

土 木 研 究 所 資 料

建設残土の利用に関する試験調査

平成3年3月

建設省土木研究所
機械施工部施工研究室

Copyright © (1991) 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。

建設残土の利用に関する試験調査

施工研究室 室 長 苗 村 正 三
研究員 田 中 貢

要 旨

建設工事から発生する高含水比の泥土の有効利用を図ることを目的として、固化材処理脱水処理、及び溶融処理による泥土の資源化について提案し、処理費用の分析を行った。調査としては溶融処理により空冷スラグと水砕スラグを作製し、基本特性試験及びこれらのスラグを骨材としたモルタル試験、コンクリート試験を行い、スラグの骨材としての適応性、土木構造物に用いた場合の適応性を検討した。脱水処理では、泥水を高圧脱水処理した場合の土質特性などについて検討を加え、高圧脱水処理土の物性を把握した。また、固化材処理した改良土を用いた盛土実験を行い、改良土の土構造物への適応性を検討した。更に各処理手法の経済性の検討を行い、それに併せて溶融モデルによるシミュレーション解析を行うことにより泥土を溶融処理した場合の熱バランスを検討した。

以上の結果、泥土の資源化の可能性などが確認できた。

キーワード：残土，泥土，資源化，スラグ，土質改良，改良盛土，脱水，フィルタープレス

ま え が き

近年、大都市を中心に建設工事にともなって発生する土、いわゆる建設残土は建設事業の遂行上大きな支障となり、社会的な問題までになっている。

建設残土は、従来主に海面埋立てや宅地造成等の埋立て材・盛土材として処分されてきた。しかし、最近では土地利用の高度化にともなう地下空間の開発等により発生土量は膨大な量になってきており、昭和62年度の首都圏の1都3県の公共事業だけでも1800万 m^3 に達している。一方、残土の処分については環境問題等の理由から海面埋立て適地が減少し、また内陸部での処分地についても、残土の処分時のトラブルや産業廃棄物等の不法投棄から自治体において残土の処分に厳しい規制が課せられるなど、大都市の近郊に残土処分地を確保するのが年々困難になっている。

このため、一部では残土の処分が工事実施上のクリティカルパスであると言われるほどになっている。

このような状況に対し建設省では「残土対策協議会」を設け、従来から残土の盛土材や埋め戻し材への使用等、残土の有効利用に努めてきており、さらに一層の残土の利用を図るため昭和63年度には全省的なプロジェクトとして「総合的建設残土対策研究会」を発足させている。

また昭和57年度から61年度まで総合技術開発プロジェクト「建設事業への廃棄物利用技術に関する研究」を実施し、残土の有効な利用を図るため、残土の埋め戻し材への適用技術や残土の発生工事・利用工事間の最適な組合せを求める残土処理計画システムの開発等、残土の利用についてハード面・ソフト面で研究を実施してきた。

本報告書は、これらの残土問題のうちシールド工法や場所打ち杭工法等から発生する泥水・泥土を取り上げ、化学的及び物理的な改質処理方法の現状と改質された泥水・泥土の基本的な性状、土木材料としての適応性について報告するものである。

シールド工法や場所打ち杭工法等から発生する泥水・泥土は、掘削面の安定や掘削土の搬送のためにきわめて高含水比の状態にあり、そのままの性状では強度、施工性等の面から埋め立てや盛土材として用いることができない。このため、これらの土を廃棄処分する時には「廃棄物の処理及び清掃に関する法律（以下、廃掃法と言う。）」の規定では、一般の残土と異なり管理型処分としての産業廃棄物扱いとなる場合が多く、処理コストがきわめて高いものとなる。

この泥水・泥土はもともとは自然の土であり、大地の成分となんら変わりがない。しかし、含水比が高いために捨土の方法によっては水質汚濁や防災上の問題が生じる可能性があるという理由で「廃掃法」で産業廃棄物に規定されている。従って適切な改質や捨土処理を行うことにより各種の材料、特に土木材料として十分使用でき、他の産業廃棄物とは区分した取り扱いが可能であると考えられる。

本報告書は、この泥水・泥土について、その発生・処分の現状を報告すると共に、以下の項目について報告する。

- 1) 石灰、セメント等による化学的な改良技術の現状
- 2) 高熱による物理的な改良技術の現状
- 3) 石灰、セメント等による化学的な改良後の泥土の現状

- 4) 高熱による物理的な改良後の泥土の性状
- 5) 高熱による物理的な改良技術の経済性
- 6) 高熱による物理的な改良後の泥土の土木材料、特にコンクリート骨材としての適性
- 7) 高熱による物理的な改良に及ぼす影響因子

目 次

まえがき

1. 調査目的及び概要	1
2. 掘削残土の現況	2
2.1 掘削残土の発生と処分	2
2.2 掘削残土の判定	5
3. 改良技術の現状	7
3.1 固化材処理による改良技術の現況	7
3.1.1 固化材の種類	7
3.1.2 混合方法	7
3.2 熱処理による溶融技術の現状	9
3.2.1 溶融技術の現状	9
3.2.2 溶融処理技術適用上の問題点	16
4. 掘削残土の基本特性に関する調査	19
4.1 目的及び概要	19
4.2 調査対象土	19
4.3 試験項目及び試験方法	19
4.3.1 土の基本性状に関する試験	19
4.3.2 土の温度特性に関する試験	19
4.4 結果及び考察	23
4.4.1 土の基本性状に関する試験	23
4.4.2 溶融による体積変化率・重量変化率試験	24
4.4.3 成分分析試験	25
4.4.4 溶融温度特性試験	26
4.4.5 粘性試験	30
4.4.6 重金属溶出試験	33
5. 残土のスラグ化に関する調査	35
5.1 目的及び概要	35
5.2 粗骨材としての材料試験	39

5.2.1 試験項目	40
5.2.2 結果及び考察	40
5.3 細骨材としての材料試験	41
5.3.1 試験に用いたスラグの種類	41
5.3.2 試験項目	42
5.3.3 結果及び考察	43
5.4 モルタル供試体試験	47
5.4.1 試験方法	47
5.4.2 結果及び考察	47
5.5 コンクリート供試体試験	51
5.5.1 試験方法	51
5.5.2 結果及び考察	51
6. 残土の軽量骨材化に関する調査	54
6.1 目的	54
6.2 残土の膨張性の確認	54
6.2.1 試料及び供試体の作成	54
6.2.2 実験方法	55
6.2.3 実験結果	56
6.3 軽量骨材の作製	61
6.4 軽量骨材としての適応性試験	61
6.4.1 試験項目	61
6.4.2 試験結果及び考察	61
6.5 コンクリート供試体試験	62
6.5.1 試験方法	62
6.5.2 試験結果及び考察	63
7. 高圧脱水処理による土質改良試験	67
7.1 目的及び概要	67
7.2 試験概要	67
7.2.1 泥 水	67
7.2.2 脱水条件	67
7.2.3 結果及び考察	68
8. 固化処理土による土質改良試験	72

8.1	目的及び概要	72
8.2	実験方法	73
8.2.1	室内実験	73
8.2.2	盛土実験	73
8.3	結果及び考察	77
8.3.1	室内実験	77
8.3.2	盛土実験	78
9.	改良の経済性の検討	83
9.1	試算条件	83
9.2	固化処理の費用分析	85
9.3	溶融処理の費用分析	86
9.4	経済性の検討	87
10.	溶融モデルによるシミュレーション解析	90
10.1	調査目的	90
10.2	調査方法	90
10.2.1	乾燥工程	90
10.2.2	溶融工程	93
10.2.3	熱回収工程	93
10.2.4	溶融モデルの概要	93
10.3	調査結果	110
10.3.1	計算結果	110
10.3.2	物質・熱特性の解析	113
11.	まとめ	118
11.1	溶融処理による改良	118
11.2	発泡処理	118
11.3	高圧脱水処理	118
11.4	固化処理	118
11.5	泥土処理の経済性	119
	参考文献	120
	付 録	121

1. 調査目的及び概要

建設工事現場からは、コンクリート塊、アスファルト塊、木材、残土等、多様な廃棄物が発生する。発生する廃棄物等の形態は、それぞれ単独の状態で発生することは少なく、通常は混在した状態で発生する。このような排出物は「廃棄物の清掃等に関する法律」（以下、廃掃法と言う。）により、廃棄物として取り扱われることが多い。しかし、残土は元来自然に存在しているものであるもので、基本的には産業廃棄物には該当しないが、「地下鉄等の工事現場から排出される含水比が高く、粒子の微細な泥状のものにあっては無機系の汚でい」と考え、産業廃棄物として取り扱われる。

掘削残土の発生量は、土地の高度利用により増加しているが、その反面、埋立地の減少等により処分地の絶対量が減り、全体として残土の受入れ地が不足しているのが現状である。将来的にも、地下空間の高度利用などにより、掘削残土の発生量は増加するが、受入れ地については、海面埋立地の減少、市街化地域の拡大、環境問題等により減少することが考えられる。このようなことから、今後は、現在以上に発生した掘削残土の処分は困難になり、掘削残土が大量に発生する事業の展開が難しくなるものと思われる。

このような残土問題の解決方法としては、施工技術の改良による発生量の抑制、新たな処分地の確保等の他に、今まで利用できなかったり、限られた用途にしか流用できなかった残土を土質改良することにより、良質土、骨材等の土木材料に作り変え、他工事への流用促進をはかることが考えられる。

当研究では、掘削残土の内、現在「廃掃法」により産業廃棄物として取り扱われ、産業廃棄物処理場へ搬入するように規定されている泥水加圧シールド工事等からの発生泥土を取り上げ、以下に示す3種類の手法により土木材料としての資源化について検討した。

1) 溶融処理による骨材化

下水汚泥において実用化している溶融処理技術を利用し、泥土を高温状態で溶融・スラグ化することにより骨材としての再利用性を探るものである。

2) 軽量骨材化

熱を利用する点では1)の溶融処理と同じであるが、土が溶融する直前の発泡した状態で取り出すことにより軽量骨材化するものである。

3) 脱水処理による改良

現在使用されているフィルタープレス機の5～6倍の圧力で脱水することにより、泥水を十分な強度を発揮する程度まで含水比を低下させ、土質材料とするものである。

4) 固化材による改良

石灰、石灰系固化材、セメント系固化材等を混合し、含水比の低下、土粒子の団粒化、強度の増加等により、泥土を流用可能な土に改質するものである。

2. 掘削残土の現況

残土問題は、土木工事の増加に伴う発生残土量の増加、環境に対する関心の高まり等から、大都市を中心に昭和40年代後半から社会問題化してきた。この問題は、程度の差はあるものの全国的な問題となっている。ここでは、残土問題が最も深刻な首都圏を例に取り上げ、残土の現況について述べることにする。

残土問題の内容は、大きく2つに大別できる。1つ目は、掘削残土の発生量が膨大であり、処分地確保が困難なことであり、2つ目は、掘削残土を「残土」と「汚泥」に区分する基準が不明確なために発生する不法投棄等のトラブルである。

2.1 掘削残土の発生と処分

掘削残土の発生量の実態を首都圏の1都3県（東京都・神奈川県・埼玉県・千葉県）を例に取り上げてみると図-2.1～図-2.4のとおりである。昭和50年度に発生した掘削残土を含む廃棄物の総量は1億1,000万 m^3 であり、そのうち、約半分の「廃棄物」が工事現場外へ搬出されている。「廃棄物」の種類は、全体の約8割が「残土」といわれる土砂である。

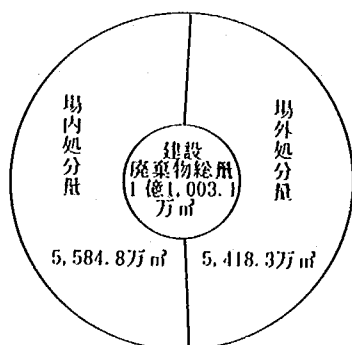


図-2.1 建設廃棄物量
(昭和50年度)

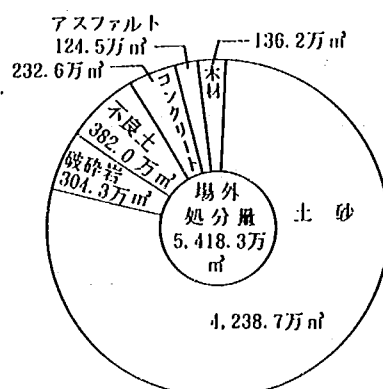


図-2.2 場外処分廃棄物の内訳
(昭和50年度)

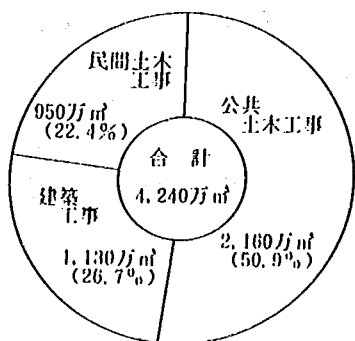


図-2.3 工事種類別発生残土量構成
(昭和50年度)

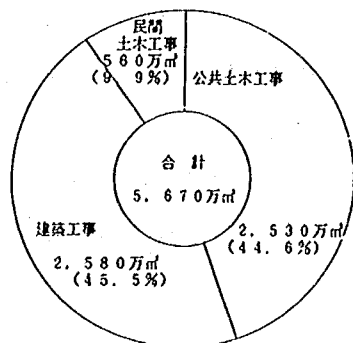


図-2.4 工事種類別発生残土量
(昭和62年度)

工事種類別発生量としては約半分が公共事業からのものであり、建築工事が27%、電気・ガス・土地造成等の民間工事が22%となっている。その後、公共事業のゼロシーリングや土地の高度利用等影響により、昭和62年度では、建築工事が46%、公共土木工事が45%、民間土木工事が10%になっている。一方、掘削残土の発生量は表-2.1に示すように、西暦2,000年（平成12年）では、6,500万 m^3 ～7,700万 m^3 に達するものと予想されている。

表-2.1 将来の残土発生量（1都3県）

(万 m^3)

年度	S50 (1975)	S62 (1987)	H12(2000)		
			ケース 1	ケース 2	ケース 3
発生量	4,240	5,670	7,700	7,200	6,500

注) ケース 1 昭和50年度～昭和62年度の年平均伸び率が今後も続く場合。

ケース 2 「21世紀への建設産業ビジョン」(建設省、S.61)で想定している4%前後の経済成長(公共投資の伸び率は3%)が続く場合。

ケース 3 ケース 2を基に、下水事業等の残土を発生させる土木工事の動向、建築物の建て替え動向等を想定した場合。

これに対する土の搬出先の推移を図-2.5に示す。昭和60年度までは主として海面埋め立て地や内陸の処分地で処理されている。図中の「他の工事現場」とは、発生土を流用したものであり、土の有効利用が図られたものであるが全体の15%程度にしか過ぎない。昭和62年度には昭和56年度以降増加していた海面への搬出割合が減少するとともに、他の工事現場での利用及び内陸受入れ地の割合が増加しており、残土利用の新たな展開を示唆している。

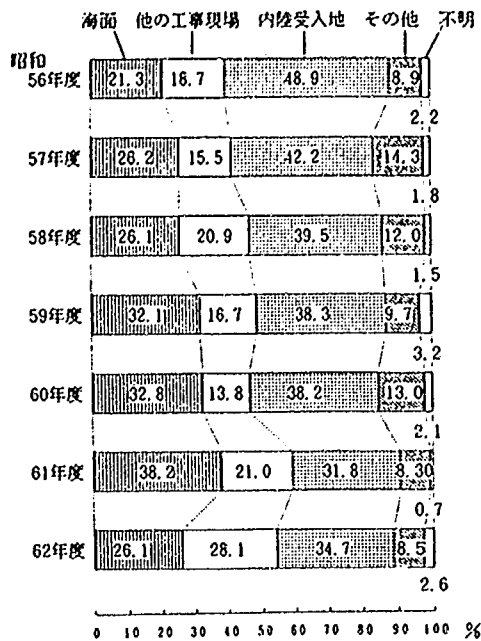


図-2.5 残土処分地の推移

表-2.2に示すように、1都3県における西暦2,000年までの総量では、年平均で1,400万 m^3 程度の残土の受入れ地が不足することが予想され、また、環境問題や土地開発等の理由から、受入れ地を遠くに求めざるを得ない状況である。

表-2.2 1都3県の将来的な残土利用の見通し
(昭和63年度から平成12年度)

(万 m^3)	
残土発生量 a	84,700
残土利用可能量 b	66,360
利用先の不足量 c = a - b	18,340 (年平均 1,410)

これらの処分地への運搬距離は、昭和50年度で東京区部地区において17km程度であったものが、昭和57年度においては16~30kmになっている。このような処分地の遠隔化はどの地域に限らず年々進み、処分コストの高騰や運搬時の交通環境の問題が生じている。また、内陸処分地においては、掘削残土埋立て後の土地利用計画無しに無秩序な投棄が行なわれ、トラブルが発生し、その結果、条例等による規制を行なう自治体もあり、処分地不足に拍車をかけている。千代田区における工事の運搬距離の推移を図-2.6に示す。

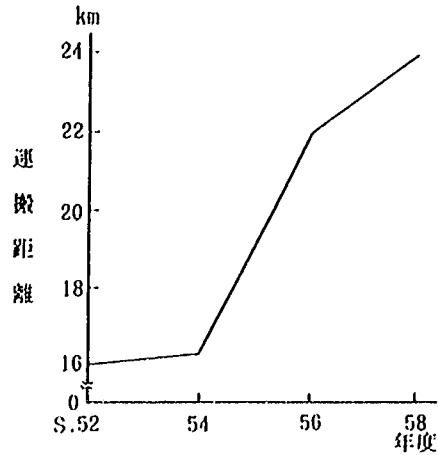


図-2.6 運搬距離の推移

2.2 掘削残土の判定

工事現場から発生し、その工事現場外へ搬出される土を一般には「掘削残土」と呼んでいる。掘削残土は、建設工事に流用可能な土「残土」と、ベントナイト泥水や高含水比粘性土のように他工事への流用が困難な産業廃棄物扱いの土「建設汚泥」とに区分できる。そのため、現場においては、各工事現場から搬出される土が「残土」か「建設汚泥」かを判断し、それぞれの土を法律に従って処分する必要がある。しかし、産業廃棄物の規定は、第1章で述べたように「地下鉄等の工事現場から排出される含水比が高く、粒子の微細なでい状のもの」であり、この規定が曖昧なため、自治体や事業者において産廃か否かの判断がまちまちであり、そのことによるトラブルも多く発生している。

建設省の「総合的建設残土対策研究会」では、「残土」と「建設汚泥」の区分を次のような基本的な考え方を基に、土質選定基準（表-2.3）、及び各土質材料の適用性の目安（表-2.4）を作成している。また、コンクリート塊やアスファルト塊が混入している土についても「重量比で30%以下の混入率で、最大粒径が30cm以下」の場合は、残土であるとしている。

表-2.3 土質選定基準

指標 区分	最大粒径 (mm)	細粒分 含有率 η (%)	強 度				備 考
			修正 CBR (%)	塑性指数 PI (%)	一軸圧縮 強度 σ_1 (kgf/cm ²)	コーン 指数 (kgf/cm ²)	
第1種 土質材料	100以下	15以下	10以上	10以下	5.0以上	—	砂相当
第2種 土質材料	150以下	50以下	5以上	—	2.0以上	8以上	砂質土、礫 質土相当
第3種 土質材料	300以下	—	2以上	—	1.0以上	4以上	ローム、粘 性土相当
第4種 土質材料	—	—	—	—	—	2以上	高含水比の 粘性土相当
汚 泥	—	—	—	—	—	2未満	

11. 改良土の場合、細粒分含有率、塑性指数は対象外とする。
12. 一軸圧縮強度は改良土を対象とする。

表-2.4 各土質材料の適用性の目安

用 途 区 分	埋 戻 し 材 料	路 床	裏 込 め 材 料	路 体	河 川 堤 防 ^{‡1}	宅 地 造 成	埋 立 て 等
第1種土質材料	○	○	○	○	△	○	○
第2種土質材料	△	○	○	○	○	○	○
第3種土質材料	×	△	○	○	○	○	○
第4種土質材料	×	×	△	△	△	△	○
汚 泥	×	×	×	×	×	×	×

○：適する △：注意 ×：不適
^{‡1}. スーパー堤防については別途検討中

① 残土と汚泥の区分は施工性の良否、ハンドリングの良否により判断し、資材として使えるものを残土とし、資材として使えないものは建設汚泥とする。

資材とは、

ア) 利用する際に施工性が保たれる。

イ) 運搬途上で流動化しない。

ウ) 利用する際に適正な管理が可能である。

ことを満足するものとする。

② 残土とガラ混じり土の区分は、土質材料としての施工性により判断する。

③ 基準の土質工学的指標としては、現場で簡易に測定でき、かつできるだけ少ない指標であることとし、具体的数値は実態調査等により決定する。

④ 汚泥及びガラ混じり土の性状を改良したものについては、改良後の性状で判断する。

⑤ 残土を利用する際には、防災等の観点から適切な受入施設や施工管理が必要であり、これを明確にするよう検討する。

3. 改良技術の現状

建設工事から搬出される土は、他の工事に流用されたり、埋立地や産業廃棄物の処理場に処分されるが、搬出土の品質改善、ハンドリング改善、公害防止等のために、脱水材や固化材により改良されることがある。改良目的としては、含水比の低下、強度増加、粒度改善等がある。

また、熱を利用した処理も実用化されている。下水汚泥における熱処理としては、下水汚泥中に含まれている水分および有機分を取り除き焼却灰にするための焼却処分と、焼却灰を更に高熱で熔融、スラグ化することにより骨材化する方法等がある。また、石炭灰の焼結による軽量骨材化等も実用化されている。

3.1 固化材処理による改良技術の現況

3.1.1 固化材の種類

土木工事における土質改良は、プレス機等による機械的な含水比の低下方法と、固化材を利用した含水比の低下や強度増加の改良とがある。固化材の種類としては、生石灰、消石灰、石灰系固化材、各種セメント及びセメント系固化材等が多く用いられている。他に、石炭灰、下水汚泥焼却灰、等も用いられているが実績は少ない。

主な固化材の特徴は次のとおりである。

(1) 石灰

生石灰による土質改良は、生石灰と水とが反応し消石灰になる時の水和反応を利用している。この水和反応で生石灰重量の32%の水を吸収することができる。この時、体積は2倍に、比重は3.34から2.24になり、284kcal/kg-CaOの発熱を行なう。また、ポゾラン反応により長期的に強度は増加する。

土質改良効果としては、吸水による含水比の低下が主で、生石灰の体積膨張による土の圧密や発熱による水分の蒸発も考えられるが、これらの効果は明確ではなく、また、ポゾラン反応による強度発現も時間を要するので、通常、これらは短期的な改良効果としては期待しない。

消石灰による改良は、長期的な強度発現を主な目的とする場合に使用されることが多い。

(2) セメント

セメントが水と反応することは生石灰と同様であるが、石灰に比べ強度の発現が早いのが特徴であり、改良効果も吸水によるものよりも、強度発現による効果を主に考える。

(3) セメント系固化材、石灰系固化材

土の種類によっては塩分や有機分が含まれているため、石灰やセメントでは改良効果の発現しにくいものがある。石灰系及びセメント系固化材は、石灰やセメントの成分の混合比を変えたり、石膏等を添加することにより、石灰やセメントでは改良しにくい土に対しても改良効果が現われるようにしたものである。また、土の種類に応じて「ヘドロ」用、「有機質土用」等、用途別に製作されている。

3.1.2 混合方法

固化材と掘削土との混合方法は、図-3.1のように分類できる。

(1) 原位置処理方式

泥土の性質	施工機械	攪拌機械	改良材
軟弱	バックホウ クラムシェル	バケット	粉体 スラリー
かなり軟弱	泥上車	トレンチャー式 ローター式 回転攪拌機	粉体 スラリー
極めて軟弱	処理船	回転攪拌機	スラリー

(2) プラント処理方式

泥土の性質	施工機械	攪拌機械	改良材
軟弱	バッチ式 連続式プラント	ドラムミキサー バグミルミキサー (インパクトミキサー) (ハンマーミル)	粉体
かなり軟弱			
極めて軟弱			

図-3.1 混合方法

現位置処理方式は、バックホー、クラムシェル等の一般重機や、混合専用重機により受け入れ地において固化材と泥土を混合する方式である。混合方式を図-3.2に示す。

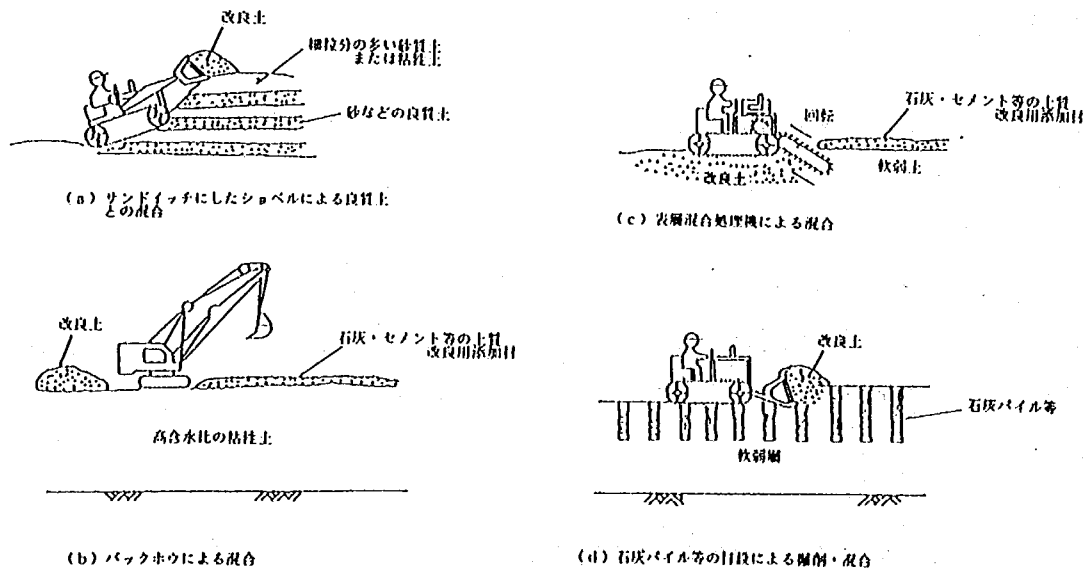


図-3.2 土質改良方法

プラント方式は、混合専用プラントを設置し、ミキサーにより汚泥と固化材を混合する方式である。プラントは、重機を用いる現位置方式に比べると、混合専用ミキサーを用いることにより泥土と固化材の投入量が計測でき、泥土の改良率や混合程度のばらつきも少ない。プラントの処理方式は、連続式かバッチ式か、あるいはミキサーが縦型か横型かにより図-3.3のように分類される。また、プラントの処理方式は、定置式だけではなく車載状態で使用する移動式も実用化されている。

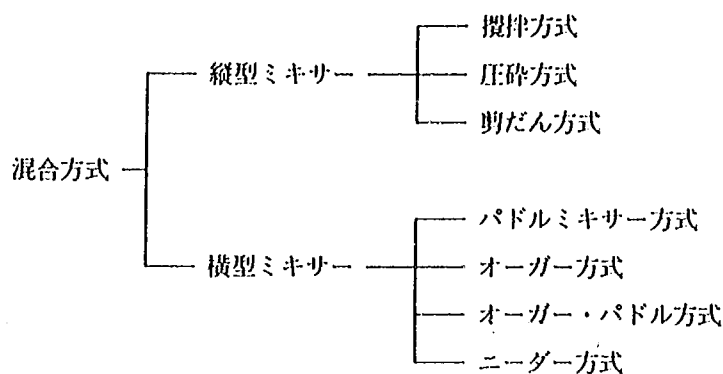


図-3.3 ミキサーの型式

3.2 熱処理による溶融技術の現状

3.2.1 溶融技術の現状

熱処理による汚泥処理は、下水汚泥の処理方法として行なわれている技術であり、一般の建設工事から発生する建設汚泥の処理には用いられていない。下水汚泥処理で実用化されている方法は、焼却と溶融である。下水汚泥は有機分の含有率が高く、乾燥状態の下水汚泥は有機分を燃焼させるだけで体積は1/2、重量は1/3程度になる。初期含水比が75%の下水汚泥では焼却処理により体積は1/4、重量は1/12になり、焼却処分による減溶化、軽量化のメリットには大きいものがある。

焼却処理により更に高温状態にすると、1,300~1,500℃あたりで土は溶融する。溶融した土を冷却して得られるのがスラグと呼ばれる碎石状のものである。冷却の方法は水冷と空冷が中心であるが、水冷スラグは砂状に、徐冷スラグは碎石状になる。下水汚泥溶融スラグの冷却方法及びそれぞれのスラグの特徴を表-3.1に示す。

このようにしてできた溶融スラグや焼却灰の有効利用が種々考えられているが、その場合、表-3.2に示すような品質・規格を満足する事が必要である。下水汚泥スラグでは表-3.3に示すような利用用途での実用化や研究開発が進められている。また、表-3.4に現在実用化されている二次製品を焼却灰を含めて示す。

表-3.1 下水汚泥融液の冷却方法等とスラグの特徴

冷却及び加熱方法 (スラグ名称)		冷却及び加熱等の内容	スラグの特徴
急 冷 (急冷スラグ)	直接水冷 (水砕スラグ)	水に接触あるいは浸した冷却	ガラス質で強度は小さく脆い。 細砂状あるいは砂状
	間接急冷 (水冷スラグ)	水等の冷却媒体と熱交換器を 介し間接的に冷却	ガラス質であるが強度は水砕 スラグより大きい。塊状
徐 冷 (徐冷スラグ)	直接空冷 (空冷スラグ)	大気中に放置した冷却	主にガラス質で強度は一般に 急冷スラグより大きい。塊状、 砕石状
	保 冷 (保冷スラグ)	温度制御を行う、あるいは放 熱量を抑えてゆっくり冷却。	結晶化が進み、強度は大きい。 岩石状、砕石(クラッシャー 品)
そ の 他	特殊冷却 (特殊スラグ)	風砕、発泡等による瞬時の冷 却。	ビーズ状、繊維状にすること も可能。ロックウールが代表
再 加 熱 (再結晶化スラグ)		急冷、あるいは直接空冷スラ グを 900～1,000℃の温度で開 気下に一定時間放置。	結晶化が進み、強度は大きい。 細砂状、砂状、塊状、砕石状

表-3.2 有効利用の目安となる品質、規格等代表的な基準

利用用途	汚泥形態	類似製品	品質、規格を定める基準
盛土・埋戻し土	無機系焼却灰	埋戻し用砂	各地方公共団体、各種機関の一部で定める以外 特になし。(参考:東京都下水道局土木工事標 準仕様書等)
路 盤 材	無機系焼却灰 熔融スラグ	クラッシャーラン 粒度調整砕石	JIS A 5001 道路用砕石 JIS A 5015 道路用スラグ アスファルト舗装要項
コンクリート骨材	熔融スラグ	砕石・砕砂	JIS A 5004 コンクリート用砕砂 JIS A 5005 コンクリート用砕石 JIS A 5011 コンクリート用高炉スラグ粗骨材 JIS A 5012 コンクリート用高炉スラグ粗骨材
軽 量 骨 材	有機系焼却灰	人工軽量骨材	JIS A 5002 構造用軽質コンクリート骨材
ヒューム管骨材	無機系焼却灰 熔融スラグ	ヒューム管	JIS A 5303 遠心力鉄筋コンクリート管
厚陶管材料	有機系焼却灰	厚陶管	JIS R 1201 陶管
タイル材料	有機系焼却灰	外装用小口タイル 床用タイル	JIS A 5209 陶磁器質タイル
透水性ブロック	有機系焼却灰	普通れんが	JIS R 1250 普通れんが
歩道用ブロック	熔融スラグ	歩道平板	JIS A 5304 歩道用コンクリート平板
インターロッキ ングブロック	熔融スラグ	インターロッキ ングブロック	特に基準なし。
透水性平板	熔融スラグ	透水性カラー平板	JIS A 5304 歩道用コンクリート平板
テラゾブロック	熔融スラグ	テラゾブロック テラゾタイル	JIS A 5411 テラゾブロック JIS A 5415 テラゾタイル
ロックウール	熔融スラグ	ロックウール	JIS A 9504 ロックウール保温材

表-3.3 スラグの利用用途

利用用途 汚泥形態	地盤・盛土 路盤・舗装					その他各種二次製品							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	盛土	埋戻	路床	下層路盤	上層路盤	コンクリート フライシャー	ヒューム 管	インター ロックキ	透水性 平板	テラゾー タイル	建築用 保温材	園芸用 資材	透水性 インター ロック
水冷スラグ	□	□	□	△	△	△	-	●	●	□	-	-	-
徐冷スラグ	□	□	□	○	△	△	-	□	□	●	-	-	○
結晶骨材	□	□	□	●	△	△	●	□	□	□	-	-	-
結晶成形材	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
スラグウール	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	-

凡例 ●：既存資材と同等に使用できる。施工規程が制定あるいは実用化。

○：既存資材と同等に使用できる。試験段階。

△：条件付きで使用できる。試験段階。

□：実績はないが、使用可能。

-：原則として、単体では使用できない。

表-3.4 下水汚泥無機分を利用した二次製品の実用化例

商 品 名	製 作 社	汚泥形態	製 作 方 法	使用可能な場所
1.汚泥タイル (ジスロンタイル)	積水樹脂(株)	有機系 焼却灰 無機系 焼却灰	磁気質タイルの通常の原料に焼却灰を5%程度混入して焼成する。	内、外壁 内、外部床
2.人工軽微細粒材	東京都下水道サービス(株)	有機系 焼却灰	焼却灰をバインダーとしてアルコール廃液を用いて増粒し、その後多段噴流炉で焼成する。	コンクリート軽骨材敷砂、造園材
3.透水性ブロック (ナチュラルワーク)	不二見タイル(株)	有機系 焼却灰	せり器質タイルの原料に焼却灰を33%程度混入のうえ焼成する。	歩道、玄関、外構(駐車場、広場)
4.インターロッキング ブロック	大阪ガスエンジニアリング(株)	熔融水冷スラグ	熔融水冷スラグを骨材としてセメントに混入して成型のうえ表面仕上げを行う。(ショットブラスト加工)	歩道、外構(駐車場、広場)
5.透水平板	大阪ガスエンジニアリング(株)	熔融水冷スラグ	熔融水冷スラグを細骨材として透水モルタルを製造し、通常のモルタルで製作した枠内に流し込み透水平板を製作する。	歩道、外構(広場等)
6.フラワーポット (新みかげ調NP)	(株)東 伸	熔融汚泥	東京都製作の熔融汚泥をコンクリートに15%混入、成型のうえ、表面たたき仕上げ。	外構、玄関
7.下水道用陶管	名古屋市長 全国陶管工業組合 愛知県内加盟業者	有機系 焼却灰	陶管の原料に有機系焼却灰を混入、焼成する。混入率は30%以上までテストしたが、初期には3%程度を混入する予定。	

前述した熔融処理による減容化、軽量化の程度は、初期含水比300%の下水汚泥では体積で1/20、重量で1/12であり、焼却灰の状態からでは体積で1/5、重量で5/6程度である。建設工事から発生する泥土は、一般に有機分の含有率は低いので、有機分の燃焼による減容化、軽量化は望めないが、下水汚泥における焼却灰の状況からの減容化、軽量化は見込めるので、熔融処理のメリットは非常に大きいと考えられる。図-3.4に下水汚泥の熱処理による体積変化、重量変化の1例を示す。

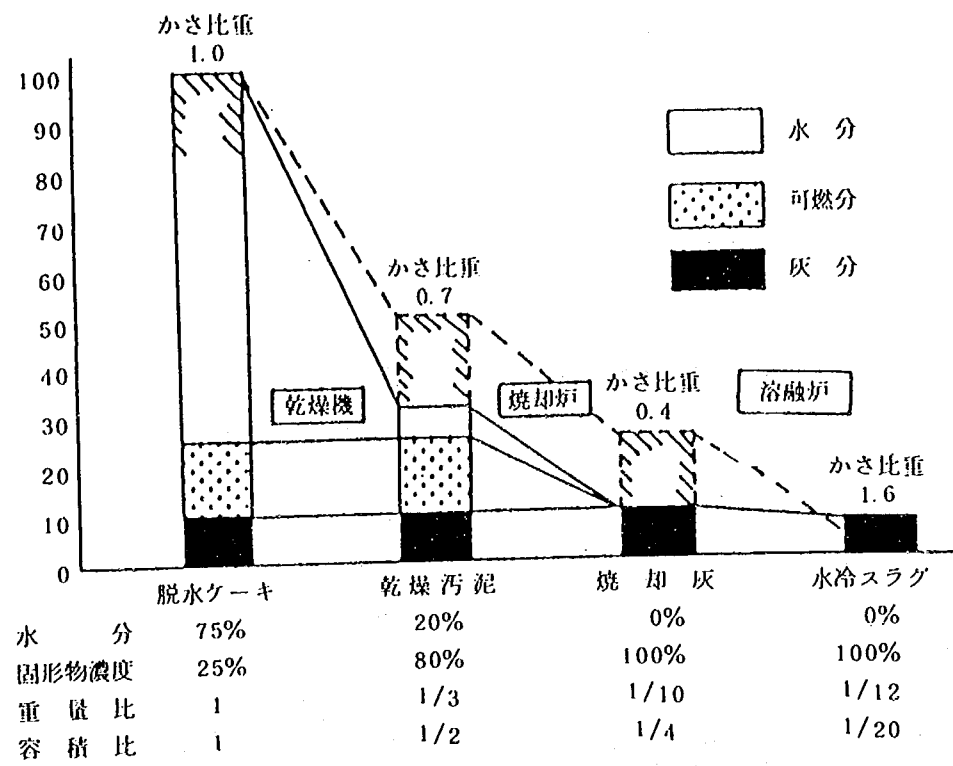


図-3.4 汚泥処理における減容化の一例

熔融炉の種類及びそれぞれの熔融炉の特徴を図-3.5、表-3.5に示す。また、実用段階の炉の形式を表-3.6に示す。

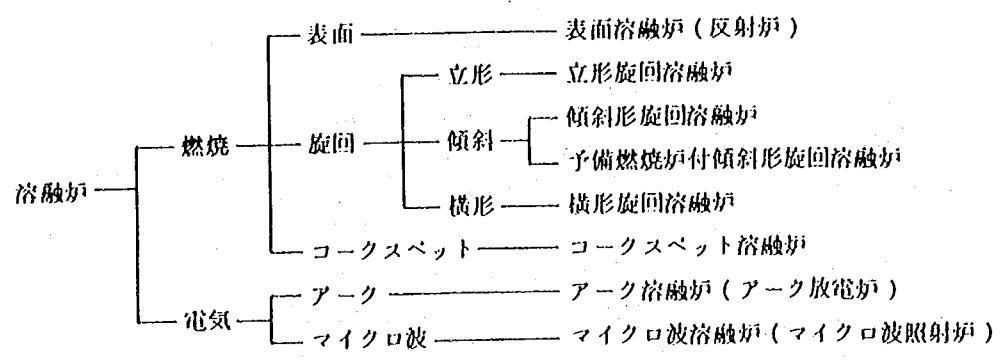


図-3.5 下水汚泥熔融炉の種類

表-3.5 汚泥溶融炉の種類

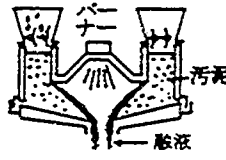
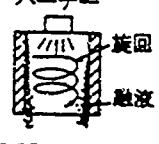
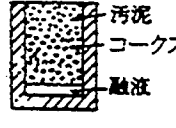
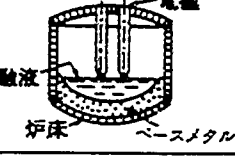
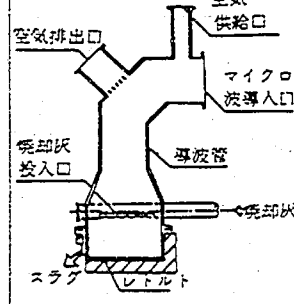
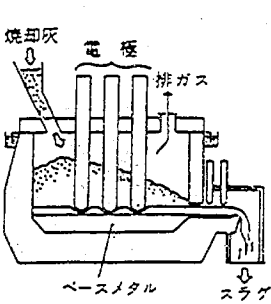
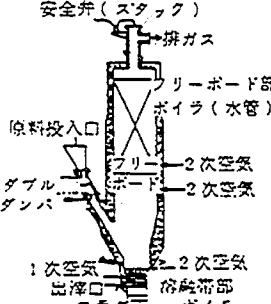
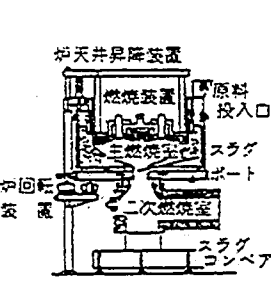
	炉の形式	(エネルギーの種類) 加熱方法	溶融対象物	溶 融 炉 の 概 説	概 略 図
1	表面溶融炉 (反射炉)	(燃 料) ・ガ ス ・重 油 ・微粉炭など	乾燥汚泥 焼 却 灰	乾燥汚泥を炉芯に対しドーナツ型に定置し、着火すると炉内上部の壁が加熱されて1種の反射炉を形成し、溶融を維持する。定常状態に整うまではバーナーで加熱し、その後は炉頂高を変化させ汚泥の供給量を調整し温度コントロールする。 炉内に焼却灰を定置しバーナーで炉内を加熱すると、炉内上部が加熱され反射炉を形成し、溶融を維持する。溶融を維持するための熱量は全て外部からの燃料の燃焼熱にたよる。	
2	旋回溶融炉 (旋回流炉)	同 上	乾燥汚泥 焼 却 灰	円筒状の炉の外周にそった旋回流を汚泥と空気で形成させ、炉内における滞留時間を長くとり燃焼させ、炉壁を加熱するとともに、溶融を維持する。 バーナーで炉内および炉壁を加熱するとともに円筒状の炉の外周にそった旋回流を焼却灰と空気で形成させ、溶融を維持する。溶融を維持するための熱量は、全て外部からの燃焼熱にたよる。	
3	コークスベット 溶融炉(コークスベット炉)	(燃 料) ・コークス	乾燥汚泥 焼 却 灰	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を維持する。 焼却灰とコークスを交互に投入し、通気性の確保とエネルギーの供給を行い溶融を維持する。	
4	アーク溶融炉(アーク放電炉)	(電 気) ・溶融物への アーク熱 ・アーク熱と 反射熱	乾燥汚泥 焼 却 灰	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すると、アーク放電が起こり、その時に発生する熱で溶融を維持する。 同 上	
5	マイクロ波 溶融炉(マイクロ波照射炉)	(電 気) ・分子の振動 回転による 摩擦熱	乾燥汚泥 焼 却 灰	理論的には可能である。 誘電体である焼却灰にマイクロ波(電磁波)を照射すると、焼却灰は電氣的振動を起こし、自己発熱し溶融する。温度条件はマイクロ波の出力で調整する。	

表-3.6(a) 各種汚泥熔融炉の概要

熔融炉の形式	マイクロ液熔融炉	アーク熔融炉	コークスベット熔融炉	表面熔融炉
熔融炉の構造図				
要 要	レトリット上部からマイクロ液（電 磁液）が導かれる。焼却灰は、 定量レトリット内に切出され、熔融 状態のスラグはレトリット下部の湯 口から流出する。	炉床部にベースメタルを形成し、 炉蓋から配した3本の電極（カ ソード）に高電流の通電すること によって、電極先端とベースメタル 間に交流アークを発生させる。融 融状態のスラグは出滓口から連続 的に流出する。	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 ギーの供給を行い熔融を維持する。 乾燥汚泥の含水率は35%～45% 程度。 （高すぎるとコークスベット上部 の通気抵抗が増し、低すぎるとダ ストの飛散が増加するため成形が 必要）	乾燥汚泥を炉芯に対してドーナツ 型に定着し、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、熔融を行う。 乾燥汚泥の含水率は20%程度。 （10%以下では、汚泥が粉塵状態 になる可能性があり、この場合に は成形が必要）
目 的 の 可 否	不 能	不 能	不能（汚泥性状にかかわらずベ ット層形成のためコークスが必要）	可能（低溶融点で高カロリーの汚 泥の場合においては可能）
スラグ 発生量	成分調整有 成分調整無	成分調整有 成分調整無	成分調整有 成分調整無	成分調整有 成分調整無
スラグ 成分	成分調整有 成分調整無	成分調整有 成分調整無	成分調整有 成分調整無	成分調整有 成分調整無
投 入 物 質 の 選 択	焼却灰	乾燥汚泥、焼却灰とも可能、焼却 灰の方がより適正	乾燥汚泥、焼却灰とも可能	乾燥汚泥、焼却灰とも可能
開 発 状 況	実証段階	実用段階	実用段階	実用段階

注-1) 開発状況については、昭和63年3月末日現在で、自治体の施設として稼働あるいは建設されているものを実用段階とし、それ以外のものは要請があれば
既建設可能なものとして実証段階とした。

表-3.6(b) 各種汚泥熔融炉の概要

溶 融 炉	溶 融 炉 の 概 要				
	形 式	立 形	傾 斜 形	予 備 燃 焼 付	機 形
溶融炉の概略図					
概要(乾燥汚泥)	垂直円筒形状をした1次燃焼室に粉末汚泥と空気を螺旋方向に旋回噴入させる。有機分はガス化して一部燃焼すると同時に灰分は炉内壁に附着しゆっくり流下する。ガスと融液は2次燃焼室に導かれ、未燃分はここで燃焼する。融液は炉底部をゆっくりとした速度で流下し炉外へ排出される。排ガスは側壁より排出される。 乾燥汚泥の含水率は10%以下。	基本的には同左	乾燥後微粉砕された乾燥汚泥は、傾斜円筒形状をした炉内へ螺旋方向に旋回噴入され、自己保有熱量もしくは少量の補助燃料によって急速に燃焼する。こうした燃焼状態のもとで、炉内は1400~1500℃の高温雰囲気中に保たれ、汚泥中灰分(無機分)は炉内壁へ附着しスラグ流となって炉外へ排出される。乾燥汚泥の含水率は10%以下が最通。	ナイロン型予備燃焼部に乾燥汚泥と空気を螺旋方向に旋回噴入する。汚泥は加熱および一部燃焼後旋回燃焼部に供給され、そこで傾斜円筒の内部にそい急速に燃焼する。こうした燃焼状態のもと、炉内は高い温度雰囲気中に保たれ灰分は炉内壁へ附着しスラグ流となって炉外へ排出される。乾燥汚泥の含水率は20%以下が最通。	乾燥汚泥と空気を円筒炉内の螺旋方向に高速で供給し、内部で高温雰囲気中に保たれ、灰分はパッフルでせき止められ、溶融状態で灰き出し口から連続的に排出される。 乾燥汚泥の含水率は10%以下が最通。
自然の可否	可能(低沸点で高カロリーの汚泥の場合に限り可能)	同 左	同 左	同 左	同 左
スラグ成分調整有	成分調整灰分+汚泥灰分	同 左	同 左	同 左	同 左
発生量	無 汚泥灰分	同 左	同 左	同 左	同 左
被溶融物の選択	乾燥汚泥、焼田灰とも可能	同 左	同 左	同 左	同 左
開発状況	実証段階	実証段階	実証段階	実証段階	実証段階

注-1) 開発状況については、昭和63年3月末日現在で、自治体の施設として稼働あるいは建設されているものを実用段階とし、それ以外のものは発注があれば既建設可能なものとして実証段階とした。

3.2.2 溶融処理技術適用上の問題点

3.2.1でのべた溶融プラントは、下水汚泥処理プラントの例である。残土に適用する場合、溶融プラントの特徴や、泥土と下水汚泥の相違点を把握し、残土に溶融プラントを適用する場合の問題点を整理しておく必要がある。以下に、溶融プラントの特徴、及び泥土と下水汚泥の相違点を述べる。

1) 溶融温度

溶融プラントによる処理では、溶融に必要な炉内温度の高低により燃料使用量が大きく異なり、溶融物の溶融温度を明確に押さえておく必要がある。

一般に、個体が液体になる溶融温度は、個体が結晶体であれば融点と呼ばれる物質に固有な定数となるが、非結晶体の溶融温度は一定ではない。物質の溶融温度は、結晶構造の違いや酸化物等の化合物になることでも異なる。また、これらの化合物が混在している場合は、その比によって溶融温度は異なるが、このような混合物の溶融温度は混合前の単体の溶融温度よりも低くなることが知られている。図-3.6は窯業分野で用いられている $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ の3種の化合物の含有割合と溶融点の関係を示したものである。図-3.7は下水汚泥の $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ の成分による溶融点の分布を示した図である。また、溶融特性を示す指標として「塩基度」が用いられている。塩基度は簡易的に石灰(CaO)とケイ酸(SiO_2)の重量比(CaO/SiO_2)として定義されており、塩基度が0.5~1.0付近の時に溶融温度は最も低くなるとされている。図-3.8に下水汚泥の塩基度-溶融点の1例を示す。掘削残土の場合、石灰(CaO)がほとんど含まれていないため、塩基度(CaO/SiO_2)の値が0低く、一般に下水汚泥に比べて溶融点が高く、下水汚泥に比べて高い温度で溶融するか、塩基度調整のための石灰分を投入する必要がある。塩基度調整材を投入する場合も、 SiO_2 の含有率が下水汚泥より高いので、同一の塩基度に調整するための調整材の量も多くなる。

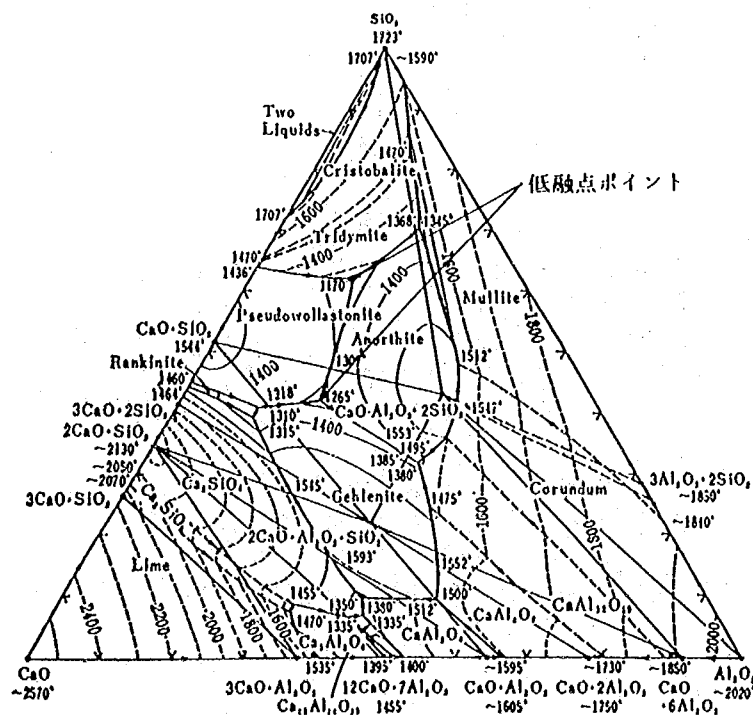


図-3.6 窯業の $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ 成分からなる融点の分布

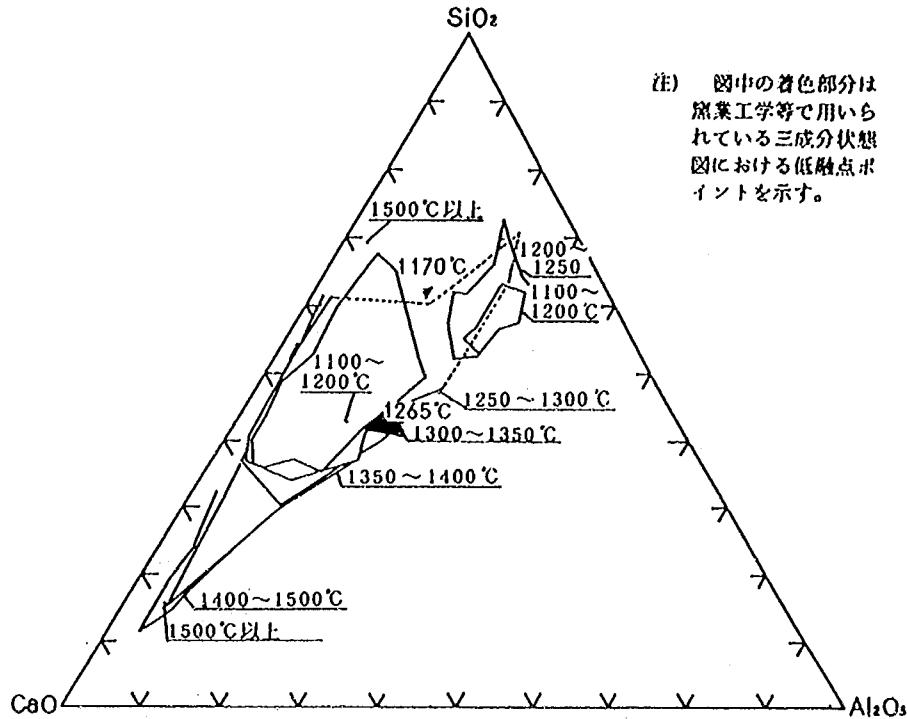


図-3.7 下水汚泥の SiO_2 - Al_2O_3 - CaO 成分による溶流点の分布

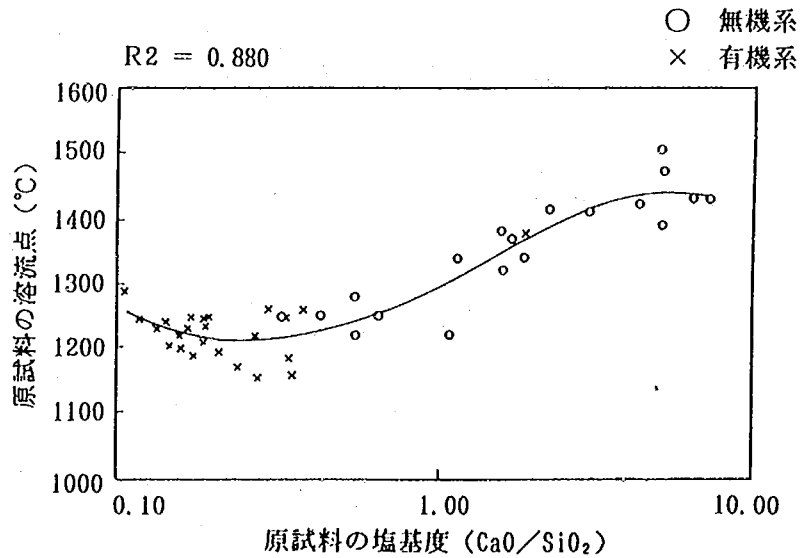


図-3.8 下水汚泥の塩基度-溶流点の例

2) 粘性

熔融物の粘性は熔融炉からの出滓効率に影響するので、粘性の低い熔融物が条件的に有利となる。粘性は SiO_2 の量に左右され、 SiO_2 の量が多いほど粘性が高く、 SiO_2 の量が少ないほど粘性が低い熔融物になる。下水汚泥では SiO_2 の量が40%程度であるのに対し、掘削残土は40~60%程度も含まれており、下水汚泥熔融物に比較して掘削残土熔融物の流動性は一般悪くなる。このため、下水汚泥用に開発された熔融炉では出滓しにくくなる恐れがある。

3) 自燃性

下水汚泥は、乾燥重量の約6割が有機分であるため自燃性を有している。このため、溶融に必要な熱の多くは自燃により得られ、溶融に必要な外部エネルギーは非常に少ないか、場合によっては不要であるが、掘削残土は有機分がほとんど含まれていないため自燃性がなく、溶融に必要なエネルギーは全て外部から与える必要がある。

4) 炉稼働率

溶融炉は、

- ・溶融温度に達するまでに半日程度を要する。
- ・点火・消化の回数が多いと、熱の上昇、下降時の温度差により炉体に発生する応力のため炉の寿命に影響する。

このため、経済的な溶融を行うためには溶融炉の長時間運転を行う必要がある。下水汚泥の場合は、季節的な変動は小さくあるものの一年を通じてほぼ一定した汚泥が発生するため、溶融炉の運転面からは非常に条件が良いが、一方の掘削残土は、公共事業費が単年度予算であるため公共事業の発注時期に偏りがあり、更に、工事の工程上、残土が発生する時期と発生しない時期がある。また、近年では、労働者の福利厚生や現場周辺の環境等の条件のため平日や週末・休日は施工をしない現場が多くなってきており、一週間の短いタイムスパンの中においても、残土の発生量が大きく変動する。これらのことは、溶融炉の「平均した処理量が連続することが経済的になる」ことにはならず、掘削残土に溶融を適用する場合、工事発注期の平準化や残土のストックヤード利用による処理量の平準化などの対策が必要となる。

4. 掘削残土の基本特性に関する調査

4.1 目的及び概要

現在行われているシールドトンネル工事現場から発生する掘削残土（泥土）の基本特性を把握するために、東京都内のシールドトンネル工事現場から発生した掘削残土を用い、土質性状を把握するための土質試験と温度特性を把握するための各種熱的試験を行った。

4.2 調査対象土

調査対象土は東京都内の8ヶ所のシールドトンネル工事現場からの発生した有楽町層の泥土と、東京湾内からボーリングで採取した2種類の有楽町層である。東京都内で発生した泥土の内、シルト質砂である対象土-2と砂質土の対象土-3以外は、全て現状では産業廃棄物の対象となる性状である。

4.3 試験項目及び試験方法

実施した試験は土の基本性状に関する試験と温度特性に関する試験に分けて実施した。

4.3.1 土の基本性状に関する試験

土の基本性状試験として、掘削残土の含水比・粒度・密度等を測定し灰化過程における体積・重量の変化について試験を行った。

4.3.2 土の温度特性に関する試験

温度特性試験として、高温域における掘削残土の特性を検討するための各種試験を対象土-1を中心に行った。

表-4.1に試験項目を示す。以下に温度特性に関する試験の概要を述べる。

表-4.1 試験項目

	試験項目	対象土の種類										JIS規格	備考
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
土の基本 性状 に関する 試験	含水量試験	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-	JIS A 1203	
	収縮定数試験	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-	JIS A 1209	
	比重試験	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-	JIS A 1202	
	粒度試験	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-	JIS A 1204	
	強熱減量試験	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-	JSF T-8-68	
温度 特性 に関する 試験	熔融による体積変化・ 重量変化率試験	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-		CaOによる 塩基度調整
	成分分析試験	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	JIS M 8812 8815	
	熔融温度試験	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	JIS M 8801	CaOによる 塩基度調整
	粘度測定試験	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-		CaCO ₃ による 塩基度調整
	溶解度	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-		Ca(OH) ₂ による 塩基度調整
	腐金属溶出試験	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

1) 熔融による体積変化率・重量変化率試験

土を加熱するとまず自由水が蒸発し、次に結晶水の蒸発や有機分の燃焼が生じる。建設工事から発生する土は一般には有機分が数%しか含まれていないため、有機分の燃焼による体積減少は微量である。また、結晶水の蒸発による体積減少も微量である。更に温度を上げると無機分が熔融・液体化し、気体の体積が除去されるため、体積が急激に減少することになる。このため体積の減容化の観点から見ると熔融処理は、泥土中の水分や有機分を除去する灰化処理に比べ、より効果的な処理方法と考えることができる。

ここでは熔融処理による減容化の傾向を把握するため、熔融温度特性試験により求められた溶流点 τ 以上の温度で30分間炉内温度を保持し試料を熔融し、その後、降温温度勾配 $4^{\circ}\text{C}/\text{分}$ で 900°C まで降温し熔融前後の体積、及び重量の変化を求めた。試験に使用した実験炉を写真-4.1に示す。

