

平成 27 年 9 月 関西大学審査学位論文

酸化マグネシウム改良土の固化機構と
その応用に関する研究

山田哲司

「酸化マグネシウム改良土の固化機構とその応用に関する研究」

[概要]

近年、「土を固める」といった本来の目的以外の要求性能が固結工法に求められるようになり、これらの要求に応えるべく、酸化マグネシウムが新しい固化材として注目されている。我が国における酸化マグネシウムの地盤改良材としての研究は約15年前から始まったが、酸化マグネシウムを地盤改良材として様々な用途に適用していく上で、酸化マグネシウムの土に対する固化機構を解明するとともに、適用範囲や改良土の物性を明らかにしていくことが重要であると考えられる。

本研究では、土に対する酸化マグネシウムの固化特性を対象土の種類、固化材の添加量、養生条件等から明らかにした。また、改良土のX線回折や対象土の非晶質成分の定量分析を行って、土に含まれる非晶質成分が酸化マグネシウム改良土の強度発現と密接な関係を有することを述べた。さらに、酸化マグネシウムの製造方法や比表面積によって、土に対する改良原理や改良効果が異なることを指摘した。最後に、その流通価格がセメント等固化材と比較して5倍～10倍と高い酸化マグネシウムの材料コストの低減を目的として、安価な高炉スラグ微粉末をブレンドした混合固化材の有効性を示した。

本研究の結果から、酸化マグネシウムを有効に活用するためには、対象土の土質特性や改良目的を十分に把握した上で、地盤改良に適用していくことが重要であるといえる。また、有効な適用分野として、従来のセメント等では改良効果が得られにくい土質への適用、改良土の耐久性を生かした曝露環境での利用、土壤汚染の修復分野への適用を示した。

[各章の要旨]

第1章では、既往の研究成果について検討を行った。酸化マグネシウムを地盤改良材として様々な用途に適用していくためには、酸化マグネシウムの土に対する固化機構を解明するとともに、地盤改良への適用範囲や酸化マグネシウム改良土の物性を明らかにしていくことが重要であることを指摘した。

第2章では、酸化マグネシウムを地盤改良材として利用するためには、セメント系固化材で行われているように、改良土の特性と改良効果との関係を明らかにする必要があることから、酸化マグネシウムの改良効果に及ぼす土質の影響について調べた。

国内外の34種類の土質に対して酸化マグネシウム改良土を作製して、土の含水比や強熱減量等の土質特性と改良土の一軸圧縮強さとの関係を調べた。その結果、酸化マグネシウム改良土の一軸圧縮強さは、高炉セメントB種改良土と比較して小さいが、火山灰土に対しては、高炉セメントB種改良土の約5倍の改良強度をもたらすことがわかった。

また、酸化マグネシウム改良土は試料土のpHによる強度への影響は小さく、改良土のpHはpH=9～11の範囲を中心に分布した。また、高炉セメントB種改良土のpHと比較して1.0

程度、消石灰改良土の pH に対しては 2.0 低い値を示し、アルカリ流出による周辺の地盤環境への影響は少ない。

以上のことから、酸化マグネシウムは、まさ土や火山灰土を対象土とすることが望ましいと考えられる。特に、火山灰土は、従来のセメント系固化材では改良効果が得られにくいので、有効な用途であると考えられる。

第 3 章では、配合設計を行うにあたっての改良土の基本的な性質を明らかにするため、改良土の固化材添加量、材齢、固化材の添加方法が改良土の一軸圧縮強さに及ぼす影響について調べた。また、乾湿繰り返し・曝露条件下における一軸圧縮強さと pH 変化について調べた。

その結果、酸化マグネシウムは、粉体添加において、その添加量が $80\sim 120\text{kg/m}^3$ の範囲では、添加量とともに改良土の強度は増加する傾向にあり、セメント系改良土と同様の配合設計が可能であることがわかった。また、酸化マグネシウム改良土の材齢に伴う強度変化は対象土の種類によって異なり、まさ土に対しては長期的な強度増加が生じ、火山灰土に対しては比較的短期材齢で大きな強度が得られた。したがって、目標とする配合強度に対する材齢の設定（セメント系改良土では 7 日もしくは 28 日）には注意が必要である。

酸化マグネシウムをスラリー添加としたとき、火山灰土に対しては粉体添加時と比較して強度低下がほとんどなかったが、まさ土では強度低下が大きい。粉体添加時と比較して強度低下が大きいと、所定の強度を得るための固化材添加量が多くなり、改良コストの増加に結び付くので、目標強度が大きい場合は、粉体添加とすることが望ましいと考えられる。

乾湿繰り返し下や曝露環境下においては、酸化マグネシウム改良土は材齢とともに強度は増加傾向にあり、養生中の pH の低下が少ないことがその要因の一つと考えられる。このことから、酸化マグネシウム改良土は、野外環境における維持補修スパンが比較的長く、舗装材料等は有効な適用分野であると考えられる。

第 4 章では、酸化マグネシウムの土に対する固化機構解明へのアプローチとして、改良土の X 線回折を行い、改良土に強度発現をもたらす反応生成物を調べた。また、土に含まれる非晶質成分の種類とその量が改良土の強度に及ぼす影響について検討した。

その結果、まさ土を用いた酸化マグネシウム改良土では、 $\text{Mg}_4\text{Al}_2(\text{OH})_{14} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ と推測される反応生成物のピークが認められた。また、関東ロームを用いた酸化マグネシウム改良土では、 $\text{MgAl}(\text{OH})_{14} \cdot \text{XH}_2\text{O}$ および $\text{Mg}_4\text{Al}_2(\text{OH})_{14} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ と推測されるマグネシウムとアルミニウムからなる反応生成物が認められた。これらのマグネシウムとアルミニウムとの化合物は改良土の強度発現要因の一つになっているものと考えられる。

また、関東ローム改良土では、材齢の初期段階において X 線回折チャートに酸化マグネシウムと水が反応した水酸化マグネシウムのピークがみられなかったことから、水酸化物が固化反応を進行させる石灰系改良土とは反応機構が異なることが示された。

非晶質成分の分析の結果、酸化マグネシウム改良土の強度発現には土中に含まれる非晶質成分の含有量が密接に関与していることがわかった。一方、非晶質成分の含有量が多い土は、含水比も大きい傾向にあり、非晶質成分を十分に反応させて前述した反応生成物を得るためには、非晶質成分の含有量に見合う酸化マグネシウムの量が必要であると考えられる。

第 5 章では、酸化マグネシウムの土に対する固化機構解明への 2 つ目のアプローチとして、

酸化マグネシウムの製造方法に注目して、製造方法が異なる鉱山起源の酸化マグネシウムと海水起源の酸化マグネシウムを用いて、改良土の性質を調べた。

その結果、鉱成酸化マグネシウムと海成酸化マグネシウムの水和反応速度の違いは、酸化マグネシウムの原料や生成温度を含めた製造方法によるところが大きいことがわかった。この原因は、海成酸化マグネシウムの方が鉱成酸化マグネシウムと比べて結晶性が低いこと、海成酸化マグネシウムがより小さい粒子構造をもつためである。

鉱成酸化マグネシウムでは、改良土中に未水和の酸化マグネシウムが残存し、これが土に含まれる粘土鉱物と反応して徐々に強度が増加する。一方、海成酸化マグネシウムは土中の水分と速やかに反応して水酸化マグネシウムを生成し、水酸化マグネシウム自体の強度が大きいことから、材齢初期段階における改良土の強度は大きい。

鉱成酸化マグネシウム改良土では、比表面積が大きいほど強度が大きい傾向があり、鉱成酸化マグネシウム改良土における空気中の二酸化炭素の強度への影響については、養生日数が 120 日程度ではほとんどないといえる。

以上のことから、酸化マグネシウムの製造方法やその比表面積によって、改良土の固化機構や改良効果が異なることが明らかとなった。酸化マグネシウムと第 4 章で示した土に含まれる非晶質成分との反応に改良効果を期待する場合は鉱成酸化マグネシウムを、含水比が大きい土を早期に改良したい場合は、海成酸化マグネシウムを選択することが有効であると考えられる。

第 6 章では、酸化マグネシウムの特徴を生かした用途の拡大と材料コストの低減を目指して、高炉スラグ微粉末を用いた混合固化材を提案した。酸化マグネシウムと高炉スラグ微粉末の混合比を変化させた改良土を作製し、酸化マグネシウムと高炉スラグ微粉末の混合比が改良土の強度に及ぼす影響を調べた。また、改良土の耐久性の評価の一指標として、改良土の繰り返し水浸実験を行い、改良土の強度特性や pH の変化について調べた。

その結果、混合固化材を用いた沖積土、まさ土、川砂改良土の一軸圧縮強さは、酸化マグネシウムのみを固化材とした場合と比較して大きくなり、酸化マグネシウムを混合固化材として用いれば、地盤改良材としての適用範囲が広がるものと考えられる。

配合設計を行う場合、セメント系固化材による配合設計と同様の設計手法が適用可能であり、改良土の特徴を生かすためには、事前に用途に応じた最適な酸化マグネシウムの混合率を求めておく必要がある。また、混合固化材を用いたまさ土改良土は、40 サイクルの繰り返し水浸を受けても、強度低下等の状態変化は見られず、酸化マグネシウム改良土がもつ高耐久性を生かすことが可能であることが明らかとなった。

以上のことから、酸化マグネシウムと安価な高炉スラグ微粉末の混合固化材は、酸化マグネシウム改良土がもつ高い耐久性を維持しつつ、材料コストの低減にも寄与できるものと考えられる。

第 7 章では、酸化マグネシウムの固化不溶化材としての有効性について検討するため、鉛、ひ素、六価クロム、シアン、ふっ素など重金属等による汚染土壌に対して固化・不溶化を図った改良土の溶出特性について調べた。

その結果、酸化マグネシウムの重金属等に対する不溶化効果は、高炉セメント B 種と比較して大きく、ほとんどのケースで土壌環境基準以下の不溶化効果が認められた。

土壤汚染修復に使用されるキレート剤等の不溶化剤は極めて高価であり、また、汚染土の最終処分場への除去費用は膨大に上るため、材料価格がセメント等と比較して高い酸化マグネシウムであっても、土壤汚染の修復分野は有効な用途であると考ええる。

8章では、酸化マグネシウムが関東ロームに対して優れた固化特性を示すことから、関東ロームを用いた流動化処理土への適用について検討した。

その結果、酸化マグネシウムは、セメント等固化材と比較して改良効果が大きく、調整泥水に対して酸化マグネシウム添加量=100~200kg/m³ で必要とされる一軸圧縮強さを満足した。必要強度を得るための添加量は、セメント等固化材と比較して少なく、改良土からの六価クロム溶出リスクが低いことから、関東ロームを用いた流動化処理土は、酸化マグネシウムの有効な用途となり得る。

以上

目 次

1章 序論	1
1.1 地盤改良における固結工法の位置づけ	1
1.2 固結工法の適用分野の多様化	3
1.2.1 曝露環境での利用	4
1.2.2 中性～弱アルカリ域での利用	4
1.2.3 セメント中の微量成分の問題	6
1.2.4 土壌汚染対策としての固化材	6
1.3 地盤改良材としての酸化マグネシウム	8
1.3.1 酸化マグネシウムの製造方法	8
1.3.2 酸化マグネシウムの地盤改良材としての既往研究	10
1.4 本研究の概要	14
参考文献	15
2章 酸化マグネシウムの改良効果に及ぼす土質の影響	18
2.1 はじめに	18
2.2 実験方法	19
2.2.1 実験材料	19
2.2.2 供試体の作製，養生方法	22
2.3 実験結果および考察	23
2.3.1 一軸圧縮試験結果	23
2.3.2 土質特性と改良土の一軸圧縮強さとの関係	25
2.4 まとめ	28
参考文献	29
3章 酸化マグネシウム改良土の特徴	31
3.1 はじめに	31
3.2 実験方法	32
3.2.1 実験材料	32
3.2.2 実験方法	33
3.3 実験結果および考察	36
3.3.1 固化材添加量と一軸圧縮強さとの関係	36
3.3.2 改良土の材齢 7 日と 28 日における強度比較	38

3.3.3 酸化マグネシウム改良土の材齢に伴う強度変化	40
3.3.4 粉体改良土とスラリー改良土との強度比較	40
3.3.5 劣化促進試験による改良土の耐久性	41
3.4 まとめ	43
参考文献	44
4章 改良土のX線回折と土に含まれる非晶質成分の分析による 反応生成物の考察	45
4.1 はじめに	45
4.2 酸化マグネシウム改良土のX線回折による固化機構の考察	45
4.2.1 実験材料	45
4.2.2 改良土の作製	46
4.2.3 X線回折結果および考察	46
4.3 土に含まれる非晶質成分の分析による固化機構の考察	54
4.3.1 実験方法	54
4.3.2 実験結果および考察	58
4.4 まとめ	62
参考文献	63
5章 製造方法からみた酸化マグネシウムの土に対する固化機構の考察	65
5.1 はじめに	65
5.2 実験方法	65
5.2.1 実験材料	65
5.2.2 実験方法	67
5.3 実験結果および考察	70
5.3.1 酸化マグネシウムのX線回折結果および 走査型電子顕微鏡観察結果	70
5.3.2 酸化マグネシウムスラリーの含水比の経時変化	72
5.3.3 改良土の含水比の経時変化	73
5.3.4 熱重量分析結果	74
5.3.5 一軸圧縮試験結果	77
5.3.6 改良土のpH	82
5.4 まとめ	83
参考文献	84

6章 高炉スラグ微粉末を用いた混合固化材の開発	86
6.1 はじめに	86
6.2 高炉スラグ微粉末の地盤改良材としての特徴	86
6.3 実験方法	87
6.3.1 実験材料	87
6.3.2 実験方法	88
6.4 実験結果および考察	90
6.4.1 固化材スラリーの強度特性	90
6.4.2 沖積土，まさ土，川砂改良土の強度特性	91
6.4.3 ローム改良土の強度特性	93
6.4.4 改良土の材齢に伴う強度変化	93
6.4.5 繰り返し水浸試験結果（一軸圧縮強さ）	95
6.4.6 繰り返し水浸試験結果（改良土の pH）	97
6.5 まとめ	98
参考文献	99
7章 有害重金属等不溶化材としての利用	101
7.1 はじめに	101
7.2 実験方法	102
7.2.1 汚染土	102
7.2.2 固化材	102
7.2.3 供試体の作製	102
7.3 実験結果および考察	104
7.3.1 鉛，ひ素，六価クロムに対する不溶化効果	104
7.3.2 その他の重金属等に対する不溶化効果	106
7.3.3 不溶化処理土の pH	108
7.3.4 酸化マグネシウムの重金属等に対する不溶化効果の有効性	108
7.4 まとめ	110
参考文献	110
8章 流動化処理土への適用	112
8.1 はじめに	112
8.2 実験方法	113
8.2.1 試料土および固化材	113
8.2.2 実験方法	114

8.3 実験結果	114
8.3.1 固化材添加量と改良土の一軸圧縮強さ(材齢 28 日)との関係	114
8.3.2 材齢による改良土の強度比較	116
8.3.3 改良土の一軸圧縮強さと変形係数 E_{50} との関係	116
8.3.4 改良土の pH	118
8.3.5 改良土からの六価クロムの溶出	118
8.4 まとめ	119
参考文献	119
9 章 結論	120

1 章 序論

1.1 地盤改良における固結工法の位置づけ

我が国は世界でも有数の軟弱地盤国である。国土が狭く、人口が多いために、軟弱地盤にも重要な構造物を建設せざるを得ないという特殊事情があるにせよ、地盤そのものも世界有数の軟弱土であるといっても過言ではない。軟弱な沖積地盤や軟弱土を有効に利用せざるをえない我が国では、地盤基礎工学の発展、施工の機械化、新しい材料の導入、公共工事の増大に刺激されて、現在では軟弱な基礎地盤や軟弱土を対象とする多くの地盤改良工法が発達し、実用に供されている。

軟弱地盤の処理には、種々の観点から、「改良の原理」と「改良の目的」および「改良地盤や改良土の性質」の3つの分類法が一般的である。通常これらの3分類法が適宜、組み合わせられて表示されることが多い¹⁾。

「改良の原理」に基づく分類は、分類方法としてもっとも本質的であり、①置換、②脱水、③高密度化または密度増大、④固結化、⑤補強、⑥荷重軽減の6種類の基本原理に大別される。つぎに、「改良の目的」に基づく分類は、工法の効果として示されているもので、①沈下対策、②安定対策または変形対策、③止水対策に区分され、改良工法の原理と組み合わせて、もっとも適切な方法を選別される。最後に、「改良地盤の性質」に基づく分類は、工法の適用地盤や適用土質として示される。工法が地盤の性質や堆積状態によって施工性が左右されるので、対象とする地盤や土質を、①砂質土、粘性土および特殊土、②不飽和土と飽和土、③浅い地盤と深い地盤、④自然堆積土と人工埋立土もしくは盛土、⑤平坦な地盤と傾斜地盤として分類している。

軟弱地盤や軟弱土の対策工法の選定にあたっては、

- ① 対策工を必要とする理由、目的を十分に検討
- ② 地盤の性状と構造物、施工条件などを考慮
- ③ 目的に適合した経済的な工法を選定する

という手順で検討する。

「改良の目的」と「改良地盤の性質」からみた対策工法の分類と適応を表 1.1 に示す。表 1.1 から、固結工法は、適用地盤や適用土質の範囲が広く、適用効果として沈下量や圧縮量が少なく、安定に必要な地盤強度を得ることができ、また、液状化防止対策、止水対策としても有効な工法といえる。

このような背景から、固結工法は、これまで研究や技術開発の対象として注目されてきた。著者らは²⁾、研究や技術開発の対象としての地盤改良工法を地盤系の論文発表件数から分析した。図 1.1 に地盤改良の原理と地盤改良の対象(ここでは、斜面、浅層、深層、盛土体、リサイクルの5項目)とのマトリックス分析結果を示す。図 1.1 によると、補強に関する論文数が多い斜面を除くと、固結工法は多くの分野で研究・技術開発の対象となっていることが、

発表論文数からも窺える。

さらに、著者らは、収集文献を地盤工学研究発表会講演概要集と土木学会年次学術講演会第Ⅲ部門講演概要集に限定して、第一期：1985～1989年、第二期：1990～1995年、第三期：1996～2000年、第四期：2001～2005年の4年代に区分し、発表論文数の割合を比較した²⁾。分析結果から、地盤改良の原理について、発表論文数の割合の経年変化を図1.2に示す。図1.2から、①置換、②脱水、③高密度化については論文数は少なく、ほぼ完成された技術として評価している。固結に関しては、経年による論文数の変化は認められず、多くの研究開発が実施されていることがわかる。これは、固結工法のニーズの多様化とともに、本論文のテーマでもある新しい固結材料の開発が継続的に行われているものと考えられる。

表 1.1 軟弱地盤対策工の適用地盤と効果 (文献 1) に加筆

工 法	適 用 地 盤	工 法 の 効 果											
		適 用 地 盤				沈下対策			安 定 対 策			止水 対策	
		粘性土	砂質土	粘性土 砂質土 の互層	特殊土	圧密沈 下促進	沈 下 量減少	せん断変 形の抑制	強度増 加促進	すべり抵 抗の付与	液状化 の防止		
表 層 処 理 工 法	表 層 排 水 工 法												
	サンドマット工法	○	—	—	○	—	—	○	○	○	—	—	
	敷 設 材 工 法 添 加 材 工 法												
置 換 工 法	掘 削 置 換 工 法	○	—	○	○	—	○	○	—	○	—	—	
	強 制 置 換 工 法												
押 え 盛 土 工 法	押 え 盛 土 工 法	○	—	○	○	—	—	○	—	○	—	—	
	緩 斜 面 工 法												
軟弱粘 性土層 の圧密 排水	緩 速 載 荷 工 法	○	—	○	○	—	—	○	—	—	—	—	
	載 荷 重 工 法	漸 増 載 荷 工 法											
		段 階 載 荷 工 法											
	盛 土 荷 重 載 荷 工 法	○	—	○	○	○	—	—	○	—	—	—	
バ ー チ カ ル ド レ ー ン 工 法	大 気 圧 載 荷 工 法												
	地 下 水 低 下 工 法												
緩い砂 質土層 の締固 め	サ ン ド ド レ ー ン 工 法	○	—	○	○	○	—	○	○	—	—	—	
	ボ ー ド 系 ド レ ー ン 工 法												
団 結 工 法	サ ン ド コ ン パ ク シ ョ ン 工 法	○	○	○	○	○	○	○	—	○	○	—	
	サ ン ド コ ン パ ク シ ョ ン 工 法												
構 造 物 に よ る 工 法	振 動 締 固 め 工 法	—	○	—	—	—	○	—	—	○	○	—	
	深 層 混 合 処 理 工 法 (C D M 工 法)	○	○	○	○	—	○	○	○	○	○	○	
	矢 板 工 法												
構 造 物 に よ る 工 法	打 設 グ イ 工 法	○	○	○	○	—	○	○	—	○	—	○	
	ス ラ ブ 工 法												
	カ ル バ ー ト 工 法												

特殊土：有機質、腐植質を多く含む土

「—」は、適用できないかもしくは事例が少ないことを示す

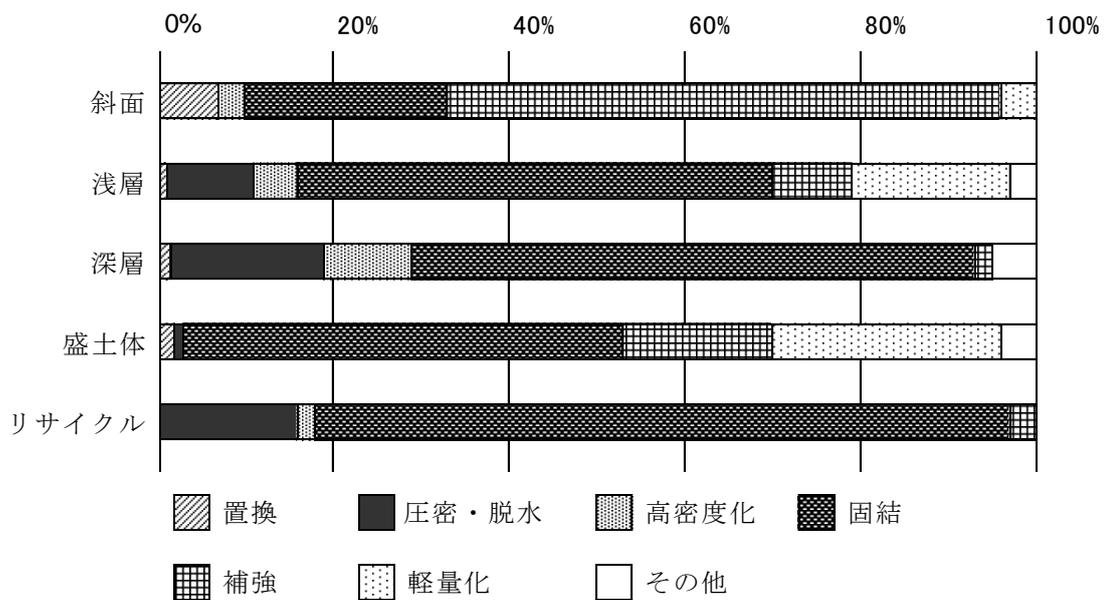


図 1.1 地盤改良の対象と改良原理²⁾

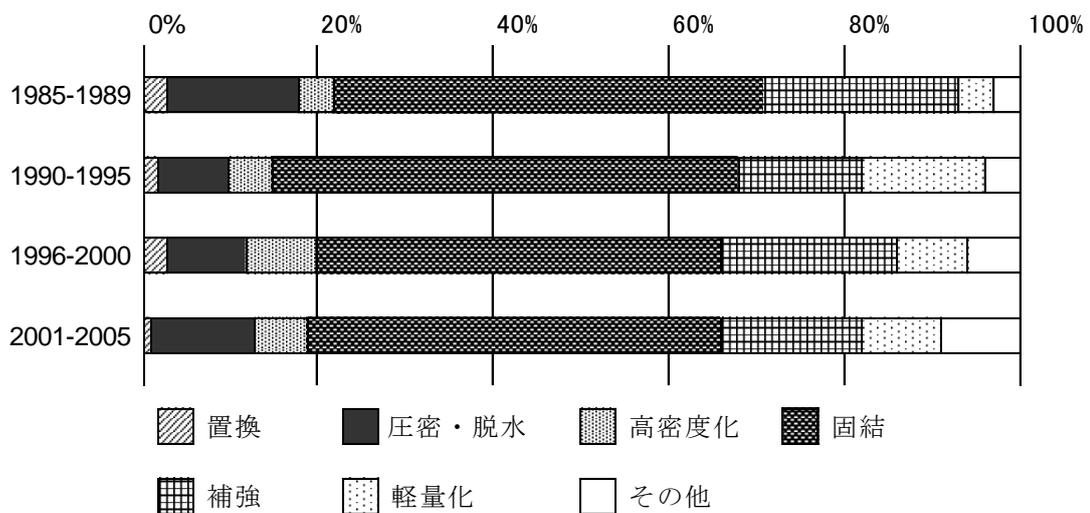


図 1.2 適用原理の経年変化²⁾

1.2 固結工法の適用分野の多様化

軟弱地盤を強固にしたり，軟弱な不良土を良質土に改質するといった目的で利用されてきた固結工法であるが，近年，その要求性能が多様化してきた。セメント・石灰に代表される固結材料は，仮設的利用や固化体が強アルカリ性を示すこと，地中環境で利用されることを

前提に使用されてきた。建築基礎としての本設利用，地中環境ではない曝露環境での利用，固化体からのアルカリ分の溶出抑制，有害物質封じ込めのための利用など，固結工法の適用分野の多様化が急速に進んでいる。

1.2.1 曝露環境での利用

歩道や園路等の舗装や歴史的文化財の保存・修復技術³⁾として，固化工法が用いられるようになった。舗装は従来，歩道であってもアスファルト舗装が主流であったが，近年，ヒートアイランド現象の懸念や景観上の観点から，土に固化材を混合した土舗装が用いられるようになった⁴⁾。曝露環境では，セメント系の改良土は固化体がある程度大きい場合は地表面にごく近い部分の劣化にとどまるが，舗装のように改良厚が薄い場合は，劣化が改良体中心にまで及ぶ恐れがある。また，セメントや石灰系の固化材の場合，カルシウムが地表面に析出して(白華現象)，景観を損ねる恐れもある⁵⁾。

文化遺産の中でも遺跡とくに遺構を対象とする場合，岩盤や地盤に密着していること，また，規模においても優に大型土木構造物に匹敵するものであり，物理化学などの自然科学の手法に加え，土木工学，建築学，地盤工学などの技術を応用することが要求される。したがって，遺跡の保存処理と地盤改良技術とは密接な関係にある。表 1.2 に示すように⁶⁾，復元整備保存や移設保存技術に固化工法が適用されており，セメント系よりもむしろ石灰系固化材が多用されている。

1.2.2 中性～弱アルカリ域での利用

セメントや石灰系固化材は，その硬化の過程で，水和反応により水酸化カルシウムを生成する。この水酸化カルシウムは水に対する溶解度が $1.2\text{g}/1000\text{g}(25^\circ\text{C})$ で，液相で解離 ($\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{OH}^-$) し，pH がアルカリ性となるため，改良土もアルカリ性を示す。改良土が地中固化体となる場合は，改良土が持つ難透水性と周辺土の緩衝作用により，固化体からのアルカリ分の溶出は大きな問題とならない⁷⁾。一方，固化体が地表面，水底面もしくはこれらの表面に近い場合は，生態系への影響が懸念されることがある。

たとえば，生態系との関わりが大きい水辺環境周辺での利用では，セメントや石灰系固化材をそのまま使用すると，力学的な目的は達せられるものの，アルカリ水の溶出が問題となる場合がある。このような用途には，その硬化物が中性を示す石膏が固化材として用いられることがある⁸⁾。しかし，石膏は水に対する溶解度が $2\text{g}/1000\text{g}(25^\circ\text{C})$ と大きく，雨水や流水によって長期的には劣化し，固化機能を失う。また，最近では，石膏に含まれる硫酸基に起因する硫化水素の発生リスクも指摘されている⁹⁾。さらに，天然石膏には微量のふっ素を含み，このふっ素は土壤汚染対策法に関わる環境 26 項目に指定されており，改良土としたときにふっ素が土壤環境基準を超えて溶出する恐れも指摘されている¹⁰⁾。

また，セメントや石灰に酸性塩を添加して，改良土の pH を低下させる試みも行われている¹¹⁾。酸性下では Ca^{2+} が溶出して水和物の生成とポズラン反応を阻害するため，強度特性が著しく低下するおそれがあり¹²⁾，目標とする改良土の強度と pH のバランスを考慮して適用する必要がある。

表 1.2 遺跡の保存処理方法とその事例⁶⁾

分類	特徴	工法	事例
現状保存	遺跡をそのままの状態ですべて保存するもので、構造部材による補強や盛土などにより遺跡周辺の整備は実施するが、遺跡そのものには人的加工を施さない。	パイプルーフ工法 パイプルーフ・トンネル工法 マイクロパイル ルートパイル 高架構造 カルバート・ボックス 地中連続壁・アンカー 鉄板被覆工法 逆けた工法 盛土工法	荒屋敷貝塚遺跡(千葉) 地頭山古墳(神奈川) 有安古墳(兵庫), 光蔵寺裏遺跡(群馬) 小谷遺跡(兵庫), 安志遺跡(兵庫) 八多No2遺跡(兵庫) 柳田館遺跡(岩手), 阿久遺跡(長野) 四つ池遺跡(大阪) 難波遺跡(大阪)
修理保存	破損、損傷が激しく、放置すると元の状態が維持できない遺跡をできるだけ元の状態・材料を保つため、そのままですべて修理するもので、遺跡に最小限度の人的加工を施す。	ロックボルト・アンカー セメントモルタル 各種の樹脂の注入	臼杵磨崖仏(大分) 清水磨崖仏(鹿児島) 垂柳遺跡(青森) 西新元冠防塁(福岡) 今市大念寺古墳(島根)
復元整備保存	元の構造、形態はできるだけ残すが、市民への公開等を目的にかなり大幅な人的加工を加え補強する。	ふき土工・ふき石下地の石 灰処理工 二和土, 三和土, 四和土 石積工 盛土・切土工	森将軍塚(長野), 五色塚古墳(兵庫) 福山城(広島), 三原城(広島) 登呂遺跡(静岡), 多賀城遺跡(宮城) 私市円山古墳(京都)
移設保存	遺跡をそのまま、あるいは一部補強して別の場所に移し、保存する。	石灰による処理	久保丸山遺跡(佐賀) 泉北ニュータウンの窯跡(大阪) 狭山池堤体(大阪)
環境制御保存	発掘された遺跡、または劣化の激しい遺跡を環境制御(温湿度, 紫外線等)によって保存する。	石室の温度・湿度の制御, 地下水の制御 日照・風速の制御等	高松塚古墳(奈良), 王塚古墳(福岡) 平城京遺跡(奈良) モヘンジョダロ遺跡

1.2.3 セメント中の微量成分の問題

ポルトランドセメントは天然の石灰石、粘土、珪石、酸化鉄原料を主原料としている。セメントの原料の大半は地殻に存在する天然資源であることから、セメントには主構成成分(Ca, Si, Al, Fe)の他に、地球上に存在する各種の微量元素も含んでいる。地殻の岩石、土、セメント原料中および普通ポルトランドセメント中の微量成分の含有量の一例を表 1.3 に示す¹³⁾。

これらの元素のうち鉛や六価クロムについては溶出することがあるものの、その他の元素についてはセメントの強いアルカリ性によって水酸化物として沈殿したり、溶解度の極めて小さい化合物になることで、セメント水和物中に固定されるため、溶出はほとんど認められないとされている¹⁴⁾。

表 1.3 セメント中の微量元素の含有量の一例¹³⁾ (mg/kg)

元素	地殻	土	セメント原料			普通ポルトランドセメント
			石灰石	粘土	珪石	
Cr (クロム)	100	5~1500	15.5	80.9	130	97
Cu (銅)	153	2~250	9.9	42.1	81.4	140
Zn (亜鉛)	70	1~900	26.1	142	186	511
As (砒素)	2	0.1~40	1.07	5.48	11.1	16.7
Se (セレン)	0	0.01~12	—	—	—	<1
Cd (カドミウム)	0	0.01~2	0.75	0.37	0.27	2
Hg (水銀)	0.08	0.01~0.5	—	—	—	0.023
Pb (鉛)	13	2~300	5.73	25.1	15.2	111

クロムは、自然界では一般に三価クロムとして存在しているが、セメントの製造過程(焼成)において一部が酸化され六価クロムとなり、セメント鉱物中に存在することになる。これが、改良土では、対象土質や配合条件により、土壤環境基準(0.05mg/L)を超える六価クロムの溶出が認められる場合がある¹⁵⁾。

大規模な地盤改良工事では、事前に改良土からの六価クロムの溶出量をチェックすることにより、溶出リスクをコントロールしている。また、六価クロムの溶出リスクの小さい六価クロム溶出抑制型セメント系固化材や高炉セメントも利用されている。

1.2.4 土壤汚染対策としての固化材

2002年の土壤汚染対策法の施行にともない、有害物質の不適正な取扱いや汚染物質の漏えいなどに起因する土壤汚染が判明し、その対策・修復が急がれている。汚染土壤の修復技術は大きく分けて、汚染物質の周辺地盤への拡散・移動を防止する①封じ込め技術と汚染物質を除去する②浄化技術とがあり、汚染物質や修復目標、さらに対策工事後の土地の利用形態などに応じて適切な対策方法が選定される¹⁶⁾。図 1.3 に土壤汚染修復の流れを示す。



図 1.3 重金属等を中心とした土壌汚染修復の流れ(文献 16 をもとに著者が作成)

汚染物質の周辺地盤への拡散・移動を防止する封じ込め技術のひとつは遮水壁の構築であり，従来技術であるソイルセメント柱列壁工法が応用できる。もうひとつは，汚染土壌からの有害物質を溶出しにくくする不溶化技術である。図 1.4 にその適用模式図¹⁶⁾を示す。

著者は，セメント等を用いて高い強度をもつ固化体に汚染土壌を改質するとともに，汚染物質の溶出濃度を大幅に低減できる固化・不溶化技術を有効な汚染地盤の修復技術として注目し，研究を進めてきた¹⁷⁾。一方で，セメント自身に微量ながら有害物質である六価クロムを含んでいることや，改良土が強アルカリとなることから，有害物質の種類によっては不溶化効果が小さい，あるいは有害物質の溶出を助長する可能性もあり，より効果的な不溶化材の開発が必要であった。

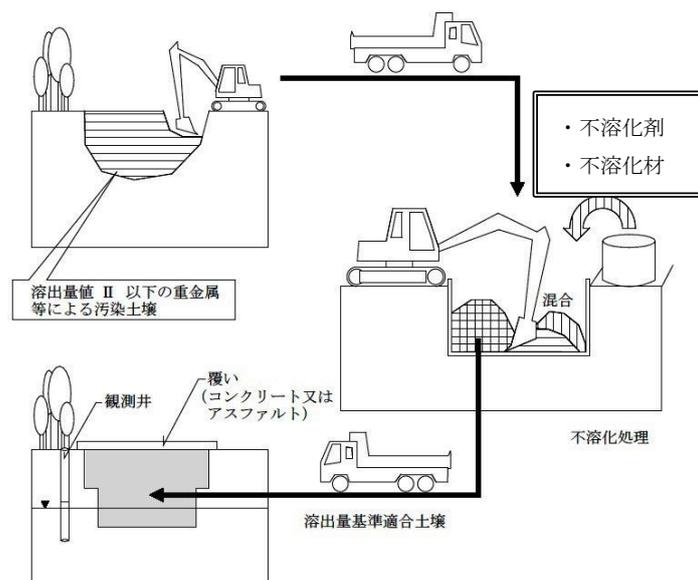


図 1.4 不溶化埋戻しによる土壤汚染の修復例
(文献 16) ⑬不溶化埋め戻し措置をもとに著者が作成)

1.3 地盤改良材としての酸化マグネシウム

以上述べたように、固結工法の要求性能が多様化してきており、これらの要求性能に応えるため、新しい固化材として酸化マグネシウムが注目された。酸化マグネシウムは排煙脱硫剤(水酸化マグネシウムとして)、セラミックや医薬品分野など工業製品として幅広く利用されてきたが、近年、新しい地盤改良材として適用が試みられるようになってきた。

1.3.1 酸化マグネシウムの製造方法

天然資源である炭酸マグネシウムや水酸化マグネシウムを 1000°C 以下の低温で焼成したものを軽焼マグネシアといい、建設分野で酸化マグネシウムといえば軽焼マグネシアを指すことが多い。この酸化マグネシウムは、水や土壤成分との反応性が高く、様々な建設分野、特に地盤改良分野への利用が試みられている。酸化マグネシウムの建設分野への利用の歴史は非常に古く、万里の長城の煉瓦目地には砂と粘土に酸化マグネシウムを混合したマグネシアセメントが使用されている。

酸化マグネシウムの製造方法は大きく分けて2種類あり、1つはドロマイト($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$)中の天然炭酸マグネシウム鉱石(MgCO_3)を焼成・粉砕して製造する方法であり、もう1つは海水中のマグネシウムイオンを水酸化物($\text{Mg}(\text{OH})_2$)として沈殿させ、これを高温下で脱水して製造する方法である。

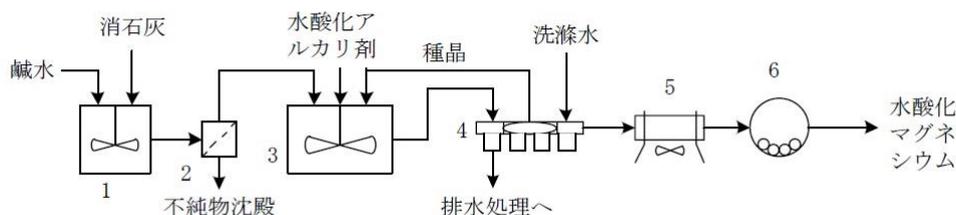
製造方法に起因する特徴をまとめると、以下のようである。

(1) 焼成・粉砕法¹⁸⁾

この製造方法の特徴は、設備が簡単で初期投資が少なくて済み、結果として生産コストが安い。欠点としては、原料となる天然炭酸マグネシウムの品質がそのまま製品に反映され、製品の純度が最大でも90%程度にとどまることである。

(2) アルカリ沈殿法¹⁸⁾

水酸化アルカリ剤としてアンモニアを使う場合は、生成した副産物が塩化アンモニウムであるため、水酸化マグネシウムとの分離が非常に生じ易く、製品に混入することもほとんどない。このため、アンモニア沈殿法を使う製品の品質は優れており、難燃剤等品質要求が厳しい工業分野には最適な製造方法といえよう。欠点としては、アンモニアは毒性と揮発性があること、生産設備等の初期投資がかかり、製造管理にも注意が必要である。図1.5にアルカリ沈殿法による酸化マグネシウムの製造フローを示す。表1.4に焼成・粉砕法、アルカリ沈殿法により製造した酸化マグネシウムの物性値の例を示す¹⁹⁾。



1. 鹼水浄化槽、 2. ろ過機Ⅰ、 3. 沈殿槽、 4. ろ過機Ⅱ、 5. 乾燥機、 6. 粉砕機

図1.5 アルカリ沈殿法による酸化マグネシウムの製造フロー¹⁸⁾

表1.4 酸化マグネシウムの物性値¹⁹⁾

項目	焼成・粉砕法	アルカリ沈殿法
原料	MgCO ₃	Mg(OH) ₂
MgO	92.2	96.5
化学組成 %		
CaO	1.92	0.59
SiO ₂	1.58	0.15
Fe ₂ O ₃	0.52	0.04
Al ₂ O ₃	0.17	0.03
SO ₄	—	2.51
生成温度	約 800℃	約 600℃
調整方法	キルン焼成 ミル粉砕	高温気流 静電気集積
Ig-loss %	3.46	2.02

1.3.2 酸化マグネシウムの地盤改良材としての既往研究

(1) 新しい地盤改良材

酸化マグネシウムの地盤改良材としての研究は比較的新しく、藤森・小堀²⁰⁾が生態系に対する負荷の少ない固化材として水田畦畔整備，法面保護，透水性舗装路への適用を提案している。海外で試験施工を実施しており，使用した酸化マグネシウムや対象土の性状は明らかでないが，山中式硬度計を用いて固化強度を測定し，施工後8か月で測定限界値を超える35mm以上の貫入抵抗量が測定されたとしている。

改良土のpHが従来のセメント系固化材より低い弱アルカリ型固化材の研究では，中澤ら²¹⁾が酸化マグネシウムに無機塩類を添加して改良土のpHをコントロールし，中性域での改良土の作製を試みている。中澤らは，酸化マグネシウムに約30%の無機酸性塩を添加した固化材を用いて，高含水比の粘性土を対象とした固化実験を行った。その結果，改良土のpHは8.5～9.5程度で，火山灰質粘性土に対して改良効果が大きいとしている。一方で，対象土に対して100kg/m³の固化材添加量で，ほとんど改良効果のなかった実験ケースもあり，対象土による改良効果のばらつきや酸性剤の添加量などについて課題を指摘している。

Vanderperreらは²²⁾，軽焼マグネシアの水との高い反応性に着目して，酸化マグネシウムに燃焼灰や普通ポルトランドセメントを混合して，固化物の強度特性について調べている。また，Yaolinらは²³⁾，酸化マグネシウムを炭酸化させることにより改良土の強度特性が大きく改善されるとして，酸化マグネシウム改良土に大量の二酸化炭素を吸収させる実験を行っている。その結果，数時間で普通ポルトランドセメント改良土の材齢28日強度に匹敵する強度が得られたとしている。

(2) 重金属等の有害物質不溶化材としての酸化マグネシウム

2002年に土壤汚染対策法が施行され，汚染土壤の処理技術に対する研究が盛んに行われるようになった¹⁷⁾。著者らは^{24),25)}，鉛，ひ素等の重金属を含む10種類の実汚染土および模擬汚染土を用いて，酸化マグネシウムによる不溶化実験を行った。その結果，鉛，ひ素，六価クロム，ふっ素等のほとんどの重金属等に対して，セメントよりも高い不溶化効果を示すことを指摘している。また，その要因として，酸化マグネシウムは土や重金属イオンに対して吸着性が高いこと，改良土のpHがセメント・石灰に比べて低いことをあげている。

また，原子力発電所の事故により広範囲にわたって放射性物質が飛散したことを受け，放射性物質に汚染された土壤を修復する技術の開発が急務となっている。(独)農研機構農村工学研究所は²⁶⁾，酸化マグネシウムの高い吸着性と土に対する適度な固化効果に着目して，酸化マグネシウムを主原料とする固化材を汚染された圃場表面に吹き付け，土壤表面固化後に表層部分の剥ぎ取り除染を行うとしている。

福島県内で行われた実証実験の施工フローを図1.6に示す。実証実験結果から，放射性セシウムの濃度変化を表1.5に示す。土壤表面の剥ぎ取り厚さは平均3cmであり，土壤の放射線セシウムの濃度は低減したとしている。また，表層土壤の固化は，土壤の飛散を抑制する効果があったとしている。酸化マグネシウムが放射性物質を特異的に吸着・固定可能かどうかは

明らかになっていないが，土壤表面に付着した放射性物質の除染技術の一つとして注目される。

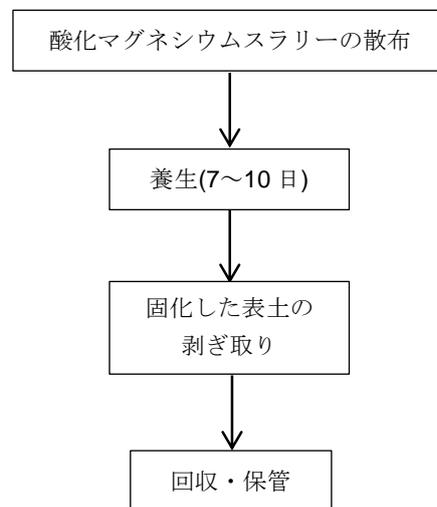


図1.6 実証実験の施工フロー
(文献26をもとに著者が作成)

表1.5 放射性セシウムの濃度変化²⁶⁾

測定時期	放射性セシウム濃度 (Bq/kg, 乾土)	低減率 (%)	地表面線量 (μ Sv/h)
剥ぎ取り前	9,090	—	7.76
剥ぎ取り後	1,671	82	3.57

(3) 酸化マグネシウムの土に対する固化機構

酸化マグネシウムの土に対する固化機構の研究では，著者ら²⁷⁾が種々の土質に対する改良土の固化特性や酸化マグネシウムの配合および養生条件が改良土の強度に及ぼす影響について取りまとめた。著者ら²⁸⁾は，固化材として酸化マグネシウム，消石灰，生石灰および普通ポルトランドセメントを用い，対象土をまさ土と関東ロームとして改良土の強度特性を調べた。その結果，酸化マグネシウムは関東ロームに対して他の固化材と比べて改良土の強度が大きいこと，改良土の気中養生下における強度低下がないことなどを指摘した。本研究の内容については，2章，3章にて詳述する。

また，著者ら^{29), 30)}は，土に含まれる非晶質物質の定量分析や改良土のX線回折を行い，酸化マグネシウム改良土の強度との関係を考察した。その結果，X線回折によって，関東ロー

ムを試料土として用いた酸化マグネシウム改良土から、マグネシウム、アルミニウム、水酸基からなる化合物が検出された。酸化マグネシウムと土に含まれる粘土鉱物とが結合する石灰系固化材におけるポゾラン反応とよく似た反応が起こり、これが改良土の固結要素の一因となっているとした²⁹⁾。また、関東ロームは非晶質成分が非常に多く、これが他の粘性土と比較して改良強度が大きくなった要因としているが、非晶質成分の種類(鉄、アルミニウム、珪酸)やその量と酸化マグネシウム改良土の強度との因果関係を明らかにするには至っていない³⁰⁾。本研究の内容については、4章にて詳述する。

