

令和 2 年 6 月 2 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01306

研究課題名（和文）住環境指標による、RC建築の耐震性能の新しい評価軸【提案と基礎データの収集】

研究課題名（英文）A new criterion on seismic performance of RC buildings based on an index for residential function - Proposal and fundamental data collection

研究代表者

眞田 靖士（SANADA, Yasushi）

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：80334358

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 20,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、RC建築が住機能を喪失する限界を、住環境指標「気密性」により定義することにより、耐震性能の新しい評価軸を提案することを目的とした。この目的の達成のため、3年間の実験、解析研究を実施した。【平成29年度以降】JIS A 2201に基づく気密性モニタリングと地震力を模擬する耐震実験を並行する新しい実験法を開発し、RC壁材の気密特性を評価した。【平成30年度以降】3Dスキャナと3Dプリンタを用いてひび割れ面を模擬する数値解析モデルを作成し、実験結果をCFD解析などにより評価した。【平成31年度】方立壁の新しい構造詳細を提案、検証し、RC建築の住機能維持限界の向上法を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、近年の地震災害で社会課題となっているRC建築が非構造壁の著しい損傷により住機能を喪失する問題に対し、RC建築が住機能を維持できる限界を、住環境指標「気密性」により定義することで、住機能維持に対する性能設計を実現する方法論を提案している点に強い社会的意義がある。また、学術的には、この目的の達成に不可欠なRC壁材の損傷と気密性能を評価するための実験装置を開発し、これを運用して基礎データを取得した点に高い価値がある。また、世界でも極めて稀な実験データをCFD解析により分析した成果や、RC壁材の気密性能に基づいてRC建築の住機能維持に対する限界性能の改善に取り組んだ成果にも高い価値がある。

研究成果の概要（英文）：The objective of the present study was to propose a new criterion on seismic performance of RC buildings, in particular a limit of maintaining the residential function, based on an index for residential function of "air tightness." Several series of experimental and analytical studies were performed to reach the goal of this study. In 2017, a new experimental system combining seismic loading test with a measurement method for airtight performance according to JIS A 2201 was developed, then it was applied to evaluate the airtight performance of RC walls with seismic damage. After 2018, the experimental results were investigated through 3D scanning, 3D printing, and CFD analysis. Furthermore, in 2019, new structural details for RC walls were proposed and verified to improve the limit of maintaining the residential function of RC buildings.

研究分野：建築耐震工学

キーワード：鉄筋コンクリート建築 機能維持限界 壁 気密性 C値 流量係数 損傷 ひび割れ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

鉄筋コンクリート造(RC)建築の耐震補強が広く普及した社会背景の下、東日本大震災以降、RC建築の非構造壁被害による機能不全の問題が従来よりも深刻なものとして認識されるようになってきている。しかし、この非構造壁被害による機能不全は、構造部材の終局変形よりも遥かに小さい変形で発生するため、これを評価、防止のための具体的な方針は明らかでない。

近年、同様の趣旨の研究が、国内を中心に活発であるが、現在までのところ、RC建築の機能維持限界は、短期許容応力度設計で許容されるひび割れ幅に関係付けて、あるいはコンクリートのひび割れや剥落を、修復コストや時間に関係づけて論じられるのが主流である。しかし、これらは耐久性や修復性の指標であるため、必ずしも建物の機能性を論じてはいない。

本研究は、RC建築が誇る高い住機能性を直接的に評価することで、建物が住機能を喪失する限界を本質的に再定義し、機能維持に対する性能設計を抜本的に見直す、新しい挑戦である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、RC建築が住機能を喪失する限界を、住環境指標「気密性」により定義することにより、耐震性能の新しい評価軸を提案することである。この目的を達成するため、以下に示す6項目の実験、解析研究を実施した。

### 3. 研究の方法

#### 【研究】

RC壁材の気密特性(損傷 - 気密性指標の関係など)を実験的かつ定量的に評価するため、JIS A 2201「送風機による住宅等の気密性能試験方法」<sup>1)</sup>に基づく気密性モニタリングと、地震力を模擬した静的載荷を繰り返す新しい実験システムを開発した。

