

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01472

研究課題名（和文）既存ひび割れプロファイルによる鉄筋コンクリート部材の構造性能劣化の評価

研究課題名（英文）Evaluation of deteriorated structural performance of RC members by existing crack profiles

研究代表者

金久保 利之（Kanakubo, Toshiyuki）

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：90261784

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,200,000円

研究成果の概要（和文）：既存ひび割れを有するコンクリートおよび鉄筋コンクリート（RC）部材のひび割れ発生模擬実験、圧縮実験、局所付着実験、一軸引張付着実験、梁付着実験、逆対称曲げせん断実験を行い、構造性能劣化の評価のための各種構成則の構築およびRC部材の構造性能の把握を行った。既存ひび割れは、コンクリートに埋設したパイプや孔に破碎剤を充填する方法、内部膨張圧によって生じるひび割れをプラスチック板埋設によって模擬する方法によった。既存ひび割れの方向、長さ、ひび割れ幅により、各種構成則の変化を評価する方法、それによって影響を受ける構造性能の変化を評価、検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

1981年の新耐震基準前に建設された既存不適格建物に対して耐震診断が多数行われてきており、劣化の指標として、ひび割れやコンクリートの中性化等をポイント的に積み上げていった経年指標が用いられるが、その力学的意味合いは等しい。RC部材の剛性や耐力、応答履歴等の力学性能は、本来、コンクリートと鉄筋の構成則およびそれらの相互作用で決定されるものであり、経年劣化などで生じる性能の変化も、それらの変化で説明され得るものと考えられる。本研究の成果により、既存ひび割れのプロファイル化によってRC部材の構造性能の劣化の程度を力学的意味合いを保持しつつ定量的に評価することができるようになる。

研究成果の概要（英文）：The experiments for cracked concrete induced by rebar corrosion and reinforced concrete (RC) members with existing cracks, as well as compression tests, pullout bond tests, uniaxial tensile bond tests, beam-type bond tests, and anti-symmetrical bending shear tests were conducted to develop various constitutive laws for evaluating deterioration of structural performance and to grasp those of RC members. Existing cracks were simulated by filling pipes or holes buried in the concrete with expansion agent, and cracks caused by internal expansion pressure were simulated by burying plastic plates. The methods for evaluating the changes in various constitutive laws based on the direction, length, and width of existing cracks, and the deterioration in structural performance of RC members influenced by these factors are evaluated and verified.

研究分野：建築構造材料

キーワード：鉄筋コンクリート ひび割れ 構造性能 性能劣化 構成則 腐食

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

鉄筋コンクリート (RC) 構造において、鉄筋腐食によるひび割れは鉄筋に沿って発生し、逆対称曲げモーメント下における付着割裂破壊のような様相を呈する。これは、RC 部材の付着性状を著しく低下させると考えられる。1981 年の新耐震基準前に建設された既存不適格建物に対して耐震診断が多数行われてきており、劣化の指標として、ひび割れやコンクリートの中酸化等をポイント的に積み上げていった経年指標が用いられるが、その力学的意味合いはないに等しい。RC 部材の剛性や耐力、地震荷重が作用したときの応答履歴等の力学性能は、本来、コンクリートと鉄筋の構成則およびそれらの相互作用で決定されるものであり、経年劣化などで生じる性能の変化も、それらの変化で説明され得るものと考えられる。RC 部材の既存ひび割れが、RC 部材の構造性能に及ぼす影響とはどのようなものなのかを、材料構成則および相互作用 (付着構成則) の観点から見定めることが必要である。

### 2. 研究の目的

RC 建物の外観から得られるひび割れ状況をプロフィール化し、既存ひび割れプロフィールを取り入れた RC 部材の構造性能の劣化の評価を行うことを目的とする。評価は圧縮、付着および曲げせん断性状に着目し、材料構成則および付着構成則に既存ひび割れプロフィールを陽に取り込む各構成則を提案し、RC 部材の構造性能劣化の評価を行う。本研究では、部材直交方向、軸方向および逆対称に生じる既存ひび割れに着目した。また、高度経済成長期に建造された建物を意識し、対象とするコンクリート強度は 15MPa ~ 21MPa とした。

