

粒子破碎性を持つ盛土材料の変形・強度特性に及ぼす締固め度の影響

Effects of Degree of Compaction on Strength-Deformation Characteristics of Fill Geomaterials Exhibiting the Particle Crushing Behavior

三浦 みなみ 澁谷 啓 江本 浩樹
 Minami Miura Satoru Shibuya Hiroki Emoto

1. はじめに

昨今、盛土の大規模化に伴い、降雨や地震などの外力に対してより安定性の高い盛土の造成が要求されている。特に、最近頻発している集中豪雨や巨大地震にも耐え得る盛土の設計法および施工法を確立することは急務である。現在、土構造物を施工する際の管理には締固め度 D_c (= 原位置における乾燥密度 ρ_d / 室内締固め試験により求められる最大乾燥密度 $\rho_{dmax} \times 100$ (%)) が基準として用いられている。しかし設計では、施工に用いる材料の工学的区分に応じた強度定数 ϕ を使用しており、設計段階で用いる強度定数と施工管理に用いる締固め度 D_c との直接的な結び付きが明らかとなっていないのが現状である。このことは、近年の施工技術の向上により可能となったより良い締固めによる強度増加を過小評価したり、また、施工管理の判定を広範囲に及ぶ現場のある任意の数箇所で行うという管理方法の性質から締固め度 D_c を過大評価している可能性がある。事実、締固めの重要性が認識されにくく、大規模災害の際に崩壊に至る事例が多く見受けられる¹⁾。これらのことから、設計する際に締固め度の変化に起因する変形・強度特性への影響を考慮する必要があるといえる。

さらに締固め度管理の問題点として、締固めによる締固め特性の変化が考慮されていない点が挙げられる。粒子破碎性を示す地盤材料を盛土材料として使用する場合、締固めにより粒子破碎が生じることで粒度分布が変化し、それに伴って締固め特性も変化する。厳密な管理を行うためにはこれらの締固め特性の変化を勘案し、原位置の最大乾燥密度 ρ_{dmax} を決定する必要があるが、現在の施工管理方法では粒子破碎の影響が考慮されていない。破碎性を有する地盤材料は、比較的堅固な材料であっても、繰返し荷重を受けるなどの周辺環境の影響により、粒子が細粒化し稜角性を失うことにより剛性の低下や沈下の増大を引き起こすと言われている²⁾。すなわち、粒子破碎性を持つ材料を扱う場合、粒子破碎によって生じる材料特性の変化を考慮した上で盛土を築堤する必要がある。

本論文では、実際の道路面で生じた路面沈下が端緒となった事例研究について述べる。この道路現場では、施工後に発生した豪雨により埋設されたボックスカルバート周辺で大きな路面沈下が見られた。変状が発生した箇所において盛土材のサンプルを採取し、施工前後で盛土材料の物理特性値を比較したところ粒子破碎が生じていることが明らかとなった。そこで本研究では、採取した施工前の盛土材料および施工後の盛土材料を用いて中型三軸圧縮試験および水浸圧密試験をそれぞれ実施し、土粒子の破碎が盛土材料の変形・強度特性に与える影響を明らかにした。

2. 試験概要

2.1 用いた試料

本研究で用いた試料は、実際の道路盛土の施工に用いられた細粒分質礫質砂 (SFG) で、土粒子密度 ρ_s は2.645 g/cm³であった。以降、施工前の締固めを行っていない状態の試料をBOX-0、施工後の試料 (JIS A 1210 で定められた「突固めによる土の締固め方法」のA-b法に準じて締固めを行った後の試料) をBOX-1 と表記する。表-1 はBOX-0 およびBOX-1 の物性値を示したものである。

また、BOX-0 およびBOX-1 の粒径加積曲線を図-1 に示す。この結果より、BOX-0 (19 mm 以下) とBOX-1 (19 mm 以下) を比較すると、粒径加積曲線から細粒分の増加が見られた。特に2 mm 以下の砂分の割合が60%から75%へと増加していることから、締固めによる粒子破碎が確認できた。さらに、均等係数 U_c に着目すると、34から90に増加していることから粒度分布が良くなったといえる。

