

盛土法面の締固め品質の向上と施工・維持管理技術の効率化に関する研究

石藏良平、安福規之

九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門

概要：本研究では、盛土法面の締固め品質が、盛土全体としての浸透特性に与える影響を把握するため、浸透模型実験を実施し、盛土法面を適切に締固めることの重要性を明らかにした。また、盛土法面の合理的な施工管理方法として、改良型 FWD 装置を試験盛土に適用し、締固め度と FWD 係数との関係から、盛土法面の健全性を管理する新たな方法を提案した。

1. はじめに

盛土は経済的かつ環境問題にも対応できる今後もなくはない土構造物の一つである。しかしながら、盛土の性能の検査には不確定な要素が多く含まれており、そのため盛土の設計において安全側の判断がなされてきた¹⁾。一般に盛土は、写真 1 に示されるように天端を転圧ローラ等で締固め、その締固め度で管理されているが、法面の健全性を直接的に管理する規定はない。法面の締固めの重要性を検証するとともに、新たな法面の管理規定を提案することで盛土の健全性を向上させることが本研究の意義である。これまで、図 1 に示す研究フローに基づき、「盛土法面の締固めの高度化」と「盛土の新たな管理手法の提案」を目標として取り組んでおり、盛土法面の締固め品質が不十分であることをこれまでに明らかにしている²⁾。本研究では、①模型実験によって、法面の締固め品質の違いが、浸透特性に与える影響を検証するとともに、②盛土法面の締固め装置（以下、振動ブレーカ）を用いた品質改善効果の確認と、改良型 FWD 装置を用いた新たな盛土法面の品質管理方法の提案を行った。



写真 1 転圧ローラによる盛土の施工状況

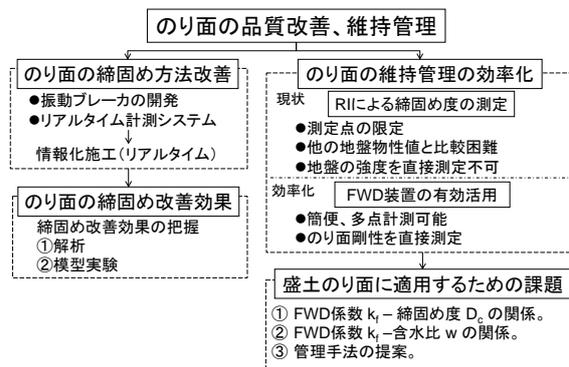


図 1 研究のフロー

2. 河川堤防を想定した浸透模型実験による盛土法面の締固め改善効果

2. 1 実験概要

模型盛土の概要を図 2 に示す。本実験では、試験の試料として豊浦砂 ($\rho_{dmax}=1.58(g/cm^3)$ 、 $w_{opt}=14.3(\%)$) を使用した。含水比は、基礎地盤、堤体ともに最適含水比の 14.3% とし、締固め度は、基礎地盤を 100%、堤体内部を 60%、法面は締固め効果が出現しやすいよう 60% と 100% の 2 ケースに設定した。(以下、のり面の締固め度が 60% の実験を Case1、100% の実験を Case2 とする。) 締固め方法は、まず基礎

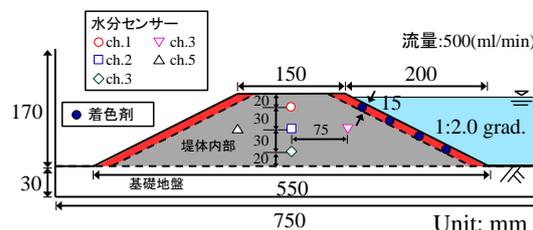


図 2 模型盛土の概要

地盤を締固め度 100% で締固め、次に基礎地盤より上部を締固め度 60% で締固めた後、不要な部分を削取り堤体内部を作製し、最後にのり面を締固め度 60% もしくは 100% になるよう締固めた。各段階とも、設定した締固め

