾓﾆｱ性窒素 (mg/L)	1.3	6.6	1.0	2.2	0.3	4.1	0.6	1.5	0.4 未満	0.4 未満	0.4 未満	0.4 未満	0.3 未満	0.3 未満	
硝酸ｲｵﾝ (mg/L)	1.4 未満	1.4 未満	1.4 未満	1.4 未満	1.4 未満	1.4 未満	1.4 未満	1.4 未満	0.15 未満	0.18	0.15 未満	0.15 未満	1.4 未満	1.4 未満	
亜硝酸ｲｵﾝ (mg/L)	1.0 未満	1.0 未満	1.0 未満	1.0 未満	1.0 未満	1.0 未満	1.0 未満	1.0 未満	0.15 未満	0.15 未満	0.15 未満	0.92	1.0 未満	1.0 未満	
pH	6.9 (21℃)	7.5 (22℃)	8.8 (25℃)	7.2 (25℃)	7.0 (21℃)	7.7 (21℃)	8.1 (25℃)	7.2 (25℃)	12.7 (23℃)	12.6 (23℃)	12.1 (23℃)	12.7 (23℃)	7.6 (25℃)	8.4 (25℃)	
電気伝導率 (mS/m)	269	168	131	98.5	307	152	120	90.2	855	702	224	654	5.3	10.3	
溶出残分 注1) (w/w%)	97.9	100	99.5	99.3	97.1	99.7	99.1	99.7	—	—	—	—	99.1	100	
浮遊物　注2) (w/w%)	0.1 未満	0.1 未満	0.1 未満	0.1 未満	0.1 未満	0.1 未満	0.1 未満	0.1 未満	—	—	—	—	0.1 未満	0.1	

注1) 溶出前乾燥固形分重量に対する遠沈後沈殿分乾燥重量の割合
注2) 溶出前乾燥固形分重量に対する遠沈後浮遊分乾燥重量の割合

表4-2-4　各種セメントにおける溶出成分の経時変化

試料名	溶出時間	六価クロム (mg/L)	総クロム (mg/L)	カルシウム (mg/L)	アルミニウム (mg/L)	硫酸イオン (mg/L)	M-アルカリ度 (mg/L)	pH (-)	水温 (℃)	電気伝導率 (mS/m)
普通ポルトランドセメント	10分間	0.61	0.61	1300	0.01 未満	1300	1100	12.6	23	667
	1時間	0.79	0.79	1600	0.01 未満	1100	2700	12.9	23	948
	3時間	0.92	0.95	1600	0.01 未満	1000	2500	13.0	23	1300
	6時間	0.64	0.64	1400	0.01 未満	1200	1500	12.7	23	855
	1日間	0.04 未満	0.04	1200	0.04	0.8	2800	12.7	23	1170
	3日間	0.04	0.04	1000	0.60	1.5	2800	12.8	24	1050
	7日間	0.06	0.06	880	0.41	1.6	2000	13.1	23	1090
高炉セメントB種	10分間	0.42	0.42	920	0.03	1100	870	12.4	23	529
	6時間	0.45	0.46	1100	0.01 未満	1100	1200	12.6	23	702
アルミナセメント2号	10分間	0.04 未満	0.01 未満	870	1300	0.5	1200	12.1	23	227
	6時間	0.04 未満	0.01	910	0.12	11	1700	12.1	23	224
ジオセット200	10分間	0.17	0.17	520	1.6	430	670	12.4	23	399
	6時間	0.16	0.20	770	0.06	460	1500	12.7	23	654

