

地震損傷に伴う RC 部材の振動特性変化の解析的再現に関する試み

(一財) 電力中央研究所 正会員 ○永田 聖二  
 同上 同上 宮川 義範

1. はじめに

本研究では、既往の実験における RC 部材の損傷時振動特性<sup>1)</sup>の解析的再現の試みとして、材料非線形性を考慮した 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に行った自由振動試験を模擬した固有値解析を行った。

2. 供試体のモデル化と解析方法

解析対象は、表-1 と図-1 に示すボックスカルバートの隔壁を模擬した RC 部材<sup>1)</sup>である。供試体 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とせん断耐力の比を高めている。FEM 解析(図-1)では、汎用有限要素解析コード DIANA<sup>2)</sup>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を適用した。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の特性にはバイリニア型の履歴モデルを、引張側の特性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。

FEM 解析では、繰返し載荷実験を模擬するため、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載荷実験と同様の手順で与えた。次に、載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。固有値解析では、直前の非線形解析で得られる接線剛性マトリクスを適用して固有振動数と固有モードを算出した。

3. 非線形履歴特性の再現性

実験と解析による供試体 No.1 と No.2 の水平荷重-水平変位関係を図-2 と図-3 に示す。両者を比較すると、今回の解析では、コンクリートと鉄筋の材料力学特性をバイリニア型等の単純なモデルを用いているため、両供試体ともに損傷が顕著になるほど、除荷時の剛性をうまく再現できていない。しかしながら、全体的な傾向として、最大耐力のレベルを含む大まかな履歴曲線の形状についてはよく再現できていると言える。

表-1 供試体諸元

項目	単位	No. 1	No. 2	No.3	No.4
コンクリート圧縮強度 <sup>1)</sup>	MPa	34.5	34.9	36.3	35.6
軸鉄筋比	%	0.57	0.57	0.57	0.57
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
軸応力比 <sup>2)</sup>	%	4.35	4.30	4.13	4.21
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

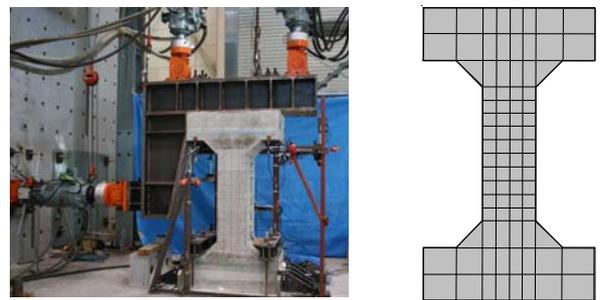


図-1 供試体全景と FEM 解析モデル

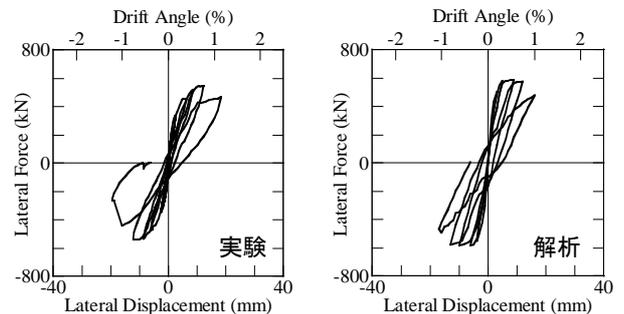


図-2 水平荷重-水平変位曲線(供試体 No.1)

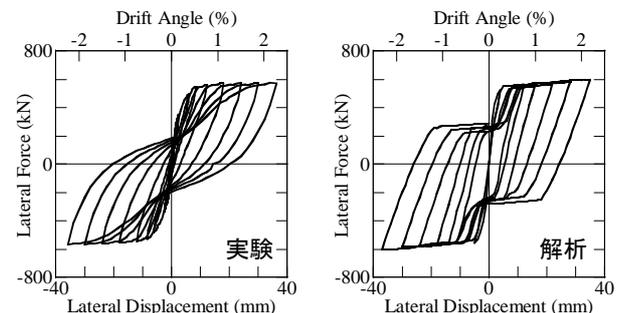
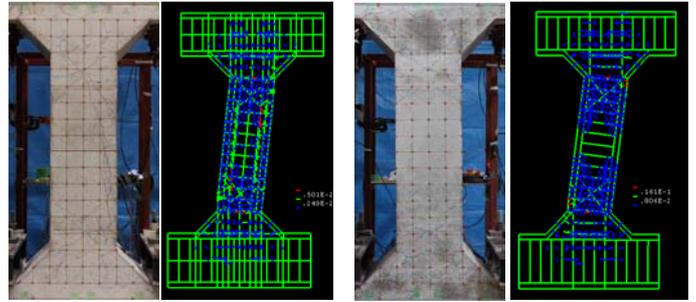


図-3 荷重-変位関係の比較(供試体 No.4)

キーワード RC 部材, 地震荷重, 振動特性変化, FEM 解析, 繰返し載荷実験, 自由振動試験

連絡先 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 (一財) 電力中央研究所 地球工学研究所 TEL: 04-7182-1181

