



衝撃試験による損傷度評価に関する基礎的研究

| | |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| メタデータ | 言語: jpn 出版者: 公開日: 2013-12-11 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 宮脇, 幸治郎 メールアドレス: 所属: |
| URL | https://doi.org/10.24729/00007694 |

衝撃試験による損傷度評価に関する基礎的研究

宮脇幸治郎*

Basic Study on the Evaluation of Damage Due to Impact Experiments

Kojiro MIYAWAKI*

ABSTRACT

This study studied the identification of the damage by information quantity of the time and frequency. The processing of the data on the damage quantity was carried out by the wavelet transform, and it showed the aspect in which the damage progressed in the change of wavelet coefficient on the resolution factor-time base. And, by defining wavelet damage factor and wavelet damage index, the quantity evaluated the degree of damage.

In the experiment, the effect of the history of the load and the damage expanded to the samples of cylindrical concretes was examined on the wave. As a result, (1) characteristics of wavelet coefficient displayed in time and resolution factor expressed well the effect of the loading history, (2) the wavelet damage increased, as the loading history advanced, (3) wavelet damage index and damping index showed the good correlation.

Key Words: wavelet transform, damage wavelet spectrum, wavelet damage factor, wavelet damage index, history of damage

1. 緒言

構造物の損傷に関する同定には、1) 欠陥・損傷の種類を推定すること、2) 損傷位置を確定すること、3) 損傷量の量的評価をすることの3つの要素がある。それぞれの損傷の同定は、相互に関係する量であり、種々の物理量として現れる。

これらに対する同定の手法には、振動実験がよく用いられる。この場合、診断に用いる信号は、空間的、時間的および周波数的な量の抽出量として処理される。

まず、空間的な処理として構造物のモード特性は、最も容易に損傷に関する同定の抽出量となる。この方法の損傷の同定は、非常に大きな欠陥を持つ損傷に対してのみ有効であり、損傷の小さく、非常に高い減衰特性を持つ構造物には有効でない。また、測定には数多くの測定点が必要である。

次に時間的な処理量として減衰特性は、損傷に関する同定の抽出量となる。この抽出量は、損傷の種

類を推定や損傷位置を確定の情報量として不十分である。しかし、多くの測定点を必要とせず、比較的容易に損傷の量的指標となる。

さらに周波数的な処理として周波数応答関数での共振ピークは、損傷に関する同定の抽出量となる。この場合、対象とする周波数帯域をどのようにとればよいか明らかでなく、共振ピーク以外での周波数応答では、ノイズの影響が大きい。しかし、多くの測定点を必要とせず、推定されるモード特性が、モード解析を用いた周波数応答の特性との比較で同定できる。さらに、周波数応答関数の手法は、高減衰で高密度の応答をもつ非モード的な挙動にも適用できる。また、異なった加振波により、容易に得られた損傷同定のチェックができる。

なお、時間量と周波数量を同時に展開したウェーブレット変換による特性は、損傷に関する同定の抽出量となる。この場合、ウェーブレットの形が多くあり、損傷同定のための最も最適なウェーブレット変換を選択する系統的な方法がない。しかしウェーブレット変換は、1) 局所的な評価に対し相対的に鋭敏、2) 構造物に多くの測定点を不必要、3) 非モードの挙動に対して

2001年4月11日 受理

*建設工学科 (Department of Civil Engineering)

も適応可, 4) 線形性との損失量が損傷の同定に有効などの利点を持っている。

最近, 損傷に関するこれら単独抽出の方法に対して, 空間・時間・周波数的に組合わせて評価するニューラルネットワークの手法¹⁾ が用いられるようになった。たとえば, Levin と Lieven²⁾ は, 片持ちばりに関する欠陥の同定にニューラルネットワークの手法を用いて評価した。Atalla と Inman³⁾ は, 有限要素モデルで欠陥の同定をし, 周波数応答関数を評価した。Paya, Esat と Badi⁴⁾ は, 回転機械の欠陥の同定にウェーブレット変換とニューラルネットワークの手法で評価した。ニューラルネットワークは, 空間, 時間および周波数による情報量により損傷の同定の信頼性を増すための方法で, 特別な前処理的なものを必要としないものである。

本研究では, 時間および周波数による情報量により損傷の同定を試み, 脆性な特性を持った供試体を対象に, 破壊・損傷が供試体全体に一樣に広がり, 載荷された荷重の履歴がどのような影響として波動に現れるか検討した。損傷量に関するデータの処理は, ウェーブレット変換により行い, 損傷の進行している様子を分解次数-時間軸上のウェーブレット係数の変化で示した。また, 損傷量はウェーブレット損傷度やウェーブレット損傷指数を定義して評価した。

