

【建設工学研究所論文報告集第54号〔論文〕2012年11月】

## 現場締固め度が盛土材料の強度および沈下特性に及ぼす影響

### The Effects for Strength and Settlement Characteristics of Embankment Material with Field Compaction Degree

|               |                |              |
|---------------|----------------|--------------|
| 李 俊 憲         | 許 晋 碩          | 金 秉 洙        |
| Junhun Lee    | Jinsuk Hur     | Byeongsu Kim |
| 山 本 拓         | 澁 谷 啓          |              |
| Taku Yamamoto | Satoru Shibuya |              |

#### 1. はじめに

国土の空間的な限界と都市化の進展に伴い、従来宅地、道路として利用されてこなかった谷底低地や埋立地あるいは山麓の斜面地等の開発が急速に進み、大規模盛土工事が増加している。

最近、締固め不足の道路・宅地・鉄道盛土が集中豪雨や地震により壊れる事故が後を絶たない。土は良く締固めると硬く強くなるので安全で耐久性に優れた盛土を造るためには土を十分に締固めるのが重要である。

一般的に、施工時には盛土が所定の品質を満たすように盛土の締固め管理を行う。土の締固め管理は品質規定方式と工法規定方式により行われている。一種類の土に対して十分に締固めることは可能であるが、現実には土構造物の中でも色々な種類の土が利用され、空間的な制約で施工が困難な部分もある。このような締固めの問題点について、良く締固めると強度が改善される<sup>1)</sup>、砂礫材料の粒径と締固め度から内部摩擦角が推定できる可能性がある<sup>2)</sup>、変形係数（ヤング率）に関わる圧縮沈下にも関係性がある<sup>3)</sup>、盛土では水浸によるコラプス現象や盛土の土粒子自体の軟弱化あるいはその両者が原因で沈下が生じることがあり、締固め密度を高めることが水浸沈下を抑制する対策として効果があることを現場で確認した<sup>4)</sup>等の研究がなされている。ところで、現場には様々な盛土材料があるので各材料の所定の性能を十分把握するには、その材料に適した時間と試験装置が必要である。そこで本研究では、高品質盛土を保証する施工管理技術に関する研究の一環として、現場締固め度による盛土材料の強度特性、盛土材料の水浸による変形特性(主に、圧縮沈下挙動)について検討を加えている。

研究方法としては、まず、ある現場で宅地盛土造成に利用された盛土材料を用い、一連の土質試験を通して基本的な物理・力学特性を把握した。次に、現場締固め度として75%、80%、85%を想定し、一面せん断試験と室内水浸試験を実施して盛土材料の強度特性および水浸圧縮特性を検討している。

#### 2. コラプスに関する過去の研究

コラプス (collapse) は、水浸時に生じる体積圧縮現象であり不飽和土の特有な現象である。土塊内部に水が侵入すると、土粒子間に作用しているサクションによる粒子間付着力が水浸により消失し、保たれていた土骨格剛性が減少することによりコラプスが生じる。また、コラプス時に吸水して間隙内へ水が浸入した間隙で圧縮が生じることが確認されている<sup>5)</sup>。コラプスに関する研究では供試体に与えるサクションを制御できる一次元圧縮試験装置により水浸試験が行われている。Barden et al. (1969)はコラプス時の体積ひずみが応力経路に依存せず発生することを示した<sup>6)</sup>。そして、コラプスが、載荷時の応力、試料の密度および水分量に影響を受けることを指摘している。試料の密度はコラプ

スを支配する重要な要因であるといえる。ところが現場での密度管理がD値で行われており、室内実験とは異なっている。そして、現場の水浸沈下を防ぐためには、D値や飽和度の規定のみでなく、施工方法も加味する必要があることが指摘されている<sup>7)</sup>。さらに、現場で採用されているD値に着目した水浸沈下特性に関する研究はほとんどなされておらず、データの蓄積が必要と考えられる。

### 3. 室内試験

#### 3. 1 試験試料と試験方法

本研究に用いられた試料は、兵庫県神戸市内に位置する4箇所の宅地造成現場にて、深さ1.0mで採取した盛土材料であり、各試料をA-1、A-2、B-1、B-2と名付けた。まず、各盛土材料ことの一次的な物理特性を調査するため、地盤工学会による標準土質試験法に準じて土の含水比試験、土粒子の密度試験、土の粒度試験、突固めによる土の締固め試験を実施した。さらに、締固め試験から得られた最大乾燥密度と最適含水比を基準として、締固め度75%、80%、85%の供試体を作製して土の一面せん断試験ならびに水浸試験を行った。

