

# 性能規定に対応した盛土の締固め管理

佐々木哲也・石原雅規・梶取真一

## 1. はじめに

河川堤防や道路盛土の盛土施工における締固めは、盛土の性能を大きく支配する重要な要素である。今後想定される巨大地震や近年多発する豪雨に対する土工構造物の性能向上が求められているが、道路盛土や河川堤防の盛土の設計・施工においては設計段階で盛土材料が確定していない場合も多い。このため、設計においては土質に応じてある締固め度を想定した強度や透水係数の一般値を採用して安定検討を行い、施工においては一定の基準値（仕様）により施工管理を行うことが多く、設計と施工が直接はリンクしていない。本来、盛土の設計施工にあたっては、盛土の要求性能と盛土材料に応じて必要とされる力学特性を満足するために締固め管理基準を設定し、施工においてはそれを確実に達成することが必要である。

本報では、模型実験等による盛土の耐震性や耐浸に対する安全性に及ぼす締固めの重要性を報告した上で、上記の背景を踏まえて締固め管理基準の高度化を目的に実施した、締固めによる盛土材料の力学特性への影響、実現場における締固め実態等について調査した結果について報告する。さらに、これらを踏まえた盛土の設計、施工における留意点について報告する。

## 2. 盛土の安定性に及ぼす締固めの効果

### 2.1 盛土の耐震性に及ぼす効果

#### 2.1.1 沢埋め盛土

既往の大規模地震では、沢部を埋めた道路盛土の崩壊により長期にわたり道路交通機能が失われた事例が多い<sup>1)</sup>。これらの被害は地山からの浸透水等による盛土内の水が被害を拡大させた要因の一つであるが、ここでは、このような盛土の耐震性評価、対策法の開発を目的とした動的遠心模型実験<sup>1)</sup>における、締固めの影響について紹介する。

写真-1に動的遠心模型実験による代表的な実験

後の変形状況を示す。重力場換算で高さ15m、のり面勾配1:1.8で、締固め度が異なる盛土模型を、遠心加速度50G場で盛土内に水位面を形成させた上で、レベル2地震動により加振している。盛土材料は山砂（平均粒径 $D_{50}=0.228\text{mm}$ 、細粒分含有率 $F_c=6.9\%$ ）である。写真中には加振前の模型形状及び浸透水面も併せて示している。本実験では、締固め度82%では流動的な大規模崩壊が生じているが、締固め度85%、90%では天端沈下量、水平変位量ともに限定的であった。盛土内に水が存在したとしても、十分な締固めにより盛土の耐震性が格段に向上することがわかる。

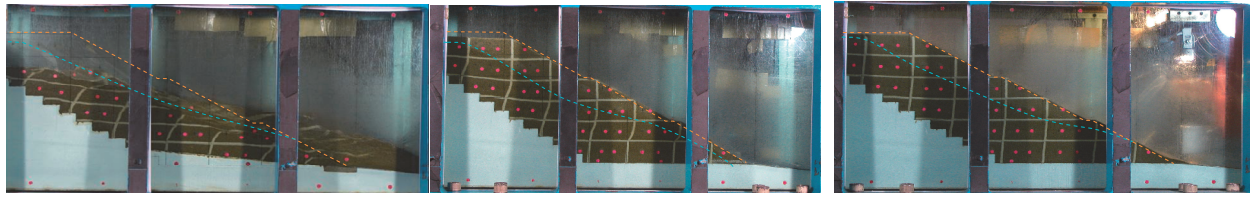
#### 2.1.2 軟弱地盤上の盛土

東日本大震災では、軟弱地盤上の河川堤防や道路盛土で盛土自体の液状化によると考えられる被害が発生した<sup>2),3)</sup>。これらの被害は、盛土構築に伴う基礎地盤の粘性土の圧密により地下水位以下まで沈下したサンドマット層および盛土底部の液状化により崩壊が発生したと考えられている。

このような軟弱地盤上の盛土の崩壊要因の解明、対策法の検討のために、道路盛土を想定した動的遠心模型実験を行った（図-1）<sup>4)</sup>。実験では、盛土の締固め度、圧密沈下量をパラメータとしてケースを設定し、遠心場で圧密沈下をさせた後にレベル2地震動による加振を行った。Case2とCase4は、同じ締固め度 $D_c=85\%$ であるが、基礎地盤の圧密沈下量（「めり込み量」）が異なる。Case4とCase5は、締固め度をそれぞれ85%と90%とし、圧密沈下量はほぼ同程度である。盛土内の水位は、盛土内の飽和層厚が同一となるように調整した。

