

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04236

研究課題名（和文）内部膨張起因の微細損傷が部材耐荷性能低下に与える影響とその載荷速度依存性の解明

研究課題名（英文）Clarification of the effect of micro-damage caused by internal expansion on the degradation of the load-bearing performance of structural components and its loading rate dependence

研究代表者

玉井 宏樹 (Tamai, Hiroki)

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号：20509632

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は内部膨張によるひび割れなどの微細損傷の載荷速度依存性を明らかにし、鉄筋腐食・ASR・それらの複合劣化が生じたRC梁部材の静的及び衝撃荷重下の耐荷性能や破壊挙動を定量評価することであった。その目的に対し、促進膨張させた供試体を多数製作し圧縮試験し、さらにRC梁に対しても載荷試験を実施することで、材料・部材の両レベルでの載荷速度依存性を解明した。さらに、コンクリートを3相で構成するメソスケールモデルを構築し、水分移動・膨張・弾塑性破壊の3段階の解析を統合した解析手法を用いることで、ASR膨張により劣化したコンクリートの圧縮特性やRC梁の載荷特性を概ね評価できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

構造工学と材料学の知識を融合し、結果として得られた知見および研究成果は、劣化による耐荷性能低下の定量評価、また、致命的破壊につながる劣化の把握に役立つものであり、学術的意義は大きい。また、劣化したコンクリート・RC・PC構造物の動的耐荷性能や衝撃荷重に対する防護性能を定量的に評価することで、今後想定される自然事象（衝撃的地震動、落石、土石流など）に対する構造物の安全性を定量的に評価することができるようになり、防災や維持管理を複合的に捉えた分野に十分に生かすことができると考える。

研究成果の概要（英文）：The objectives of this study were to clarify the loading rate dependence of microdamage such as cracks due to internal expansion, and to quantitatively evaluate the load-bearing capacity and fracture behavior under static and impact loading of RC beams with rebar corrosion, ASR, and their combined deterioration. To this end, many specimens with accelerated expansion were made and compression tests were performed, and also static and impact loading tests were conducted on RC beams to clarify the loading rate dependence at both the material and member levels. Furthermore, a FE based mesoscale model of concrete consisting of three phases was constructed. By using that model, the compressive properties of concrete deteriorated by ASR expansion were evaluated and the loading properties of RC beams can be roughly evaluated by using an analytical method that integrates the three-phase analysis of water movement, expansion, and elastoplastic fracture.

研究分野：構造工学

キーワード：内部膨張 アルカリシリカ反応 コンクリート メソスケールモデル 有限要素法

1. 研究開始当初の背景

経年劣化したインフラストックの増加に対して限られた予算内で合理的かつ効率的な維持管理を実現することは我が国の重要課題であるため、維持管理に関する研究は多角的かつ継続的に実施されているが、特に劣化した構造物の残存耐荷性能評価は余寿命予測や適切な補修工法の選定の礎になるため極めて重要である。また、自然災害が多発している我が国では新設・既設関わらずレジリエンスな構造を実現する必要がある。上述を踏まえ、鉄筋腐食や ASR といった力学的にコンクリート内部に膨張作用が生じる現象により劣化したコンクリートや RC 部材の静的・動的（衝撃）耐荷性能や破壊挙動を定量的に明らかにすることは、今後の防災・維持管理分野において重要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、内部膨張によるひび割れなどの微細損傷の荷重速度依存性を明らかにし【第一の目的】、有限要素法 (FEM) 等の数値解析手法を用いて微細損傷を考慮したコンクリートの高精細数値解析モデルを構築し【第二の目的】、最終的に、鉄筋腐食・ASR・それらの複合劣化が生じた RC 梁部材の静的及び衝撃荷重下の耐荷性能や破壊挙動を定量評価する【第三の目的】ことである。これらの目的を達成できれば、内部膨張起因で劣化した部材の状態を適切に把握でき、静的～衝撃まで幅広い荷重に対する構造物の残存耐荷性能を正確に評価できるようになるため、将来的には精度の高い余寿命予測や合理的で効率的な維持管理を通して、レジリエンスかつ高耐久な構造物の実現に寄与できる。

