



盛土構造物の排水能力に対する解析的検討

金澤, 伸一
橘, 伸也
飯塚, 敦

(Citation)

土木学会論文集A2 (応用力学) , 71(2):I_429-I_436

(Issue Date)

2015

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2015 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90003367>



盛土構造物の排水能力に対する解析的検討

金澤伸一¹・橘伸也²・飯塚敦³

¹正会員 福島工業高等専門学校准教授 建設環境工学科 (〒970-8034 福島県いわき市平上荒川長尾30)

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

²正会員 埼玉大学助教 大学院理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区大久保255)

E-mail: stachi@mail.saitama-u.ac.jp

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 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

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

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。しかしながら、近年突発的に増加している局所的豪雨や、台風に伴う集中豪雨により盛土の崩壊事例が数多く報告されているが、その要因分析に対する検討は十分になされていない。

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（空気溶存・溶解型）を用いて、盛土構造物の施工時、供用開始後の降雨による盛土内の応力挙動の変化を解析的に表現し、さらに集中豪雨による盛土崩壊の要因分析に対する検討を行う。また、現在の盛土構造物の排水対策の能力を解析的に把握することで、その適用性を検討した。

Key Words : *embankment, unsaturated soil, drainage capacity, finite element analysis*

1. はじめに

近年、あらゆる産業において、コストを削減しつつ製品に対する品質を高めることが社会的趨勢となっている。また、コスト削減が社会的に強く要求されていることも相まって、土構造物に対する品質評価の要請が高まっている。このような社会的動きに応えるためには、土構造物の品質を長期的に評価する手法の確立が急務である。現在、盛土構造物の評価方法に関する設計法では、降雨などの浸透解析結果を用いて円弧すべり解析を行うことになっており、変形解析は特に行わず浸透解析と安定解析を個々に行っている。しかしながら、浸透と変形は連成しており、この設計手法では力学的強度などに対しては有効であるが、材料自体の品質や変形などを中長期的に評価できない。そのような流れを受け、地盤工学の世界でも設計耐用期間を通じて要求性能が満足していることを照査する設計手法、いわゆる性能照査型設計法へと移行する可能性が検討されてきている。

本来、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。しかしながら、近年突発的に増加している局所的豪雨や、台風に伴う集中豪雨により盛土の崩壊事例が数多く報告されているが、そのメカニズムは十分には解明されていない。

盛土の豪雨に対する安定性として、道路土工—盛土工指針¹⁾によると、基礎地盤の処理・盛土材料の品質・締

固めの程度・水の処理の4つに強く依存しているとされ、中でも盛土の崩壊原因は排水処理に問題がある場合が多い。また本来、盛土構造物はその土地や環境条件に見合った適切な排水対策が行われているものの盛土の崩壊が多発している。つまり、盛土の施工・維持管理が技術者の経験則に依存していることも一つの要因と考えられる。また、断続的な豪雨による盛土内の強度低下も挙げられる。土は、固相、液相、気相の三相から成り、盛土や地下水位以下の地盤は空気を含んだ、もしくは溶解した不飽和状態にあることが少なくない。降雨浸透による間隙空気圧の変化に伴い液相への気体の溶解・放出が起こり体積圧縮すると考えられる。その結果、現在の施工指針は、近年の集中豪雨に対する盛土内の十分な排水対策や維持管理が十分でない可能性が考えられる。

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・多孔質理論に基づいた、それぞれの解析手法を用いて盛土内の応力状態について検討している。

そこで本研究では、空気溶存・溶解型の不飽和土／水／空気連成有限要素法解析プログラム（DACSAR-MP）⁶⁾を用いて、締固めと降雨・蒸発履歴を考慮した築堤解析を行う。そして、盛土構造物の施工時、供用開始後の降雨により受けた盛土内の応力挙動の変化を解析的に表現し、さらに集中豪雨による盛土崩壊の要因分析に対する検討を行う。また、現在の盛土構造物の排水対策の能力を解析的に把握する。

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⁷⁾の提案するモデルである。彼らは、軽部ら⁸⁾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 :全応力テンソル、 σ^N :基底応力テンソル、 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 p'_{sat} ）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⁹⁾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 :軸差応力、 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(1)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¹⁰⁾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。

