

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K04303

研究課題名(和文)環境劣化作用を受けるRC部材の疲労耐久性に基づく各種コンクリート混和材の影響評価

研究課題名(英文) Evaluation of concrete admixture based on fatigue durability of RC members subjected to environmental degradation effect

研究代表者

吉武 勇 (Yoshitake, Isamu)

山口大学・大学院創成科学研究科・教授

研究者番号：10335771

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：繰返し積載に対する疲労耐久性は、コンクリート構造において重要である。コンクリート材料に対する疲労試験の研究は多数みられるが、各種混和材料を用いたRC部材の疲労に関する研究は限られている。本研究の目的は、様々なセメント系混和材料を用いて製作したRCはり部材の曲げ疲労耐久性を調べることである。主に用いた混和材料は、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、シリカフューム、耐塩害用混和材である。本研究より、セメントの一部代替材として用いた各種混和材がRCはりの疲労耐久性に及ぼす影響を調べ、一部の混和材では湿潤環境下におけるRCはりの疲労耐久性の低下が顕著となることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

社会インフラを担うコンクリート構造物の耐久性を向上させるために、しばしば混和材料が用いられている。混和材料の中には、コンクリートの材料的性能として劣化因子などの物質透過抵抗性を向上させるものもある。一方、疲労荷重のような外力を受けるコンクリート構造においては、その影響が必ずしも効果的に寄与するものとは限らない。本研究を通じて、使用材料・条件によっては、疲労耐久性を低下させる混和材もあることを示している。これは、耐久性確保のために混和材を使用する際に注意する必要があることを示唆した研究成果と考えている。

研究成果の概要(英文)：Fatigue durability, an important structural resistance to repeated loadings, is a concern for structural concrete. Researches on the fatigue of reinforced concrete (RC) member made with various admixtures are few while cyclic loading tests using concrete materials have been widely conducted. To improve durability, concrete made with cementitious admixture is often used in RC members such as bridge deck slabs. The focus of this study was to examine flexural fatigue durability of RC beams made with various cementitious materials. The cementitious materials tested in this study were blast furnace slag powder, fly-ash, silica-fume, and an artificial admixture of rich SiO₂ and Al₂O₃. The study revealed the effect of alternative cementitious materials on the fatigue durability of RC beams exposed to the dry and wet environmental conditions.

研究分野：土木工学

キーワード：コンクリート 混和材 耐久性 疲労

1. 研究開始当初の背景

道路・鉄道・河川・港湾・空港など多くの社会インフラを支える土木構造物の劣化・老朽化が日本の大きな社会問題のひとつとなり、平成25年には国土交通省より「社会資本メンテナンス元年」が提唱され、橋梁やトンネルといった社会基盤構造物の老朽化対策・長寿命化が全国各地で取り組まれるようになった。これから少子高齢化が進む我が国の財政事情や生産（労働）人口の減少を考えれば、必然的に現存する社会基盤構造物をできるだけ永く活用することが望まれることとなる。一方、現在においても社会インフラが必ずしも充分でない地方の社会基盤整備、また全国各地で頻発する自然災害の復旧工事や同対策、さらに老朽化に伴う更新などの社会基盤の整備も必要であり、適切な維持管理が行われながらも、将来にわたって新設工事も進められていくことは必然と考えられる。これからの社会基盤構造物は、これまで以上に長期耐久性に優れるよう建設・維持管理を行っていくべきであり、その実現に向けた技術開発も継続的に進めていく必要がある。

社会基盤構造物の長期耐久性を実現するためには、これを構成する鋼やコンクリートの材料レベルの耐久性向上のみならず、これらを組み合わせる構築された構造・部材レベルにおいて、様々な環境劣化因子や作用する荷重に対して長期耐久性を確保していく必要がある。これまでコンクリートのフレッシュ性状・硬化特性の改善のみならず、コンクリート材料の長期耐久性の向上を目的として、フライアッシュや高炉スラグ微粉末、シリカフェームなどをセメントの一部代替材として混和したコンクリートに関する研究が、国内外で盛んに行われてきた。これまでの混和材を用いたコンクリートの研究では、ある特定の混和材に主眼をおき、それをセメント質量に対して置換率を広範に変えながら、材料レベルで各種の物性・耐久性を中心に検討されてきた。そして、これらの混和材は副産物起源のものが多く、セメントの一部代替材として用いることで、製造時に多量の温室効果ガス（CO₂）を放出するセメントの実質的な使用量を減らすことができるため、コンクリートの耐久性向上だけでなく、環境性にも配慮できるものとして近年盛んに研究が進められている。

