

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：21401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04336

研究課題名(和文)建物部材形状・構造種別を問わないサブストラクチャ仮動的実験手法の開発

研究課題名(英文) Development of a Substructure Pseudo Dynamic Test Regardless of Building Member Shape and Structure Type

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・准教授

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)：本研究は、建築・土木系の鉄筋コンクリート構造物の構造実験の主要な手法であるオンライン仮動的実験手法に対し、応答計算のフィードバックに新たに非線形有限要素法(FEM)による増分解析結果を逐次反映させながら実験を遂行することで、想定建物の形状の制限を取り払うとともに応答結果のさらなる精度向上を図るシステムの開発について検討した。検討ではFEMモデルの構築、FEM解析結果フィードバックモジュールの既存システムへの追加導入、改良したシステムの検証実験を行った。実験の結果から、提案手法については現時点で解決すべき課題が多く見られ、今後に向けてこれらについて整理を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

建物部材のうち、数値解析部分と実験部分とで区別の必要はあるものの、開発システムは任意形状の建物に対し大規模なRC部材の動的実験設備がなくとも地震時応答性状についてさらなる精度向上が期待できる可能性を示した。このことから、学術分野の諸研究の高精度化や部材開発の現場での活用ニーズが広まることが期待され、我が国の建物耐震技術や設計基準の高度化に貢献しうる成果といえる。

研究成果の概要(英文)：This study examined the development of a system that removes the limitation of the assumed building geometry and further improves the accuracy of the response results by conducting experiments while reflecting the results of incremental analysis using a new nonlinear finite element method (FEM) in the feedback of response calculations, in contrast to the pseudo dynamic test that is the main method for structural tests on RC structures in the architectural and civil engineering fields. The development of a system that improves the accuracy of the response results and removes the limitation of the assumed building geometry was studied. In this study, we constructed a FEM model, added a FEM analysis result feedback module to the existing system, and conducted verification experiments of the improved system. From the results of the experiments, we found that the proposed method has many issues that need to be resolved at this point, and we have organized these issues for the future.

研究分野：建築耐震構造

キーワード：鉄筋コンクリート造部材 オンライン実験 FEM

1. 研究開始当初の背景

建築・土木構造系分野では、部材の地震時挙動解明や免制震・補強部材の開発シーンで実物の模擬試験体を用いた構造実験が行われてきた。このうち、振動台などにより試験体に地震力を作用させる動的実験は建物の応答性状を最も簡単に入手可能であるが、RC 部材が対象だと実規模地震の再現に設備が大掛かりとなる欠点がある。これを解決するため、1970 年代より伯野らや高梨・岡田らにより仮動的実験手法¹⁾が開発された。仮動的実験手法は図 1 のようにコンピュータ(以下、PC) - 試験機オンラインシステムを構築し、PC 内で 1 質点系応答解析を行い、油圧ジャッキを介して算出変位を逐次試験体に作用させる手法である。本手法により静的載荷実験用設備のみでも擬似的に動的実験の応答性状を得ることができるようになった。さらにその後開発されたサブストラクチャ仮動的実験手法は図 2 のように、対象構造物の中から力学的特性が不明瞭な領域は試験体として抽出・載荷を行い、他の部位は比較的明確な力学的モデルに変換(サブストラクチャ化)して PC 内で計算し、両者を組み合わせて性状を再現する手法である。これにより従前では 1 質点系モデルのみに限定されていた仮動的実験手法は多質点系や並列 1 自由度系モデルにも適用可能となった。また同一振動モデル内で振動特性の異なる部材が混在する場合は部材ごとに載荷用試験体が必要であったが、挙動が明快な部材は数値計算での置換が可能となった。これらにより検証可能建物の拡大や検証試験体制作のコスト縮減につながった。一方、本手法は架構の一部を数値計算によりモデル化するため、地震力が作用した建物の“真の応答値”と比べてどうしても誤差が生じることになる。また想定建物は簡便な力学的モデルの適用により建物全体の挙動を模擬できることが条件となるため、部材断面形状がある程度限定されるとともに複雑な構造システムを有する建物には依然として適用できないという弱点も存在する。サブストラクチャ仮動的実験手法は上記を解決するにあたり、静的載荷実験設備のみの研究機関でも動的実験と同等の応答結果が得られる有効な手段となる。ただし本手法は想定建物モデルが簡素なものに限定され、さらに精度向上にむけた関連研究については 2000 年代初頭を最後にほぼ実施されていない。このように近年の諸問題に対する解析的解決の偏重の風潮に対し、サブストラクチャ仮動的実験手法は解析結果の証明や裏付けを得る手段として期待できるものの、諸条件の制約から簡素な建物モデルのみに限定されるため構造実験としての採用頻度が少ないのが現状である。今後、建築・土木系の RC 部材に対する構造実験手法のさらなる発展を目指すには、応答結果の精度向上のみならず建物のモデル化制約から解放されるよう自由度の向上を目指す技術革新が求められる。

