

現場使用を想定した小型簡易引抜き試験機の開発および特性評価

Development and Characteristic Evaluation of Small Simplified Pull-out Test Apparatus
Assuming its Field Use佐原邦朋 Kunitomo SAHARA (山口大学大学院創成科学研究科)
鈴木素之 Motoyuki SUZUKI (山口大学大学院創成科学研究科)

補強土壁工法の摩擦力を適切に評価することは、その性能を評価する上で大変重要である。しかし、これまで、摩擦力の評価を細粒分の含有率によって判断する間接的な方法が行われていたため、個々の摩擦特性を評価できないものであった。そこで、現場毎に摩擦特性評価が可能な小型の簡易引抜き試験機（以下、小型試験機）を開発し、その試験方法および小型試験機の特性を検証した。その結果、土質に応じた摩擦特性を評価できることを確認した。さらに、小型試験機を用いることで可能となる盛土材料の評価方法と現場管理方法について提案を示した。

キーワード：補強土壁，摩擦力，引抜き試験機，盛土材料 (IGC : E12, H02, D09)

1. はじめに

帯状の補強材を用いる補強土壁工法は、補強材と盛土材料の摩擦力によって構造安定性が確保されるため、相互の摩擦特性を把握することが重要である。一般にその摩擦特性の評価は、盛土材料の細粒分含有率によって判断している。細粒分含有率が規定の値以下であれば、規定の見かけの摩擦係数を満足するものとして設計を行い、施工段階においても使用する盛土材料の細粒分含有率を確認することで、品質を管理している。

この方法によれば、簡便に盛土材料の使用可否を判断できるため、導入時から現在まで変わらず活用されてきた。しかし、一定範囲の材料に対して全て同一の評価となるために、実際には現場毎に違うはずの盛土材料がどの程度の摩擦特性を有しているかの判断は難しく、盛土材料の良否によって違っているはずの構築された構造物の性能を評価できていなかった。さらに、細粒分含有率が規定値を超えていても摩擦力が確保できる材料の評価が出来なかった。そこで、使用する盛土材料の摩擦特性の評価を容易に行い、現場毎に構造物の性能を評価するために、補強された盛土構造体の内部状態を再現する小型試験機を考案した。そのイメージ図を(図-1)に示す。本論文では、その小型試験機の特性を評価するために実験検証を行い、現場で実施する引抜き試験との相関を検証した結果および小型試験機の活用方法について整理する。

2. 既往の研究と課題

鋼製帯状補強材を使用する補強土壁工法は、日本に導入されてから既に45年が経過している。

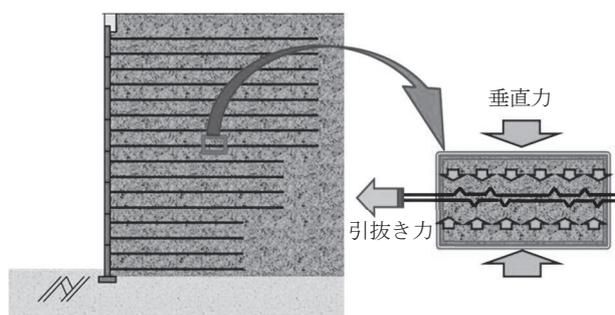


図-1 小型試験機のイメージ図

その間に数多くの実績を重ね、従来の抗土圧構造物に代わる高壁高の擁壁への適用が増えている。鋼製帯状補強土壁の主な構成部材は、壁面材（スキン）と補強材（ストリップ）および盛土材料であり、せん断抵抗力の高い盛土材料と補強材との相互の摩擦力によって強化一体化された補強盛土体となっている事が特徴である。よって、唯一の工場製品ではない盛土材料の摩擦特性を把握することは、補強土壁の性能を把握する上で大変重要となる。これまでも盛土材料と補強材の摩擦抵抗を直接的に計測する事は試みられてきた²⁾。その方法は、施工現場において施工途中に補強材を埋設しておき、ある程度の土被りになった状態で、油圧ジャッキで引抜き抵抗力を計測する現場引抜き試験であるが、施工前に行うことはできなかった。施工前に行うためには、試験盛土を構築する必要があるが、土被り高さは低い状態となるため、高壁高への評価としては活用が難しく、手間と費用が嵩む割には得られるデータが乏しいため、実施することは稀である。また、引抜き試験機を用いる方法³⁾もあるが、載荷装置や引抜き装置および計測装置などが大型のため試験室の備え付けとなり、さらに、試験土槽のサイズが大きくなり、用意する土質試料も大量になるため、

研究機関や大学などの研究開発用での用途にのみ用いられており、現場毎の評価に活用されることはほとんど無かった。

また近年は、環境への配慮から、現地発生土の有効活用が求められており、これまでのように細粒分の規定のみで使用可否を判断するだけでは現場のニーズに対応できなくなっている。さらに、購入土を使用する場合でも自然界の土砂の採掘が難しく、再生土質材料を活用するケースが増えており、再生材の種類も多くなっているため、従来までの細粒分の規定のみで評価することが難しくなっている。

上記の背景より、現状の課題を整理すると、

- (1) 最も重要な構成材料である盛土材料の摩擦特性評価が、間接的な評価である細粒分含有率($F_c \leq 25\%$)の規定のみで行われている。よって、使用される盛土材料毎に違う摩擦特性が評価できていない。
- (2) 摩擦抵抗力が十分であっても、細粒分含有率が規定よりも多い材料は、適切な評価が出来なかった。よって、地域毎の特徴ある土質材料の評価が出来ていない。
- (3) 再生土質材料の適切な評価が出来ない。
- (4) 規定から外れた材料を、有効活用する方策を検証することが難しい。
- (5) 構築された構造物に対して、使用された盛土材料の違いによる内部状態は評価できず、安全側ではあるが、安全の程度が不明瞭で、性能が評価できていない。

そこで現場毎に、施工前に現地の発生土または使用する土質材料を判断するために、直接的に摩擦特性を評価できる小型試験機を考案した。

3. 開発した小型試験機の概要

小型試験機は、現場へも携行可能なように試験土槽の大きさを、長さ 300×幅 100×高さ 100 mm程度と小型サイズとした(図-2)。専用ランマー(1.5 kg)(写真-1)にて高さ 100 mmを4層に分けて突き固めを行い、補強材を2層目と3層目の間に設置する。90%以上の締固め密度を目標値として、1層当たり12回×4周=48回の突き固めを行う48回/層の突き固めエネルギーを標準エネルギーとしている。試験土槽内に補強材を設置した状況を(写真-2)に示す。その後、計画の土被り深度に相当する上載荷重を、小型試験機上側に設けた反力枠からネジの押し込み力を利用して載荷する。載荷荷重 P は以下による。

$$P = \sigma \cdot A = \gamma \cdot h \cdot A \quad (1)$$

ここに、

σ : 土被りによる上載荷重 (kN/m²)

