

コンクリート細孔に存在する凝縮水の圧力変動と移動による構造物動的応答の変化

藤山, 知加子 / FUJIYAMA, Chikako

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

科学研究費助成事業 研究成果報告書

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

6

(発行年 / Year)

2015-05

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：32675

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24686054

研究課題名(和文) コンクリート細孔に存在する凝縮水の圧力変動と移動による構造物動的応答の変化

研究課題名(英文) Dynamic structural response depending on change and movement of pore water in concrete

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 20,200,000円

研究成果の概要(和文)：研究は載荷速度の異なる一軸圧縮試験及び四点曲げ試験およびRC梁の高速載荷実験を行った。その結果、低W/Cほどひずみ速度効果による圧縮強度、横弾性係数の増加が現れた。一方、RC供試体の四点曲げ試験では、準高速載荷において湿潤状態のRC供試体の引張強度の増加が示された。以上より、微小細孔内における正の水圧及び微細ひび割れ内の負の水圧が含水コンクリートのひずみ速度効果を発現させる要因の一つであることを示唆した。

研究成果の概要(英文)：This study investigates the influence of condensed water in concrete on the fracture mechanism of a concrete structure. The focus of this study is water pressure in concrete pores under loading with a high strain rate. First, uniaxial compression tests of saturated cylinder specimens containing various types of micro pore structures were conducted with different strain rates. The saturated concretes, especially those of low water-cement ratios, increased compression strength with increasing strain rate. Second, bending tests of rectangular beam specimens with and without rebar were conducted with different strain rates. As the strain rate increased, plain concretes and reinforced concretes showed an increase in tensile strength. These results suggest that dynamic responses of concrete structures are influenced by the strain rate dependency of material that is correlated with water content and micro pore structure.

研究分野：コンクリート工学 構造工学

キーワード：コンクリート ひずみ速度 細孔構造 凝縮水 動的応答 RC梁

1. 研究開始当初の背景

(1) 研究背景

含水状態で動的荷重を繰返し受ける実構造物、たとえば雨水に晒されながら交通荷重を支え続ける橋梁床版は、気中環境で実施された実験から予測されるよりも早期に疲労破壊に至ることが、よく知られている。このため近年我が国では橋梁床版上面に防水工を施すことで床版耐久性の改善を図ってきたものの、依然として、水が橋梁床版の疲労損傷を促進する機構は国内外で諸説あり、いずれも定量的に明らかとは言えない。

(2) 本研究の着想

本研究はその中で、コンクリート細孔中の凝縮水の粘弾性特性に着目し、コンクリート細孔中の間隙水圧と損傷機構および衝撃荷重を受ける構造物の含水状態と動的応答に着目した。コンクリート材料の力学特性に関する研究と構造物の動的応答に関する研究という、これまで異なる2つの分野であった研究を、粘弾性体である水の動態に着目して一貫した理解を目指すものである。

2. 研究の目的

コンクリート細孔中の凝縮水の水圧変化が構造物の動的応答に及ぼす影響を定量的に明らかにすることが、本研究の目的である。

粘弾性体である水の物理的性質に着目し、細孔内の凝縮水の動態という微小現象から、マクロなコンクリート構造物の動的応答を明らかにするところに、本研究の眼目がある。凝縮水を包含するコンクリートの細孔構造(空隙径分布や空隙の幾何特性)および荷重による細孔構造の変形速度に依存する細孔内の凝縮水の動態を実験で検出し、土質力学分野における土粒子骨格の有効応力と内部間隙水圧の連成力学モデルを参照し、コンクリート骨格と凝縮水のモデルを統合したコンクリートの時間依存材料構成則の検討を行う。最終的には、道路橋設計荷重に衝撃を考慮するための割増係数と、水の存在による材料係数の低下という、個別に簡易な手法によって考慮されてきた損傷促進要因を、水の動態という機構に基づき一貫して評価する手法の構築を目指している。