さらに、著者らは¹⁹⁾、酸化マグネシウムの製造方法によって、改良土の性質が異なることに注目して、酸化マグネシウムの土に対する固化機構の解明を試みている。その結果、酸化マグネシウムの製造方法に起因する水酸化マグネシウムの生成過程の違いが改良土の強度特性に大きく影響を及ぼしているとしている。地盤改良への酸化マグネシウムの適用にあたっては、提供される酸化マグネシウムの種類を十分に考慮する必要があると指摘している。本研究の内容については、5章にて詳述する。

(4) 酸化マグネシウムの地盤改良への適用例

酸化マグネシウムの実用的な研究例では、藤平ら³¹⁾がCPG工法(コンパクショングラウチング工法の1つ)に対する酸化マグネシウムの適用性について検討し、周辺生物に対する安全性が向上したとしている。本工法は、酸化マグネシウムをスラリーにして地盤に注入する工法である。著者らの研究結果では¹⁹⁾、酸化マグネシウムの種類によってその適用が困難となる場合も考えられ、適用可能な酸化マグネシウムの選択を明らかにしておく必要がある。

また、津留ら⁴⁾は、歩道・公園の園路などを対象とした土舗装用固化材に酸化マグネシウムを適用し、施工指針の作成を試みている。標準的な土舗装の仕様として、舗装厚さ=6~10cm、固化材の配合=15%等を提案している。

著者らは³²⁾、酸化マグネシウムと製鉄過程で産出される副産物である安価な高炉スラグ微粉末とを混合した混合固化材の開発を行い、材料コストの縮減と適用土質の範囲拡大を目指している。研究成果から、混合固化材は酸化マグネシウム単独使用時と比較して大きな自硬性を発揮し、適用土質の範囲が広がったとしている。また、酸化マグネシウムの使用量を大幅に低減することが可能となり、材料コストの縮減にも寄与できるとしている。本研究の内容については、6章にて詳述する。

(5) 酸化マグネシウムの地盤改良材としての既往研究のまとめ

これまでの建設分野における酸化マグネシウムの地盤改良材としての研究、適用事例からその特徴をまとめると表1.6のようである。

表1.6 酸化マグネシウムの地盤改良材としての特徴

項目	特徴
改良の目的	軟弱土の固化(無機酸性塩と併用した弱アルカリ性固化材), 重金属等不溶化, 公園・歩道等の土舗装材, 防草材, 歴史的土構造物の修復
強度	・全般にセメント・石灰系と比較して強度は小さい ・火山灰質粘性土に対して改良強度大
改良土のpH	9.5~10.5 (対象土の種類, 添加量による)
固化材としての流通価格	セメントの5~10倍

酸化マグネシウムの地盤改良材としての研究は、著者らが土に対する固化機構について研究を進めている他は、軟弱土の固化や重金属等有害物質の不溶化への適用結果に関する報告が多い。さらに、使用した酸化マグネシウムの製造方法や比表面積について記述されておらず、単に「酸化マグネシウム」として扱われているものも多い。製造方法や比表面積の異なる酸化マグネシウムを使用した場合、適用結果も大きく異なることが考えられ、酸化マグネシウムを地盤改良材として様々な用途に適用していく上で、酸化マグネシウムの土に対する固化機構を解明するとともに、適用範囲や改良土の物性を明らかにしていくことが重要である。

1.4 本研究の概要

本研究は、著者のこれまでの酸化マグネシウムの土に対する固化機構解明へのアプローチと地盤改良分野への適用方法について取りまとめたものである。本研究の流れを図1.7に示す。

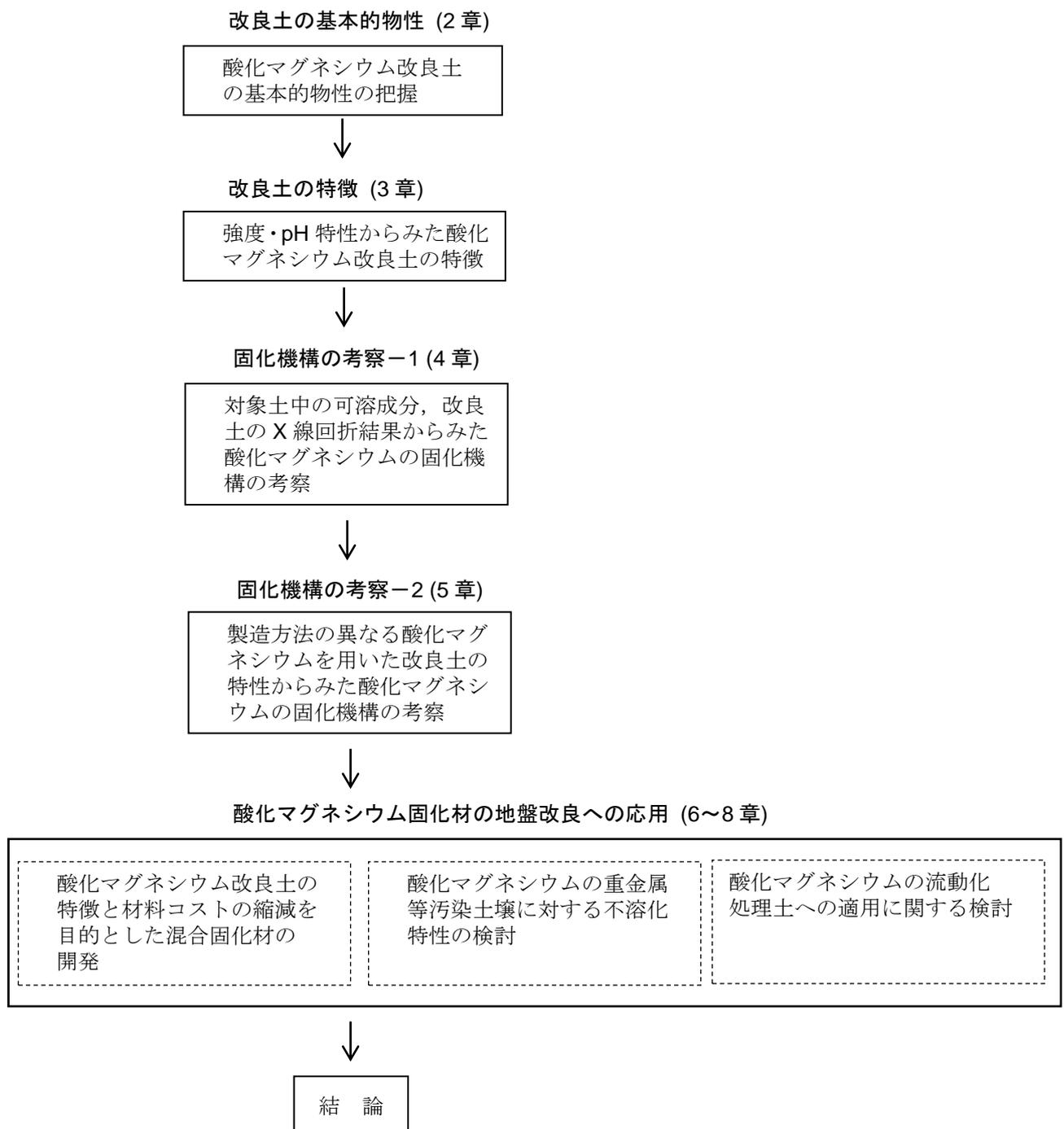


図1.7 本研究の流れ

2章では、酸化マグネシウムの土に対する基本的な改良効果を調べるため、沖積土、まさ土、ローム土をはじめとして海外産の土質を含め34種類の土質に対して酸化マグネシウム改良土を作製して、一軸圧縮強さと改良土のpHを調べた。また、普通ポルトランドセメント、消石灰、生石灰の従来型固化材(カルシウム系)についても改良土を作製して、酸化マグネシウム改良土と従来型固化材改良土の一軸圧縮強さと改良土のpHを比較して、酸化マグネシウム改良土の基本的な性質について考察した。

3章では、酸化マグネシウム改良土の特徴である、改良土の長期強度変化、乾湿繰り返し・曝露条件下での耐久性とpH変化について調べている。

4章では、酸化マグネシウムの土に対する固化機構解明へのアプローチとして、土の非晶質成分の種類とその量が改良土の強度に及ぼす影響について考察した。また、改良土のX線回折を行って、反応生成物の判定を試みた。

5章では、酸化マグネシウムの土に対する固化機構解明へのアプローチとして、酸化マグネシウムの製造方法に注目して、製造方法が異なる鉱山起源の酸化マグネシウムと海水起源の酸化マグネシウムを用いて、改良土の性質を調べた。

6章～8章では、酸化マグネシウムの地盤改良への具体的な適用に対する研究成果を示している。6章では、酸化マグネシウムの特徴を生かした利用用途の拡大を目指して、高炉スラグ微粉末を用いた混合固化材を提案した。混合固化材を用いた改良土は、酸化マグネシウムと高炉スラグ微粉末の混合比を調整することにより、酸化マグネシウムのみを用いた改良土と比較して、高い強度と耐久性を有することを示した。

7章では、酸化マグネシウムの重金属等汚染土壌に対する不溶化効果について調べ、セメントを用いた場合と比較して優れた不溶化効果が得られた。汚染土壌の修復分野は、酸化マグネシウムの利用用途の大きな柱のひとつとなるものと期待される。

8章では、酸化マグネシウムの火山灰質粘性土に対する優れた固化特性に注目して、関東ロームを対象とした流動化処理土への適用を試みた。酸化マグネシウムを用いた流動化処理土は、普通セメントや高炉セメントB種を用いた場合と比較して、優れた強度特性を示し、さらに改良土からの六価クロムの溶出リスクを低減できることを示した。

[参考文献]

- 1) CDM 研究会：セメント系深層混合処理工法 CDM，設計と施工マニュアル，pp.2-3，1991.
- 2) 中澤重一，西形達明，山田哲司：地盤改良工法の開発動向の分析，土と基礎，Vol.54，No.7，pp.34-36，2006.
- 3) 西田一彦：文化遺産と地盤改良技術，第4回地盤改良シンポジウム論文集，pp.1-8，2000.
- 4) 津留明彦，名島和義，小松崎孝志，松田 豊，中澤重一：MgO 系固化材料による土系舗装，第6回地盤改良シンポジウム論文集，pp.75-78，2004.

- 5) 中澤重一, 岩崎好規, 福田光治, 松原啓充, スレン・ソッキアン, 赤澤泰, 中川武, アンコール遺跡基壇の消石灰改良土による修復と土質特性, 材料, Vol.54, No.11, pp.1147-1152, Nov.2005.
- 6) 西田一彦, 西形達明: Preservation techniques for historical sites in Japan, Proc. Int.Symp. of Geotech. Eng. for Preservation Monuments and Historic Sites, pp.471-478, 1997.
- 7) 嘉門雅史, 勝見武, 応長雲: 地盤工学における環境質の影響評価とその制御, 材料, 47, No.2, pp.112-115, 1998.
- 8) 今山真治, 中村吉男, 奥村哲夫, 藤田功, 西野博次: 港湾浚渫土の粒状固化における石膏系固化材の適用性について, 土木学会第 64 回年次学術講演会, 第Ⅲ部門, pp.923-924, 2009.
- 9) 武下俊宏, 樋口壮太郎: 水に浸漬した石膏ボードからの硫化水素発生, 廃物学会研究発表会講演論文集, pp.861-863, 2007.
- 10) 山田幹雄, 佐野博昭, 山田武史, 坪川茂, 前川直輝: 軽焼マグネサイト添加による廃石膏ボード含有ふっ素の溶出抑制効果, 第 9 回地盤改良シンポジウム論文集, pp.171-174, 2010.
- 11) 西元央, 山田優, 鈴木健夫: 二酸化炭素併用による粘性土のセメント安定処理, 第 4 回地盤改良シンポジウム論文集, pp.249-254, 2000.
- 12) 馬場崎亮一, 寺師昌明, 鈴木健夫, 前川淳, 川村政史, 深沢栄造: 安定処理土の強度に及ぼす影響因子, セメント系安定処理土に関するシンポジウム発表論文集, p.20-41, 1996.
- 13) たとえば, 社団法人セメント協会: セメント系固化材による地盤改良マニュアル第 4 版, p.59, 2012.
- 14) 高橋茂: セメントに含まれる微量成分の環境への影響, セメント・コンクリート, No.640, pp.20-29, 2000.
- 15) 阪部秀雄, 澤幸平, 中山義久, 白木音信: セメント系改良土などからの六価クロム溶出の現状と傾向, 第 9 回地盤改良シンポジウム論文集, pp.75-80, 2010.
- 16) 環境省: 汚染の除去等の措置の実施に関する技術的基準(土壤汚染対策法第 7 条第 4 項関連), 2002.
- 17) 山田哲司, 嘉門雅史, 大山 将: 重金属類汚染土壌のセメントによる固化・不溶化処理について, 土と基礎, Vol.50, No.10, pp.10-12, 2002.
- 18) BSI 生物化学研究所: 「肥料製造学」水酸化マグネシウム, bsikagaku.jp/f-industry/Mg(OH)₂-industry.pdf, 2013.
- 19) 山田哲司, 西形達明, 西田一彦: 酸化マグネシウムの製造方法が改良土の性質に及ぼす影響について, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.68, No.4, pp.732-741, 2012.
- 20) 藤森新作, 小堀茂次: 自然環境にやさしい土壌硬化剤マグホワイトの開発, 農業土木学会誌, 第 68 巻, 第 12 号, pp.1297-1300, 2000.
- 21) 中澤重一, 国松勝一, 山口直也, 市位清宏, 平岡 陸: 建設汚泥処理用弱アルカリ性固化

- 剤の開発(その 2), 第 4 回地盤改良シンポジウム発表論文集, pp.245-248, 2000.
- 22) Vandeperre, L.J., Liska, M., and Al-Tabbaa, A. 2008a : Hydration and mechanical properties of mixtures of magnesia, pulverized fuel ash, and Portland cement blends, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(5), pp.375-383, 2007.
- 23) Yaolin Yi, Martin Liska, Cise Unluer, and Abir Al-Tabbaa : Carbonating magnesia for soil stabilization, *Can. Geotech. J.* 50, pp.899-905, 2013.
- 24) 山田哲司, 大山 将, 蔵野彰夫 : 軽焼マグネシア(MgO)による重金属類汚染土壌の固化・不溶化特性に関する検討, 第 37 回地盤工学研究発表会, pp.2303-2304, 2002.
- 25) 大山 将, 小山 孝, 山田哲司, 嘉門雅史 : 重金属類汚染土壌の固化・不溶化処理に関する検討, 第 13 回廃物学会研究発表会講演論文集, pp.1128-1130, 2002.
- 26) 独立行政法人農研機構農村工学研究所 : 報告書 (参考資料 2) 別添 4, <http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001wd45-att/2r9852000001wf3f.pdf>, 2011.
- 27) 西形達明, 山田哲司, 西田一彦, 松田 豊 : 酸化マグネシウムの地盤改良への適用について, 土と基礎, Vol.54, No.7, pp.19-21, 2006.
- 28) 田中知樹, 西形達明, 西田一彦, 山田哲司 : 酸化マグネシウムの地盤改良への適用に関する研究(その 2: 配合条件の違いによる強度特性について), 第 39 回地盤工学研究発表会, pp.815-816, 2004.
- 29) 田中知樹, 西形達明, 西田一彦, 山田哲司 : 酸化マグネシウムの地盤改良への適用に関する研究(その 4 : X 線回折試験による反応生成物の解明), 土木学会第 59 回年次学術講演会, III 部門, pp.1011-1012, 2004.
- 30) 藤原信吾, 西形達明, 西田一彦, 山田哲司 : 酸化マグネシウムの地盤改良への適用に関する研究(その 6: 非晶質物質の定量試験結果), 土木学会第 60 回年次学術講演会, III 部門, pp.79-80, 2005.
- 31) 藤平雅巳, 小西 武, 大沢一実, 熊田 弘 : 環境対応型固化材が海産生物に及ぼす影響についての検討, 第 5 回地盤改良シンポジウム論文集, pp.249-254, 2002.
- 32) 山田哲司, 西形達明 : 酸化マグネシウムと高炉スラグ微粉末からなる混合固化材を用いた改良土の強度特性, 地盤工学ジャーナル, Vol.10, No.1, pp.57-65, 2015.

2章 酸化マグネシウムの改良効果に及ぼす土質の影響

2.1 はじめに

酸化マグネシウムを地盤改良材として適用するためには、セメント系固化材で行われているように、改良土の特性と固化の原理を明らかにし、改良目的に応じた配合設計を可能にする必要がある。

セメント改良土では、天然材料を骨材として使用するコンクリートやモルタルとは異なり、対象土の物理・化学的性質によって土に対する改良効果は大きく異なる。土の粒度分布、含水比、強熱減量(有機物含有量)などと改良土の力学特性(一軸圧縮強さ)との関係のうち、特に留意すべき土の含水比および有機物含有量と改良土の一軸圧縮強さとの関係について紹介しておく。

図 2.1 にセメント系固化材添加量と改良土の一軸圧縮強さとの関係を示す¹⁾。図 2.1 は砂質土およびシルトを試料土とした改良土の例であるが、試料土の含水比が大きいほど改良土の強度は小さく、また、シルトより砂質土の方が改良土の強度が大きい傾向がみられる。

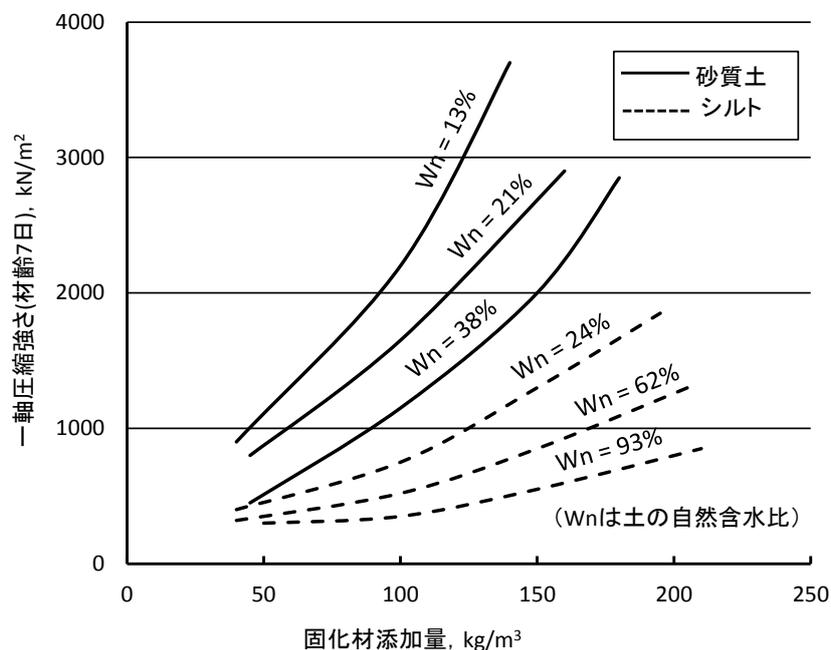


図 2.1 固化材添加量と改良土の一軸圧縮強さとの関係¹⁾

有機質土やヘドロに含まれ、セメントの水和反応を阻害する有機物の代表的な成分にフミン酸がある²⁾。府川らは³⁾、フミン酸がセメント改良土の強度発現を阻害する性質を利用して、改良土の固化を遅延させる試みを行っている。その結果、フミン酸の添加量が多いほど、セメント改良土の強度発現を遅らせる効果があり、また、その効果は養生温度に依存するとしている。

このように、セメント改良土については土質特性と改良土の力学特性について多くの知見が得られている。また、土と固化材の混合方法など、施工条件が改良土の力学特性に及ぼす影響についても研究例が多い⁴⁾。本章では、各地から採取した土質材料に酸化マグネシウムを添加混合し、改良土の一軸圧縮強さ、pHを測定し、試料土の土質特性が酸化マグネシウム改良土の強度に及ぼす影響についてセメント改良土や消石灰改良土による実験結果と比較することにより検討した。

2.2 実験方法

2.2.1 実験材料

(1) 試料土の種類と土質特性

実験の対象とした試料土は我が国各地および海外から入手した 34 種の土質材料で、このうちまさ土が 7 種類、火山灰土が 13 種類である。

まさ土は、生駒山麓の大阪府交野市において、風化状態の異なるものを採取した他、市販の園芸用のまさ土を加えた 7 種類とした。園芸用のまさ土については、加水して含水比を調整して実験に用いた。

火山灰土は、関東ローム、八戸ローム、鳥取ロームの 3 種類でそれぞれについて産地の異なる試料土を数種類用いている。火山灰土は主に根切り工事等の建設工事で発生したものをしたが、関東ローム C については、園芸用に販売されているものを含水比を調整して実験に用いた。また、八戸ロームは礫分を多く含み、火山灰質粘性土には分類されない。

沖積土は 8 種類で、主にセメント系地盤改良工事の配合試験のために採取した試料土である。産地が特定できなかったものについては、「建設残土」と表示している。沖積土に区分している国頭まあじは、沖縄県本島中～北部に産する赤褐色の風化残積土で、島内の開発工事等に起因する海洋汚染がしばしば問題となっている⁵⁾。

有機質土は 3 種類とも都市河川の堆積ヘドロを用いている。

東南アジア産の 2 試料は、現地の土質改良工事に際し、我が国で配合試験を行う際に入手したものである。

配合実験に先立ち試料土の土質特性を明らかにするため、自然含水比、土粒子の密度、強熱減量、地盤工学会基準「土懸濁液の pH 試験方法」(JGS 0211-2009) による土の pH および JGS 0711-A 法による締固め密度を測定した。また、細粒土については締固めた土のコーン指数試験を実施し、地盤材料としての品質区分を行った。

地盤材料の品質区分は⁶⁾、建設工事に伴って発生する余剰土を他の盛土等に有効利用しようとする観点から設けられた品質区分で、主にコーン指数によって適用箇所を分類している(図 2.2)。コーン指数が 200kN/m²未満となると「建設汚泥」となり、廃棄物処理法に規定する産業廃棄物として取り扱われる。

		土質区分基準による区分	
		区 分	性状, 強度
発 生 土	建設 発生 土	第1種建設発生土	礫及び砂状
		第2種建設発生土	コーン指数 800kN/m ² 以上
		第3種建設発生土	コーン指数 400kN/m ² 以上
		第4種建設発生土	コーン指数 200kN/m ² 以上
	建設 汚泥	泥土	コーン指数 200kN/m ² 未満

図 2.2 地盤材料(発生土)の品質区分⁶⁾

表 2.1 に実験に用いた試料土の土質特性を示した。含水比は自然含水比 (Wn) を示しているが、市販まさ土、火山灰土 C、コンクリート用骨材砂、東南アジア産砂、東南アジア産ラテライトについては、適宜加水して固化材添加混合後の締固めが十分に行える状態とした。土粒子の密度は、おおむね 2.60~2.70g/cm³ となっているが、関東ロームについては、2.80g/cm³ 以上のものがみられる。また、有機質土については $\rho_s=2.41\text{g/cm}^3$ と値の小さいものがみられる。土の pH についてみると、中性~やや酸性側のものが多い。特に粘土化した強風化まさ土である D,E は、pH=4 オーダーの酸性土である。締固め密度は、砂質土で 1.8~2.0g/cm³ 程度、関東ロームや沖積粘土および有機質土などの粘性土では 1.40~1.60g/cm³ 程度となっている。地盤材料の品質区分では、まさ土および関東ロームについては、火山灰土 D,K,L が汚泥に区分される以外は第 4 種以上となり、盛土材料としての利用が可能である。沖積粘土、沖積シルトおよび有機質土は国頭まあじを除いてすべて汚泥区分となり、地盤材料として利用するには力学特性を改善する必要がある。

(2) 固化材

固化材は、酸化マグネシウムおよび高炉セメント B 種 (以下 BB と称する場合もある) の 2 種類として一部の試料土については、消石灰 (Ca(OH)₂) についても改良土を作製した。酸化マグネシウムは、天然マグネサイト(炭酸マグネシウム)を 700~800°C で焼成した軽焼マグネシアで、比表面積を 6000~7000cm²/g に調整したものをを用いた。表 2.2 に実験に用いた酸

化マグネシウムの成分分析結果を示した。酸化マグネシウムは、90%以上の MgO から成り、数%のカルシウム、珪素、鉄、アルミニウム等を含有している。微量成分中には、クロム、鉛、ひ素等の有害重金属等はほとんどなく、土壌環境に対して安全な固化材といえる。高炉セメント B 種は JIS 規格品を用いた。JIS R5211 による高炉セメント B 種の品質規格を表 2.3 に示す。消石灰は市販の工業品を用いた。

表 2.1 試料土の土質特性

試料名	W_n %	ρ_s g/cm ³	I_{gloss} %	pH	締固め密度 g/cm ³	地盤材料 品質区分
まさ土A(砂質土)	13.0	2.64	2.9	6.6	1.976	—
まさ土B(砂質土)	23.5	2.76	5.6	6.4	1.906	—
まさ土C(砂質土)	16.3	2.67	3.4	5.9	1.968	—
まさ土D(強風化, 粘性土)	49.2	2.77	13.7	4.9	1.675	第3種
まさ土E(強風化, 粘性土)	41.2	2.79	14.6	4.7	1.720	第2種
まさ土F(市販園芸用)	10.3*	2.67	2.2	7.7	2.134	—
まさ土G(市販園芸用)	12.4*	2.66	2.4	7.5	2.107	—
火山灰土A(関東ローム)	132.7	2.81	15.4	6.5	1.361	第2種
火山灰土B(関東ローム)	112.6	2.85	14.4	6.5	1.435	第3種
火山灰土C(関東ローム)	99.6	2.86	12.5	6.5	1.431	第4種
火山灰土D(関東ローム)	123.9	2.73	20.2	7.3	1.339	(汚泥)
火山灰土E(関東ローム)	94.2	2.78	13.6	7.3	1.448	第4種
火山灰土F(関東ローム)	93.3	2.77	18.4	7.1	1.488	第4種
火山灰土G(関東ローム)	85.8	2.76	22.4	6.5	1.509	第4種
火山灰土G(八戸ローム)	27.4	2.71	6.9	7.3	1.899	—
火山灰土H(八戸ローム)	25.4	2.73	7.4	7.4	1.910	—
火山灰土I(鳥取ローム)	52.4	2.81	10.1	6.4	1.700	第3種
火山灰土J(鳥取ローム)	53.1	2.82	24.5	5.6	1.690	第3種
火山灰土K(鳥取ローム)	153.6	2.70	27.1	6.4	1.324	(汚泥)
火山灰土L(鳥取ローム)	161.8	2.72	9.0	6.4	1.304	(汚泥)
沖積粘土A(建設残土)	55.5	2.67	7.8	7.0	1.659	(汚泥)
沖積粘土B	68.4	2.73	10.3	7.2	1.581	(汚泥)
沖積粘土C(建設残土)	52.5	2.76	9.3	7.5	1.689	(汚泥)
沖積シルトA	48.9	2.71	5.8	6.0	1.722	(汚泥)
沖積シルトB	36.7	2.69	7.0	8.1	1.814	(汚泥)
沖積シルトC(国頭まあじ)	29.3	2.65	6.3	5.4	1.967	第2種
沖積砂質土A	30.0	2.60	2.3	7.2	1.871	—
沖積砂質土B(建設残土)	28.2	2.66	4.5	6.9	1.845	—
有機質土A	196.9	2.41	54.2	5.1	1.223	(汚泥)
有機質土B	111.0	2.68	10.8	2.9	1.397	(汚泥)
有機質土C	48.0	2.62	14.1	5.7	1.672	(汚泥)
コンクリート用骨材砂	8.4*	2.65	0.2	7.1	2.002	—
砂(東南アジア産)	10.0*	2.63	1.0	7.3	1.986	—
ラテライト(東南アジア産)	16.1*	2.72	7.5	5.2	1.976	第2種

* 調整含水比

表 2.2 酸化マグネシウムの成分分析結果

主成分	%	微量成分	ppm
MgO	92.13	Cd	0.05
CaO	1.96	Pb	0.6
SiO ₂	1.63	T-Cr	ND
Fe ₂ O ₃	0.52	T-Hg	ND
Al ₂ O ₃	0.25	As	ND
SO ₃	0.10	Cu	0.7
Igloss	3.12	Zn	7.4

表 2.3 JIS R5211 による高炉セメントの品質規格

項	目	高炉セメント A種	高炉セメント B種	高炉セメント C種
密度(g/cm ³)		—	—	—
比表面積(cm ² /g)		3000以上	3000以上	3300以上
凝結	始発(min)	60以上	60以上	60以上
	終結(h)	10以下	10以下	10以下
安定性	パット法	良	良	良
	ルンシャテリ工法(mm)	10以下	10以下	10以下
圧縮強さ (N/mm ²)	3d	12.5以上	10.0以上	7.5以上
	7d	22.5以上	17.5以上	15.0以上
	28d	42.5以上	42.5以上	40.0以上
化学成分(%)	酸化マグネシウム(MgO)	5.0以下	6.0以下	6.0以下
	三酸化硫黄(SO ₃)	3.5以下	4.0以下	4.5以下
	強熱減量	5.0以下	5.0以下	5.0以下

2.2.2 供試体の作製，養生方法

固化材の添加量は表 2.1 に示した締固め密度を基に計算し，通常地盤改良工事で用いられる 100kg/m³とし，一部の試料土に対しては 50～200kg/m³とした。計量した試料土と固化材をソイルミキサーで十分に攪拌・混合して改良土とし，φ50×100mm 且つ 2 つ割りモールドにセメント協会標準試験方法(1990)により締め固めて供試体を作製した。締固めランマーの質量は 1.5kg，層数は 4 層で，締固め回数は下層から 10 回，20 回，20 回，40 回で，総締固めエネルギーは，JIS A1210-A 法とほぼ同じである。なお，セメント協会標準試験方法は改訂され，現在，JCAS L-01 : 2006「セメント系固化材による改良体の強さ試験方法」⁷⁾とな

っているが、旧試験方法の方が突固め層数が多く、均一でばらつきの少ない供試体作製が可能と考え、旧試験方法を用いた。供試体の作製本数は1試料土当たり3本とし、供試体を固化後型枠より脱型し、食品用ラップフィルムに包んで底部に水を張った容器に保存し、20℃恒温室内で湿潤養生状態とした。供試体作製後材齢28日で一軸圧縮試験を行い、3本の平均値でもって、その改良土の一軸圧縮強さとした。また、破壊供試体を用いてJGS 0211-2009土懸濁液のpH試験方法により改良土のpHを測定した。

2.3 実験結果および考察

2.3.1 一軸圧縮試験結果

表2.4に改良土の一軸圧縮強さおよびpHを示す。なお、改良土の一軸圧縮強さおよびpHは固化材添加量=100kg/m³時の値である。図2.3に酸化マグネシウム改良土と高炉セメントB種改良土との一軸圧縮強さの比較を、図2.4に酸化マグネシウム改良土と消石灰改良土との一軸圧縮強さの比較を示す。両図とも、試料土は、まさ土、火山灰土、沖積土、有機質土の4種類に分類している。

酸化マグネシウム改良土の一軸圧縮強さは、火山灰土を除いて高炉セメントB種改良土と比較して小さい。特に、一般的に地盤改良の対象となる事例が多い沖積土に対して酸化マグネシウムの改良効果は小さく、まさ土や沖積土では、酸化マグネシウム改良土の一軸圧縮強さは、高炉セメントB種改良土の1/4程度であった。

改良地盤の設計強度は室内強度の1/3~1/5程度とされており⁸⁾、まさ土や沖積土を対象とした酸化マグネシウム改良土の一軸圧縮強さが200~1500kN/m²であったことを考慮すると、酸化マグネシウム改良土の対応可能な設計強度の範囲は、添加量=100kg/m³において50~300kN/m²程度となる。したがって、大きな設計強度を必要とする改良目的には酸化マグネシウムは不向きであると考えられる。

一方、酸化マグネシウムは火山灰土に対して特異的に大きい改良強度をもたらすといえる。沖積粘土Bの酸化マグネシウム改良土の一軸圧縮強さが比較的大きいのは、土質が火山灰起源であるためと考えている。消石灰は、まさ土に対しては高炉セメントB種より改良効果が大きく、古来から高い改良強度をもたらす組み合わせ（三和土等）として利用されている。

酸化マグネシウムはセメント等固化材では改良効果の得られにくい高含水比の火山灰土に対して、大きな改良効果をもたらした。単純な化合物からなる酸化マグネシウムと消石灰が、それぞれ火山灰土とまさ土に対して大きい改良効果を発揮することは、酸化マグネシウムの土に対する固化機構の解明の重要なファクターとなるものと考えられる。

表 2.4 改良土の一軸圧縮強さおよび pH*

試料名	一軸圧縮強さ(材齢28日)kN/m ²			改良土のpH(材齢28日)		
	MgO	Ca(OH) ₂	BB	MgO	Ca(OH) ₂	BB
まさ土A(砂質土)	1045	4394	2941	10.7	12.5	11.5
まさ土B(砂質土)	464	—	1856	10.5	—	11.4
まさ土C(砂質土)	807	4692	2862	10.6	12.5	11.6
まさ土D(強風化, 粘性土)	418	1132	357	10.3	12.2	11.3
まさ土E(強風化, 粘性土)	508	—	358	10.5	—	11.3
まさ土F(市販園芸用)	1325	—	5345	10.6	—	11.7
まさ土G(市販園芸用)	944	—	4615	10.6	—	11.6
火山灰土A(関東ローム)	1256	267	295	10.0	11.3	10.6
火山灰土B(関東ローム)	785	—	85	9.7	—	10.8
火山灰土C(関東ローム)	667	—	203	9.6	—	10.6
火山灰土D(関東ローム)	1340	—	<50	10.6	—	11.7
火山灰土E(関東ローム)	1154	—	105	10.1	—	11.4
火山灰土F(関東ローム)	1096	—	159	9.8	—	11.0
火山灰土G(関東ローム)	1488	—	464	9.4	—	10.1
火山灰土H(八戸ローム)	1789	—	1848	10.8	—	11.5
火山灰土I(八戸ローム)	2930	—	2052	10.9	—	11.6
火山灰土J(鳥取ローム)	2833	—	496	9.8	—	11.2
火山灰土K(鳥取ローム)	1844	—	255	8.8	—	9.5
火山灰土L(鳥取ローム)	376	—	<50	9.5	—	10.4
火山灰土M(鳥取ローム)	242	—	<50	10.0	—	11.3
沖積粘土A(建設残土)	284	—	622	11.1	—	11.7
沖積粘土B	808	—	240	10.7	—	11.6
沖積粘土C(建設残土)	318	312	1440	10.4	12.0	11.0
沖積シルトA	367	—	1889	11.3	—	11.9
沖積シルトB	291	—	521	10.7	—	11.9
沖積シルトC(国頭まあじ)	612	298	529	10.5	11.9	11.4
沖積砂質土A	415	—	2609	11.0	—	11.7
沖積砂質土B(建設残土)	1625	—	2534	10.8	—	11.8
有機質土A	82	—	35	10.4	—	11.1
有機質土B	<50	—	111	10.5	—	11.3
有機質土C	474	—	611	10.7	—	11.4
コンクリート用骨材砂	206	116	2593	10.7	12.5	12.4
砂(東南アジア産)	1092	190	4121	9.9	11.9	11.8
ラテライト(東南アジア産)	1584	825	1973	9.8	11.9	11.3

注 *一軸圧縮強さおよび pH は固化材添加量=100kg/m³時の値

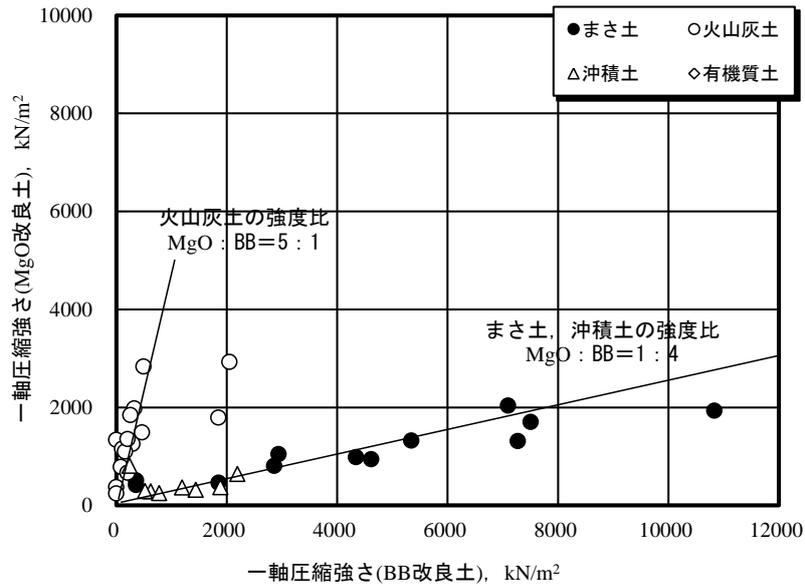


図 2.3 改良土の一軸圧縮強さの比較(酸化マグネシウム vs 高炉セメント B 種)

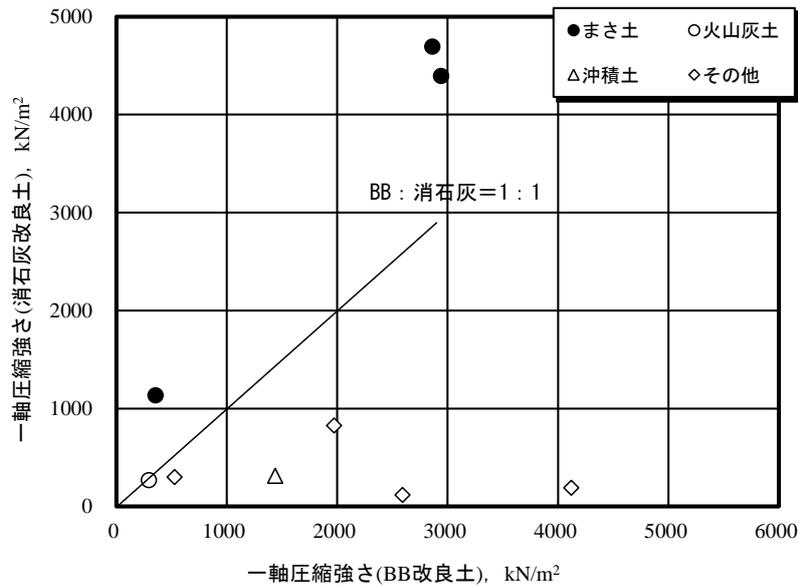


図 2.4 改良土の一軸圧縮強さの比較(高炉セメント B 種 vs 消石灰)

2.3.2 土質特性と改良土の一軸圧縮強さとの関係

図 2.5 , 図 2.6 に対象土の含水比(調整含水比を含む)と改良土の一軸圧縮強さとの関係を示す。図 2.5 は高炉セメント B 種改良土の一軸圧縮強さと含水比との関係を示したものであり、高含水比である火山灰土や有機質土の改良強度が小さいことも影響して、対象土の含水比が大きいほど改良強度は小さい。これはセメント系改良土の一般的な特徴といえる。

図 2.6 は酸化マグネシウム改良土の一軸圧縮強さと含水比との関係を示したものである。一軸圧縮強さと含水比との間には、高炉セメント B 種を用いた場合と比較して、明瞭な負の相関関係はないが、土質ごとについてみると含水比が大きいほど改良土の一軸圧縮強さが小さい傾向がある。対象土の含水比が改良土の一軸圧縮強さに及ぼす影響については、3 章および 4 章でも検討しており、含水比の大きい火山灰土の一軸圧縮強さが大きいことや、含水比の比較的小さい砂質土では高炉セメント B 種改良土と比較して一軸圧縮強さが小さいことから、高炉セメント B 種改良土ほど明瞭な関係は見られないものと考えている。

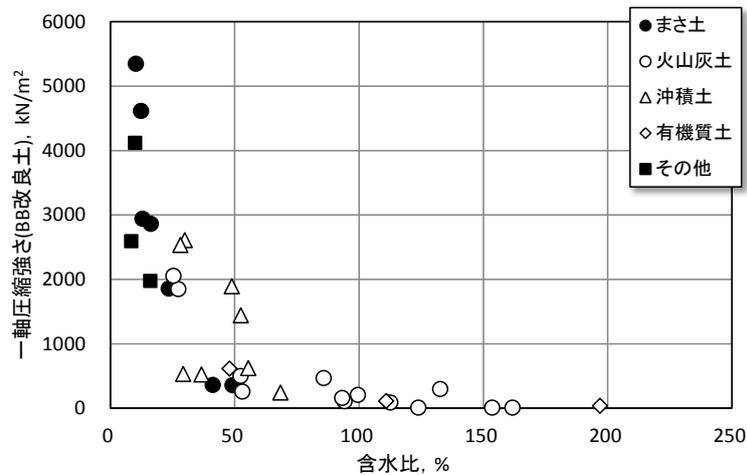


図 2.5 対象土の含水比と一軸圧縮強さとの関係(高炉セメント B 種)

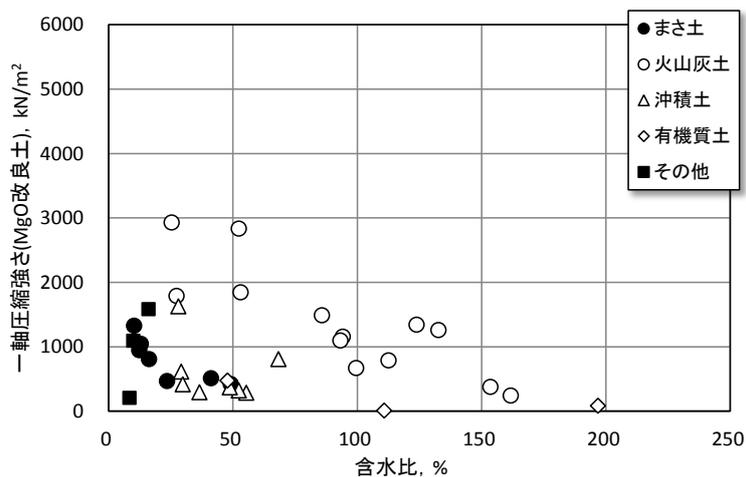


図 2.6 対象土の含水比と一軸圧縮強さとの関係(酸化マグネシウム)

図 2.7 に試料土の pH と改良土の一軸圧縮強さとの関係を固化材ごとに示す。酸化マグネシウム改良土と消石灰改良土は、試料土の pH による強度への影響は小さい。高炉セメント等

セメント系固化材は、酸性土や有機質土に対して改良効果が小さいとされているが⁹⁾、試料土の pH が中性以上でも改良強度が小さい場合があり、試料土の pH のみによる強度への影響は小さいといえる。

図 2.8 は試料土の強熱減量と改良土の一軸圧縮強さを固化材ごとに示したものである。強熱減量は、試験方法からわかるように有機物含有量や非晶質分量と密接な関係があると考えられる。高炉セメント等セメント系固化材は、火山灰質粘性土のような非晶質成分（特にアロフェン）を多く含む土質に対して改良強度が小さいことから^{10),11)}、強熱減量が大きい土質に対しても強度が小さい結果となった。酸化マグネシウムは、非晶質成分を多く含む火山灰土に対して改良効果が大きいため、強熱減量と一軸圧縮強さとの間に明瞭な相関性はみられない。消石灰は、非晶質成分を含むまき土に対しては改良効果が大きい、強熱減量が大きいアロフェンを多く含む火山灰土に対して改良効果が小さいために、高炉セメント B 種改良土と同様の傾向を示している。

改良土の化学的性質の一つとして pH を取り上げ、図 2.9 に高炉セメント B 種改良土の pH と酸化マグネシウム改良土・消石灰改良土の pH との関係を示す。高炉セメント B 種改良土の pH は pH=10~12 の範囲に集中した。また、消石灰改良土の pH はさらに高く、pH=12 前後の範囲となった。これに対して酸化マグネシウム改良土の pH は pH=9~11 の範囲に分布し、高炉セメント B 種改良土の pH と比較して 1.0 程度、消石灰改良土の pH に対しては 2.0 低い値を示した。酸化マグネシウムの水和物である水酸化マグネシウムの水に対する溶解度が消石灰の溶解度の概ね 1/100¹²⁾であることが、酸化マグネシウム改良土の pH が低くなった要因の一つであると考えている。

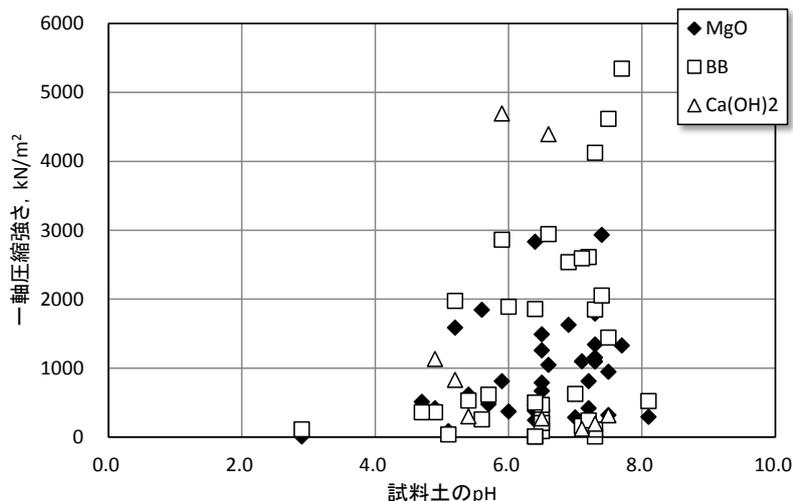


図 2.7 試料土の pH と改良土の一軸圧縮強さとの関係

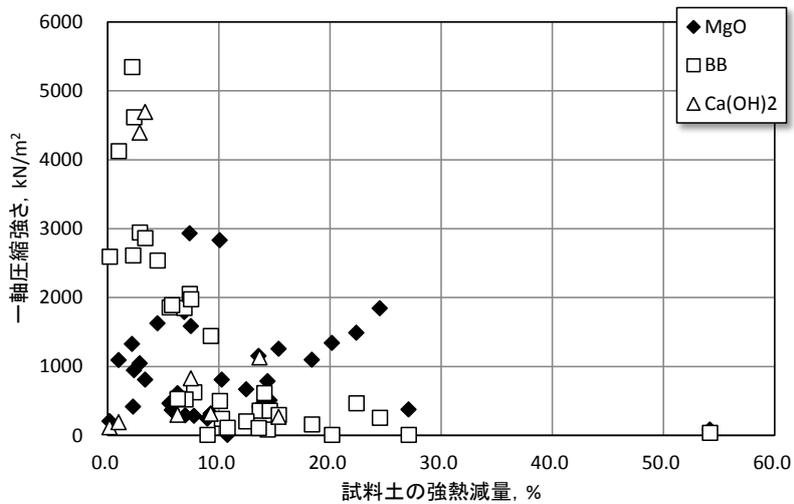


図 2.8 試料土の強熱減量と改良土の一軸圧縮強さとの関係

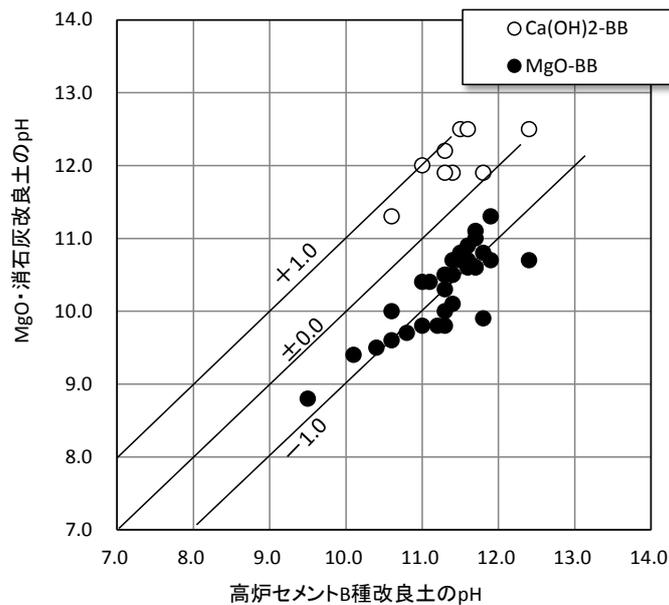


図 2.9 改良土の pH の比較

2.4 まとめ

国内外から採取した 34 種類の土質材料に酸化マグネシウムを添加混合し、改良土の一軸圧縮強さ、pH を測定し、試料土の土質特性が酸化マグネシウム改良土の強度に及ぼす影響について検討した。検討結果を以下に要約する。

- (1) 酸化マグネシウム改良土の一軸圧縮強さは、高炉セメント B 種改良土と比較して小さく、まさ土や沖積土では、高炉セメント B 種改良土の 1/4 程度である。一方、酸化マグネシ

ウムは火山灰土に対して、高炉セメント B 種に比べて約 5 倍の大きい改良強度をもたらす。

- (2) 沖積砂や沖積粘土を対象土とした場合、改良土の目標強度が大きい場合には、改良効果が小さいために、酸化マグネシウムの添加量が非常に多くなる。したがって、まさ土や火山灰土を対象土とすることが望ましいと考えられる。特に、火山灰土は、従来のセメント系固化材では改良効果が小さく、有効な用途であると考えられる。
- (3) 単純な化合物からなる酸化マグネシウムと消石灰が、それぞれ火山灰土とまさ土に対して大きい改良効果を発揮することは、酸化マグネシウムの土に対する固化機構の解明の重要なファクターとなるものと考えられる。
- (4) 含水比の大きい火山灰土の酸化マグネシウムによる改良強度が大きいことや、高炉セメント B 種改良土の強度が大きかった砂質土に対する強度が小さいことから、高炉セメント B 種改良土ほど明瞭な改良土の一軸圧縮強さと試料土含水比との相関関係は酸化マグネシウム改良土には見られない。
- (5) 酸化マグネシウム改良土と消石灰改良土は、試料土の pH による強度への影響は小さい。
- (6) 酸化マグネシウムは、強熱減量の大きい非晶質成分を多く含む火山灰土に対して改良効果が大きいために、強熱減量の増加による一軸圧縮強さの低下傾向はみられない。
- (7) 酸化マグネシウム改良土の pH は pH=9~11 の範囲となり、高炉セメント B 種改良土の pH と比較して 1.0 程度、消石灰改良土の pH に対しては 2.0 低い値を示した。これは、水和物である水酸化マグネシウムと水酸化カルシウムの溶解度の差が影響しているものと考えられる。

[参考文献]

- 1) 社団法人セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル第二版, pp.38, 1994.
- 2) 社団法人セメント協会：セメントの常識, pp.9-13, 2009.
- 3) 府川裕史, 御手洗義夫, 早野公俊：セメント改良土の配合設計におけるフミン酸の強度発現遅延剤としての応用に関する検討, 第 9 回地盤改良シンポジウム論文集, pp.161-164, 2010.
- 4) H.Yoshizawa, Y.Hosoya, R.Okumura, M.Sumii, T.Yamada: JGS TC Report, Factors affecting the quality of treated soil during execution of DMM, Grouting and Deep Mixing, Vol.2, pp.931-937, THE SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND IMPROVEMENT GEOSYSTEMS, 1997
- 5) 原久夫, 江戸孝昭：赤土濁水のろ過に関する実験的研究, 土木学会関西支部研究発表会, pp.339-340, 2010.
- 6) 独立行政法人土木研究所：建設発生土利用技術マニュアル第三版, pp.27-30, 2004.

