

## 論文 鉄筋コンクリート梁の疲労特性評価に関する基礎的研究

豆田 憲章<sup>\*1</sup>・勝木 太<sup>\*2</sup>・矢島 哲司<sup>\*3</sup>・魚本 健人<sup>\*4</sup>

要旨：本研究は、実験により RC 梁の疲労挙動と非破壊特性との相関性を検討したものである。実験は一部の部材を補修した試験体を含め、荷重制御で最大 25kN、載荷速度は 1Hz の片振り載荷で 100 万回まで行った。実験の結果、常時微動計、加速度計を使った各種の非破壊特性は鉄筋コンクリート梁の疲労特性である変形性状とひび割れ性状などと相関性を示した。

キーワード：損傷度評価，変形性状，ひび割れ幅，非破壊試験，打撃法，固有振動数

### 1. はじめに

土木学会コンクリート標準示方書『維持管理編』<sup>1)</sup>において、床版の損傷度評価に関して定量化されていないもののひび割れ状態(ひび割れ密度・ひび割れ幅など)を進行度により目視で評価できると考えられている。しかしながら、梁部材損傷程度判定においては疲労過程と損傷進行予測が鉄筋の亀裂進行度およびマイナー則による方法で求めるように示されているが、鉄筋コンクリート(以下 RC とする)中の鉄筋亀裂のモニタリングは難しく、またマイナー則においてもそれらの破壊時の予測が難しいため、実際の部材の疲労損傷度の定量的な判定が十分確立されていないのが現状であろう。

RC 構造物の部材損傷度評価方法における既往の研究としては、塑性率、変形角および剛性低下率などによる評価が行われており、その研究の多くは耐震性能評価の場合である<sup>2)</sup>。また、著者らは、断面寸法、主鉄筋比およびスパンが同一で曲げ破壊する RC 単純梁の実験において、変位制御下での載荷変位および載荷履歴の相違にかかわらず破壊時までの累積消費エネルギー量はほぼ一定の値となることより RC 梁の累積された損傷程度は累積消費エネルギー量と密接

に関係していることなどを明らかにしている<sup>3)</sup>。また、振動特性に着目した研究として地震のような荷重履歴を受けた場合には振動特性が変化していくことに着目して常時微動観測を用いて橋梁の振動特性の研究も行われている<sup>4)</sup>。

しかしながら、疲労実験と非破壊試験を組み合わせた研究事例は少ない<sup>5)</sup>。今後、交通量の増大に伴い実構造物に適応させた疲労による損傷度評価の研究が必要であろう。

そこで本研究ではその基礎的研究として、梁の疲労実験を行い、疲労挙動と同時に測定した常時微動計および加速度計による非破壊特性とを比較検討し、RC 梁の疲労挙動と非破壊特性との関係を検討したものである。

### 2. 実験概要

#### 2.1 試験体断面諸元および補修材配合

試験体の断面諸元を図-1に示す。使用したコンクリートの目標強度を  $30\text{N/mm}^2$  とし、引張側鉄筋(SD295A)の降伏点、引張強度、弾性係数はそれぞれ  $378\text{N/mm}^2$ 、 $536\text{N/mm}^2$ 、 $182418\text{N/mm}^2$  である。また、引張鉄筋比( $\rho_b$ )は 1.74%、せん断スパン比( $a/d$ )は 4.27 である。補修した試験体の補修深さは鉄筋の付着性能を考慮し、引張側鉄

\*1 芝浦工業大学大学院 工学研究科 (正会員)

\*2 芝浦工業大学 工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

\*3 芝浦工業大学 工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

\*4 東京大学 生産技術研究所教授 工博 (正会員)

