応用力学論文集 Vol.12, pp.429-436　（2009 年 8 月）　土木学会

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

Simulations of static compaction with unsaturated soil/water coupled F. E. code

河井克之[1]・柴田昌輝[2]・金澤伸一[3]・橘伸也[4]・大野進太郎[5]・飯塚敦[6]・本田道識[7]
Katsuyuki KAWAI, Masaki SHIBATA, Shin-ichi KANAZAWA, Shinya TACHIBANA,
Shintaro OHNO, Atsushi IIZUKA, Michinori HONDA

[1]工博，神戸大学助教，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，埼玉大学助教，地圏科学研究センター（〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255）
[5]工博，鹿島建設㈱，土木設計本部（〒107-0052 東京都港区赤坂 6-5-30）
[6]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）
[7]工博，㈱日建設計シビル，技術開発部（〒112-0004　東京都文京区後楽 1-4-27）

Although compacted soil is widely used to construct earth structures, the mechanism of compaction has not been explained with soil mechanics. Therefore, we cannot help using the empirical method to design and construct such structures. In this study, we regarded compaction as undrained compression of unsaturated soil from static compaction tests performed by Kawai et al. and expressed the compaction with unsaturated soil/water coupled simulation. The constitutive model proposed by Ohno et al. and soil-water retention characteristic curve model proposed by Kawai et al. are used for simulation. Consequently, we could explain the shape of compaction curve. The achievement of this study can be applied to the construction management on the site of geotechnical engineering.

Key Words : *Compaction curve,Unsaturated soils,Water characteristic curve*
キーワード ：締固め曲線，不飽和土，水分特性曲線

1.　はじめに

河川堤防やアースダム等,陸上地盤構造物を建造する場合は, 締固め土が多く用いられる. 締固め土は,土粒子が作る間隙に空気相と液相を含む不飽和土であり,間隙が水で満たされた飽和土よりもせん断強度が大きく,圧縮性･透水性が低い. そのため, より安全な材料として有用である．しかしながら, 締固め土はその強度発現メカニズムが解明されておらず,規格化された室内締固め試験結果を経験的手法で現場に適用する D 値管理(図-1)や Proctor[1)] の手法(図-2), 現場実験などを通してその特性を評

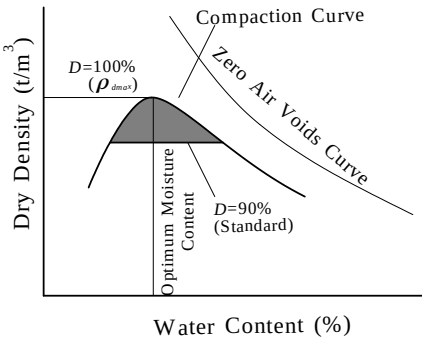


図-1　*D* 値管理の概念

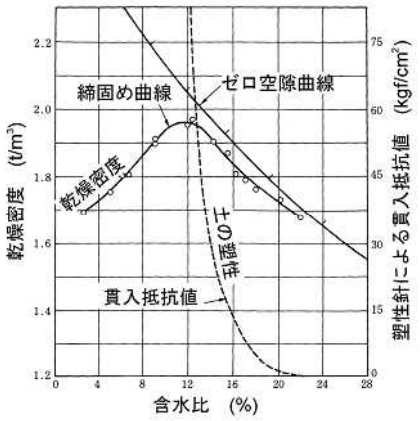
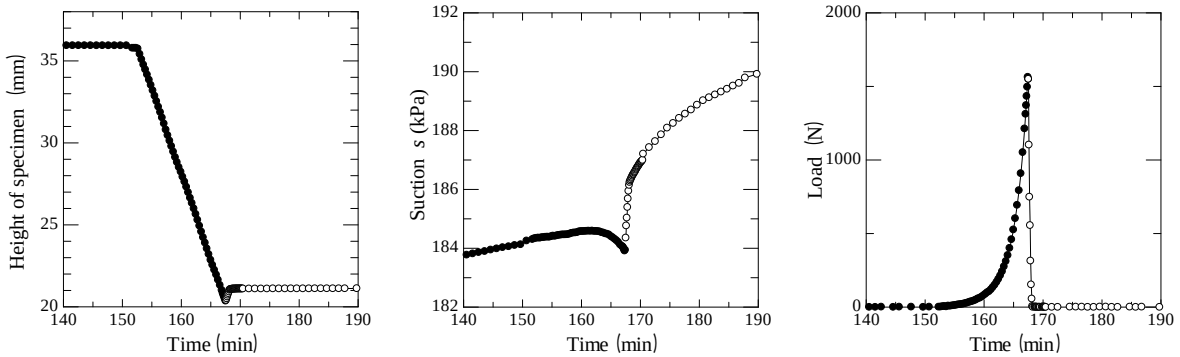
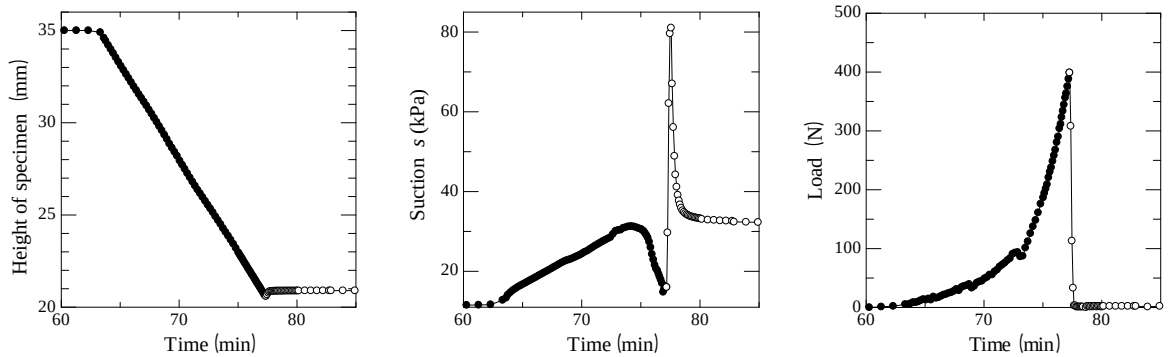


