

洋上風力地盤調査における単純せん断試験に関する実験的考察

— 供試体拘束方法の違いが結果に与える影響 —

応用地質株式会社 ○ 岩下智哉、小野正樹

1. はじめに

沖合海上における洋上風車基礎のボーリング調査は極めて高額で、採取した地盤試料も貴重である。この点、欧州で広く普及する単純せん断試験は、供試体サイズが直径5cm、高さ2cm など三軸圧縮試験に比べ小さく、同じ試料量でより多くの試験が実施できる点で有利である。

単純せん断試験は直接せん断試験の一種で、供試体の側方向変位を拘束した K_0 状態で供試体に一樣なせん断ひずみを生じさせて試料の強度・変形特性を求める試験である。本試験は、ASTM（米国試験材料協会）、NORSOK（ノルウェー標準海洋規格）で基準化されているが、日本国内では基準化されておらず、試験ノウハウの蓄積も少ない。実務で多用される単純せん断試験方法には、SGI 型と NGI 型の2種類があり、ASTM ではどちらの方法で試験を行っても良いとされている。SGI 型が薄いリングを積み重ねて（以下、積層リングと称す）供試体を拘束するのに対し、NGI 型ではワイヤーで補強されたメンブレン（以下、ワイヤーメンブレン）で拘束する違いがある¹⁾。本稿は、今後の国内の試験基準化も視野に、供試体の拘束方法の違いが繰返しせん断挙動へ与える影響を実験的に考察したものである。

なお、実験は、波浪外力に対する洋上風車基礎設計のための試験を考慮し、繰返し载荷にて実施した。

2. 積層リングとワイヤーメンブレンの違い

(1) 見かけのせん断抵抗の違い

実験に用いた積層リング(GDS 社製、リング1枚の厚さ1.1mm×22枚)とワイヤーメンブレン(Geonor 社製、メンブレン厚さ0.5mm)を図-1に、単純せん断試験機を図-2に示す。本検討では初めに、これら拘束治具の剛性を把握するための実験を行った。供試体がない状態で通常のメンブレンに積層リングをセットしたケースとワイヤーメンブレンをセットしたケースの2ケースで、押し、引きともに3mm(供試体高さ2cmの場合、せん断ひずみ15%に相当)の繰返し変位を1回加えて、その時の見かけのせん断抵抗値を測定した。



図-1 ワイヤーメンブレン(左)と積層リング(右)

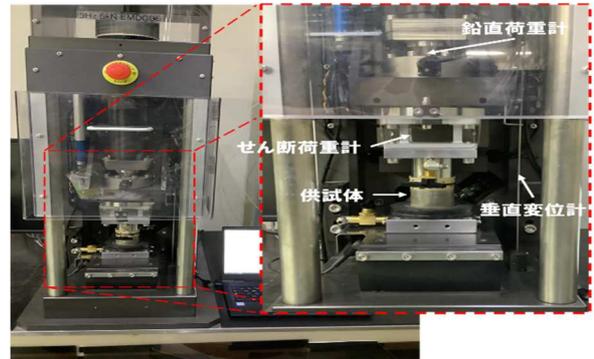


図-2 単純せん断試験機

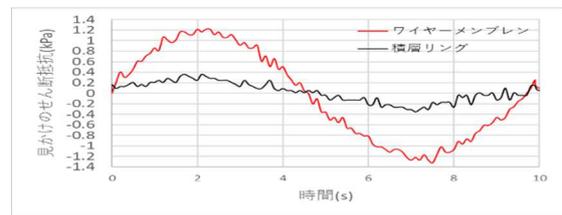


図-3 見かけのせん断抵抗

積層リングでは見かけのせん断抵抗 ($\phi 50$ mm 供試体を仮定してせん断力を断面積で除した値) が最大で 0.36kPa、最小で -0.36kPa となり、ワイヤーメンブレンでは最大で 1.23kPa、最小で -1.37kPa となった(図-3)。積層リングよりもワイヤーメンブレンのせん断抵抗が大きく、積層リングではせん断の押し側(+側)と引き側(-側)で見かけのせん断抵抗に差がほとんどないのに対し、ワイヤーメンブレンでは、せん断の押し側と引き側で 0.14kPa の差があった。今回使用したワイヤーメンブレンは、ワイヤーのねじれ・歪みに起因したくせのようなものがあり、これが押し引きのせん断抵抗の差を生じさせた要因と考えられる。

