



解析による施工時期の違いが盛土の初期応力に与える影響

金澤, 伸一
五十嵐, 日菜
飯塚, 敦

(Citation)

土木学会論文集A2 (応用力学), 73(2):I_489-I_496

(Issue Date)

2018-01

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2018 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90005912>



解析による施工時期の違いが 盛土の初期応力に与える影響

金澤伸一¹・五十嵐日菜²・飯塚敦³

¹正会員 福島工業高等専門学校准教授 都市システム工学科(〒970-8034 いわき市平上荒川長尾30)

E-mail: kanazawa@fukushima-nct.ac.jp

²学生会員 福島工業高等専門学校専攻科 産業技術システム専攻(〒970-8034 いわき市平上荒川長尾30)

E-mail: 12604@fsnct.com

³フェロー会員 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)

E-mail: iizuka@kobe-u.ac.jp

近年、集中豪雨などの異常気象による災害が世界中で頻発している。盛土構造物は安定性・変形特性を考慮し、締固め土で構成されているが、地震や集中豪雨が要因となり盛土構造物の崩壊事例が数多く報告されている。そこで、盛土構造物の品質を築堤から供用まで評価・検討できる解析手法の確立が急務であり、初期応力の把握が極めて重要であると考えられる。それゆえ、築堤後における初期応力状態を推定するためには、降雨や蒸発といった乾湿気候条件を考慮した初期応力状態を推定する手法の提案が必要である。そこで本研究では、不飽和土／水／空気連成有限要素法解析プログラム（空気溶存・溶解型）を用いて、締固めと施工時期の違いを考慮した築堤解析を行う。

Key Words : construction period, initial stress, embankment

1. はじめに

近年、集中豪雨などの異常気象による災害が世界中で頻発している。それに起因して、盛土構造物の品質を築堤から供用まで継続的に評価・検討できる解析手法の確立が急務であり、初期応力の把握が重要であると考えられる。通常、盛土構造物は安定性や変形特性の向上を目的とした締固め土で構成されているが、集中豪雨が要因となり盛土構造物の崩壊事例が数多く報告されている。

現在、盛土の豪雨に対する安定性の評価に対し、道路土工盛土工指針¹⁾では、基礎地盤の処理や盛土材料の品質・締固めの程度・水の処理の4つに強く依存しており、その中でも排水処理が重要視されている。それに加え、盛土の施工・維持管理が技術者の経験則に依存している。そういったことを踏まえ、今後は集中豪雨に対する維持管理が重要視されると考えられる。

また、盛土の排水対策・降雨の影響を受ける時期は重要な項目である。盛土の降雨に対する排水対策は施工中と供用後で異なるが、降雨の影響を受けるのは施工開始から供用後まで断続的である。それゆえ、施工中の降雨が盛土内の応力状態を変化させる可能性が示唆される。しかしながら、盛土の施工時期は特定できず施工中に受

ける降雨量は様々である。一般的には梅雨の時期に合わせて施工は行われないが、やむを得ずその時期に施工される場合もあるが、天候に注意しながら排水対策を行うなどの対応となっている。また盛土は乾湿の繰り返しといった気候条件に曝されており、不飽和状態から飽和状態へ遷移する応力挙動による影響を無視することはできない。それゆえ、築堤後における初期応力状態を推定するためには、乾湿気候条件による影響を考慮することが重要であり、降雨や蒸発といった気候条件を考慮した解析手法の提案が必要である。これまで既往の研究では、岡ら²⁾、向後ら³⁾、田中ら⁴⁾、金澤ら⁵⁾は混合体理論・多孔質理論による、それぞれの手法を用いて盛土内の応力状態について検討しているが、築堤による初期応力状態の把握に対する議論はなされていない。

そこで本研究では、不飽和土／水／空気連成有限要素法解析プログラム(DACSAR-MP)⁶⁾を用いて、締固めと様々な施工時期に対する築堤解析を行う。また、築堤解析はPipatponsaら⁷⁾に倣い行う。彼らは、砂を用いて安息角での盛土の初期応力状態を、理論・実験・弾性解析から提案している。本研究でも彼らの手法を用い、築堤中の降雨量の違いが盛土内部の初期応力に及ぼす影響を比較・検討する。

2. 解析に用いた不飽和土の弾塑性構成モデル

これまでに、いくつかの不飽和土構成モデルが提案されている。本研究で用いる不飽和土の弾塑性構成モデルは大野ら⁸⁾の提案するモデルである。彼らは、軽部ら⁹⁾のモデル（含水状態を考慮した有効応力の定義が与えられている）を参考に有効飽和度を剛性を表す状態量としたモデルを提案している。

まず有効応力を次式で与えている。

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

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

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

ここで、 σ' :有効応力テンソル、 σ^N :基底応力テンソル、 σ :全応力テンソル、 $\mathbf{1}$:クロネッカーのデルタ、 p_a :間隙空気圧、 p_s :サクシオン応力、 s :サクシオン、 p_w :間隙水圧、 S_e :有効飽和度、 S_r :飽和度、 S_{rc} :水分特性曲線上に現れる $s \rightarrow \infty$ における残留飽和度を示す。

