

令和 4 年 4 月 25 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04685

研究課題名（和文）鉄筋コンクリート雑壁付き部材の靱性能に関する研究

研究課題名（英文）Research on ductility of reinforced concrete members with secondary walls

研究代表者

田尻 清太郎（TAJIRI, Seitaro）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・准教授

研究者番号：10466013

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：鉄筋コンクリート造建物の柱の側面に壁（袖壁）が取り付いた袖壁付き柱を対象に、想定外の大地震が発生した際にどのような壊れ方となるか判定する手法の構築を目指した。本研究では、多様な壊れ方の中でも建物の耐震性にとって最も危険で脆い壊れ方である一体破壊に特に着目し、過去の実験や本研究で実施した実験のデータを用いた検討を行い、限定的ではあるが、一体破壊を生じやすい条件を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでの耐震設計では、袖壁付き柱のせん断破壊は極力避けるべき壊れ方として扱われてきたが、本研究により、せん断破壊を細分化したことで、せん断破壊の中でも許容される壊れ方があることを示し、また、壊れ方の判別法を提案した。これにより袖壁付き柱の活用の幅が広がり、ひいては袖壁付き柱の特徴である建物の剛性増大、損傷低減に貢献する可能性につながることから、学術的意義や社会的意義が高い。

研究成果の概要（英文）：We aimed to build a method to determine how the columns would break in the event of an unexpected large earthquake, targeting columns with side walls that had walls attached to the sides of columns in reinforced concrete buildings. In this study, we paid particular attention to the one-piece fracture, which is the most dangerous and fragile fracture method for the earthquake resistance of buildings among various fracture methods, and conducted a study using the data of past experiments and experiments conducted in this study. As a result, we clarified the conditions that are likely to cause one-piece destruction, although it is limited.

研究分野：建築構造

キーワード：鉄筋コンクリート 袖壁 破壊形式

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年の鉄筋コンクリート造(以下、RC造)建物の地震被害では、人命に直結する倒壊、崩壊が問題となる一方、倒壊、崩壊する建物も一昔前に比べ少なくなってきたことで、建物の継続使用性、再使用性、機能維持といった観点から、いかに損傷低減を図るかといった新たな課題が重要視されつつある。

近年建設されるRC造建物では、構造スリットを設けて、そで壁、腰壁、垂れ壁(以下、雑壁)を柱・梁から分離するのが一般的になっている。このような建物は、雑壁と柱・梁を接合した建物に比べて、強度は低く、靱性は高くなる。現行の耐震設計体系では、強度、靱性が高いほど耐震性能に優れるとしており、この観点からは、雑壁を分離または接合したいずれの建物も一長一短ある。しかし、地震時の応答変形が大きくなると、建物の損傷も大きくなるため、強度が高く、応答変形が小さくなる雑壁接合型の建物の方が、損傷低減を図れる。また、構造スリットを設置する手間が省け、施工性の面でも優れる。そこで、研究代表者らは雑壁と柱・梁を接合した損傷低減型建物の普及を目指し検討を行っている。

雑壁を分離した設計が一般的に行われる主な理由として、構造計算における雑壁の取り扱いに関する知見の不足が挙げられる。つまり、雑壁接合型建物の設計では、応力解析用の計算モデル化、雑壁が取り付く柱・梁(雑壁付き部材)の強度、剛性の評価が困難であり、結果として評価法、設計法が既に確立されている雑壁分離型建物が多数設計されている。そこで、雑壁付き部材やそれらからなる架構の強度、剛性といった構造性能の評価法の確立を目指し検討を行ってきた。これらの研究の重要性は広く認識されてきており、近年、精力的に研究されている。

これまでの検討を踏まえた今後の要検討課題の一つが、設計で想定したレベルを超える巨大地震に対する安全性の確保である。この種の地震は近年多く観測されており、それに対する備えが社会的に期待されている。雑壁付き部材は、柱・梁単体に比べ、曲げ強度が大きく、内法スパンが短くなるため、せん断破壊しやすくなる。また、建築計画によって開口部の位置・寸法が決定し、雑壁付き部材の形状が制約されることも多い。そのため、現実的な配筋量で全ての雑壁付き部材を曲げ破壊型となるよう設計するのは困難であり、せん断破壊型を許容した設計体系が必要である。そこで、申請者らはそのような雑壁接合型建物の設計法として、最大強度に至る前の変形に地震時応答を収め、靱性能に期待しない強度型の設計法を構築しているところである。しかし、前述のような巨大地震を考えた場合、最大強度時の変形を超える応答となる恐れがあるため、せん断破壊後も一定の靱性を確保する設計法とすることが強く望まれる。

