

## 重. 4 盛土施工の効率化と品質管理向上技術に関する研究（3）

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 21～平 23

担当チーム：地質・地盤研究グループ（土質・振動）

研究担当者：佐々木哲也、石原雅規、山木正彦

## 【要旨】

近年、河川堤防や道路盛土などの土構造物の洪水や地震動の作用に対する性能向上が求められ、設計の高度化が図られてきている。浸透や地震動の作用に対する土構造物は、基本的に良い土を良く締固めることでその性能は向上するが、盛土施工に関しては要求性能や土質に関係なく一律の締固め管理基準値が設定され、設計で想定する強度と施工管理基準との関連が必ずしも明確になっていないという課題がある。そのような観点から、締固め管理基準に限らず、盛土管理基準の高度化を図るとともに、それを確実に達成するための品質管理法を高度化する必要がある。

既往の研究において、高品質な盛土を施工するための新たな管理基準の作成を目的に、種々の室内力学試験等を実施するとともに、実際の土工現場から情報を収集、整理している。その結果、①土質（細粒分含有率）の違いによりその締固め効果が異なり、締固め度の上昇は、細粒分含有率が比較的低い土質では強度の発現に、細粒分含有率が比較的高い土質では水密性に寄与する傾向にあること、②細粒分含有率が比較的高い土質では、転圧後の締固め度は土の含水比に依存する傾向にあること、③細粒分含有率が比較的低い土質は、転圧回数の増加に伴い確実に締固め度が上昇することなどが確認された。

平成 23 年度は、現場において締固め度を高めることが困難と思われる細粒分含有率が比較的高い土質を使用し、空気間隙率に着目し、一連の室内試験および現地調査を行った。室内試験の結果より、強度・水密性とも締固め度の上昇に伴い向上し、特に水密性は締固め度依存性が顕著であることが明らかとなった。また試験施工の結果より、本調査における含水比の範囲では、適切な転圧機械を用いれば 90%以上の締固め度  $D_c$  が得られ、かつ河川土工マニュアルにおける空気間隙率  $V_a$  管理基準値も概ね満足できることが確認された。

キーワード：土工、空気間隙率、締固め度、三軸試験、試験施工

## 1. はじめに

道路盛土や河川堤防にかかわらず、締固めは盛土の品質を大きく支配する重要な要素である。安定して所要の機能を発揮できる盛土を構築するためには、できるだけ良い材料を良く締め固め、かつ表面水や浸透水等の水の処理を十分に行うことが特に重要となる<sup>1)2)3)</sup>。

詳細な計画・設計段階では、ある程度土質材料を想定して適切に設計しているが、実際の現場では、建設発生土を積極的に利用することが望ましいこと、また土取り場の土質が必ずしも均一でないことなどから、当初想定した土質と使用する土質が必ずしも一致しないことがある。また、現行の締固め管理基準値は、重要度や土質に関係なく一律の締固め管理基準になっているため、設計で想定した道路盛土及び河川堤防の要求性能と必ずしもリンクしていないという課題もある。以上のような観点から、締固め管理基準の高度化を図るとともに、それを

確実に達成するための品質管理法を高度化する必要がある。

そこで過去 2 年間は種々の土質材料を用いて室内土質試験を実施し、締固め度が土の強度等に及ぼす影響を調べた。締固め度の上昇により非排水強度 ( $\phi'$ ,  $q_{max}$ ) は上昇すること、その傾向は細粒分含有率によって異なり、細粒分含有率が低い土質材料の方が顕著であることなどが示された。一方、水密性（透水性）に関しては、細粒分含有率が高い土質の方が締固め度依存性が強いことなどが示された。また現地調査結果から、転圧後の締固め度は細粒分含有率および含水比の影響を受け、細粒分含有率が比較的低い土質は、転圧回数の増加に伴い確実に締固め度が上昇すること、細粒分含有率が比較的高い土質では、転圧後の締固め度は土の含水比に依存する傾向にあることなどが確認された。

平成 23 年度は、現場において締固め度を高めることが

困難と思われる細粒分含有率が比較的高い土質に着目した。実際の河川・道路土工現場において、細粒分含有率が比較的高い土質を盛土材として使用した現場を抽出し、その盛土材料を使用した一連の室内試験および現地調査を行った。

