

令和元年6月17日現在

機関番号：21401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14759

研究課題名(和文)超小型センサによるRC造有開口耐震壁の力学的抵抗機構の経時的検討

研究課題名(英文)Time Study of Resistance Mechanism for RC Shear Walls with Multi-Openings Using Extremely Small Sensors

研究代表者

櫻井 真人 (SAKURAI, Masato)

秋田県立大学・システム科学技術学部・助教

研究者番号：60710184

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)：本研究では、構造実験に用いる1/3縮尺の耐震壁試験体に直接埋設可能な直径10mm×60mmの超小型円筒形センサの開発に成功した。センサの挙動を把握するパイロット試験(角柱圧縮試験および梁せん断破壊試験)では実験時に生じる応力伝達傾向を良好に捉える結果を示した。また有開口耐震壁に対する構造実験では、開口周辺を中心に各部位の応力負担状況について微小地震を想定した少変形領域から大地震に相当する大変形領域まで明確に把握することができた。さらに上記検討の副次的な成果として有開口耐震壁の復元力特性モデル化手法の提案ならびに最大耐力時以降の実験状況との対応を重視したFEMモデル化手法の提案に至った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

縮尺試験体レベルで埋設可能な超小型センサの実用化は、他のRC部材実験においても詳細な応力伝達メカニズムの解明が期待できるため、RC構造分野における実験的検討の発展に寄与できるものである。また、地震時の有開口耐震壁における応力伝達メカニズムを把握することは、定量的な構造性能評価法の確立に寄与するもので、本データを基に具体的な設計手法の提案に結びつけることで、現行設計規基準のさらなる高度化につながる。

研究成果の概要(英文)：An ultra-small cylindrical sensor with a diameter of 10 mm × 60 mm, which can be buried directly in a 1/3 scale RC shear walls with opening Specimens for static loading tests, was successfully developed. In the pilot test (Prismatic column compression tests and beam shear loading tests) which grasped the behavior of the sensor, the result which grasped the stress transfer tendency which arose in the experiment well was shown. In the loading test for RC shear wall with openings, it was possible to clearly grasp the stress loading situation of each part center around the opening from small deformation region to large deformation. In addition, as a secondary result of the above examination, this study proposes a hysteresis characteristic modeling technique and an FEM modeling technique emphasizing the correspondence with the experimental situation after the maximum capacity for RC shear walls with Multi-openings.

研究分野：建築耐震工学

キーワード：RC造有開口耐震壁 超小型センサ 応力伝達メカニズム 構造実験

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

有開口耐震壁のせん断強度を無開口耐震壁のせん断強度に開口部の面積の比率で与えられるいわゆる「開口周比」による低減率を乗じる手法が示されている。本手法は実用的かつ簡便であり、わが国では一般建築物の構造設計や既往建物の耐震診断において従来から慣用されてきた。その一方で、本手法は開口の形状、位置および開口数が異なる場合でも開口周比が一定であれば同等のせん断強度が算定されることから、開口の形状等が構造特性に及ぼす影響が反映されにくい問題があることが以前より指摘されている。これは、開口位置および個数が変化した場合における耐震壁の破壊メカニズムが複雑となるのに対し、開口周比による強度低減の考え方が対応できないためである。その一方で、既往の実験結果や実際の地震による有開口耐震壁の破壊状況を見ると、開口位置や特に開口の個数（いわゆる複数開口となる場合）によって破壊モードが異なることが報告されており、現行評価手法による有開口耐震壁の耐震性能の定量的評価は困難な状況にあるといえる。上記理由から、有開口耐震壁部材は柱梁部材よりも高い剛性・耐力を有し、地震時の有効な耐震要素となるものの、現場の構造設計者には想定破壊モードやせん断強度の推定が困難であると認識されている。

2. 研究の目的

本研究では、地震時において複雑な破壊モードを呈し、構造性能の把握が困難とされているドアや窓などの開口を有する鉄筋コンクリート（RC）造耐震壁部材（以下、有開口耐震壁）に対し、申請者が提案しているせん断強度の定量的構造性能評価手法のさらなる算定精度向上を推し進め、現行の性能評価型設計法改正に資する成果を創出することにより、構造設計者の設計自由度の向上に寄与することを目的としている。具体的検討では、耐震壁試験体に埋め込み可能な超小型応力センサを用いた有開口耐震壁試験体の静的載荷実験を実施し、微小変形領域から部材終局領域における力学的抵抗機構の詳細な推移を解明することで有開口耐震壁の数値解析モデルの確立につなげるものである。