- 7) 社団法人セメント協会：JCAS L-01-2005，セメント系固化材による改良体の強さ試験方 4 法，2006.
- 8) 日本建築センター：改訂版建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針ーセメント系固化材を用いた深層・浅層混合処理工法ー，pp.218-228，2002.
- 9) 社団法人セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル第四版，pp.45-50，2012.
- 10) 霞誠司他：セメント系改良土による関東ローム改良土の基礎的研究(その 2)，第 33 回地盤工学研究発表会，pp.2305-2306，1998.
- 11) 社団法人セメント協会：火山灰質粘性土のセメント改良体における強度発現に関する検討 アロフェンの影響について，セメント・コンクリート，No.780，pp.3-8，2012.
- 12) 東京化学同人：化学辞典，pp.703-705，1994.

3章 酸化マグネシウム改良土の特徴

3.1 はじめに

2章では、各地から採取した土質試料に酸化マグネシウムを添加混合して改良土とし、一軸圧縮強さ、pHを測定して、試料土の土質特性が酸化マグネシウム改良土の強度に及ぼす影響について検討した。本章では、改良土の配合設計を行うにあたって、改良土の基本的な性質である、

- (1) 固化材添加量と一軸圧縮強さとの関係
- (2) 材齢による改良土の一軸圧縮強さの変化
- (3) 粉体混合改良土とスラリー混合改良土との強度特性の違い
- (4) 硬化後の改良土の耐久性

に着目した。

セメント系改良土における(1)~(4)については、文献1,2)に取りまとめられている。

(1) 固化材添加量と一軸圧縮強さとの関係について

地盤改良における配合設計では、改良土の必要強度に応じて固化材の添加量を変化させることで、配合設計の基本としている。酸化マグネシウムにおいても、従来のセメント系固化材と同様に添加量~強度の関係を把握しておく必要がある。

(2) 改良土の材齢による一軸圧縮強さの変化について

改良土は、固化材を添加・混合後から経過日数（材齢という）とともに強度が増す。セメント系固化材では、材齢28日の一軸圧縮強さをもって、配合設計が実施されることが多い。酸化マグネシウム改良土の材齢に伴う強度変化を調べることにより、配合設計時の適切な材齢を設定しておく必要がある。

(3) 粉体混合改良土とスラリー混合改良土との強度特性の違い

土と固化材を混合する方法は、大きく分けて固化材をそのままの状態（粉体）で用いる場合と、固化材を水に溶かしたスラリー添加とする場合がある。地盤改良工事においては、改良目的や規模によって両者が使い分けられている。粉体添加の場合は、改良強度の大きさの面では有利であるが、混合後に締固めが必要である。スラリー添加の場合は、改良強度の大きさの面では粉体混合に劣るが、締固めを必要としない場合が多い。酸化マグネシウムを固化材として用いる場合に、粉体添加とスラリー添加における改良土の強度特性を把握しておくことは重要である。

(4) 硬化後の改良土の耐久性

改良土の耐久性、すなわち長期強度特性は、セメント系改良土についてはセメント協会³⁾の報告があり、地中環境下で長期間安定傾向にあるとされている。酸化マグネシウム改良土の適用範囲を知る上で、地中環境下以外、たとえば野外曝露環境、水浸環境等さまざまな環境下での改良土の強度特性を把握しておく必要がある。野外曝露環境では、日射による気温

変化や試験期間中の降雨による湿度変化にランダムに曝される。ただし、その評価には数年～数十年の試験期間が必要となるため、併せて乾湿繰り返し試験を行うこととした。これは、改良土の劣化促進試験と位置づけており、湿潤状態と乾燥状態を繰り返すことにより、改良土中の硬化物生成に必要な珪素、アルミニウム、鉄イオンを溶出させ改良土の強度特性を低下させるものと考えている⁴⁾。

3.2 実験方法

3.2.1 実験材料

実験に用いた試料土は2章・表2.1に掲げた34種の土質材料のうち、まさ土Cおよび火山灰土Aの2種類とした。

表3.1に試料土の土質特性を示す。表2.1に示した試験項目に加えて、粒度試験および液性限界・塑性限界試験を行った。

まさ土Cは、生駒山麓の大阪府交野市において採取した風化状態の異なるものから選択したもので、風化度が小さく細粒分の少ない砂質土である。火山灰土Aは、表2.1に示した関東ロームのうち、火山灰土の特徴の一つである非晶質成分量と密接な関係があるとされる

表3.1 試料土の土質特性

項 目		まさ土C	火山灰土A
自然含水比	(%)	16.3	132.7
土粒子の密度	(g/cm ³)	2.67	2.81
粒 礫分	(%)	11.5	0
度 砂分	(%)	76.2	0
分 シルト分	(%)	9.8	82.2
布 粘土分以下	(%)	2.7	17.8
液性限界	(%)		164
塑性限界	(%)	NP	92.3
塑性指数			71.7
強熱減量	(%)	3.4	15.4
土のpH		5.9	6.5
締固め密度	(g/cm ³)	1.968	1.361

強熱減量値⁵⁾が平均的なものを用いた。まさ土、火山灰土はどちらも地盤工学上、「特殊土」に分類されているが⁶⁾、セメントや石灰系固化材による地盤改良の対象土としての実績が多く、西日本および東日本の代表的な地盤材料として、両者を実験に用いることとした。酸化

マグネシウムは、2章と同様の天然マグネサイトを700～800℃で焼成した軽焼マグネシアを用いている。これに、消石灰、生石灰、普通ポルトランドセメント（NPC）を加えて固化材は4種類とした。実験に用いた固化材のうち、生石灰は、土中の水分と急激に反応して消石灰を生成して土のコンシステンシーを改善し、その後徐々に土を化学反応の相手として利用することで、土中の粘土鉱物を質的に変化させるところに特徴があり、高含水比の粘性土に有効とされている⁷⁾。

3.2.2 実験方法

(1) 固化材添加量

固化材添加量と改良土の一軸圧縮強さとの関係を調べる実験では、固化材の添加方法は粉体とし、固化材添加量は表3.1に示す締固め密度を基準とし、80、100、120kg/m³の3水準とした。これは、固化材を粉体添加とする一般的な表層安定処理に用いられる固化材添加量が100kg/m³程度であることを考慮したものである。

改良土の材齢による一軸圧縮強さの変化を調べる実験では、固化材の添加方法は粉体とし、固化材添加量は表3.1に示す締固め密度を基準に、一律120kg/m³とした。

粉体混合改良土とスラリー混合改良土との強度特性の違いを調べる実験では、固化材は酸化マグネシウムと普通ポルトランドセメントの2種類とした。これは、消石灰は固化材自体に水酸基を持ちスラリー添加に不向きであること、生石灰は水と発熱を伴って急激に反応するため、スラリー添加ができないことによる。固化材添加量は表3.1に示す締固め密度を基準に、120、170kg/m³の2水準とした。これは、スラリー添加とすることで、固化時の強度が低下することを想定して、粉体添加とした実験より固化材添加量を多くしたものである。

改良土の耐久性を調べる実験のうち、野外曝露試験では、対象土はまさ土とした。対象土をまさ土としたのは、関東ロームは含水比が大きく、曝露や乾湿繰り返し環境下で含水比の変動が改良土の一軸圧縮強さに大きく影響を及ぼすと考えたためである。固化材の添加方法は粉体とし、あらかじめ予備配合実験を行って、材齢7日時の一軸圧縮強さがほぼ同じとなるように、固化材ごとに添加量を調整した。乾湿繰り返し試験では、固化材の添加方法は粉体とし、固化材添加量は表3.1に示す締固め密度を基準に、一律120kg/m³とした。

(2) 供試体作製方法

供試体作製方法は、2章の実験と同様とした。なお、固化材のスラリー添加供試体については、JGS 0821「安定処理土の締固めをしない供試体作製方法」により行った。

(3) 養生条件と一軸圧縮試験に供する材齢

固化材添加量と改良土の一軸圧縮強さとの関係を調べる実験では、食品用ラップフィルムに包んだ浸潤・室温養生として、材齢7日および28日で一軸圧縮試験を行った。

改良土の材齢による一軸圧縮強さの変化を調べる実験では、供試体の養生は食品用ラップフィルムに包んだ浸潤・室温養生とした。養生をラップフィルムに包んだのは、自然乾燥による土中の反応水の欠乏を防ぐためである。一軸圧縮試験に供する材齢は、7、30、60、90、120、150、180、210日として材齢による強度変化が測定できるようにした。また、一軸圧

縮試験後の供試体を用いて地盤工学会基準「土懸濁液の pH 試験方法」(JGS 0211-2009)により改良土の pH を測定した。

粉体混合改良土とスラリー混合改良土との強度特性の違いを調べる実験では、供試体の養生は食品用ラップフィルムに包んだ浸潤・室温養生として、材齢 7 日および 28 日で一軸圧縮試験を行った。

改良土の耐久性を調べる実験では、材齢 7 日で型枠より脱型し、写真 3.1 に示すように、野外の風通しの良い木陰に養生箱を設置し、供試体をラップせずに放置した。曝露期間は 100 日間とし、その間の気温、降水量を測定した。100 日間野外放置後、一軸圧縮強さおよび改良土の pH を測定した。



写真 3.1 野外曝露試験供試体設置状況

乾湿繰り返し試験における乾燥状態は乾燥炉、湿潤状態は水道水への水浸とした。繰り返し方法は前川⁸⁾が行った実験を参考とし、乾燥炉の温度は、急激な乾燥をさけるため 40℃とした。配合等、供試体作製条件は、曝露試験と同様で材齢 7 日時点の強度がほぼ同じとなるよう、各固化材の添加量を調整した。材齢 7 日で脱型後、水浸条件から試験を開始し、水浸、炉乾燥それぞれ 7 日を 1 サイクルとして乾湿状態を 7 サイクル繰り返した。7 サイクル終了時点での材齢は約 100 日となり、野外曝露試験における放置期間とほぼ同じとなっており、7 サイクル終了後に一軸圧縮試験および pH 試験を行った。酸化マグネシウム改良土については乾湿繰り返し条件と、気中養生(実験室内放置)、水浸養生条件における強度を比較するため、固化材添加量 120kg/m³の供試体を作製し、同材齢で一軸圧縮試験を行った。

水浸、乾燥の各試験方法を表 3.2 にまとめた。図 3.1 に耐久性試験の流れを示した。図 3.1 に示す上段は、供試体の水浸から始める乾湿繰り返し試験のサイクルを示しており、2 週間で乾湿 1 サイクルとなり、これを 7 回繰り返した。下段は、曝露状態であり、約 100 日間野外に放置した。

表 3.2 乾湿繰り返し試験方法

湿潤 ↓ 乾燥	湿潤(水浸)状態の供試体を気中(20℃恒温室)で1時間放置後に質量を測定し、乾燥炉で乾燥させた。乾燥炉の温度は、室温から徐々に上昇させ 40±2℃で1週間放置した。
乾燥 ↓ 湿潤	1週間炉乾燥後の供試体の質量を測定後、供試体を霧吹きで徐々に湿潤状態とした後、水槽に水浸して1週間水中養生とした。水温は約 20℃とした。

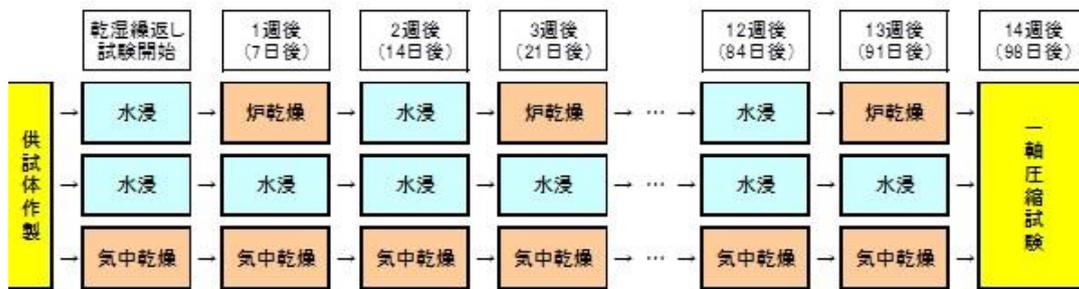


図 3.1 乾湿繰り返し試験の流れ

(水浸養生・気中養生は酸化マグネシウム改良土のみ)

表 3.3 に試験パラメータをまとめた。試験 No.(1)では、養生条件を湿潤状態として、固化材添加量と改良土の一軸圧縮強さとの関係を調べた。試験 No.(2)では、養生条件を湿潤状態として、材齢 210 日までの材齢による酸化マグネシウム改良土の強度変化を調べた。試験 No.(3)では、養生条件を湿潤状態として、固化材の添加方法（粉体添加・スラリー添加）が改良土の強度に及ぼす影響について調べた。試験 No.(4)では、養生条件を野外曝露および乾湿繰り返し状態とし、改良土の耐久性について調べた。

表 3.3 試験パラメータのまとめ

試料土	試験No.	固化材の種類	固化材の添加量	養生条件(材齢)
・まさ土C ・火山灰土A	(1)	<ul style="list-style-type: none"> ・酸化マグネシウム ・消石灰 ・生石灰 ・普通ポルトランドセメント 	[粉体添加] 80, 100, 120kg/m ³	・湿潤養生(7,28日)
	(2)	<ul style="list-style-type: none"> ・酸化マグネシウム 	[粉体添加] 120kg/m ³	・湿潤養生 (7,30,60,90,120,150, 180,210日)
	(3)	<ul style="list-style-type: none"> ・酸化マグネシウム ・普通ポルトランドセメント 	[粉体・スリ-添加] 120,170kg/m ³	・湿潤養生(7,28日)
・まさ土C	(4)	<ul style="list-style-type: none"> ・酸化マグネシウム ・普通ポルトランドセメント 	[粉体添加] 材齢7日強度が同じとなる添加量	・野外曝露(100日) ・乾湿繰り返し (7サイクル100日)

3.3 実験結果および考察

3.3.1 固化材添加量と一軸圧縮強さとの関係

図 3.2 にまさ土に対する固化材添加量と材齢 28 日における一軸圧縮強さとの関係を示す。まさ土に対する改良効果（一軸圧縮強さ）が大きいのは、普通ポルトランドセメントおよび消石灰であり、酸化マグネシウムは他の 3 種類の固化材と比較して改良効果は小さい。

普通ポルトランドセメントは、水と反応してセメントペーストとなり自硬性も大きいため、改良効果も大きい。添加量が 100~120kg/m³にかけて強度増加が見られないのは、反応に必要な水分が不足しているためと考えられる。

消石灰は、まさ土の改良材として、土間や版築材料として利用されており、普通ポルトランドセメントに次ぐ改良効果を示した。消石灰の土に対する固化機構については、瀬戸⁹⁾、西田ら¹⁰⁾らが土に含まれる非晶質成分から考察している。添加量が 80~120kg/m³にかけて強度増加が見られないのは、普通ポルトランドセメントと同様に、反応に必要な水分が不足しているためと考えられる。

生石灰改良土は、固化材の添加量とともに、一軸圧縮強さが減少するという結果となった。生石灰は、土と混合直後に水と反応して消石灰を生成した後、消石灰と土に含まれる非晶質成分との反応が進み、硬化物を形成すると考えられる。したがって、消石灰添加時より、大量の水分が必要となる。また、水との反応は発熱を伴うため、土中の一部の水分が蒸発したことも水分量が不足した原因と考えられる。

酸化マグネシウムは、添加量の増加に伴い改良土の強度は増大した。酸化マグネシウムについても、消石灰や生石灰と同様に固化材そのものに自硬性はなく、改良土の強度発現には、土に含まれる反応成分が必要であると考えられる。同じ酸化物である生石灰が水分量不足をきたしているのに対し、酸化マグネシウムではそれが生じていない。これは、水和物である酸化カルシウムと水酸化マグネシウムとの溶解度の違いから推察できる。すなわち、水酸化カルシウムは水に比較的溶け、強アルカリ性を示すのに対し、水酸化マグネシウムは水にほとんど溶解せず、水溶液の pH も低い。したがって、酸化マグネシウムは水との反応も急激に起こらず、穏やかに水和物である水酸化マグネシウムが生成されるものと考えられる。なお、5章で詳述しているように、酸化マグネシウムは製造方法によって反応性が異なり、発熱を伴う水和反応を起こす場合もある。酸化マグネシウムの土に対する反応・固化機構については、4章でも議論している。

図3.3に火山灰土に対する固化材添加量と材齢28日における一軸圧縮強さとの関係を示す。まさ土改良土とは大きく異なり、酸化マグネシウムがもっとも改良効果を示した。火山灰土に対する酸化マグネシウム改良土の一軸圧縮強さは、まさ土に対する場合とほぼ同程度の値となった。このことから、生石灰、消石灰、普通ポルトランドセメントのようなカルシウムを主成分とする固化材は、火山灰土に含まれる水和反応に対する阻害成分の影響を受けているものと考えられる。一方、酸化マグネシウムは、これらの阻害成分の影響を受けにくいといえ、強度発現に必要な硬化物を生成しやすいものと考えられる。

普通ポルトランドセメントは、火山灰土に含まれる水和反応に対する阻害成分（アロフェ

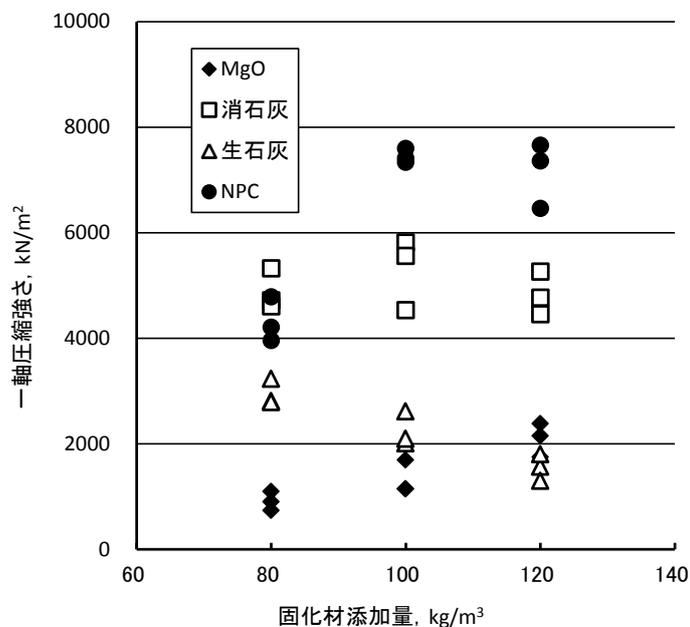


図 3.2 固化材添加量と材齢 28 日における一軸圧縮強さとの関係 (まさ土)

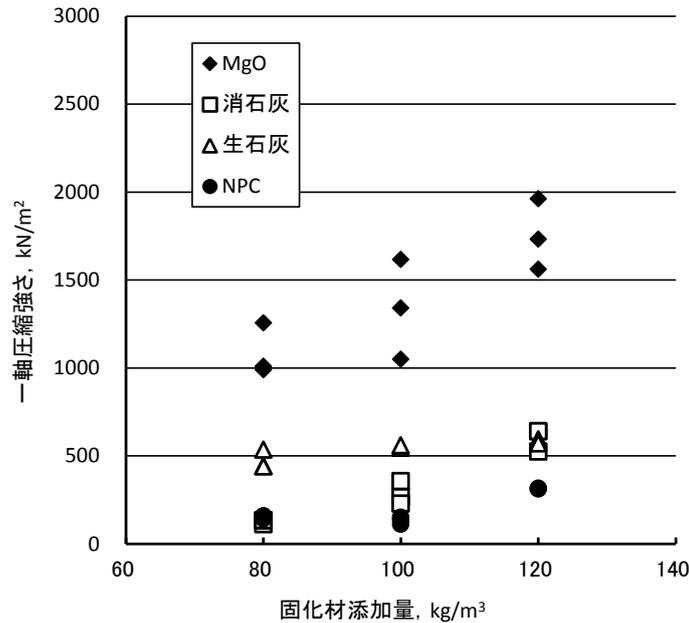


図 3.3 固化材添加量と材齢 28 日における一軸圧縮強さとの関係（火山灰土）

ン) の影響で¹¹⁾、添加量が少ないと改良土の強度は非常に小さい。文献 11)によれば、土の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 吸着量と土に含まれるアロフェンの量の間には関係が認められ、アロフェンが多いと、セメントの硬化反応に重要なエトリンガイド等の水和物の生成が阻害され、強度発現にも影響を及ぼすとしている。添加量が $100\sim 120\text{kg/m}^3$ にかけて若干の強度増加が見られるため、さらに添加量を増加させれば、普通ポルトランドセメント改良土の強度は増大するものと考えられる。

3.3.2 改良土の材齢 7 日と 28 日における強度比較

図 3.4 にまさ土改良土の材齢 7 日と 28 日における強度比較を示す。材齢 28 日／材齢 7 日強度比は、おおむね 1.2 倍から 2 倍の範囲となった。普通ポルトランドセメント改良土の強度比がもっとも小さく 1.2 倍、酸化マグネシウム改良土の強度比がもっとも大きく 2 倍程度の値となった。セメント等固化材における事例¹²⁾によると、材齢 28 日／材齢 7 日強度比は、1.5 倍を中心に 1.2～2 倍程度の範囲に分布しており、試験結果はこれらとほぼ同様であるといえる。酸化マグネシウム改良土の強度比が 2 倍程度と比較的大きい値を示したことから、酸化マグネシウムとまさ土との固化反応は、比較的緩やかに進行するものと考えられる。

図 3.5 に火山灰土改良土の材齢 7 日と 28 日における強度比較を示す。材齢 28 日／材齢 7 日強度比は、おおむね 1.1 倍から 1.5 倍の範囲となり、まさ土改良土と比較して小さい。消石灰、生石灰は、火山灰土に対する改良効果が小さく、材齢 7 日から材齢 28 日にかけての強度増加もほとんどみられない。酸化マグネシウム改良土の強度比は 1.5 倍程度であり、まさ土改良土の強度比と比較して小さい。これは、火山灰土の初期含水比が大きく、材齢初期の段階で水和物である水酸化マグネシウムが生成されやすい環境にあったため、水和反応によ

って土中水分が消費され、みかけの含水比低下によるコンシステンシーの改善が生じたためと考えられる。¹³⁾。

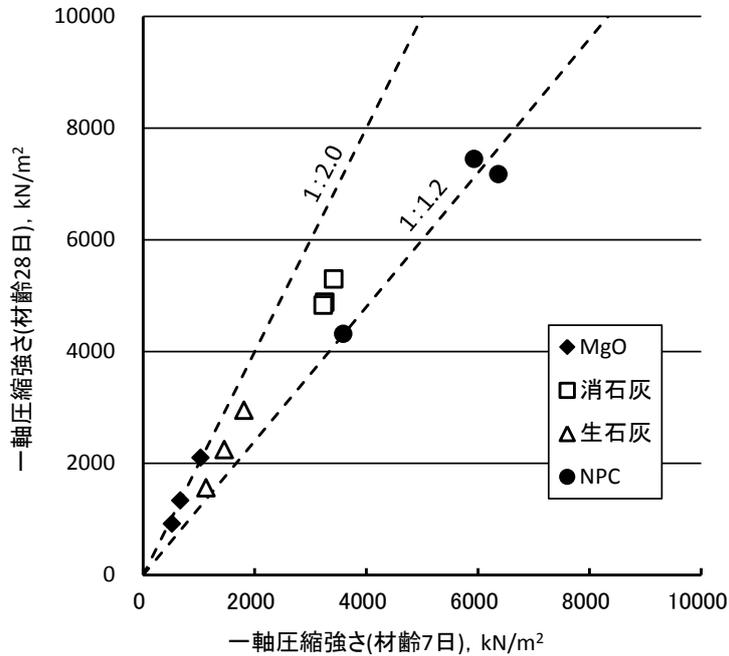


図 3.4 まさ土改良土の材齢 7 日と 28 日における強度比較

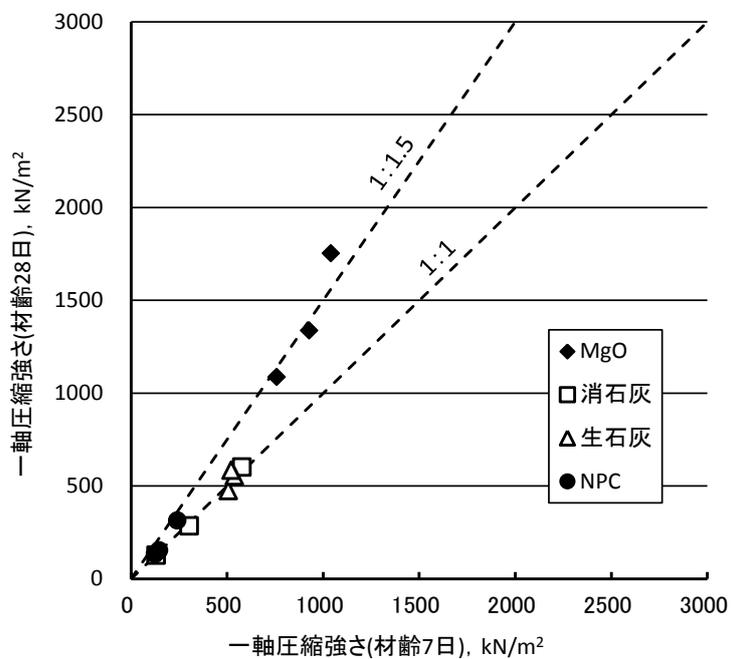


図 3.5 火山灰土改良土の材齢 7 日と 28 日における強度比較

3.3.3 酸化マグネシウム改良土の材齢に伴う強度変化

図 3.6 に酸化マグネシウム改良土の材齢 210 日までの材齢に伴う強度変化を示す。改良土の一軸圧縮強さは材齢とともに増加傾向にはあるが、まさ土と火山灰土とで大きく異なる。まさ土改良土では、材齢 60 日にかけて強度が大きく増加した後、徐々にではあるが強度増加傾向が継続している。一方、火山灰土改良土では、材齢 30 日以降、ほとんど強度増加は見られない。したがって、酸化マグネシウムは、土に含まれる反応成分と反応して硬化が進行するため、対象土の種類によって、材齢に伴う強度変化特性についても違いが生じるものと考えられる。

3.3.4 粉体改良土とスラリー改良土との強度比較

図 3.7 に酸化マグネシウムおよび普通ポルトランドセメントを用いた改良土の粉体添加とスラリー添加における強度比較を示す。セメント等固化材を用いた事例によれば¹⁴⁾、一般に、同じ固化材添加量であれば、粉体添加としたときの方がスラリー添加よりも強度は大きく、スラリーの固化材に対する水比が大きいほど強度は小さい。図 3.7 に示す普通ポルトランドセメント改良土では、スラリー添加にすることで、一軸圧縮強さが約 1/2 となっていることがわかる。なお、火山灰土に対する普通ポルトランドセメント改良土のスラリー強度は非常に小さい。

酸化マグネシウムは、スラリー添加とすることで強度は大きく低下し、粉体添加時と比較して約 1/4 となっている（まさ土）。一方、火山灰土に対しては強度低下はほとんどなく、スラリー添加改良土と粉体添加改良土の一軸圧縮強さは、ほぼ同じ大きさとなった。これは、火山灰土は初期含水比が大きく土中水分が豊富であり、スラリー添加に伴う余剰水の影響が小さかったものと考えている。対象土がまさ土の場合のように、粉体添加時と比較して強度低下が大きいと、所定の強度を得るための固化材添加量が多くなり、改良コストの増加に結び付くので、目標強度が大きい場合は、粉体添加とすることが望ましいと考えられる。

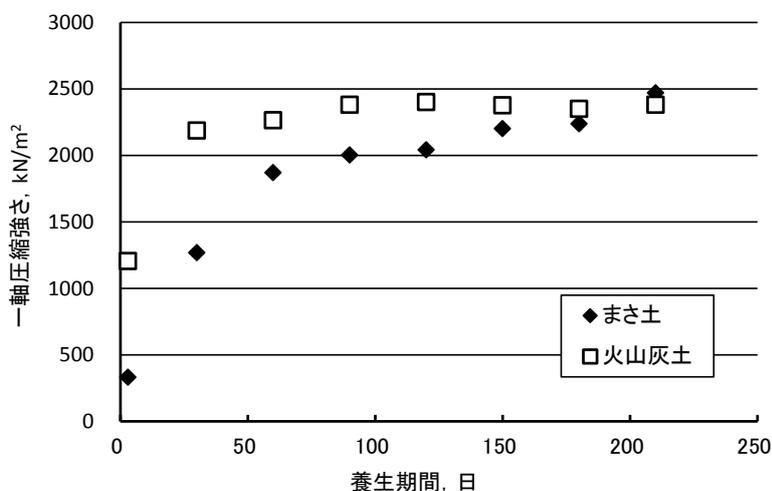


図 3.6 酸化マグネシウム改良土の材齢に伴う強度変化

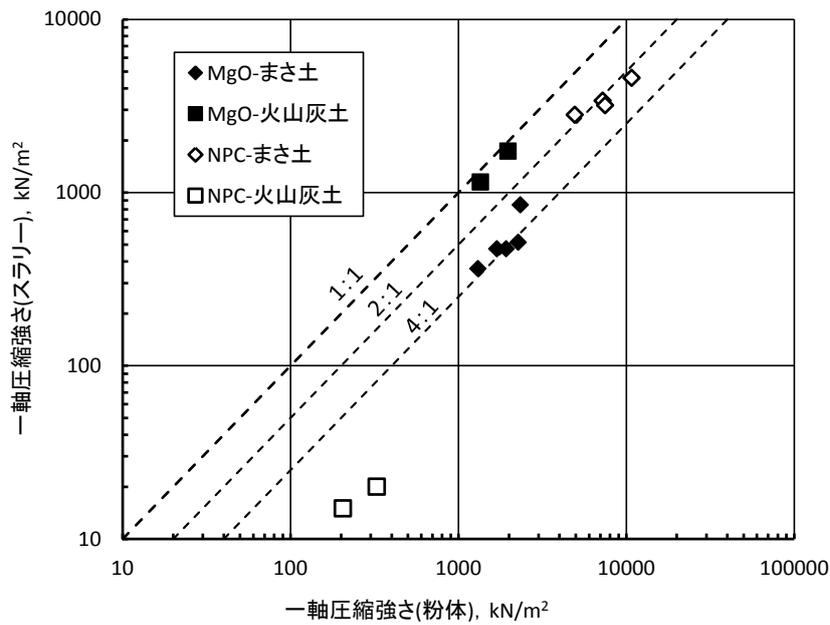


図 3.7 粉体改良土とスラリー改良土との強度比較

3.3.5 劣化促進試験後における改良土の耐久性

図 3.8 に、材齢 7 日における一軸圧縮強さがほぼ同じになるように固化材量を決定する目的で行った予備配合試験結果を示す。図 3.8 から、材齢 7 日における目標強度を 1800kN/m^2 と設定して、酸化マグネシウム添加量を 300kg/m^3 、普通ポルトランドセメント添加量を 50kg/m^3 とそれぞれ決定した。

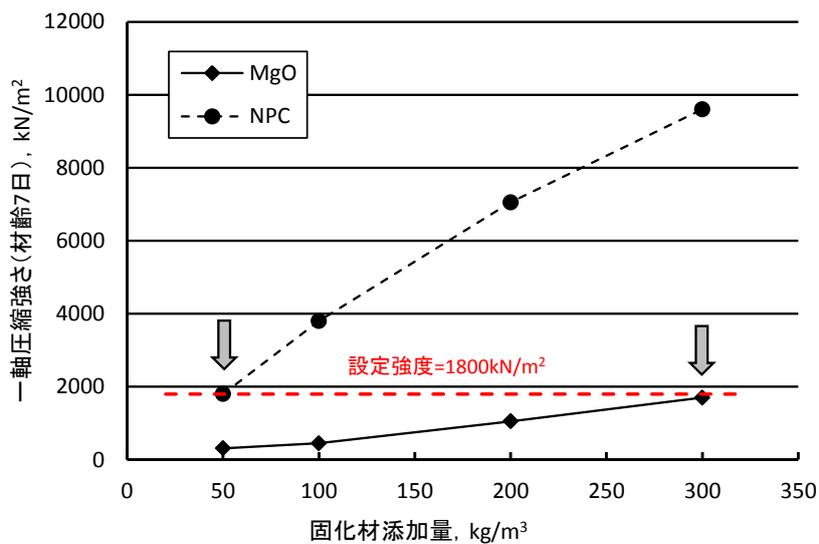


図 3.8 予備配合試験による固化材添加量の決定

図 3.9 に乾湿繰り返しや野外放置を行った改良土の一軸圧縮強さを示した。酸化マグネシウム改良土の一軸圧縮強さは湿潤養生下と比較して大きく、特に野外曝露条件下では湿潤養生下の 3 倍程度の値を示した。これは、酸化マグネシウムの添加量が多量となったことが、影響しているものと考えられる。5 章で示すように、軽焼マグネシアは水和物である水酸化マグネシウムの強度は小さいが、乾燥状態に晒されることにより、塑性化して水酸化マグネシウム自体の強度が大きくなったものと考えられる。

一方、セメント改良土の一軸圧縮強さは、野外曝露試験、乾湿繰り返し試験後では、湿潤養生下と比較して低下し、1/2 以下となった。これは、乾燥条件下で水和反応が阻害されたことや、土とのポゾラン反応が生じる前に、気中下で炭酸化が促進されたことが原因しているものと考えられる¹⁵⁾。

図 3.10 に乾湿繰り返しや野外曝露放置を行った改良土の pH を示した。乾湿繰り返しや野外曝露放置を行った酸化マグネシウム改良土の pH が湿潤養生下と比較して変化がなかった。酸化マグネシウムは、空気中の水蒸気や二酸化炭素と反応して、塩基性炭酸マグネシウムを生成するとされているが¹⁶⁾、炭酸マグネシウムの水に対する溶解度が約 0.1g/リットルと非常に小さく、改良土の pH に影響を及ぼさなかったためと考えられる。植生に直接的に影響を与える土壌の pH は、アルカリ側で 10 以上とされており、酸化マグネシウム改良土が pH=10 程度を維持していることから、防草効果の持続性が大きいものと考えられる。

一方、セメント改良土の pH は大きく低下し、特に曝露試験後ほぼ中性域の pH=8.8 となり、気中下で炭酸化が促進されていることが明らかとなった。

酸化マグネシウム改良土の乾湿繰り返し下や曝露環境下における高耐久性は、曝露環境に晒される用途、たとえば、土舗装などに有効である。

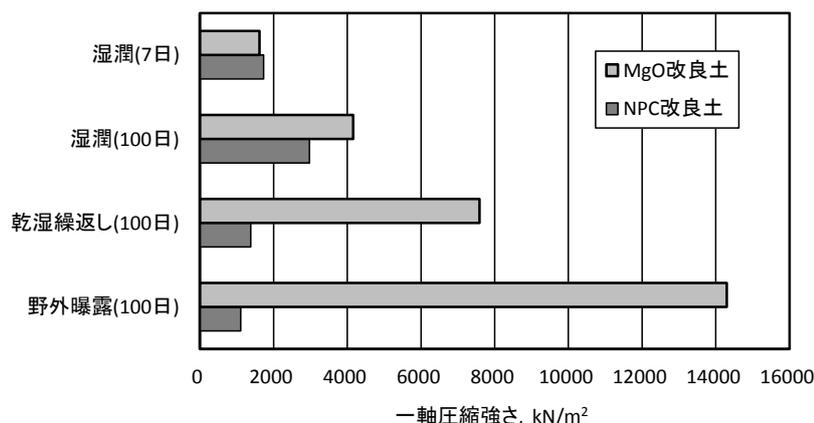


図 3.9 劣化促進試験後における改良土の耐久性

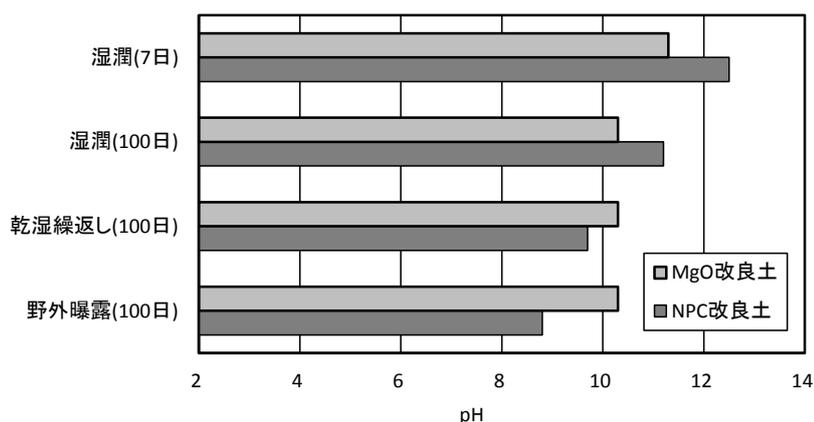


図 3.10 劣化促進試験後における改良土の pH

3.4 まとめ

酸化マグネシウム改良土の配合設計を行うにあたっての改良土の基本的な性質を調べるため、対象土としてまさ土および火山灰土を選択し、養生環境を変化させた配合実験を行った。その結果を以下に要約する。

- (1) 酸化マグネシウム添加量の増加に伴い酸化マグネシウム改良土の一軸圧縮強さは増加傾向にあり、目標強度を設定した配合試験による配合量の決定が可能である。
- (2) 酸化マグネシウム改良土の材齢に伴う強度変化は対象土の種類によって異なり、まさ土に対しては長期的に緩やかな強度増加で期待でき、火山灰土に対しては比較的短期材齢で大きな強度が得られる。したがって、配合強度を設定するための材齢は、土質や使用用途を考慮する必要がある。
- (3) 酸化マグネシウムをスラリー添加としたとき、まさ土に対してはセメントのスラリー添加時と比較して強度低下が大きい、火山灰土に対しては粉体添加時と比較して強度低下がほとんどない。したがって、粉体添加時と比較して強度低下が大きい土質を対象とした場合、所定の強度を得るための固化材添加量が多くなり、改良コストの増加に結び付くので、目標強度が大きい場合は、粉体添加とすることが望ましいと考えられる。
- (4) 酸化マグネシウム改良土は、乾湿繰返しや曝露環境下においても劣化せず、材齢とともに強度は増加傾向にあり、高い耐久性を示す。
- (5) 酸化マグネシウム改良土の pH はセメント改良土と比較してやや低く、曝露環境下において変動が小さい。これは、空気中の水蒸気や二酸化炭素と反応して、生成した塩基性炭酸マグネシウムの水に対する溶解度が非常に小さく、改良土の pH に影響を及ぼさなかったためと考えられる。

- (6) 酸化マグネシウム改良土は乾湿繰り返し下や曝露環境下において劣化せず、pHの低下が少ないことから、防草対策が必要な土舗装等に有効であると考えられる。

[参考文献]

- 1) 社団法人セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル第四版，pp.42-58，2012.
- 2) CDM 研究会：セメント系深層混合処理工法 CDM，設計と施工マニュアル，pp.75-106，1991.
- 3) 社団法人セメント協会：セメント系固化材を用いた改良体の長期安定性に関する研究，2002.
- 4) 松川尚史，井上啓司，澤幸平，中山義久，西田一彦：古い土構造物の土性とその劣化に関する考察，第 42 回地盤工学研究発表会，pp.149-150，2007.
- 5) 宋永焜：火山灰質粘性土のアロフェン含有量がその物理的性質に及ぼす影響，土壤の物理性，pp.43-54，1999.
- 6) 社団法人地盤工学会：地盤材料の方法と解説二分冊の 2，pp.988-1020，2010.
- 7) 日本石灰協会土質安定処理工法委員会編：石灰による土質安定処理工法，山海堂，1970.
- 8) 前川晴義：養生中に乾湿条件与えたセメント改良土の強度特性，第 35 回地盤工学研究発表会，pp.1213-1214，2000.
- 9) 瀬戸陸郎：石灰安定処理工法(I)，Gypsum & Lime，No.129，pp.38-43，1974.
- 10) 西田一彦，佐々木清一，久保井利達：まさ土の非晶質特性と石灰安定処理効果，材料，Vol.37，No.422，pp.21-25，1988.
- 11) 社団法人セメント協会：火山灰質粘性土のセメント改良体における強度発現に関する検討 アロフェンの影響について，セメントコンクリート，No.780，Vol.2，pp.3-8，2012.
- 12) CDM 研究会：セメント系深層混合処理工法 CDM，設計と施工マニュアル，p.85，1991.
- 13) 山田哲司，西形達明：酸化マグネシウムと高炉スラグ微粉末からなる混合固化材を用いた改良土の強度特性，地盤工学ジャーナル，Vol.10，No.1，pp.57-65，2015.
- 14) 社団法人セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル第四版，pp.43-44，2012.
- 15) 社団法人セメント協会セメント系固化材技術専門委員会：セメント系固化材を用いた改良体の長期安定性に関する研究，材齢 22 年試験結果報告，セメント・コンクリート，No.804，pp.9-14，Feb，2014.
- 16) 藤森新作，小堀茂次：自然環境にやさしい土壌硬化剤マグホワイトの開発，農業土木学会誌，第 68 巻，第 12 号，pp.1297-1300，2000.

