

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

Influences of compaction procedure upon the quality of compacted earth structures

柴田昌輝¹・河井克之²・尾崎早希子³・金澤伸一⁴・橘伸也⁵・飯塚敦⁶

Masaki SHIBATA, Katsuyuki KAWAI, Sakiko OZAKI,
Shin-ichi KANAZAWA, Shinya TACHIBANA, Atsushi IIZUKA

¹ 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)

² 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)

³ 工学士, 神戸市 (〒650-8570 神戸市中央区加納町 6-5-1)

⁴ 工博, 中央大学助教, 理工学部 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

⁵ 工博, 埼玉大学助教, 地圏科学研究センター (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

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)

There are a lot of earth structure constructed by compaction, such as embankment and earth dam. Recently, the designing code has been changing from specification-based design to performance-based design in construction industry. In performance-based design, quality estimate is needed for each structure. When we construct a compacted earth structure, target dry density is determined from compaction tests in laboratory. However, compaction method in site is different from lab-test and the relationship between them is empirically defined, not based on soil mechanics. The compaction behavior has to be explained with soil mechanics for performance-based design. In this study, we regarded the compaction as compression and consecutive expansion of unsaturated soil under undrained condition and simulated compaction in geotechnical engineering sites with unsaturated soil/water coupled F. E. code.

Key Words : *Compacted soil, Unsaturated soils, Water retention characteristics*

キーワード: 締固め土, 不飽和土, 保水特性

1. はじめに

我が国は地震や豪雨などの自然災害が多く, 自然と対峙する地盤構造物の品質評価が重要な課題である. 最近でも, 駿河湾を震源とするマグニチュード 6.5 の強い地震によって, 東名高速道路の盛土のり面が崩壊, 5 日間にわたって通行止めになるという大規模な被害に見舞われた. 道路盛土や河川堤防などの盛土構造物は, その大半が「締固め土」を材料として構築される. RC 材料等から成る他の構造物に比べて地盤構造物は材料コストの面で経済的であるが, 一方で, 材料の品質にバラつきがあり, その安全性の評価が難しい.

近年, 建設業界では性能設計体系への移行が社会の趨勢であり, 盛土構造物においてもその可能性について議論されている. 性能設計では, 構造物全体としての品質評価が必須であり, 個々の構造物に対して施工管理方法を決定しなければならない. しかしながら, 現場締固め管理施工の現状は, 経験的手法によってのみ規定されている, いわば仕様設計に

沿うものであり, 材料特性への依存性はほとんど考慮されていないと言える.

本研究では, 不飽和土の力学を用いて, 通常は外観からの品質評価が困難な締固め土構造物の品質に及ぼす締固め方法の影響を検討する.

2. 河井ら¹⁾の静的締固めシミュレーション

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, 不飽和土の力学の体系化が遅れたことを背景として, 締固め土の強度発現メカニズムは未だ解明されていない.

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¹⁾は, 不飽和土の構成モデルと水分特性曲

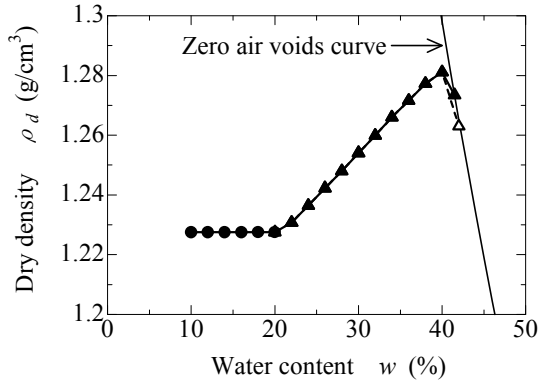


図-1 解析によって得られた締固め曲線

線モデルを取り入れた土/水連成有限要素解析コードを用い、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捉えることで、締固め曲線を表現した(図-1)。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、なおかつゼロ空気間隙曲線に接近しすぎ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。彼らは、この凸形状が、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を示唆した。

そこで本研究では、河井らの行った静的締固めシミュレーションより、土の締固め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、締固め土の品質を力学的に検討することを目的としている。さらに、締固め方法の違いが締固め土の品質に及ぼす影響についても検討を行う。

3. 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として表現するには、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。

