砂の非排水せん断挙動に及ぼす主応力反転の影響

Undrained shear behavior of a sand under principal stress reversals

佐藤研一^{*} (Ken-ichi Sato) 見郷浩二^{**} (Koji Kenkyo) 安原一哉^{***} (Kazuya Yasuhara)

本研究では、中空ねじり試験装置を用い、飽和砂の非排水挙動に及ぼす主応力反転の影響を調べた。主応力軸 を固定し主応力の方向が反転しない場合と反転する場合のそれぞれに対応する一定振幅片振り試験及び一定振幅 両振り試験を非排水状態の2種類の試験を行い、これらの試験を考察して、次のような結論を得た。(1)ひずみ速 度一定の非排水ねじり試験における間隙水圧の発生は、砂の密度の影響を受ける。とりわけ、緩い砂では大きな ひずみの発生とともに大きな間隙水圧が発生し、液状化に類似の挙動を示すことがある。(2)一定ひずみ速度ねじ りせん断試験結果を定式化して、せん断応力と間隙水圧の予測を行った結果、その傾向をうまく表現することが できた。しかし、双曲線近似法による予測法では、各パラメーターを決定する際にせん断初期部の挙動を無視す ること、また直線近似による決定法において、誤差を生じることから砂の非排水ねじりせん断初期における挙動 については十分に表現できない。(3)主応力の反転を伴なわない、主応力方向の固定された一定振幅の繰返し試験 においても、その挙動は砂の密度に大きく左右される。緩い砂の供試体に繰返し応力を加えると、大きなせん断 ひずみと間隙水圧を発生させる。(4)繰返し応力を受ける砂の過剰間隙水圧とせん断ひずみは、主応力を反転させ ることにより大きくなるため、波浪荷重を受ける防波堤下のような海底地盤の挙動を調べる際には、この影響を 考慮する必要がある。

キーワード:<u>主応力反転</u>、間隙水圧、せん断ひずみ、<u>圧密非排水せん断</u>、液状化、繰返し荷重、砂、ねじり (1GC:D6/D7)

1. 研究目的

首都圏におけるウォーターフロント開発を始めとして、沿岸部に軟着床防波堤などの新しい形式の海洋構造物 や関西新空港など大規模人工島の建設が盛んに行われるようになってきた。このような海洋構造物下の地盤は、 構造物とこれに作用する波との間の相互作用により、基礎地盤内に繰返し応力を生じる。この繰返し応力は、波 の作用に伴って主応力の大きさが変化しつつ、かつその方向が連続的に回転するという複雑な特性を持つと考え られる。このような主応力軸の回転を伴う繰返し応力は、海底地盤内に過剰間隙水圧を発生させ、有効応力を低 下させるために、海底地盤上に建設されている構造物の安定性に影響を及ぼすと考えられる。

2. 波浪荷重を受ける防波堤下の応力状態と実験概要

図-1、2は、軟弱地盤(地盤厚さ20m)上に着堤式防波堤(逆T型:幅12m、高さ6.8m)を建設した場合を想 定し、防波堤に押し波時と引き波時の2つの波浪荷重によって地盤内に発生する最大主応力σ₁の大きさとその作 用方向を弾性解析によって求めた結果を示したものである¹¹。これらの結果から、防波堤の下部の地盤内部の応 力状態は防波堤に作用する波の方向によりその大きさと作用方向が変化することが分かる。しかし、波の連続的

* 茨城大学工学部 助手、 ** 同 大学院、 *** 同 教授



図-2 地盤内に発生する最大主応力の大きさとその方向(引き波)

な作用を受ける防波堤のような海洋構造物下の地盤では、図ー3に示す ような主応力軸が連続的に回転をするような繰返し応力が作用している と考えられる。したがって、このような波浪の繰返し荷重を受ける地盤 の特性を把握することは、防波堤の安定性などを考える際には必要不可 欠である。このような主応力軸の回転を伴うような繰返し荷重下の地盤 の挙動を調べる第一段階として、まず今回の実験では前述のように図ー 4 に示すように主応力軸は空間に固定し、最大主応力σ, と最小主応力 σ。の組み合わせが変化するような応力の反転が砂の挙動に及ぼす影響 を調べた。この場合主応力軸は固定され、 σ , と σ , の組み合わせが単 に入れ替わっているに過ぎない。したがって、波浪荷重による主応力軸 の連続的な変化を表現することはできないが、任意の大きさの主応力の 反転を表現することが可能である。