3. 研究の方法

研究の目的を達成するために実施した研究項目を以下に記す。

【項目①】：高度な計測技術を用いた内部膨張により生じた微細損傷（ひび割れ）の高精度観察  
反応性骨材を通常配合により多数配置した円柱供試体を製作し、それらを促進劣化することで微細損傷を有する供試体を骨材量や膨張程度をパラメータとして複数製作した。その一部に対して、X線撮影を実施し、さらに、着目切断面に対して蛍光樹脂を含浸させ、ブラックライトを照射した上で高精度カメラで撮影することで、画像分析を行い、内部ひび割れ密度の定量評価を行った。

【項目②】：内部膨張による微細損傷を評価可能な高精細解析手法の構築

非線形有限要素法 (FEM) を用いてコンクリートをモルタル母材、界面 (ITZ)、骨材の 3 フェーズから成るメソスケールモデルとして構築した。FEM についてのソルバーは汎用コードのものを用いた。

【項目③】：微細損傷を有するコンクリートの荷重速度依存性の解明

項目①の製作供試体を用いて、静的一軸圧縮試験の他、高速荷重変形装置を用いて荷重速度をパラメータとした圧縮試験を実施し、荷重速度依存性について検討した。また、項目②で構築したモデルを用い、妥当性確認後、実験の補間解析を実施した。それらを通して、膨張程度－表面ひび割れ－内部ひび割れ密度－ひずみ速度効果の関係を明らかにした。

【項目④】：鉄筋腐食・ASR・両者の複合劣化が生じた RC 梁部材の静的・衝撃荷重下の耐荷性能及び破壊挙動の把握

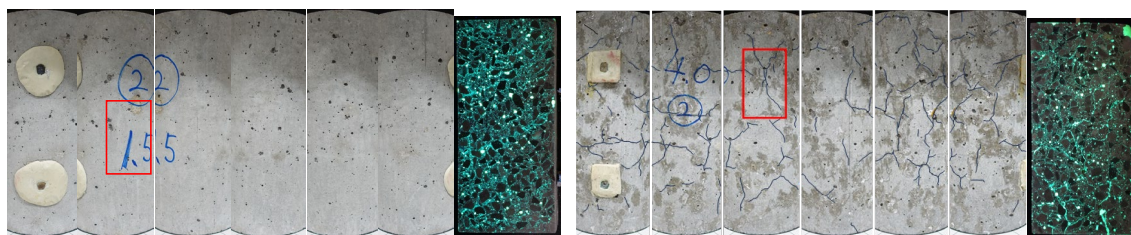
鉄筋腐食、ASR、両者の複合劣化を生じさせた RC 梁部材（曲げ破壊型）を膨張程度を複数変えて製作し、静的荷重試験ならびに落錘式衝撃試験を実施した。落錘式衝撃試験では、100kg の鋼製重錘を用い、衝突速度をパラメータとして実験を実施した。なお、複合劣化に関しては供試体の製作が間に合わず、実験を実施できなかった。

4. 研究成果

上記 4 つの項目に対して得られた主な成果を以下に記す。

(1) ASR 損傷を受けたコンクリートのひずみ速度効果に関する一考察

本検討では、総アルカリ量を 3 水準設定し ASR 損傷状態の異なる円柱供試体を製作したうえで、静的荷重実験および急速荷重実験を実施した。また、同程度 ASR が進行したコンクリートの内部ひび割れ損傷状態について、蛍光樹脂含浸法によりそのひび割れ密度、ひび割れ幅の観察を行った。これらの実験結果を用いて、ASR 内部ひび割れ損傷が動的力学特性へ及ぼす影響について、実験的に考察を行った。

