

高炉水砕スラグの強度評価および軽量地盤材料
としての適用性に関する研究

Evaluation of Shear Strength of Granulated Blast Furnace Slag and
Applicability to the Light Weight Geomaterial

平成 27 年 3 月

和 田 正 寛

山口大学大学院理工学研究科

目 次

| | |
|--------------------------------|----|
| 第1章 序論 | 1 |
| 1. 1 研究の背景 | 1 |
| 1. 2 材料特性と利用技術 | 2 |
| 1. 3 研究の目的 | 5 |
| 1. 4 本論文の構成 | 6 |
| 参考文献 | 9 |
| 第2章 従来の研究 | 11 |
| 2. 1 高炉水砕スラグの基本的性質 | 11 |
| 2. 1. 1 化学的性質 | 11 |
| 2. 1. 2 物理的性質 | 12 |
| 2. 2 高炉水砕スラグの潜在水硬性 | 14 |
| 2. 2. 1 硬化メカニズム | 14 |
| 2. 2. 2 硬化に及ぼす影響因子 | 15 |
| 2. 3 高炉水砕スラグに関する研究事例 | 17 |
| 2. 3. 1 液状化に関する研究事例 | 17 |
| 2. 3. 2 地盤改良工法に関する研究事例 | 18 |
| 2. 3. 3 硬化モデルに関する研究事例 | 19 |
| 2. 3. 4 硬化促進に関する研究事例 | 19 |
| 2. 3. 5 環境への影響に関する研究事例 | 20 |
| 2. 4 高炉水砕スラグの土工材料としての適用性 | 21 |
| 参考文献 | 25 |
| 第3章 高炉水砕スラグの軽量地盤材料としての適用性 | 29 |
| 3. 1 はじめに | 29 |
| 3. 2 現場試験盛土に用いられた高炉水砕スラグの基本的性質 | 30 |
| 3. 2. 1 高炉水砕スラグの微視構造 | 30 |
| 3. 2. 2 高炉水砕スラグの物理的性質および締固め特性 | 30 |
| 3. 2. 3 高炉水砕スラグの力学的性質 | 32 |

| | | |
|---------|---------------------------------|----|
| 3. 3 | 現場試験盛土の概要と施工性 | 35 |
| 3. 3. 1 | 施工概要および調査内容 | 35 |
| 3. 3. 2 | 盛土の施工性 | 40 |
| 3. 4 | 諸特性の経年変化 | 44 |
| 3. 4. 1 | 物理的性質の経年変化 | 44 |
| 3. 4. 2 | 力学的性質の経年変化 | 49 |
| 3. 4. 3 | 周辺環境への影響 | 57 |
| 3. 5 | まとめ | 58 |
| | 参考文献 | 60 |
| 第4章 | 高炉水砕スラグの強度評価 | 61 |
| 4. 1 | はじめに | 61 |
| 4. 2 | 高炉水砕スラグの硬化に伴うせん断特性および非液状化レベルの検討 | 62 |
| 4. 2. 1 | 試料と検討方法 | 62 |
| 4. 2. 2 | アルカリ成分溶出特性と海水の緩衝作用 | 64 |
| 4. 2. 3 | 硬化とせん断強度の関係 | 65 |
| 4. 3 | 高炉水砕スラグの再液状化特性に関する検討 | 68 |
| 4. 3. 1 | 再液状化の事例と検討の重要性 | 68 |
| 4. 3. 2 | 再液状化に関する既往の研究 | 69 |
| 4. 3. 3 | 試料と検討方法 | 70 |
| 4. 3. 4 | 未硬化高炉水砕スラグの再液状化特性 | 71 |
| 4. 3. 5 | 硬化が進行した高炉水砕スラグの再液状化特性 | 80 |
| 4. 4 | 高炉水砕スラグの再硬化に関する基礎的検討 | 83 |
| 4. 4. 1 | 試料と検討方法 | 83 |
| 4. 4. 2 | 再硬化特性 | 86 |
| 4. 5 | まとめ | 92 |
| | 参考文献 | 94 |
| 第5章 | 水和反応に着目した高炉水砕スラグの強度発現と再硬化の定量評価 | 96 |
| 5. 1 | はじめに | 96 |
| 5. 2 | 高炉水砕スラグの水和反応率 | 97 |

高炉水砕スラグの強度評価および軽量地盤材料としての適用性に関する研究

| | | |
|---------|--------------------------------|-----|
| 5. 2. 1 | 水和反応率の測定法に関する既往の研究 | 97 |
| 5. 2. 2 | 水和反応率の測定方法の選定 | 97 |
| 5. 2. 3 | 海水中の塩分による水和反応率の過大評価及び補正方法 | 99 |
| 5. 2. 4 | 水和反応率試験の適用性 | 101 |
| 5. 3 | 種々の環境で養生した高炉水砕スラグの水和反応の進行と強度特性 | 102 |
| 5. 3. 1 | 試料と検討方法 | 102 |
| 5. 3. 2 | 養生環境の設定 | 104 |
| 5. 3. 3 | 水和反応率と一軸圧縮強さの相関性 | 108 |
| 5. 4 | 水和反応に着目した高炉水砕スラグの再硬化特性の評価 | 109 |
| 5. 4. 1 | 試料と検討方法 | 109 |
| 5. 4. 2 | 現場試験盛土スラグの再硬化特性の検証 | 111 |
| 5. 4. 3 | 養生履歴が再硬化特性に及ぼす影響 | 113 |
| 5. 4. 4 | 硬化の進行と再硬化の評価 | 118 |
| 5. 5 | まとめ | 120 |
| | 参考文献 | 121 |
| 第6章 | 高炉水砕スラグの再硬化を考慮した強度予測手法 | 123 |
| 6. 1 | はじめに | 123 |
| 6. 2 | 強度予測手法の適用性に関する検証 | 123 |
| 6. 2. 1 | 水和反応の進行 | 123 |
| 6. 2. 2 | 強度予測手法の提案 | 124 |
| 6. 2. 3 | 強度予測結果の検証 | 126 |
| 6. 3 | 水砕スラグの軽量地盤材料としての適用性 | 127 |
| | 参考文献 | 129 |
| 第7章 | 結論と今後の展望 | 130 |
| | 謝辞 | 135 |

第1章 序論

1. 1 研究の背景

高炉水砕スラグ（以下、水砕スラグ）は銑鉄の製造過程で大量生産される副産物であり、年間約 2,527 万トン製造（平成 25 年度実績）されている¹⁾。前年度と比較して水砕スラグの生産量は 3.8%増加しており¹⁾、年々増加傾向にある。水砕スラグは、銑鉄の製造過程において生成される熔融スラグに多量の高圧水を噴射することにより急冷されて発生するガラス質で砂状のスラグである²⁾³⁾。一般に鉄の生産は鉄鉱石・コークス・石灰石を高炉に入れ、炉内でそれらを熔融し、熔融された鉄鉱石の鉄以外の成分は副原料の石灰石やコークス中の灰分と一緒に高炉スラグとなり分離回収される。この高炉スラグは天然の岩石に類似した成分を有し、銑鉄 1t 当たり 286kg 生成され、この熔融状態(約 1500°C)の高炉スラグをゆっくり冷却したものは高炉徐冷スラグ、高圧水により急冷すると水砕スラグとなる。水砕スラグは工場生産されるため、均一で安定供給が可能である。

近年世界中で進められている環境保護の考えは全ての業界で重要視されている。特に人工的な構造物を造る土木業界では最も重要視しなければならない項目の一つである。これに伴い、環境保護の観点から海砂や山砂等の天然資源が採取規制の対象となり、十分な量を確保することが困難となっている。良質な砂材が枯渇している状況を考慮すると、水砕スラグは均一で安定供給が可能であることから、これらの代替材料としてのみならず、新しい地盤材料としての有効活用が期待される。

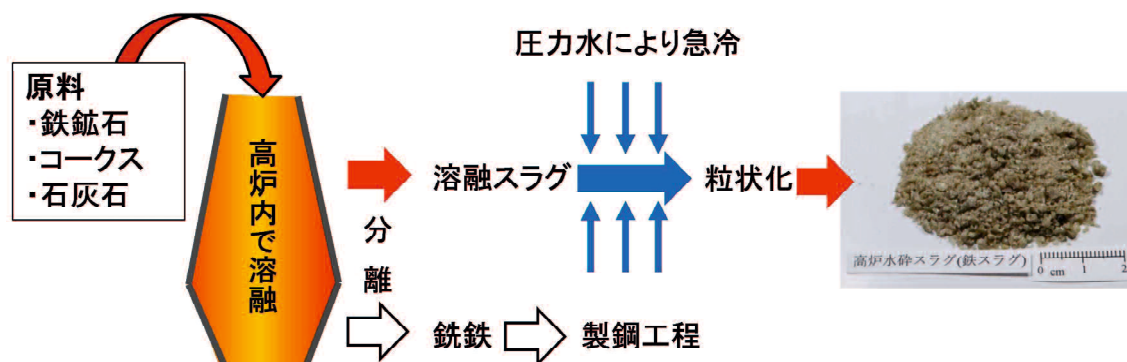


図 1.1 水砕スラグ製造過程²⁾

1. 2 材料特性と利用技術

水砕スラグは、粒度分布が天然砂に極めて類似している。水砕スラグの特徴は、写真 1.1 のように多くの気泡を有していることから、軽量且つ透水性に優れている。また、角張った形状をしていることから、大きなせん断抵抗角を発揮する。さらに、ポルトランドセメントのように水和反応により硬化する潜在水硬性を有していることが最大の特徴である。これらの特徴を活用して施工に用いると、埋立材料、地盤改良材等への投入効果が期待できる。さらに、水砕スラグは硬化することにより、液状化に対する繰返しせん断強度が増加し、裏込工や埋戻工に使用した場合に作用する土圧も軽減できる⁴⁵⁾。

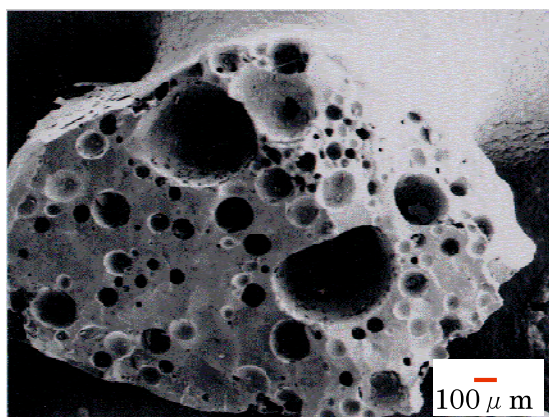


写真 1.1 水砕スラグ粒子拡大写真

水砕スラグを用いた研究は多く報告されている^{6)~16)}。現在まで多くの施工実績を有しており、特に港湾構造物における事例が多い^{6)~11)}。1989年に、「港湾工事用水砕スラグ利用手引書」¹⁷⁾が刊行され、港湾構造物への適用についてはこれに準じて設計・施工が行われた。しかしながら、同手引書は固結に関する技術的な知見が不十分であったことから、水砕スラグを固結に至らない粒状材料として扱うに留まっている。また、地震時における水砕スラグの硬化途中及び硬化後の液状化強度特性については定量化されていない。以後、潜在水硬性に関する知見が蓄積され¹⁸⁾、2007年に「港湾・空港における水砕スラグ利用技術マニュアル」¹⁹⁾として改定された。同マニュアルでは、水砕スラグを粒状材料としての扱いに加え、粘着力 c とせん断抵抗角 ϕ の両方を有する材料としても扱えるものとしている。

また上記のように、従来は主に港湾工事を対象として利用されてきたが、水砕スラグの特性を活かして、古くから陸上構造物への適用性についても継続的に検討されており、1983年に「土工用の技術資料」が発行されている。その後地盤工学を取り巻く状況は変化し多

第1章 序論

くの施工実績及び研究開発が行われ、それらの新たな知見が組み込まれ、2009年に「土工用材料としての技術資料」²⁰⁾が改定された。これらのマニュアル¹⁹⁾²⁰⁾により、水砕スラグの自然砂の代替材料としての利用拡大と経済性に優れた構造物の設計・施工に寄与できると考える。

図1.2および図1.3に、平成25年度のスラグの利用状況および高炉スラグ使用内訳推移を示す¹⁾。セメント材料としての利用が最も多く、これは、水砕スラグはポルトランドセメントのように水和反応が生じて硬化する潜在水硬性を有しているためと考えられる。また、平成22年度まで、国内セメント向け水砕スラグの出荷量は鈍化傾向にあるものの、平成23年以降は需要が増えている(図1.4)。これは、東日本大震災の復旧工事や既設の土木構造物の老朽化による維持管理・補修等があり、近年、低迷していた公共事業の増加により需要が増加したものと考えられる。このことは一時的なものであり、長期的な需要はいずれ減少傾向になるとも思われる。そのため、水砕スラグの生産量が増加傾向にある一方で、更なる需要の開拓、研究開発や施工実績データの蓄積等、自然砂の代替材料として水砕スラグの普及拡大が期待される。

水砕スラグの利用は、これまで護岸・岸壁などの裏込め材料としての使用例が多く、基礎地盤の圧密沈下対策として、サンドコンパクションパイル工法などの地盤改良材としての利用が試みられている⁷⁾¹⁰⁾²¹⁾。陸上施工においては、路盤材や擁壁の裏込め材として利用されているものの、道路盛土のような大規模な施工に利用された例はほとんどない。

しかしながら、水砕スラグの特性を有効的に利用することによって、従来天然砂ではなし得なかった安全性の高い且つ経済的な設計・施工が可能となり、利用拡大が期待される資源として注目している。また水砕スラグを使用するにより、自然砂採取による環境破壊を抑制し、公共事業において土木面からの環境保護ができると考える。

第1章 序論

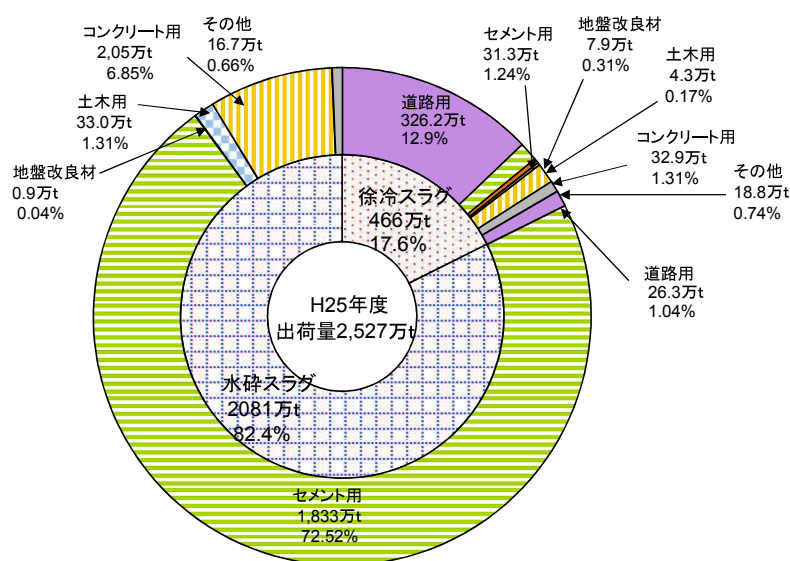


図 1.2 スラグ利用状況¹⁾

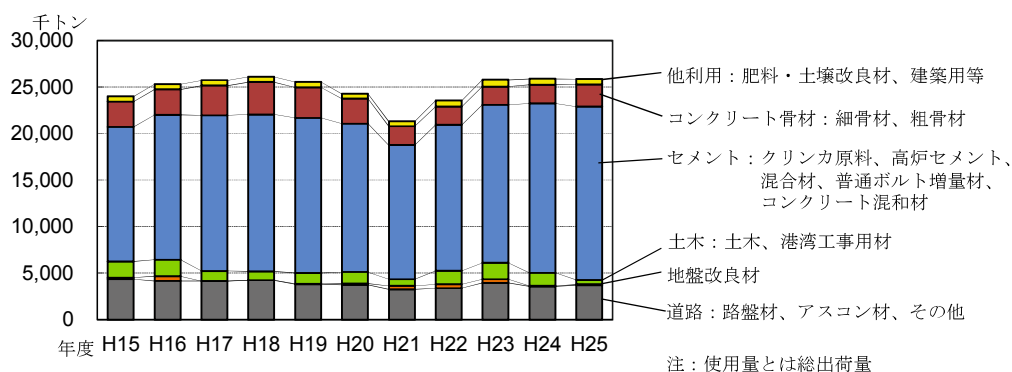


図 1.3 高炉スラグ使用内訳推移(平成 25 年鉄鋼スラグ統計書¹⁾より)

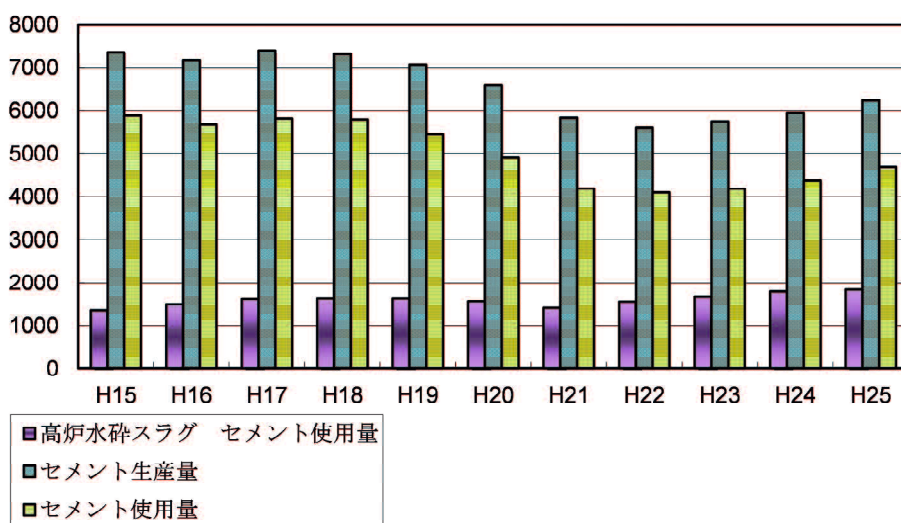


図 1.4 セメントの生産量と使用量の変化¹⁾

1. 3 研究の目的

水砕スラグのように単体で硬化する材料は自然界にはほとんど存在しないため、地盤材料として利用を促進するためには、粒状体として用いた水砕スラグの潜在水硬性に関する研究成果の蓄積が望まれる。先述のように、港湾工事及び土工用のマニュアル¹⁹⁾²⁰⁾が制定されているものの、水砕スラグ利用にあたっての技術的課題は未だに残っている。その課題を以下に示す。

【技術的課題】

- (1) 水砕スラグは港湾における施工実績が多く^{6)~11)}、大規模な土工工事での施工事例はほとんどないため、陸上での水砕スラグの硬化特性とその適用性について検討する必要がある。
- (2) 「港湾の施設の技術上の基準・同解説」²²⁾によると、未硬化時の水砕スラグは液状化しやすい範囲に含まれる。このことから、水砕スラグは完全に固結すれば液状化はしないとされているが¹⁹⁾、それに至る硬化段階についての液状化特性を明確にする必要がある。
- (3) 現在までに潜在水硬性に着目した研究は幾つか見られるものの、力学的性質の時間変化やアルカリ刺激による硬化促進などの検討が先行している。そのため、水和反応等に着眼した基礎的な材料特性についての研究事例はほとんどみられない。
- (4) 硬化した水砕スラグは地震等の外的負荷によって破壊や分離が生じた場合でも、当該箇所潜在水硬性が保持されていれば水和反応が継続し、強度が回復して自己修復すると考えられる。自己修復によって幾分か機能回復が見込める場合、維持・補修時のコスト軽減や新たな利用先の拡張に寄与できると考えられ、また、計画・施工の段階から事前対策として取り入れることが可能となれば、より計画的な耐久設計に貢献できると考える。

【研究目的】

本研究は、陸上における普及拡大を目的とし自然環境下において水砕スラグの試験盛土を施工し、長期に亘って諸特性の経年変化について調査した。得られた調査結果から、土工としての施工性とその適用性について検証した。

また、室内試験において硬化供試体を用いて水砕スラグの硬化の程度と液状化特性の関係を明確にし、非液状化レベルの検討を行うとともに、自己修復を想定した水砕スラグの

第1章 序論

硬化に及ぼすせん断履歴の影響について検討した。

さらに、上記のような力学特性の経時変化の検討に加え、水砕スラグ粒子表面に析出する水和物に着目し、種々の養生環境と水和反応が及ぼす硬化への影響について基礎的検討を行い、本研究で得られた一連の試験結果から水砕スラグの強度予測手法を提案した。これを基に実測値との比較を行い、その適用性について検討した。

1. 4 本論文の構成

本論文は、図 1.5 に示すように全 7 章から構成されており、各章の内容を概説すると以下の通りである。

【第1章 序論】

本章では、研究の背景及び目的を明確にし、論文の構成とその概要を説明する。

【第2章 従来の研究】

本章では、水砕スラグの基本的性質を述べるとともに、それらを活かした研究事例について紹介する。

【第3章 高炉水砕スラグの軽量地盤材料としての適用性】

本章では、水砕スラグの軽量性および高強度の特性に着目し、軽量盛土材としての適用性について検討した。山口県宇部市において 2001 年 11 月に水砕スラグを用いた現場試験盛土を施工後^{14)~16)}、長期間に亘って継続的に調査し、自然環境下における諸特性の経年変化について検討した。また、水砕スラグから溶出するアルカリ成分が、周辺環境へ及ぼす影響についても調べ、得られた一連の調査結果から陸上工事への適用性について検証した。本研究では、試験盛土施工後 8 年および 11 年経過時にサンプリングした試料について試験を実施し、過去に報告されている結果^{14)~16)}と併せて、水砕スラグの軽量盛土材としての適用性について検討した。

【第4章 高炉水砕スラグの強度評価】

本章では、飽和地盤における強度特性を把握するため、室内養生の硬化供試体を用いて

第1章 序論

非排水繰返し三軸試験，圧密排水三軸圧縮試験および一軸圧縮試験を実施し，硬化の進行に伴う R_{20} の変化と静的なせん断強度の関係について検討した．供試体を実践的且つより現場に近い淡水および海水で養生することにより，異なる養生環境での硬化の進行を把握するとともに，せん断強度の関係について検討した．また，未硬化時においては，せん断した同一供試体に対して再圧密および再せん断し，再液状化特性についても検討した．さらに，硬化供試体をせん断した後に，同試料で再び供試体作製，養生およびせん断を行い，初回および再せん断試験時の強度を比較し，同地盤における水砕スラグのせん断履歴が自己修復特性に及ぼす影響について検討した．

【第5章 水和反応に着目した高炉水砕スラグの強度発現と再硬化の定量評価】

本章では，水砕スラグの水和反応と強度の関係に着目し，種々の条件で養生した供試体を用いて硬化に及ぼす養生環境の影響について検討した．供試体を作製後，淡水，海水，水酸化カルシウム水溶液の3種類の水溶液を用いて養生し，養生完了後に水和反応率の測定と一軸圧縮試験を実施した．水和反応率の測定方法については，第5章で詳細を後述する．また，養生温度による影響を把握するため，淡水及び海水については20℃及び80℃とし，水酸化カルシウム水溶液は20℃のみとした．さらに，所定の期間養生し硬化履歴を与えた水砕スラグと第3章で用いた試験盛土のサンプリングした水砕スラグを用いて，上記と同様の試験を実施し，水和反応と強度の関係から自己修復を想定した硬化特性について検討した．

【第6章 高炉水砕スラグの再硬化を考慮した強度予測手法】

本章では，本研究における一連の試験結果から強度予測手法について提案した．経時的に予測可能な強度推定式を提案し，その適用性について検証した．

【第7章 結論と今後の展望】

本章では，各章で得られた知見を要約して結論を述べるとともに，今後の展望について述べる．

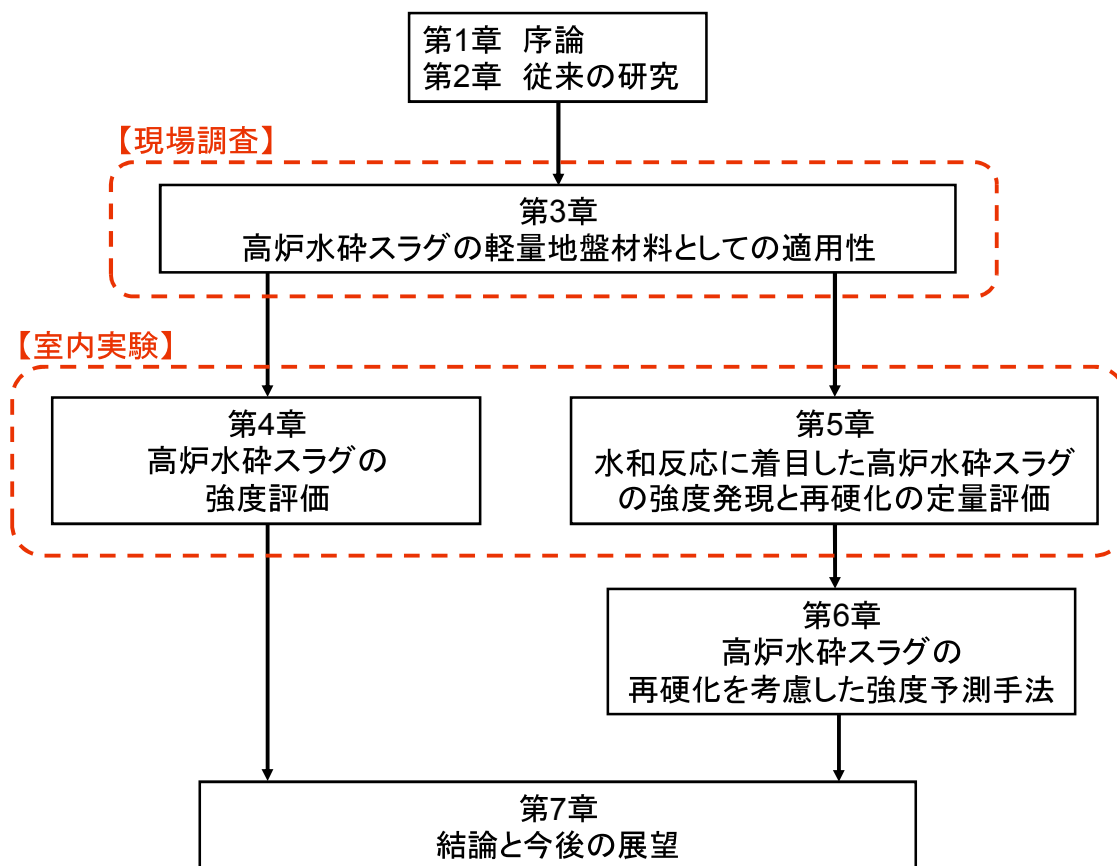


図 1.5 本論文の構成図

参考文献：

- 1) 鐵鋼スラグ協会 HP：鐵鋼スラグ統計年報 平成 25 年実績 <http://www.slg.jp/>
- 2) 鐵鋼スラグ協会 HP：鐵鋼スラグができるまで <http://www.slg.jp/slag/process.html>
- 3) Fritz Keil, 沼田晋一：高炉スラグ, 2001.5.
- 4) 近藤政彦：裏込め材料として用いた高炉水砕スラグの土圧特性について, 第 41 回地盤工学研究発表会概要集, pp.573-574, 2006.
- 5) 村岡賢二, 松田博, 白元珍, 近藤政彦, 佐々木保彦, 篠崎晴彦, 小島磨：高炉水砕スラグの硬化に伴う土圧特性の変化, 第 42 回地盤工学研究発表会概要集, pp.481-482, 2007.
- 6) 菊池喜昭, 池上正春, 山崎浩之：港湾構造物の裏込めに用いた高炉水砕スラグの経年変化に関する研究, 土木学会論文集, No.799/III-72, pp.171-182, 2005.9.
- 7) 松田博, 来山尚義, 高宮晃一, 村上剛敏, 中野恭夫：高炉水砕スラグの地盤改良材としての適用性に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.764/III-67, pp.85-99, 2004.6.
- 8) 菊池喜昭, 箕作幸治, 小野幸一郎, 鈴木操, 藤井郁男：高炉水砕スラグ埋立地盤の地盤特性の経時変化(その 1.固結の経時変化特性), 土木学会第 60 回年次学術講演会, pp.147-148, 2005.9.
- 9) 松田博, 山崎浩之, 中川雅夫, 山田紘, 鷹野明, 上山隆徳, 篠崎晴彦：高炉水砕スラグ埋立地盤の地盤特性の経時変化(その 2.動的特性), 土木学会第 60 回年次学術講演会, pp.149-150, 2005.9.
- 10) 篠崎晴彦, 松田博, 坂井悦郎, 小野幸一郎, 鈴木操, 中川雅夫：高炉水砕スラグの硬化特性と地盤改良工法への適用, 土木学会論文集 C, Vol.62, No.4, pp.858-869, 2006.12.
- 11) 篠崎晴彦, 松田博, 白元珍：高炉水砕スラグの硬化に伴う繰返しせん断強度特性の変化, 土木学会論文集 C, Vol.64, No.1, pp.175-180, 2008.3.
- 12) 菊池喜昭, 木村淳治, 水谷崇亮, 永留健：高炉水砕スラグの硬化に及ぼす pH, Ca²⁺の影響, 土木学会論文集, No.799/III-72, pp.195-200, 2005.9.
- 13) 菊池喜昭, 中島研司, 木村淳治, 水谷崇亮：高炉水砕スラグの硬化促進方法と硬化強度評価方法の検討, 土木学会論文集 C, Vol.67, No.1, pp.145-159, 2011.
- 14) 篠崎晴彦, 松田博, 来山尚義, 高宮晃一, 大平尚美, 村上守, 中野泰夫：高炉水砕スラグの軽量盛土材としての適用性に関する研究, 第 5 回環境地盤工学シンポジウム論文集, 地盤工学会, pp.213-219, 2003.
- 15) 石藏良平, 松田博, 来山尚義, 和田正寛, 石橋利倫, 谷信幸：土工材料としての高炉水砕スラグの力学特性の経年変化, 第 46 回地盤工学研究発表会論文集, pp.503-504, 2011.

第1章 序論

- 16) 石藏良平, 松田博, 来山尚義, 篠崎晴彦: 土工材料として用いられる高炉水砕スラグの地盤工学的諸特性, 地盤工学会誌, Vol.60, No.11, pp.20-23, 2012.
- 17) (財)沿岸技術研究センター, 鐵鋼スラグ協会: 港湾工事用水砕スラグ利用手引書, 1989.
- 18) 木村秀雄, 鈴木操, 高橋邦夫: 港湾工事への水砕スラグの「水硬性」の活用, 沿岸技術研究センター論文集, No.7, pp.77-80, 2007.
- 19) (財)沿岸技術研究センター: 港湾・空港における水砕スラグ利用技術マニュアル, 2007.
- 20) 鐵鋼スラグ協会: 高炉水砕スラグ「土工用材料としての技術資料」, 2009.
- 21) 水野健太, 土田孝: 高炉水砕スラグを用いた低置換率 SCP 改良地盤の強度・変形特性, 地盤工学ジャーナル, Vol.3, No.3, pp.187-202, 2008.
- 22) 運輸省港湾局: 港湾の技術上の基準・同解説 (上巻), 1999.

第2章 従来の研究

2. 1 高炉水砕スラグの基本的性質

2. 1. 1 化学的性質^{1)~4)}

高炉水砕スラグ（以下、水砕スラグ）は、表 2.1 に示すように、珪酸（SiO₂）33.4%、酸化カルシウム（CaO）41.0%、アルミナ（Al₂O₃）14.5%、酸化マグネシウム（MgO）6.0%の他、少量の硫黄（S）1.0%、酸化マンガン（MnO）0.7%、酸化鉄（FeO）0.4%、等を含有している。

表 2.1 各試料の化学成分⁴⁾

| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | CaO | MgO | S | MnO | FeO |
|-----------------|------------------|--------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|
| GBFS | 33.4 | 14.5 | 41.0 | 6.0 | 1.0 | 0.7 | 0.4 |
| Portland cement | 22.0 | 5.5 | 65.0 | 1.4 | 1.0 | - | 3.0 |
| Natural sand | 60.0 | 22.0 | 0.5 | 0.8 | 0.1 | 0.1 | - |
| Andesite | 59.6 | 17.0 | 6.0 | 3.0 | 0.2 | 1.0 | 3.0 |

水砕スラグの主要成分は先述したように、酸化カルシウム、アルミナ、珪酸、酸化マグネシウムの4成分である⁴⁾。このような組成を有する珪酸塩熔融体をゆっくり冷却するとメリライト(ゲーレンナイト 2CaO・Al₂O₃・SiO₂, オケルマナイト 2CaO・Al₂O₃・2SiO₂ の固溶体)を主体とする結晶となるが、これに高圧水を吹き付けて急冷すると、急激な粘性の上昇によって、原子配列に規則性のないガラス質を持った砂状のスラグができる。このため水砕スラグは化学的に不安定であり、水と接触すると自身で CaO 等のアルカリ成分を溶出し、その刺激で水和物を生成して硬化する性質を持っている⁴⁾。これが潜在水硬性であり、第 2.2 節で詳細を後述する。

水砕スラグは粒子形状が角張っており、粒子内外に多くの気泡を含んでいる。熔融状態のスラグは溶鉱炉内で強い還元雰囲気下であり、溶解・滞留している間に数十 ppm から数百 ppm の窒素を溶解し、その溶解量は温度の高いほど、そして滞留時間が長いほど多くなる。次に溶鉱炉から出て、酸化雰囲気に触れると窒素は急激に放出され、発泡現象を呈する。発泡状態から熔融スラグを水に接触させると、発泡途中において急激な粘性の上昇があり、内部に放出しきれないガスが集まり、自らの圧力でさらに膨張し気泡として残る。水砕スラグの気泡内部のガスの成分は、約 75%が H₂ であり、約 25%が N₂ である⁵⁾。

2. 1. 2 物理的性質

(1) 土粒子および最大・最小間隙比

表 2.2 に JIS A 1202 および JIS A 1224 によって求めた製造時期の異なる水砕スラグの土粒子密度および最大・最小間隙比を示す。同表より、6 種類の水砕スラグは土粒子密度 $\rho_s=2.62 \sim 2.77\text{g/cm}^3$ 程度⁶⁾ で天然砂とほぼ等しいが、製品によっては $\rho_s=2.84\text{g/cm}^3$ 程度⁷⁾⁸⁾ とやや大きい値となるものもある。また、水砕スラグは粒子内部に気泡を有しているが、この気泡をほとんど含まない状態まで粉砕した場合の土粒子密度は $\rho_s=2.86 \sim 2.94\text{g/cm}^3$ 程度⁵⁾ である。一方、水砕スラグの最大・最小間隙比は天然砂と比較して大きな値となっているが、この原因は水砕スラグ粒子の内部に多数の気泡を含むことによる。

表 2.2 土粒子密度および最大・最小間隙比

| | Soil particle density ρ_s (g/cm ³) | Maximum void ratio e_{\max} | Minimum void ratio e_{\min} |
|-------------|--|----------------------------------|----------------------------------|
| GBFS① | 2.694 | 1.396 | 1.014 |
| GBFS② | 2.624 | 1.521 | 1.043 |
| GBFS③ | 2.697 | 1.447 | 0.974 |
| GBFS④ | 2.723 | 1.407 | 0.968 |
| GBFS⑤ | 2.720 | 1.416 | 0.937 |
| GBFS⑥ | 2.766 | 1.445 | 0.893 |
| Genkai sand | 2.661 | 0.802 | 0.493 |

(2) 粒度特性

水砕スラグの粒度分布を表 2.3 および図 2.1 に示す。水砕スラグの粒径は 4.75mm 以下の粒状であり、粗砂領域が大部分を占め、細粒分が極めて少なく、均等係数は $U_c=2.5 \sim 4.2$ 、曲率係数は $U_c'=0.9 \sim 1.4$ の範囲³⁾⁹⁾ にあり天然砂と類似した粒度分布となっている。

表 2.3 水砕スラグの一般的粒度分布³⁾⁴⁾⁹⁾

| Percent finer by weight (%) | | | | | | |
|-----------------------------|--------|--------|---------|--------|---------|---------|
| 4.75mm | 2.00mm | 0.85mm | 0.425mm | 0.25mm | 0.106mm | 0.075mm |
| 99~100 | 80~100 | 30~75 | 7~30 | 3~15 | 1~6 | 0~4 |

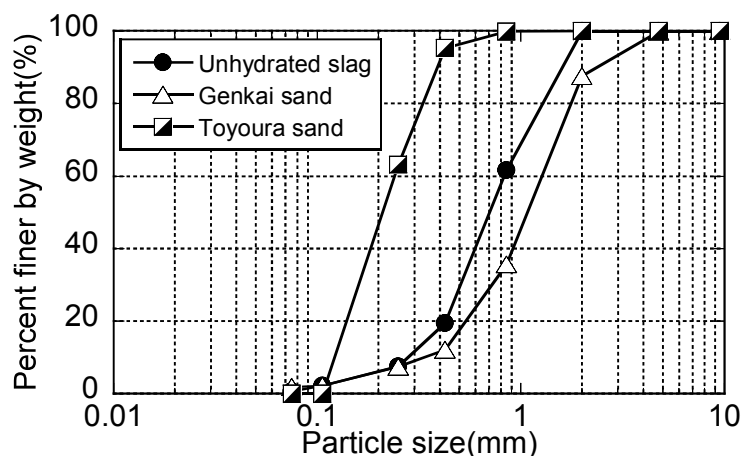


図 2.1 粒径加積曲線

(3) 単位体積重量

水砕スラグの湿潤単位体積重量は、概ね $11\text{kN/m}^3 \sim 16\text{kN/m}^3$ である⁴⁾。水砕スラグを土工用材料として用いた場合、盛土などの締固め作業では、締固め（現場密度/最大乾燥密度）が 90% となるように施工管理されることが多く¹⁰⁾、平均的な含水比は 10% 程度である。技術資料⁴⁾によると、含水比を 10% とした場合の平均湿潤単位体積重量をもとに、設計に用いる湿潤単位体積重量の標準値を $\gamma_t = 14.5\text{kN/m}^3$ としている。また、水砕スラグの単位体積重量は製鉄所間の差異があるため、重要構造物の設計にあたっては、使用が予想される水砕スラグについて事前に単位体積重量の確認が望まれるとしている。

なお、水砕スラグの飽和単位体積重量が必要な場合は、「利用マニュアル」¹¹⁾を参考にすることができ、同マニュアルでは、飽和単位体積重量を $\gamma_{\text{sat}} = 17.5\text{kN/m}^3$ (特性値) と設定されている。

(4) 締固め特性

締固めた水砕スラグの乾燥密度は、締固め時の含水比にほとんど影響されない。また、水砕スラグは締固めに伴い粒子破砕を生じるが、その程度は締固めの条件によって異なる。締固め試験前後で粒子破砕が生じないと報告¹²⁾されている一方で、締固め回数を通常の締固め試験での値より多くすると粒子破砕によって粒度分布が変化するという報告¹³⁾もある。

2. 2 高炉水砕スラグの潜在水硬性

2. 2. 1 硬化メカニズム³⁾⁴⁾

水砕スラグは潜在水硬性を有するため、所定の条件下で時間の経過とともに固結する。水砕スラグの潜在水硬性は、ポルトランドセメントの自硬性とは異なり、水砕スラグの成分とガラス構造に起因するものである。以下に、水砕スラグの潜在水硬性を化学的側面から述べる³⁾⁴⁾。

水砕スラグをガラス構造的見地からみると、結晶体では原子が規則正しく繰り返しの配列をしているが、ガラスでは全く規則性はなく、乱網構造を呈し非結晶物質である。ガラスを形成している各原子間の結合は、本質的には結晶の場合と異なるものではないがガラスの原子配列は、結晶のような対称性と周期性を持っていない。高炉水砕スラグのような珪酸塩においては、珪素と酸素は SiO_4 の 4 面体的結合をしている。すなわち Si^{4+} イオンは常に 4 個の O^{2-} イオンで囲まれた酸素の 4 面体の中心に存在し、また Al^{3+} イオンは 6 個の O^{2-} イオンで囲まれた 8 面体の中心にある。

SiO_2 、 Al_2O_3 などはガラス形成酸化物であるが、酸化物は無条件にガラス構造を形成できるものではない。 CaO 、 Na_2O などは単独ではガラス形成することはできず、ガラス形成酸化物との組み合わせによりガラス化が可能となる。すなわち、ガラス形成イオン以外の他のイオンが結合すると、はじめの電氣的平衡が破れる。そこで酸素橋の打開により、網目の空孔は押し広げられ、そこにさらに新しい結合ができる。この結合力のため導入酸化物の陽イオン(例えば Ca^{2+} イオン)がこの空孔の中に取り囲まれ、新しい結合関係の電氣的中和が保たれる。この Ca^{2+} イオンは網目構造中に不規則に分布するゆえに水砕スラグ中はガラスの三次元網目構造の中に Ca^{2+} イオンが充満している状態である。したがって、水砕スラグはガラス網目構造中に含まれる Ca^{2+} イオンを流出し自ら硬化する。これが水砕スラグの潜在水硬性である³⁾⁴⁾。

以下に、水砕スラグの硬化プロセスを示す⁴⁾。

- ① アルカリ雰囲気の中では、水砕スラグのガラス構造が構造を形成している(SiO_4)のネットワークが切断される。
- ② ネットワークの切断がいったん始まると、含有している CaO や MgO などのアルカリ性物質が溶出し、アルカリ雰囲気が保たれるので、ネットワークの切断は継続され、ガラスの水への溶出が進行する。

- ③ 溶出した CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 などにより、ポルトランドセメントと同様な水和反応が起こり、 $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ (珪酸カルシウム水和物)および $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ (カルシウム・アルミネート水和物)が生成する。

以上が定義された潜在水硬性と水和物の生成機構である⁴⁾。アルカリ雰囲気では SiO_2 などが溶出されて硬化する。水砕スラグはアルカリ雰囲気中でない淡水中などでは、自発的に CaO をイオンとして溶出し、 pH を上昇させ、水和物を生成し硬化する特性を有する⁴⁾。

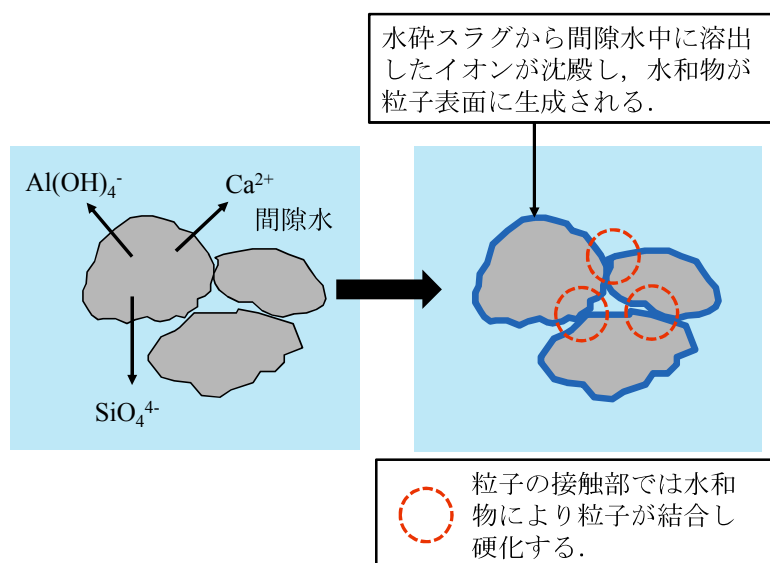


図 2.2 水砕スラグの硬化メカニズム¹¹⁾

2. 2. 2 硬化に及ぼす影響因子

水砕スラグは非晶質であるため、水と接触し得る環境下では、水砕スラグ自身からカルシウムやシリカ等の成分が溶出する。そのため、セメントと同様な水和反応が生じ、 C-S-H (珪酸カルシウム水和物) や C-A-H (アルミン酸カルシウム水和物) に代表される水和物が生成される。水砕スラグの粒子間接触部付近に析出した水和物はセメンテーション効果を発揮して硬化すると考えられている¹⁰⁾。

硬化の進行は、養生環境によって大きく異なる。硬化に及ぼす影響因子として、水分および含水比、粒度、締固め、アルカリ材の混合 (間隙水の pH を上昇させるため)、養生温度、養生水および養生水中の化学成分、間隙水の移流等が知られている¹¹⁾。ここで、水砕

スラグに及ぼす各種要因に関する既往の研究について紹介する。

(1) 水分および含水比の影響

水砕スラグは、水と接触し得る環境下においてポルトランドセメントと同様な水和反応が生じて硬化する⁴⁾。

水砕スラグを同一の締固め条件によって作成した供試体の養生後の一軸圧縮試験の結果によると、乾燥試料では水和反応が生じないのに対して、含水比一定の条件では材料毎に硬化に最適な含水比の存在が示唆されている¹⁴⁾。この要因として、含水比が極端に少ないと早期に含水中のイオン濃度が上昇して水和物が生成し強度発現するが、水和物生成に必要な水分を早期に消費してしまうため長期的な強度増加が期待できない。一方含水比が極端に大きいと水和物生成に必要なイオン濃度が飽和条件に達するまでに時間が必要となり、初期の強度発現がしにくいためと考えられる。

(2) 粒度の影響

水砕スラグは、粒度が細かい程硬化が促進されることが検証されている¹⁴⁾。特に、水砕スラグは施工時の締固めによって粒子破碎が生じることがあり、SCP工法の砂杭材として用いた場合には、締固めによる著しい粒子破碎により硬化が促進されることが確認されている¹⁵⁾。また、水砕スラグに高炉スラグ微粉末を混合した場合でも、細粒化と同様の効果によって硬化が促進されることが示されている。この要因として、粒子が細かい程水和物を生成するイオンの溶解が促進されることが確認されていることや、粒子の接触点が増加することなども理由として考えられる。