2. 基礎式の誘導

(1) ウェーブレット係数およびウェーブレットスペクトル
まず, ウェーブレット変換に関する基礎式⁶⁾について述べる。いま, 任意の関数 $x(t)$ に対する離散量のウェーブレット変換式は,

$$D_{jm} = \langle x(u), \psi_{jm}(u) \rangle \quad (j \geq 1) \quad (1)$$

ここに,

$$\psi_{jm}(u) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}u - m) \quad (2)$$

と表示される。なお, 上式中 $\langle \quad \rangle$ は内積を意味する。ここに, $\psi(\xi)$ はウェーブレット関数と呼ばれ,

$$\left. \begin{aligned} \int \psi(\xi) d\xi &= 0 \\ |\hat{\psi}(0)| &= 0, |\hat{\psi}(\pm\pi)| = 1 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

なる性質をもった関数である。なお, 上式中 $\hat{\quad}$ 記号は, Fourier 変換を意味する。

さらに, D_{jm} に関する Fourier 変換は,

$$\hat{D}_{jm} = \langle D_{jm}, e^{-imk/N_j} \rangle \quad (4)$$

と定義される。

式(1)および式(4)で定義された関数が j 次のウェーブ

レット係数およびウェーブレットフーリエスペクトルである。

式(1)あるいは式(4)を具体的に演算するには, 次のようなスケール関数の定義を必要とする。スケール関数 $\phi(\xi)$ は,

$$\left. \begin{aligned} \int \phi(\xi) d\xi &= 1 \\ |\hat{\phi}(0)| &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

なる性質を持っており, さらに,

$$\frac{1}{2} \phi(\xi/2) = \sum_n h_n \phi(\xi - n) \quad (6)$$

なる性質を持っている。なお,

$$h_n = \langle \phi_{-1}(u), \phi(u - n) \rangle \quad (7)$$

ここに,

$$\phi_j(u) = 2^j \phi(2^j u) \quad (8)$$

である。この関数を用いると任意の関数 $x(t)$ は,

$$A_{jm} = \langle x(u), \phi_{jm}(u) \rangle \quad (j \geq 1) \quad (9)$$

と変換できる。ここに,

$$\phi_{jm}(u) = 2^{-j/2} \phi(2^{-j}u - m) \quad (10)$$

である。

また, 式(1), 式(9)の記号を用いると次のような漸化式の関係が成立している。

$$A_{j+1,m} = \sum_k \bar{h}_{k-2m} A_{j,k} \quad (11)$$

$$D_{j+1,m} = \sum_k \bar{g}_{k-2m} A_{j,k} \quad (12)$$

上式中の \bar{h}_k, \bar{g}_k は, 鏡像関数であり,

$$g_n = \langle \psi_{-1}(u), \phi(u - n) \rangle \quad (13)$$

ここに,

$$\bar{g}_n = g_{-n}, \bar{h}_n = h_{-n} \quad (14)$$

である。

(2) ウェーブレット変換による損傷度評価の定義

シュミットハンマーによる衝撃波動の特性を用いて対象とする部材の損傷度を評価するため, まず, 損傷ウェーブレットスペクトル S_{DW} を次式のように定義する。

$$S_{DW} = \sum_j \sum_m |D_{jm}| \Delta t_j \quad \left\{ |D_{jm}| \geq a D_o, m \leq m_{j_o} \right\} \quad (15)$$

ここに, Δt_j は, 分解次数 j に対する時間刻み, D_o は, 反射波 (2 波目) に相当する部分の $|D_{jm}|$ の最大値, 係数 a は, D_o の設定レベルを意味している。 m_{j_o} は分解次数 j での直接波と反射波の影響が交叉する時刻 (Δt_j 単位) である。

次に, ウェーブレット損傷度 D_W は, 対象とする部材が破壊強度の荷重を受けたときの損傷ウェーブレット

スペクトル S_{DW}^U との比によって定義する. すなわち,

$$D_W = \frac{S_{DW}}{S_{DW}^U} \quad (16)$$

さらに, 衝撃波動の損傷ウェブレットスペクトルの減衰特性を用いたウェブレット損傷指数 δ_W を次のように定義する.

$$\delta_W = \ln \left(\frac{S_{DW}}{S_{DW}^S} \right) \quad (17)$$

ここに,

$$S_{DW}^S = \sum_j \sum_m |D_{jm}| \Delta t_j \quad \{ |D_{jm}| \geq aD_o, m \geq m_{jo} \} \quad (18)$$

3. 衝撃波動による部材損傷度評価に関する実験

(1) 損傷度実験の概要

対象とした供試体は, $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ の円柱コンクリートを用い, コンクリート強度は, 約 $35 \sim 45\text{MPa}$ の5種類 (A~E) を用いた.

波動計測は, 円柱供試体を水平に設置し, 図1に示すように円柱の2母線上下を鋼板で挟んで拘束 (約 5kN) し, 一方の円形断面に打撃を加え, 他方の円形断面中央部に加速度計を接着し, 波動を記録した. サンプルングは, $20 \mu\text{sec}$ で 8192 個採り, 約 0.16sec 間記録した.