つぎにBOX-0 (19 mm 以下) およびBOX-1 (19 mm 以下) の締固め曲線を図-2 にそれぞれ示す。なお、締固め試験はいずれもA-b法で行った。これらの結果を比較すると、BOX-0 (19mm 以下) では ρ_{dmax} は1.834 g/cm³であるが、BOX-1 (19mm 以下) では ρ_{dmax} = 1.858 g/cm³と増加しており、最適含水比も減少している事が分かる。

これは、締固めにより粒子破碎が生じたことで粒度分布が良くなったためであると考えられる。これらの結果は、粒子破碎による最大乾燥密度の増加に伴い、原位置での締固め度が想定よりも低くなっている可能性を示唆している。具体的にはBOX-0 の ρ_{dmax} を用いて $D_c = 90\%$ となるよう施工していた場合、粒子破碎により ρ_{dmax} が増加するため、実際には $D_c = 88.9\%$ となっている。砂礫材などでは $D_c = 90\%$ 以上であれば D_c の増加に伴い強度は著しく増加するが、 $D_c = 90\%$ を下回ると強度は十分に発揮されないと報告されており³⁾、本研究の様な条件であれば目標としている強度に達していない恐れがある。

2.2 水浸圧密試験

不飽和状態にあるゆるい粘性土やシルト質土は、降雨などによって吸水することでサクションが消失し、コラプスと呼ばれる体積収縮 (沈下) を生じることが知られている³⁾。このような懸念から、変状箇所において採取した試料を用いて、全応力一定条件下で、不飽和状態にある供試体に吸水を許す水浸圧密試験を実施することでコラプスの有無について調べた。図-3 に本研究で用いた水浸圧密試験装置の概要図を示す。

供試体は、直径60 mm・高さ20 mmの円盤状であり、供試体サイズを考慮して2 mmふるい通過試料を用いた。図-4 に2mmふるい通過試料を用いた締固め試験の結果をそれぞれ示す。締固めは原粒度および19mmせん頭粒径の締固めと同様、A-b法で実施した。図-4の結果からも、粒子破碎および破碎による締固め特性の変化が確認できる。降

表-1 用いた試料の物性値

| | BOX-0 | | BOX-1 |
|---|-------|-------|-------|
| 粒径区分 | SFG | | SFG |
| 土粒子密度 ρ_s (g/cm ³) | 2.645 | | 2.645 |
| 最大粒径 (mm) | 75.0 | 19.0 | 19.0 |
| 均等係数 U_c | 386 | 34 | 90 |
| 曲率係数 U'_c | 0.3 | 0.3 | 5.0 |
| 最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³) | 1.866 | 1.734 | 1.858 |
| 最適含水比 w_{opt} (%) | 14.4 | 14.5 | 13.9 |