図-2は加振前後の変形状況である。Case4は加振によって地下水位以下の盛土材料が液状化し、大規模に崩壊して沈下量は1.2m～2.95mまでに達した。一方で、締固め度の高いCase5で沈下量は0.25～0.41m程度、圧密沈下量の小さいCase2では沈下量は0.34～0.67m程度と小さかった。

図-3は、盛土内に設置した標点の変位から、圧密前後における盛土の締固め度の変化を求めた



(1) Dc=82%

(2) Dc=85%

(3) Dc= 90%

写真-1 沢埋め盛土の耐震性に及ぼす締固め度の影響

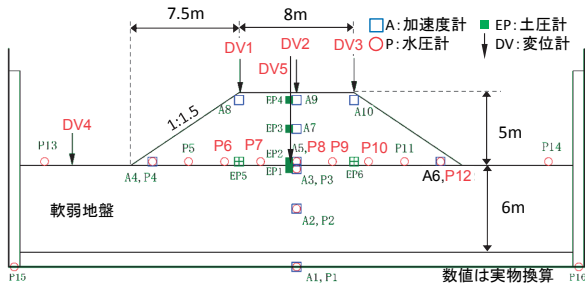
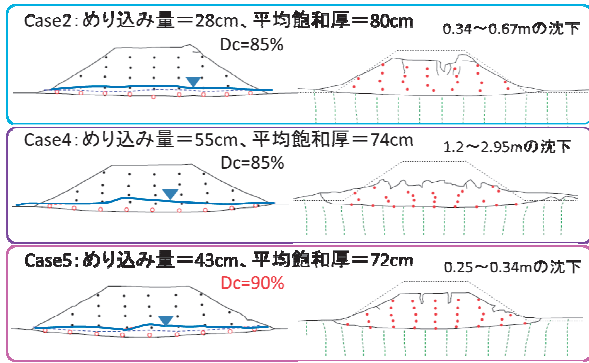


図-1 軟弱地盤上の盛土の実験模型



圧密終了時

加振後

図-2 締固め度・圧密沈下量の違いによる地震時変状の違い

ものである。圧密沈下の大きかった Case4 では圧密沈下に伴い盛土の底部の締固め度が当初の85%よりも大きく低下している。圧密沈下量が小さい Case2、締固め度の高い Case5 では、密度低下は Case4 よりは少ない。以上より、盛土内の水と締固め度が低いことが崩壊の主要因であり、さらには圧密沈下に伴う締固め度の低下が地震時の崩壊に影響を及ぼしたと考えられる。このため、地震時変形を抑制するためには、盛土内の排水と十分な締固めを確保すること、さらには、圧密沈下の抑制あるいは圧密沈下に伴う盛土のゆるみ防止が重要である。なお、道路盛土の場合、盛土底面にジオテキスタイルを敷設し圧密沈下に伴う盛土のゆるみを防止することで、盛土の耐震性を高められることが実験的に確認されている<sup>5)</sup>。

## 2.2 盛土の浸透安全性に及ぼす効果

道路盛土や河川堤防等では、降雨や河川水等の

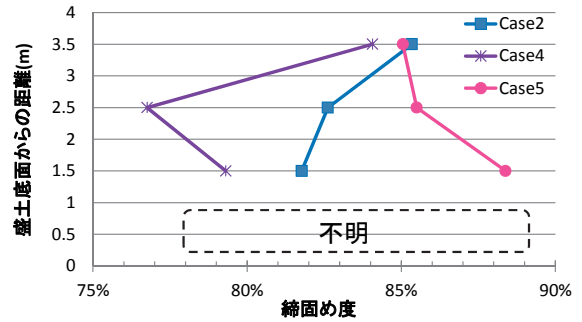


図-3 圧密沈下に伴う締固め度の変化

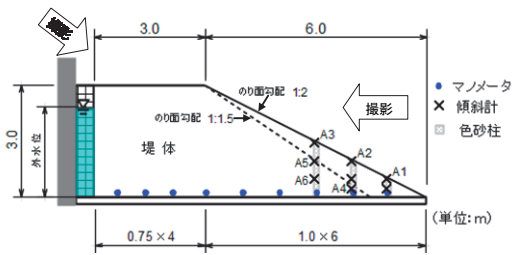
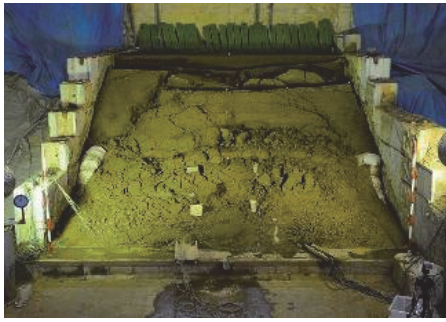