供試体に加える打撃は, シュミットハンマーで $2.207\text{N} \cdot \text{m}$ の一定衝撃エネルギーを作用させた. 打撃される位置 (c, l, r, u, d) は, 図中に示すような円形断面上の5ヶ所とした.

次に, 供試体の損傷度は, 破壊強度の約 $k/3$ ($k = 0 \sim 3$) の各載荷後の状態に設定し, 漸次載荷を増加させて設定した (以後この荷重載荷後の実験状態を「荷重履歴」と呼ぶ). なお, 各供試体の仮の破壊強度は, 別の供試体で予め破壊試験を行って求めておいた. 3段階の載荷履歴による強度劣化は, 約 92% になっていた.

また, 用いた供試体の破壊強度とシュミットハンマーによる推定強度は, 図2に示すような相関を示していた.

(2) 波動応答に関する特性

図3は, 供試体Dの中央部cをシュミットハンマーで打撃し, その衝撃波を加速度計で記録した時刻歴である. 波動は, 200mm の供試体を伝播し, センサー (加速時計) に直接に伝播したものと, センサー側の

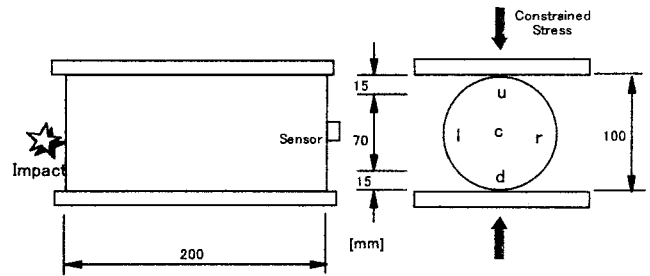


図1 供試体および実験概要

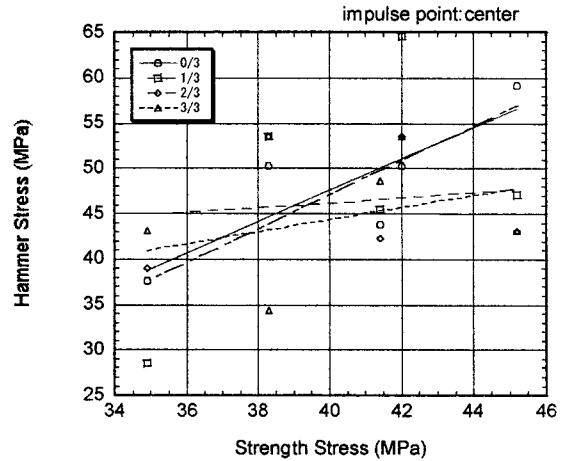


図2 シュミットハンマーによる推定強度に対する破壊強度の関係

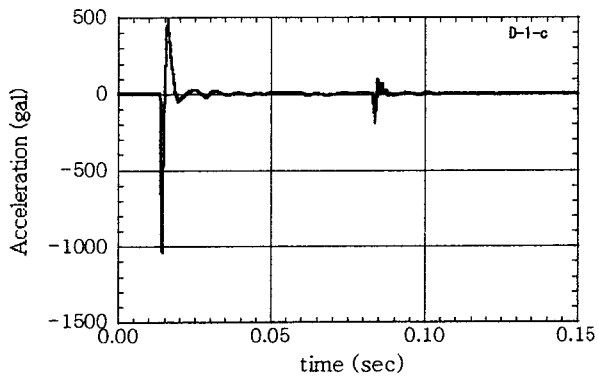
面で反射し打撃側の面で再反射して伝播したものが記録されている. すなわち, 400mm の距離を約 0.07sec で伝播し, 伝播速度は約 5.7m/s となっている. 波動特性には, いずれの場合も円柱側面による反射や粗骨材等による散乱の影響がほとんど現れていない.

図中 (a)~(d) は, 一定の衝撃エネルギーのもとで荷重履歴を $0/3 \sim 3/3$ に変化させたときの記録である. 応答波動の最大値は, 荷重履歴による損傷度の増加にしたがって 1000gal から 1500gal に増加している. しかし, 各荷重履歴後の時刻歴波形の特性は, ほとんど変化が見られない.

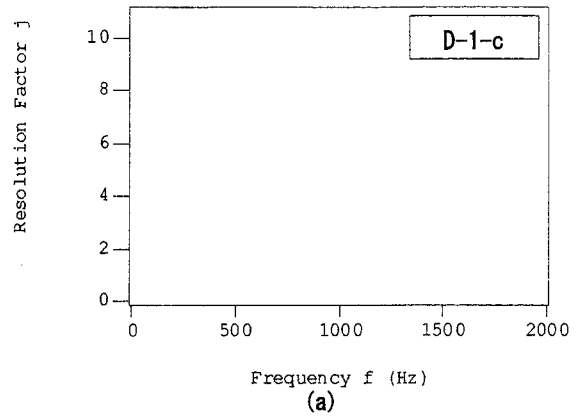
(3) ウェブレットスペクトルに関する特性

図4は, 横軸に振動数 f をとり, 縦軸に分解次数 j をとって, ウェブレットスペクトルの強さを平滑化して, 濃淡を用いて示したものである. ウェブレットスペクトルは, j が3より大の振動数域を示しているが, $j = 5 \sim 9$ でのスペクトルが特に強くなっている.

