

橋脚振動特性の実測データによる統計分析

STATISTICAL ANALYSIS ON THE PIER VIBRATIONAL CHARACTERISTICS BY THE MEASURED DATA

加藤 雅史*・島田 静雄**

By Masafumi KATO and Shizuo SHIMADA

表一 分析に用いたデータの形式別サンプル数

橋脚長		固有振動数の分析				減衰定数の分析			
		25 m 未満	25 m 以上	25 m 未満	25 m 以上	25 m 未満	25 m 以上	25 m 未満	25 m 以上
基礎長		20 m 未満	20 m 以上	20 m 未満	20 m 以上	20 m 未満	20 m 以上	20 m 未満	20 m 以上
橋脚主材別	S 造	—	3	2	—	—	3	2	—
	RC 造	25	19	10	4	14	19	8	4
	SRC 造	—	—	6	—	—	—	6	—
	煉瓦造	3	—	—	—	3	—	—	—
橋脚断面形状別	円形・正方形	2	1	1	—	2	1	1	—
	楕円形・長方形	17	18	17	4	14	18	15	4
	杭・その他	8	3	—	—	—	3	—	—
	不明	1	—	—	—	1	—	—	—
橋脚断面寸法	明瞭	21	13	10	2	11	13	9	2
	不明	7	9	8	2	6	9	7	2
基礎形式別	直接基礎	4	—	15	—	—	—	13	—
	ケーソン	20	7	—	2	13	7	—	2
	杭	4	15	3	2	4	15	3	2
基礎断面形状別	円形・正方形	4	2	7	2	—	2	6	2
	楕円形・長方形	18	2	8	—	12	2	7	—
	その他	1	18	3	2	1	18	3	2
	不明	5	—	—	—	4	—	—	—
総計		28	22	18	4	17	22	16	4
		50		22		39		20	
		72				59			

1. まえがき

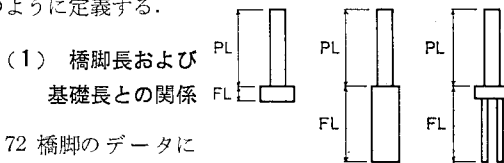
著者は前論¹⁾において、各研究機関等で実施された橋梁の振動実測結果を収集し、これを統計分析することによって、橋梁の振動特性（固有振動数、減衰定数等）と橋梁形式等との関連を明らかにした。

しかし、前論¹⁾では上部工を主体に取り扱ったため、下部工の振動特性を十分把握することができなかった。そこで、本論はわが国の橋梁を対象として、学会関係あるいは各研究所等の論文・報告、橋梁関係の雑誌の報告、種々の出版物から橋脚の振動実験結果を収集し、基礎形状（すなわち、地盤特性）に注目して橋脚の振動特性を分析し明らかにする。なお、振動特性として取り上げる項目は、収集データの関係から、水平方向の固有振動数と減衰定数とする。

2. 固有振動数の統計分析

分析の対象とした収集データは、健全でかつ橋脚長・基礎長等が明らかな橋脚のうち、上部工を有しない状態での水平方向の実測値とし、表一¹⁾に示すような形式別内訳の 72 橋脚である。

ここで、橋脚長とは橋脚柱の高さ、基礎長とは基礎の深さを意味し、橋脚長 (PL) と基礎長 (FL) は 図一¹⁾のように定義する。



図一 橋脚長と基礎長の区分

72 橋脚のデータについて、橋脚長と基本振動数の関係を 図二

に示す。この図で、深い基礎と浅い基礎を有する橋脚を便宜的に基礎の深さ 20 m で区分して表示している。これより、基本振動数は橋脚長と非常に強い関係があることがうかがえる。また、表二²⁾の相関係数と 図二²⁾から基礎長も大きく影響していることがわかる。そこで、橋脚長と基礎長を説明変数とした種々の重回帰式を推定すると、推定精度の高いものとして次の 2 式が得られた。

