

横拘束の異なる RC 正方形断面柱の二軸曲げ振動特性

中村 一郎*, 平澤 征夫**

Vibrating Property of R/C Square Columns with Different Confining Steel Contents under Biaxial Bending

Ichirou NAKAMURA* and Ikuo HIRASAWA**

(Received May 31, 1995)

This paper presents the results of tests made to study the effects of the contents of steel stirrup ties on the vibrating property of R/C square columns under biaxial bending. Dynamic and static tests were conducted on reinforced concrete square columns with eight D10mm longitudinal steel bars.

Dynamic tests were carried out by shaking table test method and static tests were carried out by actuator test method under repeated loading with the same maximum displacement corresponding to each dynamic test.

From the test results, it is obtained that the effect of the contents of steel stirrup ties on frequencies and damping factor is not significant.

The frequencies and damping factors of square columns subjected to biaxial bending are smaller than that subjected to uniaxial bending.

Keywords : reinforced concrete, column, biaxial bending, frequency, damping factor

1. まえがき

RC 高橋脚のような長柱部材と考えられる構造物が地震などによる損傷を受けた場合、その振動特性の変化を推定することは耐震設計上重要な問題である。さらに地震の性質から二軸曲げのように作用方向の影響をも明らかにしておく必要がある。

本研究では、動的損傷を受ける過程における RC 長柱部材の振動特性すなわち振動数と減衰定数について、その変化を微振動試験により評価を試みた実験的研究である。本論文では、RC 正方形断面柱模型を作成し、動的試験では振動台試験で EL CENTRO (NS) 地震波形を供試体断面に対し、異なる 3 種類の方向で入力させた

後、それぞれの方向に対する微振動試験により振動数と減衰定数を計測してその変化を調べた。一方、静的試験では振動台試験結果で得られた最大変位に相当する変位を静的載荷装置（水平アクチュエーター）により、柱頭部に静的交番の漸増繰返し載荷を行った後、微振動試験を行い、得られた振動特性を動的試験結果と比較したものである。また、振動数解析を行って、この解析法の実測値との適合性について検討した結果について述べた。

2. 実験方法

実験に使用した供試体の形状・寸法を図 1 に示す。断面は 15×15 (cm)、軸方向鉄筋に D10mm ($\sigma_{sy} = 3710 \text{ kgf/cm}^2$) を 8 本用い、高さは 144cm とした。二軸曲げの影響を調べるため図 2 のように地震波形の入力角度を 0° 、 22.5° 、 45° の三種類とし、拘束効果の影響を調

*建設工学専攻大学院生 (Graduate Student, Construction Engineering)