A : 載荷板面積 (m²)

γ : 盛土材料の湿潤単位体積重量 (kN/m³)

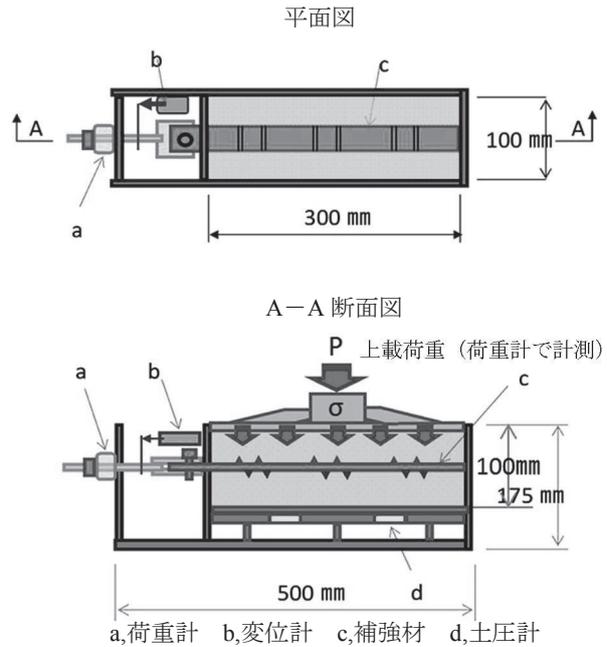


図-2 小型試験機の形状・寸法

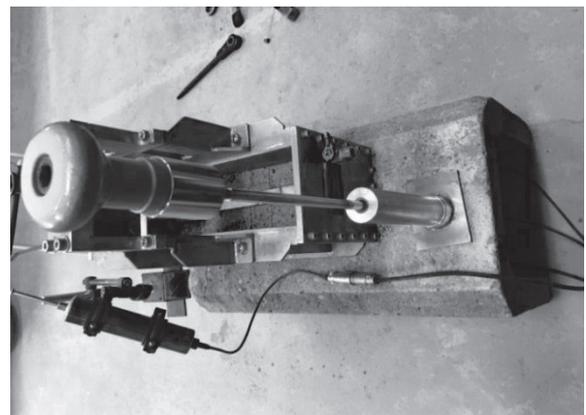


写真-1 試験機および専用ランマー



写真-2 小型試験機土槽内の補強材設置状況

h : 設定した換算土被り (m)

載荷した状態で補強材を水平方向に引き抜く事で引抜き力を計測し、所定の土被り深度に相当する摩擦抵抗値が得られる。引抜き試験中は、上載荷重が一定になるよ

表-1 土質材料物性値

試験土質	豊浦標準砂	まさ土①	まさ土②	関東ローム	B材料 (細粒分 質礫質砂)
細粒分含有率 Fc (%)	1.9	8.2	11.1	89.2	34.4
最大乾燥密度 $\rho_{d \max}$ (g/cm ³)	1.645	2.031	1.915	0.842	1.814
最小乾燥密度 $\rho_{d \min}$ (g/cm ³)	1.335	—	—	—	—
最適含水比 w_{opt} (%)	—	9.7	11.1	69.7	10.2
自然含水比 w_n (%)	0	4.2	8.3	72.6	21.5

うに反力枠からの荷重を手動で制御する。この計測には専用のデータロガーを使用することで、載荷された上載荷重に対する引抜き抵抗力と、使用する補強材の有効摩擦面積から見かけの摩擦係数が算出表示されて即座に確認できる。所定の上載荷重において引抜き試験を行い、引抜き力のピーク値における見かけの摩擦係数が確認されたら、その状態で引抜きを終了する。引抜きを止めた状態で保持すると、引抜き抵抗値は低下して一定値に落ち着く。この時のピーク値に相当する見かけの摩擦係数を上限値、低下して一定値に落ち着いた値を残留値として記録する。その後、上載荷重を除荷することで、低い土被り深度に相当する見かけの摩擦係数(残留値)が参考値として計測できる。

この試験機は、小型のために1回で使用する盛土材質量は6kg程度と少量で済み、試験体作成手間も大幅に省力化できる。これまでの室内試験機のサイズは、中型サイズで長さ×幅×深さが各2倍で2³=8倍の容積、さらに大型のものは約80倍の容積の土槽を使用していた。よって、1回当たりの作業量が軽減されるため、試験のケース数を増やして、試験結果の信頼性を高め、個別の現場にも適用できるようになった。また、試験機が小さく、載荷板の面積が小さいため、必要とされる荷重も小さくなる。よって、載荷と引抜きを人力で行うことができる。しかし、試験機のサイズが小型であるために、試験可能な試料の最大粒径が制限される。試験体の1層当たりの層厚が25mm程度のため、粒径が19mm以下でも試験可能であるが、試験機の幅100mmに対して1/10程度、および試験体作製時の補強材設置面と載荷板設置面の不陸調整には9.5mm以下の粒径が適している。ただし、この粒径では実際に現場で使用する礫分の多い盛土材料に対しては、見かけの摩擦係数が過小評価となる。しかし、摩擦特性の評価としては安全側になるため、盛土材料の使用可否を判定するためには有効と考える。

4. 小型試験機の検証課題

試験機が従来のもよりも小型のため、補強材に対する試験機側壁距離の影響、土質の違いによる影響、現場引抜き試験との相関などについての証明が必要と考えられ、それらに対して実験検証を行った。

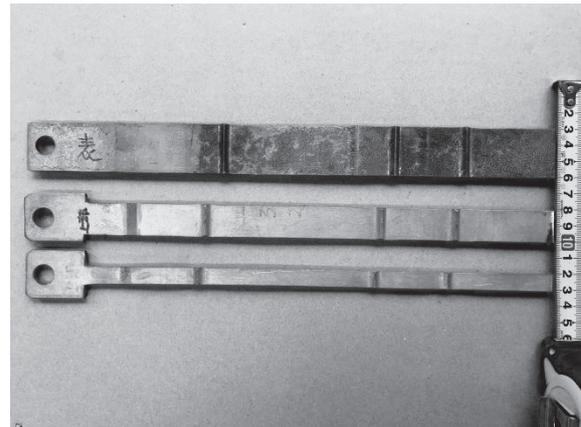


写真-3 幅の違う補強材 (10 mm, 20 mm, 30 mm)