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)一軸圧縮試験概要

圧縮試験は 2000kN 万能試験機を用いて行う。載荷速度は、低速 2.1×10^{-5} [1/sec], 高速 1.4×10^{-3} [1/sec]とした。なお、ここで言う載荷速度とは、載荷軸方向の変位量から求まるひずみを用いて算出した、最大圧縮強度の1/3点から最大圧縮強度点までの平均ひずみ速度である。

コンクリート供試体に作用する荷重及び圧縮軸方向のひずみ、圧縮軸直角方向のひずみを測定項目とした。荷重測定はロードセル

を使用し、ひずみの測定は、ひずみゲージを圧縮軸方向及び軸直角方向に各2枚、計4枚を供試体側面中央に張り付けた。荷重、ひずみの測定間隔は0.05秒とし、ローパスフィルター10Hzと設定した。

試験パラメータを表-1に示す。載荷速度、W/C、供試体条件の3項目をパラメータと設定した。

表-1 試験パラメータ

供試体条件	W	D60		D100		DW		EG	
		高	低	高	低	高	低	高	低
水セメント比	30	3	2	-	-	-	-	-	-
	35	3	3	3	2	-	-	-	-
	40	8	6	3	3	-	-	-	-
	50	11	9	3	2	3	3	4	4
	60	8	5	3	3	-	-	-	-
[%]	65	3	3	3	2	-	-	-	-
	70	3	3	-	-	-	-	-	-

表-2 載荷試験までの流れ

W	打設・脱型	水中養生	乾燥炉(60℃)		載荷試験
D60			乾燥炉(100℃)	水中静置	
D100					
DW				エチレングリコール浸漬	
EG					

W/C はコンクリート供試体内に異なる細孔構造を形成するためであり、30%、35%、40%、50%、60%、65%、70%の7種類とした。W/Cにより供試体が包含する自由水の存在空隙スケールと全体含水量がひずみ速度効果に及ぼす影響を検討することを期待した。供試体条件は、湿潤(W)、乾燥(D60、D100)、乾燥後湿潤(DW)、エチレングリコール浸漬(EG)の計4種類とした。コンクリートの動的応答におけるひずみ速度効果の発現は、コンクリート細孔中に存在する自由水の挙動が影響すると指摘されていることから、含水状況に着目しパラメータとした。

試験に用いるコンクリート円柱供試体はφ100×200mmである。使用材料は、普通ポルトランドセメント、細骨材に大井川水系陸砂(表乾密度2.57g/cm³、吸水率2.64%)を、粗骨材に青梅産硬質砂岩(表乾密度2.66g/cm³、吸水率0.58%)を使用した。作製した供試体は打設後、約24時間で脱型し、28日間以上水中養生を行った。また、供試体条件ごとの載荷試験までの流れを表-2に示す。Wシリーズ

は 28 日以上水中養生した後、荷重試験を実施した。D, DW, EG シリーズは 28 日以上水中養生後、それぞれの条件処理を行い、荷重試験を実施した。

(2) RC 構造部材による実験

①4 点曲げ試験

四点曲げ試験は 2000kN 万能試験機及び手動荷重試験機を用いて行った。荷重速度は、低速 6.7×10^{-6} [1/sec], 高速 5.7×10^{-4} [1/sec] である。なお、ここで言う荷重速度とは、供試体下面のひずみを用いて算出した、ひび割れ発生時の引張強度の 1/3 点から引張強度点までの平均ひずみ速度である。コンクリート供試体に作用する荷重及び供試体上面のひずみ(圧縮ひずみ), 下面のひずみ(引張ひずみ)を測定項目とした。荷重, ひずみの測定間隔は 0.05 秒, ローパスフィルター10Hz と設定し測定を行った。

表-3 に試験パラメータを示す。試験パラメータは荷重速度, 供試体条件の 2 種類とした。荷重速度は低速荷重, 準高速荷重の 2 種類とし, ひずみ速度効果発現を期待し設定した。供試体条件は, 湿潤(W), 乾燥(D80), 乾燥後湿潤(DW)の計 3 種類とした。W シリーズは鉄筋の有無の影響を検討するため, D80, DW シリーズは単鉄筋 RC 小型矩形梁においてひずみ速度効果発現に及ぼす含水の影響を検討するため設定した。

