

不連続性岩盤を模擬した金属六角棒積層 斜面模型の遠心力载荷加振実験 (2) — 模型材料の力学試験 —

岡田 哲実^{1*}・納谷 朋広²

¹一般財団法人 電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

²株式会社 ダイヤコンサルタント 地質解析事業部 (〒331-0811 さいたま市北区吉野町2-272-3)

*E-mail: t-okada@criepi.denken.or.jp

本研究では、不連続性岩盤の地震時挙動を明らかにするため、不連続性岩盤の模型として、金属六角棒を積み上げた斜面模型の遠心力载荷加振実験を行うとともに、様々な解析手法を用いてその解釈やシミュレーションを実施する。本論文では、連続体解析および不連続体解析を行うため、六角棒を積み上げた供試体の三軸試験および六角棒単体の一面せん断試験の結果を基に、各解析の共通のパラメータとその根拠を提示した。また、今後の実岩盤への適用を想定し、各パラメータの寸法効果に関する実験を行った。

Key Words : rock mass, discontinuity, mechanical property, dynamic characteristics, rock slope

1. はじめに

原子力発電所周辺の岩盤斜面の耐震設計では、等価線形化法に基づく動的FEM解析から得られた応力状態を用いて、すべり安全率評価が行われているが¹⁾、不連続性岩盤の地震時挙動については手法の適用性を含め未だ不明な点が多い。そこで本研究では、基礎的な観点からこれらの問題を検討するため、不連続性岩盤の模型として、金属六角棒を積み上げた斜面模型の遠心力载荷加振実験を行うとともに、様々な解析手法を用いてその解釈やシミュレーションを実施する。なお、本研究は、土木学会岩盤力学委員会岩盤動力学に関する研究小委員会（第3期，期間 2019 年 6 月～2022 年 3 月：<http://rock-jsce.org/index.php?FrontPage>）の実験・シミュレーションWGの活動として実施するものである。

これまで斜面模型材料として用いたステンレス製の六角棒（六角の短辺6mm，棒の長さ80mm）の各種の材料試験を行ってきた^{2,3)}。今回、上記WGの取組みとして、等価連続体解析と不連続体解析でそれぞれ1つの共通の解析パラメータを設定することになった²⁾。本論文では、その解析パラメータを示し、根拠となった実験結果²⁾のみを再掲して考察を加えた。また、その実験結果の解釈を深めるため、新たに実施した寸法効果の実験結果を示す。

2. 共通の解析パラメータ

等価連続体解析と不連続体解析のそれぞれに対して表-1、表-2に示す解析パラメータを設定した。密度についてはステンレスの慣用値である7.83～8.00g/cm³に基づき、等価連続体では不連続面を含む密度であることを考慮して最小値7.83 g/cm³を使用し、不連続体の母岩（ステンレス）では最大値8.00g/cm³を用いた。両解析ともに、強度特性については静的試験（単調载荷試験）の結果に、変形特性については動的試験（繰返し载荷試験）の結果に基づいている。また、材料試験から決まらないレーリ一減衰については、原則用いないこととし、計算が困難な場合のみに限り、できるだけ小さな剛性比例減衰のみを用いることとした。

等価連続体の解析に用いる強度特性は、図-1に示す六角棒により構成されるマス（横10本，縦31本）に対して実施した三軸試験²⁾から決定した。試験結果から得られた最大せん断応力発揮時のモール円と、明確な弱面となる60°での破壊規準線を図-2に示す。なお、0.0125, 0.025, 0.05, 0.1, 0.4MPaの5つの拘束圧で実験を行ったが、0.05MPaの結果についてはピーク強度発揮時に荷重が増減し不安定であったため、データから棄却した。60°の弱面の粘着力cはほぼゼロで、摩擦角φは36°であった。弱面おける六角棒の乗り上げ角度が30°である

ため、材料摩擦の ϕ は 6° 程度と考えることができる。この値は後述の境界面の ϕ と比較するとかなり小さいが、弱面以外の変形の自由度や個々のかみ合いの誤差があることに起因すると思われる。応力とひずみの関係より、高拘束圧の条件を除き、最大せん断応力を示した後、軸ひずみが数%の範囲ではせん断応力は低下しなかったため²⁾、残留強度はピーク強度に等しいと判断として解析に用いることとした。

