

第2章 R C柱状部材の損傷と振動特性に及ぼす材料特性の違いの影響に関する実験的研究

2・1 目的

本章では、R C構造物の損傷程度を定量的に判定するために、損傷過程における振動特性の変化に着目し、曲げが卓越するR C高橋脚モデルを対象に、実験的に振動特性の定量化を試みたものである。

2・2 R C柱状部材の振動特性に関する基礎的実験

(1) 実験概要

表2・1に供試体の種類を示す。実験において、変化させた要因は次のとおりである。

- a) 載荷方向・・・図2・1に示すようにI方向、V方向の2種類
- b) 載荷方法・・・図2・2に示すようにあらかじめ与える損傷としての変位（これを履歴損傷変位と定義する）での繰り返し回数を1回とした場合と11回繰り返した場合の2種類
- c) 頂部おもり・・・柱頂部に200kgf（1960N）のおもりを取り付けたものと、取り付けないものの2種類

この実験に用いた供試体は全部で8体である。

なお、繰り返し回数11回は、1回の地震によって損傷に寄与すると考えられる振幅の回数を想定したものである。また、頂部おもりは、実際の軸力の1/10程度であるが、このおもりは、軸力を想定したものではなくモデル解析の比較のために取り付けたものである。

供試体の形状・寸法は、図2・3に示すように断面が10×15cm、高さが150cmで、主鉄筋にはD10（SD35）を、帯鉄筋にはφ6mmを10cm（横力載荷部は5cm）ピッチで使用した。この柱の軸方向鉄筋比は1.90%である（通常の橋脚の場合の軸方向鉄筋比は、1.0%以下であるが高橋脚の場合は、基部の鉄筋比は2%前後となるのでここでは1.9%とした）。柱部のコンクリート配合を表2・2に示す。各供試体の柱部コンクリートの試験時の圧縮強度およびヤング係数、使用鉄筋の試験結果を表2・3に示す。

載荷装置の概要を図2・4に示す。供試体はその基礎盤を反力床に8本のφ32mmP C鋼棒により固定し、水平Actuatorを底盤上面より150cmの位置に取り付けた。載荷は水平Actuatorにより変位制御で行い、あらかじめ与える履歴変位は鉄筋降伏までは2.5mmきざみ、それ以降は5.0mm、最大荷重到達後は10.0mmきざみで行なった。各段階ごとに図2・5に

示すように頂部に接続したおもりを切断する方法で微振動を起こさせ、加速度計による波形をラピコーダに記録した。記録された波形の10サイクルを用いて各履歴損傷変位における自由振動数と減衰定数を式(2・1), (2・2)により求めた^{2・1)} (波形記録の一例を図2・6に示す)。

$$n = -b$$

$$T = \Sigma (X_{i+1} - X_i) / (N - 1)$$

$$\delta = \log_e (Y_i / Y_{i+1}) = n \cdot T$$

$$\omega = 2\pi / T$$

$$p = \sqrt{\omega^2 - n^2}$$

$$C_d = 2 \cdot m \cdot n$$

$$C_{cr} = 2 \cdot m \cdot p$$

$$f = 1 / T \quad \text{-----} \quad (2 \cdot 1)$$

$$h_r = C_d / C_{cr} \quad \text{-----} \quad (2 \cdot 2)$$

ここに、 n ：減衰定数， T ：周期， N ：波形サイクル数， δ ：対数減衰率，

ω ：円振動数， p ：固有円振動数， C_d ：粘性減衰係数，

C_{cr} ：限界減衰定数， f ：振動数， h_r ：減衰定数

図2・7にこの実験のコントロールシステムを示す。図2・4に示した変位形により水平変位，柱部と底部の引き抜け押し込み変位の測定を行った。水平荷重，水平変位はX-Yレコーダーに連続的に記録した。

また、供試体柱部の付根部分の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を確認した。

(2) 実験結果

a) 振動数の変化

図2・8は、横軸に変位をとり、縦軸にはそのときの振動数をとって損傷変位と振動数の変化する様子を示したものである。供試体に与える損傷変位が増大するにつれて振動数が減少している。図中のRCI-11(N)とRCV-11は、載荷前にすでにひびわれが入っていたため、始めからRCI-1(N)，RCV-1よりも低い振動数を示している。

次に、振動数の変化を調べるために、振動数を無次元化して示し横軸に荷重をとって示したものが図2・9である。この図は、縦軸に損傷を与える前(すなわち、損傷変位0の状態)の自由振動数を100%として(ただしRCI-11(N)とRCV-11は載荷前にひびわれが認められたので、それぞれRCI-1(N)とRCV-1の無載荷時の振動数を100%として)振動数の変化の様子を示したものである。図より、振動数率の変化は、ひびわれ発生によって急激に低下していくが、鉄筋の降伏荷重付近で傾きが緩やかになり、一時横ばい状態を示す。さらにその後は最大荷重まで振動数率は低下を続け、一定の振動数率で止まるという挙動を示すことがわかる。

またこの図からは、繰り返し回数と損傷の方向による違いは比較的顕著に認め

られたが、頂部おもりの有無の影響は、さほど顕著には認められなかった。

b) 減衰定数の変化

図2・10は、横軸に振動特性を測定する前にあらかじめ与えられた損傷変位をとり、縦軸にはその時測定された減衰定数をとって各供試体の減衰定数の変化を示したものである。この図より、ひびわれ荷重以前での減衰定数は頂部おもりの有無にかかわらず0.76~2.13% (平均1.23%) であった(ただし、RCI-11(N), RCV-11は、載荷前にひびわれが認められたので除いた)。本実験の8体の試験結果のうちRCV-1は他の結果と異なりやや大きめの減衰定数の値が得られた。ひびわれ発生後、減衰定数は増加する傾向を示したが1回繰返しよりも11回繰返しのものの方が少ない変位で大きな減衰定数を示した。その後は変位6cmまでは2~6%の間で推移した。実際の独立橋脚で測定された結果も、また設計に用いられている減衰定数もこの範囲にはいつている場合が多い。振動の方向によって減衰定数の大きさに違いがみられI方向よりもV方向のものが全体的に1~2%大きめの値を示した。いずれの方向についても引張鉄筋の降伏時近くの変位(I方向で約2.0cm, V方向で約4.0cm程度)でピーク値を示し、その後徐々に減少する傾向が認められた。さらに変位を増すと、頂部おもりのあるシリーズでは再び大きくなる傾向がみられた。

以上、減衰定数に関して得られた主な結果は、その値がほぼ2~6%の範囲であったこと、弱軸方向の値が強軸方向より大きめであること、10回程度の繰返し回数の違いでは減衰定数に顕著な違いが認められなかったことなどである。

2・3 損傷程度の評価の可能性

前節の実験結果において、本実験で取り上げた要因の影響が損傷の増大とともにその変化が明確に認められたのは、減衰定数よりも振動数の方であった。そのため、ここでは振動数の変化から、供試体の損傷程度を評価することを試みる。

表2・4は、図2・9より供試体の損傷と振動数率の関係を示したものである。この場合の損傷程度は同一変位でも断面の剛性により損傷が異なるため変位をとるのは適当ではないので、部材としての特徴的な荷重段階をとるものとする。表2・4より、損傷を受ける前の自由振動数を100%とした場合の、各損傷程度における振動数の測定結果より、振動数率として次の範囲を得た。すなわち、ひびわれ荷重時で90~75%, 設計荷重時で72~60%, 鉄筋降伏荷重時で61~49%, 終局強度計算値到達時で55~38%であった。ここで、設計荷重は許容応力度法により $\sigma_{ca} = \sigma'_c / 3$, $\sigma_{sa} = 1800 \text{ kg/cm}^2$ として求めたものであり、終局強度はACIの仮定に基づいて求めた計算値である。その変動範囲は12~17%であるが、これは供試体要因のとり方によるものであり、個々の供試体についてみれば、損傷の程度と振動数率の関係は図2・10に示すようにRCI-1からRCV-11(N)の範囲で比較的なめらかな曲線関係が成立することが予想できる。

そこで、このような損傷過程と振動数率の関係を定量化することが可能である

と考えられる。たとえば供試体 R C V - 1 1 (N) において (あるいは、同様な形式の構造物、たとえば高橋脚などにおいて) その振動数率が 7 5 , 6 0 , 5 0 , 4 0 % に低下したことがわかれば、それぞれ、ひびわれ荷重, 設計荷重, 鉄筋降伏荷重, 終局荷重計算値値に達した損傷を受けたものと評価することが可能であると考えられる。ここでは損傷度評価方法としてまず、固有振動数の変化を利用することの可能性を調べたが、他に、柱基部の曲げ剛性あるいは柱全体の剛性などを利用する方法も考えられる。いずれの方法を利用するにせよそれらの方法に対する多くの要因を調べて検証する必要がある。そこで、以下ではまず固有振動数の変化を利用する方法について、その影響する要因を取り上げて検討するものとする。

2・4 損傷過程と振動数の変化の計算

R C 部材の損傷過程と振動数の変化の関係を計算によって、定量化できることが最も望ましいことであろう。しかし、実際にその関係を計算によって求めることは困難である。それは、R C 部材の損傷過程が複雑であることに起因している。一般に R C 部材の損傷過程はコンクリートのひびわれ、鉄筋の降伏、最大荷重到達、終局破壊としてとらえられるが、実際には損傷の種類 (荷重の繰り返し回数、地震波のようなランダム波の影響) や損傷を受ける部材の種類 (形状・寸法や材料の違い) あるいは構造に付随するもの (柱基部の特性: 鉄筋とコンクリートの付着切れによる鉄筋の抜け出しや押し込みあるいは基礎の回転と固定度) が複雑にからみ合って振動数に影響するからである。