$$\log F = 1.7034 - 0.7615 \log PL - 0.2367 \log FL$$

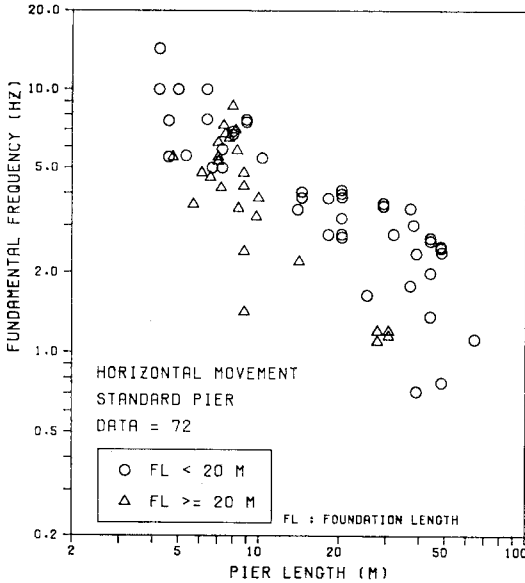
(R=0.8423) (1)

$$1/F = 0.0279 + 0.0133 PL + 0.000103 FL^2$$

(R=0.7267) (2)

ここで、F：基本振動数 (Hz)、PL：橋脚長 (m)、FL：基礎長 (m)

* 正会員 工修 名古屋大学助手 工学部土木工学科
** 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科



図一 基本振動数と橋脚長の関係

表一 基本振動数と各形式との相関係数

		単純相関係数		偏相関係数		偏相関係数	
		log F	1/F	log F	1/F	log F	1/F
基礎長	FL ²	-0.138	(+)	-0.521	0.398		
	log F	(+)	—	-0.487	0.435		
橋脚主材別	S 造	-0.265	0.243	-0.194	0.176	(-)	(+)
	RC 造	0.294	-0.255	0.116	—	0.167	—
	SRC 造	-0.243	0.193	0.142	-0.234	—	-0.229
	煉瓦造	0.160	-0.138	(-)	—	-0.311	(+)
橋脚断面形状別	円形・正方形	—	—	—	—	—	—
	楕円形・長方形	0.169	(-)	—	—	—	(+)
	杭・その他	-0.159	—	—	—	—	(-)
橋脚厚比	—	—	-0.278	0.208	-0.255	0.195	
基礎形式別	直接基礎	-0.409	0.280	0.375	-0.438	(+)	-0.383
	ケーソン	0.395	-0.297	0.175	—	0.265	—
	杭	—	—	-0.434	0.329	-0.326	0.233
基礎断面形状別	円形・正方形	(-)	(+)	0.182	-0.141	0.181	-0.164
	楕円形・長方形	0.220	-0.185	0.294	-0.230	(+)	(-)
	その他	-0.148	0.129	-0.441	0.345	-0.280	0.236
影響を除去した変数				log PL	PL	log PL / log FL	PL / FL ²

F: 基本振動数, PL: 橋脚長, FL: 基礎長, 橋脚厚比=(振動直角方向厚)/(振動方向厚)

表三 推定精度の検討

式番号	R	P	Q
(1)	0.8423	0.2067	0.2448
(2)	0.7267	0.2236	0.3023
(3)	0.8603	0.1649	0.2003
(4)	0.9083	0.0851	0.1103

回帰式の精度は一般に重相関係数(R)で表わされるが、さらに、前論りで用いたPとQの値を計算すると表一3のようである。紙面の都合上、PとQの計算式は文献1)を参照されたいが、PとQは0.0に近いほど、またRは1.0に近いほど精度が高いことになる。これより、基本振動数と橋脚長、基礎長の関係は式(1)で表わすことができるといえよう。

(2) 各種形式との関係

橋脚長、基礎長以外に要因として考えられる各種の橋脚基礎形式との関係をみるために、種々の分類ごとに各カテゴリについて基本振動数との単純相関係数および偏相関係数を求め、これを表一2に示す。ここで基本振動数、橋脚長、基礎長は、式(1)、(2)に対応して変数変換した値を用いている。表中の括弧付きの符号は、相関性は弱いが一応の傾向のみられるものを示す。