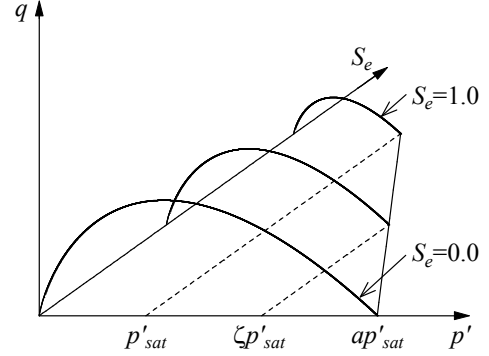


図-1 不飽和土の降伏曲面の概念図

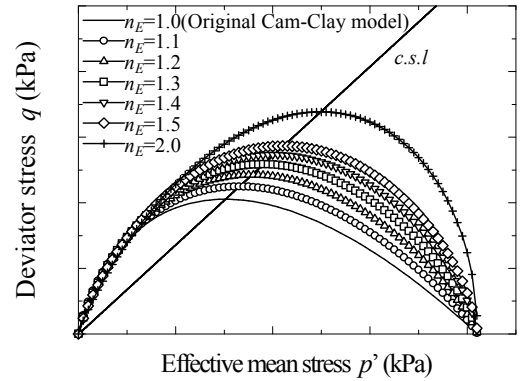
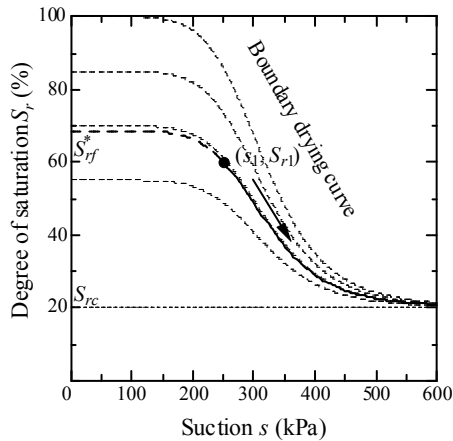


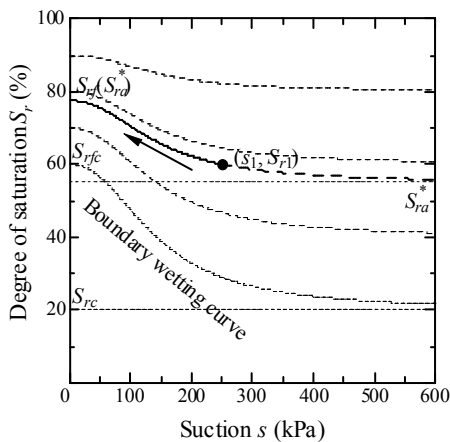
図-2 ECモデルの降伏曲面

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、脱水時と吸水時に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¹¹⁾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、任意のサクシオン、飽和度状態から描く脱水、吸水曲線は、杉井、宇野¹²⁾のロジスティック曲式（図-3）を用いる。



(1) 脱水曲線



(2) 吸水曲線

図-3 水分特性曲線モデル

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¹³⁾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。

本研究では、空気溶存・溶解型考慮して解析を行う。詳細については参考文献13を参照されたい。

5. 豪雨への排水対策について

本章では、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。

(1) 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-4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。

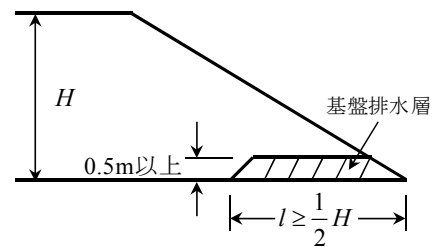


図-4 標準のり面勾配の排水層

(2) 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。

6. 盛土の降雨・蒸発履歴による状態変化

本研究では、施工期間は1ヵ月間とし、一層0.3mの撒き出しを行った後、荷重条件500kPaとして各層静的に載荷と除荷を行うことで締固めを表現する。また、変位境界は下端を鉛直・水平方向ともに固定とし、平面ひ

