

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：21401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15140

研究課題名（和文）オンライン仮動的実験に基づくRC造有開口耐震壁の数値解析モデルの確立

研究課題名（英文）Establishment of a Numerical Analysis Model for RC Shear Walls with Openings Based on Pseudo-Dynamic Experiments

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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、地震時構造性能の把握が困難とされている開口を有する鉄筋コンクリート（RC）造耐震壁に対し、提案した復元力特性モデル評価手法に対し実験的、解析的なアプローチによりその妥当性の検証を目的としている。FEMによるパラメトリック解析では曲げ降伏のしやすさを示すせん断スパン比の増加に伴い徐々に提案モデルの算定精度が低下することを示した。また、地震時の有開口耐震壁の応答性状を検証すべく開口位置・個数が異なる耐震壁の擬似動的実験を実施した。その結果、およそ最大耐力以降では開口条件の違いにより応答性状に差異が生じるなど、今後の提案モデルの継続的な検証に対して非常に有用なデータが得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

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）造耐震壁部材においてコンピュータ数値解析で適用可能な復元力特性モデルを確立することは、建築構造設計者の設計自由度の向上に寄与するものである。提案モデルを市販の構造解析ソフトウェアに採用される柱梁モデルと同等の実用レベルにまで再現精度の向上を図ることができれば、有開口耐震壁部材を含む建物の応答解析の予測精度向上、これまでかなり安全側に評価していた有開口耐震壁部材の耐力を有効活用することによる効率的設計と建築資材コスト低減の実現、新築設計のみならず既存建物の耐震性能評価にも適用可能と多くのメリットが期待できる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to investigate the validity of the proposed backbone curve model for reinforced concrete (RC) shear walls with openings, whose seismic performance is considered to be difficult to understand, through experimental and analytical approaches. Parametric FEM analysis shows that the accuracy of the proposed model gradually decreases as the shear span ratio, which indicates the susceptibility to flexural yielding behavior, increases. In addition, Pseudo-dynamic tests were conducted to investigate the response of shear walls with openings during a seismic load with different positions and number of openings. As a result, it was found that the response characteristics of the walls differed depending on the opening conditions after the approximate maximum shear capacity, which is very useful data for the continuous verification of the proposed model.

研究分野：鉄筋コンクリート構造

キーワード：RC造耐震壁 有開口耐震壁 復元力モデル 擬似動的実験 FEM解析

1. 研究開始当初の背景

日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」¹⁾では、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存建物の耐震診断において従来から慣用されてきた。しかし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値が算定されるため、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。

一方、既往の実験結果^{例えば²⁾}や実際の地震による有開口耐震壁の破壊状況³⁾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)により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。上記理由から、有開口耐震壁部材は柱梁フレームよりも高い剛性・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。このような背景と現状を打破すべく、国土交通省「建築基準整備促進補助金事業」の一環事業「開口の数や位置を考慮した鉄筋コンクリート造の耐力壁の強度・剛性評価方法に関する実験・解析」で、複数開口を有するRC造耐震壁の構造実験、有限要素法(以下、FEM)を活用したパラメトリック解析を実施し、開口位置の違いが耐震壁内部の応力伝達時の圧縮ストラットに及ぼす影響を明らかにしてきた。そして開口位置によらず定量的評価が可能な簡便なせん断強度評価式を提案し、当該手法が実験値に対し $\pm 20\%$ 以内の良好な精度を有することを示した⁴⁾。一方、有開口耐震壁の曲げ強度についてはマクロモデルや塑性理論による終局強度と変形能の評価法の検討事例^{例えば⁵⁾}があるが、地震時の繰り返し入力方向によって耐震壁全体の強度が異なる点を適切に考慮できないことや、開口数が1つの耐震壁に対する検討のため開口数が複数となる場合は適用が困難となる点が問題となる。また、日本コンクリート工学会の研究委員会報告においては「有開口耐震壁の曲げ強度は開口の存在によって低下するせん断強度の影響を受けることから単純な袖壁の累加により決定されるべきでない」との指摘もある。一方、曲げ破壊型有開口耐震壁はポストピークの耐力低下がせん断破壊型のものよりも緩やかになることが予想されるが、開口条件との因果関係は明らかとなっていない。

