

論文 繰返し载荷を受ける RC 部材の損傷時振動特性に関する再現解析

永田 聖二*1・宮川 義範*2

要旨: 本論文は、繰返し载荷履歴を受ける RC 部材の損傷時振動特性における実験的傾向を再現するために行った FEM 解析の結果を示すものである。FEM 解析では、繰返し载荷実験を模擬した静的非線形解析を行うとともに、载荷の途中に行った自由振動試験を模擬した固有値解析を行うことで、損傷時の固有振動数と固有モードの評価を行った。本検討の結果、今回適用した簡単な FEM モデルによっては、曲げひび割れの進展に伴う RC 部材の固有振動数低下の傾向については概ね再現できるが、せん断ひび割れの発生に伴う振動特性変化の再現などの複雑な現象については再現が難しいという見解を得た。

キーワード: RC 部材, 損傷時振動特性, 繰返し载荷, 自由振動試験, FEM 解析

1. はじめに

既設の RC 製地中埋設構造物の中には、鋼板巻立てや炭素繊維巻立て等による耐震補強法の適用が難しいため、大地震時にせん断破壊が懸念されるものも存在する¹⁾²⁾。また、構造物の外側が地盤で覆われているため、直接目視できる箇所が壁体側面に限られており、地震時面外変形によって壁部材にひび割れが生じたとしても、はらみ出しなどの立体的な変状³⁾が顕著でなければ、それがせん断ひび割れであるかどうかを見極めることが困難な場合がある。特にせん断ひび割れは、構造物の崩壊に繋がりがかねない危険な損傷形態の一つであることから、ひび割れの形態を的確に見極めることは、構造物の残存性能を的確に評価する上で極めて重要である。

目視調査が難しい場合に有力と考えられる手段の一つに、損傷の進展に伴って振動特性が変化するという RC 部材の性質を利用した振動計測に基づく損傷診断手法がある^{4)~6)}。筆者らは、せん断補強筋量が異なる 4 体の RC 部材を対象として静的な繰返し载荷実験とハンマリングによる自由振動試験を行い、曲げひび割れおよびせん断ひび割れの発生による RC 部材の振動特性の変化を分析した⁷⁾。その結果から、曲げひび割れが進展して軸方向鉄筋の塑性化が進むと固有振動数の低下が顕著となること、せん断ひび割れが発生すると、固有モードが変化するという傾向があることを明らかにした。

これらの知見は、直接目視できない壁部材内部の損傷形態を、部材側面から得られる振動データによって推定できる可能性を少なからず示唆していると考えられる。ただし、実際に評価したい部材がボックスカルバート等を構成する壁部材であるのに対して、前報では、振動測定による損傷診断手法の適用性を単純な条件における検討するため、矩形断面を有する RC 梁部材を実験対象としている点に注意が必要である。今後、壁部材への適用

性や地盤などの境界条件の影響等に関する様々な検討を実施していくにあたって、数値解析によって実験的傾向を再現することが重要な課題である。

本研究では、前報⁷⁾で示した繰返し変形を受ける RC 部材を対象として材料非線形性を考慮して簡単な 2 次元 FEM 解析モデルを構築し、繰返し载荷を模擬した静的非線形解析と载荷の途中に行った振動試験を模擬した固有値解析を行った。これらの解析結果を、実験から得られた損傷時振動特性と比較検討することで、静的非線形解析と固有値解析の組合せによる損傷時振動特性の再現性について検討した。

2. 試験体のモデル化と解析方法

2.1 試験体のモデル化

前報⁷⁾における実験的検討は、ボックスカルバートの隔壁を模擬した試験体 4 体に対して行っており、それらは表-1 に示す諸元を有する。载荷装置を設置した試験体全景は図-1 の通りである。図-2 には、試験体 No.1 と No.4 の配筋図を例示している。ここでは、曲げ耐力とせん断耐力の比を変えることで異なるひび割れ形態の実験データを取得しようと考え、試験体 No.1~No.4 の順に配筋を密にすることで試験体計算上の曲げ耐力⁸⁾とせん断耐力⁹⁾¹⁰⁾の比を高めた。なお、コンクリート圧縮強度や軸方向鉄筋比については極力統一させた。したがって、試験体 No.1~No.4 の順にせん断破壊を呈する可能性が高くなる設計仕様となっている。

