築堤材に用いられる砂質シルトの強度・透水性・せん断剛性に及ぼす締固め管理条件の影響

横浜 勝司¹・三浦 清一²・松村 聡³

¹正会員 北海道大学大学院助教 工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)
E-mail: yokohm@eng.hokudai.ac.jp

²フェロー 北海道大学大学院教授 工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)
E-mail: s-miura@eng.hokudai.ac.jp

³学生会員 北海道大学大学院 工学院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)
E-mail: matsumura@eng.hokudai.ac.jp

築堤材として用いられる砂質シルトを対象として、締固め管理条件の違いによる力学特性の変化を評価するために一連の試験が行われた。締固め度および締固め時の含水比を調整した供試体を準備し、非排水三軸圧縮試験、せん断剛性率測定および変水位透水試験を実施した。試験結果より、締固め度および締固め時の含水状態が異なると非排水せん断強度、せん断剛性率および透水係数が異なることが明らかとなった。これらの試験結果の相互関係を具体的に検討することで、締固め条件が力学特性に及ぼす影響を議論している。さらに、供試体内の間隙形状および土粒子配列パターンの考察から、締固め条件の違いによる力学特性変化のメカニズムを考察している。

Key Words : compaction, strength, permeability, shear modulus, embankment material

1. まえがき

近年、地震や豪雨等により、設計手順に従って構築した各種盛土構造物の崩壊が多発している。このような崩壊を防ぐためには盛土の建設時あるいは補修時に土材料を適切に締固め、盛土内の間隙水を排出させることが重要である。つまり、十分な締固めを行って盛土構造物に所定の力学性能を持たせることで、盛土構造物に求めた目的や機能（道路盛土であれば安定した車両走行性の確保、河川堤防であれば、洪水の防止や遮水性等）を発揮させることが重要である。

これまで、品質の高い盛土を構築するために十分な締固めが必要であるとされている¹⁾。また、締固め度と各種力学特性の関係^{2), 3)}が広く認識されていることもあり、締固め土工では基本的に密度情報に基づく施工管理がなされるが、空気間隙率および飽和度も併せて管理することで種々の地盤材料による盛土の品質管理が進められている。しかし、近年でも盛土崩壊事例が減少しないことから、締固め完了後の盛土構造物の性能を保証するために強度、耐震性および透水性等の力学特性の詳細を示し、設定し

た締固め管理手順が妥当なものかどうかを説明することの必要性が指摘されている^{4), 5)}。

最近では、盛土材として用いられる粗粒土に関して締固め特性と力学特性の関連性を詳細に調べた研究^{例えば 6), 7)}も行われているが、多種多様な土質材料の施工管理の高度化を図るためには、種々の土質材料での締固め特性と力学特性の相関性を調べ、その研究成果を蓄積する必要がある。また、これらの研究データを締固めの実務に反映させるためには、締固め度の違いによる強度の変化だけでなく、透水性や盛土の変形挙動解析等に必要となるパラメータであるせん断剛性等との相互関係についても示しておくことが重要となる。

以上のことから、本研究では、実際に築堤材料として用いられた砂質シルト^{8), 9)}に着目して、その試料による締固め条件と各種力学特性との関係を調べている。なお、締固め土の力学特性を厳密に議論するためには不飽和土の挙動を支配する要因であるサクション等についても考察することが不可欠である。しかし、ここでは締固め土の基本的な力学特性を詳細に調べるために、飽和条件における一連の圧密非排水三軸圧縮試験、せん断剛性率の測定および変水

図-1 粒径加積曲線

位透水試験を実施している。これは本研究では、締固め土の力学安定性が低下する条件が、飽和状態に至ったケースであるとの考えに基づいている。これら一連の試験結果から締固め条件の違いと強度、透水性および盛土の変形挙動解析等に必須となるパラメータであるせん断剛性との相互関係を調べた。また、得られた試験結果に基づいて、締固め度の違いによる力学特性変化のメカニズムについて考察を試みている。一般的には河川堤防盛土の設計・施工では、最適含水比よりも若干高い含水比条件での締固め施工が強度および遮水性の点で推奨されている。また、最適含水比よりも若干低い含水比で締固めると吸水膨張の影響により力学特性の低下も指摘されている¹⁰⁾。しかし、本研究では締固め条件と力学特性の関係を改めて詳細に評価することを目的として、最適含水比を含めて乾燥および湿潤条件下で締固められた供試体を対象としている。

