降下軽石堆積土の含水比が繰返し一面せん断特性におよぼす影響

EFFECT OF WATER CONTENT ON CYCLIC DIRECT SHEAR BEHAVIOR OF PUMICEOUS DEPOSITED SOILS

平野 愛歩[1]・藤本 連成[2]・川尻 峻三[3]
Ayumi HIRANO, Rensei FUJIMOTO and Shunzo KAWAJIRI

[1] 九州工業大学大学院　工学府工学専攻博士前期課程（〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1）
E-mail: hirano.ayumi760@mail.kyutech.jp
[2] 九州工業大学　工学部建設社会工学科（〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1）
E-mail: fujimoto.rensei186@mail.kyutech.jp
[3] 九州工業大学大学院教授　工学研究院（〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1）
E-mail: kawajiri.shunzo644@mail.kyutech.jp

***Key Words**: pumice deposited soils, water content, cyclic direct shear test, particle breakage*

1. はじめに

近年，地震国である日本では大規模な地震が頻発しており，それに伴う人的被害や土砂災害が報告されている[1]．2018 年北海道胆振東部地震では広範囲にわたって多数の斜面崩壊が発生し，特に厚真町では震度 7 を観測するとともに，斜面崩壊による甚大な被害が集中して起こった．被災地域には降下軽石層が広く分布しており，この降下軽石層におけるすべり破壊が，大規模な斜面崩壊の発生および甚大化に関与したことが指摘されている[2]．降下軽石は，火山噴火に伴って降下・堆積した火山砕屑物であり，多孔質で脆弱な粒子構造を有するため，せん断や圧縮に伴って粒子破砕が生じやすい特徴を有する．このような降下軽石堆積土や火山灰質粗粒土の繰返しせん断挙動の支配要因について，粒子破砕に着目した実験的な検討が進められている[3]．また，軽石質土や火山灰質粗粒土では，粒子の多孔質性，低い粒子強度，高い間隙比などに起因して，通常の砂質土とは異なる圧縮・せん断挙動を示すことが報告されており[4),5)]，粒子破砕がせん断強度，変形特性および限界状態に影響を及ぼすことも指摘されている[6),7)]．

一方，2018 年北海道胆振東部地震での崩壊斜面で確認された降下軽石層では，局所的に高含水比または高飽和度の状態にあった可能性が指摘されている[8),9)]．また，降下軽石層やその風化生成物は，粒子内部の多孔質構造，細粒化，粘土鉱物の生成などにより，水分を保持しやすい性質を有する場合がある[10)]．このため，降下軽石堆積土の繰返しせん断挙動を理解するためには，粒子破砕性のみならず，含水比の違いがせん断時の有効応力変化，強度低下および粒子破砕量に及ぼす影響を明らかにする必要がある．

そこで本研究では，粒子破砕性を有する鹿沼土およびボラ土を対象に，初期含水比 w_i を変化させた供試体について，定体積条件下で繰返し一面せん断試験を実施した．得られた一連の実験結果に基づき，w_i の違いが，せん断応力 τ ～ 水平変位関係 D_h，ピーク強度 τ_{max} および残留強度 τ_r，応力経路に及ぼす影響を検討した．