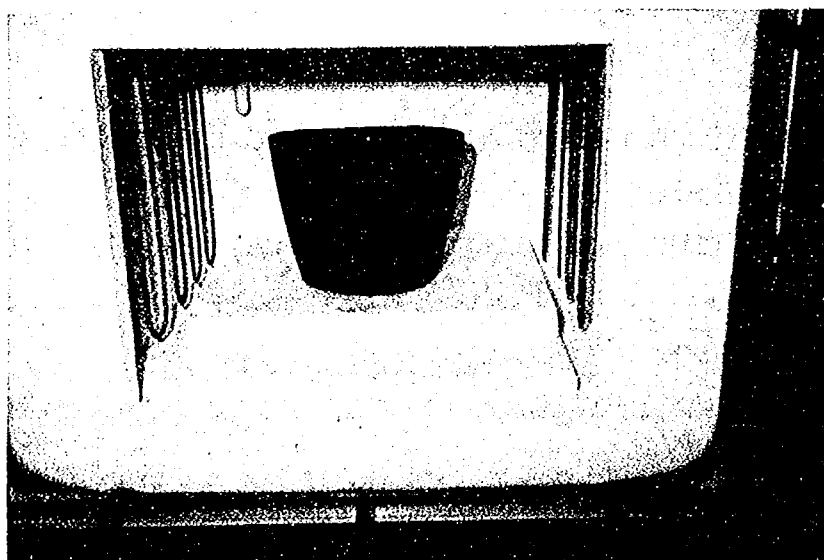


写真-4.1 実験炉（内部）

2) 成分分析試験

対象土-1、8、9、10を用い、8成分 (SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , P_2O_5 , CaO , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O) について分析試験を行った。対象土-2~7については主要構成成分である4成分 (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3) について分析試験を行った。

3) 熔融温度特性試験

熔融処理では熔融対象物の熔融温度特性（軟化点、融点、溶流点）が重要になる。通常その熔融温度特性は対象となる物質の構成成分の比により変動する。前述したように「塩基性塩と酸性塩」の比（塩基性塩／酸性塩）を塩基度と言い、塩基度 (CaO/SiO_2) により温度特性が変化し、塩基度が0.5~1.0付近で熔融温度が低くなることが知られている。ここでは対象土に対してケイ酸 (SiO_2) あるいは生石灰 (CaO) を添加することにより塩基度 (CaO/SiO_2) を変化させながら熔融温度特性を測定し、軟化点、融点、溶流点（以下、

「軟化点_T」「融点_T」「溶流点_T」と言う。)の変化を調べた。なお、溶融温度特性試験方法については巻末の付録を参照されたい。

塩基度の調整範囲は対象土-1、9、10では塩基度未調整の試料を含め7条件(未調整、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2)、対象土-2～7では塩基度未調整の試料を含め6条件(未調整、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0)とした。

4) 粘性試験

溶融処理する場合、溶融物の成分・溶融温度特性とともに炉からの出さい状況に影響する粘性を把握することが炉形式によっては重要になることがある。そのため、対象土-1を用い、溶融物の粘性を測定した。

粘性の試験方法には、直接溶融物の粘性を測定する方法と、溶融物の流れ方から間接的に粘性を測定する方法があり、本研究においても両測定法により試験を実施した。両試験法は次のとおりである。

(1) 粘度測定試験

粘度測定装置の概略図を図-4.1に示す。

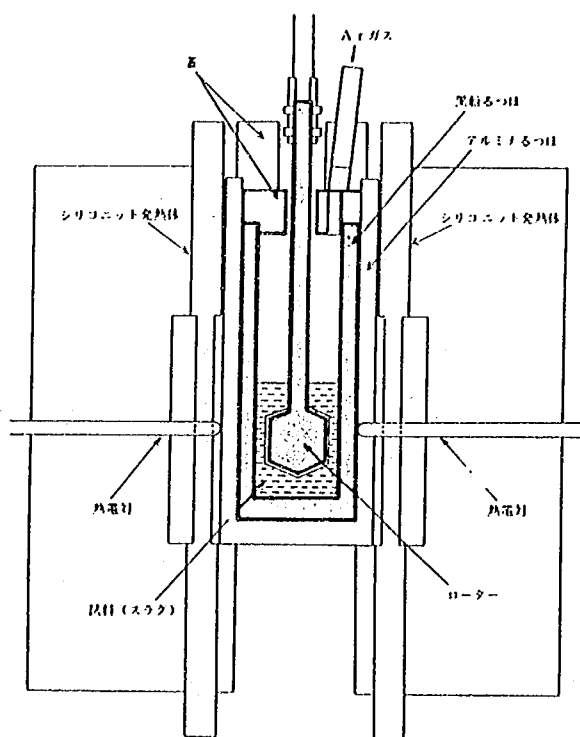


図-4.1 粘度測定装置概略図

粘度測定試験は対象土を不活性雰囲気内(アルゴンガス)で加熱溶融し、溶融物内に挿入したローターの回転トルクから粘度を直接的に測定する試験方法である。試験条件は、温度は5条件(1,300℃、1,350℃、1,400℃、1,450℃、1,500℃)、塩基度(CaO/SiO₂)は2条件(0.6、1.0)で、粘度(poise)で実施した。

(2) 溶流度試験

この試験は、図-4.2に示すように燃焼ボート（20×12×150mm）に試料7gを長さ l_0 だけ充填し、所定の温度に15分間保持した時の試料の流下長さを測定し、式（4.1）に示される溶流度（M）を求めることにより試料の粘性を把握するものである。

$$\text{溶流度 (M)} = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100 \quad (\%) \quad \text{式 (4.1)}$$

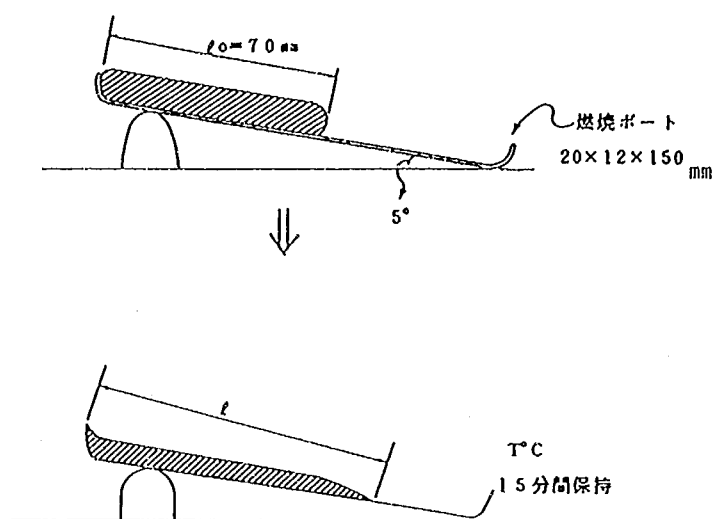


図-4.2 溶流度試験概略図

溶流度の評価として、 $M=30\%$ の時の温度を融点（以下「融点 M 」と記す。） $M=60\%$ の時の温度を溶流点（以下「溶流点 M 」と記す。）とする基準がある。溶流度試験による融点 M ・溶流点 M は、JIS規格で定められている溶融温度特性試験による融点 T ・溶流点 T に比べ高い値を示す傾向にあるが、溶流度試験は溶融温度特性試験に比べ比較的簡便な試験方法であるため、溶流度に付随して用いられることがある。

粘性が大きな影響を与える溶融形式（表面溶融炉、コークスベット炉等）においてこの基準により評価すると、 $M=30\%$ （融点 M ）以上では溶融処理が可能であり $M=60\%$ （溶流点 M ）以上であれば高い処理能力が期待できるといわれている。

今回実施した試験条件を表-4.2に示す。また、溶流度の測定時に目視による温度特性変化（変化無し・焼成・膨潤・溶融・溶流）も併せて判定した。

表-4.2 試験条件

項 目	試験条件
対象土	対象土-1
設定温度	1150～1500℃（50℃きざみ）
設定塩基度	無処理, 0.1～1.0（0.1きざみ）
塩基度調整剤	Ca(OH)_2

5) 重金属溶出判定試験

通常、建設事業から発生する建設汚泥に重金属等の有害物質が含有されていることは希であるが、工場跡地から発生する建設残土では、場合によっては重金属等を含んでいることがある。このような重金属を含む建設汚泥を処理した場合を想定し、処理後のスラグの重金属溶出試験を実施した。

下水汚泥には下水処理施設の立地条件により重金属が含まれている場合がある。しかし、そのような汚泥も熔融処理を行いスラグ化すると、重金属がスラグ内に封じ込められ、重金属は溶出しなくなる。

ここでは、汚染された現場から発生する掘削残土に対してもスラグ化することにより下水汚泥の場合と同様に重金属が溶出しないことを確認した。試験は、クロムを添加した土を熔融、スラグ化し、スラグを環境庁告示13号「産業廃棄物に含まれる有害物質の検定方法」1-4. 埋立処分（海面埋立処分を除く）に準拠し、検液をJIS K 0102「工場排水試験方法」65.1.2原子吸光法で定める方法で全クロムの定量分析を行った。判定基準には「有害な産業廃棄物に係る判定基準（昭和48.2.17 総理府令第5号）」で定める埋め立て処分の鉍滓の項を適用した（六価クロム化合物0.5mg/l以下）。

クロム含有スラグの作製方法は次のとおりである。

試料には対象土-1にクロム（粉末60mesh 99.99%）を添加した土を用い、土をるつぽに入れ、電気炉にて1400℃まで昇温して土を熔融させる。30分間1400℃の温度を保持した後、温度勾配5℃/分で900℃まで降温し、その後は自然冷却してクロム含有スラグを作製した。クロムの添加量は土の乾燥重量に対して1%、3%、5%である。また、比較用としてクロム無添加のスラグも作製した。

4.4 結果及び考察

4.4.1 土の基本性状に関する試験

対象土1～8の試験結果を表-4.3に示す。

表-4.3 土質試験結果

土の種類		1	2	3	4	5	6	7	8
粒 度 試 験	礫分(2mm以上) %	0	2	1	1	1	0	0	0
	砂分(0.074~2mm) %	10	71	90	9	5	22	18	4
	シルト分(0.005~0.074mm) %	62	18	4	56	58	41	53	69
	粘土分(0.005mm以下) %	28	9	5	34	36	37	29	27
	最大粒径 mm	0.84	9.52	4.76	9.52	4.76	2.00	0.84	0.42
	均等係数(Uc)	27.8	26.0	2.9	—	—	—	—	4.1
	曲率係数(Uc')	1.0	5.5	1.0	—	—	—	—	2.4
日本統一土質分類		F 細粒土	S 砂粒土	S 砂粒土	F 細粒土	F 細粒土	F 細粒土	F 細粒土	F 細粒土
比重		2.696	2.778	2.702	2.690	2.696	2.703	2.701	2.65
含水比		69.7	40.7	26.0	51.8	59.0	70.1	51.3	411.2
強熱減量		6.34	1.92	2.04	6.43	5.72	5.38	4.98	6.7
収縮定数試験 %		34.0	23.2	28.9	34.0	30.4	29.4	30.7	49.4

対象とした掘削残土は、2mm以上の礫分は2%以下であり、日本統一分類では砂粒土（S）または細粒土（F）である。また、強熱減量は7%以下で有機質分がほとんど含まれていないため、これらの土の焼却処理や熔融処理を行った場合の発熱量は少ない。これに対し、下水汚泥は有機分の含有率が高く焼却処理や熔融処理を行う場合、汚泥によっては自燃するため点火時以外は燃料を必要としない。この点が下水汚泥と建設汚泥との大きな相違点である。

4.4.2 熔融による体積変化率・重量変化率試験

対象土-1、2の減容化傾向を図-4.3～図-4.5に示す（対象土-3～7については付録3.参照）。

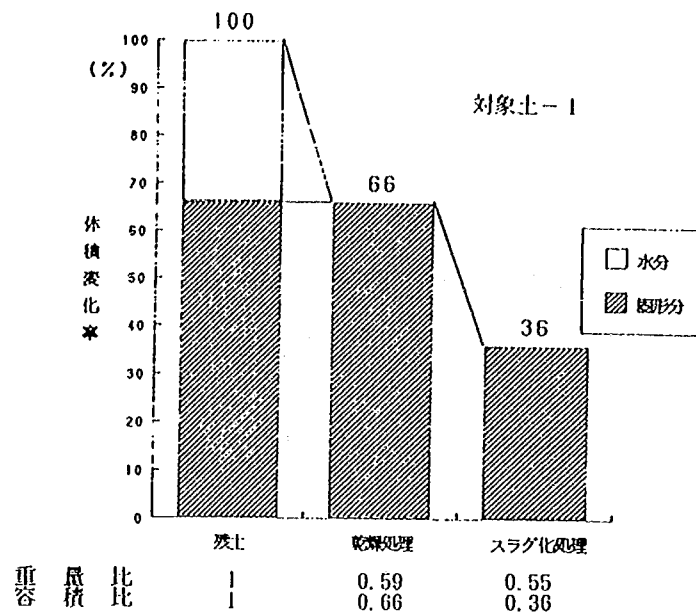


図-4.3 残土の減容化（含水比70%）

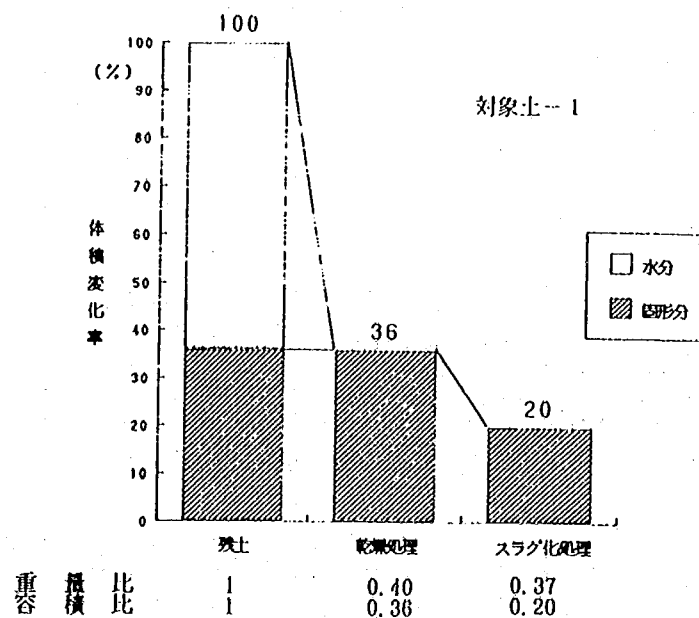


図-4.4 残土の減容化（含水比150%）

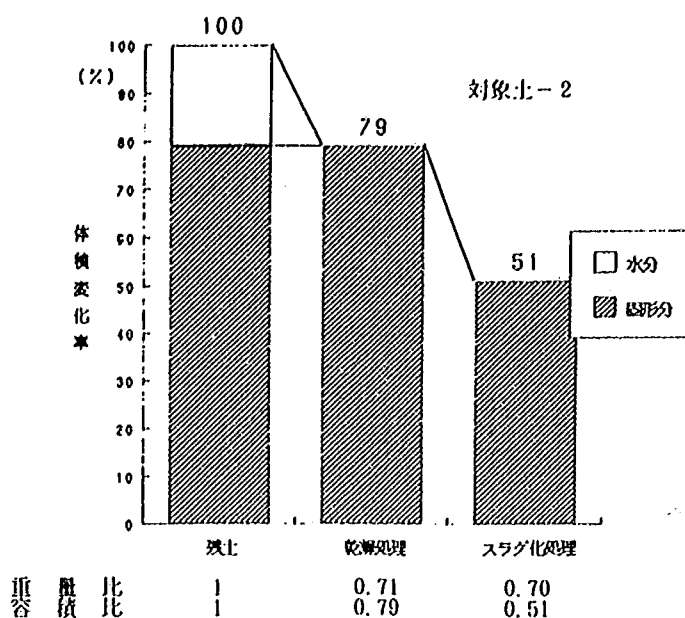


図-4.5 残土の減容化（含水比40%）

減容化の程度は対象とする残土の性状や最終的に生成されたスラグの性状等により大きく異なるため一概には言えないが、対象とした掘削残土については初期含水比を70%とした場合、もとの体積の0.4～0.6程度まで体積が減少した。対象土には有機分がほとんど含まれていないため下水汚泥に比べ減容化率は低い、半分程度には減容していることにより減容化のメリットは大きいと言える。

4.4.3 成分分析試験

対象土の成分分析結果を表-4.4に示す。

表-4.4 成分分析結果

試料 番号	成分分析結果 (Dry Base %)									塩基度
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	その他	
1	64.67	17.16	2.70	0.12	3.32	7.00	2.16	1.91	0.96	3.32/64.67=0.05
2	65.43	15.66	—	—	4.90	6.72	—	—	7.29	4.90/65.43=0.07
3	69.61	14.98	—	—	3.91	3.52	—	—	7.98	3.91/69.61=0.06
4	61.48	16.54	—	—	4.80	5.70	—	—	11.48	4.80/61.48=0.08
5	61.75	16.31	—	—	5.46	6.33	—	—	11.15	5.46/61.75=0.09
6	63.74	17.01	—	—	3.29	6.57	—	—	10.39	3.29/63.74=0.05
7	65.66	17.21	—	—	3.06	5.46	—	—	8.61	3.06/65.66=0.05
8	64.54	16.71	2.40	0.12	3.24	6.96	2.14	2.31	1.58	3.24/64.54=0.05
9	63.25	17.82	2.60	0.15	2.66	7.17	2.34	2.12	1.89	2.66/63.25=0.04
10	63.39	17.05	2.62	0.14	3.16	7.51	2.41	2.16	1.56	3.16/63.39=0.05

各試料土ともSiO₂の量が下水汚泥に比べ多いため、掘削残土は溶融状態の粘性が高いと推定される。

4.4.4 溶融温度特性試験

1) 塩基度の検討

前述したように、一般に溶融特性を表す指標として構成成分の比「塩基性塩／酸性塩」で決まる塩基度が用いられている。成分分析結果を用い、式(4.2)～式(4.8)に示す7種類の塩基度について検討を行った。なお、下水汚泥の溶融処理では簡便的に式(4.2)の塩基度を用いることが多い。

$$\text{塩基度①} : \text{CaO/SiO}_2 \quad \text{式(4.2)}$$

$$\text{塩基度②} : (\text{MgO}+\text{CaO}+\text{Fe}_2\text{O}_3)/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3) \quad \text{式(4.3)}$$

$$\text{塩基度③} : (\text{MgO}+\text{CaO}+\text{Al}_2\text{O}_3)/\text{SiO}_2 \quad \text{式(4.4)}$$

$$\text{塩基度④} : (\text{MgO}+\text{CaO}+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{K}_2\text{O})/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3) \quad \text{式(4.5)}$$

$$\text{塩基度⑤} : (\text{MgO}+\text{CaO}+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3) \quad \text{式(4.6)}$$

$$\text{塩基度⑥} : (\text{MgO}+\text{CaO}+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{P}_2\text{O}_5) \quad \text{式(4.7)}$$

$$\text{塩基度⑦} : (\text{MgO}+\text{CaO}+\text{Fe}_2\text{O}_3)/\text{SiO}_2 \quad \text{式(4.8)}$$

一般に塩基度0.5～1.0付近で溶融特性温度は最も低くなると言われている。ここでは試験結果を最も近似できた4次式により回帰している。また、実際に溶融処理を行う場合の溶融炉の運転温度は溶流点あるいはそれ以上の温度と考えられるため、溶融特性温度は溶流点 τ を代表値とした。

結果を表-4.5、図-4.6に示す。いずれの塩基度の定義式においても溶流点 τ は塩基度が0.5～0.9付近で最低となり、その決定係数 R^2 も定義式の違いによる差はわずかであった。従って、泥土の溶融特性の指標としての塩基度は、下水処理と同様CaOとSiO₂の2成分による最も簡易な式(CaO/SiO₂)で十分であると考えられる。

表-4.5 塩基度と溶流点の回帰係数(4次式)

	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	決定係数 R ²
塩基度①	1366.55	-572.898	384.477	459.014	-358.883	0.925
塩基度②	1464.27	-848.334	244.983	1341.313	-914.969	0.927
塩基度③	1544.29	-523.786	-448.175	1043.077	-392.504	0.913
塩基度④	1484.74	-848.421	113.105	1463.241	-926.293	0.926
塩基度⑤	1509.01	-851.254	-16.941	1569.771	-926.783	0.925
塩基度⑥	1509.64	-854.934	-14.893	1577.915	-933.742	0.926
塩基度⑦	1463.60	-660.458	133.864	669.771	-355.729	0.925

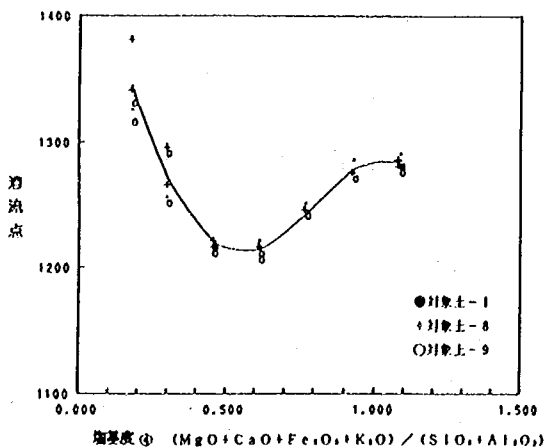
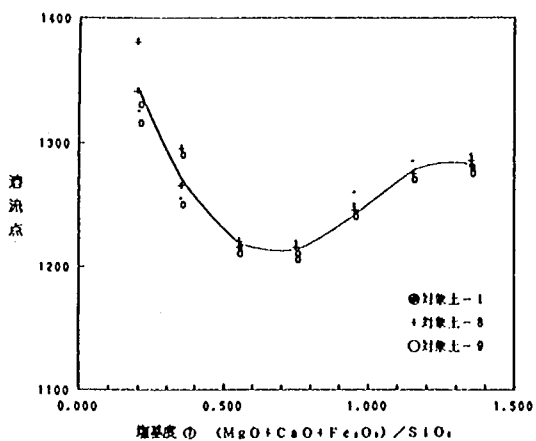
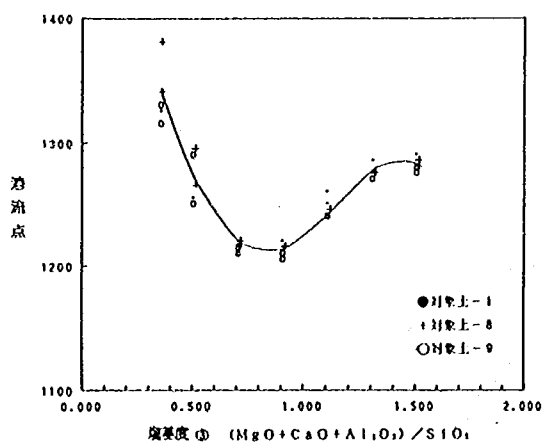
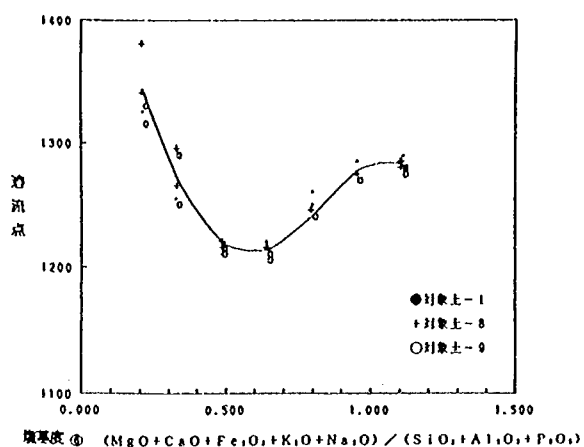
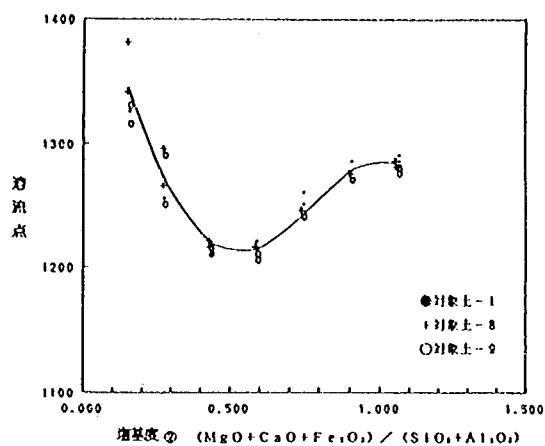
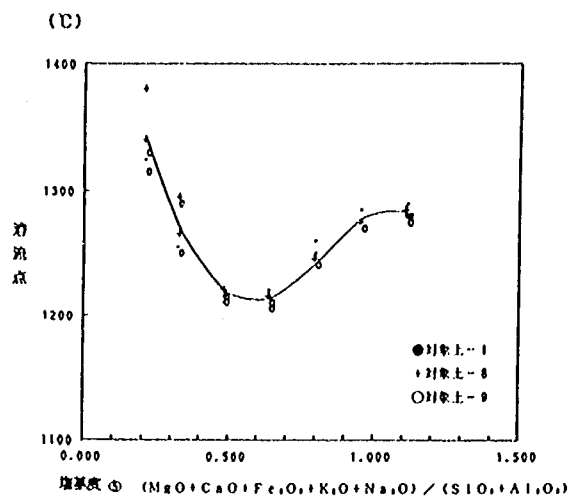
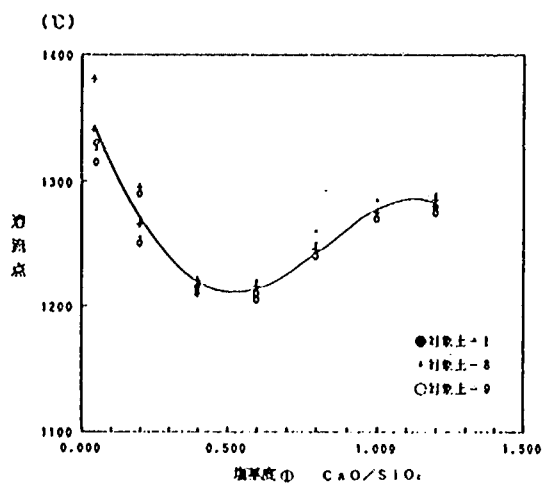


図-4.6 各種の塩基度の溶流点 (対象土-1)

2) 溶融温度特性試験結果

対象土毎の溶融温度特性を図-4.7～図-4.15に示す。溶流点 τ 、融点 τ は全ての対象土で塩基度が0.2～0.8の間で低くなっている。これは塩基度を調整することにより溶融処理温度を下げる事が可能であることを示している。なお、この傾向は下水汚泥と同様な傾向であると言える。

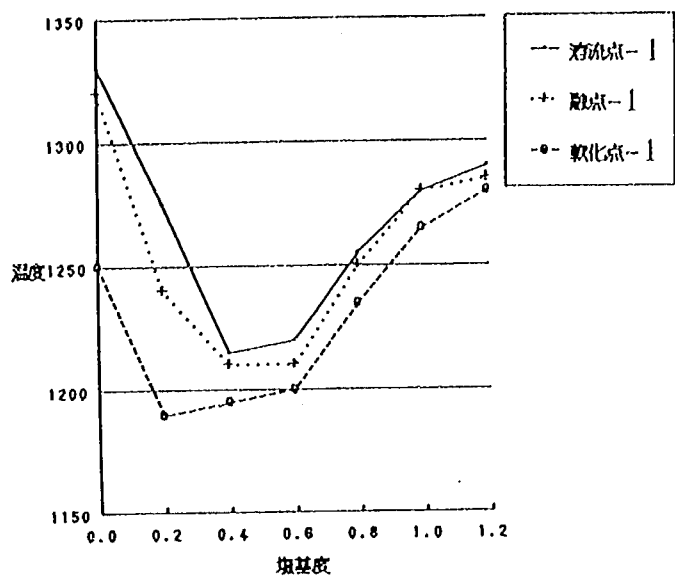


図-4.7 溶融温度特性 (対象土-1)

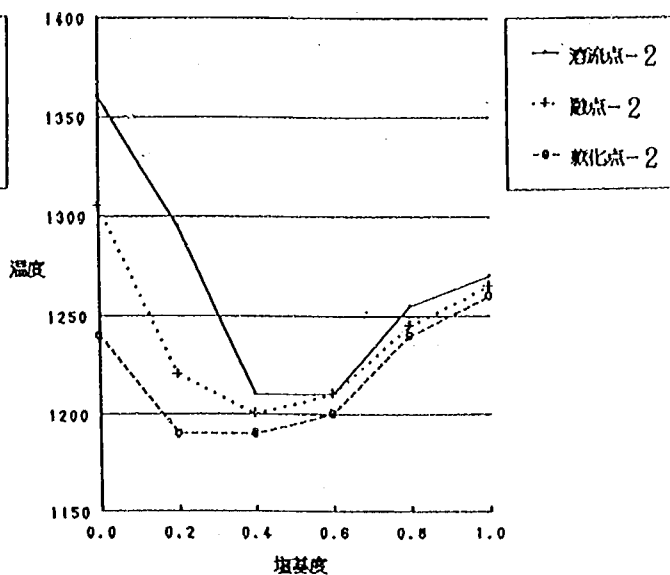


図-4.8 溶融温度特性 (対象土-2)

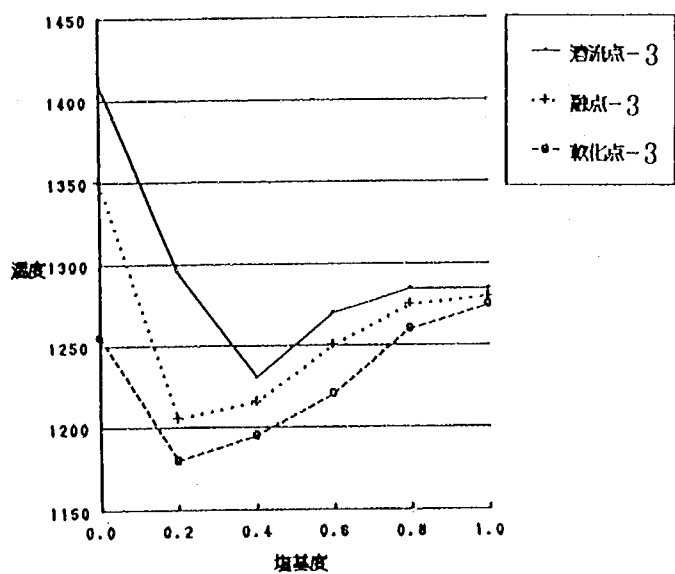


図-4.9 溶融温度特性 (対象土-3)

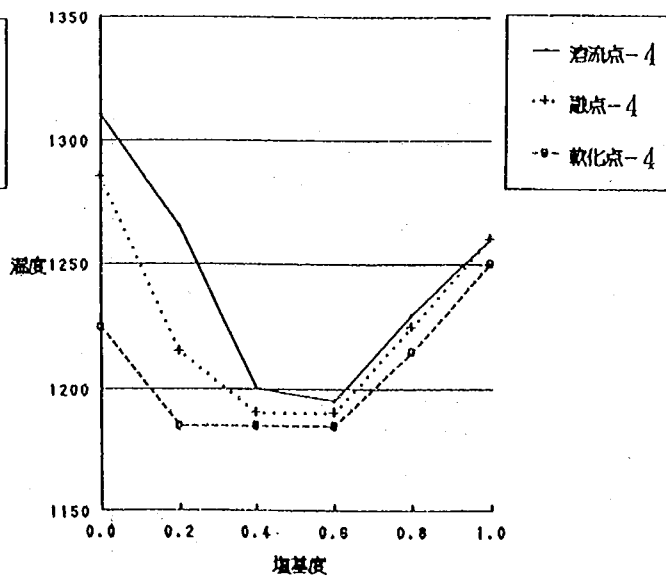


図-4.10 溶融温度特性 (対象土-4)

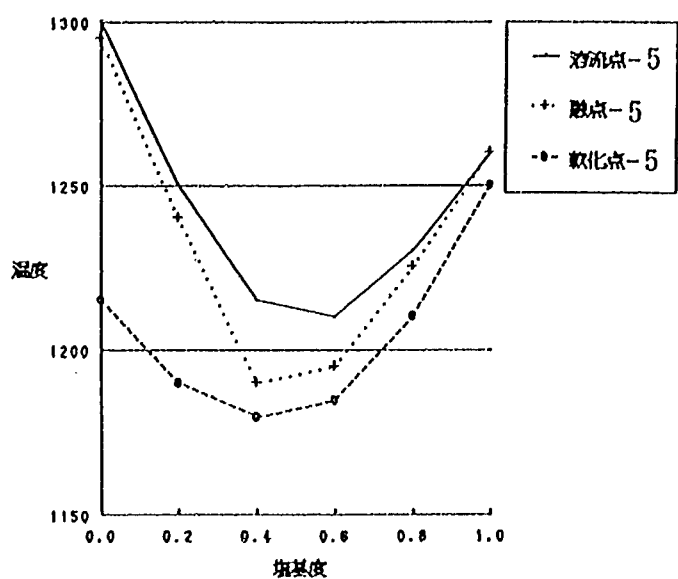


图-4.11 溶融温度特性 (对象土-5)

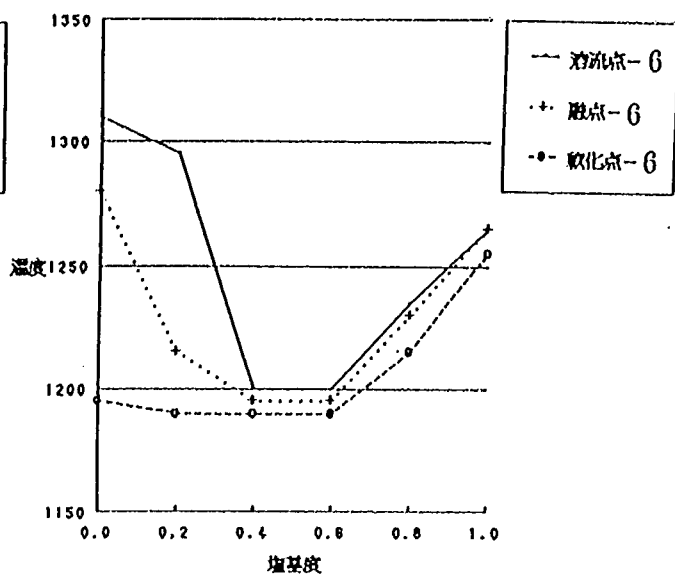


图-4.12 溶融温度特性 (对象土-6)

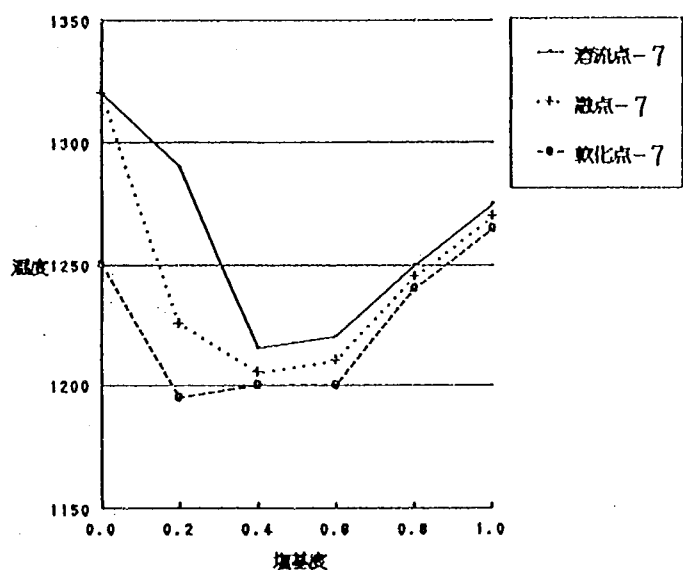


图-4.13 溶融温度特性 (对象土-7)

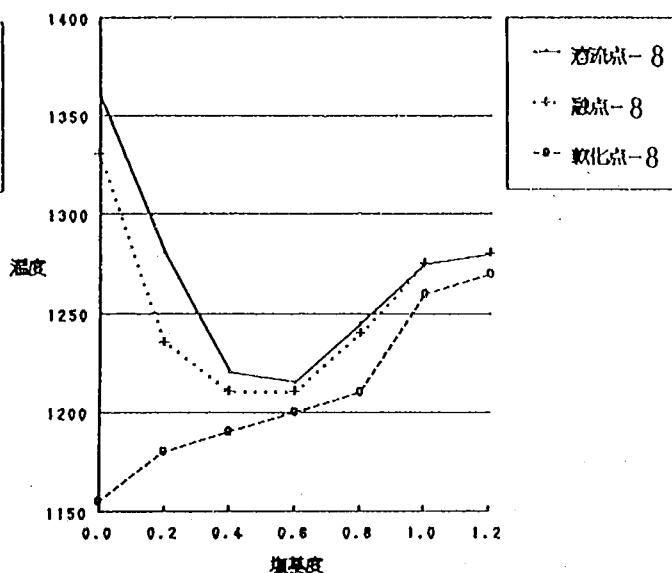


图-4.14 溶融温度特性 (对象土-8)

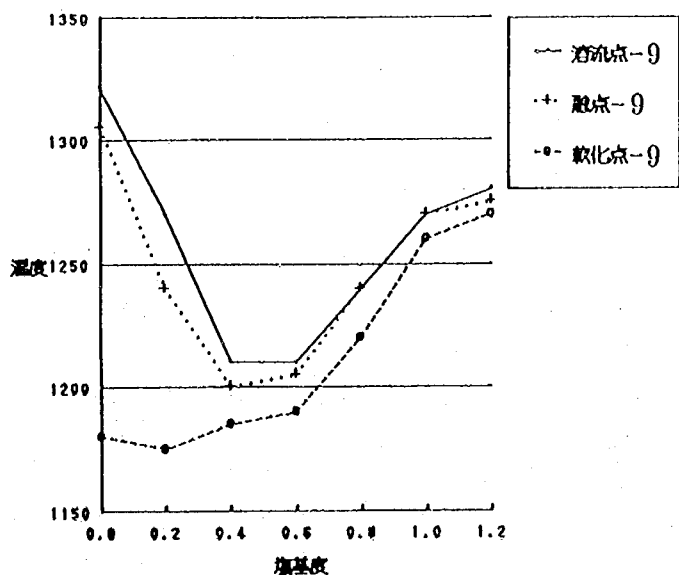


图-4.15 溶融温度特性 (对象土-9)

対象土-1, 9, 10の溶融温度特性を図-4.16～図-4.18に示す。軟化点については差異が見られるが、溶融処理に大きく影響する溶流点温度の差は小さい。

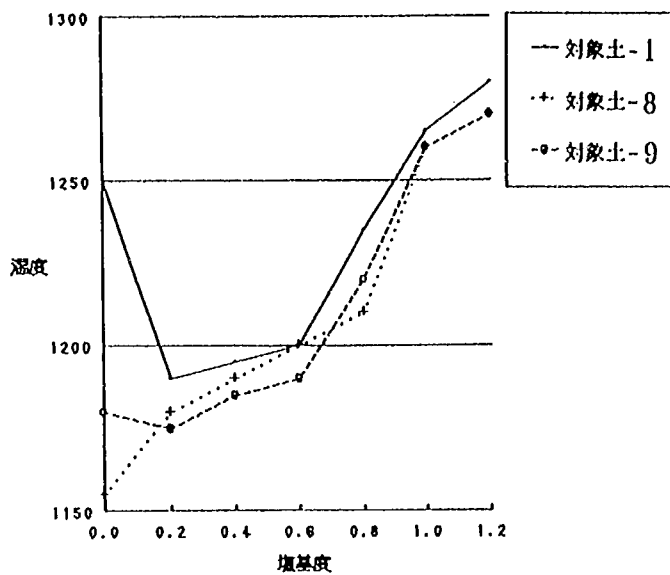


図-4.16 塩基と軟化点

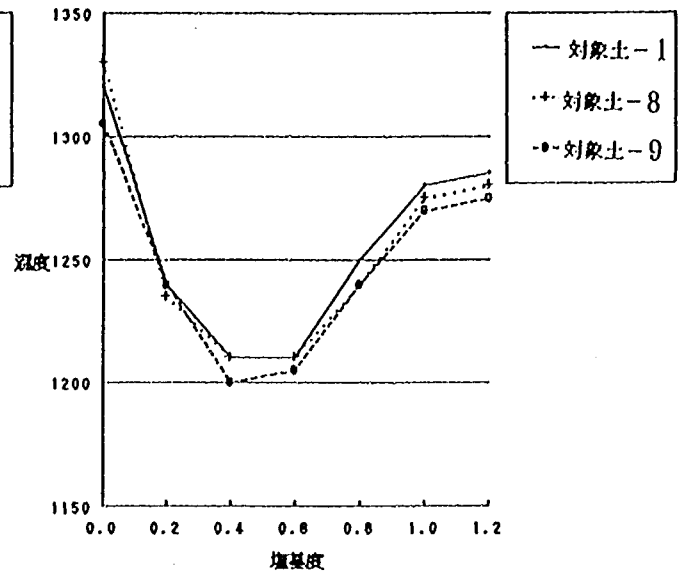


図-4.17 塩基度と融点の関係

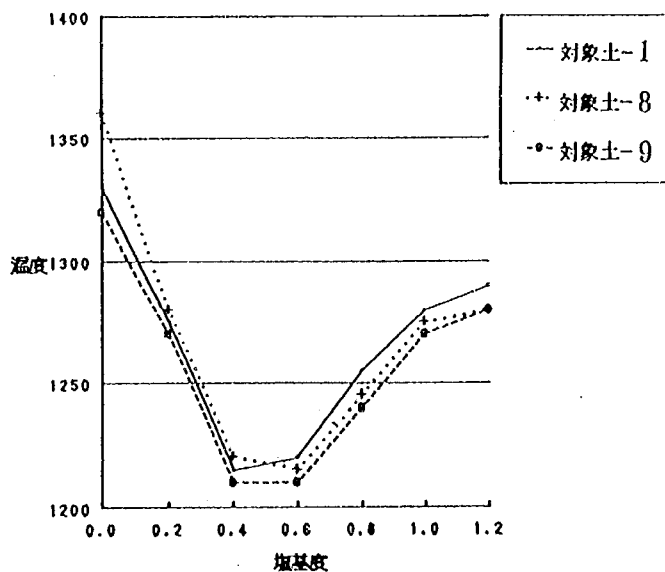


図-4.18 塩基度と溶流点の関係

4.4.5 粘性試験

1) 粘度測定試験

図-4.19、4.20は試験結果を片対数グラフにプロットしたものである。1,300℃～1,500℃の高温域における粘度は直線回帰し、アレニウス (Arrhenius) の関係を満足している。

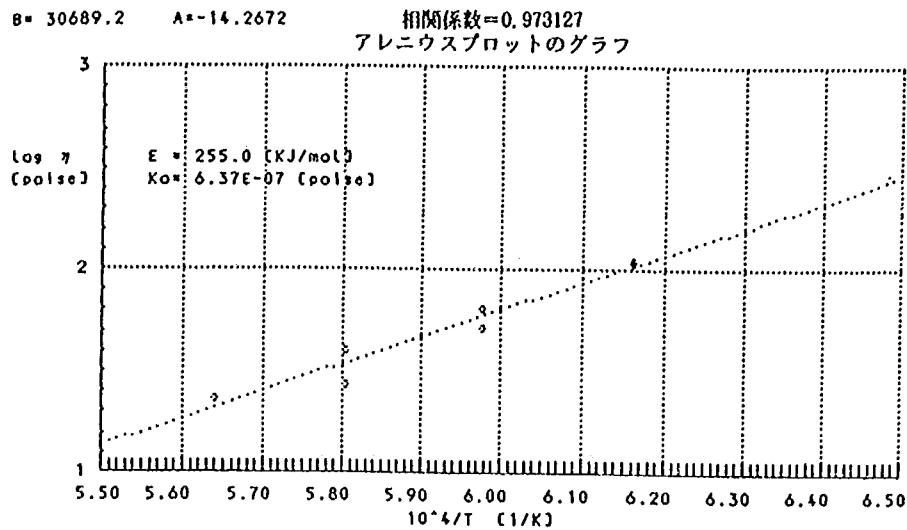


図-4.19 粘度測定試験結果塩基度 ($\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 0.6$)

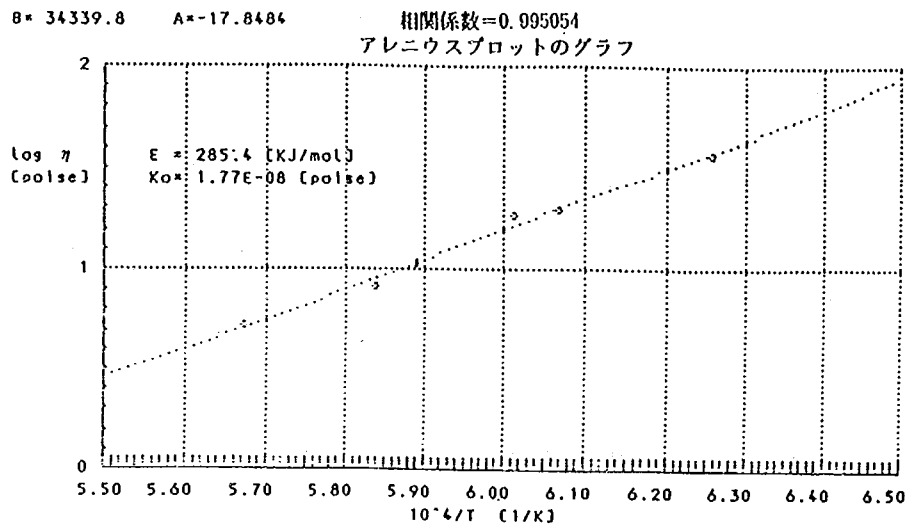


図-4.20 粘度測定試験結果 (塩基度 $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 0.1$)

高温域に関する従来の実験により、粘度測定試験で実施した温度域における粘性係数と温度の関係は式(4.9)に示すアンドレード (Andrade) の式で表現される。

$$\eta = A \eta \exp (E \eta / R T) \quad \text{式 (4.9)}$$

ここで η : 粘性係数 (poise)

$A \eta$: 頻度係数 (poise)

$E \eta$: 粘性流動の活性化エネルギー (activation energy, kcal/mol)

R : 気体定数 (kcal/mol·k)

T : 絶対温度 (k)

アンドレードの式を用いて、図-4.19、4.20の直線勾配より粘性流動の活性化エネルギーが求められ、 γ 切片より頻度係数が求められる。粘性流動の活性化エネルギーと頻度係数はその溶融物に特有な値であるため、最終的に各温度条件毎の粘性係数が求められる。結果を表-4.6に示す。

表-4.6 粘性係数

	粘 性 係 数 (p o i s e)					E η (Kcal/mol)	A η (poise)
	1300℃	1350℃	1400℃	1450℃	1500℃		
対象土-1 (塩基度=0.6)	188	103	58.8	34.5	20.9	60.9	6.37E-7
対象土-1 (塩基度=1.0)	53.5	27.3	14.5	8.0	4.5	68.2	1.77E-8

粘性の影響を大きく受ける炉形式の場合は粘性係数が50poise以下で溶融処理が可能であるとの一応の目安がある。従って、そのような炉形式においては塩基度が0.6程度では1,400℃以上で塩基度1.0程度では1,300℃以上で溶融処理を行う必要があると考えられる。

2) 溶流度試験

図-4.21に溶流度試験による融点 M 、溶流点 M の結果を示す。

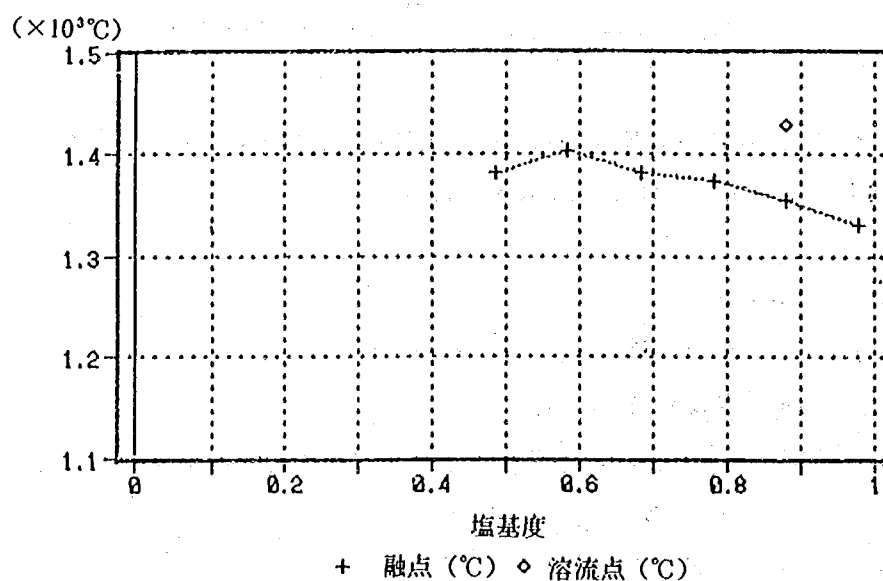


図-4.21 溶流度試験結果

塩基度無調整の場合、溶流度試験の目視判定結果によると1,350℃で溶融するが流れにくい状態であり、対象土-1の溶融時の粘性は高く流動性は悪いと判断できる（付録6.参照）。

塩基度の調整により溶流度の改善傾向が認められるが、その効果が顕著に現れるのは塩基度が0.5以上の領域であり、溶流点_Mに達したのは塩基度が0.9の場合のみであった。また、1,450℃においても溶流度（M）は $M=18.6 \leq 20\%$ であり、粘性に大きな影響を受ける溶融処理方式においては $M \geq 30\%$ が必要であると言われているため、対象土-1の場合、そのような炉では塩基度を0.9に調整する必要があるが、実際に発生する残土の成分は発生現場毎に変化することが考えられ、その成分の変化は小さく、現実的にそのような塩基度調整を行う場合には安価なCa分の確保が必要となる。また、成分構成を事前に予測することが困難な掘削残土を溶融により処理する場合、溶融物の粘性に関係なく出滓できる形式の炉を用いるなどの工夫が必要である。

4.4.6 重金属溶出試験

溶出試験での全クロム定量分析結果を表-4.7に示す。

表-4.7 全クロム溶出試験結果

試 料 内 容	分 析 値 (mg/ℓ)
未 調 整 試 料	N D
Cr 1 % 混 合	N D
Cr 3 % 混 合	N D
Cr 5 % 混 合	0.52

定量限界値 : 0.05 mg/ℓ

- 注) 1. 未調整試料のCr含有量は、0.008 W/W%(D.B) である。
(Cr含有量の分析方法：底質調査法 酸分解 原子吸光法)
2. 添加混合したCrの量は、未調整試料のCr含有量を考慮せず、それぞれの%量を添加混合した。

「有害な産業廃棄物に係る判定基準（昭和48.2.17総理府令第5号）」で定める埋め立て処分の鉱滓の基準（六価クロム化合物の判定基準が0.5mg/l以下）が溶融処理により作製したスラグに対して適用されるとした場合、クロムを5%混合したスラグでは判定基準に適合しないが、クロムを1, 3%混合し作製したスラグからの全クロム溶出量は定量限界値（0.05mg/l）以下であり判定基準に適合した。

下水汚泥を溶融、スラグ化すると汚泥に含まれていた重金属が検出されないのは、汚泥が溶融後、固化する際に重金属を包み込むためと考えられている。今回の実験において対象土-1にクロムを5%混合した場合に判定基準に適合しなかった理由としては、クロムの添加量がスラグが取り込める量を越えたためと考えられ、重金属の取り込み限界は3%～5%の間にあると考えられる。

しかし、下水道汚泥に含まれる六価クロム量は、含有量の多い処理場でも0.2%程度であり、実際の掘削残土では下水道汚泥より低い含有量であると考えられるため、非常に高濃度である3%までクロムが検

出されなかったことから実質的に掘削残土を用いたスラグからの重金属の溶出はないと判断できる。また、工場跡地などで高濃度で汚染されている残土があっても、他の現場から発生した汚染されていない残土と混合処理することにより対応は可能である。

5. 残土のスラグ化に関する調査

5.1 目的及び概要

本章では実際に泥土を用いて作製されたスラグについて道路用骨材・コンクリート用骨材等の土木用資材としての適応性を検討するため、スラグの骨材試験、及びスラグを骨材に用いたモルタル試験、コンクリート試験を行った。

溶融処理により作製されるスラグはその降温過程の違いにより以下の形態に分類できる。

- ・水砕スラグ
- ・徐冷スラグ
- ・空冷スラグ

水砕スラグを工業的に大量生産する時は高温の溶融物に大量の水を噴射し粒状化させて製造するが、実験では噴射の代わりに溶融物を水中に落下させることにより作製したものを用いた(写真-5.1~5.2)。水砕スラグは細粒状になるため、粒度的にはそのまま細骨材として利用することができるが、水砕スラグの内部構造はほとんどがガラス質であり、単体としての強度が低いものが多い。

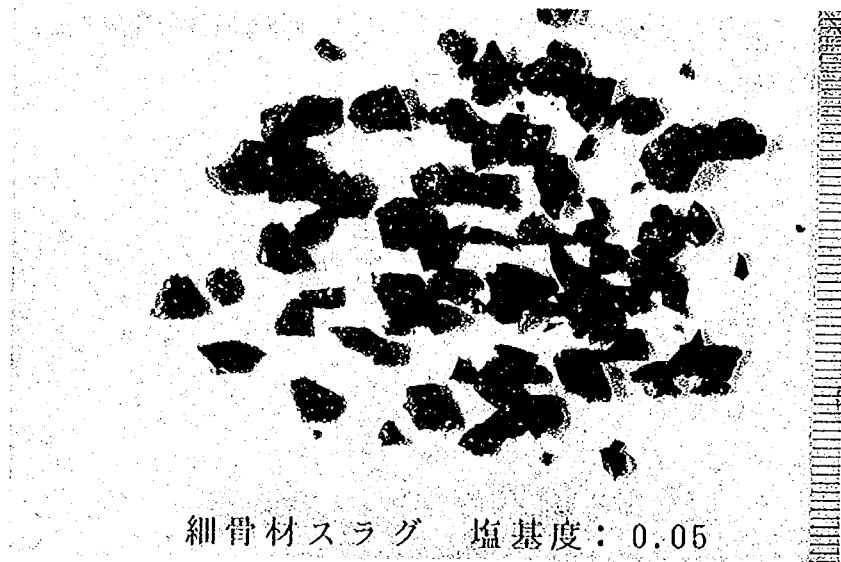
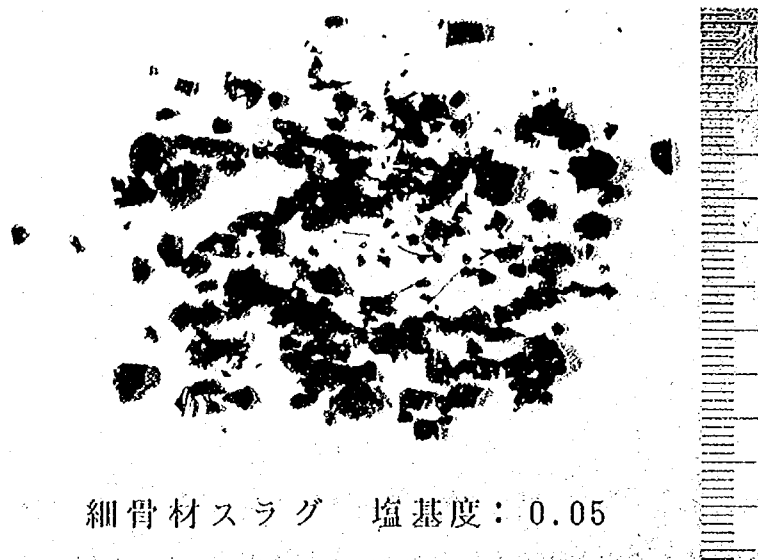


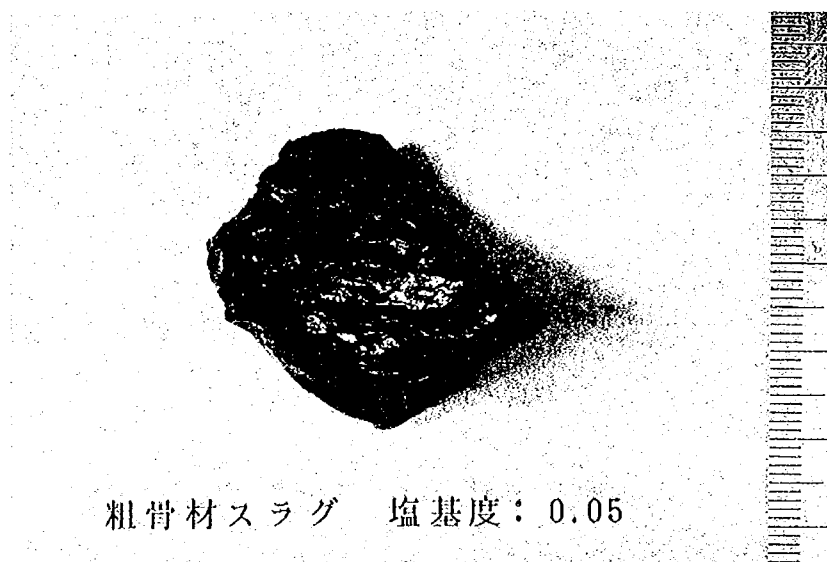
写真-5.1 水砕スラグ



細骨材スラグ 塩基度：0.05

写真-5.2 水砕スラグ（一部に針状のものが見られる）

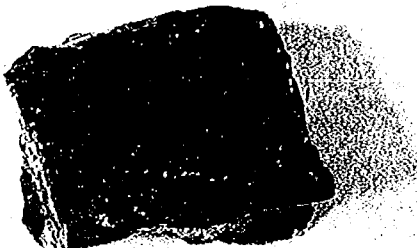
徐冷スラグ（写真-5.3）は熔融温度から結晶化温度以下まで徐々に冷却して作製したスラグで、その温度勾配に明確な基準はないが通常降温々度勾配が $5^{\circ}\text{C}/\text{分}$ 以下のものを言う。徐冷スラグの内部構造では構成物質の結晶化が進んでおり、場合によっては岩石と同程度の強度特性を発現する。形態は岩石状を示し、粗骨材として利用されている。



粗骨材スラグ 塩基度：0.05

写真-5.3 徐冷スラグ

空冷スラグ（写真-5.4）は $5^{\circ}\text{C}/\text{分}$ 以上の降温々度勾配で冷却して作製したスラグのうち、空気中で冷却したスラグについての総称である。空冷スラグは通常、空気に接している面及びその近傍についてはガラス質であり徐冷スラグに比べて強度が劣るが、中心部に向かうに従って降温速度が小さくなるため結晶化が進んでいる。工業的にも溶融物を容器に投入することにより作製出来るため徐冷スラグに比べ大量生産が可能である。また、高炉スラグ等では大量の溶融物を一度にスラグ化するために十分結晶化の進行したスラグが得られている。



粗骨材スラグ 塩基度：0.05

写真-5.4 空冷スラグ

以上の3形態のスラグは水冷、空冷等の降温条件の相違、溶融物の構成成分比によって強度・結晶化率等の基本特性が変化するため、今回は対象土-1と対象土-8から作製したスラグを用い、それぞれのスラグについて強度等の基本性状の違いを把握し、骨材としてのスラグの適応性を検討すると共に、スラグの高強度化についても検討を行った。