### 2. 研究の目的

雑壁付き部材のせん断強度評価法に関する研究を実施してきた中で、雑壁付き部材のせん断破壊は壊れ方が多種多様で、雑壁と柱・梁が一体的に脆性破壊し急激に強度低下するものもある一方、例えば、雑壁に損傷が集中し、最大強度到達後ゆるやかに強度が低下していく破壊も見られた。同じせん断破壊型の部材でも、靱性能確保のためには後者のような破壊が望ましく、やむなくせん断破壊型の部材を設計する場合には後者のような破壊を目指すのがよい。しかし、このような破壊形式の差が生じるメカニズムについては解明されておらず、一定の靱性を有するせん断破壊型部材の設計法も確立されていない。そこで、本研究ではこの点に着目し、せん断破壊型の雑壁付き部材の破壊メカニズムを解明し、破壊メカニズムに応じた靱性能の評価法、靱性を有するせん断破壊型の部材設計法の確立を目指す。

通常のRC造建物は、脆性的に破壊しないよう、せん断破壊を防止した設計が行われる。そのため、これまでの研究では、せん断破壊する際の強度については多数検討されてきたのに対し、せん断破壊後の靱性能について検討したものは少ない。本研究で対象とする建物は、せん断破壊を防止するのが困難であることから、せん断破壊を許容することとし、その代わりに、巨大地震に対する万が一の備えのために、せん断破壊後も一定の靱性を確保するという、これまでの建物の設計法とは全く異なる考え方の設計法を構築するものである。

近年の地震被害等から、地震による建物の損傷をいかに低減するかが重要視されてきているが、本研究の成果は、損傷低減が期待できる雑壁接合型建物の設計法の一部に資するものであることから、社会的意義は極めて高い。

### 3. 研究の方法

#### テーマ1：既往研究の再調査

雑壁付き部材に関する既往の研究は、曲げ強度、せん断強度の評価法に関する検討が大多数を占めているが、これらを含む全ての既往研究について、破壊性状やせん断破壊後の変形性状といった観点から再調査し、本研究の検討に有効なデータの収集を行う。

#### テーマ2：雑壁付き部材の加力実験

テーマ1での収集データ、テーマ3での検討結果を活用しつつ、本研究の目的達成にとって重要かつ不足しているデータを取得するために、雑壁付き部材の加力実験を行い、せん断破壊メカ

ニズムの解明及び靱性能評価法の検討に資するデータを取得する。

できる限り多数の試験体の実験が行えるよう、縮尺 1/3 程度まで縮小した試験体を計画する。主要な実験変数は前述の検討結果を勘案して最終的に決定するが、破壊形式や破壊後の靱性に影響を及ぼすと考えている主要変数として、帯筋量、雑壁の厚さ・コンクリート強度、雑壁の横筋量、雑壁と柱の接合詳細、雑壁端部におけるコンクリート・縦筋の拘束度、軸力比、シアスパン比、せん断余裕度等に注目し、これらを中心に計画する。

#### テーマ 3：せん断破壊メカニズムの解明及び靱性能評価法の検討

テーマ 1 で収集、取得したデータを元に、雑壁付き部材の破壊メカニズムの解明、破壊メカニズムに応じた靱性能の評価法について検討し、提案を行う。

具体的には、まず破壊形式の細分類化を行う。既往の研究のような曲げ破壊、せん断破壊という大分類でなく、破壊時や破壊後の損傷状況、応力、変形状態等を精査し、細かく類型化を行う。それと同時に、類型化された各々の破壊形式に至らしめるメカニズムを考察し、また、各々の破壊形式がどの程度の靱性能を示すか評価する。これらの検討結果は、テーマ 2 の実験計画の立案において、対象試験体を効率的に選定するためにも活用される。

また、テーマ 2 の加力実験で取得したデータを加えることにより、破壊メカニズムの考察及び靱性能評価法の検討について、再評価、見直しを行い、必要に応じて新たな追加検討を行い、改善を目指す。