3. 研究の方法

(1) 有開口耐震壁試験体に埋め込み可能な超小型応力センサの開発

構造実験時における耐震壁各部位の応力の経時的計測が可能となるセンサの開発を行った。これは試験体寸法との兼ね合いから従来の市販品を用いることが不可能であるため、超小型でコンクリート内部の圧縮応力を検出可能なφ20×60mmのセンサを制作した。

(2) 微小変形領域から部材終局領域に至る有開口耐震壁の力学的抵抗機構の解明

上記の開発センサを用いた有開口耐震壁の構造実験により、微小変形領域、第1ひび割れ発生時、鉄筋降伏時および部材終局時と各時点において形成される圧縮ストラットの応力を実測し、耐震壁の応力抵抗機構が経時的な遷移過程について詳細に解明を行った。なお、解明には FEM 解析も援用し、せん断強度の略算式の改正および新たな数値解析モデルの検討を行った。

4. 研究成果

(1) 有開口耐震壁試験体に埋め込み可能な超小型応力センサの開発

① センサの概要

センサの要求仕様としては、一般的な荷重計とおよそ同じ精度で圧縮力が検出できること、目安として縮尺 1/3 程度の RC 造耐震壁試験体の壁厚 80mm のあいだに直接埋設が可能でサイズであるとともに、センサ自体が耐震壁試験体の構造性能に影響を及ぼさないこと、コンクリート打設時にセンサ自体を埋設することになるが貼付ひずみゲージに対して防水処理が問題なく施せることが挙げられる。このためにまず、計測周辺のコンクリートのヤング係数と圧縮応力を検出するセンサ材の見かけのヤング係数を同等にすることを目標とした。ヤング係数が同等であれば、圧縮力が作用した際に生じるひずみがセンサ材自体と周辺コンクリートとで同等となり、センサ材の材質によらずに周辺コンクリートと同じ挙動を計測できると考えた。コンクリートのヤング係数 E_c を 30kN/mm^2 、センサ材を鋼材と仮定しヤング係数 E_s を 210kN/mm^2 と想定する。センサの概形は端部に対して中央部の断面積が小さいダンベル型とし、応力を受けた際のひずみがコンクリートの一致するような断面を算定した。その結果、図 1(a)のようにセンサ中央部の面積を端部の 0.1 倍とすることでセンサの全体ひずみとコンクリートひずみが一致し、センサ材が周辺コンクリートと同等の見かけのヤング係数となることがわかった。

これを踏まえ、図 1(a)のような直径 20mm の断面と、直径 8mm の断面を持つ応力センサを制作した。なお、応力センサ中央部断面寸法はひずみゲージの貼付箇所の平面区間を考慮して決定した。センサ材に使用する材料は、S50C（機械構造用炭素鋼）とし、ヤング係数を 210kN/mm^2 とした。

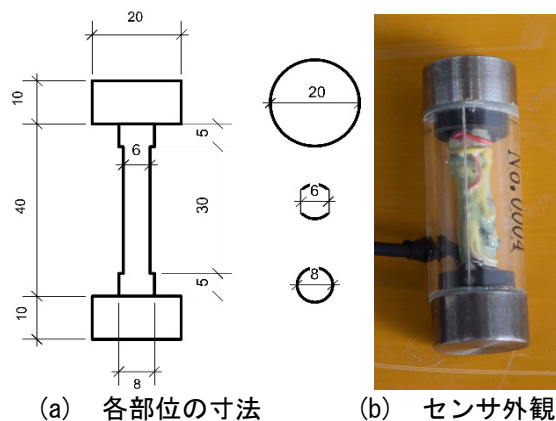


図 1 応力センサ

応力センサに作用する応力の計測については、応力センサの中央部にひずみゲージを取付け出力されたひずみへ校正係数を乗じることで応力を算定する。校正係数については、別途校正試験を行い、作用応力と出力ひずみの関係からセンサごとに変換係数を決定した。センサ中央部は、ひずみゲージ貼り付け部分を防水加工により保護するとともに、周囲のコンクリートによる横方向への力に対して抵抗し、センサ中央部のゲージ貼付部に周辺拘束を作用させないために当該部位が中空形状となるよう設計し、アクリル板による縁切りを行った。

