

砂の誘導異方性と非共軸性に関する実験的検討

名古屋工業大学 学生員 ○ 京川 裕之, 柳生 案理
 名古屋工業大学 正会員 中井 照夫, 張 鋒, 檜尾 正也, 菊本 統

1. はじめに 土は応力履歴によって異方性が発達（あるいは消散）する材料である。本研究室では、このような土の誘導異方性を主に三軸試験や三主応力試験によって検証してきた。しかし、これらの試験では3次元的な応力条件や応力経路による影響は検証できるものの、応力の主軸の回転は考慮できない。そこで今回は、直接せん断力を加えることで応力の主軸の回転を表現できる中空ねじり試験による検討を行った。本稿では、4種類の応力経路で行った砂の中空ねじり試験の結果を示し、誘導異方性に関する考察を述べる。また、subloading t_{ij} model¹⁾による計算値を示し、その適用性を検証する。

2. 砂の中空ねじり試験と解析の概要 4種類の試験を平均主応力 $p = 196 \text{ kPa}$ の等方応力状態から、 p 一定排水条件で行った。供試体は豊浦砂を間隙比 $e = 0.65 \sim 0.67$ に調整して作成した。Test1, Test2 はそれぞれ三軸圧縮, 伸張後のねじりせん断試験, Test3, Test4 はそれぞれねじりせん断後の三軸圧縮, 伸張試験である。Fig.1 に各試験の応力経路を示す。A, B, C 点は三軸試験～中空ねじり試験の切り替え点であり、以後の図中にも示してある。

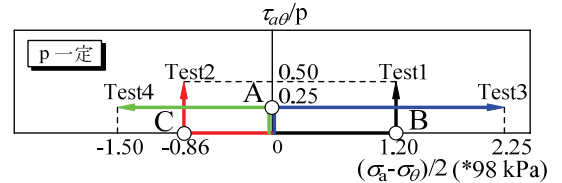


Fig.1 応力経路

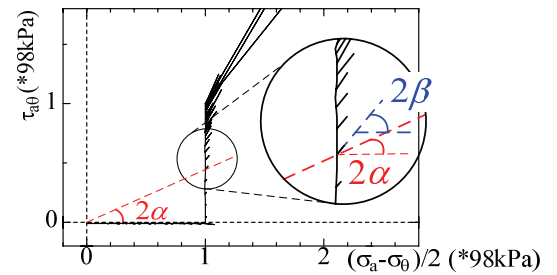


Fig.2 $2\alpha, 2\beta$ の決定方法

Table 1 構成モデルのパラメータ

λ	0.07	Same parameter as Cam clay model	
κ	0.0045		
$N=e_{NC}$ at $p=98\text{kPa}$ & $q=0\text{kPa}$	1.1		
$R_{cs}=(\sigma_1/\sigma_3)_{CS(comp)}$	3.2		
v_e	0.2	Shape of yield surface (same as original Cam clay)	
β	2.0		
a	a_{AF}	35	Influence of density and confining pressure
	a_{IC}	500	

試験結果で示す α, β はそれぞれ応力およびひずみ増分の主軸の回転量であり、モール円により求める(Fig.2)。なお、実験では弾性ひずみと塑性ひずみを明確に区別するのは困難であるため、全ひずみについて議論する。試験の要素シミュレーションには、subloading t_{ij} model を用いた。同モデルでは、中間主応力の影響、応力経路依存性および密度や拘束応力の影響が適切に考慮されている。構成モデルのパラメータを Table1 に示す。

3. 実験結果及び考察 Fig.3, Fig.4 はそれぞれ圧縮側, 伸張側のせん断ひずみと主応力比の関係である。図より、圧縮側に比べて伸張側では初期剛性が大きくなるものの、 $\sigma_1/\sigma_3 = 3$ あたりから剛性が急減する。また、不変量で整理した Fig.3, Fig.4 では、応力の主軸の回転による影響 (Test1 と Test3 あるいは Test2 と Test4 の差異) は明確には表れない。これに対して、subloading t_{ij} model による解析値は実験値を概ね捉えている。