#### テーマ 4：せん断破壊を許容した雑壁付き部材設計法の提案

テーマ 3 で提案した評価法を元に、雑壁接合型建物においてやむなくせん断破壊型の部材を計画する場合でも一定の靱性を確保する部材設計法について提案を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) 2019 年度の研究成果

鉄筋コンクリート造の柱と袖壁が一体化した袖壁付き柱の地震時の破壊メカニズムは、柱単体や壁単体の破壊メカニズムに比べ複雑であり、袖壁付き柱の破壊形式を統一的に説明、区分できる定義、分類法は確立されていないのが現状である。そこで、本研究では、既往の袖壁付き柱の構造実験のデータを収集し、破壊形式や強度、剛性、靱性等の構造性能の観点から整理し、破壊形式の定義、分類法について検討を行った。その結果、袖壁、柱、袖壁と柱の接合部の 3 つの領域に分割し、それぞれの領域において損傷状況を類型化し、各領域で類型化した損傷状況の組合せにより破壊形式を定義する提案を行った。定義した破壊形式に基づくと、既往の構造実験で観察された破壊性状は 12 パターンの破壊形式に分類することができ、それぞれの破壊形式に応じて構造性能が特徴づけられることが分かった。

次に、提案した破壊形式のうち代表的なものについて、破壊に至る力学的メカニズムに基づき、袖壁付き柱の破壊形式を判別する判定式を提案した。

さらに、提案した判定式で異なる破壊形式と判別される試験体として、帯筋、壁横筋の量を変数とする 2 体の袖壁付き柱試験体を製作し、加力実験を行った。その結果、判定式で判別された破壊形式となり、提案した判定式の妥当性を確認した。

これらの成果は、袖壁付き柱を用いた建物の耐震設計において、所要の構造性能を確保するための袖壁付き柱の部材設計法の確立に活用されることが期待される。

#### (2) 2020 年度の研究成果

これまでに、鉄筋コンクリート造袖壁付き柱の主要な破壊形式として、袖壁圧壊型、一体破壊型、境界部破壊型を定義するとともに、袖壁付き柱がそれらのいずれの破壊形式となるか推定する判定法を提案してきた。また、特に、袖壁圧壊型と一体破壊型の判定法を検証するために、判定法から両者の破壊形式となると推定された試験体の加力実験を行い、推定通りの破壊形式となることが確認された。

2020 年度は、この加力実験で得られた詳細データを用いて、提案判定法の検証を実施した。その結果、次の事項が明らかとなった。

一体破壊型の判定指標として用いられる一体破壊時せん断力  $Q_2$  の算定において、提案の判定法では袖壁付き柱全体の対角線のひび割れを横切る壁横筋及び帯筋が全て降伏する状態を仮定している。しかし、実験では壁横筋は降伏するものの、帯筋の降伏は見られず、 $Q_2$  を過大評価する。そこで、未降伏の帯筋について、実歪から算定した存在応力を用いて  $Q_2$  を算定したところ、一体破壊型試験体の実せん断力を概ね評価できることが明らかとなった。

境界部破壊型の判定指標として用いられる境界部縦せん断力  $Q_3$  の算定において、提案の判定法では柱頭及び柱脚において平面保持が成立することを仮定している。しかし、実験で得られた鉄筋歪は平面保持仮定から乖離していた。そこで、平面保持を仮定した歪分布ではなく、実験で得られた実歪を線形補間した歪分布を仮定して  $Q_3$  を算定したところ、平面保持を仮定した算定した  $Q_3$  を上回る場合と下回る場合が混在しており、すなわち、平面保持を仮定した算定法は境界部の実縦せん断力を過大評価にも過小評価にもすることが明らかとなった。

#### (3) 2021 年度の研究成果

これまでに、鉄筋コンクリート造袖壁付き柱の主要な破壊形式として、袖壁圧壊型、一体破壊

型，境界部破壊型を定義するとともに，袖壁付き柱がそれらのいずれの破壊形式となるか推定する判定法を提案してきた。

2021年度は，この中で最も靱性に乏しく実際の建物の設計で避けるべき破壊形式である一体破壊型について，その破壊性状を精査したところ，袖壁と柱にほぼ同時期に大きな損傷が集中し，急激に耐力低下を起こす極めて脆性的な破壊性状を示す試験体以外にも，袖壁の圧縮ストラットの圧壊と思われる損傷が先行し，比較的緩やかな耐力低下を示す試験体も存在することが判明した。そこで，一体破壊型と分類される袖壁付き柱について，さらに袖壁先行破壊が生じるか否かで細分化して扱うこととし，袖壁先行破壊となる条件について検討を行った。