#### 3. 2 試料の粒度分布及び締固め特性

試料の最大粒径は19.0mmであり、各試料の土粒子密度 $\rho_s$ は2.643g/cm<sup>3</sup>~2.656g/cm<sup>3</sup>の範囲である。図-1はそれぞれの試料の粒径加積曲線を示している。試料は礫分から細粒分まで幅広い粒子を含んでおり、判別すると試料A-1とA-2は細粒分まじり礫質砂(SG-F)、B-1は細粒分質砂質礫(GFS)、B-2は細粒分まじり砂質礫(GS-F)と分類される。(表-1参照)。

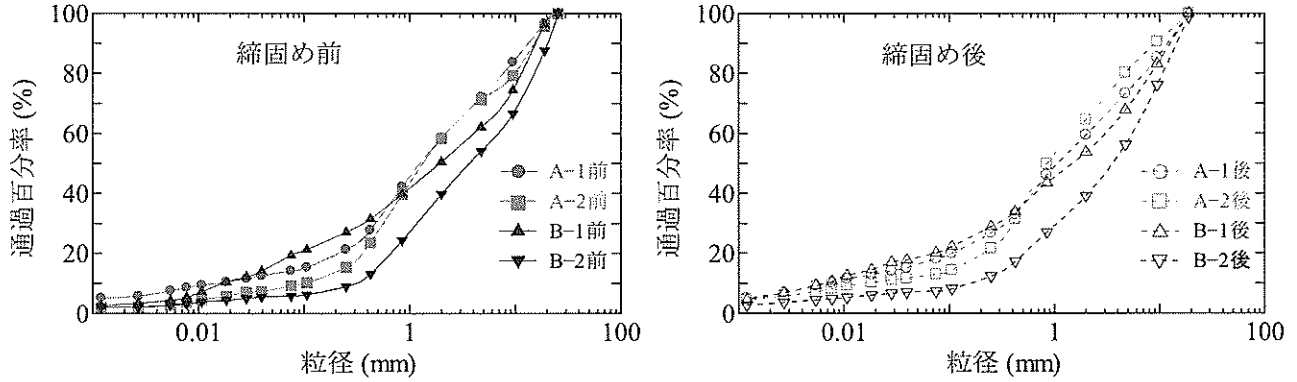
表-1 各試料の物理的特性

| 項目                                 | A-1               |         | A-2       |           | B-1     |         | B-2       |           |      |
|------------------------------------|-------------------|---------|-----------|-----------|---------|---------|-----------|-----------|------|
|                                    | 前                 | 後       | 前         | 後         | 前       | 後       | 前         | 後         |      |
| 土粒子の密度, $\rho_s$ g/cm <sup>3</sup> | 2.656             |         | 2.627     |           | 2.643   |         | 2.646     |           |      |
| 自然含水比, $w_n$ %                     | 8.64              |         | 9.00      |           | 15.67   |         | 7.45      |           |      |
| 粒度特性                               | 礫分 (75~2mm) %     | 41.4    | 40.5      | 41.6      | 35.6    | 49.4    | 46.3      | 60.2      | 59.6 |
|                                    | 砂分 (2~0.075mm) %  | 44.5    | 41.3      | 49.1      | 51.5    | 31.2    | 33.6      | 34.0      | 31.9 |
|                                    | 細粒分 (0.075mm以下) % | 14.1    | 18.2      | 9.2       | 12.9    | 19.3    | 20.1      | 5.8       | 7.3  |
|                                    | 均等係数 $U_c$        | 33      | 286       | 20        | 100     | 200     | 462       | 23        | 32   |
|                                    | 曲率係数 $U_c'$       | 0.9     | 8.3       | 1.3       | 5.5     | 1.8     | 4.3       | 0.7       | 1.3  |
| 地盤材料の分類名                           | 細粒分まじり礫質砂         | 細粒分質砂質礫 | 細粒分まじり礫質砂 | 細粒分まじり礫質砂 | 細粒分質砂質礫 | 細粒分質砂質礫 | 細粒分まじり砂質礫 | 細粒分まじり砂質礫 |      |
| 分類記号                               | SG-F              | SFG     | SG-F      | SG-F      | GFS     | GFS     | GS-F      | GS-F      |      |

今回の実験では、繰り返し突き固めを行うことで試料の破砕が懸念されたため、締固め試験後の試料に対して再度粒度試験を行った。締固め試験後に実施した粒度試験結果から、粒度分布曲線が締固め前の結果よりやや左側に移動していることが分かる(図-1参照)。これは、締固めにより粒子が破砕し、細粒分が増加していることを示している。ただし、この変化は地盤材料分類に大きく変わる程ではないわずかな変化である。

また、粒径が19.0mm以下の試料を用いて、JIS A 1210の突固めによる土の締固め試験のA-a法(10cmモールド25回、乾燥法で繰返し)による突き固め試験を行った。試料の締固め曲線は図-2にされており、試料の最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ は1.943g/cm<sup>3</sup>~2.067g/cm<sup>3</sup>、最適含水比 $w_{opt}$ は8.7%~11.6%であった。一方、地盤工学会の試験基準による供試体の許容さ

