

論文 道路橋 R C 床版における疲労劣化と振動特性の関係に関する基礎的研究

大西 弘志^{*1}・岡田 裕昭^{*2}・内田 慎哉^{*3}・鎌田 敏郎^{*4}

要旨：道路橋床版の維持管理において、その劣化の程度を知るための簡便な指標として、鉄筋コンクリート床版（R C 床版）の振動特性（固有振動数）に着目することを考えた。荷重の走行に伴う床版の疲労劣化が進行するに伴い、床版の振動特性がどのように変化するのかわ知るため、R C 床版のモデルを用いた輪荷重走行試験と並行して衝撃振動試験を行い、床版の劣化過程と振動特性の変化がどのように関係しているのかを調査してみることにした。

キーワード：道路橋 R C 床版, 疲労劣化, 振動特性, 輪荷重走行試験

1. はじめに

わが国の道路網を構成する重要な要素の一つである橋梁において、維持管理上最も重要な部材の一つとして床版がある。道路橋の床版はその形式や使用材料によって様々に分類されるが、中でも鉄筋コンクリート床版（以下、R C 床版）は昭和 40 年代からコンクリートの抜け落ちなどの損傷事例が確認され、その劣化機構を解明するための数多くの研究がなされてきた。その結果、現在では R C 床版におけるコンクリートの抜け落ち等の現象は広義の疲労現象であり、その劣化過程は図-1 に示されるようなものになることが明らかになった。また、写真-1 に示す輪荷重走行試験機を用いて行った疲労試験結果をもとに S-N 曲線が与えられており、現在の R C 床版の疲労耐久性はこの曲線を基準にして疲労耐久性を評価されることが一般的である。ただし、S-N 曲線を供用中の橋梁に適用しようと考える場合、供用開始から評価時までの車両通行履歴（車両軸重、走行位置）を正確に把握する必要がある、すでに供用されている多くの実橋梁への適用する際にはいくつかの仮定が必要となる。

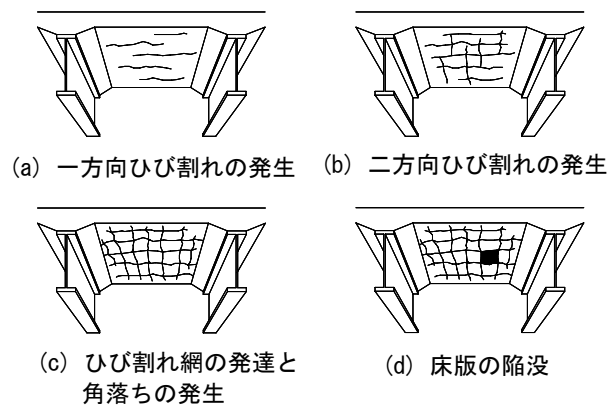


図-1 R C 床版下面のひび割れ進展過程¹⁾



写真-1
クランク（鉄輪）式輪荷重走行試験機

^{*1} 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻助手 博士(工学) (正会員)

^{*2} 大阪大学工学部地球総合工学科

^{*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} 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻教授 工博 (正会員)