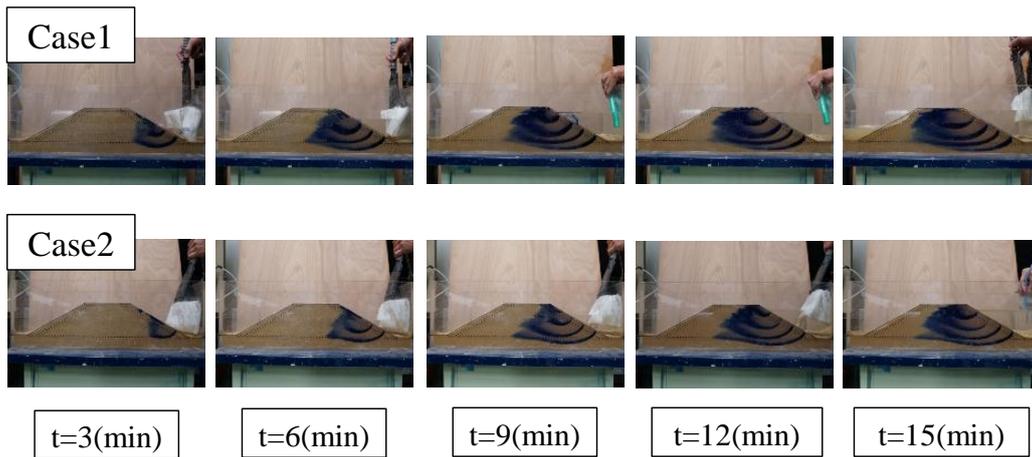


図3 浸透過程の比較

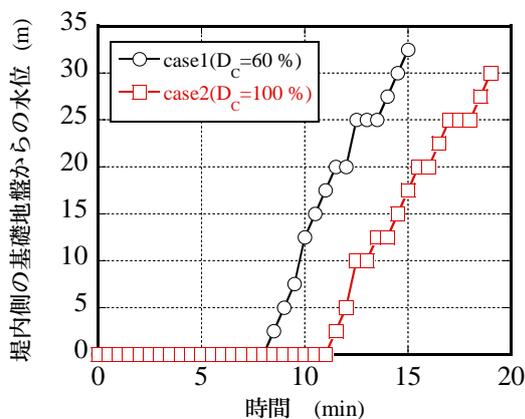


図4 堤内側の浸透水位の経時変化

度から必要な試料の質量を計算し、所定の模型盛土体積になるまで締めを行った。また、図に示す所定の位置に水分センサーを設置し、浸透過程における飽和度の経時変化を計測した。堤外側にははじめは 500ml/min の一定水量を流し込み、水位が基礎地盤から高さ 95mm 程度に達した時点で、水位を保つように（越流させないように）流量を調節した。模型盛土内の浸透状況を観察するため、堤外側のり面に着色剤を 35mm 間隔で 4 箇所埋め込んだ。

2. 2 模型盛土の浸透崩壊に対する改良効果

各ケースの浸透過程の比較を図-3 に示す。写真による比較では、Case1 と Case2 の流線網に大きな違いは見られない。また、Case2 は Case1 に比べ、実験開始直後から模型盛土内への浸透が遅く、法面から盛土内への浸透を妨げている。これは、法面の締め固め度を大きくすることで、盛土法面の透水性が低下し盛

