

論文 繰返し載荷を受ける RC 部材の固有振動数と減衰定数に関する考察

永田 聖二*1・宮川 義範*1

要旨：著者らは、これまでに繰返し載荷実験と自由振動試験に基づいて RC 部材の曲げひび割れに伴う固有振動数の低下とせん断ひび割れに伴う固有モードの変化について検討してきた。本研究では、振動特性として新たに減衰定数について検討するとともに、振動特性（固有振動数と減衰定数）と通常の変位計測や画像計測による変形状態との関係を分析した。その結果、減衰定数は曲げひび割れの進展に伴ってやや上昇し、せん断ひび割れによって更に上昇するという傾向が認められた。また、振動特性の変化は鉛直変位が残留し始めると有意になること、それらは RC 部材の上下端の塑性変形の残留に起因することを示した。

キーワード：RC 部材, 固有振動数, 減衰定数, 経験変形角, 変形状態, 鉛直ひずみ

1. はじめに

ボックスカルバート等の地中構造物^{1),2)}は、外側が地盤で覆われており、直接目視できる箇所が限られる。このため、地震後に損傷状態を的確に診断することは容易ではない³⁾。最近では、このような制約に対応できる非破壊検査技術^{4),5)}が各所で研究されており、衝撃弾性波試験⁶⁾や強制加振試験⁷⁾を適用するという試みも行われている。しかし、問題の難易度に比して研究例は少なく、診断方法として確立しているとは言い難い。更なる非破壊検査技術の試行はもとより、検出可能な物理量と損傷状態に関するより詳細な考察が必要とされている。

著者らは、直接目視できない内部の損傷状態を打撃による振動データ⁸⁾から推定することを目的として、RC 部材の繰返し載荷実験とハンマリングによる自由振動試験を実施した^{9),10)}。その結果、曲げひび割れによって固有振動数が著しく低下する一方で、せん断ひび割れによって固有モードが変化する等、損傷形態によって振動特性の傾向が異なる可能性を見出した。しかし、実際の現場では、診断に資する手掛かりを一つでも多く見出しおくことが望まれる。このような観点では、固有振動数と固有モードだけでなく、減衰定数についても検討の余地がある。また、RC 部材の振動特性と変形状態に関する詳細分析も、現場での振動データの理解に少なからず役立つと考えられる。

本研究では、既往の実験⁹⁾における RC 部材の損傷状態と振動特性の関係をより詳細に考察するため、まず、振動特性として新たに減衰定数に関する分析を行った。ここでは、同一状態での 3 回の打撃結果を用いることでばらつきの確認も行えるように配慮した。次に、RC 部材の振動特性（固有振動数と減衰定数）と変形状態との関係を把握するため、通常の変位計測によるマクロ的な変形状態、ならびに画像計測によるミクロ的な変形状態に基づく分析を行った。

2. 繰返し載荷実験と自由振動試験の概要

本章では、文献⁹⁾に基づいて、次章以降の内容を理解するために必要最低限の実験概要（試験体、実験方法、変形角と損傷状況の関係）について簡潔に示す。詳細な内容について文献⁹⁾を参照されたい。

2.1 試験体

既往の実験⁹⁾では、せん断補強筋比が異なる試験体 4 体を用いられたが、本研究では、最も破壊形態が異なる 2 体を分析対象とする。具体的には、表-1 に示すせん断補強筋比が最大 (0.71%) の場合と最小 (0%) の場合を対象とし、以下では、それぞれ曲げ破壊型とせん断破壊型の試験体と呼ぶこととする。図-1 では、曲げ破壊型の試験体の配筋図を例示するとともに、軸鉄筋のひずみ計測、棒状変位計による変位計測、画像計測における計測点も併せて示している。2 体の違いはせん断補強筋の有無のみであり、その他のパラメータは統一している。ハンチを含まない RC 部材の高さ、ハンチを含む高さおよび上下スタブの中心間高さはそれぞれ 1.2m, 1.6m および 2.05m である。断面の幅は 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、鉄筋の材質は SD345 である。

