

# 論文 RC 床版内部の鉄筋の腐食が電磁パルス法による水平ひび割れの評価に与える影響に関する基礎的研究

鈴木 真<sup>\*1</sup>・中尾 優文<sup>\*2</sup>・寺澤 広基<sup>\*3</sup>・鎌田 敏郎<sup>\*4</sup>

**要旨：**道路橋 RC 床版において、疲労等により発生する水平ひび割れを非破壊で検出する手法の確立が望まれている。こうした背景のもと、筆者らは電磁パルス法により水平ひび割れを評価する研究を行っている。本研究では、鉄筋の腐食および付着が床版の振動挙動に与える影響を確認することを目的に、水平ひび割れが発生した床版をモデル化した衝撃応答解析により、鉄筋の腐食状態によってかぶりコンクリート部の振動の大きさが相異なることを確認した。また、コンクリート供試体による実験的検討により、鉄筋およびコンクリート間の付着がない場合において、かぶりコンクリート部のたわみ共振が大きくなることが確認できた。

**キーワード：**電磁パルス法, RC 床版, 水平ひび割れ, 鉄筋腐食, 非破壊検査

## 1. はじめに

図-1 に示すように、道路橋 RC 床版の損傷の一つに、床版内に発生する水平ひび割れがある。水平ひび割れは、土砂化や抜落ちを誘発する可能性があり、早期の段階で検出して適切な補修対策を講じることが重要である。しかし、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、損傷が顕在化する前に水平ひび割れの有無を把握できる非破壊検査法が求められている。

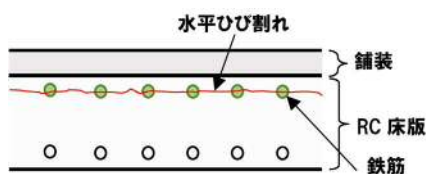


図-1 床版に発生した水平ひび割れの概念図

筆者らのこれまでの電磁パルス法に関する研究において、水平ひび割れを検出できる可能性が示唆されている<sup>1)</sup>。しかし、過去に実施した解析および実験は、鉄筋には腐食がなく、また鉄筋とコンクリートとを付着させた状態で行ってきたものである。例えば、塩害により水平ひび割れが発生した場合、鉄筋の腐食が顕在化して水平ひび割れが発生することになるが、図-2 (塩害の顕在化により撤去された床版の切断面) に示すように、ひび割れ部には腐食生成物が介在していることから、鉄筋とコンクリートとの付着力は低下していることが想定される。したがって、鉄筋の腐食および付着の有無により、これまでの知見とは異なる応答を示すことが懸念されるが、詳細は明らかにされていないのが現状である。

そこで本研究では水平ひび割れがある床版を模擬し

た解析モデルによる衝撃応答解析を行い、鉄筋の腐食状態が異なる場合のかぶりコンクリート部の振動挙動を把握することとした。また、水平ひび割れおよび鉄筋の付着の有無を再現したコンクリート供試体を用いて、電磁パルス法による実験を行い、鉄筋とコンクリートとの付着状況がかぶりコンクリート部の振動挙動に与える影響を調べた。



図-2 損傷した RC 床版の切断面の一例

## 2. 電磁パルス法の概要

電磁パルス法の原理を図-3 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と、励磁コイルの周辺に瞬間的な動磁場を発生し、内部にある鉄筋に作用する電磁力により非接触で鉄筋を振動させることができる。鉄筋の振動に伴ってコンクリートに発生した弾性波を、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鉄筋界面の状態等を把握することができる<sup>1)</sup>。

これまでの研究結果から、鉄筋位置に水平ひび割れが発生した床版に対して、電磁パルス法による計測を行った場合、たわみ共振が発生することがわかっている<sup>2)</sup>。

\*1 大阪大学大学院工学研究科 地球総合工学専攻 研究員 博士 (工学) (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 博士 (工学) (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 博士 (工学) (正会員)

