

[131] RC高橋脚モデルの損傷過程と振動特性

正会員 ○古沢 誠司 (中部大学大学院)
 正会員 平沢 征夫 (中部大学工学部)
 正会員 伊藤 和幸 (中部大学工学部)

1. まえがき

構造物の振動数を決定する要因としては、構造物の剛性および質量があげられる。一方、鉄筋コンクリート(以下RCと略記)の特徴として、荷重履歴を受けることによりコンクリートのひびわれや局所的な欠落によって剛性が低下していくことがあげられる。そのためRC構造物は、地震のような荷重履歴を受けた場合には、損傷によって振動特性が変化していく。このことは、RC構造物の耐震設計を行う際に損傷による振動特性の変化を考慮する必要があることを示している。また、損傷程度と振動特性の関係が定量化できたならば、逆に振動特性からRC構造物の損傷程度を推定できるものと考えられる。

本研究は、上記の2つの点についての基礎的研究として、曲げが卓越するRC高橋脚モデルを作製し、損傷を受けていく過程における振動数の変化を実験によって調べ、振動数による損傷度評価および、計算値との比較を試みたものである。

2. 実験概要

(1) 実験計画

実験は、次の要因を変化させた供試体について行った。

- a) 載荷方向・・・図1に示すI方向・V方向の2種類
- b) 使用コンクリート・・・普通コンクリート(RCシリーズ)・高強度コンクリート(HRCシリーズ)・鋼繊維補強高強度コンクリート(SFHRCシリーズ)の3種類
- c) 使用鉄筋・・・柱の主鉄筋にD10(SD35)とD13(SD35)を使用した2種類(軸方向鉄筋比1.9%と3.38%)

表1に供試体の種類を示す。

(2) 供試体形状・寸法

供試体の形状・寸法は、図2に示すように断面が10×15cm、高さが150cmである。また、帯鉄筋としてφ6(SR24)を10cm(横力載荷部は5cm)ピッチで配置した。なお、各供試体の柱部のコンクリートの強度および弾性係数を表2に、使

表2 コンクリート強度

供試体名	RCD10 I-1	RCD10 V-1	RCD13 I-1	RCD13 V-1
圧縮強度 (kgf/cm ²)	338	304	304	304
弾性係数 (kgf/cm ²)	2.59×10 ⁵	2.60×10 ⁵	3.31×10 ⁵	3.31×10 ⁵
供試体名	HRC I-1	HRC V-1	SFHRC I-1	SFHRC V-1
圧縮強度 (kgf/cm ²)	819	871	779	830
弾性係数 (kgf/cm ²)	5.13×10 ⁵	5.51×10 ⁵	3.88×10 ⁵	4.01×10 ⁵

表3 鉄筋強度

種類	呼び寸法	降伏点応力 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf)	弾性係数 (kgf/cm ²)
SD35	D10	3906	5648	2.10×10 ⁶
SD35	D13	3915	5288	1.95×10 ⁶

表1 供試体種類

供試体名	コンクリート種類	使用主鉄筋	載荷方向
RCD10 I-1	普通 コンクリート	D10	I
RCD10 V-1		D10	V
RCD13 I-1		D13	I
RCD13 V-1		D13	V
HRC I-1	高強度 コンクリート	D10	I
HRC V-1		D10	V
SFHRC I-1	鋼繊維補強高強度 コンクリート	D10	I
SFHRC V-1		D10	V

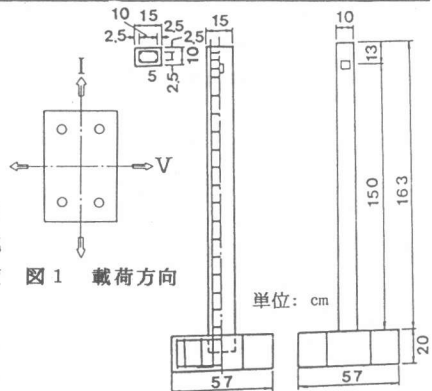


図2 供試体形状・寸法

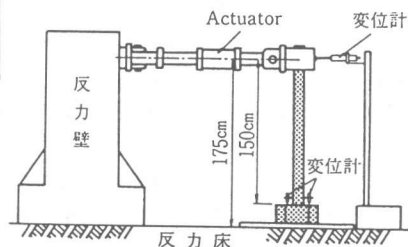


図3 載荷装置

用鉄筋の試験結果を表3に示す。

(3) 実験方法

載荷装置の概要を図3に示す。供試体は、反力床に固定し、底盤上面より150 cmの位置に取り付けた水平Actuatorにより変位制御で載荷を行った。変位は鉄筋降伏までは2.5mmきざみ、それ以降は、5.0 mmきざみ、最大荷重をこえたら10.0mmきざみにとり、各段階ごとに微振動を起し、自由振動数と減衰定数を求めた。実験において、鉄筋およびコンクリートにワイヤストレインゲージを貼付し、鉄筋の降伏およびコンクリートのひびわれの確認を行った。

