

衝撃振動測定における固有振動数特定の難易度判定方法

全日本コンサルタント(株) 技術部 吉見 隆
奥平 敬
津田 直幸
田邊 隆

論文要旨

衝撃振動測定は鉄道高架橋において構造物の健全度判定に幅広く用いられている。測定では固有振動数の特定が容易な構造物もあれば、困難な構造物もある。事前に固有振動数の特定が困難な構造物を把握しておくことは、計測作業を効率的に進める上で非常に有効である。

本稿では、当社が新設構造物の初回全般検査として実施した衝撃振動測定結果をもとに、固有振動数特定の難易度判定方法を提案するものである。

キーワード：衝撃振動測定、鉄道構造物、構造物調査、維持管理

まえがき

衝撃振動測定は(財)鉄道総合技術研究所が開発した橋脚・ラーメン高架橋健全度判定のための非破壊検査試験である¹⁾。健全度の指標には固有振動数を用いる。測定は、重錘を用いて構造物天端を打撃し、振動波形を計測する。計測された波形はフーリエ変換し、得られるフーリエスペクトルの卓越振動数と位相差スペクトルから固有振動数を特定する(図 - 1、2)。また、健全度の判定には、固有振動数の現在値と、構造物が健全であるときの値(初期値)を比較、または、理論解析値と比較することにより評価する。あらかじめ初期値がわかっているれば、現地で固有振動数の特定が出来た時点で瞬時に健全度の判定が可能である。

鉄道構造物では本測定を既存構造物の維持管理・健全度判定に用いるだけでなく、最近では初回全般検査の一環として実施されるケースも増えてきた。初回全般検査とは、構造物が完成した時点で実施される検査であり、主に目視変状調査と衝撃振動測定とからなる。構造物初期状態の把握を目的としており、衝撃振動測定は、固有振動数の初期値を得るために実施される²⁾。

当社では平成16年度より(財)鉄道総合技術研究所から販売されている衝撃振動試験用計測システム「IMPACT」を用いて衝撃振動測定を行っている。「IMPACT」は、計測波形の収録・記録、フーリエ解析を一連で行うシステムである³⁾。