たわみ共振とは、図-4 に示すように水平ひび割れより上方にあるかぶりコンクリート部に、比較的継続時間の長い上下方向の振動が発生することを言う。

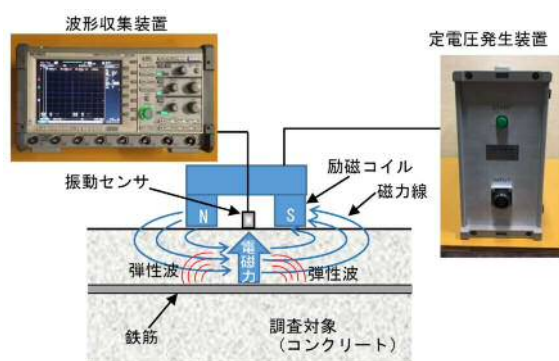


図-3 電磁パルス法の原理

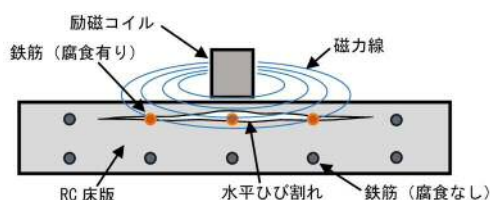


図-4 たわみ共振の概念

### 3. 鉄筋腐食がかぶりコンクリート部のたわみ共振に与える影響の解析的検討

#### 3.1 解析の目的

塩害、中性化等により、鉄筋が腐食して鉄筋周辺に発生する腐食生成物の弾性係数は、鉄筋よりはるかに小さいと考えられるが、腐食の進行状況によってその数値は異なることが想定される。電磁パルス法により、鉄筋に発生した振動は腐食生成物を介してコンクリートに伝達されるため、コンクリートに発生する弾性波に何らかの影響を与えると考えられる。そこで、鉄筋が腐食している床版に対し、電磁パルス法による入力を行った場合に発生するかぶりコンクリート部の振動挙動を把握するための解析的検討を実施した。

#### 3.2 解析概要

本解析に使用した解析モデルの大きさは、実際に床版に対して現地調査を行う場合、概ね 1m 間隔で計測点を設定することを想定し、1000mm×1000mm のコンクリート板とした。また、厚さは 150mm とした。鉄筋配置は、格子状の鉄筋の一方方向ずつの影響を検討するために一方方向の配筋とし、長さ 1000mm、直径 16mm の鉄筋を上縁から 80mm の位置に、125mm 間隔で合計 8 本を配置した。解析モデルの概要を図-5 に示す。

解析モデルは、健全な状態の床版を想定した解析モデル A、水平ひび割れを厚さ 1mm の空隙で模擬し、損傷が発生した床版を想定した解析モデル B および C の 3 種

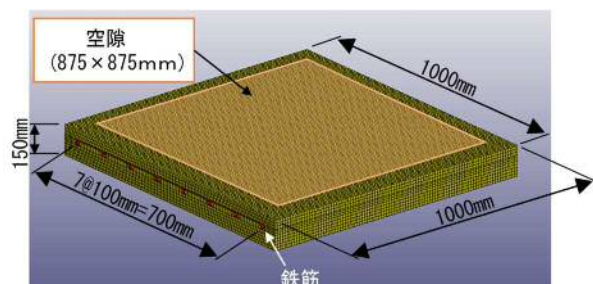


図-5 解析モデル図

類とし、要素の最大寸法 10mm の 8 節点 6 面体ソリッドで構成した。解析モデルの側面は、コンクリート板が連続するような設定にした。なお、解析モデル B および C において設定した空隙は、大きさ 875mm×875mm、厚さ 1mm とし、コンクリート板および空隙の中心が一致するように、コンクリート板の上縁から深さ 80mm の（鉄筋の中心位置と同じ）位置に設定した。解析モデル C には鉄筋の外周に腐食生成物 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) を模擬した厚さ 0.5mm の脆弱層を設定した。脆弱層の弾性係数は、既往文献<sup>3)</sup>を参照し、20 MPa、200 MPa および極端に大きくした 2000MPa の 3 種類とした。なお、脆弱層およびコンクリートは付着させた。また、解析モデル B には、鉄筋外周に脆弱層を設定していない。各解析モデルの断面図を図-6 に示す。