試験結果から得られた初期ヤング率 E_0 と拘束圧 σ_c の関係を図-3に示す。ここで、 E_0 とは軸ひずみ 1×10^4 以下

表-1 等価連続体の解析パラメータ

解析パラメータ			単位	値
密度			g/cm ³	783
強度特性	ピーク強度	c	MPa	0.003
		ϕ	°	36
	残留強度			=ピーク強度
	変形特性	ポアソン比	ν	—
初期ヤング率		E_0	MPa	共通化しないが、実験との対応を表示
ヤング率		E	MPa	
減衰乗数		h	—	
レーリー減衰			—	原則なし ^{※1}

※1：必要不可欠の場合：できるだけ小さな剛性比例減衰のみ。

表-2 不連続体の解析パラメータ

解析パラメータ				単位	値	
母岩 (ステン レス)	密度			g/cm ³	8.00	
	強度				非破壊	
	ヤング率		MPa	200000		
	ポアソン比		—	0.3		
不連 続面	強度 特性	ピーク強度	c	MPa	0.02	
			φ	°	16	
		残留強度			＝ピーク強度	
	変形 特性	垂直剛性	K _n	MPa/m	共通化しない が、実験との対 応を表示	
		せん断剛性	K _s	MPa/m		
		各減衰乗数	h	—		
レーリー減衰					原則なし※1	

※1：必要不可欠の場合：できるだけ小さな剛性比例減衰のみ。

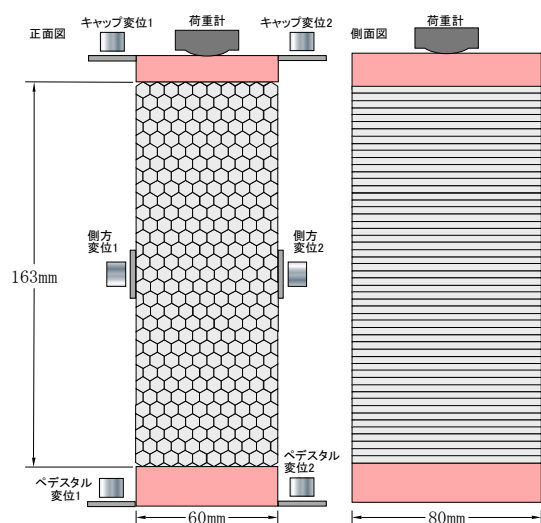


図-1 六角棒積層体の三軸試験

の実験データを基に双曲線を用いて推定した軸ひずみ 1×10^6 のヤング率である。これより、六角棒積層体の供試体の微小ひずみレベルのヤング率は強い拘束圧依存性を持つことがわかる。また、 E_0 の値は、今回の拘束圧範囲では、土質材料と比較してやや大きく、せいぜい軟岩程度であった。正規化したヤング率 E/E_0 、履歴減衰率 h と片振幅軸ひずみ ε_a の関係を図-4に示す。これより、六角棒積層体の供試体の E や h はひずみレベル依存性を示す。ただし、 E/E_0 、 h と軸ひずみの関係には拘束圧依存性は見られない。これらの特徴から、不連続性岩盤に見立てた今回の六角棒積層体の材料は、土質材料と類似の特性があることがわかる。軸ひずみ 1×10^4 で h の値が約15%というのは、豊浦砂の h^4 と比較するとかなり大きい。表-1に示すように、これらの変形特性については解析パラメータとして共通化しないが、解析で設定した値と実験結果との関係を論文中で明示することとした。ポアソン比については、三軸試験結果よりひずみレベル依存性

