

## 改良土の高度利用化技術の開発

北島 明 福島 伸二  
堀田 崇由

### 概 要

砕・転圧盛土工法<sup>1)</sup>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。砕・転圧盛土工法における品質管理は非常に重要でその頻度も多いことから、簡便な強度推定法として球体落下試験を用いることを基本としている。しかし、近年は高堤体への適用事例が増えており、初期固化土の目標強度が高くなる傾向にあるため、従来の球体落下試験では測定精度に問題が生じるようになってきた。そのため筆者らはより高い強度の改良土を対象とするべく針貫入試験の適用性について検討してきたが<sup>2)</sup>、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、針貫入試験機が対象としている軟岩と比較して低く、直径0.84mmの木綿針を用いる従来型針貫入試験では貫入抵抗が小さいため、やはり強度推定の精度が低いままであった。

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とともに、簡易的に強度を推定できる改良型針貫入試験による強度推定法について提案する。

### Development of advanced utilization technology for cement-mixed muddy soil

#### Abstract

Using muddy soil mixed with cement is an excellent and cost-effective method to repair old fill-type dam embankment, so we have applied this method to the repair of more than 13 dams. It is very important to perform a quality control test frequently, so we needed to develop a new method which can conduct testing easily. We have tested the possibility of application of a needle penetration test, but it still has some problems for application to quality control tests because the soil mixed with cement is too soft to measure accurately. In this paper, we describe the newly improved needle penetration test which can estimate the strength of cement-mixed muddy soil accurately and propose to apply it to quality control tests.

キーワード: 砕・転圧盛土工法, 発現強度, 簡易  
推定法

## §1. はじめに

砕・転圧盛土工法<sup>1)</sup>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。砕・転圧盛土工法における品質管理は非常に重要でその頻度も多いことから、簡便な強度推定法として球体落下試験を用いることを基本としている。しかし、近年は高堤体への適用事例が増えており、初期固化土の目標強度が高くなる傾向にあるため、従来の球体落下試験では測定精度に問題が生じるようになってきた。そのため筆者らはより高い強度の改良土を対象とするべく針貫入試験の適用性について検討してきたが<sup>2)</sup>、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、針貫入試験機が対象としている軟岩と比較して低く、直径0.84mmの木綿針を用いる従来型針貫入試験では貫入抵抗が小さいため、やはり強度推定の精度が低いままであった。

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とともに、簡易的に強度を推定できる改良型針貫入試験による強度推定法について提案する。

## §2. 従来の改良土の強度推定法

### 2.1 球体落下試験

砕・転圧盛土工法では堤体の築堤工における施工管理を、施工エリアを面的に広く、多数位置で試験が簡単に実施できる現場強度試験により行う必要がある。

盛土地盤の強度を現場で簡単に知ることができる現場強度試験は各種あるが、低～高強度までの広範囲な地盤の強度試験に適している球体落下試験を標準として採用してきた。この試験は固化処理地盤面上に一定条件(球体重量・落下高さ)で球体を自由落下させた時に形成された凹みの直径Dを測定して、Dと地盤の一軸圧縮強さ $q_u$ の関係から強度を簡単に知ることができるものである。この試験機(FW-26型)は図1に示すように、球体の直径80mm、重量 $W=2.6 \text{ kg}$ で、落下高さ $H=45 \text{ cm}$ である。これにより求めた初期固化土強度( $q_{u,IS}$ )あるいは砕・転圧土強度( $q_{u,CC}$ )と球体落下により形成された凹みの直径D(cm表示)の逆数 $1/D$ の関係は図2に示すようにほぼ一本の直線

