Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-12-04

土/水/空気連成有限要素解析による締固め特性に及ぼす土質定数の影響の検討

河井, 克之
坂本, 諭
Phommachanh, Viradeth
飯塚, 敦

(Citation)
土木学会論文集A2（応用力学）,68(2):I_299-I_306

(Issue Date)
2012

(Resource Type)
journal article

(Version)
Version of Record

(Rights)
©2012 公益社団法人 土木学会

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/90003362

土木学会論文集 A2（応用力学），Vol. 68, No. 2（応用力学論文集 Vol. 15），I_299-I_306, 2012.

土/水/空気連成有限要素解析による 締固め特性に及ぼす土質定数の影響の検討

Consideration of influences of soil parameters on compaction behavior with soil/water/air coupled F. E. code

河井克之 [1]・坂本諭 [2]・Phommachanh Viradeth[3]・飯塚敦 [4]
Katsuyuki KAWAI, Satoshi SAKAMOTO, Viradeth PHOMMACHANH, Atsushi IIZUKA

[1] 工博，神戸大学准教授，都市安全研究センター（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1）
[2] 工学士，神戸大学大学院工学研究科（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1）
[3] 工修，神戸大学大学院工学研究科（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1）
[4] 工博，神戸大学教授，都市安全研究センター（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1）

Compacted soil is widely used for earth structures. However, the mechanism of compaction has not been explained, so it is difficult to grasp distributions of stress, void ration, and soil moisture within compacted earth structure. Therefore, estimation of safety and stability of compacted earth structures exposed to natural disaster is complicated. Compaction is decreasing void ratio by applying stress under certain water content and pushing air out of soil mass. Thus, the mechanics of unsaturated soil, which includes air within void, is needed for understanding of compaction. In this study, we regarded compaction as compression and expansion phenomenon of unsaturated soil under drained air and undrained water conditions and formulated it in initial-boundary-value problem. Here, the influences of permeability and soil water retention characteristics on compaction were considered and static compaction tests were simulated. Moreover, multi-layered compaction was examined.

Key Words : *Compaction,Unsaturated soils,Water retention characteristics, Permeability*
キーワード：締固め，不飽和土，保水性，透水性

1. はじめに

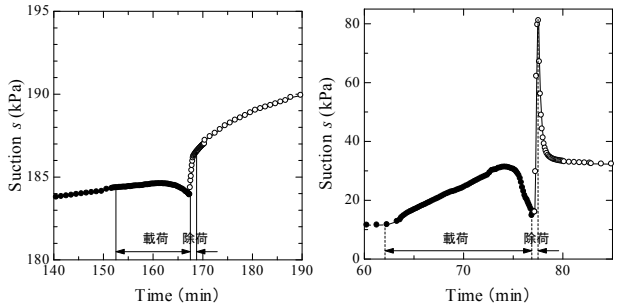
陸上の人工土構造物の多くは，締固めによって施工される．適切な締固めは，土材料のせん断強度を高め，圧縮性，透水性を低減することができ，強固な土構造物建設を成すことができる．締固めの基本的な考え方を与えたのは，Proctor[1)]の最適含水比の概念であり，一定の締固め方法のもとで含水比の異なる試料の締固めを行うとある含水比で乾燥密度がピークを示すというものである．しかし，この考え方は実験的に観察されるものであり，土の力学体系の中で説明されていない．そのため，室内締固め試験結果から得られた，最適含水比，最大乾燥密度が，実施工で実現できないことが多くある．締固めは，締固め方法やスケールに大きく依存する．締固めのこの様な特性を把握し，最適な締固め施工法を検討するためには，力学的に締固め現象を表す必要がある．

本研究では，“締固め”を不飽和土の排気・非排水条件下での圧縮・除荷と捉え，初期値・境界値問題の中でモデル化することを試みている．ここでは，特に保水性，透水性といった直接力学的な変形・強度に寄与しない土質定数に注目し，締固め品質に及ぼす影響を検討する．

2. これまでの研究と本論文の目的

長い間，締固めが力学現象として，説明されなかったのは，締固め土が土粒子間隙に空気相を含む不飽和土であること起因する．近年，不飽和土の力学体系が整備され，締固めを不飽和土の力学として捉えるようになってきた．

河井ら [2)]は，含水比調整したシルト質材料を圧密容器内で静的にひずみ制御で締固め，そのときのサクション挙動を計測した(図-1)．その結果，締固め力載荷時にはサクションが低下し，除荷と同時に増加することを明らかにした．また，締固めに要した最大荷重のコンターが締固め曲線に一致すること(図-2)，締固められた供試体内に生じるサクションの等値線を締固め曲線上に示した．この実験結果か



(a) 低含水比試料　　(b) 高含水比試料

図-1　静的締固め試験中のサクション変化 [2)]

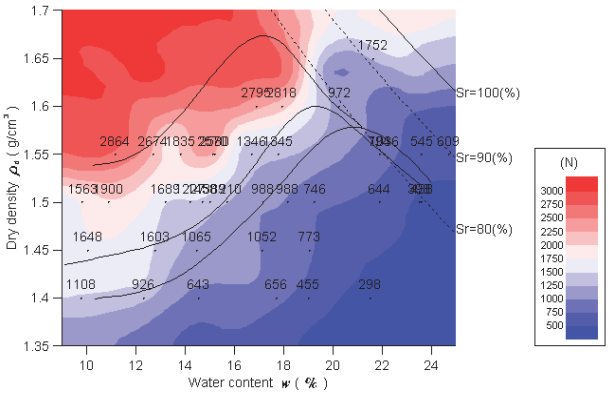


図-2　締固め荷重のコンターと締固め曲線 [2)]