スラグの作製に用いた溶融炉を図-5.1、写真-5.5に水砕スラグ作製に用いた溶融炉を図-5.2、写真-5.6に示す。

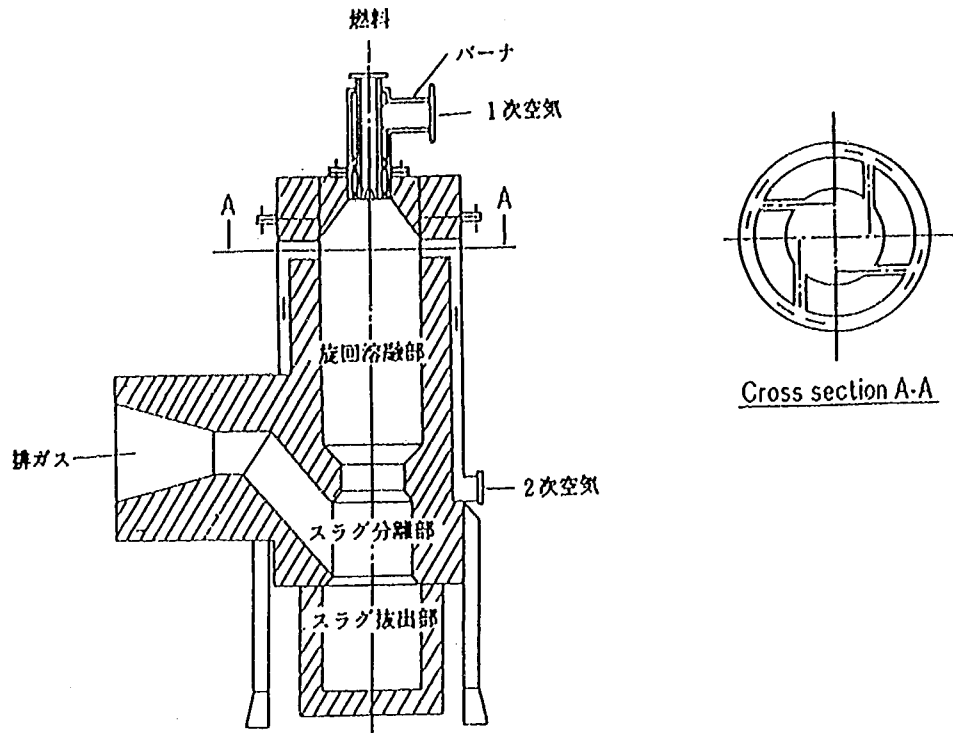


図-5.1 溶融炉構造図

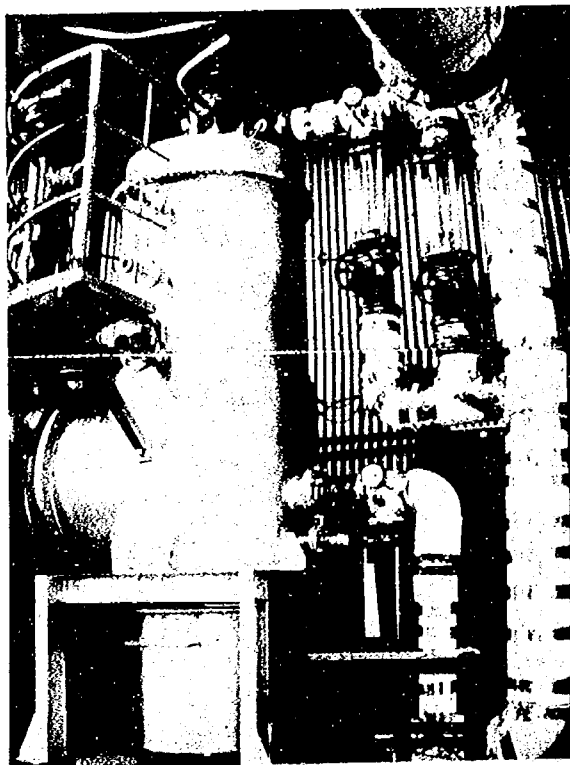


写真-5.5 空冷スラグ作製に使用した溶融炉
(株式会社神戸製鋼所所有)

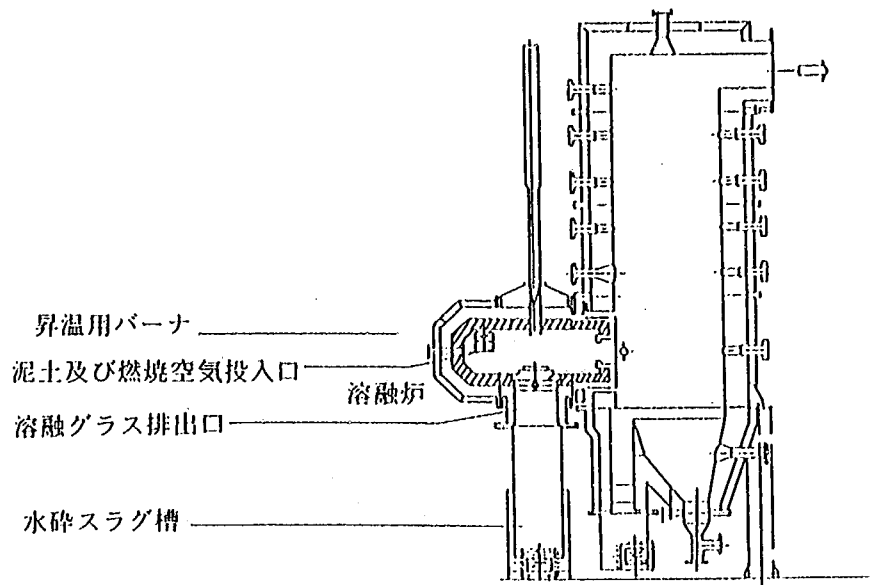


図-5.2 溶融炉構造図

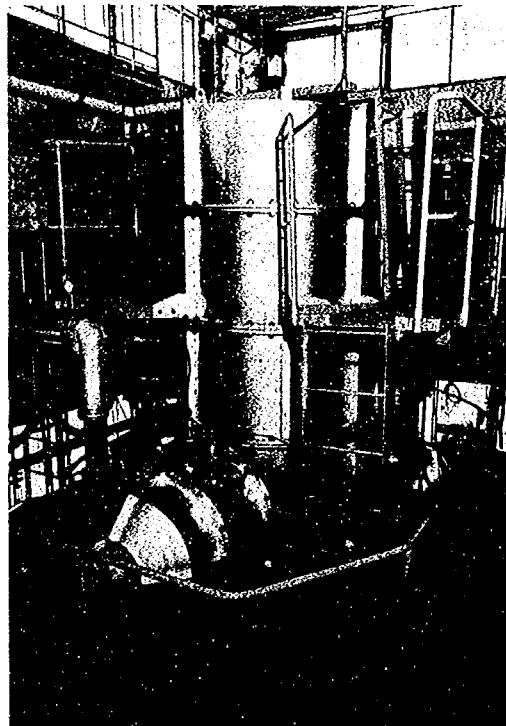


写真-5.6 水砕スラグ作製に使用した溶融炉
(川崎重工業株式会社所有)

5.2 粗骨材としての材料試験

対象土-1、対象土-8から作製した空冷スラグ（以下、空-1、空-8と言う。）を用い、空冷スラグの道路用骨材・コンクリート用骨材としての適応性を確認するため、スラグに関するJIS規格のうち「道路スラグ用試験」、「コンクリートスラグ用試験」を行った。また、作製したスラグにはガラス質の部

分が多く見られ、骨材としての強度が低いことも考えられたため、スラグのすりへり減量についても試験を行った。

5.2.1 試験項目

表-5.1に実施した試験項目を示す。

表-5.1 粗骨材スラグ試験項目

試 験 項 目	空-1	空-8	備 考
1) 道路用スラグ			
呈色試験	—	○	
骨材のふるい分け試験	—	○	
骨材の洗い試験	—	○	
骨材の単位容積重量及び実績率試験	—	○	
粗骨材の比重及び吸水率試験	—	○	
2) コンクリート用高炉スラグ粗骨材			
骨材の単位容積重量及び実績率試験	○	○	
粗骨材の比重及び吸水率試験	○	○	
水中浸せき試験	○	○	
化学成分分析試験	○	○	CaO、S、SO ₃ 、FeO
紫外線照射試験	○	—	紫外線(360.0nm)照射
3) 上記JIS以外の試験			
ロスアンゼルス試験機によるすりへり試験	○	○	

○：実施項目

5.2.2 結果及び考察

骨材試験結果を表-5.2に示す。空冷スラグを碎石にするために粒径を5～25mmに調整し、各試験に使用した。なお破碎工程では微粉状のものが多く生じ、骨材として使えるスラグの総量が減少したことを付記しておく。

道路用スラグとしては、呈色反応は示さず、骨材の単位容積重量も規定値を満足しているが、ロスアンゼルスすりへり試験結果ではすりへり減量が多い。このため、道路用として用いるすりへり減量が多いので、表層・基層用骨材としては使用が困難であり、上層路盤や下層路盤への適用が考えられる。

コンクリート用スラグとしては、両スラグとも骨材の単位容積重量試験、絶乾比重、吸水率試験、水中浸せき試験、紫外線照射試験において規定を満足したが、化学成分分析試験のうちFeOの含有率が規定値を上回っている。しかし、JIS規格のFeOの規定理由がコンクリート表面に酸化(さび)に伴うよごれを生じさせない点にあると考えられると、コンクリート表面の美観が問題とならない場所などには使用できる。

表-5.2 粗骨材試験結果

試 験 項 目			空-1	空-8	JIS 規格
道 路 用	呈色試験		—	呈色なし	呈色のないこと
	骨材のふるい分け試験	最大寸法 (mm)	—	25	25mm
	骨材の洗い試験	0.074mm通過量 (%)	—	0.07	—
	骨材の単位容積重量 及び実績率試験	単位容積重量(kg/l) 実績率 (%)	—	1.68 72.0	1.5以上 —
	粗骨材の比重 及び吸水率試験	絶乾比重 吸水率 (%)	—	2.33 1.19	— —
コ ン ク リ ー ト 用	骨材の単位容積重量 及び実績率試験	単位容積重量(kg/l) 実績率 (%)	1.33 54.7	1.32 57.1	1.25以上 (A種) —
	粗骨材の比重 及び吸水率試験	絶乾比重 吸水率 (%)	2.44 0.53	2.31 1.19	2.2以上 (A種) 6%以下 (A種)
	水中浸せき試験		異常なし	異常なし	亀裂、分解、泥状化 粉化などがないこと
	化学成分分析試験 (成分含有量%)	CaO (%)	8.7	—	45.0%以下
		S (%)	0.0	0.0	2.0%以下
		SO ₃ (%)	0.1	0.5	0.5%以下
		FeO (%)	5.9	4.8	3.0%以下
	紫外線照射試験		異常発光 見られず	—	発光しない、または 一様な紫色に輝く
他	ロスアンゼルス試験機 によるすりへり試験	B粒度 (%) C粒度 (%)	42.0 38.8	53.1 45.0	— —

5.3 細骨材としての材料試験

泥土から作製したスラグが細骨材として使用可能かどうかを確認するため、細粒度のスラグを用い細骨材としての適応性試験を行った。試験は細骨材スラグのJIS規格のうち、コンクリート用スラグ試験を行った。

また、下スラグの構成物質の結晶化率の違いによりスラグの強度が異なると考えられたので、対象土-8から作製したスラグを軟化点以下の温度で再加熱し、スラグの強度変化を確認した。

5.3.1 試験に用いたスラグの種類

試験に使用したスラグは、粗骨材スラグと同様、対象土-1、対象土-8から作製したスラグである。

対象土-1からは、塩基度無調整、及び、塩基度=0.2、0.4、0.6の4種類のスラグを作製し、試験に用いた。

対象土-8から作製したスラグは合計10種類用いた。水砕スラグ、水砕スラグを摂氏900度、及び摂氏1,000度で再加熱したスラグ、空冷スラグを粉砕したスラグ、及び粉砕した空冷スラグを摂氏900度、及び摂氏1,000度で再加熱したスラグ、ならびに、溶融前の土にニッケルまたは銅を添加した水砕スラグ、及び空冷粉砕スラグである。

スラグは、JIS A 5012の規定されている粒度分布に粒度調整したのち、試験に用いた。

表-5.3に試験に使用したスラグの種類を示す。

表-5.3 細骨材スラグの種類

対象土-1	骨材 番号	対象土-8	骨材 番号	対象土-8	骨材 番号
塩基度無調整	1	水 砕	5	空冷粉碎	10
塩基度=0.2	2	水 砕 900度再加熱	6	空冷粉碎 900度再加熱	11
塩基度=0.4	3	水 砕 1,000度再加熱	7	空冷粉碎 1,000度再加熱	12
塩基度=0.6	4	水 砕 Ni添加	8	空冷粉碎 Ni添加	13
		水 砕 Cu添加	9	空冷粉碎 Cu添加	14

スラグの再加熱処理の再加熱の方法は、再加熱温度まで5℃/分で昇温し所定の温度を30分後、5℃/分で降温した。

5.3.2 試験項目

試験は、JIS A 5012「コンクリート用高炉スラグ細骨材」のうち、表-5.4に示す6種類の試験項目を実施した。

表-5.4 細骨材スラグ試験項目

試験項目	骨 材 番 号														備 考
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
骨材のふるい分け試験	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	CaO、S、SO ₃ 、FeO
細骨材の比重及び吸水率試験	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
骨材の単位容積重量及び実積率試験	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
スラグ細骨材の貯蔵の安定性の試験	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
骨材の洗い試験	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
化学成分分析試験	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	

○：粒度調整後の試料で実施。

◎：粒度調整前後の試料で実施。

再加熱処理によるスラグ強度の試験方法は、ボールミルすりへり減量で評価した。ボールミルすりへり試験は、JIS規格のロスアンゼルスすりへり試験に準じたもので、すりへり試験前後のすりへり減量を次式で求めた。

$$\text{すりへり減量} = \frac{a - b}{b} \times 100 (\%) \quad \text{式 (5.1)}$$

a：試験前の1.18、0.60、0.30、0.15mmのふるいの加積残留重量百分率の和

b：試験後の1.18、0.60、0.30、0.15mmのふるいの加積残留重量百分率の和

5.3.3 結果及び考察

1) スラグとしての適応性

全スラグの粒度調整後の粒度分布を表-5.5に、骨材番号1～4の粒度分布を図-5.3に示す。また、全試験結果を表-5.6、及び表-5.7に示す。

表-5.5 粒度調整後の粒度分布

ふるいの呼び寸法 (mm)			ふるいを通るものの質量百分率 (%)							
スラグの種類		骨材 番号	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	粗粒率
対象土1	塩基度無調整	1	100	100	87	68	44	26	15	2.60
	塩基度=0.2	2	100	100	86	62	37	22	13	2.80
	塩基度=0.4	3	100	100	89	60	33	19	11	2.88
	塩基度=0.6	4	100	100	92	63	34	18	19	2.84
対象土8	水砕	5	100	100	89	68	42	22	11	2.68
	水砕 900度再加熱	6	100	100	89	68	42	23	11	2.67
	水砕 1,000度再加熱	7	100	100	89	68	43	24	11	2.65
	水砕 Ni添加	8	100	100	90	69	43	22	9	2.67
	水砕 Cu添加	9	100	100	89	70	44	22	11	2.64
	空冷粉砕	10	100	100	90	70	43	27	14	2.56
	空冷粉砕 900再加熱	11	100	100	90	70	45	26	15	2.54
	空冷粉砕 1,000度再加熱	12	100	100	81	57	38	22	12	3.01
	空冷粉砕 Ni添加	13	100	100	90	69	44	27	15	2.55
	空冷粉砕 Cu添加	14	100	100	89	68	41	24	13	2.65
JIS 規格			100	90 ~ 100	80 ~ 100	50 ~ 90	25 ~ 65	10 ~ 35	2 ~ 15	—

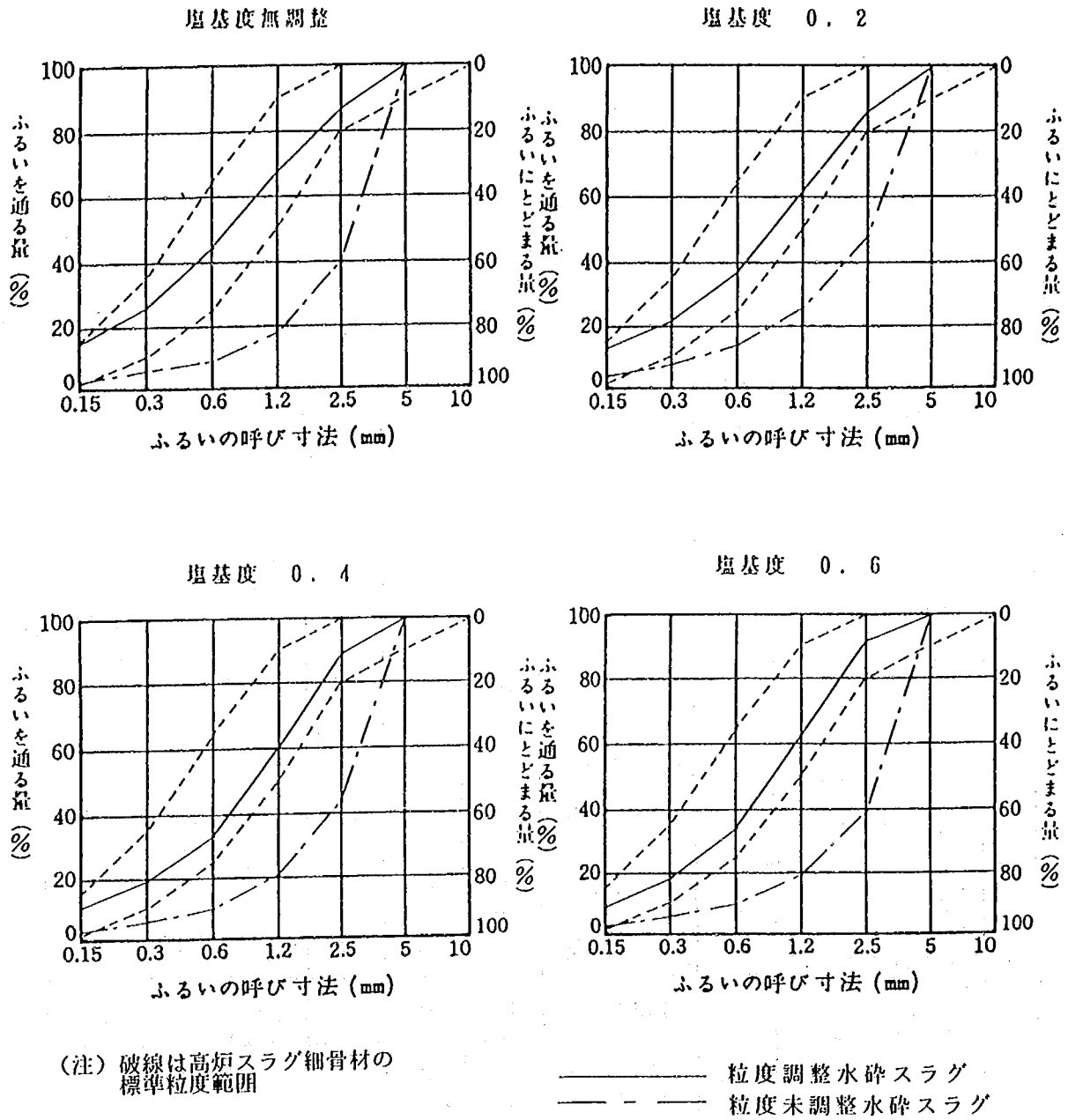


図-5.3 水砕スラグの粒度分布

表-5.6 細骨材試験結果 (対象土-1)

試 験 項 目			骨材番号			
			1	2	3	4
ふるい分け試験	粒度未調整	粗 粒 率	4.24	4.00	4.16	4.23
	粒度調整	粗 粒 率	2.60	2.80	2.88	2.84
比重及び吸水率試験	粒度未調整	比 重	2.33	2.30	2.43	2.53
		吸 水 率 (%)	0.25	2.31	1.49	0.99
	粒度調整	比 重	2.45	2.48	2.56	2.67
		吸 水 率 (%)	0.07	0.41	0.45	0.28
単 位 容 積 重 量 及 び 実 績 率 試 験	粒度未調整	単位容積重量 (kg/ℓ)	1.30	1.31	1.37	1.38
		実 績 率 (%)	56.1	57.0	56.4	54.8
	粒度調整	単位容積重量 (kg/ℓ)	1.64	1.62	1.64	1.65
		実 績 率 (%)	67.1	65.2	64.1	61.7
貯蔵の安定性の試験	粒度未調整	判 定 区 分	Λ (安定)	Λ (安定)	Λ (安定)	Λ (安定)
洗 い 試 験	粒度未調整	0.074mm通過量 (%)	2.1			
	粒度調整	0.074mm通過量 (%)	9.6			
化学成分分析試験	粒度未調整	CaO (%)	5.82			
		S (%)	0.0036			
		SO ₃ (%)	0.12			
		FeO (%)	6.29			

表-5.7 細骨材試験結果 (対象土-8)

試 験 項 目		骨 材 番 号										J I S
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	規 格
比重及び	比重	2.45	2.45	2.45	2.49	2.47	2.71	2.75	2.75	2.74	2.71	2.5以上
吸水率	吸水率 (%)	0.19	0.22	0.21	0.22	0.21	0.13	0.14	0.14	0.14	0.13	3.5以下
単位容積重量	単位容積重量 (kg/l)	1.81	1.84	1.85	1.85	1.83	1.80	1.84	1.83	1.88	1.84	1.45以上
及び実績率	実績率 (%)	66.8	66.8	66.9	68.1	65.9	66.5	67.0	66.6	68.0	68.0	
貯蔵安定性	判定区分	A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
洗い試験	0.074mm通過量 (%)	6.4	5.8	7.4	5.4	6.8	8.4	7.8	5.3	9.6	7.6	
化学成分	S (%)	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.0以下
	SO ₃ (%)	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.5以下
	FeO (%)	3.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.0以下

細骨材スラグの試験の結果、吸水率、単位容積重量、貯蔵安定性試験は試験を実施した全てのスラグでJISを満足したが、比重に付いては適・不適の結果がばらついている。対象土-8から作製したスラグ(10~14)は全て2.7以上でありJIS規格の2.5を大きく上回っているが、同じ対象土-8から作製した水砕スラグ(5~6)では全てJIS規格を下回っている。これは、水砕スラグが多孔質で、内部に気泡を含んでいるためと考えられる。また、対象土-1から作製したスラグ(1~4)では、何も添加していないスラグ1より石灰を添加したスラグ2、3、4の方が比重は高く、実積率は低くなる傾向にあり、細骨材スラグを作製する場合、冷却方法だけでなく、塩基度調整によっても比重の調整が可能である。

化学成分分析結果のうちFeOとしての鉄含有量が粗骨材空冷スラグと同様に規定値を満足していない。

以上の結果より、スラグをコンクリートの細骨材に使用する場合には、JIS規格の内の比重が問題となることがあるが、塩基度調整を行うか、冷却時の温度勾配を低くすることによりほぼJIS規格に適合した細骨材スラグを作製することができる。また、化学成分の内、FeOの含有率については、粗骨材でも述べたようにJIS規格に適合しないこともあるが、使用場所の選定をすることで、細骨材として使用することは十分に可能である。

2) 再加熱処理スラグの強度

図-5.4に再加熱温度とすりへり減量の関係を示す。

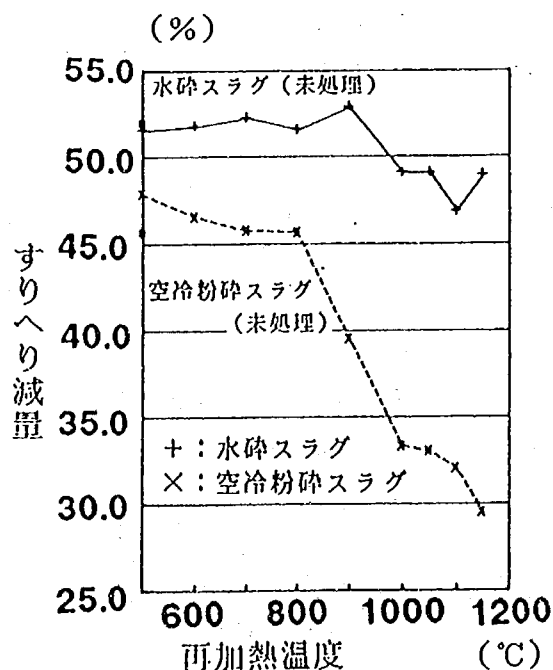


図-5.4 再加熱温度とすりへり減量

空冷スラグのすりへり減量は再加熱前後とも水砕スラグのすりへり減量より小さく、スラグの強度は冷却時の温度勾配に依存している。

両スラグ共、再加熱温度が軟化点に近づくに従いすりへり減量が低下し、スラグのすりへり抵抗が大きく

なっている。特に空冷スラグでは再加熱前のスラグの65%まで低下し、再加熱処理によるスラグの強度増加効果」が大きい。水砕スラグも再加熱によるすりへり減量が低下し、強度増加効果が認められるが、空冷スラグほどの効果はない。これは、水砕スラグがガラス質で、多孔質、ひび割れを有したもの、針状のものが多いためと考えられる。

水砕スラグと空冷スラグで再加熱による強度増加効果の表れる温度が異なり、空冷スラグの方が低い温度から効果が表れている。しかし、800℃以下では両スラグとも再加熱による強度増加の効果は見られず、スラグ毎に強度増加に必要な再加熱温度があると考えられる。

5.4 モルタル供試体試験

5.4.1 試験方法

表-5.3に示した細骨材スラグを使用してモルタル供試体を作製し、曲げ試験・圧縮試験を行い標準砂と比較することにより水砕スラグ強度を判定した。

試験条件は次の通りである。

供試体寸法	: 断面40mm平方、長さ160mmの角柱		
使用材料	セメント	比重3.16の普通ポルトランドセメント	
	細骨材	粒度調整水砕スラグ（塩基度＝無調整、0.2、0.4、0.6）	
		豊浦標準砂	
モルタル配合条件	W／C	50%	
	フロー値	190±5mm	
養生日数	: 1、3、7、28日		

5.4.2 結果及び考察

モルタル供試体試験は、対象土-1と対象土-8の実施時期、セメントの製造会社、試験の実施機関が異なり、試験結果を直接比較することはできないので、個々に考察を加える。

1) 対象土-1

圧縮強度試験結果を図-5.5に、曲げ強度試験結果を図-5.6に示す。

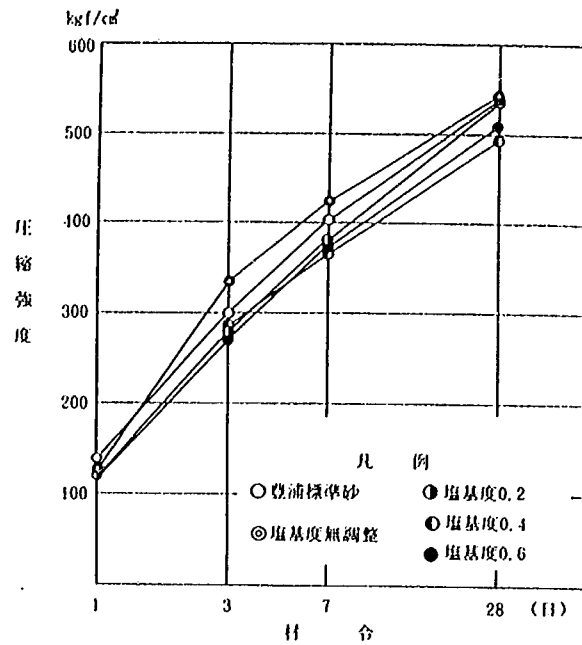


図-5.5 モルタル圧縮強度試験結果

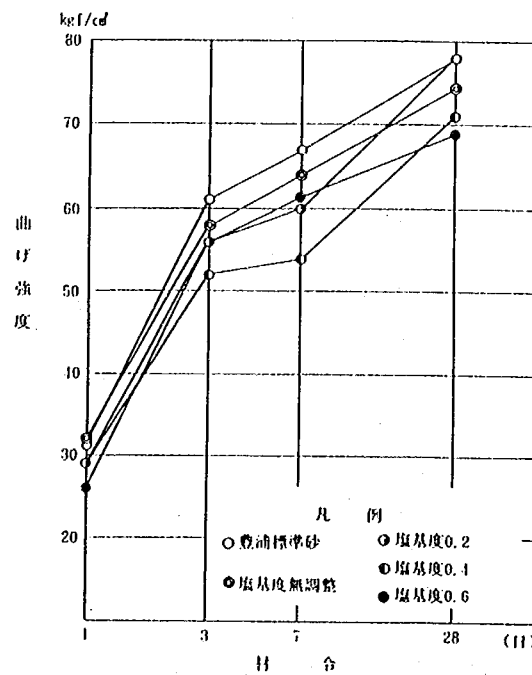


図-5.6 モルタル曲げ強度試験結果

対象土-1から作製した水砕スラグを細骨材として使用した場合、28日強度で比較すると曲げ強度では標準砂の0.88~1.00の強度が、圧縮強度では標準砂の0.91~1.01の強度が発現した。そのうち、塩基度=無調整、0.2の水砕スラグの場合では曲げ強度・圧縮強度共に標準砂の場合とほぼ同程度の強度を示しているのに対し、塩基度=0.4、0.6の水砕スラグの場合は標準砂と比較して約1割程度強度が低下し、塩基度が高くなるほど強度が低下する傾向にある。

従って水砕スラグをコンクリート細骨材に使用することは十分可能であるが塩基度の違いによりコンクリ

ート強度に若干の差があるため、使用する際にコンクリート用細骨材自身の強度が求められる場合には、所定強度の発現する塩基度に調整した水砕スラグを作製する必要がある。

2) 対象土 - 8

圧縮試験結果を図-5.7に、曲げ強度試験結果を図-5.8に示す。図中の「圧縮（曲げ）強度比」とは次式により求めた強度の比である。

スラグモルタルの圧縮（曲げ）強度

圧縮（曲げ）強度比=

豊浦標準砂モルタルの圧縮（曲げ）強度

式 (5.2)

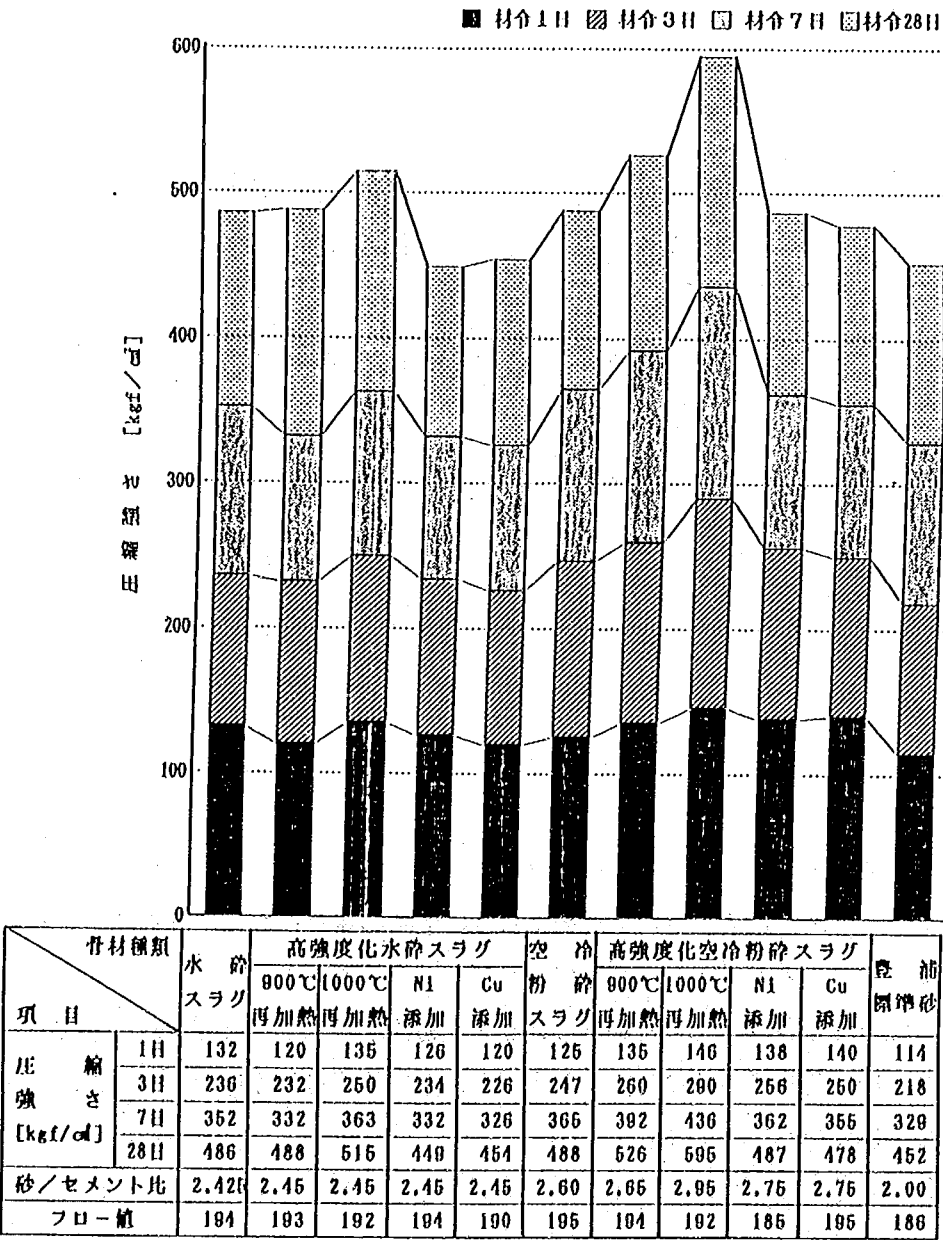


図-5.7 モルタル圧縮強さ試験結果

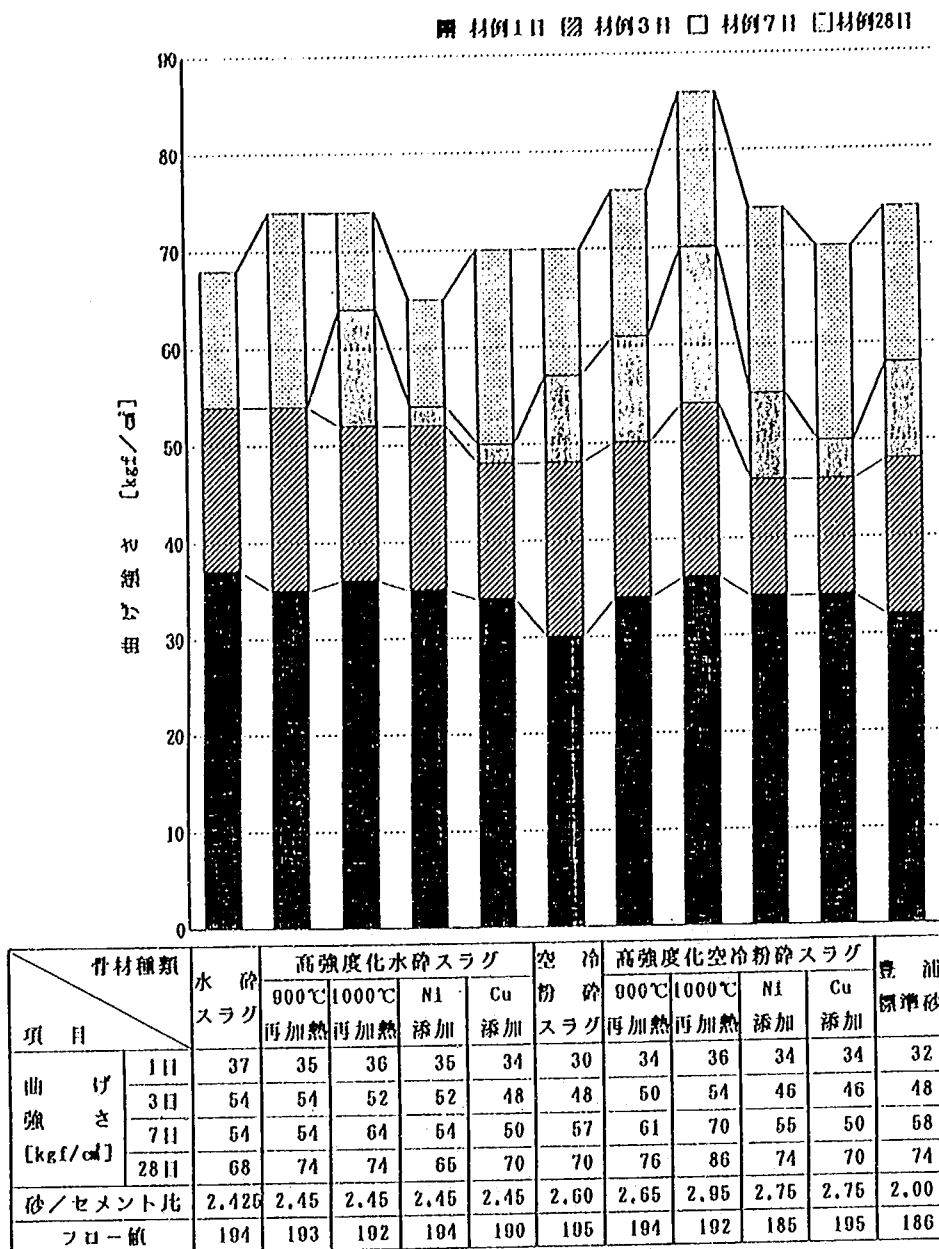


図-5.8 モルタル曲げ強さ試験結果

図中には表していないが、砂/セメント比は空冷スラグを使用の方が大きく、特に、1000℃の再加熱では2.95と最も多量のスラグが混入できた。このことは、空冷により作製した細骨材スラグは水砕スラグの場合に比べ、モルタルのワーカビリティに良好になることを示している。

成分調整や再加熱処理を行っていない水砕スラグや粉碎水冷スラグと標準砂との比較では、対象土-1の傾向とは異なり、圧縮強度では標準砂を8%上回り、曲げ強度は標準砂の92%、95%であり、対象土-1の場合と同程度の強度比になっている。

水砕スラグと粉碎空冷スラグでは、空冷スラグの方が強度が高くなっている。これは、水砕スラグは結晶化率が低く、針状のスラグが含まれるため、5.3.3で述べたように空冷スラグに比べスラグ自体の強度が低いと考えられる。また、それ以外にも、比重、単位容積重量、吸水率の違いや砂/セメント比が空冷

スラグより多きことなども影響していると考えられる。

再加熱処理による強度は、900℃、1,000℃とも、スラグの種類に関係なく再加熱前に比べて強度が高くなっている。強度は900℃より1,000℃の方が、水砕スラグよりも空冷スラグの方が高く、スラグの再加熱によるすりへり減量試験結果と同じ傾向となっている。

ニッケル、銅を添加したスラグは、強度の増加には結びつかず、無添加のスラグに比べて同等か、僅かではあるが低下している。低下の傾向は、水砕スラグではニッケルが、空冷スラグでは銅の方が大きくなっている。

圧縮強さは、全ケースで1.00以上であり、標準砂と同程度以上の強度を確保している。しかし、再加熱したスラグの場合、材令の伸びに伴い低下する傾向にあり、強度の伸びは標準砂に比べて低くなっている。

曲げ強さ比は、圧縮強さ比に比べて全般に値が小さくなっている。曲げ強さ比の傾向は圧縮強さ比の傾向と同様で、再加熱処理したスラグの比は材令に依存していないが、その他のスラグでは材令が伸びるに従い低下する傾向にある。

5.5 コンクリート供試体試験

5.5.1 試験方法

対象土-1から作製した空冷スラグ及び水砕スラグを使用してコンクリート供試体を作製し、コンクリート圧縮強度試験を行い、碎石、川砂を用いたコンクリート強度と比較することにより強度を判定した。

試験時の諸条件を以下に示す。

供試体寸法	: 直径10cm、高さ20cmの円柱	
使用材料	: セメント	比重3.16の普通ポルトランドセメント
	細骨材	粒度調整水砕スラグ（塩基度＝無調整、0.2） 川砂（富士川産）
	粗骨材	粒度調整空冷スラグ（塩基度＝無調整） 碎石（笠間産硬質砂岩）
	コンクリート配合条件 : W/C	50%
	スランプ	6～9 cm
	空気量	4.5～6 %
養生週	: 1、4 週	

5.5.2 結果及び考察

圧縮強度試験結果を図-5.9に示す。4週強度で比較すると粗骨材・細骨材共にスラグを使用した場合、碎石・川砂の組合せの強度の0.66～0.73の強度しか発現しなかった。粗骨材・細骨材の一方にスラグを使用した場合は0.92～0.97の強度が発現し強度の低下率は少なかった。また供試体の断面を調べるため供試体引っ張り破断させた断面を観察すると、スラグとモルタルの分離とスラグの破断が見られた。モルタルとスラ

グの分離はスラグ表面が滑らかな箇所について見られ、スラグとモルタル間の付着力が弱いことがわかる。またスラグの破壊率が碎石の破壊率より高く、スラグ自身の強度も碎石に比べて劣ることがわかった。このことからスラグを用いたコンクリート供試体の強度が碎石を用いたコンクリート供試体の強度より低いのは、スラグ自身の強度不足とスラグとモルタルの付着不足の2つの原因によるものと考えられる。

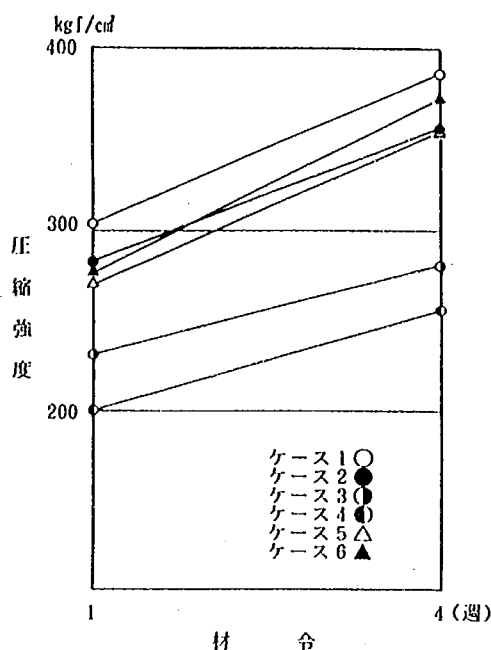


図-5.9 コンクリート圧縮強度試験結果

従ってコンクリートの骨材として空冷スラグと水砕スラグを同時に使用することはコンクリート全体の強度低下につながるため適切でなく、細骨材・粗骨材のどちらか一方についてスラグを使用すれば良いと考えられる。また粗骨材としての空冷スラグに対してはモルタルとの付着力の低下とスラグ自身の強度不足による影響が直接強度に影響するため、粗骨材として空冷スラグをコンクリートに使用する場合には低強度用コンクリートとして使用するか、セメント量を多くしてコンクリートとしての強度を上げて使用する必要がある。

今回使用したスラグは空冷スラグであるため、冷却時の降温勾配を緩やかにしてより結晶化させ強度を増した徐冷スラグを用いることにより、通常の碎石と同程度のコンクリート骨材として使用可能であると考えられる。

表-5.8 骨材の組合せ

ケース	粗 骨 材	細 骨 材
1	砕 石	川 砂
2	空冷スラグ（対象土-1） 塩基度：無調整	川 砂
3	空冷スラグ（対象土-1） 塩基度：無調整	水砕スラグ（対象土-1） 塩基度：無調整
4	空冷スラグ（対象土-1） 塩基度：無調整	水砕スラグ（対象土-1） 塩基度：0.2
5	砕 石	水砕スラグ（対象土-1） 塩基度：無調整
6	砕 石	水砕スラグ（対象土-1） 塩基度：0.2

6. 残土の軽量骨材化に関する調査

6.1 目的

本章では、泥土から作製された軽量骨材のコンクリート用骨材としての適応性を明らかにするために、軽量骨材の基本特性、及びコンクリート骨材として利用した場合のコンクリート強度について試験を実施した。

6.2 残土の膨張性の確認

土から焼物をつくる場合整形した土を焼いて作るが、土によっては熱により膨張性を示し、焼物の土として不向きなものがあることが知られている。そのような土が、熱により膨張した時点で取り出せれば、軽量骨材が作成できると考え、先ず、軽量骨材を作成するための焼成温度を確認するため、連続した温度変化での残土の熱膨張、熱収縮などの熱的变化を把握することとした。

6.2.1 試料及び供試体の作成

実験に使用した土は1種類であるが、土の成分の違いによる膨張性を確認するため、表-6.1に示すように成分を調整している。

表-6.1 試料の成分調整

試料番号	成分調整剤	添加量(%)
1	— (無添加)	—
2	パーライト	0.2
3	パーライト	0.6
4	C	0.2
5	C	0.6
6	2~5のうち最も膨張した試料に K_2SO_4 を添加	0.2
7	真珠岩	0.2
8	真珠岩	0.6
9	真珠岩	0.2
10	真珠岩	0.6

試料5は、対象土-8をJIS M 8812「石炭コークス類の工業分析方法」の3. に準じて試料を炭化し、これを乳鉢で微粉碎したものを用い、微粉碎した炭化試料を純水をバインダーとして直径3mm、高さ3mmの円柱に整形したものを供試体として用いた。ただし、 K_2SO_4 は水に易溶であるので、バインダーにはアセト

ンを使用している。

6.2.2 実験方法

実験は、次の2つの事項を確認するために実施した。

① 軽量骨材を作成するときの焼成温度を確認するために、供試体が溶流するまでの間の膨張率・収縮率の変化を確認した。

② 軽量骨材を焼成する場合、膨張した時点で加熱を止めて冷却する必要があるので、膨張後、温度を降下させることによる膨張率・収縮率の変化を確認した。

それぞれの実験方法は以下のとおりである。

① 6.2.1で整形した供試体を加熱顕微鏡に挿入し、予めJIS M 8801「灰の溶融温度特性試験方法」で確認した溶流点まで加熱し、500℃～溶流点間の供試体の膨張率・収縮率をテレビカメラの画素数から求めた。この時の温度上昇は、500℃まで炉の最大能力で上昇し、その後は5℃/minで溶流点まで上昇した。

膨張率・収縮率の計測は、1,200℃～1,350℃の間は25℃毎に行い、その他は50℃毎に行った。表-6.2に各試料の溶融温度特性を示す。

表-6.2 溶融特性

実験ケース 番 号	資料 番号	軟化点 (℃)	融点 (℃)	溶融点 (℃)
1	1	1,050	1,320	1,410
2	2	1,060	1,330	1,430
3	3	1,070	1,340	1,420
4	4	1,060	1,330	1,420
5	5	1,070	1,330	1,450
6	6	1,110	1,320	1,420
7	7	1,070	1,340	1,450
8	8	1,080	1,360	1,440
9	9	1,110	1,330	1,430
10	10	1,100	1,330	1,430

② 成分無調整の試料を①と同様に整形した供試体を加熱顕微鏡に挿入し、500℃まで炉の最大能力で上昇した。その後、①で確認した最大膨張温度まで5℃/minで上昇し、最大膨張温度に達した後は、

5℃/min、及び3℃/minで500℃まで降温し、その間の膨張率・収縮率の計測を行った。計測間隔は①と同じく1,200℃～1,350℃の間は25℃毎に行い、その他は50℃毎に行った。

図-6.1に計測装置を、表-6.3に実験条件を示す。

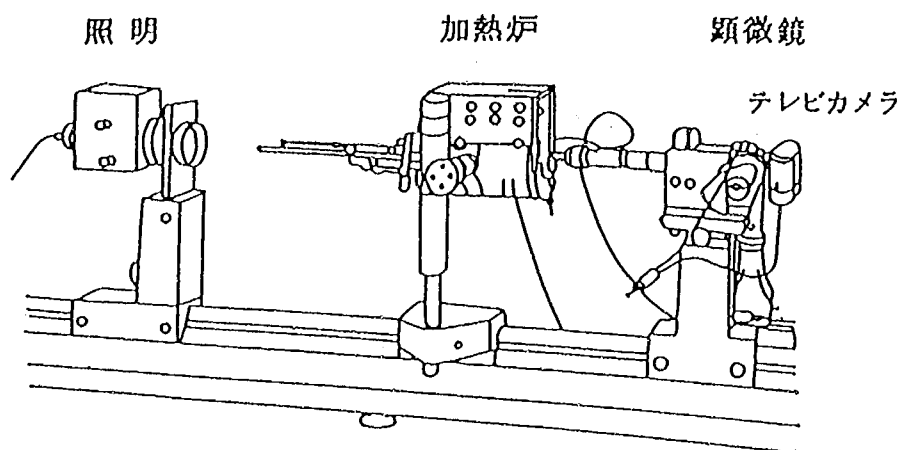


図-6.1 計測装置

表-6.3 実験条件

ケース	測定条件
11	最大膨張温度(1275℃)から降温速度5℃/min
12	最大膨張温度(1275℃)から降温速度3℃/min
13	最大膨張温度-10℃(1265℃)から降温速度5℃/min
14	最大膨張温度-10℃(1265℃)から降温速度3℃/min
15	最大膨張温度-20℃(1255℃)から降温速度5℃/min
16	最大膨張温度-20℃(1255℃)から降温速度3℃/min

6.2.3 実験結果

溶流までの投影面積の全ケースの結果を表-6.4に、ケース1の投影面の変化の状況を図-6.2に、最大膨張から温度を下げた場合の投影面積の全ケースの測定結果を表-6.5、ケース11の投影面の変化の状況を図-6.3に示す。

表-6.4 投影面積の変化

単位%

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5	ケース6	ケース7	ケース8	ケース9	ケース10
測定前	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
500℃	100.0	100.5	101.0	101.8	101.2	100.2	100.3	99.5	101.2	103.5
550℃	100.5	99.9	101.2	101.3	101.1	100.4	100.3	100.9	100.6	103.5
600℃	100.5	101.1	101.4	102.1	101.3	100.8	100.6	101.6	102.3	102.9
650℃	100.4	100.9	101.4	101.9	101.7	100.5	100.9	99.7	102.6	103.2
700℃	100.9	101.1	102.1	101.7	101.4	101.0	99.9	101.3	102.7	103.0
750℃	100.6	101.1	101.8	102.1	101.7	100.2	100.2	101.3	102.2	103.5
800℃	100.4	100.9	102.3	101.9	102.0	101.3	100.4	100.7	103.2	103.7
850℃	99.9	101.0	102.1	102.0	101.6	99.9	99.6	100.4	103.2	103.5
900℃	98.7	100.4	100.9	100.9	101.0	99.6	100.1	100.7	101.7	101.7
950℃	97.1	98.8	99.2	99.8	99.2	97.1	98.0	99.1	99.9	100.9
1000℃	96.3	97.5	97.4	97.9	97.9	95.3	97.5	98.0	99.4	99.4
1050℃	94.8	95.5	96.1	96.3	96.8	93.9	96.3	96.5	97.0	97.6
1100℃	92.5	92.2	93.5	93.2	93.4	92.0	93.4	93.5	95.5	94.8
1150℃	83.9	84.2	85.3	85.8	84.7	84.6	89.2	87.4	87.8	87.9
1200℃	71.4	72.2	72.1	74.4	71.8	69.9	77.6	75.6	74.6	75.6
1225℃	77.9	77.5	71.4	89.0	84.1	77.3	72.3	70.4	71.8	73.3
1250℃	115.2	113.3	102.0	132.6	128.4	120.0	91.4	94.4	101.8	103.9
1275℃	134.0	137.3	122.5	142.2	148.5	143.0	124.4	130.4	135.4	136.6
1300℃	133.3	140.3	131.0	130.0	110.8	129.5	137.9	147.6	127.1	139.8
1325℃	100.4	107.2	135.7	110.6	100.5	83.9	121.8	141.9	131.0	129.8
1350℃	64.6	64.3	75.6	68.8	100.3	60.3	79.2	117.0	58.2	93.7
1400℃	48.9	55.1	53.2	62.1	59.0	51.6	67.8	58.1	49.9	56.2
1450℃	40.6	47.2	41.2	41.9	46.1	39.0	57.3	47.4	47.3	50.8

[注] ケース1：掘削残土灰化試料

ケース2：残土+バーライト0.2%添加

ケース3：残土+バーライト0.6%添加

ケース4：残土+ c 0.2%添加

ケース5：残土+ c 0.6%添加

ケース6：ケース5+K₂SO₃添加

ケース7：残土+真珠岩0.2%添加

ケース8：残土+真珠岩0.6%添加

ケース9：残土+粗面岩0.2%添加

ケース10：残土+粗面岩0.6%添加

測定結果

供試体測定投影面の図化

試料名 No.5掘削土 (1回目) の灰化試料 (無調製)

1989.10.13

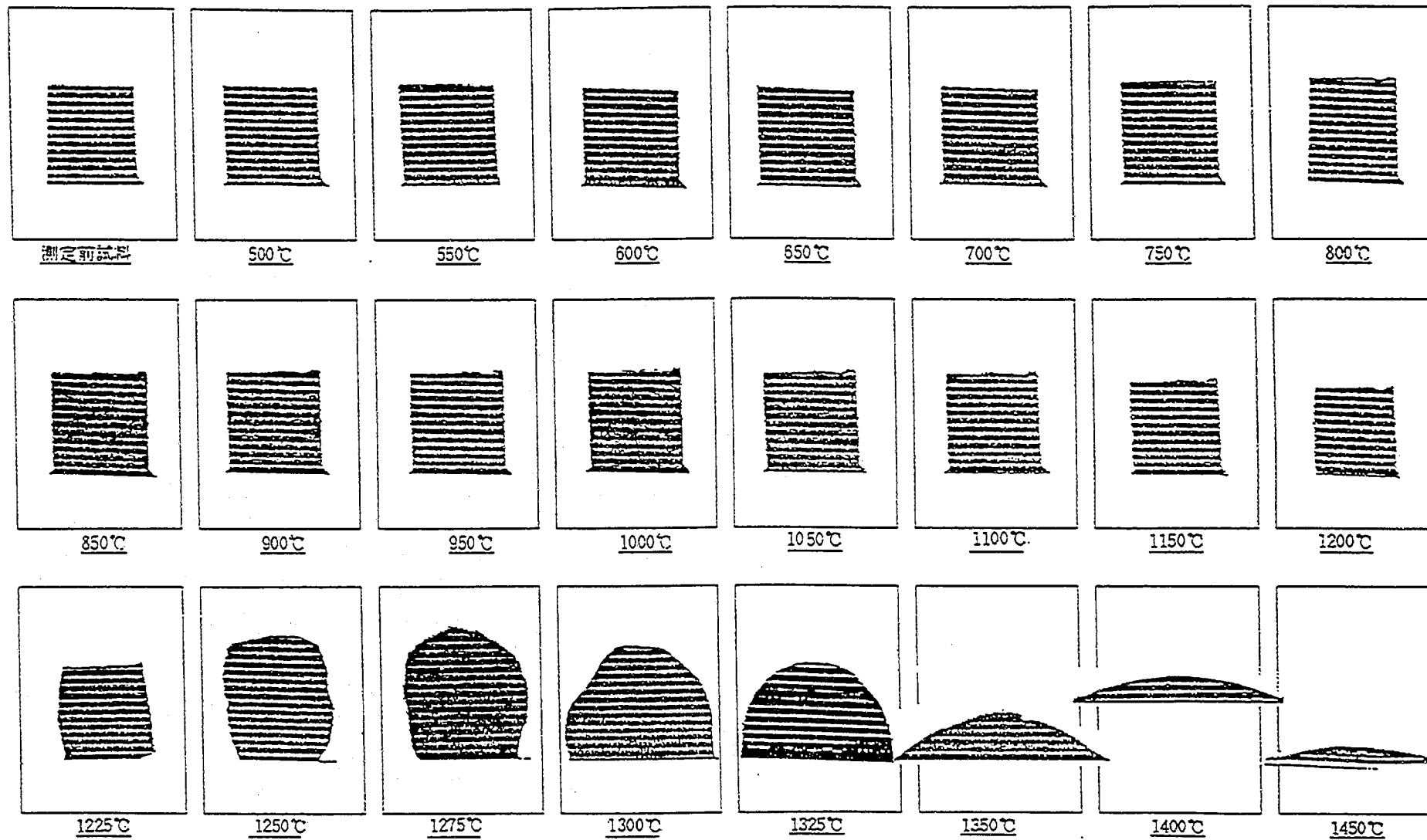


図-6.2 膨張率・収縮率測定結果

表-6.5 投影面積の変化

単位%

温度℃	ケース11	ケース12	ケース13	ケース14	ケース15	ケース16
室温	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
1200	72.9	73.4	70.6	69.9	71.1	71.6
1225	76.4	73.4	75.8	68.2	71.7	67.6
1250	109.3	107.7	104.3	104.5	102.7	97.7
MAX	130.1	120.0	118.1	120.0	105.1	116.1
1250	123.6	114.0	117.1	111.4	101.7	105.8
1225	115.3	107.9	109.0	102.2	96.6	97.1
1200	108.3	100.8	102.6	95.0	92.2	90.5
1150	104.2	93.9	94.8	87.3	87.0	84.2
1100	99.2	92.3	91.6	84.3	85.9	81.7
1050	97.8	91.1	90.5	83.0	85.4	81.8
1000	97.1	90.4	89.5	82.2	84.8	81.0
950	96.6	90.6	90.0	82.0	84.5	81.0
900	96.6	89.9	89.7	81.7	84.3	80.7
850	96.4	89.7	88.7	82.5	83.9	80.4
800	96.8	90.2	88.7	82.5	84.2	80.1
750	95.8	90.1	89.0	82.5	83.8	79.8
700	95.4	90.0	89.4	82.3	82.9	80.6
650	95.7	89.9	90.1	81.9	83.3	79.8
600	96.2	88.7	89.5	81.8	83.1	79.1
550	96.3	89.5	89.3	81.8	83.5	79.1
500	96.0	88.5	88.4	82.6	83.1	79.1

