

道路橋 RC 床版における内部水平ひび割れ部分を平板と見なした場合の動的特性に関する一考察

内外エンジニアリング(株) 正会員 ○中山 昭二
鳥取大学 正会員 谷口 朋代
鳥取大学 正会員 小野 祐輔

1. はじめに

橋梁 RC 床版における内部水平ひび割れは目視調査等外観から確認することが困難な劣化現象であり(図-1 参照), 非破壊調査により簡易にかつ迅速に把握する必要がある. そこで筆者らは, 水平ひび割れ面とその上側のコンクリートで形成される平板の動的応答に着目してコンクリート内部の水平ひび割れの検出に関する研究を進めてきた¹⁾. 本稿では, これらを拡大利用するに際し, 平板の動的特性について考察するものである.



図-1 RC 床版内部水平ひび割れ的事例

2. 平板の動的特性

図-2 に示す座標系における平板の運動方程式は, 以下のように表される.

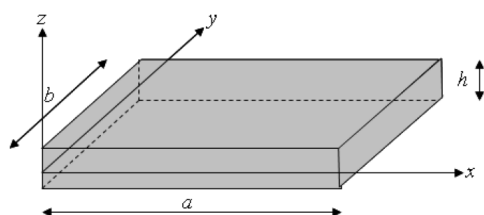


図-2 平板の座標図

$$\left\{ D \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) - \rho I \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right\} \left\{ \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) - \frac{\mu}{kGh} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right\} w + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \left\{ 1 - \frac{D}{kGh} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) + \frac{\rho I}{kGh} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right\} p_z + \frac{\partial m_x}{\partial x} + \frac{\partial m_y}{\partial y} \quad (1)$$

自由振動の場合, (1)式において, 外力 p_z を 0 とし て $p_z = m_x = m_y = 0$ とおく. ここで薄板(一般に, 厚さ辺長比 $h/a \approx 1/20$ 程度をいう)の場合では, 中央面 $z=0$ に垂直な断面は変形後も中央面に垂直であるとする Kirchhoff の仮説が成り立つものとし, 回転慣性を無

視して $\rho I = 0$, せん断変形を無視して $kGh \rightarrow \infty$ とすると, (2)式が導かれる.

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

ここで, D : 平板の曲げ剛性, w : 平板のたわみ, μ : 平板の単位面積当たり質量である.

薄板の周辺支持条件について, 1 次モード固有振動数の理論式を以下に示す.

(1) 周辺単純支持の場合

境界条件が周辺単純支持の場合の 1 次モードの固有振動数 f_s (Hz) は以下のように表される.

$$f_s = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{D}{\mu} \left[\left(\frac{1}{a} \right)^2 + \left(\frac{1}{b} \right)^2 \right]} \quad (3)$$

(2) 周辺固定支持の場合

境界条件が周辺固定支持, かつ $a/b=1$ (正方形) の場合の 1 次モードの固有振動数 f_f (Hz) は以下のように表される.

$$f_f \approx \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\lambda^2}{a^2} \sqrt{\frac{D}{\mu}} \quad (4)$$

固有値 $\lambda^2 = 35.99$ (正方形の場合)

次に, 厚板(一般に, 厚さ辺長比 $h/a > 1/10$ 程度をいい, Mindlin 板理論を用いる)の場合, (5)式により 1 次モードの固有振動数(周辺単純支持) ω を求める.

$$\omega^2 = \frac{1}{2 \left(\frac{\rho I}{D} \right) \left(\frac{\mu}{kGh} \right)} \left(\left[\left(\left(\frac{\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{b} \right)^2 \right) \left(\frac{\rho I}{D} + \frac{\mu}{kGh} \right) + \frac{\mu}{D} \right] - \sqrt{\left[\left(\left(\frac{\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{b} \right)^2 \right) \left(\frac{\rho I}{D} + \frac{\mu}{kGh} \right) + \frac{\mu}{D} \right]^2 - 4 \left(\frac{\rho I}{D} \right) \left(\frac{\mu}{kGh} \right) \left(\left(\frac{\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{b} \right)^2 \right)} \right) \quad (5)$$

1 次モードの固有振動数(周辺単純支持)の理論値を表-1 に示す. 表中, 辺長 $a/b=1$ とした.

表-1 固有振動数(周辺単純支持)

厚さ h cm	板厚/辺長比 h/a	薄板理論 Hz	厚板理論 Hz	摘要
2	1/15	797	787	次章3. の供試体を想定した
5	1/6	1,992	1,860	
10	1/3	3,984	3,173	
15	1/2	5,976	3,963	

キーワード RC 床版, 内部水平ひび割れ, 掃引加振, 非破壊試験, 維持管理

連絡先 〒601-8213 京都市南区久世中久世町 1-141 内外エンジニアリング(株) TEL 075-933-5111

3. コンクリートの内部水平ひび割れの検出

(1) 供試体の作製

内部水平ひび割れをビニール片で模した 4 供試体を作製した (図-3、表-2 参照)。

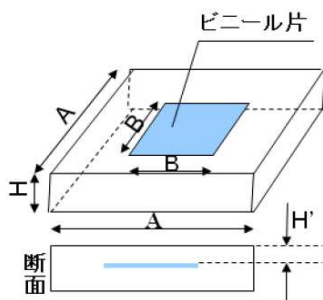


図-3 供試体の概要図

表-2 供試体の諸元

供試体	供試体寸法 A, H (cm)	ひび割れ寸法 B (cm)	表面からの深さ H' (cm)	模擬ひび割れ の材料・仕様
①	50, 50	30	2	ペール用ゴミ袋の2枚重ね t=0.05mm×2
②	50, 50	30	5	"
③	50, 50	30	10	"
④	50, 50	30	15	"

