

論文 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

永田 聖二*1・宮川 義範*2・金澤 健司*3・松村 卓郎*4

要旨：本論文は、せん断補強筋のない RC 壁供試体を対象とする正負交番荷重実験において、損傷による固有振動数の低下現象を、自由振動試験に基づいて検出した結果を示すものである。具体的には、荷重実験の除荷時にインターバルを設け、ハンマリングによって供試体の自由振動を励起させ、その卓越振動数から推定した固有振動数と荷重実験における経験変形角との関係を明らかにした。本検討から、最終的にせん断破壊する RC 部材においても、これまで曲げ破壊先行型部材を対象として研究されてきた、固有振動数の低下量に基づく健全性診断を適用できる可能性を示した。

キーワード：RC 壁供試体、せん断ひび割れ、自由振動、固有振動数、健全性診断、ハンマリング

1. はじめに

大地震で被災した RC 構造物の健全性は、一般に目視を中心とした現地調査に基づいて診断され、必要に応じて打音法などの非破壊検査が併用される。しかし、現状の診断技術では、部材の内部状況を的確に評価することが難しく、継続使用や補修の判断に多大な時間を要することがあることから、より明確な判定を与える診断技術が望まれている^{1)~3)}。現在、有力視されている手段の一つに、損傷による固有振動数の低下に着目した RC 構造物の診断があり、橋梁や建物などの地上構造物を主な適用先として研究が進められている^{4)~7)}。ただし、それらの多くは、最近の耐震設計・補強法^{8),9)}が適用された曲げ破壊先行型部材で構成される構造物が対象であり、せん断破壊を呈する場合についてはほとんど検討されていない。

これに対して地中構造物では、鋼板巻立てなどによる耐震補強法の適用が難しいため、せん断ひび割れを回避することは必ずしもできない。また、形式上目視できる箇所が限られていることから、壁体表面でひび割れが発見されても、それが内部でどのように進展しているかを見極めることは難しい。したがって、目視調査の弱点を補う診断技術の必要性は高いが、その一方で、周辺地盤とともに振動するという性質から、固有振動数に着目した診断技術の地中構造物への適用は容易ではないという問題がある。しかし、隔壁などの局所的な振動を人為的に励起させることは可能であるため、部材レベルの健全性診断については、検討の余地がある。

以上の背景から本研究では、地中構造物の隔壁を模擬したせん断補強筋のない RC 壁供試体の正負交番荷重実験¹⁰⁾において、ハンマリングによる自由振動試験を実施し、せん断ひび割れの進展による固有振動数低下の検出を部材レベルで試みる。

2. 荷重実験と振動試験の方法

本研究では、衝撃弾性波試験の適用性検討を主目的とする文献¹⁰⁾の正負交番荷重実験において、供試体の固有振動数検出のための試みとして、ハンマリングによる自由振動試験を実施した。文献¹⁰⁾では、寸法や境界条件などが異なる計 15 ケースの実験が行われているが、本研究では、これらのうち、両端回転固定部材と呼ばれる 7 体を対象として自由振動試験を行った。ただし、これらの供試体の固有振動数を検出するための計測条件（サンプリング周波数、計測レンジなど）が固まったのは 4 体目の試験からであったため、以下では同一条件による計 4 体の試験について示すこととする。

2.1 正負交番荷重実験の条件

本文で対象とする供試体は、表-1 の 4 体である。ここでは、せん断余裕度が高い順に No.1~No.4 と呼ぶこととする。なお、表中に示すせん断余裕度は、計算上の曲げ耐力¹¹⁾とせん断耐力^{12),13)}の比であり、ここでは、コンクリート強度、軸鉄筋比、軸力比（表では圧縮を正、引張を負としている）をパラメータとしてせん断余裕度を変えている。供試体および荷重装置の設置状況を、それぞれ図-1、図-2 に示す。供試体は地中埋設ボックスカルバートの隔壁を模擬したものであり、上下端のハンチを含まない壁体の高さは 1.2m（両ハンチを含む高さは 1.6m）、壁体断面の幅、奥行きは、それぞれ 0.4m、0.8m である。壁体は、下部スラブを介して荷重床に PC 鋼棒を用いて固定されており、上部スラブと L 型治具を介して鉛直 2 本、水平 1 本のアクチュエータが取り付けられている。

