

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：12102

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18917

研究課題名（和文）RC造建物の劣化度合いを構造性能に反映させた耐久性性能指数の提案

研究課題名（英文）A Proposal of Durability Index for Reinforced Concrete Buildings Considering Deterioration of Structural Performance

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） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、鉄筋コンクリート（RC）造建物の劣化度合いを的確に評価した構造性能指標を提案することを目標とし、(a)耐震診断データベースの構築、(b)変状したRC造建物の材料、要素、および部材レベルでの力学性能の確認を主たる研究内容とした。(a)については、茨城県内の学校RC造建物878棟について、コンクリート強度、中性化深さ、経年指標を含む耐震診断データベースを構築した。(b)については、沖縄県内の実構造物から採取した腐食鉄筋の座屈性状の把握、腐食ひび割れを模擬するための破砕剤充填パイプを利用した中心圧縮実験、付着実験、部材実験を行い、腐食ひび割れが構造性能に及ぼす影響を把握した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

沖縄県において、建築解体現場から採取した鉄筋（D10、D13、D19）の中には、平均断面積減少率で20%、最小断面積減少率で50%を超えるものがみられた。日本において高度経済成長期に造られた建物が建造後50年以上経過していく中で、長期供用に向けた貴重な資料が得られていると考えられる。劣化度合いを構造性能指標に適切に反映させるためには、要素や部材レベルにおける影響度を精確に評価する必要があり、破砕剤充填パイプを利用した部材実験の結果は、実験実施の簡易性も含め、構造性能評価の可能性を示唆している。今後の研究の方向性を見いだすとともに、さらなるデータの蓄積が有用であることを示している。

研究成果の概要（英文）：The objectives of this research are; (a) to construct a database of results of seismic inspections for reinforced concrete (RC) buildings, and (b) to investigate the mechanical performance of deteriorated RC structures in the viewpoints of materials, partial elements, and structural members characteristics. Concerning the item (a), the database including concrete strength, carbonation depth in concrete, and the aging index has been built for 878 RC school buildings in Ibaraki prefecture from the seismic inspection results. Concerning the item (b), buckling tests on corroded reinforcing bars sampled from actual deteriorated buildings in Okinawa prefecture, and compression tests, pullout bond tests, anti-symmetrical loading tests on cracking-simulated specimens by expansion agent filled pipes have been performed. The cracks along the reinforcing bars simulating the expansion by corrosion products were found to influence the bond strength and stiffness of RC structural members.

研究分野：建築構造

キーワード：建築構造 鉄筋コンクリート 経年劣化 腐食 ひび割れ 既存建物 座屈 破砕剤

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

1981年のいわゆる新耐震設計法以降に建設された建物も含めて、高度経済成長期以降に数多く建設された鉄筋コンクリート(RC)造建物は、建設後40~50年以上が経過しており、今後、経年劣化による耐震性能の低下が顕在化することが危惧される。土木構造物では、近年、種々の性能をすべて経時変化と関連付けて評価するライフサイクルマネジメント(LCM)の重要性が叫ばれており、RC造建物においても、維持管理を含めたLCMが求められていくものと考えられる。

RC造建物に対する現行の耐震診断基準では、建物の劣化の度合いを耐震指標に反映させる「経年指標」が導入されている。ただし同基準において、構造耐震指標に直接乗ずる係数としての、各項目の数値の根拠は曖昧である。例えば、「変質・老朽化」の項目に「鉄筋の腐食」が挙げられているが、鉛直部材の1/3以上に鉄筋腐食が認められても減点数は0.15であり、経年指標による低減は高々0.85である。今後、RC造建物における経年劣化を的確に評価し、メカニズム的知見に基づいた性能評価指標を用いて、維持管理マネジメントを行っていく必要があると考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究の最終的な目的は、新耐震設計法以降、およびそれ以前の既存不適格建物も含めたRC造建物に対する、劣化度合いを的確に評価した新たな構造性能指標を提案することである。材料およびRC要素レベルでの劣化を模擬した力学性能の評価法や、鉄筋腐食の程度や部位により部材の強度および変形を評価して、それを構造物全体で考慮し、健全(初期)状態と比較する指標(耐久性能指数)に関する知見を基に、実在建物の耐震診断資料を活用して、劣化度合いを的確に評価した新たな構造性能指標を提案する。