測定結果

供試体測定投影面の図化

試料名 ケース10 最大膨張温度(1275℃)から降温速度5℃/min

1989.11.22

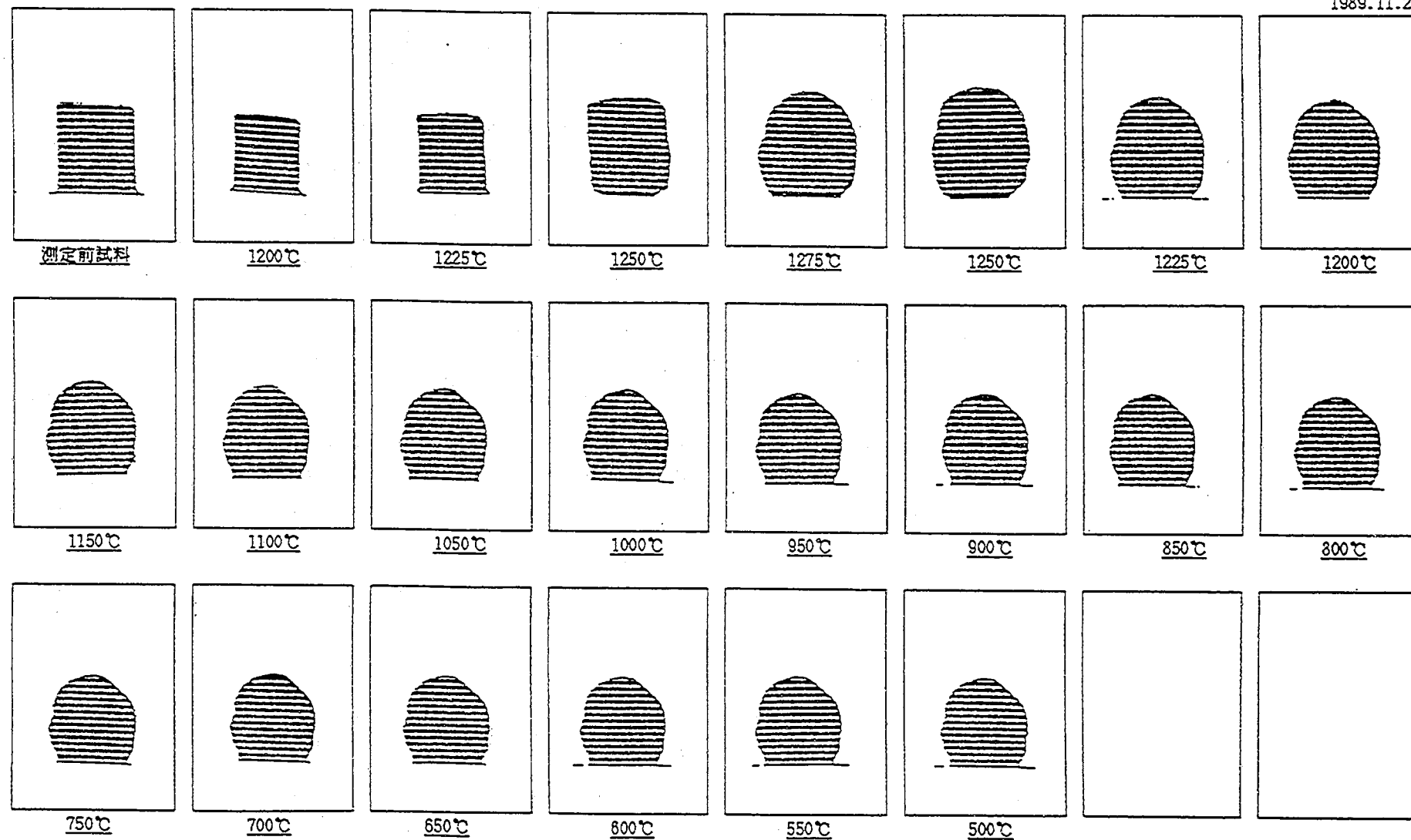


図-6.3 膨張率・収縮率測定結果

6.3 軽量骨材の作製

軽量骨材の作成方法は以下のとおりである。

- 1) 土を数mmの粒状にする。
- 2) 6.2で確認された膨張温度前後で試験焼成し、焼成に適した温度を決定する。
- 3) 土をキルンに入れて焼成する。

今回の焼成温度では試験焼成の結果表面の溶着が懸念されたので、珪石の粉末をまぶして焼成している。

作製した軽量骨材は、JIS A 5002「構造用軽量コンクリート骨材」の絶乾比重の区分に従い、L（比重1.0未満）、M（比重1.0以上1.5未満）、H（比重1.5以上）に区分し、以降の実験に使用した。

6.4 軽量骨材としての適応性試験

6.4.1 試験項目

軽量骨材について「JIS A 5002構造用軽量コンクリート骨材」により以下の試験を行った。

- (1) ふるい分け試験
- (2) 比重及び吸水率試験
- (3) 洗い試験
- (4) 単位容積質量及び実積率試験
- (5) 化学成分分析試験

また、「構造用軽量コンクリート骨材」以外の試験として、

- (6) 「JIS A 1121ロサンゼルス試験機による粗骨材のすりへり試験」を実施した。

(1)～(6)は粒度調整後の資料で実施した。また、作製した軽量骨材の内、粒径20～25mmの骨材が非常に少なかったので、B区分については省略した。

6.4.2 試験結果及び考察

ふるい分け試験の結果を表-6.6に、その他の試験結果を表-6.7に示す。

表-6.6 ふるい分け試験結果

ふるいを通るものの質量百分率						
骨材の種類	ふるいの呼び寸法 (mm)					粗粒率
	25	20	15	10	5	
L	100	83	57	18	1	6.98
M	100	95	80	37	9	6.60
S	100	99	91	46	10	6.45
JIS A 5002 の規格値	100	100 ~ 90	—	85 ~ 20	10 ~ 0	—

表-6.7 試験結果

試 験 項 目		骨 材 の 種 類			J I S 規 格 値
		L	M	H	
比重及び 吸水率	表乾比重	0.94	1.43	1.65	
	絶乾比重	0.88	1.34	1.55	
	吸水率 (%)	7.1	6.6	6.8	
単位容積重量 及び実績率	単位容積重量 (kg/l)	0.552	0.845	0.997	
	実績率 (%)	62.9	63.5	63.3	60.0以上
洗い試験	0.074mm通過量 (%)	7.1	6.6	6.8	
化学成分 分析試験	SO ₃	—	0.0	—	0.5 以下
	NaCl	—	0.00	—	0.01以下
すりへり減量 (C粒度) (%)		54.9	34.8	25.2	

これらの試験結果の内、比重及び吸水率試験・洗い試験・単位容積重量については軽量骨材に関するJISの規定がないので、これらの試験結果に対する評価はできないが、実績率、化学成分分析の試験結果はJISに規定している軽量骨材の規格値を満足している。

今後は、化学成分は土の種類や発生工事の種類、添加材の有無などにより変動することが予想されるので、これらの条件とJISの規格値との関係を調べておく必要がある。

6.5 コンクリート供試体試験

粒土調整した軽量骨材を使用してコンクリートの圧縮試験を行い、砕石を用いたコンクリート強度と比較することにより軽量骨材の強度を検討した。ただし、L骨材については、コンクリート圧縮試験に使用できるだけの量が得られなかったので実施していない。

6.5.1 試験方法

試験の諸条件は以下のとおりである。

供 試 体 寸 法：直径10cm、高さ20cmの円柱

セ メ ン ト：普通ポルトランドセメント

骨 材：細骨材 瀬戸内産海砂

粗骨材 高槻産砕石、軽量骨材（H骨材・M骨材）

コンクリート配合条件：W/C 50%

スランプ 6～9 cm

空気量 4.5～6 %

養 生 日 数：1週、4週

混 和 剤：ポゾリスNo.8

空 気 調 整 剤：ポゾリスNo.303A

骨材の組合せを表-6.8に示す。

表-6.8 コンクリートの骨材の組合せ

配合結果	骨材の組合	
	粗骨材	細骨材
ケース1	比較用碎石	海 砂
ケース2	軽量骨材 M	//
ケース3	軽量骨材 II	//

コンクリートの配合は、6.5.1で述べた配合条件を満足するように試験練りを実施し、強度試験用コンクリートの配合条件を決定した。試験練りは、W/C、スランプ、空気量を固定条件とし、所定のコンクリートを得るため、単位水量、細骨材率、混和材の添加率を変化させることとした。なお、粗骨材は表乾状態で軽量し、細骨材は表面水率を測定して単位水量の補正を行っている。

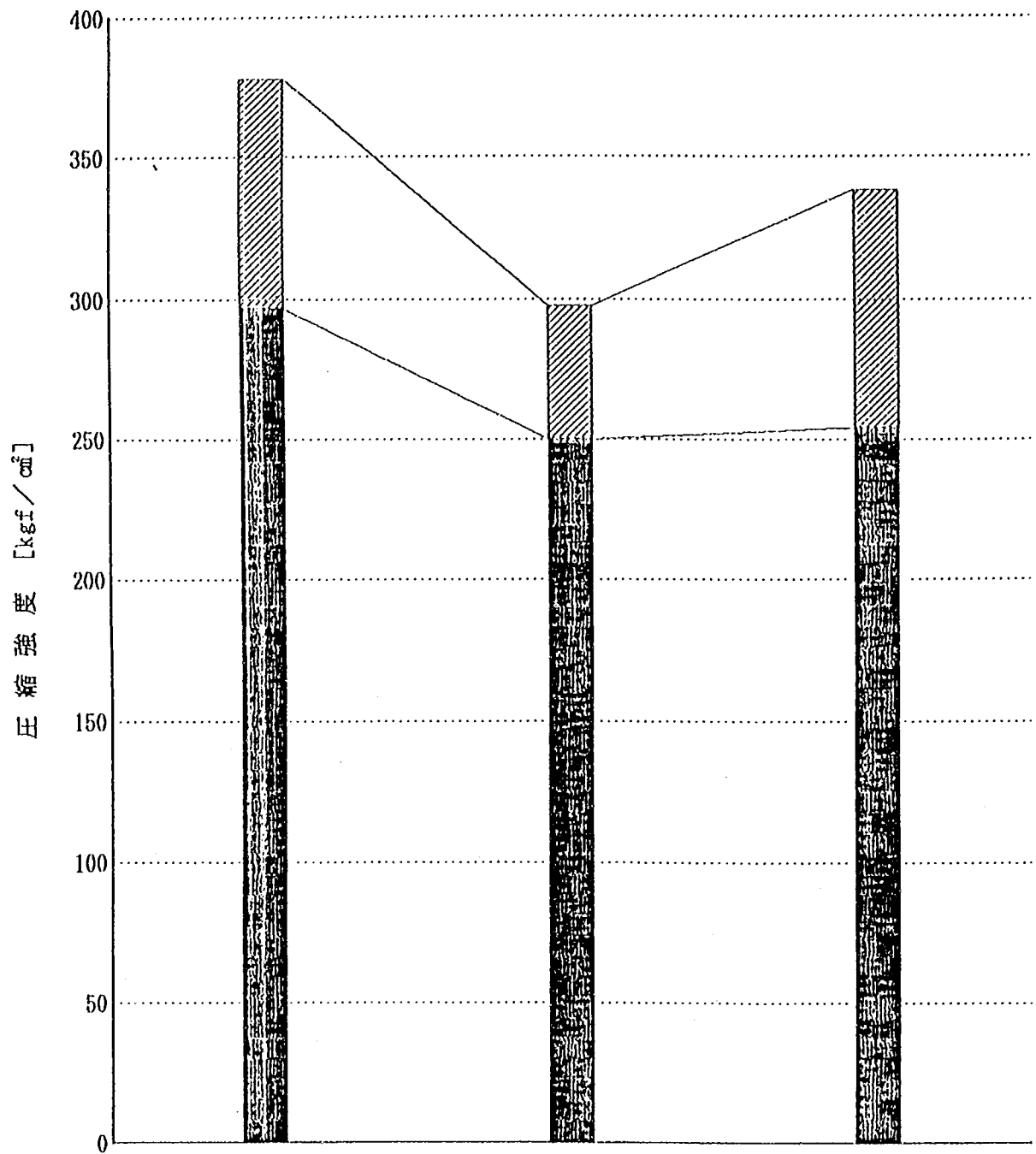
6.5.2 試験結果及び考察

コンクリートの圧縮試験結果を表-6.9、及び図-6.4に示す。

表-6.9 コンクリートの圧縮強度

	圧縮強度[kgf/cm ²]	
	7日	28日
ケース1	297	378
ケース2	250	298
ケース3	254	338

材令1週 材令4週



		ケース 1	ケース 2	ケース 3
圧縮強度 [kgf/cm ²]	1 週	297	250	254
	4 週	378	298	338
現場配合 [kg/m ³]	セメント	340	320	320
	水	165	155	155
	細骨材	海砂 773	海砂 712	海砂 712
	粗骨材	砕石 1028	軽量 M 589	軽量 II 684
	混和剤	0.85	0.80	0.80

図-6.4 軽量骨材を用いたコンクリートの圧縮強度試験結果

比較用骨材と、2種類の軽量骨材を用いたコンクリートの圧縮強度を比較すると、次に述べるような傾向がある。

- (1) 材令4週までのデータでは、軽量骨材を用いたコンクリートは、比較用骨材を用いたコンクリートの圧縮強度よりも低い値となっている。これは、軽量骨材の内部構造が発泡多孔質であるため、川砂や川砂利と比較して骨材強度がおとり、その結果、コンクリート強度も低い値となったものと考えられる。
- (2) M骨材とH骨材を比較すると、材令7日まではほぼ同じ強度をであるが、その後、材令28日までの強度の伸びは、M骨材が50kgf/cm²に対し、H骨材は100kgf/cm²となっている。これは、H骨材がM骨材よりも、比重、最大寸法、単位容積重量が大きいためと考えられる。

文献によれば、軽量コンクリートの比重、及び最大寸法が強度に及ぼす影響は、以下のように述べられている。

図-6.5に示すように、気乾比重1.5以下の軽量骨材を用いたコンクリートの圧縮強度は、350kgf/cm²程度が限度である。今回の実験で使用した軽量骨材は、H骨材の表乾比重は1.65、M骨材の表乾比重は1.43である。

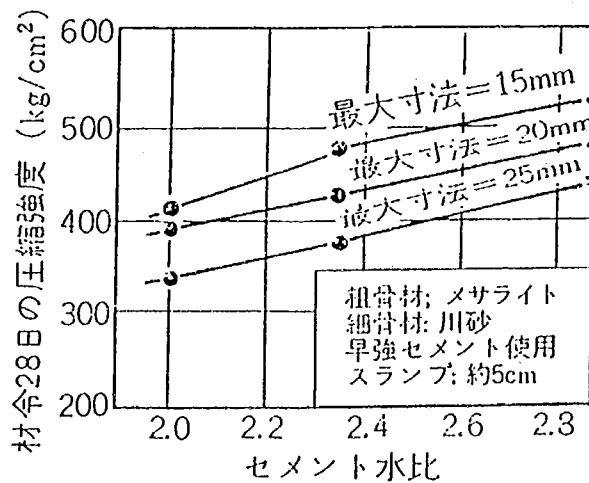


図-6.5 各種軽量骨材コンクリートの
圧縮強度と比重

図-6.6に示すように、軽量骨材をコンクリートの粗骨材として利用使用した場合、最大寸法の大きさと、コンクリートの圧縮強度の関係は逆である。今回使用した軽量骨材の最大寸法は、H骨材に比べ、M骨材の方が大きい。

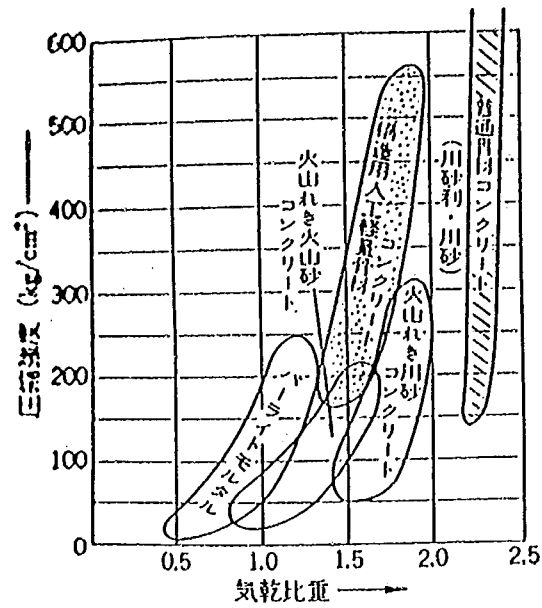


図-6.6 人工軽量骨材の最大寸法と
コンクリートの圧縮強度

以上のような関係は、今回の一連の実験結果とも符合するものである。

7. 高圧脱水処理による土質改良試験

7.1 目的及び概要

泥水シールド加圧工法、杭基礎工事、地下連続壁工事等から発生する高含水比の泥水は、そのままの状態では通常の運搬は不可能であるので、固化材やフィルタープレス機などにより処理されることが多い。

固化材による処理は、適切な固化材を選択することにより泥水の強度を確実に確保することができるが、処理量は泥水量とほぼ同量である。一方、プレス処理は、現在のプレス機の脱水圧が6～10kgf/cm²程度であり、プレス後は、泥水に比べて処理量を減量することはできるが、ハンドリング改善程度の改良であり、強度などの点から土構造物の材料には適さない。

近年の地下空間の高度利用、ビル需要の増加などによる残土発生量の増加、都市の膨張に伴う空地の減少、環境保全からの新たな受入れ地の規制、海面埋立て地の減少等による受入れ地の減少を考えると、プレス処理による処理土量の減少は非常に有効的で、受入れ地の延命化だけではなく、トラック交通量の減少、残土処理費用の軽減化のメリットも発生することになる。更に、何らかの方法により、プレス処理後の土をそのまま盛土材料、埋め戻し材料等の土質材料として利用できるのであれば、購入土の減少、購入土減少に伴うトラック交通量の減少、さらには及び土取り作業減少による自然環境保護の面からも効果があると思われる。

本章では、50kgf/cm²までの範囲で圧力を設定できる高圧フィルタープレス処理機を用い、高圧脱水処理による泥水の土質改善について検討を行なった。

7.2 試験概要

7.2.1 泥 水

実験に使用した泥水は、泥水加圧シールドの工事現場から発生した二次処理前の泥水である。泥水の粒土、及び含水比を表-7.1に示す。

表-7.1 対象泥水の土質特性

		A	B	C
礫分 (2000 η 以上)	%	0	0	0
砂分 (74～2000 η)	%	2	7	20
シルト分 (5～74 η)	%	51	39	54
粘土分 (5 η 以下)	%	47	54	26
最大粒径	mm	0.25	0.25	0.25
含水比	%	341.2	585.9	324.2

7.2.2 脱水条件

試験脱水は、脱水圧、脱水時間、固化材添加、泥水の種類が処理土の物性に与える影響を確認するため、表-7.2に示す脱水条件で実施した。なお、脱水後の形状は、直径800mm、厚さ35mmの円盤状である。

表-7.2 脱水条件

対象土	作用圧力	作用時間	改良材添加率
A	10 kgf/cm ²	20 分	—
A	20 kgf/cm ²	20 分	—
A	30 kgf/cm ²	20 分	—
A	40 kgf/cm ²	20 分	—
A	50 kgf/cm ²	20 分	—
A	40 kgf/cm ²	15 分	—
A	40 kgf/cm ²	30 分	—
B	40 kgf/cm ²	20 分	—
C	40 kgf/cm ²	20 分	—
A	40 kgf/cm ²	20 分	2 %
A	40 kgf/cm ²	20 分	5 %
A	40 kgf/cm ²	10 分	5 %
A	40 kgf/cm ²	20 分	10 %

7.2.3 結果及び考察

泥水 A の脱水圧力と含水比の関係を図-7.1に、脱水時間と含水比の関係を図-7.2図-7.3に示す。

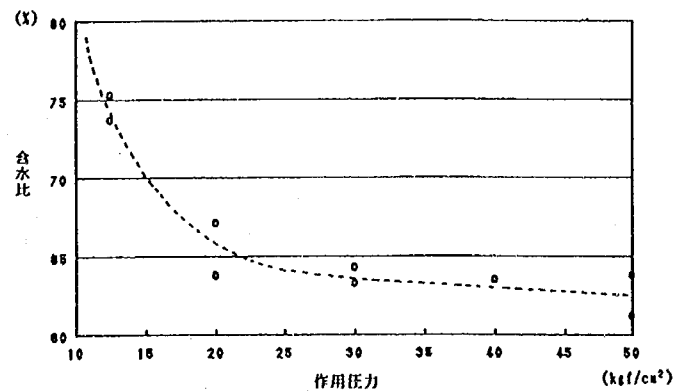


図-7.1 含水比特性（作用時間一定：20分、対象泥水-A）

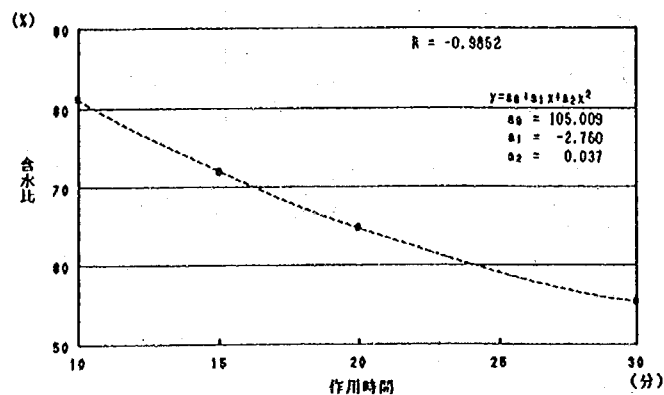


図-7.2 含水比特性（作用圧力一定：40kgf/cm²、対象泥水-A）

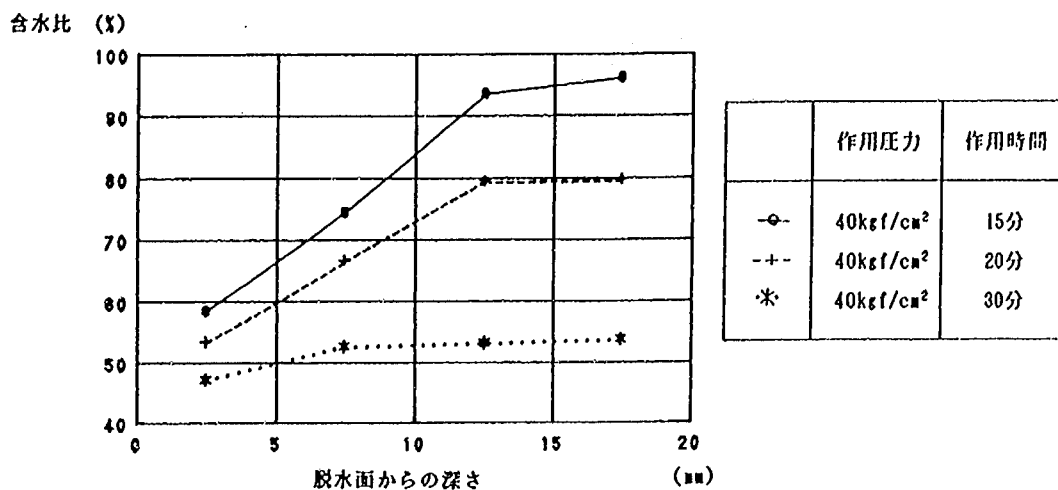


図-7.3 含水比特性（脱水時間変化、対象泥水-A）

処理後の含水比は、脱水時間20分の場合、20kgf/cm²の前後で減少傾向が急激に減少し、変曲点が存在しているが、脱水圧力を40kgf/cm²に固定した場合の含水比には変曲点は現われず、ほぼ脱水時間と含水比の関係は直線的に変化している。しかし、脱水物の表面からの含水比は表面付近は短時間で低下しているが、中心付近の含水比を低下させるためには作用時間を長くする必要がある。

次に、泥水Aの脱水後の強度を図-7.4、図-7.5に、泥水別の強度を図-7.6に示す。泥水Aのコーン指数は含水比の変化に比例し、含水比65%以上でコーン指数が2以上となり、最低限の盛土材料としての強度を確保している。脱水圧力40kgf/cm²、脱水時間20分の同一条件で脱水した場合、含水比が高い泥水Bの強度は低い、含水比が同程度の泥水Aと泥水Cではコーン指数に大きな差が生じ、泥水Cでは良質土と遜色のない強度がある。

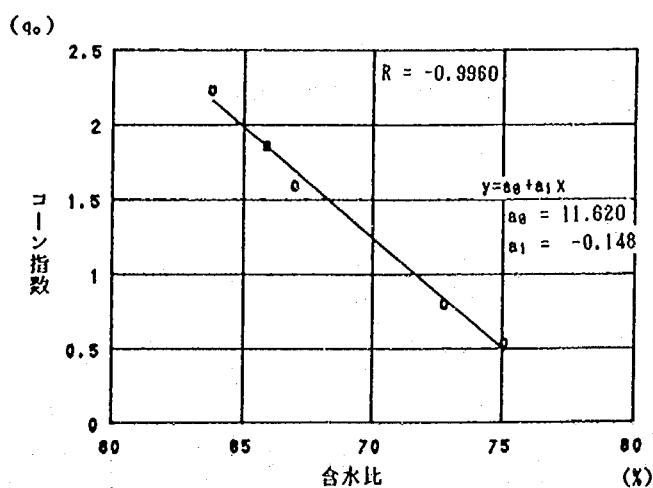


図-7.4 含水比とコーン指数の関係（対象泥水-A）

作用時間一定：20分、作用圧力：12.5、20、30、40、50kgf/cm²

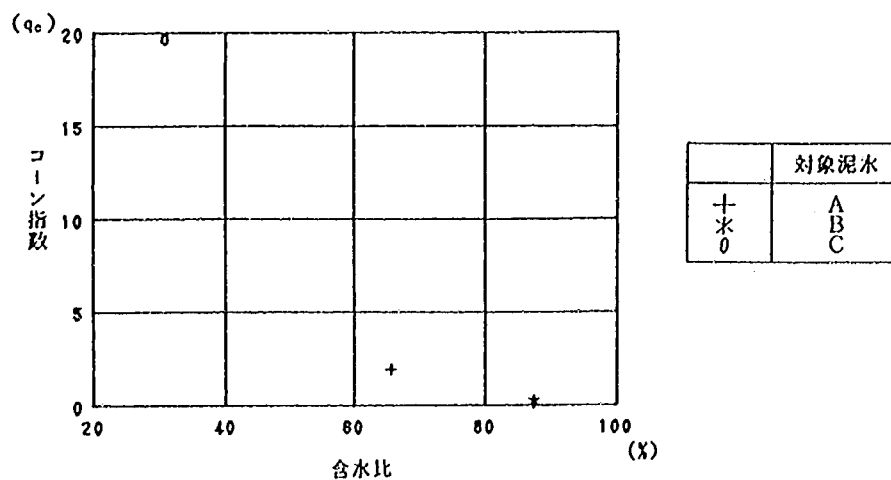


図-7.5 対象泥水別の土質特性（作用圧力一定：40kgf/cm²、作用時間一定：20分）

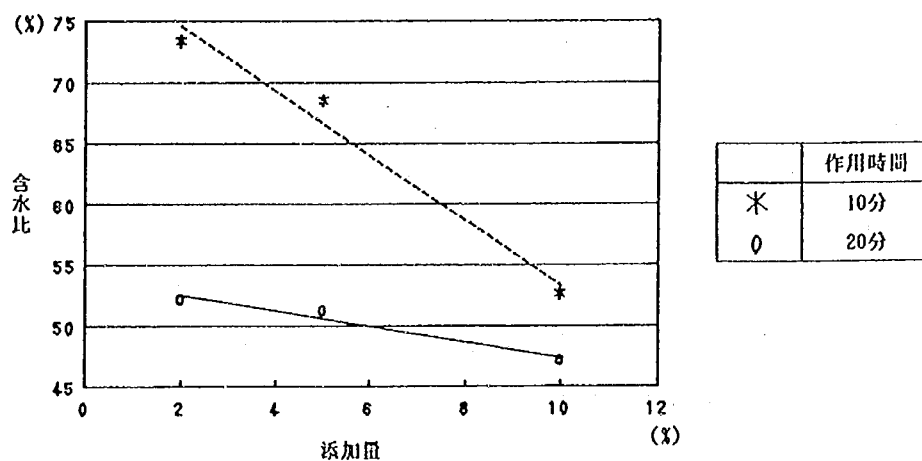


図-7.6 固化材添加量と含水比特性（作用圧力一定：40kgf/cm²、対象泥水-A）

固化材を添加した泥水の固化材添加量と脱水後の含水比の関係、及び含水比と強度の関係を図-7.7に、脱水された濾液のpHを図-7.8に示す。

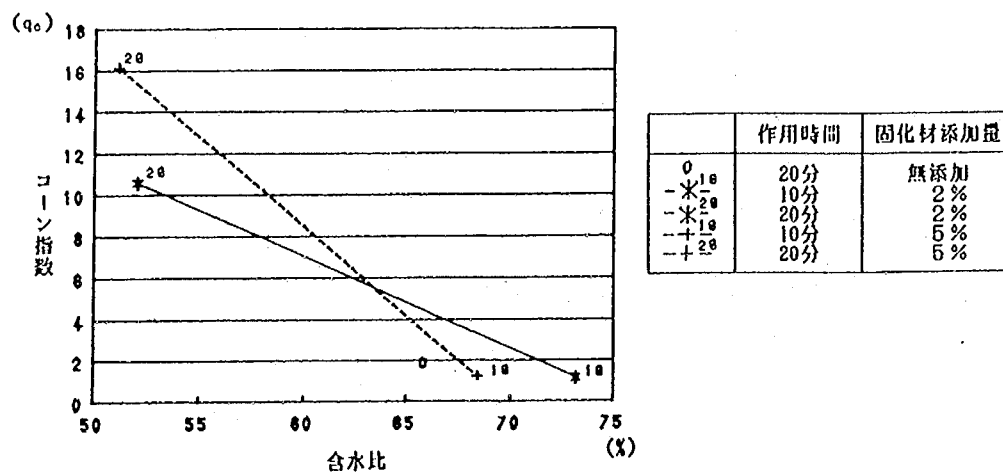


図-7.7 含水比とコーン指数特性（作用圧力一定：40kgf/cm²、対象泥水-A）

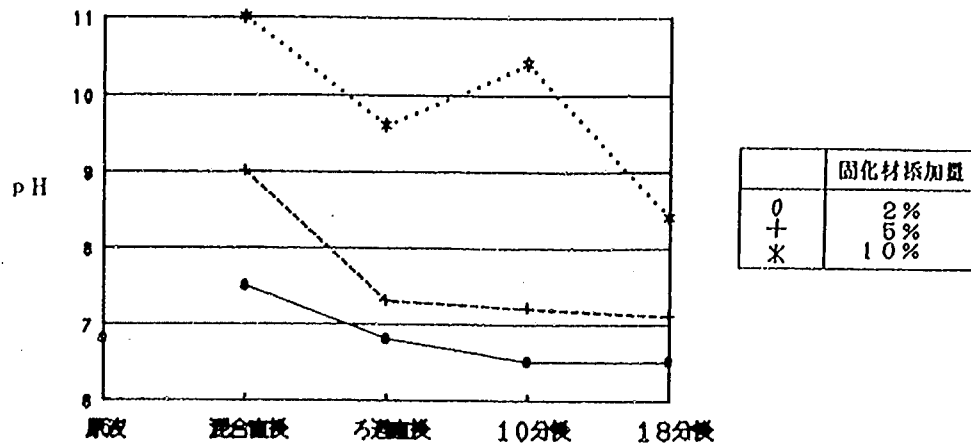


図-7.8 ろ液のpH特性（作用圧力一定：40kgf/cm²、作用時間一定：20分、対象泥水-A）

含水比は固化材添加率が高い程、また、脱水時間が長い程低下している。しかし、28日後の強度は、脱水時間による差は明確に現れているものの、添加率による差はほとんどない。これは、固化材の添加により泥水中の土粒子が団粒化して透水係数が大きくなり、その結果、含水比が低下したが、同時に改良材も大量に流出したためと考えられる。濾過水のpHも、固化材添加量の高いケースほど高くなり、濾過水に含まれる固化材の違いが現れている。

8. 固化処理土による土質改良試験

8.1 目的及び概要

土構造物には道路盛土、河川堤防、宅地等の種類があるが、明確に土の品質基準を定めたものは少なく、表-8.1のような一軸圧縮強度やCBR等の強度を必要とするといわれている。ここでは、土構造物として最も一般的な道路盛土を取り上げ、固化材により改良した土の適応性を確認した。

表-8.1 利用目的と要求品質の関係

利用目的	要求品質	備考
ハンドリングの改善	$qu = 0.2$ ————→	・ハンドリング改善だけなら $qu = 0.1 \text{ kgf/cm}$
トラフィカビリティの改善	$qu = 0.5$ ————→	・流動化防止には $qu = 0.3 \text{ kgf/cm}$ 程度必要 道路土工指針
道路盛土 路体 路床 上層路盤	$qu = 1.0$ ————→	CBR = 2.5%以上 CBR = 3%以上 修正CBR = 10%以上
セメント安定処理 石灰安定処理	一軸圧縮強さ(7日) 30 kgf/cm 一軸圧縮強さ(10日) 10 kgf/cm	アスファルト舗装要綱
下層路盤		修正CBR 10%以上
セメント安定処理 石灰安定処理	$qu = 1.0 \text{ kgf/cm}$ (7日) $qu = 7 \text{ kgf/cm}$ (10日)	アスファルト舗装要綱
擁壁基礎	$qu = 2.0$ ————→	道路土工指針
宅地造成	$qu = 1.0$ ————→	最新土木工事ハンドブック
遮水壁		10^{-6} cm/sec
裏込材		地山相当

qu = 一軸圧縮強さ

実現場で固化材により泥土を改良する場合、改良直後は泥状であるため、1～数日養生させてから搬出することが多いので、改良土を流用する場合の工程を「改良・固化、破碎、運搬、盛土」と想定し、泥土を固化材と混練・養生後に破碎し、再び締固め、強度及び環境面から盛土材料としての適否を検討した。

実験に用いた泥水は、東京都内の泥水加圧式シールド工事から排出された有楽町層を用い、含水比を室内実験では100%に、盛土実験ではフィルタプレスによる脱水前後の状態を想定して70%（泥水A）と150%（泥水B）に調整して用いた。また、盛土実験には固化処理土の他に比較用として山土による盛土も併せて施工した。

固化材は、室内試験ではセメント系固化材と石灰系固化材を、盛土実験では目標強度を一軸圧縮強度で2 kgf/cm²（1日養生）とし、添加量を泥水Aでは45kgf/cm³、泥水Bでは70kgf/cm³とした。

8.2 実験方法

8.2.1 室内実験

室内実験では、固化処理後の土の破碎ならびに破碎後の転圧までの放置時間が強度に及ぼす影響を調べるため、改良後3日後に破碎し、改めて締固めた改良土（以下、再固化土と言う。）の改良後56日養生の一軸圧縮強度と、無破碎の3日養生の一軸圧縮強度の比較を行った。

再固化の供試体は、破碎直後に締固めたもの（以下、再固化₁と言う。）と、破碎後25日目（固化材添加後28日目）に締固めたもの（以下、再固化₂と言う。）を作成した。なお、再固化時の締固め方法は土質工学会基準（案）「締固めによる安定処理土の試験方法（プラグ法）」によった。

8.2.2 盛土実験

泥水の改良方法は、写真－8.1に示す縦型連続式処理機によりセメントと攪拌する方法を用いた。



写真－8.1 縦型連続処理機

改良から盛土作成までの手順はつぎのとおりである。

- ・泥水の含水比調整

- ・泥水を縦型連続処理機によりセメントと混合
- ・処理機より吐出された状態で3日間養生
- ・3日間養生後にバックホーにより掘削
- ・盛土建設場所までトラックで運搬
- ・2tブルドーザで敷き均し・転圧し、盛土を作成。

実験に用いた泥土の物性と改良条件を表-8.2、表-8.3に、盛土形状を図-8.1に示す。また、盛土の全景を写真-8.2及び写真-8.3に、施工状況を写真-8.4～写真-8.8に示す。

表-8.2 泥土の物性

試料番号		A($w=70\%$)	B($w=150\%$)
粒 度 特 性	砂分 (2000 μm 以上) %	0	0
	砂分 (74~2000 μm) %	11.52	10.65
	シルト分 (5~74 μm) %	56.58	57.45
	粘土分 (5 μm 以下) %	31.9	31.9
	最大粒径 mm	2.00	2.00
	均等係数 U_c	—	—
	曲率係数 $U_{c\cdot}$	—	—
コン シ テ ン ス 特 性	液性限界 W_L %	46.0	
	塑性限界 W_P %	26.7	
	塑性指数 I_P	19.3	
土粒子の比重 G_s		2.716	2.707
自然 状 態	含水比 W_a %	70	150
	湿潤密度 P_a g/cm ³	1.585	1.334
	間隙比 e	1.913	4.072
	飽和度 S_r %	99.38	99.71
強度減量 (%)		6.34	6.40
pH		8.15	8.20

表-8.3 改良条件

	改良土A	改良土B
初期含水比	70%	150%
改良材の種類	セメント系固化材	セメント系固化材
改良材添加量	45kg/m ³	70kg/m ³
改良目標強度 (1日強度)	2kgf/1F	2kgf/1F

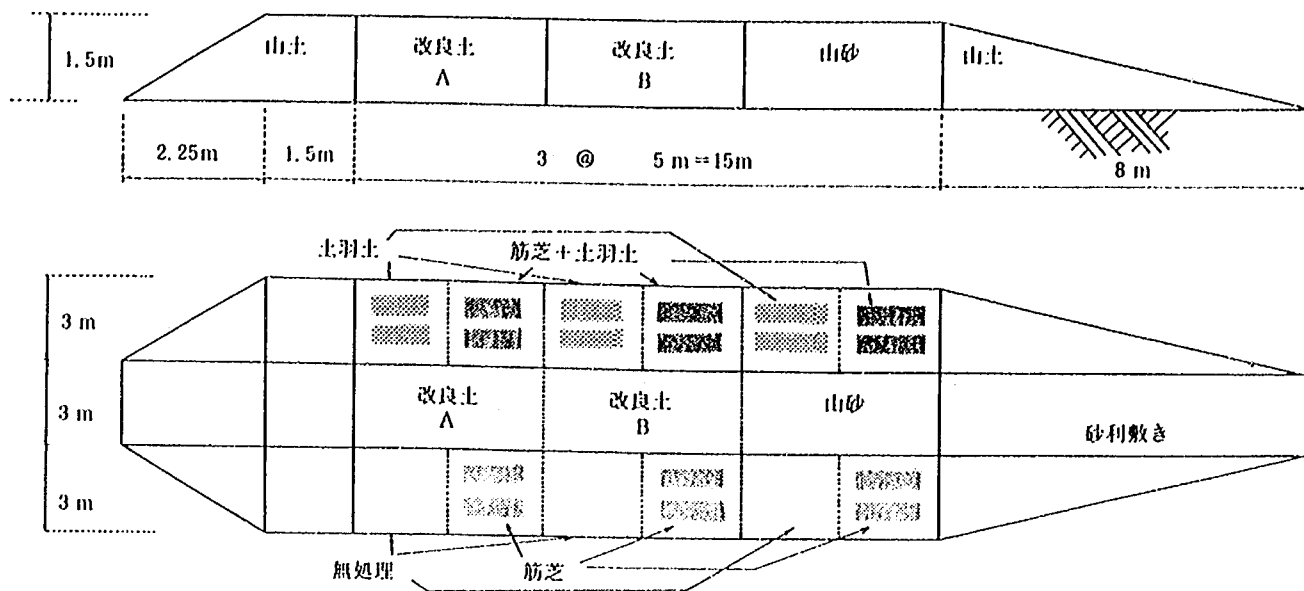


図-8.1 盛土形状



写真-8.2 盛土全景

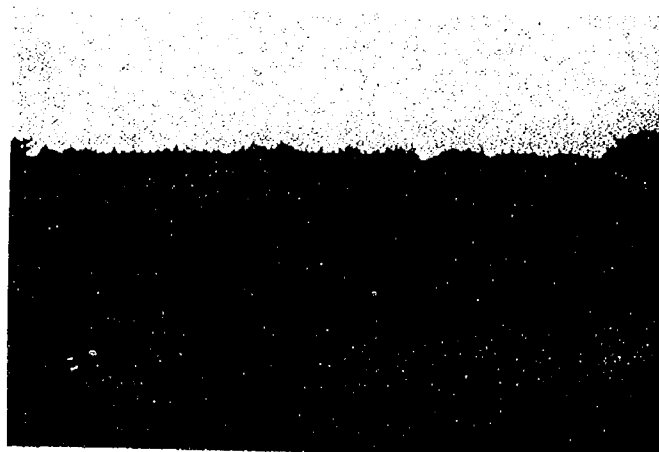


写真-8.3 盛土全景



写真-8.4 掘削状況（2日養生、初期含水比70%）



写真-8.5 掘削状況（2日養生、初期含水比150%）

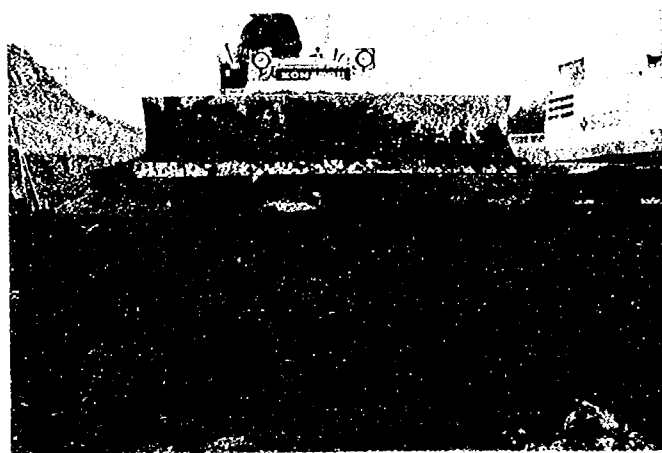


写真-8.6 敷均し・転圧状況（初期含水比70%）

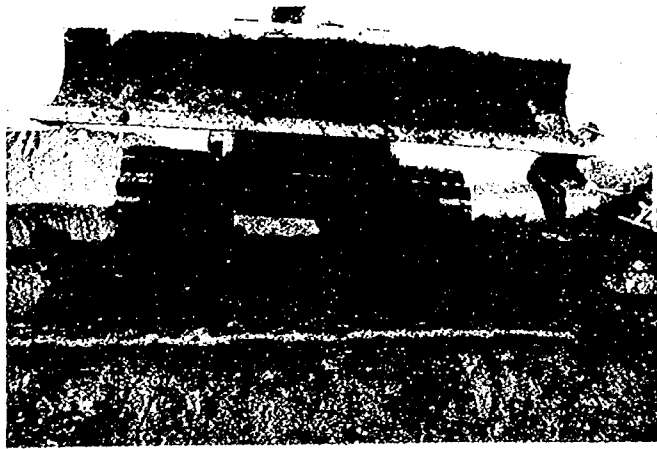


写真-8.7 敷均し・転圧状況（初期含水比150%）

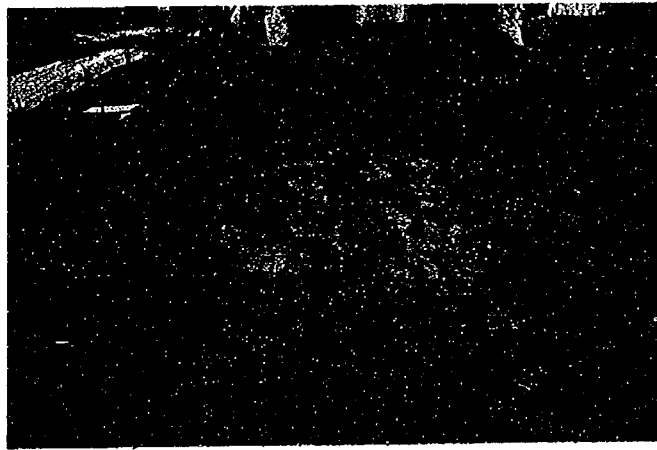


写真-8.8 盛土慣性後の状況（天端）

盛土の試験は、次に示す項目を、盛土完了後、1日後、10日後、1ヶ月後、3ヶ月後、6ヶ月後に実施した。

- ・現場CBR試験
- ・一軸圧縮強度
- ・土研式貫入試験
- ・pH試験

8.3 結果及び考察

8.3.1 室内実験

表-8.4に一軸圧縮試験(q_u)の結果を示す。再固化₃、再固化₂とも固化材の種類・改良率に関係なく、無破碎の3日強度に比べ一軸圧縮強度は小さくなるが、養生初期の段階で破碎してもその後ある程度強度は回復するようである。

表-8.4 一軸圧縮試験結果

設定含水比 (%)	100			
固化材の種類	石灰系固化材		セメント系固化材	
固化材添加量 (kg/m ³)	30	60	30	60
A : 3日養生 一軸圧縮強度 (kgf/cm ²)	1.96	5.41	0.72	4.53
B : 再固化 ₃ 一軸圧縮強度 (kgf/cm ²)	0.84	5.13	0.53	2.08
C : 再固化 ₂₀ 一軸圧縮強度 (kgf/cm ²)	0.62	3.85	0.24	1.71
B / A	0.43	0.95	0.73	0.46
C / A	0.32	0.71	0.33	0.38

破碎から締固めまでの時間の影響は、全てのケースで再固化₃の強度は再固化₂₀の強度より大きく、破碎後できるだけ早期に締固めることが構造物の強度を確保する上で重要であると考えられる。強度的には30 kg/cm²混合では再固化後の強度は $qu=1\text{kgf/cm}^2$ 未満の低強度であるが、60kg/cm²混合では $qu=1.5\text{kgf/cm}^2$ 以上であり一般に言われている盛土の一軸圧縮強度 $qu=1\sim3\text{kgf/cm}^2$ を満足している。

次に、無破碎の3日強度と再固化₃、再固化₂₀の強度の比は、再固化₃で0.5、再固化₂₀で0.3程度であり、泥土を盛土材料として流用する場合、室内実験により流用後の土構造物の強度をある程度推定することが可能である。

以上の結果より、固化処理土は盛土材料としての利用が可能であると考えられるが、固化材の添加率や破碎後の締固めまでの時間が強度に影響するので、添加率の決定や施工管理を慎重に行う必要がある。

8.3.2 盛土実験

1) 施工状況

盛土施工時の特徴として、以下のようなことが挙げられる。

- (1) 両改良土とも、養生1日目～3日目にバックホーで掘削すると土塊状を呈した。この土塊は、2 tブルドーザで転圧することにより圧砕することができた。
- (2) 改良土B (w=150%) を1 t振動ローラで転圧を試みたが、ローラが沈下し転圧作業が実施できなかった。
- (3) 改良土はダンプトラックにより運搬したが、積み下ろし時に改良土が10～20cm厚で荷台に付着したため、人力による取り除き作業が必要となり、通常の土砂と比較し作業効率が劣った。特に、含水比の高い改良土Bにおいてこの傾向は顕著であった。
- (4) 改良土Bの転圧では表面が泥濘化した状態になった。また、盛土作業中、盛土完成後とも両改良土から多量の水が発生した。
- (5) 改良土Bでは、施工時に盛土上に重機が乗るとのり面がはらみだしたが認められた。

各盛土材料の室内予備試験の結果を表-8.5に、盛土施工中の密度及び含水比を表-8.6、表-8.7に示す。

表-8.5 室内予備試験結果

盛土材料	湿潤密度 g/cm ³	含水比 %	乾燥密度 g/cm ³	施工管理基準値 g/cm ³
改良土 A	1.472	64.9	0.893	0.759
改良土 B	1.346	110.8	0.639	0.543
購入土	1.980	18.4	1.672	1.421

* 施工管理基準値 = 乾燥密度 × 0.85

表-8.6 施工時密度測定結果 (改良土 A)

	1 層	2 層	3 層	4 層	5 層	平均
湿潤密度 g/cm ³	1.351 1.373	1.529 1.460	1.437 1.567	1.401 1.430	1.508 1.514	1.458
含水比 %	66.4 58.4	62.1 69.0	54.4 67.0	66.4 65.4	61.0 60.9	63.7
乾燥密度 g/cm ³	0.812 0.867	0.943 0.864	0.931 0.900	0.842 0.865	0.932 0.941	0.890

表-8.7 施工時密度測定結果 (改良土 B)

	1 層	2 層	3 層	4 層	5 層	平均
湿潤密度 g/cm ³	1.280 1.317	1.350 1.248	1.258 1.337	1.334 1.290	1.350 1.371	1.314
含水比 %	122.0 116.0	118.0 141.0	145.0 150.0	154.0 139.0	122.0 130.0	133.7
乾燥密度 g/cm ³	0.581 0.609	0.618 <u>0.518</u>	0.514 <u>0.535</u>	0.525 <u>0.540</u>	0.608 0.596	0.564

—— は、施工管理基準値以下の個所。

2) 強度

盛土の強度確認法として、盛土の天端付近の強度には「現場 CBR 試験」と天端からサンプリングした不攪乱土の「一軸圧縮強度」により、盛土全体の強度には「土研式貫入試験」を用いた。

現場 CBR 試験結果を表-8.8に、一軸圧縮試験結果を図-8.2に示す。改良土 A は、盛立後 1 日では、現場 CBR = 0.5%、一軸圧縮強度 $q_u = 0.3 \text{ kgf/cm}^2$ であり、一般にいわれている道路盛土材の一軸圧縮強度 ($1.0 \sim 2.0 \text{ kgf/cm}^2$) に比較すると値は小さくなっているが、10 日目には $q_u = 0.9 \text{ kgf/cm}^2$ となり、また、現場 CBR 値についても 10 日目以降は約 6% 以上を確保し、山土より大きな値を示していることを考えると、10 日目に

において盛土材としての最低限の強度は発現しているものと考えられる。これに対し、改良土Bは1ヵ月後の一軸圧縮強度が $q_u=0.8\text{kgf/cm}^2$ しか発現していないので、このままの状態では盛土材として適応させることはできない。しかし、盛土の形状に施工できたことを考えると、盛土以外の低強度土構造物への流用は可能であり、また、盛土等の土構造物に対しても、緩速施工の実施、初期含水比の若干の低下、固化材点火量の増量等により盛土材としての流用が可能と考えられる。

表-8.8 現場CBR試験結果

・ ¹ 材 令	土 質	・ ² C B R (%)	含水比 (%)
1 日	購入土 (山砂)	3. 1	1 5. 5
	B (泥水 150%)	自沈・測定不能	7 1. 1
	A (泥土 70%)	0. 5 3	5 6. 6
1 0 日	購入土 (土砂)	3. 1	1 6. 8
	B (泥水 150%)	4. 5	7 6. 3
	A (泥土 70%)	7. 2	5 7. 6
1 ヶ月	購入土 (土砂)	6. 3	1 6. 6
	B (泥水 150%)	3. 6	8 9. 0
	A (泥土 70%)	5. 7	4 0. 8

・¹ 盛立後の材令

・² 貫入量 2.5mm時

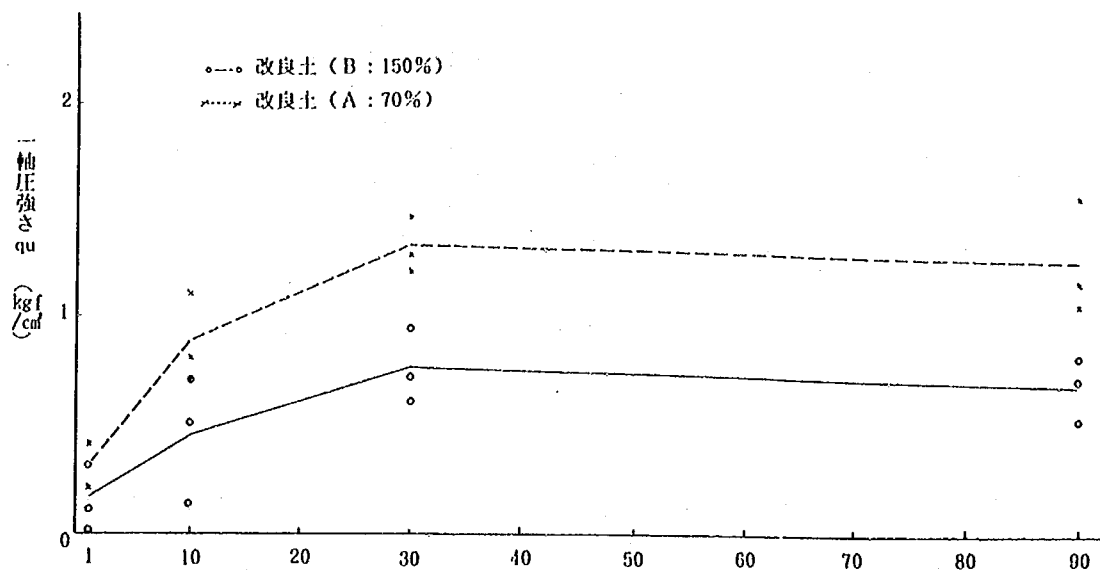


図-8.2 材令と一軸圧縮強さの関係

土研式貫入試験の結果(N_c 値)を図-8.3に示す。

改良土はA、Bともに6ヵ月までは強度の増加が認められるが、それ以降の強度の伸びは両改良土とも

なく、現場では固化材の反応は6ヶ月程度で終了するものと考えられる。Nc値は、改良土Aでは5～10であり、山土の6ヶ月養生と同程度の強度となっている。一方、改良土Bは5程度の強度しか発現せず、山土の盛土直後の強度程度に留まっている。

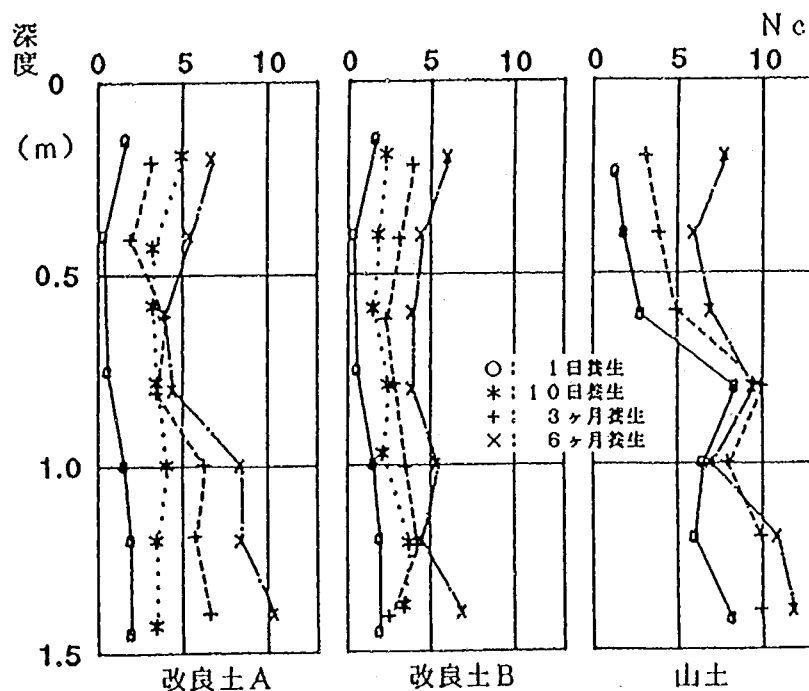


図-8.3 土研式貫入試験結果

3) pH

図-8.4に両改良土及び周辺地盤のpHを示す。周辺地盤の調査地点は盛土の影響を受けない場所であり、pHが7～9と少しアルカリ性を示しているのは、当該フィールドで過去に実施された薬液注入実験や地盤改良実験の影響である。盛土のpHであるが、両改良土とも改良土部分のpHは10前後の高いアルカリ性であるが、深度1.5m以深のpH、すなわち盛土下の原地盤のpHは7～9で周辺地盤のpHと同じであり、原地盤の上部20cmの範囲で多少高い傾向が認められる程度である。1) (4)で述べたように、盛土施工直後に盛土から多量の水が発生し原地盤にも浸透しているが、周辺地盤・原地盤には影響を及ぼしていない。カルシウム系のアルカリ水は土壤に吸着され、周辺地盤を汚染しないことが多くの文献で述べられているが、この盛土実験においても同様のことが確認できた。

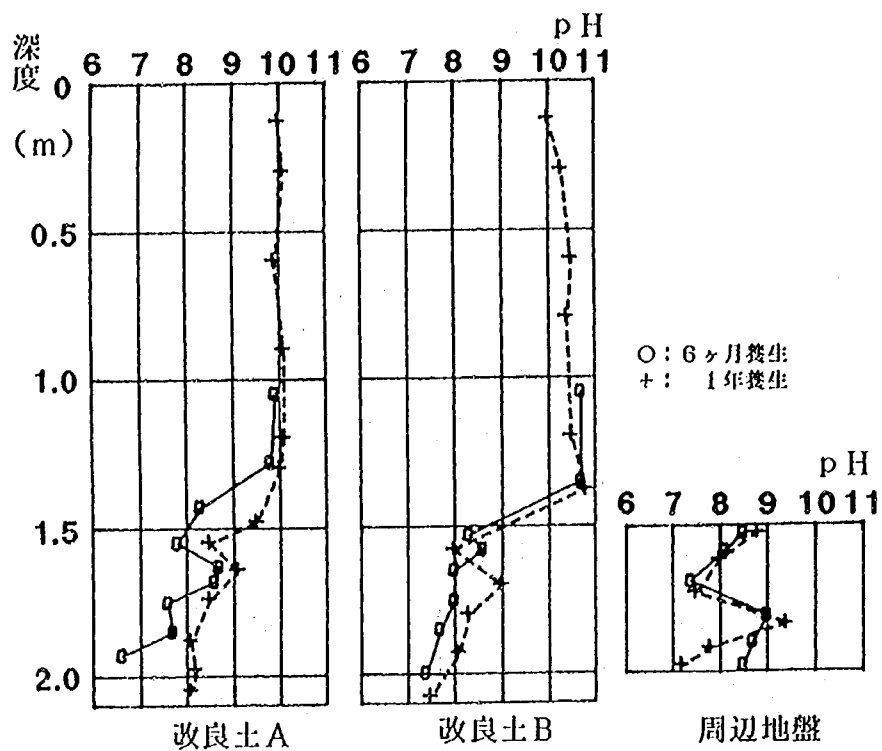


図-8.4 盛土及び周辺地盤の pH

9. 改良の経済性の検討

本章では、固化材による改良技術や熱処理による改良技術に要する費用を試算することにより、改良技術の経済性の検討を行うものである。

9.1 試算条件

試算の条件は次のとおりである。

(1) 改良対象土

- 改良対象土の物性は表-9.1に示すとおりである。

表-9.1 対象土の物性値

項 目		物 性 値
土 粒 子 の 比 重		2.7
有 機 分 含 有 量(%)		5
含 水 比(%)	脱 水 前	150
	脱 水 後	70
日 処 理 量 (■ ³)	脱 水 前	3,000
	脱 水 後	1,700

- 熔融処理に影響を及ぼす成分構成比、熔融温度特性は、表-9.2、表-9.3のとおりとする。

表-9.2 対象土の成分構成

成 分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	P ₂ O ₅	CaO
構成比	64.67	17.16	2.70	0.12	3.32
成 分	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	その他	塩基度 CaO/SiO ₂
構成比	7.00	2.16	1.91	0.96	0.05

表-9.3 対象土の熔融温度特性

軟化点	融 点	溶 流 点
1,250°C	1,320°C	1,330°C

- ・ 改良対象土の含水比は、泥水加圧シールド一次処理後の泥水と、一次処理後の泥水を脱水装置により脱水処理した泥水を想定し、それぞれの含水比を150%と70%とした。
- ・ 改良対象土の日処理量は、含水比150%の一次処理後の泥水は3,000m³/日、含水比70%の脱水後処理土は1,700m³/日とした。

(2) プラント

- ・ プラント等の原価償却は15年とする。ただし、脱水装置は現行の償却年数5年に合わせている。
- ・ 溶融プラントの稼働日数は300日/年とする。
- ・ 溶融プラント1系列当りの処理能力は40t・ds/日とする。
- ・ 溶融プラントの運転温度は1,450℃とする。但し、表面溶融炉は石灰による塩基度調整を行うこととしプラントの運転温度は1,350℃とした。
- ・ 脱水装置はフィルタープレスとし、仕様は65インチ、150室、5.25m³/h程度とする。
- ・ 泥水と固化材を攪拌する固化処理装置の能力は60m³/hとする。

(3) 試算に用いる単価

- ・ 費用の試算に用いた単価を表-9.4に示す。

表-9.4 使用単価

項 目		単 価
人件費万(円/年)	作業員	500
	管理者	700
A 重 油 (円/1) (1%分9%、 発熱量10,000kcal/kg)		46
上 水 (円/m ³)		100
工 業 用 水 (円/m ³)		20
電 力 (円/KWH) (契約量込み)		18
清 缶 材 (円/kg)		1,000
脱 酸 素 材 (円/kg)		1,750
食 塩 (円/kg)		50
捨て土代 (円/m ³)		4,000
砕 石 (円/m ³)		3,500

