

令和元年6月30日現在

機関番号：51601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06497

研究課題名（和文）突発的集中豪雨に対する盛土構造物の力学挙動評価手法の提案

研究課題名（英文）Proposal of evaluation method of dynamic behavior of embankment structure for sudden heavy rainfall

研究代表者

金澤 伸一（kanazawa, shinichi）

福島工業高等専門学校・都市システム工学科・准教授

研究者番号：20580062

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、盛土構造物の築造時における降雨・蒸発による盛土内部の応力挙動の変化と、築造後の初期応力状態を把握し、その後の集中豪雨と断続的な豪雨に伴う盛土構造物崩壊に至るメカニズムを解析的に表現することで、長期供用課程での力学挙動の変化を評価することを目的とした。その結果、降雨強度が強くなるにつれて、天端から法面に沿って弱部となり、時間の経過とともに法先が弱部となり表層滑りを起こし崩壊することが確認された。本研究より、集中豪雨によって盛土が破壊に至るメカニズムを解析と実験で表現することで長期供用課程での力学挙動変化に対する評価が可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究から得られる成果は、不飽和土の力学という地盤工学における技術をベースにしており、近年の突発的豪雨に伴う土構造物の挙動評価を長期的に行うことで品質評価に寄与すると考えられる。さらには、近年の外的作用による土構造物の劣化に伴い発生する力学挙動の変化を予測し、またそれらを説明することを可能にするツールとなることで、今後、他面性を考慮した対策を講じることができると考えられる。

研究成果の概要（英文）： In this study, the purpose on evaluate the change of the mechanical behavior of embankment structure in the long term service process by grasping the change of the stress behavior in the embankment by rainfall and evaporation in the construction and the initial stress condition after the construction, and with analytical expressing the mechanism which leads to the collapse of embankment structure by torrential rain and intermittent torrential rain afterwards. As a result, it was confirmed that as the rainfall intensity increased, alongside of the slope from the crest of embankment became weak, and as time passed, toe of slope became weak, causing surface slip and collapse.

研究分野：地盤工学

キーワード：盛土構造物 不飽和土 集中豪雨 豪雨継続時間 土/水/空気連成解析 初期応力解析 模型実験

### 1. 研究開始当初の背景

土構造物のほとんどは、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。しかしながら既存の構造物の中には、降雨や地震などの外的作用を要因として、その機能の低下が示唆される。それを踏まえ、土構造物の安定に対してリアルタイムに評価できる監視システムの必要性が求められる。また、近年突発的に増加している突発的集中豪雨や、台風に伴う集中豪雨により河川堤防に代表される土構造物の崩壊事例が数多く報告されているが、いまだにそのメカニズムは十分に解明されていない。そこで本研究では、土構造物の施工～供用後の降雨・蒸発による内部の応力挙動の変化と、その後の集中豪雨に伴う降雨の浸透～土構造物崩壊に至るメカニズムを解析的に表現することで、長期供用過程での力学挙動の変化を定量的に評価する。

### 2. 研究の目的

本研究では、盛土構造物の築堤時における降雨・蒸発による盛土内部の応力挙動の変化と、築堤後の初期応力状態を把握し、その後の集中豪雨と断続的豪雨に伴う盛土構造物崩壊に至るメカニズムを解析的に表現することを目的とする。また集中豪雨による降雨継続時間と降雨量の関係を明らかにし、盛土の破壊への危険性を評価することを目的とした。盛土築堤後の豪雨を考慮した長期変動解析を実施することで、盛土の品質がどのように変化するかを明らかにする。最終的には、土構造物の施工～供用後までの環境の変化（降雨・蒸発散など）による初期応力の推定から長期供用過程での力学挙動の変化を定量的に評価する。

### 3. 研究の方法

不飽和土/水/空気連成有限解析コードを用いて築堤解析を行い盛土内部の初期応力を検討した。さらに、供用開始後に集中豪雨と断続的豪雨によって盛土がどのように破壊に至るのか解析的に検討した。また、集中豪雨と断続的豪雨による降雨継続時間と降雨量の関係を明らかにし、盛土構造物破壊に対する危険度評価を行った。さらに降雨浸透による盛土内の飽和度分布を検証するため模型実験を行った。模型実験では、小型模型土槽を用いて一定の撒き出し圧、転圧回数の下で築堤過程を表現した。その後、模型盛土内に土壌水分計を設置し、集中豪雨と断続的豪雨によって盛土がどのように破壊に至るのか実験的に把握した。