② 応力センサの検証実験

応力センサの動作確認、市販センサとの出力比較検証を目的として、部材内に提案センサを埋設した2種類の部材実験を実施した。ここでは、RC梁試験体における提案センサの動作状況について詳説する。本実験では特に一般的なRC梁の力学的抵抗機構に基づいて主要位置に提案センサを埋設し、実測値と理論の対応について検討を行った。

図2に試験体形状およびセンサ位置を示す。梁試験体は小林、運上およびSALAMY¹⁾が実施したディープビーム試験体のうち、試験体B10DおよびB10.3Dの形状を再現した。なお、本論文ではB10.3Dの結果について報告する。試験体B10.3Dは断面が360×675mmであり、せん断破壊を先行させることを目的として、主筋降伏が生じないように引張鉄筋比を2.0%とするとともにせん断補強筋を全く入れないことにした。センサは図5に示すとおり、せん断力作用時にアーチ抵抗機構によりコンクリート内部に形成される圧縮ストラットに沿って配置した。実験では5000kNアムスラー試験機を使用し4点曲げ試験を実施した。なお、梁試験体に使用したコンクリートの1軸圧縮強度は25.5N/mm²であった。

図3に4点曲げ試験における各センサによる応力-変形関係を示す。なお、図6上部には4点曲げ試験の荷重-変形関係を併記する。

図3をみると、曲げによる圧縮応力を受ける部位であるセンサ3は荷重の上昇に応じて応力が上昇する傾向を示した一方、圧縮ストラットに沿って設置したセンサ1および2は最大耐力までほとんど圧縮応力を計測できなかった。この傾向はもう一方の試験体B10Dでも同様であった。この理由としては、仮定した圧縮ストラットはコンクリート内で梁主筋のみが存在する理想的な場合を想定しているものに対し、本試験体ではせん断力が作用しない区間に主筋位置固定のための鉄筋をわずかながら配置していることから実際の応力伝達機構が変化している可能性が考えられる。

また、最大耐力到達以前にセンサ3はコンクリートの1軸圧縮強度である25.5N/mm²を超え、最大耐力後、なだらかに耐力を保持した8~11mmの変形区間では最大で48N/mm²もの応力を記録した。このようにコンクリート内部では1軸圧縮強度を上回る応力を示す場合があることわかった。

(2) 微小変形領域から部材終局領域に至る有開口耐震壁の力学的抵抗機構の解明

RC規準に記されている複数の開口を一つの包絡開口にみなす手法の評価を目的として、開口の間隔とサイズが異なるが包絡開口とした場合に同等の耐力となるRC造耐震壁の静的荷重実験を実施した。ここでは1/3縮尺の耐震壁試験体に対して提案センサを埋設し、地震時作用に相当正負交番荷重に対する耐震壁の壁板内における応力負担状況の計測を試みた。