表-3 試験パラメータ

供試体 条件	W		D ₈₀		DW	
	準高	低	準高	低	準高	低
RC	5	3	3	3	3	3
無筋	3	3	-	-	-	-

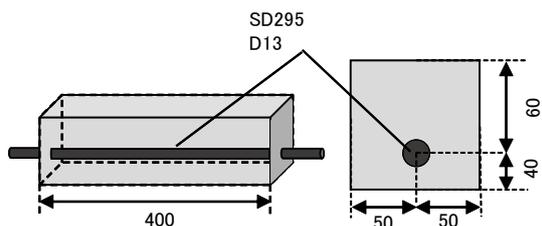


図-1 供試体概要

表-4 荷重試験までの流れ

W	打設	水中養生	乾燥炉 (80℃)	水中静置	荷重試験
D ₈₀					
DW	脱型				

曲げ試験に用いる角柱供試体は 100×100×400mmとし, RC 供試体には有効高さ 60mm の位置に鉄筋を埋設した。供試体概要図を図-1 に示す。使用材料は, 一軸圧縮試験と同じである。作製した供試体は打設後, 約 48 時間で脱型し, 14 日以上水中養生を行った。また, 供試体条件ごとの荷重試験までの流れを表-4 に示す。W シリーズは 14 日以上水中養生した後, 荷重試験を実施した。DW, D80 シリーズは 14 日以上水中養生後, それぞれの条件処理を行い, 荷重試験を実施した。

②RC 梁高速移動荷重実験

実験は, Heriot-watt 大学(イギリス・スコットランド)所有の列車の走行荷重を模擬した繰返し荷重が可能な疲労加速試験機 GRAFT II (The Geo-pavement and Railways Accelerated Fatigue Testing Facility)図-2 を用いて行った。上部より最大 6 つのアクチュエータを同時に制御することが可能であり, 各アクチュエータの最大荷重は 170kN である。本論文の実験では 1 つの荷重板に対して 2 つアクチュエータによる荷重を行った。

実験に用いた RC 単純梁の寸法を図-3 に示す。支間長 5m で中央から両端に 1200mm の位置に荷重板を設置し実験を行った。なお, コンクリートの圧縮強度は 31.8N/mm², 主鉄筋およびスターラップの降伏強度は 345N/mm² である。



図-2 GRAFT II

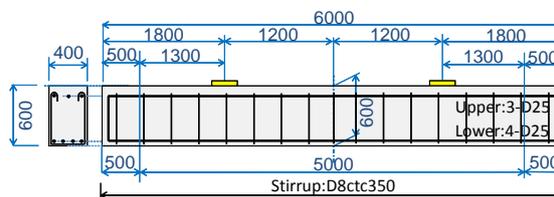


図-3 RC 梁寸法

(3) コンクリート材料の構成則の検証

①RC 梁の高速荷重実験再現解析

(2)の②で示した RC 梁実験の再現解析を行った。解析に用いた RC 単純梁モデルを図-4 に示す。実験では動的荷重時の試験体の安定のため支承位置で試験体の鉛直変位を拘束するシステムとなっているため, 本解析でも

拘束位置には支承板を上下に設置した。また、荷重位置では実験で用いたものと同様の荷重板をモデル化した。物性値は実験値で得られた値を用い、コンクリート圧縮強度 31.8N/mm^2 、鉄筋およびスターラップの降伏強度を 345N/mm^2 とした。コンクリートの引張試験は実施していなかったため、引張強度を 1.15N/mm^2 、 1.6N/mm^2 、 2.3N/mm^2 の3パターンで検討した。なお、梁の上下主鉄筋は RC 要素としてモデル化し、スターラップは線要素を用いて再現した。