2. 研究の目的

以上の問題に対し、有開口耐震壁の曲げ抵抗性状についても壁脚部における実際の応力伝達メカニズムに立脚した視点により、定量的な評価手法を確立する必要があると考えた。これまでの実験結果の耐震壁脚部の変位・ひずみおよび応力分布の分析により、有開口耐震壁においては、開口により分割される個々の袖壁ならびに壁板が独立して曲げ抵抗に寄与している傾向を明らかにする一方、開口直下の腰壁がある程度のせん断力を伝達することから個々の部材が完全に独立した挙動とはならず、耐震壁全体としてもある程度は一体的に抵抗するとの仮説を立てた。これに基づき図1のように有開口耐震壁の曲げ作用に対し、曲げひび割れ時発生時と終曲強度時に対する評価手法を提案するとともに、その結果として3折れ線モデルによる曲げ強度-曲率関係の数値計算モデルを導出するに至った。せん断作用に対しても実験結果に基づいたバイリニア型のモデル化を行い、最終的に図3に示す有開口耐震壁の4折れ線モデルを作成し、構造実験結果と非常に良い対応となることを示した⁶⁾。

これまでに示した申請者のせん断ならびに曲げ評価手法はそれぞれの実際の応力伝達メカニズムに着目し適切にモデル化したのみならず、図1および図2にもあるように視覚的にも理論的に明快である程度簡便な手法にまとめている。これにより将来的にユーザーとなりうる構造設計者が“扱いやすい”ものとした点に特徴がある。

本計画では、これらの評価手法に基づくコンピュータ数値解析に適用可能な有開口耐震壁部材の復元力特性モデル確立を目指す。

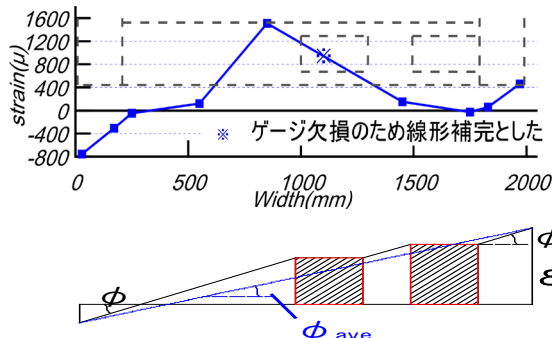


図1 耐震壁脚部の応力性状(上)とモデル化(下)

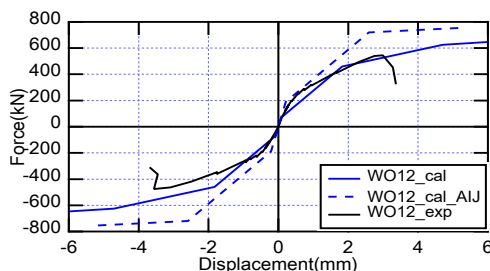


図2 荷重-曲げ変形関係 (実験値, 提案手法, AIJ 現行設計式比較)

3. 研究の方法

第1年度ではFEM解析を活用した提案復元力特性モデルの曲げ降伏型耐震壁への適用性の検証を行った。当該モデルではこれまでにせん断破壊型の有開口耐震壁に対する適用性を明らかにできた一方、近年の高層建物に多く存在する曲げ降伏型の有開口耐震壁については未検討である。曲げ降伏型有開口耐震壁の場合、靱性的な挙動が卓越することから最大耐力以降の耐力低下が緩やかとなり、適切なモデル化により設計段階で耐震壁が大変形時に有するエネルギーを有効に算定できる可能性がある。以上の考えからまずはFEM解析により、最大耐力に至るまでの曲げ降伏型有開口耐震壁の解析結果と提案モデルの対応性を検証し、提案モデルが曲げ降伏型有開口耐震壁にも適用可能かを確認した。その後、開口位置を解析変数とした曲げ降伏型有開口耐震壁のパラメトリック解析を実施した。