2. 室内試験

2.1 使用試料

本研究では全国の河川土工および道路土工現場において実際に使用された盛土材料の細粒分含有率  $F_c$  が 25% 以上の現場を抽出した。それら盛土材料を対象とし、初期の締固め度  $D_c$  を変えた条件で供試体を作製し、圧密非排水三軸圧縮試験 (CUB 試験) および透水試験を実施した。供試体作製方法および試験方法は後述の通り地盤工学会基準<sup>4)</sup>に従い実施した。なお表-1 は、河川土工マニュアル<sup>5)</sup>で記されている堤体材料の土質分類である。以下、本報でもこの分類に従い論じる。

使用材料の物性値を表-2 に示す。試料①~⑤は細粒分含有率が  $25\% \leq F_c < 50\%$  であり砂質土IIに分類され、試料⑥~⑨は  $50\% \leq F_c$  で、粘性土に分類される。塑性指数  $IP$  は粘性土の方が高く、また最適含水比  $W_{opt}$  も粘性土の方が高い傾向が見受けられる。なお、表中のマークは後記する試験結果図中のマークと対応している。

表-1 河川土工マニュアル<sup>5)</sup>における土質分類

粗粒質	砂質土I	砂質土II	粘性土
$F_c < 15\%$	$15\% \leq F_c < 25\%$	$25\% \leq F_c < 50\%$	$50\% \leq F_c$

表-2 使用試料の物性値

		$\rho_s$ ( $g/cm^3$ )	$F_c$ (%)	$D_{50}$ (mm)	$IP$	$\rho_{dmax}$ ( $g/cm^3$ )	$W_{opt}$ (%)
○	試料①	2.727	32.5	0.130	NP	1.553	22.5
△	試料②	2.691	35.0	0.133	NP	1.503	23.5
□	試料③	2.661	47.4	0.086	15.7	1.384	26.8
◇	試料④	2.656	31.2	1.531	NP	1.858	12.2
×	試料⑤	2.727	32.6	0.474	27.6	1.676	16.6
●	試料⑥	2.679	66.2	0.023	24.7	1.450	28.5
▲	試料⑦	2.662	73.2	0.018	30.5	1.552	24.6
■	試料⑧	2.632	51.1	0.068	44	1.253	36.7
◆	試料⑨	2.658	54.4	0.050	16.7	1.636	19.9

2.2 三軸圧縮試験

土の締固め度と強度の関係を把握するために、せん断中の間隙水圧を測定する圧密非排水三軸圧縮試験 (CUB 試験) を実施した。これらの試験で得られる土の強度定数は、一般に  $\phi'$  および  $c'$  (有効応力表示)、 $\phi_{cu}$  および  $c_{cu}$  (全応力表示) であるが、ここでは、最大軸差応力  $q_{max}$  (kPa) を強度の指標とした。これは  $q_{max}$  が  $\phi$  および  $c$  を包括した結果であること、整理の上で一つの指標の方

が比較する上で容易であることによる。以下に供試体作製方法および試験方法の詳細を示す。

三軸圧縮試験における供試体は、最適含水比に調整した土試料を用いて、締固め試験結果 (A 法: 1.0Ec) を基に初期密度が所定の締固め度となるように突固め法により作製した (供試体寸法は直径 50 mm、高さ 100 mm)。供試体は三軸セル内に設置後、CO<sub>2</sub>、脱気水を供給し、背圧 200kPa を与え飽和化を図り、間隙土係数  $B$  値が 0.95 以上であることを確認し、有効拘束圧  $\sigma'_c = 50kPa$  で等方圧密した。圧密終了後、砂質土IIでは 0.1%/min、粘性土では 0.05%/min のひずみ速度で圧縮を行った。

図-1 は、 $D_c$  と強度の関係を網羅的に把握するために、表-2 に示した 9 種の盛土材料に対して実施した CUB 試験によって得られた最大軸差応力  $q_{max}$  ( $\sigma'_c = 50kPa$ ) と供試体作製時の  $D_c$  の関係を整理したものである。この図より、 $D_c$  が増加するに従い  $q_{max}$  が増加する傾向が見てとれる。その傾向は全て同じではなく、砂質土IIの試料①のみが顕著であり、その他の試料では、粗粒質や砂質土Iのようなより細粒分の少ない砂質土の傾向<sup>6)</sup>と比較し緩やかな増加となっている。

