

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25450362

研究課題名(和文) 亀裂に注目した構造物および地盤の診断のための解析

研究課題名(英文) Structural analysis of crack growth for assessing safety of structures and foundations

研究代表者

西山 竜朗 (NISHIYAMA, Tatsuro)

岐阜大学・応用生物科学部・准教授

研究者番号：30294440

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：農業用ダムにおける課題解決を背景として、亀裂に注目した有限要素解析を実施し、特に模型実験をモデルとする解析の結果から、直接せん断のメカニズムに対する解釈を得た。また、ダム堤体の地震時挙動の解析を進め、基礎的知見を得た。上記過程では同時に、三軸試験を中心とする実験的検討を並行し、ダム・ため池遮水材の強度特性、不連続性岩盤の強度特性、ならびにコンクリート接合面の強度特性に関する成果が得られた。

研究成果の概要(英文)：A finite element analysis, in which crack growth was mainly considered, was conducted in order to solve recent problems related to irrigation dams. As a result, the mechanisms of direct shear were interpreted especially through an analysis of model tests. Furthermore, a seismic analysis was also carried out for the dam bodies from which fundamental knowledge was obtained.

At the same time, some experimental analyses were also carried out. Fundamental knowledge of the strength of the core materials of dams, discontinuous rock masses, and the joints of concrete were also obtained from the analyses.

研究分野：農業農村工学

キーワード：ダム 施設 地盤 強さ 亀裂 地震 診断 有限要素法

1. 研究開始当初の背景

従来、構造物の設計・解析においては、懸念される損傷に対して大幅に単純化された解釈が取り入れられ、解明に至っていない破壊機構の詳細については考慮せず、大胆な仮定に未解明な点が含まれる分については設計値に余裕をみることで当面の解決とされてきた。しかし、破壊強度というものは亀裂の発生・進展に代表されるような材料内の状態を刻々と変化させる破壊機構に従って発揮されるものである。実際、ダムや水路トンネルの現場で実構造物を診断する際には、当然のこととしてまず亀裂の有無、さらにはその特性が注目される。現場における亀裂の存在は、構造の変形そのもの、さらにはそれを引き起こした力の作用を知るための重要な手掛かりである。

にもかかわらず設計・解析において破壊機構の詳細に対する解釈が欠落している理由は、ひとえにその複雑さ、扱いの難しさにある。特に自然材料から成る地盤においては不均質性も問題となり、実用としての解決が急がれる工学の立場も手伝って、難しいながらもより基本的な問題である亀裂の発生・進展に対する解釈を置き去りにせざるを得なかったというのが実情である。

構造物や地盤を対象とする研究分野では、材料内の局所破壊を塑性の構成式、すなわち破壊箇所の周辺をも含めた領域の変形の増大として扱うのが主流であり、数値計算の高度化とともにこれまでに多くの成果が挙げられている。一方で、機械工学、特に金属やセラミクスを扱う分野で発達してきた亀裂の発生・進展に注目した解析は、構造物や地盤を対象とする場合には現在も馴染みが薄い。コンクリート構造を扱う分野では局所の引張亀裂発生の扱いを基本とする数値解析も行われており、構造物や地盤の解析でも、同様の扱いを出発点として見習える要素が大いにあると考えられる。

2. 研究の目的

本研究ではこれらの現状を鑑み、構造物および地盤の破壊を亀裂の発生・進展として扱う解析法を確立し、構造物や地盤の診断において注目される亀裂の解釈、さらには発揮される強さの評価において、より直接的に対応する解析を実現しようとした。したがってここでは、未解明事項を含みつつも強引に実用に持ち込むという工学としての立場とは別に、逆に基本に立ち返り、放置されつつも実のところ重要な未解決事項、すなわち破壊機構の詳細の解明に取り組むという、基礎研究としての立場をとろうとした。

本計画では、研究代表者らがこれまでに行ってきた岩盤の破壊強度発現特性を知るための模型実験および数値解析、地すべり斜面の安定解析の妥当性を検証するための数値解析、ならびにロックフィルダム堤体材料の劣化による強度低下を評価するための材料