#### 【研究】

上記で開発した実験システムを用いて、RC壁材を模擬する実大要素試験体を計画、製作し、その気密特性(損傷 - 気密性指標の関係など)を評価した。

#### 【研究】

実大要素試験体を対象として3Dスキャナを用いてひび割れ面を高精度に模擬する数値解析モデルを作成し、実験結果をCFD解析により評価した。

#### 【研究】

RC壁材の気密特性の実験データを蓄積するため、RC集合住宅において地震被害が生じる方立壁を模擬する試験体を対象に、【研究】で開発した実験システムを用いた気密特性(損傷 - 気密性指標の関係など)の評価実験を実施した。

#### 【研究】

これまでの実験結果を合理的に評価するため、3DプリンタによりRC壁材の理想化モデルを作成し実験およびCFD解析を行い、回帰分析を通して通気量の理論式を同定した。

#### 【研究】

典型的な方立壁の損傷特性と比較して、より高い住機能維持限界を保证するための方立壁の構造詳細を提案し、その検証実験を実施して、RC建築が住機能を喪失する限界を改善する方法について検討した。

### 4. 研究成果

#### 【研究】

研究代表者の所属研究機関(大阪大学)に既存の静的載荷システムを利用し、外部から気密性モニタリングが可能な移動式の気密測定室を接続することで、研究計画を実現するための実験システムを構築した。開発した気密性モニタリングが可能な静的載荷システムの概要を図1に、気密性能測定システムを図2に示す。

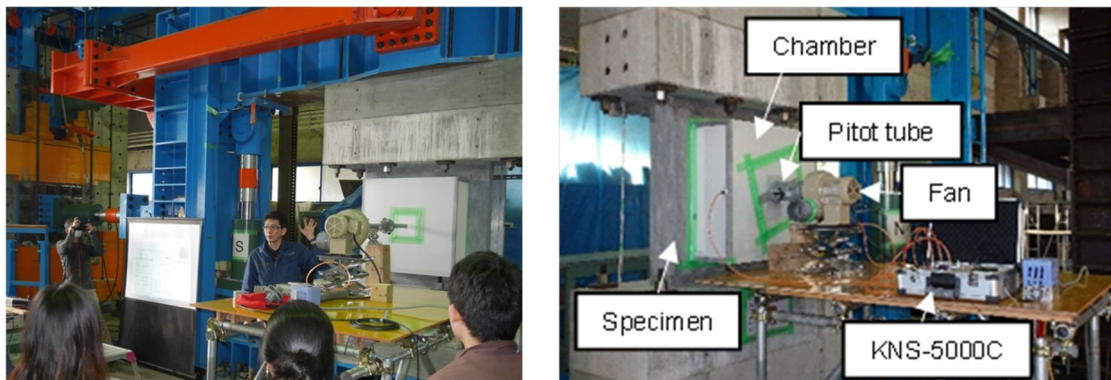


図1 実験システム(左:装置全体,右:気密性モニタリング)

