

戦-3. 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：材料地盤研究グループ
（土質・振動）

研究担当者：佐々木哲也、森啓年、榎本忠夫、
山木正彦

【要旨】

近年、河川堤防や道路盛土などの土工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工構造物の性能は、よい土をよく締固めることで向上するが、盛土の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。そのような観点から、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。

平成 22 年度は、高品質な盛土を施工するための新たな締固め管理基準値の作成を目的に、細粒分含有率 f_c の異なる種々の盛土材料を使用し、異なる締固め度のもと圧密非排水三軸圧縮試験（以下 CUB 試験）および透水試験を実施した。その結果、土質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ことが確認された。併せて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を把握するとともに、土質、含水比、施工機械等の違いが締固め度に与える影響について検討することを目的に、全国の河川土工および道路土工現場において調査を実施した。その結果、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、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。

キーワード：土工、締固め度、細粒分含有率、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構造物を構築するためには、できるだけ良い材料をよく締め固め、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^{1), 2), 3)}。

詳細な計画・設計段階ではある程度土質材料を想定して設計しているが、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く当初の想定と土質が異なることが多い。そのため、設計と施工がリンクしていないことが多いのが現状である。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。そのような観点から、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。

そこで昨年度は 4 種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に及ぼす影響を調べた。限られた土質材料の結果ではあるが、締固め度の上昇により非排水強度（ ϕ' 、 q_{max} ）は著しく上昇すること、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。

平成 22 年度は、全国で実際に使用されている盛土材料における、締固め度 D_c と強度定数（粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ など）や q_{max} （最大軸差応力）、透水係数の関係を調べた。また盛土土工現場における試験施工と本施工の調査を実施し、転圧回数とその転圧機械が締固め度に及ぼす影響等を整理するとともに、転圧後の締固め度のばらつきに及ぼす要因に関して検討を行った。

2. 室内試験

2.1 使用材料

本研究で使用した試料は、全国の河川土工現場および道路土工現場から採取した盛土材料である。各盛土材料を河川土工マニュアル⁴⁾の土質分類（表－1 参照）に従

表-1 河川土工マニュアル⁴⁾における土質分類

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

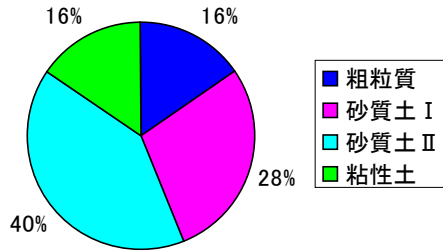


図-1 土工現場で使用された盛土材料の分類
(全 32 データ)

い整理したものが図-1となっている。この図より、細粒分含有率が 15%未満の粗粒質から、細粒分含有率が 50%を超える粘性土まで様々な土質が盛土材料として使用されていることが確認できる。ただし、いわゆる中間土と呼ばれるような砂質土 I、砂質土 II の割合が他と比較してやや高く、両土質合わせて 70%近く占める結果が得られている。

これらの盛土材料のうち、30 種を本研究における土試料として使用し、三軸圧縮試験と透水試験を実施した。

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、 ϕ' および c' (有効応力表示)、 ϕ_{cu} および c_{cu} (全応力表示) である。これら強度定数は、主応力差最大時 ($\sigma_1 - \sigma_3$) を破壊とみなし算出している。以下に供試体作製方法および試験方法を示す。

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。飽和化を図り間隙圧係数 B 値が 0.95 以上であることを確認した後、所定の有効拘束圧まで等方圧密を行い、非排水三軸圧縮を開始した。せん断時のひずみ速度は砂質土の場合は 0.1%/min、粘性土の場合は 0.05%/min を標準とし、背圧は 200kPa とした。