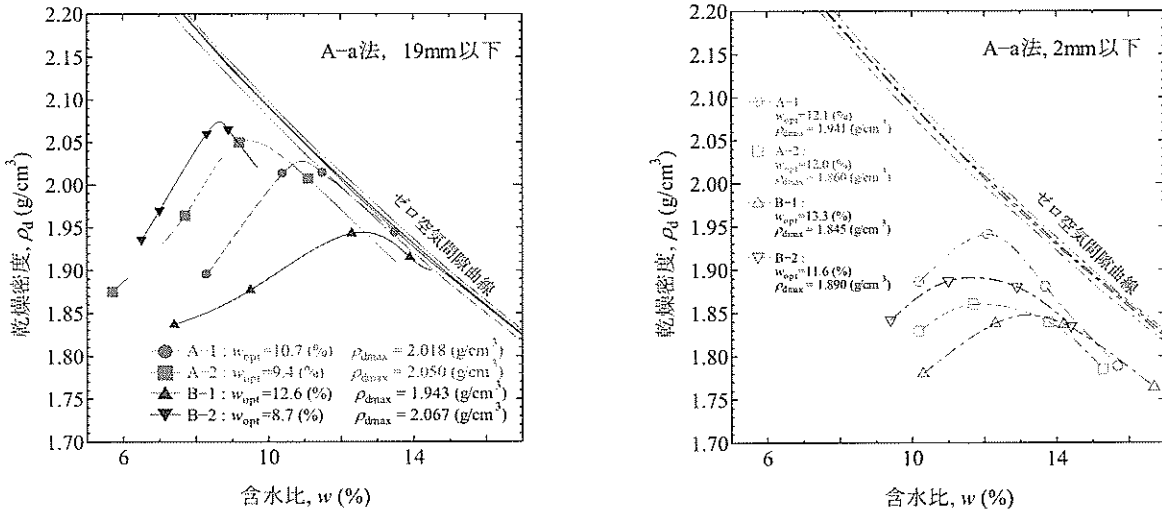
れる最大の粒子サイズは、粒径幅の広い土では最大粒径と平均粒径の比が $5 \leq D_{max}/D_{50} \leq 30$ で、供試体直径は最大粒径の30~60倍まで緩和できることが報告されている<sup>9)</sup>ので、本研究で実施した一面せん断試験および水浸試験では、2.0mmの試料を用いた。2.0mm以下試料の最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ は $1.845\text{g/cm}^3 \sim 1.941\text{g/cm}^3$ 、最適含水比 $w_{opt}$ は11.6%~13.3%であった(表-3, 図-2参照)。



(a) 締固め試験前の粒径加積曲線 (b) 締固め試験後の粒径加積曲線  
 図-1 試料の粒径加積曲線

表-2 各試料に関する締固め試験結果

| 項目  | 最大粒径19.0mm    |                                    | 最大粒径2.0mm     |                                    |
|-----|---------------|------------------------------------|---------------|------------------------------------|
|     | $w_{opt}$ (%) | $\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> ) | $w_{opt}$ (%) | $\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> ) |
| A-1 | 10.7          | 2.018                              | 12.1          | 1.941                              |
| A-2 | 9.4           | 2.050                              | 12.0          | 1.860                              |
| B-1 | 12.6          | 1.943                              | 13.3          | 1.845                              |
| B-2 | 8.7           | 2.067                              | 11.6          | 1.890                              |



(a) 粒径19.0mm以下の試料 (b) 粒径2.0mm以下の試料

図-2 各試料の締固め曲線

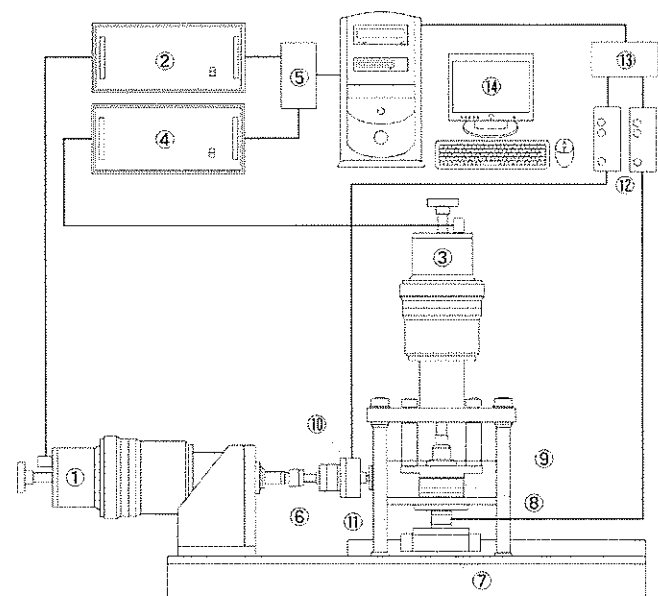
### 3. 3 一面せん断及び水浸試験

一面せん断試験は一次元圧密が容易かつ試験方法が比較的簡便であり試料の量が少量で済む利点がある。また、地盤の土要素は一次元的に圧縮され、平面ひずみに近い状態でのせん断破壊が生じると考えられる。円弧すべり法による盛土のすべり面に対する安定解析は強度定数 ( $c$ ,  $\phi$ ) が必要となる。一方、現場の排水設備がうまく機能する場合でも、長期間の浸透水により地中の含水比が高くなって地盤の飽和化されて地盤が持っていたサクシジョンの消失による安定性低下の危険性が残ることが予想される<sup>9)</sup>。よって、水の浸透に伴う地盤の圧縮変形がどの程度生じるかを求める必要がある。

