

論文 電磁パルス法の適用による水平ひび割れを有する RC 床版の振動挙動に関する基礎的研究

鈴木 真*1・中野 雄斗*2・寺澤 広基*3・鎌田 敏郎*4

要旨：塩害や疲労等により，道路橋 RC 床版の損傷が顕在化し，RC 床版内に水平ひび割れが発生する場合がある。水平ひび割れは土砂化の発生や耐力の低下につながる損傷の一つである。筆者らは，電磁パルス法に着目し，実橋 RC 床版をモデル化した衝撃応答解析および損傷が顕在化し切断・撤去された実橋 RC 床版に対する実験を行った。その結果，水平ひび割れが発生した RC 床版に電磁力を作用させると，たわみ共振が発生し，振動がより大きくなることを確認した。また，波形エネルギーを指標とすることで，水平ひび割れの有無を非破壊で検出することができる可能性を示唆することができた。

キーワード：電磁パルス法，RC 床版，水平ひび割れ，たわみ共振，波形エネルギー

1. はじめに

近年，高度経済成長期に建設された道路構造物の老朽化が懸念されている。図-1に示すように，道路橋 RC 床版の損傷の一つとして，RC 床版内に発生する水平ひび割れが問題となっている。水平ひび割れは，RC 床版の耐力性能の低下につながる損傷である。水平ひび割れが顕在化した場合，輪荷重の繰り返し载荷により土砂化が生じ，道路の陥没や床版の抜落ちが発生する危険性がある。したがって，早期の段階で水平ひび割れを検出し，適切な補修対策を講じることが重要である。しかし，RC 床版内に発生した水平ひび割れを，外観目視により検出することは極めて難しく，非破壊検査により損傷が顕在化する前にひび割れの有無を把握できる手法が求められている。

筆者らは，RC 部材内にある鉄筋を非接触で加振する電磁パルス法に着目しており，既往の研究では，電磁パルス法を用いて RC 床版の水平ひび割れを検出できる可能性が示唆されている¹⁾。しかし，電磁パルス法の適用時に RC 床版の振動挙動がひび割れの有無により違いが生じるメカニズムについては詳しく検討されていない。よって本研究では基礎的な研究として，電磁パルス法により加振可能な鉄筋のかぶりの範囲に関する実験を行うとともに，衝撃応答解析により水平ひび割れの有無による RC 床版の振動挙動の違いについて検討を行った。更に，損傷が顕在化し切断・撤去された実橋 RC 床版を用いた供試体実験を行い，既設床版と増厚コンクリート間の剥離ひび割れおよび鉄筋位置の腐食ひび割れの有無による評価指標の値の違いを確認した。

2. 電磁パルス法の原理

電磁パルス法の原理を図-2に示す。RC 構造物の表面に対して，電源装置から導線を巻き付けた励磁コイルにパルス状の大電流を流すことにより，励磁コイルの周辺に瞬間的な動磁場を発生する。これによりコンクリート内部にある鉄筋等の強磁性体に電磁力を作用させ，非接触で振動させることができる。強磁性体の振動に伴って発生した弾性波を，RC 構造物の表面に設置した振動センサにより検出し，これを分析することによって，コンクリート内部の欠陥の有無や強磁性体界面の状態等を把握できる可能が示されている²⁾。