荷重では、2 本の鉛直アクチュエータにより一定軸力を与えるとともに、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水平荷重が与えられている。水平変位は、壁体の目標変形角が 0.1%、0.2%、

*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 主任研究員 工博（非会員）

*4 電力中央研究所 地球工学研究所 構造工学領域 上席研究員 工博（正会員）

表-1 実験供試体の特性

試験体	コンクリートの 圧縮強度	引張鉄筋比	軸力比	せん断 余裕度*1	破壊モード*2
No.1	55.8 MPa	0.57 %	0 %	1.01	曲げせん断
No.2	31.4 MPa	0.57 %	-5.0 %	0.63	曲げせん断
No.3	29.4 MPa	1.13 %	-5.3 %	0.54	せん断
No.4	30.0 MPa	1.13 %	5.2 %	0.52	せん断

*1 計算上の耐力比（せん断耐力／曲げ耐力）

*2 ひずみ計測による主鉄筋の曲げ降伏の有無で評価した载荷実験における破壊形態

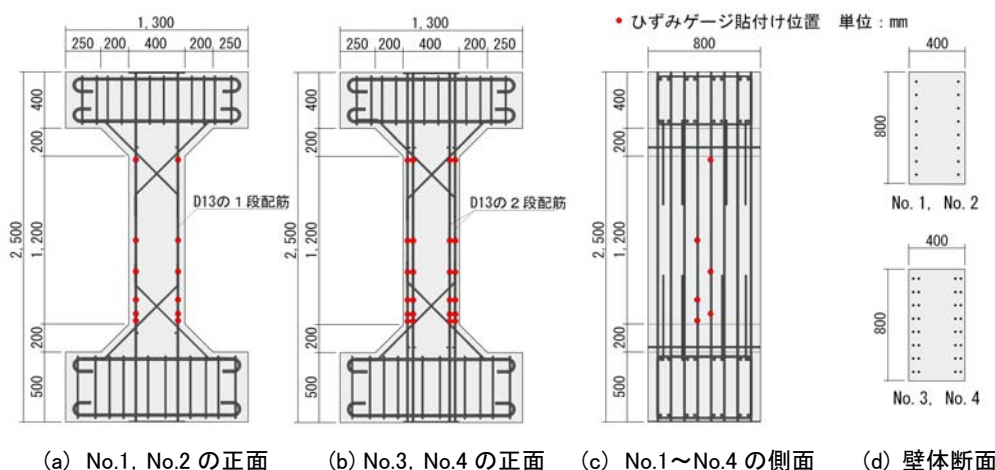
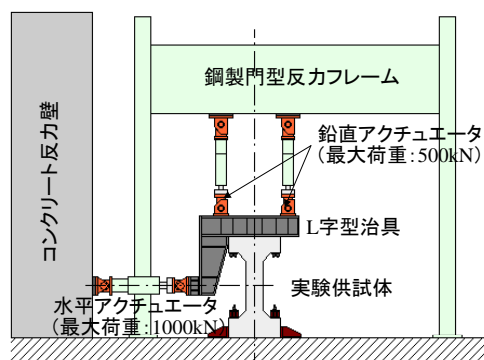


図-1 実験供試体の形状および配筋



(a) 供試体と実験装置



(b) 実験装置の構成

図-2 正負交番载荷の実験装置

0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%と徐々に漸増させながら与えられており、供試体の耐力が半分程度低下するまで载荷を実施した。なお、ここで定義する供試体の変形角は、水平アクチュエータによる水平変位を壁体の高さ1.2m（上下端のハンチを含まない）で除した値である。