使用した盛土材料は、豊浦標準砂・まさ土・関東ローム・B材料であり、それぞれの物性値を表-1に示す。ここで、鋼製帯状補強土壁工法の設計・施工マニュアル¹⁾によると、細粒分の含有率が25%以下のものをA材料、25%を超えて35%以下のものをB材料と規定している。よって、豊浦標準砂とまさ土はA材料に属し、関東ロームはB材料にも含まれず、規定外の土となる。そのため、B材料の試料でも別途検討を行った。

4.1 補強材に対する試験機側壁距離の影響

試験機の幅が100mmと狭いため、側壁の影響を考慮して使用する補強材の幅も通常の半分となる30mmのものを使用している。それでも、載荷板からの上載荷重が側壁との摩擦によって伝達が不十分になる可能性があること、または、側壁との距離が近いことによって拘束力が強く作用することなどが懸念された。そこで、補強材の幅を30mm、20mm、10mmのものを用意して、それぞれの抵抗力を比較検証した(写真-3)。補強材は、リブ付きの鋼製帯状補強材で、厚みがt=4mmのものを使用した。また、リブの無い平滑の鋼製帯状補強材は、幅30mmのものを使用した。

使用した盛土材料は、豊浦標準砂・まさ土・関東ロームの3種類であり、計測された結果を図-3、図-4、図-5に示す。

結果は、土質によって計測される見かけの摩擦係数に違いはあるが、いずれも10mm幅のもので大きな値が計測された。また、20mmと30mmの差はほとんど見られな

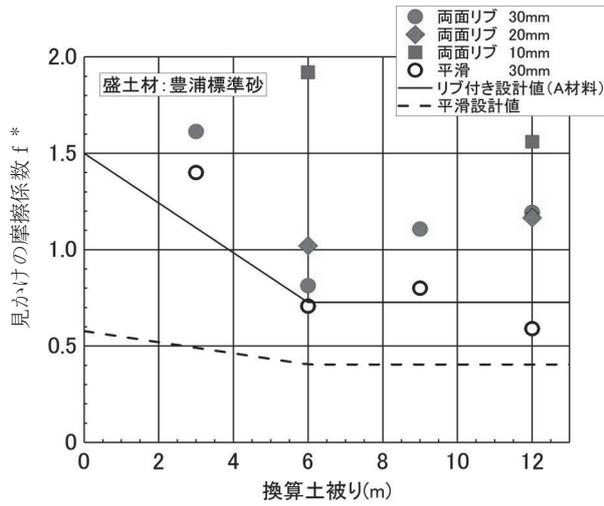


図-3 補強材幅と見かけの摩擦係数 (豊浦標準砂)

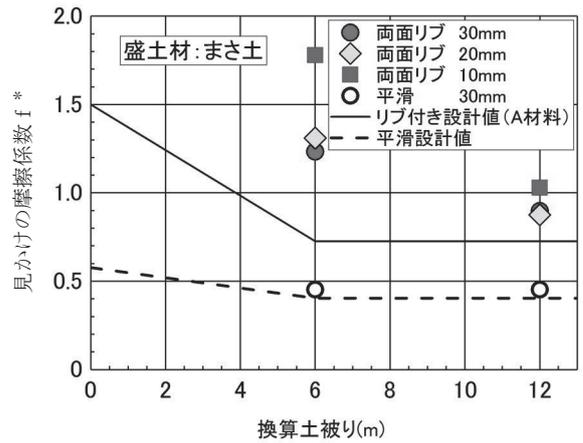


図-4 補強材幅と見かけの摩擦係数 (まさ土)

かった。

ここで、側壁の距離が近い事による拘束圧の影響があれば、側壁との間隔が大きい10mm幅のものが最も小さな値を示すと予想したが、そうならなかった理由を以下に考察する。

補強材と盛土材料の見かけの摩擦係数 f^* の算出式は、

$$f^* = \frac{T}{2 \cdot \sigma \cdot b \cdot L} \quad (2)$$

ここに、

- T : 引抜き力 (kN)
- σ : 鉛直応力 (kN/m^2)
- b : 補強材の幅 (m)
- L : 補強材の長さ (m)

式(2)に示される通り、補強材の引抜き力を鉛直応力と補強材の表面積で除したものが、見かけの摩擦係数である。ここには、補強材の厚みが考慮されていない。

よって、補強材の厚み t を考慮した見かけの摩擦係数 f^{**} は、補強材位置における上載荷重 σ からの側圧を $k_0 \cdot \sigma$ (図-6) とすると、(2)式に補強材の厚み (t) に対する側圧の影響を加えることで以下の式となる。

$$f^{**} = \frac{T}{2(\sigma \cdot b + k_0 \cdot \sigma \cdot t) L}$$

$$= \frac{T}{2 \cdot \sigma \cdot b \cdot L (1 + k_0 \cdot \frac{t}{b})} \quad (3)$$

ここに、

- k_0 : 補強材側面に作用する土圧係数
- t : 補強材の厚み (m)

よって、補強材の厚み ($t=4\text{mm}$) の割合が大きい幅 (b) の狭い補強材の方が、見かけの摩擦係数が大きく算出されたと考えられる。このことより、補強材幅と側壁の距離よりも補強材幅と厚みの関係の影響が大きいことが分かった。そこで、試験に使用する盛土材料の粒径と摩擦面を考慮して、計測値が最も安全側である幅の広い

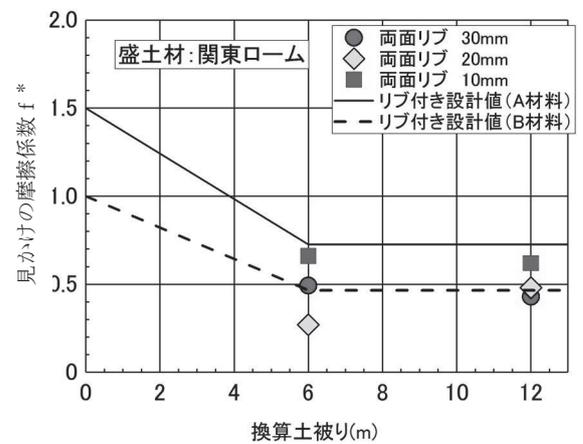


図-5 補強材幅と見かけの摩擦係数 (関東ローム)