(2) 見かけのせん断抵抗の異方性

見かけのせん断抵抗の異方性を確認するために、载荷方向を 30° ごとに $0^\circ \sim 150^\circ$ まで変化させ、繰返し载荷を行った。結果を表-1に示す。積層リングは、载荷方向を変更してもせん断抵抗にほとんど差が見られず、押し側と引き側のせん断抵抗もほぼ同じであった。一方で、ワイヤーメンブレンでは押し側と引き側のせん断抵抗に差が見られ、载荷方向が 0° の時に押し引きの差が最も小さく、载荷方向が 90° の時に最も差が大きい結果となった。

以上から、今回用いたワイヤーメンブレンは、積層リングに比べて载荷時のせん断抵抗が大きく、その大きさは载荷方向によって若干異なること、また押しと引きで異なるせん断抵抗を示す方向があることが分かった。

表-1 各載荷方向の見かけのせん断抵抗

載荷方向°	見かけのせん断抵抗(kPa)					
	0	30	60	90	120	150
積層リング (最大)	0.36	0.36	0.36	0.36	0.35	0.35
積層リング (最小)	-0.36	-0.36	-0.36	-0.36	-0.35	-0.36
ワイヤーメンブレン (最大)	1.35	1.22	1.43	1.17	1.32	1.43
ワイヤーメンブレン (最小)	-1.35	-1.32	-1.22	-1.43	-1.38	-1.22

3. 拘束方法を変えた粘土の繰返し単純せん断試験

(1) 試料と試験条件

有明海沿岸域で採取された粘土試料（シンウォール採取）を用いて繰返し単純せん断試験を行い、積層リングとワイヤーメンブレンの比較実験を行った。ワイヤーメンブレンについては、せん断抵抗の差が最も小さい載荷方向0°と、差が最も大きい載荷方向90°の2つの実験を行い、載荷方向による剛性の違いが繰返しせん断挙動に与える影響を調べた。今回の実験は、NORSOK G-001に準拠して行った²⁾。試験条件は、圧密定体積条件で、載荷周波数 f は0.1Hzとした²⁾。垂直応力 σ_n は60kPa、繰返しせん断応力 τ は17kPaとし、両振幅ひずみ DA が15%に達したときを試験終了とした。供試体の諸元を表-2に示す。

表-2 試料の諸元

拘束治具	載荷方向	供試体寸法	自然含水比(%)	湿潤密度(Mg/m ³)
ワイヤーメンブレン	0°	D=50mm H=20mm	105.6	1.434
	90°		106.4	1.427
積層リング			107.2	1.431

(2) 積層リングとワイヤーメンブレンの試験結果の比較

積層リングとワイヤーメンブレン(載荷方向0°)の試験結果を図-4に示す。 $DA=15\%$ 時の繰返し回数 $M_{15\%}$ は、積層リングが15回、ワイヤーメンブレンが16回で大きな違いは見られなかった。応力経路(図-5)については、ワイヤーメンブレンでの試験の後半で応力経路が若干いびつになったものの両者の傾向は概ね同じであった。

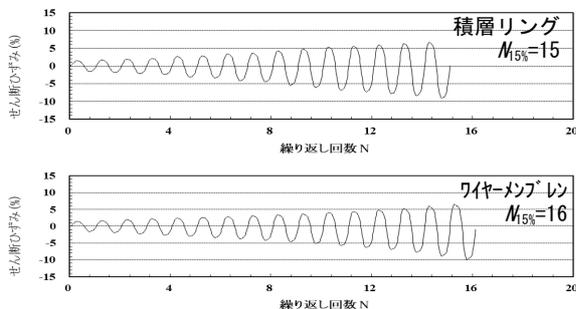


図-4 せん断ひずみ(積層リングとワイヤーメンブレン)