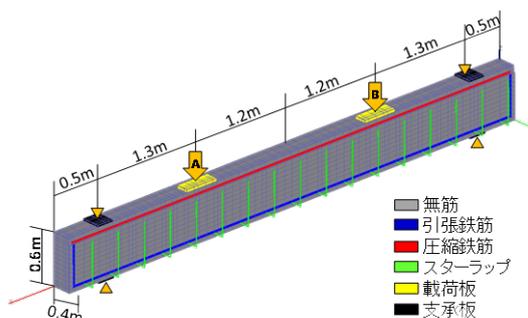


図-4 解析モデル

②RC 版を模擬した衝撃応答解析

高速荷重時の鉄筋コンクリート版の基本的な挙動の変化を調べるため、矩形 RC 版を対象として、3次元非線形有限要素解析を行うものとした。まず既往の重錘落下実験で用いられた供試体を再現する FEM モデルを構築し、静的荷重下における挙動を把握した。次に衝撃荷重を模擬した高速荷重を施し、荷重の荷重速度による破壊パターンの違いについて検討を行った。さらに要素のひずみを抽出し、荷重速度によって局所的な材料の応答が受けた影響についても、検討を行った。

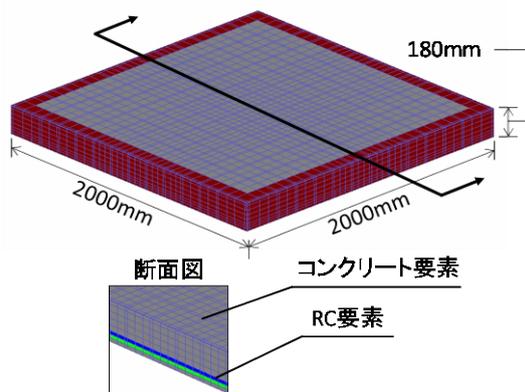


図-5 解析モデル

既往の研究で行われた RC 版の重錘落下試験の供試体を解析対象とした。寸法は $2000 \times 2000 \times 180\text{mm}$ であり、D16 の鉄筋を 150mm 間隔で格子状に配置した単鉄筋 RC 版である。構築した解析モデルを図-5 に示す。床版内に配置されている鉄筋は、主鉄筋、配力鉄筋

の両鉄筋を含む RC 要素としてモデル化した。材料諸元は実験値に従い、コンクリート圧縮強度 $f_c=26.6\text{N/mm}^2$ 、初期剛性 $EC=28.0\text{kN/mm}^2$ 、鋼板の降伏点 345N/mm^2 とした。拘束条件は 4 辺支持とした。解析コード「COM3D」(東京大学コンクリート研究室開発)を用いて数値解析を行った。コンクリートの構成則には時間依存項が含まれており、構造物応答の時間依存特性を再現できることが示されている。

4. 研究成果

(1) 材料実験による成果

①細孔構造がひずみ速度効果に及ぼす影響

W, D60 シリーズにおいて、低 W/C 供試体ほどひずみ速度上昇に伴う強度、横弾性係数の変化量は増加した。また、W シリーズでは全ケースで縦弾性係数の増加を示したが、W/C による傾向は確認されなかった。各変化量と細孔分布測定結果から、ひずみ速度効果に影響を及ぼすのは、供試体内の細孔総量ではなく、最も分布が多い細孔径の大きさであることを示唆した。

小径細孔内では、自由水は急激に移動することができず、間隙水圧が発生する。大径細孔では、細孔内を自由水が完全に満たすことが出来ないため、水圧が発生する前に消散すると考えられる。そのため小径細孔が多く分布する低 W/C では、ひずみ速度効果の増大が示されたと考えられる。結果の一例を図-6 に示す。