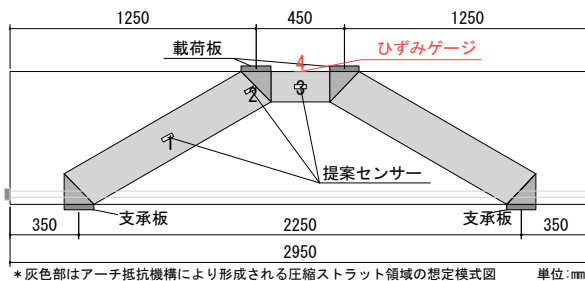


図2 梁試験体とセンサ位置

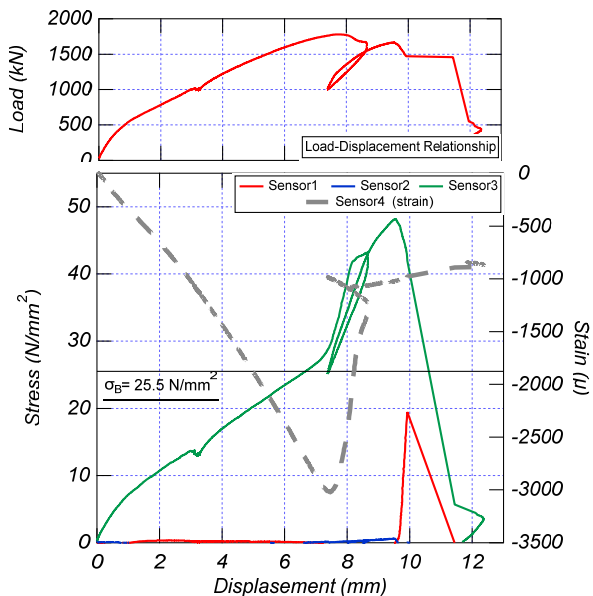


図3 梁の4点曲げ試験結果とセンサの挙動

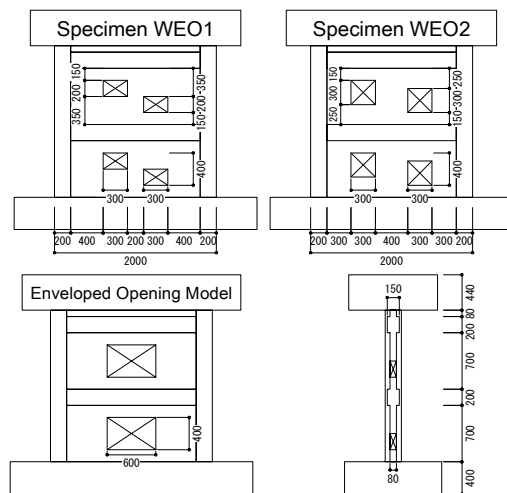


図4 試験体形状

① 試験体

図4に試験体形状を、表1に試験体諸元を示す。試験体は実物大の約1/3スケールで一般的な6層程度のRC造建物の下部を想定した連層耐震壁である。RC規準では投影長さや投影高さから決まる包絡開口、技術解説書では複数の開口を一つの大きな開口で囲う包絡開口がそれぞれ定められており、試験体 WEO1, WEO2 は RC 規準の手法で包絡開口とみなした場合、600mm×400mmの開口サイズとなるよう、元の開口形状と開口間隔を変数としたものを2体作成した。試験体 WEO1 は同一層に300mm×200mmの2つの矩形開口を対角配置し、WEO2の開口は300×300mmの矩形開口とし開口間隔をWEO1より大きくした。

表1 試験体諸元

試験体		WEO1, WEO2			
柱	B×D	200×200(mm)			
	主筋	12-D13($P_g=3.8\%$)			
	帯筋	D6@60($P_w=0.53\%$)			
	副帯筋	2-D6@120($P_w=0.27\%$)			
梁	B×D	150×200(mm)			
	主筋	4-D10($P_g=3.8\%$)			
	あばら筋	2-D6@100($P_w=0.42\%$)			
壁	壁厚	80(mm)			
	縦筋	D6@100 千鳥($P_s=0.4\%$)			
	横筋	D6@100 千鳥($P_s=0.4\%$)			
	開口補強筋	D10			
せん断スパン比 M/QL		1.0			
軸力比 N/BD σ_B		0.16			
RC 規準による低減率		WEO1	0.6	WEO2	0.6
技術解説書による低減率		WEO1	0.5	WEO2	0.44

② 荷重方法

試験体の荷重装置を図5に示す。試験体は反力床にPC鋼棒で固定し、2本の水平ジャッキで上スタブに正負繰り返しの加力を行う。試験体への加力は変位制御とし、部材角1/1000rad.から1/1250rad.までの部材角区間の微小変形領域を含む正負交番漸増荷重を実施した。