3.1 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

Bishop²⁾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 Kawai³⁾のモデルを挙げるができる。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、サクシオ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⁴⁾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。さらに、数値計算上特異点に移行することを回避するために、特異点を持たない大野⁵⁾の EC モデルを組み込むこととする。EC モデルとは、本来、土のコントラクタンシー特性を指数関数で表現した弾塑性構成モデルである。

大野らは、有効応力を以下のように表した。

$$\sigma' = \sigma'^{net} + p_s \mathbf{1} \quad (1)$$

$$\text{ただし、} \sigma'^{net} = \sigma - p_a \mathbf{1}, p_s = S_e s \quad (2)$$

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

であり、 σ' :不飽和土の有効応力テンソル、 σ'^{net} :ネット応力テンソル、 $\mathbf{1}$:2 階の単位テンソル、 σ :全応力テンソル、 s :サクシオン、 p_s :サクシオン応力、 p_a :間隙空気圧、 p_w :間隙水圧、 S_r :飽和度、 S_e :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

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

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。

$$\zeta = \exp[(1 - S_e)^n \ln a] \quad (5)$$

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

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

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、

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

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、

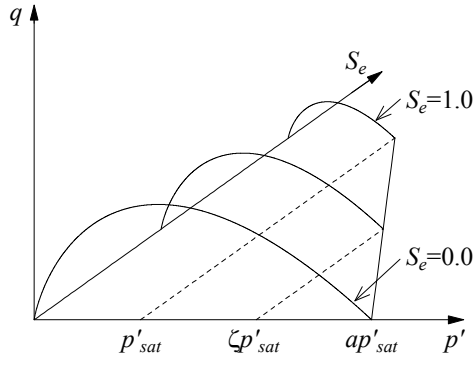


図-2 不飽和土の降伏曲面の概念図

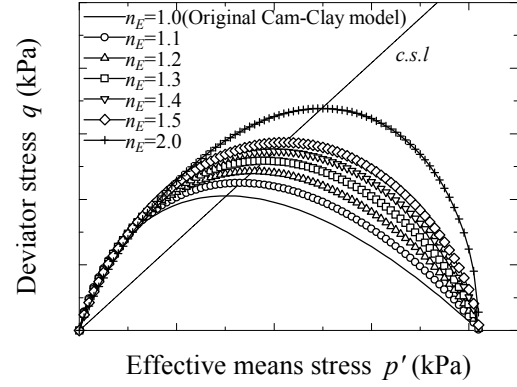
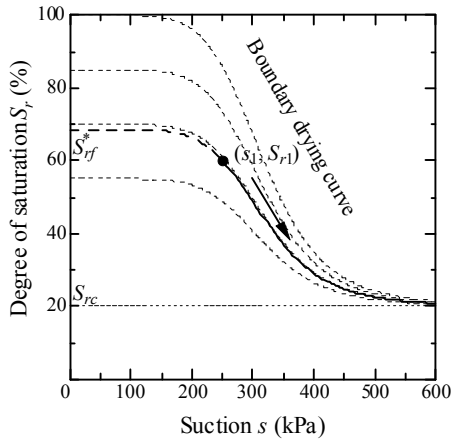
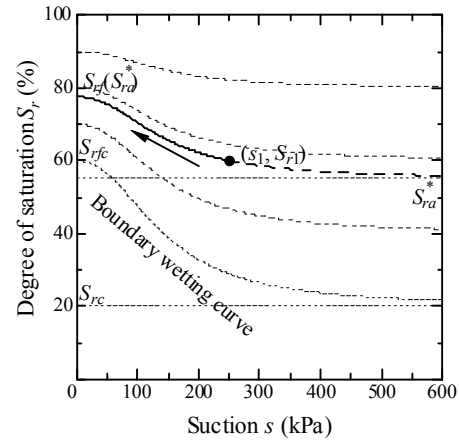


図-3 ECモデルの降伏曲面



(a) 脱水曲線



(b) 吸水曲線

図-4 河井らの水分特性曲線モデル

$$MD = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \quad (8)$$

で表される。

降伏関数の導出に用いる EC モデルの降伏関数は次式のように示される。

$$f(\sigma', p'_c) = MD \ln \frac{p'}{p'_c} + \frac{MD}{n_E} \left(\frac{q}{Mp'} \right)^{n_E} = 0 \quad (9)$$