2. 対象試料の概要

本研究で対象とした試料は、北海道池田町で採取された砂質シルト⁹⁾（以降、I soil と略称）である。この試料は河川堤防盛土材料として用いられた試料である。

図-1 は粒径加積曲線を示す。これより、細粒分含有量が 68.1%，最大粒径 D_{max} が 2.0mm である、いわゆる細粒土としてみなされる試料であることがわかる。また、土粒子の密度 $\rho_s=2.578\text{g/cm}^3$ ，液性限界 $w_L=46.8\%$ ，塑性限界 $w_P=34.5\%$ ，塑性指数 $IP=12.3$ であることから、本試料は低塑性の特徴を有する砂質シルトとして分類される。

本試料の締固め特性を図-2 および表-1 に整理した。本研究で用いた供試体作成用のモールド（内径 100mm，高さ 150mm）による締固め試験結果

図-2 締固め曲線

表-1 締固め試験結果

	TEST1 (1.13Ec)	A-b (1.0Ec)	A-c (1.0Ec)
ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.446	1.419	1.405
w_{opt} (%)	25.0	25.0	28.2

（TEST1 と表記）と A-b 法および A-c 法¹¹⁾による結果が示されている。TEST1 では試料を乾燥・非繰返し法で準備した。用いたランマーは質量 2.5kg である。ここでは供試体作成用モールドの高さが標準の締固めモールド¹¹⁾とは異なるため、本研究では独自の締固め曲線を得ることとした。ここでは、モールドの容積が 1182cm³ であるのに対して質量 2.5kg のランマーを落下高さ 30cm から 1 層 25 回の打撃を 4 層分実施して締固め曲線を得、その結果に基づいて最大乾燥密度および最適含水比を決定した。この際の締固めエネルギーは、A-b 法や A-c 法の締固めエネルギー（550kJ/m³，ここでは 1.0Ec と表記する）の 1.13 倍となっている。なお、ここで新たに得た締固め曲線と標準的な締固め試験（A-b 法および A-c 法）での結果を比較して、締固め特性を調べている。A-b 法および A-c 法での含水比の範囲は、TEST1 で得られた締固め曲線を考慮して決定した。

図-2 および表-1 より TEST1（図-2，●印参照）では、他の 2 つの締固め曲線と比べ最大乾燥密度 ρ_{dmax} が若干高く、具体的には A-b 法の ρ_{dmax} を基準にして 1.9% だけ高い結果が得られた。一方、最適含水比は 25% であり A-b 法と同じとなった。

次に、締固めエネルギーが同じ条件で、試料の準備方法が異なる A-b 法と A-c 法（それぞれ図-2 中の△および○印参照）では、最適含水比がそれぞれ 25% および 28% として得られた。このことから、締固め試験時の試料の準備法の違いは最適含水比に 3% もの差を生じさせるが、最大乾燥密度値には顕

図-3 供試体作成条件

著な差をもたらさないことが確認された。

以上のような締固め特性を有する試料に関して、本研究では、TEST1 で得られた最大乾燥密度 $\rho_{dmax}=1.446\text{g/cm}^3$ および最適含水比 $w_{opt}=25\%$ を締固め特性の指票値として用いている。

3. 供試体作成および試験方法

(1) 供試体作成方法

締固め度および締固めエネルギーの違いによる力学特性の変化を調べるために、一連の試験を実施した。ここでは、供試体作成および試験手順を述べる。

乾燥させた試料を用意し、ゴムハンマー等で団粒化している粒子をほぐす。2mm ふるいを通過した試料のみを集めて、霧吹きにより水を加えよく混合する。それらの試料を所定の締固めエネルギーで突固めて供試体を作成している。

図-3 は、供試体を作成する時の締固め含水比と乾燥密度の関係を示す。図中には本研究で実施した非排水三軸圧縮試験 (CU 試験)、ベンダーエレメント試験、透水試験で用いた供試体の条件を示している。図中の最適含水比付近の供試体 (○印参照) は、締固め度の違いに着目するために準備されている。次いで、締固め時における含水状態の違いの影響を見るために、最適含水比より乾燥側および湿潤側条件でも供試体を作成した。図中では乾燥および湿潤の作成条件をそれぞれ△印および□印で示している。ここでは、最適含水比付近、乾燥側条件、湿潤側条件での供試体の締固め度を $D_{c\text{ opt}}$ 、 $D_{c\text{ dry}}$ 、 $D_{c\text{ wet}}$ と表記し初期状態の違いを区別している。