図-4 堤防の浸透安全性に関する実験模型

浸透に対する盛土の安全性の確保が求められる。ここでは、実験で見られた、河川堤防の浸透に対する安全性について及ぼす締固めの影響について紹介する<sup>6)</sup>。

図-4に堤防模型の断面形状を示す。堤体部分は、高さ3m、天端幅3m、のり面勾配1:2を基本として、天端と裏のり面をモデル化したものである。堤体材料は細粒分を30%程度含む山砂で、締固め度の異なる盛土を作製した。実験では、盛土背面の水位を上昇させ一定の水位を保持した。写真-2に、背面水位2.7mまで上昇させた時点の実験後の変形状況を示す。締固め度の低いCase3については、堤体内浸潤線がのり尻部に達した後、浸透水による浸食（内部侵食）が発生し、その後変状が進行、216時間経過時点で大規模なすべりが発生した。一方で、締固め度の高いCase4では、のり尻部のみの部分的な内部侵食の発生に留まった。このように、同じ盛土材料でも締固め程度によ



(1) 締固め度  $D_c = 85\%$  (Case3)



(2) 締固め度  $D_c = 90\%$  (Case4)

写真-2 浸透による堤体模型の変状

り破壊形態が大きく異なり、十分な締固めにより盛土の浸透に対する安全性は格段に向上することがわかる。

### 3. 締固め度と盛土材料の力学特性の関係

2. で紹介したとおり、盛土の耐震性や浸透に対する安全性は盛土の締固め程度に大きく依存する。ここでは、要素レベルでの盛土材料の力学特性と締固めの関係について報告する。

全国の河川土工現場および道路土工現場から採取した28種の盛土材料を対象に、三軸圧縮試験および透水試験を実施した<sup>7)</sup>。図-5は、圧密非排水三軸圧縮試験 (CUB試験) によって得られた最大軸差応力  $q_{max}$  (有効拘束圧  $\sigma'_c = 50\text{kPa}$ ) と細粒分含有率  $F_c$  の関係を各締固め度毎に整理したものである。図中には、河川土工マニュアル<sup>8)</sup> の土質分類を併記した。これより、細粒分の少ない粗粒質や砂質土 I は締固め度の上昇により  $q_{max}$  は著しく増加する傾向が見てとれる。一方、砂質土 II の細粒分含有率が25%~30%を超える付近から、締固め度の上昇にとまなう  $q_{max}$  の増加が鈍化している。細粒分含有率が比較的低い粗粒質や砂質土 I では盛土の締固め度を上昇させることで、盛土の非排水せん断強度が著しく増加することがわかる。図-6には、細粒分含有率が低い試料