4 章 改良土の X 線回折と土に含まれる非晶質成分の 分析による反応生成物の考察

4.1 はじめに

地盤改良材の土に対する固化機能は、①地盤改良材自体が土に含まれる水分と反応として固化体を形成する(自硬性)、②地盤改良材の化学成分と土に含まれる化学成分とが反応して新たな化合物を生成し、これが固化体となる—の 2 ケースが考えられる。

セメントまたはセメント系固化材においては、①を水和反応、②をポゾラン反応と呼び、土に対する固化機構が説明されており¹⁾、反応①は比較的早期に、反応②は長期間かけてゆっくりと進行するとしている。

酸化マグネシウムは水と反応すると水和して水酸化マグネシウムを生成する。これまでの実験²⁾によると、天然マグネサイトから製造した酸化マグネシウムスラリー(水固化材比=80%)の強度は約 300kN/m²、海水から製造した酸化マグネシウムスラリー(水固化材比=67%)の強度は約 3800kN/m²であり、セメントスラリー(水固化材比=60%で約 35000kN/m²)と比較すると非常に小さい。また、土の種類によって改良土の強度が大きく異なることより、土に含まれる化学成分が酸化マグネシウム改良土の強度に影響を及ぼしているものと推察される。

生石灰や消石灰はアロフェン、ハロイサイト等の粘土鉱物との反応によってもたらされる反応生成物が高い改良効果を示す要因であるといわれている³⁾。酸化マグネシウム改良土の一連の性質は、酸化マグネシウムと同様に単純な化合物である生石灰や消石灰の土に対する固化機能と類似したものと推察される。

本章では、酸化マグネシウムが関東ロームのような火山灰質粘性土に対して、高い固化機能を有することから、火山灰質粘性土に含まれる化学成分が酸化マグネシウムと反応して硬化物を生成するものと考え、改良土の X 線回折を行って反応生成物を調べた。また、生石灰や消石灰の土に対する反応機構と同様に、酸化マグネシウムについても土に含まれる非晶質の化学成分である SiO₂、Fe、Al などが、改良土の強度発現に影響を及ぼすものと考え、これらの定量分析を行い、土中の非晶質成分量と改良土の強度との関係について考察した。

4.2 酸化マグネシウム改良土の X 線回折による固化機構の考察

4.2.1 実験材料

改良土の対象土はこれまでの実験で、改良土としたとき酸化マグネシウムとの相性がよいと考えられるまさ土および関東ロームとした。表 4.1 に実験に用いたまさ土、関東ローム、酸化マグネシウムの化学成分分析(スケール分析)結果を示した。まさ土は、一次鉱物として長石、石英、雲母が主であり、風化の過程でハロイサイトなどの二次鉱物を有するように

なり，非晶質成分としてシリカ（ SiO_2 ），アルミナ（ Al_2O_3 ），鉄（ Fe_2O_3 ）が多く存在するようになる。

一方，火山灰質粘性土である関東ロームなどは，アロフェンやハロイサイトなど非晶質成分を非常に多く含み，表 4.1 に示すように生石灰や消石灰と同様に酸化マグネシウムとの反応が考えられるシリカ（ SiO_2 ），アルミナ（ Al_2O_3 ），鉄（ Fe_2O_3 ）の含有量が多い。

表 4.1 実験材料の化学成分分析結果

化学成分	まさ土 (%)	関東 ローム (%)	酸化マグネ シウム (%)
Na_2O	0	3.2	0
MgO	0	0	96.5
Al_2O_3	38.3	28.3	0.2
SiO_2	15.1	56.4	1.3
SO_3	5.5	2.9	0
K_2O	2.7	2.3	0
CaO	2.9	2.5	1.5
TiO_2	6.1	0	0
FeO	29.2	4.4	0.6

4.2.2 改良土の作製

酸化マグネシウム添加量は 120 kg/m^3 とした。2 章表 2.1 に示した調整含水比状態で，試料土と酸化マグネシウムをソイルミキサーで十分に混合したのち，二つ割モールドにセメント協会試験方法により締め固めて供試体を作製した。材齢 7 日後モールドから脱型し，食品用ラップフィルムに包んで室温で湿潤養生とした。

X 線回折は，改良土の材齢による強度変化と反応生成物の生成状況との関連を調べることを目的とした。材齢 7 日，30 日，60 日，120 日，180 日で一軸圧縮試験を行い，試験後の破壊供試体を自然乾燥させ，X 線回折試料とした。まさ土およびその改良土については一次鉱物の含有量が多くなり，回折結果への影響が非常に大きくなることが懸念されるため，粉碎した試料に蒸留水を加えて懸濁液にし，その上澄み液を採取したのち遠心分離を行い，その沈殿物を自然乾燥させた後，X 線回折試験体とした⁴⁾。X 線回折には Cu 回転対陰極型 X 線発生装置を備えた理学電機（株）製回折装置（RU-200）を用い，測定は，ディフラクトメーター法により室温で行った。

4.2.3 X 線回折結果⁵⁾および考察

(1) 酸化マグネシウムおよびその水和物の X 線回折試験結果

図 4.1，図 4.2 に酸化マグネシウムおよびその水和物の X 線回折チャートを示す。図中には，主な回折ピークである M1（酸化マグネシウム），M2（水酸化マグネシウム）を記入してい

る。なお、水和物は、酸化マグネシウムを水道水でスラリーとし（水/固化材比=100%），真空タンク内で空気を遮断した状態で3ヶ月養生して試験体とした。

図4.1に示す酸化マグネシウムのX線回折チャートによると、酸化マグネシウムの明瞭な回折ピークがみられる。図4.2に示す水和物のX線回折チャートから、酸化マグネシウムの水和物である水酸化マグネシウムの明瞭な回折ピークがみられる。図4.3は、市販の水酸化マグネシウム（工業品）のX線回折チャートであり、図4.2に示す酸化マグネシウムスラリーの固化物は、これとほぼ同様の水酸化マグネシウムの回折ピークを示しており、酸化マグネシウムは水と反応して容易に水酸化マグネシウムを生成していることがわかる。

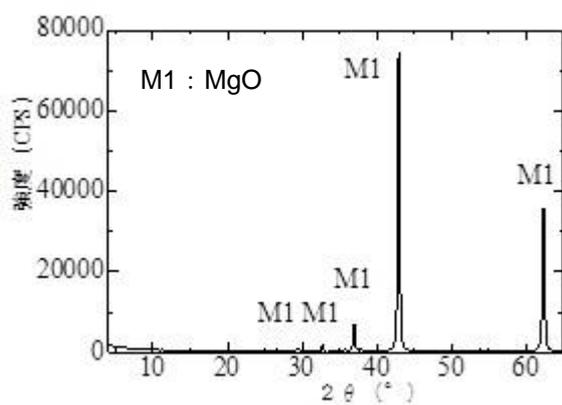


図 4.1 X線回折チャート(酸化マグネシウム)

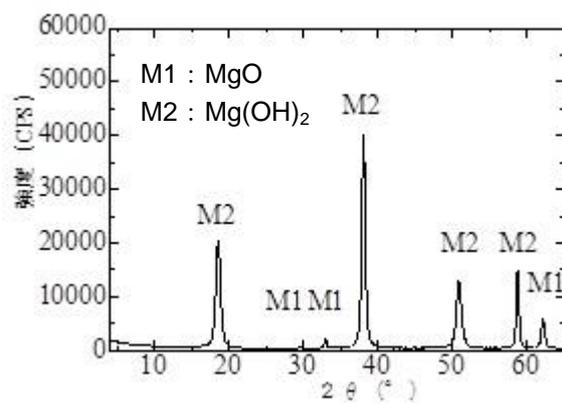


図 4.2 X線回折チャート(水和物)

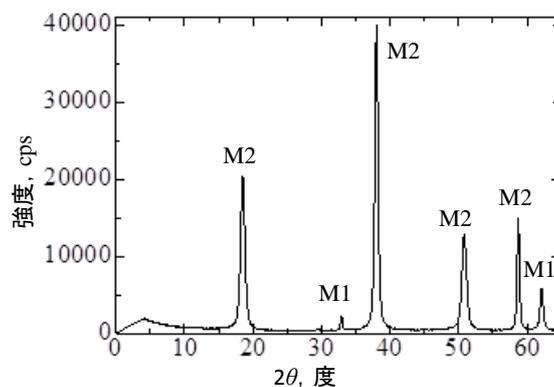


図 4.3 X線回折チャート(水酸化マグネシウム)

(2) まさ土および関東ロームのX線回折結果

図4.4に対象土として用いたまさ土のX線回折チャートを示す。主要鉱物の回折ピークから、Q（石英）とF（長石）のような一次鉱物が目立ち、他にはHH（加水ハロイサイト）のピークが見られた。なお、X線回折結果では、Q（石英）とF（長石）の著しい回折ピークが得られたが、回折強度の小さい鉱物を判別するため、縦軸のスケールを小さくしてある。

図 4.5 に対象土として用いた関東ロームの X 線回折チャートを示す。関東ロームは、まさ土と比較して回折強度が小さく、鉱物の結晶性が低いと考えられる。関東ロームは Q (石英) と F (長石) のような一次鉱物が目立ち、他には HH (加水ハロイサイト) や B (バーミキュライト) のピークが見られた。

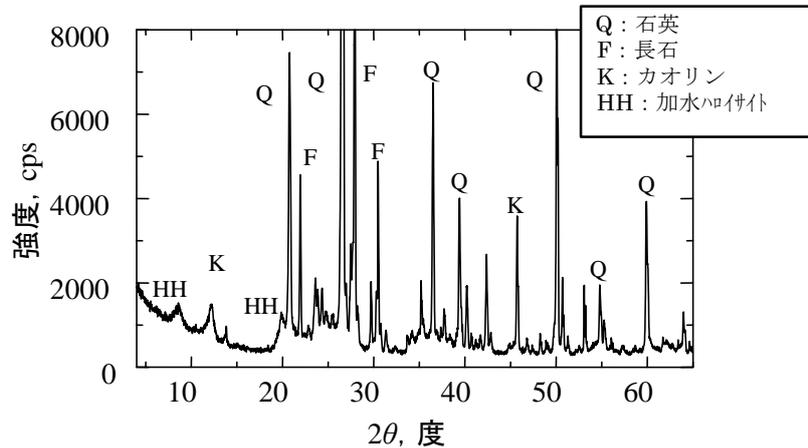


図 4.4 まさ土の X 線回折チャート

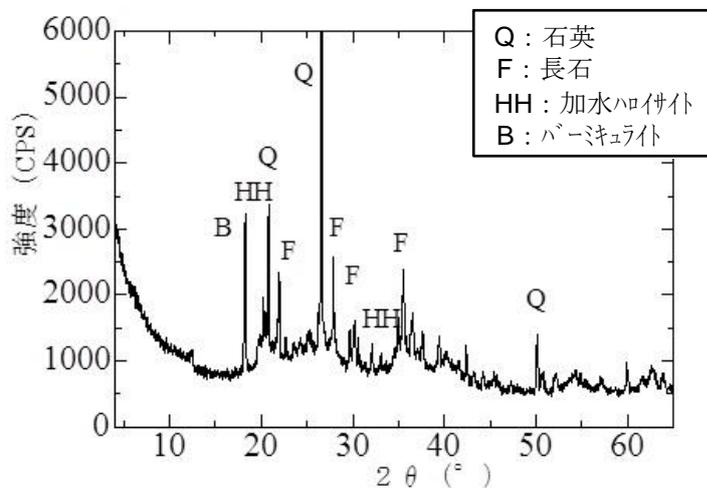


図 4.5 関東ロームの X 線回折チャート

(3) 材齢 180 日における改良土の X 線回折結果

図 4.6 にまさ土を用いた酸化マグネシウム改良土の X 線回折チャートを示す。回折ピークについてみると、未反応の M1 (酸化マグネシウム : MgO) とそれが水と反応した M2 (水酸化マグネシウム : Mg(OH)_2) が見られ、更に MC ($\text{MgAl(OH)}_{14} \cdot \text{XH}_2\text{O}$) と推測されるマグネシウムとアルミニウムとの化合物の回折ピークがみられる。これは、石灰系改良土でみられる加水ハロイサイトと反応して生成するアルミン酸石灰水和物の加水ゲレーナイトー $\text{Ca}_x\text{Al}_y(\text{OH})_z$ ⁶⁾ と類似しており、Ca が Mg に置換した形となっている。また、Q (石英) や

M2のような明瞭な回折ピークが見られないため、未反応の固化材が反応途中であり、固化反応が進行中であると考えられる。

図 4.7 に関東ロームを用いた酸化マグネシウム改良土の X 線回折チャートを示す。未反応の M1 (MgO) とそれが水と反応した M2 (Mg(OH)₂) が見られ、更に MA (MgAl(OH)₁₄·XH₂O) および MB (Mg₄Al₂(OH)₁₄·3H₂O) と推測されるマグネシウムとアルミニウムとの化合物の回折ピークがみられる。また、まさ土改良土でみられた Q (石英) や M2 のような明瞭な回折ピークが見られないため、固化材の多くが未反応または反応途中であり、固化反応が進行中であると考えられる。

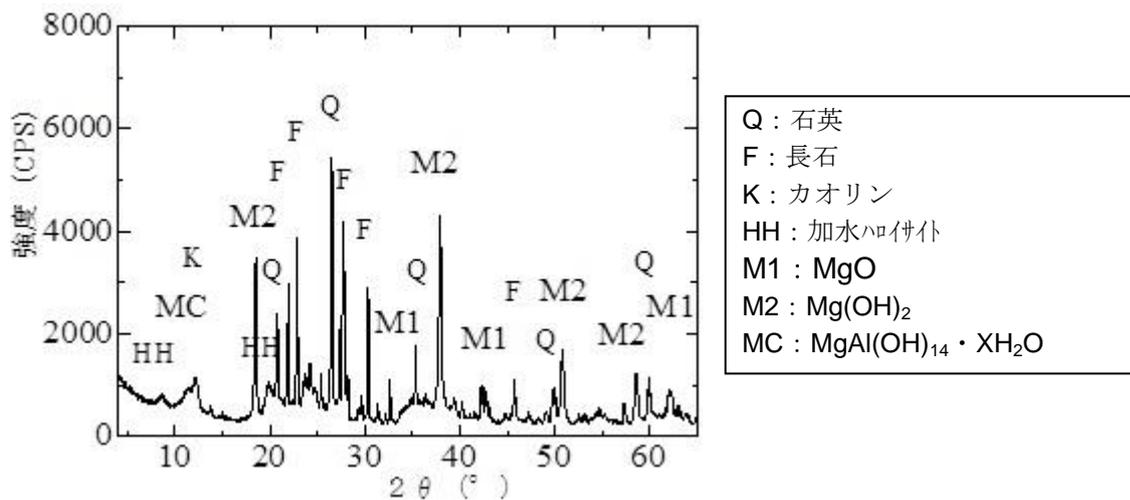


図 4.6 まさ土を用いた酸化マグネシウム改良土の X 線回折チャート (材齢 180 日)

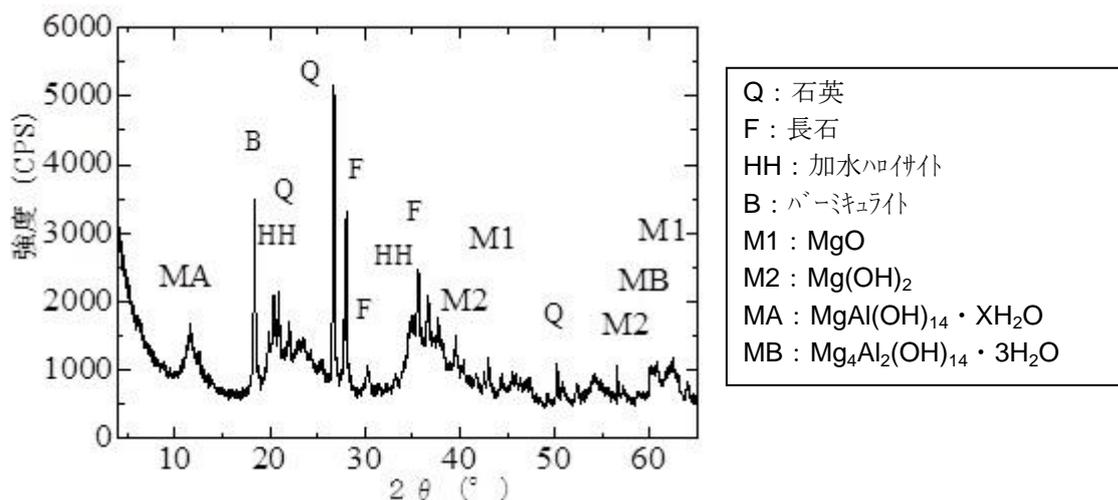


図 4.7 関東ロームを用いた酸化マグネシウム改良土の X 線回折チャート (材齢 180 日)

(4) 酸化マグネシウム改良土の材齢による反応生成物の変化

図 4.8 に酸化マグネシウム改良土（酸化マグネシウム添加量 120kg/m^3 ）の養生日数と一軸圧縮強さの関係を示した。セメント等のカルシウム系固化材に土に対する改良効果とは異なり，土に対する添加量が同じではあるが，火山灰質粘性土である関東ローム改良土の強度がまさ土改良土より大きいことがわかる。また，まさ土改良土が，材齢 60 日まで強度増加傾向がみられるのに対して，関東ローム改良土は材齢 7 日強度も大きく，材齢 30 日で一軸圧縮強さはほぼピークに達し，材齢に伴う強度変化にも違いがみられる。

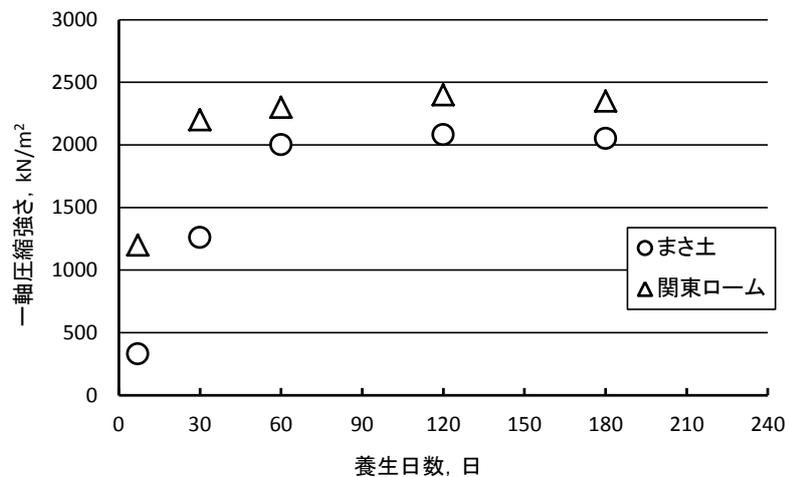


図 4.8 酸化マグネシウム改良土の材齢に伴う強度変化

図 4.9～図 4.12 に材齢 7 日から材齢 120 日に至るまさ土改良土の X 線回折チャートを示す。材齢 7 日改良土の X 線回折チャート(図 4.9)によると，固化材である酸化マグネシウム(M1)が水と反応して生成する M2 ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) の回折ピークがみられる。図 4.8 に示す材齢に伴う強度変化によると，材齢 7 日～60 日にかけて強度増加傾向があるが，X 線チャートに大きな違いはみられない。図 4.9～図 4.12 に示すように，材齢 120 日までは材齢 180 日で見られた(図 4.6) マグネシウムとアルミニウムとの化合物の回折ピークはみられなかった。

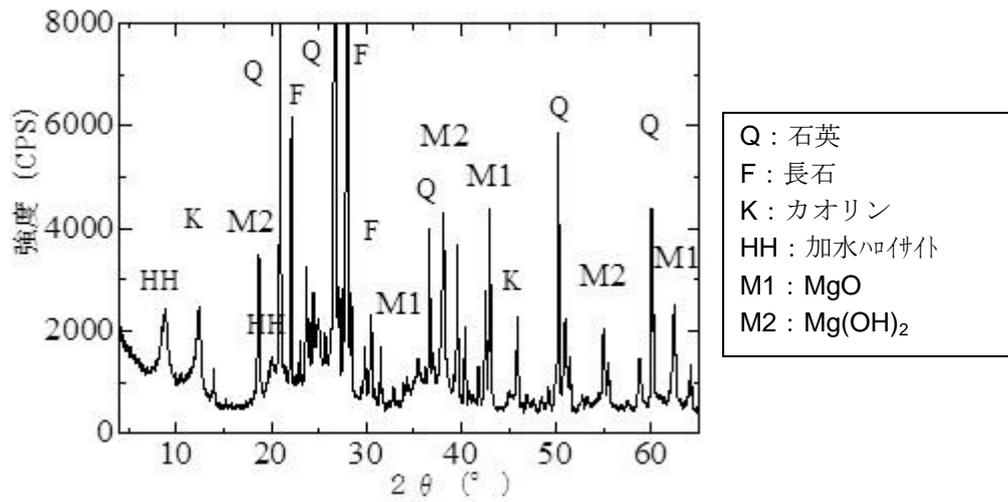


図 4.9 まさ土を用いた酸化マグネシウム改良土の X 線回折チャート (材齢 7 日)

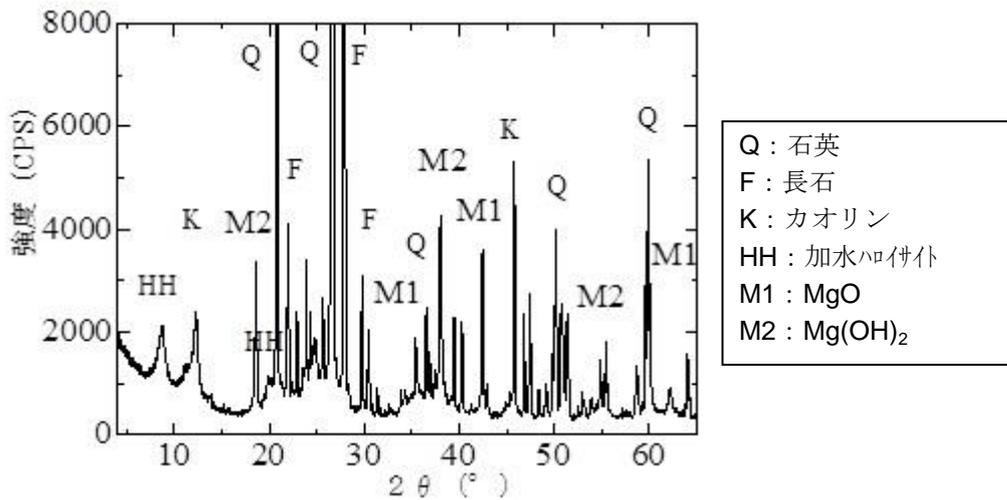


図 4.10 まさ土を用いた酸化マグネシウム改良土の X 線回折チャート (材齢 30 日)

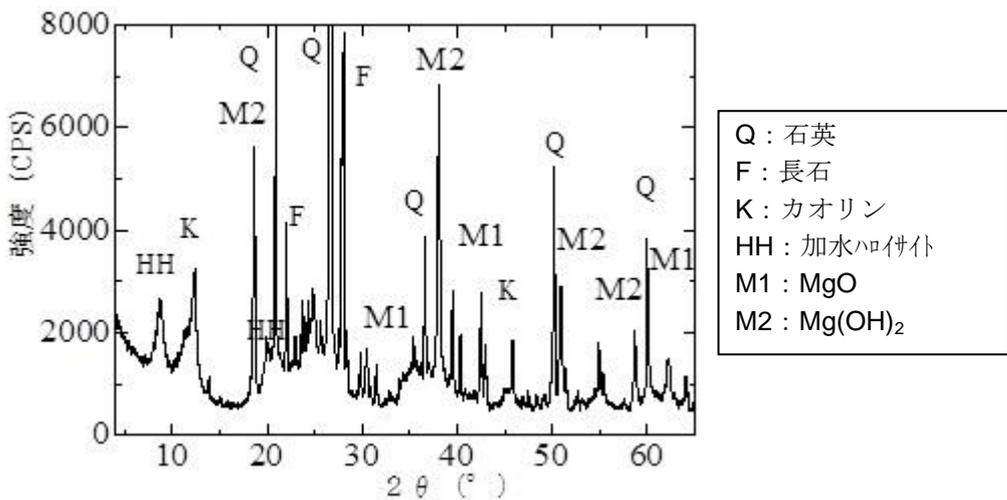


図 4.11 まさ土を用いた酸化マグネシウム改良土の X 線回折チャート (材齢 60 日)

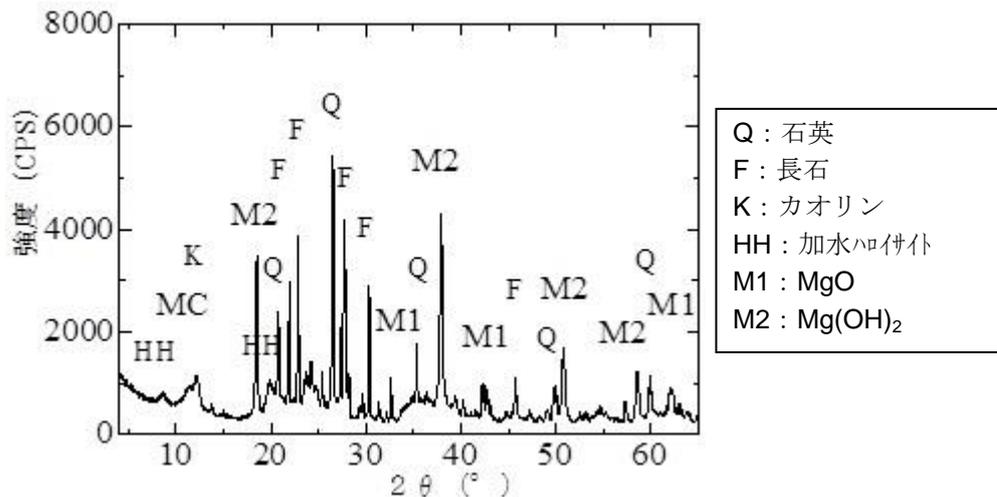


図 4.12 まさ土を用いた酸化マグネシウム改良土の X 線回折チャート (材齢 120 日)

図 4.13～図 4.16 に材齢 7 日から材齢 120 日に至る関東ローム改良土の X 線回折チャートを示す。図 4.13 に示すように、関東ローム改良土では材齢 7 日の時点で MA ($\text{MgAl}(\text{OH})_{14} \cdot \text{XH}_2\text{O}$) と推測されるマグネシウムとアルミニウムからなる化合物が生成されている。また、まさ土改良土にみられた水酸化マグネシウムの回折ピークはみられなかった。関東ロームはまさ土と比較して含水比が大きく、酸化マグネシウムの水和反応に必要な水は豊富に存在すると考えられるが、材齢 7 日時点では、水和反応が進んでいないかまたは結晶性が低い (ゲル状態) ものと推察される。MA が改良土の強度発現に関係していると仮定すれば、石灰系の反応で行われる生石灰から消石灰に反応してから固化反応が進行するメカニズムとは大きく異なることになる。

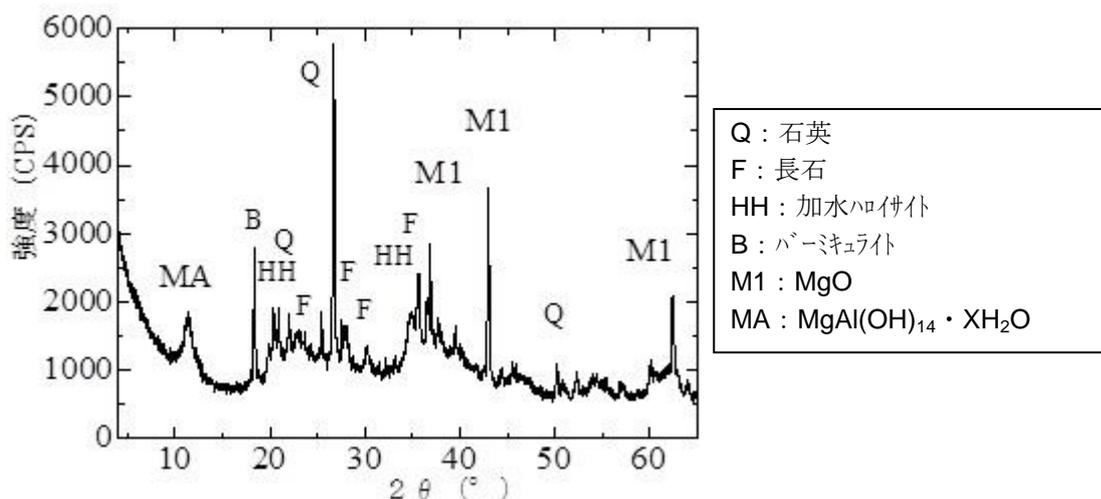


図 4.13 関東ロームを用いた酸化マグネシウム改良土の X 線回折チャート (材齢 7 日)

図 4.14 に示した材齢 30 日における改良土の X 線回折チャートによると、MA に加えて、酸化マグネシウムがアルミニウムと反応したと推測される MB ($\text{Mg}_4\text{Al}_2(\text{OH})_{14} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) の回折ピークがみられる。この材齢時においても水酸化マグネシウムのピークはみられなかった。水酸化マグネシウムは材齢 60 日 (図 4.15) でその回折ピークが出現し、それ以降材齢 180 日 (図 4.7) までは、これら以外の新たな鉱物の回折ピークは出現しなかった。

強度発現と反応生成物との関係を考察すると、図 4.8 に示すように、材齢 30 日時点で関東ローム改良土は一軸圧縮強度のピークを示している。本実験に使用した鉱物起源の酸化マグネシウムの水酸化物である水酸化マグネシウムは、それ自体の強度は小さく、改良土の強度発現の主たる要因とはならないと考えられる²⁾。強度の小さい水酸化マグネシウムが生成される前に、新たな反応生成物として発見された MA ($\text{MgAl}(\text{OH})_{14} \cdot \text{XH}_2\text{O}$) および MB ($\text{Mg}_4\text{Al}_2(\text{OH})_{14} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) が、関東ロームに対する酸化マグネシウム改良土の強度発現に大きく関係しているものと考えられる。

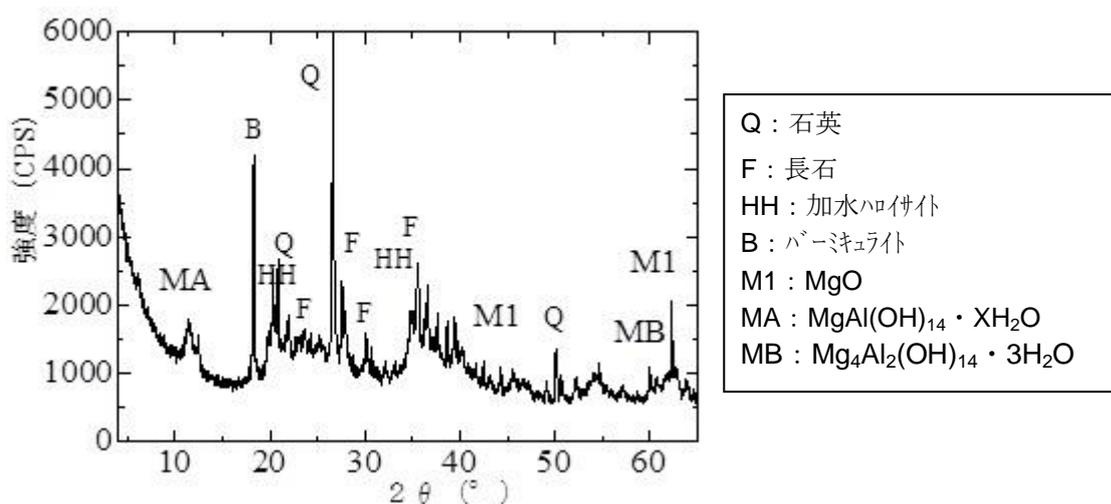


図 4.14 関東ロームを用いた酸化マグネシウム改良土の X 線回折チャート (材齢 30 日)

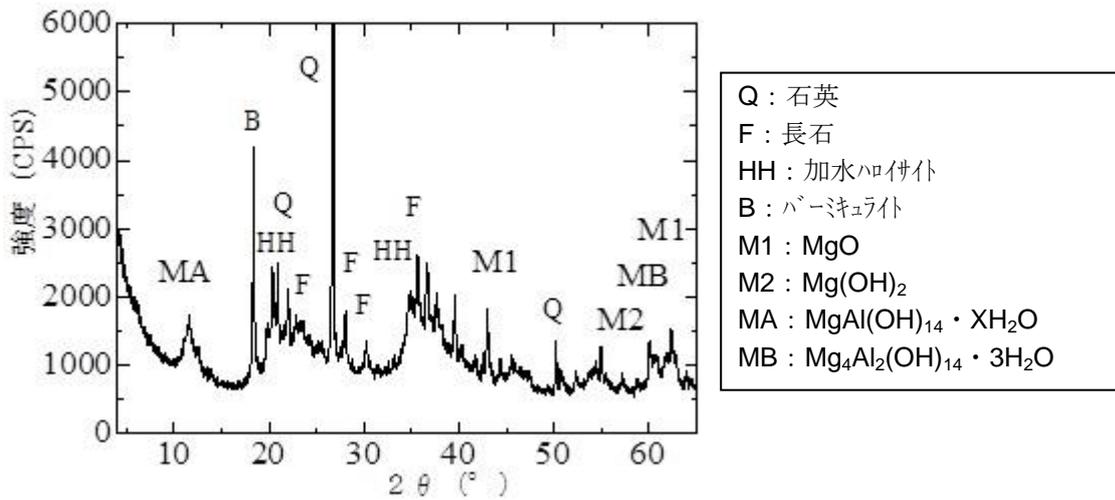


図 4.15 関東ロームを用いた酸化マグネシウム改良土の X 線回折チャート (材齢 60 日)

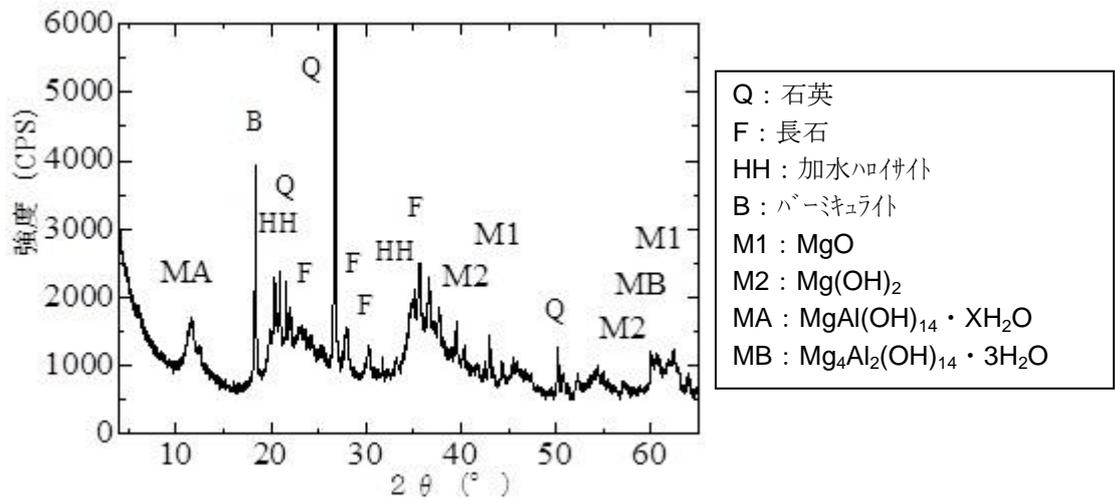


図 4.16 関東ロームを用いた酸化マグネシウム改良土の X 線回折チャート (材齢 120 日)

4.3 土に含まれる非晶質成分の分析による固化機構の考察

4.3.1 実験方法

(1) 試料土

分析に供する試料土は、2 章の表 2.1 に示す試料土のうち、まさ土および火山灰土を主として、改良土とした時の強度が異なる 14 種類とした。表 4.2 に分析に用いた試料土の土質特性および改良土とした時の一軸圧縮強さを示す。なお、固化材の添加量は一律に 100kg/m^3 としている。

(2) 分析方法

非晶質成分の定量分析にあたり、試料土の前処理を行った。前処理方法は、西田らが行った試験方法を参考にした⁷⁾。非晶質成分の溶出の原理では、土の酸およびアルカリに対する

溶解速度は結晶性鉱物に比べて非晶質性鉱物のほうがはるかに速い。したがって土を酸とアルカリ溶液で繰り返し処理すると、土の非晶質鉱物成分の溶出量は当初急激に増加し、それ以後は結晶性鉱物の溶出を示すゆるやかな直線的増加を示す。この溶解パターンを示す曲線の直線部分を延長して縦軸である含有量との交点を求めることにより各非晶質成分の含有量を知ることができる。図 4.17 に、非晶質成分の定量方法を示す。図 4.17 の例では、非晶質成分としての Fe_2O_3 が 1200mg/kg、 Al_2O_3 が 400mg/kg、 SiO_2 が 1600mg/kg と読み取れる。

分析試料は、原土を 2000 μm のふるいを通させたものとした。最初に、地盤工学会基準「粘土鉱物判定のための試料調整方法」⁸⁾ に従い、 H_2O_2 （過酸化水素）を用いて洗浄を繰り返し、有機物除去の作業を行った。有機物の除去の手順を図 4.18 に示す。

表 4.2 分析に用いた試料土の土質特性および改良土の一軸圧縮強さ

試料名	W_n %	ρ_s g/cm ³	I_{gloss} %	pH	締固め密度 g/cm ³	地盤材料 品質区分	一軸圧縮強さ(材齢28日) kN/m ²		
							MgO	Ca(OH) ₂	BB
まさ土C(砂質土)	16.3	2.67	3.4	5.9	1.968	—	807	4692	2862
まさ土E(強風化, 粘性土)	41.2	2.79	14.6	4.7	1.720	第2種	508	—	358
火山灰土A(関東ロームA)	132.7	2.81	15.4	6.5	1.361	第2種	1256	267	295
火山灰土B(関東ロームB)	112.6	2.85	14.4	6.5	1.435	第3種	785	—	85
火山灰土I(鳥取ロームA)	52.4	2.81	10.1	6.4	1.700	第3種	2833	—	496
火山灰土J(鳥取ロームB)	53.1	2.82	24.5	5.6	1.690	第3種	1844	—	255
火山灰土K(鳥取ロームC)	153.6	2.70	27.1	6.4	1.324	(汚泥)	376	—	<50
火山灰土L(鳥取ロームD)	161.8	2.72	9.0	6.4	1.304	(汚泥)	242	—	<50
沖積粘土A(建設残土)	55.5	2.67	7.8	7.0	1.659	(汚泥)	284	—	622
沖積粘土B	68.4	2.73	10.3	7.2	1.581	(汚泥)	808	—	240
沖積シルトC(国頭まあじ)	29.3	2.65	6.3	5.4	1.967	第2種	612	298	529
有機質土B	111.0	2.68	10.8	2.9	1.397	(汚泥)	<50	—	111
砂(東南アジア産)	10.0*	2.63	1.0	7.3	1.986	—	1092	190	4121
ラテライト(東南アジア産)	16.1*	2.72	7.5	5.2	1.976	第2種	1584	825	1973

* 調整含水比

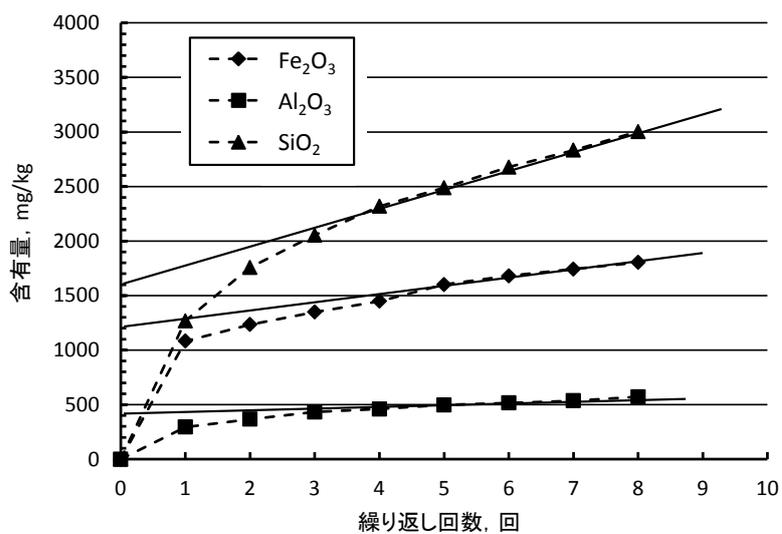


図 4.17 非晶質成分の定量方法

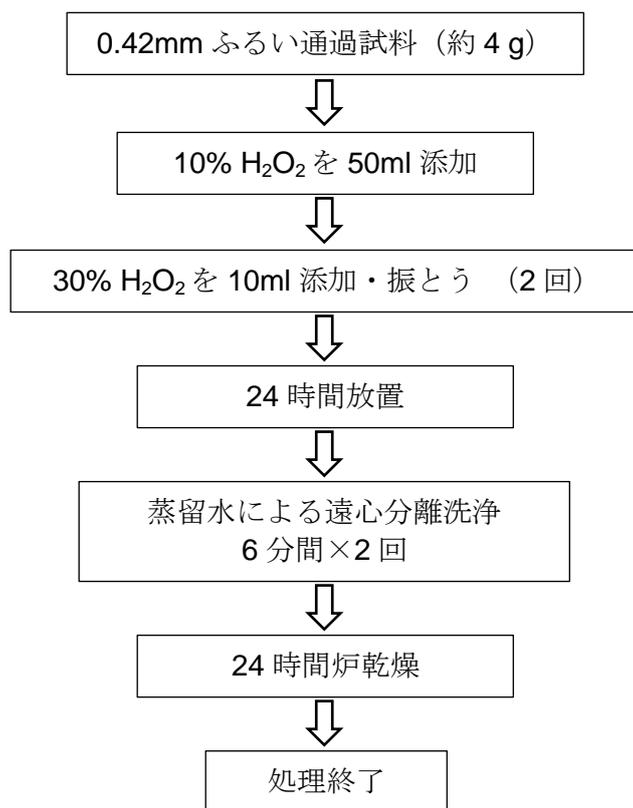


図 4.18 有機物の除去手順

有機物処理後の試料に 8 規定の塩酸と 0.5 規定の水酸化ナトリウム水溶液を添加し、その溶液を洗浄する処理を交互に 6~8 回程度繰り返した。繰り返し回数を目安は、繰り返し回数に伴う溶出量の変化が一定となるまでとした。図 4.19 に非晶質成分定量分析検液の作製手順を示す。得られた検液を用いて、 SiO_2 、 Al_2O_3 および Fe_2O_3 の定量分析を行った。西田等によると、非晶質成分の構成元素である Si、Al、Fe の酸化物は $\text{H}_2\text{O}^{(+)}$ と結びついているものと考えられる。Fe は一般に遊離酸化物として存在し、Si と Al は遊離酸化物だけでなく、アロフェン ($n \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot m \cdot \text{H}_2\text{O}$ $n=1, 2$) のように Al-Si 酸化物の形をとっている⁷⁾。以上のことから、Si、Al、Fe は土粒子中では SiO_2 、 Al_2O_3 および Fe_2O_3 の酸化物の形で存在するものとして考え、定量分析を行った。

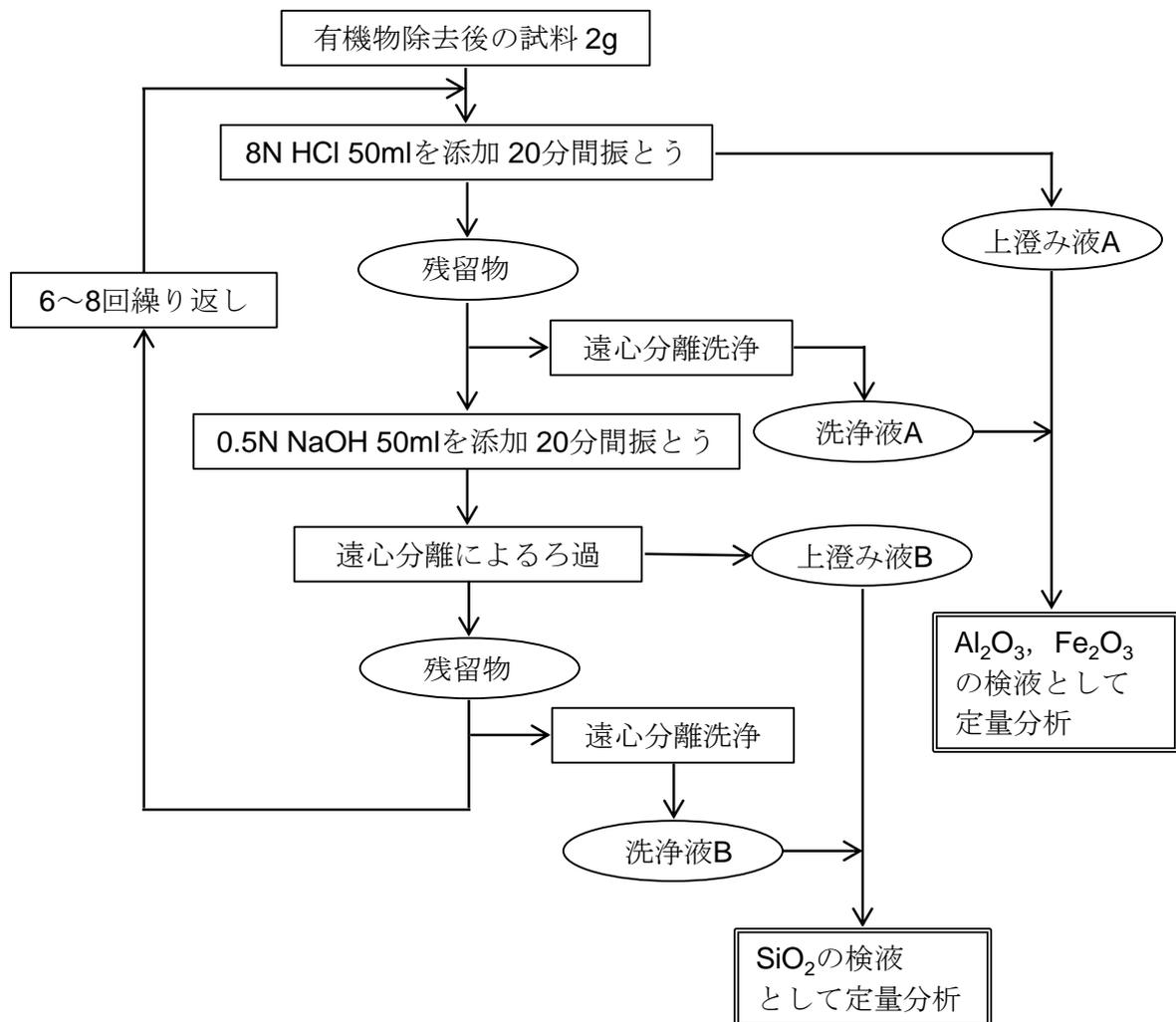


図 4.19 非晶質成分定量分析検液の作製手順

4.3.2 実験結果および考察

(1) 非晶質成分の定量分析結果（火山灰土）

表 4.3 に非晶質成分の定量分析結果を示す。関東ローム A は非晶質成分の総量が 30%以上と多く、特にアルミナ (Al_2O_3) の含有量が多い。関東ローム B も A と同様に非晶質成分の総量が多く、アルミナ、鉄、シリカの順に非晶質成分の含有量が多い。また、関東ロームは、検液作製段階の繰り返し操作において、繰り返し初期の段階で溶出のピークをむかえており、非常に可溶しやすい非晶質成分を含んでいるものと推察される。