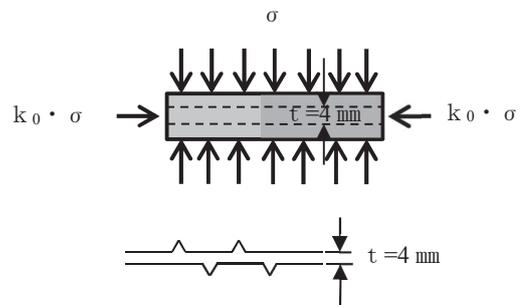


図-6 補強材断面形状と作用力

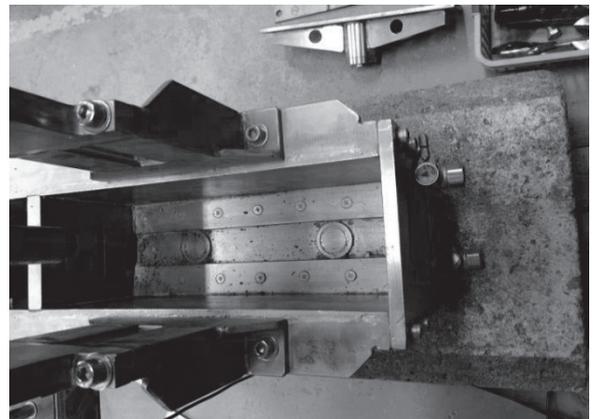


写真-4 小型試験機底部の土圧計

30 mmの補強材を使用することが適当と考えた。また、補強材上下の拘束距離がそれぞれ 50 mm程度と狭い点については、引抜き時における試験体の体積変化(ダイレイタンス)による拘束圧が上昇または下降する状態に対して、荷重が一定になるように手動調整している。それによって、小型試験機の底部 2 カ所に配置した土圧計(写真-4)による計測値が設定した上載圧以上にはならないことを確認している(図-7)。よって、小型試験機の内部応力状態は、狭い空間の中でも想定土被り深度に対応する試験開始時点の上載荷重以内の状態であると考えられ、安全側の拘束圧状態になっているといえる。このことより、これまでの細粒分含有率から判断する間接的な摩擦特性基準に対して、危険側の判定にならないと考えられた。

4.2 土質の違いによる検証

4.2.1 3種の盛土材料についての検証

4.1の検証で使用した、豊浦標準砂、まさ土、関東ロームの3種の盛土材料について、同じ30mm幅の補強材を用いて引抜き試験を実施した。豊浦標準砂とまさ土の細粒分含有率は、表-2に示す通り25%以下のためA材料に分類される。関東ロームは、細粒分含有率がB材料の規定(25% $<$ F_c≤35%)を超えているため適用外の盛土材料となる。計測された結果は、図-8に示す通り、豊浦標準砂とまさ土についてはA材料の設計で用いる数値を上回っている。しかし、関東ロームは、B材料の設計値よりも低い数値が確認された。これは、細粒分含有率の違う土質の、見かけの摩擦係数の違いが適正に計測できていると考えられる。

4.2.2 B材料に対する検証

本節で検討する土質材料は、表-3に示す通り、細粒分の含有率が34.4%であり、B材料(25% $<$ F_c≤35%)の範囲に属するものであった。しかし、三軸圧縮試験の結果では、せん断抵抗角が31.0°(≥30°)と設計条件を満足していた。

B材料はA材料に比べて細粒分含有率が多いことにより、見かけの摩擦係数が低下する。よって、そのままの状態で使用する場合には設計で用いる数値も低減して使用することになっている¹⁾。この土質材料を自然含水比状態で小型引抜き試験を実施した結果を図-9に示すが、B材料の設計値を下回っていた。また、3.5m相当の土被りでの試験結果は極端に低い数値が計測された。その理由は、7m相当の土被りでの試験を行った後に、同一試料を再度締固めて試験したために、細粒分含有率が高めの当該試料は、応力履歴による練返し状態となり強度が低下したと考えられる。そこで、未使用の試料を曝気乾燥させて最適含水比状態にした材料で再度試験を実施すると、A材料の設計値は下回ったが、B材料の設計値を満足する結果が得られた。よって、適切な含水比状態で締固めを行わないと、せん断抵抗角が設計条

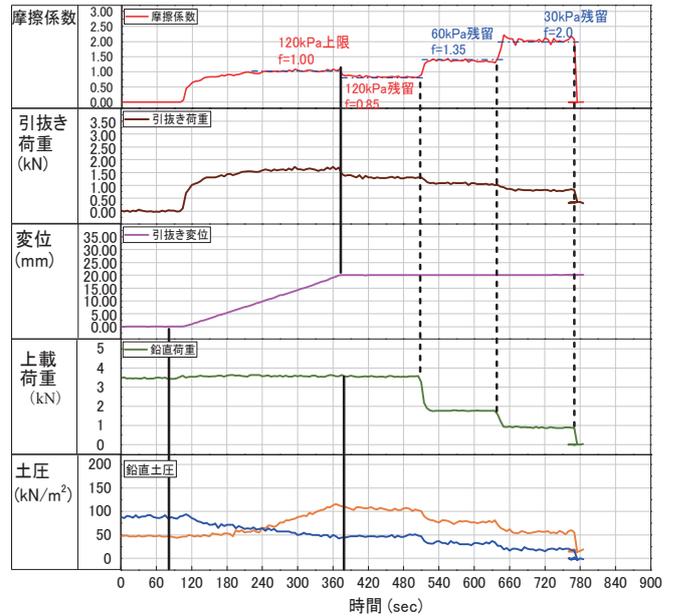


図-7 データロガーの計測例

表-2 盛土材料3種の実験条件

試験土質		豊浦標準砂	まさ土①	関東ローム
細粒分含有率	F _c (%)	1.9	8.2	89.2
最大乾燥密度	ρ _{d max} (g/cm ³)	1.645	2.031	0.842
最小乾燥密度	ρ _{d min} (g/cm ³)	1.335	—	—
最適含水比	W _{opt} (%)	—	9.7	69.7
自然含水比	W _n (%)	0	4.2	72.6
地盤密度(湿潤)	ρ _t (g/cm ³)	1.610	2.029	1.486
地盤密度(乾燥)	ρ _d (g/cm ³)	1.610	1.947	0.861
相対密度	D _r (%)	90.6	—	—
締固め度	D _c (%)	—	95.9	102.3
締固めエネルギー	E (回/層)	36	36	36
引抜きスピード	S (mm/min)	4.5	4.5	4.5

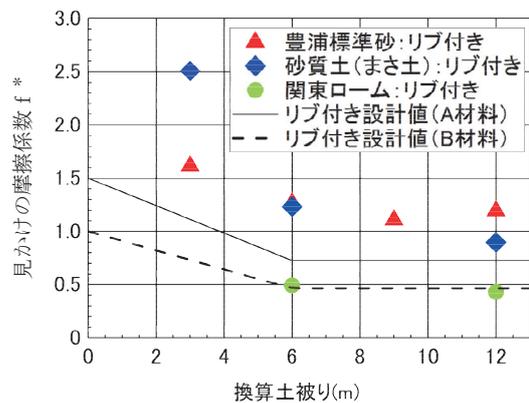


図-8 盛土材料3種の見かけの摩擦係数(補強材幅30mm)

