

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560606

研究課題名(和文)物質移動を考慮した土/水/空気連成解析による汚染土砂締固め管理手法の確立

研究課題名(英文) Approach to optimum compaction of polluted soil with using the soil/water/air coupled simulation considering mass transportation

研究代表者

河井 克之 (Kawai, Katsuyuki)

神戸大学・都市安全研究センター・准教授

研究者番号：30304132

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：東日本大震災で発生した膨大な放射能汚染土砂を安全に管理することが求められており、土砂を汚染物質の漏出なく最適に締固めることが重要となってくる。そのためには、これまで経験学的に行われてきた締固めを力学的に説明する必要がある。ここでは、まず締固めを土/水/空気連成問題としてとらえ、解析によって表現することを試みる。また、物質輸送方程式を組み込み、外力変化による土壌内の物質移動も同時に予測できる解析手法を確立する。

研究成果の概要(英文)：Safely preserving huge quantities of radiation-contaminated surface soil generated by the Great East Japan Earthquake is needed and optimum compaction of contaminated soil without leakage of pollution is important. Therefore, we have to explain compaction, which has been empirically conducted so far, in the framework of soil mechanics. In this study, the compaction is regarded as soil/water/air coupled problem first and numerically simulated. Moreover, mass transportation equation is applied to the simulation code and the method to simultaneously predict the behavior of solution within ground is developed.

研究分野：土木工学・地盤工学

キーワード：地盤工学 土壌圏現象 自然災害

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災によって発生した福島原子力発電所の問題は、未だ収束が見えず、現在も放射性物質の大気への放出は完全には止まっていない。放射性物質は周辺地域に拡散しながら飛散、降下し、土壌を汚染するだけでなく、各用水、農畜水産物への放射性物質の混入が予想され、早期の除染が社会的に焦眉の問題となっている。今後、2800万 m<sup>3</sup>もの放射能汚染土砂の削剥、処理、保管が行われることになる。これまでも建設発生土の処理は問題となっており、余剰量が少なくなる様に切り土量と盛土量のバランスを工夫したり、浚渫土の様な軟弱な土は固化剤と混ぜ改良土とするなど、場内、場外で再利用されてきた。しかしながら、東京ドーム 23 杯分にも相当する土砂を、含有放射性物質の漏出を抑制しながら、特定の制限された領域内に力学的に安定した状態で保管するには、広範な地盤工学の知見を結集した締固め施工による、盛土建設が必要となることは明らかである。

地盤工学において、締固めは古来より行われてきた土工の一種であり、これまでも大規模な盛土建設は行われてきたが、そのメカニズムが力学体系の中で演繹的に説明されたことはない。規格の締固め試験結果(締固め曲線：乾燥密度～含水比関係)を用いた、土の力学的性質の傾向把握(図-1)や、実務では詳細

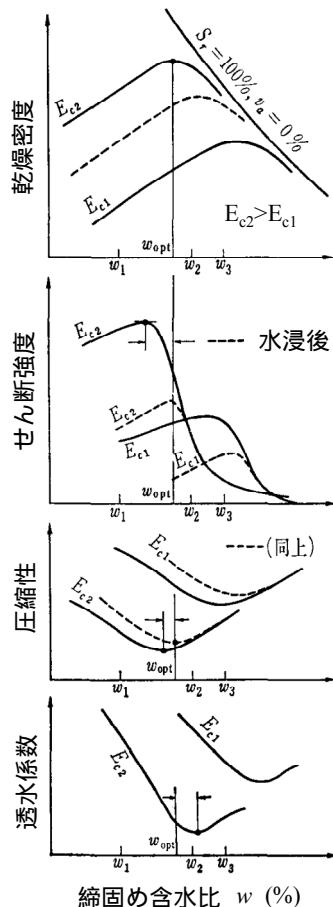


図-1 締固め土の諸性質

な締固め管理規定(締固め施工層厚、転圧回数など)の設定が行われているが、これらはすべて経験則から導かれたものであり力学的根拠に基づいていない。これは、“締固め”が適度な含水状態で、地盤材料に圧縮力を加えて空隙空気を追い出すことを目的としているものの、地盤工学が空隙空気を含む不飽和状態の土に対する力学挙動の予測手法を持ち合わせていなかったことが原因である。近年になり、ようやく不飽和土の試験法も確立しつつあり、構成モデルや透水モデルが提案されるとともに、それらを初期値境界値問題として定式化する研究も見られるようになってきた。

