

# 論文 電磁力によりコンクリート内部の鉄筋を加振した際に生じる弾性波に基づくはく離の評価方法

宗像 晃太郎\*<sup>1</sup>・鎌田 敏郎\*<sup>2</sup>・内田 慎哉\*<sup>3</sup>・米森 輝\*<sup>4</sup>

**要旨：**電磁力によりコンクリート内部の鉄筋を加振し、その際に生じた弾性波をコンクリート表面の複数の位置に貼り付けたセンサにより受振し、得られた波形エネルギーの値および分布傾向に着目することにより、はく離の有無やその位置を評価する手法についての検討を行った。その結果、はく離供試体における波形エネルギーの分布傾向は、健全供試体での分布傾向と明らかに異なることを確認した。しかも、この分布傾向に着目すると、はく離の位置やその有無をおおよそ把握できる可能性があることも明らかにした。

**キーワード：**鉄筋コンクリート、はく離、非破壊試験、電磁力、弾性波

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物において鉄筋が腐食すると、錆により鉄筋とコンクリートとの付着状況に変化が生じ、腐食の程度によっては境界部がはく離する。腐食がさらに進行すると、はく離部からひび割れが更に進展し、コンクリート表面に腐食ひび割れとして確認されることになる。腐食ひび割れの発生が著しくなると、最終的にはコンクリート片のはく落を引き起こし、部材の劣化を加速させる要因となる。したがって、部材の耐荷性能や耐久性能を確保する意味で、コンクリート表面に腐食ひび割れが発生するよりも早い時期に、鉄筋とコンクリートとの界面のはく離を、コンクリート表面から非破壊によりの確に把握することが重要となる。

このような背景に対して、著者らは、電磁力によりコンクリート内部の鉄筋を加振し、この振動をコンクリート表面に貼り付けたセンサにより受振する方法を用いて、はく離やかぶりおよび鉄筋径に起因する鉄筋の振動特性の違いについての検討を行っている<sup>1)</sup>。その結果、鉄筋径やかぶりの違いが鉄筋の振動特性に与える影響は小さいことがわかった。また、コンクリート内部の鉄筋長手方向全周にわたってはく離が生じている供試体とはく離が生じていない健全な供試体とを比較することにより、鉄筋周りのはく離をおおよそ把握できることも明らかにした。この方法では、様々な条件下における健全部での振幅値が既知であることが前提となる。しかしながら、一般的には事前にこれらの値を得ることは容易ではない。

そこで本研究では、上記手法の高度化を図るため、コンクリート表面の複数の位置にセンサを貼り付け、得ら

れた波形エネルギーの値およびその分布傾向に着目することにより、はく離の有無やその位置を評価する手法についての検討を行った。

## 2. はく離の評価原理

### 2.1 電磁力による鉄筋の加振原理

コンクリート内部の鉄筋を加振するため、写真-1に示す励磁コイルを用いた。この励磁コイルにパルス状の電流を流し、コイル周辺に瞬間的な磁場を発生させる。この磁場内に鉄筋が存在すると、鉄筋に起電流が流れて新たな磁界が生じる。鉄筋による磁界とコイルによる磁界との電磁相互作用によって電磁力が鉄筋に働き、鉄筋が振動する。

### 2.2 鉄筋加振時に生じる弾性波特性

電磁力によって加振された鉄筋の振動は、コンクリートへ弾性波として伝播する。そのため、コンクリート表面に設置したセンサで捉えた弾性波特性には、鉄筋とコンクリートの界面の状態に起因した振動特性が含まれることになる。すなわち、はく離などが生じていない場合（界面の状態が良い場合）では、鉄筋単体の振動は、コンクリートの拘束による影響を受けて、はく離があるケースと比較して小さくなる。しかしながら、鉄筋とコンクリートとの界面の付着が良いため、鉄筋の振動がコンクリートへと伝播する際は、波のエネルギー損失は小さくなる。これに対して、鉄筋周りにはく離が生じている場合では、鉄筋そのものの振動は健全な場合と比較して大きくなるものの、その振動が弾性波としてコンクリートへと伝播する際は、はく離によって波の伝播が阻害される。そのため、コンクリートへ伝播する波のエネルギー

\*1 大阪大学 工学部地球総合工学科 (正会員)

\*2 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻教授 工博 (正会員)

\*3 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (正会員)

