

## 高炉水砕スラグの未硬化時および硬化途中における 非排水繰返しせん断強度特性

### Cyclic Shear Strength of Granulated Blast Furnace Slag in the Non Hardening and the Process of Hardening

和田正寛 Masahiro WADA (山口大学大学院理工学研究科)  
石蔵良平 Ryohei ISHIKURA (山口大学大学院理工学研究科)  
松田 博 Hiroshi MATSUDA (山口大学大学院理工学研究科)

潜在水硬性を有する高炉水砕スラグは硬化により有用な非液状化材料として期待されるが、硬化途中および未硬化時の繰返しせん断強度特性については明確ではない。そこで本報告では、養生水および相対密度の異なる硬化途中の供試体と、未硬化の供試体に対して、静的および繰返しせん断試験を実施した。その結果、硬化途中においては、繰返しせん断強度は静的なせん断強度に比例して増加すること、未硬化時においては、同一相対密度であれば、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を示すことが明らかとなった。

キーワード：潜在水硬性，再液状化，粒子破碎

(IGC : D6, D7)

#### 1. はじめに

高炉水砕スラグは、銑鉄の製造過程で生産される副産物であり、天然砂と比較して軽量性、高強度、透水性に優れている他、水と反応して硬化する性質（水硬性）を有するため、地盤工学的有効利用が期待されている<sup>1)</sup>。そのため、高炉水砕スラグを地盤材料として適用する場合には、設計上液状化しない材料として扱われる<sup>2)</sup>。

しかしながら、高炉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、高炉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<sup>3)</sup>。

そこで本研究では、高炉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、高炉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。高炉水砕スラグは、港湾構造物に既に適用されていることから<sup>4)</sup>、本報告では特に、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<sup>5)</sup>。

また、未硬化時の高炉水砕スラグ供試体に対して非排水繰返しせん断試験を行い、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、高炉水砕スラグの粒子破碎特性<sup>6),7)</sup>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。

#### 2. 硬化途中の高炉水砕スラグのせん断強度特性

##### 2.1 試料と試験方法

試料には、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（写真-1）と比較のため玄海砂（玄海灘で採取）と豊浦砂を用いた。表-1に、密度試験および最大・最小密度試験の結果を示す。高炉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・最小間隙比は、玄海砂（玄海灘で採取）および豊浦砂と比較して高炉水砕スラグのほうが大きいことがわかる。これは、高炉水砕スラグが多孔質で

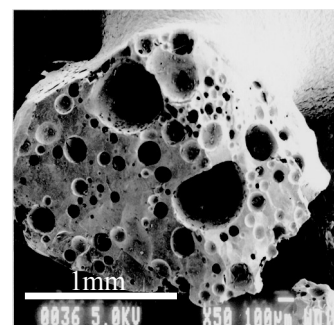


写真-1 高炉水砕スラグ粒子の拡大図

表-1 土粒子密度および最大・最小間隙比

	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$e_{max}$	$e_{min}$
玄海砂	2.678	0.827	0.516
豊浦砂	2.646	0.999	0.623
高炉水砕スラグ(2004年)	2.643	1.510	1.033