2. 実験方法および実験条件

(1) 実験に使用した試料

写真-1 および**写真-2** はそれぞれ本実験で使用す



写真-1　実験に用いた鹿沼土の拡大写真

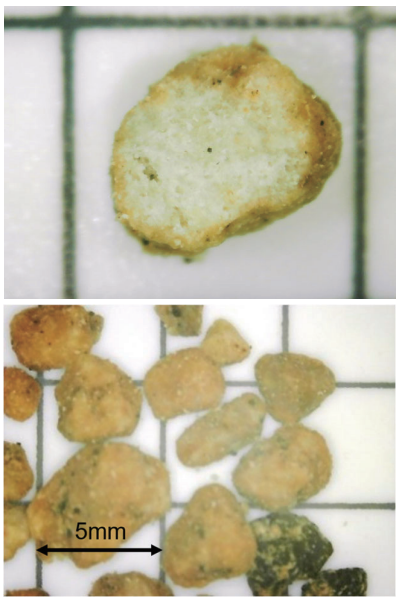


写真-2　実験に用いたボラ土の拡大写真

る鹿沼土およびボラ土の拡大写真を示している．一部の写真は粒子内部構造を確認するため，単一粒子を切断した断面写真である．土粒子の背景に示した格子の間隔は 5 mm である．鹿沼土は栃木県鹿沼地方で採掘される火山性の軽石であり，白色系の多孔質な粒子から構成されている．拡大写真より，粒子内部には層状の多孔質構造が確認され，多数の空隙が内部まで発達していることがわかった．このことから，鹿沼土は脆弱な粒子構造を有しており，せん断時に粒子破砕や骨格構造の崩壊が生じやすい可能性があると予想される．また，粒径の大きな粒子と細粒分が混在しており，淘汰が良くないことがわかる．一方で，ボラ土は鹿児島県や宮崎県に広く分布する火山噴出物であり，褐色系の粒子から構成されている．切断面の観察から，鹿沼土で確認されたような発達した内部空隙構造は明瞭には確認されず，粒子内部は比較的均質であった．また，ボラ土の一部に黒色の硬質な粒子も確認され，この粒子は単粒子強度が高く，粒子破砕が生じにくい可能性が考えられる．

図-1 は実験に用いた鹿沼土とボラ土の粒度分布を示している．なお，図中には代表的な実験として，後述の**表-1** および**表-2** に示す条件（鹿沼土：Case4(w_i = 31.5%)，ボラ土：Case5(w_i = 48.1%)）で実施した繰返し一面せん断試験後での粒度分布を併記している．鹿沼土はボラ土と比較して広い粒度分布を有していることが確認でき，拡大写真で確認された特徴と整合している．また，両方の試料で試験後に細粒分の増加が確認されていることから，繰返し一面せん断試験の過程で粒子破砕が生じたものと解釈すること

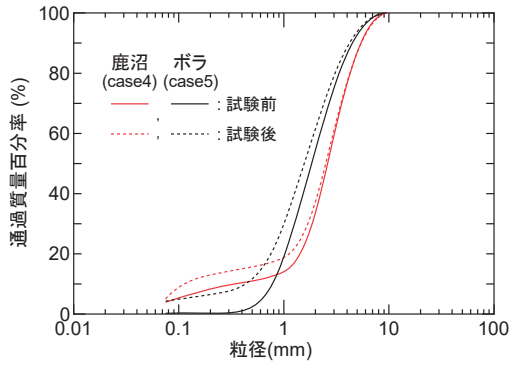


図-1　実験で用いた鹿沼土およびボラ土の粒度分布

ができ，本実験で使用する土試料は粒子破砕性を有することが確認された．

(2) 実験装置の概要

本研究で実施した繰返し一面せん断試験は，供試体のせん断方向を順次反転させることにより土に大変形を与えるものである．上下せん断箱を水平に移動することにより直接せん断する．測定項目はせん断力およびせん断変位，垂直力および垂直変位，鉛直ひずみであり，下部せん断箱に高剛性ロードセルを取り付け反力版側での垂直力の測定を可能にしている．せん断時には鉛直載荷用ダイレクトドライブモータで垂直変位を固定することによって，高精度の定体積せん断が可能である．また，繰り返しせん断を与える水平方向の載荷装置にもダイレクトドライブモータを採用することで，バックラッシュが極めて小さい繰返し載荷を実現している．

表-1　鹿沼土に対する試験および供試体の条件

Case	試験条件	垂直応力, σ_v (kN/m^2)	土粒子密度, ρ_s (g/cm^3)	初期含水比, w_i (%)	乾燥密度, ρ_d (g/cm^3)	初期間隙比 e_i	初期飽和度 S_{ri} (%)
1	定体積条件 両振幅で ±7mm	50.0	2.45	1.7	0.31	7.05	0.61
2				3.9	0.29	7.48	1.28
3				11.5	0.29	7.42	3.84
4				31.5	0.29	7.46	10.45
5				64.1	0.30	7.37	21.53
6				95.7	0.30	7.22	32.84
7				117.4	0.30	7.35	39.56
8				154.8	0.30	7.35	52.20