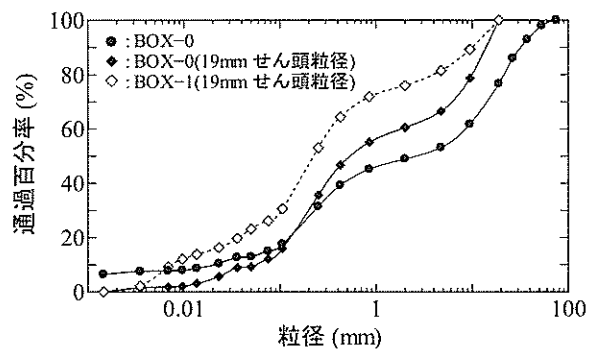


図-1 粒径加積曲線

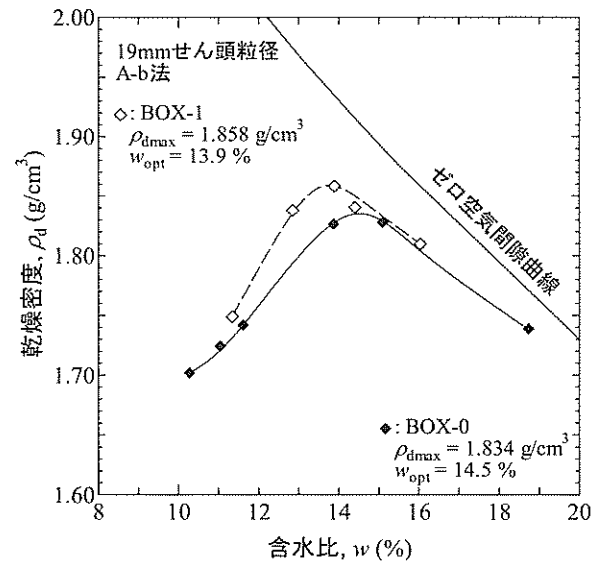


図-2 締固め曲線

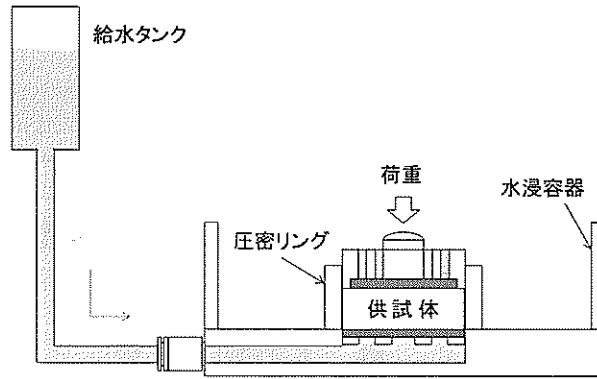


図-3 試験装置の概要図 (水浸試験)

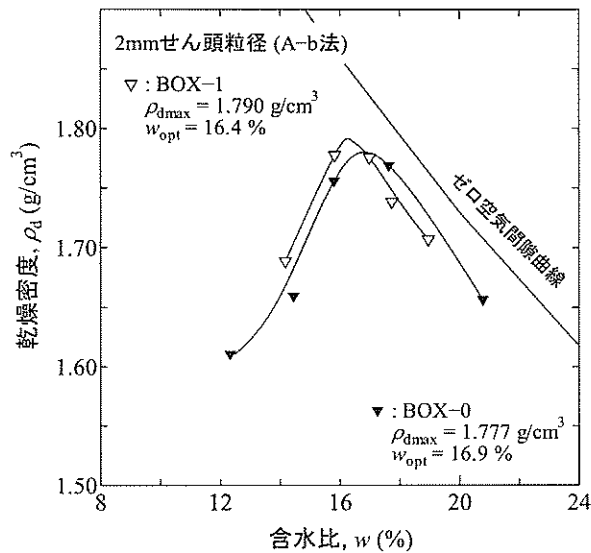


図-4 締固め曲線 (2mmせん頭粒径)

表-2 試験条件 (水浸試験)

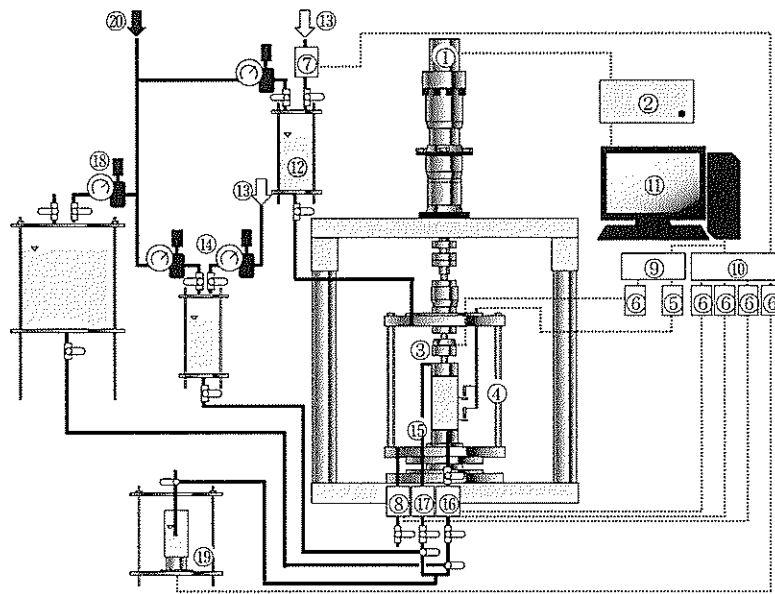
| 試料 | | BOX-0 | | |
|---------|-----------------------|-----------------|----|----|
| 供試体作製条件 | 締固め度 D_c (%) | 85 | 90 | 95 |
| | 初期含水比 w_0 (%) | 12.0 (= w_n) | | |
| 圧密条件 | 鉛直応力 σ_v (kPa) | 200 | | |