関東ロームは火山性の高含水比粘性土であり、石灰系およびセメント系固化材に含まれる Ca^{2+} が大量に消費され pH の上昇が抑制される。よって、これらの固化材では水和反応が阻害されて改良土の強度がほとんど発現しなかったものと考えられる⁹⁾。

一方、酸化マグネシウムは関東ロームに対して大きな改良効果を示した。これは、アルミナ含有量が多く、先に示した改良土の X 線回折試験から、アルミン酸系マグネシウム水和物と推察される化合物が発見されるなど、アルミナが強度発現に大きく関係しているものと考えられる。

表 4.3 試料土に含まれる非晶質成分の定量分析結果

試料土	非晶質成分の含有量 (%)			
	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	合計
まさ土C	0.7	0.3	0.5	1.5
まさ土E	5.3	1.5	3.0	9.8
関東ロームA	12.0	18.0	7.5	37.5
関東ロームB	8.5	16.5	7.5	32.5
鳥取ロームA	1.2	7.2	4.0	12.4
鳥取ロームB	1.8	8.5	2.2	12.5
鳥取ロームC	3.0	27.0	17.0	47.0
鳥取ロームD	4.0	32.0	19.5	55.5
沖積粘土A	2.4	1.3	3.1	6.8
沖積粘土B	6.6	3.5	6.0	16.1
沖積シルトC (国頭まあじ)	1.2	1.3	0.2	2.7
有機質土B	1.6	1.4	2.2	5.2
砂 (東南アジア産)	0.1	0.0	0.2	0.3
ラテライト (東南アジア産)	1.4	1.3	0.2	2.9

鳥取ローム A および B は、非晶質成分の含有量はともに 10%以上であり、各成分量は、アルミナ、シリカ、鉄の順に多い。非晶質成分の含有量は関東ロームに比べるとやや少ないが、酸化マグネシウム改良土としたとき関東ロームよりも強度が大きい。これは、鳥取ローム A、B が関東ローム A、B よりも含水比が低いことが原因しているものと考えられる。

鳥取ローム C および D は、関東ローム同様に非晶質成分を非常に多く含んだ土である。アルミナ量も多く、高含水比で強熱減量が大きいという特徴も関東ローム A、B と類似している。酸化マグネシウム改良土としたときの強度は、他のローム改良土と比較して 200～300kN/m²程度と小さい。鳥取ローム C、D は原土の含水比が 150%以上と非常に大きく、また地盤材料の品質区分は「汚泥」に分類されている。このため、酸化マグネシウムと反応する有効成分を持ちながら、強度は小さくなったものと考えられる。

(2) 非晶質成分の含有量と改良土の一軸圧縮強さとの関係

酸化マグネシウムの土に対する改良効果は、試料土の物性・化学特性が密接に影響していると考えられる。これらのうち、特に影響が大きいと考えられる試料土の初期含水比と、改良土の酸化マグネシウムとの反応生成物の構成物質の供給源とみられる非晶質成分の含有量に注目して、一軸圧縮強さとの関係について検討を試みた¹⁰⁾。

図 4.20 に、試料土の非晶質成分の含有量と改良土の一軸圧縮強さとの関係を示す。図 4.20 によると、試料土中の Fe₂O₃ 含有量は少なく、改良土の一軸圧縮強さとの間の相関性は見いだせない。Al₂O₃、SiO₂ および全非晶質成分についても、非晶質成分の含有量が同程度であっても、改良土の一軸圧縮強さに大きな差があることから、試料土の非晶質成分の含有量と改良土の一軸圧縮強さとの間には、相関性はみとめられない。

図 4.21 は、試料土から非晶質成分が比較的多い火山灰土（関東ローム、鳥取ローム）を選択し、改良土の一軸圧縮強さと非晶質成分の含有量との関係を示したものである。これによると、Al₂O₃、SiO₂ および全非晶質成分について、非晶質成分の含有量が多いほど一軸圧縮強さが小さい傾向が見られる。

アロフェンや加水ハロイサイトなどの火山灰に起源をもつ粘土鉱物を多く含む土は、石灰との化学的反応が生じやすいとされているが¹¹⁾、一方で化学的反応を促進させて改良効果を得るためには、これらの粘土鉱物の含有量に応じた石灰量が必要であるとしている。本実験では、酸化マグネシウムの添加量を 100kg/m³としたが、非晶質成分の含有量が数 10%に達する火山灰土に対して十分な添加量といえず、このため、試料土の非晶質成分の含有量と改良土の一軸圧縮強さとの間には、明瞭な相関性は認められなかったものと考えている。

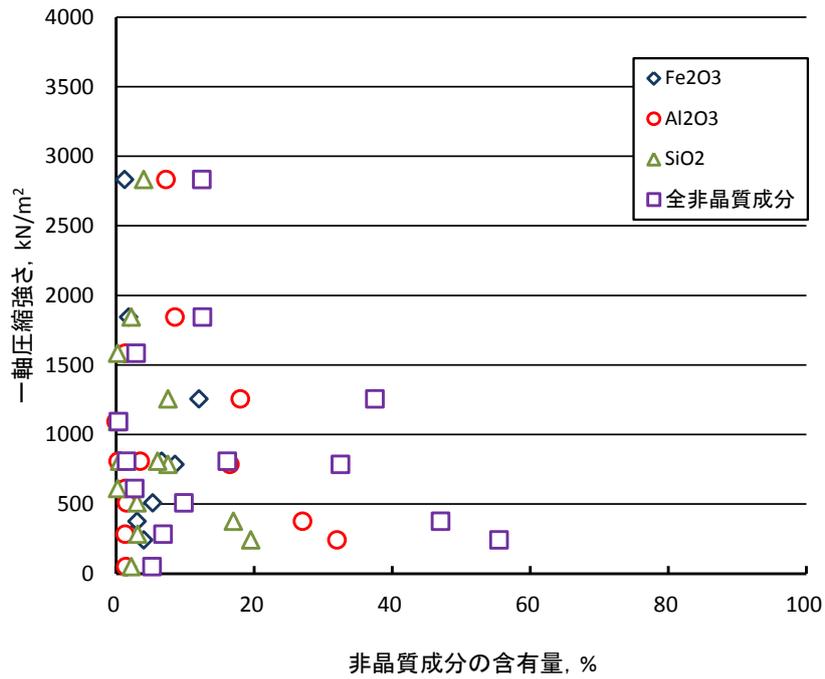


図 4.20 試料土の非晶質成分含有量と改良土の一軸圧縮強さとの関係

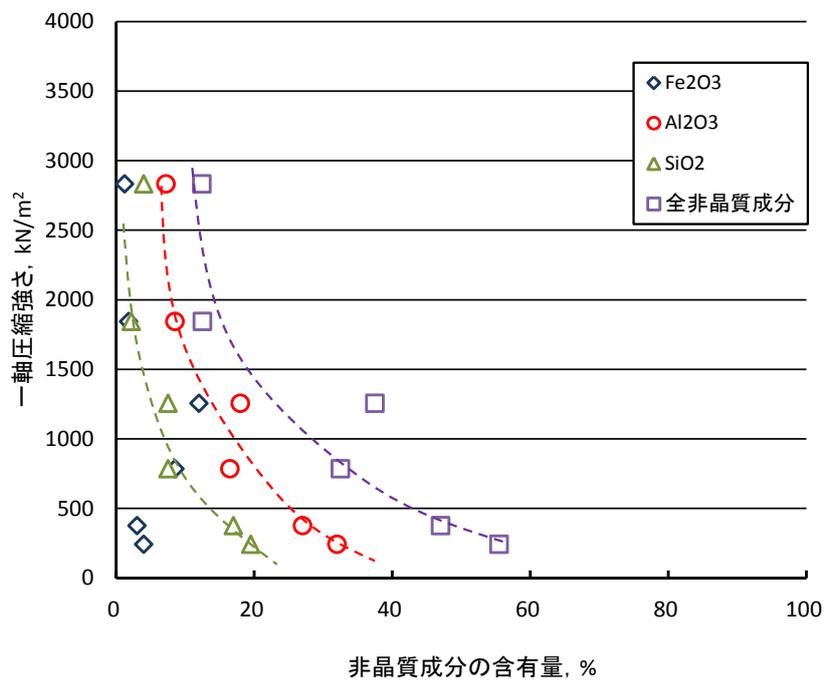


図 4.21 試料土の非晶質成分含有量と改良土の一軸圧縮強さとの関係(火山灰土)

(3) 試料土の含水比が改良土の強度に及ぼす影響

試料土の非晶質成分の含有量と改良土の一軸圧縮強さとの間に、明瞭な相関性は認められなかった原因の一つとして、試料土の含水比が影響しているものと考えた。図 4.22 に試料土の含水比と非晶質成分の含有量との関係を示す。試料土の含水比と非晶質成分の含有量との間には明瞭な相関性が認められ、非晶質成分を多く含む土は含水比も大きい傾向にある。試料土の含水比が大きいと、酸化マグネシウムの水和反応が促進され、土に含まれる非晶質成分との反応が生じにくい。その結果、試料土の非晶質成分の含有量と改良土の一軸圧縮強さとの間に、明瞭な相関性は認められなかったものと考えられる。

試料土の含水比を考慮して、非晶質成分の含有量が改良土の一軸圧縮強さに及ぼす影響について検討するため、試料土の含水比と改良土の一軸圧縮強さとの関係を非晶質成分の含有量が多い関東ローム、鳥取ロームの火山灰土とその他の土を区別して図 4.23 に示した。試料土の含水比が高いほど改良土の強度は小さく、セメント改良土でみられる傾向と類似しているが¹²⁾、同じ含水比で比較すると、酸化マグネシウムが非晶質成分を多く含む火山灰土に対して高い改良効果を示していることがわかる。

以上のことから、酸化マグネシウムは非晶質成分を多く含む火山灰土に対して改良効果は大きいですが、対象土が高含水比である場合には改良効果が得られないことがあり、添加量を多くするなどの対策が必要である。

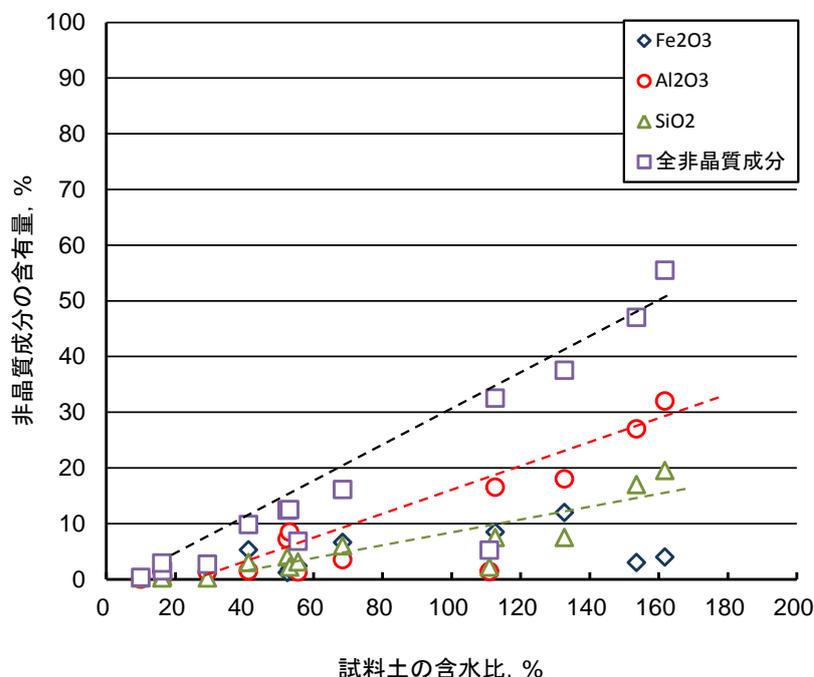


図 4.22 試料土の含水比と非晶質成分の含有量との関係

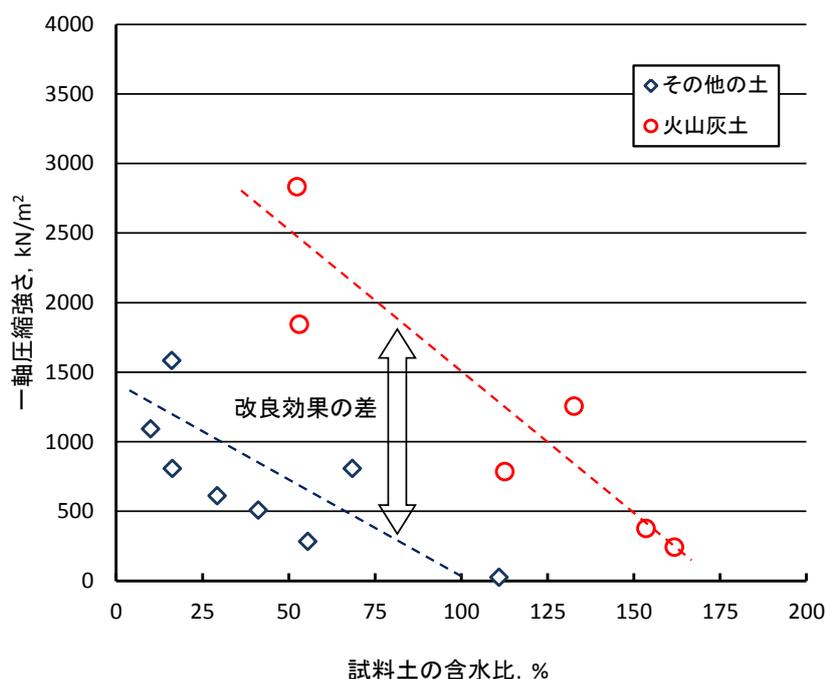


図 4.23 試料土の含水比と改良土の一軸圧縮強さとの関係

4.4 まとめ

本章における研究結果を以下に要約する。

- (1) まさ土を用いた酸化マグネシウム改良土は X 線回折の結果、 $Mg_4Al_2(OH)_{14} \cdot 3H_2O$ と推測される反応生成物のピークが認められた。これは、石灰系改良土でみられる加水ハロイサイトと反応したアルミン酸石灰水和物の加水ゲレーナイトー $Ca_xAl_y(OH)_z$ と類似しており、Ca が Mg に置換した形となっている。このマグネシウムとアルミニウムからなる化合物が改良土の強度発現要因の一つになっているものと考えられる。
- (2) 関東ロームを用いた酸化マグネシウム改良土は X 線回折の結果、 $MgAl(OH)_{14} \cdot XH_2O$ および $Mg_4Al_2(OH)_{14} \cdot 3H_2O$ と推測されるマグネシウムとアルミニウムからなる反応生成物が認められた。これらの化合物はともにマグネシウムとアルミニウムの化合物であり、加水ゲレーナイトと類似した構造をしており、まさ土の場合と同様に石灰系改良土中の Ca が Mg に置換した形となっている。関東ロームをはじめとする火山灰土においては、酸化マグネシウム改良土の強度が他の改良土よりも大きく、カルシウムとアルミニウムの化合物よりもマグネシウムとアルミニウムの化合物の方が、より大きな強度を発生させると考えられる。
- (3) まさ土を用いた酸化マグネシウム改良土を長期にわたり経時的に X 線回折試験を行った結果、材齢 120 日までにおいては酸化マグネシウムが水と反応してできる水酸化マグネシ

ウムの生成のみしか発見されなかった。水酸化マグネシウム自体の強度は小さく、まさ土における酸化マグネシウム改良土の固化には、結晶を成さないゲル状の物質や土質構造など様々な要因が考えられる。

- (4) 関東ロームを用いた酸化マグネシウム改良土を長期にわたり経時的に X 線回折試験を行った結果、水酸化マグネシウムが生成される前に、反応生成物として $\text{MgAl}(\text{OH})_{14} \cdot \text{XH}_2\text{O}$ および $\text{Mg}_4\text{Al}_2(\text{OH})_{14} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ が認められた。これらの化合物の生成は、強度発現のピークを示す材齢 30 日以前の段階であり、これらが強度発現に大きく関与しているものと考えられる。また、この時点で酸化マグネシウムと水が反応した水酸化マグネシウムはみられず、水酸化物が固化反応を進行させる石灰系改良土とは反応機構が異なるものと考えられる。
- (5) 酸化マグネシウム改良土の強度発現には土中に含まれる非晶質成分の含有量が密接に関与している。一方、非晶質成分の含有量が多い土は、含水比も大きい傾向があり、含水比の大きい火山灰土に対して改良効果を得るためには、酸化マグネシウムの添加量を多くする必要がある。

[参考文献]

- 1) 高速道路調査会：セメント、石灰による路床安定処理の計画，設計および施工に関する研究報告書，1978.
- 2) 山田哲司，西形達明：水酸化マグネシウムが酸化マグネシウム改良土の硬化反応に及ぼす影響，第 45 回地盤工学研究発表会，pp.534-544，2010.
- 3) 宋永焜，応長雲：関東ロームのアロフェン含有量が石灰－石膏土質安定処理工法に及ぼす影響，土質工学会論文報告集，Vol.34，No.4，pp.103-113，1994.
- 4) 八島隆志：粉末 X 線回折によるスメクタイトの交換性陽イオンの推定，全地連「技術フォーラム 2011」京都，pp.40-41，2011.
- 5) 須藤俊男：粘土鉱物学，岩波書店，1974.
- 6) 宋水焜：関東ロームのアロフェン含有量が生石灰安定処理土に及ぼす影響，関東学院大学工学部研究報告，第 38-1 巻，pp.147-161，1994.
- 7) 西田一彦，佐々木清一，久保井利達：まさ土の非晶質物質とその特性について，土質工学会論文報告集，VII.24，No.2，pp.180-190，1984.
- 8) 社団法人地盤工学会：粘土鉱物判定のための試料調整方法，地盤材料試験の方法と解説 pp.355-360，2010.
- 9) 霞誠司他：セメント系改良材による関東ローム改良土の基礎的研究(その 2)，第 33 回地盤工学研究発表会，pp.2305-2306，1998.
- 10) 藤原信吾，西形達明，西田一彦，山田哲司：酸化マグネシウムの地盤改良への適用に関する研究(その 6: 非晶質物質の定量試験結果)，土木学会第 60 回年次学術講演会，III 部門，

pp.79-80, 2005.

11) 日本石灰協会：石灰による土質安定処理工法, p.8, 1970.

12) 金城徳一, 酒巻克之, 田坂行雄, 高倉篤：土を固める原理と応用 3.改良土の特性, 土と基礎, Vol.52, No.11, pp.59-66, 2004.

5章 製造方法からみた酸化マグネシウムの土に対する固化機構の考察

5.1 はじめに

4章では、酸化マグネシウム改良土のX線回折や土に含まれる非晶質成分の定量分析を行い、マグネシウムとアルミニウムからなる化合物が改良土の強度発現要因の一つであることを提唱した。ここまでの研究に用いた酸化マグネシウムは、ドロマイト($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$)中の天然炭酸マグネシウム鉱石(MgCO_3)を焼成・粉砕して製造したものである。地盤改良材として流通している酸化マグネシウムには、海水中のマグネシウムイオンを水酸化物($\text{Mg}(\text{OH})_2$)として沈殿させ、これを高温下で脱水して製造したものがある¹⁾。さらに、焼成温度や粉末度(比表面積)も製造時のパラメータとなり、多くの種類の酸化マグネシウムが流通しているのが現状である。

脱炭酸ガスあるいは脱水時の製造温度は、製造された酸化マグネシウムの活性度(水や土壌成分との反応性)と密接な関係があり、改良土の特性に影響を及ぼすものと考えられる。水との反応性が敏感すぎると、生石灰のように発熱を伴う急激な水和反応が起こり、水との懸濁液にして用いるスラリー添加は困難となる。粉末度については、著者ら²⁾が高炉スラグ微粉末を用いてその比表面積が改良土の強度に及ぼす影響について研究しており、比表面積が大きいほど改良土の強度が大きいとしている。

このように、酸化マグネシウムの製造方法がその取扱いや改良土の性質に影響を及ぼすことは明らかであるが³⁾、現在のところ酸化マグネシウムという一括りの材料として扱われることが多く、その結果、改良目的に応じた効果が得られないケースが生じるものと考えられる。

そこで、本章では、地盤改良の目的に応じた酸化マグネシウムの選択を明らかにしておく必要があると考え、原料や製造温度、比表面積の異なる酸化マグネシウムを用いて改良土を作製し、酸化マグネシウムの製造方法の違いが改良土の性質に及ぼす影響について調べ、酸化マグネシウムの土に対する固化機構の考察を試みた。

5.2 実験方法

5.2.1 実験材料

(1) 酸化マグネシウム

固化材として用いた酸化マグネシウムは、ドロマイト($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$)中の天然炭酸マグネシウム鉱石(MgCO_3)を焼成・粉砕して製造した酸化マグネシウム(以下鉱成酸化マグネシウムと称す)と海水中のマグネシウムイオンを水酸化物($\text{Mg}(\text{OH})_2$)として沈殿させ、これを高温下で脱水して製造した酸化マグネシウム(以下海成酸化マグネシウムと称す)の2種類とした。鉱成酸化マグネシウムについては、比表面積(粉末度)の異なるものを4種類用

いた。酸化マグネシウムの物性値および製造方法等を表5.1に示す。鉍成酸化マグネシウムのうち比表面積が4100m²/g, 7100m²/g, および海成酸化マグネシウムは、固化材や重金属等不溶化材の材料として一般に流通しているものである。鉍成酸化マグネシウムの比表面積が、9000m²/gおよび12500m²/gのものについては、比表面積と改良土の特性との関係を調べるため、7100m²/gの酸化マグネシウム製造時にできる微粉末分を集積し、必要に応じて再度ミル粉砕するなどして実験用に比表面積を調整したものである。

鉍成酸化マグネシウムと海成酸化マグネシウムの物性値や製造方法を比較すると、酸化マグネシウムの含有量は海成酸化マグネシウムの方が大きく、その他の化合物の不純物が少ないといえる。生成温度は、海成酸化マグネシウムの方が低く、比表面積が非常に大きいことと併せてその活性度は高いものと考えられる。また、海成酸化マグネシウムはセメント等固化材の生成・調整に用いられるキルンを使用していないことやミルによる粉砕を行っていないことが特徴として挙げられる。

表5.1 酸化マグネシウムの物性値および製造方法

種別	鉍成酸化マグネシウム	海成酸化マグネシウム
製造方法	焼成・粉砕法	アルカリ沈殿法
原材料	MgCO ₃	Mg(OH) ₂
化学組成%		
MgO	92.2	96.5
CaO	1.92	0.59
SiO ₂	1.58	0.15
Fe ₂ O ₃	0.52	0.04
Al ₂ O ₃	0.17	0.03
SO ₄	—	2.51
生成温度	約 800℃	約 600℃
調整方法	キルン焼成 ミル粉砕	高温気流 静電気集積
Ig-loss %	3.46	2.02
比表面積 cm ² /g	4100,7100 9000,12500	16050

(2) 試料土

実験に用いた試料土は、これまでの研究⁴⁾から火山性の粘土鉍物に富み酸化マグネシウムによる改良効果の大きい「まさ土」および「ローム」に加え、火山性の粘土鉍物が少ないと考えられる沖積土の3種類とした。試料土の土質特性値を表5.2に示す。まさ土は生駒山山麓の露頭より採取し、ロームは関東ロームを一旦乾燥させて地盤材料として販売されているも

のを用いた。沖積土は、滋賀県内の杭工事に伴う配合試験時に対象地盤より採取したものを
用いた。試料土の含水比は、実験方法で述べるように、供試体作製時の締固めに対して過転
圧状態とならないように調整した。

表5.2 試料土の物性値

項目	まさ土	ローム	沖積土
調整含水比 %	14.4	69.5	29.5
粒 最大粒径 mm	2.0	4.75	4.75
度 礫分 %	9.7	5.5	2.2
分 砂分 %	75.9	26.5	56.5
布 細粒分 %	14.4	68.0	41.3
液性限界 %	—	113.2	45.5
塑性限界 %	—	51.5	21.3
塑性指数	NP	61.7	24.2
Ig-loss %	3.0	16.8	2.9
土の分類	S-FG	V	SF
採取地	大阪府	茨城県	滋賀県

5.2.2 実験方法

(1) X線回折

固化材として用いた酸化マグネシウムの結晶状態の違いを把握するため、X線回折を行った。
鉍成酸化マグネシウムは比表面積の異なるものが4種類あるが、製造方法が同じであるため、
結晶構造には違いがないと考え、比表面積が7100cm²/gのものを検体として用いた。X線回折
の主な仕様は、X線管球：Cu (1.54060Å)，管電圧：40.0kV，管電流：30.0mA，測定範囲：
3.00～70.00度，ステップ幅：0.02度であった。

(2) 走査型電子顕微鏡による観察

X線回折と同様、酸化マグネシウムの結晶構造を調べるため、走査型電子顕微鏡による観察
を行った。検体は、鉍成酸化マグネシウムが比表面積が7100cm²/gおよび12500cm²/gのもの、
海成酸化マグネシウムは表1に示す比表面積が16050cm²/gのものとした。走査型電子顕微鏡
の機種はHitachi S-4800，印加電圧は5kVとした。

(3) 含水比の経時変化の測定

酸化マグネシウムの水和反応の進行状況を調べるため、水道水を用いて酸化マグネシウム
スラリーを作製し、JIS A 1203による含水比を測定した。作製時の含水比は、鉍成酸化マグ
ネシウムが67%，海成酸化マグネシウムが80%とした。海成酸化マグネシウムは、スラリー

としたときの粘度が大きく、含水比を鉍成酸化マグネシウムより大きくすることで、両者の粘度がほぼ同等となるように調整した。

酸化マグネシウム改良土中の水分変化を調べるため、改良土の含水比を測定した。試料土は土の含水比が比較的大きく、含水比の変化がとらえやすいロームとし、鉍成酸化マグネシウムは比表面積が $7100\text{cm}^2/\text{g}$ のものをを用いた。試料土に対する酸化マグネシウム添加量は、湿潤質量比で20%とした。

含水比測定用の試料作製後、水分が蒸発しないように密封可能なポリ袋に保管した。含水比の測定は作製直後から28日経過後までとし、経過時間初期においては測定時期を練り混ぜ1時間後、3時間後、6時間後、24時間後と頻度を密とし、以後3日、7日、28日後とした。

(4) 改良土の一軸圧縮試験

固化材として比表面積が $7100\text{cm}^2/\text{g}$ の鉍成酸化マグネシウムおよび海成酸化マグネシウムを、試料土としてまさ土およびロームを用いて改良土を作製した。酸化マグネシウム添加量は試料土の湿潤質量に対して一律10%とし、ソイルミキサーで十分に混合後、 $\phi 50 \times 100\text{mm}$ 且つ2つ割りモールドにセメント協会標準試験方法(1990)⁵⁾により締め固めて供試体を作製した。ランマーの質量は1.5kg、層数は4層で、締め固め回数は下層から10回、20回、20回、40回で、締め固めエネルギーは、JIS A 1210のA法とほぼ同じとなっている。なお、前述したように、セメント協会標準試験方法は改訂され、JCAS L-01 : 2006「セメント系固化材による改良体の強さ試験方法」⁶⁾となっているが、旧試験方法の方が締め固め層数が多く、ばらつきの少ない供試体を作製可能と考え、旧作製方法を用いている。供試体は、材齢3日時点で型枠から脱型し、食品用ラップフィルムで包んで室温にて湿潤養生とした。養生日数は原則として、3日、7日、14日、28日、50日の5材齢とした。

次に、製造方法が同じで比表面積が異なる酸化マグネシウムによる改良土の強度特性を比較検討するため、固化材として鉍成酸化マグネシウム（4種類：比表面積= $4100\text{cm}^2/\text{g}$ 、 $7100\text{cm}^2/\text{g}$ 、 $9000\text{cm}^2/\text{g}$ 、 $12500\text{cm}^2/\text{g}$ ）を、試料土としてまさ土および沖積土を用いて改良土を作製して一軸圧縮試験を行った。供試体作製は前述した方法によった。一軸圧縮試験に供する材齢は、3日、7日、14日、28日、60日の5材齢とし、食品用ラップフィルムで包んだ室温下における湿潤養生とした。一軸圧縮試験後に供試体を粉砕して、地盤工学会基準「土懸濁液のpH試験方法」(JGS0211-2009)により、pHを測定した。

さらにこれとは別に、材齢28日から120日にかけて、養生方法を(イ)室内で空气中に曝した気中養生、(ロ)真空箱に閉じ込めた真空養生として、一軸圧縮強さを比較した。なお、気中養生、真空養生ともに供試体の過度な乾燥を防ぐため、保管容器底部に水を満たし容器内を湿潤状態とした(図5.1参照)。養生温度はいずれも室温としているので、両者の養生条件の違いは空気の有無である。地表面近くにある改良土は、空気に晒されるものと考えられる。セメントや石灰のようなカルシウム系の固化材では、水和物である水酸化カルシウムが空気中の二酸化炭素と反応し、炭酸カルシウムを生成してアルカリ性を失う現象を中性化と呼び、改

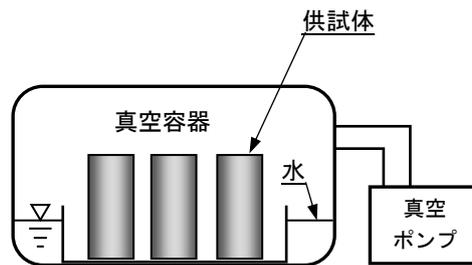


図5.1 真空養生方法

良土の強度に悪影響を及ぼすとされている⁷⁾。酸化マグネシウムではセメントや石灰と同様に空気中の二酸化炭素と反応するが、塩基性炭酸マグネシウムを生成し、これが改良土の強度増加に寄与するとされている⁸⁾。本実験では真空養生を行い、空気中の二酸化炭素との反応を遮断して気中養生供試体の強度と比較することにより、二酸化炭素が改良土の強度に及ぼす影響について定量的に把握することを目的とした。

改良土に加えて、水固化材比を鉍成酸化マグネシウムは**67%**、海成酸化マグネシウムは**80%**とした酸化マグネシウムスラリーについても、材齢**28日**で一軸圧縮試験を行った。

表5.3に一軸圧縮試験の試験条件の組み合わせをまとめた。

表5.3 一軸圧縮試験の試験条件の組み合わせ

試料土	酸化マグネシウム		養生方法
	製造起源	比表面積 cm ² /g	
まさ土	鉍成	4100, 7100 9000, 12500	湿潤・気中・真空
	海成	16050	湿潤
ローム	鉍成	7100	湿潤
	海成	16050	湿潤
沖積土	鉍成	4100, 7100 9000, 12500	湿潤・気中・真空

(5) 熱重量分析

酸化マグネシウムの水和物である水酸化マグネシウムは、空気中の二酸化炭素と反応して塩基性炭酸マグネシウムを生成し、これが強度増加の一因となると指摘されている⁸⁾。そこで、酸化マグネシウムスラリーおよび改良土中で生成した水酸化マグネシウムの定量分析を試みる目的で、熱重量分析を行った。

熱重量分析の分析仕様を表5.4に示す。改良土の試料土はロームを乾燥状態とし乳鉢で磨り潰して粉末状にしたものを用いた。これは、試料土と酸化マグネシウムの反応性を高め、反応生成物の生成を促進させるためである。さらに、酸化マグネシウムの水和化合物とその生成量の変化を調べるため、水固化材比80%とした海成酸化マグネシウムスラリーについても分析を行った。熱重量分析の検体の配合条件を表5.5に示す。

表5.4 熱重量分析の仕様

項目	仕様・条件等
測定機器	TG-50 (メトラートレド社製)
測定温度	35~1,000°C 5°C/分
測定環境	窒素気流 200ml/分
試料質量	約 20mg

表5.5 熱重量分析の配合条件

試料土	酸化マグネシウム	試料土に対する酸化マグネシウム添加割合	試料土+酸化マグネシウムに対する加水割合	測定材齢
なし	海成酸化マグネシウム	—	80%	27日
乾燥ローム	鉍成酸化マグネシウム	50%	65%	7日, 38日
乾燥ローム	海成酸化マグネシウム	50%	65%	7日, 39日

5.3 実験結果および考察

5.3.1 酸化マグネシウムのX線回折結果および走査型電子顕微鏡観察結果

図5.2に酸化マグネシウムのX線回折結果を示す。鉍成および海成酸化マグネシウムのX線回折チャート上での重なりを避けるため、海成酸化マグネシウムのチャートを+1度程度右側にずらして表示している。主な回折強度のピーク位置は、 $2\theta =$ 約36.9°、約42.9°、約62.3°で両者とも同じで、酸化マグネシウムの著しい回折ピークを示している。回折強度の値(cps)は鉍成酸化マグネシウムの方が大きい値を示した。X線回折強度は対象結晶鉍物の量や結晶構造に関係があるとされており、酸化マグネシウム含有量の差や、製造方法の違いに起因する

結晶構造の違いがX線回折強度の違いに表れたものである。したがって、回折強度の大きい鉍成酸化マグネシウムの方が結晶構造が発達しているといえる。

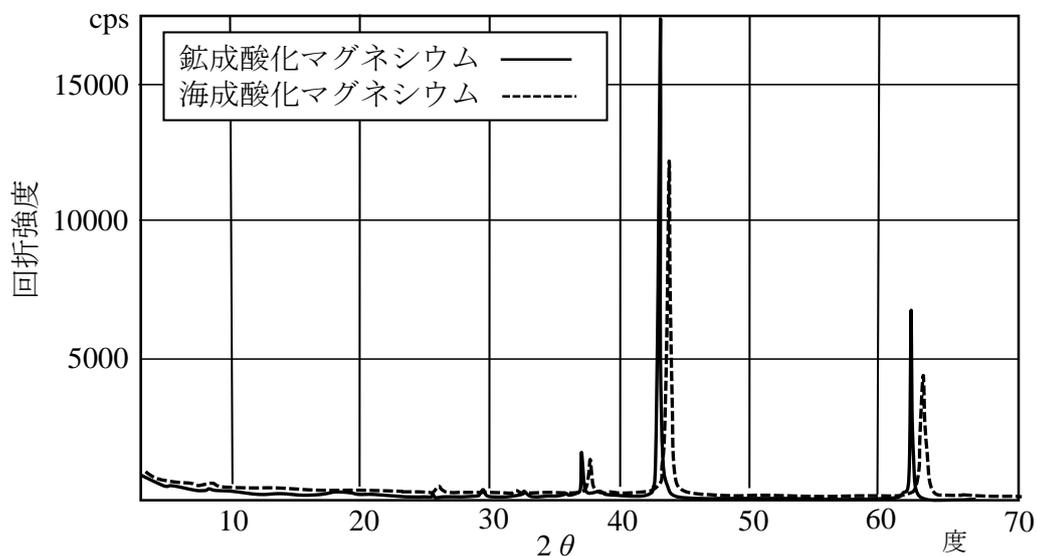


図5.2 酸化マグネシウムのX線回折結果

写真5.1～写真5.3に走査型電子顕微鏡撮影写真を示す。撮影倍率を5000倍とした撮影結果（各写真左側）についてみると、鉍成と海成の原料の違いによる粒子形状の違いはみられず、比表面積が大きいほど、角張った粒子の大きさが小さい傾向がみられた。撮影倍率を30000倍（海成酸化マグネシウムでは40000倍）とすると、角張った粒子を構成するさらに微細な粒子構造の存在がわかる。微細な粒子構造は、鉍成酸化マグネシウムでは比表面積の大きさの違いによらずほとんど同じであるが、海成酸化マグネシウムの微細な粒子構造は、鉍成酸化マグネシウムと比較してさらに細かく、微細な空隙部分が存在していることがわかる。この違いは鉍物起源と海水起源との原料の違いや生成温度の違いによるものと考えられる。

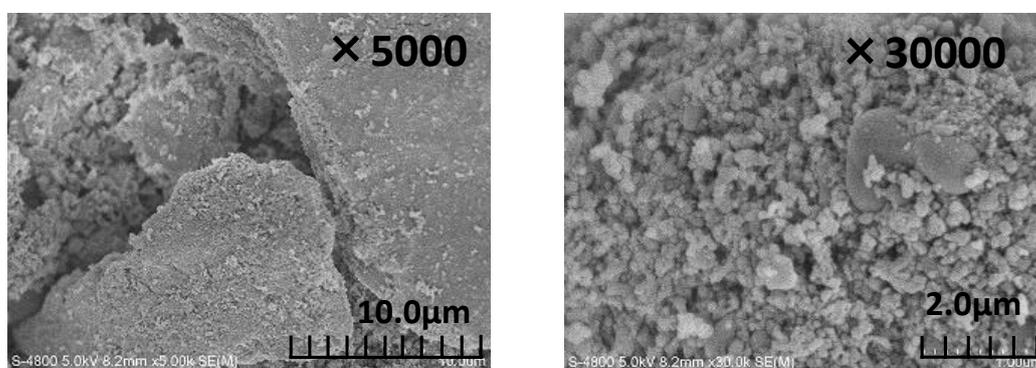


写真 5.1 走査型電子顕微鏡写真
 (鉍成酸化マグネシウム：比表面積=7100cm²/g)

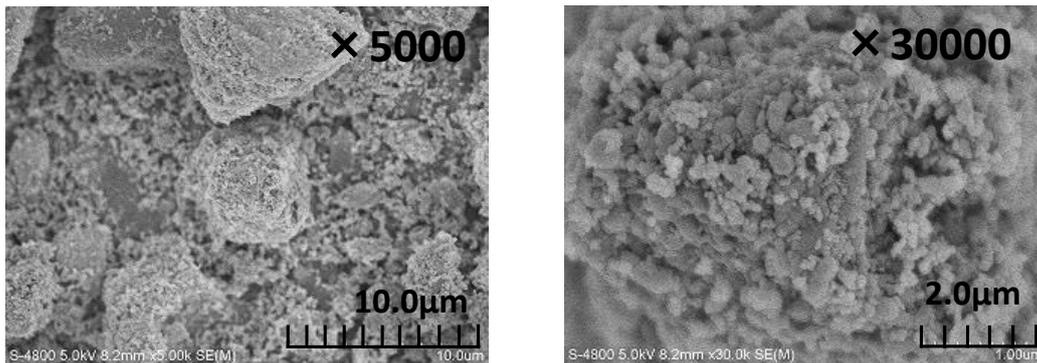


写真 5.2 走査型電子顕微鏡写真
(鈦成酸化マグネシウム：比表面積=12500cm²/g)

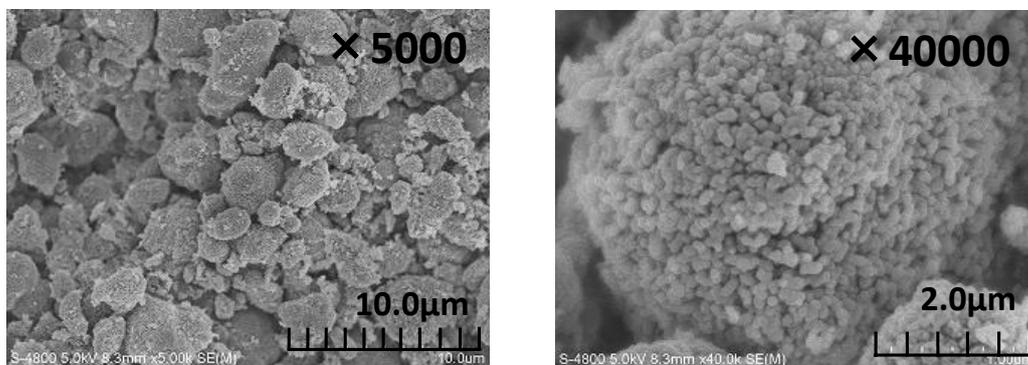


写真 5.3 走査型電子顕微鏡写真
(海成酸化マグネシウム：比表面積=16050cm²/g)

5.3.2 酸化マグネシウムスラリーの含水比の経時変化

図5.3に酸化マグネシウムスラリーの含水比の経時変化を示した。同図には水固化材比から決まるスラリー作製時の初期含水比も併せてプロットしている。鈦成酸化マグネシウムと海成酸化マグネシウムの含水比の経時変化に大きな違いがみられた。鈦成酸化マグネシウムスラリーはいずれの比表面積についても練り混ぜ後7日間はペースト状であり、含水比は練り混ぜ直後に大きく低下したのち、含水比の変化は6時間までは小さく、以後経過時間とともに徐々に含水比は低下した。一方、海成酸化マグネシウムスラリーの含水比は練り混ぜ直後に急激に低下し、1～2時間経過後に発熱を伴いスラリーは硬化し、さらに含水比は低下した。以後28日（672時間）まで含水比の変化はほとんどみられなかった。

鈦成酸化マグネシウムスラリーの比表面積による含水比の経時変化の違いについてみると、比表面積が12500cm²/gの鈦成酸化マグネシウムスラリーの含水比変化が他の比表面積のスラリーと比較してやや大きいのが、海成酸化マグネシウムスラリーでみられた発熱現象や大きな含水比の変動は見られなかった。

酸化マグネシウムは水に触れると水和して水酸化マグネシウムを生成するが、酸化マグネシウムの種類（鈦成、海成）によってその水和反応速度は大きく異なる結果となった。鈦成

酸化マグネシウムについては、比表面積が $10000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度以下では、酸化マグネシウムの水和反応速度に大きな差はないと考えられる。比表面積がさらに大きくなると、水酸化マグネシウムの生成がやや活発になるが、海成酸化マグネシウムで見られた発熱を伴う急激な反応は起こらなかった。この水和反応速度の差は、写真5.1～写真5.3に見られる酸化マグネシウムの結晶構造等の違いによるものと考えられる。なお、発熱を伴う急激な水和反応生成物の水分量の測定をJIS A 1203による含水比測定とすることは議論の余地があるが、同一の試験条件による測定結果の比較として評価している。

以上のことから、鉍成酸化マグネシウムは水との反応が穏やかで、土に対してスラリー添加が可能であるが、海成酸化マグネシウムは急激な反応を示し、スラリー添加が困難なことを示している。

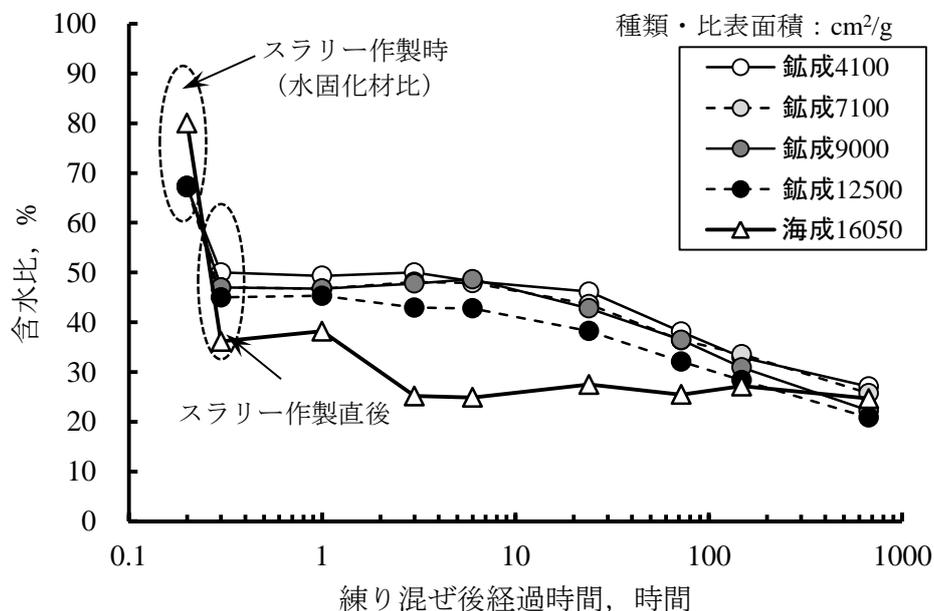


図 5.3 酸化マグネシウムスラリーの含水比の経時変化

5.3.3 改良土の含水比の経時変化

図5.4に試料土をロームとした場合の酸化マグネシウム改良土の含水比の経時変化を示した。鉍成酸化マグネシウムは比表面積が $7100\text{cm}^2/\text{g}$ のものを用いた。鉍成酸化マグネシウム改良土と海成酸化マグネシウム改良土の含水比変化には違いがみられた。鉍成酸化マグネシウム改良土の含水比は練り混ぜ初期にはほとんど変化せず、その後約1日経過後から、経過時間とともに含水比は低下し、3日(72時間)以降では含水比の変化はほとんどみられなかった。海成酸化マグネシウム改良土では、含水比は練り混ぜ直後から28日間連続的に低下した。海成酸化マグネシウムスラリーでみられた発熱を伴う大きな含水比の変動はみられなかった。28日経過時点での鉍成酸化マグネシウム改良土と海成酸化マグネシウム改良土の含水比の差