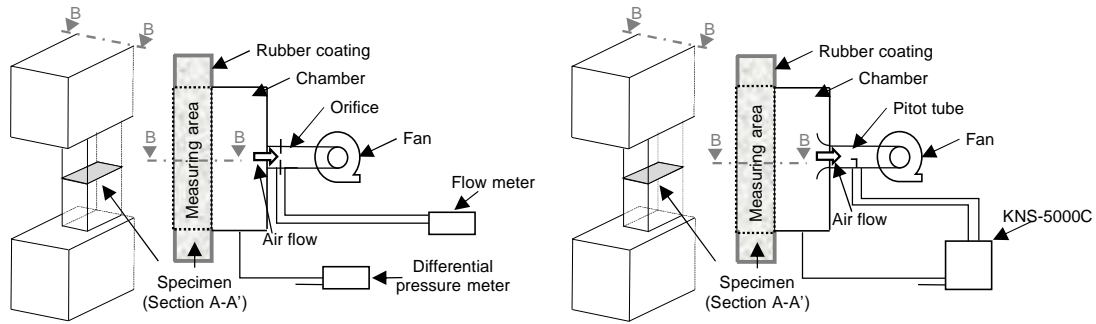


図2 気密性能測定システム（左：壁の損傷小，右：壁の損傷大）

【研究】

RC壁材を模擬する実大要素試験体として、図3に示す壁厚と配筋を変動因子とする試験体2体を計画、製作し、RC壁の載荷と気密測定を繰り返す実験を実施した（図4）。その結果、図5より比較的微小なひび割れを生じた残留変形角から隙間特性値  $n$  は高い値（1.81）を示し、残留変形の進行に伴い2に近づく傾向がみられた。また、図6よりRC壁のひび割れの流量係数は一般開口の0.6より小さい0.19~0.33の範囲であった。さらに上記の実験結果に基づいて壁厚が流量係数に与える影響を分析した結果、壁厚が薄いほど、残留変形（平均的なひび割れ幅）が大きいほど流量係数が大きくなる特徴が、実験結果において捉えられていることを明らかにした。

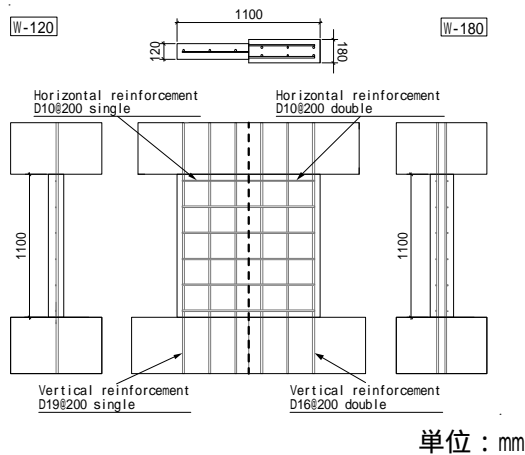


図3 実大要素試験体

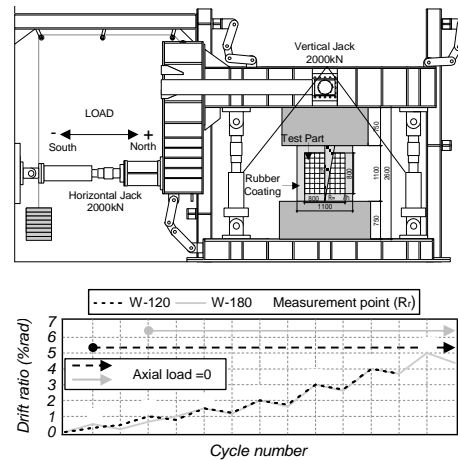


図4 実験方法（上：装置，下：載荷履歴）

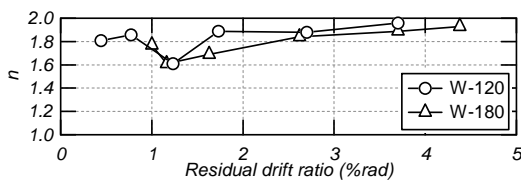


図5 隙間特性値 - 残留変形角の関係

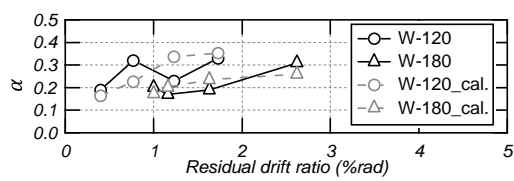


図6 流量係数 - 残留変形角の関係

【研究】

RC壁の要素試験体に単一ひび割れを発生させ、隙間換気量の測定実験を実施するとともに、ひび割れ面を3Dスキャンしてデジタルデータ化した詳細モデルと、スリット状に単純化したモデルを対象にCFD解析を行い、隙間幅やひび割れ面の粗度が開口の隙間特性に及ぼす影響について検討した。図7に隙間幅を4mmとした場合の解析モデルを一例として示す。図8より、隙間特性値  $n$  は実験・解析ともに1~2の範囲で変動し、理論どおり隙間幅が大きくなると2に近づく傾向が見られた。図9より、流量係数はひび割れ開口がスリット開口よりも値が小さくなり、隙間幅が大きくなるとも大きくなった。

