論文 固有振動数の低下に着目した RC 部材の地震時損傷評価に関する 基礎的研究

渡辺 孝和^{*1}·長谷川 俊^{*2}·内藤 英樹^{*3}·鈴木 基行^{*4}

要旨: せん断スパン比 1.6~3.5 を変化させた RC はり供試体の静的曲げ載荷試験を行い, 塑性率 (変位/降伏 変位) と固有振動数との関係を整理した。その結果,本実験の範囲では,せん断スパン比が小さいほど載荷に 伴う固有振動数の低下が大きくなる傾向が示された。その低下傾向は,縦振動と比較してたわみ振動におい て顕著に表れた。振動試験の結果より,部材長さ方向の縦振動計測は健全時から塑性率 2 程度までに固有振 動数が大きく低下することが示された。また,2次モードに着目したたわみ振動計測では塑性率2以上におい て,固有振動数が低下することが示された。

キーワード: RC 部材,振動試験,損傷,固有振動数,縦振動,たわみ振動

1. はじめに

地震後の救命,救助,復旧活動などにおいて,道路や 鉄道などは重要な役割を担う。このため、地震発生直後 から管理技術者が外観目視によって構造物の倒壊、部材 の破断、せん断破壊、かぶりコンクリートの剥落や軸方 向鉄筋の座屈などの重大な損傷がないことを確認し、早 期の供用再開に努めている。一方,2011年の東北地方太 平洋沖地震では、東北地方から関東地方にかけて非常に 強い揺れが広域で観測されており、上記のような構造物 の安全性を即時に損う甚大な損傷ではなくても、膨大な 数のコンクリート構造物にひび割れなどの損傷が散見さ れた。地震によってひび割れが生じたコンクリート構造 物は、耐久性確保の観点から、部材の損傷レベルに応じ て適切な補修・補強を迅速に行うことが望ましく、この ためには地震時最大応答の推定が課題となる。しかし、 部材の復元力特性や最大応答後の挙動によって RC 部材 のひび割れが閉じるため,外観目視によるひび割れ調査 のみでは部材の地震時最大応答を推定することは難しい。 また, 壁式橋脚の側面や, 橋台および擁壁などの背面土 がある場合、あるいは地中構造物など、目視では部材の ひび割れ性状を容易に観察できない場合もある。

振動試験は実施が容易であるため、従来より RC 柱や 杭などの地震時損傷評価が検討されており¹⁾,鉄道構造 物の点検では衝撃振動試験が用いられている²⁾。これら はひび割れによる RC 部材の固有振動数の低下に着目し たものが多い。しかし、既往の研究では、軸力やせん断 スパン、載荷履歴および残留変形と、RC 部材の固有振 動数の低下との関係を整理するまでには至っておらず、 地震時損傷評価手法を高度化するためには、これらのパ ラメータに着目した実験データの整理が必要である。

本研究はその基礎的検討として位置づけており,せん 断スパン比をパラメータとした RC はり供試体の静的曲 げ載荷試験を行い,塑性率(変位/降伏変位)と固有振動 数との関係を整理した。前記のように地震時の損傷状況 は載荷履歴に大きく影響するが,本実験では,背面土の ある擁壁や橋台,あるいは偏心軸力を受ける逆L字形橋 脚³⁾など,地震時応答が非対称に卓越する場合を考えて, 1 方向曲げ載荷によって損傷を与えた。また,既往の研 究では,はりや柱部材のたわみ振動に着目する実験が多 いが,本研究では,たわみ振動と併せて部材長さ方向の 縦振動も検討し,地震時損傷評価における有用性につい て考察した。

2. 実験概要

2.1 供試体諸元

供試体諸元を表-1 に示す。これらの供試体はせん断 スパン比をパラメータとした。供試体寸法は、部材長さ 1800 mm、断面幅 200 mm を共通とし、断面高さを 250 ~400 mm まで変化させた。静的曲げ載荷試験では 3 点 載荷および4 点載荷とするため、供試体をそれぞれ 2 体 ずつ作製した。供試体の概略図を図-1 に示す。引張鉄 筋比は 0.54~0.95 % であり、せん断破壊が先行しないよ うにスターラップを配筋した。鉄筋およびコンクリート の材料試験の結果を表-2 に示す。

2.2 曲げ載荷試験

載荷条件を図-1に示す。はりのスパンは1400 mm と した。3 点載荷では、スパン中央に鋼製ピンを介して鉛 直荷重を加え、4 点載荷では、載荷冶具を介して図-1

*1 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻 (学生会員)
*2 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻 (学生会員)
*3 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻准教授 博(工) (正会員)
*4 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