表-3 B材料の実験条件

試験土質		B材料(高含水比)	B材料(含水比調整)
細粒分含有率	F _c (%)	34.4	34.4
最大乾燥密度	ρ _{d max} (g/cm ³)	1.814	1.814
最適含水比	W _{opt} (%)	10.2	10.2
自然含水比	W _n (%)	21.5	10.0
地盤密度(湿潤)	ρ _t (g/cm ³)	2.018	1.847
地盤密度(乾燥)	ρ _d (g/cm ³)	1.661	1.679
締固め度	D _c (%)	91.6	92.6
締固めエネルギー	E (回/層)	36	36
引抜きスピード	S (mm/min)	4.5	4.5

件 ($\phi \geq 30^\circ$) を満足していても、必要な摩擦抵抗力が發揮できないことが改めて確認できたとともに、当該試料の摩擦特性が適正に計測できた。

5. 小型試験機の特性

5.1 見かけの摩擦係数の上限値と残留値および除荷による残留値

小型試験機は、想定土被り深度の荷重を載荷した状態で引抜き試験を行う。一定の速度で補強材を引き抜くと、引抜き変位が 20 mm 程度以下で抵抗値のピークが観測される。そのピーク値で計測される引抜き荷重から見かけの摩擦係数が算出されてデータロガーに表示される(図-7 参照)。ピークの抵抗値に相当する見かけの摩擦係数が計測された後、引抜きを止めて、さらに抵抗値を観測すると、抵抗値は低下してある一定値に落ち着く。その時の見かけの摩擦係数計測値を残留値として観測する。この時のピーク値を見かけの上限摩擦係数、残留値を見かけの残留摩擦係数と定義する。見かけの残留摩擦係数は、引抜きを止めた後に保持される抵抗力から求められる数値のため、本来設計で用いられるべき常時の見かけの摩擦係数と考えられる。一方、見かけの上限摩擦係数は、動的な状態の抵抗値のため、地震時や一時荷重時に相当する見かけの摩擦係数とも考えられる。

さらに、引抜きを止めた状態で、上載荷重を除荷すると、除荷した状態の土被りに相当する摩擦抵抗力が計測される。図-10 は、①6m 相当の土被りで引抜き試験を行い、その後引抜きを止めた状態で、上載荷重を 3m 相当、1.5m 相当に除荷して計測されたものと、②3m 相当で引抜き試験を実施し、1.5m 相当に除荷した結果を併せてグラフ化したものである。6m 相当から 3m 相当に除荷した結果と、3m 相当で引抜き試験を実施した結果が同等になることが分かる。さらに、1.5m 相当まで除荷した結果も同等であることから、荷重から除荷によって得られる見かけの摩擦係数の有効性が確認できた。

ただし、この際の土質は $F_c=6.2\%$ と細粒分が少ない礫質土であったため明瞭な相関が見られたものと考えられる。しかし、細粒分が多い土質材料の場合には、初期上載荷重による圧縮の体積減少に伴う強度増加が見込まれ、上載荷重を除荷しても引抜き抵抗力が残留するため参考値として取り扱う。

5.2 標準締固めエネルギー

小型試験機の締固めは、専用のランマー (1.5 kg, 落下高さ 20 cm) (写真-2) を使用する。締固め度 90% 相当を目標に試験土槽を 4 層に分けて、各層 12 回 \times 4 周 = 48 回/層を突き固める【4 層 \times 48 回】を標準エネルギーとしている。その理由は、基準書¹⁾ が改訂される以前の締固め管理基準は、JIS A 1210 の A, B 法による最

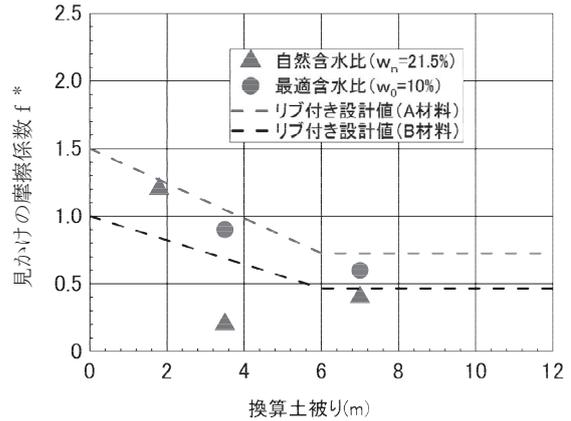


図-9 B 材料の小型引抜き試験結果

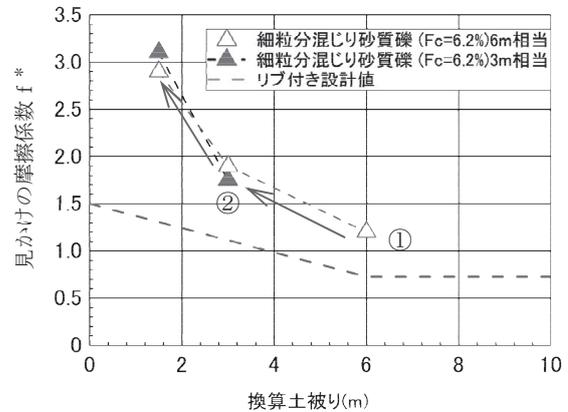


図-10 土被り圧の違いによる残留値の比較

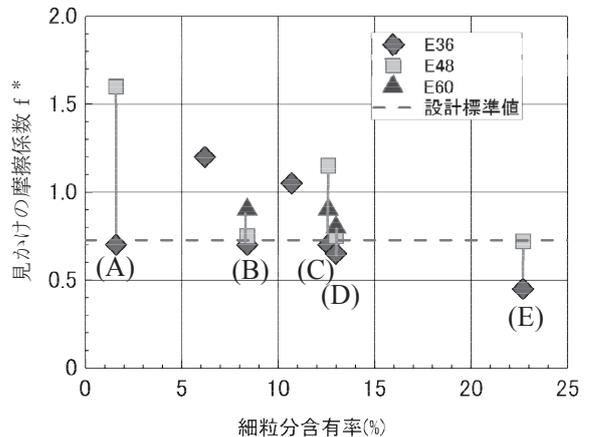


図-11 締固めエネルギーによる見かけの摩擦係数(残留値)と細粒分含有率の相関

大乾燥密度の 90% 以上であったこと、および、現場で実施する試験を簡略化して盛土材料の良否を判定できることを目指したためである。実際には、土質によって、また、含水比状態によって、締固め度が違ってくる。しかし、標準エネルギーで締固めた場合に、細粒分含有率で規定された範囲の土質においては設計標準値の見かけの摩擦係数が計測されることを確認している。図-11

