

改良型針貫入試験による固化改良土（砕・転圧盛土工法）の強度推定原理

株式会社 フジタ 正会員 ○北島 明・福島伸二・堀田崇由

§ 1. まえがき

砕・転圧盛土工法¹⁾は老朽化したフィルダムやため池の堤体改修（補強や漏水防止）を池内に堆積した底泥土を所要の強度や遮水性を有するように固化改良した築堤土（砕・転圧土）により行うもので、これまでに13事例に適用されている。筆者らは砕・転圧盛土工法における固化改良土の強度管理に針貫入試験の適用性について検討してきたが²⁾、対象となる固化改良土の強度レベルが $q_u \leq 200 \sim 1000 \text{ kN/m}^2$ と一般の地盤改良工法に比較して低く、直径0.84mmの木綿針を用いる通常型針貫入試験では貫入抵抗が小さく強度推定における精度が問題となっていた。そこで、本稿は砕・転圧盛土工法の固化改良土にも適用できるように針径を大きくした改良型針貫入試験の強度推定原理について室内試験により調べた結果を報告する。

§ 2. 針貫入試験の強度推定原理

針貫入試験は軟質な岩石に試験針（JIS S3008 木綿針2号針）を一定速度で貫入させたときの抵抗力 P と貫入量 δ の比例関係より、 $\delta=10\text{mm}$ における針貫入勾配 $N_p (=P/\delta \text{ (N/mm)})$ から一軸圧縮強さ $q_u (\text{kN/m}^2)$ を求めるもので、試験が現場で簡単にできる利点がある³⁾。 q_u と N_p の関係には市販の針貫入試験機（丸東製作所社製軟岩ペネトロ計 SH-7⁴⁾）に付属した相関図に強度換算式として $q_u=418 \cdot N_p^{0.978}$ が与えられている。上式は $20 \sim 300 \text{ MN/m}^2$ の軟岩、 $5 \sim 100 \text{ MN/m}^2$ の固化改良土の試験から得られたものである⁵⁾。

針貫入試験は、図-1に概念的に示すように、直径 d の試験針を供試体中に深さ δ まで一定速度で貫入させると P と δ の間に比例関係が得られるが、この意味は以下のように説明できる。 P と貫入した針周面に発揮されるせん断応力 τ の関係は、 d が小さく先端の尖った針の先端抵抗を無視すると周面摩擦のみからなり $P=\pi \cdot d \cdot \tau \cdot \delta$ となる。そして、 P は応力レベルが低く内部摩擦角の影響を無視できるので τ を粘着力 c に等しいとおけるから、 $P=\pi \cdot d \cdot c \cdot \delta$ となる。したがって、 c と q_u の関係を $c=q_u/2$ とおくと $P=\pi \cdot d \cdot (q_u/2) \cdot \delta$ となり、 P と δ が比例しているので貫入勾配 $N_p=P/\delta$ を導入すると

$$q_u=2 \cdot (P/\delta) / (\pi \cdot d) = 2 \cdot N_p / (\pi \cdot d) \quad (1)$$

が得られる。すなわち、針貫入試験は q_u と N_p の間に比例関係が成り立つことを利用した強度試験とすることができる。

§ 3. 改良型針貫入試験による強度

改良型針貫入試験は、 P を大きくするために木綿針より直径を大きく $d=4\text{mm}$ あるいは 2mm としたロッドを用い、その先端を図-2に示すように固化改良土内にスムーズに貫入し式(1)で想定したように周面摩擦抵抗だけを受けるように角度 $\theta=30^\circ$ のコーン状にしたコーン・ロッド型針（Mk. I）を採用した。写真-1には使用した試験針 Mk. I の外観を示す。針を δ だけ貫入させたときの P は前述の通常型針貫入試験と同様に c のみによる表面摩擦抵抗からなるとすると、コーン部の貫入量 δ_c による抵抗力 P_c と、ロッド部のみの貫入量 $\delta-\delta_c$ による P_R からなり（ $P=P_c+P_R$ ）

$$P_c=(\pi/2) \cdot q_u \cdot \tan(\theta/2) \cdot \delta_c^2 / \cos(\theta/2) \quad (2.1)$$

