

繰返し荷重を受けるコンクリート構造物のひび割れ間に介在する水の動態特性

藤山, 知加子 / FUJIYAMA, CHIKAKO

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

科学研究費助成事業 (科学研究費補助金) 研究成果報告書

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

5

(発行年 / Year)

2013-05

様式 C-19

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 25 年 5 月 30 日現在

機関番号：32675

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2011

課題番号：23860015

研究課題名（和文）

繰返し荷重を受けるコンクリート構造物のひび割れ間に介在する水の動態特性

研究課題名（英文）

Kinematics of water between cracks of structural concrete subjected to repetition of opening -closure process under cyclic loads

研究代表者

藤山 知加子 (FUJIYAMA CHIKAKO)

法政大学・デザイン工学部・准教授

研究者番号：60613495

研究成果の概要（和文）：コンクリートにひび割れが発生することによる透水性の変化およびひび割れ幅（ひずみ）、ひび割れ透水性、ひび割れ間隙水圧に関するモデルを提案した。検証のため、意図的にひび割れを生じさせたコンクリート試験体を水槽中で載荷し、載荷速度と載荷波形をパラメータとした繰返し載荷を行いひび割れ付近の水圧変動をハイドロフォンにより測定した。ひび割れ閉合時の圧力上昇はほぼ予測通り補足できた一方、ひび割れ開口時負圧の発生の確認には至らなかった。

研究成果の概要（英文）：Theoretical model relating permeability of concrete cracks, crack width and water pressure between crack was proposed. To verify the model, simple experiment was performed. Small concrete beam with artificial single crack and RC beams are examined by high-speed cyclic load under submerged condition. Changes of water pressure were measured by hydrophone during loading. Measured pressure increases agreed with the prediction, however the existence of negative pressure could not be captured in the experiments.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2011 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
年度			
総計	1,100,000	330,000	1,430,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：コンクリート速度依存性、ひび割れ間隙水圧、キャピテーション、コンクリートの動的応答

1. 研究開始当初の背景

(1) 研究の背景

繰返し荷重をうける実構造物、たとえば雨水に晒されている橋梁床版や、海水および河川中の橋脚は、気中環境での構造実験結果に比べて早期に破壊に至ること知られている。

コンクリート構造物上に水を張るあるいは水槽中で繰返し荷重実験を行った場合、いずれも媒質として水が存在する場合、気中に比べてコンクリート構造物の疲労寿命が著しく低下することや、破壊モードが変化することが、定性的に再現されてきた（たとえば、

松井 1987). 機構に着目した研究としては、水によるコンクリートの静的あるいは疲労強度低下に関する材料レベルでの研究が行われた(たとえば, Raithby et al. 1974). 強度低下の主たる原因として媒質として水が存在する場合の界面エネルギー低下が指摘されている. しかしながら, コンクリート構造物の性能の低下を, 実験室で得られた材料強度の低下だけで説明することは適当ではない. コンクリート構造物では, 材料にひび割れを許容するという, 他の構造材料にはない特性があるためである.

(2) 本研究の着想に至った経緯

ひび割れを含む材料での検討が必要なのである. ひび割れを含む構造物とそこに作用する水の影響を明らかにするための研究としては, ひび割れ間の水がひび割れ面相互のスリップを助長して構造物の破壊を早めること (Gebreyouhannes et al. 2006), ひび割れ間の介在物によってひび割れ開閉が制限され構造応答が変化すること (研究代表者ら 2008) が, 既に報告されている.

これらの効果を, 粘弾性体である水の物理的性質と, 多孔質体でわずかながら透水性をもつコンクリートの材料特性を鑑みて, 載荷速度をひとつのパラメータとして定量的に明らかにすることを目指すことはできないかと考えたのが, 本研究の着想に至った経緯である.

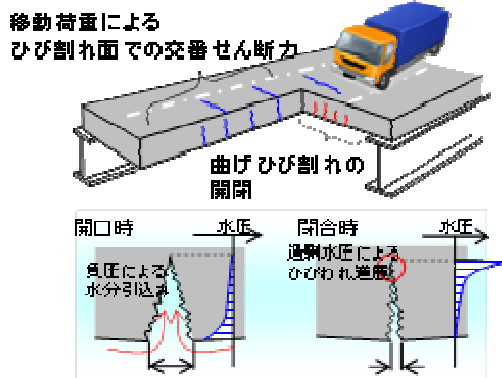


図-1 本研究の着想と実現象

(3) 本研究の特色

水がコンクリート構造物の性能に及ぼす影響を考える上で, 特にひびわれを含む構造物スケールで, 動的応答に着目したことが, 本研究の特色である. 水がコンクリートの力学特性に及ぼす影響に関する研究はこれまでも数多く行われてきたが, 主としてクリープや乾燥収縮といった長期持続荷重あるいは静的荷重に対する研究であった. これらはセメント硬化体の微細空隙中に存在する凝結水の移流と拡散に起因する問題であり, スケールとしては $10^{-9} \sim 10^{-6}$ (m) に着目した

研究である.