表4-3-1 灰硬化体および粉砕珪砂硬化体からの溶出成分

項目	試料名 No.1 灰H硬化体	No.2 灰Y硬化体	No.3 灰I硬化体	No.4 灰T硬化体	No.5 灰H硬化体	No.6 灰Y硬化体	No.7 灰Y硬化体	No.8 灰Y硬化体	No.9 灰Y硬化体	No.10 灰Y硬化体	No.11 灰Y硬化体	No.12 灰Y硬化体	No.13 粉砕珪砂硬化体	土壌環境基準 (mg/L)
カドミウム (mg/L)	0.001 未満	0.001 未満	0.001 未満	0.001 未満				0.001 未満					0.001 未満	0.01
全シアン (mg/L)	検出せず	検出せず	検出せず	検出せず				検出せず					検出せず	N.D.(0.1)
鉛 (mg/L)	0.005 未満	0.005 未満	0.005 未満	0.005 未満				0.005 未満					0.005 未満	0.01
六価クロム (mg/L)	0.24	0.21	0.21	0.23	0.38	0.23	0.29	0.26	0.26	0.31	0.004 未満	0.16	0.04	0.05
砒素 (mg/L)	0.005 未満	0.005 未満	0.005 未満	0.005 未満	0.005 未満	0.005 未満	0.005 未満	0.005 未満	0.005 未満	0.005 未満	0.005 未満	0.005 未満	0.005 未満	0.01
総水銀 (mg/L)	0.0005 未満	0.0005 未満	0.0005 未満	0.0005 未満				0.0005 未満					0.0005 未満	0.0005
セレン (mg/L)	0.002 未満	0.002 未満	0.005	0.004	0.005	0.002 未満	0.002 未満	0.002 未満	0.004	0.002 未満	0.002 未満	0.002	0.002 未満	0.01
ふっ素 (mg/L)	0.4	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.2	0.2	0.2 未満	0.4	0.2	0.7	0.4	0.8
ほう素 (mg/L)	0.2 未満	0.2 未満	0.2 未満	0.2 未満				0.2 未満					0.2 未満	1
カルシウム (mg/L)	60	70	51	56	15	50	160	100	90	40	130	130	620	
マグネシウム (mg/L)	0.2	0.1 未満	0.1 未満	0.1 未満				0.1 未満		21.5			0.1 未満	
鉄 (mg/L)	0.1 未満	0.1 未満	0.1 未満	0.1 未満				0.1 未満					0.1 未満	
アルミニウム (mg/L)	100	9.0	51.8	58.0	120	6.5	2.1	9.0	9.2	21.5	15.7	8.2	2.0 未満	
硫酸イオン (mg/L)	520	47.7	61.6	76.4	240	46.7	302	152	94.4	138	2.6	48.3	2.6	
全りん (mg/L)	0.20	0.04	0.03 未満	0.03 未満	0.38	0.03 未満	0.03 未満	0.03 未満	0.03 未満	0.03 未満	0.03 未満	0.03 未満	—	
M-アルカリ度 (mg/L)	320	286	226	216	386	246	272	314	310	444	304	470	1800	
ナトリウム (mg/L)	147	61	24.7	16.7	123	55	57	58	57	64	58	43.6	36.2	
カリウム (mg/L)	361	58	71.6	66.0	263	46	70	61	55	289	57	40.4	70.2	
シリカ (mg/L)	3.9	24.8	4.6	3.3	5.2	29.1	30.5	20.2	20.4	22.7	11.8	16.8	2.4	
塩化物イオン (mg/L)	9.7	4.8	2.1	3.0				7					1.0 未満	
アンモニア性窒素 (mg/L)	0.4	0.3 未満	0.3	0.3 未満				0.4					—	
硝酸イオン (mg/L)	1.4 未満	1.4 未満	1.4 未満	1.4 未満				1.4 未満			363		—	
亜硝酸イオン (mg/L)	1.0 未満	1.0 未満	1.0 未満	1.0 未満				1.0 未満					—	
pH	10.7 (20℃)	11.8 (20℃)	11.3 (19℃)	11.2 (19℃)	10.9 (24℃)	11.7 (20℃)	11.8 (20℃)	11.8 (20℃)	11.8 (20℃)	11.9 (25℃)	11.7 (24℃)	12.0 (24℃)	12.6 (19℃)	
電気伝導率 (mS/m)	184	134	71.5	66.2	141	116	175	161	145	231	184	213	769	
ORP	265	170	134	150	194	140	64	65	72	72	83	94	78	
成形条件	表2-2-6 No.1	表2-2-6 No.2	表2-2-12 No.3	表2-2-13 No.3	表2-2-8 No.2	表2-2-8 No.4	表2-2-9 No.3	表2-2-9 No.4	表2-2-9 No.5	表2-2-10 No.3	表2-2-11 No.3	表2-2-11 No.4	表2-2-2に準じる	
灰略号	灰H	灰Y高	灰I	灰T	灰H(水洗)	灰Y高(水洗)	灰Y高	灰Y高	灰Y高	灰Y高	灰Y高	灰Y高	粉砕珪砂	
薬品配合条件	薬品無	薬品無	薬品無	薬品無	薬品無	薬品無	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 対灰内割10.0%	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 対灰内割5.0%	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 対灰内割1.8%	K_2SO_4 対灰内割2.0%	$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ 対灰内割2.0%	$Ca(OH)_2$ 対灰内割2.0%	薬品無 注)	
養生方法	密閉系気中:20℃	密閉系気中:20℃	密閉系気中:20℃	密閉系気中:20℃	密閉系気中:20℃	密閉系気中:20℃	密閉系気中:20℃	密閉系気中:20℃	密閉系気中:20℃	密閉系気中:20℃	密閉系気中:20℃	密閉系気中:20℃	密閉系気中:20℃	
W/P (%)	22	23	22	22	25	24	23	24	23	23	23	23	17	
a. 成形試験日 供試体No.	7/17 ②	7/25 ③	9/11 ①	9/12 ②	7/4 ⑦	7/4 ③	8/28 ③	8/15 ③	7/25 ⑤	8/29 ②	8/9 ④	8/9 ②	9/17 ②	
b. 溶出操作日	10/8	10/8	1/29	1/29	10/10	10/8	10/4	10/4	10/4	10/9	10/9	10/9	1/29	
b-a (日)	83	75	140	139	98	96	37	50	71	41	61	61	134	
c. ORP測定日	10/10	10/10	1/30	1/30	10/10	10/10	10/10	10/10	10/10	10/10	10/10	10/10	1/30	
c-b (日)	2	2	1	1	0	2	6	6	6	1	1	1	1	