締固め供試体を試験機に設置し飽和化を図る。供試体内に CO_2 を供給後、必要に応じて二重負圧法¹²⁾を適用し、さらに脱気水を通水することで供試体の飽和化を図った。その後、背圧 200kPa を載荷して

図-4 ベンダーエレメント試験装置

図-5 透水試験装置

間隙圧係数 B 値を確認している。 B 値が 0.96 以上に達した場合には飽和状態と判断し試験を継続した。使用したメンブレンは厚さ 0.3mm である。本研究で適用する拘束圧レベルおよび試験準備に長時間を要することを考慮して厚さ 0.3mm のメンブレンを採用した。なおメンブレン厚さによる試験結果の補正はしていない。

飽和化作業に引き続き、所定の有効拘束圧 σ'_c による等方圧密を実施した。圧密時の排水量および軸変位量を記録し、排水量が供試体の体積 (初期状態) を基準として $1.0 \times 10^{-4} \%$ /min 以下となった状態を圧密完了としている。なお、I soil での飽和・圧密段階における締固め度の変化は 1% 程度であり、飽和および圧密による間隙比および締固め度の変化は小さいことが確認されている¹³⁾。

図-6 最大主応力差 $q_{\max}$ - D_c 関係

(2) 試験方法

圧密非排水三軸圧縮試験（CU 試験）では、0.1%/min の軸ひずみ速度で载荷を行った。初期有効拘束圧 σ'_c は 50kPa, 100kPa, 150kPa とした。

次いで、供試体の微小変形レベルにおける変形性状を見るためにベンダーエレメント試験でせん断剛性率を測定した。図-4 は用いた試験装置の概略図を示す。本装置は直径 70mm の円筒形供試体用の三軸試験装置である。トップキャップおよびペDESTAL にベンダーエレメント端子が設置されている。供試体の飽和後に 50kPa の有効拘束圧で等方圧密をし、せん断剛性率 G_{BE} の測定を行った^{14), 15)}。供試体内を伝播するせん断波速度をオシロスコープで読み取り、S 波の伝播速度 Δt を測定している。せん断剛性率は式(1)のように求めている。

$$G_{BE} = \rho_t \cdot V_s^2 = \rho_t \cdot \left(\frac{L}{\Delta t} \right)^2 \quad (1)$$

ここで、 ρ_t ：供試体の湿潤密度、 V_s ：せん断波速度、 L ：供試体上下端に挿入されたベンダーエレメント間の距離、 Δt ：S 波の伝播時間である。

さらに本研究では、変水位透水試験を実施して透水性を調べている。用いた透水試験装置¹⁶⁾を図-5 に示す。本装置は 2 本のビュレットを有する三軸試験装置である。これらは供試体の上下端に接続される機構となっている。200kPa の背圧を供給した状態で 2 本のビュレット内の水位を調整し、供試体に所定の動水勾配を与える。CU 試験およびベンダーエレメント試験と同様に等方圧密をしながら鉛直方向の透水係数を測定した。なお、本試験中では過大な軸差応力が発生しないように軸応力および軸変位が常にコントロールされている。ここでは、漏水の影響を小さくするために透水係数の測定中も拘束圧の載

図-7 破壊ひずみ ϵ_f - D_c 関係

荷を継続することで、試料とメンブレンを密着させるようにした。

4. 試験結果と考察

(1) 強度特性

図-6 は CU 試験で得られた最大主応力差 $q_{\max}$ ($=\sigma'_1 - \sigma'_3 = 2c_u$, c_u ：非排水強度) と供試体作成時の締固め度 D_c の関係を示す。

まず、 $\sigma'_c = 50\text{kPa}$ では最適含水比での結果（図中の○印）に比べ、乾燥側および湿潤側（図中の△および□印）での $q_{\max}$ が確実に低いことがわかる。次に、 $\sigma'_c = 100\text{kPa}$ では締固め時の含水状態の違いが認められない。さらに、 $\sigma'_c = 150\text{kPa}$ では、湿潤側の $q_{\max}$ が最適含水比条件および乾燥側より高い傾向も見られる。この結果は、供試体を受ける拘束圧が異なると、乾燥側および湿潤側条件での $q_{\max}$ の大小関係が異なることを示している。したがって、締固め土の非排水せん断強度を適切に評価する際には、締固め時の含水状態および拘束圧の大きさを適切に考慮することが重要となる。

