

打撃法によるコンクリート柱の健全度診断に関する研究 Study on Integrity Diagnosis of Damaged RC Pier by using Impact Testing Method

山崎智之*・三上修一**・大島俊之***・久保田和徳****

Tomoyuki YAMAZAKI, Shuichi MIKAMI, Toshiyuki OSHIMA, Kazunori KUBOTA

*正会員 北見工業大学助手 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165)

**正会員 博(工) 北見工業大学助教授 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165)

***フェロー会員 工博 北見工業大学教授 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165)

**** (株)川田工業 (〒114-0023 東京都北区滝野川1丁目3-11)

By using impact echo testing method integrity diagnosis of RC column is dealt with in this paper. Numerical simulation of stress wave propagation is used to interpret wave scattering around crack in concrete. Good agreement on crack location between numerical and experimental results is obtained in wave form analysis.

Key Words : QNDE, stress wave, crack, echo wave

1. はじめに

地震などの大きな外力の作用を受けることによって土木構造物は大きな損傷を受ける。兵庫県南部地震(1995 年)でも多くのRC橋脚が倒壊したり、相当な損傷を受けた。その際に図-1に示すような倒壊まで至らなかったRC橋脚の損傷評価を行うために様々な非破壊試験が行われた。しかし、これまでの非破壊評価の手法だけでは調査しきれない損傷もあり、損傷評価に関して研究開発¹⁾の必要性が高いと考えられる。

打撃法による損傷評価は、計測法が簡便で、大きな振動エネルギーと対象物の固有振動を利用して多層構造や杭等の地中構造物の非破壊検査へ適用されており、兵庫県南部地震の際にも杭の診断に多くの実績を上げている。コンクリート構造の場合には波動散乱の影響が大きく柱のように長い構造の場合には指数型増幅係数をフィルターとして用いることにより雑音に埋もれてしまう内部欠陥の波動情報を取り出している²⁾。打撃法による診断は機械的な波動発生によって入力が行われるため、結果に不安定さがあり、波動伝播解析による詳細な検討によって散乱・回折などの現象と内部欠陥の関係をさらに解明し、逆問題として内部欠陥の定量的非破壊評価をす

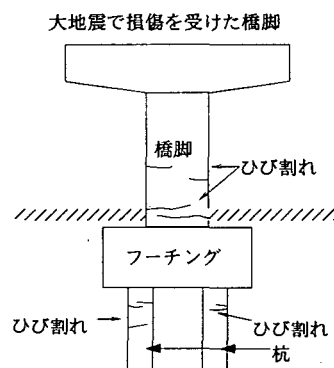


図-1 損傷を受けた橋脚

る必要がある。

本論文では、コンクリート中を伝播する応力波動伝播特性を数値解析する。コンクリート中に発生している曲げひび割れ等の損傷を対象として、打撃によってコンクリート中を伝播する応力波動の伝播特性の変化について検討を行う。また、コンクリート橋脚の模型を用いた静的正負交番載荷実験^{3),4)}によって実際に損傷を与え、曲げひび割れを発生させ、その損傷の大きさと発生位置を打撃法によって測定を行い、解析結果との比較検討を行う。

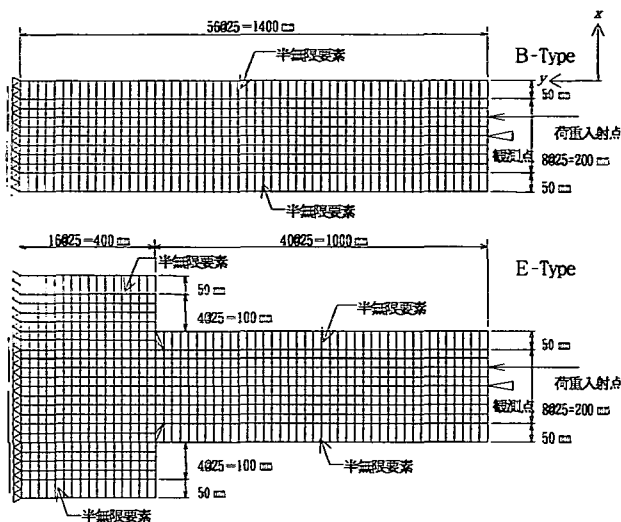


図-2 解析モデルと要素分割図

2. 解析方法

本論文ではコンクリート橋脚に発生するひび割れの位置や深さなどの違う解析モデルと断面変化を有する解析モデルを考え、汎用構造解析プログラムによる時刻歴応答解析でコンクリート中の弾性波伝播特性の解析を行う。