2.2 自由振動試験の条件

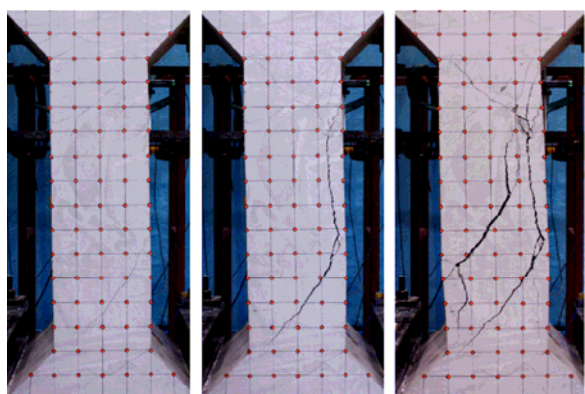
ハンマリングによる自由振動試験の概要を図示すると、図-3のようになる。载荷実験における荷重-変位の曲線を描いた時、a) 実験前、b) 除荷時にプラスチック製のハンマーを用いて人力で壁体中央を打撃し、これにより上下端固定で壁体中央が腹となる振動モードを励起させた。自由振動データの記録は、ひずみゲージ式加

速度計（定格 $5,000\text{cm/s}^2$ 、応答周波数範囲DC~1,500Hz）3個、A/D変換機、ノートパソコンをケーブルで接続した計測システムで行った。計測時のサンプリング周波数は5,000Hz、計測レンジは $1,000\text{cm/s}^2$ である。なお、3個の加速度計は、上下端固定の自由振動を計測するため、それぞれ壁上部スラブ（TP）、壁中央（MD）、壁下部スラブ（BT）に配置した。

供試体の固有振動数の推定は、後述するように、この自由振動データに対してフーリエ変換によりパワースペクトルを算出し、壁中央（MD）の自由振動データの卓越振動数を壁体の固有振動数と見なした。ここでは、壁中央（MD）で生じた明瞭な共振ピークは壁上下部（TP、

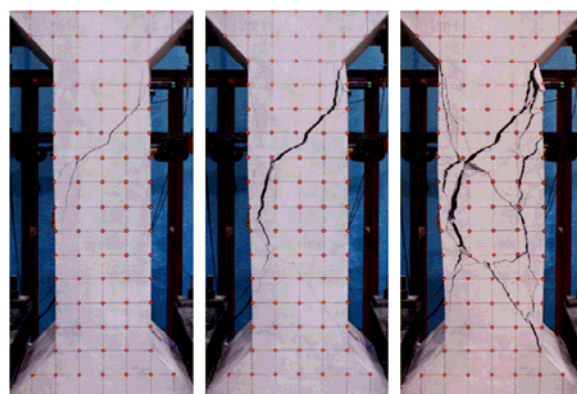


図-3 ハンマリングによる自由振動試験の概要



(a) 変形角 1.0% (b) 変形角 1.5% (c) 変形角 2.0%

図-4 供試体 No.1 正面の損傷状況



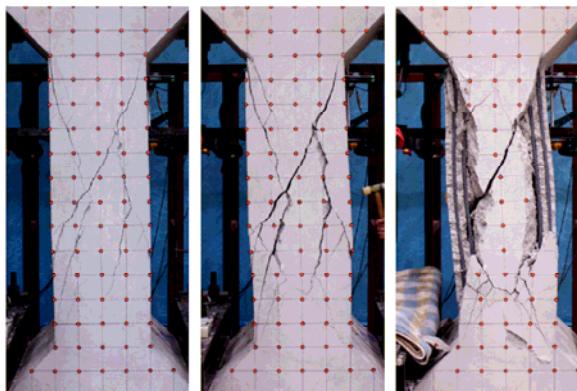
(a) 変形角 1.0% (b) 変形角 1.5% (c) 変形角 2.0%

図-5 供試体 No.2 正面の損傷状況



(a) 変形角 1.0% (b) 変形角 1.5% (c) 変形角 2.0%

図-6 供試体 No.3 正面の損傷状況



(a) 変形角 1.0% (b) 変形角 1.5% (c) 変形角 2.0%

図-7 供試体 No.4 正面の損傷状況

BT)では認められなかったこと、また、実験前のハンマリングによる固有振動数の推定値が、有限要素解析(条件:壁体の上下端を固定、ひび割れを考慮しない)に基づく固有振動数の試算値と概ね一致したことから、ハンマリングにより意図した振動モードが励起されていると判断した。なお、実験では1回のインターバルにつき3回の打撃を行っているが、打撃の強弱などによる固有振動数のばらつきはほとんどみられなかったため、後述の試験結果では、各インターバルでの1回目の打撃で得られた自由振動データに基づく固有振動数を示すこととする。