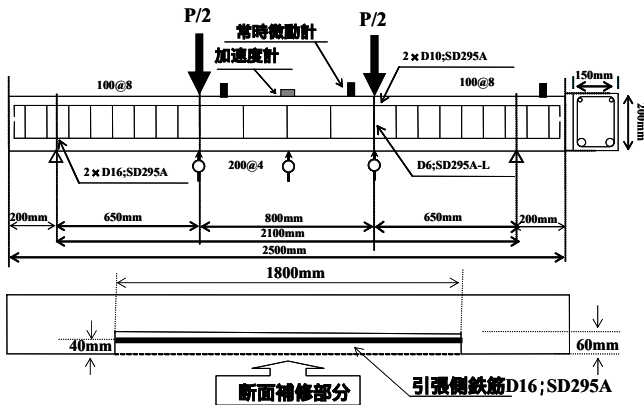


図 - 1 試験体諸元および補修箇所

表 - 1 補修材配合

略名	P/C (%)	水結合材比 W+P/B (%)	細骨材率 S/B (%)	単用量(kg/m <sup>3</sup> )					
				W	粉体: B=C+E	S	P	消泡剤	
補修(♯'リマ)	5	50	282	225	500	0	1409	25	C×0.25%
補修(ピ'ニロ纖維)			189	283	602	24.1	1183	30.1	0

表 - 2 試験体略名および補修材料

試験体No	略名	載荷方法	補修材料
No.1	補修なし	静的載荷	-
No.2	補修なし	動的載荷	-
No.3	補修(♯'リマ)	動的載荷	♯'リマ+膨張材(E)
No.4	補修(ピ'ニロ纖維)	動的載荷	♯'リマ+(P)+膨張材(E)+ピ'ニロ纖維(F)

筋の裏側までを補修材充填部として 60mm とし (図 - 1), 補修材の目標強度はコンクリートと同一とした(表 - 1)。試験体 No.4 に用いたピニロン纖維はポリマーセメントモルタルの体積(空気を除く)の 2%を混入した。なお, 試験体の略名および補修材料は表 - 2 に示す。

2.2 載荷方法および測定方法

載荷方法は図 - 1 に示すようにスパン 2100mm で載荷区間 800mm の 2 点載荷でおこなった。RC 構造物のひび割れ幅制限値は各機関により異なり, 本研究では橋梁の補修基準(案)<sup>6)</sup>を参考にし て 0.3mm とした。静的載荷においては補修して いない試験体を一方向載荷し, 試験体の終局耐力などを求めた(試験体 No.1)。動的載荷においては補修なしの試験体を基準として 1 回目の静的載荷で求められた試験体下縁における最大ひび割れ幅 0.3mm 発生荷重  $P_{0.3}$ (以下  $P_{0.3}$  とする)に達するまで漸増漸減で 3 サイクルまで静的に載荷を行った。その後, 動的載荷(ハーバーサイン波, 載荷速度; 1Hz)をサーボパルサーによる荷重制御  $P_{0.3}$  で片振りにより 100 万回繰り返し載荷を

行い, 荷重の急激な低下もしくは鉄筋破断で載荷を中止するものとした。なお, 補修を行った試験体については, 補修をしていない試験体における最大ひび割れ幅発生荷重  $P_{0.3}$  と同一の荷重で載荷するものとした。

測定項目は, 荷重, 変位, ひび割れ幅(下縁・鉄筋位置), ひずみ(鉄筋・コンクリート)等であり, 非破壊検査は試験体中央部から 20cm の位置に鋼球(173.5g)を高さ 70cm から落下させる打撃法により常時微動計(等モーメント区間 2 箇所(1ch, 2ch)・スパン外 1 箇所; 計 3 箇所)および加速度計(中央部)により計測を行った。また同様に, 動的載荷時による微動・加速度波形を常時測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 試験体(補修なし)による静的載荷