は、約5%であり、鉍成酸化マグネシウム改良土中には、未水和の酸化マグネシウムがより多く残存していることを示している。

鉍成酸化マグネシウム改良土と海成酸化マグネシウム改良土の含水比変化特性は図5.4に示す通り、図5.3に示した酸化マグネシウムスラリーとは異なり、改良土作製後24時間以降は、両者とも徐々に含水比は低下する傾向にあり、両者間の変化特性に大きな違いはみられなかった。これは、土の水に対する吸着力によって、酸化マグネシウムの水和反応がスラリーとしたときと比べて、穏やかに進行するためと考えられる。

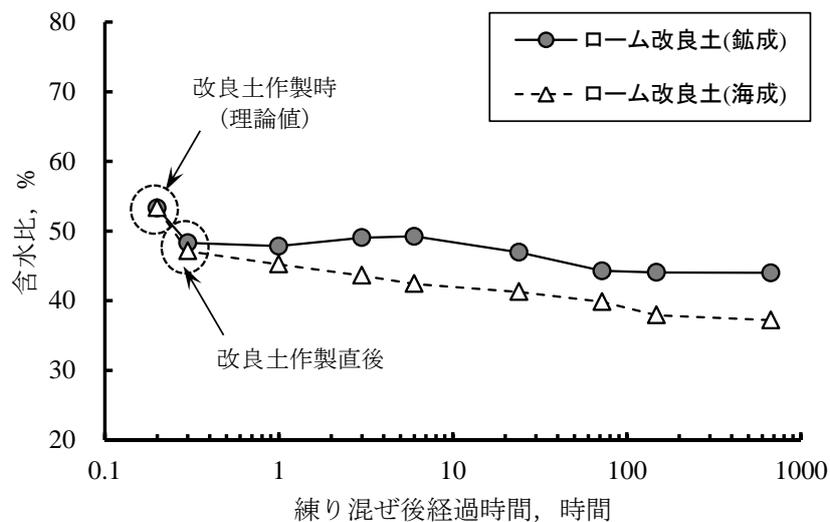


図 5.4 酸化マグネシウム改良土の含水比の経時変化

5.3.4 熱重量分析結果

各検体のTG曲線（温度上昇に伴う質量変化）を図5.5に示す。図5.5の横軸は上昇温度、縦軸は検体質量に対する温度上昇による質量減少率としており、質量減少率20%のスケールを記載している。単位上昇温度あたりの質量減少量がもっとも大きくなるときの温度をピーク温度と呼び（図中、TG曲線の勾配がもっとも大きくなる温度）、図中矢印で示したピーク温度はいずれも370～380℃付近となり、分解水和物は水酸化マグネシウムと断定される。海成酸化マグネシウムスラリーの質量減少量が大きく、熱分解した水酸化マグネシウムの量が多いことを示している。ピーク温度付近の質量減少をすべて式(1)に示す水酸化マグネシウムの脱水反応による水の消失量として熱分解した水酸化マグネシウム量を逆算し、添加した酸化マグネシウムがすべて水和したときの水酸化マグネシウム量に対する割合=水酸化マグネシウム生成率を求めた（式(2)）。



$$\text{水酸化マグネシウム生成率(\%)} = \frac{\text{検体中のMg(OH)}_2\text{量}}{\text{添加したMgOがすべて水和したときのMg(OH)}_2\text{量}} \times 100 \quad \dots \dots \dots (2)$$

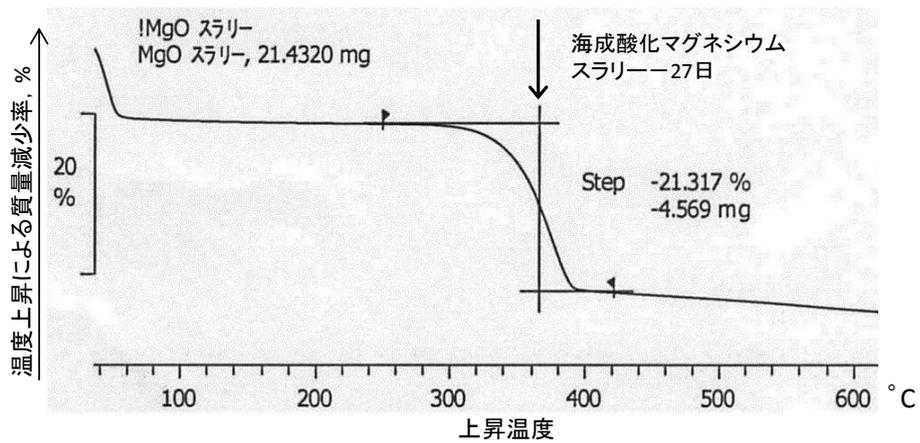


図5.5(a) 熱重量分析結果 (TG曲線-海成酸化マグネシウムスラリー材齢27日)

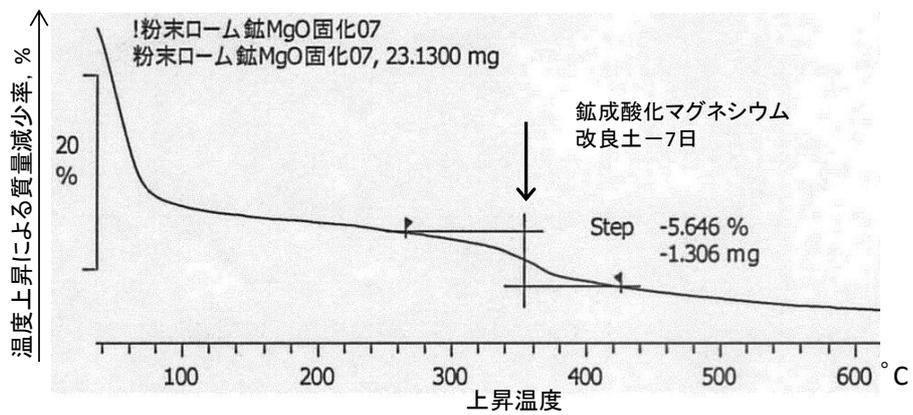


図5.5(b) 熱重量分析結果 (TG曲線-鈹成酸化マグネシウム改良土材齢7日)

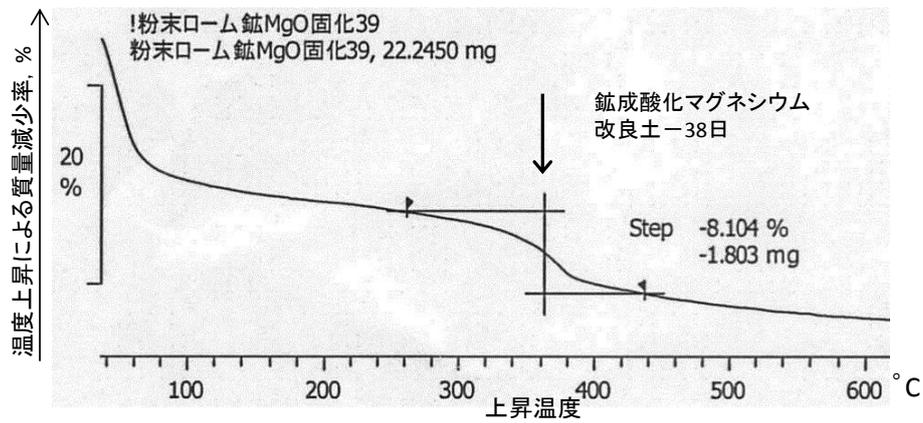


図5.5(c) 熱重量分析結果 (TG曲線—鈰成酸化マグネシウム改良土材齢38日)

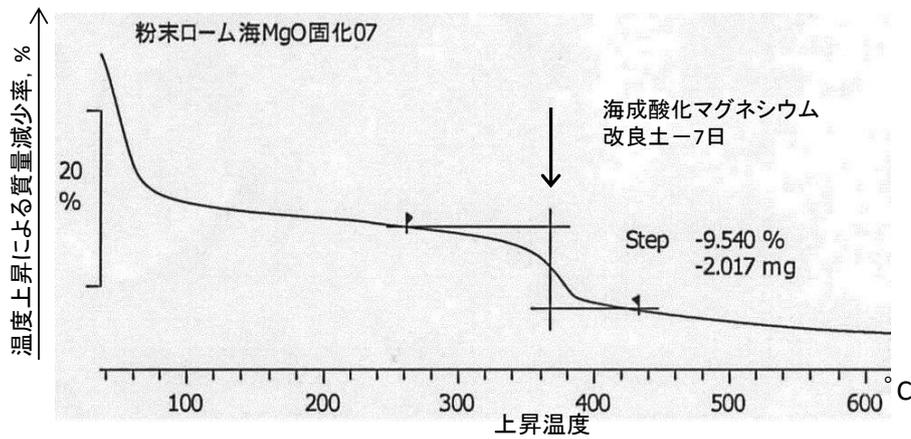


図5.5(d) 熱重量分析結果 (TG曲線—海成酸化マグネシウム改良土材齢7日)

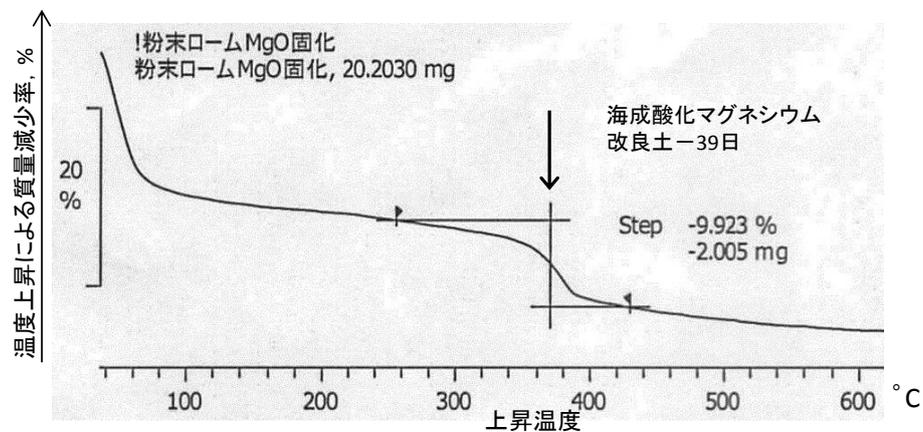


図5.5(e) 熱重量分析結果 (TG曲線—海成酸化マグネシウム改良土材齢39日)

水酸化マグネシウム生成率を表5.6に示す。表5.6中の質量減少率の値は、図5.5中にStepとして示されている。水酸化マグネシウム生成率の計算には、表5.1に示した固化材に含まれる酸化マグネシウム含有率（鉍成酸化マグネシウム=92.2%、海成酸化マグネシウム=96.5%）を反映させた。海成酸化マグネシウムスラリーの練り混ぜ27日後の水酸化マグネシウム生成率は104.1%となり、添加したすべての酸化マグネシウムが水和して水酸化マグネシウムとなったことを示している。図5.3に示した含水比測定結果から、海成酸化マグネシウムスラリーの練り混ぜ28日後の水酸化マグネシウム生成率を求めると101.2%となり、含水比の変化は水酸化マグネシウム生成量の変化とみることができる。改良土の水酸化マグネシウム生成率についてみると、鉍成酸化マグネシウム改良土の水酸化マグネシウム生成率は測定材齢7日から38日にかけて増加しており、水酸化マグネシウムの生成が材齢とともに徐々に進行している。一方、海成酸化マグネシウム改良土の水酸化マグネシウム生成率は測定材齢7日から39日にかけてほとんど変化がなかった。水酸化マグネシウム生成率は鉍成酸化マグネシウム改良土と比較して大きく、材齢初期の段階でほとんどの酸化マグネシウムが水和して水酸化マグネシウムが生成したものと考えられる。海成酸化マグネシウム改良土の水酸化マグネシウム生成率が100%を大きく超過しているのは、水酸化マグネシウムが $Mg(OH)_2 \cdot nH_2O$ の形態をとっていることや、同ピーク温度付近で生じる他の化合物の分解の影響と考えている。

表5.6 水酸化マグネシウム生成率計算結果

検体	測定材齢(日)	ピーク温度 °C	分解水和物	質量減少率 %	水酸化マグネシウム生成率 %
海成酸化マグネシウムスラリー	27	376	水酸化マグネシウム	21.32	104.1
鉍成酸化マグネシウム改良土	7	365	水酸化マグネシウム	5.65	67.9
	38	375	水酸化マグネシウム	8.10	97.5
海成酸化マグネシウム改良土	7	377	水酸化マグネシウム	9.54	128.2
	39	379	水酸化マグネシウム	9.92	133.6

5.3.5 一軸圧縮試験結果

(1) 養生日数に伴う強度変化（まさ土改良土）

まさ土改良土の供試体作製後3日～63日間の養生日数に伴う強度変化を図5.6に示す。鉍成酸化マグネシウム改良土と海成酸化マグネシウム改良土の養生日数に伴う強度変化には大きな違いがみられた。

鉍成酸化マグネシウム改良土の一軸圧縮強さは養生日数とともに増加傾向にあった。比表面積が $7100\text{cm}^2/\text{g}$ の鉍成酸化マグネシウム改良土の材齢28日における一軸圧縮強さは、図5.6に示すように約 2400kN/m^2 となり、鉍成酸化マグネシウムスラリーの材齢28日一軸圧縮強さ=約 300kN/m^2 と比べて非常に大きい。鉍成酸化マグネシウム改良土の強度は、生成した水酸化マグネシウムの強度よりはるかに大きく、まさ土に含まれる粘土鉍物と酸化マグネシウムとの反応によるところが大きいと考えている⁹⁾。鉍成酸化マグネシウム改良土の強度が材齢とともに増加するのは、粘土鉍物と未水和の酸化マグネシウムとの反応が徐々に進行するためであると考えられる。

海成酸化マグネシウム改良土は養生日数が3日、7日の材齢初期においては鉍成酸化マグネシウム改良土を上回る強度を発現したのち、これ以降の強度増加はほとんどみられなかった。海成酸化マグネシウム改良土の材齢28日における一軸圧縮強さは約 1800kN/m^2 であったが、海成酸化マグネシウムスラリーの材齢28日一軸圧縮強さは約 3700kN/m^2 であり、鉍成酸化マグネシウムスラリーの強度と比較して非常に大きい。酸化マグネシウムスラリーの含水比の経時変化や熱重量分析結果から、海成酸化マグネシウム改良土の強度は材齢の初期段階で生成した水酸化マグネシウムの強度によるところが大きいものと考えられる。材齢7日以降、海成酸化マグネシウム改良土の強度増加がほとんど見られなかったのは、水酸化マグネシウムの生成以降、未水和の酸化マグネシウムがほとんどなく、鉍成酸化マグネシウム改良土でみられた強度増加をもたらすような反応が生じていないものと考えている。

鉍成酸化マグネシウム改良土の比表面積の違いについてみると、比表面積= $9000\text{cm}^2/\text{g}$ と $12500\text{cm}^2/\text{g}$ の改良土強度の大きさおよび強度変化傾向にはほとんど差はなかったが、比表面積が大きいほど改良土の強度も大きい傾向にある。比表面積の違いによる酸化マグネシウムスラリーの含水比の経時変化には、さほど差がみられなかったことから、水酸化マグネシウムの生成量もほぼ同じであると考えられる。このことから、鉍成酸化マグネシウム改良土の比表面積による強度の違いは、まさ土に含まれる粘土鉍物と酸化マグネシウムとの反応性の違いによるもので、比表面積が大きいほど粘土鉍物との反応が活発化するものと考えられる。

(2) 養生日数に伴う強度変化（ローム改良土）

ローム改良土の供試体作製後3日～50日間の養生日数に伴う強度変化を図5.7に示す。鉍成酸化マグネシウム改良土の強度は海成酸化マグネシウム改良土と比較して大きいがまさ土改良土にみられたような大きな違いはなかった。材齢初期においても鉍成酸化マグネシウム改良土の強度は大きく、海成酸化マグネシウム改良土を上回り、まさ土改良土とは異なった強度変化傾向を示した。

鉍成酸化マグネシウム改良土の材齢初期における強度発現が良好であったのは、試料土中の水分が多く、酸化マグネシウムの水和に伴い試料土中の水が消費され、その結果、見かけの含水比が低下しコンシステンシーの改善が生じたものと考えられる。

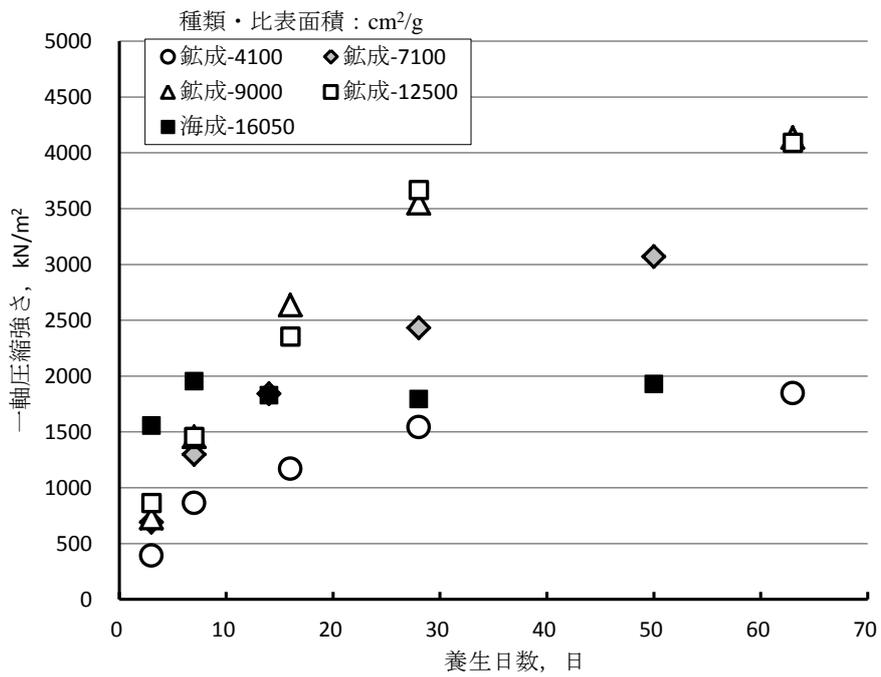


図 5.6 養生日数に伴う強度変化 (まさ土改良土)

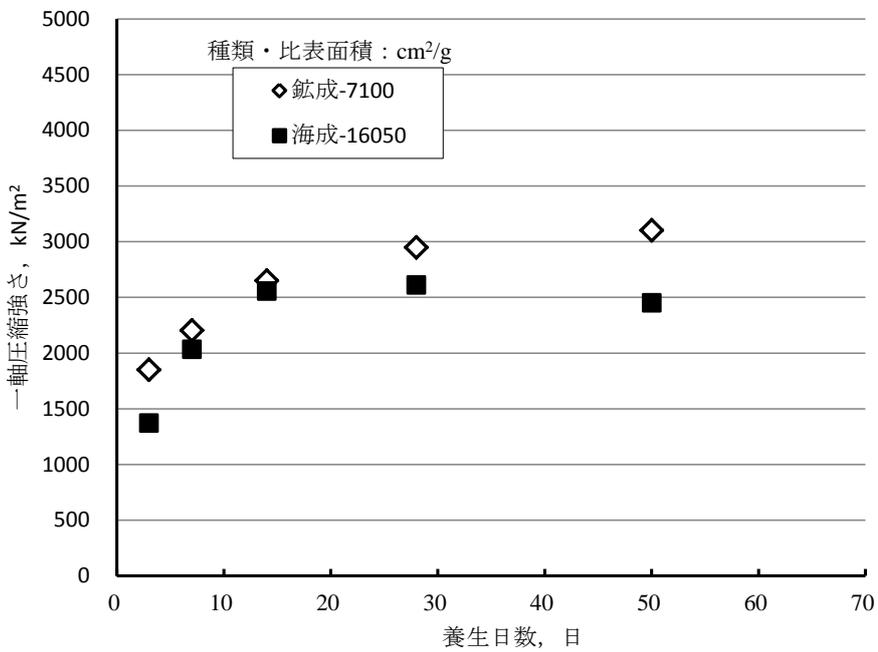


図5.7 養生日数に伴う強度変化 (ローム改良土)

海成酸化マグネシウム改良土の強度が材齢14日以降ほとんど変化がなかった点については、まさ土改良土と同様であった。鉍成酸化マグネシウム改良土および海成酸化マグネシウム改良土ともに材齢28日時点で比較すると、まさ土改良土より強度は大きい。これは、ロームに多量に含まれる非晶質成分^{10),11)}と未水和の酸化マグネシウムとの反応が材齢の初期段階で進行したためである。

(3) 養生日数に伴う強度変化（沖積土改良土）

鉍成酸化マグネシウムを固化材とした沖積土改良土の供試体作製後3日～58日間の養生日数に伴う強度変化を図5.8に示す。改良強度はまさ土改良土やローム改良土と比較して小さい。これは、これまでの実験結果で示されるように、まさ土やローム土には火山性の粘土鉍物が多く含まれているのに対し、沖積土では少ないためと考えられる。養生日数に伴う強度増加傾向は、ローム改良土と同様で、材齢3日、7日といった初期材齢においても強度発現は良好であった。比表面積の違いについてみると、比表面積が大きいほど改良土強度も大きい傾向にあるが、図5.6に示したまさ土改良土と比較すると比表面積による強度の差は小さい。まさ土における実験結果から、比表面積が大きいほど粘土鉍物との反応が活発化するものと考えられるが、沖積土は酸化マグネシウムと反応する有効な粘土鉍物に乏しいためと考えられる。

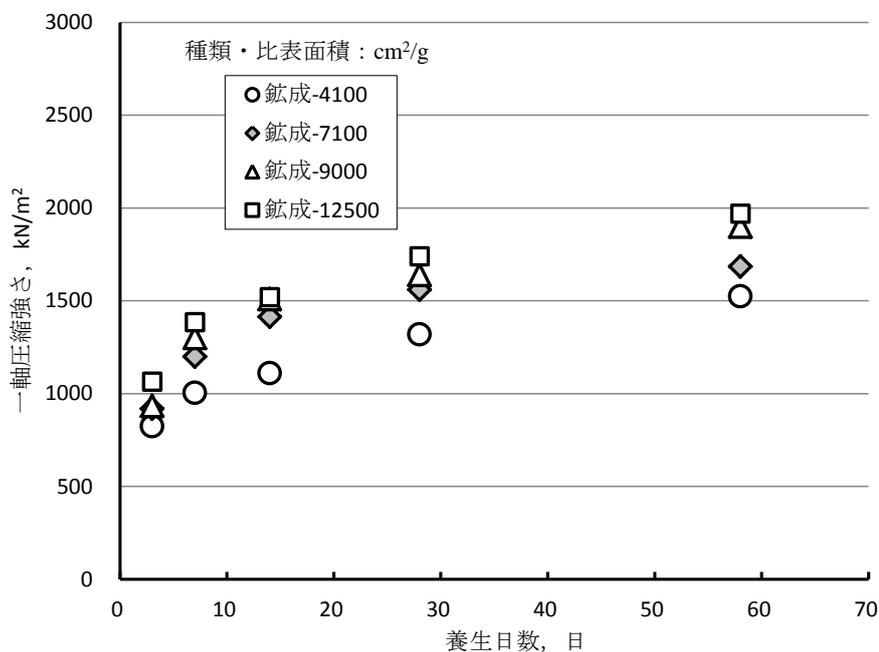


図 5.8 養生日数に伴う強度変化（沖積土改良土）

(4) 養生方法による強度の違い

養生条件を真空養生とした一軸圧縮強さと気中養生とした一軸圧縮強さとを比較したものを図5.9に示す。まさ土改良土は、真空養生下と気中養生下での強度差はほとんどなく、比表面積に対する強度の違いも図5.6に示す比表面積が大きいほど改良強度も大きいという傾向とほぼ同様であった。

真空養生と気中養生との養生条件の大きな違いは空気の有無である。空気中には、二酸化炭素が存在することから、二酸化炭素と酸化マグネシウムの化合物である塩基性炭酸マグネシウムの生成が推定されるが、養生日数が120日程度では、真空養生と気中養生下における改良強度の差はほとんどなく、空気中の二酸化炭素の強度への影響はみられなかった。沖積土改良土はいずれの比表面積についても気中養生下の強度が真空養生下より大きく、気中養生下の強度は、酸化マグネシウムの比表面積が小さいほど大きい結果となった。Yaolinらは¹²⁾、酸化マグネシウム改良土に二酸化炭素を強制的に通気し、その結果、改良土の強度が大きく増加したとしているが、空気中での放置程度では酸化マグネシウムと二酸化炭素との反応は生じにくいものと考えられる。

一軸圧縮試験時の供試体の含水比状態は、一軸圧縮強さに影響を及ぼす。そこで、改良土の含水比測定結果を図5.10、図5.11に示す。まさ土改良土の含水比は、真空養生下および気中養生下ともに7%程度で、養生期間中湿潤状態が保たれていたとあってよい。一方、沖積土

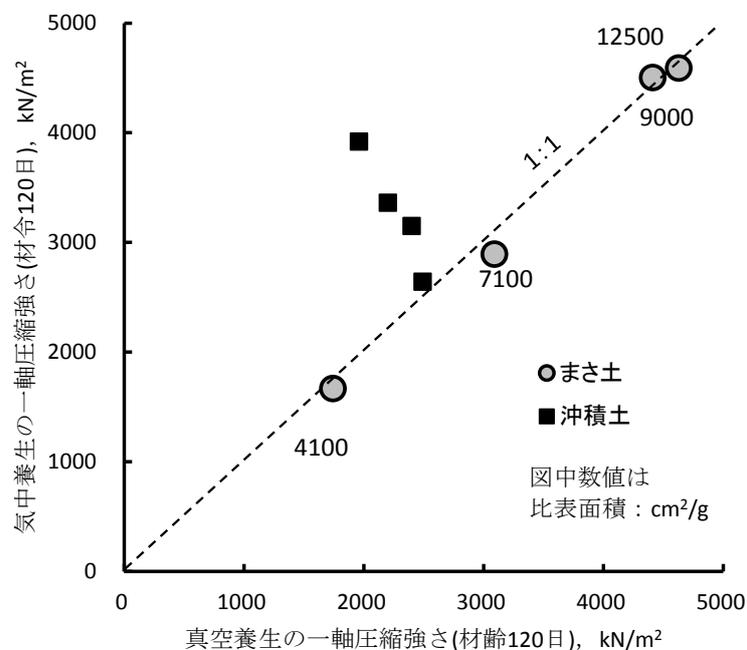


図5.9 鉍成酸化マグネシウム改良土の養生方法による一軸圧縮強さの比較

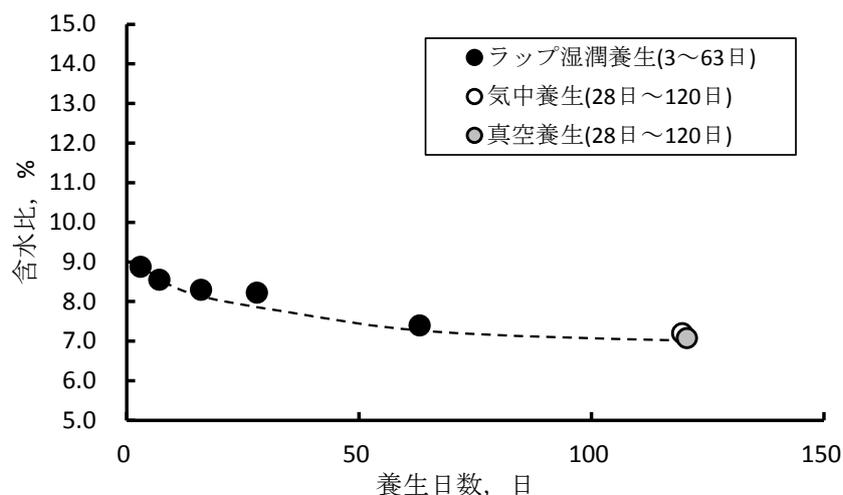


図 5.10 供試体含水比の経時変化(まさ土改良土)

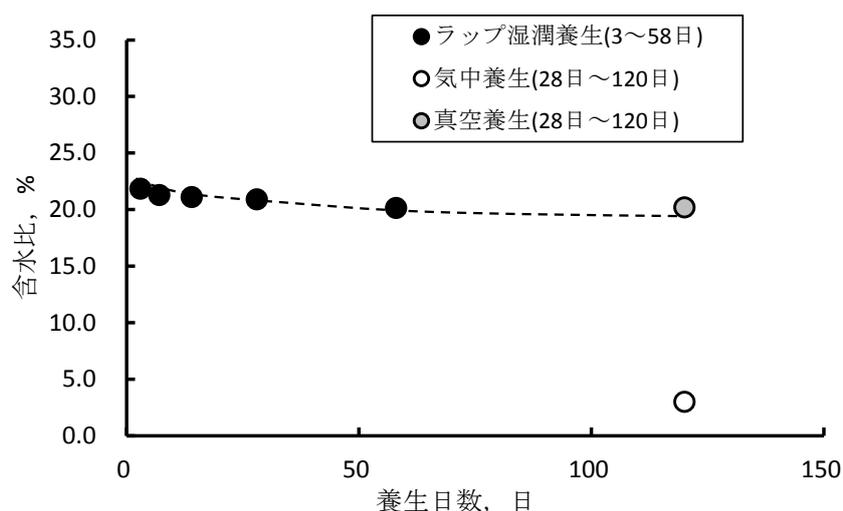


図 5.11 供試体含水比の経時変化(沖積土改良土)

改良土では、真空養生下の含水比が 20%、気中養生下の含水比が 3%程度となり、気中養生下の環境が乾燥状態であったことを示すものである。3章で示したように、野外に放置した酸化マグネシウム改良土の強度が大きいことから、気中養生下における沖積改良土の強度が大きくなった要因の一つには、供試体が乾燥状態となったことが考えられる。

5.3.6 改良土の pH

図 5.12 に湿潤養生を行ったまさ土改良土における pH の経時変化を示す。改良土作製直後の pH は、10.7 程度で、酸化マグネシウムの種類による違いはほとんどみられない。その後は、いずれの酸化マグネシウムに改良土においても材齢に伴い pH は低下傾向にある。鉍成酸化マグネシウムについてみると、酸化マグネシウムの比表面積による改良土の pH の違いは見られず、材齢 120 日では混合直後よりやや低下し、10.3 程度となった。海成酸化マグネシ

ウムでは, 材齢に伴う pH 低下が大きく, 材齢 50 日で pH=10.0, 材齢 120 日では 9.7 となり, 混合直後と比較して 1.0 低下した。

改良土の pH の経時変化は, 酸化マグネシウムの比表面積による影響は小さく, 写真 5.1～写真 5.3 に示した結晶構造の違いによるところが大きいものと考えられる。

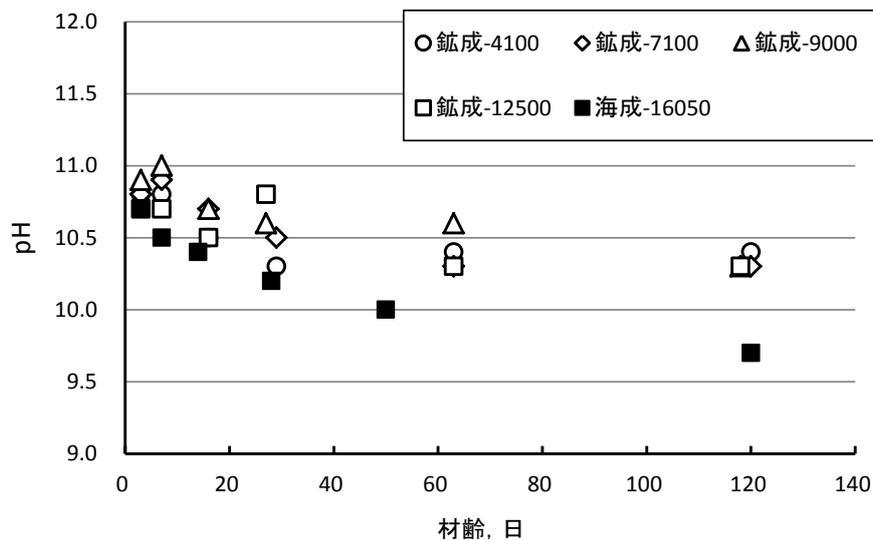


図 5.12 改良土の pH の材齢に伴う変化

5.4 まとめ

原料や製造温度, 比表面積の異なる酸化マグネシウムを用いて酸化マグネシウムスラリーおよび改良土を作製し, 製造方法の異なる酸化マグネシウムの種類の違いが酸化マグネシウムスラリーや改良土の性質に及ぼす影響について調べた。得られた結果を以下に要約して示す。

- (1) 鈹成酸化マグネシウムと海成酸化マグネシウムの水和反応速度は大きく異なり, 海成酸化マグネシウムは水と接触後, 早期に水和物である水酸化マグネシウムを生成する。これは, 海成酸化マグネシウムの方が鈹成酸化マグネシウムと比べて結晶性が低いこと, 海成酸化マグネシウムがより小さい粒子構造をもつためであると考えられる。
- (2) 比表面積が $10000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度以下の鈹成酸化マグネシウムの比表面積の違いによる水和反応速度の違いはあまりみられず, 酸化マグネシウムの水和反応速度の違いは, 酸化マグネシウムの原料や生成温度を含めた製造方法によるところが大きいと考えられる。
- (3) 酸化マグネシウム改良土の強度特性は, 酸化マグネシウムの水和物である水酸化マグネシウムの生成速度およびその生成量の違いによって異なる。鈹成酸化マグネシウムは, 改良土中に未水和の酸化マグネシウムが残存することから, これが土に含まれる粘土鈹物と反

応して徐々に強度が増加する。海成酸化マグネシウムは土中の水分と速やかに反応して水酸化マグネシウムを生成し、さらに水酸化マグネシウム自体の強度も大きいことから、材齢初期段階における改良土の強度は大きい。しかしながら、未水和の酸化マグネシウムがほとんどないため、鉍成酸化マグネシウムのような土中の粘土鉍物との反応が生じず、強度増加がみられない。

- (4) ローム改良土の材齢に伴う強度変化においては、鉍成酸化マグネシウムと海成酸化マグネシウムの間にはまさ土改良土でみられたような違いは認められない。この原因は、ロームには他の土質と比較して非晶質成分が多く含まれているため^{10),11)}、鉍成酸化マグネシウムの未水和の酸化マグネシウムと非晶質成分との反応が材齢の初期段階で進行したためであると考えられる。
- (5) 鉍成酸化マグネシウム改良土では、比表面積が大きいほど強度が大きい傾向がある。これは、粒子が細かいほど土に含まれる粘土鉍物との反応性が増すためと考えられる。このことから、目標強度が大きい場合には、比表面積の大きい鉍成酸化マグネシウムを使用するのが有効である。
- (6) 鉍成酸化マグネシウム改良土における空気中の二酸化炭素の強度への影響は、養生日数が120日程度ではほとんどない。酸化マグネシウム改良土の強度発現のひとつの要素として塩基性炭酸マグネシウムの生成が指摘されているが³⁾、今回の実験では、強度への影響は認めなかった。
- (7) 酸化マグネシウム改良土のpHは、酸化マグネシウムの比表面積より製造起源に伴う結晶構造の影響を受け、海成酸化マグネシウムの方が材齢によるpHの低下が大きい。
- (8) 酸化マグネシウムの製造方法やその比表面積によって、改良効果が異なることが明らかとなり、土に含まれる非晶質成分との反応に改良効果を期待する場合は鉍成酸化マグネシウムを、含水比が大きい土を早期に改良したい場合は、海成酸化マグネシウムを選択することが有効である。

[参考文献]

- 1) BSI 生物化学研究所：「肥料製造学」水酸化マグネシウム，[bsikagaku.jp/f-industry/Mg\(OH\)₂-industry.pdf](http://bsikagaku.jp/f-industry/Mg(OH)2-industry.pdf)，2013.
- 2) 山田哲司，蔵野彰夫，伊藤 隆，日高 厚：高炉スラグ微粉末を用いたソイルセメントの固化特性について，第33回地盤工学研究発表会，pp.2267-2268，1998.
- 3) 山田哲司，西形達明：水酸化マグネシウムが酸化マグネシウム改良土の硬化反応に及ぼす影響，第45回地盤工学研究発表会，pp.543-544，2010.
- 4) 西形達明，山田哲司，西田一彦，松田 豊：酸化マグネシウムの地盤改良への適用について，土と基礎，Vol.54，No.7，pp.19-21，2006.
- 5) 社団法人セメント協会：JCAS A-01-1990，セメント協会標準試験方法，1990.

- 6) 社団法人セメント協会：JCAS L-01-2005，セメント系固化材による改良体の強さ試験方法，2006.
- 7) 中村健，北詰昌樹：セメント安定処理土の耐久性に関する室内試験，港湾空港技術研究所資料，No.1128，June 2006.
- 8) 藤森新作，小堀茂次：自然環境にやさしい土壌硬化剤マグホワイトの開発，農業土木学会誌，第68巻，第12号，pp.1297-1300，2000.
- 9) 田中知樹，西形達明，西田一彦，山田哲司：酸化マグネシウムの地盤改良への適用に関する研究(その2：配合条件の違いによる強度特性について)，第39回地盤工学研究発表会，pp.815-816，2004.
- 10) 田中知樹，西形達明，西田一彦，山田哲司：酸化マグネシウムの地盤改良への適用に関する研究(その4：X線回折試験による反応生成物の解明)，土木学会第59回年次学術講演会，III部門，pp.1011-1012，2004.
- 11) 藤原信吾，西形達明，西田一彦，山田哲司：酸化マグネシウムの地盤改良への適用に関する研究(その6：非晶質物質の定量試験結果)，土木学会第60回年次学術講演会，III部門，pp.79-80，2005.
- 12) Yaolin Yi, Martin Liska, Cise Unluer, and Abir Al-Tabbaa : Carbonating magnesia for soil stabilization, Can. Geotech. J. 50, pp.899-905, 2013.

6 章 高炉スラグ微粉末を用いた混合固化材の開発

6.1 はじめに

これまで、酸化マグネシウム改良土の特徴や改良土の固化機構について、基礎的な考察を行ってきた。以降の 6 章、7 章および 8 章では、地盤改良分野への酸化マグネシウムの適用方法について述べる。

酸化マグネシウムは、流通価格がセメントの 5~10 倍程度と高く、適用にあたっては、材料価格に見合う使用用途・改良目的・付加価値等が必要となる。また、対象土質によって改良効果が大きく異なることや、改良土の強度がセメント等改良土と比較して小さく¹⁾、結果として酸化マグネシウムの添加量が多くなって材料コストの増大に結びついている。

これらの現状を踏まえて、製鉄過程で産出される副産物である安価な高炉スラグ微粉末を酸化マグネシウムに加えた混合固化材を用いることにより、材料コストの低減と適用土質の範囲拡大を目的とした混合固化材の検討を行った。これまでの研究結果から、酸化マグネシウム改良土が持つ曝露条件下での長期安定性²⁾に注目し、混合固化材を用いた改良土は、土舗装材や歴史的土建造物の復元・修復材料への適用を目的としている。

本章では、混合固化材を用いた改良土の強度特性や曝露環境での耐久性を明らかにしておく必要があると考え、酸化マグネシウムと高炉スラグ微粉末の混合比を変化させた改良土を作製し、酸化マグネシウムと高炉スラグ微粉末の混合比が改良土の強度に及ぼす影響を調べた。また、改良土の耐久性の評価の指標として、改良土の繰り返し水浸試験を行い、繰り返し水浸下での改良土の強度特性やpHの変化について調べた。

6.2 高炉スラグ微粉末の地盤改良材としての特徴

高炉スラグ微粉末は、比表面積が $3000\text{cm}^2/\text{g}$ 以上に調整された高炉スラグで、高強度・高流動・低発熱性コンクリート用混和材として利用されている。また、比表面積が $3000\sim 4000\text{cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグは一般の高炉セメントの材料として用いられている。比表面積が $3000, 4000, 6000, 8000\text{cm}^2/\text{g}$ のものは、コンクリート用高炉スラグ微粉末として JIS 規格が制定されている。

高炉スラグは、アルカリ刺激材の存在下で水と反応して凝結硬化する性質（潜在水硬性という）をもっており、固化材として用いる場合は、消石灰やセメントなどのアルカリ材を添加して、液相の pH を上昇させる必要がある。著者ら³⁾は、比表面積が $4000\sim 18000\text{cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末とアルカリ刺激材として普通ポルトランドセメントを用いて、鋭敏比の高い沖積粘性土を対象土として配合実験を行った。その結果、改良土の強度は普通ポルトランドセメントのみを使用した場合と比較して大きくなり、高炉スラグ微粉末の比表面積が大きいほど改良土の強度が大きくなったとしている。また、普通ポルトランドセメントと高炉ス

ラグ微粉末の混合比が 20 : 80~40 : 60 で改良土の強度が最大となったとしている。

河野⁴⁾は、セメント製造時のエネルギーに由来する CO₂ 排出量を削減するため、高炉スラグ高含有セメントの開発を行い、高強度改良体の造成を目指しており、普通ポルトランドセメント、高炉スラグ、無水石膏等の最適混合比を求めている。

本研究では、高炉スラグ微粉末の凝結促進材として酸化マグネシウムを用いることとし、酸化マグネシウム改良土の特徴を生かし、材料コストの低減と適用土質の範囲拡大を目的とした配合実験を行った。

6.3 実験方法

6.3.1 実験材料

(1) 酸化マグネシウムおよび高炉スラグ微粉末

酸化マグネシウムは、ドロマイト (CaCO₃・MgCO₃) 中の天然炭酸マグネシウム鉱石 (MgCO₃) を焼成・粉砕して製造したもので、比表面積が 7100m²/g のものを用いた。酸化マグネシウムは、固化材や重金属等不溶化材の材料として一般に流通しているものである。

高炉スラグ微粉末は、市販の JIS A 6206 「コンクリート用高炉スラグ微粉末 4000」を用いた。4000 は比表面積 (cm²/g) の代表値を表している。コンクリート用高炉スラグ微粉末にはこの他、3000, 6000, 8000 タイプのものがあるが、もっとも流通量が多くかつ価格の安い 4000 タイプのものを用いた。

実験では、表記の 2 種類の材料を単独、もしくは比率を変化させた混合材料（以下、“混合固化材” と称す）として用いた。表 6.1 に実験に用いた酸化マグネシウムおよび高炉スラグ微粉末の化学組成等の物性値を示す。

(2) 試料土

実験に用いた試料土の土質特性値を表 6.2 に示す。実験に用いた試料土はこれまでの研究の結果から、火山性の粘土鉱物に富み酸化マグネシウムによる改良効果の大きい「まさ土」および「ローム」に加え、火山性の粘土鉱物が少ないと考えられる沖積土、コンクリート用細骨材の川砂の 4 種類とした。後述する実験方法で述べるように、酸化マグネシウムと高炉スラグ微粉末との混合固化材による改良土の強度特性の検討では、これらの 4 種類の試料土を用い、繰り返し水浸試験ではまさ土を試料土として用いた。

まさ土は生駒山麓の露頭より採取し、ロームは関東ロームを一旦乾燥させて地盤材料として販売されているものを用いた。沖積土は、徳島県内の地盤改良工事に伴う配合試験時に対象地盤より採取したのものを用いた。試料土の含水比は、実験方法で述べるように、供試体作製時の締固めに対して過転圧状態とならないように調整した。

表 6.1 固化材の物性値

項 目	酸化マグネシウム	高炉スラグ 微粉末
原 料	MgCO ₃ (ドロマイト鉱石)	鉄鋼スラグ
MgO	92.2	5.4
化学組成 %		
CaO	1.9	42.5
SiO ₂	1.6	33.0
Fe ₂ O ₃	0.5	0.3
Al ₂ O ₃	0.2	13.8
SO ₄	—	0.1
生成温度	約 800°C	—
調整方法	キルン焼成 ミル粉砕	—
密度 g/cm ³	3.15	2.77
Ig-loss %	3.46	0.10
比表面積 cm ² /g	7100	4050

表 6.2 試料土の物性値

項 目	生駒産 まさ土	沖積土	ローム	川砂
調整含水比 %	15.3	34.0	73.7	8.3
土粒子の密度 g/cm ³	2.66	2.71	2.86	2.64
粒 最大粒径 mm	2.0	4.75	4.75	4.75
度 礫分 %	9.7	10.9	5.5	8.8
分 砂分 %	75.9	52.2	26.5	90.5
布 細粒分 %	14.4	36.8	68.0	0.7
液性限界 %	—	47.3	113.2	—
塑性限界 %	—	24.3	51.5	—
塑性指数	NP	23.0	61.7	NP
Ig-loss %	3.0	3.7	16.8	0.1
土の分類	S-FG	SF-G	V	S-G
採取地	大阪府	徳島県	茨城県	—

6.3.2 実験方法

(1) 混合固化材を用いた改良土の強度試験

混合固化材による改良土の強度特性を把握するため、改良土の一軸圧縮試験を行った。対象とした試料土は先に述べた4種類の土質で、さらに水固化材比を70%とした固化材スラリーについても供試体を作製して一軸圧縮試験を行った。

混合固化材の酸化マグネシウムと高炉スラグ微粉末の混合比率は、100 : 0, 50 : 50, 30 :

70, 10 : 90, 0 : 100の5パターンとした。混合比率は、高炉スラグ微粉末と普通ポルトランドセメントを用いた改良土に関するこれまでの研究³⁾で、普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末との混合比が20 : 80~40 : 60で一軸圧縮強さが最も大きくなったこと等を参考に設定した。

試料土の含水比は、表 6.2 に示す調整含水比とした。混合固化材添加量は試料土湿潤質量に対して一律 10%とし、ソイルミキサーで十分に混合後、φ50×100mm 且つ2つ割りモールドに JCAS L-01 : 2006「セメント系固化材による改良体の強さ試験方法」⁵⁾により締固めて供試体を作製した。締固め方法を表 6.3 に示す。供試体は、材齢 3 日時点で型枠から脱型し、食品用ラップフィルムで包んで室温にて湿潤養生とし、養生日数は、7 日、28 日、56 日の 3 材齢とした。