図-2　Procter 締固め試験



(a) 供試体高さ変化　(b) サクション変化　(c) 載荷重変化

図-3　低含水比試料($w = 9.85(\%)$)の締固め試験



(a) 供試体高さ変化　(b) サクション変化　(c) 載荷重変化

図-4　高含水比試料($w = 23.53(\%)$)の締固め試験

価する以外になかった．Terzaghi[2)]の有効応力原理以降，飽和土の力学が急速に整備された一方で，不飽和土の力学の体系化が遅れたことが要因のひとつとして考えられる．近年，様々な室内試験から，いくつかの不飽和土構成モデル，水分特性曲線モデルが提案され，不飽和土の力学から「締固め」を検討する研究も行われてきた．

河井ら[3)]は，シルト質試料を用いてサクション測定を伴う静的締固め試験を行っている．試験は，圧密リング内であらかじめ含水比調整された試料を目標の乾燥密度で供試体高さが 2cm になるまで載荷台を一定速度(1.06mm/min)で上昇させて締固め，その後除荷するというものである．**図-3,4** に，試験結果を示す．締固め初期では，試料内の間隙水の連続性が不十分であること，また供試体底部でサクションを計測していることから，局所的なサクションを計測している可能性があり，結果的にサクションが締固めとともに漸増している．しかしながら，締固めが進むと，載荷，除荷に応じて，サクションの減少，増加が生じるようになる．このとき，低含水比試料に比べ，高含水比試料の締固め時には，サクション変化が大きいことが分かる．また，低含水比試料の方が同じ乾燥密度になるまでの載荷重が大きくなっている．彼らは，このような挙動が不飽和土の力学に基づいていることを示唆した．

そこで本研究では，河井らの行った締固め試験結果より，締固め時の土の力学挙動を不飽和土の非排水圧縮・膨張現象と捉え，土/水連成有限要素解析プログラム(DACSAR-UA)を用いて，「締固め」を力学的に説明することを目的としている．

2.　解析に用いる数理モデル

締固めを不飽和土の非排水条件下での圧縮挙動であるとし，締固めを表現するには，不飽和土の構成モデルと水理モデルが必要となる．ここでは，解析に用いた不飽和土構成モデルと，水分特性曲線モデルを紹介する．

2.1　有効飽和度で不飽和土の剛性を表現する不飽和土モデル

Bishop[4)]が不飽和土の有効応力式を提言して以来，様々な不飽和土の構成モデルが提案されてきた．水分特性曲線のヒステリシスを考慮した代表的なモデルとして，Karube and Kawai[5)]のモデルを挙げることができる．Karube and Kawai は不飽和土の乾湿過程における剛性の変化を表すパラメータとしてメニスカス応力を用い，サクション履歴の影響を応力状態の違いとして記述している．非常に合理的なモデルといえるが，応力成分を記述するパラメータを設定する上で，最乾燥水分線等を用いた複雑な計算を要する．一方，大野ら[6)]は剛性の変化を表すパ

ラメータに有効飽和度を用い，より簡便に不飽和土の力学特性を表現できる弾塑性構成モデルを構築した．そこで本研究では，大野らによって提案されたモデル(S_e-Hardening モデルと呼ぶ)を使用する．

大野らは，有効応力を以下のように表した．

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

ただし，$\boldsymbol{\sigma}^{net} = \boldsymbol{\sigma} - p_a \mathbf{1},\ p_s = S_{re} s$ (2)

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

であり，$\boldsymbol{\sigma}'$:不飽和土の有効応力テンソル，$\boldsymbol{\sigma}^{net}$:ネット応力テンソル，$\mathbf{1}$:2 階の単位テンソル，$\boldsymbol{\sigma}$:全応力テンソル，$s$:サクション，$p_s$:サクション応力，$p_a$:間隙空気圧，$p_w$:間隙水圧，$S_r$:飽和度，$S_{re}$:有効飽和度，$S_{rc}$:吸着水が占める飽和度である．