### 4. 研究成果

本研究で得た結果を以下に示す。

#### (1) 盛土の築堤解析

はじめに築堤解析を行い、それと同時に解析的に降雨・蒸発散を与える。築堤中に降雨を与える解析を行った後、供用開始後に突発的集中豪雨を与えた解析を行う。そして、供用開始後の突発的集中豪雨によって盛土がどのような力学挙動を経て破壊に至るか把握する。図-1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。図-2に解析対象となる盛土とその解析領域を示す。図-3に築堤から供用開始後までの解析ステップを示す。解析ステップは、一層の撒き出し、荷重載荷・除荷、降雨・蒸発に対し、層間の水収支に関して十分な定常状態（透水性等）になることを考慮し、それぞれ1日とした。

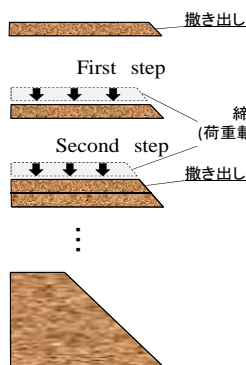


図-1 盛土の築堤過程

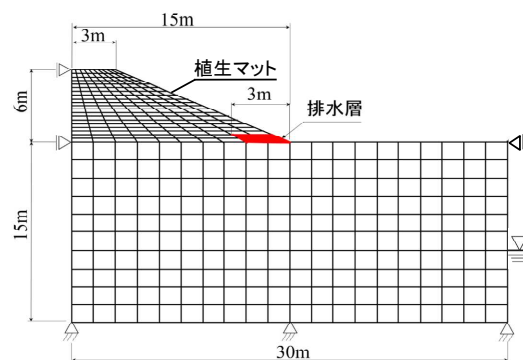


図-2 解析領域



図-3 解析ステップ

#### (2) 築堤～降雨解析（突発的豪雨・豪雨継続解析）

築堤後に、降雨解析（突発的豪雨・豪雨継続解析）を行う。盛土供用開始後に与える降雨とし

て1時間当たり10mm～50mmの降雨量を盛土が破壊する危険性が高くなるまで（最大継続降雨時間11時間）与えて解析を行った。

図-4の平均有効主応力から、各応力分布を比較すると、盛土法面の表層部の値が低く、降雨量が大きいほどその値は低くなっていることが確認された。これは、降雨によるサクシジョンの消失や間隙水圧の増加が寄与し、平均有効主応力が減少したと考えられる。図-5の飽和度から、それぞれを比較すると、降雨量が大きくなるほど増加している。また、盛土表層部の飽和度が増加していることから、水分が盛土表層に沿って浸透していることが確認できる。これは、突発的集中豪雨という急激な雨を与えたことにより、水分が盛土内部に浸透する余裕がなかったため、表層に流れ出たと考えられる。特に今回の解析手法は、地盤浸透可能量（浸透能）を考慮しているため、降雨によって斜面の間隙水圧が正とならないように地盤内の浸透可能量を考慮し計算しているために表層流水が表現され、結果的に表層すべりを形成すると示唆される。図-6のサクシジョンから、それぞれを比較すると、平均有効主応力と同様に与える降雨量を増加させるにつれて、盛土表層部から法先部分にかけて低下している。これは飽和度分布より、降雨によって盛土表層部の飽和度が増加し、サクシジョンが消失したと考えられる。つまり、このことから降雨が盛土表層に沿って浸透しているということが確認された。次に、図-7のせん断ひずみと、図-8の限界状態接近比について、降雨量が大きくなるにつれて、盛土内部のせん断ひずみは変化がないが、盛土表層部のせん断ひずみが増加している。特に、降雨量50mmにおいて盛土表層部のせん断ひずみが卓越し、場所によっては7%を超え表層すべりの危険性が考えられる。また、それぞれの限界状態接近比を比較すると、せん断ひずみと同様に、降雨量が大きくなっても盛土内部の限界状態接近比はさほど変化がないが、盛土表層部の限界状態接近比が増加している。また、表層すべりが懸念される降雨量50mmでは、盛土表層部の限界状態接近比が盛土全体に比べ高いことが見て取れる。そのため、これを起点に表層すべりのような破壊が起きると考えられる。このことから突発的豪雨によって盛土が表層部から破壊する危険性が高くなることが確認できる。