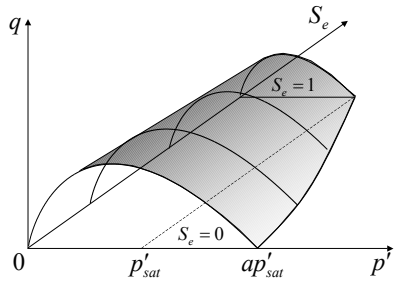
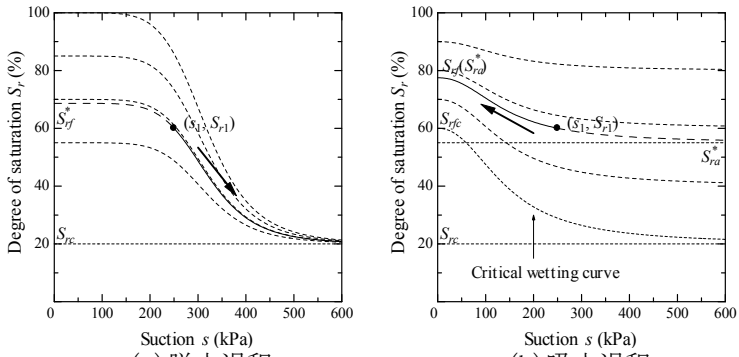


図-3　不飽和構成モデルにおける降伏曲面



(a) 脱水過程　　(b) 吸水過程

図-4　河井らの水分特性曲線モデル

ら得られた結果は，不飽和土の力学から説明できることも付記している．

不飽和土の構成モデルによる締固めシミュレーションも行われている．河井ら [3)]は，先述した静的締固め試験を不飽和土の構成モデルを組み込んだ土/水連成有限要素解析コードで模擬し，含水比~乾燥密度関係において，ある含水比で最大の乾燥密度を呈するという締固め曲線形状を再現することに成功している．彼らは，この締固め曲線の凸形状は水分特性曲線がヒステリシスを有することに大きく起因しているとしている．

さらに，柴田らは [4)]，仮想の盛土において多層締固めを行う，締固め施工シミュレーションを行い，締固め層厚さ，締固め回数などが盛土品質に及ぼす影響を明らかにするとともに，多層締固めを行った場合に生じる継ぎ目の発現についても言及している．

本研究では，土/水/空気連成有限要素解析コード DACSAR-MP による締固めシミュレーションを行い，締固め曲線や締固め品質に及ぼす土質定数の影響について検討を行う．

3.　解析に用いる数理モデル

本研究で用いる土/水/空気連成有限要素解析コード DACSAR-MP[5)]で用いられている数理モデルを次に示す．

3.1　不飽和土構成モデル

本研究では，大野 [6)]らの提案する不飽和土構成モデルを用いる．有効応力は次式で表される．

$$\boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{\sigma}^{net} + p_s \mathbf{1} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{\sigma}^{net} = \boldsymbol{\sigma} - p_a \mathbf{1},\ \ p_s = S_e s \tag{2}$$

$$s = p_a - p_w,\ \ S_e = \frac{S_r - S_{rc}}{1 - S_{rc}} \tag{3}$$

ここで，$\boldsymbol{\sigma}'$ は有効応力テンソル，$\boldsymbol{\sigma}^{net}$ は基底応力テンソル，$\mathbf{1}$ は二階単位テンソル，$\boldsymbol{\sigma}$ は全応力テンソル，s はサクション，p_s はサクション応力，p_a は間隙空気圧，p_w は間隙水圧，S_r は飽和度，S_e は有効飽和度，S_{rc} は $s \to \infty$ における飽和度である．降伏面上に特異点を含まない大野ら [7)]の EC モデルを用いて降伏関数は次式で与える．

$$f\left(\boldsymbol{\sigma}', \zeta, \varepsilon_v^p\right) = MD \ln \frac{p'}{\zeta p'_{sat}} + \frac{MD}{n_E}\left(\frac{q}{Mp'}\right)^{n_E} - \varepsilon_v^p = 0 \tag{4}$$

$$\zeta = \exp\left[(1 - S_e)^{n_s} \ln a\right],\ \ MD = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \tag{5}$$

$$p' = \frac{1}{3}\boldsymbol{\sigma}' : \mathbf{1},\ q = \sqrt{\frac{3}{2}\mathbf{s}:\mathbf{s}},\ \mathbf{s} = \boldsymbol{\sigma}' - p'\mathbf{1} = \mathbf{A}:\boldsymbol{\sigma}',\ \mathbf{A} = \mathbf{I} - \frac{1}{3}\mathbf{1}\otimes\mathbf{1} \tag{6}$$

