

繰返し一面せん断試験による風化砂岩の不連続面の変形特性の評価

関口 陽^{1*}・岡田 哲実¹

¹一般財団法人電力中央研究所 地球工学研究所（〒271-1194 千葉県我孫子市我孫子1646）

*E-mail: absekigu@criepi.denken.or.jp

Key Words : discontinuity, cyclic deformation properties, box shear test, sandstone

1. はじめに

不連続性岩盤の繰返し変形特性を求める試験方法は、未だ確立されていない。現状では動的解析に用いるヤング率は均質な地盤と同様に弾性波速度から求め、履歴減衰率は慣用値（2～5%）を用いている。また、ひずみレベルに伴うこれらの非線形性は考慮せず、線形と仮定している。このように変形特性を設定しておけば、地盤内に発生する応力を実際よりも大きく、すなわち保守的に評価できるからである。しかし、東北地方太平洋沖地震以降、設計用地震動レベルが増大しており、保守的ではなく、現実的な岩盤の応答を評価することが求められている。不連続性岩盤においても、繰返し変形特性を適切に評価できる試験方法が必要である。このような観点から、直径約40cmの大型供試体を用いた原位置岩盤三軸試験により、繰返し三軸試験を行う試みがなされている¹⁾。ただし、原位置試験には時間とコストが必要であるため、室内試験により不連続性岩盤の繰返し変形特性を評価できることが望ましい。不連続性岩盤は岩石と不連続面から構成されており、岩石の繰返し三軸試験方法は確立されている。そこで本研究では、不連続面の繰返し変形特性を得ることを目的とし、不連続面を対象とした繰返し一面せん断試験を実施した。

2. 繰返し一面せん断試験装置

岩盤不連続面の単調载荷の一面せん断試験は、既に地盤工学会で標準化されているが²⁾、この試験は不連続面の強度特性のみを求めることを意図したものである。よって、繰返し一面せん断試験の特徴は、繰返し载荷が可能であり、かつ変形特性をより正確に計測することである。用いた試験装置を図-1に示す。試験装置は両振りの繰返し载荷を行うために、せん断力の载荷軸はせん断箱まで全て剛結されている。垂直力、せん断力ともに油圧サーボによって荷重および変位制御を切り替えて载荷することが可能である。せん断箱は上箱が固定箱で、下箱が可動箱である。リニアガイドを取り付けたスライドベースにより、せん断方向に平行かつ直線的に移動できる構造となっている。上箱は昇降クロスヘッドを介して垂直力载荷装置に剛結されている。変位計はせん断箱の上面の四隅で垂直変位を、側面の左右4箇所でせん断変位

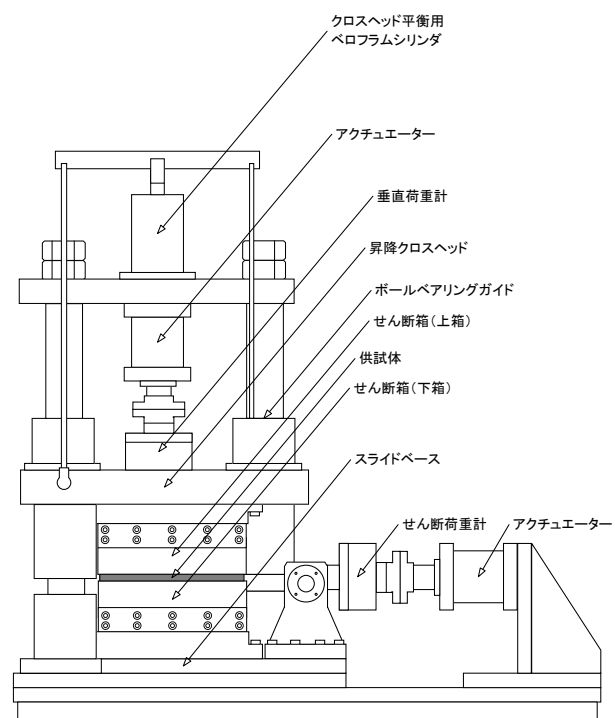


図-1 一面せん断試験装置

を計測した．せん断力の载荷は変位制御で行い，微小変位から大変位まで载荷できるように異なる分解能を持つ変位計を2台切り替えてフィードバック制御した．せん断箱の内寸はそれぞれW200mm×D120mm×H60mmであり，不連続面をせん断面に収めるために，せん断箱の隙間を11mmとした．