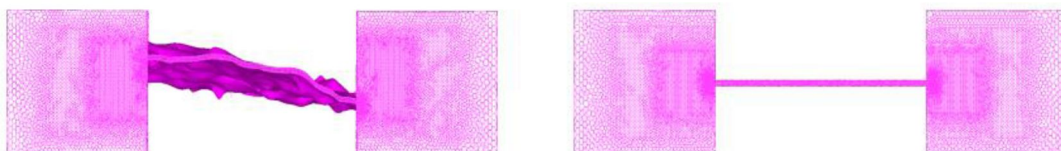


図7 CFD解析モデル（左：ひび割れ開口，右：スリット開口）

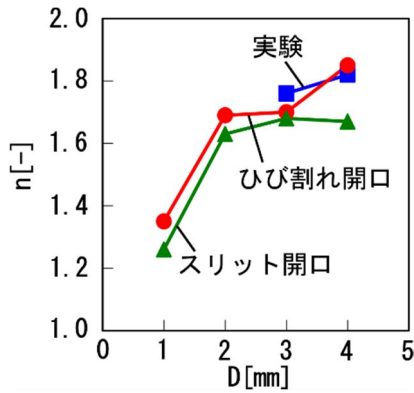


図8 隙間特性値 - ひび割れ幅の関係

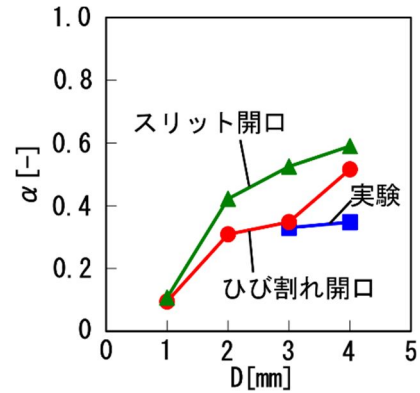


図9 流量係数 - ひび割れ幅の関係

【研究】

被災RC建物を対象にRC方立壁を模擬した試験体(図10)の気密性能評価実験を実施した。実験結果より、残留変形と総相当隙間面積、隙間特性値、流量係数の関係を実験的に取得した。とくにRC壁のひび割れの流量係数は0.09~0.22の範囲であった。実験結果として得られた流量係数(=0.2)を用い、研究対象建物<sup>2)</sup>の一居室(図11)に対して気密性能を維持できる方立壁の損傷量の限界値を試算するとC値(気密性能を示す一指標である相当隙間面積)が2の場合にひび割れの総面積が約580cm<sup>2</sup>、C値が5の場合には約1450cm<sup>2</sup>と算定された。本研究対象建物の試算の範囲であるが、損傷量の限界値を実験より算定した損傷量と比較すると、方立壁がせん断破壊してコンクリートの剥落が顕著になる1/50radを超過する変形を受けると、上記の限界に達する結果が得られた。