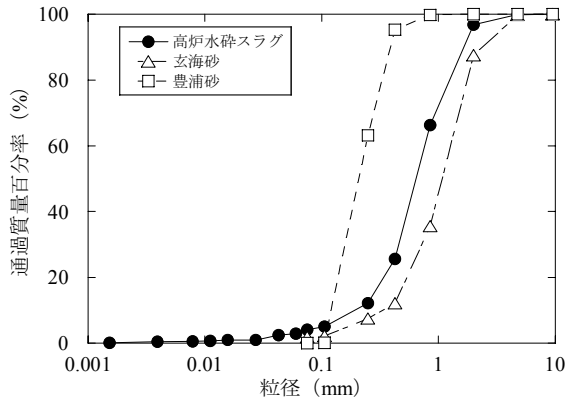


図-1 粒径加積曲線

あるためと考えられる。各試料の粒径加積曲線を図-1に示す。高炉水砕スラグは、天然砂と類似した粒度分布を示していることがわかる。

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  $Dr=50\%$  および  $80\%$  となるように空中落下法で作製した。図-2に硬化供試体の養生方法を示す。供試体は、海水中 (pH≒8) および水中 (水道水) で、固液比 (試料:養生水) 1:2、養生温度 15~20℃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完全に密閉した。三軸試験装置を用いて、100kPaで等方圧密後、正弦波繰返し載荷 (周期:  $T=10s$ ) 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  $\sigma'_0$  を 50kPa, 100kPa, 150kPa, ひずみ速度 0.3%/min, 背圧 300kPa で行った。また、二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 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抑える方法であり、供試体の圧密応力よりも小さな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ように配慮した。本研究では、二重負圧法と同時に二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) の浸透も行った。間隙内の空気を、水に対する溶解度が高い二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 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  $\sigma'_0$  の 1/2 に相当するセル圧を減少させ、それによって

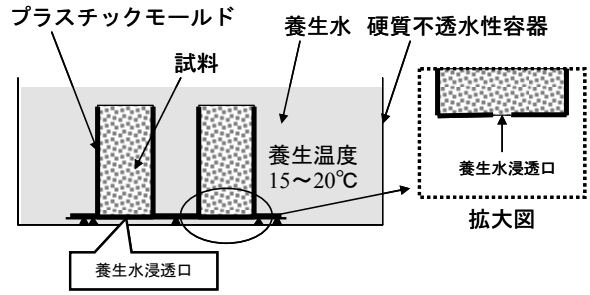


図-2 養生方法

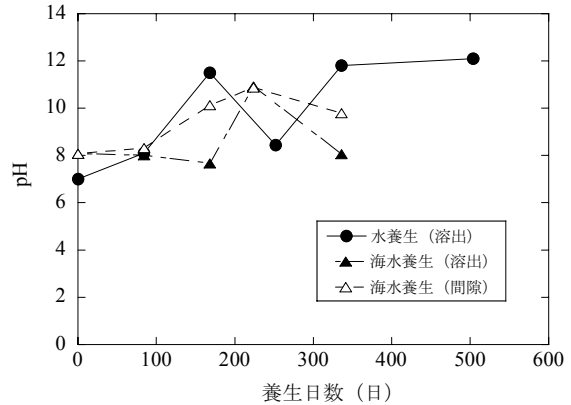


図-3 養生日数と pH の関係

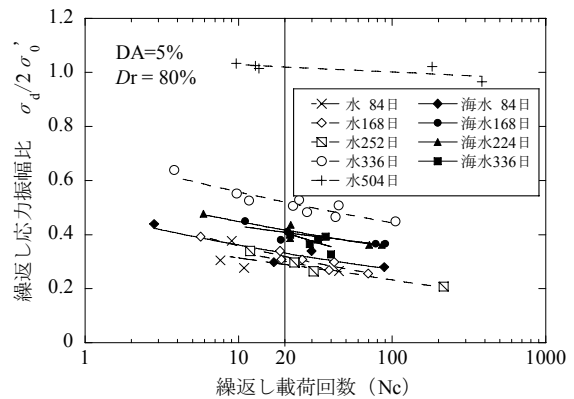


図-4 繰返し載荷回数と繰返し応力振幅比の関係

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 以上を満たすようにした。

## 2.2 養生水の pH の経時変化

図-3 に海水及び水養生した高炉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、高炉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-2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。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