ここで、

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

となり、 $\mathbf{I}$: 4 階の単位テンソルである。また、 n_E は EC モデルのフィッティングパラメータである。

EC モデルの降伏関数式(9)に式(7)を代入すると、不飽和土の降伏関数は次式のように導かれる。

$$f(\sigma', \zeta, \varepsilon_v^p) = MD \ln \frac{p'}{\zeta p'_{sat}} + \frac{MD}{n_E} \left(\frac{q}{Mp'} \right)^{n_E} - \varepsilon_v^p = 0 \quad (10)$$

式(10)は $n_E = 1.0$ を代入すると、

$$f(\sigma', \zeta, \varepsilon_v^p) = MD \ln \frac{p'}{\zeta p'_{sat}} + D \frac{q}{p'} - \varepsilon_v^p = 0 \quad (11)$$

となる。さらに式(11)は、飽和状態 ($S_e = 1$) では、 $\zeta = 1$ となり一般的な飽和土の弾塑性構成モデル (オリジナル Cam-Clay モデル) に帰着する。図-2 に S_e -Hardening モデルが示す不飽和土の降伏曲面の概念図を、図-3 に EC モデルの降伏曲面を示す。EC モデルに関しては、降伏面の回転により異方性を表現可能であるが、本研究では等方性モデルとして用いることとする。

3.2 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⁶⁾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⁷⁾のロジスティック曲

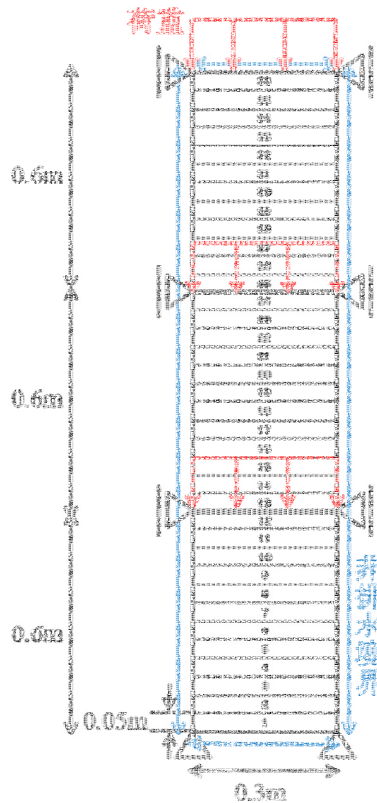


図-5 解析領域

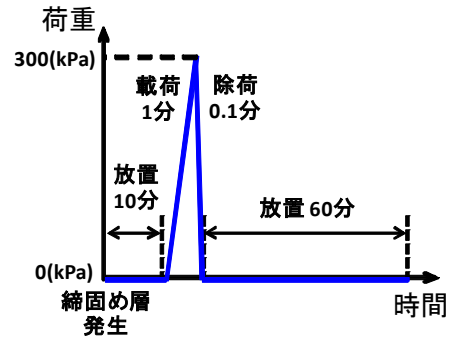


図-6 締固め条件 (Case1)

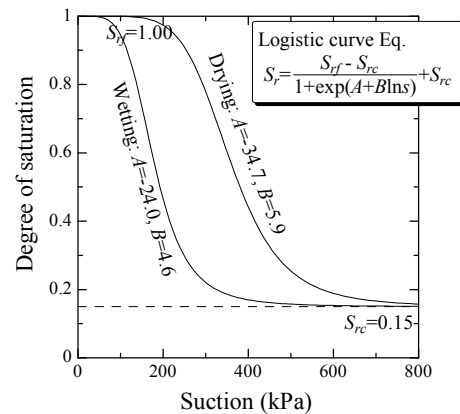


図-7 水分特性曲線

表-1 解析で用いる材料パラメータ

λ	κ	M	ν	a	n	n_E	k (m/day)	m
0.075	0.010	1.333	0.33	10	1.0	1.3	0.01	0.8

m : Mualem⁸⁾の不飽和透水係数式($K_r = S_e^{1/2} \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2$)のパラメータ

線式を用い、図-4のように表される。

4. 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)で静的締固めをシミュレートし、締固め土の品質の検討を行う。

