

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H03340

研究課題名(和文) RC造袖壁付き柱の最大耐力後の安定した挙動を導入した新しい荷重変形関係のモデル化

研究課題名(英文) New load-deformation model of R/C columns with side walls considering stable behavior after maximum strength

研究代表者

加藤 大介 (Kato, Daisuke)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：90169508

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,600,000円

研究成果の概要(和文)：袖壁付き柱は、地震時に袖壁部分が圧壊するまでの強度が高い状態の後に、変形能力の高い柱部分の挙動が出現するという特徴を持ち、安全性・損傷制御性が高いとされる。しかし、現行の鉄筋コンクリート造建物では、袖壁付き柱の特徴を踏まえた耐震設計がなされていない。袖壁が圧壊するまでと、袖壁が圧壊し無効になった後の信頼できる荷重変形モデルが得られていないことも理由のひとつである。本研究では、静加力実験と解析的検討により、これらのモデルの構築を行った。本研究により、袖壁の高い損傷制御性と安全性という有用な性能を生かした耐震設計法確立の基盤的知見が得られると期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、袖壁が圧壊するときの変形を評価する点、現在十分に理解されていない袖壁圧壊後の挙動を評価する点、である。特に、袖壁付き柱の特徴を捉えたそのモデルの提案は独創的な点と考えている。また、予想される結果は、現行の法律による建物と同じ建物性能で想定外の極限地震に対応する設計が可能になる点である。さらに、将来的には、中小地震に対しての損傷制御性を検討する場合には袖壁を考慮し、大地震や極限地震に対しての安全性を検討する場合には袖壁を無視することにより、建物性能を落とし大地震時の袖壁の損傷を許容する設計も選択可能になると考えている。

研究成果の概要(英文)：In this study models of lateral load - story drift relationship of RC columns with side walls are proposed which can be used in practical design procedures toward effective use of side walls. Firstly a series of tests on RC columns with side walls have been conducted to investigate the effects of the reinforcement details and the width and length of the side walls on the flexural deformability. The behavior of RC columns with side walls are characterized by two view points, i.e. high strength by contribution of side walls and high deformability after compressive failure of side walls. From this view point, finally in this study, simplified lateral force - story drift angle models for columns with sidewalls are proposed separating sidewall effects from overall behavior. In other word models for side walls and isolated columns are formulated separately. It is noted that the behavior of the overall member can be expressed as the envelope curve of two models.

研究分野：建築構造

キーワード：鉄筋コンクリート 袖壁 終局変形

1. 研究開始当初の背景

研究代表者は東日本大震災で被害を受けた袖壁が多用されている学校建物の被害調査の機会を得たが、それまでの研究成果をもとに、その被害の解析を試みている。袖壁の損傷は大きいですが、その袖壁の存在を無視してみると、建物の被災度はかなり少なくなることがわかり、安全限界以内に収まっていることが推定できた。一方、隣接する袖壁の少ない建物は落階する大破の被害を受けており、袖壁の効果であったと結論付けている。

このような既往の多くの地震被害の経験を経て、RC造建物における袖壁、腰壁、垂れ壁等の二次部材の構造設計における考え方が整理されてきている。例えば2011年の日本建築学会のパネルディスカッション(以下PD)ではこれら二次部材の各種性能評価式が紹介され、この議論を元に本年4月に刊行された保有水平耐力計算規準(以下保耐規準)ではその設計式が提案されている。さらに、近年ではその有効利用にも興味が集まっており、実際に、昨年および今年のPDでは連続して話題としてとりあげられ、研究代表者はその発表の機会を得ている。

しかしながら、さらなる有効利用を考えた場合、保耐規準の提案には2つの課題が残っていると考えている。まず、袖壁付き柱の安全性に対応する終局状態は袖壁の破壊により決定されており、変形能をそれほど必要としない比較的壁の多い建物に対しては有効な提案とはなっていないものの、袖壁破壊後の安定した本来の袖壁付き柱の性能を生かした手法とはなっていない点である。次に、その袖壁の破壊により決定される終局状態(変形能)の評価法も、横補強筋によるコンクリートと主筋への拘束効果や開口位置の影響が十分には反映されていないという点である。