さらに本研究では、数値計算上、微分不可能な特異点（例えば飽和時の先行圧密応力）に移行することを回避するために、降伏曲面に特異点を持たない大野ら¹⁰⁾の EC モデルを組み込んだ。EC モデルとは、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のことである。

彼らは、不飽和土の降伏関数を次式のように導いた。

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

ここで、 σ' :不飽和土の有効応力テンソル、 p'_{sat} :飽和時の先行圧密応力、 p' :平均有効主応力、 q :偏差応力、 M : q/p' で表された限界応力比、 D :ダイレタンシー係数、 ε_v^p :塑性体積ひずみ、 n_E :EC モデルのフィッティングパラメータである。

また、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 は有効飽和度の関数となっており、次のように表すことができる。

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

ここで b : $e - \ln p'$ 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。特に、 a はフィッティングパラメータとして取り扱うことが多い。

また、式(4)に $n_E = 1.0$ を代入すると、

$$f(\sigma', \zeta, \varepsilon_v^p) = MD \ln \frac{p'}{\zeta p'_{sat}} + D \eta - \varepsilon_v^p = 0 \quad (\eta = \frac{q}{p'}) \quad (6)$$

となる。式(3)は、飽和状態 ($S_e = 1$) では、 $\zeta = 1$ となりオリジナル Cam-Clay モデル¹¹⁾に帰着する。

図-1 に S_e -Hardening モデルが示す不飽和土の降伏曲面の概念図を示す。さらに、図-2 は EC モデルの降伏曲面を示しており、 n_E が大きくなるほど特異点が解消され微分可能となる ($n_E = 1.5$ の時、修正 Cam-Clay モデル¹²⁾に類似する)。また本研究では、等方モデルとして用いることとする。

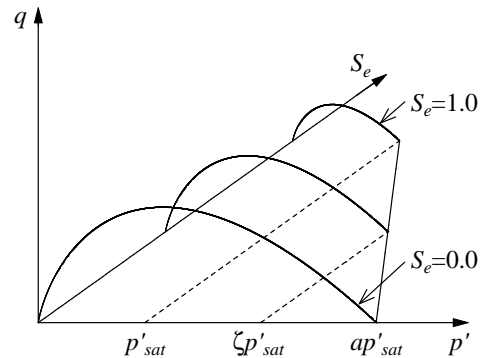


図-1 不飽和土の降伏曲面の概念図

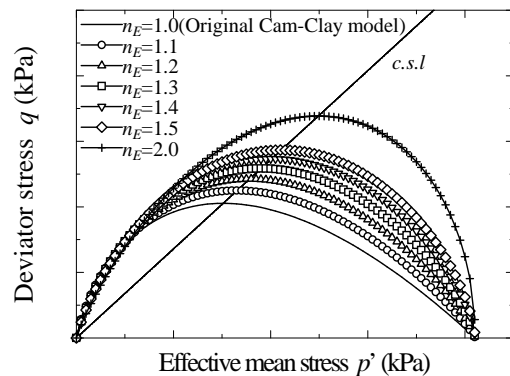


図-2 EC モデルの降伏曲面

3. 解析に用いた水分特性曲線モデル

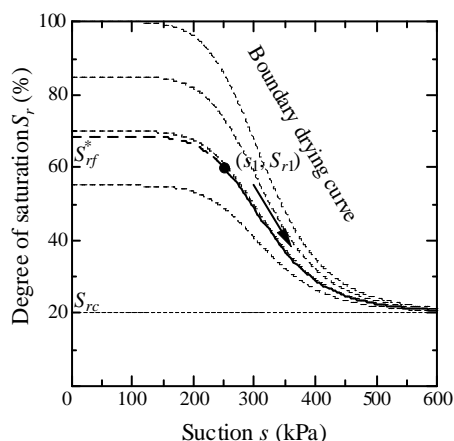
不飽和土の力学挙動を左右する水分特性曲線（サクシオン～飽和度関係）は、脱水時と吸水時で異なることは広く知られている。つまり、サクシオン～飽和度関係を表した水分特性曲線は唯一ではなく、脱水時もしくは吸水時の保水状態に依存して、無数の走査曲線が存在する。そこで、河井ら¹³⁾は、それらの走査曲線が脱水時と吸水時ではそれぞれ相似な形であることを利用することで、ヒステリシス表現が可能な水分特性曲線モデルを提案している。また本解析では、図-3に示すように、ある任意のサクシオン～飽和度状態から、脱水側と吸水側に描く (1) 脱水曲線、(2) 吸水曲線は、杉井、宇野¹⁴⁾の提案するロジスティック曲線式を用いる。

脱水曲線では、任意のサクシオン、飽和度(s_l, S_r)を通過する脱水曲線は $s \rightarrow \infty$ で限界含水比 w_c に収束し、間隙比の影響を無視すれば $s \rightarrow \infty$ で収束する飽和度は $S_{rc} = G_s w_c / e$ となる。ここで G_s : 土粒子比重, e : 間隙比である。