4.1 解析条件

図-5に解析領域を示す。高さ0.05m・幅0.3mの要素を鉛直方向に12要素並べたまき出し厚さ0.6mの締固め層を1段とし、この締固め層を3段積み上げた締固め土構造物を想定する。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。段階的に発生

させる締固め層上端に等分布荷重を載荷・除荷することで締固めを行う。1段目の締固め終了後に2段目を積み上げ、1段目と同様に締固めを行う。このとき、載荷層の自重は、要素発生とともにその下部要素上端に等分布荷重として与え、その後締固め荷重を与える。図-6に締固め条件を示す。締固め層を積み上げて載荷を開始するまで自重のみ作用した状態で10分放置し、除荷後に次の締固め層を積み上げるまで60分放置する。載荷荷重を300(kPa)とし、載荷・除荷に要する時間をそれぞれ1分・0.1分とする。ここで図-6は、境界値問題の最終結果に至るまでの過程を十分に考察できる条件として設定した。要素番号は下から順番に要素1～36とする。

解析に用いる材料定数を表-1、水分特性曲線を図-7のように与える。材料定数等は河井らの締固めシミュレーションを参考にした。また、試料の初期状態として、間隙比1.20、含水比 $w=36\%$ 、飽和度0.81を与え、このとき主吸水曲線上にサクシオン～

表-2 解析ケース

	まき出し厚さ	転圧回数	放置 1	放置 2
Case1	0.60m×3 段	1	10 分	60 分
Case2	0.15m×12 段	1	10 分	60 分
Case3	0.60m×3 段	4	10 分	60 分
Case4	0.60m×3 段	1	1 日	60 分
Case5	0.60m×3 段	1	10 分	1 日