$$(q_{u,IS}, (q_{u,CC}) = 3960 \cdot (1/D) - 602$$

で近似できることがわかる。図中の○は砕・転圧土、◆は初期固化土の試験結果であり、強度レベルによらず高い相関性があることが確認できる。

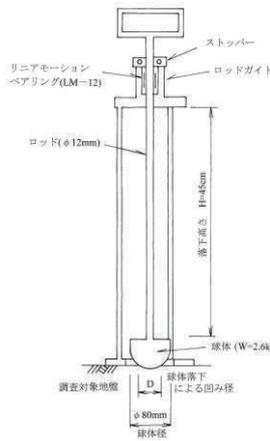


図1 球体落下試験器

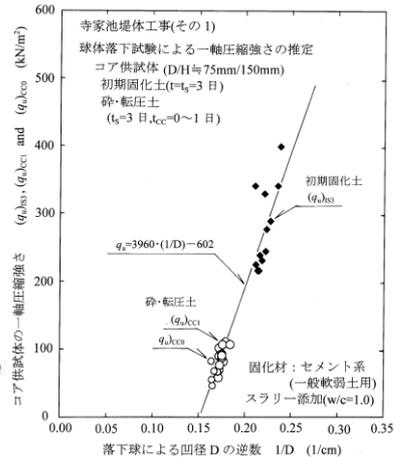


図2 球体落下試験と一軸圧縮強さの関係

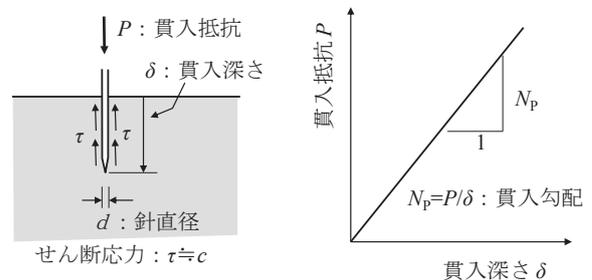


図3 針貫入試験の貫入抵抗と貫入深さの関係

### 2.2 従来型針貫入試験

従来型針貫入試験(以下、単に針貫入試験)は軟質な岩石に試験針(JIS S3008 木綿針2号)を一定速度で貫入させたときの抵抗力 $P$ と貫入量 $\delta$ 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<sup>3)</sup>。 $q_u$ と $N_p$ の関係には市販の針貫入試験機(丸東製作所製軟岩ペネトロ計 SH-7<sup>4)</sup>)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<sup>5)</sup>。

針貫入試験の強度推定原理を図3に概念的に示す。直径 $d$ の試験針を供試体中に深さ $\delta$ まで一定速度で貫入させると $P$ と $\delta$ 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 $\tau$ 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。また、 $P$ は拘束圧レベルが低く内部摩擦角の影響を無視できるので $\tau$ 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 $\delta$ 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推定法

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の大きい( $d=4\text{mm}$ あるいは $2\text{mm}$ )ロッドを用い、その先端を図4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として角度 $\theta=30^\circ$ 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 $\delta$ 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力からなるとすると、コーン部の貫入量 $\delta_c$ 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( $P=P_c + P_R$ )

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

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

とおくことができる。 $P_c$ はコーン部貫入量 $\delta_c$ の二乗に比例する。また、式(2.2)は貫入勾配を $N_p = P_R / (\delta - \delta_c)$ とおくと式(1)と同形になる。

### §4. 改良型針貫入試験 Mk. I の試作

#### 4.1 供試体の作製

針貫入試験用の固化改良土の供試体は図5に粒度曲線を示す NN カオリンと藤の森粘土を乾燥質量比 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初期固化土を用いた。モデル化底泥土に加える固化材添加量 ( $\Delta Mc=50 \sim 200\text{kg/m}^3$ ) や養生日数 ( $t=2 \sim 28$ 日) を種々変えることで強度の異なる複数の供試体を準備した。モルタルミキサーで攪拌混合したまだ固まらない状態の改良土を、針貫入試験用供試体として直径 100mm×深さ 50mm の広口の浅いビーカーと、一軸圧縮試験用供試体として直径 50mm×深さ 100mm の三分割成形モールドに流し込んで作製し、乾燥しないようにラッピングし、クーラーボックス内で所定の期間養生した。

#### 4.2 針貫入試験と一軸圧縮試験の試験結果

固化改良土の針貫入試験は試験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、同時に一軸圧縮試験も実施することにより固化改良土の  $q_u$  を求めた。

図6と図7にそれぞれ針径  $d=4\text{mm}$  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、また写真2に針貫入試験状況を示す。

