

論文

[1113] 超音波スペクトロスコピー法による無筋および鉄筋コンクリート部材中のひびわれ欠陥の定量的評価について

正会員 ○坂田康德 (九州東海大学工学部)

正会員 大津政康 (熊本大学工学部)

1. まえがき

コンクリート構造物は、本来、耐久性、耐火性、耐震性に優れており、任意形状の構造物を容易に構築できることから市民の間に広く親しまれ、これまでに数多くの構造物が造られてきた。ところが近年、これらの構造物の中にはアルカリ骨材反応や塩害その他の原因に基づくひびわれや空隙などの各種欠陥によると考えられるコンクリート構造物の早期劣化が大きな社会問題となっている。コンクリート構造物の安全性確保と有効利用の見地から、これらの構造物中の各種欠陥を、効果的に評価するための非破壊評価法の開発が急務である。コンクリート中のひびわれや空隙などの各種欠陥を評価する方法として従来より各種の方法が実施、検討されているが、いずれも未だ開発途上にあり、新たな開発の余地も残されている。なかでも超音波を利用した方法は安全性や経済性の点で優れており、かなり以前より研究されているが、その大部分は材料中を伝播する超音波の伝播速度を利用した音速法が大部分であった。ところが最近、超音波の周波数特性に着目したコンクリート非破壊評価法に関する研究が行なわれるようになり、それは超音波スペクトロスコピーと呼ばれている。この周波数特性を得るには一般的に衝撃波入力に対する受信波のフーリエ変換による方法が行なわれているが、発信器のスイープモード入力に対する受信波の応答スペクトルを利用する方法も考えられる。本方法についての理論的背景や計測法、ならびに応答スペクトルとフーリエスペクトルの等価性については既報¹⁾を参照されたい。ここでは、無筋および鉄筋コンクリート部材に生じた曲げひびわれ深さを評価する方法を検討するために、実験並びに境界要素法 (BEM) による2次元共振解析を行なうと共に、共振法による理論的考察を行なって、実験結果との対応を検討した。

2. 実験および解析の概要

図-1 (a), (b)に無筋および鉄筋コンクリート

部材のひびわれ深さ評価の実験で使用した人工ひび割れをもつ部材を示している。無筋コンクリート部材は $10 \times 7.5 \times 40$ cm、鉄筋コンクリート部材は $10 \times 7.5 \times 39$ cmの角柱供試体である。人工ひびわれを持つ無筋コンクリート部材は、図-1 (a)のように、供試体中央に幅約1.2mmのカッターにて、深さ $h=0 \sim 8$ cmまで0.5cmずつ変化する部材軸に垂直な人工ひびわれを導入し、各ひびわれ深さに対する応答スペクトルを測定した。また曲げひびわれは、図-2に示すように、外部より部材軸線方向に予めプレストレスを導入した後、単純梁の状態での1点荷重曲げ試験を行なって曲げひびわれを導入し、曲げひびわれ導入前後の応答スペクトルを測定した。この際の曲げひび