放置 1：締固め層のまき出し後，载荷開始するまでの放置時間

放置 2：荷重除荷後に次の締固め層をまき出すまでの放置時間

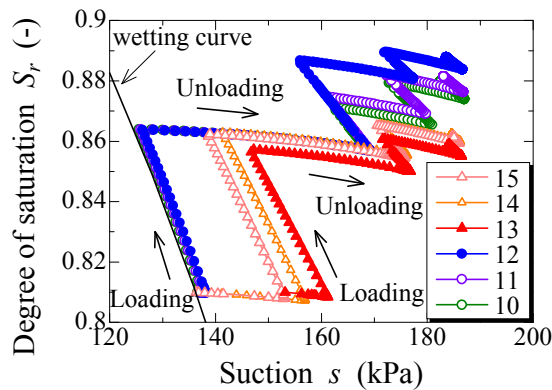


図-8 締固め施工中の水分特性曲線

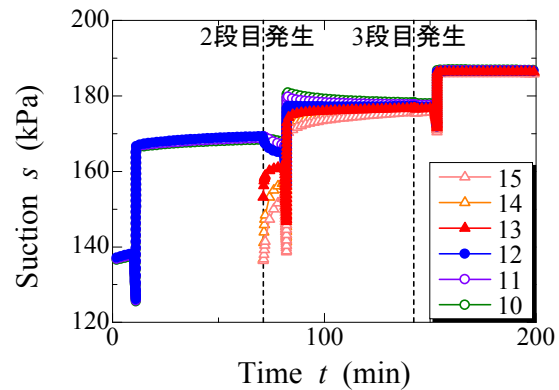


図-9 締固め施工中のサクシオン変化

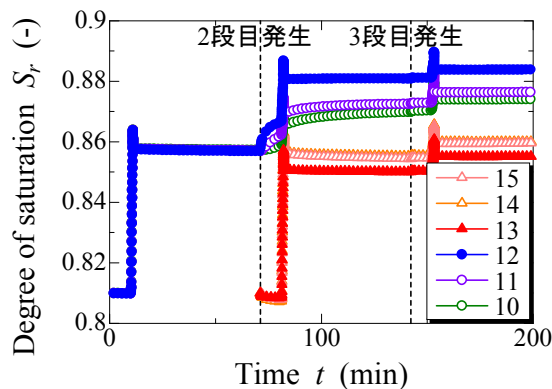


図-10 締固め施工中の飽和度変化

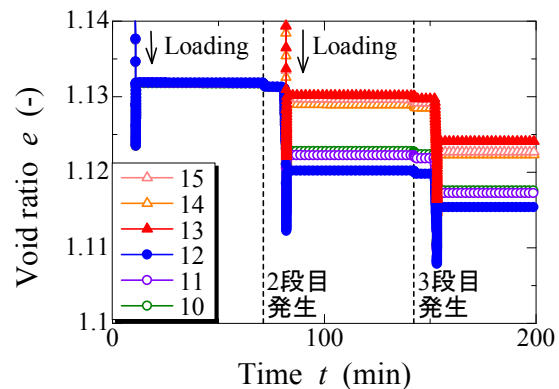


図-11 締固め施工中の間隙比変化

飽和度関係があるものとし，初期サクシオン 136.4kPa を与えた．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，土粒子接点で発現するサクシオンは，その飽和度状態で最も小さい状態であると考えられ，主吸水曲線上に初期状態を設定することが合理的であると考えた．ここで，発生させる全要素で同じ初期サクシオンを与えるため，要素発生時には全水頭の鉛直方向分布から初期の水分状態が非定常状態となり，時間経過につれて解析領域内で鉛直下向きの流れが生じる．締固め層まき出し後の放置時間の影響は，このときの流れに影響を受けると考える．

また，締固め方法の違いが締固め土の品質に及ぼす影響についても検討を行う．表-2 に，解析ケースをまとめる．Case 1, 2 は各層のまき出し厚さが

異なる．まき出し厚さを薄くすることは，締固め層全体における载荷量の増大を意味するため，Case3 では転圧回数を増やし，繰り返し締固めの影響について考察を行う．また，Case4, 5 では，締固め速度の違いの影響について検討する．

4.2 締固め土の品質の検討(Case1)

まず，実施工でも問題となる施工層間に現れる施工継ぎ目に注目して検討を行う．図-8～図-11 は図-5 の解析領域における，1 段目(要素 1~12)の上部 3 要素(要素 10~12)と 2 段目(要素 13~24)の下部 3 要素(要素 13~15)の解析結果である．図-8 は締固め中の水分特性曲線を表わしている．非排水条件であるため，締固め中の载荷圧縮時には，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

