

# 論文 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

永田 聖二<sup>\*1</sup>・宮川 義範<sup>\*2</sup>・金澤 健司<sup>\*3</sup>

**要旨:** 本文は、面外繰返し変形を受けるボックスカルバート壁部材の損傷形態の評価に資することを目的として行った RC 部材実験の結果を示すものである。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載荷実験とハンマリングによる自由振動試験を行い、曲げひび割れと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。本検討の結果、曲げひび割れが進展し軸方向鉄筋が降伏する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振動数はほとんど変化しないが局所的な振動モードが励起される傾向があることを明らかにした。

**キーワード:** RC 部材, 面外繰返し変形, 損傷形態, 曲げひび割れ, せん断ひび割れ, 振動特性

## 1. はじめに

大地震を受ける地中埋設構造物に懸念される典型的な被害要因として、面外繰返し変形に起因する RC 壁部材の損傷がある<sup>1),2)</sup>。現行の設計基準<sup>3),4)</sup>に基づく構造物では、せん断補強筋の適切な配置により十分な曲げ変形性能を確保するよう配慮されるが、既設構造物の中には、地震時にせん断破壊が懸念されるものも存在する。また、外側が地盤で覆われている地中埋設構造物では、目視可能な箇所が限られており、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が認められなければ、そのひび割れがせん断ひび割れであるか曲げひび割れであるかを見極めることは容易ではないと考えられる。

そのような損傷形態の推定には、設計式や数値解析の適用が有効と考えられるが、せん断ひび割れは細かい構造条件の違いや地震時の荷重履歴に影響されることから、特に曲げ耐力に対するせん断耐力の裕度が比較的小さい場合には、別途詳細な評価法を適用して慎重に判断することが望まれる。このような状況を想定して、筆者らは、ボックスカルバートの隔壁を模擬したせん断補強筋のない RC 部材の繰返し載荷実験<sup>2)</sup>において、ハンマリングによる自由振動試験を行った<sup>5)</sup>。その結果から、最終的にせん断破壊する RC 部材においても、曲げ破壊する RC 部材で有効と考えられていた振動特性変化に基づく損傷評価法<sup>6)</sup>を適用できる可能性を示した。

本研究では、損傷形態の違いが RC 部材の振動特性に及ぼす影響を明らかにするため、せん断補強筋量が異なる 4 体の RC 部材を製作し、前報<sup>5)</sup>と同様の繰返し載荷とハンマリングによる自由振動試験を実施した。特に、曲げひび割れの進展とせん断ひび割れの発生などのイベントとの対応に着目しながら RC 部材の振動モードと固有振動数の変化について分析を行った。

## 2. 試験体と実験方法

### 2.1 試験体の諸元

載荷装置を設置した試験体の全景を図-1 に示す。これは、前報<sup>5)</sup>でハンマリングによる自由振動試験を試みたボックスカルバート隔壁を模擬した試験体とほぼ同一仕様である。本研究で製作した試験体は表-1 に示す 4 体である。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、ここでは、せん断補強筋比をパラメータとした。一方、コンクリート圧縮強度、軸方向鉄筋比、軸応力比については極力統一した。せん断補強筋比は、No.1~No.4 の順に 0%, 0.16%, 0.32%, 0.64% としており、計算上の耐力比（せん断/曲げ）は No.1~No.4 の順に 0.67, 0.99, 1.32, 2.06 となった。これは、試験体 No.1~No.4 の順にせん断破壊を呈する可能性が高いことを示している。

図-2 には、せん断補強筋がない試験体 No.1 と配置間隔が等しい No.3 と No.4（これらは鉄筋径が異なる）の配筋図を示す。ここで定義する正面と側面は、実際のボックスカルバート隔壁において目視できない面とできる面に相当する。上下のハンチを含まない RC 部材の高さ  $h_1$ 、ハンチを含む高さ  $h_2$ 、上下スラブの中心間距離  $h_3$  はそれぞれ 1.2m, 1.6m, 2.05m である。試験体正面の幅は 0.4m、奥行きは 0.8m である。コンクリートの設計基準強度は 30MPa であり、全ての試験体を同一バッチで打ち継ぎ目がないように一回で打設した。鉄筋の材質は、軸方向鉄筋とせん断補強筋ともに SD345 である。材料試験に基づく各試験体のコンクリート圧縮強度と鉄筋の降伏点応力は、表-1 に示す通りである。