図 - 2 は試験体 No.1(補修なし)による静的載荷荷重-変位の関係である。初期ひび割れ発生荷重( $P_{cr}$ )は 9kN ( $P_{cr}/P_{ut}=0.12$ )で発生し, 最大ひび割れ幅 0.3mm 発生荷重( $P_{0.3}$ )は 25kN, 降伏荷重( $P_y$ )および変位( $\delta_y$ )は 57.91kN( $P_y/P_{ut}=0.90$ ), 13.79mm, 終局耐力( $P_u$ )は 63.21kN ( $P_u/P_{ut}=0.98$ )であった。また, 土木学会コンクリート標準示方書『構造的な性能照査編』より求めた終局耐力( $P_{ut}$ )は 64.21kN である。なお, 今回の載荷では載荷装置のストロークの限界である最大変位 47mm で載荷を中止している。

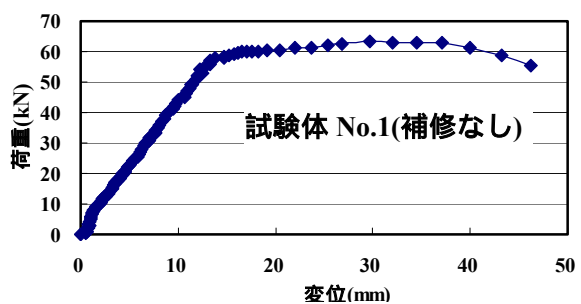


図 - 2 荷重-変位曲線(静的載荷)

3.2 繰り返し載荷における荷重-変位履歴曲線

図 - 3 は試験体 No.2(補修なし)の 100 万回載荷までの荷重と変位の関係を示したものである。1

サイクル終了後において大きな残留変位を生じ、その後、荷重回数が増加するにつれ最大変位および残留変位が漸増する。しかしながら、1サイクル終了後の残留変位量は、各荷重回数を通じてもっとも大きな値を示した。100万回終了後の変位が1サイクル終了後の最大変位から2.04mm(約2.0倍)増加し、残留変位は1.33mm(約1.5倍)増加している。また、いずれの試験体も、100万回荷重終了時に鉄筋破断まで至っていない。

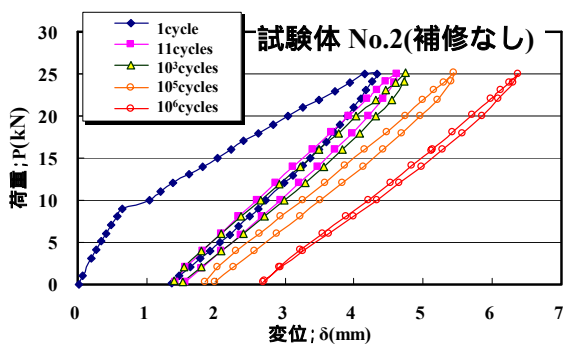


図 - 3 100万回までの荷重-変位履歴曲線

### 3.3 繰り返し回数におけるひび割れ幅-変位の変化

図 - 4 は試験体 No.2(補修なし)における100万回荷重迄のひび割れ幅(最大・残留)と変位(最大・残留)の変化を示したものである。1サイクル終了後に残留ひび割れ幅、残留変位いずれも大きな値を示しており、その後荷重回数の増加に伴い最大ひび割れ幅、最大変位は漸増する。特に最大ひび割れ幅は30万回以降急激な増加がみられた。

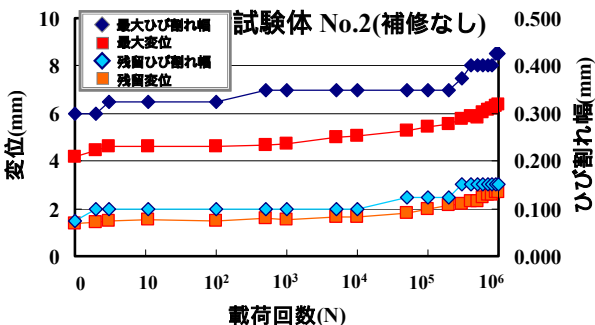


図 - 4 繰り返し回数におけるひび割れ幅-変位の変化

### 3.4 荷重回数と累積消費エネルギー量との関係

各試験体100万回までの荷重と累積消費エネルギー量との関係を示したのが図 - 5 である。繰り返し荷重回数が増加するにつれていずれの試験体も累積消費エネルギー量の増加が見られる。10回以降は、補修を行ったいずれの試験体も補修していない試験体より累積消費エネルギー量が少ない値を示しているが、その後荷重回数の増加に伴い30万回以降はほぼ同一な値を示した。

