

令和元年6月17日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04402

研究課題名(和文) 地盤の液状化メカニズムに立脚したコンクリート砂利化機構の解明

研究課題名(英文) Mechanism of aggregation of concrete referring a mechanism of liquefaction

研究代表者

藤山 知加子 (FUJIYAMA, Chikako)

法政大学・デザイン工学部・教授

研究者番号：60613495

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,500,000円

研究成果の概要(和文)：(1)要素実験 事前にひび割れを入れたコンクリートに水圧を繰返し与えることで、水圧の大きさに応じて、水圧の繰返しにより粗骨材とモルタルの界面破壊が促進され、ひび割れ延長が増加することを定量的に示すことができた。また、粗骨材の種類が砂利化現象に一定程度影響を与えることを確認した。

(2)数値解析 FEMを用いて、本研究のターゲットである橋梁モデルを構築し、繰返し荷重を与える解析を実施した。解析で得られたコンクリートの応力変動、ひずみ、水圧変動等を求めた。定性的には実験との整合を得たが、定量的な数値を見ると要素実験との差異が大きいことがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

湿潤状態で繰返し作用を受ける我が国の道路橋鉄筋コンクリート床版で多くみられるコンクリートの「砂利化」と言われる現象について、その原因のひとつがコンクリート細孔中の凝縮水の水圧上昇によるコンクリート骨格の破壊であるという仮説を、実験と理論から検証した。水圧やコンクリート中の粗骨材等の条件をパラメータとした要素実験(水圧、圧縮、せん断)では、砂利化現象の初期の兆候をとらえることに成功し、これをもとに、「砂利化指数」を提案した。また、FEMにおいても、本指数は損傷を定性的に示すことを確認した。定量的な評価値に改善の余地はあるものの、簡易な指標で砂利化の度合いを評価する手法の提案は、社会的意義がある。

研究成果の概要(英文)：This study aims to identify a specific degradation of concrete which has been observed on bridge decks made of reinforced concrete (RC). Compressive load and external water pressure were cyclically applied to submerged concrete cylinder specimens with different pre-loading and restraint conditions. Then, fine aggregates without cement matrix were found on inner surfaces of split specimens. These phenomena were quantitatively analysed and the analyses suggested that cyclic water pressure acted to inside of pre-cracked specimens and washed out their cement matrix to outside. Degradation of rough crack surface was also examined by cyclic shear test with/without water supply to the crack. The shear slip and the orthogonal displacement were clearly amplified with increase of the cycle when the water was supplied. The mechanical properties of cracked concrete with water in shear were discussed in accordance with that of liquefaction.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：繰返し荷重 砂利化 コンクリート 水圧 ひび割れ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

#### (1) 研究の背景

含水状態で動的荷重を繰返し受ける実構造物の代表的な例として、雨水に晒されながら交通荷重を支え続ける道路橋の鉄筋コンクリート床版(以下 RC 床版)がある。舗装打ち替えのためアスファルト舗装を剥いだところ、床版上面コンクリートのマトリクス部分が粉碎され水と混じって泥水となり、コンクリートの粗骨材だけが残っている「砂利化」あるいは「土砂化」と言われる現象が発見されたという報告が、全国で絶えない。一方、現象解明のための RC 床版の再現実験では、「砂利化」現象は気乾状態では生じず、床版上面に水を張った場合にのみ見られることはよく知られており、原因のひとつが水の存在であることは、明らかである。

一方、構造物のコンクリートではなく、コンクリートのみの要素試験では、水中で繰返し圧縮作用を与えた場合、気乾状態で行うよりも著しく疲労寿命が低下することが知られている。この結果について国内外で多くの知見が蓄積されている中、原因のひとつとして、骨格の急激な圧縮によりコンクリート細孔中の凝縮水の水圧(コンクリートを形成するマトリクスからみれば間隙水圧)が上昇しコンクリート骨格の損傷を促進するという仮説が示されている[3]が、コンクリート細孔中の水圧を直接測定することは困難であることや、水中実験では水を媒質とするため表面エネルギーが低下しクラック発生が容易になるという別の要因も関連することから、間隙水圧上昇のみに着目した直接的な検証は行われていない。

このように、これまでは実構造物で見られる現象や部材レベルの実験で確認された現象と、材料要素試験で得られた知見とを結びつけるのが困難であったが、本研究課題の位置づけは、まさに両者を結びつけるものである。具体的には、「砂利化」発生原因の一つとしての間隙水圧上昇の寄与を定量的に検証することで、実構造物設計時に「砂利化」発生の可能性の有無を判定し、「砂利化」を未然に防ぐあるいは進行を遅らせるための材料選定を可能にすることを目指すこととした。