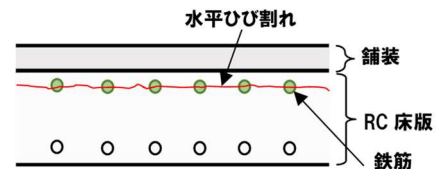


図-1 RC 床版の水平ひび割れ

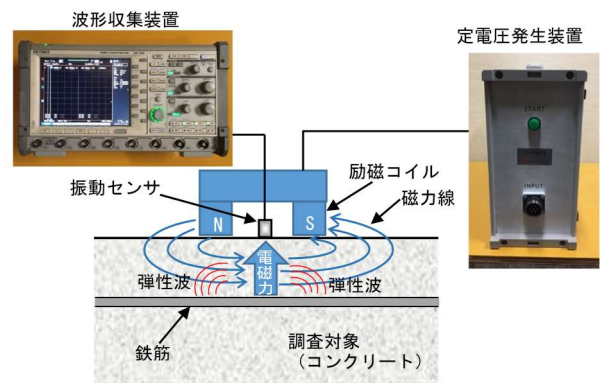


図-2 電磁パルス法の原理

*1 大阪大学大学院工学研究科 地球総合工学専攻 研究員 博 (工) (正会員)
 *2 大阪大学大学院工学研究科 地球総合工学専攻 博士前期課程
 *3 大阪大学大学院工学研究科 地球総合工学専攻 助教 博 (工) (正会員)
 *4 大阪大学大学院工学研究科 地球総合工学専攻 教授 博 (工) (正会員)

3. かぶりの違いが鉄筋の振動挙動に与える影響

3.1 実験概要

本実験は、電磁パルス法において適用可能なかぶりの大きさを検討することを目的として実施した。

図-3 に示すように、長さ 1800mm の異形棒鋼 (D19) の両端から 350mm の位置において、寸法が 100mm×100mm×100mm の木製の架台により支持し、電磁パルス法により振動させた。

励磁コイルの外形寸法を、図-4 に示す。励磁コイルは、電磁鋼板を高さ 100mm、長さ 200mm、幅 50mm の凹字形に加工したものに、短辺部の下方部に導線を巻き付けた。励磁コイルの導線の巻き数は 20 ターン、定電圧発生装置のコンデンサ容量は 1000 μ F、電圧は 600V とした。

図-5 に本実験に使用した計測装置の外観を、図-6 に実験状況を示す。本実験では、励磁コイルの長辺部の中心線と鉄筋の軸方向を平行、かつコイルの中心と鉄筋の軸方向中心とを一致させ、励磁コイルの下端を鉄筋に向けてるように配置した。また、励磁コイル下端および (励磁コイル側の) 鉄筋の表面からの距離をかぶりと想定し、30mm、60mm、90mm、120mm、150mm、180mm および 210mm の 7 パターンにおいて計測を行った。鉄筋の振動は、鉄筋の表面に反射シールを貼り付け、レーザドップラー振動計により計測した。

3.2 実験結果

図-7 に最大振幅値およびかぶりとの関係を示す。図-7 より、かぶりが大きくなるに従って、最大振幅値は小さくなることがわかった。一方、一般的な RC 床版のかぶり (40~45mm) の範囲では、2.5V 以上の振幅が得られていることから、本計測装置を使用した電磁パルス法の適用は、十分可能であることがわかった。

4. RC 床版の振動挙動に関する解析的検討

4.1 解析概要および条件

電磁パルス法により、水平ひび割れが発生した RC 床版が、どのような振動挙動を示すのか衝撃応答解析により検討を行った。

解析モデルの概要を図-8 に示す。解析モデルの大きさは、現地調査において概ね 1m 間隔で計測点を設定することから、1000mm×1000mm、厚さ 100mm のコンクリート板とした。水平ひび割れは、厚さ 1mm の空気層を



図-3 実験要領 (平面図)

