

芝 浦 工 業 大 学
博 士 学 位 論 文

セメント・石灰系固化材による土質改良の
メカニズムと品質管理技術に関する研究

平成 31 年 3 月

久 保 博

目 次

第1章 序論	
1.1 石灰・セメントによる土質改良の変遷と社会的背景	
1.1.1 石灰による土質改良	1
1.1.2 セメントによる土質改良	2
1.2 研究の視点と構成	
1.2.1 研究の視点	6
1.2.2 改良土の強度に影響する要因	7
1.2.3 構成と内容	9
参考文献	11
第2章 セメント・石灰系固化材の土質改良メカニズム	
2.1 背景	13
2.2 既往研究	15
2.3 pH, EC 測定によるポゾラン反応の簡易推定手法	
2.3.1 目的	19
2.3.2 供試材料	19
2.3.3 試験方法	20
2.3.4 結果と考察	22
2.3.5 まとめ	38
2.4 各種セメント系固化材による軟弱土固化における生成鉱物と強度特性	
2.4.1 目的	40
2.4.2 供試材料	40
2.4.3 試験方法	41
2.4.4 結果と考察	41
2.4.5 まとめ	51
2.5 結論	52
参考文献	53

第3章	改良土中のセメント・石灰含有量試験方法の開発	
3.1	背景	58
3.2	既往研究	61
3.3	改良土中のセメント・石灰含有量の塩酸反応熱による試験方法の開発	
3.3.1	目的	64
3.3.2	試料と試験方法	64
3.3.3	結果と考察	66
3.3.4	まとめ	73
3.4	塩酸反応熱法の適用（その1：セメント中層混合による地盤改良工事）	
3.4.1	目的	75
3.4.2	工事概要	75
3.4.3	土質性状	76
3.4.4	試験方法	77
3.4.5	結果と考察	78
3.4.6	まとめ	80
3.5	塩酸反応熱法の適用（その2：石炭灰改良盛土材の製造試験工事）	
3.5.1	目的	82
3.5.2	石炭灰改良材	83
3.5.3	使用材料と配合	84
3.5.4	試験方法	84
3.5.5	小型ミキサー試験	86
3.5.6	大型ミキサー試験	94
3.5.7	まとめ	99
3.6	結論	100
	参考文献	101
第4章	総括	105
	謝辞	106

第1章 序 論

1.1 石灰・セメントによる土質改良の変遷と社会的背景

1.1.1 石灰による土質改良

人類と石灰の出会いは、非常に古い。約 9,000~8,000 年前には、西アジアで石灰石を加熱（900℃以上）して石灰を製造し、石灰を漆喰などとして利用する技術を手に入れていたとされる。角田¹⁾は、古代人による石灰の発見を以下のように想像している。古代人が付近に転がっている石灰石を並べて、炉を造り、料理のため、あるいは暖を取るなどのため、その中で焚火をした。翌朝、炉の石灰石の一部が粉体になっていることに気づいた。古代人たちは、その理由を理解できなかったが、石灰石に含まれる二酸化炭素と水素（水分）が燃え盛る薪の高温（900℃以上）で気化して生石灰が製造されたのである $[\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2]$ 。粉化した石灰石は、さらに夜露などの水分を受けて消石灰に変化した $[\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2]$ 。古代人たちは、この粉（石灰）に水を混ぜて練って糊状にしてから再び乾燥させると、空気中の炭酸ガスを吸収して固くなり、耐水性を持つとともに強度が増し、衝撃にも耐えることを知り $[\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}]$ などの炭酸カルシウム生成反応、建造物への利用など、いろいろな用途が広がったと考えられる。石灰は、古代ローマの道路、古代中国の万里の長城などで使われた。日本では、7 世紀後半に大陸から伝わってきた技術で石灰を作り、漆喰として古墳や寺院の壁材などに使用されるようになり、その後、三和土（たたき）などとして用途が広がった。江戸時代末期には各地で石灰が製造されていた²⁾。三和土は、消石灰に水を加えて練るだけでなく、消石灰に粘土などを加えて水で練る方がよく硬化することを発見してできた技術である。このように石灰石から生石灰を造る、生石灰に水を加えて消石灰に変える、消石灰を土などに混ぜて硬化させるという一連の技術は、世界各地で古代から近代まで続いて発展してきた技術であり、石灰安定処理の基本原理は今も同じである。石灰は、数千年を経て、土質改良にとどまらず、広範な用途に用いられるようになり、世になくってはならない工業素材として大きな発展を遂げている。近代の科学技術が無かった時代から、我々の祖先は石灰を製造し、石灰を貴重な材料として建設材料などに利用してきたのである。

土に石灰を混合することによって土質を改良し強度を増大させる技術は、石灰による土質安定処理(soil stabilization)あるいは石灰安定処理とも言われる。近代の土木工事で石灰安定処理が最初に行われたのは、1920年代の米国である。当時の米国では、自動車による交通量の増加にともない路床の支持力と耐久性の増大が必要となり、道路建設の近代化が必要な状況にあった。欧米を中心に石灰安定処理が盛んに行われるようになったのは、第二次大戦後である^{3,4)}。アメリカで1950年前後に道路や滑走路の路盤工事に石灰安定処理が大規模に行われ、合理的な設計・施工方法が整備されたこともあって、その後、石灰安定処理は世界各地へ普及し発展した。それと並行して、石灰安定処理土の物理的・力学的性質、強度増大メカニズムなどの研究も盛んに行われるようになった^{5,6)}。石灰安定処理は、特に粘性土に対して有効であることから、日本では、多くの地盤が火山灰質粘性土をはじめとする各種の粘性土によって構成されていることもあって、石灰安定処理が急速に普及した⁷⁾。この背景には、石灰石の大量採掘・輸送そして石灰の大量生産を可能とする工業の発展がある⁸⁾。世界の2010年の石灰生産量は、約3億トン/年、そして日本の近年の石灰生産量は、950万トン/年前後である⁹⁾。

石灰安定処理工法の発展には、材料面と機械装置面の両方が寄与した。材料面では、1970年代から石灰に他の材料を複合したもの、石灰の成分や焼成方法を工夫したものなどが開発され、これらは石灰系固化材と称され、発展した。また、機械装置面では、当初、表層攪拌混合機が主体であったが、深層攪拌混合機の開発、混合プラントの大型化や車載化など、ラインアップ化が進んだ。石灰安定処理工法は、いろいろな土質条件、現場条件、改良目的に対応する技術に発展している^{10,11)}。

1.1.2 セメントによる土質改良

セメントの歴史は、古代から続いてきた石灰の歴史の延長線にあるといえる。セメントの主原料は石灰石であり、セメントは石灰石と粘土の反応を応用した材料である。ポルトランドセメントは、英国の煉瓦職人アスプジンによって1824年に発明された。その製法は、それまでのローマンセメントなどと異なり、二重焼成という特徴的技術によるものであった。石灰石を焼いていったん生石灰とし、これをふかして石灰(消石灰)に変えたものに、粘土を混ぜて再度焼成しクリンカーをつくり、粉砕したのである。アスプジンは、ポルトランドセメント製法の特許を1824年に取得した。その後、欧州やアメリカで相次いでセメント工場が建設され、セメントの製造が始まった。日本にセメ

ントが初めて輸入されたのは1861年である。そして、日本では、1872年に官営で東京の深川にセメント工場の建設が始まり、1875年にセメントの製造が始まった^{12, 13, 14)}。その後、民間によるセメント工場も建設された。セメントは、鉄とともに日本の近代国家建設のための一翼を担った。当時のセメントの値段は今の貨幣価値に換算すると、50万円/トン程度と非常に高価なものであった¹⁵⁾。極めて貴重な材料であったことから、当時は、土質の改良に利用するという考えさえもなかったと思われる。

土にセメントを混合することによって土の強度を増大させる技術は、セメントによる土質安定処理あるいはセメント安定処理とも言われる。欧米でセメントが土質安定処理のために本格的に使用されたのは、第二次大戦後であり、当初は道路や飛行場の建設のためであった。日本でも1950年代後半になると、セメント安定処理が道路工事などに使われるようになり^{16, 17)}、研究が行われた⁵⁾。日本では、その当時の施工機械、すなわち地盤表層の攪拌混合を行うスタビライザーや転圧機械などは欧米から導入されたもので、施工マニュアルなどのソフト面でも欧米からの導入によるものが主体であった。

日本では、1960年代に入って高度経済成長の時代が始まり、各地で道路、鉄道、空港、港湾などのインフラや民間事業としての工場建設、宅地造成などの建設ラッシュとなった。それに伴い、良質な地盤や土だけでなく、軟弱な沖積粘土地盤、ヘドロ埋立地、あるいは腐植土、有機質土、火山灰質粘土などの特殊土を対象にした工事も急増した。開発地域が拡大する中で、従来扱われなかった土を対象にする必要が生じ、もはや欧米から導入した技術だけでは対応しきれなくなった。日本独自による材料、施工機械が盛んに開発されることとなった。高含水比のへどろや軟弱粘土¹⁹⁾には、石灰系よりもセメント系の方が水硬性に優れ、短時間でより大きな強度を出すことが多いことから、セメント系が多く使われるようになった。当初は、既往のポルトランドセメントや高炉セメントが使われていたが、土質によっては、とくに高含水比土や有機質土において、硬化が難しい場合が多々、発生した。また、建設汚泥や大量発生する産業副生物（焼却灰、スラッジなど）を固化するというニーズも増大し、より効果的な固化材が求められるようになった。1970年代に入ると、各メーカーから、より優れた土質改良効果を有するセメント系固化材が開発され、工事に使われるようになった^{20, 21)}。地盤改良用セメントは、その後も改良が行われ、新タイプも開発され、進化を続け、現在ではセメント安定処理

の多くの現場で使用されている。1990年代に入ると、自然由来による汚染や都市型汚染による重金属汚染土壌の固化・不溶化を行うニーズが増大し、不溶化機能を有するセメント系固化材の開発が行われ、現場で使用されている²²⁾。図1-1は、セメント協会から公表されているセメント需給の推移である²³⁾。セメント生産量は、その時々

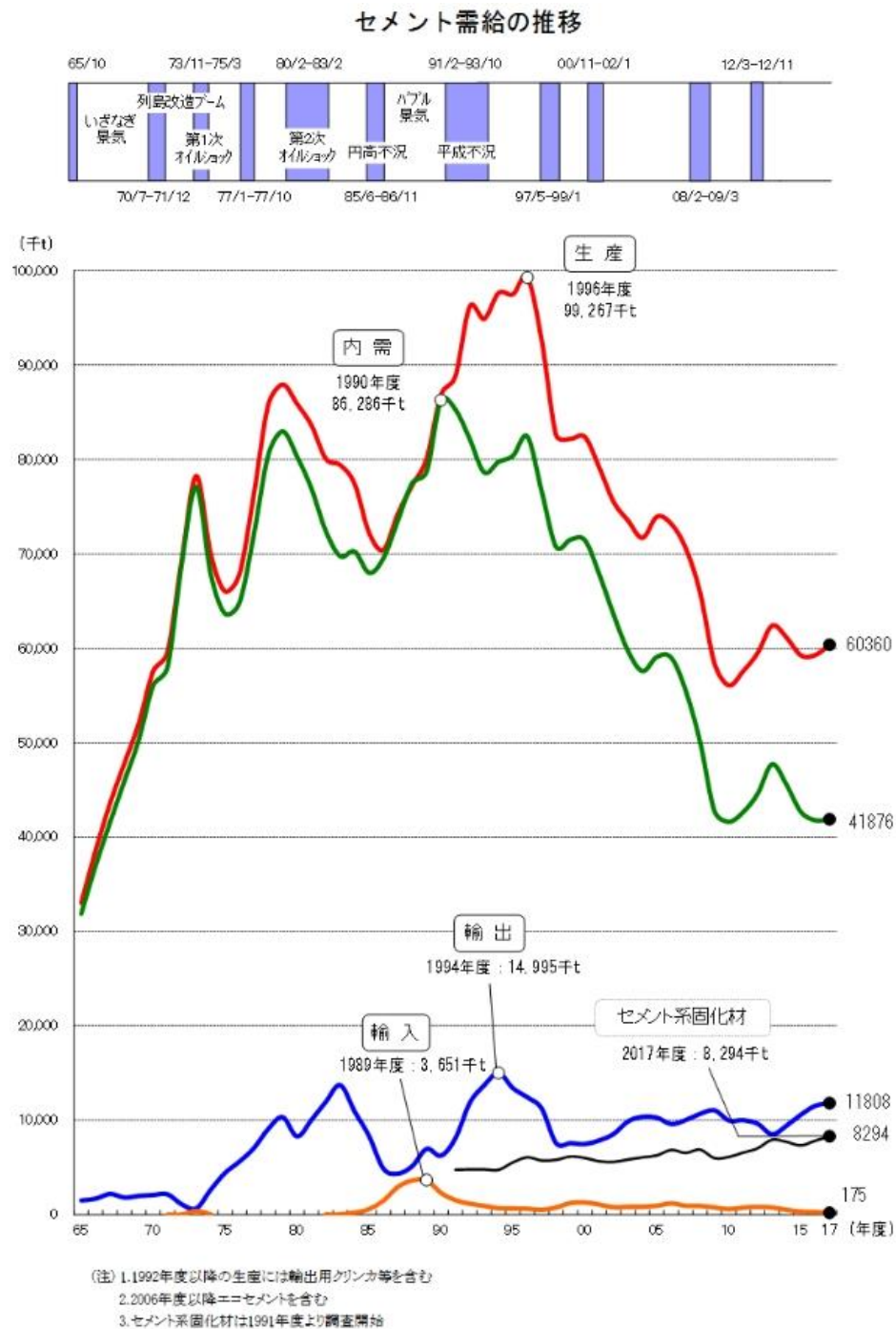


図 1-1 セメント需給の推移 (セメント協会の H.P.より引用²²⁾)

況、経済状況をストレートに反映していると言える。その中で、セメント系固化材は、調査が始まった1991年以降、緩やかであるが、右肩上がりである。2017年度のセメント系固化材の生産量は、829万トン/年であり、内需セメント量（4,188万トン/年）の約20%を占めている。

また、セメント安定処理の施工機械の発展にも目覚ましいものがある。1960年代までは、道路工事などで表層数10cmの土を攪拌混合するスタビライザーが主であったが、1970年代に入ると、浚渫埋立によってできた超軟弱な地盤を走行して表層固化する処理機^{19, 25)}、また地下数十mの深さまで改良する深層混合処理機^{24, 25)}などが開発・実用化され、1980年代以降になって地中を連続移動する中層混合処理機²⁶⁾、車載型あるいは自走型混合処理機²⁶⁾などが開発され、セメント安定処理の様々な工事条件、用途に応じた施工が可能となった。

セメントおよび石灰による安定処理は、近代的な技術で施工されるようになってから約60年を経過したが、その間に、材料、施工機械、そして設計・施工技術において大きな発展を遂げた分野である。

1.2 研究の視点と構成

1.2.1 研究の視点

セメント・石灰による土質改良の強度に影響する要因を整理し、その中で人為的コントロールが可能な要因については、その要因に付帯するコントロール条件を最適化することが重要である。セメントを用いて強度増大を図るという点で、土質改良とコンクリートは同じである。しかし、両者には相違点がある。目標強度レベルの相違、使用場所および用途の相違は、勿論であるが、その他に大きな相違点が2つある。

第一の相違は、コンクリートが品質管理され出荷された砂、砂利に、セメント、水などを混合して造られるのに対して、土質改良では千差万別の物性を有する自然状態の土にセメントを混合することである。このことが土質改良の技術を複雑化している。たとえば、コンクリートには標準配合というものがあって、標準配合で製造すれば、ほぼ所定のワーカビリティと硬化強度が得られる。一方、土質改良では、商品化された粘土材などを用いてソイルモルタルを製造する工法などの例を除くと、標準配合というものが存在しない。土の種類によってセメント固化強度は、大きく異なる。コンクリートでは、水/セメント比によって強度が大略決まるのに対して、土質改良では土の含水比から水/セメント比を求めて強度との関係をグラフ化しても強度が定まらない。これには土、とくに粘土の保水力が影響している²⁷⁾。また、土質改良では、土粒子とセメントの間でポゾラン反応が生じ、その程度は土によって異なり、固化強度に影響する。さらに、土に含まれる有機物からは、セメント・石灰のアルカリによってフミン酸が溶出し、セメント等の硬化を阻害する²⁸⁾。また、パイライトを含む土ではパイライトの酸化によって硫酸を生成しpHが大幅に低下することからセメント・石灰の固化強度に影響する可能性がある。このように、土は固化強度に影響する要因を多く含んでおり、コンクリートには存在しない課題を抱えているため、統一的な配合設計が出来ない。しかし、これまでに多くの研究者によって、そのメカニズム解明がなされ、そして、より有効な固化材が開発されてきた。以上のことは、セメント改良土を念頭にして述べたが、石灰改良土についても同様なことが言える。このような背景から、本研究では、研究項目の一つ目として、現地の土質に適したより良い固化材の選定などに繋げるため、セメント・石灰系固化材による土質改良メカニズムを取り上げた。

第二の相違は、コンクリートが一部のケース（山奥でのダム工事など）を除き、大半のケースでは生コン工場で製造された生コンクリートを工事現場に搬入し使用するのに対して、土質改良では現場でセメント・石灰を各種の攪拌混合施工機によって混合することである。生コン工場では、規格化された装置と方法によって生コンクリートが製造されており、どの生コン工場から取り寄せても品質に実用上、支障となるようなバラツキはない。つまり、コンクリートでは、現場の担当者が生コンの混合精度を気にするような場面は皆無と言ってよい。一方、土質改良では、地盤条件や土質、初期強度が多様で、いろいろな土層が混在し、異物を含むこともある。また、改良深度、目標強度も様々である。混合精度は、強度に影響する²⁹⁾が、現場では或る程度のバラツキが避けられない。混合精度が悪いと、どんなに良い固化材を用いても期待した強度は得られない。そのような中で、現場では、経済性（施工速度）を考慮する中で適切な混合時間、すなわち施工条件が決定される。また、短時間で混合精度を向上させるための機械装置の改良・開発が行われ、現在も続いている。このような背景から、本研究では、研究項目の二つ目として、土質改良現場におけるセメント・石灰の混合精度の評価試験方法（品質管理技術の一項目）を取り上げた。

1.2.2 改良土の強度に影響する要因

セメント・石灰による土質改良の強度に影響する要因を図 1-2 に示す。

土質に関連する要因としては、含水比、粒度分布、pH および水溶性塩類、有機物の種類と含有量、粘土鉱物、液性限界・塑性限界、ポゾラン反応性などがあげられる。粘性土の場合、保水力が大きいので、含水比については pF 水分、あるいは液・塑性限界との比較、すなわち液性指数などで評価する必要がある。ポゾラン反応性は、粘土鉱物と関係が深いことが明らかになっている⁴⁾。

固化材に関連する要因としては、固化材の化学組成と鉱物組成がある。鉱物組成とは、セメントクリンカー鉱物、石膏、石灰、炭酸カルシウムなど、固化材に含まれる鉱物のことである。そして、固化材の添加量が大きな要因となる。

混合精度に関連する要因としては、施工機械、攪拌翼の回転速度などの施工条件、混合時間が挙げられる。施工機械の中で、攪拌翼の部分には、混合精度を上げるため、各メーカーのノウハウが結集している。

養生条件に関連する要因としては、温度、乾燥、凍結、養生時間が挙げられる。室内試験は、通常、20℃恒温室での養生となるが、現場は、冬場に 0℃前後になる場合もある。また、夏場には、地表面が 30℃以上の高温となり、乾燥も進むという状況もある。低温下ではセメント改良土の硬化が芳しくないなど、養生温度が大きく影響することが報告されている^{30,31)}。高含水比土の場合、乾燥による収縮劣化もある。本研究で対象とする要因は、第2章、第3章それぞれ図1-2のように位置づけられる。

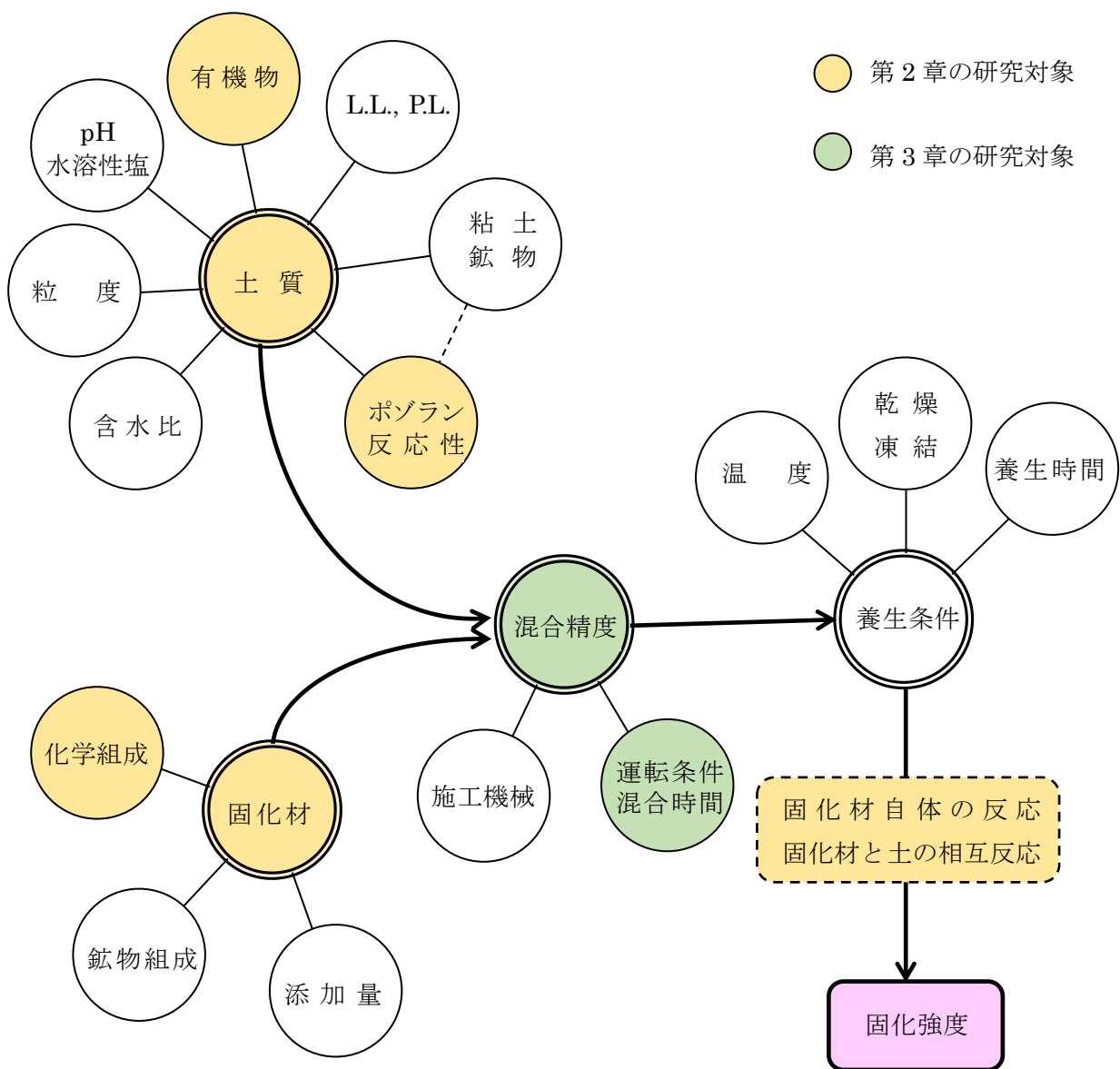


図 1-2 セメント・石灰改良土の強度要因と本研究の対象

1.2.3 構成と内容

本研究は、1.2.2 に述べたように、セメント・石灰系改良土の強度、品質に影響する大きな要因である「土と固化材の反応（メカニズム）」と「土と固化材の混合精度（品質管理技術）」について取り上げる。この 2 つの要因は、多くある要因の一部にすぎないが、改良土の強度増大と品質の向上の方策を検討する際の一助となると考える。本研究の第 2 章、第 3 章、第 4 章の構成と内容を以下に示す。

第 2 章 セメント・石灰系固化材による土質改良メカニズム

2.1 節 背景

セメント・石灰系による土質改良の用途（適用先）と研究開発の現状と課題について述べる。

2.2 節 既往研究

セメント・石灰系による固化反応（ポズラン反応，エトリンガイト生成反応など）に関する既往研究について述べる。

2.3 節 pH, EC 測定によるポズラン反応の簡易推定手法

各種の土等と石灰あるいはセメントとの懸濁液の pH, EC を経時的に測定することによって、ポズラン反応の第一段階となる石灰固定量を簡易に概略推定する手法に関する研究の成果を述べる。

2.4 節 各種セメント系固化材による軟弱土固化における反応生成物と強度特性

4 種の土を対象にして 14 種類のセメント系固化材を用いて反応生成物と固化強度を試験し、固化材の種類とエトリンガイトの生成量、エトリンガイトの生成量と強度の関係などについて調査した研究成果を述べる。

2.5 節 結論

第 2 章の結論を述べる。

第 3 章 改良土中のセメント・石灰含有量試験方法の開発

3.1 節 背景

現場施工において混合精度を向上させることの必要性を述べ、混合精度評価のためには、現場で簡易・迅速にセメント・石灰含有量を測定する試験方法を開発する必要があることを述べる。

3.2 節 既往研究

改良土中のセメントおよび石灰の含有量の分析，および混合精度の評価方法に関する既往研究について述べる。

3.3 節 改良土中のセメント・石灰含有量試験方法の開発

塩酸反応熱法における塩酸濃度，固化材の種類，土の含水比，セメント混合後の経過時間などの影響を調査した結果を述べ，それに基づき開発した試験方法を示す。

3.4 節 塩酸反応熱法の適用（その 1：セメント中層混合による地盤改良工事）

軟弱粘性土地盤でのセメント中層混合処理工事において，施工条件として重要な攪拌機の水平移動速度の最適値を決定するため，塩酸反応熱法を用いてそれぞれの改良土中のセメント含有量を測定し，混合精度を評価した事例を述べる。

3.5 節 塩酸反応熱法の適用（その 2：石炭灰改良盛土材の製造試験工事）

石炭灰の有効利用法の一つとして，石炭灰にセメントと不溶化材と比較的少量の水を混合して石炭灰改良盛土材がある。石炭灰改良盛土材を製造する再のミキサーによる混合時間は，製品の品質に影響する一方で，サイクルタイムに直結し製造コストに影響する。混合手順と混合精度の関係について塩酸反応熱法を用いて調査することによって，最適な混合手順を確立した事例を述べる。

3.6 節 結論

第 3 章の結論を述べる。

第 4 章 総括

第 2 章および第 3 章の研究成果を総括する。

参考文献（第1章）

- 1) 角田清美：古代から中世前期における石灰と漆喰の利用，専修人文論集，88，pp.49-76，2011.
- 2) 角田清美：中世から近世における石灰の利用，専修人文論集，pp.149-187，2012.
- 3) 山内豊聡：土質安定処理の展望，電気化学，Vol.33，335，pp.335-341，1965.
- 4) 土質工学会編：土質工学における化学の基礎と応用，1978.
- 5) 内田一郎，松本錬三：セメント及び石灰による土質の改良，土と基礎，No.12，pp.4-10，1956.
- 6) 日本石灰協会編：石灰による土質安定処理工法，山海堂，1970.
- 7) 小島利司：石灰と土質安定処理，無機マテリアル学会誌，Vol.14，pp.255-260，2007.
- 8) 伊永孝：炭酸カルシウムの製造技術の変遷と応用，無機マテリアル，Vol.9，pp.346-352，2002.
- 9) 学習塾 nocs：世界の石灰（USGS（米国地質調査所）発表資料を基にまとめたもの），
<http://www.nocs.cc/study/ind/lime.htm>
- 10) 日本石灰協会編：石灰による地盤改良マニュアル，第7版，2016.
- 11) 日本石灰協会編：石灰による地盤改良の手引き，2018.
- 12) 山田順治：セメントの歴史，土木学会論文集，Vol.13，420，pp.29-32，1990.
- 13) 笠井順一：セメント化学概論(その1)，コンクリート工学，Vol.21，9，pp.77-82，1983.
- 14) 下田孝：セメント製造技術の系統化調査，国立科学博物館産業史資料，
<http://sts.kahaku.go.jp/diversity/document/system/pdf/093.pdf>
- 15) 太平洋セメント資料：国内におけるポルトランドセメントの工業化，
<http://www.taiheiyo-cement.co.jp/rd/archives/story/images/story2.pdf>
- 16) 高橋国一郎，多田宏行：下層路盤のセメントによる安定処理について(中間報告)，土と基礎，Vol.3，2，pp.13-17，1958.
- 17) 三谷健，田代幹夫，浅田秋江：ソイルセメントの現場試験施工について，土と基礎，Vol.4，6，pp.19-26，1958.
- 18) 谷山重孝：プラスチックソイルセメントに関する二，三の考察，土と基礎，Vol.6，6，pp.27-33，1961.
- 19) 喜田大三，久保博：へどろ対策工法，土と基礎，Vol.29，5，pp.53-60，1981.
- 20) セメント協会編：セメント系固化材による地盤改良マニュアル，技報堂，1985.
- 21) 金城徳一：セメント系固化材による地盤改良，地盤工学会誌，Vol.59，12，pp.16-17，2011.
- 22) 青木秀起，石井準一郎，小山誠，村松英樹，守屋政彦：土を固める原理と応用，7，循環型社会とセメント産業，土と基礎，Vol.53，3，pp.52-57，2005.
- 23) セメント協会ホームページ，<http://www.jcassoc.or.jp/cement/1jpn/jc5.html>

- 24) 寺師昌明：深い地盤改良の実際と問題点を考える, 12, 深層混合処理工法の実際と問題点, 今後の課題と最近の研究動向, 土と基礎, Vol.31, 8, pp.75-83, 1983.
- 25) 吉田信夫, 一本英三郎, 山根敬：施工機械と土質工学 基礎工—軟弱地盤処理—, 土と基礎, Vol.30, 2, pp.63-71, 1982.
- 26) 佐藤明人：地盤改良工法, 新潟大学紀要, pp.17-36, 1997.
- 27) 喜田大三, 久保博, 炭田光輝：汚泥の固化処理に関する研究(3), セメント固化強度と水セメント比との関係への pF 水分の適用, 大林組技術研究所報, 14, pp.104-108, 1977.
- 28) 喜田大三, 久保博, 辻博和, 炭田光輝：汚泥の処理処分に関する研究(9), 底泥中の有機物とその固化強度への影響, 大林組技術研究所報, 19, pp.116-121, 1979.
- 29) 喜田大三, 久保博, 辻博和：公害汚泥の固化処理に関する研究(1), セメント固化における混合指数の提案とその適用, 大林組技術研究所報, 11, pp.152-156, 1975.
- 30) 喜田大三, 久保博, 辻博和, 炭田光輝：汚泥の処理処分に関する研究(7), 固化強度に及ぼす養生温度の影響, 大林組技術研究所報, 18, pp.90-94, 1979.
- 31) 佐藤厚子, 鈴木輝之, 西本聡：セメントおよび石灰改良土の発現強度に及ぼす養生温度の影響, 地盤工学ジャーナル, Vol.3, 4, pp.331-342, 2008.

第2章 セメント・石灰系固化材の土質改良メカニズム

2.1 背景

軟弱な地盤や土を改良する工法には、各種の工法が存在し、現在も新たな改良材や施工機械システムが開発されている。その中で、セメント・石灰系材料を添加混合する工法は、基本的で主要な位置を占めていることに変わりはない。セメント・石灰による土質安定処理工法の適用先は、表層・浅層^{例えば 1~6}および深層^{例えば 6~9}の地盤補強（強度増大）、盛土や法面の安定化¹⁰、土止め壁¹¹・遮水層の造成、流動化処理土¹²を用いる埋戻し・裏込め・空洞充填・水底盛土^{13,14}などに適用されている。また、浚渫汚泥¹⁵や石炭灰^{16~20}を始め、その他の産業副生物^{21~25}の有効利用²⁶、汚染土壌の重金属等の不溶化・封じ込め^{27~31}などに拡大している。東日本大震災の復旧復興に向けた工事でも、土地造成や津波堆積土砂の再資源化³²のために、石灰系・石膏系による土質安定処理が適用されている。

セメント・石灰安定処理は、歴史が長く、多くの実績があるので、完成された技術と思われるがちである。しかし、必ずしもそうではない。土に対するセメント・石灰添加量を決めるために、その都度、現地の対象土をサンプリングして室内配合試験を行って添加量を設計するという一連の作業は、本技術の開発当初から基本的に変わっていない。この間にセメント・石灰による土質改良のメカニズムについて数多くの研究が行われ、沢山の貴重な成果が出て解明が進み^{例えば 33~42}、また、土質改良材の研究が行われ、次々と新たな改良材が開発され^{例えば 43~50}、設計施工のマニュアルが整備された^{51, 52, 53}。しかし、土質改良材の種類を選定、添加量の決定のためには、室内配合試験の結果を待たなければならないという状況は、今でも変わっていない。土の種類・性状が如何に多様で、多くの要因をかかえているか、を物語っている。特に、日本は、4枚のプレートの移動とせめぎあいによって形成された列島であり、世界有数の火山国でもあり、温暖多雨な地域であることも、地盤を構成する土質の多種多様さをもたらしている。

セメント・石灰による土質改良の強度推定法の研究^{54, 55, 56}も行われているが、実用化、普及には至っていないように思われる。広範な土に強度推定法を適用することは、コンピューターがごく身近なツールとなり、性能が格段に向上し、小型モバイル化が進

んだ現在においても、容易なことではないのであろう。しかし、セメント・石灰による土質改良の室内配合試験の省力化、迅速化、合理化は、もっと発展する可能性があることを期待したい。そして、より性能の高い改良材の開発のためにも、根底となる改良メカニズムのさらなる究明を行うことは不可欠であると考えます。土質改良メカニズムの完全な解明は、”永遠の課題”である。

筆者の経験した一例をご紹介します。某現場で、セメントミルク注入攪拌工法による深層地盤改良工事（深さ十数 m）を実施した際に、上層の強度が設計値を大幅に下回った（この不具合は、対象箇所の再施工により解決して事なきを得た）。これは、事前の室内配合試験で上層土試料と下層土試料を層厚の比率に合わせて混合した 1 つの試料土にまとめて試験し、配合設計を行ったことが原因であった。室内試験の労力を減らすための工夫ではあったが、結果は裏目に出た。施工機械には各種あるが、水平方向の回転翼を装備した施工機械では上下方向の土層がよく混ざらないことが多く、当現場もそのような攪拌機械で施工されたのである。現地の上層はローム層（火山灰質粘性土）、下層は同じような土色の砂質シルト層であった。ローム層は、練り返さなければ一見、良好な物理性を呈するので、担当者は土質の違いは認識していても、土質の違いがセメント（高炉セメント B 種使用）の改良強度に大きな差を与える場合があること、特にローム層のセメント改良強度は出にくいことの認識が薄かった。本来、上層土と下層土のそれぞれについて室内配合試験を行い、それぞれの必要セメント添加量を求めて、設計添加量を決める必要があった。担当者は、ローム層の強度が出ない現実を目にした時、反省とともに土質改良の奥深さについて貴重な経験をしたとのコメントをされた。現場の担当者、すなわち施工により近いところで働いている方々に、分かりやすく、役に立つ土質改良メカニズムの情報を届けたいと強く思ったことである。

2.2 既往研究

(1) 石灰安定処理工法とポゾラン反応

土と消石灰（水酸化カルシウム）の相互反応の中で、ポゾラン反応は最も重要な反応である。ポゾラン反応は、セメント安定処理においても、セメントが水和反応する過程においてアルカリ性となり Ca^{2+} イオンを多量供給するので、共通する現象である。

コンクリート用語事典⁵⁷⁾によると、「ポゾラン反応 (pozzolanic reaction) とは、シリカ (SiO_2) 質あるいはシリカとアルミナ (Al_2O_3) を主組成とするポゾランが水の存在する条件下で、常温で水酸化カルシウムと徐々に反応し、結合能力を有する不溶性の化合物を生成する反応である。ポゾラン反応によって生成された不溶性化合物は、ポルトランドセメントの水和物である $\text{C}\cdot\text{S}\cdot\text{H}$ と似た形態のものが多い。ポゾランとは、ポゾラン反応性を有する材料の総称で、フライアッシュ、シリカフェーム、けい酸白土、けい藻土、火山灰などがあり、ポゾラン類とも呼ばれる」と解説されている。ポゾランの名称は、遠くローマ時代にナポリ地方の人々がナポリ近くにあるポズリー町の火山灰を消石灰と混ぜて一種の混合セメントを作り、レンガなどを作り出したことに由来する⁵⁸⁾。

表 2-3-1 は、ポゾラン反応の評価試験に関する既往研究の例を示す。コンクリート分野では、ポゾラン物質は、ポゾランの種類によって効果の特性が異なるが、未硬化時のワーカビリティ改善、硬化後の強度増大、水和結晶構造の緻密化、アルカリ骨材反応の抑制、耐久性改善（化学抵抗性）などを目的として使用される。小菅ら⁵⁹⁾ はシリカフェームのポゾラン反応量を、山本ら^{60,61)} は、フライアッシュ（石炭灰）のポゾラン反応性を、いずれも化学的な手法で評価した。それは、JIS 法（ポゾランを含むモルタルを作製し養生して強度試験を行い強度の増加率からポゾラン反応量を間接的に評価する方法）に比べて、試験期間の短縮を図るとともに、ポゾラン反応量を直接的かつ本質的に評価しようというものである。一方、土質分野のポゾラン反応の捉え方には、コンクリート分野とは異なる面がある。軟弱粘性土に石灰を添加すると、含水比低下、イオン交換、凝集化、ポゾラン反応、炭酸化などが複合した作用によって強度増大がもたらされる。その中でポゾラン反応は、土中の粘土鉱物などに含まれる SiO_2 や Al_2O_3 の一部が溶出し、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と反応してトバモライトゲル、 $\text{C}\cdot\text{S}\cdot\text{H}$ あるいは $\text{C}\cdot\text{A}\cdot\text{S}\cdot\text{H}$ など

の水和結晶鉱物を生成するものである⁶²⁾。すなわち、土質分野のポズラン反応は、強度増大メカニズムの一つであって、対象土質によってポズラン反応の程度が大きく異なることを考慮した添加量設計を行う必要がある。宋ら^{63,64)}は、関東ローム懸濁液に消石灰飽和溶液を滴下して pH12.4 になったときの消石灰量を最適石灰添加量、消石灰飽和点、消石灰固定点と称し、これが消石灰の必要最小量になるとした。そして、長期的なポズラン反応による消石灰の消費はさらに続き、その量を中和法またはアルカリ減