### 2.2 載荷実験の方法

載荷装置の構成は図-3 の通りである。試験体は、下部スラブを介して PC 鋼棒を用いて載荷床に固定した。上部スラブには、L 型治具を介して鉛直 2 本、水平 1 本の

\*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 工修（正会員）

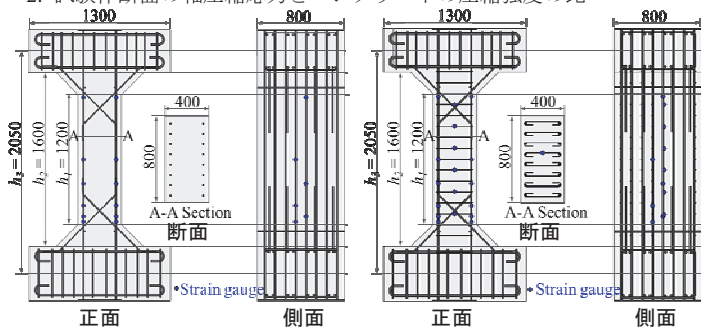
\*3 電力中央研究所 地球工学研究所 地震工学領域 上席研究員 工博（非会員）

表-1 試験体の諸元一覧

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
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
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

\*1: 各試験体の実験日における圧縮強度

\*2: 試験体断面の軸圧縮応力とコンクリートの圧縮強度の比



(a) 試験体 No.1

(b) 試験体 No.3 および No.4

図-2 試験体の形状および配筋 (単位: mm)

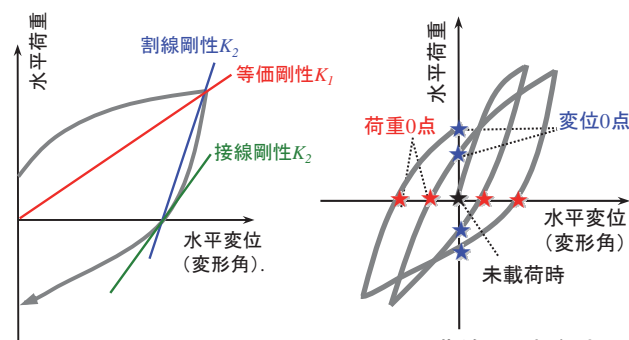


図-4 水平剛性の評価方法



図-1 試験体の全景

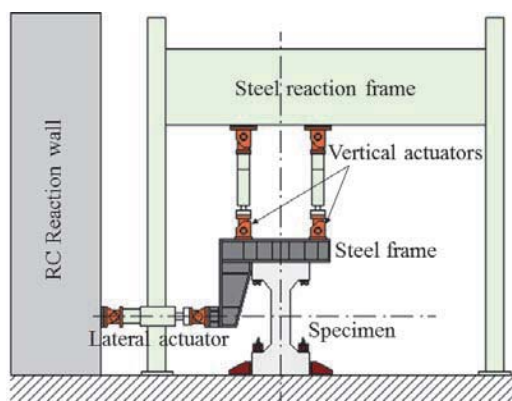
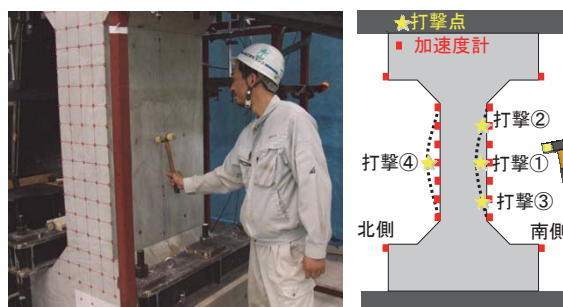


図-3 静的載荷装置の構成



(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

アクチュエータを取り付けた。繰返し載荷では、鉛直アクチュエータによって450kN相当の一定軸力を与えて上部スラブの回転を抑制した状態で、水平アクチュエータにより変位制御で載荷した。水平変位は、部材の目標変形角 (部材高さ  $h_1$  に対する部材の水平変位) が 0.1%, 0.2%, 0.5%, 0.7%, 1.0% (以後 0.5%ずつ増加) と漸増するように与えた。なお、第3章以降の実験結果では、変形角として、下スタブの中心間距離  $h_3$  で基準化した部材の水平変位を用いることとする。