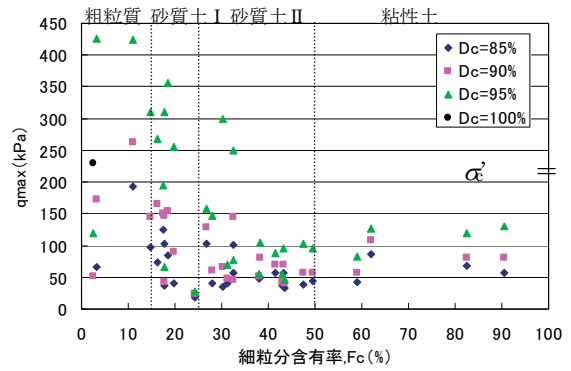


図-5 締固め度ごとの細粒分含有率と強度

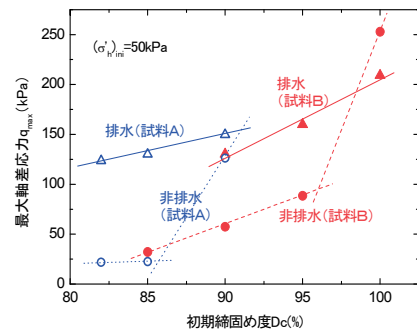


図-6 締固め度と排水せん断強度、非排水せん断強度の関係

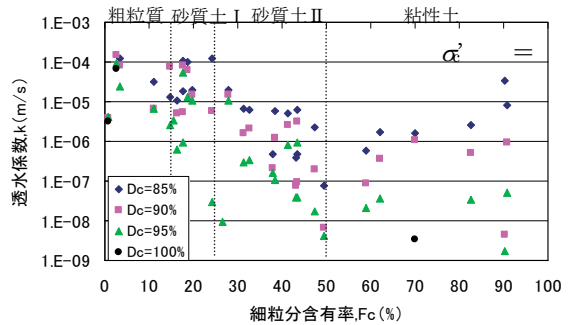


図-7 締固め度ごとの細粒分含有率と透水係数

$A(F_c=6.9\%)$ 、細粒分含有率が高い試料  $B(F_c=57.7\%)$  における初期締固め度と排水及び非排水三軸圧縮試験による最大軸差応力  $q_{max}$  の関係を示す。細粒分含有率が低い試料Aでは締固め度  $D_c = 85\%$  程度、細粒分含有率が高い試料Bでは締固め度  $D_c = 95\%$  程度を超えると非排水強度の傾きが急激に大きくなり、締固め度が高くなると非排水強度の方が排水強度よりも大きくなった。地下水位以下では地震時は非排水状態に近いので、2. で紹介した沢埋め盛土等の水の影響を受けやすい盛土の耐震性については、締固めの意義はさらに大きいことがわかる。

図-7は細粒分含有率  $F_c$  と透水係数  $k$  および締固め度  $D_c$  の関係を整理したものである。これより、締固め度が増加するに従い透水係数が低下する傾

向が確認でき、特に細粒分含有率が比較的高い砂質土Ⅱおよび粘性土でその傾向が顕著である。このことは、河川堤防においては、細粒分含有率が比較的高い砂質土Ⅱや粘性土では、締固め度の上昇により水密性が大きく向上し、強度の増加と相まって浸透に対する安全性が大幅に向上することを意味している。設計や浸透安全性評価においては土質の粒度に応じた概略の透水係数により評価が行われることが多いが、特に、細粒分の多い材料で詳細な検討を行うためには、実際の締固め度を考慮した評価を行う必要がある。

#### 4. 締固め施工の実態

以上に示したように、盛土の性能には施工時の締固めが大きく影響する。このため、設計で求められる強度、透水性等を達成するため、実施工においては確実な締固め施工が求められる。ここでは、全国の盛土施工現場の実態調査を行った結果等<sup>9),10)</sup>を紹介し、それらから見えてくる締固め施工の留意点を述べる。

##### 4.1 調査内容

平成21年～23年に実施した国土交通省各地方整備局の盛土施工現場から、試験施工および施工管理のデータを収集した。収集できた現場数は延べ991現場である。調査対象とした期間における「品質管理基準及び規格値」<sup>11)</sup>は、砂置換法による場合締固め度の管理基準値は $D_c=85\%$ 以上、RIを用いた場合平均 $D_c=90\%$ 以上であった。なお、本調査の結果を踏まえて「品質管理基準及び規格値」は平成23年度に改定され、例えば、砂置換法による場合の締固め度の管理基準値は、 $D_c=90\%$ 以上に引き上げられている。

##### 4.2 締固め施工状況

密度管理結果を図-8に示す。締固め度 $D_c=85\%$ 以上が管理基準値であったため全ての結果は締固め度 $D_c=85\%$ 以上を満足しており、締固め度 $D_c=90\%$ を境にその件数が増え、6割以上の現場で $D_c=90\%$ 以上が得られている。図-9は締固め度 $D_c=90\%$ 以上の現場と締固め度 $D_c=85\sim90\%$ の現場での土質の違いを見るために、各々の土質の分類の割合を示したものである。締固め度 $D_c=85\sim90\%$ の現場でやや細粒分の割合が大きい傾向が見られる。