2. 研究の目的

本研究では、申請者らがこれまで開発してきた不飽和土構成モデルを用いて、締固めメカニズムを明らかにするとともに、汚染物を含む地盤材料で安全で効率的な締固めを実現するためのガイドラインを示す。

3. 研究の方法

締固め施工が土中水に溶解する物質が挙動に及ぼす影響を検討するために、以下の研究計画を立てた。

(1) 土/水/空気連成解析を用いた締固めシミュレーション

“締固め”を、不飽和土への非排水載荷・除荷として境界値問題の中で表現することを試みる。その際に、初期含水状態の違いとして得られる含水比～初期乾燥密度曲線を締固めとして捉える。また、このときの内部の物理量変化や局所化に注目して締固められた土の特性について検討する。同時に実務で行われる段階的締固めを模擬し、薄層締固めの効果について考察を加える。

(2) 土/水/空気連成解析への物質輸送方程式の適用

すでに、申請者らは不飽和土の土/水連成解析の枠組みに物質輸送方程式を適用し、塩害問題などに取り組んでいる(藤川和彦、飯塚敦、河井克之、ティラポン・ピパットパンサー：物質移動を考慮した不飽和土/水連成問題の数値モデルと有限要素解析手法、応用力学論文集、Vol.9, pp.377-384, 2006.)。しかしながら、水理モデルの離散化に赤井・田村の方法を用いていたため、計算精度に問題があった。そこで、アイソパラメトリック要素を適用し、計算における安定性の向上を目指す。また、外応力が地盤愛の物質移動に及ぼす影響について明らかにする。

(3) キャピラリーバリア性能に及ぼす影響の検討

地盤からの物質漏出抑制のためには、降雨などの浸透水を遮断することが最も効果的である。異なる地盤材料を組み合わせ傾斜した層構造を設けることで降雨の側方へ排水するキャピラリーバリアシステムが実際の処分場でも多重バリアシステムのひとつ

として用いられている。しかしながら、材料選定のみならず、傾斜角や層厚などの幾何構造因子が及ぼす影響については、詳細に調べられておらず、設計を困難にしている。ここでは、キャピラリーバリアへの降雨浸透シミュレーションを行う。

#### 4. 研究成果

本研究で得た成果を以下の様にまとめる。

##### (1) 締固めシミュレーション

まずは、締固めメカニズムを明らかにするために、図-2 に示す解析領域に排気・非排水条件で図-3 に示す一定の荷重・除荷応力を加え、そのときの状態量変化を初期含水状態の違いによって整理した。図-4 は解析によって得られた締固め曲線である。これまで、要素挙動としてモデル化が困難であった“締固め”を境界値問題で表現することに成功している。この荷重・除荷過程での内部の間隙水圧、空気圧挙動を図-5 に示す。荷重時に水圧、空気圧とも増加し、除荷時に消散しているが、その挙動が最適含水比の乾燥側と湿潤側で大きく異なることが分かる。この結果より、締固め曲線が最適含水比で最大の乾燥密度を持つ上に突な形状を示すのは、最適含水比

近傍で間隙空気の排出が困難になり、結果的に外応力の有効応力への寄与が小さくなるためであり、湿潤側でその影響がより顕著になるからである。このように得られた締固め供試体の間隙比の内部分布を図-7 に示す。この結果からも、乾燥側と湿潤側で間隙比の分布傾向が異なることが分かる。

また、締固めシミュレーション後の解析領域を図-8 のように単純せん断し、得られるせん断抵抗力を比較した。その結果を図-9 にまとめる。図中には異なる締固め応力の結果も併せて示す。その結果、締固め曲線の最適含水比(図中 )よりも少し乾燥側で強度が最大になる結果となっており、これまで経験的に知られていた結果を矛盾なく表現できている。