実験は図-5および表-1に示すような応力経路及びせん断方法に従 い、まず、非排水ねじりせん断挙動に及ぼ砂の密度を影響を調べるため に、せん断応力τ, φをひずみ制御により一定ひずみ速度(γ, φ=0.2%/min) でせん断を行う試験(ソリーズ1)を行った。次に、最大主応力σ」と最小主

応力σ、の組み合わせが固定され た状態で繰返し応力が作用する τ_vを一定の片振り振幅で変動さ せる試験(シリーズ2)とせん断試験中 に最大主応力の組み合わせが同時 に反転するて、、を一定の両振り振 幅で変動させる試験(シリーズ3)をそ れぞれ砂の密度を緩い状態(Dr=59 %)と密な状態(Dr=70%)の2つにつ

及ぼす影響について調べた。 3. 中空ねじり試験装置と実験方法 3-1 中空ねじり試験装置



図-4 せん断時の最大・最小主応力の方向



図-5 非排水せん断の応力経路 表-1 実験概要

シリース	試験名	試験条件	応力経路
1	一定ひずみ速度せん断試験	$\sigma_{\mathbf{v}} = \sigma_{\mathbf{h}}$ $\alpha = 45^{\circ}$ b=0.5	0 -> A
2	一定振幅せん断応力片振り試験		$0 \rightarrow A^* \rightarrow 0$
3	一定振幅せん断応力両振り試験		$0 \rightarrow A' \rightarrow 0 \rightarrow B' \rightarrow 0$

いて行った。これらの結果から、主応力の組み合わせの反転が伴うような繰返し応力が砂の非排水せん断挙動に

本研究で用いた実験装置は、図-6に示すような中空ねじり試験装置で ある。中空ねじり試験装置は、空気圧によってセル圧(外圧 = Po)と供試 体内の中空部の圧力(内圧 = Pi)を独立に制御が可能である。内圧におい ては、2重管ビューレットを使用することにより、内容積変化から供試体 の変形量を測定することが可能である。また、鉛直荷重もベロフラムシリ ンダーにより、制御可能である。また、鉛直応力とねじり力の測定につい ては、ロードセルとトルク計をセル内部に入れることで、ねじり力により シャフト部分に発生する摩擦を考えることなく測定することが可能である。 また、シャフト部分の荷重をカウンターバランスの装着によりキャンセル し、キャップ及びシャフト部分による供試体に作用する初期応力を軽減し ている。ねじり角は、セル外部の鉛直応力載荷軸上部のピニオン部に取り 付けられてたポテンショメーターによって測定した。

ねじり力の載荷は、鉛直応力載荷軸上部に取り付けられたラックとピニ オンに、無断変速モーターによりねじり荷重を加える方式であり、これに よって載荷軸を回転させ、ねじり荷重を供給させた。鉛直変位は、ねじり 角同様に、載荷軸直上部の変位測定棒に取り付けたダイヤルゲージによっ て測定している。

Ball Bushing Ball Valve Ball Valve Control Cell Torgue Meter Top Cap Porous Stone Specimen Pedestal

Potentiometer

図-6 中空ねじり試験装置

3-2 中空供試体

今回実験に使用した中空供試体は図-7に示す通りである。供試体の形状は、外径約100 mm, 内径約60mm、高さ約200mmである。また、この中空円筒供試体はねじり力を伝達させるた めに、供試体上下両端部に刃付きポーラスストーンを使用している。実験に使用したメンプ レンは、内・外両方共に厚さが0.3mmのものを使用した。試料には、豊浦標準砂(Gs=2.64, emax=0.991, emin=0.623)を使用して、供試体の作成と密度の調整は、空中落下法により行な った。また、飽和試料の作成については、炭酸ガスと脱気水を供試体に通し、バックプレッ シャーのmpを1.0kgf/cm²かけて、8時間以上放置した後、B値が0.96以上になっていること を確認した後、実験を開始することにした。