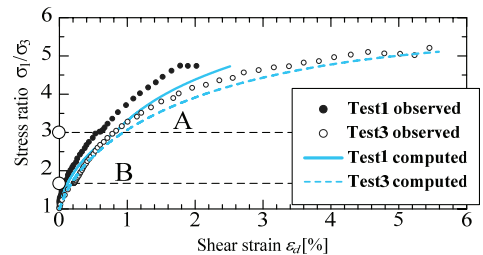


Fig.3 せん断ひずみ～主応力比関係(Test1, 3)

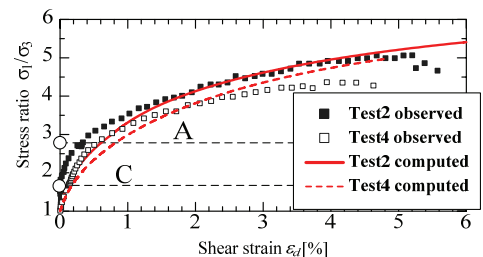


Fig.4 せん断ひずみ～主応力比関係(Test2, 4)

Fig.5～8 は、Test1～4 における応力あるいはひずみ増分の主軸の回転量と応力比の関係である。Fig.5, 6 より、三軸圧縮・伸張後のねじりせん断時に、応力の主軸の回転に伴ってひずみ増分の主軸も回転するが、それぞれの回転量 (α, β) が異なることから非共軸であるとわかる。これは、ねじりせん断以前の応力履歴 (三軸圧縮・伸張) およびねじりせん断による応力の主軸の回転に起因すると考えられる。換言すると、非共軸性は主軸の回転を含む応力履歴により発達した誘導異方性といえる。

キーワード 中空ねじり試験, 異方性, 非共軸性

〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町 名古屋工業大学社会工学専攻

Fig.7, Fig.8 についても同様のことが言える。(既にねじりせん断しているの厳密には三軸状態ではなく、主軸は回転するが) 三軸圧縮・伸張的な応力変化に対して、以前の応力履歴によって非共軸性があらわれることが確認される。ただし、三軸圧縮・伸張の進行によって応力とひずみ増分の主軸は一致することから、軸方向への応力履歴に比べて、せん断方向への応力履歴(ねじりせん断)の影響は小さいといえる。

Fig.5~8 には、subloading t_{ij} model による解析値も示している。図より、解析でも応力と全ひずみ増分は非共軸になることがわかる。これは、関連流れ則により応力と塑性ひずみ増分は常に共軸になるよう仮定している一方で、一般的なフックの法則に従う構成モデルでは弾性ひずみ増分の方が応力増分の方に支配されるため、全ひずみ増分の影響を受けるからである。また、実験値と解析値を比較すると、subloading t_{ij} model は単調載荷時や応力履歴後の三軸圧縮・伸張時の挙動はよく捉えているものの、主軸の回転や応力履歴による誘導異方性の影響は定量的には表現できていない。

Fig.9, 10 に、各応力経路下でのひずみ増分方向と大きさを示す。図より、どのケースにおいても初期の単調載荷時には、ひずみ増分方向は一様であり、解析もそれを適切に表現している。しかしながら、(subloading t_{ij} model を含めて)従来の関連流動則に基づく等方硬化型モデルでは、応力履歴や主軸の回転の影響があらわれる際のひずみ増分方向や大きさは評価できていない。

4. 結論 4種類の実験経路下で中空ねじり試験を実施し、主軸の回転を含む応力履歴の影響による応力とひずみ増分の非共軸性を確認した。また、subloading t_{ij} model による解析を通じて、従来の等方硬化型モデルでは応力と塑性ひずみ増分の非共軸性を表現するのは困難であることを示した。これに対して本研究では、①中間主応力の影響、②応力履歴の影響、③非共軸性は本質的に同じであるとの考えから、新たな修正応力 t_{ij}^* の概念に基づいた等方硬化則の範疇での構成式の開発にも取り組んでいる²⁾。今後は、主軸の回転や3次元的な応力条件を考慮した実験的検討を進めるとともに、構成モデルの改良・拡張に取り組んでいく予定である。

参考文献 1) Nakai, T. and Hinokio, M.: A simple elastoplastic model for normally and over consolidated soils with unified material parameters, *S & F*, 44(2), 53-70, 2004. 2) 菊本ら：移動硬化側を用いない応力誘導異方性のモデル化、第41回地盤工学研究発表会講演概要集, 2006 (投稿中)。