(1) 計算方法

このような構造物の振動解析のもっとも簡単な方法は、図 2・12 に示すような一質点系のモデルを仮定し、式 (2・3) によって求める方法^{2・2)} である。この場合の損傷の影響は柱のばね定数 K に含まれる曲げ剛度 E I の変化として考慮される。

$$\begin{aligned} f &= \omega / 2 \pi \\ \omega &= \sqrt{K / (m + 0.23 m_s)} \quad \text{-----} \quad (2 \cdot 3) \\ K &= 3 E I / l^3 \end{aligned}$$

ここに、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, E I : 柱の剛性
l : 柱の長さ

曲げ剛性 E I の計算は次の 3 方法で行った。

a) 柱断面を 20 要素に分割し、力の釣合から中立軸の位置を繰り返し定め、

そのとき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等分しに分割し、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^{2・3)}によって柱の等価剛性を計算する。c) 実験で測定した、柱基部における引き抜きあるいは押し込み変位の実測値より求めた局率から曲げ剛性を計算する。以下、a), b), c)の方法で求めた振動数を計算値A, B, Cとする。

(2) 実験結果との比較

図2・13に縦軸に振動数率を、横軸には最大荷重を100%とした荷重比で、それぞれの計算値と実測値の比較を行ったものを示す。図中の破線、実線はそれぞれ計算値A, 計算値Bによる振動数率である。図より、計算値Aは柱の基部一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80~90%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, Cはいずれもよく実測の振動数の変化を表示しているが、計算値Bがやや高めの振動数を示すのに対し、計算値Cはやや小さめの値を示している。これらのことから、モデルであることによる制限はあるが、柱の最大荷重までの範囲であれば、道路橋示方書・耐震設計編による等価剛性を用いる方法b)でその振動数の変化を推定することが可能である。しかし、この計算値Bは柱基部鉄筋の引き抜け、押し込みの影響を考慮していないため実際の振動数の値よりも大きめの値となる。また、基部に設置した2個の変位計により求めた曲率(基部10cm間隔における平均曲率)を用いた振動数の計算値Cは、逆に実測値より小さく推定されたが、これは、曲率の推定値が静的正負交番載荷の値であって、振動時のものではないことから、振動時にはそこに生じないような鉄筋の引き抜け、押し込みの影響が静的載荷においては現れ、結果として実測の曲率を大きめに与えたためと考えることができる。以上より、損傷を受けたRC高橋脚の振動数を求める場合には、柱基部の鉄筋の引き抜けの影響およびその動的影響を考慮する必要があることが明かとなった。

2・5 振動特性に及ぼす材料特性の違いの影響

RC部材の損傷程度と振動特性の変化を定量化する場合に、2・2で取り扱ったような繰り返し回数による損傷ばかりでなく、逆に損傷を与えられる側の問題もある。具体的には構造物の種類、形状・寸法あるいは、使用された材料の違いによる影響も調べておく必要があるだろう。ここでは、材料特性の異なる3種類の高橋脚モデルについて2・2と同様な実験により履歴載荷によって損傷を受けていく過程における振動特性を調べた。

(1) 実験方法

実験は、表 2・5 に示すような 12 体の供試体について、コンクリートの種類、載荷方向、繰返し回数の要因を変化させて 2・2 と同様の試験を行った。コンクリートの種類として、普通コンクリート (RC)，高強度コンクリート (HRC)，鋼繊維補強高強度コンクリート (SFHRC) の 3 種類をとった。供試体の形状・寸法および試験方法は 2・2 と同様である。ただし、普通コンクリート供試体 4 体は 2・2 の同名の供試体と同一であり、ここでは比較のためにとっている。使用したコンクリートの配合を表 2・6 に示す。各コンクリートの圧縮強度は RC: 390 kg/cm^2 (38.2 MPa)，HRC: 838 kg/cm^2 (82.1 MPa)，SFHRC: 825 kg/cm^2 (80.9 MPa) (おのおの、 $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ 円柱供試体 12 本の平均値) であり、弾性係数は、RC: $2.59 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ ，HRC: $4.50 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ ，SFHRC: $3.95 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ であった。配筋および使用鉄筋も 2・2 と同一のものとした。

(2) 実験結果

a) 振動数の変化

各供試体の振動数数の変化を載荷方向別に図 2・14 に示す。図よりいずれの方向においても、初期振動数は HRC が SFHRC よりも高いが、変位がひびわれ発生変位以降では、逆転し SFHRC の方が高い振動数を示す。これは鋼繊維補強コンクリートの特徴であるひびわれ後の開口の拘束効果が現れたものと考えることができる。また、繰返し回数による影響は、高強度コンクリートよりも普通コンクリートにおいて大きく現れている。次に初期振動数を 100% として無次元化した図 2・15 より、振動数率は RC の I 方向で約 50%，V 方向で約 40% に、また HRC では、I 方向で約 40%，V 方向では約 35% に、SFHRC では、I 方向で約 50%，V 方向で約 40% に低下し、それ以上の振動数の低下はみられない。次に初期振動数から各損傷変位での振動数低下が、最終振動数までの低下に対してどの程度の割合であるかを示すために、横軸に損傷変位をとり縦軸に初期振動数からの最終振動数までの低下振動数に対して、その時までの低下振動数の百分率をとってこれを相対低下振動数と定義して図 2・16 に示す。図より、材料および載荷方向の違いによらず同じ低下の様子を示していることがわかる。

b) 減衰定数の変化

横軸に損傷変位をとり、縦軸には減衰定数をとって各供試体の減衰定数の変化を図 2・17 に示す。この図より減衰定数は使用材料に関係なくひびわれ発生後 2～5% の間で変化し I 方向よりも V 方向の方が 1% ほど大きな値を示していることがわかる。

2.6 振動数による損傷度評価

前節までの実験結果より、RC 高橋脚モデルの損傷を定量化する場合には、減

減衰定数よりも振動数による方が定量化の可能性があることがわかった。すなわち、減衰定数の変化は載荷方向によって1%程度の違いはみられるものの、損傷変位の増加につれて全体として2~6%の間で変化し、損傷度と減衰定数の間には明確な関連性が認められず、その定量化は困難である。これに対し振動数は図2・14に示したように、損傷変位の増加とともに比較的なめらかに低下する。縦軸に振動数率をとった図2・15では、最終振動数率は載荷方向と使用材料によって異なるが、最終振動数として最終変位時のものをもって縦軸を相対低下振動数率とすれば、材料及び載荷方向の違いによらずほぼ同一の低下曲線で示すことができ、図2・16中の指数関数で近似できることがわかった。すなわち高橋脚モデルの損傷を定量化する場合、損傷変位と低下振動数の関数を表示する損傷関数は基本的には $y = a e^{-bx}$ なる指数関数形を仮定するのが適当であると判断できる。

次にこの関数を用いて、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、損傷変位を無次元化する必要がある。それには終局変位を定める必要があるが、現状ではこのような構造モデルの終局変位を定めるにはまだ多くの問題がある。そこで、ここでは便宜的ではあるが、横軸に高橋脚モデルの基部の鉄筋が降伏点に達したときの変位の計算値（柱断面を20要素、柱長手方向に30分割して求めた値）を基準（ $\mu_0 = 1.0$ ）とした変位損傷度 μ をとり、 $\mu_0 = 4.0$ のときの変位を終局変位と仮定し、縦軸にはこの終局変位までの低下振動数幅を100%としてとった相対低下振動数率をとってI方向について示すと図2・18(a)のようであり、この場合の鉄筋降伏時（ $\mu = 1.0$ ）の相対低下振動数率は35%にまで下っていることがわかる。図2・18(b)はV方向に対して求めた同様の結果であるが、実験の都合上、Actuatorのストロークの限界のため $\mu = 2 \sim 3$ までしか測定できなかった。そのため、測定した最終変位時（60~75mm）を終局変位にして示してある。このため、 $\mu = 1.0$ のときの相対低下振動数率は20%となりI方向とはやや異なった値となった。しかしこれは、終局変位のとり方ばかりでなく、柱のI方向とV方向での鉄筋比の大きさの違いも含まれていると考えられる。これを明らかにするためには、終局変位の影響を除かなければならない。そのためにはさらに縦軸（相対低下振動数率）をも無次元化する必要がある。このような考えから、縦軸についても横軸の変位損傷度と同様に、初期振動数から柱基部の鉄筋の降伏時の損傷変位を与えられたときまでの低下振動数を基準（ $\nu_0 = 1.0$ ）の振動損傷度と定義すれば、さらに損傷変位が増大するにつれて、この振動損傷度がどの程度まで増大しているかで、鉄筋降伏以降の変位損傷度を評価できる。図2・19はこのようにして表した振動数~損傷変位評価曲線の例である。この場合の評価曲線は次の式の形をとる。

$$\nu = \nu_0 - a e^{-b\mu} \quad (2.4)$$

ここに、 ν ：振動損傷度， ν_0 ：終局変位時の振動損傷度，

μ ：変位損傷度， a, b ：定数（ $a, b > 0$ ）

このように、縦横両軸とも初期から基部鉄筋降伏までの低下振動数と損傷変位（あるいは断面の曲率でも可能と考えられるが）を基準とした振動損傷度~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。また、この図 2・19 (a), (b) を比較することより I 方向と V 方向での鉄筋比の違いによる損傷度曲線の違いを認めることができる。さらに図 2・18 (a), (b) 中の式の両辺の対数をとれば、図 2・20 に示すように直線の切片と勾配で、載荷方向、鉄筋比、繰返し回数、使用材料の種類あるいはランダム波の影響など種々の振動による損傷度の違いを損傷係数として定量化できると考えられる。