さらに一般的な含水状態にある土の体積変化を

$$e = e_0 - \lambda \ln \frac{p'}{\zeta p'_{sat}} \tag{4}$$

とし，不飽和化による圧密降伏応力の増大を飽和状態における圧密降伏応力 p'_{sat} の ζ 倍という形で表現した．ζ は有効飽和度を用い，次のように表すことが出来る．ここで e_0:初期間隙比である．

$$\zeta = \exp\left[(1 - S_{re})^n \ln a\right] \tag{5}$$

となり，ここで n：$e - \ln p'$ 面上の等飽和度線の間隔を調整するパラメータ，a：不飽和化による剛性の増大が最大時の圧密降伏応力の倍率を決定するパラメータである．

ここで間隙比を体積ひずみに変換し，塑性体積ひずみを表すと

$$\varepsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{\zeta p'_{sat}} \tag{6}$$

となり，ここから不飽和土の圧密降伏応力の変化を表す式は，

$$p'_c = \zeta p'_{sat} \exp\left(\frac{\varepsilon_v^p}{MD}\right) \tag{7}$$

と書ける．ここで，p'_c：平均有効主応力で表された先行圧密応力，M：q/p' で表された限界応力比，D：ダイレタンシー係数であり，

$$MD = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \tag{8}$$

さらに，オリジナル Cam-Clay モデルの降伏関数に適用すると，

$$f\left(\boldsymbol{\sigma}', \zeta, \varepsilon_v^p\right) = MD \ln \frac{p'}{\zeta p'_{sat}} + D \frac{q}{p'} - \varepsilon_v^p = 0 \tag{9}$$

と，不飽和土の降伏関数が得られる．

ここで，

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

となり，$\mathbf{I}$：4 階の単位テンソルである．

また，飽和状態($S_{re} = 1$)のときには，$\zeta = 1$ となり式(9)は Cam-Clay モデルに帰着する．図-5 に大野らのモデルが示す不飽和土の降伏曲線の概念図を示す．

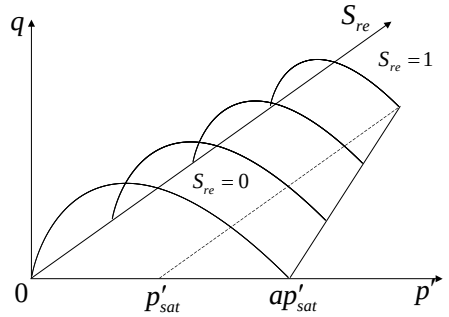
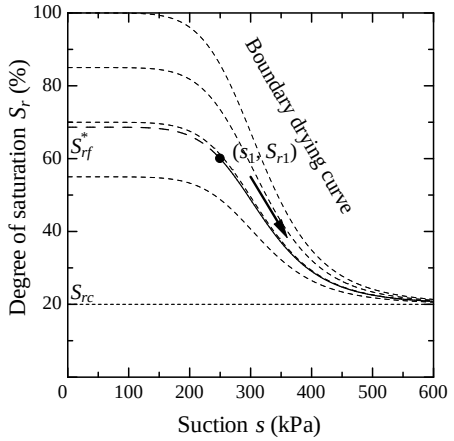
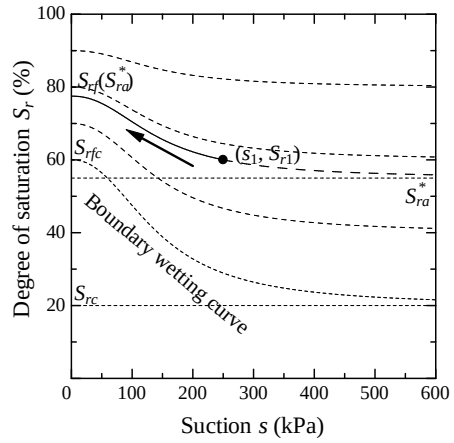


