

京都大学大学院 正会員 岡 二三生・小高 猛司

京都大学大学院 学生員 金 容成・○石垣 成直

1.はじめに

地下トンネルを掘削する際の地盤改良工法の1つに凍結工法がある。近年ではその信頼性の高さから、砂質地盤のみならず都市部の粘土地盤への適用例も報告されつつある¹⁾。しかし、粘土地盤に凍結工法を採用する場合には、凍結時の地盤全体の膨張や、その反動で現れる融解時の大沈下等が心配される。本報では、実際に粘土地盤に凍結工法が適用された現場において採取された試料を用いて、凍結・融解履歴を受けた粘土の変形・強度特性を調べた。また、凍結・融解履歴による粘土の構造の劣化を調べるために、再構成練返し粘土による比較実験も行ったので合せて報告する。

2.実験概要

表 1 物理試験結果

(1)実験試料：表1に当該粘土の物理試験結果を示す。試料採取地点は深度20mの神戸市内の大阪洪積粘土層である。

G_s (g/cm^3)	w_n (%)	w_L (%)	w_P (%)	I_p (%)	砂分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)	D_{max} (mm)
2.636	33.4	59.1	27.4	31.7	9.8	56.2	34.0	0.85

(2)実験方法：凍結・融解履歴を受けた試料(以後便宜的に凍結試料と記す)の供試体の鉛直方向は、原地盤では水平方向である。凍結、練返し、いずれの試料も3軸セルに設置した後、2重負圧法により飽和化を行った。

3軸圧縮試験は、有効拘束圧1.0, 2.0, 3.0, 4.0 kgf/cm^2 で等方圧密後、軸載荷速度0.01%/minで非排水せん断を行った。

等方圧密試験は練返し試料、凍結試料のいずれも有効拘束圧0.5~5.0 kgf/cm^2 まで0.5 kgf/cm^2 刻みで載荷した。

3.実験結果

図1に、3軸試験による凍結試料と練返し試料の(a)有効応力径路と(b)軸差応力~軸ひずみ関係を示す。図2のプロットは3軸試験における圧密過程終了時の平均有効応力と空隙比の関係を示したものである。図3は3軸試験の各有効拘束圧での圧密過程において計測された体積ひずみ ϵ_v および軸ひずみ ϵ_a を示したものである。

図1(a)より、破壊応力比 M は、凍結試料が1.4、練返し試料が1.25であり、凍結試料における変相線が練返し試料の限界状態線とほぼ一致している。図3の圧密過程での ϵ_v および ϵ_a との関係をみると、凍結試料の軸ひずみの発生は卓越しており、等方圧密であるにも拘らず軸方向に卓越した異方的な変形を示している。

4.実験の考察

(1)強度特性

図1に示すように、どの有効拘束圧においても破壊時軸差応力は凍結試料の方が大きかったが、図2を見ると、ばらつきが多いとはいえ凍結試料の方が空隙比は大きい。

これは、練返し試料よりも凍結試料の方が、より構造を残しているからと考えられる。今回凍結前の不攪乱試料を得ることができなかったが、比較のため試料採取地点はかなり離れているが同じ大阪洪