表-2　ボラ土に対する試験および供試体の条件

Case	試験条件	垂直応力, σ_v (kN/m^2)	土粒子密度, ρ_s (g/cm^3)	初期含水比, w_i (%)	乾燥密度, ρ_d (g/cm^3)	初期間隙比 e_i	初期飽和度 S_{ri} (%)
1	定体積条件 両振幅で ±7mm	50.0	2.51	1.1	0.61	3.13	0.91
2				16.5	0.61	3.15	13.13
3				20.8	0.61	3.12	16.77
4				41.2	0.60	3.20	32.30
5				48.1	0.60	3.19	37.77
6				66.2	0.59	3.28	50.62
7				85.1	0.61	3.15	67.74
8				102.9	0.61	3.15	82.02

(3) 実験条件および供試体作製方法

表-1 および**表-2** はそれぞれ鹿沼土とボラ土の実験に使用した供試体群の実験条件および状態量の一覧を示している．本研究では w_i の影響に着目するため，Case1 から Case8 の 8 ケースについて，w_i を変化させた供試体を作製した．なお，鹿沼土の自然含水比 $w_{n,K}$ は31%程度であり，ボラ土の自然含水比 $w_{n,B}$ は 48%程度である．本研究では各試料の自然含水比を基準として，乾燥側の土試料については粒子破砕が生じない温度に設定した炉乾燥機により，所定時間乾燥させて含水比を調整した．一方で，湿潤側の土試料については，土試料に所定量の水を加え，十分に攪拌した後に一定時間静置し，w_i が均一な土試料を準備した．ボラ土の最も高含水比条件である Case8 については，高含水比状態を再現するため，ボラ土を水中に浸した状態で約 1 分間脱気を行った土試料を用いて供試体を作製した．

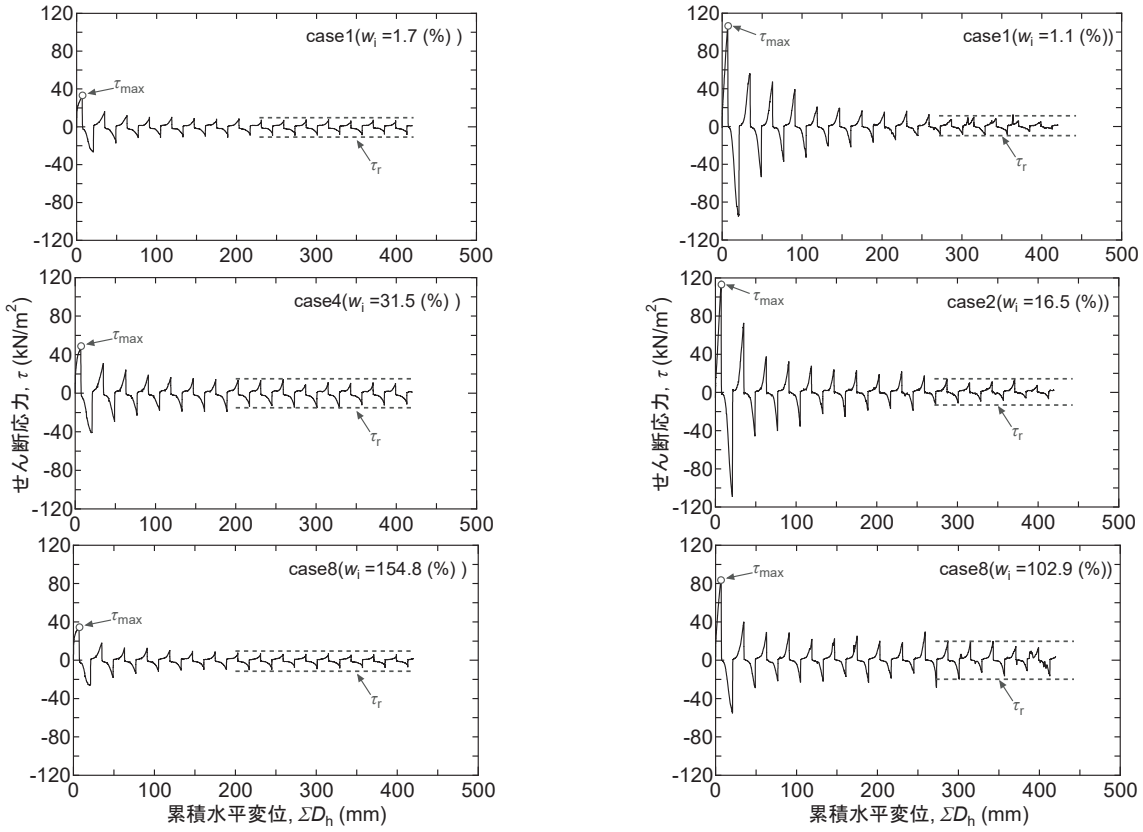
一面せん断試験の供試体は一辺 60 mm，高さ 40 mm の四角柱とし，各ケースの w_i に応じて所定の質量の試料を計量した後，三層に分けてせん断箱内に投入し，各層ごとに軽く締め固め，供試体高さが 40 mm となるよう作製した．垂直応力 σ_v = 50 kN/m^2 の条件で圧密を行った後の繰返しせん断では，せん断開始前のトップキャップの位置を固定した状態とし，供試体の体積変化は機械的には発生しない定体積条件とした．繰返しせん断時のせん断速度は 0.5 mm/min とし，水平変位 D_h は両振幅で±7 mm とした．また，繰返し回数は 15 回とし，せん断箱間隔は 2.0 mm とした．