**土木工学科 (Department of Civil Engineering)

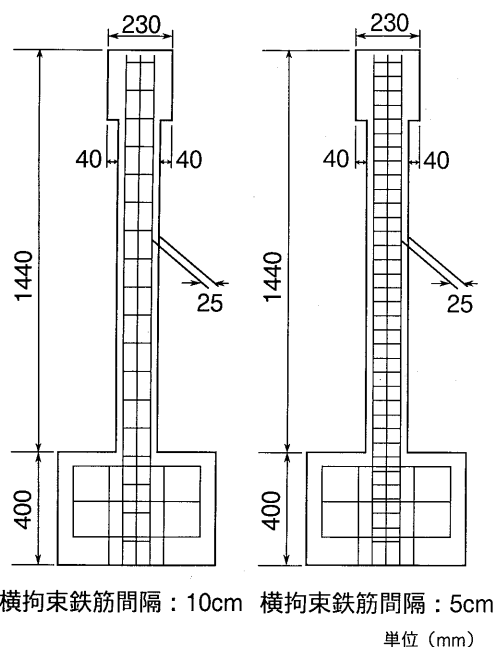


図1 供試体の形状・寸法

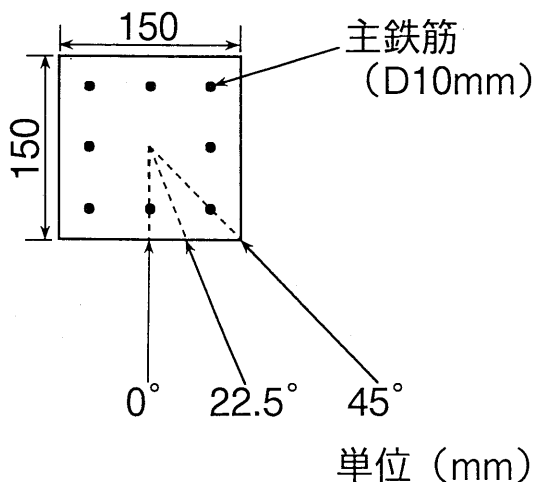


図2 地震波形の入力角度

表1 供試体名

試験方法	横拘束鉄筋間隔	0° 方向	22.5° 方向	45° 方向
振動台試験	10cm	ET94-00-10	ET94-22-10	ET94-45-10
	5cm	ET94-00-05	ET94-22-05	ET94-45-05
静的載荷試験	10cm	ES94-00-10	ES94-22-10	ES94-45-10
	5cm	ES94-00-05	ES94-22-05	ES94-45-05

べるために横拘束鉄筋 (D6mm) を 10cm と 5cm の間隔で二種類用いた。なお、表 1 に実験に使用した合計 12 体の供試体名を示す。試験方法による影響を明らかにするため、動的試験では図 3 に示す振動台試験機を用い、EL CENTRO (NS) 地震波を各加速度段階 (1/3, 2/3, 1, 4/3 倍...) に同一の供試体に対して破壊するまで増加

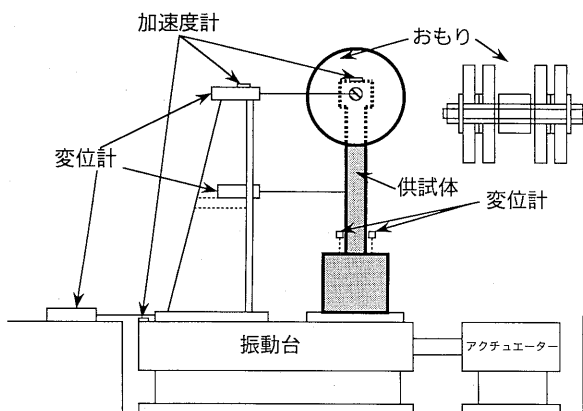


図3 振動台試験機 (Shaking-Table Test)

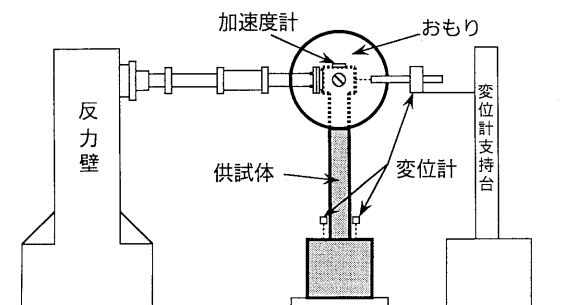


図4 静的載荷装置 (Static Test)

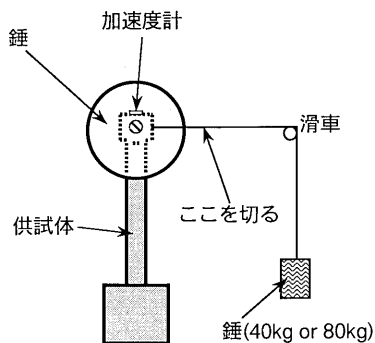


図5 微振動装置

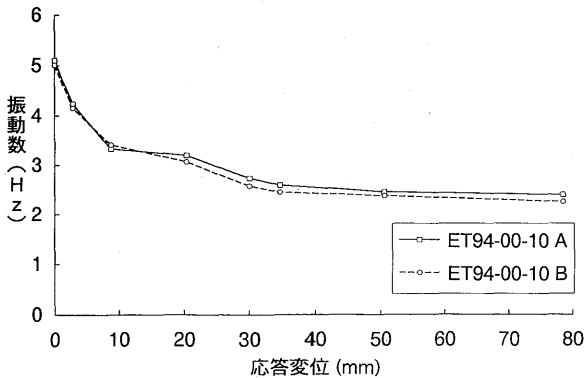


図6 振動数～応答変位関係(微振動試験によるおもりの影響)