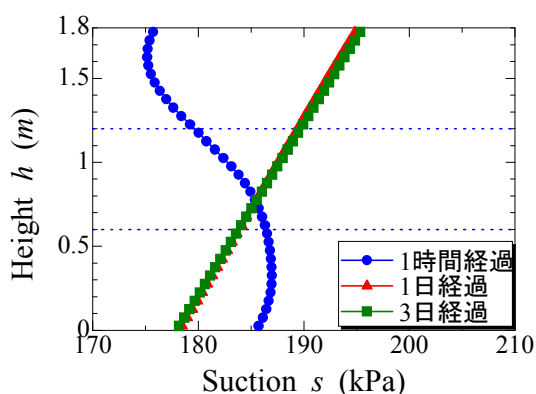


図-12 サクションの深度分布

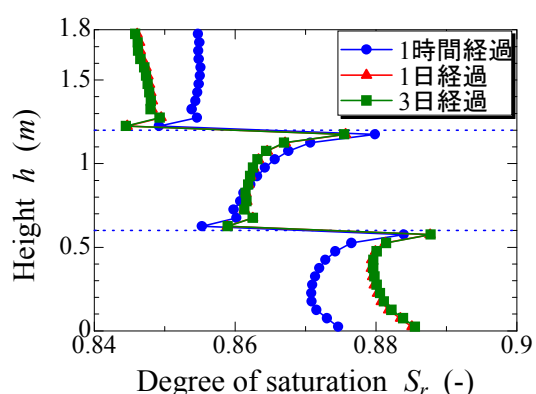


図-13 飽和度の深度分布

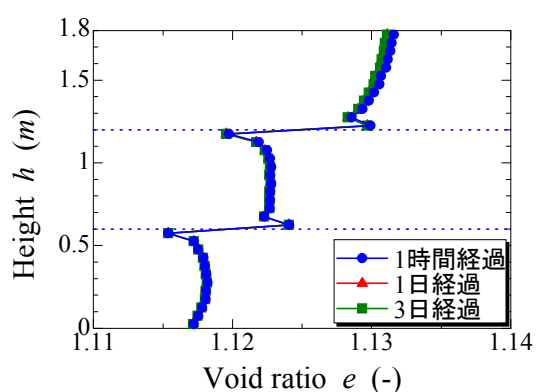


図-14 間隙比の深度分布

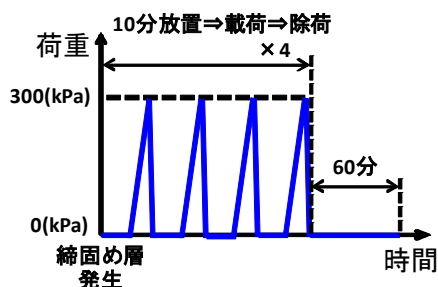


図-15 締固め条件 (Case3)

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-9、10 に示すようなサクション・飽和度の経時変化が得られた。ここでは、2

段目発生において、要素 10~12 ではサクション減少・飽和度増加の吸水挙動を、要素 13~15 ではサクション増加・飽和度減少の脱水挙動を示すことが確認できる。これは、初期サクションが全要素ともに同じであることや締固めによるサクション増加によって、上段と下段の各要素が持つサクションに差異が生じたためと考えられる。また、図-10 から、2 段目の締固め応力・除荷後の飽和度の値は、下段では最上部要素(要素 12)が目立って高く、上段では最下部要素(要素 13)が目立って低くなっていることが分かる。これは、要素間の全水頭差による水分移動の他に、締固め応力・除荷時の初期サクション・飽和度の値の違いから、締固めによって水分特性曲線ヒステリシスを呈したためと考えられる(図-8)。図-11 は間隙比の経時変化である。2 段目の載荷圧縮において、下段では最上部要素(要素 12)の間隙比変化が他要素に比べて大きく、上段では最下部要素(要素 13)の間隙比変化が他要素に比べて小さくなっている。図-2 から分かるように、飽和度の増大によって降伏応力は減少するため、外部載荷応力に対する変形量は大きくなる。前述の通り、要素 12 では 2 段目発生によって吸水挙動を示すため剛性が低下し、間隙比が大きく変化したと考えられる。同様に、要素 13 では 2 段目発生による脱水挙動から、剛性が増加したものと考えられる。

続いて、図-12、13、14 に最終締固め終了後から 1 時間経過・1 日経過・3 日経過時の高さ方向のサクション・飽和度・間隙比の分布を示し、締固め土全体の品質について考察を行う。3 段目の締固め終了時点では、サクションの分布は非定常であるが、時間の経過とともに静水圧分布に漸近していくのが分かる。それに伴い、上段締固め層では脱水、下段締固め層では吸水が生じ、飽和度の分布も変化している。間隙比については、最終締固め終了から時間経過に伴う変化はほとんど見られない。図-13、14 より、施工層間では飽和度・間隙比分布において、不連続な継ぎ目を確認できる。これは、前述に示すように、新しい層のまき出し時における上段と下段の土の状態が、下段の締固めによって大きく異なったためと考えられる。その結果、飽和度、間隙比は、各層内では連続的であるものの、全体としては層間の継ぎ目の不連続性ととも、段ごとに異なるものであることが分かる。

4.3 まき出し厚さと転圧回数の影響

Case 1~3 の比較から、まき出し厚さと転圧回数の違いが締固め土の品質に及ぼす影響について検討する。図-15 は Case3 の締固め条件である。Case2 の締固め層全体の転圧回数と同等にするため、Case3 では各層に対して 4 回の締固めを行うこととする。