FEM 解析における試験体のモデル化を図-3 に示す。また、図-4 は、本解析で仮定したコンクリートと鉄筋の応力-ひずみの履歴モデルを、除荷・再载荷履歴も含めて示している。解析には汎用有限要素解析コード DIANA9.4.4¹¹⁾を用いており、上下のスタブやハンチも含めて試験体全体を平面応力要素でモデル化した。コンク

*1 電力中央研究所 地球工学研究所 地震工学領域 主任研究員 工博 (正会員)

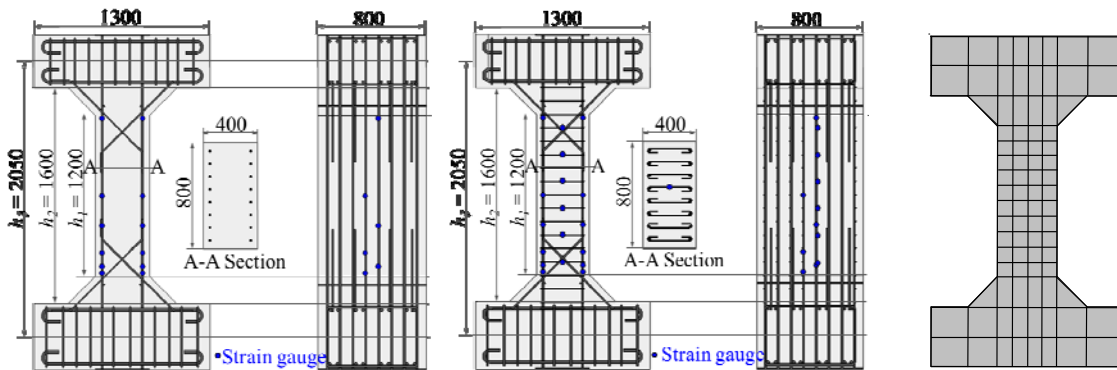
*2 電力中央研究所 地球工学研究所 構造工学領域 主任研究員 工博 (正会員)

表-1 試験体の諸元一覧⁷⁾

項目	単位	No. 1	No. 2	No.3	No.4
コンクリート圧縮強度	MPa	34.5	34.9	36.3	35.6
コンクリートヤング係数	GPa	30.5	30.2	29.7	29.1
軸鉄筋比	%	0.57	0.57	0.57	0.57
軸鉄筋径	mm	16	16	16	16
軸鉄筋の降伏点応力	MPa	369	369	369	369
せん断補強筋比	%	0	0.16	0.32	0.71
せん断補強筋径	mm	-	6	6	10
せん断補強筋間隔	mm	-	200	100	100
せん断補強筋降伏点応力	MPa	-	390.4	390.4	370.9
試験体のせん断耐力	kN	310.7	462.4	617.0	958.1
試験体の曲げ耐力	kN	465.7	465.8	466.1	465.9
耐力比 (曲げ/せん断)	%	0.67	0.99	1.32	2.06



図-1 荷重装置を設置した試験体の全景

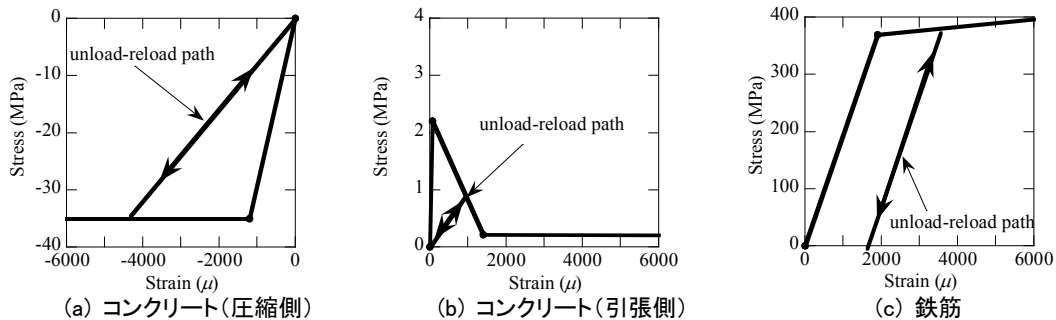


(a) 試験体 No.1

(b) 試験体 No.4

図-2 試験体の形状および配筋 (単位:mm)