図-2 は CUB 試験の結果として、代表的な粗粒質、砂質土 I、砂質土 II、粘性土の強度定数を締固め度との関係で整理した。

これらの結果より全てにおいて締固め度が上昇すると ϕ' が増加する傾向が見受けられる。ただしその傾向は

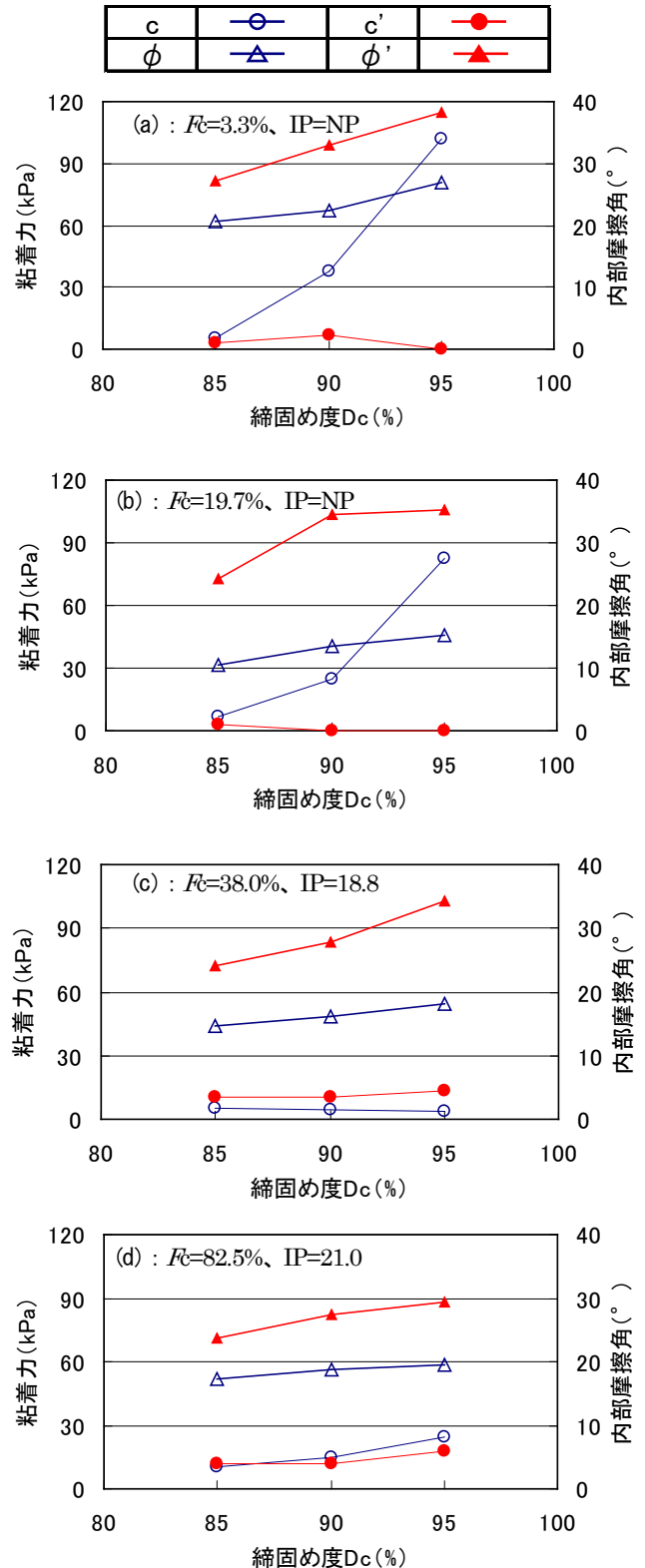


図-2 各種土質の強度定数と締固め度の関係

(a) 粗粒質 (b) 砂質土 I (c) 砂質土 II (d) 粘性土

F_c が低い盛土材料の方が顕著である。これらの傾向は大木ら⁵⁾ の報告と同様である。 c' に着目すると、粗粒質と

砂質土Ⅰに関しては締固め度依存性を確認できず、0に近い値となっているが、砂質土Ⅱと粘性土に関しては若干ではあるが締固め度の上昇にともない増加するようである。また、全応力表示においても強度定数 c 、 ϕ は、締固め度の上昇にともない増加する傾向にある。特に粗粒質、砂質土Ⅰで締固めの上昇にともなう c の上昇傾向が顕著である。これは、締固め度の上昇にともない、せん断過程において正のダイレイタンスが発現し、見かけの粘着力が増加したものと考えられる。

図-3は、 F_c と強度および締固め度の関係を網羅的に把握するために、28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} ($\sigma'_c = 50\text{kPa}$)と F_c の関係を各締固め度毎に整理したものである。この図より、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 F_c が25%~30%を超える付近から、締固め度の上昇にともなう q_{max} の増加が鈍化するようである。これより、 F_c 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、盛土のせん断強度が著しく増加するということがわかる。

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。

F_c と k および締固め度の関係を図-4に整理した。図より、バラツキは見られるが、同じ締固め度で比較すると F_c が増加するに従い k が低下する傾向が確認できる。特に F_c が比較的高い砂質土Ⅱおよび粘性土では、締固め度の上昇による k の低下が顕著である。このことは、 F_c が比較的高い砂質土Ⅱや粘性土では、河川堤防の締固め度の上昇により、河川堤防において重要な機能の一つである水密性が大きく向上することを意味している。