今後、本研究で行ったような損傷度を定量化するための実験を多くの供試体について行い、種々の鉄筋比や履歴載荷の方法（繰返し回数、ランダム波等）の違いによる影響を含めた損傷度評価曲線を定め、損傷係数を定量化することができれば、低下振動数に基づくこの方法は、この種の構造物の損傷度を定量化するための重要かつ有効な一手法となり得るものと考えられる。この場合、定量化されるべき最も重要な事柄は、終局時の変位と振動数であり、今後の研究が期待されるところである。

2. 7 第 2 章の結論

本章では、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を使用した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特性の変化、ならびに損傷の度合を評価する方法について、載荷方向、繰返し回数を変化させて実験的に検討したものである。得られた事柄をまとめると以下のようである。

(1) 高橋脚モデルの損傷と振動数の変化は、ひびわれ発生後はやや急激に低下し、鉄筋降伏荷重付近で一時低下が少なくなり、その後最大荷重までは徐々に低下を続け、それ以後は、ほぼ一定の振動数に止まるという傾向を示す。全体的にはなめらかな曲線を描く。

(2) 高橋脚モデルの損傷と減衰定数の変化は、ひびわれ前は、1～2%であるが、ひびわれ後増加し、鉄筋降伏荷重時付近でピークを示し、その後最大荷重を越えるまで減少するが、さらに損傷を受けると再び増加する傾向を示す。全体を通じて減衰定数の変動は 2～6% の範囲にあった。

(3) RC 構造物の損傷と振動数の変化の関係を定量化する方法として、損傷を受ける前の固有振動数を 100% とし、損傷を受けた後の振動数が何% にまで低下しているかを調べることにより、その構造物の現在の損傷程度を明らかにすることが可能である。しかし、減衰定数の変化は変動が大きく、定量化が困難であり損傷の度合を評価する方法としては振動数よりは劣る。

(4) 振動数の変化を計算によって求める方法としては、1 質点系のモデルを仮定して求め得るが、この場合の曲げ剛性は 1 断面のものではなく、高さ方向にも分割して求めた等価剛性を用いれば、最大荷重までの振動数をやや大きめではあるが求めることができる。

(5) 損傷過程における振動数の変化は、使用材料によって、大きく異なり、終局変位時の振動数の低下割合も相違する。この場合は、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、損傷度を判定することが可能となる。損傷度を定量化する一方法として、変位損傷度 (μ) と相対低下振動数率 (y) を表示するための基本的な損傷関数としては、 $y = a e^{-b\mu}$ なる関数形を仮定した場合によく一致する。

(6) 高橋脚モデルの損傷を定量化する場合の損傷度関数として式 (2・4) を提案する。また、損傷度関数の係数を損傷係数として定め、片対数グラフで示せば、各種損傷要因の影響をも含めてより明確に損傷の度合を判断することが可能であると考えられる。

表 2・1 供試体種類

供試体名	頂部おもり	載荷条件	
		方向	回数
RC I- 1 (N)	無	I	1
RC I-11 (N)	無	I	11
RC V- 1 (N)	無	V	1
RC V-11 (N)	無	V	11
RC I- 1	有	I	1
RC I-11	有	I	11
RC V- 1	有	V	1
RC V-11	有	V	11

表 2・2 コンクリート配合

粗骨材最大 寸法 (mm)	W / C (%)	s / a (%)	単 位 量 kgf/m ³			
			W	C	S	G
15	55	50	200	364	851	868

表 2・3 コンクリート・鉄筋強度

コンクリート強度

コンクリート強度				
供試体名	RC I- 1 (N)	RC I-11 (N)	RC V- 1 (N)	RC V-11 (N)
圧縮強度 (kgf/cm ²)	424	420	427	376
弾性係数 (kgf/cm ²)	3.31×10^5	3.05×10^5	3.00×10^5	3.08×10^5
供試体名	RC I- 1	RC I-11	RC V- 1	RC V-11
圧縮強度 (kgf/cm ²)	338	315	304	274
弾性係数 (kgf/cm ²)	2.59×10^5	2.60×10^5	3.01×10^5	2.17×10^5

鉄筋強度

使用鉄筋	
種類	SD35 3種
呼び寸法	D10
公称直径	0.953cm
公称断面積	0.7133cm ²
降伏点応力	3906kgf/cm ²
引張強度	5648kgf/cm ²
弾性係数	2.10×10 ⁶ kgf/cm ²

表2・4 損傷程度と振動数率

供試体名	振 動 数 率 (%)				
	載荷前	ひびわれ 荷重時	設 計 荷重時	鉄筋降伏 荷重時	終局計算 荷重時
RC I- 1(N)	100	76	69	60	51
RC I-11(N)	100	76	65	59	44
RC V- 1(N)	100	99	68	55	53
RC V-11(N)	100	75	61	49	38
RC I- 1	100	98	72	60	51
RC I-11	100	89	70	57	53
RC V- 1	100	97	69	50	43
RC V-11	100	84	68	59	55
RC V-11*	73	61	53	42	40

*RC V- 1の載荷前振動数を100%とした時

表2・5 供試体種類

供試体名	コンクリート 種類	載荷条件	
		方向	回数
RC I- 1	普通 コンクリート	I	1
RC I-11		I	11
RC V- 1		V	1
RC V-11		V	11
HRC I- 1	高強度 コンクリート	I	1
HRC I-11		I	11
HRC V- 1		V	1
HRC V-11		V	11
SFHRC I- 1	鋼繊維補強 高強度 コンクリート	I	1
SFHRC I-11		I	11
SFHRC V- 1		V	1
SFHRC V-11		V	11

表2・6 コンクリート配合

高強度コンクリート

粗骨材最大 寸法 (mm)	W / C	s / a	単 位 量 kgf/m ³			
	(%)	(%)	W	C	S	G
15	25	35	150	600	587	1094

鋼繊維補強高強度コンクリート (鋼繊維混入率1.5%)

粗骨材最大 寸法 (mm)	W / C	s / a	単 位 量 kgf/m ³				
	(%)	(%)	W	C	S	G	F
15	25	62	200	800	817	501	117

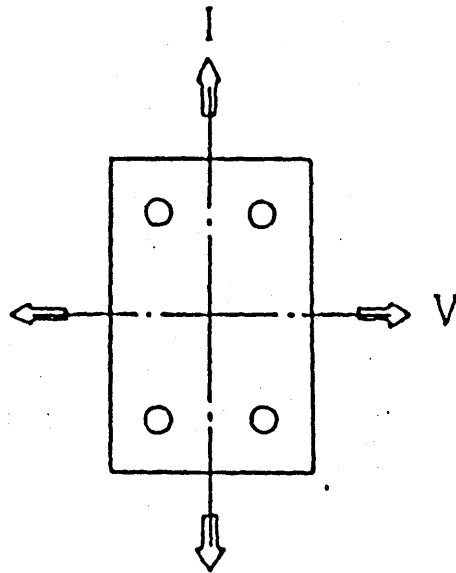


図2・1 载荷方向

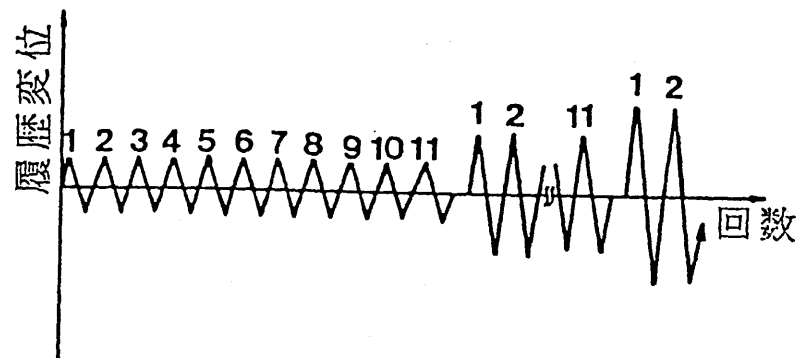
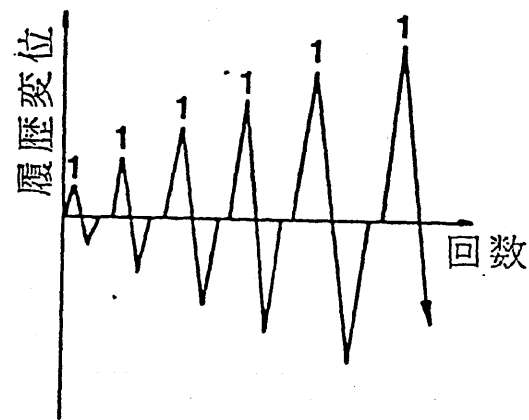