混和材は、セメントより微粒粉体のポゾラン材料等であることが多く、コンクリートの組織構造の緻密化を図ることができ、水やCO₂、塩化物イオンなどの外来の劣化因子の侵入・浸透を妨げる効果をもたらすことが知られている。一方、鉄筋コンクリート（RC）構造の基本的設計思想は、部材に作用する引張力を主鉄筋で負担するものとして、作用荷重によるコンクリートのひび割れ発生を阻止できるものではない。RC部材に交通荷重等が作用しひび割れが生じたとき、混和材により緻密化したコンクリートであっても水などの外的劣化因子は容易に侵入できる。ここでコンクリートの疲労耐久性を著しく低下させる原因の一つにコンクリート中の微細空隙における水の影響が知られ、さらにこれは凍結融解作用や鉄筋腐食環境下においても著しい影響を与えることが予想される。混和材で組織構造を緻密化したコンクリートを用いたRC部材が繰返し荷重を受けるとき、水や温度・塩分などの環境作用が相互に影響することが予想される。

このように混和材を用いたコンクリートの材料レベルの耐久性試験は、それぞれ独立した耐久性能を評価できるが、例えば環境に依存する塩害や凍害作用を受ける鉄筋コンクリート（RC）部材が、同時に疲労荷重を受ける場合の耐久性評価は難しい。さらに様々な混和材が使用されているものの、環境作用と荷重作用を同時に受けるRC部材の疲労耐久性について、各種混和材がもたらす効果を総合的に比較・評価した研究はほとんどみられない。これらの影響を取り入れたRC部材の耐久性試験をベースに、混和材を用いたコンクリートの材料設計を検討する必要があるものと考えられる。特に混和材を活用したコンクリートの材料レベルにおける耐久性には、数多くの知見が得られているが、これを構造部材に適用した際に、各種環境劣化作用を受けながら、さらに交通荷重等の各種構造作用を繰返し受ける場合の長期的耐久性（主に疲労）については、未だ十分に検討されていない。

2. 研究の目的

本研究では、これまで材料レベルにおいて耐久性の向上効果が期待される一般的なコンクリート混和材に着目し、これを用いたRC部材の曲げ疲労性状を調べることが主な目的である。その際、実構造物が曝されるような各種環境作用（水・温度・鉄筋腐食環境など）を考慮して実施し、各混和材がコンクリート部材レベルの疲労耐久性におよぼす影響を比較・評価を試みた。そして材料レベルにおける耐久性指数と部材レベルの疲労耐久性との相関性を明らかにすることが本研究の目的である。

3. 研究の方法

本研究では、フライアッシュ・高炉スラグ微粉末・石灰石微粉末・シリカフェームといった一般的に使用されるコンクリート混和材に加え、近年開発された耐塩害用混和材を用いたコンク



図-1 混和材を用いたRCはりの曲げ疲労実験

リートを対象とした。さらに、セメントの一部代替材として混和材を用いる場合、実質的な水セメント比 (W/C) が大きくなることから、混和材を含まない高 W/C コンクリート (低強度コンクリート) を用いて、RC 部材を作製し、その曲げ耐力および曲げ疲労性能を比較・評価した。なお、コンクリートが湿潤下にあると曲げ疲労耐力が著しく低下することが知られている。そこで、本研究では、乾燥下の試験に加え、曲げ疲労載荷前まで十分に湿潤養生した RC はりをフィルム保護して乾燥を防ぎながら、載荷試験を実施した (図-1)。

4. 研究成果

本研究では、表-1 に示す配合条件のレディーミクスコンクリート (生コン) を使用した。水結合材比 (W/B) を 55.0% と設定した上で、高炉スラグ微粉末 (B)、フライアッシュ (F)、シリカフェーム (S)、耐塩害用混和材 (C) を混和した。生コンで製造できるレベルを考え、セメントに対する内割質量置換率 10% とした。これらのコンクリートの細孔径容積 (図-2) を調べた。また、比較用として水セメント比 (W/C) 100% の低強度コンクリートを用いた RC はりの曲げ疲労実験を行った。この実験では、鉄筋腐食の有無の影響も考慮するため、コンクリートには撥水性を有するシラン系表面含浸材を塗布した試験体も同様に試験を行った。