高炉水砕スラグの未硬化時および硬化途中における非排水繰返しせん断強度特性

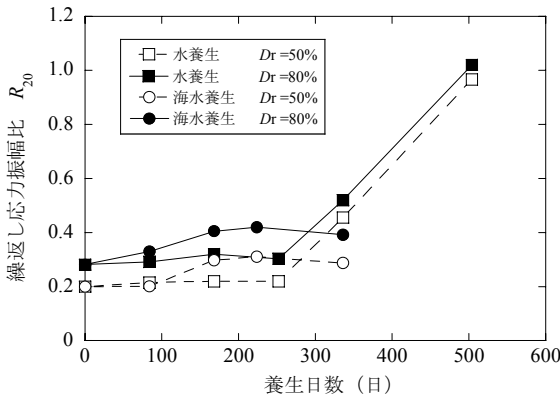


図-5  $R_{20}$ の経時変化

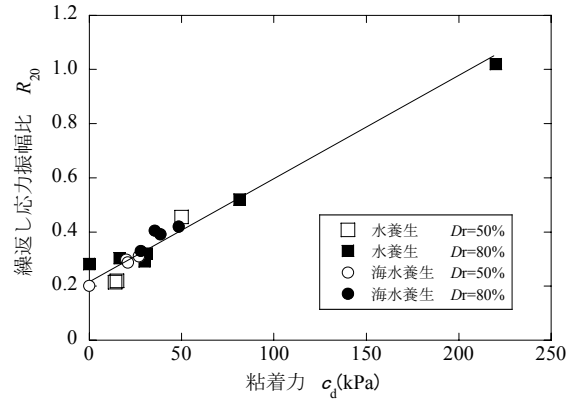


図-7 粘着力と  $R_{20}$  との関係

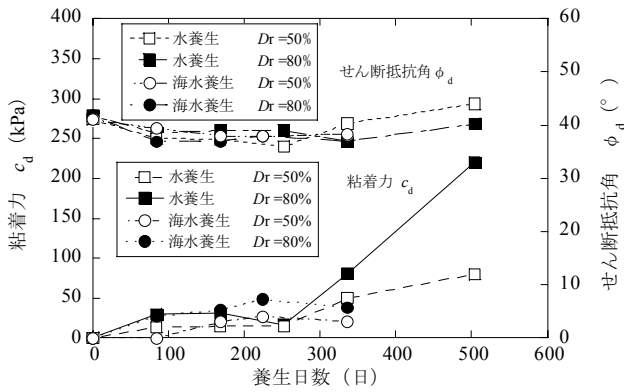


図-6 粘着力およびせん断抵抗角の経時変化

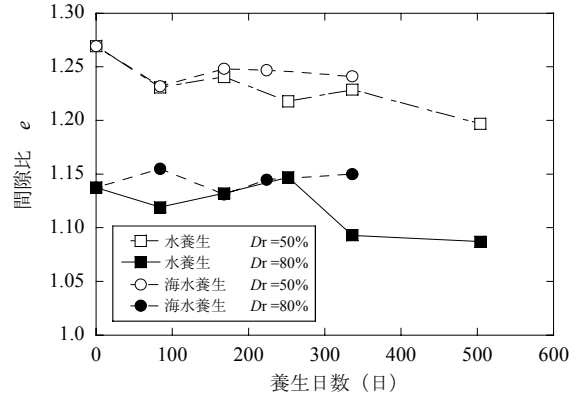


図-8 間隙比の経時変化

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、供試体中の高炉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。

2.3 硬化途中の繰返しおよび静的せん断強度特性

本研究では両振幅軸ひずみ DA が 5% に達した時を破壊（液状化）と定義して整理を行った。また、繰返し載荷回数が 20 回の時の繰返し応力振幅比を  $R_{20}$  と定義した。

図-4 は、海水および水養生した高炉水砕スラグ ( $Dr=80\%$ ) の液状化強度曲線を示す。水養生した供試体では、養生日数が経過するに伴い、 $R_{20}$  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  $R_{20}$  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-5 は、海水および水養生した高炉水砕スラグ供試体の  $R_{20}$  と養生日数の関係を示したものである。海水および水養生ともに相対密度が大きな  $Dr=80\%$  の供試体の方が  $R_{20}$  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、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-6 に、海水および水養生した高炉水砕スラグ供試体の粘着力  $c_d$  およびせん断抵抗角  $\phi_d$  と養生日数の関係を示す。同図より、せん断抵抗角  $\phi_d$  は、 $35^\circ$  以上<sup>2)</sup> 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、養生日数の経過と伴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、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-7 に、粘着力  $c_d$  と  $R_{20}$  の関係を示す。図に示されるように、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-8 は、海水および水養生した高炉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。