3. 実験結果および考察

(1) せん断応力～累積水平変位量関係

図-2 は各試料の試験結果としてせん断応力 τ ～ 累積変位量 ΣD_h 関係を示している．なお，鹿沼土については Case1（w_i = 1.7%），Case4（w_i = 31.5%），Case8（w_i = 154.8%）を，ボラ土については Case1（w_i = 1.1%），Case2（w_i = 16.5%），Case8（w_i = 102.9%）を代表ケースとして示した．ここで，Case1 は各試料における最も乾燥側の条件，Case8 は最も湿潤側の条件である．また，鹿沼土の Case4 およびボラ土の Case2 は，各試料においてピーク強度 τ_{max} が最も大きく確認されたケースである．

図-2 より，鹿沼土およびボラ土のいずれにおいても，繰返しせん断の初期段階で τ_{max} に到達した後，τ は繰返し回数の増加とともに低下し，最終的に残留強度 τ_r に近づく傾向を示した．このことから，本実験で対象とした鹿沼土およびボラ土は，繰返しせん断に伴って明瞭なひずみ軟化挙動を示す材料であると解釈できる．このような強度低下挙動は，斜面崩壊時にすべり面近傍の土が大変形を受ける過程で，せん断抵抗が急速に低下し，崩壊土塊の移動性が高まる現象と対応する可能性がある．特に，軽石質土や火山灰質粗粒土では，粒子の多孔質性や低い粒子強度に起因して，せん断中に粒子破砕や骨格構造の再配列が生じやすいことが報告されており[4)～7)]，本実験で確認されたひずみ軟化挙動にも，これらの影響が含まれていると考えられる．w_i の違いに着目すると，鹿沼土では Case4 において τ_{max} が最も大きく，



a) 鹿沼土　　b) ボラ土

図-2　鹿沼土およびボラ土の繰返しせん断中のτ~ ΣD_h関係

乾燥側の Case1 および湿潤側の Case8 ではτ_{max}が小さくなった．乾燥側では，粒子内の水分が少ないために軽石粒子が脆性的に破砕しやすく，せん断初期から粒子破砕および骨格構造の崩壊が進行したことで，十分なせん断抵抗が発揮されにくかったものと考えられる．一方，湿潤側では，粒子内および粒子間に保持された水分の増加により，定体積条件下でのせん断に伴う有効応力の低下が生じやすくなり，τ_{max}が低下したと考えられる．これに対して，自然含水比付近に相当する Case4 では，乾燥側で顕著となる脆性的な粒子破砕と，湿潤側で顕著となる有効応力低下の影響が相対的に小さく，最も大きなτ_{max}を示したものと推察される．

一方，ボラ土においても，w_iの違いによってτ_{max}は変化し，Case2 で最も大きなτ_{max}を示した．ただし，鹿沼土と比較すると，全体的にτ_{max}およびτ_rはいずれも大きい傾向が認められた．これは，ボラ土が鹿沼土よりも粒子内部の空隙構造が発達しておらず，比較的緻密かつ硬質な粒子から構成されるため，せん断中の粒子破砕や骨格構造の崩壊が生じにくかったことに起因すると考えられる．また，τ_rに着目すると，τ_{max}と比較してw_iによる差は小さくなる傾向を示した．これは，繰返しせん断の進行に伴い，初期の粒子配列や含水状態の影響が徐々に失われ，破砕後の粒子群によって形成される残留的なせん断抵抗に移行したためと考えられる．