は、細粒分含有率の違う土質材料に対して、締固めエネルギーを変えて試験した見かけの残留摩擦係数を示すものである。使用した土質試料は、(A)RC-40:Fc=1.6%、(B)流しコーラル:Fc=8.4%、(C)碎石残土:Fc=12.6%、(D)細粒分質礫質砂:Fc=13.0%、(E)細粒分質砂質礫:Fc=22.7%の5種類である。4×36回締固め(E36)は設計標準値を下回っているものもあるが、4×48回締固め(E48)は全て設計標準値を超えている。4×60回締固め(E60)も設計標準値を超えているが、E48と同等か、それ以下の場合もあった。よって、E48が小型試験機の標準エネルギーとして適当と考えた。

また、この時の締固め度は、90%以上でなくても良いが、その理由を以下に述べる。小型試験機の特徴として、試験に用いる専用ランマーは質量1.5kgと軽量のため、締固めに大きなエネルギーを必要とする礫質土等に対しては、締固め度が90%より低くなるが、見かけの摩擦係数は大きく計測される。一方、比較的細粒分の多い材料は、小さなエネルギーでも締固め度が90%よりも高くなる。締固め度に応じた見かけの摩擦係数が計測されている。よって、締固め度が90%以下であっても、見かけの摩擦係数が設計値以上を確保できていれば安全側の評価となるため良いと考える。このような小型試験機の性質から、90%以上の締固め度を目標にして試験を行っているが、それが条件ではなく、同一エネルギーで締固めを行った状態の見かけの摩擦係数を比較して、土質材料の性質に応じた評価をする。それが、締固め度に応じた盛土材料の摩擦特性評価の目安になる。試験結果の評価方法を下記に示す。

- イ) $\rho_d > 90\%$ で見かけの摩擦係数が確保できているなら適正
- ロ) $\rho_d < 90\%$ でも見かけの摩擦係数が確保できている材料は更に良い傾向
- ハ) $\rho_d > 90\%$ でも見かけの摩擦係数が確保できない場合には、締固め回数を増やして95%まで締固めた状態で再度確認する

なお、現在の現場締固め基準では、最大乾燥密度の95%以上の締固め密度で管理することになっているため、土質によっては、ハ)のようにエネルギーを増やして95%密度状態での引抜き試験を行うことで、従来の細粒分含有率による判断に加えて使用可否を検討することもできる。ただし、現場締固めでは締固め層厚の上部と下部における密度差があることを考慮して慎重な検討が必要となる。

5.3 引抜き速度と見かけの摩擦係数の相関

小型引抜き試験における鋼製帯状補強材の引抜き速度は、油圧ジャッキによる現場引抜き試験の引抜き速度を参考にして、4.5mm/minの速度を標準速度としている。その速度は、一般的に行われている室内試験での引抜き速度1mm/min⁵⁾よりも早い。現場との整合と、実務

表-4 まさ土②の実験条件

試験土質			まさ土②-1	まさ土②-2
細粒分含有率	Fc (%)		11.1	
最大乾燥密度	$\rho_{d,max}$ (g/cm ³)		1.915	
最適含水比	w_{opt} (%)		11.1	
自然含水比	w_n (%)		8.3	7.3
地盤密度(湿潤)	ρ_t (g/cm ³)		1.863~1.882	1.839~1.860
地盤密度(乾燥)	ρ_d (g/cm ³)		1.720~1.733	1.714~1.733
締固め度	D_c (%)		89.8~90.8	89.5~90.5
締固めエネルギー	E (回/層)		48	
引抜き速度	S (mm/min)		1~6	1~4.5

注：4.1,4.2のまさ土とは異なる

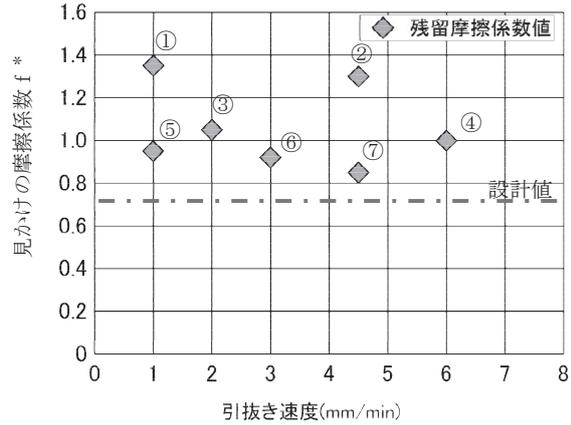


図-12 引抜き速度と見かけの摩擦係数の相関

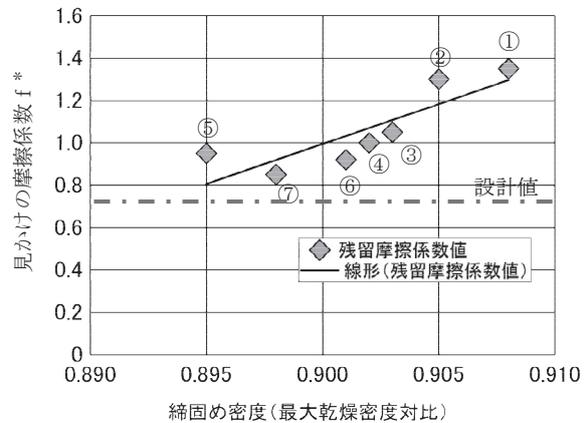


図-13 締固め密度と見かけの摩擦係数の相関

への適用を考慮した効率化を図るために設定した。そこで、その速度の妥当性を検討するために、同一試料(表-4)、同一締固め条件(E48)で、引抜き速度のみを変化させた試験を実施した。速度は、1・2・3・4.5・6mm/minでそれぞれ実施した。1mm/minと4.5mm/minのみは2回実施したが、速度との明確な相関は見られなかった(図-12)。

しかし、同一エネルギー管理をしても試験体の密度は90%の前後0.5%程度のバラつきが発生する。そこで、密度との相関を整理したところ、わずかに1%程度の中でも高い密度で見かけの摩擦係数が高くなる傾向が確認された(図-13)。ここで、図-12、図-13の計測値の対

応を①～⑦で示す。計測される見かけの摩擦係数は、密度の高さに比例して大きくなる関係が確認できる。

この結果より、鋼製帯状補強材を用いた引抜き抵抗値は、引抜き速度 1 mm～6 mm/min の範囲においては、速度依存性が見られず、現場引抜き試験相当の 4.5 mm/min 速度の妥当性が確認された。また、同一エネルギーで締固めた試料が、1%程度のわずかな密度の差によって、見かけの摩擦係数が 0.85～1.30 の範囲にバラついた要因は、使用した土質がまさ土であり摩擦抵抗力の発現が顕著なため、結果への影響が大きかったと考えられる。