ここで，n_E は形状パラメーター，ε_v^p は塑性体積ひ

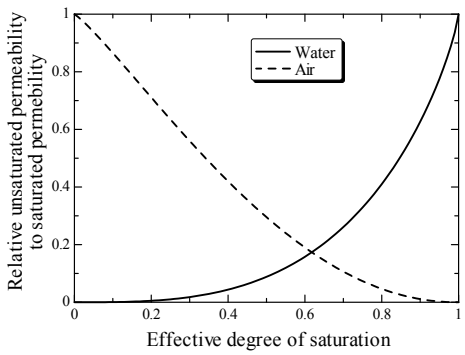


図-5　不飽和透水係数，透気係数

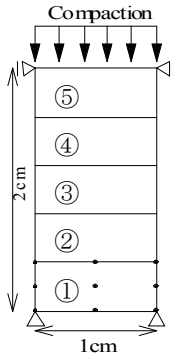


図-6　解析メッシュ

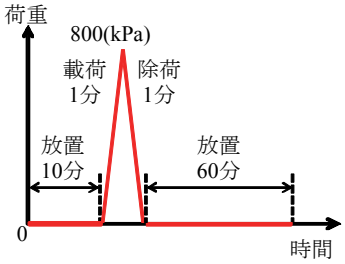


図-7　締固め荷重条件

表-1　材料定数(STD)

λ	κ	M	ν
0.107	0.011	1.344	0.33
a	n_s	n_E	p'_{sat} (kPa)
30	1.0	1.3	73.5
k_w (m/day)	k_a (m/day)	m	e_0
0.01	1.0	0.8	0.85

ずみ，M は限界状態における q/p'，D はダイレタシー係数，a と n_s は不飽和化に伴う降伏応力の増加を表すパラメーター，λ，κ はそれぞれ圧縮，膨潤指数である．図-3 は，式(4)で表される降伏曲面である．式(4)と関連流れ則により次の弾塑性構成モデルが得られる．

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}}' = \mathbf{D} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - \mathbf{C} \cdot \dot{S}_e \tag{7}$$

ここで，$\mathbf{D}$ は弾塑性剛性マトリクス，$\boldsymbol{\varepsilon}$ はひずみテンソル，$\mathbf{C}$ は不飽和化による剛性の変化を表す係数テンソルである．

3.2　間隙水・空気の支配方程式

本研究では，Borja[8]に倣い，次の間隙水，空気の支配方程式を用いる．

Darcy則(水)　$$\tilde{\mathbf{v}}_{\mathbf{w}} = -\mathbf{k}_{\mathbf{w}} \cdot \mathrm{grad}h \tag{8}$$

Darcy則(空気)　$$\tilde{\mathbf{v}}_{\mathbf{a}} = -\mathbf{k}_{\mathbf{a}} \cdot \mathrm{grad}h_a, \quad h_a = \frac{p_a}{\gamma_w} \tag{9}$$

連続式(水)　$$n\dot{S}_r - S_r\dot{\varepsilon}_v + \mathrm{div}\tilde{\mathbf{v}}_{\mathbf{w}} = 0 \tag{10}$$

連続式(空気)

$$(1-S_r)\dot{\varepsilon}_v + n\dot{S}_r - n(1-S_r)\frac{\dot{p}_a}{p_a + p_0} - \mathrm{div}\tilde{\mathbf{v}}_{\mathbf{a}} = 0 \tag{11}$$

ここで，$\tilde{\mathbf{v}}_{\mathbf{w}}$，$\tilde{\mathbf{v}}_{\mathbf{a}}$ はそれぞれ間隙水，空気の流速，$\mathbf{k}_{\mathbf{w}}$，$\mathbf{k}_{\mathbf{a}}$ はそれぞれ透水係数，透気係数，h は全水頭，γ_w は水の単位体積重量，h_a は空気圧水頭，p_0 は大気圧である．　式(7)を釣合式に，式(8),(9)を式(10),(11)に代入し，有限要素法を用いて空間離散化，Euler 法を用いて時間離散化を行うと，土/水/空気連成問題として定式化できる．

3.3 水分特性曲線モデル

水分特性曲線は，脱水過程と吸水過程で異なる経路をたどり，サクション履歴に大きく依存する．このヒステリシスが締固め挙動に影響を及ぼすため，ヒステリシス表現が可能な水分特性曲線モデルが必要となる．本研究では，図-4 に示す河井ら[9]の水分特性曲線モデルを用いる．このモデルでは，脱水過程，吸水過程に描く走査曲線は，それぞれ主脱水曲線，主吸水曲線に相似な形となることを利用し，任意のサクション，飽和度を通る脱水曲線，吸水曲線をモデル化したものである．

また，不飽和透水係数，不飽和透気係数については，式(12)の Mualem[10]の比透水係数，式(13)の Van Genuchten[11]の比透気係数を用いる．

$$k_{rw} = S_e^{1/2}\left[1-\left(1-S_e^{1/m}\right)^m\right]^2 \tag{12}$$

$$k_{ra} = (1-S_e)^{1/2}\left(1-S_e^{1/m}\right)^{2m} \tag{13}$$

ここで，k_{rw}，k_{rw} はそれぞれ比透水係数，比透気係数，m は Mualem 係数である．図-5 に比透水係数，比透気係数の相関関係を示す．図中に示されているのは，以降の解析で用いる $m = 0.8$ のものである．不飽和透水係数，透気係数は，これら比透水係数，比透気係数を，最大飽和度での透水係数，最小飽和度での透気係数に乗じたものである．これらの透水係数，透気係数は間隙比変化に大きく依存するが，本論文では不飽和性による影響に注目するため，計算の煩雑さを避け，間隙比変化の影響を考慮しない．