表 2-3-1 ポズラン反応量の評価試験に関する研究例

著者	対象物	試料構成	試験法の概略	主な成果	出典
小菅ら	シリカフェーム (SF) (コンクリート混和材の一つ。粒径 0.1~0.2 μ m の球形微粒子。SiO ₂ を約 90% 含有。)	・ SF + 消石灰 + 水 ・ SF + 普通ポルトランドセメント + 水	混合系のペーストを作製し養生。SF 残量を HCl-Na ₂ CO ₃ 溶解法で化学分析。消石灰残量を DSC (示差走査熱量計) で分析。	SF は消石灰 / SF = 2 で 20°C・40 日間で完全に消失してポズラン反応生成物に変化。反応速度 (80% 消失時間) は 20°C から 40°C の温度上昇により約 4 倍増大。セメントも SF に対して消石灰と同じ効果。	59)
山本ら	フライアッシュ (FA)	・ FA + 普通ポルトランドセメント + 水	API 法。混合試料の懸濁液を 80°C で 24 時間反応させ、ろ液の Ca ²⁺ 濃度測定。FA を含まない試料と比較。	API 法は、JIS 法 (FA 添加モルタルの 28 日・91 日強度と FA 無添加の標準モルタルの強度を比較し活性度指数とする) の結果とよく一致し、試験期間の大幅短縮を実現。	60) 61)
宋	関東ローム (KL)	・ KL + 消石灰 + 水	土懸濁液に消石灰飽和液を pH 12.4 になるまで滴定し、消石灰飽和点を測定。また、経時的な変化は中和法、アルカリ減少法によって測定。	pH12.4 までの消石灰添加量は、石灰飽和点、石灰固定点と称され、土と石灰の長期的化学反応のための最小石灰量であり、アロフェン含有量に伴って増大。経時的なアルカリ減少量は主にポズラン反応に起因。	63) 64)
鬼塚ら	対象：有明粘土 (AN) 副材：火山灰、下水汚泥焼却灰、石炭灰、ゴミ焼却灰	・ AN + 副材 + 生石灰	有明粘土 (w=160~180%) に各添加材を混合し、モールドに入れて締固めて養生し 1~28 日強度を測定。	材令 1 日強度を消化反応強度、それ以降の強度増加をポズラン反応強度として区分。ポズラン反応強度と試料の (SiO ₂ + Al ₂ O ₃) / CaO 比との相関を調査。	65)

少法で測定している。また、鬼塚ら⁶⁵⁾は、軟弱な有明粘土を生石灰で改良する際に助材として各種のポゾランを併用した強度試験を実施し、ポゾラン反応の必要物質である SiO_2 , Al_2O_3 , CaO 量比と強度の関連性を調査した。同論文⁵³⁾では、 SiO_2 , Al_2O_3 の全含有量が指標として用いられており、アルカリ可溶性 SiO_2 , Al_2O_3 の含有量を指標とすることはなされていない。

ポゾラン反応については、有泉による多くの研究がある^{66, 67, 68)}。それらによると、ポゾランには、天然のものと人工のものがあり、前者には、火山堆積物(火山灰)、珪藻土、オパールなどの高シリカ材料または粘土鉱物など、後者には、焼成した粘土・頁岩、フライアッシュ、焼成珪藻土、焼成ボーキサイト、高炉スラグなどがある。そして、火山灰であってもポゾラン反応性を持たないものがあるなど、一義的には決まらない。ポゾラン反応性を有するものに共通している点は、微晶質、ガラス質、無定形質を含み、相当量の可溶性シリカまたはアルミナを含み、石灰溶液との共存で石灰を固定して新しい結晶物質を生成することである。さらに、ポゾラン反応は石灰とどのように反応しようが、建設材料として強度を与えなければ意味をなさないという工学的な観点から述べている⁶⁷⁾。その他に、石灰安定処理の室内試験に関して神谷ら⁶⁹⁾および富田ら⁷⁰⁾の研究報告などがあり、現場施工に伴う調査試験に関して喜田ら⁷¹⁾の研究など、そして工法について浅川⁷²⁾および工藤⁷³⁾の総論などがある。

(2) セメント・石灰安定処理工法におけるエトリングイト生成

セメント・石灰安定処理工法において硫酸塩を含む場合、エトリングイト (Ettringite) が生成され、改良土の強度が増大する。エトリングイトは、 $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot32\text{H}_2\text{O}$ の化学組成を有する針状結晶である。エトリングイトは、生成時に膨張する性質があり、コンクリート分野では膨張破壊の被害を及ぼす場合があることから、セメントバチルスとも呼ばれている。

エトリングイト生成が土質安定処理に利用されるようになったのは、1970年代になってからと思われる。有泉ら⁴³⁾は、固化材の成分調整によってエトリングイト生成量を変えた試験を行った。そして、へどろなどの高含水比土の改良強度は、エトリングイト生成量に比例することを明らかにし、そのメカニズムとしてエトリングイト生成時に、その生成量に応じて土中水を結晶水化するためであると推察した。また、柳場ら⁷⁴⁾は、消石灰(またはセメント)・排脱石膏・高炉スラグからなる固化材の配合を変えて砂質土、粘性土の安定処理強

度を測定し、エトリンタイトの生成量が強度に大きく影響することを明らかにした。筆者ら^{44, 16)}は、関東ローム、へどろの固化処理において、セメントと石膏を併用することによってエトリンタイト生成による強度増大が得られること、石膏/セメント比に最適値が存在することを明らかにした。筆者ら¹⁶⁾は、石炭灰と普通ポルトランドセメントとセルロースエーテル化合物（増粘剤）と水を混合したスラリー状組成物（流動化処理土の一種）を養生して出来た固化体にエトリンタイトが生成することを見出し、エトリンタイトが強度増大に寄与すると推測した。

また、重松⁷⁶⁾は、酸性硫酸塩土の石灰安定処理において、多量のエトリンタイトが生成すること、酸性硫酸塩を多く含む土では石灰添加量を多くする必要があることを明らかにした。山田ら⁷⁷⁾は、酸性硫酸塩土に石灰系（酸化鉄を併用）を混合することによってエトリンタイト生成量を増やすことができ、それに比例して強度が増大することを報告している。Wang⁷⁸⁾は、セメント安定処理された土の周囲に硫酸塩が存在する場合、硫酸塩の攻撃によって処理土中にエトリンタイトが生成する現象について研究を行った。

2.3 pH, EC 測定によるポゾラン反応の簡易推定手法

2.3.1 目的

火山灰質粘性土を始めとする各種の土と石灰・セメントとの相互反応については、これまで多くの研究が行われてきた。しかし、現場技術者が多種多様な土を工事対象とするとき、それらの土と石灰・セメントとの反応性の大小を簡易に把握する方法はなく、室内配合試験を行い固化強度の結果が出るのを待つしかないのが現状である。室内配合試験は、手間と時間がかかることから、試験数があまり増えないように試験ケースが設定される。対象となる土等と石灰・セメントとの反応性について、概略でも良いので、簡易に評価する方法があると、室内配合試験の際に試料土の選定を合理的にできるのではないかと考える。つまり、簡易な試験で、現場の土のポゾラン反応性の評価ができると、室内配合試験を同じような土で重複して実施することがなくなり、また重要な土を見落とすこともなくなるのではないかと考える。

そこで、2.3 節では、土等の石灰・セメントとのポゾラン反応性を推定する簡易な方法を開発することを目的として、土等と石灰・セメントの懸濁液の pH と EC（電気伝導度）の経時的変化を測定について研究を行った⁸⁰⁾。

2.3.2 供試試料

試験に用いた試料は、表 2-3-1 に示す 7 種類（関東ローム、青森ローム、木節粘土、ベントナイト、高炉水砕スラグ、石炭灰、火山灰）である。関東ロームと青森ロームは、ともに火山灰土であるが、関東ロームの粘土鉱物がアロフェン主体であるのに対して、青森ロームはハロイサイト主体であった。両者は、コンシステンシーにも差がある。木節粘土は、土木工事の泥漿材などとして使われ、カオリナイト、クロライト等を含んでいた。ベントナイトは、Na 型モンモリロナイトを主体とし、土木工事でもよく使われるものを用いた。高炉スラグは、アルカリ刺激を受けて硬化反応が始まるとされることから、石灰・セメントとの反応性を調査した。また、石炭灰（フライアッシュ）と火山灰は、代表的なポゾラン物質とされることから調査対象とした。なお、火山灰は、宮崎県の新燃岳が噴火した後、2～3 か月後に降下灰を採取したものである。

また、添加材料としての消石灰は、懸濁試験では水酸化カルシウムの試薬 1 級を用

い、土質改良強度試験では工業用を用いた。セメントは、六価クロム溶出リスクが低いことと、地盤改良工事で多用されていることから、高炉セメント B 種（太平洋セメント製）を用いた。

2.3.3 試験方法

(1) 懸濁液の pH, EC 試験

土と消石灰の反応を調べるための pH 試験の方法には、従来から行われている滴定法と、筆者らが工夫したバッチ法がある。両者の試験フローを図 2-3-1 に示す。

滴定法では、消石灰飽和溶液を用いることが基本である。消石灰の溶解度は 1.7g/L (25℃) と低いため、安定した状態で使用できる消石灰溶液の上限濃度は、1g/L 程度 (=0.1%程度)である。例えば土 1g に対して消石灰反応量が 0.3g である場合、消石灰溶液 300mL が必要となる。滴定法は、液量が多くなり、滴定に時間がかかるという短所

表 2-3-1 試料の性状等⁸⁰⁾

	関東 ローム	青森 ローム	木節粘 土	ベントナ イト	高炉水砕 スラグ	石炭灰	火山灰	
産地, メーカー等	東京都 清瀬市 (立川ローム層)	青森県 上北郡	(株)立花マ テリアル	クニミネ 工業(株)ク ニゲル V1	(株)デー シー	北電興業 (株), JIS 灰 2 号	宮崎県 新燃岳 (2011 年 噴火の 灰)	
自然含水比(%)	122	72	1.4	8.1	0.8	0.4	0.8	
色 調	褐色	黄褐色	黄白色	灰白色	灰白色	暗灰色	暗灰色	
pH (水比5で30分後)	5.36	5.37	7.69	10.65	10.93	10.28	5.09	
粒子密度(g/cm ³)	2.63	2.64	2.65	2.66	2.99	2.22	2.71	
粒 度 分 布 (%)	75μm~ 2mm	6.1	44.0	9.1	0.4	5	2	95
	5~75μm	55.7	32.9	56.1	23	81	76	5
	<5μm	38.2	23.1	34.8	76.6	14	22	0
液性限界(%)	163.3	109.1	28.4	560	45	NP	NP	
塑性限界(%)	101.6	73.8	13.6	55	24	NP	NP	
塑性指数	61.7	35.3	14.8	505	21	NP	NP	
主要粘土鉱物	アロフェ ン	ハロイ サイト	カオリナ イト, ク ロライト	Na 型モン モリロナイ ト	—	—	—	

がある。そこで、筆者らは、消石灰ミルク(2%)を用いる方法で試験した。消石灰ミルク中の消石灰粒子が沈降して濃度が不均一になることを避けるため、消石灰ミルクの攪拌を継続して沈殿を防止するようにした。消石灰ミルクを分注器によって1mL添加するごとにpHを測定した。

一方、バッチ法は、図2-3-1に示すように、石灰添加量の異なる数本の懸濁液を作製し、密閉して振とうし、所定の時間ごとにpHとECを測定する方法である。

(2) 土質改良強度試験

土に消石灰(またはセメント)と水を添加し、ホバート型ミキサーで3分間混合した。添加水量は、混練直後にシリンダーフロー試験($\phi 8\text{cm} \cdot h8\text{cm}$)を行い、フロー値が

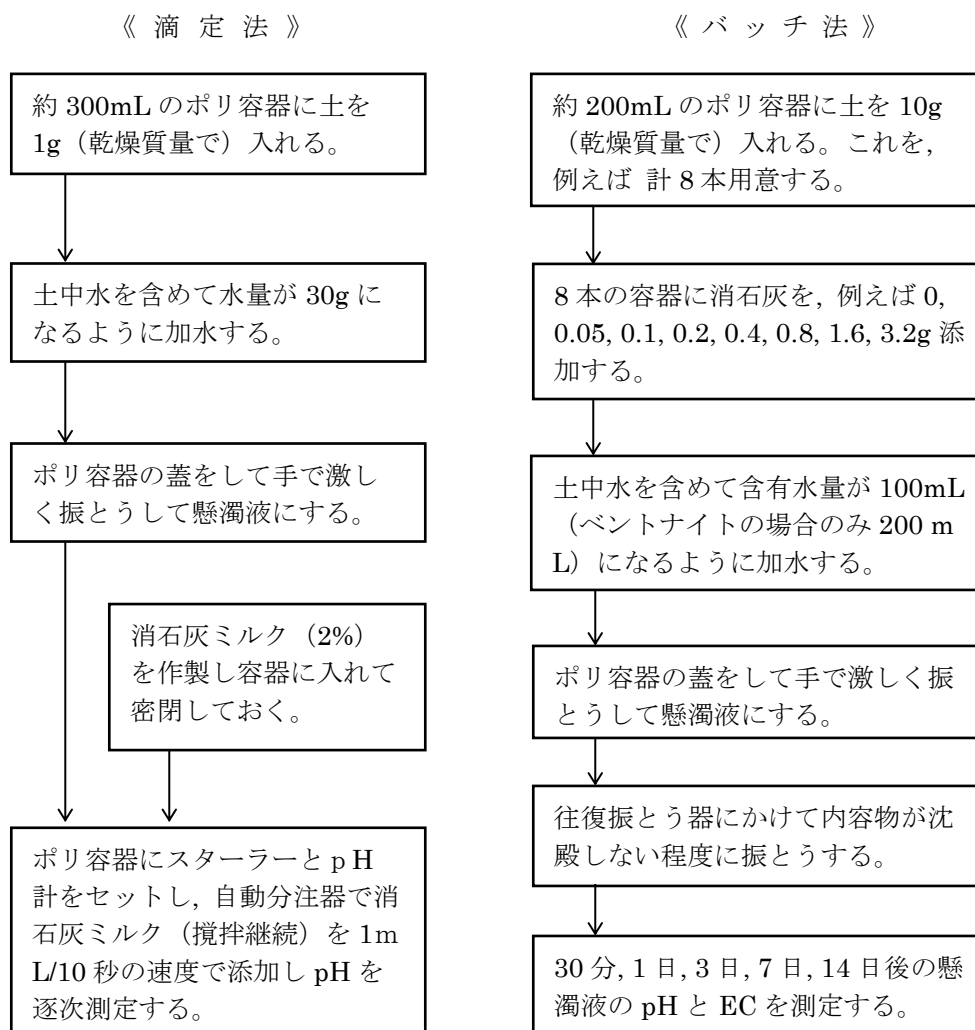


図 2-3-1 土-消石灰系懸濁液 pH の試験方法

90～100mm 程度になるように目指した。しかし、消石灰やセメント添加によるカルシウムイオンによる土粒子の凝集反応が時間経過とともに進行し、レオロジーに影響してフロー値を合わせることは必ずしも容易でなく、目標のフロー値に入らないものもあった。それでもすべてのケースにおいて、処理土を一軸圧縮試験用モールドに詰める際にはタッピング（モールドを持って台の上で叩く）によって充填できる程度の流動性（ハンドクリーム状）が確保されており、かつ、分離水の発生は認められなかった。養生温度は 20℃とした。

2.3.4 結果と考察

(1) 消石灰およびセメントの懸濁液の pH と EC

土・消石灰・セメント懸濁液の pH, EC について調査する前に、その基礎となる消石灰およびセメントの懸濁液の pH, EC 特性について調査した。図 2-3-2 は、R.S.Boynton^{81, 82)}による温度と消石灰溶解度の関係である。消石灰の溶解度は、温度とともにほぼ直線的に減少する。本研究では、室温(約 20℃)での試験を基本としたので、消石灰の飽和溶解度が約 0.165g/100g となる条件で試験を行ったことになる。また、図 2-3-3 は、消石灰飽和溶液の温度と pH の関係を示す⁸³⁾。消石灰飽和溶液は、pH 標準液としても使われており、温度と pH の関係が安定している。消石灰飽和溶液の pH は、溶解度の影響もあって、温度とともに低下する。20℃における飽和消石灰の pH は約 12.6 である。

つぎに、消石灰、セメントのそれぞれの懸濁液の濃度と pH, EC の関係について試験

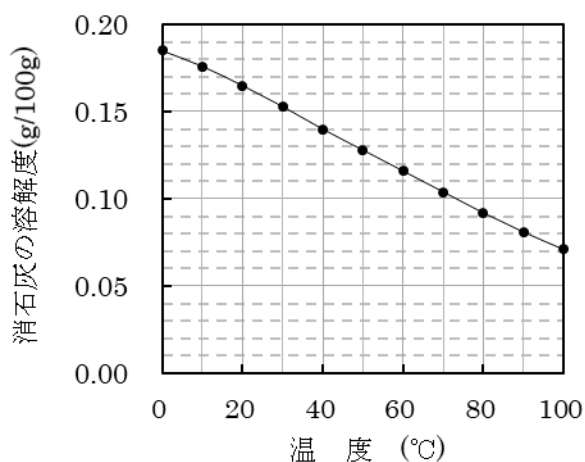


図 2-3-2 温度と消石灰溶解度の関係 (R.S.Boynton⁸²⁾ のデータを図化した)

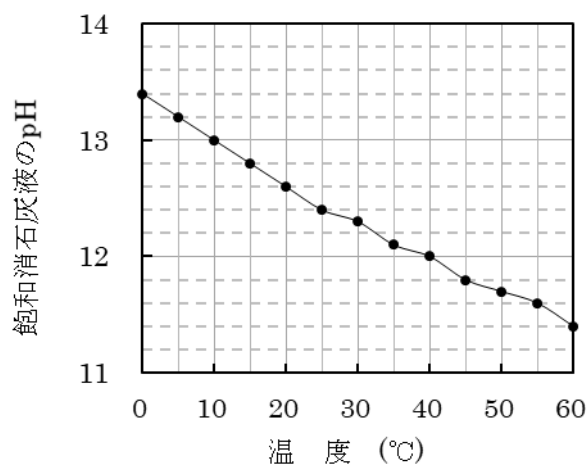


図 2-3-3 温度と消石灰飽和溶液の pH の関係 (菊池⁸³⁾ のデータを図化した)

した結果を図 2-3-4～図 2-3-7 に示す。試験時の各懸濁液の温度は約 18℃であった。まず、消石灰の pH(1 日)は、図 2-3-4 に示すように、0.05%で 12.1, 0.1%で 12.4, 0.2%で 12.6 となり、それ以上の濃度ではほとんど変わらなかった。そして、30 分後の懸濁 pH と 1 日後の懸濁 pH の差は、ほとんどなかった。消石灰懸濁液の EC(1 日)は、図 2-3-6 に示すように、0.05%で 248mS/m, 0.1%で 432mS/m, 0.2%で 744mS/m, 0.4%で 862mS/m, 0.8%で 953mS/m と増大し、3.2%では 960mS/m と僅かな増大となった。そして、30 分後の懸濁 EC と 1 日後の懸濁 EC の差は、ほとんどなかった。

一方、セメント懸濁液（高炉セメント B 種）の pH は、図 2-3-5 に示すように、30 分後と 1 日では明確な差があった。例えば、0.8%の pH は、30.分後に 11.7, 1 日後に 12.3 となり、3.2%の pH は、30 分後に 11.9, 1 日後に 12.6 となり、それぞれ 0.7 程度の上昇を示した。このことは、OH⁻イオン濃度が約 5 倍増大 ($10^{0.7} \approx 5$) したことを意味する。また、セメント懸濁液の EC は、図 2-3-7 に示すように、濃度とともに増大し、徐々

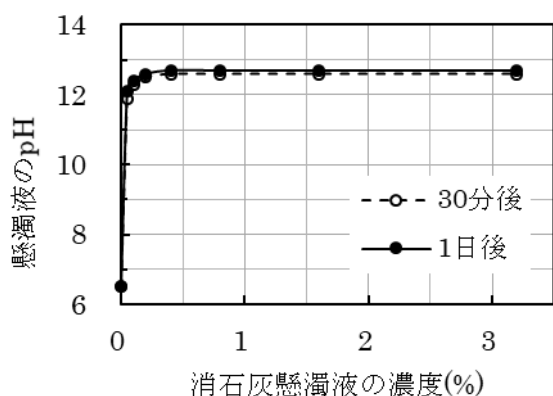


図 2-3-4 消石灰懸濁濃度と pH の関係 (約 18℃)

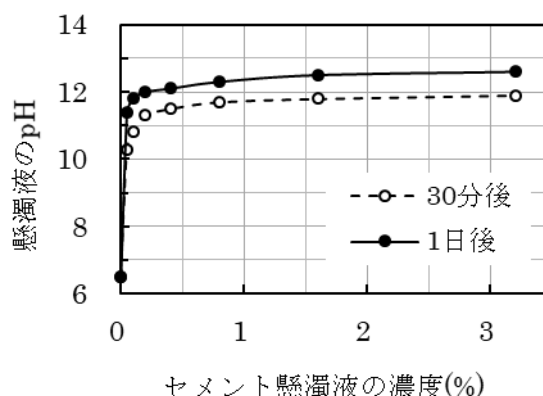


図 2-3-5 セメント懸濁濃度と pH の関係 (約 18℃)

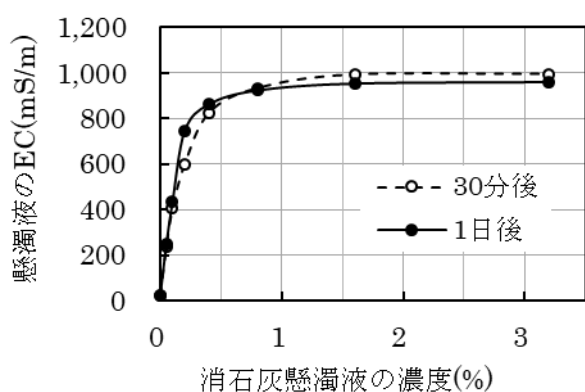


図 2-3-6 消石灰懸濁濃度と EC の関係

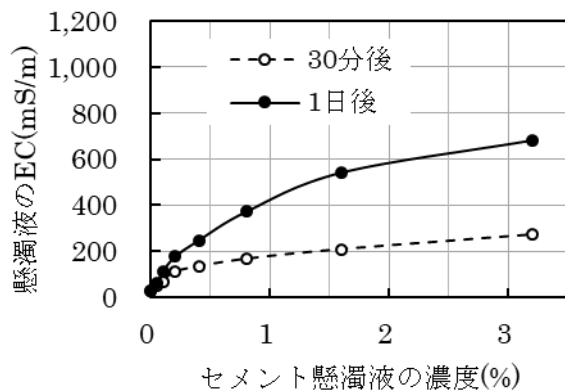


図 2-3-7 セメント懸濁濃度と EC の関係

に増大が鈍化するようになり、そして 30 分後と 1 日後では大きな差を示した。0.8～3.2%の EC は、30 分から 1 日の間に 2.2～2.6 倍増大した。このように、セメントの pH、EC は、消石灰に比べて、時間依存性が大きい。このことは、セメントの水和反応に伴うカルシウムイオン等の溶出量が経過時間とともに変化（増大）することを示す。したがって、土とセメントを混合した懸濁液の pH、EC の経時的測定によって土のポズラン活性を評価することは、困難と判断された。

(2) 滴定法とバッチ法の比較

関東ロームを対象として、土-消石灰懸濁液 pH 試験を滴定法で行った結果を図 2-3-8、またバッチ法で行った結果を図 2-3-9 に示す。それぞれの試験方法は、図 2-3-1 の方法による。滴定法による試験は、2 回繰り返して実施した。

図 2-3-8 に示す滴定法の結果は、図 2-3-9 に示すバッチ法の 30 分後の結果に近似している。滴定法の試験が数十分間を要したことから、バッチ法の 30 分後の結果に近似したと考えられる。両図には、飽和消石灰懸濁液の平衡 pH が図 2-3-2 において 12.5 であったことから、基準線として、宋ら^{63, 64}の研究を参考にして、pH12.5 の線を付記している。宋らは pH12.4 線と曲線の交点の石灰量を石灰飽和点、石灰固定点、あるいは最適消石灰添加量とした。ここでは図 2-3-4 の結果を考慮し、pH12.5 線と曲線の交点を石灰固定量とした。

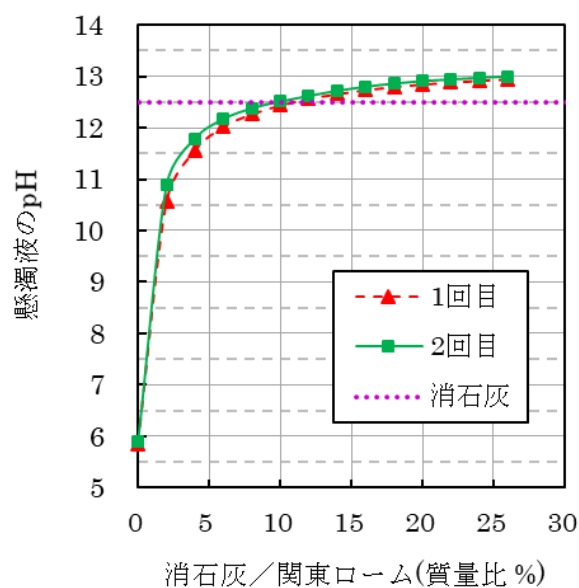


図 2-3-8 滴定法による関東ロームと消石灰の懸濁液 pH⁸⁰

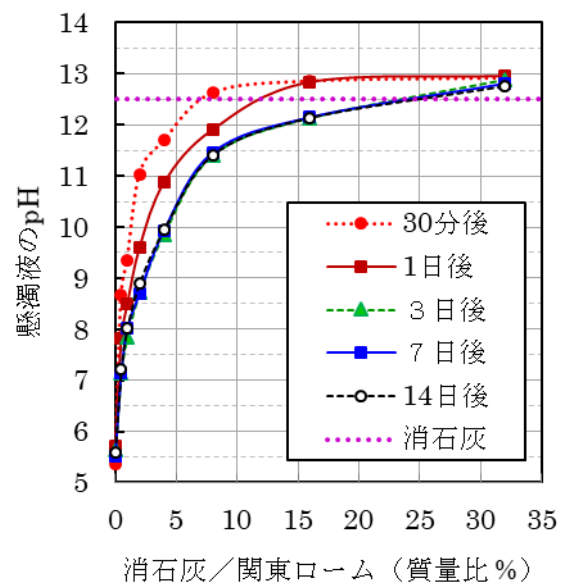
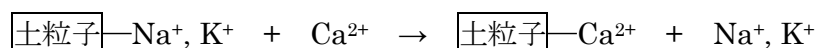


図 2-3-9 バッチ法による関東ロームと消石灰の懸濁液 pH⁸⁰

石灰固定量は、滴定法では 11%、バッチ法(30 分後)では 8%となった。このように滴定法の方がやや大きな石灰固定量を示した原因は、土・消石灰懸濁液の攪拌条件の違い、また滴定操作中(スターラーによる攪拌継続)に大気中の CO₂ を吸収したため、などが考えられるが、詳細は不明である。滴定法では、滴定速度、攪拌の条件を出来るだけ一定にする必要があると考えられる。

また、図 2-3-8、図 2-3-9 ともに消石灰添加量の多い所で pH が約 13 まで上昇している。これは、図 2-3-4 の最大 pH が 12.7 であったことに比べると、やや高い。この原因としては、消石灰の Ca²⁺イオンと関東ロームの土粒子表面の交換性イオンのイオン交換によって、Ca²⁺よりも解離定数の高い Na⁺、K⁺などが溶液中に放出されたためと考えられる。



一方、バッチ法による pH 曲線は、図 2-3-11 に示すように、30 分後と 1 日後、3 日後では大きな差があった。そして、3~14 日後の pH には、差がほとんど見られなかった。各曲線の pH12.5 線との交点すなわち石灰固定量は、30 分後では 7%、1 日後では 12%、3 日後では 24%であった。石灰固定量は、30 分から 1 日で 1.7 倍、1 日から 3 日で 2 倍に増大した。そして、3 日から 14 日の石灰固定量は、ほとんど増大しないことが明らかになった。

以上のことから、滴定法では時間に伴う pH 変化を調査することは出来ないのに対し、バッチ法は、時間経過に伴う pH 変化を容易に調査することが出来る。そして、バッチ法は、容器内の試料が固結することを防ぐように適宜、振とうすることによって、試験者間による差が出にくく、再現性の高い試験方法である。このことから、以下の試験ではバッチ法を適用した。

(3) 7 種試料の消石灰添加懸濁液の pH

バッチ法によって 7 種類の試料に消石灰を加えた懸濁液の pH 試験の結果を図 2-3-10~図 2-3-17 に示す。図 2-3-10 (関東ローム) は、図 2-3-9 の再掲である。

青森ローム-石灰の pH (図 2-3-11) は、関東ローム-石灰と類似の挙動を示し、30 分後から 7 日後まで低下がみられたが、7~14 日では変化が認められなかった。そして、青森ロームの石灰固定量 (pH12.5) は、関東ロームに比べて、やや少ないことが認められた。バッチ法による pH 試験は、ロームの石灰固定量の初期 (数日間) の傾向を詳細

に調査することができ、ロームの種類による石灰固定量の相違を把握することが可能である。ローム等による石灰固定反応については、後述の(7)に述べる。

つぎに、ベントナイト-石灰の pH (図 2-3-12, 13) は、消石灰 2%添加までにおいて 14 日まで僅かずつであるが、明確に低下した。イオン交換反応は短時間で終了することから、この反応は、イオン交換だけでなく、筆者ら⁸⁴⁾がベントナイトの水酸化ナトリ

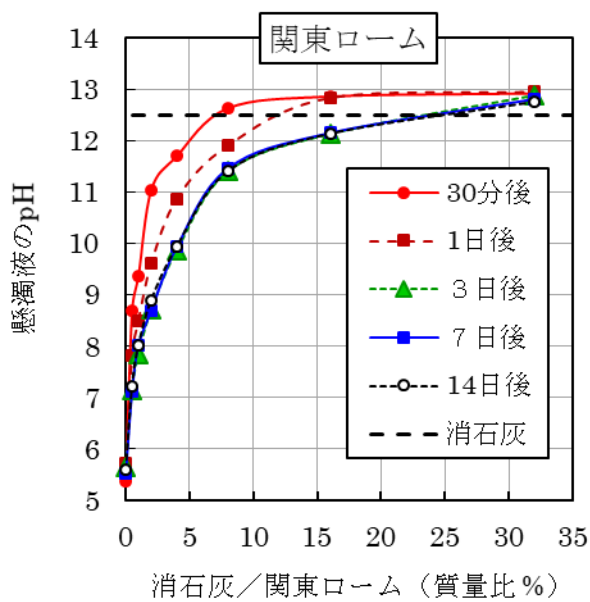


図 2-3-10 関東ローム-石灰の pH⁸⁰⁾

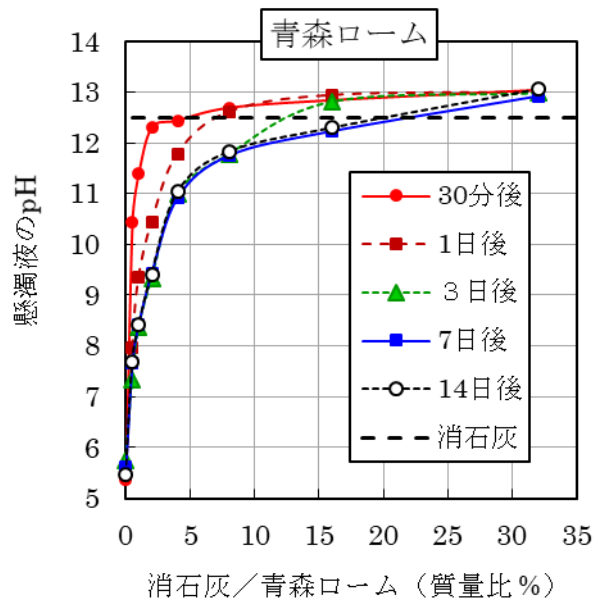


図 2-3-11 青森ローム-石灰の pH⁸⁰⁾

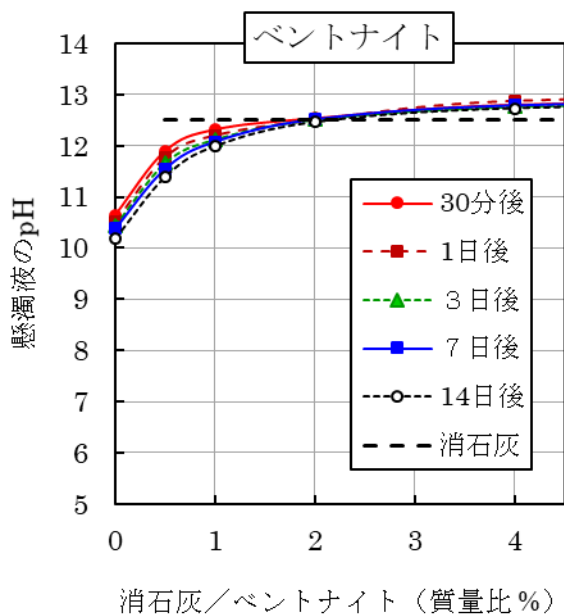


図 2-3-12 ベントナイト-石灰の pH⁸⁰⁾

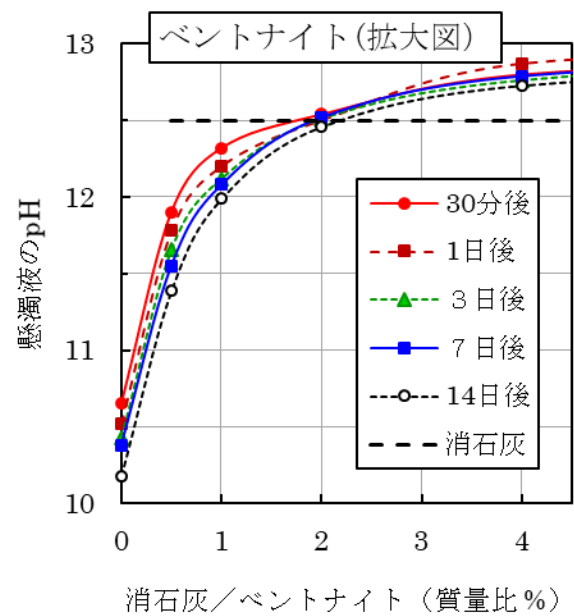


図 2-3-13 左図の拡大図

ウム溶液によるアルカリ溶解について報告したように、石灰による粘土鉱物のアルカリ溶解が一部で起き、その反応に石灰が消費されるため pH が低下したと考えられる。また、木節粘土-石灰の pH (図 2-3-14) は、時間経過にともなう変化がほとんどなく、石灰混合の初期に起きるイオン交換反応が主体であることが示唆される。

高炉スラグ-石灰の pH (図 2-3-15) は、消石灰無添加で時間とともに上昇していることから、高炉スラグ自体が水和反応にともなって Ca^{2+} イオンなどのアルカリ成分を

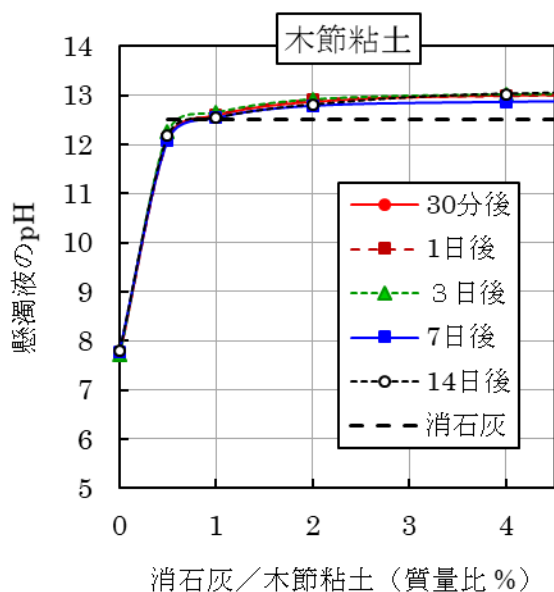


図 2-3-14 木節粘土-石灰の pH

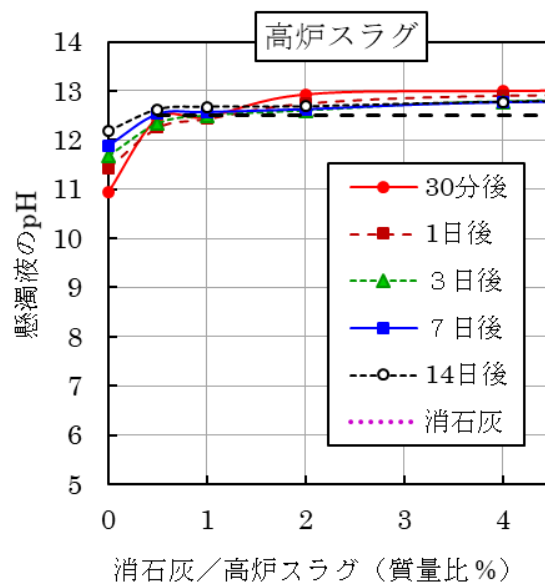


図 2-3-15 高炉スラグ-石灰の pH

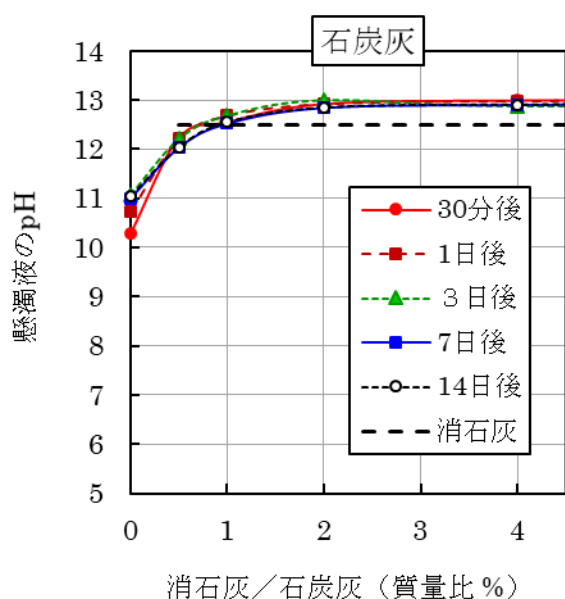


図 2-3-16 石炭灰-石灰の pH

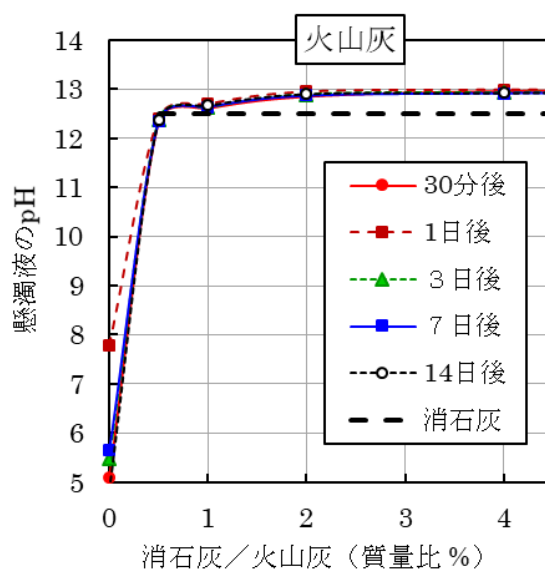


図 2-3-17 火山灰-石灰の pH

放出している。したがって、高炉スラグのポゾラン反応を pH や EC で評価するのは困難である。

石炭灰-石灰の pH (図 2-3-16) は、消石灰無添加で材令に伴って少し上昇するが、消石灰を添加したケースでは、時間ともなう pH 変化はほとんどない。

火山灰-石灰の pH (図 2-3-17) は、消石灰無添加において、30 分後から 1 日にかけて大幅に低下した。このことは、比較的新鮮な降下火山灰の試料であるため、初期に若干のアルカリ金属イオンが存在したが、その後、金属硫化物やフリーの硫黄が酸化して硫酸イオンを生成し pH 低下をもたらしたためと考えられる。この火山灰試料では、石灰との反応をうかがわせるような pH 挙動は見られなかった。吉田ら⁸⁵⁾は、北海道の火山灰について、普通ポルトランドセメント 15g、火山灰 5g、水 100g を混合して 40°C で 15 日または 60 日経過後にろ過し、ろ液中の水酸化物イオンとカルシウムイオンを ICP 発光分析によって測定することによって、別途のモルタル強度試験結果と併せて、ポゾラン反応性を評価した。その結果、いずれの火山灰試料にもポゾラン反応性があると結論づけた。筆者らの pH 試験のみでは、火山灰のポゾラン反応性を評価することは困難と考えられる。