図2・2 载荷パターン

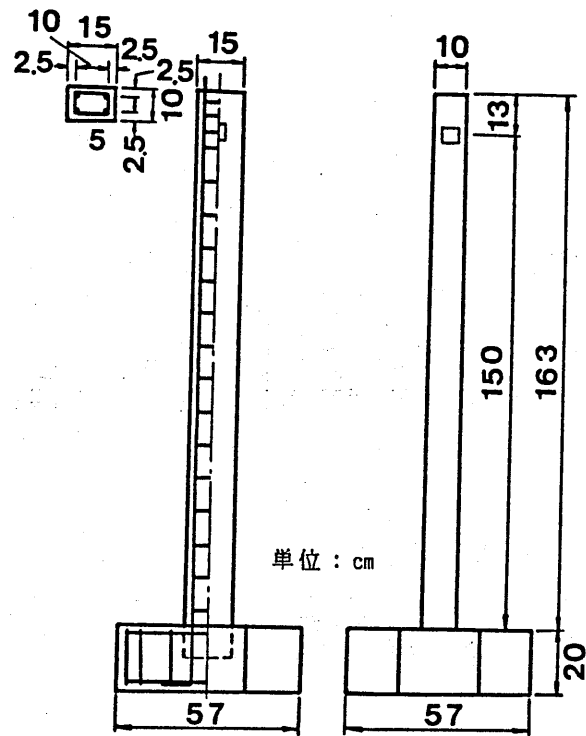


図 2・3 供試体形状・寸法

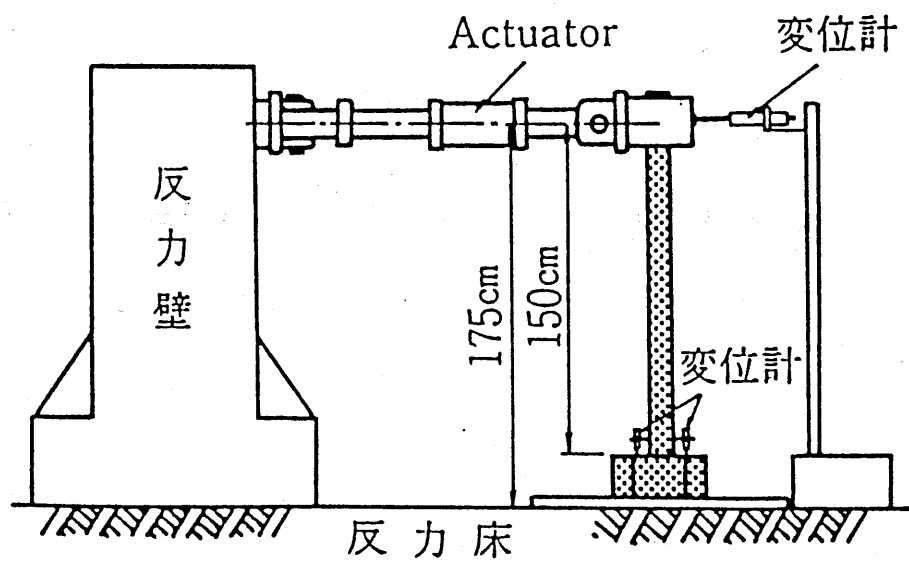


図 2・4 載荷装置

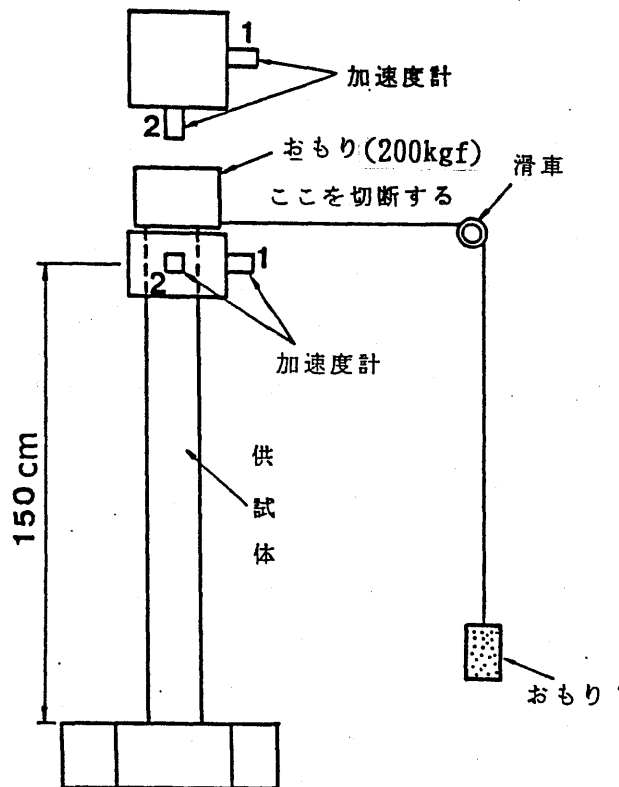


図 2・5 振動測定装置

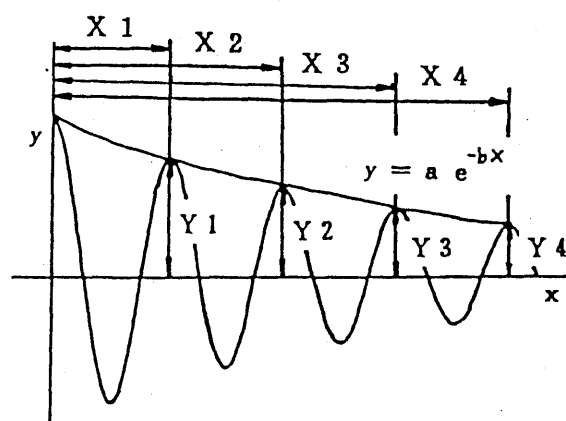
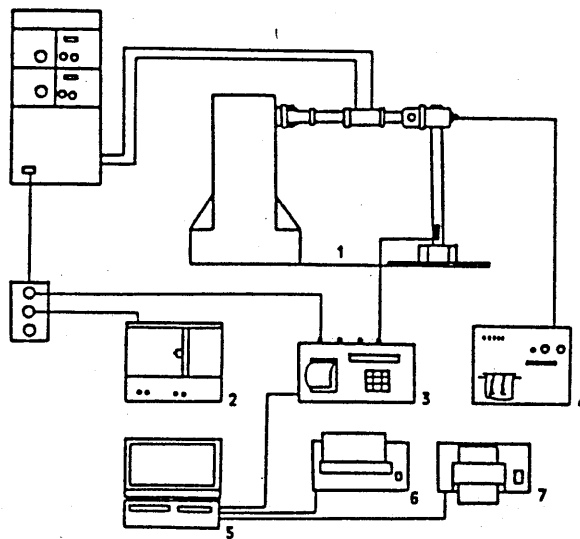


図 2・6 波形記録



- 1 MTS 載荷装置
- 2 X-Yレコーダー
- 3 TDS データーロガー
- 4 電子ラビコーダー
- 5 パーソナル コンピューター
- 6 プリンター
- 7 X-Yプロッター

図2・7 コントロールシステム

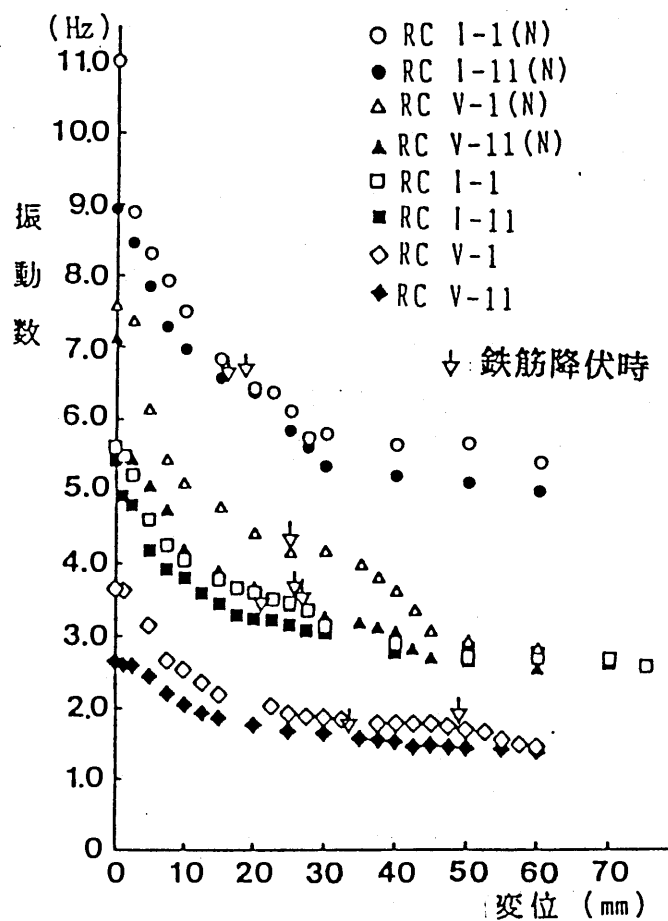
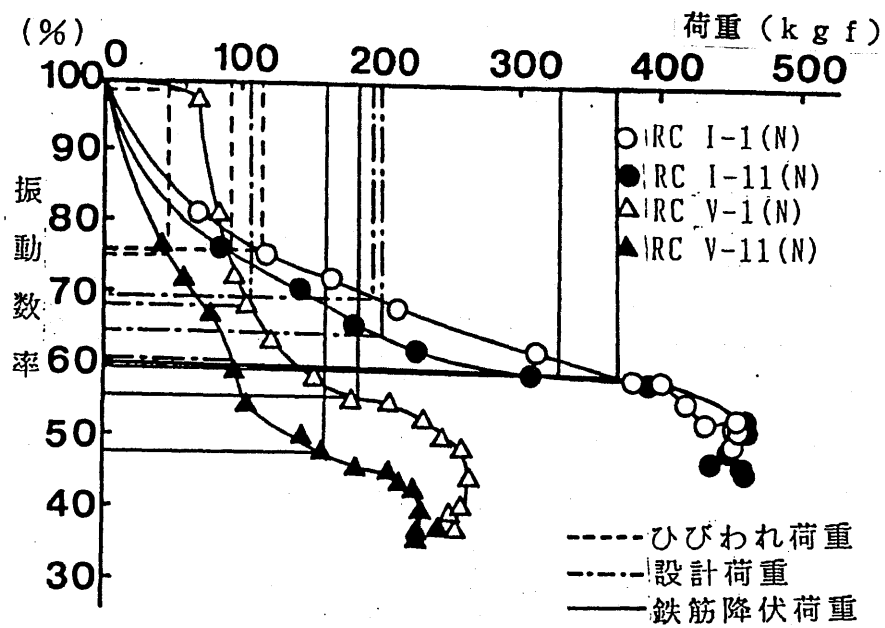
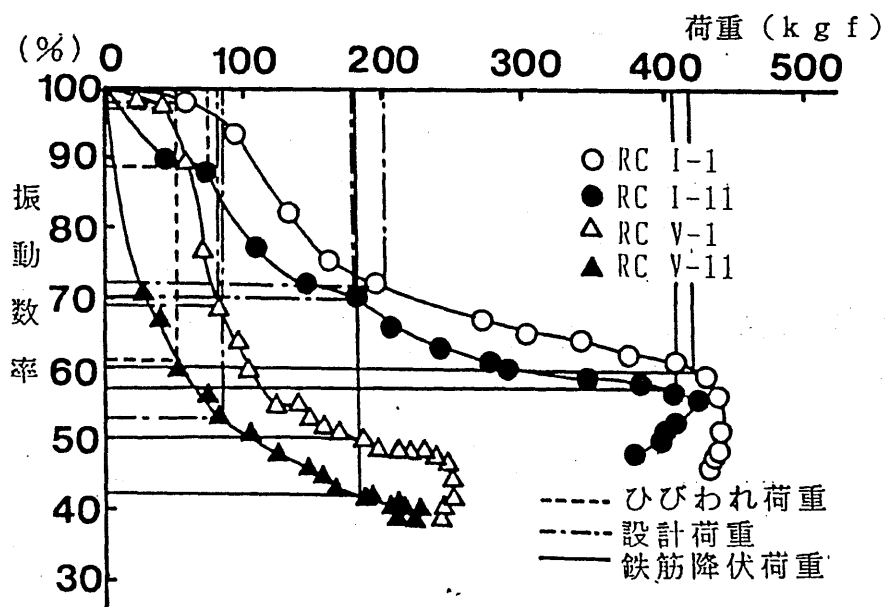


