

## 22. 締固め管理手法に基づく盛土のり面の品質評価とその現状

九州大学大学院  
榊浅川組  
福井大学大学院

○ 安福 規之  
谷山 充  
小林 泰三

### 1. はじめに

これまでに様々な地盤の締固め技術が開発・実用化されてきているが、そのほとんどが水平面を対象としたものである。法面に対しては、平底の法面バケットを利用したバックホウによる法面造成が一般的であり、勾配等の幾何学的な法面整形（仕上げ）に主眼が置かれることが多く、十分な締固めや均質性を必ずしも保証するものとは言えないのが実情である。しかし、昨年の東日本大震災での土構造物の多くの被害事例を鑑みると、その教訓のひとつとして、締固めの重要性和適切な排水処理の大切さが指摘される。そんな中、土構造物としての盛土のり面の健全性を確保することは、盛土全体での健全性を考える上で重要な要素であると考えられるが、盛土法面がどの程度の締固め特性や均質性を有しているものなのかを把握した例は少ないと思われる。

本研究では、盛土の試験施工を通常の方法で実施し、事例的ではあるが、盛土のり面における締固め管理の現状を盛土天端（水平面）でのそれと比較しながら言及する。また、のり面の締固め手法を工夫することで、のり面の締固め度がどの程度改善されるかを現地実験の結果<sup>1)</sup>に基づいて考察する。加えて、筆者らの開発する非破壊の小型FWD装置を紹介し<sup>2)</sup>、試験盛土のり面への適用例を示し、変形特性を反映した指標に基づく健全度評価結果について述べる。

### 2. 試験盛土に関する現地および室内実験

ここでは、試験盛土の天端とのり面の施工条件および盛土材の締固め特性を示すと共に、現位置および室内での測定・試験条件をまとめる。

#### 2.1 試験盛土の形状と特色

図-1(a)および写真-1は、現地で行った試験盛土の幾何学的形状を示したものである。盛土は、現地発生土を一層30cmで巻きだし、写真-2(a)に示す振動ローラを8往復して、締固めながら所定の高さとなるように整形した。最終的な、盛土のり面の高さは2.0m、勾配は1:1.8であり、結果として、のり面長は約3.6mとなる。また、天端の奥行きは



写真-1 現地での試験盛土の施工状況

6mとし、盛土の幅（全長）は25mに設定した。

後述するように盛土のり面は、写真-2(b)の掘削機のバケットの背を使って、形状を整えるのみの予備的なり面（Slope-Sと称する）およびバケットの背を使って静的に締固める方法で整形したもの（Slope-Lと称する）を用意し、それぞれのり面の締固めの状態を天端のそれと比較した。なお、盛土天端は、一般に行われる振動ローラを使った動的な締固めによって整形されている。

#### 2.2 盛土のり面の施工方法と設定条件

盛土のり面は、Slope-SとSlopes-L2,M2,N2が準備された。まず、Slope-Sは、巻きだし厚30cmの層上を写真-2に示す振動ローラを8往復することで各層ごと締固め、製作されたものである。この場合、のり面は、所定の盛土高さになった後、写真-2の掘削機のバケットの背を使って、のり面に対して垂直に掘削機が浮き上がらない程度の力を加え、形状を整えたものである。

次にSlope-L2,M2,N2のり面は、Slope-Sと同じ方法で整形した盛土のり面の表層を30cm程度はぎ取り、その部分に新たに盛土材を巻きだし、バケットを使って静的に締固めを行って作成したものである。L2,M2,N2の違いは、締固めエネルギーの違いである。この方法を以下、「バケットタンピング法」と称する。図-1に示すようにSlope-L2,M2,N2は、バケットで様にそれぞれ12回、24回、50回ずつタンピングすることで、整形したものであり、相対的にSlope-L2,M2,N2の順に

