

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2015

課題番号：25709040

研究課題名(和文) 体積変化に起因したコンクリート中不均一損傷がRCはりのせん断特性に与える影響評価

研究課題名(英文) Effect Evaluation of Heterogeneous Damage in Concrete Due to its Volumatic Change on Shear Property in Reinforced Concrete Beams

研究代表者

三木 朋広 (Miki, Tomohiro)

神戸大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30401540

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,100,000円

研究成果の概要(和文)：コンクリート部材のせん断破壊は、コンクリートの引張破壊挙動の影響を受ける。この破壊挙動は、コンクリート硬化時の体積変化や、アルカリシリカ反応(ASR)等の劣化要因で生じる微細ひび割れの影響を受ける。本研究では、この材料の引張破壊挙動を詳細に調べるとともに、その破壊挙動とコンクリート部材がせん断破壊する構造レベルの要因を関連付けることに成功した。特に、ASRが生じたコンクリートにおいて、表面から見ることでできないコンクリート内部のひび割れの様子を3次元的に可視化することに成功するとともに、そのようなひび割れが生じたコンクリートの破壊力学特性について、画像解析を用いて定量的に評価している。

研究成果の概要(英文)：Shear failure of concrete members is related to the fracture failure behavior of the concrete in tension. The presence of micro cracks due to the volume expansion of concrete during the hardening or material damages such as Alkali-Silica Reaction (ASR) also affects the fracture failure behavior of concrete. In this study, the fracture of materials which was pre-damaged due to the several reasons was investigated in detail. In addition, the damaged concrete members failed in shear were tested. Interestingly, the distribution of internal cracks in the concrete induced by the ASR was observed by means of a three dimensional integration technique using digital images which was captured from a thinly sliced concrete specimen polished from its surface. The fracture properties of the ASR damaged concrete were evaluated by not only conventional procedures and also the image analysis in order to measure the crack propagation in the concrete during loading tests.

研究分野：コンクリート構造

キーワード：初期応力 弾性係数 ASR 微細ひび割れ 高強度繊維補強コンクリート RCはり せん断耐力 画像解析

1. 研究開始当初の背景

本研究で対象とするコンクリート構造において、エネルギー吸収が小さく、急激に進行するせん断破壊は、設計上避けるべき終局状態である。このコンクリート部材のせん断破壊は、コンクリートの引張破壊挙動の影響を受ける。例えば、高強度コンクリートのように自己収縮が大きい場合や、骨材の影響による大きな乾燥収縮が生じる場合、コンクリートの体積変化に起因する初期応力や初期損傷が RC 部材のせん断特性に影響することが既往研究で指摘されている。ここでは、コンクリートの収縮やアルカリシリカ反応によってコンクリート中に不均一に生じた微細損傷がコンクリートのひび割れ進展に与える影響、さらにその結果、RC 部材のせん断特性に与える影響について調べるのが重要となる。

2. 研究の目的

本研究では、コンクリートの体積変化に起因した初期応力や、過大な体積変化に伴って生じた不均一な微細損傷が、コンクリート部材のせん断性状に与える影響を徹底的に調べることを目的とした。その目的を達成するため、以下の3つの仮説を設定し、それぞれについて要素レベルから構造部材レベルの実験ならびに解析により検証した。

- (1) 仮説1：コンクリートの体積変化に起因する初期応力が、RC 部材中のコンクリート強度、特に見かけの引張強度を低下させる。
- (2) 仮説2：コンクリートの体積変化が大きい場合、コンクリート中に損傷や微細ひび割れが不均一に生じ、コンクリートのひび割れ進展挙動に影響する。
- (3) 仮説3：以上の挙動が RC はりの斜めひび割れ発生荷重、ならびに斜めひび割れの角度に影響し、さらに、はりのせん断耐力を低下させることがある。

3. 研究の方法

(1) 要素レベルの検討

図1に示す小型ジャッキと応力解放法を



図1 開発したジャッキシステム

併用して、コンクリートの初期応力度と弾性係数を測定することを試みた。

図2に要素レベルにおける検証実験の様子を示す。実験では、普通強度モルタルと超高強度モルタルを用いて、100 mm×100 mm×100 mm の立方体供試体を対象とした圧縮載荷試験を実施した。さらに、断面が75 mm×200 mm、長さが500 mm のプレストレストコンクリート供試体を用いて、骨材寸法、円孔の直径、圧縮応力の分布をパラメータとして本手法の測定精度を検証するとともに、測定精度に与える影響を調べた。