図-7 は破壊ひずみ発生挙動を調べるために、最大軸差応力 $q_{\max}$ 発生時の破壊ひずみ ϵ_f と締固め度 D_c の関係を示す。実務的には軸ひずみが小さいレベルでの非排水せん断強度および過剰間隙水圧発生量の評価が重要となるが、ここでは締固め供試体の基本的力学特性を調べるために、破壊ひずみを考察する。図より、最適含水比の供試体では、締固め度が 90% および 100% において、 ϵ_f がそれぞれ 3.5% および 11% になる傾向がみられた。一方、乾燥状態で作成された供試体では最適含水比での結果に比べて全体的に ϵ_f が 2~3% と小さく、湿潤状態では ϵ_f が 15% 近くに達する結果となった。つまり、この結果は破壊

図-8 $p'/\sigma'_c - q/\sigma'_c$ 関係
(a) $D_{c \text{ opt}} = 88.6 \sim 91.2\%$
(b) $D_{c \text{ opt}} = 99.6 \sim 103.0\%$

ひずみ量が締固め時の含水状態に依存することを示している。

次に、せん断時の応力状態の違いを表示するために、有効応力経路 $p'/\sigma'_c - q/\sigma'_c$ 関係として結果を整理した。ここで p' は有効平均主応力 ($p' = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3$)、 q は主応力差 ($q = \sigma'_1 - \sigma'_3$) である。図-8(a), (b) は最適含水比での締固め供試体における $D_{c \text{ opt}}$ がそれぞれ 88.6~91.2% および 99.6~103.0% で得られた結果を示す。まず、(a) のように締固め度が 90% 付近の場合では、応力比 q/σ'_c が最大でも 2.1 程度であり、応力比 q/σ'_c がピークに達した後、 q/σ'_c および p'/σ'_c が減少し続ける傾向にある。これは、過剰間隙水圧が増加し続けることに対応している。つまり、この条件では負のダイレイタンシー挙動が見られているといえる。また、図中の点線で示す応力経路（排水せん断時）との位置関係を見ると、せん断中は正の過剰間隙水圧が発生していることも伺える。それに対し、(b) では q/σ'_c の最大値が (a) での結果より高く、応力経路の形状も異なることが見られる。

これらの結果は、一般的に良好な締固め状態と考えられる 90% 以上の締固め度であっても、締固め度が異なると有効応力の変化挙動が大きく異なること

図-9 $p'/\sigma'_c - q/\sigma'_c$ 関係
(a) 乾燥側条件 $D_{c \text{ dry}} = 91.9 \sim 92.4\%$
(b) 湿潤側条件 $D_{c \text{ wet}} = 91.1 \sim 91.9\%$

を示唆している。より精密な締固め管理を行うためには崩壊に至るまでの盛土の有効応力挙動を考慮することが重要と考えられるが、できるだけ有効応力の減少を抑え、崩壊しにくい盛土を構築するためには、現在の締固め管理基準よりも高い締固め度が必要となることも考えられる。

図-9(a), (b) は乾燥側および湿潤側条件で作成された供試体での $p'/\sigma'_c - q/\sigma'_c$ 関係を示す。いずれも締固め度は 92% 付近である。両者を比較すると、いずれも応力比 q/σ'_c が 3.0 で最大となることがわかる。しかし、両者の応力経路の形状が大きく異なることも認められる。まず、(a) では σ'_c の大きさに異なるが、例えば、 $\sigma'_c = 50\text{kPa}$ では p'/σ'_c が 1.0 から 1.8 の範囲で推移していることがわかる。一方、(b) では $\sigma'_c = 50\text{kPa}$ の結果に関して、 p'/σ'_c は一旦 0.7 まで減少した後増加し続ける挙動が見られた。これより、湿潤側条件では乾燥側条件で見られた結果（図-10(a) 参照）よりも、せん断による平均有効主応力および過剰間隙水圧の変化が顕著であると考えられる。

これらの比較より、類似した締固め度を有する供試体においても締固め時の含水状態が異なることで、非排水せん断時の有効応力の変化傾向が大きく異なる

 図-10 締固め含水比- q_{max} 関係

(a) 締固め曲線, (b) q_{max} ($\sigma'_c=50$ kPa),
(c) q_{max} ($\sigma'_c=150$ kPa)

ることが示された。

強度特性と締固め条件との関係をさらに調べるために、図-10(a), (b), (c)はそれぞれ締固め曲線、 $\sigma'_c=50$ kPa および 150 kPa での q_{max} と締固め含水比の関係を示す。図中には、締固め曲線を得た際と同一エネルギーで作成された供試体での q_{max} の変化傾向を示すための曲線を示している。(b)より、実線で示された同一エネルギー条件で比較すると、含水比 15%および 32%の供試体の q_{max} は最適含水比での値の 30%程度であることがわかる。

