

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01512

研究課題名(和文) コンクリートにおける微細ひび割れ発生の機構分析とその応用

研究課題名(英文) Analysis of micro-cracking of concrete and its applications

研究代表者

半井 健一郎 (Nakarai, Kenichiro)

広島大学・先進理工系科学研究科(工)・教授

研究者番号：10359656

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,700,000円

研究成果の概要(和文)：コンクリート内部に発生する微細ひび割れに着目し、材料および構造レベルでの影響を検討した。材料レベルでは、石灰石骨材や膨張材、高炉セメントなどの使用材料や養生条件を変化させた試験を行い、コンクリートの諸物性が各鉱物の反応率や結合水率、水和生成物量から説明されることを示した。そのうえで、構造レベルにおいては、RCはりの載荷試験を行い、初期高温履歴を与えた石灰石骨材コンクリートでは微細ひび割れが発生し、せん断耐力の低下を解消する可能性があることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

コンクリート内部に生じる微細ひび割れはコンクリート構造物の性能に影響を与える可能性があることを明らかにした。特に、収縮低減のために使用が増加している石灰石骨材はせん断耐力を低下させるが、微細ひび割れを意図的に導入することによってせん断耐力の低下を解消し、構造物の性能を向上させることができる可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：This study focused on micro-cracking in concrete and examined its effects on the material and structural performance. At the material level, experimental results varying the curing conditions and the used materials such as limestone aggregate, expansion material, and blast furnace slag cement showed that the concrete material properties can be explained by the reaction rate of each mineral, the amounts of reacted water and hydrates. At the structural level, loading tests were conducted on RC beams, and it was shown that limestone aggregate concrete subjected to an initial high-temperature history could develop micro-cracks, which could resolve the reduction in shear strength.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：コンクリート 骨材 石灰石 ひび割れ せん断 膨張材

1. 研究開始当初の背景

コンクリートは、複合材料であるがゆえに多数の微細ひび割れを内部に生じることがあり、コンクリート構造物の性能に影響を及ぼすと考えられる。これまでに破壊進展領域において発生する微細ひび割れに関する研究が数多くある一方で、骨材種や混和材料の影響についての議論は少ない。特に内部応力によって発生した微細ひび割れがコンクリート構造物の性能に及ぼす影響に関する研究はほぼ皆無である。このことは、マクロなひび割れ抵抗性やせん断耐力などのコンクリート構造物の諸性能に見られる大きなばらつきの本質的理解を妨げる一因となるとともに、材料の最適配合や新たな技術開発への道を閉ざしてきた可能性がある。

近年、コンクリートの収縮に関する研究が数多く行われ、収縮低減が強く求められるようになった。コンクリートの収縮への骨材の大きな影響が注目され、収縮を低減させる骨材として石灰石骨材が活用されている。石灰石骨材は骨材そのものの破碎性が高いため、石灰石骨材を用いた場合にはせん断耐力が低下する。さらに、石灰石はセメントペーストよりも線膨張係数が小さいため、条件によっては骨材周りに微細ひび割れを生じさせるが、その影響に関する検討は少ない。

一方、膨張コンクリートにおける収縮補償効果や高い耐疲労耐久性などの性能が見直されつつある。性能向上には内包する微細ひび割れが関与していると考えられるが、研究は十分ではない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、材料由来の微細ひび割れの発生機構を明らかにしたうえで、コンクリート構造物としての性能への影響を定量的かつ体系的に分析し、その評価手法を確立することとした。さらには、微細ひび割れの発生を促進・制御する手法を検討することで、新たな材料開発や構造形式の提案につなげることを目指した。

3. 研究の方法

コンクリート内部に発生する「微細ひび割れ」に着目し、材料由来の微細ひび割れの発生機構を分析したうえで、せん断耐力をはじめとする構造物の性能への影響を実験によって明らかにするとともに、数値解析による再現を試みた。また、微細ひび割れの発生を促進・制御する手法として、初期高温養生や膨張材の使用を検討し、コンクリート製品の高性能化を安価に実現可能な技術開発を目指した。