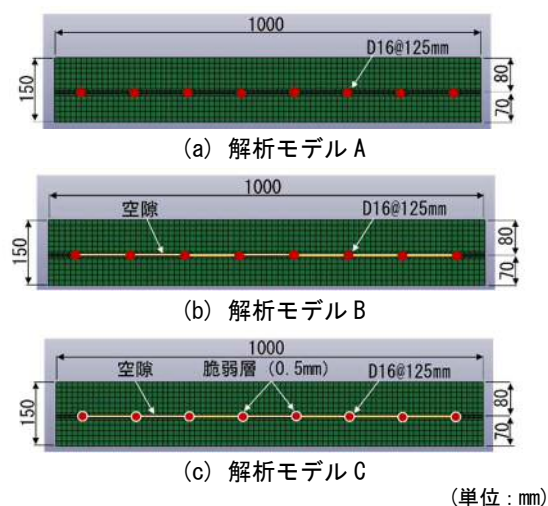
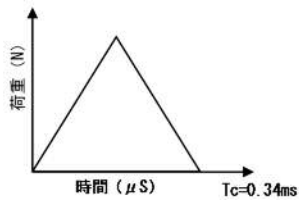


図-6 解析モデル図（断面図）

電磁パルス法による作用力は、パルス幅 1.0ms（励磁コイルの巻き数 20 ターン相当（ターン数については後述する））のパルス波形とし、鉄筋の中心から床版の鉛直上方向に作用させた。荷重の大きさは、電磁パルス法を用いた実験において、鉄筋表面上で計測した磁束密度の大きさを基に決定した<sup>2)</sup>。入力波形を図-7 に示す。出力点は床版上面の中央部とした。出力波形は速度とし、出力間隔 5 $\mu$ s、出力点数 10000 点とした。解析に入力し

た物性値を表－１に示す。なお、解析ソフトはLS-DYNAを使用した。



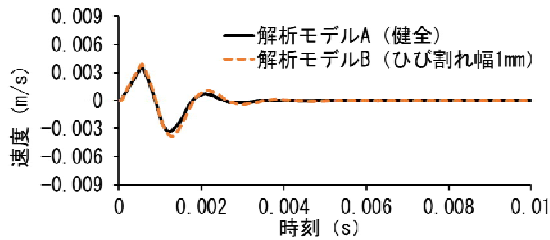
図－７ 入力波形

表－１ 物性値

|        | 密度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 弾性係数<br>(MPa)     | ポアソン比 |
|--------|----------------------------|-------------------|-------|
| コンクリート | 2.3                        | $3.0 \times 10^4$ | 0.2   |
| 鉄筋     | 7.85                       | $2.0 \times 10^5$ | 0.3   |
| 脆弱層    | 5.24                       | 2000, 200, 20     | 0.3   |

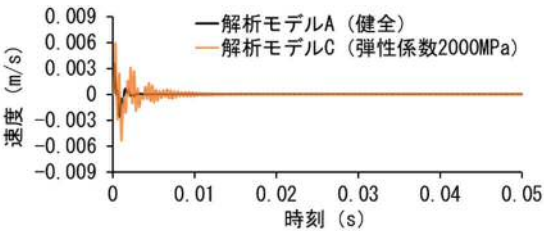
### 3.3 解析結果および考察

解析モデル A および B に関する解析結果を図－８に示す。図－８より、解析モデル A および B の波形が、ほぼ一致していることがわかる。これまでの実験結果によると、水平ひび割れが発生した床版に対して、電磁パルス法による計測を行った場合、健全な床版に対して振幅値が大きくなることがわかっている<sup>1)</sup>。しかし、本解析結果においては、解析モデル B に水平ひび割れに相当する空隙が設定されているが、空隙により分断された上下のコンクリートが、鉄筋を介して結合された状態にあるため、かぶりコンクリート部にたわみ共振が発生しなかったと考えられる。