(4) 固化処理単価、脱水処理の単価

- ・ 脱水処理単価、固化処理単価は、各社から各種の製品が出されているが、同程度の能力のプラントでもプラント費に幅があることや、脱水装置により脱水圧や濾布の種類等が異なり、脱水時間などの脱水能力が異なる。また、固化処理後の強度は一軸圧縮強度（ q_u ）で0.5kgf/cm²（24時間養生）程度を想定したが、泥土の種類や状態により固化材の添加量が異なり、固化材の単価も種類により異なる。そのため、ヒヤリング結果などを参考に、脱水処理は1,500円/m³、固化処理は含水比150%の場合で2,000円/m³、含水比の場合で70% 1,500円/m³とした。

(5) その他

- ・ 試算は、プラント費（機械設備費、電気設備費）、運転経費、維持管理費、及び溶融プラントの占有面積について行い、土地の購入費や借地料、土地造成等の土木費用、管理棟等の建築費用は現場条件に左右されるものであり、一般的な想定が困難であるので試算の対象外とした。
- ・ 維持管理費は、諸設備費の5%とする。
- ・ 溶融プラントの運転に必要な人員構成は、運転人員として3人/班×4班、それ以外に日勤1人、管理者1人とした。
- ・ 泥土は固化処理前後で体積変化は生じない。

9.2 固化処理の費用分析

表-9.5に計算結果を示す。初期含水比70%の泥土は、含水比も低く、全体処理量も少ないので固化処理費用だけに着目すると初期含水比150%の泥土の40%程度となっているが、脱水費が必要となるため、発生泥土量1m³当りの処理費用としては2割程度高くなっている。しかし、初期含水比150%の泥土を直接固化処理する場合は、70%の泥土の場合に比べてプラント全体の占有面積が広く、処理土運搬用のトラックも倍近く必要となるので、借地料や運搬距離によっては、処理単価の逆転も考えられる。また、脱水処理を実施しない場合は泥土発生現場で固化処理することが必要となるので、固化処理場プラントを設置するスペースが現場にない場合は、この形式は採用が困難である。

表-9.5 固化処理費

	初期含水比150%	初期含水比70%	70%/150%
①脱 水 費（円）	—	4,500,000	—
② 固 化 処 理 費（円） （処理土全体）	6,000,000	2,550,000	0.43
③ 泥土処理単価（円） （発生泥土1m ³ 当り）	2,000	2,350	1.18
④捨 て 土 料（円）	12,000,000	6,800,000	0.57
⑤ 最終処分単価（円） ⑥（①+②+④）/3,000	6,000	4,600	0.76

次に、この処理土を捨て土した場合の比較では、脱水処理による減容化のため初期含水比70%の方が2割以上安価になっている。この試算には処理土の運搬に擁する費用は含まれていないので、実際の処理費は試算結果以上に差がある。

以上のことより、一般には、脱水処理を行うことにより全体処理費用が安く抑えられる。処理土を盛土材料などに有効利用できる場合は、盛土材購入費の軽減などにより全体費用の軽減が計られるならば、発生した泥土を脱水を行わずそのまま固化する方法も検討の対象となることがわかる。

9.3 熔融処理の費用分析

泥土熔融プラントを現在の技術水準で検討し、泥土をスラグ化した場合の費用分析を行った。

熔融処理技術は下水道の最終処理の一つとして各種の汚泥熔融炉が研究され、既に処理プラントとして実機で稼働する段階に至っている。ここでは4種類の代表的な熔融炉形式について泥土を熔融処理しスラグ化するための費用原単位を算出し、炉形式別にプラント建設費用及び運転に伴う費用等の比較を行った。

費用分析に伴う諸条件は次のとおりである。

炉形式 : 4種類(縦型旋回炉、横型旋回炉、表面熔融炉、コークスベット炉)

処理システム : 乾燥工程を含む熔融システム一式

泥土貯蔵ピットからスラグのストックヤードまでのシステム

(乾燥工程を必要としない炉形式の場合は乾燥機を省略)

NOx、SOx対策考慮

プラント運転費はシミュレーション計算により求められた燃料使用量等から1日(24時間)プラントを運転した場合に消費する燃料費、水道費、薬品費、電力費等の合計値である。

また、ここでのそれぞれの費用項目は、各処理単位で実運転に必要な量を積み上げ計算し各単価を掛けて算出した。

上記の操作により作製した処理量 $3,000\text{ m}^3/\text{day}\cdot\text{wet}$ (含水比150%)及び $1,700\text{ m}^3/\text{day}\cdot\text{wet}$ (含水比70%)のプラントについて、概算費用計算を行った結果を表-9.2~表-9.5に示す。泥土を 1 m^3 処理する費用は含水比=70%まで二次処理を行った後乾燥・熔融処理した場合で22,500~49,100円程度、発生状態(含水比=150%)のままで乾燥・熔融処理した場合で22,400~53,500円程度必要となり、炉形式により処理費用に大きな差が見られた。しかし、熔融処理技術は、下水汚泥処理においても実用化されたばかりの技術であり、また、現在の熔融技術は下水汚泥を対象としているが、建設事業から発生する掘削残土と下水汚泥は成分比も大きく異なり、建設汚泥に対する既存のデータが殆どない状態であり、建設汚泥の費用分析も下水汚泥処理の費用からの推測である。今後、建設汚泥を対象とした熔融処理技術が研究されることにより建設汚泥の熔融処理費用も低減されるものと考えられる。このため、今回の計算結果を単純に処理費として比較することは困難であるが、下水汚泥処理の実績を踏まえた費用分析により概略費用としての評価は可能であると判断される。

表-9.6 溶融処理に必要な費用：炉形式(1)

項 目	含水比70%費用	含水比150%費用
二次処理費	4,500,000	—
プラント制作費	39,470,000	43,020,000
プラント運転費（日）	54,765,000	58,120,000
合計	98,735,000	101,140,000
汚泥 1 m ³ 当り処理単価 （円/m ³ ）	32,911	33,713

表-9.7 溶融処理に必要な費用：炉形式(2)

項 目	含水比70%費用	含水比150%費用
二次処理費	4,500,000	—
プラント制作費	54,311,000	58,488,000
プラント運転費（日）	8,667,000	8,040,000
合計	67,478,000	67,314,000
汚泥 1 m ³ 当り処理単価 （円/m ³ ）	22,493	22,438

9.4 経済性の検討

9.1及び9.2で試算した処理費単価と、それに捨て土費を加えた一覧表を表-9.8、及び表-9.9に示す。

溶融による処理費用は、固化処理の10～35倍程度となっている。また、溶融処理は減容化が大きいいため、捨て土費用だけでは逆に溶融処理の方が安くなるが、捨て土費を考慮した場合においても、処理費用全体としては溶融処理費用は固化処理費の約4～10倍程度にまでしか下がらない結果となっている。

表-9.8 溶融処理に必要な費用：炉形式(3)

項 目	含水比70%費用	含水比150%費用
二次処理費	4,500,000	—
プラント制作費	48,044,000	60,578,000
プラント運転費（日）	80,753,000	99,792,000
合計	133,297,000	160,369,000
汚泥 1 m ³ 当り処理単価 （円/m ³ ）	44,432	53,456

表-9.9 溶融処理に必要な費用：炉形式(4)

項 目	含水比70%費用	含水比150%費用
二次処理費	4,500,000	—
プラント制作費	46,778,000	50,556,000
プラント運転費(日)	96,150,000	106,515,000
合計	147,428,000	157,071,000
汚泥 1 m ³ 当り処理単価 (円/m ³)	49,143	52,357

第7章までで、溶融スラグはコンクリート骨材として使用できる可能性が高いことを述べたが、今回対象としたような大量の固化処理土を盛土材料として有効利用することは不可能であるが、スラグであれば路盤材やコンクリート用骨材として利用可能な工事は相当数存在すると考えられる。そこで、捨て土まで含めた固化処理費用と、捨て土は含まない溶融処理費用の比較を行ってみた。その結果、溶融処理費は固化処理費の4～9倍になる。更に、スラグを使用することによる路盤やコンクリート用骨材の購入費用の低減までを考慮しても、骨材の購入費用は発生泥土 1 m³ 当り 1,000 円程度にしかならないため、処理単価の比は3.5～9.5倍程度にしか縮まらない。また、溶融炉の稼働日数は年300日と仮定しているが、建設残土の発生量は、季節的な変化が大きく、実際に稼働する場合の稼働日数は仮定した日数以下であると考えられ、現実的には固化処理費用との差は、今回の試算結果以上になるものと考えられる。

現在の情勢では、建設残土の溶融はエネルギー多消費型の処理手法であり、また、処理単価が現行の処理法に比べて非常に高いため、近い将来に実用化される可能性は少ないと思われる。今後、溶融処理を行う場合は、処理土(スラグ)の高付加価値化、技術開発によるエネルギー効率の向上及び廃熱の有効利用等を考える必要がある。

表-9.10 処理単価の比較(初期含水比70%)

(円/m³)

	炉形式(1)	炉形式(2)	炉形式(3)	炉形式(4)	固化処理
処理費単価 (捨土費含まず)	32,900	22,500	44,400	49,100	1,500
処理費単価 (捨土費込み)	34,000	23,600	45,500	50,200	5,500

注) 処理費用にはフィルタープレス代を含む。
処理単価は、発生泥水 1 m³ 当り。

表-9.11 処理単価の比較（初期含水比150％）

（円/㎥）

	炉形式(1)	炉形式(2)	炉形式(3)	炉形式(4)	固化処理
処理費単価 （捨土費含まず）	33,700	22,400	53,500	52,400	2,000
処理費単価 （捨土費込み）	34,800	23,500	54,600	53,500	6,000

注）処理単価は、発生泥水 1 ㎥ 当り。

10. 溶融モデルによるシミュレーション解析

10.1 調査目的

泥土の溶融システムを処理単位毎に区分すると、脱水、乾燥、溶融、熱回収及び排ガス対策処理の各工程からなっている。溶融処理に要する主な熱量としては水分を蒸発させるための比較的低温の熱量と溶融に必要な炉内温度を維持するための高温の熱量があり、溶融工程で使用する高温の熱量は乾燥工程に再利用できる。このため溶融システム全体の熱効率を検討する際には乾燥機・溶融炉等の熱効率や含水比・溶流点温度等の泥土の性状と言った個別の要因の検討に加え、溶融工程で使用する高温の熱量を乾燥工程にどの程度再利用するかと言ったシステム全体の熱バランスを検討する必要がある。

本章では下水汚泥の溶融システムを例にとり、溶融システムを構成する乾燥、溶融及び廃熱回収の各工程での熱量の収支を調べ、泥土の性状と溶融に要する熱量の関係を明らかにし、溶融システム全体としての消費熱量の効率化について検討した。図-10.1に溶融システムの概念図を示す。

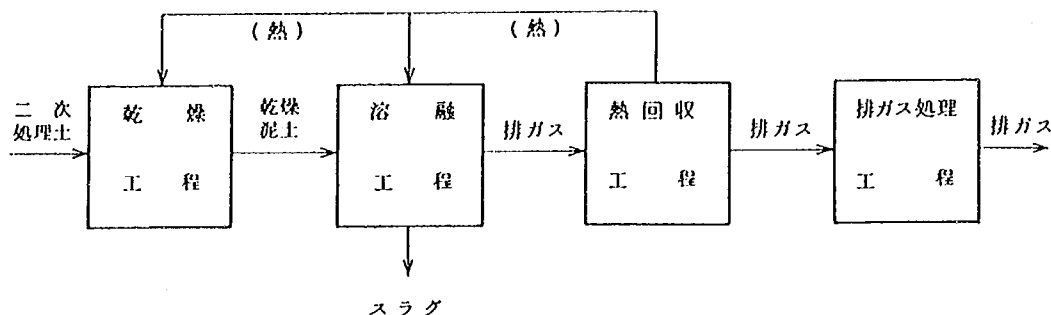


図-10.1 溶融システムの概念

10.2 調査方法

泥土の溶融処理のうち、熱消費に直接関係する乾燥、溶融、熱回収について、各工程内での熱量と物質の動きと回収された熱量を再利用するシステム全体での熱の動きについて熱収支・物質収支の平衡モデルによりシミュレーション計算を行い、泥土溶融システムの熱バランスの効率化について検討した。

なお溶融モデルは表面溶融形式をモデルケースとして計算を行った。

10.2.1 乾燥工程

乾燥は二次処理土の含水比を溶融に適した含水比まで低下させるためのもので、泥土の脱水処理方法、溶融炉形式によって乾燥工程に入る二次処理土の含水比や乾燥工程で乾燥する程度が異なる。乾燥工程の効率に影響するものとしては、以下のものが挙げられる。

- 1) 乾燥機の効率
- 2) キャリアガスの量及び温度
- 3) 熱媒体の量及び温度
- 4) 乾燥泥土温度
- 5) 循環泥土量

以下に各項目の概要を述べる。

1) 乾燥機の効率

乾燥機には各種のものがあるが、泥土の溶融処理では蒸気をパイプ等に通して泥土を間接的に加熱・乾燥する間接乾燥機と熱風を泥土に直接吹き付ける熱風乾燥機が考えられる。前者は泥土から悪臭が発生する場合や泥土の含水比のコントロールが必要な場合に適している。後者には装置が簡単で摩耗部分が少ないドラム乾燥機や泥土を粉碎状乾燥させる気流乾燥機（熱風粉碎乾燥機）等がある。

これらの乾燥機では乾燥機への投入泥土の含水比を下げ乾燥工程におけるハンドリング改善のために乾燥泥土の一部を循環させることがある。図-10.2に間接乾燥機と熱風乾燥機の熱収支の模式図を示す。

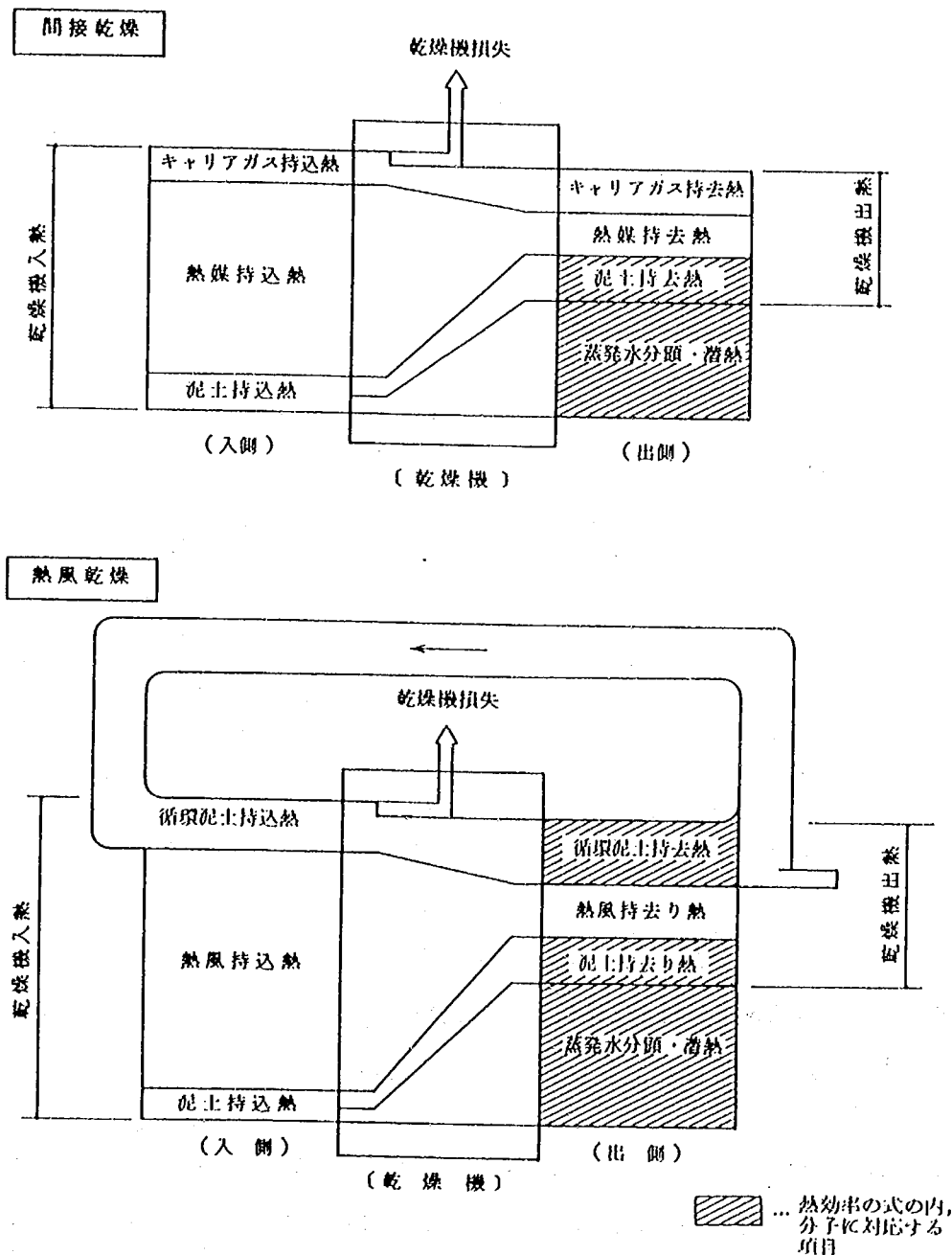


図-10.2 乾燥機熱収支模式図

2) キャリアガスの量及び温度

間接乾燥機で泥土を加熱すると泥土中の水分は水蒸気となるが、その飽和蒸気量は温度により異なる。乾燥温度が高くなれば空気の飽和蒸気量は増加しキャリアガスは少なくてすみ、乾燥機から持出される熱量は少なくなる。

また温度が100℃を越えると蒸気は過熱蒸気の状態となり、キャリアガス中の飽和蒸気量は大幅に増加するが泥土の含水比の調整は困難になる。

3) 熱媒体の量及び温度

間接乾燥の場合は蒸気が熱源となっているため、必要蒸気量は蒸発水量より把握することが可能である。蒸気圧力が高いほど蒸気のエンタルピーは高くなるので少ない蒸気量で熱量を与えることが可能であるが、取扱いの制限や効率面から通常は蒸気ゲージ圧力で3～7 kg/cm²・G程度で使用する。図-10.3に蒸気圧力とエンタルピーの関係を示す。

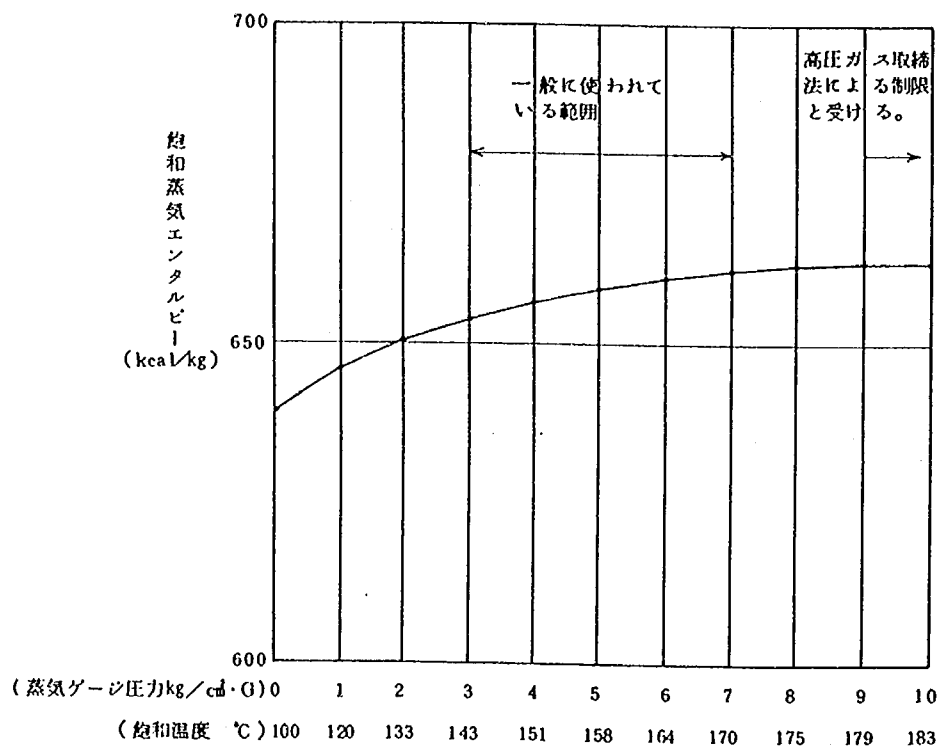


図-10.3 蒸気圧力とエンタルピーの関係

熱風乾燥の場合では必要熱量は蒸発水分量より求められるが、熱風量を求める際には熱風の入口温度と出口温度の差により決定される。

4) 乾燥泥土温度

乾燥泥土温度は低いほどエネルギー損失が少ないが、泥土中から効率的に水分を蒸発させるためにはある程度の温度が必要となる。一般的に間接乾燥機においては熱媒体の温度は最高170℃程度であるため泥土の温度は大幅に上昇することは少ないと考えられる。熱風を用いた直接乾燥機では、運転状況が良好な場合、泥土の温度は80℃～90℃程度であると考えられるが、熱風の温度が間接乾燥に比べ高温であるため泥土温度

が高くなる可能性があり、熱効率面で不利となる場合がある。

5) 循環泥土量

乾燥泥土を循環させ乾燥機への投入泥土の実質含水比を低下させることは、解砕機を有するタイプの熱風乾燥（気流乾燥機や熱風粉碎乾燥機）においてハンドリング改善上必要であるが、図-10.2から明らかなように、循環中の熱損失（乾燥泥土の温度低下）が考えられるので、循環量はできるだけ少なくすることが熱効率上有利となる。

10.2.2 熔融工程

熔融工程は乾燥機で乾燥された泥土を1,200～1,500℃程度まで温度上昇させ熔融する工程である。

熔融工程の熱効率に影響するものとしては、以下のものが挙げられる。

- (1) 熔融温度
- (2) 空気比
- (3) 燃焼率
- (4) 熱損失率

泥土は1,200～1,500℃の熔融温度に達すると熔融状態になる。このための熱量は、燃料の燃焼熱が主であり、この他泥土の持込み熱、熱回収工程で予熱された燃料用空気の持込み熱によって熔融炉内に供給される。出熱としてはスラグ及び燃焼ガスの顕熱、熔融炉の熱損失が主であるため、熔融工程では燃料消費量を少なくし、熔融温度を低くすることが重要となる。第4章で述べたように泥土の熔融特性は構成成分の比（塩基度）により影響を受けるため、成分調整を行うことにより熔融工程の効率化が図られる可能性がある。

また空気量をできるだけ低くすることが熱効率の向上につながる。なお一部の炉ではNOx対策のため2段階で燃料を燃焼する方法もある。

10.2.3 熱回収工程

熱回収工程は熔融炉から排出される高温のガスの熱量を回収し乾燥工程や熔融工程に回収熱を供給するものである。

熱回収工程の熱効率に影響するものとしては、以下のものが挙げられる。

- 1) 熱回収器の熱損失
- 2) 熱回収器入口の排ガス温度

一般的に熱回収器の熱損失率は交換熱量に対して熱交換器で10%程度、廃熱ボイラーで6%程度である。熱回収器には熱交換器、廃熱ボイラーが用いられる。両機器とも熱回収の分野での実績は多いが、熱損失率が大幅に向上することは現在の技術水準では期待できない。またダクト類の断熱が不十分だと熱損失率が大きくなり熱効率の面で不利になることが考えられる。

10.2.4 熔融モデルの概要

1) モデルの選択

第3章2節、熱処理による改良技術の現況で述べた熔融方式のうち4方式について、概略のシステムフローを図-10.4～10.7に示す。熔融モデルは前述したように、表面熔融システムについての物質収支・熱収支モデルにより解析を行った。

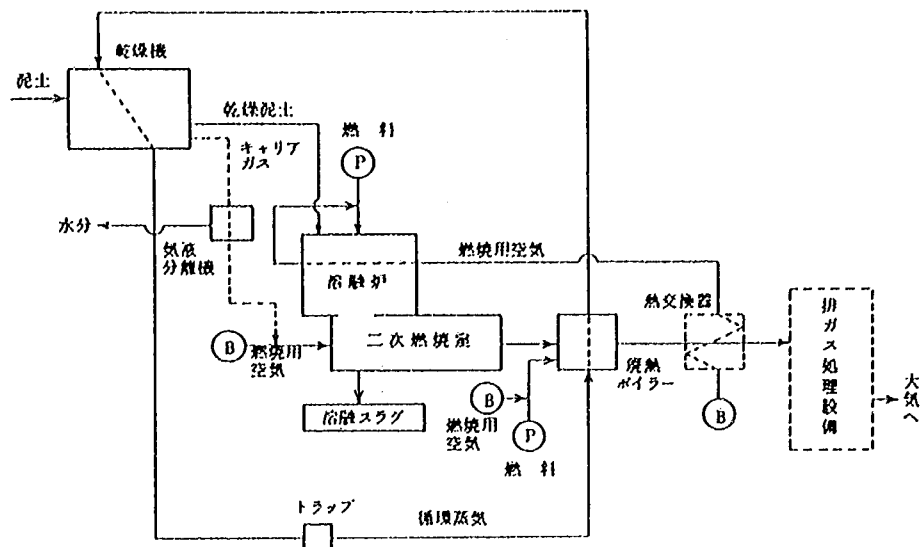


図-10.4 表面熔融システムフローの一例

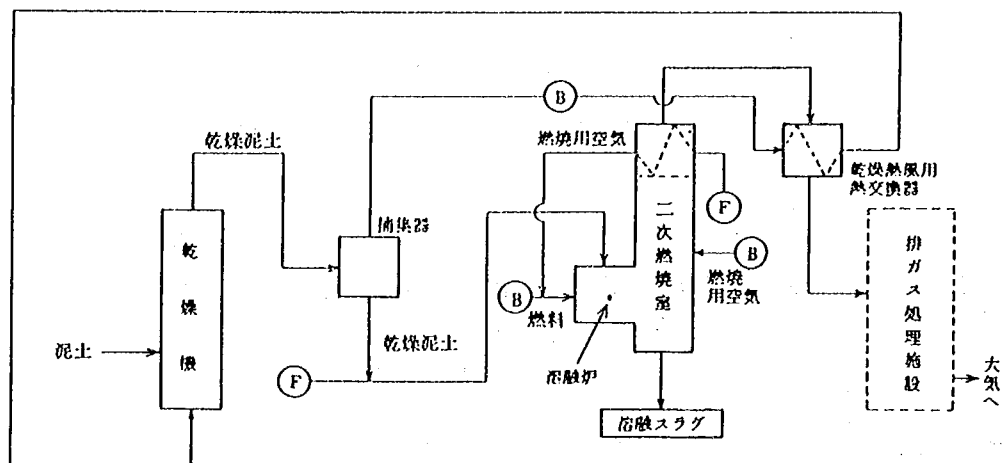


図-10.5 旋回熔融システムフローの一例

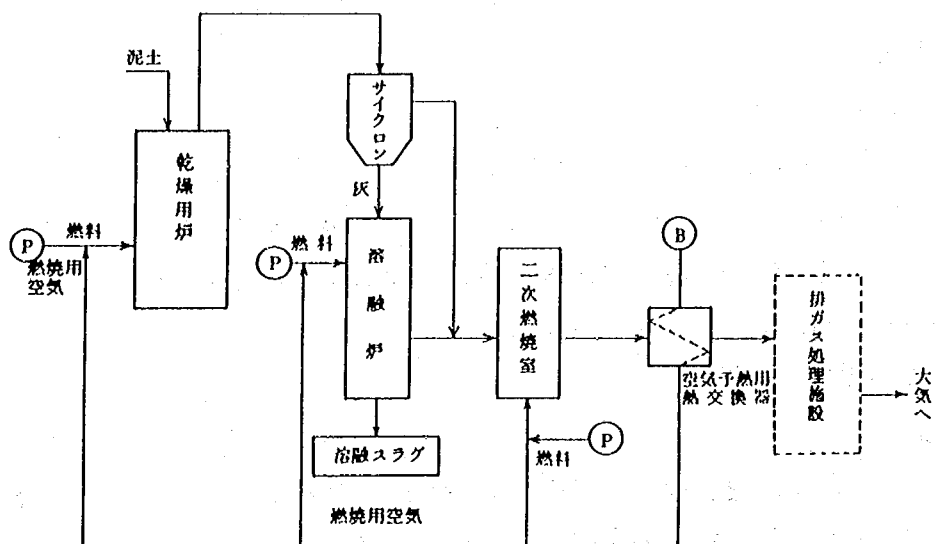


図-10.6 旋回熔融システムフローの一例

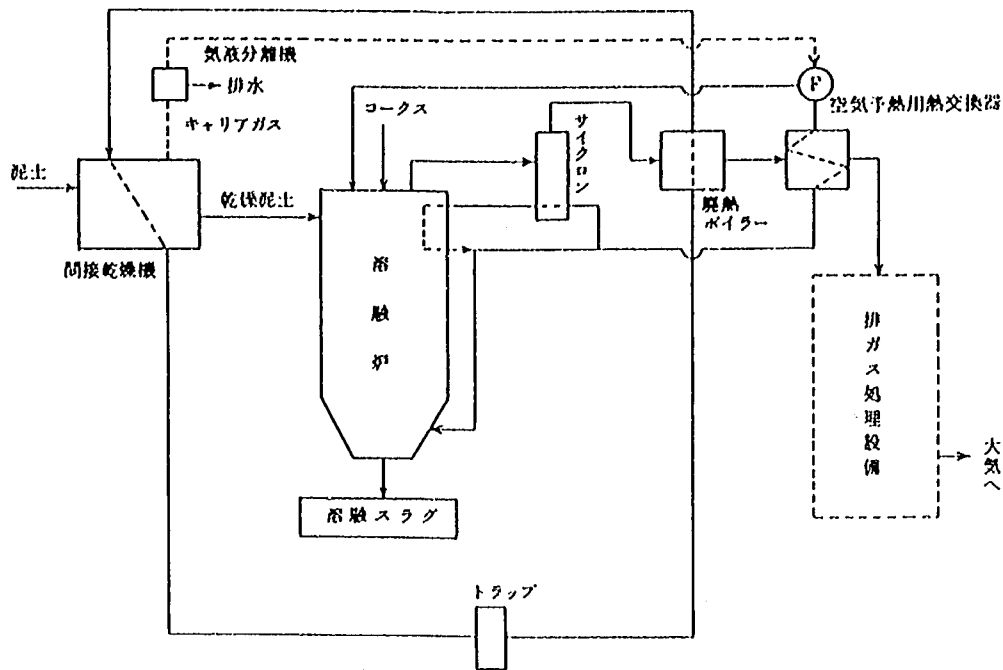


図-10.7 コークスベッド熔融システムフローの一例

(1) 表面熔融システム

乾燥機において熔融に適した含水比になるまで泥土を乾燥し熔融炉に投入する。乾燥は二次燃焼室出口の排ガス回収熱及び燃料の燃焼熱による。熔融炉内温度は1,200～1,500℃程度である。燃料の一部は分解ガスの状態で二次燃焼室に導かれ、そこで完全燃焼する。

(2) 旋回熔融システム (I)

所定の含水比まで乾燥し粉碎した泥土を熔融炉で熔融する。排ガスは二次燃焼室で完全燃焼後、熱交換器により主燃焼室の燃焼用空気の予熱や乾燥機用の熱風のために熱回収される。熱回収の方法は熱風による方法や蒸気による方法等が考えられるので、選択に際しては泥土熔融システムに適した方法を検討する必要がある。

(3) 旋回熔融システム (II)

乾燥温度を保持した状態で熔融炉に投入する。燃焼炉における排ガスと熔融炉における排ガスは二次燃焼室で完全燃焼され、熱交換器により燃焼用空気を予熱する。

(4) コークスベッド熔融システム

間接乾燥機において熔融に適した含水比になるまで泥土を乾燥し熔融炉に投入する。乾燥には熔融炉から出た排ガスの保有熱を廃熱ボイラーで回収した熱量を用いる。乾燥泥土とコークスは炉上部より投入され、コークスの燃焼熱により泥土が熔融する。廃熱ボイラーを通過した排ガスは空気予熱用熱交換器により熱回収される。

2) 物質収支・熱収支の計算式

(1) 基本数値

物質収支・熱収支に用いる基本数値を表-10.1～10.6に示す。

表-10.1 物質収支・熱収支に用いた基本数値

項 目	記号	単 位	数 値 等
1 熱収支基準状態	—	—	0℃基準・高位発熱量基準
2 外気温度	T_o	℃	20
3 外気絶対湿度	h	kg/kg	0.01 (kg-H ₂ O/kg-乾空気): 相対湿度70%
4 水の潜熱	L	kcal/kg	表-9.2 参照
5 ガス等の平均定圧比熱	C_p	kcal/kg・℃	表-9.3 参照
6 乾空気組成	—	—	表-9.4 参照
7 灰の比熱	C_A	kcal/kg・℃	0.2
8 泥土性状	—	—	表-9.5 参照
9 燃料の性状	—	—	“
10 泥土焼却に必要な理論空気量等	—	—	表-9.6 参照
11 重油燃焼に必要な理論空気量等	—	—	“
12 泥土の比熱	C_{oa}	kcal/kg・℃	0.3

表-10.2 水の蒸発潜熱

温 度 (℃)	0	20	70	100
蒸発潜熱(L): (kcal/kg-H ₂ O)	598	586	558	539

表-10.3 ガス等の平均定圧比熱

(kcal/kg・℃)			
温 度 (T) (℃)	燃焼乾ガス (C _{PG})	水 蒸 気 (C _{PH})	乾 空 気 (C _{PA})
0~100	0.249	0.448	0.240
0~200	0.250	0.453	0.242
0~300	0.250	0.459	0.243
0~400	0.253	0.465	0.245
0~500	0.255	0.473	0.248
0~600	0.257	0.480	0.251
0~700	0.260	0.488	0.253
0~800	0.263	0.496	0.256
0~900	0.265	0.504	0.258
0~1000	0.267	0.513	0.261
0~1100	0.270	0.520	0.262
0~1200	0.272	0.529	0.265
0~1300	0.274	0.535	0.266
0~1400	0.276	0.544	0.269
0~1500	0.278	0.550	0.270
0~1600	0.280	0.557	0.296
0~1700	0.281	0.565	0.298
0~1800	0.282	0.571	0.300
0~1900	0.283	0.577	0.301
0~2000	0.285	0.583	0.302
備 考	表の数値は環境整備研究会編「廃棄物焼却」による。 燃焼乾ガス比熱は窒素の比熱を採用した。		

表-10.4 乾き空気の組成

項 目	重 量 基 準	容 積 基 準
酸 素	23.3 (WT%)	21.0 (Vol%)
窒 素	76.7 (WT%)	79.0 (Vol%)
空気の比重	1.29 (kg/N m ³)	

表-10.5 二次処理土・燃料の性状

項 目		二次処理土		燃料 (A重油)		コークス	
		記 号	数 値	記 号	数 値	記 号	数 値
高位発熱量 (kcal/kg-DS)		S _{HCV}	46.3V	F _{HCV}	10,800	C _{HCV}	7,270
強熱減量の 内部組成	炭素: C (%)	S _C	19.0	F _C	85.4	C _C	95.2
	水素: H (%)	S _H	11.9	F _H	12.6	C _H	0.4
	窒素: N (%)	S _N	0.0	F _N	0.4	C _N	1.6
	可燃性硫黄: S (%)	S _S	16.7	F _S	0.9	C _S	0.7
	酸素: O (%)	S _O	52.4	F _O	0.7	C _O	2.1
	塩素: Cl (%)	S _{Cl}	0	F _{Cl}	0	C _{Cl}	0
備 考		二次処理土の高位発熱量は「汚泥焼却の省エネルギーに関する調査報告書」(S.61.3 建設省都市局下水道部, 日本下水道事業団)による。二次処理土の強熱減量は対象土-1を用い, JIS M 8812を準用した。強熱減量の内部組成の内, C, H, Nについては, JIS M 8813の炭素・水素・窒素定量装置を使用した。検出方法は非外吸収方式による。コークスの高位発熱量については, JIS M 8813のエキュ法による。コークスの高位発熱量, 内部組成は「代替エネルギーによる熔融プロセスとスラック再利用に関する研究」(S.53.3 大阪府)による。強熱減量の内部組成の含有率は(VTS/TS)比=100%基準。コークスの強熱減量の割合は0.3.7/DSである。					

表-10.6 二次処理土・燃料の燃焼に必要な理論乾き空気量等の計算式一覧

項 目	単 位	計 算 式	数 値
理論乾き空気量	二 次 重量基準	$S_{TA} = 11.49 \times S_C + 34.5 \{ S_H - S_O/8 \} + 4.31 \times S_S$	= 4.75
	二 次 体積基準	$S_{VA} = 8.89 \times S_C + 26.7 \{ S_H - S_O/8 \} + 3.33 \times S_S$	= 3.68
	燃 料 重量基準	$F_{TA} = 11.49 \times F_C + 34.5 \{ F_H - F_O/8 \} + 4.31 \times F_S$	= 14.17
	燃 料 体積基準	$F_{VA} = 8.89 \times F_C + 26.7 \{ F_H - F_O/8 \} + 3.33 \times F_S$	= 10.96
	コークス 重量基準	$C_{TA} = 11.49 \times C_C + 34.5 \{ C_H - C_O/8 \} + 4.31 \times C_S$	= 11.02
	コークス 体積基準	$C_{VA} = 8.89 \times C_C + 26.7 \{ C_H - C_O/8 \} + 3.33 \times C_S$	= 8.52
理論乾き燃料ガス量	二 次 重量基準	$S_{TD} = 12.49 \times S_C + 26.5 \times S_H - 3.31 \times S_O + 5.31 \times S_S + S_N$	= 4.68
	二 次 体積基準	$S_{VD} = 8.89 \times S_C + 21.1 \times S_H - 2.64 \times S_O + 3.33 \times S_S + 0.8 \times S_N$	= 3.37
	燃 料 重量基準	$F_{TD} = 12.49 \times F_C + 26.5 \times F_H - 3.31 \times F_O + 5.31 \times F_S + F_N$	= 14.04
	燃 料 体積基準	$F_{VD} = 8.89 \times F_C + 21.1 \times F_H - 2.64 \times F_O + 3.33 \times F_S + 0.8 \times F_N$	= 10.27
	コークス 重量基準	$C_{TD} = 12.49 \times C_C + 26.5 \times C_H - 3.31 \times C_O + 5.31 \times C_S + C_N$	= 11.98
	コークス 体積基準	$C_{TV} = 8.89 \times C_C + 21.1 \times C_H - 2.64 \times C_O + 3.33 \times C_S + 0.8 \times C_N$	= 8.53
燃焼時の生成水分	二 次 重量基準	$S_{TW} = 9 \times S_H$	= 1.07
	二 次 体積基準	$S_{VW} = 11.2 \times S_H$	= 1.33
	燃 料 重量基準	$F_{TW} = 9 \times F_H$	= 1.13
	燃 料 体積基準	$F_{VW} = 11.2 \times F_H$	= 1.41
	コークス 重量基準	$C_{TW} = 9 \times C_H$	= 0.04
	コークス 体積基準	$C_{VW} = 11.2 \times C_H$	= 0.04

(2) 物質収支の計算式

溶融システムの物質収支計算は、乾燥機まわりと溶融炉まわりに分けて考える必要がある。

① 乾燥機まわりの物質収支計算式

乾燥機まわりの物質収支の計算式は図-10.8の模式図によるが、乾燥機の形式によっては不要な項目もある。

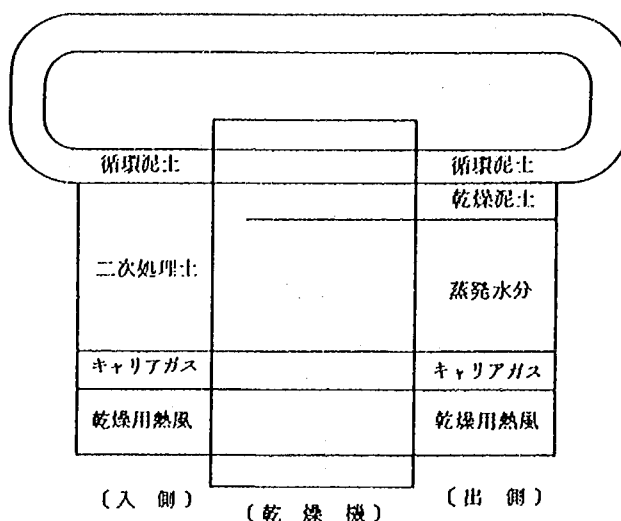


図-10.8 乾燥機まわりの物質収支模式図

② 溶融炉まわりの物質収支計算式

溶融炉まわりの物質収支の計算式は図-10.9の模式図によるが、溶融炉の形式によっては不要な項目もある。

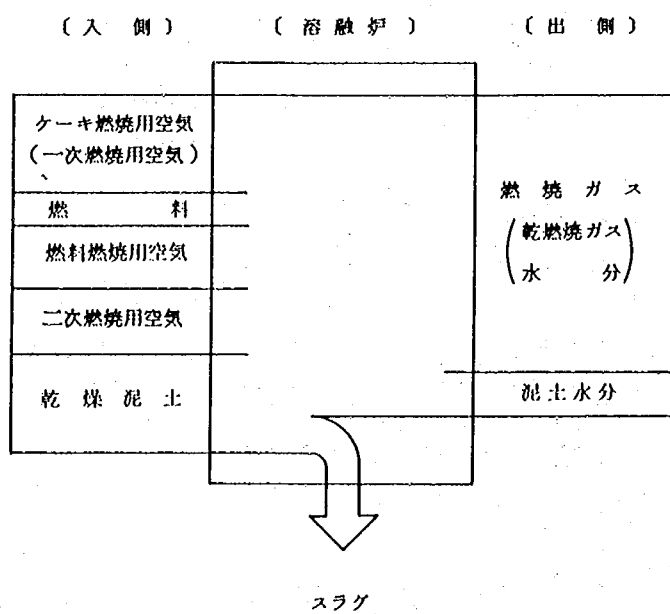


図-10.9 溶融炉まわりの物質収支模式図

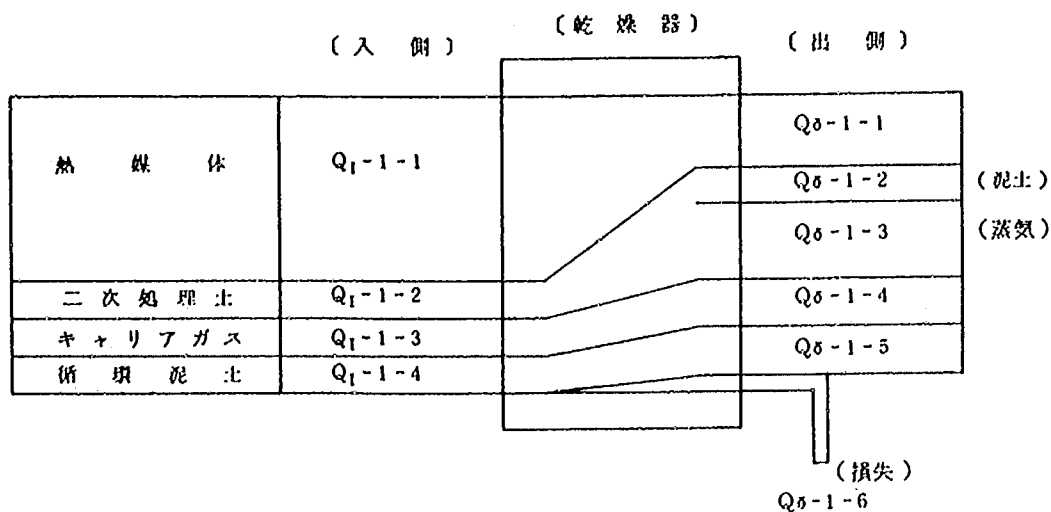


図-10.10 乾燥機まわりの熱収支模式図

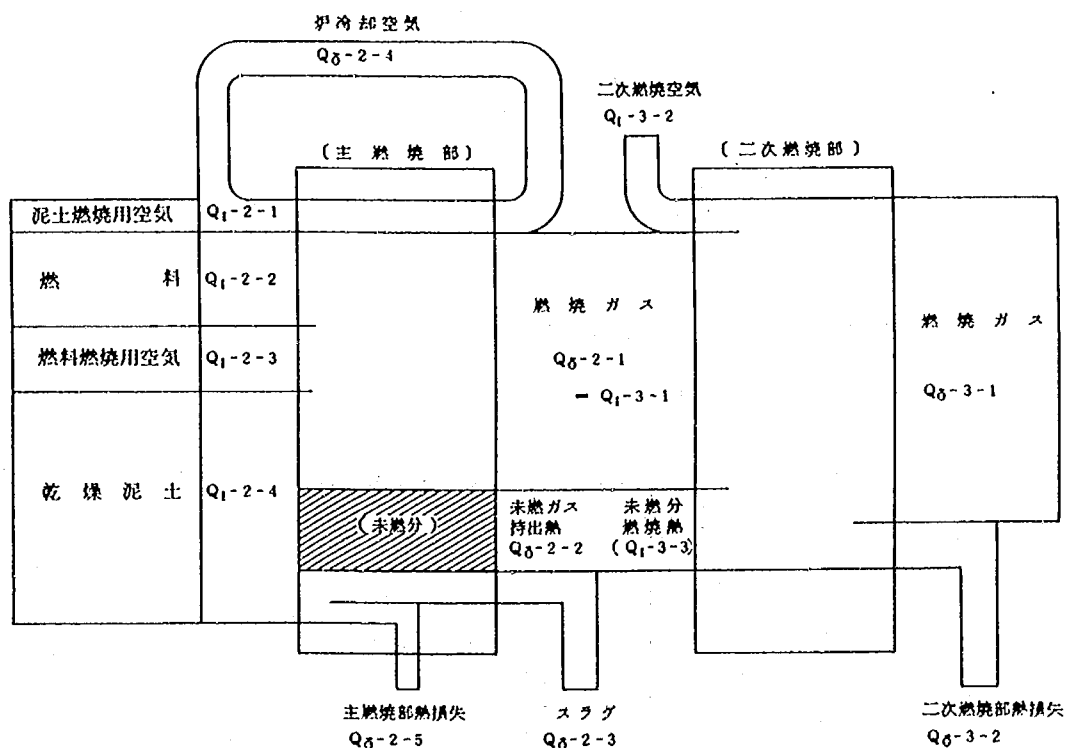


図-10.11 溶融炉まわりの熱収支模式図

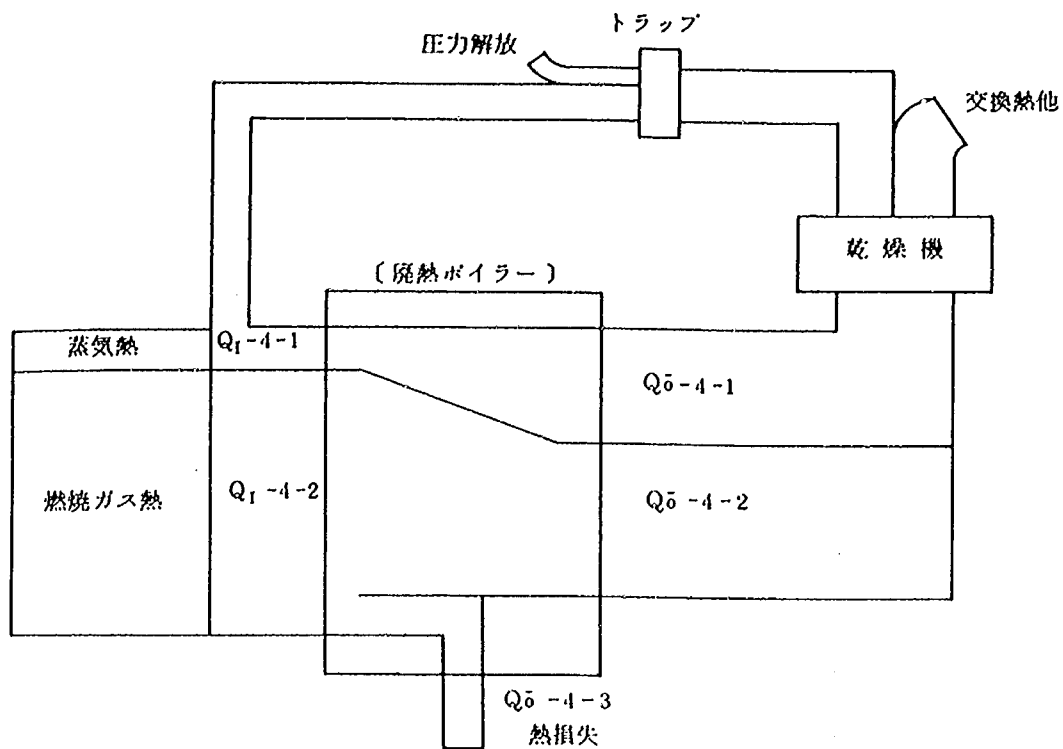


図-10.12 廃熱ボイラーまわりの熱収支模式図

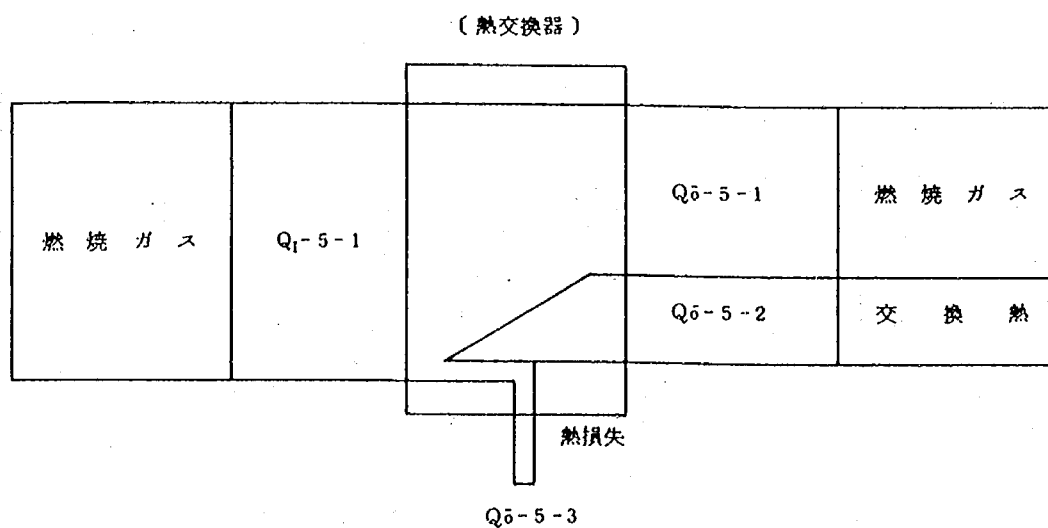


図-10.13 熱交換器まわりの熱収支模式図

表-10.7 乾燥機まわりの物質収支に用いた項目

	記 号	項 目	単 位	計 算 式 等
入 側	a. 二次処理土			
	S	投 入 泥 土 量	kg/H	S
	(S _{W0})	投入泥土中水 分 量	"	$S_{W0} = S \cdot S_W / 100$
	(S _{DS})	" 固形物量	"	$S_{DS} = S - S_{W0}$
	(S _{VD})	" 有機物量	"	$S_{VD} = S_{DS} \cdot S_V / 100$
	(S _{AS})	" 灰 分 量	"	$S_{AS} = S_{DS} - S_{VD}$
	b. 循環泥土			
	S _C	循 環 泥 土 量	kg/H	$S_C = R_{SC} \cdot S_{DS}$
	c. キャリアガス			
	Q _{Cr}	キ ャ リ ア ガ ス 量	kg/H	$Q_{Cr} = S_{WE} \cdot V_{SS} \cdot R_{Cr}$
出 側	d. 乾燥用熱風			
	Q _{IW}	熱 風 量	kg/H	Q _{IW}
	a. 乾燥泥土量			
	S _D	乾 燥 泥 土 量	kg/H	$S_D = S_{DW0} + S_{DDS}$
	(S _{DW0})	乾燥泥土中水 分 量	"	$S_{DW0} = S_{DW} \cdot S_{DDS} / (100 - S_{DW})$
	(S _{DDS})	" 固形物量	"	$S_{DDS} = S_{DS}$
	(S _{DVD})	" 有機物量	"	$S_{DVD} = S_{VD}$
	(S _{DAS})	" 灰 分 量	"	$S_{DAS} = S_{AS}$
	b. 蒸発水分量			
	S _{WE}	蒸 発 水 分 量	kg/H	$S_{WE} = S_{W0} - S_{DW0}$
	c. 循環泥土			
	R _C	循 環 泥 土 量	kg/H	R _C
	d. キャリアガス			
	Q _{Cr}	キ ャ リ ア ガ ス 量	kg/H	Q _{Cr}
	e. 乾燥用熱風			
	Q _{IW}	熱 風 量	kg/H	Q _{IW}

表-10.8 溶融炉まわりの物質収支に用いた項目（入側）

記号	項目	単位	計算式等
a. 乾燥泥土			
S_D	投入泥土量	kg/H	S_D
$(S_{DW\bar{O}})$	投入泥土中水分量	"	$S_{DW\bar{O}}$
(S_{DDS})	" 固形物量	"	S_{DDS}
(S_{DVD})	" 有機物量	"	S_{DVD}
(S_{DAS})	" 灰分量	"	S_{DAS}
b. 泥土燃焼用空気			
D_{AC}	空き空気量	kg/H	$D_{AC}=M_1 \cdot S_{TA} \cdot S_{DVD}$
H_{AC}	水分量	"	$H_{AC}=h \cdot D_{AC}$
c. 燃料			
F	燃料使用量	kg/H	F
d. 燃料燃焼用空気			
D_{AF}	空き空気量	kg/H	$D_{AF}=M_2 \cdot (F_{TA} \text{ or } C_{TA}) \cdot F$
H_{AF}	水分量	"	$H_{AF}=h \cdot D_{AF}$
e. 二次燃焼用空気			
D_{AN}	乾き空気量	kg/H	$D_{AN}=(M_3-M_1) \cdot S_{TA} \cdot S_{DVD}+(M_3-M_1) \cdot F_{TA} \cdot F$
D_{HF}	水分量	"	$H_{AN}=h \cdot D_{AN}$

表-10.9 溶融炉まわりの物質収支に用いた項目（出側）

記号	項目	単位	計算式等
a. 燃焼ガス			
D_G	乾き燃焼ガス量	kg/H	$D_G = D_{G1} + D_{G2}$ $D_{G1} = S_{TD} \cdot S_{DVD} + (F_{TD} \text{ or } C_{TD}) \cdot F$ $= 7.62 \cdot S_{DVD} + (14.04 \text{ or } 11.98) \cdot F$ $D_{G2} = (M_3-1) \cdot S_{TA} \cdot S_{DVD} + (M_3-1) \cdot (F_{TA} \text{ or } C_{TA}) \cdot F$ $= (M_3-1) \cdot 7.23 \cdot S_{DVD} + (M_3-1) \cdot (14.17 \text{ or } 11.02) \cdot F$
H_G	燃焼ガス中の水分量	kg/H	$H_G = H_{G1} + H_{G2}$ $H_{G1} = S_{TW} \cdot S_{DVD} + (F_{TW} \text{ or } C_{TW}) \cdot F$ $= 0.61 \cdot S_{DVD} + (1.13 \text{ or } 0.04) \cdot F$ $H_{G2} = H_{AC} + H_{AF} + H_{AN}$
b. 泥土水分			
S_{DWO}	泥土中水分量	kg/H	$S_{DW\bar{O}}$
c. スラグ			
S_{LUG}	スラグ量	kg/H	$S_{LUG} = S_{DAS}$

表-10.10 乾燥機まわりの熱収支に用いた項目（入熱）

記 号	項 目	単 位	計 算 式
a. 熱媒体の保有熱			
Q_{1-1-1}	熱媒体の保有熱 （投入温度： T_1 ）	Kcal/H	（蒸気の場合） $Q_{1-1-1} = q \times i_1$ q：蒸気量（kg/H） i_1：乾燥機入口圧力における飽和蒸気エンタルピー 8 kg/cm²圧力の場合→$i_1 = 661.0$ Kcal/kg （熱風の場合） $Q_{1-1-1} = G_{HWA} \cdot C_{PA} \cdot T_1 + C_{HWS} \cdot C_{PS} \cdot T_1$ G_{HWA}：熱風中空気量（kg/H） C_{PA}：T_1℃における空気比熱（Kcal/kg・℃） G_{HWS}：熱風中蒸気量（kg/H） C_{PS}：T_1℃における蒸気比熱（Kcal/kg・℃）
b. 二次処理土の保有熱			
Q_{1-1-2}	二次処理土の保有熱 （投入温度： T_2 ）	Kcal/H	$Q_{1-1-2} = S_{US} \cdot C_{PS} \cdot T_2 + S_{WO} \cdot T_2$ C_{PS}：の比熱=0.3 Kcal/kg・℃
c. キャリアガスの保有熱			
Q_{1-1-3}	キャリアガス保有熱 （投入温度： T_3 ）	Kcal/H	$Q_{1-1-3} = G_{CRA} \cdot C_{PA} \cdot T_3 + G_{CRS} \cdot C_{PS} \cdot T_3$ G_{CRA}：キャリアガス中空気量（kg/H） G_{CRS}：キャリアガス中蒸気量（kg/H）
d. 循環泥土の保有熱			
Q_{1-1-4}	循環泥土保有熱 （投入温度： T_4 ）	Kcal/H	$Q_{1-1-4} = S_{CS} \cdot C_{PC} \cdot T_4 + S_{CW} \cdot T_4$ S_{CS}：循環泥土中固形物量 S_{CW}：循環泥土中水分量

表-10.11 乾燥機まわりの熱収支に用いた項目（出熱）

記 号	項 目	単 位	計 算 式
a. 熱媒の持去熱			
$Q_{\delta-1-1}$	熱媒の持去熱 (出口温度: T_5)	Kcal/H	(蒸気の場合) $Q_{\delta-1-1} = q \times i_2$ i_2 : 乾燥機出口圧力における飽和蒸気エンタルピー 8 kg/cm ² 圧力の場合 $\rightarrow i_2 = 171.26$ Kcal/kg (熱風の場合) $Q_{\delta-1-1} = G_{HWA} \cdot C_{PA} \cdot T_5 + C_{HWS} \cdot C_{PS} \cdot T_5$
b. 二次処理土の持去熱			
$Q_{\delta-1-2}$	二次処理土の持去熱 (出口温度: T_6)	Kcal/H	$Q_{\delta-1-2} = S_{DS} \cdot C_{PC} \cdot T_6 + (S_{W6} - S_{WE}) \cdot T_6$
c. 蒸気の持去熱			
$Q_{\delta-1-3}$	蒸気の持去熱 (出口温度: T_7)	Kcal/H	$Q_{\delta-1-3} = S_{WE} \cdot \{ (100 - T_2) + 539 + C_{PH} \cdot (T_7 - 100) \}$
d. キャリアガスの持去熱			
$Q_{\delta-1-4}$	キャリアガスの持去熱 (出口温度: T_8)	Kcal/H	$Q_{\delta-1-4} = Q_{CRA} \cdot C_{PA} \cdot T_8 + Q_{CRS} \cdot C_{PS} \cdot T_8$
e. 循環泥土の持去熱			
$Q_{\delta-1-5}$	循環泥土の持去熱 (出口温度: T_9)	Kcal/H	$Q_{\delta-1-5} = S_{CS} \cdot C_{PC} \cdot T_9 + S_{CW} \cdot T_9$
f. 熱 損 失			
$Q_{\delta-1-6}$	熱損失	Kcal/H	$Q_{\delta-1-6} = \sum Q_{1-1-1 \sim 4} - \sum Q_{\delta-1-1 \sim 5}$