2.2 実験方法

繰返し載荷実験の載荷装置を図-2 に示す。試験体は下部スタブを介して載荷床に固定されるとともに、上部スタブに設置された L 型治具を介して鉛直 2 本と水平 1 本のアクチュエータが取り付けられている。載荷では、450kN 相当の一定軸力を与えて上部スタブの回転を抑制した状態で、水平変位を変位制御で与えた。水平変位は、目標変形角（ハンチを含まない RC 部材の高さ 1.2m で基準化）が 0.1%, 0.2%, 0.5%, 0.7%, 1%（以後、0.5%ずつ増加）と漸増するように与えた。ただし、本論文で実験結果を示す際には、上下スタブの中心間高さ 2.05m で基準化した変形角^{1),2)}を用いることとする。

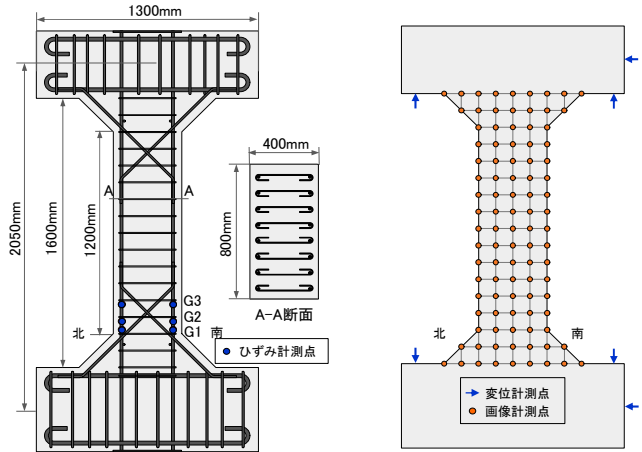
*1 電力中央研究所 地球工学研究所 構造工学領域 博(工) (正会員)

図-1 試験体の主な仕様

項目	単位	曲げ破壊型	せん断破壊型
コンクリート圧縮強度 ^{*1}	MPa	35.6	34.5
軸鉄筋比	%	0.57	0.57
軸鉄筋径	mm	16	16
軸鉄筋の降伏点応力	MPa	369	369
せん断補強筋比	%	0.71	0
せん断補強筋径	mm	10	-
せん断補強筋間隔	mm	100	-
せん断補強筋降伏点応力	MPa	370.9	-
軸応力比 ^{*2}	%	4.21	4.35
試験体のせん断耐力	kN	958.1	310.7
試験体の曲げ耐力	kN	465.9	465.7
耐力比 (曲げ/せん断)	%	2.06	0.67

*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) 配筋とひずみ計測点 (b) 変位計測点と画像計測点
図-1 試験体の配筋(曲げ破壊型)と計測点

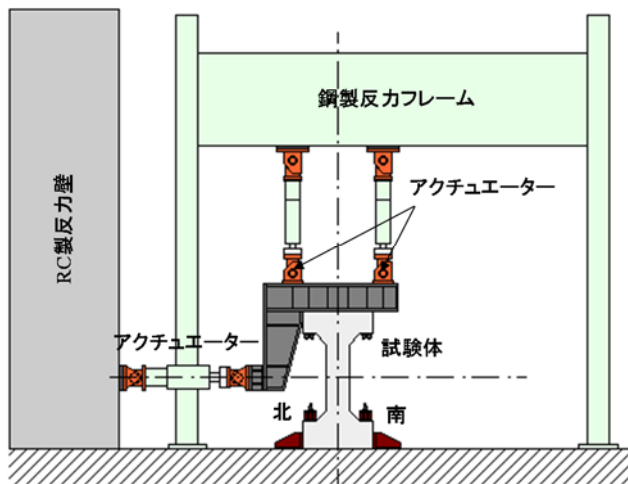
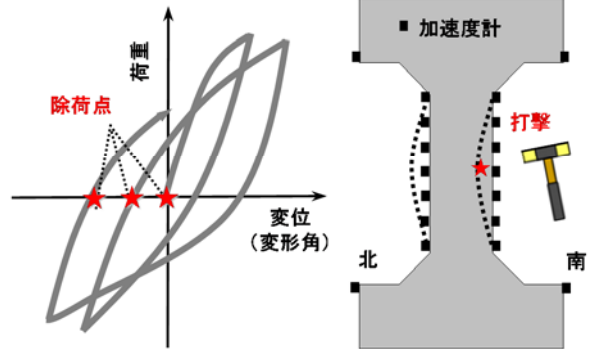