図-3 FEM 解析モデル

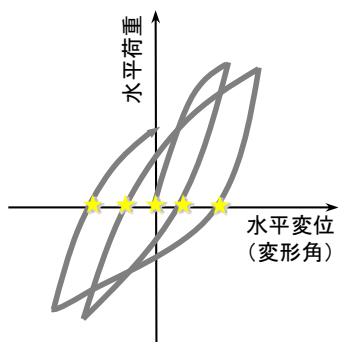


(a) コンクリート (圧縮側)

(b) コンクリート (引張側)

(c) 鉄筋

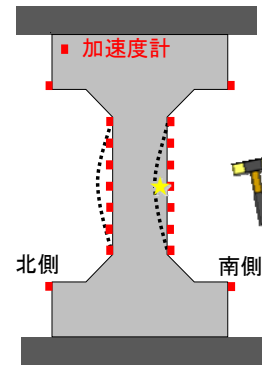
図-4 FEM 解析で仮定したコンクリートおよび鉄筋の履歴特性



(a) 履歴曲線上の打撃点



(b) 試験体における打撃点



(c) 加速度計の配置

図-5 ハンマリングによる自由振動試験の概要

リートには、分散ひび割れモデルの一つである直交回転ひび割れモデル (全ひびずみ理論) を適用した。一方、軸方向鉄筋とせん断補強筋には、コンクリートへの完全付着を仮定した埋め込み鉄筋要素を用いた。コンクリート

の圧縮側にはバイリニア型の履歴モデルを、引張側にはマルチリニア型の引張軟化履歴モデルをそれぞれ適用した。軸方向鉄筋とせん断補強筋には、Von Mises の降伏条件に基づくバイリニアモデルを用いた。これらの履歴モ