曲げ疲労試験を開始するにあたり、予め基準コンクリート (Con) の RC はり静的曲げ耐力を求め、その曲げ耐力の 80% を上限荷重と設定し、さらに下限荷重を 20% として載荷周波数 1Hz で曲げ疲労試験を実施した。各混和材を用いた RC はりの疲労試験についても同様に載荷試験を行い、それぞれ 80% 上限荷重に換算した等価回数を求めた (図-3)。この結果に示すように、湿潤環境下では、シリカフェーム (S) を除く RC はりの曲げ疲労耐久性は低下したが、S においては疲労低下がみられなかった。一方、基準コンクリートや高炉スラグ微粉末 (B) やフライアッシュ (F) を用いた RC はりでは、乾燥・湿潤環境下における曲げ疲労耐久性の低下が著しいものであった。この結果を踏まえ、シリカフェーム (S) や耐塩害用混和材 (C) のような超微粒子の混和材ではマイクロファイバー効果が著しく、その結果、曲げ疲労強度の低下が小さいものの、高炉スラグ微粉末 (B) やフライアッシュ (F) のような標準的な混和材においては、実質的な W/C が大きくなり、コンクリートの湿潤・乾燥の影響が顕著に表れたものと考えた。その考察を検証するため、試験的に生コンで W/C=100% の低強度コンクリートを作製し、同様の曲げ疲労試験を行った。特に水分・塩分浸透の影響の有無を調べるため、一部の RC はりにはコンクリート表面にシラン系表面含浸材を塗布して実験を行った。その結果、低強度 RC はりでは曲げ疲労強度のバラツキが大きく、乾燥下においても試験結果に大きな隔たりがみられたが、湿潤環境下における等価回数は顕著に低下した。ただし、コンクリート表面含浸材の影響はほとんどみられず、湿潤環境下においては、低強度 RC はりの曲げ疲労耐久性は小さいものであった。これより F・B 等の混和材を用いても緻密性向上の効果は限定的であり、湿潤下の RC はりでは疲労耐久性の向上はみられないことが分かった。

表-1 配合条件

ID.	単位量 (kg/m ³)							
	W	OPC	Ad.	S1	S2	S3	G1	G2
Con.	164	299	0	362	181	362	571	381
B	164	269	30	361	180	361	571	381
F	164	269	30	357	179	357	571	381
S	164	269	30	357	179	357	571	381
C	164	269	30	358	179	358	571	381

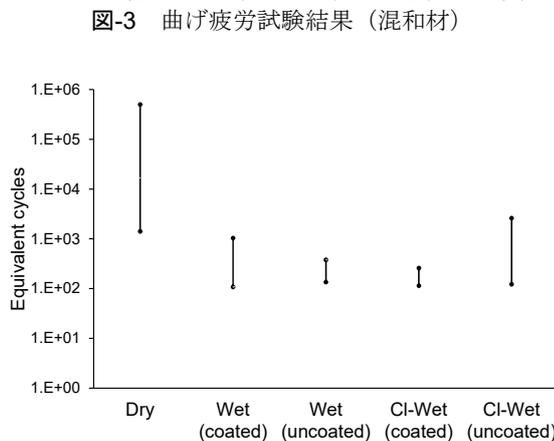
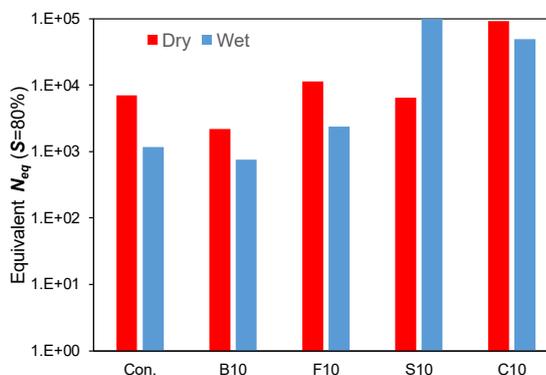
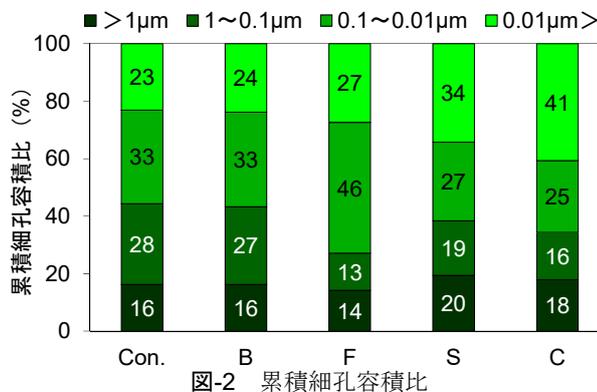


