

有限プリズム法を用いた単鉄筋RC梁の位相速度分散曲線とモード分布

A Phase-Velocity Dispersion Curve and Mode Distribution of
a RC Beam with Single Reinforcement Using Finite Prism Method

岸 徳 光 * 松岡健一 ** 能町純雄 ***

By Norimitsu KISHI, Ken-ichi G. MATSUOKA and Sumio G. NOMACHI

In this paper, the characteristics of a phase-velocity dispersion curve and mode distribution of the elastic wave for a RC beam with single reinforcement are discussed. Finite prism method assuming isoparametric quadrature element in the transverse direction and wave propagation in the axial direction is taken here. It is shown that the phase velocity of the elastic wave of RC beam calculated as multi-layered system consisting of concrete and steel elements are almost the same results which is obtained by a row of discrete reinforcement elements in the concrete matrix.

1. まえがき

構造部材の位相速度分散曲線に関しては古くから多くの研究がなされている。例えば棒部材においては、曲げたわみ波動に関するBernoulli-Euler梁理論や、それを修正するRayleighの梁理論、Timoshenko梁理論があり、縦波動に関しては初等理論を修正するLoveの理論、あるいはMindlin-Herrmannの理論がある。これらの近似理論に対して厳密理論としてはPochhammer-Chreeの理論¹⁾が知られている。

また、薄板要素から構成されている任意部材に関しては波長の減少とともに各要素の面内変形作用の他に面外変形作用が位相速度分散曲線の特性やモード分布に大きな影響を与えることが明らかになっており²⁾、二種類の材料から成る積層複合成梁に関しても、波長が桁高と同程度以下になると平面保持を仮定する梁理論の適用が困難であることが実験及び理論解析より明らかになっている³⁾。このように丸棒、梁要素、薄肉断面梁のような単純な構造要素に関しては弾性波動の特性も明らかになっており、衝撃的荷重に対する動的応答解析も比較的容易に行うことができるようになった。しかしながら、梁要素において特に幅と桁高が同程度のような角柱構造の場合やRC、SRC構造のように鉄筋あるいは鉄骨などのインクルージョンがマトリックス内に存在するような構造物の場合などにおいては、波長の減少とともに三次元的な効果が位相速度あるいはモード分布に現れてくるものと考えられるため、実験あるいはより詳細な解析によってその弾性波特性を明らかにし慣用な解析理論の衝撃応答問題への適用性あるいは工学的に有効な解析方法の確立について検

* 工博 室蘭工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒050 室蘭市水元町27番1号)

** 工博 室蘭工業大学教授 工学部土木工学科 (〒050 室蘭市水元町27番1号)

*** 工博 日本大学教授 生産工学部土木工学科 (〒275 習志野市泉町1丁目2番1号)

討をおこなうことが必要である。

衝突衝撃荷重による構造物の動的応答性状は一般に破壊現象を含む複雑な弾塑性挙動を示すものである。特にRC, SRC構造の場合は載荷初期の時点からコンクリートの物性が非線形領域に入ること、クラックや鉄筋あるいは鉄骨とコンクリートとの付着問題が発生する等、鋼構造物と比較してより一層複雑な挙動を示すものと考えられる。このような構造物の衝撃応答解析は有限要素法あるいは有限差分法に基づいた汎用解析コードを用いて行なわなければならないものと考えられるが、経済的にも経験的にもそれほど手軽に利用できるものではないのが現状である。一方弾性的な衝撃応答解析は、構造物の概略的な動的挙動の把握や汎用コードの予備解析として利用可能であり、また破壊の程度が小さい場合には実験結果と併用することによって実務的な問題にも利用可能であるものと考えられる。

本論文ではRC構造部材の弾性衝撃応答解析を効率よく行なうために、本論文で用いている解析法の妥当性や部材の効率的なモデル化等に関する基礎資料を得ることを目的として、単鉄筋RC梁の位相速度分散曲線や各モード分布を用いることによって、鉄筋部のモデルを種々変化させた場合や引張り側のコンクリートの弾性係数を低下させた場合について検討を行なった。解析手法には断面全体の変形状態や局所的な変形挙動が解析可能である有限プリズム要素法を採用している。

波動伝播問題に関する有限プリズム要素法に関しては、大島等⁴⁾が独自に三次元弾性論から得られる微分方程式にガラーキン法を適用して定式化を行ない一方に繊維強化された複合材の縦波動伝播速度に関する研究に応用している。解析は補強繊維を慣性力及び軸方向抵抗力とTimoshenko梁抵抗力を有する1部材として扱いそれらが母材マトリックス中に規則的に配置されている場合について行っており、断面方向に定和分変換を施して、剛性マトリックスの縮小化をはかることによって効率的に数値計算を行なっている。