注) 加圧成形法による粉砕珪砂硬化体の供試体密度および圧縮強度データを下記に示す。

重量配合比		W/P	供試体密度(g/cm3)					圧縮強度(N/mm2)		
粉砕珪砂	セメント	(%)	0d	1d	1w	2w	4w	1w	2w	4w
100	40	17	2.12	2.11	2.12	2.11	2.11	41.2	—	42.3

表4-3-2 チオ硫酸ナトリウムの効果

項目		試料名 No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	土壌環境基準 (mg/L)
カドミウム	(mg/L)	—	—	—	—	—	—	—	—	0.01
全シアン	(mg/L)	—	—	—	—	—	—	—	—	N.D.(0.1)
鉛	(mg/L)	—	—	—	—	—	—	—	—	0.01
六価クロム(比色)	(mg/L)	0.27	0.17	0.04 未満	0.04 未満	0.27	0.23	0.10	0.04 未満	0.05
全クロム(ICP)	(mg/L)	0.29	0.26	0.24	0.21	0.28	0.28	0.27	0.21	—
砒素	(mg/L)	—	—	—	—	—	—	—	—	0.01
総水銀	(mg/L)	—	—	—	—	—	—	—	—	0.0005
セレン	(mg/L)	0.002 未満	0.003	0.002 未満	0.002 未満	0.002	0.002	0.002 未満	0.002 未満	0.01
ふっ素	(mg/L)	0.2 未満	0.2 未満	0.2 未満	0.2 未満	0.5	0.3	0.4	0.5	0.8
ほう素	(mg/L)	—	—	—	—	—	—	—	—	1
カルシウム	(mg/L)	75	64	70	68	82	83	62	68	
マグネシウム	(mg/L)	—	—	—	—	—	—	—	—	
鉄	(mg/L)	—	—	—	—	—	—	—	—	
アルミニウム	(mg/L)	—	—	—	—	7.5	8.6	9.9	9.9	
硫酸イオン	(mg/L)	99.2	108	115	112	184	178	106	137	
全りん	(mg/L)	—	—	—	—	—	—	—	—	
M-アルカリ度	(mg/L)	—	—	—	—	176	171	214	204	
ナトリウム	(mg/L)	—	—	—	—	62.6	63.2	70.0	78.0	
カリウム	(mg/L)	—	—	—	—	—	—	—	—	
シリカ	(mg/L)	—	—	—	—	—	—	—	—	
塩化物イオン	(mg/L)	—	—	—	—	—	—	—	—	
アンモニア性窒素	(mg/L)	—	—	—	—	—	—	—	—	
硝酸イオン	(mg/L)	—	—	—	—	1.4 未満	—	—	—	
亜硝酸イオン	(mg/L)	—	—	—	—	—	—	—	—	
pH		11.6 (23℃)	11.6 (23℃)	11.6 (23℃)	11.7 (23℃)	11.5 (21℃)	11.4 (21℃)	11.6 (21℃)	11.6 (21℃)	
電気伝導率	(mS/m)	129	124	130	138	110	106	114	117	
酸化還元電位	(mV)	133	135	123	117	144	222	181	180	
ヨウ素消費量	(mg/L)	6.0 未満	7.0	21	47	6.0 未満	6.0 未満	6.0 未満	34.5	
灰略号		灰Y中	灰Y中	灰Y中	灰Y中	灰Y中	灰Y中	灰Y中	灰Y中	
配合条件(重量配合比)	灰	100	100	100	100	100	100	100	100	
	セメント	35	35	35	35	35	35	35	35	
	二水石膏	5	5	5	5	5	5	5	5	
還元剤名		ブランク	チオ硫酸ナトリウム	チオ硫酸ナトリウム	チオ硫酸ナトリウム	ブランク	チオ硫酸ナトリウム	チオ硫酸ナトリウム	チオ硫酸ナトリウム	
還元剤添加量	(対セメントw/w%)	—	0.2	0.5	1.0	—	0.2	0.5	1.0	
W/P	(%)	27	27	27	27	27	27	27	27	
a. 成形試験日		10/22	10/23	10/23	10/23	10/22	10/23	10/23	10/23	
b. 溶出操作日		11/5	11/6	11/6	11/6	1/29	1/30	1/30	1/30	
b-a	(日)	14	14	14	14	99	99	99	99	