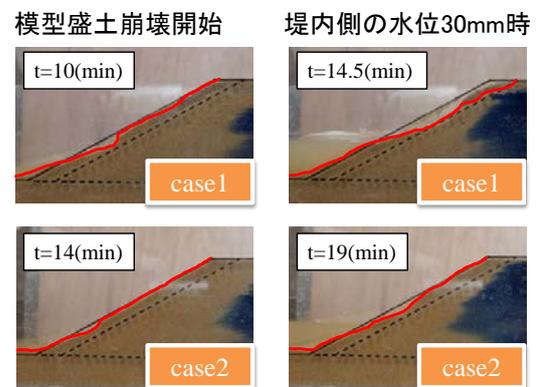


図5 堤内法面の崩壊状況の経時変化

土に蓋をするような状態になっていたためと考えられる。

図4に、浸透過程での堤内側に流出した水量と時間の関係を比較するため、堤内側における基礎地盤からの水位高さの経時変化を示す。水位高さは、所定時間経過した際に撮影した写真画像によって得られた。水位上昇の傾向は、Case1、Case2 とともにほとんど変わらない。しかし、Case2 は case1 に比べ、水位上昇開始時間が 3 分程度遅い。これは、模型盛土のり面の締め固め度を向上させることによって、模型盛土全体としての透水性が低下し、模型盛土堤内側への浸透速度を抑制したためと考えられる。

模型盛土の崩壊開始時と堤内側水位が 30mm の時の堤内側盛土法面の浸食状況を図5に示している。崩壊時間は模型実験の画像結果から求めている。Case2 は Case1 に比べ、模型盛土の崩壊開始時間が 4 分程度遅くなっている。堤内側水位が 30mm 時には、Case1 よりも Case2 は浸食土量が少ない。これは、

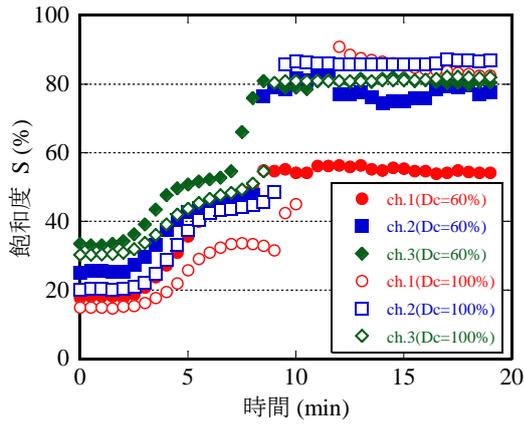


図 6 盛土中心下の飽和度の経時変化

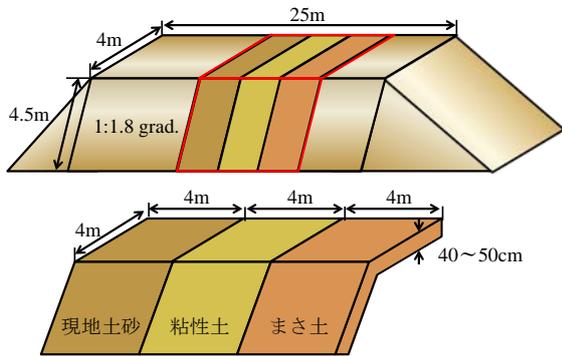


図 7 試験盛土の概要

表 1 用いた試料の基本物性値

	現地土砂	粘性土	まさ土
ρ_{dmax} (g/cm ³)	2.03	2.08	1.97
w_{opt} (%)	9.1	7.0	10.0
w_{nature} (%)	10.7	10.6	10.2
土の工学的分類	GFS 細粒分質砂質礫	GS-F 細粒分まじり砂質礫	SG-F 細粒分まじり礫質砂

法面の締固め度が向上することによって、法面のせん断強度が増加したことに起因しているものと考えられる。

水分センサーの結果の一例として、盛土の中心の深さ方向にある ch.1~ch.3 の結果を図 6 に示す。Case1、Case2 ともに盛土下部である ch.3 から浸透していき、ch.2、ch.1 へと上部へ浸透が進んでいることがわかる。また、すべての盛土位置において、Case1 に比べ Case2 の浸透開始時間が遅いことから、のり面の品質改善が浸透を抑制していると推察される。