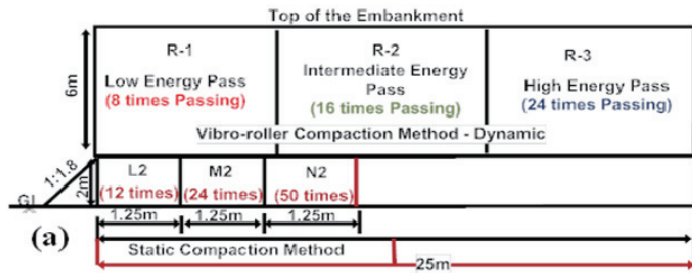


図-1 (a) 試験盛土のスケッチと幾何学的な形状

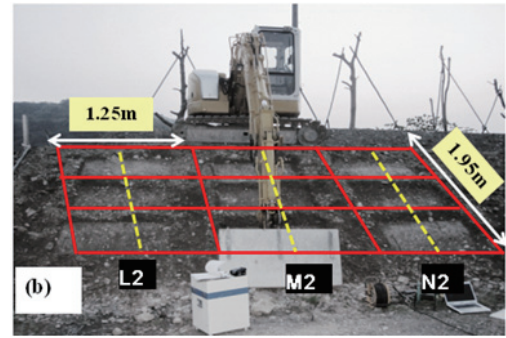


図-1 (b) 盛土のり面の試験グリッドのイメージ

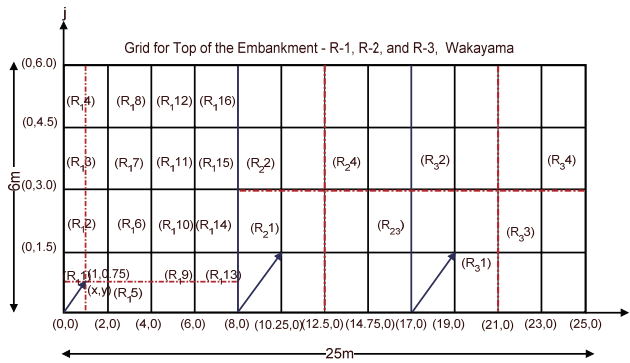


図-2 盛土天端の試験グリッドの状況

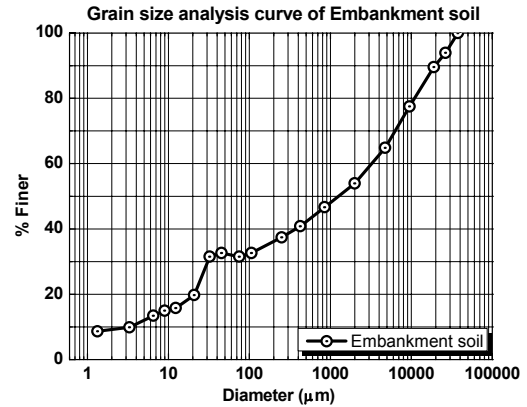


図-3 盛土材の粒度分布

良く締固められたのり面ということになる。

### 2.3 盛土天端の施工方法と設定条件

盛土天端の水平面もまた、図-1 に示すように振動ローラーによる締固め方法によって締固めエネルギーの異なる3つの部分(R1,R2,R3)に分けて施工されている。盛土天端R1は、一般的な方法である、振動ローラーを各層ごと8往復させることによって施工された区域である。また、R2区域とR3区域はそれぞれ振動ローラーを16回と24回往復させて整形されたものであり、標準的な締固めであるR1区域に比べて大きなエネルギーを加えた天端であると言える。

### 2.4 FWD試験を含む現地測定項目と方法

現地計測は、図-1(b)と図-2に示すように測定区域をグリッドに分けて、グリッドごとで行った。用いた主な計測装置には、RI密度測定装置(写真-3(a))と非破壊で地盤表層の変形性の評価できる小型のFWD装置(写真-3(b))である。RI密度測定装置は、その土の締固め曲線が既知であれば、土の最大密度と最適含水比をRI装置に基礎データとして入力することで、測定地点における土の湿潤および乾燥密度に加えて締固め度が標準偏差を伴った形で求められる。計測はグリッドで区分された区域内で3回ずつ行った。