図-2 は図-1 に関して供試体作製時の空気間隙率  $V_a$  で再整理したもので、参考に示す。ここで注意したいのは、三軸圧縮試験自体は地盤工学会基準に従い飽和条件で実施しているため、圧縮時の空気間隙率は  $V_a = 0$  である。そのため、この図における横軸  $V_a$  は供試体作製時 (飽和化を図る前) の  $V_a$  である。なお  $V_a$  は以下の関係式(1)から算出した。

$$V_a = \left\{ 1 - \frac{\rho_d}{\rho_w} \left( \frac{\rho_w}{\rho_s} + \frac{w}{100} \right) \right\} \times 100 \quad \dots (1)$$

なおここで、 $\rho_d$ : 乾燥密度、 $\rho_s$ : 土粒子密度、 $\rho_w$ : 水の密度 (ここでは 1 とした)、 $w$ : 含水比 (ここでは最適含水比とした) である。

式(1)から  $D_c$  と  $V_a$  は乾燥密度、土粒子密度、水の密度、含水比が同じであれば、一対一の関係であることから、図-2 は当然図-1 と同じ意味を持つため説明は省略するが、本図より、最適含水比で  $D_c$  を 95% まで上昇させた場合、砂質土IIで  $V_a$  は 12~15% 程度、粘性土で  $V_a$  は 8~11% 程度であることが読み取れる。