従来の計測システムと比較して、パソコン本体と構造物に設置する計測器が無線接続となったため、比較的容易に衝撃振動測定が可能となった。

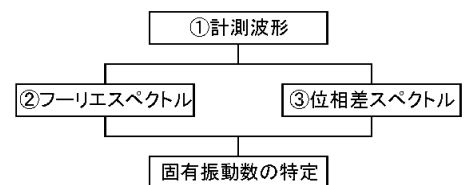


図 - 1 固有振動数の特定フロー

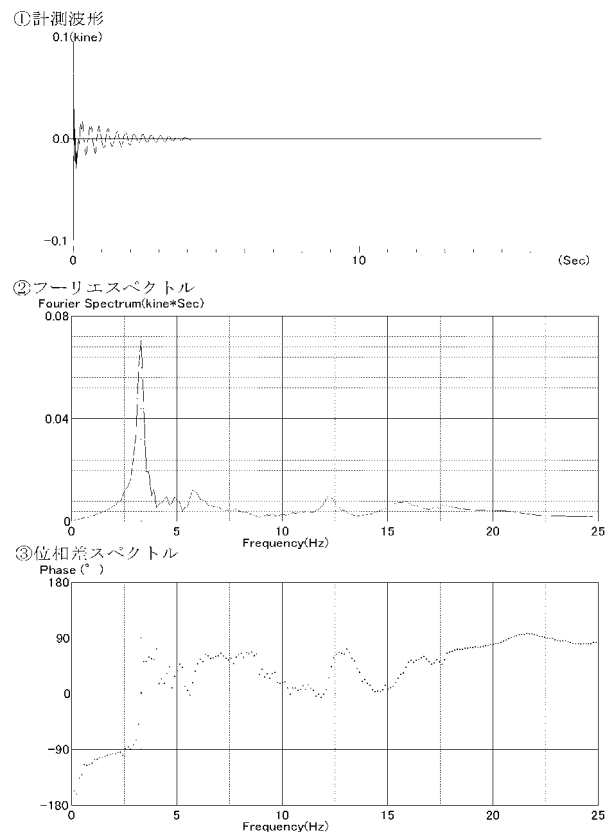


図 - 2 計測波形の例

また、当社では、現時点で、ラーメン高架橋 32 基、橋脚 14 基の測定を実施している。表 - 1 に測定構造物の一覧を示す。

表 - 1 測定構造物の一覧

高架橋名	ラーメン(基)	橋脚(基)
A	2	4
B	10	-
C	4	5
D	6	4
E	10	1
計	32	14

1. 固有振動数の特定の難易度を把握する意義

固有振動数の特定が困難である場合のフーリエスペクトルの例を図 - 3 に示す。

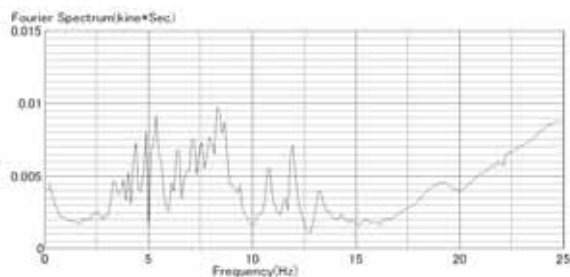


図 - 3 固有振動数の特定が困難な構造物のフーリエスペクトルの例

固有振動数の特定が困難な構造物は、より良い計測波形を得るためにセンサー取付け位置や打撃箇所、重錘の変更 (30kgf または 60kgf) を試行錯誤しながら計測を繰り返すことになる。この場合、計測時間が長くなり、工程に大きな影響を与えることになる。また、場合によっては固有振動数が全く特定できないようなデータしか計測できないこともある。

このため、固有振動数の特定が困難な構造物を事前に把握できれば、計測対象とするかどうかを含め、計測方法や工程を計画に反映しておくことが可能となる。

2. 固有振動数特定が困難な場合の原因究明方法

当社で計測したデータを元に、特定を困難にする可能性のある要因の列挙、フーリエスペクトルによる固有振動数特定の難易度の分類、要因と特定の難易度の因果関係を検証、特定が困難となる要因の整理、の手順で固有振動数の特定が困難になる要因を検討する。