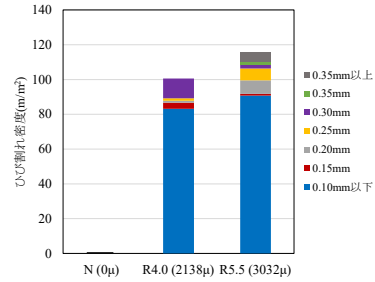


(a) N 膨張量 82 μ

(b) R4.0 膨張量 1751 μ



(c) R5.5 膨張量 3496 $\mu$



(d) 内部ひび割れ密度とひび割れ幅

図-1 3水準の促進膨張試験体（表面ひび割れ，内部ひび割れ（蛍光樹脂），ひび割れ密度）

図-1 に示すように，反応性粗骨材を用いた配合により円柱供試体を製作し，促進膨張して結果として得られた 3 水準の供試体の表面及び内部ひび割れ状況を示す。これらの供試体に対して，静的圧縮試験および急速圧縮試験を実施した結果をまとめたものを図-2 および図-3 に示す。荷重速度としては，静的の他，1cm/s，500cm/s の 3 水準とした。これらの結果より，まず，約 1800 $\mu$  (R4.0) または約 3000 $\mu$  (R5.5) の ASR 膨張を生じたコンクリートの圧縮強度に対するひずみ速度効果は健全時のコンクリートに比べると限定的である。よって，ASR 膨張による内部損傷が進展した場合，荷重速度の違いによるひずみ速度効果は鈍化する傾向にあることが確認できた。また，(2)約 1800 $\mu$  (R4.0) の ASR 膨張を生じたコンクリートには，弾性係数の動的倍率の変化は起こらない。一方で，約 3000 $\mu$  (R5.5) ではひずみ速度の増加による著しい弾性係数の動的倍率が確認された。

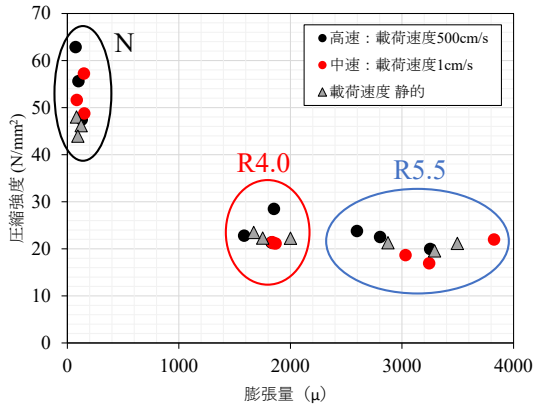


図-2 膨張量と圧縮強度の関係

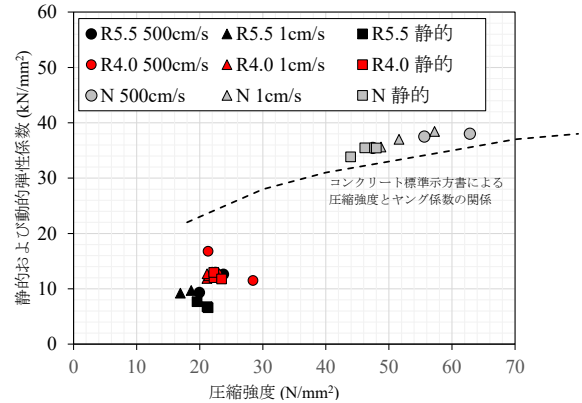
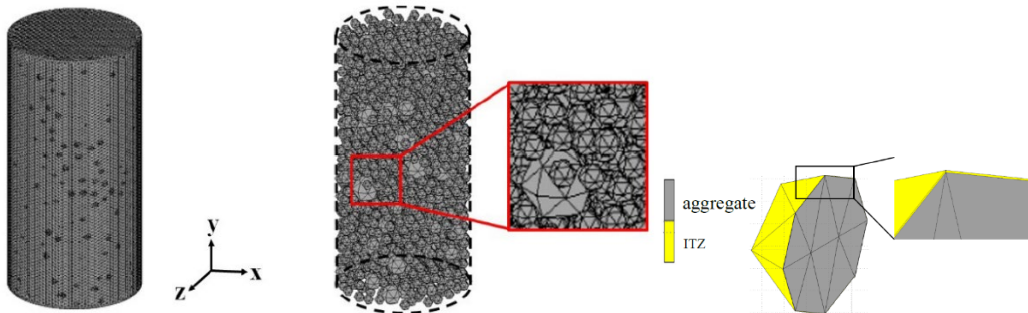