そのためには、(a)既存建物の耐震診断におけるコンクリートの中性化および鉄筋腐食に関する資料の精査と、診断に用いられた経年指標および構造耐震指標データベースの構築、(b)変状したRC造建物の材料、要素、および部材レベルでの力学性能の確認が必要である。

### 3. 研究の方法

上記(a)に関しては、茨城県内の公立学校RC造建物の耐震診断データベース<sup>1)</sup>における経年指標の統計データを検討する。対象RC造建物2,229棟のうち、耐震診断時の情報があり、コンクリートコア抜き強度、中性化試験結果が把握できた878棟について整理した。(b)に関しては、まず、変状したRC造建物の実態を把握するために、(b1)沖縄県において劣化が進行し解体される建物の解体現場から実際の腐食鉄筋を採取して腐食の状況を確認するとともに、腐食による断面減少の状況および圧縮試験による座屈強度の確認を行った。また、従来、変状したRC部材の実験は、暴露試験や電食試験体を用いられているが、実験実施に長い期間を要することや、変状の量や位置をコントロールすることが難しいため、(b2)鉄筋腐食生成物の膨張によるコンクリートのひび割れを簡易に模擬するための破碎剤充填パイプを利用したRC要素および部材の加力実験を行った。

### 4. 研究成果

#### (a) 耐震診断に用いられた経年指標および構造耐震指標データベースの構築

コンクリートコア抜き強度および中性化試験結果が把握できた878棟の耐震診断結果を、建築年により、第一年代：建築年が1971年以前の建物、第二年代：建築年が1972~1981年および1982年以降でも耐震診断が行われた建物、と分類した。

経年指標の分布を図1に示す。経年指標(T)の全棟平均値は0.958であり、 $T \geq 0.96$ が多く、65.7%(577棟)を占めている。中性化深さの平均値および最大値、コンクリートコア抜き圧縮強度平均値、構造耐震指標 $I_s$ との関係を図2に示す。 $I_s$ は、桁行方向(X方向)の値とした。第一年代と第二年代の経年指標の分布に特筆すべき差異はみられず、建築年、診断時経過年数、中性化深さ、圧縮強度平均値ともに明瞭な傾向はみられなかった。経年指標の下限值と構造耐震指標は右上がりの傾向があり、これは、構造耐震指標は経年指標との積で求められるため当然であるとも言えるが、構造耐震指標が1以下の範囲でみると、あまり明瞭でない。

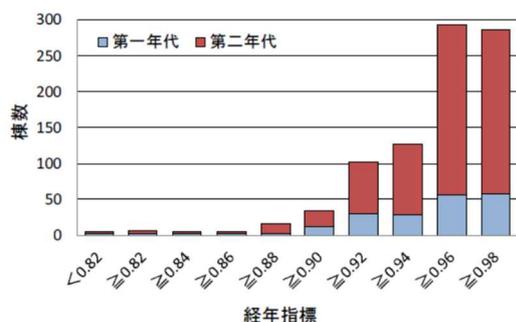


図1 経年指標の分布

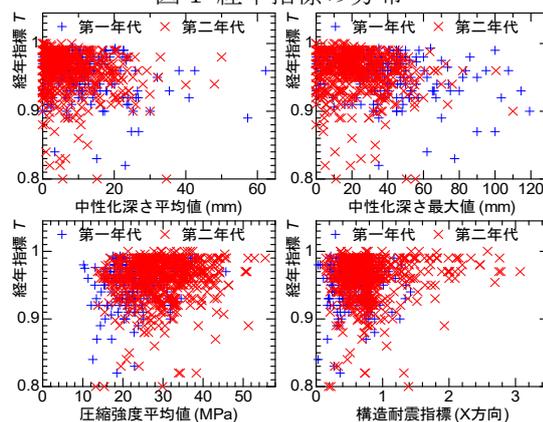


図2 経年指標と他の因子の関係

(b1) 実構造物における腐食鉄筋の確認と座屈試験

沖縄県内の築約 40 年の RC 造建物から D10 腐食鉄筋を、同築 57 年の建物から D13 腐食鉄筋を、同築 46 年の建物の柱部材および梁部材から D19 腐食鉄筋を採取した。D19 腐食鉄筋を採取した建物を図 3 に、採取した鉄筋の例を図 4 に示す。除錆後、ノギスで計測した軸方向断面積分布の例を図 5 に示す。図中の実線は計測結果、破線は基準断面積を表している。リブを有している 2 方向からの腐食の進行が見られ、中央付近に断面が残存する形状を有していた。平均断面積減少率は 22.6%、最小断面積減少率は 61.9%であった。