図2・8 振動数の変化

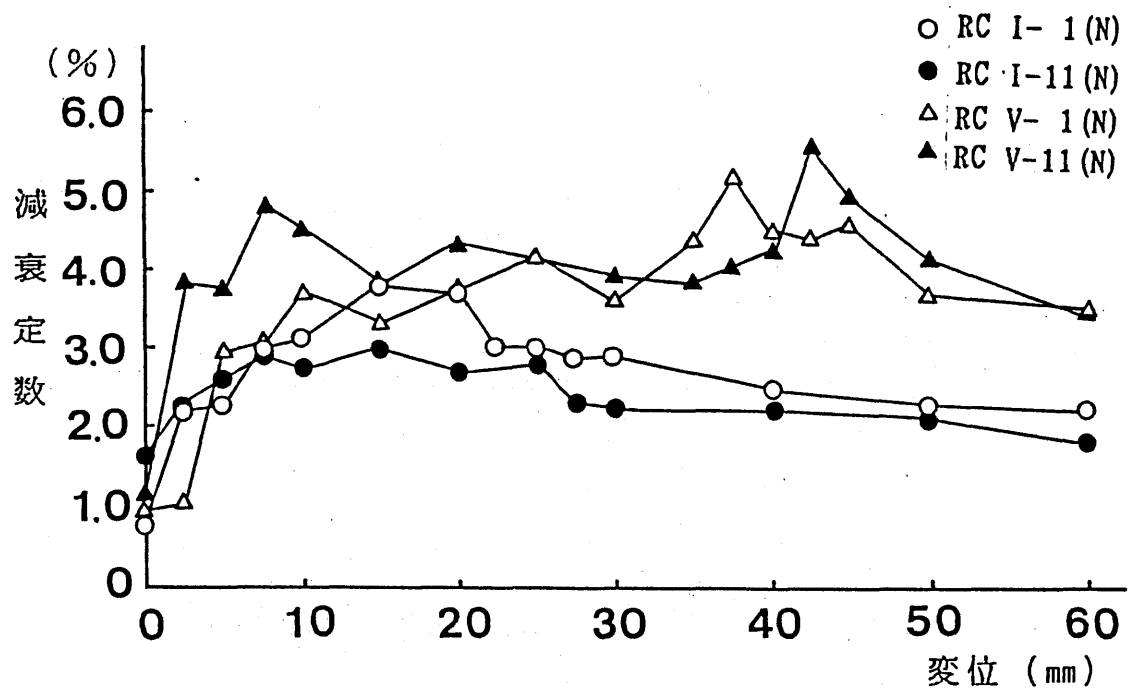


(a) 頂部おもりなし

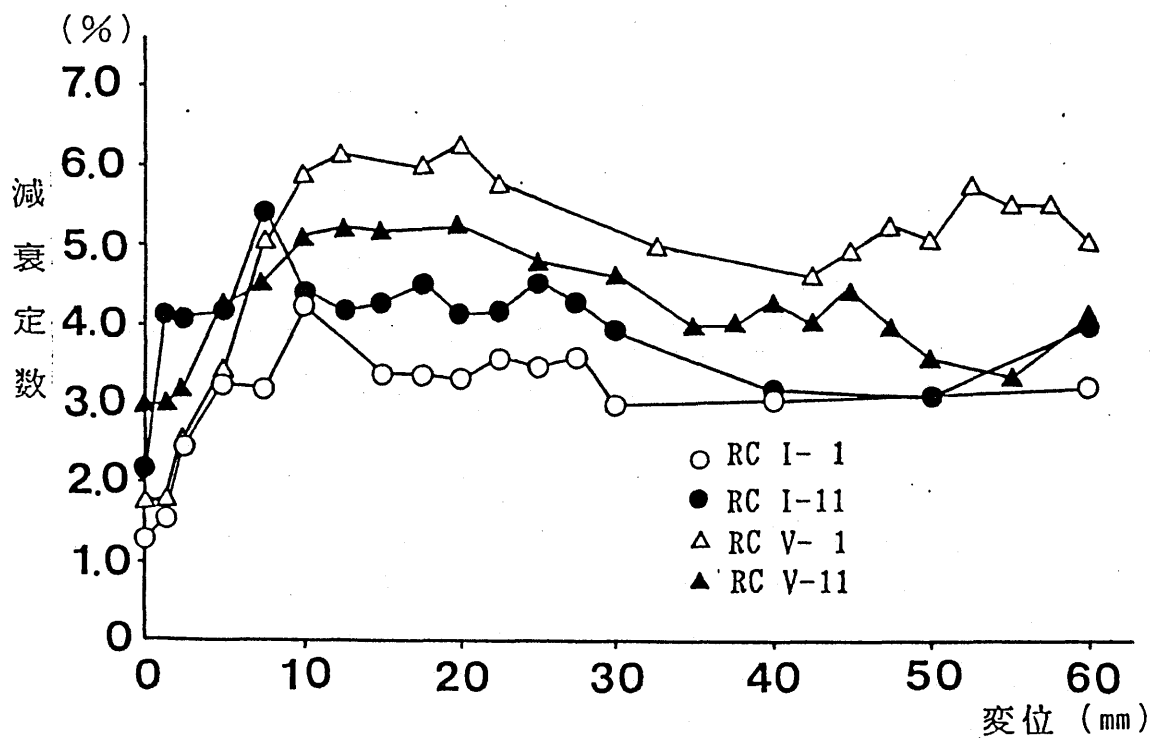


(b) 頂部おもりあり

図2・9 振動数率の変化



(a) 頂部おもりなし



(b) 頂部おもりあり

図2・10 減衰定数の変化

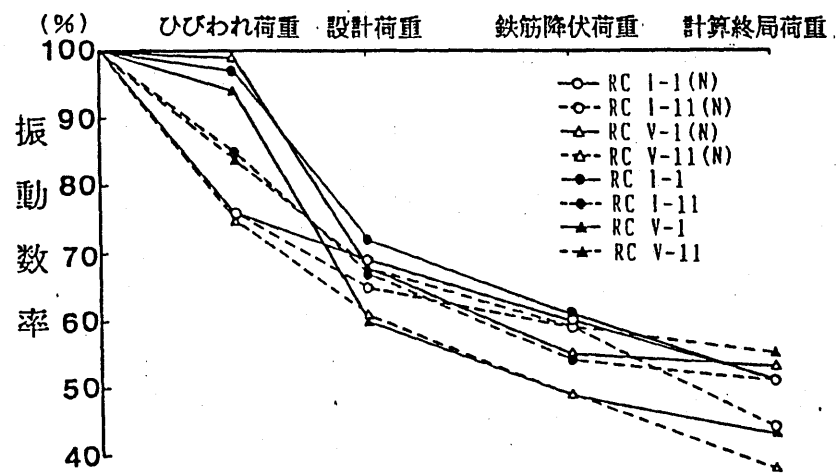


図 2・11 損傷程度と振動数率

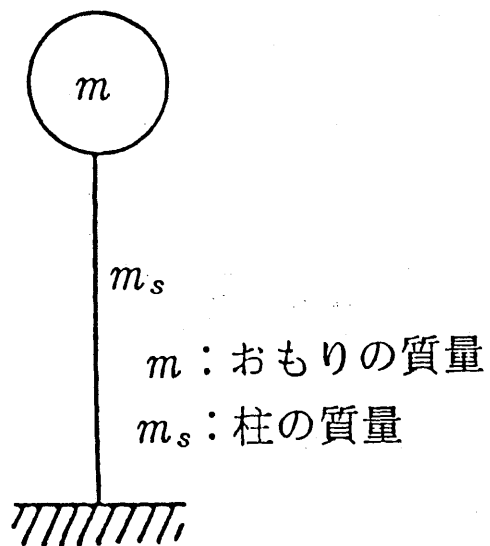