### 3. 研究の方法

既存ひび割れを模擬したひび割れ (以降、既存ひび割れと称する) をあらかじめ試験体に導入し、加力実験を行って試験体の性状を把握し評価する手法を主とした。既存ひび割れの導入方法は次の 3 種類である。

#### プラスチック板やシートを用いる方法 (PPCS : Plastic Plate Crack Simulation)

コンクリート打設前の試験体の鉄筋や型枠にプラスチック板やシートを接着し、その部分のコンクリートの連続性を阻害して既存ひび割れを模擬する方法である。既存ひび割れの方向や長さを明確にした試験体を作製することが可能であり、本研究では、ポリプロピレンシートやプラスチック板を用いた。一部の試験体では発泡ポリスチレンを用いてかぶりの欠損を模擬した。

#### パイプに破砕剤を充填する方法 (EAFP : Expansion Agent Filled Pipe)

あらかじめコンクリートに埋設したアルミパイプ内に、岩石やコンクリートの破壊に用いられる破砕剤を充填し、内部膨張圧によりひび割れを発生させる方法である。鉄筋腐食における腐食生成物の内部圧により生じる実際のひび割れと同様のメカニズムで既存ひび割れを生じさせることができる。また、破砕剤充填後の経過時間によりひび割れの幅をコントロールすることができ、比較的短時間で実験を遂行することができる。

#### コンクリート孔に破砕剤を充填する方法 (EAFH : Expansion Agent Filled Hole)

あらかじめコンクリートに孔を設けておき、そこに破砕剤を充填して内部膨張圧によりひび割れを発生させる方法である。アルミパイプがないため、実際の破砕剤と同様に最終的にコンクリートを膨張圧で破壊させることが可能で、本研究では、内部膨張によるひび割れ (コンクリート内部を含む) の発生状況の観察に用いた。

### 4. 研究成果

#### コンクリートの圧縮構成則

コンクリートの圧縮構成則を評価するために、軸方向ひび割れに着目し、円柱試験体を用いて EAFP によって既存ひび割れを導入したコンクリートの圧縮実験を行った。試験体形状を図 1 に示す。実験因子は試験

体の寸法 (直径 100mm、150mm、200mm) および既存ひび割れ幅 (0mm ~ 0.9mm) である。圧縮強度比 (ひび割れのない試験体の圧縮強度に対する比) はひび割れ幅を断面径で除した指標で評価可能である (図 2)。なお、軟化勾配に関してはひび割れ幅による明瞭な差異は認められなかった。

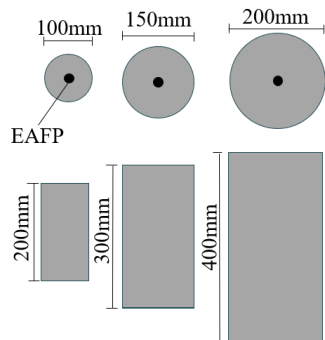


図 1 コンクリート圧縮実験試験体 (EAFP)

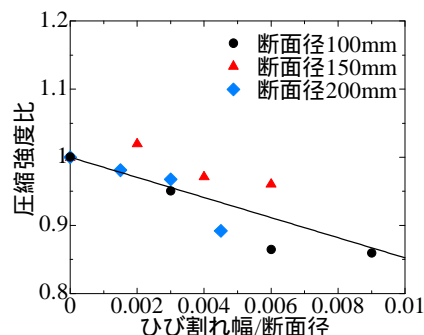


図 2 圧縮強度 - ひび割れ幅関係

直交方向の既存ひび割れの長さや角度に着目し、角柱供試体を用いてPPCSによって既存ひび割れを導入したコンクリートの圧縮実験を行った。試験体形状を図3に示す。実験因子は、ひび割れ幅（プラスチック板の厚さ）、ひび割れの長さ（30mm～90mm）および角度（0°～30°）である。ひび割れ角度が0°および15°ではほとんど圧縮強度は低下せず、角度が30°では低下した。30°の場合、ひび割れ長さが大きいほど圧縮強度が低下した（図4）。また、ひび割れ長さが90mmでは、軟化勾配が急になった。