3. 現場実験による締固め効果の確認

3. 1 現場締固め実験の概要

本研究でこれまでに開発している法面締固め装置（振動ブレーカ）の適用性³⁾を明らか

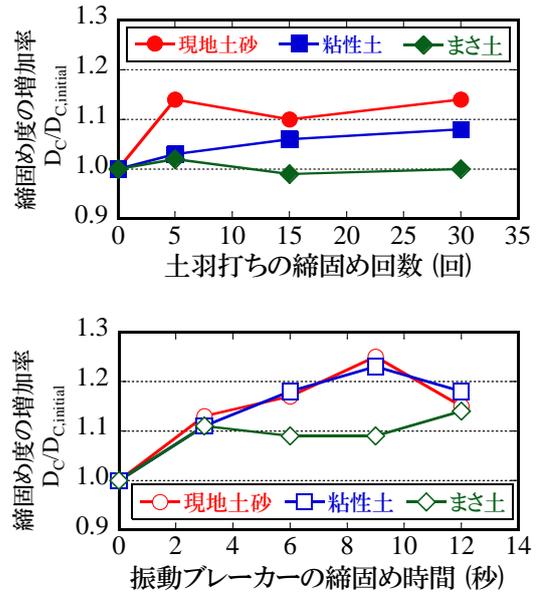


図 8 各締固め法による締固め度の増加率

にするために現場実験を行った。造成した盛土の概略図を図 7 に示す。まず、現地で採取した土砂により幅 12m、高さ 2m、奥行き 4m、法面勾配 1:1.8 の盛土を造成した。天端は撒き出し厚 30cm ごとに振動ローラを 8 回転圧し、法面は所定の盛土高さになった後、バックホウのバケットの背を用いて形状を整えた。その後、天端、法面ともに表面から 40~50cm を現地土砂、粘性土、まさ土の 3 種類の異なる試料に置き換えた。天端は振動ローラで、法面は振動ブレーカおよび、バックホウによる土羽打ちの二種類の方法での締固めを行った。各試料の基本的物性値を表 1 に示している。天端では振動ローラの転圧回数を 0 回、4 回、8 回、12 回、24 回として締固めを行った。法面では振動ブレーカの締固め時間を 0 秒、3 秒、6 秒、9 秒、12 秒とし、土羽打ちの締固め回数を 0 回、5 回、15 回、30 回と変えて締固めを行った。盛土材のバラツキによる影響を抑えるために、各試料ともに 3cm 以下にふるった材料を使用した。各条件で締固めた後、RI 測定による密度測定を行った。締固め度については、次式を用いた。