3. 振動数の変化

供試体の損傷を受けていく過程における振動数の変化を、図4 (a), (b)に示す。図4 (a), (b)は、縦軸に振動数を取り、横軸には損傷変位をとって振動数の変化を表した図である。

4. 振動数による損傷度評価

(1) 相対低下振動数率

振動数の低下割合によって、RC構造物の損傷程度の定量化を試みる場合、図4 (a), (b)に示したように断面と材料の違いによって振動数が異なったのでは、一般的な損傷度を評価する上で不都合である。そこで、より合理的な評価方法を捜す目的で、以下のような振動数変化の無次元化を試みた。

振動数は、図4 (a), (b)で表されるように、断面・材料によってある一定の大きさの初期値と最終値が定まるものと考えられる。そこで、初期振動数と最終振動数の差を最終低下振動数幅と定義し、これに対する各損傷変位における低下振動数幅(初期振動数との差)の比を考え、100%から引いた値を相対低下振動数率と定義する。

図5は、相対低下振動数率を用いて、振動数の変化を示したものである。図より、材料および載荷方向の違いによらずほぼ同一の低下曲線で表すことができ、図5中の指数関数で近似できる。すなわち損傷変位と相対低下振動数の関係を表示する損傷関数は、基本的には $y = a e^{-bx}$ なる指数関数を仮定するのが適当であると考えられる。

(2) 損傷度関数の提案

しかしながら、一般的な形で損傷度を定量化するためには、振動数のみでなく、損傷変位についても無次元化する必要がある。この考えから、横軸に供試体基部の鉄筋が、降伏点に達した時の変位の計算値(柱断面を20要素、柱長さ方向に30分割して求めた値)を基準($\mu_0 = 1.0$)とした変位損傷度を取り、縦軸には $\mu_u = 4.0$ の時の変位を終局変位と仮定し、この終局変位までの低下振動数幅を100%として表した相対低下振動数率をとった。この方法を使ってI方向について、振動数の低下の様子を表した図を、図6に示す。

しかし、この方法では終局変位の仮定方法によって、評価に違いが現れる。この影響を除くために、縦軸(相対低下振動数率)についても横軸と同様に、初期振動数から柱基部の鉄筋の降伏変位時までの低下振動数を基準($\nu_0 = 1.0$)とし

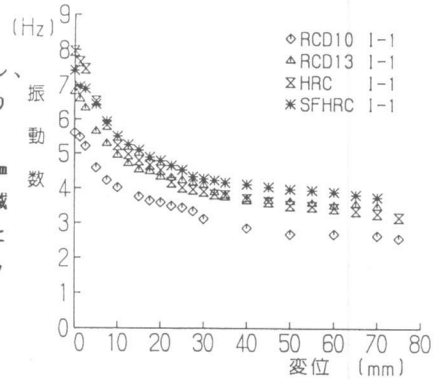


図4 (a) 振動数の変化 (I方向)

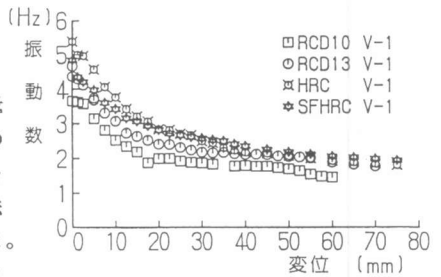


図4 (b) 振動数の変化 (V方向)

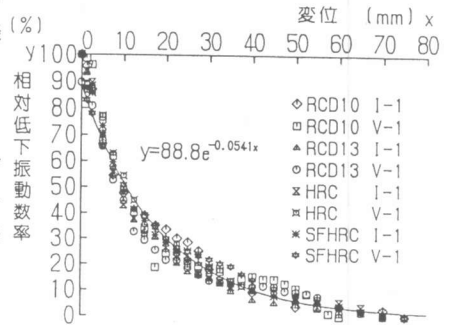


図5 相対低下振動数率の変化

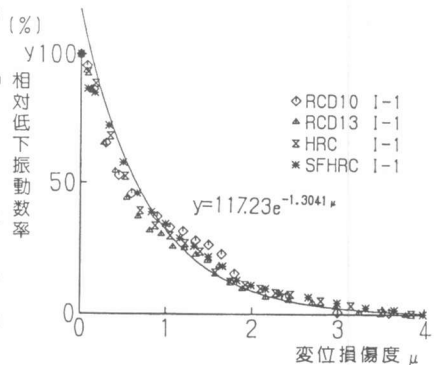


図6 相対低下振動数率の変化

て表す必要がある。

図7はこのようにして、I方向について表した振動損傷度～変位損傷度曲線の例である。このように、振動損傷度～変位損傷度曲線によれば、振動数から損傷度(履歴変位)を定量化することが可能でありこれを損傷度関数と考えることができる。