図 2・12 振動モデル

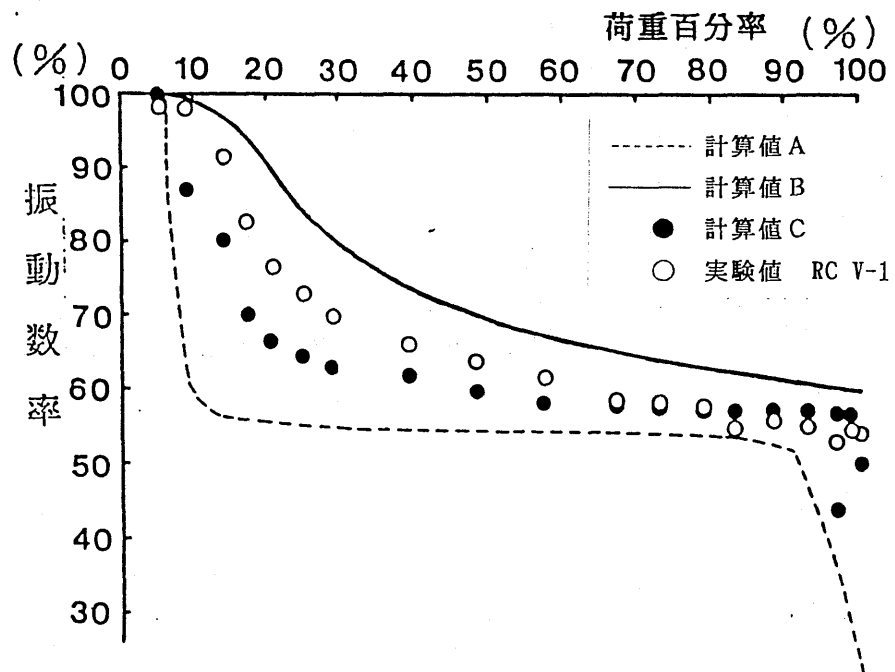
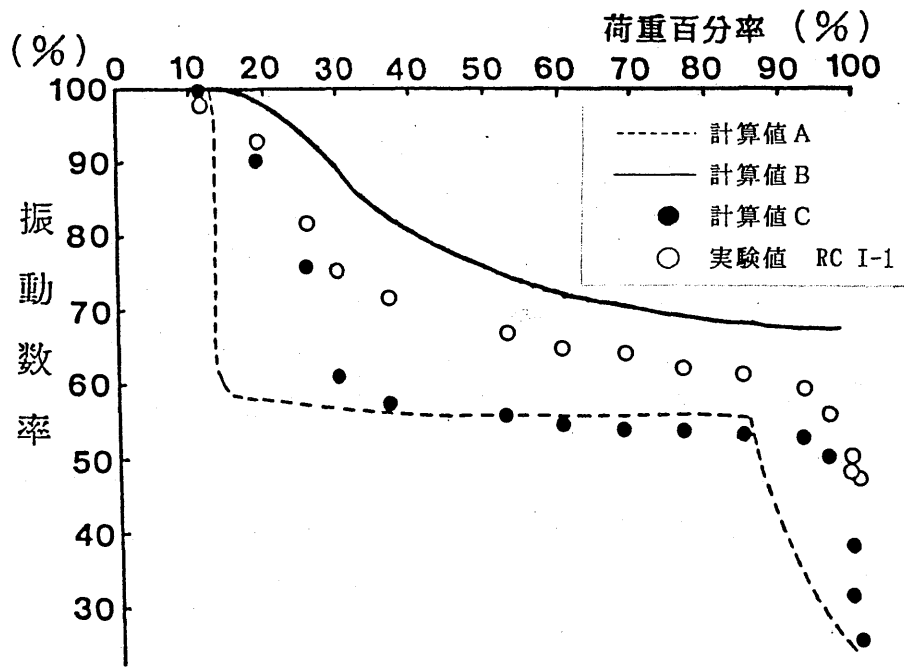


図2・13 計算値と実験値の比較

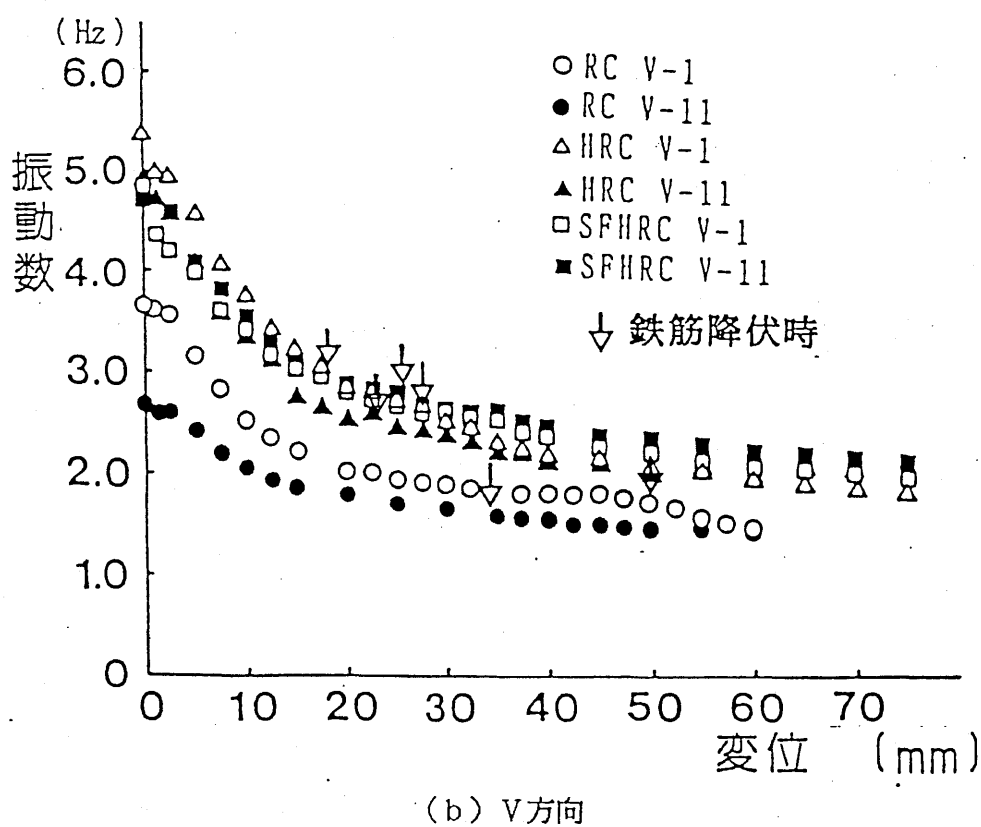
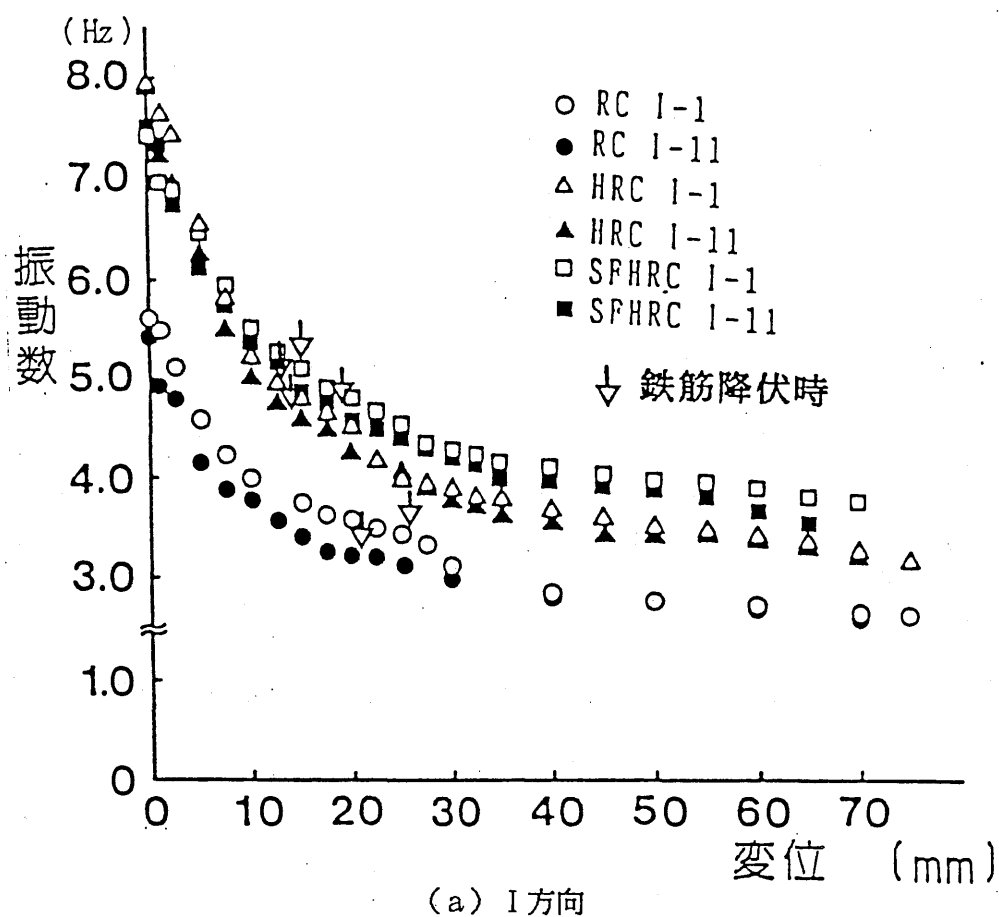
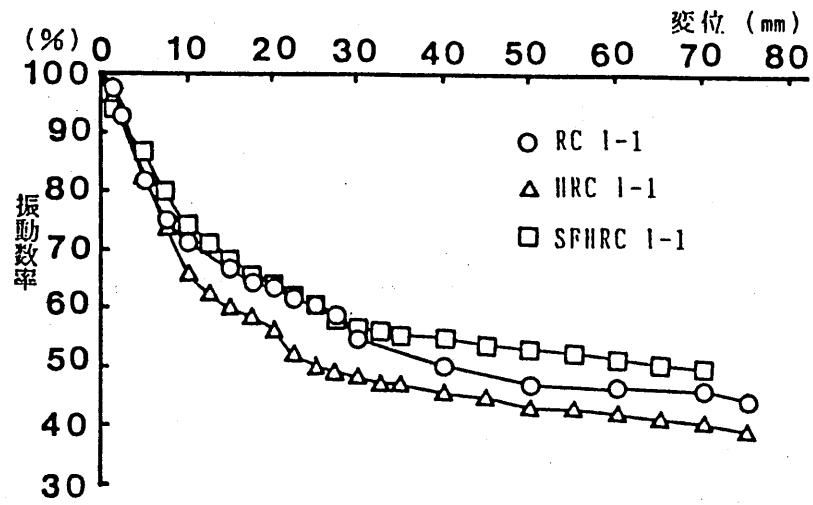
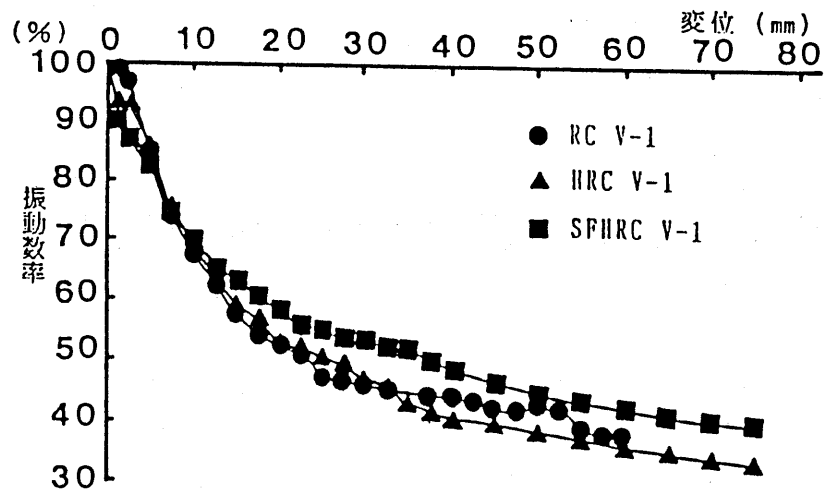