そこで、袖壁付き柱の性能を最大限に生かすことのできる設計法の構築を目指すために、この2つの課題をより深く追求し、RC造袖壁付き柱の最大耐力後の安定した挙動を導入した新しい荷重変形関係のモデル化を試みたい。これが、本研究を開始する当初の背景である。

2. 研究の目的

図-1は袖壁付き柱の挙動の概念図であるが、その挙動は袖壁部分が圧壊するまでの強度が高い領域の後に変形能力の高い柱部分の挙動が出現するところに特徴がある。現状の設計法では損傷制御と安全性確保が要求されているが、この2つの要求に対して袖壁が支配する領域で対応している。一方、想定外の極限地震についても対応が急務となっているが、現状の枠組みを壊すことなく、柱の支配する領域により極限地震に対応することも可能であろう。本研究では、この損傷制御性と安全性のいずれも高いという有用な性能を生かした耐震設計法の構築を最終目標として視野に入れつつ、申請期間での目標としては、前提となる荷重-変形関係のモデル化を目指している。

具体的には、テーマを大きく2つに絞り、これらを明らかにする。1つ目のテーマは、袖壁端部が圧壊するまでのモデル(以降、袖壁モデル)の評価法であるが、これは袖壁の拘束筋に着目する。すなわち、変形能の評価のための大きな問題は薄い壁板のためコンクリートへの拘束は未解明なことであり、袖壁の拘束状態に依存する終局変形能評価式を提案する(テーマ(1))。

2つ目のテーマは袖壁が圧壊して袖壁が無効となった後のモデル(以降、柱モデル)の評価法であるが、要点はその破壊形式である。これには袖壁と柱の接合面の挙動が大きく影響し、接合面のコンクリートが広く圧壊して袖壁部分と柱部分が分離して挙動する場合と最終段階まで袖壁付き柱として挙動する場合に分けて検討する。破壊形式を明確にした後は、今までに蓄積してきた独立柱に関する知見などを如何に転用できるかに重点をおいて検討する。(テーマ(2))

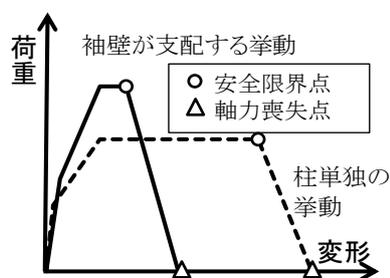


図-1 袖壁付柱の挙動の概念

3. 研究の方法

(1) 袖壁端部が圧壊するまでのモデルの評価法

1つ目のテーマは袖壁端部が圧壊するまでのモデルの評価法である。このうち、初期剛性、曲げひび割れ点、降伏点までの挙動は現在の知見で十分表現できる。重点的に検討すべきは終局変形能は袖壁端部が圧壊することにより決定される終局変形能の評価式である。

日本建築学会(以後、AIJと呼ぶ)は保有水平耐力計算規準において、袖壁の曲げ変形能の評

価式（以後、AIJ 式）を示している。しかしながら、この評価式ではコンクリートの圧壊ひずみを拘束の有無で段階的に決めていることと、コンクリートの圧壊高さが袖壁厚さにのみ依存しており、曲げ変形能を決める要因となり得る袖壁端部の拘束効果やシアスパンによる影響を考慮していないことが問題点として挙げられる。

そこで、本研究では、袖壁付柱の静加力実験を計画し、実験的に袖壁圧壊時の変形を求めた。さらに、FEM 解析による数値実験結果および他研究機関で行われた実験結果を用いて、終局変形能の評価式を提案する。