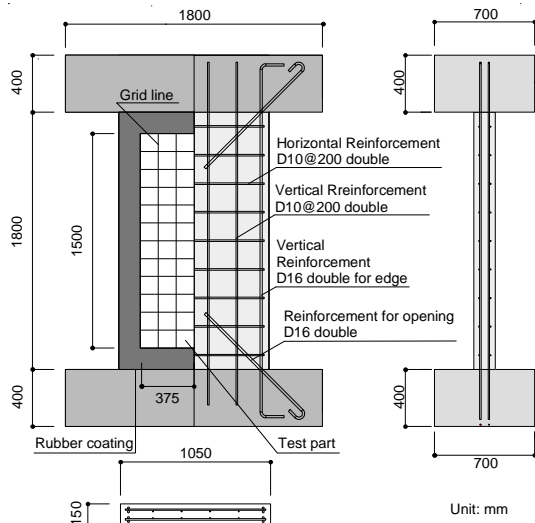


図10 RC方立壁試験体

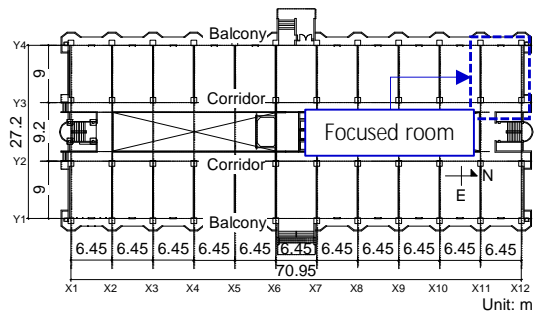


図11 研究対象建物

【研究】

RC壁の要素試験体のスリット置換による理想化モデルに対し、CFD解析を実施し、換気量 $Q$ (m<sup>3</sup>/h)と圧力損失 $P$ (Pa)の関係を評価するとともに、同関係を表す下記の二次式と指数式を回帰分析により同定した。

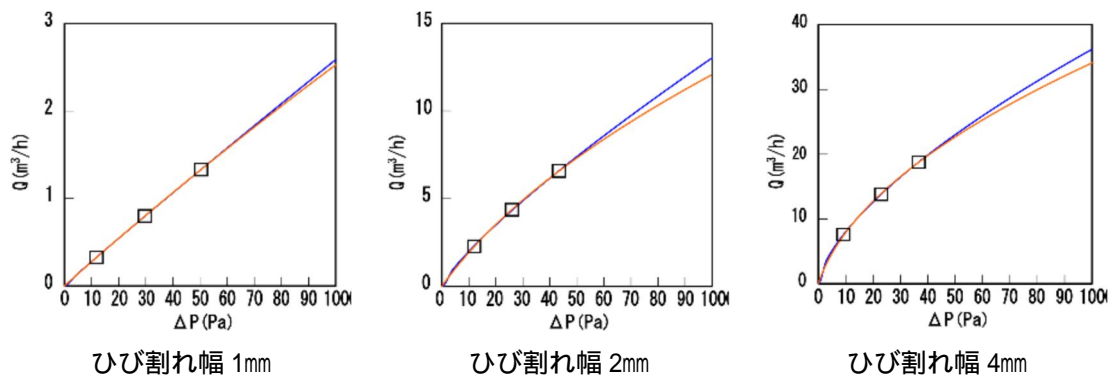


図12 二次式(青)と指数式(橙)による換気量と圧力損失の関係の同定結果



二次式：

$$\Delta P = c_1 \frac{Q}{3600} + c_2 \left( \frac{Q}{3600} \right)^2$$

指数式：

$$Q = a \cdot \Delta P^{\frac{1}{n}}$$

ここで、 $c_1$ ：定数 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^3$ )、 $c_2$ ：定数 ( $\text{kg}/\text{m}^7$ )、 $a$ ：隙間前後差圧が 1Pa 時の通気量 ( $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{Pa}^{1/n})$ ) である。

また、理論式である二次式と、近似式である指数式の傾向を図 1 2 において比較したところ、指数式は回帰する圧力範囲の影響を受ける傾向を確認した。

### 【研究】

RC 方立壁の損傷を抑制する新しい構造詳細として、図 1 3 に示す壁縦筋の定着を解消する方法と壁の上下端部にスリットを設ける方法を提案した。方立壁に対する水平力の載荷を方立壁の軸方向伸びを拘束した条件(実際の建物を想定した条件)で実施した結果、壁縦筋の定着を解消しても、一般的な方立壁と同程度の最大耐力を発揮することを実験的に確認した。また、壁縦筋の定着を解消することで、図 1 4 に比較するように方立壁の端部に発生する曲げひび割れおよび同変形レベルにおいて損傷を抑制できることを確認した。また、同図に示すように、方立壁にスリットを設けると、方立壁がスタブ(実際の建物では梁)と接触する 1/100rad の変形角まで、壁の損傷制御に有効に機能することを確認した。