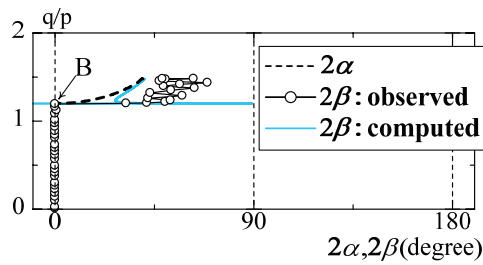
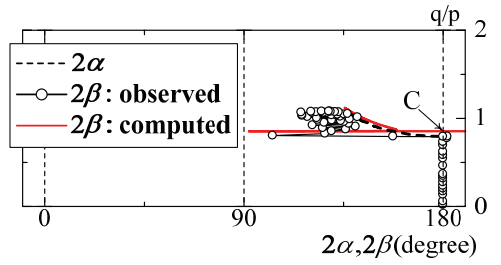
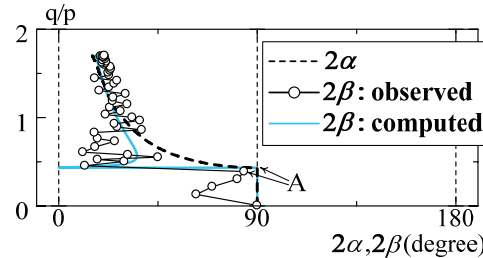
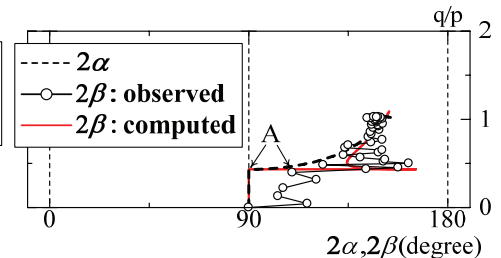
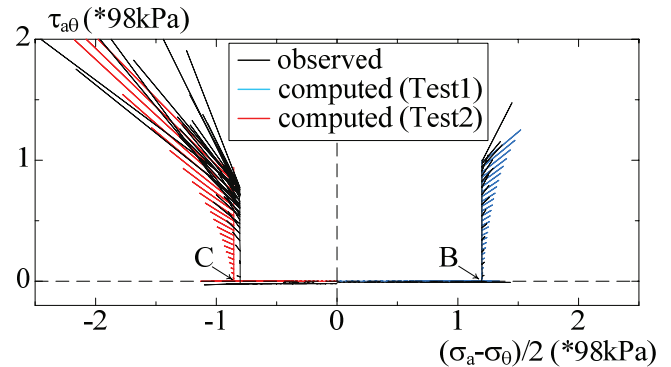
Fig.5 主軸の回転量 $\alpha, \beta \sim q/p$ 関係(Test1)Fig.6 主軸の回転量 $\alpha, \beta \sim q/p$ 関係(Test2)Fig.7 主軸の回転量 $\alpha, \beta \sim q/p$ 関係(Test3)Fig.8 主軸の回転量 $\alpha, \beta \sim q/p$ 関係(Test4)

Fig.9 応力経路とひずみ増分方向(Test1, 2)

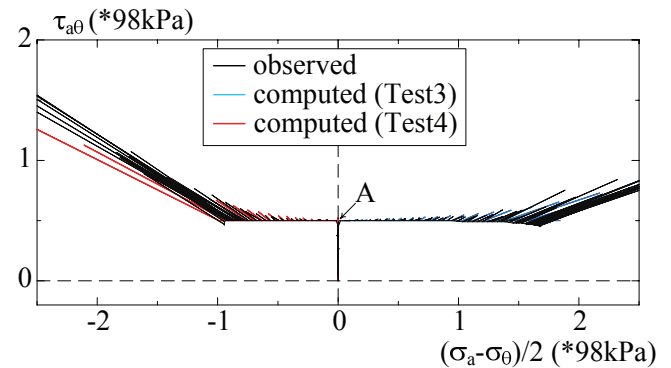


Fig.10 応力経路とひずみ増分方向(Test3, 4)