3. 供試体および試験方法

(1) 供試体

表-1に使用した風化砂岩（C_L級）の基本物性を示す．供試体のせん断面の位置を決めるために，医療用ヘリカルX線CTスキャナー（東芝製Aquilion64）を使用し，風化砂岩の不連続面の3次元形態を観察した．なお，X線CTスキャナーの空間分解能は約0.35mmである．その一例を図-2に示す．天然不連続面供試体は供試体中心部と下部に不連続面があるが，中心部の方が不連続面の幅が狭いため密着している可能性が高いと考え，この部分を用いて試験を行うこととした．不連続面は境界面に空隙（空気）が多く分布することから密度は小さく，CT画像では黒く表示される．また，空隙に比べ密度の大きい砂岩部ではCT画像では灰色で表示される．

(2) 試験方法

供試体としてコアサンプリング試料の不連続面のない部分をカッターで人工的に切断して作製した人工切断面，天然の不連続面，および不連続面のないインタクト部の三種類で繰返し一面せん断試験を実施した（図-3）．

表-1 使用した砂岩の物性

項目	値
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.65
含水比 ω (%)	8.01
湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	2.17
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	2.01
間隙比 e	0.32

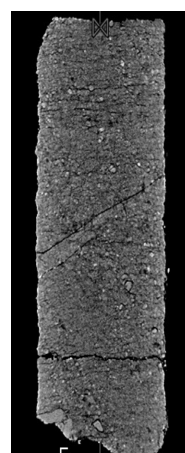


図-2 不連続面供試体の CT 画像

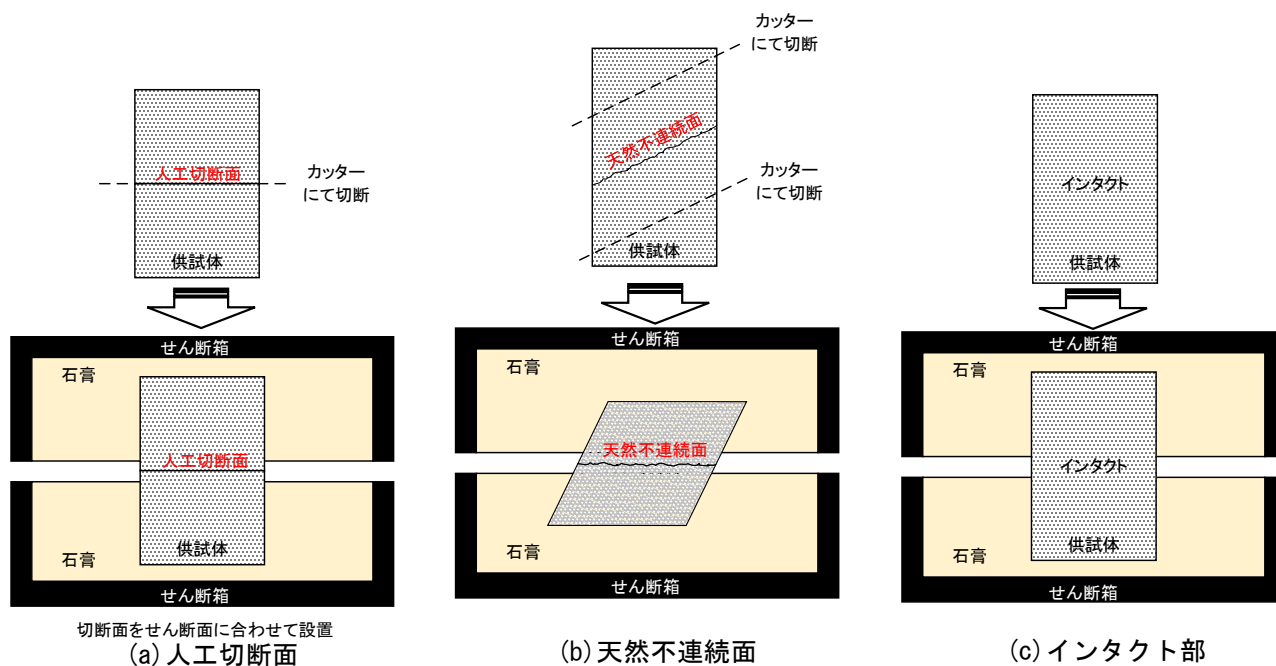


図-3 供試体の設置概要

表-2 一面せん断試験の载荷条件

No.	供試体	垂直力 (MPa)	载荷手順	载荷パターン		周波数 (Hz)
				垂直力载荷 の繰返し	せん断力载荷 の繰返し	
1	人工切断面	0.2	繰返し载荷（せん断）	-	変位制御 ±0.002mm から段階的に倍増 して最大で±2.56mm まで载荷	0.01→ 0.1→ 1
2	天然不連続面					
3	人工切断面	0.2→0.8	繰返し载荷（垂直）→ 繰返し载荷（せん断）	応力制御 ±0.01MPa から段階的に倍増 して±0.08MPa まで载荷		
4	天然不連続面					
5	インタクト	0.2→0.8	繰返し载荷（垂直）	応力制御 ±0.01MPa から段階的に倍増 して±0.08MPa まで载荷	—	

人工切断面供試体は図-3(a)に示すように加工し、せん断箱内に設置した。天然の不連続面のコアサンプルリング試料は、不連続面のかみ合わせを乱さないように、ラップにて固定した状態で図-3(b)に示すように切断し、不連続面をせん断箱の隙間に収まるよう設置した。石膏にて供試体を固定したせん断箱を一面せん断試験装置のスライドベースの上に置き、载荷軸と結合した。