表-10.12 溶融炉まわりの熱収支に用いた項目（入熱）

	記 号	項 目	単 位	計 算 式
主 燃 焼 部	a. 泥土燃熱用空気保有熱			
	Q_{1-2-1}	泥土燃熱用 空気保有熱 (入口温度: T_{10})	Kcal/H	$Q_{1-2-1} = D_{AC} \cdot C_{PA} \cdot T_{10} + H_{AC} \cdot C_{PS} \cdot T_{10}$
	b. 燃料保有熱			
	Q_{1-2-2}	燃料保有熱	Kcal/H	$Q_{1-2-2} = F \cdot (F_{HCV} \text{ or } C_{HCV})$
	c. 燃料燃焼用空気保有熱			
	Q_{1-2-3}	燃料燃焼用 空気保有熱 (入口温度: T_{11})	Kcal/H	$Q_{1-2-3} = D_{AF} \cdot C_{PA} \cdot T_{11} + H_{AF} \cdot C_{PS} \cdot T_{11}$
	d. 乾燥泥土保有熱			
	Q_{1-2}	乾燥泥土保有熱 (入口温度: T_{12})	Kcal/H	$Q_{1-2-4} = \eta_1 \cdot S_{DDS} \cdot S_{HCV}$ $+ S_{DDS} \cdot C_{PC} \cdot T_{12} + S_{DWO} \cdot T_{12}$ η_1 : 主燃焼室における燃焼率
二 次 燃 焼 部	a. 燃焼ガス保有熱			
	Q_{1-3-1}	燃焼ガス保有熱	Kcal/H	$Q_{1-3-1} = Q_{1-2-1}$
	b. 二次燃焼空気保有熱			
	Q_{1-3-2}	二次燃焼空気保有熱 (入口温度: T_{13})	Kcal/H	$Q_{1-3-2} = D_{AN} \cdot C_{PA} \cdot T_{13} + H_{AN} \cdot C_{PA} \cdot T_{13}$
	c. 未燃分乾燥泥土保有熱			
	Q_{1-3-3}	未燃分乾燥泥土 保有熱	Kcal/H	$Q_{1-3-3} = (1 - \eta_1) \cdot S_{DDS} \cdot S_{HCV}$

表-10.13 溶融炉まわりの熱収支に用いた項目（出熱）

	記 号	項 目	単 位	計 算 式
主 燃 焼 部	a. 燃焼排ガス持去熱			
	$Q_{\bar{o}-2-1}$	燃焼排ガス持去熱量 (出口温度: T_{14})	Kcal/H	$Q_{\bar{o}-2-1} = \{ \eta_1 \cdot S_{TD} \cdot S_{DVD} + (F_{TD} \text{ or } C_{TD}) \cdot F \} \cdot C_{PG} \cdot T_{14}$ $+ (M_1 - \eta_1) \cdot \{ S_{TD} \cdot S_{DVD} + F_{TA} \text{ or } C_{TA} \} \cdot F \cdot C_{PA} \cdot T_{14}$ $+ \{ \eta_1 + S_{TW} \cdot S_{DVD} + (F_{TW} \text{ or } C_{TW}) \cdot \{ (100 - T_0) + 539 + C_{PS} \cdot (T_{14} - 100) \} \}$ $+ (H_{AC} + H_{AF}) \cdot C_{PS} \cdot T_{14}$ $+ (1 - \eta_1) \cdot S_{DVD} \cdot C_{PG} \cdot T_{14}$
	b. 未燃ガス分解熱（吸熱）			
	$Q_{\bar{o}-2-2}$	未燃ガス分解熱	Kcal/H	$Q_{\bar{o}-2-2} = (1 - \eta_1) \cdot S_{DVD} \cdot (S_c \text{ or } C_c) / 100 \cdot R_{HR}$ $R_{HR} : \text{炭素分解熱} (\div 635 \text{ Kcal/kg-C})$
	c. スラグ持去熱			
	$Q_{\bar{o}-2-3}$	スラグ持去熱	Kcal/H	$Q_{\bar{o}-2-3} = S_{LUG} \cdot C_{PSL} \cdot T_{15} + S_{LUG} \cdot R_{HS}$ $C_{PSL} : \text{スラグ比熱} (= 0.32 \text{ Kcal/kg-}^\circ\text{C})$ $R_{HS} : \text{スラグ熔融熱}$
	d. 熱損失			
	$Q_{\bar{o}-2-4}$	熱損失	Kcal/H	$Q_{\bar{o}-2-4} = (\sum Q_{1-2-1 \sim 4}) \cdot \eta_2$ $\eta_2 : \text{主燃焼室熱損失率}$
二 次 燃 焼 部	a. 燃焼ガス持去熱			
	$Q_{\bar{o}-3-1}$	燃焼ガス持去熱	Kcal/H	$Q_{\bar{o}-3-1} = (\sum Q_{1-3-1 \sim 3}) - Q_{\bar{o}-3-2}$
	b. 熱損失			
	$Q_{\bar{o}-3-2}$	二次燃焼部熱損失	Kcal/H	$Q_{\bar{o}-3-2} = (\sum Q_{1-3-1 \sim 3}) \cdot \eta_3$ $\eta_3 : \text{二次燃焼部熱損失率}$

表-10.14 廃熱ボイラーまわりの熱収支に用いた項目

	記 号	項 目	単 位	計 算 式
入 熱	a. 熱媒の持込熱			
	Q_{1-4-1}	熱媒の持込熱 (入口圧力: 2 kg/cm ²)	Kcal/H	$Q_{1-4-1} = q \cdot i_3$ $i_3: 2 \text{ kg/cm}^2$ 飽和水エンタルピー (Kcal/kg)
	b. 燃焼ガス持込熱			
	Q_{1-4-2}		Kcal/H	Q_{1-4-2}
出 熱	a. 熱媒の持去熱			
	Q_{0-4-1}	熱媒の持去熱 (出口圧力: 8 kg/cm ²)	Kcal/H	$Q_{0-4-1} = q \cdot i_1$ $i_1: 8 \text{ kg/cm}^2$ 加熱蒸気 エンタルピー (Kcal/kg)
	b. 燃焼ガスの持去熱			
	Q_{0-4-2}	燃焼ガスの持去熱	Kcal/H	$Q_{0-4-2} = (\sum Q_{1-4-1 \sim 2}) - Q_{0-4-3}$
	c. 熱 損 失			
	Q_{0-4-3}	熱損失	Kcal/H	$Q_{0-4-3} = (Q_{0-4-1} - Q_{1-4-1}) \cdot \eta_4$ η_4 : 廃熱ボイラー熱損失率

表-10.15 熱交換器まわりの熱収支に用いた項目

	記 号	項 目	単 位	計 算 式
入 熱	a. 燃焼ガス保有熱			
	Q_{1-5-1}	燃焼ガス保有熱	Kcal/H	Q_{1-5-1}
出 熱	a. 燃焼ガス持去熱			
	Q_{0-5-1}	燃焼ガス持去熱	Kcal/H	$Q_{0-5-1} = Q_{1-5-1} - Q_{0-5-2} - Q_{0-5-3}$
	b. 交 換 熱			
	Q_{0-5-2}	交換熱	Kcal/H	Q_{0-5-2}
	c. 熱 損 失			
	Q_{0-5-3}	熱損失	Kcal/H	$Q_{0-5-3} = Q_{0-5-2} \cdot \eta_5$ η_5 : 熱交換器熱損失率

(3) 熱収支の計算式

① 乾燥工程における熱収支計算式

乾燥工程における熱収支計算式を以下に示す。キャリアガスに関する項目は熱媒体が熱風の場合、熱媒体との区別がなくなるので削除した。

乾燥機における効率を式(10.1)に示すように定義した。

$$\text{乾燥機熱効率}(\beta) = \frac{Q_{0-1-2} + Q_{0-1-3}}{(\sum Q_{0-1-1\sim4}) - (\sum Q_{0-1-1\sim2,4\sim5})} \times 100(\%) \quad \text{式(10.1)}$$

シミュレーション計算においては、予め熱効率を設定した後、蒸気量や熱風量を算出した。

② 溶融工程における熱収支計算式

溶融工程における熱収支計算式を以下に示す。主燃焼室における温度が溶融温度に達しているかどうかの判断が必要となるため、熱収支計算は主燃焼室における主燃焼部と二次燃焼室における二次燃焼部とに分けた。

③ 熱回収工程における熱収支計算式

a. 廃熱ボイラー

廃熱ボイラーにおける蒸気の状態を以下に示すように設定した。

廃熱ボイラー入口 2 kg/cm²飽和水 (エンタルピー=119.86kcal/kg)

廃熱ボイラー出口 8 kg/cm²飽和蒸気 (エンタルピー=661.00kcal/kg)

b. 熱交換器

3) 評価条件の設定

運転操作条件を表-10.16に示す。

表-10.16 溶融システムの運転操作条件

項 目		設 定 値
乾 燥 プ ロ セ ス	熱媒入口圧力 (T ₁) (kg/cm ²)	8 (飽和蒸気)
	二次処理土投入温度 T ₂ (℃)	20
	キャリアガス入口温度 T ₃ (℃)	40
	循環泥土入口温度 T ₄ (℃)	60
	熱媒出口圧力 (T ₅) (kg/cm ²)	8 (飽和水)
	二次処理土出口温度 T ₆ (℃)	80
	キャリアガス出口温度 T ₇ (℃)	80
	循環泥土出口温度 T ₈ (℃)	80
	キャリアガス量 (G _{CR}) (kg/H) キャリアガス入口温度における飽和絶対湿度 キャリアガス出口温度における飽和絶対湿度	$G_{CR} = S_{WE} \cdot V_{SS} \cdot R_{CR}$ $h_{40} = 0.049 \text{ (kg H}_2\text{O/kg} \cdot \text{乾)}$ $h_{80} = 0.546 \text{ (kg H}_2\text{O/kg} \cdot \text{乾)}$ $V_{SS} = \frac{1}{(h_{80} - h_{40})}$ $R_{CR} = 1.2$
溶 融 プ ロ セ ス	泥土燃焼用空気比 M ₁	1.0
	燃料燃焼用空気空気比 M ₂	1.1
	泥土燃焼用空気入口温度 T ₁₀ (℃)	110
	燃料燃焼用空気入口温度 T ₁₁ (℃)	20
	乾燥泥土入口温度 T ₁₂ (℃)	80
	二次燃焼空気空気比 M ₃	(総合) 1.3
	二次燃焼空気入口温度 T ₁₃ (℃)	20
熱 回 収 プ ロ セ ス	廃熱ボイラー入口飽和水圧力 (kg/cm ²)	2.0
	廃熱ボイラー出口飽和蒸気圧力 (kg/cm ²)	8.0

表-10.17 各プロセスの熱損失率等

項 目	数 値 (%)
間接乾燥機の熱効率 : β (%)	85
主燃焼室における燃焼率 : η_1 (%)	65
主燃焼室における熱損失率 : η_2 (%)	(対全入熱) 5
二次燃焼室における熱損失率 : η_3 (%)	(対全入熱) 10
熱交換器熱損失率 : η_4 (%)	(対交換熱) 10

モデル計算のパラメーターは、原泥土含水比、熔融温度、乾燥泥土含水比とし、熔融システムに必要な燃料消費量を算出した。設定したパラメーターを表-10.18に示す。

表-10.18 パラメーターの設定値

項 目	設 定 値
泥土含水比 : W (%)	75, 100, 125, 150
熔融温度 : T (°C)	1300, 1400, 1500
乾燥泥土含水比 : Wo (%)	20, 25, 30
標準状態 泥土含水比	100(%)
泥土の強熱減量	5(%)
熔融温度	1400(°C)
乾燥泥土含水比	25(%)

表-10.19 計算ケース

ケース名	熔融温度	含水比		強熱減量	備考
		二次処理土	乾燥泥土		
1	1400	100	25	5	標準状態
2	1400	75	25	5	含水比変化
3	1400	125	25	5	
4	1400	150	25	5	
5	1300	100	25	5	熔融温度変化
6	1500	100	25	5	
7	1400	100	20	5	乾燥泥土含水比変化
8	1400	100	30	5	

10.3 調査結果

10.3.1 計算結果

1) 計算ケース

前述の条件設定に基づき、以下のケースについて計算を行った。

2) 物質収支の計算結果

物質収支の計算結果を以下に示す。

表-10.20 乾燥機における物質収支

表-10.20 物質収支の計算結果（乾燥機）

乾燥機物質収支 (kg/H)

ケース名	1	2	3	4	5	6	7	8
項目								
【入側】								
乾燥機投入泥土量	2083.3	2083.3	2083.3	2083.3	2083.3	2083.3	2083.3	2083.3
キャリアガス量	1978.8	1507.8	2345.2	2638.3	1978.8	1978.8	2110.7	1846.8
入側計	4062.1	3590.9	4428.5	4721.6	4062.1	4062.1	4194.0	3930.1
【出側】								
乾燥泥土量	1302.1	1488.1	1157.4	1041.7	1302.1	1302.1	1250.0	1354.2
キャリアガス量	1978.8	1507.8	2345.2	2638.3	1978.8	1978.8	2110.7	1846.8
蒸発水分量	781.3	595.2	925.9	1041.7	781.3	781.3	833.3	729.2
出側計	4062.2	3590.9	4428.5	4721.7	4062.2	4062.2	4194.0	3930.2

表-10.21 主燃焼室における物質収支

表-10.21 物質収支の計算結果(主燃焼室)

主燃焼室物質収支 (kg/H)

ケース名	1	2	3	4	5	6	7	8
項目								
〔入側〕								
乾燥泥土量	1302.1	1488.1	1157.4	1041.7	1302.1	1302.1	1250.0	1354.2
泥土燃焼用空気量	249.8	285.5	222.0	199.8	249.8	249.8	249.8	249.8
燃料消費量	279.2	319.1	248.2	223.3	220.0	364.0	257.5	300.8
燃料燃焼用空気量	4397.7	5026.0	3909.6	3517.6	3485.6	5732.9	4056.0	4737.8
入側計	6228.8	7118.7	5537.2	4982.4	5237.5	7648.8	5813.3	6642.8
〔出側〕								
乾燥泥土燃焼乾燥ガス量	244.8	279.8	217.6	195.8	244.8	244.8	244.8	244.8
乾燥泥土燃焼排ガス中水分量	301.9	345.1	268.4	241.5	301.9	301.9	249.9	354.0
燃料燃焼乾燥ガス量	4316.8	4933.4	3837.6	3452.8	3401.8	5627.4	3981.4	4650.6
燃料燃焼排ガス中水分量	360.3	411.7	320.3	286.2	283.9	469.7	332.3	388.1
スラグ量	989.6	1131.0	879.6	791.7	989.6	989.6	989.6	989.6
未燃排ガス量	15.8	17.9	13.9	12.5	15.8	15.8	15.8	15.8
出側計	6229.0	7118.9	5537.4	4982.5	5237.6	7649.0	5813.6	6642.7

表-10.22 二次燃焼室における物質収支

表-10.22 物質収支の計算結果(二次燃焼室)

二次燃焼室物質収支 (kg/H)

ケース名	1	2	3	4	5	6	7	8
項目								
〔入側〕								
乾燥ガス量	4561.5	5213.2	4055.2	3648.6	3648.6	5872.2	4226.2	4895.4
排ガス中水分量	882.2	756.8	588.7	529.7	585.8	771.8	582.1	742.2
二次燃焼空気量	885.8	989.3	769.5	682.3	687.8	1149.2	804.1	926.8
二次燃焼空気中水分量	8.7	9.9	7.7	6.9	7.0	11.5	8.0	9.3
スラグ量	989.6	1131.0	879.6	791.7	989.6	989.6	989.6	989.6
未燃排ガス量	15.8	17.9	13.9	12.5	15.8	15.8	15.8	15.8
燃料消費量	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
燃料燃焼空気量	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
入側計	7103.2	8118.1	6314.6	5881.7	5942.4	8609.7	6625.6	7578.9
〔出側〕								
乾燥ガス量	4164.6	4759.6	3702.4	3331.1	3333.5	5355.1	3860.0	4467.9
排ガス注水分量	887.6	785.8	611.2	550.0	609.6	799.8	606.9	768.2
乾空気量	1261.3	1441.5	1121.2	1008.8	1009.6	1665.1	1169.0	1353.1
スラグ量	989.6	1131.0	879.6	791.7	989.6	989.6	989.6	989.6
出側計	7103.1	8117.8	6314.4	5881.6	5942.3	8609.6	6625.5	7578.8

表-10.23 廃熱ボイラーにおける物質収支

表-10.23 物質収支の計算結果(廃熱ボイラー)

廃熱ボイラー物質収支 (kg/H)

ケース名	1	2	3	4	5	6	7	8
項目								
〔入側〕								
排ガス量	6113.5	6986.9	5434.8	4889.9	4952.7	7820.0	5635.9	6589.1
燃料消費量	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
燃料燃焼空気量	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
入側計	6113.5	6986.9	5434.8	4889.9	4952.7	7820.0	5635.9	6589.1
〔出側〕								
排ガス量	6113.5	6986.9	5434.8	4889.9	4952.7	7820.0	5635.9	6589.1
燃料燃焼排ガス量	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
出側計	6113.5	6986.9	5434.8	4889.9	4952.7	7820.0	5635.9	6589.1

3) 熱収支の計算結果

熱収支の計算結果を以下に示す。

表-10.24 乾燥機における熱収支

表-10.24 熱収支の計算結果 (乾燥機)

乾燥機熱収支 (1000kcal/H)

ケース名	1	2	3	4	5	6	7	8
項目								
【入側】								
乾燥機投入泥土顕熱	27	25	28	30	27	27	27	27
キャリアガス顕熱	20	15	23	26	20	20	21	18
指通蒸気顕熱・潜熱	829	859	981	1086	829	829	872	785
入側計	876	899	1013	1122	876	876	920	830
【出側】								
乾燥泥土顕熱	46	52	41	37	46	46	42	50
キャリアガス顕熱	40	30	47	53	40	40	42	37
蒸発水分顕熱・潜熱	459	350	544	612	459	459	480	429
指通蒸気潜熱・顕熱	215	171	249	278	215	215	228	203
乾燥機熱損失	116	86	132	145	116	116	121	112
出側計	876	899	1013	1123	876	876	921	831

表-10.25 主燃焼室における熱収支

表-10.25 熱収支の計算結果 (主燃焼室)

主燃焼室熱収支 (1000kcal/H)

ケース名	1	2	3	4	5	6	7	8
項目								
【入側】								
乾燥泥土保有熱	215	245	191	172	215	215	210	219
泥土燃焼用空気保有熱	7	6	6	5	7	7	7	7
燃料保有熱	3018	3447	2882	2413	2377	3932	2782	3250
燃料燃焼用空気保有熱	117	134	104	84	92	153	108	126
入側計	3355	3834	2983	2684	2691	4307	3107	3602
【出側】								
乾燥泥土燃焼乾燥ガス持出熱	94	107	83	75	86	101	94	94
乾燥泥土燃焼排ガス中水分持出熱	405	463	360	324	385	424	335	475
燃料燃焼乾燥ガス持出熱	1864	1902	1479	1331	1208	2340	1535	1793
燃料燃焼排ガス中水分持出熱	460	525	409	368	344	629	424	495
スラグ持出熱	542	620	482	434	511	574	542	542
未燃排ガス持出熱	6	7	5	5	6	7	6	6
未燃排ガス分解熱	10	11	9	8	10	10	10	10
炉冷却空気持出熱	6	7	5	5	6	6	6	6
主燃焼室熱損失	168	192	149	134	135	215	155	180
出側計	3355	3834	2981	2684	2691	4308	3107	3601

表-10.26 二次燃焼室における熱収支

表-10.26 熱収支の計算結果(二次燃焼室)

二次燃焼室熱収支(1000*Kcal/H)

ケース名	1	2	3	4	5	6	7	8
項目								
【入側】								
排ガス保有熱	2829	3004	2337	2103	2029	3501	2393	2883
スラグ保有熱	542	820	482	434	511	574	542	542
未燃排ガス保有熱	72	83	64	58	72	72	72	72
二次燃焼空気保有熱	4	5	4	3	3	8	4	5
入側計	3247	3712	2887	2598	2615	4153	3011	3482
【出側】								
排ガス持出熱	2218	2535	1972	1774	1713	2958	2018	2417
スラグ持出熱	542	820	482	434	511	574	542	542
二次燃焼室熱損失	487	557	433	380	382	623	452	522
出側計	3247	3712	2887	2598	2618	4153	3012	3481

表-10.27 廃熱ボイラーにおける熱収支

表-10.27 熱収支の計算結果(廃熱ボイラー)

廃熱ボイラー熱収支(1000*Kcal/H)

ケース名	1	2	3	4	5	6	7	8
項目								
【入側】								
排ガス保有熱	2218	2535	1972	1774	1713	2958	2018	2417
循環蒸気保有熱	150	120	174	193	150	150	158	142
燃料保有熱	0	0	0	0	0	0	0	0
燃料燃焼用空気保有熱	0	0	0	0	0	0	0	0
入側計	2368	2655	2146	1967	1863	3108	2176	2559
【出側】								
循環蒸気持出熱	829	859	981	1088	829	828	872	785
排ガス持出熱	874	999	777	699	743	1088	788	980
排熱ボイラー熱損失	76	87	88	81	55	107	70	82
余剰蒸気熱	589	909	340	141	238	1105	448	732
出側計	2388	2654	2146	1967	1863	3107	2176	2559

10.3.2 物質・熱特性の解析

10.3.1の計算結果に基づき、各パラメーターの燃料消費量に与える影響を以下に示す。

1) 含水比

燃料は主燃焼室のみで消費され、二次燃焼室、廃熱ボイラーでは燃料を消費せず、二次燃焼室、廃熱ボイラーにおいて新たに熱量を供給する必要がない。図-10.14に示すように溶融スラグ1kg当りの燃料消費量は含水比に関係なく0.282kgであり、二次処理土含水比が75~150%の間では溶融炉で消費される燃料の熱量でシステム全体の消費熱量が決定される。

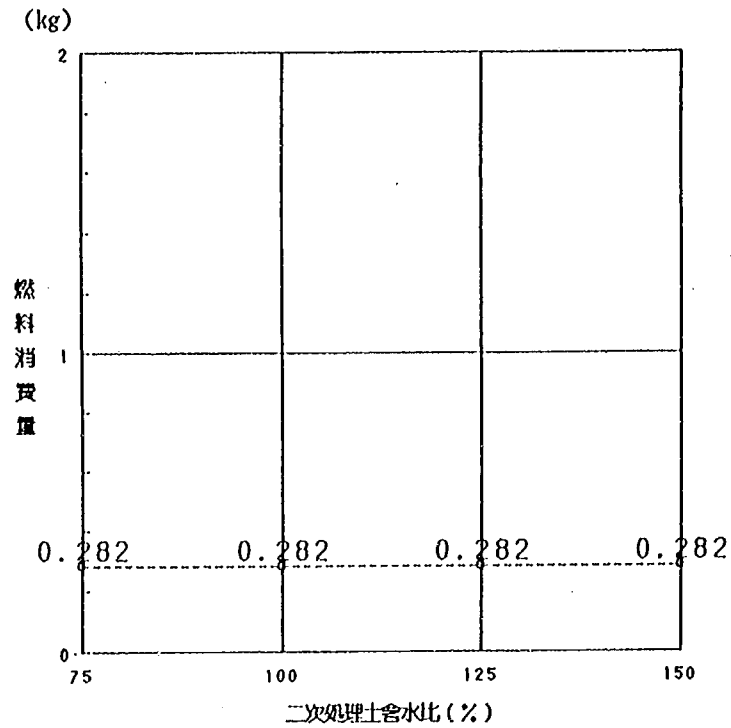


図-10.14 熔融スラグ1 kg当りの燃料消費量

また二次処理土含水比と燃料消費量の関係を図-10.15に示す。

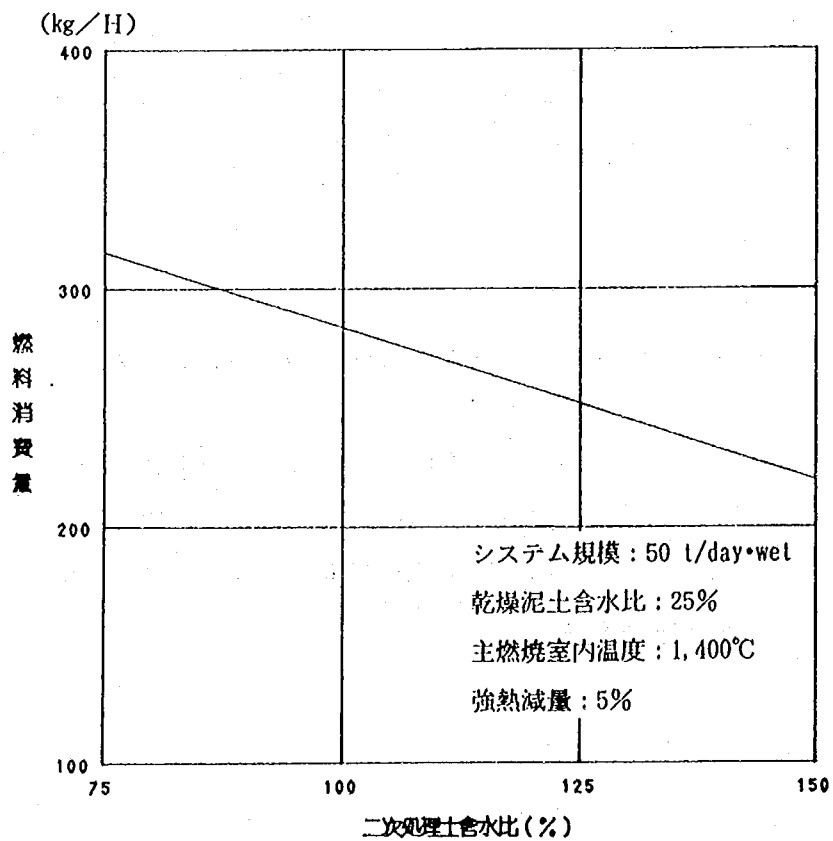


図-10.15 二次処理土含水比と燃料消費量の関係

熔融炉内の燃料消費量は二次処理土の含水比の上昇に伴って減少しており、減少の割合は含水比が1%上昇することにより、約1.3kg/Hrとなっている。これは表-10.28に示すように二次処理土量が一定であるので、二次処理土の含水比が低いほど熔融炉に投入される乾燥泥土の量が多くなるためである。

表-10.28 二次処理土含水比と乾燥泥土量の関係

二次処理土含水比 (%)	75	100	125	150
項 目				
二次処理土量(kg/H)	2,083.3	→	→	→
乾燥泥土量(kg/H)	1,488.1	1,302.1	1,157.4	1,041.7

表-10.29に二次処理土含水比と乾燥機における蒸発水分量の関係を示す。

表-10.29 二次処理土含水比と乾燥機における蒸発水分量

二次処理土含水比 (%)	75	100	125	150
項 目				
乾燥機における 蒸発水分量(kg/H)	595.2	781.3	925.9	1,041.7

表-10.30 強熱減量と泥土発熱量、燃焼ガス量

泥土固形物の 強熱減量 (%)	1	3	5	7
項 目				
泥土発熱量(Kcal/kg-DS)	46.3	138.9	231.5	324.1
燃焼ガス量(kg/H)	5,939.4	6,025.5	6,113.5	6,199.5

泥土の発熱量は高位発熱量とする。

2) 熔融温度

熔融温度と熔融炉燃料消費量の関係を図-10.16に示す。

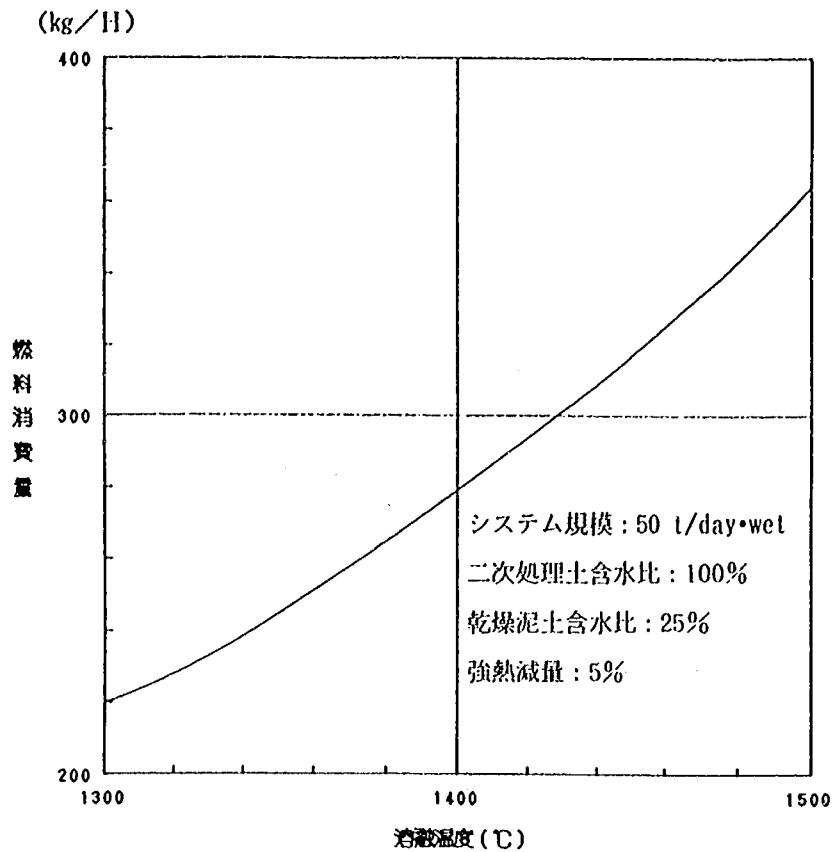


図-10.16 熔融温度と燃料消費量の関係

熔融温度の上昇に伴って熔融炉内における燃料消費量は増加するが増加の割合は一定でなく、1,300～1,400°Cにおける増加量が約59.2kg/Hrであるのに対して、1,400～1,500°Cにおける増加量が約84.8kg/Hrであり、熔融温度が上がるほど燃料消費量の増加の割合が大きい。

これは燃料の発熱量が一定であるので、熔融温度が高くなると燃料の燃焼ガスの持去る熱量が急激に増加していることによる。

3) 乾燥泥土含水比

乾燥泥土含水比と熔融炉における燃料消費量の関係を図-10.17に示す。

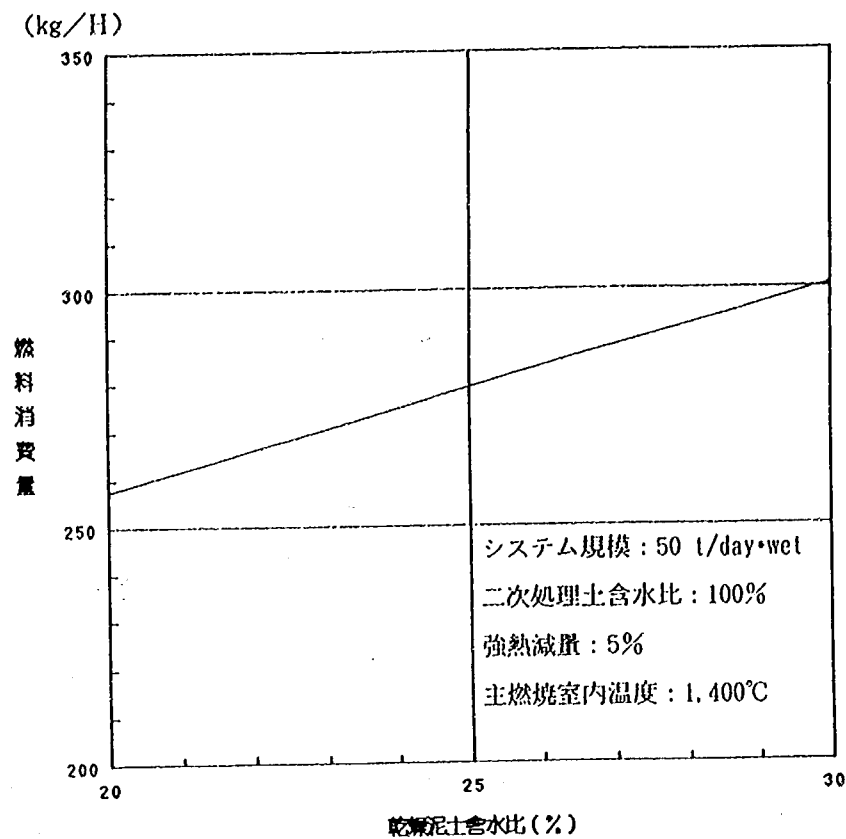


図-10.17 乾燥泥土含水比と燃料消費量の関係

乾燥泥土の含水比が上昇すると熔融炉内における燃料消費量は一定の割合で増加している。増加の割合は乾燥泥土含水比が1%上昇することにより約4.3kg/Hrとなっている。

これは乾燥泥土中の水分が高温の加熱蒸気になる際に多量の熱量が持ち出されるためである。

11. ま と め

本研究では、泥水の有効利用に関する検討を、熱処理（熔融処理、発泡処理）、脱水処理、固化処理の手法を用いて行った。それぞれの詳細については各章においても述べているが、今回の一連の実験で獲られた知見をまとめると次のようになる。

11.1 熔融処理による改良

- (1) 掘削残土の熔融温度は、石灰の添加などにより塩基度 (CaO/SiO_2) を0.5~0.9の範囲に調整することにより低くすることができる。
- (2) 熔融スラグの骨材としての品質は、道路用及びコンクリート用スラグのJIS規格を概ね満足している。
- (3) スラグは土の軟化点から200~300℃低い温度で再加熱することにより、スラグ自体の強度を高強度化することができる。再加熱による高強度化は水砕スラグよりも空冷スラグに効果があり、また、空冷スラグの方が低い温度から高強度化の効果が現れる。
- (4) 再加熱したスラグを用いたモルタルの強度は、再加熱処理を行っていないスラグを用いたモルタル強度より高くなる。
- (5) スラグを粗骨材、または細骨材の一方に用いた場合のコンクリート強度は、砕石と川砂を使用したコンクリート強度の9割以上の強度を確保したが、粗骨材・細骨材の両方にスラグを用いた場合の強度は7割程度の強度しか発現しなかった。

11.2 発泡処理

- (1) 融点の直前で体積膨張を示す土からは、軽量骨材を作製できる。
- (2) 残土から作製した軽量骨材は、JIS規格を満足する。

11.3 高圧脱水処理

- (1) 脱水時間を固定して脱水圧力を変化させた場合、脱水ケーキの脱水効率が急激に変化する圧力が存在する。
- (2) 脱水時間を増加させると、脱水ケーキの含水比は直線的に減少する。
- (3) 20分の脱水時間であっても、高圧で脱水することにより、脱水ケーキは土質材料として最低限の施工性を有するコーン指数 $2 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ を確保することができる。
- (4) 固化材を数%併用することにより、脱水ケーキの強度を上げることができる。

11.4 固化処理

- (1) 養生3日目に破碎した固化処理土を締固めても強度はある程度発現する。ただし、破碎後から締固めまでの間が短いほど強度の伸びは大きい。
- (2) 破碎前の強度から、一度破碎した改良土の強度をある程度推定できる。
- (3) セメント系固化材改良3日目の改良土はトラックの荷台に付着する傾向があり、作業性が劣る。

- (4) 初期含水比=150%の泥水を改良後3日養生し、掘削・盛土を行うと、1t振動ローラの締固めではローラが沈下し、転圧は不可能であった。
- (5) 改良後3日目に掘削し、築造した盛土の強度は次のとおりである。
- ・ 初期含水比70%の改良土では、盛土後10日で一軸圧縮強度は $qu=0.9\text{kgf/cm}^2$ 、現場CBR=6%となり、盛土材としての適用性は高いと考えられる。
 - ・ 初期含水比150%の改良土では、盛土後1ヶ月後においても一軸圧縮強度は $qu=0.8\text{kgf/cm}^2$ しか得られず、現状では盛土材としての適用は困難である。盛土材として使用するには初期含水比の低下、固化材添加量の増加、緩速施工の実施などの工夫が必要である。

11.5 泥土処理の経済性

- (1) 溶融処理のみの処理単価は、固化材処理の10～35倍になる。
- (2) 捨土費を含めた処理単価では、溶融処理は固化材処理の4～10倍になる。
- (4) 固化材処理後の土は捨土、溶融処理後のスラグは骨材として再利用する場合においても、溶融処理単価は固化材処理単価の3.5～9.5倍にしかならず、溶融処理は固化処理に比べ経済的に劣る。

参 考 文 献

- 1) 建設省土木研究所汚泥研究室「下水汚泥の建設資材としての利用方法」土木研究所資料第2440号, 1987. 2
- 2) 建設省都市局下水道部, 日本下水道事業団「汚泥溶融プロセスの省エネルギー化に関する調査報告書」1988. 3
- 3) 建設省都市局下水道部, 日本下水道事業団「汚泥焼却炉の省エネルギー化に関する調査報告書」1986. 3
- 4) 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, No30, 1985, 下水道汚泥資源利用協議会
- 5) 市川治徳, 笠倉忠夫: 下水汚泥消却灰の溶融骨材化, 第35回年次学術講演会講演概要集, 1980
- 6) 中村宗, 田中英二他: 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, 1982
- 7) 野口文男他: 下水汚泥溶融スラグの資源化—スラグ組織に及ぼす冷却速度の影響—, 第23回下水道研究発表会講演集, 1986
- 8) 三輪幸太郎他: 溶融炉の温度設定に関する一考察, 第23回下水道研究発表会講演集, 1986

付 録 目 次

付録1. 成分分析試験・溶融温度特性試験について	123
付録2. 体積変化率・重量変化率試験結果	126
付録3. 減容化傾向（対象土－3～7）	127
付録4. 膨張率・収縮率測定結果	130
付録5. 溶融特性試験結果	145
付録6. 溶融温度特性試験における状態変化（対象土－1）	147
付録7. 溶流度試験結果	148
付録8. モルタル供試体試験結果（スラグ1）	159
付録9. コンクリート供試体試験結果	159
付録10. モルタル供試体試験結果（スラグ8）	160

付録1. 成分分析試験・溶融温度特性試験について

JIS M 8801（石炭類の試験方法）の9.「灰の溶融特性試験方法」に準じて行った。以下にその概略を示す。

(1) 対象残土の灰化处理

それぞれの対象土について適量をJIS M 8812（石炭類及びコークス類の工業分析方法）の4.灰分定量方法に準じて灰化する。これをめのう乳鉢で微粉とし、再度加熱して未燃分が完全に灰化した物を試料とする。

(2) 成分分析試験

灰化处理した試料の内対象土－1、8、9について、それぞれの主成分である SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 P_2O_5 、 CaO 、 Fe_2O_3 、 Na_2O 、 K_2O の8成分について分析を行った。対象土－2～7については SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 Fe_2O_3 の4成分について分析を行った。成分分析方法はJIS M 8815（石炭灰及びコークス灰の分析方法）に準拠した。

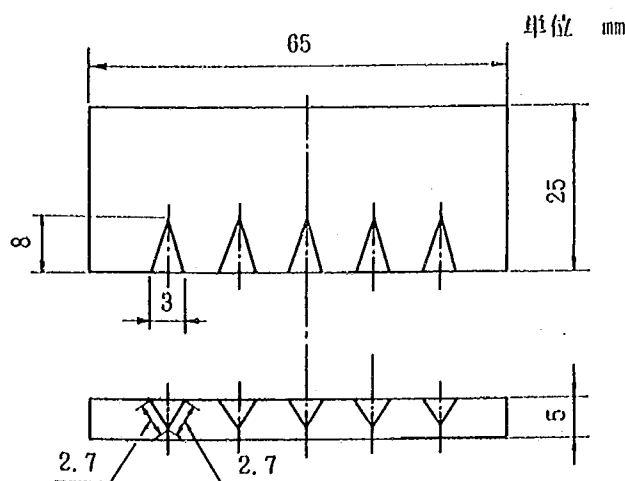
(3) 塩基度調整

高温による溶融処理では通常その温度特性（軟化点、融点、溶流点等）は対象となる物質の成分及び成分構成比により左右される。その内主な構成成分である SiO_2 と CaO との重量比を塩基度とし、 CaO/SiO_2 で表し、対象試料に対してケイ酸（ SiO_2 ）、あるいは生石灰（ CaO ）の純試薬を添加することにより、所定の塩基度になるように調整した。

塩基度（ CaO/SiO_2 ）の調整範囲は、対象土－1、8、9について塩基度未調整の試料を含め7条件（未調整、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2）、対象土－2～7について塩基度未調整の試料を含め6条件（未調整、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0）とした。

(4) 試験すいの制作

塩基度未調整の試料及び塩基度調整試料について、適量を時計ざらに取り純水をバインダーとして加えペースト状に練り合せた後、図－付1.1に示すような三角すい型の中に押し込んで試験すいを作製した。



図－付1.1 三角すい型

(5) 溶融温度特性試験

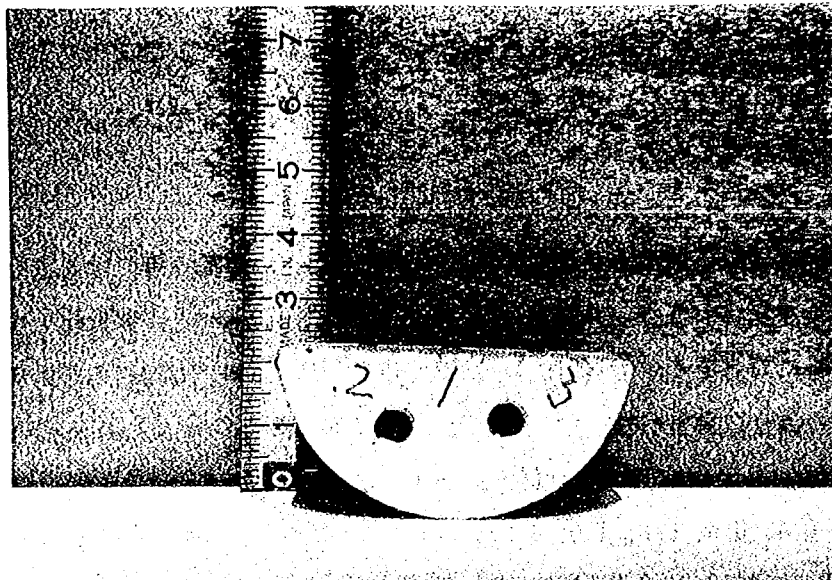
制作した試験すいの中から形の正しいものを選び、3または4検体（塩基度の異なるもの）を支持台に垂直に立て、次の手順で試験を行った。

a. 電気炉の昇温

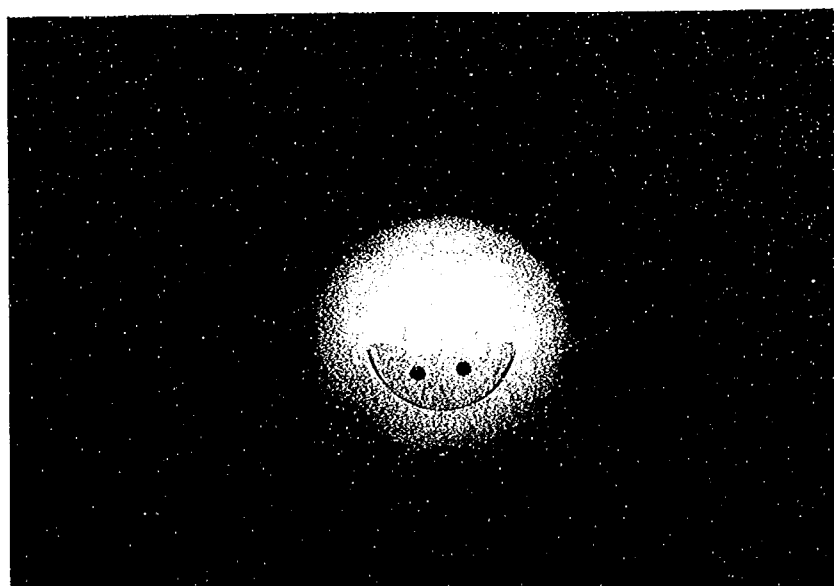
電気炉を昇温し、均熱部の温度を900℃以下に調節する。

b. 試験すいの挿入

試験すいを取り付けた支持台（写真－付1.1参照）を電気炉内に挿入し、試験すいを急熱しないように時間をかけて均熱帯中央部まで静かに挿入する。（写真－付1.2参照）



写真－付1.1 支持台への試験すいの取り付け状況



写真－付1.2 炉内に挿入された試験すい

c. 観測

5℃/分の加熱速度で昇温を開始し、試験すいの状態を観測する。

d. 記録

図-付1.2に示すような試験すいの形状の変化する状況を観察し、溶融特性温度（軟化点 τ 、融点 τ 、溶流点 τ ）を記録した。なお、各溶融特性温度の判定方法を以下に示す。

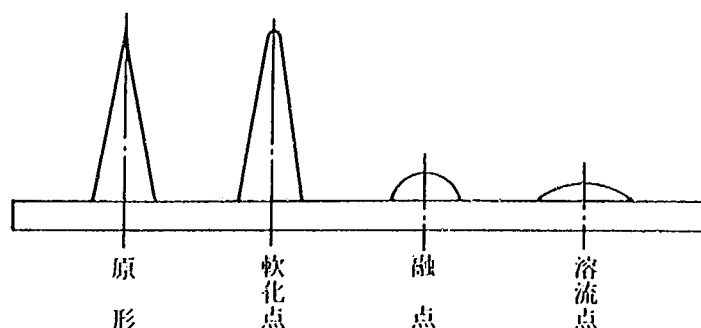


図-付1.2 試験すいの形状変化

軟化点 τ ：試験すいの頂部が溶けて丸くなり始めた温度

融点 τ ：試験すいが溶融して、その高さが底部の見かけ上の幅のほぼ1/2に等しくなったときの温度

溶流点 τ ：溶融物が支持台に流れ、融点の時の高さのほぼ1/3の高さになった時の温度

なお、図-付1.3に使用した電気炉の概観図を、表-付1.1にその仕様を示す。

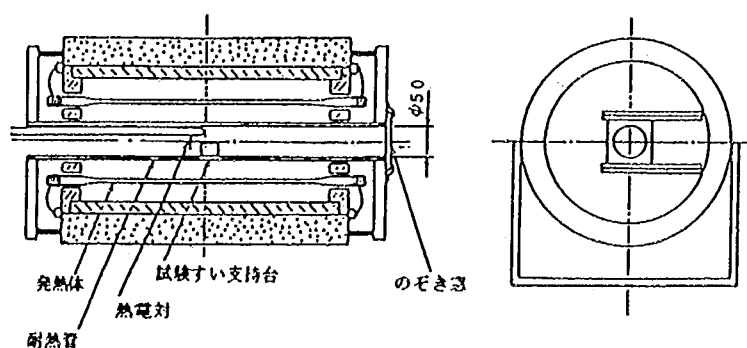


図-付1.3 水平形管状電気炉の外観図

表-付1.1 水平形管状電気炉の設備仕様

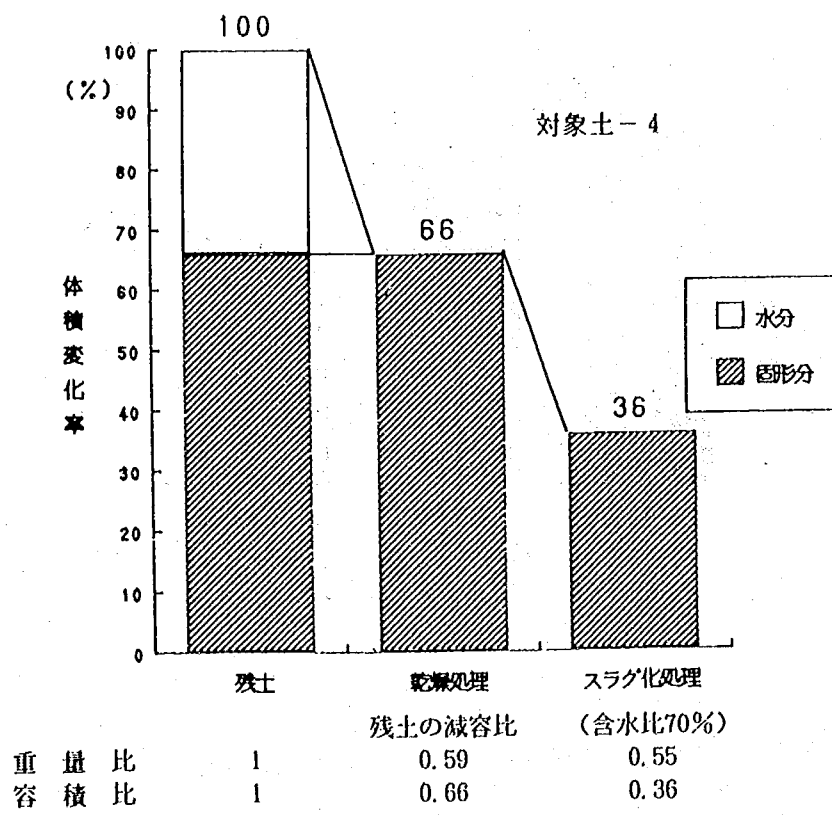
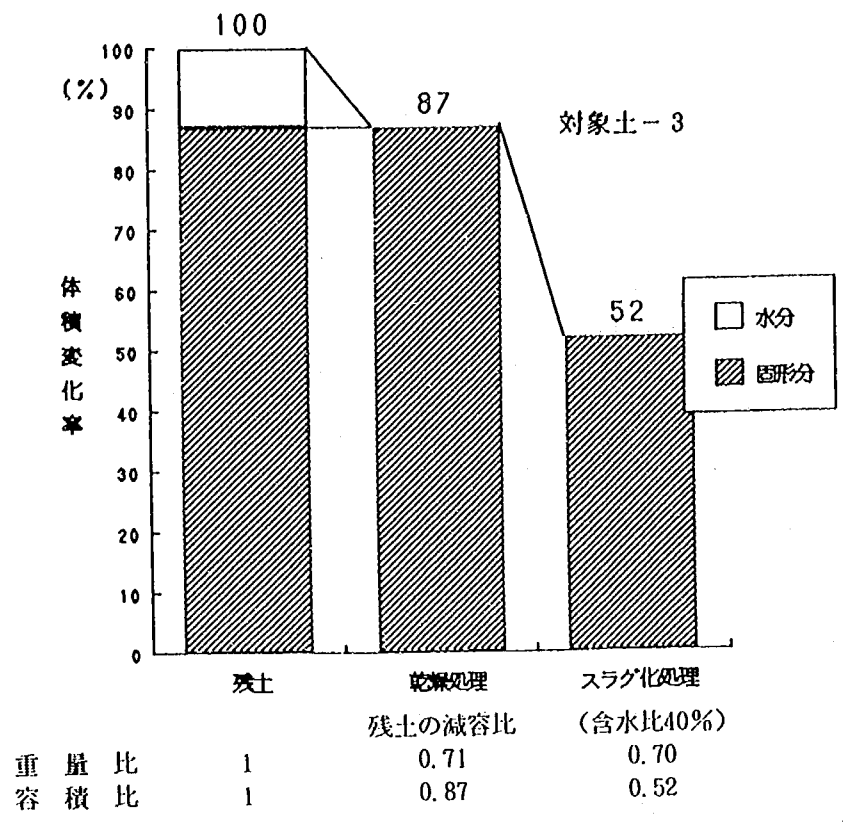
型 式：EXO-HC-3（非金属用）	発 熱 体：SiC
能 力：試験可能温度 1600℃	寸 法 12φ×250 6本
炉内寸法：50φ×500	電 源：220V 60A 5KVA
昇温速度：MAX 10℃/min	

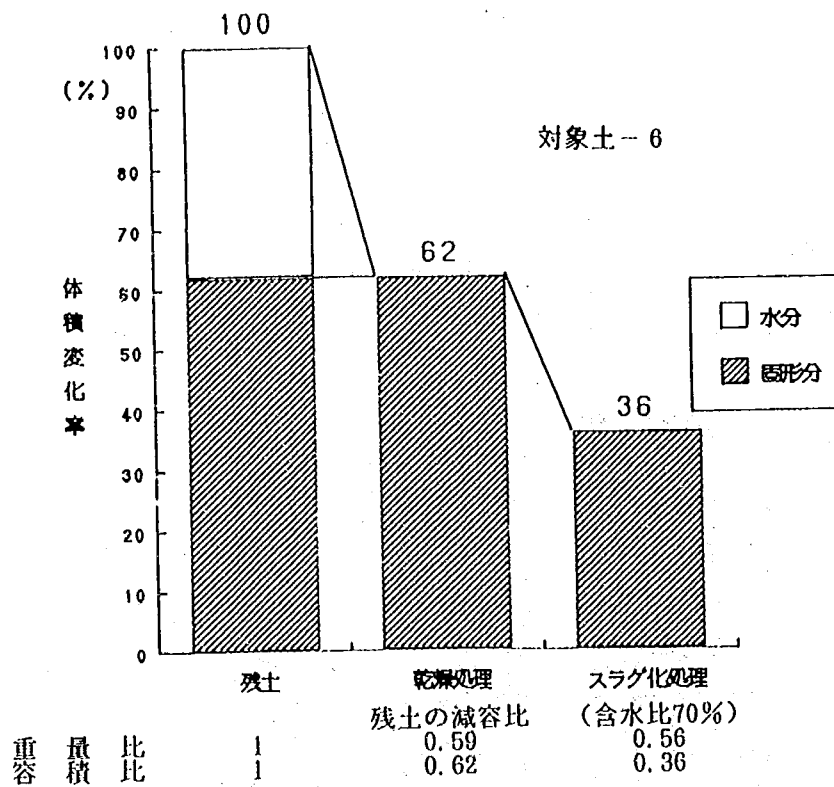
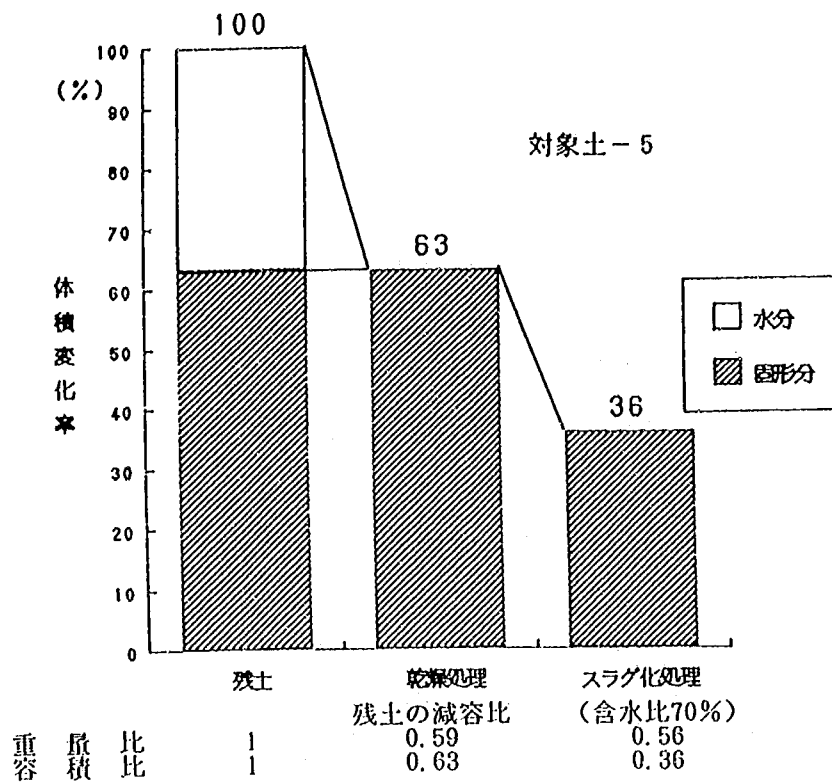
付録2. 体積変化率・重量変化率試験結果

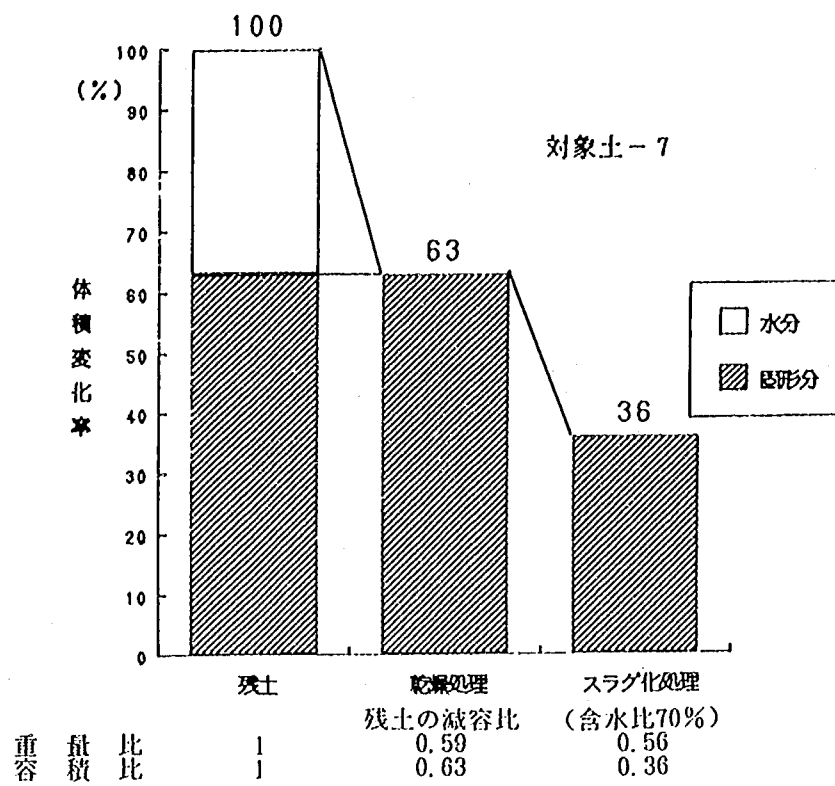
体積変化率・重量変化率

対象土 塩基度	NO	試料重量 (g)	試料体積 (cm ³)	単位体積 重量 (g/cm ³)	溶融後試料 重量 (g)	重量変化率	溶融物体積 (cm ³)	体積変化率
1 無調整	1	21.919	20.21	1.085	21.376	0.975	8.44	0.418
2 無調整	2	23.684	20.21	1.172	23.128	0.977	9.89	0.489
3 無調整	3	16.624	20.21	0.823	15.104	0.909	6.74	0.333
4 無調整	4	16.625	20.21	0.823	15.279	0.919	9.38	0.464
5 無調整	5	17.403	20.21	0.861	16.157	0.928	7.12	0.352
6 無調整	6	17.859	20.21	0.884	16.797	0.941	7.50	0.371
7 無調整	7	17.098	20.21	0.846	16.025	0.937	7.16	0.354
7 無調整	8	16.655	20.21	0.824	15.613	0.937	7.07	0.350
7 0.40	9	17.869	20.21	0.884	17.087	0.956	6.25	0.311
7 0.40	10	18.599	20.21	0.920	17.790	0.957	6.54	0.324
7 1.00	11	19.052	20.21	0.943	18.356	0.963	6.49	0.321
7 1.00	12	18.884	20.21	0.934	18.201	0.964	6.46	0.320