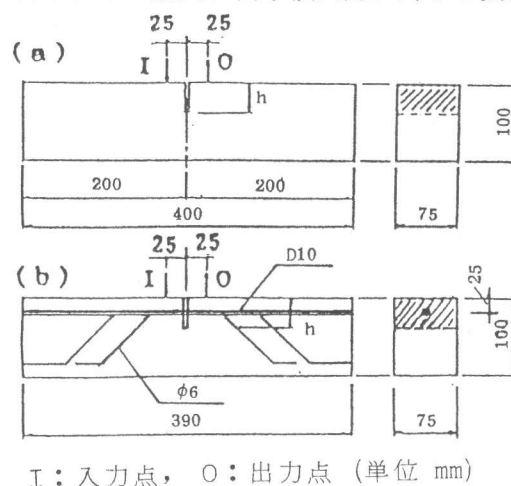


図-1 無筋および鉄筋コンクリート供試体の形状寸法および人工ひびわれ配置状況

われ深さは、ひびわれ後の供試体を約0.392MPaの圧力容器中で着色液（ビンゾール3倍液）に約24時間浸した後、これを取り出してひびわれ面から割り、そのひびわれ面の着色部分より、その深さを測定した。その時のひびわれ深さは、大部分のひびわれが断面中央付近で浅く、供試体側面で深くなっていることや、供試体中を伝播する超音波が最も短い経路を最も早く伝播すること等を考慮して、破断面中央部の部材幅の4等分点での3つの測定値の内、最も小さいものとした。一方鉄筋コンクリート部材では、図-1(b)に示すように主鉄筋D10 mm異形鉄筋(SD30)1本に腹鉄筋 $\phi 6$ mm普通丸鋼(SR24)を溶接し、これをかぶり厚約2cmでコンクリート中に埋め込んだ。この際の人工ひびわれ導入は、予め所定の深さになるように厚さ約3mmのスティロール樹脂板を鉄筋と同時にコンクリート中に埋め込んで、脱型後にこれを掻き出して導入した。人工ひびわれを持つ鉄筋コンクリート供試体は、ひびわれ深さ $h=0\sim 8$ cmまで1cm毎に変化させて各2本ずつ作成した。曲げひびわれは、鉄筋を配置している側のコンクリート表面をカッターにて約2cm程切り欠いた後、単純梁の状態で一荷重曲げ試験を行なって導入し、曲げひびわれ導入前後の応答スペクトルを測定した。また、曲げひびわれ深さは無筋コンクリート部材と同様に測定した。使用したコンクリートは粗骨材最大寸法20mm,スランプ12cm,水セメント比 $W/C=60\%$,材令28日圧縮強度 $f'_c=36.6$ MPaのものである。

応答スペクトルの測定は発信電圧と受信波増幅率を一定にし、発信側には音速測定で用いる超音波センサ(共振周波数50kHz)を、また受信側には圧電加速度計(共振周波数20kHz)を使用した。発信および受信センサは部材軸方向の中心線上でひびわれを中心に左右2.5cmの位置に供試体に取り付けた。その際発信側はグリスを介して圧着し、また受信側は瞬間接着剤で固定してコンクリート表面に取り付けた。測定周波数領域は $0\sim 10$ kHz間とし、また測定では発信側センサを各3回ずつ付け替えて測定した。図-3に計測システムの感度特性を示す。図より判るように計測システム自身の感度特性は10kHz近傍を除いてはほとんど滑らかであるため、得られた応答スペクトル振幅の補正は行っていない。故に以下の応答スペクトル振幅は全て相対的なものである。

BEMによる解析は、人工ひびわれを持つ無筋コンクリート部材をモデル化し、実験で使用したコンクリートの特性値を参考にして弾性係数 $E=31.4$ GPa,密度 $\rho=2.43$ ton/ m^3 ,ポアソン比 $\nu=0.22$ としてひびわれ深さ $h=0\sim 8$ cmまで1cm毎に解析した。図-4はBEM解析における拘束条件および節点配置状況を示している。