3. 盛土土工原位置調査結果

3.1 原位置調査概要

現場における締固め度、含水比、盛土材料および施工の面的なばらつき、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、現場調査として、RI計器による密度管理を1現場あたり1500㎡に30点を標準として行った。

実際の土工現場では、ある区間の土が均一だと仮定し、当該区間を代表する土試料から得られた最大乾燥密度を基に当該区間の締固め度を算出し締固め管理を行ってい

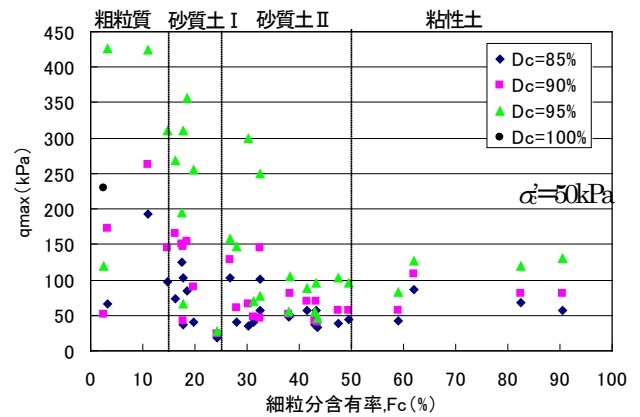


図-3 F_c とせん断強度 q_{max} の関係

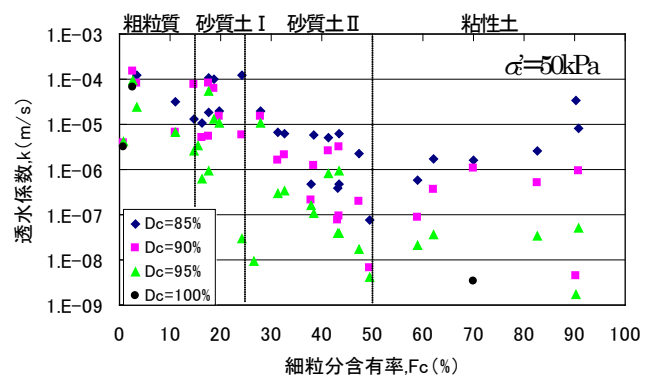


図-4 F_c と透水係数の関係

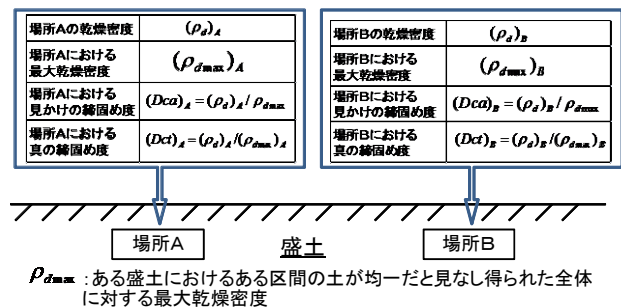


図-5 見かけの締固め度と真の締固め度

る。しかし、実際の土工現場で使用される土は均一ではなく、さらに同じ区間内でも大きくばらついていることが想定され、最大乾燥密度を求める代表試料と密度管理を行う地点の土質が異なる可能性がある。このため、ここで得られた現場締固め度は、締固め程度のばらつきに加え、土試料のばらつきも含んでおり、「見かけの締固め度⁸⁾」と呼ぶことができる(図-5参照)。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、これは土試料のばらつきの影響がない「真の締固め度⁹⁾」