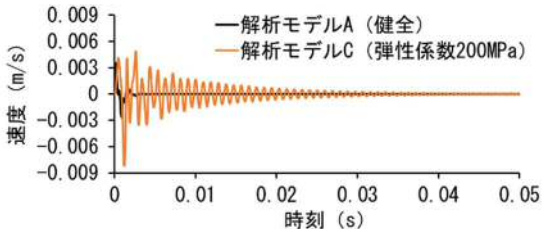


図－８ 解析結果（解析モデル A および B）

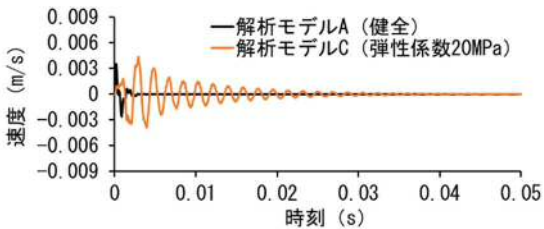
解析モデル C に対する解析結果を、解析モデル A の結果と対比させて図－９に示す。図－９より、鉄筋の外周に脆弱層を設定すると、かぶりコンクリート部にたわみ共振が起こり、速度および波形継続時間ともに大きくなることがわかった。これは、脆弱層において弾性係数が小さくなったため、鉄筋が振動しやすくなり、脆弱層を介してかぶりコンクリート部のたわみ共振を誘発したことに起因すると推測する。その傾向は、脆弱層の弾性係数が小さくなるほど顕著になる。しかし、弾性係数をさらに小さくし、ある一定の値（本解析では 20MPa）以下になると、逆に振動が弱まる傾向を示した。これは、脆



(a) 脆弱層の弾性係数 2000MPa の場合



(b) 脆弱層の弾性係数 200MPa の場合



(c) 脆弱層の弾性係数 20MPa の場合

図－９ 解析結果（解析モデル C）

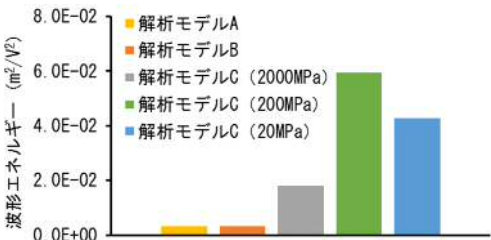
弱部の剛性が小さくなり過ぎて、脆弱層が鉄筋の振動を吸収してしまい、かぶりコンクリート部に振動が伝達され難くなったことに起因する。これらのことから、鉄筋が腐食して鉄筋外周に腐食生成物の層が発生した場合、相対的にたわみ共振が大きくなるが、腐食性生物の弾性係数の大きさによって振動の大きさが異なることがわかった。

図－１０に各解析モデルの解析結果から波形エネルギーを算出した結果を示す。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 乗和であり、式(1)により算出することができる<sup>4)</sup>。

$$E = \sum_{i=1}^{n=10000} y_i^2 \tag{1}$$

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。

過去の研究においては、床版に対して電磁パルス法に



図－１０ 波形エネルギー

よる計測を行った結果、波形エネルギーが大きくなれば水平ひび割れが発生している可能性が高いという知見を得ている<sup>1)</sup>。図-10より、解析モデルCにおける脆弱部の弾性係数が200MPaの場合、波形エネルギーが最も大きくなることがわかった。このことから、健全な床版においては波形エネルギーが小さくなり、鉄筋腐食により水平ひび割れが発生すれば、波形エネルギーは大きくなる傾向を示すが、脆弱層の弾性係数が極端に小さくなると波形エネルギーが減少する傾向を示すことがわかった。本解析では、腐食生成物の弾性係数が不明確であるため、比較的大きい範囲(20MPa~2000MPa)で設定した。しかし、かぶりコンクリート部の振動挙動に与える影響は大きいと、腐食生成物の弾性係数を明確にすることが今後の課題であると考えられる。

#### 4. 鉄筋の付着がかぶりコンクリート部のたわみ共振に与える影響の実験的検討

##### 4.1 実験の目的

床版内の鉄筋が腐食した場合、腐食生成物が鉄筋およびコンクリートの付着を阻害する可能性が考えられる。電磁パルス法により計測を行う場合、鉄筋からの振動が直接コンクリートに伝達されるため、腐食生成物が鉄筋およびコンクリートとの付着を阻害することにより床版の振動挙動に影響を与えることが推測される。よって、本実験は、コンクリートに付着しないように鉄筋に加工を施して埋設したコンクリート板を供試体として使用し、電磁パルス法により計測を行った際に、鉄筋の付着がかぶりコンクリート部のたわみ共振にどのような影響を与えるのかを確認することを目的として実施した。

##### 4.2 供試体概要

供試体として5枚の鉄筋コンクリート板を製作した。全供試体のコンクリートの強度は $f'_{ck} = 24 \text{ N/mm}^2$ とし、各供試体の寸法は前項の解析モデルと同様に1000mm×1000mm、厚さ150mmとした。また、一般的なRC床版の鉄筋配置を模擬して、異形棒鋼D16を125mm間隔で8本ずつ格子状に配置した。上段鉄筋のかぶりは80mmとした。