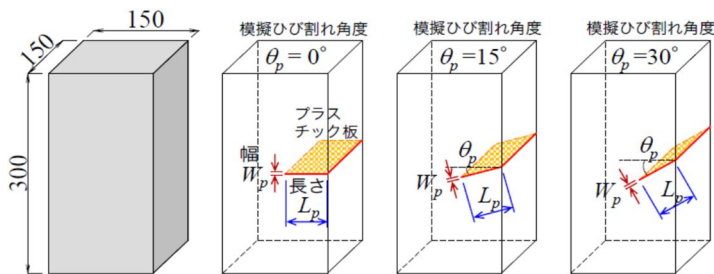


図3 コンクリート圧縮実験試験体 (PPCS)

以上より、コンクリートの圧縮強度はひび割れの幅、角度、長さに影響を受けるが、圧縮応力 - 歪関係には、断面の半分を貫通するほどの大きなひび割れでなければ、通常のコンクリートと同一のモデルが使用できると考えられた。

#### 鉄筋とコンクリートの付着構成則

鉄筋とコンクリートの付着構成則を評価するために、軸方向ひび割れに着目し、EAFPによって既存ひび割れを導入したコンクリートと鉄筋の局所付着実験を行った。試験体形状を図5に示す。実験因子は既存ひび割れ幅（0mm～0.95mm）である。付着強度比（ひび割れのない試験体の付着強度に対する比）とひび割れ幅に明瞭な関係が見られ、ひび割れ幅が1mm程度になると付着強度は30%程度に低下する（図6）。付着応力 - すべり関係をPopovicsモデルで評価した結果、軟化勾配を表す係数はひび割れ幅が大きくなるほど低下し（図7）これは逆に付着強度以降の付着応力低下が緩やかになっていることを示す。したがって、RC部材の変形当初では性能が劣化することが考えられるが、変形が大きくなると必ずしも劣化するとは限らないことが想定された。また、軸方向に既存ひび割れを有するコンクリートと鉄筋の付着構成則を得た。

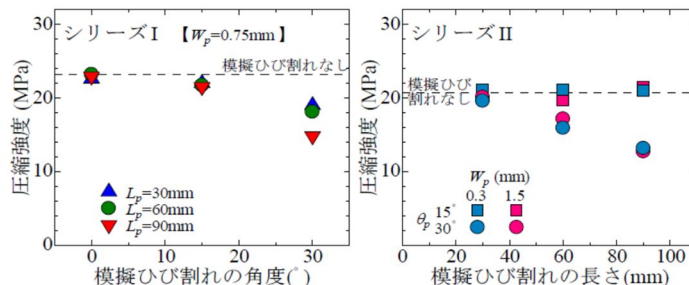


図4 圧縮強度 - ひび割れ角度、長さの関係

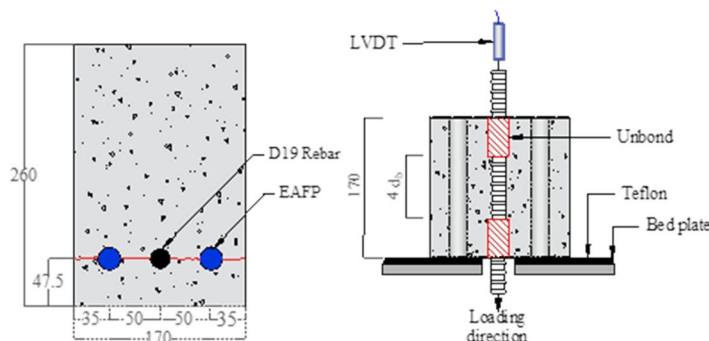


図5 鉄筋とコンクリートの局所付着実験試験体 (EAFP)