小型のFWD装置(Portable light falling weight

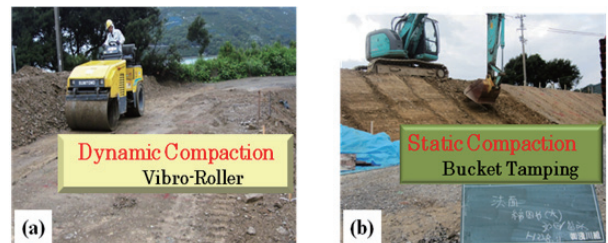


写真-2 締固めの様子 (a) 振動ローラーによる締固め、(b) バケットタンピングにより締固め

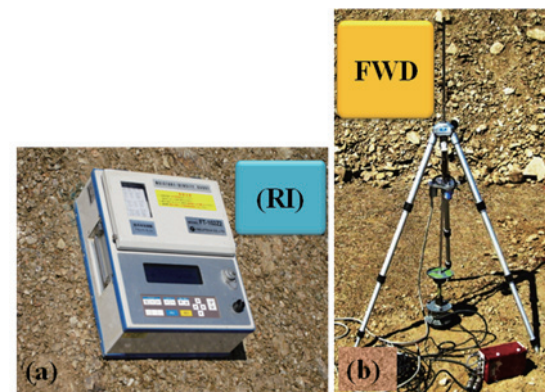


写真-3(a) RI 装置 写真-3(b) 試作したFWD装置

deflectometer)は九州大学で開発したもので<sup>1)</sup>盛土表層15cm程度の深さまでの盛土地盤の平均的な変形性能を表現できるとされている。図に示すよ

うに重錘を自由落下させ、その際の表層地盤に作用する加速度と力を記録することで、結果的に応力と変位を算定し、最大応力と最大変位の比としてFWD係数  $k_f$  を求めるものである。すなわち、

$$k_f = \frac{\sigma_{\max}}{u_{\max}} \quad (\text{MN}/\text{m}^3) \quad (1)$$

FWD係数  $k_f$  が大きいほど、剛性の高い地盤として通常評価される。

盛土のり面および天端のグリッドで仕切られた区域ごとで、試料の採取も行った。これにより、直接的に各区域の含水状態が直接的に求められる。また、使用した盛土材の締固め特性を評価するために盛土天端からの試料のサンプリングも行った。

## 2.5 盛土材の締固め特性と基本的性質

盛土材には、現地発生土を用いている。図-3は使用した盛土材の粒度分布を示している。表-1は、その基本的性質をまとめたものであり、均等係数が600を超え、平均粒径が1.3mmであり、JGS分類では比較的GFSに分類される。図-4はJIS A 1210

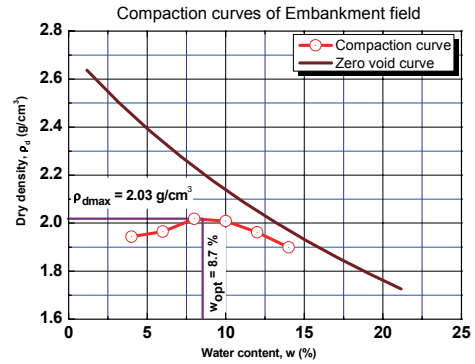


図-4 盛土材の締固め曲線

表-1 盛土材の基本的性質

JGS classification of soil		GFS
$U_c$		942.9
$D_{50}$	mm	1.3
$\rho_{dmax}$	$\text{g}/\text{cm}^3$	2.03
$W_{opt}$	%	8.7
Natural water content, $w_s$	%	13.65

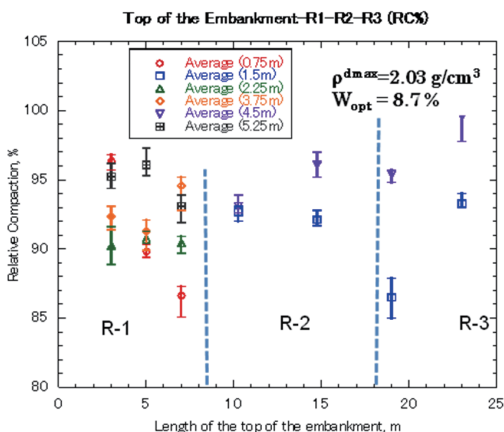


図-5 (a) 盛土天端の締固め度の空間的分布

(ランマー重量:4.5kg、落下高さ:45cm、ブロー回数:3層で1層あたり92回、非繰返し法)に基づいて実施した締固め試験の結果である。これより、盛土材の最大乾燥密度と最適含水比はそれぞれ  $2.03 \text{ g}/\text{cm}^3$  と  $8.7\%$  であることがわかる。