(3) 締固めによる影響

締固めによる密度が大きいほど硬化は促進される¹⁶⁾。これは、前述と同様に粒子の接触点が増加することなども理由として考えられる¹⁴⁾。

(4) アルカリ成分溶出および添加材による影響

水砕スラグに、セメント、水酸化カルシウム等のアルカリ材を混合すると硬化が促進されることは多くの研究によって検証されている¹⁷⁾¹⁸⁾。水酸化カルシウムを混合した場合には、水和物へのカルシウムの供給源になること、水酸基イオン(OH⁻)による水砕スラグのガラス骨格であるSi-O結合を切断し、Ca²⁺、Siなどのイオンの溶解を促進すること、pHの上

昇とともに Al^{3+} の溶出を促進し C-A-H 等の生成を促進することなどが示されている。

(5) 養生温度による影響

同一の締固めおよび含水比の 2 つの供試体の養生温度を変えて実施した事例では、明らかに養生温度が高いほど初期の硬化が促進されることが示されている¹⁴⁾。この要因として、水砕スラグからの水硬性に係わるイオンの溶出反応や水和物の析出反応が促進されるためと考えられる。

(6) 間隙水の移流による影響

室内で養生した水砕スラグについて、間隙水の移流の影響を調べた結果、間隙水の移流がある場合には、水砕スラグの硬化が遅延されることがわかっている¹⁵⁾。この要因として、間隙水の移流によって間隙水中のイオン濃度の上昇が抑えられ水和反応が生じにくいことが考えられている。岸壁の裏込めに用いた事例では、下層部の硬化が遅れる傾向にあるが、これは、潮汐に伴い捨石層を通して移流する海水の影響があるものと考えられている¹⁹⁾。

(7) 在庫期間による影響

水砕スラグは、経過時間とともに粒子表面に水和物が生成される。同一製造所で製造直後および製造後 2 年経過した 2 種類の水砕スラグを用いて実施した埋立実験の結果では、製造後の水砕スラグよりも製造後 2 年経過した水砕スラグを用いた埋立地盤中の間隙水の pH が高く早期に硬化が見られたことが確認されている²⁰⁾²¹⁾。この要因として、製造後の在庫の間に水砕スラグのガラス構造が破壊して水に対して、化学成分が溶出しやすい状態になっていたことが考えられている。

2. 3 高炉水砕スラグに関する研究事例

2. 3. 1 液状化に関する研究事例

篠崎ら¹⁷⁾は、室内養生の硬化供試体を用いて非排水繰返しせん断試験を実施し、硬化の進行に伴う液状化強度比 R_{20} の変化と静的なせん断強度の関係を調べ、既往のセメント改良砂の知見^{22)~24)}と比較し、液状化しない硬化の程度について検討している。また、水砕スラ

グを用いた埋立て現場で施工後 20 ヶ月時に採取した硬化試料を用いて一軸圧縮試験および非排水繰返しせん断試験を実施し、室内養生供試体との比較検討をしている¹⁷⁾。その結果、粘着力が 40kN/m^2 あるいは一軸圧縮強さが 50kN/m^2 以上あればネッキング（非液化化）破壊が生じること、さらに液化化強度比 R_{20} は水砕スラグの種類、相対密度、養生方法に関係なく粘着力および一軸圧縮強さと相関性が認められ、一軸圧縮強さと液化化強度比 R_{20} の関係は室内および現場試料ともに同様の傾向であることを示している。

2. 3. 2 地盤改良工法に関する研究事例

篠崎ら¹⁴⁾は、水砕スラグの特性に着目し、地盤改良材（サンドコンパクションパイル）及び岸壁裏込め材（埋立柱）として用いた場合の硬化特性を現場試験施工により検討している。

サンドコンパクションパイルについては、粘土地盤の圧密促進のためのドレーン機能も期待する低置換率サンドコンパクションパイル工法において、水砕スラグの硬化が中詰め材としての適用性に及ぼす硬化の影響に着目して、海砂を用いたサンドコンパクションパイル工法による地盤改良効果との比較を行っている。さらに、地盤改良工法としての締固めの有無による硬化、透水性を比較するため、サンドドレーンとの比較も行っている。

裏込め材（埋立柱）としての利用に関しては、液化化特性に着目して、室内養生硬化供試体について硬化レベルと動的せん断強度、破壊形態の関係を調べ、現場硬化試料についての結果と比較して以下の結果を得ている。

- (1) 水砕スラグをサンドコンパクションパイル工法に適用した場合、杭のせん断抵抗角は 35° 以上が得られ、砂杭の設計せん断抵抗角を満足することを明らかにした。また、杭の強度は、硬化に伴って増加し杭の強度を期待する高置換率サンドコンパクションパイル工法へ適用可能であるとしている。
- (2) 施工時の締固めによって粒子破碎が生じ、著しい硬化と透水性の低下が早期に生じ、砂杭によるサンドコンパクションパイルの場合に比べて、粘土の強度増加が満足されないことから、杭間粘土の強度を期待する低置換率サンドコンパクションパイル工法には適用が困難であるとしている。一方、水砕スラグをサンドドレーン工法に適用する場合は、サンドコンパクションパイルと比較して締固めに伴う粒子破碎が生じないため、おおよそ 6 ヶ月までは砂杭と同等の透水性 (10^{-3}cm/s 以上) が維持されドレーン材として粘土

地盤の圧密効果が期待できるとしている。

- (3) 液状化強度 R_{20} は、硬化の進行とともに増加し、一軸圧縮強さが 50kN/m^2 、あるいは粘着力が 40kN/m^2 以上あれば、伸張破断を示す。また、 R_{20} は水砕スラグの種類、相対密度、養生方法に関係なく粘着力および一軸圧縮強さと相関性が認められ、一軸圧縮強さと R_{20} の関係は、室内試料と現場使試料とほぼ同等であるとしている。
- (4) 水砕スラグを埋立材に用いた場合、施工後3~6ヶ月から硬化が始まり、施工後約1年で硬化 ($q_u \geq 100\text{kN/m}^2$) する。ただ試験施工では、水砕スラグ埋立地盤の下層部で捨石を介して海水が浸透し、間隙水中の pH 上昇が抑えられて硬化が進行しない箇所があったとしている。

2. 3. 3 硬化モデルに関する研究事例

篠崎ら²⁵⁾は、室内試験によって各種試験条件が硬化に及ぼす影響について調べ、物理的要因として締固め、粒度等の効果を接触点数で表し、化学的要因として養生水の pH の時間積分値を用いた硬化反応モデルを提案し、検討を行った。その結果、以下の結論を得ている。

- (1) 水砕スラグ粒子を完全な球形と仮定して、粒度分布および間隙比から接触点を算定することにより硬化に伴う強度の予測が可能。
- (2) 反応速度理論によって養生水のイオン濃度積を時間積分により求め水和物生成量を、pH あるいは【OH⁻】濃度のみの時間積分値で表現することによって、淡水中での硬化の現象を説明できる。

海水養生では、海水中の Mg^{2+} が $\text{Mg}(\text{OH})_2$ として沈殿することにより pH は小さいが、硬化を促進する。これは、水砕スラグからの Ca^{2+} の溶解が淡水の場合に比べて著しく促進されるためであり、この場合、【OH⁻】【Ca²⁺】の時間積分値で表現したモデルにより、養生水の違いに関係なく硬化の程度の予測の可能性を示した。

2. 3. 4 硬化促進に関する研究事例

菊池ら¹⁸⁾は、水砕スラグの硬化に及ぼす間隙水の影響として、特に pH、 Ca^{2+} に着目して

検討を行っている。実験では、セメントミルク $c/s=2, 4, 6, 8, 10\%$ 、人工海水、NaOH 水溶液を用いて養生を行い、 Ca^{2+} 濃度と pH の計測、一軸圧縮試験を実施している。これらの結果から、間隙水に海水を用いた場合、pH は高くないにもかかわらず水砕スラグは硬化し、NaOH 水溶液のように必ずしも pH が高いことが硬化の必要条件にはならない。これは、海水は Ca^{2+} を含んでいることによる影響が大きい。また、海水および NaOH 溶液の環境では硬化が始まるのに時間がかかるが硬化が始まると十分な一軸圧縮強さを示し、間隙水の pH は上昇すると結論付けている。

さらに菊池ら²⁶⁾は、室内試験において、水砕スラグを確実に硬化させる、また、硬化にかかる時間短縮を目的とし、3 シリーズの実験を実施し、硬化に及ぼす間隙水と添加物の影響について検討を行っている。シリーズ 1 では直径 5cm、高さ 12cm のモールドに 10cm の高さまで相対密度を 50%となるように水砕スラグを詰め、30cc 程度上澄み液を残して密閉し、20°Cで養生を行っている。その際、カルシウムイオンや塩素イオンの有無によって硬化に差があると考え、養生水として人工海水、イオン交換水、塩化カルシウム溶液、塩化ナトリウム溶液を用いている。シリーズ 2 では、イオン交換水、人工海水を用いて、セメント、高炉スラグ微粉末などの添加物の効果について実験を行っている。シリーズ 3 では、高炉スラグ微粉末の添加量が硬化に及ぼす影響について検討を行っている。これらの実験結果から以下のとおり結論を得ている。従来言われていた pH やカルシウムイオン濃度が単純に高いだけでは硬化を促進できない。また、間隙水にイオン交換水を用いた場合、セメントを添加した方が強度発現は大きく、海水の場合は高炉スラグ微粉末を添加した場合のほうが大きくなり、長期的には海水で高炉スラグ微粉末を用いた場合のほうが大きい。以上のことから、海水で養生を行う場合、高炉スラグ微粉末を添加したほうが水砕スラグの硬化促進に対して効果的であるとしている。

2. 3. 5 環境への影響に関する研究事例

水砕スラグはアルカリ性を呈するため、陸上構造物に適用する際、その溶出特性や土壌の吸着効果といった周辺環境への影響についても検討する必要がある。

石橋²⁷⁾²⁸⁾らは、水砕スラグのアルカリ成分の溶出特性と覆土材の吸着効果を調べるため、ビーカー試験（溶出試験）および上向流カラム試験を実施し、その基礎的な特性について検討し水砕スラグからのアルカリ成分の溶出に伴い、溶出水の pH 値は上昇するものの、覆

土材と介することにより pH 値が減少することから覆土材の吸着効果を確認している²⁶⁾²⁷⁾。

また本論文においても、水砕スラグを用いて現場試験盛土を施工し盛土周辺地盤の環境への影響を調査するため長期に亘って盛土周辺地下水の pH について計測している。この結果については、第3章で述べる。

2. 4 高炉水砕スラグの土工材料としての適用性

(1) 路床材としての利用

河野ら²⁹⁾³⁰⁾は、1層の撒き出し厚を1mとし、15tタイヤローラで12回転圧し、その後アスファルト舗装要項におけるD交通相当の交通量を想定した繰返し走行試験を行った。その結果、水砕スラグの層では密度の変化はみられず、また施工後の沈下量も少なかった。これらの結果より、タイヤローラ3~4回の走行で最大乾燥密度の95%以上は確保できるとしている。

山本ら³¹⁾³²⁾は、ブルドーザ、タイヤローラで締め固めた場合の締め固め特性について追跡調査を行い、天然砂との比較を行った。その結果、水砕スラグではブルドーザでの敷均し直後においてもCBR値は10%近くが得られ、ブルドーザ15回転圧を行うとCBR値は20%まで上昇した。一方、天然砂では敷き均し直後で5%程度、15回転圧後でも10%程度と、水砕スラグと比較すると締め固め度は低くなる。また、タイヤローラで転圧すると、水砕スラグ、天然砂ともにCBR値は上昇した。これより、水砕スラグの締め固めはブルドーザ、タイヤローラともに有効であるのに対し、天然砂ではタイヤローラが有効との結論を導いている。また、締め固めた水砕スラグの追跡調査を行った結果、地表面では3ヶ月後にCBR値が100%を超え、GL-70cmでも締め固め直後より3倍の増加を示し、アルカリ刺激剤なしでも水硬性が期待できるとしている。また、タイヤローラ15tを使用する場合、95%の締め固め度を得るための転圧回数は10回、90%では7回との試験結果を得た。タイヤローラでの締め固めが出来ない狭い場所においては、厚さ3mを6層で撒き出し、各層毎に石灰溶液を散布することにより、施工当初CBR値が3~5%だったものが1年後には80~160%にまで上昇した。

(2) 覆土材としての利用

山本ら³³⁾は、層厚1mを湿地ブルドーザで敷き均し、3tおよび11tタイヤローラで締め

第2章 従来の研究

固める実験を行った。タイヤローラで12回転圧しても CBR 値は締め固め前の3%から9%までしか上昇しなかった。これは締め固め度90%程度に相当する。その後6ヶ月放置しても CBR 値はほとんど増加しなかったのに対し、消石灰を3%混合すると6ヶ月後には80%まで上昇した。これより、軽転圧（締め固め度90%程度）で施工後荷重がかからない場合、アルカリ刺激剤なしでは強度増加が期待できないとしている。

富永ら^{34)~36)}は、水砕スラグを軟弱地盤上に敷設するサンドマット材として利用するため、敷網上に厚さ1mで小型ブルドーザによって撒き出し、ソイルコンパクターで平均2回の転圧を行った。山土で撒き出した場合、シルト層下端までめり込み（厚さ4m）が生じたのに対し、水砕スラグでは圧密沈下も含めて0.8~1.0mの沈下量にとどまり、水砕スラグの軽量性が確認された。そして施工後3週間で4tトラックの走行が可能になった。また、サンドマット中の水のpHは11~12程度であったのに対し、前面水域では7程度と水砕スラグの施工によるpHの上昇は認められなかった。

また、製鉄所内のヤードにおいてサンドポンプによる撒き出しを行い、天然砂と同等の施工能率が確保できることを確認した。

山本ら³⁷⁾は、浚渫粘性土上にネットを敷設後、水砕スラグを層厚3mでマイクロポンプ船により埋立て、長期間に渡って強度変化を調査した。その結果、N値は撒き出し50日後で3程度であったものが1年後には8程度となり、特に工事車両の通行が多いところでは、1.5年後に22、1年9ヶ月後には30にまで上昇した。CD試験の結果、せん断強度および変形係数は時間とともに増加した。

(3) 港湾工事への利用

菊池ら¹⁹⁾は、これまで港湾工事において水砕スラグが用いられてきた3現場において、施工後長期間経過した時点で現地調査を行った。調査結果から、地下水面以下の水砕スラグは長期的に固結する。原位置における水砕スラグの物性、力学特性には、比較的大きなばらつきがみられ、固結した水砕スラグの粘着力は平均4~6kPa、残留強度から求めた内部摩擦角は37°以上である。また、固結した水砕スラグの透水係数は 10^{-3} cm/secオーダーであり、長期間養生しても大きく変化はしない。水砕スラグのpHは11程度であり、その間隙水のpHは9~10程度であるとしている。

松永ら³⁸⁾、宮島ら³⁹⁾、運輸省第三港湾局神戸港震災復興事務所⁴⁰⁾は、地震で被害を受けた岸壁背後の土圧低減を目的として、水砕スラグを1層1mで撒き出し、材料特性を調査するとともに追跡調査を行った。その結果、密度および強度試験結果から1層1mの撒き出し、

第2章 従来の研究

および土圧の測定結果から荷重分散角として 45° が適切であり、通常の砂と比較して土圧が軽減されることを示した。また、追跡調査の結果からも、土圧の増加は確認できなかった。施工後 16 ヶ月経過時の三軸圧縮試験結果からは、潜在水硬性によって粘着力が増加しており、設計において粘着力を考慮する必要があるとしている。

(4) 埋立材料としての利用

西ら^{41)~45)}は、製鉄所内に設けた水槽（深さ 9~10m）に水砕スラグを埋立て、3 年間に渡って追跡調査を行った。水砕スラグはダンプトラックで投入しただけの緩い状態であり、大部分が水中へ投入された。埋立直後の N 値は 5 程度であったが、7 ヶ月後には 22 程度まで増加し、3 年後には 23 程度であった。また孔内水平載荷試験結果から求めた基準 k 値（杭径 1m の杭が、1cm の変位を生じたときの k 値）は埋立直後の 4kPa から 1 年後には 24kPa、3 年後には 20kPa であった。これらより、潜在水硬性による強度増加は 1 年程度まで急激に生じ、それ以降の増加量は少ないことを示した。また、三軸圧縮試験結果より、初期間隙比が小さい程、せん断抵抗力の増加量は大きいことを示し、合わせて、間隙比とせん断抵抗力の関係は変化しないことから水砕スラグの硬化が進行しても摩擦項はほとんど変わらず、粘着力のみ増加することを示した。

(5) サンドコンパクションパイルとしての利用

佐藤ら⁶⁾、(株)神戸製鋼所ら⁷⁾は、現地においてサンドコンパクションパイルを打設（改良率 70%、杭径 1.6m）し、9 ヶ月間の追跡調査を行った。その結果、杭芯の N 値は 3 ヶ月後までは 15~25 の範囲で変化はみられないが、9 ヶ月後には 40~50 以上に上昇し、水硬性が発揮されていることを示した。これより、短期的にはドレーン材、長期的には強度を期待した杭材料として扱うことを提案しているが、その詳細については今後の課題としている。また、海水の pH は打設前後で変化がないことを確認した。

(6) 盛土材としての利用

河野ら⁴⁶⁾は、補強材としてエキスパンドメタルを使用し、水砕スラグによって高さ 4m の垂直盛土を行い、6 ヶ月間に亘って変位測定を行った。この結果、変位は小さく、潜在水硬性による効果が期待できることを示した。これによって建設費の削減効果は多大なものとなるが、潜在水硬性の設計値への反映方法を課題としている。

(7) 環境対策への利用

宮田ら⁴⁷⁾は、海底に水砕スラグを入れた容器（W600×L1000×H700）を設置し、環境への影響を調査した。その結果、周辺海水とスラグ近傍の pH, COD, DO の変動は一致し、水砕スラグ中の間隙水の pH は 4 週後に 9.6 まで上昇したが、それ以降は 8.5~8.6 で推移したことから、周辺への影響は非常に小さいことを示した。また、H₂S 濃度の測定結果から、天然の砂より底質改善効果が大きく、石灰と同様の底質改良材となりうることを、これより近傍海水の水質改善にも効果的であることを示した。合わせて、水砕スラグ表面およびサンプリング中の生物調査結果から、水砕スラグ表面のみならず内部においても生物の生息が可能であることを示した。

参考文献：

- 1) 鐵鋼スラグ協会 HP：鐵鋼スラグ統計年報 平成 25 年実績 <http://www.slg.jp/>
- 2) Fritz Keil, 沼田晋一：高炉スラグ, 2001.5.
- 3) (財)沿岸技術研究センター, 鐵鋼スラグ協会：港湾工事用水砕スラグ利用手引書, 1989.
- 4) 鐵鋼スラグ協会：高炉水砕スラグ「土工用材料としての技術資料」, 2009.
- 5) 菊地喜昭, 高橋邦夫：水砕スラグの力学特性の経年変化, 港湾技研資料 No.915, pp.3-26, 1998.
- 6) 來山尚義：低置換率 SCP 工法における高炉水砕スラグの適用に関する研究, pp.69, 2003.
- 7) 佐藤康文, 衣斐隆志, 福田勇治：地盤材料としての高炉水砕スラグの土質工学的性質とその経時変化について, 土木学会第 37 回年次学術講演会講演概要集Ⅲ-302, pp.601-602, 1982.
- 8) (株)神戸製鉄所, 中央復建コンサルタント(株)：高炉水砕スラグの地盤改良材（サンドコンパクションパイル工法）への適用性試験報告書, 1981.
- 9) (株)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp.357-358, 1999
- 10) (社)日本道路協会：道路土工 盛土工指針, pp.219-220, 2010.
- 11) (財)沿岸技術研究センター：港湾・空港における水砕スラグ利用技術マニュアル, pp.46-47, 2007.
- 12) 松田博, 來山尚義, 安藤義樹, 中野恭夫：水砕スラグの地盤工学的有効利用に関する基礎的研究、地盤と建設, Vol.16, No.1, pp.33-40, 1998.
- 13) 山本親志, 岡本明男, 河野伊一郎：軟質水砕スラグの締固め特性について, 土木学会第 36 回年次学術講演会講演概要集Ⅲ, pp.714-715, 1981.
- 14) 篠崎晴彦, 松田博, 坂井悦郎, 小野幸一郎, 鈴木操, 中川雅夫：高炉水砕スラグの硬化特性と地盤改良工法への適用, 土木学会論文集 C, Vol.62, No.4, pp.858-869, 2006.12.
- 15) 松田博, 來山尚義, 高宮晃一, 村上剛敏, 中野恭夫：高炉水砕スラグの地盤改良材としての適用性に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.764/Ⅲ-67, pp.85-99, 2004.6.
- 16) 河野伊一郎, 二町宣洋, 遠藤隆, 井ノ口哲生：水砕スラグの硬化特性に関する考察, 第 36 回中国四国支部研究発表講演集, Ⅲ-22, pp.199-200, 1984.
- 17) 篠崎晴彦, 松田博, 白元珍：高炉水砕スラグの硬化に伴う繰返しせん断強度特性の変化, 土木学会論文集 C, Vol.64, No.1, pp.175-180, 2008.3.
- 18) 菊池喜昭, 木村淳治, 水谷崇亮, 永留健：高炉水砕スラグの硬化に及ぼす pH, Ca^{2+} の影響, 土木学会論文集, No.799, Ⅲ-72, pp.195-200, 2005

第2章 従来の研究

- 19) 菊池喜昭, 池上正春, 山崎浩之: 港湾構造物の裏込めに用いた高炉水砕スラグの経年変化に関する研究, 土木学会論文集, No.799/III-72, pp.171-182, 2005.9.
- 20) 菊池喜昭, 箕作幸治, 小野幸一郎, 鈴木操, 藤井郁男: 高炉水砕スラグ埋立地盤の地盤特性の経時変化(その 1.固結の経時変化特性), 土木学会第 60 回年次学術講演会, pp.147-148, 2005.9.
- 21) (社)地盤工学会: 高炉水砕スラグの地盤工学的利用促進に関する研究委員会報告書, pp.41-42, 2010.
- 22) 善功企, 山崎浩之, 渡辺篤, 芳沢秀明, 玉井章友: セメント混合した砂質土の埋立工法に関する研究—改良土の基本的特性と混合・埋立実験—, 港湾技研資料, No.579, pp.1-41, 1987.
- 23) 奥村哲夫, 成田国朝, 大根義男: 人工的にセメンテーション効果を与えた砂の非排水繰返し強度, 土質工学会論文報告集, Vol.29, No.2, pp.169-180, 1989.
- 24) 山本哲朗, 山内智也, 堀淵幸司: 砂〜シルト地盤に対する液状化対策としてのセメント安定処理の効果に及ぼす粒度の影響, 土木学会論文集, No.541/III-35, pp.133-146, 1996.
- 25) 篠崎晴彦: 高炉水砕スラグの水硬性および地盤材料としての適用性に関する研究, 学位論文, pp.24-58, 2008.
- 26) 菊池喜昭, 中島研司, 木村淳治, 水谷崇亮: 高炉水砕スラグの硬化促進方法と硬化強度評価方法の検討, 土木学会論文集 C, Vol.67, No.1, pp.145-159, 2011
- 27) 石橋利倫, 松田博, 石藏良平, 堀田晋吾, 山下昌木: 高炉水砕スラグのアルカリ成分溶出特性と覆土材の吸着効果, 第 45 回地盤工学研究発表会講演集, pp.2007-2008, 2010.
- 28) 石橋利倫, 松田博, 石藏良平, 和田正寛: 高炉水砕スラグのアルカリ成分溶出特性と軽量盛土材への適用, 第 9 回地盤改良シンポジウム論文集, pp.107-110, 2010.11.
- 29) 河野伊一郎, 難波, 二町宣洋: 水砕スラグの工学的性質に関する研究, 第 34 回土木学会中国支部研究発表会講演概要集, III-25, pp.222-223, 1982
- 30) 河野伊一郎, 二町宣洋, 渡辺茂身: 水砕スラグの路床材としての考察, 第 13 回土質工学研究発表会概要集, pp.1337-1340, 1978.
- 31) 山本親志, 嶋田洋二, 河野伊一郎: 通常転圧による水砕スラグの軽量土木用材としての適性, 土木学会第 38 回年次学術講演会講演概要集 III, pp.363-364, 1983.
- 32) 山本親志, 岡本明男, 小野凌: 水砕スラグの潜在水硬性を利用した現場工事の応用例, 土木学会第 38 回年次学術講演会講演概要集 III, pp.365-366, 1983.
- 33) 山本親志, 島崎信明, 河野伊一郎: 軽転圧による水砕スラグの軽量土木用材としての適

第2章 従来の研究

- 性, 土木学会第 38 回年次学術講演会講演概要集Ⅲ, pp.367-368, 1983.
- 34) 富永真生, 獅々田昭生, 財木良文, 中里実三: 軟弱地盤における水砕マット工法, 第 12 回土質工学研究発表会概要集, pp.1253-1256, 1977.
- 35) 富永真生, 獅々田昭生, 財木良文, 中里実三: 水砕マット工法 その 2, 第 13 回土質工学研究発表会概要集, pp.1433-1436, 1978.
- 36) 富永真生, 堺信介, 波田耕吉郎, 山内博美: 水砕スラグを用いた軟弱地盤処理工法, 第 13 回土質工学研究発表会概要集, pp.1417-1420, 1978.
- 37) 山本利繁, 福原大輔, 山崎友二, 北森一郎, 南部光広: 埋立地における水砕スラグの地盤特性, 第 18 回土質工学研究発表会概要集, pp.1585-1588, 1983.
- 38) 松永康男, 竹内大輔, 戸川准一, 昆野功, 山中量一: 岸壁裏埋材に利用された軽量地盤材料としての高炉水砕スラグの特性, 土木学会第 52 回年次学術講演会Ⅲ, pp.654-655, 1997.
- 39) 宮島正悟, 安達明宏, 濱本晃一, 戸川准一, 遠山俊一, 山中量一: 岸壁裏埋材に利用された軽量地盤材料としての高炉水砕スラグの特性 (第 2 報) 土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集Ⅲ, pp.222-223, 1998.
- 40) 運輸省第三港湾建設局神戸港湾震災復興事務所, 財団法人沿岸開発技術研究センター: 神戸港 直轄災害復旧事業 施工技術開発調査 (その 2) 報告書 (その 4) - 軽量地盤材料による岸壁の復旧 - ~水砕スラグ~, 1997.
- 41) 西勝, 佐藤康文, 山田史郎, 南部光広, 後藤毅: 高炉水砕スラグの土質特性, 第 17 回土質工学研究発表会概要集, pp.2653-2656, 1982.
- 42) 西勝, 佐藤康文, 南部光広: 埋立地盤造成材料としての高炉水砕スラグの強度特性, 土と基礎, 30-12, pp.41-48, 1982.
- 43) 西勝, 中村憲正, 佐藤康文, 山田史郎, 南部光広: 鉄鋼スラグ地盤の諸特性観察結果, 第 16 回土質工学研究発表会概要集, pp.793-796, 1981.
- 44) 西勝, 中村憲正, 佐藤康文, 山田史郎, 南部光広: 鉄鋼スラグ地盤の諸特性観察結果 (その 2) - 高炉水砕スラグについて -, 第 17 回土質工学研究発表会概要集, pp.2649-2652, 1982.
- 45) 西勝, 中村憲正, 佐藤康文, 山崎友二, 南部光広: 鉄鋼スラグ地盤の諸特性観察結果 (その 3) - 高炉水砕スラグについて -, 第 18 回土質工学研究発表会概要集, pp.1589-1592, 1983.
- 46) 河野伊一郎, 大島満久, 二町宣洋: 水砕スラグによる垂直盛土工, 第 35 回土木学会中

第2章 従来の研究

国四国支部研究発表会概要集, pp.275-276, 1983.

- 47) 宮田康人, 沼田哲始, 豊田恵聖, 佐藤義夫, 小田静: 高炉水砕スラグの海底設置実験, 日本造船学会第15回海洋工学シンポジウム, pp.339-346, 2000.

第3章 高炉水砕スラグの軽量地盤材料としての適用性

3. 1 はじめに

軟弱地盤上に盛土を行う場合の沈下安定対策の一つに軽量盛土工法がある。この工法に用いる材料は軽量性かつ高い強度が求められる。一方、高炉水砕スラグ（以下、水砕スラグ）は軽量性、高強度、透水性に優れ、水和反応により硬化する潜在水硬性を有しているため、地盤安定上は有利であると考えられる。水砕スラグは、既に港湾工事において埋立て材や護岸・岸壁などの裏込め材として利用されている他、サンドコンパクションパイル工法などの地盤改良材としての利用が試みられている^{1)~3)}。水砕スラグの港湾工事への適用にあたってはすでに検討が行われ、マニュアルも制定されている⁴⁾。

一方、水砕スラグの土工材料としての実用化にあたっては陸上構造物に適用した水砕スラグの経時的な特性変化を把握する必要がある。しかし、水砕スラグを陸上構造物に適用した施工事例はあまり見られず⁵⁾、物理・力学特性の経年変化を計測した事例はほとんどない。また、水砕スラグを土工材料として使用した場合、アルカリ成分の溶出によりpHが上昇し、降雨等によって地下水に浸透し周辺環境に影響を及ぼすことが懸念される。

自然環境下で長期間放置した水砕スラグの物理・力学特性の経年変化および環境への影響を把握できれば、水砕スラグの土工材料としての利用促進に大きく貢献できると考えられる。

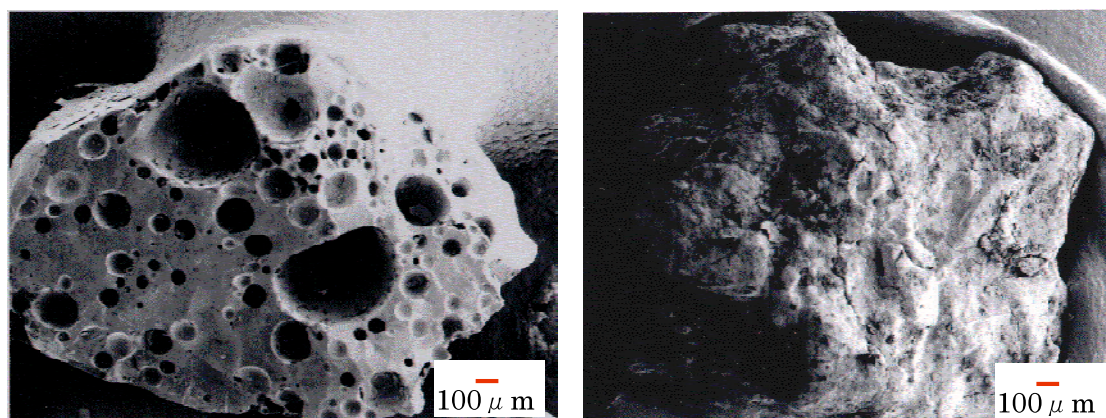
そこで、水砕スラグを軽量盛土材として適用した場合を想定し、全国に先駆け、山口県宇部市内において、2001年11月に水砕スラグを用いた試験盛土の施工し⁶⁾⁷⁾、施工後13年に亘って諸特性の変化について調査している。

本章では、水砕スラグを軽量盛土材として適用した現場において、水砕スラグの盛土材としての施工性を調べるとともに、施工直後から現場計測およびサンプリング供試体に対する室内試験を継続的に実施し、水砕スラグ試験盛土の物理・力学特性の経年変化と周辺地下水への影響について述べる。なお、本研究では施工後8年および11年経過時のサンプリング試料について試験を実施しており、過去の報告内容⁶⁾⁷⁾と併せて考察する。

3. 2 現場試験盛土に用いられた高炉水砕スラグの基本的性質

3. 2. 1 試料と微視構造

試験盛土に使用した水砕スラグは製鉄所内で約4ヶ月間仮置きした後、粉砕した材料である。写真3.1に、同一製鉄所の製造後間もないフレッシュな水砕スラグ（以下、水砕スラグA）および試験盛土に使用した水砕スラグ（以下、水砕スラグB）粒子の電子顕微鏡による写真を示す。写真から分かるように、水砕スラグAは粒子内部が多孔質であり、角張った形状を示している。試験盛土に使用した水砕スラグBは、水砕スラグBは製鉄所で4ヶ月間の仮置きにより自然環境下で一度硬化した後、クラッシャーによって破砕したものである。



(a) 水砕スラグA

(b) 水砕スラグB

写真3.1 水砕スラグ粒子拡大写真

3. 2. 2 高炉水砕スラグの物理的性質および締固め特性

(1) 土粒子密度および最大・最小間隙比

盛土材料として使用した水砕スラグBの物理試験結果を表3.1に示す。比較のため水砕スラグAおよび玄海灘で採取した玄海砂の結果も併せて示す。

各試料とも、土粒子密度は類似しているが、水砕スラグは玄海砂に比べて最大・最小間隙比が大きい。また、試験盛土に使用した水砕スラグBの最大・最小間隙比は水砕スラグAと比較して小さくなっている。これは、水砕スラグBは4ヶ月間の仮置きにより自然環境下で

一度硬化した後、クラッシャーによって破碎したことによる粒子形状の変化、細粒分の増加により充填性が向上したことなどが考えられる。

(2) 粒度特性

図 3.1 に、各試料の粒径加積曲線を示す。試験盛土に使用した水砕スラグ B は、自然砂に類似した粒度分布を示し、フレッシュな水砕スラグ A と比較して、細粒分が増加している。前述したように、一度硬化した水砕スラグをクラッシャーで破碎したことによると考えられる。

表 3.1 各試料物理特性

| | Soil particle density ρ_s (g/cm ³) | Maximum void ratio e_{max} | Minimum void ratio e_{min} |
|-------------|--|---------------------------------|---------------------------------|
| GBFS-A | 2.624 | 1.521 | 1.043 |
| GBFS-B | 2.766 | 1.445 | 0.893 |
| Genkai sand | 2.661 | 0.802 | 0.493 |

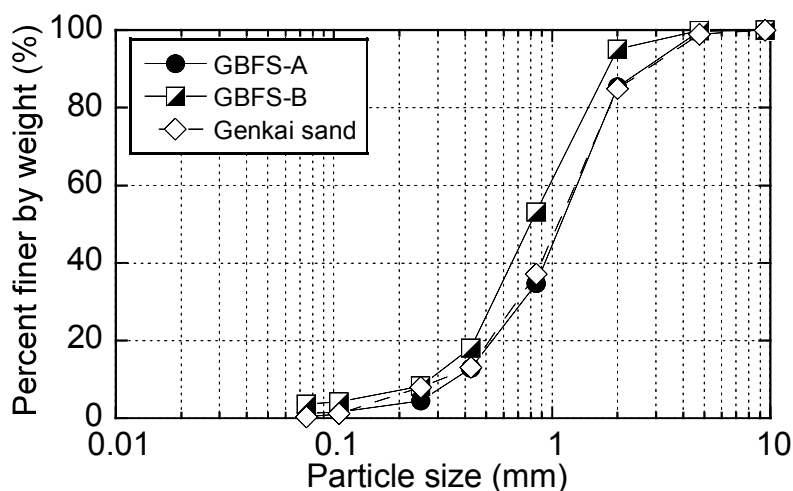


図 3.1 粒径加積曲線

(3) 締固め

図 3.2 に水砕スラグの締固め曲線を示す。試験は JIS A 1210 A-c 法に準じて実施した。水砕スラグの乾燥密度は玄海砂と比較して小さい値を示している。また、水砕スラグの締固め度は玄海砂のような自然砂と比較して含水比による影響をほとんど受けずに一定値を示しており、試験盛土に使用した水砕スラグ B の乾燥密度 ρ_d は、含水比 $w=17.8\%$ の時に最大

となり 1.38g/cm^3 であった。このような傾向は既に示されており、水砕スラグを盛土材料として使用する場合は、施工時に含水比の特別な管理を必要としないために施工管理が容易となる⁵⁾。

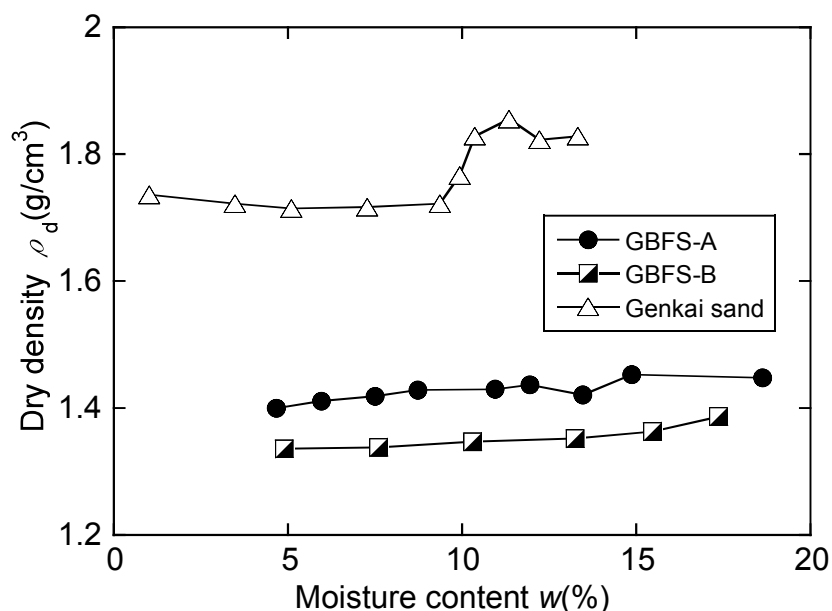


図 3.2 締固め曲線

3. 2. 3 高炉水砕スラグの力学的性質

(1) せん断強度特性

ここでは、未硬化状態にある水砕スラグの静的せん断強度特性を把握するため、表 3.1 に示した水砕スラグ B に対して圧密排水三軸圧縮試験を実施した²⁾。比較のために、玄海砂に対しても同様の試験を行った。水砕スラグは多孔質であるため、飽和供試体の作製時には、試料内の空隙が飽和するように試料をあらかじめ脱気水に浸し、数日間負圧を与えた。その後、供試体を水中落下法で作製し、B 値 0.95 以上を確保した。供試体の寸法は、直径 50mm、高さ 100mm とし、相対密度 $D_r=80\%$ になるように作製した。その後、有効拘束圧 σ'_3 を 50, 100, 150, 300, 500kPa とし、等方圧密後、排水三軸圧縮試験（ひずみ速度 0.3%/min）を行った。

図 3.3 に水砕スラグ B および玄海砂の応力比 q/p' と軸ひずみ ε_a の関係および体積ひずみ ε_v と軸ひずみ ε_a の関係を示す。ここで $q=\sigma_1-\sigma_3$ 、 $p'=(\sigma'_1+2\sigma'_3)/3$ である。応力比と軸ひずみの

関係では、水砕スラグ B は、ピーク応力比に達するまでに 5%以上の軸ひずみが生じている。水砕スラグ B は、有効拘束圧の増加に伴い、応力比と軸ひずみ関係の傾きが小さくなり、応力比も低下する傾向を示した。玄海砂においても有効拘束圧の増加に伴い、応力比は低下する傾向を示すものの、特に有効拘束圧が低い場合には、水砕スラグ B と比較してその程度が小さいことがわかる。体積ひずみと軸ひずみの関係では、両者ともに有効拘束圧の増加に伴い、体積は収縮側に向かう傾向を示した。しかし、その程度は水砕スラグ B の方が大きいことがわかる。このような有効拘束圧の増加に伴う応力比の低下や体積収縮の傾向は、せん断による粒子破碎の影響と考えられる。せん断前後の粒径分布の比較により水砕スラグに粒子破碎が生じることがすでに報告されている²⁾。

図 3.4 (a), (b)に各材料についてのモールの応力円を示す。両図は、応力比最大時のモール円を示しており、有効拘束圧 $\sigma'_3=50, 500\text{kPa}$ に対応するモール円に対して原点を通る接線を描いた最大・最小内部摩擦角も併せて示している。各材料とも有効拘束圧の増加に対して内部摩擦角が低下しており、载荷に伴う粒子破碎の影響が見られる。図に示されるように、未硬化時における試験盛土に使用した水砕スラグ B は、有効拘束圧の大きさに依らず、玄海砂と同等もしくはそれ以上の内部摩擦角を有していることが分かる。

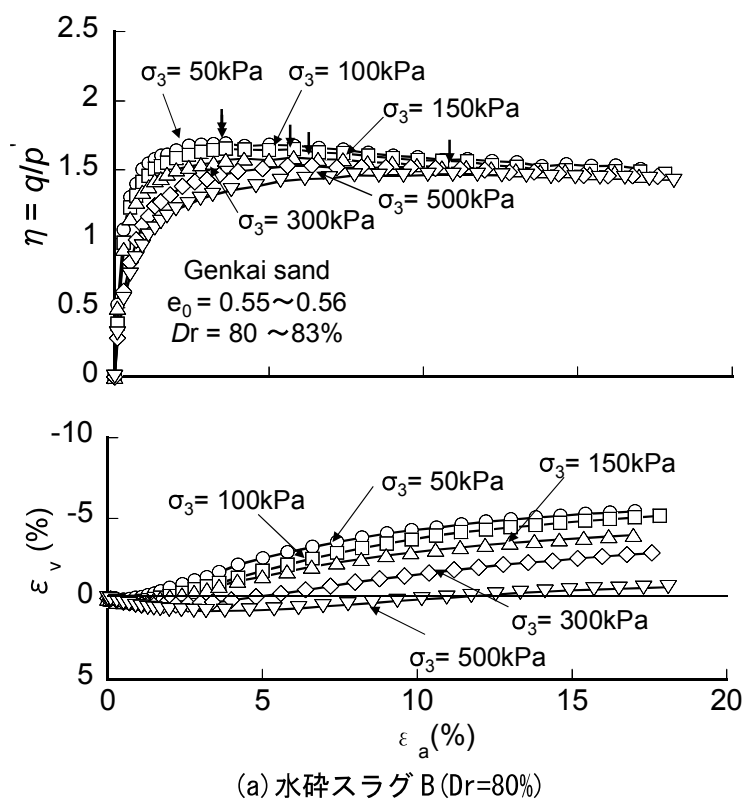


図 3.3 応力比および体積ひずみと軸ひずみの関係⁶⁾⁷⁾

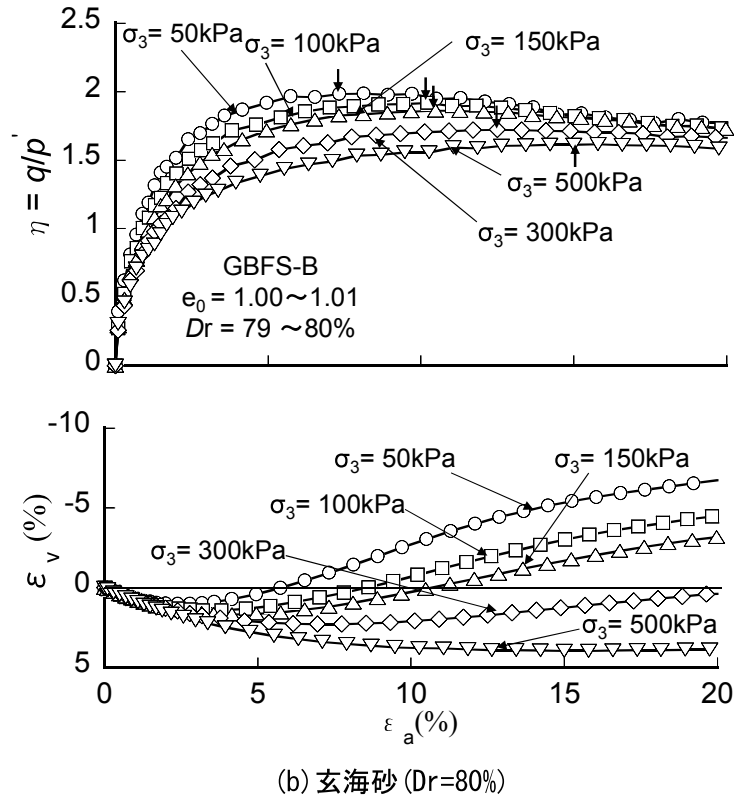
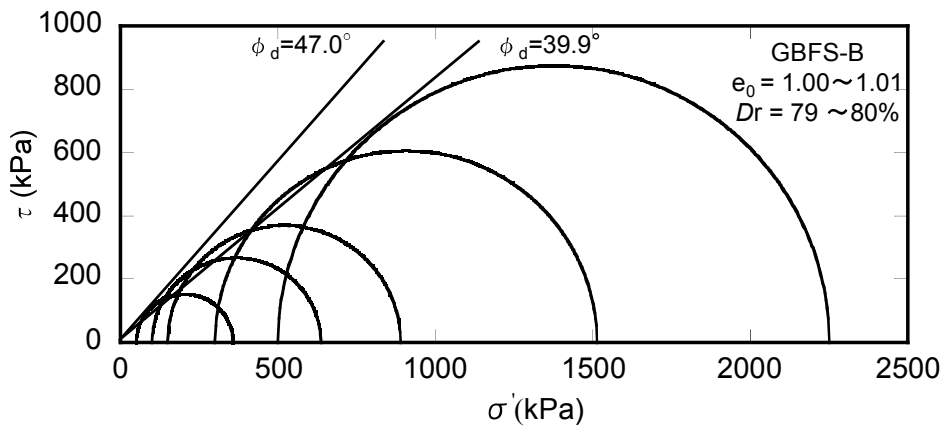
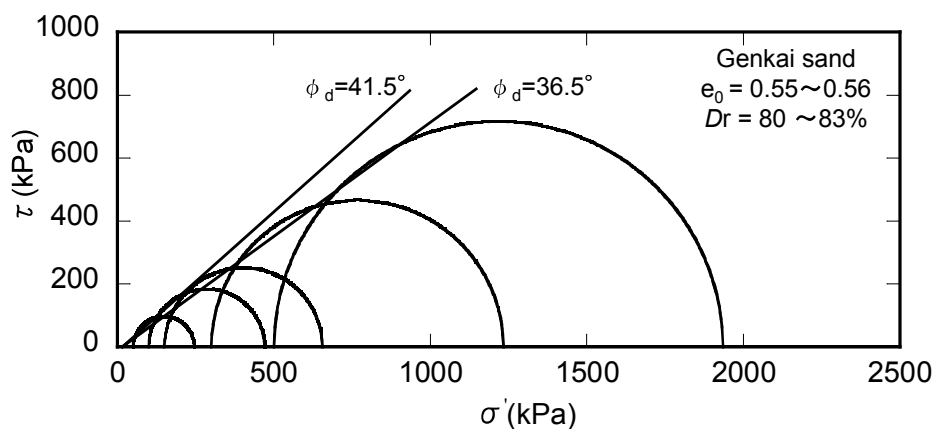