また、その他の偏相関分析の結果をまとめて表一4に示す。この表で、有意性の認められる分類は有意性の高い順に左から並べてある。

表一2, 4から、基本振動数と各種形式との相関性について、次の点がいえよう。

① 基礎形式別分類が橋脚長と基礎長の影響を除去しても相関性が高い。これは、基礎長が同じでもケーソンと杭の剛性の違いによるものと考えられる。

② 橋脚主材別分類も比較的相関が高い。

③ 同一橋脚の振動方向による振動数の違いを分析するために、橋脚厚比(振動方向の橋脚厚さに対するこれに直角方向の橋脚厚さの比)という橋脚形状のパラメーターを用いたが、橋脚厚比が大きくなるほど、すなわち振動方向の橋脚厚さが薄くなるほど基本振動数が低下する傾向がみられる。

④ 橋脚断面形状別分類と基礎断面形状別分類には、相関性はあまり認められず、有意な分類とはいえない。

このほか、橋脚の内部が中空か詰まっているかの分類も検討したが、データ数の関係で明確でなかった。

(3) 基本振動数の推定式

表四 基本振動数と各形式の偏相関分析結果

影響を除去した変数	有意性の認められる分類
橋脚長・基礎長・橋脚主材別	基礎形式別
橋脚長・基礎長・基礎形式別	橋脚主材別, 橋脚厚比, 基礎断面形状別
橋脚長・基礎長・橋脚厚比	基礎形式別, 橋脚主材別, 橋脚断面形状別, 基礎断面形状別

前述の結果をふまえ、式 (1), (2) の形で基本振動数を推定する実験式を、ダミー変数 (該当する場合に 1, そうでない場合には 0 となる変数) を併用した重回帰分析によって種々推定し、最も推定精度の高いものとして次式を得た。

$$F = 10^a \cdot PL^{-0.783} \cdot FL^{-0.187}, \quad \alpha = a + b \dots\dots (3)$$

$$a = 1.706$$

$$b = \begin{cases} -0.117 & (\text{杭基礎の場合}) \\ 0.0 & (\text{その他の基礎の場合}) \end{cases}$$

ここで、 F : 基本振動数 (Hz), PL : 橋脚長 (m), FL : 基礎長 (m)

また、同一橋脚での振動方向による違いを考慮するために、データ数は 46 と少ないが、橋脚厚比を変数に加えて実験式を推定すると次式のようなものである。

$$F = 10^{a-0.018K} \cdot PL^{-0.680} \cdot FL^{-0.183} \left. \begin{array}{l} K = \frac{\text{(振動直角方向橋脚厚)}}{\text{(振動方向橋脚厚)}} - 1.0 \\ \alpha = a + b \end{array} \right\} \dots\dots (4)$$

$$a = 1.841$$

$$b = \begin{cases} -0.070 & (\text{杭基礎の場合}) \\ 0.0 & (\text{その他の基礎の場合}) \end{cases}$$

式 (3), (4) について、(1) と同様に精度の検討をした結果は 表-3 に示してある。

この 2 式は、橋脚長、基礎長が長いほど、また杭基礎の方が他の基礎に比して固有振動数が低くなるというほぼ常識的な結果となっており、式 (3) あるいは式 (4) によって、橋脚の水平方向基本振動数の推定が可能といえよう。

3. 減衰定数の統計分析

収集データのうち、2. で示したような条件を満足する 59 橋脚を分析の対象とし、その形式別内訳を 表-1 に示す。収集データでは減衰性を示す指標として種々のものが用いられているが、すべて減衰定数 (減衰係数/臨界減衰係数; 無次元量) に変換している。

また、振動次数と減衰定数との関係については、高橋脚で高次振動まで得られているものを検討したが、振動次数による変化傾向はみられなかった。この点と多くの収集データが基本振動のものだけであることより、基本振動に対応した減衰定数を分析の対象とする。

(1) 基本振動数との関係

基本振動数と減衰定数の関係をプロットしたものが 図-3 である。図中で深い基礎と浅い基礎を便宜的に 20 m で区分して表示したが、これによると、基本振動数が高くなると減衰定数は大きくなるが、深い基礎と浅