## 3. 試験盛土の締固めの現状

### 3.1 盛土天端での締固めの状況

図-5は、盛土天端での締固め度と小型FWDで得られたFWD係数  $k_f$  をR1,R2,R3の測定グリッドごとで比較したものである。この結果から、締め固めを行うための振動ローラーでの往復回数が同じであっても、計測位置によって締固め度はかなり変動していることがわかる。例えば、R1サイト

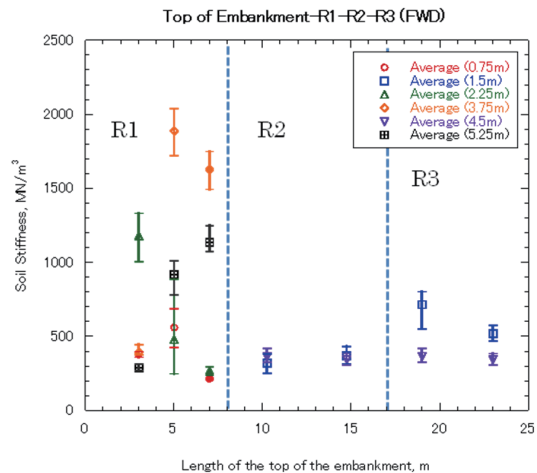


図-5 (b) 盛土天端のFWD係数の空間的分布

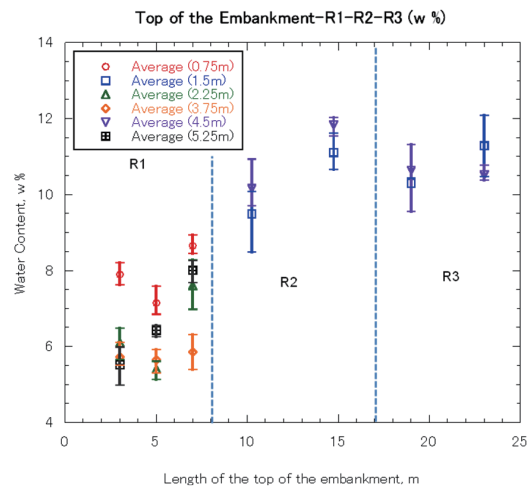


図-5 (c) 盛土天端のFWD係数の空間的分布

では、86%程度から 95%を少し超える程度の変動

表層の初期剛性を表す指標であるとする、R1 サ

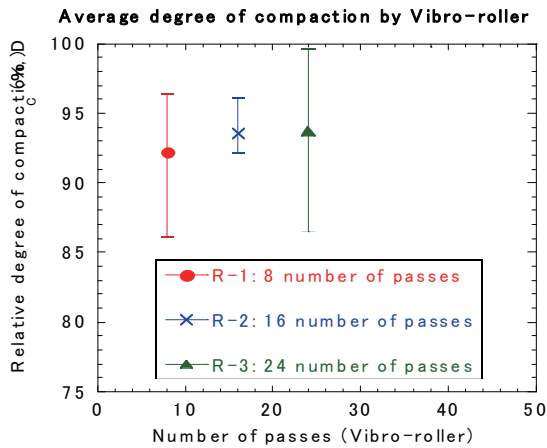


図-6 (a) 往復回数に着目した盛土天端の締固め度

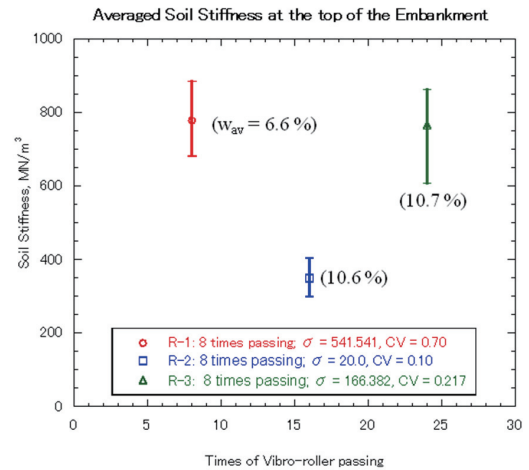


図-6 (b) 往復回数に着目した盛土天端のFWD係数