主な計測項目は、アクチュエータ内蔵のロードセルによる水平荷重と鉛直荷重、棒状型変位計による下スラブと上スラブの水平変位と上下変位である。第3章以降の実験結果では、RC部材の水平変位として上下のスラブの相対変位を用いることとする。また、ひずみゲージを図-2に示す位置に張り付けており、軸方向鉄筋とせん断

補強筋のひずみを測定した。

本研究では、繰返し載荷による荷重-変位関係からRC部材の水平剛性を把握し、自由振動試験による固有振動数との比較を行う。水平剛性の評価方法は、図-4に示す通りであり、原点と最大変位点を結ぶ等価剛性  $K_1$ 、荷重0点の接線剛性  $K_2$ 、最大変位点と変位0点を結ぶ割線剛性  $K_3$  の3つの剛性を評価対象とした。

### 2.3 振動試験の方法

振動試験の概要を図示すると、図-5のようになる。まず、図-5(a)のように繰返し載荷時の荷重-変位関係を描いた時、1) 未載荷点、2) 荷重0点、3) 変位0点にインターバルを設け、図-5(b)のようにプラスチック製ハンマーで部材の中央部付近を打撃した。ここで、1) 未載荷点はRC部材の初期状態、2) 荷重0点は地震後に水平荷重は収束するが変位が残留する状態、3) 変位0点は地震後に変