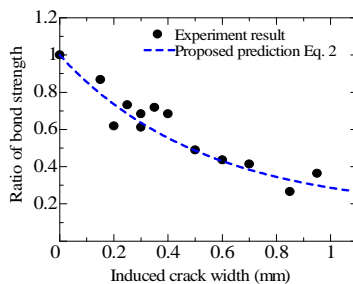


図6 付着強度とひび割れ幅

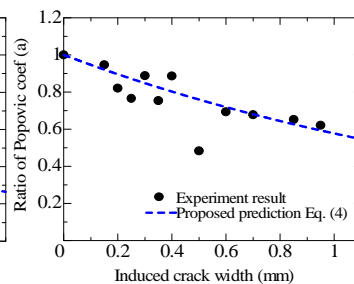


図7 軟化勾配係数

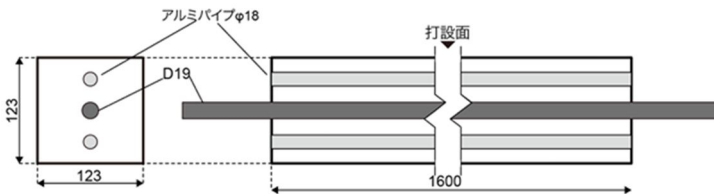


図8 両引き付着実験試験体 (EAFP)

RC部材中での上記の挙動を確認するために、EAFPによって既存ひび割れを導入したプリズム試験体の両引き付着実験を行った。試験体形状を図8に示す。実験因子は既存ひび割れ幅（0mm～2mm）である。引張荷重 - 全体変形関係から、各

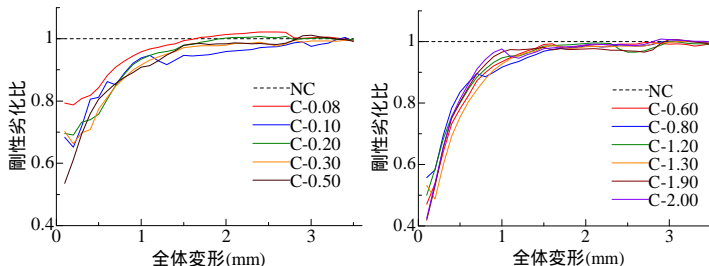


図9 剛性劣化比の推移



変形における剛性を算出し、ひび割れのない試験体と比較（剛性劣化比）した結果、全体変形が1mm程度までは明瞭な剛性低下が確認できるが、それ以降の変形では剛性に大きな変化はない（図9）。また、局所付着実験から得た付着構成則を用いて両引き付着解析を行った結果、実験結果と解析結果によい適合性を得た（図10）。

より実部材に近い状況での付着性状を確認するために、梁試験体形式の付着実験を行った。既存ひび割れはPPCSによって導入し、あらかじめ別試験体でEAFHを実施して、既存ひび割れの位置や角度を決定した。試験体形状を図11に示す。

実験因子は、ひび割れの位置、長さおよび角度（図11参照）である。既存ひび割れを貫通して付着割裂ひび割れが進展する様子が確認され、既存ひび割れによる明瞭な付着強度低下が確認された（図12）。付着強度を評価するため、図13に示す付着割裂線を想定し付着強度を評価した結果、実験結果とよい適合を得た（図14）。

### RC部材の曲げせん断性状

既存ひび割れがRC部材の曲げせん断性状に及ぼす影響を検討するため、梁および柱試験体の曲げせん断実験を行った。なお、着目する既存ひび割れは、その影響度が大きい軸方向ひび割れとした。

