

粘土の硬化挙動におよぼすせん断ひずみの影響

北海道大学工学研究院 正会員 ○福田 文彦
 北海道大学工学院 中畑 逸郎
 北海道大学会計専門職大学院 星川 尚久

1. 発表の概要

筆者らは再構成粘土の硬化則を調べるために過去に行った研究の実験データ¹⁾²⁾³⁾の吟味を改めて行った。その結果、(1)粘土の硬化則が等方硬化則であり、(2)硬化パラメーターは塑性体積ひずみ/間隙比の塑性成分のみならず塑性せん断ひずみの関数でもあり、(3)せん断中と等方圧縮中の硬化パラメーターが異なることの三つの可能性が出てきた。今回の発表ではこれらについて報告する。

2. 等方過圧密履歴を受けた粘土の平均有効応力一定排水圧縮せん断中の硬化挙動を調べるための実験(Pre-Compression 試験)の概略と実験結果

表 1 PC 試験の実験条件

Test No.	Isotropic consolidation stage		Isotropic preloading and unloading stages		Shear stage	
	Consolidation pressure (kPa)	Maximum preloading stress, p' (kPa)	O.C.R.	p' (kPa)	Shear mode	
NC	300	----	1.00	300	Compression	
OC-1.25		375	1.25			
OC-1.50		450	1.50			
OC-1.75		525	1.75			
OC-2.00		600	2.00			

(1)実験の概略 PC 試験の概略を表 1 と図 1 にまとめた。実験試料は NSF-Clay ($\rho_s=2.76 \text{ g/cm}^3$, $w_l=54\%$, $I_p=26$)であり、実験には応力制御型の三軸試験器を使用した。表 1 の NC 試験は等方正規圧密粘土の平均有効応力(p')一定排水圧縮せん断試験, OC-1.25~OC-2.00 は等方過圧密粘土の p' 一定圧縮排水せん断試験である。図 1 は各試験のあらかじめ定めた有効

応力経路である。NC 試験は図 1・経路 AB の等方圧密過程と経路 BC の p' 一定排水せん断過程からなり、OC 試験は図 1・経路 DE の等方圧密過程、経路 EFG の初期等方圧縮と除荷、経路 GH の p' 一定排水せん断過程からなる。この実験の詳細については文献¹⁾を参照されたい。

この実験の試料の硬化が等方硬化則にしたがっているとすれば OC 試験の硬化パラメーター(κ)の挙動は図 2(b)のとおりとなる。すなわち OC 試験のせん断応力($q=\sigma_1'-\sigma_3'$)~ κ 曲線が NC 試験の同曲線と交わる点が降伏点(点 Y_2')であり、降伏点以降の OC 試験の $q \sim \kappa$ 曲線と NC 試験の曲線が完全に一致する。

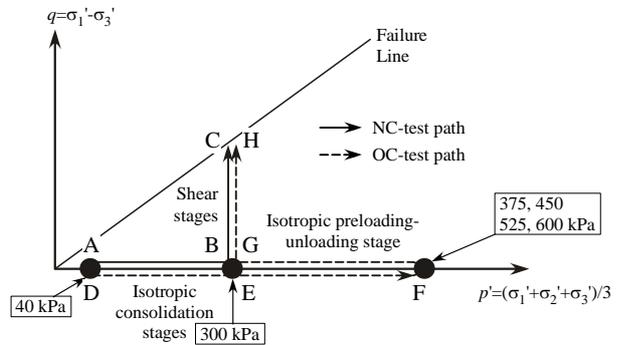


図 1 OC 試験の有効応力経路

(2)実験結果 本研究では等方過圧密履歴を受けた粘土の p' 一定排水圧縮せん断における硬化パラメーターの探索を行うために、無ひずみ点を等方圧密過程の終了点にとり、NC 試験と OC 試験のせん断過程における様々なひずみパラメーターの挙動と、図 2(b)の硬化パラメーターの挙動の比較を行った。その結果、体積ひずみ(ϵ_p)とせん断ひずみ($\epsilon_q = 2(\epsilon_1 - \epsilon_3)/3$)の和の挙動が、図 2(b)の硬化パラメーターの挙動とほぼ一致することを見いだした。NC 試験と OC 試験のせん断過程における $\epsilon_p + \epsilon_q$ の挙動を図 3 に示す。なお OC 試験の初期ひずみは等方圧縮・除荷過程(図 1・経路 EFG)で生じたものである。また筆者らは $\epsilon_p + \epsilon_q$ ではなく、 $\epsilon_1 + \epsilon_2$ を硬化パラメーターとする等方硬化則も提案しているが¹⁾²⁾、三軸圧縮条件($\epsilon_2 = \epsilon_3$)のもとでは $\epsilon_p + \epsilon_q$ と $\epsilon_1 + \epsilon_2$ の挙動の違いは小さい。