図-5　不飽和土の降伏曲面の概念図



(a)　脱水曲線



(b)　吸水曲線

図-6　河井らの水分特性曲線モデル

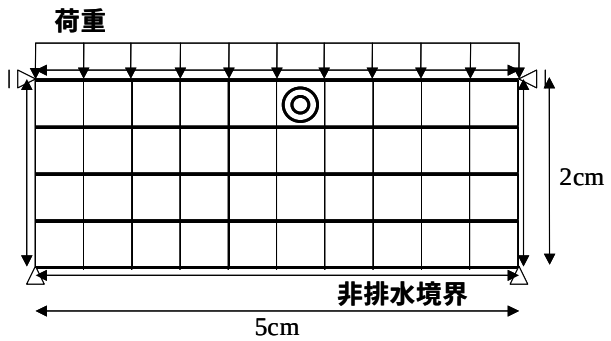


図-7　解析領域

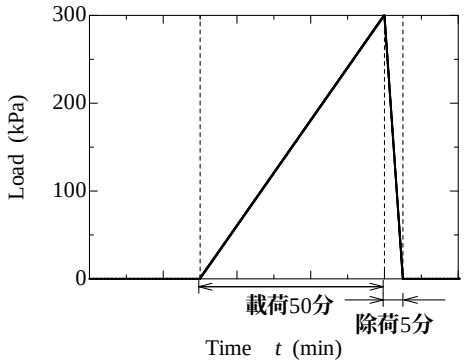


図-8　載荷・除荷条件

表-1　解析で用いる材料パラメータ

λ	κ	M	ν	a	n	k (m/day)	m
0.075	0.010	1.333	0.33	10	1.0	0.01	0.8

m：Mualem[9]の不飽和透水係数式のパラメータ

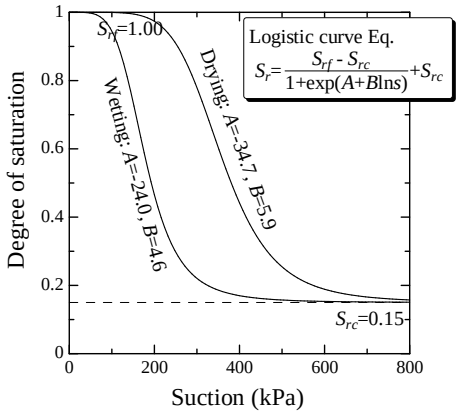


図-9　水分特性曲線

表-2　解析条件

	a	載荷回数
Case 1	10	1
Case 2	20	1
Case 3	30	1
Case 4	10	5

2.2 ヒステリシスの表現が可能な水分特性曲線モデル

不飽和土の挙動に大きく影響を及ぼす水分特性(サクション～飽和度関係)は，乾燥時と湿潤時で異なる．つまり，サクション～飽和度関係を表した水分特性曲線は唯一ではなく，乾燥時もしくは湿潤時の保水状態に依存して，無数の走査曲線が存在する．河井ら[7]は，それらの走査曲線が乾燥時と吸水時ではそれぞれ相似な形であることを利用して，ヒステリシス表現が可能な水分特性曲線モデルを提案している．任意のサクション，飽和度状態から描く脱水，吸水曲線は，杉井，宇野[8]のロジスティック曲線式を用い，図-6 のように表される．

3　静的締固めシミュレーション

前章で示したモデルを適用した土/水連成有限要素解析コード(DACSAR-UA)で，静的締固め試験をシミュレートした．

3.1　解析条件

図-7 に示す，2cm×5cm の供試体を想定した解析領域を設定した．解析領域の下端は水平・鉛直方向ともに固定，左右端は水平方向のみを固定し，一次元圧縮条件とする．また，解析領域上下端・左右端は非排水境界とする．河井らの研究では，ひずみ制御の締固め試験であったが，除荷の表現が困難であるため，解析領域上端に等分布荷重を段階的に載荷・除荷することで締固めを行う．載荷荷重を 300(kPa)，載荷に要する時間・除荷に要する時間をそれぞれ 50 分・5 分とする(図-8)．

解析に用いる材料定数を表-1，水分特性曲線を図-9 のように与える．材料定数等は河井らの試験結果を参考にした．しかしながら，実際の試験における試料の初期状態は，可能な限り緩く含水比調整を行った試料を圧密リングに投入することとしており，間隙比変化量もかなり大きく，微小ひずみ理論を用いた解析初期条件としては不適当であるため，ある程度連続体と仮定できる初期条件として，試料の初期間隙比を 1.20，初期含水比を w=10 ~ 42%(2%