雨によって変状箇所雨水が侵入したという実際の現象を再現するため、初期含水比を原位置の自然含水比 w_n (= 12.0%) として供試体を作製し、変状箇所付近の土被り圧に相当する鉛直応力 σ_v まで載荷した後、水浸させた。

表-2 は試験条件をまとめたものである。初期乾燥密度については締固め度 $D_c = 85\%$ 、 90% 、 95% となる質量の試料をモールドに投入し、油圧ジャッキを用いて静的に締固めることで供試体を作製した。試験は、含水比調整した試料を所定の乾燥密度となるよう圧密リングに投入し、不飽和状態の供試体に対して $d\sigma_v/dt = 4.0 \text{ kPa/min}$ の載荷速度で鉛直応力 $\sigma_v = 200 \text{ kPa}$ まで増加させた。所定の応力に到達した後、3t 法で圧密終了を確認した後、供試体の下面から約 1 m の水頭差を設けて供試体体積の数倍の蒸留水を供給し、鉛直変位の変化を観察した。なお、本試験の水浸は試料の飽和化するためのものではないため、試験終了後の飽和度の計測は行っていない。

2.3 三軸圧縮試験

粒子破碎による締固め特性の変化が、強度変形特性にどのような影響を与えるかを調べるために、BOX-0 および BOX-1 の試料を用いて、それぞれ飽和圧密排水三軸圧縮試験を実施した。図-5 に本研究で用いた三軸圧縮試験装置の



- ①ダイレクトドライブモーター
- ②ドライブユニット
- ③ロードセル
- ④非接触型変位計 (GAPセンサ)
- ⑤専用アンプ
- ⑥ストレイアンプ
- ⑦セル圧制御用電空変換機
- ⑧セル圧測定用圧力変換機
- ⑨DA/AD変換ボード (PEX)
- ⑩AD変換ボード (LPC)
- ⑪パーソナルコンピュータ
- ⑫セル圧供給小型セル
- ⑬セル圧および背圧供給用元圧
- ⑭背圧調節用超精密減圧弁
- ⑮ペDESTAL
- ⑯間隙水圧測定用圧力変換機
- ⑰背圧測定用圧力変換機
- ⑱間隙水圧調節用超精密減圧弁
- ⑲体積変化計測用ロードセル
- ⑳ベルト駆動型油回転真空ポンプ

図-5 試験装置の概要図 (三軸圧縮試験)

表-3 試験条件 (三軸圧縮試験)

| 試料 | | BOX-0 | | | BOX-1 | |
|---------|--------------------------------------|----------------------|----|----|----------------------|-----|
| 供試体作製条件 | 締固め度 D_c (%) | 85 | 90 | 95 | 85 | 100 |
| | 初期含水比 w_0 (%) | 14.5 ($= w_{opt}$) | | | 13.9 ($= w_{opt}$) | |
| 圧密条件 | 圧密応力 p' (kPa) | 50 | | | 50 | |
| | 載荷速度 dp'/dt (kPa / min) | 1.0 | | | 1.0 | |
| 単調載荷 | 排水条件 | 排水 | | | 排水 | |
| | 載荷速度 $d\varepsilon_a / dt$ (% / min) | 0.02 | | | 0.02 | |
| | 目標軸ひずみ ε_a (%) | 15 | | | 15 | |

