

株式会社 IHI インフラシステム 学生会員 ○和田野晋悟

鳥取大学大学院 正会員 谷口朋代

鳥取大学大学院 正会員 小野祐輔

株式会社ソーキ 正会員 中山昭二

サンイン技術コンサルタント 非会員 熊田安亮

1. はじめに

RC 床版内部の鉄筋に沿って水平クラックが存在することが明らかになっている(図-1 参照)。しかし、クラック端部が RC 床版表面に達していないこともあり、クラックを床版表面から目視で確認することは極めて困難であるとともに、有効な検出法が確立されていない。

そこで本研究では、1) インパクトハンマーを用いて供試体表面を叩くことで供試体の動特性を把握すること、2) RC 床版表面を加振器で掃引打撃し、加振器側と供試体側に貼付した加速度計の時刻歴から周波数応答関数を求めること、について検討し、床版内部に存在する水平クラックを検出する技術に関して、検出原理の確認と、検出方法を確立すべく実験的な検討を行った。

2. 供試体概要

図-2 に示すように、正方形の内部水平クラックをビニール片で模擬し、クラックの寸法や表面からクラックまでの深さが異なる 7 種類の供試体を作製した。表-1 は、供試体幅を A、高さを H、クラック寸法を B、表面からクラックまでの深さ H' を示す。

3. 供試体の動特性の把握

(1) 固有振動数の算定

供試体表面からクラックまでを厚みとする平板と見なしたときの固有振動数は、平板の自由振動から求められる。図-3 に示す諸元を有する平板の運動方程式は以下のように表される¹⁾。

$$D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

ここで、 h : 板厚、 E : ヤング係数、 ν : ポアソン比、 ρ : 平板の密度、 D : 板の曲げ剛性、 w : たわみ、 μ : 板の単位面積当たりの質量である。

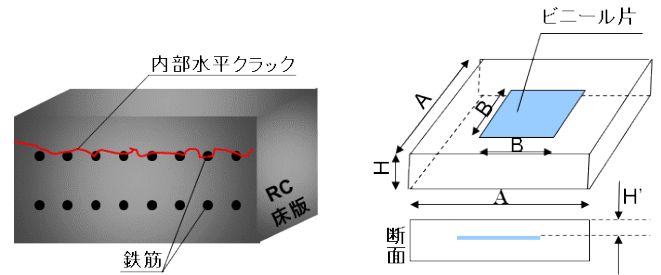


図-1 RC 床版内クラック

図-2 供試体概要図

表-1 供試体寸法

供試体	A、H 供試体寸法 (cm)	B クラック寸 法 (cm)	H' 表面からク ラックまで の深さ (cm)
①	30、10	15	4
②			6
③	30、10	20	4
④			6
⑤	50、15	30	5
⑥			10
※⑦	100、30	80	11

①～⑥：無筋コンクリート ⑦：鉄筋コンクリート

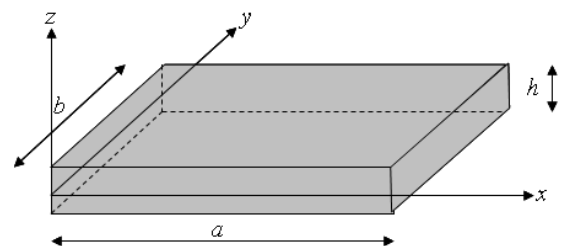


図-3 平板の座標系

板の周辺支持条件が明らかではないので、周辺単純支持と固定支持の場合の平板の 1 次モードの固有振動数を算定し、実験値と比較することにした。それぞれの境界条件に対応する平板の 1 次モードの固有振動数の理論式を以下に示す²⁾。

周辺単純支持

$$f_s = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{D}{\mu} \left[\left(\frac{1}{a} \right)^2 + \left(\frac{1}{b} \right)^2 \right]} \tag{2}$$

周辺固定支持

$$f_f \cong \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{35.99}{a^2} \sqrt{\frac{D}{\mu}} \text{ (正方形を仮定)} \tag{3}$$

(2) インパクトハンマーを用いた供試体の固有振動数の計測

供試体表面をインパクトハンマーで叩き、供試体表面に貼付した圧電素子型の加速度計の時刻歴を FFT 処理し、周波数応答関数を求め、平板の固有振動数の理論値と比較した。図-4 はインパクトハンマーで供試体表面を 5 回叩き、FFT 処理したスペクトルを足し合わせて得られた周波数応答関数を示し、図-5 はそのうちの代表的な加速度の時刻歴を示す。表-2 は周波数応答関数から読み取った共振振動数と、(2) 式と (3) 式から求まる 1 次モードの固有振動数との比較を示す。

