

## 学 位 論 文 内 容 の 要 旨

学位論文題目	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
氏 名	和田 正寛
<p>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 2,500 万トン（平成 25 年度実績）製造されている。水砕スラグは軽量かつ透水性に優れ、角張った形状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と同様な水和反応が生じて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。自然砂の枯渇が懸念される中、水砕スラグは工場生産であり安定供給が可能であることから、自然砂に代わる地盤材料として期待されている。</p> <p>水砕スラグは、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陸上構造物への適用性についても検討されている。多くの施工実績により、港湾および土工におけるマニュアルも制定され、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。しかしながら、先述のようにマニュアルが制定されているものの、技術的課題は未だ残っており、以下にその内容を示す。</p> <p>(1) 水砕スラグは港湾における施工実績が多く、大規模な陸上工事での施工事例はほとんどないため、陸上における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。</p> <p>(2) 水砕スラグは、完全に固結すれば液状化しないとされているが、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。</p> <p>(3) 潜在水硬性に着目した研究は多くなされているが、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おり、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がほとんどない。</p> <p>(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、当該箇所でも潜在水硬性が保持されていれば水和反応が継続し、強度回復して自己修復すると考えられるが、その特性については明らかにされていない。</p> <p>上記の技術的課題を踏まえ、本研究は、陸上における普及拡大を目的とし、水砕スラグの軽量盛土材としての適用性について検討するため、現場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変化を調査した。また、室内試験において未硬化時における水砕スラグの再液状化特性について検討したほか、硬化供試体を用いて、水砕スラグの硬化の程度とせん断強度の関係および硬化した水砕スラグの再硬化特性について検討した。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硬化に及ぼす影響について基礎的検討を行った。本研究で得られた成果は以下のとおりである。</p> <p>(1) 水砕スラグは、自然環境下で長期間放置すると、盛土体として十分な強度増加を示すことがわかった。さらに、施工後 10 年以上が経過しても自然土と比較して十分な軽量性を維持し、また周辺環境への影響も少ないことから、水砕スラグは軽量盛土材としての性能を十分に満足することがわかった。</p> <p>(2) 淡水および海水養生した硬化供試体は、ともに相対密度が大きい <math>D_r=80\%</math> の供試体の方が繰返しせん断強度（液状化強度）が大きい。さらに、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 <math>D_r=50\%</math> の供試体の方が大きくなる。</p> <p>(3) 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と考えられる。さらに、著しく硬化した水砕スラグも、解砕後に強度発現が確認でき、自己修復することがわかった。</p> <p>(4) 水和反応率の増加に伴い一軸圧縮強さは増加するが、その増加傾向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。さらに、水砕スラグは、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ことを示した。</p> <p>(5) 本研究の一連の試験結果から、水砕スラグの強度予測式を提案した。実験値と予測値を比較した結果、比較的精度良く評価することがわかった。</p>	

以上のことから、水砕スラグは軽量盛土材として適用可能で、大規模な陸上工事においても十分な使用効果が期待できる。さらに、一度硬化した水砕スラグは地震等の外的負荷によって破壊・分離が生じても水和反応により再硬化するため、維持・補修時のコスト軽減や新たな利用先の拡張や、自己修復を考慮して計画・施工の段階から事前対策として取り入れることにより計画的な耐久設計に貢献できる。

## 【論文審査結果の要旨】

高炉水砕スラグ（以下、水砕スラグ）は鉄鋼の製造過程で大量生産される副産物であり、年間約2,500万トン（平成25年度実績）製造されている。水砕スラグは軽量かつ透水性に優れ、湿潤環境下においては水和反応が生じて硬化する潜在水硬性を発揮する点が最大の特徴で、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陸上構造物への適用性についても検討されている。しかし、水砕スラグは、完全に硬化すれば液状化しないとされているものの、硬化途中の液状化特性が明確にされていない。また、潜在水硬性に着目した研究は多くなされているが、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がほとんどない。さらに、硬化した水砕スラグは外的負荷によって破壊や分離が生じた場合でも水和反応が継続し、強度回復すると考えられるが、その特性については明らかにされていない。

これらの技術的課題を踏まえ、水砕スラグの軽量地盤材としての適用性について検討するため、現場において水砕スラグの試験盛土を施工し、長期にわたって工学的諸特性の変化を調査した。また、室内試験において未硬化時における水砕スラグの再液状化特性について調べるとともに、硬化の程度とせん断強度の関係および再硬化特性について調べた。さらに、力学特性の経時変化に加え、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硬化に及ぼす影響について調べた。

論文は7章で構成されており、第1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述べている。第2章では水砕スラグの基本的性質および、それらを活かした研究事例について述べている。第3章では、水砕スラグを用いた現場試験盛土の地盤工学的性質を長期間に亘って調査し、

水砕スラグが長期間自然環境下にあると含水比は増加するが、乾燥密度は同程度もしくは減少する傾向を示すこと、施工後 11 年経過した後においても、自然土と比較して十分な軽量性を保つこと、さらに盛土体として十分な強度を示すことを標準貫入試験および室内試験結果から明らかにしている。第 4 章では、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ついて静的三軸圧縮試験および非排水繰返し三軸試験を行って再液状化強度、水砕スラグの再硬化特性について調べた。その結果、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ること、また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とを明らかにした。第 5 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の一軸圧縮強さと水和反応率の関係、さらに現場試験盛土から採取した水砕スラグの再硬化特性について調べた。その結果、水和反応率の増加に伴い一軸圧縮強さが増加すること、水和反応率には強度発現に係わる閾値が存在すること、さらに硬化履歴を有する水砕スラグは硬化履歴が無い場合の 5~6 割程度まで強度が回復することを明らかにした。第 6 章では、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、実験結果との比較によって予測手法の妥当性を確認するとともにその適用性を検証している。

第 7 章では、結論である。

公聴会における主な質問は、現場での移流の影響、強度推定式の適用範囲、粒子破碎の影響、湿潤密度と含水比の関係に関するもの等についてであった。いずれの質問に対しても発表者からの的確な回答がなされた。

以上より、本研究は独創性、信頼性、新規性、実用性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。