概要図を示す。供試体は、直径 100 mm・高さ 200 mm であり、いずれの試料においても供試体サイズを考慮して 19 mm ふり通過試料を用いた。供試体作成時の含水比を最適含水比付近となるように水分調整を行い、BOX-0 に関しては $D_c = 85\%$ 、 90% 、 100% 程度、BOX-1 に関しては $D_c = 85\%$ 、 100% 程度となるよう供試体を作製した。表-3 は試験条件をまとめて示したものである。

まず、最適含水比 w_{opt} 付近に水分調整した試料を 5 層に分けて二つ割れモールドに投入し、所定の密度となるよう油圧ジャッキを用いて静的に締固めた。その後 24 時間程度通水を行い、供試体を飽和化した。飽和化は B 値が 0.95 以上であることで確認を行っている。なお、いずれの供試体においても通水による体積変化は見られなかった。飽和供試体を有効圧密応力 $p' = 50$ kPa で等方圧密を実施した後、1 時間程度排水クリープを許し、その後、排水条件下で軸ひずみ $\varepsilon_a = 15\%$ まで単調載荷を実施した。単調載荷時に得られた偏差応力の最大値を強度 q_{max} とする。単調載荷終了時まで最大値が得られない場合は、 $\varepsilon_a = 15\%$ の偏差応力を q_{max} としている。また、本研究で考察している変形係

数は、微小ひずみ領域 ($\epsilon_a < 0.001\%$) におけるヤング率 E_{max} である。微小ひずみ領域における軸ひずみの計測はベディンゲラーの影響を受けやすいため⁴⁾、非接触型変位計 (GAP センサー) を用いて計測を行った。

3. 試験結果及び考察

3.1 水浸試験

図-6 は、水浸圧密試験より得られた圧密時の軸ひずみ ϵ_a と経過時間 t の関係を示したものである。図中に示す矢印は注水を開始した時点を示している。この結果より、いずれの供試体においても浸水により体積収縮が生じていることが分かる。特に、 $D_c = 85\%$ の供試体の収縮量は大きく、注水前と比較すると軸ひずみが 2.5 倍程度沈下していることが分かる。一方、 $D_c = 100\%$ の供試体については水浸による収縮量はわずかであり、ほぼ変化がなかった。このことから、ゆるい供試体は水浸による圧縮量が著しく大きい、よく締め固めることにより圧縮は抑制できるといえる。

また、図-7 は圧密終了時の間隙比 e と試験終了時の e を締固め度 D_c ごとにまとめたものである。 $D_c = 90\%$ および 95% の供試体の水浸による e の変化量は 0.001 程度とほとんど体積収縮しないのに対し、 $D_c = 85\%$ の供試体の e の変化量は 0.1 程度と大きく体積収縮している。

3.1 三軸圧縮試験

図-8 は、等方圧密過程に得られた体積ひずみ ϵ_v と経過時間 t の関係である。水浸試験の結果と同様に、 $D_c = 90\%$ の前後で体積ひずみ ϵ_v の変化量が大きく変化している。また、BOX-0 および BOX-1 の $D_c = 100\%$ の供試体を比較すると、BOX-1 の圧縮量の方がより大きいことが分かる。このことから、同じ締固め度 D_c であっても、BOX-1 の方がより大きく変形する可能性があることが分かった。

つぎに、図-9 は単調載荷時に得られた応力ひずみ関係である。この結果は、いずれの D_c においても、BOX-0 の強度が BOX-1 の強度を僅かながら上回っていることを示している。このことから、同様の締固め度であっても BOX-1 の供試体は BOX-0 と同程度の強度を見込むことはできないといえる。変形係数 E_{max} についても同様の傾向を示している。図-10 は、BOX-0 および BOX-1 の $D_c = 100\%$ の微小ひずみ領域における応力ひずみ関係を示したものである。図中に、それぞれの最大ヤング率 E_{max} の値を示している。この結果より、 E_{max} も q_{max} と同様に BOX-1 の方が値が小さく、BOX-0 の 0.8 倍程度であることが分かる。