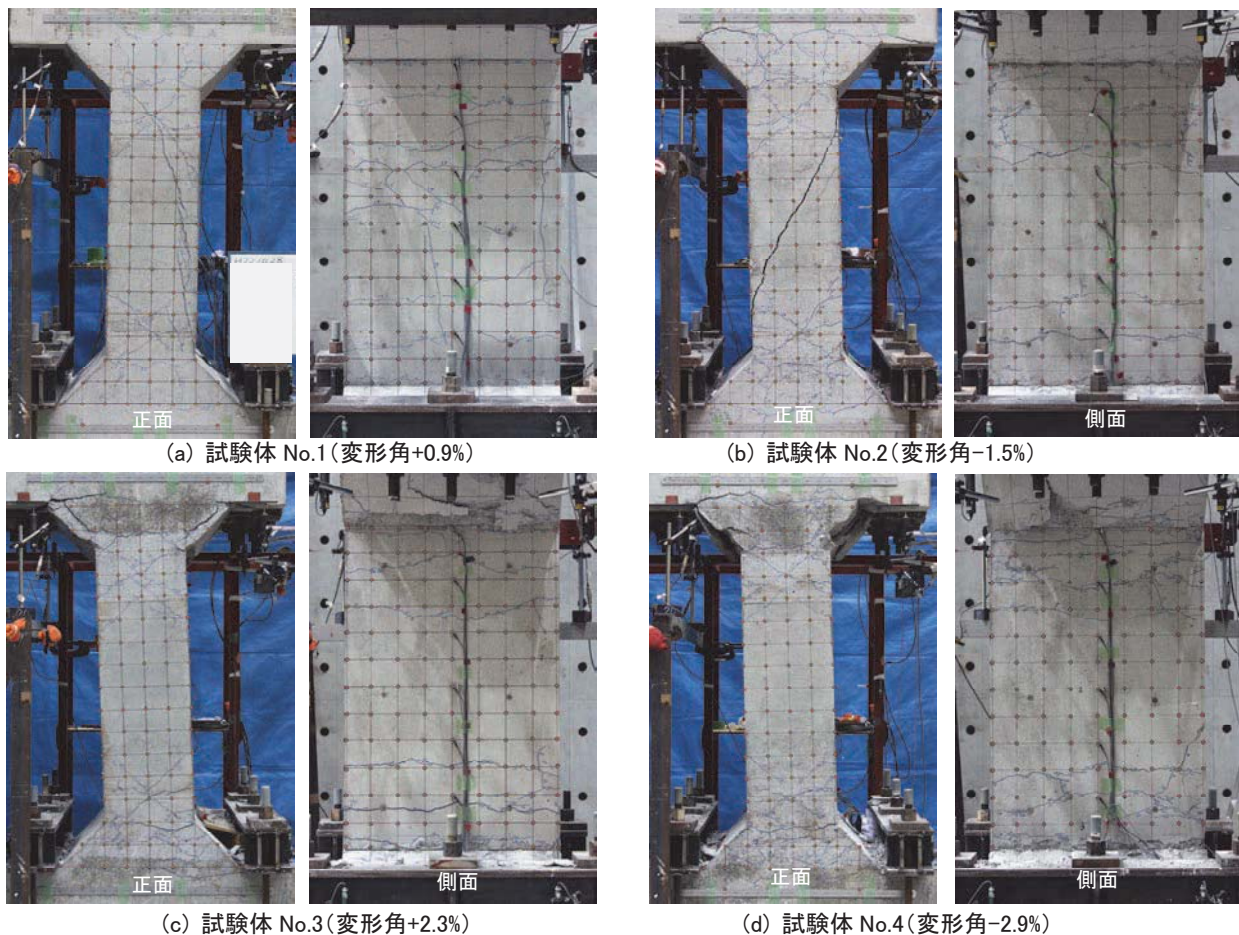


図-6 各試験体における縦断面と側面の損傷状態

位は戻るが荷重が残留する状態をそれぞれ想定した。また、3) 変位0点では鉛直軸力が振動特性に及ぼす影響を把握するため、450kNを基準軸力としてその100%, 50%, 0%の3段階の軸力状態で打撃を行った。

試験体上の打撃点は、図-5(c)に示すように、南側の中央(打撃点①)、中央より上側(打撃点②)、中央より下側(打撃点③)および北側の中央(打撃点④)の4か所である。なお、打撃の強弱などによる振動特性のばらつきを確認するため、一か所につき打撃を3回行っている。第4章以降の振動試験結果では、基本的に打撃点①における1回目の打撃により得られた自由振動データに基づく振動特性を示すこととした。

振動計測では、図-5(c)に示すように、合計18個の一分分ひずみ式加速度計(共和電業製AS-10GB, 定格 $10,000\text{cm/s}^2$ )を、RC部材の北側と南側にそれぞれ9個ずつ縦に1列に並べて水平方向の加速度を計測した。なお、計測時のサンプリング周波数は $10,000\text{Hz}$ 、計測レンジは $10,000\text{cm/s}^2$ 、A/D変換機の分解能は16bitである。

### 3. 繰返し載荷による損傷状況と履歴特性

#### 3.1 損傷状況

繰返し載荷による試験体 No.1~No.4 の正面と側面の損傷状況を図-6 に示す。試験体 No.1, No.2, No.3 では、

せん断ひび割れが発生した時の写真を選定した。一方、試験体 No.4 はせん断ひび割れが発生しなかったが最終的な損傷状況を示した。いずれの試験体も変形角が0.4%程度になると、部材の上部と下部に曲げひび割れが明瞭となり、変形角が大きくなるにつれてひび割れの範囲や幅が増大した。せん断補強筋比が高い試験体ほどせん断ひび割れ発生までの変形性能が良好であり、試験体 No.1, No.2, No.3 では変形角+0.9%, -1.5%, +2.3%の時にせん断ひび割れが発生した。試験体 No.4 では、コンクリートの剥落や鉄筋の局部座屈が著しくなったため、変形角-2.9%の時に載荷を終了した。

ここで、試験体正面はボックスカルバートでは横断面に相当するため、本来目視できない面である。このことに注意して損傷状況を見ると、面外変形に起因する曲げひび割れとせん断ひび割れの発生状況は、試験体正面からは容易に判別できるが、実際に目視できる側面側から内部状況を把握することは必ずしも容易ではない。

#### 3.2 履歴特性

図-7 は、繰返し載荷による試験体 No.1~No.4 の水平荷重-変形角の履歴曲線である。ここでは、ひずみ計測に基づく鉄筋の降伏点についても図示している。いずれの試験体も変形角が約0.4%の時に曲げ降伏し、同程度の水平耐力を発揮している。しかし、曲げ降伏後には、せん