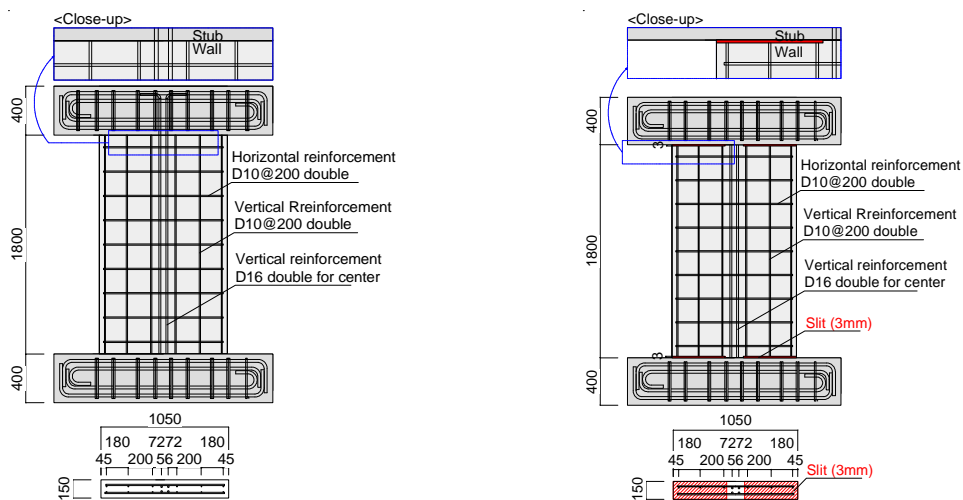


図 1 3 RC 方立壁の損傷抑制法 (左：壁縦筋の解消，右：スリットの設置)

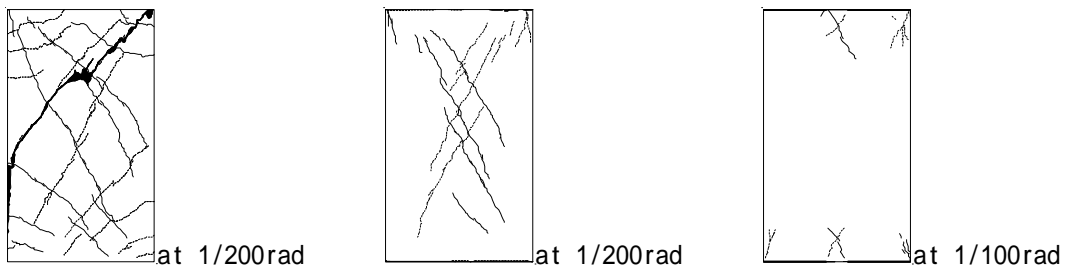


図 1 4 RC 方立壁の損傷の比較 (左：従来型，中：壁縦筋の解消，右：スリットの設置)

以上の研究成果により、RC 建築の機能維持限界を壁材の気密性に基づいて定量化するために不可欠な基礎データを得ることができた。これらの研究成果を実用化するために、今後、RC 壁の気密性能と(居住者が健全な生活が可能な)居住環境との相関関係を明らかにするとともに、建物の機能維持限界に関わるその他の因子(例えば設備機器などの機能維持限界)との関係性を把握する必要がある。

### 参考文献

- 1) 日本規格協会：送風機による住宅等の気密性能試験方法 (JIS A 2201:2003)，2003.1
- 2) 真田靖士，尹ロク現，赤堀巧，小塩友斗，崔琿：東日本大震災で被災した靱性型コンクリート系建物の被害シミュレーション - RC 造方立壁が靱性型コンクリート系建物の構造性能に与える影響 - ，日本建築学会構造系論文集，Vol. 80，No. 713，pp. 1145-1153，2015.7