以上のことから、粒子破砕による粒度特性の変化が盛土材料の変形・強度特性に影響を及ぼしており、締め固めを実施する前と比較して変形係数および強度はいずれも低下することが明らかとなった。

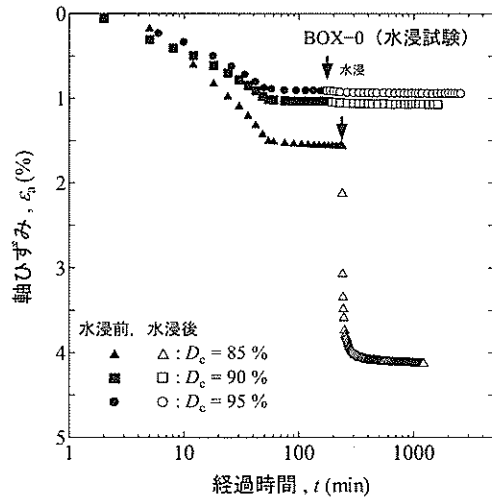


図-6 水浸圧密試験結果

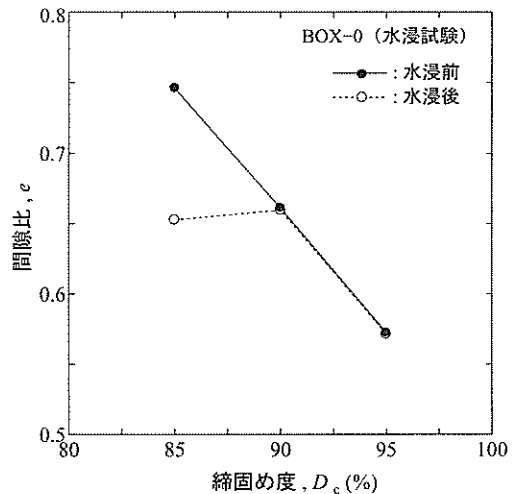


図-7 試験終了時の $e_a \sim D_c$ 関係

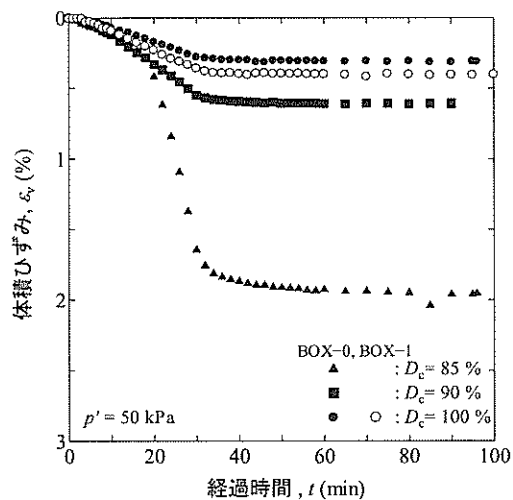
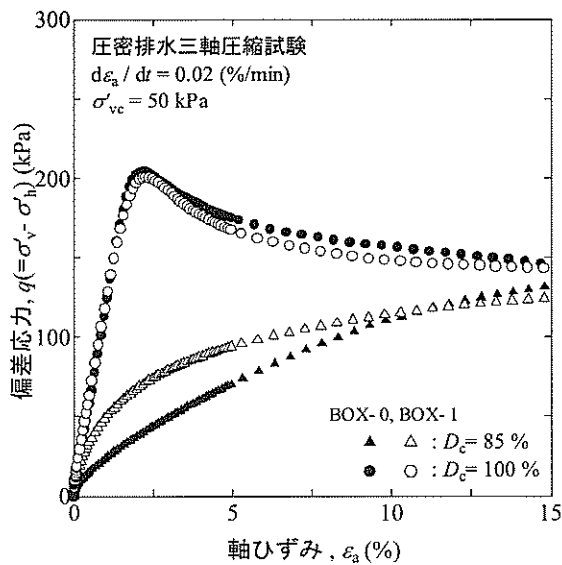
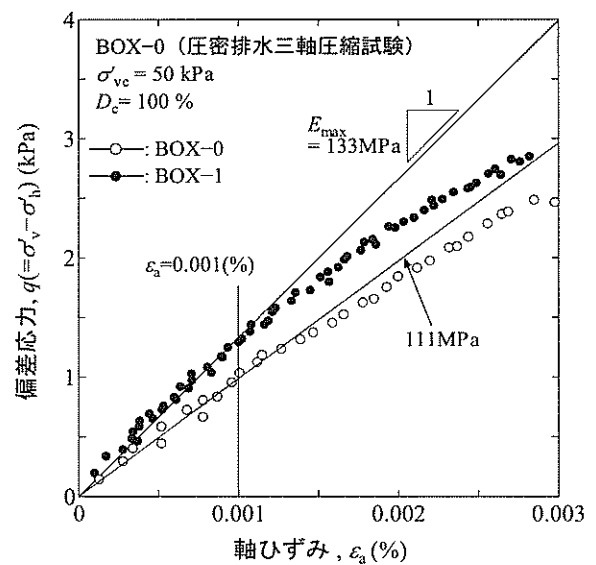