2. 1 コンクリート橋脚のモデル化

解析モデルは図-2に示すような等断面の橋脚モデル(B-Type)とフーチングを有する橋脚モデル(E-Type)について検討を行う。モデルは後述する実験供試体の寸法を基に決定している。要素分割は4辺形平面ひずみ要素と6節点平面ひずみ半無限要素による平面モデルとした。要素サイズは入射波長を考慮して1要素を25×25mmの正方形要素に分割した。半無限要素はモデルの外周部に配置することによって側面からの反射波の影響をなくするために用いている。半無限要素には形状関数として指数関数が用いられ、無限遠で0に漸近するように定式化されている。境界条件は、底面の3節点を完全固定にし、残りの底面の節点をy軸方向にだけ固定とした。物性値は表-1の値を全ての解析モデルに用いている。ここでSteelの物性値は解析に鉄筋を考慮する場合に用いる値である。

2. 2 数値解析方法

本研究では後述する実験で得た波形を基に入射波(図-3)を決めた。入射波形は指数関数減衰するsin波を式(1)のような関数でモデル化し解析に用いた。

$$P = Ce^{Dt} \cdot \sin(2\pi f \cdot t) \quad [0 \leq t \leq t_0] \quad (1)$$

表-1 物性値

	Concrete	Steel
ヤング率	3100 kgf/mm ²	21000 kgf/mm ²
ポアソン比	0.17	0.3
質量密度	2.3×10^{-10} kg/mm ³	7.8×10^{-10} kg/mm ³

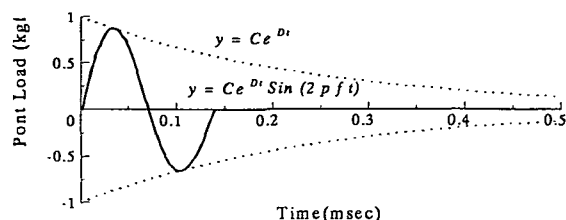


図-3 入力荷重履歴のグラフ

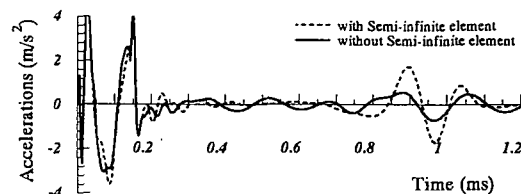


図-4 半無限要素による応答加速度の比較

ここで $C=1.0$ 、 $D=-4092.87$ 、 $f=7225.43\text{Hz}$ (周波数)、 t_0 は荷重入射時間とする。

時刻歴応答解析は直接積分法のニューマーク β 法($\beta=1/4$)を用いて解析を行っている。ニューマーク β 法では解析で考慮する最大振動数の周期の10%以下になるように 2.0×10^{-6} (sec)を時間ステップとした。また総解析時間は、入力荷重によって発生した弾性波が底面から反射し観測点に到達するまでの時間を計算し、底面からの反射波全体が観測点まで到達する時刻(総解析時間)を1.2msとした。減衰は時間ステップに比例し振動の高周波成分を取り除くための数値減衰のみを考慮して解析を行っている。

ここで半無限要素を用いた場合と用いない場合の応答加速度の比較を図-4に示す。縦軸は加速度で、横軸は経過時間(ms)を表している。入射初期には入射点から直接伝播した波動が観測点に到達し、次に入射点と反対側の境界からの反射波が現れる。この比較より半無限要素を用いて解析することによって拘束境界である底面からの反射波が明確に比較でき、半無限要素の有効性が確認できた。