繰返し試験は、垂直応力 0.2MPa および 0.8MPa とし、0.01Hz, 0.1Hz, 1Hz の正弦波を 11 波で両振り载荷した。表-2 に試験の载荷条件を示す。No.1 と No.2 は垂直力 0.2MPa で一定に制御し、せん断力を変位制御により段階的に増加させ、繰返し载荷を実施した。No.3 と No.4 は垂直力 0.2MPa の状態から、垂直応力を応力制御により段階的に増加させ、繰返し载荷を行った。次に、垂直力を 0.8MPa に上げ、0.2MPa の時と同様に垂直応力を段階的に増加させる繰返し载荷を行った。さらにその後、No.1,2 の条件と同様に、せん断力の繰返し载荷を行った。No.5 のインタクトな供試体については、No.3,4 と同様の垂直力の繰返し载荷のみ実施した。なお、No.3 と No.4 において、垂直力の繰返し载荷からせん断力の繰返し载荷を行う際に、応力制御から変位制御に切り替える必要があるため、一旦垂直応力を除荷したのち、再度、垂直応力を载荷して試験を行った。

4. 試験結果

図-4 に垂直力载荷の試験結果、図-5 にせん断力载荷の試験結果の一例を示す。垂直力の繰返し载荷では一定のループを描かず変位が進行していく傾向が見られるが、人工切断面よりも天然不連続面の方が残留変位量は大きかった。また、せん断力の繰返し载荷では、一定のループを描き、全 11 波の波形がほぼ一致している結果であった。人工切断面と天然不連続面を比較すると、垂直力 0.2MPa の最大振幅時を除き、ループは概ね類似した傾向が得られた。垂直力 0.8MPa はループの傾きに若干違いが見られるが、最大振幅時では概ね類似していた。

繰返し载荷の 10 波目のループから垂直剛性 K_n 、せん断剛性 K_s 、履歴減衰率 h と等価せん断変位 dh との関係求めた（図-6）。なお、試験で得られる垂直変位は、不連続面そのものの変位量以外に供試体のインタクト部の変位量も含まれる。垂直剛性の算出には No.5 で実施したインタクト部の試験で得られた変位量を差し引くことで不連続面の垂直剛性を算出した。せん断変位についてもインタクト部の変位も含まれるが、変位の多くは不連続面で生じると思われるため、垂直変位のようなキャンセルは行わなかった。

図-6 の上段より、一面せん断試験の垂直応力の繰返し载荷では、不連続面が離れないように、垂直応力の振幅は、垂直応力以下にする必要があるため、垂直変位が微小変位のみに限定されてしまうが、結果的に人工切断面と天然不連続面では、垂直力 0.2MPa では天然不連続面の方が K_n が小さな値を示したが、垂直力 0.8MPa では両者に大きな差は見られなかった。また、初期の垂直力が大きいほど K_n は増加するが、 h には初期の垂直力の影響は見られなかった。周波数の影響については、顕著な周波数依存性は見られなかった。