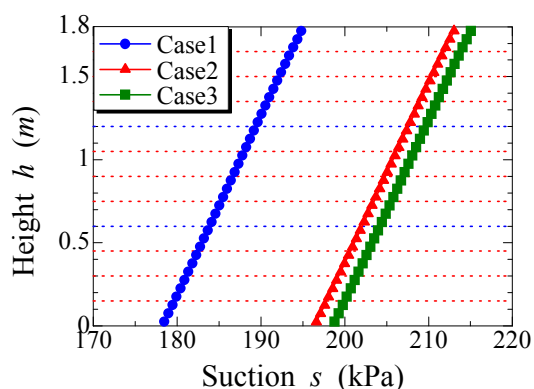


図-16 サクションの深度分布

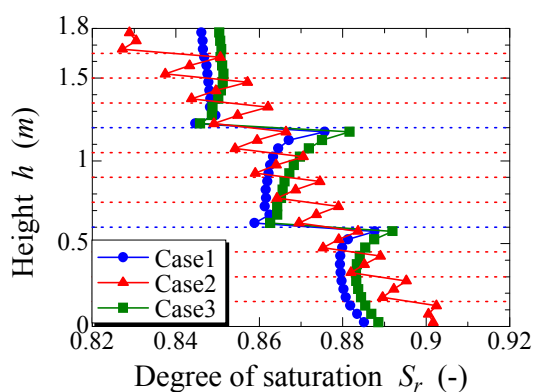


図-17 飽和度の深度分布

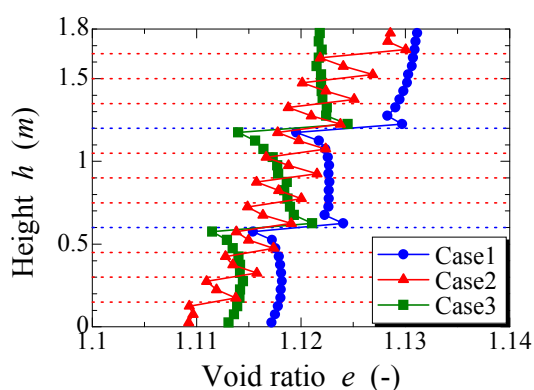
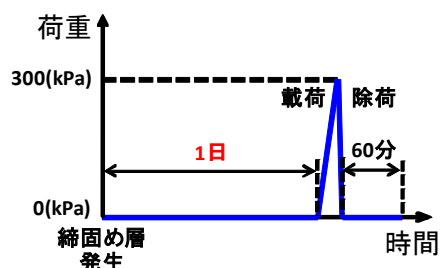
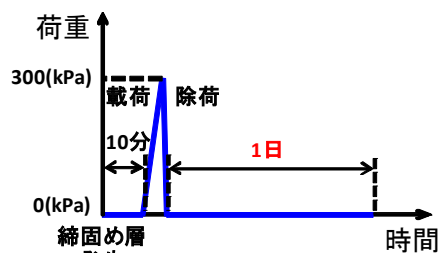


図-18 間隙比の深度分布

図-16, 17, 18 は, Case1~3 における最終締固め終了後から 1 日経過時の高さ方向のサクション・飽和度・間隙比の分布を示している。まき出し厚さを薄くすることは締固め土構造物全体での載荷量の増大を意味しており, 図-16, 18 より, まきだし厚さを小さくするとサクションの値は大きく, 間隙比の値は小さくなるのが分かる。これは, 薄層まき出しが高いサクション値と乾燥密度を得るのに効果的であることを示す。また, 薄層まき出しは, 施工層間の継ぎ目における不連続の度合いを抑える効果も期待できる。しかしながら, 実施工では数均し過程が全体の施工スピードを制約している場合が多く, コストや品質, 施工方法などを総合的に評



(a) Case4



(b) Case5

図-19 締固め条件

価した場合, まき出し厚さの薄層化が必ずしも合理的なわけではない。逆に, まき出し厚が大きくなると, 締固め効果は小さくなるが, Case3 の解析結果が示すように, 転圧を複数回繰り返すことで, 全体的なサクション値と平均乾燥密度を高めることができた。より合理的な施工手段のためには, 個々の構造物に対して, こうした工学的な検討を様々に行う必要がある。

4.4 締固め速度の影響

ここでは, Case1・Case4・Case5 の比較から, 締固め施工速度の違いが締固め土の品質に及ぼす影響を検討する。Case4・Case5 の締固め条件を図-19 に示す。Case4 では, 新しい締固め層をまき出し, 締固め応力の載荷を開始するまでの放置時間を 1 日とし, Case5 では, 締固め荷重除荷後に次の締固め層をまき出すまでの放置時間を 1 日とした。