図2・14 振動数の変化



(a) I 方向



(b) V 方向

図 2・15 振動数率の変化

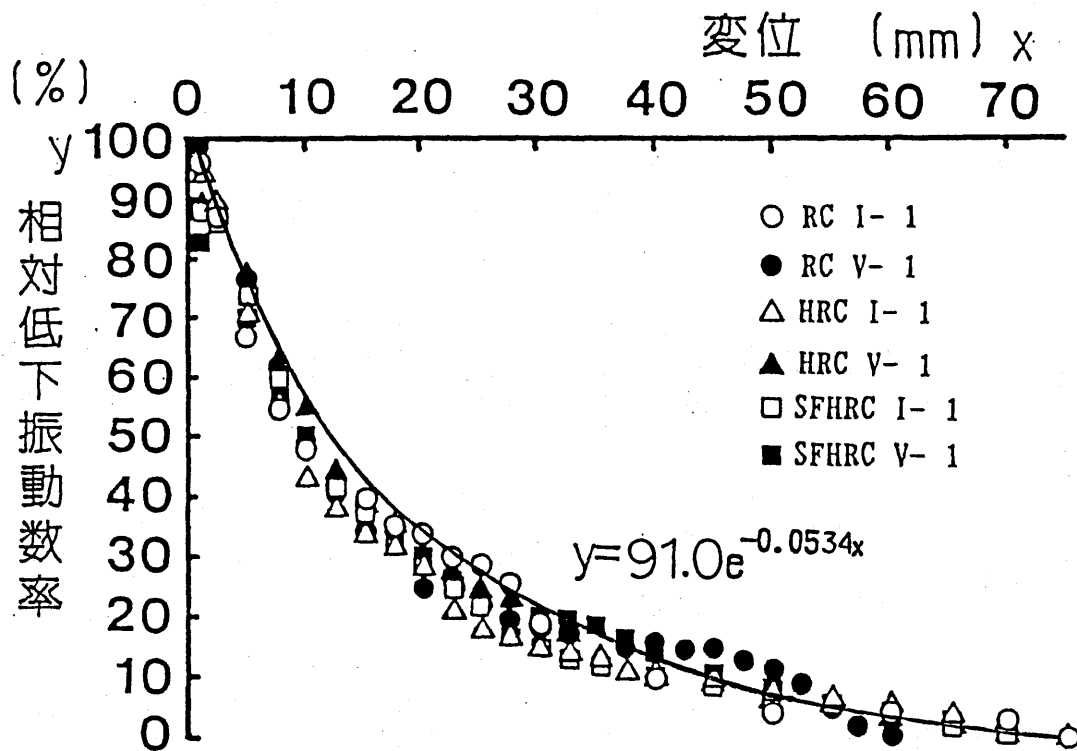


図2・16 相對低下振動數率の變化

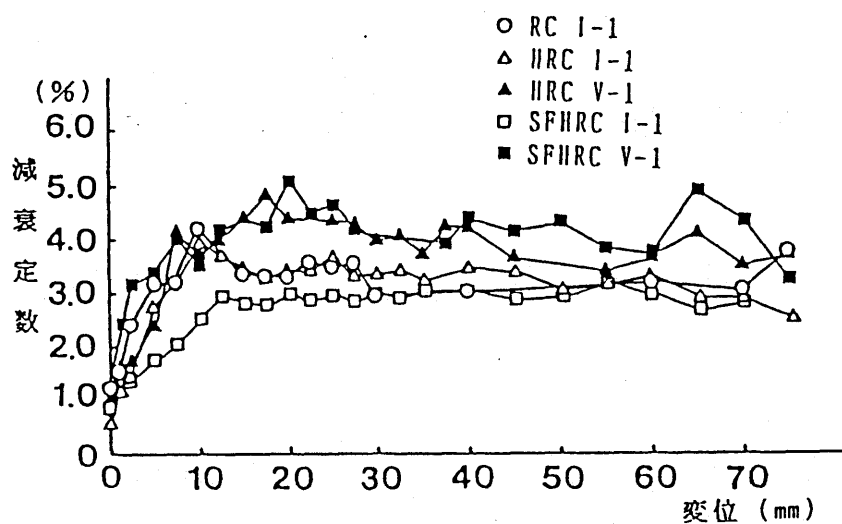
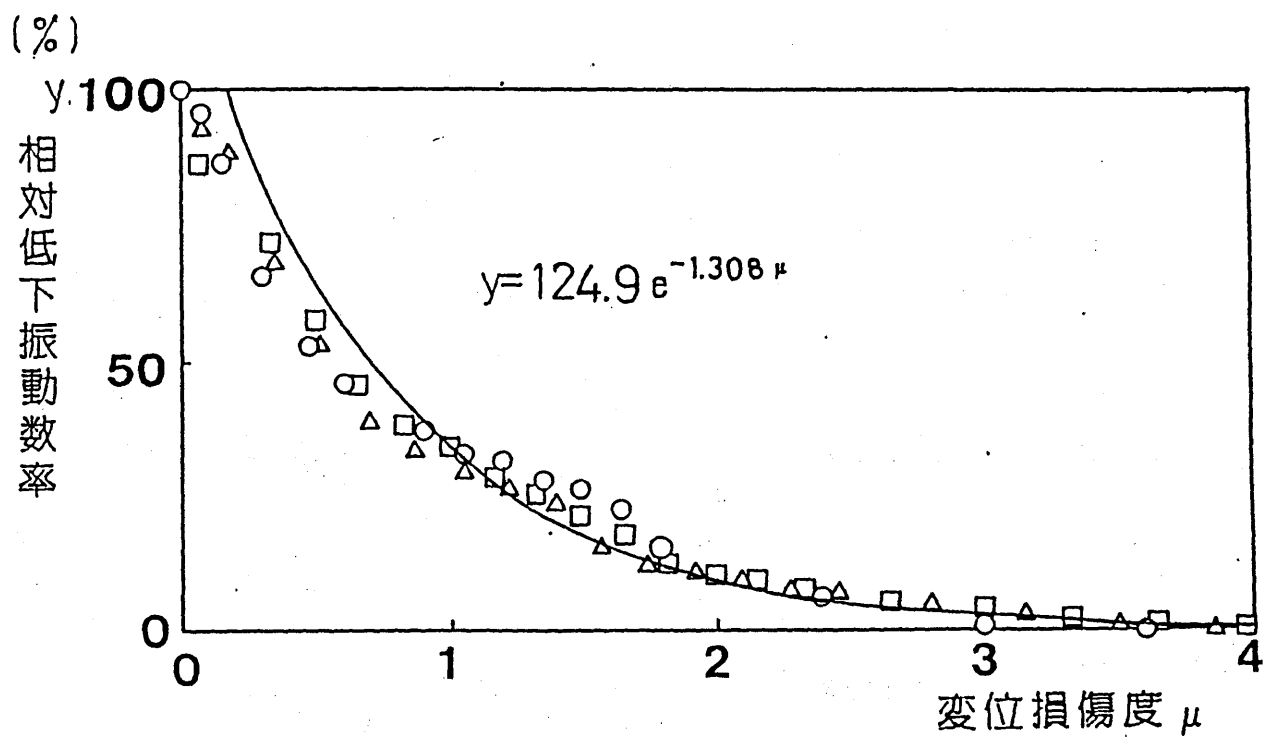
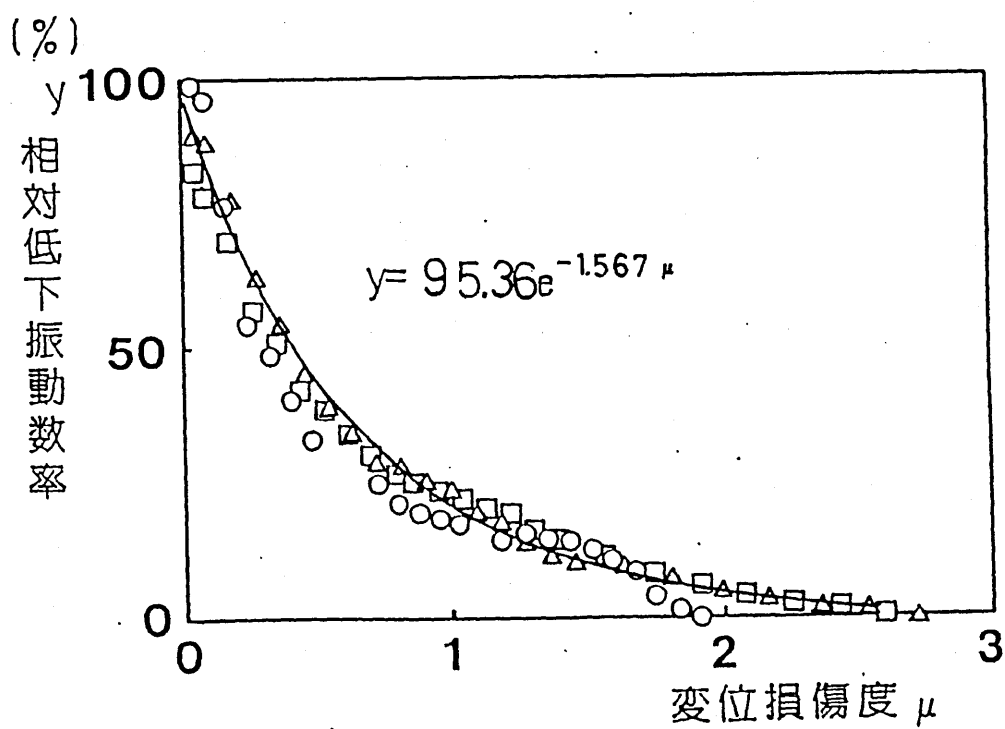