表 6.3 供試体の締固め方法

ランマー質量 kg	突固め層数	1層の 突固め回数
1.5	3	12

(2) 改良土の繰り返し水浸試験

改良土全体が含水比の変化に曝される土舗装等への適用を想定し、改良土の耐久性を評価しうる一つの指標として、改良土の養生条件を水浸状態と初期湿潤状態とに繰り返す試験（以下繰り返し水浸試験と称す）を行った。水浸後の気乾状態を初期湿潤状態としたのは、過度の乾燥による収縮クラックの発生や水浸時の急激な吸水膨張による供試体の損傷を考慮したものである。気乾時の含水状態を初期湿潤状態としても、供試体の表面付近は乾燥状態となり、水浸時には試料土や固化材に含まれるカルシウムイオン、マグネシウムイオン、鉄イオン(二価)、アルミニウムイオン(二価)等の溶出による改良土の状態の経年変化を再現できるものと考えた⁶⁾。

対象土は生駒山まさ土とし、実験方法 3.2.1 に示した方法で供試体を作製した。混合固化材の混合比は、酸化マグネシウム : 高炉スラグ微粉末=20 : 80, 50 : 50, 80 : 20 の 3 パターンとした。供試体作製後、材齢 28 日で供試体を水道水に水浸させ、以降、室内放置による気乾・水浸を繰り返した。水浸時間は、供試体の湿潤質量がほぼ衡量となるまでの 3 日間とした。乾燥過程は過度の乾燥を避け、最初の水浸前脱型時の含水比と同じ程度になるまで室内放置とした。繰り返し回数は、水浸－気乾を 1 サイクルとして、最大 40 サイクルとした。水道水は、1 サイクルごとに新鮮なものと交換した。繰り返し回数=10 サイクル, 20 サイクル, 30 サイクル, 40 サイクル終了時点で一軸圧縮試験を行い、破壊後の供試体を用いて、地盤工学会基準「土懸濁液の pH 試験方法」(JGS0211-2009) により pH を測定した。また、繰り返し

水浸を実施しない湿潤養生供試体も準備し、同材齢で一軸圧縮試験を行い、繰り返し水浸供試体と比較・検討を行った。表 6.4 に試験条件まとめた。

表 6.4 試験条件

試験目的	改良土の強度特性	改良土の耐久性
試料土	まさ土, 沖積土 ローム, 川 砂	まさ土
混合固化材 酸化マグネシウム: 高炉スラグ微粉末	0:100, 10:90 30:70, 50:50 100:0	20:80, 50:50 80:20
養生	湿潤養生	28日間湿潤養生後, 繰り返し水浸
材 齢	7日, 28日, 56日	10, 20, 30, 40 サイクル

6.4 実験結果および考察

6.4.1 固化材スラリーの強度特性

図 6.1 に固化材スラリーにおける混合固化材の酸化マグネシウム混合率と一軸圧縮強さとの関係を材齢ごとに示す。各プロットは 3 個の供試体の平均値としている。酸化マグネシウムのみによる一軸圧縮強さ（酸化マグネシウム混合率=100%）は、著者らが指摘しているように^{7),8)}、水酸化マグネシウム生成によるところが大きく、セメント等と比較すると極めて小さい。高炉スラグ微粉末のみのスラリー（酸化マグネシウム混合率=0%）は材齢 56 日時点でも固化せず、自硬性は認められなかった。

酸化マグネシウムの混合率が減少するにともない、一軸圧縮強さは増加し、材齢 28 日での一軸圧縮強さは酸化マグネシウム混合率=10%において約 8000kN/m²となった。固化材スラリーが、固化材中の酸化マグネシウム混合率が少ない配合で大きな強度を示したことから、酸化マグネシウムが高炉スラグ微粉末の反応（アルカリ促進）材として機能したものと考えられる。図 6.1 から、固化材スラリーの一軸圧縮強さのピークは、固化材中の酸化マグネシウム混合率が 30%以下の範囲であると考えられる。

材齢 28 日時点の混合固化材スラリー強度が、酸化マグネシウム混合率=50%で約 5000kN/m²、10%で約 8000kN/m²と酸化マグネシウムスラリーの強度=1500kN/m²と比較して大きくなったことで、酸化マグネシウムのみを固化材とした場合と比較して地盤改良材としての適用範囲が広がるものと考えられる。

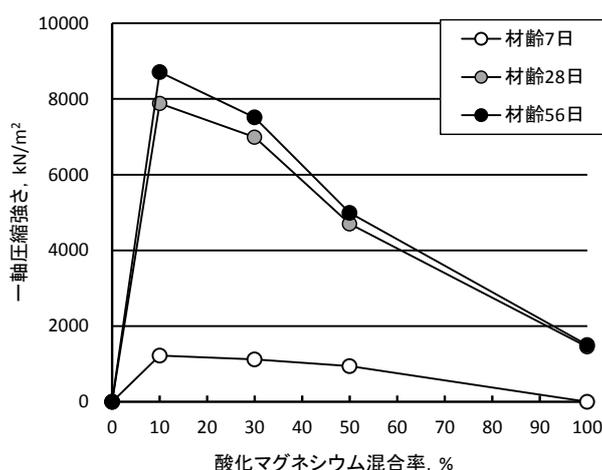


図 6.1 酸化マグネシウム混合率と一軸圧縮強さの関係（固化材スラリー）

6.4.2 沖積土，まさ土，川砂の改良土の強度特性

図 6.2，図 6.3，図 6.4 にそれぞれ沖積土，まさ土，川砂を用いた改良土の混合固化材の酸化マグネシウム混合率と一軸圧縮強さとの関係を材齢ごとに示す。各プロットは 3 個の供試体の平均値としている。

沖積土を用いた改良土の強度特性（図 6.2）についてみると，酸化マグネシウム混合率=10%～50%で一軸圧縮強さは最大値を示すと考えられるが，固化材スラリーの強度特性と異なり，この範囲で顕著な一軸圧縮強さのピークはみられない。また，酸化マグネシウムのみによる一軸圧縮強さ（酸化マグネシウム混合率=100%）は，200kN/m²程度と非常に小さい。混合固化材による改良土の一軸圧縮強さは，材齢 28 日において 2000kN/m²に達しており，高炉スラグ微粉末混合による改良効果が大きいものと考えられる。材齢とともに一軸圧縮強さのピークが，酸化マグネシウム含有率が少ない配合に移行する傾向がある。

まさ土を用いた改良土の強度特性（図 6.3）では，沖積土と比較して混合固化材を用いた効果が高い。まさ土のように粘土鉱物，特に火山性粘土鉱物に富む土質に対しては，酸化マグネシウム単体でも改良効果は大きく，材齢 56 日時点で 1000kN/m²程度の一軸圧縮強さとなったが，高炉スラグ微粉末を併用した混合固化材の改良効果はさらに大きい。材齢 7 日における強度発現も良好であり，材齢に伴う強度増加も顕著である。一軸圧縮強さのピークは固化材中の酸化マグネシウム混合率が 30%以下の範囲と考えられる。

川砂を用いた改良土の強度特性（図 6.4）では，固化材スラリーの強度特性に近い傾向を示した。これは，川砂が細粒分を含む沖積土やまさ土とは異なり粘土鉱物に乏しいため，固化材自体の固化特性が卓越したものと考えられる。沖積土と同様に酸化マグネシウムのみによる一軸圧縮強さ（酸化マグネシウム混合率=100%）は小さいが，高炉スラグ微粉末を併用した混合固化材の改良効果は大きい。材齢に伴う強度増加は大きく，一軸圧縮強さのピークは固化材スラリーと同様に酸化マグネシウム混合率が 30%以下の範囲と考えられる。

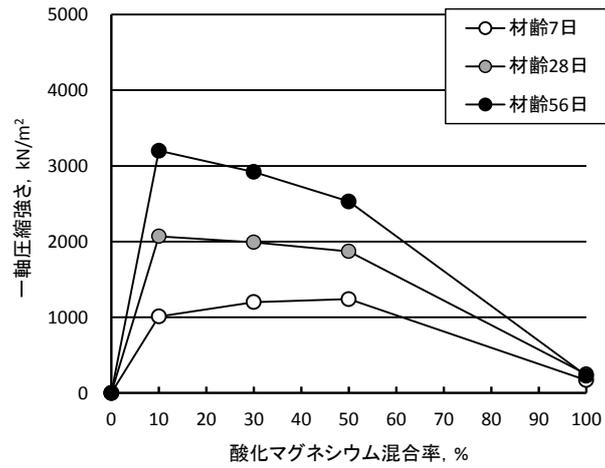


図 6.2 酸化マグネシウム混合率と一軸圧縮強さの関係（沖積土）

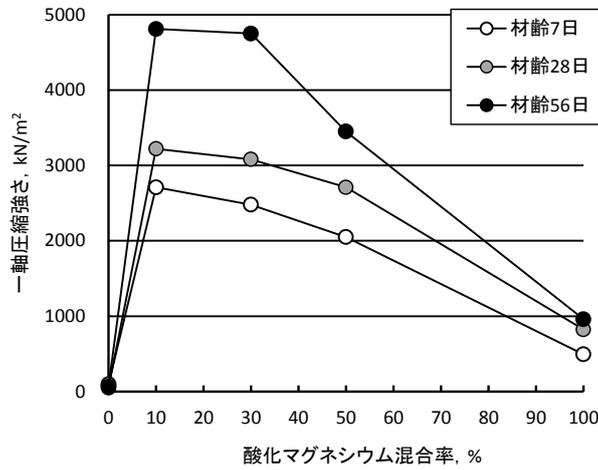


図 6.4 酸化マグネシウム混合率と一軸圧縮強さの関係（まさ土）

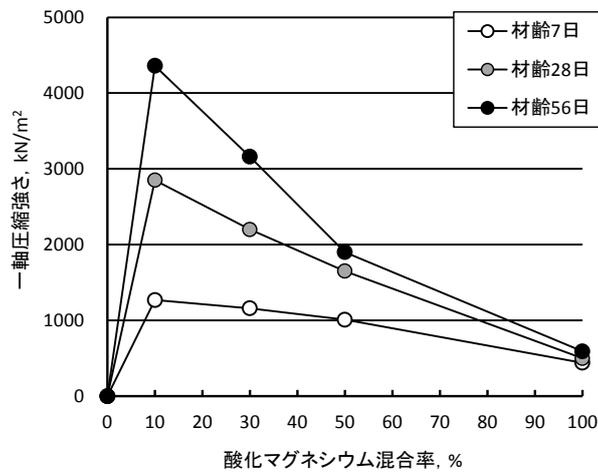


図 6.4 酸化マグネシウム混合率と一軸圧縮強さの関係（川砂）

6.4.3 ローム改良土の強度特性

ロームを用いた改良土の強度特性（図 6.5）では，固化材スラリーや他の試料土を用いた試験結果とは異なる傾向を示した。各プロットは 3 個の供試体の平均値を示している。酸化マグネシウムの混合率の増加に伴って一軸圧縮強さは増加し，酸化マグネシウムのみによる改良土の一軸圧縮強さが最大となり，高炉スラグ微粉末を混合した効果がほとんどなかった。これは，4 章で示したように，ロームに含まれる非晶質の粘土鉱物が酸化マグネシウムと反応して硬化物を生成したことと，ロームはセメントによる改良効果は小さく，セメントに近い化学組成をもつ高炉スラグ微粉末を混合した効果はみられなかったと考えられる。

また，材齢 7 日時点からの材齢にともなう強度増加はほとんどなかった。これは，ロームに多量に含まれる非晶質成分と未水和の酸化マグネシウムとの反応が材齢の初期段階で進行したためであると考えられる⁹⁾。

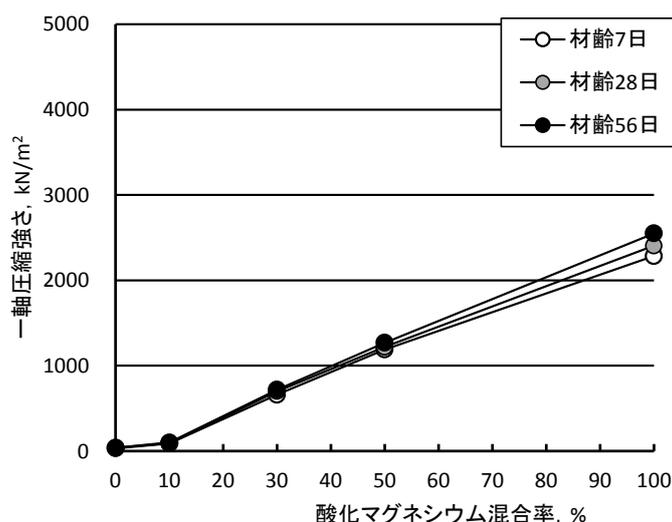


図 6.5 酸化マグネシウム混合率と一軸圧縮強さの関係（ローム）

6.4.4 改良土の材齢にともなう強度変化

図 6.6，図 6.7，図 6.8 に材齢にともなう一軸圧縮強さの変化を酸化マグネシウム混合率ごとに示した。各プロットは 3 個の供試体の平均値としている。なお，材齢に伴う強度変化がほとんど認められなかったローム改良土は除外した。これらによると，酸化マグネシウム混合率の違いによる改良土の材齢にともなう強度変化の傾向は，固化材スラリーを含めて大きな差はない。

固化材スラリーの材齢に伴う強度変化は，図 6.1 に示したように材齢 7 日から 28 日にかけて大きく強度増加したのち，材齢 56 日まで微増傾向であった。この傾向は，高炉スラグを多

く含む高炉セメント B 種を用いたコンクリートの材齢に伴う強度変化と同様であり¹⁰⁾、固化材スラリーにおける強度は高炉スラグ微粉末の水和反応によるところが大きく、酸化マグネシウムは高炉スラグ微粉末のアルカリ促進材として機能しているものと考えられる。

改良土の材齢に伴う強度変化についてみると、材齢 7 日と材齢 28 日強度比が 1.2~2 倍程度となっていることや材齢 28 日以降も強度が増加傾向にあり、普通ポルトランドセメント、高炉セメント B 種を用いた改良土の材齢に伴う強度変化¹¹⁾と同様の傾向を示した。したがって、混合固化材の配合設計を行う際、材齢 7 日あるいは 28 日を配合強度とする従来のセメント等固化材による配合設計と同様の設計手法が適用可能であると考えられる。

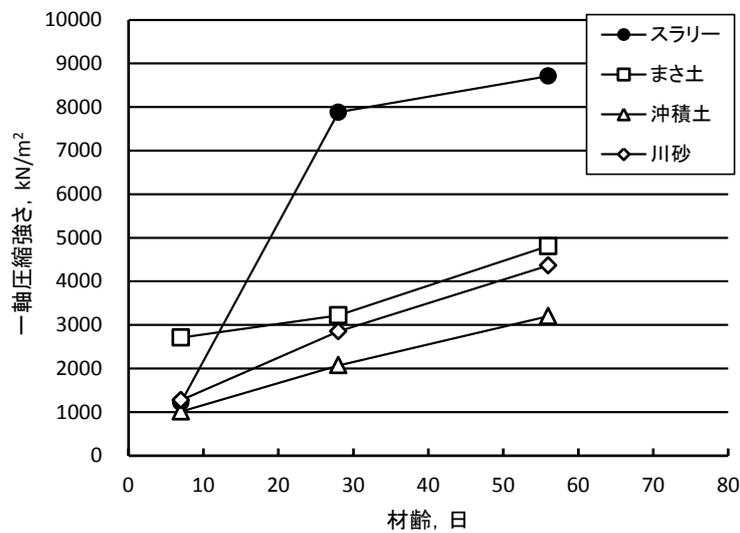


図 6.6 材齢に伴う強度変化 (酸化マグネシウム混合率=10%)

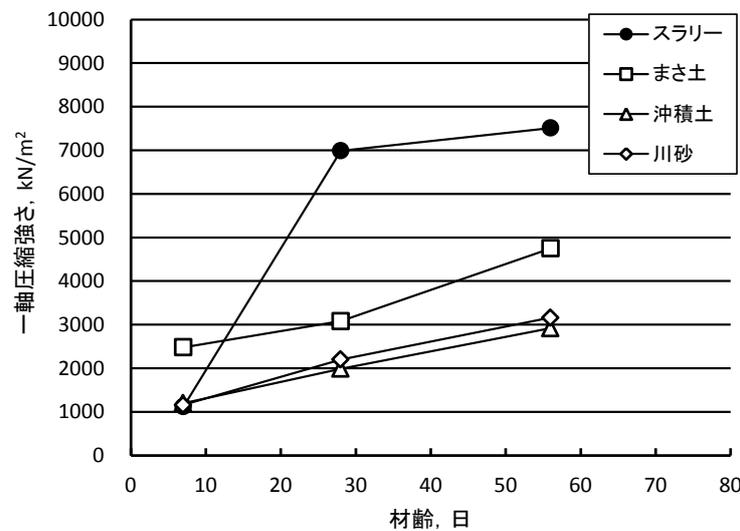


図 6.7 材齢に伴う強度変化 (酸化マグネシウム混合率=30%)

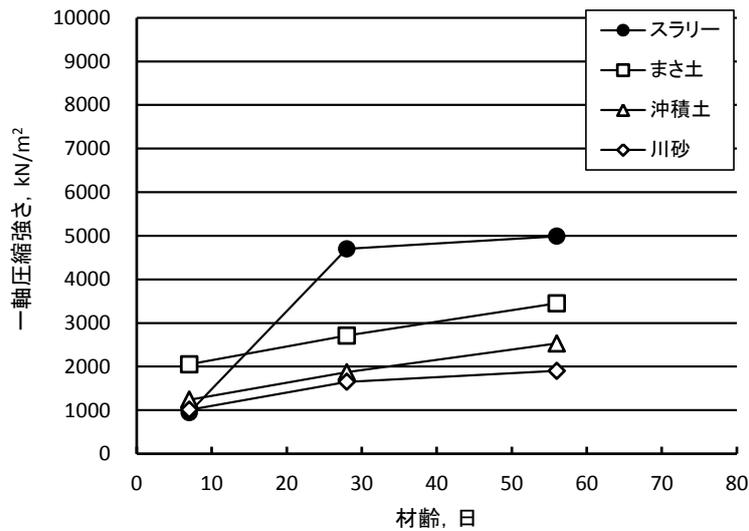


図 6.8 材齢に伴う強度変化 (酸化マグネシウム混合率=50%)

6.4.5 繰り返し水浸試験結果 (一軸圧縮強さ)

図 6.9, 図 6.10, 図 6.11 に繰り返し水浸を行った供試体の材齢にともなう一軸圧縮強さの変化を湿潤養生供試体との比較で示した。実験ケースごとに 3 個の供試体を作製し、一軸圧縮強さに大きな差がなかったことから、図中の各プロットは 3 供試体の一軸圧縮強さの平均値としている。試料土は実験方法で述べたとおり、まさ土を用いた。図中、括弧内数値は繰り返し回数を示している。10 サイクル終了時点の材齢が 70 日、20 サイクルが 110 日、30 サイクルが 150 日、40 サイクルが 190 日程度となっており、1 サイクルあたり水浸 2~3 日、気中 1~2 日単位で繰り返し水浸させた。

湿潤養生改良土の一軸圧縮強さは、混合固化材の酸化マグネシウム混合率による大きさの違いはあるものの、材齢とともに増加傾向にある。普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末を用いた改良土の長期材齢における一軸圧縮強さに関する著者ら¹²⁾の測定例では、材齢 100 日以降も大きい強度増加を得ていることから、長期材齢における強度増加傾向はスラグ系セメントの特徴と考えられる。

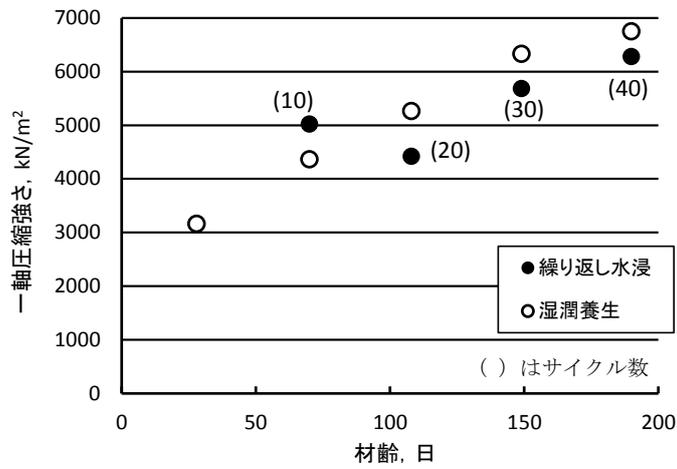


図 6.9 養生条件による改良土の一軸圧縮強さの違い (酸化マグネシウム混合率=20%)

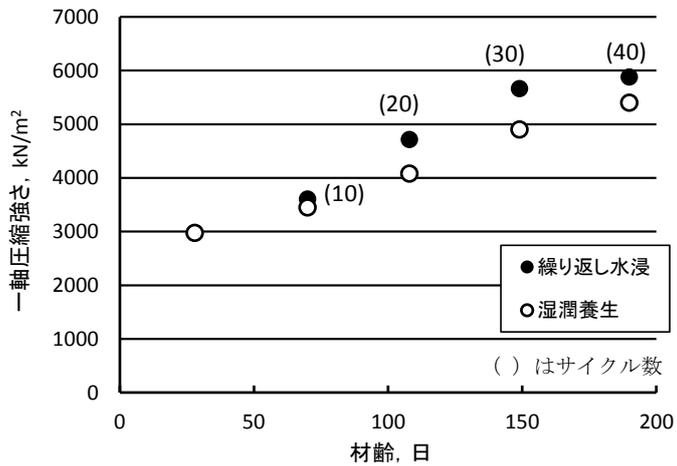


図 6.10 養生条件による改良土の一軸圧縮強さの違い (酸化マグネシウム混合率=50%)

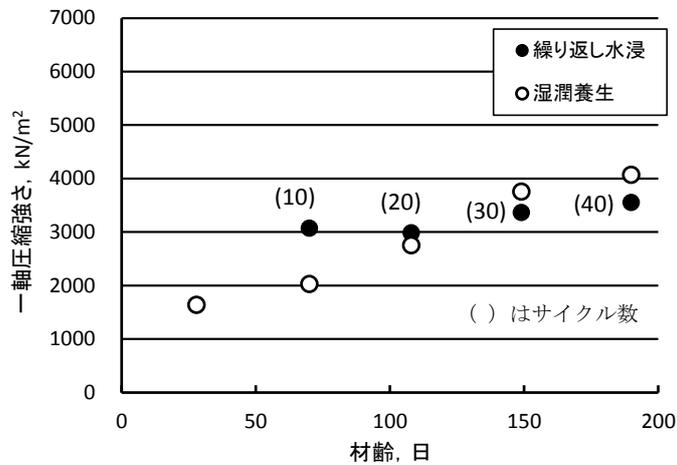


図 6.11 養生条件による改良土の一軸圧縮強さの違い (酸化マグネシウム混合率=80%)

写真 6.1 に、30 サイクルの繰り返し水浸を行った供試体と同材齢の湿潤養生供試体の外観を示す。30 サイクルの繰り返し水浸を行った供試体は、水槽からの出し入れや気中設置時に生じたと考えられる供試体端部のわずかな欠け以外は、同材齢の湿潤養生供試体と比較してほとんどその状態に変化がみられないことがわかる。繰り返し水浸による改良土の一軸圧縮強さは、酸化マグネシウム混合率=20%、80%において強度の上下変動がみられるものの、湿潤養生供試体と比較して大きな強度低下はみられず、繰り返し水浸下においても材齢とともに強度は増加傾向にある。本研究の 3 章で示したように、改良土の一軸圧縮強さが、野外曝露や乾湿繰り返し条件下で湿潤養生環境と比較して同等以上の値を示したことから、酸化マグネシウムは高炉スラグ微粉末との併用においても、その改良土は酸化マグネシウム単体使用と同様の高い耐久性を有するものと考えられる。



写真 6.1 繰り返し水浸 30 サイクル後の供試体と湿潤養生供試体の比較例

6.4.6 繰り返し水浸試験結果（改良土の pH）

図 6.12 に湿潤養生下における改良土の材齢に伴う pH の変化を示す。混合固化材を用いた改良土の pH は、酸化マグネシウム混合率によらず材齢とともに低下傾向にあった。図 6.13 に繰り返し水浸後の改良土の pH の変化を示す。図中、括弧内数値は繰り返し回数を示す。繰り返し水浸後の改良土の pH は、湿潤養生下と同様に材齢（繰り返し回数）とともに低下し、湿潤養生下と比較して pH は低い値となった。特に、酸化マグネシウム混合率を 80%とした改良土は、繰り返し水浸に伴う pH の低下は大きく、20 サイクル以降 pH は 9 以下となった。20 サイクル以降の改良土の pH の変化は小さく、40 サイクルまで改良土の pH はほぼ一定の値となった。

セメント系改良土では、pH の低下は固化体の劣化の一要因として考えられているが¹³⁾、図 6.9～図 6.11 に示したように一軸圧縮強さは材齢とともに増加しており、混合固化材を用いた改良土では、pH の低下が必ずしも改良土の劣化に影響を及ぼしていないと考えられる。

以上の混合固化材の特徴を利用すると、改良土が乾燥状態や湿潤状態に変化する野外環境にさらされる場合、改良土を中性～弱アルカリ域に維持するには、酸化マグネシウム混合率

を大きくして 80%程度とすれば、改良土の pH が中性域に近づき、生態系に対する影響を低減できるものと考えられる。一方、土舗装等で防草効果を期待したい場合は、高炉スラグ微粉末の混合率を多くすることで、改良土をアルカリ領域に保つことができるものと考えられる。

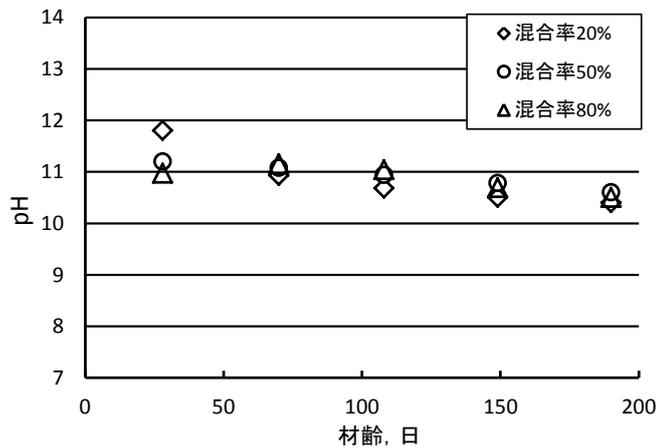


図 6.12 材齢にともなう改良土の pH 変化 (湿潤養生)

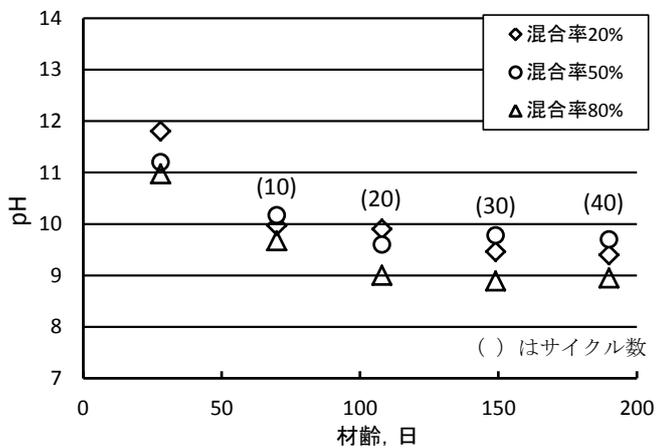


図 6.13 材齢にともなう改良土の pH 変化 (繰り返し水浸)

6.5 まとめ

酸化マグネシウムと高炉スラグ微粉末の混合比を変化させた改良土を作製し、酸化マグネシウムと高炉スラグ微粉末の混合比が改良土の強度に及ぼす影響を調べた。また、改良土の耐久性の評価の一指標として、改良土の繰り返し水浸実験を行い、改良土の強度特性や pH

の変化について調べた。得られた結果を以下に示す。

- (1) 混合固化材スラリーの一軸圧縮強さは、酸化マグネシウム混合率=50%で約 5000kN/m²、10%で約 8000kN/m²となり、酸化マグネシウムスラリーの強度=1500kN/m²と比較して大きくなった。このことから、酸化マグネシウムのみを固化材とした場合と比較して、混合固化材は地盤改良材としての適用範囲が広がるものと考えられる。
- (2) 混合固化材を用いた沖積土、まさ土、川砂改良土の一軸圧縮強さは、酸化マグネシウムのみを固化材とした場合と比較して大きく、酸化マグネシウムの混合率が 30%以下の範囲で最大となった。
- (3) 混合固化材を用いたローム改良土は、高炉スラグ微粉末の添加効果はなく、酸化マグネシウムのみを固化材とした方が改良効果が大きい。
- (4) 混合固化材を用いた沖積土、まさ土、川砂改良土の一軸圧縮強さの材齢にともなう強度増加は、セメント等固化材によるものと同様の傾向を示し、セメント等固化材による配合設計と同様の設計手法が適用可能であると考えられる。ただし、混合固化材を用いた改良土の特徴を生かすためには、事前に土質ごとに配合試験を行い、用途に応じた最適な酸化マグネシウムの混合率を求めておく必要がある。
- (5) 混合固化材を用いたまさ土改良土は、40 サイクルの繰り返し水浸を受けても、強度低下等の状態変化は見られず、湿潤養生下と同様に材齢にともなう強度増加傾向を示した。
- (6) 混合固化材を用いたまさ土改良土の pH は、繰り返し水浸 10~20 サイクルで大きく低下した後、40 サイクルまではほぼ一定の値となった。
- (7) 野外環境下において混合固化材を用いるとき、低アルカリ環境が必要な場合は酸化マグネシウムの含有率を多くすることで、また、防草対策等で高アルカリに改良土を維持したい場合は、高炉スラグ微粉末の含有率を多くすることで対応が可能である。

[参考文献]

- 1) 西形達明, 山田哲司, 西田一彦, 松田 豊: 酸化マグネシウムの地盤改良への適用について, 土と基礎, Vol.54, No.7, pp.19-21, 2006.
- 2) 田中知樹, 西形達明, 西田一彦, 山田哲司: 酸化マグネシウムの地盤改良への適用に関する研究(その2:配合条件の違いによる強度特性について), 第39回地盤工学研究発表会, pp.815-816, 2004.
- 3) 山田哲司, 蔵野彰夫, 伊藤 隆, 日高 厚: 高炉スラグ微粉末を用いたソイルセメントの固化特性について, 第33回地盤工学研究発表会, pp.2267-2268, 1998.
- 4) 河野貴穂, 津川澄夫, 吉田智憲, 佐藤英二: 高炉スラグ高含有セメントを用いた地盤改良体の特性(その1), 第45回地盤工学研究発表会, pp.565-566, 2010.
- 5) 社団法人セメント協会: JCAS L-01-2005, セメント系固化材による改良体の強さ試験方法,

2006.

- 6) 松川尚史, 井上啓司, 澤幸平, 中山義久, 西田一彦: 古い土構造物の土性とその劣化に関する考察, 第42回地盤工学研究発表会, pp.149-150, 2007.
- 7) 山田哲司, 西形達明, 西田一彦: 酸化マグネシウムの製造方法が改良土の性質に及ぼす影響について, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.68, No.4, pp. 732-741, 2012.
- 8) 山田哲司, 西形達明: 水酸化マグネシウムが酸化マグネシウム改良土の硬化反応に及ぼす影響, 第45回地盤工学研究発表会, pp.543-544, 2010.
- 9) 藤原信吾, 西形達明, 西田一彦, 山田哲司: 酸化マグネシウムの地盤改良への適用に関する研究(その6: 非晶質物質の定量試験結果), 土木学会第60回年次学術講演会, III 部門, pp.79-80, 2005.
- 10) 社団法人セメント協会コンクリート専門委員会: 委員会報告ダイジェスト版, pp.7-8, 2011.
- 11) CDM 研究会: セメント系深層混合処理工法「設計と施工マニュアル」, pp.84-85, 1991.
- 12) 山田哲司, 蔵野彰夫, 伊藤 隆, 日高 厚: 高炉スラグ微粉末を用いたソイルセメント工法の開発, 鴻池組技術研究報告, pp.35-43, 1999.
- 13) 社団法人セメント協会: セメント系固化材による地盤改良マニュアル第二版, pp.58, 1985.

7章 有害重金属等不溶化材としての利用

7.1 はじめに

市街地再開発や土地利用の変更に伴う土壌調査などで、有害物質の不適正な取り扱いや汚染物質の漏洩などが原因とされる土壌汚染が判明する事例が多い。平成14年に施行された土壌汚染対策法（平成22年改正）がその牽引役となっているものと考えられる。汚染土壌の修復技術は大きく分けて、汚染物質の周辺地盤への拡散・移動を防止する「封じ込め技術」と汚染物質を除去する「浄化技術」とがあり、汚染物質や修復目標、さらに対策工事後の土地の利用形態などに応じて適切な対策方法が選定されている¹⁾。

固化・不溶化処理は、有害汚染物質の含有量が改良前後で変化がないことで、溶出量が環境基準（表7.1参照）を達成できても指定区域の解除を受けることができないことから、修復技術としての積極的な選択肢がないのが現状である。このような背景から、固化・不溶化処理は、汚染土壌を埋立処分基準（概ね土壌環境基準の30倍）以下に固化・不溶化し、管理型処分場に搬出する手段として利用されるケースが多い。しかしながら、管理型処分場の負担や、処分費用の低減の観点から、処理後の土地の利用形態によっては、土壌汚染による環境リスクを低減するための適切な措置（リスク低減措置）の一つとして不溶化・固型化の処理技術の研究は重要であると考えられる^{2),3)}。

表 7.1 重金属等(第二種特定有害物質)の指定基準

特定有害物質の種類	指定基準	
	土壌溶出量基準* mg/L	土壌含有量基準** mg/kg
カドミウム及びその化合物	0.01以下	150以下
六価クロム化合物	0.05以下	250以下
シアン化合物	不検出	遊離シアン 50以下
水銀及びその化合物	0.0005以下 アルキル水銀は不検出	15以下
セレン及びその化合物	0.01以下	150以下
鉛及びその化合物	0.01以下	150以下
ひ素及びその化合物	0.01以下	150以下
ふっ素及びその化合物	0.8以下	4000以下
ほう素及びその化合物	1以下	4000以下

* 環境省告示第18号(平成15年3月6日)

** 環境省告示第19号(平成15年3月6日)

固化・不溶化処理は、セメントなどを用いて固化体とすることで、飛散リスクの低減を図るとともに、透水係数の小さい改良土に汚染土壌を改質して、汚染物質の溶出濃度を大幅に低減できることから、有効な修復技術のひとつと考えられる⁴⁾。

本章では、重金属等汚染土壌に対してセメントや酸化マグネシウムなどの固化材を添加・混合して固化・不溶化を図った改良土の溶出特性について調べ、酸化マグネシウムの固化不溶化材としての有用性について検討した。

7.2 実験方法

7.2.1 汚染土

実験に用いた汚染土壌は、工場跡地などから採取した実汚染土壌 7 種類、人為的にまさ土に重金属等を添加して作製した模擬汚染土壌 3 種類の計 10 種類である。なお、ここで扱う重金属等とは、土壤環境基準項目のうち、カドミウム、全シアン、鉛、六価クロム、ヒ素、総水銀、セレン、フッ素、ホウ素の第二種特定有害物質に該当するものをいう。実汚染土は自然含水比状態で実験に必要な量をよく混合し、9.5mm フルイを通過したものを試料土とした。模擬汚染土壌は、9.5mm フルイを通過したまさ土に重金属等を水溶液にして添加・混合し、最適含水比付近に調整後、3 ヶ月以上密封養生したものを試料土とした。

表 7.2 に実験に用いた汚染土壌のおもな土質特性と重金属等の含有・溶出量を示す。含有量の測定方法は底質調査法、溶出量は環境庁告示第 46 号法により行い、pH は溶出操作の検液を測定した。

7.2.2 固化材

実験に用いた固化材は、炭酸マグネシウム鉱山から製造した比表面積 $7000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度に調整した酸化マグネシウムと高炉セメント B 種とした。セメントを高炉セメント B 種としたのは、セメント等に含まれる六価クロムの溶出の恐れが少ないためである⁵⁾。固化材の添加量は通常地盤改良工事で用いられる $100\sim 150\text{kg}/\text{m}^3$ の範囲とした。

7.2.3 供試体の作製

固化材の添加方法は粉体添加とし、固化材と試料土をソイルミキサーで十分に混合後、セメント系固化材による安定処理土の試験方法(セメント協会)⁶⁾に準じて供試体を作製した。試料土の密度は、表記試験方法によって作製された締固め密度とし、これをもとに固化材の添加量を計量した。硬化後、型枠から脱型後 20°C で密封養生し、材齢 7 日(一部の試料)および材齢 28 日で一軸圧縮試験を行い、破壊供試体を粉碎・風乾後、環境庁告示第 46 号溶出試験を行った。改良土の pH は溶出操作後の検液を測定した。

表 7.2 実験に用いた汚染土壌の汚染状況

汚染土 の区分	試料No.	原土の 含水比 (%)	原土の pH	鉛 (Pb)		砒素 (As)		六価クロム (CrVI)		セレン (Se)		シアン (CN)		ふっ素 (F)		ほう素 (B)	
				含有 mg/kg	溶出 mg/L	含有 mg/kg	溶出 mg/L	含有 mg/kg	溶出 mg/L	含有 mg/kg	溶出 mg/L	含有 mg/kg	溶出 mg/L	含有 mg/kg	溶出 mg/L	含有 mg/kg	溶出 mg/L
実汚染土	A-1	18.5	10.4	790	0.009	230	0.25	—	—	25	0.041	—	—	—	—	—	—
	A-2	18.7	11.2	480	<0.005	96	0.017	—	—	6.2	<0.005	—	—	—	—	—	—
	A-3	17.5	9.4	2300	0.008	200	4.4	—	—	8.4	0.022	—	—	—	—	—	—
	A-4	22.5	7.6	640	<0.005	69	0.028	—	—	24	0.029	—	—	140	0.7	—	—
	A-5	11.3	8.9	59	<0.005	150	0.31	—	—	17	0.022	—	—	—	—	30	3.7
	A-6	15.9	9.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	37	3.1	—	—	—
	A-7	10.0	7.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	110	2.7	—	—
模擬 汚染土	I-1	10.3	6.8	51	0.035	—	—	67*	2.92	—	—	—	—	—	—	—	—
	I-2	10.3	3.8	4900	22	430	0.051	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	I-3	10.3	7.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	800	57	490	37

*総クロム含有量

7.3 実験結果および考察

7.3.1 鉛・ひ素・六価クロムに対する不溶化効果

固化・不溶化処理を行った改良土の pH および重金属等溶出量を表 7.3 に示す。

図 7.1 に高炉セメント B 種による不溶化効果のうち、鉛、ひ素、六価クロムの不溶化効果に関するものを、原土に対する溶出量との比較で示す。図中の矢印は、定量限界未満の測定データを示している。図 7.1 によると、高炉セメント B 種の添加・混合による一定の不溶化効果が認められ、土壤環境基準(溶出量が 0.01mg/L 以下)を達成するケースがみられる(鉛、ひ素)。一方で、原土壌の溶出量が土壤環境基準以下の場合、高炉セメント B 種の添加によって溶出量が原土より増大するケースもみられる。これは、原土壌の鉛含有量が多く、高炉セメント B 種の添加によって、改良土中の pH が上昇し、鉛が溶出しやすくなったためである。六価クロムに対する不溶化効果は、鉛やひ素と比較して小さいものと考えられる。

図 7.2 に酸化マグネシウムによる不溶化効果のうち、鉛、ひ素、六価クロムの不溶化効果に関するものを、原土に対する溶出量との比較で示す。図 7.2 によると、酸化マグネシウムの不溶化効果は、高炉セメント B 種と比較して大きく、ほとんどのケースで土壤環境基準以下の不溶化効果が認められる。六価クロムについても、高炉セメント B 種と比較して溶出量が低下している。酸化マグネシウム改良土では、高炉セメント B 種でみられた改良土の溶出量が原土より増大するケースは見られず、これは酸化マグネシウム改良土の pH が高炉セメント種よりも小さいことが原因のひとつと考えられる。

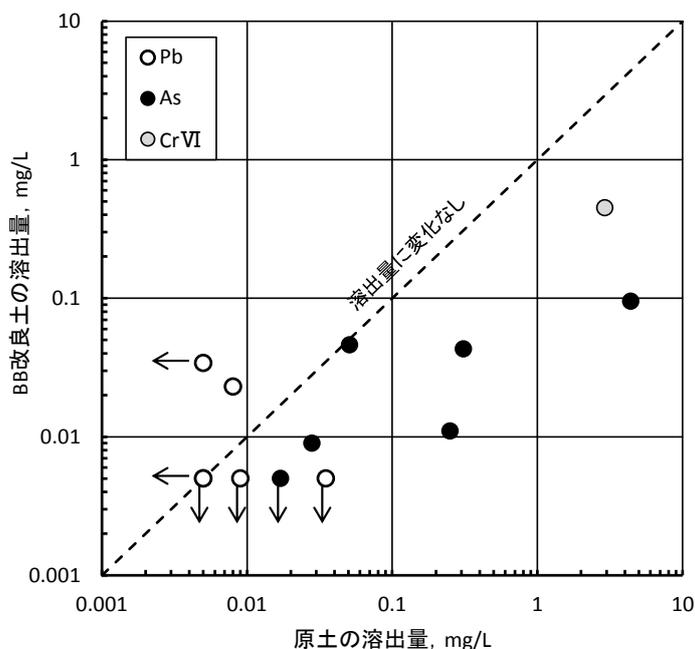


図 7.1 高炉セメント B 種による不溶化効果(鉛・ひ素・六価クロム)

表 7.3 改良土の溶出試験結果

汚染土 の区分	試験No.	固化材 添加量 kg/m ³	改良土のpH		鉛 (Pb)		砒素 (As)		六価クロム (CrVI)		セレン (Se)		シアン (CN)		ふっ素 (F)		ほう素 (B)	
			MgO	BB	MgO	BB	MgO	BB	MgO	BB	MgO	BB	MgO	BB	MgO	BB	MgO	BB
実汚染土	A-1	100	10.3	11.4	<0.005	<0.005	<0.005	0.011	—	—	<0.005	<0.005	—	—	—	—	—	—
	A-2	150	10.3	12.1	<0.005	0.034	<0.005	<0.005	—	—	<0.005	<0.005	—	—	—	—	—	—
	A-3	100	11.0	11.6	0.008	0.023	<0.005	0.095	—	—	<0.005	<0.005	—	—	—	—	—	—
	A-4	100	10.1	11.0	<0.005	<0.005	<0.005	0.009	—	—	0.007	<0.005	—	—	0.10	0.45	—	—
	A-5	150	10.7	11.9	<0.005	<0.005	0.006	0.043	—	—	—	—	<0.01	0.14	—	—	0.5	0.7
	A-6	150	10.3	11.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	A-7	100	11.2	12.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	<0.2	1.0	—	—
模擬 汚染土	I-1	150	10.3	11.9	<0.005	<0.005	—	—	0.09	0.45	—	—	—	—	—	—	—	—
	I-2	100	10.5	11.8	0.072	0.21	<0.005	0.046	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	I-3	150	10.7	11.9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.0	6.3	6.1	8.2

(単位: mg/L)

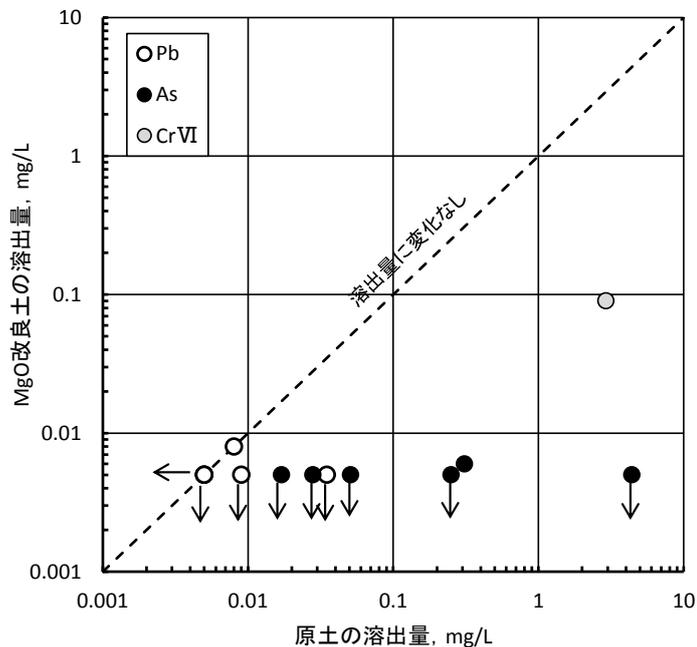


図 7.2 酸化マグネシウムによる不溶化効果(鉛・ひ素・六価クロム)

7.3.2 その他の重金属等に対する不溶化効果

図 7.3 に高炉セメント B 種による不溶化効果のうち、セレン、シアン、ふっ素、ほう素の不溶化効果に関するものを、原土に対する溶出量との比較で示す。図中の矢印は、定量限界未満の測定データを示している。図 7.3 によると、不溶化処理後のセレンの溶出量がすべて土壤環境基準以下となっており、高炉セメント B 種による不溶化効果が大きいことを示している。シアンに対しても不溶化効果が認められるが、ふっ素・ほう素に対しては、溶出量が低減しているものの、不溶化効果は小さいと言える。

図 7.4 に、同様に酸化マグネシウムによる不溶化効果を示す。図 7.4 によると、セレンに対しては高炉セメント B 種と同様に高い不溶化効果がみられる。さらに、シアンに対しては、検出限界以下に不溶化され、土壤環境基準を満足するものであった。ふっ素およびほう素に対しても高炉セメント B 種よりも高い不溶化効果が得られた。

