研究ノート

飽和粘土の載荷速度効果とダイレイタンスー

(Effects of Loading Speed and Dilatancy of Saturated Clays)

外 崎	明 ⁱ⁾	(Akira Tonosaki)
赤 石	勝 ⁱⁱ⁾	(Masaru Akaishi)
斉 藤 浩	之 ⁱⁱⁱ⁾	(Hiroyuki Saitoh)
稲 田 倍	穂 ⁱⁱ⁾	(Masuho Inada)

キーワード：せん断強さ／時間効果／ダイレイタンスー／応力経路／安定解析／粘土 (IGC : D6/E6)

1. ま え が き

軟弱地盤上の盛土の安定性の検討には、全応力法が採用されることが多い。有効応力法では軟弱地盤内の圧密中における間隙水圧の予測がむずかしく、それがあまり利用されない理由の一つとして考えられる。

しかし全応力法が簡単に利用しようと言っても問題がない訳ではない。軟弱地盤内任意点における圧密中の強度増加の厳密な評価には、有効応力法と同じようなむずかしさが存在し、同程度の計算労力を必要とするであろう。

最近、計算上の労力は電子計算機や数値解析法の進歩によってかなり軽減されるようになってきている。すなわち上述の軟弱地盤内間隙水圧の経時変化は現在計算上十分予測可能であり簡単である。しかし予測の精度・信頼性は、土の強度・変形特性の複雑性に起因する問題から、まだ実用化の段階にないと考えられる。近い将来安定問題を変形量で考える時代が到来すると思われるが、それまでの間、過去の多数の施工実績に基礎を置く全応力法による安定解析の時代が継続するであろう。

このような認識の下にこの本報告では、全応力法の安定解析に利用する飽和粘土の非排水せん断強度と載荷速度の関係について検討した。

そこでまず筆者らが当面の課題として考えている全応力安定解析に用いるせん断強度に関する主な問題点を列挙すると次のようである。

- (1) 多次元圧密条件下での圧密による強度増加
- (2) せん断変形あるいは乱れによる強度低下とその後の強度回復
- (3) 室内試験と現場の載荷速度の相違による強度変化

まず(1)について強度増加率 c_u/p は圧密時の応力条件によって異なることが知られているが、圧密中の主応力の変化や主応力軸の変化などどのように考慮すべきかなど明らかでない。(2)については、チキソトロピーによる強度回復に関する定性的説明以外ほとんど研究されていない。(3)速度効果の存在することは、古くから知られた実験の事実である。しかし現場の載荷速度は、極めて緩速であるため短時間で実施される室内試験から得られる強度と現場の土の強度との関係をどのように考えればよいか明らかでない。

本報告は問題(3)に関するものであり、飽和粘土のせん断中に発揮される負のダイレイタンスーの時間依存性¹⁾が載荷速度とせん断強度の関係にどの程度影響するか二、三の計算結果から考察した。

2. 非排水せん断強度の計算

非排水条件下で異方的応力の作用する飽和粘土に発生する過剰間隙水圧 δu_e は、一般に式(1)で表される²⁾。

$$\delta u_e = \delta p + D \delta q \quad (1)$$

ここに、 δp は平均応力増分、 δq 偏差応力増分、 D はダイレイタンスー係数である。この過剰間隙水圧が圧密によって消散すれば、有効応力増加に伴う強度増加と体積変化が発生する。式(1)から明らかなように体積変化ならびに強度増加に寄与するのは、最大有効主応力増分 $\delta \sigma_1'$ でなく、平均有効応力増分 $\delta p'$ と偏差応力増分 δq それにダイレイタンスー係数 D で、柴田・松尾の主張と一致する³⁾⁴⁾。筆者らは、これを等価有効応力増分 $\delta \sigma_e'$ として式(2)のように定義し、圧密時の応力条件に依

i) 金沢工業大学土木工学科 講師 (石川県金沢南局区内扇が丘 7-1)
ii) 東海大学工学部土木工学科 教授
iii) (株)興和
(1987.5.11 原稿受付・討議期限 1988.7.1, 要請があれば1か月の
期限延長可能)