3. 正負交番载荷実験による損傷状況

正負交番载荷実験から得られた主要な結果として、まず、供試体No.1~No.4のひび割れの進展状況をそれぞれ図-4~図-7に示す。これらは、目標変形角1.0%、1.5%、2.0%の側の最大変形時における供試体正面のひび割れである。ここで、供試体正面とは、ボックスカルバートでは横断面に相当するため、本来、直接目視できない面であることに注意されたい。なお、軸鉄筋のひずみ計測に基づく降伏の有無で判定した破壊モードは、表-1に示した通り、供試体No.1, No.2が曲げせん断破壊(曲げ降伏後のせん断破壊)、供試体No.3, No.4がせん断破壊で

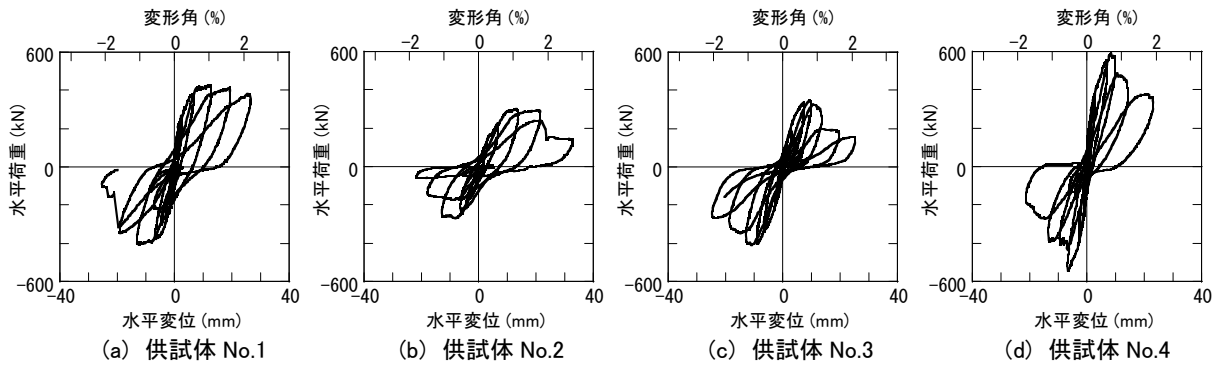


図-8 水平荷重-水平変位の履歴曲線

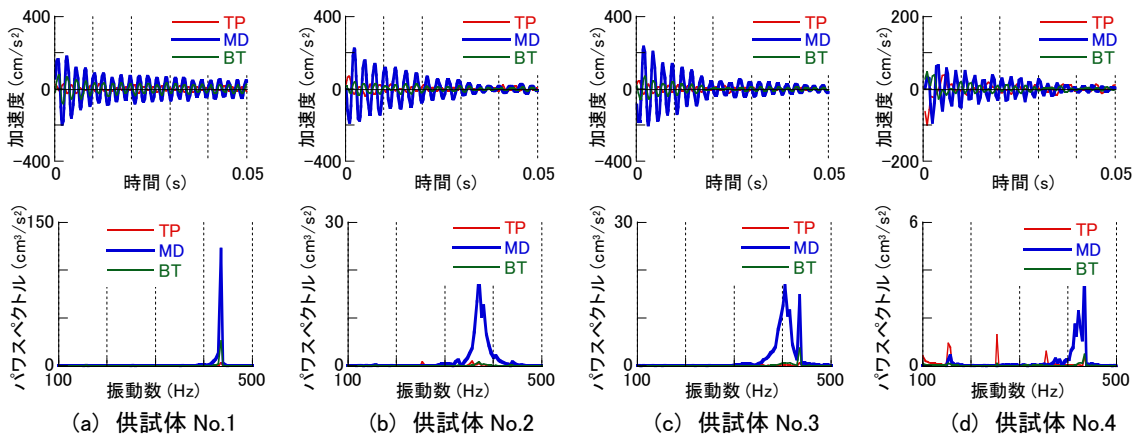


図-9 実験前のハンマリングによる自由振動データ(時間表示および振動数表示)

