

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 23 年 5 月 25 日現在

機関番号：32641

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010～2011

課題番号：22860058

研究課題名（和文） 施工速度を考慮した締固め土構造物の力学挙動評価

研究課題名（英文） Evaluation of mechanical behavior of compacted soil structures considering the speed of construction

研究代表者 金澤伸一（KANAZAWA SHINICHI）

中央大学・理工学部・助教

研究者番号：20580062

研究成果の概要（和文）：

盛土構造物の建設には、締固め土が重要である。しかしながら、盛土構造物の内部状態を把握することが難しく、豪雨や地震といった自然災害による不測の事態に備えることができないと言える。本研究では、土/水/空気連成有限要素解析を用いて、施工速度を考慮した静的締固めシミュレーションと締固め土構造物の施工シミュレーションを行った。本研究の成果は、合理的な締固め管理を可能にするものである。

研究成果の概要（英文）：

Soil compaction is important when constructing earth structures. However, we have had difficulties in presuming the internal state of earth structures and predicting their behaviors under natural disaster such as storm of rain and earthquake. In this study, simulated static compaction tests and processes of compacted earth structures considering the speed of construction with soil/water/air coupled finite element analysis. The achievement of this study is useful for the reasonable construction management.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	500,000	150,000	650,000
2011 年度	1,010,000	303,000	1313,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,510,000	453,000	1,963,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：締固め、施工速度

1. 研究開始当初の背景

盛土構造物のほとんどは締固め土で構成されており、港湾施設、高速道路、河川堤防といった主要構造物において幅広く利用され、その重要性も認められてきた。締固め土を利用した土構造物の施工管理手法は、使用

する土の種類や施工方法などによって適切なものを選択できるように様々なものが存在している。さらに施工技術の発展や、管理における測定技術の進歩なども相まって、現在では維持管理の体制がより安全なものへととなりつつある。しかしながら、その一方で

締固め土に対する力学的説明は十分とは言えず、締固め土を使用する際に求められる強度を得るための施工方法などは示されているものの、実際に使用する材料特性も考慮されていない。さらにはその強度発現のメカニズムに関しても完全に解明されていない。その理由として、締固め土を構成している大部分が不飽和土で構成されており、その不飽和土の力学体系の確立が不十分であったことが挙げられる。

2. 研究の目的

近年では、不飽和土に関する研究が進み、その力学的な理解や解釈が深まってきたと言える。そこで締固めによる不飽和土の力学挙動を三相連成問題として捉え、締固めにおける載荷速度の違いによる影響を調べることで、締固めに対する機構を解明する。さらに盛土を要素として捉え、供用開始後の降雨浸透による強度変化を把握し、今後の管理手法に対する提案を数値解析から検討する。

3. 研究の方法

まず、土/水/空気連成有限要素解析プログラムの開発を行い、それをを用いることで締固めによる不飽和土の力学挙動を三相連成問題として解き、強度発現のメカニズムを解明する。また、締固めにおける載荷速度の違いによる影響（間隙内に発生する空気の影響）を調べることで、締固めに対する機構や降雨浸透による強度変化について考察する。また、締固めを盛土の要素として捉え、降雨浸透による強度変化を比較検討する。

4. 研究成果

締固めによる不飽和土の力学挙動を三相連成問題として解くことで、締固めの強度発現機構について考察を行った。また、解析時の条件として、締固めにおける載荷速度の違いによる影響（間隙内に発生する空気の影響）を調べることで、締固めに対する機構や最適な載荷速度、さらには締固めを盛土の要素として捉え、供用開始後の降雨浸透による強度変化を数値解析から検討した。

1) 締固めシミュレーション

解析条件として、高さ 20mm・幅 10mm の要素を用い、一次元圧縮・除荷条件とし、上下端・左右端は非排水境界、上端のみを排気境界とする。荷重条件を載荷と除荷にそれぞれ、0.25分・0.5分・1.0分・2.0分・4.0分の計 5 パターンと、載荷速度の違いを表現した。

図-1 は、含水比ごとに乾燥密度を整理した締固め曲線を示している。弾性から弾塑性に転じる含水比や、ピークが現れる含水比は速度によって差は見られなかった。しかし、

最もゆっくりと締固めた載荷速度 4.0 分のものに比べ高含水比で乾燥密度は減少しているのがわかる。そして、載荷速度を徐々に上げていくと、さらに乾燥密度が低下してゆく傾向となった。