図-4 より供試体⑦では、952Hz で周波数応答関数に明瞭なピークが発現しており、固定支持の場合の理論値が 1012Hz であることから、境界条件は固定支持であることがわかる。また、表-2 から、供試体①～⑥の境界条件は、単純支持であることがわかる。そこで、クラックの大きさによって支持条件が異なる理由を探るために、平板としての質量を調べたところ、表-2 の供試体⑦の平板としての質量が他と比べ、極端に大きいことから、境界条件は質量によって変化することが考えられる。

4．加振器を用いた固有振動数の計測

加速度計を加振器側と供試体側に貼付し、加振器で供試体表面を掃引打撃したときに得られる周波数応答関数から、供試体の固有振動数が検出できることを確認した。写真-1 に示すように、供試体を跨ぐように渡した 2 本の鋼材間に加振器を取り付けた。

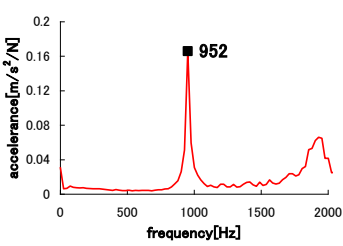


図-4 供試体⑦の周波数応答関数

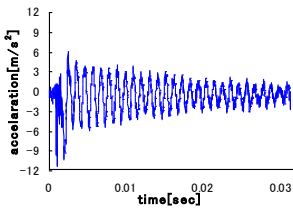


図-5 供試体⑦の時刻歴

表-2 固有振動数とインパクトハンマーの実験結果

供試体	1 次モードの固有振動数		実験値	平板としての質量 (kg)
	単純	固定		
①	7256	13231	7904	2.1
②	10885	19846	11865	3.2
③	4082	7442	3968	3.8
④	6123	11163	7764	5.6
⑤	2488	4536	2240	10.6
⑥	4975	9072	4541	21.2
⑦	555	1012	952	165.4



写真-1 実験の様子

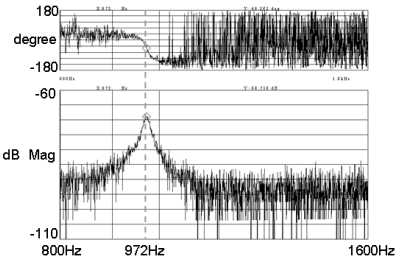


図-6a 供試体⑦（加速度計を供試体に貼付）

また、RC 床版表面の凹凸に対処できるように加振器の先端に袋ナットを付けた。ここで、加振器側に貼付した加速度計で平板の応答の検出が可能であれば、加振器を移動させるだけで検査対象物の応答が検出できるため、検査対象の範囲の広さが問題にならない等の利点があるために検討を行った。

(1) 供試体中央を掃引加振した場合

図-6a は加速度計を供試体⑦の中央に貼付し、その脇を掃引加振したときのボード線図であり、供試体⑦の固有振動数に近い972Hzで周波数応答関数に明瞭なピークが発現していることから、水平クラックによって形成された平板の応答を検出できたと考えられる。一方、図-6b は加速度計を加振器側に貼付し、供試体⑦の中央を掃引加振した結果であるが、周波数応答関数には明瞭なピークは現れていないことから、水平クラックによって形成された平板の応答を検出することは困難であると考えられる。各供試体について同様の実験を行った結果を表-3 に示す。表-3 より、加速度計を供試体に貼付した場合には、インパクトハンマーで得られた供試体の固有振動数とほぼ同じ振動数を検出したが、加速度計を加振器に貼付した場合には、全ての供試体において周波数応答関数に明瞭なピークが現れず、平板としての応答を検出することが極めて困難であった。

従って、加振器側に加速度計を貼付するだけでは平板としての応答を検出することは極めて困難であり、供試体側に貼付すれば平板としての応答が検出できると考えられる。

(2) 加振器あるいは加速度計を移動し掃引加振した場合

加速度計の供試体表面の貼付位置と加振位置が平板の応答の検出に及ぼす関係を明らかにするために、図-7a、図-7b に示すように供試体⑦の中央を通る直線上に、加振器を設置して掃引加振した。図-8a、図-8b の横軸は加振器や加速度計の位置を示し、縦軸は供試体⑦の周波数応答関数のピーク値を示す。加振器、加速度計を移動した結果は、どちらも加振器と加速度計が近づくにつれて値が大きくなり、供試体中心を軸に山型を示し、周波数応答関数のピーク値は加振器と加速度計の位置に応じてほぼ同じ値となった。従って、周波数応答関数のピークの大きさか