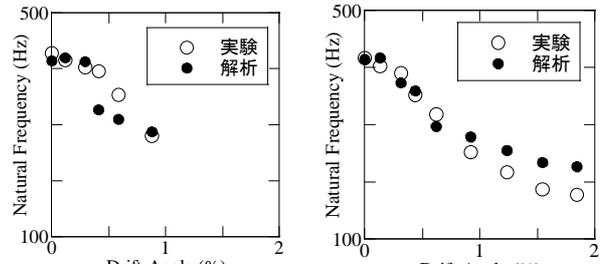
図-4 は、実験による損傷状況と解析で予想されるひび割れパターンを示している。実験では、供試体 No.1 と No.2 とともに、部材上下に曲げひび割れが多数発生しており、特に、供試体 No.1 では、部材中央の右側にほぼ縦方向のせん断ひび割れが発生している点に特徴がある。これに対して、解析での主要なひび割れ(赤線)に着目すると、両供試体とも実験によるひび割れパターンを概ね再現できていることが確認できる。



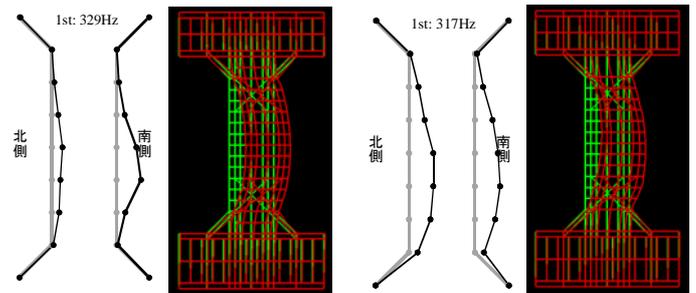
(a) 供試体 No.1 (d) 供試体 No.4  
図-4 実験と解析による損傷状況の比較 (変形角 0.9%時)

4. 振動特性変化の再現性

図-5 は、固有振動数と最大経験変形角の関係を実験と解析で比較して示している。両供試体とも、初期固有振動数は約 420Hz であり、変形角が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、変形角 0.5%前後になると固有振動数低下は顕著になる。変形性能が高い供試体 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 程度になる。これらの大まかな傾向を解析によってよく再現できているが、損傷が進展した時の一致度には改善の余地がある。図-6 は、供試体 No.1 と No.4 の固有モードを示している。実験では、供試体 No.1 のようにせん断ひび割れ生じることで、局所変形(右側の中央よりやや下部)が励起されることが特徴的である。しかし、解析によってはこのような固有モード変化をうまく再現できていない。



(a) 供試体 No.1 (d) 供試体 No.4  
図-5 実験と解析による固有振動数-変形角関係の比較



(a) 供試体 No.1 (d) 供試体 No.4  
図-6 実験と解析による固有モードの比較 (変形角 0.9%時)

次に、固有モード変化を再現するための試みとして、せん断ひび割れを疑似的にモデル化した線形モデル(図-7)に対して固有値解析を行った。ここでは比較的ひび割れパターンが単純な供試体 No.2 を解析対象とした。モデル化では、曲げひび割れを水平方向の、せん断ひび割れを斜め方向の平面応力要素で表した。これらの要素では、幅 1mm, ヤング率ほぼ 0GPa とした。実験と解析による固有モードは図-8 の通りである。実験では、左下部分のせん断ひび割れの始点で局所変形が顕著となっているのが特徴的である。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。この結果は、ひび割れ離散的にモデル化することで、せん断ひび割れによる固有モード変化を再現できる可能性を示唆している。

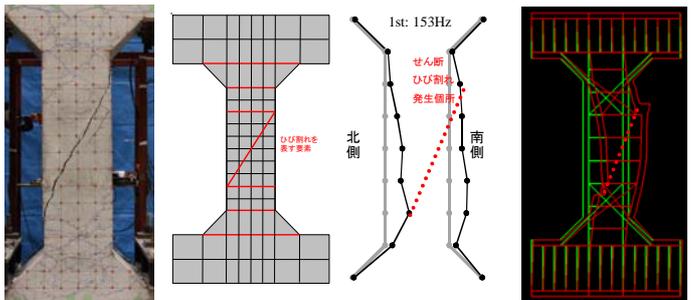


図-7 供試体 No.2 のひび割れ 図-8 供試体 No.2 の実験と解析による固有モードの比較

5. まとめ

以上の結果、今回検討した分散型ひび割れモデルによっては、曲げひび割れに伴う RC 部材の固有振動数低下の傾向を概ね再現することができるが、せん断ひび割れに伴う固有モード変化の再現は難しいという見解を得た。今後は、離散型ひび割れモデルの適用を含めて解析モデルの精緻化を行う予定である。

参考文献

1) 宮川他：鉄筋コンクリート製地中構造物の地震による損傷の評価，電力中央研究所研究報告 N11005, 2011  
2) 永田他：せん断ひび割れの進展に伴う RC 壁供試体の固有振動数低下の検出，コンクリート工学年次論文集, Vol.33, 2011