続いて、第2年度ではオンライン実験と時刻歴応答解析を用いた復元力特性モデルの検証を行った。本検討では時刻歴応答解析における提案数値解析モデルの妥当性を実験的に明らかにすることを目的として、図3に示すオンライン仮動的実験手法による構造実験を実施した。オンライン仮動的実験手法は地震時の応答計算をコンピュータ上でを行い、その時の建物の応答状態をコンピュータから構造実験の加力システムにオンラインで伝達し、損傷状況などを詳細に再現する手法であり、従来の油圧ジャッキによる静的載荷システムでも動的な振動実験と同等の性状が得られることに特徴がある。本検討では、実験時の応答結果とFEM時刻歴応答解析の結果の比較によりモデルの妥当性を検証する。試験体は6層程度のRC造建物の下部2層を想定する。せん断破壊型および曲げ降伏型の複数開口耐震壁を各1体用意し、せん断破壊型試験体は最大耐力以前まで、曲げ降伏型試験体は最大耐力の80%まで耐力低下が生じた時点までに着目して、実験結果、提案数値計算モデルによる時刻歴応答解析結果およびFEM解析結果との対応性について検証を行った。

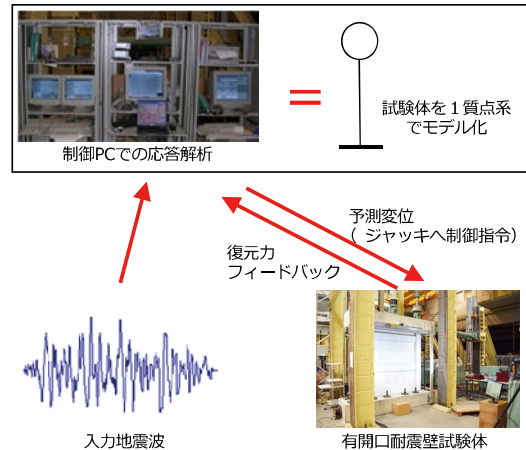


図3 オンライン実験イメージ

4. 研究成果

(1) FEM解析を活用した提案復元力特性モデルの曲げ降伏型耐震壁への適用性の検証

解析対象は既往研究における実験試験体⁷⁾とした。本報告では試験体WO2を一例とした要素分割図を図4に示す。試験体は6層程度のRC造建築物における連層耐震壁の下部2層を想定し、実大の1/3スケールのものでした全5体である。実験変数は開口数および開口位置としている。上記に対し提案復元力モデルの曲げ降伏型耐震壁への適用性の検証を念頭にせん断スパン比を1.0, 1.38, 1.8と変化させたパラメトリック解析を実施した。

図5にWO2の解析における荷重-曲げ変形関係ならびに提案モデルによる算定結果の比較を示す。せん断スパン比1.0と1.38では鉄筋降伏点におけるせん断力算定値とFEMの解析結果との対応が良いことが確認できた。しかしながらせん断スパン比1.8のモデルでは、鉄筋降伏点におけるせん断力算定値がFEM解析結果よりも小さくなるのがわかる。図6に鉄筋降伏時点における耐震壁脚部のひずみ分布における実験結果と提案モデルによる算定結果の比較を示す。本図によるといずれも各部位のひずみ挙動に対し耐震壁脚部全体のひずみ挙動として一様に評価する提案復元力モデルの手法により概ね脚部ひずみ分布を概ね再現できている。一方で圧縮側袖壁となる幅0mmから500mmの領域においては提案モデルではひずみ分布傾向を高い精度で再現できていると言い難く、提案モデルのほうが耐力を低めに評価していると推察される。

これらの傾向は他の解析ならびに算定結果においても同等となり、提案解析モデルではせん断スパン比1.0から1.4程度では精度良く挙動を評価できる一報、以降はせん断スパン比の増加に伴い、最大せん断力を過小評価しうることを示した。