ずみ解析を行う。水理境界は盛土各層の上下左右を非排水境界とする。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非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、盛土の築堤時に締め固めを行なった後（締め固め中でも降雨・蒸発考慮）、供用開始後に断続的に様々な降雨・蒸発履歴を与えて解析を行う。この際、盛土の排水対策として①盛土内部に排水層を挿入、②のり面に植生マットの敷設を模擬する。そして供用開始後の降雨が盛土にどのように影響を及ぼすか、供用開始1年後の状態変化から検討する。また、近年の集中豪雨に対する盛土の状態変化も確認する。

(1) 日本平均降雨を模擬した解析

a) 解析条件

表-1に解析で用いた材料定数、図-5に水分特性曲線を示す。材料定数、水分特性曲線は一般的に用いられている盛土材料について室内土質試験結果等によって決定している。また、図-6に解析対象となる盛土とその解析領域を示す。今回は、排水能力の検討のため盛土部だけをモデル化し用いた。解析には、排水対策として法先に長さ3m、厚さ0.6mの排水層（透水係数86.4m/day）を設け、法面には植生マットを使用した（解析では蒸散効果のみを扱う）。排水層については盛土工指針に則った条件下でパラメータ設定を行った。また、植生マットは一般的に使用されている植生の種類から蒸散量（2mm/day）を算出し用いた¹⁴⁾。

表-1 材料パラメータ

λ	κ	M	m	S_{r0}	$p'_{sat} \text{ (kPa)}$		$k_a \text{ (m / day)}$
0.18	0.037	1.333	0.8	0.15	59.1		1.00
n	n_E	a	b	ν	G_s	e_0	$k_w \text{ (m / day)}$
1.0	1.3	10.0	1.0	0.33	2.7	1.2	0.01

m : Mualem¹⁵⁾の不飽和透水係数

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

図-7に本節で使用した降雨・蒸発履歴を示す。ここでは日本平均降雨量（1700mm）を模擬するため、総降雨量が概ね同様である、2011年の京都府京都市の年間降雨量（1650mm）を用いた¹⁶⁾。また、降雨・蒸発の与え方は、図-8のように行った。盛土の築堤時には、基本となる年間降雨量合計1650mmを約1ヵ月分に直した138mmを日割りで与える（降雨を与える時間的単位はmm/dayである）。その後、供用開始後に図-7に示す、

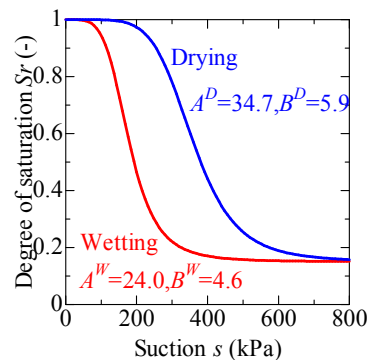


図-5 水分特性曲線

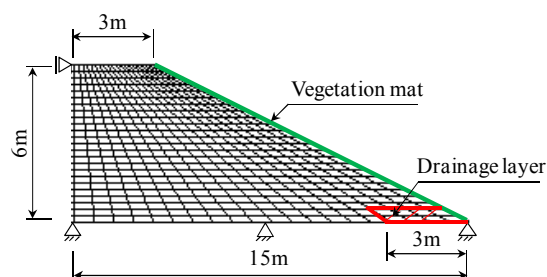


図-6 解析領域

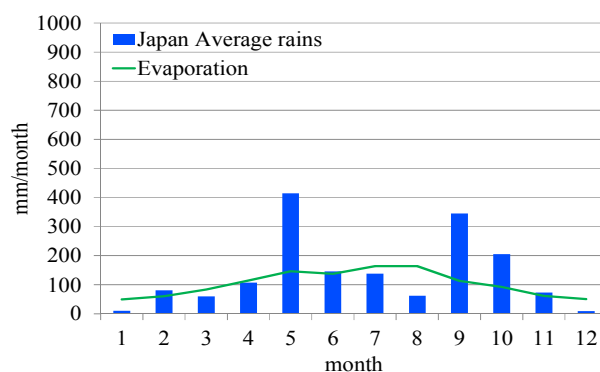


図-7 2011年度京都府の降雨・蒸発履歴

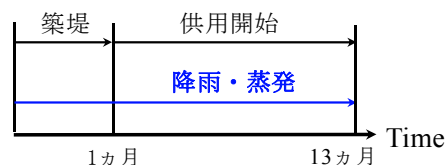


図-8 降雨・蒸発条件の与え方

京都府の降雨履歴のそれぞれの月を日割りで算出し与えて解析を行った。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