表4-3-3 硫酸第一鉄およびﾊｲﾄﾞﾛｻﾙﾌｧｲﾄの効果

項目		試料名 No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11	土壌環境基準 (mg/L)
ｶﾄﾞﾐｳﾑ	(mg/L)	0.001 未満	—	—	0.001 未満	—	—	0.001 未満	0.001 未満	—	—	0.001 未満	0.01
全ｼｱﾝ	(mg/L)	検出せず	—	—	検出せず	—	—	検出せず	検出せず	—	—	検出せず	N.D.(0.1)
鉛	(mg/L)	0.005 未満	—	—	0.005 未満	—	—	0.005 未満	0.005 未満	—	—	0.005 未満	0.01
六価ｸﾛﾑ(比色)	(mg/L)	0.09	0.16	0.14	0.10	0.32	0.25	0.16	0.32	0.30	0.27	0.26	0.05
全ｸﾛﾑ(ICP)	(mg/L)	0.08	0.17	0.15	0.11	0.34	0.29	0.22	0.35	0.33	0.31	0.35	—
砒素	(mg/L)	0.005 未満	—	—	0.005 未満	—	—	0.005 未満	0.005 未満	—	—	0.005 未満	0.01
総水銀	(mg/L)	0.0005 未満	—	—	0.0005 未満	—	—	0.0005 未満	0.0005 未満	—	—	0.0005 未満	0.0005
ｾﾚﾝ	(mg/L)	0.002 未満	0.004	0.004	0.002 未満	0.002 未満	0.002 未満	0.002	0.002 未満	0.002 未満	0.002 未満	0.004	0.01
ふっ素	(mg/L)	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.5	0.3	0.2	0.8
ほう素	(mg/L)	0.2 未満	—	—	0.2 未満	—	—	0.2 未満	0.2 未満	—	—	0.2 未満	1
ｶﾙｼｳﾑ	(mg/L)	210	75	80	99	220	420	600	81	76	82	76	
ﾏｸﾞﾈｼｳﾑ	(mg/L)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
鉄	(mg/L)	0.1 未満	0.1 未満	0.1 未満	0.1 未満	0.1 未満	0.1 未満	0.1 未満	0.1 未満	—	—	—	
ｱﾙﾐﾆｳﾑ	(mg/L)	2.5	10.7	49.6	44.6	2.7	2.0 未満	2.7	5.9	4.7	4.0	5.0	
硫酸ｲｵﾝ	(mg/L)	13.6	62.4	150	186	504	1170	1240	181	250	246	244	
全りん	(mg/L)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
M-ｱﾙｶﾘ度	(mg/L)	549	—	—	151	—	—	28.2	131	—	—	135	
ﾅﾄﾘｳﾑ	(mg/L)	—	—	—	—	—	—	—	59.4	73.0	86.0	125	
ｶﾘｳﾑ	(mg/L)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
ｼﾘｶ	(mg/L)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
塩化物ｲｵﾝ	(mg/L)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
ｱﾝﾓﾆｱ性窒素	(mg/L)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
硝酸ｲｵﾝ	(mg/L)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
亜硝酸ｲｵﾝ	(mg/L)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
pH		12.2 (21℃)	11.8 (21℃)	11.0 (21℃)	10.7 (21℃)	10.9 (19℃)	10.5 (19℃)	10.3 (19℃)	11.4 (21℃)	11.4 (21℃)	11.4 (21℃)	11.4 (21℃)	
電気伝導率	(mS/m)	250	115	71.0	76.4	143	206	250	98.0	103	110	122	
酸化還元電位	(mV)	197	194	233	244	520	480	460	213	201	199	195	
ﾖｳ素消費量	(mg/L)	6.0 未満	6.0 未満	6.0 未満	6.0 未満	6.0 未満	6.0 未満	6.0 未満	6.0 未満	6.0 未満	6.0 未満	6.0 未満	
灰略号		灰Y中	灰Y中	灰Y中	灰Y中	灰Y中	灰Y中	灰Y中	灰Y中	灰Y中	灰Y中	灰Y中	
配合条件(重量配合比)	灰	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
	ｾﾒﾝﾄ	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
	二水石膏	0	0	0	0	10	10	10	10	10	10	10	
還元剤名		ﾌﾞﾗﾝｸ	硫酸第一鉄	硫酸第一鉄	硫酸第一鉄	硫酸第一鉄	硫酸第一鉄	硫酸第一鉄	ﾌﾞﾗﾝｸ	ﾊｲﾄﾞﾛｻﾙﾌｧｲﾄ	ﾊｲﾄﾞﾛｻﾙﾌｧｲﾄ	ﾊｲﾄﾞﾛｻﾙﾌｧｲﾄ	
還元剤添加量	(対ｾﾒﾝﾄw/w%)	—	5	10	20	5	10	20	—	0.5	1.0	2.0	
W/P	(%)	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	
a. 成形試験日		1/24	1/24	1/24	1/24	2/4	2/4	2/4	1/24	1/24	1/24	1/24	
b. 溶出操作日		2/4	2/4	2/4	2/4	2/12	2/12	2/12	2/4	2/4	2/4	2/4	
b-a	(日)	11	11	11	11	8	8	8	11	11	11	11	