以上の 7 種の試料について、経過時間に伴う石灰固定量 (pH12.5) の変化をまとめて図 2-3-18 に示す。また、図 2-3-19 には、材令 7 日の石灰固定量の比較を示す。石灰

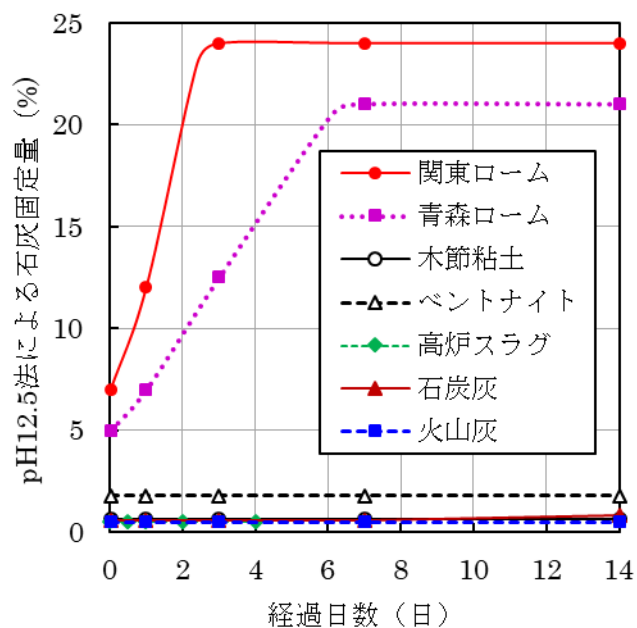


図 2-3-18 各試料の石灰固定量の経時変化⁸⁰⁾

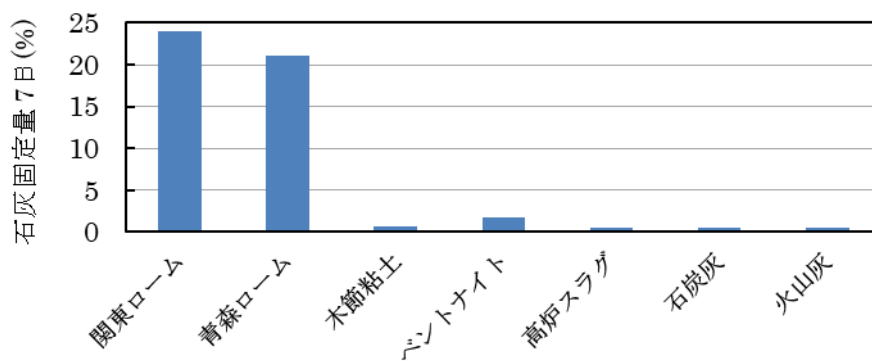


図 2-3-19 各試料の石灰固定量 (7日, pH12.5)

固定量は、関東ロームが最大で、次いで青森ロームである。ロームの石灰反応性を調べるには、バッチ法で 3~7 日まで測定する必要がある。ローム以外では、ベントナイトが 1.8%と他に比べて明らかに大きく、木節粘土、石炭灰、火山灰は、いずれも 0.5~0.6%と小さく、有意差が認められなかった。これらの試料の中には、数週間あるいは数か月という中長期的にはポズラン反応を示すものがあると考えられるが、これらの試料では、本試験のように常温で最大 14 日までという試験条件でポズラン反応性を明らかにすることは出来ない。本試験方法は、関東ローム、青森ロームなどの火山灰質粘性土、およびベントナイトなどの石灰反応性に富む材料に適用可能である。

(4) 消石灰添加懸濁液 pH の考察

図-2-3-20 は、本試験による石灰固定量測定の様式図である。pH12 程度になるまでの消石灰添加量では、土による石灰の消費（イオン交換，土粒子の一部溶解と沈殿生成

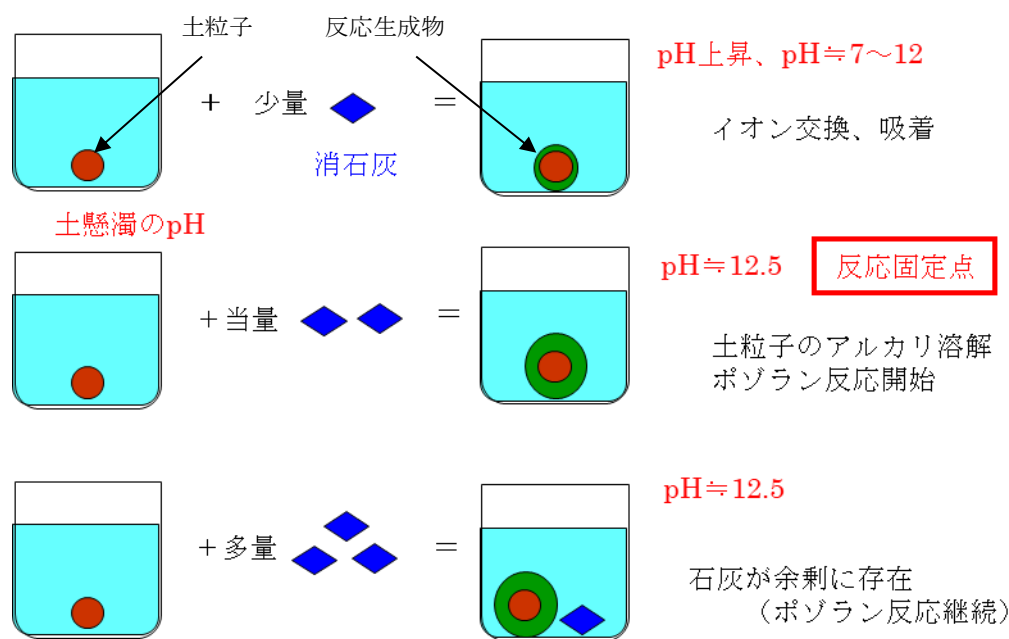


図 2-3-20 バッチ法による石灰固定量測定の様式図

物)は起きているが、消石灰が飽和濃度に達していないため、固形(溶解しきれない)の消石灰は存在しないと考えられる。次に、当量点(反応固定点)では、土による短期的な石灰消費が一応終了しており、余剰の消石灰(消石灰の固形物)のない上限の石灰濃度と考えられる。この状態は、中長期的には、土による消石灰の消費によって、pHが徐々に低下する。次に、反応固定点を上回る消石灰を添加した場合、pHは約12.5のままであるが、容器内に消石灰の固形物(溶解しきれない消石灰)が存在するようになると考えられる。この消石灰は、土との反応に消費される石灰の供給源となるため、消石灰量が十分に確保されていればpH約12.5が中長期的に維持されるが、消石灰量が少ないと、いずれpHの低下を招くと考えられる。

日本石灰協会編の石灰による地盤改良マニュアル⁵²⁾では、強度増大反応を図2-3-21のようにモデル化している。消石灰の場合、消化吸水反応はなく、イオン交換以降の反応となる。また、エトリンガイト生成を積極的に起こすための硫酸塩は添加していないので、ここでは無視すると、残るのはイオン交換反応とポゾラン反応である。ポゾラン反応は、土に含まれるアルカリ可溶性のシリカ、アルミナが溶解することから始まる。石灰は、シリカ、アルミナの溶解反応のためにも消費される。そして、溶解したシリカ、アルミナは、ともに溶液中にイオンとなって現れることはない。何故ならば、シリカ、アルミナともにカルシウムイオンとの結合力が強く、即座に不溶性の珪酸カルシウム水和物、アルミン酸カルシウム水和物となって沈殿する。これらの水和物が中長期的に

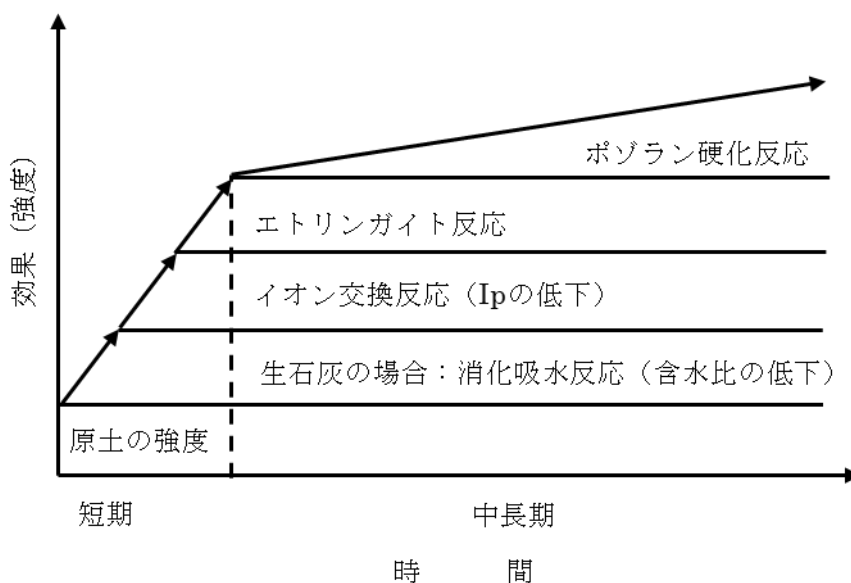


図 2-3-21 土と石灰系固化材の強度増加モデル⁵²⁾

結晶化して、トベルモライト、 C_4AH_{13} などの鉱物に生長し⁶⁸⁾、土粒子間隙を接着あるいは充填して、土の強度を増大させる。有泉⁶⁶⁾は、関東ロームの主要粘土鉱物であるアロフェンが石灰と容易に反応し、 C_2ASH_n 化することを認めた。このように生成したゲルが結晶化し強度増大に寄与することでポゾラン反応が完結する。

有泉⁶⁶⁾は、Ca ベントナイト懸濁液 (30%) に対して、消石灰の添加量を増していくと、図-2-3-22 のように、石灰保持点 (石灰固定量) がこの場合に 60me/100g であって、石灰保持点において粘度と塑性限界が最大を示すと報告している。石灰保持点において、ベントナイト粒子は Ca^{2+} イオンで飽和され、凝集構造 (ダブル T 構造のフロック) を形成したことによる。これらの現象は、粘土コロイド粒子の界面化学的性質の変化に起因するもので、ポゾラン反応の初期段階 (溶解と沈殿) との直接的関係はない。

本試験で、例えば、関東ロームで 24% の消石灰の固定が見られた。関東ローム 100g 当り 24g の消石灰を固定したことになる。24g の消石灰は、 $24 \div 74 = 0.32$ モル = 320 ミリモルである。カルシウムイオンは 2 価なので、 $320 \times 2 = 640$ ミリ当量となる。関東ロームの陽イオン交換容量は、pH 依存性が強いので、単純に評価できないが、それほど大きくなく、640meq/100g というような大きな値ではない。したがって、消石灰固定量 24% の大半は、関東ロームのシリカ、アルミナの溶解と水和物の生成に消費されたと考えられる。ポゾラン反応の全体ではないが、少なくともポゾラン反応の初期反応 (溶解と沈殿) は、3~7 日間に活発に起きることが明らかである。ロームの場合、図 2-3-21 のモデルのように、イオン交換が起きてから、ポゾラン反応が始まるという別々のステップではなく、イオン交換、溶解、沈殿がほぼ同時に始まる。そして、初期 (7 日まで) の

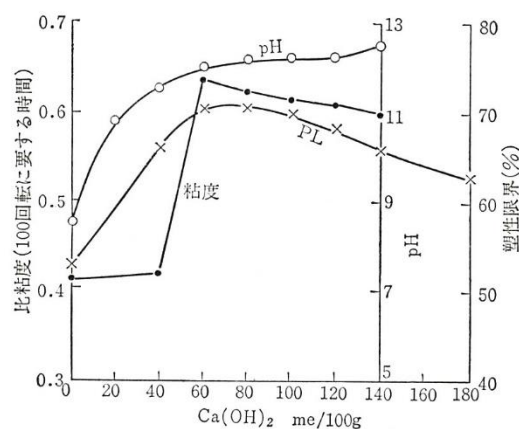


図 2-3-22 消石灰の添加に伴う Ca ベントナイト懸濁液土 (30%) の pH, 粘度および塑性限界⁶⁶⁾

反応で消石灰の消費は一段落し、その後の消石灰の消費量は、多くなく、それまでに生成した水和ゲルの質的な変化（結晶化）が徐々に進行すると考えられる。

(5) 7 種試料の消石灰添加懸濁液の EC

7 種類の試料について、消石灰を添加した懸濁液の pH 測定後に EC を測定した。その結果を図 2-3-23～図 2-3-29 に示す。関東ローム-石灰（図 2-3-23）と青森ローム-石灰（図 2-3-24）は、経過時間に伴う EC の大幅な低下を示した。EC 低下と前述の pH 低下の関係を調査するため、図 2-3-30 および図 2-3-31 には、関東ローム-消石灰（4% および 8%）の pH と EC の経時変化を示す。これらの図から、EC の経時変化は、pH と連動した動きをすることがわかる。このように、土-石灰懸濁液の EC は、消石灰飽和懸濁液の EC950mS/m（図 2-3-6 参照）を上限として、それぞれの初期 EC から時間経過に伴って減少傾向をたどる。EC の減少は、懸濁液中のイオン（電解質）の減少を意味する。土-石灰系懸濁液中のイオンとして考えられるのは、カルシウムイオン、土からイオン交換によって生じたイオン（ Na^+ , Mg^{2+} など）、水酸化物イオン、粘土のアルカリ溶解によって生じたイオン（ SiO_3^{2-} , $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ など）などである。これらのイオンが時間とともに急速に減少するのは、粘土のアルカリ溶解で生じた珪酸やアルミン酸がカルシウムイオンと反応して、珪酸カルシウム水和物やアルミン酸カルシウム水和物の生成

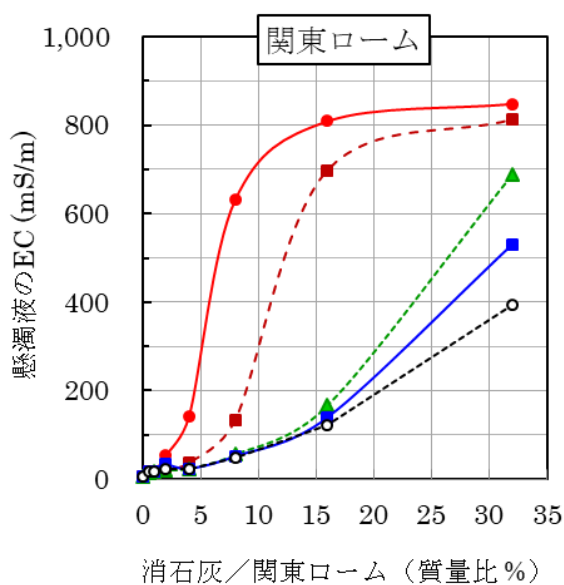


図 2-3-23 関東ローム-消石灰の EC⁸⁰⁾
(凡例は図 2-3-23 と同じ)

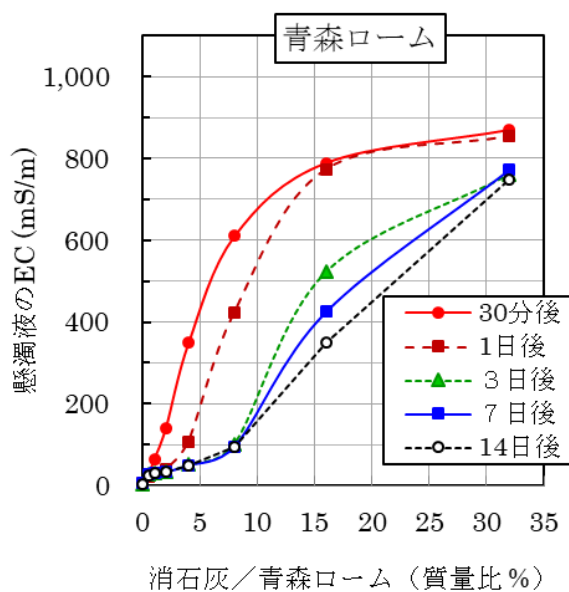


図 2-3-24 青森ローム-消石灰の EC⁸⁰⁾

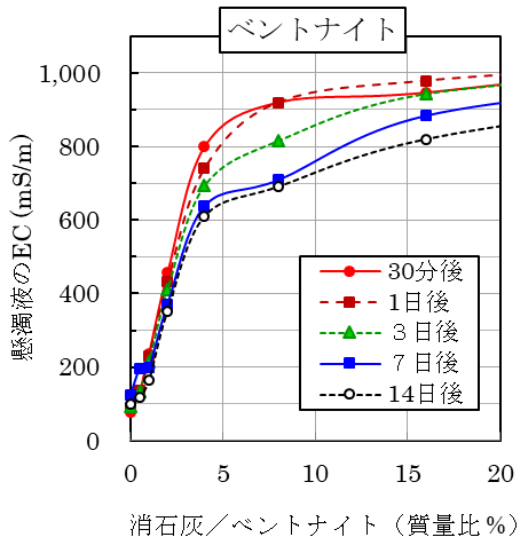


図 2-3-25 ベントナイト-消石灰の EC

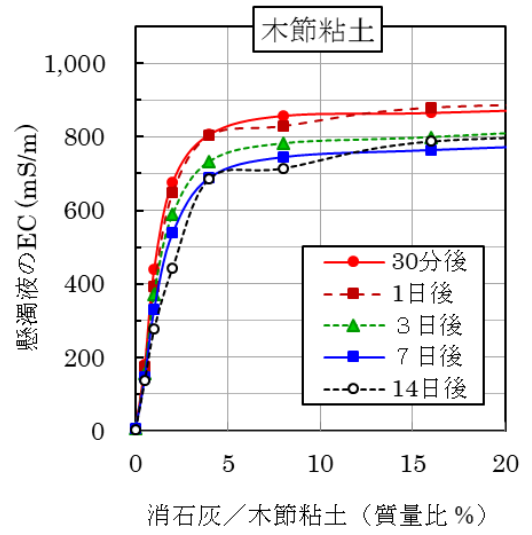


図 2-3-26 木節粘土-消石灰の EC

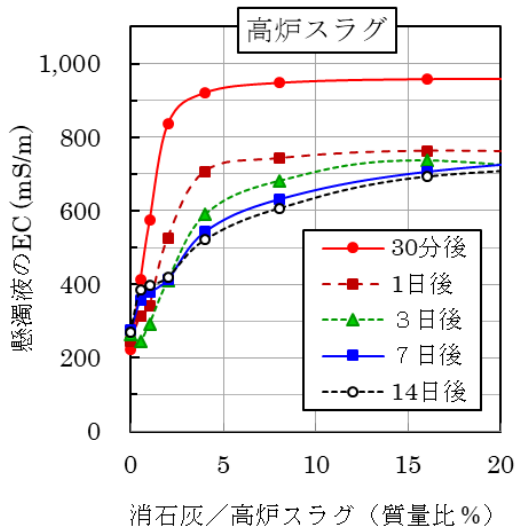


図 2-3-27 高炉スラグ-消石灰の EC

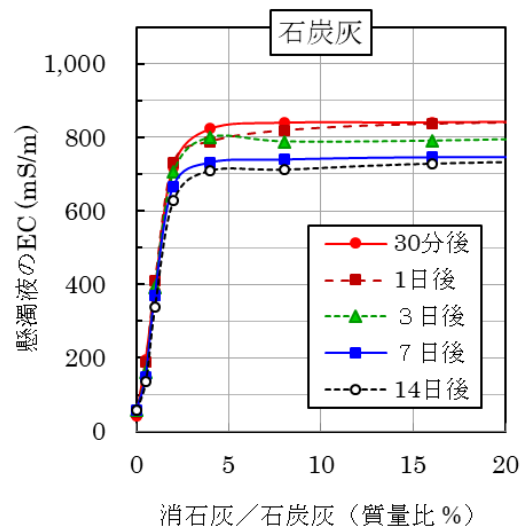


図 2-3-28 石炭灰-消石灰の EC

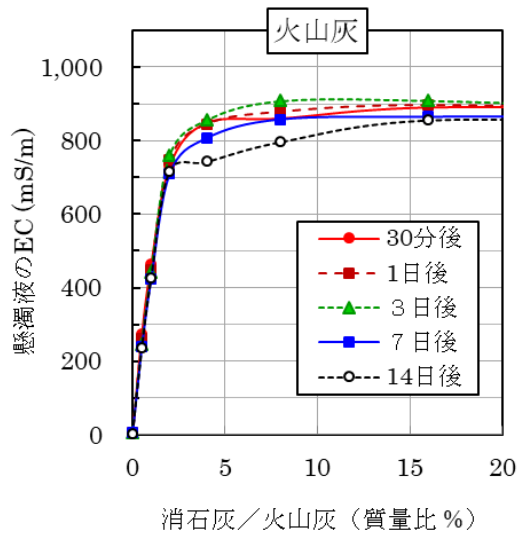


図 2-3-29 火山灰-消石灰の EC

が活発に行われること、そして、これらの水和物（沈殿）生成の際に他のイオンの一部が共沈し水和物に取り込まれる（イオン吸着を含む）ためと推察される。関東ロームは、とくにアルカリ可溶性のアルミナが多いことから、アルミン酸カルシウム水和物（結晶化が速い）が多く生成するが多い⁶⁶⁾。これらの反応以外に、大気中のCO₂と反応して炭酸カルシウムが生成することもECの減少を招く。しかし、本研究では密閉容器を使用し、できるだけCO₂の吸収を防ぐように試験したので、炭酸カルシウム生成の影響は、それほど大きくないと考える。

時間経過に伴うEC低下は、ベントナイト-石灰（図2-3-25）、木節粘土-石灰（図2-3-26）、高炉スラグ-石灰（図2-3-27）、石炭灰-石灰（図2-3-28）でも見られる。これらの試料においても、各種イオンの相互反応による沈殿、水和物の生成、それらによるイオン吸着が行われていると推察される。前述のpH測定に比べて、EC測定の方が反応の状況をよく表している面がある。なお、図2-3-28の火山灰のECは、経過時間に伴う変化が小さく、複雑な変化を示した。宮尾ら⁸⁷⁾の研究にもあるように、EC測定は、ポズラン反応の初期段階の把握に有効である。

(6) ECによる石灰固定量の試算

ECの値から概略の石灰固定量を試算した。図2-3-32は、関東ローム-消石灰のECを示す（再掲）。図2-3-33は、消石灰懸濁液のECを示す（図2-3-6の低濃度域を拡大した図）。図2-3-32における消石灰/関東ローム=8%の30分後のEC 631mS/mは、図2-3-33の消石灰溶液のECからみて、懸濁液の消石灰が飽和濃度以下であることを示

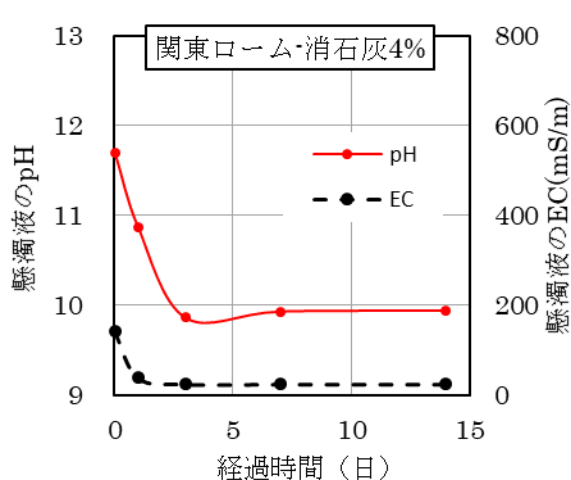


図 2-3-30 関東ローム-消石灰 4%の pH, EC の経時変化

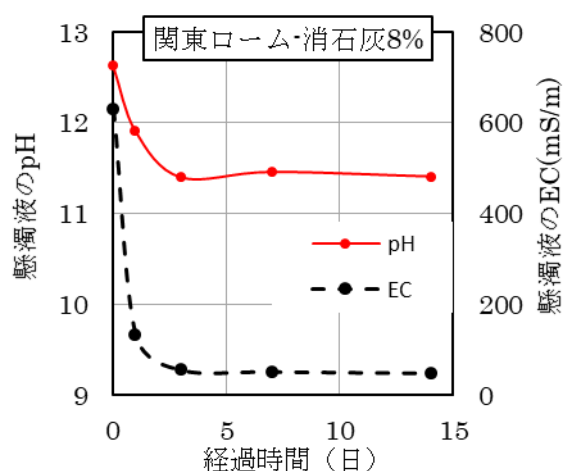


図 2-3-31 関東ローム-消石灰 8%の pH, EC の経時変化

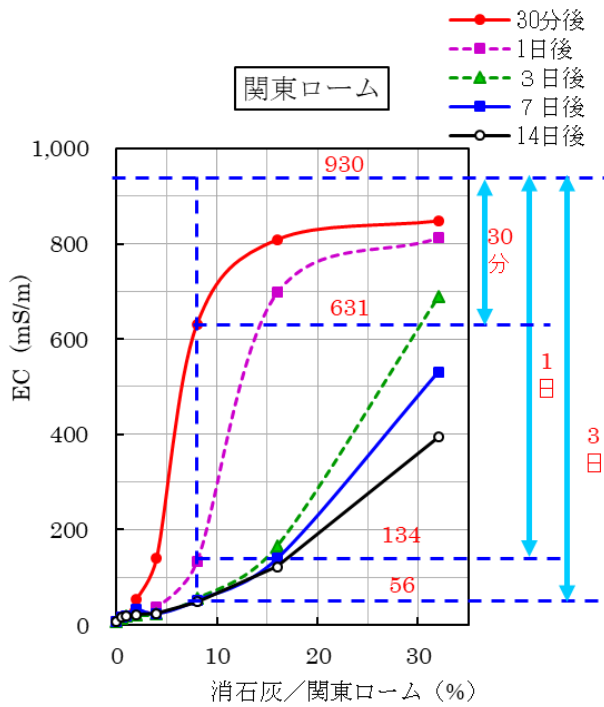


図 2-3-32 関東ローム・消石灰の EC の経時変化

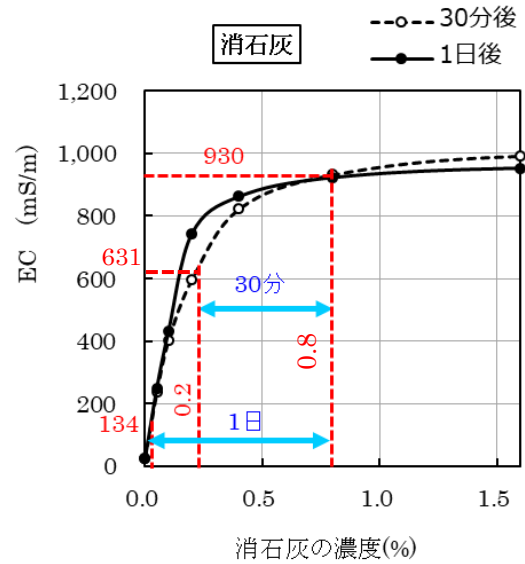
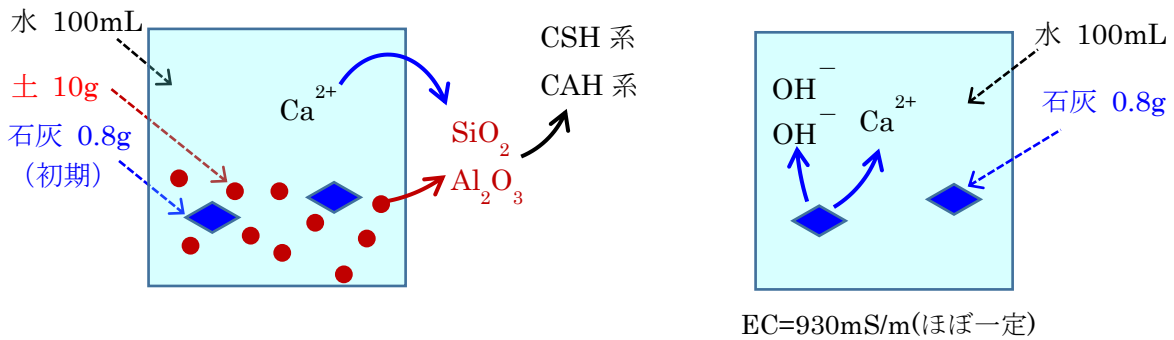


図 2-3-33 消石灰懸濁液 EC (詳細図)



EC=631mS/m (30分) →石灰 0.2% 134mS/m (1日) →石灰 0.04% 56mS/m (3日) ※土のみ 88mS/m	石灰濃度の減少 : $0.8 - 0.2 = 0.6\%$ 土による固定量 : $0.6g \div 10g \times 100 = 6(\%)$
	石灰濃度の減少 : $0.8 - 0.04 = 0.76\%$ 土による固定量 : $0.76g \div 10g \times 100 = 7.7(\%)$

図 2-3-34 EC の値を用いた石灰固定量の試算例

す。また、図 2-3-32 における消石灰/関東ローム=8%の 3 日後の EC 134mS/m は、図 2-3-33 と照合すると、溶液中に消石灰はごく僅かしか存在しないことを示す。この状態は、消石灰の飽和濃度を十分に下回っているので、消石灰が固形粒子として存在しない。大半の消石灰が土の SiO_2 , Al_2O_3 との反応に消費され、石灰固定量に相当すると考えられる。図 2-3-34 は、模式図と計算式を示す。これによると、関東ロームの石灰固定量は、30 分後で 6%, 1 日後で 7.7%と試算される。pH によって求めた石灰固定量(図 2-3-17) に比べて低い値となったが、EC の方が pH に比べて詳細な測定ができ、測定時間が速いなどの利点もあるので、今後さらに究明していくことによって、EC 法も実用化できる可能性があると考えられる。バッチ試験の際に pH と併せて EC を測定することは、非常に有効である。

(7) 土-NaOH 溶液による SiO_2 , Al_2O_3 の溶解

土と消石灰やセメントとの反応の主体は、①カルシウムイオンの吸着およびイオン交換反応、②アルカリによって土粒子の一部が溶解する反応、③その溶解物質が消石灰と反応して沈殿生成・鉱物化に至る反応の 3 つと考えられる。これらの中で、①は pH 中性のもとでも起きるが、②は消石灰のアルカリ性によって起こり、アルカリ性が高いほど多く起きる。③は②の反応による溶解成分がなければ起きず、②の溶解成分が多い

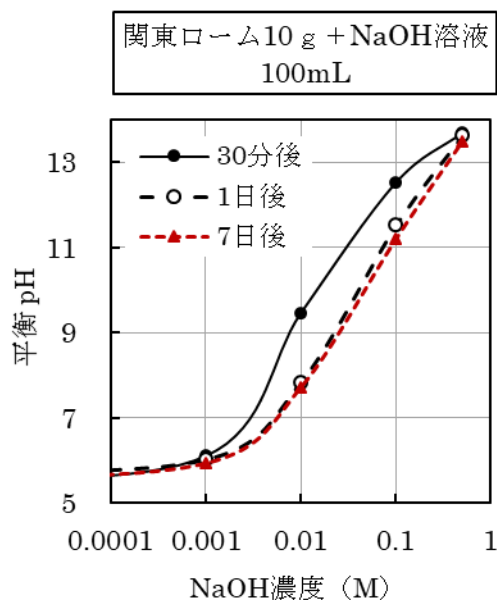


図 2-3-35 関東ロームに各種濃度の水酸化ナトリウム溶液を加えた場合の平衡 pH⁸⁰⁾

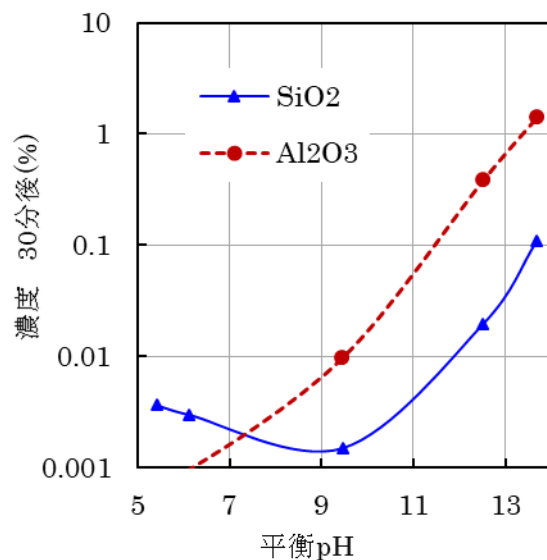


図 2-3-36 関東ロームに各種濃度の水酸化ナトリウム溶液を加えた場合の pH とシリカ、アルミナ溶解濃度の関係⁸⁰⁾

ほど多く生成する。②、③は反応に必要な消石灰量が十分に供給されることが条件となる。

②の溶解量を pH との関係で簡易に評価することを目的として、いろいろな濃度の水酸化ナトリウム (NaOH) 溶液による土の溶解試験を行った。溶解方法は、消石灰やセメントの懸濁液試験と同じ要領で行った。ただし、消石灰やセメントは含まない系とした。関東ローム-NaOH 溶液の懸濁液について、NaOH 初期濃度と 30 分後、1 日後、7 日後の pH の関係を図 2-3-35 に示す。土を含まない NaOH 溶液は、濃度が 0.1M の場合に pH13、また 0.01M の場合に pH12、そして 0.001M の場合に pH11 である。一方、NaOH 溶液 100mL に関東ロームを 10g 入れた場合の pH は大きく低下した。pH11 であったものが pH6 まで低下し、アルカリ分は全量消費された。pH12 であったものは 30 分後に pH9.3 になり、1 日以降に pH7.8 で一定になった。このような pH の低下は、土の pH 緩衝能と言われ、その反応はイオン吸着、イオン交換、土粒子の一部溶解に伴うアルカリの消費に起因する。

図 2-3-36 は、図 2-3-35 の 30 分後の平衡 pH とその時の SiO₂、Al₂O₃ 溶解濃度の関係を示したものである。SiO₂ は、中性域でも数 mg/L が検出されたが、pH9.5 以上になると著しく、かつ直線的に増大し、pH13.7 では 100mg/L の濃度になった。これは、土 10g 当り SiO₂ が 10mg 溶解 (0.1%) したことに相当する。消石灰飽和液の pH にほぼ相当する pH12.5 における SiO₂ 溶解濃度は 20mg/L で、土の 0.02% となった。一方、Al₂O₃ は、NaOH 濃度に伴う平衡 pH の上昇とともにほぼ直線的に溶解量が増大した。pH13.7 では Al₂O₃ 濃度が 1,200mg/L となり、これは土の 1.2% に相当する。pH12.5 では Al₂O₃ 濃度が 350mg/L となり、土の 0.35% となった。これらの溶解量は、前述した消石灰の反応量 (最大 35%) に比べると非常に少ない値であった。この原因として溶解した SiO₂、Al₂O₃ の再結合が始まっていて沈殿やゲル化によって、ろ液に出てこない部分があったのではないかと考えられる。

(8) 消石灰、セメントによる土質改良試験

関東ローム、青森ローム、ベントナイトおよび土木用粘土について、消石灰またはセメント添加混合による土質改良試験を行った。木節粘土を除く試料については、土乾燥質量あたりの添加量を 30% (一定) とし、木節粘土については添加量を 5% とした。

結果を表 2-3-2 に示す。関東ロームは、添加水量が多いことも影響しているが、非常

に硬化し難いことが分かる。添加水量を単純に比べると、ベントナイトの方が関東ロームに比べてはるかに多い水量であるにもかかわらず、ベントナイト 1000g+セメント 300g は、かなりの固化強度の発現が認められる。青森ロームは、強度が低いレベルにあるが、関東ロームに比べると、より大きい固化強度を示した。そして、青森ロームでは、消石灰の方がセメントよりも大きい強度を示したことは、他の土との違いである。木節粘土+セメントは、通常の流動化処理土に必要な強度レベルが容易に得られたが、消石灰ではほとんど硬化しない。ロームに代表される消石灰反応性の高い土（消石灰を多量消費する土）は、流動化処理土のように、一定の流動性を確保するため多量の水を用いる配合では、セメント量を多くしても固化強度があまり期待出来ないことから、固化材種の選定や添加量の設計時には、とくに注意が必要である。

表 2-3-2 流動状態で作製した消石灰・セメント混合土の固化強度⁸⁰⁾

対象土 (含水比)	配 合 (g)				一軸圧縮強度 (kN/m ²)	
	土粒子	消石灰	セメント (高炉B)	水 (全水)	7 日	28 日
関東ローム (122%)	1000	300	—	2220	—	—
	1000	—	300	2070	—	—
青森ローム (72%)	1000	300	—	1370	47	52
	1000	—	300	1220	39	47
ベントナイト (8%)	1000	300	—	2400	—	12
	1000	—	300	5500	66	150
木節粘土 (1%)	1000	50	—	560	—	—
	1000	—	50	560	166	435

2.3.5 まとめ

軟弱な土の石灰・セメント安定処理工法において、土と消石灰（水酸化カルシウム）の反応性を把握することは、固化材の選定や添加量の設計にとって重要である。そこで、出来るだけ簡易な方法で土と消石灰の反応性を評価する方法について検討し、以下のような知見を得た。