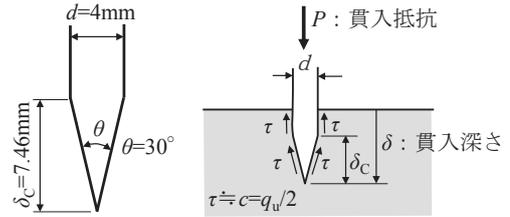


図4 改良型針貫入試験 Mk. I の貫入針と貫入抵抗

Mk. I ( $d=4\text{mm}$ ,  $\theta=30^\circ$ )

Mk. I ( $d=2\text{mm}$ ,  $\theta=30^\circ$ )

写真1 改良型針貫入試験 Mk. I の試験針

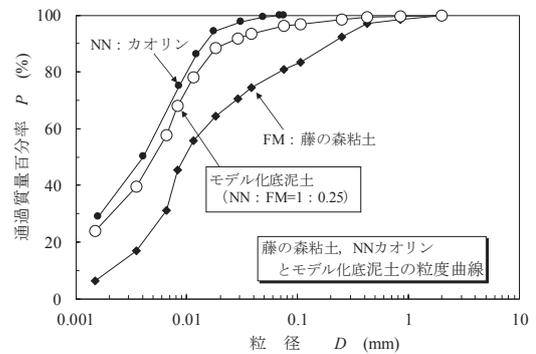


図5 モデル化底泥土試料の粒度曲線

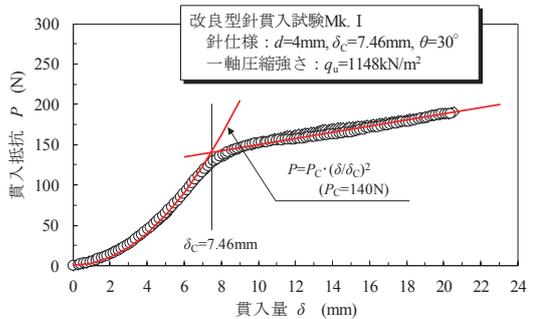


図6  $d=4\text{mm}$  の針貫入試験 Mk. I による  $P \sim \delta$  関係

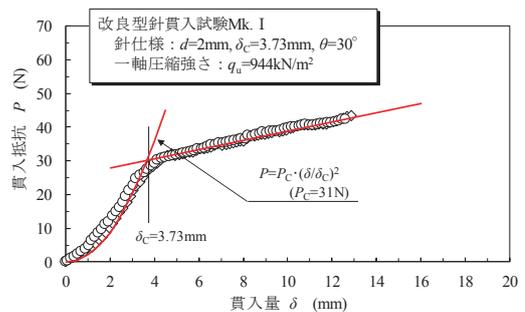


図7  $d=2\text{mm}$  の針貫入試験 Mk. I による  $P \sim \delta$  関係

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  $\delta$  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  $\delta_c$  の関係は割線勾配  $N_{PC}=P_c/\delta_c$  を導入し、 $d=2 \cdot \delta_c \cdot \tan(\theta/2)$  を考慮すると、式(2.1)が

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

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6と図7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こととして扱えることがわかった。

図8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。 $q_u \sim N_P$  関係にややバラツキが目立つが、両関係とも従来型試験と同様に直線関係が成立つことがわかる。

### §5. 改良型針貫入試験 Mk. II の試作

コーン・ロッド型針を用いる針貫入試験 Mk. I 試験による  $P\sim\delta$  関係はコーン部とロッド部の二つの部分から構成され、それらのおのおのにおいて得られる貫入勾配  $N_{PC}=P_c/\delta_c$  と  $N_P=P_R/(\delta-\delta_c)$  のどちらも一軸圧縮強さ  $q_u$  との相関関係が得られる。しかしながら、改良型針貫入試験 Mk. I は現場での実施を想定すると、試験から得られる  $P\sim\delta$  関係はコーン部あるいはロッド部のどちらからも強度推定ができるものの、第二段階のロッド部の  $N_P$  では  $\delta < \delta_c$  以降の貫入抵抗  $P_R$  を読取ることが難しい問題がある。そこで、現場で実施する試験は貫入抵抗が読みやすく、貫入勾配も大きいコーン