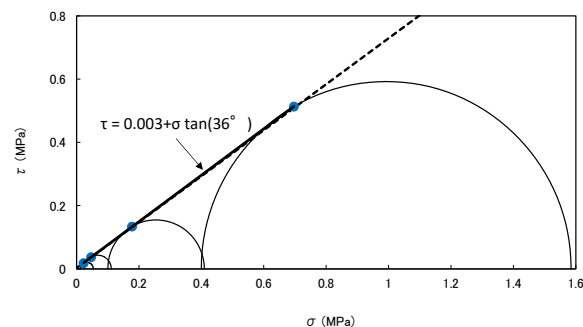


図-2 破壊時モール円

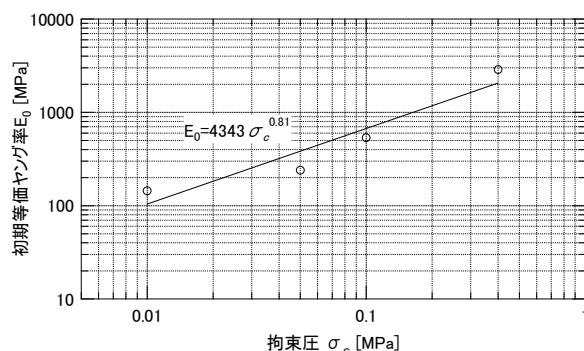


図-3 初期等価ヤング率と拘束圧の関係

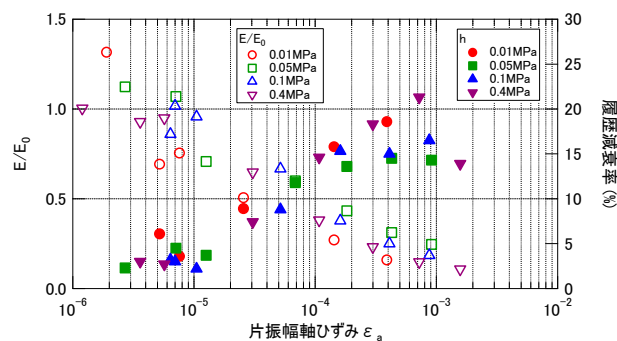


図-4 ヤング率、履歴減衰率と軸ひずみの関係

を示し²⁾、微小変形時は0に限りなく近く、せん断の進行に伴い六角棒間の隙間が開くことにより0.5を超えるポアソン比が計測されたが、等価連続体力学では、この関係を表現することが困難であった。そこで不連続性岩盤として一般的に用いられるポアソン比が0.2~0.3程度であることを考慮して、今回は金属材料自体のポアソン比の慣用値である0.3を用いることとした。ただし、この仮定については今後再検討する必要があると考えている。

不連続体の解析に用いる母岩（ステンレス）のヤング率、ポアソン比は慣用値を用いた。不連続面の強度特性は、図-5に示す一対の六角棒の一面せん断軸試験²⁾から決定した。試験結果から破壊時のせん断応力と垂直応力の関係を図-6に示す。見かけ上の粘着力 c があるが、解析パラメータとしてはそのまま用いることとした。境界平面の ϕ は 16° であり、先の三軸試験の材料摩擦の 6° と比較すると大きい、別途実施した傾斜実験の結果²⁾とは概ね整合している。