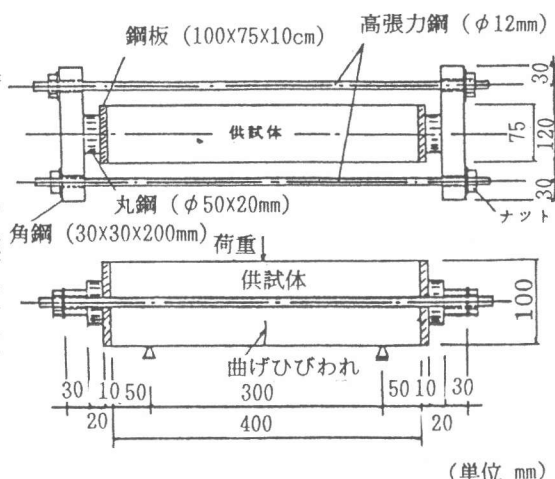


図-2 無筋コンクリート部材の曲げひびわれ導入のための装置

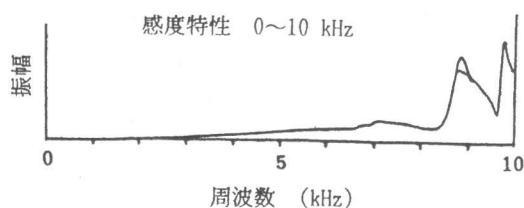


図-3 計測システムの感度特性

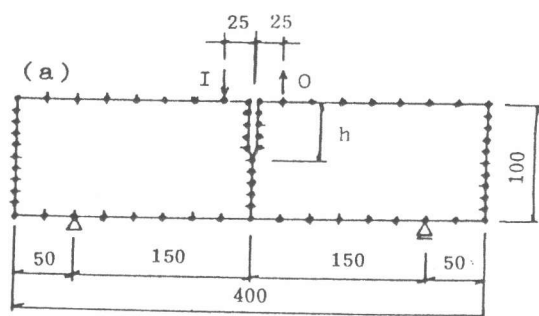


図-4 境界要素法によるひびわれを有する無筋コンクリート部材の2次元解析モデル

3. 結果および考察

図-5および図-6は、鉄筋および無筋コンクリート部材の中央部に人工ひびわれを導入した場合のひびわれ深さ h の増加に伴う応答スペクトルの変化状況を示している。図中のピークA, B, Cはここで着目したピークであり、各ピーク周波数は鉄筋および無筋コンクリート両部材共に h の増加に伴って漸次低下するが、その低下状況が各ピークともそれぞれ若干ずつ異なっているのが判る。ピークAは h が小さい内から h の増加に伴って急激に低下し、またピークBは h が小さい間は緩やかに低下するが h が大きくなると急激に低周波数側へ移動するのが判る。さらにピークCは h が部材高さ d の約 $1/2$ 以下では振幅が大きく、またそのピーク周波数は漸次低下するが、 h が約 $d/2$ より大きくなると急激にその振幅が小さくなり、ピークの識別が困難となっている。このような傾向は無筋および鉄筋コンクリート部材共にほとんど同様であり、これより、無筋および鉄筋コンクリートの両部材共に、このような低周波数領域における応答スペクトルに、ひびわれ深さの変化に敏感なピークが存在することが判る。ただし、鉄筋コンクリート部材におけるピークAのひびわれ深さの増加に伴うピーク周波数の変化率が、無筋コンクリート部材におけるピークAに比べて若干小さくなっているのが判る。これは、鉄筋の存在に基づく部材の曲げ剛性の相違によるものと考えられる。