まず、材料レベルの検討においては、石灰石骨材や膨張材、各種高炉セメント（石膏添加の有無や高炉スラグ微粉末の置換率を変化）などの使用材料を変化させたセメントペースト、モルタル、コンクリートおよび骨材単体の材料物性を分析した。体積変化は埋め込みゲージで測定するとともに、高炉スラグ微粉末の反応率や水和生成物はセメントペーストのリートベルト解析、結合水量は熱分析により分析した。線膨張係数は 20 ~ 60 での長さ変化から計測を行った。また、材料レベルと構造レベルの議論を連結させるためにコンクリートの破壊エネルギーに着目した検討を行い、骨材種類や水セメント比、養生温度を変化させたコンクリートにおける破壊エネルギーの変化、その評価についての検討を行った。さらに、使用材料や養生条件とコンクリートの諸物性との関係については、圧縮強度あるいは膨張ひずみ、透気性や吸水性への影響に着目して検討を行った。

次に、構造レベルの検討においては、微細ひび割れの発生を膨張材の添加や初期高温養生によって試み、その影響を RC はりのせん断耐力の変化の観点から検討した。まず、鉄筋周囲に形成されるひび割れによる付着低下とそれによる構造性能への影響に着目して、線膨張係数が 17.3 $\mu\text{/}^\circ\text{C}$ のステンレス異形鉄筋と早強モルタルによって RC はりを作製し（図 1 (a)）、その打設温度と載荷時温度（10 と 55 の組み合わせ）の変化の影響を実験的に分析した。さらに、養生温度と使用骨材の関係进行分析するために、石灰石骨材を用いた RC はりを作製し（図 1 (b)）、初期高温履歴を与えた。いずれもせん断破壊先行型で設計した。微細ひび割れは蛍光エポキシ樹脂の含浸によって行い、RC はり試験体においては採取コアを用いた。RC はりの力学挙動の再現を破壊エネルギーから求まる引張軟化係数に着目した数値解析によって試みた。

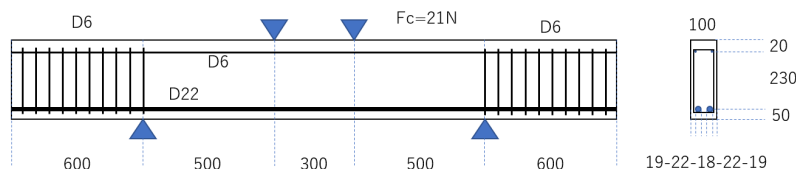


図 1 (a) 本研究で作製した RC はり（モルタル製）の概要

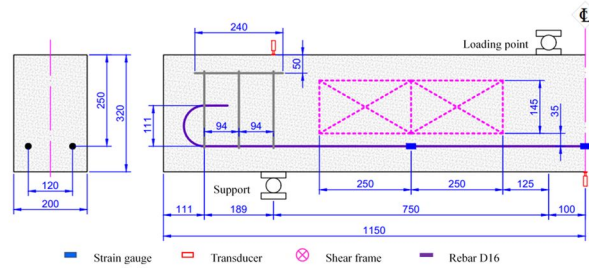


図 1 (b) 本研究で作製した RC はり (コンクリート製) の概要

4. 研究成果

材料レベルでの検討

まず、水和反応の検討として、水セメント比 50% のセメントペーストを 5, 20, 40 の温度条件で材齢 91 日まで水中養生を行ったものの分析結果の例として、図 2 に高炉スラグ微粉末の結合水量の経時変化、図 3 に高炉スラグ微粉末の反応率と結合水量の関係を示す¹⁾。養生温度が高くなることで高炉スラグ微粉末の反応が促進されるが、スラグ反応量とスラグ水和由来の結合水率との関係においては、スラグ置換率や養生温度の影響はほとんどないことが確認できる。なお、水セメント比が同一であれば、圧縮強度の発現は結合水量の増加によって説明できることも示した。