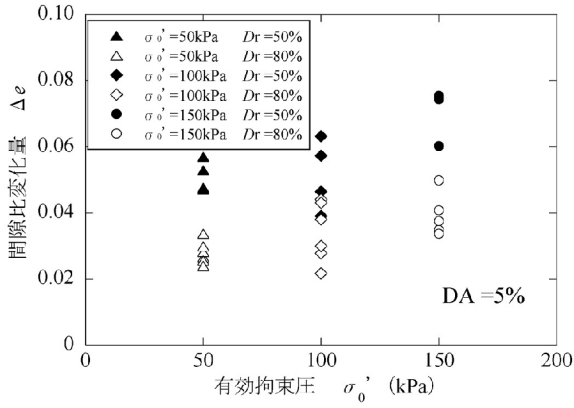


図-9 有効拘束圧と再圧密後の間隙比変化量の関係

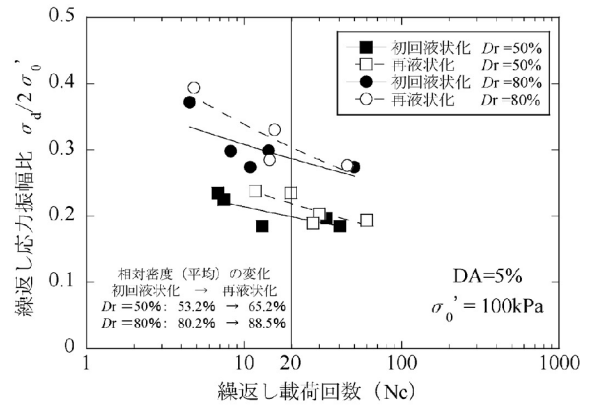
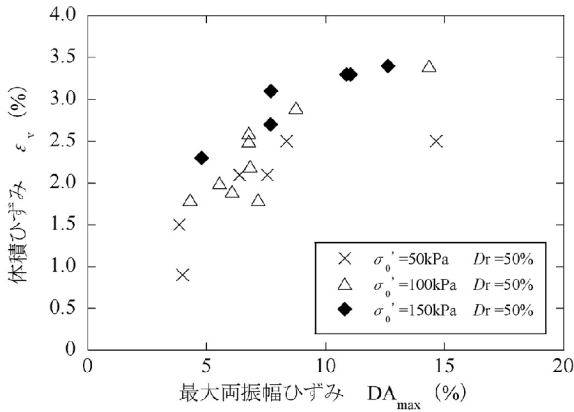
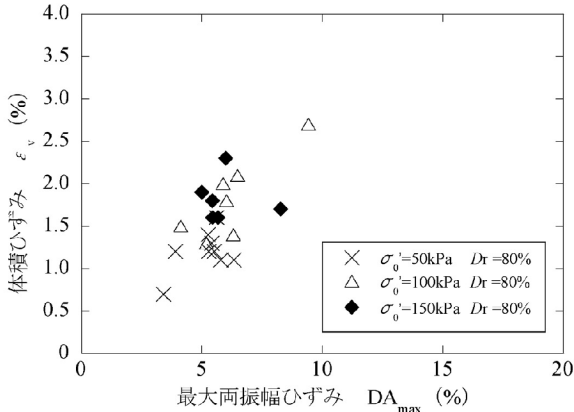