図2 ジャッキを挿入したモルタル供試体の圧縮載荷試験の様子

(2) ASR 劣化したコンクリートの破壊力学特性の評価

研究期間2年目においては、メゾレベルの検証に研究を展開した。まず、アルカリシリカ反応によって生じたひび割れがコンクリートのひび割れ進展挙動、ならびに圧縮破壊挙動に与える影響を実験的に調べて、コンクリート中の不均一な損傷がコンクリートのひび割れ進展挙動に与える影響について検証した。

図3には、3年間屋外で暴露したコンクリート供試体において生じたひび割れの分布について、写真、ひび割れスケッチを示す。

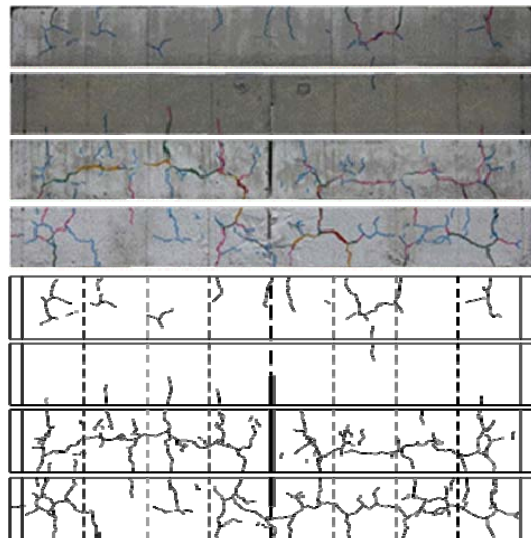


図3 アルカリシリカ反応によって生じたひび割れの例

屋外暴露によって ASR を生じさせ、様々ひび割れの状態を再現するとともに、このコンクリートはり供試体に対してスパン中央に 1 つの切欠きを設けて、三点曲げ載荷試験を実施して、破壊エネルギーならびに引張軟化曲線を求めた。

さらに、アルカリシリカ反応によって生じたひび割れの性状を把握するため、内部ひび割れを観察するために、暴露供試体を対象として、研磨剤（粒度 F100）を用いて研磨面を 0.3 mm 程度の間隔で研磨し、その研磨面のデジタル画像（解像度：1600 dpi）を積層化することによって、コンクリート内部に生じたひび割れの様子を 3 次元の画像を作成した。

コンクリートの収縮がひび割れ進展挙動に与える影響については、様々な収縮量のコンクリート供試体の曲げ試験を行い、破壊力学特性値、特に引張軟化曲線と破壊エネルギーを測定した。

(3) 超高強度繊維補強コンクリートはりのせん断載荷実験

研究期間最終年には、RC はり中コンクリートの初期応力を把握した上で、RC はりの載荷実験を系統的に実施した。ここで、内在鉄筋の拘束によって生ずる初期応力は、軸方向と直交方向で鉄筋の拘束度が異なるために方向性を有するためその影響について調べた。実験では、鋼繊維混入率、せん断補強鉄筋比、収縮量を変化させた RC はり部材を対象として載荷試験を行った。

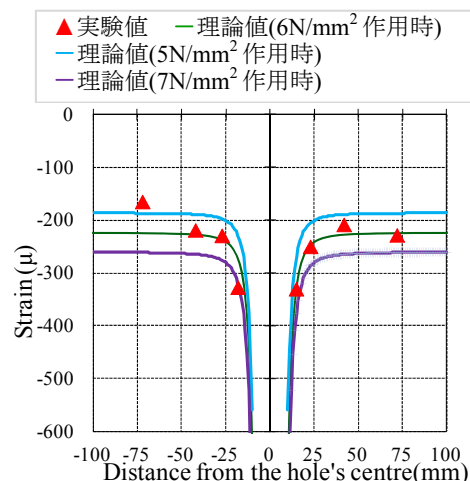
4. 研究成果

検討から得られた本研究の成果は以下の通りである。

(1) 要素レベルの検証

① モルタル供試体を対象とした検証実験では、設ける円孔の直径、ならびに材料の弾性係数が測定結果に与える影響を明らかにした。ゲージ長 10mm もしくは 20mm のひずみゲージを用いた計測では、ひずみ分布として応力集中を計測できたのは直径 10mm ならびに 20mm のときであり、それらの測定誤差を 8%以下とすることができた。

② コンクリート供試体を対象としたプレストレス導入試験では、75×200×500mm のコンクリート供試体の側面に 5mm、10mm、20mm の円孔を設けて、円孔周辺のひずみ分布を計測した。この供試体を対象に 2 本の PC 鋼棒を介して、5MPa に相当するプレストレスを断面内に一様に、もしくは偏心させてコンクリート供試体に導入した。検討結果の一例を図 4 に示す。このような、より実構造物に近い状況を再現した加力条件においても、本手法による作用圧縮応力の測定精度を確認できた。