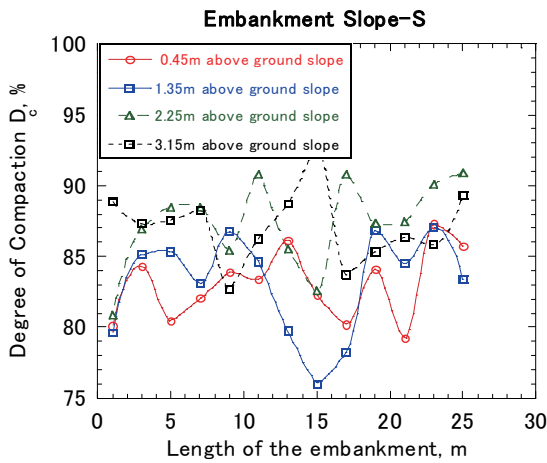


図-7 (a) 盛土のり面の締固め度の空間的な分布

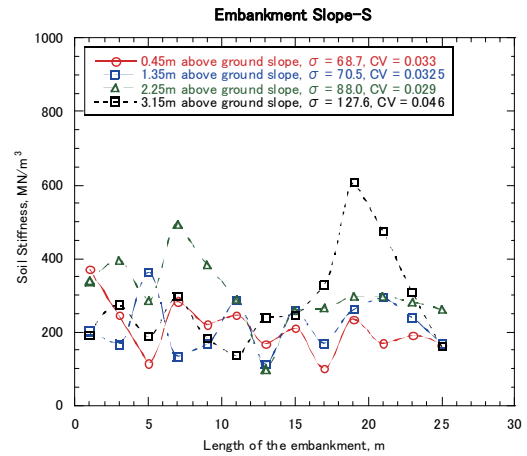


図-7 (b) 盛土のり面のFWD係数の空間的な分布

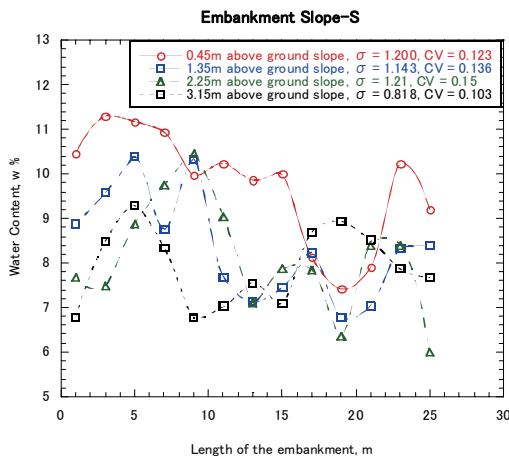


図-7 (c) 盛土のり面の初期含水比の空間的な分布

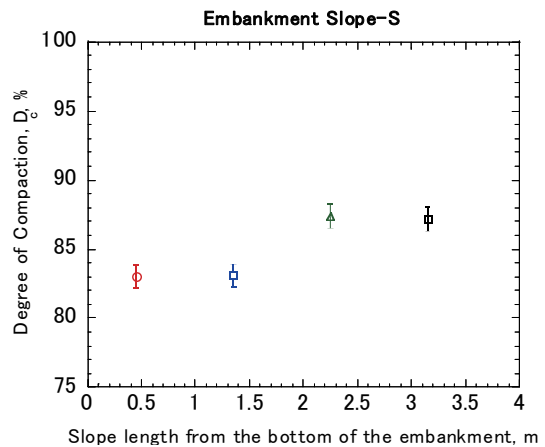


図-8 盛土のり面の締固め度と底面からの距離

幅となっており、盛土管理を行う上で、施工上この程度のばらつきはあり得ることを認識しておくことが必要であろう。図-5(b)は、測定グリッドごとで得られた  $k_f$  値をまとめたものである。 $k_f$  値を

イトのデータは、締固め度と同様かなりのばらつきを有する結果となっている。考えられる地盤工学的な要因としては、1) 公称、均質な現地発生土を用いているのであるが、局所的にみると土質そのものに違いがあった可能性があること、2)