ここで、まさ土の摩擦抵抗力が大きく発現する理由は、礫粒子が角張っており、高い拘束圧状態でも礫粒子が破碎せず、礫粒子同志のかみ合わせが強固なため、帯鋼表面との摩擦抵抗に増して、帯鋼リブの引抜き抵抗によるダイレイタンスー効果も大きく発現するためと考えられる。

また、同試料を用いて、補強材幅を 30 mm, 20 mm, 10 mm で試験した結果を図-14 に示す。計測された見かけの摩擦係数は、③10 mm > ②20 mm > ①30 mm の順番で幅が狭い場合に大きな見かけの摩擦係数が計測される傾向は変わらなかった。さらに、図中の矢印の幅が同一補強材幅 30 mm の試験結果の差であるが、① Dc = 89.8% < ④ Dc = 90.5% となっており、見かけの摩擦係数は密度に依存していることが分かる。

5.4 現場引抜き試験との相関

小型試験機と現場引抜き試験結果の相関を確認するために、双方の試験結果を図-15 に整理した。記号の中塗りは現場(現)を示し、記号の中抜きは小型試験機(T)を示す。小型試験機の値は、囲い枠が実線のものは E36⁴⁾ の上限値と比較している。ここで、E36 とは、専用ランマーで(4層×36回/層)締固めたエネルギーを示し、効率化のために比較的少ない締固めエネルギーで試験を行ったものである。また、囲い枠が破線のものは、E48(4層×48回/層)の見かけの残留摩擦係数と比較したものである。囲った枠が小さい程、現場と試験機の差が少ない。全体の傾向としては、どちらか一方のみが大きくなるなどの傾向は見られない。しかし、差が大きいものも見られる。その要因を考察すると、小型試験機では 19 mm または 9.5 mm ふるいを通過しない礫を除いて試験を行ったことにより、大礫の含有率が多い土質の場合には礫の摩擦効果が低減された影響で小型試験機の結果が低くなり、現場の結果が高くなったと考えられる。また、小型試験機の結果が高い場合は、現場引抜き試験がピーク手前で試験を終わらせた後に、再度引抜き試験を行ったために現場のピーク値が低くなっているなどの要因がある。さらに、現場においては施工期間内における天候の変化や降雨による含水比の変化、および締固め施工品質のばらつきなどの影響で計測値にも影響が出易いと考えられる。また、小型試験機による結果の傾向を見ると、細粒分の含有率が低い土質で見かけの摩擦

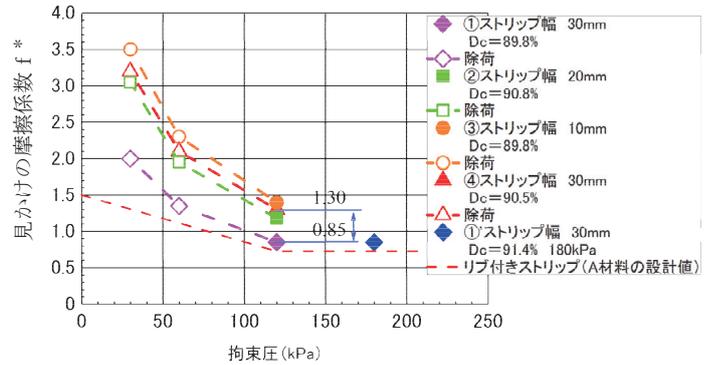


図-14 補強材幅と見かけの摩擦係数(残留値)の相関および締固め密度

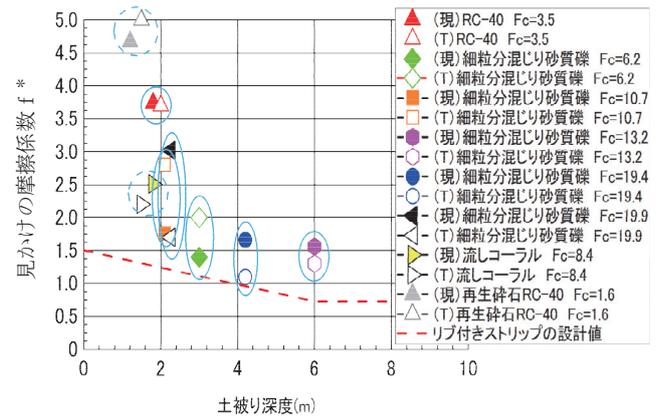


図-15 現場引抜き試験と小型試験機の対比 (E36 上限値, E48 残留値)

係数が高くなり、細粒分含有率が高い土質で見かけの摩擦係数が低くなる傾向を示している。よって、土質による見かけの摩擦抵抗値の傾向を良く表しているといえる。

これらの結果から、現場引抜き試験と小型試験機の対比は、19 mm または 9.5 mm を超える礫の割合が多い場合を除き、比較的良い整合を示しているといえる。よって、小型試験機による計測値を現場引抜き試験と整合させるための補正などを行う必要は無いと考えられる。

6. 小型試験機の活用方法

6.1 実験結果からの考察

これまでの鋼製帯状補強土工法に用いられる摩擦力が十分確保できる盛土材料としての評価は、細粒分含有率で判断されてきた。しかし、細粒分の含有率の判断に加えて、実際に計測される摩擦力を評価することで、使用する盛土材料の適用範囲を広くできることが考えられる。ただし、せん断抵抗角が設計条件 ($\phi \geq 30^\circ$ 等) を確保できていることが条件となる。さらに、使用可能な盛土材料についても材料特性に応じて品質グレードに分けて評価できるようになる。これまで小型試験機で評価した土質試料を基に、摩擦特性による盛土材料の評価基準(例)を表-5 に示す。これまでの基準書¹⁾にお

表-5 摩擦特性による盛土材料の評価基準 (例)