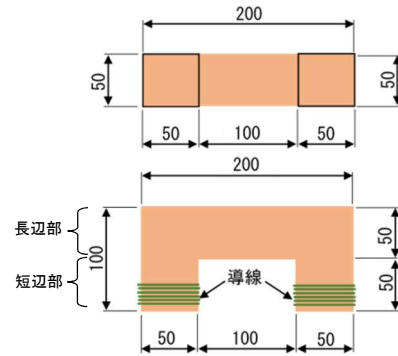


図-4 励磁コイルの外形寸法



図-5 計測装置外観



図-6 実験状況

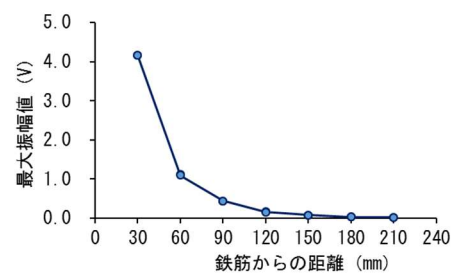


図-7 かぶりと最大振幅値の関係

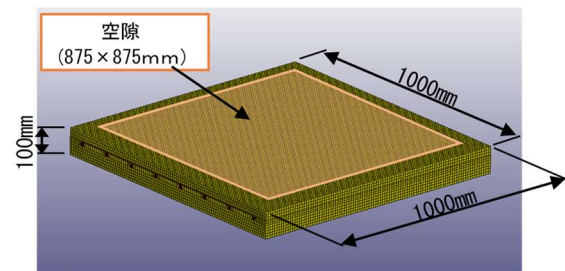


図-8 解析モデル図

設定することで模擬した。空隙を設定しない解析モデル A および空隙を設定した解析モデル B の 2 種類とした。各解析モデルとも、長さ 1000mm、直径 16mm の鉄筋を上縁からかぶり 43mm および 125mm 間隔で合計 8 本を配置した。解析モデル B の空隙は、大きさは 875mm×875mm、厚さ 1mm とし、コンクリート板と空隙の中心が一致するように、上面から深さを 35mm の位置に設定した。解析モデルの側面は、板が連続するような設定にした。各モデルの断面図を図-9 に示す。

電磁パルス法により作用する力の波形は、図-10 に示すパルス波形とし、供試体の中央から解析モデルに対して鉛直方向に作用させた。荷重強度は、前項 3.1 に記した実験において、鉄筋表面上で計測した磁束密度の大きさを基に、図-11 に示す通りとした。また、パルス幅は 1.0ms (励磁コイルの巻き数 20 ターン相当) とした。出力点は、図-12 に示すように解析モデル上面において、鉄筋軸方向にそれぞれ解析モデルの中心位置から 350mm までの範囲で 50mm 間隔の点とした (全 8 計測点)。出力波形は速度として、サンプリング間隔 5μs、サンプリング数 10000 点とした。解析に入力した物性値を表-1 に示す。各モデルは、いずれも 8 節点 6 面体ソリッドモデルで構成されており、要素の最大寸法は 10mm とした。

4.2 解析結果

各解析モデルの中央および中央から鉄筋軸方向に 350mm 離れた位置における時刻歴波形を、それぞれ図-13 および図-14 に示す。両図より、中心位置においてより大きく振動していることがわかる。また、空隙がない解析モデル A に対して、空隙がある解析モデル B の速度波形は、減衰が遅く振動している時間が長いことがわかる。

ここで、振動の大きさを表す指標として、既往の研究³⁾と同様に式 (1) で示される波形エネルギーを適用した。

$$E = \sum_{i=1}^{n=10000} y_i^2 \quad (1)$$

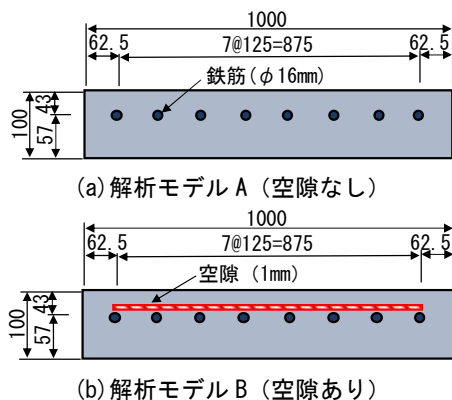


図-9 解析モデル (断面図)

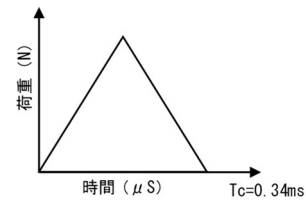


図-10 入力波形

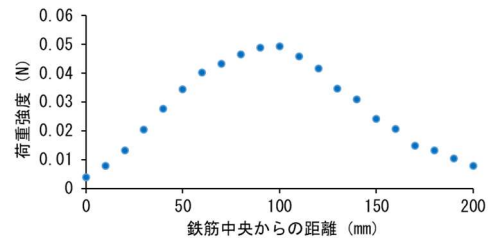


図-11 荷重の大きさ

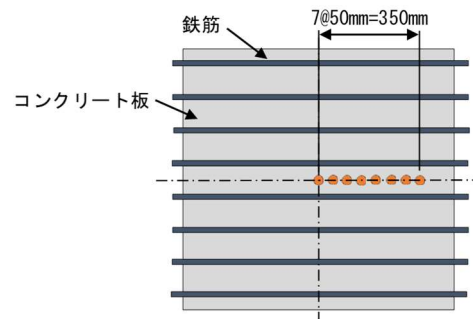


図-12 計測点

表-1 物性値

	密度 (g/cm ³)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
コンクリート	2.3	30	0.2
鋼	7.85	200	0.3