\*4 大阪大学 工学部地球総合工学科

は、界面の状態が良い場合と比べて小さくなる。したがって、鉄筋とコンクリートとの界面の状態に応じて、コンクリート表面で受振する波のエネルギーが変化することになる。

### 2.3 本手法によるはく離評価の原理

鉄筋コンクリート部材において、鉄筋が局部的に腐食している場合、図-1 に示すように、鉄筋長手方向においては、はく離が生じている部分（はく離部）と生じていない部分（健全部）とに大別できる。かぶりやはく離長さおよび部材の形状にもよるが、はく離直上でかつはく離長手方向の中央にセンサを設置した場合（図-1 a）参照）、はく離部からの波のエネルギーは、健全部のそれと比較して小さくなる。しかしながら、はく離部からの弾性波の伝播に加えて、図に示す健全部1および健全部2の相互からも波が伝播することになる。両健全部からの波の伝播は、センサ設置位置から考えて、波の位相がほぼ同じであるため、波の重ね合わせによってセンサで受振した波のエネルギーは大きくなると予測される。

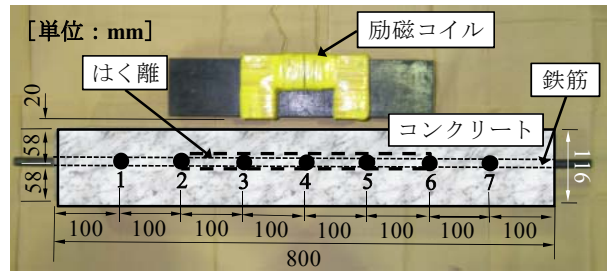
これに対して、はく離部端部の直上においてセンサを貼り付けた場合（図-1 b）参照）では、はく離部および健全部1から弾性波が伝播するものの、波のエネルギーは健全部1からのものの方が明らかに大きくなる。ここで、健全部1における鉄筋の振動の大きさについて考えると、励磁コイルに最も近いはく離部と健全部1の境界位置において鉄筋の振動が最も大きくなる。この位置のほぼ直上にセンサが貼り付けてあるため、波のエネルギーが大きくなると考えられる。

一方、はく離部からある程度距離を離し、かつ健全部直上で波形エネルギーを測定した場合（図-1 c）参照）は、センサ直下およびその周辺に健全部1があるため、その他のケースと比べて健全部からの距離が最も近くなり、波のエネルギーが大きくなると考えられる。しかしながら、励磁コイルとセンサとの距離が離れているため、センサ直下周辺の健全部1における鉄筋の振動は小さい。したがって、励磁コイルとセンサとの距離によっては、波のエネルギーが変動する可能性が考えられる。

以上のことから、コンクリート表面の複数の位置にセンサを貼り付け、各センサで得られた波のエネルギーを把握することにより、はく離供試体におけるはく離部の検知に加えて、はく離部と健全部との境界位置について把握できる可能性があると考えられる。

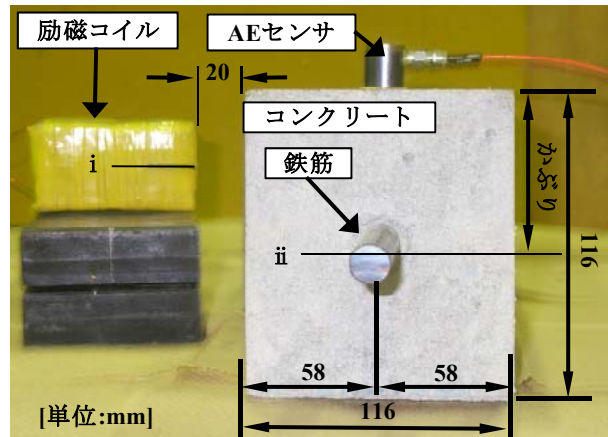
### 3. 実験概要

実験では、本手法の適用範囲を確認することを目的に、以下の2通りの検討を行った。すなわち、「実験I」では、鉄筋のかぶりの違いが弾性波の伝播特性に与える影響について検討した。また、「実験II」では、はく離長さの