4.　締固めシミュレーション解析条件

“締固め”の目的は，間隙空気を排出し乾燥密度を高めることにある．ここでは，“締固め”を排気非排水条件下での不飽和土の圧縮載荷・除荷と定義し，静的締固め試験を模擬する．図-6 は解析に用いたメッシュである．水平方向の変形を拘束した一次元圧縮状態，また境界はすべて非排水境界とし，荷重載荷を行う上面のみ大気圧に解放され

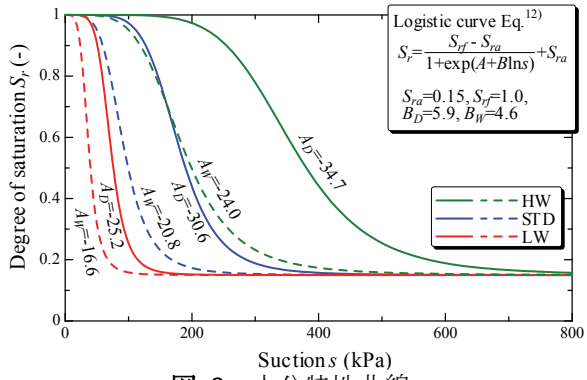


図-8　水分特性曲線

表-2　解析ケース

解析ケース	変更点
STD(standard)	―
HC (high compressibility)	圧縮・膨潤指数×1.5
LC (low compressibility)	圧縮・膨潤指数×0.5
HP (high permeability)	透水・透気係数×10
LP (low permeability)	透水・透気係数×0.1
HW (high water retentivity)	空気・水侵入値×2.0
LW (low water retentivity)	空気・水侵入値×0.5

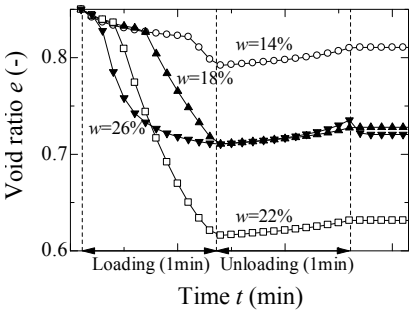


図-9　要素③の間隙比変化

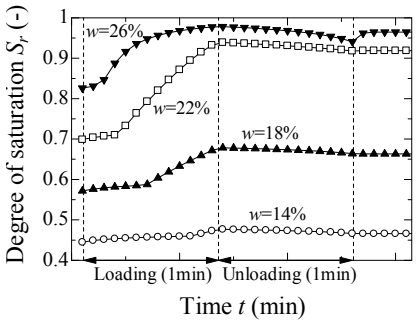


図-10　要素③の飽和度変化

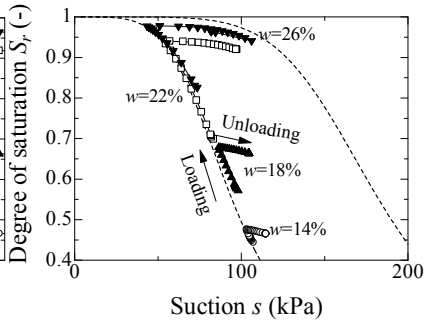


図-11　締固め中の水分特性

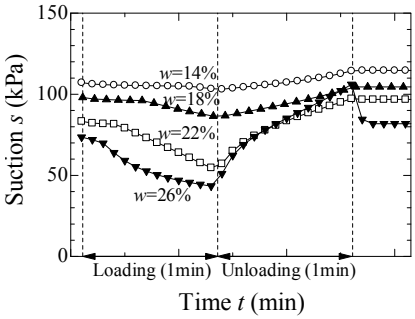


図-12　要素③のサクション変化

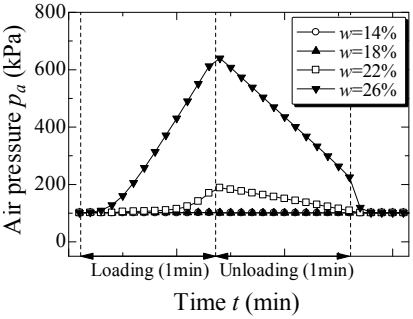


図-13　要素③の間隙空気圧変化

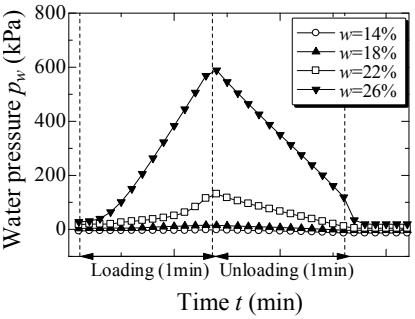


図-14　要素③の間隙水圧変化

た排気条件とする．図-7 は荷重載荷条件である．要素発生後 10 分間放置し，その後所定の圧力まで載荷，除荷し，再び放置する．ここでは，基準となる解析ケースとして，シルト質試料を想定し，表-1 の土質定数，図-8 の水分特性曲線を与える．解析初期条件として要素の間隙比を 0.85，含水比を 10～28%に設定し，それに対応する飽和度および主吸水曲線上のサクションを初期水分特性とした．本研究では，表-1 のパラメーターを基準として，3 種類の土質定数が締固め挙動に及ぼす影響について検討する．一つ目は，圧縮指数および膨潤指数を 1.5 倍とした HC，0.5 倍とした LC．二つ目は，透水係数，透気係数を 10 倍した HP，0.1 倍した LP．それから，保水性を図-8 のように変えた HW，LW である．HW，LW は，脱水曲線，吸水曲線の空気侵入値，水侵入値が約 2 倍，0.5 倍となる様に形状パラメーターを変化させている．以上の解析ケースを表-2 にまとめる．