- 1) 消石灰添加量を変えて土-消石灰-水の懸濁液を作製し、密閉容器に入れて経時的に pH を測定するバッチ法を確立した。バッチ法は、土の石灰反応性を簡易かつ詳細に調査することが可能で、従来の滴定法よりも優れている。バッチ法による pH の経時変化の測定は、2 週間程度行うことが望ましく、少なくとも 7 日間程度行う必要がある。
- 2) 同法は、イオン吸着、イオン交換反応に加え、ポゾラン反応の初期段階として重要である土粒子の部分的なアルカリ溶解と珪酸カルシウム水和物、アルミン酸カルシウム水和物生成のために消費される石灰の量を評価する。pH12.5 を確保するための石灰添加量を石灰固定量と定義する。石灰固定量の大部分は、ポゾラン反応の初期段階によるものである。
- 3) 関東ロームや青森ロームなどの火山灰起源の粘性土は、石灰反応性が非常に高く、石灰固定量が非常に大きい。ベントナイトは、ロームほどではないが、イオン交換反応の量を上回る石灰固定量を示し、粘土鉱物の一部の溶解反応が生じていると認められた。木節粘土、高炉水砕スラグ、石炭灰、火山灰などの石灰固定量は、非常に小さく、これらにおけるポゾラン反応は、少量かつ長期にわたる緩速反応であることを伺わせる結果であった。
- 4) 懸濁液の pH 試験を行う際に、EC（電気伝導度）を併せて測定することは、石灰固定量の評価に利用できる場合があり、有効な方法である。
- 5) 石灰固定量大きいロームなどの土は、添加水量の多い施工法（セメントミルク供給による攪拌混合、あるいは流動化処理土など）の場合、石灰・セメントの多量添加でも強度が出にくい場合があるので、固化材の選定と添加量の決定の際、注意する必要がある。

2.4 各種セメント系固化材による軟弱土固化における反応生成物と強度特性

2.4.1 目的

へどろや建設汚泥は、高含水比、超軟弱であるため、締固め工法、載荷圧密工法などの物理的な方法による土質改良は困難であり、固化工法によって処理されることが一般的である。しかし、モルタル・コンクリート製造に用いられるような従来のセメントでは、十分に固化しない場合が多くみられ、軟弱土を固化するための専用のセメント系固化材が各セメントメーカーで開発され工事に使用される。そのような状況の中で、セメント系固化材を用いて土質安定処理の工事を設計・施工する技術者、すなわちセメント系固化材のユーザーの立場からは、各種市販されているセメント系固化材の中でどのような違いがあるのか、また土の種類に応じた固化材選定はどのようにすれば良いか、など不明な点が多々ある。そこで、本研究では、普通ポルトランドセメントを含め、14種類の地盤改良用セメント系固化材について、化学組成と固化強度や反応生成物との関係を調査し、固化材選定の基礎データを収集することを目的とした⁸⁸⁾。

2.4.2 供試材料

(1) 供試土

供試土としては、表 2-4-1 に示す 4 種類、すなわち田子の浦へどろ、勝島へどろ、霞ヶ浦へどろ、および大手町粘土を用いた。これらの土は、含水比、有機物含有量などがそれぞれ大きく異なっている。田子の浦は、紙・パルプ工場などからの排水に起因する有機物を多量含む港湾へどろである。勝島は、都市の生活排水などで汚染された運河のへどろである。霞ヶ浦は、富栄養化が進み青粉の発生が著しい湖沼のへどろである。また、大手町は、東京都内のビル建設工事の地下掘削において発生した粘性土である。

表 2-4-1 供試土の性状⁸⁸⁾

	調製 含水比 (%)	土粒子 密度 (g/cm ³)	粒度分布(%)			コンシステンシー			強熱 減量 (%)
			<0.005m m	0.005~ 0.075mm	0.075~ 2mm	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	塑性 指数	
大手町粘土	250	2.61	50	49	1	114	52	62	6
霞ヶ浦へどろ	250	2.52	38	47	15	113	35	78	11
勝島へどろ	230	2.45	36	51	13	120	43	77	23
田子の浦へどろ	510	2.34	77	12	11	268	54	214	43

土の含水比は、固化強度に大きく影響する因子の一つである。したがって、試験において各供試土の含水比をどのように設定するか、が課題である。ここでは、各供試土の水分保持特性に応じたかなり高い含水比における固化強度を調査することにした。具体的には、各供試土を固形分濃度として 5% で水に懸濁させ、数日間、静置沈降させてほとんど平衡に達したのちの含水比（土壌学の分野では、この状態の体積を沈定容積という）に調製した。各供試土の調整含水比は、表 2-4-1 のとおりで、これらの液性指数 $IL(=(W_n-PL)/PI)$ は、2.1~3.2 の範囲にあった。

(2) 供試固化材

固化材には、セメント系と石灰系であるが、高含水比のへどろや超軟弱土の固化に用いられるのは、大部分がセメント系である。その理由として、石灰系（特に生石灰を主体としたもの）は消石灰化に伴う含水比低下、イオン交換およびポズラン反応などによって土を安定化するものであるが、高含水比土の場合には非常に多量の生石灰を必要とすること、一方、セメント系は水硬性が著しいので高含水比土でも固化できやういことがあげられる。したがって、ここではセメント系固化材について試験した。供試したのは 14 種類である。これら固化材を化学成分で SO_3 含有量 (%) の少ない方から A, B, C, . . . , N と表示した。

2.4.3 試験方法

各供試土を所定の含水比に調製したのち、固化材を水道水でミルク状（水/固化比 = 0.8）にして添加混合した。固化材添加量は、土の湿潤質量に対して、大手町、霞ヶ浦および勝島にはそれぞれ 10%、また田子の浦には 15% とした。また、土と固化材の混合は、ホバート型ミキサーで 10 分間行った。そして、 $\phi 3 \text{ cm} \times h 7 \text{ cm}$ の塩ビ製モールドに入れて密閉し 20°C で 7 日間、28 日間および 50 日間養生したのち、JIS A1216 の方法で一軸圧縮強度を測定した。

つぎに、一部分の固化試料について、粉末法による X 線回析を行い、また CRU 法で試料調整したのち走査型電子顕微鏡観察を行った。

2.4.4 結果と考察

(1) 固化材の化学組成と分類

固化材の硬化反応は、その化学組成、鉱物組成および粒径（比表面積）などによって影響される。ここでは、それらのうち特に大きな影響をもつと考えられる化学組成について検討した。各固化材の化学組成を図 2-4-1 に示す。A は普通ポルトランドセメント（以下、普通セメントという）であり、B～N はへどろ・汚泥用あるいは地盤改良用などとして使用されているセメント系特殊固化材である。

これらの固化材はいずれも、CaO および SiO₂ を主体にしており、その他に Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO および SO₃ などを含んでいる。しかし、固化材によって各成分の含有量には差異があり、CaO は 47～65%、SiO₂ は 16～29%、Al₂O₃ は 4～10%、さらに SO₃ は 2～19% の範囲にある。注目すべきこととして、特殊化材の SO₃ 含有量は、いずれも普通セメントのそれを上回っている。すなわち、へどろ・汚泥用あるいは地盤改良用としての効果を高めるために、SO₃ を増量していると考えられる。なお、これらの SO₃ は X 線回析の結果、半水石膏 (CaSO₄・0.5H₂O) あるいは二水石膏 (CaSO₄・2H₂O) として

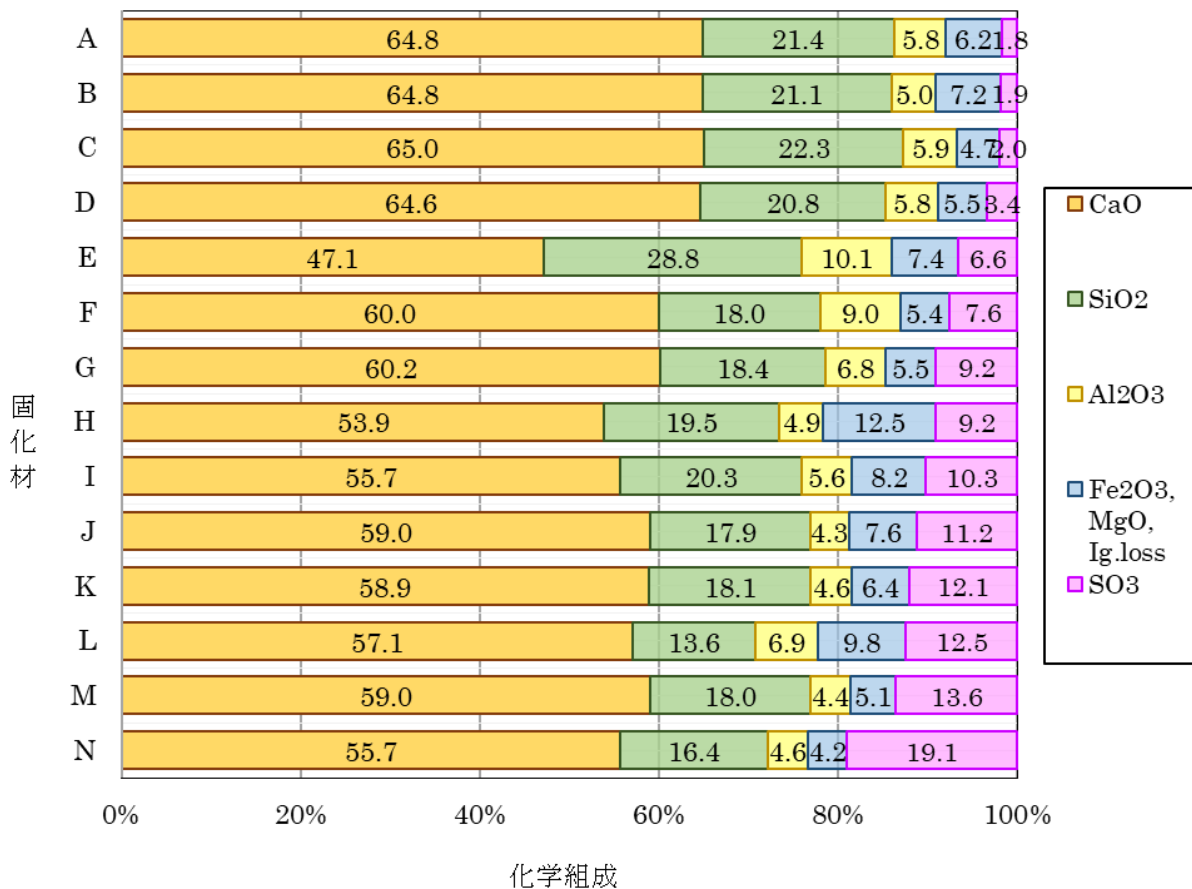


図 2-4-1 固化材の化学組成 ⁸⁸⁾

含有されていた。そこで、供試の 14 種類の固化材を CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 および SO_3 の各含有量によって分類した。その結果、I～VIのタイプに分けられた。各グループの特徴は以下のようなものである。

- I : 普通セメントに類似した化学組成 (A, B, C, D)
- II : CaO が非常に少なく、 Al_2O_3 および SiO_2 が多く、 SO_3 が少ない (E)
- III : Al_2O_3 が多く、 SO_3 が中位 (F, G)
- IV : SO_3 が中位 (H, I)
- V : CaO がやや少なく、 SO_3 がかなり多い (J, K, L, M)
- VI : CaO および SiO_2 が少なく、 SO_3 が非常に多い (N)

(2) 固化材の種類と固化強度

各固化材によって 4 種類の土を固化した場合の一軸圧縮強度 (q_{u28} 日) を図 2-4-2 に示す。 q_u は固化材の種類によってかなり差異があり、大手町では $310\sim 1,040\text{kN/m}^2$ 、霞ヶ浦では $170\sim 780\text{kN/m}^2$ 、勝島では $10\sim 290\text{kN/m}^2$ 、さらに田子の浦では $10\sim 110\text{kN/m}^2$ の範囲に分布した。そして固化材添加量一定では、 q_u は大手町が最大で、以下霞ヶ浦、勝島、田子の浦の順である。固化強有機物含有量 (強熱減量) が多く、含水比の高い田子の浦および勝島は、固化強度が低い。固化材種による差は明らかである。

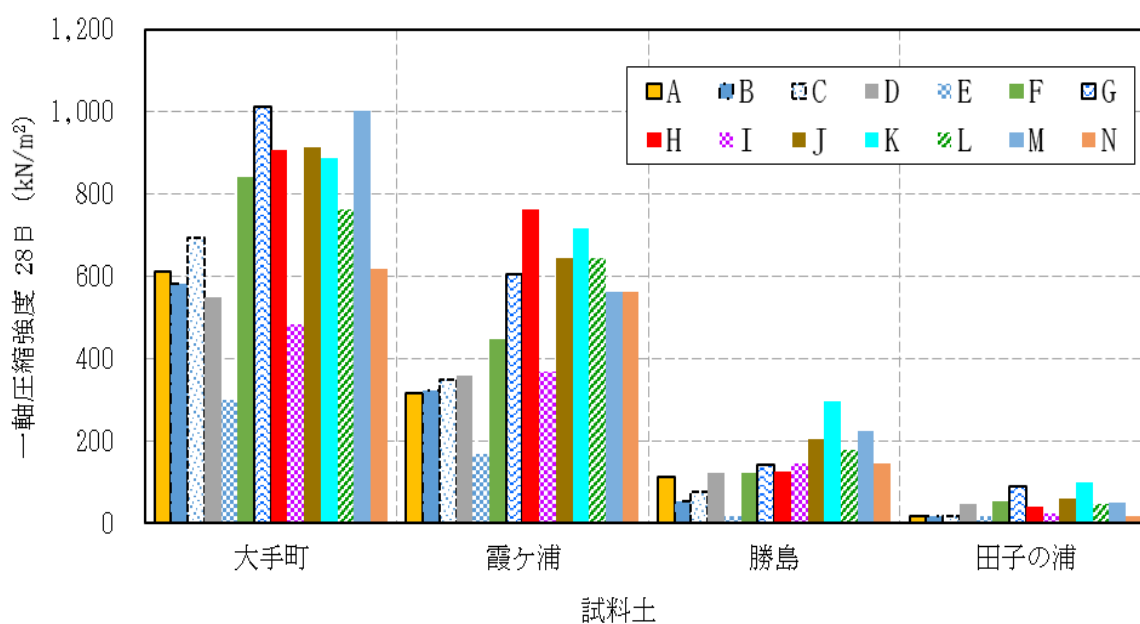


図 2-4-2 各種固化材による一軸圧縮強度(28 日)⁸⁸⁾

(3) 養生日数と固化強度

代表的な固化材として A, H, K に着目し, 4 種類の土について, 材令 (養生日数 7, 28, 50 日) と固化強度の関係をそれぞれ図 2-4-3~図 2-4-6 に示す。H は, 大手町の固化において材令に伴う強度増大が顕著で, その傾向が霞ヶ浦においても認められた。一方, K は, H に比べて強度の伸びは小さいが, 初期強度が大きい。K は, 勝島, 田子の浦において, 初期から相対的に大きな強度を示したことも特徴である。A(普通セメント)は, H や

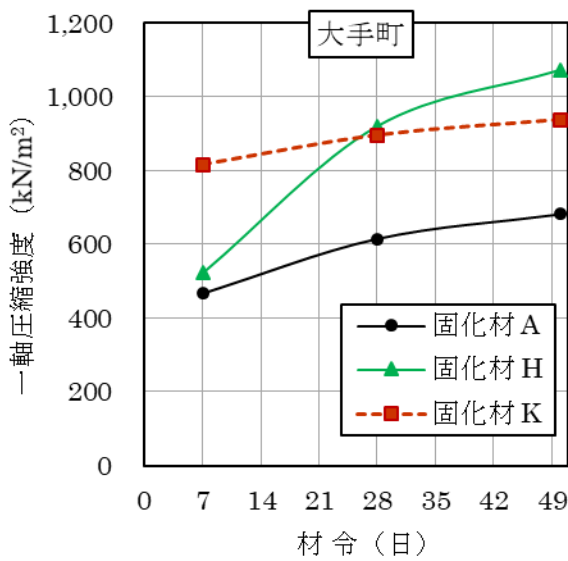


図 2-4-3 固化材 A, H, K による大手町の強度特性⁸⁸⁾

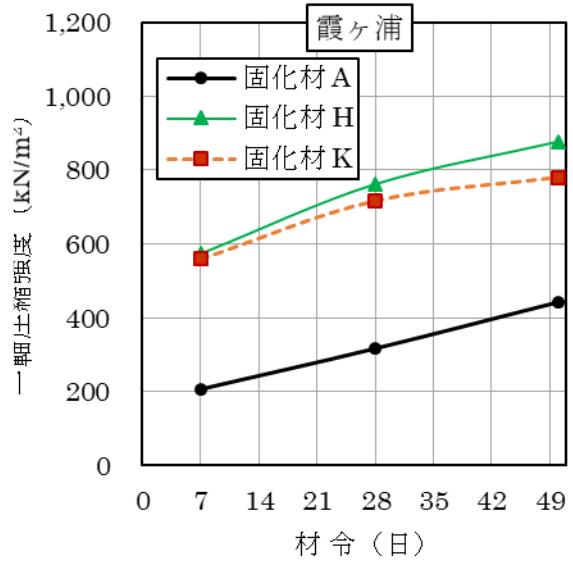


図 2-4-4 固化材 A, H, K による霞ヶ浦の強度特性⁸⁸⁾

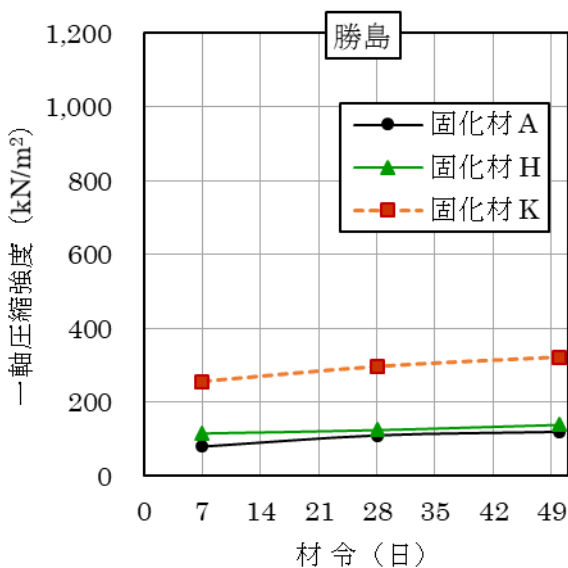


図 2-4-5 固化材 A, H, K による勝島の強度特性⁸⁸⁾

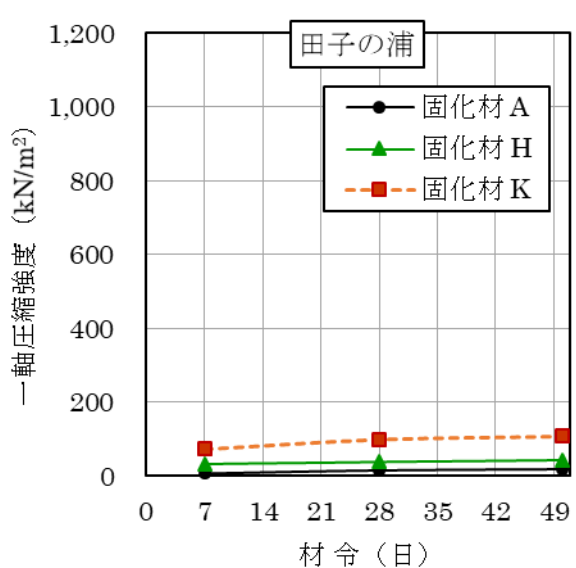


図 2-4-6 固化材 A, H, K による田子の浦の強度特性⁸⁸⁾

Kに比べて、いずれの土でも強度が低い、材令に伴う強度の伸びでは、Kと類似した。A, H, Kの中でSO₃含有量が多いのはKであり、次いでHであり、Aはかなり少ない。SO₃を多く含有することが初期強度を増大させ、高含水・有機質土の固化強度を高める条件の一つであると考えられる。

(4) 固化材の化学組成と固化強度

化学組成によってI～VIに分類した固化材について、固化強度への影響が特に大きいと考えられるCaO含有量とSO₃含有量に着目して整理した結果を図2-4-7に示す。それぞれの固化材の特徴の一面を読み取ることができる。

図2-4-7図上で、4種類の土の固化強度がどのように分布するか、を調べた結果を図2-4-8～図2-4-11に示す。これらの図は、それぞれの土で28日強度の最大値を100%として、各固化材による28日強度の比を示している。

大手町(図2-4-8)では、VグループとIII, IVグループの一部が高強度を示し、周辺に位置するI, II, VIグループの強度は、やや低い。大手町は、他の土に比べて固化材種による強度差が比較的小さい(固化材による影響が小さい)ことも特徴である。

霞ヶ浦(図2-4-9)では、Vグループを中心としIII, IV, VIグループの強度が高く、I, II, IVグループの一部の強度が低い。

勝島(図2-4-10)では、Vグループの強度が高く、その他のグループの強度は、Vグ

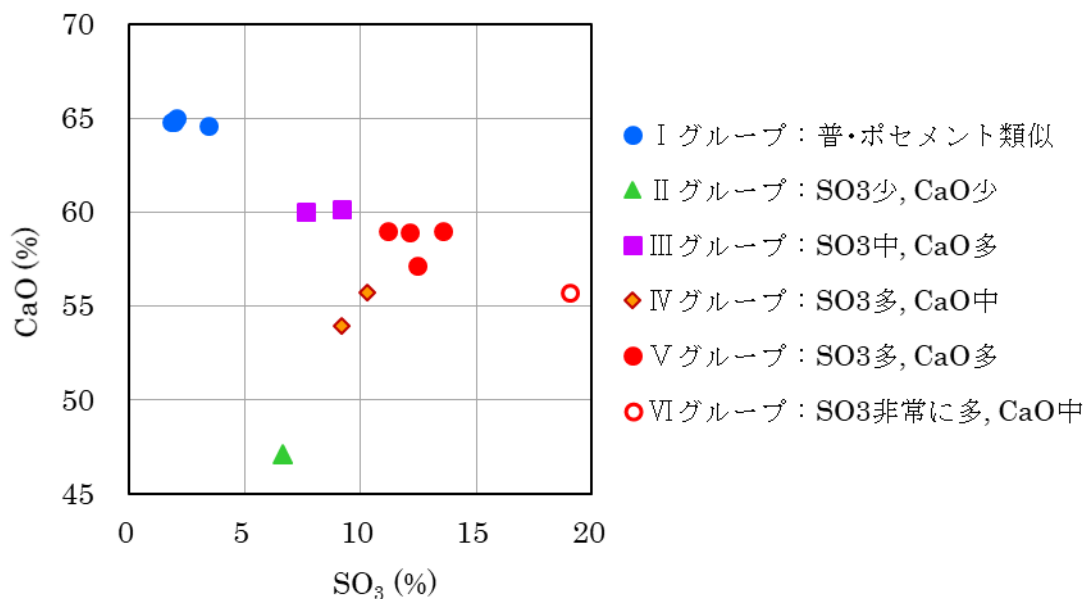


図2-4-7 14種類の固化材のCaO, SO₃含有量の特徴⁸⁸⁾

ループの 1/2 以下であり，明確な差である。

田子の浦（図 2-4-11）では，ⅢグループとⅤグループの強度が高く，その他のグループの強度は低かった。勝島と同様に，明確な差である。

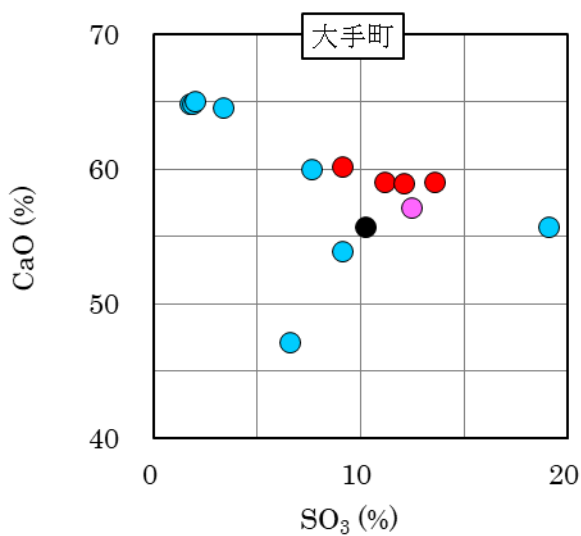
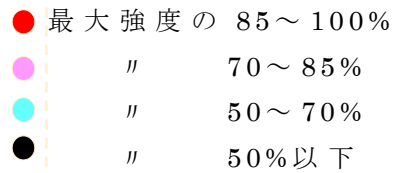


図 2-4-8 大手町の CaO～SO₃ 図上の強度

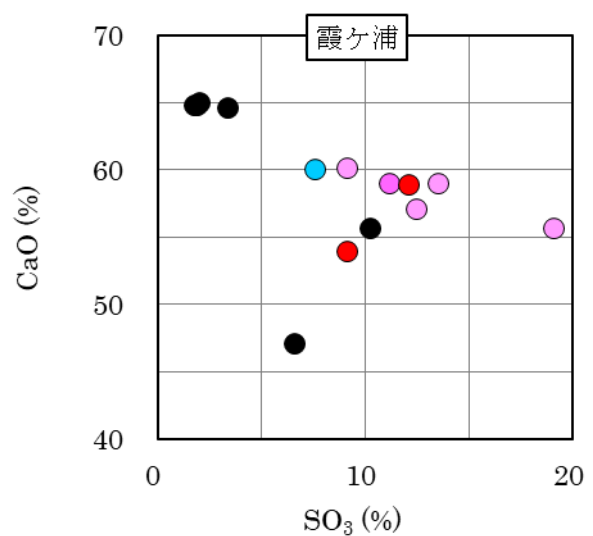


図 2-4-9 霞ヶ浦の CaO～SO₃ 図上の強度

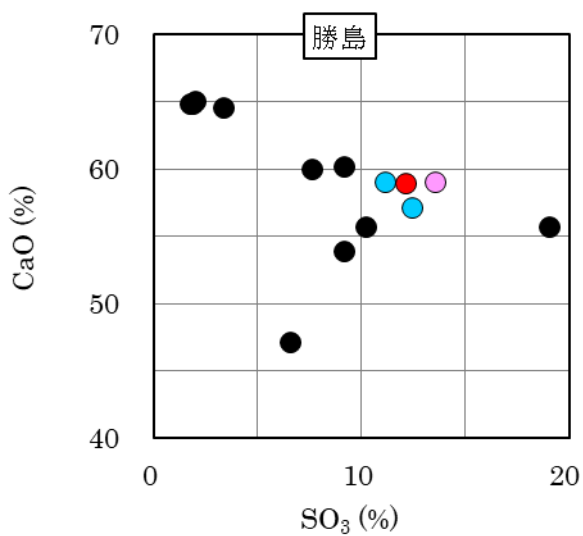


図 2-4-10 勝島の CaO～SO₃ 図上の強度

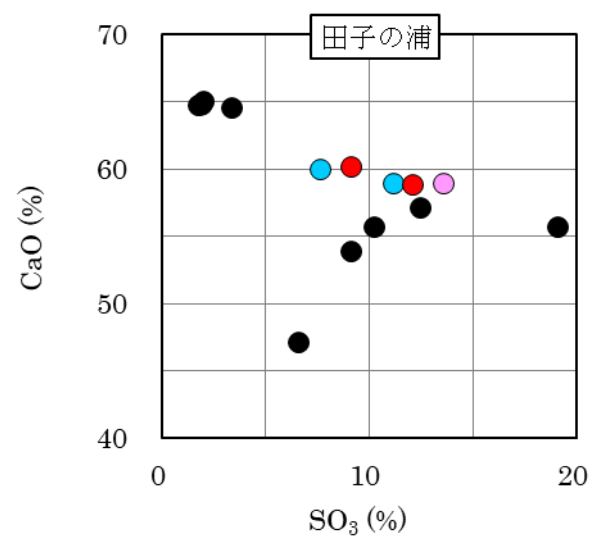


図 2-4-11 田子の浦の CaO～SO₃ 図上の強度

これらの図からも、固化材の化学組成、とくに SO_3 含有量と CaO 含有量は、固化強度に大きく影響し、その影響の程度は、対象土の有機物含有量が多い場合、含水比が高い場合に顕著であることが明らかである。

(5) X線回折による固化強度の検討

固化材による強度特性の違いの原因を調査するため、X線回折による鉱物学的検討を行った。代表例として、田子の浦と霞ヶ浦の生土（固化材無添加の土）、そして、それぞれのA, Kによる固化処理土（30日間養生）のX線回折図を図2-4-12に示す。

いずれの土も石英、長石および粘土鉱物を含んでいる。田子の浦で粘土鉱物としてタルク（滑石）が検出されたのは、周辺の製紙工業との関連と考えられる。そして、Kに

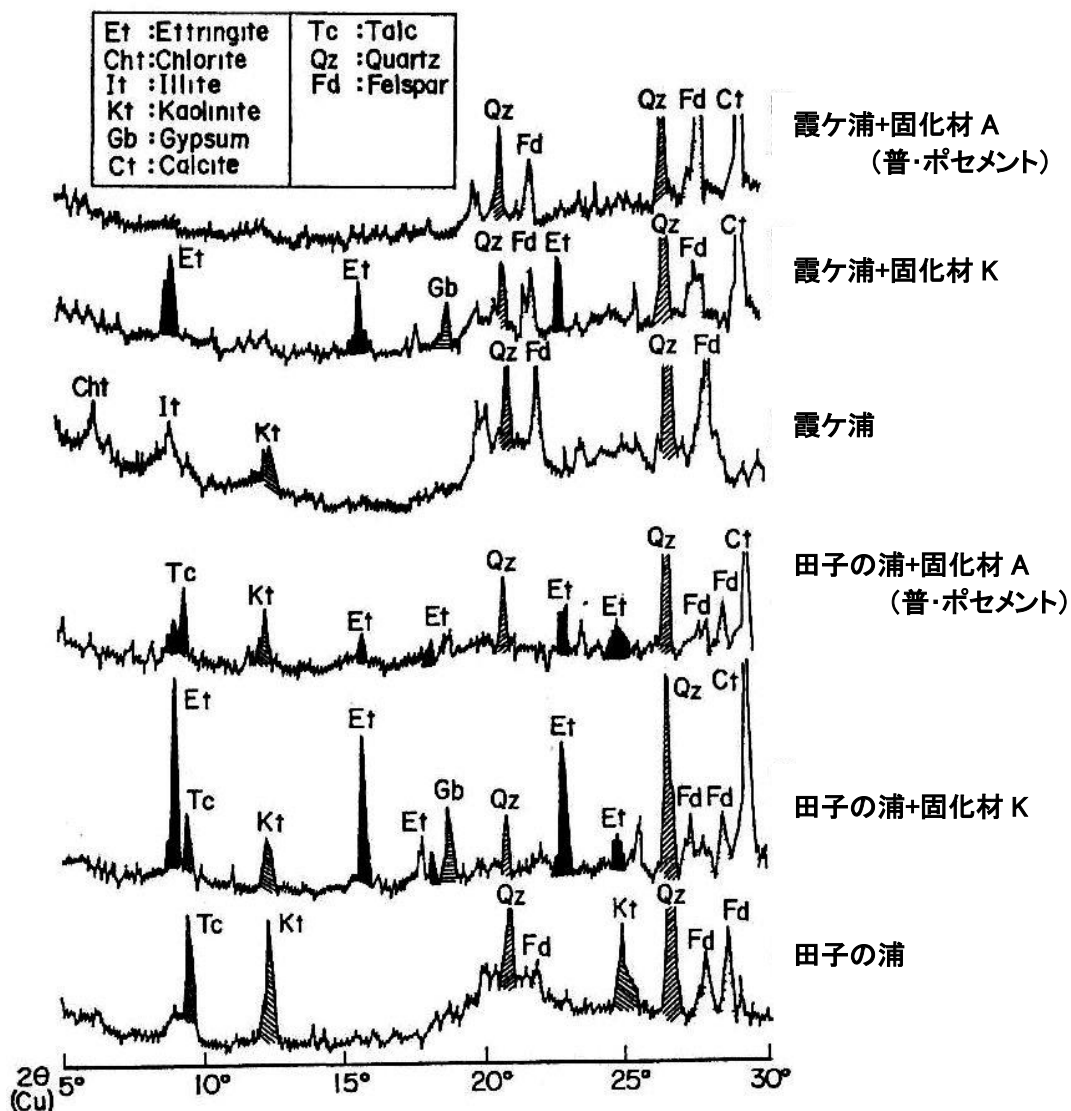


図 2-4-12 土および固化処理土の X 線回折図 ⁸⁸⁾

よる霞ヶ浦および田子の浦の固化処理土（養生 30 日）には、 9.1° (9.73 \AA)、 15.8° (5.61 \AA) および 22.9° (3.88 \AA) に明瞭なエトリングイト (Ettringite, 以下 Et で表す) の回析ピークがみられる。一方, A (普通セメント) によるそれぞれの固化処理土（養生 30 日）には, Et のピークが田子の浦でわずかに認められるが, 霞ヶ浦では認められない。なお, これらの固化処理土で Et 以外のセメント水和鉱物（トベルモライトなど）のピークは認められなかった。

Et は, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ の示性式で表される針状鉱物で, セメントバチルスとも呼ばれ, セメントや石灰を用いた土質安定処理において, 強度増大に大いに寄与することが報告されている^{43, 74~78})。そこで, 固化土中の Et 生成量と強度の関係, 固化材の化学組成と Et 生成量の関係を以下に検討した。Et 生成量は, ここでは 9.1° の Et 回析線における回析 X 線強度を 40 秒間カウントする方法で測定した (3 回繰返し)。霞ヶ浦および田子の浦の固化処理土中の Et 生成量と強度の関係をそれぞれ図 2-4-13 および図 2-4-14 に示す。霞ヶ浦の Et 生成量と固化強度の関係は, データが集中しているため, それほど明瞭ではない。一方, 田子の浦の固化強度は, N を除き, Et 生成量とともに増大している。

つぎに, 固化材中の SO_3 含有量と固化土中 Et 生成量の関係を図 2-4-15 に示す。いずれの固化処理土においても, Et は, 固化材の SO_3 含有量が多いほど, 多量生成している。

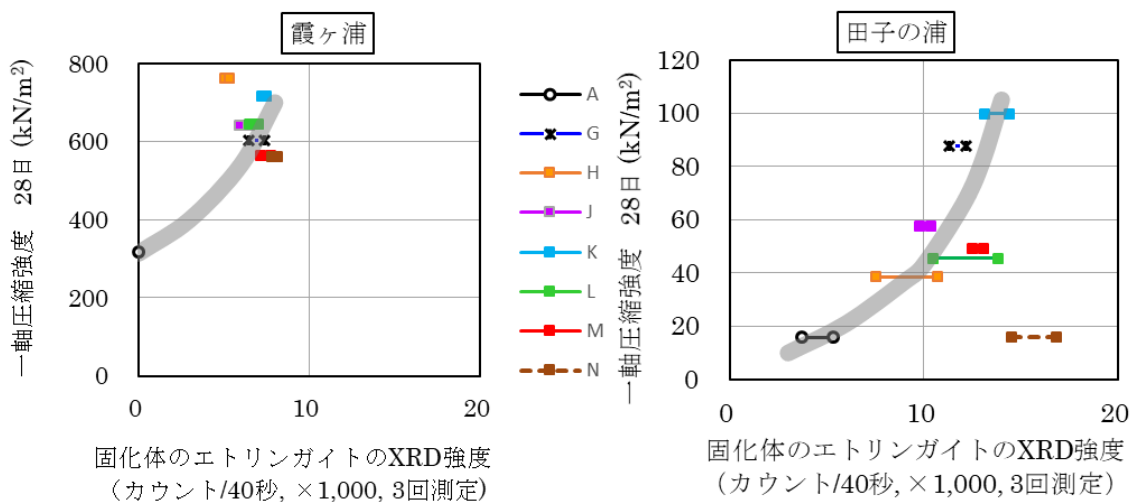


図 2-4-13 エトリングイト生成量比と強度の関係 (霞ヶ浦)⁸⁸⁾

図 2-4-14 エトリングイト生成量比と強度の関係 (田子の浦)⁸⁸⁾

以上、高い強度を発現する固化処理土は、Et を多量生成している。Et 生成量は、固化材の SO₃ 含有量が多いほど（最大 19%）、増大している。Vグループの固化材（J, K, L, M）が相対的に高い強度を発現したのは、I～IVグループに比べて SO₃ を多量含んでおり、Et を多量生成したことによると考えられる。

なお、固化材 N が多量の SO₃ を含み、Et を最も多量生成したにもかかわらず、固化強度が中程度に落ち着いたのは、固化強度において Et と同様に重要である他のセメント水和鉱物の生成状態が不良であったことによると推察される。また、霞ヶ浦において、Et 生成量がある一定値以上になると、強度が Et 生成量に無関係に増大したことも、他のセメント水和鉱物の生成状態の影響と推察される。

(6) 走査型電子顕微鏡による強度の検討

固化材による強度差異の原因について、走査型電子顕微鏡（走査電顕）によって検討した。写真 2-4-1～写真 2-4-8 に田子の浦、勝島、霞ヶ浦、大手町のそれぞれ生土および