図-2 繰返し載荷実験用の載荷装置



(a) 履歴曲線上の打撃点 (b) 試験体上の打撃点

図-3 自由振動試験の概要

繰返し載荷実験における計測項目としては、アクチュエータに内蔵されたロードセルによる鉛直と水平の荷重の他に、図-1(a)に示した軸鉄筋のひずみ計測、図-1(b)に示す棒状型変位計を用いた上下スタブの鉛直と水平の変位計測、デジタルカメラを用いた画像計測を行った。なお、画像計測については、計測方法と計測結果ともに、本論文で新たに報告する内容であることから、詳細については4章にて別途記載することとする。

図-3は、自由振動試験の概要を示している。本試験は、地震後においてボックスカルバートの隔壁の中央を打撃して、壁体の上下端を固定とした面外方向の自由振動を励起させることを想定したものである。具体的には、水平荷重-変形角の関係における除荷点にインターバルを設け、プラスチック製ハンマーによって部材中央を打撃した。打撃時の境界条件としては、鉛直と水平のアクチュエータを設置したままの状態としており、図-3(b)の破線のような上下端を固定としたRC部材の振動モードを励起させた。なお、打撃の強弱等による振動特性のばらつきを確認するため、同一状態につき3回の打撃を行った。また、試験時には、RC部材の側面に設置したひずみ

式加速度計によって水平加速度を計測した。収録時のサンプリング周波数は10kHz、計測レンジは100m/s²、A/D変換機の分解能は16bitである。

2.3 変形角と損傷状態の関係

ここでは、繰返し載荷実験における各試験体の変形角と損傷に関するイベントとの関係について簡単に整理しておく。まず、曲げ破壊型の試験体では、変形角が約0.4%の時に、RC部材の上下端付近において曲げひび割れが顕著になり始めるとともに、水平荷重-変形角の履歴曲線上で明確な曲げ降伏が生じ始めた。その後、例えば、変形角が2%程度においても、ひび割れが明瞭なること以外は顕著な損傷の進展はなく、履歴曲線においても安定した耐力を有する履歴ループを描いた。

これに対して、せん断破壊型の試験体では、変形角が約0.4%の時には、曲げ破壊型の場合と同様に曲げひび割れが明瞭になり始めた。また、水平荷重-変形角の履歴曲線上においても明瞭な曲げ降伏が生じた。変形角が約0.9%になると、RC部材に急角度のせん断ひび割れが複雑に進展するとともに、履歴曲線においても、せん断ひび割れに起因する著しい耐力低下が生じた。