(2) 袖壁が圧壊して袖壁が無効となった後のモデルの評価法

2 つめのテーマは袖壁が圧壊して袖壁が無効となった後のモデルの評価法である。

本研究の流れは、それぞれの対象試験体を当研究室で提案した復元力特性のモデルを使用してモデル化を行い、実験値との比較をして妥当性を検討する。各論文で挙げられている試験体の破壊形式の信憑性を確認するために各試験体で曲げの挙動とせん断の挙動のどちらも実験値とモデル化で比較する。それをもとに曲げ破壊型とせん断破壊型それぞれの復元力特性のモデル化を行う。次に、それぞれの対象試験体から得られた復元力モデルを実験値と比較してその精度を検討する。

対象試験体は、他大学で発表された 29 体あり、そのうち曲げ破壊型が 16 体（両側袖壁付き柱 9 体、片側袖壁付き柱 7 体）、せん断破壊型が 13 体（両側袖壁付き柱 8 体、片側袖壁付き柱 5 体）である。

4. 研究成果

(1) 袖壁端部が圧壊するまでのモデルの評価法に関する結論

1 つめのテーマである袖壁端部が圧壊するまでのモデルの評価法についての総まとめは文献 1) で報告している。以下は同論文の概要である。

① 終局変形能の既往の提案式

式(1)に文献 2) による袖壁曲げ変形能の AIJ 評価式を示す。

$$R_u = c \times l_h \times \phi_u \quad [rad] \quad \dots(1)$$

$$c = 6(\text{梁試験体は } 8 \text{ とする}) \quad l_h = 2t_w \quad \phi_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{x_n}$$

$$\varepsilon_{cu} = 0.003 \quad (0.6\% \text{以上の端部拘束の場合 } 0.006)$$

c は実験係数、 t_w は袖壁厚さ、 ε_{cu} は終局時ひずみ、 l_h はコンクリート圧壊高さ、 ϕ_u は終局時曲率、 x_n は中立軸深さである。しかしながら、拘束量による連続的な評価がされていないことが問題点と言える。

次に、式(2)に文献 3) で提案した袖壁の終局変形角の評価式を示す。

$$R_u = l_h \times \varphi_u = l_h \times \frac{\varepsilon_{cu}}{x_n} \quad [rad] \quad \dots(2)$$

$$l_h = 1.5t_w \quad \varepsilon_{cu} = 7.0 \times \frac{p_{wx} + p_{wy}}{2} \quad x_n = \frac{N}{t_w \times v \times \sigma_B}$$

中立軸深さ x_n はストレスブロック略算式で求める。 N は軸力、 v はコンクリート有効係数で 0.85、 σ_B はコンクリート圧縮強度である。また、終局ひずみ ε_{cu} は面内方向と面外方向の袖壁部分の拘束筋比の平均値と相関が確認されたことから式(2)のように提案されている。

図-2(a) (b-1) (b-2) は、その 1 で示した計 40 体の袖壁付柱試験体を用い、これらの既往の 2 つの評価式の精度を見たものである。図より、(2) 式では危険側に評価された試験体が多くなり、特に高強度コンクリートの試験体（図 2(b-2) に○で示す試験体）は大きく危険側評価となっていることがわかる。

② コンクリート圧縮強度の有効係数の検討

終局変形の評価式にコンクリート強度の影響を取り込むために、平面保持解析の解析結果から直接的にコンクリート圧縮強度の有効係数を評価した。具体的には最大耐力の 80% となった点を終局変形点と見なし、終局変形点におけるコアコンクリートの最端部の要素のひずみ度 $\varepsilon_{cu,exp}$ を求め、コンクリートの応力度-ひずみ度関係のモデル上において、そのひずみ度での面積比をコンクリート圧縮強度の有効係数とした。