写真2 改良型針貫入試験の状況

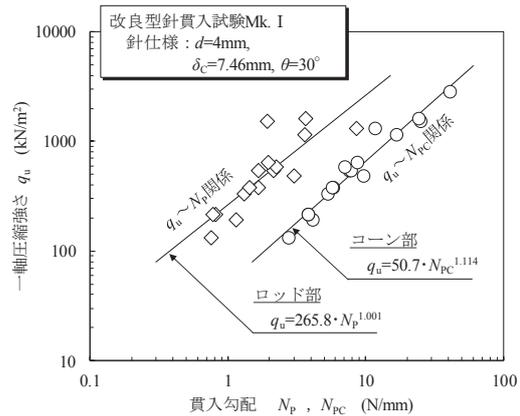


図8 針貫入試験 Mk I による  $q_u \sim$  貫入勾配関係

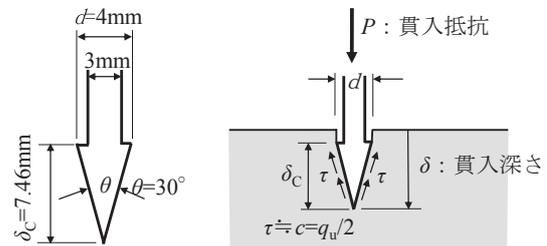


図9 改良型針貫入試験 Mk II の貫入針と貫入抵抗

Mk. II ( $d=4\text{mm}$ ,  $\theta=30^\circ$ )



Mk. II ( $d=4\text{mm}$ ,  $\theta=15^\circ$ )



写真3 改良型針貫入試験 Mk II の試験針

部のみを利用する方が便利なことから、ロッド部の周面摩擦が作用しないようにした図9に示すような  $d=4\text{mm}$ 、 $\theta=30^\circ$  のコーン型針を採用した改良型針貫入試験 Mk. II を実施した。写真3に Mk. II 針の外観を示す(後述する  $\theta=15^\circ$  の針も併せて示す)。

§6. 改良型針貫入試験 Mk. II とその試験結果

図 10 と図 11 は強度レベルを変えた固化改良土供試体の針貫入試験 Mk. II により得られた  $P \sim \delta$  関係の典型例を示す。図中には  $\delta \leq \delta_c$  の  $P \sim \delta$  関係を二次曲線  $P = P_c \cdot (\delta/\delta_c)^2$  により近似した曲線も示してある。図から、Mk. II 試験による  $P$  は、コーン貫入部 ( $\delta < \delta_c$ ) では Mk. I 試験の場合と同様に二次関数的に増加しているが、コーン部分が改良土中に埋没した以降では表面積の増加がないためほぼ一定値になることがわかる。ただし、二次曲線領域から一定荷重領域への移行は Mk. I と同様に理想的なものではなく、 $P$  が  $\delta = \delta_c$  で一定値にならず、さらに変位の進んだ  $\delta = 10\text{mm}$  付近になると一定値となっている。

図 12 は強度レベルを種々変えた固化改良土の針貫入試験 Mk. II による  $N_{PC}' = P'/\delta_c$  と  $q_u$  の関係を示す。 $N_{PC}'$  は  $\delta = \delta_c$  における  $P$  値、すなわち図 13 に概念的に示すように  $P_c' (< P_c)$  を読み取り、 $N_{PC}' = P_c'/\delta_c$  から求めた貫入勾配である。コーン型針の Mk. II 試験を現場で実施することを想定すると、貫入勾配には現場で読み取りやすい  $P$  値の方が便利であり、 $P_0$  としては図 13 に示したように  $P$  が一定値になる  $\delta = 10\text{mm}$  での値  $P_{10}$  を採用するのが実用的と考えられる。そこで、図 14 には  $P \sim \delta$  関係から読み取った  $P_{10}$  から求めた  $N_{PC} = P_{10}/\delta_c$  と  $q_u$  の関係を示す。図から、 $q_u \sim N_{PC}$  関係は両対数グラフ上でほぼ直線になり

$$q_u = 39.1 \cdot N_{PC}^{1.165} \quad (4)$$

により近似できる。図中には図 12 に示した  $q_u \sim N_{PC}'$  関係も示すが、上式とほぼ平行となっており、 $P_c$  相当値をきちんと読み取りできれば  $N_{PC}$  と  $N_{PC}'$  のどちらでも強度推定が可能であり、現場での読み取りに個人差の少ない  $P_{10}$  を用いる  $N_{PC}$  が合理的といえよう。