2. 研究の目的

請者はサブストラクチャ仮動的実験手法のうち、サブストラクチャ部に年々シミュレーション精度が向上しているコンクリート系部材の FEM ソルバを援用することを提案する。

そこで本検討では基礎的検討として、建築・土木系の RC 部材に対する構造実験手法のさらなる発展を目指し、同一モデル条件下で従前実験手法と提案手法による仮動的実験をそれぞれ実施し、サブストラクチャ部の実物に対する再現精度について考察する。そしてこれらの成果を基に現行サブストラクチャ仮動的実験手法のさらなる高度化を推し進め、本提案手法が次世代の構造実験手法におけるデファクトスタンダードとなることを目指す。

コンクリート系部材の FEM 解析では近年、コンクリートの非線形挙動をよく表現できる材料構成則の充実や計算機の高速度化により、構造実験に匹敵する高精度な計算結果が容易に得られるようになった。申請者も複雑な開口形状の RC 造有開口耐震壁の実験結果に対し、大変高精度での再現が可能であると報告している²⁾。そこで、この高精度な非線形 FEM 解析の計算結果を逐次応答計算に導入すると仮動的実験手法の大幅な精度向上が図ることができると考えた。本提案手法は、これまで簡便な力学的モデルを使用せざるを得なかった数値計算部位に対し、FEM 解析により簡便に精度の高い応答値が得られること、

FEM 解析を用いるため、数値計算部位の形状をはじめ内部鉄筋や材料特性の設定などの自由度が格段に向上する点に特徴があると考えている。並列 1 自由度系モデルを例にとると、図 3 のように複雑な開口を有する耐震壁は FEM モデル化により数値計算部位として扱い、性状検証を行いたい極脆性柱は試験体を作製し載荷を行うという形式も可能となり、検

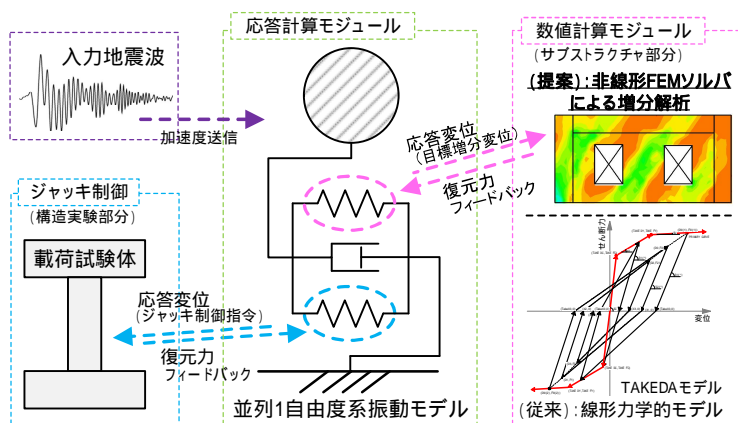


図 1 提案オンライン仮動的実験の概念 (並列 1 自由度系)