付録3. 減容化傾向（対象土－3～7）







測定結果

供試体測定投影面の図化

試料名 No.5 掘削土（2回目）の灰化試料（無調製）

付録4. 膨張率・収縮率測定結果

1989.10.20

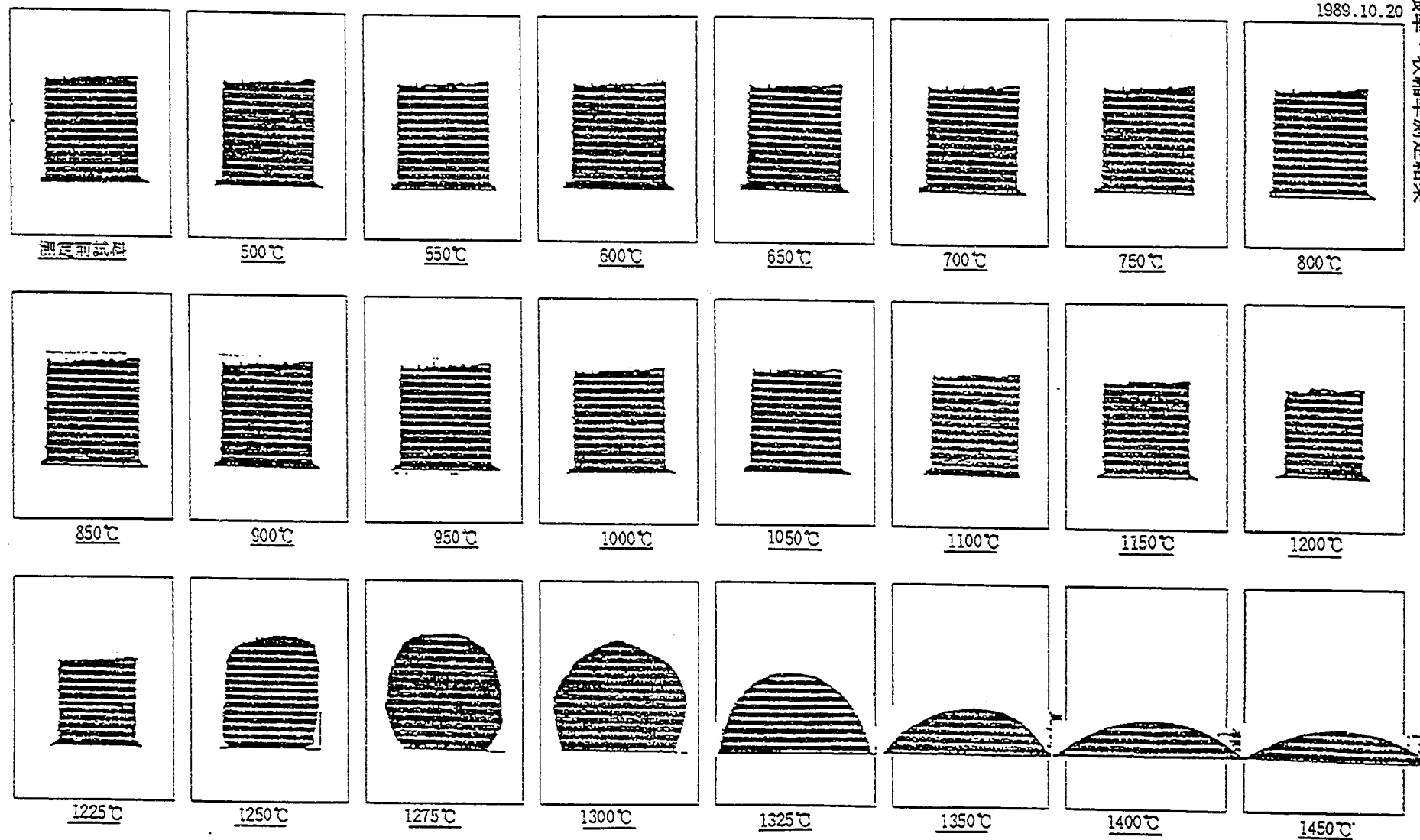


図-付4.1 膨張率・収縮率測定結果（ケース1）

測定結果

供試体測定投影面の図化

試料名 ケース1 残土+パーライト0.2%添加

1989.10.24

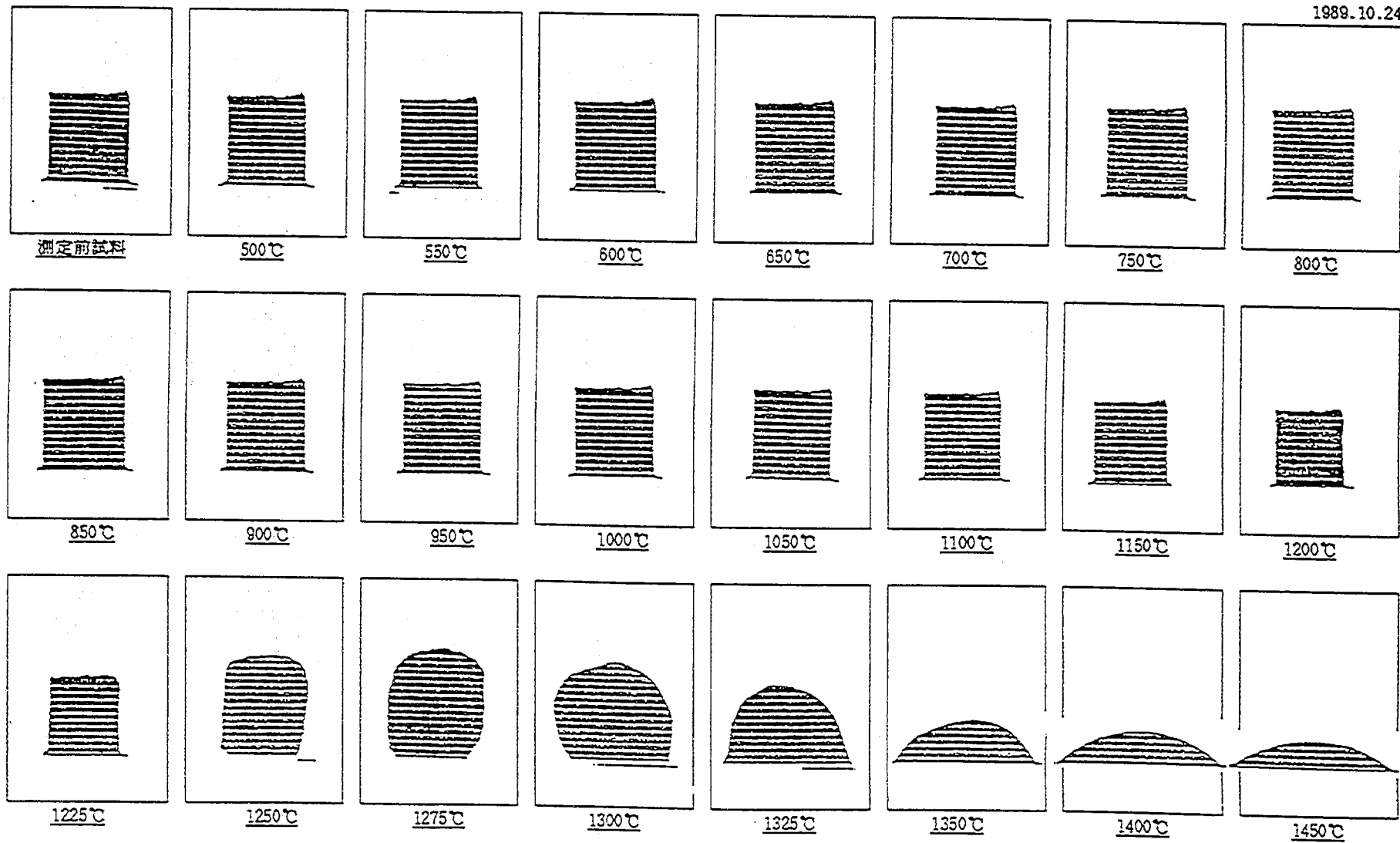


図-付4.2 膨張率・収縮率測定結果（ケース2）

測定結果

供試体測定投影面の図化

試料名 ケース2 残土+パーライト0.6%添加

1989.10.27

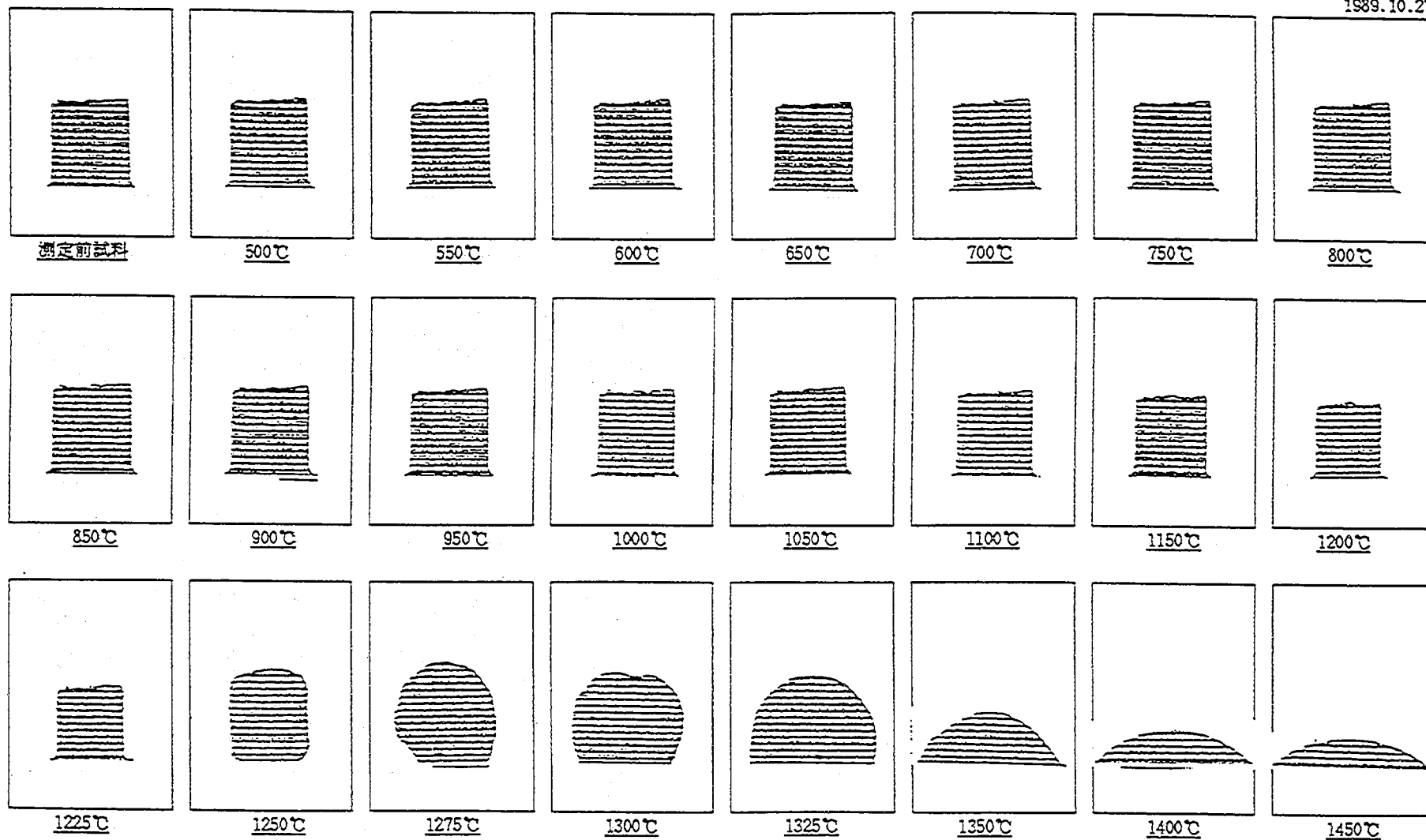


図-付4.3 膨張率・収縮率測定結果（ケース3）

測定結果

供試体測定投影面の図化

試料名 ケース3 残土 + C 0.2%添加

1989.10.27

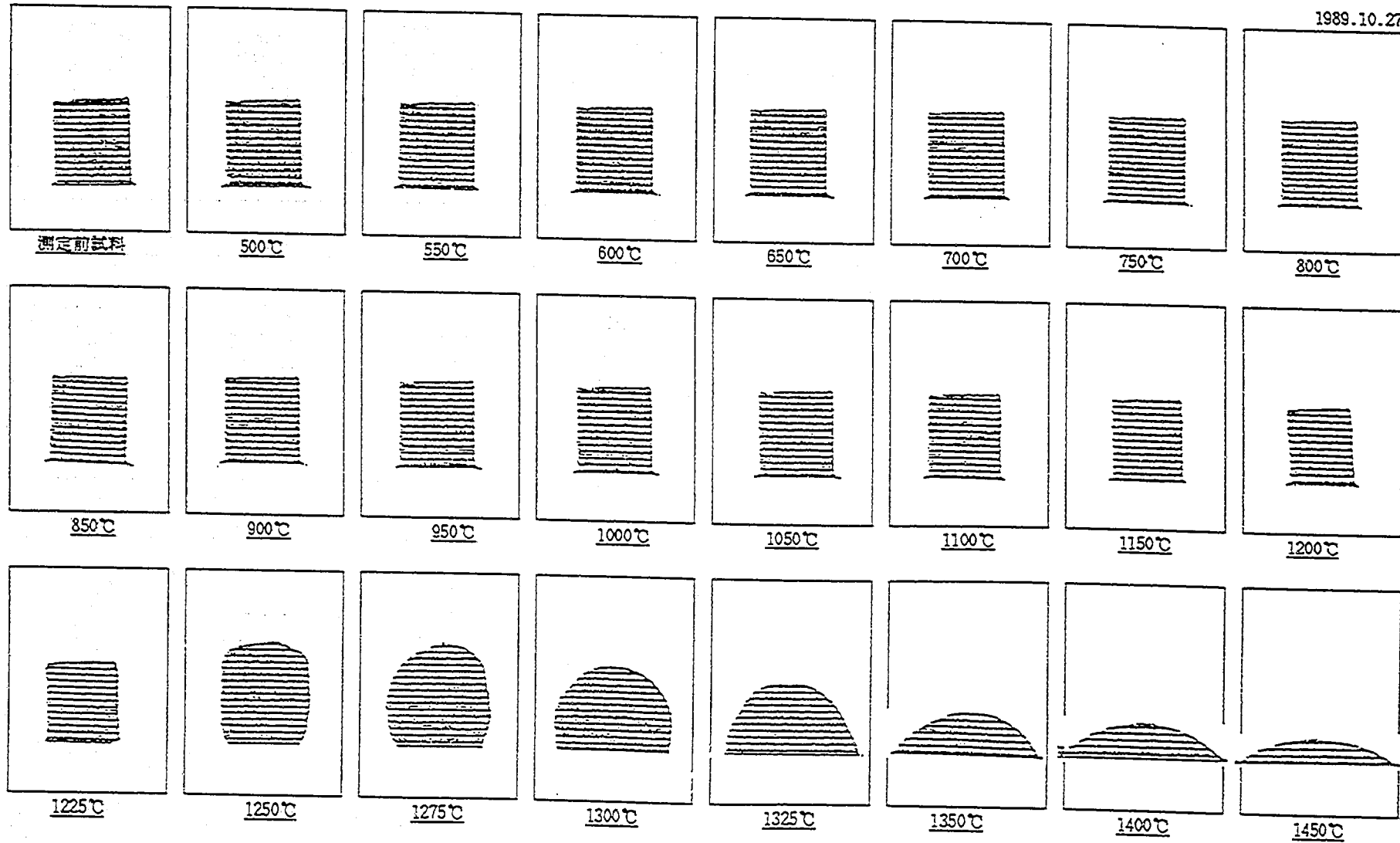


図-付4.4 膨張率・収縮率測定結果（ケース4）

測定結果

供試体測定投影面の図化

試料名 ケース4 残土 + C 0.6%添加

1989.10.31

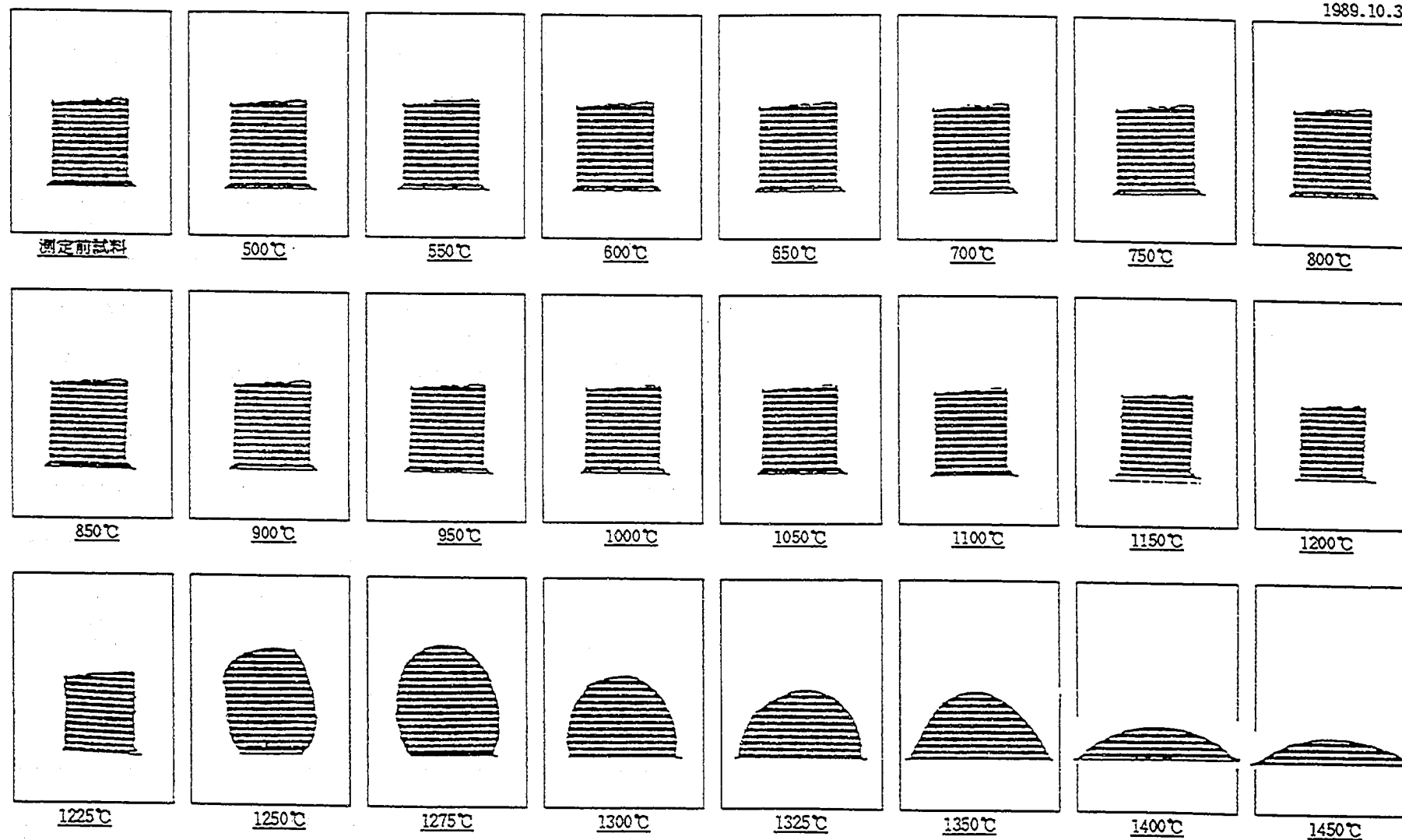


図-付4.5 膨張率・収縮率測定結果(ケース5)

測定結果

供試体測定投影面の図化

試料名 ケース5 残土 + C0.6 + K₂SO₃ 0.2%添加

1989.11.16

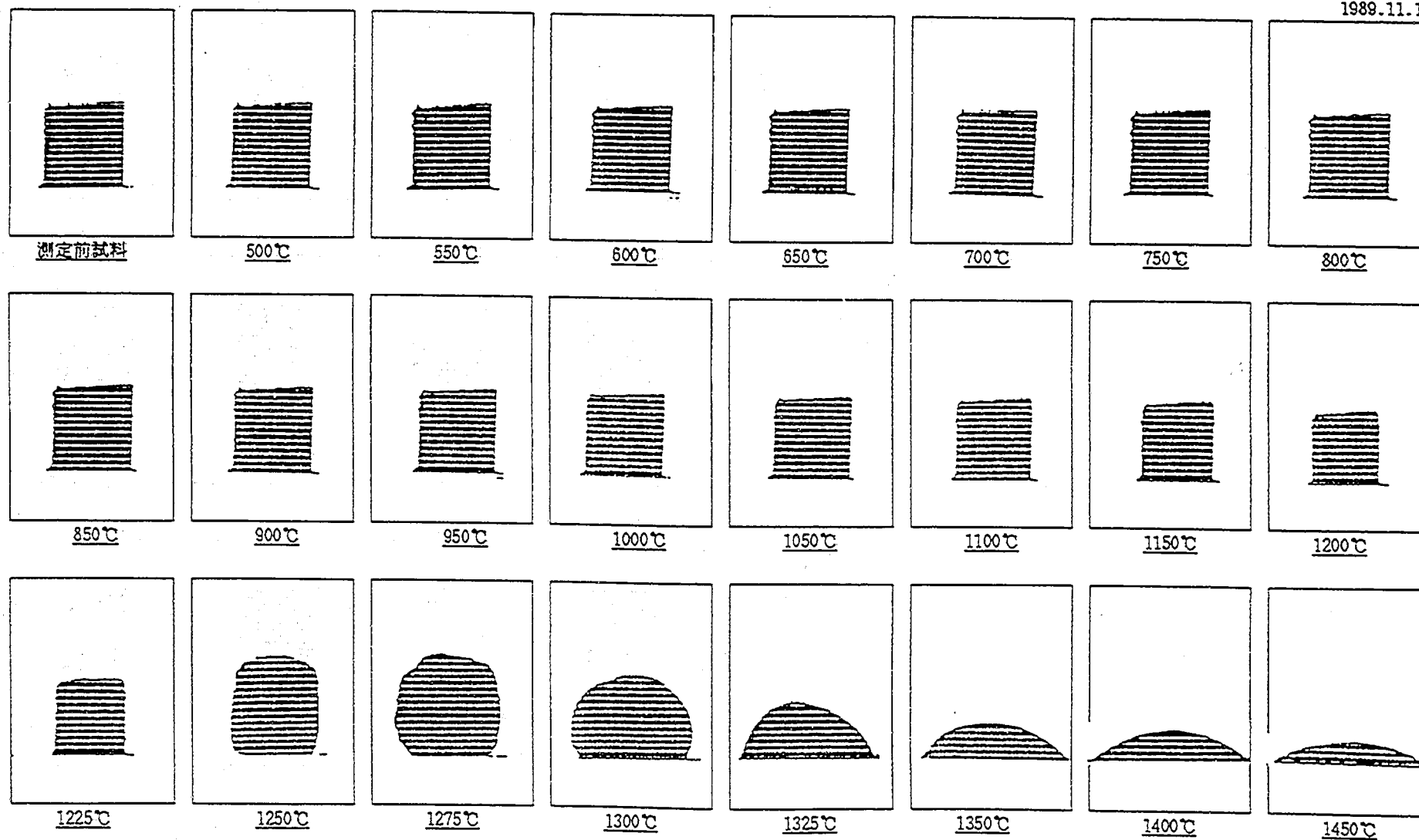


図-付4.6 膨張率・収縮率測定結果 (ケース6)

測定結果

供試体測定投影面の図化

試料名 ケース6 残土+真珠岩 0.2%添加

1990.02.13

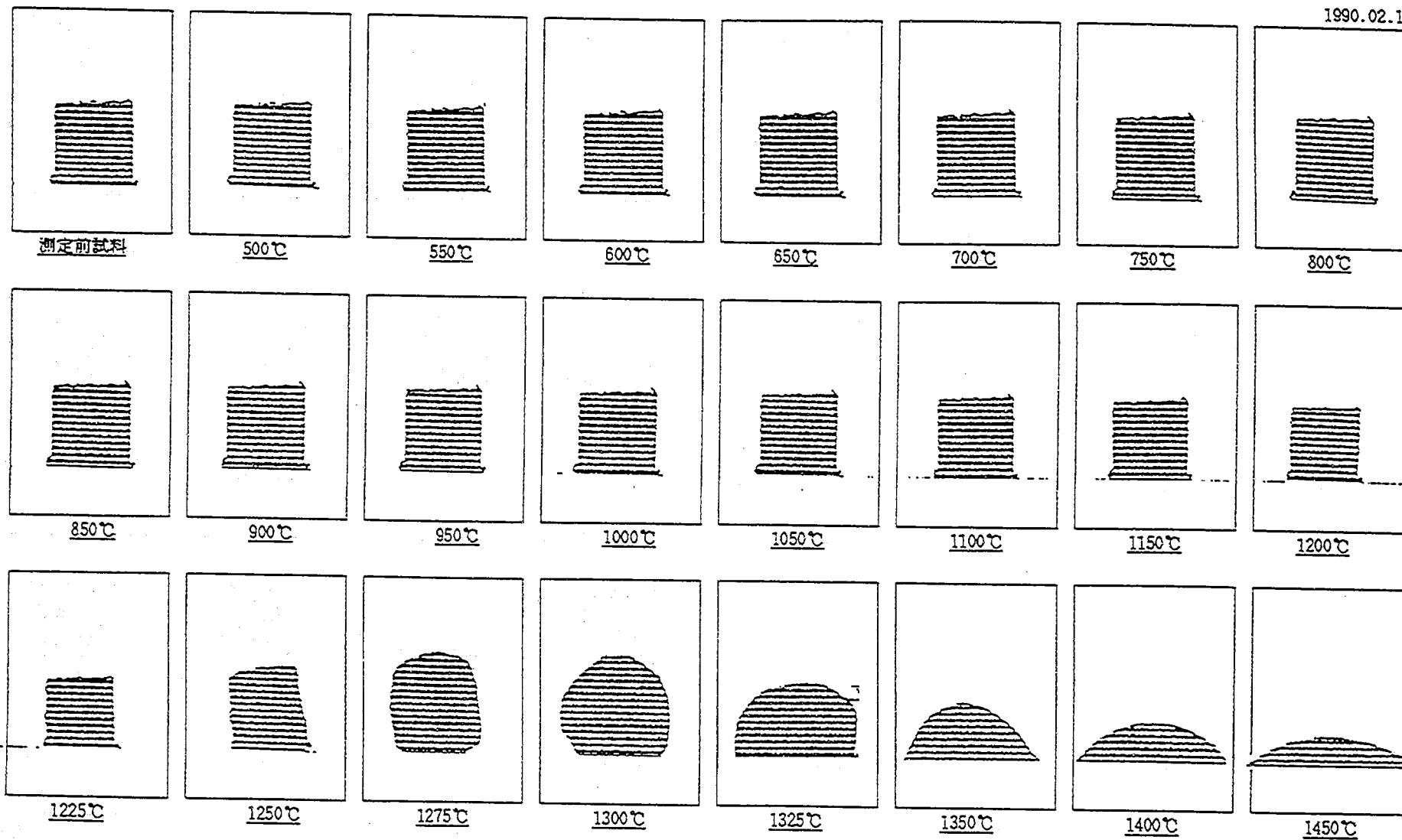


図-付4.7 膨張率・収縮率測定結果 (ケース7)

測定結果

供試体測定投影面の図化

試料名 ケース7 残土+真珠岩 0.6%添加

1990.02.13

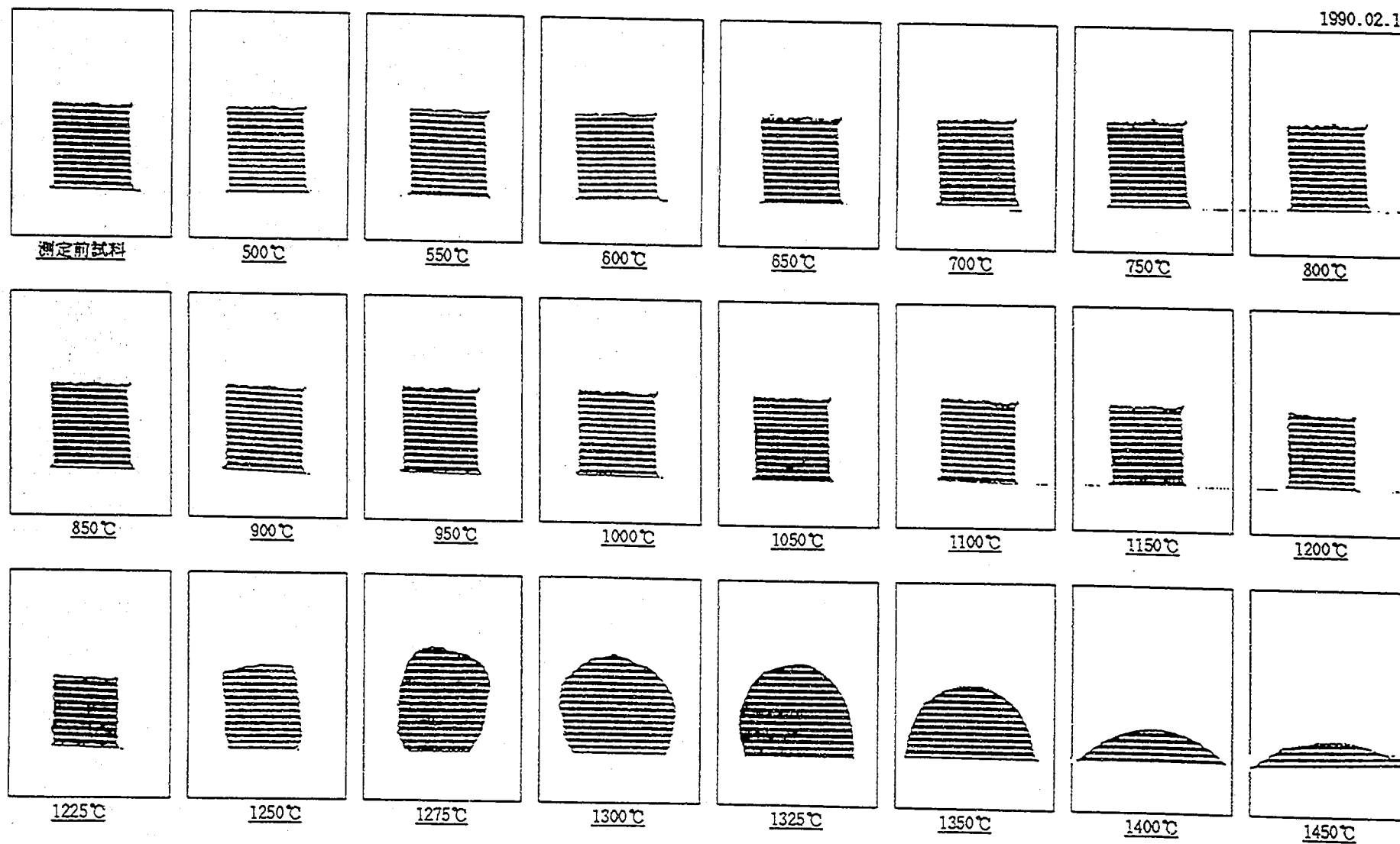


図-付4.8 膨張率・収縮率測定結果(ケース8)

測定結果

供試体測定投影面の図化

試料名 ケース8 残土+粗面岩 0.2%添加

1990.02.13

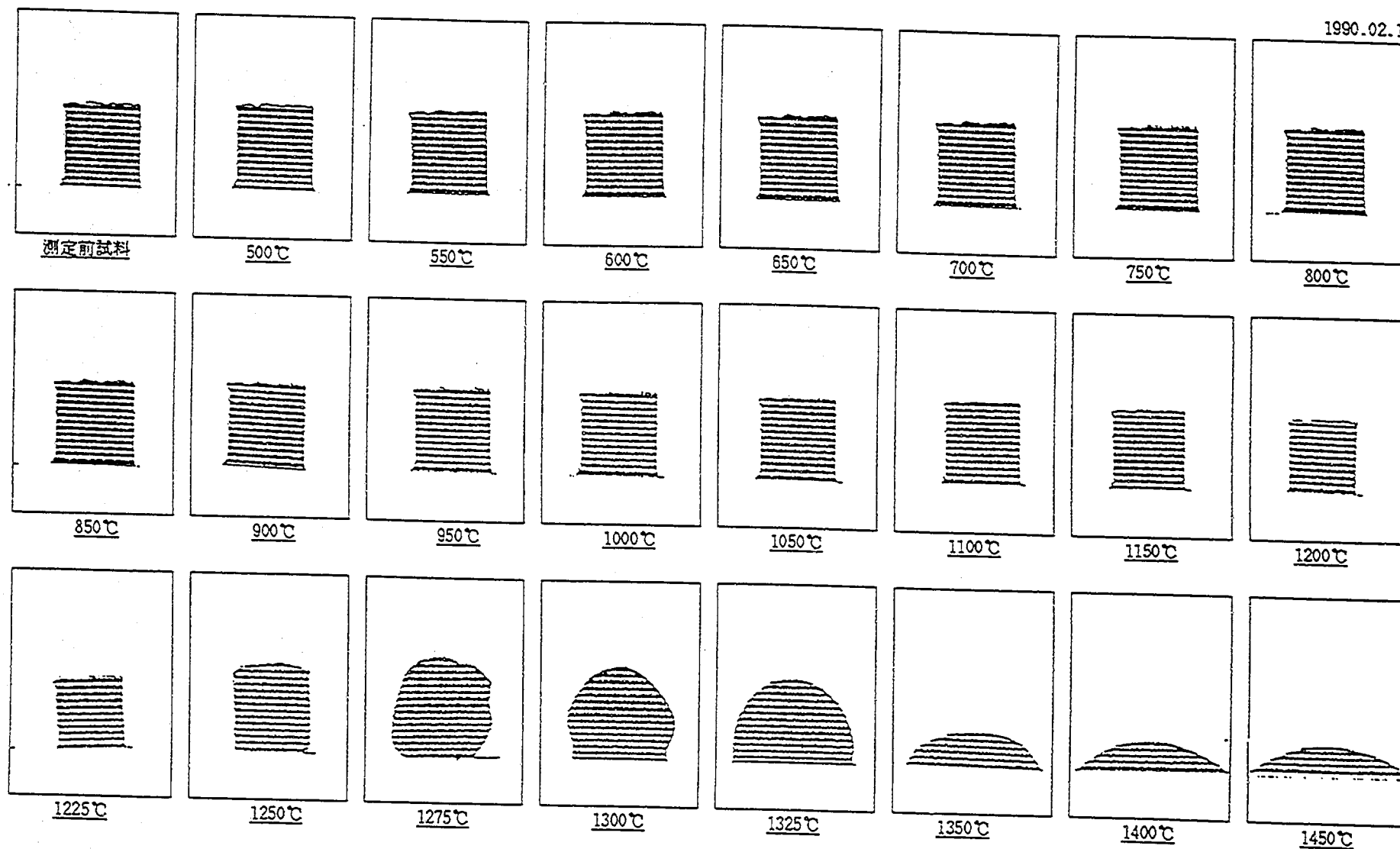


図-付4.9 膨張率・収縮率測定結果(ケース9)

測定結果

供試体測定投影面の図化

試料名 ケース9 残土+粗面岩 0.6%添加

1990.02.13

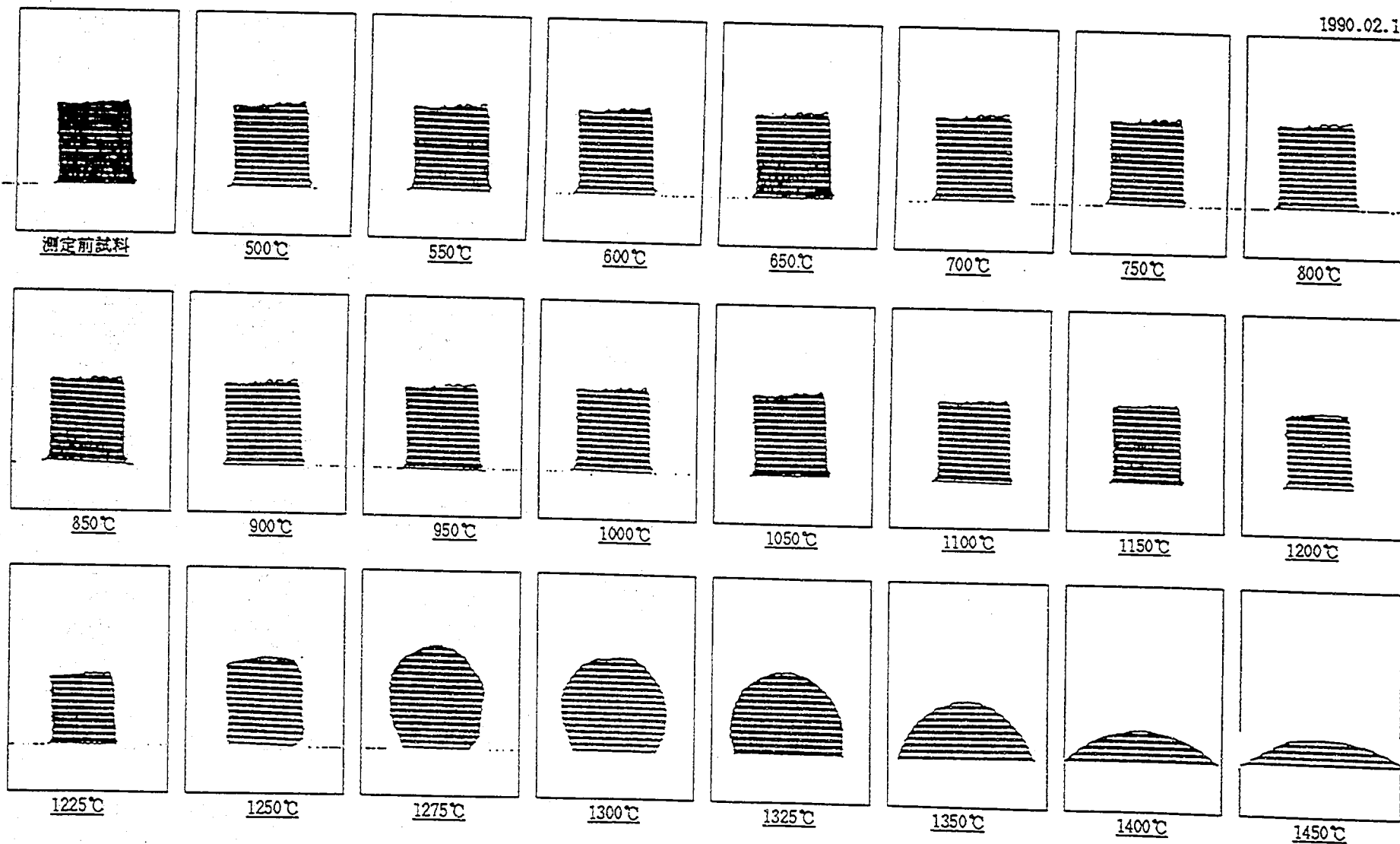


図-付4.10 膨張率・収縮率測定結果 (ケース10)

測定結果

供試体測定投影面の図化

試料名 ケース11 最大膨張温度 (1275℃) から降温速度 3℃/min

1990.01.12

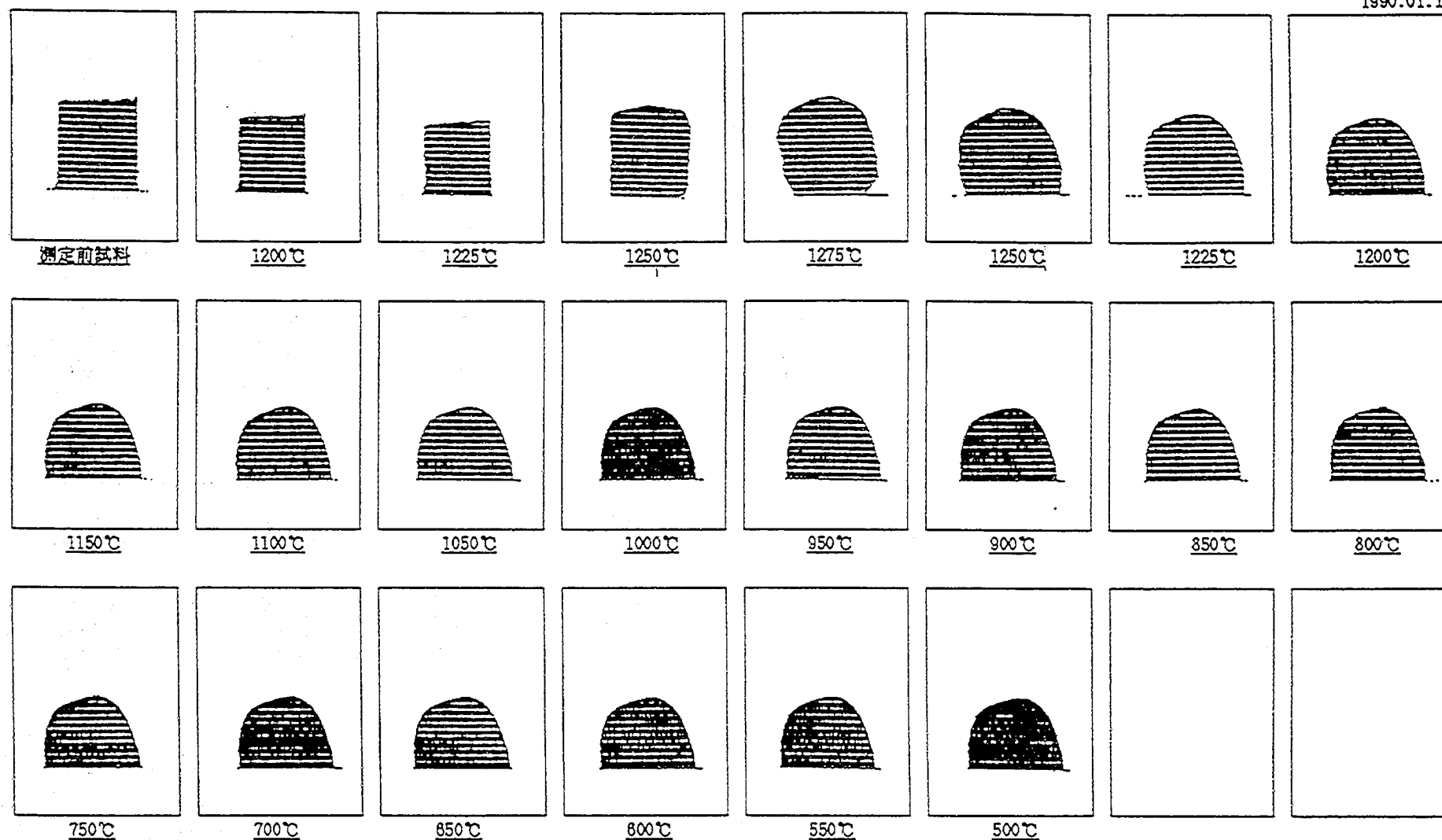


図-付4.11 膨張率・収縮率測定結果

測定結果

供試体測定投影面の図化

試料名 ケース12 最大膨張温度-10℃ (1265℃) から降温速度 5℃/min

1989.11.22

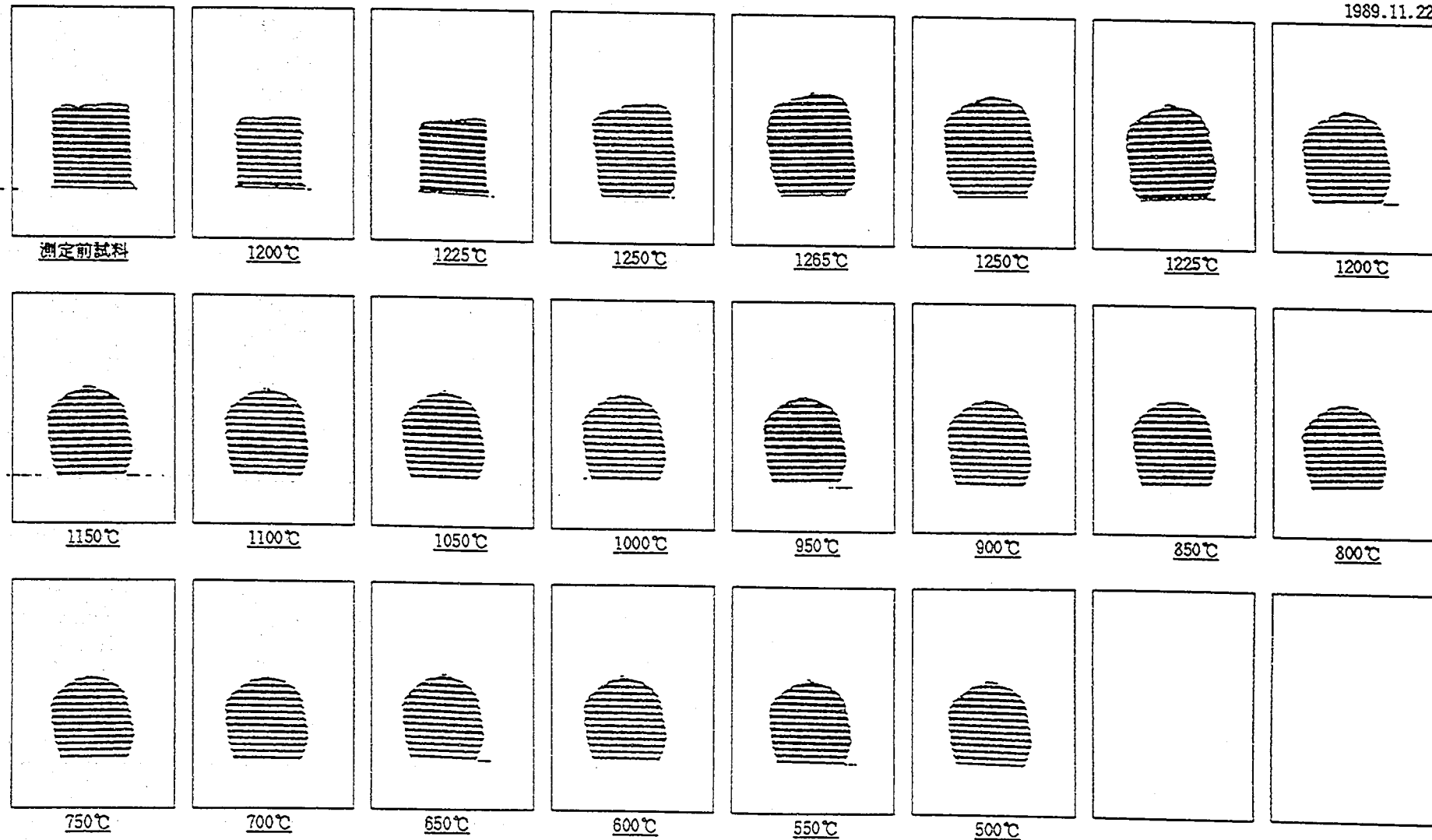


図-付4.12 膨張率・収縮率測定結果

測定結果

供試体測定投影面の図化

試料名 ケース13 最大膨張温度 -10°C (1265°C) から降温速度 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$

1990.01.16

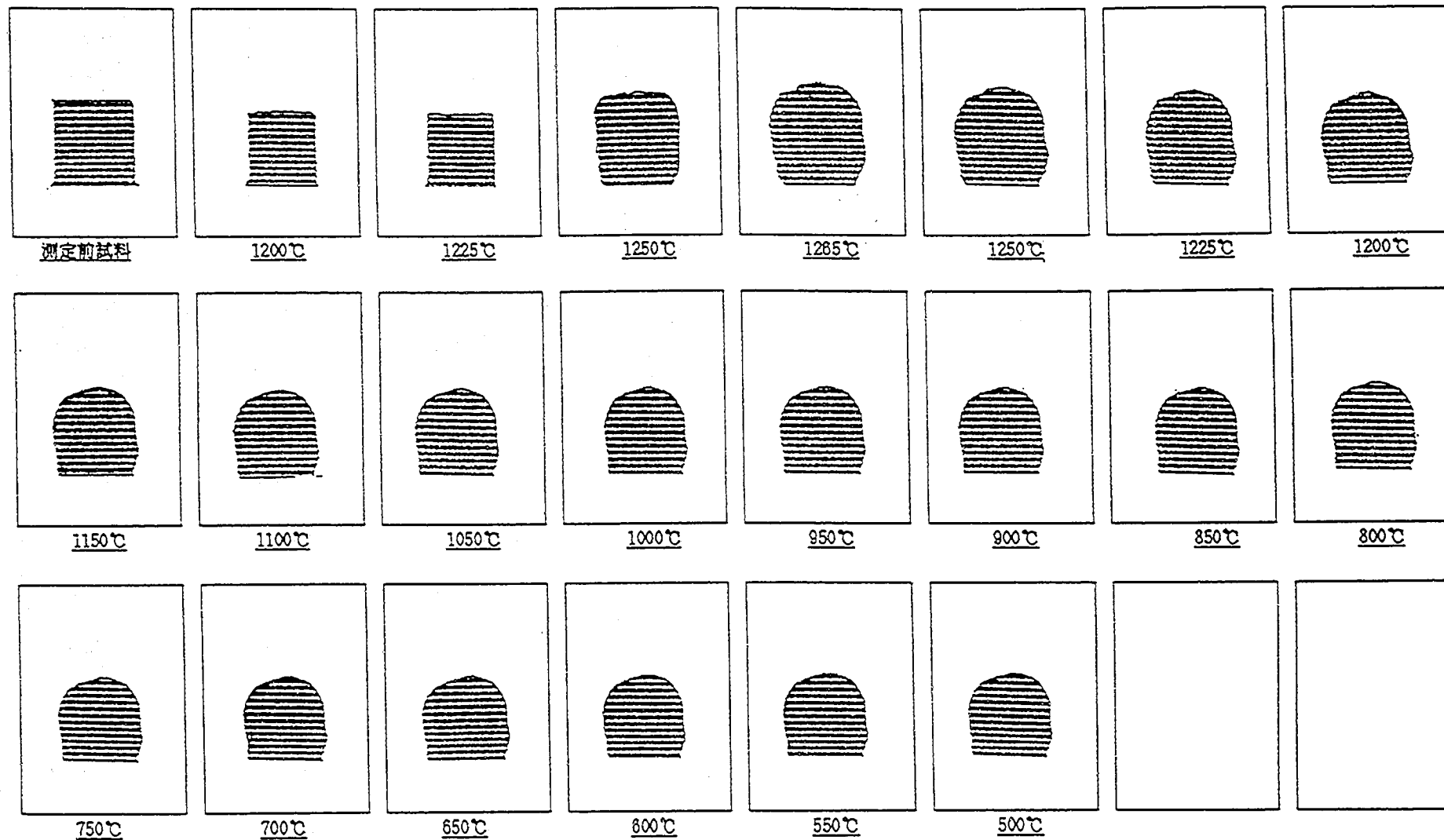


図-付4.13 膨張率・収縮率測定結果

測定結果

供試体測定投影面の図化

試料名 ケース14 最大膨張温度 -20°C (1255°C) から降温速度 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$

1989.11.22

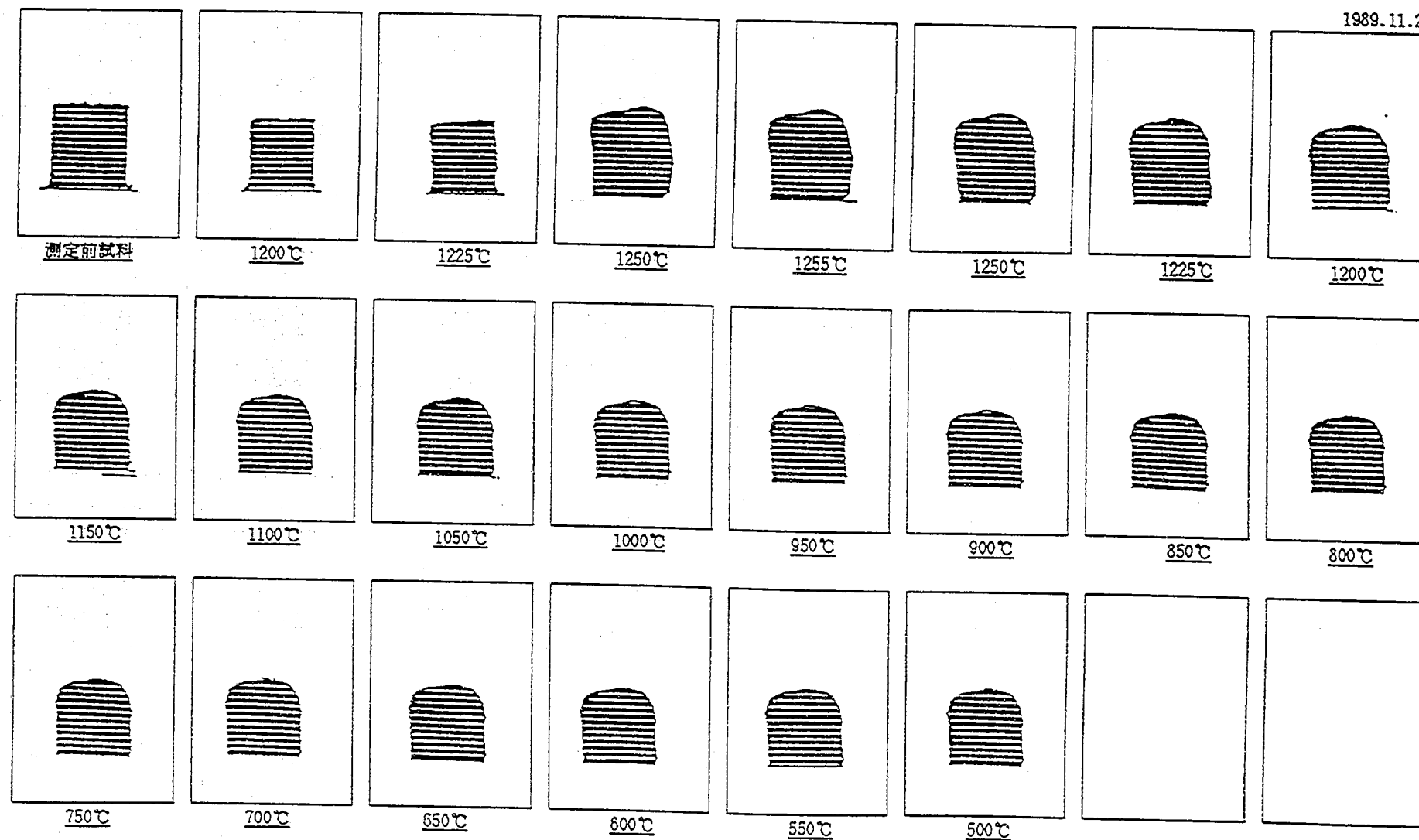


図-付4.14 膨張率・収縮率測定結果

測定結果

供試体測定投影面の図化

試料名 ケース15 最大膨張温度 -20°C (1255°C) から降温速度 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$

1990.01.16

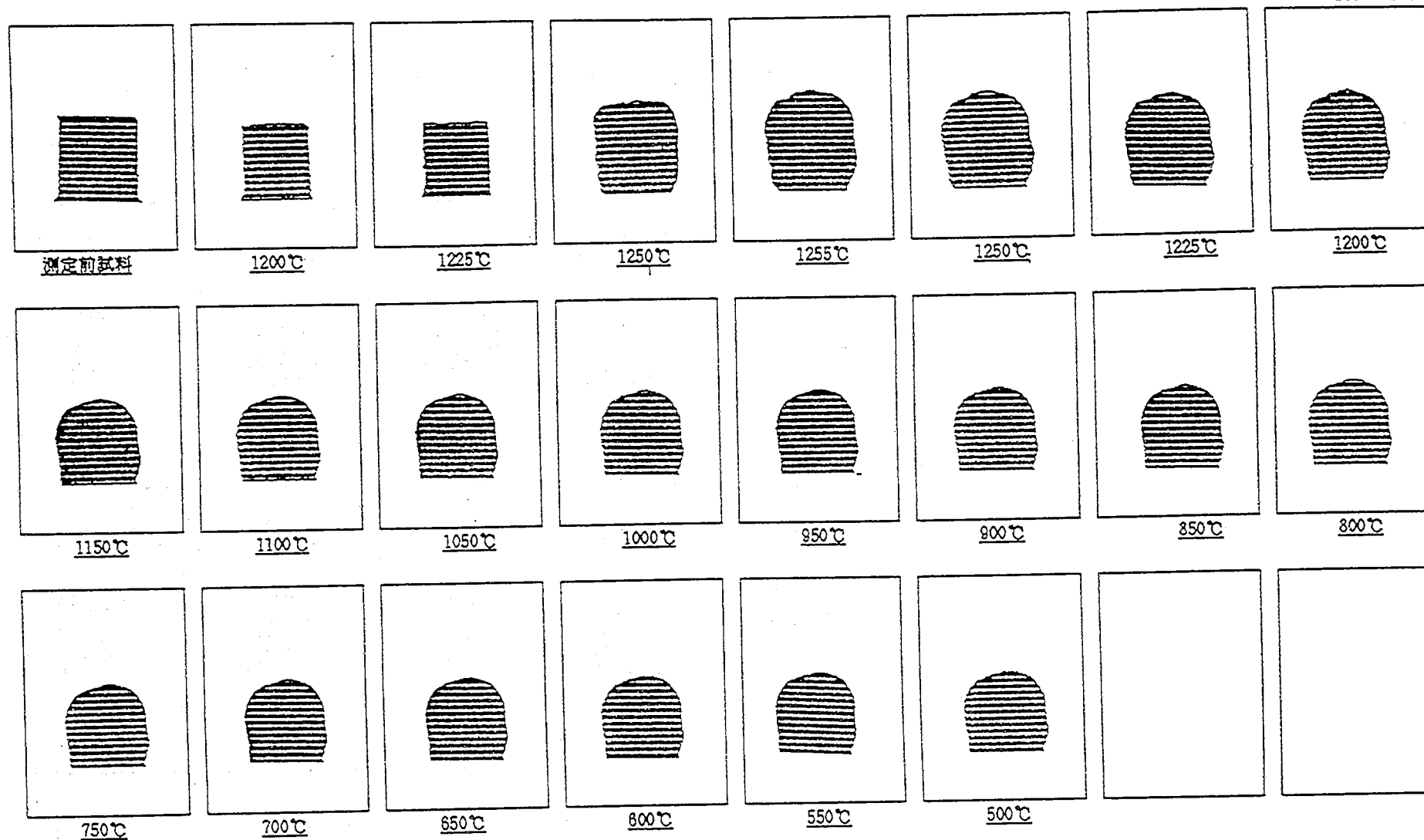


図-付4.15 膨張率・収縮率測定結果

付録5. 溶融特性試験結果

溶融特性試験結果

単位：℃

試料No 試料名 溶融特性温度		①			⑧			⑨		
		対象土 - 1			対象土 - 8			対象土 - 9		
		軟化点	融点	溶流点	軟化点	融点	溶流点	軟化点	融点	溶流点
塩基度 (CaO/SiO ₂)										
未調整試料 試料No 0.05 0.04 0.05	1回目	1240	1325	1325	1155	1325	1380	1185	1310	1315
	2回目	1255	1320	1340	1155	1340	1340	1175	1300	1330
	平均値	1250	1320	1330	1155	1330	1360	1180	1305	1320
0.2	1回目	1185	1235	1255	1190	1230	1265	1170	1245	1250
	2回目	1195	1250	1295	1175	1240	1295	1180	1235	1290
	平均値	1190	1240	1275	1180	1235	1280	1175	1240	1270
0.4	1回目	1195	1205	1210	1195	1210	1215	1185	1205	1210
	2回目	1195	1210	1220	1190	1210	1220	1185	1200	1215
	平均値	1195	1210	1215	1190	1210	1220	1185	1200	1210
0.6	1回目	1205	1210	1215	1195	1210	1215	1190	1210	1210
	2回目	1200	1210	1220	1205	1210	1215	1190	1200	1205
	平均値	1200	1210	1220	1200	1210	1215	1190	1205	1210
0.8	1回目	1230	1245	1250	1215	1240	1245	1225	1240	1240
	2回目	1240	1255	1260	1210	1240	1245	1210	1240	1240
	平均値	1235	1250	1255	1210	1240	1245	1220	1240	1240
1.0	1回目	1265	1275	1275	1260	1275	1275	1260	1270	1270
	2回目	1265	1280	1285	1260	1275	1275	1260	1265	1270
	平均値	1265	1280	1280	1260	1275	1275	1260	1270	1270
1.2	1回目	1275	1280	1285	1270	1280	1285	1270	1275	1280
	2回目	1280	1290	1290	1265	1275	1280	1265	1275	1275
	平均値	1280	1285	1290	1270	1280	1280	1270	1275	1280