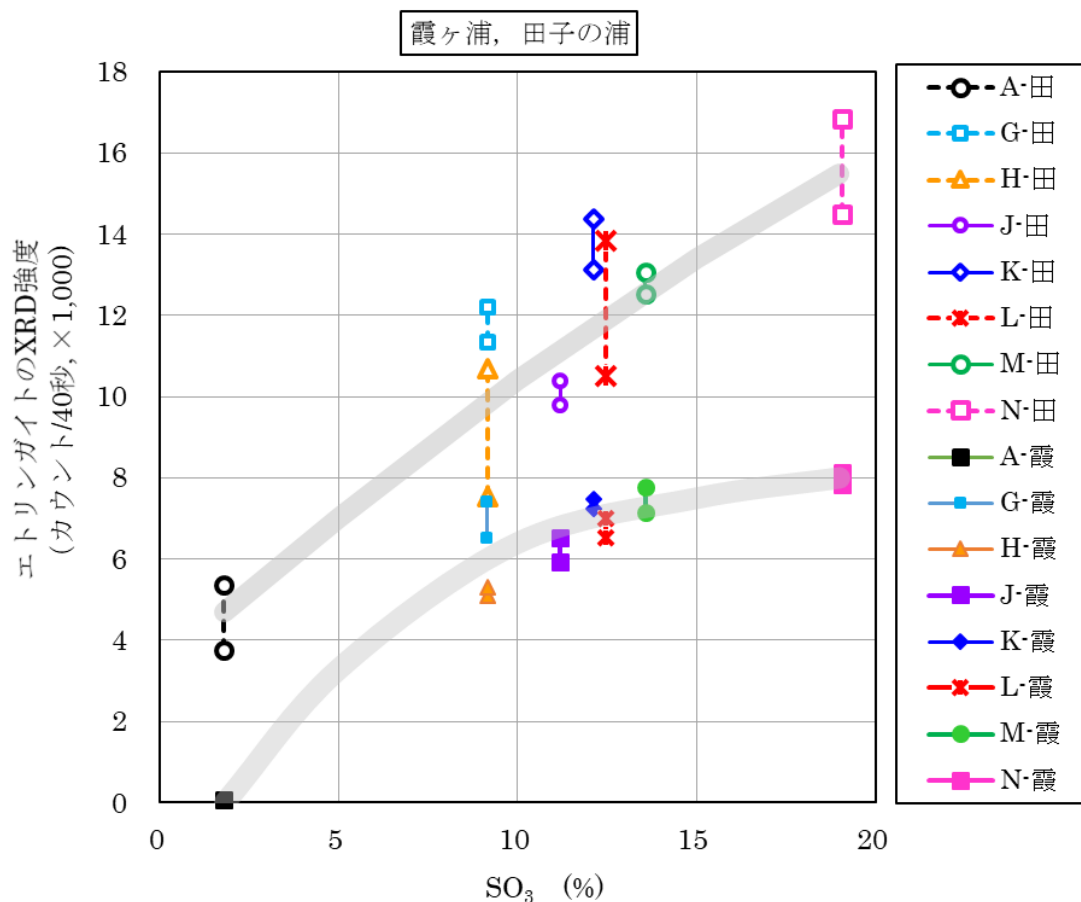


図2-4-15 SO₃含有量とエトリンガイト生成量比の関係⁸⁸⁾

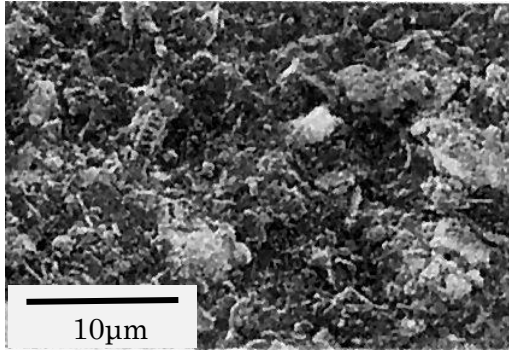


写真 2-4-1 大手町粘土

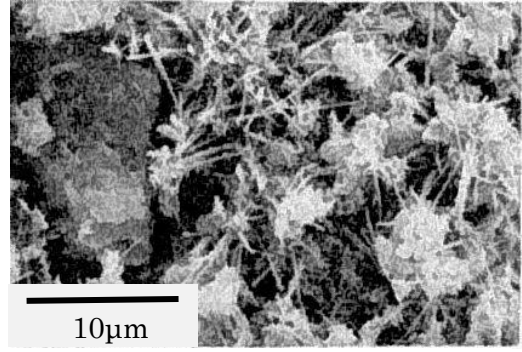


写真 2-4-2 大手町粘土の M による
固化

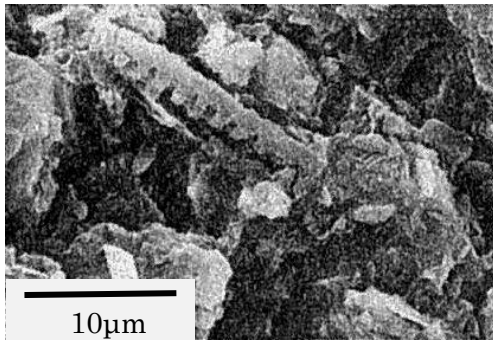


写真 2-4-3 霞ヶ浦へどろ

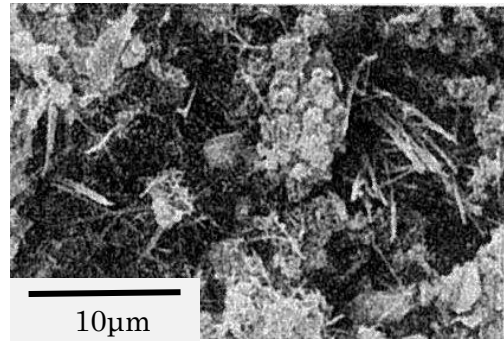


写真 2-4-4 霞ヶ浦へどろの H に
よる固化

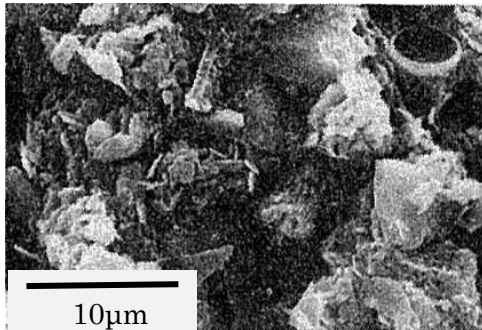


写真 2-4-5 霞ヶ浦へどろ

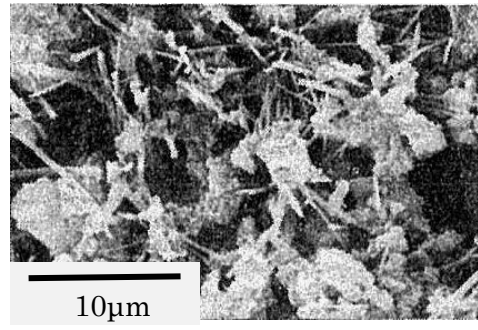


写真 2-4-6 霞ヶ浦へどろの H に
よる固化

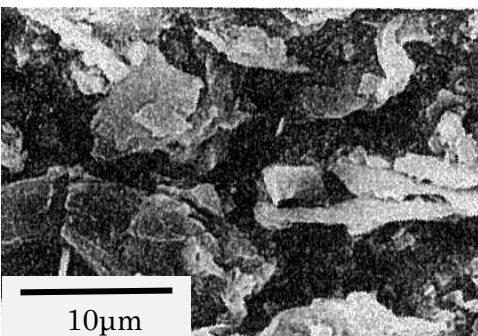


写真 2-4-7 田子の浦へどろ

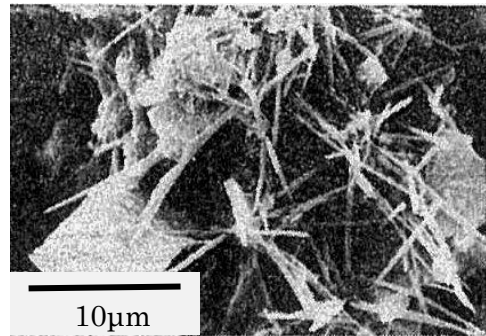


写真 2-4-8 田子の浦へどろの K
による固化

固化処理土の走査電顕写真を示す。なお、各固化処理土の写真は、それぞれの土で最大の強度を発現した固化材によるものを示した

固化処理土中には、Et の針状結晶が認められる。Et 以外のセメント水和鉱物も認められ、土粒子塊の間隙を Et の針状結晶が充てんし架橋している様子が伺われる。このことから、Et の生成と、Et 以外のセメント水和鉱物の生成の総合的な効果によって固化土の強度が増大すると考えられる。

2.4.5 まとめ

へどろや軟弱土の固化処理のために、専用の特殊セメントが使用されることが多い。これらの特殊固化材を現場に適用する際の基礎資料を得るため、4 種類の土と 14 種類のセメント系固化材を用いて、固化強度の特徴およびその差異の原因を検討した。

- 1) セメント系固化材の主成分の含有量は、CaO (47~65%)、SiO₂ (16~29%)、Al₂O₃ (4~10%)、および SO₃ (2~19%) の範囲にあり、化学組成の特徴によって固化材が I ~VIグループに分類された。
- 2) 固化強度は SO₃ を多量 (11~13%) 含む V グループが比較的大きな強度を発現し、普通ポルトランドセメントおよびそれに類似の化学組成を有する I グループの強度は、小さかった。なお、SO₃ を非常に多量 (19%) 含む VI グループは、中位の強度であった。
- 3) 土が多量の有機物を含み、高含水比であるほど、その固化強度は、固化材種の影響を顕著に受け、固化材種の選定が重要である。そのような土に対しては、V 部グループの固化材が効果的であった。
- 4) X 線回析および走査型電子顕微鏡によって調査した結果、大きい強度を発現した固化土には、針状結晶のエトリンガイトが多量生成していた。エトリンガイトは、他のセメント水和鉱物や土粒子の粒塊の間隙を充てんし、架橋して、強度増大に寄与すると考えられる。そして、エトリンガイト生成量は、固化材の SO₃ 含有量とともに増大することから、SO₃ を多量含む V グループ固化材が大きい強度を発現するのは、エトリンガイトの生成が大いに寄与したと考えられる。

2.5 結論

第 2 章では、セメント・石灰系による土質改良が固化材自体の化学反応および固化材と土との相互反応に依存していることを踏まえ、土質改良メカニズムについての研究成果を述べた。

先ず、固化材と土との相互反応として最も重要かつ代表的な反応は、ポゾラン反応である。ポゾラン反応は、中長期的に進行する反応であるが、関東ロームなどの火山灰質粘性土では、石灰を混合した直後から、石灰のアルカリによる土中の SiO_2 , Al_2O_3 の一部溶解が始まり、溶解した成分はすぐに石灰のカルシウムイオンと結合して、CAH 系、CSH 系の水和物（沈殿）を生成することが懸濁液の pH, EC 試験から推察された。土と消石灰を混合した水懸濁液を作製し、バッチ法で pH, EC の経時的変化を測定する方法は、簡易な試験方法であり、現場で土の石灰反応性（ポゾラン反応の初期段階の反応）を判定する簡易試験法として極めて有効と考える。従来の試験方法は、pH 測定によって石灰固定量を評価するものであったが、本法では、pH と併せて EC を測定することで反応に関してより多くの情報が得られることを示した。本法は、ベントナイトの石灰反応性についても評価可能である。ただし、本法は、一般の粘土、石炭灰、火山灰、高炉スラグなどのように極めて緩速にポゾラン反応が進行するような材料には適用し難い。

つぎに、固化材自体の反応が主体となる場合として、へどろや軟弱土の固化処理に多用されているセメント系固化材の反応がある。市販の多数のセメント系固化材を入手して、各種のへどろ、軟弱土の固化試験を実施した。固化材の化学組成として CaO 含有量と SO_3 含有量に着目した。セメント系固化材の SO_3 含有量は、総じて多めに調製されており、 SO_3 含有量とともにエトリンタイトの生成量が増大する傾向、そしてエトリンタイト生成量とともに固化強度が増大する傾向を認めた。ただし、エトリンタイト生成量が多くても、固化強度がそれほど高くないという例外もあり、固化強度にはエトリンタイト以外のセメント水和鉱物も関連した総合作用によって増大すると考えられる。

参考文献（第2章）

- 1) 喜田大三, 久保博: ヘドロ対策工法, 土と基礎, Vol.29, 5, pp.53-60, 1981.
- 2) 喜田大三, 久保博, 辻博和, 漆原知則: 汚泥の処理処分に関する研究(第11報), ヘドロ(底質)の固化処理システムと各種固化剤の比較, 大林組技術研究所報, 20, pp.77-84, 1980.
- 3) 喜田大三, 久保博, 漆原知則: 汚泥の処理処分に関する研究(第13報), 伏木富山港新湊地区・軟弱地盤の表層固化工事, 大林組技術研究所報, 22, pp.121-125, 1981.
- 4) 嘉門雅史, 友久誠司, 澤孝平: セメント系固化材によるヘドロ安定処理に関する研究, 材料, 38, 432, pp.114-119, 1989.
- 5) 喜田大三, 久保博, 漆原知則: 貯木場造成における表層セメント安定処理工事, 大林組技術研究所報, 23, pp.92-95, 1981.
- 6) 吉田信夫, 一本英三郎, 山根敬: 施工機械と土質工学, 7.基礎工—軟弱地盤処理, 土と基礎, Vol.30, 2, pp.63-72, 1982.
- 7) 鈴木孝一, 齋藤邦夫, 原満生, 佐藤篤哉, 高倉功樹, 古澤政夫, 蓮香朋宏: 複合相対攪拌翼を用いた深層混合処理工法の改良原理と適用事例, 材料, Vol.59, 1, pp.32-37, 2010.
- 8) Horpibulsk, S., Rchan, R., Suddeepong, A. and Chinkulkijniwat, A.: Strength development in cement admixed Bangkok clay, Laboratory and field investigation, Soils and Foundations, Vol.51, No.2, pp.239-251, 2011.
- 9) 横沢圭一郎, 安井成豊: 深層混合処理工法の最近の動向, 建設の施工企画, 2008.
- 10) 福島伸二, 北島明, 富岡進, 道前京太郎: セメント系固化材で改良した関東ロームによる地盤造成とその強度・沈下特性, 土木学会論文集, 610, III-45, pp.135-144, 1998.
- 11) 鈴木健夫, 伊藤秀敏, 国藤光弘: H鋼入りソイルセメントにおけるソイルセメントの補強効果について, 材料, Vol.31, 341, pp.39-44, 1982.
- 12) 土木研究所: 流動化処理土利用技術マニュアル, 2007.
- 13) 久保博, 川地武: アクアソイル工法に関する研究(その8), 砂質土主体のソイルモルタルの性状と品質管理方法, 大林組技術研究所報, 50, pp.53-58, 1995.
- 14) 橋本文男, 島正憲, 森拓雄, 龍岡文夫: 化学的固化に対する新しい考え方, 東京湾横断道路におけるセメント改良土工法, 土と基礎, Vol.42, 2, 1994.
- 15) Tang, Y. X., Miyazaki, Y. and Tsuchida, T.: Practices of reused dredgings by cement treatment, Soils and Foundations, Vol.41, No.5, pp.129-143, 2001.
- 16) 喜田大三, 久保博, 漆原知則: アクアソイル工法に関する研究(その4), 石炭灰を利用したアクアソイルの性状, 大林組技術研究所報, 37, pp.16-20, 1988.
- 17) 久保博, 川地武, 須川廣一, 山田秀平: SG(自硬性安定液)工法に関する研究(その12), 石炭灰を利用したSGの開発, 大林組技術研究所報, 51, pp.87-92, 1995.
- 18) 河野伊一郎, 富田武満, 上村克己, 田辺和康: 石灰とフライアッシュの混合物を用いた粘性土と砂質土の安定処理の相違について, 土木学会論文集, 469, III, 23, pp.73-81, 1993.

- 19) 佐々木徹, 熊谷祐一, 田島孝敏, 井出一貴, 久保博, 大賀伸一, 岡田公彦: 石炭灰改良材製造のための二軸パドルミキサー適用試験, 日本材料学会第12回地盤改良シンポジウム論文集, pp.171-176, 2014.
- 20) 石炭エネルギーセンター編: 石炭灰混合材料有効利用ガイドライン(高規格道路盛土編), 2016.
- 21) 喜田大三, 久保博, 泊正雄: 脱りん・いおうスラグの土質安定材への利用に関する基礎的実験, 大林組技術研究所報, 36, pp.26-29, 1988.
- 22) Zhu, J. H., Zaman, M. and Laguros, J. G.: Resilient modulus and microstructure of cement-kiln-dust stabilized base/subbase aggregate, *Soils and Foundations*, Vol.39, No.6, pp.33-42, 1999.
- 23) 西田一彦, 久保井利達: 砕石粉の土質安定処理への有効利用について, 材料, Vol.40, 459, pp.16-21, 1991.
- 24) 伊藤孝優, 伊藤孝男, 平野久史: 下水汚泥焼却灰を用いた土質改良材の適応性の評価, 土木学会論文集, 771, III-68, pp.281-288, 2004.
- 25) 亀井 健史, 小川 靖弘, 志比 利秀, 半水石膏と石炭灰を添加したセメント安定処理土の強度変形特性とその内部構造, 地盤工学ジャーナル, Vol.5, No.1, pp.35-43, 2009.
- 26) 川地武, 堀内澄夫, 大森啓至, 檜垣貫司: 産業廃棄物の地盤材料としての有効利用, 廃棄物学会誌, Vol.12, 3, pp.161-169, 2001.
- 27) 下田正雄: 環境整備のための地盤改良, 石膏と石灰, 234, pp.111-121, 1991.
- 28) 田口信子, 川地武, 久保博: 汚染土の不溶化処理に関する研究(その1), シアン, 六価クロム, セレン汚染土の不溶化と効果の安定性, 大林組技術研究所報, 51, pp.115-120, 1996.
- 29) 山田哲司, 大山将, 嘉門雅史: 重金属汚染土壌のセメント固化・不溶化処理について, 土と基礎, Vol.50, 10, pp.10-12, 2002.
- 30) 恒岡伸幸, 森啓年, 大野真希, 小橋秀俊: セメント改良土に起因する六価クロムの溶出の特徴, 土と基礎, Vol.51, 11, pp.41-43, 2003.
- 31) 原俊郎: 水底汚染土対策のための原位置固化工法「CDM-SSC工法」, 建設の施工企画, 2007-9, pp.29-34, 2007.
- 32) 太田綾子, 海野円, 宇野浩樹, 石井裕康, 根岸昌範, 高畑陽: 気仙沼市の災害廃棄物処理における改質材および不溶化材を用いた津波堆積物の再資源化, 材料, Vol.65, 1, pp.10-15, 2016.
- 33) 川村満紀, 柳場重正, 杉浦精治, 中野寿: ソイルセメントにおける粘土鉱物とセメントの相互作用の役割, 土木学会論文報告集, 169, pp.31-43, 1969.
- 34) 喜田大三, 久保博, 炭田光輝: 汚泥の固化処理に関する研究(3), セメント固化強度と水セメント比との関係への pH 水分の適用, 大林組技術研究所報, 14, pp.104-108, 1977.
- 35) 喜田大三, 久保博: ソイルセメントの固化特性と品質管理に関する研究(その1), ソイルセメント壁における沖積粘土・関東ローム・砂の室内固化特性, 大林組技術研究所報, 31,

- pp.124-128, 1985.
- 36) 喜田大三, 久保博, 辻博和, 炭田光輝: 汚泥の固化処理に関する研究(9), 底泥中の有機物とその固化強度への影響, 大林組技術研究所報, 19, pp.116-121, 1979.
 - 37) 喜田大三, 久保博, 辻博和, 炭田光輝: 汚泥の処理処分に関する研究(7), 固化強度に及ぼす養生温度の影響, 大林組技術研究所報, 18, pp.90-94, 1979.
 - 38) 久保博, 喜田大三: 水・ベントナイト・セメント・スラグ系スラリーの強度発現機構の検討, 第25回土質工学研究発表会講演集, pp.1969-1970, 1990.
 - 39) 平川道生, 万波一郎: 石灰安定処理工法の開発研究経緯と応用分野, 石膏と石灰, No.244, pp.32-40, 1993.
 - 40) 松川尚史, 玉野富雄, 金岡正信, 中山義久: セメント安定処理土における養生および実験の方法が圧縮強さに及ぼす影響, 地盤工学ジャーナル, Vol.5, 3, pp.525-532, 2010.
 - 41) 北詰昌樹, 高橋英紀: 現地石灰安定処理土の長期特性調査, 土木学会論文集C, Vol.64, 1, pp.144-156, 2008.
 - 42) 林宏親, 西本聡, 大石幹太, 寺師昌明: セメント安定処理土の長期強度特性, その1, DJM改良柱体の現場調査, 北海道開発土木研究所月報, 611, pp.11-19, 2004.
 - 43) 有泉昌, 保国光敏, 藤崎邦弥, 栗原宏武, 深沢栄造: セメントバチルスの生成を利用した軟弱土の安定処理について, 第10回土質工学研究発表会講演集, pp.999-1002, 1975.
 - 44) 喜田大三, 久保博, 炭田光輝: 汚泥の処理処分に関する研究(5), セメント固化における石膏の助剤としての効果, 大林組技術研究所報, 14, pp.114-118, 1977.
 - 45) 小林和一: ヘドロ固化材と粘土鉱物との反応, セメント・コンクリート論文集, Vol.37, pp.105-108, 1983.
 - 46) 藤崎征夫: 軟弱地盤改良における粘性土—セメント系反応と強度発現, 石膏と石灰, 206, pp.41-44, 1987.
 - 47) 南里勝, 鬼塚克忠, 田中聡: 超軟弱な有明粘土の地盤材料化への試み, 土と基礎, Vol.46, 8, pp.17-20, 1998.
 - 48) 前川淳: 地盤改良用セメント材料, コンクリート工学, Vol.23, 10, pp.101-107, 1985.
 - 49) 戸田尚旨: 地盤改良用固化材, 石膏と石灰, 215, pp.46-54, 1988.
 - 50) 金城徳一: セメント系固化材による地盤改良, 地盤工学会誌, Vol.59, 12, pp.16-17, 2011.
 - 51) 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, 技報堂, 1985
 - 52) 日本石灰協会編: 石灰による地盤改良マニュアル, 第7版, 2016.
 - 53) 日本石灰協会編: 石灰による地盤改良の手引き, 2018.
 - 54) 土田孝, 湯怡新: 海成粘土を用いたセメント固化処理土の強度推定方法, 地盤工学ジャーナル, Vol.7, 3, pp.435-447, 2012.
 - 55) 深山正光: 生石灰および高炉セメントを用いた有明粘土固化処理土の強度予測方法, 地盤工学ジャーナル, Vol.9, 1, pp.29-40, 2014.
 - 56) 福島伸二, 谷茂: 固化改良した含水比と粒度が変化する混合泥土を用いた長原口堤体

- 回収工事, 地盤工学会誌, Vol.59, 9, pp.30-33, 2011.
- 57) 長瀧重義, 山本泰彦編: 図解コンクリート用語事典, 山海堂, 2000.
- 58) 山崎寛司, 佐藤健: ポゾラン・フライアッシュがコンクリートに及ぼす影響, コンクリート工学, Vol.19, 11, pp.68-74, 1981.
- 59) 小菅啓一, 坂井悦郎, 大門正機, 浅賀喜与志: シリカフェュームのポゾラン反応と反応率測定方法, シリカフェュームを用いたコンクリートに関するシンポジウム講演論文報告集, 1-7, 土木学会, 1993.
- 60) 山本武志, 廣永道彦: フライアッシュコンクリートのポゾラン反応に伴う強度発現メカニズムについての考察, API法の適用性の拡張, 電力中央研究所報告, N06018, pp.1-27, 2004.
- 61) 山本武志, 金津努: フライアッシュのポゾラン反応性を評価するための促進化学試験法の検討, 電力中央研究所報告, U98047, pp.1-30, 2009.
- 62) 土質工学会編: 土質工学における化学の基礎と応用, pp.154-177, 1978.
- 63) 宋永焜: 火山灰粘性土のアロフェン含有量が生石灰処理土の反応性に及ぼす影響, 材料学会第1回地盤改良シンポジウム論文集, pp.13-20, 1994.
- 64) 宋永焜, 遠藤和人: 関東ロームの石灰安定処理における反応性, 土と基礎, Vol.49, 2, pp.13-16, 2001.
- 65) 鬼塚克忠, 南里勝: 生石灰とポゾラン材料添加による建設発生土(有明粘土)の強度発現特性, 土木学会論文集, 54, III-36, pp.97-106, 1996.
- 66) 有泉昌: Soil-Lime工法の問題点, 粘土科学, Vol.6, 2-3, pp.74-80, 1967.
- 67) 有泉昌: ポゾラン反応, 土と基礎, Vol.22, 1, p.4, 1973.
- 68) 有泉昌: 石灰安定処理の機構, 土と基礎, Vol.25, 1, pp.9-16, 1977.
- 69) 神谷貞吉, 今野誠: セメントおよび生石灰と粘性土の混合処理効果について, 土と基礎, Vol.25, 1, pp.39-44, 1977.
- 70) 富田平四郎, 松川進: セメント, 生石灰を用いた鹿沼土の土質改良, 土と基礎, Vol.47, 7, pp.37-40, 1999.
- 71) 喜田大三, 中田礼嘉, 原田政太: 灰土(九州)の土質化学的諸性質と石灰安定処理, 粘土科学, Vol.9, 1-2, pp.28-40, 1969.
- 72) 浅川美利: 土質工学における土・石灰安定処理の現況, 石膏と石灰, 128, pp.32-40, 1975.
- 73) 工藤矩弘: ケミコライム工法, 生石灰による軟弱地盤安定化工法, 無機材料学会誌, 9, pp.423-429, 2002.
- 74) 榎場重正, 川村満紀, 鳥居和之: 排煙脱硫石膏および高炉水砕スラグを使用した安定処理土における反応生成物と強度特性, 土木学会論文報告集, 320, pp.77-88, 1980.
- 75) 宋永焜, 応長雲: 関東ロームのアロフェン含有量が石灰-石膏安定処理土に及ぼす影響, 土質工学会論文報告集, Vol.34, 4, pp.97-107, 1994.
- 76) 重松宏明, 西本佑輔, 西澤誠, 池村太伸: 酸性硫酸塩土の石灰安定処理に関する一考察,

- 土木学会論文集C, Vol.66, 2, pp.426-430, 2009.
- 77) 山田幹雄, 佐野博昭, 稲澤知洋, 小木曾晴信: 石灰質の安定材を添加した酸性硫酸塩土における強度増分とエトリンガイト生成量の関係, 材料, Vol.67, 1, pp.67-70, 2018.
- 78) Wang, L.: Cementitious stabilization of soils in the presence of sulfate, Louisiana State University Doctoral Dissertations, 2002.
- 80) 久保博, 三浦俊彦, 田島孝敏: 土-消石灰反応性の簡易試験法の検討, 日本材料学会第10回地盤改良シンポジウム論文集, pp.155-162, 2012.
- 81) Boynton, R. S.: Chemistry and Technology of Lime and Limestone, 177, 1966.
- 82) 笠井順一, 武田義之, 斉藤昌, 下田正雄: 生石灰の水和機構, 生石灰液相組成の過飽和現象について, 石膏と石灰, 108, pp.48-52, 1970.
- 83) 菊池実: pH 標準, 計測, Vol.11, 11, 1961.
- 84) 久保博, 黒木康貴, 三原守弘: ベントナイト系緩衝材のコンクリート間隙水による長期変質の基礎研究, 地盤工学会誌, Vol.46, 10, pp.31-34, 1998.
- 85) 吉田行, 田口史雄, 谷口円, 垣原康之, 高橋徹, 秋山衛: 火山灰の反応性と火山灰を用いたコンクリートの特性, 寒地土木研究所月報, 729, pp.10-24, 2014.
- 86) 上村克己, 松尾新一郎, 森川祐一: ポゾラン反応生成物の追跡, 土木学会年次学術講演会講演集, pp.163-164, 1979.
- 87) 宮尾昌克, 杉田修一, 庄谷征美: ポゾラン活性の迅速評価法に関する基礎的研究, 土木学会東北支部技術研究発表会講演集, pp.430-431, 1989.
- 88) 喜田大三, 久保博, 漆原知則: へどろ・軟弱土処理における各種固化材の比較検討, 材料, Vol.31, 341, pp.58-64, 1982.

第3章 改良土中のセメント・石灰含有量の塩酸反応熱試験方法の開発

3.1 背景

土にセメント系・石灰系の材料（粉体添加またはミルク状添加）を混合することによって土の工学的性質を改良する工法は、建設工事において多く採用されている。工事に先立って現地の土を用いた室内配合試験が行われ、目標とする強度が得られるようにセメント等の添加量の設計が行われる。セメント混合工法には、原位置で地盤にセメントを混合する方法と、土をミキシングプラントまで輸送してセメントを混合する方法がある。セメント混合工法において、現場強度と室内強度の比 (qu_f/qu_l)、すなわち、土とセメントをミキサーで十分に混合した場合の強度と、現場施工によって出来たセメント混合土の強度の比は、現場セメント添加量の設計にとって重要である。現場添加量の決定方法を図 3-1-1 に示す¹⁾。現場添加量は、設計基準強度を qu_f/qu_l で割り、さらに現場強度係数で割って求められる割増強度に相当するセメント添加量となる。現場強度定数は現場強度のバラツキを考慮して決められる定数 (<1.0) である。

qu_f/qu_l は、三浦ら²⁾による有明粘土地盤での生石灰深層混合処理の工事では 0.25～1.1 であった。また、Horpibulsk S.ら³⁾は、バンコク粘土地盤でのセメント深層混合処理の工事において qu_f/qu_l を調査し、同比が全体を通じて 0.6 以上であったこと、ウェットミキシング（セメントミルク使用）では qu_f/qu_l がドライミキシング（セメント粉体使用）の qu_f/qu_l よりも大きかったことを報告している。榎並ら⁴⁾は、住宅用小型混

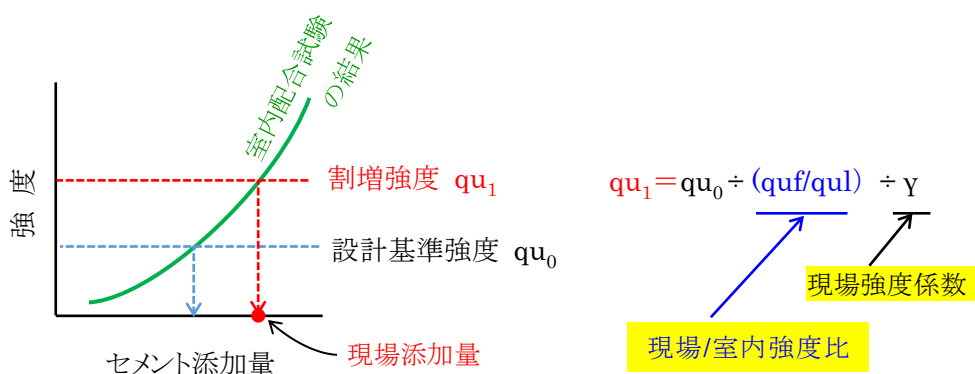


図 3-1-1 現場のセメント添加量の決定方法（文献¹⁾を基に作成）

合処理機械でセメントミルクを混合して基礎地盤を柱状改良する工事において quf/qul が 0.6 であったと報告している。内田ら⁵⁾は、東京湾横断道路の建設において大量のセメント混合土をプラント混合し海中打設した工事で quf/qul が 0.9 であったこと、その値が海中打設によって影響されたことを報告している。さらに、三木ら⁶⁾は、中層混合処理工法（パワーブレンダー工法）で quf/qul が 0.5～0.7 であったと報告している。

quf/qul は、いろいろな要因によって影響されるが、それら要因の中で混合精度は重要な位置を占めている^{3,7)}。室内試験では、十分に混合し均質な安定処理土を作製することを前提とするため、地盤工学会の基準「締固めをしない安定処理土の供試体作製方法（JGS 0821-2009）」⁸⁾によると、ホバート型ミキサーなどのミキサーを用いて 10 分間程度の混合を行うこととされている。室内試験では、土試料の含水状態やミキサー内の混合状況を見て、また混合時間が長いと固化材の硬化反応が始まり結果としてオーバーミキシングになることを避けるため、混合時間 3～5 分間で均一な混合土が作製されている場合が多い。

一方、現場の原位置での混合施工では、現場によって使用される施工機械は多種多様であり^{2,4,9,10,11,12,13)}、攪拌翼形状と回転速度が異なる。混合にバックホーが用いられる場合もある¹⁴⁾。このため、室内試験の混合時間と現場の混合時間を単純に比較することは出来ない。深度方向の柱状攪拌では、単位深度あたりの羽根切り回数で混合程度を

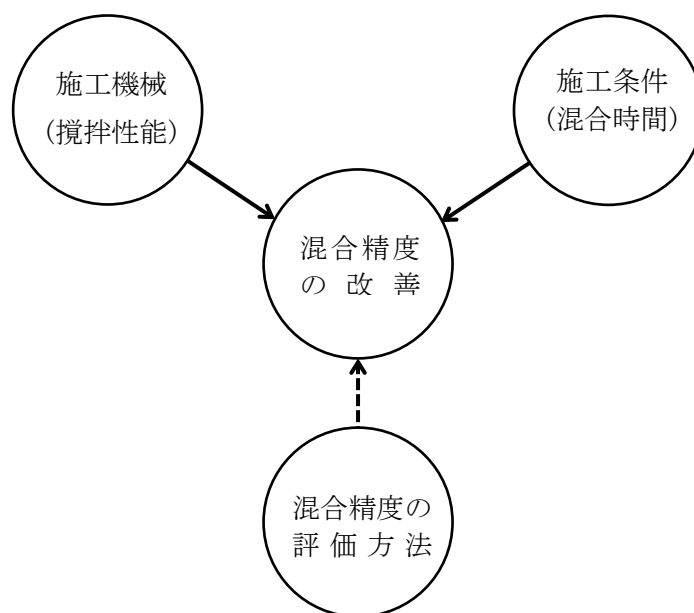


図 3-1-2 混合精度の改善の要因

管理する場合もある⁴⁾。現場では、施工効率（施工出来高）が経済性に直接影響することから、混合時間を長くすることには限界がある。混合時間を長くするほど、混合精度は向上し処理土の品質のばらつきが減少し良好な処理土を製造できるが、混合時間の増大とともに施工コストが上昇する。このことから、図 3-1-2 に示すように現場では、施工機械の攪拌性能を考慮して機械を選定し、施工条件の中で特に重要となる混合時間をどのように設定するか、が重要になる。また、混合精度の評価方法も重要である。

混合時間の最適値は、施工機械および地盤、土質条件によって異なる。最適混合時間の調査は、原位置での混合施工に限ったことではなく、プラント混合施工^{15,16)}においても共通である。すなわち、バッチ処理の場合、ミキサーの回転速度や混合時間の最適値を調査する必要があり、連続処理の場合、ミキサーの回転速度と被処理土の供給速度の最適条件を求める必要がある。

本章では、セメント・石灰安定処理工法の計画や施工において、処理土品質（混合精度）を評価する際に必要となるセメント・石灰含有量の測定のために塩酸反応熱法による試験法を開発した結果について述べる。

3.2 既往研究

(1) 固化強度等を調査する方法

セメント・石灰混合処理土の品質を調査する方法として、まず挙げられるのは、多数の処理土サンプルを採取してそれらの固化強度を測定し、強度とそのバラツキから処理土の品質を評価する方法である。この方法は、間接的にセメント・石灰の含有量や分布のバラツキを評価していることになる。三木ら⁶⁾は、固化強度（山中式土壤硬度計の改良型を使用）を多数測定し、統計学的手法を用いて処理土品質を評価する方法を提案した。コンクリート分野でも試料を多数採取し、養生後の圧縮強度などを測定し、その値のバラツキから品質を評価することが行われている¹⁷⁾。湯ら¹⁸⁾は、浚渫土の固化強度とセメント含有量の関係についてデータベースに基づき数式を作成し、強度からセメント含有量を求めている。固化強度によって品質を評価する方法は、土質改良の目的に合致した直接的な方法で分かりやすいが、試料が硬化するまで少なくとも数日以上待つ必要があり、混合精度の調査と管理に用いるには、迅速性に難がある。

(2) 化学分析法

化学分析によって処理土中のセメント・石灰含有量を測定する方法である。セメント中のカルシウムを化学分析する方法は、石井ら¹⁹⁾、および磯ら²⁰⁾によって研究された。これは、キレート滴定の妨害イオンをトリエタノールアミンでマスクングして EDTA で滴定する方法である。三瀬²¹⁾は、この方法をベースにしたソイルセメント中のセメント量の化学分析法を確立した。Ho ら²²⁾は、試料を 0.1M 塩酸で抽出し、その溶液を電気炉で 1000°C に加熱して残渣質量を測ることによってセメント含有量を測定した。化学分析によって現場のセメント混合処理土（ボーリングコア）のセメント含有量を測定し品質評価を行った研究として、石川ら¹⁴⁾の研究、Horpibulks ら³⁾の研究がある。また、石灰混合土中の石灰含有量を化学的に測定する方法として、日本石灰協会の「石灰による土質安定処理工法」²³⁾に掲載された方法、JIS M 8850「石灰石分析方法」²⁴⁾などがある。喜田ら²⁵⁾は、九州灰土の石灰安定処理工事において処理土をサンプリングして EDTA 滴定法によって石灰含有量を分析し品質評価を行った。また、三浦ら²⁾は、有明粘土地盤の DJM 工法（生石灰使用）による深度 15m までの改良工事においてコアサンプルの深度別の生石灰含有量を JIS M 8850 の方法で測定した。

上記の方法とは異なる化学的方法として、逆滴定法がある^{26, 27, 28)}。これは、コンクリートやソイルセメントの試料に一定量の過剰の塩酸を加えて混合液を酸性化し、セメント溶解に要した塩酸量を水酸化ナトリウム溶液で中和滴定して求める方法である。逆滴定法は、カルシウム含有量を直接分析するものではないが、そのセメント含有量との相関は高いと思われ、カルシウムの化学分析に比べて簡易な方法である。

化学的方法は、試料がフレッシュ状態、硬化状態のいずれにも適用できる。反面、多くの化学分析器具、薬品を必要とし、熟練を要することから、現場で簡単かつ迅速に行うことは困難である。

(3) 蛍光 X 線分析法および熱的分析法

蛍光 X 線 (XRF) 装置は、多元素同時分析の機器として広く使われている。河野²⁹⁾は、岩石試料の XRF 分析を行い、Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, P, Ba, Cr, Cu, Nb, Ni, Pb, Rb, Sr, V, Y, Zr の 21 元素については問題なく分析できることを報告した。末次ら³⁰⁾は、海洋環境で劣化したセメント混合処理土の強度特性を調査する中で、XRF 法によって処理土中の Ca, Mg を分析し、劣化メカニズムの考察を行った。Hürkamp ら³¹⁾は携帯型の XRF 装置を用いて、また Manceau ら³²⁾はシンクロトロン X 線装置を用いて土壤中の汚染重金属の分析を行った。蛍光 X 線法で Ca を分析して処理土中のセメント・石灰の含有量を迅速に測定することは可能である。しかし、携帯型装置が存在するとは言え、高価であること、取扱いに熟練を要することなどから、現場で広く使われるには至っていない。

また、熱分析によってセメント・石灰の含有量を測定する方法もある。熱分析の中で熱重量分析 (TG) は定量分析まで可能である。Villain ら³³⁾は、セメント水和鉱物の中の炭酸カルシウムについて TG 曲線の特徴を利用して分析を行った。半井ら³⁴⁾は、セメント水和鉱物の水酸化カルシウムおよび炭酸カルシウムについて TG による定量を行った。熱分析によるセメント・石灰の含有量の測定は可能である。しかし、装置が携帯型でなく、高価で、取扱いに熟練を要するため、現場での簡便、迅速な測定法とは言えない。

(4) 塩酸溶解熱法

神田³⁵⁾は、まだ固まらないコンクリートの水セメント比を塩酸用加熱法によって測定する方法を開発した。神田は、この方法の原理を以下のように解説している。「モルタ

ルに一定量の水を加えたモルタルの希釈液に塩酸を加えると急激な発熱反応を生じ、試料中のセメントは分解する。この際に生ずる反応熱は、きわめて急速に一定温度に到達するものであり、反応後の最高温度から反応前の基準温度を差し引いた温度差とセメント量との間には、常に一定の関係がある」と述べている。喜田ら³⁶⁾も、まだ固まらないコンクリートの品質判定法に塩酸溶解熱法が有効なことを報告している。この方法は、指標が温度という分かりやすい物理量であり、結果が迅速に得られ、断熱性の容器、塩酸、温度計、秤があれば計測可能という簡便さにも優れている。筆者らは、同法のセメント改良土への適用を研究した^{37, 38, 39, 40)}。また、手塚ら⁴¹⁾がセメントミルク高圧噴射攪拌による地盤改良土の品質調査に適用した研究がある。