コンクリート橋脚に発生する曲げひび割れを図-5のようにフーチングを考慮しないモデル化をした。ひび割れは幅を2mmのスリットとし、ひび割れの位置を荷重入射位置からの距離L、ひび割れ深さDを



図-5 ひび割れ解析モデル

表-2 解析モデル名

	D=100mm	D=150mm	D=200mm
L=1050mm	モデル B4	モデル B1	モデル B7
L=700mm	モデル B5	モデル B2	モデル B8
L=350mm	モデル B6	モデル B3	モデル B9
L: ひび割れ位置 D: ひび割れ深さ			

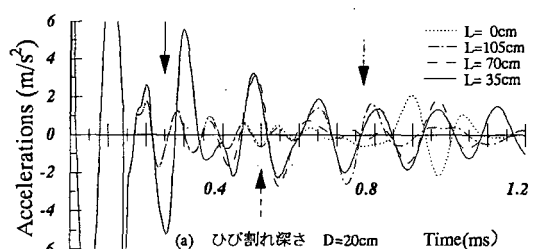
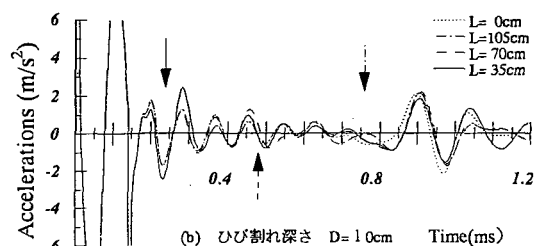


図-6 ひび割れ位置とひび割れ長さによる比較

表-2に示すようなパラメータとしてモデルB1～B9までのモデルに関して応答解析を行った。ただし、ひび割れ深さとは解析モデル側面からx軸方向にひび割れが進展する長さのことである。

3. コンクリート柱の応力波動伝播特性

コンクリート橋脚や杭等の一方向に長い構造物は一樣な断面の棒部材の応答特性を示す。このときにひび割れ深さDが波長に比べて大きい場合には波動の透過断面が小さくなり回折等の現象が起こる。またひび割れ発生位置と反射波の振幅や位相などの波動特性を検討する必要がある。

3. 1 ひび割れ位置による応答の比較

ひび割れ発生位置による応力波動の伝播特性を検討するために、B-Typeのモデルによる解析結果を基に比較検討する。図-6(a)はひび割れ深さD=20cm、(b)はD=10cmの場合にひび割れの位置によってひび割れからの反射波がどのように変化するかを比較した図である。縦軸は加速度で、反射波を比較しやすくするためにズームアップして表示してい

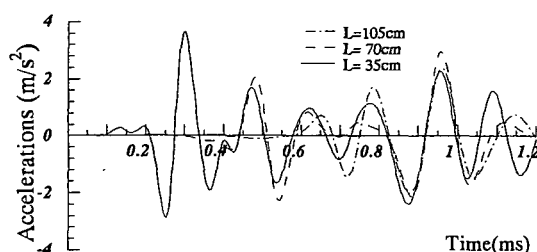


図-7 ひび割れ位置による反射波形の比較 (D=15cm)

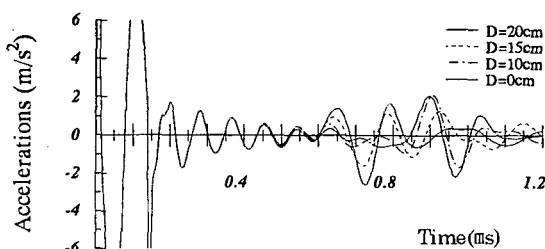


図-8 ひび割れ深さによる反射波の比較 (L=105cm)