2.3 透水試験

土の締固め度と透水性の関係を把握するために、締固め度を変えた条件で透水試験を実施した。砂質土IIの場合は定水位透水試験、粘性土の場合は変水位透水試験を

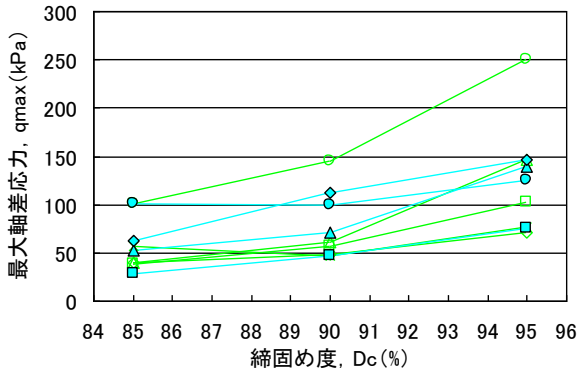


図-1  $D_c$  と  $q_{max}$  の関係

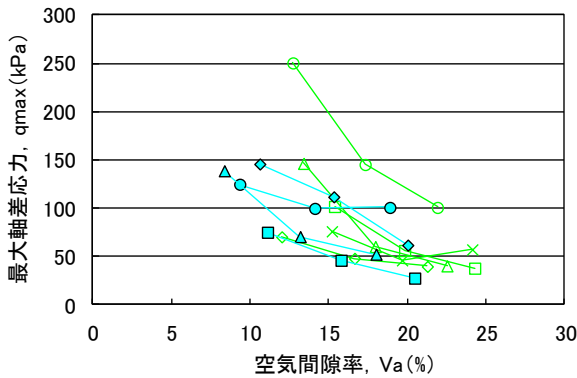


図-2 供試体作製時の  $V_a$  と  $q_{max}$  の関係

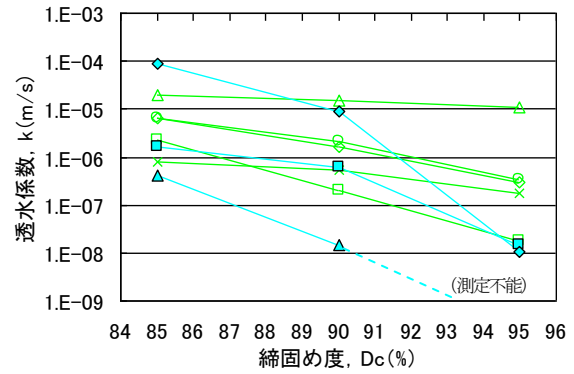


図-3  $D_c$  と  $k$  の関係

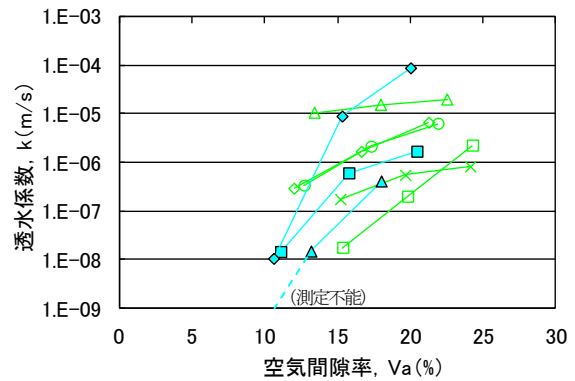


図-4 供試体作製時の  $V_a$  と  $k$  の関係

標準としている。なお供試体の作製方法は三軸圧縮試験と同じとした。

表-2 に示した 8 種の盛土材料 (試料①、②、③、④、⑤、⑦、⑧、⑨) に対して実施した透水試験の結果を図-3 に整理した。図より  $D_c$  が増加するに従い透水係数も低下する傾向が確認できる。粘性土では  $D_c$  が 10% 程増加することで  $k$  が 1/10000 程もの低下が見られるものもあり、既往の研究によりその傾向は示されていたが、改めて粘性土の  $k$  に対する  $D_c$  依存性は著しく高いといえる。

図-4 に図-3 の結果に関して供試体作製時の空気間隙率  $V_a$  で再整理したものを参考に示す。先述の通りこの図における横軸  $V_a$  は供試体作製時 (飽和化を図る前) の  $V_a$  であることに注意されたい。

### 3. 試験施工調査結果

盛土現場調査において得られた盛土の試験施工結果を示す。ここで、表-3 は盛土工指針と河川土工マニュアルにおける管理基準をまとめたものである。表より  $F_c$  が比較的高い粘性土と砂質土Ⅱに関しては  $V_a$  管理が標準となっているが、 $D_c$  管理の適用も可能となっている。また、含水比に関しては表中※2 の記載の他、河川土工に関しては最適含水比より高い含水比での施工が推奨され

ている。これは、河川堤防は水の浸入が前提であるため、初期に乾燥側で堤防が構築されると、その後の浸水によって、盛土の沈下や強度低下といった影響を受けることが勘案されるからである。

図-5、6 は表-2 の試料のうち試験施工を実施した試料①、②、④、⑤、⑥、⑦、⑧、⑨に関して各転圧回数と  $D_c$ 、 $V_a$  の平均値の関係を整理したものである。 $V_a$  は現場含水比 (現場における自然含水比) の値で整理した。なお各転圧回数における現場含水比とその時の飽和度の範囲を各試料の最適含水比との関係で図-7 に示した。図-5、6 と図-7 の関連付けは表-2 の最適含水比の値を参照されたい。なお図-5、6 中に示した転圧用機械とは振動ローラ、タイヤローラ、コンパインドローラ、ハンドガイドローラであり、規格は様々であるがここでは区分していない。

図-5 より、転圧回数を増加させると  $D_c$  も増加する傾向は見受けられるが、砂質土Ⅱの試料②、④、⑤、および粘性土の試料⑥、⑦、⑨でオーバーコンパクションが確認された。しかし、今回実施された試験施工における含水比の範囲であれば、転圧用機械を用いることで  $D_c$  90% 以上が確保可能であることがわかる。また図-1 (図-2) で  $D_c$  の増加 ( $V_a$  の低下) に伴う強度増加が顕著であった砂質土Ⅱの試料①は、オーバーコンパクシ

表-3 道路土工—盛土工指針および河川土工マニュアルにおける施工管理基準

	管理基準値				施工含水比
	土質分類	締め固め度	空気間隙率	飽和度	
道路土工—盛土工指針(路体)	砂質土	90%以上	—	—	(※2)
	粘性土	—(※1)	10%以下	85%以上	
河川土工マニュアル	粗粒質および砂質土Ⅰ	平均90%以上	—	—	
	砂質土Ⅱ	—(※1)	15%以下	—	
	粘性土	—	2%以上10%以下	85%以上95%以下	