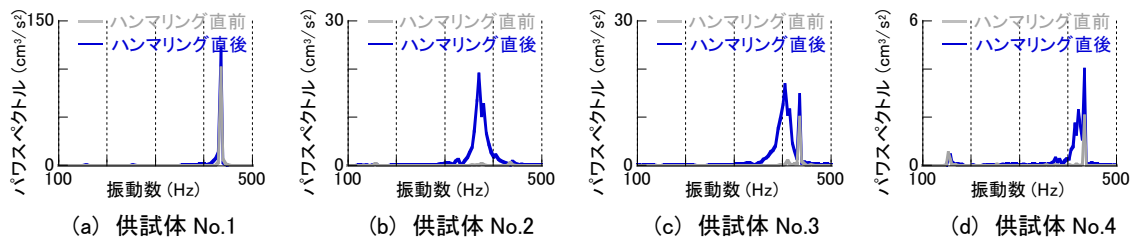


図-10 実験前におけるハンマリング有無による加速度計 MD の振動データの違い(振動数表示)

ある。変形角1.0%の段階での損傷を供試体ごとに比較すると、全ての供試体でせん断ひび割れは生じているが、概ね供試体No.1からNo.4へとせん断裕度が低い供試体ほど、そのひび割れが著しいという傾向がある。ただし、この段階では、供試体側面（ここでは示していないが、本来、直接目視できる面）から見ても、ひび割れの角度や程度を把握することは難しい。変形角1.5%になると、いずれの供試体もせん断破壊により壁体にはらみ出しが生じており、損傷の顕著さは、本来目視できる供試体側面からでも目視や打音などで予想できそうなレベルであった。

各供試体の水平荷重-水平変位の履歴曲線は図-8に示す通りである。履歴曲線の+側を見ると、せん断余裕度が低い順（No.4からNo.1の順）に耐力低下が早い段階で生じる傾向、すなわち変形性能が低くなる傾向が見受

けられるのに対して、一側を見ると変形角1.5%の段階で全ての供試体で顕著な耐力低下が生じており、せん断裕度と変形性能の相関は必ずしも認められない。変形角-1.5%での耐力低下については、前出の図-4～図-7に示した部材のはらみ出しを伴う激しいせん断破壊から概ね説明できそうである。したがって、図-8における一側の履歴曲線のように明確な耐力低下を伴っている場合であれば、本来目視できる面（供試体側面）からでも、目視や打音法によって補修や取替えなどの判断が可能と考えられる。その一方で、本載荷実験における変形角1.0%以下の損傷レベルでは、目視などによる診断が比較的難しいと考えられるため、後述する自由振動試験では、このレベルでの固有振動数低下の検出が重要である。

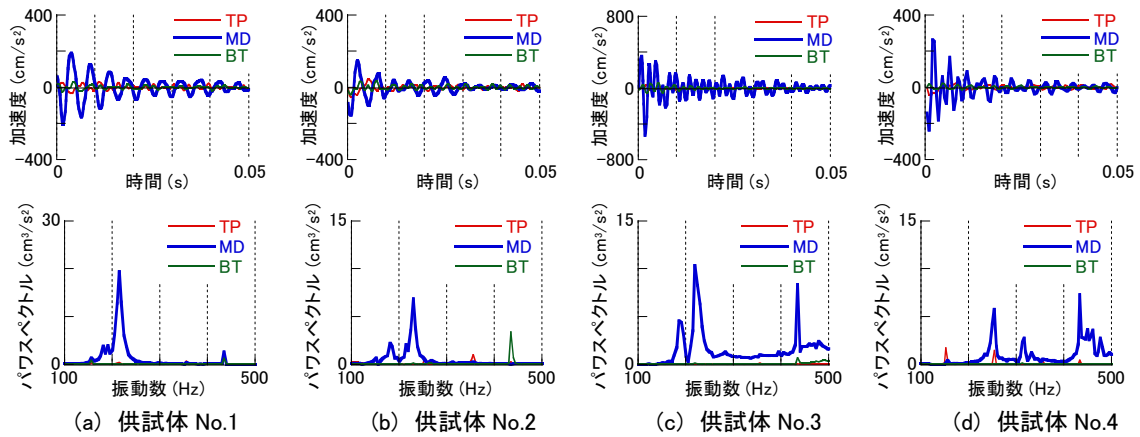


図-11 変形角 1.0% 載荷時のハンマリングによる自由振動データ(時間表示および振動数表示)