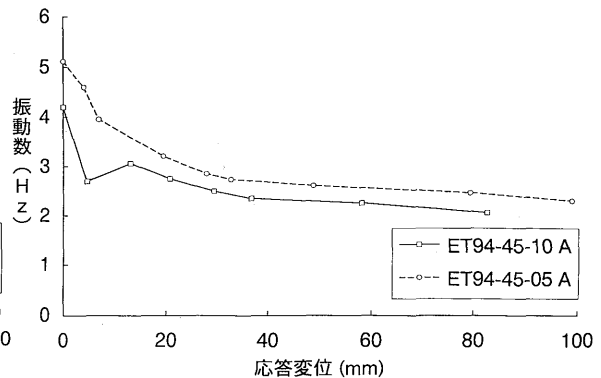


図8 振動数～応答変位関係(横拘束鉄筋間隔の違い)

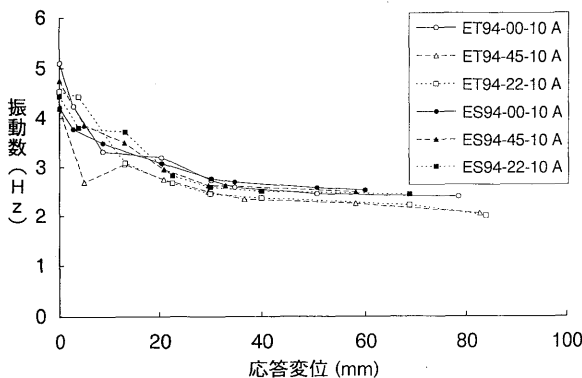


図7(a) 振動数～応答変位関係(横拘束鉄筋 10cm 間隔)

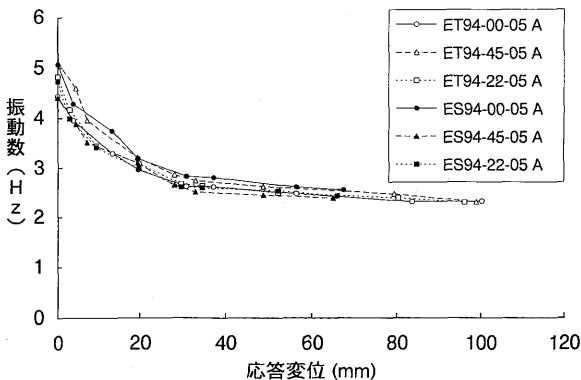


図7(b) 振動数～応答変位関係(横拘束鉄筋 5cm 間隔)

させた。

同様に静的試験では図4に示す静的載荷装置を用いて、動的試験で得られた柱頭部の正負の最大応答変位を1サイクルずつ静的に漸増交番繰り返し載荷を行った。そして、振動特性は図5に示す微振動装置を用いて、動的・静的試験の載荷段階の初めと終わりに約40kg(正確には39.76kg)と80kg(正確には85.8kg)の錘を吊るし切り放すという方法で供試体に微振動を与え、振動数と減衰定数の値を得た。

3. 実験結果と考察

3.1 振動数と応答変位関係

1) 図6～9に示した振動数～応答変位の変化からは、振動数は始め大きく減少し、応答変位が増加するにつれて、緩やかに減少していくことがわかる。

2) また図6に示すように、微振動試験におけるおもりA(40kg)とB(80kg)の違いは、どの供試体においてもあまり差は見られなかった。おもりAの方が約0.1Hzぐらい大きくなった。これは、40kgのおもりによる微振動を受けた方が、80kgのものより損傷が小さく剛性が大きいために振動数が大きくなったと考えられる。

3) 試験方法と載荷方向による振動数の変化の違いを図7に示す。図7の(a)は横拘束鉄筋間隔10cmのものであり、図7の(b)は間隔5cmの結果である。これらより、間隔10cmの場合は、静的試験結果の方が動的試験結果より損傷が少なく振動数が大きくなる傾向が認められた。しかし、間隔5cmの結果からは、動的試験と静的試験による違いは認められなかった。載荷方向別では、横拘束鉄筋10cm間隔の場合は、動的・静的試験ともに0°、45°、22.5°の順に振動数が小さくなっている。一方、5cm間隔の場合は、静的試験が0°、22.5°、45°であるのに