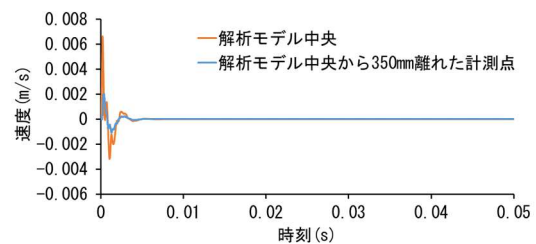


図-13 時刻歴波形 (解析モデル A (空隙なし))

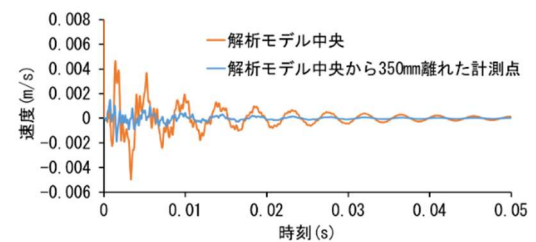


図-14 時刻歴波形 (解析モデル B (空隙あり))

ただし、 E は波形エネルギー、 y_i は時刻 i における時刻歴波形の振幅値である。すなわち、波形エネルギーは、時刻歴波形における各時刻の振幅値の 2 乗和である。式

(1) を適用して、両解析結果に対する波形エネルギーを算出した結果を図-15 に示す。図-15 から、各解析モデルとも中心位置で最も波形エネルギーが大きくなり、中心から縁部に向けて離れていくに従い減少していくことがわかった。また、空隙がある解析モデル B において、波形エネルギーが大きくなる傾向を示すことがわかった。特に解析モデル中央部では、解析モデル A の波形エネルギー ($2.03 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}^2$) に対して、解析モデル B の波形エネルギー ($7.85 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}^2$) が約 3.9 倍大きくなっている。このことから、解析モデル A と比較して解析モデル B には、より大きな振動が発生していたことがわかる。

上記より、解析モデル B において空隙より上縁側にある部分に、たわみ共振が発生していることが推測される。ここで、たわみ共振周波数の算出式⁴⁾を式 (2) に示す。

$$f = \lambda \frac{\pi^2 h}{b^2} \sqrt{\frac{E}{3(1-\sigma)^2}} \quad (2)$$

ただし、 f : たわみ共振周波数、 h : 水平ひび割れより上縁側 (かぶり部) にあるコンクリート部分の厚さ、 b : 板の短辺の長さ、 E : ヤング率、 σ : ポアソン比であり、板が正方形である場合、 $\lambda=3.65$ である。式 (2) を適用して、解析モデル B に対するたわみ共振周波数を算出したところ、 $f=0.82\text{kHz}$ となった。図-16 に解析モデル B において計測された波形を、FFT 変換して得られた周波数スペクトルの一例を示す。図-16 より、 $f=0.22\text{kHz}$ 近傍において板厚(100mm)に相当するたわみ共振によるピークが発生し、また、 $f=0.82\text{kHz}$ 近傍でかぶりコンクリート部 (43mm) のたわみ共振によるピークを確認することができた。なお、当該たわみ共振は 3 次の固有振動モードであった。

解析モデル A に対して、解析を行った結果をコンター図 (荷重を作用させてから $300\mu\text{s}$ 後) にして図-17 に示す。図-17 (a) は解析モデル全体を示し、図-17 (b) は鉄筋に対して直角方向に解析モデルの中央部を切断した断面を、図-17 (c) は鉄筋と同方向に解析モデルの中央部を切断した断面を示す。また、空隙がある解析モデル B に対して、解析を行った結果をコンター図 (荷重を作用させてから $4790\mu\text{s}$ 後) にして図-18 に示す。図-18 (a) は解析モデル全体を示し、図-18 (b)~(c) は、図-17 と同様の切断面とした。