##### (2) 締固め施工シミュレーション

締固めが境界値問題の解となっていることから、実際に行われている締固め施工の締固め層厚や段階施工の方法によって得られる締固め品質が異なることが予想される。そこで、図-10 に示す多層締固めシミュレーションを行った。ここで、Case1 は0.6m 毎の締固め、Case2 は0.3m 毎の締固めであり、Case3 は0.6m 層厚ではあるものの、繰り返す載荷

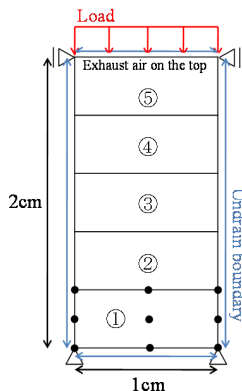


図-2 解析領域

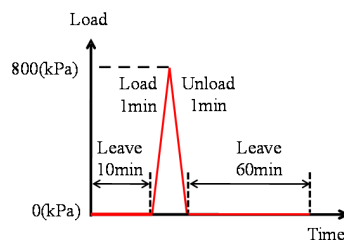


図-3 締固め応力の作用

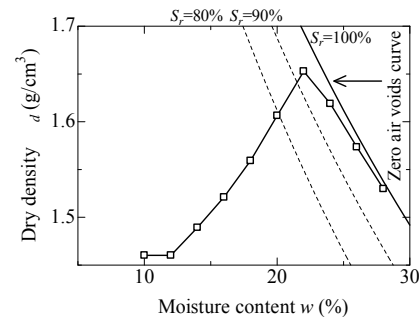


図-4 解析から得られた締固め曲線

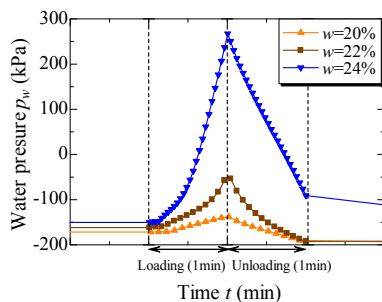


図-5 締固め時の間隙水圧変化

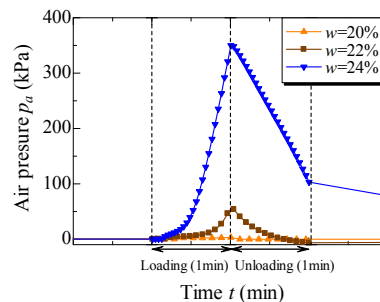


図-6 締固め時の間隙空気圧変化

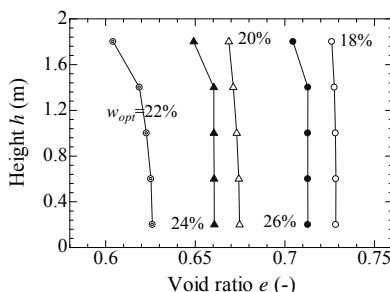


図-7 締固め供試体の内部間隙比分布

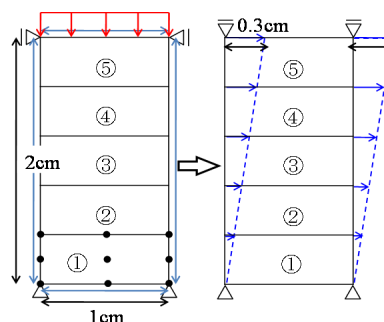


図-8 単純せん断シミュレーション

を行い、Case2 と締固め総数同じにした場合である。図-11 にそれぞれの結果得られた間隙比の深度分布を比較する。全体的に締固め層間で間隙比が不連続になるのが確認できる。Case1 と 2 を比較すると、同様に締固め層間の不連続は確認できるものの、薄層締固め(Case2)の方が、全体的によく締め固まっているのが分かる。また、同じ締固め量を加えた Case3 と比較すると平均の間隙比は近い値になるものの、層間の継ぎ目がより明確に現れることが分かった。

本研究では、材料定数のパラメトリックスタディも行っており、各材料定数が締固め曲線に及ぼす影響も明らかにした。

(3) 外荷重が内部の物質移動に及ぼす影響

土/水/空気連成解析の枠組みに物質輸送方程式を導入し、図-12 に示す解析を行った。その結果、図-13 に示す濃度分布を得た。外力の载荷によって内部に動水勾配が生じ、それに応じて物質が移動することが表現できた。しかしながら、その影響は降雨浸透など