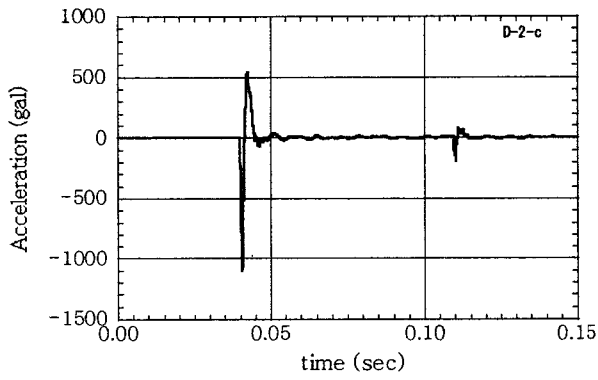
図中 (a)~(d) は, 荷重履歴を $0/3 \sim 3/3$ に変化させた場合の結果であり, スペクトルの最大値が増加し



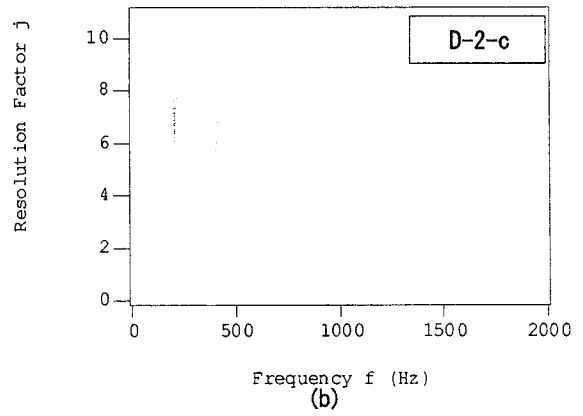
(a)



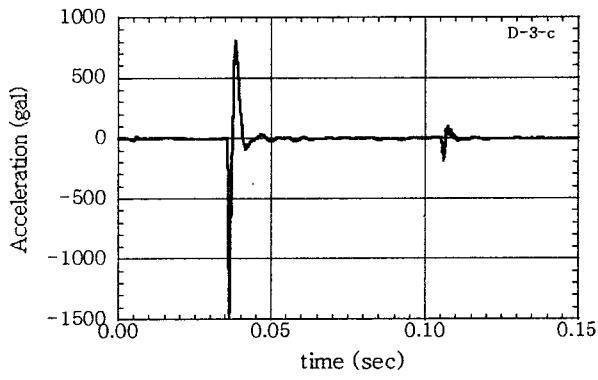
(a)



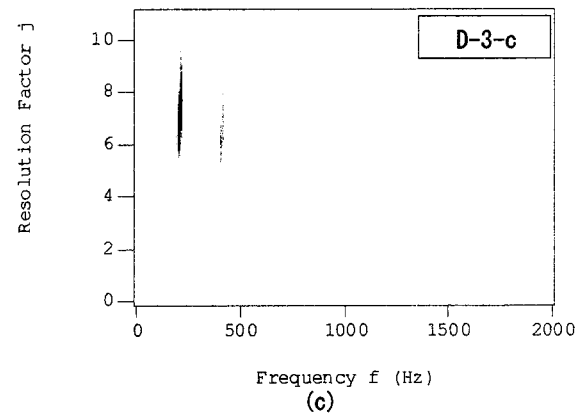
(b)



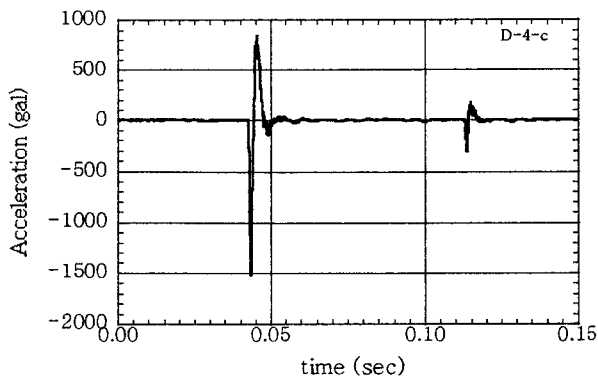
(b)