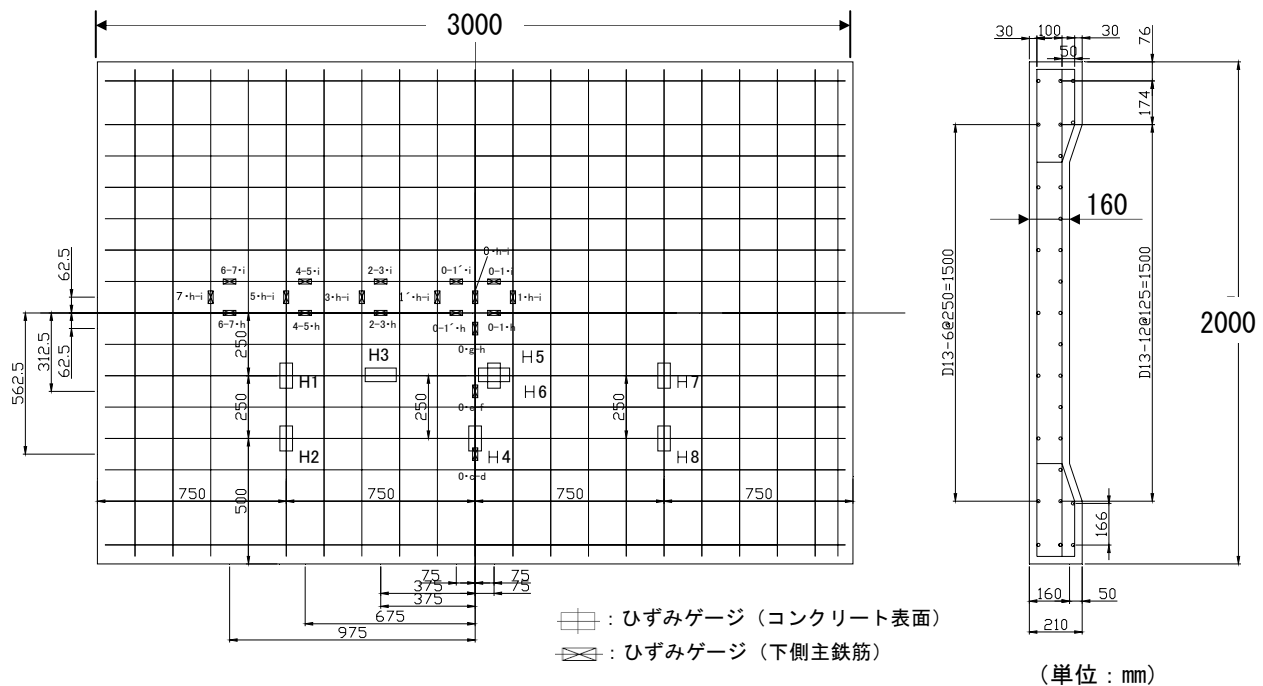


図-2 供試体概要図

これに対し、床版の置かれている状況を把握することを目的とした調査方法として、床版の活荷重たわみ（弾性変形）や床版下面に発生するひび割れの分布状態を調査する方法³⁾が提案されている。これらの方法では、床版のたわみやひび割れの密度により床版に発生している損傷の程度（以下、劣化度）を比較的精度良く求められることが分かっており、一般的な調査手法として認められている³⁾。

しかしながら、近年の全国規模での新形式道路橋床版の適用と道路橋床版における疲労損傷の進展や種々の補修・補強の実施に伴い、上記の調査方法による状況把握が適切に実施できない事例が増加している。そこで著者らは床版の下面からの検査が適切にできない床版を対象とした検査方法として衝撃振動試験を用いる手法を考え、その妥当性を検討するための試験を実施した。

2. 実験の概要

2.1 供試体

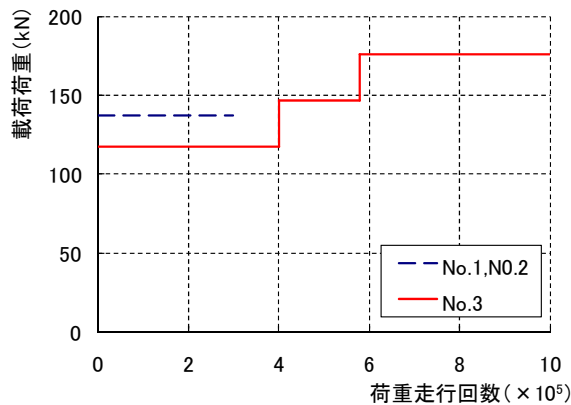
本研究で使用した供試体形状の概要を図-2に示す。今回はこの図に示した床版を3体使用