図-7は、BEMによる2次元共振解析における0~10kHz間の周波数応答解析結果を示している。 h

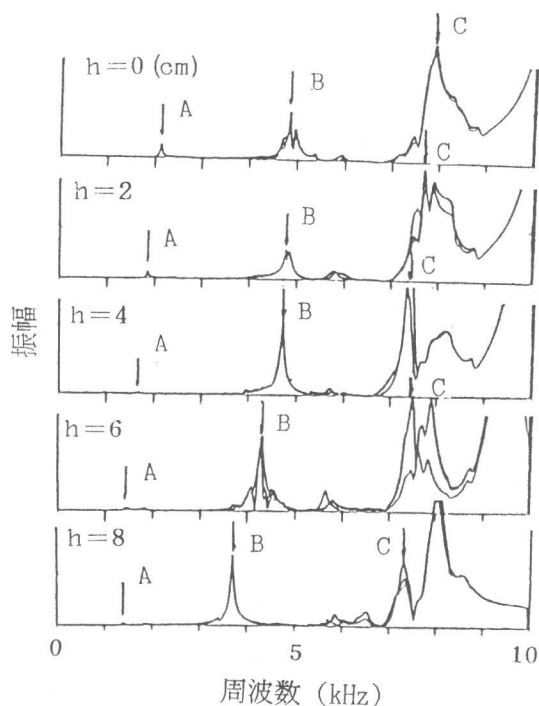


図-5 鉄筋コンクリート部材の人工ひびわれ深さ h の増加に伴う応答スペクトルの変化状況

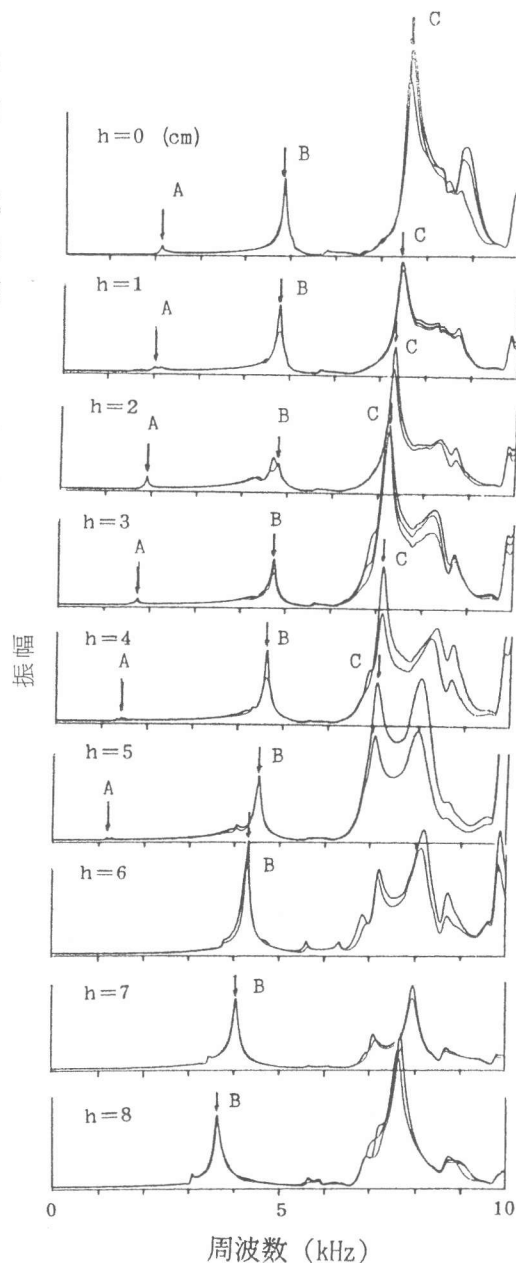


図-6 無筋コンクリート部材の人工ひびわれ深さ h の増加に伴う応答スペクトルの変化状況

=0において約1.2kHzと2.1kHz付近に振幅の大きなピーク P_1, P_2 があり、また約4.5, 6.5, 8.4kHz 付近にもピーク P_3, P_4, P_5 が現われているのが判る。そして、各ピークはひびわれ深さ h の増加に伴ってそれぞれ特有の挙動を呈するが、全体的には h の増加に伴って漸次低周波数側へ移動している様子が判る。特に P_2 は h の増加に伴って漸次大きな割合で低周波数側へ移動し、また、 P_3 は $h=0\sim4$ cmまではピーク周波数の変化が少ないが、 $h=5$ cm付近でピークが2つのピーク P_3 と P'_3 に別れ、その一方の P_3 が急激に低周波数側へ移動する様子が判る。この P_2 と P_3 は応答スペクトル上のピーク A, B と周波数帯域が近く、またその挙動も類似していることから、これらのピークはピーク A, B に相当するものと考えられる。さらに、図-8 は BEM 解析における $h=0$ cm の場合の共振モードを示している。この図より、ピーク P_2 は半波長の曲げモードの振動であり、また P_3 は同じく半波長のせん断モードの振動を呈していることが判る。

図-9 は、無筋および鉄筋コンクリート部材における、ひびわれ深さ $h=0$ の場合のピーク A, B の周波数を f_{A0}, f_{B0} 、任意のひびわれ深さ h に対するピーク周波数を f_{Ah}, f_{Bh} とし、そのピーク周波数比 $n_A = f_{Ah}/f_{A0}$, $n_B = f_{Bh}/f_{B0}$ と、部材高さ H に対するひびわれ深さ h の比 h/H との関係求めたものである。実線は無筋コンクリートの場合の、そして、点線は鉄筋コンクリートの場合の人工ひびわれに基づく n_A, n_B の変化状況を示している。無筋コンクリート部材においては n_A, n_B 共にほぼ放物線状に変化するが、鉄筋コンクリート部材では n_A の方がひびわれ深さが大きくなると下に凸の曲線となり、かぶり深さを越える付近で無筋コンクリートの場合と若干異なってくるのが判る。そして、無筋および鉄筋コンクリート共に、 n_A の方が h/H の小さい内から急激に低下するのに比べて、 n_B は h/H の小さい間はその変化率が小さく、 h/H が大きくなるに従って大きくなるのが判る。これより、ひびわれが浅い場合には n_A 曲線を、またひびわれが深い場合は n_B 曲線を利用すれば、ひびわれ深さを比較的精度よく評価できるものと考えられる。図中の■印と●印および■印と●印は、無筋および鉄筋コンクリート部材における曲げひびわれ導入前後のピーク周波数比 n_A, n_B とひびわれ深さの実測値との関係を示している。ひびわれ後のピーク A は、本計測システムの感度特性が低周波数側で低くて検出困難なため、測