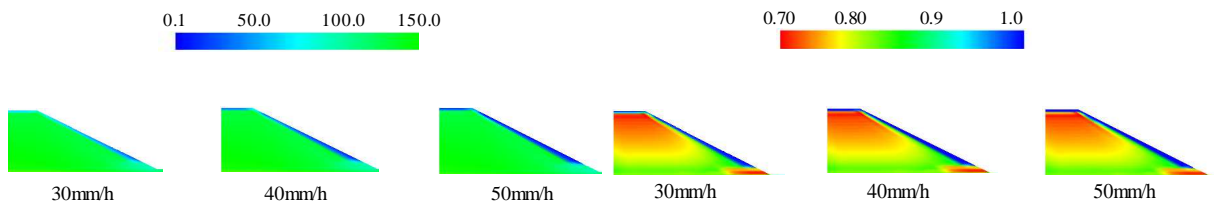


図-4 平均有効主応力  $p'$

図-5 飽和度  $S_r$

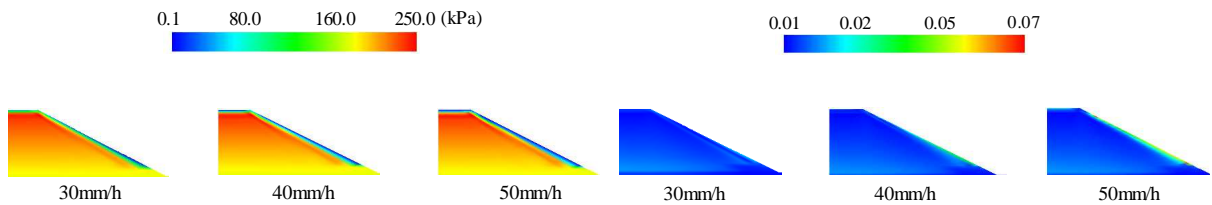


図-6 サクシジョン  $s$

図-7 せん断ひずみ  $\epsilon_s$

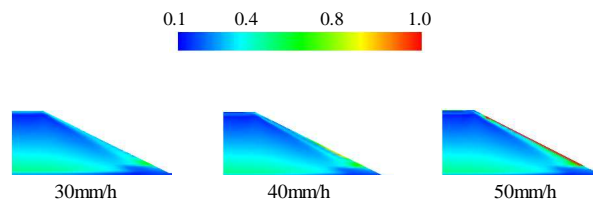


図-8 限界状態接近比 ( $\eta/M$ )

図-9に、降雨量30mmにおける飽和度の時間変化（最大7時間）を示す。また、図-11に降雨量30mmにおける天端部分、法面中央部分、法先部分の飽和度の時間変化のグラフを示す。検討した要素は、図-10に記載する。検討した要素については、法先部分に近く、その上に位置する盛土本体と同じ材料定数の要素240について検討を行った。図-11において左側のグラフは築堤から供用後にかけての時間変化、右側のグラフは供用後の時間変化に着目したグラフである。まず、降雨量30mmにおける飽和度の時間変化から降雨の浸透過程をみると、降雨1時間では天端や法面など表層約0.3m分（1要素分ほど）の飽和度が高くなっているが盛土内部にまだ浸透していないことが確認できる。しかし、時間が経過していくにつれて、徐々に降雨が盛土内部に浸透し、降雨7時間では天端から高さ0.6～0.9m（2～3要素分）が飽和している。このことから、集中豪雨によって水分がゆっくりではあるが盛土内部に浸透していくということが確認できる。また、降雨量30mmにおける飽和度の時間変化について、供用直後の飽和度が法

先部分の要素 240 で 90% 近く、法面中央の要素 300 で 80% 以上と高くなっている。これは築堤過程において断続的に降雨を受け続けたことが原因であると考えられる。しかしながら、天端部分の要素 400 では、築堤中の降雨をあまり受けておらず飽和度が 70% 以下と法先、法面中央の二つと比べて低くなっている。このことから、法面から法先にかけて飽和しやすく、また破壊に近づきやすい結果となった。また、集中豪雨として供用後に与える降雨量が小さいと飽和に近づく速さも遅く、大きいとより早く飽和に近づく結果となった。