図-3 圧縮強度と静的および動的弾性係数の関係

## (2) コンクリートの FE ベースのメソスケールモデルの構築

モデルの検証・妥当性の確認を繰り返し，粗骨材，モルタル，ITZ の 3 相から成るコンクリートのメソスケールモデルを構築した。(図-4 参照) ITZ は界面要素でモデル化した。その結果，図-5 に示すように，健全な円柱供試体の圧縮特性はもちろん，ASR 膨張量，つまり，ひび割れなどの微細損傷による強度や剛性の低下を精度よく評価することに成功した。

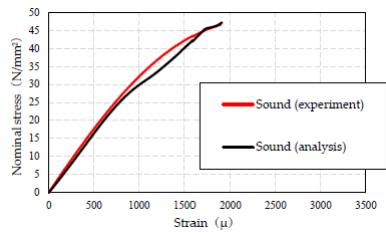


(a) メッシュ図 (全体像)

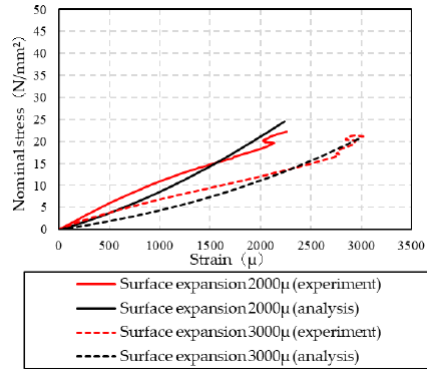
(b) メッシュ図 (粗骨材)

(c) ITZ

図-4 コンクリートのメソスケールモデル



(a) 健全な場合

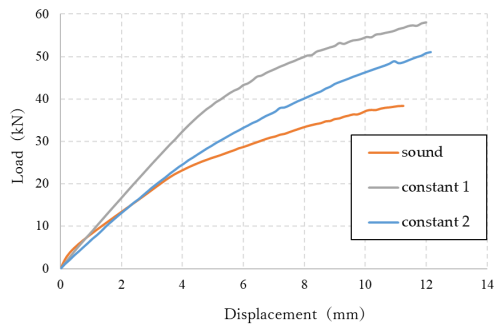


(b) ASR 膨張の場合

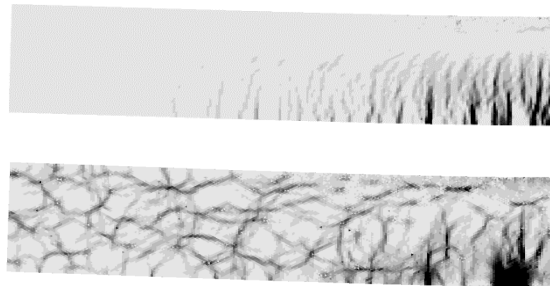
図-5 圧縮特性の評価

### (3) ASR 劣化した RC 梁の耐荷特性および破壊挙動

上記項目 (4) に対して、実験および解析を実施したが、ここでは、紙面の関係上、主に解析について述べる。実験に関しては、ASR 劣化により RC 梁の静的曲げ耐荷性能が低下すること、衝撃荷重下では、ASR 劣化によるひび割れの方法が破壊挙動に及ぼす影響が大きいことなどを明らかとした。解析においては、(2) で記したコンクリートのメソスケールモデルに加え、異形鉄筋を忠実に再現したメッシュを併用することで、RC 梁の FE モデルを構築した。また、水分移動・膨張・載荷の多段階で構成される解析手法を構築し、アルカリ量や水分流入方向と言った因子が ASR 劣化した RC 梁のひび割れ分布性状に及ぼす影響を明らかにするとともに、図-6 に示すように、耐荷性能や載荷後の破壊性状を明らかとした。



(a) 荷重-変位関係



(b) 破壊性状 (上: 健全, 下: ASR 劣化の一例)