表-3 各試料の一面せん断試験から求めたせん断強度定数

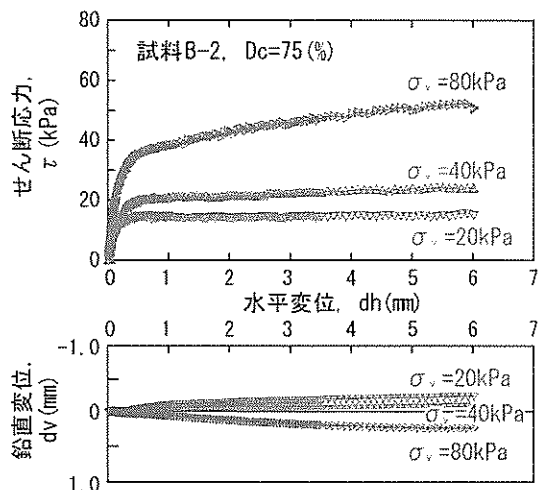
| 試料  | 項目              | $D_c=85\%$ |              | $D_c=80\%$ |              | $D_c=75\%$ |              |
|-----|-----------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|
|     |                 | $c_d=0$    | $c_d \neq 0$ | $c_d=0$    | $c_d \neq 0$ | $c_d=0$    | $c_d \neq 0$ |
| A-1 | 内部摩擦角, $\phi_d$ | 37.2°      | 29.7°        | 39.4°      | 38.0°        | 40.0°      | 37.2°        |
|     | 粘着力, $c_d$      | —          | 11.3kPa      | —          | 2.6kPa       | —          | 4.1kPa       |
| A-2 | 内部摩擦角, $\phi_d$ | 42.3°      | 33.4°        | 35.8°      | 27.0°        | 38.7°      | 27.2°        |
|     | 粘着力, $c_d$      | —          | 14.8kPa      | —          | 12.3kPa      | —          | 12.6kPa      |
| B-1 | 内部摩擦角, $\phi_d$ | 38.0°      | 35.0°        | 35.0°      | 22.8°        | 28.4°      | 16.2°        |
|     | 粘着力, $c_d$      | —          | 5.3kPa       | —          | 16.8kPa      | —          | 14.7kPa      |
| B-2 | 内部摩擦角, $\phi_d$ | 45.0°      | 35.8°        | 38.7°      | 34.2°        | 33.0°      | 31.8°        |
|     | 粘着力, $c_d$      | —          | 17.5kPa      | —          | 7.5kPa       | —          | 1.8kPa       |

図-3は使用した室内一面せん断試験装置（地盤工学会基準JGS0561「土の圧密定圧一面せん断試験方法」）概略図である。鉛直及び水平方向の応力あるいは変位制御にダイレクトドライブモーターを用いている。試料に作用する垂直力は下箱の下部に設置されたロードセルによって測定される。また、上・下せん断箱のすき間を0.2mm開け、せん断中にせん断層の発達を妨げないように設定した<sup>10)</sup>。せん断箱と土試料を水浸させるために水浸箱が設置されている。供試体は一層として静的締固め方法で作製し、そのサイズは直径60mm、高さ40mmである<sup>11)</sup>。4種類の試料を用いて実施した一面せん断試験からせん断強度定数を求めた。この結果を表-3にまとめている。せん断強度定数は、見かけ上の締固め度 $D_c$ が75%, 80%, 85%の供試体について3つの鉛直応力 ( $\sigma_v = 20\text{kPa}$ ,  $40\text{kPa}$ ,  $80\text{kPa}$ ) を与えて、その結果から求めた。ただし、破壊時の応力点から求めた $c$ ,  $\phi$ 値と粘着力を $c_d=0$ として求めた $\phi$ の値の2種類の強度定数を求めた。この理由は、本試験の鉛直応力が低いため、せん断時に、周面摩擦力と鉛直応力等何らかの原因の影響が見かけ粘着力を発生させる可能性があるかと判断したためである(図-4参照)。