※1：締め固め管理が可能な場合は砂質土（粗粒質および砂質土Ⅰ含む）の基準を適用可

※2：締め固め曲線において目標となる締め固め度が得られる含水比またはトラフィカビリティーが確保できる含水比

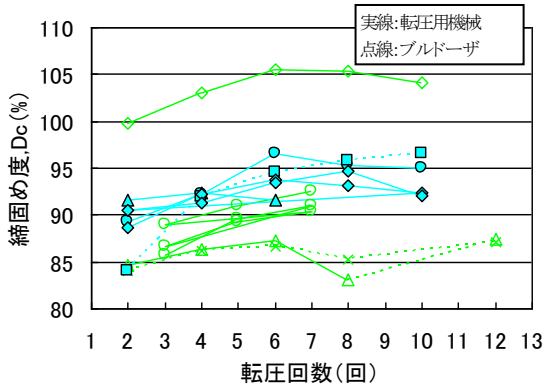


図-5 試験施工における転圧回数と  $D_c$  の関係

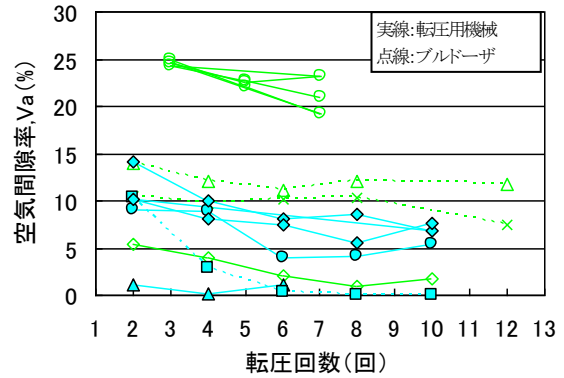


図-6 試験施工における転圧回数と  $V_a$  の関係 (現場含水比時)

ンが見られず転圧回数の増加に従い  $D_c$  が増加する。試料①のような試料は、適切に転圧することで強度の高い良品質の盛土が構築されと考えられる。一方、ブルドーザで転圧した3試料(砂質土Ⅱの試料②、⑤および粘性土の試料⑧)のうち2試料(砂質土Ⅱの試料②、⑤)に関しては  $D_c$  が90%を下回っている。

転圧回数と  $V_a$  の関係(図-6)を見ると、砂質土Ⅱの試料①および粘性土の試料⑦が河川土工マニュアルにおける  $V_a$  管理基準値の範囲外にあるが、図-5より比較的高い  $D_c$  を示していることが確認できる。特に試料①は明らかに  $V_a$  管理基準値の上限値を超えているが、その  $D_c$  が比較的高いことから水浸による沈下(コラプス)は限定的と思われる<sup>7)</sup>

図-7で試験施工時の試料の含水状態に着目すると、今回使用した砂質土Ⅱ、粘性土は細粒分含有率が比較的高いため、全体的に現場含水比は最適含水比より高い傾向にある。また  $D_c$  が90%を下回った砂質土Ⅱの試料②( $w_{opt}=23.5\%$ )と試料⑤( $w_{opt}=16.6\%$ )も最適含水比より高い含水比で転圧されているが、他と比較し含水比が特段高いとはいえ、飽和度に関しても同様である。両試料の  $D_c$  が他試料と比較し相対的に低かったことは、転圧機械の違いが一つの原因と考えられる。

一般に、加水により飽和度を上げることで  $V_a$  管理基準値を満たすことは容易になるが、同時に施工性が悪化することも多い。今回使用した試料は含水比が特段高いものではなかったため、比較的容易に管理基準を満足する