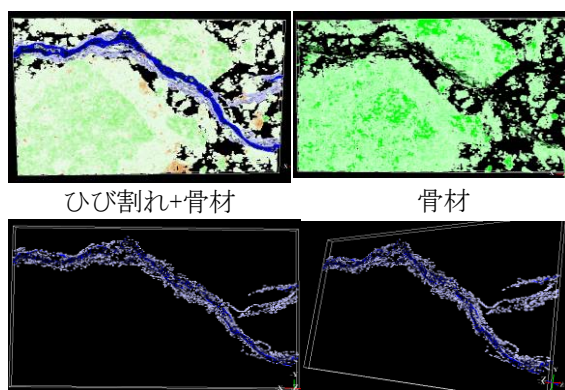
(1) 直径 20mm

図 4 偏心させた応力場におけるプレストレス導入試験結果（作用応力：負側 7N/mm²、正側 5N/mm²）

③ 有限要素法を用いた検証では、材料の弾性係数、ならびに圧縮応力の作用分布の影響を調べるとともに、骨材の配置や分布が応力測定結果に与える影響に関する感度を把握した。圧縮荷重下では、骨材の位置や分布によって結果が左右されるのに対して、小型ジャッキを用いた加力を想定した円孔内側から膨張圧を加えた場合には、骨材の存在の影響は比較的小さいことがわかった。

(2) ASR 劣化したコンクリートの破壊力学特性の評価

① アルカリシリカ反応によって生じたひび割れをコンクリート内部まで観察することによって、図 5 に示すように、表面から見ることのできないひび割れ性状の可視化に成功した。



ひび割れと骨材の積層化三次元画像
図 5 ひび割れと骨材の積層化三次元画像

② アルカリシリカ反応によるひび割れについて、ひび割れ面積をひび割れの長さで除した「平均ひび割れ幅」が破壊エネルギーに与える影響が大きく、平均ひび割れ幅が大きいと引張破壊エネルギーが小さくなる傾向にあることを確認した。

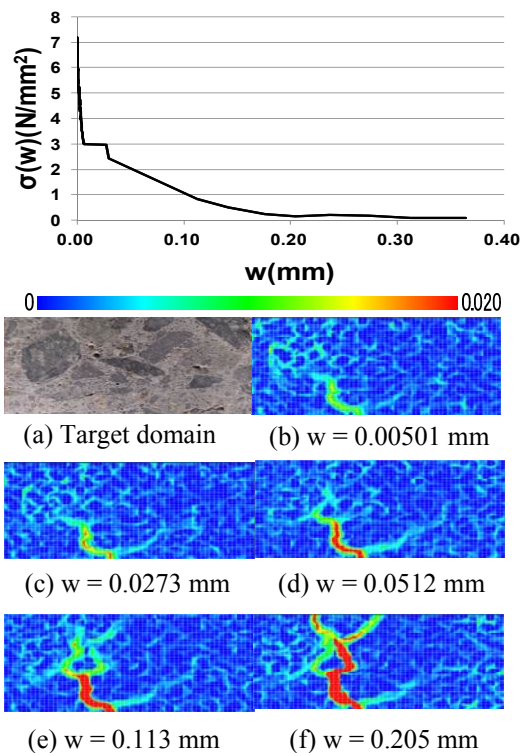


図6 切欠きはりの3点曲げ試験から得た引張軟化曲線と画像解析によるひび割れ進展計測結果の一例 (ASR-3-1-2、表面研磨した供試体)

No.6 Max. Comp Stress 28 (MPa)

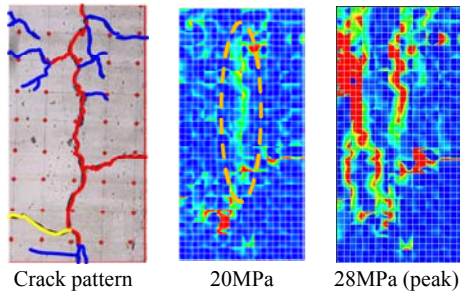


図7 ASRによってひび割れが生じたコンクリート供試体の圧縮応力下のひび割れ進展

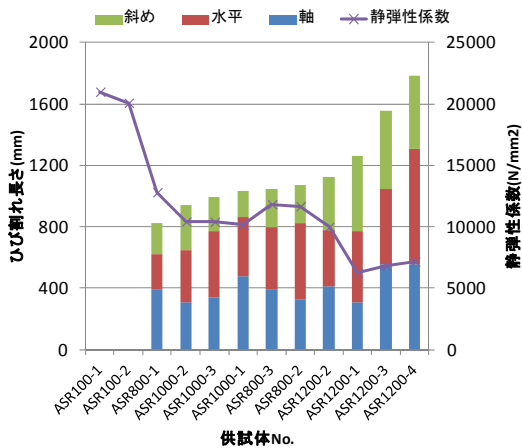


図8 ひび割れ面積と静弾性係数の関係

また、図6に示すように、表面を研磨した供試体において、荷重によるひび割れの進展には、ASRによって生じていた微細ひび割れ、ならびに骨材の位置が影響していることが確認できた。