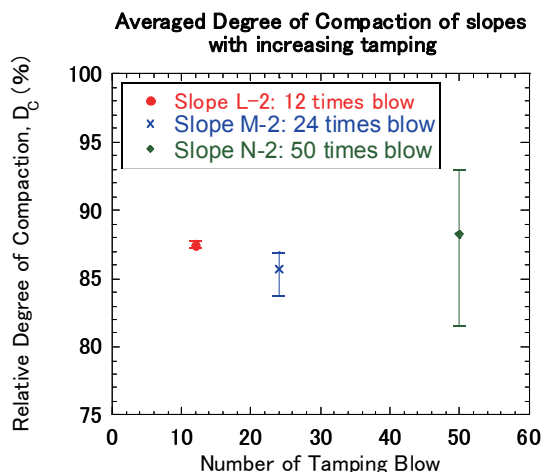


図-9 盛土のり面の締固め度に及ぼす締固め回数の影響

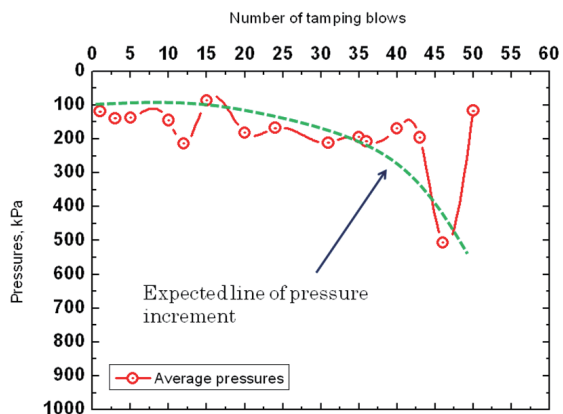


図-10 締固め回数とバケットの背面に係る土圧の変化

表-2 締固め度に着目した盛土のり面と天端の品質の比較

Embankment	Name of the Embankment	Relative Degree of Compaction, ( $D_c$ )			Water Content ( $w$ )		
		Average	Standard Deviation ( $\sigma$ )	Coefficient of Variation (CV)	Average	Standard Deviation ( $\sigma$ )	Coefficient of Variation (CV)
Top of the Embankment	R1	93.88	0.988	0.01	6.67	1.089	0.163
	R2	98.24	4.982	0.05	10.65	0.895	0.084
	R3	96.58	1.282	0.01	10.69	0.367	0.034
Slope of the Embankment	S	83.02	2.100	0.025	8.54	1.319	0.154
	L2	87.43	0.247	0.003	8.9	0.518	0.058
	M2	85.71	1.396	0.016	9.25	0.268	0.029
	N2	88.27	4.903	0.056	9.29	0.147	0.016

同じ土質であっても、空間的には施工時の含水比が大きくばらついていること（図-5(c)参照）が想定される。

図-6 は、振動ローラーの往復回数に着目して、締固め度と初期の剛性および含水比を整理したものであり、平均値とばらつきがわかるように示されている。図-6(a)から、往復回数が 8 回、16 回、24 回と増えるとともに締固め度の平均値は、92%程度から 94%程度と増加の傾向が伺える。しかし、データの変動の幅などを考えると、標準的な往復回数をさらに増やしたとしても平均的な締固め度が著しく改善される結果とはなっておらず、8 回程度の往復回数である程度の締固め度が確保されることを示している。図-6(b)は、サイトでの  $k_f$  値の平均値と往復回数の関係およびその変動の幅を示したものである。往復回数が増えることで表層の剛性が増加すると言った結果にはなっておらず、16 回の往復回数の場合には、 $k_f$  値の平均値は、往復回数 8 回の場合に比べて約半分程度であり、著しい低下を示している。これは、それぞれ