梁試験体を図15に示す。既存ひび割れはEAFPによって導入し、実験因子はひび割れ幅(0mm~1.1mm)である。部材角1/400~1/15の正負漸増繰返し曲げせん断加力を行った。破壊状況の

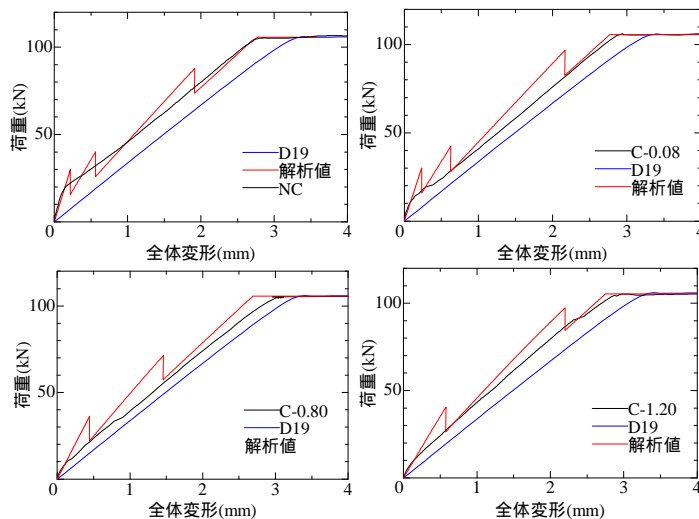


図10 両引き付着実験の解析例

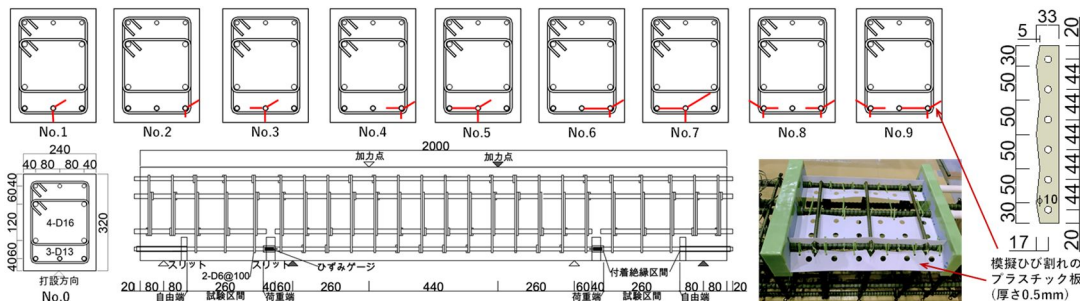


図11 梁形式の付着実験試験体（PPCS）

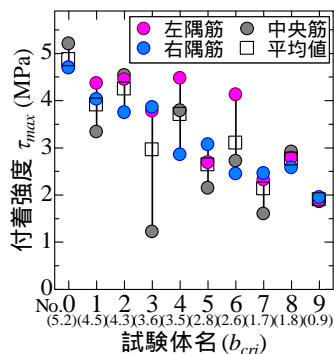


図12 付着強度

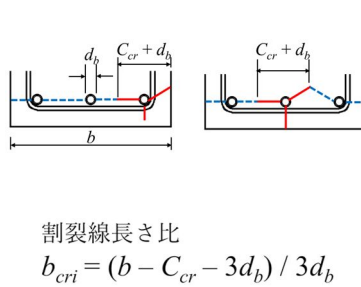


図13 割裂線長さの算定

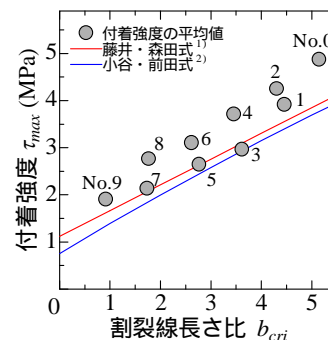


図14 付着強度の評価

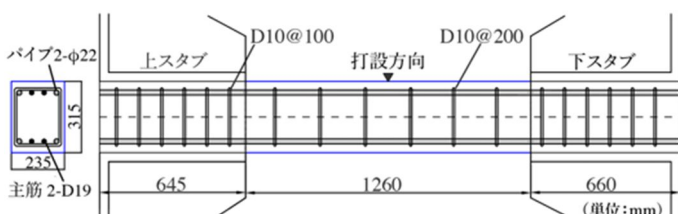


図15 梁試験体（EAFP）

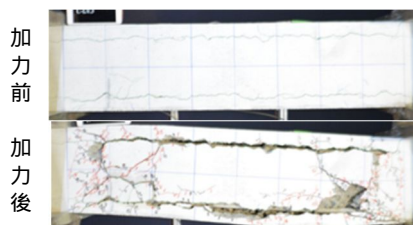


図16 破壊状況（幅1.1mm）

一例を図 16 に示す。既存ひび割れが拡幅して明瞭な付着破壊を呈した。包絡線を比較すると(図 17)、既存ひび割れ幅の増加にしたがって初期剛性の低下がみられるものの、大変形時の耐力低下はなく、付着構成則の検討時に確認された性状が部材の性状でも現れた。