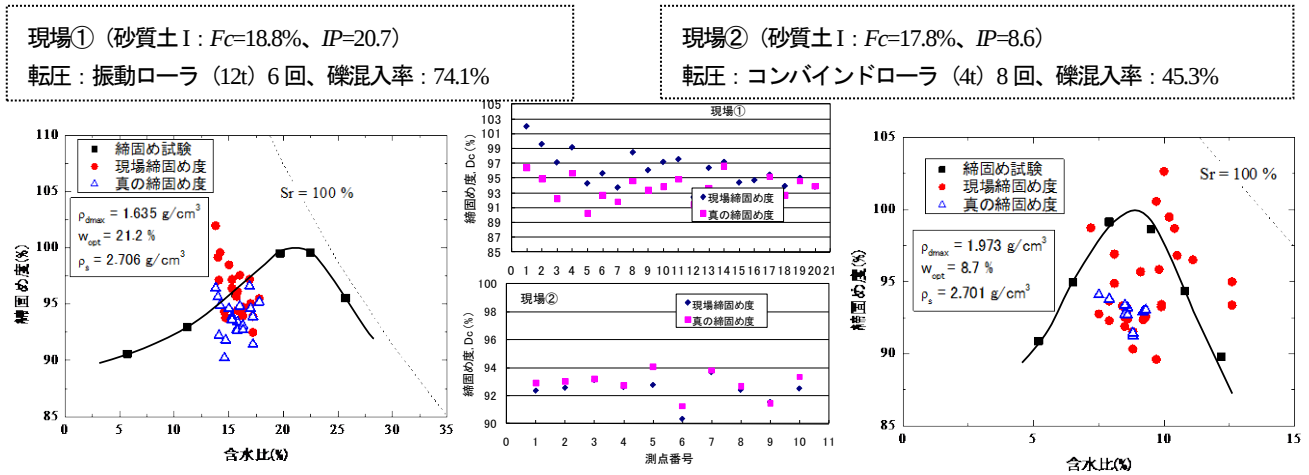


図-6 砂質土 I における室内締固め曲線と実施工データの比較 (左右)、および、真の締固め度と見かけの締固め度 (中)

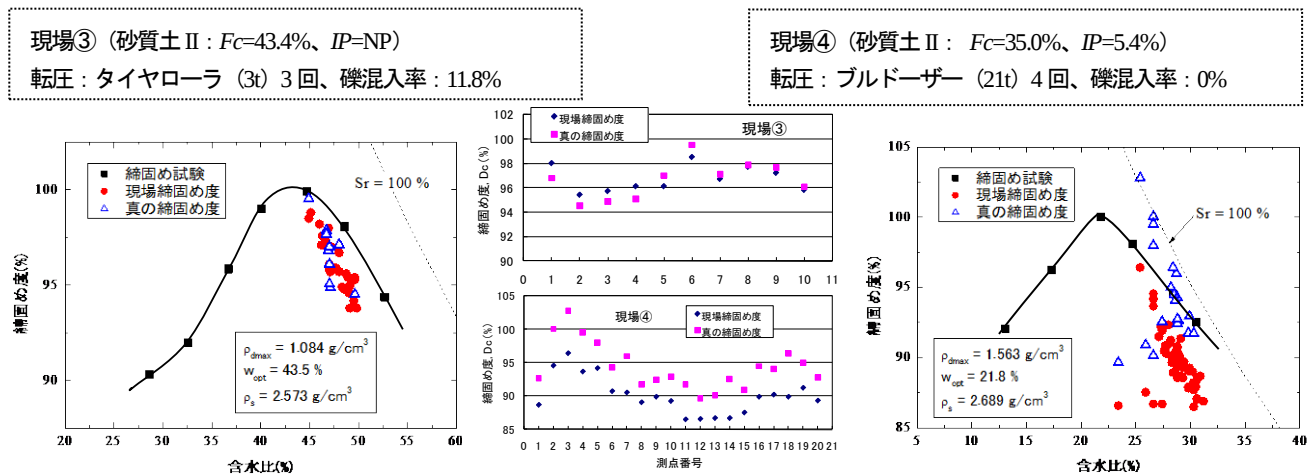


図-7 砂質土 II における室内締固め曲線と実施工データの比較 (左右)、および、真の締固め度と見かけの締固め度 (中)

(図-5 参照) 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することができる。このため、本調査においては、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。なお、締固め試験は A-a 法を標準としたが、大きな礫を含んでいるような場合は B-a 法で試験を行った。

3.2 原位置調査結果

図-6 は、砂質土 I に分類される盛土材料に関して、盛土材料の締固め曲線と、現場における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の関係をプロットした例である。細粒分含有率 F_c 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 w とともに地点毎にばらつきが多いことが分かる。一方、図-7 は砂質土 II に関して、図-6 と同様に盛土材料の締固め曲線と現場データをプロットした例である。実施工におけるデータは最適含水比

より湿潤側において室内で得られた締固め曲線に沿って分布しており、施工時の w が D_c 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 w の増加に伴い D_c が低下することを意味しており、図-7 の例にあるとおり、一般に F_c 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 w の管理が非常に重要になってくる。