3. 要因の列挙

本測定では、重錘打撃により発生する振動をフーリエ変換し、固有振動数を特定するため、減衰時間が短い構造物は固有振動数の特定が難しい。

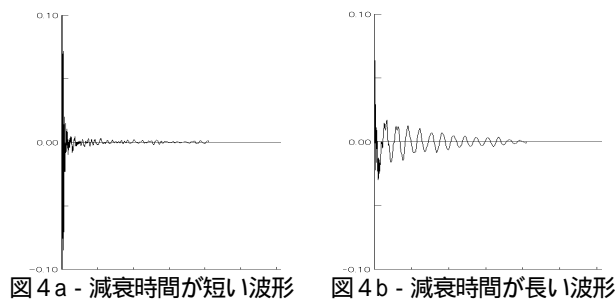


図 4 a - 減衰時間が短い波形 図 4 b - 減衰時間が長い波形

固有振動数の特定を困難にする要因として可能性のあると考えられるものを以下に列挙する。

(1) 構造形式

3 柱式ラーメン高架橋

2 柱式ラーメンに比べ振動が拘束されると考えられるため、固有振動数の特定が困難になると推測する。

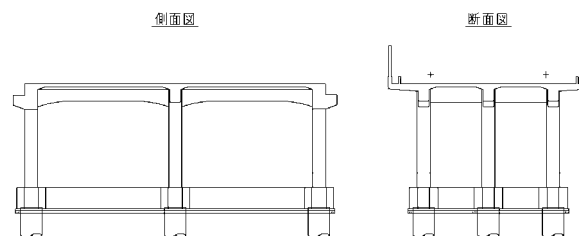


図 - 5 3 柱式ラーメン高架橋の例

2 層ラーメン高架橋

中層梁により振動が拘束されると考えられるため、固有振動数の特定は困難になると推測する。

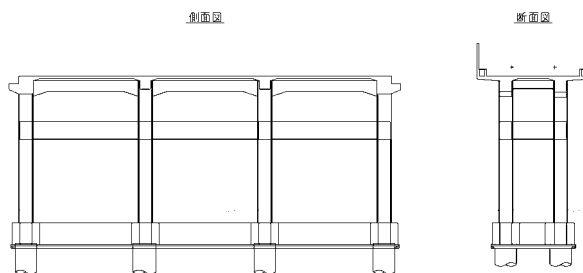


図 - 6 2 層ラーメン高架橋の例

(2) 立地条件

柱の突出長が異なるラーメン高架橋

各柱位置での土被りの違いにより柱の突出長が異なる場合、柱の地盤支持ばねが不均等になるため、固有振動数の特定が困難になると推測する。

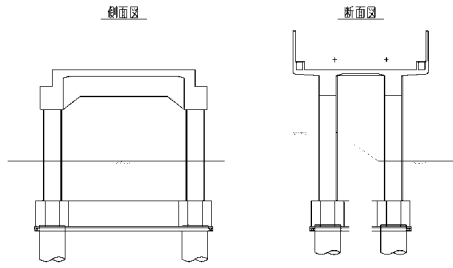


図 - 7 柱突出長の異なるラーメン高架橋の例

土圧を直接受けるラーメン高架橋（橋台タイプ）

背面土と構造物の間に発生する摩擦力により振動が拘束されるため、固有振動数の特定は困難になると推測する。

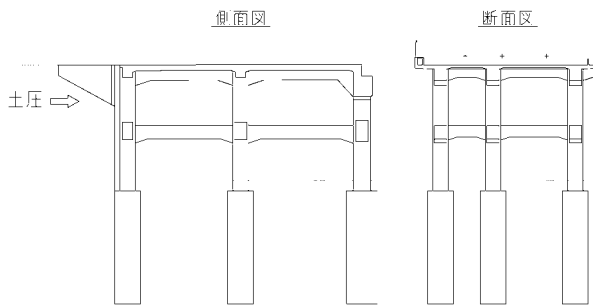


図 - 8 土圧を直接受けるラーメン高架橋の例

桁を介し橋台に隣接するラーメン高架橋

桁を介して打撃による振動を橋台が拘束するため、固有振動数の特定は困難になると推測する。

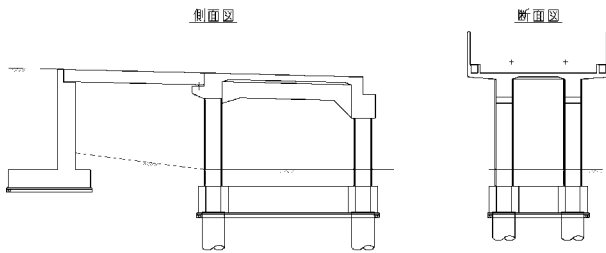


図 - 9 桁を介し橋台に隣接するラーメン高架橋の例

(3) 構造物の剛性

構造物の剛性が高いほど変形しにくく、振幅量が小さいため、固有振動数の特定が困難になると推測する。

構造物の剛性は柱に着目して、片持ち梁のたわみ式より、柱剛性指数(C)を定義した。下記に柱剛性指数(C)の構造形式ごとの算出方法を示す(ただし、H: 柱高、y: 変位、P: 単位荷重、E: ヤング係数、I: 断面2次モーメント、n: 線路直角方向の柱本数とする)。