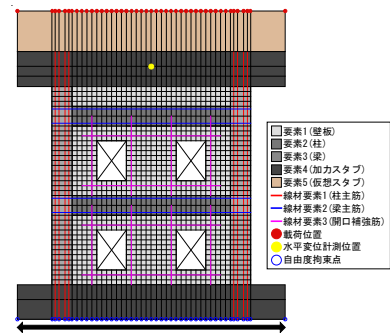


図4 要素分割図

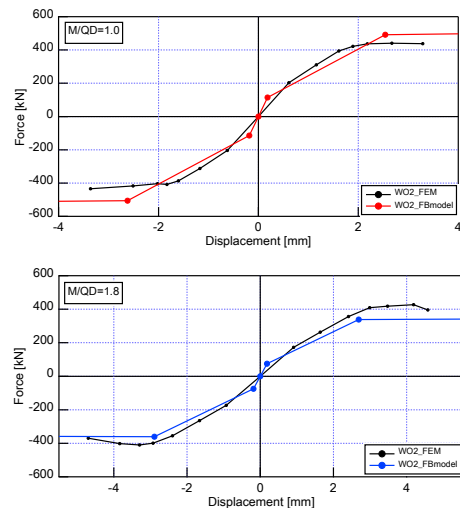


図5 WO2 荷重-曲げ変形関係算定結果

(2) オンライン実験と時刻歴応答解析を用いた復元力特性モデルの検証

複数開口を有する RC 造耐震壁の評価法の精度向上ならびに地震応答解析手法の確立に向けた技術資料の整備を目標として、有開口 RC 造耐震壁試験体の擬似動の実験を実施し、開口の個数・位置の違いが地震応答性状に及ぼす影響を検討するとともに FEM 動的解析を実施した。

試験体は既往の RC 造耐震壁の振動実験⁸⁾を参考に、6 層程度の RC 造建築物における連層耐震壁の下層部を想定したもの 2 体である。各試験体とも実大の約 1/3 スケールとし、実験変数には開口数と開口位置を選択した。試験体 WO1PD は開口数が各層 1 個で壁板中央に配置したものとし、試験体 WO2PD は開口数が各層 2 個でそれぞれの開口を壁板中央から少し離れた位置に配置したものである。

実験に用いた入力地震波は図 8(a)に示す兵庫県南部地震における神戸海洋気象台観測波 (JMA KOBE)⁹⁾ の主要動 10 秒間である。なお加速度倍率は変更していない。ただし試験体が 1/3 スケールであることから、図 8(b)に示すように相似則を満足するため時間軸に $1/\sqrt{3}$ 倍を乗じて換算したものをを用いている。なお、実験はこの換算時刻 5s 以降で応答変位波形が漸減した時点で終了することとした。

図 9 に変位応答時刻歴を示す。両試験体で変位応答時刻歴を比較すると、両試験体が主筋降伏ならびに試験体 WO2PD が最大耐力に到達するまでおよそ同等の応答性状を示していることがわかる。一方、WO2PD が最大耐力に達した以降はおよそ時刻 3s までは同等の応答性状を示したが、以降はわずかに位相のずれや応答振幅が異なる傾向がみられた。これは、最大耐力到達後の有開口耐震壁では開口の個数や配置の条件によって試験体の最大耐力ならびに耐力低下挙動が異なることが影響を及ぼしているためと推察される。

図 10 に各試験体のせん断力-変位関係を示す。同図には、筆者らが提案している有開口耐震壁のせん断強度評価式 (以下、ストラット式) ならびに復元力モデルによる算定結果を併せて示す。図 10 をみるといずれの試験体においても負荷荷側で最大耐力を発現している。また、試験体 WO1PD ではおよそ応答変位 13mm 付近で正負とも最大耐力に到達したのに対し、WO2PD では中央壁板が先行して損傷が卓越した影響により正負とも 8mm 程度で最大耐力に達している。また、最大耐力も WO1PD よりも WO2PD のほうが 13% 程度低い結果となった。一方、最大耐力後の挙動は、スケルトンにおける割線剛性に基づく等価周期をみると各試験体ともほぼ同等の挙動を示した 2.34s では試験体 WO1PD で 0.184s、WO2PD で 0.172s となり、WO1PD が 7% ほど大きい結果となった。これに対し、主筋降伏後に負側最大応答を示した 2.45s 付近では WO1PD で 0.212s、WO2PD で 0.242s となり、正側で大きな応答を示した 3.00s 付近では WO1PD で 0.224s、WO2 で 0.258s となり、いずれも WO2PD のほうが 15% ほど大きい傾向となったものの、各試験体で変位応答性状に大きな影響を及ぼすほどの明確な差異はみられない結果となった。これは入力地震波による最大応答変位がおよそ 15mm で、同一形状試験体の既往の静的載荷実験において急激な耐力低下を呈した 20mm 以上の領域まで変形が生じなかったためである。このことから最大耐力以降に両試験体の応答性状にそこまで大きな差異がみられなかったものと推察される。