図-6 の下段より、せん断力の繰返し载荷から、人工切断面と天然不連続面では、人工切断面の方が K_s 、 h

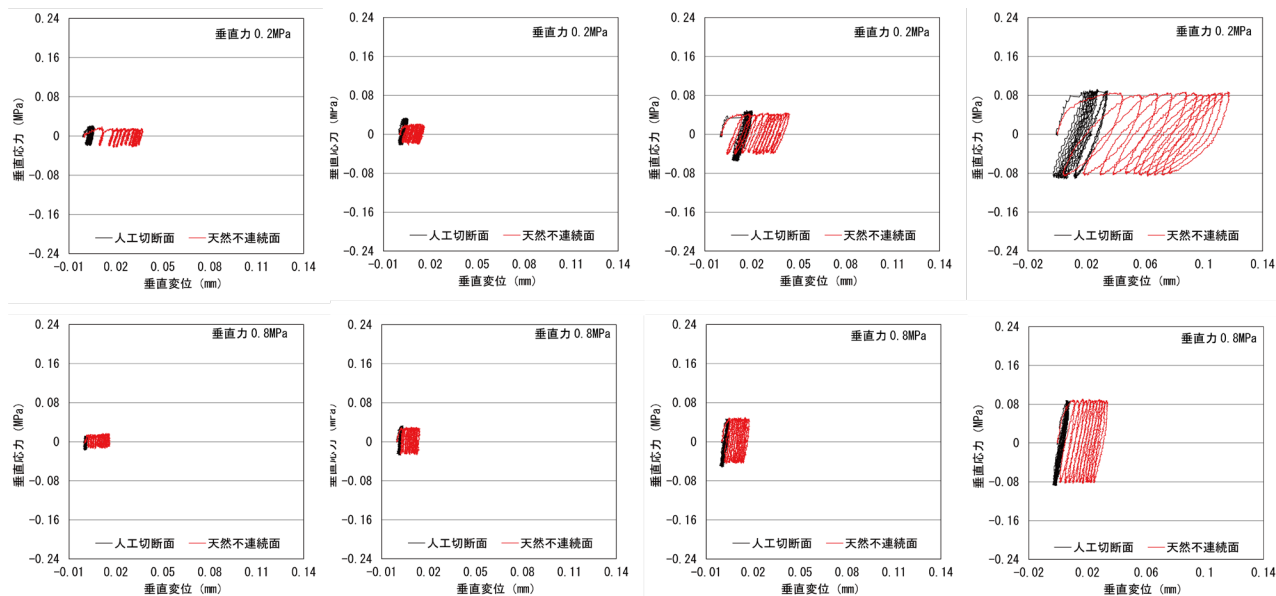


図-4 垂直力载荷の試験結果（周波数 0.01Hz）

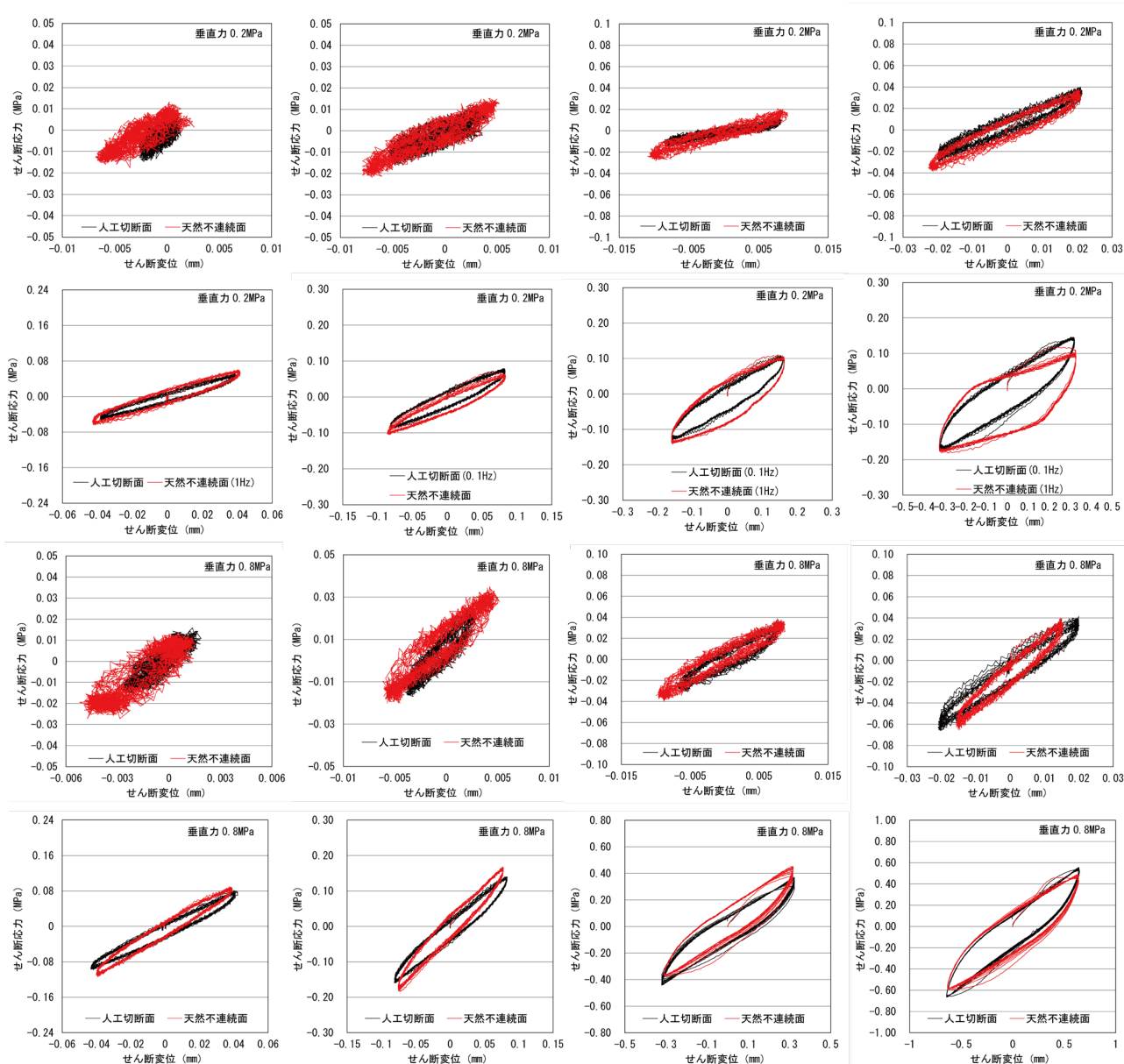


図-5 せん断力载荷の試験結果（周波数 0.01Hz）

ともに若干小さな値を示したが、概ね類似のせん断変位依存性の傾向を示すことがわかった。また、垂直力 0.2MPa と 0.8MPa の結果を比較すると、若干 0.8MPa の方が K_s が大きく、 h が小さくなる傾向を示した。また、両試験結果ともに周波数を変えて何度も繰返して試験を行ったものであるが、再現性が高く、今回実験を行った 1~0.01Hz の範囲で顕著な周波数依存性は見られなかった。微小変位レベルにおける不連続面の減衰率は約 10%程度であることがわかった。既往の知見では³⁾、風化石灰岩不連続面を用いた単調載荷の一面せん断試験を行った結果、せん断剛性は垂直応力の影響が著しいとあるが、本試験では垂直応力によってせん断剛性が若干大きくなる程度であった。この原因としては、石灰岩に比べ今回実験を行った砂岩粒子が粗粒で、初期の空隙が小さい可能性があるが詳細は不明であり、今後の検討課題である。また、測定方法の課題として、変位をせん断箱の外側で計測しているため様々なエラーを含んだ値である、より正確な計測を行うために不連続面を直接測るような工夫が必要であり、今後は測定方法を改善して試験を行う予定である。