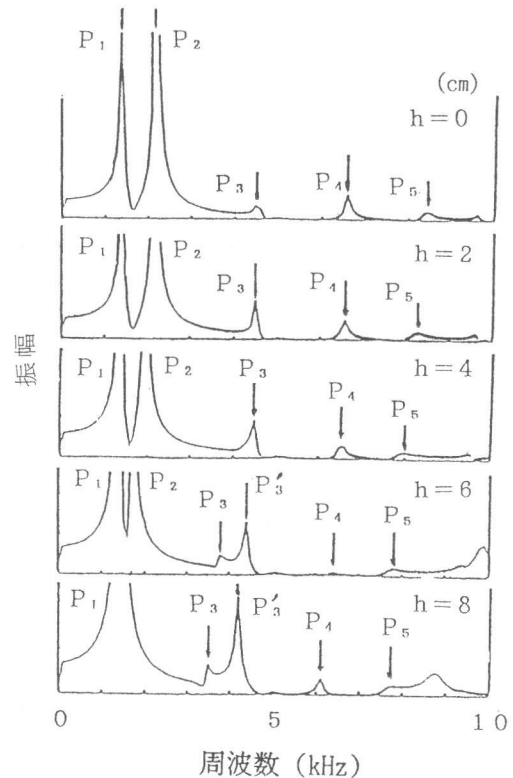


図-7 BEM解析におけるひびわれ深さ h の増加に伴う周波数応答の変化状況

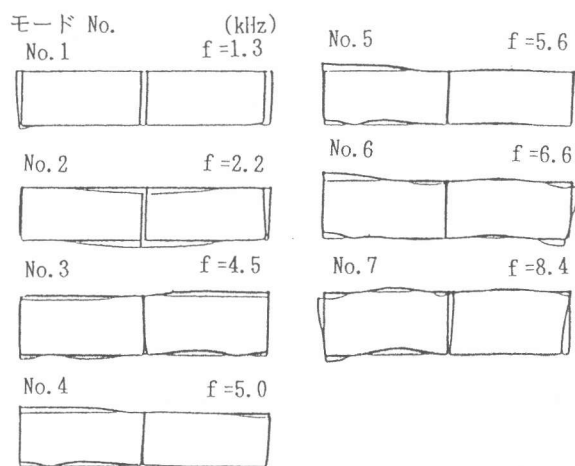


図-8 BEM解析におけるひびわれ深さ $h=0$ の場合の共振モード

点数が少なくなっている。曲線より左側にあるものはひびわれ深さを過大に評価し、逆に右側にあるものは過小評価していることになる。若干のバラツキはあるものの、測定値はほぼ曲線の周囲にあることが判る。そして、全体的には若干浅く評価する傾向が見られる。これは着色液がひびわれ先端部の遷移領域まで浸透しているか、またはひびわれ先端部の幅の狭い部分では材料的に連続している部分が混在しているため、あるいはひびわれ面の摩擦等が働いて、このような部分では超音波が一部通過するためと考えられる。

図-10は、無筋および鉄筋コンクリート部材の人工ひびわれ導入後における応答スペクトル上のピークAとBの周波数比 $n_{AB}=f_{Ah}/f_{Bh}$ と h/H の関係を示している。 n_{AB} 曲線を用いれば、ひびわれ前の応答スペクトルを用いることなく、ひびわれ後の応答スペクトルのみでひびわれ深さを評価できるので、ひびわれ評価がより簡単になるものと考えられる。ただし、ひびわれ深さが大きい場合にはピークAが感知しにくいので、現時点におけるこの曲線の利用は、ひびわれ深さが比較的浅い場合に限られるが、低周波数領域における応答感度を改良すれば、より深いひびわれも評価できるものと考えられる。図中の●印と◆印は無筋および鉄筋コンクリート部材における n_{AB} と曲げひびわれ深さの実測値との関係を示している。実測値はいずれもほぼ曲線の周囲にあり、無筋コンクリート、鉄筋コンクリート共に、 n_{AB} 曲線を用いて部材に生じた曲げひびわれ深さをおよそ評価できることが判る。