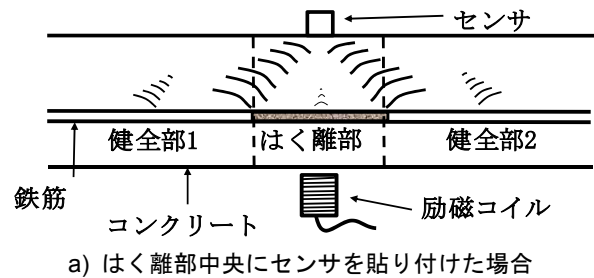
● : AE センサ貼り付け位置

a) 平面状況

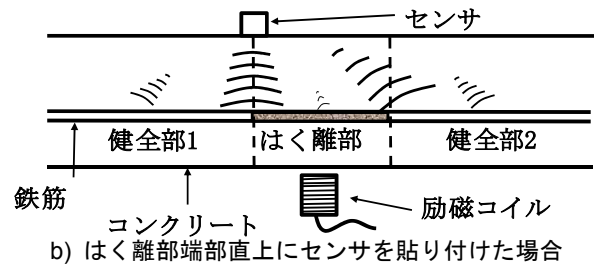


b) 断面状況

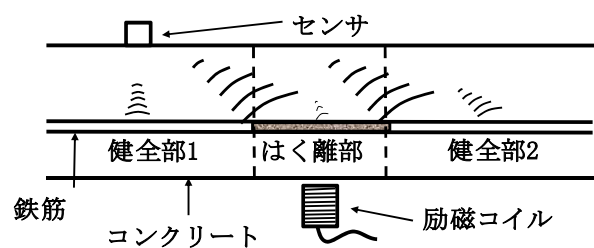
写真-1 供試体概要および計測状況



a) はく離部中央にセンサを貼り付けた場合



b) はく離部端部直上にセンサを貼り付けた場合



c) 健全部にセンサを貼り付けた場合

図-1 はく離の評価原理

違いが弾性波の伝播特性に与える影響についての検討を行った。以下にそれぞれの実験ケースの概要を示す。

### 3.1 実験 I

#### (1) 供試体

ここでは、直径 16mm、長さ 1000mm の丸鋼を、かぶり 30mm、60mm および 90mm とした供試体をそれぞれ 1 体ずつ、合計で 3 体作製した (表-1 参照)。実験において鉄筋の加振状態を確認することを目的に、鉄筋はコンクリート長手方向両端部からそれぞれ 100mm 突出させた。コンクリート部分の寸法は、高さ 116mm×幅 116mm×長さ 800mm である (写真-1 参照)。いずれの供試体においても、はく離を模擬するために、鉄筋長手方向の中央部において、高発泡ポリエチレンシートを厚さ 4mm でそれぞれ巻き付けた。はく離長さは 400mm とし、鉄筋の長手方向の中心位置とはく離の長手方向の中心位置とが一致するようにした。コンクリートの配合を表-2 に示す。なお、比較のため、はく離を模擬していない健全な供試体を、各かぶりのケースにつき 1 体ずつ作製した。

#### (2) 鉄筋の加振方法

励磁コイルは、電磁鋼板にマグネットワイヤを巻き付けたものを使用した。コイルの設置位置は、鉄筋を安定して加振するために、鉄筋の長手方向と磁束線とをほぼ平行にする必要がある。そこで、供試体とコイルの長手方向中心位置を一致 (写真-1 a) 参照) させた上で、写真-1 b) に示すコイルの中心 i と鉄筋の中心 ii とが一致するように励磁コイルを設置した。なお、コイルは、コンクリート表面から 20mm の位置に非接触で設置している (写真-1 a) 参照)。電気信号発生器を用いて、最大電圧 645V、パルス幅 1ms の電流を励磁コイルに流すことにより、鉄筋を加振した。

#### (3) 弾性波の受振方法

電磁パルスによって加振された鉄筋の振動により発生した弾性波は、コンクリート表面に貼り付けたセンサにより受振した。コイルとセンサとの位置関係は、実構造物に本手法を適用することを考慮し、写真-1 に示す通りとした。この写真に示すコイルとセンサとの位置関係は、図-1 のそれとは異なるものの、両者における鉄筋の加振状況および加振により生じる弾性波の伝播挙動に違いはほとんどないと考えられる。なお、センサに対して励磁コイルが影響を及ぼさないことを、実験によ