図-9 に解析結果を示す。解析結果は、築堤直後、6 ヶ月後、12 ヶ月後に分け、平均有効主応力、軸差応力、サクシオン、飽和度、限界状態接近比 (η/M) でまとめた。

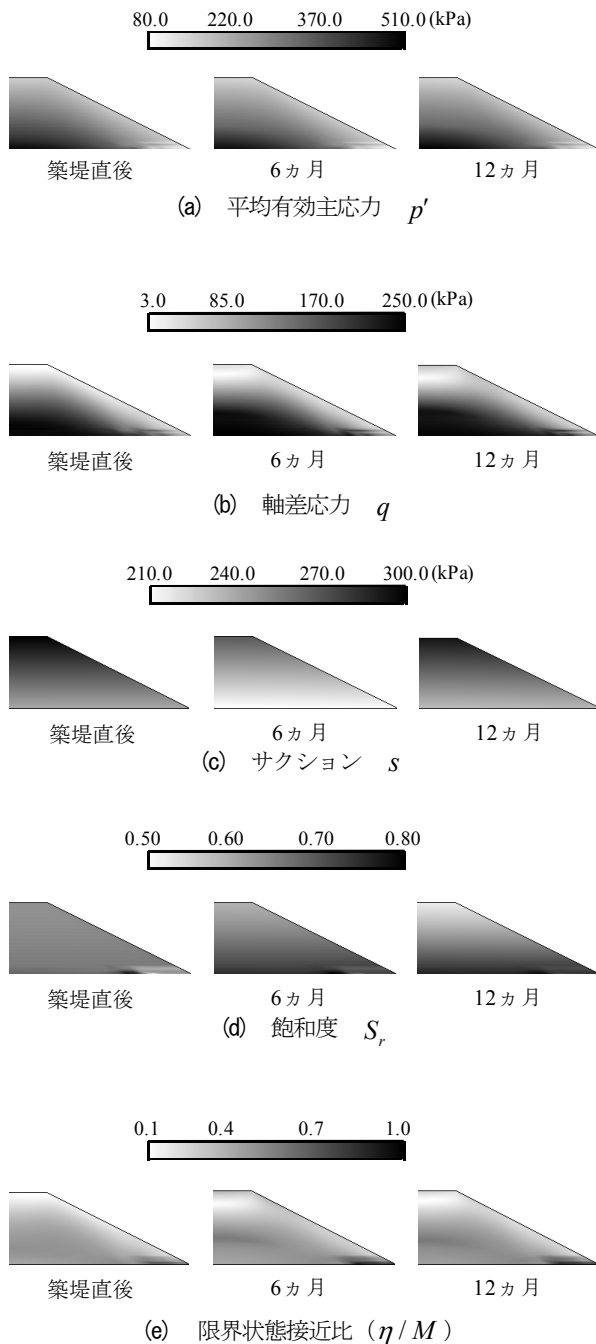


図-9 日本平均降雨量を与えた盛土の状態変化

平均有効主応力から、築堤直後、6 ヶ月後、12 ヶ月後と 1 年間の降雨を受けることにより、盛土の表層部分、内部ともに徐々に増加していることがわかる。しかしながら、法先付近（排水層）は盛土内部に比べてかなり低い値を示していることがわかる。これは、築堤中・供用開始後ともに盛土内の水分が徐々に排水層に向かう浸透流によって低い値を示していると考えられる。

次に軸差応力から、築堤直後を基準として、盛土内部に関しては、降雨による鉛直全応力の増加として現れる自重効果によって増加していることがわかる。また、表層部分に関しても若干ではあるが軸差応力の増加がみてとれる。