$$D_c = (\rho_d / \rho_{dmax}) \times 100 \quad (1)$$

ここでは、 ρ_d : 現場における乾燥密度、 ρ_{dmax} : 室内締固め試験により得られる最大乾燥密度を表す。

3. 2 締固め方法および土質の違いによる法面の品質

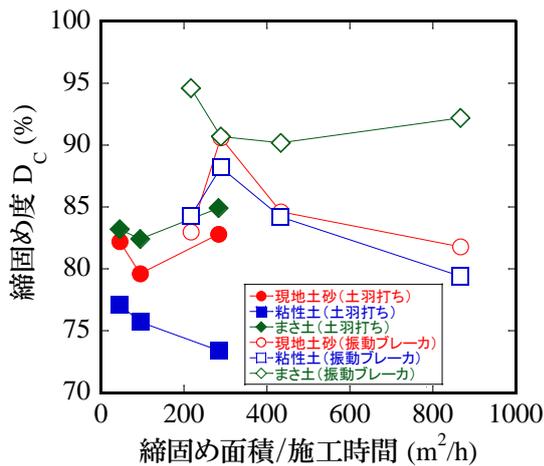


図9 各締固め方法による締固め度と締固め効率の比較

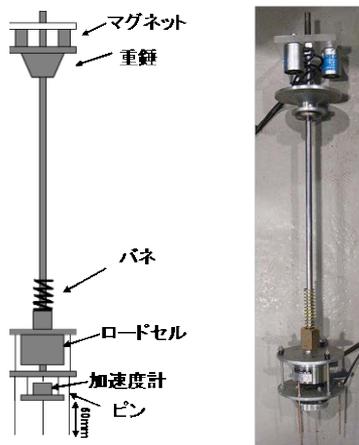


図10 改良型 FWD 装置の概略図

図-8は0回もしくは0秒の値を初期値とし、各締固め方法における締固め度の増加率を示したものである。各試料の初期締固め度は、現地土砂 72.4(%)、粘性土 71.6(%)、まさ土 83.0(%)である。図に示されるように、土羽打ちによる締固め方法では試料により締め固め効果の有効性が異なっている。一方、振動ブレーカによる締固めでは、すべての試料において締固め度が増加した。ただし、試料によっては、締固め度の増加後、オーバーコンパクションの傾向が示されており、最適な締固め時間や締固め回数が存在すると思われる。

図9に土羽打ちと振動ブレーカによる締固め品質および締固め効率の比較を示す。縦軸は締固め度になっており、締固めの品質を表している。横軸は、締固め面積を施工時間で除した値となっており、この値が大きければ締固め効率が良く短時間でより広い面積を締固めることができることを表す。振動ブレー

カは縦軸、横軸ともに土羽打ちより大きな値を示している。つまり、振動ブレーカは土羽打ちよりも締固めの品質、効率ともに優れていることを表している。

4. 改良型 FWD 装置を用いた締固め特性の解釈

4. 1 改良型 FWD 装置による地盤剛性評価

盛土法面の効率的な施工管理等を行うためのひとつの方法として、FWD 装置を用いた管理方法を検討した⁴⁾。図10に示す改良型 FWD 装置では、重錘を地盤に落下させ、バネを介して地盤に生じる荷重と加速度を測定する。測定荷重を載荷板の面積で除し応力を求め、加速度は2階積分することによって変位に換算する。得られた最大応力を σ_{max} とし、その時に生じた変位を u_{max} とすると、 k_f (FWD 係数) は次式で与えられる。

$$k_f = \sigma_{max} / u_{max} \quad (\text{MN/m}^3) \quad (2)$$

FWD 係数が大きいほど剛性の高い地盤として評価され、これまでの研究結果から、地表面から 10cm 程度までの剛性を評価できることが明らかになっている。

4. 2 室内実験による適用性の検証

締固め度と FWD 係数の関係を調べるため、室内実験で得られる締固め曲線上で FWD 測定を行った。試料は、4.75mm でふるった現地発生土砂を用いた。通常のコールドサイズでは、内径が小さいため FWD 係数がモールドの影響を受ける恐れがあるため、内径 28.6cm のモールドを用いて締固め試験と FWD 測定を行った。4.5kg のランマーを使い、1層 6cm の5層で締固めを実施した。一層の突固め回数は仕事量の定義より、通常のコールドサイズと仕事量が等しくなるように締め固めた。その後、 $D_c=100, 95, 90(\%)$ となる締固め曲線上と最適含水比で FWD 測定を行った。

4. 3 FWD 係数と締固め度および含水比の関係

FWD 測定の結果を図11に示す。最適含水比においては締固め度の増加に伴いと FWD 係数も増加している。また、締固め度 $D_c=90, 95(\%)$ の一定値ライン上では、最適含水比までの乾燥側においては、FWD 係数はほぼ同値を示しているのに対して、最適含水比より湿潤側では FWD 係数が著しく低下している。以上のことから締固め曲線内では例えば、図-11のように FWD 係数の等値線が引けると考え