5. 損傷過程における振動数の計算

4. (2)で提案したように振動数からその構造物の損傷度の判定を行う場合には、その構造物の損傷過程と振動数の変化の関係を計算によって定量化する必要がある。

そこで、今回実験を行った供試体について、損傷していく過程における振動数変化の計算を行ってみたい。

(1) 計算方法

実験を行った供試体のような、構造物の固有振動数を求める最も簡単な方法は、図8に示すような一質点系のモデルを仮定し、式(1)によって求める方法である。この場合の損傷の影響は、柱のばね定数Kに含まれる曲げ剛性EIの変化として考慮される。

$$f = \omega / 2\pi \quad (1)$$

$$\omega = \sqrt{K / (m + 0.23m_s)} \quad K = 3EI / \ell^3$$

f: 自由振動数 ω : 自由円振動数 K: 柱のばね定数
m: おもりの質量 m_s : 柱の質量 EI: 柱の剛性 ℓ : 柱の長さ

ここでは、以下の方法で曲げ剛性を求めてみた。

a) 柱断面を20要素に分割し、力の釣合いから中立軸の位置を繰り返し定め、その時のモーメントと曲率より断面の曲げ剛性を計算する。

b) 柱を高さ方向に30等分に分割し、a)の方法を用いて各断面の曲げ剛性を計算し、道路橋示方書・耐震設計編の方法によって柱の等価剛性を計算する¹⁾。以下、a)・b)の方法で求めた振動数を計算値A、Bとする。

(2) 実験結果との比較

RCD13I-1についての計算値と実験値の比較を行った図を図9に示す。図9は、縦軸に振動数率を横軸には最大荷重を100%とした荷重百分率を用いて、計算値と実験値の比較を行った図である。図中、実線、破線は、それぞれ計算値B、計算値Aによる振動数率の変化であり、白丸は、実験で得られた振動数率である。図より、計算値Aは、柱基部1断面での曲げ剛性を用いているために、わずかにひびわれ荷重時(荷重百分率の10%程度)と鉄筋降伏時(荷重百分率の80%程度)の2点においてのみ一致するが、中間では適合していない。計算値Bは、やや高めではあるが実測の振動数の変化の傾向をよく表している。このことから、モデルであることによる制限はあるが、柱の剛性として道路橋示方書・耐震設計編による等価剛性を用いて求めるならば、振動数の変化を推定することが可能である。

6. 損傷過程における曲げ剛性の変化

5.で行ったように、曲げ剛性の変化を計算で求めることにより、振動数の変化を求めることができる。しかし、実際に終局変位時(ここでは、鉄筋降伏変位時の4倍)の振動数を計算で求める場合には、柱基部の押し込み、引き抜けの影響が入ってくるものと考えられる。そこで、柱基部の押し込み、引き抜けが振動数に与える影響を調べるために、実際に損傷していく過程における曲げ剛性の変化を調べ、実験で得られた曲げ剛性を用いて振動数の計算を行った。

(1) 曲げ剛性の測定

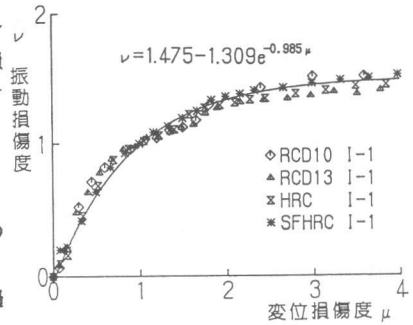


図7 損傷度評価曲線

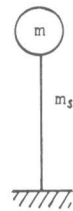


図8 振動モデル

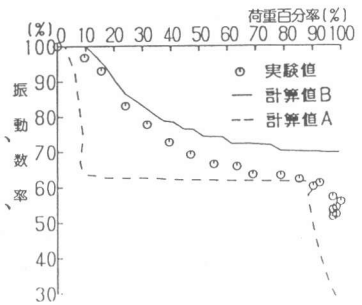


図9 実験値と計算値の変化

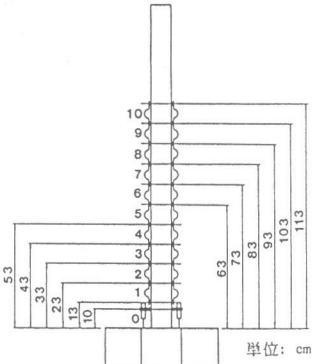


図10 曲率測定位置

曲げ剛性は、図10に示した0～10の範囲について、変位計およびパイゲージを用いて曲率を測定し、測定された曲率より曲げ剛性を求めた。そのため、区間0での曲げ剛性は、柱基部の押し込み、引き抜き量を含んだ曲率を用いて求めた曲げ剛性である。