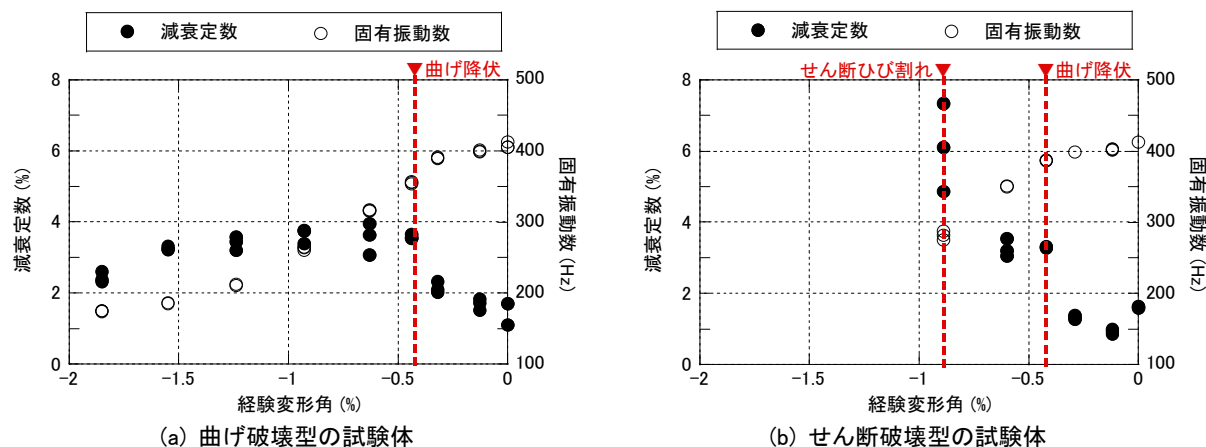


図-4 減衰定数と経験変形角の関係

3. 減衰定数に関する分析

本章では、減衰定数の算出方法を示した上で、減衰定数と経験変形角との関係について述べる。

3.1 減衰定数の算出方法

構造物の振動特性の算出方法^{11),12)}としては、自由振動試験で得られた時刻歴波形を時間領域で算出する方法と、フーリエ変換によってパワースペクトル等を求めてから振動数領域で算出する方法がある。一般には、固有振動数と固有モードは振動数領域で、減衰定数は時間領域で算出の方が精度良く評価できるとされている。このため、本研究では、時間領域での減衰定数の算出方法を用いることとし、その中でも最も簡便な方法として広く用いられている振幅減衰比による方法を採用する。

振幅減衰比による方法では、基本的に、単一の振動モードのみが卓越した自由振動波形を計測するか、あるいはフィルター処理等によって単一の振動モードのみを抽出した自由振動波形を用いる必要がある。本研究では、本論文の2章で述べた通り、加速度計測時のサンプリング周波数が1kHzであり、ノイズや高次の振動モード等が少なからず混在する。したがって、振幅減衰比による方法を適用する前に、時間領域の自由振動波形に対して、一度、振動数領域（パワースペクトル）に変換し、着目する共振ピーク以外の不要な振動数成分をバンドパスフィルターによって除去した上で、再度、時間領域に逆変換するという下処理を行った。フィルターのバンド幅を設定する際の考え方としては、基本的には、着目する共振ピークの前後でパワースペクトル上の振幅レベルが1/10以下に下がった振動数領域を選定することとし、着目する共振ピークに他の共振ピークが隣接する場合には、両共振ピークの谷間の振動数領域を選定した¹²⁾。

ここで、減衰定数の算出においては、同じ構造条件であっても振動データの振幅レベルによって評価値が異なるという、いわゆる振動振幅依存性^{13),14)}があることが知られており、留意が必要である。本研究では、振動振幅

依存性の影響を緩和するための配慮として、一つの自由振動波形の中で加速度レベルが概ね同等の範囲である波を選定した上で、振幅減衰比による方法を適用することとした。具体的には、一つの自由振動波形において、オーダーとして0.1 m/s²から1 m/s²程度の6波（極大値6個分の波）を選定し、それらによる減衰定数の平均値を、その自由振動波形における減衰定数と見なした。

以上の手順で算出した減衰定数の妥当性については、既往の研究^{13),14)}における比較的単純なRC構造物の健全時における減衰定数の評価値と比較して、大きな違いがないかどうかで判断することとする。ただし、損傷時における減衰定数の評価値については、著者らが知る限り、現状では十分なデータがないことから、既往の知見と照らし合わせて妥当性を論ずることは難しい。したがって、本研究では、健全時において妥当性を確認した減衰定数の算出方法を、損傷時に対しても適用した上で、ひび割れ等のイベントによって評価値のどのように増減するか、あるいはどのようにばらつくか等について、定性的な傾向を調べることにする。

3.2 減衰定数と経験変形角の関係

減衰定数の評価値と経験変形角の関係を図-4に示す。ここでは、同一状態における評価値のばらつきを確認するため、3回分の打撃結果を同時に示している。また、経験変形角に対する固有振動数の低下傾向⁹⁾についてばらつきも含めて比較するため、同図にはピーク法に基づく固有振動数についても同時にプロットしている。まず、未載荷時では、いずれの試験体でも減衰定数は1.1%~1.7%となっている。ここで、既往の研究によると、健全時のRC超高層煙突¹³⁾とRC橋梁模型¹⁴⁾を対象とした自由振動波形に基づく減衰定数の評価値はともに0.5~1.5%程度であったことから、ここでは、今回得られた減衰定数の評価値は概ね妥当であると判断した。