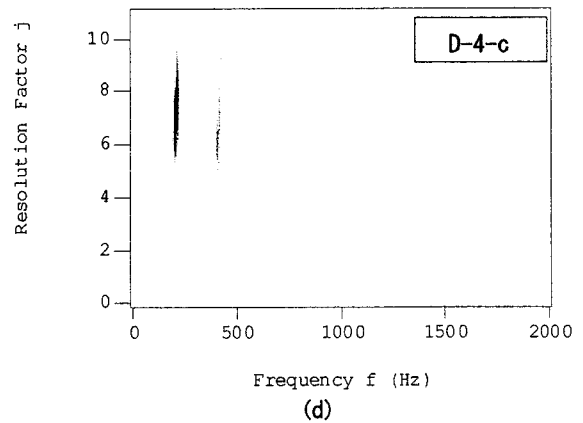
(c)



(c)



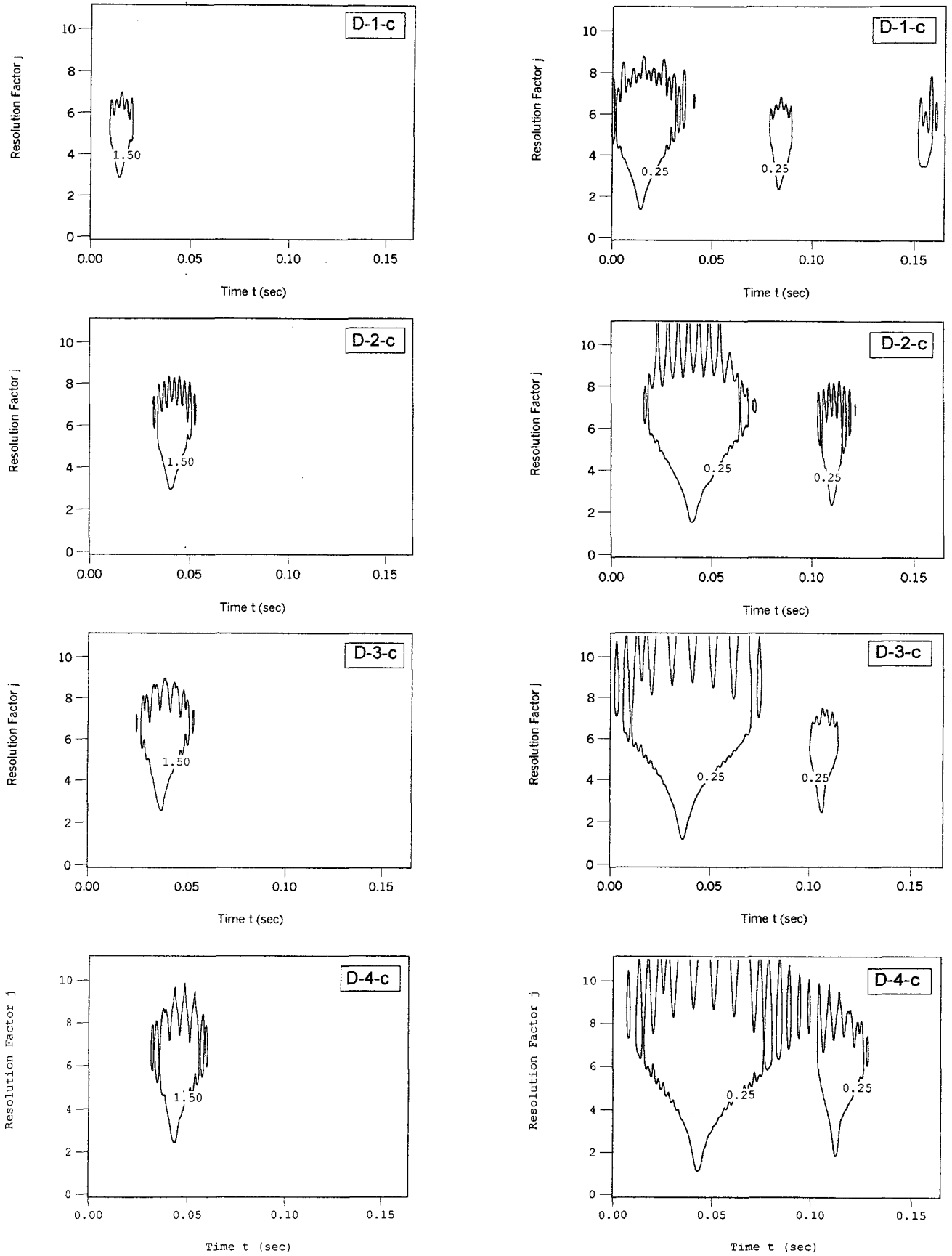
(d)



(d)

図3 波動応答記録 (D供試体)

図4 ウェブレットスペクトル (供試体D)



(a) high level contour of wavelet coefficient

(b) low level contour of wavelet coefficient

図5 ウェブレット係数 (荷重履歴に伴う特性変化)