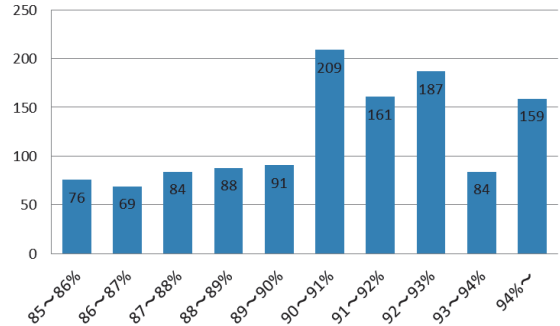
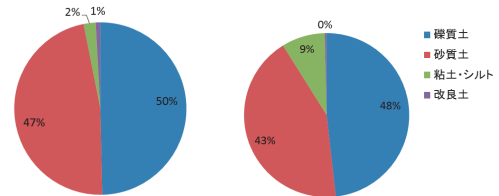


図-8 締固め度の頻度（砂置換による管理時）



(1)  $D_c=90\%$ 以上 (2)  $D_c=85\sim90\%$

図-9 締固め度による土質の割合

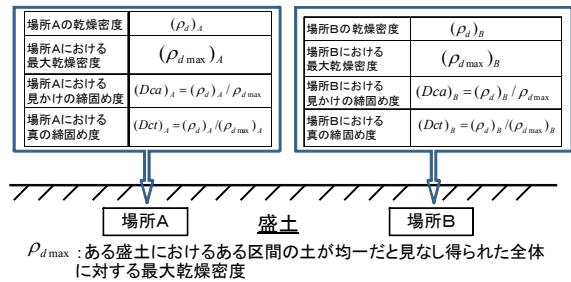


図-10 見かけの締固め度と真の締固め度

##### 4.3 実施工における締固め度のばらつき

現場における締固め度、含水比、盛土材料の面的なばらつき、土質や含水比の違いが締固め度に与える影響を検討するため、締固め施工現場において密度計測等を高密度（1現場あたり1500m<sup>2</sup>で30点を標準）に行った。

施工管理に用いられる締固め度は、本来、密度管理を行う箇所（筒所）の土試料の最大乾燥密度と当該筒所で計測される現場乾燥密度の比として定義されるものである。しかし、実際の土工現場では、ある区間の盛土材料が均一と仮定し、当該区間を代表する土試料から得られた最大乾燥密度が当該区間すべての計測点の最大乾燥密度として使用される。このため、代表試料と現場乾燥密度計測を行う地点の盛土材料が異なる場合には、代表する土試料から得られた最大乾燥密度と計測箇所（筒所）の土試料の最大乾燥密度が異なる可能性がある。このため、一般に得られた現場締固め度は、締固め程度のばらつきに加え、盛土材料のばらつきも含んで