#### (2) 着想に至った経緯

これまで、コンクリート材料の速度依存応答に関する実験研究に取り組んできたが、その過程で、特に速度依存性が顕著にあらわれる含水状態のコンクリートおよびモルタルについて、水セメント比とセメントマトリクス中の細孔構造について調べ、毛細管空隙( $10^{-9} \sim 10^{-6}$  (m)程度)の分布が力学特性への関与が強いとの知見を得た。毛細管空隙では、水分子ではなく凝縮水(液状水)としての水が存在することから、毛細管のような微小な領域の水圧変動が、材料全体の剛性や強度に影響を与えるものと考えている。そこから、間隙水圧上昇が土骨格を崩壊させる液状化のような現象が、コンクリートでも十分に起こり得るし、床版の砂利化の原因ではないかとの認識に至った。

さらに、コンクリート細孔空隙中の水圧上昇がコンクリート骨格の損傷を促進することを理論的に検証するため、非線形有限要素解析において地盤の液状化を再現するための構成則をコンクリートに適用し、道路橋床版を対象としたシミュレーションを実施した経験がある[4]。これにより、含水状態では繰返し圧縮作用を受ける上面側のコンクリートのひずみが乾燥状態に比べ顕著に増加することを定性的に確認できた。ただし、その際必要なコンクリートの透水係数や空隙量といった入力値を左右するセメントマトリクス中の毛細管空隙の容量や粗骨材種類等について、実験的かつ定量的な検証までには至らなかった。そこで、本研究ではこの検証を実施したいと考えている。

地盤の液状化については多くの研究が蓄積され、液状化が生じやすい条件として土粒子の粒径やその分布、また繰返し三軸強度比など要素試験での指標を用いて、既往の地盤の液状化危険度判定や、判定された地盤の改良設計が可能となっている。コンクリートにおいても同様に、適切な材料の指標を選び、構造解析の結果を結びつけることで、定量的な砂利化の危険度判定や、判定にもとづく補修や改築の検討を行える可能性があるのではないかと。以上が、本研究の着想に至った経緯である。

### 2. 研究の目的

湿潤状態で繰返し作用をうける我が国の道路橋鉄筋コンクリート床版で多くみられるコンクリートの「砂利化」と言われる現象について、その原因のひとつがコンクリート細孔中の凝縮水の水圧上昇によるコンクリート骨格の破壊であるという仮説を、地盤の液状化発生メカニズムに立脚した実験と理論から検証することが、本研究の目的である。コンクリート中に凝縮水が存在し得る空隙スケールを絞りこんだ実験を行い、最終的には、使用材料の物性値や配合から橋梁床版「砂利化」可能性の有無を判定することを目指す。

### 3. 研究の方法

#### (1) 要素実験 1: 水圧によるコンクリート砂利化の検証実験

##### 一定水圧による実験

図-1 に実験装置の概要を示す。供試体は、直径 100 mm、高さ 100 mm の円柱供試体とし、予め圧縮試験機を用いて供試体直径方向に貫通ひび割れを発生させた。供試体を含水状態にするため、脱気装置を用いて水中で 1 日間脱気を行った。圧力容器に供試体を固定する際は、供試体周面と圧力容器の隙間にコーキング材(シリコンシーラント SA-45889)を注入して固定した。

載荷に使用する水は蒸留水を脱気して用いた。水圧発生装置は、水で満たされたシリンダー内のピストンが前後することにより水圧を発生させる。水圧発生装置をナイロンチューブで圧力容器と接続し、圧力容器内に水を注入することで、水圧が発生する。測定項目は蒸留水の載荷前後の pH とひび割れ密度及び粉体質量である。ひび割れ密度は載荷終了後、供試体の高さ方向の6 か所を切断し、ひび割れの長さを計測し、それを断面積で除すことで求めた。粉体質量はひび割れ面を筆で軽く擦って粉体を採取し、その質量を測定した。加えてふるいを用いて粉体の粒度分布を測定した。