() 単柱橋脚の柱剛性指数

図 - 10a より

$$y = PH^3 / 3EI$$

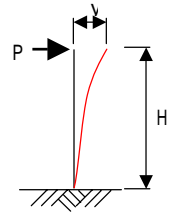
P、E は一定と仮定すると、y は H^3 に比例し、I は反比例する。

$$y = H^3 / I$$

よって、柱剛性指数(C)は

$$C = 1/y = I / H^3$$

とする。



() ラーメン高架橋、ラーメン式橋脚の柱剛性指数

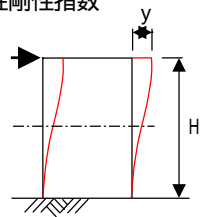
図 - 10b より

$$y = (H/2)^3 \times 2 / (I \times n)$$

よって、柱剛性指数は(C)は

$$C = 1/y = 1 / \{ (H/2)^3 \times 2 / (I \times n) \}$$

とする。



() 2層ラーメン高架橋の柱剛性指数

図 - 10c より

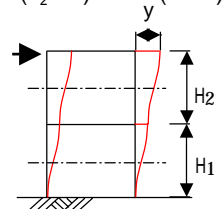
$$y = (H_1/2)^3 \times 2 / (I \times n) + (H_2/2)^3 \times 2 / (I \times n)$$

よって、柱剛性指数は(C)は

$$C = 1/y$$

$$= 1 / \{ (H_1/2)^3 \times 2 / (I \times n) + (H_2/2)^3 \times 2 / (I \times n) \}$$

とする。



(4) 構造物上部の質量

質量が大きい構造物ほど、重錘打撃による振幅量が小さく、振動しにくいいため、固有振動数の特定が困難になると推測する。

構造物上部の質量は、図 - 11a、b に示すハッチングの範囲とする。

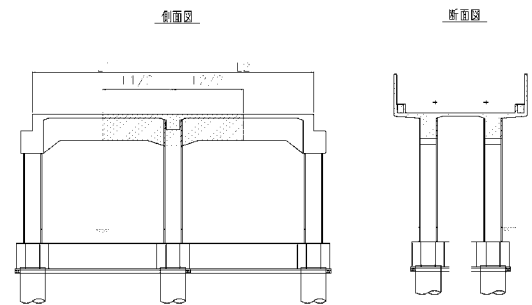


図 - 11a 構造物上部の質量（ラーメンの場合）

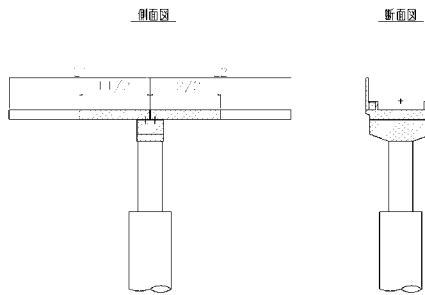


図 - 11b 構造物上部の質量 (橋脚の場合)

(5) 構造物が支持する桁の連数

支持する上部工が1連の場合は、上部工による下部工の拘束がアンバランスになり、ねじれ振動が発生するため、固有振動数の特定は困難になると推測する。また、上部工を3連以上支持する場合は、上部工が互いに干渉しあうようにして振動するため、固有振動数の特定は困難になると推測する。支持する上部工が2連の場合は、打撃方向に同位相で上部工が振動するため固有振動数の特定は困難ではないと推測する。