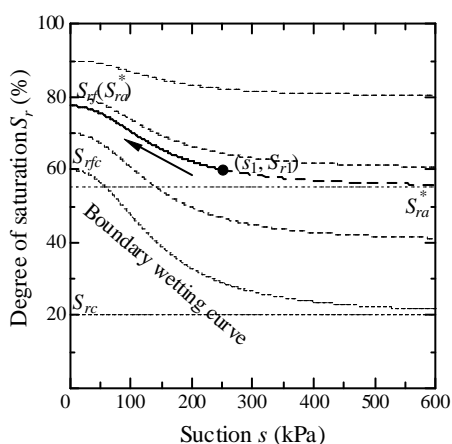
これによって求めた S_{rf}^* を用いれば脱水曲線が次式のように表される。

$$S_r = \frac{S_{rf}^* - S_{rc}}{1 + \exp(A^D + B^D \log_e s_l)} + S_{rc} \quad (7)$$

ここで、 S_e : 有効飽和度, S_r : 飽和度, s : サクシオン, S_{rc} : $s \rightarrow \infty$ での飽和度 (残留飽和度), S_{rf} : $s = 0$ における飽和度, A, B : 水分特性のフィッティングパラメータである。次に吸水曲線では、任意のサクシオン、飽和度(s_l, S_r)を通過する吸水曲線は $s \rightarrow \infty$ での収束飽和度が一定にならないため、脱水曲線とは違い S_{ra} と S_{rf} の 2 つのパラメータを決めなければならない。つまり、次式を満足する S_{ra}^* を求めればよい。



(1) 脱水曲線



(2) 吸水曲線

図-3 水分特性曲線モデル

$$\frac{S_{r1} - S_{ra}}{S_{rf}(S_{ra}^*) - S_{ra}^*} = \frac{1}{1 + \exp(A^W + B^W \log_e s_l)} \quad (8)$$

これにより、任意の飽和度、サクシオンでも脱水曲線、吸水曲線が求まる。

4. 空気溶存・溶解を考慮した連成解析

本研究では、不飽和土/水/空気連成有限解析コード (DACSAR-MP) に、盛土に気相が存在する不飽和状態にあり、かつ気相の液相への溶解・溶脱現象を考慮できる、杉山らの提案するモデル¹⁵⁾を使用した。杉山らは、以下の仮定によりモデルを構築した。

- ①気相中に存在する気体の体積変化は、ボイル=シャルルの法則 (Combined gas law) から導出される状態方程式で考える。
- ②液相中に存在する気体の溶存・溶脱はヘンリーの法則で考えることにする。
- ③間隙空気は全て理想気体として扱い、間隙空気自身の相変化 (液化) は考慮しないとする。
- ④溶解気体は体積をもたず、溶解しても液相の密度に影響を及ぼさないと仮定する。
- ⑤液相に溶解・溶脱に伴う熱の影響については考慮せず、温度一定であると仮定する。
- ⑥温度が一定であるため、蒸気圧についても考慮せず、気相は圧縮・膨張、もしくは、液相への溶解・溶存のみの変化であるとしている。

高圧条件下では気相の体積が無くならないため、高飽和度付近で急激な圧力上昇が生じ、圧力を過剰に評価してしまうことが懸念される。また、より精緻な飽和度、サクシオン変化を捉えるため、本研究では、空気溶存・溶解型を考慮して解析を行う。詳細については参考文献 15を参照されたい。

5. 解析による締固めの表現

実際の盛土構造物は締固められた土で構成されている。つまり、解析的に盛土構造物を表現するには締固めの再現性を確認する必要がある。そこで、本章の目的として本研究で用いる解析プログラムの締固めに対する適含水比の把握を行った用性の検討を行った。

(1) 解析条件

図-4 に解析に用いたメッシュ図を示す。解析領域のサイズは、高さ 20mm・幅 10mm の要素を想定する。解析領域の下端は水平・鉛直方向ともに固定し、左右端は水平方向のみを固定とし、一次元圧縮・除荷条件としている。また、解析領域の上下端・左右端は非排水境界とし、上端のみを排気境界としている。次に、図-5 で締固めの載荷条件を示す。載荷条件は荷重の載荷過程と除