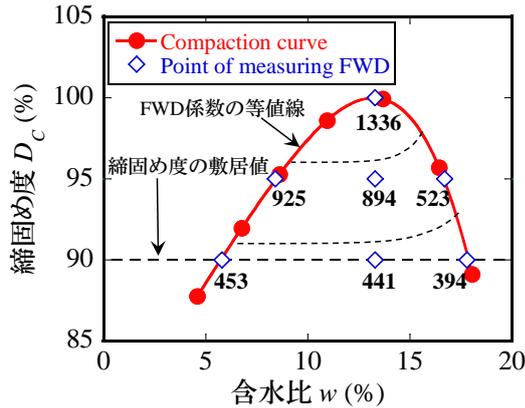


図 11 締固め度と含水比および FWD 係数

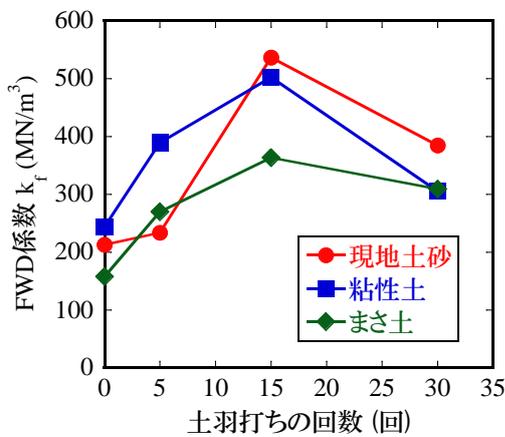


図 12 土羽打ち回数と FWD 係数の関係

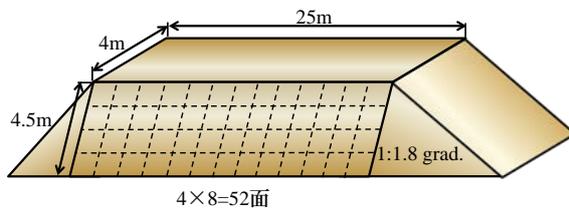


図 13 現場盛土における FWD 測定を行った法面グリッドの形状

られる。このように、土質に応じて締固め度の敷居値 ($D_c=90(\%)$) を越えるような FWD 係数を事前に決定できれば、FWD 装置を用いて法面を合理的に管理することができる。と考える。

4. 4 改良型 FWD 装置の盛土法面への適用例

FWD 試験の現場盛土への適用の一例を図 12 に示す。3. 1 で造成した土質の異なる盛土法面に対して実施したものであり、FWD 係数と土羽打ちの回数の関係を示す。図に示さ

れるように、すべての試料において、締固め回数が 15 回までは FWD 係数 k_f が増加し、30 回では低下する傾向を示した。実際に、現地では地盤の剛性が増加しているように見られたことから、地盤の剛性の増加を FWD 装置が定量的に捉えることができているものと推察される。ただし、RI 装置による締固め度との傾向が一致しておらず、FWD 装置による剛性評価の範囲については課題が残る。

5. 改良型 FWD 装置を用いた盛土法面の管理基準の提案

盛土法面の空間的ばらつきと、改良型 FWD 装置の法面管理への適用性を検証するため、現地土砂を用いた一般的な方法で締固めた盛土法面において、図 13 に示す 52 か所で RI 測定と FWD 測定を実施した。各地点で RI 測定を 5 回、FWD 測定を 10 回行っている。

FWD 係数値を確率変数としたときの、FWD 測定値と実験で得られた頻度の関係を図 14 に示す。520 回の測定値の分布をみると、FWD 係数は、ばらつきはみられるものの、対数正規分布を示している。

各地点での、締固め度および FWD 係数の平均値の関係を図 15 に示す。FWD 係数の平均値は、 $251(\text{MN}/\text{m}^3)$ であり、標準偏差は 112 であった。FWD 係数を用いた法面管理を提案するため、ばらつきはあるものの、両者の関係を線形近似した。また、近似線に対して、 \pm 標準偏差 σ を平行移動した線も併記した。