さらに、締固め度 D_c が 93%から 95%の範囲で比較した場合でも、最適含水比付近では他に比べて与えられた締固めエネルギーが低いにも関わらず、 q_{max} が高いことが見られる。一方、(c)で示す $\sigma'_c=150$ kPa のケースでも、エネルギー同一条件では最適含水比において q_{max} が最も高いことがわかる。特に $D_{c,dry}=92.4\%$ および $D_{c,wet}=92.5\%$ での結果を比較すると、締固め含水比の増加に伴う q_{max} の増加傾向が見られた。この傾向は(b)で示した $\sigma'_c=50$ kPa のケースとは異なる。つまり、これらの図より、同一の

 図-11 締固め度 D_c -せん断剛性率 G_{BE} 関係

 図-12 締固め含水比-せん断剛性率 G_{BE} 関係

(a) 締固め曲線, (b) G_{BE}

締固め度条件下においても、締固め時の含水状態が異なることで q_{max} が変化すること、さらに拘束圧レベルの違いにより乾燥側および湿潤側条件の q_{max} の両者の大小関係が異なることが読取れる。

以上より、締固めによる土の強度特性を適切に評価するためには、締固め度および含水状態および締固め後に受ける拘束圧の大きさを明確にしておくことが重要であると考えられる。

(2) せん断剛性

締固め土の変形特性を評価するために、供試体のせん断剛性率を調べた。図-11 はせん断剛性率 G_{BE} と締固め度 D_c の対応関係を示す。図より、締固め度 D_c の増加に伴い、せん断剛性率 G_{BE} が高くなる傾向が見られる。また、最適含水比よりも高い含水比で締固めた場合(図中、□印参照)では、他に比べて若干高い傾向にある。

次に、締固め条件の相違によるせん断剛性率の変化を見るために、図-12(a), (b)はそれぞれ、締固

 図-13 締固め度 D_c - 透水係数 k 関係

め曲線およびせん断剛性率 G_{BE} と含水比との関係を示している。なお、(b)の実線は、締固め試験と同一エネルギーで作成された供試体での結果を示す。また、図中には、最適含水比付近での締固め度が異なる結果も示している。

図より、最適含水比よりも湿潤側 ($w_i=28\%$) でのせん断剛性率 G_{BE} が、最大乾燥密度での値より若干高いことがわかる。この結果は、最適含水比より湿潤側条件下での締固めにより、高いせん断剛性率を有する土粒子配列が形成されていることを示唆している。

(3) 透水性

図-13 は透水係数 k と締固め度 D_c の関係を示す。ここで、 k は水温 15°C で換算した透水係数である。図より、締固め度が高いと透水係数が低くなる傾向が見られる。具体的には、締固め度 D_c が 90% から 97% になると透水係数が 0.1 倍になることがわかる。

次に、締固め度 D_c が 96% のデータに着目すると、特に最適含水比よりも乾燥側条件下で作成された供試体 (Δ 印参照) の透水係数が高いことも認められた。

図-14(a) および (b) はそれぞれ、締固め曲線および得られた透水係数 k と締固め含水比との関係を示す。図中には、最適含水比付近での締固め度が異なる結果も併記している。図より、最適含水比 ($w_{opt}=25\%$) および含水比 27% での締固め供試体の透水係数が最も低いことが見られる。このことから、最適含水比およびそれより若干湿潤側条件下で締固められた場合では、鉛直方向透水性が最小になるような土粒子配列が形成されることが考えられる。

次に、透水性の変化挙動についてさらに検討を進める。図-15 は各試験で得られた k を最適含水比条件下で最も高い締固め度 ($D_{c, opt}=96.1\%$) で得られた透水係数 (以後 k^* とする) で正規化した k/k^* と締固

 図-14 締固め含水比 - 透水係数 k 関係

(a) 締固め曲線, (b) 透水係数 k

 図-15 締固め度 D_c - k/k^* 関係

め度 D_c との関係として示す。これより、締固め度 D_c の増加に伴い k/k^* が小さくなる傾向が見られる。特に、締固め度が 97% から 90% まで低くなると k/k^* は 10 倍以上になることがわかる。さらに、図中の締固め度 D_c が 96% 付近で着目すると、締固め含水比が異なると k/k^* も異なる結果が得られた。特に、乾燥側条件下での供試体 (Δ 印参照) の k/k^* 値が他のケースでの 4 倍に達していることが見られる。以上のことから、締固め条件が異なると供試体内の間隙形状が変化する様相を確実に反映しているのではないかと考えられる。