る。横軸は時間軸 (ms) で入射時からの経過時間として表示を行っている。点線はひび割れがないモデルで、実線、波線、一点鎖線の順に欠陥の位置が入射点から遠くなっている。入射初期には入射点から直接伝播した波動が到達し、次にひび割れや拘束境界からの反射波が現れる。各ひび割れ位置からの反射波を矢印で示した。矢印の軸線は各測定波形の線種に対応して示している。ひび割れ位置が入射点に近づくにつれて反射波の特徴が明確に識別できていることがわかる。ひび割れ深さが大きいほどその傾向は顕著に現れている。図-7は入射波の影響を欠陥のない解析モデルの解析値との差で表し、欠陥からの反射波のみを比較した図である。縦軸は反射波形をズームアップして表示している。この図のひび割れ深さはD=15cmの場合である。図-7よりひび割れ位置が実線、破線、一点鎖線の順にひび割れ位置が入射点から遠くなっていることが明確に示されている。

3. 2 ひび割れ深さによる応答の比較

コンクリート橋脚に発生する曲げひび割れの長さを打撃法によって求めるためには反射波の振幅に着目する必要がある。また、回折現象を考慮して入射力の振動数に着目することによってひび割れ深さの検出が可能である。図-8はひび割れ位置L=105cmの時にひび割れ深さが異なった場合の測定波形を比較した図である。実線、波線、一点鎖線の順にひび割れ深さは小さくなっている。ひび割れからの反射波は0.6msから0.9msにかけて到達しておりひび割れが大きくなると反射面が大きくなるため反射波の

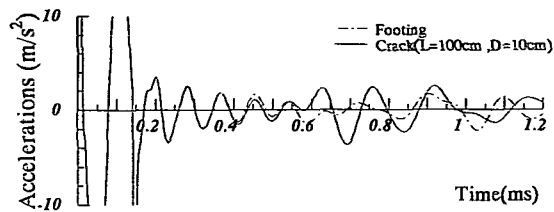


図-9 フーチングによる反射波の影響

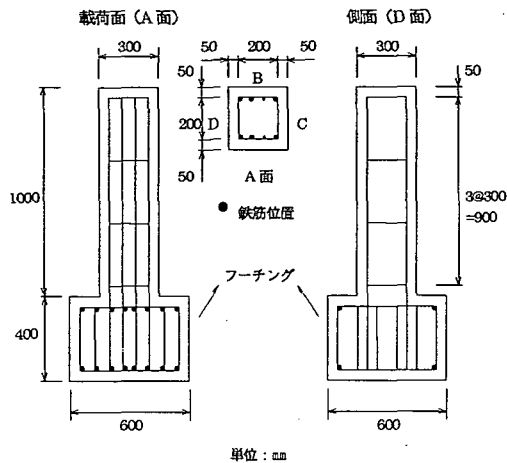


図-10 鉄筋コンクリート角柱供試体

振幅も大きくなっている。また、底面からの反射波の振幅は逆に小さくなっている。

3.3 断面変化モデルの解析

断面変化（フーチング、ひび割れ）を有するモデルを解析し、断面が急変する場合の応力波動伝播特性を調べる。

解析モデルは図-2に示すフーチングを考慮したE-Typeの解析モデルとB-Typeの $L=100\text{cm}$ の位置に深さ $D=10\text{cm}$ のひび割れがある場合を比較する。解析結果は図-9に示すように破線がフーチング100cmの位置にあり断面が急増した場合で、実線は100cmの位置にひび割れによる断面の急減した場合の比較である。実線のひび割れ箇所からの反射波は0.6msから0.8msにかけて確認できる。これに対して、断面の急増箇所では波動の回折が断面急増部に起こり底面からの反射波の振幅も小さくなっている。