試験結果から得られた垂直応力と垂直変位の関係を図-7に示す。この関係については、図-5に示すように六角

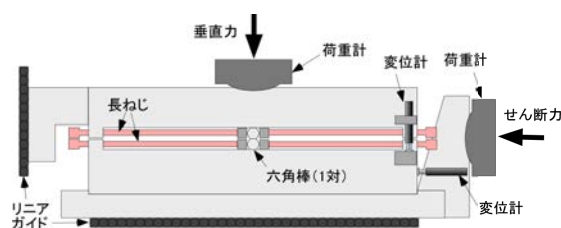


図-5 六角棒単体の一面せん断試験

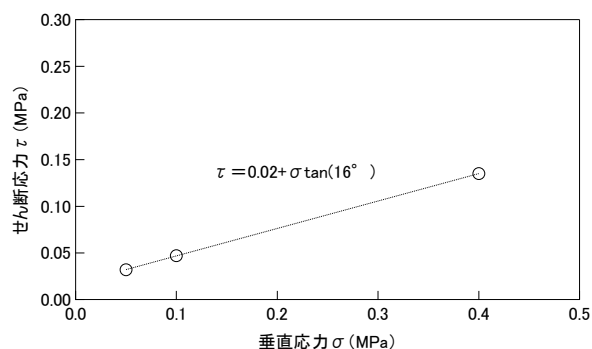


図-6 破壊時のせん断応力と垂直応力の関係

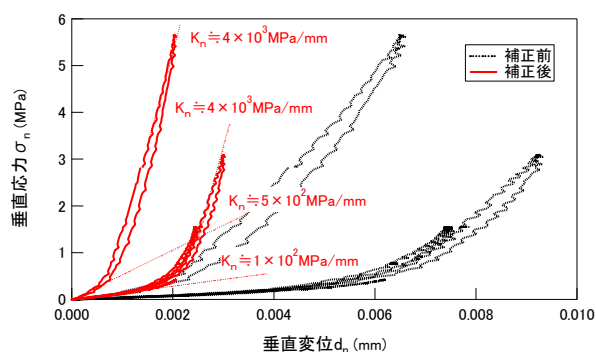


図-7 垂直応力-垂直変位の関係

棒間の1つの境界面だけでなく、せん断箱と六角棒が接する2つの境界面の影響や、金属自体の変形の影響も受ける。このため、図-7には金属の変形量を引いた後、変形量を3で割った補正後の結果も示す。補正後の K_n は100~4000MPa/mmであり、密着性の高い岩盤不連続面の垂直剛性²⁾と比較すると1オーダー程度大きな値となった。

試験結果から得られた初期せん断剛性 K_0 と垂直圧 σ_c の関係を図-8に示す。ここで、 K_0 は実験で得られた K_s と片振幅せん断変位 d_s の関係をべき乗関数でフィッティングして推定したせん断変位 1×10^{-4} mmのせん断剛性である。これより、図-3に示した積層体の三軸試験の結果と比較すると六角棒の境界面の K_0 の拘束圧依存性はやや小さいことがわかった。正規化したせん断剛性 K_s/K_0 、履歴減衰率 h と片振幅せん断変位 d_s の関係を図-9に示す。せん断剛性については、六角棒間の境界面の変形が他の変形に比べて大きいと考えられることから補正は行わなかった。これより、六角棒の境界面の K_s や h は、積層供試体の E や h のひずみレベル依存性と同様に、せん断変位レベル依存性を示す。ただし、 K_s/K_0 、 h とせん断変位の関係には明瞭な拘束圧依存性は見られない。 h については積層供試体の h と比較して、かなり大きいのが特徴である。 K_0 の値は岩盤不連続面のせん断剛性²⁾と同程度であった。表-2に示すように、これらの変形特性については解析パラメータとして共通化しないが、設定した値と実験結果との関係を論文中に示すこととした。