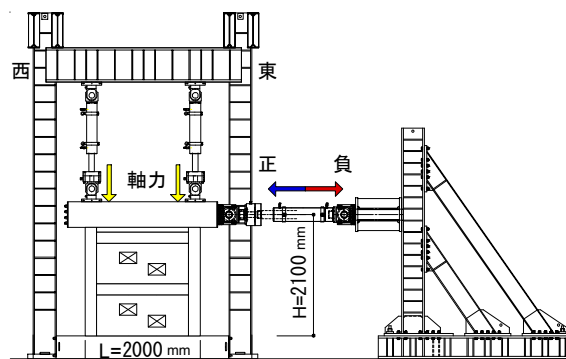


図5 荷重装置

③ 荷重方法

写真1に応力計の写真と取り付けの様子を、図6に応力計取り付け位置を示す。図6の黄色で示した応力計は、壁脚部において開口直下とその他の部分との応力状況の差異を計測することを意図した。また同図で、赤及び青色で示した応力計は、壁板に形成される圧縮ストラットの応力状況を計測することを意図した。なお応力計の測定には方向性が有り、青色は正荷重時の、赤色は負荷重時の応力の測定を考慮している。取り付けは配筋組立時に応力計を鋼線に括り付け、鉛直応力計は水平から90度、その他の応力計は水平から45度になるよう鋼線を試験体の配筋に取り付けた。

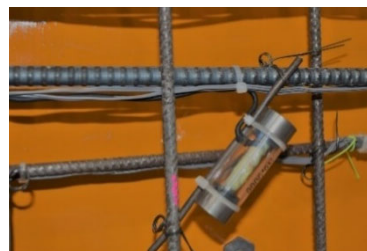


写真1 応力型取付状況



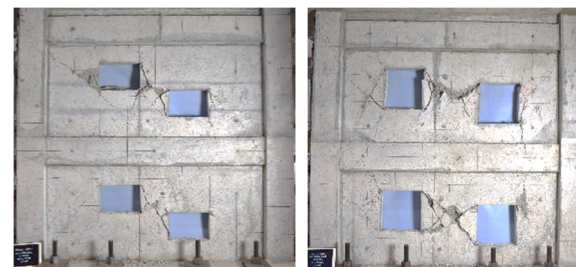
● 鉛直測定用応力計 ● 正荷重時測定用応力計 ● 負荷重時測定用応力計

図6 試験体1層応力計取り付け位置

④ 実験結果

各試験体の最終破壊性状を写真2に、荷重一部材角関係を図7にそれぞれ示す。なお、図7には各計算規基準による算定結果を併記している。

試験体 WEO1 は、正荷重では $R=+1/250rad.$ の1サイクル目で最大せん断耐力+567.5kN を記録し、 $R=+1/200rad.$ では+0000kN で、最大せん断耐力と比較して8%程せん断耐力が低下した。負荷重では $R=-1/250rad.$ の1サイクル目で-539.0kN を記録し、 $R=-1/200rad.$ の1サイクル目では-535.0kN とほぼせん断耐力低下がみられず、正荷重と比べてもほぼせん断耐力低下がみられなかった。試験体 WEO2 は、正荷重では $R=+1/250rad.$ の1サイクル目に+526.0kN を記録した。 $R=+1/200rad.$ の1サイクル目では+484.0kN と最大せん断耐力と比較して8%程せん断耐力が低下した。負荷重では $R=-1/250rad.$ の1サイクル目で-475.5kN を記録し、 $R=-1/200rad.$ の1サイクル目では-452.0kN で5%のせん断耐力低下で、WEO1 と同等に負荷重の耐力低下は小さい傾向が見られた。



(a) WEO1 (b) WEO2

写真2 最終破壊性状

図8に1層壁板内の応力計と同位置のコンクリート表面に張り付けた3軸ゲージによる各サイクルピーク時の応力度-サイクル関係を示す。この項ではストラット式で仮定される壁板内