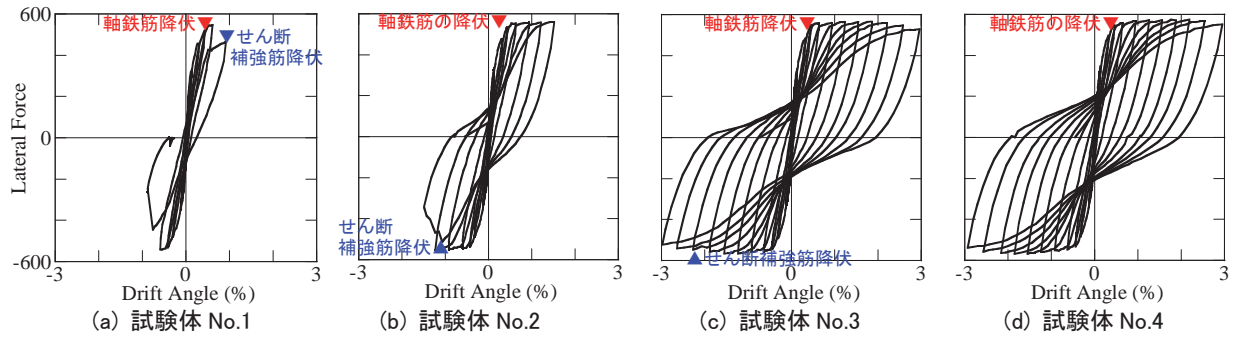


図-7 各試験体における水平荷重-変形角の履歴曲線

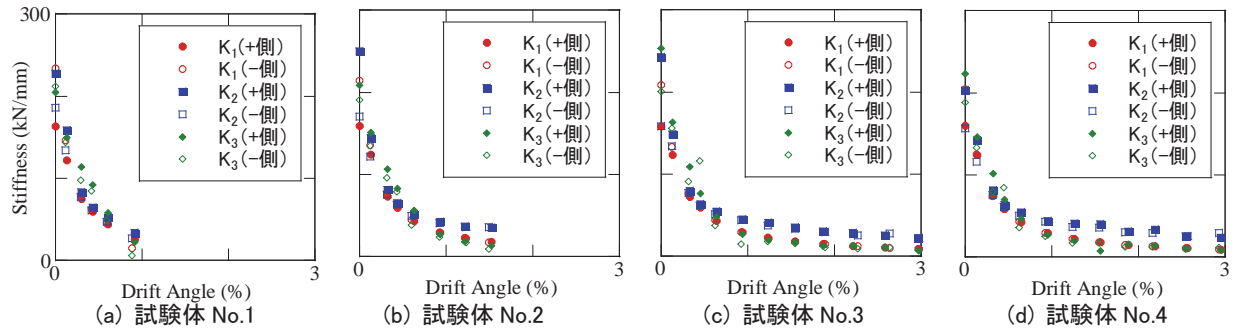


図-8 各試験体における経験変形角の増大に伴う水平剛性低下

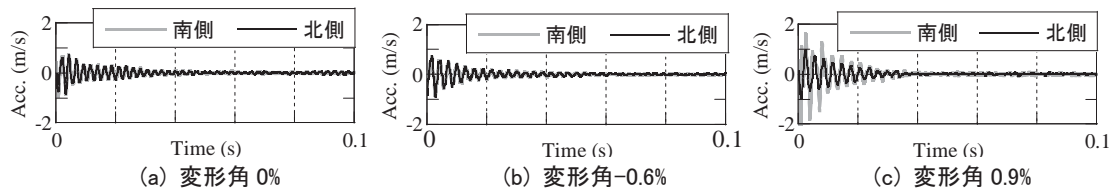


図-9 試験体 No.1 における部材中央の自由振動波形

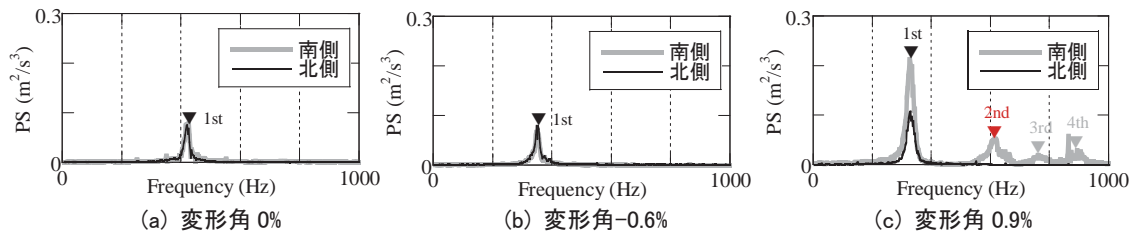


図-10 試験体 No.1 における部材中央の自由振動波形に対するパワースペクトル

断補強筋比が低い試験体ほど早い段階で耐力低下が生じている。具体的には、試験体 No.1 と No.2 では、前節でせん断ひび割れが確認された変形角+0.9%と-1.5%の時にそれぞれせん断補強筋の降伏を伴う顕著な耐力低下が生じている。これに対して、試験体 No.3 では、せん断ひび割れが確認された変形角-2.9%の時にせん断補強筋の降伏が生じているが、耐力低下はほとんど生じていない。せん断ひび割れを生じなかった試験体 No.4 では、せん断補強筋の降伏も耐力低下も生じることはなかった。