供試体の種別は、①水平ひび割れが発生していない健全な状態のもの(以下、健全)、②水平ひび割れを模擬し、鉄筋に加工を施していないもの(以下、全面付着あり)、③水平ひび割れを模擬し、全ての上段鉄筋の全周に厚さ0.08mmのテフロンテープを張り付けて、鉄筋およびコンクリートを付着させないようにしたもの(以下、全面付着なしと称す)、④水平ひび割れを模擬し、全ての上段鉄筋の上半面にだけテフロンテープを張り付けたもの(以下、上面付着なし)、⑤水平ひび割れを模擬し、④に対して全ての上段鉄筋の下半面のみテフロンテープを

張り付けたもの(以下、下面付着なし)の5種類とした。

水平ひび割れを模擬するために弾性係数の小さい物質を使用し、鉄筋の振動がかぶりコンクリート部に伝達し易くなるように配慮した。具体的には、粒径0.6mmの珪砂をビニール袋の中に入れたものを、厚さ1mmにし

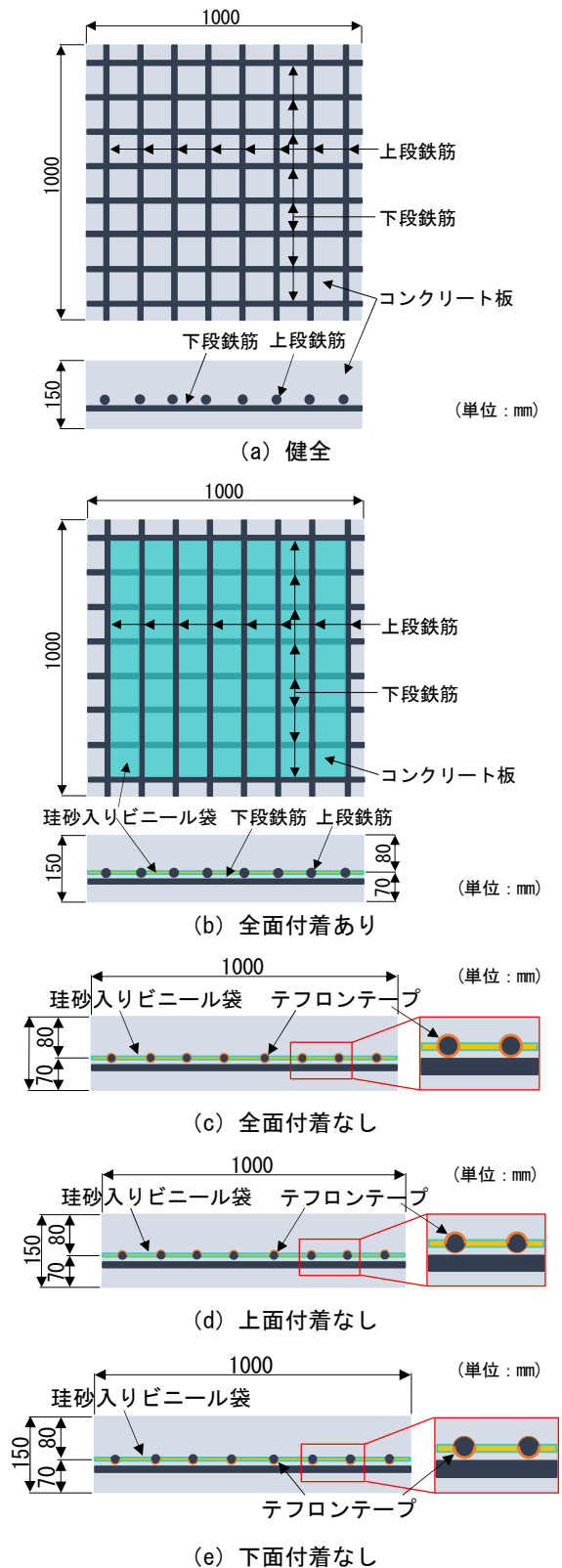


図-11 供試体の概要

て上段鉄筋の間に埋設した。各供試体の概要図を図-11に示す。図-11において、健全および全面付着ありについては平面図および断面図を示し、全面付着なし、上面付着なしおよび下面付着なしについては断面図を示す（平面図は全面付着ありに同じ）。コンクリートの打設は、一旦上段鉄筋位置まで行い、天端仕上げを行って、十分に硬化してから珪砂入りビニール袋を配置して所定の高さまで再度コンクリート打設した。供試体の製作状況を図-12に示す。