以上より、上部工を1連、または、3連以上支持する場合、固有振動数の特定は困難になると推測する。

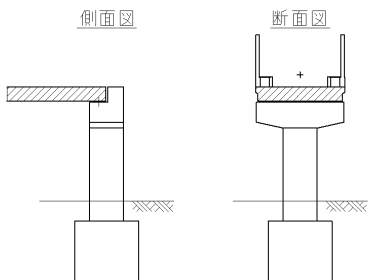


図 - 12a 支持する上部工が1連の例

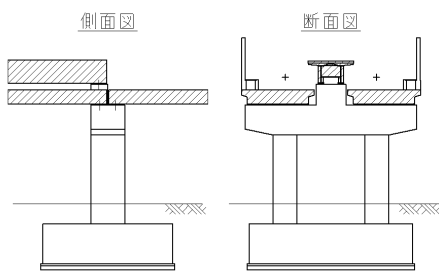


図 - 12b 支持する上部工が3連の例

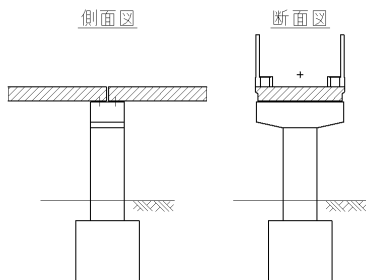
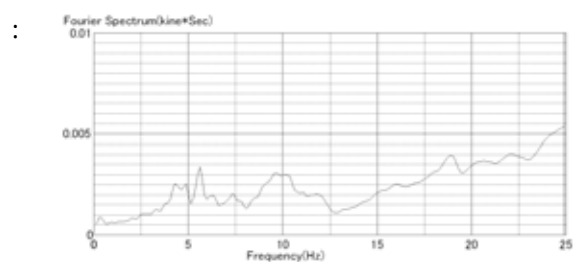
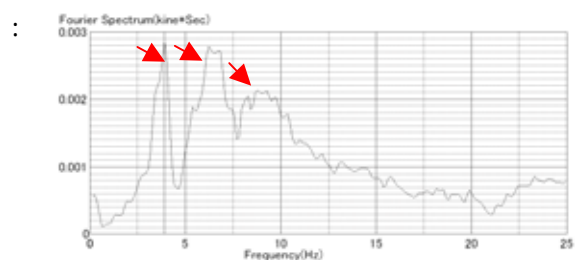
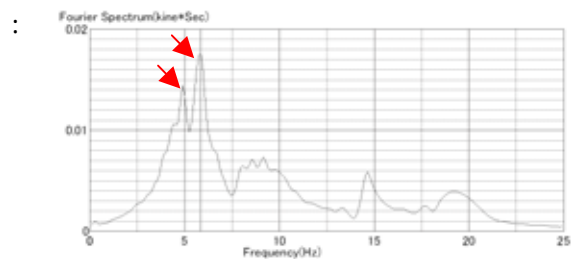
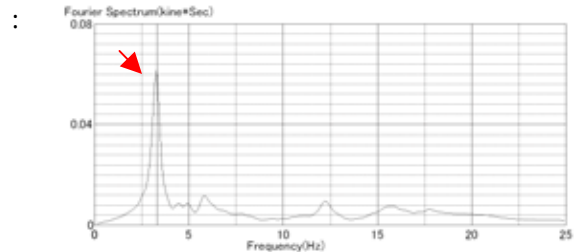


図 - 12c 支持する上部工が2連の例

4. 固有振動数特定の難易度

フーリエスペクトルの波形に着目して、固有振動数特定の難易度を ~ に分類する。

- ：固有振動数の特定が容易 (ピークが一つ)
- ：固有振動数の特定が比較的容易 (ピークが二つ)
- ：固有振動数の特定が困難 (ピークが三つ以上)
- ：固有振動数が特定できない。



当社で計測した構造物を上記の方法で分類した結果を表 - 2 に示す。

表 - 2 固有振動数特定の難易度

判定				計	
ラーメン	16	14	2	0	32
橋脚	2	2	3	7	14

5. 要因と固有振動数特定の難易度の検証

推定した要因が固有振動数特定の難易度に寄与しているかどうかの検証をする。方法は分類結果が・判定に該当する構造物の確率を算出し、確率が50%を超えた場合を要因と認めることによる。