供試体名	部材長さ (mm)	断面幅 (mm)	断面高さ (mm)	せん断スパン比	載荷形式
S250	1800	200	250	3.5	3 点曲げ
D250			230	2.8	4 点曲げ
S300			300	2.8	3 点曲げ
D300				2.2	4 点曲げ
S350			350	2.3	3 点曲げ
D350				1.9	4 点曲げ
S400			400	2.0	3 点曲げ
D400				1.6	4 点曲げ

表-1 供試体諸元



図-1 供試体の概略図

に示すようにモーメント一定区間を280mmとした。

変位計はスパン中央に2箇所,両側の支点上にそれぞ れ1箇所の計4箇所に設置して,鉛直変位を測定した。 これらの供試体では,引張および圧縮主鉄筋のスパン中 央位置にそれぞれ2枚ずつひずみゲージを貼付している。 載荷実験では,引張主鉄筋のひずみ値と表-2の材料特 性との対応から,実験時の降伏変位δ,を定めた。

載荷パターンは、降伏荷重の半分 ($0.5 P_y$) まで載荷し た後に徐荷して、荷重がゼロとなったときに振動試験を 行った。その後は、降伏変位 δ_y を基準として、 δ_y の整数 倍の変位まで載荷し、除荷後に荷重がゼロとなったとき に振動試験を行った。ただし、 $0.5P_y$ の載荷では、予め求 めた降伏荷重の計算値の半分程度となるように鉛直荷重 を加えた。各載荷ステップの除荷後には、振動試験と併 せて目視によるひび割れ状況を観察した。

2.3 振動試験

実構造物においては,諸元や目的などに応じて振動試験方法が選択される。ここでは,はり供試体の固有振動数を測定する方法として,最大加振力49Nの加振器を用いた強制加振試験^{4),5)}を行った。

振動試験は、 $0.5P_y, 1\delta_y, 2\delta_y, \cdot \cdot \cdot, 6\delta_y$ の各載荷ステップの除荷後に行った。著者ら⁴⁾が実施した道路橋の強制

表-2 鉄筋およびコンクリートの材料特性

		降伏 強度 (N/mm ²)	静弾性 係数 (N/mm ²)	引張 強さ (N/mm ²)	伸び (%)
鉄筋	D6	289	141000	521	7.8
	D13	326	163000	516	16.3
		圧縮 強度 (N/mm ²)	静弾性 係数 (N/mm ²)	動弾性 係数 (N/mm ²)	密度 (kg/m ³)
コンクリート		31.8	27800	31800	2300



写真-1 たわみ振動の測定



写真-2 縦振動の測定

加振試験では、スパンの1/4点付近の加振と応答加速度 の測定によって、1次と2次のたわみ振動の固有振動数 が良好に得られた。本実験では、写真-1に示すように スパンの1/4点付近を鉛直加振するたわみ振動⁴⁾と、写 真-2に示すように部材端部から長さ方向に水平加振す る縦振動⁵⁾を測定した。これらの振動試験では、加振器 の振動テーブルを両面テープを介して供試体表面に接地 し、加速度振幅5m/s²を一定として調和振動を与えた。 加振器の稼動部の錘は0.13kgである。たわみ振動では周 波数30~1200Hz,縦振動では周波数500~2500Hzを基 本として、加振器の周波数を3分間で変化させた。この とき、加振点付近には両面テープによって計測加速度ピ ックアップを貼付け、供試体の応答加速度から共振曲線 (周波数-加速度関係と位相特性)を得た。使用機材の仕 様や実験方法の詳細などは、参考文献4),5)と同様とした。





	$0.5P_y$	$1\delta_y$	$2\delta_y$	$3\delta_y$	$4\delta_y$	$5\delta_y$	$6\delta_y$
S250			1.5	3.0	3.0	3.0	3.0
D250	0.03	0.05	1.4	1.4	2.1	2.5	4.0
S300	0.03	0.08	1.3	3.3	5.0	5.0	5.0
D300	0.03	0.05	0.3	3.5	4.1	4.5	5.3
S350		0.10	2.0	3.0	3.5	4.0	4.0
D350	0.03	0.05	1.2	2.7	4.0	4.0	5.0
S400	0.03	0.08	2.0	4.0	4.0	5.0	5.0
D400		0.08	1.2	1.5	2.5	3.5	5.2

表-3 最大ひび割れ幅



図-5 たわみ振動による共振曲線 (S250)

3. 曲げ載荷試験の結果

実験結果の一例として, S250 および D400 供試体の荷 重-変位関係を図-2 に示す。2 つの供試体のひび割れ 状況を図-3 と図-4 に示す。これらのひび割れ図は, 各載荷ステップの除荷後における目視調査に基づいて作 成した。いずれの供試体でも,載荷ステップの増加に伴 ってスパン中央のひび割れが大きく開口した。スパン中 央に生じた最大ひび割れ幅を表-3 に示す。ひび割れ幅 はクラックスケールを用いて計測した。ただし,S250 と S350 および D400 供試体では,0.5P_yの除荷後にひび割れ を確認することができなかった。また,S250 供試体では 1δ_yの載荷後でも 0.03 mm 以上のひび割れを確認するこ とができなかった。