これに対し, 本研究は, ひび割れ間に介在する水の速度効果に着目している. 外力によってコンクリート構造物に生じるひび割れは, 幅 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ (m) 程度のスケールである. ひび割れ間に存在する水は, 長期持続荷重あるいは静的荷重下においては構造物の力学特性に影響を及ぼさない. しかしながら, 一定以上の速度で外力を与えてひび割れを開閉させた場合, ひびわれ間の水は速度に依存性して抵抗性を増し, ひび割れの開閉を妨げ, 構造物の変形振幅を小さくことが予測される. 応力振幅は材料の疲労寿命に影響をおよぼす重要な要因であるため, 載荷速度と構造応答 (変形振幅) の関係を定量的に導くことは重要である. さらに, ひびわれ間の水が正・負圧を繰返し受けるポンプのような作用を受けることで, ひびわれ閉合時に水とともに骨材やセメント成分を噴出し, 繰返しによる材料劣化を促進することも予測される. 実際に, 雨水が浸透した状態で繰返し交通荷重をうけた橋梁床版では, コンクリートのセメント成分が流出して土砂化した損傷事例が数多く報告されている.

以上, 対象とするスケールと着目する速度が, 本研究の特色である.

2. 研究の目的

本研究の目的は, 繰返し荷重を受けるコンクリート構造物について, ひび割れ間に介在する水が, 構造物の変形性能, 疲労寿命に与える影響を定量的に明らかにすることである. コンクリート構造物特有の事象であるひび割れの開閉に着目し, 媒質として存在する水がひび割れ発生時 (開口時) は負圧によってひび割れ間に引き込まれ, ひび割れ閉合時にはひび割れの閉合を妨げる効果を明らかにすることに, 本研究の眼目がある. 粘弾性体である水の物理的性質と, 多孔質体でわずかながら透水性をもつコンクリートの材料特性を鑑みて, 繰返し荷重の載荷速度と水が構造成能に与える影響との関係を定量的に分析し, 水中構造物の非線形有限要素解析に用いる数値モデルを提案することを目指す.

3. 研究の方法

本研究には, 以下の3つの段階がある. 各段階での研究方法の概要も併せて示す. (1) ~ (3) は完全に順を追って実施するわけではなく, 並行して行うことができる.

(1) 載荷速度とひび割れ間の水の抵抗性を定量的に調べる基礎的実験
 --- 事前の載荷によってひび割れを生じさせた小型試験体を用いて, ひび割れ幅とひび割れ間水圧を制御しながら, ひび割れを含むコ

ンクリートの見かけの体積変化と剛性変化を測定する。

載荷速度は 0.1Hz~10Hz 程度、試験体の変位、鉄筋ひずみ、水圧は、動的計測機で逐次測定するものとする。高性能変位計から得られたコンクリート試験体の見かけの体積変化から、ひび割れ間に水を含む鉄筋コンクリートの見かけの剛性を、載荷速度に関連付けた変数として算出する。また、鉄筋ひずみの測定値と鉄筋のヤング率からひび割れ幅の変化量を算出し、見かけの体積変化におけるコンクリート自体の弾性変形とひび割れ開閉による体積変化とをそれぞれ特定する。これを、試験体内の空洞に水を満たした場合と満たさない場合とで比較し、ひびわれ開閉挙動に対する水の抵抗特性を同定する。

急速なひびわれ開放時には、付近での負圧の発生とそれに伴うキャビテーション現象、キャビテーション気泡崩壊による衝撃波発生が予測されるため、水圧の変動をハイドロフォンで計測する。計測した波形データの分析を行い、微小な衝撃波発生の有無を調べるものとする。

(2) 水の抵抗性をコンクリートの非線形有限要素解析に導入するためのモデル化検討
--- 1. で得られた結果をもとに、既存の鉄筋コンクリート構成則に水の影響をとりこむための簡易なモデルを提案する。1. の実験結果について、非線形有限要素解析による再現を行う。先の実験で得られた結果をもとに、既存の鉄筋コンクリートの構成則に水の影響をとりこむための簡易なモデルを提案する。モデル構築の前提は、有限要素解析で、分散ひび割れモデルを用いたコンクリート平均応力-平均ひずみ関係を規定する構成則である (Maekawa et al. 2003)。ひび割れ間に水を含む場合の、ひび割れ間の水による変形抵抗性を示す仮定の弾性バネ値を構成則に導入することを想定している。これらの構成則には、既にクリープ等の影響を考慮した時間依存性を再現する項が含まれているため、ひび割れ間の水の影響を載荷速度に関する変数とする場合、対象とするひずみ領域や載荷速度に境界値を設定し、構成則の連続性と数値解析の収束性を損なわないものとするのが鍵となる。