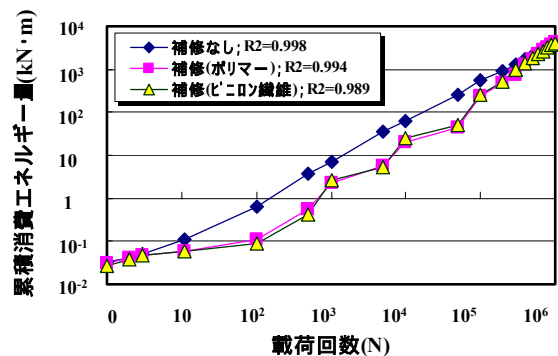


図 - 5 荷重回数と累積消費エネルギー量との関係

### 3.5 試験体の固有振動数の算出

荷重前における試験体 No.2(補修なし)の固有振動数は以下の式で求められる。

$$f = \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \times \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \dots \dots \dots (1)$$

但し、 $L = 2.1(\text{m})$ ；支点間長、 $E = 26188(\text{N}/\text{mm}^2)$ ；コンクリートの弾性係数、 $I = 1.093 \times 10^{-4}(\text{m}^4)$ ；換算断面二次モーメント、 $\rho = 2450(\text{kg}/\text{m}^3)$ ；試験体密度、 $A = 0.03(\text{m}^2)$ ；換算断面積である。本実験で使用した試験体から計算により求めた固有振動数は  $f_0 = 74.1\text{Hz}$  である。なお、打撃法により求めた固有振動数は  $73.5\text{Hz}$  であり、計算で求めた値の99.2%の値を示した。

今回は補修した試験体については不明な点が多いため、荷重前の固有振動数の算出をおこなっておらず、今後の課題とした。参考までに表 - 3 に各材料の圧縮強度および弾性係数を示す。

表 - 3 各材料における圧縮強度および弾性係数

	コンクリート	補修材	
		ポリマー	ビニロン繊維
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	31.7	33.2	32.8
弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	26188	19935	23924

### 3.6 非破壊検査による固有振動数の算出

動的載荷中に試験体 No.2(補修なし)から常時微動計・加速度計から得られた波形(図-6)を高速フーリエ変換(FFT)したものが図-7である。図-7からも明らかなように動的載荷中に求めた常時微動計・加速度計ともに同一な固有振動数を示していることがわかる。なお、打撃法にて求めた固有振動数は動的載荷中に求めた値とほぼ同じである。また、図-8は測定位置が異なった場合の固有振動数を比較検討した結果である。等モーメント区間の1ch, 2chのいずれの固有振動数は同一な値を示し、スパン外でもほぼ同一な値を示したことから、計測箇所での固有振動数ではなく部材全体の固有振動数を示していると考えられる。