した。この供試体の橋軸方向長さは3000mm、橋軸直角方向長さは2000mmであり、床版支間は1800mmである。床版支間部の厚さは160mmである。床版引張側主鉄筋、配力筋の配置間隔はそれぞれ150mm、125mmであり、圧縮側のそれは引張側の2倍である。使用したコンクリートの試験開始時の圧縮強度は42.3MPa、弾性係数は32.1GPa、ポアソン比は0.189であった。また、鉄筋の引張試験を行った結果、主鉄筋の降伏強度、引張強度はそれぞれ321MPa、463MPaであり、弾性係数は193GPaであった。これに対し、配力筋の降伏強度、引張強度はそれぞれ344MPa、488MPaであり、弾性係数は195GPaであった。

2.2 輪荷重走行試験

本研究では床版に疲労損傷を与えるための手法として輪荷重走行試験を実施した。今回の試験で採用した载荷プログラムを図-3に示す。本研究では3体の供試体のうち2体は使用限界まで、残りの1体については押抜きせん断破壊を生じるまで走行载荷を実施した。

走行試験中は適宜走行を中断して荷重の静的载荷を行い、床版に生じるたわみやひずみを確



図－3 輪荷重走行試験時の載荷プログラム

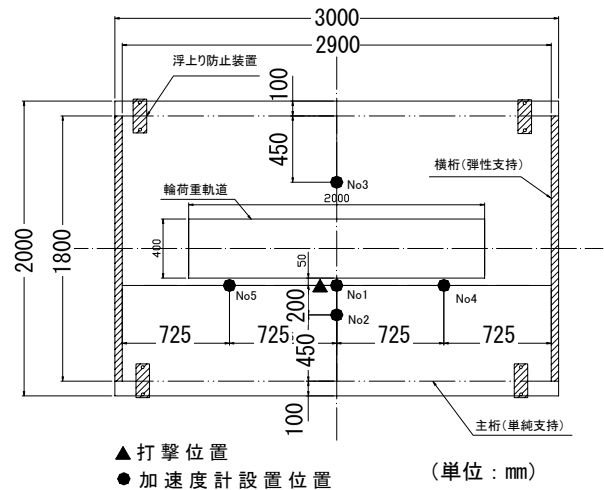
認することにした。たわみを計測するための変位計は床版中央から橋軸方向，橋軸直角方向にそれぞれ 200mm の間隔で配置した。また鉄筋やコンクリート表面のひずみを計測するためのゲージは図－2 中に示される位置に配置した。

2.3 衝撃振動試験

本研究では，床版の劣化状態を把握するための非破壊検査として衝撃振動試験を実施した。この検査方法は床版の 1 ヶ所に設置された厚さ 5mm のゴム板上に高さ 15cm の位置から重さ 4kg の木槌を自由落下させることにより衝撃力を与え，その力によって発生する振動を計測し，床版の面外方向の振動における固有振動数を求め，床版の剛性低下を把握するものである。今回の実験では，輪荷重走行試験中に適宜荷重走行を停止させ，静的載荷試験を実施しているので，その時点で試験を行い，静的載荷試験で得られた各種指標との対応を確認することにした。なお，今回の試験では図－4 に示す位置に打撃位置と加速度計設置位置を設定した。

2.4 床版劣化度の評価²⁾

一般に床版の維持管理においては，その疲労損傷の程度を表す指標として劣化度を導入する。劣化度はその床版が全く損傷を有していない，健全な状態から損傷が発生することによって使用限界状態にどれだけ近づいているのかを簡便に表すための指標である。劣化度を決定する際



図－4 加速度計の配置

に用いられる項目としては，荷重が静的に作用しているときの弾性変形成分である活荷重たわみや床版の下面に発生しているひび割れの総量を比較しやすくするために用いられる指標であるひび割れ密度がある。

活荷重たわみを指標として用いた場合の劣化度は次式で与えられる。

$$D_{\delta} = \frac{\delta - \delta_0}{\delta_{RC} - \delta_0} \quad (1)$$

ただし， D_{δ} ：活荷重たわみによる劣化度， δ ：実際に計測された活荷重たわみ(mm)， δ_0 ：全断面有効を仮定したときの活荷重たわみ計算値(mm)， δ_{RC} ：引張側コンクリートを無視したときの活荷重たわみ計算値(mm)