分類	ランク	グレード	呼称	試験機との相関	土質	実際の土質	備考
A材として 使用可	1	G7	HS	-	硬岩ずり・クラッシャー ラン・砕石	(宅造認定擁壁の基準: $F_c \leq 15\%$, $\phi \geq 35^\circ$)	礫径が大きいと、小型試験 機では評価が難しい
	2	G6	S	-	粒度の良い礫質土	(重要度の高い用途: 橋台背 面の裏込め土等)	〃
	3	G5	A1	標準EでA材を大き くクリア(密度90% 以下)	礫質土	Oita/OS (灰土: $F_c=24\%$, $\phi=34^\circ$), Okinawa/NS (RC40: $F_c=6\%$)	
	4	G4	A2	標準EでA材を大き くクリア(密度90% 以上)	まさ土・砂質土	Kagoshima/シラス ($F_c=35\%$, $\phi=36.2^\circ$)	
	5	G3	A3	標準EでA材料の数 値を満足	粒度の良い山砂	Okinawa/NS (流しコーラル: $F_c=8\%$)	旧マニュアルでの適用目安
	6	G2	A4	標準EでNG, 4×60~72回でA材	粒度の悪い山砂・細砂		
	7	G1	A5	密度を95%まで上 げてOK	$F_c > 25\%$ だが $\phi \geq 30^\circ$	Miyagi/WS ($F_c=33\%$, $\phi =$ 33.4°) Fukui/FS ($F_c=30\%$, $\phi = -$)	マニュアル改訂前はB材の判 定
B材	8	G0	B1	エネルギーを上げ てもB材の評価	シルト質砂, $25\% < F_c \leq 35\%$	Fukuoka/IS ($F_c=34\%$, $\phi =$ 33.5°), Fukushima/DS ($F_c=34\%$: $\phi =$ 31° , 高含水比)	・摩擦係数を低減して提案 ・含水比調整, サンドイッ チ工法等対策が必要
	9	G0	B2	〃	$35\% < F_c < 50\%$		・セメント改良処理等の土 質改良を検討
規格外	10	NG	規格外	エネルギーを上げ てもB材を下回る	細粒分の多い砂質土		・土取り場の変更, 購入土 の検討 ・セメント改良処理等の土 質改良を検討
※標準E=標準エネルギー: 4×48回/層 突き固め, 1.5kg専用ランマー使用							

ける分類は、岩石質材料を除いた土質材料の分類は A 材料 ($F_c \leq 25\%$) と B 材料 ($25\% < F_c \leq 35\%$) の 2 タイプに分類されていた。A 材料とは、そのまま適用可能な土質材料であり、B 材料とはそのままでは適用出来ないため、何らかの対応策を施して使用できるものである。しかし、摩擦特性を直接的に確認できる小型試験機を活用することによって、A 材料の中でも盛土材料の品質に応じて数段階のグレード分けが可能となる。また、B 材料の領域で評価されていた土質材料であっても、摩擦特性が設計値以上であることが確認できたものは、A 材料としての利用が可能となる。(例: 表-5, グレード G1) 一方、品質の劣る盛土材料は、施工前に摩擦特性を検証することで、使用に当たっての制限をかけることができるため、品質の確保につながってくる。

6.2 今後の活用方法について

今後の活用方法への期待として、小型試験機を用いることで現場毎の盛土材料の摩擦特性を評価し、表-5 のようにグレード分けすることができれば、構造物に求められる品質や性能に応じて材料を選定して使用することが可能となる。仕様設計から性能設計へ移行するために、土構造物はみなし規定が適用されているのが現状である。しかし、重要な構成材料である盛土材料を個別に評価できることによって、求められる重要度や用途に応じて使用材料を使い分ける提案につながる。

さらに、使用材料のグレードによって、構築された補強土壁構造物の内部状態を評価することが可能となり、

コンクリート壁面で覆われた表面からは判断できない内部状態の安全余裕度を評価することで、将来的な維持管理の目安としても活用が期待できる。

7. まとめ

本研究の結果を以下にまとめる。

- (1) 小型試験機のサイズによる影響、適用可能な土質等の特性を明らかにした。
- (2) 従来の現場引抜き試験との相関を見ることで、小型試験機のサイズによる計測値の補正等は必要無いことが分かった。しかし、9.5 mmを超える礫径が占める割合の多い材料については適用が難しい。
- (3) 引抜きを止めた直後の見かけの残留摩擦係数と、上載荷重を除荷して得られる見かけの残留摩擦係数との相関を示した。
- (4) 小型試験機によって個別現場毎の盛土材料を評価する方法として、専用ランマーを用いた標準エネルギーによる方法を提案した。
- (5) 鋼製帯状補強材を用いた引抜き試験では、4.5 mm/min の速度で引抜きを行っても結果に影響ないことが分かった。
- (6) 摩擦抵抗が大きい土質材料においては、締固め密度のわずかな違いが計測結果の違いに影響する。
- (7) 細粒分含有率のみで使用可否を判定する以外に、個別の摩擦特性を確認する試験によって適用土質を

広げることが可能となる。現場発生土などの有効利用につながることで、環境負荷の軽減が期待できる。また、今後の可能性の提案として、

- (1) これまでの締固め管理基準である締固め度90%が、95%に上がったことで、設計で採用している見かけの摩擦係数を確保できる盛土材料の領域が広くなったと考えることもできる。しかし、適用に当たっては十分な事前準備と現場締固め管理および含水比管理に注意が必要である。使用する場合には、重要度が低い、低壁高への適用や傾斜壁などへの適用に留めることを提案する。
- (2) 施工前に、使用する盛土材料の摩擦特性が検証できることによって、要求品質を確保できる盛土材料の選定が可能となる。一方、品質の劣る材料の使用を制限できることで、補強土構造物の品質確保と施工管理に活用できる。
- (3) 使用する盛土材料の摩擦特性を個別に評価できることで、性能設計に向けた使用材料の提案が可能となり、将来的な維持管理の目安としても活用が期待できる。

今後の課題としては、さらに多くの盛土材料について試験を実施して、小型試験機と現場引抜き試験のデータを蓄積することが必要である。そして、そのデータに基づいて、摩擦特性による盛土材料の評価基準(表-5)を整備し、構造物に要求される性能に応じて発生土を有効利用できるようにしていくことが望まれる。また、土質

による摩擦特性の違いと、壁面変位との相関を明らかにするために、壁面計測データの集積も併せて行っていきたい。それによって、補強土壁工法が性能設計へ移行できる基礎資料としての活用が期待できる。

参考文献

- 1) 一般財団法人土木研究センター：補強土（テールアルメ）壁工法設計・施工マニュアル第4回改訂版，2014。
- 2) 小川憲保：現場引抜き試験による帯鋼補強材と盛土材との摩擦特性，土木学会論文集，No.568/III-39,pp.221-226,1997。
- 3) 熊田哲規，渡辺恵二：鋼製帯状補強土壁（テールアルメ）に用いる補強材の引抜き試験，第49回地盤工学シンポジウム平成16年度論文集，pp.253-260，2004。
- 4) 佐原邦朋，松崎裕太：現場使用を想定した小型引抜き。の性能検証，第51回地盤工学研究発表会，pp.1535-1536，2016。
- 5) 公益社団法人地盤工学会：ジオシンセティックスの土中引抜き試験方法(JGS0942-2009)，地盤材料試験の方法と解説，pp.1058-1068，2009。

(2017年6月18日 受付)