

ESR 工法による改良土の強度ばらつきと内部構造に関する実験的研究

新潟大学 非会員 ○櫻井遥 新潟大学 正会員 金澤伸一

新潟県土質改良事業協同組合 非会員 帆苅浩三 新潟県土質改良事業協同組合 非会員 戸田東一

1. 研究背景・目的

軟弱土を利用した盛土造成では、改良土に必要な強度を付与するとともに、施工範囲全体で品質を安定させることが求められる。平均強度が十分でも、局部的に弱い部分が混在すれば、盛土内の変形・応力状態が不均一となる可能性がある。そのため、改良土の品質評価では、強度だけでなく、ばらつきや内部状態の均一性も重要である。改良土の品質は、原料土の含水比、改良剤の添加量や混合方法などに影響される。ESR 工法は、自走式土質改良機を用い、原料土の含水比に応じて改良剤添加量を調整する¹⁾。一方、バックホウによる混合では、改良剤の混合状態が施工操作に左右される可能性がある。このため、各工法の改良土の内部状態を比較することは、施工品質の評価に有意義である。本研究では、ESR 工法、バックホウ混合および原位置改良による 3 種類の試験盛土からコア試料を採取し、一軸圧縮試験と X 線 CT 測定を行った。一軸圧縮強さと CT 値の分布を比較し、各工法の強度特性と内部均一性の違いを把握するとともに、盛土造成における ESR 工法の適用可能性を検討する。

2. 試験方法

母材は礫まじり砂質シルトで、含水比 49.6 %，土粒子密度 2.64 g/cm^3 であった。改良剤として特殊土用セメント系固化材 GS200 を母材 1684 kg に対して 90 kg 添加した²⁾。試験対象は、異なる混合・施工方法で造成した 3 工法の試験盛土である。ESR 工法では自走式土質改良機内で改良剤の添加・混合を行い、バックホウ混合および原位置改良では土量に応じて改良剤を散布し、バックホウによって混合した。それぞれの盛土から採取したコア試料を用い、直径 5 cm，高さ 10 cm の供試体を各工法 6 本用意した。各工法の供試体は、材齢 7 日と 28 日にそれぞれ 3 本ずつ割り当てた。各材齢で X 線 CT 測定を行った後、一軸圧縮試験を JIS A 1216:2020 に準じて実施し、試験後には供試体の含水比を測定した。X 線 CT 測定は管

電圧 135 kV，管電流 100 mA，スキャン速度 1 s，スライス厚 1 mm，再構成間隔 1 mm とした。CT 値と密度の対応関係を求めるため、直径 2 cm，高さ 1 cm で含水比の異なる検量線用供試体を作製し、CT 値と含水比および湿潤密度との関係を整理した。また、湿潤密度の箱ひげ図を用い、各工法の供試体内部および供試体間の分布傾向を比較した。

3. 試験結果及び考察

3. 1 一軸圧縮強さの比較

各工法の一軸圧縮試験結果を図-1 に示す。ESR 工法では材齢 7 日で 212.5 kN/m^2 ，28 日で 308.0 kN/m^2 であった。原位置改良ではそれぞれ 153.3 kN/m^2 ， 154.1 kN/m^2 ，バックホウ混合では 121.9 kN/m^2 ， 157.0 kN/m^2 となり、今回の比較では ESR 工法が両材齢で最も高い値を示した。ESR 工法では材齢 7 日から 28 日にかけて強度の増加が認められたのに対し、原位置改良では増加が小さかった。ただし、盛土造成への適用性を考える場合、強度の最大値のみで工法の優劣を判断することは適切ではない。所要強度を満たすことを前提として、施工後の改良土に局所的な低品質部が生じにくいかという観点も重要である。