(2)　τ~ σ関係（応力経路）

図-3a)，b)は，それぞれ鹿沼土およびボラ土の代表的な試験結果として，繰返しせん断中におけるτ~ σ関係を示している．なお，τ_{max}が異なるため，τ，σの軸範囲が異なっている点に留意が必要である．本研究では，繰返しせん断を定体積条件下で実施しているため，せん断中に供試体が示す収縮または膨張傾向は，σの変化として現れる．すなわち，せん断に伴って供試体が収縮しようとする場合には，定体積条件を維持するためにσが低下し，非排水せん断試験における有効応力低下に類似した挙動として解釈できる．したがって，**図-3** のストレスパスは，繰返しせん断中の強度低下過程を，有効応力変化の観点から評価する上で重要である．鹿沼土のストレスパスに着目すると，Case1 および Case8 では，Case4 と比較してせん断初期から σ が低下する傾向が明瞭であった．最も乾燥側の Case1 では，含水比が小さいため粒子内部の水分による緩衝効果が小さく，多

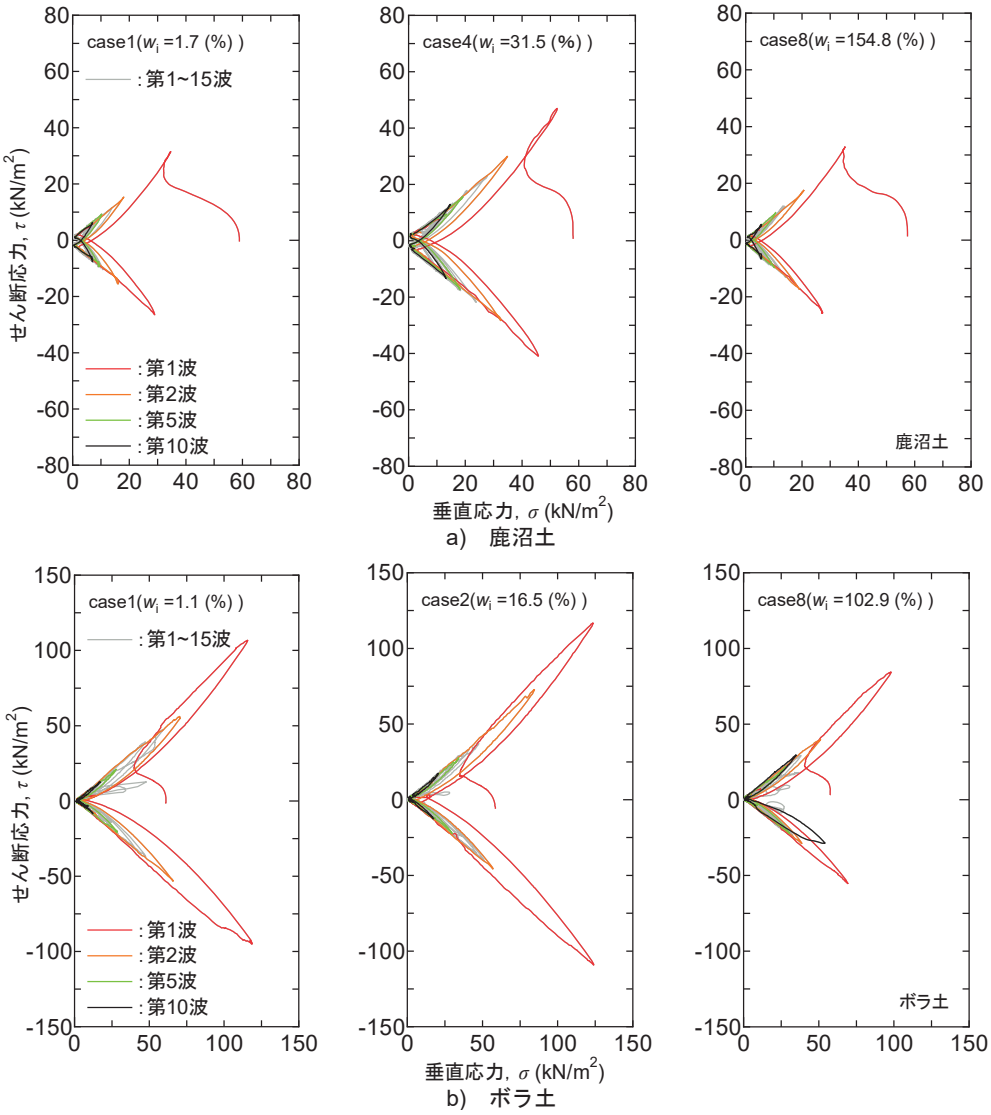


図-3　鹿沼土およびボラ土の応力経路（ストレスパス）

孔質で脆弱な粒子がせん断に伴って破砕しやすい状態にあったと考えられる．その結果，粒子破砕および骨格構造の再配列による収縮傾向が卓越し，定体積条件下でσの低下として現れたものと解釈できる．軽石質土や火山灰質粗粒土では，粒子破砕が圧縮性，せん断強度および限界状態に影響を及ぼすことが報告されており[4)~7)]，鹿沼土の乾燥側で確認されたσの低下は，このような破砕性材料に特有の骨格構造の不安定化を反映していると考えられる．

一方，最も湿潤側の Case8 においても，せん断初期からσの低下が確認された．この場合には，粒子内部および粒子間に保持された水分が多く，せん断時の収縮傾向が有効応力低下として現れやすかったことが要因と考えられる．特に，降下軽石層では多孔質構造や風化に伴う細粒化により水分を保持しやすい場合があり，高含水比または高飽和度の領域が崩壊に関与した可能性も指摘されている[8)~10)]．したがって，鹿沼土の湿潤側でみられたσの低下は，高含水状態にある軽石質土が繰返しせん断を受けた際に，有効応力を低下させやすいことを示唆している．また，第 2 波以降ではτおよびσの到達範囲が縮小し，第 10 波ではストレスパスが原点近傍を往復するような形状を示した．これは繰返しせん断に伴って有効応力が低下し，せん断抵抗が小さくなった状態で変形が継続したことを示しており，サイクリックモビリティ[11)]に類似した挙動が発生したと推定できる．