図-4 曲げ疲労試験結果 (比較用低強度 RC)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Isamu YOSHITAKE, Shun INOUE, Kota MOTOYOSHI	4. 巻 -
2. 論文標題 CYCLIC LOADING TEST OF REINFORCED CONCRETE (RC) BEAMS INCORPORATING ALTERNATIVE CEMENTITIOUS MATERIALS	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of International Structural Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14455/ISEC.2020.7(2).STR-08	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yamato Koichiro, Sasaki Akira, Ito Takayasu, Yoshitake Isamu	4. 巻 14
2. 論文標題 Resistance Properties to Chloride Ingress of Standard-Cured Concrete Made with an Admixture Incorporating Rich SiO ₂ and Al ₂ O ₃	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Concrete Structures and Materials	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40069-020-0391-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 大和功一郎, 伊藤貴康, 山地功二, 吉武 勇	4. 巻 31
2. 論文標題 耐塩害混和材を用いた蒸気養生コンクリートの塩化物浸透抵抗性	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 コンクリート工学論文集	6. 最初と最後の頁 1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3151/crt.31.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 SAYAMA SHOICHI, SAYAMA MASAYUKI, MITANI KOJI, UTSUMI TENSUKE, YOSHITAKE ISAMU	4. 巻 9
2. 論文標題 WATER-REPELLANT EFFECT OF REINFORCED CONCRETE (RC) BEAM COATED WITH A SURFACE-PENETRANT	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of International Structural Engineering and Construction	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14455/ISEC.2022.9(2).MAT-04	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 本吉晃大, 佐山昌佑記, 佐山彰一, 吉武 勇
2. 発表標題 表面含浸材を塗布したコンクリートの基礎特性に及ぼすW/C の影響
3. 学会等名 土木学会中国支部第73回研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 内海天翼, 本吉晃大, 吉武 勇
2. 発表標題 凍結融解作用を受けた混和材を含むRC はりの疲労耐久性について
3. 学会等名 土木学会中国支部第73回研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本吉晃大, 井上 駿, 吉武 勇
2. 発表標題 各種混和材を用いた鉄筋コンクリート（RC）はり部材の曲げ疲労耐久性
3. 学会等名 土木学会中国支部第72回研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井上 駿・吉武 勇
2. 発表標題 微細構造に着目したコンクリートの疲労耐久性におよぼす混和材の影響
3. 学会等名 第73回セメント技術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Isamu YOSHITAKE, Shun INOUE, Keisuke MIYAMOTO and Koichiro YAMATO
2. 発表標題 Strength Properties of Durable Concrete Mixed with Various Alternative Cementitious Materials
3. 学会等名 The Tenth International Structural Engineering and Construction Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Isamu YOSHITAKE, Shun INOUE and Kota MOTOYOSHI
2. 発表標題 Cyclic Loading Test of Reinforced Concrete (RC) Beams Incorporating Alternative Cementitious Materials
3. 学会等名 The Fifth Australasia and South-East Asia Structural Engineering and Construction Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井上 駿, 吉武 勇
2. 発表標題 微細構造に着目したコンクリートの疲労耐久性におよぼす混和材の影響
3. 学会等名 第73回セメント技術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Isamu Yoshitake, Shun Inoue, Keisuke Miyamoto, Koichiro Yamato
2. 発表標題 Strength Properties of Durable Concrete Made with Various Alternative Cementitious Materials
3. 学会等名 The Tenth International Structural Engineering and Construction Conference
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山路遙己, 佐山昌佑記, 佐山彰一, 吉武 勇
2. 発表標題 表面含浸材を塗布した低強度RCはりの曲げ疲労実験
3. 学会等名 土木学会中国支部第74回研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 内海天翼, 池末二郎, 吉武 勇
2. 発表標題 W/C=100%のコンクリートを用いた低強度RCはりの曲げ試験
3. 学会等名 土木学会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shoichi SAYAMA, Masayuki SAYAMA, Koji MITANI, Tensuke UTSUMI, and Isamu YOSHITAKE
2. 発表標題 Water-repellant Effect of Reinforced Concrete (RC) Beam Coated with a Surface-penetrant
3. 学会等名 The Sixth Australasia and South-East Asia Structural Engineering and Construction Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------