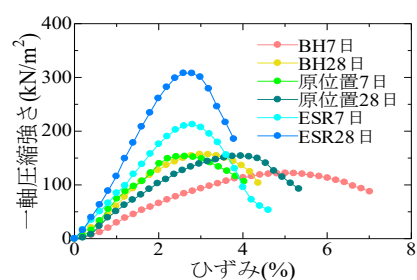


図-1 一軸圧縮試験結果

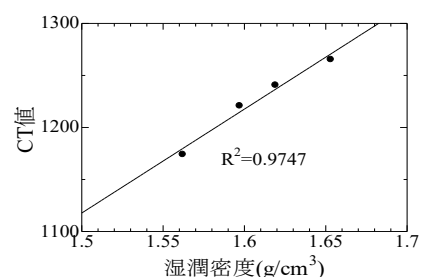


図-2 CT 値-密度検量線

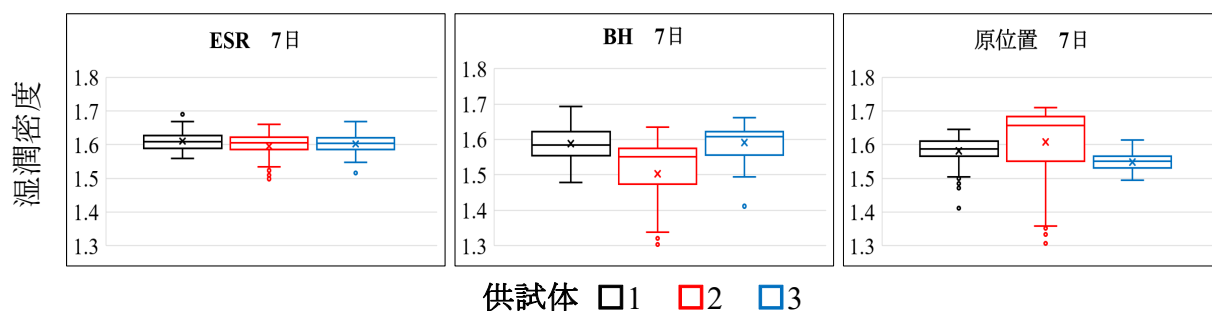


図-3 湿潤密度の箱ひげ図

3. 2 CT 値の分布と内部均一性

材齢 7 日における各供試体の CT 値の箱ひげ図を図-3 に示す。ESR 工法の CT 値は 1116～1313 であったのに対し、バックホウ混合では 747～1310、原位置改良では 925～1327 の範囲に分布した。これらの範囲には外れ値も含まれるが、ESR 工法では 3 本の供試体で箱の幅が比較的小さく、分布の集中した傾向が認められた。一方、バックホウ混合および原位置改良では、一部の供試体で CT 値の分布幅が大きく、低 CT 値側に外れた測定値もみられた。このことは、これらの供試体の内部状態に局所的な差が存在する可能性を示している。材齢 28 日についても、元の測定結果では同様の傾向が確認されている。X 線 CT 値は密度や含水状態、材料組成などの影響を受けるため、CT 値の分布だけで改良剤の偏在や強度ばらつきの原因を断定することはできない。しかし、同一の撮影条件で得られた CT 値の分布を比較することは、改良土の内部不均一性を把握するための有用な手がかりとなる。

3. 3 CT 値と推定湿潤密度の関係

CT 値と湿潤密度の検量線を図-2 に示す。検量線には高い相関 ($R^2=0.9747$) が認められた。各工法の平均 CT 値は、ESR 工法が 1217.7、原位置改良が 1190.0、バックホウ混合が 1149.6 であった。この値を検量線により湿潤密度に換算すると、それぞれ 1.60 g/cm^3 、 1.57 g/cm^3 、 1.53 g/cm^3 となり、ESR 工法が最も高かった。一方、3 工法間の推定平均湿潤密度には比較的小さな差しか認められないのに対し、図-1 に示す一軸圧縮強さには明瞭な差が生じている。したがって、今回の強度差を平均湿潤密度のみで説明することは難しく、混合状態や密度の局所的な分布なども含めた検討が必要である。また、検量線による密度換算には

含水状態・材料構成の影響も考慮する必要がある。

3. 4 盛土造成に対する示唆

盛土造成では、必要な強度の確保に加え、品質の安定化が重要である。本研究では、ESR 工法は他工法より高い一軸圧縮強さを示し、推定平均湿潤密度の分布幅も比較的小さい傾向がみられた。この結果から、ESR 工法は強度向上と品質安定化に有効である可能性が示された。ただし、供試体数が限られるため、盛土全体の品質の均一性については、今後の検証が必要である。

4. まとめ

ESR 工法は、材齢 7 日および 28 日のいずれも 3 工法の中で最も高い一軸圧縮強さを示した。また、材齢 7 日の湿潤密度の箱ひげ図では、ESR 工法の供試体では分布幅が比較的小さく、他の工法の一部の供試体では大きな分布幅が確認された。工法間の推定平均湿潤密度の差は、強度差ほど大きくなかった。以上より、ESR 工法は所要強度の確保に加え、内部状態のばらつきを抑えた改良土を供給する観点から、盛土造成に利用価値を有することが示唆された。

5. 今後の課題

今後は供試体ごとの一軸圧縮強さの標準偏差・変動係数を求め、CT 値分布との対応を検討する。また、CT 断面の低 CT 値領域と施工条件の関係を整理し、改良土の内部不均一性が盛土の変形・安定性に及ぼす影響を数値解析も併用して評価する。

6. 参考文献

- 1) ESR 工法 自走式土質改良 リサイクル
<https://www.niigata-esr.com/>
- 2) 新潟県土質改良事業協同組合
「盛土の健全性評価に関する試験施工報告書」
令和 8 年、未公開資料