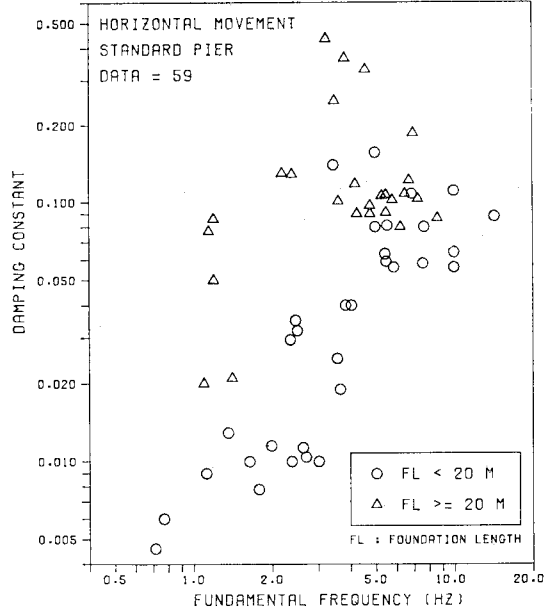


図-3 減衰定数と基本振動数の関係

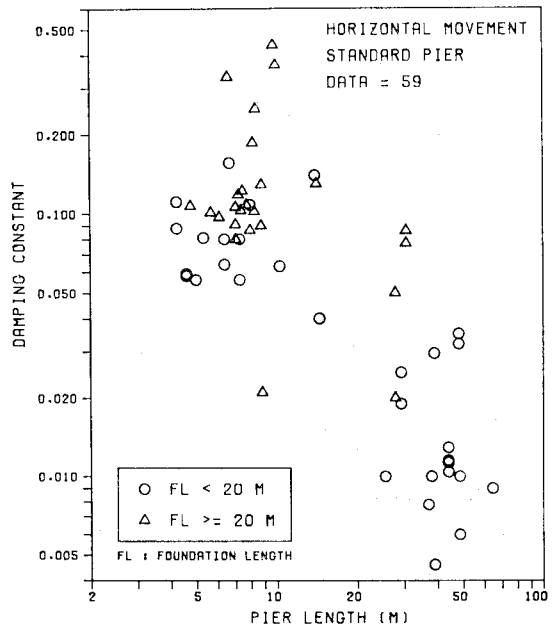


図-4 減衰定数と橋脚長の関係

い基礎では明らかな違いが認められる。栗林・岩崎²⁾の分析では、上部工のない橋脚のデータだけを取り出しても高次振動も含めているため、高橋脚と一般橋脚で特性が異なっているが、このような違いは特に認められない。

このような基本振動数と減衰定数の関係は、図-2 で示した橋脚長と基本振動数また次に述べる橋脚長と減衰定数の相関性を考えれば当然のことといえる。

(2) 橋脚長および基礎長との関係

橋脚長と減衰定数の関係を 図-4 に示す。減衰定数の値はかなりの幅があり、特に短い橋脚ではバラツキが多い。また、この図からも基礎長が大きく影響していることがうかがえる。そこで橋脚長と基礎長を説明変数とした種々の重回帰式を求めると、比較的精度の高いものとして次の2式を得た。

$$\log h = -0.6406 - 0.8063 \log PL + 0.0124 FL \quad (R=0.8461) \dots\dots\dots (5)$$

$$\log h = -1.0700 - 0.7424 \log PL + 0.5246 \log FL \quad (R=0.8432) \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 h ：減衰定数、 PL ：橋脚長 (m)、 FL ：基礎長 (m)

式 (5)、(6) より、橋脚長が短いほど基礎長が長いほど減衰定数は大きくなるのが明らかである。2式とも重相関係数 R は比較的よい値となっているが、固有振動数で検討したような P, Q を求めると大きな値となり、固有振動数以上に他の要因に影響されているといえる。