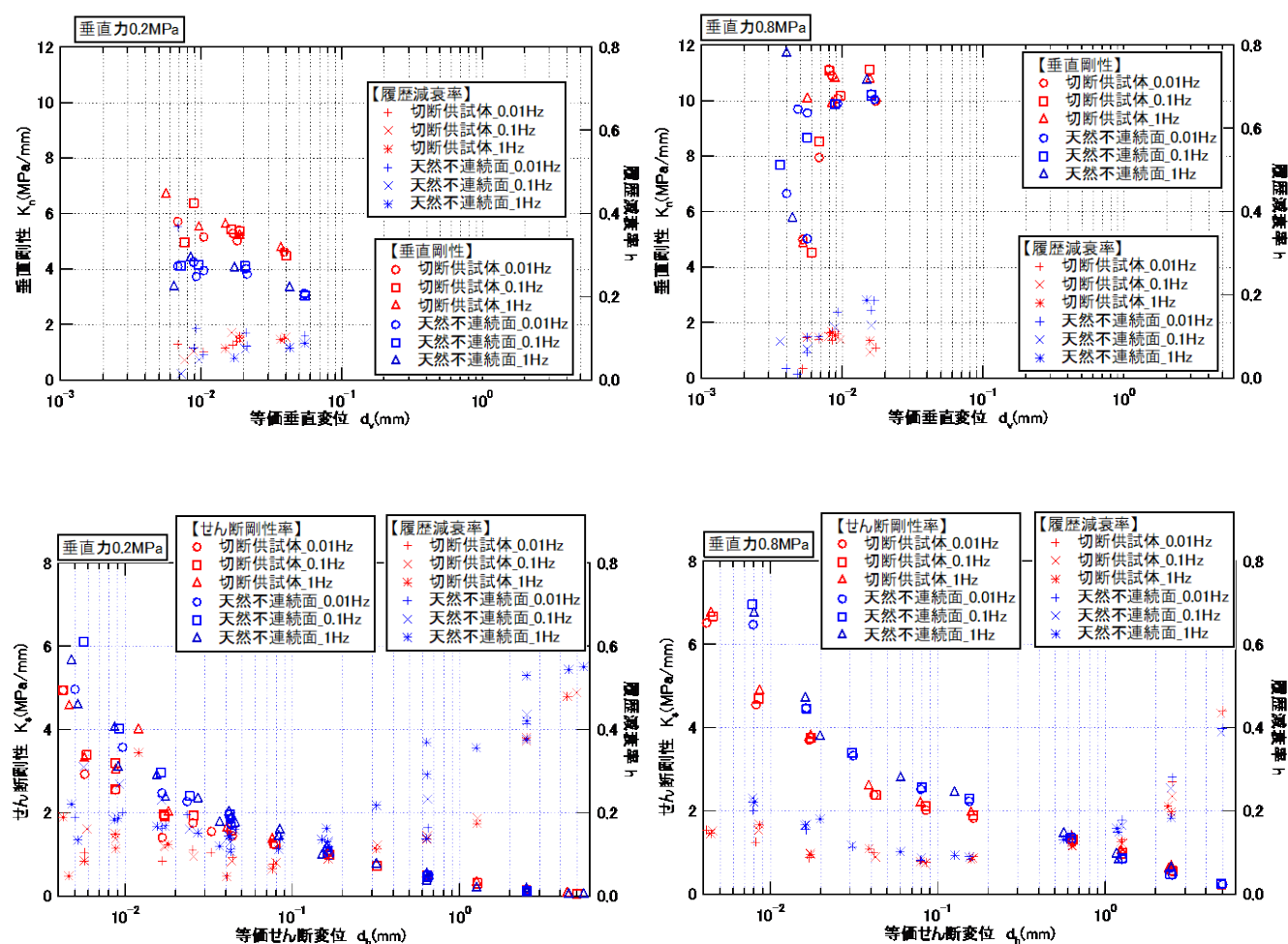


図-6 岩盤不連続面の繰返し変形特性

5. おわりに

- (1) 垂直力およびせん断力の繰返し载荷が可能な不連続面の一面せん断試験装置を用いて、不連続面の繰返し変形特性の変位依存性を得ることができた。
- (2) 繰返し载荷試験 1~0.01Hz の範囲で垂直剛性、せん断剛性ともに顕著な周波数依存性は見られなかった。
- (3) せん断剛性は天然不連続面の方が大きく、垂直剛性では切断供試体の方が大きい結果となり、繰返し変形特性が異なることがわかった。
- (4) 不連続面の垂直剛性については、既往の知見と異なり、顕著な垂直圧依存性が見られなかった。詳細は不明で今後の検討課題ではあるが、変位の測定方法については改善の余地があり、より正確なデータ取得を目指したい。今後は岩と不連続面の室内試験の結果を用いて、原位置岩盤三軸試験のシミュレーションを行う予定である。

参考文献

- 1) 岡田哲実, 納谷朋広, 中村大史: 原位置繰返し三軸試験装置の開発と風化砂岩を対象とした試験法の実証, 第 44 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 2016.
- 2) 地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説, 岩盤不連続面の一面せん断試験方法 (JGS2541-2008), pp.912-944
- 3) Bandis, S.C., Lumsden, A.C., Barton, N.R.: Fundamentals of Rock Joint Deformation, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 20, No. 6, pp. 246~268, 1983.
- 4) 岡田哲実, 納谷朋広: 人工的に作製した規則的な凹凸を有する岩盤不連続面の繰返し一面せん断試験, 第 43 回地盤工学研究発表会, 2008, No. 243, pp. 485-486