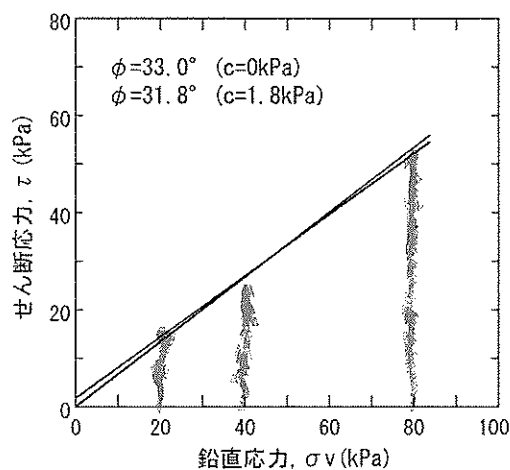
- ①: 水平載荷用ダイレクトドライブモーター
- ②: 水平載荷用ドライブユニット
- ③: 鉛直載荷用ダイレクトドライブモーター
- ④: 鉛直載荷用ドライブユニット
- ⑤: シリアル通信ボード
- ⑥: スライドユニット
- ⑦: リニアローラウェイ
- ⑧: せん断箱
- ⑨: 水浸箱
- ⑩: 水平荷重用ロードセル
- ⑪: 鉛直荷重用ロードセル
- ⑫: ストレインアンプ
- ⑬: AD変換ボード
- ⑭: パーソナルコンピュータ