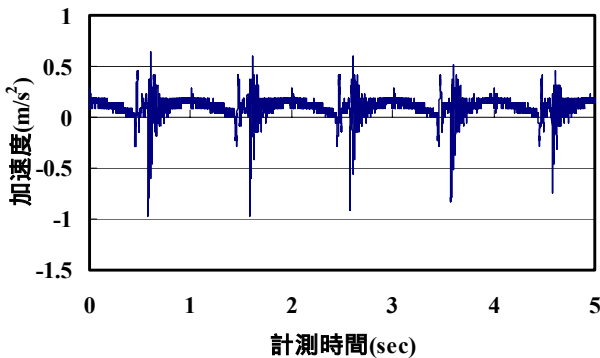


図-6 加速度計による動的載荷中計測波形

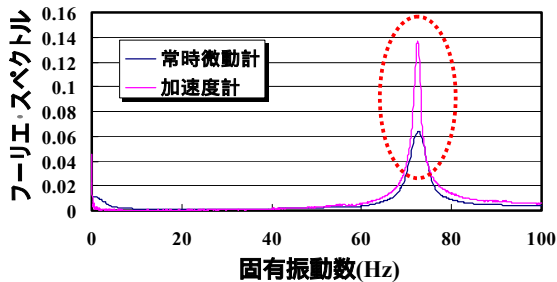


図-7 FFT 変換後の波形

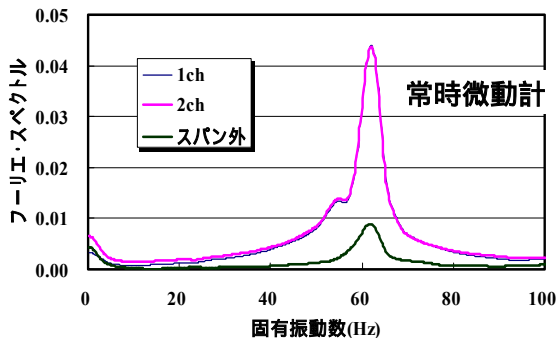


図-8 測定位置の違いによる固有振動数の算出

### 3.7 載荷回数による固有振動数の変化

各試験体における載荷回数と打撃法によって得られた固有振動数との関係を示したのが図-9である。載荷回数の増加に伴い固有振動数は低下の傾向を示しており、いずれの試験体も1サイクル終了後の固有振動数は載荷前に比べ大きな低下を示している。補修なしにおいて1サイクル終了後に65.7Hz, 約9%, 100万回載荷終了時には56.9Hz, 約24%程度の低下が見られた。これは梁部材にひび割れが入ることにより剛性低下を生じたため(ひび割れ本数; 14本, 最大ひび割れ幅; 0.45mm)と考えられ、梁部材などのRC構造物はひび割れ発生による影響が大きいことが分かる。また、ポリマーによって補修した試験体は30万回以降急激な固有振動数の低下を示している。これは、補修材と母材のコンクリートもしくは鉄筋と補修材との付着切れが生じ、ひび割れ幅が増加したためと考えられる。

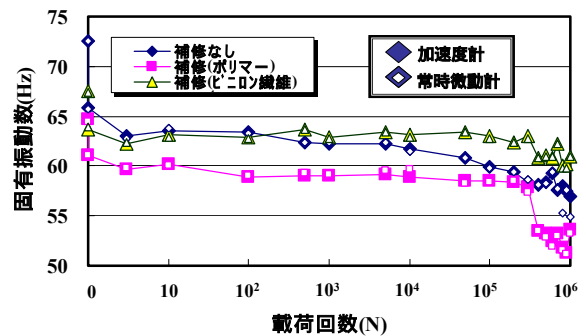


図-9 載荷回数と固有振動数との関係

健全な試験体である補修なしの載荷前の固有振動数を基準として固有振動数の低下率をまとめたものが表-4である。補修を行った試験体は補修なしと比較して載荷前において約10%, 1サイクル終了後は約15%の低下を示した。これは、補修を行ったいずれの試験体も補修材の弾性係数などが母材のコンクリートとは異なること、補修した箇所のコンクリートとの付着力の低下などが原因として考えられる。また、式(1)における固有振動数と剛性との関係から固有振動数の低下率と剛性(EI)の低下率の関係を示したのが図-10である。図から明らかなように、

両者の関係は実験の範囲内においてほぼ線形を示していることから、以後の評価においては部材の損傷度と密接な関係にある剛性へ変換して評価をおこなった。なお、図中の曲げ圧縮破壊および鉄筋切断に関しては4章にて後述する。

表-4 荷重前における補修なしの固有振動数を1とした場合の変化

略名	補修なし	補修(ポリマー)	補修(ビニロン繊維)
荷重前	1.00	0.89	0.93
1947回終了後	0.91	0.84	0.88
100万回終了後	0.76	0.74	0.84
圧縮破壊	0.58	-	-