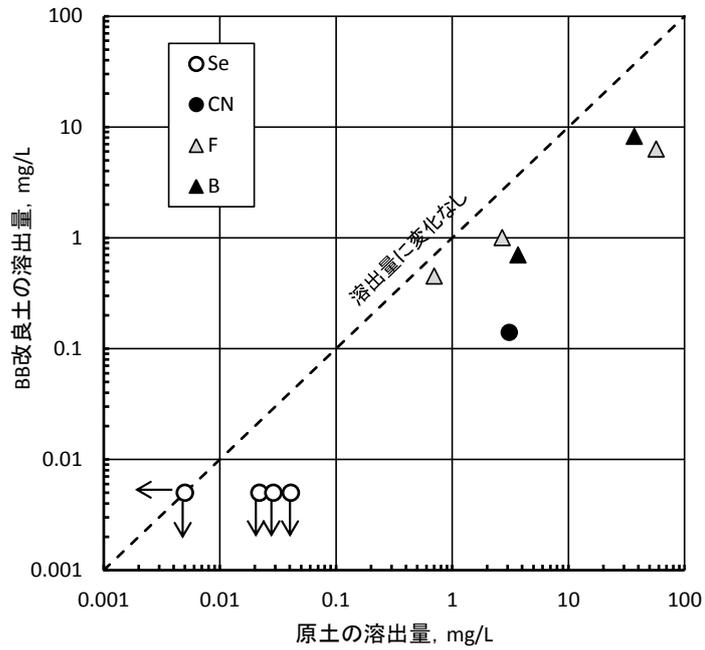


図 7.3 高炉セメント B 種による不溶化効果(セレン・シアン・ふっ素・ほう素)

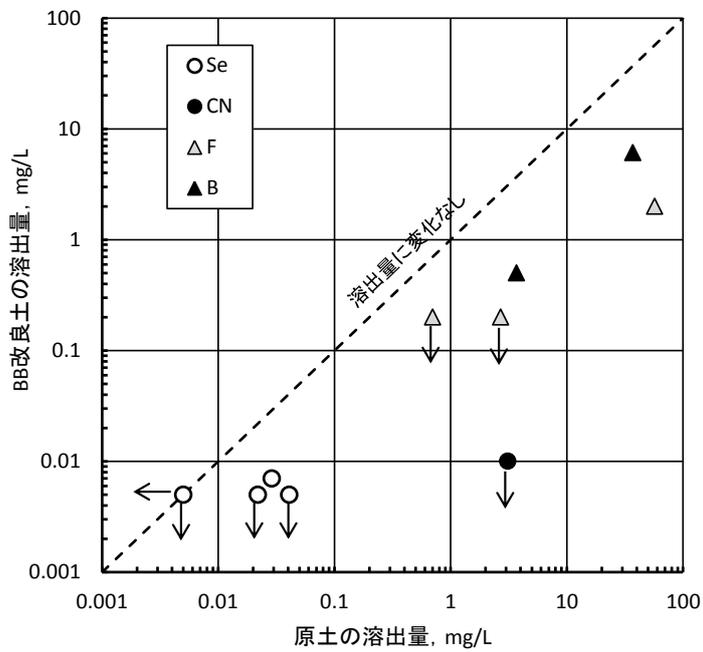


図 7.4 酸化マグネシウムによる不溶化効果(セレン・シアン・ふっ素・ほう素)

7.3.3 不溶化処理土の pH

図 7.5 に、酸化マグネシウム不溶化処理土と高炉セメント B 種不溶化処理土の pH の比較を示す。これまでの改良土の実験結果で示されるように (2 章)、酸化マグネシウム不溶化処理土の pH は、高炉セメント B 種不溶化処理土の pH と比較して、1.0~1.5 程度低い値を示した。高炉セメント B 種を用いた場合、pH 上昇による鉛の再溶出現象が見られたが、酸化マグネシウム不溶化処理土の pH が低いことが、鉛の再溶出防止に寄与しているものと考えられる。

7.3.4 酸化マグネシウムの重金属等に対する不溶化効果の有効性

実験結果に示す通り、酸化マグネシウムは高炉セメント B 種と比較して、重金属等に対して高い不溶化効果を示した。酸化マグネシウムが重金属等に対して有効な不溶化効果を示した要因について、以下の 3 項目から推察した。

(1) 固化材の比表面積

高炉セメント B 種の比表面積が $3000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度であるのに対して実験に用いた酸化マグネシウムの比表面積は $7000\text{cm}^2/\text{g}$ と大きく、土を構成する鉱物や重金属等イオンとの吸着能力が大きいものと推察される。一方で、5 章で示したように、比表面積が大きくなると、水との反応性も増し、土との混合後ただちに水酸化マグネシウムを生成する。酸化マグネシウムが水和して水酸化マグネシウムに変化すると、水酸化マグネシウム難溶性の化合物であり、酸化マグネシウムと同等の重金属等に対する不溶化効果は期待できないものと考えられる。

(2) 酸化マグネシウムの土との反応性

セメントの主成分である Ca である水和物 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) に対して、酸化マグネシウムの水和物である水酸化マグネシウム ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) の溶解度が 1 オーダー小さく、これらに重金属等イオンを取り込んだ化合物も、溶解度が小さいものと推察される。また、土に含まれる重金属等はその大半が土粒子に吸着されており、酸化マグネシウムが自硬性よりむしろ土壌成分と反応して硬化物を生成する特徴をもつことから、土粒子に吸着されている重金属等を含めて硬化物を生成し、これが不溶化効果として現れているものと考えられる。

(3) 改良土の pH の影響

酸化マグネシウム改良土の pH は 1~1.5 程度セメント改良土と比較して小さい。一般に、化合物の溶解度は、液相の pH と密接な関係があるとされている。嶋ら⁷⁾は、自然由来の重金属等を含む土・岩試料を用いて、溶出量の pH 依存性について調べ、液相の pH が中性域である $\text{pH}=7\sim 8$ を超えると、溶出量が増大するとしている。図 7.6 に示した嶋らの実験結果によると、pH の上昇とともにヒ素の溶出量が増加する傾向がみられる。嶋らの実験データは、pH が概ね 10 以下の実験結果であり、pH が 10 以上の高アルカリ領域であっても溶出量の pH 依存性が生じるかどうかについては、議論を要するところである。

(4) 改良土の長期安定性

これまでの実験結果から、酸化マグネシウム改良土は曝露環境や乾湿繰り返し下で高い耐久性を有することが示されている。不溶化を図った汚染土壌改良土は半永久的にその機能を損なわないことが必要であり、酸化マグネシウム改良土の高い耐久性は、その要求にこたえるものと考えられる。

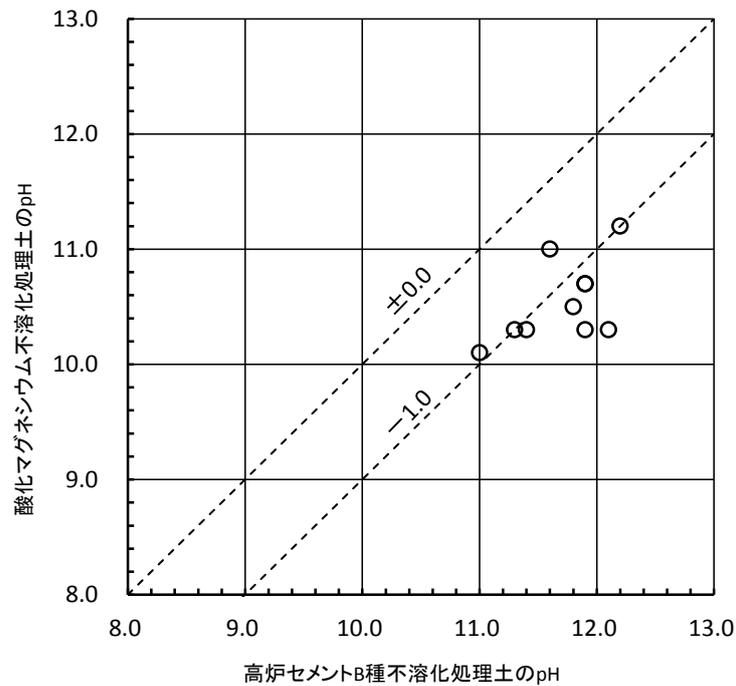


図 7.5 不溶化処理土の pH の比較

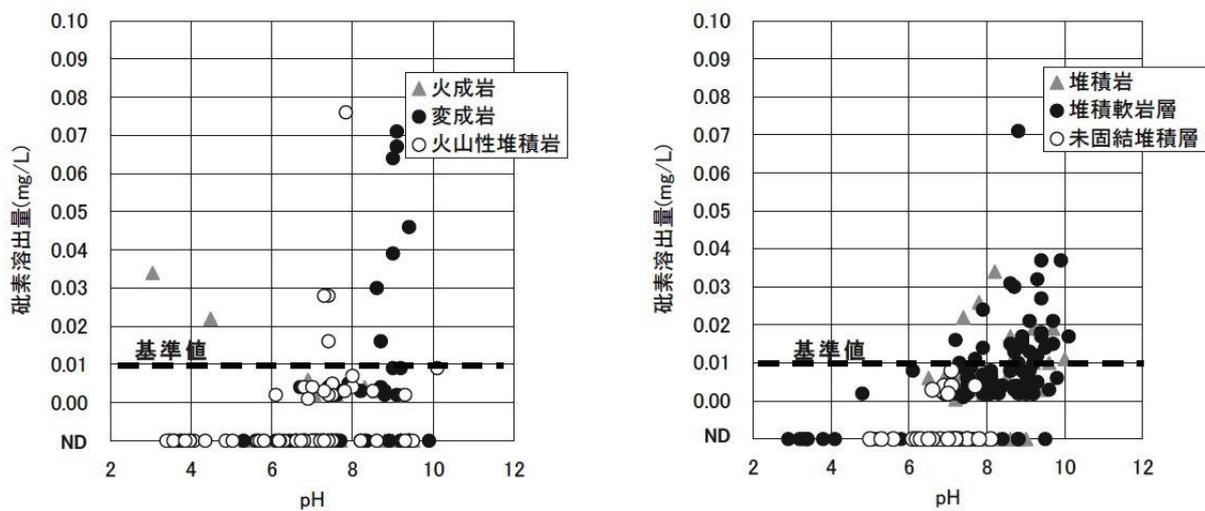


図 7.6 ひ素の溶出量の pH 依存性⁷⁾

7.4 まとめ

重金属類汚染土壌に対してセメントや酸化マグネシウムなどの固化材を添加・混合して固化・不溶化を図った改良土の溶出特性について調べ、酸化マグネシウムの固化不溶化材としての有効性について検討した。得られた結果を以下に要約する。

- (1) 酸化マグネシウムの鉛、ひ素、六価クロム、セレン、シアン、ふっ素およびほう素に対する不溶化効果は、高炉セメント B 種と比較して大きく、ほとんどのケースで土壤環境基準以下の不溶化効果が認められ、酸化マグネシウムは重金属等の不溶化に対して有効な固化材であることが示された。
- (2) 酸化マグネシウムは比表面積が $7000\text{cm}^2/\text{g}$ と大きく、土を構成する鉱物や重金属等イオンとの吸着能力が大きいことが考えられる。ただし、5 章で示したように、比表面積が大きくなると、水との反応性も増し、土との混合後ただちに水酸化マグネシウムを生成する。酸化マグネシウムが水和して水酸化マグネシウムに変化すると、不溶化効果は期待できない恐れがある。
- (3) 酸化マグネシウムは、自硬性よりむしろ、土壌成分と反応して硬化物を生成する特徴をもつことから、土粒子に吸着されている重金属等を含めて硬化物を生成し、これが不溶化効果として現れているものと考えられる。
- (4) 重金属等は pH の上昇とともに溶出量が増加する傾向がみられるため、酸化マグネシウム改良土の pH は 1~1.5 程度セメント改良土と比較して低いことが、重金属等の溶出リスクを低下させているものと考えられる。
- (5) 酸化マグネシウム改良土は曝露環境や乾湿繰り返し下で高い耐久性を有することから、長期わたって不溶化効果が要求される重金属等汚染土壌に対する不溶化材として有効であると考えられる。

[参考文献]

- 1) 環境省：汚染の除去等の措置の実施に関する技術的基準（土壤汚染対策法第7条第4項関連），pp.72-77，2002.
- 2) 山田哲司，大山将，嘉門雅史：重金属等汚染土壌のセメントによる固化・不溶化処理について，土と基礎，Vol.50，No.10，pp.10-12，2002.
- 3) 大山 将，小山 孝，山田哲司，嘉門雅史：重金属類汚染土壌の固化・不溶化処理に関する検討，第13回廃棄物学会研究発表会公演論文集，pp.1128-1130，2002
- 4) EPA：Stabilization/Solidification，INNOVATIVE SITE REMEDIATION TECHNOLOGY，DESIGN & APPLICATION，Vol.4，pp.2.1-2.38，1997.

- 5) ジオセメント研究グループ：セメント及びセメント系固化材を用いた改良体からの六価クロムの溶出，セメント・コンクリート，No.658，Dec，2001.
- 6) 社団法人セメント協会：JCAS A-01-1990，セメント協会標準試験方法，1990.
- 7) 嶋将志，今田真治，山本裕雄：自然由来重金属等の条件による分布の特徴，中国地質調査業協会岡山支部平成24年度第20回技術講演会，pp.21-26，2012.

8章 流動化処理土への適用

8.1 はじめに

建設工事等から産出される発生土を建設資材として利用する場合、発生土量、時期、土質等に応じて、様々な形態が考えられる。発生土は、その品質によって第1種～第4種に区分され、品質区分に応じた適用方法・取り扱いがなされる¹⁾。品質が第4種に満たないものは、「泥土」として取り扱われ、廃棄物処理法の適用を受けることになるが、第1種～第3種に区分される土質材料は、通常の施工性の確保が可能でそのまま建設資材として利用できる場合が多い。一方、第4種は適用範囲が限られるため、セメント等固化材を添加して、その品質を第2種・第3種相当に改質して適用範囲を拡大するケースも多い。さらに、処分場の枯渇問題から、有害物質を含まない「泥土」についてもセメント等固化材を添加して再利用するケースも増加している。

表 8.1 発生土の分類図¹⁾

区 分	性状, 強度	
第1種建設発生土	礫状および砂状	
発 生 土	第2種建設発生土	コーン指数 800kN/m ² 以上
	第3種建設発生土	コーン指数 400kN/m ² 以上
	第4種建設発生土	コーン指数 200kN/m ² 以上
	泥土	コーン指数 200kN/m ² 未満*

* 標準仕様ダンプトラックに山積みできず、その上を人が歩けないような流動性を呈する状態のもの。

おおむねコーン指数が 200kN/m²以下

発生土の用途は、大きくは以下の3ケースに分類される。

(1) 盛土

発生土のうち、第1種～第3種に区分される礫質土や砂質土等は、そのまま盛土材料として利用できるが、含水比の高い粘性土や有機質土は改良しないとそのままでは使用できないことがある。特に、宅地造成や高規格堤防への使用では、コーン指数で 400kN/m² 以上とされている。

(2) 路床・構造物基礎地盤

発生土を路床・構造物基礎地盤に用いる場合、十分な締固めが効かない粘性土や、たわみやわだちが生じやすい土、降雨等に敏感で軟弱化する土に対しては、所定の品質が得られるように改良を行う必要がある。改良土に必要な強度は、路床の場合で設計 CBR=3 以上、構造物基礎地盤の場合は、設計基準強度 $F_c=150\text{kN/m}^2$ 以上とされることが多い。

(3) 構造物の埋戻し・裏込め材

下水管やボックスカルバート等の埋設物の埋戻し土には、砂が用いられてきたが、最近では同じ現場の掘削土を埋戻し材として再利用する事例が増加している。埋設管底部や複雑な地中構造物等狭隘部の埋め戻し材が充填しにくい箇所の施工では、土砂に大量の水を含む泥水と固化材を加えて混合することにより造成する流動化処理土を用いる場合がある²⁾。

関東ロームをはじめとする火山灰質粘性土は、セメント系固化材による改良効果が得られにくいいため、固化材として生石灰が用いられることが多い。生石灰による改良効果は、発熱と消石灰生成によるコンシステンシーの改善によるところが大きく、流動化処理土とする場合には、生石灰を用いて前処理を施してから、セメントを添加する等の工夫がされている³⁾。

本章では、流動化処理土の固化材に酸化マグネシウムを利用することを目的として、対象土に酸化マグネシウムが優れた固化特性を示す関東ロームを用いて、従来のセメントによる場合と比較することにより、酸化マグネシウムの流動化処理土への適用性について検討することとした。

8.2 実験方法

8.2.1 試料土および固化材

試料土は産地の異なる4種類の関東ロームとした。試料土の土質特性を明らかにするため、自然含水比、土粒子の密度、強熱減量、土のpHおよびJGS 0711-A法による締固め密度を測定した。また、締固めた土のコーン指数試験を実施し、地盤材料としての品質区分を行った。

表8.2に実験に用いた試料土の土質特性を示した。試料土の自然含水比は100~130%で、強熱減量はいずれも10%を超える。地盤材料の品質区分では、関東ロームDが汚泥に区分される以外は第4種以上となり、盛土材料としての利用が可能な状態であった。

表 8.2 試料土の土質特性

試料名	W_n %	ρ_s g/cm ³	I_{gloss} %	pH	締固め密度 g/cm ³	地盤材料 品質区分
関東ロームA(東京都渋谷区)	132.7	2.81	15.4	6.5	1.361	第2種
関東ロームB(東京都立川市)	112.6	2.85	14.4	6.5	1.435	第3種
関東ロームC(茨城県つくば市)	99.6	2.86	12.5	6.5	1.431	第4種
関東ロームD(埼玉県埼玉市)	123.9	2.43	13.6	7.3	1.339	(汚泥)

実験に用いた固化材は、酸化マグネシウム(MgO)、普通ポルドラントセメント(NPC)および高炉セメントB種(BB)の3種類とした。酸化マグネシウムは、天然鉱物起源の鉱成酸化マグネシウムで、比表面積が約7000cm²/gのものを用いた。セメントは共にJIS規格品を用いた。

8.2.2 実験方法

原土をシリンダーフロー値で 200mm 程度となるよう加水し，調整泥水を作製した。調整泥水作製のための加水量およびその密度は表 8.2 に示す通りである。

固化材の添加量は調整泥水 1m³に対して 100～400kg の 3 水準とし，計量した調整泥水と固化材をソイルミキサーで十分に攪拌・混合し流動化処理土とし，φ50×100mm モールドに充填して供試体を作製し，20℃恒温室内で湿潤養生状態とした。

供試体作製後材齢 7 日および 28 日で一軸圧縮試験を行い，破壊供試体を用いて地盤工学会基準「土懸濁液の pH 試験方法」(JGS0211-2009)により改良土の pH を測定した。また，一部の改良土については，環境庁告示第 46 号法による六価クロム溶出試験を行った。

表 8.2 加水量と調整泥水の密度

試料名	調整泥水	
	加水量 kg/m ³	密度 g/cm ³
関東ロームA	750	1.23
関東ロームB	600	1.25
関東ロームC	700	1.27
関東ロームD	550	1.24

8.3 実験結果および考察

8.3.1 固化材添加量と改良土の一軸圧縮強さ(材令 28 日)との関係

図 8.1～図 8.4 に，固化材添加量と改良土の一軸圧縮強さ(材令 28 日)との関係を示した。固化材添加量 200kg/m³以下では，ほとんど強度が得られないセメント類と比較して，酸化マグネシウムは添加量を 100kg/m³とした場合でも改良効果が認められた。普通ポルトランドセメントと高炉セメント B 種の比較では，普通ポルトランドセメントの方が関東ロームに対する改良効果が大きい。

流動化処理土の品質管理基準⁵⁾によると，構造物の埋戻しや埋設管の埋戻しに用いる場合の一軸圧縮強さは 200～500kN/m²が一般的である。表 8.3 に，目標強度を 300kN/m²とした時の固化材添加量を図 8.1～図 8.4 から読み取って示す。酸化マグネシウム改良土は添加量=100～200kg/m³の範囲で必要とされる一軸圧縮強さを満足している。普通ポルトランドセメントは，酸化マグネシウムの 1.5 倍程度の添加量で目標強度を達成できる。一方，高炉セメント B 種は，酸化マグネシウムの 2 倍以上の添加量が必要な場合があり，改良効果が小さい。

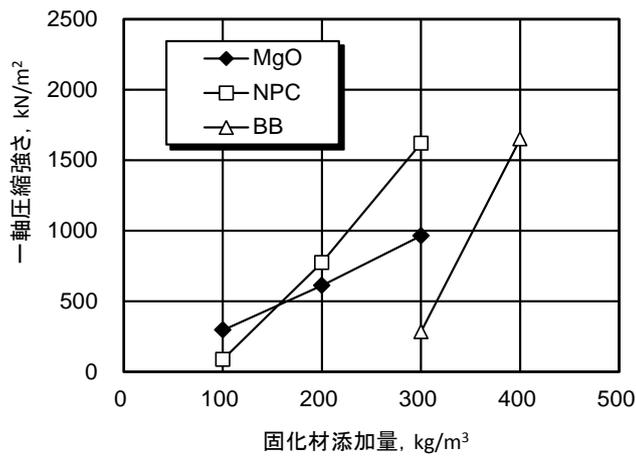


図 8.1 固化材添加量と一軸圧縮強さとの関係(関東ローム A)

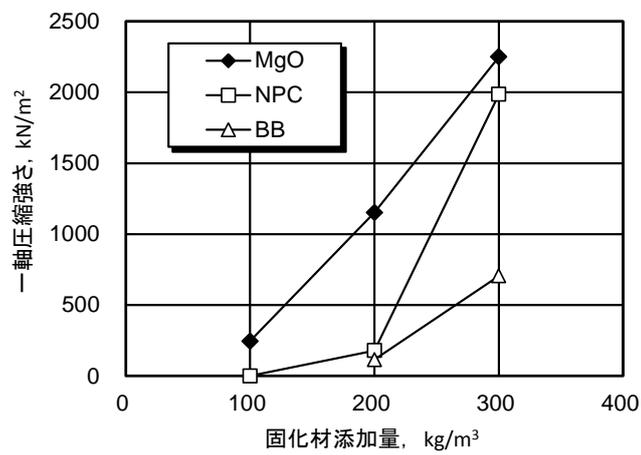


図 8.2 固化材添加量と一軸圧縮強さとの関係(関東ローム B)

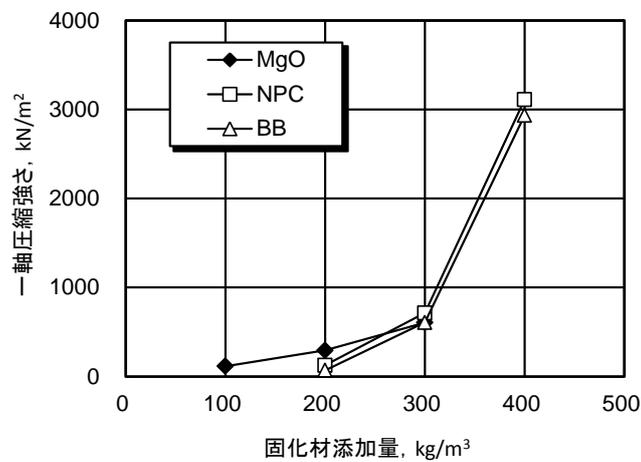


図 8.3 固化材添加量と一軸圧縮強さとの関係(関東ローム C)

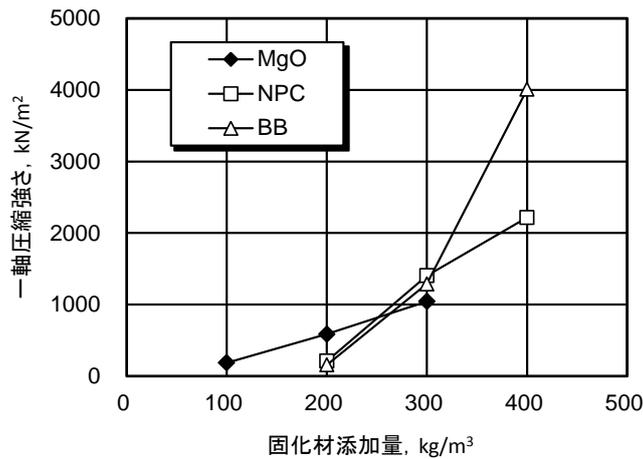


図 8.4 固化材添加量と一軸圧縮強さとの関係(関東ローム D)

表 8.3 目標強度を 300kN/m²とした時の固化材添加量の比較

固化材種別	目標強度=300kN/m ² の達成に必要な添加量 kg/m ³			
	関東ロームA	関東ロームB	関東ロームC	関東ロームD
酸化マグネシウム	100	110	200	130
普通ポルトランドセメント	130	210	230	210
高炉セメントB種	300	230	240	220

8.3.2 材齢による改良土の強度比較

図 8.5 に材齢 28 日と材齢 7 日における改良土の一軸圧縮強さの比較を示す。材齢 28 日と材齢 7 日における改良土の強度比は、関東ロームの種類や固化材の種類によらず、2 倍を中心分布する結果となった。この結果から、関東ロームに対して、酸化マグネシウムを流動化処理土の固化材として用いた場合、材齢 7 日の一軸圧縮強さから、材齢 28 日一軸圧縮強さを推定することが可能であると考えられる。

8.3.3 改良土の一軸圧縮強さと変形係数 E_{50} との関係

図 8.6 に改良土の一軸圧縮強さ qu と変形係数 E_{50} との関係を示す。酸化マグネシウム改良土の変形係数 E_{50} は、セメント改良土とほぼ同様の $200 \cdot qu \text{ kN/m}^2$ から $500 \cdot qu \text{ kN/m}^2$ の範囲となった。セメント等固化材によるスラリー添加改良土の一軸圧縮強さ qu と変形係数 E_{50} との関係は、

$$E_{50} = 350 \sim 1000 \cdot qu \text{ kN/m}^2$$

とされており⁶⁾、流動化処理土の変形係数 E_{50} は、これらよりやや小さく、 $E_{50} = 200 \sim 500 \cdot qu \text{ kN/m}^2$ としても良いと考えられる。

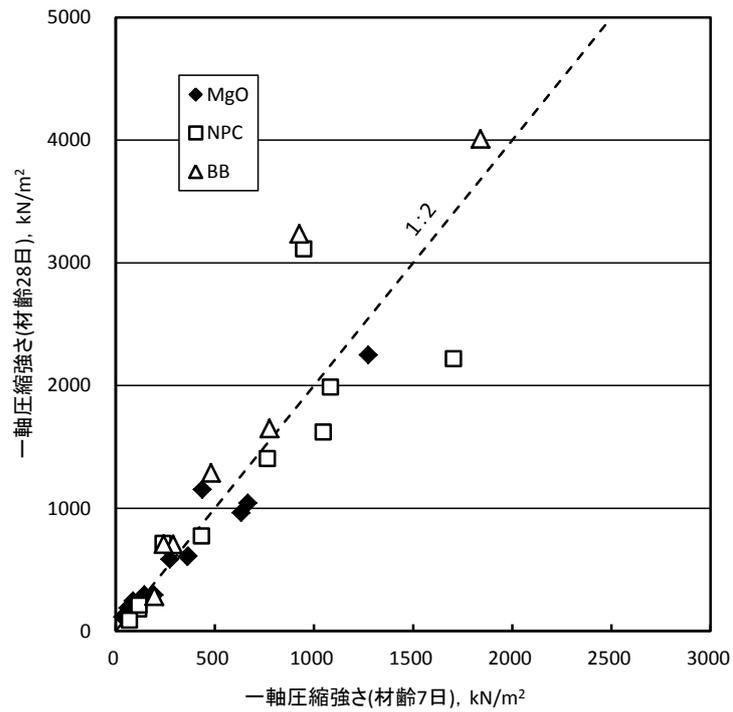


図 8.5 材齢による改良土の強度比較

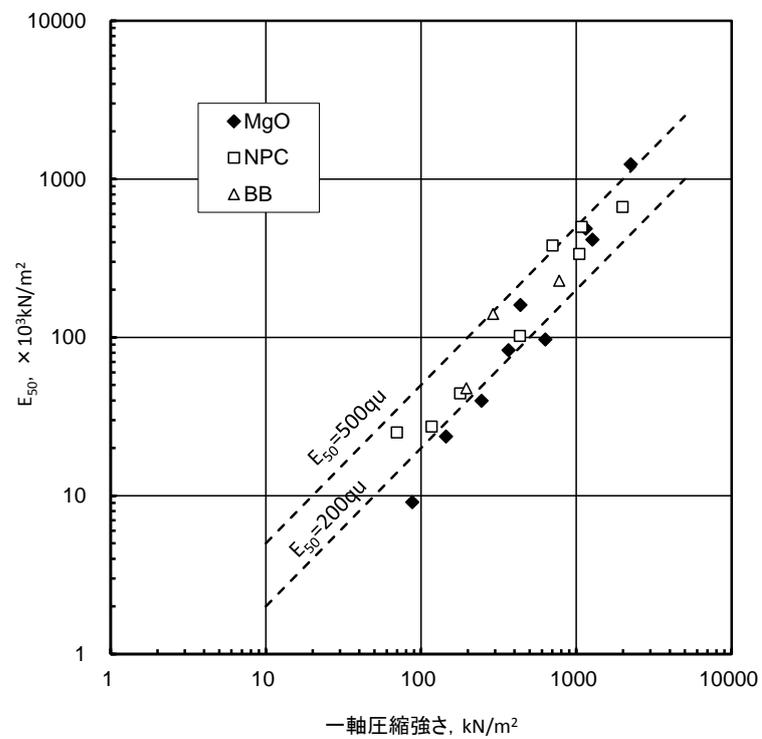


図 8.6 改良土の一軸圧縮強さと変形係数 E_{50} との関係

8.3.4 改良土の pH

図 8.7 に改良土の固化材添加量と pH との関係を示す。酸化マグネシウム改良土の pH が 9.7～11.0 であったのに対し、セメント改良土は 11.2～12.2 となった。1 章で示した種々の土に対する改良土の pH 測定結果と同様に、流動化処理土においても、酸化マグネシウム改良土の pH はセメント改良土の pH と比較して、1 程度低い値を示した。

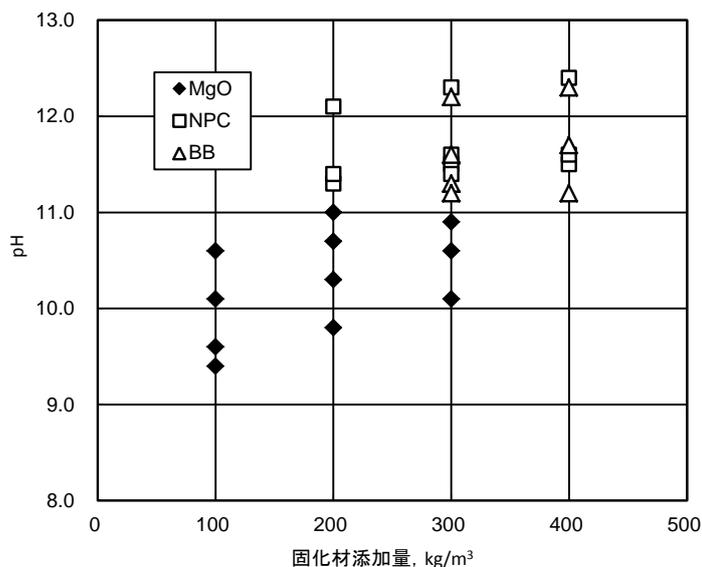


図 8.7 改良土の固化材添加量と pH との関係

8.3.5 改良土からの六価クロムの溶出

表 2 に関東ローム A および C を用いた改良土の六価クロム溶出試験結果を示した。固化材添加量はいずれも 300kg/m^3 で、溶出操作は材令 28 日以上で行った。六価クロム溶出量は、すべて土壤環境基準(0.05mg/L)以下となったが、普通ポルトランドセメントを用いた改良土から、六価クロムの溶出が認められた。セメントを固化材として用いる場合は、改良効果の面からは普通ポルトランドセメントが高炉セメント B 種に比べて有利であるが、従来から指摘されているように⁷⁾六価クロム溶出のリスクが高いことがわかる。

表 2 六価クロム溶出試験結果

試料土	六価クロム溶出量 mg/L		
	MgO改良土	NPC改良土	BB改良土
ロームA	<0.01	0.03	<0.01
ロームC	<0.01	0.05	<0.01

8.4 まとめ

流動化処理土の固化材に酸化マグネシウムを、対象土に酸化マグネシウムが優れた固化特性を示す関東ロームを用いて、従来のセメントによる場合と比較することにより、酸化マグネシウムの流動化処理土への適用性について検討した。

- (1) 酸化マグネシウムは、関東ロームに対して流動化処理土の固化材として用いたとき、セメント等固化材と比較して、改良効果大きい。目標とする一軸圧縮強さを 300kN/m^2 とすると、調整泥水に対して酸化マグネシウム添加量= $100\sim 200\text{kg/m}^3$ とすることで必要とされる一軸圧縮強さを満足する。
- (2) 材齢 28 日と材齢 7 日における酸化マグネシウム改良土の強度比は、関東ロームの種類や固化材の種類によらず、ほぼ 2 倍であり、その変形係数 E_{50} は、 $E_{50}=200 \cdot q_u \text{ kN/m}^2$ から $E_{50}=500 \cdot q_u \text{ kN/m}^2$ の範囲である。
- (3) 普通ポルトランドセメントは、酸化マグネシウムに次ぐ改良効果を示したが、改良土からの六価クロムの溶出リスクが酸化マグネシウムや高炉セメント B 種と比較して大きい。
- (4) 酸化マグネシウム改良土の pH は $9.7\sim 11.0$ となり、セメント改良土の pH と比較して 1 程度低い値を示し、関東ロームに対して流動化処理土に用いたとき、改良土からの六価クロム溶出リスクが低いことが明らかとなった。
- (5) 以上の結果から、酸化マグネシウムは強度発現に優れ、かつ六価クロムの溶出リスクが少ないことで周辺環境への影響が小さく、関東ロームを対象土とした流動化処理土に有効であると考えられる。

[参考文献]

- 1) 独立行政法人土木研究所：建設発生土利用技術マニュアル第 3 版，p.5，2004.
- 2) 久野五郎，中島慎一，藤崎勝利：流動化処理土の流動性と固化特性，第 27 回地盤工学研究発表会，pp.2337-2340，1992.
- 3) 藤岡一瀬他：愛鷹ロームを用いた流動化処理土の耐久性，第 38 回地盤工学研究発表会，pp.795-796，2003.
- 4) 山田哲司，西田一彦，西形達明，中澤重一，松田豊：酸化マグネシウムの地盤改良への適用に関する研究(その 3：流動化処理土への適用)，第 38 回地盤工学研究発表会，pp.1111-1112，2003.
- 5) 社団法人セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル第 3 版，pp.200，2003.
- 6) 斉藤聡：深層混合処理工法による改良土の調査と工学的性質，基礎工，Vol.13, No.2, pp.108～114，1985.
- 7) セメント系固化処理土検討委員会：セメント系固化処理土に関する検討最終報告書，2003.

9章 結論

本論文は、著者が酸化マグネシウムを新しい地盤改良材として注目し、約 15 年間の研究成果を取りまとめたものである。以下に本研究の成果を総括する。

第 1 章では、酸化マグネシウムの地盤改良工法における位置づけを明らかにするとともに、既往の研究成果について検討を行った。酸化マグネシウムを地盤改良材として様々な用途に適用していくためには、酸化マグネシウムの土に対する固化機構を解明するとともに、地盤改良への適用範囲や酸化マグネシウム改良土の物性を明らかにしていくことが重要であることを指摘した。

第 2 章では、酸化マグネシウムの土に対する基本的な改良効果を調べるため、沖積土、まさ土、ローム土をはじめとして国内外の 34 種類の土質に対して酸化マグネシウム改良土を作製して、一軸圧縮強さと改良土の pH を調べた。また、普通ポルトランドセメント、消石灰、生石灰の従来型固化材（カルシウム系）についても改良土を作製して、酸化マグネシウム改良土と従来型固化材改良土の一軸圧縮強さと改良土の pH を比較して、酸化マグネシウム改良土の基本的な性質について検討した。

その結果、酸化マグネシウム改良土の一軸圧縮強さは、ほとんどの土質に対して高炉セメント B 種改良土と比較して小さいが、火山灰土に対しては、高炉セメント B 種改良土の約 5 倍の改良強度をもたらすことがわかった。また、酸化マグネシウム改良土は高炉セメント B 種改良土ほど明瞭な改良土の一軸圧縮強さと試料土含水比との関係は見られず、高炉セメント B 種改良土のような強熱減量の増加による一軸圧縮強さの低下はみられない。さらに、酸化マグネシウム改良土は、試料土の pH による強度への影響は小さく、改良土の pH は pH=9 ~11 の範囲となり、高炉セメント B 種改良土の pH と比較して 1.0 程度、消石灰改良土の pH に対しては 2.0 低い値を示した。

以上のことから、酸化マグネシウム改良土の一軸圧縮強さは、高炉セメント B 種改良土と比較して小さく、改良土の目標強度が大きい場合には、固化材の添加量が非常に多くなる。したがって、まさ土や火山灰土を対象土とすることが望ましいと考えられる。特に火山灰土は、従来のセメント系固化材では改良効果が小さく、有効な用途であると考えられる。

第 3 章では、改良土の配合設計を行うにあたっての改良土の基本的な性質を調べるため、改良土の長期強度変化、乾湿繰り返し・曝露条件下での耐久性と pH 変化について調べた。

その結果、酸化マグネシウム添加量の増加に伴い酸化マグネシウム改良土の一軸圧縮強さは増加傾向にあるが、材齢に伴う強度変化は対象土の種類によって異なり、まさ土に対しては長期的に緩やかな強度増加を示し、火山灰土に対しては比較的短期材齢で大きな強度が得られた。

また、酸化マグネシウムをスラリー添加としたとき、まさ土に対してはセメントのスラリー添加時と比較して強度低下が大きい、火山灰土に対しては粉体添加時と比較して強度低下がほとんどない。

さらに、酸化マグネシウム改良土は、乾湿繰り返し下や曝露環境下においても劣化せず、材齢とともに強度は増加傾向にあり、その pH はセメント改良土と比較してやや低く、曝露環境下において変動が小さい。これは、空気中の水蒸気や二酸化炭素と反応して生成した、塩基性炭酸マグネシウムの水に対する溶解度が非常に小さく、改良土の pH に影響を及ぼさなかったためと考えられる。

以上のことから、酸化マグネシウムを固化材とした時、目標強度を設定した配合試験による配合量の決定が可能であるが、配合強度を設定するための材齢は、土質や使用用途を考慮する必要があるといえる。

また、酸化マグネシウムは、粉体添加時と比較して強度低下が大きい土質を対象とした場合、所定の強度を得るための固化材添加量が多くなり、改良コストの増加に結び付くので、目標強度が大きい場合は、粉体添加とすることが望ましいと考えられる。さらに、酸化マグネシウム改良土は乾湿繰り返し下や曝露環境下において劣化せず、pH の低下が少ないことから、防草対策が必要な土舗装等に有効であると考えられる。

第4章では、酸化マグネシウムの土に対する固化機構解明へのアプローチとして、改良土の X 線回折による反応生成物の検討と土に含まれる非晶質成分の種類とその量が改良土の強度に及ぼす影響について検討した。

その結果、まさ土を用いた酸化マグネシウム改良土では、 $Mg_4Al_2(OH)_{14} \cdot 3H_2O$ と推測される反応生成物のピークが認められ、この化合物が改良土の強度発現要因の一つになっているものと考えられる。関東ロームを用いた酸化マグネシウム改良土では、 $MgAl(OH)_{14} \cdot XH_2O$ および $Mg_4Al_2(OH)_{14} \cdot 3H_2O$ と推測されるマグネシウムとアルミニウムからなる反応生成物が認められ、カルシウムとアルミニウムの化合物よりもマグネシウムとアルミニウムの化合物の方が、より大きな強度を発生させると考えられる。

また、関東ローム改良土に酸化マグネシウムと水が反応した水酸化マグネシウムのピークがみられなかったことから、水酸化物が固化反応を進行させる石灰系改良土とは反応機構が異なる。

さらに、非晶質成分の分析結果から、酸化マグネシウム改良土の強度発現には土中に含まれる非晶質成分の含有量が密接に関与していることがわかった。一方、非晶質成分の含有量が多い土は、含水比も大きい傾向があり、含水比が大きく泥状を呈する火山灰土に対して改良効果を得るためには、酸化マグネシウムの添加量を多くする必要がある。

第5章では、酸化マグネシウムの土に対する固化機構解明への2つめのアプローチとして、酸化マグネシウムの製造方法に注目して、製造方法が異なる鉱山起源の酸化マグネシウムと海水起源の酸化マグネシウムを用いて、改良土の性質を調べた。

その結果、鉱成酸化マグネシウムと海成酸化マグネシウムの水和反応速度の違いは、酸化マグネシウムの原料や生成温度を含めた製造方法によるところが大きく、海成酸化マグネシウムの方が鉱成酸化マグネシウムと比べて結晶性が低いこと、海成酸化マグネシウムがより小さい粒子構造をもつためであると考えられる。

鉍成酸化マグネシウムでは、改良土中に未水和の酸化マグネシウムが残存し、これが土に含まれる粘土鉱物と反応して徐々に強度が増加する。一方、海成酸化マグネシウムは土中の水分と速やかに反応して水酸化マグネシウムを生成し、水酸化マグネシウム自体の強度が大きいことから、材齢初期段階における改良土の強度は大きい。また、鉍成酸化マグネシウム改良土では、比表面積が大きいほど強度が大きい傾向があった。さらに、鉍成酸化マグネシウム改良土における空気中の二酸化炭素の強度への影響については、養生日数が 120 日程度ではほとんどないといえる。

以上のことから、酸化マグネシウムの製造方法やその比表面積によって、改良効果が異なることが明らかとなり、土に含まれる非晶質成分との反応に改良効果を期待する場合は鉍成酸化マグネシウムを、含水比が大きい土を早期に改良したい場合は、海成酸化マグネシウムを選択することが有効である。

第 6 章では、酸化マグネシウムの特徴を生かした用途の拡大を目指して、高炉スラグ微粉末を用いた混合固化材を提案した。酸化マグネシウムと高炉スラグ微粉末の混合比を変化させた改良土を作製し、酸化マグネシウムと高炉スラグ微粉末の混合比が改良土の強度に及ぼす影響を調べた。また、改良土の耐久性の評価の一指標として、改良土の繰り返し水浸実験を行い、改良土の強度特性や pH の変化について調べた。

その結果、混合固化材スラリーの一軸圧縮強さは、酸化マグネシウムスラリーの強度と比較して非常に大きい。また、混合固化材を用いた沖積土、まさ土、川砂改良土の一軸圧縮強さも、酸化マグネシウムのみを固化材とした場合と比較して大きい。このことから、混合固化材は地盤改良材としての適用範囲が広がるものと考えられる。

混合固化材を用いた配合設計を行う場合、セメント等固化材による配合設計と同様の設計手法が適用可能であるが、改良土の特徴を生かすためには、事前に土質ごとに配合試験を行い、用途に応じた最適な酸化マグネシウムの混合率を求めておく必要がある。さらに、混合固化材を用いたまさ土改良土は、40 サイクルの繰り返し水浸を受けても、強度低下等の状態変化は見られず、酸化マグネシウム改良土がもつ高い耐久性を生かすことが可能であることが明らかとなった。

野外環境下において地盤改良に混合固化材を用いるとき、低アルカリ環境が必要な場合は酸化マグネシウム含有率を多くすることで、一方、防草対策等で高アルカリに維持したい場合は高炉スラグ微粉末の含有率を多くすることで対応できる。また、高炉スラグ微粉末の材料価格が酸化マグネシウムの 1/5 程度とした場合、固化材の混合比を 1:1 とすると、30~40% 程度の材料コストの低減が可能と考えられる。

第 7 章では、重金属等汚染土壌に対してセメントや酸化マグネシウムなどの固化材を添加・混合して固化・不溶化を図った改良土の溶出特性について調べ、酸化マグネシウムの固化不溶化材としての有効性について検討した。

その結果、酸化マグネシウムの鉛、ひ素、六価クロム、セレン、シアン、ふっ素およびほう素に対する不溶化効果は、高炉セメント B 種と比較して大きく、ほとんどのケースで土壌

環境基準以下の不溶化効果が認められ、酸化マグネシウムは重金属等の不溶化に対して有効な固化材であることが示された。

また、酸化マグネシウムによる重金属等の不溶化効果は、1)酸化マグネシウムの比表面積が大きいこと、2)酸化マグネシウムは土壌成分と反応して硬化物を生成する特徴をもつこと、3)酸化マグネシウム改良土の pH は 1~1.5 程度セメント改良土と比較して低いことが、その要因となっているものと考えられる。

以上のことから、酸化マグネシウム改良土は曝露環境や乾湿繰り返し下で高い耐久性を有することで、長期わたって不溶化効果が要求される重金属等汚染土壌に対する不溶化材として有効であると考えられる。

第 8 章では、流動化処理土の固化材として酸化マグネシウムを用い、対象土を酸化マグネシウムが優れた固化特性を示す関東ロームとして、従来のセメントによる場合と比較することにより、酸化マグネシウムの流動化処理土への適用性について検討した。

その結果、酸化マグネシウムは、関東ロームに対して流動化処理土に用いたとき、セメント等固化材と比較して、改良効果が大きく、目標とする一軸圧縮強さを 300kN/m^2 とすると、調整泥水に対して酸化マグネシウム添加量= $100\sim 200\text{kg/m}^3$ で必要とされる一軸圧縮強さを満足する。

また、酸化マグネシウム改良土の pH は 9.7~11.0 となり、セメント改良土の pH と比較して 1 程度低い値を示し、改良土からの六価クロム溶出リスクが低いことが示された。

以上のことから、酸化マグネシウムは関東ロームを対象土とした場合、強度発現に優れ、かつ六価クロムの溶出リスクが少ないことで周辺環境への影響が小さく、流動化処理土に有効であると考えられる。

酸化マグネシウムはその流通価格がセメント等固化材と比較して 5 倍~10 倍と高く、一般的な軟弱土の改良には不向きである。材料コストに見合う地盤改良分野への適用が必要となる。本研究で示した、従来のセメント等では改良効果が得られにくい関東ロームをはじめとする火山灰土への適用、安価な材料として高炉スラグ微粉末をブレンドした混合固化材の利用や、さらには、膨大な費用を要するとされる土壌汚染の修復分野が適用のターゲットになるものと考えている。

材料自体に自硬性のない酸化マグネシウムの土に対する固化機構については、未だ不明な点も多く、今後の研究に期待するところも大きい。本研究成果が、酸化マグネシウムの地盤改良分野での利用拡大の一助となれば幸いである。