柱試験体を図 18 に示す。既存ひび割れはPPCSによって導入し、あらかじめ別試験体でEAFHを実施して、断面内の既存ひび割れの位置や角度を決定した。EAFHにより観察されたひび割れの例を図 19 に示す。破碎剤充填が中主筋の位置の場合には、かぶりコンクリート方向およびその反対方向に斜めに発生する傾向がみられた。破碎剤充填が隅主筋の位置の場合には、コーナースプリットのようなひび割れが発生した。破碎剤の充填位置が隣接する場合は、隣接する破碎剤充填位置に向かってひび割れが進展し、主筋間をつなぐようにひび割れが発生した。柱試験体の実験因子は、ひび割れの位置(片面・両面、柱頭・柱中)である(図 18 参照)。部材角 1/400 ~ 1/20 の正負漸増繰返し曲げせん断加力を行った。破壊状況の一例を図 20 に示す。最大荷重は既存ひび割れの量に応じて低下した(図 21)が、既存ひび割れが柱中の場合、破壊形式がせん断破壊から付着割裂破壊に遷移しやすくなり、靱性能においてむしろ安全側の影響を及ぼした(図 22)。

茨城県内の公立学校 RC 造校舎 1,523 棟の 2011 年当時の耐震診断資料のデータベースを整理し、耐震改修の有無、経年指標、構造耐震指標( $I_s$ )の分布、および 2023 年度における継続利用状況を調査した。その結果、34 棟が解体され、その中での経年指標の最小値は 0.75、 $I_s$  の最小値および最大値はそれぞれ 0.18、0.84 であった。経年指標と解体には何ら相関は見られず、あらためて、力学的意味合いを持たせる劣化程度の評価方法の必要性が明らかとなった。