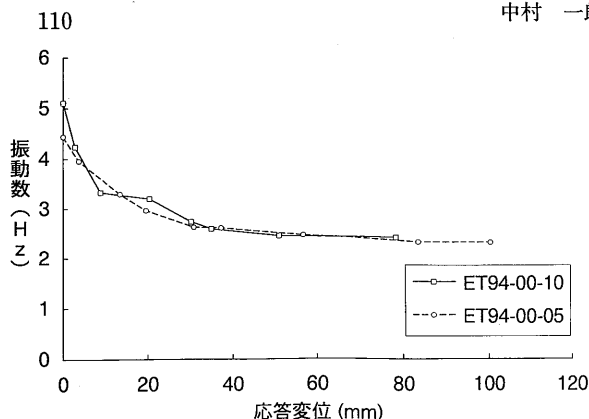


図9 振動数～応答変位関係(横拘束鉄筋間隔の違い)

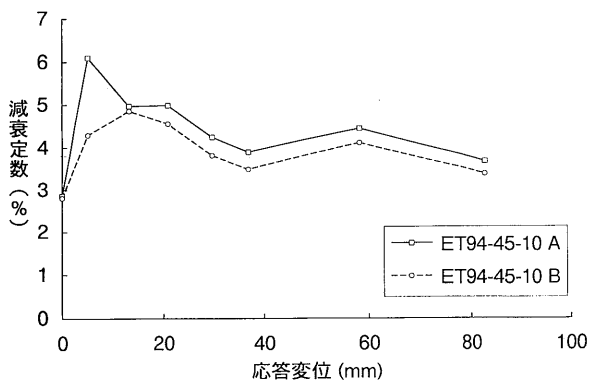


図10 減衰定数～応答変位関係(微振動試験によるおもりの影響)

対し、動的試験では45°が最も大きく0°, 22.5°はほぼ同じであった。この結果からは一般に22.5°方向からの力の入力が最も供試体を損傷させる傾向があることを示すものと考えられる。これは、断面に作用するねじりモーメントの影響であると推定できる。

4) 横拘束鉄筋における5cmと10cm間隔の違いが最も明確に表れた供試体を比較したものを図8に示す。この例は、動的試験結果後の40kgのおもりによる微振動結果を比較したものであるが、このように明らかに5cm間隔の方が振動数は大きく、損傷が少ないことがわかる。この傾向は図9に示す動的試験による0°方向のみ、その差が認められなかった以外は、他のすべての場合について言えた。この結果より、拘束鉄筋の間隔が広いとひび割れ間隔やひび割れ幅も広くなり載荷速度の影響が現れ易くなることを示している。

3.2 減衰定数と応答変位関係

1) 図10～12に示す減衰定数～応答変位関係の変化からは、減衰定数は一度増加をした後に緩やかに減少する傾向がある。この現象は以下のように説明できる。すな

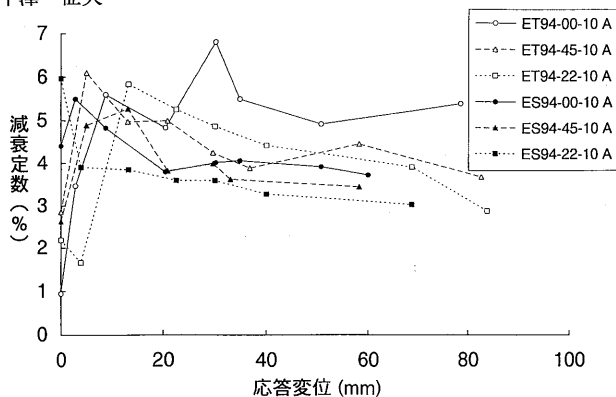


図11(a) 減衰定数～応答変位関係(横拘束鉄筋10cm間隔)