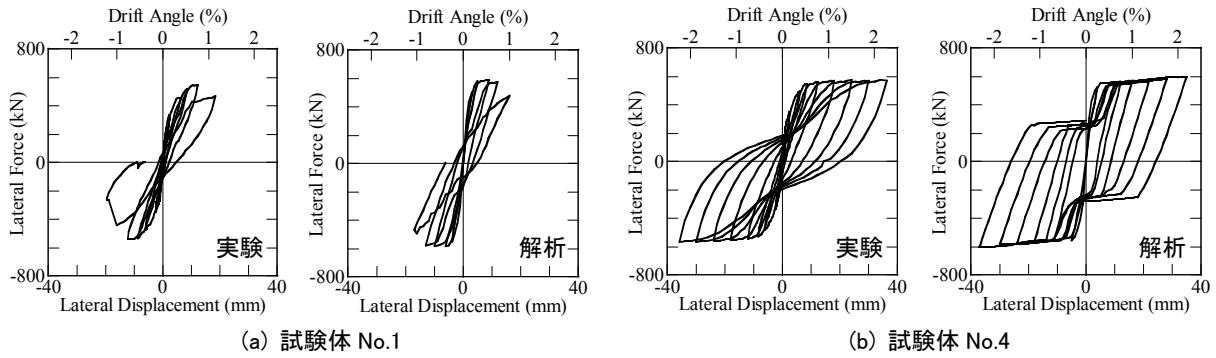


図-6 実験と解析による水平荷重—水平変位履歴曲線の比較

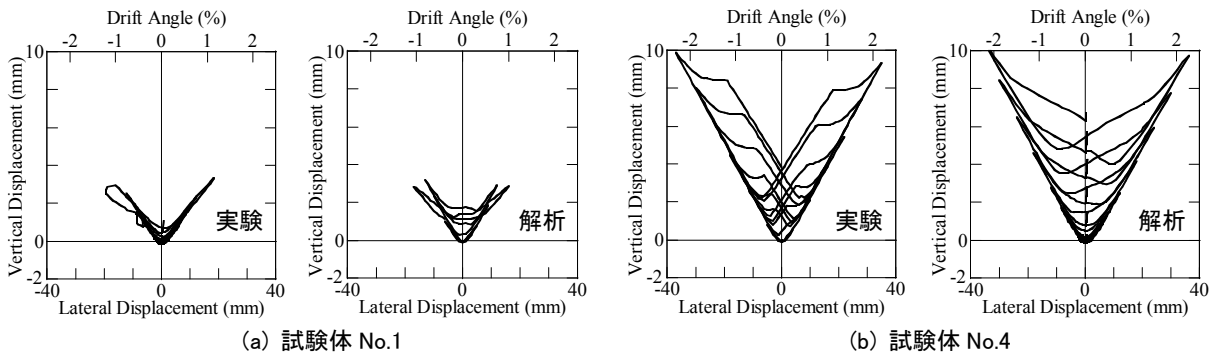


図-7 実験と解析による鉛直変位—水平変位履歴曲線の比較

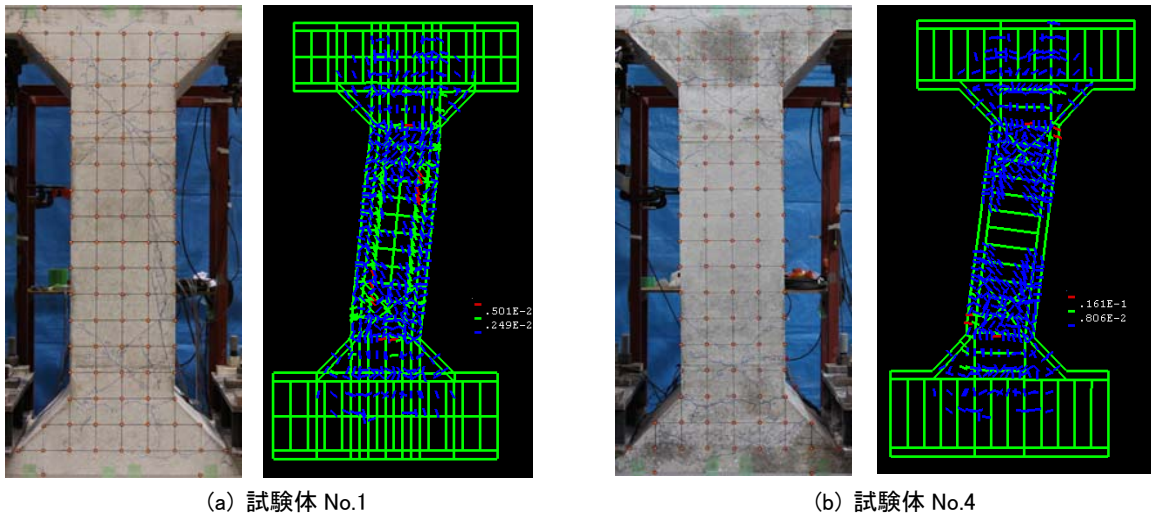


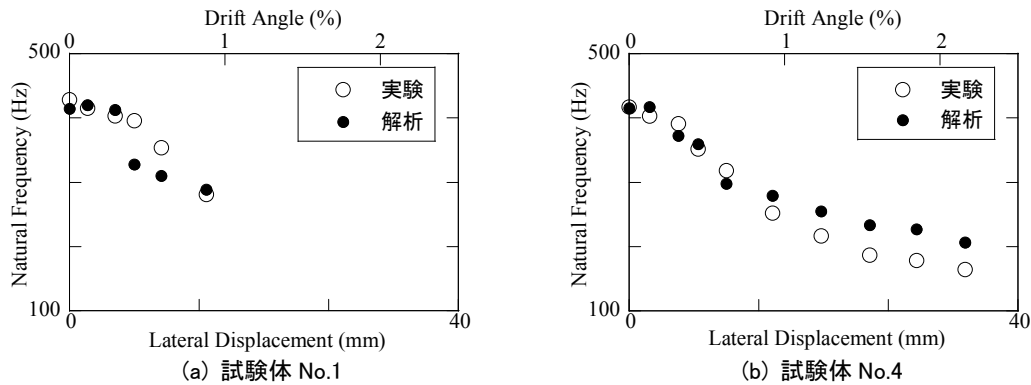
図-8 実験と解析によるひび割れ進展状況の比較(変形角 0.9%時)