表4-3-4 各種セメントを使用した灰硬化体における溶出挙動

試料性状	試料名	溶出時間	養生期間(日)	セメント種類	薬品1	薬品2	重量配合比 灰	セメント	薬品1	薬品2	W/P (%)	六価クロム (mg/L)	総クロム (mg/L)	カルシウム (mg/L)	アルミニウム (mg/L)	硫酸イオン (mg/L)	M-アルカリ度 (mg/L)	pH (-)	水温 (℃)	電気伝導率 (mS/m)	酸化還元電位(mV)	硝酸イオン (mg/L)
灰硬化体	No. 1－1	6時間	10	高炉B	－	－	100	40	－	－	32	0.07	0.14	53	22	27	230	11.7	23	90.0	145	
	No. 1－2	6時間	10	高炉B	二水石膏	－	100	36	4	－	32	0.04 未満	0.23	57	15	80	170	11.5	23	83.1	164	
	No. 1－3	6時間	10	アルミナ2	－	－	100	40	－	－	32	0.04 未満	0.01 未満	210	180	0.5	590	11.7	23	130	170	
	No. 1－4	6時間	10	アルミナ2	二水石膏	－	100	36	4	－	32	0.04 未満	0.01 未満	170	160	2.3	510	11.6	23	107	169	
	No. 1－5	6時間	10	ジセ200	－	－	100	40	－	－	32	0.04 未満	0.08	63	12	90	160	11.5	23	82.9	157	
	No. 1－6	6時間	34	高炉B	－	－	100	40	－	－	32	0.04 未満	0.20	56	10	50	220	11.6	24	107	−16	
	No. 1－7	6時間	34	高炉B	二水石膏	－	100	36	4	－	32	0.04 未満	0.17	73	8.6	82	180	11.6	24	98.2	−11	
	No. 1－8	6時間	34	アルミナ2	－	－	100	40	－	－	32	0.04 未満	0.01 未満	98	97	3.5	300	11.5	23	78.6	−6	
	No. 1－9	6時間	34	アルミナ2	二水石膏	－	100	36	4	－	32	0.04 未満	0.01 未満	120	83	38	280	11.4	24	76.1	−3	
	No. 1－10	6時間	34	ジセ200	－	－	100	40	－	－	32	0.04 未満	0.04	320	1.4	540	55	10.7	24	147	3	

表4-3-5 硝酸カルシウム配合時の溶出挙動

試料性状	試料名	溶出時間	養生期間(日)	セメント種類	薬品1	薬品2	重量配合比 灰	セメント	薬品1	薬品2	W/P (%)	六価クロム (mg/L)	総クロム (mg/L)	カルシウム (mg/L)	アルミニウム (mg/L)	硫酸イオン (mg/L)	M-アルカリ度 (mg/L)	pH (-)	水温 (℃)	電気伝導率 (mS/m)	酸化還元電位(mV)	硝酸イオン (mg/L)
灰硬化体	No. 1－1	6時間	9	OPC	二水石膏	－	100	28	12	－	32	0.39	0.44	200	3.9	430	96	11.4	21	134	43	1.2
	No. 1－2	6時間	9	OPC	二水石膏	硝カル4水	100	28	9	3	32	0.16	0.17	140	7.4	120	110	11.5	21	122	32	230
	No. 1－3	6時間	9	OPC	二水石膏	硝カル4水	100	28	6	6	32	0.04 未満	0.01 未満	290	28	2.2	220	11.7	21	221	26	720
	No. 1－4	6時間	9	OPC	二水石膏	硝カル4水	100	28	3	9	32	0.04 未満	0.01 未満	540	30	2.1	210	11.6	21	322	27	1300
	No. 1－5	6時間	9	OPC	－	硝カル4水	100	28	－	12	32	0.04 未満	0.01 未満	840	35	0.5	210	11.6	21	428	26	2000
	No. 1－6	6時間	35	OPC	二水石膏	－	100	28	12	－	32	0.35	0.35	180	4.4	360	67	10.9	26	116	18	0.15 未満
	No. 1－7	6時間	35	OPC	二水石膏	硝カル4水	100	28	9	3	32	0.13	0.13	160	6.5	140	75	11.0	26	124	9	240
	No. 1－8	6時間	35	OPC	二水石膏	硝カル4水	100	28	6	6	32	0.04 未満	0.01	300	19	5.5	180	11.3	26	214	−14	750
	No. 1－9	6時間	35	OPC	二水石膏	硝カル4水	100	28	3	9	32	0.04 未満	0.01	540	22	1.9	180	11.3	26	312	−16	1300
	No. 1－10	6時間	35	OPC	－	硝カル4水	100	28	－	12	32	0.04 未満	0.01 未満	840	30	1.0	260	11.4	26	458	−13	2300