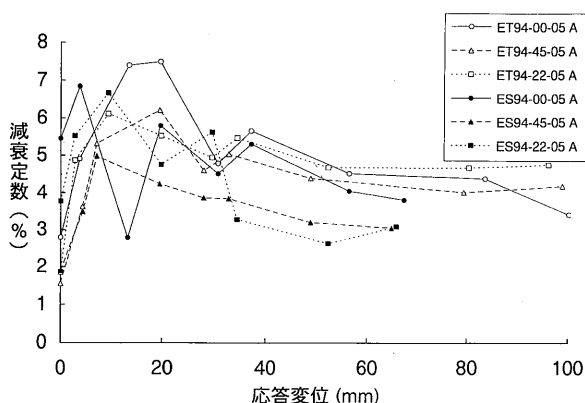


図11(b) 減衰定数～応答変位関係(横拘束鉄筋5cm間隔)

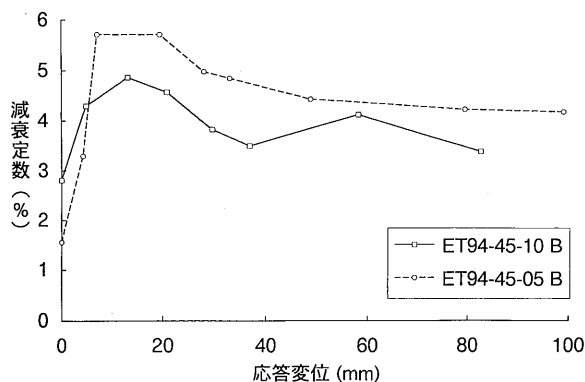


図12 減衰鉄筋～応答変位関係(横拘束鉄筋間隔の違い)

わち柱に荷重が作用し、コンクリートにひび割れが入るまでは、コンクリートの内部摩擦により荷重の増加とともに減衰定数は増加する。そして、ひび割れが入るとひび割れ面の凹凸による摩擦力が増大することによって、

荷重に対する抵抗力が増加するので減衰定数はさらに増すことになる。しかし、鉄筋が降伏したりコンクリート面が分離すると、ひび割れ幅が大きくなり、ひび割れ面がこすり合わさることにより、凹凸面が滑らかになって荷重に対する抵抗力が低下するので、減衰定数は応答変位の増大とともに小さくなるものと考えられる。

2) 微振動試験によるおもり A (40kg) とおもり B (80kg) による違いを図 10 に示す。影響はあまり明確でなく各供試体の値にバラツキが多いことがわかる。

3) 試験方法と載荷方向による違いを図 11 に示す。図 11 の(a)は横拘束鉄筋 10cm 間隔のものであり、図 11 の(b)は間隔 5cm のものである。試験方法では応答変位 0 の時点では、静的試験の方が動的試験より減衰定数は大きな値であるが、応答変位が大きくなるにつれて動的試験の方が減衰定数は大きくなる傾向を示した。載荷方向別では、10cm 間隔においては、動的・静的試験ともに 22.5°方向が最も小さくなり、5cm 間隔においては方向別の傾向が顕著でなかった。

4) 横拘束鉄筋による 5cm と 10cm の間隔の違いは図 12 のように載荷方向により結果が異なったが、全体的に 5cm 間隔の方が大きくなったと思われる。しかし、測定値にバラツキが大きいことがわかる。

