

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 4 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560605

研究課題名(和文)大地震時における軟弱粘性土地盤上の河川堤防の変形-破壊メカニズムとその強化法

研究課題名(英文) Deformation and failure mechanism of levee on the soft clay deposit during great earthquakes and reinforcement method

研究代表者

岡 二三生 (Oka, Fusao)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・名誉教授

研究者番号：10111923

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)：東日本大震災など既往大地震での堤防の被害データを収集、整理した結果、変形-破壊のパターンと基礎地盤の特性との関係が明らかになった。河川堤防の土を用いた不飽和土の変形特性を室内3軸試験によって明らかにし、多次元の空気-水-土3相系動的有限変形解析の開発を行った。繰り返し特性を考慮できる地盤の構成式を用いて、液状化を含む動的解析を行い、軟弱粘土地盤の影響を明らかにした。3相系有限変形解析から、堤体内での変形の局所化からクラック発生特性を明確になった。河川堤防の被害では地震継続時間は液状化や進行性破壊によって被害の拡大要因である。粘性地盤上の堤防の強化対策には詳細で高度な動的解析が必要である。

研究成果の概要(英文)：Deformation and failure pattern due to the large earthquakes have been investigated and the effect of the ground has been clarified. The deformation characteristics of unsaturated soil of levee were studied using the triaxial tests and the FEM numerical codes for the air-water-soil three phase dynamic analysis were been developed. Using the developed new method, we have clarified the deformation and strain localization characteristics of levee on the clayey ground. The duration time of earthquake is an important factor of the disaster of levee due to large earthquakes. For the construction of infrastructure to prevent disaster of the river embankments, we need the dynamic analysis of levee using the new analysis method developed in this study.

研究分野：地盤力学

キーワード：河川堤防 大地震 軟弱粘性土 変形と破壊 シミュレーション 不飽和盛土 3相混合体 強化法

## 1. 研究開始当初の背景

平成 23 年の 3 月 11 月に発生した東北地方太平洋沖地震は広範囲に堤防の被害をもたらした。中でも、宮城県、茨城県では大きな被害であった。宮城県、岩手県、青森県では、河川管理箇所 1195 箇所、堤防は 773 箇所に及ぶ被害を受けた。宮城県では軟弱な基礎地盤上、特に下部に厚い粘土層がある場合に大きな被害が発生している。このような形態は、宮城県沖地震、十勝地震などでもみられているが、その原因には依然として不明な点が多く、その解決が強く求められている。被害形態を整理し、そのメカニズムと堤防基礎のみでなく、堤体の変形破壊の実態を明らかにし、対策工法の確立を目指すことが重要な課題である。これらの地盤で特徴的なのは、堤防下部に厚い軟弱粘土地盤があることである。この粘性土地盤の影響はこれまで指摘されてきているが、明確になっていない。このため、適切な対策法の決定が合理的にされていない。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、巨大地震時の堤防の軟弱粘性土上の河川堤防の変形破壊メカニズムとその強化法を明らかにすることである。

## 3. 研究の方法

- 1) 東日本大震災など大地震での堤防の変形や崩壊のデータを収集、整理する。
- 2) 堤防堤体及び下部基礎地盤の変形・強度特性を明らかにすることを目的に実際の河川堤防の土を用いた不飽和土の変形特性を、変形、間隙水圧、間隙空気圧について室内 3 軸試験によって明らかにする。
- 3) 空気 水 土 3 相系動的有限変形解析の開発を行う。
- 4) 繰り返し特性を考慮できる地盤の構成式を用いて、液状化を含む動的解析を

行い、液状化のみでなく軟弱粘土地盤の影響を明らかにする。

## 5) 地震特性の影響

液状化や進行性破壊に対する地震の継続時間の影響を明らかにする。

## 6) 今後の研究と防災対策への提言。

## 4. 研究成果

- 1) 東日本大震災および既往の大地震での堤防の変形や崩壊のデータを収集、整理した。

その結果、地震時変形 - 破壊のパターンと河川堤防 基礎地盤の特性との関係を明らかにした。

- 2) 堤防堤体及び下部基礎地盤の変形・強度特性を明らかにすることを目的に実際の河川堤防の土を用いた不飽和土の変形特性を、変形、間隙水圧、間隙空気圧について室内三軸試験によって明らかにした。さらに、X 線-CT を用いて不飽和土の変形時における微視的な構造の変化を明らかにした。

- 3) 空気 水 土 3 相系動的有限変形解析の開発を行った。開発したプログラムは 2 次元と 3 次元解析用である；COMVI2D-DY, COMVI-3D-DY である。