5.　締固めシミュレーション解析結果

基準となる締固めシミュレーション(STD)から得られた結果を図-9～14 に示す．すべて要素③における状態量変化である．荷重載荷に伴って圧縮量が大きくなり，除荷と同時に膨張しているが，含水比ごとに大きく圧縮する時間が異なっているのは，低含水比ほど降伏応力が大きくなるからである(図-9)．非排水条件下での圧縮，膨張なので，それに応じた飽和度の増加，減少が生じている(図-10)．含水比が大きいものほど圧縮量が大きいので，その結果，飽和度変化も大きくなっている．不飽和土における飽和度変化はサクション変化を誘引するが，飽和度増加時は水分特性曲線上の吸水過程として，サクション減少を，飽和度減少時は脱水過程としてサ

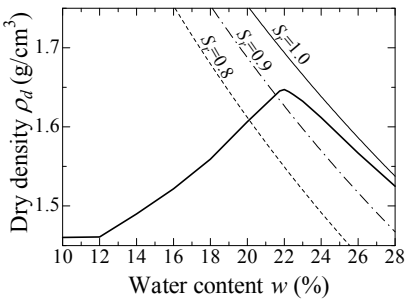


図-15　締固め曲線(STD)

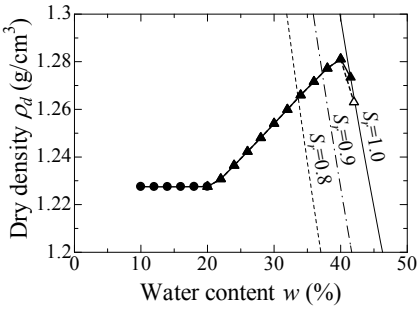


図-16　土/水連成解析による締固め曲線

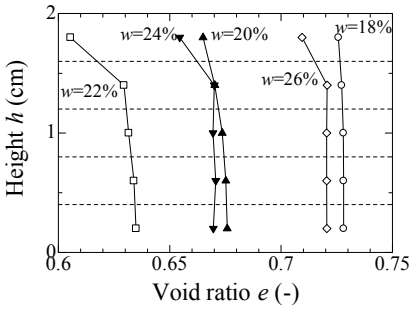


図-17　間隙比分布(STD)

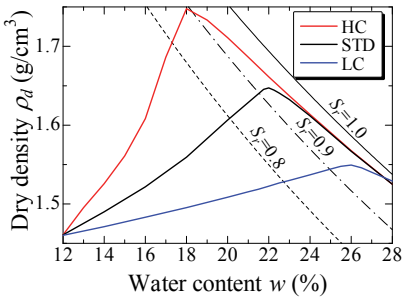


図-18　圧縮・膨潤指数の影響

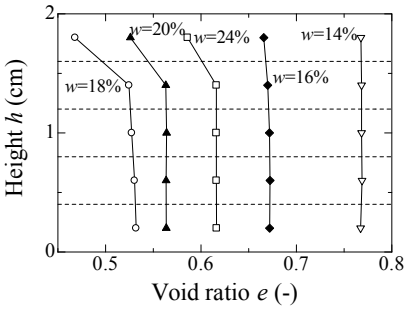


図-19　間隙比分布(HC)

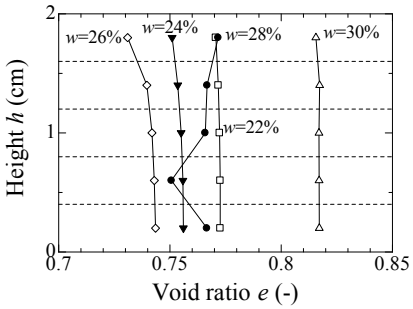


図-20　間隙比分布(LC)

クション増加を表すことになる(図-11). このような水分特性曲線の影響で, 含水比が高いほどサクション変化も大きくなるが, 締固め後のサクションは含水比が小さいものほど大きい(図-12). また, 締固めによって, 締固め前よりサクションが高くなっていることも分かる. このサクションの発現が, 締固めによる強度および剛性の増加を表していると考えられる. また, 締固めは間隙空気を押し出すことを目的としているが, 荷重載荷によって供試体内の空気圧が大きくなっていることが確認できる(図-13). 図中で 98kPa は大気圧を示し, 含水比が低い, つまり相対的に飽和度が低い供試体は, 透気係数が大きいため, 円滑に空気の排出が為され, 小さな空気圧上昇の後, 速やかに大気圧に戻っている. 一方, 高含水比供試体では, 空気が封入されるためにその圧力上昇も大きく, 空気排出前に除荷が始まるため, 除荷とともに空気圧が小さくなるものの, 除荷後も空気圧が残留している. 水圧に関しては, 空気圧と同じ変化を示すが, 空気は排出されるため, 水圧変化の方が大きくなる(図-14). この空気圧と水圧の変化量の違いが, サクション変化となっている. 含水比 26%の供試体に関しては, 除荷時にも残留空気圧の排出が同時に起こっているため, 水圧が減少するよりも空気の排出が早く済んだ結果, 除荷時にサクションが減少している. 実際, 含水比がかなり高い条件で締固めを行うと, もはや非排水条件を満たせなくなり, 排水が生じることを考えると, 高含水比域での排水条件に関しては今後検討が必要であると言える.