文献 2)の方法に準じ、これらの腐食鉄筋の座屈試験を行った。比較的健全な試験体、最小断面積減少率が 20%以下の試験体では、中央が腹となるモードで座屈が見られた。最小断面積減少率が 20%以上の試験体では、最小断面積の位置が座屈する位置に影響を与える傾向にあった。最小断面積の位置が端部に近く、また、その区間内の残存断面積と座屈した区間内の残存断面積との差異が大きい場合、短い区間で座屈変形すると考えられる。

試験区間 16d 試験体の座屈荷重比（腐食鉄筋の座屈強度と健全と見なした鉄筋の座屈強度の比）と最小断面積減少率の関係を図 6 に示す。○は、前述の D10 腐食鉄筋の実験結果を示す。座屈荷重比は最小断面積減少率よりも小さくなる傾向にあり、断面腐食による圧縮試験時の偏心荷重の影響と考えられ、切削鉄筋の実験結果<sup>2)</sup>と同様の結果が得られた。

(b2) 破砕剤充填パイプを利用した RC 要素および部材の加力実験

変状した RC 部材の実験は、暴露試験や電気試験体を用いられているが、実験実施に長い期間を要することや、変状の量や位置をコントロールすることが難しく、定性的な傾向の把握に留まることが多い。既往の研究<sup>3)</sup>では、鉄筋の腐食膨張の模擬に静的破砕剤を用いた検討が行われ、破砕剤の膨張に伴って鉄筋軸に沿ったひび割れが進展し、コンクリートの拘束圧が低下することが報告されている。本研究では、コンクリートに埋設したアルミニウムパイプに静的破砕剤を充填し、膨張圧によって腐食生成物と同様にコンクリートにひび割れを発生させる方法（破砕剤充填パイプ）を試みた。250mm 角断面の RC 柱に、4 本または 8 本の外径 18mm または 22mm のパイプを埋設し、破砕剤充填後の経過時間とひび割れの発生状況を確認した（図 7）。いずれの試験体においても、破砕剤の充填によってパイプに沿ったひび割れが生じた。経過時間が大きい試験体ほどひび割れ幅が大きくなり、ひび割れ本数も増した。さらに、パイプの外径が大きいとひび割れ幅が大きくなる傾向がみられた。

中心圧縮実験の試験体の例を図 8 に示す。加力前のひび割れ状況と中心圧縮時の最大応力の間に明瞭な関係は確認できなかった。加力前ひび割れ幅が 0.3mm 以上のひび割れの長さを用いて既往の研究<sup>4)</sup>で提案された式で



図 3 D19 腐食鉄筋を採取した建物



図 4 採取した腐食鉄筋の例 (D19)

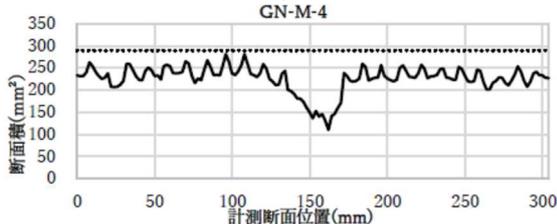


図 5 軸方向断面積分布の例

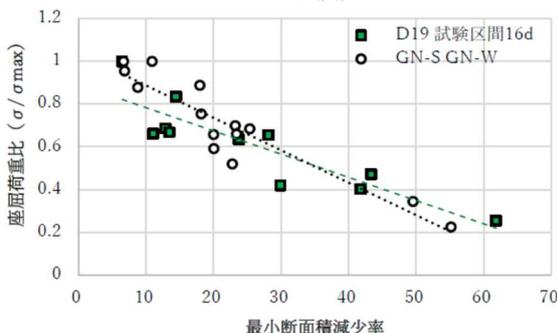


図 6 座屈強度と最小断面積減少率の関係

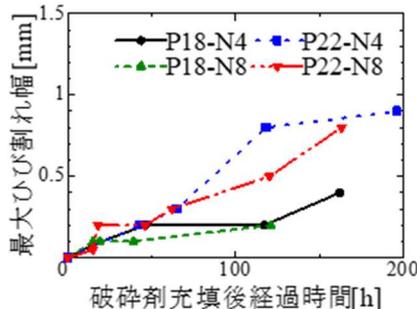
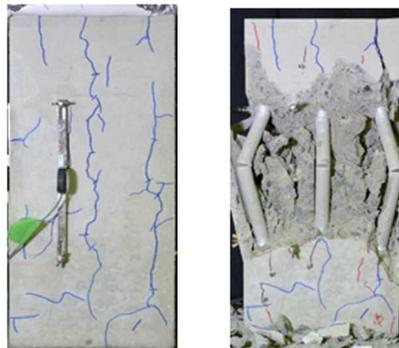