図 3.3 応力比および体積ひずみと軸ひずみの関係⁶⁾⁷⁾



(a) 水砕スラグ B ($Dr=80\%$)

図 3.4 モール応力円⁶⁾⁷⁾



(b) 玄海砂 (Dr=80%)

図 3.4 モール応力円⁶⁾⁷⁾

(2) 透水特性

未硬化時の水砕スラグおよび玄海砂の透水係数を比較したものが表 3.2 である。いずれも定水位透水試験によって得られた結果であって、試験盛土に使用した水砕スラグ B の透水係数は、相対密度によらず玄海砂と同程度の透水係数を有している。

表 3.2 透水係数の比較⁶⁾⁷⁾

| | Dr(%) | k(m/s) | Dr(%) | k(m/s) |
|-------------|-------|-------------------------------|-------|-------------------------------|
| GBFS-A | 65 | $2.5 \sim 3.2 \times 10^{-3}$ | 82 | $1.7 \sim 2.2 \times 10^{-3}$ |
| GBFS-B | 50 | 5.4×10^{-4} | 80 | 2.5×10^{-4} |
| Genkai sand | 62 | $6.1 \sim 7.3 \times 10^{-4}$ | 83 | $3.3 \sim 3.9 \times 10^{-4}$ |

3. 3 現場試験盛土の概要と施工性

3. 3. 1 施工規模および調査内容

水砕スラグ試験盛土は、山口県宇部市において、2001年11月に施工が行われた⁶⁾⁷⁾。施工現場は、山口県宇部市中川沿いに位置する。図3.5に、試験盛土位置図を示す。盛土完成直後と施工後約13年経過した2014年9月の試験盛土の全景を写真3.2、3.3に示す。図3.6に試

験盛土の平面図，断面図および各計測位置の状況を示す．事前に実施したボーリング調査によると支持地盤は，表層に5mまで緩い砂層が堆積し，その下層には厚さ約6m程度の軟弱な沖積粘土層が堆積している．試験盛土は，水砕スラグを盛土材料として用い，17m×23m×2m（盛土厚）の規模で施工を行った．



図 3.5 試験盛土の施工箇所位置図



写真 3.2 試験盛土の完成状況



写真 3.3 施工後 10 年以上が経過した試験盛土外観写真

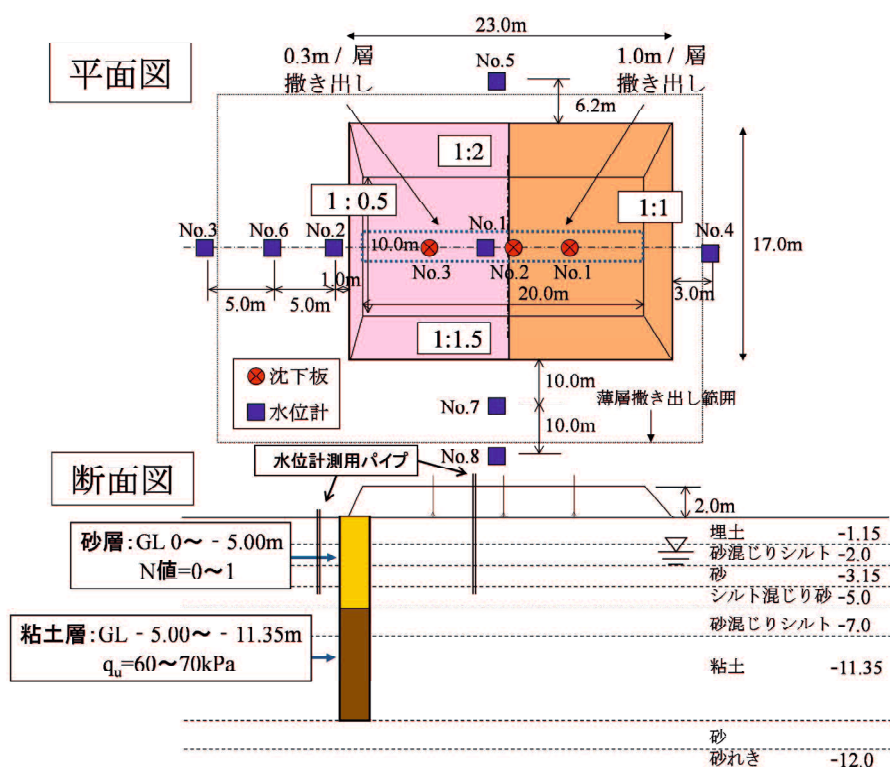


図 3.6 試験盛土の平面図および断面図

普通土による盛土施工では通常1層あたり0.3mでの撒き出し厚で施工が行われる。本研究では、図3.6に示した盛土の左側1/2は1層あたり0.3mの撒き出し厚で施工を行い、盛土の右側1/2については水砕スラグの粒子形状が角ばった形状をしていることに起因したインターロッキング効果を期待し、1層当たり1.0mの撒き出し厚でも施工を行い、その効果についても調査した。また、水砕スラグは天然砂と比較して大きい内部摩擦角を有することが示されていることから、各法面勾配を変化させ施工可能な法面勾配についても調査を行った。

第3章 高炉水砕スラグの軽量地盤材料としての適用性

さらに水砕スラグはCaO, MgOを多く含むアルカリ性の材料であり、これらの成分は水に溶解し流出する⁴⁾。そのため、試験盛土周辺地盤の地下水への影響が懸念される。そこで、**図3.6**に示す水位計から定期的に地下水をくみ出し、そのpHの経年変化についても調べた。地下水位は、地表面から平均で約-1.56mであった。地下水位計測用パイプは、表層から-3.15m以深のシルト混じり砂の途中の深さまで設置した。なお、本節で述べる深度とは、高炉水砕スラグ盛土体の天端からの深さを意味する。

整地後あらかじめ、**図3.6**に示す位置に沈下版(**図3.7, 写真3.4**)を3ヶ所、水位計(観測井戸)を8ヶ所設置した(**写真3.5**)。また、同図に示す位置でボーリングを行った結果、在来地盤は表層から5mは緩い砂層、その下層厚さ約6m程度は軟弱な沖積粘土層であった。

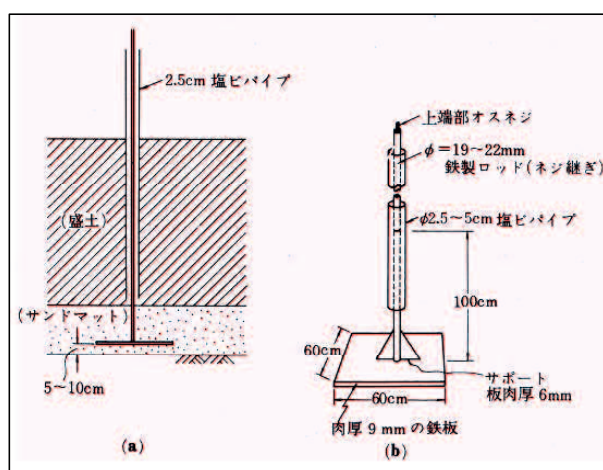


図 3.7 沈下板概要⁶⁾⁷⁾



写真 3.4 沈下板外観写真⁶⁾⁷⁾



写真 3.5 沈下板および観測井戸設置後⁶⁾⁷⁾

調査内容は以下のとおりである。

(1) 施工性

①撒き出し層厚

普通土では通常、1層 0.3m で撒き出しが行われる。しかし、水砕スラグは、粒子形状の角ばりと繊維状物質が混在していることから得られる“インターロッキング効果”により、1層 1.0m の撒き出しが可能と考えられるため、その確認を行う。

②法面勾配

水砕スラグは、普通土と比較して大きな内部摩擦角を有しているため、法面をどの程度の勾配で形成できるかを確認する。

③法面保護

水砕スラグは、普通土と比較して高強度・高透水性であることその他、潜在水硬性を有しているため法面保護が必要であるかどうかを確認する。

(2) 物理特性の経年変化

①湿潤密度

水砕スラグを軽量盛土材料として使用するため、水砕スラグの軽量性を確認する必要がある。また、併せて長期的に生じる湿潤密度の変化について現場密度試験を行って把握する。

②含水比

水砕スラグの潜在水硬性が、含水比に及ぼす影響を確認する。

③乾燥密度

水砕スラグの潜在水硬性が、乾燥密度に及ぼす影響を確認する。

(3) 沈下特性

水砕スラグの粒子破碎に伴い生じる圧縮沈下および載荷状態時における雨水の浸透に起因して生じる圧縮沈下等の確認を行う必要がある。そこで盛土体の圧縮沈下量の変化について沈下測定（沈下板の設置）を行い把握する。また、併せて盛土荷重による在来地盤の沈下量の変化についても把握する。

(4) 強度特性の経年変化

水砕スラグは普通土と異なり時間の経過とともに固結し、強度増加するため盛土の安定性について有利となる。したがって、水砕スラグの強度特性の変化について一軸圧縮試験および圧密排水三軸圧縮試験等行って把握する。

(5) 透水特性の経年変化

盛土材料の透水性は設計上規定されていないが、一般的に排水性の良い材料が要求される。高炉水砕スラグの場合、潜在水硬性の発現に伴う透水性の低下が懸念されるため、盛土施工前後で透水試験を実施し透水特性の変化について把握する。

(6) 環境への影響

水砕スラグは、CaO、MgO を多く含むアルカリ性物質であり、これらの成分が水に溶解し流出する。したがって、盛土施工付近での地下の pH の測定を行って把握する。

3. 3. 2 盛土の施工性

(1) 撒き出し層厚

図 3.2 に示した締固め試験結果より、水砕スラグ B における乾燥密度の最大値の 90% ($\rho_d=1.25\text{g/cm}^3$) を締固め管理基準値⁸⁾として設け、各施工段階の転圧終了時に砂置換による現場密度試験⁹⁾を行い、これを満足する転圧回数を調べた。転圧には、3.5t 湿地ブルドーザを用いた。

図 3.8 に 1 層当たり 0.3m で撒き出した場合の転圧回数と現場密度の関係を示す。同図より 3 回程度転圧することにより管理基準値を満たすことが分かる。先述したように 1 層当たりの撒き出し厚さを盛土の半分は 1 層 0.3m 厚さ、盛土の残り半分では 1 層 1.0m 厚さとし、1 層あたり 3 回の転圧にて施工を行った。

各撒き出し域における乾燥密度の深度分布を図 3.9 に示す。同図より、0.3m/層の撒き出し域では全ての深度において管理基準値を満足するが、1.0m/層の撒き出し域では一部で管理基準値を下回る結果となった。これは規定した転圧回数が 0.3m/層撒き出しを基準として転圧回数を決めたため、1.0m/層撒き出し域においては撒き出し層下部において、十分な締固めが行えなかったことが原因と考えられる。ただし、水砕スラグを盛土材として 1.0m/層

の撒き出し厚さで施工する場合も、転圧回数を増やすことによって、所定の密度管理基準値を満たす施工を行える可能性がある。

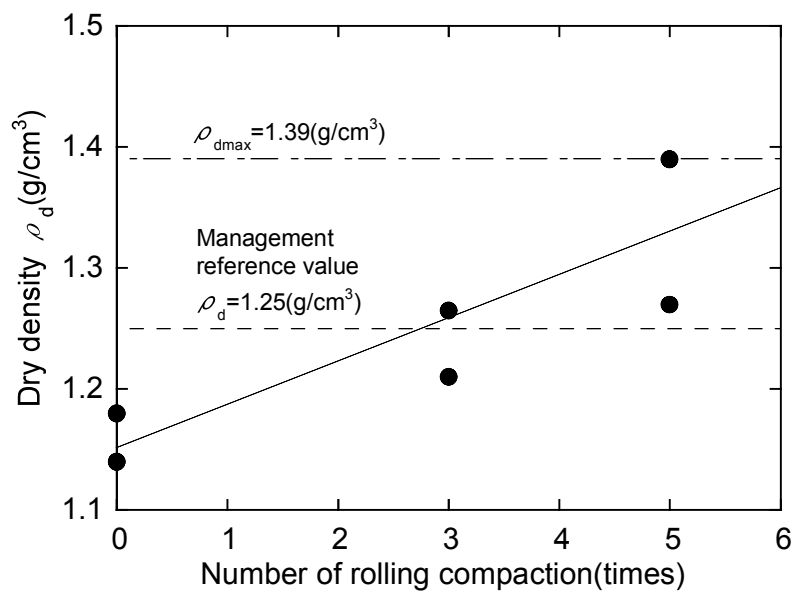


図 3.8 転圧回数と乾燥密度の関係⁶⁾⁷⁾



写真 3.6 盛土転圧状況⁶⁾⁷⁾

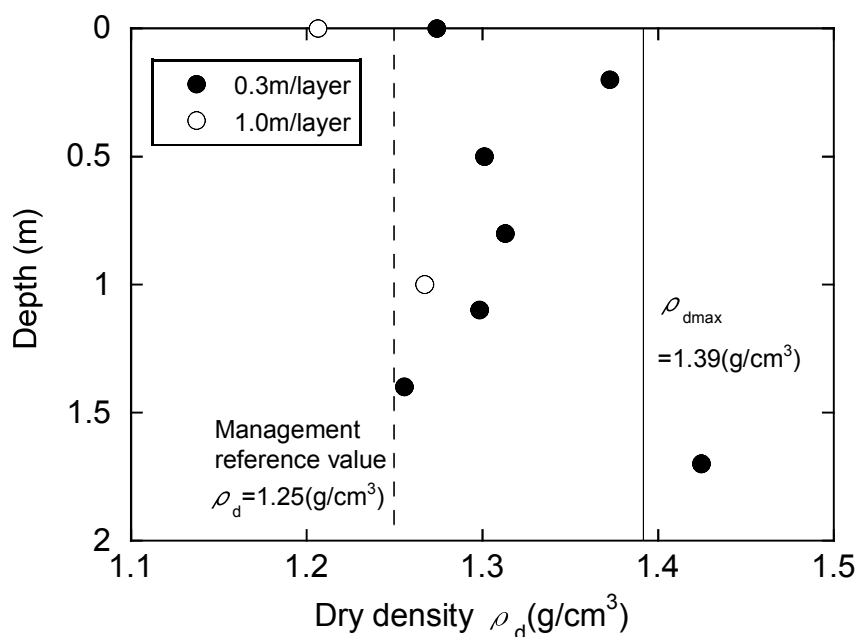


図 3.9 乾燥密度の深度分布⁶⁾⁷⁾

(2) 法面勾配

水砕スラグを用いた盛土法面の最急勾配について図 3.6 に示した各法面において異なる勾配での施工を行った。その結果、計画段階での 1:0.5 および 1:1.0 の勾配では法面が崩壊し、完成時の最急勾配は 1:1.4 であった。同勾配の法面は、盛土施工後約 10 年以上が経過した現在においても法面崩壊等を生じることなく安定している。このことから、水砕スラグを盛土材料として用いる場合、法面勾配が 1:1.5 程度であれば安定性を保つことができるものと考えられる。ただし試験盛土の盛土高は 2.0m と比較的低いため、それ以上の盛土高については、試験施工を実施するなど事前の確認が必要になると考えられる。



写真 3.7 法面形成状況⁶⁾⁷⁾

表 3.3 計画法面勾配および実施法面勾配⁶⁾⁷⁾

| Planing slope gradient | Practicing slope gradient |
|------------------------|---------------------------|
| 1:2.0 | 1:2.0 |
| 1:1.8 | 1:1.8 |
| 1:1.0 | 1:1.4 |
| 1:0.5 | 1:1.5 |



写真 3.8 形成可能な法面勾配⁶⁾⁷⁾

(3) 法面保護

盛土の法面保護工は、法面の浸食や風化を防止することを目的として植生または構造物により法面を被覆し、排水工や土留め構造物で法面の安定を図るものである。

図 3.10 および写真 3.9 に盛土施工後 4 年経過時の盛土法面の浸食状況平面図、浸食状況写真を示す。各法面では雨水による浸食が数箇所見られ、その程度は浸食幅 15cm、深さ 5cm 程度であった。しかしながら、水砕スラグによって形成された盛土法面は水砕スラグが有する高強度、高透水性および潜在水硬性に起因した土粒子間の固結によって特に目立った浸食も無く、長期にわたって安定していた。これより、まさ土や山砂で造成される盛土法面において特別な法面保護は必要なく、法面施工時に十分な締固めを行っていただくと考えられる。

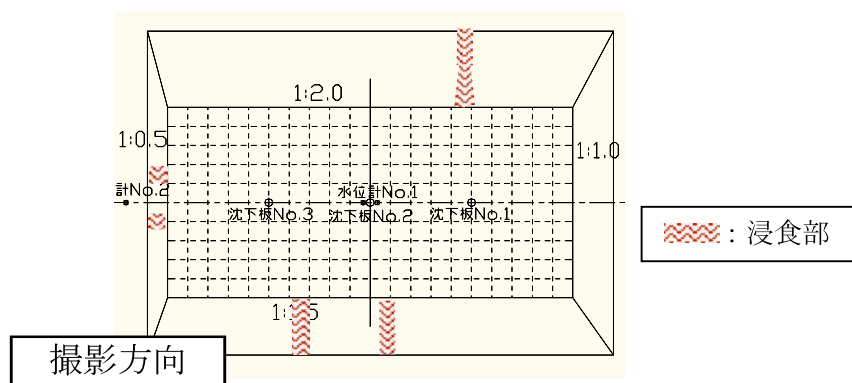


図 3.10 浸食箇所図

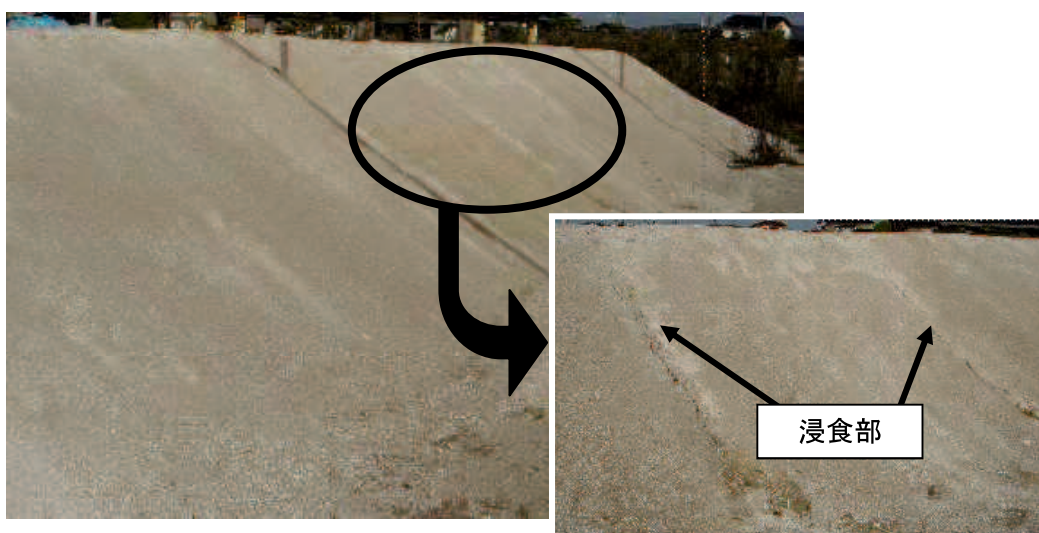


写真 3.9 法面浸食状況⁶⁾⁷⁾

3. 4 諸特性の経年変化

3. 4. 1 物理的性質の経年変化

設計段階における盛土材料の湿潤密度の設定においては、仮定値を用いることが多く、通常、自然土で $\rho_t = 1.94 \sim 2.04 \text{g/cm}^3$ が用いられる¹⁰⁾。水砕スラグは、普通土と比較して未硬化時には軽量であるが、自然環境下で長期間放置した水砕スラグの密度に関する経年変化は明らかにされていない。

そこで水砕スラグの長期的な軽量性を確認するため、施工後、3日、8ヶ月、2年、4年、8年、11年経過時に砂置換法による現場密度試験を実施した。なお、各種試験およびサンプリングについては、各撒き出し域において毎回別の地点で実施し、埋戻しには掘削した盛土材を使用した。

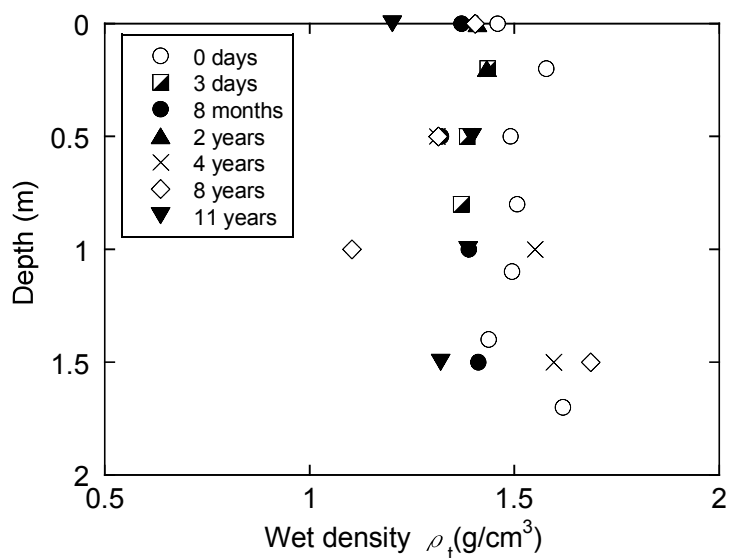
(1) 湿潤密度

図 3.11 に湿潤密度の深度分布を示す。試験は、各深度で 3～5 回の現場密度試験を実施し、その平均値をプロットしている。水砕スラグの湿潤密度にばらつきが見られるものの、各撒き出し域ともに、概ね $\rho_t=1.2\sim 1.5\text{g/cm}^3$ の間にあることが確認できる。全体として、深さ方向に明確な違いは見られず、時間の経過に伴い湿潤密度は小さくなる傾向を示した。

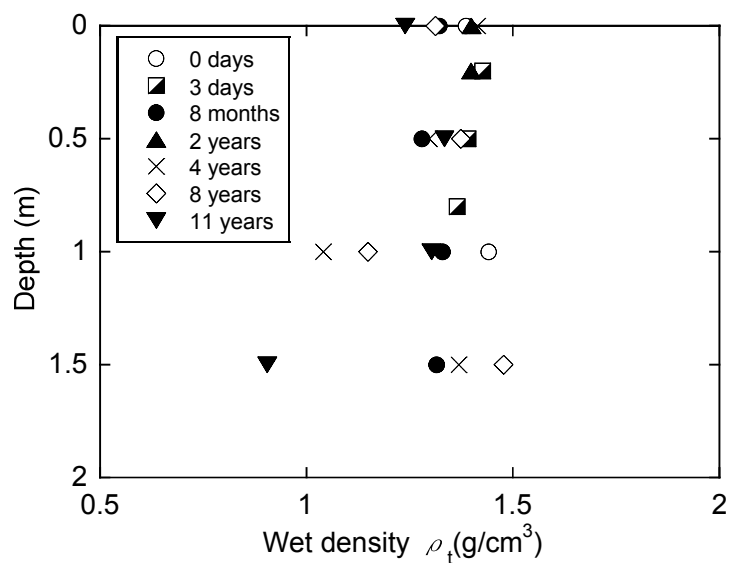
現在、設計に用いられる高炉水砕スラグの湿潤密度は $\rho_t=1.48\text{g/cm}^3$ を標準値としており⁵⁾、スラグ試験盛土の結果は若干これより小さな値となっている。水砕スラグの製造および保管過程における品質にばらつきがあると考えられることから、盛土の軽量効果を十分に発揮させるためには施工前に事前に材料特性を把握し、また施工後には現場密度試験等による軽量効果の確認を行うことが望ましいと考えられる。



写真 3.10 現場密度試験状況



(a) 湿潤密度の深度分布（撒き出し層厚 0.3m）



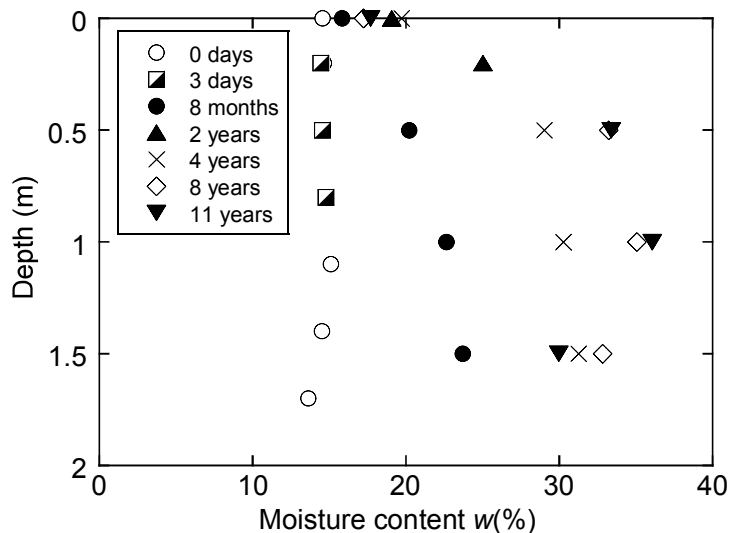
(b) 湿潤密度の深度分布（撒き出し層厚 1.0m）

図 3.11 各撒き出し層における湿潤密度の深度分布

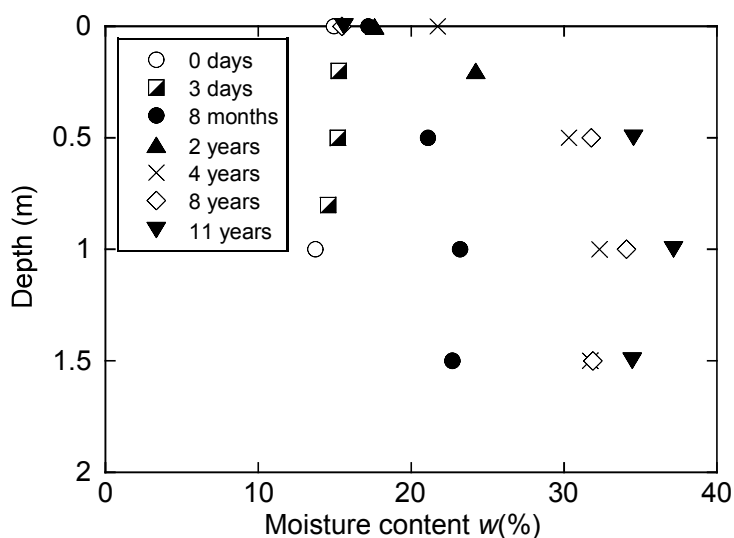
(2) 含水比

図 3.12 に、各撒き出し域における含水比の深度分布を示す。同図より初期の締固め程度によらず、含水比は時間の経過とともに増加しており、また、深度方向に含水比が増加する傾向を示した。両撒き出し域において、盛土施工後約 4 年経過時には、含水比は $w_n=30\%$

以上であることがわかる。盛土完成後は降雨等により盛土内部の含水比は上昇したものと考えられる。



(a) 含水比の深度分布（撒き出し層厚 0.3m）



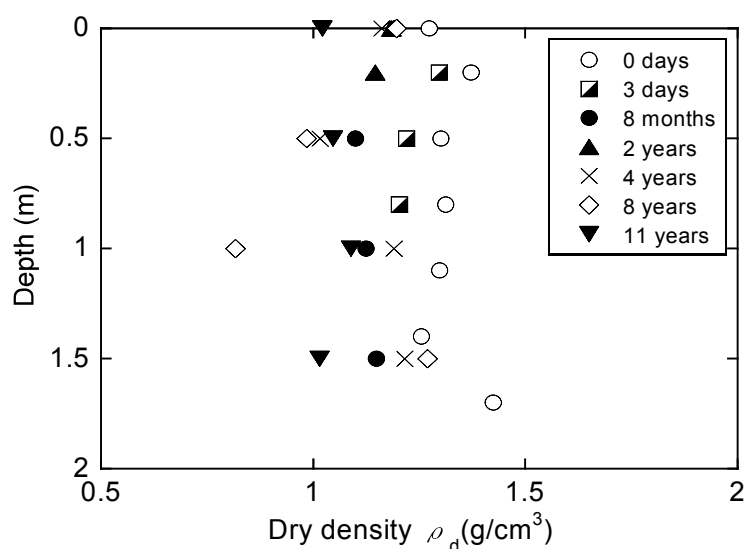
(b) 含水比の深度分布（撒き出し層厚 1.0m）

図 3.12 各撒き出し層における含水比の深度分布

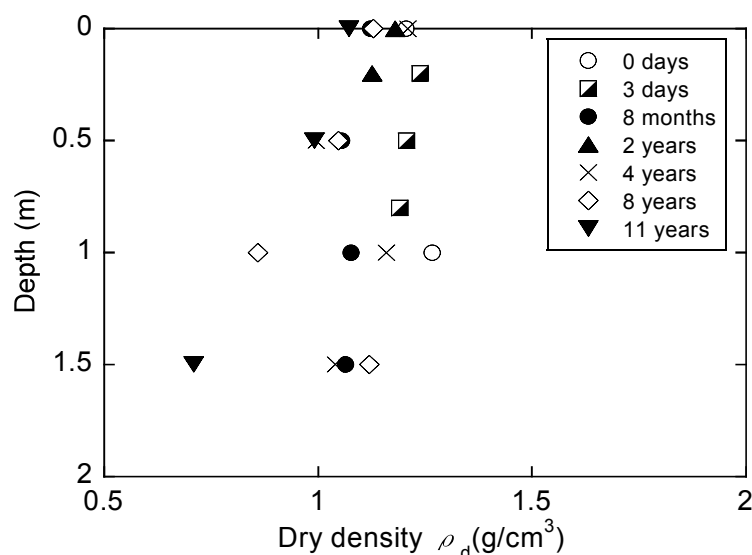
(3) 乾燥密度

図 3.13 に乾燥密度の深度分布を示す。両図ともに、盛土施工時の乾燥密度は深度方向にほとんど差異は見られなかった。また、各撒き出し域ともに、初期締固めの程度に依らず、時間の経過と共に乾燥密度は小さくなっている。そこで、各撒き出し域ごとの乾燥密度の

経年変化を示したものが、図 3.14 である。図中には、各撒き出し域における深度ごとの累乗近似曲線の一部も併記している。両撒き出し域において、施工時の乾燥密度と比較して、自然環境下で長期間放置された水砕スラグ試験盛土の乾燥密度は、同程度もしくは小さくなる傾向を示した。これは、アルカリ成分の溶出にともなう質量の減少などが考えられる。このように、水砕スラグを盛土材として適用した場合、施工初期から施工後 11 年経過した現在においても、普通土と比較して十分な軽量性を維持している。なお、水砕スラグの長期的な密度変化のメカニズムについては今後も検討する必要がある。

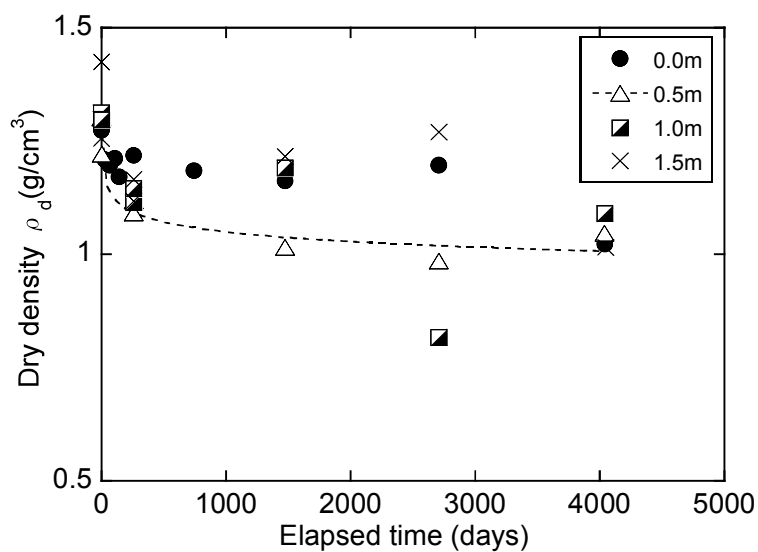


(a) 乾燥密度の深度分布 (撒き出し層厚 0.3m)

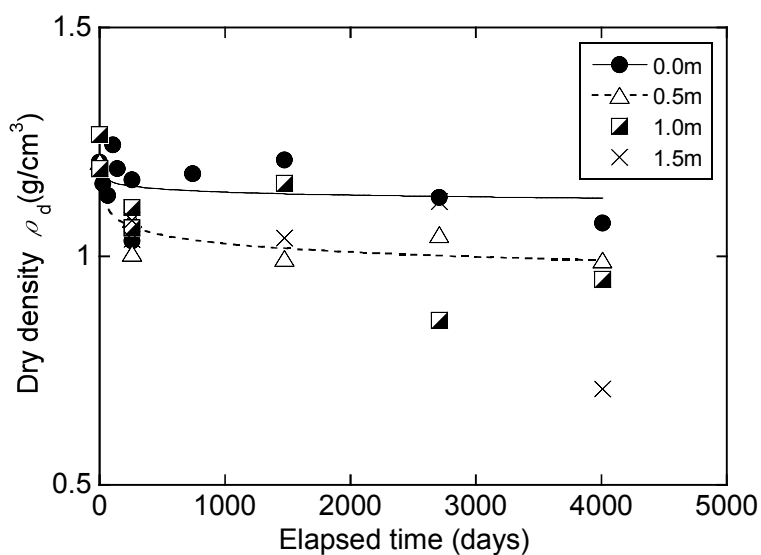


(b) 乾燥密度の深度分布 (撒き出し層厚 1.0m)

図 3.13 各撒き出し層における乾燥密度の深度分布



(a) 乾燥密度の経年変化（撒き出し層厚 0.3m）



(b) 乾燥密度の経年変化（撒き出し層厚 1.0m）

図 3.14 各撒き出し層における乾燥密度の経年変化

3. 4. 2 力学的性質の経年変化

水砕スラグは水中において硬化する性質（水硬性）を有する。しかしながら、盛土材として自然環境下で長期間放置した水砕スラグの力学特性については未だ明らかにされてい

ない。盛土施工後の水砕スラグの強度増加を把握できれば、従来の盛土工法と比較してより経済的な設計が可能となる。そこで、水砕スラグ試験盛土にて現場試験（標準貫入試験）を行うとともに、盛土施工後に定期的に試験盛土からブロックサンプリングを行い、室内試験（一軸圧縮試験、圧密排水三軸圧縮試験）を実施し、力学特性の経年変化について調べた。



写真 3.11 ブロックサンプリング状況

(1) N 値と一軸圧縮強さ

各撒き出し域における標準貫入試験結果を図 3.15 に示す。いずれの撒き出し層厚についても、時間の経過とともに N 値は増加傾向を示し、盛土施工後 4 年経過以降から N 値が収束する傾向を示した。各経過年数で比較すると、すべての経過年数において、0.3m/層撒き出し域の方が 1.0m/層撒き出し域よりも N 値が大きくなっており、締固め程度の違いが水砕スラグの強度増加に大きく影響していることがわかる。また、各撒き出し域において N 値の深度方向の分布に明確な差は見られなかった。なお、1.0m/層撒き出し域では、施工後 8 年経過しても N 値が 50 に達することなく、一定値に収束している。

現場にて採取したブロックサンプルを所定の大きさに切り出した後にトリミングを行い、直径 5cm、高さ 10cm のスラグ供試体を成形した。その後、ひずみ速度 0.3%/min で一軸圧縮試験を行った。

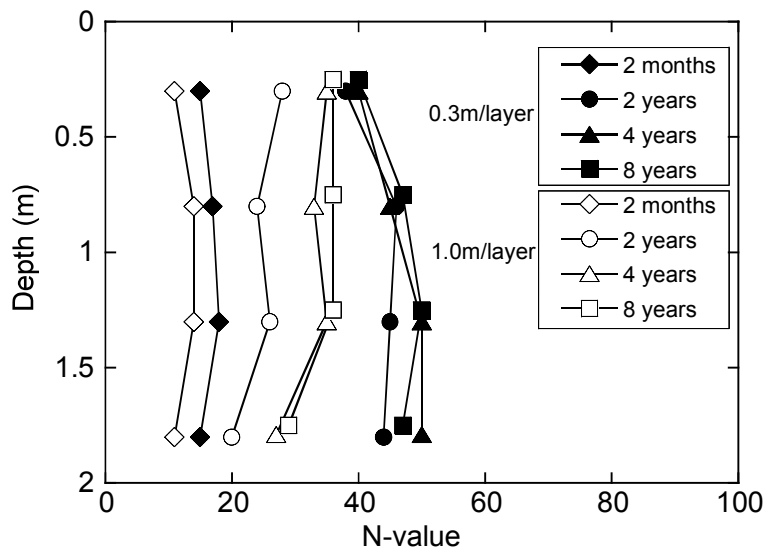


図 3.15 N 値の深度分布

図 3.16 に一軸圧縮強さの深度分布を示す。各撒き出し域において、圧縮強度にばらつきは見られるものの、深度方向に強度の明確な差異は見られない。

図 3.17 に、水砕スラグ供試体を採取した深度における一軸圧縮強さと乾燥密度との関係を示す。両撒き出し域の全体的な傾向として、乾燥密度が小さい方が一軸圧縮強度のばらつきが大きくなる傾向を示した。

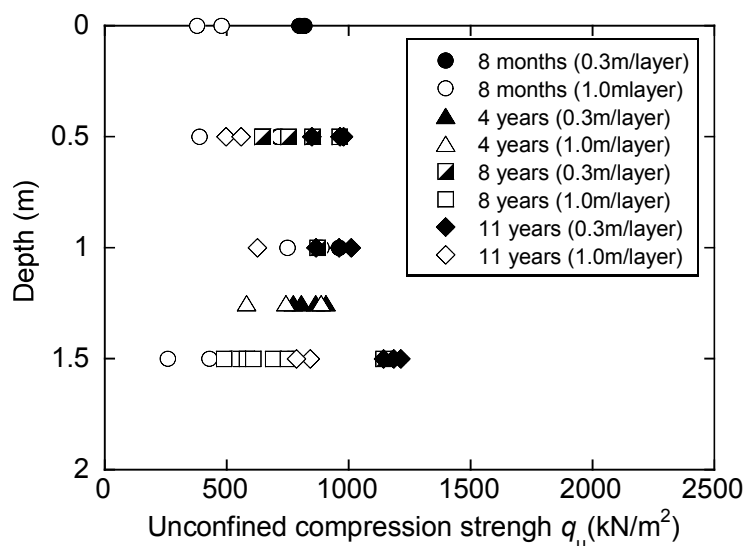


図 3.16 一軸圧縮強さの深度分布

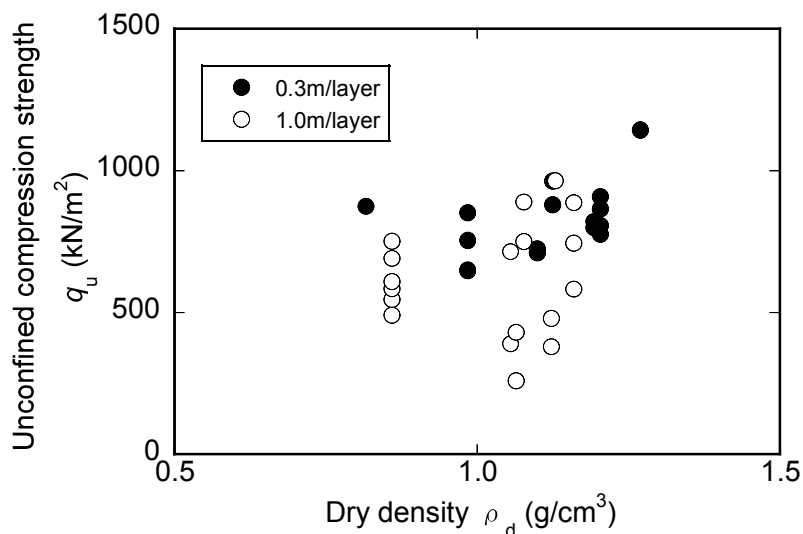


図 3.17 一軸圧縮強さと乾燥密度の関係

両撒き出し域における一軸圧縮強さの経年変化を図 3.18 に示す。8 ヶ月経過時の一軸圧縮強さは、ばらつきがあるものの 1.0m/層撒き出し域では 250kN/m²、0.3m/層撒き出し域で 700kN/m² 以上の一軸圧縮強さが得られ、8 ヶ月経過以降、各撒き出し域ともに一軸圧縮強さにあまり変化は見られない。全体的に、初期締固め程度が大きい 0.3m/層撒き出し域の供試体の方が、一軸圧縮強さは大きくなる傾向を示した。

このように、自然環境下で長期間放置した水砕スラグの一軸圧縮強さは、ばらつきは見られるものの施工初期から増加し、8 ヶ月経過以降の一軸圧縮強さに大きな変化は見られなかった。

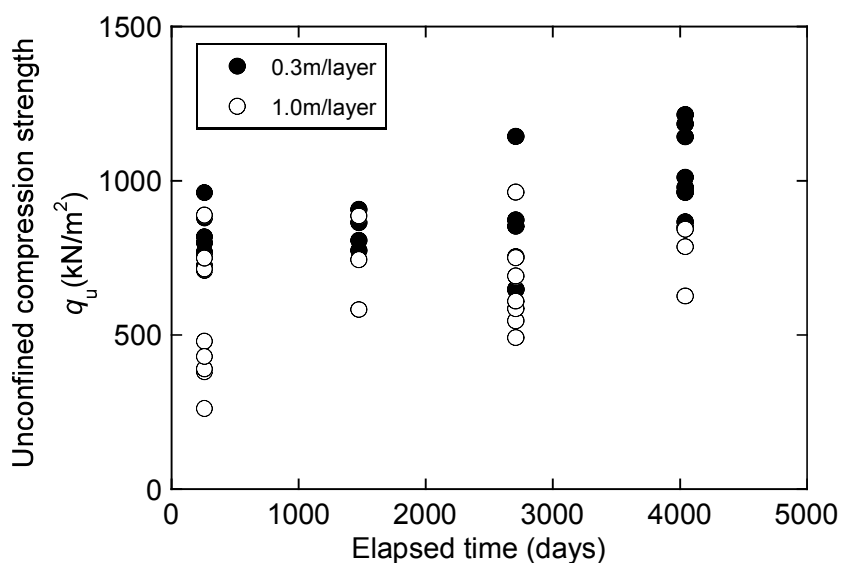


図 3.18 一軸圧縮強さの経年変化

(2) せん断強度定数

ブロックサンプリングした水砕スラグに対してトリミングを行い、直径5cm、高さ10cmのスラグ供試体を成形し、圧密排水三軸圧縮試験(CD)を実施した。試験では背圧を100kPaとし、B値0.95以上を確保した。各撒き出し域の各深度の試料に対して有効拘束圧 σ'_0 を50, 100, 150kPaとして等方圧密後、ひずみ速度0.3%/minの条件で行った。

図3.19に、施工後8年経過した1.0m/層撒き出し域、深度1.5mのスラグ供試体の応力比一軸ひずみ—体積ひずみ関係の例を示す。応力比と軸ひずみの関係では、各有効拘束圧ともに、軸ひずみが5%以下で最大応力比に達している。また、有効拘束圧の増加に伴い応力比は減少傾向を示す。

図3.20に図3.19で示したスラグ供試体におけるモールの応力円を示す。高炉水砕スラグは、潜在水硬性の発現により粘着成分が増加することがこれまでも報告されている²⁾が、図3.20においても、包絡線は明らかに原点を通らず粘着力が生じていることが分かる³⁾¹⁾。

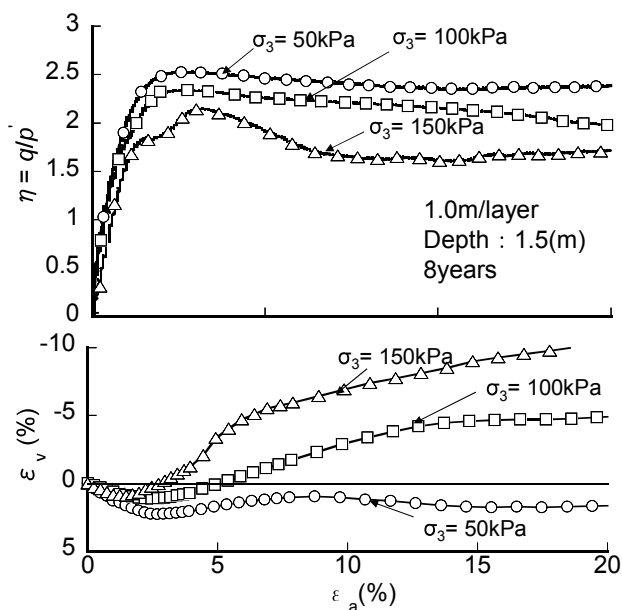


図 3.19 応力および体積ひずみと軸ひずみの関係 (施工後 8 年)

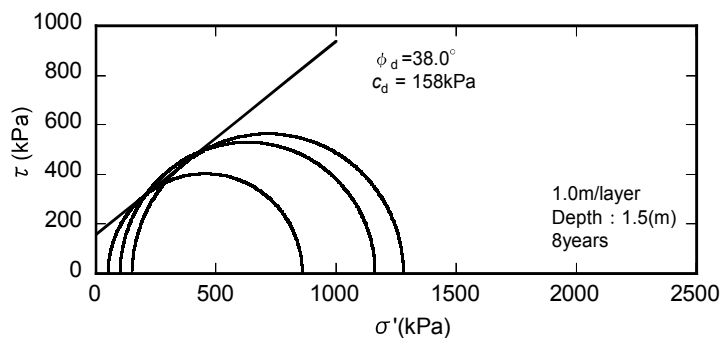


図 3.20 モールの応力円 (施工後 8 年)