Dial Gauge

nce Weiaht

ηŶ

図-7 中空ねじり供試体

3-3 実験方法

実験は、飽和させた供試体を圧密圧力 $\sigma_{e=1.0kgf/cm^{3}}$ で約2時間圧密させ、圧密終了後、全ての供試体は非排水状態でせん断試験を行った。せん断試験はひずみ制御により一定ひずみ速度($\gamma_{v_{h}=0.2%/min}$)で載荷を行った。 また実験に使用した一定振幅の繰返し応力は0.3kgf/cm³として行った。 これらの試験は、最大主応力 σ_{1} 及び σ_{1} と鉛直方向のなす角 α は、 $\sigma_{v'} - \sigma_{h'} = 0$ であるから α は、±45°のみに限られており、中間主応力係数b=0.5 の試験である。主応力軸の方向は空間に固定されており、 $y_{J-X'}$ 3については σ_{1} 'と σ_{3} 'について主軸の反転が起 こっている。これらの試験から主応力の反転が砂の応力・変形特性と間隙水圧の発生過程に及ぼす影響について 調べた。

3. 実験結果及び考察

(a) 一定ひずみ速度せん断試験(シリーズ1)

図-8は異なる密度の砂供試体のねじりせん断試験におけるせん断応力とせん断ひずみの関係を示している。 ねじりせん断を受ける応力ーひずみ曲線は、通常の三軸試験同様に砂の密度によって著しく異なることがわかる。 ここで特徴的なことはそれぞれの曲線は、一度変曲点を示し、緩い砂では一度せん断開始直後にせん断応力が最 大値に達し緩やかに減少し、さらにせん断を続けるとゆっくりと増加する傾向を見せるのに対し、密な砂ではせ ん断初期より大きなせん断力が発生し、そのせん断応力は増加し続ける傾向にある。図ー9に、せん断中に発生 した過剰間隙水圧が発生してせん断が進むとともに徐々に減少するという傾向を示すことがわかる。この傾向は、 密な砂の方が顕著でせん断途中から間隙水圧は負圧に転じるが、緩詰めの砂ではせん断中に大きな正の過剰間隙 水圧が発生し、せん断変形に伴うその減少量も少ない。したがって、図-8の応力ひずみの関係はこの間隙水圧 の発生と密接な関係があり、過剰間隙水圧が増加しているときには せん断応力が減少し、減少に転じると増加する傾向を示している。

そこで、今回行った一定ひずみ速度ねじりせん断における砂の挙動を双曲線近似法により予測する方法を適用して考察する。まず、 KondnerとZelasko⁸⁾が提案する双曲線型応力・びずみ関係式にならっ て、せん断中の応力比(τ,μ/σ,)とせん断ひずみ(γ,μ)の関係を次 のような関数によって表わすことにする。

$$\frac{\tau_{\rm vh}}{\sigma_{\rm a}'} = \frac{\gamma_{\rm vh}}{a + b\gamma_{\rm vh}} \tag{1}$$

次に、 図ー10に密な供試体 (Dr=85.1%)に対する試験結果に基づいて $\gamma_{vh}/(\tau_{vh}/\sigma_{\bullet}) - \gamma_{vh}$ の関係を示す。式(1)中の定数a,bは、この図中の関係における直線部を直線近似した時の切片と傾きに相当 する。したがって、この定数a,bは、次式で与えられる。

$$a = \left\{ \gamma_{vh} / (\tau_{vh} / \sigma_{a'}) \right\}_{\gamma_{vh} \rightarrow 0}$$
$$b = 1 / (\tau_{vh} / \sigma_{a'})_{max} \qquad (2)$$

次に、発生間隙水圧の予測を行うために応力比と間隙水圧の関係を求める。図-11に密な供試体(Dr=85.1%)におけるせん断中 に発生する間隙水圧のひずみ増分比と応力比の関係を示す。この 図より、供試体が一様変形している部分について直線近似を行っ た。その関係は次式で表すことができる。

$$\frac{\tau_{vh}}{\sigma_{a'}} = c + d\left(-\frac{du}{d\gamma_{vh}}\right)$$
(3)

ここで、 c, dは定数であり、式(3)で近似した直線の傾きと切片 により求めることができる。

最後に、式(1)、式(4)の関係を用い、発生間隙水圧Δuとせん断ひずみγνωの関係を求めると次式のようになる。







図-9 過剰間隙水圧とせん断ひずみの関係(シリーズ1)

(4)