(3) 各種形式との関係

橋脚基礎の形式による分類ごとに求めた単純相関係数、偏相関係数を 表-5 に示す。この表でも括弧付きの符号は 表-2 と同様の意味である。この表に基づいて、収集データの各形式による減衰定数の相違を 表-6 に示す。これらより、各形式と減衰定数の関係として次の点が認められる。

① 橋脚主材別分類は、橋脚長や基礎長の影響を除去しても相関性が最も高く、鋼橋脚よりRC橋脚の方が減衰定数が大きい。煉瓦造の橋脚はデータが少ないため明確ではないがRC橋脚と同程度である。

② 基礎形式別分類は、表-6 では差が認められるが、橋脚長と基礎長による影響が強くこれらを考慮すると、表-5 のようにあまり相関性はみられない。

③ 橋脚厚比も、固有振動数ほどの相関性はみられない。

④ 橋脚断面形状別分類、基礎断面形状別分類は、橋脚長、基礎長の他に橋脚主材別分類を考慮するとほとんど相関性はみられず、有意な分類とはいえない。

4. あとがき

以上のように、橋脚の固有振動数と減衰定数を橋脚長、基礎長およびその他形式との関係で明らかにした。ただデータ数があまり多くないため不十分な点もあり、

表-5 減衰定数と各形式との相関係数

		単純相関係数	偏相関係数	偏相関係数	
		$\log h$	$\log h$	$\log h$	$\log h$
基礎長	FL	0.591	0.602		
	$\log FL$	0.652	0.592		
橋脚主材別	S 造	-0.168	-0.119	-0.316	-0.296
	RC 造	0.395	0.290	0.235	0.163
	SRC 造	-0.479	-0.210	(-)	—
	煉瓦造	(+)	-0.147	(+)	0.122
橋脚断面形状別	円形・正方形	(-)	(-)	(-)	-0.173
	楕円形・長方形	(+)	(+)	0.267	0.264
	杭・その他	—	—	-0.295	-0.188
橋脚厚比		0.184	(+)	0.107	(+)
基礎形式別	直接基礎	-0.678	-0.261	—	0.152
	ケーソン	0.311	—	(+)	—
	杭	0.280	0.124	(-)	(-)
基礎断面形状別	円形・正方形	-0.160	0.189	0.147	0.165
	楕円形・長方形	-0.187	-0.392	—	—
	その他	0.304	0.249	(-)	-0.101
影響を除去した変数			$\log PL$	$\log PL / FL$	$\log PL / \log FL$

h ：減衰定数、 PL ：橋脚長、 FL ：基礎長
橋脚厚比 = (振動直角方向厚) / (振動方向厚)

表-6 各形式による減衰定数の相違

低橋脚 (25m未満)	浅い基礎 (20m未満)	0.0786	
	深い基礎 (20m以上)	0.1477	
高橋脚 (25m以上)	浅い基礎 (20m未満)	0.0152	
	深い基礎 (20m以上)	0.0582	
低橋脚 (25m未満)	RC橋脚	0.1202	
	鋼橋脚	0.0764	
高橋脚 (25m以上)	RC橋脚	0.0315	
	鋼橋脚	0.0160	
RC橋脚 $PL=15.7$ $FL=22.7$	0.0971	直接基礎 $PL=39.0, FL=5.1$	0.0240
		ケーソン基礎 $PL=10.1, FL=23.1$	0.0904
		杭基礎 $PL=11.7, FL=31.0$	0.1428
鋼橋脚 $PL=23.0$ $FL=19.4$	0.0496	PL ：平均橋脚長 (m) FL ：平均基礎長 (m)	

さらにデータ収集に努める必要がある。この統計分析には名古屋大学大型計算機センターの FACOM-M 200 を用いたことを付記する。

参考文献

- 1) 加藤雅史・島田静雄：橋梁実測振動特性の統計解析，土木学会論文報告集，No. 311, pp. 49~58, 1981年7月。
- 2) 栗林栄一・岩崎敏男：橋梁の耐震設計に関する研究(III)，土木研究所報告，No. 139, pp. 63~165, 1971年2月。
(1982.8.16・受付)