ているが、分布的にはほとんど変化が認められない。
 (4) ウエブレット係数に関する特性

図5は、横軸に時刻 t をとり、縦軸に分解次数 j をとって、ウエブレット係数の絶対値の大きさを平滑化して等高線表示したものである。

(a)図は、ウエブレット係数が1.5gal/Hzのレベルにおける等高線を示し、上から荷重履歴が0/3～3/3と進行するように順に並べて示している。(b)図は、0.25gal/Hzのレベルにおける等高線を同様に示している。これらの結果より、ウエブレット係数のレベルが高い等高線での荷重履歴による変化よりレベルが低い等高線での変化の方が明瞭にその違いを示している。

等高線で示される形状は、分解次数が1～2近傍で細った形状で、5、6近傍において等高線で示されたピークを持ち、8近傍で扇状に広がりを見せ、8以上で楕状になっている。

ウエブレット係数による波動特性の分解は、図中に示されているように分解次数が1、2の小さい部分でパルス時刻に相当するごく近傍において大きな値を示しているが、分解次数が5～7と大きくなるとパルス時刻を挟んで広領域において大きな値を示している。さらに、分解次数が8以上で楕状で大きな値を示している。

図は上から順位に、荷重履歴を0/3～3/3に変化させた場合の結果であり、ウエブレット係数は、荷重履歴による損傷度の増加により、扇形の等高線形状が広がり、値が増加している。

図6は、供試体Dの荷重履歴を1/3にした衝撃位置1、r、u、dの4ヶ所に対するウエブレット係数の絶対値の大きさを平滑化して等高線表示したものである。

ウエブレット係数が大きな値を示している時刻は、時刻歴でパルス状の応答を示している時刻に対応している。第1波目に相当するパルス時刻での分解特性と第2波目に相当するパルス時刻での分解特性が、示されている。図の結果より、分解次数が小さい部分で、等高線の稜線に相当する部分の時刻がパルス状の応答波形の時刻と一致している。なお、図中の数値は、2波目の応答に相当するピークの約80%前後の係数[gal/Hz]を示している。

パルス時刻での分解特性の結果は、左右位置(1、r)の打撃結果より上下位置(u、d)の打撃結果の方が大きい値を示している。特に2波目の分解特性の結果は、ピーク部の約80%値の等高線とウエブレット係数値0.1[gal/Hz]の等高線でその特性が示されて

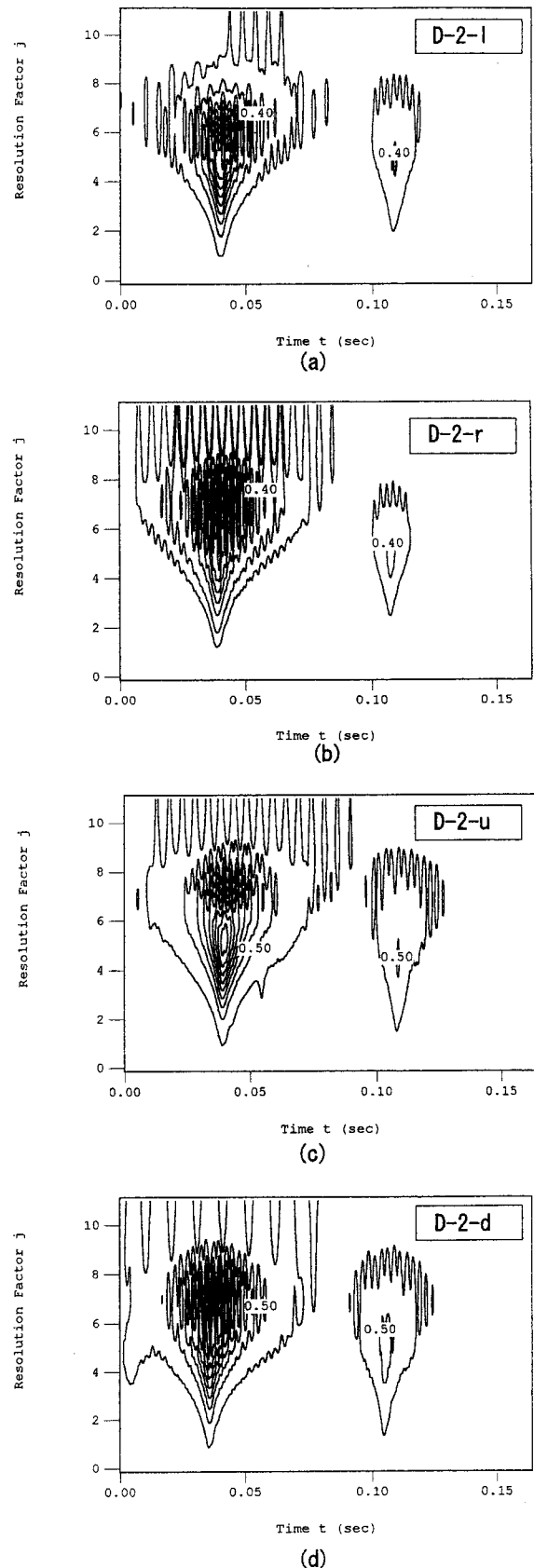


図6 ウエブレット係数 (打撃位置の違いによる特性変化)