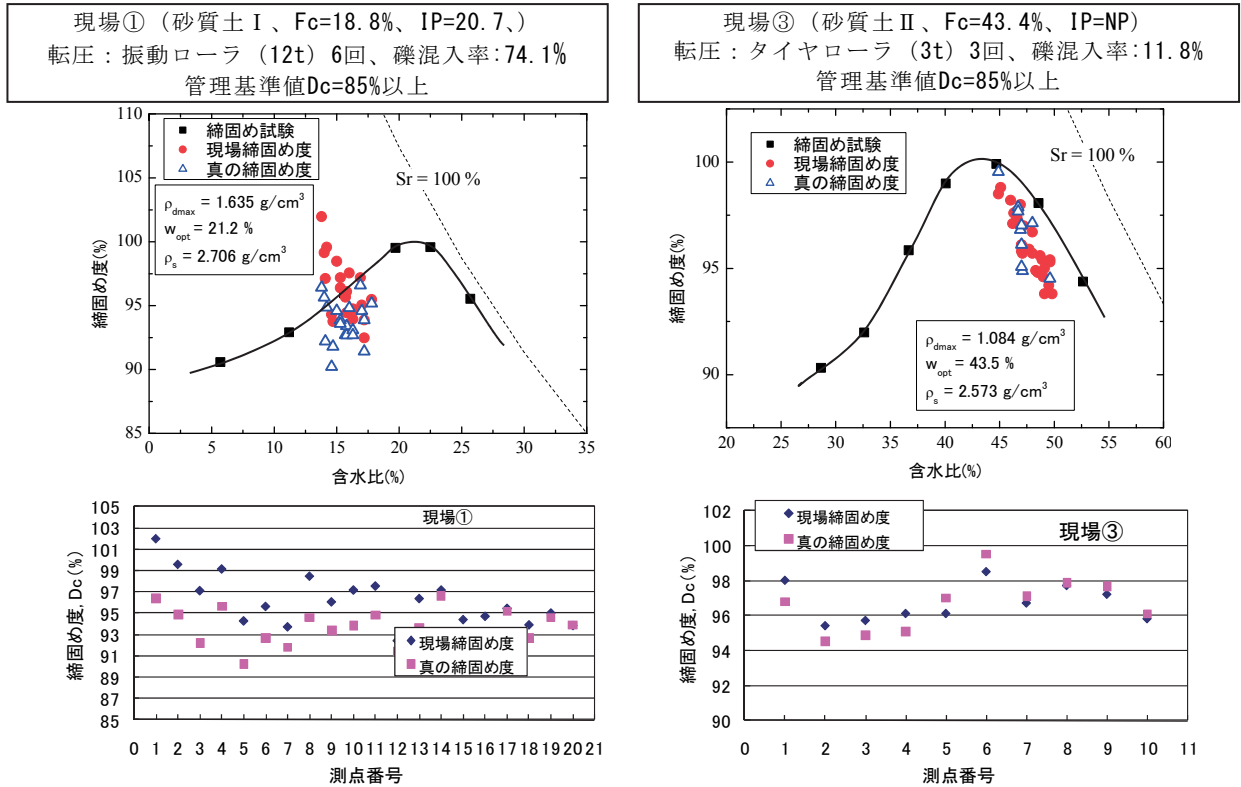


図-11 締固め曲線と実施工データの比較 (上図)、真の締固め度と見かけの締固め度 (下図)

おり、「見かけの締固め度<sup>12)</sup>」と呼ぶことができる (図-10)。一方で、現場乾燥密度を計測した箇所の土試料から得られた最大乾燥密度を用いてそれぞれの地点の締固め度を算出すれば、これは盛土材料のばらつきの影響がない「真の締固め度<sup>12)</sup>」 (図-10) と呼ぶことができる。そこで、「真の締固め度」の分布を把握することにより、実際の土工現場における締固め程度の面的なばらつきを検討した。具体的には、本調査では、上記に加え、RI計器による密度測定箇所のうち10点から盛土材料を採取し室内で締固め試験を行い、それぞれの箇所の最大乾燥密度を算出した。

図-11は、砂質土 I、砂質土 II に分類される盛土材料を使用する代表的な2箇所の現場において、盛土材料の締固め曲線と見かけの締固め度および真の締固め度と現場密度測定箇所の含水比  $w$  の関係をプロットしたものである。細粒分含有率が比較的低く、礫の混入率が高い砂質土 I では、実施工における現場締固め度、施工時の含水比ともに地点毎にばらつきが多いことが分かる。一方、細粒分含有率の高い砂質土 II では、データは最適含水比より湿潤側で、飽和度  $Sr=100\%$  の曲線に沿って分布しており、施工時の含水比が締固め度

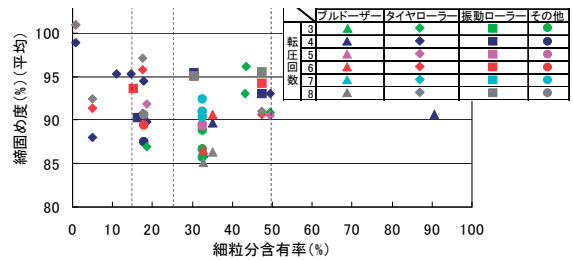


図-12 細粒分含有率と締固め度の関係

に大きく影響していることが分かる。すなわち、含水比が高い場合には含水比の増加に伴い締固め度が低下することを意味しており、一般に細粒分含有率が高い盛土材料は自然含水比が最適含水比よりも高い傾向にあるため、このような材料では施工時の含水比の管理が非常に重要になる。

次に、真の締固め度と見かけの締固め度を比較すると、両者の差は、細粒分含有率が比較的低く、礫の混入率が高い砂質土 I で、比較的大きい傾向がある。真の締固め度と見かけの締固め度の差が比較的大きいことは、基準となる最大乾燥密度を求めた盛土材料から当該箇所の盛土材料が変化していることを意味しており、特に礫の混入率が高い場合、基準密度となる最大乾燥密度が礫の混入率の変化に伴い大きく変化しやすいことが推測される。今後、盛土材料の種類等を考慮した、締固