図-20, 21, 22 に Case1・Case4・Case5 における最終締固め終了後から 1 日経過時の高さ方向のサクション・飽和度・間隙比の分布を示す。Case1 と Case5 より, 締固め後の放置時間を変えても, サクション・飽和度・間隙比分布にはほぼ影響を与えないことが分かる。しかしながら, 新層まき出し後における放置時間を長くおいた Case4 では, Case1・Case5 と比べて, 最上段と最下段の飽和度・間隙比分布に差が見られた。これらの放置時間は, 締固め地盤内のサクション分布による全水頭の差が, 地盤内で間隙水の再分布を促進することに費やされる。この結果, 締固め荷重が作用したときに如何なるサクション・飽和度分布にあるかが, 締固め後の間隙比・飽和度分布に影響を及ぼすと考えられる。

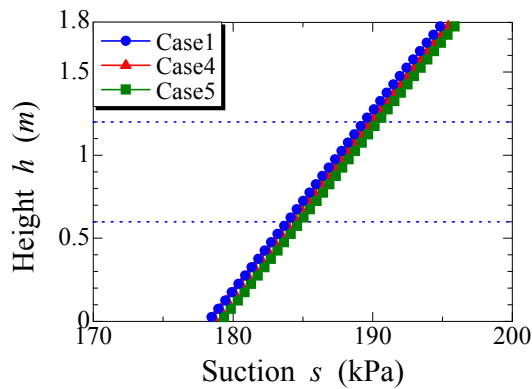


図-20 サクシヨンの深度分布

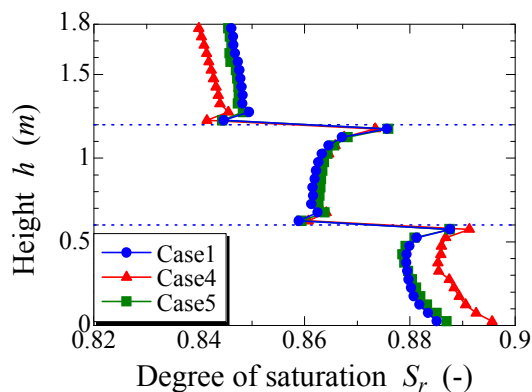


図-21 飽和度の深度分布

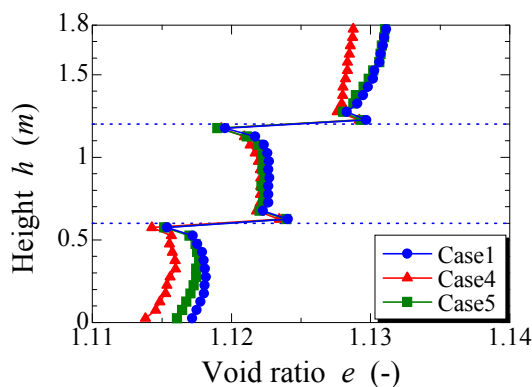


図-22 間隙比の深度分布

5. まとめ

本研究では、水分特性曲線のヒステリシスを考慮した S_e -Hardening モデルを取り入れた土/水連成有限要素解析プログラム(DACSAR-UA)を用いて、土の締固めを不飽和土の非排水圧縮・膨張現象と捉えることで、実際に行われる施工法の違いが締固め土の品質に及ぼす影響を検討した。その結果、何層かに分けて行う段階締固め施工では、施工層間に飽和

度・間隙比の不連続な施工継ぎ目が現れることが明らかとなった。また、締固め施工後は、サクシヨンが静水圧分布となるように地盤内で水収支が生じ、定常状態に至るが、最終的な飽和度・間隙比分布には、施工法の違いが明確に現れることが分かった。以上のように、通常は外観からの評価が困難な締固め土の品質を、土/水連成解析によって明らかにした。この成果は、締固め土構造物の建設・維持において、「品質評価」に基づく締固め管理を可能にするものであると考える。

しかしながら、本研究で設定した締固め地盤は、実地盤のスケールと比べると小さく、土質定数も仮想のものである。実際に用いる土材料の物性を用い、忠実に施工過程を模擬することで、精緻な締固め品質の評価が可能になると考えられる。

参考文献

- 1) 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.
- 2) Bishop, A. W. : The principle of effective stress, *Norwegian Geotechnical Institute*, No.32, pp.1-5, 1960.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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, pp.407-414, 2006.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.

(2010 年 3 月 9 日 受付)