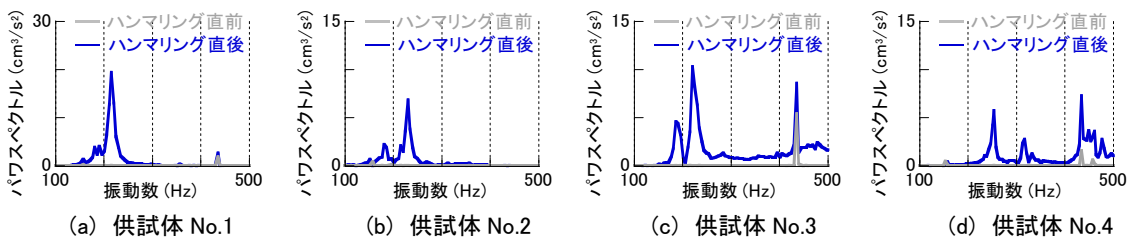


図-12 変形角 1.0% 載荷時におけるハンマリングの有無による加速度計 MD の振動データの違い(振動数表示)

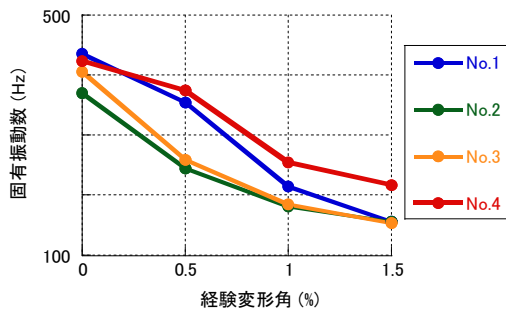


図-13 変形角と固有振動数の関係

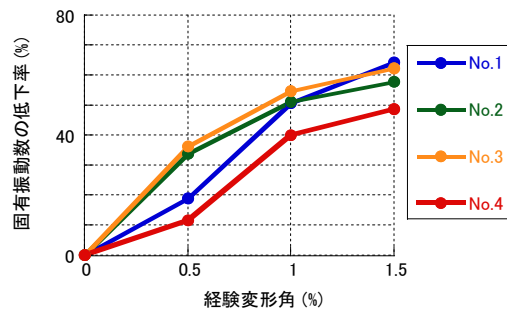


図-14 変形角と固有振動数の低下率の関係

4. 自由振動試験に基づく固有振動数

図-9 は、正負交番載荷実験前(鉛直軸力は導入されている状態)に実施したハンマリングによる自由振動データを、時間領域、振動数領域(フーリエ変換によるパワースペクトル)で示した結果である。まず、時間領域でみると、いずれの試験体でも壁中央(MD)において、明瞭な自由振動波形が得られていることがわかる。振動数領域でみると、壁中央(MD)で、壁上下部スラブ(TP, BT)には見られない明瞭な共振ピークがそれぞれ認められる。供試体 No.1, No.3, No.4 では振動数 436Hz にスパイク状のピークが見られるが、これはハンマリングをしない状態(図-10 参照)でも生じており、実験装置の機械振動により励起されたものと考えられる。ここには示していないが、実験装置を停止している状態では、430Hz 付近のスパイク状のピークが消えることを確認している。

以下では、上下部スラブやハンマリング直前のスペクトル形状と照らし合わせた上で、ハンマリングによって励起されたと考えられる壁中央での共振ピークを、一次固有振動数とみなすこととする。供試体 No.1 の固有振動数は、実験装置の機械振動の振動数と一致しているとみなし、436Hz と見込んだ。同様に推定した供試体 No.2, No.3, No.4 の固有振動数は、それぞれ 370Hz, 406Hz, 423Hz である。