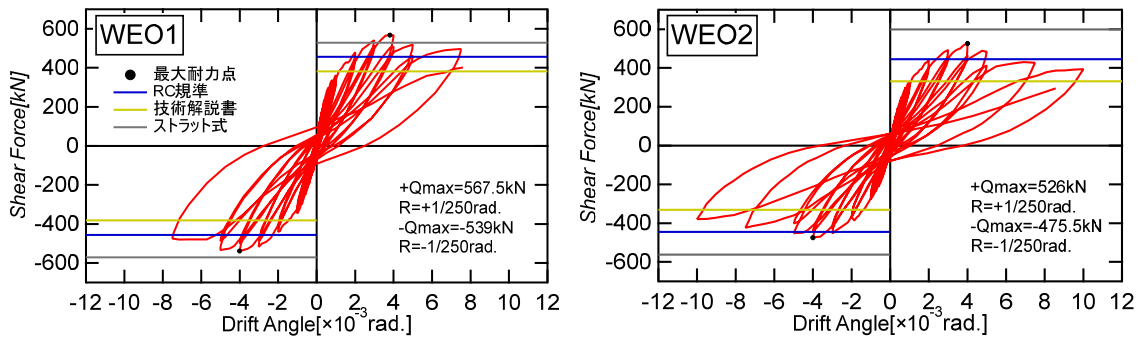


図7 荷重一部材角関係

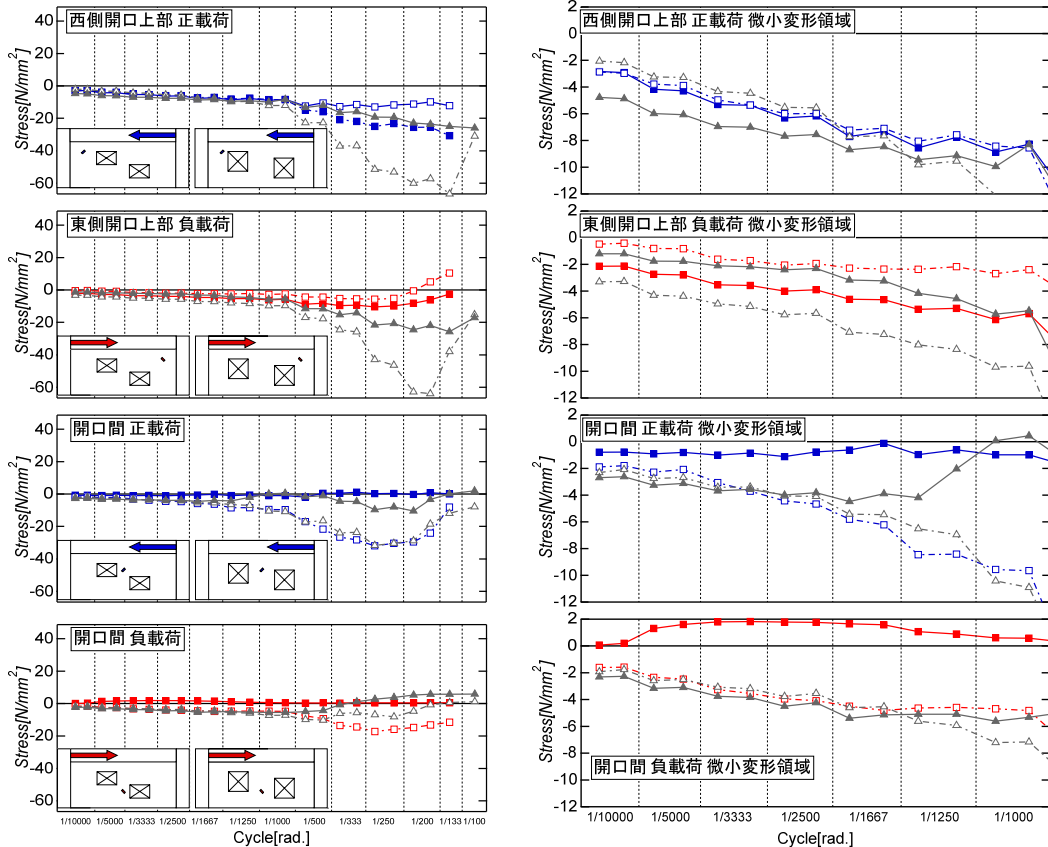


図8 1層壁板内の応力度—サイクル関係(左:全体, 右:微小変形領域)

の圧縮ストラットにおける応力伝達性状を確認することを目的としている。応力計の取付精度の都合上、取り付け部位の主応力方向と実際に取り付け方向とは誤差がある可能性があるため、本項では3軸ゲージより算出される主応力方向を基に応力計測定方向の応力度について考察することとした。なお同図には左側に実験終了時までの結果を、右側に微小変形領域付近である $R=1/1000rad$ までのサイクルの結果を示す。また同図では正側を引張、負側を圧縮とする。

応力計と3軸ゲージによる最小主応力を比較すると、試験体WEO1の西側開口上部やWEO2の開口間壁板では微小変形領域までおおよそ近似している。また荷重サイクルの増加とともに3軸ゲージと応力計の値に解離が生じているが、これはひび割れの増加に伴い3軸ゲージが剥がれるため、測定結果が不安定になると考えられる。特にWEO2の開口間にある正荷重方向の応力計は $R=1/1250rad$ 以降3軸ゲージとの対応が悪く、その傾向が顕著といえる。一方、WEO2の西側開口上部や両試験体の東側開口上部では、応力度の値が異なるものの圧縮応力度の増加傾向は一定で推移していることから応力計設置方向と作用主応力方向にズレがあると考えられる。