それぞれの含水比で締固められた供試体の鉛直変位から, 供試体全体の乾燥密度を算出し, 含水比に対してプロットすることで締固め曲線が得られる(図-15). 河井ら [3)]が行った土/水連成解析から得られた締固め曲線(図-16)は, 最適含水比付近で鋭角にピークが現れ, ゼロ空隙曲線へ接近し過ぎであるが, 空気項の影響を考慮した本解析では, 同様に土質定数としては非排水圧縮によって飽和可能な水分特性曲線を与えるものの, 空気が封入される影響で, 締固め曲線がゼロ空隙曲線から離れ, より現実的な締固め曲線が得られていると言える. 図-17 は, 最適含水比前後の含水比で締固められた供試体内の間隙比分布である. 最適含水比(22%)より乾燥側では供試体高さ方向の間隙比のばらつきが小さく, 最適含水比に近づくにつれて, 排気境界である上面に向かってなだらかに間隙比が減少するのが分かる. しかし, 最適含水比の湿潤側になると, 間隙比が小さいのは, 排気境界近傍のみであり, 下部要素の間隙比のばらつきが小さくなるのが分かる.

5.1　圧縮・膨潤指数の影響

図-18 に, 圧縮・膨潤指数の異なる解析ケース(STD, HC, LC)から得られた締固め曲線を比較する. 圧縮指数が大きくなるに従って, 全体的により締固め曲線が上方に移動している. 注目すべきは, 最適含水比を迎えたときの飽和度である. 圧縮指数が大きい試料は, 膨潤指数も大きくなるため, 締固め荷

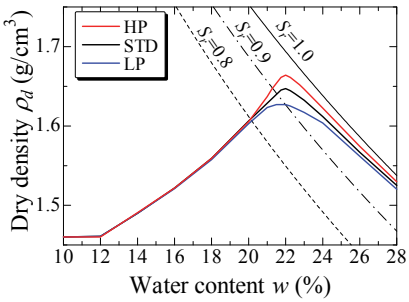


図-21　透水・透気係数の影響

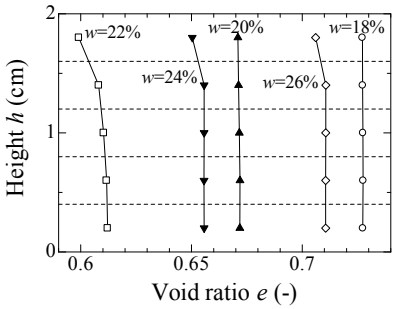


図-22　間隙比分布(HP)

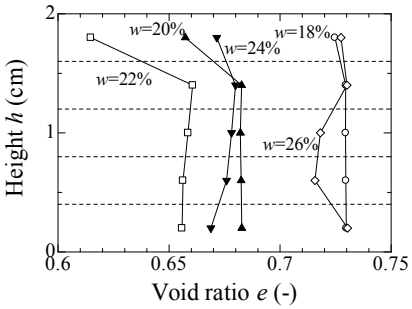


図-23　間隙比分布(LP)

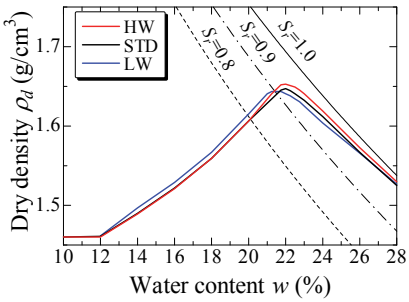


図-24　保水性の影響

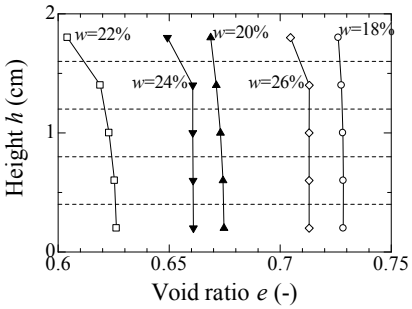


図-25　間隙比分布(HW)

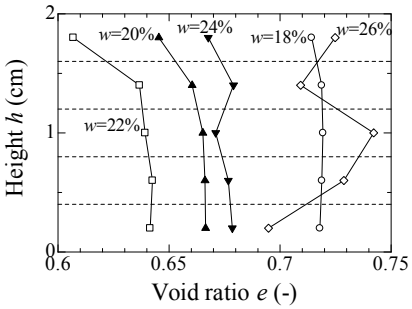


図-26　間隙比分布(LW)

重除荷時のリバウンド量も大きくなる．このリバウンドは最適含水比より湿潤側で顕著になること，空気が封入される飽和度がほぼ同じであることから，圧縮・膨潤指数の大きい試料ほど，最適含水比での飽和度が低くなることが説明できる．

図-19, 20 に HC, LC の間隙比分布を示す．図-18 の締固め曲線からも明らかなように，圧縮・膨潤指数が大きいほど，含水比による締固め後の間隙比の差は顕著になる．先述のように，最適含水比に近づくにつれて，排気境界に向けて，間隙比が小さくなる傾向が現れる．LC の含水比 28%の間隙比分布に乱れが生じているが，空気の封入と排出のタイミングによってこのような不均一な分布が現れる．さらに高含水比の 30%の結果が乱れていないのは，空気の排出がほとんど起こらないため，非排気・非排水条件に近い状態であり，供試体全体が弾性圧縮しか起こさないからである．