(4) 強度、せん断剛性、透水係数の相互関係

地盤材料の力学特性を考慮して高品質な盛土の設計を行うためには、締固め条件と力学特性の相互関係を詳細に考察し、そこで得た成果を積極的に活用することが望まれる。ここでは、強度 - せん断剛性率 - 透水係数の相互関係について得られた結果を基

表-2 試験結果の一覧

D_c (%)	$q_{\max}$ (kN/m ²) (at $\sigma'_c=50$ kPa)			k/k^*			G_{BE}/G_{BE}^*		
	Optimum	Drier	Wetter	Optimum	Drier	Wetter	Optimum	Drier	Wetter
85	66.5	---	---	61.3	---	---	0.46	---	---
87.5	96.5	---	---	21.5	---	---	0.53	---	---
90	139.0	---	---	11.0	---	---	0.61	---	---
95	290.5	182.0	182.0	2.7	4.2	1.1	0.81	0.81	1.17
97	389.5	---	---	1.0	---	---	1.0	---	---

図-16 強度と透水性および剛性変化

 (a) $q_{\max}-k/k^*$ 関係, (b) $q_{\max}-G_{BE}/G_{BE}^*$ 関係

に検証を試みる。

表-2 は前述した一連の試験結果を所定の締固め度 D_c に対応する $q_{\max}$, k/k^* 値および G_{BE}/G_{BE}^* 値の一覧として示している。ここで G_{BE}^* は $D_c=97\%$ のせん断剛性率とした。これらのデータを基に以下の考察を進めた。

図-16(a), (b) はそれぞれ $q_{\max}-k/k^*$ 関係および $q_{\max}-G_{BE}/G_{BE}^*$ 関係を示す。まず (a) では、 k/k^* 値が大きくなるほど $q_{\max}$ が減少することがわかる。つまり、透水性が高くなるのに伴い締固め度または乾燥密度が小さくなり間隙比が高くなるために、同時に非排水強度が低下する結果が得られたと考えられる。さらに、 $D_c=97\%$ の結果と比較して、同程度の締固め度でかつ乾燥側条件下 (図中の△印) で作成された場合には、 $q_{\max}$ が半分程度で透水性が 4 倍程度高くなることが伺える。一方、湿潤側条件下 (図中の□印) では、 $D_c=97\%$ の透水性と類似しているが、 $q_{\max}$ が半分程度しか発揮されていないことが見られる。次に、(b) より最適含水比条件では、 G_{BE}/G_{BE}^* が高いほど $q_{\max}$ が高くなる傾向が認められる。また、 $D_c=95\%$ 付近のデータを比較すると乾燥側および湿潤側条件で $q_{\max}$ が 37% 低下している。さらに G_{BE}/G_{BE}^* は乾燥側および湿潤側でそれぞれ 0.81 および 1.17 となる。これらの結果より、締

 図-17 $k/k^*-G_{BE}/G_{BE}^*$ 関係

固め時の含水条件が異なると、微小ひずみレベルのせん断剛性率と中・大ひずみレベルの非排水強度との相関性が変わっていくことになると想定される。

図-17 は k/k^* と G_{BE}/G_{BE}^* の関係を示す。これより、透水性とせん断波速度の伝播度合いには一義的な関係が存在しているようである。具体的には、 k/k^* が 1.0 から 10 まで増加すると G_{BE}/G_{BE}^* では 40% 程度低下する。つまり、透水性が高くなるとせん断剛性が低下するような土粒子配列になると考えられる。

以上のような考察を表-3 に整理した。これより、本研究で対象とした低塑性の砂質シルトでは、同一

表-3 締固め条件と力学特性の相関

		締固め時含水比 w		
		乾燥側 条件	最適 含水比	湿潤側 条件
同一の 締固め エネルギー	乾燥密度	低い	高い	低い
	非排水 せん断 強度	低い	高い	低い
	破壊ひずみ	小さい	中程度	大きい
	透水性 (鉛直)	高い	低い	低い
	せん断剛性	低い	高い	高い
同一の 締固め 度	必要となる 締固め エネルギー	高い	低い	高い
	非排水 せん断 強度	低い	高い	低い
	破壊ひずみ	小さい	中程度	大きい
	透水性 (鉛直)	高い	中程度	低い
	せん断剛性	やや低い	やや低い	高い