粘着力および内部摩擦角の深度分布を図 3.21 および図 3.22 に示す。粘着力は、各撒き出し域において硬化に起因した増加が見られ、深度方向には強度増加の明確な差異は見られなかった。内部摩擦角については、ばらつきは見られるものの、深度方向での明確な差異は見られず、撒き出し厚さによる影響はほとんど見られなかった。

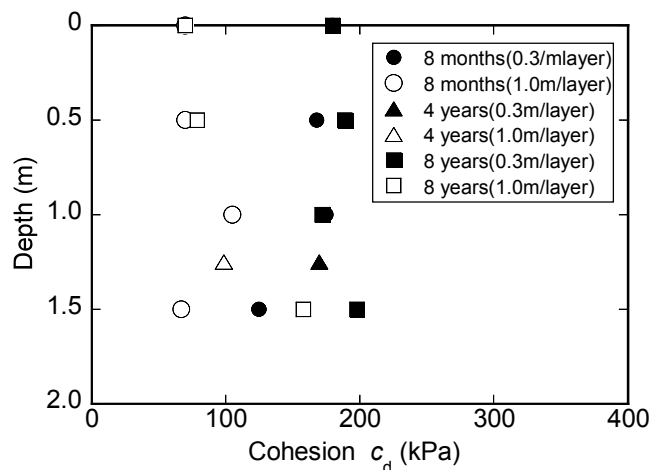


図 3.21 粘着力の深度分布

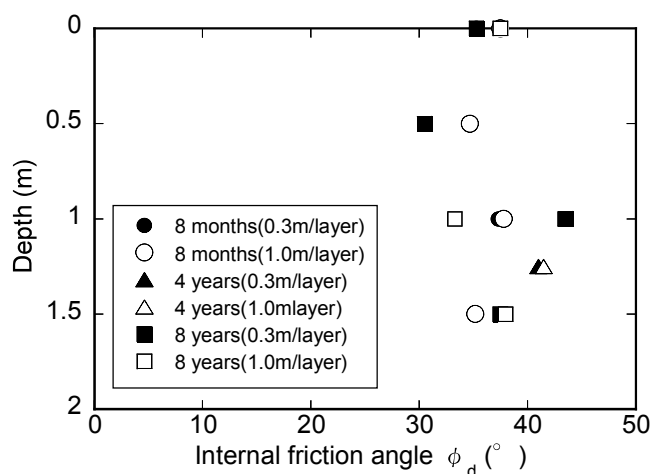


図 3.22 内部摩擦角の深度分布

図 3.23 に、粘着力および内部摩擦角の経年変化を示す。粘着力については、同一経過年数において、1.0m/層撒き出しに比べ 0.3m/層撒き出し域の方が粘着力の増加傾向は大きいことがわかる。内部摩擦角については、ばらつきは見られるものの、概ね 35° 以上¹¹⁾を有したまま、時間が経過してもあまり変化は見られなかった。

図 3.24 に両撒き出し域における内部摩擦角と乾燥密度との関係を示す。図に示されるように内部摩擦角に及ぼす乾燥密度の影響は非常に小さいことがわかる。

このように、水砕スラグの潜在水硬性に伴う強度増加は、特に粘着力が時間の経過に伴って増加し、その増加量は、締固めの程度が大きいほど、大きくなることが明らかとなった。

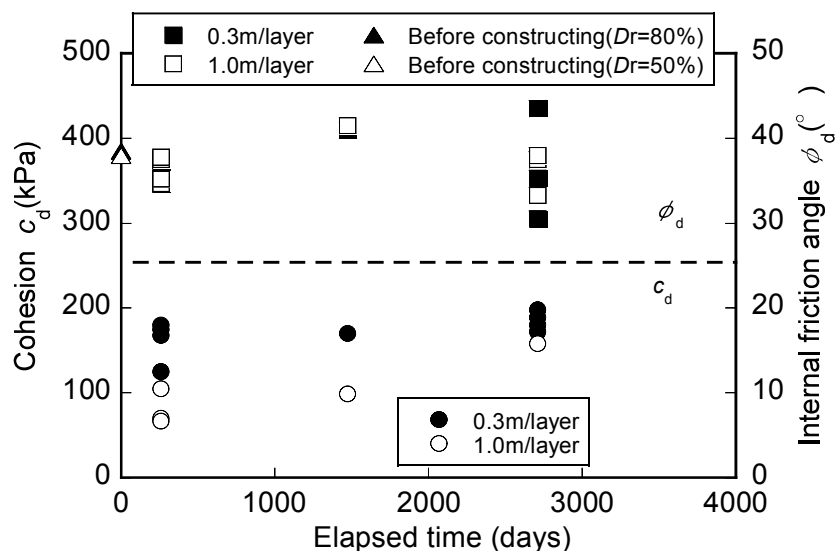


図 3.23 粘着力と内部摩擦角の経年変化

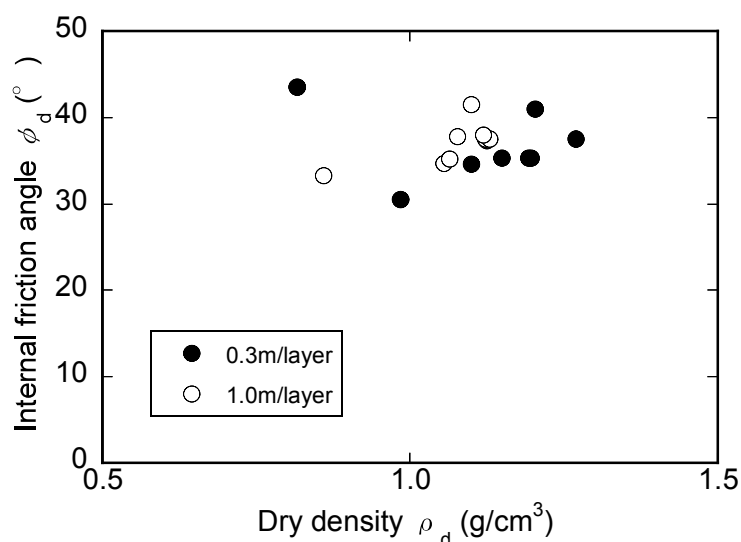


図 3.24 内部摩擦角と乾燥密度の関係

(3) 透水特性

盛土材の透水性に関して設計上の規定はないものの、一般的に雨水および地下水等が盛土内へ浸透した場合、間隙水圧の上昇に伴う盛土崩壊が懸念されるため透水性の確保が要求される。

水砕スラグの透水特性に関して未硬化時の透水係数は $k=1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 程度²⁾と報告されており、試験盛土に使用した水砕スラグ B の透水係数も表 3.2 に示したように、同程

度の透水性を有している。

水砕スラグは潜在水硬性に伴い硬化することにより、透水係数は $k=1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 程度¹²⁾に低下することがすでに知られている。そこで盛土施工後 8 ヶ月および 4 年、8 年経過時に採取したブロックサンプリング試料を用いて定水位透水試験を行い、硬化した水砕スラグの透水係数を測定した。

図 3.25 にその結果を示す。盛土施工前の水砕スラグの透水係数は $k=1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ であるのに対し、4 年経過時の結果ではばらつきが見られるものの、8 年経過時には両撒き出し域ともに $k=1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ となっており、透水性低下が見られた。供試体側面のシーリングは、市販のロウを充填することによって行ったが、充填具合の違いが 4 年および 8 年経過時の透水係数に影響したと考えられる。なお、港湾工事に使用された水砕スラグの透水係数の経年変化については、6~10 年後における透水係数は $k=1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ オーダーであることが報告されており、水砕スラグ試験盛土の透水性も同程度の低下傾向が見られた¹⁾。また、施工後 8 年経過時には同一盛土において原位置透水試験¹⁴⁾が実施されており、定水位透水試験結果と同程度の透水係数が得られている¹⁵⁾。なお、原位置透水試験の透水係数は、 $3 \times 10^{-4} \sim 3.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 程度あった。水砕スラグの透水性の経年変化については今後更に検討する必要があるが、水砕スラグの透水係数は硬化後も微細砂、シルト、砂・シルト・粘土混合土に分類される土の透水係数¹⁶⁾である $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 以上であることから盛土体としては、その透水性については十分に期待できる。

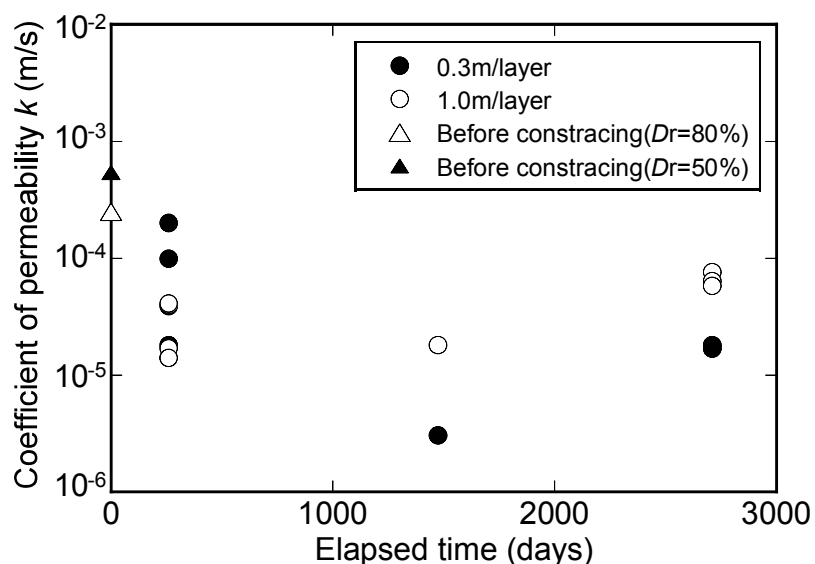


図 3.25 透水係数の経年変化

(4) 沈下特性

盛土体の沈下（圧縮沈下）特性について調べるため沈下計測を行った。圧縮沈下量の計測は図 3.6 に示す 3 地点（No.1～No.3）の在来地盤上に設置した沈下板および盛土天端上に設置した鋼板にてそれぞれ行い、これらの沈下量の差から各地点の圧縮沈下量を求めた。図 3.26 は盛土完成後における圧縮沈下量の経時変化である。盛土施工後 8 年経過した時点の圧縮ひずみ量は最大で 1.5% 程度であり、盛土体の圧縮沈下はほとんど生じていない。なお、8 年経過時点の圧縮量は約 0.13m である。

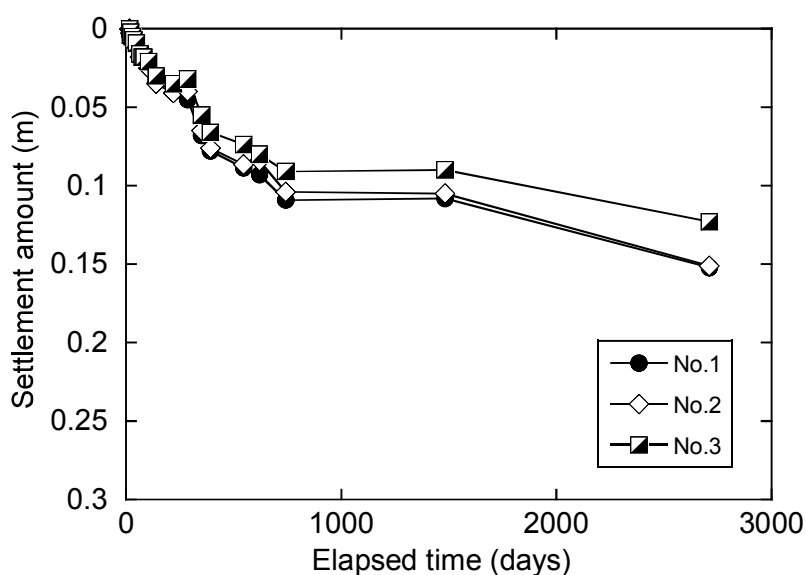


図 3.26 沈下圧縮量の経年変化

3. 4. 3 周辺環境への影響

水砕スラグ試験盛土から溶出したアルカリ成分の地下水環境への影響範囲について検討するため、試験盛土周辺地下水の pH の経年変化を調べた。図 3.6 に示す水位計の位置で水面付近の地下水を汲み上げ、pH を測定した。

図 3.27 は各水位計の位置での地下水の pH の経時変化を示したものである。盛土中央の No.1 および盛土法尻の No.2 から採取した地下水の pH は、盛土施工直後から変動が大きく、最大で pH =12 まで達している。地下水の下流側にあたる No.7 の地下水の pH においても、盛土施工直後から大きな pH の上昇を示した。これに対して、他の位置で計測した pH については、盛土施工直後から現在に至るまで大きな上昇は生じていない。

また、盛土施工直後に pH が大きく上昇した No.2, No.7 では 11 年経過後、他の位置で計測した pH と同程度の値に収束している。一方、盛土中央の No.1 においては、他の位置で計測した pH と比較して高い値を示している。このことから、スラグ試験盛土から溶出したアルカリ成分は土壤中に浸透後、拡散したものと推察される。今回試験施工された水砕スラグ試験盛土において、アルカリ成分を含む溶出水の地下水環境への影響は、長期的にみると水砕スラグの施工領域直下で見られ、それより広い範囲までは影響はしなかった。

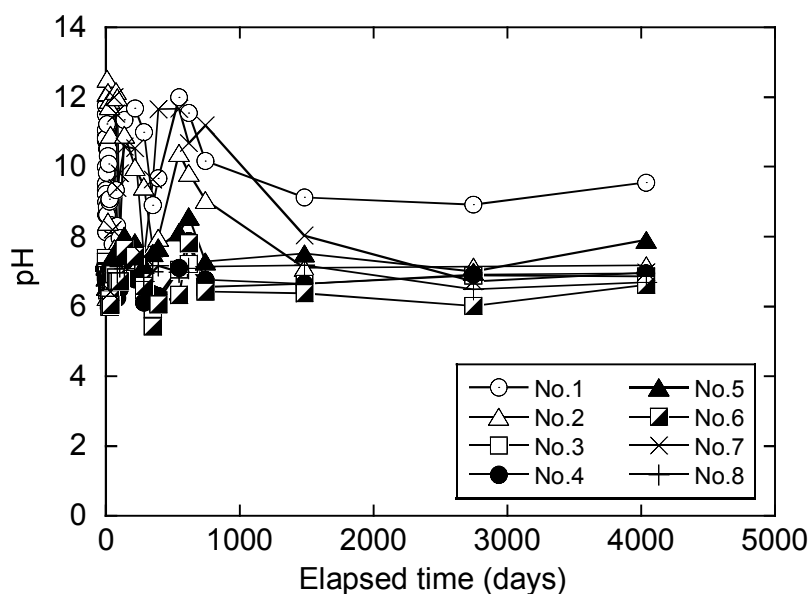


図 3.27 pH の経年変化

3. 5 まとめ

本研究では、水砕スラグの土工材料としての適用性を検証するため、軽量盛土材として用いた水砕スラグ試験盛土において、水砕スラグの特性変化についての長期的な調査を実施した。得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 自然環境下で長期間放置された水砕スラグの乾燥密度は、施工初期と比較して、同程度もしくは小さくなる傾向を示す。水砕スラグを盛土材として適用した場合、施工初期から 11 年経過後においても、自然土と比較して十分な軽量性を維持する。水砕スラグの長期的な密度変化のメカニズムについては今後検討する必要がある。
- (2) 水砕スラグは、自然環境下で長期間放置すると、ばらつきは見られるものの、盛土体として十分な強度増加を示すことが標準貫入試験および室内実験結果から明らかとなっ

第3章 高炉水砕スラグの軽量地盤材料としての適用性

た。内部摩擦角にあまり変化は見られないものの、特に粘着力が時間の経過とともに増加し、施工後8ヶ月経過以降は粘着力に大きな変化は見られなかった。

- (3) 水砕スラグは、硬化後も自然土と同程度の透水性を有しており、盛土材としての適用に充分期待できる。
- (4) 今回試験施工された水砕スラグ試験盛土においては、長期的にみると、アルカリ成分を含む溶出水の地下水環境への影響は、水砕スラグの施工領域直下で見られ、それより広範囲には影響しない。

参考文献：

- 1) 菊池喜昭, 池上正春, 山崎浩之：港湾構造物の裏込めに用いた高炉水砕スラグの経年変化に関する研究, 土木学会論文集, No.799/III-72, pp.171-182, 2005.9.
- 2) 松田博, 来山尚義, 高宮晃一, 村上剛敏, 中野恭夫：高炉水砕スラグの地盤改良材としての適用性に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.764/III-67, pp.85-99, 2004.6.
- 3) 篠崎晴彦, 松田博, 坂井悦郎, 小野幸一郎, 鈴木操, 中川雅夫：高炉水砕スラグの硬化特性と地盤改良工法への適用, 土木学会論文集 C, Vol.62, No.4, pp.858-869, 2006.12.
- 4) (財)沿岸技術研究センター：港湾・空港における水砕スラグ利用技術マニュアル, 2007.
- 5) 鐵鋼スラグ協会：高炉水砕スラグ「土工用材料としての技術資料」, 2009.
- 6) 大平尚美, 松田博, 来山尚義, 村上守, 村上剛敏, 片山章徳, 中野泰夫, 盛岡研三：軽量盛土材料としての高炉水砕スラグの適用, 土木学会中国支部第 54 回研究発表会, III-12, pp.259-260, 2002.
- 7) 篠崎晴彦, 松田博, 来山尚義, 高宮晃一, 大平尚美, 村上守, 中野泰夫：高炉水砕スラグの軽量盛土材としての適用性に関する研究, 第 5 回環境地盤工学シンポジウム論文集, 地盤工学会, pp.213-219, 2003.
- 8) (社)日本道路協会：道路土工 盛土工指針, pp.219-220, 2010.
- 9) (社)土質工学会：土の調査実習書, pp.151-159, 1983.
- 10) (社)日本道路協会：道路土工 軟弱地盤対策工指針, pp.50-51, 1988.
- 11) 篠崎晴彦, 松田博, 白元珍：高炉水砕スラグの硬化に伴う繰返しせん断強度特性の変化, 土木学会論文集 C, Vol.64, No.1, pp.175-180, 2008.3.
- 12) 松田博, 来山尚義, 安藤美樹, 中野恭夫：地盤工学において用いられる水砕スラグの特性, 地盤工学会誌, Vol.48, No.6, pp.22-24, 2000.
- 13) 松田博, 来山尚義, 安藤美樹, 中野恭夫：水砕スラグの地盤工学的有効利用に関する基礎的研究, 地盤と建設, Vol.16, No.1, pp.33-40, 1998.
- 14) 竹下祐二, 森井俊広：土中水分計測データを用いた簡便な原位置透水試験方法による不飽和砂質土地盤の飽和・不飽和透水係数の測定, 土木学会論文集 C, pp.Vol.63, No.4, pp.831-839, 2006.
- 15) (社)地盤工学会：高炉水砕スラグの地盤工学的利用促進に関する研究委員会報告書, pp.105-109, 2010.
- 16) (社)土質工学会：土質試験の方法と解説, pp.271-288, 1992.

第4章 高炉水砕スラグの強度評価

4.1 はじめに

高炉水砕スラグ（以下、水砕スラグ）は硬化に時間を要することから、硬化に至るまでの硬化途中と液状化強度との関係を明確にする必要がある。また、水砕スラグは粒状材であり、未硬化時に液状化が生じると、初期の骨格構造とは異なった構造になると考えられるため、その際の再液状化強度を明確にすることも重要と考える¹⁾。

本章では、水砕スラグの静的なせん断強度と液状化強度（繰返しせん断強度）の関係について把握することを目的とし、水砕スラグの硬化途中における液状化強度特性について調べた。水砕スラグは、港湾構造物に既に適用されていることから²⁾、本章では特に、淡水養生に加えて海水養生した供試体に対する静的および液状化強度の関係について調べた³⁾。

また、未硬化時の水砕スラグ供試体に対して非排水繰返しせん断試験を実施後、同一供試体における液状化強度および再液状化強度の比較を行った。さらに、水砕スラグの粒子破碎特性⁴⁾⁵⁾が液状化強度に及ぼす影響を把握するため、一度繰返しせん断を受けた再液状化供試体と同一相対密度の処女供試体を作製し、両者の液状化強度の比較を行った。

先述のように、水砕スラグは硬化により非液状化レベルまで達するが、硬化段階においては地震等の外的要因によってせん断破壊が生じる可能性がある。図4.1に示すように、硬化が進行した地盤内において破壊が生じた場合、水が接触し得る環境においては水和反応が継続され自己修復することが予想される。そこで、上記の検討に加えて、硬化履歴を有する水砕スラグの再硬化特性についても検討した。

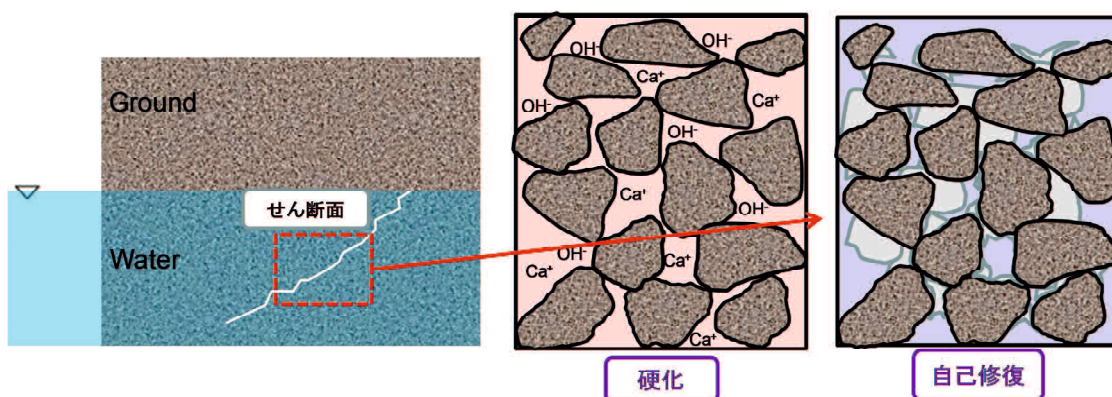


図 4.1 自己修復（再硬化）概要図

4. 2 高炉水砕スラグの硬化に伴うせん断特性および非液状化レベルの検討

4. 2. 1 試料と検討方法

試料は、新日本製鐵大分製鐵所にて2004年に製造された水砕スラグと比較のため玄海砂（玄海灘で採取）と豊浦砂を用いた。表4.1に、土粒子密度試験および最大・最小密度試験の結果を示す。水砕スラグと玄海砂および豊浦砂はいずれもほぼ同等の土粒子密度（真密度）を示している。最大・最小間隙は、玄海砂（玄界灘で採取）および豊浦砂と比較して水砕スラグのほうが大きいことがわかる。これは、水砕スラグが多孔質であるためと考えられる。各試料の粒径加積曲線を図4.2に示す。水砕スラグは、天然砂と類似した粒度分布を示していることがわかる。

表 4.1 土粒子密度および最大・最小間隙比

| | Soil particle density ρ_s (g/cm ³) | Maximum void ratio e_{max} | Minimum void ratio e_{min} |
|-----------------|--|---------------------------------|---------------------------------|
| Unhydrated slag | 2.643 | 1.510 | 1.033 |
| Genkai sand | 2.678 | 0.872 | 0.516 |
| Toyouura sand | 2.646 | 0.999 | 0.623 |

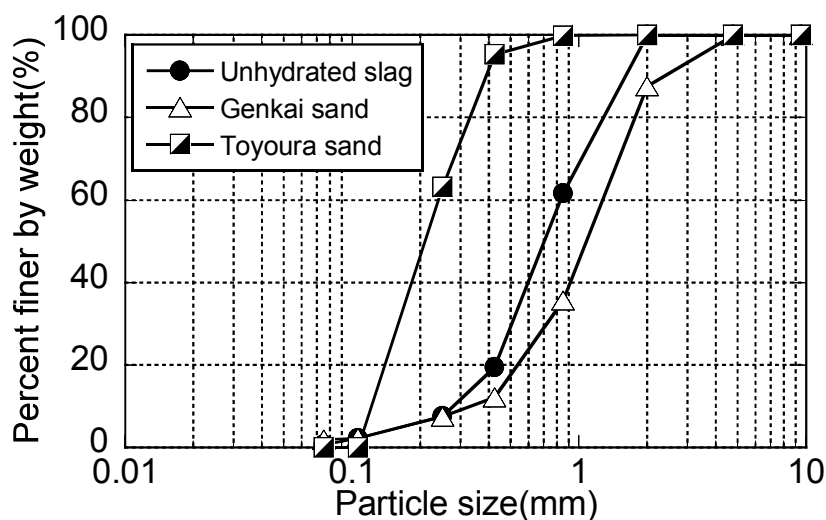


図 4.2 粒径加積曲線

供試体の作製方法は、未硬化供試体は水中落下法で作製し、硬化供試体は、直径 5cm、高さ 10cm のプラスチックモールドに相対密度 $D_r=50\%$ および 80% となるように空中落下法で作製した。図 4.3 に硬化供試体の養生方法を示す。供試体は、海水中 ($\text{pH}\approx 8$) および水中 (水道水) で、固液比 (試料 : 養生水) 1 : 2、養生温度 $15\sim 20^\circ\text{C}$ の条件で、室温が保たれた試験室において密閉して養生を行った。

海水は、山口県宇部港周辺で採取した海水を用いた。水道水 (淡水) の pH は約 7 であった。供試体に水が浸透するようモールド底面に直径 1.5mm 程度の穴を開けた。また、養生水が蒸発しないように、硬質不透水性容器は密閉した。三軸圧縮試験装置を用いて、100kPa の圧密後、正弦波繰返し載荷 (周期 : $T=10\text{s}$) の条件で、非排水繰返し三軸試験 (以下、液状化試験) を行った。静的三軸圧縮試験 (CD) は、有効拘束圧 σ'_0 を 50kPa, 100kPa, 150kPa, ひずみ速度 $0.3\%/\text{min}$, 背圧 300kPa で行った。また、二酸化炭素 (CO_2) を用いた二重負圧法を行い供試体の飽和を確認した。二重負圧法とは供試体にできるだけ高い負圧をかけ、供試体に残留している空気 (主として水に溶解しにくい窒素ガス) を吸出し、同時に三軸セルの内部にも適切な負圧を加え、有効応力を所定の値に維持する方法であり、供試体の圧密応力よりも小さい値に設定することによって、供試体に過圧密履歴を与えない。

本研究では、二重負圧法と同時に二酸化炭素 CO_2 の浸透も行った。間隙内の空気を、水に対する溶解度が極めて高い二酸化炭素 (CO_2) に置き換え、これをさらに脱気した水に置換し適当な背圧を加えることにより飽和させた。飽和の確認は、ビュレットに通じる排水バルブをいったん閉じ、有効拘束圧 σ'_0 の 1/2 に相当するセル圧を減少させ、それによって生じる間隙水圧の降下量を測定し、間隙水圧の降下量をセル圧の減少量で除することにより B 値を算定した。B 値の基準値は 0.95 以上⁶⁾を満たすようにした。

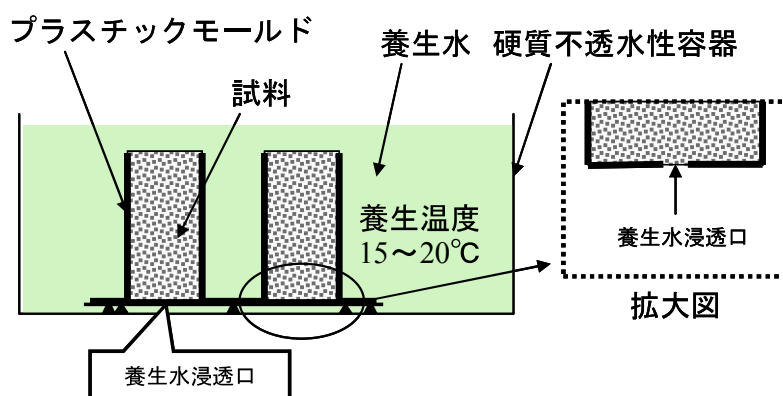


図 4.3 養生方法

4. 2. 2 アルカリ成分溶出特性と海水の緩衝作用

図4.4に海水及び淡水養生した水砕スラグの養生水のpHの経時変化を示す。pH測定は、pH測定器で測れる程度の養生水を採取し測定した。溶出水は、水砕スラグからアルカリ成分が溶出される養生水を意味し、間隙水は、図4.3に示される供試体内から抽出した養生水を意味する。

間隙水は、硬質不透水性容器から養生モールドを取り出し、供試体浸透口からの間隙水を所定量採取し、pHを測定した。淡水養生における溶出水のpHはばらつきがみられるものの、徐々に上昇しpH≒12付近に収束している。海水養生の間隙水のpHは、溶出水のpHと比較して大きくなっており、供試体中の水砕スラグからアルカリ成分が溶出していることが伺える。

水砕スラグの溶出水はアルカリ性を呈するが、アルカリ成分の初期溶出速度が小さいことと、海水成分による中和作用、緩衝作用および海水による希釈効果によりpHの上昇が抑制される。

海水にはCl⁻やNa⁺以外にも、SO₄²⁻、Mg²⁺、Ca²⁺、CO₃²⁻などの多くのイオンが溶存している。これらの成分による中和および共存イオンによる錯体生成のため、イオンの活量は大きく低下しpHの変化を抑制する。また、海水中のMg²⁺によりMg(OH)₂が生成沈殿し、OH⁻を減少させてpHを低下させる。これらの反応により、水砕スラグを海中に投入しても海水のpHはほとんど上昇しないと考えられている⁷⁾。

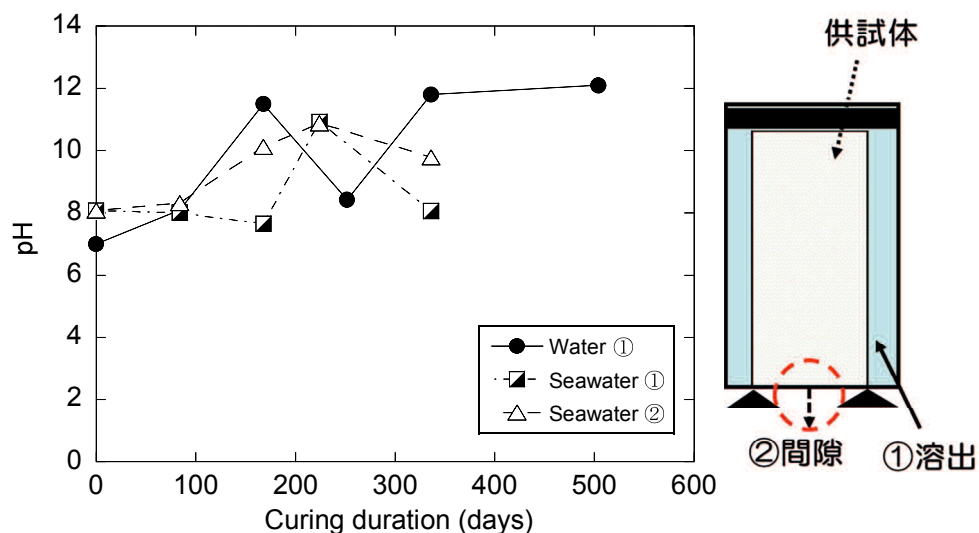


図4.4 養生日数とpHの関係

なお、水砕スラグの溶出、中和、緩衝作用のメカニズムは、以下のとおりである⁷⁾。

(1) 水砕スラグからの石灰分の溶出 (pHの上昇作用)

水砕スラグ中のCaが海水に溶けてCa²⁺とOH⁻が生じてpHが上昇する。

(2) 溶出水と炭酸との反応 (中和作用)

海水は常に0.03%のCO₂を含む大気と接触していることや、CO₂を含んだ雨水が加わることにより、海水中にはCO₃²⁻が溶存している。これとスラグから溶出したCa(OH)₂と反応してpHを下げる。

(3) 溶出水と海水中マグネシウムとの反応 (緩衝作用)

海水中のMg²⁺は、石灰分の溶出に伴い発生したOH⁻と反応してpHを下げる。



(4) 海水による希釈

希釈によりpHが低下することは、単に[スラグ溶出水の量]対[海水の量]による希釈作用だけでなく、前述のように海水中のCO₃²⁻やMg²⁺による中和作用、緩衝作用が相乗効果として作用していると考えられる。

4. 2. 3 硬化とせん断強度の関係

図4.5は、海水および淡水養生した水砕スラグ(Dr=80%)の液状化強度曲線を示しており、実線が海水養生、破線が淡水養生である。また、図中において略記号を用いており、Sw(海水)、W(淡水)とし、括弧内は養生日数を示している。淡水養生した供試体では、養生日数が経過するに伴い、R₂₀の増加が確認できる。また、海水養生した供試体では、養生168日以降で、R₂₀が収束する傾向を示した。相対密度Dr=50%の条件でも同様の傾向を示した。

図4.6は、海水および淡水養生した水砕スラグ供試体のR₂₀と養生日数の関係を示したものである。海水および淡水養生ともに相対密度が大きなDr=80%の供試体の方がR₂₀は同一養生日数で大きくなっている。これはDr=80%の供試体の方が固結の起点となる接触点が多いためと考えられる。また、養生日数250日程度までの傾向として、淡水養生より海水養

生した供試体の方が R_{20} の増加が大きくなる傾向を示した。これは海水養生ではアルカリ成分により、水和反応が促進され、強度発現したものと考えられる。海水養生において、330日程度で R_{20} が若干低下している。これは、養生日数が200~300日付近は、強度発現の遷移領域と考えられ、実験誤差であると考えられる。今後は、海水養生における330日以降の R_{20} の傾向を把握する必要がある。

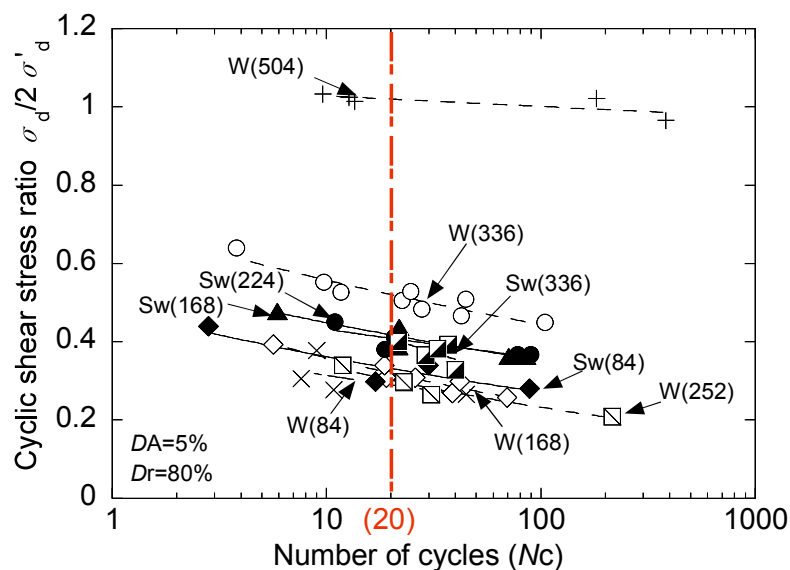


図 4.5 繰返し載荷回数と繰返し応力振幅比の関係

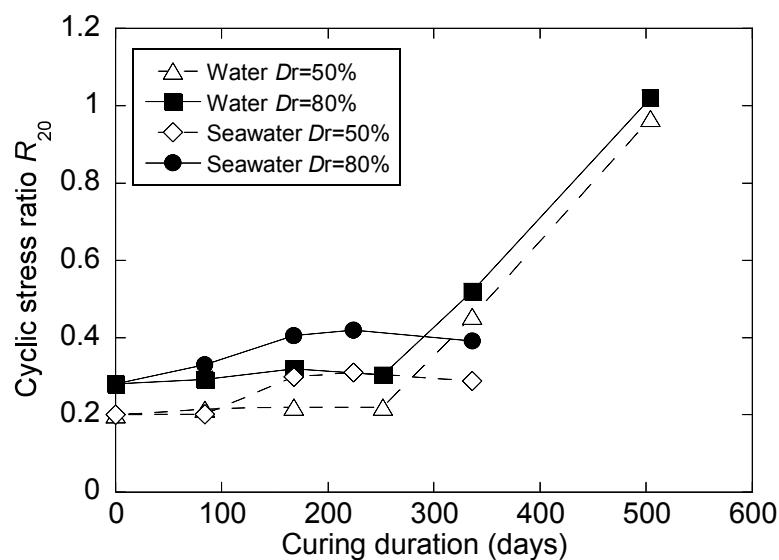


図 4.6 R_{20} の経時変化

図4.7に、海水および淡水養生した水砕スラグ供試体の粘着力 c_d およびせん断抵抗角 ϕ_d と養生日数の関係を示す。同図より、せん断抵抗角 ϕ_d は、 35° 以上²⁾を有したまま、養生日数が経過してもあまり変化は見られなかった。粘着力 c_d は、養生水に依らず、養生日数の経過と共に増加する傾向を示した。 R_{20} と同様に養生日数250日程度までの傾向として、淡水養生より海水養生した供試体の方が粘着力 c_d の増加が大きくなる傾向を示した。

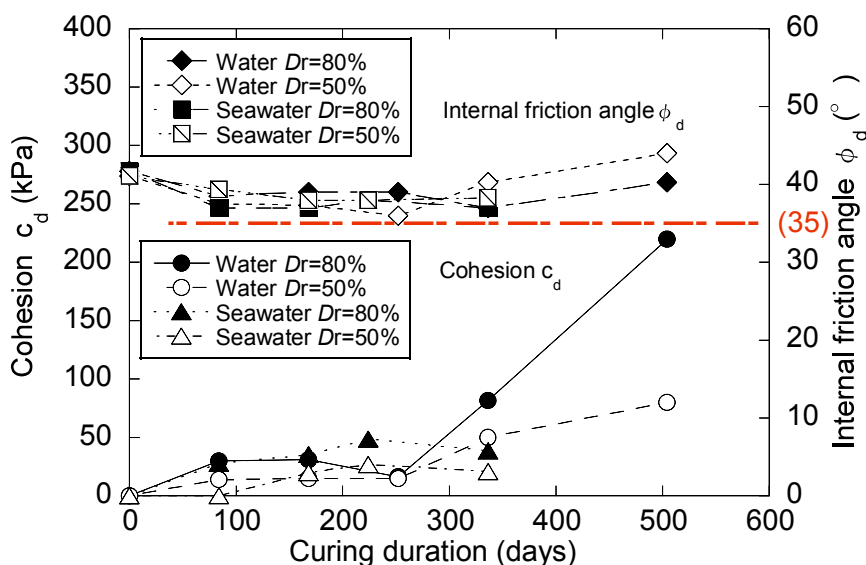


図4.7 粘着力及びせん断抵抗角の経時変化

図4.8に、粘着力 c_d と R_{20} の関係を示す。図に示したように、ばらつきは見られるが、養生水、相対密度に依らず、両者には一義的な関係が見られる。

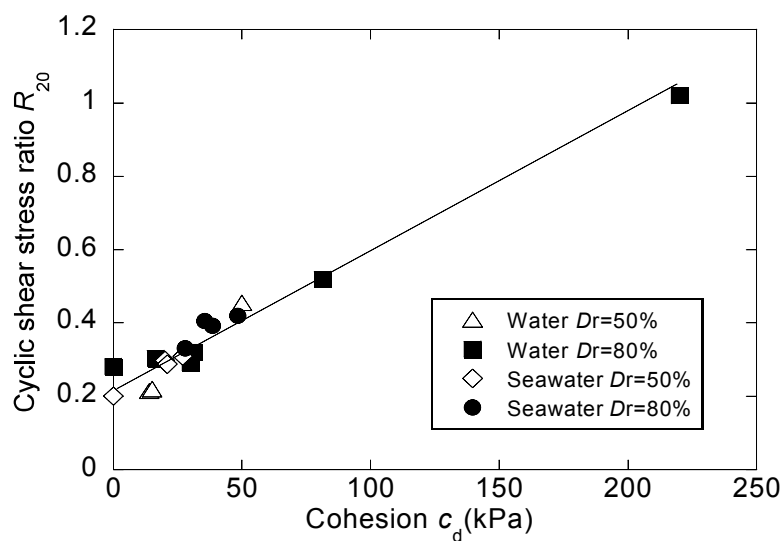


図4.8 粘着力と R_{20} との関係

図 4.9 は、海水および淡水養生した水砕スラグ供試体の間隙比 e の変化と養生日数との関係を示したものである。同図より、ばらつきは見られるものの、間隙比 e は、養生日数が増加するに伴い、減少する傾向を示した。これは水和反応によって粒子接点間に水和物が生成されたためと推察される。

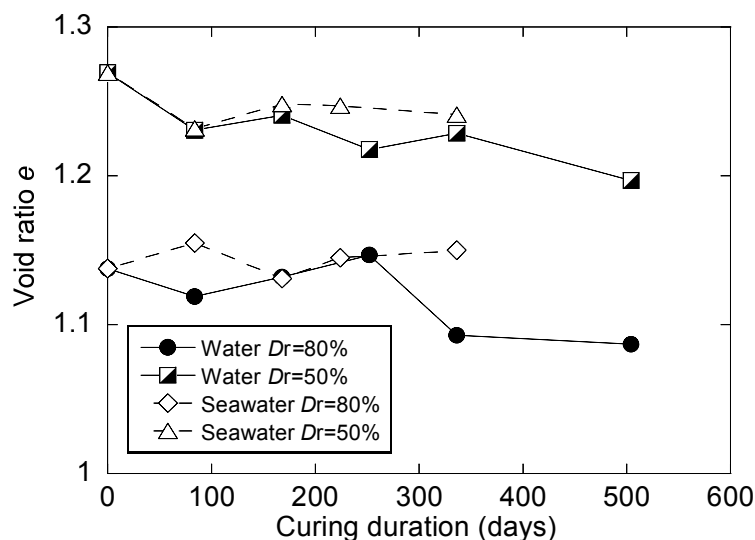


図 4.9 間隙比の経時変化

4. 3 高炉水砕スラグの再液状化特性に関する検討

4. 3. 1 再液状化の事例と検討の重要性

液状化した地盤では間隙水が排出し、それに伴って地盤は沈下する。このように考えると、一度液状化した地盤は密度が高くなり、再び同程度の地震動によっても以前より液状化しにくくなるはずである。しかしながら、1983年の日本海中部地震においては本震により液状化した津軽半島のいくつかの箇所で、約1ヶ月後の余震により再び液状化したと報告⁸⁾されている。また、南九州に広く分布しているシラス地盤でも1997年の鹿児島北西部(M6.5)では液状化が発生し、同年の同第二北西部地震(M6.3)では再液状化したと報告⁹⁾されている。このように、単に密度増加により液状化しにくくなるとは考えにくい。

若松¹⁰⁾は、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震で発生した再液状化の事例

を調査している。この地震における再液状化の箇所は、東京湾沿岸の埋立地、千葉県と茨城県の県境を流れる利根川下流沿岸の旧河道の埋立地、湖沼の干拓地、房総半島九十九里平野の砂鉄採掘跡地および宮城県の鳴瀬川・江合川・北上川沿岸など、合計 85 箇所にも及び、中にはこの地震で 4 回目の液状化となった箇所も存在している。若松の調査結果¹⁰⁾によると、再液状化地点の大部分は人工造成地であったが、自然地盤の再液状化も確認されている。このような事例から、人工造成地の構築にあたっては計画・設計の段階から再液状化対策を行う必要があり、また、水砕スラグは人工造成地用の材料としての利用も期待できるため、再液状化特性についての検証が必要である。

4. 3. 2 再液状化に関する既往の研究

これまで再液状化の研究は数多く行われており、特に初回に発生したひずみに着目した研究が多くある。ここで、砂質土の再液状化特性に関する既往の研究について紹介する。

田辺、佐藤ら¹¹⁾は等方圧密及び初期せん断を加えた供試体を用いて、繰返し履歴を受けた砂質土のせん断特性と再圧密時の圧密挙動について検討を行っている。繰返しせん断履歴は1回目の圧密後、非排水条件で繰返しせん断強度比 $\tau/p'_c=0.16$ を作用させた。この時、過剰間隙水圧比を① $u/p'_c=0.7$ 付近と、② $u/p'_c=1.0$ までそれぞれせん断を行った。その結果、ばらつきはあるが $u/p'_c=0.7$ まで履歴を与えた場合に強度が増加し、このばらつきは履歴時の DA (両振幅ひずみ) の大きさにより生じたとしている。

また、DA が増加すると N_R/N_L (ここに、 N_R : 初回液状化時の繰返し載荷回数、 N_L : 再液状化時の繰返し載荷回数) は減少しており、履歴時の軸ひずみが 6% を越えると N_R/N_L が減少することを報告している。

Finn ら¹²⁾は、初回液状化時のせん断ひずみ量の大きさに着目している。試験機は単純せん断試験機と繰返し三軸試験機を用いており、初回液状化により発生したせん断ひずみが大きいほど再圧密による間隙比 e の増加が著しいと報告している。また、初回液状化時のひずみが大きいほどの再液状化強度が低下することを明らかにした。初回液状化時のせん断ひずみ γ_{XY} と繰返し回数比 N_R/N_L の関係では、 γ_{XY} が 0.5% 以下の場合に限り、 N_R/N_L が大きくなり再液状化強度が大きくなると報告している。先に述べた田辺らの研究と同様の結果となっており、再液状化は初回液状化時のひずみ履歴に影響されることが示唆された。

松岡ら¹³⁾は液状化時の粒子構造に着目した研究を行っている。試験は豊浦砂を用い繰返

し単純せん断試験機で行った。初回の液状化が終了した供試体はせん断を受けた状態にあることから、ここに着目し①そのまま再圧密を行うパターン、②中立構造に戻し再圧密を行うパターンで再圧密を行った。その結果、初回液状化時に大きな履歴を受け粒子構造に大きな変形が生じた場合に再液状化しやすくなり、また、中立構造に戻った場合は再液状化しにくくなるとしている。