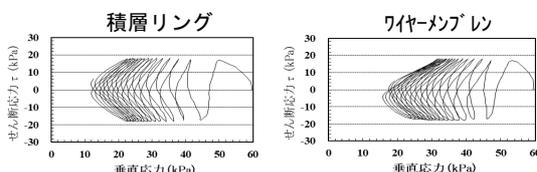


図-5 応力経路(積層リングとワイヤーメンブレン)

(3) 載荷方向が異なるワイヤーメンブレンの試験結果

せん断抵抗の差が小さい載荷方向0°と、差が大きい載荷方向90°で繰返し単純せん断試験を行った。載荷方向0°はひずみが均等に進行していったが、載荷方向90°では、片側にひずみが進行する結果となった(図-6)。また、載荷方向0°より、載荷方向90°の方が、応力経路が一側に偏りいびつになっている(図-7)。

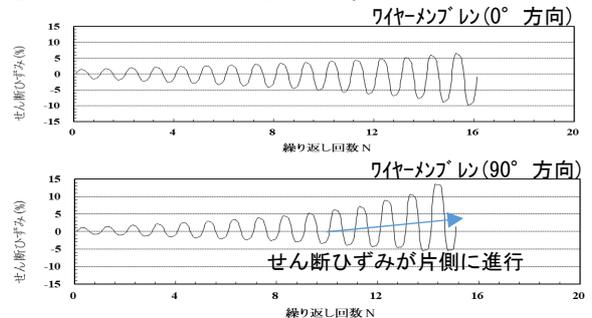


図-6 せん断ひずみ(ワイヤーメンブレン、異なる載荷方向)

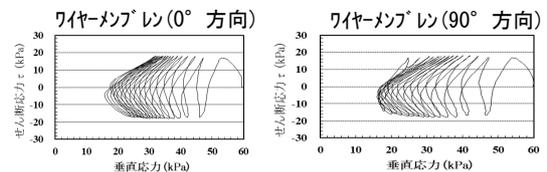


図-7 応力経路(ワイヤーメンブレン、異なる載荷方向)

4. まとめ

積層リングとワイヤーメンブレンを用いて、粘土の繰返し単純せん断試験を行い、供試体側面の拘束方法が繰返しせん断挙動に与える影響について実験的に検証した。実験の結果、①拘束方法を変えても $DA=15\%$ における繰返し回数にほとんど差が無いこと、②ワイヤーメンブレンでは、押しと引きで見かけのせん断抵抗が異なる載荷方向で試験をした場合、せん断ひずみが片側に進行していくことが分かった。②の原因としては、ワイヤーメンブレンにワイヤーを巻く方向や間隔の違いなどにより反力特性に微小な違いがあり、繰返し応力載荷に伴い供試体の剛性が失われていくにつれて、このワイヤーメンブレンのくせと見かけのせん断抵抗の影響が相対的に大きくなったためと考える。今回の粘土を用いた実験からは、繰返し強度を求める場合に拘束方法の違いは大きく影響しなかったが、繰返し載荷中の供試体の剛性低下を詳細に計測する場合、ワイヤーメンブレンの使用には注意する必要がある。

《引用・参考文献》

- 1) M. I. Amer, M. S. Aggour, W. D. Kovacs: SIZE EFFECT IN SIMPLE SHEAR TESTING, Civil Engineering Department, University of Maryland, College Park, MD, 1984.
- 2) 工藤雄次 細田光一 亀谷裕志: 洋上風力地盤調査における繰返し単純せん断試験, 海洋調査(海洋調査協会協会報), 139号41-44, 2020.