続いて、サクシオン、飽和度から、サクシオンは 6 ヶ月後では梅雨時期の影響で低下しているが、12 ヶ月後では、ほぼ変化がないことがわかる。また飽和度は時間が経過するにつれ盛土内部の水分が排水層に流れ、12 ヶ月後では築堤直後から盛土の上部より徐々に低下していく傾向となった。

法先部分の限界状態接近比に着目すると、最終的に、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。これは平均有効主応力が排水層の部分で低い値をとっており、それにより限界状態接近比も高くなっていると考えられる。しかしながら、解析上どの部分でも危険な箇所は確認されなかった。

以上の結果から、日本の平均的な降雨・蒸発散の環境下では、盛土は安定する状態へ向かうと示唆される。

(2) 集中豪雨を模擬した解析

a) 解析条件

解析に用いる材料定数、水分特性曲線、解析対象はこれまで解析で用いたもの（表-1、図-5、図-6）を使用する。また盛土の初期条件は前節での築堤直後と同様の状態とした。図-10 に使用した降雨履歴を示す。ここでは近年の集中豪雨を模擬するため、2011 年の和歌山県東牟婁郡の年間降雨量（5370mm）の降雨履歴を用いた¹⁰⁾。特徴としては 5 月、6 月と梅雨時期の降雨量が合計約 1100mm と京都府の降雨履歴と比較しても多いことがわかる。またこの年は 7 月に 1 回（台風 6 号）、9 月に 2 回（台風 12 号、15 号）台風が日本に上陸し紀伊半島に集中豪雨を与えている。降雨の時間的与え方は、それぞれの月を日割りで算出し解析を行った。