大原、山本ら¹⁾は、先に述べた Finn らの研究を検討するため動的三軸試験機による再液状化実験を行った。動的三軸試験は、初回到液状化した後、圧密排水した供試体の相対密度にほぼ等しい相対密度をもつ処女供試体を作成し、両者の液状化に対する抵抗力の違いを検討している。その結果、両者には差が見られないことを明らかにした。彼らは振動台でも実験を行っており、液状化後の密度増加により液状化しにくくなったと報告している。彼らの研究ではひずみ履歴に関係なく、再液状化は供試体の相対密度により一義的に決まるとしており、先に述べた研究結果と異なる結論となっている。

山本ら¹⁴⁾の研究では、粒子破砕性のあるシラスで再液状化試験を行い液状化後の再圧密に伴う密度変化に着目して再液状化特性に及ぼす初期相対密度と有効拘束圧の影響について検討し、以下の結果を得ている。

- (1) 再液状化強度は初回の液状化強度よりも増加する。その理由は液状化後の再圧密によって間隙が減少したためとしている。
- (2) 再液状化強度は初回の液状化強度と同様に、初期相対密度の増加に対して増加する。また、初期有効拘束圧の影響を受ける。

4. 3. 3 試料と検討方法

再液状化試験は、水中落下法で作製した未硬化供試体を用い、4.2.1で示した試験と同様の方法で初回液状化試験を行った。約30分間圧密後、再度非排水繰返しせん断を行った。有効拘束圧は50kPa、100kPa、150kPaとし、初回及び再液状化それぞれ両振幅軸ひずみ $DA=5\%$ に達した時を液状化と定義した。この試験では、水中落下法で作製した未硬化の供試体を使用した。

4. 3. 4 未硬化高炉水砕スラグの再液状化特性

図 4.10 は、各試験の初回液状化試験における、 $DA=5\%$ に到達直後に再圧密を行った際の間隙比の変化量 Δe を示したものである。同一条件で Δe にばらつきが見られるのは、繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_0$ の相違によるものと考えられる。有効拘束圧が増加するほど初回液状化後の間隙比変化量 Δe は大きくなる傾向を示した。また相対密度が小さい $Dr=50\%$ の供試体の方が初回液状化後の間隙比変化量 Δe が大きくなる傾向を示した。また、有効拘束圧や相対密度が小さいほど、同一のせん断ひずみを受ける条件では、液状化後の密度増加が大きくなる傾向を示した。

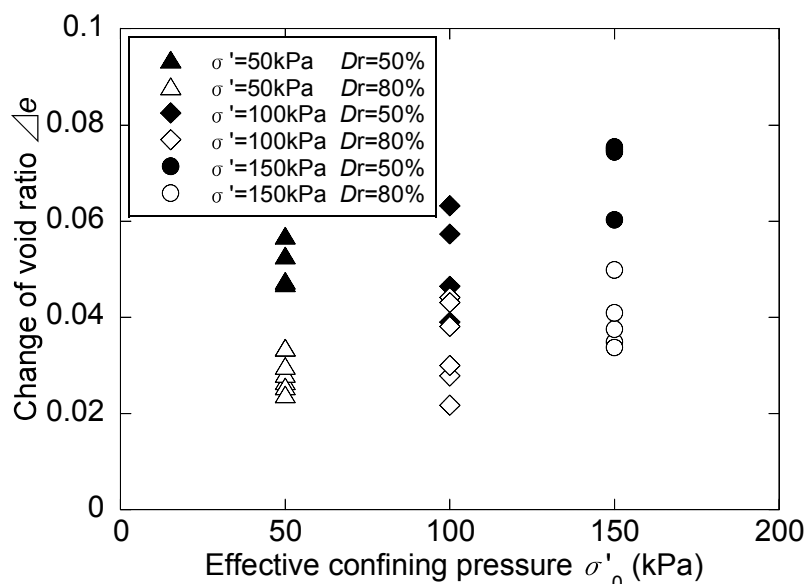


図 4.10 有効拘束圧と再圧密後の間隙比変化量の関係

図 4.11 に初回液状化試験時に生じた最大両振幅軸ひずみ DA_{max} と初回液状化試験後の再圧密によって生じた体積ひずみ ϵ_v との関係を示す。図中には、 $DA_{max}=5\%$ 未満の結果も併記している。同図より、相対密度に依らず、 DA_{max} が大きいほど ϵ_v が大きくなっている。相対密度が小さな $Dr=50\%$ の条件では、有効拘束圧に依らず DA_{max} が10%程度で体積ひずみ ϵ_v に収束傾向が見られる。

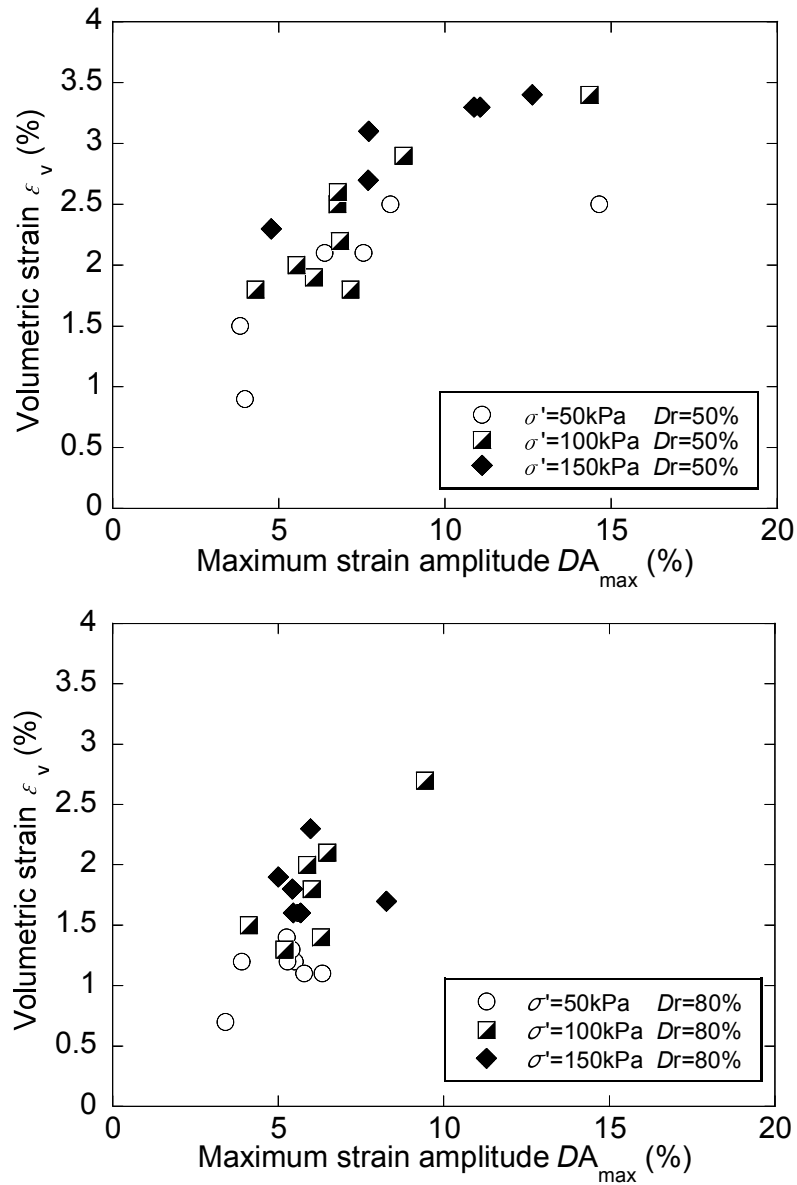


図 4.11 初回液状化時に生じた最大両振幅ひずみと体積ひずみの関係

図 4.12 は、有効拘束圧 $\sigma'_0=100\text{kPa}$ 時の水砕スラグの初回液状化および再液状化強度曲線を示したものである。供試体の初期相対密度の大きさに関係なく、再液状化強度曲線は初回液状化強度曲線よりも上方に位置している。これは、初回液状化後に再度圧密排水を行うことによって、供試体の密度が増加したためと考えられる。他の有効拘束圧においても同様の傾向が見られた。初回せん断試験後の再圧密による相対密度 Dr の変化は、 $Dr=50\%$ の供試体は平均で約 13%増加し、 $Dr=80\%$ の供試体は平均で約 8%増加している。

図 4.13 は、図 4.12 に示す結果のうち、有効拘束圧 $\sigma'_0=100\text{kPa}$ での $Dr=50\%$ の未硬化水砕

スラグ供試体に対する初回液状化時および再液状化時の記録波形を示したものである。初回液状化時には、過剰間隙水圧の急増とともに軸ひずみ ε_a が急激に生じているのに対し、再液状化時には、相対密度が増加しているため、初回液状化時と同様に過剰間隙水圧の増加がみられるが、軸ひずみ ε_a は緩やかに生じている。他の有効拘束圧 σ'_0 においても同様の傾向が見られた。

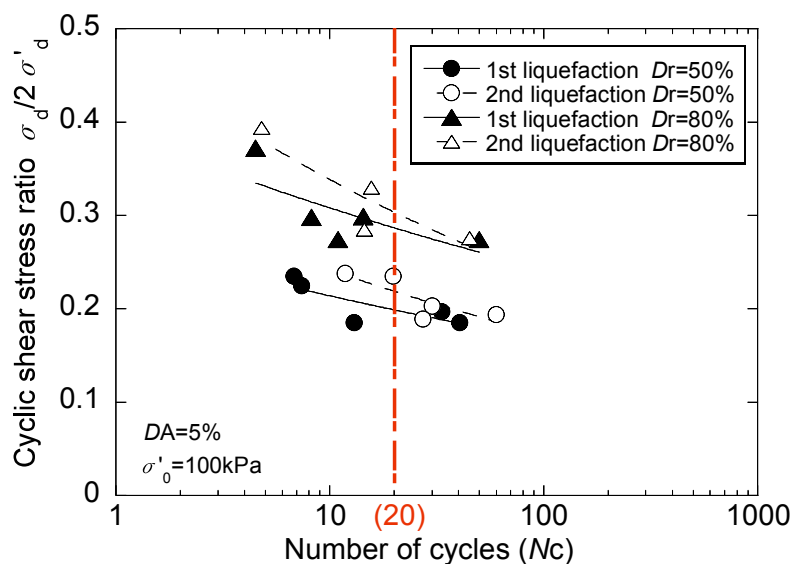
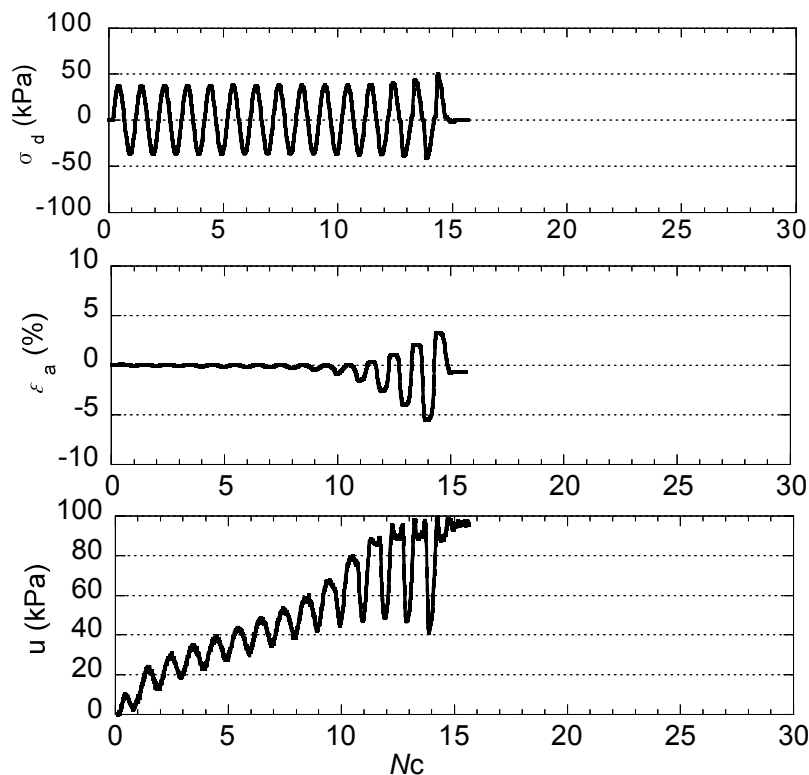


図 4.12 初回及び再液状化試験結果



(a) 初回液状化時

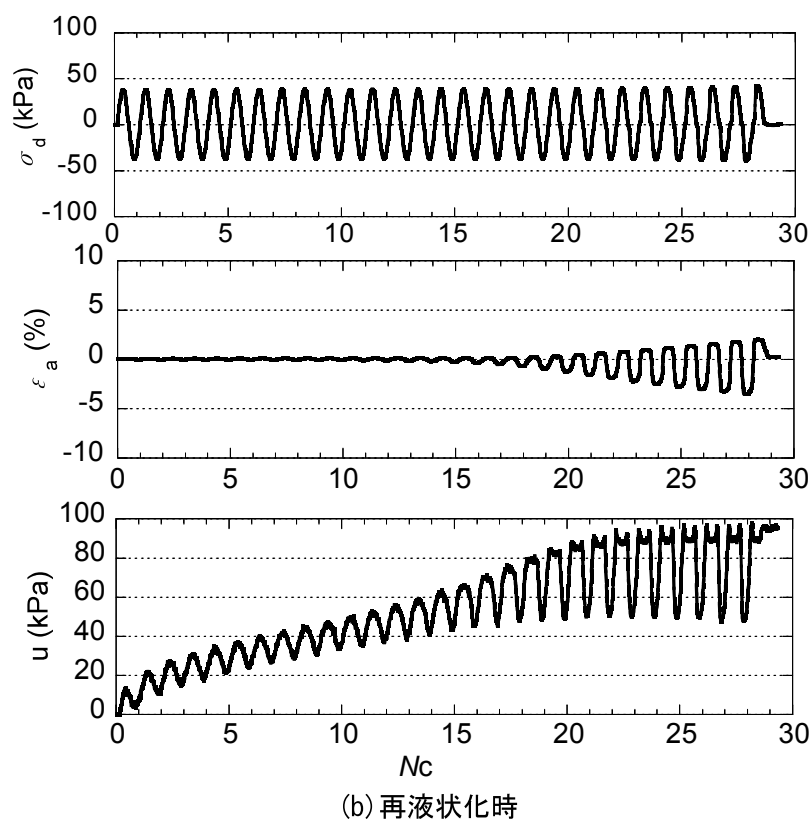
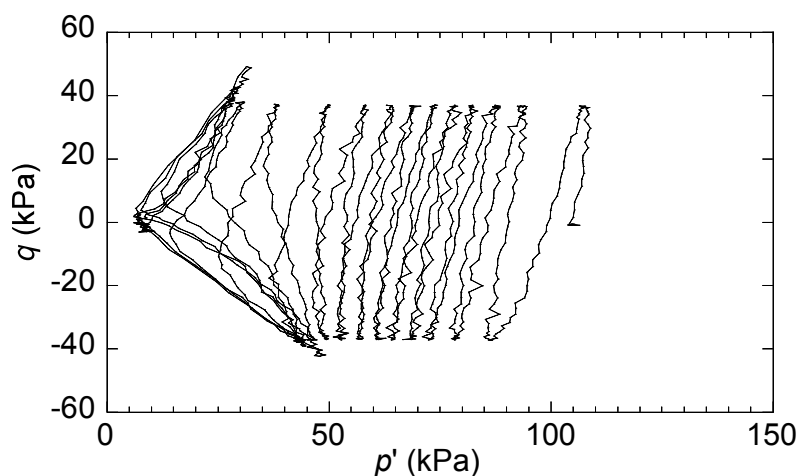
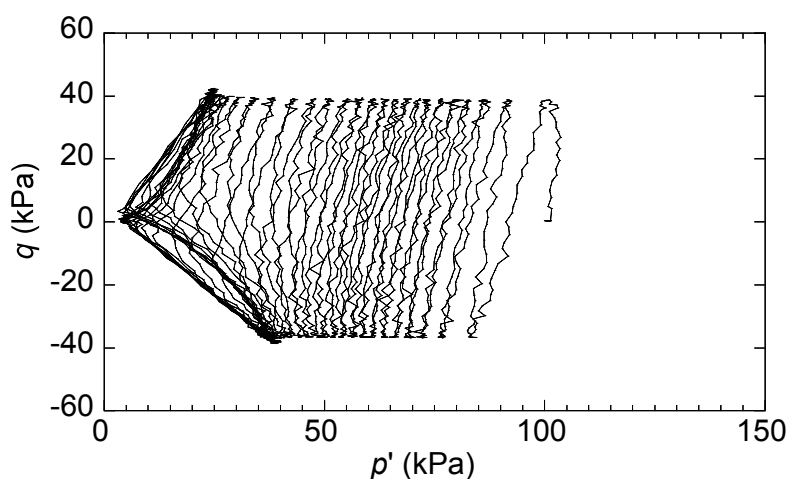


図 4.13 初回及び再液状化時の記録波形

図 4.14 は、図 4.13 の結果を有効応力経路で整理したものである。試験結果における繰返し軸荷重は、 $DA=2\%$ に達するまで、圧縮および伸張荷重の片振幅の和の変動が 10% 以下になり、圧縮荷重を伸張荷重で除した値が 0.9 から 1.1 の範囲内⁶⁾にあることを確認している。そのため、有効応力減少と繰返し载荷回数に与える実験精度の影響は少ないものと考えられる。図に示されるように、再液状化時の有効応力経路は初回液状化時に比べ、供試体の密度が増加しているため、有効応力が減少するのに必要な繰返し载荷回数が初回液状化時と比較して多く必要であることがわかる。



(a) 初回液状化時



(b) 再液状化時

図 4.14 初回および再液状化時の有効応力経路

図 4.15 および図 4.16 は、両振幅軸ひずみ DA が 2% および 5% 生じるために必要な再液状化時と初回液状化時の繰返し回数比 N_R/N_L と初回液状化時に生じた最大両振幅軸ひずみ DA_{max} の関係を示したものである。図 4.15, 図 4.16 より、有効拘束圧、相対密度に依らず、初回液状化時に生じた最大両振幅軸ひずみ DA_{max} が大きくなるほど、繰返し回数比 N_R/N_L は低下する傾向を示した。これは、再液状化強度が低下していることを意味し、特に相対密度 $D_r=80\%$ の結果においては、初回液状化時に生じた最大両振幅軸ひずみ DA_{max} が 5% 付近で N_R/N_L が 1 以下になる結果を示した。この傾向は、飽和砂における既往の研究と一致している⁷⁾⁻¹⁰⁾。Fin ら⁸⁾は、飽和砂の再液状化実験を行い、初回液状化後に、排水に伴い供試体の密度が増加するにも関わらず、少ない繰返し回数で再液状化が生じることを示して

いる。その原因の一つとして、山本ら¹⁾は、繰返し三軸試験時に生じた供試体上部の「くびれ」部分に応力集中が生じるためであることを指摘している。

本試験結果においても、再液状化試験の方が初回液状化試験よりも少ない繰返し回数で所定の両振幅軸ひずみが生じる原因として、初回液状化試験時に受ける最大両振幅軸ひずみ DA_{max} が大きくなるほど、供試体の一部に局所的なひずみが発生し、再液状化試験時に応力集中が生じたためと考えられる。一方、初回液状化時に生じる最大両振幅軸ひずみ DA_{max} が小さな条件では、 N_R/N_L が1以上となっている。これは初回液状化試験後の再圧密によって供試体の密度が増加するため、再液状化強度が大きくなったものと推察される。

今後、初回液状化時のせん断ひずみ量の大きさと再液状化強度の関係について、更に検討する必要がある。

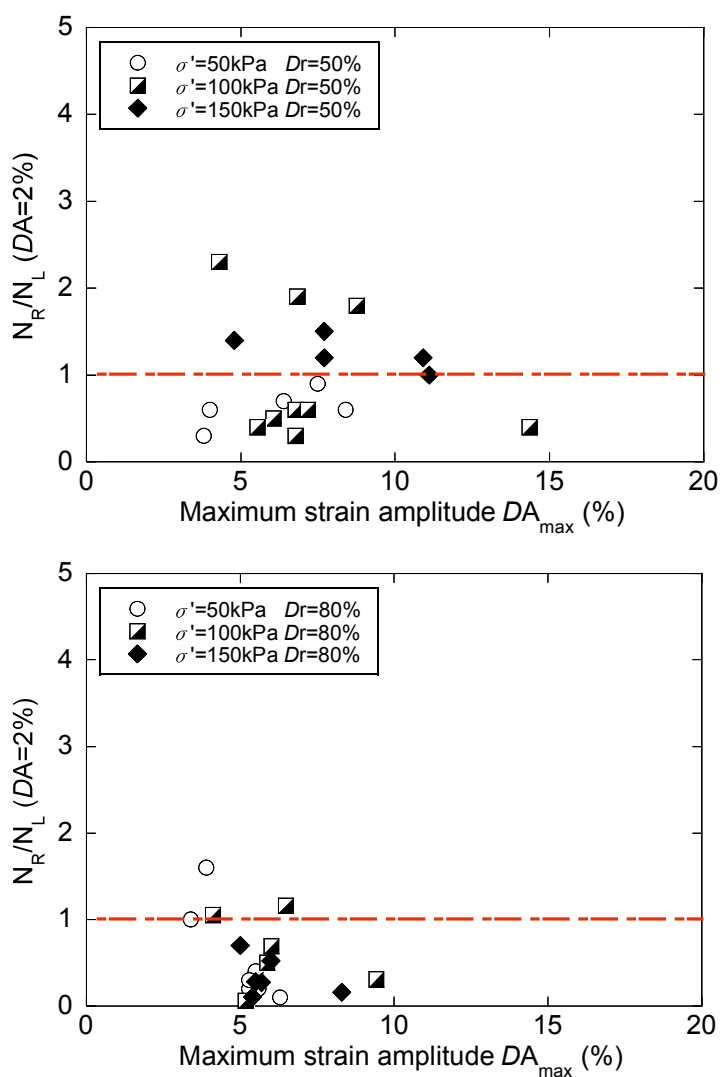


図 4.15 初回液状化時の最大両振幅ひずみと DA=2%における繰返し回数比の関係

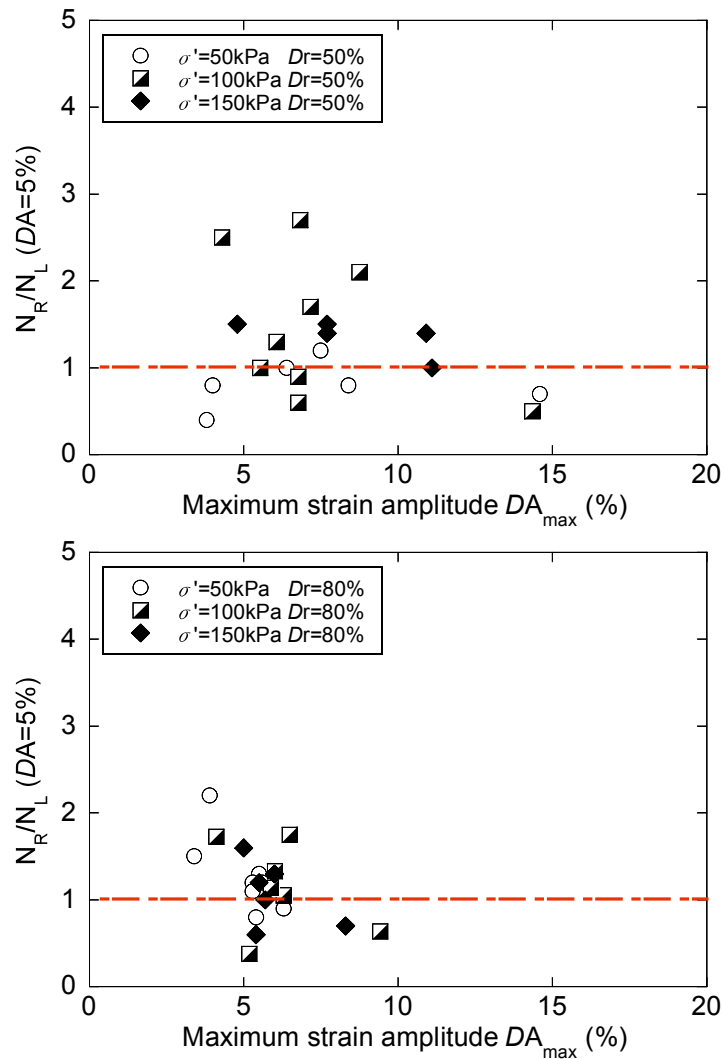


図 4.16 初回液状化時の最大両振幅ひずみと DA=5%における繰返し回数比の関係

同一供試体に対する初回液状化強度と再液状化強度について比較検討を行い、初回液状化後の密度増加により、再液状化時の液状化強度が増加する傾向を示すことが明らかになった。ここでは、初回液状化時の繰返しせん断の影響を検討するため、再液状化試験体と等しい相対密度で処女供試体を作製し、両者の液状化強度の比較を行った。

図 4.17 は、液状化強度曲線を比較したものである。図に示されるように、同一相対密度の供試体において、処女供試体の液状化強度曲線の方が上方に位置していることがわかる。豊浦砂やまさ土における同様の実験結果において、液状化強度は過去に生じた液状化の回数、ひずみ履歴に関係せず、供試体の相対密度によって一義的に決まることが報告されており¹⁾、本試験結果とは異なる傾向を示した。このことは、水砕スラグは、一度繰返しせん断を受けて、その後密度増加しても、再度繰返しせん断を行うと、液状化強度が低下する

可能性があることを示している。この原因については、今後繰返しせん断中の粒子破碎の影響等を考察し¹¹⁾、更に検討する必要がある。次頁に、未硬化水砕スラグの液状化試験結果一覧を示す。

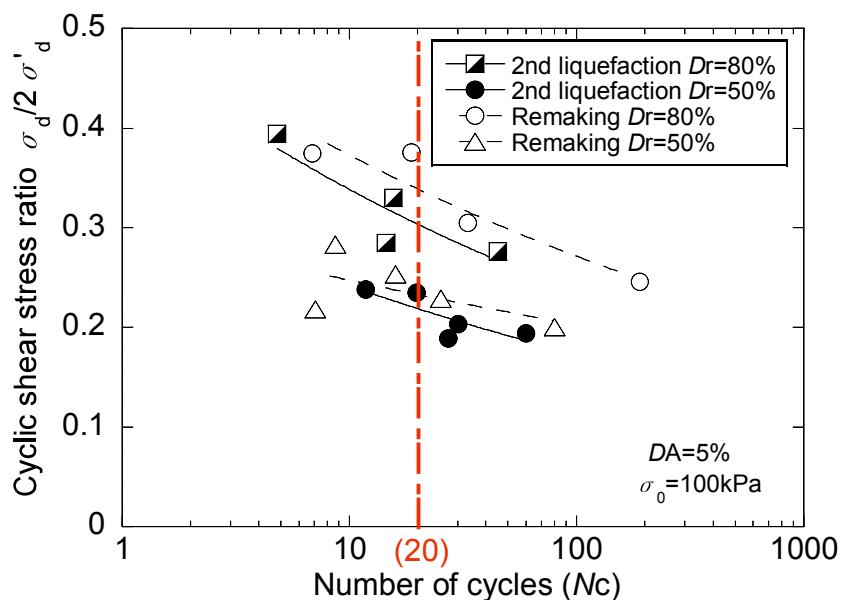


図 4.17 同一相対密度における再液状化供試体と処女供試体の液状化強度の比較

第4章 高炉水砕スラグの強度評価

表 4.2 未硬化水砕スラグの液状化試験結果一覧

| test No. | σ'_0 (kPa) | Dr_0 (%) | Liquefaction | | | | | | | Reliquefaction | | | | N_q/N_L (DA=2%) | N_q/N_L (DA=5%) |
|-----------|----------------------|---------------|---------------|-----------------------|---------------|---------------|-------------------|------------------------|-------------------------------|----------------|-----------------------|---------------|---------------|----------------------|----------------------|
| | | | Dr_1 (%) | $\sigma_d/2\sigma'_0$ | $N_{LDA=2\%}$ | $N_{LDA=5\%}$ | DA_{max} (%) | ε_v (%) | $\varepsilon_1/\varepsilon_3$ | Dr_2 (%) | $\sigma_d/2\sigma'_0$ | $N_{RDA=2\%}$ | $N_{RDA=5\%}$ | | |
| 07sl070cy | 50 | 53.3 | 52.7 | 0.211 | 14.9 | 16.8 | 6.4 | 2.1 | 1.8 | 62.5 | 0.219 | 10.9 | 16.0 | 0.7 | 1.0 |
| 07sl071cy | 50 | 46.9 | 46.4 | 0.240 | 1.4 | 2.0 | 14.6 | 2.5 | 0.4 | 57.5 | 0.244 | - | 1.5 | - | 0.7 |
| 07sl072cy | 50 | 54.6 | 54.1 | 0.204 | 9.4 | 11.3 | 7.5 | 2.1 | -0.3 | 64.1 | 0.214 | 8.5 | 13.2 | 0.9 | 1.2 |
| 07sl073cy | 50 | 53.3 | 52.4 | 0.198 | 19.8 | 21.9 | 8.4 | 2.5 | -0.5 | 64.3 | 0.206 | 11.0 | 16.5 | 0.6 | 0.8 |
| 07sl081cy | 50 | 50.1 | 48.4 | 0.204 | 82.6 | 86.4 | 3.8 | 1.5 | 0.3 | 55.4 | 0.207 | 25.7 | 36.9 | 0.3 | 0.4 |
| 07sl085cy | 50 | 49.2 | 48.6 | 0.208 | 21.9 | 23.9 | 4.0 | 0.9 | 0.0 | 53.0 | 0.217 | 13.7 | 18.2 | 0.6 | 0.8 |
| 07sl006cy | 100 | 44.7 | 47.6 | 0.225 | 5.6 | 7.4 | 6.8 | 2.2 | 0.2 | 58.3 | 0.235 | 10.5 | 19.8 | 1.9 | 2.7 |
| 07sl056cy | 100 | 50.1 | 52.5 | 0.197 | 28.9 | 33.3 | 6.8 | 2.5 | 1.9 | 64.5 | 0.203 | 15.9 | 30.1 | 0.6 | 0.9 |
| 07sl057cy | 100 | 52.4 | 54.1 | 0.249 | 9.2 | 13.7 | 6.1 | 1.9 | 0.2 | 67.3 | 0.252 | 4.5 | 17.7 | 0.5 | 1.3 |
| 07sl058cy | 100 | 49.6 | 51.3 | 0.219 | 24.4 | 30.5 | 5.5 | 2.0 | 0.1 | 61.1 | 0.224 | 10.0 | 30.0 | 0.4 | 1.0 |
| 07sl059cy | 100 | 48.6 | 51.6 | 0.235 | 4.7 | 6.8 | 7.2 | 1.8 | -0.4 | 59.8 | 0.238 | 3.0 | 11.8 | 0.6 | 1.7 |
| 07sl074sy | 100 | 53.1 | 55.4 | 0.185 | 11.5 | 13.0 | 8.8 | 2.9 | -0.6 | 69.2 | 0.194 | 20.9 | 27.3 | 1.8 | 2.1 |
| 07sl079cy | 100 | 58.0 | 60.1 | 0.204 | 13.0 | 14.6 | 14.4 | 3.4 | 0.9 | 75.9 | 0.216 | 5.5 | 8.0 | 0.4 | 0.5 |
| 07sl082cy | 100 | 47.0 | 48.7 | 0.215 | 10.1 | 12.5 | 4.3 | 1.8 | -0.1 | 57.5 | 0.219 | 22.9 | 30.8 | 2.3 | 2.5 |
| 07sl088cy | 100 | 45.4 | 50.3 | 0.216 | 19.7 | 23.9 | 6.8 | 2.6 | 0.4 | 65.1 | 0.223 | 5.6 | 13.9 | 0.3 | 0.6 |
| 07sl042cy | 150 | 48.0 | 53.8 | 0.183 | 12.5 | 13.7 | 7.7 | 2.7 | -0.7 | 66.4 | 0.186 | 15.3 | 19.1 | 1.2 | 1.4 |
| 07sl064cy | 150 | 48.7 | 56.3 | 0.177 | 6.7 | 7.6 | 10.9 | 3.3 | 2.3 | 71.9 | 0.184 | 7.9 | 10.3 | 1.2 | 1.4 |
| 07sl065cy | 150 | 50.9 | 57.9 | 0.216 | 1.5 | 2.1 | 12.6 | 3.4 | -0.9 | 73.7 | 0.233 | 3.5 | 5.6 | 2.3 | 2.7 |
| 07sl066cy | 150 | 47.8 | 55.0 | 0.147 | 26.6 | 27.5 | 11.1 | 3.3 | -0.7 | 70.7 | 0.152 | 25.4 | 28.3 | 1.0 | 1.0 |
| 07sl075cy | 150 | 54.2 | 61.1 | 0.139 | 62.7 | 64.5 | 7.7 | 3.1 | 1.5 | 75.7 | 0.143 | 92.3 | 99.3 | 1.5 | 1.5 |
| 07sl084cy | 150 | 48.3 | 53.5 | 0.166 | 66.6 | 69.4 | 4.8 | 2.3 | -1.3 | 64.4 | 0.170 | 94.1 | 105.5 | 1.4 | 1.5 |
| 07sl027cy | 50 | 79.3 | 78.8 | 0.421 | 4.8 | 12.1 | 5.5 | 1.2 | -0.7 | 84.4 | 0.450 | 1.8 | 15.9 | 0.4 | 1.3 |
| 07sl028cy | 50 | 78.8 | 78.0 | 0.325 | 17.5 | 26.3 | 5.4 | 1.3 | -0.7 | 83.9 | 0.354 | 3.8 | 22.1 | 0.2 | 0.8 |
| 07sl029cy | 50 | 79.2 | 78.5 | 0.342 | 21.5 | 42.4 | 5.3 | 1.4 | -0.4 | 84.8 | 0.359 | 4.5 | 50.3 | 0.2 | 1.2 |
| 07sl034cy | 50 | 79.4 | 77.9 | 0.374 | 10.7 | 25.1 | 5.3 | 1.2 | 0.6 | 83.3 | 0.386 | 2.9 | 27.2 | 0.3 | 1.1 |
| 07sl054cy | 50 | 78.3 | 77.7 | 0.341 | 10.4 | 21.2 | 5.8 | 1.1 | -4.2 | 82.8 | - | - | - | - | - |
| 07sl069cy | 50 | 76.2 | 74.9 | 0.351 | 13.7 | 33.3 | 5.6 | 1.6 | 0.4 | 82.0 | 0.359 | 2.7 | 39.4 | 0.2 | 1.2 |
| 07sl083cy | 50 | 80.8 | 79.5 | 0.363 | 2.5 | 4.5 | 3.9 | 1.2 | -0.4 | 84.9 | 0.371 | 4.2 | 9.9 | 1.6 | 2.2 |
| 07sl086cy | 50 | 75.3 | 74.7 | 0.321 | 32.5 | 47.8 | 3.4 | 0.7 | -1.2 | 78.1 | 0.328 | 32.9 | 71.9 | 1.0 | 1.5 |
| 07sl087cy | 50 | 76.6 | 76.2 | 0.393 | 20.2 | 59.4 | 6.3 | 1.1 | -3.1 | 81.4 | 0.392 | 1.8 | 51.0 | 0.1 | 0.9 |
| 07sl009cy | 100 | 79.4 | 81.1 | 0.274 | 30.8 | 49.9 | - | - | - | 85.7 | - | - | - | - | - |
| 07sl015cy | 100 | 76.1 | 77.6 | 0.274 | 6.7 | 10.9 | 6.0 | 1.8 | -0.3 | 85.6 | 0.285 | 4.6 | 14.5 | 0.7 | 1.3 |
| 07sl018cy | 100 | 81.0 | 81.9 | 0.299 | 9.2 | 14.3 | 6.5 | 2.1 | -0.3 | 91.1 | 0.306 | 10.6 | 25.1 | 1.2 | 1.8 |
| 07sl019cy | 100 | 79.6 | 80.6 | 0.290 | 32.4 | 40.6 | 5.2 | 1.3 | -1.4 | 86.4 | 0.330 | 1.8 | 15.6 | 0.1 | 0.4 |
| 07sl020cy | 100 | 80.0 | 81.5 | 0.372 | 1.9 | 4.5 | 6.3 | 1.4 | -2.9 | 87.8 | 0.394 | - | 4.8 | - | 1.1 |
| 07sl021cy | 100 | 80.2 | 82.3 | 0.298 | 4.9 | 8.2 | - | - | - | 97.6 | - | - | - | - | - |
| 07sl067cy | 100 | 74.6 | 76.1 | 0.246 | 11.1 | 16.9 | 5.9 | 2.0 | -14.1 | 85.1 | 0.247 | 5.6 | 19.3 | 0.5 | 1.1 |
| 07sl076cy | 100 | 78.2 | 80.4 | 0.306 | 4.9 | 9.3 | 9.4 | 2.7 | 7.9 | 92.6 | 0.312 | 1.5 | 5.9 | 0.3 | 0.6 |
| 07sl077cy | 100 | 77.6 | 79.4 | 0.305 | 5.6 | 9.2 | 4.1 | 1.5 | -3.5 | 86.0 | 0.302 | 5.9 | 15.9 | 1.0 | 1.7 |
| 07sl037cy | 150 | 77.3 | 80.9 | 0.289 | 1.6 | 2.6 | 8.3 | 1.7 | -5.3 | 88.5 | 0.310 | 0.3 | 1.9 | 0.2 | 0.7 |
| 07sl040cy | 150 | 77.1 | 80.1 | 0.263 | 16.9 | 24.9 | 5.7 | 1.6 | 1.5 | 87.4 | 0.267 | 4.6 | 25.8 | 0.3 | 1.0 |
| 07sl046cy | 150 | 77.0 | 79.8 | 0.222 | 58.0 | 70.7 | 5.4 | 1.8 | 5.4 | 87.7 | 0.219 | 6.0 | 43.0 | 0.1 | 0.6 |
| 07sl048cy | 150 | 77.8 | 80.7 | 0.267 | 19.8 | 28.3 | 5.5 | 1.6 | 0.8 | 87.8 | 0.268 | 5.6 | 33.8 | 0.3 | 1.2 |
| 07sl068cy | 150 | 78.4 | 80.6 | 0.241 | 12.8 | 18.6 | 6.0 | 2.3 | 0.2 | 91.0 | 0.247 | 6.7 | 24.5 | 0.5 | 1.3 |
| 07sl080cy | 150 | 76.1 | 79.4 | 0.242 | 12.8 | 19.5 | 5.0 | 1.9 | 0.2 | 88.0 | 0.247 | 9.0 | 31.9 | 0.7 | 1.6 |

4. 3. 5 硬化が進行した高炉水砕スラグの再液状化特性

ここまで未硬化時の水砕スラグについての再液状化特性について検討してきた。しかし、水砕スラグは自然砂に無い潜在水硬性を有している。そこで硬化が進行した水砕スラグの再液状化特性について検討した。試料は海水養生168日、224日における相対密度 $Dr=50\%$ の水砕スラグ供試体を用い、初期拘束圧は 100kPa とした。初回液状化時の軸ひずみは $DA=7\%$ 程度生じるまで載荷させた。

図4.18には初回液状化後の再圧密による排水量から計算した体積ひずみ ϵ_v と初回液状化時に生じた最大両振幅軸ひずみ DA_{max} の関係である。同図より、海水養生した水砕スラグにおいても未硬化時と同様の体積ひずみを示している。伊達らの研究¹⁵⁾ではセメント安定処理した豊浦砂および宇部まさ土供試体について初回液状化時から再液状化時までの密度の変化を検討している。さらに、伊達らは分離防止剤を加えたことにより土粒子の見かけ上の粒子が大きくなるため、密に堆積しにくくなるとし、養生日数が長いほど再圧密による密度変化は小さいことを示している。しかしながら、本研究においては未硬化時とほぼ変らない体積ひずみを示しており、また、粘着力も未硬化時と比べて増加している。水砕スラグは固結しても透水係数は天然砂と同等の排水効果があることが報告されている¹⁶⁾ことから、セメント安定処理土よりも再圧密時の排水効果が大きく体積ひずみも未硬化と同等の値を示したと推察される。

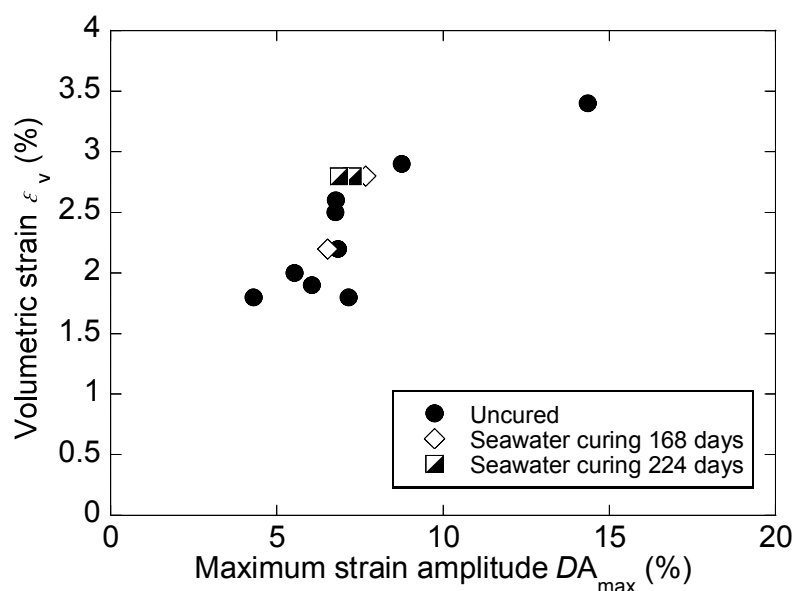
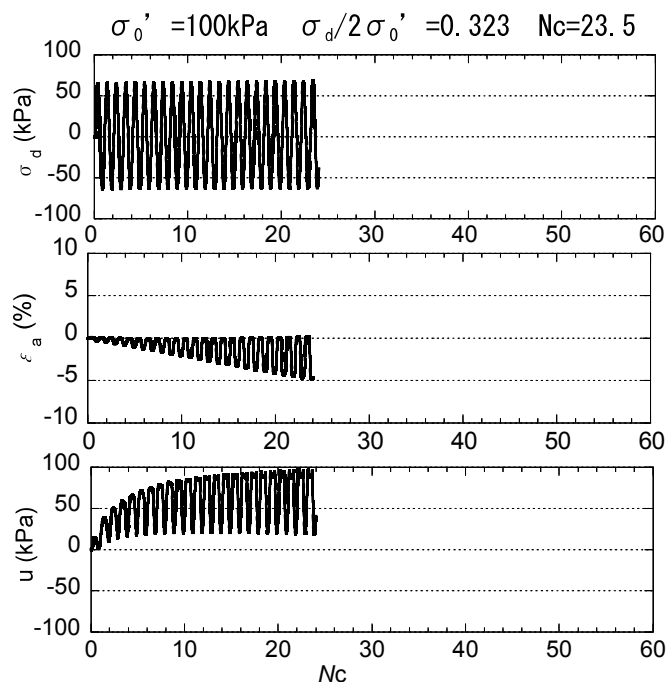
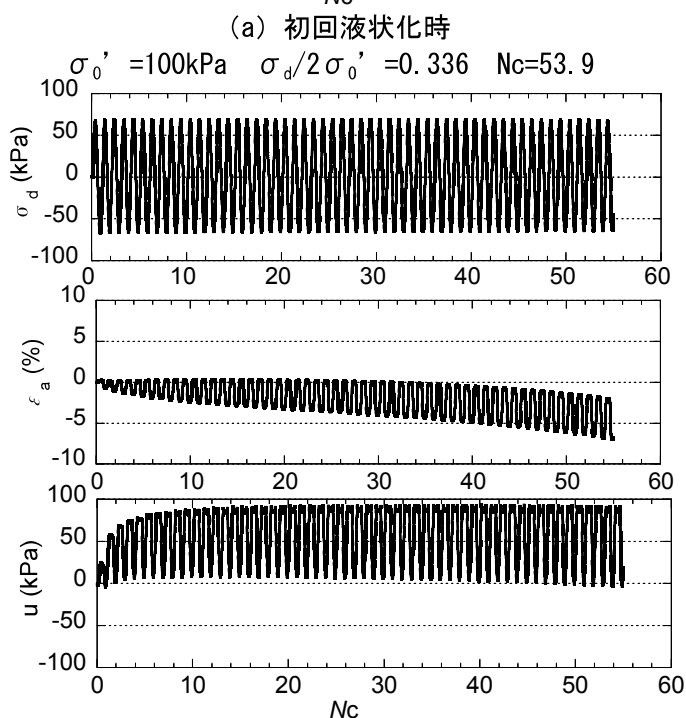


図4.18 体積ひずみと初回液状化時に生じた最大両振幅ひずみの関係

図4.19(a), (b)に海水養生168日した水砕スラグの初回液状化時と再液状化時の記録波形を示している。記録波形は上から、繰返しせん断応力 σ_d 、軸ひずみ ϵ_a 、過剰間隙水圧 u と繰返し載荷回数 N_c の関係である。写真4.1(a), (b)に、初回および再液状化時の破壊形態を示し、表4.3には初回液状化時の両振幅軸ひずみが約 $DA=7\%$ の海水養生168日、224日の試験結果を示した。



(a) 初回液状化時



(b) 再液状化時

写真4.1 破壊形態
(海水養生168日 $Dr=50\%$)