のサイトの平均的な含水比が、6.6%と 10.6%と大きく異なっているおり、この違いが表層地盤の剛性に反映したものと考えている。

### 3.2 盛土のり面での締固めの状況

(1)標準的な施工によるのり面 (Slope-S) の場合  
 図-7 は、締固め度、小型 FWD で得られ  $k_f$  値および含水比を 25m の幅で設定した測定グリッドごとでまとめたものである。これらの結果から、1) 締固め度は 75%程度から 91%程度の範囲で変動しており、天端の結果と比べて相対的に小さい締固め度となっていること、2)  $k_f$  値は概ね  $100\text{MN/m}^3$  程度から  $600\text{MN/m}^3$  の範囲で変動していること、3)含水比は、のり面先端からの距離に応じて 6%程度から 11%程度までの範囲で場所的な変動を示していることがわかる。図-8 は、のり面の底部からの距離ごとで平均的な締固め度および変動の幅を比較したものである。平均値で見るとのり面の締固め度は、83%程度から 87%程度の範囲にあり、天端と比べると締固め度で 7%程度低い結果となっている。また、のり面の底面に近いほど締固め

度は低くなる傾向にあることも読み取れる。

## (2) 締固め度に与えるバケットタンピングの効果

ここでは、バケットの背面で静的に締め固める「バケットタンピング」によって、どの程度、盛土のり面の締固め度が改善されるのかを SlopeL2, M2, N2 を使って調べた結果をまとめる。

図-9 は、平均的な締固め度および変動の範囲をタンピング回数との関係でまとめたものである。この結果から、タンピング回数が 12 回、24 回、50 回に対して締固め度の平均値は、それぞれ 87%、85%、88%であり、回数の増加に伴う締固め度の顕著な改善はこの場合見られない。なお、図-1(b) は、バケットタンピング法で盛土のり面を締め固めている状況を示している。また、図-10 は、バケットの背面に小型の土圧計を複数設置し、バケットの背面に係る圧力をタンピング回数ごとに測定した結果をまとめたものである。図には、土圧の平均値を示している。締固め時、バケットには 100kPa 程度の土圧がかかっていることになり、その圧力は、タンピング回数とともに表層のり面の剛性が高くなることによって、増加する傾向にあることが示唆される。

## (3) 盛土のり面と天端の品質の比較

表-2 は、今回現地実験で調べた盛土のり面と天端の締固め度および含水比の平均値、標準偏差、変動係数をまとめたものである。この結果を比較することで、盛土のり面と天端の品質が締固め度等の観点から評価できるが、現状では、盛土のり面および天端いずれも品質に空間的なばらつきがかなり存在し、またのり面の締固め度、および FWD 係数の平均値は、天端でのそれらに比べてかなり劣っていることが認識される。

## 4. まとめと今後の課題

本研究では、現地での試験施工を通して、締固め度と FWD 係数を指標として、盛土のり面の品質の現状を、盛土天端と比較しながら考察した。得られた主な知見をまとめる。

1) 標準的な方法で施工された盛土のり面の締固め度は、振動ローラーによって締固められた盛土天端の締固め度に比べて、平均値で 7%程度小さい結果であった。

2) 盛土のり面および天端の品質は、一様ではなくかなりの変動が存在することが示された。その地盤工学的な要因として、土質そのものや初期の含水比のばらつきを指摘した。

3) バケットタンピング法による盛土のり面の改善の程度について考察した。結果として、50 回程度タンピングを行ったとしても、締固め度の平均値は 90%を越えることはなかった。

したがって、今後の課題として、盛土のり面の

品質を効率的に改善するための新たな取組が必要であることが示唆される<sup>3)</sup>。

最後に、本論文をまとめるにあたり、九州大学の Snman Manandhar 氏に献身的なサポートをいただいた。深甚の謝意を表したい。

## 参考文献

- 1) Manandhar, S., Yasufuku, N., Kobayashi, T., Omine, K., Hazarika H., Suenaga, S., & Taniyama, M. Features of static and dynamic field compaction of embankment slope; *Western Japan Society of Civil Engineers (JSCE)*, 2012-03-03, Kagoshima, Kyushu, Japan, No. III-033, pp. 413-414.
- 2) Ninomiya, H., Yasufuku, N., Omine, K., & Kobayashi T. Characteristic and purpose of portably nondestructive evaluation device of slope soundness. *44<sup>th</sup> Annual meeting of JGS*, August 18-21, Yokohama: 69-70, 2009.
- 3) 小林泰三・谷山 充・安福規之：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、平成24年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集、2012（後掲論文）