図-11 初回および再液状化試験結果



(a)  $D_r=50\%$



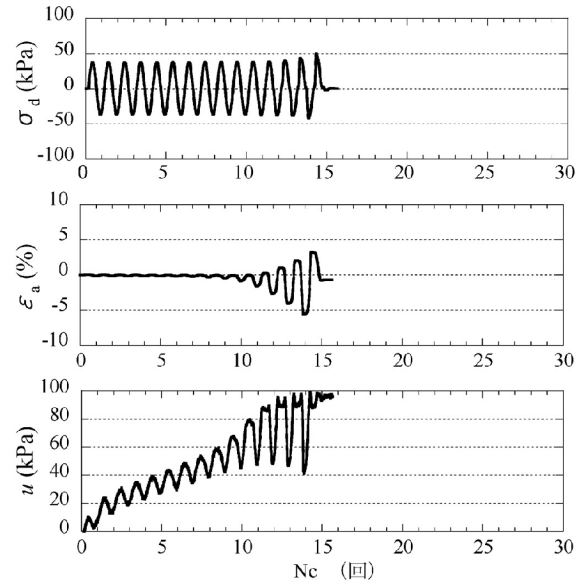
(b)  $D_r=80\%$

図-10 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

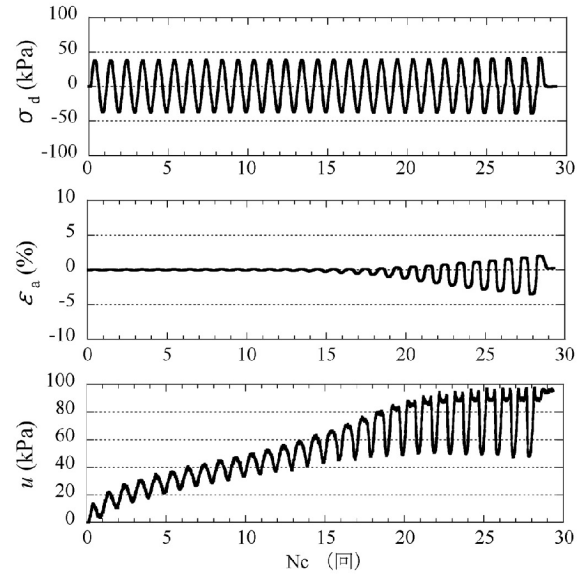
### 3. 未硬化時の高炉水砕スラグの再液状化特性

#### 3.1 試験方法

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、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



(a) 初回液状化時



(b) 再液状化時

図-12 初回および再液状化時の記録波形 ( $\sigma'₀=100\text{kPa}$ ,  $D_r=50\%$ )



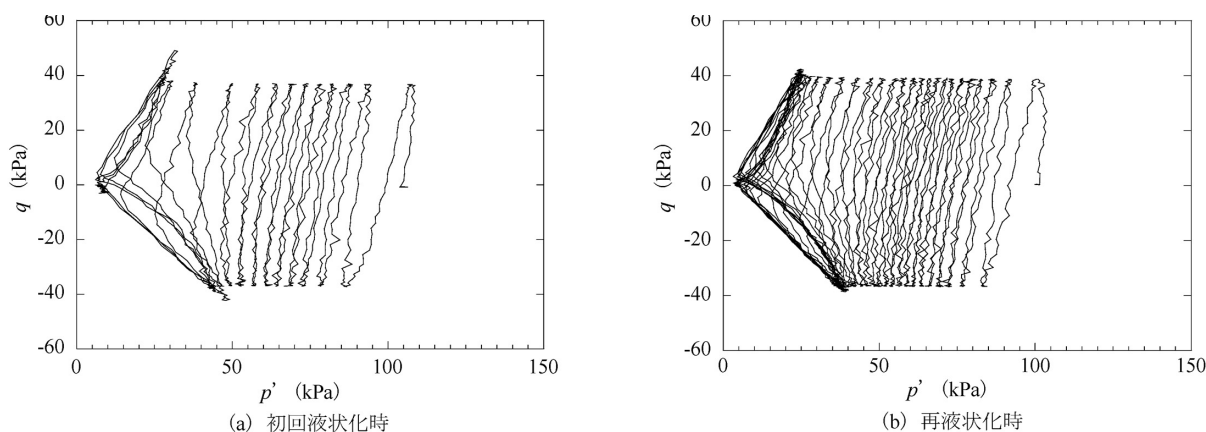


図-13 初回および再液状化時の有効応力経路( $\sigma'_0=100\text{kPa}$ ,  $Dr=50\%$ )

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。

### 3.2 初回液状化及び再液状化試験結果

図-9 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  $\Delta e$  を示したものである。同一条件で  $\Delta e$  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  $\Delta e$  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  $\Delta e$  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-10 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  $\varepsilon_v$  との関係を示す。供試体が液状化に達するかどうかに関わらず、供試体に生じた最大両振幅軸ひずみと試験後の再圧密によって生じた体積ひずみとの関係を明確にするため、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  $\varepsilon_v$  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  $\varepsilon_v$  に収束傾向が見られる。