表4-3-6 炭酸カルシウム配合時の溶出挙動

試料性状	試料名	溶出時間	養生期間(日)	セメント種類	薬品1	薬品2	重量配合比 灰	セメント	薬品1	薬品2	W/P (%)	六価クロム (mg/L)	総クロム (mg/L)	カルシウム (mg/L)	アルミニウム (mg/L)	硫酸イオン (mg/L)	M-アルカリ度 (mg/L)	pH (-)	水温 (℃)	電気伝導率 (mS/m)	酸化還元電位(mV)	硝酸イオン (mg/L)
灰硬化体	No. 1－1	6時間	12	OPC	二水石膏	炭カル	100	28	9	3	32	0.34	0.34	79	6.6	220	120	11.2	23	95.5	43	
	No. 1－2	6時間	12	OPC	二水石膏	炭カル	100	28	6	6	32	0.33	0.33	44	12	96	150	11.1	23	84.9	42	
	No. 1－3	6時間	12	OPC	二水石膏	炭カル	100	28	3	9	32	0.24	0.24	43	21	130	400	11.2	23	88.9	45	
	No. 1－4	6時間	12	OPC	－	炭カル	100	28	－	12	32	0.04 未満	0.03	140	10	3.3	200	11.5	23	173	16	
	No. 1－5	6時間	33	OPC	二水石膏	炭カル	100	28	9	3	32	0.31	0.31	63	6.6	160	100	11.2	22	81.2	133	
	No. 1－6	6時間	33	OPC	二水石膏	炭カル	100	28	6	6	32	0.29	0.29	43	9.3	79	130	11.2	22	76.7	111	
	No. 1－7	6時間	33	OPC	二水石膏	炭カル	100	28	3	9	32	0.27	0.27	37	12	57	160	11.3	22	79.6	95	
	No. 1－8	6時間	33	OPC	－	炭カル	100	28	－	12	32	0.20	0.20	32	13	33	160	11.2	22	70.3	93	
	No. 2－1	6時間	11	OPC	二水石膏	炭カル	100	28	2	10	32	0.13	0.13	44	17	34	200	11.4	21	86.1	48	
	No. 2－2	6時間	11	OPC	二水石膏	炭カル	100	28	1.5	10.5	32	0.11	0.11	46	18	24	220	11.7	21	92.8	44	
	No. 2－3	6時間	11	OPC	二水石膏	炭カル	100	28	1	11	32	0.04	0.04	81	10	6.5	280	11.9	21	121	35	
	No. 2－4	6時間	11	OPC	二水石膏	炭カル	100	28	0.5	11.5	32	0.05	0.05	140	7.7	19	350	11.8	21	162	31	
	No. 2－5	6時間	32	OPC	二水石膏	炭カル	100	28	2	10	32	0.25	0.25	31	14	45	190	11.5	21	78.0	77	
	No. 2－6	6時間	32	OPC	二水石膏	炭カル	100	28	1.5	10.5	32	0.22	0.22	33	13	40	180	11.5	21	73.3	69	
	No. 2－7	6時間	32	OPC	二水石膏	炭カル	100	28	1	11	32	0.23	0.23	30	13	37	180	11.5	21	78.2	64	
	No. 2－8	6時間	32	OPC	二水石膏	炭カル	100	28	0.5	11.5	32	0.23	0.23	29	13	37	180	11.5	21	80.5	60	