図2・17 減衰定數の變化

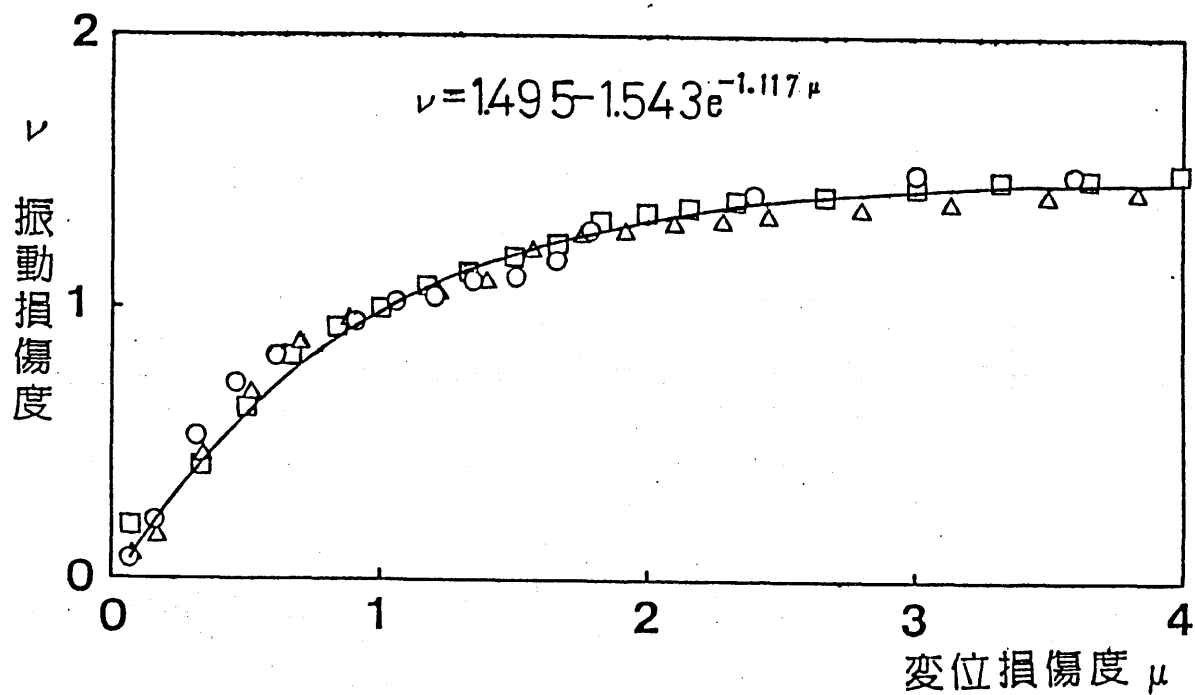


(a) 1方向

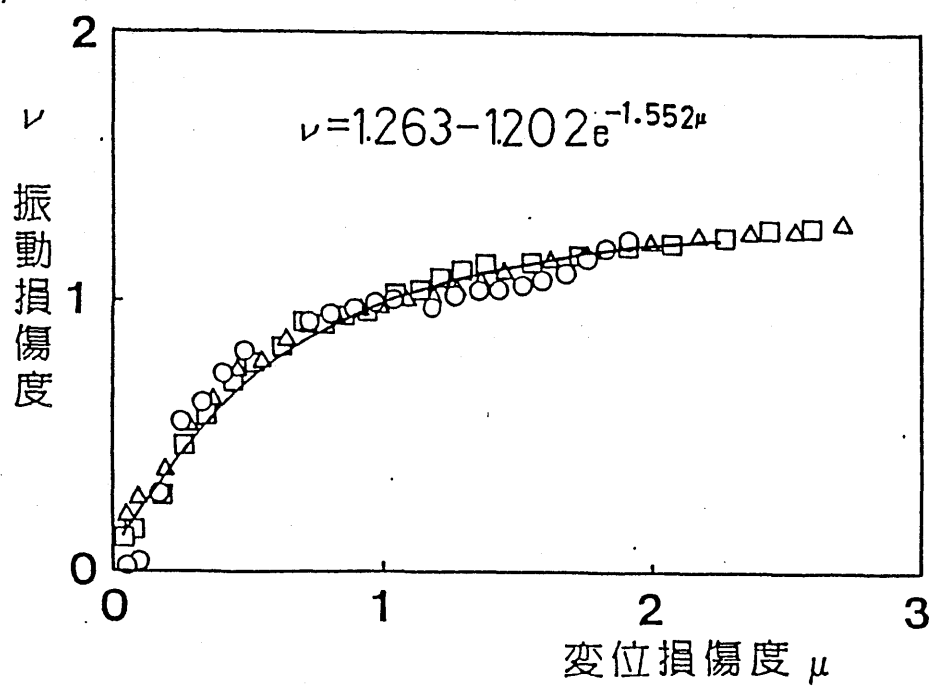


(b) V方向

図2・18 相対低下振動数率の変化



(a) I 方向



(b) V 方向

図 2・19 損傷度評価曲線

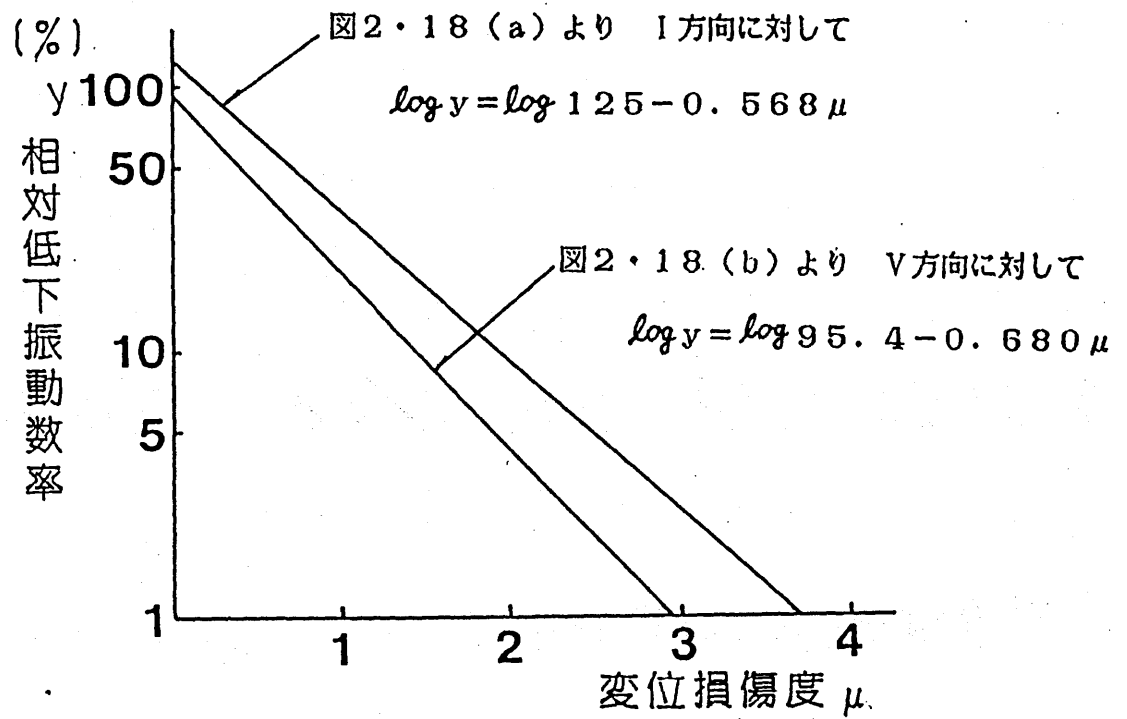


図2・20 損傷度の片対数グラフによる表示