いるが、比較的単純化されてその特性が示されている。

(5) 損傷ウェブレットスペクトルに関する特性

図7は、横軸に破壊強度と縦軸に損傷ウェブレットスペクトルとの関係を示したものである。図は、破壊強度が大きい方が損傷ウェブレットスペクトルが大きくなる傾向を示しているが、荷重履歴の違いが現れている。すなわち、荷重履歴が0/3, 2/3と荷重履歴が1/3, 3/3の傾きは、大きく異なり、前者は後者の1/3~1/5の傾向を持っている。

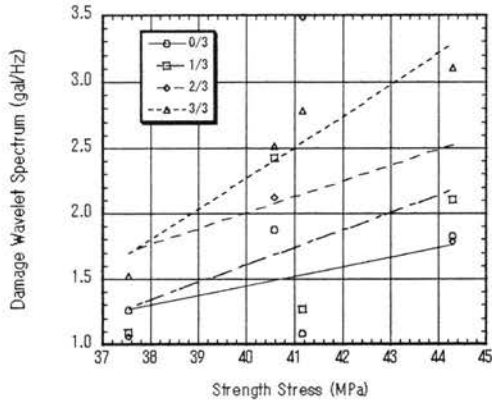


図7 損傷ウェブレットスペクトルと荷重履歴の関係

(6) ウェブレット損傷度に関する特性

図8は、横軸に荷重履歴と縦軸にウェブレット損傷度との関係を示したものである。図は、荷重履歴の進行にしたがってウェブレット損傷度が約0.5から増大して1に近づいている。供試体B, C, Dの特性は、荷重履歴の少ない状況から損傷が進んでいる傾向を示し、供試体Eの特性は、荷重履歴を多く受けて破壊荷重に近い状態で急激に損傷が進んでいる様子を示している。

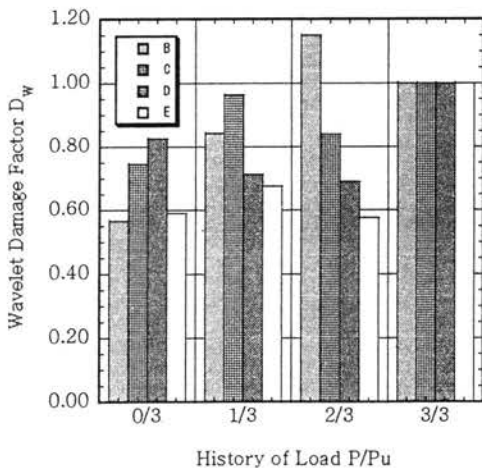


図8 ウェブレット損傷度と荷重履歴との関係

(7) ウェブレット損傷指数に関する特性

図9は、横軸にウェブレット損傷指数と縦軸に減衰指数との関係を示したものである。凡例中の正負記号は、減衰指数の算定における採用した波形(図3)の正負を意味している。

図の結果をみれば、ウェブレット損傷指数と波形の減衰指数は、よい相関を示している。

図10は、打撃位置によるウェブレット損傷指数との関係を示したものである。結果の図より、打撃位置による違いは、明確に読みとれない。荷重履歴による違いは、荷重履歴が進むことによる打撃中央部との比較において小さめに現れている。

図11は、供試体Dにおける打撃位置の違いによる減衰指数の特性を示している。ただし、荷重履歴は、1/3の状態を示している。結果の図は、波形の採用した最大・最小の値により異なるが、左右(l, r)の打撃位置の方が上下(u, d)の打撃位置の減衰指数が大きくなっている。