(1)式中使用されている計算値には Huber の板理論式を用いた簡便な数値計算により与えられる結果が採用されることが多いので本研究でもそれに倣って劣化度の算出を行っている。

ひび割れ密度を指標として用いた場合の劣化度は次の式で与えられる。

$$D_C = \frac{C_d}{10.0} \quad (2)$$

ただし， D_C ：ひび割れ密度による劣化度

C_d ：床版下面のひび割れ密度(m/m²)

(2)式では分母に 10m/m² という値を用いているが，この数値は道路管理者によっては橋梁の置かれた状況を加味して，より適正な値が決められている場合があるが，今回は実験の結果に

関しての算出であるので、この値を採用している。また、本研究では土木学会「道路橋床版の合理化検討小委員会」の研究成果⁴⁾を参考として、ひび割れ密度の算出範囲を輪荷重の走行範囲に限定して実施している。これは、今回使用したクランク式と呼ばれる試験機では床版の橋軸方向端部においてひび割れ密度が大きく低下する傾向があるためであり、より実橋梁で発生するひび割れに近い状況の部分だけを取り出して評価するための措置である。

3. 実験結果と考察

3.1 輪荷重走行試験

輪荷重走行試験で床版上に荷重を走行させた結果の概要を表-1に示す。今回の試験では、実験上の都合により、3つの床版全てを破壊することは避けねばならなかったため、2体の供試体に関しては使用限界を超過した状態まで荷重の走行を行い、残りの1体に関しては床版に押抜きせん断破壊が発生するまで試験を行った。

床版中央の活荷重たわみから与えられる劣化度 D_δ の変動を図-5に示す。この図では供試体間の比較を行いやすくするために、縦軸に荷重を98kNに換算した活荷重たわみを取り、横軸には既往の研究で示されているS-N曲線により与えられる、荷重を98kNに換算した場合の走行回数（等価走行回数）を示している。今回の輪荷重走行試験では試験終了時の各床版の劣化度を求めたところ、No.1床版の劣化度は1.21、No.2床版の劣化度は0.99であり、破壊したNo.3床版の劣化度は1.25であった。

床版下面のひび割れの発生状況を調査した結果を図-6に示す。図中に示さなかった供試体No.2のひび割れ発生状態はNo.1のそれと良く似たものであった。この図を見ると、供試体No.3ではかなり細かなひび割れ網が形成され、ひび割れの分散状態が良好である。これに対し、No.1床版ではひび割れがそれほど分散していないようにも見えるが、ひび割れ密度の変動を確認してみると、3体の供試体間でそれほど大きな変化

表-1 輪荷重走行試験 走行結果

供試体	走行回数(回)			最終状態
	荷重 1	荷重 2	荷重 3	
No.1	12000 (137kN)			使用限界 (未破壊)
No.2	50000 (137kN)			使用限界 (未破壊)
No.3	400000 (117.6kN)	180000 (147kN)	74556 (176.4kN)	終局限界 (破壊)