存しない強度増加率 c_u/σ_e' を式 (3) のように表示することを提案している⁵⁾。

$$\delta\sigma_e' = \delta p' + D\delta q \quad (2)$$

$$\frac{c_u}{\sigma_e'} = \frac{\sin\phi'}{1 + (2A_f - 1)\sin\phi'} \quad (3)$$

ここに、 A_f は破壊時の間隙圧係数、 ϕ' は有効応力に関するせん断抵抗角である。

等価有効応力 σ_e' によって飽和粘土の塑性体積ひずみを式 (4) のように表す。

$$\delta v^p = \frac{\chi}{\sigma_e'} \delta\sigma_e' \quad (4)$$

ここに、 $\chi = (\lambda - \kappa)/(1 + e_0)$ 、 e_0 は初期間隙比、 λ は圧縮指数 ($c_c/2.3$)、 κ は膨潤指数 ($c_s/2.3$) である。

また筆者らは、ダイレタンシー係数 D の時間依存性を実験的に明らかにするとともにそれを一次元圧密解析に応用し、いわゆる二次圧密を定量的に予測しうることを明らかにしている¹⁾。ダイレタンシー係数が時間の対数に比例するとした場合等価有効応力増分 $\delta\sigma_e'$ は、

$$\delta\sigma_e' = \delta p' + D\delta q + \frac{0.434aq}{t} \delta t \quad (5)$$

$$D = a \log(t/t_0) \quad (6)$$

となる。ここに (6) 式中の t_0 は、ダイレタンシーが発生し始める時間である。本解析では $t_0 = 1$ 分と仮定した⁶⁾。また、弾性体積ひずみ δv^e は、式 (7) のように表すことができるので、全体積ひずみは弾性体積ひずみと塑性体積ひずみの和として式 (8) のように表すことができる。

$$\delta v^e = \frac{1}{K} \delta p' \quad (7)$$

$$\delta v = \delta v^e + \delta v^p = \left(\frac{1}{K} + C_1 \right) \delta p' + C_2 \delta q + C_3 \delta t \quad (8)$$

ここに、

$$K = (1 + e_0)p'/\kappa, \quad C_1 = \chi/\sigma_e', \quad C_2 = \chi D/\sigma_e', \\ C_3 = 0.434aq\chi/\sigma_e'/t$$

である。

非排水せん断試験では、体積変化がないので式 (8) の $\delta v = 0$ とすればせん断中の有効応力の変化が求められる。

$$\delta p' = - \frac{C_2 \delta q + C_3 \delta t}{1/K + C_1} \quad (9)$$

ここで、(9) 式中の定数 $C_1 = \chi/p'$ 、 $C_2 = \chi/(M - \eta)$ 、 $C_3 = 0$ ($\eta = q/p'$ 、 M は限界状態の η であり、 $M = 6 \sin\phi'/(3 - \sin\phi')$ で求められる。) とすれば、Original Cam Clay Model の有効応力経路が計算できる。そこで Cam Clay Model との有効応力経路の比較をしたのが図-1 である。Cam Clay Model の場合数値積分でなくても有効応力経路は得られるが、数値積分プログラムのチェックをかねていずれの有効応力経路も式 (9) より求め

図-1 有効応力経路の Cam Clay Model との比較
(1.0 kgf/cm² = 98.1 kN/m²)

た。

3. 計算ならびに実験結果と考察

4 種類の沖積粘土から解析に必要なダイレタンシー係数やその他の定数を定め、その定数を用い式 (9) から載荷速度の異なる非排水せん断試験の有効応力経路を求め、実験結果ならびに Cam Clay Model と比較する。

沖積粘土の物理的性質は表-1、解析に必要な定数は表-2 に示した。表-2 の a は通常の標準圧密試験における二次圧密速度から求めた⁷⁾。

図-2 が有効応力経路の計算結果と実験結果の比較である。図中に示したように三種類の載荷速度 ($\dot{q} = 10^{-2}$, 1.67×10^{-3} , 6.94×10^{-5} kgf/cm²/min (9.81×10^{-1} , 1.64

表-1 試料の物理的性質

試料	比重	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	粒 度 (%)		
				砂 分	シルト分	粘土分
A	2.66	103.0	50.0	16.0	51.0	33.0
B	2.69	82.0	22.0	10.0	42.0	48.0
C	2.71	88.1	40.4	38.0	51.0	11.0
D	2.67	82.6	20.8	5.0	41.0	54.0