図-12 双曲線によるて、ユーク、国係の近似

これらの関係を用いるとせん断中の応力、発生間隙水圧とせ ん断ひずみ関係の予測を行うことができる。密な供試体(Dr= 85.1%)と緩い供試体(Dr=55.7%)におけるせん断応力、発生間隙 水圧とひずみ関係に、これらの方法を適用して得られた計算値 と観測値の比較を行ったものをそれぞれ図ー12、13に示し ている。せん断応力とせん断ひずみの予測した結果によると、 せん断初期において実験値と計算値が一致していないが、せん 断が進むと両者は良く一致していることが分かる。また、発生 間隙水圧とひずみの関係を予測した結果による実験値に比べ計



図-13 双曲線によるΔu~γ **関係の近似



算値が大きな値を示し、予測式はせん断中に正の間隙水圧が発生し、引き続き負に転じる過程をうまく表現でき ていることが分かる。しかし、このような双曲線近似法は、各バラメーターを決定する際にせん断初期部の挙動 を無視すること、また直線近似による決定法において、誤差を生じることなどが挙げられる。したがって、曲線 近似法は非排水状態のねじりせん断挙動の全体を表現することは可能であるが、せん断初期部における挙動につ いては十分に表現できないと言える。

図-14に密度の異なる2つの試料の平均有効主応力p'とせん断応力τ いの関係を示している。これからせん 断中の有効応力径路が供試体の初期密度により異なっていることがわかる。緩い砂では、過剰間隙水圧が負に転 じるまで有効応力径路は原点に向かって進み、その後応力比一定線上を原点とは逆向きに進むことがわかる。ま た、密な砂では応力比一定線に沿って進み、過剰間隙水圧が負に転じた時点から、この線上を進みせん断応力が 増加し続ける傾向を示した。

次に、この有効応力径路の変曲点、すなわち最大過剰間隙水圧が発生する点における間隙水圧比を Δumax /σ。として、相対密度D.との関係を図-15に示す。この図より相対密度が小さくなると最大過剰間隙水圧比 Δumax/σ。は、大きくなる傾向を見せた。したがって、とくに緩い砂では非排水状態の単調載荷においても液状 化(Δumax/σ。=1)する可能性があると考えられる。次に最大過剰間隙水圧が生じるせん断ひずみに着目して、 このせん断ひずみと砂の密度の関係を示したものが図-16である。これより、緩い砂ほど最大過剰間隙水圧が 生じるせん断ひずみは大きくなる。このことから、緩い砂が非排水状態で大きな変形が生じると過剰な間隙水圧 佐藤 見郷 安原



の発生により、有効応力がかなり低下し、地盤が不安定な状態になることを示唆している。

<u>(b)</u>一定振幅片振り試験(シリーズ2:ONE-WAY)

密度の異なる2つの供試体(Dr=59%,74%)に一定振幅片振りで繰返し応力を載荷した場合のせん断応力で、よと平均主応力p'=(σ、+2σ」)/3との関係を図-17と図-18に示している。この場合、主応力の反転は起こらず、せん断応力の大きさのみが圧縮側で変動する。これらの結果によると2つの供試体ともに最初の載荷時における





p の減少量、すなわち過剰間隙水圧の発生量が最も大きいが、繰返し回数が増えるに伴って載荷時におけるp の 減少量が小さくなり、除荷時における方が大きくなる。このことは、緩い砂に比べ、砂の密度が高い供試体ほど 繰返しの初期段階から生じる。

次に、せん断応力 て、」とせん断ひずみ 7、」の関係を図-19,20にまとめている。密な砂のひずみが繰返し が進むにつれて単調に増えていくのに対し、緩い砂では3回目の繰返し以降に極端な大変形が生じている。この 時せん断変形は進むがせん断応力は上昇しておらず、供試体は限界状態になっており、それに伴う間隙水圧の上 昇も見られる。そしてその後は、せん断応力増加時のひずみ量の増加が著しく大きくなっていく傾向を示した。 (c) 一定振幅両振り試験(ソリー<u>ス´3:TWO-WAY)</u>