本研究では弾性衝撃応答解析を行なうことを前提とし、複合成構造部材や任意形状の部材断面を対象としているため、一方向への進行波と波動進行直角方向にアイソパラメトリック四辺形要素を仮定して、有限要素法的な考え方に基づいて定式化し数値解析を行なっている。

2. 解析理論

本論文では上記のように一方向に進行波を仮定する有限プリズム要素を用いている。以下に定式化の概要を簡単に示す。

図-1に示すような節点1, 2, 3, 4を有する有限プリズム要素において、長軸方向をz軸とし、この軸と直角な断面にx-y軸をとる。x-y-z座標系に対応する変位をu, v, wとし、z軸方向への進行波動を仮定する。さらに要素断面内に局所座標系として ξ - η 座標を設定して、式(1)のような形状関数マトリックス[N]を仮定し、アイソパラメトリック要素を用いることとすると要素内任意点の座標(x, y), 変位(u, v, w)は式(2), (3)のように示される。

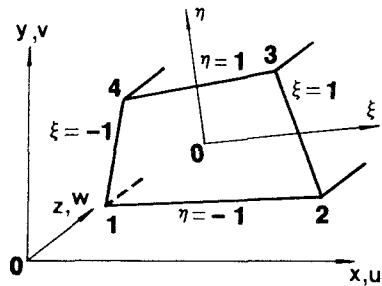


図-1 任意四辺形プリズム要素

$$[N] = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} (1-\xi)(1-\eta) & (1+\xi)(1-\eta) & (1+\xi)(1+\eta) & (1-\xi)(1+\eta) \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [N] & & & \\ & [N] & & \\ & & [N] & \\ & & & [N] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{x_1\} \\ \{x_2\} \\ \{x_3\} \\ \{x_4\} \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [N] & & & \\ & [N] & & \\ & & [N] & \\ & & & [N] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_1\} \\ \{v_1\} \\ \{w_1\} \\ \{u_2\} \\ \{v_2\} \\ \{w_2\} \\ \{u_3\} \\ \{v_3\} \\ \{w_3\} \\ \{u_4\} \\ \{v_4\} \\ \{w_4\} \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$\{x_i\}$, $\{y_i\}$ は各節点のx座標,y座標からなるベクトルであり $\{u_i\}$, $\{v_i\}$, $\{w_i\}$ も同様にそれぞれ各節点のx方向,y方向,z方向の変位からなるベクトルである。

ここで、波長を λ , 伝播速度を c としてz軸方向への進行波を仮定すると各変位成分は

$$u = \bar{u} \sin \frac{2\pi}{\lambda} (z - ct) \quad , \quad v = \bar{v} \sin \frac{2\pi}{\lambda} (z - ct) \quad , \quad w = \bar{w} \sin \frac{2\pi}{\lambda} (z - ct) \quad \dots\dots\dots (4)$$

となり、歪,応力に関しても同様の進行波動の式を求めることができる。上式(1)～(4)を用い、三次元弾性論に従って整理すると、歪と変位の振幅に関する関係式は、 $[B]$ マトリックスを導入し振幅として上付き“-”を用いることとすると

$$\{\bar{\varepsilon}\} = [B] \{\bar{d}\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで

$$\{\bar{\varepsilon}\} = [\bar{\varepsilon}_x \quad \bar{\varepsilon}_y \quad \bar{\varepsilon}_z \quad \bar{\gamma}_{xy} \quad \bar{\gamma}_{yz} \quad \bar{\gamma}_{zx}]^T \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\{\bar{d}\} = [[\bar{u}_i] \quad [\bar{v}_i] \quad [\bar{w}_i]]^T \quad \dots\dots\dots (7)$$

一方、応力と歪の振幅に関する関係式は応力-歪マトリックスを $[D]$ とおくと

$$\{\bar{\sigma}\} = [D] \{\bar{\varepsilon}\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

但し、

$$\{\bar{\sigma}\} = [\bar{\sigma}_x \quad \bar{\sigma}_y \quad \bar{\sigma}_z \quad \bar{\tau}_{xy} \quad \bar{\tau}_{yz} \quad \bar{\tau}_{zx}]^T \quad \dots\dots\dots (9)$$

である。

要素のつりあい式は慣性力を考慮し仮想仕事の原理より求めることができる。いま $\{f\}$ を節点力ベクトルの振幅、 $[K]$, $[M]$ をそれぞれ要素の剛性マトリックス,質量マトリックスとすると次のような1要素に関する剛性方程式が得られる。

$$\{\bar{f}\} = [K] \{\bar{d}\} - \left(\frac{2\pi}{\lambda} c\right)^2 [M] \{\bar{d}\} \quad \dots\dots\dots (10)$$