図-17 (b) および図-17 (c) を見てみると、解析モデルの断面が上縁から下縁にかけて一様に振動していることを確認することができる。これに対して、図-18 (b) および図-18 (c) を見てみると、解析モデル内に設定した空隙より上縁側にあるコンクリート部にたわみ共振が発生

していることを確認することができる。

上記より、空隙がある場合において、たわみ共振が発生することにより、空隙より上縁側のコンクリートの振動が大きくなり、波形エネルギーに差が生じることが確

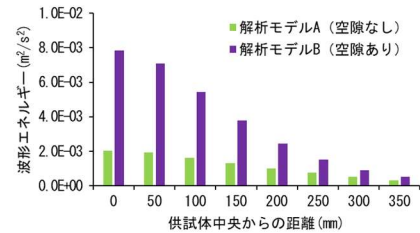


図-15 波形エネルギー

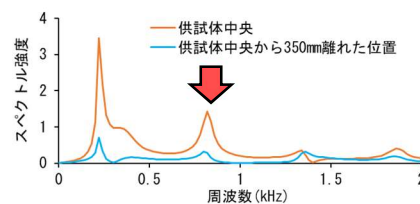
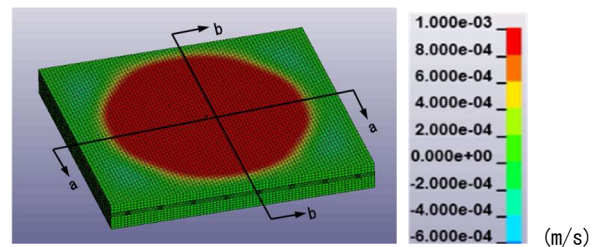
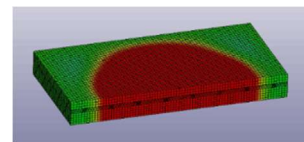


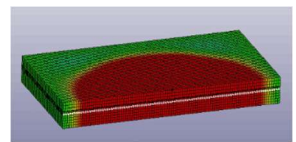
図-16 周波数スペクトル (解析モデル B)



(a) 全体 ($300\mu\text{s}$)

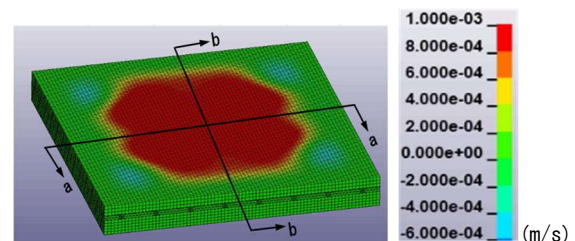


(b) a-a 断面

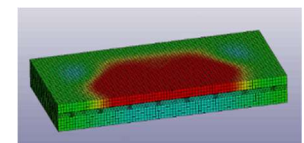


(c) b-b 断面

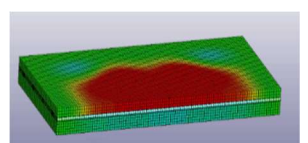
図-17 コンター図 (解析モデル A (空隙なし))



(a) 全体 ($4790\mu\text{s}$)



(b) a-a 断面



(c) b-b 断面

図-18 コンター図 (解析モデル B (空隙あり))

認することができた。また、波形エネルギーを指標とすることで、電磁パルス法が RC 床版内に発生した水平ひび割れの検出に対する適用性が示唆されただけでなく、水平ひび割れが RC 床版の振動挙動に与える影響について確認することができた。

5. 撤去床版による基礎評価実験

5.1 撤去床版の概要

上記の実験および解析結果を踏まえて、実橋 RC 床版に対して、電磁パルス法の適用性を検討することを目的とした実験を行った。本実験は、平成 15 年に上面増厚が行われたが、その後さらに損傷が顕在化し、平成 29 年に床版取替え工事が行われた際に、撤去された実橋 RC 床版に対して実施された。既設床版には普通コンクリート（設計基準強度 $f_{ck} = 24\text{N/mm}^2$ ）、増厚コンクリートには鋼繊維補強コンクリートが使用されていた。撤去床版の外観を、図-19 に示す。