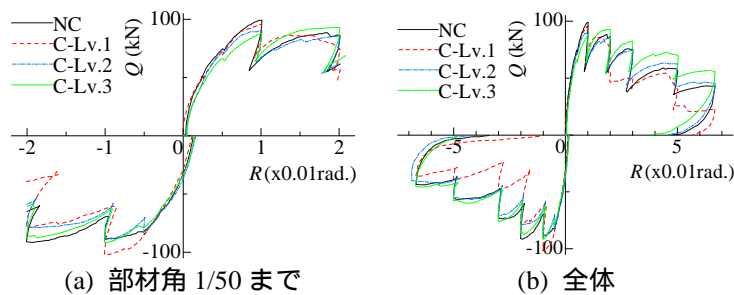


図 17 梁試験体の包絡線の比較

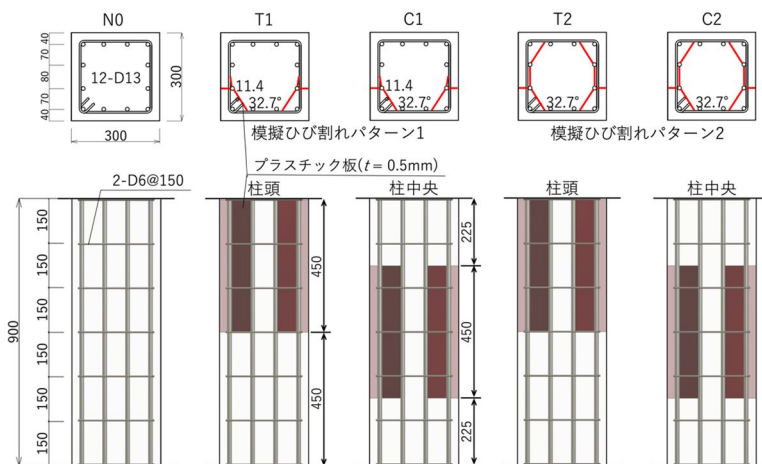


図 18 柱試験体 (PPCS)

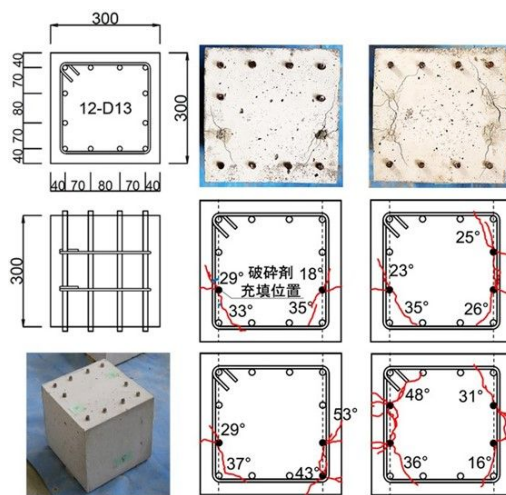


図 19 EAFH によるひび割れの例

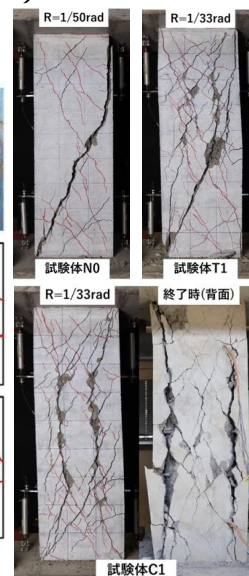


図 20 破壊状況

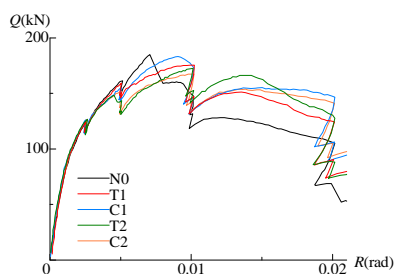


図 21 包絡線の比較 (1/50 まで)