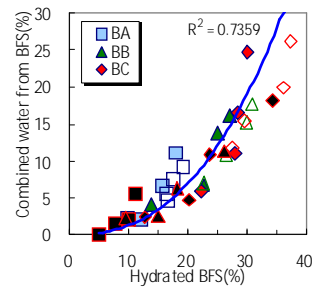
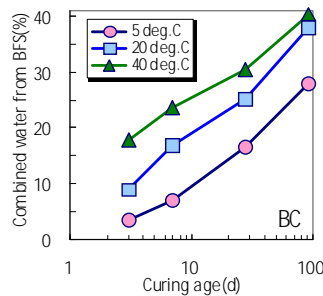


図 2 高炉スラグ微粉末の結合水量の変化 図 3 高炉スラグの反応率と結合水量

また、石灰石骨材および普通骨材として石英斑岩を用いたコンクリートを、水セメント比 23, 35, 50% で作製し、常温養生と蒸気養生での比較を行った²⁾。図 4 に示すように、石灰石を用いることで破壊エネルギーは大きく低下したが、本研究では、特に強度が低い場合に差が顕著となった。試験後のコンクリート供試体の破断面の凹凸形状を計測して面積の増加率を求めると、図 5 に示すように、強度に対する破壊エネルギーの値は骨材種類や水セメント比、養生温度に寄らずに概ね類似の傾向を示すことが示唆された。

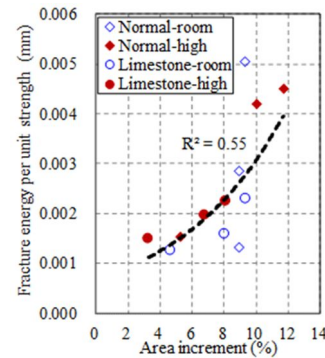
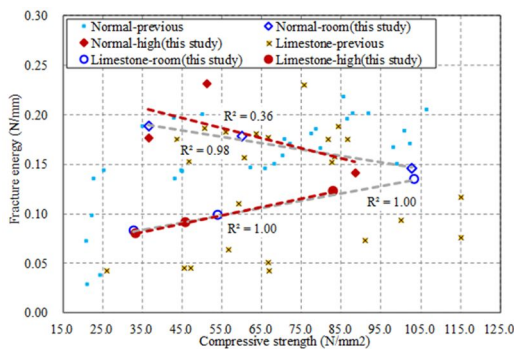


図 4 圧縮強度と破壊エネルギーの関係 図 5 面積増加と強度に対する破壊エネルギー

さらに、膨張コンクリートの膨張発現や物性との関係に関しては、高炉スラグ微粉末の種類や石膏置換の有無を変化させた検討を実施した³⁾。図 6 に示すように養生温度によって膨張ひずみの発現は変化するが、材齢 1 日程度の初期の膨張ひずみはエトリンガイト生成量と良好な相関があること(図 7)、その後の材齢経過とともに相関が低下することなどを明らかにした。また、

結合材の種類や養生温度によらず、圧縮強度や透気性、吸水性には良好な相関があることも示した。すなわち、使用材料と養生条件から各鉱物の反応率や結合水率、水和生成物量を求めることで、圧縮強度や膨張挙動など、コンクリートの諸物性を評価可能であることが示されたといえる。

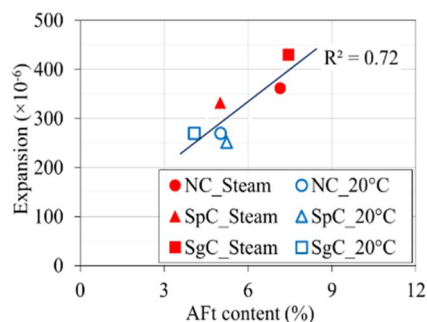
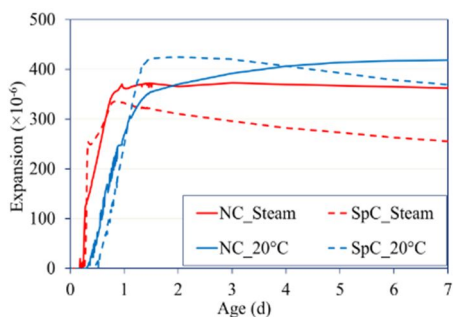