表-2 解析に用いた諸定数

試 料	χ	M	K	α	a
A	0.077	1.48	53.63 p'	0.873	0.299
B	0.066	1.42	65.17 p'	0.719	0.205
C	0.062	1.20	70.46 p'	0.614	0.178
D	0.071	1.54	174.57 p'	0.525	0.125

図-2 有効応力経路の計算結果と実験結果 ($1.0 \text{ kgf/cm}^2 = 98.1 \text{ kN/m}^2$)

$\times 10^{-1}$, $6.81 \times 10^{-3} \text{ kN/m}^2/\text{min}$) の有効応力経路が示してある。図-2 の場合ダイレタンシーが、時間の対数に比例して生じると仮定して計算しているが、時間に依存しない定数として計算した図-1 の場合と同じように有効応力経路はほぼ直線である。4 種類の粘土では A B C D の順に二次圧密速度あるいは定数 a が小さくなるので、載荷速度の影響は小さくなり実験結果ともよく一致している。また有効応力経路に対する載荷速度の影響の大小によって Cam Clay Model による計算結果が実験結果とかなり異なることも明らかである。図-2 から明らかのように載荷速度が減少するほど大きなダイレタンシーが発揮され、限界状態 ($\eta = M$) に達した時の偏差応力 q_f は小さくなる。

そこで q_f と載荷速度の関係をプロットしたのが図-3 である。試料によって若干の差はあるが、ほぼ載荷速度

の対数に比例して q_f が増加している。これは柴田⁸⁾が、過去に実施された多くの研究者の実験結果をとりまとめた結果とほぼ同じ傾向を示すものである。また最近、関口⁹⁾は柴田のダイレタンシー理論⁴⁾におけるダイレタンシー発生の時間遅れに着目して、弾・粘塑性理論を提示し同様の解析結果を示した。筆者らの仮定のようにほぼせん断中も時間の対数に比例してダイレタンシーが生じる可能性のあることを示すものと思われる。

4. ま と め

標準圧密試験で観察される二次圧密は、偏差応力の増加に伴うダイレタンシーの時間依存性によるものであるという考えを、非排水せん断中に発揮されるダイレタンシーにも応用し、その有効応力経路を求め、二、三の考察を加えた。その結果をとりまとめると次のようであ

図-3 載荷速度と非排水せん断強さの関係 ($1.0 \text{ kgf/cm}^2 = 98.1 \text{ kN/m}^2$)

る。

(1) 飽和粘土の非排水せん断強度は、載荷速度の影響を受ける。

(2) Cam Clay Model による非排水せん断強度の予測は載荷速度ならびに粘土にダイレタンシー特性によってせん断試験結果とあう場合とあわない場合がある。

(3) ダイレタンシーの時間依存性を考慮した非排水せん断試験の計算結果より、載荷速度の対数に比例してせん断強度が増加すると言う従来から得られている実験成果と類似の結果が得られた。

参 考 文 献

- 1) 稲田倍穂・赤石 勝 (1980): ダイレタンシーを考慮した一次元圧密解析, 「土質工学会論文報告集」, Vol. 20, No.2, pp.119~127.
- 2) Skempton, A.W. (1960): "The pore-pressure coefficient in saturated soils," Correspondence to Geotechnique, Vol.10, No.4, pp.186-187.

- 3) 柴田 徹・松尾 稔 (1962): 粘土のダイレタンシー, 「第 11 回レオロジー討論会講演概要」, pp.50~60.
- 4) 柴田 徹 (1963): 粘土のダイレタンシーについて, 「京都大学防災研究所年報」, 第 6 号, pp.128~134.
- 5) 稲田倍穂・赤石 勝・寒河江健也 (1981): 強度増加率に関する一考察, 「土質工学会論文報告集」, Vol.21, No.1, pp.139~145.
- 6) 赤石 勝・稲田倍穂・白子博明 (1981): 一次元圧密における排水距離と圧密係数, 「土質工学会論文報告集」, Vol.21, No.3, pp.132~136.
- 7) 稲田倍穂・赤石 勝・山田道男・似内政康 (1981): 標準圧密試験結果を利用した二次圧密の予測, 「土と基礎」, Vol.29, No.3, pp.25~29.
- 8) 柴田 徹 (1974): レオロジーの立場から, 「第 29 回年次学術講演会研究討論会資料」, 土木学会, pp.38~40.
- 9) Sekiguchi, H. (1977): "Rheological characteristics of clays," Proc. 9 th ICSMFE Vol 1, pp.289-292.