各供試体の $1\delta_y$ の載荷では,除荷後の目視調査においてスパン中央の引張下縁のひび割れを確認することができたが,このときのひび割れ幅は 0.1 mm以下であり,目視での発見は容易ではなかった。 $2\delta_y$ 以降はスパン中

(単位:mm)



図-6 縦振動による共振曲線 (S250)

表-4 健全時の固有振動数

	たわみ振動 (2 次)		縦振動 (1 次)		
	実験	解析	実験	解析	
S250	698	602	1040		
D250	774	093	1064		
S300	782	700	1044		
D300	778	790	1050	1040	
S350	851	972	1051	1040	
D350	862	075	1046		
S400	961	042	1057		
D400	944	942	1074		

(単位:Hz)

央のひび割れが上縁付近まで達している。表-3 より, いずれの供試体でもスパン中央のひび割れは $1\delta_y \sim 3\delta_y$ にかけて大きく開口する傾向が示された。せん断スパン 比が大きく異なる S250 と D400 供試体のひび割れ図を図



図-7 塑性率と固有振動数の関係 (たわみ振動)



図-8 塑性率と固有振動数の関係(縦振動)

-3 と図-4 に示す。3 点載荷の S250 供試体では斜め方 向のひび割れの割合が多いが、4 点載荷の D400 供試体で はモーメントー定区間において鉛直方向のひび割れが生 じた。これらのひび割れが発生する区間は 800~1000 mm 程度であり、大きな差異はなかった。

4. 振動試験の結果

4.1 健全時の固有振動数

(1) たわみ振動

写真-1 のたわみ振動によって得られた共振曲線の一 例として, S250 供試体の載荷前(健全時)の実験結果を図 -5 に示す。図-5 の掃引周波数の範囲において, 101 Hz と 698 Hz に明確な応答加速度のピークが表れており,こ れらの位相が-90°と概ね対応した。

実験結果の妥当性を検討するため,FEM (モード解析) によって固有振動数を求めた。汎用有限要素解析プログ ラム MARC を使用し,4節点2次元平面応力要素によっ て断面高さ250,300,350,400 mm の供試体を900,1260, 1620,1800 要素でモデル化した。はり長さ方向の分割数 は全て 90 である。境界条件は、両側支点において中立軸 位置 (図心軸位置)の節点を単純支持とした。コンクリー トの特性は**表-2**の材料特性を与え、鉄筋は無視した。

S250供試体のモード解析では、1次の固有振動数が203 Hz, 2次の固有振動数が693 Hz として得られており、図 -5 に示される 1 次の固有振動数が実験結果と解析結果 では大きく異なった。断面高さが異なる他の供試体の振 動試験でも、図-5 と同様に100 Hz 付近に応答加速度の ピークが表れており、さらに全ての供試体において、載 荷に伴ってこの振動数は変化することがなかった。この ことから、図-5 に示される100 Hz 付近の応答加速度の ピークは、載荷試験装置のフレームの剛性を評価したも のと推察される[®]。一方、表-4 に示すように、2 次の固 有振動数については、実験結果と解析結果が概ね対応し た。この振動数を与えた健全時の強制加振試験では、加 振に対する各点の応答の位相からモードを確認した。

上記のように、図-5の共振曲線では妥当な1次の固 有振動数が得られないため、以降のたわみ振動の検討で は、2次の固有振動数に着目して実験データを整理した。

(2) 縦振動

写真-2の縦振動計測によって得られた共振曲線の一 例として,S250供試体の載荷前(健全時)の実験結果を図 -6に示す。図-6の掃引周波数の範囲では,1040 Hz と 2075 Hz に明確な応答加速度のピークが表れており,こ れらの位相が-90°と概ね対応した。両端自由の棒部材 の縦振動による固有振動数は次式で与えられる。

$$f = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \tag{1}$$

ここで,fは固有振動数,nはモード次数,Lは部材長さ, $E_d \ge \rho$ はそれぞれ動弾性係数と密度である。

鉄筋の影響を無視して式(1)に表-2 のコンクリート の物性を代入すると、1次と2次の固有振動数はそれぞ れ 1040 Hz と 2080 Hz となり、図-6の実験結果と良好 に対応した。この他の供試体について、1次の固有振動 数の実験結果と解析結果の比較を表-4 に示す。表-4 より、縦振動については1次の固有振動数が妥当に得ら れたことから、以降では1次の固有振動数に着目して実 験データを整理した。