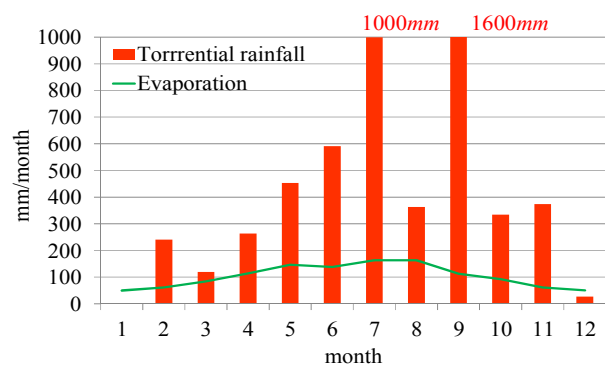


図-10 2011 年 和歌山県東牟婁郡の降雨・蒸発履歴

b) 解析結果

図-11 に解析結果を示す。ここでは、1 ヶ月後、3 ヶ月後、7 ヶ月後に分け、平均有効主応力、軸差応力、サ

クシオン，飽和度，限界状態接近比（ η/M ）でまとめた．また図-12，図-13に法先部の応力経路， $e-\ln p'$ 関係を示している．

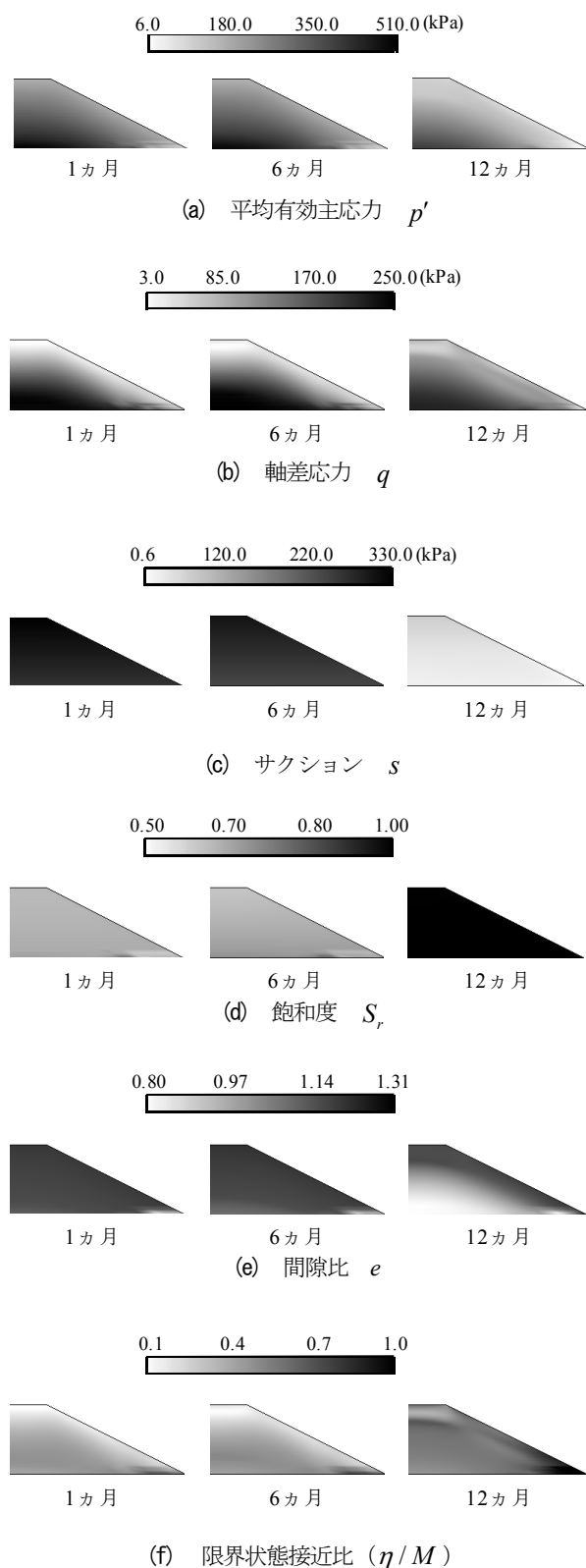


図-11 集中豪雨を与えた盛土の状態変化

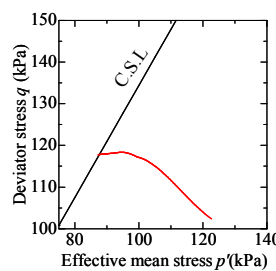


図-12 法先付近の応力経路

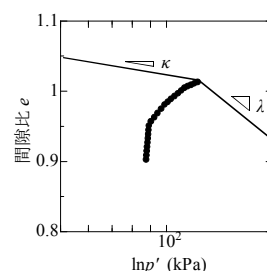


図-13 法先付近の $e-\ln p'$ 関係

平均有効主応力から，1 ヶ月後，3 ヶ月後と変化は少ないが，7 ヶ月後をみると法先部分（排水層）からのり面に向かって低下していることがわかる．これは，5 月と 6 月の降雨量が合計約 1100mm もあり，さらには 7 月の台風に伴う集中豪雨の影響で 1000mm の降雨が降ったため排水機能が追い付かず，法先から飽和したためだと考えられる．

次に軸差応力から，1 ヶ月後を基準として盛土内部に関しては，降雨による鉛直全応力の増加として現れる自重効果によって増加していることがわかる．しかしながら，表層部分全体に関してはほぼ変化が見られず，盛土内部に比べて低い値を示している．

サクシオン，飽和度をみると，どちらも降雨の影響を受けており，特に約 1100mm の降雨を受けた 6 ヶ月後は排水層が機能せず，盛土内がほぼ飽和状態となり，それに伴いサクシオンも消失していることがわかる．

さらに法先の崩壊要因の一つとして，図-12，図-13 から，間隙比をみると法先付近で低下しており，さらに有効応力の低下もみてとれることから，不飽和土特有のコラプス現象が起こっていることが確認できる．

最後に限界状態接近比から，平均有効主応力の低下に伴い，7 ヶ月後で法先が限界状態に達しており破壊が進行する可能性が示唆される．

この結果，2011 年 7 月の和歌山県東牟婁郡が受けたような集中豪雨では現在の盛土の排水対策は，十分に機能しない結果となった．

7. 近年の豪雨における排水対策の有効性

前章の集中豪雨を与えた解析結果を受けて，本章では盛土工指針によって定められている現在の排水対策の限界値を，集中豪雨の降雨量と降雨時間を変化させることにより解析的に検討した．