図-11 は、有効拘束圧  $\sigma'_0=100\text{kPa}$  時の高炉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。

### 3.3 再液状化試験の記録波形と有効応力経路

図-12 は、図-11 に示す結果のうち、有効拘束圧  $\sigma'_0=100\text{kPa}$  での  $Dr=50\%$  の未硬化高炉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  $\varepsilon_a$  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  $\varepsilon_a$  は緩やかに生じている。他の有効拘束圧  $\sigma'_0$  においても同様の傾向が見られた。

図-13 は、図-12 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  $1.1$  の範囲内にあることを確認している<sup>8)</sup>。そのため、有効応力減少と繰返し载荷回数との関係に与える実験精度の影響は少ないものとする。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確認される。

### 3.4 軸ひずみに着目した再液状化特性

図-14 および図-15 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の比  $N_R/N_L$  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-14、図-15 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  $Dr=80\%$  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

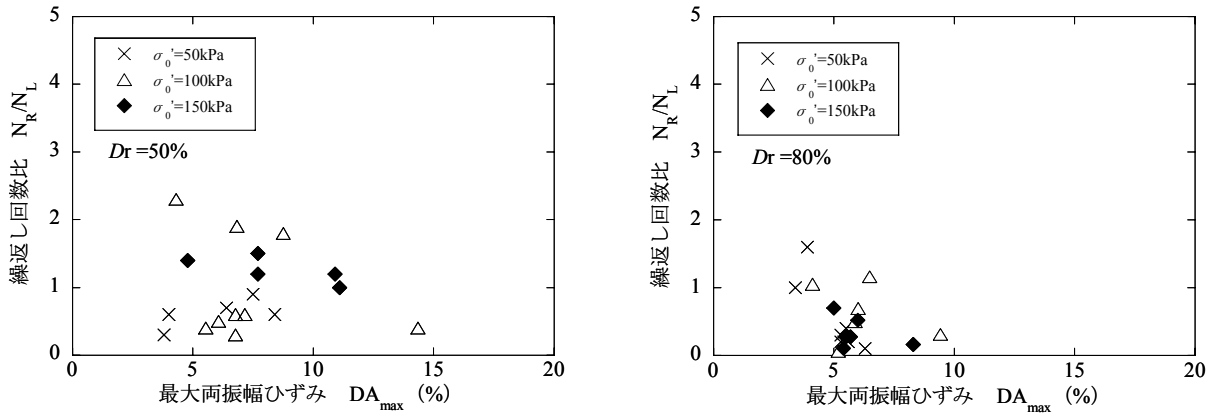


図-14 初回液化化時の最大両振幅軸ひずみと DA=2%における繰返し回数比の関係

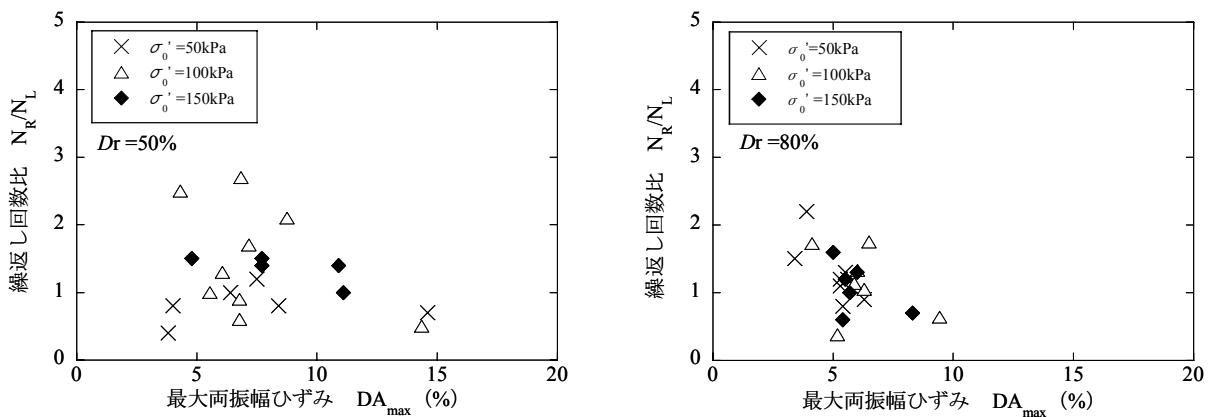


図-15 初回液化化時の最大両振幅軸ひずみと DA=5%における繰返し回数比の関係

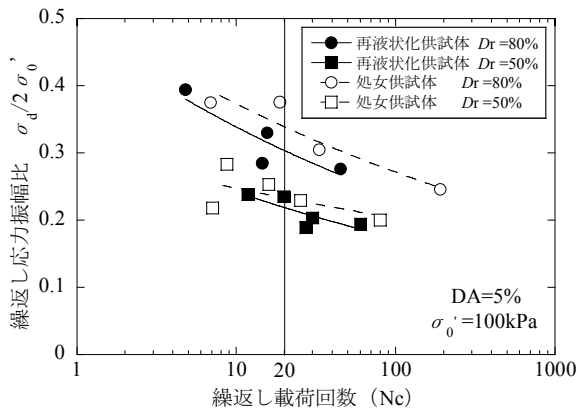


図-16 同一相対密度における再液化化供試体と処女供試体の液化化強度の比較

果を示した。これは、飽和砂における既往の研究と一致している<sup>3), 9), 10)</sup>。Finら<sup>10)</sup>は、飽和砂の再液化化実験を行い、初回液化化後に、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化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<sup>3)</sup>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、再液化化試験の方が初回液化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、初回液化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、再液化化試験時に応力集中が生じたためと考える。

一方、初回液化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。これは初回液化化試験後の再圧密によって供試体の密度増加するため、再液化化強度が大きくなったものと推察される。

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