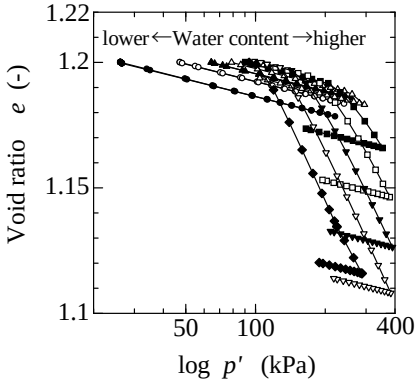


図-10　締固め中の間隙比変化

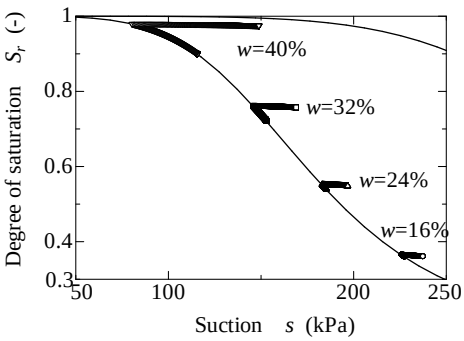


図-11　締固め中の水分特性曲線

間隔)の計 17 ケースとして設定した．このときの間隙比と含水比から土粒子比重を 2.70 として得られる飽和度を基に，与えた水分特性曲線の主吸水曲線上(最も飽和度が低い状態)のサクションを算定して，試料の初期サクションとした．非常に緩い状態からの締固めは，土粒子接点を増加する過程であると考えると，土粒子接点増加によって発現するサクションは，その飽和度状態で最も小さい状態であると考えられる．そこで，主吸水曲線上に初期状態を設定した．ここで，全要素で同じ初期サクションを与えると，深度方向に初期の水分状態が非定常状態となるため，解析領域内の流れが定常になるまで時間をおいた．**表-2** に，解析ケースをまとめる．Case 1～3 は降伏面形状を決定付けるパラメータ a の大きさが異なる．a の値が大きくなるほど，不飽和化による降伏面の拡大が顕著になることを表す．また，締固め応力の繰返し載荷の影響を見るために，Case 4 を行った．

3.2　含水比による挙動の違い

Case 1 から得られた間隙比変化を**図-10** に示す．横軸には式(1)で表される不飽和土の有効応力をとっている．供試体の初期応力は，サクション応力が支配的であるが，このサクション応力は設定含水比から算出される飽和度と主吸水曲線上でその飽和度に相当するサクションによって決定される．このとき，設定含水比の範囲内では主吸水曲線がサクション変化に比べて飽和度の変化の方が顕著であるため，低含水比試料の方が比較的サクション応力が小さく，それに伴って初期有効応力も小さくなっている．また，低含水比試料では不飽和化による降伏応力の増大が大きくなるため，圧縮量も抑えられていることが確認できる．

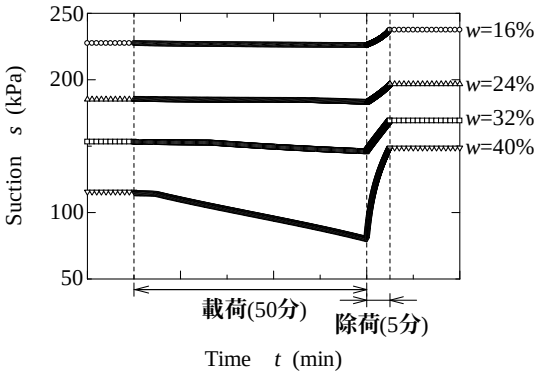


図-12　締固め中のサクション変化

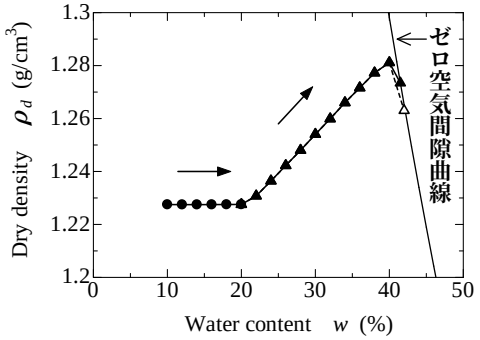


図-13　解析から得られた乾燥密度

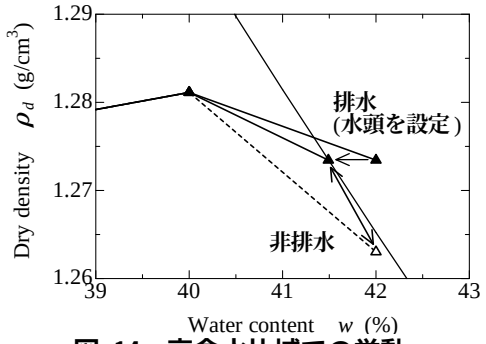


図-14　高含水比域での挙動

図-11 は，締固め中の水分特性曲線を表している．締固め中の載荷圧縮時には，飽和度が高まるため吸水曲線上を，除荷膨張時には，逆に飽和度が低下するため脱水曲線上の，サクション～飽和度関係を示す．その結果，**図-12** に示すようなサクションの経時変化が得られた．ここでは，高含水比試料ほどサクションの値は小さいが，締固めによる変動が大きくなることが分かる．これは，河井らの実験結果にも合致する．また，締固めによって初期サクションよりも大きなサクションが発揮されている．