これに対して，ボラ土での Case1，Case2 では，第 2 波のσのピーク値がせん断初期のσよりも大きくなり，せん断初期においても比較的大きなせん断抵抗を発揮した．これはボラ土が鹿沼土よりも粒子内部の空隙が少なく，粒子構造が比較的緻密であるため，乾燥状態においても粒子破砕や骨格構造の崩壊が生

じにくかったためと考えられる．また，湿潤側のCase8においても，鹿沼土ほど顕著なσの低下は確認されなかった．

図-4 は，試料間における w_i の違いに対する強度の変化挙動を比較するため，w_i を各試料の τ_{max} が最大となる含水比 w_p で正規化した値 w_i / w_p と，τ_{max} を各試料の最大ピーク強度 $(\tau_{max})_p$ で正規化した値 $\tau_{max} / (\tau_{max})_p$ の関係を示している．鹿沼土では，$w_i / w_p = 1$ までは $\tau_{max} / (\tau_{max})_p$ が急激に増加しており，乾燥側において w_i の変化が強度増加に大きく影響していることがわかる．これは，乾燥状態では多孔質で脆弱な粒子がせん断に伴って破砕しやすく，骨格構造の崩壊や再配列が生じやすいため，十分なせん断抵抗が発揮されにくかったことによると考えられる．一方，$w_i / w_p = 1$ を超える湿潤側では，w_i の増加に伴って $\tau_{max} / (\tau_{max})_p$ は低下するものの，その低下傾向はボラ土と比較して緩やかであった．鹿沼土は発達した多孔質構造と大きな間隙比を有するため，増加した水分の一部が粒子内部や大きな間隙内に保持され，w_i の増加が直ちに粒子間水の増加や高飽和化として現れにくかった可能性がある．一方，ボラ土では，乾燥側から $w_i / w_p = 1$ に至るまでの $\tau_{max} / (\tau_{max})_p$ の増加は鹿沼土よりも緩やかであったが，$w_i / w_p = 1$ を超える湿潤側では，w_i の増加に伴って $\tau_{max} / (\tau_{max})_p$ が比較的急激に低下した．ボラ土は鹿沼土と比較して粒子内部の空隙構造が発達しておらず，間隙比も小さいことから，w_i の増加が粒子間水の増加や飽和度の上昇として現れやすいと考えられる．ただし，w_i の増加が粒子間水の増加や飽和度の上昇にどの程度対応するかは，土粒子の内部構造や間隙比に依存すると考えられる．