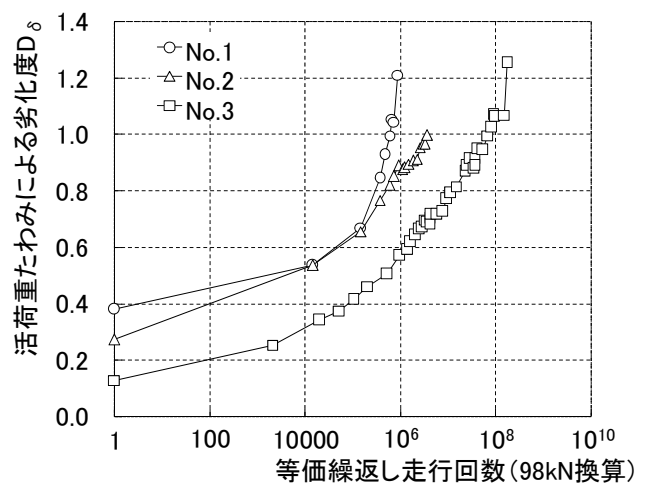
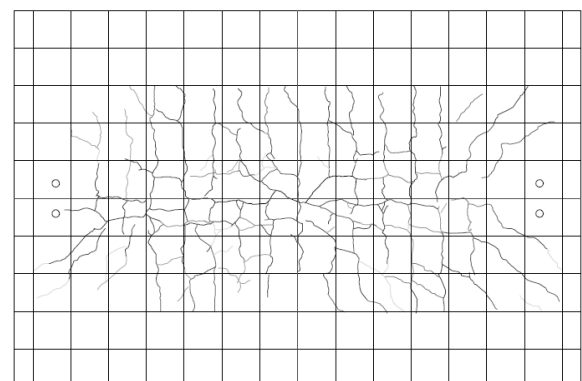
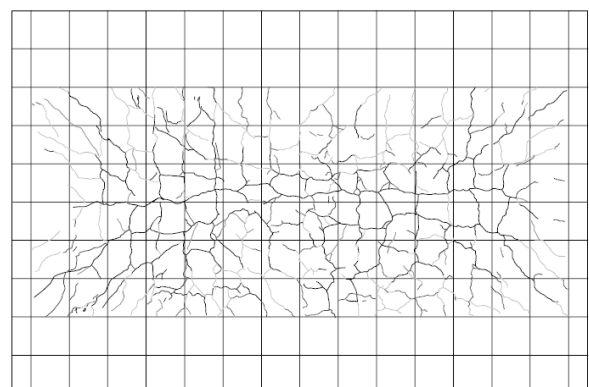


図-5 劣化度 D_δ の変動



(a) No.1 床版



(b) No.3 床版

図-6 ひび割れ観察結果

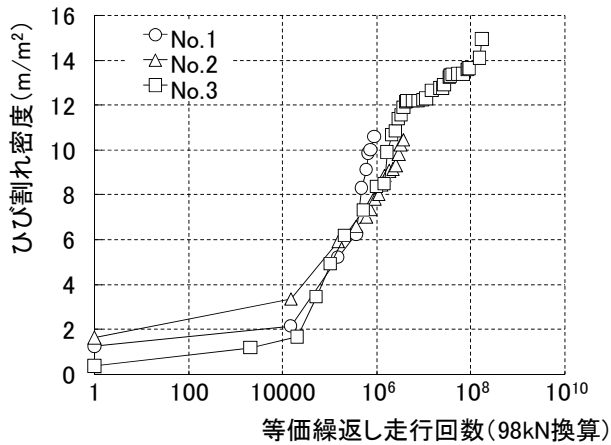


図-7 ひび割れ密度の変動

があるわけではないことが分かる(図-7 参照)。このことから、今回の試験においては供試体間のひび割れの発生量の違いは考えなくても良いと判断した。

3.2 衝撃振動試験

輪荷重走行試験と平行して実施した衝撃振動試験の結果(加速度計による計測結果)の一例を図-8に示す。本研究ではこの図に示されるような計測結果に対して高速フーリエ変換(FFT)を行い、そのスペクトル分布を求めた。その一例を図-9に、輪荷重走行試験の進行に伴う固有振動数の変動を図-10に示す。この図に示されるように、今回のFFT計算結果では固有振動数を30Hz~70Hzの範囲で確認することができ、またその値が試験の進行と共に低周波側へ移動する傾向があることが確認できた。なお、今回確認できた固有振動数は位相差スペクトルを確認することにより、2次のモードに対応した振動数であることが確認できている。

3.3 床版劣化度の比較

輪荷重走行試験で与えられる従来の指標である活荷重たわみによる劣化度 D_δ とひび割れ密度による劣化度 D_c の関係を図-11に示す。供試体No.1とNo.2に関してはこの2つの指標の関係はほぼ $D_\delta = D_c$ であるとみなせるが、供試体No.3のデータでは D_c の値が大きくなる傾向が顕著で