撤去床版の外形寸法は、5500mm×2200mm であり、厚さは標準部で 260mm である。設計図書には既設床版厚が $t=210\text{mm}$ 、増厚コンクリートの厚さは、 $t=60\text{mm} \sim 80\text{mm}$ であった。なお、本撤去床版は、アスファルト舗装が切削された状態である。本橋の RC 床版の水平ひび割れの発生状態を確認するために、撤去作業を行う事前に RC 床版の下面から削孔を行い、コンクリートコアを採取して目視確認を行った。各計測点の近傍において、既設床版および増厚コンクリートの境界面（以下、床版境界面と称す）において、両者が剥離して発生する水平ひび割れ（以下、剥離ひび割れと称す）があることを確認した。また、RC 床版内の鉄筋の腐食に起因する水平ひび割れ（以下、腐食ひび割れと称す）が発生している部位もあった。なお、下段鉄筋位置には、水平ひび割れが発生していなかった。

5.2 実験概要

本実験は、水平ひび割れの発生状態が異なる箇所を選定して計測点とし、撤去床版の上面から電磁パルス法により実施した。計測装置は、前項 3.1 に記したものを使用した。励磁コイルの導線の巻き数は 20 ターンとし、定電圧発生装置の電圧は 600V とした。振動センサは、15kHz～100kHz の間に応答感度を有し、特に 25kHz～80kHz の間では感度特性が比較的フラットな AE センサを使用した。AE センサは、鉛直方向における弾性波を受信するが、その時刻歴応答は電気信号の振幅 (mV) として出力する。受信した信号は、サンプリング間隔 5 μs 、サンプリング数 10,000 点の時刻歴応答波形として波形収集装置に記録した。なお、図-20 に実験状況を示す。

本撤去床版には、異形棒鋼 D16 が、125mm 間隔で橋軸方向および橋軸直角方向に配置されていた。ここで、励

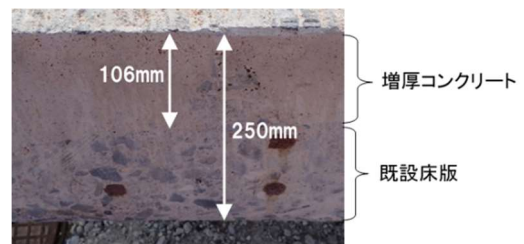
磁コイルは、橋軸方向鉄筋の直上に励磁コイルの長辺部が並行となるように設置した。また、AE センサは、励磁コイルから約 50mm 離れた箇所に設置した。



図-19 撤去床版の外観



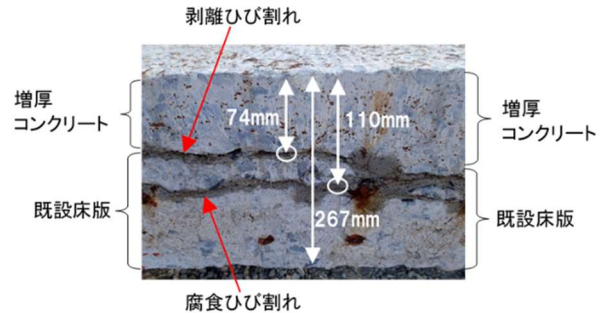
図-20 実験状況



(a) 健全部



(b) 剥離ひび割れの発生箇所



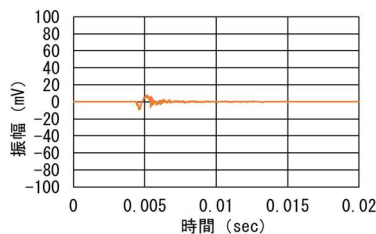
(c) 剥離ひび割れおよび腐食ひび割れの発生箇所

図-21 計測点の状況

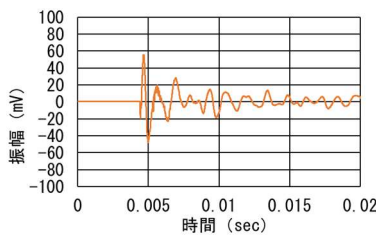
計測は、図-21に示すように、水平ひび割れがない健全な部位（床版境界面に打継ぎ面があるが外観上一体化している）、床版境界面に剥離ひび割れがある部位および剥離ひび割れだけでなく上段鉄筋位置に腐食ひび割れがある部位の3箇所に対して行った。なお、水平ひび割れの状態は、撤去床版の切断面を外観目視により確認した。健全部については床版上面から床版境界面までの深さを、各ひび割れについては床版上面から各水平ひび割れまでの深さを図-21に示す。実際の計測点は、切断面から撤去床版中央部に向かって500mm離れた位置とした。