(2) 固有振動数の計測および理論値の算出

表面からの深さ H' ごとの 1 次モードの固有振動数 (理論値) および供試体の計測値を表-3、4 に示す。

表-3 固有振動数 (単純支持) と計測値

供試体	単純支持 深さH'	1次モードの固有振動数				
		ソリッド4段	ソリッド2段	Mindlin	板理論値	実験値
①	2 cm	785	820	762	797	1,071
②	5 cm	1,714	1,760	1,744	1,992	3,020
③	10 cm	2,675	2,790	2,940	3,984	3,398
④	15 cm	3,134	3,336	3,710	5,976	4,122

表-4 固有振動数 (固定支持) と計測値

供試体	固定支持 深さH'	1次モードの固有振動数				
		ソリッド4段	ソリッド2段	Mindlin	板理論値	実験値
①	2 cm	1,423	1,533	1,397	1,453	1,071
②	5 cm	2,852	3,087	2,978	3,632	3,020
③	10 cm	4,049	4,494	4,283	7,263	3,398
④	15 cm	4,491	5,109	4,793	10,895	4,122

ソリッド 4 段, 2 段は深さ H' を 4 層および 2 層に分割した 8 節点 6 面体要素モデル, Mindlin は要素厚を考慮できる, 平面を 30×30 分割した Mindlin 板要素モデル, 板理論値は(3)(4)式, 実験値は供試体の計測, から求めた 1 次モードの固有振動数である。

(3) 固有振動数の比較

図-4 は, 表-1、3、4 で求めた 1 次モードの固有振動数を図化, 比較したものである。図から, 表面からの深さ H' が 10cm 程度すなわち, ひび割れ平面の深さ辺長比 H'/B が 1/3 程度を超えると薄板理論(3)(4)式の適用が難しくなることが分かる。

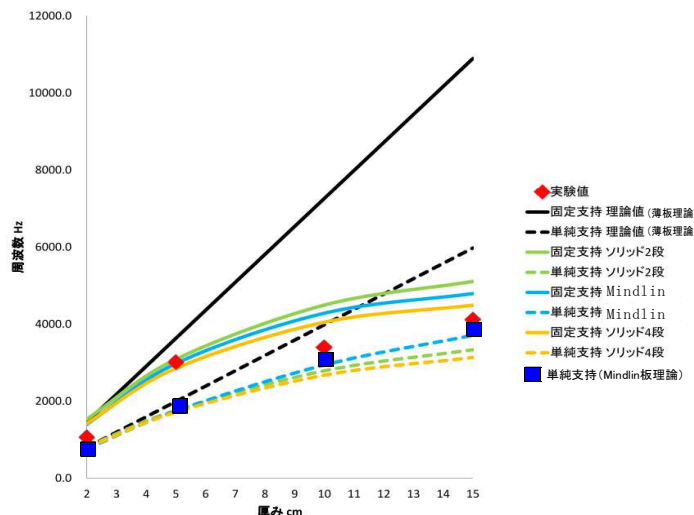


図-4 計算値および計測値の相関図

4. 考察・まとめ

以上のことから次のことが言える。

- 1) コンクリート平板の固有振動数からコンクリート内部の水平ひび割れを検出できる可能性がある。
- 2) 薄板理論(3)(4)式を用いてひび割れ面とその広さ (正方形近似) を検出できる可能性がある。すなわち, 床版の上層鉄筋位置付近のように表面からの深さが 3~4cm と浅い場合, 30cm 角程度までのひび割れ面は, 図-5 のようにして算出できる。

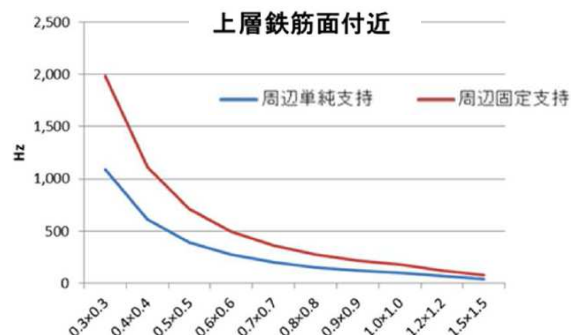


図-5 ひび割れの平面寸法と固有振動数の関係

- 3) ひび割れ面の深さ辺長比 H'/B が 1/3 程度を超えると上記 2) の適用は難しい。すなわち, 床版の下層鉄筋位置付近のように表面からの深さが 15~20cm と深い場合, 60cm 角程度より小さいひび割れ面については, (3)(4)式では見かけ上, 高めの固有振動数が与えられる。結果, ひび割れ面を広くとらえることになるので, Mindlin 板理論に基づく理論値を用いて計算することが適当である。

参考文献

- 1) 中山昭二, 谷口朋代, 小野祐輔, 佐藤彰紀, 堀岡良則: 平板の動的応答に着目した RC 床版の内部水平ひび割れ検出法の実地検証, 土木学会構造工学論文集 Vol.64A, pp.715-723, 2018.4