次に、図-6、7 の中央に示した図を用いて、真の締固め度と見かけの締固め度を比較する。両者の差は、砂質土 I、砂質土 II という土質分類に関係なく、比較的大きい現場もあれば (最大で $\pm 5\%$ 程度)、比較的小さい現場 ($\pm 1\%$ 程度) もある。実施工で締固め管理に用いる基準となる最大乾燥密度は、締固め試験の方法や代表試料の選び方等により大きく変化し、それに伴い見かけの締固め度も変動する。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盛土材料が変化していることを意味しており、今後、締固め管理に用いる基準最大乾燥密度を求める際の頻度について検討していく必要がある。

図-8 は、これらの現場調査 (計 18 現場) における F_c と D_c の関係を転圧機械と転圧回数毎にプロットしたも

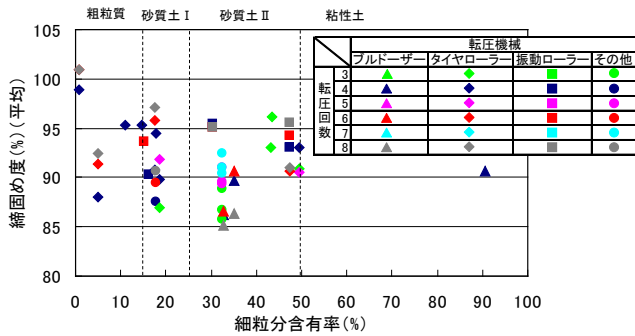


図-8 現場調査における F_c と D_c の関係

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、 F_c が低い盛土材料は転圧回数の増加により高い D_c が得られている。この結果は、過転圧が生じない盛土材料であれば転圧回数を増やすことにより D_c も増加することを示している。一方で、 F_c が高い盛土材料はある所定の転圧回数を超えると過転圧が発生し D_c が低下するものもあった。また、同じ転圧機械、転圧回数で比較すると、 F_c が低い盛土材料は F_c が高い盛土材料よりも相対的に D_c が高い傾向にある。

4. まとめ

4. 1 室内試験

一連の試験結果より、以下の結論が得られた。

- (1) 締固め度の上昇が盛土に資する効果は土質により異なることが確認された。
- (2) その効果として、 F_c が比較的低い粗粒質や砂質土 I といった土質では強度の増加、 F_c が比較的高い砂質土 II や粘性土といった土質では水密性の向上が示された。

4. 2 盛土工原位置調査

原位置調査の結果、以下の結論が得られた。

- (1) 砂質土 I では現場締固め度と含水比にはさほど相関がないのに対して、砂質土 II では施工時の含水比が締固め度に大きく影響した。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、施工時の含水比の管理が非常に

重要になる。

- (2) 真の締固め度と見かけの締固め度の差が比較的大きい現場もあった。今後、締固め管理に用いる基準最大乾燥密度を求める際の頻度について検討していく必要がある。

- (3) 細粒分含有率が低い盛土材料では転圧回数の増加により高い締固め度が得られるが、細粒分含有率が高い盛土材料ではある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った。

4. 3 今後の課題

今回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詳細な調査結果を統合し、必要に応じ土質毎の締固め基準値の提案や、含水比の範囲など施工時の留意事項をとりまとめ、設計で想定した盛土構造物の要求性能を満足する実現可能な締固め管理の在り方を具体的に検討する。

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, 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) 国土技術研究センター：河川土工マニュアル、2009.
- 5) 大木基裕, 館山勝, 小島謙一：土質の異なる盛土材料の強度特性に及ぼす締固め度の影響について、土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集, 2005.
- 6) 榎本忠夫, 山木正彦, 森啓年, 佐々木哲也：土質と含水比の締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(投稿中), 2011.
- 7) 龍岡文夫：盛土の締固め管理と設計の共働の必要性, 基礎工、7 月号、pp. 32-39、2009.

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

HIROTOSHI Mori

TADAO Enomoto

MASAHIKO Yamaki

Abstract : Fill soil compaction construction and a technological standard are provided. However, the disasters etc. such as earthquakes and downpours and trouble by the passing age occur. These are thought for the problem to exist in neither an appropriate grasp nor a weak part of the quality being understood.

In 2010, CUB tests and permeability tests were carried out with various kind of soils. As result, next became clear. Relations of soil compaction degree and soil strength, coefficient of permeability vary according to a kind of the soil. And as result of research to test banking, water content effects on the soil compaction degree if the soil has high fine fraction content.

Key words : earthwork, soil compaction, fine fraction content, triaxial test, test banking