### 3.5 液化化強度と再液化化強度との比較

3.2 および 3.3 では、同一供試体に対する初回液化化強度と再液化化強度について比較検討を行い、初回液化化後の密度増加により、再液化化時の液化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、初回液化化時の繰返しせん断が供試体に及ぼす影響を検討するため、再液化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-16は、両者の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<sup>3)</sup>、本試験結果は異なる傾向を示した。このことは、破砕性の材料である高炉水砕スラグ<sup>7)</sup>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砕の影響<sup>11)</sup>について、繰返しせん断後の供試体の粒度分布の比較からも更に検討を行う予定である。

#### 4. まとめ

本報告では、高炉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、未硬化時の高炉水砕スラグにおいて、粒子破砕に着目した再液状化強度に関する検討を行った。その結果、得られた結果は以下の通りである。

- (1) 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  $Dr=80\%$  の供試体の方が液状化強度 (繰返しせん断強度) は大きい。
- (2) 高炉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間隙比  $e$  は減少する。
- (3)  $R_{20}$  は、相対密度  $Dr$ 、養生水に関係なく粘着力  $c_d$  と相関性が認められる。
- (4) 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  $Dr=50\%$  の供試体の方が大きくなる。
- (5) 未硬化の供試体において、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処女供試体と比較して、液状化強度が低下する傾向を示した。この原因については、今後繰返しせん断中の粒子破砕の影響等を考察し、更に検討する必要がある。

#### 参考文献

- 1) 鉄鋼スラグ協会：水砕スラグ「土木用材料としての技術資料」, 2009.
- 2) 運輸省港湾局：港湾の技術上の基準・同解説 (上巻),
- 3) 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.
- 4) (財)沿岸開発技術センター, 鉄鋼スラグ協会：港湾工事用水砕スラグ利用手引書, 1989.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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砕に関する研究, 第45回地盤工学研究発表会講演集, pp.483-484, 2010.
- 8) 地盤工学会：土質試験の方法と手引き, 2010.
- 9) 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.
- 10) Finn, W.D.L., P.L.Brandsby and D.J.Pickering : Effect of Strain History on Liquefaction of sand, j.SMFD, ASCE, Vol.96, No.SM6, pp.1917-1934. 1970.
- 11) 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.

(2010年8月3日 受付)