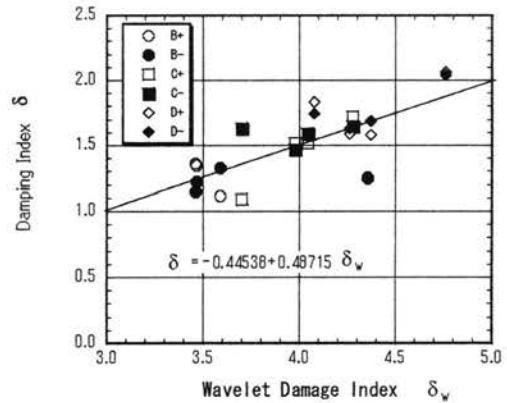


図9 ウェブレット損傷指数と減衰指数との関係

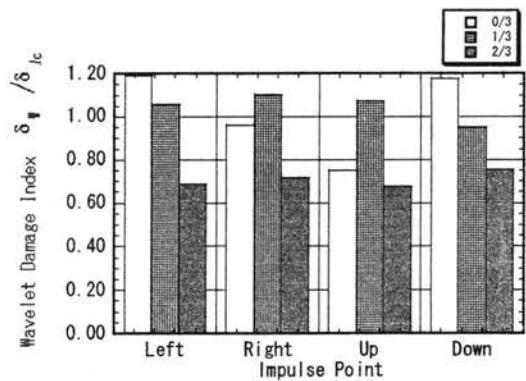


図10 衝撃位置に対するウェブレット損傷指数の関係

図12は、供試体Dに対してシュミットハンマーの打撃位置での反発力より推定強度の特性を示したものである。ただし、推定強度は、中央部の推定強度との比を採っている。打撃位置上下 (u, d) と左右 (l, r) の大きな違いは、バラッキが大きいため、見られない。ただし、荷重履歴が1/3での結果は、打撃位置上下 (u, d) の値が左右 (l, r) の値に比較して大きめの値を示している。

4. 結言

本研究は、荷重履歴を持った複合体のコンクリートの供試体に対して、シュミットハンマーによる打撃実験を行い、その波動特性を調べた。用いたコンクリートは、骨材やモルタルからなる複合材料であるが、波動特性から微視的に見て不均質であっても巨視的に見て均質な材料として扱えた。

波動特性の解析はウェブレット変換を行い、損傷度の評価としてウェブレット損傷度およびウェブレット損傷指数を定義し、その特性を抽出した。その結果次のような特性を示した。

- (1) 時間と分解次数とで表示したウェブレット係数の特性は、荷重履歴の影響をよく表現していた。
- (2) ウェブレット損傷度は、荷重履歴が進むにしたがい増加していた。
- (3) ウェブレット損傷指数と減衰指数とは、よい相関を示していた。
- (4) 供試体の打撃位置の影響は、ウェブレット損傷度およびウェブレット損傷指数に明瞭に表現できなかった。

最後に本実験に関する多くのデータを解析していただいた本校卒業生の孫福英君に感謝する次第である。

参考文献

- 1) Perrone, M.P. and Cooper, L.N.: "When networks disagree: ensemble methods for hybrid neural networks", *Artificial neural networks for speech and vision*, R.J. Mammone, ed., Chapman and Hall, 1993, pp. 126-142.
- 2) Levin, R.I. and Lieven, N.A.J.: "Dynamic finite element updating using neural networks", *J. Sound and Vibration*, 210, 1998, pp. 93-608.
- 3) Atalla, M.J. and Inman, D.J.: "On model updating using neural networks", *Mech. Sys. and Signal Processing*, 12, 1998, pp. 135-161.
- 4) Paya, B.A., Esat, I.I. and Badi, M.N.M.: "Artificial neural network based fault diagnostics of rotating machinery using wavelet transforms as a pre-processor", *Mech. Sys. and Signal Processing*, 11, 1997, pp. 751-765.
- 5) Marwala, T.: "Damage identification using committee of neural networks", *J. Eng. Mech.*, Vol. 126, No. 1, 2000, pp. 43-50.
- 6) Mallat, S.G.: "A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 11, No. 7, 1989, pp. 674-693.

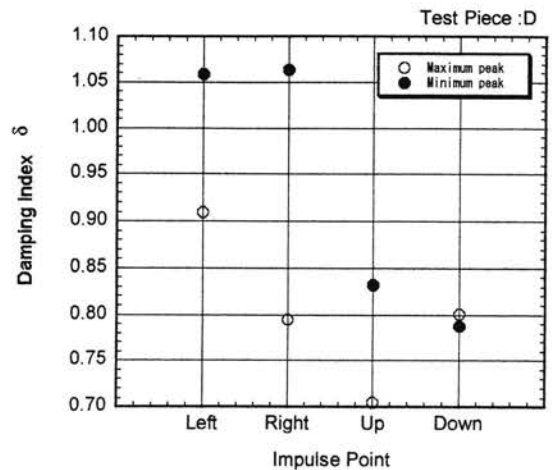


図11 衝撃位置に対する減衰指数の関係

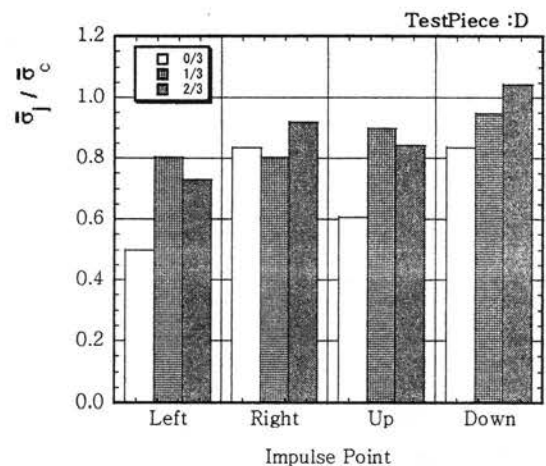


図12 衝撃位置に対する推定応力の関係