図 7 破砕剤充填後の経過時間とひび割れ幅



破砕剤によるひび割れ 加力終了後  
図 8 中心圧縮実験試験体

コンクリートの軟化勾配を示す形状係数を求めると、概ね実験結果を評価できた。

腐食生成物によって鉄筋軸に沿ったひび割れが進展すると、コンクリートの拘束圧が低下すると考えられるため、鉄筋とコンクリートの付着性状に大きな影響を及ぼすことが予想される。付着性状の劣化を実験的に把握するため、破砕剤を充填するパイプを切削加工して異形鉄筋を模擬し(図9)、破砕剤充填パイプの引抜き実験を行った。試験体は、図10左図に示すように、断面260mm角、厚さ82mmのコンクリートブロックで、破砕剤を充填するパイプを1本埋設してある。破砕剤充填後ひび割れの性状を確認し、図10右図のように引抜き実験を行った。

破砕剤充填後の試験体のひび割れ性状の例を図11に示す。破砕剤充填パイプの膨張圧により、試験体によって、幅0.15mm~3.0mmのひび割れが発生した。引抜き実験終了前後の試験体の例を図12に示す。破砕剤充填パイプによって生じたひび割れとは異なるひび割れが生じる場合(上図)と、前者のひび割れが拡幅して破壊する場合(下図)がみられた。通常のRCの付着割裂強度計算値<sup>5)</sup>で基準化した付着強度と、破砕剤充填パイプによるひび割れ幅との関係を図13に示す。存在ひび割れによる付着強度の低下が顕著であり、ひび割れ幅が1mm程度で付着強度は0.6程度に低下した。

主筋とコンクリートの付着強度が劣化すると、逆対称モーメント荷重を受ける部材では耐力が低下し、靱性能の乏しい性状を示すようになることが予想される。破砕剤充填パイプによって生じるひび割れが、逆対称モーメント下での繰返し履歴性状に及ぼす影響を把握するため、パイプを埋設した梁試験体で実験を行った。試験体の配筋を図14に示す。試験体の断面は220mm×420mmで、4隅に外径22mmのパイプを埋設し、その内側に異形鉄筋2-D19を配筋した。加力実験に先立ち、断面内でのひび割れ発生状況を確認するために、同一断面、配筋の試験体で破砕剤を充填し、試験体を切断して、ひび割れを確認した(図15)。試験体内部の断面にコーナースプリット型およびサイドスプリット型のひび割れの発生が確認された。

試験体の実験因子は加力前の最大ひび割れ幅とし、Level.1、Level.2およびLevel.3試験体で、それぞれ0.05mm、0.4mm、1.6mmとなった。加力は建研式加力で、部材角1/400~1/15の正負交番繰返し加力を行った。

各試験体の加力前後のひび割れ状況を図16に示す。いずれの試験体も加力によって付着

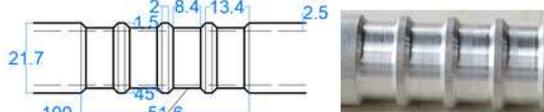


図9 D19 異形鉄筋を模擬した切削パイプ

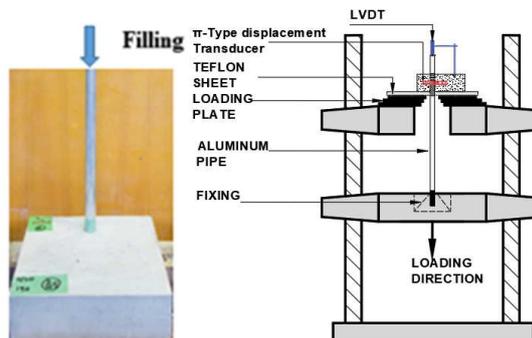
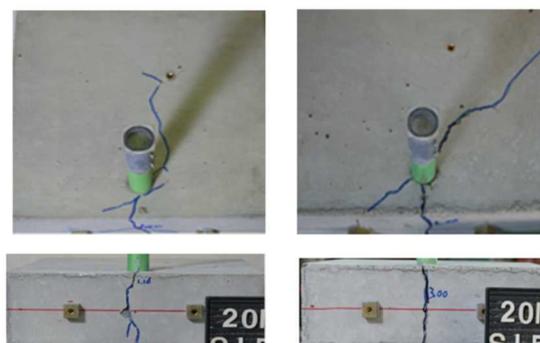