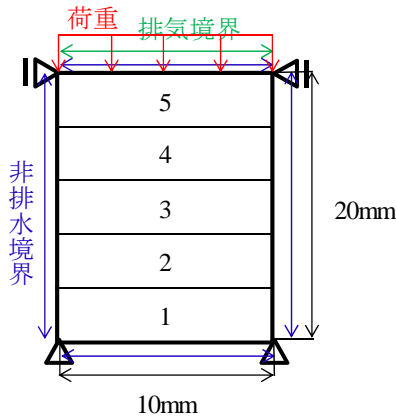


図-4 メッシュ図

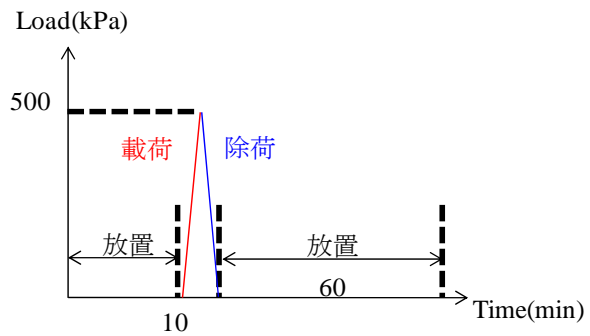


図-5 荷重条件

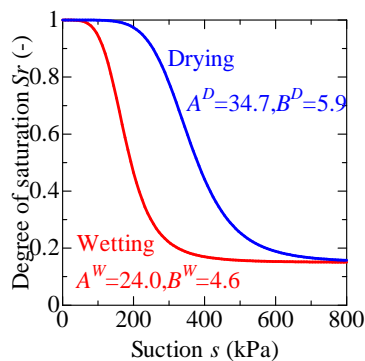


図-6 水分特性曲線

表-1 解析で用いた材料パラメータ

λ	κ	M	m	S_{r0}	p'_{sat} (kPa)	k_a (m/day)
0.13	0.013	1.33	0.8	0.15	20.0	1.00
n_E	a	b	ν	G_s	e_0	k_w (m/day)
1.3	10.0	1.0	0.33	2.7	1.0	0.01

m : Mualem¹⁶⁾の不飽和透水係数

$$(K_{rw} = S_e^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^2 \right]) \text{ のパラメータ}$$

荷過程の速度を簡易的に1分間とした。また、静的締固めとして最終荷重が500kPaとなるように荷重を与え、そののち除荷を行った。この値は一般的な盛土施工で使用されているタイヤローラの性能による平均接地圧を参考にしている。また、締固め試験の載荷前に10分、除荷後に60分の放置を行うことで、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。次に、解析に用いる材料パラメータを表-1、水分特性曲線を図-6のように与える。材料定数、水分特性曲線については、本田ら¹⁷⁾の研究による結果等を考慮して決定している。

ここで、 λ :圧縮指数、 κ :膨潤指数、 k_a :透気係数、 k_w :透水係数、 e_0 :初期間隙比、 S_{r0} :限界飽和度、 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、 ν :ポアソン比、 A 、 B :水分特性曲線のフィッティングパラメータで、添え字の D は脱水曲線、 W は吸水曲線を示す。

締固め解析の初期状態として、間隙比1.0、初期含水比を $w=6\% \sim 28\%$ で与えた。また初期飽和度と初期サクシジョンについては、間隙比と各含水比から飽和度を決定したのち、水分特性曲線より初期サクシジョンを決定した。

(2) 解析結果

図-7は、締固め終了後の乾燥密度を縦軸として、含

水比で整理した締固め曲線のグラフである。図を見ると含水比16%以降から乾燥密度が上昇していることから、弾塑性領域になったことが確認できる。その後、締固め曲線は最適含水比 $w_{opt}=24\%$ で最大乾燥密度 $\rho_{dmax}=1.58\text{g/cm}^3$ となり、使用するプログラムは土の締固めを解析的に表現できると判断できる。

なお、これ以降の解析で用いる盛土の材料定数の最適含水比はこの結果により24%とする。

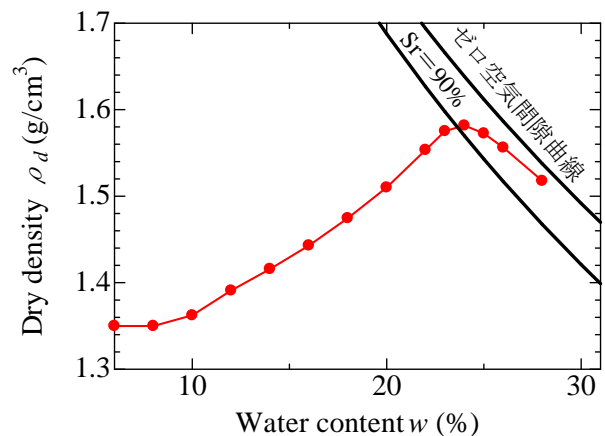


図-7 締固め曲線

6. 施工時期の違いによる盛土の初期応力解析

(1) 盛土の排水対策について

一般的に使用されている盛土の豪雨への排水対策の例を挙げる。

(a) 排水層について

盛土内の浸透水を排除するため、必要に応じて図-8のように盛土の一定厚さごとに水平の排水層を挿入する。特に、長大のり面を有する高盛土、片切り片盛り、切り盛り境部、沢を埋めた盛土や傾斜地盤上の盛土では、水平排水層を設置する必要がある。また、含水比の高い土で高盛土を構築すると、盛土内部の間隙水圧が上昇し、のり面のはらみ出し崩壊が生じることがあるので、透水性のよい材料で水平排水層を敷設し、間隙水圧を低下させて盛土の安定性を高めることが行われる。