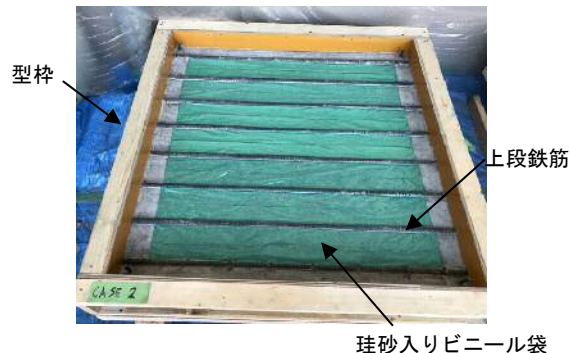


図-12 供試体の製作状況

#### 4.3 計測概要

本計測に使用した励磁コイルは、図-13に示すように、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、短辺部に導線を巻き付けたものを使用した。なお、導線の巻き数をターン数と称し、本実験に使用した励磁コイルは 20 ターンとした。

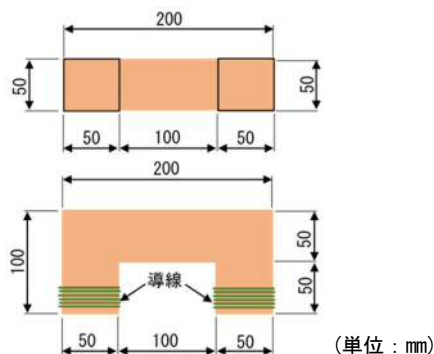


図-13 励磁コイルの外形寸法

定電圧発生装置の電圧は 600V、静電容量は 1000 $\mu$ F 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、供試体表面に両面テープで固定して計測を行った。AE センサで受信した信号は、サンプリング間隔 5 $\mu$ s、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。各供試体とも 3 回の計測を行い、その平均値を採用することとした。

図-14 に計測装置の外観を示す。

励磁コイルは、長辺部と上段鉄筋が平行かつ上段鉄筋間に、供試体表面から短辺部下端面を供試体表面に向けて、1mm 程度上方に離して配置した。AE センサは、励磁コイルの長辺部中央から、長辺部と直角方向に 50mm 離れた上段鉄筋の直上に配置した。計測機器の配置を図-15に示す。



図-14 計測装置の外観

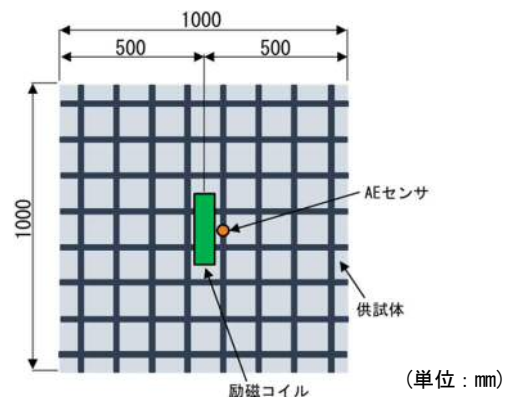


図-15 計測機器の配置

#### 4.4 実験結果および考察

各供試体に対する実験結果（時刻歴応答波形）を図-16に示す。また、実験値から算出した波形エネルギーを図-17に示す。図-16より、健全と比較して水平ひび割れを模擬した4体の供試体の振幅値が大きくなり、さらに減衰し難くなることがわかる。また、図-17より、波形エネルギーについても水平ひび割れの有無により値が大きくなる傾向を示すことがわかる。これらのことから、水平ひび割れを設けたいずれの供試体においても、かぶりコンクリート部にたわみ共振が発生したと推測することができる。

前項において述べたように、解析モデル A および B の波形エネルギーにほとんど差が発生しなかったが、本実験においては健全に対して全面付着ありの波形エネルギーが約 3 倍になった。この要因として、供試体製作時にブリーディング等によって鉄筋の付着が低下した可能性が考えられる。また、テフロンテープの有無に着目してみると、全面付着ありおよび全面付着なしでは振幅値に

大きな差は見られなかった。テフロンテープの表面は、比較的平滑ではあるが、コンクリートと付着してしまった可能性があり、両供試体の振幅値に差が発生しなかった原因の一つに成り得ると考えられる。また、最大振幅値および波形エネルギーとも、上面付着なしおよび下面付着なしの実験結果が大きくなる傾向を示した。特に波形エネルギーについては、全面付着あり ( $2.8 \times 10^3 \text{mV}^2$ )