表4-3-7 消石灰配合時の溶出挙動

試料性状	試料名	溶出時間	養生期間(日)	セメント種類	薬品1	薬品2	重量配合比 灰	セメント	薬品1	薬品2	W/P (%)	六価クロム (mg/L)	総クロム (mg/L)	カルシウム (mg/L)	アルミニウム (mg/L)	硫酸イオン (mg/L)	M-アルカリ度 (mg/L)	pH (-)	水温 (℃)	電気伝導率 (mS/m)	酸化還元電位(mV)	硝酸イオン (mg/L)
灰硬化体	No. 1－1	6時間	10	OPC	二水石膏	消石灰	100	28	9	3	32	0.31	0.31									
	No. 1－2	6時間	10	OPC	二水石膏	消石灰	100	28	6	6	32	0.06	0.06									
	No. 1－3	6時間	10	OPC	二水石膏	消石灰	100	28	3	9	32	0.04 未満	0.01 未満									
	No. 1－4	6時間	10	OPC	－	消石灰	100	28	－	12	32	0.04 未満	0.01 未満									
	No. 1－5	6時間	31	OPC	二水石膏	消石灰	100	28	9	3	32	0.29	0.29									
	No. 1－6	6時間	31	OPC	二水石膏	消石灰	100	28	6	6	32	0.18	0.18									
	No. 1－7	6時間	31	OPC	二水石膏	消石灰	100	28	3	9	32	0.16	0.16									
	No. 1－8	6時間	31	OPC	－	消石灰	100	28	－	12	32	0.04 未満	0.04									
	No. 2－1	6時間	9	OPC	二水石膏	消石灰	100	28	2	10	32	0.04 未満	0.01 未満									
	No. 2－2	6時間	9	OPC	二水石膏	消石灰	100	28	1.5	10.5	32	0.04 未満	0.01 未満									
	No. 2－3	6時間	9	OPC	二水石膏	消石灰	100	28	1	11	32	0.04 未満	0.01 未満									
	No. 2－4	6時間	9	OPC	二水石膏	消石灰	100	28	0.5	11.5	32	0.04 未満	0.01 未満									
	No. 2－5	6時間	30	OPC	二水石膏	消石灰	100	28	2	10	32	0.08	0.15									
	No. 2－6	6時間	30	OPC	二水石膏	消石灰	100	28	1.5	10.5	32	0.10	0.10									
	No. 2－7	6時間	30	OPC	二水石膏	消石灰	100	28	1	11	32	0.04	0.04									
	No. 2－8	6時間	30	OPC	二水石膏	消石灰	100	28	0.5	11.5	32	0.04 未満	0.02									

表4-3-8 消石灰／硝酸カルシウム配合時の溶出挙動

試料性状	試料名	溶出時間	養生期間(日)	セメント種類	薬品1	薬品2	薬品3	重量配合比 灰	セメント	薬品1	薬品2	薬品3	W/P (%)	六価クロム (mg/L)	総クロム (mg/L)	カルシウム (mg/L)	アルミニウム (mg/L)	硫酸イオン (mg/L)	M-アルカリ度 (mg/L)	pH (-)	水温 (℃)	電気伝導率 (mS/m)	酸化還元電位(mV)	硝酸イオン (mg/L)
灰硬化体	No. 1－1	6時間	8	OPC	二水石膏	消石灰	硝カル4水	100	28	6	1.5	4.5	32	0.04 未満	0.01 未満									
	No. 1－2	6時間	8	OPC	二水石膏	消石灰	硝カル4水	100	28	6	3	3	32	0.04 未満	0.01 未満									
	No. 1－3	6時間	8	OPC	二水石膏	消石灰	硝カル4水	100	28	6	4.5	1.5	32	0.04 未満	0.01 未満									
	No. 1－4	6時間	29	OPC	二水石膏	消石灰	硝カル4水	100	28	6	1.5	4.5	32	0.04 未満	0.01 未満									
	No. 1－5	6時間	29	OPC	二水石膏	消石灰	硝カル4水	100	28	6	3	3	32	0.04 未満	0.01 未満									
	No. 1－6	6時間	29	OPC	二水石膏	消石灰	硝カル4水	100	28	6	4.5	1.5	32	0.23	0.24									