(1) 排水層に対する有効性の検討

a) 解析条件

本節では，前項の結果を受けて盛土が破壊する降雨量を調べるため，想定し与えた突発的豪雨は，10-50mm/h の降雨量を 1 時間~5 時間継続して与えて解析を行った．

b) 解析結果

解析結果を図-14 に示す．まず，10mm/h の降雨量を

1 時間～5 時間，20mm/h の降雨量を 1 時間～5 時間与えた盛土では破壊に至ることはなかった．一方，盛土が破壊に至る降雨量を 30mm/h，40mm/h，50mm/h にわけ，さらに平均有効主応力，軸差応力，サクシオン，飽和度，間隙比，限界状態接近比でまとめた．これらは，いずれ

も代表として 3 時間の降雨を与えた時の結果である．

平均有効主応力から，盛土内部や盛土表層部に比べて，法先部分で低いことがわかる．

サクシオンは，降雨量が増加するにつれて，盛土内部から法先部分に向かって低下していることがわかる．それと対照的に飽和度は，降雨量が増加するにつれて盛土内部から法先部分に向かって増加していることから，盛土内部の水分が浸透流によって法先部分へと移動したことが確認できる．

また間隙比に着目すると，降雨量が増加するにつれて低下していることが見てとれる．

最終的に限界状態接近比から，盛土全体に比べ法先部分が著しく高いことがわかる．

以上の結果から，降雨量 30mm/h，40mm/h，50mm/h の降雨を 3 時間以上受けた盛土の法先部分はほぼ飽和状態となり，それに伴いサクシオンも消失し，その結果，前章の集中豪雨と同様に，不飽和土特有のコラプス現象（有効応力と間隙比より）が発生し，法先が限界状態に達し法先から破壊が進行する可能性が示唆される．

8. 排水機能の評価

前章の解析結果を受けて，降雨に対する排水機能の評価（降雨量と降雨継続時間）を表-2 に示す．また，盛土に対する評価は次のように設定することとした．○危険な個所が存在しない（限界状態に達する箇所はない），△は危険な個所が懸念される（時間が経つと限界状態に達する可能性がある），×は危険な個所が存在する（限界状態に達する箇所が存在する）．

このことから，10～20mm/h の降雨量では，危険個所は確認されなかった．しかしながら，30mm/h の降雨を 4 時間降らせたあたりから，盛土が局所的に危険であると確認された．さらに 40mm/h，50mm/h ではそれぞれ 3 時間の降雨を受けた時点でも同様の結果となった．

表-2 降雨に対する排水機能の評価

	1時間	2時間	3時間	4時間	5時間
10mm	○	○	○	○	○
20mm	○	○	△	△	△
30mm	○	△	△	×	×
40mm	○	△	×	×	×
50mm	○	△	×	×	×

9. まとめ

本論文では，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，締固めと降雨・蒸発履歴を考慮した築堤解析を行い，供用開始後に受けた様々な降雨による盛土内の応力挙動の変化を解析的に表現した．その結果，集中豪雨による盛土崩壊の要因分析に対する検討を行ない，現在の盛土構造物の排水対策の能力を解析的に把握した．