載荷実験による損傷時の固有振動数の推定に用いたデータ例として、経験変形角 1.0% の除荷時のハンマリングによる自由振動データ(時間表示、振動数表示)を図-11 に示す。また、ハンマリング直前の振動データ(常時微動)と自由振動データの比較(振動数表示)を図-12 に示す。時間領域でみると、程度は供試体によるが、前述の実験前と比べると自由振動波形は乱れており、振動数領域によると複数の共振ピークが出現していること

がわかる。前述の実験前と同様に、スペクトル形状から供試体 No. 1, No. 2, No. 3, No. 4 の一次固有振動数を推定すると、それぞれ 215Hz, 229Hz, 184Hz, 254Hz である。なお、これらの推定では、機械振動によるもの以外で明瞭な共振ピークが複数ある場合、それらのうち最も顕著な共振ピークを選定した。

正負交番荷重実験による経験変形角 (0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%) と、上記の手順で自由振動データから求めた固有振動数との関係を示すと図-13 のようになる。図-14 は、実験前の自由振動試験から推定した固有振動数を基準とした、各経験変形角における固有振動数の低下率を縦軸にして図示した結果である。いずれの供試体も経験した変形角の増大に伴い固有振動数は低下しており、経験変形角が 1.0% の場合には、いずれも実験前の状態よりも 40% 以上の固有振動数の低下が生じる結果となっている。前述したように、経験変形角 1.0% レベルの荷重では、実際の地中構造物において目視可能な面からの損傷度の推定は難しいと考えられるのに対して、今回行ったハンマリングによる自由振動試験によると、地震前後の固有振動数の低下を把握することで、せん断ひび割れの発生を、原理的には検知できる可能性がある。

5. まとめ

本研究では、せん断補強筋のない RC 壁供試体 4 体を対象として、正負交番荷重実験による経験変形角とハンマリングによる自由振動試験から推定した固有振動数の関係を明らかにした。

荷重実験によると、経験変形角 1.0% レベルでは、供試体側面からの目視による損傷度の推定は難しいのに対して、自由振動試験に基づく固有振動数は、実験前 (健全時) よりも 40% 以上低下することを確認した。このことから、せん断破壊先行型の部材においても、これまで曲げ破壊先行型の部材を対象として研究されてきた固有振動数の低下量に基づく健全性診断を、原理的には適用できると考えられる。

ただし、今回の RC 壁供試体は、実際の地中構造物 (軸線方向に連続) とは異なり、壁体の奥行き 800mm 前後で不連続としているため、地中構造物の隔壁への適用性を直接示しているとは言えない。今後、実験による固有振動数の低下を有限要素解析などで再現するとともに、実際の境界条件を想定した適用性検討が必要である。

参考文献

- 1) Housner, G. W., et al.: Special Issue: Structural Control: Past, Present and Future, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 123, No. 9, 1997.
- 2) 山本鎮男: ヘルスモニタリング-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.
- 3) 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.
- 4) Petters, B., and De Reock, G.: One year monitoring of the Z24 Bridge: environmental effects versus damage events, Proceedings of the 18th International Modal Analysis Conference, San Ansonio, TX, 2001.
- 5) 関雅樹, 西村昭彦, 佐野弘幸, 中野聡: RC ラーメン高架橋の地震時損傷レベルの評価に関する研究, 土木学会論文集, No.731/I-63, 2003.
- 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) 金澤健司: 長期常時微動観測による建築物の固有振動数の地震時変動の検出, 第 12 回日本地震工学シンポジウム論文集, 2006.
- 8) Priestley, M. J. N., Seible, F. and Calvi, G. M.: Seismic Design and Retrofit of Bridges, Jhon Wiley & Sons, Inc., 1996.
- 9) 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耐震性能照査指針・同マニュアル, 2005.
- 10) 宮川義範, 松村卓郎, 堀江正人, 岩森暁如: せん断破壊する鉄筋コンクリート部材の局所変形の増大および衝撃弾性波の周波数特性, 土木学会, 第 65 回年次学術講演会講演概要集, 2010.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 二羽淳一郎, 前田詔一, 岡村甫: ディープビーム的な 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.