ここで、現在の管理基準値である締固め度 90(%)に対応する最適な FWD 係数を選定するため、検出率を導入した。検出率とは、所定の FWD 係数と締固め度 90(%)の「両者の基準を満たす」サンプルと「両者の基準を満たさない」サンプルの合計が全サンプル数に占める割合と定義した。その結果、現地土砂を用いた盛土のり面においては、 $k_f=150$ を基準とすると最も検出率が高くなる結果となった。また、実測結果を近似した線形近似線や線形近似線 \pm 標準偏差 σ を最適な FWD 係数とした場合の検出率も併せて表 2 に示す。乾燥密度と FWD 係数には、緩やかな正の相関があり $k_f=150$ を管理基準とした場合、この土質では約 77(%)検出できるという結果となった。そのため、FWD 試験はのり面の締固め度の向上を把握する上で有効な手段となる可能性がある。

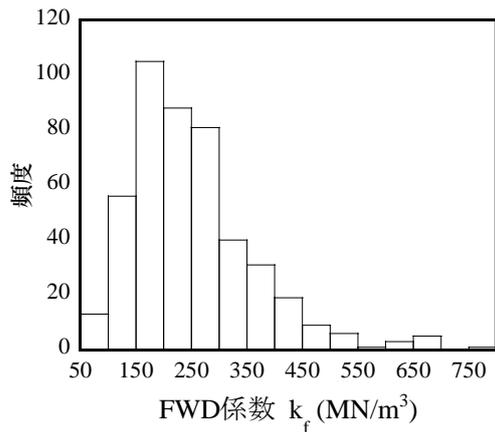


図 14 FWD 係数の頻度分布

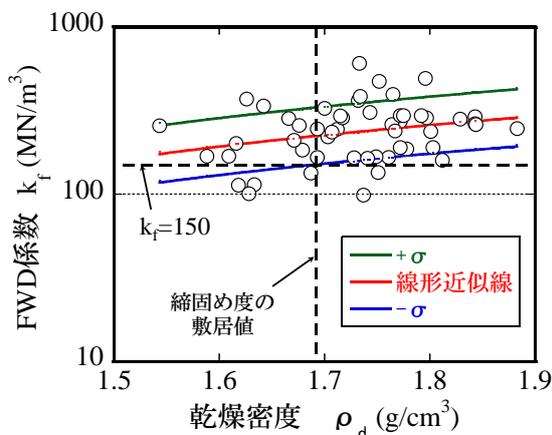


図 15 乾燥密度と FWD 係数の平均値の関係 (現地土砂)

表 2 FWD 係数による盛土管理基準と検出率

FWD係数の基準	検出個数	検出率
$k_f=150(\text{MN}/\text{m}^3)$	40/52	76.9(%)
線形近似線	30/52	57.7(%)
線形近似線 $+\sigma$	18/52	34.6(%)
線形近似線 $-\sigma$	39/52	75.0(%)

6. まとめ

本研究では、盛土法面の締固め品質の向上が、盛土全体としての安定性に与える影響を確認するため、浸透模型実験を実施した。実験により、盛土法面の締固め度を向上させることにより、盛土内への水の浸透を抑え、浸透速度を遅らせることができることが確認された。堤内側の浸食量も低減される傾向が確認された。

また、現場実験にて、新たな法面締固め装置(振動ブレーカ)を用いることで、法面の締固め品質が改善されることを確認すると

もに、改良型 FWD 装置を用いた盛土法面の健全性を管理する方法を提案した。今後、土質の異なる盛土材料に対しても、FWD 係数と締固め度との相関を確認し、提案方法の適用性について更に検討する予定である。

参考文献

- 1) 龍岡文夫：盛土の締固め管理と設計の協働の必要性, 基礎工, 37 巻, 7 号, pp.2~9,2013.
- 2) 安福規之, 石蔵良平, 谷山充, 小林泰三：盛土法面の締固め品質の現状, 建設機械,28-33,2013.
- 3) 小林泰三ら：油圧ブレーカの打撃エネルギーを利用したバックホウによる法面締固め技術の開発 建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, pp.171~120,2012.
- 4) 属寛, 落合英俊, 安福規之, 大嶺聖：重錘落下式変形係数測定装置を用いたセメント安定処理土の変形・強度特性の評価 土木学会論文集,pp.283~292,2002.