図-3 一面せん断試験機概略図

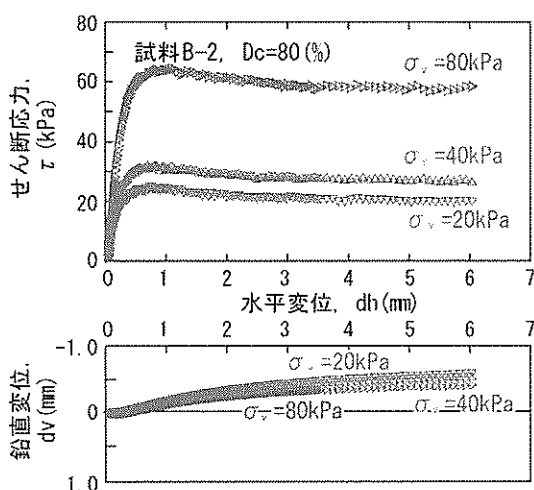


【水平変位～せん断応力, 水平変位～鉛直変位】

(a) 締固め度  $D_c=75\%$

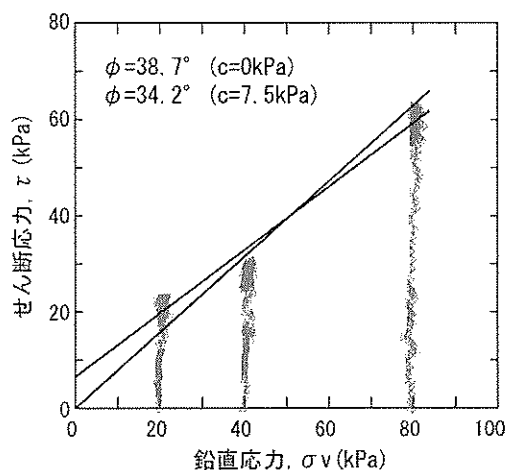


【鉛直応力～せん断応力】

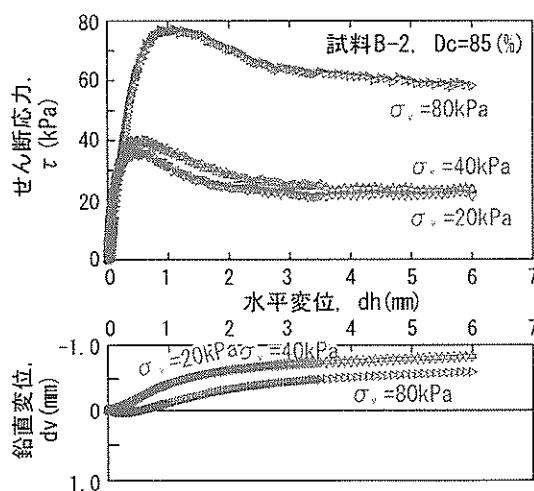


【水平変位～せん断応力, 水平変位～鉛直変位】

(b) 締固め度  $D_c=80\%$

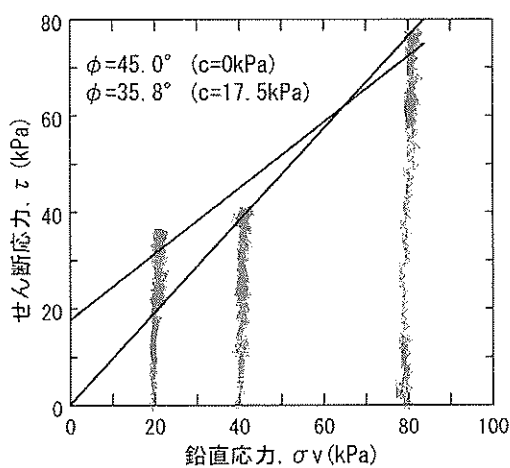


【鉛直応力～せん断応力】



【水平変位～せん断応力, 水平変位～鉛直変位】

(c) 締固め度  $D_c=85\%$



【鉛直応力～せん断応力】

図-4 B-2試料の締固め度による一面せん断試験結果

なお、粘着力を $c_a=0$ として求めた場合、締固め度が85%以上であれば、盛土材料の土質定数の規定<sup>12)</sup>として要求されている内部摩擦角 $35^\circ$ 以上の条件は十分に満たしていることがわかる。水浸試験では一面せん断試験と同じ供試体を作製し、せん断箱内に設置した後、不飽和状態で圧密過程を実施した。その後、3t法による圧密終了と判断される時点以後も圧密過程を継続し、水浸箱に水を入れ、時間と圧縮ひずみの関係を求めた。その結果を図-5に示している。A-1、A-2、B-2試料は締固め度が85%の時、沈下の変状は見られなかったがB-1試料ではわずかな沈下が発生していることがわかる。