溶融特性試験結果

単位: °C

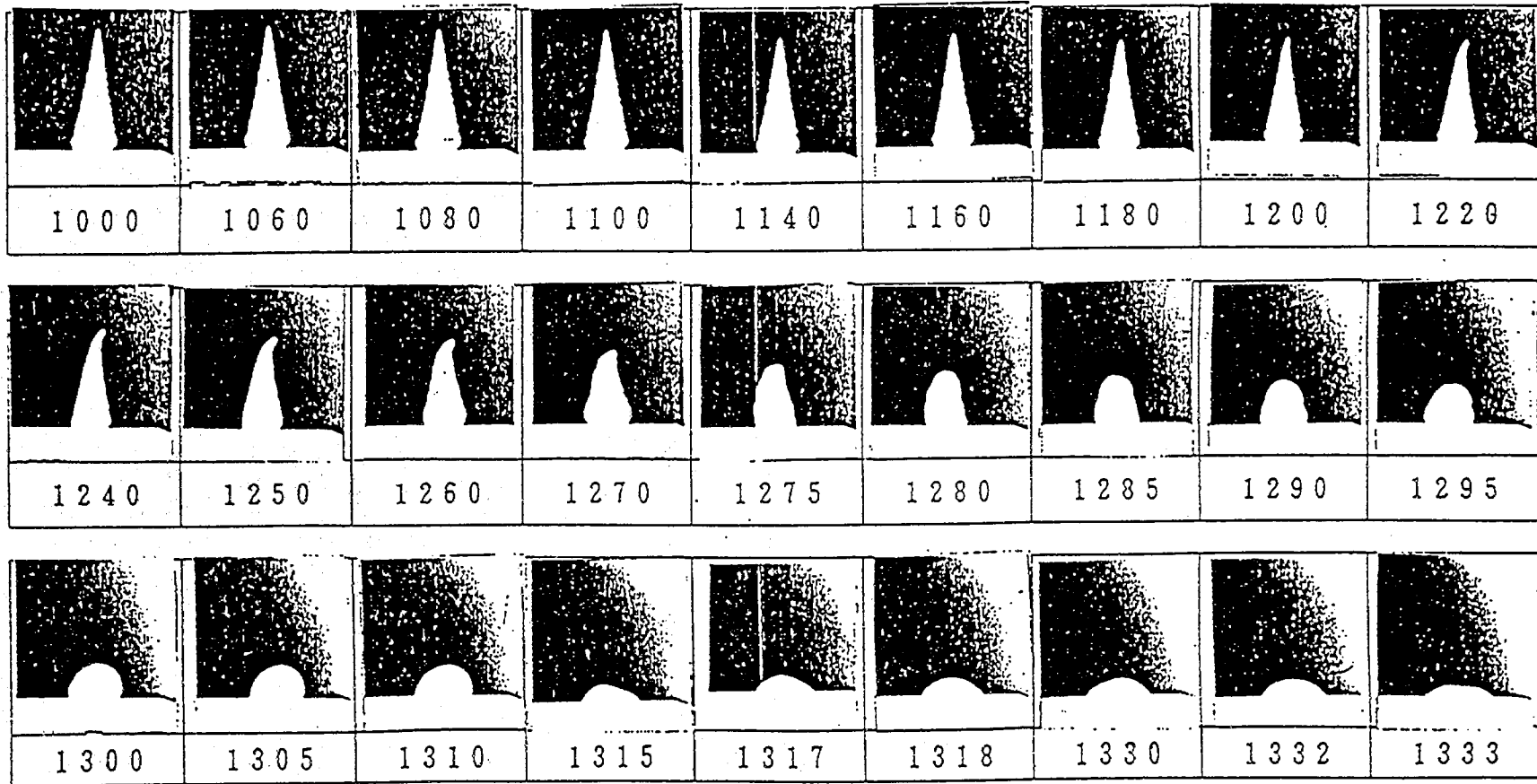
試料No 試料名 溶融特性 温度 塩基度 (CaO/SiO₂)	②			③			④		
	対象土 - 2			対象土 - 3			対象土 - 4		
	軟化点	融 点	溶流点	軟化点	融 点	溶流点	軟化点	融 点	溶流点
未 調 整	1240	1305	1360	1255	1350	1410	1225	1285	1310
0.2	1190	1220	1295	1180	1205	1295	1185	1215	1265
0.4	1190	1200	1210	1195	1215	1230	1185	1190	1200
0.6	1200	1210	1210	1220	1250	1270	1185	1190	1195
0.8	1240	1245	1255	1260	1275	1285	1215	1225	1230
1.0	1260	1265	1270	1275	1280	1285	1250	1260	1260

注) 未調整試料 試料No② 0.07, No③ 0.06, No④ 0.08

試料No 試料名 溶融特性 温度 塩基度 (CaO/SiO₂)	⑤			⑥			⑦		
	対象土 - 5			対象土 - 6			対象土 - 7		
	軟化点	融 点	溶流点	軟化点	融 点	溶流点	軟化点	融 点	溶流点
未 調 整	1215	1295	1300	1195	1280	1310	1250	1320	1320
0.2	1190	1240	1250	1190	1215	1295	1195	1225	1290
0.4	1180	1190	1215	1190	1195	1200	1200	1205	1215
0.6	1185	1195	1210	1190	1195	1200	1200	1210	1220
0.8	1210	1225	1230	1215	1230	1235	1240	1245	1250
1.0	1250	1260	1260	1255	1265	1265	1265	1270	1275

注) 未調整試料 試料No⑤ 0.09, No⑥ 0.05, No⑦ 0.05

付録6. 溶融温度特性試験における状態変化 (対象土-1)



付録5 溶融温度特性試験における状態変化 (対象土-1)

付録7. 溶流度試験結果

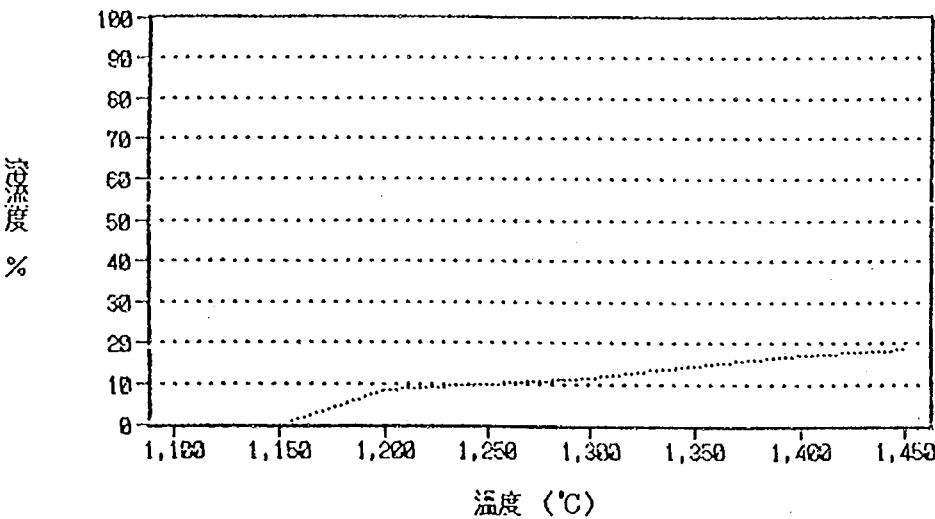
作成日:S.63.8.11

溶流度試験結果

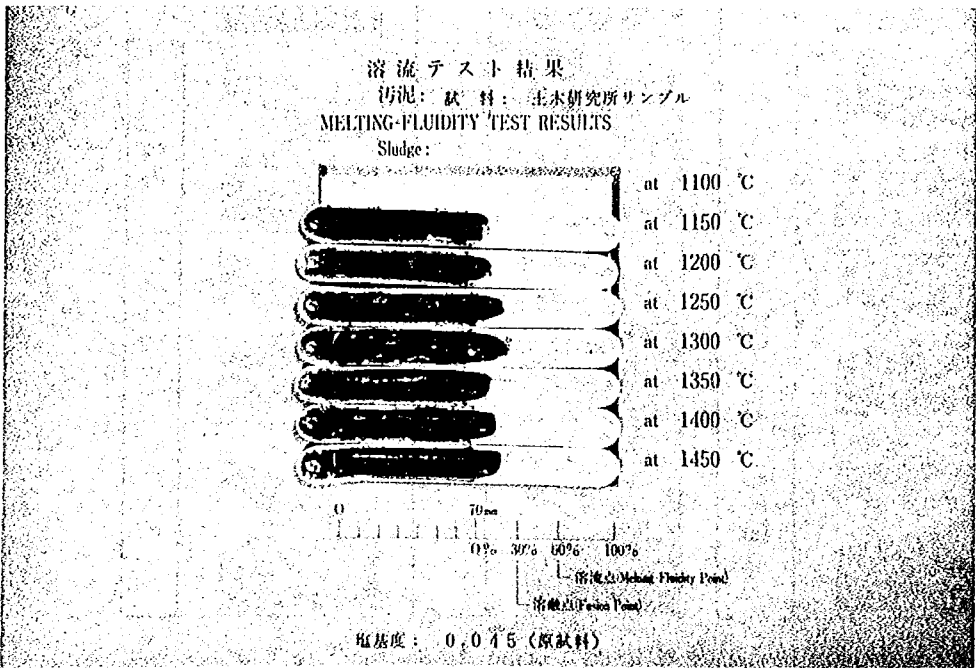
試料名 対象土-1 (原試料)				
測定日 S.63.8.10				
No.	温度 ℃	測定長さ mm	溶流度 %	目視判定
1	1,100			
2	1,150	70	0.0	△
3	1,200	76	8.6	●
4	1,250	77	10.0	●
5	1,300	78	11.4	●
6	1,350	80	14.3	○
7	1,400	82	17.1	◎
8	1,450	83	18.6	◎

No.	目視凡例	説明	
1	×	変化なし	
2	△	焼成	
3	●	膨潤	
4	○	溶融	
5	◎	溶流	
No.	構成成分名	重量	比率
1	対象土-1		100
塩基度		0.045	
溶融点		-	℃
溶流点		-	℃

溶流度の温度変化



溶流状態



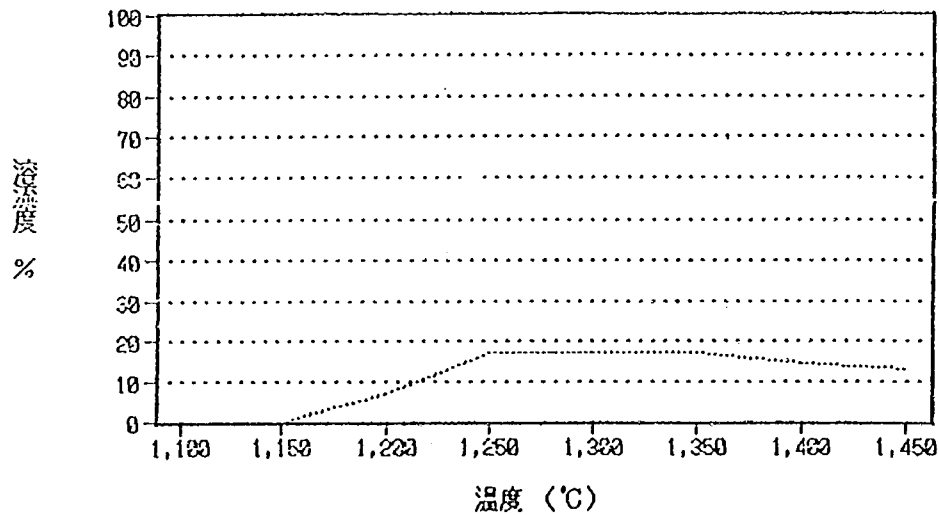
溶流度試験結果

作成日:S.63.8.19

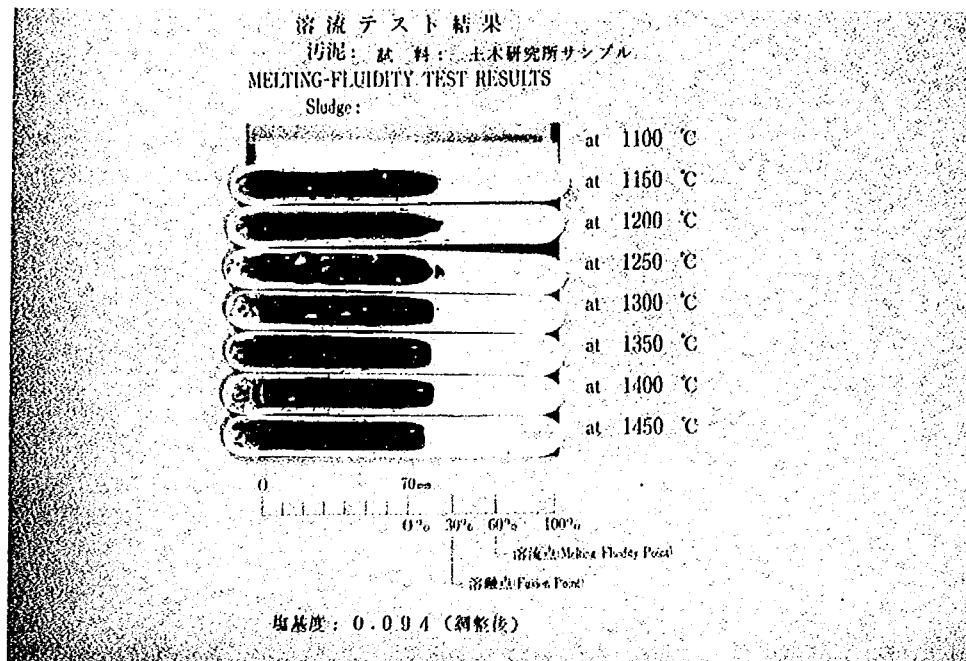
試料名 対象土-1 (塩基度調整後)				
測定日 S.63.8.19				
No.	温度 ℃	測定長さ mm	溶流度 %	目視判定
1	1,100			
2	1,150	70	0.0	△
3	1,200	75	7.1	△
4	1,250	82	17.1	●
5	1,300	82	17.1	●
6	1,350	82	17.1	○
7	1,400	80	14.3	◎
8	1,450	79	12.9	◎

No.	目視凡例	説明	
1	×	変化なし	
2	△	焼成	
3	●	膨潤	
4	○	溶融	
5	◎	溶流	
No.	構成成分名	重量	比率
1	対象土-1	1	96.8
2	Ca(OH) ₂	0.032	3.10
塩基度		0.094	
溶融点		-	℃
溶流点		-	℃

溶流度の温度変化



溶流状態



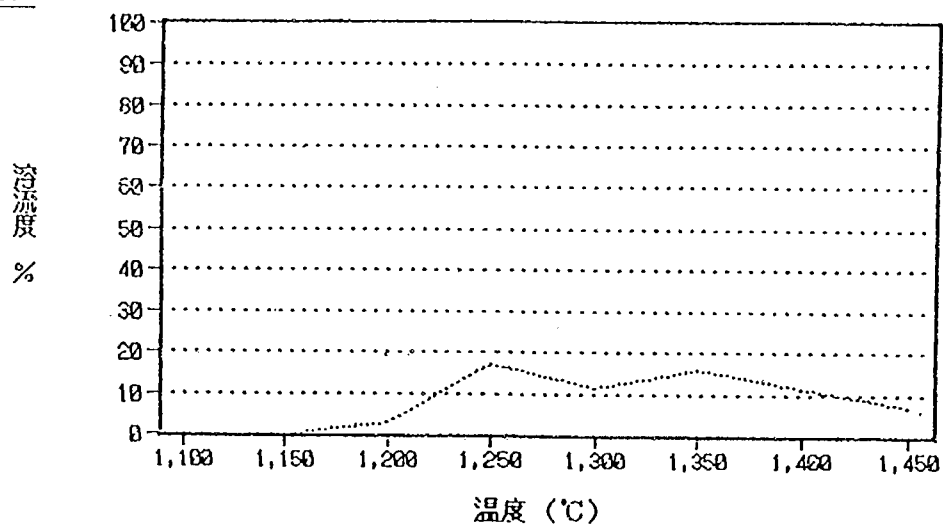
作成日:S.63.8.19

溶流度試験結果

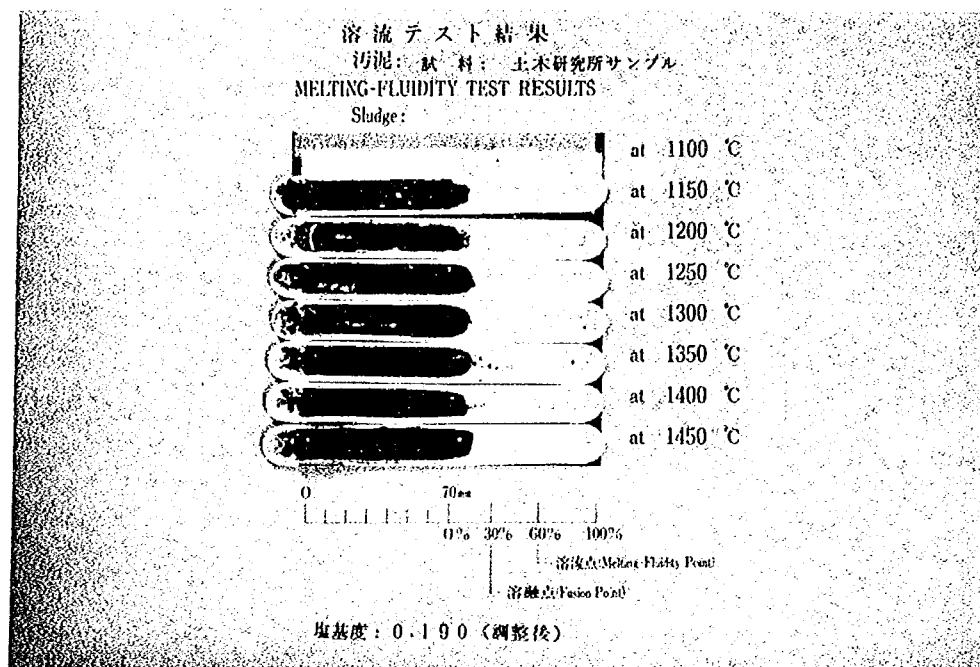
試料名 対象土-1 (塩基度調整後)				
測定日 S.63.8.19				
No.	温度 ℃	測定長さ mm	溶流度 %	目視判定
1	1,100			
2	1,150	70	0.0	△
3	1,200	72	2.9	△
4	1,250	82	17.1	●
5	1,300	78	11.4	●
6	1,350	81	15.7	○
7	1,400	78	11.4	◎
8	1,450	75	7.1	◎

No.	目視凡例	説明	
1	×	変化なし	
2	△	焼成	
3	●	膨潤	
4	○	溶融	
5	◎	溶流	
No.	構成成分名	重量	比率
1	対象土-1	1	91.1
2	Ca(OH) ₂	0.097	8.84
塩基度		0.19	
溶融点		— °C	
溶流点		— °C	

溶流度の温度変化



溶流状態



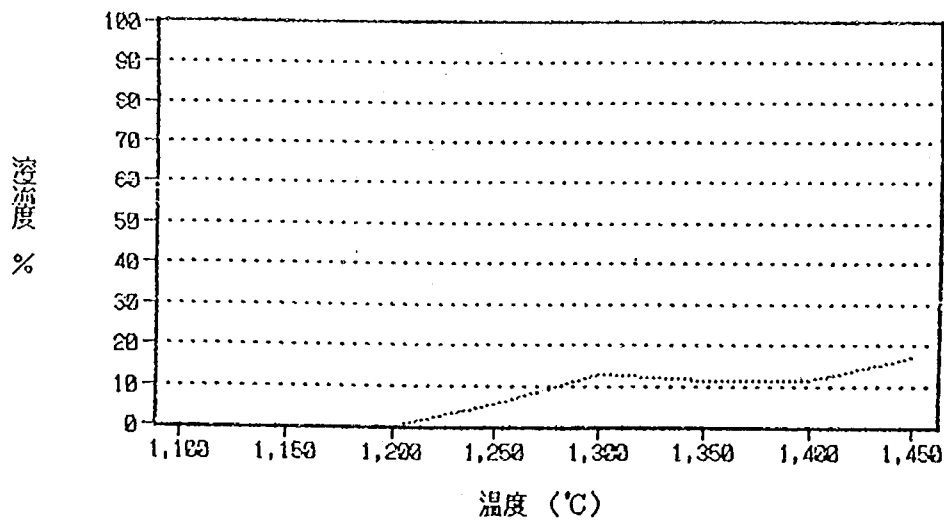
溶流度試験結果

作成日:S.63.8.19

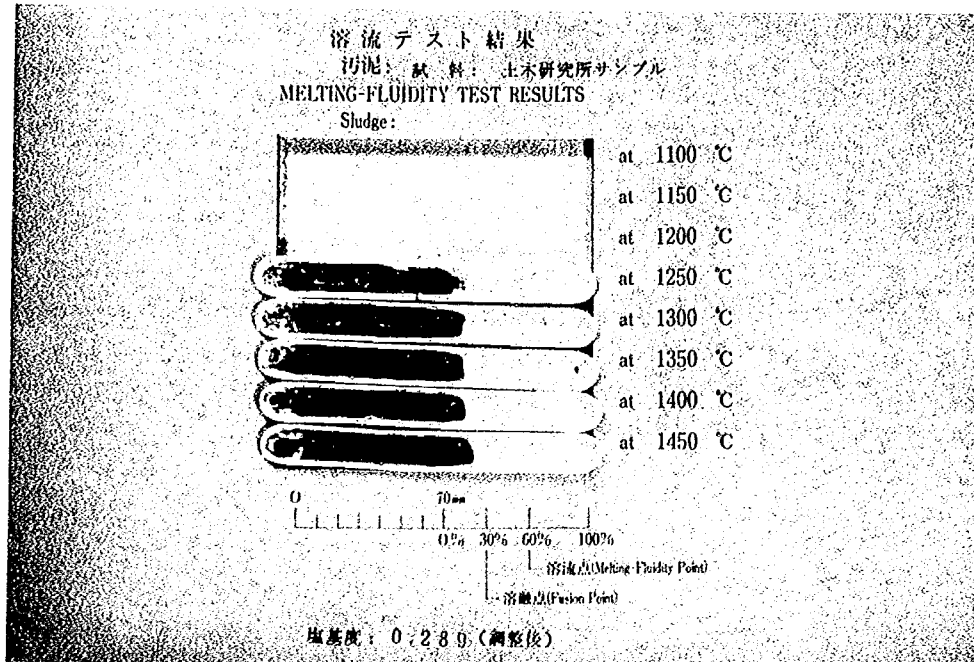
試料名 対象土-1 (塩基度調整後)				
測定日 S.63.8.19				
No.	温度 ℃	測定長さ mm	溶流度 %	目視判定
1	1,100			
2	1,150	70	0.0	△
3	1,200	70	0.0	●
4	1,250	74	5.7	●
5	1,300	79	12.9	●
6	1,350	78	11.4	○
7	1,400	78	11.4	◎
8	1,450	82	17.1	◎

No.	目視凡例	説明	
1	×	変化なし	
2	△	焼成	
3	●	膨潤	
4	○	溶融	
5	◎	溶流	
No.	構成成分名	重量	比率
1	対象土-1	1	85.9
2	Ca(OH) ₂	0.163	14.0
塩基度		0.289	
溶融点		-	℃
溶流点		-	℃

溶流度の温度変化



溶流状態



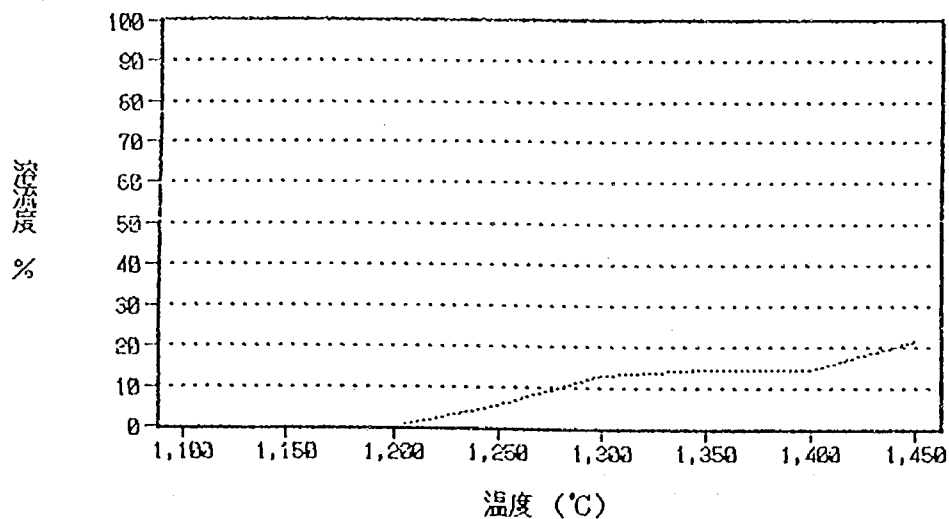
作成日:S.63.8.19

溶流度試験結果

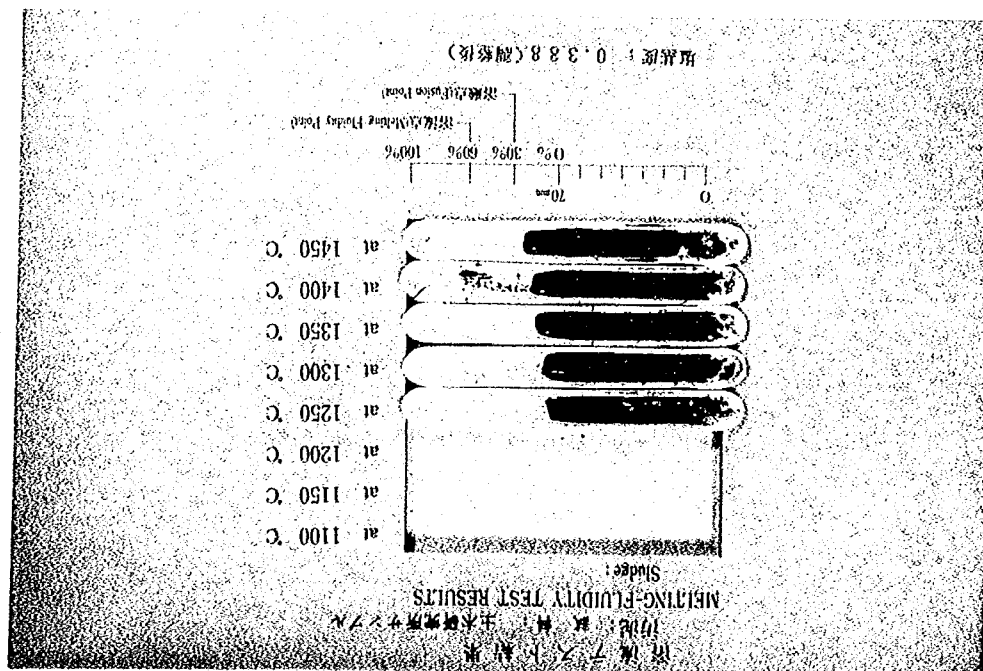
試料名 対象土-1 (塩基度調整後)				
測定日 S.63.8.19				
No.	温度 ℃	測定長さ mm	溶流度 %	目視判定
1	1,100			
2	1,150	70	0.0	△
3	1,200	70	0.0	●
4	1,250	74	5.7	●
5	1,300	79	12.9	○
6	1,350	80	14.3	○
7	1,400	80	14.3	◎
8	1,450	85	21.4	◎

No.	目視凡例	説明	
1	×	変化なし	
2	△	焼成	
3	●	膨潤	
4	○	溶融	
5	◎	溶流	
No.	構成成分名	重量	比率
1	対象土-1	1	81.3
2	Ca(OH) ₂	0.229	18.6
塩基度		0.388	
溶融点		- °C	
溶流点		- °C	

溶流度の温度変化



溶流状態



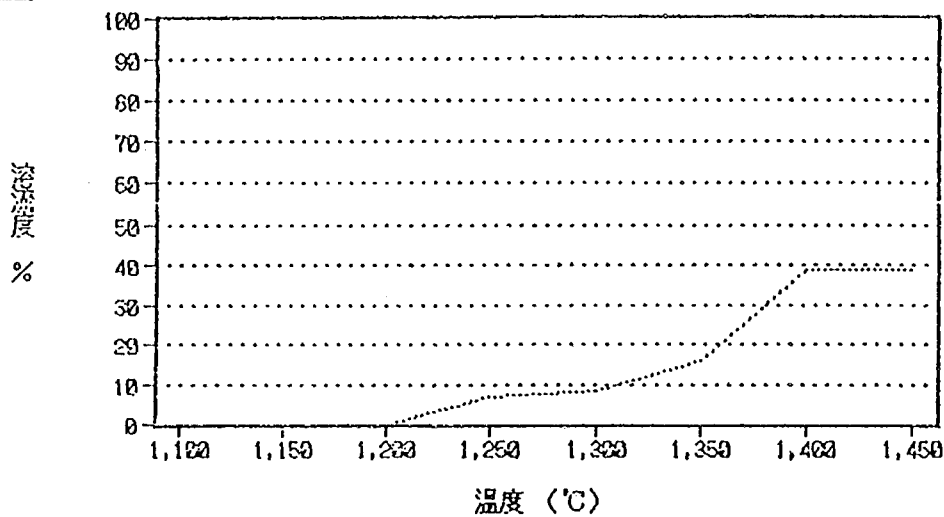
溶流度試験結果

作成日:S.63.8.19

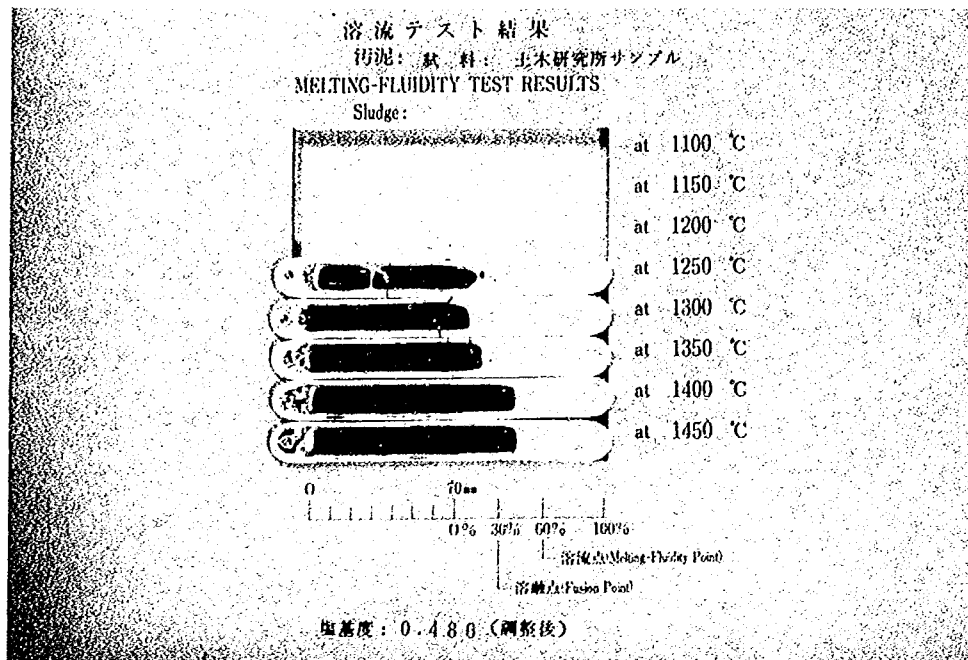
試料名 対象土-1 (塩基度調整後)				
測定日 S.63.8.19				
No.	温度 ℃	測定長さ mm	溶流度 %	目視判定
1	1,100			
2	1,150	70	0.0	△
3	1,200	70	0.0	●
4	1,250	75	7.1	○
5	1,300	76	8.6	○
6	1,350	81	15.7	○
7	1,400	97	38.6	◎
8	1,450	97	38.6	◎

No.	目視凡例	説明	
1	×	変化なし	
2	△	焼成	
3	●	膨潤	
4	○	溶融	
5	◎	溶流	
No.	構成成分名	重量	比率
1	対象土-1	1	77.2
2	Ca(OH) ₂	0.295	22.7
塩基度		0.486	
溶融点		1,381℃	
溶流点		- °C	

溶流度の温度変化



溶流状態



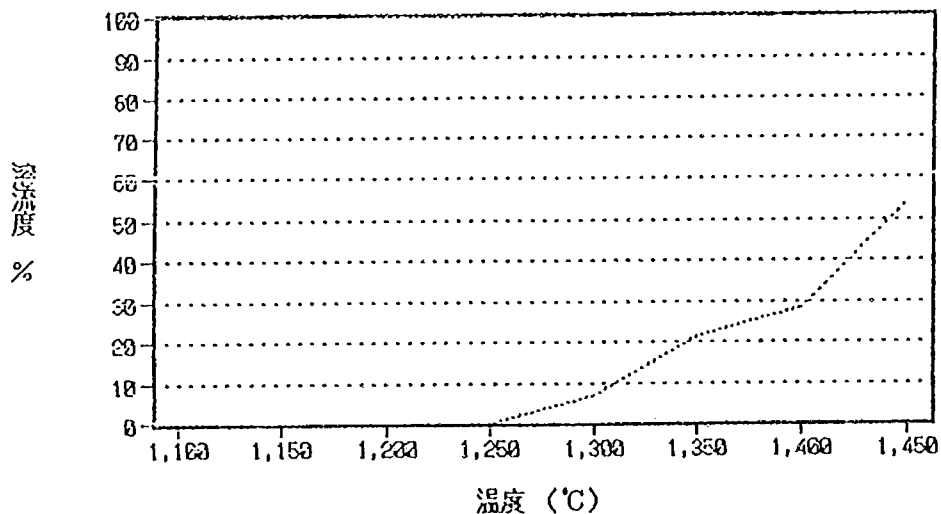
作成日:S.63.8.19

溶流度試験結果

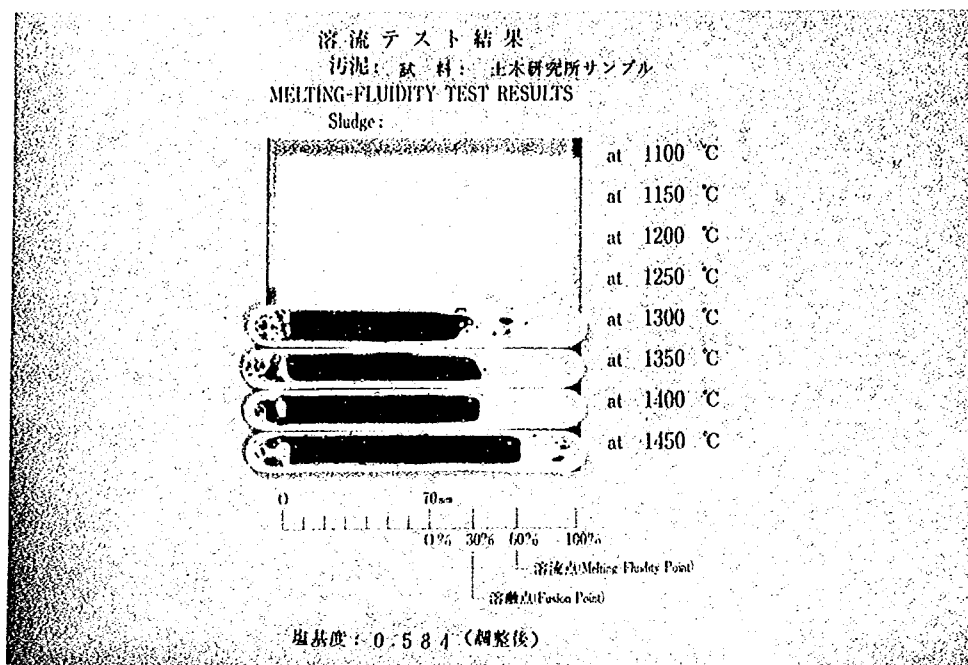
試料名 対象土-1 (塩基度調整後)				
測定日 S.63.8.19				
No.	温度 ℃	測定長さ mm	溶流度 %	目視判定
1	1,100			
2	1,150	70	0.0	△
3	1,200	70	0.0	●
4	1,250	70	0.0	●
5	1,300	75	7.1	○
6	1,350	85	21.4	◎
7	1,400	90	28.6	◎
8	1,450	108	54.3	◎

No.	目視凡例	説明	
1	×	変化なし	
2	△	焼成	
3	●	膨潤	
4	○	溶融	
5	◎	溶流	
No.	構成成分名	重量	比率
1	対象土-1	1	73.4
2	Ca(OH) ₂	0.361	26.5
塩基度		0.584	
溶融点		1,403℃	
溶流点		-- °C	

溶流度の温度変化



溶流状態



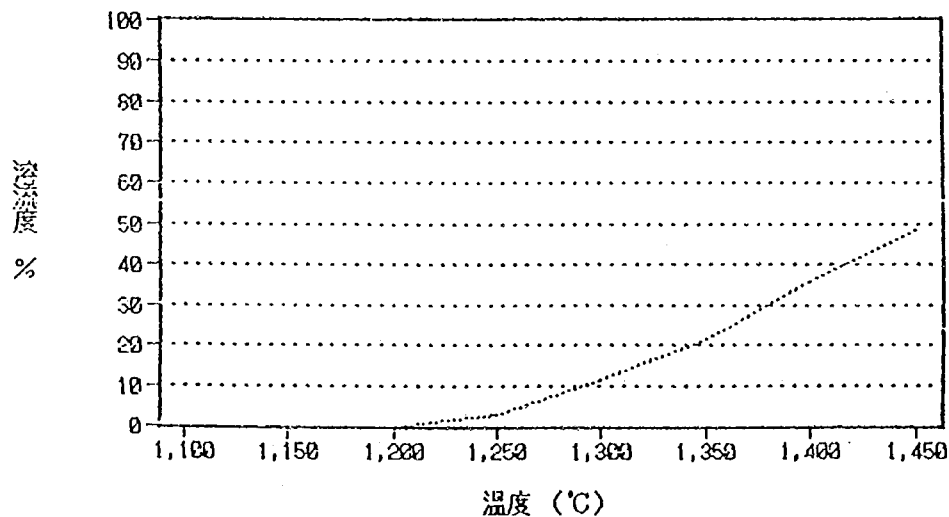
作成日:S.63.8.19

溶流度試験結果

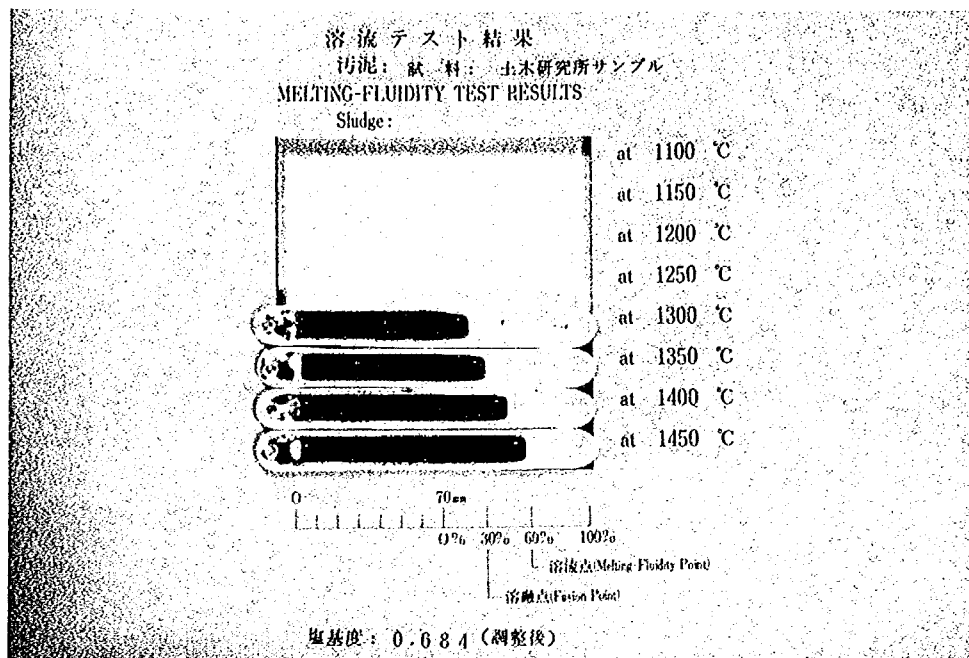
試料名 対象土-1 (塩基度調整後)				
測定日 S.63.8.19				
No.	温度 ℃	測定長さ mm	溶流度 %	目視判定
1	1,100			
2	1,150	70	0.0	△
3	1,200	70	0.0	●
4	1,250	72	2.9	●
5	1,300	78	11.4	○
6	1,350	85	21.4	◎
7	1,400	95	35.7	◎
8	1,450	104	48.6	◎

No.	目視凡例	説明	
1	×	変化なし	
2	△	焼成	
3	●	膨潤	
4	○	溶融	
5	◎	溶流	
No.	構成成分名	重量	比率
1	対象土-1	1	70.0
2	Ca(OH) ₂	0.427	29.9
塩基度		0.684	
溶融点		1,380℃	
溶流点		-℃	

溶流度の温度変化



溶流状態



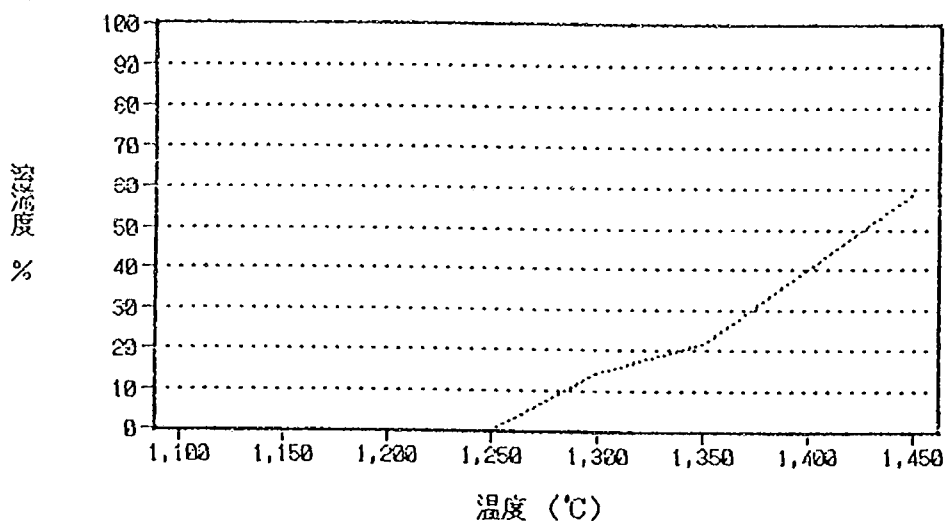
溶流度試験結果

作成日:S.63.8.19

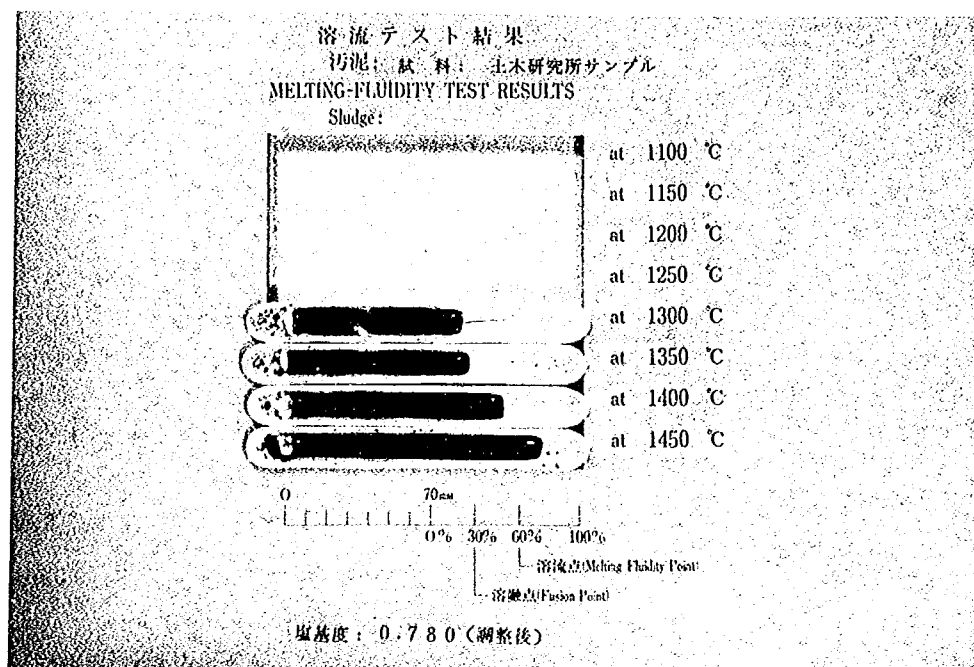
試料名 対象土-1 (塩基度調整後)				
測定日 S.63.8.19				
No.	温度 ℃	測定長さ mm	溶流度 %	目視判定
1	1,100			
2	1,150	70	0.0	△
3	1,200	70	0.0	●
4	1,250	70	0.0	●
5	1,300	80	14.3	○
6	1,350	85	21.4	◎
7	1,400	98	40.0	◎
8	1,450	111	58.6	◎

No.	目視凡例	説明	
1	×	変化なし	
2	△	焼成	
3	●	膨潤	
4	○	溶融	
5	◎	溶流	
No.	構成成分名	重量	比率
1	対象土-1	1	67.0
2	Ca(OH) ₂	0.492	32.9
塩基度		0.78	
溶融点		1,373℃	
溶流点		- °C	

溶流度の温度変化



溶流状態



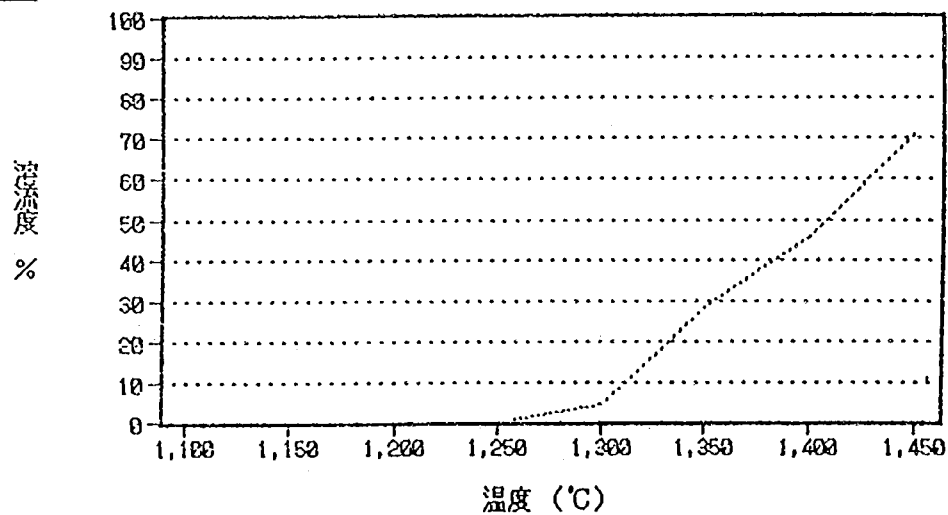
作成日:S.63.8.19

溶流度試験結果

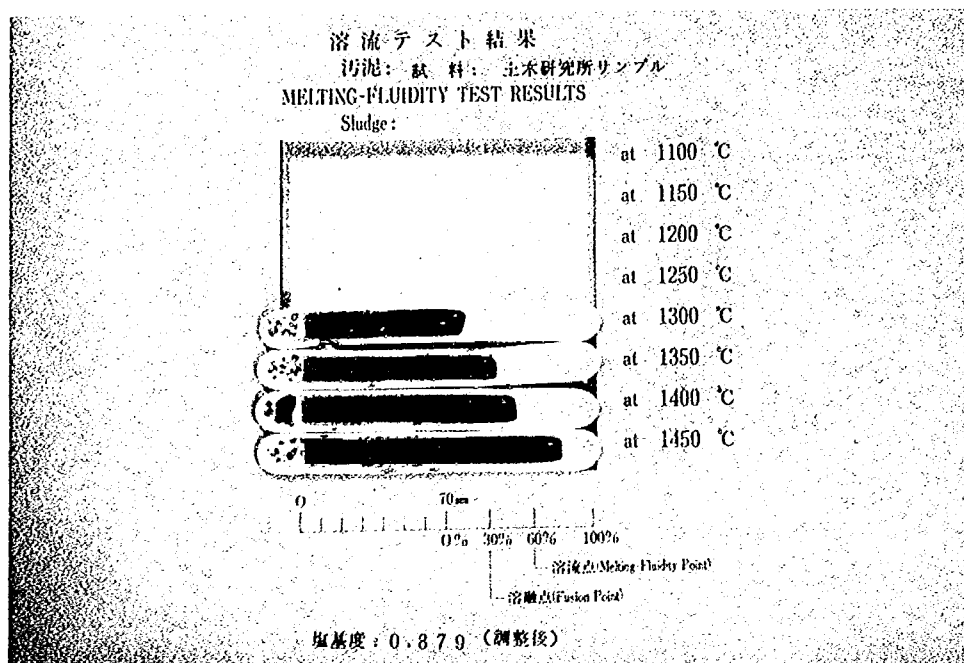
試料名 対象土-1 (塩基度調整後)				
測定日 S.63.8.19				
No.	温度 ℃	測定長さ mm	溶流度 %	目視判定
1	1,100			
2	1,150	70	0.0	△
3	1,200	70	0.0	●
4	1,250	70	0.0	●
5	1,300	73	4.3	○
6	1,350	90	28.6	◎
7	1,400	102	45.7	◎
8	1,450	120	71.4	◎

No.	目視凡例	説明	
1	×	変化なし	
2	△	焼成	
3	●	膨潤	
4	○	溶融	
5	◎	溶流	
No.	構成成分名	重量	比率
1	対象土-1	1	64.1
2	Ca(OH) ₂	0.558	35.8
塩基度		0.879	
溶融点		1,354℃	
溶流点		1,428℃	

溶流度の温度変化



溶流状態



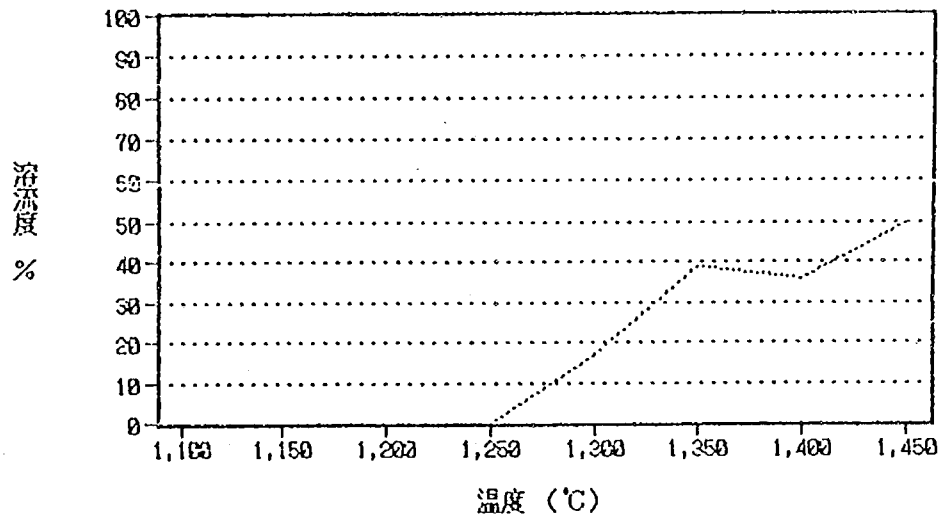
作成日:S.63.8.19

溶流度試験結果

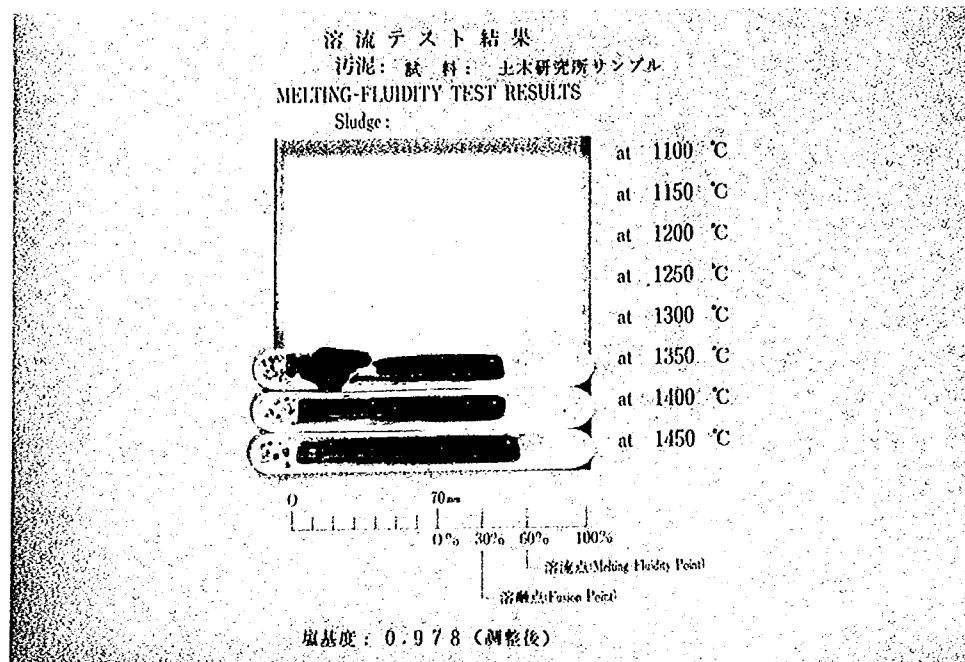
試料名 対象土-1 (塩基度調整後)				
測定日 S.63.8.19				
No.	温度 ℃	測定長さ mm	溶流度 %	目視判定
1	1,100			
2	1,150	70	0.0	△
3	1,200	70	0.0	●
4	1,250	70	0.0	●
5	1,300	82	17.1	○
6	1,350	97	38.6	◎
7	1,400	95	35.7	◎
8	1,450	105	50.0	◎

No.	目視凡例	説明	
1	×	変化なし	
2	△	焼成	
3	●	膨潤	
4	○	溶融	
5	◎	溶流	
No.	構成成分名	重量	比率
1	対象土-1	1	61.5
2	Ca(OH) ₂	0.624	38.4
塩基度		0.978	
溶融点		1,330℃	
溶流点		- °C	

溶流度の温度変化



溶流状態



付録8. モルタル供試体試験結果（スラグ1）

細骨材	曲げ強度 (kgf/cm ²)				圧縮強度 (kgf/cm ²)			
	1 日	3 日	7 日	28日	1 日	3 日	7 日	28日
豊浦標準砂	31	61	67	78	141	301	404	541
細骨材スラグ 塩基度無調整	32	58	64	74	128	334	426	546
細骨材スラグ 塩基度 0.2	29	56	60	78	120	280	383	536
細骨材スラグ 塩基度 0.4	29	52	54	71	122	288	365	494
細骨材スラグ 塩基度 0.6	26	56	61	69	119	275	376	508

付録9. コンクリート供試体 圧縮強度試験結果

ケースNo.	1 週材令				4 週材令			
	重量(g)	最大荷重(t)	強度kgf/cm ²	強度の平均	重量(g)	最大荷重(t)	強度kgf/cm ²	強度の平均
ケース 1	3733.7	23.85	303.8	304	3783.7	29.45	375.2	385
	3742.5	23.85	303.8		3761.4	31.05	395.5	
ケース 2	3597.2	23.15	294.9	283	3587.6	27.25	347.1	355
	3590.2	21.35	272.0		3618.5	28.45	362.4	
ケース 3	3432.2	18.45	235.0	232	3453.1	22.65	288.5	281
	3439.2	17.90	228.0		3463.4	21.40	272.6	
ケース 4	3416.2	14.90	189.8	200	3395.1	19.65	250.3	256
	3438.6	16.50	210.2		3422.7	20.60	262.4	
ケース 5	3630.0	20.50	261.1	272	3428.4	28.10	358.0	353
	3635.7	22.15	282.2		3636.0	27.35	348.4	
ケース 6	3577.5	22.10	281.5	278	3611.8	29.60	377.1	372
	3582.3	21.60	275.2		3617.5	28.75	366.2	

骨材種類 項 目		水 砕 スラグ	高強度化水砕スラグ				空 冷 粉 砕 スラグ	高強度化空冷粉砕スラグ				豊 浦 標準砂
			900℃ 再加熱	1000℃ 再加熱	Ni 添 加	Cu 添 加		900℃ 再加熱	1000℃ 再加熱	Ni 添 加	Cu 添 加	
砂／セメント比[－]		2.425	2.45	2.45	2.45	2.45	2.60	2.65	2.95	2.75	2.75	2.00
フロー値 [－]		194	193	192	194	190	195	194	192	185	195	186
圧 縮 強 さ [kgf/cm ²]	1日	132	120	135	126	120	125	135	146	138	140	114
	3日	236	232	250	234	226	247	260	290	256	250	218
	7日	352	332	363	332	326	365	392	436	362	355	329
	28日	486	488	515	449	454	488	526	595	487	478	452
曲 げ 強 さ [kgf/cm ²]	1日	37	35	36	35	34	30	34	36	34	34	32
	3日	54	54	52	52	48	48	50	54	46	46	48
	7日	54	54	64	54	50	57	61	70	55	50	58
	28日	68	74	74	65	70	70	76	86	74	70	74
圧縮強さ 曲げ強さ	1日	3.6	3.4	3.8	3.6	3.5	4.2	4.0	4.1	4.1	4.1	3.6
	3日	4.4	4.3	4.8	4.5	4.7	5.1	5.2	5.4	5.6	5.4	4.5
	7日	6.5	6.1	5.7	6.1	6.5	6.4	6.4	6.2	6.6	7.1	5.7
	28日	7.1	6.6	7.0	6.9	6.5	7.0	6.9	6.9	6.6	6.8	6.1
脱型直後の 供試体質量 [g]	1日	544	540	547	550	541	576	582	598	584	583	538
	3日	544	541	546	550	542	578	583	599	584	582	539
	7日	545	541	546	550	540	578	584	599	584	583	539
	28日	546	542	548	552	540	576	584	600	585	582	539
水切直後の 供試体質量 [g]	1日	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	3日	550	546	552	556	547	583	589	603	590	588	546
	7日	552	548	553	557	547	585	592	604	591	589	548
	28日	556	552	557	560	550	586	594	608	594	591	551

配布先住所

土木研究所資料第2992号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名

印