排水条件とひずみ速度がジオグリッド による固化土の補強効果に及ぼす影響

奥田聖章¹・重久伸一²・宮田喜壽²

著者らは、固化土の脆性的な力学特性をジオグリッドで補強する技術について検討を行っている。本研究では、排水条件とひずみ速度が補強効果に及ぼす影響を調べた。一連の実験では、ジオグリッドを配置した固化土に対して、擬似過および正規圧密の条件で直接引張試験を行った。排水条件の影響は非常に小さいことが明らかになった。ひずみ速度の影響は、正規圧密条件で卓越することが明らかになった。

キーワード：ジオグリッド、固化土、排水条件、ひずみ速度

1. はじめに

固化処理は、そのままでは地盤材料として用いることができない現場発生土などに、セメント等の固化材を添加混合することで化学的に安定処理する技術である¹⁾。固化処理は経済性や施工性で有利なことから、多くの施工実績をあげている。しかし、地震による港湾構造物の被災事例から固化土に引張クラックが生じることが確認され、模型実験でもそのような挙動が明らかにされている。固化土の引張りに対する脆性的な力学特性を改善する技術が必要である。著者らは、固化土の脆性的な力学特性をジオグリッドで補強する方法に着目し、実験と解析の両面から検討を行っている^{2,3)}。

固化材の添加量やジオグリッドの配置を合理的に行うには、種々の条件に対する補強効果について調べる必要がある。本文では、排水条件とひずみ速度が補強効果に及ぼす影響を調べた室内試験の結果について検討した結果を示す。

2. 実験の概要

本研究で用いた試験装置の概要を図-1に示す。一連の実験では、固化土の脆性的な性質が最も卓越する問題として、固化土あるいはジオグリッドを配置した固化土の引張り力に対する応答を調べた。三平ら⁴⁾を参考に作製した装置で、曲げや偏心载荷による影響を軽減するために、载荷軸とキャップおよびペDESTALとの接合部にユニバーサルジョイントを装着しているのが特徴である。角柱供試体の上下部を模型用石膏で固定具と接着し、引張り力を供試体に直接作用させた。実験は、等方圧密後、側圧一定、変位制御で载荷した。

固化土は、木節粘土に普通ポルトランドセメント（以

下セメント）を混合して作製した。木節粘土の物性値は表-1のとおりである。木節粘土を液性限界の約1.5倍に相当する含水比に調整し、これにセメントを固化土1.0m³あたり100kgの割合で混合した。これを、固化

図-1 実験装置の概要

図-2 実験で用いた補強材の応力-ひずみ関係

1 学生会員，防衛大学校 建設環境工学科（〒239-8686 横須賀市走水1-10-20）

2 正会員，防衛大学校 建設環境工学科（〒239-8686 横須賀市走水1-10-20）

表-1 木節粘土の物性

土粒子密度 (g/cm^3)	2.651
平均粒径 (mm)	0.0025
液性限界 (%)	92
塑性指数	59

表-2 排水条件の影響を調べる実験ケース

補強パターン	無補強, 補強
排水条件	排水, 非排水
拘束圧 (kPa)	0, 49, 98, 147, 196
ひずみ速度 (%/min)	排水 : 0.01, 非排水 : 0.1

表-3 ひずみ速度の影響を調べる実験ケース

補強パターン	無補強, 補強
排水条件	非排水
拘束圧 (kPa)	0, 147
ひずみ速度 (%/min)	0.01, 0.1, 1, 10

処理土の乾燥重量に対する固化材の添加量の比 a_w で整理すると, $a_w = 17.3\%$ となる. 養生は完全密封状態で水中において7日間行った. ジオグリッドは, 強度や目合いが実際より小さい高分子シートを用いた. 補強材の選定において, 相似則などは考慮しなかった. 4種類のひずみ速度で実施した引張試験の結果を図-2に示す. ひずみ速度が大きくなるほど, 剛性および強度が大きくなった.

排水条件が補強効果に及ぼす影響を調べる実験ケースを表-2に示す. 圧密圧力が固化土の引張強度に与える影響を調べるために, 排水および非排水の条件において, それぞれ圧密圧力を 0, 49, 98, 147, 196 kPa の5通りに変化させて, 合計 10 ケースの実験を行った. 圧密の打ち切り時間は 3t 法で定めた. 排水条件での試験においては, ひずみ速度が 0.01%/min のときと 0.1%/min のときとで固化土の引張強度特性は大きく変化する. 一方, 非排水条件の試験においては, ひずみ速度が 0.01%/min のときと 0.1%/min のときとで固化土の引張強度特性はほとんど変わらないことを確認している. 実験条件の制約から, 載荷時のひずみ速度は非排水条件の試験の場合が 0.1%/min, 排水条件での試験の場合が 0.01%/min とした.