図6 膨張ひずみの経時変化 図7 膨張ひずみとエトリンサイト生成量（材齢1日）

構造レベルでの検討

まず、ステンレス鉄筋を用いたモルタル製 RC はりの載荷試験結果⁴⁾を図8に示す。打込み温度と載荷温度がほぼ同じでステンレス筋を用いた場合には、既存のせん断耐力予測と同じ程度のピーク荷重でせん断破壊が生じた。一方、打込み温度が10で載荷時温度を55に上げたものでは、通常の鉄筋およびステンレス鉄筋のいずれにおいても、ピーク耐力が70%程度に減少するという結果が得られた。飽和水蒸気圧の上昇に伴うコンクリートの収縮が原因と考えられ、当初の研究目的であった鋼材の線膨張係数の影響は確認できなかった。

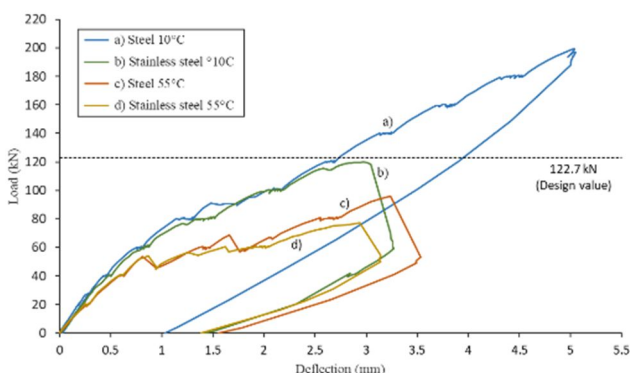


図8 モルタル製RCはりの載荷試験結果

さらに、石灰石骨材と普通骨材を用いて作製したRCはりを用い、微細ひび割れの発生の有無を検討したところ、石灰石骨材を用い初期高温履歴を作用させた場合には骨材周りにひび割れの発生が確認された。破壊エネルギーの結果とあわせて考察をすると、微細ひび割れの存在によってひび割れ発生荷重は低下するものの、ピーク後の荷重保持性が高く、結果として破壊エネルギーが増加する場合があることを示した。次に、コンクリート製RCはりの載荷試験結果より、石灰石骨材を用いて初期高温履歴を与えた場合、曲げひび割れ発生荷重は低下するものの、斜めひび割れ発生荷重や終局荷重は、常養生のみを行った石灰石骨材RCはりよりも増加し、普通骨材RCはりと同程度に回復した(図9)。斜めひび割れを含むコアを採取して観察したところ、初期高温履歴を与えたことで骨材周りに微細ひび割れが発生し、斜めひび割れが粗骨材を貫通しなくなったことが確認できた(図10)。これによって骨材のかみ合わせによるせん断抵抗が確保され、せん断耐力の低下が解消されたものと考えられた。

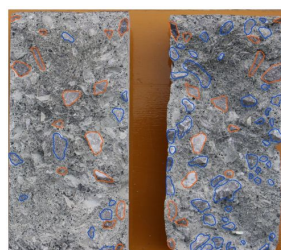
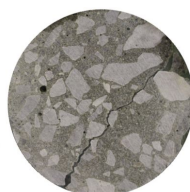
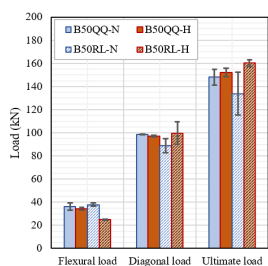


図9 RCはりの載荷試験結果 図10 せん断ひび割れ面の観察(石灰石骨材,高温)

以上の構造挙動に関して、3次元非線形構造解析による再現を試みたが、十分な精度で評価することができず、今後の課題となった。

参考文献

- 1) 佐川孝広，田中拳太郎：スラグ置換率と養生温度が異なる高炉セメントの強度発現と水和反応，第75回セメント技術大会，2021
- 2) X. Wang, H. A. Saifullah, H. Nishikawa and K. Nakarai: Effect of water-cement ratio, aggregate type, and curing temperature on the fracture energy of concrete, *Construction and Building Materials* 259: 119646, 2020.
- 3) H. V. Nguyen, K. Nakarai, K. H. Pham, S. Kajita and T. Sagawa: Effects of slag type and curing method on the performance of expansive concrete, *Construction and Building Materials* 262: 120422, 2020.
- 4) Peerapong CHAROENKIJWATTANAKUL, Takaaki YAMAZAKI, Nobuhiro CHIJIWA. Effect of Temperature Change on Structural Performance of Stainless Steel Reinforcing Concrete Structure, 4th International Symposium on Concrete and Structures for Next Generation (CSN2019), Proceedings of 4th International Symposium on Concrete and Structures for Next Generation, pp. 456-465, June 2019.