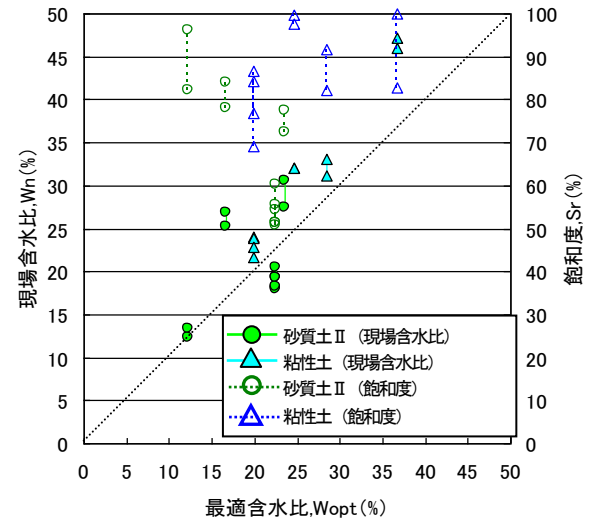


図-7 各試料の現場含水比および飽和度と最適含水比の関係

ことができたが、今後、現場で問題となることが多い含水比が高い条件での施工に関して調査し、施工含水比等の規定値を含めた  $V_a$  管理の在り方を検討する。併せて、初期含水比を変えた条件で作製した供試体を用いて、初期の空気間隙率が強度や透水係数に及ぼす影響も検討していく。

#### 4. まとめ

##### 4.1 室内試験

(1) 比較的細粒分含有率が高い土質は、締め固め度の上昇に伴い強度が増加するが、その増加傾向は鈍く、

また試料によりその傾向は異なる。

- (2) 一方、特に粘性土に関して、透水係数は締固め度の上昇に従い著しく低下し、締固め度が10%上昇することで透水係数が1/10000となる試料も確認された。
- (3) 最適含水比で $D_c$ を95%まで上昇させた場合、砂質土IIで $V_a$ は12~15%程度、粘性土で $V_a$ は8~11%程度である。

#### 4. 2 盛土工調査

- (1) 本調査における含水比の範囲では、通常の転圧機械を用いれば90%以上の $D_c$ が得られ、河川土工マニュアル等で記された $V_a$ 管理基準値も概ね満足できる。
- (2) 試験施工の結果、一部、締固め度 $D_c \geq 90\%$ に達しなかったケースがあったが、転圧機械にブルドーザが使用されたケースであった。

#### 4. 3 今後の課題

今回および既往の研究により得られたこれら土質毎の締固め度と強度、透水性の関係および現場の調査結果を統合し、土質毎の締固め管理基準値や空気間隙率管理基準値の具体的な提案を行う。

併せて、現場で問題となることが多い含水比が高い条件での施工に関して調査し、施工含水比等の規定値を含めた $V_a$ 管理の在り方を検討する。

また、必要に応じ不飽和供試体を用いた各種要素試験

の実施を検討し、構築された盛土の性能を適切に評価しうる手法を検討する。

#### 参考文献

- 1) 建設省土木研究所 機械施工部 土質研究室：盛土構造物の崩壊と対策に関する研究，土木研究所資料第2017号，1983.
- 2) 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，pp.1131-1132，2007.
- 3) 松尾修：道路盛土・河川堤防の設計と締固め，基礎工，7月号，pp.172-175，2009.
- 4) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，2009.
- 5) 国土技術研究センター：河川土工マニュアル，2009.
- 6) 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，第46回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.333-334，2011.
- 7) 亀井健史，榎本雅夫：締固めた土のコラプス沈下量に及ぼす試験条件の影響，地盤工学シンポジウム論文集，Vol.6，pp.101-108，1994.

## EFFECTIVE CONSTRUCTION AND QUALITY CONTROL FOR EARTH STRUCTURES

**Budgeted** : Grants for operating expenses

General account

**Research Period** : FY2009-2011

**Research Team** : Soil Mechanics and Dynamics

Research Team

**Author** : TETSUYA Sasaki

MASANORI Ishihara

MASAHIKO Yamaki

**Abstract** : In recent years, performance improvement to the action of seismic and flooding of soil structures such as road embankments and river embankment is obtained, and the upgrading of design have been required.

In 2011, CUB tests and permeability tests were carried out with soils that contain higher fine fraction content. As result, strength and water-tightness also improved with an increase in the degree of compaction, the compaction degree of dependency is significant has been clarified that water-tightness in particular. And as result of research to test banking, in the range of water content in this study, compaction degree more than 90% is obtained and the air content control standards can also be generally satisfactory has been confirmed by using the appropriate compaction machine.

**Key words** : earthwork, air content, degree of compaction, triaxial test, test banking