ひずみ速度が補強効果に及ぼす影響を調べる実験ケースを表-3に示す. 非排水条件とし, 拘束圧は 0kPa と 147kPa の2種類とした. ひずみ速度は, 0.01, 0.1, 1, 10%/min の4通り変化させて, 合計8ケースの実験を行った.

3. 実験結果と考察

(1) 排水条件の影響

無補強の場合の実験結果を図-3に示す. 排水・非排水試験それぞれに, 3種類の拘束圧条件に対する結果を示した. 非排水条件の場合には, 応力-ひずみ関係において, 拘束圧が小さいときほど, ピーク後の q の減少

図-3 軸差応力と平均軸ひずみの関係 (無補強)

図-4 引張強度 q_f と圧密圧力 σ_3 の関係 (無補強)

が大きかった. 拘束圧が大きいとき, ピーク強度を発揮後, ゆるやかに引張応力が減少した. 排水条件の場合には, 非排水条件の結果と異なり, 拘束圧が小さい場合 q はほとんど増加せずに残留状態に推移した. また, 排水条件の場合には, 明確なピークを示さず残留強度を発揮した. 一般に, 排水試験の方が非排水試験より変形の自由度が大きい. 排水試験の方がそれだけ不連続面の発生が容易だったため, 強度が小さくなったと考えられる. 排水条件により引張抵抗が異なることが明らかになった.

以上の応力ひずみ関係の特徴付けるパラメータとして, 軸差応力 q の最大値 q_f と圧密圧力 σ_3 との関係を排水条件ごとに考察した. まず, ピーク強度 q_f と圧密圧力の関係を図-4に示す. 非排水試験の結果をみると, $\sigma_3 = 100$ kPa 付近を境に両者の関係は2直線で近似できることがわかる. 2直線の交点での圧密圧力を σ_y と表すと, 非排水強度と圧密圧力の関係は次式で表すことができる.

$$q_f = a_0 \quad (\sigma_3 < \sigma_y) \quad (1)$$

$$q_f = a_1 \cdot \sigma_3 \quad (\sigma_3 \geq \sigma_y) \quad (2)$$

ここで, a_0, a_1 : 材料定数.

図-5 軸差応力と平均軸ひずみの関係 (補強)

図-7 引張強度 q_t と圧密圧力 σ_3 の関係 (補強)

図-6 実験パラメータ

一方、排水強度と圧密圧力の関係は次式で表すことができる。

$$q_f = a_2 \cdot \sigma_3 + a_3 \quad (3)$$

ここで、 a_2 、 a_3 ：材料定数。

圧密圧力が σ_3 より小さい場合は、非排水強度の方が排水強度よりも大きくなる。一方、圧密圧力が σ_3 より大きい場合は、排水強度の方が非排水強度よりも大きくなった。今回の実験では、排水強度と非排水強度の大きさが逆転する圧密圧力の大きさは 70kPa 程度だった。排水条件で固化土に荷重を作用させると、わずかな体積変化で構造が破壊されるが、圧密圧力が大きいと変形に伴う構造の再生が生じるので、圧密圧力が大きいとき、非排水条件のときより強度が大きくなったと考えられる。これらの結果は、小林・龍岡によるセメント固化土の圧縮試験⁵⁾においても同じような結論が報告されている。非排水強度と圧密圧力の関係が変化するときの圧密圧力は、固化土の構造の強さを表していると考えられる。これを圧密試験の降伏応力と関係付ける試みがなされているが、圧密中の養生時間の影響が無視できないと思われる。小林・龍岡⁵⁾は、一軸圧縮試験で観察された降伏応力で構造の強さを評価する試みをしている。今回の実験にそれをあてはめると、一軸圧縮試験における降伏応力 q_f は σ_3

の 85%程度となった。今後、より長い養生時間や載荷時のひずみ速度を変えた実験によって、構造の強さに関する指標の考え方について議論する必要がある。以下、本文では便宜上、圧密圧力が σ_3 より小さい場合を擬似過圧密領域、圧密圧力が σ_3 より大きい場合を擬似正規圧密領域と呼ぶことにする。