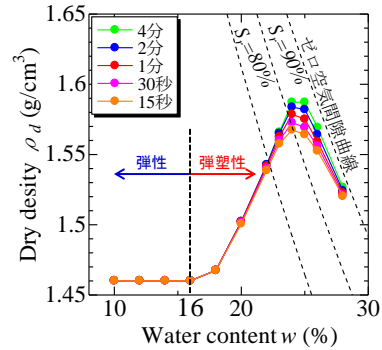


図-1 締固め曲線

次に、図-2、図-3 は締固め過程における載荷速度ごとの間隙空気圧・サクシオン応力を示している。載荷速度が速くなるほど、飽和度の上昇によって透気係数が低下し、内部の間隙空気圧の消散に時間がかかり、その分だけ外部応力に対して空気圧が受け持つと考えられる。つまり、短時間の締固めでは内部の間隙空気圧は排気されにくく、間隙空気

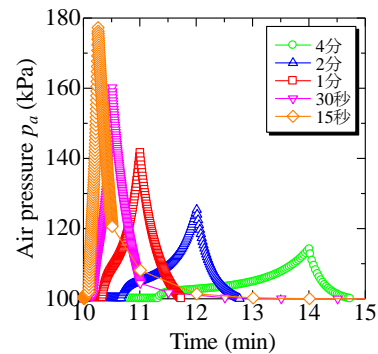


図-2 間隙空気圧の経時変化

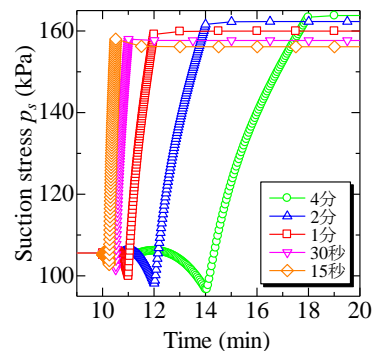


図-3 サクシオン応力の経時変化

が受け持つ応力が高くなり、土粒子が受け持つ応力が少なくなり有効応力が減少すると考えられる。

2) 降雨による浸透シミュレーション

図-4, 図-5 に、降雨による浸透過程における平均有効主応力～間隙比関係, 浸透過程における間隙空気圧の経時変化, さらに図-6 に飽和度～サクシオン関係を示している。

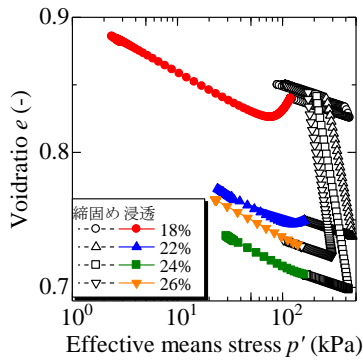


図-4 $e-\ln p'$ 曲線

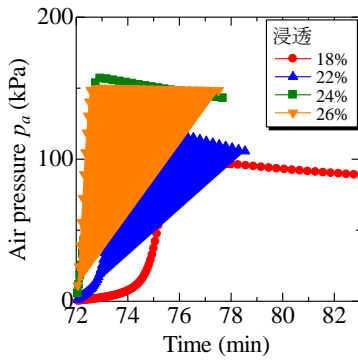


図-5 間隙空気圧の経時変化

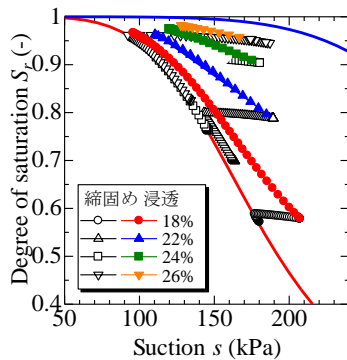


図-6 水分特性曲線

その結果、降雨によって、すべてのケースで吸水挙動を示し、サクシオンが大きく減少している (図-6)。また、浸透によって飽和度は増加する一方、図-5 に示すように、高含水比になるほど、間隙空気圧の消散に時間が

かかることがわかる。また図-4 より、浸水によってすべてのケースで平均有効応力が減少するとともに、浸透終了後に膨張しているのがわかる。しかし、低含水比においては、浸透初期にコラプス現象がみとれる。

3) 降雨浸透による強度変化

締固めた土の性質として、締固め後の強度は、締固め曲線のピークよりも低い含水比で締固め土の強度のピークが現れることは一般的に知られている。そこで、浸透前後における強度特性について解析的に説明する。

2) で得られた、締固め～浸透シミュレーションを行った締固め土に対し、等体積せん断を試みた。与えるひずみは、せん断ひずみが最終的に 15% になるように設定する。

対象とする含水比は、最適含水比 (24%) を中心に、最適含水比付近 (22%), WET 側 (26%) の計 3 パターンである。

図-7 は降雨浸透前のせん断過程における応力経路を示している。その結果、浸透前の締固め土は最適含水比よりも乾燥側の含水比 (22%) でせん断強度がピークとなる結果となった。また、図-8 は浸透後のせん断強度を示している。これより、全ての含水比において、せん断強度の低下が見受けられた。最適含水比で強度がピークを示し、浸透前と強度の序列が変化する結果となった。これは、図-6 でも示したように、浸透に伴うサクシオン低下により剛性が低下し、コラプスをお