提案モデルによる算定結果をみると、試験体 WO1PD においては荷重-変形関係の概形を多折れ線による復元力モデルにより概ね模擬できていることがわかる。一方、WO2PD では最大耐

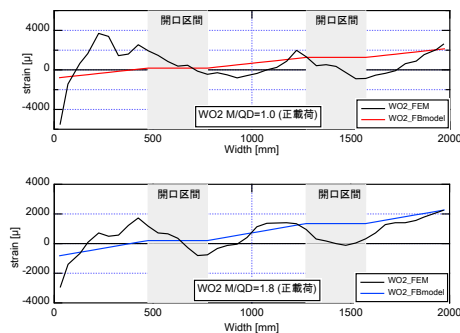


図 6 WO2 脚部ひずみ分布の比較

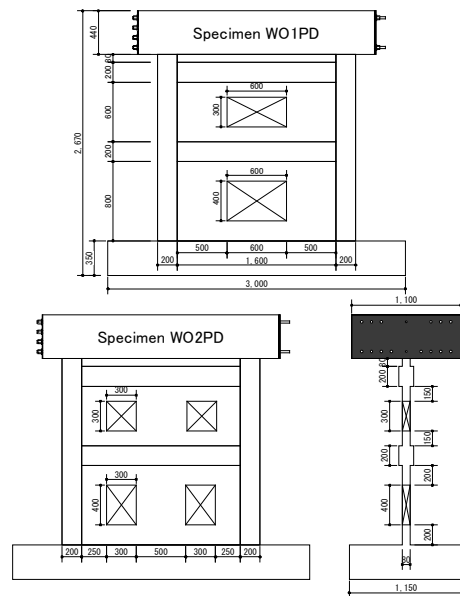
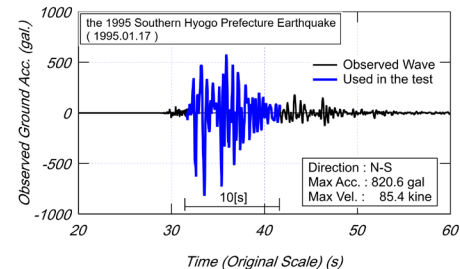
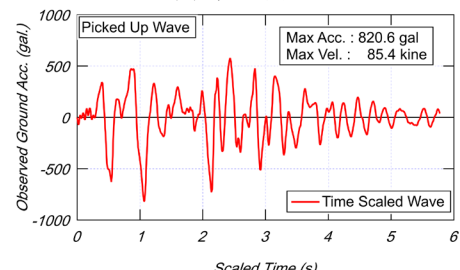


図 7 試験体形状



(a) 観測波形



(b) 時間縮尺適用後

図 8 使用地震波

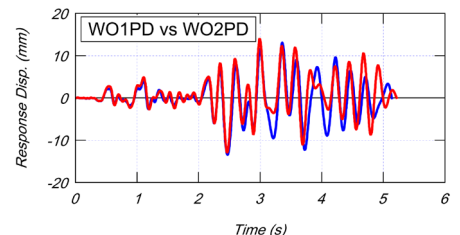


図 9 変位応答時刻歴波形

力時変形算定値が 10.608mm となり実験値よりも大きく算定される結果となった。また、いずれの試験体も降伏時耐力がおよそ 490kN と算定されており、WO1PD 実験値-410.5kN および WO2PD 実験値-428kN よりもおよそ 15%大きく評価する結果となった。提案モデルにおいては降伏耐力時から部材が曲げ降伏型となった場合の大変形挙動におけるさらなる精度向上が必要であるといえる。また、スケルトン概形との対応状況の定量的な評価については今後の検討課題としたい。