構造全体の剛性方程式は上式(10)を構造体を構成している各ブリズム要素に適用し変位の適合条件と力のつり合いのもとにマトリックス式を整理することによって求まる。位相速度はこれらのマトリックス式において節点力ベクトルを零と置き、次式(11)のような固有値方程式を解くことによって求めることができる。

$$\det | [K_{ST}] - \left(\frac{2\pi}{\lambda} c\right)^2 [M_{ST}] | = 0 \quad \dots\dots\dots (11)$$

但し、 $[M_{ST}]$, $[K_{ST}]$ はそれぞれ構造全体の剛性マトリックス, 質量マトリックスを示している。

本論文では基礎となる材質のせん断波速度に対する比速度の形で位相速度を整理している。

3. 数値計算精度の検討

本数値計算手法は各変位の変位関数を波動進行方向には連続関数, 波動進行直角方向には線形変化とし、エネルギー法を用いて定式化を行なっているため、基本的には近似的な解析手法であり、設定された要素の分割数に対して解析可能な限界波長が存在するものと考えられる。ここでは本解析手法の精度検討の1つとして要素分割と限界波長との関係や他の理論による解析結果との比較検討を行なった。

3.1 要素分割と限界波長の関係

本解析手法は大島等の手法と異なり剛性マトリックスと質量マトリックスが分離されているため数値計算上、各マトリックスが極端に性質の悪い状態にならないかぎり位相速度、モード分布を離散的に求めることができる。しかしながら、波動進行直角方向に変位の線形変化を仮定していることなどにより、本手法によ

る解析にも限界があるものと考えられる。事実、試算の結果ある波長以下になると与えられた要素分割に対して波動モードが設定されたモードとは明らかに異なった乱れた状態となり、また位相速度も理論値よりも小さなものになることが明らかになっている。ここではこのように波動モードが乱れ、位相速度も急激に減少するような状態になった場合を解析不可能な状態と考え、種々要素分割を変化させた場合の位相速度分散曲線、波動モードを求め本解析法の適用範囲に関する検討を行なった。解析はポアソン効果を無視した矩形

断面梁を用い、曲げたわみ波動に限定して行なった。すなわち、図-2に示すように梁の構造、変形の対称性を考慮して梁の四半分について幅方向に1分割、桁高方向に均等分割して波動モードの乱れ、位相速度の急激に減少する時の波長をマークする形で整理した。検討結果を図-3に示す。図中、横軸 β は梁の桁高 H と1要素の高さ h との比をとり、縦軸 α は波長 λ と梁の桁高 H との比をとっている。図より、 $\beta=60$ までの範囲では解析できる波長範囲が $\alpha \geq 0.12$ であることがわかる。この値はほぼ波長が桁高の1/8程度であることを示している。

以上より、本論文では図-3の精度を基本として解析のための要素の大きさや波長の限界値を決定している。

3.2 他解析理論による解析結果との比較

3・1では梁部材を用いて分割した要素と解析可能な限界波長の関係について検討を行なった。ここでは、本解析手法に基づいて作成した解析プログラムの妥当性を検討するために、大島等が田中等⁵⁾、Fraser⁶⁾、Nigro等⁷⁾の計算結果と比較検討するために用いたポアソン比0.3の正方形断面部材を用い解析を行なった。要素分割は縦横同数となるように、大島等と同様に48×48分割、24×24分割、8×8分割の3種類とし、縦波動と第一スクリ

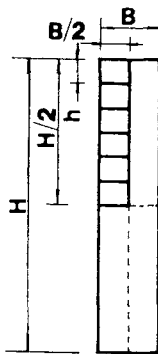


図-2

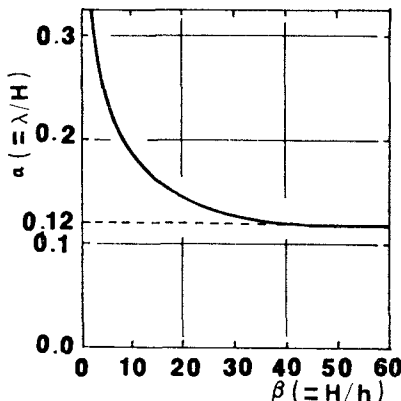


図-3 波長と分割数の関係

表-1 位相速度の分散特性の比較、縦波動 ($\nu=0.3$)