(5) その他

橋本ら⁴²⁾は、ミキサー内にコンクリートとともにトレーサー粒子を添加したビデオ撮影画像を用いて混合特性を可視化する研究を行った。

以上の(1)～(4)をまとめると、表 3-2-1 のようになる。セメント改良土、石灰改良土に含まれるセメント量、石灰量を現場で簡便かつ迅速に測定する方法としては、塩酸溶解熱法が最有力であると評価される。

表 3-2-1 セメント・石灰含有量試験方法の特徴

	固化強度測定	化学分析	蛍光X線分析 (A) 熱分析 (B)	塩酸溶解熱法
概要	・強度がセメント含有量に対応するとの前提	・CaO を分析しセメント・石灰量に換算または逆滴定	・CaO 量分析 (A) ・消石灰、炭酸カルシウムを分析(B)	・セメントと塩酸の反応熱を利用
使用機器の特徴	○ 汎用	△ やや特殊	× 特殊	○ 小型、安価
取扱い	○	△ 熟練を要する	× 熟練を要する	△ 反応が激しい
結果の迅速性	× 養生必要	△	×	○ 極めて迅速

3.3 改良土中のセメント・石灰含有量の塩酸反応熱による試験方法の開発

3.3.1 目的

神田³⁵⁾によるフレッシュコンクリート中のセメント含有量を塩酸溶解熱法によって測定する方法は、原理が分かりやすく、特殊な分析機器を必要とせず、試験方法が簡単で、測定結果が安定して再現性に優れていることから、この方法をセメント・石灰混合土の品質試験に適用できるのではないかと考えた。

しかし、安定処理土に適用するには、神田の方法をいくつか改善することと、試験条件の影響を調査しておくことが必要と考えた。第一は、使用する塩酸の濃度である。神田の方法は、濃塩酸（約 12M）を使用する。濃塩酸は、常温でも塩化水素ガスの発生量が多く、狭い空間での作業になると作業環境に大きな問題が生ずる。コンクリートやモルタルと異なり、安定処理土のセメント含有量は少ないので、もっと低濃度の塩酸を使用できないか、と考えた。第二は、使用する塩酸量である。神田の方法は、濃塩酸を 1 回の試験で 500g 使用する。安定処理土の試料量を調整することによってもっと少ない塩酸量で試験できないか、と考えた。第三は、土質安定用の特殊セメントにも適用できるか、石灰系材料にも適用できるか、を調査して土質安定工事に広く適用したいと考えた。第四は、土とセメントを混合してからの経過時間によって反応温度がどのように影響されるか、この試験方法を安定処理土の材令についてどこまで適用可能か、を調査することであった。

本節では、これらの課題について調査・検討し試験方法を確立することを目的とする。

3.3.2 試料と試験方法

(1) 供試土、安定材および塩酸

使用した土は、砂質土と粘土の 2 種類である。粘土は、日本の岐阜県で産出したカオリン鉱物を主体としたものである。砂は、日本の千葉県で産出したものである。それぞれの土の物理的性状などを表 3-3-1 に示す。また、粒径加積曲線を図 3-3-1 に示す。

試験に主体的に使用したセメントは、高炉セメント B 種（スラグ含有量：30～60%）である。比較のため、普通ポルトランドセメント、地盤改良用の特殊セメント、生石灰および消石灰も用いた。塩酸は試薬 1 級（約 12M）を水道水で所定の濃度に希釈し、冷

却してから使用した。

(2) 試験装置

塩酸 100mL の供給は、写真 3-3-1 に示すオートビューレット(100mL)を用いて行った。また、使用した保温容器と温度計を写真 3-3-2 に示す。保温容器は、容量 300mL のガラス製デュア瓶である。温度センサーは、Pt100Ω 測温抵抗体タイプで、富士電機(株)製の FTNGOPF3(テフロン保護管付き)を用いた。デジタル指示計は、シマデン(株)の SD24 を用いた。

(3) 試験方法

試験方法を図 3-3-2 に示す。土、セメント、水および塩酸は、室内に 1 日以上放置し

表 3-3-1 供試土の性状^{37,40)}

	自然含水比 (%)	土粒子密度 (g/cm ³)	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	均等係数
砂質土	7	2.67	—	—	2.0
粘土	1.3	2.66	41	12	—

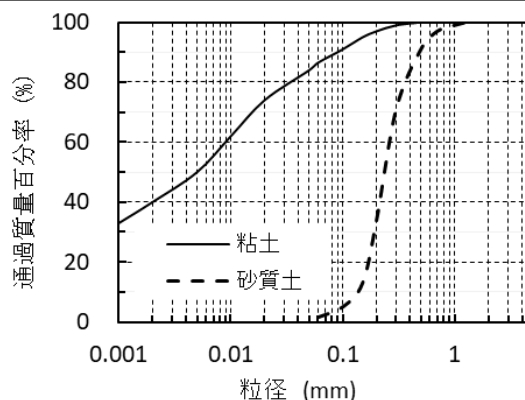


図 3-3-1 供試土の粒径加積曲線^{37,39)}



写真 3-3-1 オートビューレット



写真 3-3-2 保温容器と温度計³⁹⁾

て、室温と平衡温度 ($T_0^{\circ}\text{C}$) になった状態で使用した。保温容器に、所定量の土、セメント、水を計量して保温性容器に入れ、ヘラを用いて混合した。そして、オートビューレットを用いて塩酸を 100mL 添加し、温度計 (最高温度を表示する留点温度計) を連結した攪拌棒で混合した。そして、最高温度 ($T_1^{\circ}\text{C}$) を読み取り、(1)式によって上昇温度 ($\Delta T^{\circ}\text{C}$) を求めた。

$$\Delta T = T_1 - T_0 \quad (1)$$

3.3.3 結果と考察

(1) 塩酸濃度が温度上昇に及ぼす影響

砂質土の含水比を 10% に調製し、湿潤土として 110g (乾燥土として 100g) を採取して高炉セメントを 0~10g 添加し混合し、保温性容器に入れた。高炉セメントを用いたのは、日本では地盤改良工事に多く採用されているからである。そして、2~12M(mole/L) の濃度の塩酸 (HCl) をそれぞれ 100mL 添加混合して温度上昇 ΔT を求めた。

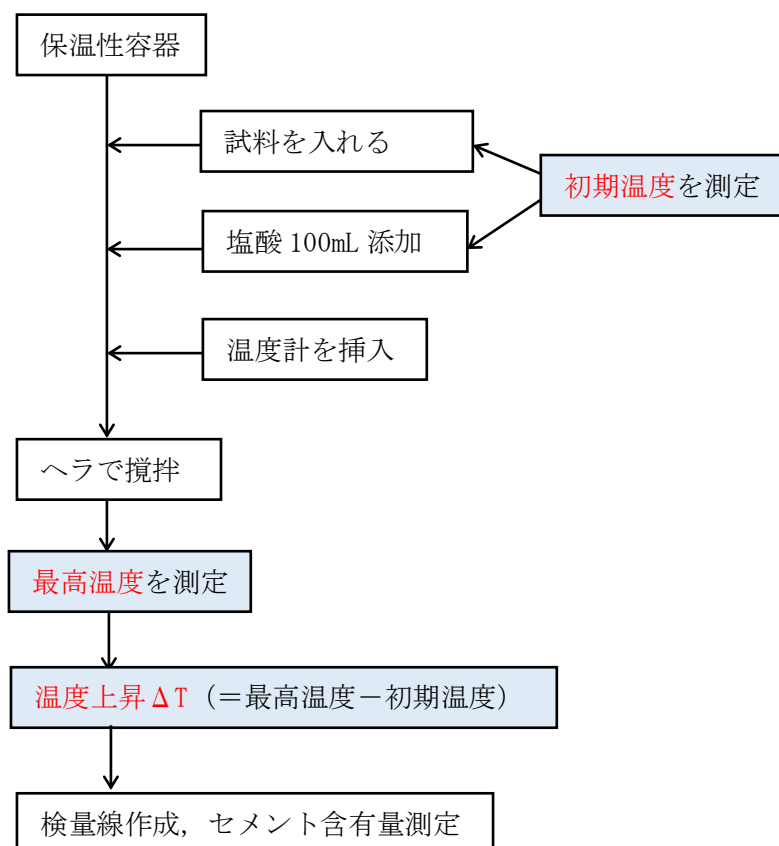


図 3-3-2 塩酸反応熱の試験方法

結果を図 3-3-3 に示す。ΔT は、セメントの量が多いほど、また塩酸濃度が高いほど、増大した。2M HCl は、セメント 6g までは直線的に温度を上昇させたが、セメント 8g 以上では上昇が鈍化した。これは、セメントと塩酸の反応において、塩酸の化学量 (=濃度×量) の不足が生じたためと考えられる。一方、12M HCl は、最大の温度上昇をもたらすが、セメントと塩酸の反応が激しく、直線から少しズレる傾向があった。また、取り扱い上、塩化水素ガスの発生が多く、皮膚に付着した場合の火傷などのリスクが大きいく、安全性が高いとは言えない。6M HCl と 4M HCl は、セメント量と直線関係を示し、12M HCl に比べて反応がマイルドで、リスクが大幅に低減した。6M HCl は、セメント量が多い場合でも、4M HCl に比べて、塩酸量の不足になり難いという利点がある。したがって、塩酸濃度は、6M が最適との結論に達した。神田³⁴⁾は、生コンクリートのセメント量測定に濃塩酸 12M を用いたが、セメント混合土では、6M HCl が実用的であると判断された。試料土約 100g に対して 6M HCl 100mL を添加して温度上昇を測定することで、図 3-3-3 の 6M HCl のような検量線が作成でき、セメント含有量を測定可能であることが分かった。

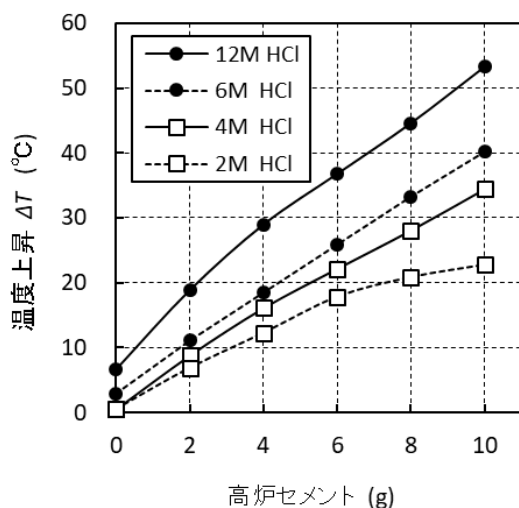


図 3-3-3 塩酸濃度をパラメータとした場合の高炉セメント量と発熱量の関係^{37, 40)}
(砂質土: 110g, 砂質土含水比: 10%, 塩酸: 100mL)

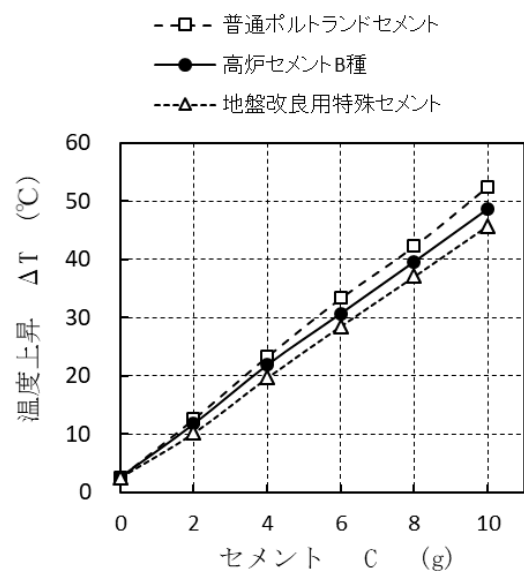


図 3-3-4 3 種類のセメントのセメント量と温度上昇の関係^{37, 40)}
(砂質土: 110g, 砂質土含水比: 10%, 塩酸: 6M, 100mL)

(2) 各種セメント・石灰の塩酸反応熱による温度上昇

セメント安定処理工事では、高炉セメント以外のセメントが使われる場合がある。そこで、前述の高炉セメントの場合と同じようにして、普通ポルトランドセメントと土質改良用の特殊セメントについて、含水比 10%の砂質土 110g に対してセメントを 0～10g 添加混合し、6M HCl 100mL 添加による上昇温度を測定した。結果を図 3-3-4 に示す。

温度上昇直線の傾きは、3 種類のセメントで異なった。傾きの大きさは、普通ポルトランドセメント>高炉セメント>特殊セメントの順であった。これらのセメントは、CaO 含有量などが異なる。セメントの化学組成、鉱物組成の違いが塩酸反応熱の大きさに関与すると考えられる。検量線は、使用するセメントの種類ごとに作成することが必要である。

図 3-3-5 は、高炉セメントの銘柄による塩酸反応温度上昇の比較を行った結果を示す。銘柄による温度上昇の差異はほとんどなく、実用上、無視できると考えられる。図 3-3-4 の高炉セメントの結果と図 3-3-5 の結果を比較すると、後者の温度上昇の方がやや小さくなっている。これは、試験環境条件（室温）の違い、使用したときの容器温度などの違いによると考えられる。これらのことがセメント含有量の測定値に影響する場

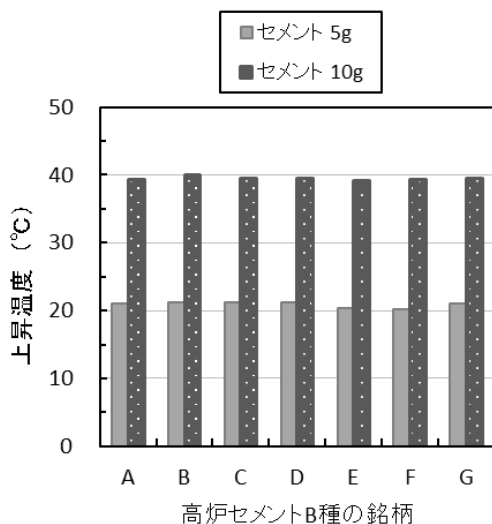


図 3-3-5 高炉セメントの銘柄と温度上昇の関係³⁷⁾
(砂質土: 110g, 砂質土含水比: 10%, 塩酸: 6M, 100mL)

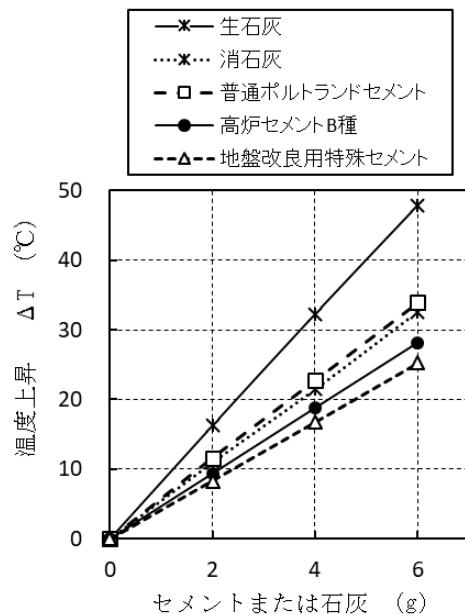


図 3-3-6 各種セメント・石灰の量と温度上昇の関係^{37), 40)}
(砂質土: なし, 塩酸: 6M, 100mL)

合、検量線を取り直すことで対処する必要がある。また、攪拌が不十分であると、セメントが継粉（ままこ）になって塩酸と十分に接触しない結果、上昇温度が低めに出ることがあるので注意する必要がある。

つぎに、石灰やセメントと塩酸の反応による温度上昇について、基礎的なデータを取得するための試験を行った結果を図 3-3-6 に示す。対象としたのは、生石灰、消石灰、普通ポルトランドセメント、高炉セメント、地盤改良用特殊セメントの 5 種類である。保温性容器は以前の試験と同じものを使用し、石灰またはセメント 0~6g に対して、6M HCl 100mL を添加し混合し ΔT を測定した。ただし、土を含まない系の試験である。そして、図 3-3-5 における各直線の傾き H ($\Delta T^{\circ}\text{C/g}$) と CaO 含有量を表 3-3-2 に示す。

図 3-3-6 に示すように、生石灰、消石灰は、セメントと同様に量に比例した温度上昇を示した。このことから、生石灰、消石灰などの石灰系材料に対しても本試験が適用可能であることが明らかになった。 $H(\Delta T^{\circ}\text{C/g})$ は、生石灰>普通ポルトランドセメント \geq 消石灰>高炉セメント>特殊セメントの順で、図 3-3-7 に示すように CaO 含有量との相関が高い。表 3-3-2 の H は、直線の傾き（すなわち単位量当たりの温度上昇）を示すが、断熱性を十分に確保した条件での試験ではないので、熱化学的には正確な値ではない。しかし、統一された条件で試験を行うことによって、このような相対的評価は可能と考える。

温度上昇を引き起こす発熱量は、石灰とセメントの溶解熱、土の一部の溶解熱、中和熱、および塩酸の希釈熱などの反応熱の合計によるものである。図 3-3-3、図 3-3-4 において、セメント 0g で温度上昇が見られるのは、土の一部の溶解熱、中和熱、および希

表 3-3-2 各種セメント・石灰の CaO 含有率と単位質量当たりの塩酸反応上昇温度⁴⁰⁾

	CaO (%)	H ($^{\circ}\text{C/g}$)
生石灰	100	8.0
消石灰	76	5.4
普通ポルトランドセメント	64	5.7
高炉セメント B 種	56	4.7
地盤改良用特殊セメント	52	4.2

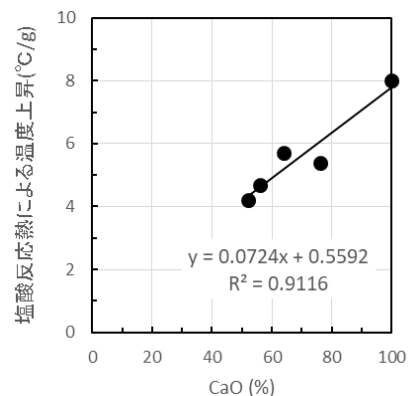
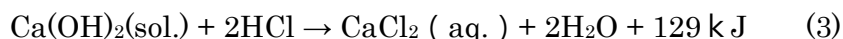
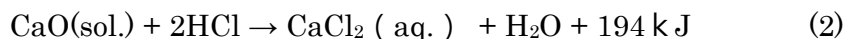


図 3-3-7 CaO(%)と $H(^{\circ}\text{C/g})$ の関係

積熱によるものである。生石灰および消石灰の塩酸による溶解反応は、(2)式および(3)式で表される。



これらの反応は、いずれも発熱反応であり、温度上昇に対して最も大きく寄与している。表 3-3-2 の生石灰の H 値と消石灰の H 値の比は、等しいモル数で比をとると、1.12 になる。一方、式(2)の発熱量と(3)の発熱量の比は、1.50 である。この違いは、試験における熱量ロスの影響などによると考えられる。セメントは、いろいろな鉱物の混合物で、CaO を主成分とする鉱物を多く含むことから、石灰と類似の溶解反応によって発熱すると考えられる。

ヘスの法則は、総熱量保存の法則ともいわれ、物質が変化するときに出入りする熱量は、変化する前と変化した後の物質の状態だけで決まり、途中の経路は無関係である、というものである。ヘスの法則を応用した研究もある⁴²⁾。式(2)の CaO は、加水すると式(3)の Ca(OH)₂ に変化するが、そのときの発熱量は、ヘスの法則により式(2)の発熱量から式(3)の発熱量を差し引いた発熱量、すなわち 65kJ/mole となる。

(3) 砂質土の含水比が塩酸反応温度上昇に及ぼす影響

セメントを混合する前の砂質土の含水比が塩酸反応温度上昇に与える影響を試験し

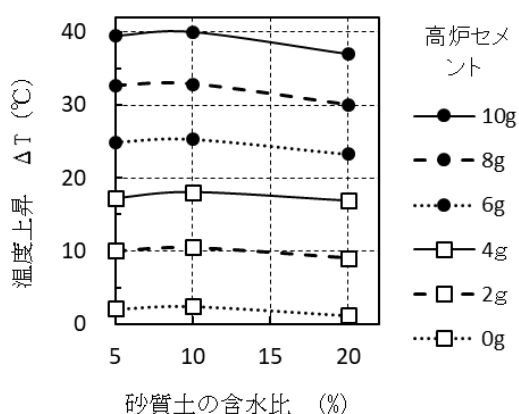


図 3-3-8 砂質土の含水比と温度上昇の関係^{37,40)}

(砂質土：100g (乾燥質量として)、塩酸：6M, 100mL)

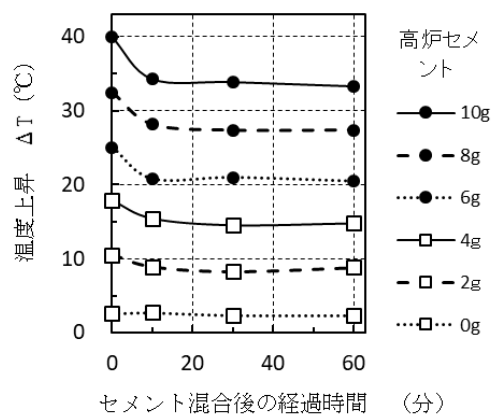


図 3-3-9 セメント混合後の経過時間と温度上昇の関係³⁷⁾

(砂質土：100g (乾燥質量として)、塩酸：6M, 100mL)

た。結果を図 3-3-8 に示す。温度上昇 ΔT は、砂質土の含水比 5%の場合と 10%の場合とでは、ほとんど差がなかった。そして、含水比を 20%に上げると、 ΔT が 1~3°C減少した。 ΔT に対する含水比の影響は、基本的に熱量計算に従う、すなわち試料土中の水分の熱容量（質量×比熱）が塩酸反応熱を奪うので、温度上昇が減少する。図 3-3-7 より、砂質土の場合、含水比がおおむね±5%以内の範囲に入っている場合、共通の検量線として使うことが出来ると考えられる。

(4) 砂質土のセメント混合後の経過時間が塩酸反応温度上昇に及ぼす影響

砂質土とセメントを混合してから塩酸反応熱試験を行うまでの経過時間が温度上昇に与える影響を調査した。経過時間は最大 60 分までとした。結果を図 3-3-9 に示す。

ΔT は、経過時間が 0 分、すなわち混合直後に最大を示し、5 分後に 1.6~5.7°C減少し、30 分および 60 分後には 5 分後とほぼ同じ値を示した。 ΔT が 5 分後に減少した理由は、砂質土の中の水分によってセメントが水和し、その分、 ΔT が減少したと考えられる。また、5 分以降で ΔT の減少が鈍化したのは、水量の比較的少ない条件での試験であったためと考えられる。神田が生コンクリートについて行った塩酸溶解熱試験においても、水量の多い方が経過時間に伴う ΔT の減少が大きい。このことは、経過時間の影響がセメントの水和速度に依存することを示唆する。図 3-3-9 のような結果になる場合、塩酸反応熱試験は、0~5 分の間を避けて実施することが必要である。

(5) 高含水比のセメント混合土における各種セメントの塩酸反応温度上昇

砂・粘土スラリーは、乾燥質量として砂 100 g 当り粘土を 8g 加え、さらに水 40mL を加えてよく混合して作製した。砂・粘土スラリーの含水比は、40%となった。このスラリーに対して、スラリーとセメントとの合計質量が 100g になるようにスラリー量を調整して、セメントを 0~10g 添加し混合しセメント混合土を作製した。例えば、セメント量が 6g の場合、スラリー量は 94g とした。このセメント混合土について塩酸反応熱試験を行った。使用したセメントは、3 種類である。結果を図 3-3-10 に示す。

ΔT は、いずれのセメントともに直線的に増大した。そして、比較的低い含水比の砂を用いて試験した図 3-3-4 と同じような直線傾向を示した。そして、図 3-3-10 では、土の含水量が多いため、図 3-3-4 に比べていずれのセメントでも直線の傾きが小さくなった。セメント 10g における ΔT は、図 3-3-10 の方が図 3-3-4 に比べて約 10°C減少した。これらは、水量の増大に伴う熱容量の増大によるものであり、熱量計算によって ΔT の

推定が可能と考えられる。

(6) 高含水比のセメント混合土の経過時間が塩酸反応温度上昇に与える影響

粘土-砂スラリーに高炉セメントを混合し、塩酸反応熱試験を行うまでの時間を 10 分、30 分、60 分、1 日、7 日、28 日に設定して ΔT を測定した。試料は、試験を行うまでの間、ビニールで密閉して 20°C で養生した。結果を図 3-3-11 に示す。

ΔT は、いずれのセメント量においても、10 分後から減少が始まっている。 ΔT の減少は、セメント量が多い場合ほど顕著である。 ΔT の減少は、セメントの水和反応が進んだことを意味する。この試験条件では、土がセメントの水和に十分な量の水を含むので、

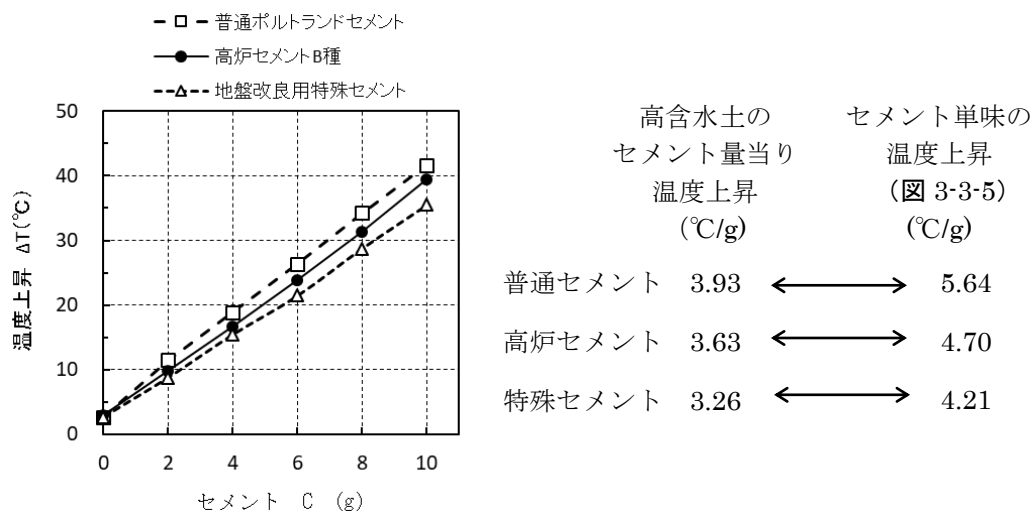


図 3-3-10 高含水セメント混合土における各種セメント量と塩酸反応温度上昇の関係 (砂質土+粘土 (100 : 8) : w=40%. 塩酸 : 6M, 100mL) ^{37, 40)}

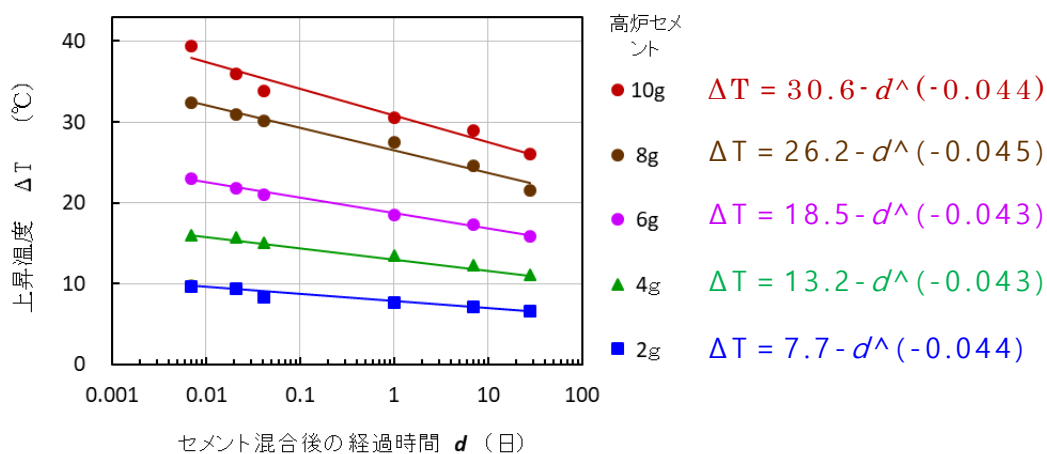


図 3-3-11 高含水セメント混合土の混合からの経過時間と温度上昇の関係 ³⁷⁾
(砂質土+粘土 (100 : 8) : w=40%. 塩酸 : 6M, 100mL)

セメント量が多いと水和反応熱で内部温度が上昇し、水和反応が速くなったと推測される。土粒子がセメントから溶出するカルシウムイオンの一部を吸着する反応も関与していると考えられる。このことから、検量線の作成と検体の試験においては、セメント混合からの経過時間を或る一定範囲に限定し、統一することが重要である。

また、1日、7日、28日後の ΔT は、10分後の ΔT に比べて減少しているが、かなりの塩酸反応熱のキャパシティ（遊離の水酸化カルシウムなどが考えられる）が残存している。このことは、検量線の作成方法を工夫することによって、長期材令の試料についてもセメント量の測定が可能であると考えられる。

3.3.4 まとめ

軟弱土に対するセメント・石灰安定処理工法では、安定材（セメント・石灰）と土を良好に混合することが重要である。安定材と土との混合精度を評価するためには、安定処理土中の安定材の含有量を測定することが必要となる。本節では、神田²⁸⁾の方法を安定処理土に適用しやすい形に改良することを目的とし、塩酸反応熱法による安定材含有量試験方法について検討した。確立した試験方法と特長を以下に述べる。

- 1) 試験方法の第一ステップは、安定材の量と塩酸反応熱による温度上昇の関係を示す検量線を作成することである。工事の対象となる現場の土を採取し、土（湿潤質量）90～100gに対して安定材を0～10g混合して混合土を作製する。このとき、土+安定材の合計質量は、常に100gになるように配合する。混合土をそれぞれ保温性容器に入れ、濃度6Mの塩酸100mLを添加する。容器に温度計を挿入して、容器内部をゆっくり攪拌し、反応による最高温度(T_1)を計測する。最高温度に達するまでの時間は、1分間前後である。一方で、土、安定材、塩酸、保温容器は、室温に置かれて温度が平衡している場合には、その温度を基準温度(T_0)とする。室内でなく、現場などの野外で試験する場合、温度が変動するので、土、塩酸などの温度を逐次測定し、熱容量を考慮して平均温度を算出し、それを基準温度(T_0)とする。温度上昇 ΔT は、 $T_1 - T_0$ である。検量線のグラフは、横軸に ΔT (°C)、縦軸に安定材量(g)をとったもので、両者の関係はほぼ直線関係（一次式）となる。検量線は、使用する安定材の種類が変更される場合、および、現場の土質が変化する場合に作成しなおす必要がある。

- 2) 試験方法の第二ステップでは、セメント含有量が未知の試料（施工による混合土）について測定を行う。試料 100g を保温容器に入れ、上記の 1) と同じ方法で最高温度(T_1)と基準温度 (T_0) を計測し、 ΔT を求める。 ΔT の値を 1) で作成した検量線グラフに当てはめることによって安定材含有量(g/100g)が求まる。これを原地盤の湿潤密度、あるいは安定処理土の湿潤密度を考慮した計算式に入れることに依って、安定材含有量 (kg/m^3) などとして表示することが出来る。
- 3) 塩酸反応熱法は、測定時間が 1 分間程度という迅速な試験方法である。また、現地ので試験して得られた検量線を用いるので、複雑な化学反応の影響を考慮する必要がなく、あらゆる土に適用可能と考える（少なくとも、これまで筆者が測定不可という土に遭遇したことはない）。使用する塩酸の濃度が 6M であるため、ガスの発生量が少なく、通常の換気を行う程度で、作業環境も良好に確保できる。また、使用する塩酸量も 100mL/回と比較的少ないので、廃液量を抑制している。簡便、迅速、安全、安価という条件をかなりのレベルでクリアした試験方法であると思う。今までよりも、手軽に現場での安定処理土の品質を計測できる試験方法である。

3.4 塩酸反応熱試験法の適用(その1:セメント中層混合による地盤改良工事)

3.4.1 目的

中層混合処理工法によって軟弱粘性土地盤にセメントを攪拌混合する土質改良工事が施工された。対象地盤は、非常に粘着性・付着性の高い粘性土層によって構成されており、混合精度の確保が課題になっていた。そこで、良好な混合精度を確保するための施工条件(重要なポイントとなる攪拌機の水平移動速度)について調査することを目的として、塩酸反応熱法によるセメント含有量等の測定を実施した。

3.4.2 工事の概要

施工状況を写真 3-4-1 に示す。施工に用いられたのは、中層混合処理工法の代表的工法の一つであるパワーブレンダー工法である。同工法は、チェーンに装着された攪拌羽根が鉛直方向に回転して攪拌機下部から噴射されるセメントミルクを地盤中に攪拌混合する。攪拌機は、1 ブロックの施工中には地中に挿入したまま、ベースマシンのアーム操作によって水平移動するのが基本になっている。水平移動速度は、各種土質での施工実績と、当該現場の施工中の混合状態を見て決定された。

工事概要を表 3-4-1 に示す。改良深度は、約 10m であった。セメントとしては、地盤改良用の特殊セメントが使用された。セメント添加量とセメントミルクの W/C は、事前の室内配合試験によるテーブルフロー値と一軸圧縮強度を基に決められた。セメント

表 3-4-1 工事概要



写真 3-4-1 施工状況
(パワーブレンダー工法)

施工場所	東北地方 某地
試験時期	2017 年
改良目的	地盤の変形抑制など
改良深度	GL.0~約・10m
セメントの種類	地盤改良用特殊セメント
セメントの 設計添加量	103kg/m ³
セメントミルク の W/C	260%
目標一軸圧縮強度	200kN/m ² 以上(28 日)
工 法	パワーブレンダー工法

ミルクの W/C が一般的な値に比べて高めに設定したのは、施工時の粘性土の粘着性が強く、施工性を確保するために必要であった。目標の一軸圧縮強度は、200kN/m² 以上(材令 28 日)であった。

3.4.3 土質性状

工事の対象になった土の性状を表 3-4-2 に示す。細粒分 (75 μ m 以下の土粒子) の含有率は、88%と高かった。自然含水比が液性限界に近いことから分かるように軟弱な粘性土であった。液性指数 (= (自然含水比・塑性限界) \div (液性限界・塑性限界)) は、0.90 であった。高山⁴⁴⁾ は、有明粘土の有明粘土の液性指数と練り返し時のせん断強さの関係について図 3-4-1 のように報告している。この図にあてはめると、当該粘土の練り返し時のせん断強さは、3kN/m²程度と非常に小さいことが推測される。また、当該粘土は、パワーブレンダー機で攪拌混合すると、練り返されて強い付着性を示し攪拌機に粘土が多く付着した。

表 3-4-2 現場の粘土の性状

自然含水比 (%)	土粒子密度 (g/cm ³)	湿潤密度 (g/cm ³)	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	粒度分布 (%)	
					< 75 μ m	75 μ m ~ 2mm
74.3	2.64	1.48	77.1	44.8	88	12

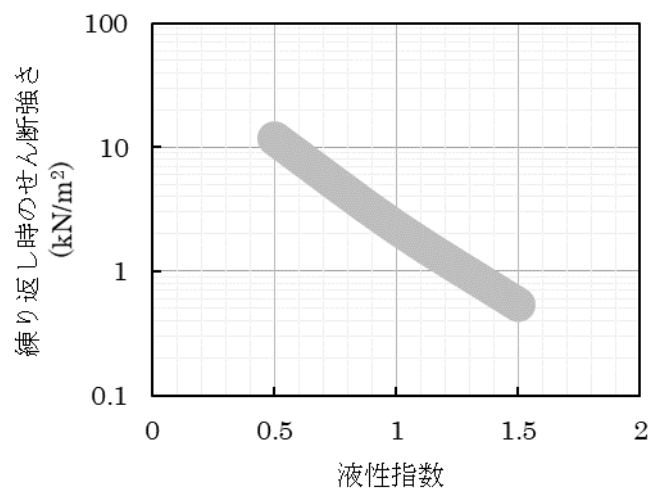
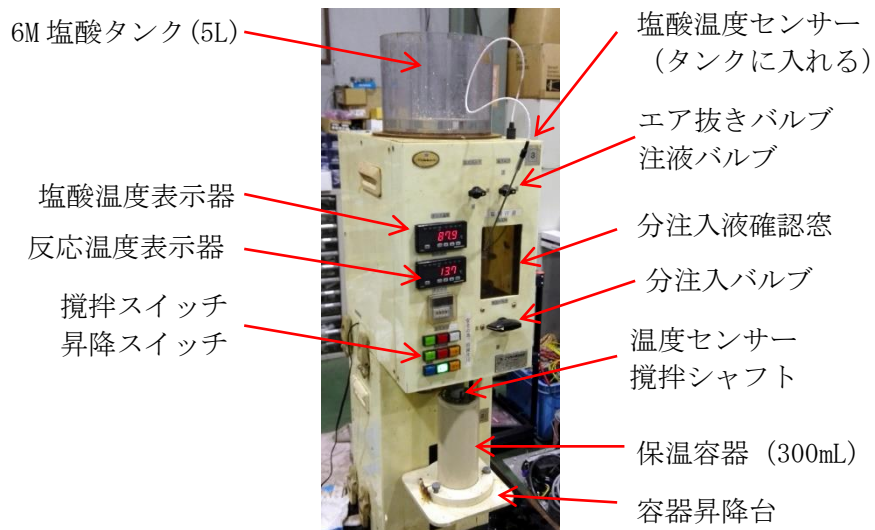


図 3-4-1 有明粘土の液性指数と練り返し時のせん断強さの関係 (高山の報告⁴⁴⁾ を簡略化し縦軸の単位を書き換えた)

3.4.4 試験方法

当現場での塩酸反応熱法の試験には、写真 3-4-2 に示す装置を用いた。同装置³⁷⁾は、上部に塩酸タンク（5L）を備えており、バルブ操作によって 6M 塩酸 100mL が重力によって保温容器に注入されるようになっている。保温容器は昇降台にセットされており、試料土と塩酸が入れたのち、昇降台を上昇させて攪拌翼と温度センサーが所定に位置に収まる。攪拌翼を回転させると、反応温度表示器の温度が上昇し、最高温度を検出すると最高温度を表示したままになる。塩酸タンクの中に設置した温度センサーによって塩酸温度も表示される。

検量線の作成は、現場の土と現場で使用されたセメント、混練水を用いて、合計が 100g になるようにして、セメントを 0~10g 混合した試料土について実施した。また、現場施工による試料土（セメント含有量未知）の試験では、常に 100g の試料土を用いた。試験状況を写真 3-4-3 に示す。