り確認している。実験では、まず、写真-1 a) の No.1 にセンサを貼り付け、センサの感度を確認した後、鉄筋の状態に応じた弾性波を受振した。センサで受振した電圧波形は、サンプリング周波数 2MHz でデジタル化した後、波形収集装置に記録した。続いて、励磁コイルを固定したまま、センサを No.2 の位置に貼り替え、同様に弾性波の受振および記録を行った。受振前には、No.1 と No.2 での感度が同じであること確認した。同様に、No.3 から No.7 まで、同一の感度となるようにセンサを貼り付け、電圧波形の測定を行った。各点の間隔 (センサ設置間隔) は、100mm である。また、実験で用いたセンサは、より微弱な信号を検出するため、感度の良い共振型の AE センサとした。なお、本研究では、センサ設置面から鉄筋表面までの距離をかぶりとした (写真-1 b) 参照)。

### 3.2 実験 II

#### (1) 供試体

はく離長さの違いが弾性波の伝播特性に与える影響について検討するため、実験 I のかぶり 30mm、はく離長さ 400mm の供試体に加えて、かぶりを 30mm と一定とした上で、はく離長さを 200mm にした供試体を作製した。表-1 に実験 II のケースを示す。なお、鉄筋の直径・種類・長さ、はく離の模擬方法・模擬材料・はく離設置位置、コンクリートの寸法・配合は、実験 I と同じである。

#### (2) 鉄筋の加振および弾性波の受振方法

ここでは、実験 I と同じ方法で行った。

## 4. 実験結果および考察

### 4.1 かぶりの違いが弾性波の伝播特性に与える影響

本研究では、弾性波の伝播特性として、センサで受振した電圧波形の波形エネルギーを用いることとした。ここでいう波形エネルギーとは、電圧波形における振幅値をそれぞれ二乗した後、それらを総和することにより算出し

表-1 検討ケース

実験 I \ 実験 II		はく離長さ (mm)	
		200	400
かぶり (mm)	30	○	○
	60	-	○
	90	-	○

表-2 コンクリート配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
20	57.0	44.8	168	295	796	1007	3.13

た。以下に、波形エネルギーの算出式を示す。

$$E = \sum_{i=1}^n \{A(t_i)\}^2 \quad (1)$$

ここで、 $E$  : 波形エネルギー、 $A(t_i)$  : 電圧波形における  $i$  番目の振幅値、 $n$  : データ数である。

図-2 に電気信号発生器によって励磁コイルに印加したパルスの電圧波形を示す。なお、パルスの電圧を計測するにあたり、励磁コイルに巻き付けたマグネットワイヤに、1/100 減圧プローブを接続し、その点での電圧を計測した。したがって、図に示す電圧波形は、実際の電圧と比較して、1/100 の値を示している。図-2 に示すように、電気信号発生器によって励磁コイルに印加された電圧は、時間軸における電圧の関数： $f(t)$  として表現することができる。そこで、本研究では、電圧波形を表現するため、 $f(t)$  における電圧波形の立ち上がり時刻を  $t_1$ 、電圧が最も小さくなった時刻を  $t_2$  として、 $f(t)$ 、 $x$  軸、 $t=t_1$  および  $t=t_2$  で囲まれた面積 (図-2 参照) を電圧面積： $S$  と定義した。次式に電圧面積の算出式を示す。

$$S = \int_{t_1}^{t_2} |f(t)| dt \quad (2)$$

安定した測定結果を得ることを目的に、式(1)および式(2)を用いて、波形エネルギー比： $E'$  を便宜上定義した。

次式に波形エネルギー比の算出式を示す。

$$E' = E/S \quad (3)$$

この波形エネルギー比を本研究におけるはく離評価のパラメータとして用いることとした。

図-3 に、はく離長さを 400mm と一定として、かぶりを 30, 60 および 90mm とした供試体における波形エネルギー比と各センサ貼り付け位置との関係を示す。なお、図上において波形エネルギーの分布傾向を判読しやすくするため、かぶり 30mm の場合のみ縦軸のスケールを変えて示した。この図によれば、はく離中央部の No.4、およびはく離端部の No.2 と No.6 において、波形エネルギーがその他の計測点と比べて大きくなっていることが確認できる。このうち、はく離中央において波形エネルギー