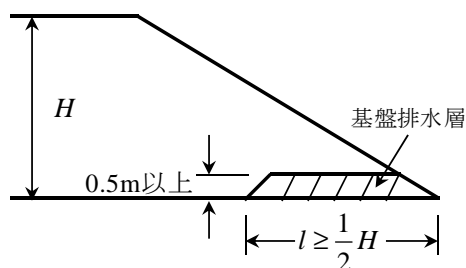


図-8 標準のり面勾配の排水層

(b) 法面緑化工

法面緑化工とは、法面を植物で覆うことにより、雨水による法面の浸食を防ぎ、風化を抑制することが可能となる。また、法面に周辺の自然環境と調和のとれた植生を成立させることで、自然環境や景観を保全することができる。さらに、植物を導入することにより二酸化炭素の吸収・固定効果が期待できることから、地球温暖化対策としても有効であるといえる。法面緑化工の一つに植生マットがあり、盛土構造物の法面に敷設することで上記の効果が得られるようになる。植生の種子の種類は主に芝科、マメ科が多く使用されている。

(2) 築堤中の降雨による盛土内部の応力挙動

本節では、5章で得られた解析による締固め試験の結果を受けて築堤解析を行い、それと同時に解析的に降雨・蒸発散を与える。これにより、築堤過程における降雨による盛土内部の応力挙動の変化を盛土築堤完了時の盛土全体の初期応力分布から検討する。

なお、本研究での初期応力状態とは盛土の築堤完了時の応力状態のことを示す。

(a) 解析条件

解析に用いる（基礎地盤、盛土ともに）材料パラメータおよび水分特性曲線は5章で用いたものと同様のものを用いている。図-9に解析で行う盛土の築堤シミュレーションを模式的に表した。また、図-10に解析対象となる盛土とその解析領域を示す。解析領域のサイズは、縦15m×横45mの基礎地盤と天端幅3m、下端15m、高さ6mの盛土を想定し基礎地盤は地表面から3mまで飽和とした。施工期間は1ヵ月間とし、一層30cmの撒き出し後、荷重条件500kPaとして各層に載荷と除荷を行うことで締固めを表現する。また、変位境界は基礎地盤の下端