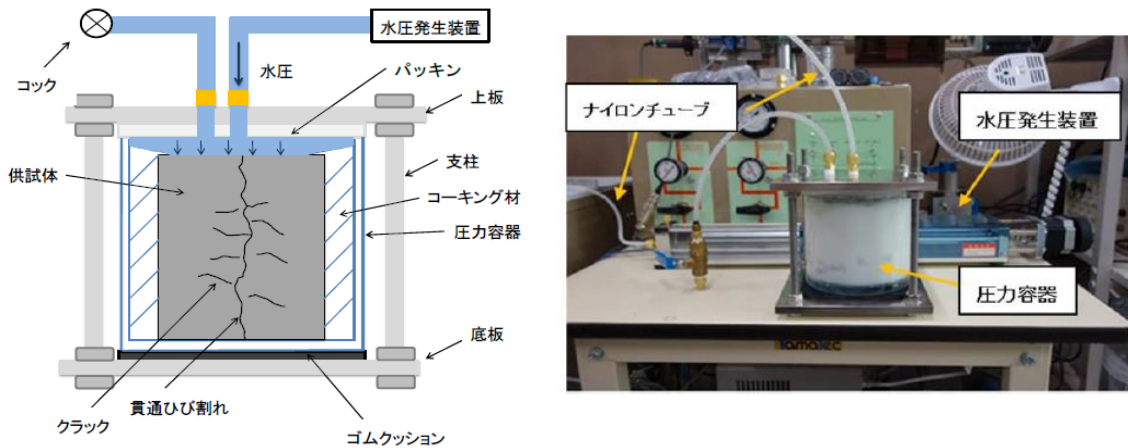


図 1 水圧試験装置の概要

#### 不規則な振幅の水圧による実験

供試体は、直径 100mm、高さ 100mm の円柱を上下 2 つで 1 組とし、上下のコンクリートの間には、幅 10mm、厚さ 10mm のクロロブレンゴムで円をつくり内径 70mm とした。ゴムの内側を水で満たして上下コンクリートで挟み、上側コンクリートに荷重を加え、ゴムの内側に水圧を発生させるためである。なお、クロロブレンゴムは、予備試験において 20kN 程度載荷しても上下のコンクリートブロックが直接干渉しないような硬度（規格 60A）を選定した。上側コンクリート（途中でアクリルに変更）では、打設前に水圧作用面（下面）に鋼製パイプの開口部をあわせて設置した。同様に、下側コンクリートでは、水圧作用面（上面）に釘の頭部をあわせて固定するとともに、釘の先端付近（水圧作用面から 15mm 程度の深さ）およびさらにその 10mm 下に開口部位置をあわせた鋼製パイプを、側面から設置した。打設時は各鋼製パイプの開口面を紙の膜で覆い、コンクリート流入を防いだ。載荷時に、各鋼製パイプを水で満たした状態で先端に圧力計を接続することで、水圧作用面の水圧、釘のスペース（ノッチ）によって誘導されたひび割れ先端での水圧、さらにその 10mm 下のコンクリート内部の水圧を測定するためである。

#### (2) 要素実験 2：圧縮力と水圧によるコンクリート砂利化の検証実験

供試体形状は、直径 100mm、高さ 100mm の円柱であり、供試体中央には、幅約 0.5mm とする割裂ひび割れを予め導入した。なお、疲労載荷試験に先立ち供試体は、水を張ったポリカデシケーターに静置させ脱気を行うことで飽水状態とした。図-2 に疲労載荷試験の概要を示す。図より、水圧は供試体を水槽内に設置し、供試体上面側圧盤に外径 100mm、内径 60mm、厚さ 10mm のクロロブレンゴム製の円環を介し載荷することで円環内の水を加圧し、水圧を発生させた。下面側圧盤においてはドレン口を開放し上下面間の水圧差を生じさせるとともに微粒分が水槽内に排出されるようにした。また、水の浸入を供試体上下面方向に制限するため、供試体側面をプチルテープで止水した。

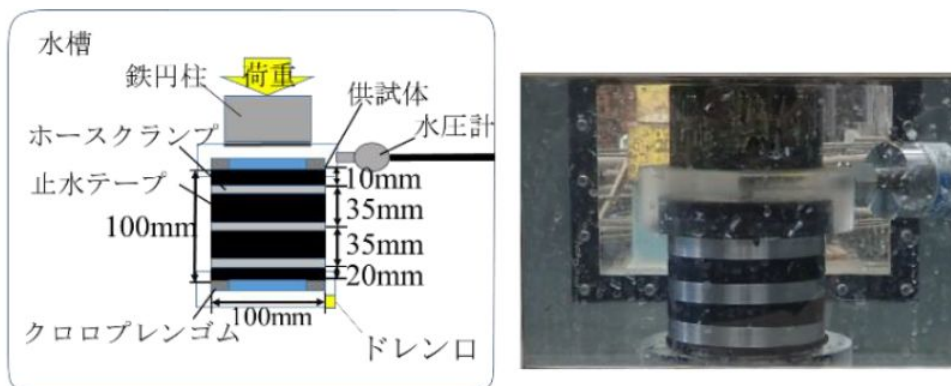


図 2 水圧および圧縮試験装置の概要

疲労載荷試験は、繰り返し載荷時の上限荷重を 20kN とし 2Hz の正弦波として与え、繰り返し載荷回数を 20 万回とした。測定項目は、載荷試験前後の質量変化と試験中の水の観察、試験終了後における流出した微粒分の質量測定、および供試体切断面のひび割れ観察とその密度計測である。