め管理に用いる基準最大乾燥密度を求める頻度を検討していく必要がある。

図-12は、現場調査（計18現場）における細粒分含有率  $F_c$  と締固め度  $D_c$  の関係を転圧機械と転圧回数毎にプロットしたものである。転圧機械によってその傾向は異なるが、同図から、細粒分含有率が低い盛土材料は転圧回数の増加により高い締固め度が得られている。一方で、細粒分含有率が高い盛土材料は所定の転圧回数を超えると過転圧が発生し、締固め度が低下するものもある。このような材料ではばっ気処理や改良等により適切な含水比に調整する必要がある。なお、平成23年度の「品質管理基準及び規格値」の改定により細粒分の高い材料については、空気間隙率  $V_a$  等による管理が可能となっている。ただし、空気間隙率管理の本来の目的は、浸水に対する土の性質の恒久性の確保（浸水に伴う強度低下、体積収縮（コラプス）の防止等）を目的としているが、締め固めた土の強度、変形特性等との関係は不明瞭な点も多く、今後更なる検討が必要と考える。

## 5. まとめと今後の課題

盛土の安定性に及ぼす締め固めの効果について模型実験等による検討結果を紹介した上で、締め固めによる盛土材料の強度特性への影響、実現場における締め固め度、含水比、盛土材料ばらつき等について調査した結果について報告した。

締め固めにより強度や遮水性の向上により、盛土の耐震性や浸透に対する安全性が向上する。特に細粒分の少ない材料では強度が、細粒分の多い材料では遮水性の向上が顕著である。このため設計においては盛土の性能、盛土材料に応じて締め固め管理基準適切に設定するとともに、施工においてはそれを確実に達成するため、十分な転圧と土質、

含水比の管理が重要となる。また、細粒分の多い材料については、空気間隙率  $V_a$  等による施工管理が行われるが、このように管理された締め固めた土の強度、変形特性、盛土の性能との関係は不明瞭な点も多く、引き続き検討を行っていく予定である。

## 参考文献

- 1) 大川寛、杉田秀樹、佐々木哲也、水橋正典：山岳道路盛土の耐震対策に関する動的遠心模型実験、第42回地盤工学研究発表会発表講演集、2007
- 2) 国総研・土研：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査速報、国総研資料第646号、土研資料第4202号、2011
- 3) 河川堤防耐震対策緊急検討委員会：東日本大震災を踏まえた今後の河川堤防の耐震対策の進め方について（報告書）、2011
- 4) 梶取真一、佐々木哲也、石原雅規、宮武裕昭、藤田智弘：軟弱地盤上の道路盛土の地震時変形に関する遠心力模型実験、第49回地盤工学研究発表会発表講演集、2014
- 5) 梶取真一、石原雅規、佐々木哲也：ジオテキスタイルを用いた軟弱地盤上の道路盛土の液状化対策、Geokanto2014、2014
- 6) 斎藤由紀子、森啓年、佐々木哲也：砂質土堤防の浸透による破壊形態と土質定数に関する大型模型実験、河川技術論文集、第17巻、2011
- 7) 山木正彦、森啓年、佐々木哲也、榎本忠夫：細粒分含有率に着目した締め固めによるせん断強度向上および透水係数低下に関する調査：46回地盤工学研究発表会発表講演集（CD-R）、2011
- 8) 国土技術研究センター：河川土工マニュアル、2009
- 9) 山木正彦、石原雅規、佐々木哲也：河川堤防の締め固め度の現況と締め固め度管理基準値に関する考察48回地盤工学研究発表会発表講演集（CD-R）、2013
- 10) 榎本忠夫、山木正彦、森啓年、佐々木哲也：土質と含水比の締め固め度に与える影響に関する現地調査、第46回地盤工学研究発表会発表講演集（CD-R）、2011
- 11) 国土交通省：土木工事施工管理基準値及び規格値（案）、2013
- 12) 龍岡文夫：盛土の締め固め管理と設計の共働の必要性、基礎工、7月号、pp.32～39、2009

佐々木哲也



土木研究所地質・地盤研究グループ土質・振動チーム 上席研究員  
Tetsuya SASAKI

石原雅規



土木研究所地質・地盤研究グループ土質・振動チーム 主任研究員  
Masanori ISHIHARA

梶取真一



研究当時 土木研究所地質・地盤研究グループ土質・振動チーム研究員、現 国土交通省水管理国土保全局治水課  
Shinichi KAJITORI