r/b	Fraser	Nigro	Tanaka	Oshima			author		
			second	48div.	24div.	8div.	48div.	24div.	8div.
0.1	1.6120	1.6120	—	1.6112	1.6120	1.6150	1.6120	1.6120	1.6120
0.5	1.5996	1.5996	1.5997	1.6003	1.6010	1.6044	1.5996	1.5996	1.5993
1.2	1.5150	—	1.5149	1.5155	1.5163	1.5208	1.5149	1.5147	1.5122
1.6	1.4048	—	—	1.4049	1.4055	—	1.4046	1.4041	1.3989
2.0	1.2743	1.274	1.2743	1.2738	1.2740	1.2823	1.2741	1.2734	1.2661
2.6	1.1285	—	1.1285	1.1275	1.1274	1.1360	1.1283	1.1275	1.1196
3.2	—	—	1.0469	1.0457	1.0457	1.0551	1.0466	1.0459	1.0384
3.8	—	—	1.0022	1.0011	1.0014	1.0124	1.0019	1.0013	0.9945
5.0	0.962	0.962	0.9619	0.9613	0.9623	0.9776	0.9617	0.9612	0.9563
7.0	0.942	0.942	0.9418	0.9419	0.9448	—	0.9416	0.9416	0.9394
10.0	0.934	0.936	0.9345	0.9362	0.9423	—	0.9345	0.9350	0.8494
14.0	0.931	0.939	0.9316	0.9366	0.9467	—	0.9318	0.9330	0.6942

表-2 位相速度の分散特性の比較、第一スクリー波動 ($\nu=0.3$)

r/b	Fraser	Nigro	Tanaka	Oshima			author		
			third	48div.	24div.	8div.	48div.	24div.	8div.
0.1	—	—	22.2909	22.225	22.271	—	22.1975	22.1768	21.9484
0.5	—	—	4.4057	4.457	4.4043	4.5988	4.3947	4.3914	4.3558
1.2	1.8074	—	—	1.8119	1.8104	1.8425	1.8070	1.8057	1.7917
1.6	1.3926	—	1.3929	1.3931	1.3944	1.4088	1.3923	1.3912	1.3792
2.0	1.1793	1.1793	1.1794	1.1795	1.1802	1.1846	1.1790	1.1780	1.1672
2.6	1.0258	—	1.0262	1.0258	1.0257	1.0215	1.0255	1.0246	1.0149
3.2	0.9594	—	0.9602	0.9593	0.9586	0.9505	0.9592	0.9584	0.9495
3.8	0.9292	—	0.9303	0.9290	0.9278	0.9187	0.9290	0.9283	0.9199
5.0	0.908	0.9090	0.9097	0.9076	0.9056	0.8996	0.9080	0.9074	0.8978
7.0	0.903	0.9058	0.9055	0.9019	0.8981	0.9045	0.9028	0.9022	0.8766
10.0	0.903	0.9121	0.9080	0.9010	0.8949	0.9246	0.9033	0.9016	0.8109
14.0	—	0.9234	0.9110	0.9000	0.8943	—	0.9034	0.8979	0.6921

ュー波動の2つの波動パターンについて比較を行なった。その結果を表-1,2に示す。表中、位相速度はせん断波速度との比速度で示しており、 γ は $2\pi/\lambda$, b は断面の幅である。大島等の解析結果は波長によって分割数に対する収束の状況が異なっているようであるが、本解析結果は縦波動、第一スクリー波動とも分割数の増大とともに小さい位相速度からFraser, Nigro, Tanaka等の解に漸近しているようである。特に、Fraserの解と比較すると 48×48 分割ではほぼ両者が一致することがわかり本解析理論のもとに作成した数値解析プログラムの妥当性を確認することができた。

4. 単鉄筋RC梁の位相速度分散特性

4.1 単鉄筋RC梁の位相速度分散特性への鉄筋部のモデル化の影響

鉄筋部のモデルを種々変化させた場合の単鉄筋RC梁の位相速度分散特性や各モード分布の三次元的挙動を検討するために、桁高50cm, 幅20cm, 鉄筋比1%の単鉄筋梁を取り上げ解析を行なった。解析は図-4に示すように無筋とした場合(CASE1), 曲げ剛性が等しくなるように鉄筋部の重心位置をそれぞれ等しくして、幅方向に平均化した場合(CASE2), 側面のかぶりを考慮して中央部に集中化させた場合(CASE3), より実際に近い形とするように二つの塊に分離させた場合(CASE4)の4ケースについて行なった。物性値は表-3に示すとおりである。位相速度分散曲線は鉄筋のせん断波速度(C_s)に対する比速度 $V(=C/C_s)$ で整理し、モード分布は4次モードまでを対象として検討を行なっている。尚、解析モデルにおいて最も大きい要素は桁高方向に全桁高の1/20の大きさとしてメッシュ分割を施しているので、ここでは H を梁の桁高として $\alpha = \lambda/H = 0.2$ まで解析を行なっている。