5.3　透水性・透気性の影響

“締固め”が境界値問題になっている以上，透水性，透気性に大きく依存するものと考える．図-21 は，透水性，透気性とも 10 倍，0.1 倍の試料を静的締固めシミュレーションした場合の締固め曲線の比較である．図-13,14 から，締固めにおいて透水性，透気性が問題となるのは，透気性が落ちて空気封入が生じる高含水比域である．最適含水比よりも湿潤側になると，空気の封入はより顕著になり，ほぼ空気の排出が困難になる．その結果，図-21 のように最適含水比近傍で透水係数が高くなるに従って乾燥密度が増加するものと考える．図-22,23 は HP, LP の含水比毎の間隙比分布である．透水係数が高い HP では排気境界に向かって緩やかに間隙比が減少しているのに対して，透水係数が低い LP では排気境界近傍のみ間隙比が小さく，比較的小さな含水比で，間隙比分布が排気境界に向かって単調減少とならない挙動が表れているのが確認できる．

5.4　保水性の影響

図-24 では，保水性の異なる試料の締固め曲線の比較を行っている．空気侵入値，水侵入値が高い HW は保水性が高いことを表す．保水性の違いは，締固め中の水分特性曲線上でのサクション，飽和度変化から説明することができる．保水性の高い試料は，保水性の低い試料に比べて，締固め荷重載荷時に描く吸水曲線(サクション～飽和度関係)の傾きが緩やかであるため，同じ含水比では比較的飽和度変化が小さく，空気の封入が起こりにくい．そのため，高い含水比域まで封入空気の影響を受けないため，最適含水比が高く飽和度 100%線に近い締固め曲線となる．この影響は，大きな最大乾燥密度としても現れる．ただし，保水性の高い試料は，締固め荷重除荷時の飽和度変化も小さいので，締固め曲線全体としての傾向をすべて理由づけるのは難しい．図-25,26 は，HW, LW の間隙比分布であるが，保水性の低い LW の方が空気封入の影響を受けやすいのが分かる．

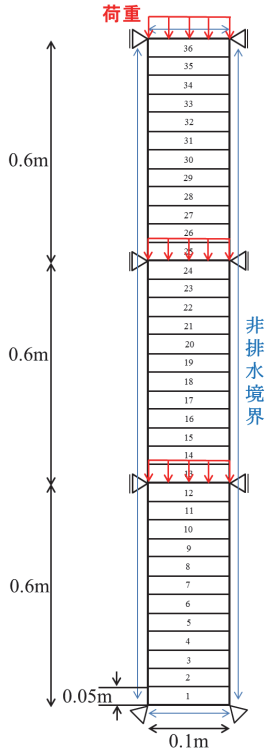


図-27　締固め施工シミュレーション解析領域

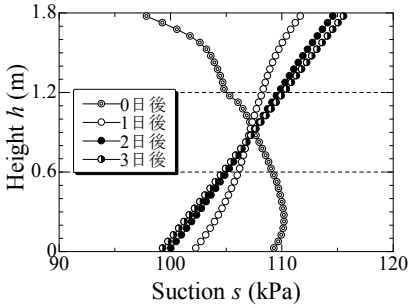


図-28　サクション分布(STD)

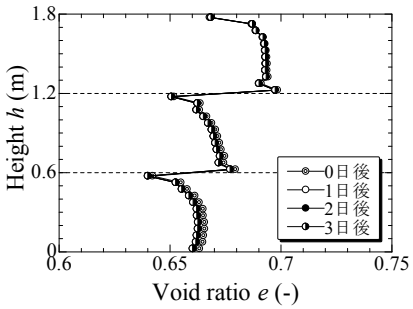


図-29　間隙比分布(STD)

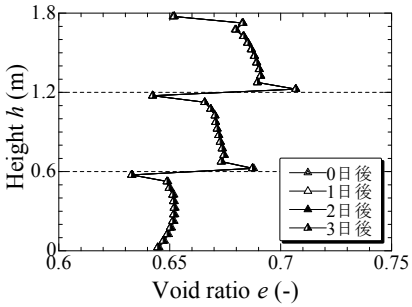


図-30　間隙比分布(HP)

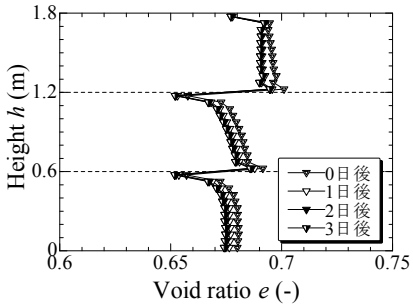


図-31　間隙分布(LP)

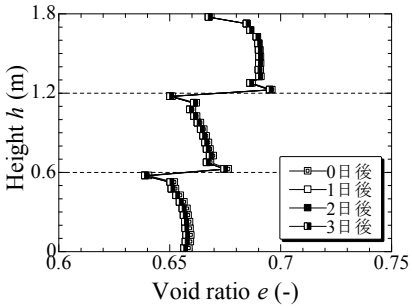


図-32　間隙比分布(HW)

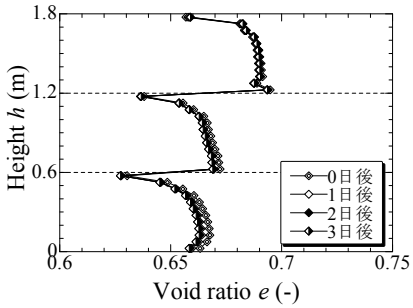


図-33　間隙比分布(LW)