図-3 はコンクリート強度と得られた各試験体の有効係数の関係である。図において赤色に示した試験体はコンクリート強度 $\sigma_B = 45 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ を超える高強度試験体である。高強度試験体についてよく表せている以下の(3)式を採用する。

$$v = 1 - \frac{\sigma_B}{100} \quad \dots(3)$$

③終局時の端部のコンクリートのひずみの検討

終局ひずみは圧縮される袖壁部分の拘束状態に大きく依存し、終局ひずみと拘束筋比 p_w の間には比例関係があると推測できる。また、終局ひずみは拘束筋比だけではなく、拘束筋の圧縮強度とコンクリートの圧縮強度の比 (σ_{wy}/σ_B) にも依存すると考えられる。

そこで本研究では、圧壊高さと中立軸深さを式(3)を用いて計算したときの終局変形角の計算値が実験値と等しくなるような終局ひずみ ε_{cu} を逆算し、その値と各種拘束筋比との相関を検討した。図-4(a)~(f)にコンクリート圧縮強度の有効係数を用いた終局ひずみ(逆算値)と各種拘束筋比および材料強度についての関係を示す。最も相関性が最も高いのは図-4(e)に示した $p_{wx} \times (\sigma_{wy}/\sigma_B)$ との関係であるため、その比例関係から比例定数 0.25 を用いた以下の(4)式を採用する。

$$\varepsilon_{cu} = 0.25 \times p_{wx} \times \frac{\sigma_{wy}}{\sigma_B} \quad \dots(4)$$

④各評価式の終局変形角比較、考察

以上の検討から、以上の式を用いた以下の(5)式を評価式として提案する。

$$R_u = h_p \times \varepsilon_{cu} / x_n \quad \dots(5)$$

$$h_p = 1.5t_w \quad \varepsilon_{cu} = 0.25 \times p_{wx} \times \frac{\sigma_{wy}}{\sigma_B}$$

$$x_n = \frac{N}{t_w \times v \times \sigma_B} \quad v = 1 - \frac{\sigma_B}{100}$$

図-2(c)に式(5)を用いた提案式についての終局変形角の実験値と計算値を示す。高強度試験体を赤色に示している。AIJ 評価式、(2)式提案式で危険側であった高強度試験体について、提案式では安全側に評価できている。未だ危険側となる試験体はどちらも両側袖壁付き柱の試験体である(内一体は実大)。特に基線から離れる国交省 S22 における S30A05 については、他の似たような条件の試験体より壁厚が厚い。圧壊高さを壁厚の 1.5 倍としているため、壁厚が大きくなれば計算値の終局変形角が大きくなり、過小評価してしまうことがわかる。よって今後、圧壊高さの検討も必要になるとと思われる。