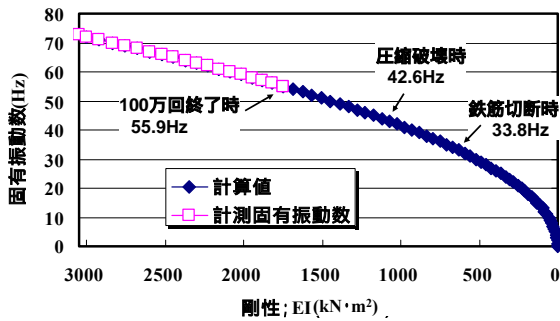


図 - 10 剛性と固有振動数との関係

### 3.8 最大ひび割れ幅と剛性低下率との関係

部材の疲労挙動と非破壊特性との相関性を検討したのが図 - 11 の最大ひび割れ幅と打撃法で得られた波形を基に求めた剛性との関係である。但し、式(1)を変形し求めた  $EI_i$  および  $EI_0$  は各荷重における剛性および試験体 No.2(補修なし)の荷重前における剛性である。いずれの試験体もひび割れ幅の増大に伴い、剛性が低下していることが分かる。図には示していないが、いずれの試験体も平均ひび割れ幅と比べて最大ひび割

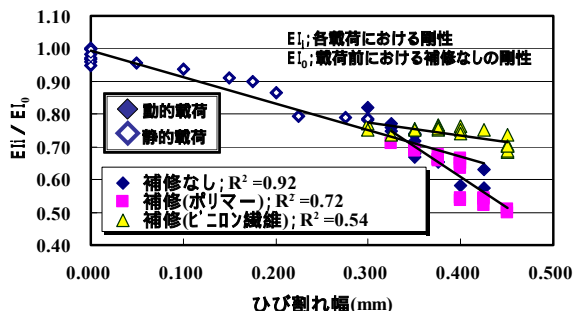


図 - 11 最大ひび割れ幅と剛性低下率との関係

れ幅のほうが高い相関性が見られ、特に補修なしにおいて 0.92 と高い相関性を示していることから、補修なしの健全時を基準とした最大ひび割れ幅に着目することにより梁部材の損傷度評価の可能性が示された。

### 3.9 部材角の変化と剛性低下率との関係

3.8 と同様部材の疲労挙動で求められた部材角の変化と非破壊特性で求めた剛性低下率との関係を示したのが図 - 12 である。各試験体荷重回数の増加に伴い部材角は増加し剛性は低下を示した。ビニロン繊維で補修した試験体を除いた試験体は剛性との相関性が見られ、特に補修なしにおいては部材角と剛性低下率との相関係数 0.94 と高い相関性があることが分かった。このことから、補修をおこなっていない試験体の健全時を基準として部材角に着目することにより梁部材の損傷度評価の可能性が示された。

ビニロン繊維で補修した試験体は部材角の増大にもかかわらず、他の試験体より剛性低下を示していないことから、ビニロン繊維を混入することが補修に有効的であると考えられる。

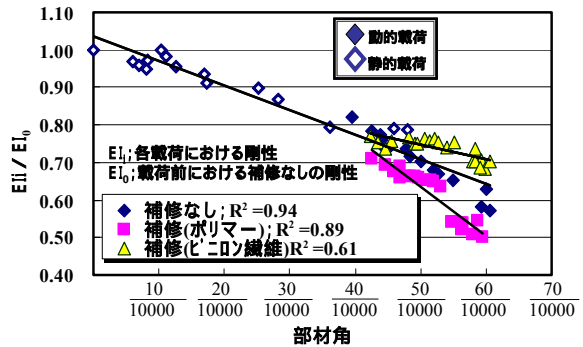


図 - 12 部材角の変化と剛性低下率との関係

### 4. 固有振動数による評価

以上の結果より、非破壊試験による固有振動数の低下率から算定した剛性の低下率と梁のひび割れ幅および変形量(部材角)等の疲労挙動とが比較的高い相関性を示したことから、実構造物の健全な梁の固有振動数を断面諸元から求め、それを基準とした実構造物への適用の可能性が示されたと考えられる。しかし、土木学会コンクリート標準示方書『維持管理編』<sup>1)</sup>における各