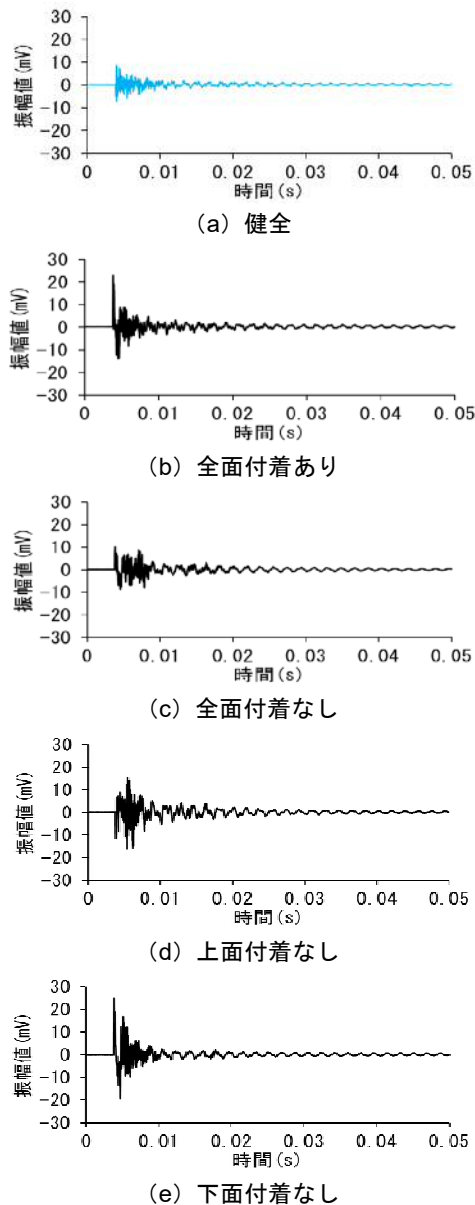


図-16 実験結果（時刻歴応答）

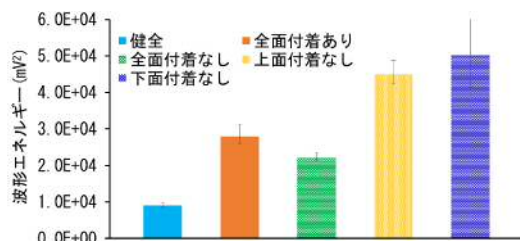


図-17 実験結果（波形エネルギー）

に対して上面付着なしが約 1.6 倍 ( $4.5 \times 10^3 \text{mV}^2$ )，下面付着なしが約 1.8 倍 ( $5.0 \times 10^3 \text{mV}^2$ ) となった。このことから、鉄筋全周ではなく一部（半面以上）に付着がなくなっても、たわみ共振が大きくなることがわかった。なお、鉄筋腐食に限らず、コンクリートの締固め不足やブリーディング等による施工的要因により鉄筋およびコンクリートの付着が阻害される場合も考えられるが、水平ひび割れが存在しなければたわみ共振は発生しないため、計測結果に対する鉄筋腐食および施工的要因との区別は可能かと考える。

## 6. まとめ

本研究において得られた知見を以下に示す。

- (1) 水平ひび割れが発生した床版をモデル化し、鉄筋の周りに腐食生成物を模擬した弾性係数の異なる層を設けて衝撃応答解析を行った。その結果、電磁パルス法による電磁力に対してかぶりコンクリート部のたわみ共振は腐食層がない場合に比べて大きくなった。
- (2) 実験結果より、鉄筋の表面の一部分（半面以上）において鉄筋およびコンクリートが付着していなければ、かぶりコンクリート部のたわみ共振床版は大きくなることがわかった。

## 謝辞

本論文を取りまとめるあたり、ご協力いただいた大阪大学大学院の服部晋一特任研究員、大学院生の中野雄斗君および小間健右君に心より謝意を表します。

## 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) 鈴木真，中野雄斗，寺澤広基，鎌田敏郎：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，日本コンクリート工学会年次論文集，Vol. 42，No.1，pp.1648-1653，2020.7
- 3) 河村圭亮，中村光，国枝稔，上田尚史：鉄筋の腐食膨張圧に関する研究，土木学会第 63 回年次学術講演会，V-117，pp.233-234.2008.9
- 4) 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