図-6 ASR 劣化した RC 梁部材の耐荷性能に関する結果の一例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 玉井 宏樹、徳永 和也、園田 佳巨	4. 巻 69A
2. 論文標題 中立軸位置に緊張材を配したプレテンションPC梁の単発および繰り返し衝撃荷重下の動的挙動に関する実験的研究	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 構造工学論文集 A	6. 最初と最後の頁 1048 ~ 1057
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/structcivil.69A.1048	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 徳永 和也、梶原尚平、玉井 宏樹、園田 佳巨	4. 巻 44
2. 論文標題 衝撃荷重が作用するプレテンションPC 梁の耐荷性状に関する実験的研究	5. 発行年 2022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 949 ~ 954
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 Masuhiro Beppu, Koki Mori, Hiroyoshi Ichino and Yoichiro Muroga	4. 巻 13
2. 論文標題 Local failure resistance of polypropylene fiber reinforced concrete plates subjected to projectile impact	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Protective Structures	6. 最初と最後の頁 317 ~ 343
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/20414196221078607	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 山本大介, 川端雄一郎, 泉心太, 濱田秀則	4. 巻 44
2. 論文標題 一軸, 三軸持続圧縮応力を受けるコンクリートのASR進展に伴う変形挙動	5. 発行年 2022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 610 ~ 615
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 西村拓真, 玉井宏樹, 園田佳巨	4. 巻 第37号
2. 論文標題 骨材の吸水膨張がコンクリートのひび割れ性状に及ぼす影響に関する一考察	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木構造・材料論文集	6. 最初と最後の頁 153, 161
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 玉井宏樹, 古賀智史, 園田佳巨	4. 巻 第37巻
2. 論文標題 付着性能ならびに動的加振が断面修復部の剥落危険性に及ぼす影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木構造・材料論文集	6. 最初と最後の頁 139, 146
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 林亮太, 樫原弘貴, 添田政司	4. 巻 vol143
2. 論文標題 塩害環境下における実構造物の調査に基づくかぶりと鋼材腐食に与える関係性	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 コンクリート年次論文集	6. 最初と最後の頁 473, 478
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 中川潤哉, 樫原弘貴, 添田政司, 山田悠二	4. 巻 vol.43
2. 論文標題 早強セメントおよび高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの腐食抵抗性に関する基礎的研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 コンクリート年次論文集	6. 最初と最後の頁 155, 160
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 松澤遼, 伊東雅晴, 佐藤暁拓, 大西慶弘, 大田敏郎, 千馬敦哉, 別府万寿博	4. 巻 33
2. 論文標題 衝撃解析用非線形コンクリートモデルに関する検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 第13回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 1, 6
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 -

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 西村拓真, 玉井宏樹
2. 発表標題 骨材膨張起因のひび割れを有するRC 梁の曲げ耐荷性能に関する基礎的研究
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 岸川拓郎, 玉井宏樹
2. 発表標題 水分流入と周辺拘束が骨材膨張起因のコンクリートのひび割れ性状に及ぼす影響
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 小山拓途, 森広毅, 別府万寿博, 市野宏嘉, 原田耕司, 福井秀平
2. 発表標題 飛来物の繰返し衝突に対するポリウレタ塗布RC版の耐衝撃性に関する研究
3. 学会等名 土木学会関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤太治, 山本大介
2. 発表標題 荷重・拘束条件下におけるコンクリートのASR膨張の変形挙動
3. 学会等名 令和4年度土木学会西部支部研究発表会概要集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岸川 拓郎 ・ 西村 拓真 ・ 玉井 宏樹 ・ 園田 佳巨
2. 発表標題 相対湿度や周辺拘束条件が骨材膨張に伴うコンクリートのひび割れ状況に及ぼす影響に関する解析的検討
3. 学会等名 令和3年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西村 拓真、玉井 宏樹、園田 佳巨
2. 発表標題 骨材の吸水膨張によるコンクリートのひび割れ状況に関する解析的検討
3. 学会等名 第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 波多野文人, 山本大介, 福永隆之, 佐川康貴, 瀧田秀則
2. 発表標題 ASRによる膨張が接着系あと施工アンカーの引抜耐力に及ぼす影響に関する研究
3. 学会等名 第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021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	山本 大介  (Yamamoto Daisuke)  (40398095)	大分工業高等専門学校・都市・環境工学科・准教授   (57501)	
研究 分担者	櫛原 弘貴  (Hazehara Hirotaka)  (70580182)	福岡大学・工学部・准教授   (37111)	
研究 分担者	別府 万寿博  (Beppu Masuhiro)  (90532797)	防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、 電気情報学群及びシステム工学群)・システム工学群・教授   (82723)	

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