(2) 曲げ剛性の変化

実験で得られた曲げ剛性の変化を図11に示す。図11は、縦軸に曲げ剛性をとり横軸には曲げモーメントをとって、曲げ剛性の変化を示したものである。なお、図中に前に述べた a) の方法による曲げ剛性の計算値も同時に示した。この図より、柱の曲げ剛性は、場所によってひびわれの入り方に差があるため、同じ曲げモーメント時でも曲げ剛性に差があることがわかる。なお、計算で求めた曲げ剛性がその変化の様子をよく表していることがわかる。また、変位計によって求めた剛性（柱基部の押し込み、引き抜きを含んだ曲率から求めた曲げ剛性）は、パイゲージによって求めた曲げ剛性より、 $1 \times 10^6 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ 程度小さく現れ、その差が柱基部の押し込み、引き抜きによる見掛けの曲げ剛性であると考えられる。

次に、実験で測定した剛性を用いて5.と同様の方法で振動数の計算を行った。なお、区間0の剛性（柱部と底部の押し込み、引き抜きを含んだもの）を用いて求めた振動数を計算値C、区間1の剛性を用いて求めた振動数を計算値Dとする。（区間0および区間1の位置は図10参照）

図12は、縦軸に振動数をとり、横軸に荷重百分率をとって実測の振動数と計算で求めた振動数との比較を行った図である。図より計算値C、Dは、いずれもよく実測の振動数の値を示しているが、計算値Cは曲げ剛性を求める際の曲率に静的な、柱基部の押し込み、引き抜きの影響を含んでいるため、振動時には、この影響がすべて現れるとは限らないため、小さめの値を示している。また、計算値Dは、初期（荷重百分率の30%程度まで）においては良く一致しているが、柱基部の押し込み、引き抜きの影響を考慮していないために、それ以降では実際の振動数よりも幾分か大きな値となった。

このことより、柱基部の引き抜き、押し込みが振動数に影響を与えており、振動数を正確に求めるには、この影響を明らかにする必要があると考えられる。

7. まとめ

本研究は、使用コンクリート（普通コンクリート、高強度コンクリート、鋼繊維補強高強度コンクリート）、使用鉄筋（D10とD13）、載荷方向（I方向、V方向）の異なる高橋脚モデルを対象として、それが損傷を受けた場合の振動数を実験的に調べ、振動数による損傷度評価および、計算値との比較を行った。その結果、以下の事柄が得られた。

- (1) 高橋脚モデルの損傷と振動数の変化は、使用材料・載荷方向によって異なる。しかし、初期振動数と終局変位時振動数との差を基準とした相対低下振動数率を用いることにより、振動数の変化を $y = a e^{-bx}$ で表すことができる。
- (2) 損傷度関数として、4. (2) で提案したような振動損傷度～変位損傷度曲線を用いれば、振動数から損傷度（履歴変位）を定量化することが可能である。
- (3) 振動数の変化を計算によって求める場合の曲げ剛性は、1断面の曲げ剛性の変化を用いるのではなく、高さ方向にも分割して求めた等価剛性を用いれば、振動数の変化の様子を計算で求めることができる。
- (4) 柱基部の押し込み、引き抜きが振動数に影響を与え、振動数を正確に求めるには、その影響を明らかにする必要がある。

参考文献 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，pp. 135，昭和55年。

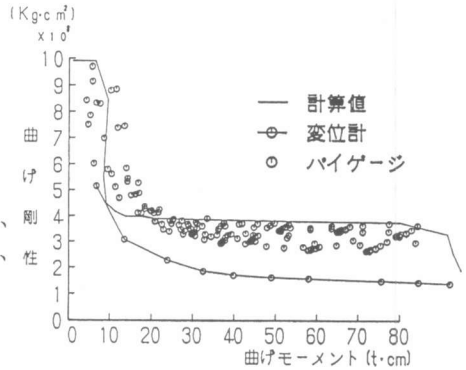


図11 曲げ剛性の変化

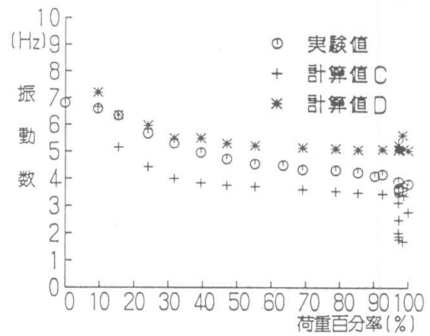


図12 実験値と計算値の比較