締固めエネルギー条件または、同一締固め度と比較しても、試料の含水比をコントロールして最適含水比での締固めを行うことが非排水せん断強度に関して最も有利であると考えられる。

最適含水比より乾燥および湿潤側条件下での締固めでは、所定の締固め度にするためのエネルギーが高い割には、高いせん断強度を期待できないことが考えられる。しかし、高い透水性が要求されるようなケースでは、せん断強度が最適含水比で作成された供試体での値より低減することを理解した上で、最適含水比より乾燥側条件下で締固めを行う必要がある。

一方、盛土の遮水性を高めたり、盛土が崩壊に至るまでの挙動をよりねばり強くしたい場合では、最適含水比より若干高い含水条件下での締固め施工をすることも有効と考えられる。

以下、前述までに得た結果から供試体内の土粒子配列パターンを考察し、締固め土の力学特性の変化メカニズムの説明を試みる。強度異方性と粒子配向の関係^{例えは 17), 18), 19)}については、既に多くの知見が得られているが、本研究では得られた試験結果を基に、締固め条件の違いによる粒子配列変化の検討を試みた。図-18 は透水性と剛性を基に考察した締固め条件の違いによる供試体の土粒子配列変化の概念図を示している。ここでは、供試体内の粗粒分と細粒分を区別して図示している。

まず、本試料の細粒分含有率は 68.1%と高いことから、透水係数は供試体内の細粒分の配置に影響されると仮定してみる。さらに、せん断波が主として

図-18 土粒子配列変化の概念図

供試体内の粗粒分を伝播しやすい¹⁴⁾こと、砂の室内要素試験で得られた堆積構造と強度および軸ひずみ発生挙動の関係^{17), 18)}を参考にして、ここでは、締固め条件と粒子配列パターンを次のように推察してみた。

湿潤側条件下では鉛直方向の透水性が低く、せん断剛性率が若干高い結果を示すことから、せん断波速度が伝播しやすい粗粒土の長軸方向が供試体の軸方向と近い傾向にあると推測できる。周辺の細粒土では水平方向の配列が卓越し鉛直透水性が低くなると想像できる。一方、乾燥側条件下では湿潤側条件下とは逆に、粗粒分では水平方向の配列が卓越し、周辺の細粒分では鉛直方向に卓越した配列となって透水性が高くなると予想される。

以上のように、本研究で得た試験結果から想像すると、供試体内部での細粒分と粗粒分の土粒子配列のパターンが締固め条件によって異なることで力学特性変化が生じるのではないかと考えられる。

5. 結論

締固め土の力学特性の議論にはサクシオン等の影響を検討する必要があるが、本研究では力学安定性が低下する状態であると考えられる飽和条件下での一連の試験を実施した。その結果より以下の結論を得た。

- (1) 非排水せん断強度に関しては、最適含水比付近で締固められた供試体で最も高くなる。また、締固め度が同じ条件での比較では、締固め含水比によって強度が異なる結果が得られた。破壊ひずみは、湿潤側条件下で作成された供試体で大きく、乾燥側条件下の供試体で小さくなる。

このように、せん断時の変形挙動は締固め条件に大きく影響されることも明らかにされた。

- (2) 締固め条件と透水係数およびせん断剛性率の関係が示された。特に、最適含水比より低い含水比で締固めた場合では透水係数が高くなることが示された。最適含水比より湿潤側の締固め供試体では、透水係数が小さくせん断剛性率が若干高くなる傾向が見られた。このような試験結果の相違は、土粒子配列構造と密接に関係していると考えられる。
- (3) 非排水せん断強度とせん断剛性および透水性との相互関係が明示された。特に、最適含水比で作成された供試体での力学特性変化が明確になった。さらに、締固め度が 95~97% 付近の含水条件の違いの影響も示された。これらの結果に基づいて、締固め土の粒子配列構造の変化を推察した。