4. 振動解析

4.1 解析値（振動数）の計算方法

構造物の振動解析は一質点系モデルを仮定し、次式から求めた。

$$f = \omega / 2\pi$$

$$\omega = (K/M)^{1/2}$$

$$K = 3EI/l^3$$

ここで、 f ：自由振動数

ω ：自由円振動数

K ：柱のばね定数

M ：柱とおもりの質量

EI ：柱の剛性

l ：柱の長さ

ただし、曲げ剛性 EI の計算はつぎの 2 つの場合を考慮した。

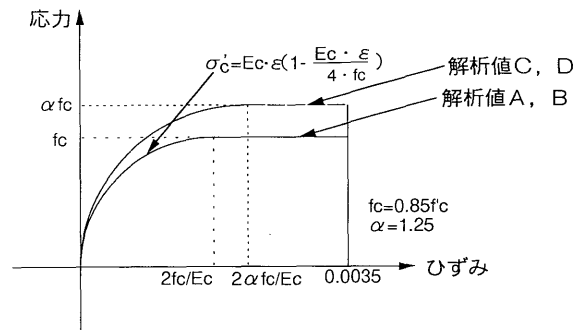
a) 柱基部の剛性を用いた場合。

柱基部における曲げ剛性を $EI = M/\phi$ で求める。

表 2 解析で考慮した要因と解析値の種類

ひずみ速度 曲げ剛性	考慮なし	考慮あり
柱基部剛性	解析値 A	解析値 C
換算剛性	解析値 B	解析値 D

コンクリートの応力～ひずみ曲線



鉄筋の応力～ひずみ曲線

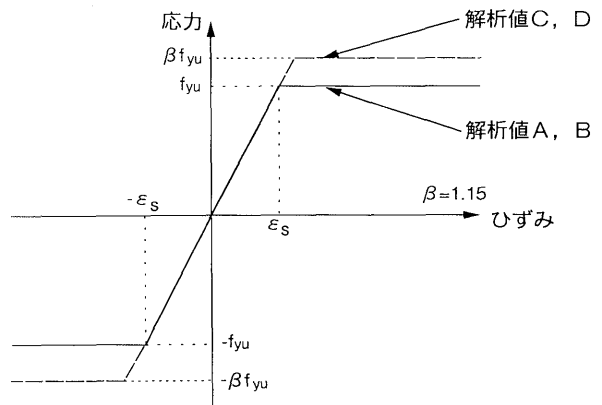


図 13 解析に用いたコンクリートおよび鉄筋の応力～ひずみ曲線

ここに、 M ：柱基部における曲げモーメント

ϕ ：柱基部の曲率

b) 柱を高さ方向に 13 等分し、道路橋示方書・耐震設計編¹⁾より換算断面二次モーメントから柱の換算剛性を計算した場合。

つぎに上記 a), b) の場合に対して、さらにひずみ速度の影響を考慮した解析を行った。

a) 振動台試験（動的試験）に対して、図 13 のように

解析に用いる材料の応力～ひずみ曲線の仮定においてコンクリートのテストピースの圧縮強度にまず 0.85 を乗じた後にひずみ速度の影響として $\alpha=1.25$ 倍, また, 鉄筋に対しては降伏強度を $\beta=1.15$ 倍としたものを用いて計算した場合。

b) 静的載荷試験 (静的試験) に対して, 図 13 の様に解析に用いる材料の応力～ひずみ曲線の仮定において, コンクリートのテストピースの圧縮強度に 0.85 倍, 鉄筋の降伏強度は材料試験で得られた値を用いた場合。

ここでコンクリートのひずみ速度の影響を示す $\alpha=1.25$ の値は小谷氏の文献²⁾より, 通常地震に対するひずみ速度 $\dot{\epsilon}=0.005\sim0.10/\text{sec}$ に相当する値である。また, 鉄筋のひずみ速度による降伏強度の増加割合 $\beta=1.15$ も同様に引用したものである。

なお, 表 2 に考慮した要因と解析値の種類を示す。

4.2 実験値と解析値 (振動数) の比較

振動数～応答変位関係は図 14 に示すように, (a) は実験値が ET94-00-10 であり, (b) は実験値が ES94-00-

10 についての, 実験値と, 表 2 に示した解析値 A～D を比較して示したものである。図より最も実験値に近い解析値は, どの供試体に対してもひずみ速度を考慮した場合の換算剛性 (解析値 D) を用いたものであった。しかし, 応答変位が大きくなると実験値と解析値に大きな差が生じてしまうことがわかる。さらに, この解析法には繰り返し履歴損傷に対する考慮がなされていないにも関わらず, 解析値の振動数が実験値よりも全てにわたって小さな値を示すという大きな問題があることがわかる。これは, 損傷過程における剛性変化を正確に推定できていないためであろうと考えられる。今後は, 剛性の正確な推定法の再検討が必要であり, 特に, 最大荷重を示す時の応答変位 (約 20mm 程度) 以上の応答変位に対する剛性の低下を正確に推定する方法を確定する必要があるであろう。

5. まとめ

本研究の目的は, RC 高橋脚の振動特性の変化を微振動試験による振動数, 減衰定数から評価しようとするものである。本研究では特に微振動試験に用いるおりの違い, 載荷方向, 試験方法, 帯鉄筋の間隔などの要因による影響を明らかにすることを目的とした実験を行った。さらに, ひずみ速度の影響を考慮した解析方法を提案し, 実験結果と比較した。本研究で得られた結論をまとめると以下となる。