証架構の組み合わせが無限大に広がる点は大きなメリットである。

3. 研究の方法

提案手法の実験フローとしては RC 架構を並列 1 自由度系に置換し、性能検証したい部材を構造実験試験体、その他の部位を FEM モデルとしてサブストラクチャ化することで振動モデルを構築する。実験では振動モデルの応答計算モジュール、FEM モデルの数値計算モジュールとジャッキ制御モジュールとの同期を確立し仮動的実験を実施するものである。

本計画では、上記システムの確立を目指し以下の 3 つのテーマを設定した。

(1) 仮動的実験に用いる数値計算用 FEM モデル化手法の検討

提案手法では、応答計算で用いる FEM モデルの再現精度が大きく影響する。このためまずは FEM モデルの精度向上を目指し、曲げ降伏型 RC 造柱部材を対象とした 3 次元による非線形 FEM 解析におけるモデル化手法を検討する。既往の 1/3 縮尺試験体の構造実験結果のシミュレーションを行うことで、使用する材料構成則の妥当性について検証する。

(2) 仮動的実験に用いる各種モジュールの開発

提案手法の実現のためには、既往の仮動的実験手法で用いられるコンピュータ - 試験機オンラインシステムに、応答計算モジュールから応答変位情報を受信し、FEM モデルの増分解析を実行し、せん断力計算値を応答計算モジュールにフィードバックする数値計算モジュールを開発する必要がある。モジュールに用いるソルバには市販ソフトウェアを使用することを計画している。この数値計算モジュールをはじめ、実験に用いる他モジュールと同期・通信が安定して行えるよう実験制御プログラムの追加・修正を行う。

(3) オンライン仮動的実験による応答再現精度検証：

オンライン仮動的実験を通じて、提案手法による応答性状と実際の応答性状の比較により応答再現精度の検証を行う。RC 造短柱と長柱の 2 種類の柱の並列 1 自由度系の振動モデルを設定し、表 1 に示すように 3 パターンの試験体載荷を計画する。パターン A ではいずれの柱も実試験体を準備し 2 体同時加力による仮動的実験を実施する。パターン B では長柱を数値計算部位として既往の手法と同様に力学的モデルに TAKEDA モデルを採用する一方、短柱は実試験体として準備し仮動的実験を実施する。パターン C では長柱を FEM モデル化した上で、短柱は実試験体として準備し仮動的実験を実施する。パターン A の 2 体同時加力結果を真として、パターン B およびパターン C との応答値との比較より、提案手法の妥当性を検討した。

表 1 実験変数

パターン	応答復元力の取得方法		備考
	部材 (長柱)	部材 (短柱)	
A	実試験体へのジャッキ加力	実試験体へのジャッキ加力	2 体同時加力実験 (真の応答値と仮定)
B	力学的モデルによる数値計算	実試験体へのジャッキ加力	従前手法
C	FEM モデルによる数値計算	実試験体へのジャッキ加力	提案手法