表4-4-1 ｱﾍﾞｲﾗﾋﾞﾘﾃｨ試験結果

項目		No.1		No.2		No.3		No.4	
		pH＝7	pH＝4	pH＝7	pH＝4	pH＝7	pH＝4	pH＝7	pH＝4
ｶﾄﾞﾐｳﾑ	(mg/L)	0.001 未満	0.015	0.001 未満	0.013	0.001 未満	0.017	0.001 未満	0.021
全ｼｱﾝ	(mg/L)	0.1 未満	0.1 未満	0.1 未満	0.1 未満	0.1 未満	0.1 未満	0.1 未満	0.1 未満
鉛	(mg/L)	0.005 未満	0.009	0.005 未満	0.014	0.005 未満	0.025	0.005 未満	0.014
六価ｸﾛﾑ(比色)	(mg/L)	0.09	0.04 未満	0.16	0.04 未満	0.10	0.04 未満	0.11	0.04 未満
全ｸﾛﾑ(ICP)	(mg/L)	0.09	0.04	0.16	0.04	0.10	0.04 未満	0.11	0.04 未満
砒素	(mg/L)	0.006	0.008	0.006	0.011	0.008	0.008	0.007	0.008
総水銀	(mg/L)	0.0005 未満	0.0005 未満	0.0005 未満	0.0005 未満	0.0005 未満	0.0005 未満	0.0005 未満	0.0005 未満
ｾﾚﾝ	(mg/L)	0.011	0.002 未満	0.010	0.002 未満	0.009	0.002 未満	0.006	0.002 未満
ふっ素	(mg/L)	0.08 未満	1.10	0.08 未満	1.20	0.08 未満	1.20	0.08 未満	1.20
ほう素	(mg/L)	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4
pH		7.2 (20.5℃)	3.8 (20.5℃)	7.3 (21.1℃)	3.6 (21.1℃)	7.4 (21.2℃)	3.9 (21.2℃)	7.4 (20.1℃)	3.8 (20.1℃)
1N硝酸消費量 注)	(mL)	33.0	42.0	39.0	42.0	38.0	39.5	33.0	42.0
灰略号		灰Y中		灰Y中		灰Y中		灰Y中	
配合条件(重量配合比)	灰	100		100		100		100	
	ｾﾒﾝﾄ	28		28		28		28	
	二水石膏	6		0		6		6	
	消石灰	0		0		1.5		3	
	硝酸カルシウム4水和物	6		12		4.5		3	
W/P	(%)	29		26		32		32	

試料あたりの溶出量		pH＝7	pH＝4	pH＝7	pH＝4	pH＝7	pH＝4	pH＝7	pH＝4	灰硬化体 注2)	原灰Y 注3)	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ 注3)
ｶﾄﾞﾐｳﾑ	(mg/kg)	—	0.83	—	0.72	—	0.93	—	1.16	—	5 未満	5 未満
全ｼｱﾝ	(mg/kg)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5 未満	5 未満
鉛	(mg/kg)	—	0.50	—	0.77	—	1.37	—	0.77	111	190	52
六価ｸﾛﾑ(比色)	(mg/kg)	4.87	—	8.78	—	5.48	—	5.95	—	—		
全ｸﾛﾑ(ICP)	(mg/kg)	4.87	2.21	8.78	2.21	5.48	—	5.95	—	167	290 as酸溶出Cr	67 as酸溶出Cr
砒素	(mg/kg)	0.32	0.44	0.33	0.61	0.44	0.44	0.38	0.44	8.0	12.8	7.2
総水銀	(mg/kg)	—	—	—	—	—	—	—	—	0.17	0.31	0.05 未満
ｾﾚﾝ	(mg/kg)	0.60	—	0.55	—	0.49	—	0.32	—	3.0	5.4	0.48
ふっ素	(mg/kg)	—	60.78	—	66.30	—	65.93	—	66.30	126	160	260
ほう素	(mg/kg)	16.24	22.10	21.95	22.10	16.43	21.98	21.65	22.10	65	110	39

注1) ｻﾝﾌﾟﾙ:脱ｲｵﾝ水＝8g:400mLに対する消費量
注2) 灰硬化体の重量配合比 灰:ｾﾒﾝﾄ:薬品＝100:28:12、W/P＝32%として、原灰Yおよび普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄの微量有害物質含有量から、灰硬化体あたりの微量有害物質含有量を試算した値。総水銀については原灰Yの含有量のみ考慮した。
注3) 表4-2-2より転載した。

第５章　総合評価

５－１　まとめ

以下に、本共同研究を通じて得た知見について要約する。

第２章　２－１灰前処理方法の検討について

・転動ミルおよび振動ミルにおいて、タップかさ密度の増加を目的として微粉砕を行う場合、粒子径の低減を目的とする場合と異なり、ボール径が大きいほど効率的であることが示された。

第２章　２－２成形方法の検討について

・灰の入手先によって灰硬化体の圧縮強度が異なる要因として、灰に含まれる溶出成分(硫酸イオン)が影響していることが示された。

・灰硬化体の強度が低い場合、二水石膏等、硫酸イオンを含む薬品の配合により強度を向上できることが示された。

・加圧振動成形法により、加圧成形法と同等程度の圧縮強度の灰硬化体を作製可能であることが示された。

第３章　灰および灰硬化体の物性に関する検討について

・加圧振動成形法による灰硬化体は、加圧成形法による灰硬化体よりも耐凍害性で劣り、乾燥収縮や中性化の面でも一般的なコンクリート材料として扱うには材料物性の向上が必要であることが示された。

第４章　安全性に関する検討について

・硝酸カルシウムや消石灰等、塩素を含まない薬品の配合により、灰硬化体からの六価クロム溶出を防止可能であることが示された。

５－２　今後の課題

加圧振動成形法による灰硬化体の材料物性向上について、以下の検討が必要と考える。

・給材方法、加圧条件、振動条件、等の成形条件の検討

・コンクリート混和剤(AE 減水剤等)、骨材、等の使用による配合条件の検討