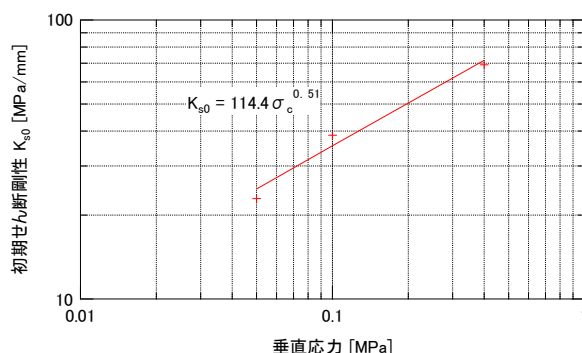


図-8 初期せん断剛性と垂直圧の関係

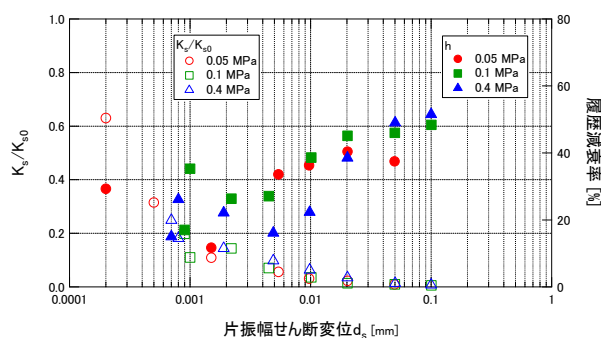


図-9 せん断剛性比、履歴減衰率とせん断変位の関係

3. 等価連続体の寸法効果に関する検討

(1) 試験の概要

等価連続体の解析に用いる強度・変形特性を求めるため、図-1に示す六角棒により構成される三軸試験を実施したが、六角棒の個数については限定したものであった。そこで、六角棒の個数、すなわち供試体の寸法を変化させて三軸試験を実施した。図-10に示すように、これまでの供試体の横幅60mm（横10本）に対して、供試体の横幅30mm（横5本）と横幅120mm（横20本）の試験を追加した。全ての供試体の高さは横幅の約2.7倍である。奥行き寸法は同様に全て80mmである。メンブレンを介して拘束圧を加えるため、最外部には六角棒を切断した端材を作製して使用し、供試体の外側に凹凸ができないようにした。

三軸試験の载荷方法は横幅60mmの試験と同様に単調载荷と多段階の繰返し载荷の2種類を実施した。拘束圧は0.01, 0.05, 0.1, 0.4MPaの4ケースで実施した。なお、供試体の密度から考えると、斜面の模型実験の最下段の拘束圧が重力（1G）場で0.01MPaで、遠心力50G場で0.6MPaとなり、上記の拘束圧範囲は斜面の模型実験の応力範囲と概ね一致する。変位、荷重の計測方法は図-1に示した方法と同様に三軸セルの内部で計測した。

(2) 試験の結果

単調载荷試験における最大強度発揮時のモール円とその包絡線を図-11に示す。横幅60mmの時の強度が少し小さいものの、横幅30mmと120mmの結果がほぼ一致しており、この範囲で寸法効果がないことが確認できた。個々の六角棒に寸法のばらつきが存在するため、六角棒の個数が増えると強度が低下する可能性があるが、60° 方向に明確な弱面が存在する規則的な幾何形状の供試体では強度の寸法効果が生じないことがわかった。

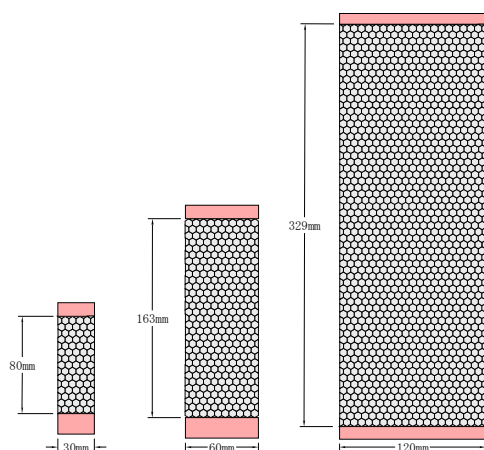


図-10 三種類の供試体のサイズ

多段階の繰返し载荷試験から得られた10波目の初期等価ヤング率 E_0 と拘束圧 σ_c の関係を図-12に、正規化した等価ヤング率 E/E_0 、履歴減衰率 h と軸ひずみ ε_a の関係を図-13に示す。変形特性である E_0 、 E 、 h に寸法効果は見られない。これより、横幅60mmで設定した強度、変形特性は解析パラメータとして妥当であると考えられる。

4. 不連続面の寸法効果に関する検討

(1) 試験の概要

不連続体の解析に用いる不連続面の強度・変形特性を求めるため、図-5に示す1対の六角棒の境界面の一面せん断試験を実施したが、同じ試験装置を用いて13対の実験も行った²⁾。この結果、強度特性には大きな差はなく、