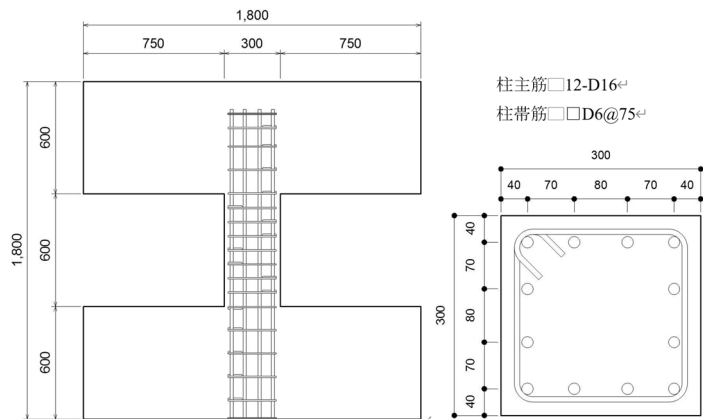
4. 研究成果

本章では前章で示した(1)から(3)の検討項目のうち、(3)のオンライン仮動的実験の概略と精度検証の結果について概説する。

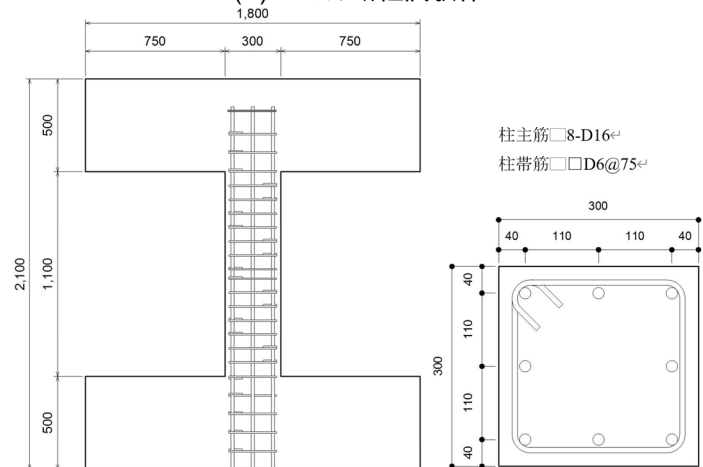
実験では図 2 に示すせん断破壊先行型となる内法長さの短いせん断柱試験体と曲げ破壊先行型となる内法長さの長い曲げ柱試験体をそれぞれ並列バネの特性として設定した並列 1 自由度系振動モデルに対し、疑似動的実験に地震波を入力した際の応答性状について比較検証を行う。

本実験では 3 パターンの検証のうち、すべてのパターンのせん断柱と曲げ柱 1 体について載荷実験を行うこととなるが、これらの試験体のセットアップは図 3 に示すとおりに行った。

入力地震波は図 4 に示すように連続地震動を想定して周期特



(a) せん断柱試験体



(b) 曲げ柱試験体

図 2 試験体形状

性の異なる模擬波2波の合成スペクトル特性が第2種地盤の地盤増幅を考慮した告示スペクトルと適合するよう作成している。そのうち前半部分の短周期成分が卓越する地震波 EQ-a を最大加速度が 2.84m/s^2 となるよう倍率を 0.55 倍としたものを採用している。

提案システムの模式図を図 5 に示す。提案システムでは、既往の実験手法とは異なり、曲げ柱の復元力情報をステップごとに FEM 解析 PC において応答計算 PC からの目標変位に対する FEM 解析による算定を行い、当該結果を応答計算 PC へフィードバックする点が特色となっている。

図 6 に変位応答時刻歴を示す。RCS 試験体では、 2.71s (水平変位 -1.75mm) で負側せん断ひび割れが確認され、 2.78s (水平変位 1.50mm) で正側せん断ひび割れが確認された。 2.94s (水平変位 2.82mm) で帯筋の降伏が確認され、 3.48s (水平変位 -3.64mm) までピーク変位を更新しながら応答を繰り返した。その後 3.95s まで小さな応答を繰り返し、 4.00s (水平変位 3.55mm) から単調に減少するような応答を繰り返した後、 4.58s (水平変位 3.76mm) で最大耐力 272.75kN を迎えた時点でパターン C では組み込んだ FEM 解析モジュールで不具合が生じたため実験を終了した。なおパターン A では 6.65s でピーク変位 6.05mm を記録し、実験は 10s まで続いている。

パターン C で解析に不具合が生じた理由としてはサーバとの通信時のデータ送受のエラーに起因するものであり、特定条件下で、サーバ側に誤った荷重値を送信するケースがあったことによるものと推察される。

しかしながら不具合が生じる 4.5s まではパターン A とパターン C ではおよそ良好な対応を示していることがわかり、並列 1 自由度系モデルに FEM 解析ソルバの結果を援用することの優位性や可能性を示すことができたといえる。今後はまず本実験で生じた不具合のさらなる究明と成果についてとりまとめを行っていく。また、よりシステムの安定性や信頼性の向上を図りつつ、他にも大きな規模の地震動波形や位相特性の異なる地震波条件、または並列パネの特性を変化させた場合の応答性状について一連の検討を重ねていくことが課題であるといえる。