### (3) 要素実験 3：せん断力と液状水によるコンクリート砂利化の検証実験

図 3 に示す装置は、せん断箱と、せん断力及び垂直力の載荷装置からなる。この方法は岩盤不連続面の一面せん断試験方法 (JGS 2541-2008) を参考に既存の装置を改良し、繰り返しせん断できるようにしたものである。供試体はひび割れ面がせん断箱の中心の高さかつ水平になるように治具を用いて仮固定した後、供試体とせん断箱の隙間に石膏を充填して固定した。供試体の水浸の有無、ひび割れ面作製方法の違いに着目した 5 ケース (各供試体 1 体) の実験を行った。なお、水浸供試体は、水深約 20cm の条件で、水道水に 1 週間以上水浸したものをを用いた。繰り返しせん断試験は、ひび割れ面に対して、垂直力 (0.1kN) を一定で載荷した条件で、正弦波 (0.5Hz) の繰り返しせん断力 (振幅: 0.2, 0.4, 0.8kN) を載荷した。せん断力振幅は段階的に増加させ、各段階で約 5 万回載荷した。測定項目は、せん断力、垂直力、水平変位、垂直変位である。

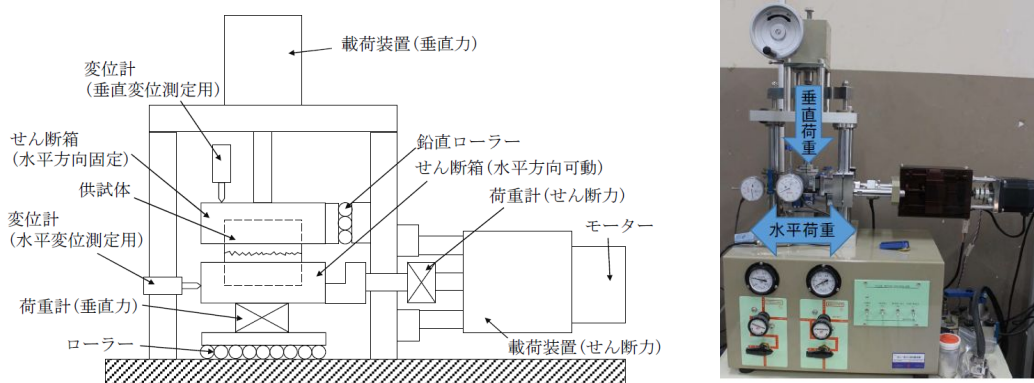


図 3 せん断試験装置の概要

### (4) 数値解析：FEM による RC 床版に生じる応力および水圧の検討

三次元非線形有限要素解析コード COM3D の SKLT and PORE オプションを用いて、コンクリート要素に空隙と間隙水を導入し、水圧を考慮したモデルを構築した。はじめに、鉄筋を分散鉄筋モデルで再現した RC 要素とし、全てのコンクリート要素に空隙・間隙水を導入した。荷重は 4 軸 8 輪の 25tf 荷重車を再現し、30 億回繰り返し移動載荷を行った。1 輪当たりの寸法は 200×500(mm)である。次に、鉄筋を分散鉄筋モデルで再現した RC 要素とし、全てのコンクリート要素に空隙・間隙水を導入した。荷重は 4 軸 8 輪の 25tf 荷重車を再現し、30 億回繰り返し移動載荷を行った。1 輪当たりの寸法は 200×500(mm)である。解析モデルを図 4 に示す。