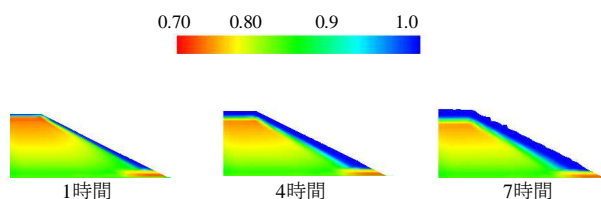


図-9 降雨量 30mm における飽和度の時間変化

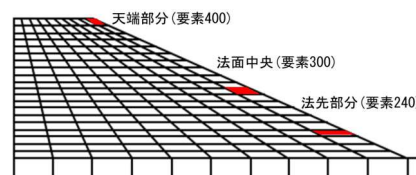
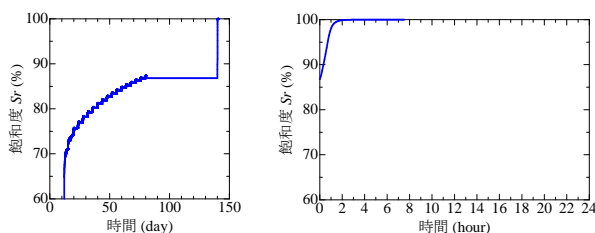
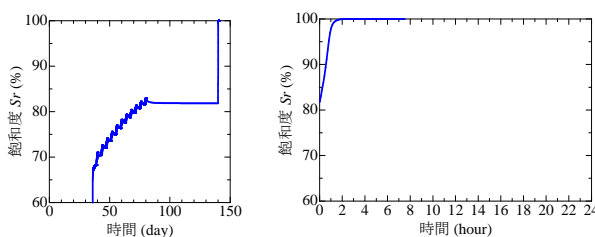


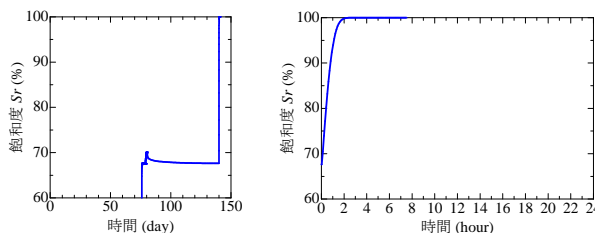
図-10 検討要素



a) 要素 240 : 法先



b) 要素 300 : 法面中央



c) 要素 400 : 天端

図-11 降雨量 30mm における飽和度の時間変化

### (3) 降雨量と降雨継続時間との関係性の評価

表-1 は、降雨量とその継続時間の関係を示したものである。ここで、限界状態接近比が 1.0 よりも低い場合は○ (安全である)、1.0 を超えたものを× (危険である) として評価を行った。特に、今回の解析結果では、降雨浸透による表層すべりが懸念される結果となっている。このことから、10mm の降雨量では、9 時間まで盛土は安全であることが確認された。しかしながら、10 時間で盛土の表層すべりが懸念され、11 時間でその危険性が高くなることが確認された。また、20mm の降雨では 3 時間経過したあたりから盛土の表層すべりが懸念され、4 時間でその危険性が高くなることが確認された。さらに、30mm の降雨では 2 時間も表層すべりの危険性が高くなることが確認された。一方で、40mm~50mm の降雨では 1 時間も経たずに表層すべりの危険性が高くなることが確認される結果となった。

表-1 降雨量と降雨継続時間との関係性

		降雨継続時間					
		1時間	2時間	3時間	4~9時間	10時間	11時間
降雨量	10mm	○	○	○	○	×	×
	20mm	○	○	×	×	×	×
	30mm	○	×	×	×	×	×
	40mm	×	×	×	×	×	×
	50mm	×	×	×	×	×	×

(4) 模型を用いた豪雨実験

実験は、1.0m×0.8m×0.5mの亚克力土槽内に0.1mの基礎地盤と盛土（高さ0.3m，勾配1：1.5）を作製した。盛土部は締固め性を考慮して、珪砂6，7，8号を5：2：5で混合した試料を使用した。土槽上部に設置したスプレーノズルを用いて降雨を再現した。降雨強度は、突発的な集中豪雨を模擬した100mm/hを設定した。実験装置の概要と土壌水分計の設置箇所及び名称を図-12に示す。