図-8 $\epsilon_v \sim t$ 関係

図-9 単調載荷時の $q \sim \varepsilon_a$ 関係図-10 単調載荷時の $q \sim \varepsilon_a$ 関係 ($\varepsilon_a < 0.003\%$)

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- ・ 本研究で用いた試料は、締固めにより粒子破碎が生じ、粒径幅の広い試料へと変化することで、最大乾燥密度 ρ_{dmax} が大きくなることが確認できた。このことは、見かけ上の D_c が実際の D_c を下回っていた可能性を示唆している。
- ・ 水浸圧密試験の結果より、水浸時の圧縮量は $D_c = 90\%$ 以下のゆるい状態であれば、締固め度 D_c の変化が僅かであっても大きく変化することが分かった。一方、 $D_c = 100\%$ の供試体は水浸前後の圧縮量がおおよそ等しいことから、よく締固めることで水浸沈下は抑制できるといえる。これは、三軸圧縮試験の等方圧密過程において得られた D_c と体積ひずみ ε_v の関係と一致している。
- ・ 三軸圧縮試験より、 $D_c = 100\%$ の供試体の強度 q_{max} および変形係数 E_{max} は、いずれも BOX-0 が BOX-1 を上回った。これは、粒子破碎による粒度特性の変化により変形・強度特性そのものが低下する恐れがあることを示唆している。

以上のことから、粒子破碎性を持つ盛土材料を使用する場合は、破碎前後の締固め特性を把握することによって D_c を正確に評価した上で、材料特性の変化による変形・強度特性の低下を勘案し、締固めの管理基準値を決定する必要があるといえる。

参考文献

- 1) Shibuya S., Kawaguchi T., Chea, J. : Failure of Reinforced Earth as Attacked by Typhoon No. 23 in 2004, *Soils and Foundations*, Vol.47, No.1, pp.153-160, 2007.
- 2) 加藤文学, 森尾敏, 中田幸男, 兵頭正幸: 粒子特性に着目した砂の排水せん断特性, 舞鶴工業高等専門学校紀要, 38, pp.101-107, 2003.
- 3) 例えば, 阿部廣史: 不飽和土の膨潤とコラプス, 地盤工学会誌, VOL.59 No.10, No.645, pp.56-57, 2011.
- 4) 例えば, 澁谷啓, 小高猛司, 龍岡文夫: 地盤材料の小ひずみでの非線形性と地盤変形問題への適用, 3.地盤材料の変形特性 (その1), 土と基礎, Vol.45, No.4, pp.59-60, 1997.

著者

| | |
|--------|-------------------------|
| 三浦 みなみ | 神戸大学大学院博士前期課程, 修士 (工学) |
| 澁谷 啓 | 所員, Ph.D, 博士 (工学), 地盤工学 |
| 江本 浩樹 | 神戸大学大学院博士前期課程, 学士 (工学) |