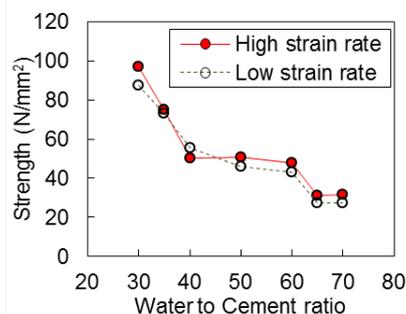


図-6 水セメント比とひずみ速度効果

②含水状態がひずみ速度効果に及ぼす影響

自由水が存在する DW は D100 に比べ各変化量は大きく強度、縦弾性係数は増加傾向であり、横弾性係数は減少傾向を示した。つまり、含水の有無がひずみ速度効果に影響を及ぼしていると考えられる。また、水の粘弾性と非圧縮性を考慮すると、急速な荷重に伴い自由水の移動抵抗性が発現し各変化量に影響したと推察される。

③自由水移動抵抗性がひずみ速度効果に及ぼす影響

細孔内を満たす液体に高い圧力がかかる際、荷重軸方向では液体は固体と近い挙動を現す。そのため浸漬液体の粘度が高いほど、強度及び縦弾性係数の変化量は増加したと考えられる。また、荷重軸直角方向では自由

水は流動的に移動するため、浸漬液体の粘度(移動抵抗性)が高いほど横弾性係数の減少が顕著に現れたと推察される。

以上より、自由水の挙動が含水コンクリートのひずみ速度効果発現に影響を及ぼす要因の一つであることを示した。

(2) RC 構造部材による実験

①引張強度におけるひずみ速度効果

4点曲げ試験の RC 供試体で供試体条件に関わらず、ひずみ速度による影響が小さく現れたのは、荷重初期では鉄筋とコンクリートが一体化しひずみ速度による影響が小さいと考えられる。

また、ひずみ速度上昇に伴う引張強度の増加は W, DW シリーズで現れ、D シリーズでは強度の増加が示されなかった。つまり、自由水が存在する場合に強度が増加すると考えられる。荷重後期になると細孔内の自由水は引張力に抵抗し、負の水圧として働く。その結果引張強度が増加したと考える事が出来る。

②コンクリートと鉄筋の付着性状とひずみ速度効果

4点曲げ試験の W シリーズのコンクリートと鉄筋のひずみの関係を図-7 に示す。なお、ここで言うコンクリートのひずみとは平面保持の仮定より、圧縮ひずみと引張ひずみの関係から算出した鉄筋埋め込み位置のコンクリートのひずみである。

準高速では荷重初期から後期にかけて直線的な関係を示すのに対して、低速では荷重後期にかけて徐々に傾きが増加していることが分かる。つまり、準高速は低速に比べコンクリート、鉄筋間の付着は保たれる傾向にあると言える。荷重速度上昇により鉄筋周囲の空隙内を満たす自由水が、引張力やひび割れ進展力に抵抗する負の水圧として作用したため付着が保たれたと考えられる。また、低速では含水による表面エネルギーの低下やひび割れ進展が徐々に生じることで付着が切れやすくなったと考えられる。

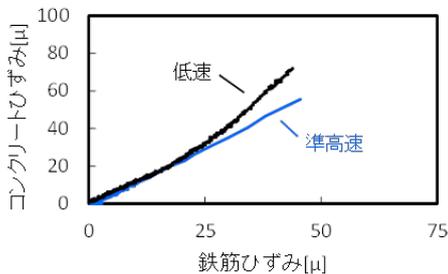


図-7 付着に及ぼすひずみ速度効果

一方、実構造物大の RC 梁を用いた高速荷重実験においては、乾燥状態および湿潤状態を比較しても、上記の傾向は明確ではなかった。以上より、鉄筋の配置が複雑な実構造物部材では、材料のひずみ速度依存性に対する応答の感度は高くないと推察される。

(3) コンクリート材料の構成則の検証

低速荷重域においては、たわみ分布が直線的な挙動を示しながら推移している。4辺単純支持の拘束条件であるため、局所的な変形はなく、RC 版全体がたわむような曲げ変形をしている。しかしながら、版中央変位が約 5mm に達すると、荷重位置周辺がわずかに凹むように変形していることがわかる。従って最終的には押し抜きせん断破壊に至ったと言える。