5.3 実験結果および考察

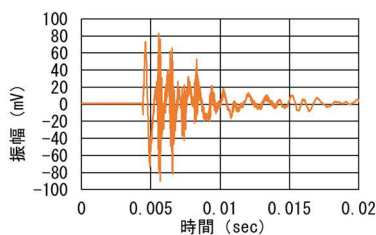
受信波形の一例を図-22に、波形エネルギーを算出した結果を図-23に示す。振幅および波形エネルギーとも、水平ひび割れがない部位に対して、水平ひび割れが発生している部位において大きくなるのがわかった。特に



(a) 健全 (20 ターン)



(b) 剥離ひび割れ (20 ターン)



(c) 剥離ひび割れおよび腐食ひび割れ (20 ターン)

図-22 受信波形の一例

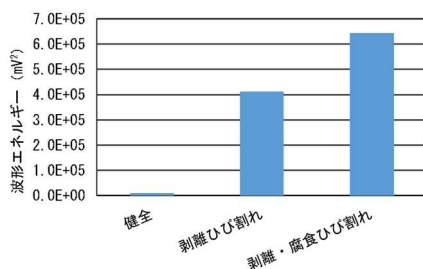


図-23 波形エネルギー

健全部および剥離ひび割れが発生している部位における波形エネルギーの比率は1:45となった。これは、先述の解析結果と同様に、剥離ひび割れが発生している部位において、たわみ共振が発生したことに起因すると考えられる。また、剥離ひび割れと腐食ひび割れが発生している場合には、振幅および波形エネルギーはさらに大きくなるのが分かった（健全部との波形エネルギーの比率は1:70）。上記より、電磁パルス法を適用することにより、一定の深さ（鉄筋位置または床版境界面）および一定の面積を有する水平ひび割れであれば、周波数分析結果等を参照することによって、RC床版に発生した水平ひび割れを検出することができるだけでなく、現場の環境によっては衝撃弾性波法では検出が難しくなると想定される剥離ひび割れおよび腐食ひび割れの有無を検出することができる可能性が示唆された。

6. まとめ

本研究において得られた知見を以下に示す。

- (1) 一般的に RC 床版に採用されているかぶりであれば、電磁パルス法を適用することは十分に可能である。
- (2) 水平ひび割れが発生した RC 床版に電磁パルス法を適用した場合、水平ひび割れより上縁側にあるコンクリート部にたわみ共振が発生することにより、当該部位の振動が大きくなる。
- (3) 振動の大きさを示す波形エネルギーを指標として、RC床版の水平ひび割れを検出できる可能性が示唆された。

参考文献

- 1) 鈴木真, 安井和也, 寺澤広基, 内田慎哉, 鎌田敏郎: 上面増厚後に再劣化した RC 床版の損傷状況の非破壊評価手法, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.19, pp.641-646, 2019.10
- 2) 宗像晃太郎, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 森和也: 電磁パルスにより加振したコンクリート内部鉄筋の振動特性に関する基礎研究, 日本コンクリート工学会年次論文集, Vol. 29, No.2, pp.781-786, 2007.7
- 3) 木村貴圭, 内田慎哉, 宮田弘和, 鎌田敏郎: 電磁パルス法による接着系アンカーあと施工アンカー固着部の非破壊検査手法に関する実験的検討, 日本コンクリート工学会年次論文集, Vol.36, No.1, pp.2116-2121, 2014.7
- 4) 弾性波法の非破壊検査研究小委員会報告書および第2回弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関するシンポジウム講演概要集, 土木学会, 2007.2