図-8 では、図-4 で定義した等価剛性  $K_1$ 、接線剛性  $K_2$  および割線剛性  $K_3$  を図-7 の履歴曲線から算出し、それらを経験変形角ごとにプロットした。いずれの試験体においてもまたいずれの定義の剛性においても、剛性の低下傾向はほぼ同様となっている。具体的には、荷重開始から一気に剛性が低下し、変形角 0.5%前後から徐々に緩やかになり、変形角 1.0%前後からほぼ一定値となる。な

お、軸方向鉄筋の降伏(変形角 0.4%前後)などのイベントとの相関はここからは特に読み取れない。

#### 4. 振動試験に基づく振動特性の評価

##### 4.1 自由振動データの特徴

図-9 と図-10 は、試験体 No.1 の自由振動試験において部材中央の北側と南側で得られた自由振動波形とそれに対するパワースペクトルを示した結果である。ここでは、部材の曲げ降伏の前後とせん断ひび割れの発生前後における振動波形の特徴を把握するため、経験変形角が 0% (未荷重時)、-0.6%、0.9%における荷重 0 点で取得した結果を示している。まず、変形角 0%と-0.6%の結果に着目すると、いずれのケースでも南側と北側の波形は良く一致しており、単一かつ明瞭な共振ピークを有する自由振動波形が得られている。一方、せん断破壊した変形角 0.9%の時を見ると、南側では北側に比較して 2 倍程度

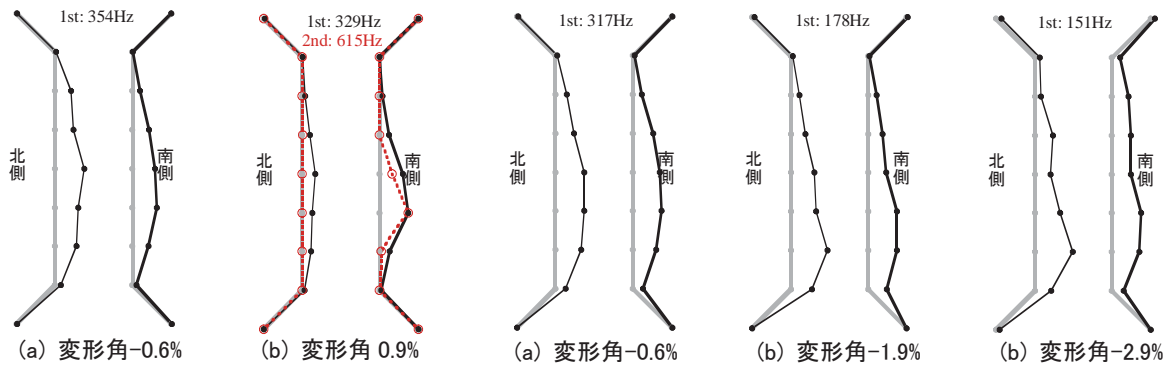


図-11 試験体 No.1 の振動モード

図-12 試験体 No.4 の振動モード

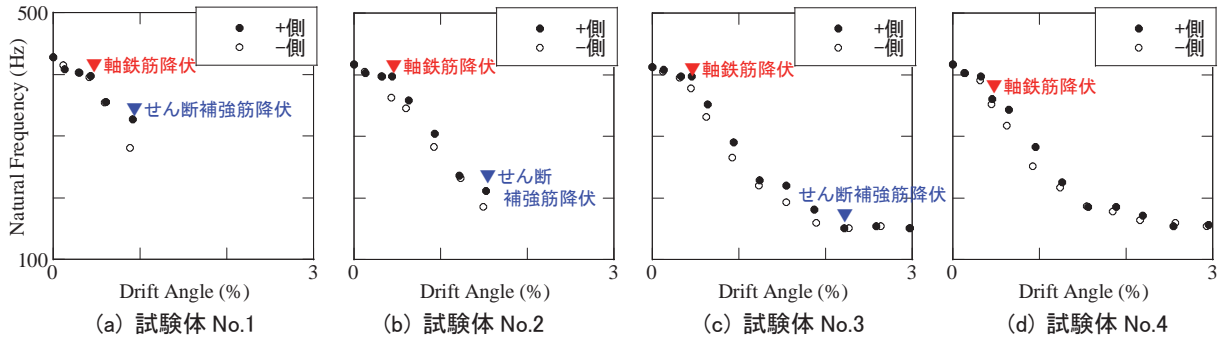


図-13 各試験体の一次固有振動数の変化(水平荷重の除荷時)