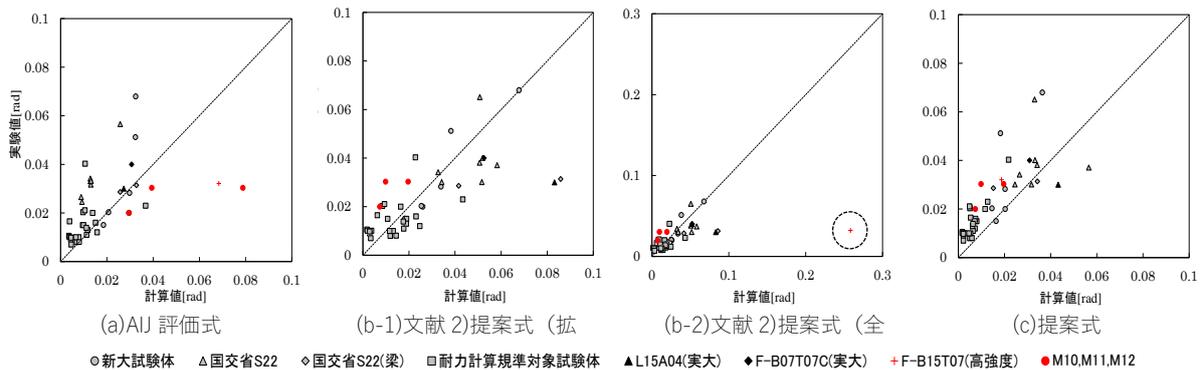


図-2 終局変形角各評価式の精度

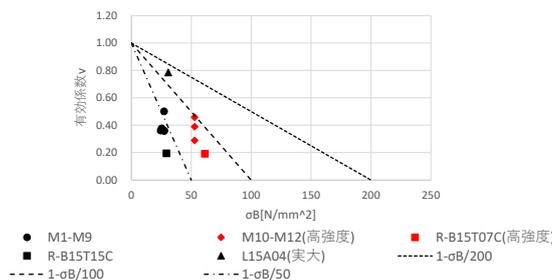


図-3 コンクリート強度と強度の有効係

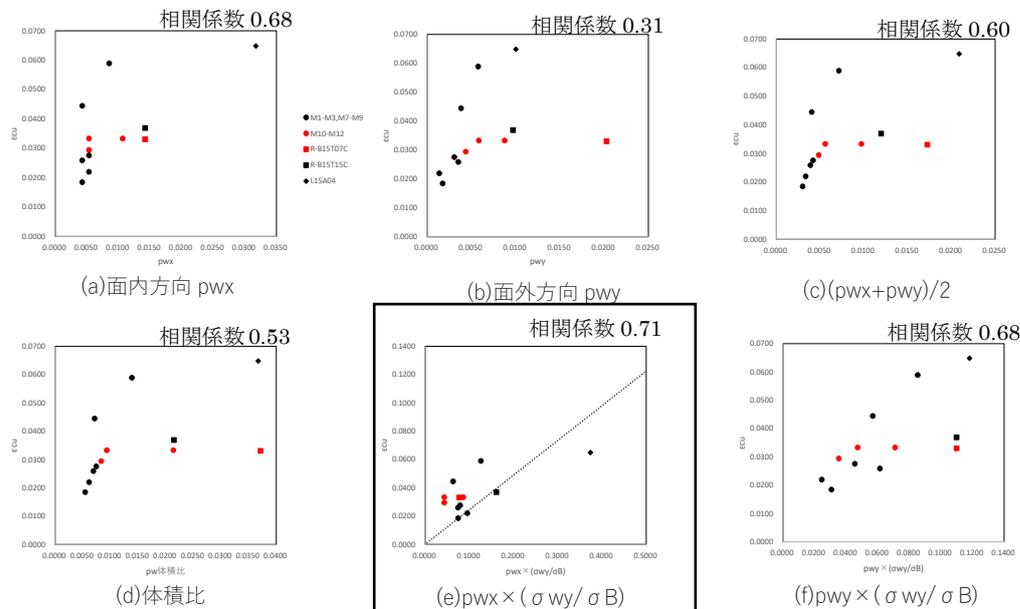


図-4 終局ひずみ（逆算値）と各種拘束筋比の関係

(2) 袖壁が圧壊して袖壁が無効となった後のモデルの評価法に関する結論

2 つめのテーマである袖壁が圧壊して袖壁が無効となった後のモデルの評価法についての総まとめは文献 4) で報告している。各評価式はここでは省略するので同論文を参照されたい。以下はその結果の概要である。

実験値と計算値の荷重-変形関係の比較を図-5 に示す。a), b), c), d) が曲げ破壊型の試験体のうちの 4 体、e), f), g), h) がせん断破壊型の試験体のうちの 4 体を示す。曲げ破壊型の試験体の計算値は比較的多くの試験体が実験値の挙動に近い挙動を示している。

まとめとしては、終局強度に関しては検討した試験体全てにおいて概ね精度良く評価できた。終局変形角に関しては、袖壁モデルが過剰に安全側に評価された一方で柱モデルは結果にばらつきが見られた。加力が最後まで行われていない試験体が多かったため実際はより安全側に評価されると考えられる。