経験変形角0.3%以前では、両試験体ともに減衰定数は、未載荷時とほとんど変わらず1%~2.5%の範囲に分布し

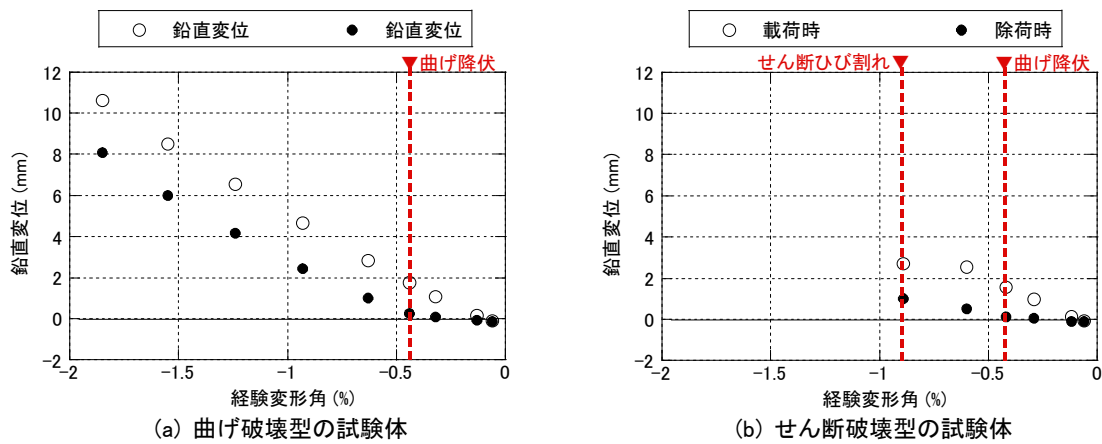


図-5 繰返し載荷実験における載荷時と除荷時の鉛直変位—経験変形角の関係

ている。RC 部材が曲げ降伏した経験変形角 0.4%以降になると、両試験体ともに減衰定数は上昇し、3%~4%程度に達した。なお、曲げ降伏前後で評価値が変化するという傾向は固有振動数と同様である。曲げ破壊型の試験体では、変形角 0.6%以降は、少なくとも減衰定数の上昇は認められない。一方、せん断破壊型の試験体では、せん断ひび割れ発生時に減衰定数が上昇するとともに、評価値がばらつく傾向が認められることに特徴がある。

以上の減衰定数の傾向は、固有振動数の低下と同様に、地震後の損傷評価における一つの手掛かりとなり得る。ただし、減衰定数の傾向は、構造形式や損傷状態あるいは振動試験の条件等によって異なる可能性があるため、ここで得られた傾向の一般性を示すためには、更なる実証データの蓄積と分析が必要である。また、今回は簡便な算出方法として振幅減衰比による方法を用いたが、定量的な減衰定数の評価を行うためには、様々な方法による比較を交えて分析することが望まれる。

4. 振動特性と変形状態に関する分析

4.1 基本方針

本章では、試験体の振動特性と変形状態に関する分析を行う。振動特性としては、図-4 に示した固有振動数と減衰定数を対象とする。本研究では、ひび割れ幅の測定は行っていないが、試験体頂部の鉛直変位が、RC 部材に分布するひび割れ幅をマクロ的に捉えた指標と考え、載荷に伴う鉛直変位の増大について、振動特性と照らし合わせて分析する。一方、その時の鉛直方向のミクロ的な変形状態を把握するため、塑性ヒンジ区間となる RC 部材の上下端周辺における軸鉄筋のひずみと画像計測に基づく鉛直ひずみの分布について分析を行う。

画像計測については、本論文で新たに報告する内容であることから、その手順を簡単に示す。基本的に類似した既往の研究^{3),15)}と同様に、ターゲットとしては、蛍光色の円形マークを 100mm 間隔の格子状に貼り付けた。

撮影は、デジタルカメラ (2848×4272 ピクセル) を用いて、載荷の各サイクルの載荷点 (最大変位点) と除荷点にて行った。画像解析では、レンズの歪曲収差を補正した後、色の識別によってマークを検出し、その中心座標を求めた。ピクセル数等に基づく分解能は約 0.25mm と見込まれるが、マークの中心座標を求める際の平均化処理によって、実質的にはその半分程度の分解能 (約 0.5mm) となる。