試験法の開発において得られた成果・知見を出発点とし、全面的な発展・追加・再構築によって、新しい知見を得ようとした。

3. 研究の方法

次の4項目を柱として研究を進めた。

(1) 損傷を亀裂の発生・進展として扱う構造物・地盤の有限要素応力解析

ひびわれ解析プログラムの開発を進めながら、後掲(3)の模型実験および実ダム堤体を対象とする解析を実施し、各段階で得られた結果に対する力学的考察を進めた。

(2) 地震および材料劣化を想定した構造物の挙動解析

別途、振動解析プログラム基礎骨格部分を開発した上で、上記(1)のプログラムと統合させ、ダム堤体を対象とする解析を行った。

(3) 構造物・地盤の直接せん断を想定した模型実験

岩盤の直接せん断の典型的ケースを再現する石膏模型実験を行った。また、コンクリート打ち継目のような弱面の強度測定を試行し、試験法開発に対する検討を行った。

(4) 地震動および経年劣化による材料特性の変化を評価するための試験

土および砂利を対象とする三軸試験機制御機構を整備した上で、ダム・ため池の堤体および基礎に関する各種材料を採取し、それらの材料に対する各種強度試験を実施した。

4. 研究成果

上記の各項目に対応して、次のような成果が得られた。

(1) 損傷を亀裂の発生・進展として扱う構造物・地盤の有限要素応力解析

界面内蔵要素を使用したひびわれ解析プログラムを開発し、後掲(3)の模型実験ならびに別の仮想条件を解析モデルとしながら、ダムの設計における岩盤強度評価への貢献を想定した直接せん断の解析を実施した。その結果、ロックせん断試験ならびにブロックせん断試験から得られる岩盤の測定強度が再現されるとともに、各々の破壊機構の相違が見出されるに至った。次いで、アーチダム継目の挙動を解析し、継目構造の内部応力分布の基本的傾向に関する知見が得られた。

(2) 地震および材料劣化を想定した構造物の挙動解析

有限要素法による振動解析プログラムを開発した上で、国内農業用ダム7基を対象として、上下流方向断面に対する地震時挙動解析を行った。固有値解析から堤体の基本的特性に対する検討を行うとともに、地震動を受けた際のひび割れ解析を進めた。これらの解析については今後も継続して検討を行う。

(3) 構造物・地盤の直接せん断を想定した模型実験

岩盤の直接せん断の典型的ケースを再現する石膏模型実験を行い、結果を上記(1)の解析で参照した。また、弱面を有するモルタル供試体に対する三軸圧縮試験を実施し、弱面上のせん断強さに対する理論的解釈、ならびに弱面付近における条件の違いによる破壊機構の変化に対する解釈の整理を行うとともに、上記解析結果との整合を確認した。

(4) 地震動および経年劣化による材料特性の変化を評価するための試験

三軸試験機制御機構を整備した上で、ダム・ため池堤体材料を採取し、その材料に対する各種強度試験から、遮水材として用いられる土質材料の強度特性の解釈に関する知見が得られた。また、不連続性岩盤の試料採取機会に恵まれたため、その試料に対する三軸試験を実施し、強度特性に対する検討を進め、上記解析結果との整合を確認した。

本計画終了時点において、これらの成果全体の統合を詰めるには至っていないが、以上総じて、農業用ダムにおける喫緊課題を背景とする力学的問題の解決に資するための知見が得られた。またその過程では随時、水利施設の不具合に関する情報が収集された。

今後はダム堤体ひび割れ解析のさらなる発展を目標としている。本報告執筆時点において、ひび割れ解析手法に関して残された課題として塑性の取り扱いの部分的採用を新たに検討しており、プログラム吟味・試作を進め、より妥当な解析手法の構築を図っている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計10件)

Tran, D. Q., Nishimura, S., Senge, M. and Nishiyama, T., Research on cause of dam failure from viewpoint of hydraulic fracturing - case study of a dam failure in Vietnam, *International Journal of GEOMATE*, 査読有, 14(41), 2018, pp. 86-94.
DOI: <https://doi.org/10.21660/2018.41.57454>

Fang, C., Shimizu, H., Nishimura, S., Hiramatsu, K., Onishi, T. and Nishiyama, T., Seismic risk evaluation of irrigation tanks: a case study in Ibigawa-cho, *International Journal of GEOMATE*, 査読有, 14(41), 2018, pp. 1-6.
DOI: <https://doi.org/10.21660/2018.41.31882>

Nishiyama, T., Analysis of the strength of rock foundations for the safety of dams, *Proceedings of the 5th*

International Workshop on Recent Progress in Agriculture and Water Management in Asia, 2017, pp. 1-4.

千原英司, 西山竜朗, 石橋真治, 松元 晃, 変形性地盤において外防水止水板を用いた監査廊構造, *水土の知*, 査読有, 85(4), 2017, pp. 17-22.

千原英司, 千家正照, 西山竜朗, アルカリ骨材反応により損傷したコンクリート構造物の評価, *水土の知*, 査読有, 85(1), 2017, pp. 47-51.

Nishiyama, T. and Hasegawa, T., Numerical Experiment for Virtual Plaster Model Tests Simulating Block Shear Tests, *International Journal of GEOMATE*, 査読有, 10(21), 2016, pp. 1950-1955.

<http://www.geomatejournal.com/sites/default/files/articles/1950-1955-5300-Nishiyama-May-2016-c1.pdf>

井谷昌功・西山竜朗・井端 洸・河端俊典, 農業用パイプラインにおける漏水事故実態に関する調査研究 琵琶湖周辺の幹線系パイプラインの事例, *Journal of Rainwater Catchment Systems*, 査読有, 20(2), 2015, pp. 61-66.