デルのヤング率や降伏点の設定においては、表-1 に示した材料特性試験の結果を反映させた。

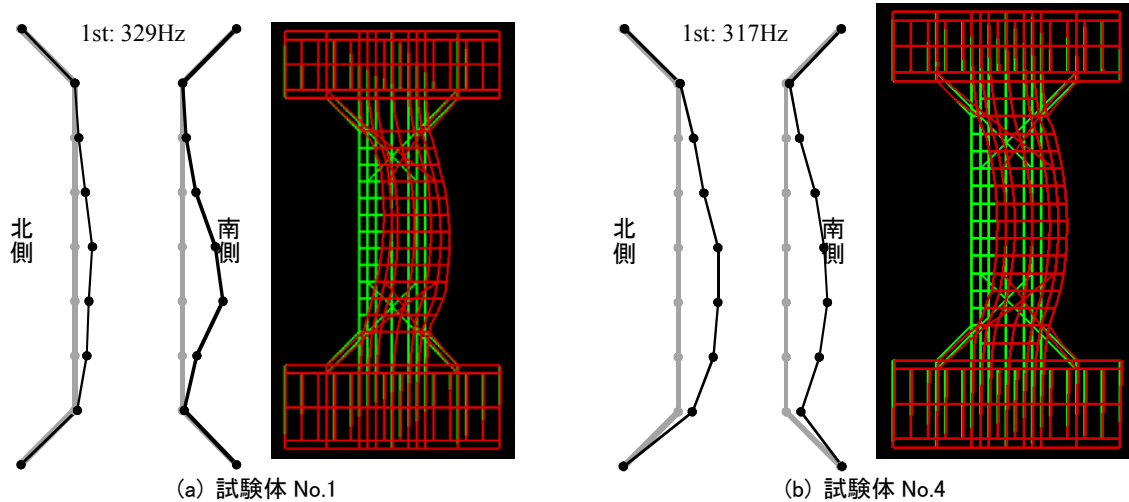
ここで、ひび割れ進展状況や振動モードの発生状況をより厳密に解析しようとした時、モデルの3次元化、細かい要素分割、コンクリートと鉄筋の履歴モデルの精緻化等が必要であると考えられる。しかし、本研究では、繰返し載荷実験と自由振動試験から得られた損傷時振動特性の傾向を、静的非線形解析と固有値解析の組合せによって再現可能であるかについて見通しを得ることを主目的としている。すなわち、試験体の荷重—変位の履歴曲線等のマクロ的挙動を概ね再現できる必要最低限のモデル化や要素分割で検討を行っている。

2.2 実験方法を模擬した解析方法

繰返し載荷実験では、鉛直アクチュエータにより450kN（梁断面で約1.5Maに相当）の一定軸力を与えながら供試体頂部の回転を抑制した状態で、水平アクチュエータにより繰返し変位を徐々に漸増させた。自由振動試験では、図-4のように載荷時の水平荷重—水平変位履歴を描いた時、荷重が0となる点（除荷点）にインターバルを設け、プラスチック製ハンマーで部材中央を打撃した。振動試験時の計測では、水平方向の固有モード形状を把握するため、計18個のひずみ式加速度計を、部材の北側と南側に9個ずつ並べて水平加速度を計測した。一方、FEM解析では、繰返し載荷実験を模擬するため、



図一9 実験と解析による固有振動数—経験最大変形角関係の比較



図一10 実験と解析による一次固有モードの比較(変形角0.9%時)