の外水位変動に比べると相当小さいことが明らかになった。

(4) キャピラリーバリア性能の評価方法の検討

図-14 に示す模型実験を模擬した降雨浸透シミュレーションを行った。まずは、同じ層構造(層厚、傾斜角)を持つキャピラリーバリア層に異なる降雨強度を与えた結果を比較した。図-15 に全水頭分布を比較する。その結果、降雨強度の小さな CASE1 では下部層への漏出はなく、降雨強度が大きくなるにつれて、流下途中で漏出(CASE2)、全面で漏出(CASE3)することが表現できている。傾斜角を変えて、降雨強度の漏出への影響を整理した結果を表-1 にまとめる。この結果は、仮想のものではあるものの、実際の模型実験と詳細に比較することで、キャピラリーバリアシステムの設計に有益であると考えられる。

以上、実務に適用できるレベルにまで解析手法の確立、精度向上を図れたものとする。今後は、実構造物の挙動と比較することで信

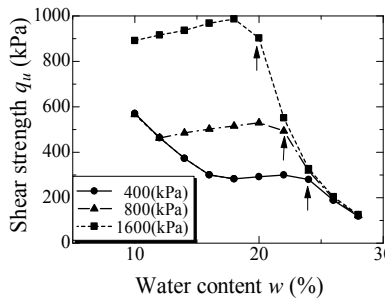


図-9 締固め土のせん断強度

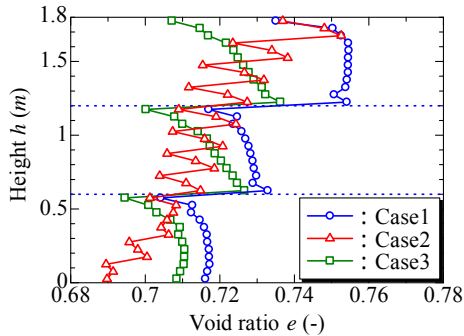


図-11 締固め施工シミュレーション結果

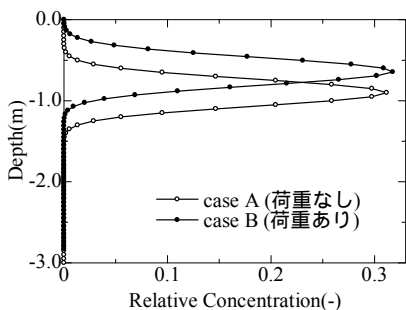


図-13 外力载荷時の濃度深度分布

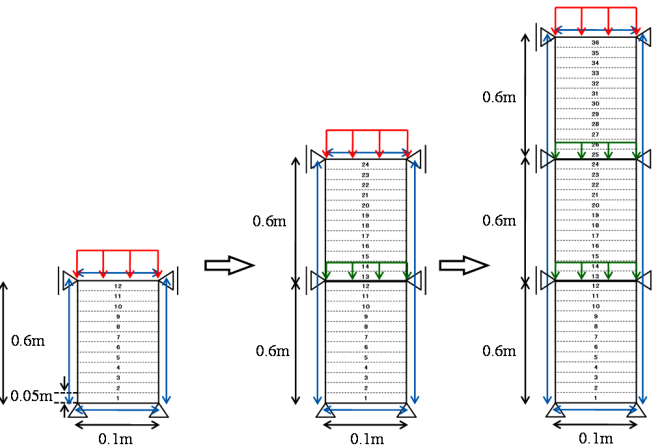
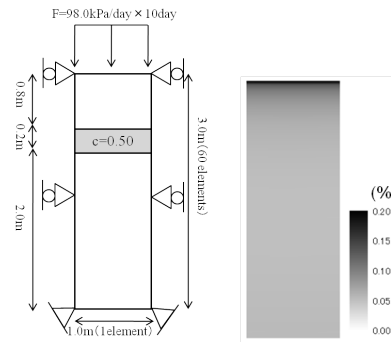