幅	: 280mm
奥行	: 390mm
高さ	: 1,280mm
質量	: 約 39kg
装置構成	: 3 分割・組立式



写真 3-4-2 塩酸反応熱試験装置

写真 3-4-3 現場での塩酸反応熱法の試験状況

中層混合処理機（パワーブレンダー工法）によって施工された直後の処理地盤において、鉛直方向に試料採取管を挿入し、深度別の試料土を採取した。そして、試料土のセメント含有量を塩酸反応熱法によって測定するとともに、試料土をモールド（φ50mm, h100mm）に充填して密閉養生（20℃恒温室）して7日後の湿潤密度と一軸圧縮強度を測定した。

試料採取は2地点で行い、A地点は、50m³/hの施工能力に相当する水平移動速度（平均8.3cm/分）、B地点は、60m³/hの施工能力に相当する水平移動速度（平均10cm/分）である。B地点は、施工能力増大を意図した試験で、水平移動速度が平均で20%速い。

3.4.5 結果と考察

(1) 塩酸反応熱法の検量線

検量線データおよび検量線の例をそれぞれ表3-4-3、図3-4-2に示す。写真3-4-3に

表 3-4-3 検量線データの例

土 (g)	セメント (g)	水 (g)	計 (g)	塩酸 (mL)	塩酸温度 (°C)	反応温度 (°C)	温度上昇 (°C)	土の体積 (L)*	セメント (kg/m ³)
100	0	0	100	100	9.7	11.6	1.9	0.0676	0.0
93.4	2	4.6	100	100	11.7	18.0	6.3	0.0631	31.7
86.9	4	9.1	100	100	14.7	25.3	10.6	0.0587	68.1
80.3	6	13.7	100	100	16.2	31.5	15.3	0.0543	110.6
73.8	8	18.2	100	100	17.1	37.6	20.5	0.0499	160.4

*土の体積は、湿潤密度を1.48g/cm³として計算した

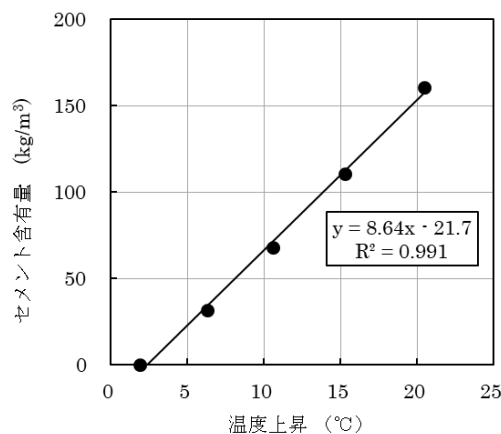


図 3-4-2 検量線の例

示したように、野外の気温変化の激しい環境条件下（直射日光、寒風など）で試験を行ったため、検量線の直線性がやや悪いが、現地の試験目的に対しては満足できるレベルを確保していた。

(2) 深度別のセメント含有量, 湿潤密度, 一軸圧縮強度

A 地点, B 地点のそれぞれの深度別のセメント含有量, 湿潤密度, 一軸圧縮強度の結果を図 3-4-3 に示す。セメント含有量は 2 個の試験結果の平均値, 湿潤密度と一軸圧縮強度は 3 個の試験結果の平均値である。

A のセメント含有量は、深度方向のバラツキが小さく、平均 96.6kg/m³, 変動係数

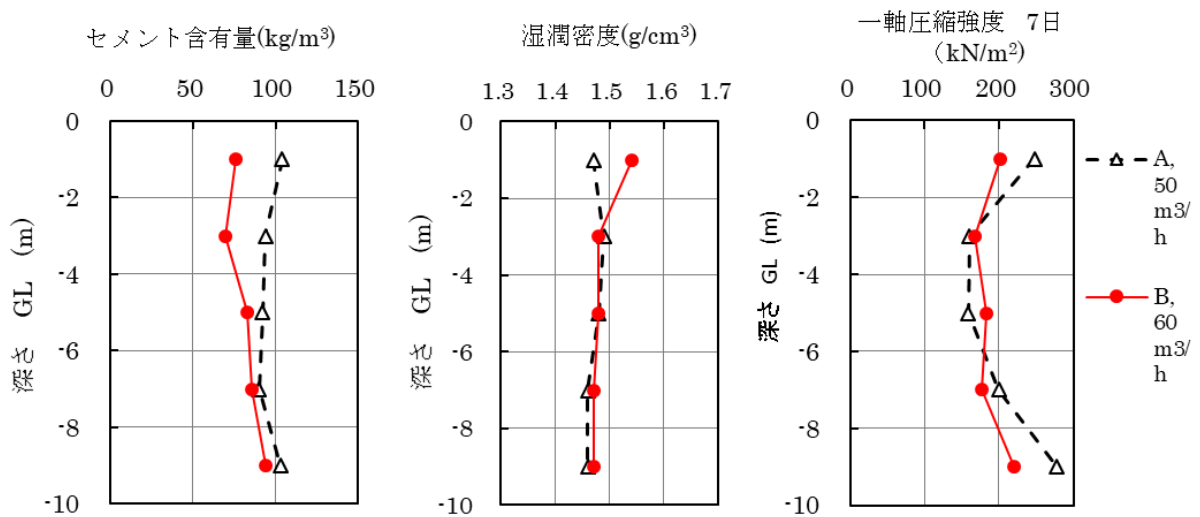


図 3-4-3 深度別のセメント含有量, 湿潤密度, 一軸圧縮強度

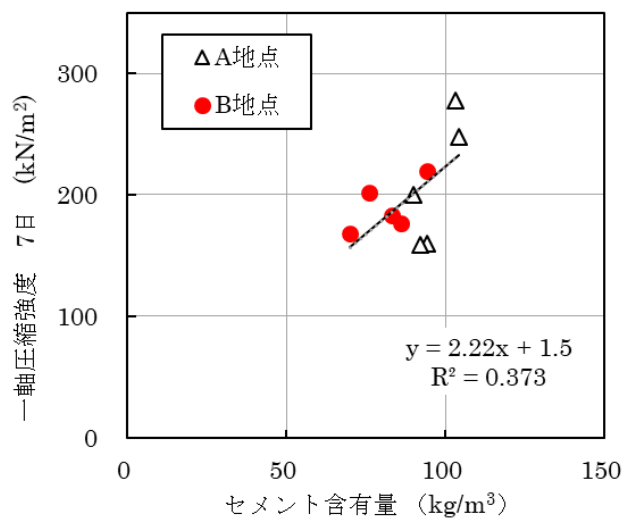


図 3-4-4 セメント含有量と一軸圧縮強度の関係

6.0%あった。平均値は、設計セメント添加量 103kg/m^3 と近似した値であった。一方、B のセメント含有量は、平均 81.8kg/m^3 、変動係数 10.1%であった。平均セメント量が少ないのは、セメントミルクの供給速度が一定の下で水平移動速度を平均で 20%速くしたことによるもので、予想された結果である。B の深度別のセメント含有量は、上層が少なめ、下層が多めであり、A に比べると、上下の差がやや大きかった。

湿潤密度は、B の最上層でやや大きくなったが、全体としては深度方向に値が安定しており、A と B の差はなかった。一軸圧縮強度（7 日）は、A で平均 209kN/m^2 、B 地点で 190kN/m^2 であった。

セメント含有量と一軸圧縮強度（7 日）の関係を図 3-4-4 に示す。全体（10 個のデータ）の相関係数は、37%と高くないが、相関性が認められる。一軸圧縮強度は、供試体の作製方法、とくにモールドへの試料の充填方法としてタッピング（モールドに試料を入れて固定台の上に打ちつける）の方法が若干、ばらついたこと等の影響を受けたと考えられる。これらの試験結果も考慮に入れて、標準条件（A の条件）による施工が行われたが、今後、土質条件等によっては施工速度増大の可能性もあることが示唆された。

3.4.6 まとめ

塩酸反応熱法によるセメント含有量試験方法を、中層混合処理工法（パワーブレンダー工法）による軟弱粘性土地盤の改良工事に適用した。

- 1) 本現場の試験には、塩酸添加、攪拌、最高温度表示などを半自動化した塩酸反応熱試験装置を用いた。野外でコンパクトに試験を遂行するのに、作業性が良く、有効であった。
- 2) 野外で塩酸や試料の温度が変化しやすい環境下での試験であったが、実用に供することが可能な検量線を作成でき、施工直後の試料土のセメント含有量を迅速に測定することができた。
- 3) 現場の改良深度は約 10m で、土質は軟弱で粘着性、付着性の強い粘性土が主体とされていた。攪拌機の水平移動速度（施工能力）を変えた試験施工を行い、深度別のセメント含有量、一軸圧縮強度などを測定した。標準的な施工条件（ $50\text{m}^3/\text{時}$ 、平均水平移動速度 $8.3\text{cm}/\text{分}$ ）で良好な混合精度（変動係数 6%）が達成されること、水平移動速度を 20%アップの（ $60\text{m}^3/\text{時}$ 、 $10\text{cm}/\text{分}$ ）にすると、混合精度（上

層と下層のセメント含有量の差) が若干低下することが認められた。また、セメント含有量と固化強度の間には、高くないが、相関性が認められた。

3.5 塩酸反応熱試験法の適用（その2：石炭灰盛土材の製造試験工事）

3.5.1 目的

石炭火力は日本におけるベースロード電源の重要な柱の一つとして位置付けられている。石炭火力発電に伴って発生する石炭灰は、図 3-5-1 に示すように平成 11 年度から増加傾向となり、近年では 1,200 万トン/年を超えている⁴⁵⁾。また、石炭灰の有効利用率は、近年高くなっており、図 3-5-2 に示すように、セメント分野が約 840 万トン/年と多く、土木分野では約 190 万トン/年が使用されている⁴⁵⁾。石炭灰を建設分野で大量かつ環境安全性を確保して有効活用する技術は、数多く研究され^{例えば 46~55)}、多くの施工実績がある^{56,57)}。筆者ら⁵⁸⁾は、石炭灰にセメント・不溶化材・水を添加混合し、締固め施工を行う盛土材（以下、“石炭灰改良材”という）の製造する技術を開発した。

石炭灰改良材は土材料として利用されることから、大量かつ低コストでの製造が求

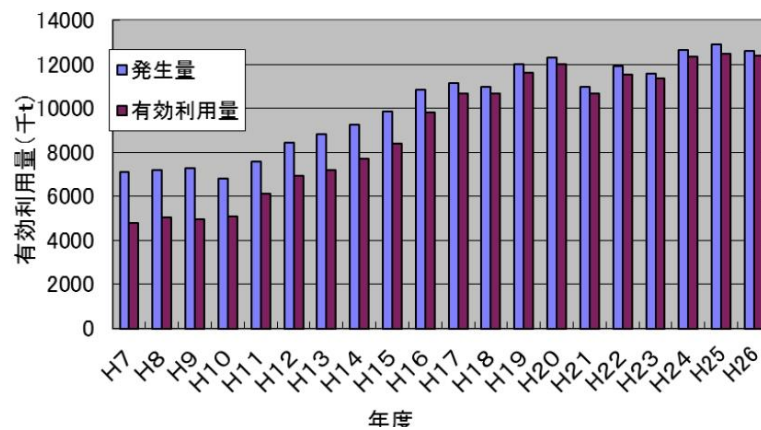


図 3-5-1 石炭灰の発生量と有効利用量の推移⁴⁵⁾

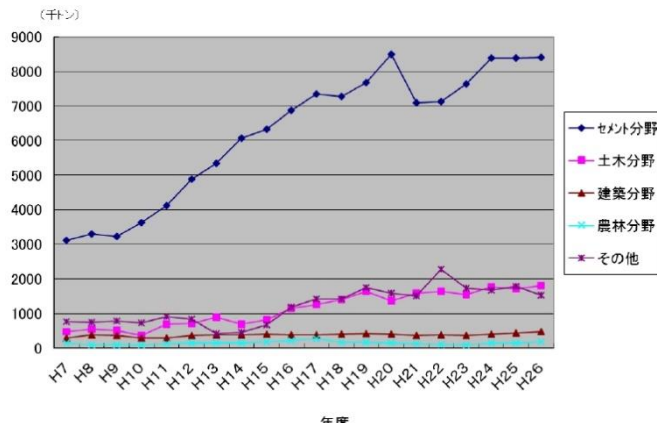


図 3-5-2 石炭灰の分野別有効利用量の推移⁴⁵⁾

められる。汎用性があり、大量施工が可能なミキサーとしては、二軸パドルミキサーによるバッチャープラントが一般的である。石炭灰を活用した材料は、長期的な環境安全性（重金属等の溶出防止）を確保することが重要で、そのためには、セメントや助材が出来るだけ均一に混合されている必要がある。石炭灰改良材のように「紛体材料に比較的少量の加水を行う」材料を二軸パドルミキサーで混合する場合の混合特性については、これまでほとんど研究されておらず、最適な混合方法が明らかになっていない。

そこで、石炭灰改良材を製造する際の混合精度を塩酸反応熱法によって調査し、混合施工条件の最適化をはかることを目的として、3.5節の研究を行った。

3.5.2 石炭灰改良材

石炭灰改良材は、図 3-5-3 に示すような方法で製造し利用される。製造プラントを写真 3-5-1、ダンプトラックによる運搬・荷卸し状況を写真 3-5-2、転圧状況を写真 3-5-3

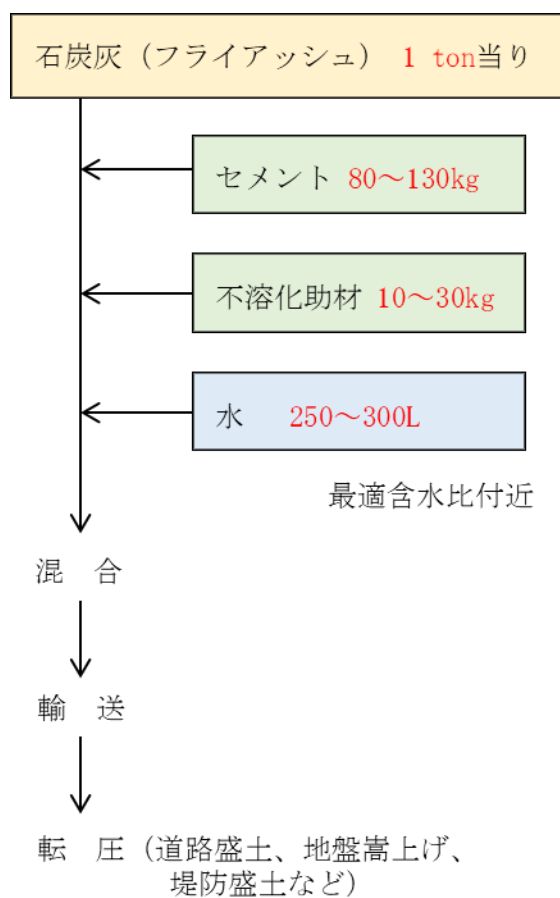


図 3-5-3 石炭灰改良材の製造・利用の流れ



写真 3-5-1 石炭灰改良材プラント



写真 3-5-2 石炭灰改良材の運搬



写真 3-5-3 石炭灰改良材の転圧

に示す。石炭灰改良材は、図 3-5-3 に示すように、石炭灰 1 トン（乾燥質量）当り、セメントと助材（不溶化材）と比較的少量の水（最適含水比付近になるように添加する）を混合した材料で、道路盛土、地盤嵩上げ、堤防盛土などに適用可能な材料である。

3.5.3 使用材料と配合

試験に使用した石炭灰は、JIS フライアッシュ 2 号として市販されている乾灰である。その性状を表 3-5-1 に示す。不溶化材は、石炭灰から少量溶出する可能性がある砒素、フッ素、セレンなどの重金属等の溶出を防止するための添加材で、カルシウム系の材料である。また、セメントとしては高炉セメント B 種（太平洋セメント製）を用いた。添加水には水道水を用いた。

試験における材料配合は、小型ミキサー試験、大型ミキサー試験ともに共通で表 3-5-2 に示す通りとした。同表におけるセメント添加量は設計固化強度を達成するように、不溶化材添加量は溶出量が土壌環境基準をクリアするように、また水量は、締固め試験に基づく最適含水比 23%になるように、それぞれ決定された。

表 3-5-1 使用した石炭灰の性状⁵⁸⁾

種 類	JIS フライアッシュ 2 号
粒子密度	2.33g/cm ³
強熱減量	2.3%
粒 度	< 75 μ m 99.6%, < 5 μ m 21.8%
pH*	11.1
EC*	85.2mS/m

*灰：水＝1：5 の懸濁液で測定

表 3-5-2 試験の配合
(乾灰 1000kg 当り, kg)

石炭灰（乾灰）	1,000
高炉セメント B 種	100
不溶化材	20
水	258

3.5.4 試験方法

小型ミキサー試験および大型ミキサー試験は、いずれも基本的な流れは同じである。ミキサー試験の流れを図-3-5-4 に示す。小型ミキサー試験では、石炭灰を乾灰として 100kg 使用した。まず「灰+水」の混合によって含水比 13%程度の加湿灰を製造した。この含水比は石炭火力発電所から加湿灰として搬出されるとき含水比の事例に合わ

せたものである。また、セメント混合試験では、塩酸反応熱法によるセメント含有量分析を単純化するため、助材（不溶化材）は添加せずに試験した。灰、セメント、助材は、いずれも類似の粒度の粉体であることから、灰とセメントの混合が良好にできれば、助材の混合も良好になるであろうと考え、助材抜きで試験した。石炭灰改良材は、石炭灰（加湿灰）にセメント等を添加して空練り（水を添加する前のパサパサ状態の物質を混

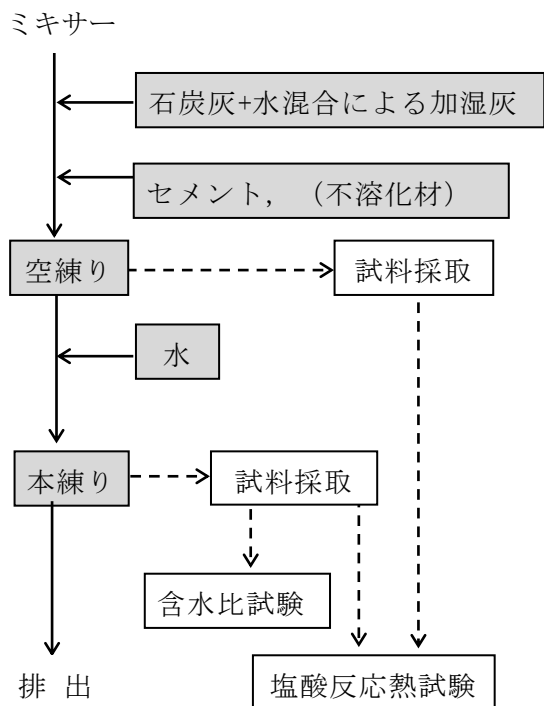


図 3-5-4 ミキサー試験のフロー

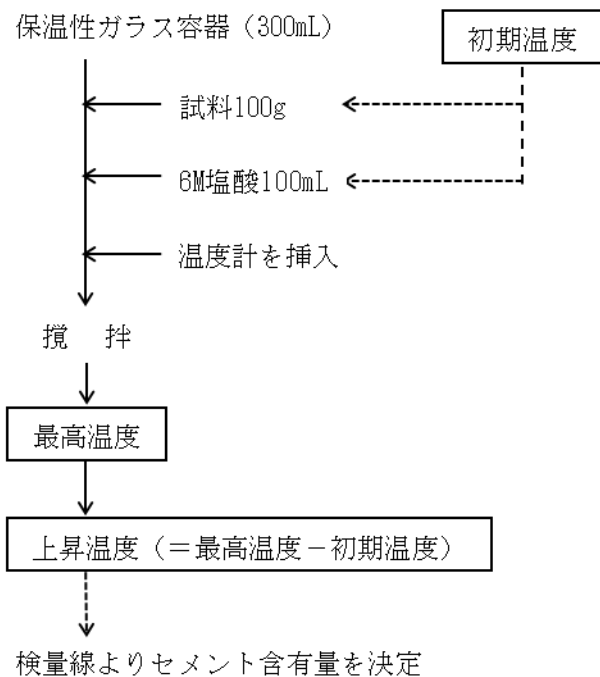


図 3-5-5 塩酸反応熱法

表 3-5-3 各ミキサー試験の位置づけと調査項目

試験ステップ	位置づけ	調査項目
(1) 小型ミキサー試験	混合精度の要因および最適条件の調査	<ul style="list-style-type: none"> 含水比のばらつき セメント含有量のばらつき 全混合時間、空練時間の影響
(2) 大型ミキサー試験	小型ミキサー試験の成果の実機検証	<ul style="list-style-type: none"> 含水比のばらつき セメント含有量のばらつき ダマの生成量、セメント含有量 固化強度および溶出特性

合すること)を行ったのち、所定量の水を添加して本練りを行うことによって製造される。空練り段階および本練り段階において、それぞれ混合時間を区切ってミキサー内から試料を採取し、含水比測定および塩酸反応熱法によるセメント含有量測定を行い、混合精度を調査した。セメント含有量は、図 3-5-5 に示す塩酸反応熱法によって測定した。

本研究における試験の概要を表 3-5-3 に示す。まず、小型ミキサー試験では、各混合時間が混合精度に及ぼす影響を調査した。次に、大型二軸パドルミキサー（実機）による検証試験を行った。

3.5.5 小型ミキサー試験

(1) 小型二軸パドルミキサーの仕様

試験に用いた小型二軸パドルミキサーの外観を写真 3-5-4、ミキサー内部を写真 3-5-5 に示す。また、同ミキサーの仕様を表-3-5-4 に示す。2本の回転軸にそれぞれ4本のパドルが装着され、回転速度 31.5rpm、公称容量 0.06m³ のである。排出口は底部に設けられている。

(2) 試料採取位置

ミキサー試験において、ミキサー内から計 15 個（約 150g/個）の試料を採取した。



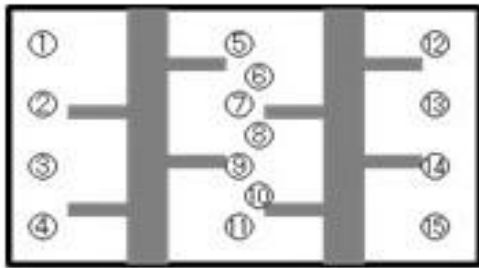
写真 3-5-4 小型ミキサー全景



写真 3-5-5 同上の内部

表 3-5-4 小型ミキサーの仕様⁵⁸⁾

高さ	本体部分 750mm (ホッパー, 脚を除く)
幅	本体部分 1,680mm (足場を除く)
奥行	本体部分 950mm
排出口	160mm×370mm
パドル	4本/軸, 回転半径 290mm
回転数	31.5rpm (50Hz)
公称容量	0.06m ³
動力	3.7kW モーター1基, 4P
電源	AC.100V



⑥,⑧,⑩は深部、他は表層

図 3-5-6 小型・大型ミキサー内の試料採取位置（ミキサーを上から見た状態図）



写真 3-5-6 小型ミキサー内の試料採取状況



写真 3-5-7 大型ミキサー内の試料採取状況

試料の採取位置を図 3-5-6 に示す。小型ミキサー、大型ミキサーともに二軸パドルミキサーであり、基本形が同じであることから、試料採取位置をいずれも図 3-5-6 のように設定した。試料採取状況を写真 3-5-6、写真 3-5-7 に示す。

(3) 加湿灰の製造

加湿灰（目標含水比 13%）の製造は、以下のようにして行った。小型ミキサーに乾灰 100kg を投入し、粉塵を避けるため蓋をしてミキサーのパドルを回転させながら、蓋の開口部から水 13L を添加した。その際の加水を急速（15 秒で加水）と緩速（60 秒で加水）の 2 つの条件で行った。水の添加には、18L ペール缶の底に φ5~10mm の孔を多数開けて流出時間を調整した容器を用いた。加水終了後さらにパドル回転を続け、60 秒、120

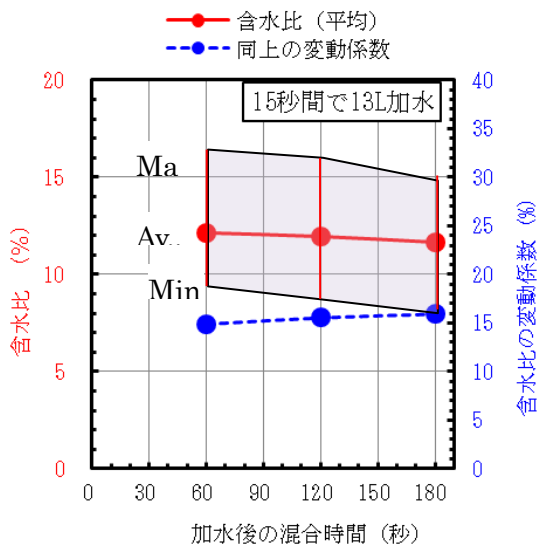


図 3-5-7 加湿灰製造における含水比分布（急速加水の場合）⁵⁸⁾

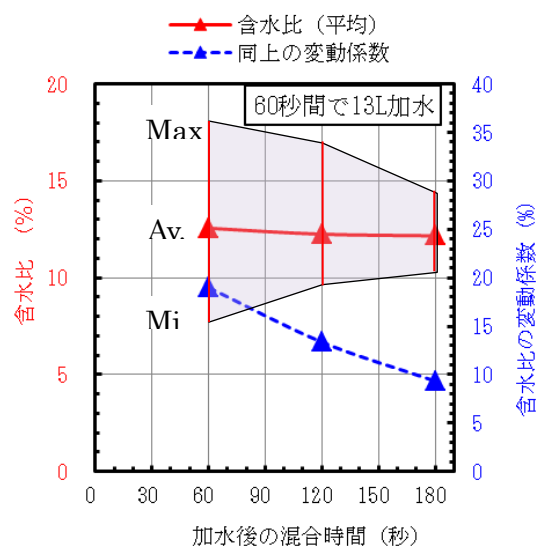


図 3-5-8 加湿灰製造における含水比分布（緩速加水の場合）⁵⁸⁾

秒, 180 秒後に回転を止めて, 図 3-5-6 に示すミキサー内位置から計 15 個の試料 (1 個あたり平均 80g) 採取し, それぞれの含水比を測定した。

急速加水の結果を図 3-5-7, 緩速加水の結果を図 3-5-8 に示す。いずれの場合も平均含水比は 12%前後で一定であったが, 含水比のバラツキには差が見られた。図 3-5-7 の急速加水の場合, 混合時間を増しても含水比のバラツキ (変動係数) は, 減少せず, 14~16%と高い値を維持した。一方, 図 3-5-8 の緩速加水の場合, 混合時間とともに変動係数は減少し 180 秒後には 9%になった。これらの結果から, 攪拌しながらの加水であっても, 灰が微細粒子で吸水性に富むため, 攪拌効果による造粒作用により, ダマが生成し, その後のパドル回転を行っても, ダマの破碎と水分の分散がそれほど進まないと考えられる。緩速加水では, 急速加水に比べてダマの生成が少なく, 混合時間に伴って水分が分散 (均等化) しやすいと考えられる。以下の試験では, 緩速加水によって加湿灰を製造した。

(4) 試験ケース

小型ミキサー試験のケースを表 3-5-5 に示す。図 3-5-4 の「空練り→水投入→本練り」の一連の工程の中で, それぞれの工程の時間 (秒) および試料採取の条件を変えた。

試験 No.1 では, 加湿灰とセメントの空練りを 30 秒行い, パドル回転を続けながら 30 秒間で加水し, 本練りを最大 120 秒間行う中で, 30, 60, 90, 120 秒でパドル回転を止め試料 (15 ヶ所×160g) を採取した。No.2 では, 空練りを最大 120 秒間行う中で, 30, 60, 90, 120 秒においてもパドル回転を止め試料を採取した。No.2 では, 加水, 本練りは行わず, 空練りの効果を調査した。また, No.3 では, No.2 の結果から最適と判断された空練り時間 90 秒を採用し, No.1 と同様に加水・本練りを行った。

表 3-5-5 小型ミキサー試験のケース (各工程時間(秒)と試料採取 (●印))

試験 No.	空 練 り				加水	本 練 り			
	30	60	90	120		30	60	90	120
1	30	—	—	—	30	30 ●	60 ●	90 ●	120 ●
2	30 ●	60 ●	90 ●	120 ●	—	—	—	—	—
3	—	—	90	—	30	30 ●	60 ●	90 ●	120 ●

(5) 結果と考察

試料中のセメント含有量を測定するために作成した検量線の例を図 3-5-9 に示す。検量線の各プロットは、「石炭灰+セメント+水」の合計を常に 100g とする中で、水量は灰に対して 25.8%とし、セメント量をそれぞれ 0, 6, 8, 10g とした試料である。上昇温度とセメント含有量の間には直線関係が成立した。同図より、セメント 10g による温度上昇は、48°C (セメント 10g の時の温度上昇) から 8°C (セメント 0g の時の温度上昇) を差し引いた 40°C であり、セメント 1g 当たり約 4°C の上昇温度ということになる。この値は、試験容器の断熱性、外気温度 (熱量ロスに関係する)、攪拌条件などに影響されるので、絶対的な値ではないが、これらの条件がほぼ一定である時は、検量線として利用可能である。また、図 3-5-9 の X 軸切片の値は、セメント量 0g、すなわち「石炭灰+水」の温度上昇を意味し、8°C であった。この値は、灰種によって変動するので、灰種が変わるごとに検量線を作成する必要がある。しかし、この試験では、必要な灰量を一括購入して使用したので、検量線の作成はクロスチェックを 1 回/日行う程度で済んだ。

小型ミキサー試験 No.1 (条件は表 3-5-5 に示した) のセメント含有量の結果を図 3-5-10、また含水比の結果を図 3-5-11 に示す。いずれも試料数 15 個の値のバラツキ範囲と変動係数を示している。図 3-5-10 では、空練り 30 秒後の本練り時間を 30 秒から最大 120 秒まで増大させても、セメント含有量のバラツキ幅はそれほど減少せず、変動係数は混合時間 30 秒, 60 秒で約 4%, 混合時間 90 秒, 120 秒で 3~3.5% となり平衡状態になった。また、図 3-5-11 の含水比においても、バラツキ幅は本練りの混合時間の増大

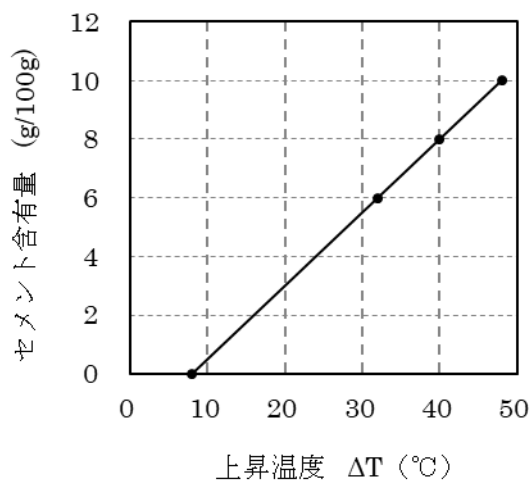


図 3-5-9 塩酸反応熱試験の検量線の例 ⁵⁸⁾

によってほとんど低減せず，変動係数は 3~4.5%の範囲を推移し，本練り時間の効果は認められなかった。なお，図 3-5-10 においてセメント含有量が平均 7.2~7.7g/100g となったが，これは表 3-5-2 に示した配合から計算されるセメント含有量，すなわち $10 \div (100+10+25.3) \times 100 = 7.4$ (g/100g) とほぼ一致している。

試験 No.2 の結果を図 3-5-12 に示す。試験 No.2 では，空練り時間の影響を調査した。セメント含有量のバラツキは，空練り時間が 30 秒から 60 秒, 90 秒に増すと大幅に低減した。変動係数は，30 秒で 16%，60 秒で 7%，90 秒で 3.7%となり，120 秒ではほぼ

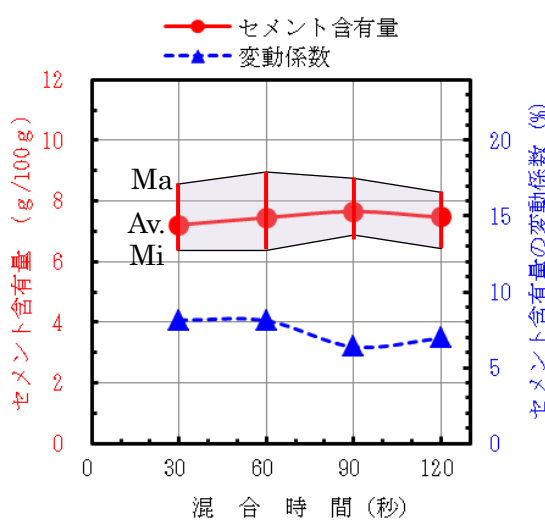


図 3-5-10 空練り 30 秒後の本練り時間とセメント量分布の関係 (No.1) ⁵⁸⁾

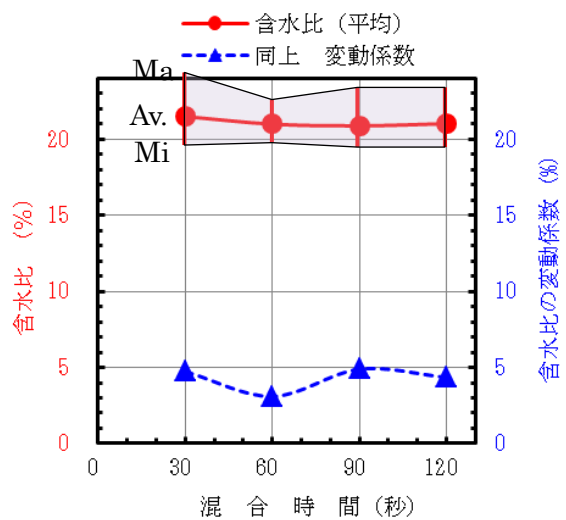


図 3-5-11 空練り 30 秒後の本練り時間と含水比分布の関係 (No.1) ⁵⁸⁾

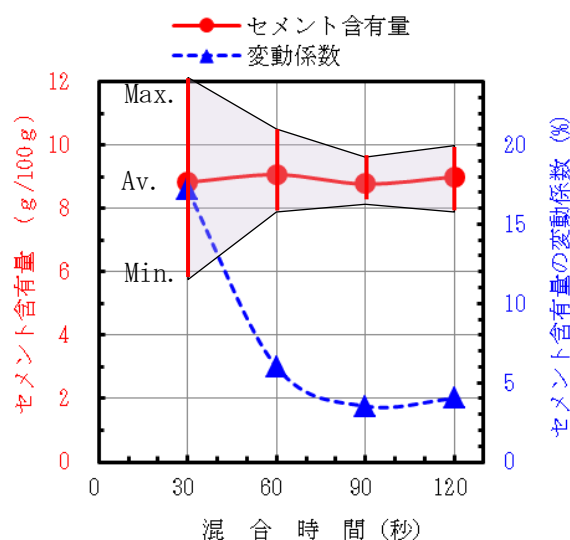


図-3-5-12 空練り時間とセメント含有量分布の関係 (No.2) ⁵⁸⁾

平衡に達した。このように、空練り工程では、混合精度に対する混合時間の効果が非常に高いことが明らかになった。そして、空練りを良好に行うためには、小型ミキサーの場合、90 秒間の空練り時間が適切であった。

つぎに、試験 No.3 のセメント含有量の結果を図 3-5-13、含水比の結果を図 3-5-14 に示す。図 3-5-13 より、90 秒間の空練りと加水を行った後に、本練り時間を 30 秒間とした場合、セメント含有量のばらつき範囲は $\pm 0.3\text{g}/100\text{g}$ 以下で、変動係数は約 1%であった。そして、本練り時間を 30 秒以上かけても、セメント含有量のバラツキはほとんど変化しなかった。すなわち、30 秒間の本練り時間で混合精度が飽和に達したことにな

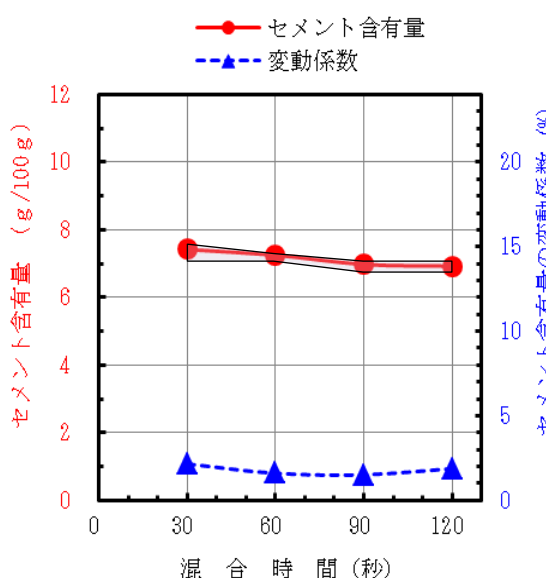


図 3-5-13 空練り 90 秒後の本練り時間とセメント含有量分布の関係 (No.3) ⁵⁸⁾

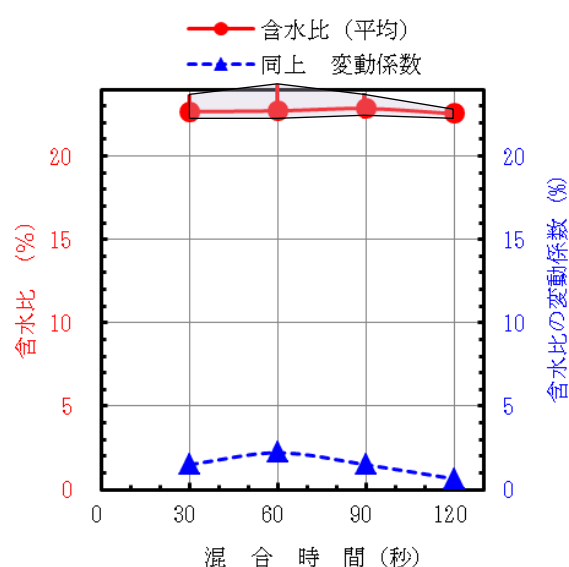


図 3-5-14 空練り 90 秒後の本練り時間と含水比分布の関係 (No.3) ⁵⁸⁾



写真 3-5-8 試験 No.3 の終了後に 5mm 篩に残留したダマの状況 ⁵⁸⁾

表 3-5-6 試験 No.3 の試験終了時のダマの分析結果 ⁵⁸⁾

試験項目	試料数	平均値	最小値	最大値	変動係数
セメント含有量 (g/100g)	6	7.0	6.8	7.1	1.5 %
含水比 (%)	6	25.0	24.4	26.5	1.8 %

る。また、図 3-5-14 に示す含水比の変動係数も本練り時間 30 秒で約 1%となり、ほぼ平衡に達した。なお、図 3-5-13 でセメント含有量の平均値が混合時間（本練り）とともに少し減少したのは、時間経過によってセメントの水和反応が進行し、その分の塩酸反応熱が減少したためと考えられる。しかし、このことは、セメント混合精度の評価を行う場合には支障にならないと考える。また、試験 No.3 の終了（本練り 120 秒）後に、ミキサー内の試料をすべて取り出し、5mm 篩で篩ってダマの生成量を調査した（写真 3-5-8）。ダマの生成量は、全体の約 4%であった。そして、ダマを 100g ずつ 6 個採取して、それぞれのセメント含有量を測定し、またそれぞれの含水比を測定した。結果を表 3-5-6 に示す。ダマのセメント含有量、含水比ともに、図 3-5-13、図 3-5-14 に示したダマ以外を主体とする値とほぼ一致し、かつ変動係数も 1%台と小さかった。