(3) 実大構造物を用いた疲労実験によるモデルの検証 (H24)

--- 実大床版あるいは柱を用いて、高速載荷による水中疲労実験を実施し、提案モデルを導入した数値解析について構造物スケールでの妥当性を検証する。

4. 研究成果

本研究は、平成 24 年度辞退せざるを得な

かった (別の研究課題の採択に伴う同一研究者への過度の研究費重複を防止する規定) ため、成果は先に述べた第一段階と第二段階に関するところまでである。

(1) 載荷速度とひび割れ間の水の抵抗性を定量的に調べる基礎的実験

コンクリートに意図的にクラックを導入した試験体および 1 か所のみ不連続面をもつアクリルブロックによる水中高速載荷実験を行った (図-2)。また、埼玉大学で実施された水中でのコンクリート柱正負交番載荷実験の際の水圧変動データ計測を行った。

これらの実験では、ひび割れ閉合時の圧力上昇はほぼ予測通りの値を補足できた。(予測に関しては(2)で述べる)。

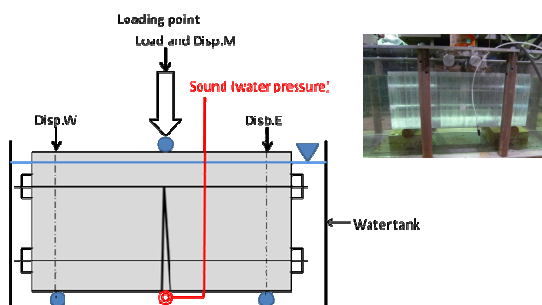


図-2 実験概要と実際の様子 (アクリル)

コンクリート柱の水中載荷実験で取得したハイドロフォン波形データの一例を図-3に示す。荷重が増加あるいは減少したピークではなく、中ほどの過程で波形に乱れがみられた。フーリエ解析を行い周波数ごとの波形との関連を調べた結果、この乱れは 1.0kHz 以上の周波数波形に依存するものと推測できた。引き続き、キャビテーション崩壊の衝撃波に近いと考えられる 10kHz 以上の成分について短時間フーリエ変換を行ったところ、周期的に強い水圧変動が生じていることは確認できたが、その周波数成分に特異な傾向はなく、キャビテーション気泡崩壊による衝撃波発生については、確証を得るに至らなかった。

(2) 水の抵抗性をコンクリートの非線形有限要素解析に導入するためのモデル化検討

有限要素解析で、分散ひび割れモデルを用いたコンクリート平均応力-平均ひずみ関係を規定する構成則 (Maekawa et al. 2003) に、コンクリートにひび割れが発生することによる透水性の変化およびひび割れ幅 (ひずみ)、ひび割れ透水性、ひび割れ間隙水圧を関係づけるモデルを提案した。

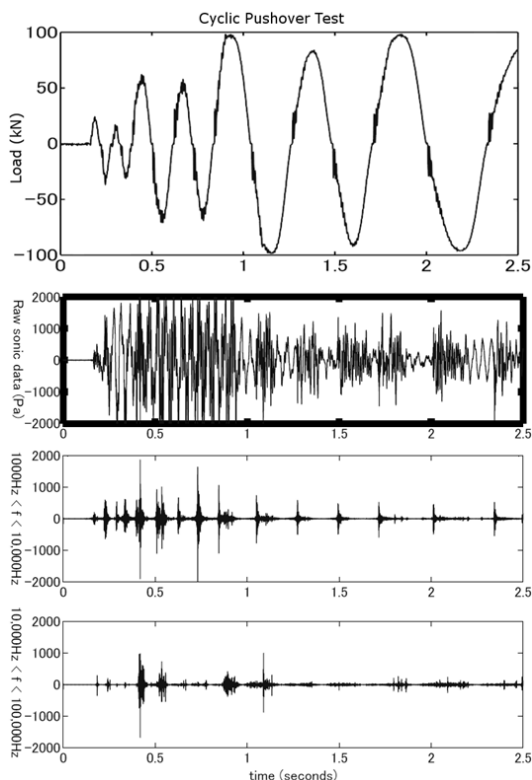


図-3 水中マイクによる水圧計測データ例

具体的には、土質力学で実績のある Biot のモデルにおいて、固層であるコンクリートの透水性に異方性を付与したものである。

等方で考えられるその基本式は、以下のとおりである。

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^* + \delta_{ij} \cdot p$$

ここで σ_{ij} は着目要素の応力、 σ_{ij}^* は土骨格の有効応力、 p は間隙水圧である。ここで、クラックを生じたあとのコンクリートの異方性に適用するため、 κ_i を導入する。