図10 付着試験体と加力方法



ひび割れ幅 1mm ひび割れ幅 3mm

図11 破砕剤充填後のひび割れの例



破砕剤によるひび割れ 加力終了後

図12 引抜き実験試験体

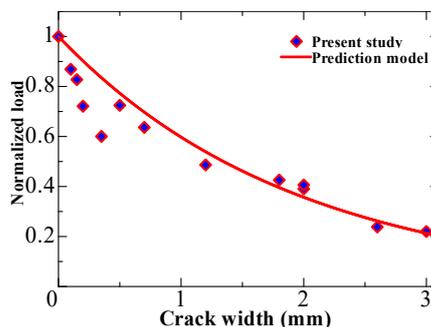


図13 ひび割れ幅と付着強度比の関係

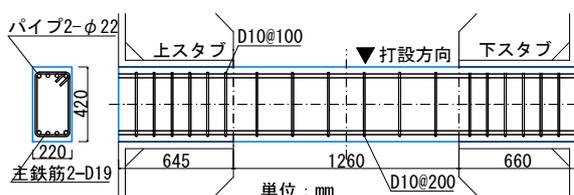


図14 逆対称加力実験試験体

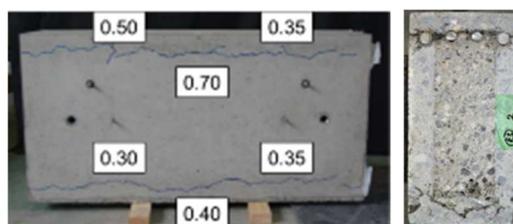


図15 ひび割れ導入予備実験

割裂ひび割れが発生し、特に加力前ひび割れ幅が 0.8mm を超えた区間では、新たな付着割裂ひび割れは発生せず、加力前ひび割れの拡幅がみられた。各試験体の包絡線を図 17 に示す。加力前ひび割れは試験体の最大耐力に大きな影響を及ぼしていないが、部材角 1/100 までの剛性および最大耐力時の部材角に差がみられる。加力前最大ひび割れ幅が 0.4mm の試験体では、破砕剤充填パイプの膨張圧から生じる拘束力により耐力低下の割合が減少し、一方で、ひび割れ幅が 1.6mm の試験体では、部材角 1/50 以降の耐力低下が大きい。

以上の破砕剤充填パイプを利用した RC 要素および部材の加力実験結果より、破砕剤充填パイプによって、腐食生成物の膨張圧と同様にコンクリートにひび割れを発生させることが可能であること、破砕剤充填パイプによって生じたひび割れは局所的な鉄筋とコンクリートの付着性状を大きく劣化させる可能性があるものの、ある程度の幅のひび割れが生じていなければ、必ずしも部材の圧縮性状や繰返し曲げせん断性状が低下するものではないことが明らかとなった。