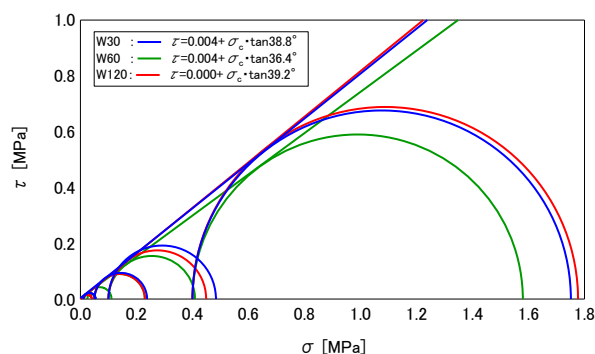


図-11 せん断応力と垂直応力の関係

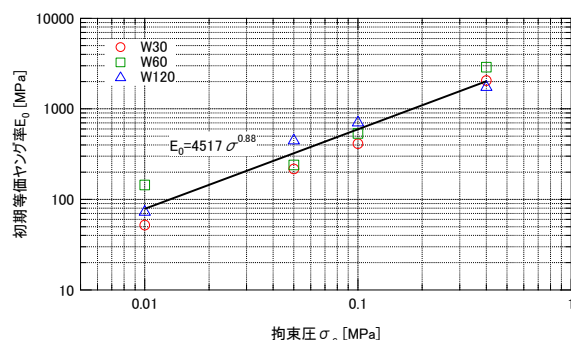


図-12 初期ヤング率と拘束圧の関係

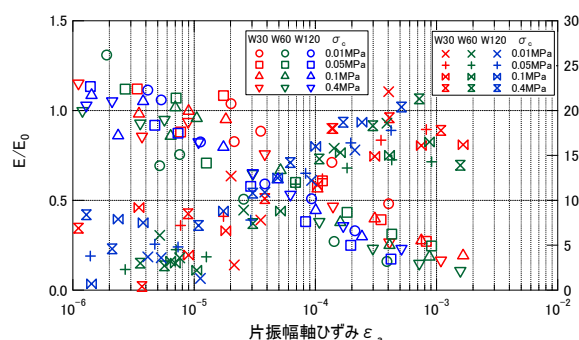


図-13 ヤング率比、履歴減衰率と軸ひずみの関係

変形特性である垂直剛性、せん断剛性は六角棒の数が増えると、小さくなる傾向を示した²⁾。また、岩盤不連続面の垂直剛性、せん断剛性がせん断面積の増加とともに低下することは広く知られている。そこで、岩盤不連続面と比較すると均一でなめらかなステンレスの境界面における寸法効果を調べる目的でステンレスのプレート間における一面せん断試験を実施した。

六角棒の表面の粗さをレーザー顕微鏡により計測し、それと同等の表面粗さ「▽▽▽(0.8a)」に研磨した表面積の異なる3種類のステンレス板（10×80mm、30×80mm、100×80mm）を用意した。このステンレス板を上板として、接触させるステンレス下板は1種類の表面積（120×120mm）とした。これら2つの板の単調载荷および多段階の繰返し载荷の一面せん断試験を実施した。単調载荷では、0.01、0.05、0.1、0.4MPaの4つの拘束圧、繰返し载荷では、0.05、0.1、0.4MPaの3つの拘束圧で試験を実施した。試験装置を図-14に示す。