一方、高速荷重域(図-8)では、低速荷重域とは明らかに異なる。端部ではほぼたわみが発生していない事に対し、版中央部では大きくたわんでいる。つまり、荷重速度が増加するに伴い傾向は顕著に表れていた。なお、このような荷重速度による変形性状の変化は、既往の実験を再現したものと言える。

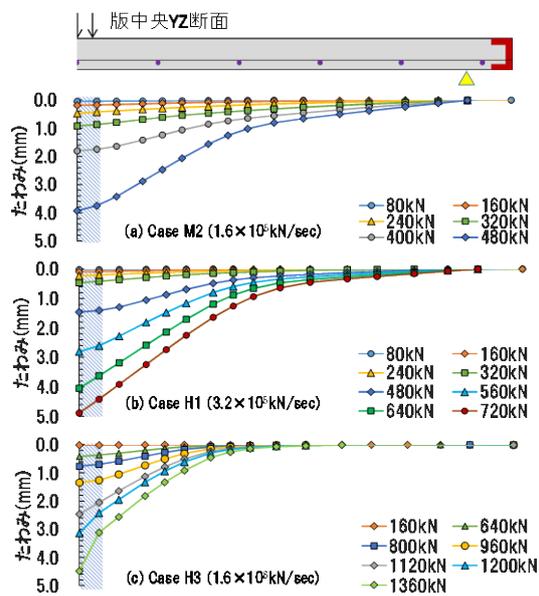


図-8 たわみ分布(中速荷重～高速荷重域)

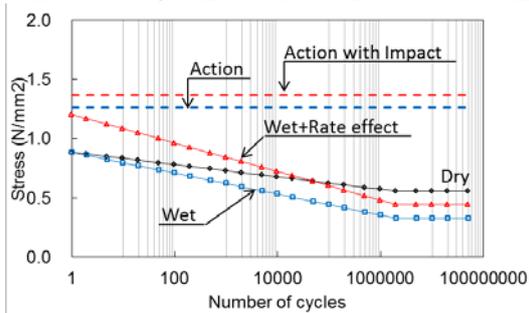
これらの結果から、低速荷重時においては、荷重初期では曲げ作用が支配的となり版全体が一樣に変形していくが、最終的には押し抜きせん断破壊の形態に移行していく。それに対し高速荷重を受ける RC 版は、荷重初期からせん断破壊モードとして破壊が進行し、押し抜きせん断破壊に至っていると考えられる。従って、荷重速度は版が押し抜きせん断破壊に至るまでの破壊過程に影響を及ぼし、RC 版は荷重速度によって異なる変形性状を示すと言える。

また、荷重速度を増加させると、RC 版の変形と破壊性状が異なることがわかったが、材料要因(ひずみ速度効果)と、構造要因(版の応力分配の変化)との寄与をそれぞれ考察するには至っていない。そこで、材料要因(ひずみ速度効果)のみの影響を調べるため、材料強度のみをパラメータとした解析を実施し、前節の解析結果と比較した結果、衝撃的な高速荷重を受ける鉄筋コンクリートの挙動を考える際に、材料の「ひずみ速度効果」

を見込むように各要素の応答特性（応力—ひずみ関係）を一様に割り増すだけでは、変形性状や破壊モードの変化といった実際の挙動を再現するのは難しいことがわかった。

さらに、版モデルに移動荷重を繰り返し荷重を与えて、衝撃を含む版の応答値（応力、ひずみ）を得た。これを用いて疲労の照査をする際に、高速載荷による材料剛性や強度の増加、湿潤によるコンクリートの静的強度の低下を加味して、コンクリート標準示方書で得られる材料の疲労強度を割り増しし、数値解析で得られた応答値を照査した（図-9）。