改良型針貫入試験 Mk. II では  $\theta$  が小さい針ほど固化改良土中にスムーズに貫入し、通常型針貫入試験に近い条件になると考えられる。そこで、同一径  $d=4\text{mm}$  で  $\theta=15^\circ$  とした、より尖ったコーン型針の改良型針貫入試験 Mk. II を実施し、得られた  $P \sim \delta$  関係を図 15 に示す。図中には比較のために、同一強度の固化改良土について実施した  $\theta=30^\circ$  の改良型針貫入試験 Mk. II による結果も示してある。 $\theta=15^\circ$  の針は、 $\theta=30^\circ$  の針に比較して表面積が 2 倍であるから  $P_c$  が 2 倍になり、かつ  $\delta_c$  が 2.04 倍であるので、 $N_{PC}$  がほぼ等しくなるはずである。図から、実際にそのような関係になっていることがわかる。すなわち、 $P$  は  $\theta=15^\circ$  と  $\theta=30^\circ$  のどちらでも、 $c=(q_u/2)$  が一定ならば、二次関数的に増加するコーン表面積だけで決まることがわかる。現場での試験に使用する針に  $\theta=30^\circ$  と  $\theta=15^\circ$  のどちらを選択するかの問題は、針貫入試験の強度推定原理に近い先端のより尖った  $\theta=15^\circ$  の針であるが、どちらも同様の結果が得られ

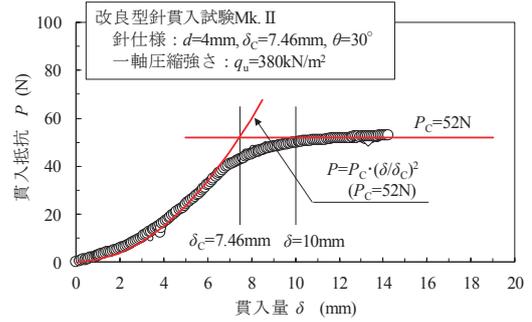


図 10 針貫入試験 Mk II による  $P \sim \delta$  関係 ( $q_u=380\text{kN/m}^2$ )

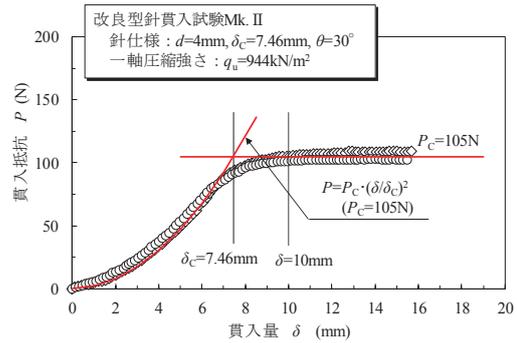


図 11 針貫入試験 Mk II による  $P \sim \delta$  関係 ( $q_u=944\text{kN/m}^2$ )