の振幅を有する振動が生じるとともに、高振動数側の3つを含めて4つの共振ピークが複数出現する結果となった。なお、変形角が0%と-0.6%の時には、1000Hz以上の領域においても共振ピークは出現しておらず、変形角0.9%の時の複数のピークはせん断ひび割れが生じたことによって生じたと考えられる。また、ここには示していないが、No.2でもせん断ひび割れ発生後には複数の共振ピークが現れる結果となっている。

#### 4.2 振動モードの推定

図-11は、計18個の加速度計による自由振動データから推定した経験変形角-0.6%と0.9%の時の試験体No.1の振動モードである。ここでは、パワースペクトル18成分において、共振ピークの振幅値を読み取ることで部材の振動モードを取得した。これによると、せん断ひび割れ発生前の変形角-0.6%の時には、上下端固定で中央が腹となる振動モードが得られた。一方、せん断ひび割れが発生した変形角0.9%の時には複数の振動モードが取得された。ここでは、主要な二つの振動モードを示す。一次振動モードは上下端固定で中央が腹となる振動モードになるものの南側中央付近の変形が卓越した。また、二次振動モードは、南側中央付近の局所振動モードとなった。

これに対して、図-12では、せん断ひび割れが生じなかった試験体No.4を対象として、経験変形角-0.6%、-1.9%、-2.9%の時の振動モードを求めた。曲げひび割れが進展しても基本的には、上下端固定で中央が腹となる振動モードが支配的となるが、損傷が進展するにつれて部材下側の変形が卓越する傾向が認められた。以上の結

果は、振動モードの次数や形状に着目することで、部材側面からは判別できない部材内部の損傷形態を推定できる可能性を示唆している。今後、繰返し载荷による部材の変形状況と、振動試験による振動モードの関係を分析し、それらのメカニズム解明を行う必要がある。

#### 4.3 損傷に伴う固有振動数の低下

図-13は、繰返し载荷における荷重0点(図-5(a)参照)で取得した固有振動数と経験変形角の関係である。ここでは、パワースペクトルの共振ピークの振動数を読み取ることで固有振動数を推定した。これらによると、各試験体の経験変形角の増大に伴う固有振動数の低下傾向は良く似ている。具体的には、いずれの試験体でも、未载荷時における固有振動数は約420Hzであり、変形角が小さい領域では固有振動数はほとんど低下せずに400Hz程度の値を保持する。その後、経験変形角が約0.4%以上になると固有振動数は一気に低下する。固有振動数の低下は、軸方向鉄筋の降伏によって開口したひび割れが閉じにくくなるために急激に進む。しかし、せん断補強の降伏によっては必ずしも変化しない。なお、変形角3.0%近くまで耐力低下が生じなかった試験体No.3とNo.4では、変形角2.0%前後からは固有振動数はほとんど低下せず150Hz程度の値を保持している。これらの結果は、固有振動数低下を指標とすることで軸方向鉄筋の塑性化の有無を評価できる可能性を示唆している。