(1) 構造形式

表-3に示すように、3柱式ラーメン高架橋や2層ラーメン高架橋は、固有振動数の特定を困難にする要因であるとはいえない。

表-3 構造形式による判定

構造形式	該当基数	・判定	確率(%)
3柱式ラーメン	5	2	40
2層ラーメン	4	1	25

(2) 立地条件

表-4に示すように、柱の突出長が異なる高架橋や土圧を直接受ける高架橋、桁を介して橋台に隣接する高架橋は、固有振動数の特定が困難であるとはいえない。

表-4 立地条件による判定

立地条件	該当基数	・判定	確率(%)
柱突出長が異なる	4	1	25
土圧を受ける	1	0	0
橋台に隣接する	6	2	33

(3) 構造物の剛性

表-5に示すように、柱剛性指数(C)が $0.01(m^{-1})$ 以上であると固有振動数の特定が困難となる。

表-5 柱剛性指数による判定

柱剛性指数(C)	該当基数	・判定	確率(%)
$C > 0.01(m^{-1})$	10	8	80

(4) 構造物上部の質量

表-6に示すように、質量が400(t)以上であると固有振動数の特定が困難となる。

表-6 構造物上部質量による判定

質量(M)	該当基数	・判定	確率(%)
$M > 400(t)$	17	10	59

(5) 構造物が支持する桁の連数

表-7に示すように、1連、または、3連以上支持する場合は固有振動数の特定は困難となる。

表-7 桁の連数による判定

桁の連数	該当基数	・判定	確率(%)
1連 or 3連以上	9	8	89

(6) 検証結果

固有振動数特定が困難となる要因は以下の3項目であることが分かった。

柱剛性指数(C) $> 0.01(m^{-1})$ (該当確率 80%)

構造物上部質量(M) $> 400(t)$ (該当確率 59%)

構造物が支持する桁の連数が1連または3連以上 (該当確率 89%)

これら3項目の関係を図-13に示す。

6. 複合要因による固有振動数特定の難易度

これら3要因のうち1要因で固有振動数特定の難易度を判断することは精度の高い方法とは言い難い。このため、これら3要因が複合要因となった場合の固有振動数の特定の難易度を考察する。

(1) 構造物の剛性と構造物上部の質量

柱剛性指数(C) $> 0.01(m^{-1})$ 、かつ、構造物上部質量(M) $> 400(t)$ の要因を満足する構造物は図-14aの範囲にプロットされた構造物であり、判定結果を下記に示す。

表-8 柱剛性と質量による判定

複合要因	該当基数	・判定	確率(%)
$C > 0.01(m^{-1})$ $M > 400(t)$	9	7	78

(2) 構造物の剛性と桁の連数

柱剛性指数(C) $> 0.01(m^{-1})$ 、かつ、桁の連数が1連または3連以上の要因を満足する構造物は図-14bの範囲にプロットされた構造物であり、判定結果を下記に示す。

表-9 柱剛性と桁の連数による判定

複合要因	該当基数	・判定	確率(%)
$C > 0.01(m^{-1})$ 桁が1連 or 3連以上	4	4	100

(3) 構造物上部の質量と桁の連数

構造物上層質量(M) $> 400(t)$ 、かつ、桁の連数が1連または3連以上を満たす構造物は図-14cの範囲にプロットされた構造物であり、判定結果を下記に示す。