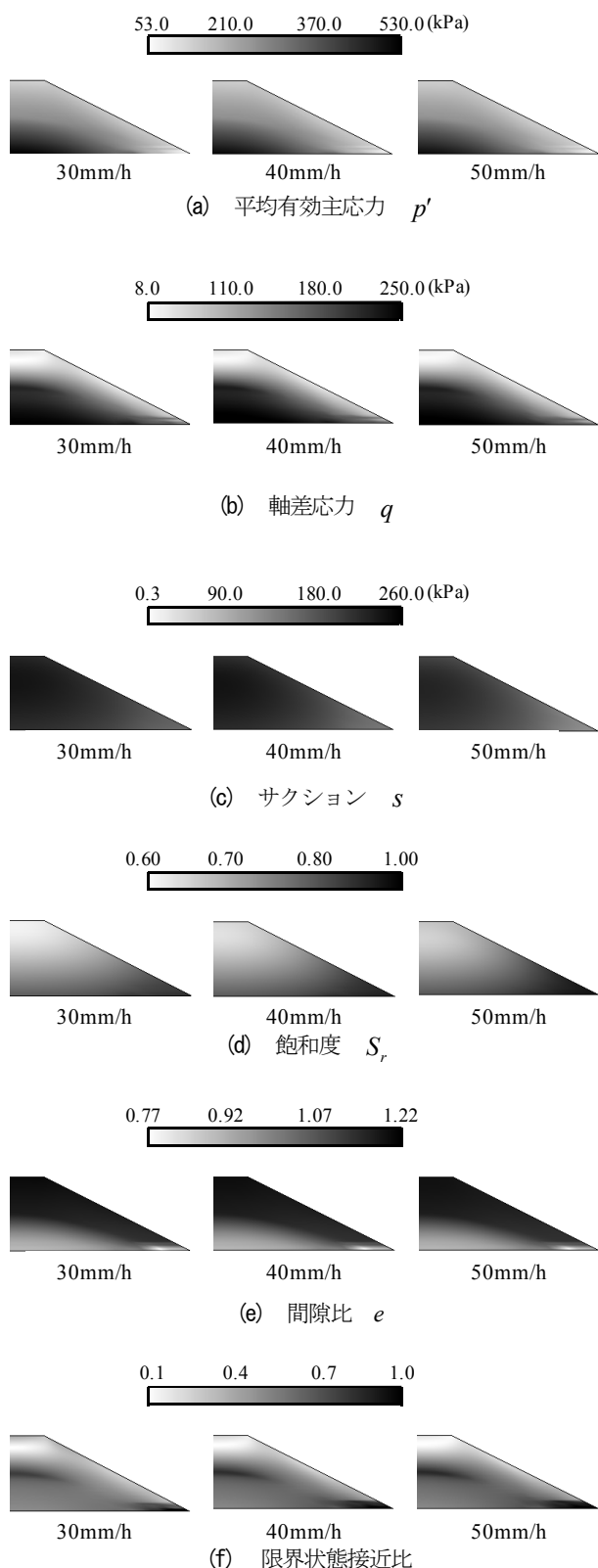


図-14 突発的豪雨を与えた盛土の状態変化

以下に本研究で得た知見を示す。

- 日本の平均的な降雨条件では、今回の盛土は、降雨降雨による鉛直全応力の増加として現れる自重効果によって安定する方向へ向かうと考えられる。

- 今回の盛土では、10~20mm/h の降雨では危険は確認されなかった。しかし 30mm/h の降雨を与えた時点から、危険箇所が確認された。また 30mm/h の降雨が 4 時間続くと、盛土が局所的に危険であると確認された。さらに 40~50mm/h でも同様の結果となった。

以上のように、本論文では、様々な降雨条件による盛土内の応力挙動の変化を解析的に表現した。

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) 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.
- 8) 軽部大蔵, 加藤正司, 浜田耕一, 本田道誠: 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.
- 9) 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.
- 10) Schofield, A and Wroth, P.: *Critical State Soil Mechanics*, McGraw-Hill, pp. 1-310, 1968.
- 11) 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.
- 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.
- 13) 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.
- 14) (公)新産業創造研究機構(緑化対策): <http://www.niro.or.jp>.
- 15) 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.
- 16) 気象庁 (Japan Meteorological Agency): <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>.

(2015. 6. 23 受付)

ANALYSIS STUDY AN EMBANKMENT MODEL WITH DRAINAGE

Shin-ichi KANAZAWA, Shinya TACHIBANA and Atsushi IIZUKA

Embankments are constructed with compacting soil with the aim of improving their stability and deformation characteristics. Typhoons and guerrilla rainstorms are occurring frequently due to the abnormal weather of recent years, and there have been many reports of cases of collapses of embankments due to their effects. 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. 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. Further, changes in the stresses inside the embankment by the effects of rainfall sustained after commencement of use are considered. In addition, the effectiveness of current drainage measures for embankments is considered.