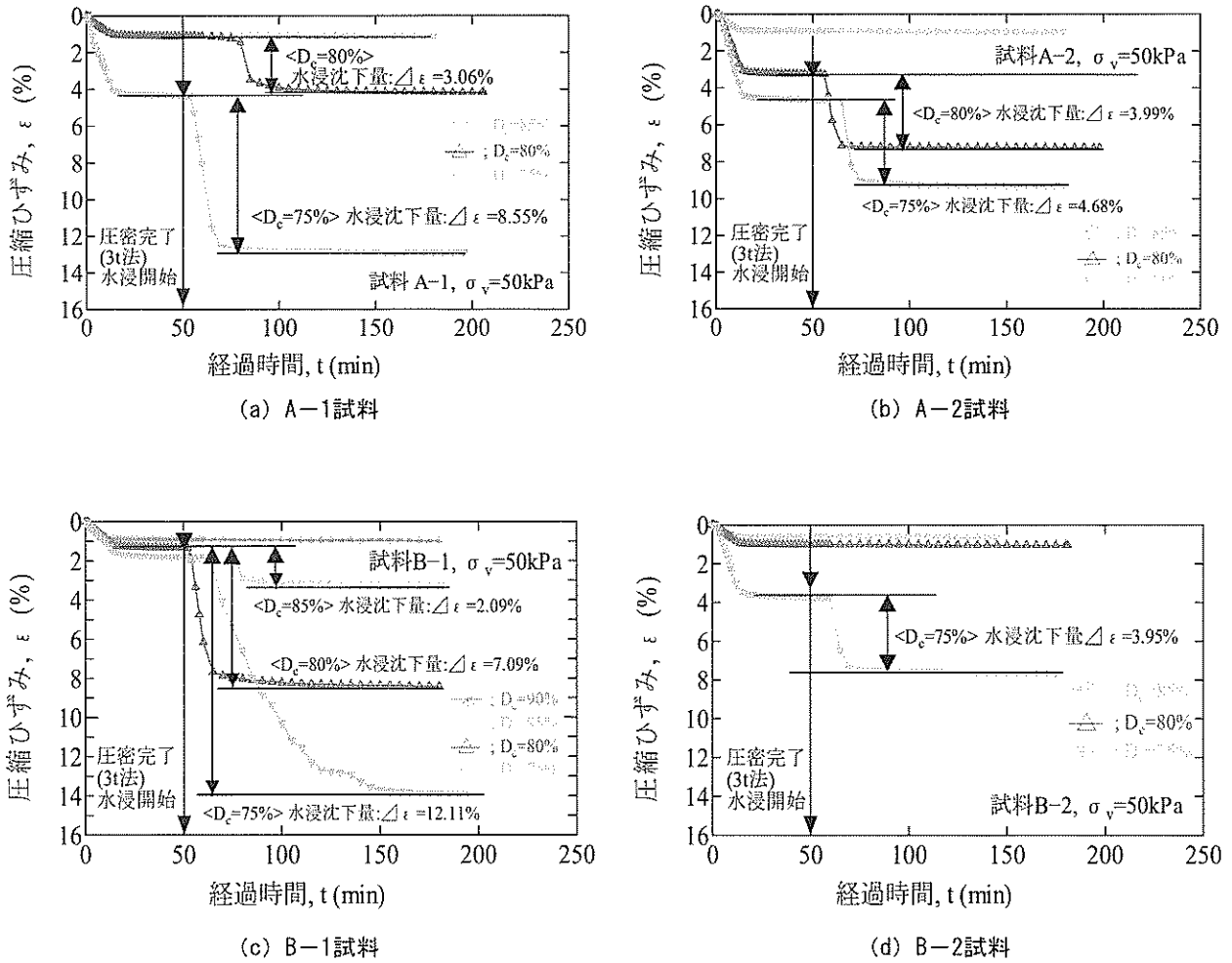


図-5 各試料の時間と圧縮ひずみ関係

#### 4. 試験結果の考察

##### 4. 1 締固め度が地盤強度に及ぼす影響

試料B-1、B-2の締固め度を、2.0mm以下試料を用いて求められた締固め曲線（最大乾燥密度、最適含水比含む）を基に再計算すると表-4 ようになる。図-6は、試料B-1、B-2の2mm以下試料を用いて行った一面せん断試験より得られた内部摩擦角と再計算した締固め度の関係を示したものである。図からB-1、B-2の場合、最大乾燥密度（ $\rho_{dmax}$ ）即ち、締固め度が高くなるにつれて内部摩擦角も増加する傾向があることが分かる。

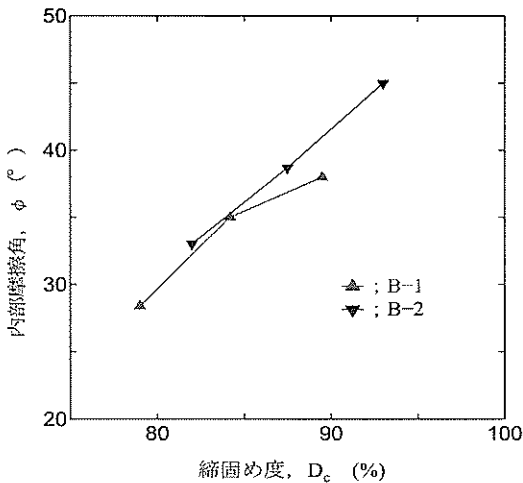


図-6 縮固め度と内部摩擦角の関係 ( $c_d=0$ )

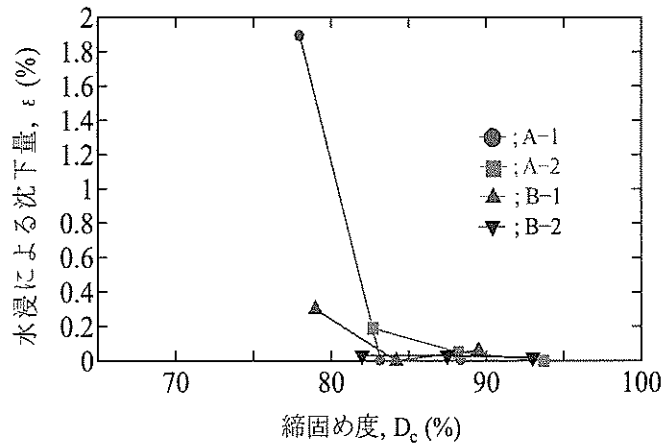


図-7 縮固め度と沈下量の関係 (19.0mm以下基準)

表-4 最大粒径19.0mmの試料基準として計算した縮固め度

| 試料  | 縮固め度 ( $D_c$ ) |              |              |
|-----|----------------|--------------|--------------|
|     | 75% (19.0mm)   | 80% (19.0mm) | 85% (19.0mm) |
| B-1 | 79.0 %         | 84.2 %       | 89.5 %       |
| B-2 | 82.0 %         | 87.5 %       | 93.0 %       |

その理由は、図-4に示すB-2試料のせん断変位～せん断応力関係において、縮固め度が増加するにつれてせん断応力が増加し最大値 ( $\tau_{max}$ ) に達する。その後、せん断応力は減って一定値に収束するような傾向を見せる。また、水平変位～鉛直変位関係を見ると、初期には鉛直変位が若干収縮し、その後膨張の状態に変わってほぼ収束することが確認できた。一方、縮固め度が低い試料では、水平変位の増加につれせん断応力は一定の値まで増加して収束する傾向を示している。また、せん断過程の進行に伴って鉛直変位が体積収縮方向に生じ、一定値に収束することが分かる。このことは、試料の密度状態が、せん断時に行う体積変化 (ダイレイタンス) 特性と土のせん断強度に密接に関連していることを示している。

#### 4. 2 縮固め度が水浸沈下特性に及ぼす影響

全ての試料は、縮固め度が低ければ水浸による沈下量が増加することが分かる (図-7, 8参照)。つまり、不十分な縮固めがなされた場合には、水の浸透による沈下が起こり得るということが言える。この理由として、土粒子の接触部に内力として働いていたサクションが水浸によって解放され、土粒子が結合構造を維持できず移動したため変形が生じたことが考えられる。

そこでこの水浸沈下特性に土の種類が与える影響をを把握するために、最大乾燥密度ならびに土の細粒分の含有量 (図-1, 2参照) と水浸による圧縮沈下量の傾向を比較して見ると、縮固め度で求められる最大乾燥密度が低い程、また細粒分が多い程沈下する傾向がわかる。