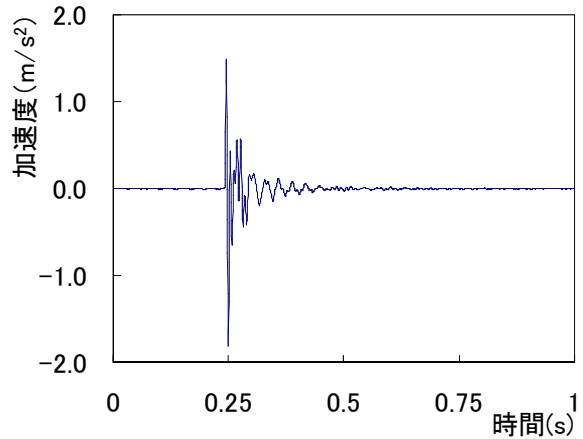


図-8 加速度計測結果例
(No. 1, 9000 回走行時, 1 回目計測)

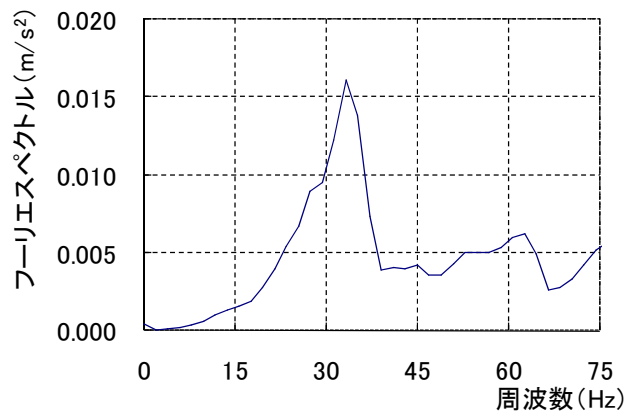


図-9 スペクトル分布例
(No. 1, 9000 回走行時, 1 回目計測)

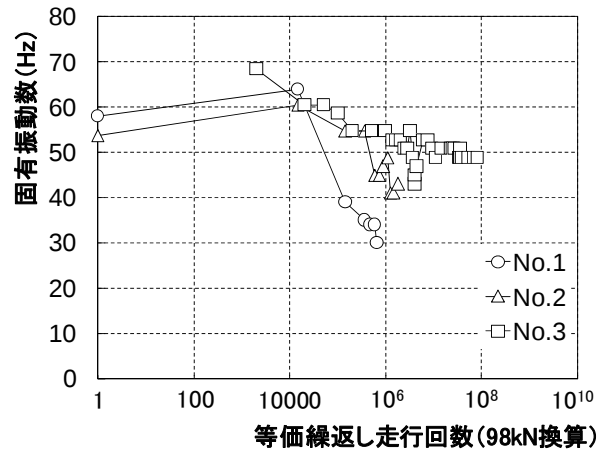


図-10 固有振動数の変動

ある。このことから、 D_c は D_δ よりも安全側の評価を与える可能性がある。

次に、 D_δ や D_c と固有振動数の関係を図-12、図-13に示す。これらの図から、固有振動数と劣化度 D_δ 、 D_c との間にはある程度の相関が認められる。しかし、固有振動数と劣化度 D_c との関

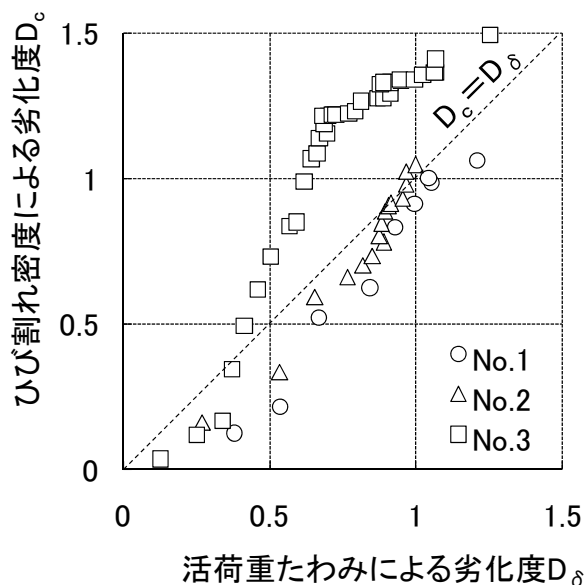


図-11 劣化度 D_δ と D_e の関係

係では供試体毎の差が大きく見える傾向がある。このことは供試体間のひび割れ網形成過程におけるひび割れ分散の程度に起因しているものと推測されるが、今回の試験では明確な影響因子を見出すには至っていないため、今後も検討が必要であると考えられる。