(b) 再液状化時

図4.19 海水養生168日 $Dr=50\%$ の記録波形

表 4.3 硬化供試体の初回および再液状化試験結果(海水 168 日および 224 日養生)

| Test No. | Curing duration (days) | σ_0' (kPa) | 1st liquefaction | | | | 2nd liquefaction | | N_R/N_L (DA=5%) |
|--------------|------------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|
| | | | $\sigma_d/2\sigma_0'$ | $N_{LDA=5\%}$ (Times) | Damax (%) | ϵ_v (%) | $\sigma_d/2\sigma_0'$ | $N_{RDA=5\%}$ (Times) | |
| 07swsl004rcy | 168 | 100 | 0.33 | 14.4 | 7.7 | 2.8 | 0.34 | 52.9 | 3.7 |
| 07swsl005rcy | 168 | | 0.32 | 23.5 | 6.5 | 2.2 | 0.34 | 53.9 | 2.3 |
| 07swsl003rcy | 224 | | 0.32 | 47.0 | 7.3 | 2.8 | 0.35 | 52.9 | 1.1 |
| 07swsl006rcy | 224 | | 0.32 | 14.6 | 6.9 | 2.8 | 0.34 | 41.0 | 2.8 |

図 4.19 (a), (b) より, 初回液状化時の軸ひずみの記録波形では伸張側へ軸ひずみが DA=5%まで生じている。未硬化時とは異なり硬化の進行により液状化発生の抑制が確認できる。また, 再液状化時の軸ひずみの記録波形では初回液状化時と同様に伸張側へ軸ひずみが生じており, 軸ひずみが 5%生じるまでの載荷回数は増加している。最終的には伸張側へのみ軸ひずみが生じている。これは硬化した水砕スラグの破壊形態(ネッキング破壊)に非常に類似している。また, 写真 4.2 (b) に示すように供試体の中央部で“くびれ”¹⁾を伴った破壊形態が見られた。表 4.2 より, 繰返し回数比は 1 以上でありすべての試験で再液状化強度は増加していることがわかる。ここでの実験では各養生日数について 2 回ずつ試験を行ったがすべての供試体について同様の破壊形態を示し, 再液状化強度も増加していた。伊達らの研究¹⁵⁾ではセメント安定処理した豊浦砂および宇部まさ土供試体の再液状化試験を行った結果では, 初回液状化時においてネッキング破壊した部分で供試体は破壊状態になるため, 再液状化はネッキングした部分でひずみが生じて再液状化強度は低下していた。本節においては初回液状化時にネッキング破壊していなかったことから, 再液状化強度は低下しなかったと考えられる。しかし, 再液状化時の破壊形態は“くびれ”¹⁾が伴ったものであり, 未硬化時と同様にせん断変形が生じた粒子構造であると思われる。また, 再液状化後の供試体には硬化した水砕スラグのような固結部分がなかったことを考えると地震の大きさによっては液状化の発生が危惧される。今回のように初回および再液状化時で破壊形態が異なるため, 再液状化の評価は容易ではない。

水砕スラグの再液状化特性について, 本研究の実験からでは把握できない点が多く残っている。例えば, 液状化後の繰返し載荷の継続時間, 加速度の大きさなど再液状化特性は様々な要因が影響していると思われる。故に再液状化というのは非常にテーマが漠然としており実験条件の設定が難しい。特に水砕スラグの再液状化特性については, 硬化の進行度が問題となる。一旦, 水砕スラグが液状化すれば密度は増加するため非常に長い期間後には硬化が進行し, 再液状化強度は増加する。また, 初回液状化時において初期拘束圧の影響から粒子破碎していたことも考えられる。高橋・菊池ら¹⁷⁾¹⁸⁾の研究では粒子破碎すれ

ば固結の起点となる粒子の接触点が増えるため、潜在水硬性が早期に発現されることを確認している。即ち、初回軸ひずみの検討でもあったようにせん断変形した状態での粒子構造となっても水砕スラグの硬化に繋がる好条件が揃って硬化することによりその問題はなくなる。再液状化という現象はある地盤が液状化履歴を受けた後に考慮される問題であり、施工においては液状化しない地盤の構築が望ましい。しかしながら、釧路沖地震においては復旧工事として行った液状化対策を怠り再液状化が発生している。また、伊達らの実験のように再液状化強度が低下するとなれば、硬化した水砕スラグが万が一、液状化した場合にはその後の対策は必ず必要となる。今回は硬化途中の水砕スラグについても検討したがあくまで予測でしかなく、より様々な条件での水砕スラグの再液状化特性を検討する必要があると考えられる。

4. 4 高炉水砕スラグの再硬化に関する基礎的検討

4. 4. 1 試料と検討方法

本研究で用いた試料は、新日本製鐵大分製鐵所にて2004年に製造された高炉水砕スラグ(以下、水砕スラグA)である。また、第3章で述べたスラグ試験盛土の水砕スラグ(以下、水砕スラグB)も用いて検討した。水砕スラグBは、施工後8年にブロックサンプリングしたものである。

上記試料を用いて、各種物理試験を実施した。

(1) 土粒子密度および最大・最小間隙比

表4.4に、密度試験(JIS A1202:1999)および最大・最小密度試験(JIS A1224:2000)の結果を示す。後述するが、今回用いたスラグ試験盛土は撒き出しを0.3m/層、1.0m/層と2つに分けて締め固めているため、撒き出し0.3m/層、撒き出し1.0m/層と分けて考えることとした。水砕スラグと玄海砂、豊浦砂はいずれも土粒子密度はほぼ同等である。最大・最小間隙比は天然砂と比較して水砕スラグのほうが大きくなっている。このことは、粒子表面に多数の気泡跡が確認されることから明らかである。

表 4.4 各試料の土粒子密度及び最大・最小間隙比

| | Soil particle density ρ_s (g/cm ³) | Maximum void ratio e_{max} | Minimum void ratio e_{min} |
|-----------------------------|--|---------------------------------|---------------------------------|
| GBFS-A | 2.643 | 1.510 | 1.033 |
| GBFS-B(Before construction) | 2.766 | 1.445 | 0.893 |
| GBFS-B(0.3/layer) | 2.779 | 1.809 | 1.177 |
| GBFS-B(1.0/layer) | 2.691 | 1.669 | 1.060 |
| Genkai sand | 2.678 | 0.872 | 0.516 |
| Toyoura sand | 2.646 | 0.999 | 0.623 |

(2) 粒度特性

表 4.5 に各試料の均等係数 U_c および曲率係数 U_c' を示す。水砕スラグの均等係数は 2.5～4.2 の範囲にあることが報告²⁾されているが、水砕スラグ A および水砕スラグ B もこの範囲にあることが分かる。

図 4.20 は、各試料についてふるい分析 (JIS A 1204:2000) を行った結果である。水砕スラグは、玄海砂より全体的に粒径が小さくなっている。

表 4.5 試料の均等係数 U_c および曲率係数 U_c'

| | U_c | U_c' | D_{10} (mm) | D_{60} (mm) |
|-------------------|-------|--------|---------------|---------------|
| GBFS-A | 3.90 | 1.42 | 0.20 | 0.65 |
| GBFS-B(0.3/layer) | 3.67 | 1.09 | 0.30 | 0.90 |
| GBFS-B(1.0/layer) | 3.33 | 1.08 | 0.30 | 0.85 |
| Genkai sand | 4.24 | 1.15 | 0.33 | 1.15 |
| Toyoura sand | 1.92 | 0.89 | 0.13 | 0.21 |

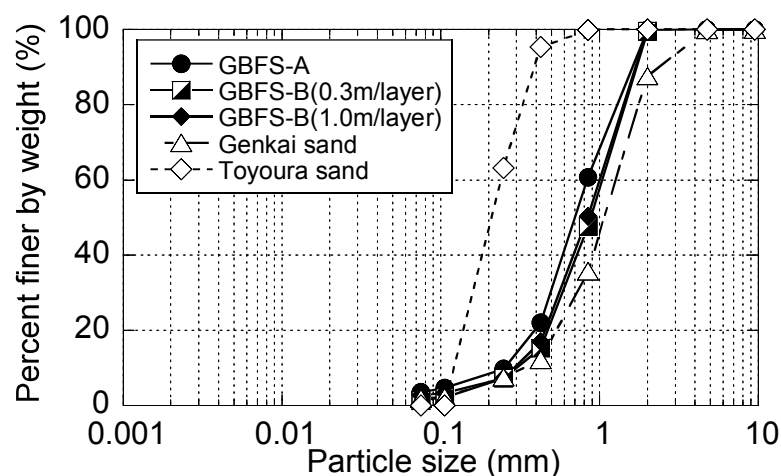


図 4.20 粒径加積曲線

第4章 高炉水砕スラグの強度評価

供試体は、直径 5cm、高さ 10cm のプラスチックモールドに相対密度 80%となるように試料を充填し、養生した。また、図 4.3 に示すように、供試体に養生水が浸透するようにプラスチックモールド底面に直径 1.7mm 程度の穴を開けた。供試体は、写真 4.2 に示すように海水で浸した養生容器に入れて密閉し、80℃に設定した炉乾燥機内で養生を行った。今回設定した養生条件は、硬化を促進し短期的な評価を行うためである¹⁹⁾²⁰⁾。海水は山口宇部空港の近くで採取したものであり、pH は約 8.01~8.15 である。



写真 4.2 養生方法および養生状況外観写真

実験手順を図 4.21 に示す。水砕スラグ A については 2mm ふるいにかけて、 $Dr=80\%$ となるように試料をプラスチックモールドに詰め、所定の期間養生した。養生完了後に供試体を取り出し、非排水繰返しせん断試験および圧密排水三軸圧縮試験(CD)を実施した。せん断試験後に供試体を解砕し、上記と同様の方法で再び供試体を作製後に再び養生した。再養生完了後、同様のせん断試験を実施し、初回せん断および再せん断試験時の強度を比較検討した(図 4.21 の①と③を比較)。

水砕スラグ B については、現場試験盛土からサンプリングした試料を解砕し、上記と同様の手順で検討した。なお、水砕スラグ B は硬化履歴を有しているため、試験手順は図 4.21 の②から開始となり、再養生および再せん断試験と位置付けた。養生日数は、28、56、112 日間とし、再養生日数は初回時と同等の日数とした。

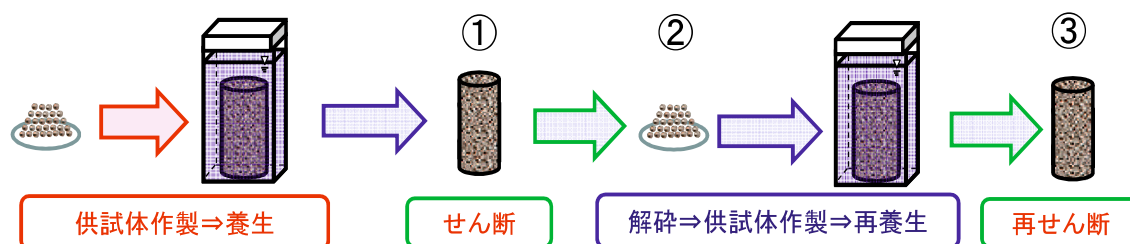


図 4.21 実験手順

4. 4. 2 再硬化特性

(1) 水砕スラグ A および B の粒度

図 4.22 に、水砕スラグ A の初回および再養生前の粒度分布、現場試験盛土のサンプリング試料を解砕した水砕スラグ B(撒き出し 0.3m, 1.0m/層)の粒度分布を示す。いずれの試料においても類似の粒度分布を示しているが、水砕スラグ B の粒径加積曲線は水砕スラグ A より細粒分が少ないことがわかる。これは、水砕スラグ B は自然下で長期間放置されていたため、硬化の進行により粒子表面に水和物が生成され、見かけの粒子が大きくなったものと考えられる。

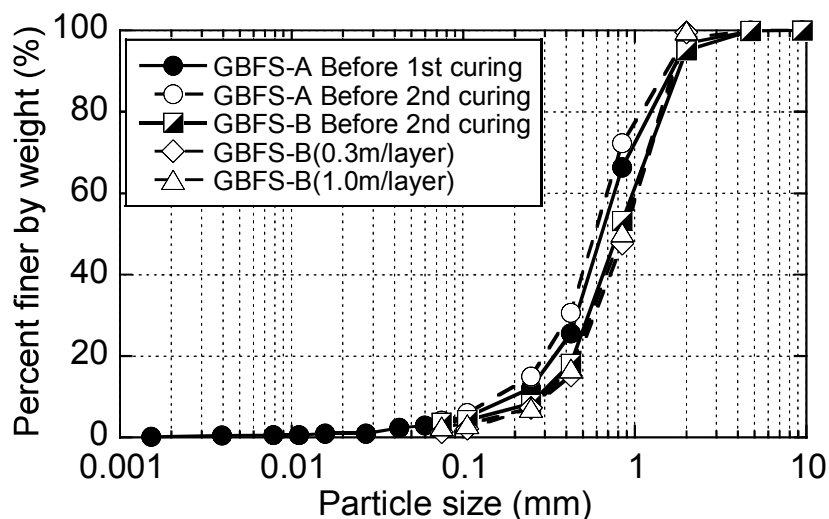


図 4.22 初回及び再養生前における粒径加積曲線

(2) 化学特性

図 4.23 に水砕スラグ A および B の溶出 pH の経時変化を示す。凡例の「溶出」は、養生容器内の養生水の pH 値であり、「間隙」は供試体内から流出した養生水の pH 値を示す。水砕

スラグ A は、初回養生の「溶出」及び「間隙」に大きな変化はないが、初回及び再養生ともに養生日数の経過に伴い pH が上昇していることが分かる。水砕スラグ B も同様に、養生前と比較して pH が上昇し水和反応が進行していることがわかる。

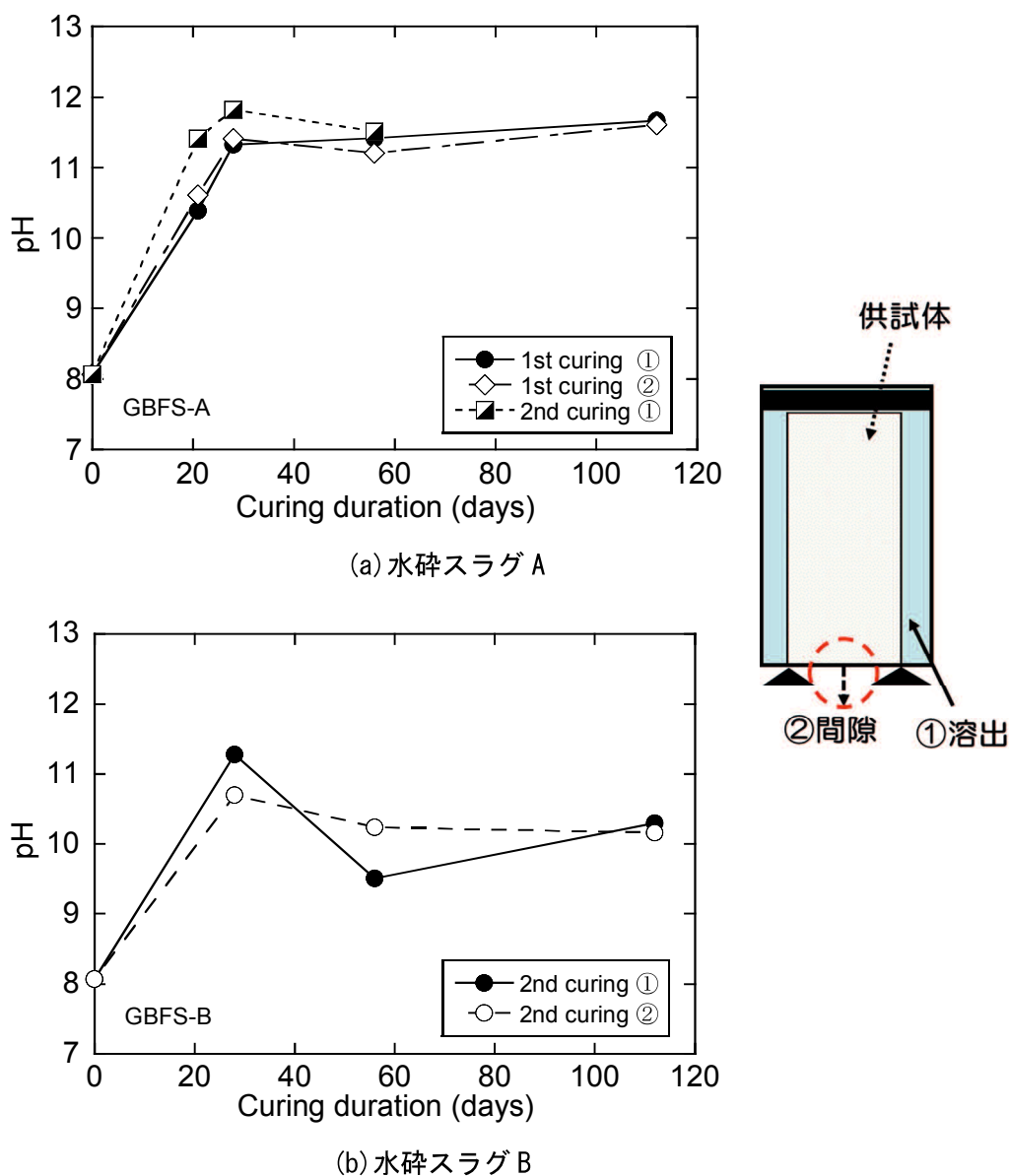


図 4.23 pH の経時変化

図 4.24 は、水砕スラグ A について養生日数が 28 日、56 日、112 日の供試体を用いた非排水繰返し三軸せん断試験での繰返し応力振幅ひずみ σ_d 、軸ひずみ ϵ_a 、過剰間隙水圧 Δu の時刻歴を示したものである。養生日数 28 日の供試体では、過剰間隙水圧は徐々に上昇して、徐々に軸ひずみは大きくなる。また、軸ひずみは引張側に偏っている。この供試体は握れ

第4章 高炉水砕スラグの強度評価

ば簡単に潰せる程度の硬化状態であり、試験終了時は粒子間の結合力が失われて自立できず、液状化破壊と判断される。さらに、養生日数 56 日と 112 日の供試体では、過剰間隙水圧は载荷初期に緩やかに上昇し、軸ひずみは引張側に増大し破壊に至る。これらの供試体は、試験終了時は供試体上面が载荷装置のペダスタルスと剥離し、くびれた状態（ネッキング破壊）で破壊した。写真 4.3 にネッキング破壊の状況を示す。

供試体の上部はその影響で崩れているが、その他の部分は硬化状態を維持した。このような供試体の状況から判断しても、明らかに液状化とは異なる破壊形態を呈しており、非液状化の破壊形態である。また、再養生供試体についても、各初回養生の供試体と同様の挙動が確認できた。水砕スラグ B については、養生日数が 28 日、56 日及び 112 日の供試体を用いて非排水繰返しせん断試験を行ったが、それぞれの日数について図 4.24 (b)(c)(d)と同様の挙動が見られた。

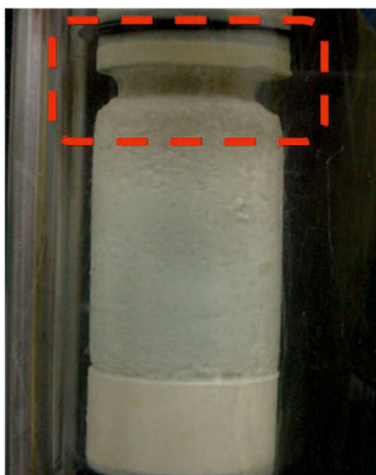


写真 4.3 ネッキング破壊状況写真

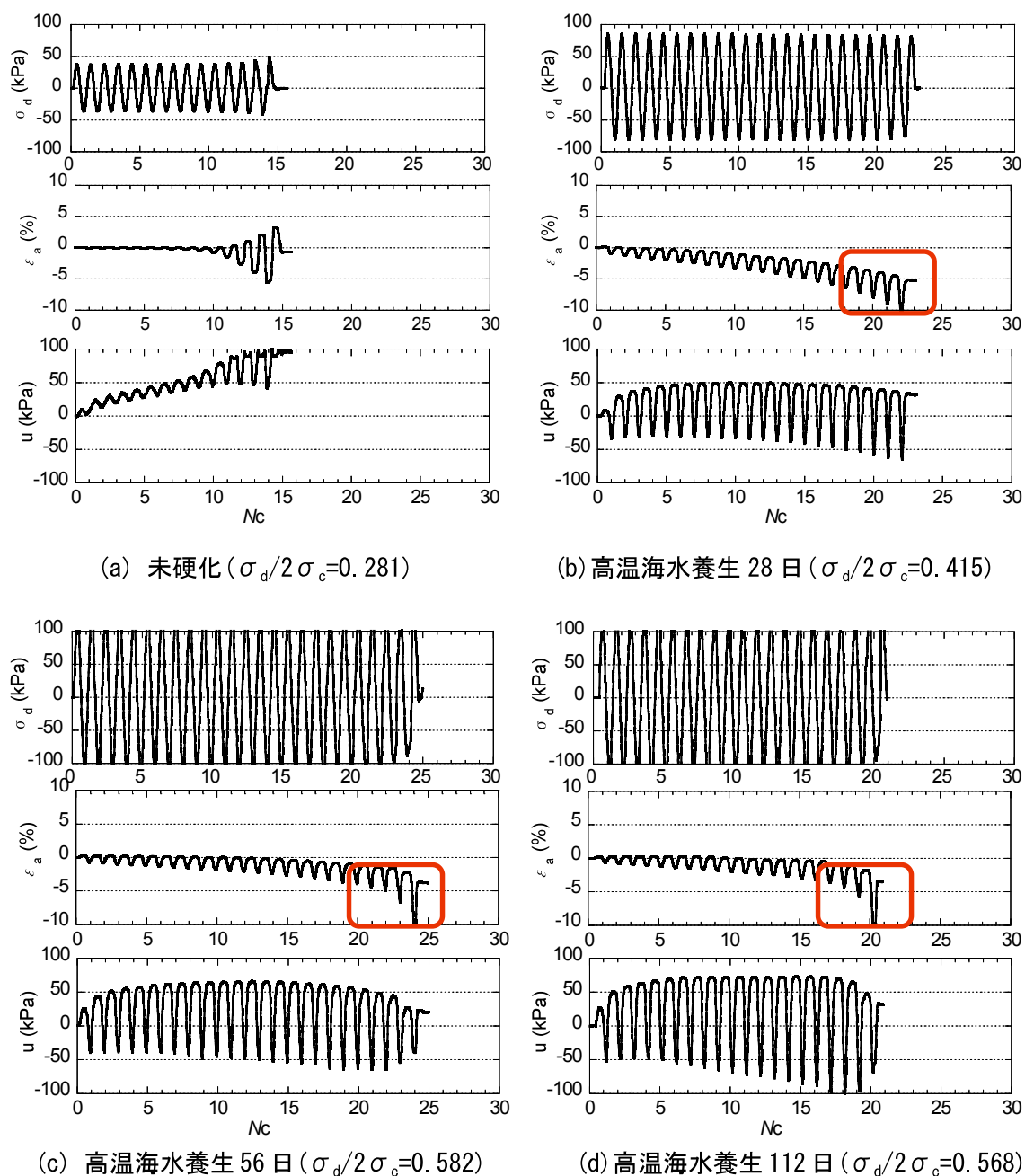


図 4.24 非排水繰返しせん断試験結果

図 4.25 および図 4.26 は、水砕スラグ A および水砕スラグ B の繰返し応力振幅比と繰返し荷重回数の関係でまとめたものである。図中には未硬化水砕スラグ供試体の結果も併せて示す。ここでネッキング破壊した供試体は伸張側の残留ひずみに大きく支配され、いわゆるきれいな砂の破壊形態とは異なる。このような破壊形態の繰返し応力振幅比をそのま

ま液状化強度比と見るのは問題があると思われるが、強度を示す指標として液状化強度比の比較を行った。なお、硬化供試体では有効応力が 0 になる繰返し回数と両振幅ひずみが 5%に達する繰返し回数が一致しないため、両振幅ひずみが 5%に達した場合を破壊とした。水砕スラグ A は、初回及び再養生供試体の両者とも養生日数の増加に伴い、強度増加していることが確認できる。特に、再養生後の試験結果については初回と同様の日数で養生した場合、若干差は見られるものの初回養生時と同程度の強度が確認でき、せん断履歴を受けた水砕スラグも水硬性は保持されていることがわかる。

水砕スラグ B は、養生日数の増加に伴って強度増加しており、自然下で長期間養生されたスラグにおいても、再び硬化が進行することがわかった。

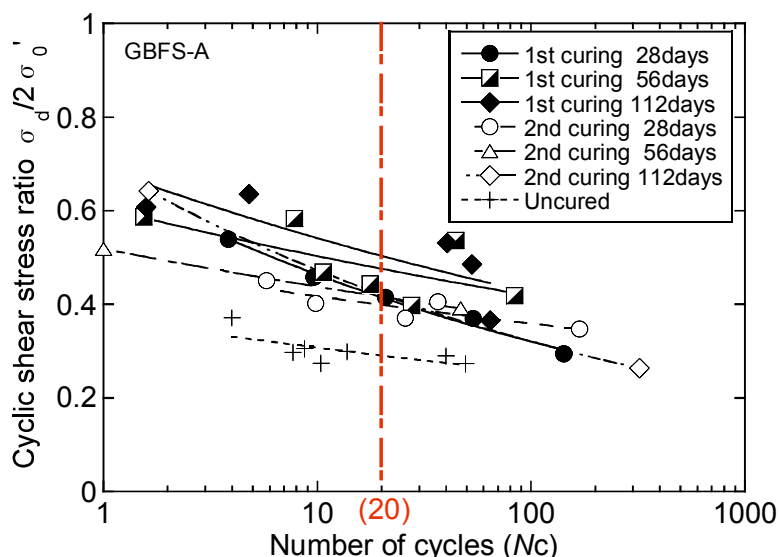


図 4.25 繰返し応力振幅比と繰返し载荷回数の関係(水砕スラグ A)

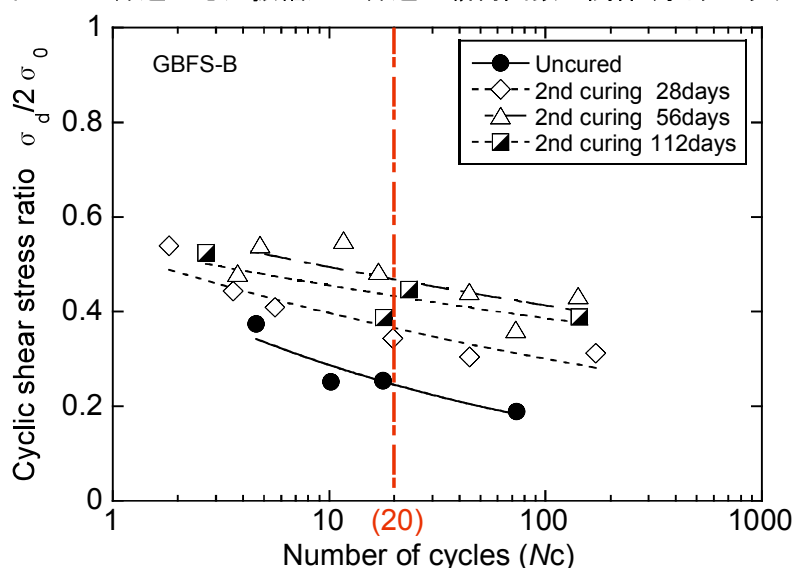


図 4.26 繰返し応力振幅比と繰返し载荷回数の関係(水砕スラグ B)

図 4.27 に、液状化強度比 R_{20} の経時変化を示す。いずれの試料においても養生日数の増加に伴い強度増加していることがわかる。しかしながら、養生日数 56 日を過ぎると強度は増加傾向であるがほぼ収束傾向にある。高温の場合、初期段階で強度増加する点に関して、常温に比べて長期的な強度は見込めないと指摘されており²⁰⁾、また、海水の緩衝作用⁷⁾により pH の上昇が抑制されたことが、強度増加に影響したとも考えられる。

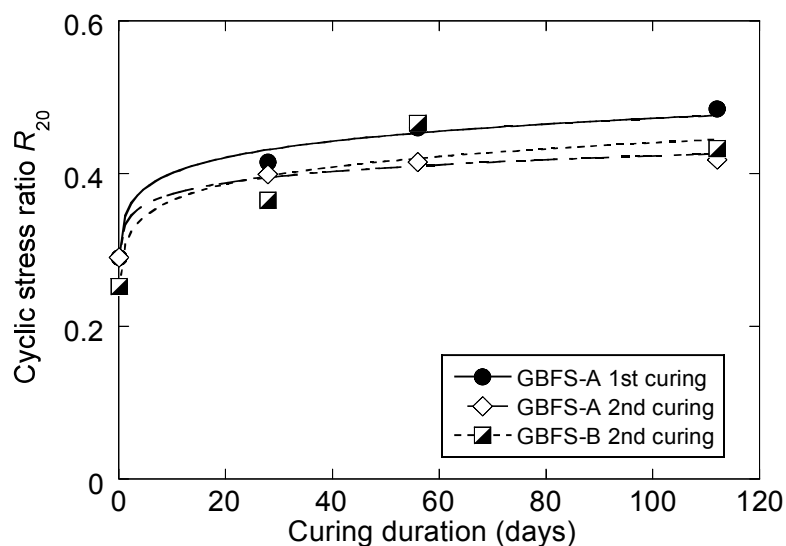


図 4.27 液状化強度比 R_{20} の経時変化

図 4.28 に、各養生条件について液状化強度比 R_{20} の経時変化を示す。同図より、本研究の養生条件である海水 80°C は、海水 20°C よりも短期間で大幅な強度増加が期待できる。

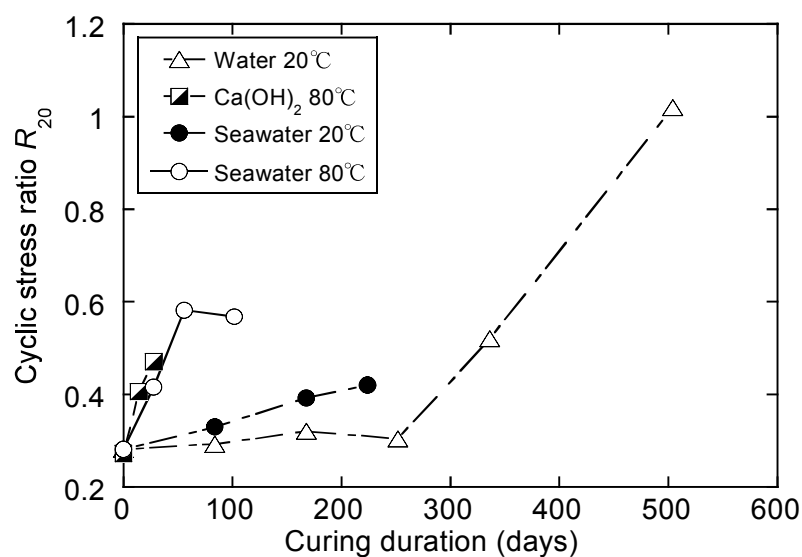


図 4.28 各養生条件の液状化強度比 R_{20} の経時変化

図 4.29 は、せん断抵抗角及び粘着力と養生日数の関係で、実線が初回養生した供試体の試験結果、破線が再養生した供試体の試験結果である。せん断抵抗角には大きな変化は見られず、養生条件が異なっても 35.0°~42.0°程度で水砕スラグの設計基準値 35°以上²⁾を示し、粘着力は養生日数の増加に伴い増加している。

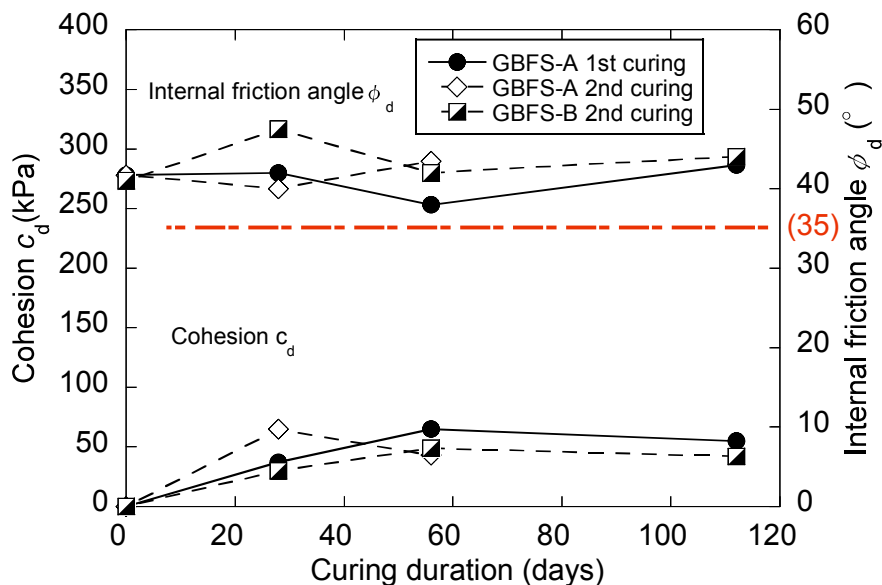


図 4.29 せん断抵抗角および粘着力の経時変化

4.5 まとめ

本報告では、水砕スラグの未硬化時および硬化途中の繰返しせん断強度を把握するため、未硬化および室内養生した供試体に対して静的三軸圧縮試験 (CD) および非排水繰返し三軸試験を行った。また、未硬化時の水砕スラグにおいて、粒子破碎に着目して再液状化強度に関する検討を行った。さらに、硬化供試体に対してせん断試験を実施した後、同試料を用いて供試体を作製し、所定の期間養生した。養生完了後、再せん断試験を実施し再硬化特性について検討した。

本章で、得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 淡水養生および海水養生した供試体は、ともに相対密度が大きい方が繰返しせん断強度 (液状化強度) が大きい。
- (2) 水砕スラグの間隙比は、養生日数が経過するに伴い、水和物が生成されるため減少する。
- (3) 再液状化強度は、再圧密による密度増加によって初回液状化強度よりも大きくなり、そ

の傾向は初期相対密度が小さい供試体の方が大きくなる。

- (4) R_{20} は、相対密度 D_r 、養生水に関係なく粘着力 c_d と相関性が認められる。
- (5) 初回液状化時の最大両振幅軸ひずみが大きくなると、再液状化強度が低下する。
- (6) 同一相対密度で比較すると、一度繰返しせん断を受けた供試体の方が液状化強度が低下する傾向を示す。この原因については、今後繰返しせん断中の粒子破碎の影響等を考察し、更に検討する必要がある。
- (7) 硬化が進行した水砕スラグは、せん断を受けた後も潜在水硬性は保持され、再び硬化が進行する。このことから、硬化が進行した水砕スラグは、せん断後同地盤内において、水が接触し得る環境では自己修復することを示している。

参考文献：

- 1) 大原資生, 山本哲朗：振動台による飽和砂の再液状化特性に関する実験的研究, 土質工学会論文報告集, Vol.22, No.2, pp.123-131, 1982.
- 2) (財)沿岸開発技術センター, 鐵鋼スラグ協会：港湾工事用水砕スラグ利用手引書, 1989.
- 3) 篠崎晴彦, 松田博, 白元珍：高炉水砕スラグの硬化に伴う繰返しせん断強度特性の変化, 土木学会論文集 C, Vol.64, No.1, pp.175-180, 2008.
- 4) 和田正寛, 西東辰朗, 松田博, 石藏良平：高炉水砕スラグの再液状化抵抗に関する研究, 第44回地盤工学研究発表会講演集, pp.423-424, 2009.
- 5) 石藏良平, 小林俊介, 和田正寛, 松田博：高炉水砕スラグの再液状化抵抗と粒子破碎に関する研究, 第45回地盤工学研究発表会講演集, pp.483-484, 2010.
- 6) (社)土質工学会：土質試験の方法と解説, pp.438-440, 2000.
- 7) (財)沿岸技術研究センター：港湾・空港における水砕スラグ利用技術マニュアル, pp.37-38, 2007.
- 8) Yasuda, S. and Tohno, I. : Sites of Reliquefaction Caused by the 1983 Nihonkai-Chobu Earthquake, 土質工学会論文集報告集, Vol.28, No.2, pp.61-72, 1988.
- 9) 山本哲朗, 岡林巧, 松本直, 郷健一：1977年鹿児島県北西部地震, 同第二北西部地震における地震災害, 地震工学振興会ニュース, No.157, pp.33-41, 1997.
- 10) 若松加寿江：2011年東北地方太平洋沖地震による地盤の再液状化, 日本地震工学会論文集, Vol.12, No.5, pp.69-88, 2012.
- 11) 田辺裕次, 佐藤研一, 吉田信夫：繰返し履歴を受けた砂の液状化特性, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.1331-1336, 1998.
- 12) Finn, W.D.L., P.L.Bransby and D.J.Pickering: Effect of Strain History on Liquefaction of sand, J.SMFD, ASCE, Vol.96, No.SM6, pp.1917-1934. 1970.
- 13) 松岡元, 山崎浩元, 松原義仁, 青木康, 原康彦：粒子構造の変化に着目した再液状化現象の解析, 第20回土質工学研究発表会講演集, pp.625-626, 1985.
- 14) 山本哲朗, 鈴木素之, 千田隆行：しらすの再液状化特性に及ぼす初期相対密度と初期有効拘束圧の影響, 山口大学工学部研究報告, Vol.5, No.2, pp.105-111, 2001.
- 15) 松尾晃, 山本哲朗, 鈴木泰之, 伊達明彦, 森章一郎：セメント安定処理地盤の再液状化特性の予測に関する実験的研究, 第34回地盤工学研究発表会講演集, pp.1003-1004, 1999.2
- 16) 松田博, 来山尚義, 高宮晃一, 村上剛敏, 中野恭夫：高炉水砕スラグの地盤改良材とし

第4章 高炉水砕スラグの強度評価

- での適用性に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.764/III-67, pp.85-99, 2004.6.
- 17) 高橋邦夫, 菊池喜昭ほか: 高炉水砕スラグの固結に及ぼす要因 (その2: 粒度の影響), 土木学会第57回年次学術講演会講演概要集III, pp.63-64, 2002.
 - 18) 高橋邦夫, 菊池喜昭ほか: 高炉水砕スラグの固結に及ぼす要因 (その1: 各種要因の影響), 土木学会第57回年次学術講演会講演概要集III, pp.61-62, 2002.
 - 19) 篠崎晴彦, 松田博, 坂井悦郎, 小野幸一郎, 鈴木操, 中川雅夫: 高炉水砕スラグの硬化特性と地盤改良工法への適用, 土木学会論文集C, Vol.62, No.4, pp.858-869, 2006.12.
 - 20) (社)地盤工学会: 高炉水砕スラグの地盤工学的利用促進に関する研究委員会報告書, pp.44, 2010.

第5章 水和反応に着目した高炉水砕スラグの強度発現と

再硬化の定量評価

5. 1 はじめに

高炉水砕スラグ（以下、水砕スラグ）は非晶質であるため、水と接触し得る環境下では、水砕スラグ自身からカルシウムやシリカ等の成分が溶出する。そのため、セメントと同様な水和反応が生じ、C-S-H（珪酸カルシウム水和物）やC-A-H（アルミン酸カルシウム水和物）に代表される水和物が生成される。水砕スラグの粒子間接触部付近に析出した水和物はセメンテーション効果を発揮して硬化すると考えられている¹²⁾。このことから、水砕スラグから析出する水和物量が強度に大きく影響すると考えられる。

水砕スラグは既に多くの施工実績を有しており、特に港湾構造物における事例報告は多い³⁾⁻⁸⁾。また、第3章で述べたように水砕スラグを用いた現場試験盛土を施工し、長期に亘る調査結果から経年的に強度増加することが明らかとなっている⁹⁾⁻¹¹⁾。このことから、港湾のみならず陸上構造物における水砕スラグの利用拡大が期待される。

水砕スラグのように、単体で硬化する材料は自然界にはほとんど存在しないため、地盤材料としての利用を促進するためには、粒状体として用いた水砕スラグの潜在水硬性に関する研究成果の蓄積が望まれる。一方、硬化した水砕スラグは地震等の外的要因によって破壊が生じても、水和反応により自己修復すると考えられる。著者らは、第4章で硬化履歴を有する水砕スラグの自己修復について検討している¹²⁾¹³⁾。その結果、養生日数の増加に伴って強度増加し、破壊後も潜在水硬性が保持され自己修復することを明らかにしている。このように、現在までに水砕スラグの潜在水硬性に着目した研究は多く報告されているものの、その多くは力学的性質の時間変化やアルカリ刺激による硬化促進などの検討が先行している。水和反応等に着目した基礎的な材料特性についての研究事例はほとんど見られず、また自己修復能力に関しても定量的評価がなされていない。

自己修復によって幾分かの機能回復が見込める場合、維持・補修時のコスト軽減や新たな利用先の拡張に寄与できると考えられる。そのため、水砕スラグの自己修復能力を考慮して計画・施工の段階から事前対策として取り入れることが可能となれば、より計画的な耐久設計に貢献できると考えられる。

本章は、水砕スラグ粒子表面に析出する水和物に着目し、種々の環境で養生した水砕スラ

グ供試体の一軸圧縮強さと水和反応率の関係について検討した。さらに、硬化に及ぼす硬化履歴の影響を明確にするため、第3章で示した現場試験盛土から採取したスラグ試料を用いて、硬化が進行した水砕スラグの自己修復特性についても検討を行った。

5. 2 高炉水砕スラグの水和反応率

5. 2. 1 水和反応率の測定法に関する既往の研究

水砕スラグはガラス質で反応性が高く、高炉セメント、高硫酸塩スラグセメントなどの主要成分として利用されている。これらセメント中のスラグ含有量あるいはその水和反応の速度や生成物の組成を問題とする場合にスラグを定量するために水和反応率が測定される。スラグの水和反応率の測定について、これまで数々の手法が提案されているが、最も代表的なものとしてリートベルト法と選択溶解法がある。

佐川らは、水砕スラグの水和反応率の測定において、リートベルト法と選択溶解法によって求められる水和反応率の比較を行っている¹⁴⁾。その結果、特に材齢初期において両手法でスラグの水和反応率が異なることを明らかにしている。この原因として、スラグ粒子の表層において、幾つかの化学成分が溶脱して残った溶脱層と呼ばれる存在が指摘されている。溶脱層には粒子間を接着する効果はないものの、その結晶性は水和物に近く、加熱処理を行った際に結晶化せずに水和物と判断され、リートベルト法による水和反応率は過大となったとしている。

近藤らは、精度良く水砕スラグの水和反応率を測定するため、選択溶解法の条件を報告している¹⁵⁾。水和反応率の測定にサリチル酸・アセトン・メタノール溶液を採用し、この溶液を用いた手法では、スラグはほとんど溶解しないが、生成された水和物の大部分を溶解させることを示した。

5. 2. 2 水和反応率の測定方法

本研究では、前節で述べた近藤らによる選択溶解法を用いて水砕スラグの水和反応率を測定することとした。これは、地盤材料として粒状の水砕スラグを単体で用いることを検討し

ているため、本手法を適用すれば、スラグと水和物のみの質量比から精度良く定量できると考えたためである。

試験は以下に記す手順で行った。まず、110℃で炉乾燥したスラグ試料を準備する。次に、アセトン 70ml、メタノール 30ml にサリチル酸 5.0g を溶解させた混合溶液を試料 1.0g とともに共栓付き三角フラスコに投入する。その後、マグネチックスターラーを用いて 350rpm の攪拌速度で 1 時間攪拌して約 24 時間静置する。静置後、孔径 1 μ m の定量ろ紙を用いて吸引ろ過し、得られた残渣をメタノールで洗浄する。残渣をろ紙とともにろ紙に移し、850℃で約 1 時間強熱してろ紙を灰化させ、秤量した。試験のフローを Fig.1 に示す。近藤らによると試験に供する試料は 0.5g として上述した試薬もそれぞれ半分の量を用いているが、この場合、試料の僅かな損失が結果に大きな影響を及ぼす懸念がある。そのため、本研究における水和反応率試験では、試料を 1.0g に設定し、併せて混合溶液容量も 2 倍とした。既往の研究より、試薬量変更による水和反応率への影響はほとんどないと報告されており¹⁶⁾、上記の実験条件においても影響はないと考える。マグネチックスターラーの回転数については、従来の方法では 600~700rpm であるが¹⁷⁾、水砕スラグの粒子破碎を考慮し、回転数を 350rpm に設定した。水和反応率 R は、式(5.1), (5.2)により算出できる。

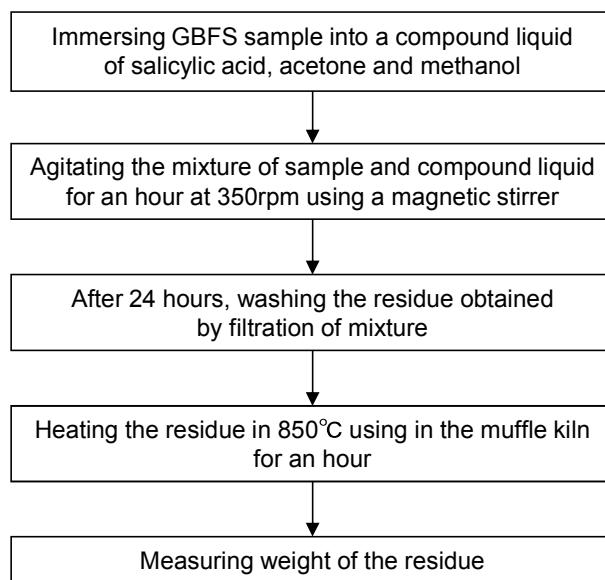


図 5.1 水和反応率試験の手順

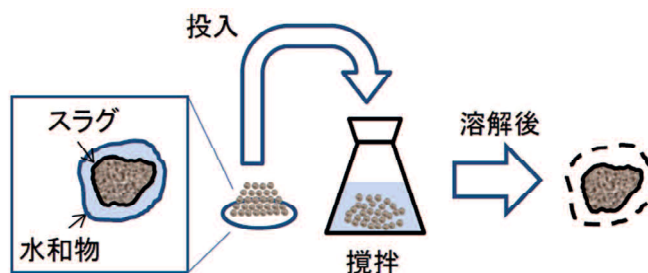


図 5.2 水和反応率試験の概要図

$$R_i(\%) = \frac{m_h}{m_d \times (1 - L_i / 100)} \times 100 \quad (5.1)$$

$$R(\%) = 100 - R_i \quad (5.2)$$

ここに、 R_i ：未反応率（%）， m_h ：強熱後の水砕スラグ質量（g）， m_d ：溶液浸漬前の水砕スラグ質量（g）， L_i ：未水和の水砕スラグの強熱減量（%）である。