4.2 振動特性と変形状態との関係

図-5 は、載荷時と除荷時における鉛直変位 (引張側が正) と経験変形角の関係である。曲げ破壊型の試験体では、載荷時の鉛直変位は、変形角 0.3%の時に約 1mm となった後、変形角の漸増に伴って単調に増大する。一方、除荷時の鉛直変位は、変形角 0.6%の時に 1mm 程度残留し、その後は変形角の漸増に伴って単調に増大する。せん断破壊型の試験体でも、変形角 0.6%までの挙動は曲げ破壊型の試験体とほとんど変わらない。しかし、変形角 0.9%になると、曲げ破壊型の傾向と比較すると明らかに鉛直変位が低くなっており、せん断破壊に伴う沈下が生じたことを示している。除荷時における振動特性と経験変形角の関係を示した前出の図-4 によると、固有振動数と減衰定数ともに変化し始める変形角は 0.4%付近であったのに対して、図-5 をよると、除荷時に鉛直変位が残留し始める変形角と概ね対応している。

図-6 と図-7 は、載荷時と除荷時における両試験体の RC 部材の上下端における軸鉄筋のひずみ (計測点については図-1(a)参照) を示している。ここでは、降伏ひずみが約 0.2%であることに留意して進展状況を述べる。曲げ破壊型の試験体では、変形角 0.6%の載荷時に計測点 G1 にて 0.4%弱の塑性ひずみが生じ、除荷時には 0.2%以上のひずみが残留した。また、変形角 0.9%の載荷時には計測点 G2 と G3 においても 1%前後のひずみが生じ、除荷時には 0.4%以上のひずみが残留した。せん断破壊型の場合でも、変形角 0.6%の時点では曲げ破壊型の場合と同