劣化期および破壊時期等の詳細な定義との関係は明確化されなかった。なお、本研究においては、いずれの試験体も鉄筋破断まで至っていない。そこで、破壊時の推定のために試験体 No.2(補修なし)をカッターにより鉄筋を切断し、試験体 No.1(補修なし)を曲げ圧縮破壊させたときのそれぞれの固有振動数の計測を行った。本実験で使用した試験体の主鉄筋は2本であり、2本切断した場合の固有振動数低下率および剛性低下率は載荷前の値の0.46, 0.21になった。また、曲げ圧縮破壊した試験体の固有振動数低下率および剛性低下率は0.58, 0.34である。数少ない実験例ではあるが、疲労損傷度評価においてはこれらの値が今後の評価の指標の一例となると考える。

## 5. まとめ

- 本研究範囲内で以下のことが明らかになった。
- ・繰り返し載荷回数の増加に伴い、変位、ひび割れ幅、累積消費エネルギー量は補修の有無にかかわらず漸増する。
  - ・常時微動計・加速度計で計測された固有振動数は載荷回数の増加に伴い徐々に低下し、ほぼ同一な固有振動数を示した。また、その値は計測箇所での値ではなく、部材全体の固有振動数と考えられる。
  - ・1サイクル終了後での固有振動数は載荷前と比べ大きく低下し、ひび割れの発生が剛性低下と密接に関係していることがわかる。
  - ・補修を行っていない試験体は固有振動数と変位・ひび割れ幅との関係において比較的高い相関性を示した。
  - ・ビニロン繊維を混入して補修した試験体は、他の試験体と比較してひび割れ幅および部材角がほぼ同一にもかかわらず、他の試験体に比べ剛性の低下率小さいことから、疲労に対する有効性が示された。
  - ・健全な部材を基準とした固有振動数の低下率と変位やひび割れ幅などの疲労挙動との関係が比較的高い相関性を示すことから RC 部材

の損傷度評価の可能性が示された。

## 今後の課題

実構造物では部材横締めの影響や断面諸元、コンクリートの強度など不明な要因が数多くあるため、数多くの実構造物の計測をおこなって部材の挙動と非破壊特性とを比較検討し、他の非破壊検査をも含めた総合的な部材の損傷度評価が必要であろう。

謝辞：本研究を遂行するにあたり一部の実験は東京大学生産技術研究所 魚本研究室でおこなったものであり、本実験を遂行するにあたり東京大学 生産技術研究所 魚本研究室 西村次男氏に終始有益なご助言を頂きました。ここに、深甚なる感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) コンクリート標準示方書『維持管理編』(2001年制定版), pp114-118, 2001
- 2) 鈴木基行, 赤倉康寛, 足立英明, 尾坂芳夫: RC 構造物の損傷度評価に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.490(V-23), pp121-129, 1994.5
- 3) 矢島哲司, 本郷和徳, 魚本健人: 繰り返し載荷された RC 梁の累積損傷および破壊特性評価, 土木学会論文集, No.490(V-23), pp31-39, 1994.5
- 4) 中村 豊, 富田健司, 西永雅行: 常時微動による橋梁振動特性の推定, 鉄道総合技術論文誌, Vol.7, No.12, pp57-64, 1993.12
- 5) 増田克洋, 矢島哲司, 魚本健人: 各種非破壊検査を利用した鉄筋コンクリート梁の損傷測定に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告書, Vol.18, No.1, pp1245-1250, 1996.6
- 6) 堤知明, 中川貴之, 松島学, 大賀宏行: 鉄筋コンクリート構造物の補修実施の判定基準に関する研究, 土木学会論文集, No.599(V-40), pp41-48, 1998.8