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる．

- 鹿沼土およびボラ土はいずれも，繰返しせん断の初期段階でピーク強度 τ_{max} に到達した後，繰返し回数の増加に伴ってせん断応力が低下し，残留強度 τ_r に近づくひずみ軟化挙動を示した．
- 鹿沼土では，乾燥側および湿潤側条件において定体積せん断中の垂直応力σの低下が顕著であり，粒子破砕や骨格構造の再配列，ならびに高含水状態に伴う有効応力低下が強度低下に関与した可能性が示された．一方，ボラ土では鹿沼土と比較して τ_{max} および τ_r が大きく，σの低下も相対的に小さかった．

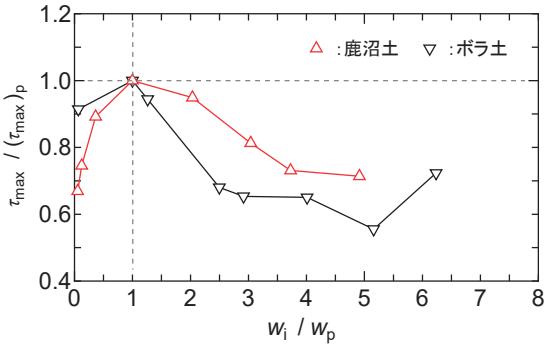


図-4　$w_i / w_p \sim \tau_{max} / (\tau_{max})_p$ 関係

- 以上のことから，粒子構造とそれに起因する破砕性の違いにより，初期含水比が繰返しせん断特性に及ぼす影響が異なることが示唆された．

現在，定量的な粒子破砕量と初期含水比の関係，残留状態に至るまでの繰り返し回数に着目したデータ整理と追加実験を進めている．今後はこれらの結果から，より定量的な分析を進める予定である．

参考文献

1) Kawamura, S. et al.: Slope failures/landslides over a wide area in the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake, *Soils and Foundations*, Vol. 59, No. 6, pp. 2376–2395, 2019.
2) Kawajiri, S. et al.: Geotechnical characteristics and seismic stability evaluation of pumice-fall deposits soil on collapse slope by the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake, *Natural Hazards*, Vol. 120, pp. 5233–5255, 2024.
3) 杉原佳苗ら：火山灰質粗粒土の単調せん断並びに繰返しせん断時における粒子破砕挙動の観察，土木学会論文集，Vol. 81, No. 13，24-13497，2025.
4) Pender, M. J. et al.: Geotechnical properties of a pumice sand, *Soils and Foundations*, Vol. 46, No. 1, pp. 69–81, 2006.
5) 三浦清一ら：北海道火山性粗粒土の静的および動的力学挙動と粒子破砕，土木学会論文集，No. 547/III-36, pp. 159-170, 1996.
6) Sato, I. et al. : Particle crushing and critical state of volcanic pumice – 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake, *Soils and Foundations*, Vol. 64, No. 3, 101465, 2024.
7) Bandini, V. and Coop, M. R.: The influence of particle breakage on the location of the critical state line of sands, *Soils and Foundations*, Vol. 51, No. 4, pp. 591–600, 2011.
8) Li, R. et al.: Controlling role of Ta-d pumice on the coseismic landslides triggered by 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake, *Landslides*, Vol. 17, pp. 1233–1250, 2020.
9) Aoki, T. et al.: Hydraulic properties of and pressure-head dynamics in thick pyroclastic-fall deposits in Atsuma, Northern Japan: implications for the role of water in shallow landslides induced by the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake, *Landslides*, Vol. 19, pp. 1813–1824, 2022.
10) Kameda, J.: Mineralogical and physico-chemical properties of halloysite-bearing slip surface material from a landslide during the 2018 Eastern Iburi earthquake, Hokkaido, *Progress in Earth and Planetary Science*, Vol. 8, 37, 2021.
11) 岡田健杜，後藤聡：2018 年北海道胆振東部地震における樽前 d 降下火砕堆積物の定体積繰返し一面せん断特性，第 10 回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp. 225-230，2020.

（2026. 5. 29　受付）