③ アルカリシリカ反応によりひび割れが生じたコンクリートの圧縮荷重試験によって、図7に示すように、ひび割れの方向ならびに形状によって、圧縮力によって生じる鉛直方向のひび割れの開口挙動が異なり、その結果、圧縮強度が異なることを確認した。

また、図8に示すようにASRによって生じたひび割れを方向別に整理することによって、ASRひび割れの長さや面積と静弾性係数との相関を求め、その結果から斜め方向のひび割れの長さ、ならびに水平方向と斜め方向のひび割れの面積が静弾性係数と高い相関を有することを確認した。

(3) 部材レベルの検証

① 鋼繊維混入率、せん断補強鉄筋比、収縮量を変化させた高強度繊維補強コンクリートはり部材を対象とした荷重試験の結果から、繊維混入率が大きくなると、RCはりにおいて測定した収縮ひずみは小さくなり、せん断耐力は大きくなることを確認できた。

② せん断補強鉄筋比が大きくなると、せん断耐力は大きくなることを確認した。特に、せん断補強鉄筋と繊維補強を併用した場合のせん断補強効果は、鋼繊維のみ2%混入した場合のせん断補強効果より若干大きな補強効果を示すことがわかった。

③ 鋼繊維を混入したRCはり、ならびにせん断補強鉄筋を配置したRCはりにおいて、画像解析を行うことによって、目視では確認できない程度のひび割れを観察することができた。結果の一例を図9に示す。この画像解析の結果を基に、斜めひび割れ発生後の荷重に伴う耐荷機構の変化を可視化することに成功した。

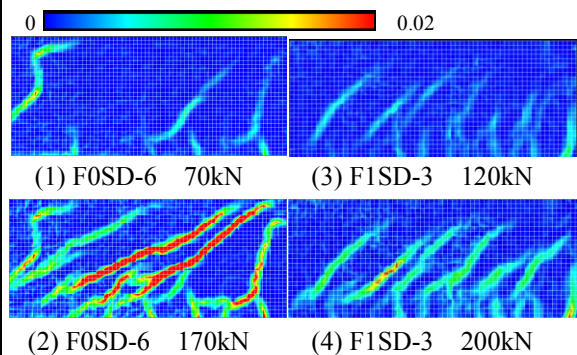


図9 主引張ひずみ分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計10件）

- ① Miki, T., Kita, K., Kono, K., Experimental Investigation on Shrinkage in High Strength Fiber Reinforced Concrete and its Influence on Shear Capacity of the RC Beams having Shear Reinforcement, Proceedings of 10th Mechanics and Physics of Creep, Shrinkage, and Durability of Concrete and Concrete Structures、査読有り、Vol.10、2015、pp.738-744
- ② 三木朋広、北皓輔、河野克哉、せん断補強した高強度繊維補強コンクリートはりにおける収縮特性とせん断耐力に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、査読有り、Vol.37、No.2、2015、pp.571-576
- ③ 三木大地、三木朋広、応力集中係数を用いたコンクリートの内部応力測定方法に関する基礎的研究、第23回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、査読有り、Vol.23、2014、pp.435-440
- ④ 三木朋広、宮川侑大、アルカリシリカ反応によりひび割れが生じたコンクリートの圧縮破壊挙動に関する研究、コンクリート工学年次論文集、査読有り、Vol.36、No.2、2014、pp.73-78

〔学会発表〕（計15件）

- ① 塚原宏樹、三木朋広、切欠きはりのリガメント部における ASR によるひび割れの状態が引張軟化挙動に与える影響、土木学会第70回年次学術講演会、2015.9.18、岡山大学（岡山）
- ② 三木大地、三木朋広、円孔周辺の応力集中係数を用いたプレストレス力の推定に関する基礎的研究、土木学会第69回年次学術講演会、2014.9.12、大阪大学（大阪）
- ③ 三木朋広、Nur Izyan Syazwani binti Julkifli、小型加力装置によるコンクリートに作用する圧縮応力の測定に関する基礎的研究、土木学会第67回年次学術講演会、2013.9.6、日本大学（千葉）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三木 朋広 (MIKI, Tomohiro)
神戸大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：30401540