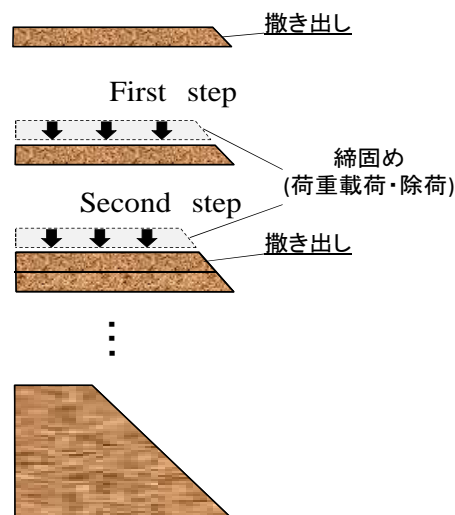


図-9 盛土の築堤過程

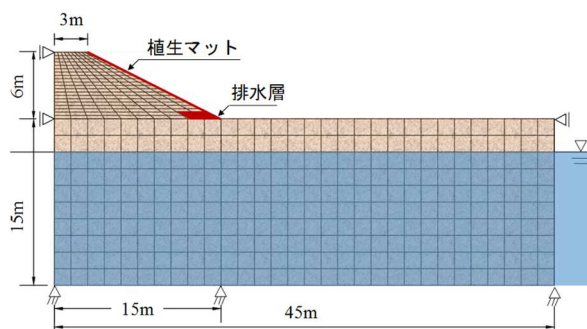


図-10 解析領域

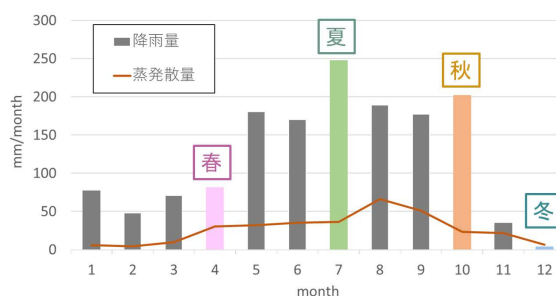


図-11 滋賀県彦根市の降雨量と蒸発散量（2011）

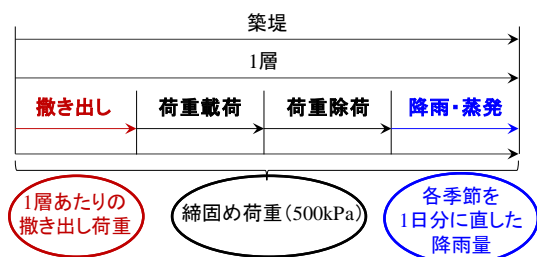


図-12 荷重条件と降雨・蒸発条件

を鉛直・水平方向固定とし、平面ひずみ解析を行う。基礎地盤の水利境界は上下を排水境界、左右を非排水境界とする。また排水対策として、図-10 に示すように、法先部分に排水層（長さ 3m、高さ 0.6m）と法面すべてに根要素として植生マットを表現した（蒸散効果のみを扱う）。排水層については盛土工指針に示されている条件内で、透水係数を堤体の 500 倍（透気係数は透水係数の 100 倍）に設定した。植生マットは一般的に使用されている種子を基準に蒸散量（2mm/day）を算出し用いた¹⁸⁾。使用した降雨条件を図-11 に示す。ここでは、日本の平均降雨量（約 1750mm）を模擬するため、滋賀県彦根市の年間降雨量（2011 年）の降雨条件を用いた¹⁹⁾。また解析には、春・夏・秋・冬を図のように選定して行い、築堤に関する荷重条件と降雨・蒸発条件を図-12 に示す。各季節を 1 日分に直した降雨量を築堤過程に与えて解析を行った。蒸発量に関しても降雨時期と合わせている。ここで、要素の盛り立てに際しては、初期条件として各層に対する所定の水頭を与える。このとき、大気と接する節点では排水条件が課せられる。与えられた水頭によって水収支が生じ新たな水頭が計算される。さらに、その上に要素を盛り立てる際にも同様の操作を行うが、盛り立て層とその下部層の間では、非排水条件が排水条件に変わり、上下の要素間の水収支を可能にする。また解析には、地盤浸透可能量（浸透能）を考慮している。つまり、地表面において間隙水圧が正とならないように降雨による地盤内の浸透可能量を考慮し計算している。

(b) 解析結果

解析結果は築堤完了時（各季節）の平均有効主応力 p' 、偏差応力 q 、サクシオン s 、間隙比 e 、せん断ひずみ ε_s^{20} 、飽和度 S_r 、限界状態接近比 (η/M) でまとめた。

まず基礎地盤について、図-13 の平均有効主応力より、どの時期も盛土直下において深くなるほど値が大きくなっており、図-18 の間隙比からも、どの時期も盛土直下において深くなるほど値が小さくなっている。これは、盛土が築堤されたことによる圧密効果が地盤内に十分発揮されていると考えられる。

次に盛土内部について、図-13 の平均有効主応力より、降雨量が少ない春と冬の値が大きく、逆に降雨量の多い夏と秋の値が小さい。また、図-18 の間隙比より、

春と冬の値が他の季節より小さく、逆に夏と秋の値は斜面部分大きい。これは、降雨による体積膨張が生じたことや、図-15 のサクシオン分布より夏と秋のサクシオンが消失したことが原因として考えられる。また、サクシオンが大きい（不飽和状態）ほど、強度・変形特性が向上するため、降雨量が少ない季節の方がより盛土内の強度が大きいものと考えられる。それに伴い、図-17 のせん断ひずみ分布より、春と冬の値は小さくなっているが、夏と秋では斜面にわずかな円弧すべりの形が現れている。値としては最大で 1% 程度であるが、築堤完了時に既にすべりのモードを形成していることが確認できる。また、図-19 の限界状態接近比より、表層部分に着目すると、夏と秋に、盛土内部と比べてやや高い値を示していることがわかる。しかしながら、解析上どの部分においても限界状態接近比に近づくことはなく、今すぐ崩壊に至るとは考えにくい。ここでも円弧を形成するように限界状態接近比が大きくなっているため、築堤完了時、すでに表層部分が弱部になっていることが確認された。

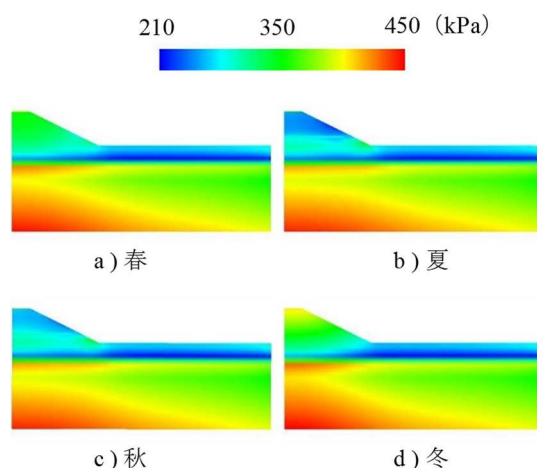


図-13 平均有効主応力 p'