下側のスタブ底面を上下成分と水平成分、および上側のスタブ上面の回転成分を固定した状態で、上側のスタブ上面に一定鉛直荷重と繰返し水平変位を繰返し载荷実験と同様の手順で与えた。次に、载荷の途中で行った自由振動試験を模擬するため、水平荷重—水平変位履歴の除荷点で静的解析を中断させて固有値解析を行った。ここでは、非線形解析で得られる接線剛性（瞬間剛性）のマトリクスを用いて固有振動数や固有モードを算出するという Diana9.4.4 に組み込まれた機能を適用した。なお、固有値解析を行う際には、下側のスタブ底面だけでなく上側のスタブ上面の水平成分と鉛直成分も固定して、自由振動試験の時と同様に、上下端固定で部材中央を腹とする振動モードを算出できるように配慮した。

次章以降では、特に水平荷重—水平変位関係等のマクロ的な履歴特性を再現した時に、接線剛性（瞬間剛性）に基づいて固有振動特性を用いることで、ハンマリングによる微小振動における固有振動特性をどの程度再現可能であるかという点に主眼を置いて考察していく。

3. FEM 解析に基づく再現性の検討

本章では、曲げひび割れ発生時、またはせん断ひび割れ発生時の振動特性に対する再現性について検討するた

め、せん断耐力がない試験体 No.1（せん断破壊先行）とせん断補強筋の配置が最も密な試験体 No.4（曲げ破壊先行）の2ケースの実験結果を中心に示す。

3.1 履歴特性に関する再現性

静的非線形解析による履歴特性に関する再現性を検討するため、水平荷重—水平変位関係および鉛直変位—水平変位関係を図一6 および図一7 に示す。いずれの試験体においても、降伏変位は変形角にして0.4%程度である。試験体 No.1 と試験体 No.4 とともに、最大耐力のレベルや繰返し载荷に伴う上下変位の増大傾向についてよく再現できている。しかし、水平荷重—水平変位の履歴曲線を詳細見ると、試験体 No.1 も試験体 No.4 も、除荷剛性の再現性は良いとは言いがたい。わかりやすい傾向としては、試験体 No.4 では、経験変形角に伴う除荷剛性の低下を再現できておらず、解析による除荷勾配の方が大きめとなっている。このことは、後述する固有振動数の再現に影響を及ぼすと予想される。これは、今回の解析では、コンクリートや鉄筋の履歴特性に単純なモデルを用いているためであり、今後、解析精度を高めるために、要素分割や履歴モデルを改善していく必要がある。

図一8 では、繰返し载荷実験による試験体正面のひび

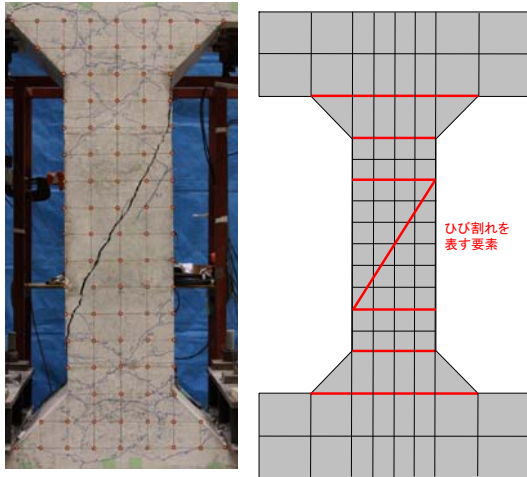


図-11 試験体 No.2 のひび割れ進展状況とそのモデル化

割れ進展状況と静的非線形解析で予想されるひび割れ進展状況を比較して示している。ここでは、せん断ひび割れの有無を直接比較できる変形角 0.9%の時の状況を示している。繰返し載荷実験では、試験体 No.1 と No.4 とともに、部材上下に多数の水平曲げひび割れが多数発生しているが、せん断補強筋のない試験体 No.1 では、曲げひび割れに加えて部材中央の右側にほぼ縦方向のせん断ひび割れが発生している点に特徴がある。これに対して、解析結果における主要なひび割れ(赤線)に着目すると、試験体 No.1 では、繰返し載荷実験による縦方向のせん断ひび割れと良く似たひび割れパターンが発生していることが確認できる。試験体 No.4 の解析結果では、このような縦方向のひび割れは表れておらず、主要なひび割れは部材の上下端に集中している点は、実験による結果と一致している。