開口間と開口上部の応力計を比較すると、WEO1の開口間の正負方向の応力計では、ともに応力度が小さいことが確認できる。これは測定箇所壁板面積が小さいため、応力が伝達されにくいものと考えられる。また各箇所の応力推移は、荷重サイクルの進行に伴い圧縮応力度が増加していることがわかる。しかし荷重方向別で応力度状況を比較すると、正荷重より負荷重での荷重サイクルの進展に伴う圧縮応力度の漸増傾向が小さく、負荷重の最大せん断耐力が低くなった要因だと推察される。

[参考文献] 1) 小林寛, 運上茂樹, Mohammad Reza SALAMY: 大型ディーブーム部材のせん断耐力に関する実験的検討, シクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.829-834, 2005

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計9件)

- ①櫻井真人, 及川有也, 西田哲也: 複数開口を有する RC 造耐震壁の構造性能に関する研究 (その12) 包絡開口とみなされる有開口耐震壁の静的載荷実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 査読無, (採録決定), 2019
- ②及川有也, 櫻井真人, 西田哲也: 複数開口を有する RC 造耐震壁の構造性能に関する研究 (その13) 包絡開口とみなされる有開口耐震壁の応力性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 査読無, (採録決定), 2019
- ③及川有也, 櫻井真人, 西田哲也: 包絡開口とみなされる有開口 RC 造耐震壁の静的載荷実験, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 41 (採録決定), 2019
- ④及川有也, 櫻井真人, 西田哲也: 包絡開口とみなされる RC 造有開口耐震壁の FEM 解析, 日本建築学会東北支部研究報告集, 査読無, Vol. 82, (採録決定), 2019
- ⑤千葉幸大, 櫻井真人, 小林淳, 西田哲也: 開口を有する RC 造耐震壁の復元力特性のモデル化手法, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 40, No. 2, pp. 265-270, 2018
- ⑥三浦翔太, 櫻井真人, 小林淳, 西田哲也: 開口を有する RC 造耐震壁の最大耐力後の挙動を考慮した FEM 解析モデル化手法, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 40, No. 2, pp. 271-276, 2018
- ⑦千葉幸大, 西田哲也, 櫻井真人: 開口を有する RC 造耐震壁の復元力モデル化手法に対する適用性の検討, 日本建築学会東北支部研究報告集, 査読無, Vol. 81, pp. 49-52, 2018
- ⑧三浦翔太, 西田哲也, 櫻井真人: 耐力低下時挙動を考慮した開口周比の異なる RC 造有開口耐震壁のパラメトリック解析, 日本建築学会東北支部研究報告集, 査読無, Vol. 81, pp. 53-56, 2018
- ⑨櫻井真人: RC 部材の構造実験に用いる小型応力センサーの検証実験, 秋田県立大学ウェブジャーナル B (研究成果部門), 査読無, Vol. 4, pp. 44-49, 2017

<http://id.nii.ac.jp/1180/00000722/>

〔学会発表〕(計4件)

- ①千葉幸大, 櫻井真人, 小林淳, 西田哲也: 開口を有する RC 造耐震壁の復元力特性のモデル化手法, コンクリート工学年次大会 (神戸), 兵庫, 2018
- ②三浦翔太, 櫻井真人, 小林淳, 西田哲也: 開口を有する RC 造耐震壁の最大耐力後の挙動を考慮した FEM 解析モデル化手法, コンクリート工学年次大会 (神戸), 兵庫, 2018
- ③千葉幸大, 西田哲也, 櫻井真人: 開口を有する RC 造耐震壁の復元力モデル化手法に対する適用性の検討, 日本建築学会東北支部研究報告会, 青森, 2018
- ④三浦翔太, 西田哲也, 櫻井真人: 耐力低下時挙動を考慮した開口周比の異なる RC 造有開口耐震壁のパラメトリック解析, 日本建築学会東北支部研究報告会, 青森, 2018

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。