4.2 載荷に伴う固有振動数の低下

横軸に各載荷ステップの変位を降伏変位 δ_y で除した塑 性率,縦軸に固有振動数を健全時の固有振動数 f_0 で除し た固有振動数の低下率を表し,載荷に伴う固有振動数の 変化を整理した。たわみ振動および縦振動の実験結果を それぞれ**図-7**と**図-8**に示す。これらの実験結果より, せん断スパン比が小さい(断面高さが大きい)供試体で あるほど,固有振動数の低下が大きく,たわみ振動では その低下傾向が顕著であることが示された。また,ひび 割れの方向が異なる3点載荷と4点載荷については,固 有振動数の低下傾向に明確な差異は見られなかった。

図-7 (a).(b) より,2 次のたわみ振動に着目した検討で は、2 δ_y から 6 δ_y にかけて直線的に固有振動数が低下する 傾向が示された。2 次のたわみ振動では、振動モードの 節がスパン中央と一致するため、図-3 や図-4 に示す ような 1 δ_y の載荷によって生じたスパン中央の 1 本の曲 げひび割れが固有振動数に及ぼす影響は小さいと考えら れる。しかし、2 δ_y 以降では載荷に伴ってひび割れ本数 がスパン中央から両支点方向に増加するため、固有振動 数が段階的に低下したものと推察される。図-7 (a).(b) より、2 δ_y 以降の載荷では健全時の 90 % 以下にまで固有 振動数が低下することが示されており、部材塑性率や損 傷程度が推定可能になると考えられる。

これに対して、1次の縦振動に着目した図-8(a)、(b)の 検討では、健全時から $2\delta_y$ 程度までに固有振動数が健全 時の 60% 程度まで低下しており、その後の低下勾配は 緩やかになる傾向が示された。1次の縦振動では、スパ ン中央の断面剛性が固有振動数に大きく影響するため、 $2\delta_y$ 程度までに生じたスパン中央の曲げひび割れが固有 振動数を大きく低下させると考えられる。以上より、1 次の縦振動の固有振動数は、 $2\delta_y$ 程度までの損傷評価に 有用と考えられる。特に、目視による外観調査では確認 が困難な $0.5P_y$ や $1\delta_y$ のひび割れ性状に対しても、縦振動 計測によって損傷程度を評価できる可能性が示唆された。

5. まとめ

本研究では, RC 部材の地震時損傷評価を目的とした 基礎的検討として, せん断スパン比をパラメータとした RC はり供試体の曲げ載荷試験と振動試験を行った。せ ん断スパン比 1.6~3.5 の供試体諸元の範囲では, 部材塑 性率の増加に伴って固有振動数が低下した。せん断スパ ン比が小さい供試体であるほど固有振動数が大きく低下 しており,その傾向はたわみ振動において顕著であった。

特に,塑性率2程度までは部材長さ方向の縦振動計測 によって軽微なひび割れが検知できることや,たわみ振 動でも塑性率2以上の損傷に対して固有振動数に着目し た損傷評価の可能性を見出すことができた。

本検討は1方向の静的曲げ載荷試験によって得られた ものである。RC 部材のひび割れ性状は載荷履歴に大き く影響するため、今後、地震波を入力した振動台実験を 予定している。また、載荷履歴の検討においては、1 方 向載荷に加えて正負交番載荷の実験データも必要となる。

参考文献:

- 平澤征夫,古澤誠司,伊藤和幸: RC 高橋脚モデル の損傷過程と振動特性に関する実験的研究,土木学 会論文集, No. 372 / V-5, pp. 75-84, 1986.8
- 吉田幸司,関雅樹,曽布川竜,西山誠治,川谷充郎: 鉄道高架橋の部材剛性低下による振動特性への影響 評価,構造工学論文集, Vol. 51A, pp. 447-458, 2005.3
- 永田聖二,川島一彦,渡邊学歩:逆L字型RC橋脚の 地震応答特性に関する実験的検討,構造工学論文集, Vol. 52A, pp. 425-436, 2006.3
- Takakazu WATANABE et al.: A Method for Determining the Location of Cracks in Concrete Beam Using Anti-Resonance Frequency Change, Proceedings of ATEM'11, , OS11F024, CD-ROM, 2011.9
- 5) 渡辺孝和, 荒川岳, 長谷川俊, 内藤英樹, 秋山充良, 佐藤啓, 鈴木基行:地盤に埋め込んだ RC 杭の損傷 と固有振動数の関係, 土木学会第 66 回年次学術講 演会, V-090, pp. 179-180, 2011.9
- 宮村正樹,子田康弘,内藤英樹,岩城一郎,鈴木基 行:振動特性に着目した RC 床版の疲労損傷度評価 手法に関する研究,構造工学論文集, Vol. 57A, pp. 1251-1262, 2011.3