4. 鉄筋コンクリート柱損傷実験

4.1 実験概要

実験は図-10に示すような橋脚をモデル化した角柱鉄筋コンクリート供試体に繰返し交番載荷することによって損傷を与え、ひび割れの発生状況を記

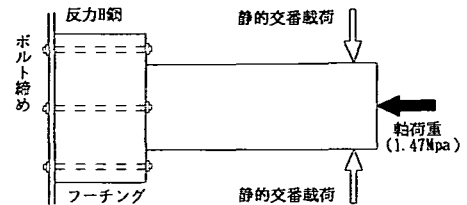


図-11 静的交番載荷

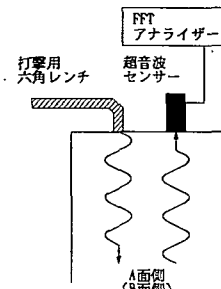


図-12 打撃法による測定

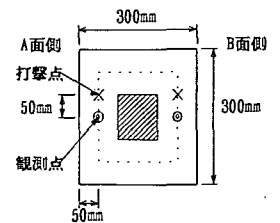


図-13 測定位置

録しながら各荷重段階で非破壊試験を行った。載荷方法は図-11のように橋脚の上載荷重を1.47Mpaと想定して軸荷重をかけた状態で橋脚頂部に直角方向から交番載荷した。ただし各荷重段階とは交番載荷で正負の載荷を10kN増加する段階のことで、正負の載荷は供試体のA面およびB面から載荷するものであり、これを1サイクルの荷重段階とした。供試体形状は図-10のように供試体断面が 30×30 で高さが100cmの橋脚モデルで、供試体基部にフーチング($60 \times 60 \times 40\text{cm}$)を設けている。供試体の種類は鉄筋の配筋により7種類の供試体を作製している。ここでは、主鉄筋に $D16 \times 6$ をA面、B面に配筋し、せん断補強鉄筋間隔を30cmとして作製した供試体の実験結果について検討を行う。供試体を使用した材料は鉄筋:SD295A、コンクリート強度:31Mpaである。

打撃法による非破壊試験は図-12のような六角レンチによる打撃加振によって入射し、受信超音波センサーには広帯域のAEセンサーを用いた。測定位置は図-13に示すように橋脚の軸力載荷部横A面側とB面側でそれぞれ5回測定を行い、その平均を測定波形とした。この方法で1サイクルごとに打撃法による実験を行い、同時に曲げひび割れ発生状況を記録した。

4.2 実験結果

実験に用いた供試体の5cycle(最大荷重50kN)、7cycle(最大荷重70kN)、10cycle(最大荷重100kN)での損傷状態を図-14に示す。また、図-15に打撃法によるエコー波形の測定結果を供試体のB面