図 11 に時刻歴応答波形における FEM 動的解析結果と実験結果の比較を示す。FEM モデルは第 1 年度に行った解析的検討で用いたものを準用し、当該モデルに実験で使用した加速度波形を入力したものである。ただし、軸力作用については、これまでのスタブ上端の前節点に均等荷重を与える方式から、実験時のジャッキ取り付け位置に沿って同等質量のおもりを作用させる形式とした。漁師検体とも最大応答に到達する 3s 付近まで実験と解析で良好な対応を示しているといえる。一方、3s 以降ではいずれも各サイクルのピークが一致しなくなるとともに位相差もみられるようになってきている。これは FEM モデルでは最大耐力・最大応答後において実験時の等価周期と差異が目立つようになってきていることを示唆しており、せん断挙動が卓越する本試験体では耐力低下の挙動をうまく追跡できていないものと推察される。このことから最大耐力・最大応答後でも実験時の性状を良好に再現できる材料構成則を検討する必要があるといえる。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説
- 2) 小野正行，徳弘育夫：鉄筋コンクリートの開口の影響による耐力低減率の提案，日本建築学会構造系論文報告集，第 435 号，pp.119-129，1992.5.
- 3) 建設省建築研究所：平成七年度兵庫県南部地震被害調査報告書，1996.3.
- 4) 櫻井真人，倉本洋，松井智哉：複数開口を有する RC 造耐震壁のせん断強度算定法，日本建築学会構造系論文集，No.679，pp.1445-1453，2012.9
- 5) 木村匠，壁谷澤寿海：鉄筋コンクリート耐震壁の開口による終局強度低減率，コンクリート工学年次論文報告集，11-2，pp.585-590，1989.6.
- 6) 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，日本コンクリート工学会年次論文報告集，Vol.40，No.2，pp.265-270，2018.7
- 7) 倉本洋，櫻井真人，河野進，坂下雅信：建築基準法等に係る技術基準整備のための事業(平成 20~23 年度報告)有開口耐力壁の変形能力の評価等に関する実験・解析，ビルディングレター No.563，pp.2-13，2012.11
- 8) 松井智哉，秋田知芳，壁谷澤寿海，加藤敦：鉄筋コンクリート造耐震壁の動的実験，コンクリート工学年次論文集 Vol.25，No.2，pp.206-209，2003
- 9) 気象庁ホームページ：
https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/hyogo_nanbu/index.html
 (閲覧日：2020 年 11 月 1 日)

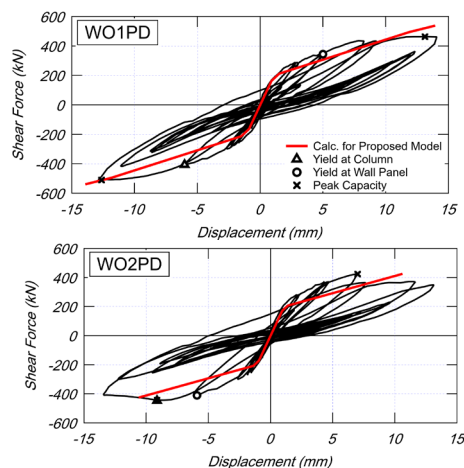


図 10 せん断力-変位関係

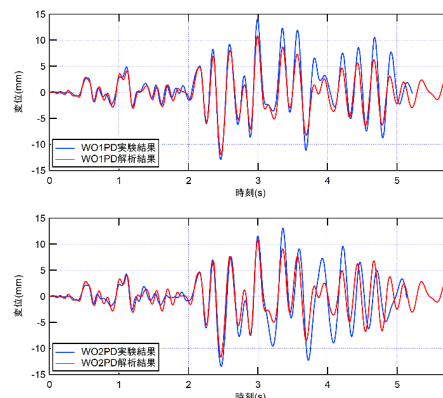


図 11 時刻歴応答波形における FEM 動的解析結果と実験結果の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1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 櫻井真人, 菅野秀人, 西田哲也	4. 巻 43
2. 論文標題 複数開口を有するRC造耐震壁の擬似動的実験	5. 発行年 2021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 (採録決定)
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 櫻井真人, 菅野秀人, 西田哲也	4. 巻 構造
2. 論文標題 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14) 有開口耐震壁の擬似動的実験	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 (採録決定)
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2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 櫻井真人
2. 発表標題 複数開口を有するRC造耐震壁の擬似動的実験
3. 学会等名 コンクリート工学年次大会2021 (名古屋)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 櫻井真人
2. 発表標題 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14) 有開口耐震壁の擬似動的実験
3. 学会等名 2021年度日本建築学会大会 (東海)
4. 発表年 2021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
---------	---------