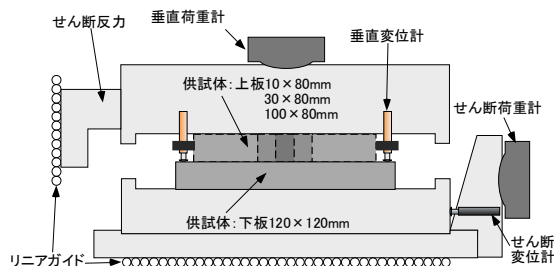


図-14 ステンレス板の摩擦試験

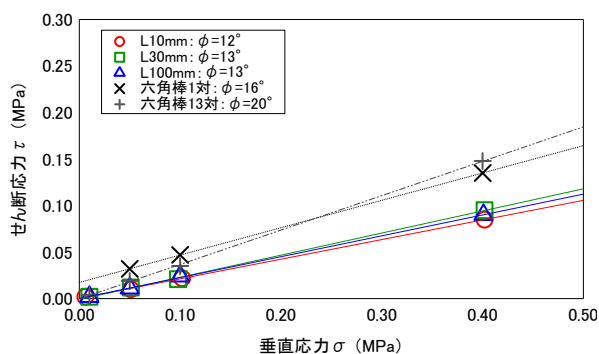


図-15 破壊時のせん断応力と垂直応力の関係

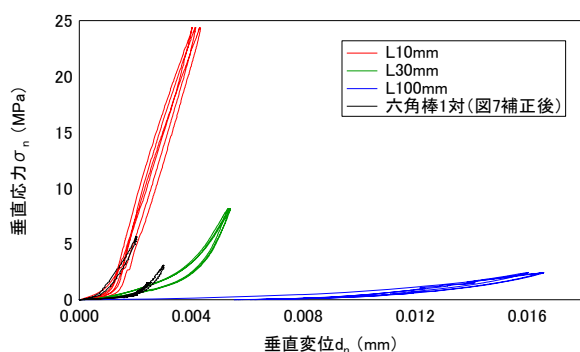


図-16 垂直応力と垂直変位の関係

(2) 試験の結果

単調载荷における最大強度発揮時のせん断応力と垂直応力の関係を図-15に示す。同図には六角棒1対と13対の試験結果についても示す。3種類の寸法の強度は12～13°であり、この範囲で寸法効果がないこと確認できた。これらの強度に比べると、六角棒の試験の強度はやや大きいことがわかる。表面粗さの微妙な違いや面の平行度が影響している可能性が考えられる。

試験結果から得られた垂直応力と垂直変位の関係を図-16に示す。同図には六角棒1対の試験結果についても示す。全ての結果は、ステンレス自体の変形を引いた結果である。これより、寸法が大きくなるに従い垂直剛性（同図の傾き）が小さくなる明瞭な寸法効果が見られた。図-7に示した六角棒1対の結果は、結果的に横幅10mmや

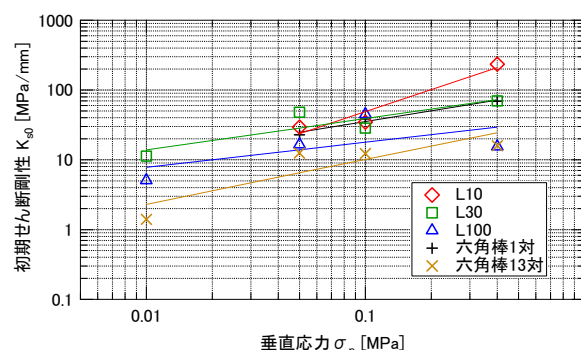


図-17 初期せん断剛性と拘束圧の関係

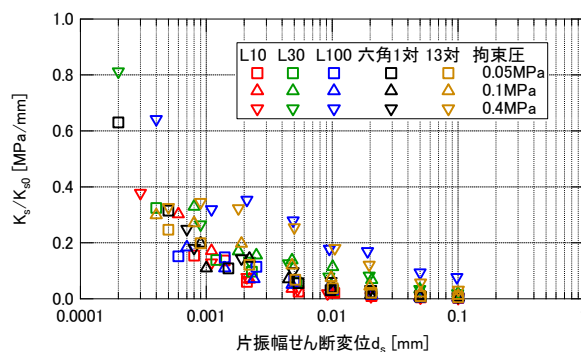


図-18 せん断剛性比とせん断変位の関係

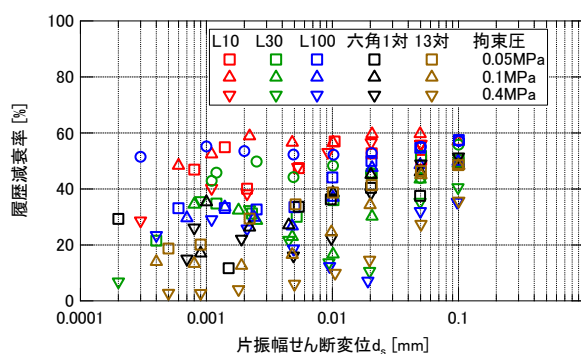


図-19 履歴減衰率とせん断変位の関係

30mmの結果に近い。面の平行度の精度や垂直応力の均一性が垂直剛性の試験結果に大きな影響を与えている可能性が高いが、試験結果として概ね妥当な値であったことが検証できた。