ところで、応答スペクトル上のピークAは、共振法タワミ振動法における一次共振周波数 f_2 と考えられる。ひびわれを有する部材がタワミ振動を起こす場合の共振周波数の変化について、これをJIS A 1127-1976の長方形断面部材のタワミ振動の式(1)²⁾を用いて考察すると次の様になる。

$$E_D = C_2 W f_2^2 \quad (1)$$

ただし、 $C = 966 \times 10^{-6} \times L^3 T / (b t^3)$

ここで、 E_D は動弾性係数(kgf/cm²)、 W は部材重量(kgf)、 f_2 はタワミ振動の一次共振周波数(Hz)、 L は部材長(cm)、 b は部材幅(cm)、 t は振動方向の部材寸法(cm)であり、ひびわれが無い場合 $t=H$ である。また T は部材の回転半径 k と部材長 L および

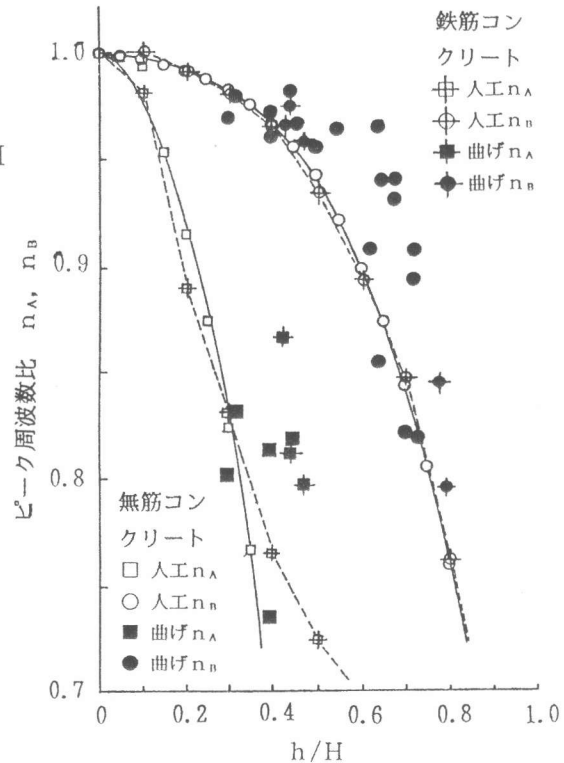


図-9 ピーク周波数比 n_A, n_B と人工ひびわれおよび曲げひびわれ(h/H)との関係

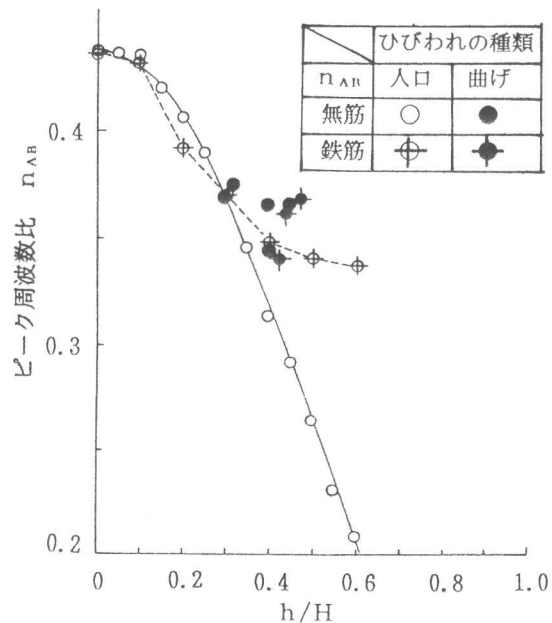


図-10 ピーク周波数比 n_{AB} と人工ひびわれおよび曲げひびわれ(h/H)との関係

動ポアソン比 μ_D によって定まる修正係数である。
以下の定式化のため、 $\mu_D=1/6$ としてここでは T と k/L の関係を次のような近似式で表すものとする。

$$T=1.0+40(k/L)^{1.7} \quad (2)$$

図心軸に関する部材の断面 2 次モーメントを I 、部材断面積を A とすれば、 $k=\sqrt{I/A}$ である。そしてひび割れ前では $I=bH^3/12$ 、 $A=bH$ 、ゆえに $k=H/\sqrt{12}$ となる。一方、部材に深さ h のひびわれが生じた場合、部材の残りの断面積は bt' (ただし、 $t'=H-h$) となる。そこで、これを断面積 bt' を持つ重量 W の一様な部材と仮定すれば、ひびわれ後の残りの断面中心に対する回転半径は $k'=t'/\sqrt{12}=(H-h)/\sqrt{12}$ となり、ひびわれ後の補正係数 T' は次のように表される。

$$T'=1.0+40\{(H-h)/(L\sqrt{12})\}^{1.7} \quad (3)$$

弾性係数やポアソン比および部材の重量や外形寸法はひびわれの前後で変わらないので、ひびわれ発生前後の共振周波数を f_{20} 、 f_{2h} 、係数 C_2 を C_{20} 、 C_{2h} とすれば、周波数比 N は

$$N=f_{2h}/f_{20}=\sqrt{C_{20}/C_{2h}}=\sqrt{(T/T')\cdot(t'/t)^3}=\sqrt{(T/T')(1-h/H)^3} \quad (4)$$

となる。図-11 は h の増加に伴う式(4) による周波数比 N と無筋コンクリート部材における人工ひびわれ による実験値 n_A 、および BEM 解析におけるピーク P_2 の周波数比 n_{P2} を併記したものである。これより、理論値、実験値共に h/H の増加に伴ってピーク周波数比または共振周波数比はいずれも低下することが判る。そして、実験値は式(4) と BEM 解析値の間にあり、式(4) より大きく BEM 解析値より小さくなっている。ここでは実験値と解析値の厳密な対応はできなかったが、ひびわれ深さの増加に伴うピーク周波数の変化状況が実験的および理論的にほぼ明らかになったと考えられる。

4. 結論

以上のことをまとめると次のような結論が得られる。1) 本方法を用いて無筋および鉄筋コンクリート部材に生じたひびわれ深さを評価することが可能である。2) 境界要素法による部材軸に直角方向のひびわれを持つ部材の二次元共振解析の結果は実験値と傾向的によく一致する。また、共振法タワミ振動法の理論を用いても、ひびわれ深さの変化に対する共振周波数の変化状況は実験値と傾向的に一致することがわかった。

〔参考文献〕 1) 坂田康徳、大津政康：超音波スペクトロスコピーに基づくコンクリートのひびわれ評価法に関する基礎研究、土木学会論文集, No. 414/V-12, 1990. 12, pp. 69~76

2) 土木学会編：コンクリート標準示方書(土木学会規準, 昭和61年版)

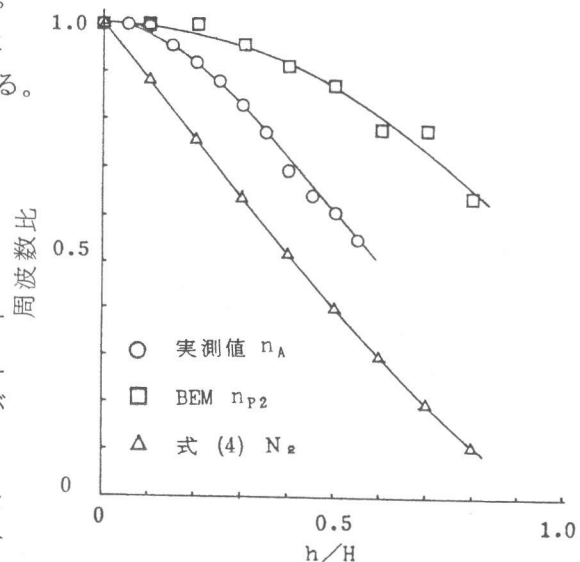


図-11 ひびわれ深さ (h/H) k の増加に伴う実験値 n_A 、BEM 解析値 n_{P2} および式(4)による共振周波数比 N の変化状況