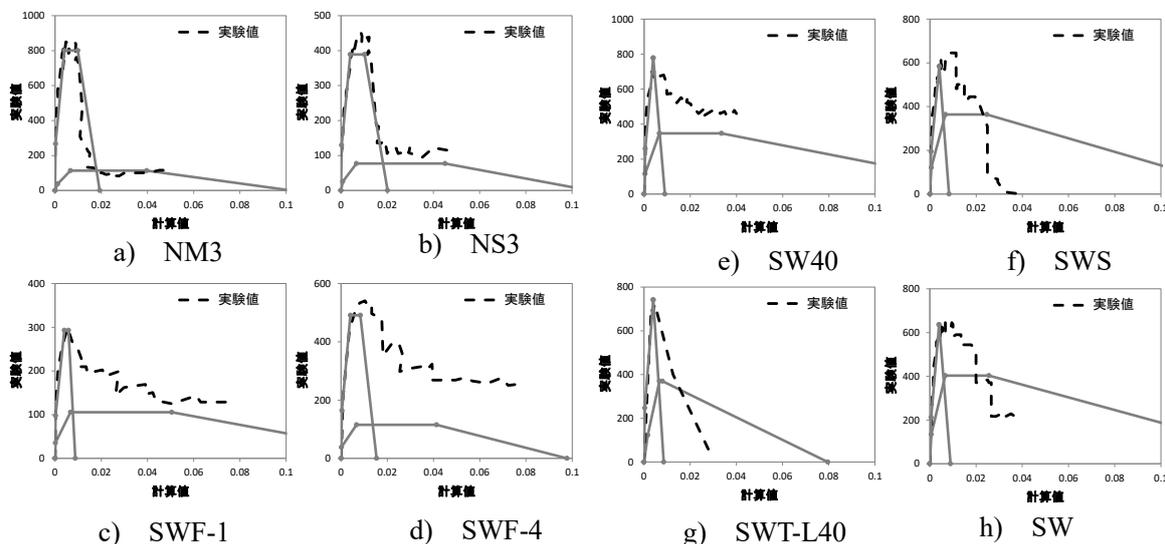


図-5 実験値と計算値の比較（荷重-変形関係）

- 1) 香取幹, 三富皓介, 加藤大介: 曲げ降伏する RC 造袖壁の終局変形能に及ぼすコンクリート強度と部材寸法の影響 その 2: 終局変形能の評価式の検討, 日本建築学会学術講演梗概集(東海), 2021, 構造IV
- 2) 日本建築学会, 鉄筋コンクリート構造保有水平耐力計算規準・同解説, 2021年2月
- 3) 香取幹・加藤大介・肥後朋宏: 曲げ降伏する RC 造袖壁の終局変形の評価法の提案, 日本建築学会北陸支部研究報告, 第 63 号 2020.7
- 4) D. KATO, R. KURAMOTO, N. ABE and T. NAKAMURA, RESTORING FORCE DRIFT ANGLE RELATIONSHIP MODELS OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS WITH SIDE WALLS, 16th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, December, 2019