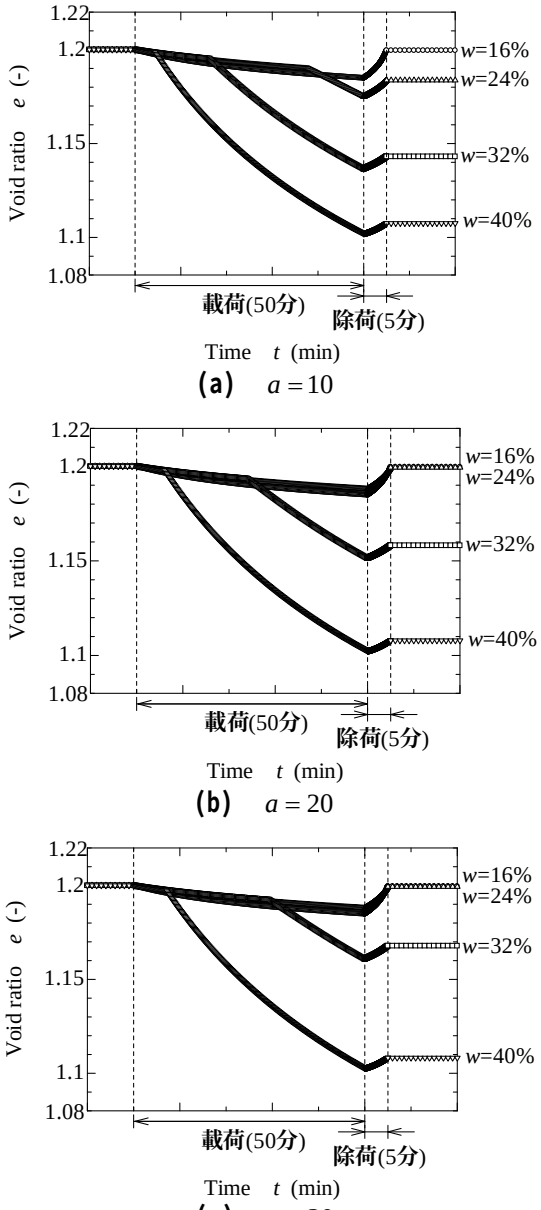


図-15　パラメータ a と間隙比変化

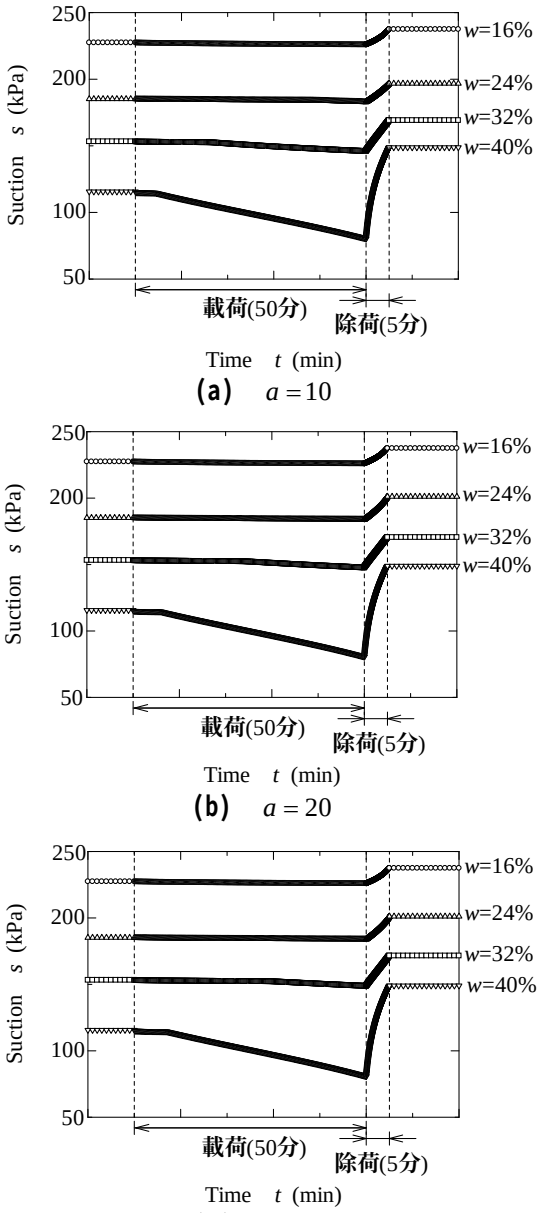


図-16　パラメータ a とサクション変化

図-13 は，締固めシミュレーションによって得られた乾燥密度を含水比で整理したものである．一般的に見られる締固め曲線と同様に，含水比に対して乾燥密度がピーク点を持っているのが確認できる．図-10 に見られるように，含水比の増大によって降伏応力が減少するため，外部載荷応力に対する変形量が大きくなる．このため，締固め曲線の乾燥側で含水比に比例して乾燥密度が増加する．しかしながら，一方で，非排水条件であるため，外部荷重に対して載荷時にはサクションの減少，除荷時にはサクションの増加が見られる．含水比の増加とともに，圧縮・膨張によるサクションの変化量は大きくなる．これは，外部載荷応力の有効応力への変換が効率的に行われないことを示し，その結果，ある含水比以上では乾燥密度が小さくなる．図中の含水比 42% のプロットが白三角で示されているが，この解析では載荷圧縮中に供試体内の間隙水圧が正に転じた．実際の締固めにおいても，高含水比状態では非排水条件を満足できずに，試料表面に水が漏出してくることが一般的に知られている．そこで，解析上，間隙水圧が正圧に転じた時点で，非排水境界を圧力水頭ゼロの水頭境界に変更した(図-14)．排水条件下では，水収支が明確でないため，飽和状態で圧縮除荷が行われるものとして，含水比 42%のプロットをゼロ空隙曲線上に水平移動させたものを，図-13 中では黒三角プロットで示している．実際の締固めにおいては，これら二つの状態の間にプロットが来るものと予想できる．