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 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nguyen Hoang Viet, Nakarai Kenichiro, Pham Kien Hoang, Kajita Saeko, Sagawa Takahiro	4. 巻 262
2. 論文標題 Effects of slag type and curing method on the performance of expansive concrete	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Construction and Building Materials	6. 最初と最後の頁 120422 ~ 120422
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.conbuildmat.2020.120422	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Wang Xiangen, Saifullah Halwan Alfisa, Nishikawa Hiroki, Nakarai Kenichiro	4. 巻 259
2. 論文標題 Effect of water/cement ratio, aggregate type, and curing temperature on the fracture energy of concrete	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Construction and Building Materials	6. 最初と最後の頁 119646 ~ 119646
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.conbuildmat.2020.119646	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 佐川孝広, 山本真奈海	4. 巻 -
2. 論文標題 高炉スラグの化学組成が高炉セメントの硬化体特性に及ぼす影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	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) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Halwan Alfisa Saifullah, Kenichiro Nakarai, Nobuhiro Chijiwa, Koichi Maekawa, Stefanus Kristiawan	4. 巻 897
2. 論文標題 Influence of Longitudinal Reinforcement Ratio on Shear Strength of RC Slender Beam Under Different Loading Rates	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Mechanics and Materials	6. 最初と最後の頁 91-97
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/AMM.897.91	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 佐川孝広, 山本真奈海
2. 発表標題 高炉スラグの化学組成が高炉セメントの硬化体特性に及ぼす影響
3. 学会等名 コンクリート工学年次講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐川孝広, 横瀬莉緒
2. 発表標題 高炉セメント硬化体の自己収縮特性に及ぼすスラグ化学組成と無水石こうの影響
3. 学会等名 日本セラミックス協会2021年年会講演予稿集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐川孝広, 田中拳太郎
2. 発表標題 スラグ置換率と養生温度が異なる高炉セメントの強度発現と水和反応
3. 学会等名 第75回セメント技術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 豊田拓真, 長岡漣, 佐川孝広
2. 発表標題 膨張材と石灰石微粉末を混和した高炉セメントのマス養生下での体積変化と水和反応
3. 学会等名 第74回セメント技術委大会講演要旨
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Peerapong CHAROENKIJJWATTANAKUL, Takaaki YAMAZAKI, Nobuhiro CHIJIWA.
2. 発表標題 Effect of Temperature Change on Structural Performance of Stainless Steel Reinforcing Concrete Structure
3. 学会等名 Proceedings of 4th International Symposium on Concrete and Structures for Next Generation (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 La Vanny, Kenichiro Nakarai, Halwan Alfisa Saifullah, Asuka Mizobe
2. 発表標題 Experimental investigation of loading rate effects on the shear capacity of reinforced concrete deep beams
3. 学会等名 The 5th International Conference on Geotechnics, Civil Engineering Works and Structures (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 豊田拓真, 佐川孝広
2. 発表標題 高炉セメント -膨張材系の初期高温履歴下で体積変化と水和挙動
3. 学会等名 第46回土木学会関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 豊田拓真, 佐川孝広
2. 発表標題 高炉セメント-膨張材系のマス養生下での体積変化と水和挙動
3. 学会等名 第73回セメント技術大会
4. 発表年 2019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
研究分担者	小川 由布子 (Ogawa Yuko) (30624564)	広島大学・先進理工系科学研究科(工)・助教 (15401)	
研究分担者	千々和 伸浩 (Chijiwa Nobuhiro) (80546242)	東京工業大学・環境・社会理工学院・准教授 (12608)	
研究分担者	佐川 孝広 (Sagawa Takahiro) (90621045)	前橋工科大学・工学部・准教授 (22303)	

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
---------	---------