$$P_R=(\pi \cdot d/2) \cdot q_u \cdot (\delta-\delta_c) \quad (2.2)$$

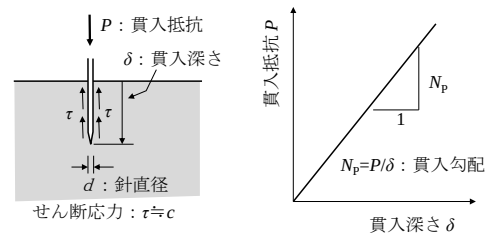


図-1 針貫入試験の貫入抵抗と貫入深さの関係

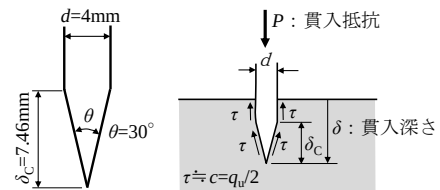


図-2 改良型針貫入試験 Mk. I の貫入針と貫入抵抗

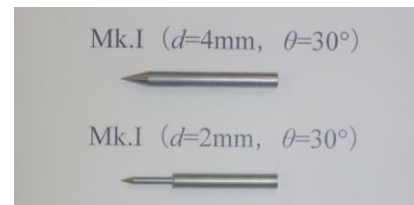


写真-1 改良型針貫入試験 Mk. I

とおくことができる。 P_c はコーン部貫入量 δ_c の二乗に比例する。また、式(2.1)の $P_R (=P-P_c)$ はロッド部貫入量 $\delta-\delta_c$ に比例し、貫入勾配を $N_p=P_R/(\delta-\delta_c)$ とおくと式(1)と同形になる。

§ 4. 改良型針貫入試験 Mk. I の試験結果

固化改良土の供試体の準備には図-3に粒度曲線を示すNNカオリンと藤の森粘土を質量比1:0.25で混合し、含水比 $w=60\%$ に調整したモデル化底泥土を使用した。針貫入試験用の固化改良土供試体は水平地盤状態を再現するために、直径100mm×深さ50mmの口の広い浅いビーカー内で、モデル化底泥土にセメント系固化材（高有機質土用）を添加して攪拌混合直後のまだ固まらない状態で詰めて所定期間だけ固化させて準備した。固化改良土の強度は固化材添加量や養生日数を種々変えることで制御した。針貫入

キーワード：針貫入試験，固化改良土，一軸圧縮強さ

連絡先 〒243-0125 神奈川県厚木市小野 2025-1 株式会社フジタ 技術センター 土木研究部 ☎ 046-250-7095

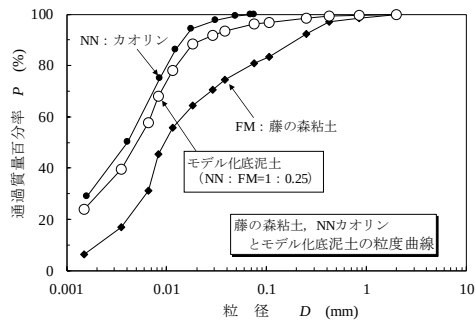
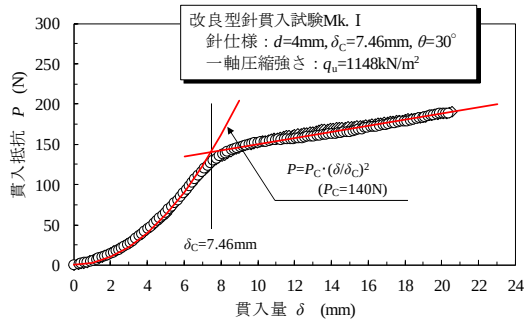
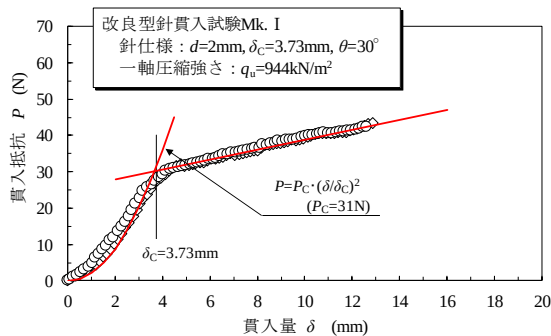
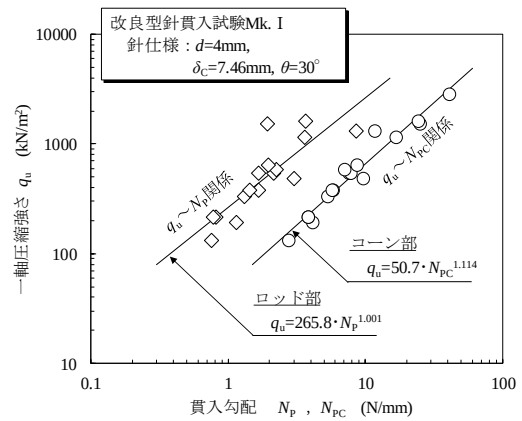


図-3 モデル化底泥土試料の粒度曲線

図-4 $d=4\text{mm}$ の針貫入試験 Mk. I による $P \sim \delta$ 関係 ($q_u=1148\text{kN/m}^2$)図-5 $d=2\text{mm}$ の針貫入試験 Mk. I による $P \sim \delta$ 関係 ($q_u=944\text{kN/m}^2$)