参考文献

- 1) 宮内靖昌, 倉本洋, 南宏一: コンクリート構造物に関する構造実験の現状と今後の課題, コンクリート工学, Vol.43, No.4, pp.11-18, 2005.4.
- 2) 菅野秀人, 櫻井真人, 藤井賢志, 西田哲也: 周期特性の異なる地震波を連続入力した鉄筋コンクリート造柱の擬似動の実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.2, pp.943-948, 2019.7

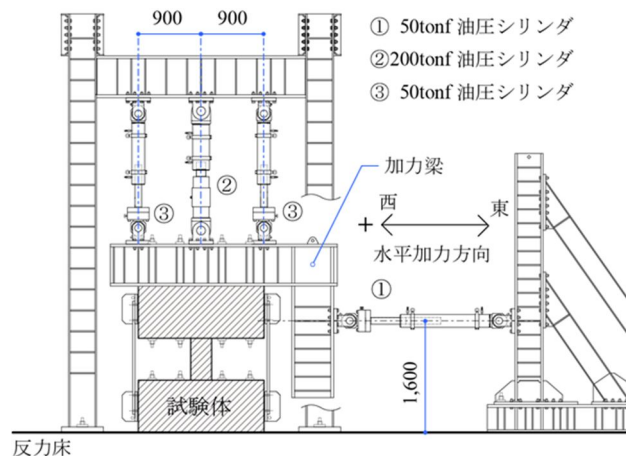


図 3 加力装置外観 (せん断柱試験体)

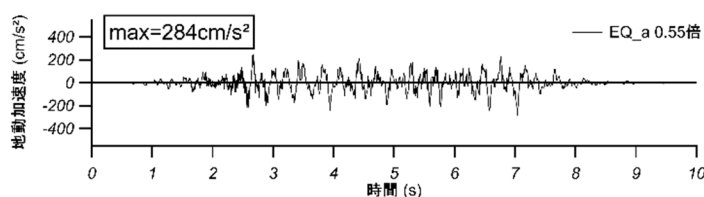


図 4 地動加速度時刻歴 (EQ_a × 0.55)

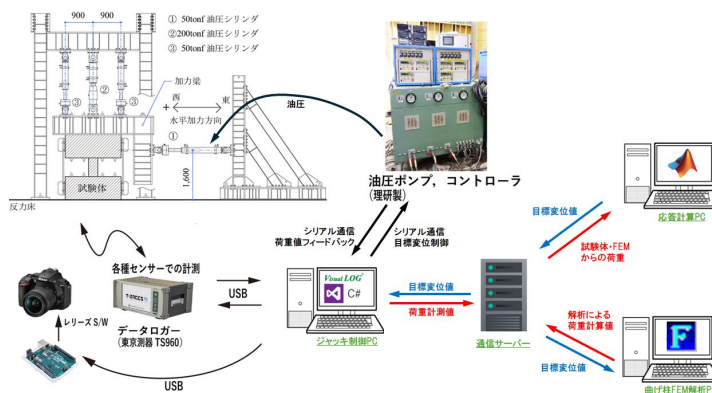


図 5 提案実験システムの模式図

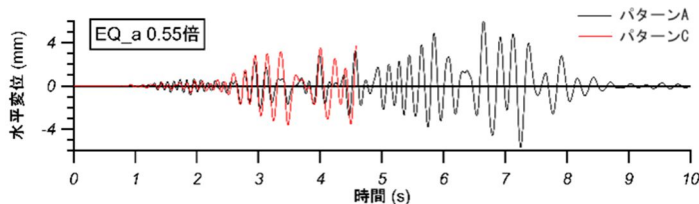


図 6 変位応答時刻歴

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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	菅野 秀人 (Kanno Hideto) (20336449)	秋田県立大学・システム科学技術学部・教授 (21401)	
研究 分 担 者	西田 哲也 (Nishida Tetsuya) (40315627)	秋田県立大学・システム科学技術学部・教授 (21401)	

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