- 4) 繰り返し特性を考慮できる地盤の構成式を開発した。今後、液状化のみでなく軟弱粘土地盤の影響を明らかにすることが可能となった。解析においては、これまでの研究のような基礎地盤のみでなく、堤防堤体の変形-破壊特性を明らかにするため、堤防堤体の不飽和部については、不飽和特性を考慮した構成式を開発した。その結果、空気 水 土 3 相系有限変形解析が可能となった。

- 5) 軟弱粘性土上の河川堤防の地震応答解析を行い、変形の局所化帯に注目した変形のパターン、変形量やサクション、骨格応力などの分布を明らかにした。特に変形の局所化に関しては、兵庫県南部地震のような強地震時にクラックに発展するひずみの

局所化帯が堤防内部方向に向かうことを明らかにした。この結果は、1993年北海道南西沖地震で後志利別川の堤防が受けたパターンに類似のものである。このパターンの再現は今回の研究で初めて明らかになった。

堤防内部での飽和帯の存在の影響を明らかにした。堤体とその直下の基礎地盤での飽和砂の存在によってより沈下卓越の変形モードとなる。

地震特性の影響については、兵庫県南部地震と最大加速度は相対的に小さいが継続時間の長い東北地方太平洋沖地震でえられた波形を用いた。その結果、波形によって変形モードは強い影響を受けることが明らかになった。

#### 6) 今後の課題と提言

1. 実験に関しては、三軸圧縮試験のみでなくねじり試験など多様な応力状態での繰り返し載荷時の挙動を不攪乱自然土に対して実施する必要がある。それに基づいて、現在の構成モデルを改良する必要がある。
2. 解析法で用いる構成式については、特に異方性や中間主応力などの効果を正確に取り入れ構成式をより一般化し、繰り返し載荷時の自然地盤の挙動を再現する必要がある。
3. 動的応答解析では、継続時間の長い地震動に対して、不均質な堤体のパターンに対する解析が必要である。
4. 豪雨が多発する現在では、豪雨時や豪雨直後の降雨と浸透を考慮した地震時の挙動を解析し、河川堤防の強化をはかる必要がある。
5. 巨大地震時の堤防の安定性を検討するためには、本研究で開発したような高度な解析法を用いる必要がある。

本研究で開発した手法を用いて種々の基礎地盤 河川堤防系の解析を行い、災害予測

法の高度化を進めるとともに、種々の河川堤防の強化法（堤体の改良・補強土工法による堤体の強化・基礎地盤の改良・杭基礎など）を解析し、場所や境界条件にふさわしい強化法を採用する必要がある。また、新たな強化法の開発することが期待される。

#### 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 11 件)

1. Oka, F., P. Tsai, S. Kimoto and R. Kato, Damage patterns of river embankments due to the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake and a numerical modeling of the deformation of river embankments with a clayey subsoil layer, *Soils and Foundations*, 52(5), pp.890-909, 2012.
2. Higo, Y., F. Oka, T. Sato, Y. Matsushima and S. Kimoto, Investigation of localized deformation in partially saturated sand under triaxial compression by microfocus X-ray CT with digital image correlation, *Soils and Foundations*, Vol.53(2), pp.181-198, 2013.
3. Kimoto, S., F. Oka and E. Garcia, Numerical Simulation of the Rainfall Infiltration on Unsaturated Soil Slope Considering a Seepage Flow, *J. SAGS & AGSSA (Journal of the SOUTHEAST ASIAN GEOTECHNICAL SOCIETY & ASSOCIATION OF GEOTECHNICAL SOCIETIES IN SOUTHEAST ASIA)*, Vol.44, No.3, pp.1-13, 2013
4. Shahbodaghkha Kahn, M. Mirajalili, S. Kimoto and F. Oka, Dynamic Analysis of Strain Localization in Water-Saturated Clay Using A Cyclic Elasto-Viscoplastic Model, Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). DOI: 10.1002/nag.2221, 2013.
5. 山田茂治, 岡 二三生, 木元小百合, 河

川堤防における電磁波・電磁法による内部構造探査事例, 基礎工

Vol.41, No.9, pp.48-50, 2013.

6. Higo, Y., Oka, F., Morishita, R., Matsushima, Y., Yoshida, T., TRINARIZATION OF MUX-RAY CT IMAGES OF PARTIALLY SATURATED SAND AT DIFFERENT WATER-RETENTION STATES USING A REGION GROWING METHOD, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, Volume 324, pp. 63-69., 2014

7. Sadeghi, H., S. Kimoto & F. Oka, B. Shahbodagh, Dynamic analysis of river embankments during earthquakes using a finite deformation FE analysis method, Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics, Oka, Murakami, Uzuoka & Kimoto (Eds.), Proc. 14th ICIACMAG, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-00148-0, pp. 637-642, 2014.