6.　締固め施工シミュレーション解析条件

柴田ら[4]は，多層締固め施工を土/水連成解析によって模擬し，施工継ぎ目の発生過程を表現した．ここでは,同じ施工シミュレーションを行うことで,土質定数が施工品質に及ぼす影響について検討を加える．図-27 は，解析領域である．12 要素からなる土の層を 3 層締固めながら上載していく過程を模擬する．最下層締固め時には，要素発生，全境界を非排水境界とし,上面のみ排気境界で同様の締固め荷重を与える．2 層目以降，下部層との境界においては水収支を可能とするように,境界条件をキャンセルし，左右端，上端を非排水境界，同様に上端は排気境界で，締固め荷重を加えていく．ここでの締固め含水比はそれぞれの最適含水比である．

7.　締固め施工シミュレーション解析結果

図-28 は，締固め施工シミュレーションにおける STD のサクション分布経時変化である．3 層目を締固めた後からの時間変化となっている．3 層目を締固めた直後の時間 0 日後では，3 層目下部と 2 層目上部でサクションが不連続となっている.時間とともに，鉛直下向きの水収支が生じ，静水圧分布に近づいていくことが分かる．図-29 は，その時の間隙比分布である．柴田ら[4]の指摘にもあるように，鉛直荷重載荷回数の影響によって生じる下層と上層の間隙比の不連続のみならず,層間で間隙比分布が乱れているのが分かる．これは，締固め層と，撒き出し(要素発生，放置期間)層の間のサクションの差異によって生じる層間継ぎ目である．図-30,31 は，透水性の違いによる間隙比分布の違いを表している．透水性の低い LP では水収支が定常になるまで時間がかかるため,間隙比分布も時間とともに推移している．透水性が高いと，撒き出し時に下層との水収支が顕著になるため,最終的に層間の継ぎ目が大きく残留する結果となった．そのため，透水性が低いほど,盛土全体の大きくばらつきのない間隙比

分布となることが分かる．図-32,33 は，保水性の違いによる間隙比分布の違いを表したものである．保水性の高い HP に比べて保水性の低い LP では，定常状態に至るまでの時間が長いことが分かる．また，LP では層の中でも間隙比の差が大きな分布となっている．これは，LP では 1 層の厚さ 60cm が大きな飽和度差を生じさせる位置水頭の差となるため，上下方向の飽和度が大きく異なることが原因である．その結果，HP に比べて全体的な間隙比の差が生じてしまった．

8. まとめ

土/水/空気連成有限要素解析による静的締固めシミュレーション，締固め施工シミュレーションを行い，土質定数が締固め曲線，締固め品質に及ぼす影響について検討を行った．その結果，最適含水比，最大乾燥密度といった定量的な指標や，締固め曲線形状に土質定数の違いが現れることが分かった．本研究では，詳細な土質定数が与えられればその静的締固め挙動を表現できることを示すに留めるが，さらなる入力パラメーターや荷重条件などへの感度分析を行うことで，締固め曲線形状の違いから，土質定数の違いを定性的に推定することも可能であると考える．

参考文献

1) Procter, R. R. : Four articles on the design and construction of rolled-earth dams, Eng. News Record, Vol.111, pp.245-248, 286-289, 348-351, 372-376, 1933.
2) 河井克之，金銀羅，流田寛之，飯塚敦，本田道識: 不飽和土の力学を用いた締固め土における圧密降伏応力の簡易予測手法，土木学会論文集, Vol.5, pp.785-792, 2002.
3) 河井克之，柴田昌輝，金澤伸一，橘伸也，大野進太郎，飯塚敦，本田道識: 土/水連成有限要素解析プログラムを用いた静的締固めシミュレーション，応用力学論文集，Vol.12，pp.429-436, 2009.
4) 柴田昌輝，河井克之，尾崎早希子，金澤伸一，橘伸也，飯塚敦: 締固め方法の違いが締固め土構造物の品質に及ぼす影響，応用力学論文集，Vol.13, pp.363-370, 2010.
5) 金澤伸一: 不飽和土の数理モデルに基づく締固め土構造物の力学挙動評価，神戸大学博士論文, 2010.
6) 大野進太郎，河井克之，橘伸也: 有効飽和度を剛性に関する状態量とした不飽和土の弾塑性構成モデル，土木学会論文集，Vol.63/No.4, pp.1132-1141, 2007.
7) 大野進太郎，飯塚敦，太田秀樹: 非線形コントラクタンシー表現式を用いた土の弾塑性構成モデル，応用力学論文集，Vol.9，pp.407-414, 2006.
8) Borja, R. I.: A mathematical framework for three-phase deformation and strain localization analyses of partially saturated porous media, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.193, pp.5301-5338, 2004.
9) Karube, D. and K. Kawai : The role of pore water in the mechanical behavior of unsaturated soils, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.19, No.3, pp.211-241, 2001.
10) Mualem, Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, Vol.12, No.3, pp.514-522, 1976.
11) Van Genuchten: A closed-form equation for predicting hydraulic of unsaturated soils, *Soil Science Society American Journal*, Vol.44, pp.892-898, 1980.
12) 杉井俊夫，宇野尚雄: 新しい水分特性曲線のモデル化について，土木学会第 50 回年次学術講演会概要集, pp.130-131, 1995.

（2012 年 3 月 8 日　受付）