謝辞：実験及び結果整理に伊藤啓介氏、細野雄太氏、高田諒平氏（北海道大学大学院）各氏の協力を得た。また、本研究には国土交通省建設技術研究開発費補助金（研究代表者 東京理科大 龍岡文夫教授）の補助が与えられた。末筆ながら記して深い感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 河上房義：土の締固め，土と基礎，Vol.24，No.4，pp.1-3，1974.
- 2) 久野悟郎：締固めと力学特性の相関，土と基礎，Vol.24，No.4，pp. 5-10，1974.
- 3) 伊勢田哲也，水野正憲：締固めた土の圧縮性状に関する研究，土木学会論文報告集，No.188，pp.45-52，1971.
- 4) 龍岡文夫：盛土の締固め管理と設計の協働の必要性，基礎工，Vol.37，No.7，pp.2-9，2009.
- 5) 龍岡文夫，望月勝己，望月一宏，國廣勇三：盛土施工における締固め度管理の目的について，第55回地盤工学ジャーナル，pp.27-34，2010.
- 6) 佐々木朋子，島峰徹夫，野澤伸一郎，木村勝，長谷川浩夫，龍岡文夫，平川大貴：種々の条件での繰返し及び単調載荷における粗粒材の変形強度特性，土木学会論文集C，Vol.64，No.2，pp.209-225，2008.
- 7) 平川大貴，川原園美幸，龍岡文夫：砂礫盛土材の変形強度特性に与える締固め条件の影響，土木学会論文集C，Vol.64，No.2，pp.253-266，2008.
- 8) 松村聡，横浜勝司，三浦清一，伊藤啓介：堤防締固め土の動的せん断挙動に及ぼす締固め度の影響とその評価法，地盤工学会北海道支部技術報告集，Vol.51，pp.229-236，2011.
- 9) 松村聡，三浦清一，横浜勝司，伊藤啓介：築堤材に用いた砂質シルトのせん断特性に及ぼす締固め条件の影響，土木学会第65回年次学術講演会概要集，pp.283-284，2010.
- 10) 財団法人国土技術研究センター：河川土工マニュアル，p.62-79，2009.
- 11) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説（二分冊の1），pp.373-376，2010.
- 12) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説（二分冊の2），pp.568-569，2010.
- 13) 松村聡，三浦清一，横浜勝司，高田諒平：締固め度管理された盛土の耐震性能評価に関する研究，地盤工学会北海道支部技術報告集，Vol.52，pp.95-102，2012.
- 14) Timpong, S. and Miura, S. : Shear moduli of volcanic soils, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.25, No.2, pp.157-165, 2005.
- 15) Timpong, S., Miura, S. and Yara, K. : Effect of consolidation time on shear modulus of crushable volcanic soils, *Soils and Foundations*, Vol.45, No.5, pp.115-119, 2005.
- 16) 横浜勝司，高橋寛子，三浦清一：粗粒火山灰土の飽和透水係数に関する粒径の影響，第43回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.1071-1072，2008.
- 17) Oda, M. : Initial fabrics and their relations to mechanical properties of granular material, *Soils and Foundations*, Vol.12, No.1, pp.17-36, 1972.
- 18) Miura, S. and Toki, S. : Anisotropy in mechanical properties and its simulation of sand sampled from natural deposits, *Soils and Foundations*, Vol.24, No.3, pp.69-84, 1984.
- 19) 鬼塚克忠，吉武茂樹：締固めた混合土の強度異方性について，土質工学会論文報告集，Vol. 23，No.4，pp.149-156，1983.

(2011. 9. 26 受付)

EFFECT OF COMPACTION CONDITION ON STRENGTH, PERMEABILITY AND SHEAR MODULUS OF SANDY SILT AS EMBANKMENT MATERIAL

Shoji YOKOHAMA, Seiichi MIURA and Satoshi MATSUMURA

In order to reveal change in mechanical characteristics of soil due to difference of compaction condition, a series of laboratory tests on sandy silt which was used as embankment material are performed. In those tests, shear strength, shear modulus and coefficient of permeability are measured under the various compaction conditions. Firstly, it is shown that shear strength of the specimen prepared at the optimum water content is higher than these of drier and wetter condition at the lower confining pressure. On the other hand, it is found that vertical permeability and shear modulus of the specimens depend on the degree of compaction and water content at compaction. At the same compaction energy, the permeability and the shear modulus show the minimum and maximum values at the wetter situation. Those experimental facts are reflected to the change in the soil fabric of specimen due to the compaction. In order to reveal the correlations among the shear strength, shear modulus and permeability coefficient prepared at the various compaction conditions are graphically-illustrated. Those explain that (1) increase of the permeability coefficient makes the strength reduction, (2) the shear strength increase in almost directly proportion to the shear modulus of compacted specimen. In this study, it is attempted to express the patterns for fabrics of compacted soil. At the compaction under drier condition, the finer particles generally stand up and coarse particles lay horizontally. By contrast, under wetter condition, the finer particles lay horizontally and coarse particles almost stand up. Those may explain reasonably the effects of condition of compaction on the mechanical properties.