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^* + \delta_{ij} \cdot l_i \cdot p$$

オリジナルモデルでは、骨格の変位量 u と間隙水圧の移動量 w 、さらに空隙率を n 、 κ を透水性とすると、以下のとおり運動方程式を示すことができる。

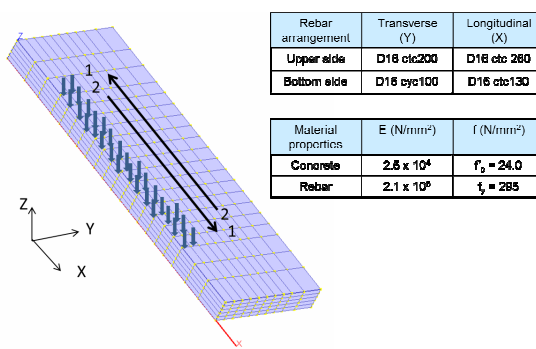
$$\sigma_{ij,j} = \rho(\ddot{u}_i - g_i) + \rho_f \ddot{w}_i$$

$$p_{,i} = \rho_f(\ddot{u}_i - g_i) + \rho_f \ddot{w}_i / n + \frac{1}{\kappa_i} \dot{w}_i$$

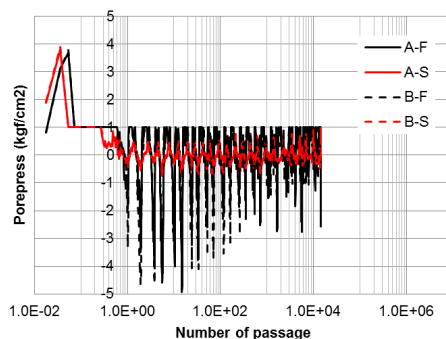
この際の透水性 κ をひび割れ発生後のひび割れ幅と関連付けるため、既往の研究よりひび割れ発生による着目要素のひずみの増加と結びつけ、以下のとおり設定した。

$$\kappa_i = \kappa^* \left\{ 1 + \left(\frac{\epsilon_{jj} + \epsilon_{kk}}{a} \right)^4 \right\}$$

以上のモデルを用いて、橋梁 RC 床版の構造解析を行った。支間 2.0m、長手方向 3.0m、厚さ 190mm の RC 床版上面に繰返し移動荷重を与えるモデルは、既往の研究で用いられたものである。水圧上昇に対する荷重速度の影響を調べるため、移動荷重の移動速度は 77km/h および 0.77km/h の 2 種類を設定した。また、上面圧縮部と、ひび割れの生じる下面側引張部の水圧に提案モデルが与える影響を調べるため、床版上面のみに提案も出るを適用したケース、下面のみに適用したケース、全体に適用したケースを用意し、パラメトリックスタディを行った (図-4)。



(a) 解析モデルの概要



(b) 床版下面要素の間隙水圧変動

図-4 提案モデルを用いた床版疲労解析

解析の結果、高速の荷重で床版下面に急激なひび割れ進展をとまなう場合、ひび割れ間には負圧が生じるだけでなく、しばしば大気圧よりも水圧が下がり、水の一部が気化する現象 (キャビテーション) を引き起こす可能性が示唆された。これを検証するため、(1) の実験を実施したものである。

(1) に述べたとおり、実験の結果、解析で予測されたような負圧の発生を捉えることはできなかった。今後は実験手法の改良を試みると同時に、理論モデルの再検討も行いたい。

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 1 件)

① Koichi Maekawa and Chikako Fujiyama, Rate-dependent model of structural concrete incorporating kinematics of ambient water subjected to high cycle loads, Special Issue of Engineering Computations, Vo.30, issue 6, 2013.

[学会発表] (計 2 件)

① Maxim Sagan, Chikako Fujiyama and Koichi Maekawa, Investigation into cavitation as a cause of rate-dependent fatigue loss in submerged concrete members, Australasian Conference on Mechanics of Structures and materials, 2012.12.11-14, Sydney (Australia)

② Chikako Fujiyama et al., Rate-dependent model of structural concrete incorporating kinematics of ambient water subjected to high cycle loads, Recent advances in nonlinear models structural concrete applications, 2011.11.24-25, Coimbra (Portugal)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等
該当なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤山 知加子 (FUJIYAMA CHIKAKO)
法政大学・デザイン工学部・准教授
研究者番号：60613495

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし