

打撃法による伝播速度、部材長の算出法と コンクリート浮き部分の図化法に関する検討

Prediction method of propagation velocity, member length by blow method and
plotting the distribution of separated concrete

藤本 良雄 *, 荒巻 真二**, 烏野 清 ***, 岳尾 弘洋 ****

Fujimoto Yoshio, Aramaki Shinji, Uno Kiyoshi, Takeo Kouyou

* (株)富士ビー・エス技術部部长 (〒810-0001 福岡県福岡市中央区天神 2 丁目 14 番 2 号)

** 工修 九州共立大学工学部助手 (〒807-0867 福岡県北九州市八幡西区自由ヶ丘 1-8)

*** 工博 九州共立大学工学部教授 (〒807-0867 福岡県北九州市八幡西区自由ヶ丘 1-8)

**** 工博 ショーボンド建設(株)技術本部技術課長 (〒101-8468 東京都千代田区神田町 3 丁目 18 番地)

In this study, blow tests by using of two kinds of hammers were conducted to examine the impact acoustics responses of steel H-beam and prestressed concrete sheet pile. A method is proposed to calculate the propagation velocity, which is one of the most important factors in impact acoustics method, and to predict the member length. It is found that the proposed method can predict the propagation velocity and the member length with good precision. Based on the mode of vibration of the form Fourier spectrum, a method is also suggested to plot the distribution of separated concrete. It is confirmed by an experiment.

Key Words: non-destructive test, propagation velocity, separation, mode of vibration

1. まえがき

従来からコンクリート構造物は鋼構造物と異なり、強度さえ十分であれば半永久的に使用できると考えられていた。しかし、近年コンクリート構造物の表面に大きなひび割れやはく離等が発生している。その原因としては、塩化物を多く含んだ海砂やアルカリ量の多いセメントの使用によって起こる塩害やアルカリ骨材反応といった使用材料に起因するものや、鉄筋のかぶり不足や締め固め不足などの施工不良に起因するもの¹⁾、設計当初に想定した以上の交通量の増加等による載荷荷重の増加²⁾などが考えられる。

現在では、これらの問題に対処するための多くの研究がなされ、それらの成果を踏まえた構造物が建設されている。しかしながら、今まで建設されたコンクリート構造物には対策が実施されていないものが多く、長期使用するためにはその耐久性について定期的に診断を実施していく必要があると考えられる。

この耐久性の診断試験の一つに非破壊試験がある。非破壊試験の最大の特徴は構造物を破壊することなく、同じ構造物を使って何度でも繰り返し試験が実施できるところにある。しかし、非破壊試験の種類は数多く^{1) 3)}、その原理や手法をすべて熟知する事は大変であり、また、計測機器の多くは専門的知識を必要とするため、容易に測定できないことが多い。

本研究は非破壊試験法の中でも比較的簡単な打撃法に着目し、打撃部の材質が異なるスチール製およびプラスチック製の2種類のハンマーを用いて、H形鋼およびPC矢板に対して打撃試験を実施し、打撃法で最も重要なファクターとなる伝播速度を精度良く求める方法および部材長の算出法を検討したものである。また、塩害によるコンクリートかぶり、あるいは補強における鋼板接着の浮き部分の分布を図化する方法として、フーリエスペクトルより求めた振動モードを利用した方法を提案すると共に、実験によるその確認を行った。

2. 伝播速度と部材長の検討

地中の杭や矢板の部材長の推定を打撃試験で行う場合、打撃振動は地盤中に発散、減衰の影響を受けることになる。そこで、打撃試験で部材長を推定する場合における測定方法の精度確認の基礎的研究として、気中での検討を行うこととした。

2.1 試験体および試験方法

(1) 試験体

試験に用いたH形鋼の断面形状寸法は100×100×8×7mmである。試験にH形鋼を用いたのは伝播速度が5120m/sであることから、伝播速度の精度確認に最適と考えたからである。また、反射波による影響を見るため、

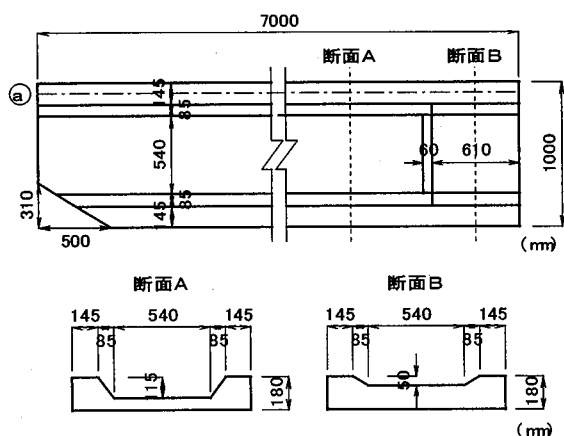


図-1 PC矢板の形状寸法 (7.0m)

長さを3.5mと9.0mの2種類とした。

また、試験に用いたPC矢板は長さ4.0mと7.0mの2種類で、どちらも幅は1.00mである。図-1に7.0mのPC矢板を示す。断面形状は図に示すように断面中央部がくぼんだ凹形で、それぞれ矢板の端部でそのくぼみの深さが変化している。

(2) 試験機器

図-2に打撃用ハンマーを示す。ハンマーの種類により衝撃力の作用時間が異なるため、構造物内の伝播波の特性が違ってくものと予想される⁴⁾。そこで、打撃部分がプラスチック製とスチール製の2種類のハンマーを用いて試験を実施することとした。また、各試験の打撃力の大きさが極端に異なると、非線形性による影響が現れてくることも考えられることから、図に示すようにハンマーにゲージを張り、衝撃力を検出できるようにした。

一般に、構造材料の伝播速度は非常に速いことから、サンプリング間隔 Δt を小さくしなければならないことと、ピックアップの周波数特性の範囲も広いことが測定の条件となる。使用したピックアップは圧電形加速度計(0.2~22kHz, TEAC製)とデジタルレコーダー(最小 $\Delta t=1\mu s$, TEAC製)である。本試験では $\Delta t=10\mu s$ 、記録データ個数 $N=4098$ 個として測定した。

(3) 試験方法

試験方法としては試験体の頭部に加速度計を設置すると共に、もう1個の加速度計の設置位置を変化させ、頭部を打撃用ハンマーで打撃し、その時の加速度を測定した。

コンクリート製品は水セメント比、骨材等によって伝播速度が異なることから⁵⁾、正確な伝播速度を求めることが、打撃試験では重要な条件となる。PC矢板断面の中央部では矢板の厚さが両端で変化しており、その板厚の違いが伝播速度に影響するものと考えられる。そこで、矢板の等断面部分(矢板の両端で厚さ一定の部分：図-1中①線上)に加速度計を設置して実施した。

3.2 伝播速度と部材長の測定結果と考察

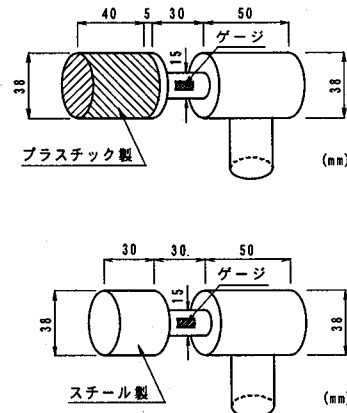


図-2 打撃用ハンマー

(1) H形鋼

図-3に長さ9.0mのH形鋼をスチール製ハンマーで打撃した時の衝撃力、H形頭部と3.0mだけ離れた点の加速度波形の比較および頭部加速度波形とそのフーリエスペクトルを示す。同様に、プラスチック製ハンマーで打撃した時の試験結果を図-4に示す。

図-3, 4からスチール製ハンマーで打撃した場合はプラスチック製ハンマーに比べて、次の特徴がある。

- ①スチール製ハンマーの打撃力作用時間が約0.5msであるのに対し、プラスチック製ハンマーでは約1msとなっており、打撃力作用時間が長い。
- ②スチール製ハンマーの場合の打撃力波形では、主打撃力の直後に逆向きの衝撃力が現われている。
- ③頭部の加速度波形において、スチール製ハンマーで打撃した場合に先端からの反射波が明瞭である。一方、プラスチック製ハンマーでは波形がシャープになっていないため、波形の位相差より部材長を求める場合に誤差が大きくなるものと考えられる。

図-5は鋼の伝播速度5120m/s⁶⁾と試験より算出した伝播速度との比を表したものである。試験からの伝播速度の算出方法は、頭部と加速度計間距離(Lm)だけ離れた点で伝播波の立ち上がり時刻の位相差(初期位相差)より伝播速度を求めた。L=2.0m以上離せばハンマーの種類に関係なく、6~7%程度の誤差で伝播速度が得られることがわかる。この場合、サンプリング間隔 $\Delta t=1\mu s$ とすれば当然、精度は向上するがデータ個数が非常に多くなる。一般に、部材長あるいは損傷箇所を検出することが、打撃法本来の目的であることから、通常、 $\Delta t=10\mu s$ 、データ個数4096個程度の測定方法が打撃法としては妥当と考えられる。

頭部の加速度波形より先端からの反射波を見つけ、その位相差より部材長を式(1)を用いて算出できる。

$$l = \Delta t \times 5120 \text{ m/s} \quad (1)$$

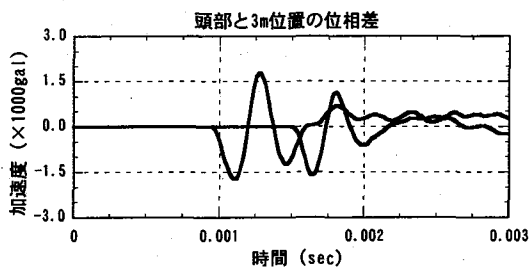
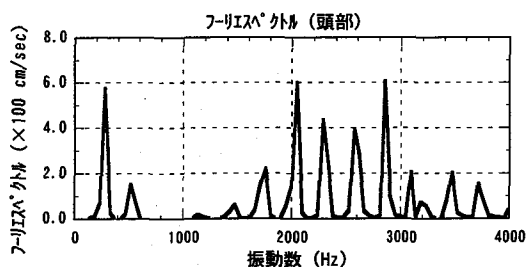
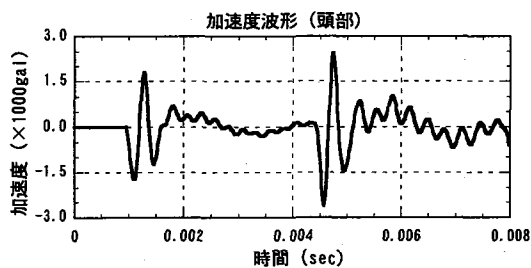
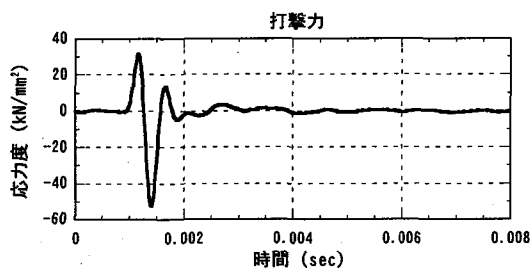


図-3 H形鋼 (9.0m) スチール製ハンマー打撃

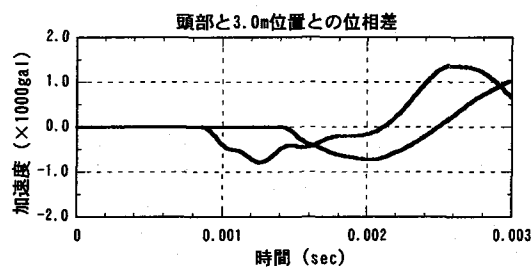
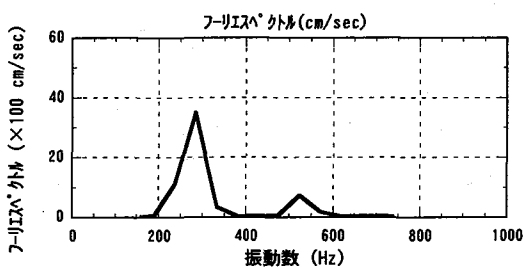
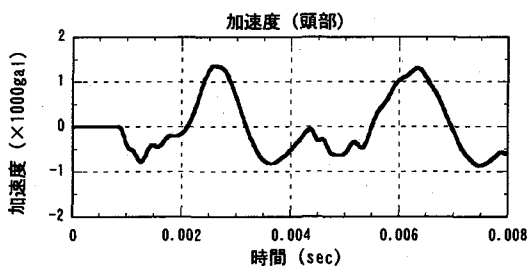
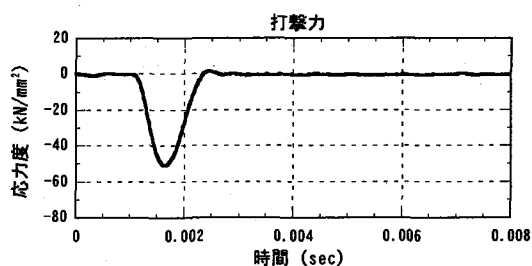


図-4 H形鋼 (9.0m) プラスチック製ハンマー打撃

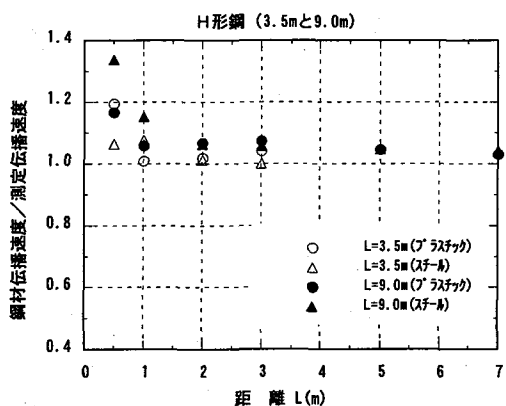


図-5 初期位相差による伝播速度の推定精度

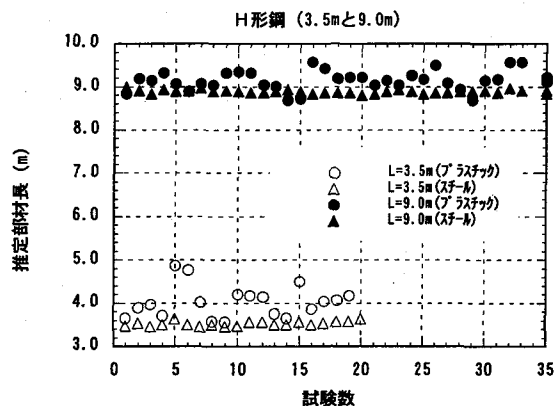


図-6 初期位相差による部材長の推定精度

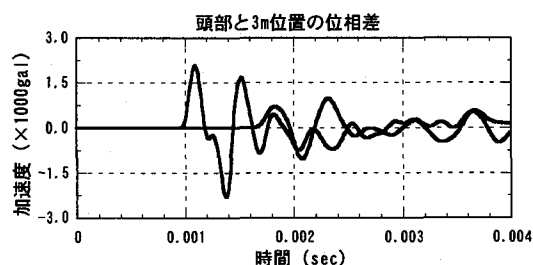
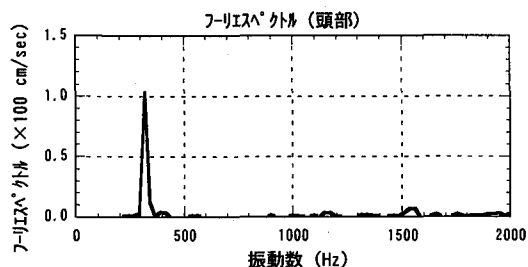
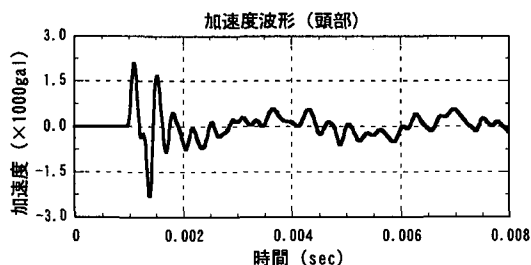


図-7 PC 矢板 (7.0m) スチール製ハンマー打撃

ここで、 ℓ : 推定部材長(m), Δt : 位相差(sec)

図-6 は 3.5m の試験体でそれぞれの打撃用ハンマーで 20 回、9.0m の試験体については 35 回の打撃試験を行い、式(1)より推定した部材長を示したものである。それぞれの推定部材長の平均値はスチール製ハンマーの場合は 3.53m, 8.88m, プラスチック製ハンマーの場合で 4.00m, 9.15m となった。

この方法で、部材長を算出する場合、材端からの反射波形が明瞭であるスチール製ハンマーの方が、変形した反射波形を出すプラスチック製ハンマーより精度良く求められる。ただし、部材長の長い 9.0m の場合にはハンマーの種類による違いは少ないことがわかる。

一方、フーリエスペクトルの卓越振動数から式(2)を用いて部材長を算出できる。

$$\ell = \frac{V}{2f} \quad (2)$$

ここで、 f : 卓越振動数(Hz), V : 伝播速度(m/s)

長さ 9.0m の H 型鋼では、プラスチック製ハンマー打撃において、ただ 1 個の卓越振動数 286Hz が得られた。一方、スチール製ハンマー打撃の場合は最小卓越振動数が 286Hz となっている。この値で部材長を求めると 8.95m となり、9.0m に対して非常に精度良く求められた。

以上のことから、部材長がある程度長ければ、ハンマー

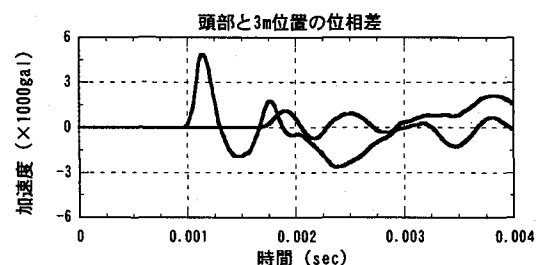
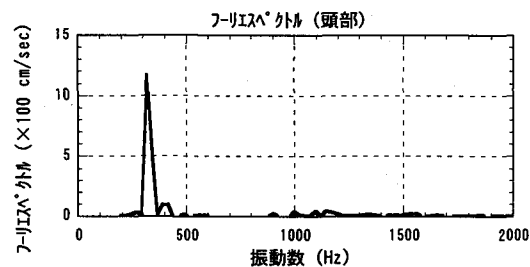
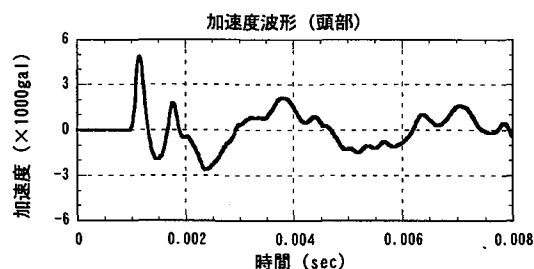


図-8 PC 矢板 (7.0m) プラスチック製ハンマー打撃

の種類によらず、頭部の加速度波形のフーリエスペクトルから求めた卓越振動数より、部材長の推定ができる。

(2)PC 矢板

図-7 および図-8 に、長さ 7.0m の PC 矢板に対して H 形鋼と同様な試験を実施した試験結果を示す。

スチール製ハンマーによる衝撃力はプラスチック製ハンマーに比べて作用時間が短く、H 形鋼に対する試験結果と全く同じであった。

ハンマーの種類によらず頭部の加速度波形に現われる下端からの反射波は、PC 矢板では H 形鋼に比べて明瞭でない。したがって、PC 矢板の場合、反射波より算出する部材長には誤差が多いものと思われる。

図-9 は加速度計間距離(L)に対する PC 矢板の伝播速度(V)をまとめたもので、 $L=4.0m$ 以上で伝播速度が 4400m/s にほぼ収束している。

長さ 4.0m の PC 矢板の頭部における加速度波形の反射より求めた推定部材長と実長の比較を行ったが、波形の乱れから誤差が多く部材長の算出が難しい。

PC 矢板 7.0m の試験体をプラスチックおよびスチール製ハンマーの打撃で得られるフーリエスペクトルの卓越振動数 317Hz より式(2)を用いて部材長を計算すると、 $\ell = 4400/(2 \times 317) = 6.94m$ となり、部材長 7.0m によく一致している。

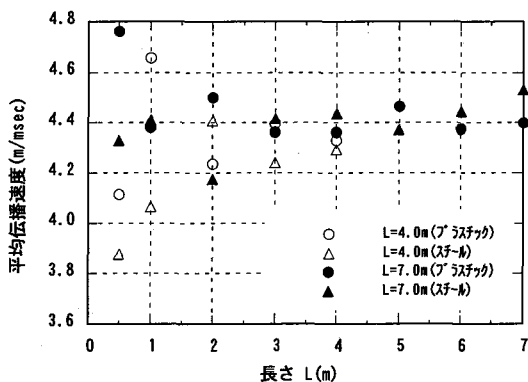


図-9 初期位相差による伝播速度の推定

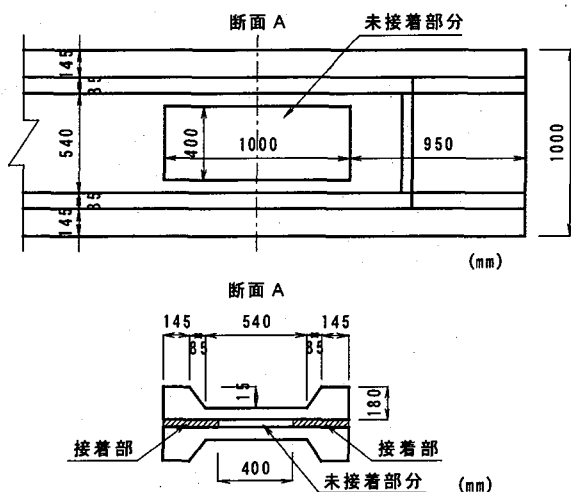


図-10 試験体（浮き部分）

4. 浮き部分の分布測定

橋梁の維持管理の上で、浮き部分の分布を推定することが重要な課題となっている。一般に、浮き部分の推定は打撃によって発生する音の違いから、ある程度判断できるが、合理的な分布図化をすることが難しいとされている。

浮き部分が健全な部分の打撃音より低いということは、両者が異なった振動をしていることを示している。そこで、打撃時の浮き部分における振動特性を求められれば、この浮き部分の振動モードを用いて推定することが可能と考えられる。そこで、浮き部分を有するPC矢板を作成し、打撃試験を実施し、浮き部分の分布の図化を試みた。

4.1 試験方法

図-10 に示すように、2枚のPC矢板の平面側を接着剤で張り合わせ、この中の一部に、幅40cm、長さ100cmの部分に未接着として、浮き部分を製作した。

試験方法としてはこの未接着部分をプラスチック製ハンマーで打撃した時、図-11 に示すメッシュに切った各測点上の加速度を測定した。ただし、打撃位置が振動モードの節になる場合には、この次数の振動が発生しないことか

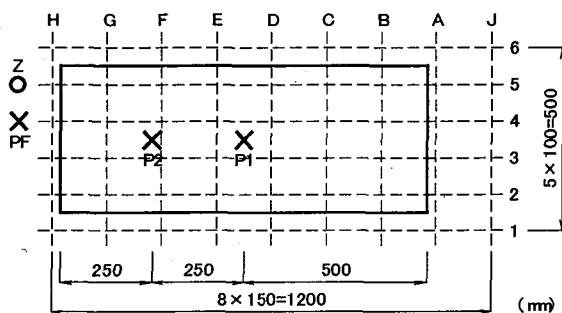


図-11 浮き部分の打撃位置と測定位置

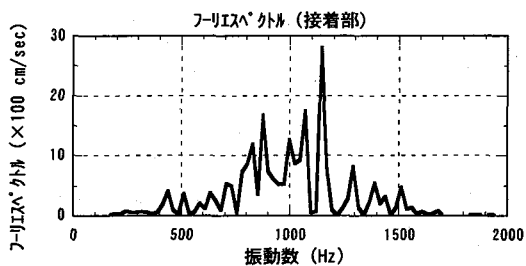
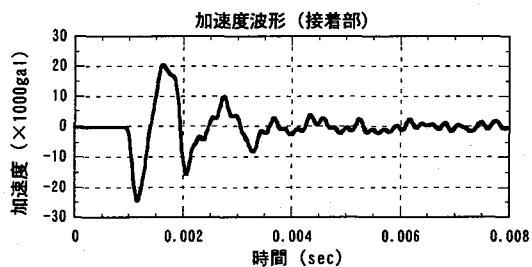


図-12 接着部の加速度とフーリエスペクトル

ら、打撃位置を図中のP1、P2の2カ所を設定した。図中のPFは接着部分の打撃点、Zは接着部分の測点である。

一般に、構造材料の伝播速度は非常に速いことから、サンプリング間隔 Δt を小さくしなければならないこと、ピックアップの周波数特性の範囲も広いことが測定の条件となる。使用したピックアップは圧電形加速度計(0.2~22kHz、TEAC製)とデジタルレコーダー(最小 $\Delta t=1\mu s$ 、TEAC製)である。本試験では $\Delta t=10\mu s$ 、記録データ個数 $N=4098$ 個として測定した。

4.2 浮き分布測定結果および考察

図-12 に PF を打撃した時の接着部分 Z 点の加速度波形とフーリエスペクトルを示す。加速度波形を見ると、打撃直後に衝撃力の影響による振動が見られるが、その後は急激に減衰している。

図-13 は P1 を打撃した時の打撃点近傍の測点 E4 における加速度波形とフーリエスペクトルである。また、図-14 は P2 を打撃した時の同じ測点 E4 での結果である。図-13 および図-14 をみると図-12 と比

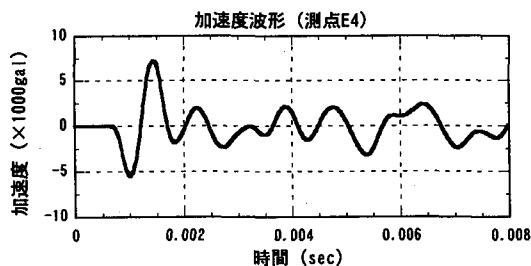


図-13 未接着部の加速度とフーリエスペクトル (P1 点打撃)

較して低い振動数領域に卓越振動数が現われており、接着部分の卓越振動数に比べて、未接着部分の卓越振動数が低いことがわかる。これらの低い振動数を含んでいるため、打撃音が低くなっており、この卓越振動数が未接着部分の固有振動数に対応していると考えられる。

また、図-13 と図-14 を比較してみると、同じ測点でも打撃位置が異なると各次数の固有振動数に対応するフーリエスペクトルのピーク値の大きさが異なっていることがわかる。つまり、打撃点の位置によって卓越する振動モードが異なっていることを示している。

次に、このフーリエスペクトルのピーク値の大きさは、振動振幅の 2 乗に比例していることから、各メッシュの測点で得られたフーリエスペクトルのピーク値の平方根から、各次数の振動モードを算出できることになる⁷⁾。この場合、全測点同時に測定するためには数多くのピックアップが必要となる。

本試験ではピックアップ数の制限から、2 測点ずつ測定している。また、各打撃時の打撃力が大きく異なると振動に非線形性の影響が現われることから、ほぼ一定になるように調整して試験を実施すると共に、最終的には打撃力一定に換算して振動モードを算出した。

図-15 は 1 次から 3 次までの未接着部分の振動モード(最大値を 1.00 と基準化)を示したものである。ここで、打撃点の位置によって振動モードが多少異なっていることから、打撃点が振動モードの最大振幅に近い場所(モードの腹)にあるものを正式の振動モードとして採用することとした。したがって、図に示すように最終的に採用した振動モードは 1 次と 3 次は P1 打撃、2 次は P2 打撃から求めたものと

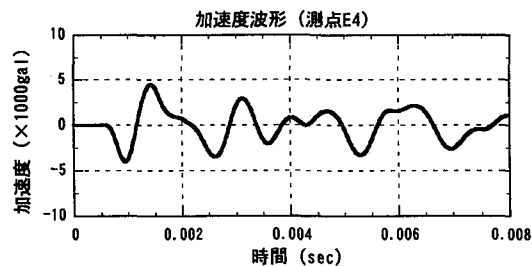
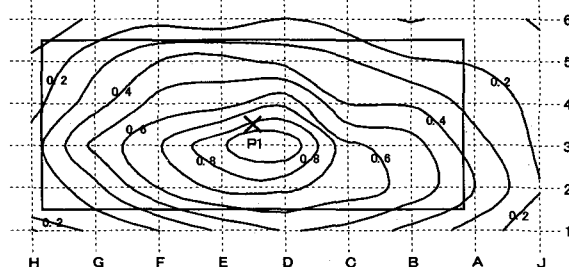
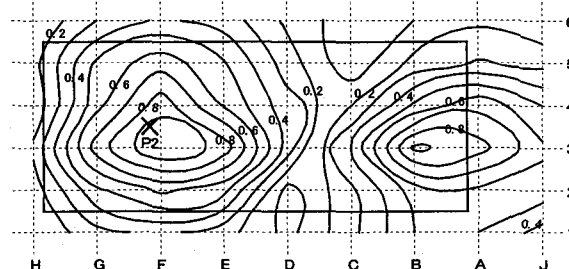


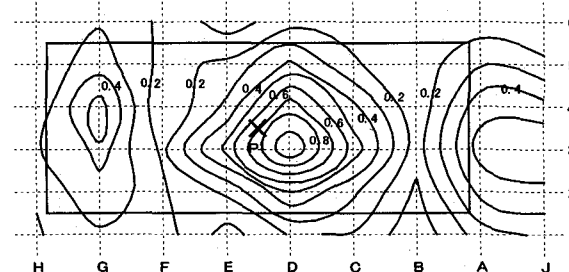
図-14 未接着部の加速度とフーリエスペクトル (P2 点打撃)



(1) 1 次モード 463Hz (P1 点打撃)



(2) 2 次モード 634Hz (P2 点打撃)



(3) 3 次モード 878Hz (P1 点打撃)

図-15 振動モード

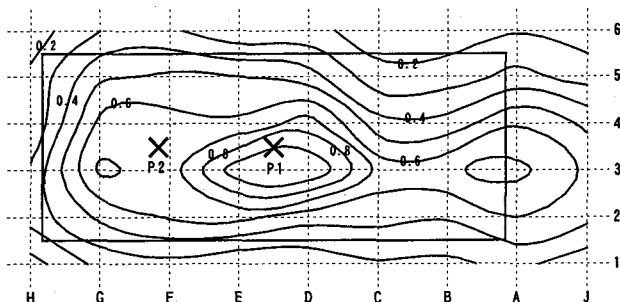


図-16 各次数の振動モードの合計値

なっている。打撃した時の未接着部の振動は、接着している部分にも伝搬することからこの振動成分が全くないわけではない。そこで、各次数の振動モードを総合的に見て、全ての次数で振動モードの値が0.2以上の部分を浮きの状態であると判断すれば良いものと考えられる。

図中のAとJ部分は未接着の状態として振動モードが現われているが、これは試験終了後の試験体の検査で、矢板のそりが原因と考えられる隙間が生じていたことを確認した。

図-16は未接着（浮き）の部分を確認するため、各次数の振動モードを全て加算し、最大値を1.00に規準化したものである。この図においても0.2以上を浮き部分と考えれば良く、図-15に比べて簡単にしかも明確に判断できる。また、この図-16は図-15の1次の振動モードに近いことから、浮きの形状にもよるが最低次数のモードから、ある程度の浮きが判断できることを示している。

実際の大規模なコンクリート構造物すべての損傷、欠損部位の発見へこの手法を適用した場合、多大な労力を必要とするため、実用的とは言えない。この手法は、打音検査で経験的判断に基づき異常と判断された箇所の検証や損傷分布を図化できるので、損傷の進行状況の把握に利用することが有効であると考えられる。

5. まとめ

打撃部が異なるハンマーを用いて、H形鋼とPC矢板に対して打撃試験を実施し、伝播速度を精度よく求める方法および部材長の算出方法の検討を行った。また、振動モードを用いた浮き部分の分布図化方法の検討を行った。これらの試験結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 構造材料の伝播速度は加速度計間距離を4.0m以上離し、初期位相差より求めれば良い。この場合、ハンマーの種類による影響は少ない。
- (2) 部材長は部材の材質およびハンマーの種類によらず、頭部の加速度波形のフーリエスペクトルの卓越振動数から求めることが可能である。しかし、部材長が短いと誤差が大きい。
- (3) H形鋼部材長を頭部の加速度波形から算出しようとする場合は、スチール製ハンマーの方が反射波の波形に乱れが少ないため、精度が高い。しかし、PC矢板の場合はハンマーの種類に関係なく反射波が明確に現われないため、部材長を算出することが難しい。この原因としては矢板が等質材料でないことも影響しているものと思われる。
- (4) 打撃法による浮き部分の加速度波形のフーリエスペクトルから算出した各次数の振動モードから、浮き部分の分布状態を図化することが可能である。

今後、杭先端からの反射成分が小さい実杭等に対する試験を実施し、損傷箇所の検出など打撃法実用化のための検討を行うと共に、実橋に対する試験から、浮きの分布図化の精度向上を図る予定である。

＜参考文献＞

- 1) 大津：コンクリート構造物の非破壊調査と診断，コンクリート構造物の非破壊調査の診断に関する講習会テキスト，pp1-3，1997
- 2) 前川，川村，石崎，岡田，金本：コンクリート構造物の損傷と今後の点検における課題，構造物診断に関するシンポジウム，pp215-222，1998
- 3) 魚本，加藤，広野：コンクリート構造物の非破壊検査，森北出版，1990
- 4) 伊東：打音法によるコンクリートの非破壊検査，コンクリート構造物の非破壊調査の診断に関する講習会テキスト，pp47-54，1997
- 5) 伊東：打音法によるコンクリート構造物の非破壊検査に関する研究，技術研究所報別冊，佐藤工業株式会社技術研究所，1997
- 6) 理科年表，丸善株式会社，1977
- 7) 片山，宮田，国井：構造物の振動解析，技報堂出版，1979

(1999年9月17日受付)