試験 No.3 の結果（図 3-5-13）は、試験 No.1（図 3-5-10）に対比させると、違いが歴然としている。そこで、試験 No.1～3 の特徴を明確にするため、これらを 1 つの図にまとめたものを図 3-5-15 に示す。同図の横軸は、空練りから本練りに至る過程の混合時間の合計を示し、縦軸は、セメント含有量の変動係数を示す。例えば、試験 No.1 では、空練り 90 秒時のセメント含有量は測定していないが、試験 No.2 で空練り 30 秒時のセメント含有量の変動係数が分かっているので、試験 No.1 と試験 No.2 の曲線を接合することができる。90 秒間の空練りを行った試験 No.3 についても、同様に試験 No.2 の曲線と接合することができる。この図より、試験 No.2 では、混合不十分な段階で「加

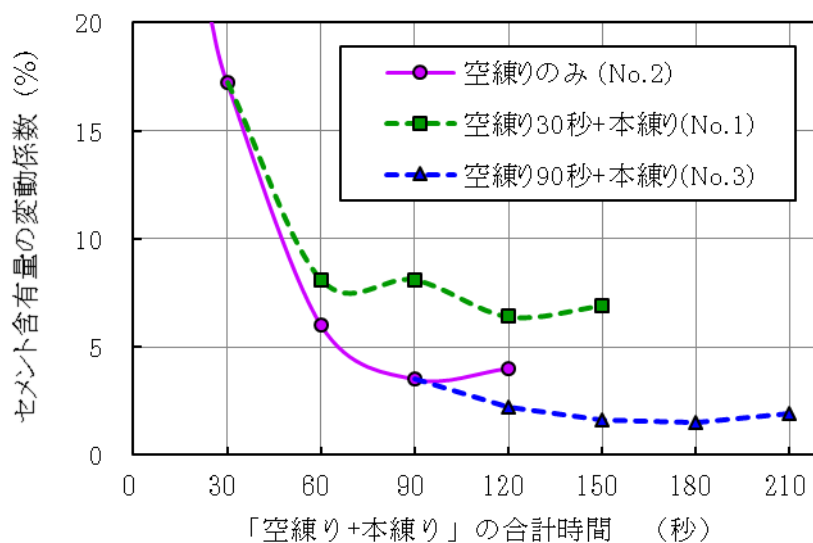


図 3-5-15 空練りと本練りの合計時間とセメント含有量の変動係数の関係

水、本練り」の工程に移行したこと、本練り時間を長くしても試験 No.3 の変動係数まで到達困難なことが明確である。一方、試験 No.3 は、90 秒間の空練りでかなり良く混合されたのちに「加水、本練り」工程に移行したこと、30 秒間の本練りで良好な混合状態に達したことが明確である。空練り時間、すなわち加水するまでの時間を一定程度確保することが重要である。そして、石炭灰改良材の製造にあたっては、サイクルタイムが施工速度、経済性に大きく影響することから、重要な課題である「空練り+本練り」の合計時間の短縮に向けた指針を得たことは、大きな成果と考える。

そこで、図 3-5-15 のような結果になった原因、メカニズムについて考察を行った。結果を図 3-5-16 に示す。空練り時間が短く、混合不良な段階で加水を行うと、水によってセメント粒子の付着力が増大し、本練りに時間をかけてもセメント粒子の分散がそれ以上進行し難くなり、混合不良な状態が維持される。その結果、混合精度の低い石炭灰改良材が出来る。一方、空練り時間を長くとり、混合良好な段階になってから加水を行うと、水によるセメント粒子の付着力増大の前に混合良好な状態になっているので、本練りは水分の均等化が主体に行われるだけで、結果として混合精度の良い石炭灰改良材が出来る。水分の均等化は、セメントの粒子の分散よりも、短時間で達成出来るこ

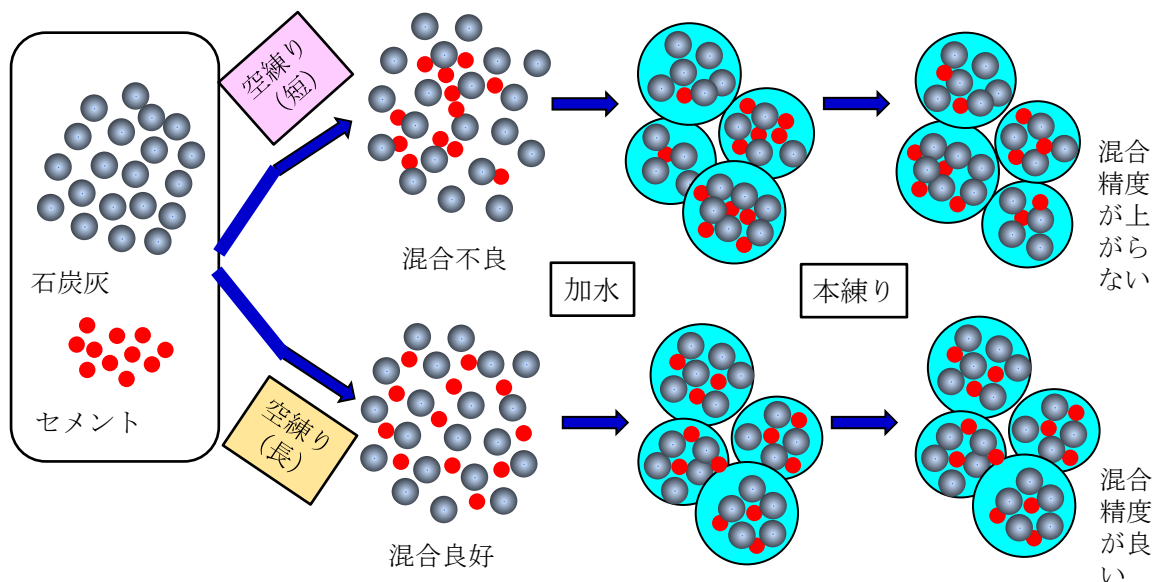


図-3-5-16 空練り時間がセメント混合精度に影響するメカニズム

とが示唆される。このようにして、空練りに時間をかければ、セメント含有量の変動係数および含水比の変動係数が本練り 30 秒間程度で良好な結果になると考えられる。

3.5.6 大型ミキサー試験

(1) 大型二軸パドルミキサーの仕様

試験に用いた大型二軸パドルミキサーと付帯設備の全景を写真 3-5-9、またミキサー内部を写真 3-5-10 に示す。大型ミキサーの仕様は、表-3-5-7 のとおりである。二軸にそれぞれ 8 本のパドルが装着され、パドル長（回転半径）は 609mm、回転速度は 31rpm、ミキサー容量は 3.0m³ である。また、底部中央に設けられた排出口は、最大開放時に幅



写真 3-5-9 大型ミキサー試験状況



写真 3-5-10 大型ミキサー内部

表 3-5-7 大型ミキサーの仕様⁵⁸⁾

項目	単位	数値	備考
公称容量	m ³	3.0	
動力	kW	75	1基
重量	kg	11,800	
攪拌軸	本	2	水平方向
パドル	本/軸	8	
回転速度	r.p.m.	31	50Hz
パドル長	mm	609	先端曲面の中間長
全長	mm	2,610	モーター部を除く
全幅	mm	2,474	
全高	mm	1,425	モーター部を除く

370mm×長 1,800mm である。パドル回転の周速度は、小型ミキサーでは $29(\text{cm}) \times 2 \times \pi \times 31.5(\text{rpm}) \div 100 \div 60 = 0.96(\text{m/s})$ であるのに対し、大型ミキサーでは $60.9(\text{cm}) \times 2 \times \pi \times 31(\text{rpm}) \div 100 \div 60 = 1.98(\text{m/s})$ と 2 倍以上の速度である。

(2) 試験方法

大型ミキサー試験の方法を図 3-5-17 に示す。試験プラント全景を写真 3-5-9 に示したように、大型ミキサーを専用架台の上に乗せ、ミキサー内の試料は、排出口を開放した際に、直下に設置した 3 個のフレコン袋に收容されるようにした。ミキサーへの石炭灰の供給はミキサー後方のサイロ（計量器付き）から行った。また、セメントと不溶化材は作業足場（ミキサー手前）上から人力でミキサーに投入した。水は計量タンクに貯留しポンプで供給した。1 バッチ当たりの各材料の量は、図 3-5-17 示したとおりである。合計 $2,500+250+50+644=3,444$ (kg) という多量の混合が可能なことを事前に確認しておいた。材料投入と空練りを合せて 50 秒、水添加を 40 秒、本練りを 40 秒とし、ここまでパドルは回転を継続したままとした。大型ミキサーの攪拌翼の周速が小型ミキサ

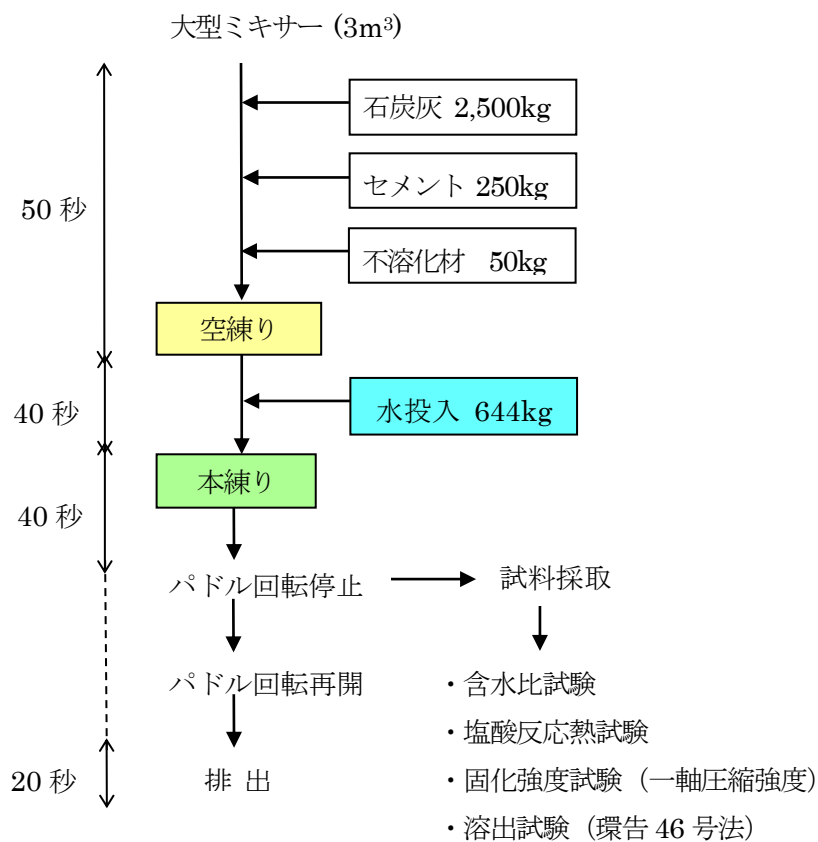


図 3-5-17 大型ミキサー試験の方法

一の 2 倍以上あり、攪拌力が強いことから、空練り時間は 50 秒とした。本混合後の試料採取 (15 ヶ所) を行ったのち、再びパドルを回転させ、石炭灰改良材の排出を行った。排出時間は約 20 秒であった。試料採取を除くサイクルタイムは 150 秒とした。

(3) 結果と考察

大型ミキサーによって製造した石炭灰改良材のセメント含有量および含水比の試験結果を表 3-5-8 と表 3-5-9 に示す。表 3-5-8 は、本混合終了時にミキサー内から 15 ヶ所で採取した試料の結果、また右側の表は、ミキサーから排出した試料を計 30kg 採取し 5mm 篩残留試料 (ダマ) の結果である。ミキサー内試料のセメント含有量の変動係数は 1.7%、また含水比の変動係数は 2.7% であった。これらは、前述の小型ミキサー試験の結果 (図 3-5-13, 図 3-5-14) と同様に低いものであった。また、表 3-5-9 に示すダマ

表 3-5-8 ミキサー内試料のセメント含有量と含水比⁵⁸⁾

試料 No.	セメント量 (g/100g)	含水比 (%)
1-1	7.5	21.1
1-2	7.5	20.4
1-3	7.2	20.7
1-4	7.3	22.2
1-5	7.2	20.8
1-6	7.3	21.1
1-7	7.2	20.6
1-8	7.5	20.3
1-9	7.2	21.1
1-10	7.3	20.7
1-11	7.2	21.7
1-12	7.2	21.8
1-13	7.2	21.1
1-14	7.5	20.6
1-15	7.2	21.9
平均値	7.3	21.1
標準偏差	0.13	0.56
変動係数 (%)	1.7	2.7

表 3-5-9 ダマ試料のセメント含有量と含水比⁵⁸⁾

試料 No.	セメント量 (g/100g)	含水比 (%)
ダマ 2-1	7.0	23.3
ダマ 2-2	7.0	23.1
ダマ 2-3	7.1	23.2
ダマ 2-4	7.2	23.6
ダマ 2-5	7.3	23.6
ダマ 2-6	7.2	23.4
平均値	7.1	23.4
標準偏差	0.11	0.19
変動係数 (%)	1.5	0.8

試料のセメント含有量および含水比の変動係数は、ミキサー内試料の変動係数と近似していた。

図 3-5-18 にミキサー内試料とダマ試料のセメント含有量のヒストグラムと正規分布曲線を示す。ダマ試料のセメント含有量は、ミキサー内試料に比べて、平均で 0.2g/100g

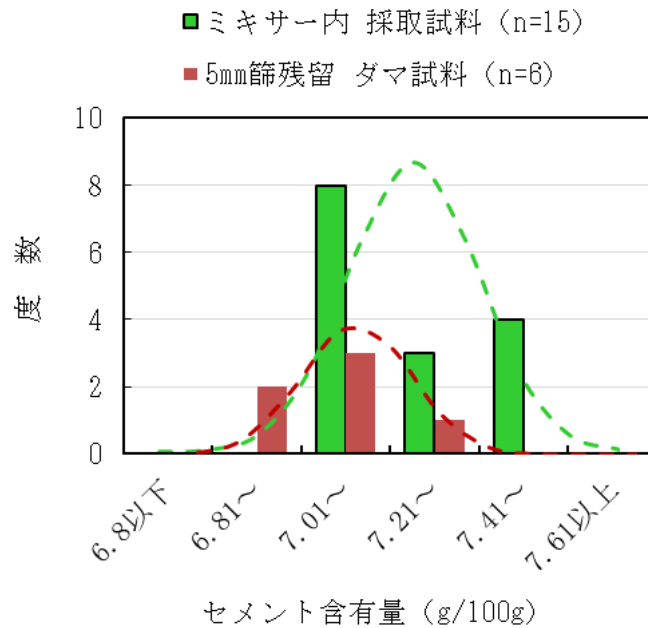


図 3-5-18 セメント含有量のヒストグラム

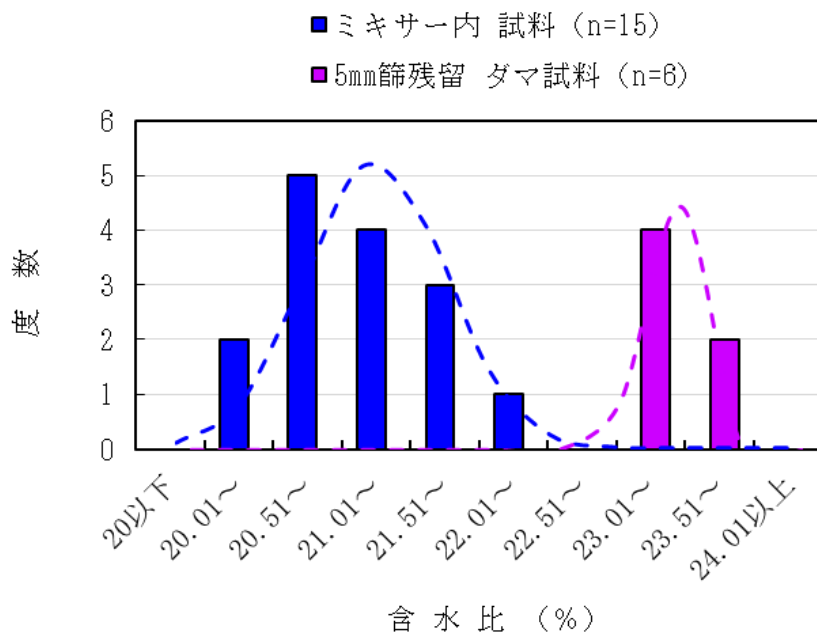


図 3-5-19 含水比のヒストグラム

ほど少ない。また、図 3-5-19 にミキサー内試料とダマ試料の含水比のヒストグラムと正規分布曲線を示す。ダマ試料の含水比の平均は、ミキサー内試料に比べて 2.3%高い。図 3-5-20 に含水比とセメント含有量の関係を示す。両者の間に弱い相関関係が認められる。セメント含有量は、湿潤試料 100g に含まれるセメント量で表示しているため、含水比がやや高い分、セメント含有量が低くなったと考えられる。しかし、灰乾燥質量当りのセメント含有量は、ミキサー内試料とダマ試料でほとんど差がなかった。

表 3-5-10 に、ミキサー内試料を突き固めて密閉養生し、28 日後の湿潤密度と一軸圧

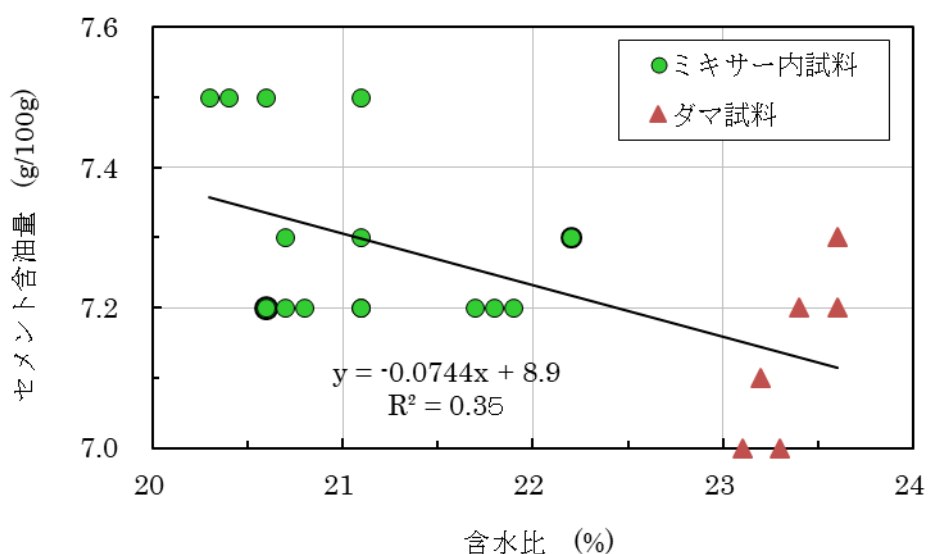


図 3-5-20 含水比とセメント含有量の関係

表 3-5-10 ミキサー内試料の突き固め・養生による一軸圧縮強度(28日)⁵⁸⁾

試料 No.	湿潤密度 (g/cm ³)	圧縮強度 28日 (N/mm ²)
3-1	1.59	2.29
3-2	1.63	2.50
3-3	1.61	2.35
3-4	1.64	2.68
平均値	1.62	2.46
標準偏差	0.02	0.15
変動係数 (%)	1.2	6.1

表 3-5-11 試料の溶出試験結果⁵⁸⁾

項目	単位	元の石炭灰	石炭灰改良材	土壤環境基準値
ヒ素	mg/L	0.1	ND	0.01
六価クロム	〃	0.1	ND	0.05
セレン	〃	ND	ND	0.01
フッ素	〃	0.3	0.1	0.8
ホウ素	〃	2.4	ND	1
pH	—	11.2	12.6	—
EC	mS/m	74.1	296	—

縮強を測定した結果を示す。なお、突き固めは、 $\phi 50\text{mm} \times h100\text{mm}$ モールドに 1.25kg のランマーを 30cm 高さから 3 層、各 15 回落下させる方法で行った。この方法は、筆者らが開発した簡易試験機によるもので JIS 法に比較的近い締固め度になる。平均密度は 1.62g/cm^3 、平均強度は 2.46N/mm^2 であった。強度の変動係数がやや大きかったのは、供試体作製時の締固め密度のバラツキが大きかったためと考えられる。

表 3-5-11 は、一軸圧縮強度を測定後の試料 No.3-1 を用いて、環境庁告示 46 号法による溶出試験を行った結果を示す。石炭灰改良材では、ヒ素、六価クロム、セレン、フッ素、ホウ素のいずれも基準値を十分に満足する結果となった。

3.5.7 まとめ

“石炭灰改良材”は、石炭灰を環境安全性の高い土木材料として資源化し、大量利用するもので、石炭灰にセメントと不溶化材と比較的少量の水を混合して製造される。石炭灰改良材を大量（短いサイクルタイムで）かつ高品質で製造するために、二軸パドルミキサーによる混合条件の最適化をはかることを目的として、を塩酸反応熱法によるセメント含有量分析の手法を用いて調査した。結果を以下に要約する。

- 1) 塩酸反応熱法によるセメント含有量試験は、石炭灰改良材にも適用できた。同試験は、施工場所の近くで多試料を迅速に分析できるので、ミキサーの混合性能、混合施工の最適条件を調査するために極めて有効な手段となった。
- 2) 小型ミキサー試験において、空練り時間を短く（30 秒間）とした場合、加水後の本練り時間を長く（最大 120 秒間）してもセメント含有量の変動係数は 3.5%以下に下がらなかった。一方、空練り時間を長くする（90 秒間）ことによって、本練り時間が短くても（30 秒）、セメント含有量の変動係数は 1%程度まで下がる。空練り時間を長くすることが全体のサイクルタイムの短縮のために重要であることを明らかにした。また、そのメカニズムについて考察した。
- 3) 大型ミキサー試験を行い、空練りを重視した混合時間管理を行うことによって、約 3.4 トン/バッチをサイクルタイム 150 秒という高速施工で、高品質な石炭灰改良材を製造可能なことを実証した。石炭灰改良材は、セメント含有量の変動係数が 1%台で、目標の固化強度を上回る一軸圧縮強度が得られ、重金属等の溶出量が基準値を十分に下回るものであった。

3.6 結論

第 3 章では、改良土中のセメント・石灰含有量の塩酸反応熱試験方法の開発について述べた。神田が生コンクリート中のセメント含有量を測定する方法として開発した塩酸溶解熱法を、改良土の試験に適用しやすくなるように改良を加えた。主な改良点は、試料量を 100g と比較的少量にすること、使用する塩酸濃度を 6M(モル/リットル)と比較的低濃度にする、塩酸添加量を 100mL とすること、容器として保温性がある程度確保されている汎用の容器を用いること、などである。また、試料土の含水比の影響、セメント混合後の経過時間の影響についても調査し、大きく異なる場合には別途、検量線を作成することで対処する。

開発した塩酸反応熱法は、多数の現場で使われ、現場の施工管理、品質管理に役立っている。その中で、2つの事例を紹介した。1つ目は、軟弱粘性土地盤のセメント中層混合処理工事、2つ目は、石炭灰とセメント等を混合して造る石炭灰改良材の製造試験工事である。いずれも、現場で、簡易に、そして多数の試料を迅速に測定することができ、施工条件を決定するための貴重な裏付けデータを提供した。本試験は、現地の土で検量線を作成するので、あらゆる土質に対応可能である。また、特殊セメントなど、化学組成がよく分からない安定材に対しても、検量線を作成できれば、問題なく測定できる。安全性に関しては、希塩酸を用いるので、換気に留意することで問題はなく、これまで事故を起こしたことはない。

参考文献（第3章）

- 1) パワーブレンダー工法協会編：パワーブレンダー工法（中層混合処理工）技術資料，2018.
- 2) 三浦哲彦，古賀良治，西田耕一：有明粘土地盤に対する生石灰を用いた深層混合処理工法の適用，土と基礎，Vol.34, 4, pp.5-11, 1986.
- 3) Horpibulsk, S., Rchan, R., Suddepong, A. and Chinkulkijniwat, A.: Strength development in cement admixed Bangkok clay: Laboratory and field investigation, Soils and Foundations, Vol.51, No.2, pp.239-251, 2011.
- 4) 榎並昭，日比野信一，高橋守男，秋谷健二：住宅用小型混合処理機械を用いた基礎地盤の改良，Vol.34, 6, pp.37-43, 1986.
- 5) 内田恵之助，塩井幸武，橋本文男，龍岡文夫：東京湾横断道路におけるセメント改良固化土，土と基礎，Vol.41, 8, pp.23-28, 1993.
- 6) 三木博史，大河内保彦，牧野昌己，佐藤利行：機械攪拌による固化系地盤改良の新しい品質管理方法，地盤工学会誌，Vol.59, 6, pp.20-23, 2011.
- 7) 喜田大三，久保博，辻博和：公害汚泥の固化処理に関する研究(第1報)，セメント固化における混合指数の提案とその適用，大林組技術研究所報，No.11, pp.152-156, 1975.
- 8) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，pp.426-434, 2013.
- 9) 吉田信夫，一本英三郎，山根敬：施工機械と土質工学，7.基礎工—軟弱地盤処理，土と基礎，Vol.30, 2, pp.63-72, 1982.
- 10) 鈴木孝一，齋藤邦夫，原満生，佐藤篤哉，高倉功樹，古澤政夫，蓮香朋宏：複合相対攪拌翼を用いた深層混合処理工法の改良原理と適用事例，材料，Vol.59, 1, pp.32-37, 2010.
- 11) 原俊郎：水底汚染土対策のための原位置固化処理工法「CDM-SSC工法」，建設の施工企画，2007-9, pp.29-34, 2007.
- 12) 土田孝，藤崎治男，卷淵正治，新舎博，長坂勇二，彦坂周男：建設発生土を原料土とする軽量混合処理土の護岸工事への適用，土木学会論文集，No.644, VI-46, pp.13-23, 2000.
- 13) 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，技報堂，1985
- 14) 石川芳治，矢沢昭夫，矢島重美，井原邦明，富士代悟，安養寺信夫，高橋宏造：火砕流堆積土砂を用いたソイルセメントの性質及び施工法に関する現地試験，砂防学会誌，Vol.49, 2, pp.28-34, 1996.
- 15) 輪湖健雄，土田孝，松永康男，濱本晃一，岸田隆夫，深沢健，軽量混合処理土工法の港湾施設への適用，土木学会論文集，No.602, VI-40, 1998, 9, pp.35-52.
- 16) 土木研究所：流動化処理土利用技術マニュアル，2007.
- 17) 大森淑孝，松井淳，中村秀三：移動式大容量連続練りコンクリートプラントのPCCPへ

- の適用, コンクリート工学年次論文集, Vol.13, 1, pp.923-928, 1991.
- 18) 湯怡新, 宮崎良彦: セメント混合液濃度の固化強度と均一性評価, 土と基礎, Vol.49, 5, pp.4-6, 2001.
 - 19) 石井一, 永長久彦: セメント中のカルシウムおよびマグネシウムの迅速キレート滴定, セメント・コンクリート論文集, 1970, pp.108-110, 1970.
 - 20) 磯文夫, 石井一: 石灰石, ドロマイト, 石灰質肥料中のカルシウムおよびマグネシウムの迅速キレート滴定法, 石膏と石灰, 116, pp.30-32, 1972.
 - 21) 三瀬貞: ソイルセメント中のセメントの簡易分析法, 材料試験, Vol.7, 61, pp.19-23, 1958
 - 22) Ho, L. S., Nakarai, K., Ogawa, Y., Sasaki, T. and Morioka, M.: Effect of internal water content on carbonation progress in cement-treated sand and effect of carbonation on compressive strength, Cement and Concrete Composites, Vol.85, Issue 1, pp.9-21. 2018.
 - 23) 日本石灰協会: 石灰による土質安定処理工法, 山海堂, 1970
 - 24) 日本工業規格: JIS M 8850 石灰石分析方法
 - 25) 喜田大三, 中田礼嘉, 原田政太: 灰土(九州)の土質化学的諸性質と石灰安定処理, 粘土科学, Vol.9, 1-2, pp.28-40, 1969.
 - 26) 公開特許公報, 昭55-96454: コンクリート中のセメント量検出方法
 - 27) 公開特許公報, 昭63-214666: ソイル柱列の強度判定装置
 - 28) 公開特許公報, 特開平10-293058: セメント量の測定及び装置
 - 29) 河野良信: 蛍光X線装置による珪酸塩岩石および堆積物の定量化学分析, 地球環境研究, Vol.12, pp.85-97, 2010.
 - 30) 末次大輔, 原弘行: 海水環境下で劣化したセメント混合処理土の強度特性, 低平地研究, 24, pp.24-28, 2015.
 - 31) Hürkamp, K., Raab, T. and Völkel, J.: Two and three-dimensional quantification of lead contamination in alluvial soils of a historic mining area using field portable X-ray fluorescence (FPXRF) analysis, Geomorphology, Vol.110, Issue 1-2, pp.28-36, 2009.
 - 32) Manceau, A., Marcus, M. A. and Tamura, N.: Quantitative speciation of heavy metals in soils and sediments by synchrotron X-ray techniques, Reviews in Mineralogy and Geochemistry, Vol.49, pp.341-428, 2002.
 - 33) Villain, G., Thiery, M. and Platret, G.: Measurement methods of carbonation profiles in concrete: Thermogravimetry, chemical analysis and gammadensimetry, Cement and Concrete Composites, Vol.37, Issue 8, pp.1182-1192, 2007.
 - 34) 半井健一郎, 渡邊真樹, 石井宏和, 鯉淵清: 隣接ベントナイトへの炭酸塩の混合がセ

- メント系材料の溶脱に及ぼす影響, コンクリート工学論文集, Vol.32, 1, pp.713-718, 2010.
- 35) 神田衛: まだ固まらないコンクリートの水セメント比の測定方法, 土木学会論文集, 193, pp.115-123, 1971.
- 36) 喜田大三, 斉藤裕司: まだ固まらないコンクリートの品質判定法に関する研究(その1), 塩酸を利用した水セメント比測定法(塩酸溶解熱法)の検討, 大林組技術研究所報, No.15, pp.98-102, 1977.
- 37) 久保博, 川地武: ソイルセメントのセメント含有量試験への塩酸溶解熱法の適用, 大林組技術研究所報, No.46, pp.75-78, 1993.
- 38) 久保博, 福田孝雄: セメント類含有率測定装置の開発, 第21回道路会議論文集, B, pp.20-21, 1995.
- 39) 特許公報, 特許第3118553号: セメント類含有率測定装置
- 40) Kubo, H., Inazumi, S. and Miura, T.: Hydrochloric acid heat reaction method to measure cement contents in cement mixed soils, International Journal of GEOMATE, Dec., Vol.15, pp.177-183, 2018.
- 41) 手塚広明, 山内崇寛, 安井利彰: 新しい高圧噴射攪拌による地盤改良工法の開発, 地盤工学ジャーナル, Vol.8, 2, pp.179-196, 2013.
- 42) 橋本親典, 平井秀幸, 辻幸和, 田村真: 2軸強制練りミキサ内のコンクリート練混ぜ機構の可視化, コンクリート工学年次論文集, Vol.15, 1, pp.1037-1042, 1993.
- 43) 細川: 熱化学計算によるセメントの水和熱の定量的評価, セメント・コンクリート論文集, 2018.
- 44) 高山昌照: 有明粘土のこね返し強さについて, 農業土木学会誌, Vol.39, 7, pp.445-450, 1971.
- 45) 石炭エネルギーセンター: 石炭灰全国実態調査報告書(平成26年度実績), 2016.
- 46) 岩原廣彦, 佐々木勝教, 山中稔, 長谷川修一, 増田拓朗, 森邦夫: フライアッシュを主原料とした粒状材料の開発とその特性, 地盤工学ジャーナル, Vol.3, 1, pp.25-35, 2007.
- 47) 川真田桂, 東健一, 高橋邦夫, 小笹和夫: 石炭灰を利用した深層混合処理工法により改良された地盤の水平地盤反力係数の評価方法について, 土木学会第56回年次学術講演会, III-B, pp.398-399, 2001.
- 48) 鳥居和之, 川村満紀: 路盤・盛土材料としての締め固めたフライアッシュ, 土と基礎, Vol.37, 2, pp.67-72, 1989.
- 49) 喜田大三, 久保博, 漆原知則: アクアソイル工法に関する研究(その4), 石炭灰を利用したアクアソイルの性状, 大林組技術研究所報, 37, pp.16-20, 1988.
- 50) 久保博, 川地武, 須川廣一, 山田秀平: SG(自硬性安定液)工法に関する研究(その12), 石炭灰を利用したSGの開発, 大林組技術研究所報, 51, pp.87-92, 1995.
- 51) 黒木泰貴, 久保博, 今野宣二, 熊谷祐一: 石炭灰埋立地間隙水のドライアイスによる中

- 和対策, 大林組技術研究所報, 63, pp.107-112, 2001.
- 52) 甚野智子, 久保博: 石炭灰のほう素不溶化処理に関する研究, 大林組技術研究所報, 66, pp.89-94.
- 53) 甚野智子, 久保博, 田島孝敏: 石炭灰の酸洗浄によるほう素除去技術の開発, 洗浄液循環利用と処理システムの検討, 大林組技術研究所報, 67, pp.1-6, 2003.
- 54) 井出一貴, 佐藤祐司, 甚野智子, 久保博, 新村亮: 石炭灰の酸洗浄によるほう素除去技術の開発(その2)
- 55) 井出一貴, 甚野智子, 久保博, 佐藤祐司, 新村亮: 石炭灰の酸洗浄によるほう素除去技術の開発(その3), 抽出・直接脱水方式の実証試験, 大林組技術研究所報, 69, pp.1-6, 2005.
- 56) 石炭エネルギーセンター編: 石炭灰混合材料有効利用ガイドライン(高規格道路盛土編), 2016.
- 57) 石炭エネルギーセンター編: 港湾工事における石炭灰混合材料有効利用ガイドライン(改訂版), 2017.
- 58) 佐々木徹, 熊谷祐一, 田島孝敏, 井出一貴, 久保博, 大賀伸一, 岡田公彦: 石炭灰改良材製造のための二軸パドルミキサー適用試験, 日本材料学会第12回地盤改良シンポジウム論文集, pp.171-176, 2014.

第4章 総括

日本列島は、4つのプレートの移動・せめぎあいによって形成され、山地が多く、世界有数の火山国であり、地形・地盤が複雑で多様な土質が分布している。そして、沿岸部の平野に多くの都市が発達し、人口が集中している。沿岸部には、軟弱な粘性土層が多く分布し、内陸には火山灰土をはじめとする特殊土が分布する。このような状況のなかで、インフラ整備をはじめとするいろいろな建設工事が行われているが、地盤、土を制することからスタートする。

セメント・石灰による土質改良は、第二次大戦後、急速に発展した工法であるが、材料、施工機械の両面にわたる多くの研究開発により、めざましい発展を遂げた。本研究は、セメント・石灰による土質改良のメカニズムと品質管理技術に関するものである。全体を通して共通することは、現場の技術者が分かりやすい技術にすること、できるだけ簡易な手法を用いること、現場で使ってもらえる技術にすること、を目指した。

土質改良メカニズムに関しては、関東ロームなどの石灰反応性を評価するのに、バッチ式で懸濁液の pH と EC を測定する方法が有効なことを見出した。この方法は、特殊な機械装置を必要としない簡易な方法であるので、現場でも容易に試験できる。また、セメント系の特殊固化材について、いろいろな固化材が市販されており、ユーザーはその選定に苦勞することがあることから、多数の固化材を収集し、比較検討を行った。その結果、へどろや軟弱粘土の固化には、固化材の SO_3 含有量が重要で、エトリンガイトの生成量が強度に関与し、その程度は高有機質・高含水の土ほど顕著である。

土質改良の品質管理技術に関しては、コンクリート分野で開発された塩酸溶解熱法を、改良土に適用しやすい試験方法に改良した。この方法は、塩酸反応熱法と称され、現場適用事例も増大している。その中で現場適用事例を2つ述べた。一つは、軟弱粘性土地盤での中層混合処理工法によるセメント改良工事における攪拌施工条件の検討事例である。もう一つは、石炭灰とセメント、不溶化材を混合して造る石炭灰改良材の製造時の混合条件の最適化の検討事例である。いずれも、塩酸反応熱法の特長である簡易性、迅速性が大いに発揮され、施工方法の合理化に寄与することができた。

本研究は、セメント・石灰安定処理工法のごく一端に過ぎないが、長年かかわりを持たせて頂いた一人として、同工法のますますの発展を願ってやみません。

謝 辞

まず、この学位論文作成の契機となりました芝浦工業大学大学院 理工学研究科 博士課程への入学の機会を与えて頂きました稲積真哉先生、はじめ関係の先生方に御礼申し上げます。同研究科の地域環境システム専攻に入学後には、主査（指導教官）の稲積真哉先生、副主査の並河努先生の懇切かつ的確なご指導を頂きました。心より感謝申し上げます。また、学位論文の中間検討会、最終審査会におきまして貴重な助言とご指導を頂きました稲積真哉先生、並河努先生、紺野克昭先生、伊代田岳史先生、杉山太宏先生（東海大学）に感謝申し上げます。

本論文の内容の多くは、1973年に株式会社 大林組に入社し、同社の技術研究所在席中に技術開発の一環として実施したものです。入社した若輩の時から約20年間にわたり専門分野のみならず幅広いご指導を頂いた喜田大三先生に感謝申し上げます。また、同研究所在勤時代、共に研究開発の汗を流し、数多くの経験をさせて頂いた川地武先生、辻博和氏、漆原知則氏、滝永進氏、熊谷祐一氏（相馬環境サービス株式会社を兼務）、佐々木徹氏、三浦俊彦氏、田島孝敏氏、井出一貴氏、甚野智子氏、その他大勢の方々にお礼申し上げます。

本論文の内容の一部は、2013年1月に株式会社 立花マテリアルに入社してから実施したものです。その関連の技術開発において、株式会社大林組の浜井邦彦氏、森田晃司氏、望月勝紀氏、また株式会社 加藤建設の伊藤浩邦氏、倉田実氏、牧野貴哉氏にご指導頂きました。厚くお礼申し上げます。また、株式会社 立花マテリアルの石井三郎氏（社長）、石井宏明氏には、本論文に関わるご指導、ご支援を頂きました。そして、同社の足立達彦氏、富田正文氏、大賀伸一氏、岡田公彦氏、西田光昭氏、長尾善彰氏、他大勢の方々にご指導、ご協力を頂きました。厚くお礼申し上げます。

最後になりましたが、九州大学農学部にて在学中に土壌学を教わり、その後も私の学位論文作成を応援、激励して頂きました和田光史先生に感謝申し上げます。