以上から、今回構築した簡単な解析モデルによって、除荷剛性の一致度については改善の余地があるものの、繰返し載荷実験による試験体の最大耐力やひび割れ進展状況についての大きな傾向を概ね再現できていることを確認した。このことを踏まえて、損傷時振動特性の再現性について次節にて検討する。

3.2 損傷時振動特性に関する再現性

図-9 は、繰返し載荷実験の履歴曲線における一側の除荷点にて取得した固有振動数とその時の経験最大変形角の関係を実験と解析と比較しながら示している。まず、繰返し載荷に伴う固有振動数低下の実験的傾向について整理する。いずれの試験体でも、未載荷時における固有振動数は約 420Hz であり、変形角 0.4%未満と小さい領域では固有振動数低下はほとんど生じずに 400Hz 程度の値を保持する。その後、いずれの試験体でも、経験最大変形角が 0.4%~0.6%かそれ以上になると固有振動数低下は顕著になり始める。その後の固有振動数低下の傾向に

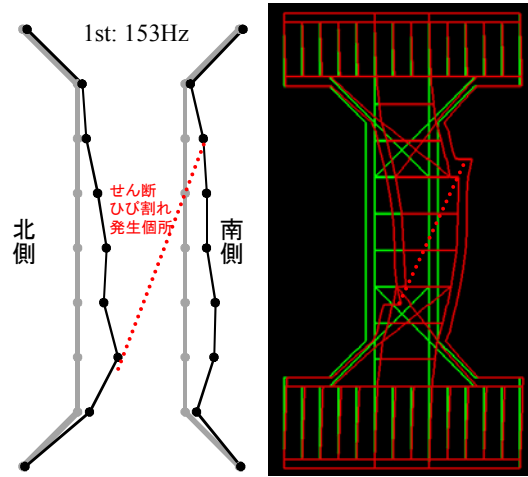


図-12 試験体 No.2 の実験と解析による一次固有モード

についても、せん断破壊する試験体 No.1 と曲げ塑性変形を続ける試験体 No.4 で同様である。試験体 No.4 では、変形角 1%を超えると固有振動数低下は緩やかになり概ね 200Hz 程度に収束する。

これに対して、解析結果をみると、変形角 0.4%未満と小さい領域では固有振動数が概ね 400Hz 前後の値を保持しており、それ以上の変形角になると固有振動数低下が顕著となるという傾向は概ね再現できている。しかし、詳細に見ると、試験体 No.1 では、最大変形角 0.5%以降、試験体 No.4 では、1%以降での一致度に課題が残る。このことは、前節で述べた除荷剛性の再現性と関係していると考えられ、今後、解析精度向上のためにコンクリートや鉄筋のモデルを精緻化する必要がある。

図-10 は、試験体 No.1 と No.4 における固有モードを実験と解析で比較して示した結果である。ここでは、せん断ひび割れの有無の影響を直接検討できるように最大経験変形角 0.9%の時の結果を示している。まず、実験的傾向を簡単に述べると、試験体 No.1 のようにほぼ縦方向のひび割れ生じることで、損傷が著しい箇所(試験体 No.1 の場合、右側の中央よりやや下部)の局所変形が卓越する振動モードが励起されることが特徴的である。

これに対して、解析結果のうち、試験体 No.1 の結果を見ると、少なくとも前述した図-8 における縦方向のひび割れ付近に対応する箇所で局所的な変形が卓越するという固有モード形状とはなっていない。このことについては、コンクリートや鉄筋のモデルを精緻化した上で確認する必要があるが、せん断ひび割れによる振動モードの変化の再現しようとする場合には、基本的には、コンクリート要素内に一様にひび割れを分布させる分散型ひび割れモデルでは難しいと思われる。