試験は針をビーカー内の固化改良土面に一定速度 3.5mm/分で貫入させて実施した。固化改良土の q_u は直径 50mm×深さ 100mm の二つ割り成形モールド内で、モデル化底泥土を針貫入用供試体と同一条件で固化させた供試体の一軸圧縮試験により求めた。

図-4 と図-5 はそれぞれ針径 $d=4\text{mm}$ と $d=2\text{mm}$ の針貫入試験 Mk. I から得られた典型的な $P \sim \delta$ 関係を示す。これらの図から、 $P \sim \delta$ 関係は d に関係なく傾向の異なる二つの部分、すなわちコーン部貫入による P_c に対応して曲線的に増加する部分と、それ以降の一定径のロッド貫入による P_R に対応して直線的に増加する部分から構成されることがわかる。ロッド部分の $P \sim \delta$ 直線の勾配は式(1)の N_p に相当している。一方、コーン部の $P \sim \delta$ 関係は式(2.1)に示したように表面積が δ の二次曲線として増加するので、図中に $\delta \leq \delta_c$ の範囲で $P \sim \delta$ 関係を近似した二次曲線 $P = P_c \cdot (\delta/\delta_c)^2$ を示す。図から、二次曲線がよい近似となっており、 P がコーン部貫入による表面積に比例した c ($=q_u/2$) のみで構成されたとした針貫入試験の強度推定原理に調和していることがわかる。コーン部による P_c と δ_c の関係は割線勾配 $N_{PC} = P_c/\delta_c$ を導入し、

図-6 $d=4\text{mm}$ の針貫入試験 Mk. I による $\log_{10} q_u \sim \log_{10} N_p$ (N_{PC}) 関係

$d=2 \cdot \delta_c \cdot \tan(\theta/2)$ を考慮すると、式(2.1)が

$$q_u = (2/\pi) \cdot \{\cos(\theta/2) / \tan(\theta/2)\} \cdot (P_c/\delta_c^2) = 4 \cdot \cos(\theta/2) \cdot N_{PC} \cdot (\pi \cdot d) \quad (3)$$

となり、 q_u と N_{PC} の直線関係を利用できる。また、コーン部のみの貫入による P_c は貫入した針の表面積に比例するので、 $d=4\text{mm}$ の針による P_c は $d=2\text{mm}$ によるものの4倍になるはずであり、図-4 と図-5 の比較から強度の相違を考慮するとほぼそのようになっていることがわかる。針は d が小さい方が固化改良土内にスムーズに貫入するが、 $d=2\text{mm}$ では P が小さく強度推定の精度を確保しにくいので、以下の試験では $d=4\text{mm}$ の針を基本とした。

以上から、改良型針貫入試験 Mk. I はコーン部による P_c とロッド部による P_R のどちらも c による周面摩擦抵抗のみからなるとして扱えるので、図-6 は以上のような試験を固化改良土の強度レベルを各種変えた供試体について実施して得られた $P_R \sim (\delta - \delta_c)$ 関係から求めた $q_u \sim N_p$ 関係、 $P_c \sim \delta_c$ 関係から求めた $q_u \sim N_{PC}$ 関係のそれぞれを両対数図上にプロットしたものである。 $q_u \sim N_p$ 関係と $q_u \sim N_{PC}$ 関係のそれぞれは、 $q_u \sim N_p$ 関係にややバラツキが目立つが、通常型試験と同様に直線関係が成立つことがわかる。

§ 5. あとがき

本稿は、砕・転圧盛土工法における固化改良土に適用できるように、木綿針より貫入抵抗が大きくなるように針径 d を大きく、かつ先端を一定角度 θ で尖らせたコーン・ロッド針 ($d=2.4\text{mm}/\theta=30^\circ$) を採用した改良型針貫入試験 Mk. I による強度推定原理を室内試験により調べた。試験結果から、改良型私権は対象となる固化改良土の強度範囲では、通常型試験と同様にコーン部による貫入抵抗 P_c とロッド部による貫入抵抗 P_R のどちらも粘着力 c による表面摩擦のみからなるとして扱えることを確認できた。

【参考文献】 1) (社) 農業農村整備情報総合センター編：ため池改修工事の効率化—砕・転圧盛土工法によるため池堤体改修—設計・施工・積算指針(案), (社) 農業農村整備情報総合センター, 2006. 2) 北島 明, 福島伸二, 谷茂：固化改良土(砕・転圧盛土工法)の強度管理への針貫入試験の適用性, 土木学会第68回年次学術講演会, III-61, pp.121-122, 2013. 3) 土木学会編：軟岩の調査・試験の指針(案)—1991年版—, 土木学会, pp.56-60, 1991. 4) (株)丸東製作所 HP：<http://www.manuto-group.co.jp/>. 5) 岡田 滋, 泉谷泰志, 飯塚友之助, 堀内澄夫：針貫入試験による軟弱な地山強度の推定, 土と基礎, Vol.33, No.2, pp.35-38, 1985.