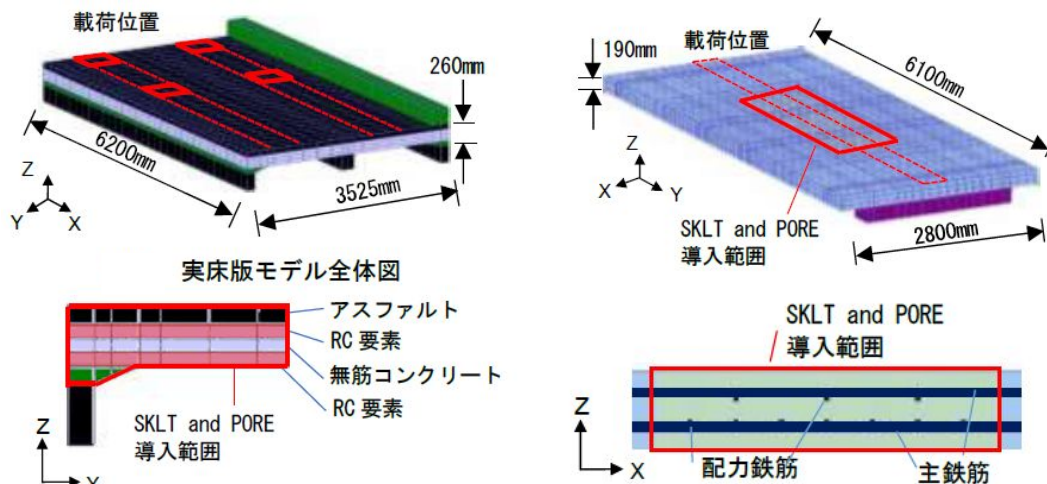


図 4 解析モデルの概要

## 4. 研究成果

### (1) 実験による検討

水圧の大きさに応じて、水圧の繰り返しにより粗骨材とモルタルの界面破壊が促進され、ひび割れ延長が増加することを定量的に示すことができた。また、粗骨材の種類が砂利化現象に一



定程度影響を与えることを確認した。また、コンクリートに作用していた水圧の頻度分析を行い、水圧と頻度の乗数の総和をコンクリート圧縮強度で無次元化した「砂利化指数」を定義した。砂利化指数と割裂面付着物質量との間には、正圧、負圧ともに、一定の相関がみられた(図 5)。

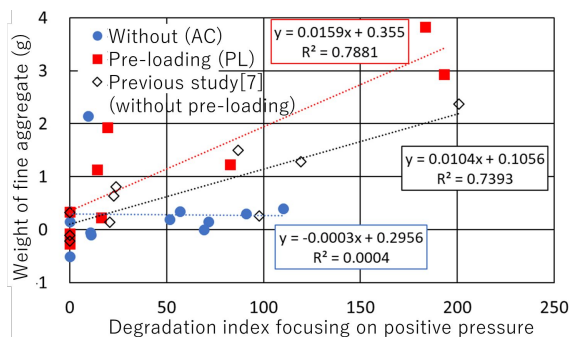


図 5 砂利化指数

## (2) 解析による検討

解析で得られたコンクリートの応力変動、ひずみ、水圧変動等を利用して、要素実験で得られた「砂利化指数(本研究課題で提案したもの)」を算出した。定性的には実験との整合を得たが、定量的な数値を見ると要素実験との差異が大きいことがわかった。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計 3 件)

Chikako Fujiyama, Yasuhiro Koda, Noriaki Sento, Degradation of submerged/wet concrete under cyclic compression and cyclic shear, MATEC Web Conf., 査読有, Volume 258, 2019 International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials, Article Number 05012

DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201925805012>

仙頭紀明, 子田康弘, 藤山知加子, 繰返しの圧縮力およびせん断力を与えたコンクリートの砂利化発生機構の検討, コンクリート工学年次論文集, 査読付き, 第 40 巻, 第 2 号, 679-684, 2018

藤山知加子, 小川健, 子田康弘, 仙頭紀明, 水圧を繰返し与えたコンクリートにおける砂利化検証実験, コンクリート工学年次論文集, 査読付き, 第 39 巻, 第 2 号, 610-616, 2017

### 〔学会発表〕(計 4 件)

Chikako Fujiyama, Yasuhiro Koda, Noriaki Sento, Degradation of submerged/wet concrete under cyclic compression and cyclic shear, 4<sup>th</sup> International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials, 2018

岡田修哉, 藤山知加子, 子田康弘, 事前載荷と繰返し水圧によるコンクリート砂利化の検証, 土木学会第 73 回年次学術講演会, 2018

仙頭紀明, 子田康弘, 藤山知加子, 繰返しの圧縮力およびせん断力を与えたコンクリートの砂利化発生機構の検討, コンクリート工学年次大会, 2018

藤山知加子, 小川健, 子田康弘, 仙頭紀明, 水圧を繰返し与えたコンクリートにおける砂利化検証実験, コンクリート工学年次大会, 2017

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名: 仙頭 紀明

ローマ字氏名: Sento Noriaki

所属研究機関名: 日本大学

部局名: 工学部

職名: 教授

研究者番号(8桁): 40333835

研究分担者氏名: 子田 康弘

ローマ字氏名: Koda Yasuhiro

所属研究機関名: 日本大学

部局名: 工学部

職名: 准教授

研究者番号(8桁): 40328696