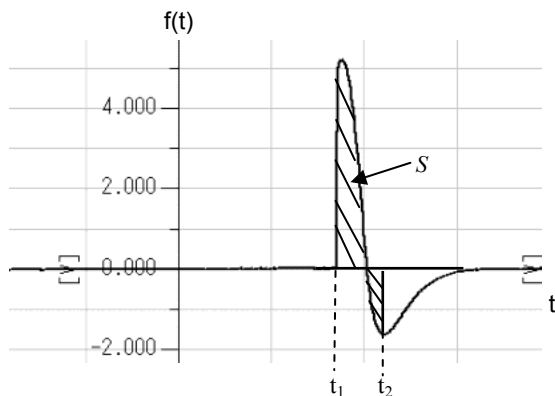
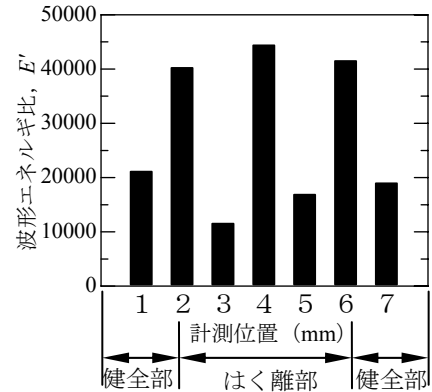
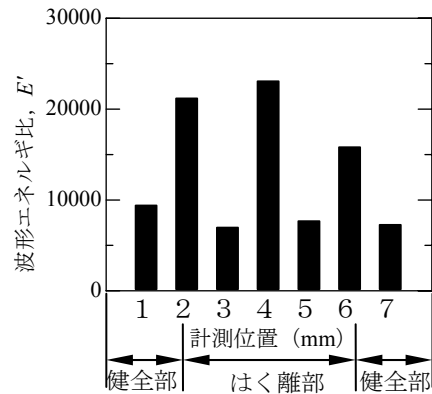


図-2 印加電圧

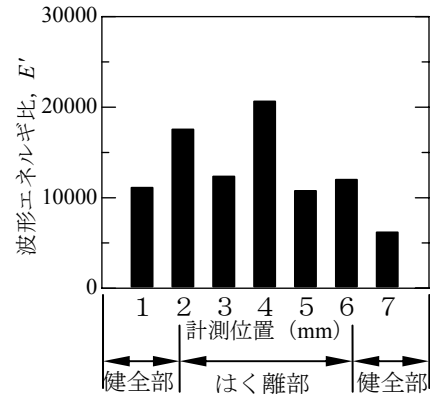
が大きくなった理由としては、前述のはく離評価の原理で説明したとおり、No.1 および No.7 直下のそれぞれの健全部からの波の重ね合わせによるものと推察される。これに対して、はく離部と健全部の境界位置の直上にセンサを貼り付けた場合 (No.2 および No.6) では、センサ直下近傍において鉄筋の振動が大きくなったことにより、波形エネルギーが大きくなったと考えられる。また、かぶりごとに健全部 No.1 と No.7 とを比較すると、両者