図-5にはRC梁(CASE2)と無筋コンクリート梁(CASE1)の位相速度分散曲線を示している。図中、最低次は曲げ波動モードであり、第2次の曲線は縦波動モードである。波長が無限長の場合、CASE2は鉄筋とコンクリートの

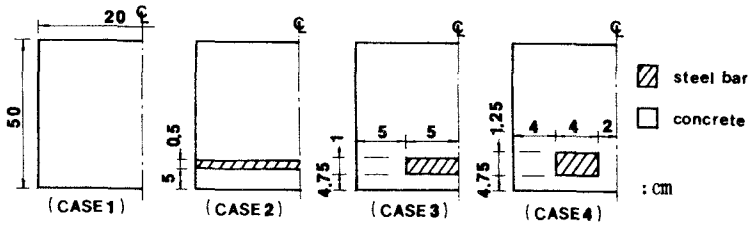


図-4 解析モデル

の換算断面の速度で伝播しているようであるが、鉄筋量が1%とコンクリートの容積に比較して非常に少ないために無筋コンクリートとほぼ同様の分散性状を示しているようである。

表-3 解析に用いた物性値一覧

$E_c/E_s = 1/7$, $\rho_c/\rho_s = 2.4/7.85$, $\nu_c = 1/6$, $\nu_s = 0.3$
suffix c: concrete, s: steel

RC梁としてCASE2の場合のみを示しているが、他のCASE3,4に関する解析結果もCASE2の場合とまったく同様の解となることを確認しており、煩雑さを避けるためここでは除いている。

図-6にはCASE1と3の場合における代表的な波長に対する軸方向変位モード分布を示している。(a)がCASE1の場合であり、(b)がCASE3の場合の結果である。図より、CASE1の無筋コンクリート梁の場合は波長の大小にかかわらず桁高方向中心に対して対称あるいは逆対称の分布をしているが、CASE3の鉄筋コンクリート梁の場合は波長の減少とともに対称性、逆対称性がくずれてくるようである。波長の長い $\alpha = 1000$ における第1次、第2次モードを調べると両ケースとも変位モードが線形変化しており平面保持の仮定が成立していることがわかる。このように、

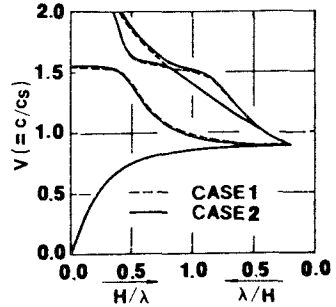
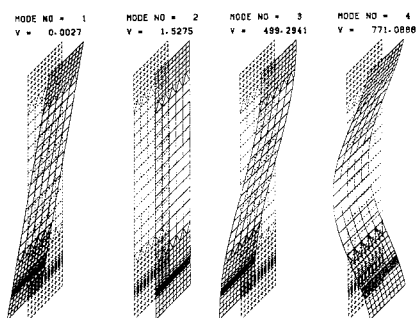
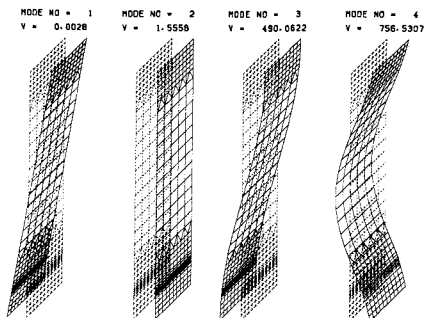


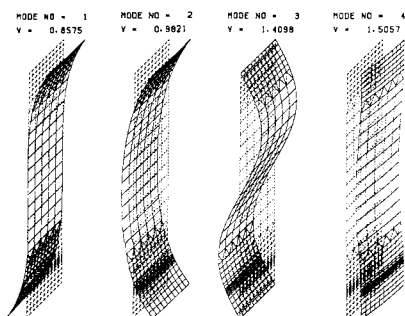
図-5. CASE1とCASE2の場合の位相速度分散曲線



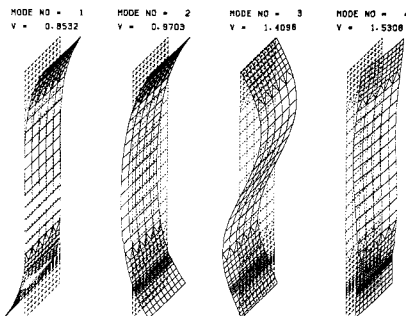
($\alpha=1000.0$)



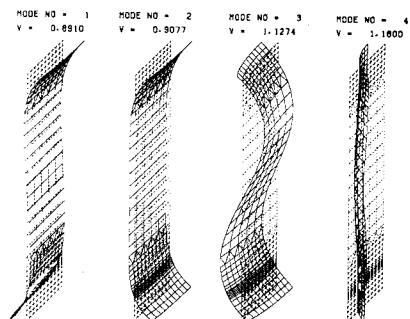
($\alpha=1000.0$)