8. Kato, R., F. Oka & S. Kimoto, A numerical simulation of seismic behavior of highway embankments considering seepage flow, Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics, Oka, Murakami, Uzuoka & Kimoto (Eds.), Proc. 14th ICIACMAG, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-00148-0, pp. 755-760, 2014.

9. Kimoto, S., Babak Shahbodagh Khan, Mojtaba Mirjalili, Fusao Oka, A Cyclic Elasto-Viscoplastic Constitutive Model for Clay Considering the Nonlinear Kinematic Hardening Rules and the Structural Degradation, Int. J. Geomechanics, 2015 to appear.

10. Oka, F., B. Shahbodagh Khan, M. Mirjalili, S. Kimoto, Dynamic Analysis of Strain Localization in Water-Saturated Elasto-Viscoplastic Material,

Bifurcation and Degradation of Geomaterials in the New Millennium, Proceedings of the 10th International Workshop on Bifurcation and Degradation in Geomaterials, Kam-Tim Chau and Jidong Zhao, Editors, Springer, ISBN: 978-3-319-13505-2 (Print) 978-3-319-13506-9 (Online) pp. 355-360, 2015

11. Higo, Y., F. Oka, R. Morishita, Y. Matsushima, Quantitative Observation of Strain Localisation in a Partially Saturated Triaxial Specimen Using Microfocus X-ray CT with Image Analysis, Bifurcation and Degradation of Geomaterials in the New Millennium, Proceedings of the 10th International Workshop on Bifurcation and Degradation in Geomaterials, Kam-Tim Chau and Jidong Zhao, Editors, Springer, ISBN: 978-3-319-13505-2 (Print) 978-3-319-13506-9 (Online), pp. 325-330, 2015

{学会発表}(計8件)

1. 上田 準也, 岡 二三生, 木元 小百合, 肥後 陽介, 岩井 裕正, 狩野 修志, 木津川堤防砂質土を用いた繰返し応力履歴を考慮した繰返し中空ねじりせん断試験, 第48回地盤工学研究発表会, No. 935, pp. 1869-1870, 2013.

2. 上田 準也, 肥後 陽介, 岡 二三生, 岩井 裕正, 木元 小百合, 狩野 修志, 繰返し応力履歴を考慮した繰返し中空ねじりせん断試験, 土木学会関西支部, 講演番号-23, 2013

3. 石川 椋, 木元 小百合, 森本 恭弘: 不飽和砂質土のせん断時および圧縮時の挙動におけるサクシヨンの影響, 第49回地盤工学研究発表会, No. 359, p. 717-718, 2014.

4. Sadeghi, H., S. Kimoto & F. Oka, B. Shahbodagh, Dynamic analysis of river embankments during earthquakes using a finite deformation FE analysis method, Computer Methods and Recent Advances in

Geomechanics, Oka, Murakami, Uzuoka & Kimoto (Eds.), Proc. 14th ICIACMAG, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-00148-0, pp.637-642, 2014.

5 Kato, R., F. Oka & S. Kimoto, A numerical simulation of seismic behavior of highway embankments considering seepage flow, Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics, Oka, Murakami, Uzuoka & Kimoto (Eds.), Proc. 14th ICIACMAG, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-00148-0, pp.755-760, 2014.

6. Kimoto, S., T. Akaki, T. Kitano, H. Iwai & F. Oka, Dynamic behavior of hydrate-bearing sediments during earthquakes, Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics, Oka, Murakami, Uzuoka & Kimoto (Eds.), Proc. 14th ICIACMAG, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-00148-0, pp.1669-1674, 2014.

7. Higo, Y., D. Nishimura, F. Oka, Dynamic analysis of unsaturated embankment considering the seepage, flow by a GIMP-FDM coupled method, Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics, Oka, Murakami, Uzuoka & Kimoto (Eds.), Proc. 14th ICIACMAG, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-00148-0, pp.1761-1766, 2014.

8. 由井 洋和、木元 小百合、岡 二三生、不飽和を考慮した有限変形理論に基づく河川堤防の液状化解析、平成 27 年地盤工学研究発表会講演集、発表予定

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：

番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織  
(1) 研究代表者  
岡 二三生(京都大学工学研究科  
名誉教授)

研究者番号：10111923

(2) 研究分担者  
肥後陽介(京都大学工学研究科准教授)  
研究者番号：10444449

(3) 連携研究者  
木元小百合(京都大学工学研究科准教授)  
研究者番号：70362457