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6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 加藤大介, 丸屋友樹	4. 巻 40.2
2. 論文標題 壁厚と圧縮端部の拘束条件を変化させた曲げ降伏するRC造袖壁の静加力実験	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 PP.331-337
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 小松叶宜, 松原魁, 千葉勇輝, 加藤大介	4. 巻 64B
2. 論文標題 軸方向筋の座屈とコンクリートに対する基礎からの拘束効果に着目したRC造片側袖壁付き柱と独立柱の平面保持解析	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 391-398
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 坂上正裕, 本多良政, 加藤大介	4. 巻 Vol.63B
2. 論文標題 RC造有開口片側袖壁付き柱の実用的なせん断強度設計式	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 pp.377-384
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 佐藤大典, 加藤大介	4. 巻 Vol.63B
2. 論文標題 地震後の応急的な補修を行った有開口RC造袖壁付き柱の再加力実験	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 pp.441-446
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 加藤大介, 佐藤大典, 高松恭	4. 巻 第82巻, 第735号
2. 論文標題 RC造袖壁付柱の曲げ挙動に及ぼす開口位置の影響に関する実験的研究	5. 発行年 2017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. 693-700
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 Daisuke KATO, Daisuke SATO, Tadashi TAKAMATSU and Kenichi OSHIO	4. 巻 Vol. 50, No.4
2. 論文標題 EFFECTS OF OPENING LOCATION ON FLEXURAL BEHAVIOR OF RC COLUMNS WITH SIDEWALLS	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering	6. 最初と最後の頁 pp. 547-554
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14件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 松原魁, 加藤大介
2. 発表標題 鉄筋コンクリート造有開口耐震壁のモデル化の検討
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 加藤大介, 阿部直樹, 黒井秀人
2. 発表標題 : RC造袖壁付き柱の復元力特性のモデル化に関する研究 (その1モデル化の概要)
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 土田一輝, 加藤大介
2. 発表標題 一質点系の地震応答解析によるRC造建物における袖壁の有効利用に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 本多良政, 加藤大介
2. 発表標題 袖壁に拘束をもたせたRC造有開口袖壁付き柱の曲げ強度に関する考察
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 丸屋友樹, 千葉勇輝, 加藤大介
2. 発表標題 壁厚と圧縮端部の拘束条件を変化させた曲げ降伏するRC造袖壁の静加力実験(その1実験概要と実験結果)
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 倉本 凌, 阿部 直樹, 加藤 大介
2. 発表標題 RC造袖壁付き柱の復元力特性のモデル化に関する研究 その1
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), 2017, 構造
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 阿部 直樹, 倉本 凌, 加藤 大介
2. 発表標題 RC造袖壁付き柱の復元力特性のモデル化に関する研究 その2
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), 2017, 構造
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 土田一輝, 加藤 大介
2. 発表標題 建物の損傷制御性と安全性をより向上させるための袖壁付き柱の有効利用に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), 2017, 構造
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小松叶宜, 松原魁, 千葉勇輝, 加藤大介
2. 発表標題 軸方向筋の座屈とコンクリートに対する剛強な基礎からの拘束効果に着目したRC造片側袖壁付き柱とRC造柱の平面保持解析 その1 軸方向筋のモデル
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), 2017, 構造
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松原魁, 千葉勇輝, 小松叶宜, 加藤大介
2. 発表標題 軸方向筋の座屈とコンクリートに対する剛強な基礎からの拘束効果に着目したRC造片側袖壁付き柱とRC造柱の平面保持解析 その2 コンクリートのモデル
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), 2017, 構造
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 千葉勇輝, 小松叶宜, 松原魁, 加藤 大介
2. 発表標題 軸方向筋の座屈とコンクリートに対する剛強な基礎からの拘束効果に着目したRC造片側袖壁付き柱とRC造柱の平面保持解析 その3 解析結果
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), 2017, 構造
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 加藤大介, 丸屋友樹
2. 発表標題 大地震後の応急的な補修を行った有開口RC造袖壁付き柱の再加力実験 その1
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), 2017, 構造
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 丸屋友樹, 加藤大介
2. 発表標題 大地震後の応急的な補修を行った有開口RC造袖壁付き柱の再加力実験 その2
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), 2017, 構造
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 下川禎生, 加藤大介
2. 発表標題 拘束筋を考慮したRC造有開口袖壁付き柱のFEM解析
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), 2017, 構造IV
4. 発表年 2017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	中村 孝也 (Nakamura Takaya) (50305421)	新潟大学・自然科学系・准教授 (13101)	
研究 分担者	本多 良政 (Honda Yoshimasa) (80509919)	小山工業高等専門学校・建築学科・教授 (52201)	

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