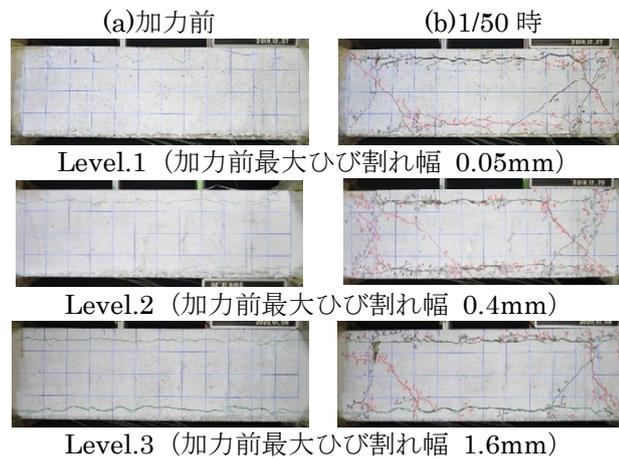


図 16 逆対称加力実験試験体

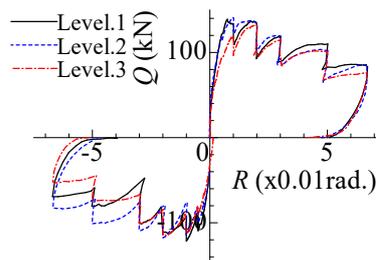


図 17 逆対称加力実験の包絡線の比較

<引用文献>

- 1) 金久保利之, 余 劍華, 八十島章, カストロ・ホワン・ホセ: 2011 年東北地方太平洋沖地震における茨城県内の公立学校 RC 建造物の被害, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), C-2 構造IV, pp.67-70, 2014.
- 2) 墨野倉駿, 金久保利之, 八十島章, 大屋戸理明: 腐食を模擬した鉄筋の座屈性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.973-978, 2015.
- 3) 長岡和真, 阿部哲雄, 番場俊介, 村上祐貴: 主鉄筋の腐食膨張挙動に対するコンクリートの拘束圧に基づく付着割裂性状評価, コンクリート工学論文集, 第 24 巻, 第 2 号, pp.29-42, 2013.
- 4) 藻川哲平, 八十島章, 金久保利之, 大屋戸理明: 鉄筋腐食によるひび割れを模擬した RC 柱の中心圧縮性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp.151-156, 2016.
- 5) Yasojima, A., Kanakubo, T., Bond Splitting Strength of RC Members Based on Local Bond Stress and Slip Behavior, 11th International Conference on Fracture, No.4486, 2005.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 嘉村弘和, Castro Juan Jose, 金久保利之	4. 巻 40
2. 論文標題 実構造物から採取した腐食鉄筋の座屈性状に関する基礎的な研究	5. 発行年 2018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 957-962
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 油野登梧, 金久保利之, Syll Amadou Sakhir	4. 巻 41
2. 論文標題 破砕剤充填パイプにより腐食ひび割れを模擬したRC柱の中心圧縮性状	5. 発行年 2019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 109-114
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 油野登梧, 金久保利之, Syll Amadou Sakhir	4. 巻 42
2. 論文標題 破砕剤充填パイプにより腐食ひび割れを模擬したRC部材の構造性能	5. 発行年 2020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 印刷中
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12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 嘉村弘和, Castro Juan Jose, 金久保利之
2. 発表標題 腐食鉄筋の座屈性状に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Amadou Sakhir Syll , Yoshihiro Kawamura , Toshiyuki Kanakubo
2. 発表標題 Simulation of Concrete Cracks due to Bar Corrosion by Aluminum Pipe Filled with An Expansion Agent
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 嘉村弘和 , 金久保利之 , Castro Juan Jose
2. 発表標題 曝露させた腐食鉄筋の座屈性状に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 金久保利之 , Castro Juan Jose
2. 発表標題 RC造建物の構造・耐久性能指数の試算と経年指標の調査
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川村佳弘 , 金久保利之
2. 発表標題 破砕剤充填パイプにより鉄筋腐食時ひび割れを模擬したRC梁部材の曲げ性状
3. 学会等名 土木学会関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 嘉村弘和, Castro Juan Jose, 金久保利之
2. 発表標題 沖縄県の解体建築現場より採取した腐食鉄筋の座屈性能に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 油野登梧, Juan Jose Castro, Amadou Sakhir Syll, 金久保利之
2. 発表標題 鉄筋腐食によるひび割れを模擬するための破砕剤充填パイプの引張性能
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kanakubo, T., Castro, J.J., Syll, A. S., Aburano, T
2. 発表標題 Concrete Cracks by Expansion Agent Filled Pipes in Bond Test Specimens
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Syll, A. S., Aburano, T., Kanakubo, T., Castro, J.J
2. 発表標題 Bond Behavior in Cracked Concrete by Expansion Agent Filled Pipes
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 嘉村弘和, Castro Juan Jose, 金久保利之
2. 発表標題 RC柱部材から採取した腐食鉄筋の腐食性状と座屈強度
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 嘉村弘和, CASTRO Juan Jose, 金久保利之
2. 発表標題 劣化したRC構造部材から採取した腐食鉄筋の座屈性状に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Togo Aburano, Amadou Sakhir Syll, Toshiyuki Kanakubo
2. 発表標題 Uniaxial compressive performance of RC columns with induced corrosion cracks
3. 学会等名 The 2019 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM19) (国際学会)
4. 発表年 2019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="http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~kanakubo/2cor.htm">http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~kanakubo/2cor.htm</a> Structural Performance of Corroded RC <a href="http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~kanakubo/2core.htm">http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~kanakubo/2core.htm</a>
--