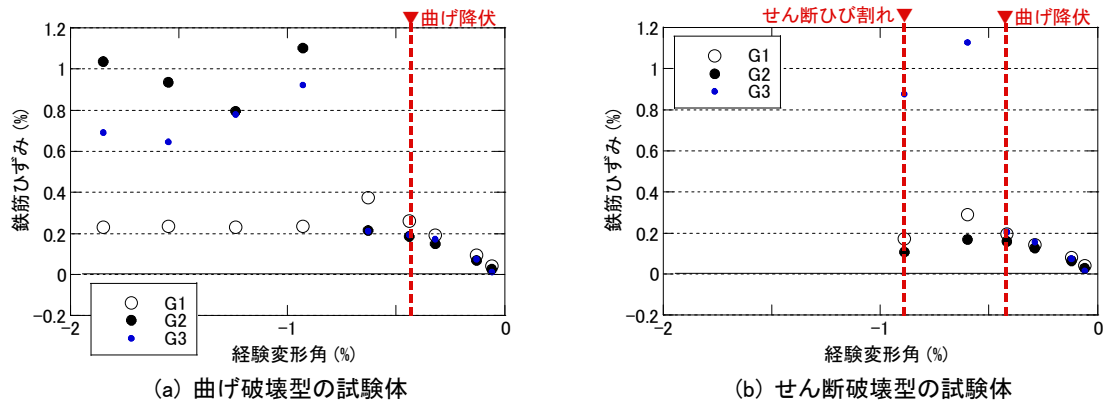


図-6 繰返し載荷実験における載荷時の軸鉄筋のひずみ

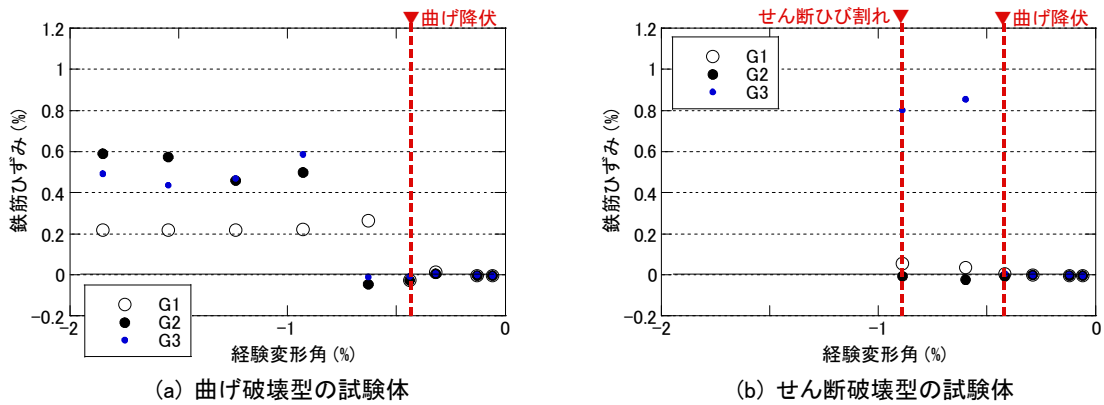
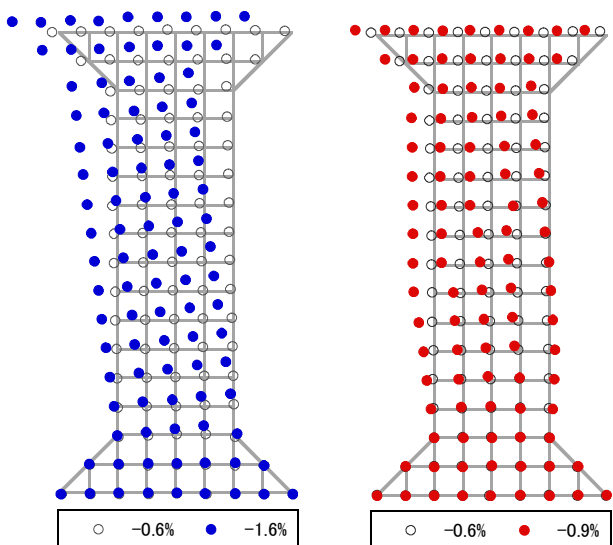
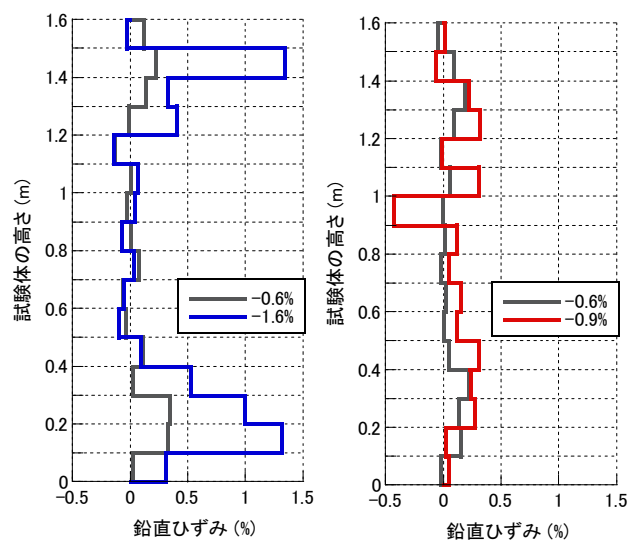


図-7 繰返し載荷実験における除荷時の軸鉄筋のひずみ



(a) 曲げ破壊型の試験体 (b) せん断破壊型の試験体

図-8 画像計測に基づく試験体の変形状況



(a) 曲げ破壊型の試験体 (b) せん断破壊型の試験体

図-9 画像計測に基づく鉛直ひずみの高さ方向分布

様に載荷時に計測点 G3 にて 1%以上のひずみが生じ、除荷時には 0.8%以上のひずみが残留した。ただし、せん断破壊を呈した 0.9%では、前サイクルと比較してひずみは上昇せずむしろ低下している。両試験体ともに、変形角 0.6%以降になると除荷時でもひずみが 0.2%以上となっていることから、前出の図-4 で振動特性の変化が顕著になった時には、RC 部材の上下端付近において軸鉄筋に塑性ひずみが残留していたと判断できる。

画像計測に基づく試験体の変形状況を図-8 に示す。曲げ破壊型の試験体では、変形角の漸増に伴って水平方向だけでなく鉛直方向にも残留変位が生じている。一方、せん断破壊型の試験体では、斜め方向のせん断ひび割れによって RC 部材の側面にはらみ出しが生じ、複雑な残留変形状態となったことが、本画像計測からも確認できる。図-9 は、図-8 の変形状態に基づいて RC 部材の鉛直ひずみの高さ方向分布を求めた結果である。曲げ破壊型

の試験体では、変形角 0.6%の時には、RC 部材の上下端周辺において残留ひずみがやや卓越し、変形角 1.6%の時にはそれらのひずみが急激に上昇している。せん断破壊型の試験体では、最終的には、せん断ひび割れによって中央付近に圧縮側の残留ひずみが卓越して複雑な分布を呈するものの、曲げひび割れのみが発生していた変形角 0.6%の時点では、曲げ破壊型の場合と同様に RC 部材の上下端周辺の残留ひずみがやや卓越した。これらの結果は、軸鉄筋の残留ひずみ(図-7 参照)が変形角 0.6%以降に顕著になったことと概ね対応している。