図-9 RC版下面引張応力に着目した疲労照査



その結果、衝撃と材料特性の変化を同時に考慮しても、版が急激な変形に至る応力レベルに達しないと判定され、実構造物で観察されるような脆弱性は認められなかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計7件・すべて査読有）

- ① 山口大地, 藤山知加子, Benny Suryanto, Peter Woodward, 高速列車走行を模擬した繰り返し荷重下におけるRC単純梁の疲労に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, 第37巻, 2015.7 (掲載決定, 頁未定)
- ② Maekawa, K., Ishida, T., Chijiwa, N. and C. Fujiyama : Multiscale Coupled-Hygro-mechanistic Approach to the Life-Cycle Performance Assessment of Structural Concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol.27, No.2, A4014003, 2015.
- ③ Tetsuri Kaji, Chikako Fujiyama : Mechanical Properties of Saturated Concrete Depending on the Strain Rate, Journal of Procedia Engineering, 95, 442-453, 2014.
- ④ 鍛冶哲理, 藤山知加子 : コンクリート細孔に存在する凝縮水の圧力変動と移動による材料動的応答, コンクリート工学年次論文集, 第35巻, 第1号, pp391-396, 2013.7
- ⑤ K. Maekawa and C. Fujiyama : Rate-dependent model of structural concrete incorporating kinematics of ambient water subjected to high-cycle loads, Journal of Engineering Computations, Vol.30, Iss.6, pp.825-841, 2013.
- ⑥ Maekawa, K. and Fujiyama, C. : Crack Water Interaction and Fatigue Life Assessment of RC Bridge Decks. Poromechanics V: ASCE, pp.

2280-2289, 2013.

⑦ Sagan, M., Fujiyama, C. and Maekawa, K. : Investigation into cavitation as a cause of rate-dependent fatigue loss in submerged concrete members, From Materials to Structures – Advancement through Innovation, Samali, Attard & Song (Eds), Taylor & Francis Group, London (ISBN 978-0-415-63318-5), 1171-1176, 2012.

〔学会発表〕（計6件）

① C. Fujiyama, T. Kaji and Y. Ogiyama : Fatigue life assessment of RC bridge deck considering both dynamic response of saturated concrete and action of impact load, Proceedings of 4th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE), pp.1265-1272, 2014.11.19, Tokyo, Japan.

② T. Kaji, C. Fujiyama : Mechanical Properties Of Saturated Concrete Depending On The Strain Rate, Proceedings of the 2nd International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials (SCESCM) MAT-15, Jogjakarta, Indonesia, 2014.9.25

③ 荻山陽太郎, 鍛冶哲理, 藤山知加子 : 衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート版の動的応答, 第8回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.13-18, 土木学会講堂 (東京都新宿区), 2014.10.30

④ 荻山陽太郎, 鍛冶哲理, 藤山知加子 : 衝撃荷重を受けるRC版の動的応答に関する数値解析的検討, 第69回土木学会年次学術講演会講演概要集, V-616, 大阪大学 (大阪府豊中市), 2014.9.13

⑤ 鍛冶哲理, 藤山知加子 : 含水コンクリートの強度及び初期弾性のひずみ速度効果発現メカニズムの検討, 第69回土木学会年次学術講演会講演概要集, V-021, 大阪大学 (大阪府豊中市), 2014.9.12

⑥ 山口大地, 藤山知加子 : 高速列車走行時におけるRC単純梁の疲労に関する基礎的研究, 第69回土木学会年次学術講演会講演概要集, V-615, 大阪大学 (大阪府豊中市), 2014.9.13

〔図書〕（計1件）

① Editor: Hitoshi Furuta, Dan M. Frangopol and Mitsuyoshi Akiyama, Author : other more than 20 authors and C. Fujiyama, Life-Cycle of Structural systems: design, assessment, maintenance and management, CRC press, 2014. pp.434-435, 総頁数 1272

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 : 6 0 6 1 3 4 9 5

(2) 連携協力者

Suruyanto Benny
Institute for Infrastructure and Environment
Assistant Professor