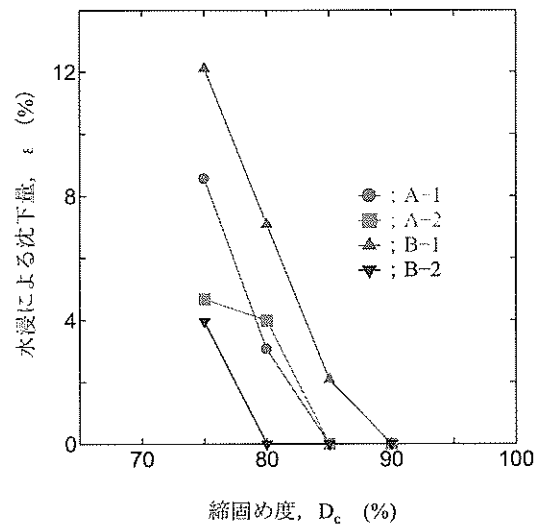


図-8 縮固め度と沈下量の関係 (2.0mm以下基準)

## 5. 結論

本研究では現場締固め度の変化が盛土材料の強度特性および変形特性に及ぼす影響を把握するため、室内試験を実施した。

- 1) 試料B-1とB-2の場合、締固め度の向上につれ内部摩擦角(B-1: 28.4° ~ 38.0°, B-2: 33.0° ~ 45.0°)も増加する傾向が見られた。
- 2) 試験に用いた全試料について、締固め度が低くなると水浸による沈下量が増加する傾向が見られた(B-1: 0% ~ 12.11%)。
- 3) 不十分な締固めがなされた場合、水の浸透によるサクシオン解放が沈下を発生させることが考えられる。
- 4) 以上の結果、今後、盛土の性能向上のために様々な盛土材料について強度特性および変形特性を求めることが必要と考えられる。

## 参 考 文 献

- 1) 三浦みなみ, 川尻俊三, 澁谷啓, 高橋正和: 締固めた細粒分質礫質砂の微小~小ひずみ領域の変形挙動に及ぼす排水条件の影響, 建設工学研究所論文報告集第52号, p p. 61~66, 2010.
- 2) 上本雄也, 澁谷啓, 橋元洋典, 川尻俊三: 砂礫盛土材の締固め特性および変形・強度特性に及ぼす粒度特性の影響, 社団法人 地盤工学会, 地盤工学ジャーナル, Vol.6, No.2, p p. 181~190, 2011.
- 3) 上本雄也, 澁谷啓, 川尻俊三, 高橋正和: 築堤中に採取したある河川堤防盛土の締固め特性について, 建設工学研究所論文報告集第52号, p p. 67~72, 2010.
- 4) 藤田武彦, 山中敏和, 石黒昌信, 中里誠司: 南紀新空港造成高盛土における水浸沈下について, 土木学会論文集No.575, III-40, p p. 231~242, 1997.
- 5) 加藤正司: 締固めた粘性土の等方応力条件下におけるコラプス時の変形特性とコラプス後のせん断特性, 土木学会論文集No.596, III-43, p p. 271~281, 1998.
- 6) Barden, L., Maderdor, A.O. and Sides, G.R.: Volume change characteristics of unsaturated clay, Proc. ASCE, Vol.95, No.SMI, p p.35~51, 1969.
- 7) 鳥山暁司: 締固め土の水浸沈下について, Bull. Fac. Life Env. Sci. Shimane Univ., 8, p p. 81~86, 2003.
- 8) 深見知亨, 大島昭彦, 高田直俊, 住武人: 一面せん断定圧試験における供試体寸法と許容粒径の関係(第2報), 土木学会第52回年次学術講演会概要集, III-A31, p p. 62~63, 1997.
- 9) 許晋碩: 各種地盤構造物の設計・施工トラブルの要因とその対策に関する事例研究, 神戸大学大学院工学研究科, 博士論文, 2012.
- 10) 地盤工学会地盤調査法改訂編集委員会: 地盤材料試験の方法と解説, 社団法人 地盤工学会, p p. 661~695, 2009.
- 11) 澁谷啓, 三田地利之, 高田増男: 粘性土の一面せん断試験に関するいくつかの提案, 直接型せん断試験の方法と適用に関するシンポジウム, 社団法人地盤工学会, p p. 127~134, 1995.
- 12) 日本道路公団: 日本道路公団: 設計要領第一集, 第1編土工, p. 28, 1983.

## 著 者

|      |                         |
|------|-------------------------|
| 李 俊憲 | 神戸大学大学院博士後期課程, 地盤工学     |
| 許 晋碩 | 神戸大学大学院, 博士(工学), 地盤工学   |
| 金 秉洙 | 神戸大学大学院, 博士(工学), 地盤工学   |
| 山本 拓 | 神戸大学大学院博士前期課程, 地盤工学     |
| 澁谷 啓 | 所員, 博士(工学), Ph.D., 地盤工学 |