次に、補強した場合の実験結果を図-5に示す。非排水条件の場合、拘束圧が小さいときは、一度ピークを示したあと q は低下するが、あるところで下げ止まり、その後再び残留抵抗を示した。また、拘束圧が大きい場合には、 q は低下することなく残留抵抗を發揮する。排水条件の場合、拘束圧が小さい場合でも、 q はピークを示すことなく残留抵抗を發揮する。

補強した場合の応力-ひずみ関係を模式的に図-6に示す。補強した場合は、拘束圧が大きい条件では、明確なピークを示さず、残留抵抗を發揮する。そのため、残留抵抗を發揮するときの軸差応力を引張強度 q_t とした。残留時に明確なピークが見られない実験ケースの場合には、平均軸ひずみ $\epsilon_a = 3.0$ %時の q を引張強度とした。拘束圧 σ_3 と q_t あるいは q_f との関係を図-7に示す。排水条件に関わらず、直線ではほぼ近似できる。今回の実験条件において、補強効果は排水条件、拘束圧の大きさに関係なく、見かけの粘着力として評価できることが明らかになった。この見かけの粘着力は、固化土と補強材の相互作用によるものであり、今後はより広範囲な実験によりモデル化する必要がある。

(2) ひずみ速度の影響

無補強の場合の引張強度 q_t とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の関係を図-8に示す。拘束圧の大きさに関わらず、 q_t の大きさは、ひずみ速度が 10^2 %/min と 10^1 %/min のときとではほぼ同じだった。一方、 10^1 %/min 以上になると、 q_t の大きさは、ひずみ速度の対数に比例して大きくなった。その増加割合は、拘束圧の大きさによってほとんど変わらなかった。

図-8 引張強度 q_t とひずみ速度の関係（無補強）

図-9 引張強度 q_t とひずみ速度の関係（補強）

補強の場合の引張強度 q_t とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の関係を図-9に示す。拘束圧が大きい方が、ひずみ速度の対数に比例して引張強度がより大きくなった。拘束圧が大きくなると、ジオグリッドの引張り力による補強効果が卓越する。ジオグリッドの引張り強度特性は、ひずみ速度に依存するので、圧密圧力が σ_v より大きい領域、すなわち擬似正規圧密領域においては、補強した供試体の引張り強度はひずみ速度に大きく依存するようになると考えられる。

4. まとめ

排水条件とひずみ速度がジオグリッドを配置した固化土の引張試験に及ぼす影響を室内試験で調べた。擬似過圧密、正規圧密の条件で、排水および非排水条件で載荷を行い、排水条件が補強効果に及ぼす影響を調べた結果、排水条件の影響は非常に小さいことが明らかになった。次に、非排水条件で、ひずみ速度の影響を調べた結果、擬似正規圧密領域では補強効果のひずみ速度依存性が大きくなることが明らかになった。

現在、より詳細に現象を理解するために、微視構造の

可視化実験を行っている。それらの結果をふまえた解析モデルの構築を今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 北詰昌樹, 善 功企: 地盤工学ハンドブック 第4編構造物各論 8.6 化学的・熱的固化による工法, (社)地盤工学会, pp.1235-1248, 1999.
- 2) 重久伸一, 宮田喜壽, 末次大輔, 奥田聖章, 落合英俊: 補強材を配した固化処理土の引張強度特性に関する基礎的研究, ジオシンセティックス論文集, Vol.20, pp.117-122, 2005.
- 3) 宮田喜壽, 重久伸一: ジオグリッドで補強された固化土の粒状離散化解析, 土木学会論文集 (投稿中)。
- 4) 三平信吾, 古関潤一: セメント改良砂の一軸・三軸引張試験, 土木学会 第56回年次学術講演会講演概要集, pp.310-311, 2001.
- 5) 小林 晃, 龍岡文夫: セメント混合により改良した飽和軟弱粘性土の強度変形特性 III-排水せん断特性-, 生産研究 第34巻, 第8号, pp.27-30, 1982.

INFLUENCE OF DRAINAGE CONDITIONS AND STRAIN RATE ON TENSILE STRENGTH OF REINFORCED STABILIZED SOIL WITH GEOGRID

Kiyoaki OKUDA, Shin-ichi SHIGEHISA and Yoshihisa MIYATA

Authors examine reinforcing effect of geogrid for stabilized soil. In this research, the effects of drainage condition and strain rate condition were investigated in the laboratory test. In a series of the test, tensile strength of reinforced stabilized soil was measured in the pseudo-over or normal consolidation condition. As a test result, it was cleared that drainage condition does not affect on the reinforcing effects. And it was cleared that it becomes remarkable in the pseudo-normal consolidation condition.

Keywords: geogrid, stabilized soil, drainage condition, strain rate