図-10 多層締固めシミュレーション



(a) 解析条件 (b)体積ひずみ分布  
図-12 外荷重による物質移動シミュレーション

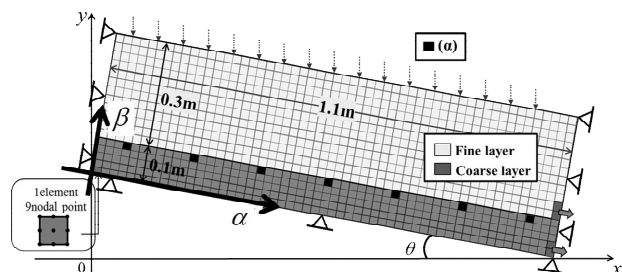


図-14 キャピラリーバリアへの降雨浸透シミュレーション

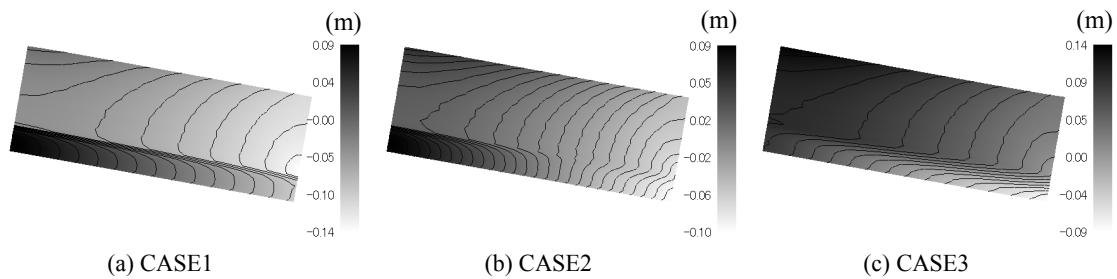


図-15 降雨時の全水頭分布

表-1 傾斜角毎の降雨強度と漏出の関係

Layer thickness 30cm		Rain				
		0.5mm/hr	1.0mm/hr	2.1mm/hr	4.2mm/hr	6.2mm/hr
Slope angle	5 °			×	×	×
	10 °				×	×
	15 °					×

頼性を高めていきたいと考える。

#### 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 23 件)

河井克之, 坂本諭, Phommachanh Viradeth, 飯塚敦: 土/水/空気連成有限要素解析による締固め特性に及ぼす土質定数の影響の検討, 土木学会論文集 A-2(応用力学), 査読有, Vol.68, No.2, I\_299-I\_306, 2012.

河井克之, 杉山友理, 野村 瞬, 飯塚 敦: 地盤内塩分移動シミュレーションによる陸前高田一本松の生育環境評価, 土木学会論文集 A-2(応用力学), 査読有, Vol.68, No.2, I\_345-I\_352, 2012.

Kawai, K., A. Iizuka and S. Kanazawa: Expression of mechanical characteristics in compacted soil with soil/water coupled F.E. simulation, *Proc. 18th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 査読有, pp.1129-1132, 2013.

杉山友理, 河井克之, 田中博之, 飯塚敦: 数値計算を用いた間隙圧係数 B 値の評価, 土木学会論文集 A2(応用力学), 査読有, Vol.70, No.2, I\_145-I\_153, 2015.

[学会発表](計 41 件)

Kawai, K., M. Shibata, T. Ohtsuki, V. Phommachanh, S. Kanazawa and A. Iizuka: Simulations of static compaction with soil/water /air coupled F. E. analysis, 2nd European Conf. on Unsaturated soils, 2012.6.22, Naples (Italy).

Kawai, K., V. Phommachanh, S. Sakamoto and A. Iizuka: Compaction simulation with soil/water/air coupled FEA code and parametric study, 6th Asia-Pacific Conf. on Unsaturated soils, 2014.7.3, Sidney

(Australia).

Kawai, K., T. Saeki, S. Nomura and Y. Sugiyama: Reduction of evaporation from the ground with mulching, 12th Int. Symp. on Geo-disaster Reduction, 2014.9.5, Fullerton (USA).

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

河井 克之 (KAWAI, KATSUYUKI)  
神戸大学・都市安全研究センター・准教授  
研究者番号: 30304312

##### (2) 研究分担者

なし

##### (3) 連携研究者

なし