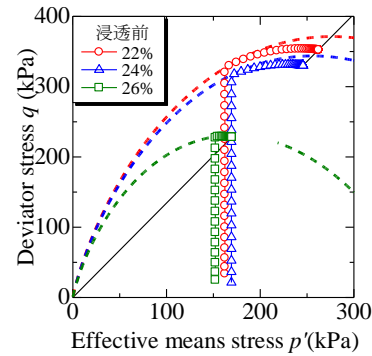


図-7 浸透前の強度

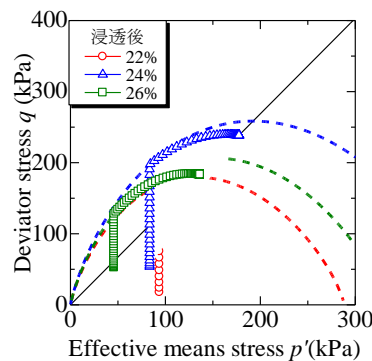


図-8 浸透後の強度

こしたことで、せん断強度に顕著に影響が表れたものと考えられる。

以上より、載荷速度が速くなるほど内部の間隙空気圧は排気されにくく、間隙空気圧が外力に対して働くため、有効応力の変化が抑えられ変形量が抑えられる結果となった。また、締固めを盛土の要素として捉え、降雨浸透による強度変化を比較した。その結果、浸透前の締固め土は最適含水比よりも若干乾燥側の含水比でせん断強度がピークとなるが、浸透後は、最適含水比で強度がピークを示す結果となった。この要因として、浸透に伴うサクシオン消失により剛性が低下し、クラプスを起こしたためだと考えられる。

結果、締固めを三相連成問題として解くことで、間隙空気が締固め土、さらには浸透過程での変形・強度特性に与える影響を明らかにした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ①□ 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, 土木学会, 査読有, Vol.15, 2012(掲載決定)。
- ②□ 野村瞬、河井克之、角井駿祐、橘伸也、金澤伸一、飯塚敦: 飽和/不飽和地盤内における水溶性物質移動モデルの構築、応用力学論文集, 土木学会, 査読有, Vol.14, pp.231-240, 2011。
- ③□ 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盛土内応力分布に及ぼす影響、応用力学論文集, 土木学会, 査読有, Vol.13, pp.423-430, 2010。
- ④□ 柴田昌輝、河井克之、尾崎早希子、金澤伸一、橘伸也、飯塚敦: 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、応用力学論文集, 土木学会, 査読有, Vol.13, pp.363-370, 2010。

[学会発表] (計6件)

- ①□ Nomura, S., K. Kawai, A. Iizuka, S. Tachibana, S. Kanazawa: Mathematical model of soil/water/air coupled problem for unsaturated soils considering mass transfer within pore-water, *Proc. 5th Asia-Pacific Conf. on Unsaturated Soils*, pp.287-292, 査読有, 2012年3月1日, Pattaya, Thailand.
- ② 豊嶋拓馬、金澤伸一、石井武司、齋藤邦夫: 浸水時における締固め土の力学特

性: 第8回地盤工学会関東支部発表会発表講演集, pp.152-153, 山梨市. 2011, 11月10日。

- ③□ Tanaka, M., K. Kawai, S. Kanazawa, A. Iizuka, S. Tachibana, S. Ohno and T. Takeyama: Banking simulation with a constitutive model for unsaturated soil, *Proc. 5th Int. Conf. on Unsaturated Soils*, 査読有, pp.1337-1342, 2010, 11月7日, Barcelona.
- ④□ Nomura, S., K. Kawai, S. Kanazawa and A. Iizuka: Study of stratification resistant to salt damage, *Proc. 5th Int. Conf. on Unsaturated Soils*, 査読有, pp.1133-1139, 2010, 11月7日, Barcelona.
- ⑤□ Shibata, M., K. Kawai, S. Kanazawa and A. Iizuka: Simulation of static compaction with unsaturated soil/water coupled F. E. analysis, *Proc. 5th Int. Conf. on Unsaturated Soils*, 査読有, pp.965-971, 2010, 11月7日, Barcelona.
- ⑥□ Kawazu, J., K. Kawai, S. Kanazawa and A. Iizuka: Mechanical behaviors and water retention characteristics of micro-porous ceramic particles produced by burning sludge, *Proc. 5th Int. Conf. on Unsaturated Soils*, 査読有, pp.277-282, 2010, 11月7日, Barcelona.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金澤 伸一 (KANAZAWA SHINICHI)
中央大学・理工学部・助教
研究者番号: 20580062