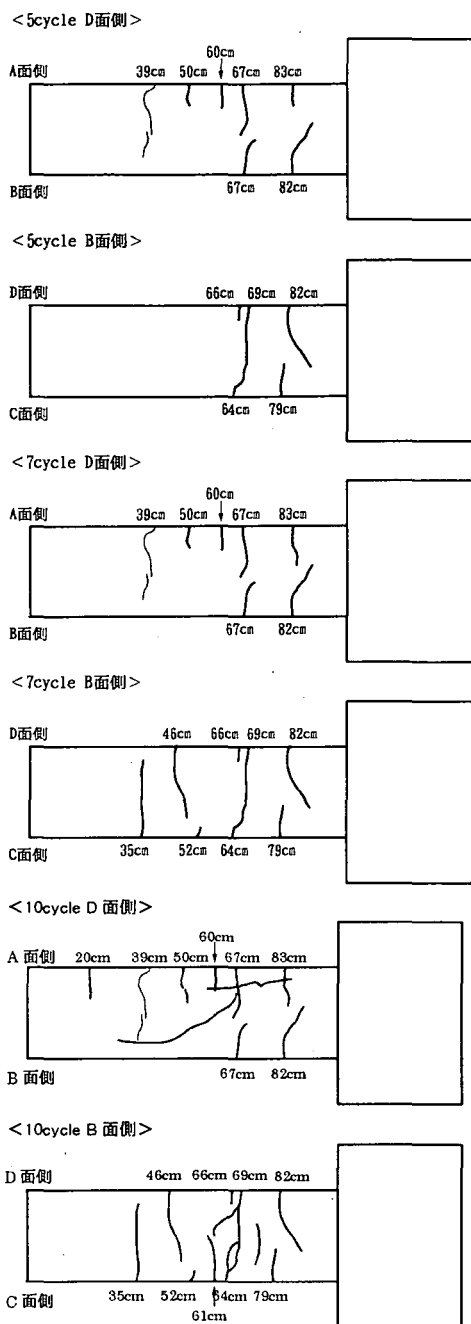


図-14 最終荷重段階のひび割れ状況

側で測定したものについて示す。

図-14の供試体損傷状況図中の数値は、頂面からひび割れまでの距離をcm単位で示した値である。また、図-15の打撃弾性波エコー波形中の数値は、0cycle時の波形にはなかった反射波や変化している反射波について、その到達時刻と弾性波速度（実験供試体の弾性波試験より求めた）3400m/sにより、打撃入力点の頂面からの距離(m単位)として計算したものである。0cycleにおける下に凸の反射波が約0.6msにあり、橋脚基部までの距離が1.0mであることから伝播速度はほぼ確認することができる。5cycleの波形に見られる0.67mと0.87mの波は、

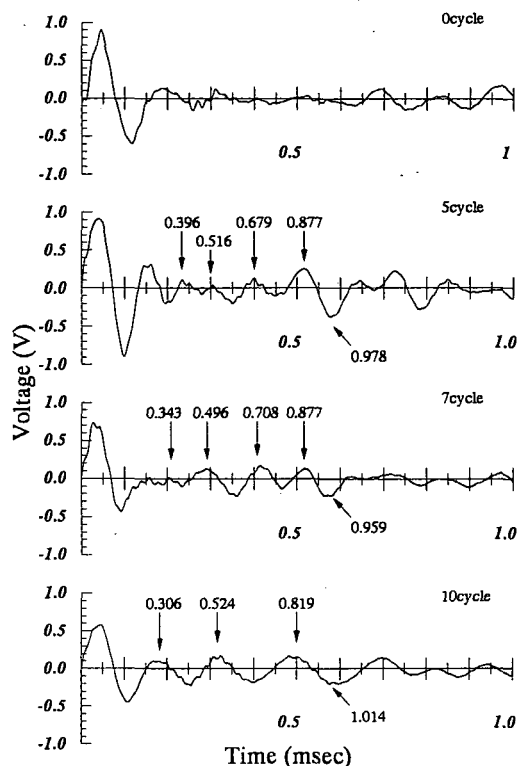


図-15 打撃法による試験結果

損傷図のB面側ひび割れ位置とほぼ対応している。また、7cycleでの反射波形の0.34、0.49、0.71、0.88mについても損傷図に対応していることがわかる。10cycleになると損傷図より先端側の曲げひび割れが大きくなっている。このため図-15における測定波形も入射点に近い反射波形の振幅が大きくなっている。これらのことから打撃法による反射波形と曲げひび割れ位置の関係を確認することができた。しかし、打撃強さにより波形の出方が異なり適度な強さでたたく必要があり、また受信センサーにおいても打撃周波数に合わせたものを用いた方が精度良く測定することができる。

5. ひび割れ欠陥検出と解析結果の比較

ここでは数値解析によって得られた各解析モデルの反射波のパターンを実験で得られた応答波形と比較して妥当なものであるか検討する。実験は鉄筋コンクリートであるが、鉄筋の影響を解析モデルに含めた場合と比較をした結果、本解析で用いた入射周波数では結果に影響を与えないことから鉄筋を考慮しないモデルで解析を行うことにした。