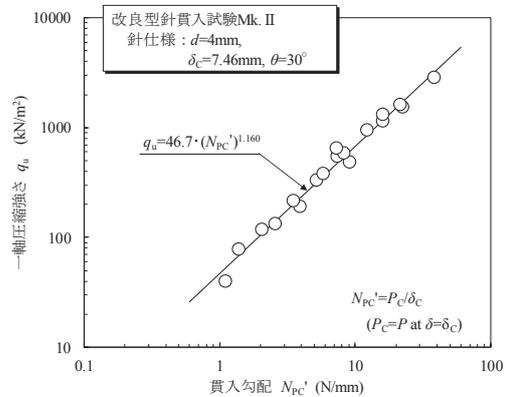


図 12 針貫入試験 Mk II による  $q_u \sim$  貫入勾配関係

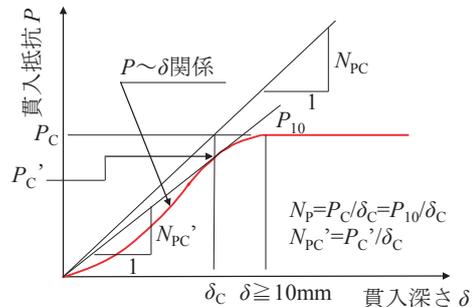


図 13 改良型針貫入試験 Mk II における貫入勾配

るので、ここでは  $\theta$  が大きく試験実施中に損傷しにくい  $\theta=30^\circ$  の針を使用することにする。

### §7. 改良型針貫入試験 Mk. II の実施上の留意点

コーン型針を用いる試験針の改良型針貫入試験 Mk. II の理想的な  $P\sim\delta$  関係はコーン部貫入中では二次曲線的に増加し、 $\delta=\delta_c$  に達した以降に一定値  $P=P_c$  に移るが、実際にはそのようにならずにコーン部が完全に貫入した後のほぼ  $\delta=10\text{mm}$  に達すると一定値になる。そこで、現場で実施する試験では、 $N_{PC}$  としてはコーン針が  $\delta=\delta_c$  を超えて  $\delta=10\text{mm}$  まで貫入したときの  $P=P_{10}$  を読み取り、これを  $\delta_c=7.46\text{mm}$  で除し値  $N_{PC}=P_{10}/\delta_c$  を求め、図 14 に示した  $q_u\sim N_{PC}$  関係を近似した式(4)から  $q_u$  を換算することを提案したい。

### §8. おわりに

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  $\theta$  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、およびコーン型針 ( $d=4\text{mm}/\theta=30^\circ$ ) を採用した改良型針貫入試験 Mk. II 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  $R_r$  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。コーン型針の貫入抵抗  $P$  は針貫入試験の基本原則に合致してコーン貫入部の表面積に比例するが、 $P\sim\delta$  関係が必ずしも理想形とならないので、試験針が  $\delta_c$  を超えた  $\delta=10\text{mm}$  まで貫入したときの  $P=P_{10}$  を読み取り、これを  $\delta_c=7.46\text{mm}$  で除して  $N_{PC}=P_{10}/\delta_c$  を求める式(4)を提案した。

#### 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.

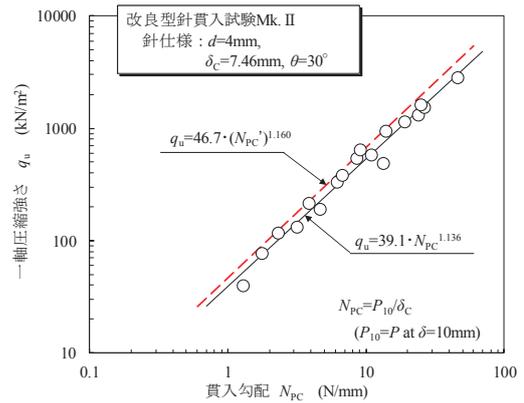


図 14 針貫入試験 Mk II による  $q_u\sim$  貫入勾配関係

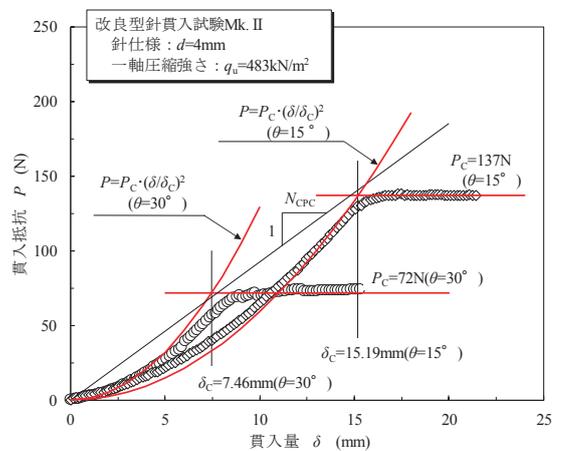


図 15 Mk II ( $\theta=15^\circ, 30^\circ$ ) による  $P\sim\delta$  関係

- 3) 土木学会編：軟岩の調査・試験の指針(案)－1991 年版一、土木学会、pp.56-60、1991.
- 4) (株)丸東製作所 HP：<http://www.maruto-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.

#### ひとこと

砕・転圧盛土工法は品質管理の占める割合が高く、試験の簡便化が喫緊の課題であるが、本試験法がその一助になることは嬉しい限りである。一方、早くも秋風が吹き始めたペナントではあるが、せめて CS 進出を目指して今一度虎の奮起を期待したい。



北島 明