検討の結果，袖壁の柱のそれぞれについて推定せん断耐力/作用せん断力を略算し，両者の比率の大小関係により，袖壁先行破壊となるか判定できる可能性があることが分かった。そこで，その判定法を精査すべく，一体破壊型と判定される試験体2体を設計し，一方は袖壁先行破壊を目指し，もう一方は袖壁先行破壊を起こさないよう目指し，これらの試験体の加力実験を行った。

加力実験では，反曲点高さが当初の想定と異なったことからいずれの試験体も一体破壊型とはならず袖壁圧壊型となった。しかし，両者の破壊性状は大きく異なっており，袖壁先行破壊を目指した試験体は最大耐力後比較的緩やかな耐力低下を生じたのに対して，袖壁先行破壊を目指さなかった試験体は最大耐力後急激な耐力低下を生じた。このことから，一体破壊型となるか否かに関わらず，袖壁先行破壊しやすい部材は緩やかな耐力低下を起こしやすく，そうでないものは脆性的な破壊を生じやすいことが推察された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 2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 田尻清太郎, 引田大暉	4. 巻 構造IV
2. 論文標題 鉄筋コンクリート造袖壁付き柱の破壊形式の推定法に関する研究(その1 既往実験概要と結果)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 195-196
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 無
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 引田大暉, 田尻清太郎	4. 巻 構造IV
2. 論文標題 鉄筋コンクリート造袖壁付き柱の破壊形式の推定法に関する研究(その2 せん断変形比と破壊形式判別法)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 197-198
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 無
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 田尻清太郎, 引田大暉	4. 巻 構造IV
2. 論文標題 両側袖壁付きコンクリート部材の破壊形式の分類式の精度に関する研究(その1 分類法)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	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 無
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 引田大暉, 田尻清太郎	4. 巻 構造IV
2. 論文標題 両側袖壁付きコンクリート部材の破壊形式の分類式の精度に関する研究(その2 実験結果)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	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 無
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 引田大暉, 田尻清太郎	4. 巻 44
2. 論文標題 両側袖壁付き鉄筋コンクリート造部材の破壊形式の分類式の精度に関する研究	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 -
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 松本菜, 田尻清太郎, 塩原等, 大西直毅	4. 巻 42
2. 論文標題 袖壁・腰壁・垂れ壁付き部材の破壊形式に関する研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本コンクリート工学会年次論文集	6. 最初と最後の頁 139-144
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 松本菜, 田尻清太郎, 塩原等, 大西直毅	4. 巻 構造IV
2. 論文標題 鉄筋コンクリート造袖壁付き柱の破壊形式に関する研究 (その1 破壊形式の分類と推定)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	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 無
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 田尻清太郎, 松本菜, 塩原等, 大西直毅	4. 巻 構造IV
2. 論文標題 鉄筋コンクリート造袖壁付き柱の破壊形式に関する研究 (その2 実験)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	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 無
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 田尻 清太郎
2. 発表標題 鉄筋コンクリート造袖壁付き柱の破壊形式の推定法に関する研究（その1 既往実験概要と結果）
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 引田大暉
2. 発表標題 鉄筋コンクリート造袖壁付き柱の破壊形式の推定法に関する研究（その2 せん断変形比と破壊形式判別法）
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田尻清太郎
2. 発表標題 両側袖壁付きコンクリート部材の破壊形式の分類式の精度に関する研究(その1 分類法)
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 引田大暉
2. 発表標題 両側袖壁付きコンクリート部材の破壊形式の分類式の精度に関する研究(その2 実験結果)
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 引田大暉
2. 発表標題 両側袖壁付き鉄筋コンクリート造部材の破壊形式の分類式の精度に関する研究
3. 学会等名 コンクリート工学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松本菜
2. 発表標題 鉄筋コンクリート造袖壁付き柱の破壊形式に関する研究（その1 破壊形式の分類と推定）
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田尻清太郎
2. 発表標題 鉄筋コンクリート造袖壁付き柱の破壊形式に関する研究（その2 実験）
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020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
---------	---------------------------	-----------------------	----

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