全体的に，実際の締固め曲線と比較すると，低含水比域から高含水比域で傾きが変わる部分が明確

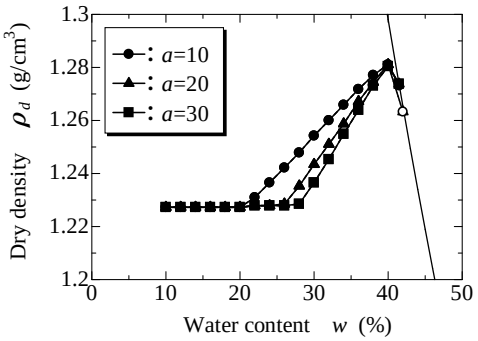


図-17　Case 1～3 から得られた締固め曲線

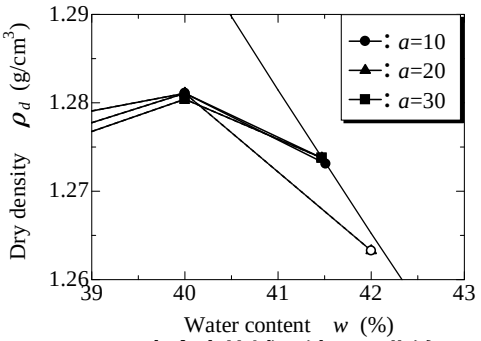


図-18　高含水比域の締固め曲線

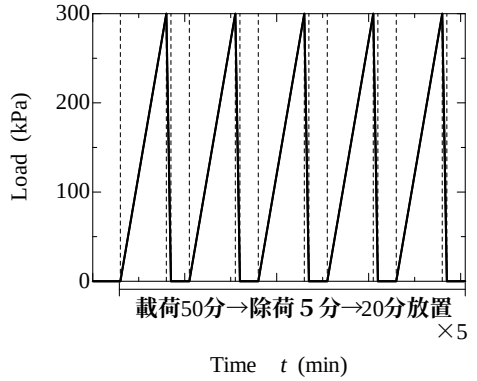


図-19　締固め荷重の繰返し載荷

であることや, 最適含水比での乾燥密度が鋭角にピークが現れており, なおかつゼロ空隙曲線に接近していることなど相違もあるが, 定性的な形状は十分に表現できているものと考える. この形状が不飽和土特有の降伏面形状や, 水分特性曲線ヒステリシスに依存していることは明白である.

3.3　降伏曲面形状の違いの影響

Case 1～3 では, 大野らのモデルにおける降伏曲面形状の違いに関係するパラメータ a の影響について検討を行う.

図-15 に, パラメータ a の値が異なる解析の間隙比変化である. 式(5)に示されるようにパラメータ a は, 不飽和化による降伏応力の増加率を決定する. ここでは, 一定の p'_{sat} を用いるため, 特に低飽和度, つまり低含水比試料ほどその影響が顕著になる. その結果, a の値が大きいものでは, 降伏に到達するのに大きな荷重(時間)を要し, 低含水比域では降伏に達しない含水比域が増加する. **図-16** は, サクションの変化である. 前節で示したとおり, サクションの変化は供試体の間隙比変化に依存する. そのため, パラメータ a が小さい方が降伏後の間隙比変化が大きく, サクション変化も大きくなることが w=24, 32(%)の結果から確認できる. **図-17** は, パラメータ a の違いが締固め曲線形状に及ぼす影響を比較している. **図-18** は, 前節で示したとおり高含水比域で水理境界の変更を行った場合の影響を表している. パラメータ a は低含水比域での影響が大きいため, 締固め曲線のピーク時の乾燥密度には大きな違いは見られないのが分かる.

3.4　繰り返し載荷の影響

実際の締固めにおいては, 載荷回数も規定されている場合が多い. 古典的な飽和土の力学においては, このような繰返し載荷は, 単なる弾性域での応力繰返しを示すため, 回数によらず最終的な状態は等しい. ここでは, 不飽和土の力学における繰返し載荷について検討を行う. **図-19** は, 締固め荷重の繰返し載荷方法を示している. ここまでの解析と同様, 50 分をかけて載荷, 5 分で除荷を行い, 20 分放置することを 1 サイクルとし, 5 サイクル繰り返したものを Case 4 とする.

図-20 は, 間隙比変化である. 載荷繰返しにより少しずつひずみが蓄積していっているのが分かる. 特に, 高含水比試料でその影響が大きくなっている. これは, 水分特性曲線から説明が可能である. **図-21** に水分特性曲線を示すが. 載荷時には圧縮によって飽和度が増加, サクションが減少しているが, 続く除荷膨張時にサクションが増加している. このときにヒステリシスを描くため, すべての含水比で繰返し載荷によりサクションが漸増している(**図-22**). このとき, 飽和度に関しては, 初期よりも高くなっている. この結果, サクション応力は増加, 降伏応力は減少と, 圧縮変形が進行する条件を満たす. そのため, 繰返しによる締固め効果が発揮されれたと言える. **図-23** は, 繰返し締固めによる締固め曲線の違いを表している. 特に, 高含水比域でその違いが明確である. しかしながら, このような差異は水分特性曲線ヒステリシスによってもたらされるため, 水分特性曲線の形状によって, その影響がここでの解析結果と異なる可能性も考えられる.