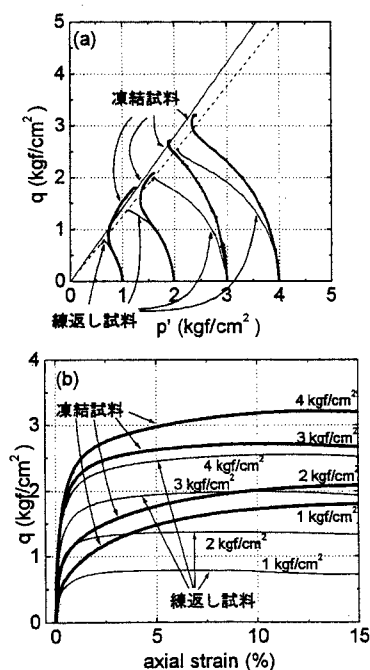


図1 三軸圧縮試験結果

Fusao Oka, Takeshi Kodaka, Yong-Seong Kim and Shigenao Ishigaki

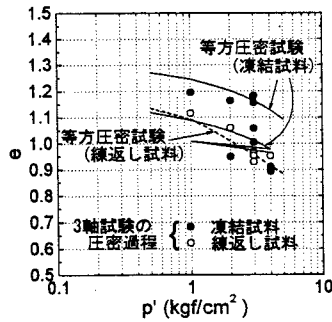


図2 圧密終了後の $e-p'$ 関係および
等方圧密試験結果

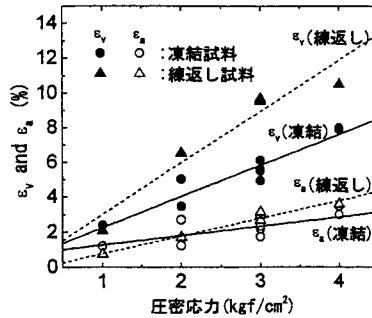


図3 三軸試験の圧密過程で発生する
体積ひずみと軸ひずみ

積粘土層(MA12)の粘土を用いた 3 軸試験の結果を図 4 に示す²⁾。試料は本報の試料とほぼ同深度で得られたものであり、図には不撓乱試料とその練返し再構成試料の試験結果が示されている。この練返し試料の破壊時軸差応力は、本報の練返し試料の実験結果(4kgf/cm²)とほぼ同じであるが、不撓乱試料は本報の凍結試料よりも破壊時軸差応力は大きく、かつピークに達した後に大きく軟化していることがわかり、不撓乱状態ではきわめて構造が卓越していたことが見て取れる。本報の凍結試料においても、不撓乱状態においては構造が卓越していたと予想されるが、凍結・融解履歴を受けることにより、相当量の構造が劣化したと考えられる。この構造の劣化の原因としては、凍結時に粘土内に局所的に生長するアイスレンズにより、構造が直接破断されたり、間接的に膨張に伴う複雑な応力履歴により劣化すると現在のところ考えている。

(2) 圧縮特性

図 2 の等方圧密試験結果が示すように、凍結試料と練返し試料の圧縮指数はほぼ同じであり、凍結・融解履歴を受けた粘土の圧縮挙動は練返し粘土に近いと考えられる。図 3 で観察された凍結試料の圧密中の異方的な変形については、もともとの自然堆積状態における異方性

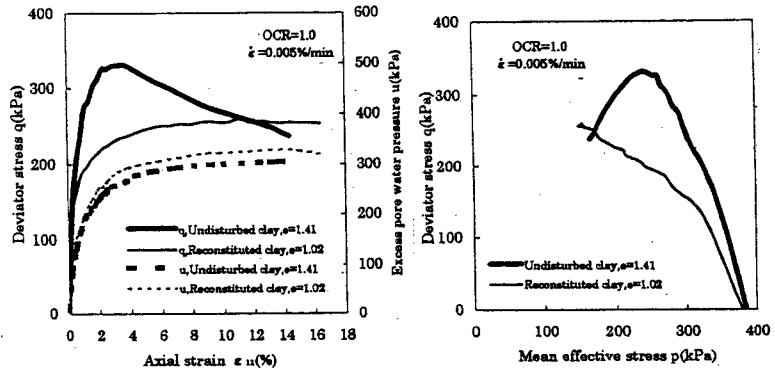


図4 大阪久宝寺粘土(MA12)の 3 軸試験結果(文献 2))

の他にアイスレンズの影響が考えられる。原位置における凍結管の配置から考えて、アイスレンズは供試体に対して水平方向に生長していると考えられるが、実際目視でも供試体には水平の小さなクラックが多数観察されている。軸ひずみが卓越しているのは、このアイスレンズによる多数のクラックの影響もあると考えている。また、図 3 によれば、原位置での有効土被り圧を 2kgf/cm² とすれば、凍結後の融解時に発生する体積ひずみは約 3~5%と読み取れる。融解時の体積変化がすべて 1 次元的に発生すると仮定すれば、粘土層厚が 2m の場合は 6~10cm の沈下は発生することが予想され、都市部の近接施工では融解時には何らかの対策を講じる必要があるだろう。

5. おわりに

凍結・融解履歴を受けることにより、自然堆積粘土の構造はかなり劣化することがわかったが、練返し粘土のレベルにまでは至らない。凍結・融解後の粘土地盤の強度を評価する場合にも練返し粘土まで落として考える必要はないだろう。しかし、融解時に発生する圧縮量は、特に都市部の施工においては決して無視できるレベルではない。

参考文献： 1) 鎌田ら(1998)：大規模凍結工法を用いた通信用トンネルの地中切下げ工事，平成 10 年度施工技術報告会，地盤工学会関西支部，2) 八嶋・重松・岡・長屋(1999)：上部大阪洪積粘土の力学特性と骨格構造，土木学会論文集（掲載予定）