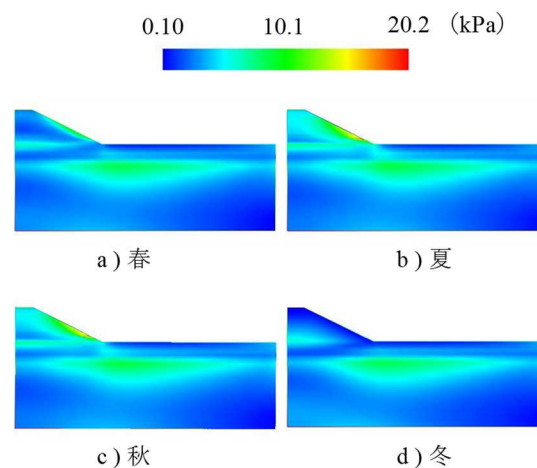


図-14 偏差応力 q

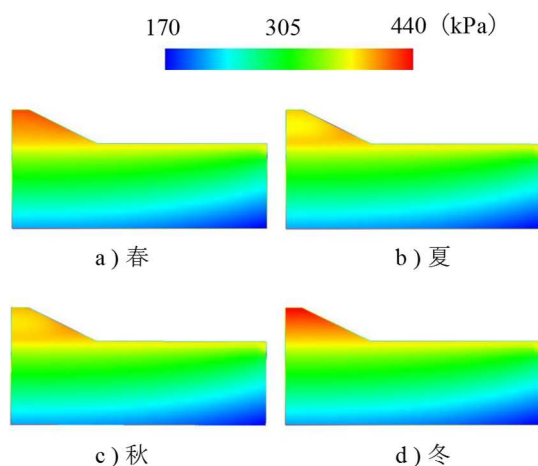


図-15 サクシヨン s

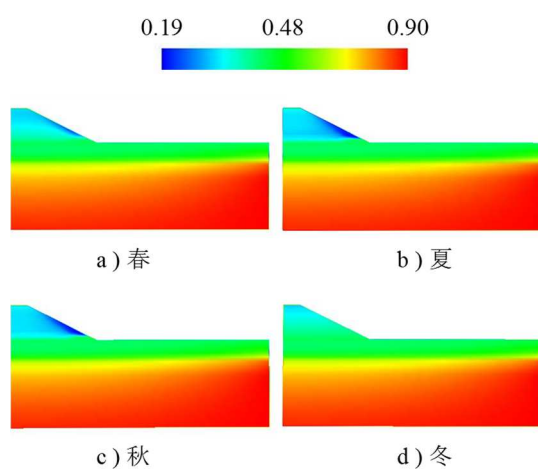


図-16 飽和度 S_r

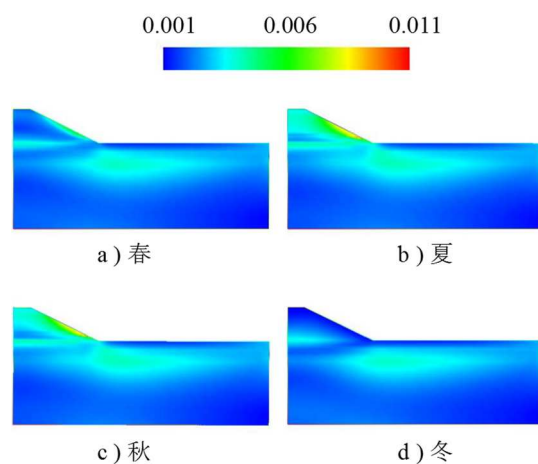


図-17 せん断ひずみ ε_v

以上のように、築堤中の降雨条件の違いが盛土築堤完了時の各初期応力状態に影響を及ぼす結果となった。また、弱部が確認された表層部分に関して、供用後の継続解析を行うことも必要であると考えられる。

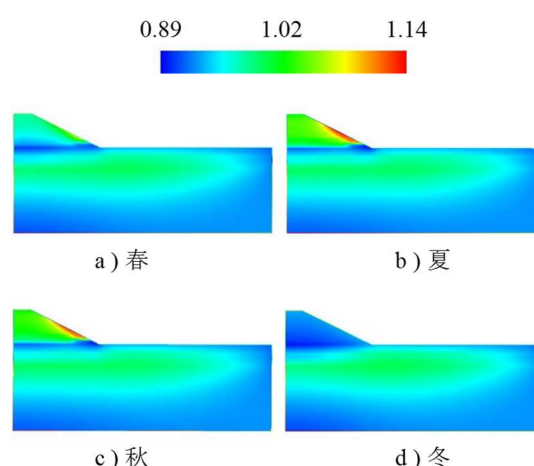


図-18 間隙比 e

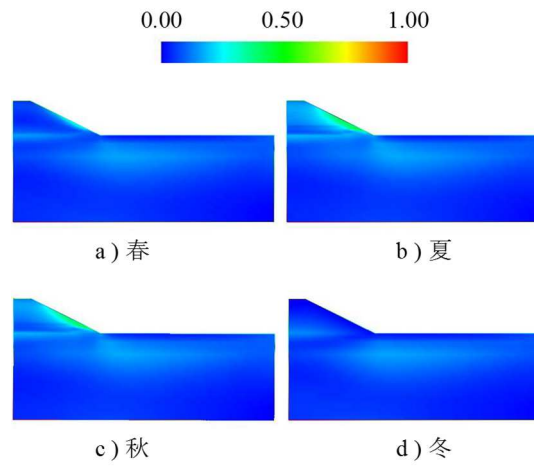


図-19 限界状態接近比 (η/M)

7. まとめ

本研究では、空気溶存型の不飽和土／水／空気連成有限要素解析を用いて、解析による締固めと、盛土築堤時の降雨・蒸発散の違いが初期応力に及ぼす影響を検討した。以下に結果をまとめる。

- 1) 施工時期の違いにより初期応力状態が変化すること、降雨量の少ない時期に施工した盛土が降雨量の多い時期に施工した盛土よりも強度が高くなることが確認された。
- 2) 水収支の影響を直接的に受ける斜面に大きな差が見られ、それに伴い築堤完了時で既にすべりのモードを形成する結果となった。