($\alpha=1.00$)

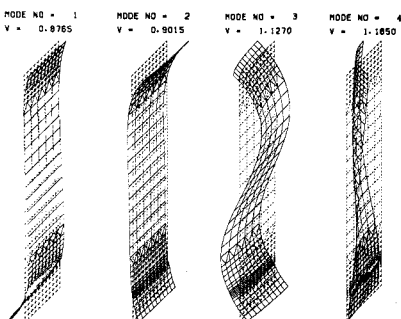


($\alpha=1.00$)



($\alpha=0.60$)

(a) CASE1



($\alpha=0.60$)

(b) CASE3

図-6 CASE1とCASE3の場合における軸方向変位モード分布 ($\alpha = \lambda/H$)

波長の長い場合にはRC梁の場合も換算剛性を有する単一な梁と考えて処理することが可能であることを示している。 $\alpha=1.0$ の場合は第1次、第2次モードとも平面保持仮定がくずれ、第1次モードに関して注目すると両者とも上下縁に波動が集中しているようであり、第2次モードに関して梁理論の仮定とは異なり、中央部の変位が上下縁部のそれと符号反対となっていることがわかる。さらに波長が短くなって $\alpha=0.6$ となると、第1次モードは波動の上下縁への集中とともに中立軸の上下部それぞれにおいて変位の逆転が起っている。すなわち、通常の梁理論における圧縮あるいは引張り領域において引張り及び圧縮応力のいずれもが発生することを意味している。鉄筋部の影響は波長の減少とともに徐々にあらわれてくるようであり、特に $\alpha=0.6$ においては全モードに関して鉄筋要素が周辺コンクリート要素の変形をおさえるような働きをしているようである。他、CASE2,4に関して、鉄筋部周辺でコンクリート要素が局所的な変形モードを示す以外は、CASE3の場合と同様なモード分布を示すことを確認している。

図-7には鉄筋部要素の配筋効果を調べるために $\alpha=0.5$ における各ケースの第1次、第2次モードの軸方向変位分布を示した。図よりモデル化の違いにより鉄筋部周辺のモード分布が異なり、鉄筋要素の変形モードが周辺コンクリート要素より小さく示され、鉄筋による三次元効果が現れていることがわかる。

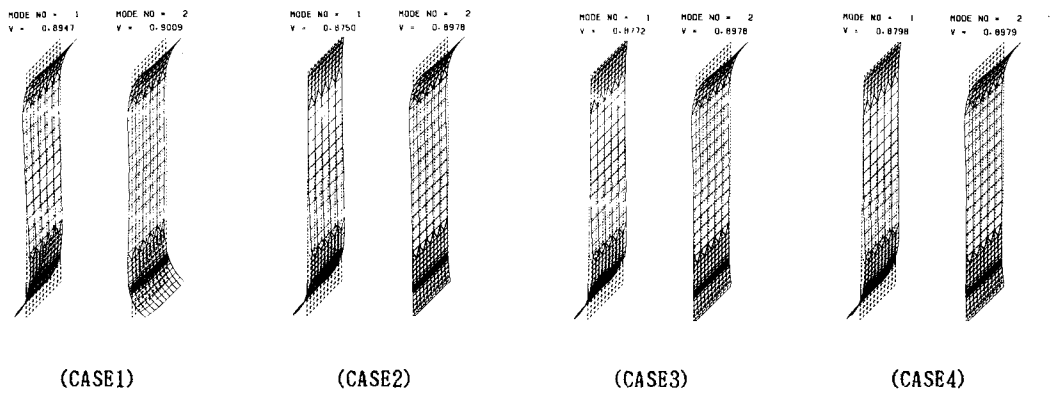


図-7 $\alpha=0.5$ における各ケースの軸方向変位モード分布

4.2 引張り部コンクリートの弾性係数を低下させた場合

4.1においては無筋コンクリート梁とRC梁の状態Ⅰすなわち全断面有効の場合について種々解析を行なった。ここでは通常のRC梁の設計状態を想定して解析を試みることにする。RC梁の慣用設計法では状態Ⅱすなわち引張り部は鉄筋のみが抵抗すると仮定して行なわれているが、引張り部コンクリートの挙動を精度よく評価して波動伝播に関する検討を行なうことはひびわれ部の処理を含め弾塑性的な解析が必要であるため非常に困難な問題であるものと考えられる。

本論文では梁全体の概略的な伝播性状を把握することに限定し、引張り部はコンクリートの弾性係数が低下する形で劣化するものと大胆に仮定して検討を行なった。引張り部の劣化の程度に関しては、大沼が引張り部コンクリートの弾性係数 E_{ct} と圧縮部コンクリートの弾性係数 E_{cc} の比を、 $E_{ct}/E_{cc}=1/5$ と仮定する場合が実験