4. まとめ

本研究では RC 床版を用いた輪荷重走行試験と衝撃振動試験を並行して行うことにより、次の知見を得ることができた。

- 1) RC 床版における疲労の損傷の程度を示す指標である劣化度が増加すると固有振動数は低下する傾向を有している。
- 2) RC 床版の活荷重たわみから与えられる劣化度 D_δ と固有振動数の関係と比較して、ひび割れ密度から与えられる劣化度 D_e と固有振動数の関係には RC 床版に載荷された荷重履歴の影響が大きく出る傾向を有している。

謝辞

本研究で使用した供試体の製作、使用に際して日本大学 岩城一郎助教授、首都高速道路下西勝氏に多大なるご協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表すものである。

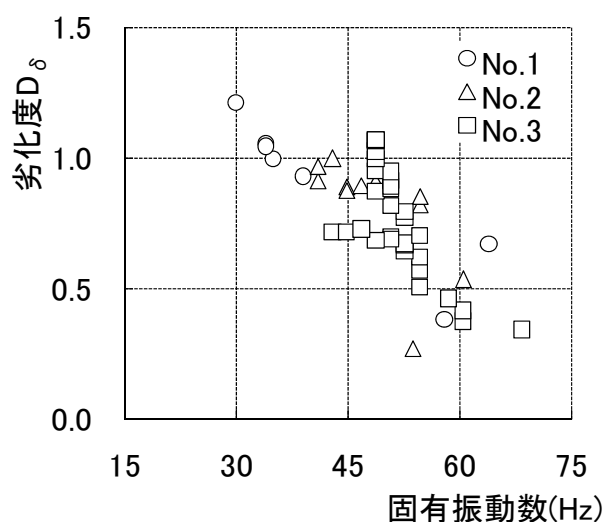


図-12 固有振動数と劣化度 D_δ の関係

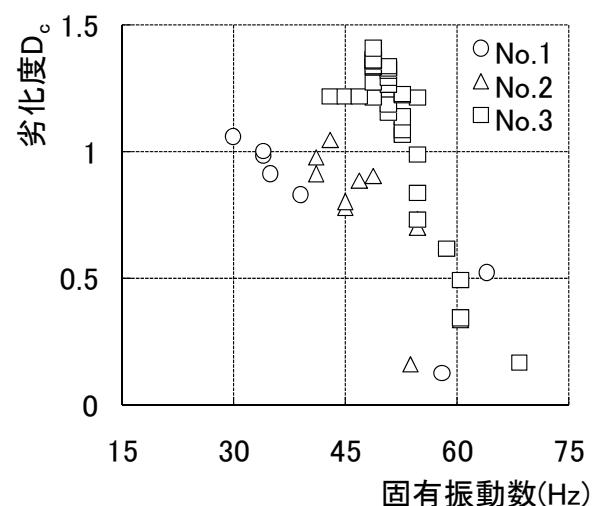


図-13 固有振動数と劣化度 D_e の関係

参考文献

- 1) 土木学会メンテナンス連合小委員会：社会基盤メンテナンス工学，東京大学出版会，2004. 3
- 2) 松井繁之，前田幸雄：道路橋 RC 床版の劣化度判定法の一提案，土木学会論文集，No. 374/I-6，pp. 419-426，1986. 10
- 3) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート標準示方書 [維持管理編]，土木学会，2001
- 4) 例えば，大西弘志，永田淳，長屋優子，鈴木統：クランク式試験装置を用いた道路橋床版の共通輪荷重走行試験，第 5 回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp. 31-38，2006. 7