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 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 尹ロク現, 真田靖士, 桃井良尚	4. 巻 Vol.83, No.753
2. 論文標題 建物の耐震性評価を目的とするRC壁の気密性能評価	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本建築学会環境系論文集	6. 最初と最後の頁 pp.871-881
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.3130/aije.83.871">https://doi.org/10.3130/aije.83.871</a>	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 水谷駿介, 福井紳矢, 尹ロク現, 真田靖士	4. 巻 Vol.41, No.2
2. 論文標題 鉄筋コンクリート造方立壁のせん断耐力に関する一考察	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 pp.379-384
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 松尾啓斗, 水谷駿介, 尹ロク現, 真田靖士	4. 巻 Vol.41, No.2
2. 論文標題 RC造方立壁の損傷制御法に関する提案と検証	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 pp.757-762
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 福井紳矢, 真田靖士, 尹ロク現	4. 巻 Vol.84, No.765
2. 論文標題 RC造方立壁に地震時に作用する軸力の解析的検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 pp.1465-1474
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.3130/aijs.84.1465">https://doi.org/10.3130/aijs.84.1465</a>	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11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 水谷駿介, 尹ロク現, 真田靖士, 桃井良尚
2. 発表標題 ひび割れを有する鉄筋コンクリート壁の気密性能の評価実験
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 桃井良尚, 杉山顕文
2. 発表標題 測定機器の応答速度がトレーサガス濃度減衰法による換気量測定に及ぼす影響に関する研究（その1）畳み込み積分によるセンサ応答の推定
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 水谷駿介, 尹ロク現, 真田靖士, 桃井良尚
2. 発表標題 ひび割れを有する鉄筋コンクリート壁の気密性能に関する研究：その1実験計画と載荷実験結果
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 尹ロク現, 水谷駿介, 真田靖士, 桃井良尚
2. 発表標題 ひび割れを有する鉄筋コンクリート壁の気密性能に関する研究：その2実大RC壁の気密性能の評価結果
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松尾啓斗, 水谷駿介, 尹ロク現, 真田靖士
2. 発表標題 鉄筋コンクリート造方立壁の構造性能とその改善法に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小川景, 桃井良尚
2. 発表標題 損傷鉄筋コンクリート壁の通気特性に関する研究 その1 CFD解析による単一ひび割れの流量係数及び隙間特性値の算出
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 尹ロク現, 水谷駿介, 松尾啓斗, 真田靖士, 桃井良尚
2. 発表標題 ひび割れを有する鉄筋コンクリート壁の気密性能に関する研究: その3実大スケールの方立壁の気密性能の評価
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小川景, 桃井良尚, 真田靖士, 尹ロク現
2. 発表標題 ひび割れを有する鉄筋コンクリート壁の気密性能に関する研究: その4部分試験体による単一ひび割れの流量係数及び隙間特性値の算出
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 水谷駿介, 松尾啓斗, 尹ロク現, 真田靖士
2. 発表標題 鉄筋コンクリート造方立壁の構造性能評価のための静的載荷実験: その1実大方立壁の実験
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松尾啓斗, 水谷駿介, 尹ロク現, 真田靖士
2. 発表標題 鉄筋コンクリート造方立壁の構造性能評価のための静的載荷実験: その2損傷制御法の提案と検証
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Rok-Hyun Yoon, Yasushi Sanada and Yoshihisa Momoi
2. 発表標題 Airtight Performance Evaluation Test of Cracked RC Walls Using a Fan Pressurization for Building Seismic Performance
3. 学会等名 The 21th Japan-Korea-Taiwan Joint Seminar on Earthquake Engineering for Building Structures (国際学会)
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	桃井 良尚  (Momoi Yoshihisa)  (40506870)	福井大学・学術研究院工学系部門・講師    (13401)	