表-10 質量と桁の連数による判定

複合要因	該当基数	・判定	確率(%)
$M > 400(t)$ 桁が1連 or 3連以上	7	6	86

以上より、2つ以上の要因に該当すると固有振動数の特定が困難となる確率が86%以上となり、高い割合となった。

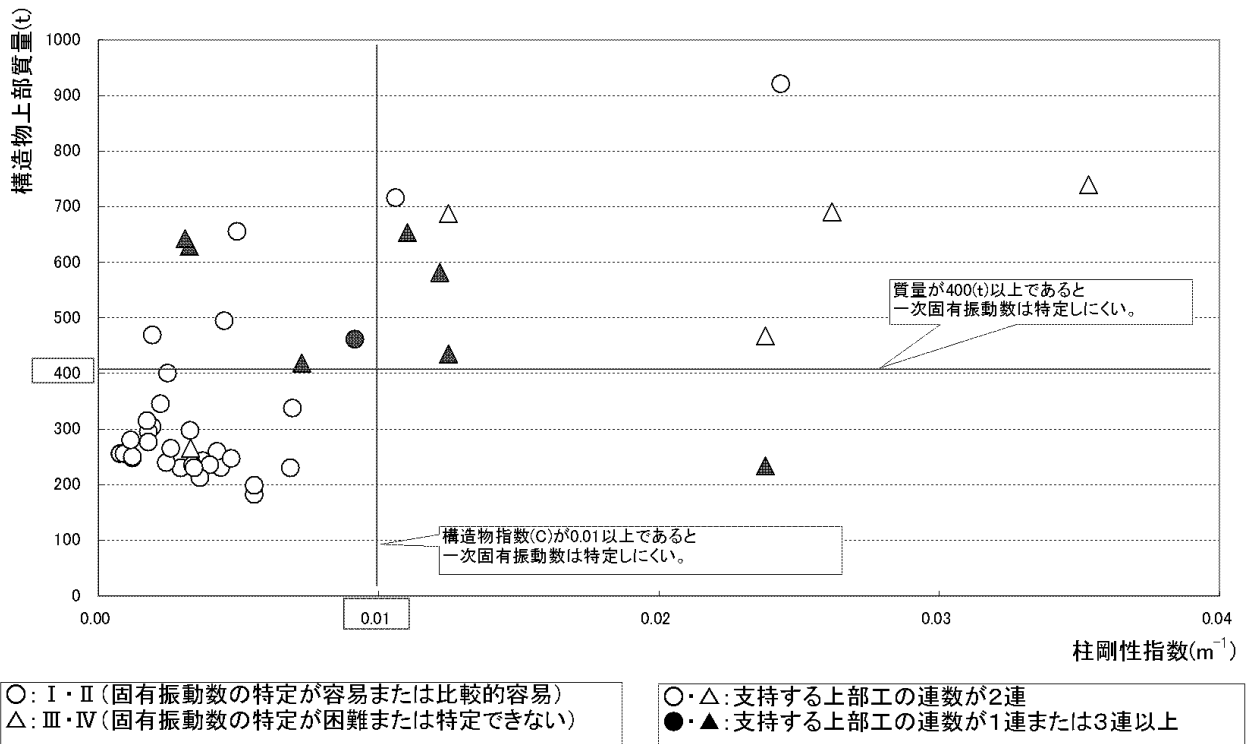


図 - 13 固有振動数特定が困難になる要因

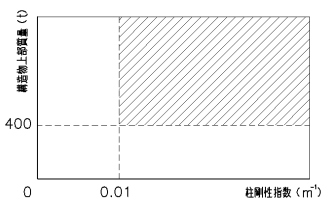


図 - 14a 剛性と質量の範囲

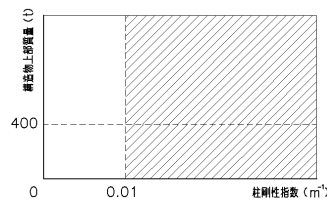


図 - 14b 剛性と桁の連数

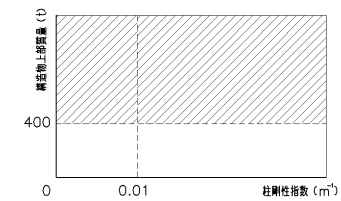


図 - 14c 質量と桁の連数の範囲

(4) 判定方法

固有振動数の特定が困難となる構造物の判定方法を次のように提案する。

以下の要因に2つ以上該当する構造物であること。

柱剛性指数(C) > 0.01(m⁻¹)の構造物である。

構造物上部質量(M) > 400(t)である。

構造物が支持する桁の連数が1連または3連以上である。

あとがき

ここで提案している固有振動数特定の難易度は、統計的に導き出しており、本稿で提案した手法により、鉄道のラーメン高架橋と橋脚では判定可能と考える。今後も測定データの蓄積を行い、提案手法の妥当性を確認していきたい。

最後に、本稿の作成にあたり、ご指導、ご助言およびご協力いただきました関係各位に深く感謝の意を示す次第です。

参考文献

- 1) (財)鉄道総合技術研究所：衝撃振動試験マニュアル、平成7年3月。
- 2) 近畿日本鉄道株式会社：建造物検査実施要領、平成16年9月。
- 3) (財)鉄道総合技術研究所：橋梁下部工健全度システムIMPACT 取扱説明書、平成6年6月