本試験は、JSCE-D 501-1999 の高炉水砕スラグの微粉末の混入率及び置換率により規格化された。しかしながら、「コンクリート標準示方書 規準編 2005 年度版」¹⁸⁾によるとフルオロカーボン系メンブランフィルターを用いるとされているが、 $850 \pm 50^\circ\text{C}$ で強熱すると有毒ガス（パーフルオロイソブチレン）が発生することか安全性に問題があるため、2007年に廃止された経緯がある¹⁹⁾。本研究では、セルロース系メンブランフィルターである耐薬品性の高いADVANTEC-5C、孔径 $1 \mu\text{m}$ を使用した。

5. 2. 3 海水中の塩分による水和反応率の過大評価および補正方法

後述するように、本実験では、港湾での利用を念頭に海水環境に置かれた水砕スラグに対しても検討している。海水に浸漬～養生した場合、炉乾燥過程で水砕スラグ表面に析出した海水中の塩分も溶解されるため、水和反応率を正しく求めることができない。そこで、塩分の析出量を事前に計測し、水和反応率を算出する際に補正を行った。計測方法として、電気伝導率試験を実施し、粒子表面に付着する塩分の有無を確認した。

電気伝導率試験は、以下の手順で実施した。各養生水で養生後の水砕スラグを20~30gを容器に量り取る。その容器ごと200mLのイオン交換水に投入する。その後、5分間ガラス棒を用いて攪拌し、容器を取り除き、その溶出水に対し、電気伝導率計を用いて電気伝導率を計測する。計測後に再びイオン交換水200mLに容器を投入する。この過程を電気伝導率に変動が見られなくなるまで行った。用いた試料は乾燥状態の20℃海水14日養生、80℃海水84日養生、20℃アルカリ水56日養生の3つ試料を用いた。参考に、湿潤状態の20℃海水14日養生の試料も行った。

図5.3に各養生条件の電気伝導率試験結果を示す。海水養生は一回目に大きな値を示し、アルカリ水養生はほぼ0の値となっている。また、海水養生の乾燥状態と湿潤状態いずれのケースも大きい値を示している。

図5.4に、塩分濃度換算値を示す。ここでの塩分濃度は1Lあたりの塩分質量である。算出方法は以下のとおりである。まず、使用した海水の電気伝導率を計測する。今回用いた海水の電気伝導率は37200 μ S/cm、と塩分濃度は35gであった。これより、単位塩分濃度当たりの電気伝導率を算出し、試験結果を換算した。また、100 μ S/cm以上の値を塩分溶出量とし、それらの総量を総塩分溶出量とした。総塩分溶出量と乾燥質量から、単位質量当たりの塩分溶出質量を算出した。海水養生のケースにおいてはすべてのケースにおいて塩分の溶出が確認でき、単位乾燥質量当たりの塩分溶出量は0.01gを上回った。これは、本研究で行った反応率試験において算出する反応率の1%分にあたる事が明らかとなった。

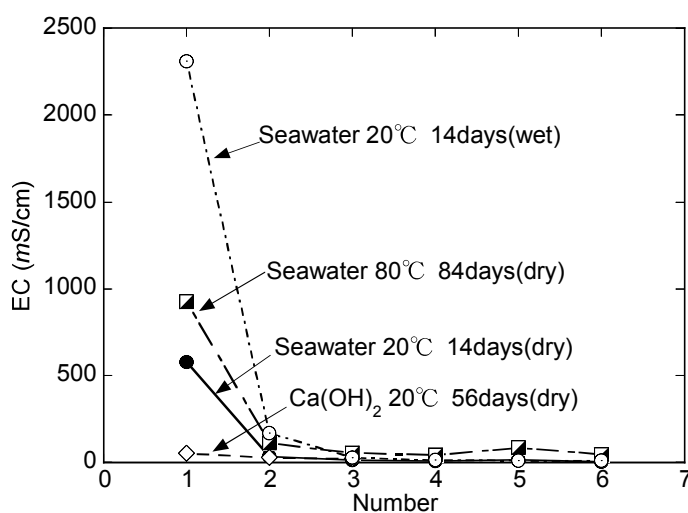


図 5.3 電気伝導率試験結果

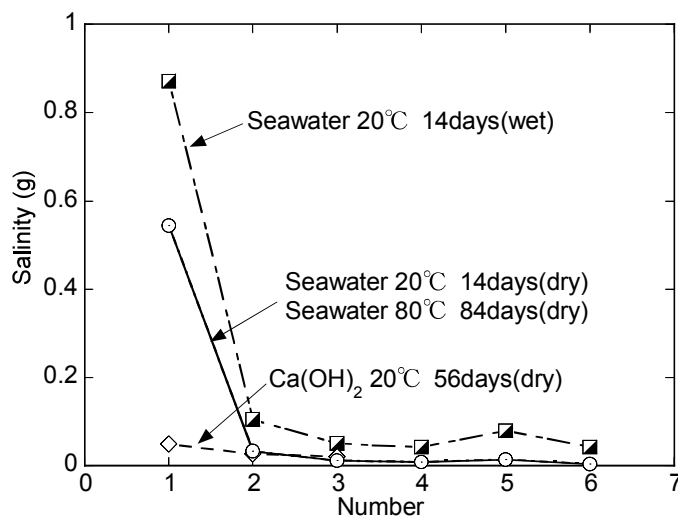


図 5.4 塩分量換算値

以上のことから、海水を用いた場合、式(5.3)より未反応率を算出し、式(5.2)から水和反応率を求めた。

$$R_i(\%) = \frac{m_h}{m_d \times (1 - L_i / 100) - m_{sa}} \times 100 \quad (5.3)$$

ここに、 m_{sa} は塩分質量 (g) である。

5. 2. 4 水和反応率試験の適用性

一定期間海水中で養生し、硬化が進行した水砕スラグに対して水和反応率試験を実施した。このスラグの水和反応率は約3%であった。水砕スラグの電子顕微鏡写真を写真5.1に示す。試験前は表面に細孔がほとんど見られず、水和物の析出により細孔が充填されたと考えられる。それに対して試験後の水砕スラグの粒子表面には、試験前よりも比較的大きな細孔が確認でき、試料表面の様子も全く異なる。このことから、スラグ表面に析出していた水和物が溶解したものと推察できる。なお、養生前の水砕スラグの水和反応率 R は約0.3%を示し、近藤らと同程度の値が得られ、当試験によって水砕スラグ自身がほとんど溶解しないことを検証している。

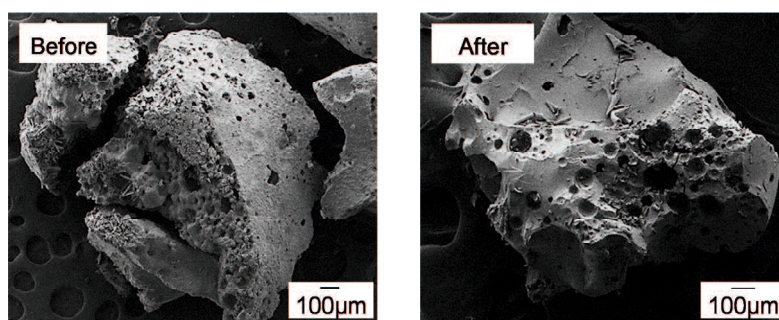


写真 5.1 水和反応率試験の実施前後の粒子拡大写真

5. 3 種々の環境で養生した高炉水砕スラグの水和反応の進行と強度特性

5. 3. 1 試料と検討方法

試料は、未硬化の水砕スラグ（以下、未硬化スラグ）を用いた。土粒子の密度は JIS A 1202（土粒子の密度試験）に準拠して測定した。最大間隙比、最小間隙比は JIS A 1224（砂の最小密度・最大密度試験）によって最大密度、最小密度を求め、土粒子の密度との関係から算出した²⁰⁾。表 5.1 には、比較のため、玄海砂についても併記している。水砕スラグは自身の持つ多くの気泡によって最大・最小間隙比は玄海砂に比べて大きい値を示している。また、未硬化スラグよりも盛土スラグの方が高い値を示している。これは、粒子表面に水和物が生成されていることから見かけの粒径が大きくなるなどして、密になりにくい状態に変化したことが原因と考えられる。図 5.5 に、各試料の粒径加積曲線を示す。

供試体を養生させる環境として淡水、海水、水酸化カルシウム水溶液の 3 種類の水溶液を使用した。図中では、それぞれ、W（淡水）、Sw（海水）、Ca(OH)₂（水酸化カルシウム水溶液）と表記する。淡水には水道水を用い、海水は山口県宇部港周辺で採取したものをを用いた。実験に用いた海水の塩化ナトリウム濃度は 2.7% であり標準的な濃度の海水である。水酸化カルシウム水溶液は、淡水に水酸化カルシウムを飽和濃度以上に添加し、沈殿するのを待ってから上澄み液を採取して使用した。淡水環境において、水砕スラグの硬化は以下の過程で進行すると考えられる。すなわち、まず水砕スラグが含有するカルシウム成分が溶出し、間隙水の pH が増加する。その後、高 pH 環境下で溶出が促進されるシリカ、アルミナ等の成分と水和反応することによって粒子間のセメンテーション効果が発揮されて硬化に至る。しかし、淡水の場合、pH が十分に上昇し、硬化し始めるまでに長期間を要することを確認してい

る⁵⁶⁾。本実験の養生環境の一つとした上記水酸化カルシウム水溶液は、pH 上昇までの過程を省略し、予め水砕スラグを高い pH 環境に置くことで、硬化を促進させて短期的に評価するために用いたものである。

表 5.1 各試料の物理特性

| | Soil particle density ρ_s (g/cm ³) | Maximum void ratio e_{max} | Minimum void ratio e_{min} |
|-----------------|--|---------------------------------|---------------------------------|
| Unhydrated slag | 2.643 | 1.510 | 1.033 |
| Genkai sand | 2.678 | 0.872 | 0.516 |
| Toyoura sand | 2.646 | 0.999 | 0.623 |

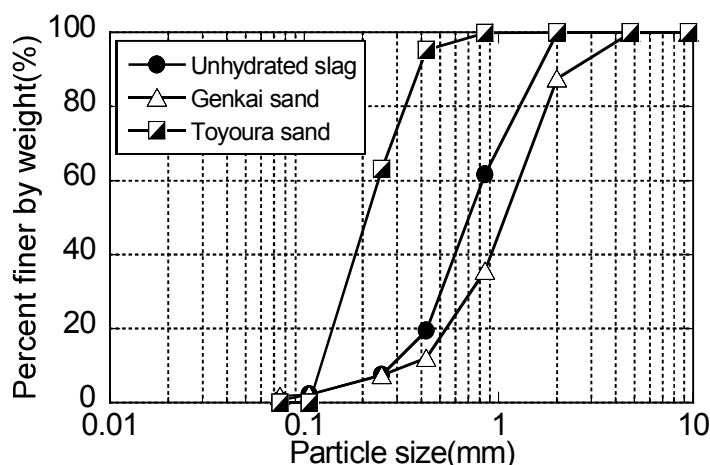


図 5.5 粒径加積曲線

未硬化スラグの供試体は直径 5cm、高さ 10cm のプラスチックモールドを用いて空中落下法で作製した。このとき、締固めの管理基準値は最大乾燥密度 $\rho_{d max}$ の 90%と定められているため²¹⁾、これを満足するように、相対密度は 80%に設定した。

供試体を養生する際には、淡水、海水、水酸化カルシウム水溶液を投入したポリエチレン製容器に供試体をプラスチックモールドごと浸漬する方法で行った。このとき、供試体が飽和しやすいように、モールド下部に直径 1.7mm 程度の小さな穴を設けている。固液比は 1:1.4 とした。実際の現場では、水砕スラグは不飽和になっていると考えられるが、室内試験において飽和度の調整は困難なため、本研究では溶液へ浸漬させる方法で養生を行っている。常温の淡水および海水の場合、供試体が自立に至るまでに約 180 日を要することが報告されている³⁾。化学反応の速度は温度依存性が有ることから、水和反応によって生じる水砕スラグ

の硬化の進行の程度も養生温度で異なる⁵⁾。そこで、硬化を促進させるために淡水および海水の場合は温度 80℃で養生した。ただし、先述のように、水酸化カルシウム水溶液はそれ自体が硬化促進効果を持つため、養生温度は 20℃とした。

養生方法は、水溶液が蒸発しないように容器を密閉し、80℃の場合は温度を調整した乾燥炉内、20℃は恒温試験室内で養生した。なお、養生日数は 3, 7, 14, 28, 56, 84, 112 日とし、所定の養生期間終了後に供試体を取り出し、5.2 で述べた水和反応率の測定および一軸圧縮試験を実施した。一軸圧縮試験は JIS A 1216 (土の一軸圧縮試験) に準拠して行った。なお、一軸圧縮試験は供試体を養生容器から取出した後、速やかに実施した。

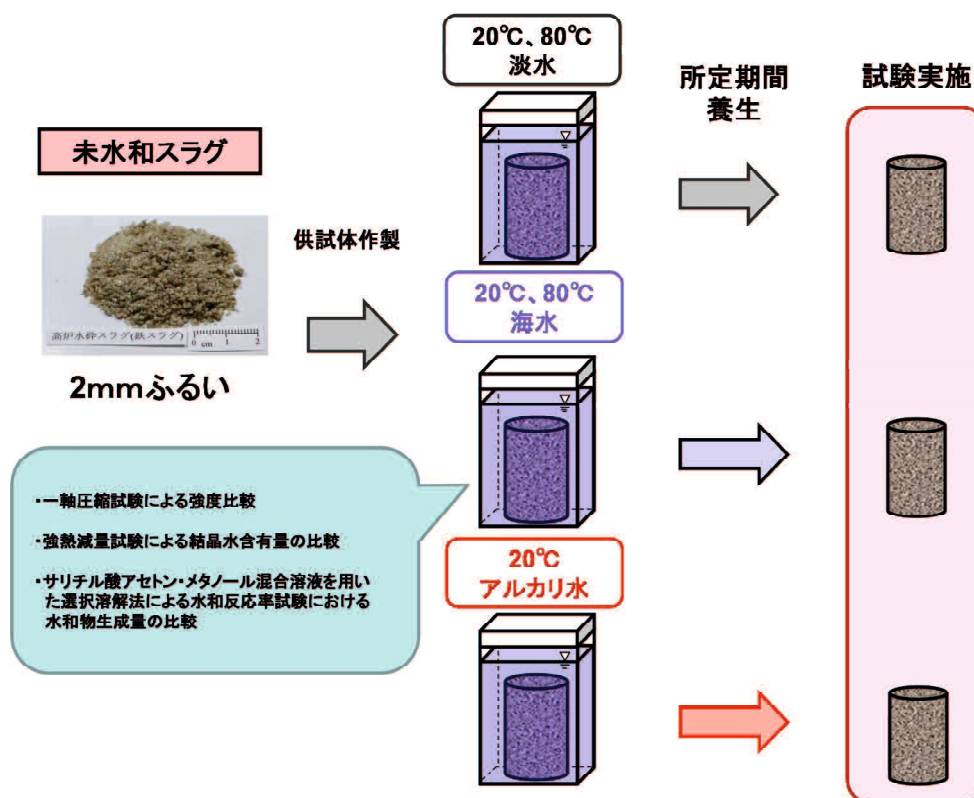


図 5.7 実験方法

5. 3. 2 養生環境の設定

図 5.8 に、各養生条件に対する水和反応率の経時変化を示す。ただし、水和反応率は養生前の未硬化スラグの水和反応率 (0.3%) を差し引いている。いずれの条件においても養

生日数の増加に伴い、水和反応率は増加している。水和反応率の増加傾向は水酸化カルシウム水溶液が最も大きく、次いで海水、淡水の順となっている。

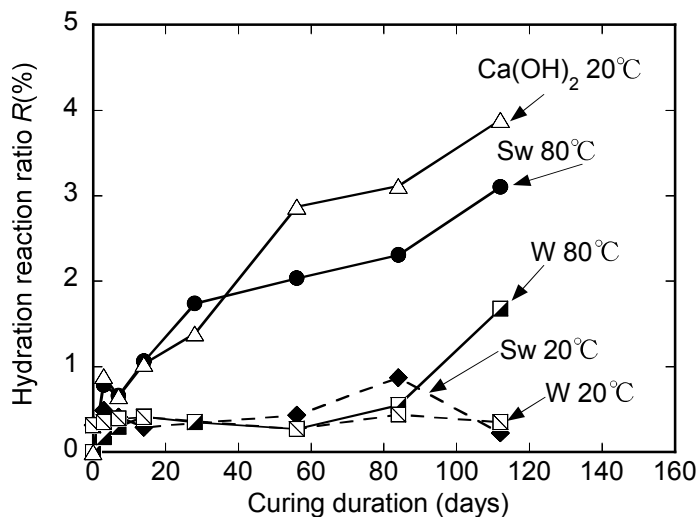


図 5.8 水和反応率の経時変化

図 5.9 に、pH の経時変化を示す。水酸化カルシウム水溶液で養生したケースは pH に大きな変化は見られず 11 以上を示している。80°Cでの海水および淡水の場合では、ほぼ同様の増加傾向を示し、最終的には 10 以上の値を示した。海水の場合、淡水に比べて pH の上昇が若干遅くなっている。これは、海水の緩衝作用によるものと考えられる。海水および淡水 20°Cでは、顕著な変化は見られない。

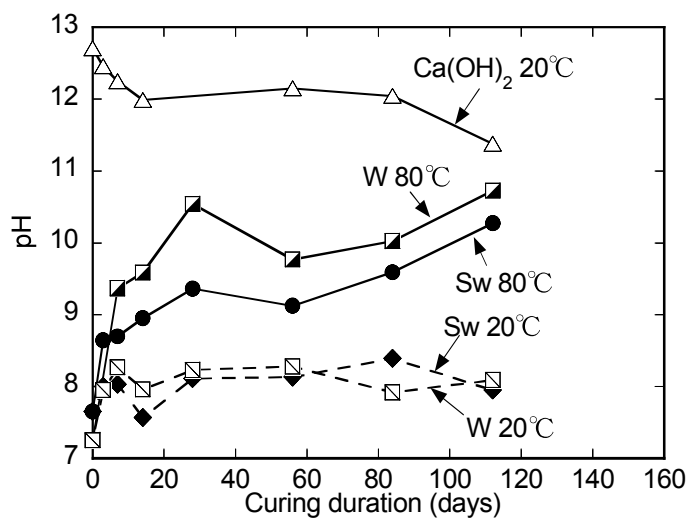


図 5.9 pH の経時変化

図 5.10 に、各養生条件について強熱減量の経時変化を示す。強熱減量は養生前の未硬化スラグの水和反応率（0.016%）を差し引いたものである。いずれの条件においても養生日数の増加に伴い、強熱減量は増加している。水和反応率と強熱減量の関係を図 5.11 に示す。両者の間には、一義的な関係がある。

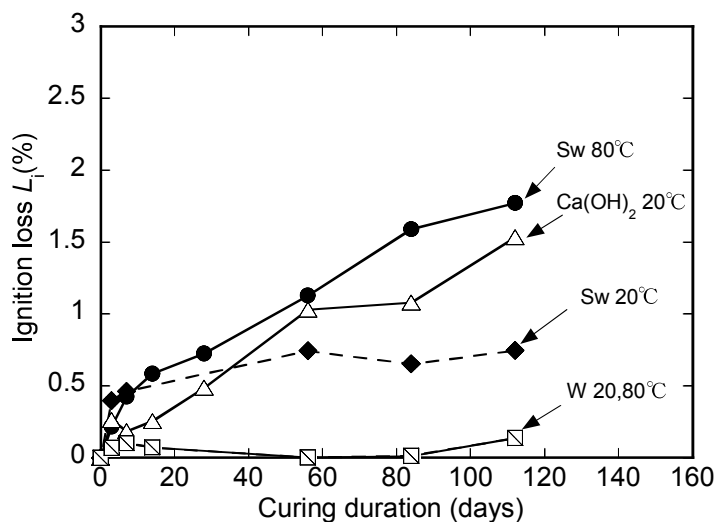


図 5.10 強熱減量の経時変化

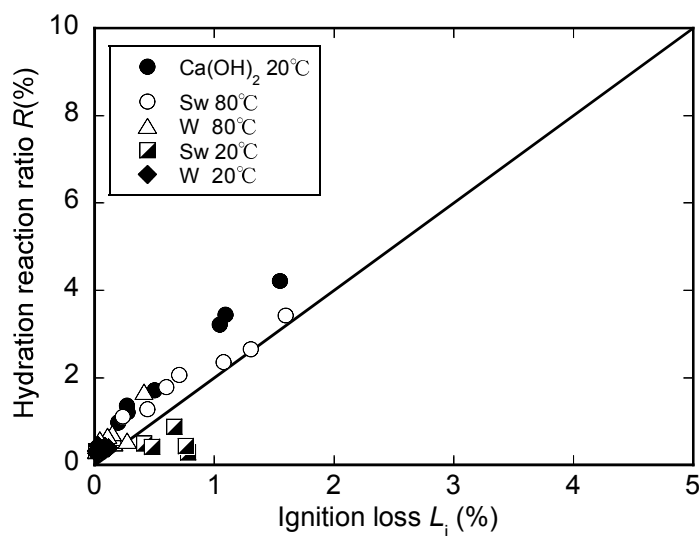


図 5.11 水和反応率と強熱減量の関係

図 5.12 に、一軸圧縮強さの経時変化を示す。一軸圧縮強さがゼロの点は供試体が自立せず、試験を実施できなかったことを意味している。海水および水酸化カルシウム水溶液は養生から数日で自立し、その後時間の経過に伴い一軸圧縮強さは増加している。淡水は他のケースよりも強度発現に時間を要し、養生日数 112 日で自立が確認できた。

水砕スラグの硬化に必要な条件に、 $\text{pH}=11$ 以上の高アルカリ性の環境であることが挙げられているが⁷⁾、図 5.9、図 5.12 より海水については $\text{pH}\approx 9$ で強度発現している。菊池らは、高 pH のアルカリ刺激が唯一の水和反応の要因ではないことを明らかにしており、水溶液中に含まれる塩化物イオン、カルシウムイオン等の化学成分の影響を指摘している³⁾。このことは、本研究の試験結果においても顕著に現れており、硬化促進の要因とされる上記化学成分は海水および水酸化カルシウム水溶液に含まれているため、淡水と比較して硬化が促進されたと推察される。

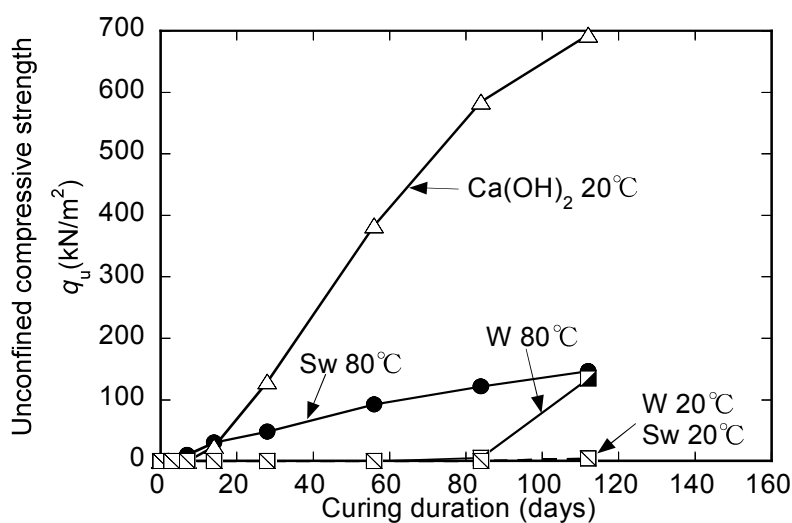


図 5.12 一軸圧縮強さの経時変化

図 5.13 に、一軸圧縮強さと水和反応率の関係を示す。水和反応率が増加すると一軸圧縮強さも増加している。水酸化カルシウム水溶液と海水の場合、水和反応率が 1.0% 付近に達したところで自立して強度発現する傾向が確認できる。淡水の場合、養生 80 日以降の短期間で水和反応率が 1.4% 付近まで急激に増加して強度発現したため、自立に要する詳細な数値は確認できなかったが、同様な傾向があるものと推察される。また、海水と水酸化カルシウム水溶液では強度の増加傾向には相違がみられ、海水の方が下方に位置している。これは、養生環境によって生成される水和物の種類が異なり、それが強度に寄与できる割合も同様に異なるためと推察される。化学的な地盤改良においても海水環境では、ナトリウムを含む水和物が生成されることがわかっている²²⁾。従って、水砕スラグも養生環境次第で生成される水和物とその強度へ寄与する割合が異なると考えられる。

また、図 5.11 より水和反応率と強熱減量の間の一義的な関係があることから、水和反応

率と強熱減量いずれかの測定値を把握することによって、簡易的に強度推定ができると考えられる。

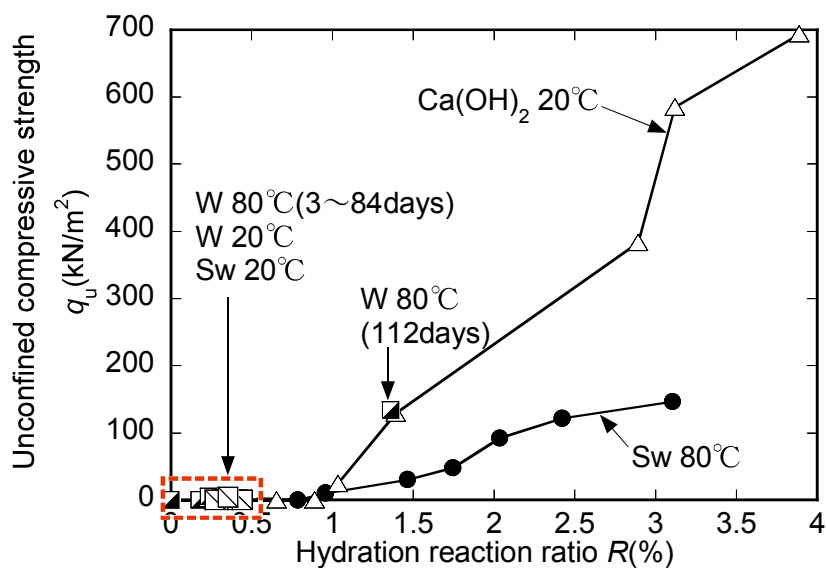


図 5.13 一軸圧縮強さと水和反応率の関係

5. 3. 3 水和反応率と一軸圧縮強さの相関性

養生条件が異なる場合、水和反応率と一軸圧縮強さの関係として図 5.13 が得られたが、いずれの場合においても一軸圧縮強さは水和反応率が 1%付近から増加している。図 5.14 は、一軸圧縮強さと水和反応率の関係を次式で近似して示したものである。実験結果と式 (5.4)は比較的よく一致している。

$$q_u = m \cdot R + C \quad (\text{ただし, } q_u > 0) \quad (5.4)$$

ここに、 m, C は実験定数である。

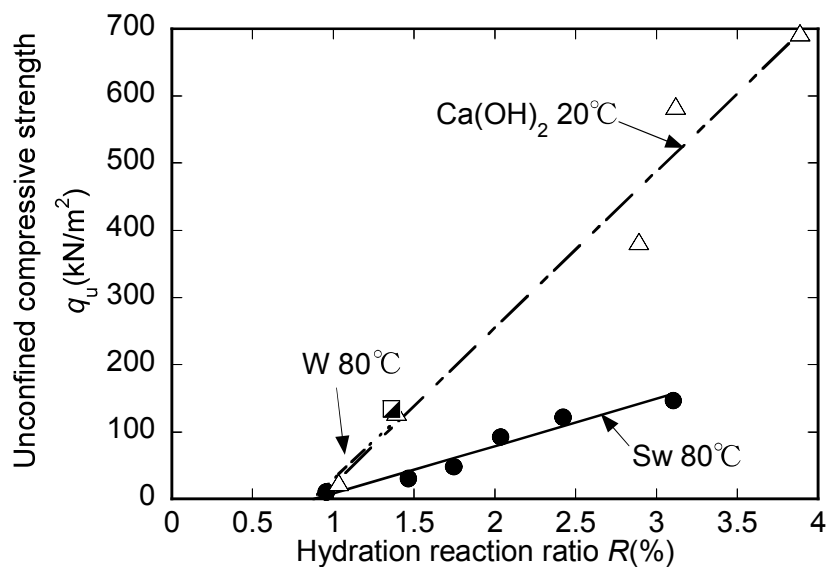


図 5.14 一軸圧縮強さと水和反応率の近似直線

5. 4 水和反応に着目した高炉水砕スラグの再硬化特性の評価

5. 4. 1 試料と検討方法

試料は、未硬化の水砕スラグ（以下、未硬化スラグ）と施工後 11 年が経過した現場試験盛土から採取したスラグ（以下、盛土スラグ）を用いた。現場試験盛土の概要については第 3 章で述べている。各水砕スラグの物理特性および粒度分布を表 5.2 および図 5.15 に示す。水砕スラグの再硬化特性について検討するため、所定の期間養生した供試体を解砕した後、5.3.1 と同様の方法で供試体を作製し再養生したケースについても実験を行った。供試体の解砕は、粒子破砕が生じないように注意して外側からはく離させるようにして行った。解砕後のスラグの粒度分布の測定は実施していないが、図 5.15 に示す未硬化スラグのそれに近いものと推察される。本論文では、解砕までの硬化履歴を受けた期間を初回養生日数、解砕してモールドに再充填した後の期間を再養生日数とそれぞれ定義する。初回養生日数は 0, 14, 28, 56 日、再養生日数は 3, 7, 14, 28, 56, 84, 112 日とした。なお、自己修復特性の検討は海水 80°C 養生のみ実施した。さらに、第 3 章で述べた現場試験盛土からサンプリングした水砕スラグを用いて、同様の試験を実施し、著しく硬化した水砕スラグの再硬化特性についても検討した。実験概要図を図 5.16 に示す。

表 5.2 各試料の物理特性

| | Soil particle density ρ_s (g/cm ³) | Maximum void ratio e_{max} | Minimum void ratio e_{min} | Hydration reaction R (%) |
|--------------------|--|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| Unhydrated slag | 2.643 | 1.510 | 1.033 | 0.319 |
| Slag at embankment | 2.759 | 1.898 | 1.263 | 10.582 |
| Genkai sand | 2.678 | 0.872 | 0.516 | — |

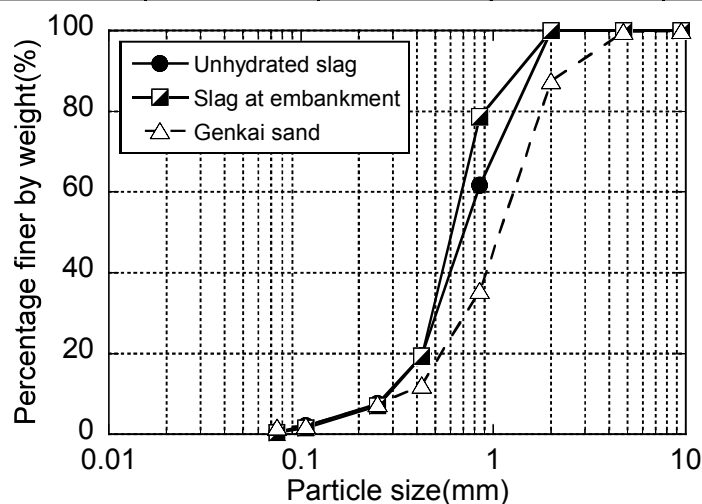


図 5.15 粒径加積曲線

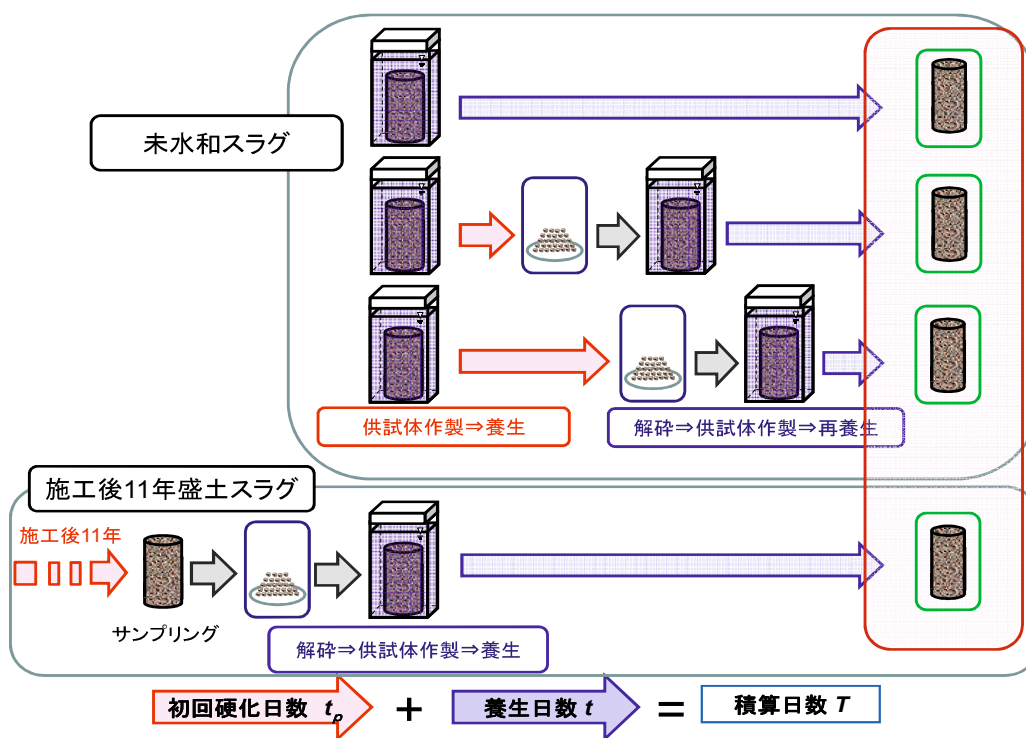


図 5.16 再硬化特性の実験手順

5. 4. 2 現場試験盛土スラグの再硬化特性の検証

本節では、未硬化水砕スラグの解砕履歴の無いケースと著しく硬化した現場試験盛土スラグを用いて、自己修復特性について検証した。また、短期的に評価するため養生水に水酸化カルシウム水溶液を用いて養生および試験を実施した。

図 5.17 に、未硬化スラグおよび盛土スラグの水和反応率の経時変化を示す。両試料とも養生日数の増加に伴い水和反応率は増加している。このことから、既に著しく水和反応が進行した盛土スラグも未だ潜在水硬性を保持していることが明らかになった。図 5.18 に、未硬化スラグおよび盛土スラグの水和反応率増分の経時変化を示す。水和反応率増分は、式(5.5)により算出を行った。

$$\Delta R(\%) = R_n - R_0 \quad (5.5)$$

ここに、 ΔR : 水和反応率増分 (%)， R_n : 養生 n 日後の水和反応率， R_0 : 養生前の水和反応率である。

両試料とも養生日数の増加に伴い水和反応率は増加しているが、その増加傾向は異なっている。表 5.2 に示したように、盛土スラグの解砕後の水和反応率は約 10%であり、粒子表面に多くの水和物が残っていることは明らかである。そのため、盛土スラグの水和反応が阻害され²³⁾²⁴⁾、5.2.1 節で述べた溶脱層がスラグ深部までおよび、化学成分の溶出に時間を要したと推察できる。

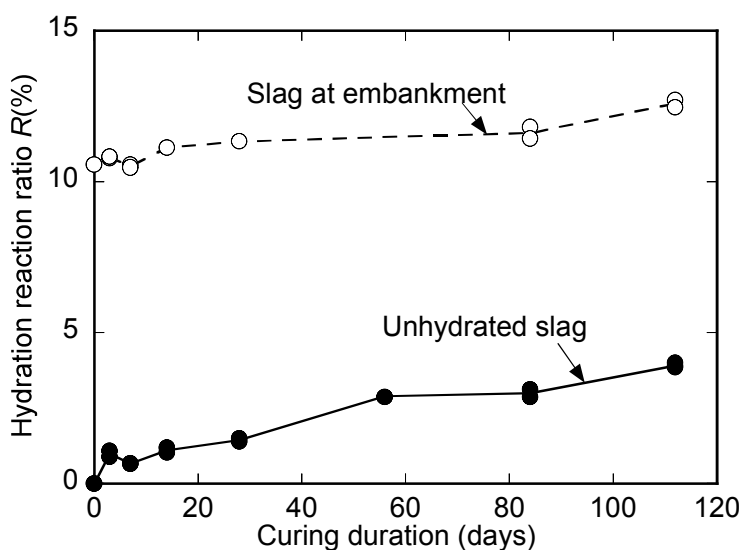


図 5.17 水和反応率の経時変化

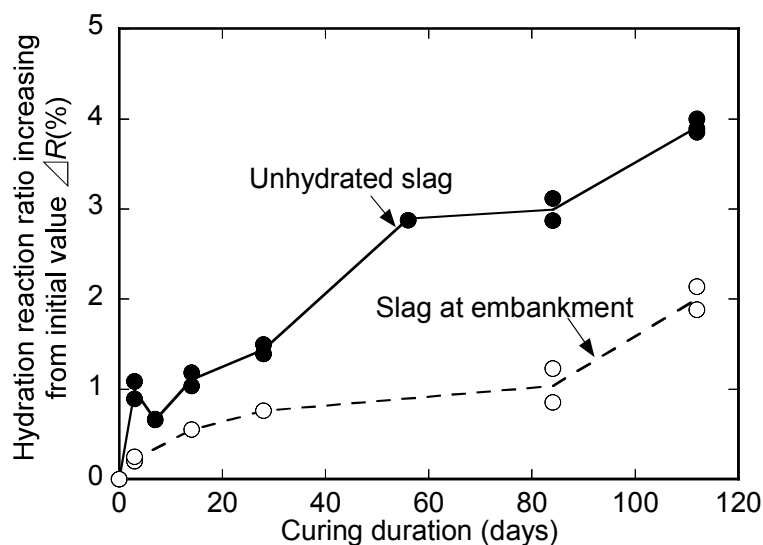


図 5.18 水和反応率増分の経時変化

図 5.19 に、未硬化スラグおよび盛土スラグの一軸圧縮強さの経時変化を示す。両試料とも養生日数の増加に伴い一軸圧縮強さは増加している。盛土スラグも時間とともに強度発現しており、水和反応が進行するとともに自己修復することがわかった。しかしながら、強度の増加傾向は試料によって大きく異なっている。これは既に水和反応が著しく進行した盛土スラグは、未硬化スラグと比較して水和反応速度が低下したことが原因と推察される。このことから、水砕スラグの自己修復には粒子表面の水和物量が大きく影響するものと推察され、利用先によっては、水和反応の進行程度に応じて別途他の補助工法の必要性が生じることも視野に入れておく必要がある。

図 5.20 に、未硬化スラグおよび盛土スラグの一軸圧縮強さと水和反応率増分の関係を示す。同図より、両試料とも水和反応率の増加に伴い一軸圧縮強さは増加しているものの、盛土スラグは水和反応率の増加に対する一軸圧縮強さの増加量が小さい。水砕スラグは細粒分が多い程、粒子同士の接触点が増加し強度発現しやすいとされている⁵⁾。表 5.2 に示したように盛土スラグは最大・最小間隙比が未硬化スラグと比べて大きいいため、粒子同士の接触点が無硬化スラグよりも少なく、同等の水和反応率に対する強度に差異が生じたと考えられる。

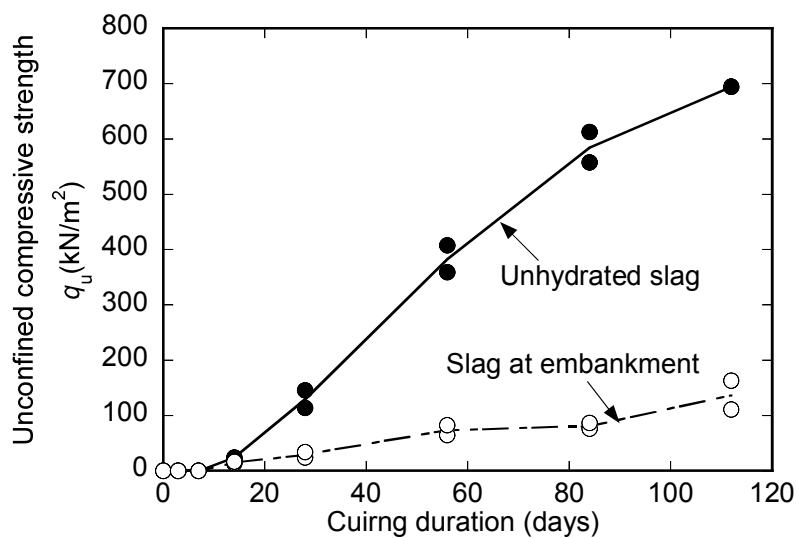


図 5.19 一軸圧縮強さの経時変化

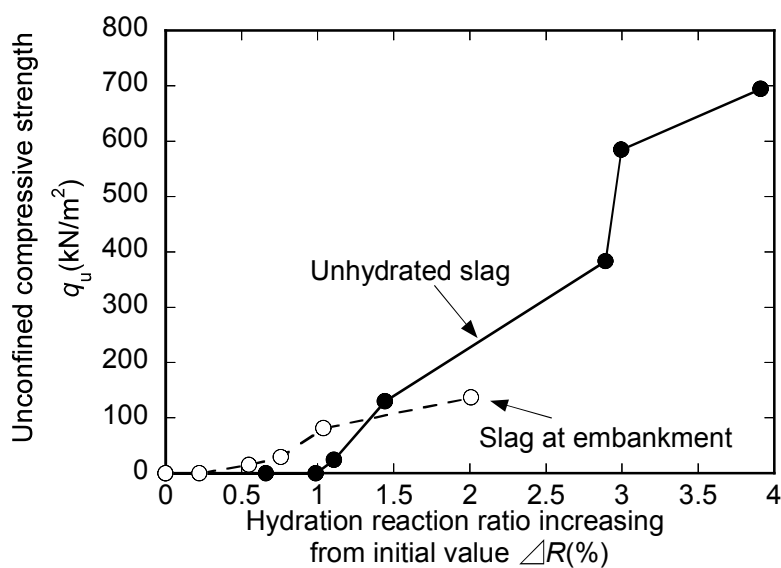


図 5.20 一軸圧縮強さと水和反応率増分の関係

5. 4. 3 養生履歴が再硬化特性に及ぼす影響

本節では、未硬化水砕スラグの解砕履歴各ケースと現場試験盛土スラグを用いて、自己修復特性について検証した。養生は海水 80°Cで実施した。

図 5.21 は、硬化後解砕した水砕スラグについて水和反応率の経時変化を示したものである。図中において、括弧内の数字は初回養生日数を示している。初回養生日数に依らず、水和反応率は一樣に増加する傾向を示しており、解砕の有無が水和反応の進行に及ぼす影響は小さいことがわかる。

図 5.22 は、式(5.5)で得られる水和反応率増分 ΔR の経時変化を示したものである。解砕の履歴がない場合（初回養生日数 0 日）においては水和反応率の増分は硬化後解砕した場合に比べて大きい。

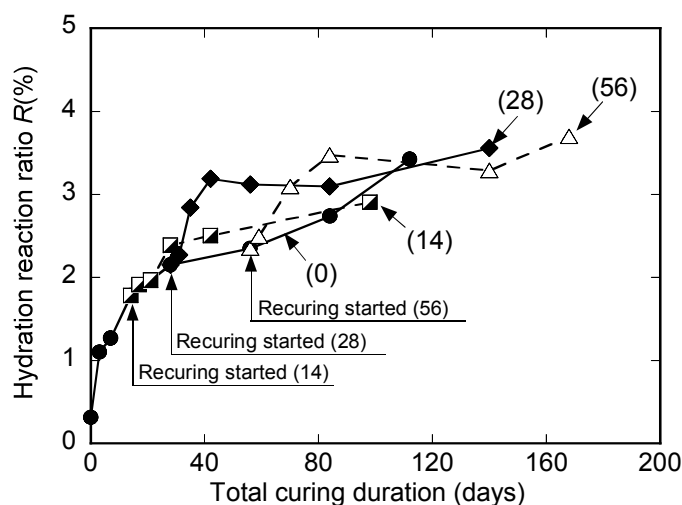


図 5.21 水和反応率の経時変化

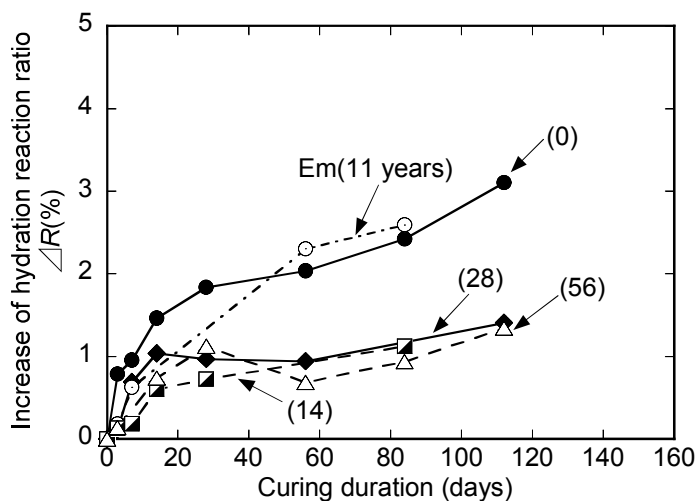


図 5.22 水和反応率増分の経時変化

図 5.23 は、pH の経時変化を示したものである。図中において、括弧内の数字は初回養生日数を示している。水和反応率と同様に pH も増加する傾向を示しており、アルカリ成分を溶出し硬化が進行していることがわかる。図 5.24 は、式(5.5)を pH 値に置き換えて得られ

る pH 増分 ΔpH の経時変化を示したものである。解砕の履歴がない場合（初回養生日数 0 日）においては、解砕の履歴がある場合に比べて pH は大きい値を示し、水和反応率の増加傾向とほぼ一致している。