4. 固有モード変化の再現に関する試み

せん断ひび割れの発生に伴う固有モードの変化を再現するための簡単な試みとして、せん断ひび割れを疑似的にモデル化した線形解析モデルに対する固有値解析を行った。RC 部材のひび割れ進展状況とそのモデル化は図-11 に示す通りである。モデル化においては、図-11 に示すように、部材上下端の代表的な曲げひび割れを水平方向の直線的な要素で表し、せん断ひび割れを斜め方向の直線的な要素で表した。これらのひび割れを表す要素には、コンクリート部分と同じ平面応力要素を用いているが、要素幅を 1mm とするとともに、ヤング率をほぼ 0GPa としている。軸方向鉄筋とせん断補強筋については、前述の非線形解析の時と同様に、埋め込み鉄筋要素を用いて配筋図（図-2）の通りにモデル化しており、ひび割れを表す要素の中にも鉄筋は埋め込んでおり、ひび割れを表す要素を挟むコンクリート要素間については、鉄筋の剛性によって繋ぎとめられるように配慮している。

上記の固有値解析で得られた一次固有モードを、実験結果と比較して示すと図-12 のようになる。実験結果では、特に左下部分のせん断ひび割れの始点において局所変形が卓越しているのが特徴的である。これに対して、固有値解析においても実験的な傾向を概ね再現できていることが確認できる。この結果は、ひび割れを離散的にモデル化することによってせん断ひび割れの発生状況をうまく再現できれば、その状態で固有値解析を実施することで、原理的に、せん断ひび割れによる固有モードの変化も再現できる可能性を示唆している。

5. まとめ

本研究では、繰返し変形を受ける RC 部材の損傷時振動特性を再現するための試みとして、材料非線形性を考慮した簡単な FEM 解析モデルを構築し、繰返し載荷実験を模擬した静的非線形解析と、載荷途中の自由振動試験を模擬した固有値解析を行った。実験と解析による損傷時振動特性を比較検討した結果、以下の知見を得た。

(1) 荷重-変位関係等の履歴特性を再現できる解析モデルを構築し、損傷時の接線剛性マトリクスに基づいて固有振動数を算出することで、繰返し載荷に伴う固有振動数低下を再現できるという見通しを得た。ただし、今回の解析モデルでは、損傷が著しくなるほど固有振動数の一致度が低下する傾向がある。

(2) 実験で生じたせん断ひび割れに伴う固有モード変化に対しては、少なくとも今回検討したコンクリート要素内に一様にひび割れを分布させる分散型ひび割れモデルによる再現は難しいと考えられる。

今後は、離散型ひび割れモデルの適用を含めて FEM 解析モデルの精緻化を行うとともに、振動測定に基づく損傷診断手法の実構造物への適用に向けて、壁部材への適用性検討や地盤などの境界条件の影響検討等を実施する予定である。

参考文献

- 1) 土木学会原子力土木委員会：原子力発電所屋外重要土木構造物の構造健全性評価に関するガイドライン、2008.
- 2) 土木学会原子力土木委員会：原子力発電所屋外重要構造物の耐震性能照査指針・同マニュアル、2005
- 3) 宮川義範、永田聖二、松村卓郎：せん断補強筋の無い鉄筋コンクリート部材の横膨張と残存耐力の関係、土木学会論文集 E2, Vol. 70(2014) No. 4, pp.402-416.
- 4) Housner, G. W., et al.: Special Issue: Structural Control: Past, Present and Future, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 123, No. 9, 1997.
- 5) 山本鎮男：ヘルスマニタリングー機会・プラント・建築・土木構造物・医療の健全性監視、共立出版、1999.
- 6) 永田聖二、金澤健司、梶原浩一、矢花修一：常時微動モニタリングに基づく実大 RC 橋脚試験体の地震損傷評価、構造工学論文集, Vol.56A, 2010.
- 7) 永田聖二、宮川義範、金澤健司、松村卓郎：面外繰返し変形を受ける RC 部材の損傷形態と振動特性変化の関係、コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.787-1726, 2014.
- 8) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説、1997.
- 9) 二羽淳一郎、山田一字、横沢和男、岡村甫：せん断補強筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価、土木学会論文集, No.372/V-5, 1986.
- 10) 二羽淳一郎、前田詔一、岡村甫：ディーブビーム的な RC 部材の設計方法に関する提案、第 5 回コンクリート工学年次講演会講演文集、1983.
- 11) TNO Building and Construction Research: DIANA, Release 9.4.4, Delft, Netherland, 2012.