4.　まとめ

大野らによる不飽和土の構成モデルと河井らの水分特性曲線モデルを取り入れた土/水連成有限要素解析コード(DACSAR-UA)を用いて静的締固めシミュレーションを行った. その結果, 締固め時の土の圧縮挙動を不飽和土の非排水圧縮現象ととらえ

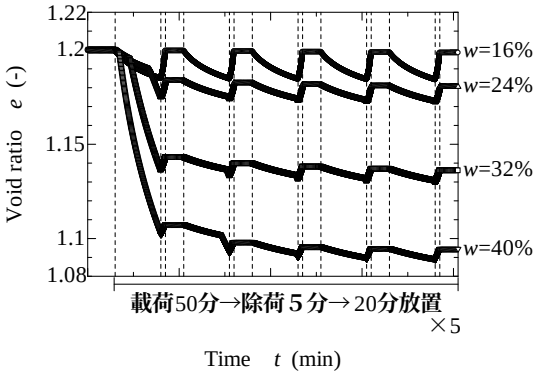


図-20　繰返し締固め時の間隙比変化

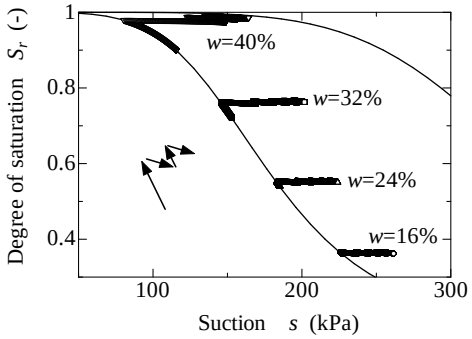


図-21　繰返し締固め時の水分特性曲線

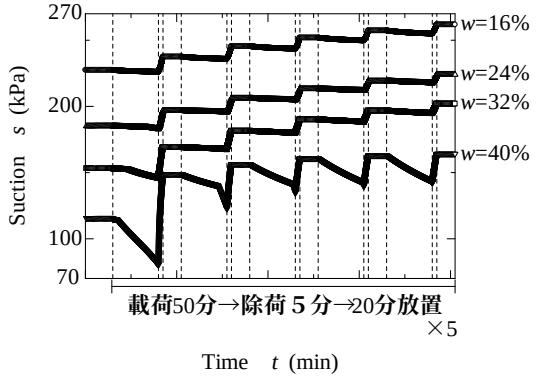


図-22　繰返し締固め時のサクション変化

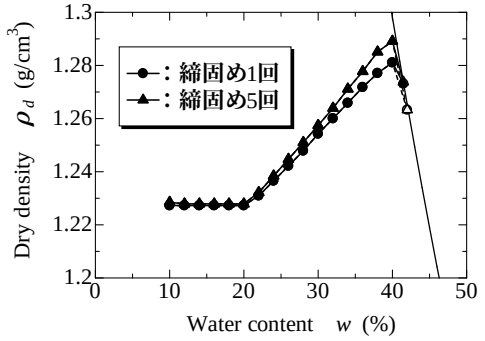


図-23　繰返し締固めによる締固め曲線

ることで締固め曲線を表現することができた．また，繰返し締固めの効果を水分特性曲線ヒステリシスから説明することができた．しかしながら，本研究における解析では，初期の間隙比を等しくしたため，低含水比域の締固めは，降伏応力の増大による弾性挙動であるとされているが，低含水比試料は嵩高い状態であり，初期間隙比が大きいものとなる．実際の締固めでは，降伏応力の増大と初期間隙比の影響が同時に表れていると考えられる．また，ここでは間隙空気の封入圧縮を考慮していない．これらの条件を忠実に再現することで，より現実的な締固め曲線を表現できるものと考える．本研究で提案する手法では，締固め時の応力履歴，乾湿履歴の影響が明らかとなるため，締固め土構造物の建設・維持における締固め管理に役立てることができる．

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) Terzaghi, K. : The shearing resistance of saturated soils and the angle between the planes of shear, *Proc.1st IC-SMFE* , Vol.1, pp.54-56, 1936.
3) 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.
4) Bishop, A. W. : The principle of effective stress, *Norwegian Geotechnical Institute*, No.32, pp.1-5, 1960.
5) 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.
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) 河井克之，汪偉川，飯塚敦：水分特性曲線ヒステリシスの表現と不飽和土の応力変化，応用力学論文集, Vol.5, pp.777-784, 2002.
8) 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.
9) 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.

（2009 年 4 月 9 日　受付）