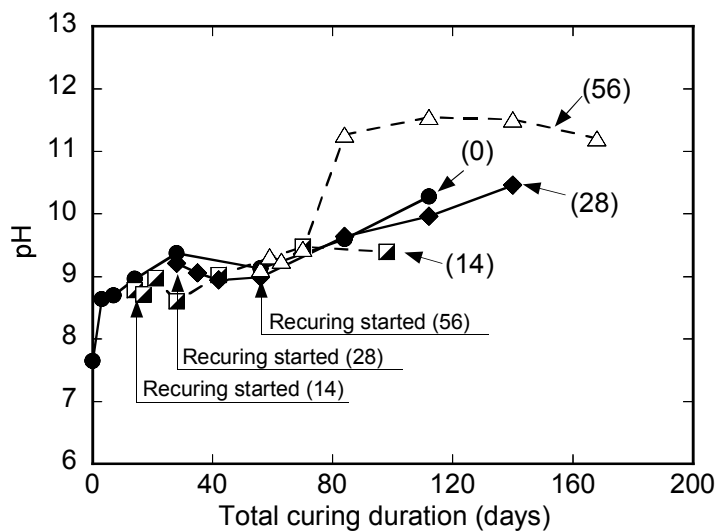


図 5.23 pH の経時変化

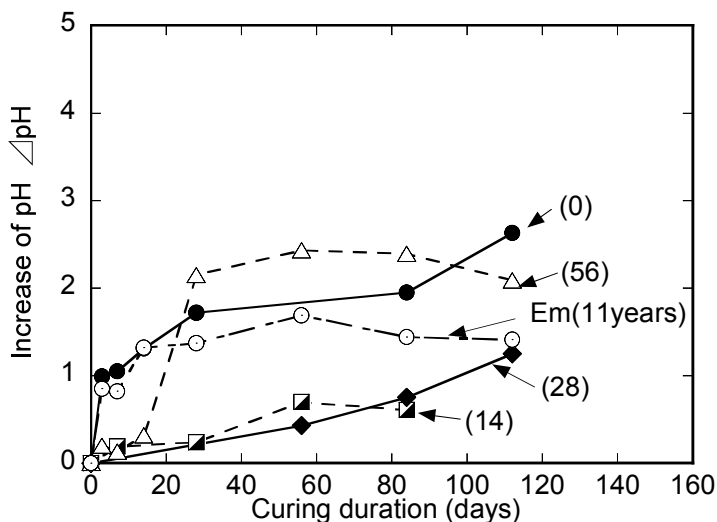


図 5.24 pH 増分の経時変化

図 5.25 は、強熱減量の経時変化を示している。水和反応率、pH と同様に、強熱減量は一樣に増加する傾向を示している。

図 5.26 は、式(5.5)を強熱減量に置き換えて得られる強熱減量増分 ΔL_i の経時変化を示したものである。解砕の履歴がない場合（初回養生日数 0 日）においては強熱減量の増分は硬化後解砕した場合に比べて大きい。

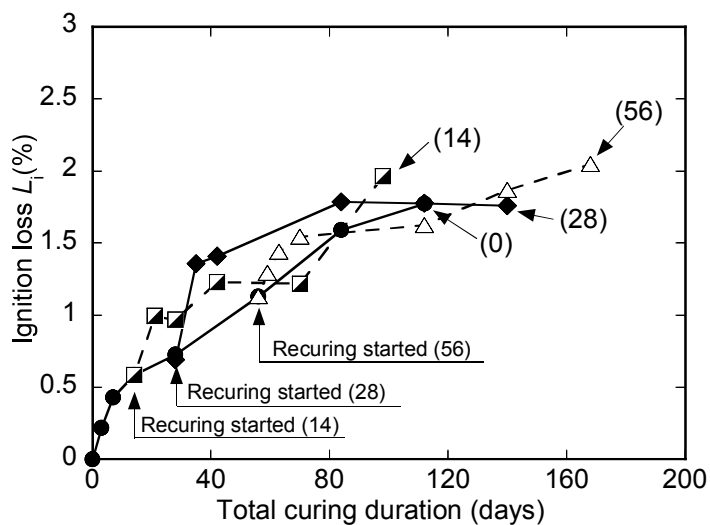


図 5.25 強熱減量の経時変化

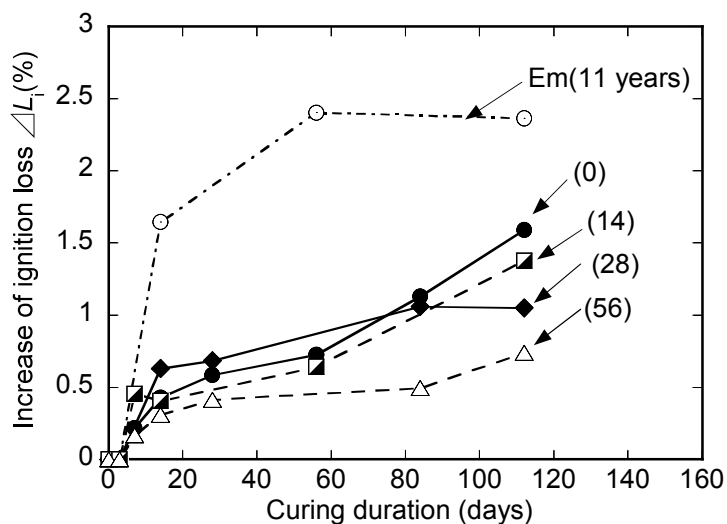


図 5.26 強熱減量増分の経時変化

水和反応率と強熱減量の関係を図 5.27 に示す。硬化履歴を有する場合においても、両者の間には一義的な関係にあることが確認できる。

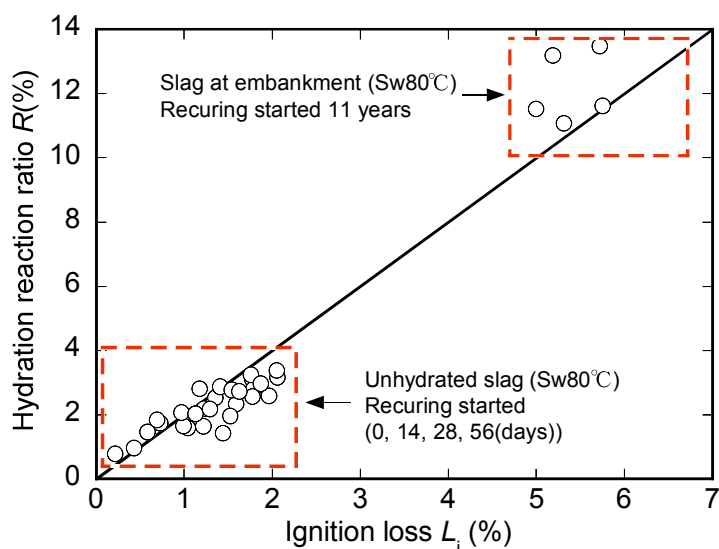


図 5.27 水和反応率と強熱減量の関係

図 5.28 は、一軸圧縮強さと経過時間の関係を示している。硬化後解砕した水砕スラグの強度は、解砕を行っていない場合に比べて、強度は小さいものの、再養生日数の増加に伴い一軸圧縮強さは増加している。

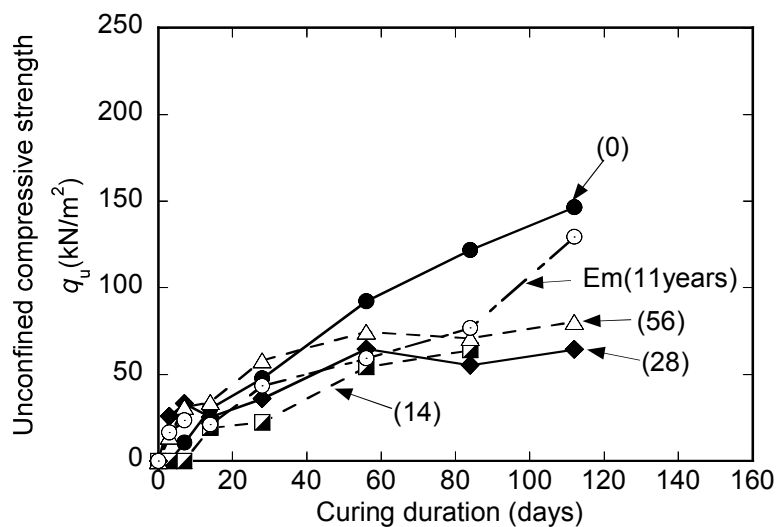


図 5.28 一軸圧縮強さの経時変化

水和反応率増分と一軸圧縮強さの関係を示したものが図 5.29 である。解砕の履歴がない場合、水和反応率が約 0.8%において一軸圧縮強さの増加がみられるのに対して、硬化後解砕した水砕スラグにおいては、水和反応率の増加とともに一軸圧縮強さは増加している。

一方、解砕の履歴がある場合、一軸圧縮強さと水和反応率増分の関係は類似している。このことは、水砕スラグは硬化履歴の有無によって、強度の発現が異なることを意味しており、水砕スラグは、長期保存された場合、保存期間が長い程硬化しやすい傾向があると報告されており¹⁾²⁴⁾、今回の実験結果と符号する。

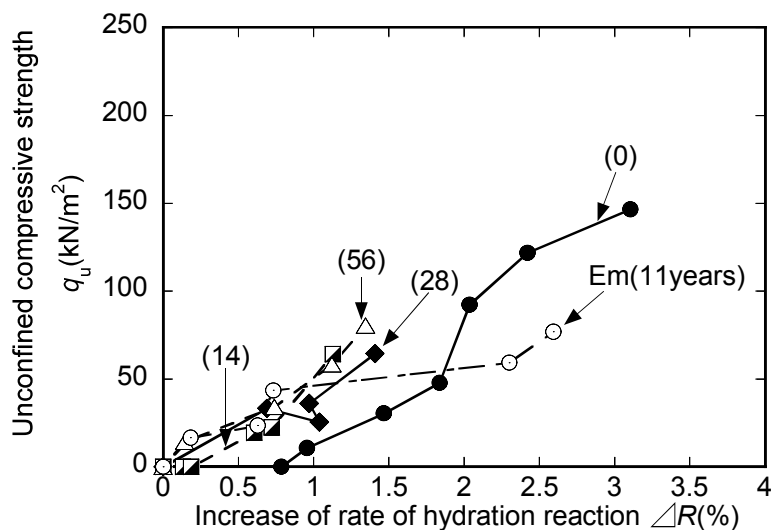


図 5.29 水和反応率と一軸圧縮強さの関係

5. 4. 4 硬化の進行と再硬化の評価

ここで、一軸圧縮強さ q_u を次式で近似した。

$$q_u = A\sqrt{t} \quad (5.6)$$

ここに、 A : 実験定数, t : 養生日数である。

実験定数 A は、得られた実験値から最小二乗法により求めた。この式を用いて算出した一軸圧縮強さの近似曲線を図 5.30 に示す。図中の括弧内は初回養生日数を表している。いずれのケースにおいても近似曲線と実験値はよく一致しており、相関係数 R は 0.9 以上となっている。ここで、硬化履歴の無いケース（初回養生日数 0 日）の実験定数を A_0 、硬化履歴を有するケースの実験定数を A_n とし、各条件における A_n/A_0 と初回養生日数の関係を図 5.31 に示す。硬化履歴を有する場合、 A_n/A_0 の値は硬化履歴が無い場合よりも小さくなっており、

盛土スラグを除く A_n/A_0 の平均値は 0.583 である。このことから、今回用いた水砕スラグでは、硬化履歴後破壊して再硬化する場合、強度回復は 5~6 割程度であると推定される。また、盛土スラグの A_n/A_0 の値は 0.777 を示し、フレッシュなスラグとは硬化履歴が異なるものの、初回硬化日数が長いほど再硬化時の強度が大きくなる傾向を示した。

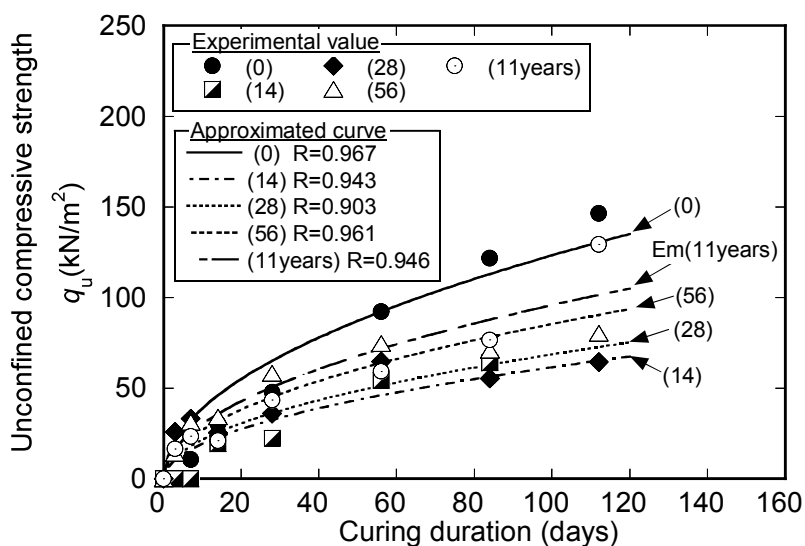


図 5.30 一軸圧縮強さの近似曲線

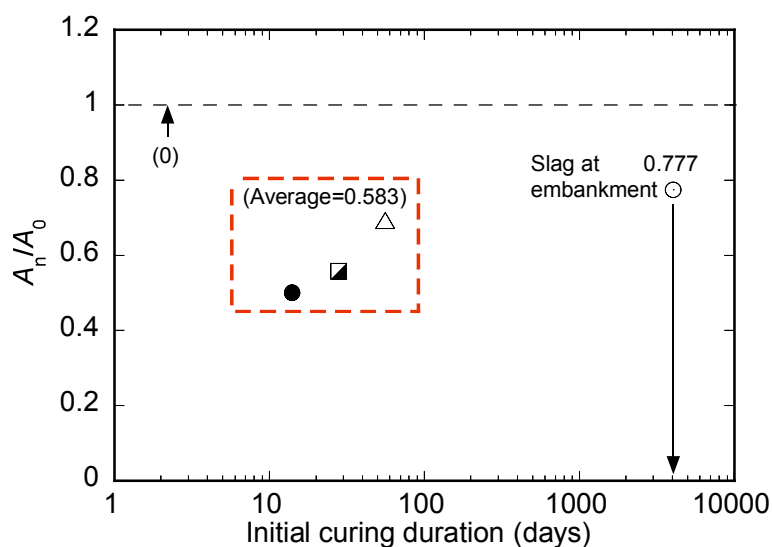


図 5.31 A_n/A_0 の関係

5. 5 まとめ

本章では、水砕スラグ粒子表面に析出する水和物に着目し、種々の環境で養生した水砕スラグ供試体の一軸圧縮強さと水和反応率の関係について検討した。さらに、硬化に及ぼす硬化履歴の影響を明確にするため、第3章で論述した現場試験盛土から採取したスラグ試料を用いて、硬化が進行した水砕スラグの再硬化特性について検討した。得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 水和反応率の増加に伴い一軸圧縮強さが増加する。
- (2) 水砕スラグを養生した淡水および海水は、同等の pH を示すが、水和反応率と一軸圧縮強さに相違がみられた。これは、海水中の塩化物イオン、カルシウムイオン等により硬化が促進されたためと考えられる。
- (3) 水和反応率には強度発現に対する閾値が存在する。また、各養生環境における一軸圧縮強さと水和反応率の関係は養生環境によって異なる。これは、養生環境によって生成される水和物の種類が異なり、強度に寄与する割合も異なるためと推察される。
- (4) 著しく硬化した水砕スラグは、解砕後も強度発現が確認でき、自己修復する。
- (5) 著しく硬化したスラグは、未硬化スラグに比べて水和反応の進行が遅くなる。このことから、水砕スラグの自己修復には粒子表面に生成された水和物量が大きく影響すると考えられる。
- (6) 水砕スラグの強度増加は養生時間の平方根に比例する傾向がみられる。
- (7) 水砕スラグは水和反応の進行に伴って強度増加する。また、硬化履歴を有する場合、硬化履歴が無い場合の5～6割程度の強度が回復する。
- (8) 硬化履歴を有する場合、初回養生日数が長いほど再硬化時の強度増加は大きくなる傾向がある。

参考文献：

- 1) (財)沿岸技術研究センター：港湾・空港における水砕スラグ利用技術マニュアル，2007.
- 2) 鐵鋼スラグ協会：高炉水砕スラグ「土工用材料としての技術資料」，2009.
- 3) 菊池喜昭，池上正春，山崎浩之：港湾構造物の裏込めに用いた高炉水砕スラグの経年変化に関する研究，土木学会論文集，No.799/III-72，pp.171-182，2005.9.
- 4) 松田博，来山尚義，高宮晃一，村上剛敏，中野恭夫：高炉水砕スラグの地盤改良材としての適用性に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.764/III-67，pp.85-99，2004.6.
- 5) 篠崎晴彦，松田博，坂井悦郎，小野幸一郎，鈴木操，中川雅夫：高炉水砕スラグの硬化特性と地盤改良工法への適用，土木学会論文集 C，Vol.62，No.4，pp.858-869，2006.12.
- 6) 篠崎晴彦，松田博，白元珍：高炉水砕スラグの硬化に伴う繰返しせん断強度特性の変化，土木学会論文集 C，Vol.64，No.1，pp.175-180，2008.3.
- 7) 菊池喜昭，木村淳治，水谷崇亮，永留健：高炉水砕スラグの硬化に及ぼす pH，Ca²⁺の影響，土木学会論文集，No.799/III-72，pp.195-200，2005.9.
- 8) 菊池喜昭，中島研司，木村淳治，水谷崇亮：高炉水砕スラグの硬化促進方法と硬化強度評価方法の検討，土木学会論文集 C，Vol.67，No.1，pp.145-159，2011.
- 9) 篠崎晴彦，松田博，来山尚義，高宮晃一，大平尚美，村上守，中野泰夫：高炉水砕スラグの軽量盛土材としての適用性に関する研究，第5回環境地盤工学シンポジウム論文集，地盤工学会，pp.213-219，2003.
- 10) 石藏良平，松田博，来山尚義，和田正寛，石橋利倫，谷信幸：土工材料としての高炉水砕スラグの力学特性の経年変化，第46回地盤工学研究発表会論文集，pp.503-504，2011.
- 11) 石藏良平，松田博，来山尚義，篠崎晴彦：土工材料として用いられる高炉水砕スラグの地盤工学的諸特性，地盤工学会誌，Vol.60，No.11，2012.
- 12) 新舎良典，和田正寛，正木理久，松田博，石藏良平：硬化した高炉水砕スラグの自己修復特性に関する考察，第10回地盤改良シンポジウム論文集，pp.463-466，2012.10.
- 13) 和田正寛，松田博，原弘行，石藏良平，新舎良典，井川尚之：せん断破壊した高炉水砕スラグの再硬化特性，第10回環境地盤工学シンポジウム，pp.159-162，2013.9.
- 14) 佐川孝広，名和豊春：リートベルト法及び選択溶解法による高炉スラグの反応率測定，コンクリート工学論文集，pp.209-214，Vol.28，No.1，2006.
- 15) 近藤連一，大沢栄也：高炉水砕スラグの定量およびセメント中のスラグの水和反応速度に関する研究，窯業協会誌，Vol.77，pp.39-46，1969.
- 16) 高松伸之，丸山一平，五十嵐豪，寺本篤志：高炉スラグ微粉末を用いたセメント硬化体の若材齢体積変化と水和反応に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，

pp.187-192, 2009.

- 17) 土木学会：コンクリート標準示方書 規準編, pp.50-55, 2010.
- 18) 土木学会：コンクリート標準示方書 規準編, pp.46-51, 2002.
- 19) 土木学会 HP：<http://www.jsce.or.jp/committee/concrete/kijun/index.html>
- 20) (社)地盤工学会：土質試験 基本と手引き 第二改訂版, 2010.
- 21) (社)日本道路協会：道路土工 盛土工指針, pp.219-220, 2010.
- 22) 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, No.4, pp.5-11, 1986.
- 23) 森本丈太郎, 魚本健人：初期高温養生したポルトランドセメントの細孔構造に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.7, No.1, pp.153-159, 1996.1.
- 24) (社)地盤工学会：高炉水砕スラグの地盤工学的利用促進に関する研究委員会報告書, pp.41-42, 2010.

第6章 高炉水砕スラグの再硬化を考慮した強度予測手法

6. 1 はじめに

コンクリート分野において、数々の研究グループによってコンクリートの強度推定について検討されている^{1)~5)}。コンクリートの強度推定には、一般的に積算温度方式が用いられ、水砕スラグと同様に硬化の進行度は養生温度に影響される。

水砕スラグの硬化速度への影響因子は、養生温度、養生溶液、化学成分、粒度、密度、移流等がある^{6)~10)}。さらに、アルカリ刺激剤を添加することにより硬化の促進が可能である^{6)~10)}。水砕スラグの利用にあたって、環境条件、使用材料の特性、現場周辺において硬化に及ぼす物理的および化学的影響因子の調査等、これらを事前に把握することにより施工後の強度予測が可能である。

第5章において、水砕スラグは水和反応の進行によって強度増加し、その程度は養生環境によって異なり、強度への寄与率が異なることを検証した。また、硬化履歴を有する場合、硬化履歴が無い場合（初回養生日数0日）の5~6割程度の強度が回復することを示した。

本章では、本研究で得られた一連の結果から異なる養生環境における水砕スラグの強度予測および再硬化を考慮した強度予測手法について提案した。

6. 2 強度予測手法の適用性に関する検討

6. 2. 1 水和反応の進行

第5章において、水砕スラグは水和反応率の増加とともに強度増加することを示した。そこで、水砕スラグの水和反応の進行の予測方法について検討する。図5.30で示すように、水和反応の進行も水和反応率 R と養生日数 t の関係は式(5.6)によって近似できることを示した。また、図5.13においては、淡水80℃については養生日数80日以降で水和反応率が急激に増加する傾向が確認できた。これらの点から、水和反応が急激に進み始める期間は養生環境によって異なると考えられることから、水和反応率 R を次式で表す。

$$R = r\sqrt{t - t_m} \quad (\text{ただし, } t > t_m) \quad (6.1)$$

ここに、 r ：比例定数、 t ：養生日数、 t_m ：水和反応が急激に進み始める養生日数である。

式(6.1)を用いて算出した水和反応率の近似曲線を図 6.1 に示す。なお、同図において、水酸化カルシウム水溶液と海水 80°C の場合については、養生初期から水和反応の進行が確認できたため、 $t_m=0$ とした。式(6.1)によって水和反応率 R と養生期間の関係を表すことが可能である。

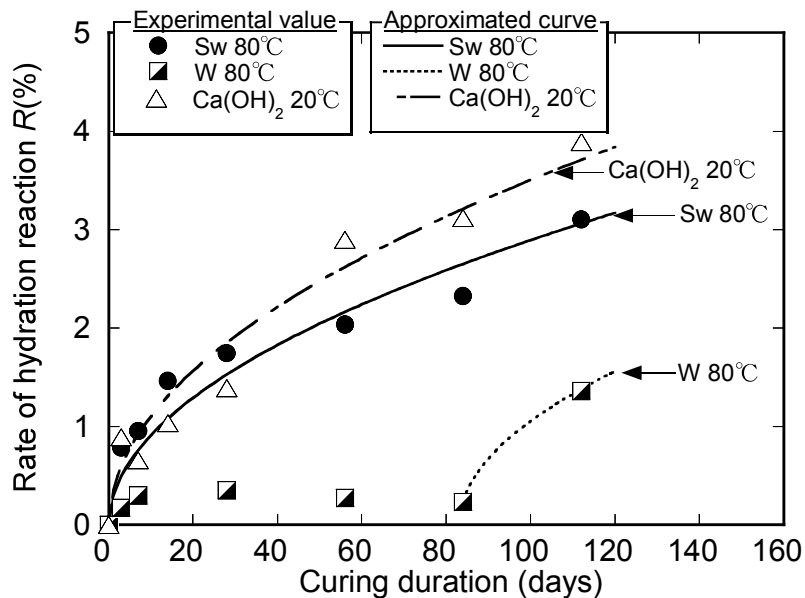


図 6.1 水和反応率の近似曲線

6. 2. 2 強度予測手法の提案

水和反応および硬化の進行は、養生日数の平方根に比例することを示し、また第 5 章で水和反応率と一軸圧縮強さの関係は次式であらわされることを示した。

$$q_u = m \cdot R + C \quad (\text{ただし, } q_u > 0) \quad (6.2)$$

ここに、 m, C は実験定数である。

式(6.1), (6.2)より, 一軸圧縮強さは式(6.3)のように表される.

$$q_u = m \cdot r \sqrt{t - t_m} + C \quad (6.3)$$

ここで, 式(6.3)において $a = m \cdot r$ とおく.

a は定数であって, 硬化に伴う一軸圧縮強さの推定式として次式が得られる.

$$q_u = a \sqrt{t - t_m} + C \quad (6.4)$$

ここに, a : 比例定数, C : 実験定数である. 表 6.1 に, 各養生条件の実験定数を示す.

表 6.1 各養生条件の実験定数

| | Emperimental constants | | |
|-----------------------------------|------------------------|---------|-------|
| | a | C | t_m |
| Seawater 80°C | 19.87 | -57.51 | 0 |
| Plain water 80°C | 30.84 | -52.08 | 84 |
| Ca(OH) ₂ solution 20°C | 78.81 | -185.65 | 0 |

図 6.2 に, 本章の試験結果と第 4 章の淡水養生($D_f=80\%$)について, 一軸圧縮強さの経時変化を示す. 同図には, 式(6.4)により求めた近似曲線も示している. いずれの養生条件においても実験値をよくあらわしている. また, 水酸化カルシウム水溶液 20°C, 淡水 20°C については, 硬化 (水和反応) が進行し始める養生日数は異なるものの, 強度発現以降は一樣に増加している.

第 5 章で述べたように, 水酸化カルシウム水溶液は, 淡水に水酸化カルシウムを添加したものであり, pH 上昇までの過程を省略して硬化を促進する効果がある. そのため, 同一の養生温度における淡水と水酸化カルシウム水溶液とでは, 強度発現までの養生日数は異なるもののそれ以降の強度増加は一樣であると考えられ, 硬化 (水和反応) が進行し始める養生日数 t_m を把握することにより簡易的に強度予測が可能である.

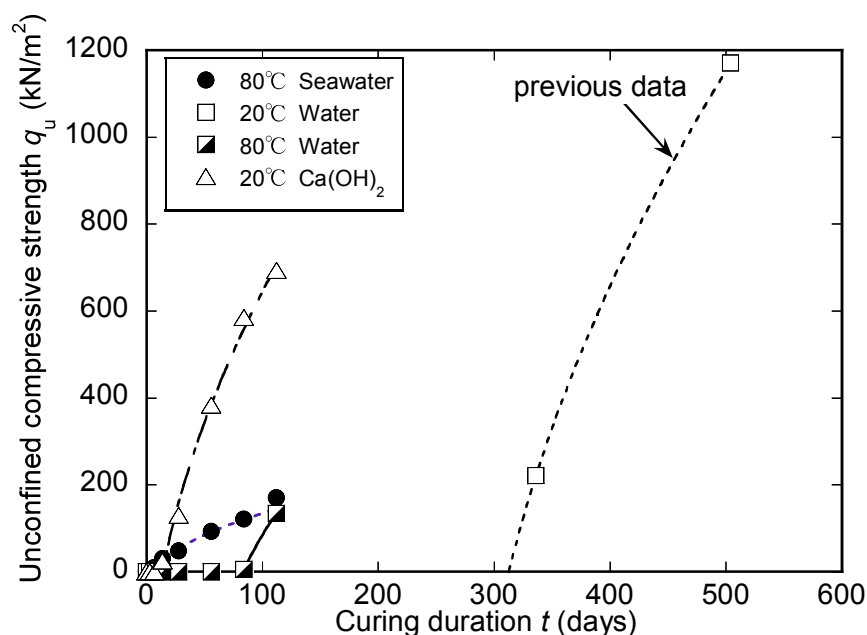


図 6.2 一軸圧縮強さの近似曲線

一方、図 5.31 のように、フレッシュなスラグにおける A_n/A_0 の平均値は 0.583 を示し、水砕スラグの再硬化時には硬化履歴が無い場合の約 5~6 割程度まで強度増加することを検証した。また盛土スラグ A_n/A_0 は 0.777 を示している。これを再硬化係数 k_{re} として、再硬化を考慮した一軸圧縮強さ q_u を式(6.5)のように定義した。

$$q_u = k_{re} \times (a\sqrt{t-t_m} + C) \quad (6.5)$$

6. 2. 3 強度予測結果の検証

前節で提案した水砕スラグの強度予測手法を用いて、実験値との比較によりその適用性について検討する。

図 6.3 は、式(6.5)による予測値と実験値との関係を示したものである。再硬化係数 k_{re} は、未硬化水砕スラグの実験値に対しては 0.583 (図 5.31)、現場試験盛土スラグに対しては 0.777 (現場試験盛土の結果のみで算出) とした。同図より、実験値と予測値はよく一致しており、比較的精度良く評価できている。

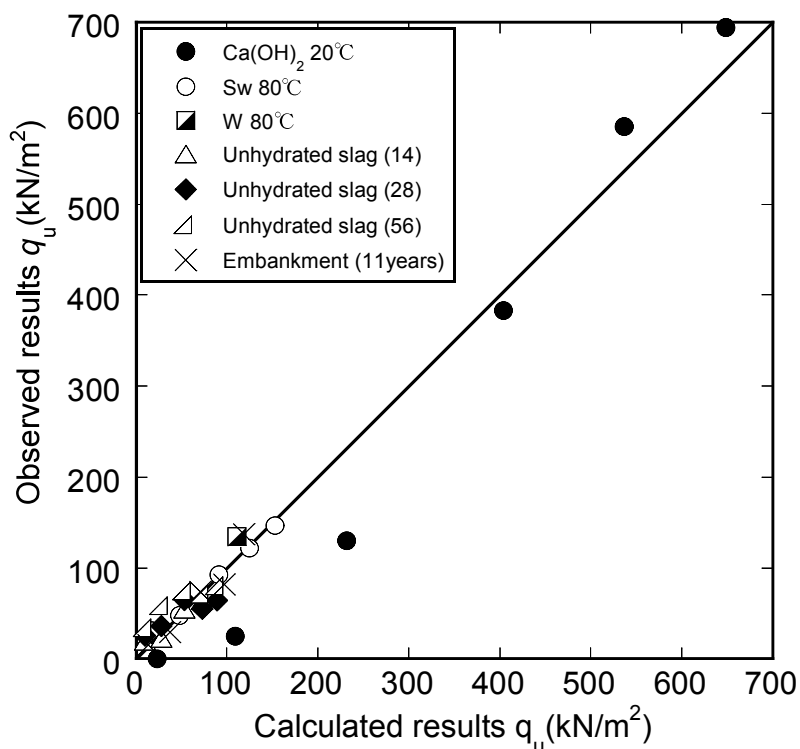


図 6.3 一軸圧縮強さの実験値と計算値の相関図

6. 3 水砕スラグの軽量地盤材料としての適用性

本章では、本研究で得られた一連の試験結果から水砕スラグの強度予測手法を提案し、その適用性について検証した。得られた成果は以下のとおりである。

- (1) 水和反応率と時間との関係は式(6.1)で表現でき、水和反応および硬化の進行は、養生日数の平方根に比例することがわかった。
- (2) 一連の試験結果から、水砕スラグの強度予測手法である式(6.5)を提案した。

$$R = r\sqrt{t - t_m} \quad (6.1)$$

$$q_u = k_{re} \times (a\sqrt{t - t_m} + C) \quad (6.5)$$

本章で提案した水砕スラグの強度予測手法(6.5)は、水酸化カルシウム水溶液 20°C、海水 80°C、淡水 80°C、淡水 20°Cに適用され、再硬化係数 k_{re} は海水 80°C養生のみ適用する。硬

第6章 高炉水砕スラグの再硬化を考慮した強度予測手法

化に及ぼす影響因子は、養生温度、粒度、密度、移流等、現場によって様々であり、実験式の適用については、今後更なる検討が必要である。

参考文献：

- 1) 洪悦郎, 鎌田英治, 田畑雅幸, 浜幸雄：ロジスティック曲線を応用したコンクリート強度推定式の提案, 日本建築学会構造系論文報告集, No.367, 1986.9.
- 2) 中間哲志, 中野徹, 斉藤聰, 馬場崎亮一：セメント改良土の強度の早期材齢からの予測, 土木学会第55回年次学術講演会, III-B214, 2000.9.
- 3) 中間哲志, 斉藤聰, 馬場崎亮一：セメント改良土の強度の早期材齢からの予測(その2), 土木学会第55回年次学術講演会, III-B156, 2000.9.
- 4) 氏家勲, 大野浩二：各種の成長曲線によるコンクリートの早期強度推定に関する検討, 土木学会論文集 No.798/IV-68, pp.51-61, 2005.9.
- 5) 宍倉大樹：積算温度方式による高強度コンクリートの圧縮強度推定に関する基礎的研究, 建材試験センター, 建材試験情報技術レポート, 2013.6
- 6) 菊池喜昭, 木村淳治, 水谷崇亮, 永留健：高炉水砕スラグの硬化に及ぼす pH, Ca^{2+} の影響, 土木学会論文集, No.799/III-72, pp.195-200, 2005.9.
- 7) 篠崎晴彦, 松田博, 坂井悦郎, 小野幸一郎, 鈴木操, 中川雅夫：高炉水砕スラグの硬化特性と地盤改良工法への適用, 土木学会論文集 C, Vol.62, No.4, pp.858-869, 2006.12.
- 8) (財)沿岸技術研究センター：港湾・空港における水砕スラグ利用技術マニュアル, 2007.
- 9) 鐵鋼スラグ協会：高炉水砕スラグ「土工用材料としての技術資料」, 2009.
- 10) (社)地盤工学会：高炉水砕スラグの地盤工学的利用促進に関する研究委員会報告書, 2010.

第7章 結論と今後の展望

本論文では、高炉水砕スラグ（以下、水砕スラグ）の利用促進に向けたデータの蓄積のため、水砕スラグを用いて試験盛土を施工し、自然環境下における水砕スラグの諸特性の変化を長期に亘って調査し、軽量地盤材料としての適用性を調べた。

また、室内で養生した硬化供試体を用いて、非排水繰返しせん断試験および圧密排水三軸圧縮試験を実施し、硬化とせん断強度の関係および非液状化レベルについて調べるとともに、未硬化水砕スラグと現場試験盛土からサンプリングした水砕スラグの2種類の試料を用いて、一度硬化した水砕スラグのせん断後の硬化特性についても調べた。

さらに、水砕スラグの水和反応に着目し、種々の環境における水和反応と強度の関係について調べ、軽量地盤材料として適用する上で基礎となる水砕スラグの材料特性について考察するとともに、水砕スラグの強度予測手法を提案し、その適用性について検証した。

得られた成果は各章でまとめているが、本章ではそれらを総括した。また今後の課題についても述べている。

第1章では、本研究の背景、技術的課題および目的を示した。また、本論文の各章における論述内容について示した。

第2章では、水砕スラグの基本的性質を述べるとともに、硬化メカニズムと硬化に及ぼす影響因子について述べた。また、現在までの水砕スラグの研究成果および利用例について紹介した。

第3章では、水砕スラグの軽量性および硬化特性に着目し、軽量地盤材料としての適用性について検証した。山口県宇部市において2001年11月に施工された試験盛土について、長期に亘って力学的性質の変化およびスラグからのアルカリ成分溶出による環境周辺への影響について調べた。得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 自然環境下で長期間放置された高炉水砕スラグの乾燥密度は、施工初期と比較して、同程度もしくは小さくなる傾向を示す。水砕スラグを盛土材として適用した場合、施工初期から11年経過した時点においても、自然土と比較して十分な軽量性を維持していることが明らかになった。しかし、水砕スラグの長期的な密度変化のメカニズムについては今後検討する必要がある。

第7章 結論と今後の展望

- (2) 水砕スラグは、自然環境下で長期間放置すると、ばらつきは見られるものの、盛土体として十分な強度増加を示すことが標準貫入試験および室内実験結果から明らかとなった。内部摩擦角にあまり変化は見られないものの、特に粘着力は施工後 8 ヶ月まで時間経過とともに増加した後一定となり、その後大きい変化は見られなかった。
- (3) 水砕スラグは、硬化後も自然土と同程度の透水性を有しており、透水性も期待する地盤材料として適用できる。
- (4) アルカリ成分を含む溶出水の地下水環境への影響は、水砕スラグの施工領域直下で見られるものの周辺地盤への影響は確認されなかった。

第4章では、室内養生の硬化供試体を用いて非排水繰返し三軸試験、圧密排水三軸圧縮試験および一軸圧縮試験を実施し、硬化の進行に伴う R_{20} の変化と静的なせん断強度の関係について調べた。また、供試体を現場に近い淡水および海水で養生することにより、異なる養生環境での硬化の進行について調べるとともに、未硬化時においては、再液状化特性についても検討した。さらに、地震時を想定し、せん断破壊した水砕スラグの潜在水硬性について確認するため、硬化供試体をせん断した後、同試料で再び供試体作製および養生し、せん断試験を実施することによって、初回および再せん断試験時の強度を比較し、水砕スラグの再硬化特性について検討した。得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 淡水養生および海水養生した供試体は、ともに相対密度が大きい $D_r=80\%$ の供試体の方が繰返しせん断強度（液状化強度）が大きい。
- (2) 水砕スラグの間隙比は、養生日数が経過するに伴い、水和物が生成されるため減少する。
- (3) 再液状化強度は、再圧密による密度増加によって初回液状化強度よりも大きくなり、その傾向は初期相対密度が小さい $D_r=50\%$ の供試体の方が著しい。
- (4) R_{20} は、相対密度 D_r 、養生水に関係なく粘着力 c_d と相関性が認められる。
- (5) 初回液状化時の最大両振幅軸ひずみが大きくなると、再液状化強度が低下する。
- (6) 同一相対密度で比較すると、一度繰返しせん断を受けた供試体の方が液状化強度の低下が著しい。この原因については、繰返しせん断中の粒子破碎の影響等を考察し、更に検討する必要がある。
- (7) 硬化が進行した水砕スラグは、せん断を受けても潜在水硬性は保持され、再び硬化が進行する。このことから、硬化が進行した水砕スラグがせん断破壊した場合においても、湿潤状態においては自己修復すると推察される。

第5章では、水砕スラグの水和反応と強度の関係に着目し、種々の条件で養生した供試体を用いて硬化に及ぼす養生環境の影響について検討した。実験では供試体を、淡水、海水、水酸化カルシウム水溶液の3種類の水溶液を用いて養生し、養生完了後に水和反応率の測定と一軸圧縮試験を実施した。水和反応率は、サリチル酸・アセトン・メタノール混合液による選択溶解法により測定した。また、養生温度による影響を把握するため、淡水及び海水については20℃及び80℃とし、水酸化カルシウム水溶液は20℃のみとした。さらに、所定の期間養生し硬化履歴を与えた水砕スラグと第3章で用いた試験盛土のサンプリングした水砕スラグを用いて、水和反応と強度の関係から自己修復特性について検討した。得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 水和反応率の増加に伴い一軸圧縮強さが増加する。
- (2) 水砕スラグを養生した淡水および海水は、同等のpHを示すが、水和反応率と一軸圧縮強さに相違がみられた。これは、海水中の塩化物イオン、カルシウムイオン等により硬化が促進されたためと考えられる。
- (3) 水和反応率には強度発現に対する閾値が存在する。また、一軸圧縮強さと水和反応率の関係は養生環境によって異なる。これは、養生環境によって生成される水和物の種類が異なり、強度に寄与する割合も異なるためと推察される。
- (4) 硬化した水砕スラグは、解砕後も強度発現が確認でき、自己修復することがわかった。
- (5) 硬化後解砕した水砕スラグは、未硬化スラグに比べて水和反応の進行が遅くなる。このことから、水砕スラグの自己修復には粒子表面に生成された水和物量が大きく影響すると考えられる。
- (6) 水砕スラグは水和反応の進行に伴って強度増加し、硬化履歴を有する場合、硬化履歴が無い場合の5~6割程度まで強度増加する。
- (7) 水砕スラグの強度増加は養生時間の平方根に比例する。

第6章では、本研究で得られた一連の試験結果から水砕スラグの強度予測手法を提案し、その適用性について検証した。得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 水和反応率と時間との関係は式(7.1)で表現でき、水和反応および硬化の進行は、養生日数の平方根に比例する。
- (2) 一連の試験結果から、水砕スラグの強度予測可能な式(7.2)を提案した。

$$R = r\sqrt{t - t_m} \quad (7.1)$$

$$q_u = k_{re} \times (a\sqrt{t-t_m} + C) \quad (7.2)$$

ここに、 r ：比例定数、 t ：養生日数、 t_m ：水和反応が急激に進み始める養生日数、 m 、 C ：実験定数、 k_{re} ：再硬化係数である。

以上、本論文で得られた結論をまとめたが、それらを受けて今後の課題と展望について述べる。

【陸上工事における水砕スラグの利用促進に向けた課題】

本論文では、水砕スラグの軽量地盤材料としての適用性について検証するため、2001年に現場試験盛土を施工し、長期に亘って諸特性の変化について調査した。その結果、水砕スラグは長期間に亘って硬化が進行し軽量地盤材料に求められる性能を十分に満足することが明らかとなり、土工工事における使用効果が期待できる。

試験盛土の施工現場である山口県宇部市においては、本論文で示したように硬化が著しく進行し、軽量性の維持且つ硬化によって強度のある盛土が完成した。これは、同市内は比較的温暖な地域であり、また水和反応が進行するための降雨による水分供給があったことに起因している。本研究では対象としていないため具体的な結果は得られていないが、水砕スラグの硬化の進行は、水分の供給量や周辺温度が大きく影響すると想定されることから、降雨の少ない地域や積雪寒冷地域においては、硬化の遅延が危惧される。したがって、水砕スラグの将来的な力学的特性の変化や盛土自体の強度予測を行うには、施工現場において事前調査を十分に行い、緻密な条件設定が必要であると考えられる。そのため、現場における実績を蓄積し、地域によって簡易的に硬化の進行が予測できるマニュアルの制定に期待したいところである。

【自己修復を想定した地盤材料としての課題】

本研究では、硬化が進行した水砕スラグは地震等の外的要因により破壊が生じても、潜在水硬性は保持され再硬化することを検証した。しかしながら、本研究では硬化供試体をせん断させた後、解砕して再充填し供試体を作製および再養生しているため、即ち硬化が進行する条件が揃っている。実際の現場でせん断破壊が生じた場合、地盤内のせん断面同

土が接触していれば自己修復すると考えられるが、この接触面は必ずしも均一ではない。そのため、接触点を想定するのは困難であり、また、せん断面において水と接触し得る環境であるか疑問である。

本研究は、水砕スラグの材料特性について基礎的な検討をしたものであり、実際の現場条件とは異なるものの、再硬化することを検証した。そのため、破壊が生じた同地盤内において、湿潤環境であれば自己修復が期待できる。今後の課題としてより現場に近い条件で検討すること、さらに試験方法を開発し模擬実験を行う等、自己修復する地盤材料としての利用促進および用途拡大を図っていきたい。

【強度予測手法の現場への適用に向けた課題】

本研究では、水和反応と強度の関係を調べ、強度予測手法を提案した。実験値と予測値の比較により、提案した予測式は比較的精度よく評価できた。しかしながら、今回提案した予測式は室内試験において人工的に作製した供試体を用いて試験を実施した結果に基づくものであり、実際の現場においては、気候条件、温度、粒度、密度、移流、養生水中の化学成分等、硬化に及ぼす影響因子は多くある。また本研究では、短期的に評価するため硬化促進を図り、養生条件を海水および淡水 80℃、さらに水酸化カルシウム水溶液を用いて検討している。このような条件は現実的でないため、適用にあたっては補正が必要である。そのため、強度予測手法の精度を向上させるためには、これらの影響因子を加味し、室内試験においては、より現場に近い実験条件を設定し、試験を実施する必要がある。

今後は、多くの現場において試験施工し、現場における事前調査、水和反応、時間、それに伴う硬化の程度を継続的に調査し、室内試験結果との比較検討することによって、より精度の高い強度予測手法の確立に努めたい。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり，ご指導頂きました山口大学大学院理工学研究科の松田博教授には終始懇切なご指導を賜り，ここに深甚な感謝の意を表するとともに厚く御礼申し上げます。

松田博教授には，貴重な時間を割いていただき，本研究の遂行に多大なるご助力を頂くとともに，研究のみならず多くのことを教えていただきました。深く感謝の意を表します。

本論文の審査にあたっては，兵動正幸教授，中田幸男教授，鈴木泰之准教授，原弘行助教に多大なるご助言を頂き，深く感謝致します。

原弘行助教および九州大学工学研究院 石藏良平助教（前山口大学大学院理工学研究科助教）には，本研究に関するご指導と多大なるご助力を頂きました。深く感謝致します。

現在，(株)銭高組でご活躍中の村岡賢二氏には，工学部時の著者に対し，厳しくも暖かいご指導を頂くとともに，研究に対する姿勢を学びました。一年という短い期間ではありましたが，三軸班でともに研究ができたことは著者にとっての誇りであり，また本研究の遂行および研究成果の取り纏めに不可欠であったと思っております。深く感謝の意を表します。

本論文の貴重なデータ取得および提供に関して，松田研究室の学生の皆様には多大なご支援を頂きました。特に，現在，八千代エンジニアリング(株)でご活躍中の井川尚之氏には，深く感謝致しております。

本研究の機会を与えて頂きました宇部市役所北部総合支所土木課長の田原宏氏，宇部市上下水道局下水道整備課長の杉本秀一氏をはじめ，市の皆様には感謝の意を表します。

最後に，著者の大学生活を支えてくれた家族，特に，著者の健康にいつも気を遣い励ましてくれた兄に心より感謝する次第であります。