Kobayashi, N., Kimata, T., Ishii, M., Nishiyama, T., Tsukada, Y and Izumi, T., Estimation of the Coefficient of Volume Compressibility of Soils Using Artificial Neural Network with Batch Learning Algorithm, *Journal of Rainwater Catchment Systems*, 査読有, 20(2), 2015, pp. 23-28.

Nishiyama, T. and Hasegawa, T., A practical use of the finite element with an embedded interface for simulating the direct shear on brittle materials, *Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics, Proceedings of the 14th International Conference of the International Association for Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics*, 査読有, 2014, pp. 323-327.

藤井弘章, 横溝隆之, 難波明代, 堀 俊男, 西村伸一, 島田 清, 西山竜朗, 1995年兵庫県南部地震による淡路島北部の被害・無被害ため池堤体の土質特性, *農業農村工学会論文集*, 査読有, 82(1), 2014, pp. 1-17.

DOI: <https://doi.org/10.11408/jsidre.82.1>

[学会発表](計 20 件)

浅野純平,長束 勇,石井将幸,松本 拓,
西山竜朗,無機系補修材料とコンクリート母材の界面剥離強さの評価に関する研究,平成 29 年度農業農村工学会大会講演会,2017.

Fang, C., Shimizu, H., Nishimura, S., Hiramatsu, K., Onishi, T. and Nishiyama, T., Seismic risk evaluation of irrigation tanks -Case study of two irrigation tanks in Ibigawa-cho, Gifu Prefecture, Japan-, International Symposium on Soil Management for Sustainable Agriculture 2017, UGSAS-GU & BWEL Joint Poster Session on Agricultural and Basin Water Environmental Sciences, 2017.

西山竜朗,原位置岩盤せん断試験における応力経路と発現強度の解析,農業用ダム研究会シンポジウム,2017.

Izumi, T., Miyoshi, M. and Kobayashi, N., Runoff analysis using a deep neural network, The 12th International Conference on Hydroscience & Engineering, 2016.

高須賀愛美,小林範之,Hilbert-Huang 変換を用いた地震時における堤体剛性の評価,第 71 回農業農村工学会中国四国支部講演会,2016.

長井和樹,小林範之,SIS による浸透特性および遮水ゾーン位置の推定,第 71 回農業農村工学会中国四国支部講演会,2016.

田中洋平,小林範之,木全 卓,三次元個別要素法による EPS 破砕片混合土が持つ衝撃吸収性の検討,第 71 回農業農村工学会中国四国支部講演会,2016.

中島圭菜,小林範之,個別要素法を用いた農地石垣の安定性評価,第 71 回農業農村工学会中国四国支部講演会,2016.

浅野純平,長束 勇,石井将幸,堂元咲子,松本 拓,西山竜朗,コンクリート開水路における無機系表面被覆工法の界面剥離強度を求める試験方法の提案,第 71 回農業農村工学会中国四国支部講演会,2016.

橋梅和音,番菜生子,伊藤祐太,池永健人,西山竜朗,長束 勇,堂元咲子,三軸圧縮試験によるコンクリート補修面のせん断強さの評価,第 71 回農業農村工学会中国四国支部講演会,2016.

小林範之,技術者教育プログラムによる地方創世推進事業の実施について,平成 28 年度農業農村工学会大会講演会,2016.

田中洋平・小林範之・木全 卓,個別要素法による EPS 破砕片混合土が持つ衝撃吸収性の検討,第 70 回農業農村工学会中国四国支部講演会,2015.

小林範之・武智正行・田中洋平,地下水位変動がおよぼす地盤卓越振動数への影響について,平成 27 年度農業農村工学会大会講演会,2015.

Nishiyama, T. and Hasegawa, T., Numerical Experiment for Virtual Plaster Model Tests Simulating Block Shear Tests, The Fifth International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment (GEO-MATE 2015), 2015.

西山竜朗・長谷川高士,仮想石膏模型の数値実験による原位置岩盤せん断試験 2 種の比較,平成 27 年度農業農村工学会大会講演会,2015.

影浦弘樹・西山竜朗・長谷川高士,ロックフィル材の一次元圧縮試験における初期相対密度制御,平成 26 年度農業農村工学会大会講演会,2014.

井端 洸・西山竜朗,農業用パイプラインの事故要因分析 調査対象拡充と新たな傾向,平成 26 年度農業農村工学会大会講演会,2014.

井端 洸,西山竜朗,農業用パイプラインの事故要因に関する調査研究,湖北・日野川地区管理体制整備推進協議会,2014.

西山竜朗,ため池の決壊過程,平成 25 年度岡山県ため池安全性等向上研修会,2013.

西山竜朗,有限要素法によるダム基礎岩盤のひび割れ解析手法の研究,ダム研究委員会シンポジウム,2013.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西山 竜朗 (NISHIYAMA, Tatsuro)
岐阜大学・応用生物科学部・准教授
研究者番号: 30294440

(2) 研究分担者

小林 範之 (KOBAYASHI, Noriyuki)
愛媛大学・大学院農学研究科・教授
研究者番号: 00314972