密度の異なる2つの供試体(Dr=59%,70%)に一定振幅両振りで繰返し応力を載荷した結果、せん断応力で、よと平 均主応力p'との関係として図-21と図-22が得られた。シリーズ2の一定振幅片振り結果に比べると、両方 の供試体ともにp'の減少量は極端に大きく、緩い砂では2回目の繰返しの途中にp'が0となり供試体は液状化し てしまった。これは、両振りで繰返し応力を載荷したために、主応力の方向が反転したことによる影響がp'の減 少に現れたことによるものである。また、密な供試体においてもほぼp'が0となり液状化している様子がうかが える。図-23、24に各供試体におけるせん断応力で、よどせん断ひずみで、の関係を示している。これらの図 から供試体の変形量は供試体の密度の差が少しは現れているが主応力を反転させることにより大きくなり、特に 密な砂の供試体では片振りに比べると、繰返し回数に伴ってせん断ひずみが大きくなっていることがわかる。し たがって、主応力の反転は、地盤の変形に大きく影響を及ぼすことを意味している。

次に、主応力の反転しない場合の繰返し(シリーズ2)と主応力の反転を伴う繰返し(シリーズ3)における過剰間隙水圧の発生量Δuと繰返し回数Nの関係を図-25と図-26に比較してみた。これらの結果より発生間隙水圧比は





Δu/σ。は繰返し回数の増加により大きくなり、液状化に至る過程が分かる。また、主応力を反転させることに より、供試体の密度の差に関係なく大きな間隙水圧が少ない繰返し回数で発生することも分かる。したがって、 防波堤下のような海底地盤では、主応力の反転を伴うような繰返し応力が作用していると考えられるために、過 剰間隙水圧が発生し地盤は不安定な状態になると予想される。

4.まとめ

中空ねじりせん断試験機を用いて砂の非排水せん断挙動に及ぼす砂の密度の影響および繰返し応力を受ける砂 の非排水せん断における主応力反転の影響を調べた結果、次のようなことが明らかとなった。

1)ひずみ速度一定の非排水ねじり試験における過剰間隙水圧の挙動は、砂の密度の影響を受ける。とりわけ、緩 い砂では大きなひずみの発生とともに大きな間隙水圧が発生し、液状化に類似の挙動を示すことがある。2)一定 ひずみ速度ねじりせん断試験結果を定式化して、せん断応力と間隙水圧の予測を行った結果、その傾向をうまく 表現することができた。しかし、双曲線近似法による予測法では、各パラメーターを決定する際にせん断初期部 の挙動を無視すること、また直線近似による決定法において、誤差を生じることから砂の非排水ねじりせん断初 期における挙動については十分に表現できない。3)主応力の反転を伴なわない、主応力方向の固定された一定振 幅の繰返し試験においても、その挙動は砂の密度に大きく左右される。緩い砂の供試体に繰返し応力を加えると、 大きなせん断ひずみと間隙水圧を発生させる。4)主応力の反転を伴う繰返し応力を受ける砂は、反転を伴なわな い繰り返し応力を受ける砂の場合と比較すると、少ない繰返し回数で大きな過剰間隙水圧とせん断ひずみを発生 させる。

参考文献

1)Symes, M. J. P. R., et al. (1984): "Undrained anisotropy and principal stress rotation in saturated sand ", Geotechnique, Vol. 34, No. 1, pp. 11-27. 2) Towhata, I. and Ishihara, K. (1985): "Undrained strength of sand undergoing cyclic rotation of principal stress axes", Soils and Foundations, Vol. 25, No2, pp. 135-147. 3) Ishihara, K. and Towhata, I. (1983): "Sand response to cyclic rotation of principal stress directions as induced by wave loads", Soils and Foundations, Vol. 23, No. 4, pp. 11-26. 4) Hight, D. W., et al. (1983): "The development of a new apparatus for investigating the effects of principal stress rotation in soils", Geotechnique, Vol. 33, No. 4, pp. 355-383. 5) 福島伸二(1982): ねじりせん断試験による砂の変形 .強度特性の実験的研究、東京大学学位請求論文、pp. 29-103. 6) Shibuya, S. (1988): "A servo system for hollow cylinder testing of soils", Geotechnical Testing Journal, Vol. 11, No. 2, pp. 109-118. 7) 佐藤研一、安原一哉、 斉藤論(1992): 波浪荷重を受ける海底粘土地盤の沈下解析、第17回海洋開発シンポジュウム論文集、pp. 439-444. 8) Kondner, R. L. and Zelasko, J. S. (1963): "Void ratio effects on the hyperbolic stress-strain response of a sand, ASTM, STP, No. 361, pp. 250-257.