a) はく離長さ : 400mm, かぶり : 30mm

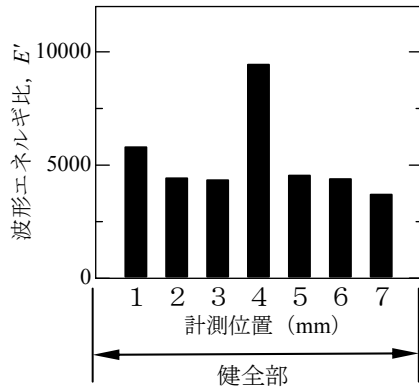


b) はく離長さ : 400mm, かぶり : 60mm

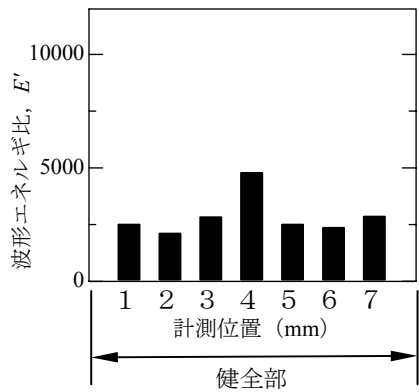


c) はく離長さ : 400mm, かぶり : 90mm

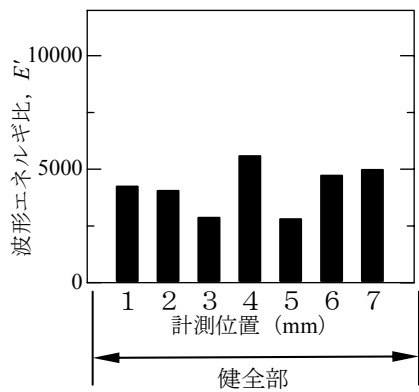
図-3 かぶり 30, 60, 90mm における  
波形エネルギー比



a) 健全, かぶり : 30mm



b) 健全, かぶり : 60mm

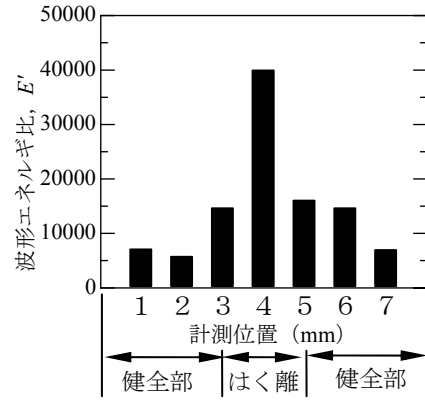


c) 健全, かぶり : 90mm

図-4 健全供試体における波形エネルギー比

の波形エネルギーは、ほぼ同じ値になっていることもわかる。なお、かぶりが大きくなると、供試体中央およびはく離部と健全部の境界位置における波形エネルギーの増加も小さくなり、健全部での波形エネルギーの値に近づいていくことが確認できる。これは、主に拡散減衰の影響によるものと考えられる。しかしながら、供試体中央およびはく離部と健全部の境界位置以外 (No.1, 3, 5 および 7) のセンサ貼り付け位置において波形エネルギーが小さくなっていないことから、その詳細は不明である。

続いて、図-4 に、健全供試体 (はく離長さ 0mm, かぶり 30, 60mm および 90mm) における波形エネルギー比



はく離長さ : 200mm, かぶり : 30mm

図-5 はく離長さ 200mm における  
波形エネルギー比と計測位置との関係

をセンサ貼り付け位置と対応させて示す。いずれのかぶりの場合も、供試体中央位置に貼り付けたセンサ (No.4) での波形エネルギーが大きくなっている。かぶりごとに波形エネルギーのセンサ貼り付け位置による変動に着目すると、No.4 以外においては、ほぼ一定の値となっていることが確認できる。ここで、図-3 と図-4 とを比較すると、いずれの供試体においても、供試体中央 (No.4) での波形エネルギーが大きくなっている。さらに、図-4 におけるそれぞれの健全部 (No.1 および 7) での波形エネルギーの傾向と、図-4 における No.4 以外での波形エネルギーの傾向は、ほぼ同じであることもわかる。

#### 4.2 はく離長さの違いが弾性波の伝播特性に与える影響

はく離長さ 200mm, かぶり 30mm の供試体にて得られた受振波の波形エネルギー比を図-5 に示す。この図に示すセンサ貼り付け位置 No.1, 2, 6 および 7 が健全部, No.3 から 5 がはく離部を示している。供試体長手方向の中心である No.4 において、波形エネルギーが大きくなっているが、これは先に考察した通り、波の重ね合わせが原因と考えられる。これに対して、はく離部端部である No.3 および No.5 における波形エネルギーは、健全部である No.1, 2, 6 および 7 におけるそれよりも、若干ではあるが大きくなっている。しかしながら、このような波形エネルギーの増加傾向は、はく離長さ 400mm の場合の増加傾向 (図-3 a) 参照) と比較して、増加幅が小さい。これは、はく離長さが小さくなったことにより、波の重ね合わせや干渉が複雑になったことによるものと考えられる。

#### 5. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) 供試体における複数の計測点で得られた波形エネルギーの分布状態は、はく離の有無により、異なるこ

とがわかった。

- 2) はく離供試体における「はく離部」と「健全部」との境界線の直上において得られた波形エネルギーは、「健全部」で得られた波形エネルギーよりも大きくなることが明らかとなった。
- 3) 以上のことから、コンクリート表面の複数の位置にセンサを貼り付け、得られた波形エネルギーの分布傾向に着目することにより、波形エネルギーそのものの値で、はく離の有無やその位置を把握できる可能性があることを確認した。

今後は、励磁コイルによって鉄筋が加振される範囲や、はく離の位置に対する励磁コイルの設置位置およびセンサの貼り付け位置の関係について、詳細に検討を行う

予定である。

#### 謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金（萌芽研究 18656124）の援助を受けて行ったものである。ここに記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 宗像晃太郎，鎌田敏郎，内田慎哉，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，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，pp.781-786，2007