ここで、前出の荷重-変位の履歴曲線に基づく剛性低下(図-8)と比較すると、経験変形角の増大に伴って剛性が低下する点は整合するが、図-8では変形角が0%~

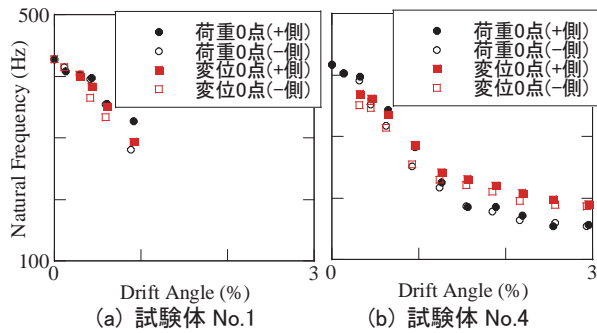


図-14 水平荷重の有無が固有振動数に及ぼす影響

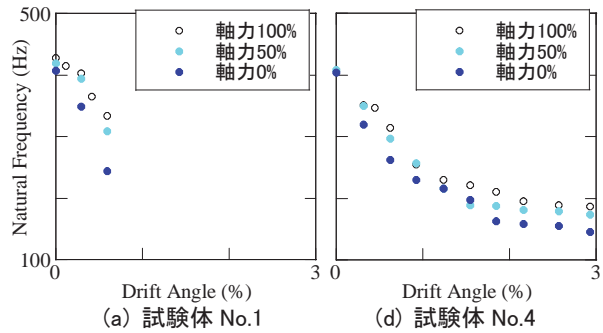


図-15 鉛直軸力の有無が固有振動数に及ぼす影響

0.4%までの間に一気に剛性低下が進んでいる点が図-13とは異なる。これは繰返し載荷におけるRC部材の変形モード(逆対象曲げ変形)が、打撃による振動モード(上下端固定で中央を腹とする変形)が異なることに起因すると考えられる。この点のメカニズム解明については、今後、繰返し載荷による部材の変形状況と、振動試験による振動モードの対応を詳細に分析する必要がある。

次に、前出の図-5(a)の変位0点で行った打撃による固有振動数の推定結果を、損傷形態が最も異なる試験体No.1とNo.4を対象として示す。図-14は、変位0点における固有振動数の推定結果を荷重0点の結果(図-13)と比較して示す。また、図-15は、変位0点で軸力レベルを3段階変化させた時の固有振動数を示している。これらによると、同じ経験変形角であっても水平荷重や鉛直軸力の残留状態によって固有振動数が増減することがわかる。具体的には、変位0でひび割れが閉じている場合の方が、荷重0で残留変位が残ってひび割れが開いている場合よりも、特に著しい曲げ降伏した場合には、固有振動数が上昇する。また、同じ経験変形角であれば、鉛直軸力が低いほどひび割れが開きやすくなり、固有振動数が低くなる。これらの結果は、同じ損傷レベルでも残留荷重の条件によってひび割れの開閉程度が変化し、見かけの剛性が変化することを示している。このような現象については、今後、部材の鉛直方向の変位や軸方向鉄筋のひずみなどのデータと照らし合せながら、詳細に分析する必要がある。

## 5. まとめ

本研究では、面外繰返し変形によるボックスカルバート壁部材の損傷形態の評価に資する知見取得を目的として、せん断補強筋量が異なる4体のRC部材に対して繰返し載荷実験とハンマリングによる自由振動試験を行った。本検討で得られた知見は以下の通りである。

(1) RC部材の曲げひび割れまたはせん断ひび割れの発生状況は、実際のボックスカルバートでは目視できない試験体正面からは容易に確認できる。しかし、

実際に目視できる側面から内部の損傷形態を判別することは必ずしも容易ではない。

(2) 未載荷時や曲げひび割れ発生時には、ハンマリングによる振動データから上下端固定で中央を腹とした明瞭な振動モードを取得することができた。一方、せん断ひび割れ発生時には、局所的な振動を含む複雑な振動モードが励起された。

(3) 経験変形角増大に伴う固有振動数低下を評価した結果、せん断ひび割れ等の激しい損傷に対して固有振動数はほとんど変化しないが、軸方向鉄筋降伏に対しては固有振動数が急激に低下することを確認した。

なお、今回検討したRC部材は、実際のボックスカルバートの壁部材とは異なり、0.8m×0.4mの断面を有する梁部材である。また、実構造物の振動特性では、周辺地盤の影響を考慮する必要がある。したがって、今後、軸線方向の連続性や周辺地盤などの境界条件を考慮した検討をFEM解析等で実施することにより、ここで得られた知見の一般性と実用性を検証する予定である。

## 参考文献

- 1) 香川智哉他：新潟県中越沖地震による柏崎刈羽原子力発電所6・7号機放水路の被害と復旧，電力土木，347号，pp.54-59，2010
- 2) 宮川義範他：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(その1)，電力中央研究所研究報告，N11005，2011
- 3) 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
- 4) 土木学会：2007年制定 コンクリート標準示方書[設計編]，2008
- 5) 永田聖二他：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，No.1，pp.1721-1726，2011
- 6) 永田聖二他：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