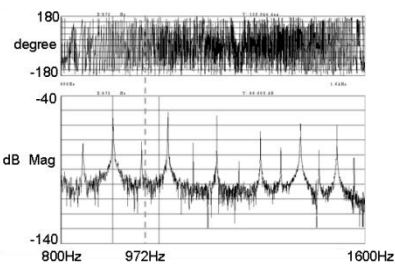


図-6b 供試体⑦（加速度計を加振器に貼付）

表-3 供試体中央の掃引加振結果

供試体	インパクトハンマーの結果 (Hz)	加速度計貼付位置	
		供試体 (Hz)	加振器 (Hz)
①	7904	7904	検出不可
②	11865	検出不可	検出不可
③	3968	3968	検出不可
④	7764	7764	検出不可
⑤	2240	2240	検出不可
⑥	4541	7136	検出不可
⑦	952	972	検出不可

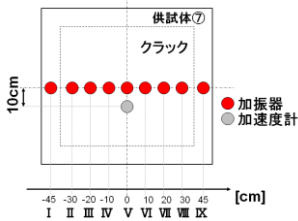


図-7a 加振器を移動した場合

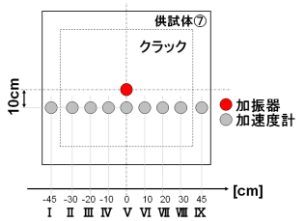


図-7b 加速度計を移動した場合

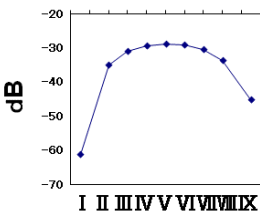


図-8a 加振器移動

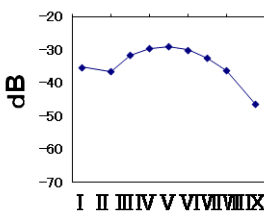


図-8b 加速度計を移動

加振器を取り付けた台車

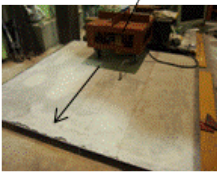


写真-2 加振器を取り付けた台車

ら加速度計と加振器の位置関係が推定できると考えられる。

(3) 台車に加振器を取り付け掃引加振した際の検出精度の確認

加速度計を供試体側に貼付し、写真-2 に示すように加振器を台車に取り付け、図-7a に示すように加振器を動かしながら掃引加振した。実験結果を図-9 に示す。供試体側に加速度計を貼付した図-8a と比較すると、全体的に周波数応答関数のピーク値が小さく、Vの位置でのピーク値は、他に比べて小さくなっているものの、概ね供試体中央を軸に山型となった。従って、供試体側に加速度計を貼付すれば、加振器を台車に取り付けたとしても、周波数応答関数のピークの大きさから加速度計と加振器の位置関係が推定できると考えられる。現場で広い RC 床版上を探索することを考えると、加振器を台車に取り付けられ、移動しながらの探索が可能であるので、現実的な装置になると考えられる。

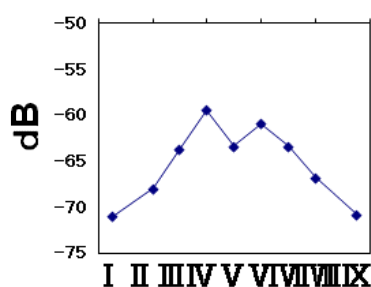


図-9 加振器を取り付けた台車で掃引加振

5. まとめと今後の課題

(1) まとめ

1. 平板としての質量によって、境界条件が変化することを確認した。
2. 加速度計を加振器側に貼付した場合には、水平クラックによって形成された平板の応答を検出することは極めて困難であるが、供試体側に貼付すれば検出可能である。
3. 加速度計を供試体に貼付すれば、加振器を台車に取り付けても水平クラックによって形成された平板の応答を検出することが可能である。

(2) 今後の課題

RC 床版側に加速度計を貼り付ければ水平クラックによって形成された平板の応答が検出可能である

ことがわかったが、加振器と加速度計の位置関係を決定する手法の開発が必要である。また、凹凸が激しい RC 床版上をスムーズに移動しながら掃引加振するためには、台車や加振器の先端に更なる工夫を施す必要がある。

6. 参考文献

- 1) 幸節雄二：構造振動学の基礎、九州大学出版会、2010、p233～258
- 2) 岩田佳雄、佐伯暢人、小松崎俊彦：機械振動学、数理工学社、2011、p171～172
- 3) 特開 2013-134221 検査方法及び検査システム