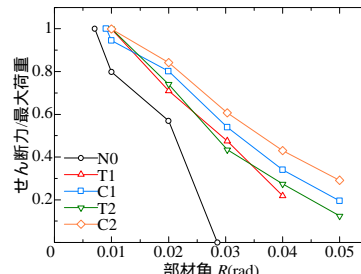


図 22 耐力低下率

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Syll Amadou Sakhir, Shimokobe Hiroki, Kanakubo Toshiyuki	4. 巻 20
2. 論文標題 Effect of local bond behavior degradation on tension stiffness in reinforced concrete with preexisting longitudinal cracks	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Case Studies in Construction Materials	6. 最初と最後の頁 e03017
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cscm.2024.e03017	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 栗原朋久, 三谷龍世, 金久保利之, Castro Juan Jose	4. 巻 46
2. 論文標題 破砕剤充填パイプによるひび割れ模擬コンクリートの圧縮性状	5. 発行年 2024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 相沢慧, 八十島章	4. 巻 46
2. 論文標題 プラスチック板で鉄筋腐食ひび割れを模擬したRC柱の構造性能	5. 発行年 2024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 Syll Amadou Sakhir, Kanakubo Toshiyuki	4. 巻 17
2. 論文標題 Residual bond strength in reinforced concrete cracked by expansion agent filled pipe simulating rebar corrosion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Case Studies in Construction Materials	6. 最初と最後の頁 e01565
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cscm.2022.e01565	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 Syll Amadou Sakhir, Kanakubo Toshiyuki	4. 巻 15
2. 論文標題 Impact of Corrosion on the Bond Strength between Concrete and Rebar: A Systematic Review	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Materials	6. 最初と最後の頁 7016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/ma15197016	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 三谷龍世, Syll Amadou Sakhir, 金久保利之	4. 巻 45
2. 論文標題 破砕剤充填パイプ導入による腐食ひび割れ模擬RC部材の繰返し局所付着挙動	5. 発行年 2023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 853-858
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 下河邊大貴, 藤原海, Syll Amadou Sakhir, 金久保利之	4. 巻 44
2. 論文標題 鉄筋腐食による付着劣化を模擬したRC部材の繰返し曲げせん断性能	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 997-1002
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 八十島章, 井ノ口元暉	4. 巻 44
2. 論文標題 かぶりコンクリートのひび割れ・剝離を模擬したRC柱のせん断性能	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 973-978
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8件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Kanakubo Toshiyuki, Syll Amadou Sakhir
2. 発表標題 Bond Degradation in RC Members with Induced Cracks due to Rebar Corrosion
3. 学会等名 International Symposium on Life Cycle Maintenance of Concrete Infrastructure (LCMC12023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三谷龍世, Syll Amadou Sakhir, 金久保利之
2. 発表標題 腐食ひび割れコンクリートにおける異形鉄筋の付着応力 - すべり量関係のモデル化
3. 学会等名 土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Syll Amadou Sakhir, 三谷龍世, Castro Juan Jose, 金久保利之
2. 発表標題 破砕剤充填パイプ(EAFP)による腐食模擬ひび割れコンクリートの圧縮性状
3. 学会等名 土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 八十島章, 相沢慧
2. 発表標題 鉄筋腐食によるひび割れを模擬したコンクリートと鉄筋の付着特性
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 相沢慧, 八十島章
2. 発表標題 プラスチック板により鉄筋腐食ひび割れを模擬したRC柱のせん断性能
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 下河邊大貴, 藤原海, Syll Amadou Sakhir, 金久保利之
2. 発表標題 鉄筋腐食による腐食ひび割れを模擬したRC柱部材中の主鉄筋の付着応力の検討
3. 学会等名 土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Syll Amadou Sakhir, 金久保利之
2. 発表標題 Bond Strength Degradation due to Corrosion Cracking in Concrete Specimens without Stirrups
3. 学会等名 土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 八十島章
2. 発表標題 模擬ひび割れを有するコンクリートの圧縮特性
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

劣化したRCの構造性能 <a href="https://www.kz.tsukuba.ac.jp/~kanakubo/2cor.htm">https://www.kz.tsukuba.ac.jp/~kanakubo/2cor.htm</a> Structural Performance of Corroded RC <a href="https://www.kz.tsukuba.ac.jp/~kanakubo/2core.htm">https://www.kz.tsukuba.ac.jp/~kanakubo/2core.htm</a>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

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	カストロ ホワンホセ  (Castro Juan Jose)  (70593391)	琉球大学・工学部・教授   (18001)	
研究 分 担 者	八十島 章  (Yasojima Akira)  (80437574)	筑波大学・システム情報系・准教授   (12102)	

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