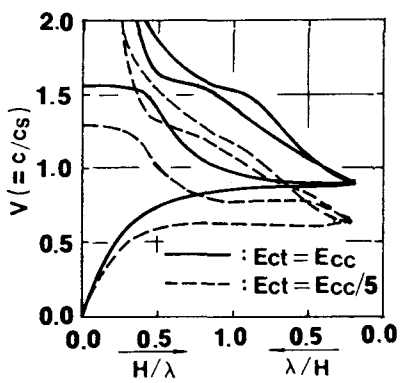


図-8. $E_{ct}=E_{cc}$ と $E_{ct}=E_{cc}/5$ の場合における位相速度分散曲線(CASE3)

結果とよく近似することを報告しているので⁸⁾、ここでもその値を用いて解析を行なうこととした。

図-8にはCASE3を用い $E_{ct}=E_{cc}$ の場合と、 $E_{ct}=E_{cc}/5$ とした場合の位相速度分散曲線を示している。 $E_{ct}=E_{cc}/5$ とした場合は梁の剛性が低下しているため、 $E_{ct}=E_{cc}$ の場合より全体的に小さい分散曲線となっている。また、波長無限小の場合に関しては、本解析法を用いて解析することが不可能であるが、過去の研究より $E_t=E_c$ の場合はコンクリートのみの物性値に対するRayleigh波速度へ、また $E_{ct}=E_{cc}/5$ とした場合は弾性係数を E_{ct} とした場合のRayleigh波速度へ漸近するものと考えられる。

図-9には $E_{ct}=E_{cc}/5$ を仮定する場合の代表的な波長に対する軸方向変位のモード分布を示している。図より、波長の長い $\alpha=1000$ の場合は換算剛性で挙動し中立軸が多少上方に上がっていることがわかる。 $E_{ct}=E_{cc}$ の場合の解析結果(図-6)と比べ、比較的波長の長い状態($\alpha=1.5$)で圧縮部あるいは引張り部コンクリートの領域で軸方向変位モードに関する符号が大きく逆転していることがわかる。さらに $\alpha=1.0$ 以下になると弾性係数の小さい引張り側領域で大きな軸方向変位モードを示している。鉄筋部の波動モードへの影響に関しては4.1と同様、波長の減少とともに徐々に現れてくるようである。ここでは引張り部のコンクリートの劣化の程度を $E_{ct}=E_{cc}/5$ として評価し、CASE3の鉄筋モデルを用いて検討を行なったが、劣化の程度を変えた場合もまったく同様の性状を示し、またその他の解析モデルに関しても4.1と同様の挙動を示すことを数値解析によって確認している。