キーワード 硬化則, 硬化パラメーター, せん断, 等方圧縮, 粘土

連絡先 〒060-8628 札幌市北区北 1 3 条西 8 丁目 北海道大学 工学研究院 TEL 011-706-6194

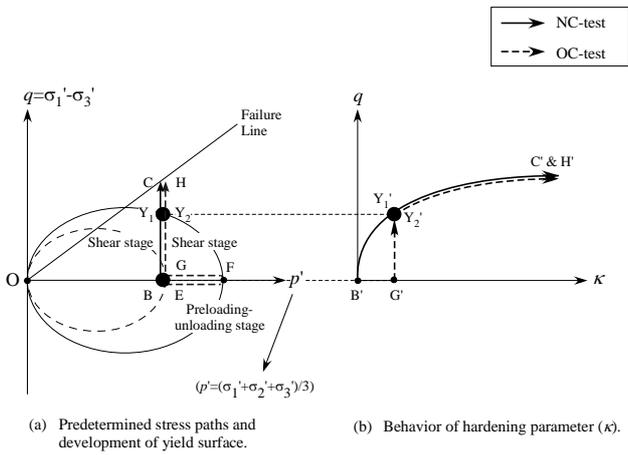


図2 等方硬化則と硬化パラメータの挙動

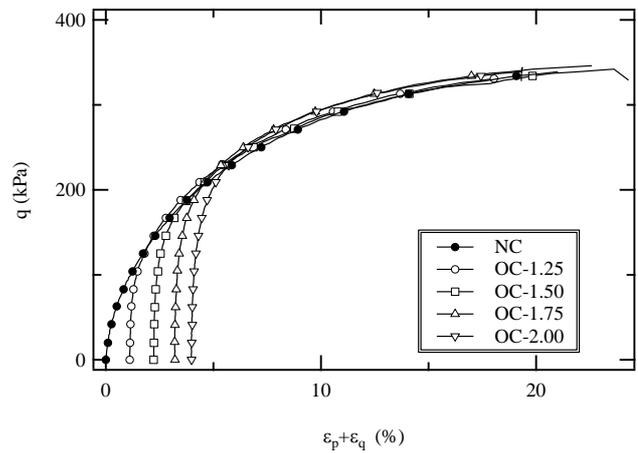


図3 OC試験のせん断過程における $\epsilon_p + \epsilon_q$ の挙動

3. 初期せん断履歴を受けた粘土の等方圧縮時における硬化挙動を調べるための実験(Pre-Shear 試験)の概略と実験結果

表2 PS試験の実験条件

Test No.	Isotropic consolidation stage	Pre-shearing and unloading stages
	Con- consolidation pressure (kPa)	Maximum pre-shearing stress, q (kPa)
PS-N0	300	-----
PS-50		50
PS-100		100
PS-200		200

(1)実験の概略 PS試験の概略を表2と図4にまとめる。この実験に用いた粘土試料もNSF-Clayである。表2のPS-N0試験は等方正規圧密粘土の等方圧縮試験であり、PS-50~PS-200は初期せん断履歴を受けた粘土の等方圧縮試験である。各試験のあらかじめ定めた有効応力経路を図4に示す。PS-N0試験は図4・経路ABの等方圧密過程と経路BCの等方圧縮過程の二つの载荷過程からなり、PS-50~PS-200試験は経路DEの等方圧密過程、経路EFGの初期せん断(p' 一定排水圧縮せん断)と除荷過程、経路GHの等方圧縮過程の三つの過程からなる。この実験の詳細については文献³⁾を参照されたい。

(2)実験結果 PC試験と同じ方法論によってせん断履歴を受けた粘土の等方圧縮中における硬化パラメータの探索を行った。すなわち無ひずみ点を等方圧密過程の終了点にとり、等方圧縮過程における p' とさまざまなひずみパラメータのグラフを描き、図2(b)の硬化パラメータと同様な挙動を示すひずみパラメータの探索を行った。その結果、先に述べたようにPC試験ではひずみパラメータ $\epsilon_p + \epsilon_q$ が硬化パラメータの有効な候補であったのに対し、PS試験ではひずみパラメータ $\epsilon_p - \epsilon_q/2$ が硬化パラメータの有効な候補であることが明らかとなった。PS試験のせん断過程における $p' \sim \epsilon_p - \epsilon_q/2$ 関係を図5に示す。

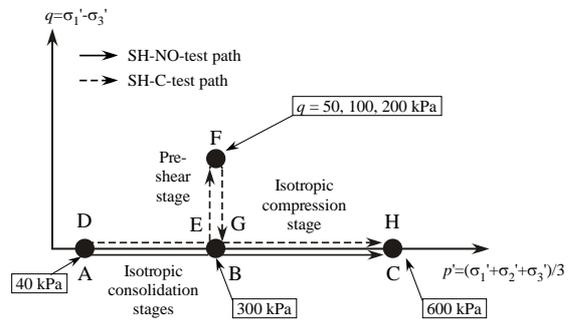


図4 PS試験の有効応力経路

4. まとめ

- (1)少なくとも p' 一定排水圧縮せん断条件や等方圧縮条件などの限定された応力条件の下では、粘土の硬化挙動を等方硬化則によって表すことが可能性である。
- (2)粘土の硬化には体積ひずみ/間隙比のみならず、せん断ひずみも大きな役割を果たす。また硬化パラメータが载荷条件によって変化している可能性がある。

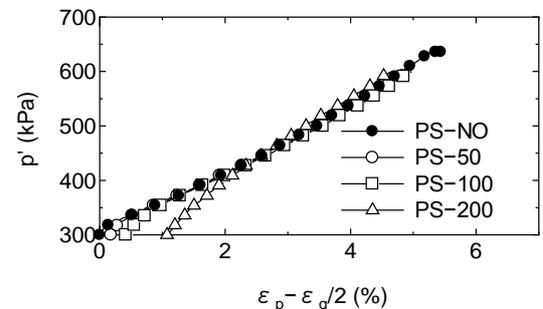


図5 PS試験の $\epsilon_p + \epsilon_q/2$ の挙動

参考文献 1)中畑・福田, 平均有効応力一定条件下における粘土の硬化則, 第46回地盤工学研究発表会講演集, 地盤工学会, 2011, pp295-296
 2)福田・中畑, 平均有効応力一定条件下における粘土の降伏規準, 第46回地盤工学研究発表会講演集, 地盤工学会, 2011, pp293-294 3)
 土田・福田・三田地, せん断履歴を受けた粘土の等方圧縮挙動, 第60回土木学会年次学術講演会講演概要集III, 土木学会, 2005, pp883-884