1) 履歴損傷の増大に伴う振動特性の変化が, 要因を変化させた実験からその違いが明らかに認められやすいものは振動数の変化であり, 一方, 減衰定数は一般にその値のパラツキが大きいいため要因の影響をつかむことが困難な場合が多い。

2) 微振動試験に用いるおりの違いが振動特性の違いに与える影響はわずかであった。

3) 載荷方向の違いによる影響は, 総じて, 二軸曲げを受ける 22.5° 方向の供試体が振動数, 減衰定数ともに値が小さくなった。これは断面に作用するねじりモーメントの影響であろう考えられる。

4) 動的及び静的試験方法の違いが振動数の大きさに与える影響は, 動的試験よりも静的試験による結果が大きくなった。一方, 減衰定数は静的試験よりも動的試験による値が大きくなった。この現象に対する納得のできる説明は, 現在考察中である。

5) 横拘束鉄筋の間隔による違いは, わずかではあるが振動数の違いとして, 拘束効果の影響が認められた。減衰定数については, はっきりとした傾向は認められなかった。

6) 実験値と解析値の振動数を比較した結果からは, 解析値 D が実験値に最も近似したが, 応答変位が大き

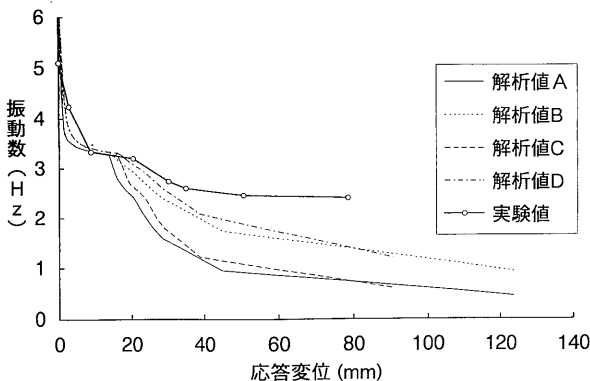


図14(a) 振動数～応答変位関係(実験値 ET94-00-10 と解析値との比較)

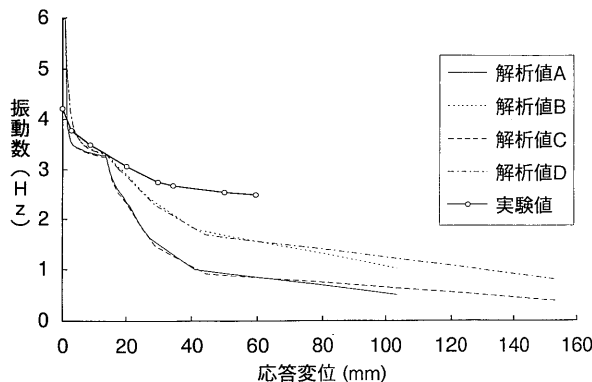


図14(b) 振動数～応答変位関係(実験値 ES94-00-10 と解析値との比較)

なるにしたがって両者は離れる傾向が認められた。そのため、今後は履歴損傷の影響や部材の塑性域における剛性低下のより詳細な解析法を開発し提案することが必要かつ重要であると考ええる。

6. 謝 辞

本研究は、中部大学総合工学研究所平成6年度研究費によって行われたものである。また、実験には中部大学材料・構造実験施設、設備を利用させていただいた。使用に当たり、施設技術員である帆山公郎氏、駒田尚一氏の両氏には大変お世話になった。ここに記して深謝申し上げる。また、実験に多大な協力を頂いた平澤研究室大学院生である加納昌男、藤城正裕の両氏、及び卒業研究

生である有山友滋、鴛谷雅樹、後藤充孝、櫻井崇、高井浩彰、鈴木信彦、松尾路成、奥村篤、加藤宏樹、川前大の諸氏に心より感謝する。

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5月
- 2) 小谷俊介：鉄筋コンクリートにおける載荷速度の影響，コンクリート工学，Vol.21, No. 11, pp. 23～24, 1983年11月
- 3) 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，第372号/V-2, pp75～84, 昭和61年8月