試験結果から得られた初期せん断剛性 K_0 と拘束圧の関係を図-17に、正規化したせん断剛性 K/K_0 と片振幅せん断変位 d_s の関係を図-18に示す。同図には六角棒1対と13対の試験結果についても示す。これより、寸法が大きいくほど、 K_0 がやや小さくなる寸法効果が見られる。図-8に示した六角棒1対の結果は、結果的に横幅30mmの結果に近い。 K/K_0 のせん断変位依存性については、拘束圧0.4MPaにおける横幅100mmと六角棒13対の結果が他と異なるが、それ以外については拘束圧依存性や明瞭な寸法効果は見られない。

試験結果から得られた履歴減衰率 h と片振幅のせん断変位 d_s の関係を図-19に示す。同図には六角棒1対と13対の試験結果についても示す。試験結果のばらつきが大きく明瞭な寸法効果は確認できない。図-9に示した六角棒1対の結果は、概ね同様の傾向を示すことが確認できた。その一方データのばらつきも大きいため、試験法やデータ整理方法を含めて再検討の余地があると考えている。

以上より、不連続面の強度については、明瞭な寸法効果は見られないが、解析条件として設定した六角棒1対の結果は、強度をやや過大評価する可能性が示された。一方、不連続面の変形特性については、寸法が大きくなるに従い、垂直剛性や初期せん断剛性が低下する傾向を示したが、解析条件として設定した六角棒1対の結果は今回実施した平板を用いた寸法効果の実験結果と概ね整合的であった。よって、六角棒を用いた模型実験の解析を行う意味では実物の六角棒を使用した材料試験の結果は概ね妥当と考えられる。

5. おわりに

実験結果を基に連続体解析および不連続体解析で設定するそれぞれの共通パラメータを設定し、その根拠データを提示した。また、設定したパラメータに対して寸法効果の影響を検討した。その結果、等価連続体解析に用いる六角棒により構成されるマスの三軸試験においては、強度、剛性ともに寸法効果は見られなかった。一方、不連続体解析に用いるステンレスの境界面の強度については寸法効果が見られなかったが、垂直剛性、せん断剛性については寸法効果が見られた。履歴減衰率については、試験結果のばらつきが大きいため、寸法効果は見られなかった。

参考文献

- 1) 日本電気協会・原子力規格委員会：原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-2015, 2015.
- 2) 岡田哲実, 納谷朋広, 和仁雅明, 大塚康範：不連続性岩盤を模擬した金属六角棒積層の斜面模型の動的挙動評価(1)―研究の取り組み方法と材料の室内試験―, 第15回岩の力学国内シンポジウム講演集, 2021.
- 3) 和仁雅明, 岡田哲実, 亀村勝美, 河村精一, 大塚康範：不連続性岩盤を模擬した金属六角棒積層斜面模型の遠心力载荷加振実験(1)―文献調査と本研究の取り組み―, 第48回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 2022.
- 4) 土の動的変形定数試験方法基準化委員会：室内繰返し载荷試験による豊浦砂の変形特性に関する全国一斉試験の実施と試験結果の解析, 土と基礎, Vol.42, No.11, pp.85-88.
- 5) 日本材料学会編：ロックメカニクス, p.106, 2002.

CENTRIFUGE TESTING TO DYNAMIC BEHAVIOR OF SLOPE MODEL PILED UP STEEL HEXAGONAL BAR SIMULATING DISCONTINUOUS ROCK MASS (PART 2) -TESTS FOR MECHANICAL PROPERTY OF MODEL MATERIAL-

Tetsuji OKADA and Tomohiro NAYA

In order to investigate the seismic assessment of discontinuous rock mass, centrifuge shaking table tests of a slope model of piled up steel hexagonal bars simulating discontinuous rock mass were conducted and various analysis for the interpretation and simulation of the model tests were performed. In this paper, analysis parameters and the basis of those decisions were exhibited based on the results of triaxial tests of the specimen of piled up steel hexagonal bars and box shear tests of a pair of the steel hexagonal bars for the continuum and discontinuous analysis. Moreover, tests for the scale effect of the parameters were performed on the assumption that these results are applied to the natural rocks.