- 3) 施工後、盛土の長期的な応力状態をモニタリングする際、初期応力解析を把握することは重点的な計測器の設置位置の把握に役立つと考えられるため、長期的な盛土の性能照査を行う場合の一つの指標になると考える。

以上のように、本論文では、様々な施工時期による盛土内の応力挙動の変化を解析的に表現した。また、精緻

な初期応力状態を求めるために、降雨や蒸発といった乾湿気候条件を考慮して初期応力状態を比較検討した。

今後は、実地盤における土質材料の物性値を用い、施工過程を模擬することで、より精緻な品質評価が可能になると考えられる。ただし、今回は限られた条件での結論であり、また非常に理想的な条件の下での解析結果である。今後は、より自然環境下に即した解析条件でも行っていく必要があると考える。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会:「道路土工一盛土工指針」,丸善出版,2010.
- 2) Oka, F., Kimoto, S., Takada, N., Gotoh, H. and Higo, Y.: A seepage-deformation coupled analysis of an unsaturated river embankment using a multiphase elasto-viscoplastic theory, *Soils and foundations* Vol.50, No.4, pp.483-494, 2010.
- 3) 向後雄二, 高橋章, 鈴木朋和: 不飽和土弾塑性モデルを用いた実ダムの築堤・湛水挙動解析, *土木学会論文集*, Vol.66, pp.183-195, 2010.
- 4) 田中麻穂, 河井克之, 金澤伸一, 橘伸也, 大野進太郎, 飯塚敦, 竹山智英: 築堤シミュレーションにおける設定条件が初期応力状態に及ぼす影響, *応用力学論文集*, Vol.13, pp.423-430, 2010.
- 5) 金澤伸一, 豊嶋拓馬, 河井克之, 橘伸也, 飯塚敦: 土/水/空気連成有限要素解析を用いた締固め土の力学挙動の解析, *土木学会論文集 A2(応用力学)*, Vol.15, pp. 291-298, 2012.
- 6) Kanazawa, S. et al.: Influence of rain and evaporation of the stress state for embankment with soil/water/air coupled F.E. analysis. *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, Vol. 62, Vol.62, pp.227-235, 2013.
- 7) Pipatpongsa, T., Tanaka, M., Kanazawa, S., Matsushita, T., and Kawai, K.: Theoretical and experimental studies of stress distribution in wedge-shaped granular heaps, *Acta Mechanica Solida Sinica*, Vol.27, Issue 1, pp. 28-40, Elsevier, February 2014.
- 8) 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.
- 9) 軽部大蔵, 加藤正司, 浜田耕一, 本田道識: 不飽和土の間隙水状態と土塊の力学的挙動の関係について, *土木学会論文集*, No.535/III-34, pp.83-92, 1996.
- 10) 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*, 土木学会, pp. 407-414, 2006.
- 11) Schofield, A and Wroth, P.: *Critical State Soil Mechanics*, McGraw-Hill, pp. 1-310, 1968.
- 12) Roscoe, K. H and Burland, J. B.: *On the Generalised Stress-Strain Behavior of Wet Clay*, *Engineering Plasticity* eds. J. Heyman and F. A. Leckie, Cambridge University Press, pp.535-609, 1968.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 杉山友理, 河井克之, 田中博之, 飯塚敦: 土/水/空気三相連成モデルによる間隙圧係数B値の解釈, *土木学会論文集 A2(応用力学)*, pp.145-153, 2014.
- 16) 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.
- 17) 本田道識, 飯塚敦, 大野進太郎, 河井克之, 汪偉川: 締固め土の圧縮特性に関する評価手法の検討, *土木学会論文集*, No.806/III-73, 33-44, 2005.12.
- 18) (公)新産業創造研究機構(緑化対策): <http://www.niro.or.jp>.
- 19) 気象庁(Japan Meteorological Agency): <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>.
- 20) 寺田賢二郎(監訳): 非線形有限要素法, 弾塑性解析の理論と実践, 森北出版, 2012.

(2017. 6. 23 受付)

INFLUENCE OF DIFFERENCE IN CONSTRUCTION TIME DUE TO ANALYSIS ON INITIAL STRESS OF EMBANKMENT

Shin-ichi KANAZAWA, Haruna IGARASHI and Atsushi IIZUKA

Drainage measures for embankments against rainfall are different during construction and after commencement of use, and the effects are sustained intermittently from the start of construction to after the commencement of use. Of the rainfall over this span of time, it is considered that embankments are undermined internally by the effects of the rainfall during construction. However, as the dates of construction of embankments cannot be determined and the amounts of rainfall sustained during construction are varied, the effects of rainfall on the initial stress conditions upon the completion of embankments have not been clarified. In this study, soil/water/air-coupled F.E. analysis was used to perform analyses of embankments which take into account compaction and the history of rainfall/evaporation, and a comparative study is made of the effects of differences in the amount of rainfall during construction on the initial stresses inside embankment.