5.1 0cycle時とE-Typeモデルの波形の比較

0cycle時の波形と図-2のE-Typeの解析波形を図-16に示す。上は実験より得られた1msまで

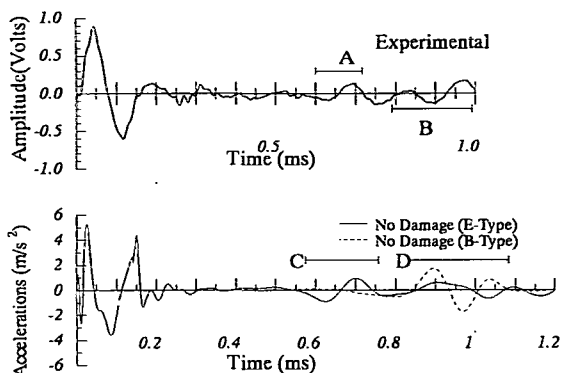


図-16 損傷のない時の実験と数値解析の比較

の測定波形で下が1.2msまでの解析結果である。0cycle時の波形は载荷前の供試体で測定されたものである。このときの供試体はひび割れなどの損傷が無い状態で、波形にはフーチングの断面変化部からと底面からの反射エコーだけが現れているはずである。供試体の弾性波伝播速度3400m/sから反射波の到達時刻を計算すると、フーチングの断面変化部からの反射波が0.588msで底面からの反射波が0.823msとなる。この値から0cycle時の波形のAにフーチングからの反射エコーが、Bに底面からの反射エコーが現れていると推定できる。一方、断面変化を有するE-Typeの数値解析結果にはCの付近に断面変化部からの反射波が、Dの付近に底面からの反射波が現れている。AとC、BとDそれぞれの反射波を比較してみるとほぼ同じパターンであると見ることができる。

5. 2 打撃実験とひび割れモデルの波形の比較

5cycle時の実験波形とB-Type(モデルB2)の解析波形との比較を図-17に示す。モデルB2は等断面でL=70cm、D=15cmのひび割れ一つを持つモデルである。実験において5cycleの段階では図-14にあるように、供試体頂面から64~82cmにかけてひび割れが現れていた。これらのひび割れからの反射波は、コンクリートの弾性波速度より反射波形は0.376~0.482msに到達していると推定できるので、図-17の範囲Eの反射波と見ることができる。ひび割れを有する解析モデルB2ではGの範囲にひび割れからの反射波が現れているが5cycleの波形の範囲Eと比較するとパターンがほぼ同じである。

6. 結論

以上の解析によって得られた結果を要約すると以下のようなになる。

1) 半無限要素を用いて解析することによって拘

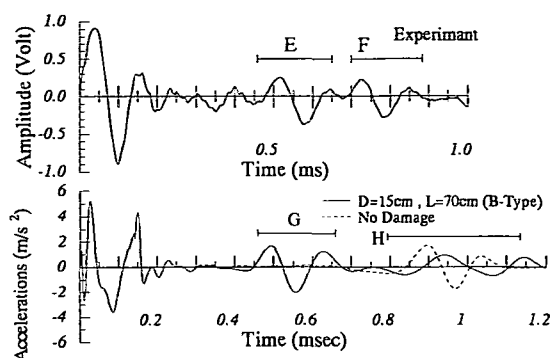


図-17 5 cycle 損傷時の実験と数値解析の比較

束境界である底面からの反射波が明確に比較でき、半無限要素の有効性が確認できた。

- 2) 曲げひび割れによってコンクリート内部に発生する欠陥の位置と大きさによってコンクリートを伝播する応力波動の振幅及び周波数に特性を示した。
- 3) 打撃法による実験結果とひび割れを考慮した解析結果はほぼ一致した時間にひび割れからの反射波が得られた。数値解析の妥当性を確認した。

本研究の一部は平成9年度文部省科学研究費(代表大島俊之)の補助を受けて行われました。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 南荘、森田、杵本：非破壊検査手法を用いた杭基礎の損傷調査，第23回地震工学研究発表会，pp651-654, 1995.
- 2) 大島俊之：構造物の非破壊評価はどこまでできるか，土木学会平成7年度全国大会研究討論会資料「逆解析の可能性を探る」，pp. 6-11, 1995. 9.
- 3) 山崎、大島、三上、太田、工藤：鋼板巻立てRC橋脚の打撃による振動特性変化と損傷評価，土木学会北海道支部論文報告集，Vol. 54, 1998. 2.
- 4) 太田、大島、三上、山崎、外山：打撃法による損傷RC橋脚の健全度診断と損傷評価，橋梁振動コロキウム'97論文集，pp. 233-238, 1997.

(1998年4月24日受付)