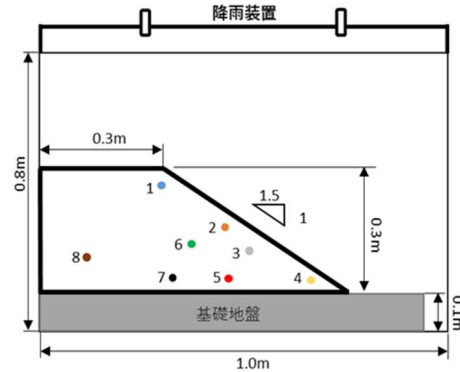


図-12 土壌水分計の配置図

図-13に降雨強度120mm/h時の飽和度の推移を示す。降雨開始から3分20秒後、法先にあたる4番の飽和度が上昇した。6分後から8分後にかけて斜面表層にあたる2番，3番，1番の順で上昇した。その後は5番，6番，8番，7番の順に上昇した。それぞれのピークに着目してみると法先の4番，表層付近の1番，2番，3番，盛土内部の6番，8番の飽和度がおよそ80%であるのに対し，土被り厚の大きい5番，7番はおよそ70%であった。このことから，盛土に突発的な集中豪雨があった際には，降雨が盛土全域に浸透する前に，斜面表層で土塊の移動が発生し崩壊すると考えられる。

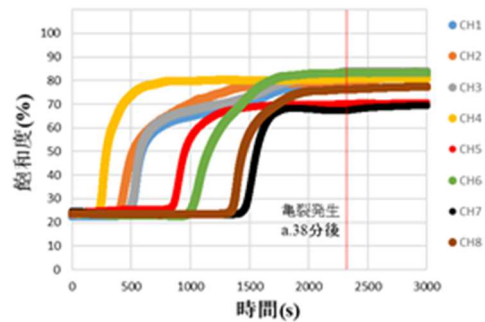


図-13 飽和度の推移(120mm/h)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件)

- 1) 金澤伸一，松崎慎也，飯塚敦：突発的豪雨に起因する盛土構造物の破壊に関する解析的検討，土木学会論文集 A2，土木学会 Vol.74, 373-380, 2019.
- 2) 金澤伸一，五十嵐日菜，飯塚敦：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，土木学会論文集 A2，土木学会，Vol.73, pp. 489-496, 2018.
- 3) 林久資，西内瑞生，金澤伸一，石山宏二：直接処分施設の建設・運用時における力学的影響予測，トンネル工学論文集，土木学会，Vol.27 pp.1-5, 2017.
- 4) 市川希，金澤伸一，林久資，石山宏二，飯塚敦：地層処分施設内における温度・密度・飽和度変化を考慮したベントナイト緩衝材の力学特性，環境地盤工学シンポジウム論文集，地盤工学会，Vol.12, pp.557-560, 2017.
- 5) 武藤尚樹，金澤伸一，林久資，市川希，石山宏二，飯塚敦：地層処分施設内における温度，飽和度変化を考慮したベントナイト緩衝材の力学挙動に関する研究，環境地盤工学シンポジウム論文集，地盤工学会，Vol.12, pp.567-570, 2017.

〔学会発表〕(計38件)

- 1) Hayashi, H., Nishiuchi, M., Kanazawa, S., Ishiyama, K., Morimoto, M., Shinji, M.: A Proposal of the Design Consideration in Construction and Operation of Direct Nuclear Waste Disposal Facilities, Proc. 10th Asian Rock Mechanics Symposium, Singapore, 2018. (USB)

- 2) 五十嵐日菜, 金澤伸一: 不飽和土／水／空気連成解析を用いた盛土構造物の力学挙動解析, 平成 30 年度土木学会全国大会, 第 73 回年次学術講演会, pp.591-592, 2018.
- 3) 小野里花子, 金澤伸一: 集中豪雨による河川堤防崩壊メカニズムの解明, 平成 30 年度土木学会全国大会, 第 73 回年次学術講演会, pp.473-474, 2018.
- 4) 鈴木颯, 金澤伸一, 小野里花子: 外水位変動に起因した河川堤防崩壊メカニズムの検討, 第 53 回地盤工学研究発表会講演集, pp.544-545, 2018.
- 5) 鈴木聡恵, 金澤伸一, 五十嵐日菜: 施工条件の違いを考慮した盛土の初期応力解析, 第 53 回地盤工学研究発表会講演集, pp.1008-1009, 2018.

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。