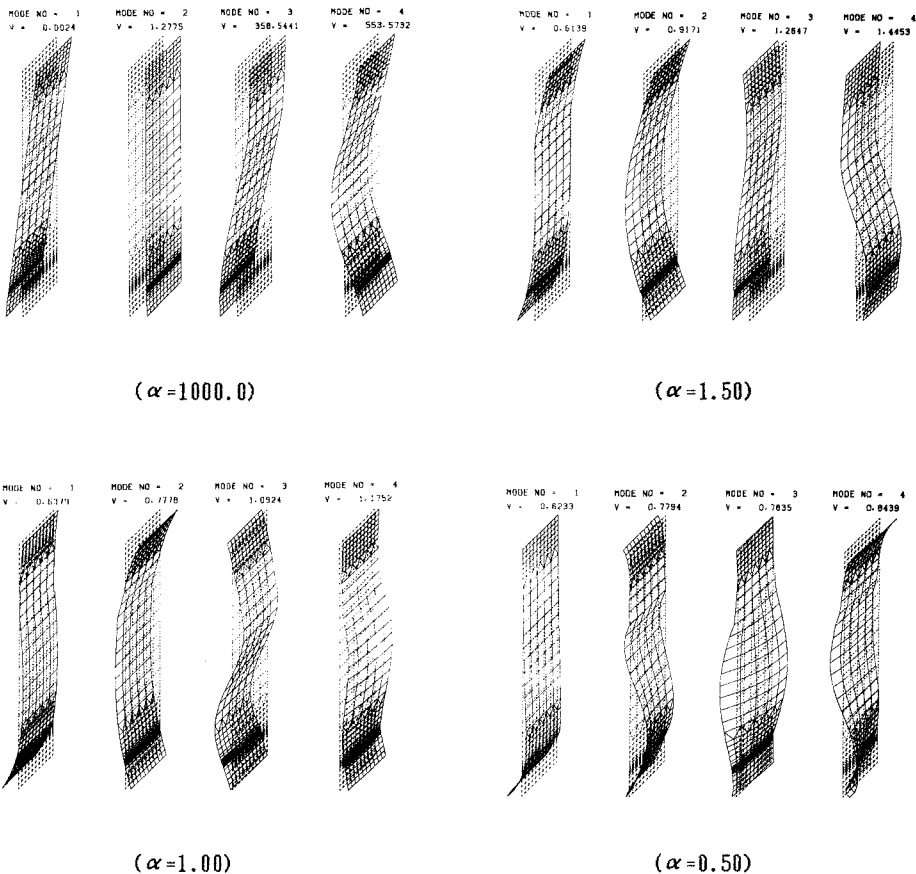


図-9 $E_{ct}=E_{cc}/5$ の場合における軸方向変位モード分布 (CASE3)

5. まとめ

RC構造部材の弾性衝撃応答解析を効率よく行うために、本論文で用いている解析法の弾性衝撃問題への適用性や部材の効率的なモデル化等に関する基礎資料を得ることを目的として、単鉄筋RC梁の位相速度分散曲線や軸方向変位モード分布について、全断面有効（状態Ⅰ）を仮定して鉄筋部のモデルを種々変化させた場合や、静解析における引張り部コンクリート無視仮定（状態Ⅱ）を想定し引張り側コンクリートの弾性係数を低下させた場合について解析を行なった。解析は一方向への進行波動と波動進行直角方向に線形変位を仮定するアイソパラメトリック要素を用いた有限ブリズム法によって行なった。数値解析は、精度検討の結果仮定から生ずる誤差あるいは数値誤差のため全波長に渡って解析を行なうことは困難であったが、本解析の範囲内で得られた結果を要約すると、

- 1) 鉄筋量1%程度の場合、梁断面に対する鉄筋部の重心位置が変化しない範囲ではモデル化による低次の位相速度分散曲線への影響がほとんどないことがわかった。また、モード分布への影響は $\lambda/H > 1.0$ では小さいが、 $\lambda/H < 1.0$ では波長の減少とともに鉄筋要素の変形モードが周辺コンクリート要素よりも小さく示され、局所的にモデルの影響が現れてくるようである。
- 2) 従って、衝撃荷重によるRCの梁あるいは板の概略的な動的挙動を検討する場合には、鉄筋部をCASE2のような層構造に簡略化することが可能であるものと考えられる。
- 3) 状態Ⅱの場合を想定して、引張り側コンクリートの弾性係数が $E_{ct}=E_{cc}/5$ 程度低下する形で劣化するものと仮定する場合、曲げ波動に関しては波長が桁高より大きい状態から圧縮部あるいは引張り部の領域において軸方向変位(歪)モードの逆転が生じ、 $E_{ct}=E_{cc}$ の場合と多少異なったモード分布を示している。

以上、有限ブリズム要素法を用いた単鉄筋RC梁の位相速度分散曲線とモード分布解析より、今後本手法を用いることによって波動進行直角方向断面が任意形状を有する場合のRC構造等複合成部材の弾性衝撃応答解析をより合理的に行なうことが可能になったものと考えられる。

参考文献

- 1) Abramson, H.N., Plass, H.J. and Ripperger, E.A.: Stress Wave Propagation in Rods and Beams, Advanced in Appl.Mechs., pp.111-193, 1958
- 2) 能町純雄, 角田与史雄, 岸徳光: 薄肉H型断面ばりの弾性波の位相速度について, 土木学会論文報告集, 第244号, pp.37-46, 1975.12
- 3) 岸徳光, 松岡健一, 能町純雄: 単純支持された多層複合成梁の横衝撃について, 材料, 第34巻, 第387号, pp.1375-1381, 1985.12
- 4) 大島俊之, 能町純雄: 有限ブリズム法による繊維強化複合材の縦波動伝播速度の研究, 土木学会論文報告集, 第297号, pp.47-57, 1980.5
- 5) 田中吉之助, 岩橋嘉生: 長方形断面棒を伝わる弾性波の分散関係, 日本機械学会論文集(第一部), 第42巻, 364号, pp.3771-3779, 1976.12
- 6) Fraser, W.B.: Stress Wave Propagation in Rectangular Bars, Int. J. Solids & Struct., Vol.5, 1969
- 7) Nigro, N.J.: Steady-State Wave Propagation in Infinite Bars of Noncircular Cross Section, J. Acous. Soc. Amer., Vol.40, No.6, 1966
- 8) 大沼博志: コンクリート構造物の高温クリープと衝撃応答特性に関する研究, 北海道大学学位論文 昭和59年9月

(1988年10月12日受付)