以上の結果から、図-5 に示した鉛直変位が RC 部材に分布するひび割れ幅をマクロ的な指標に相当すると考えると、曲げひび割れが除荷時にも開いたまま残留し始めたことで、図-4 のように、固有振動数と減衰定数の変化が有意になったと考えられる。軸鉄筋のひずみ(図-7)と画像計測に基づく鉛直ひずみ(図-9)によると、鉛直変位の残留は RC 部材の上下端周辺における局所的な塑性変形の残留によって生じたと考えられる。すなわち、RC 部材の塑性ヒンジ区間において軸鉄筋が降伏し、残留曲げひび割れが顕著になると、振動特性の変化が有意になり始めることを示唆している。

5. まとめ

本研究では、損傷に伴う RC 部材の振動特性の変化を把握するために実施した既往の実験⁹⁾を対象として、減衰定数に関する分析を行うとともに、振動特性(固有振動数と減衰定数)と通常の変位計測や画像計測に基づく鉛直方向の変形状態との関係について分析した。得られた知見を整理すると以下ようになる。

(1) 繰返し載荷実験における変形角の漸増によって、RC 部材が曲げ降伏に至ると、減衰定数はやや上昇するという傾向が認められた。また、せん断ひび割れが発生し、著しく耐力低下した際には、減衰定数は更に上昇することを確認した。同じ損傷状態における減衰定数はややばらつき傾向があり、特にせん断ひび割れを呈した時にばらつきが著しくなることが示唆された。

(2) 通常の変位計測による試験体頂部の鉛直変位と振動特性の変化を照らし合わせて分析した結果、鉛直変位が引張側に残留し始めると、曲げひび割れに伴う固有振動数と減衰定数の変化が有意なることを確認した。また、画像計測に基づく鉛直ひずみの分布ならびに軸鉄筋のひずみの進展状況から、鉛直変位の残留は、塑性ヒンジに相当する RC 部材の上下端周辺の局所的な残留変形に起因することを確認した。

以上は、境界条件、規模およびケース数に制約がある部材実験に基づく知見であることに留意が必要である。特に、減衰定数の評価値は、構造形式、損傷状況、振動

試験の条件あるいは評価方法等によってばらつくと考えられる。今後は、本研究で得られた知見の再現性や一般性を確認するために、更なる実証データの蓄積と詳細なデータ分析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編：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
- 2) 土木学会原子力土木委員会編：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
- 3) 宮川義範 他：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留耐力の関係，土木学会論文集 E2, Vol. 70/No. 4, pp.402-416, 2014
- 4) Housner, G., et al.: Special Issue: Structural Control: Past, Present and Future, J. Eng. Mech., ASCE, Vol.123 (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) 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 3) 衝撃弾性波の損傷検知への適用性，電力中央研究所報告，N11010, 2012
- 7) 五十嵐亜季 他：強制加振試験によるコンクリート開水路の損傷評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.37, No.2, 2015
- 8) Neild, S., et al.: Nonlinear Vibration Characteristics of Damaged Concrete Beams, J. Struct. Eng., ASCE, Vo.129 (2), pp.260-268, 2003
- 9) 永田聖二 他：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
- 10) 永田聖二 他：繰返し載荷を受ける RC 部材の損傷時振動特性に関する再現解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.37, No.2, pp.799-804, 2015
- 11) 日本建築学会編：建築物の減衰，2000
- 12) 土木学会編：橋梁振動モニタリングのガイドライン，構造工学シリーズ 10, 2000
- 13) 菅野裕晃 他：振幅依存性を考慮した RC 造高層煙突の振動特性評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.22, No.3, pp.7-12, 2000
- 14) 竹嶋竜司 他：異なる振動レベルにおける RC 橋脚を有する橋梁の振動特性の変化に関する研究，土木学会論文集 A1, Vol.70, No.4, I-130-I_139, 2014
- 15) 酒井理哉 他：円筒型 RC 構造物の局所変形箇所における画像計測，コンクリート工学年次論文集，Vol.23, No.3, pp.1141-1146, 2001