

# 流水の影響を考慮した橋脚振動解析モデルと 洗掘時の振動特性評価

佐溝 昌彦\* 渡邊 諭\*

An Evaluation of Vibration Properties of Scoured Bridge Piers by Using the Analytical Model of Vibration Characteristics Considering the River-flow

Masahiko SAMIZO Satoshi WATANABE

As one of evaluation methods of bridge pier integrity, we suggested before a method to determine the natural frequency of practical bridge piers through microtremor measurement. However, it has been found out through long-term measurement that accuracy of determination of natural frequencies of bridge piers depends on their structural conditions. Therefore, we focused a displacement of bridge pier as another indicator of stability and studied on the relationship between displacement and instability. The research in this paper focused on studies on vibration properties of scoured bridge piers by using the analytical model of vibration characteristics with consideration on the river-flow.

キーワード：洗掘，橋梁，常時微動，付加質量，抗力係数

## 1. はじめに

河川増水時には洗掘等の影響で橋脚基礎の安定性が低下する場合がある。このため、鉄道では水位に応じて必要により運転規制を行って列車の安全を確保している。これまで、微動から求める橋脚の固有振動数の変化で増水時における橋脚基礎の健全性を評価する技術を提案した<sup>1) 2)</sup>。この増水時における橋脚の微動を用いた橋脚基礎の健全性評価手法を適用するには、増水時の微動から橋脚の固有振動数が特定できる橋脚であることと、洗掘に伴い固有振動数が低下していく振動数域に他の明瞭な固有振動数が存在しないことが必要である。そうした条件を満足しない場合にはこの手法の適用が必ずしも有効でないという課題が残された。そこで、微動から求める固有振動数の変化で評価することが困難な場合には、それ以外の指標として橋脚の変位に着目し、根入れに対する変位振幅の感度の高低で評価手法の適用を判断する流れ(図1)を新たに加えることを提案することとした。

橋脚の変位を用いた健全性評価の考え方の例を図2に示す。評価は、あらかじめ解析モデルを用いて水深に応じた変位を根入れ比別に求め、ノモグラムを作成しておき、実測の水深から想定される変位と橋脚天端での実測変位とを比較することで想定される根入れ比を求める、方法が考えられる。この際、水深に応じた関係を用いることで、一般的な運転規制の指標である「橋脚周りの水

位」との関連づけが容易となる利点がある。

こうした評価方法検討の一環として、実橋脚での計測結果を基に、橋脚に作用する流水力や地盤振動などの設定手順を整理した上で、これらを橋脚の2次元FEMモデルに入力して増水時の橋脚の挙動を求めた。また、このモデルを用いて、流水条件や根入れ条件を変化させた際の根入れに対する変位振幅の感度分析を行い、実橋脚における、橋脚の固有振動数の感度と比較した結果について報告する。

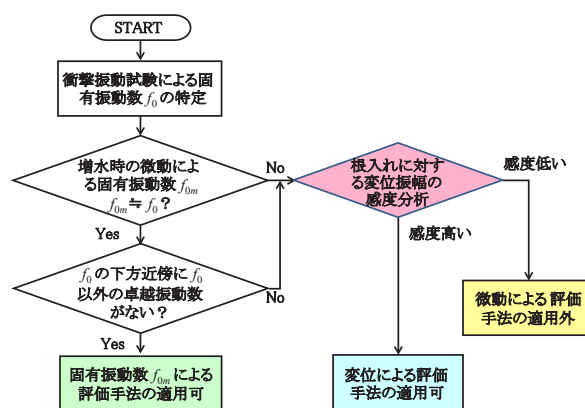


図1 増水時の微動を用いた健全性評価手法の適用に関するフロー

## 2. 増水時の橋脚振動に影響を及ぼす要因

増水時の橋脚振動に影響を及ぼす要因には、橋脚に作用する力として流水力、風力、列車荷重や地盤振動など

\* 防災技術研究部 地盤防災研究室

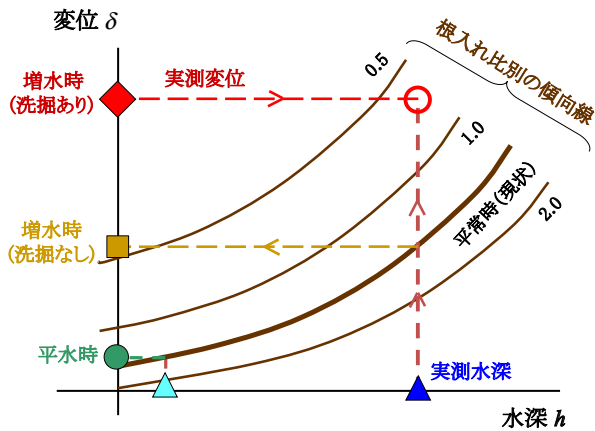


図2 水深と変位を用いた健全性評価の考え方の例

がある。また、橋脚の構造諸元の他、付帯する施設の影響も考えられる。ここでは、増水時に必ず橋脚に作用する外力として「流水力」と「地盤振動」を考慮することとした。また、橋脚周りの水深が影響すると考えられる「付加質量」、橋脚基礎の根入れが影響する「地盤ばね」、および躯体や流水、地盤がもつ「減衰」効果を考慮することとした。図3に今回の検討で考慮する作用力と影響要因を示す。

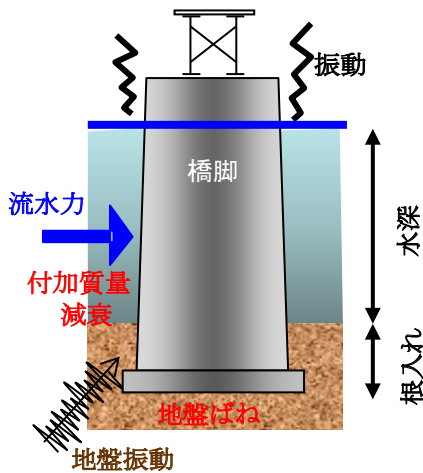


図3 解析で考慮した増水時の橋脚振動に影響を及ぼす要因

### 3. 増水時の橋脚への作用力の推定

#### 3.1 流水力の推定

##### 3.1.1 模型実験による流水力の推定

###### (1) 模型実験の概要

橋脚に作用する流水力に対する橋脚の断面形状と流速が及ぼす影響を把握する目的で水理模型実験を実施した。

模型実験は、実橋脚を模擬した縮尺 1/15 の橋脚模型(躯体幅  $D=0.1\text{m}$ )と流水条件(実験流速  $v=0.6\sim 0.8\text{m/s}$ , 水深  $h=0.1\sim 0.3\text{m}$ )で実施した。実験に用いた橋脚模型の断面形状は、①円形、②長円形(長さ  $1.5D$ )、③翼

形(長さ  $5.5D$ )の3種類とした(図3)。なお、橋脚模型に作用する流水力(全抗力)は3方向成分の力が計測できる分力計を用いた。

###### (2) 流水力の実物への換算

模型実験で得られた橋脚に作用する全抗力を流水条件および断面形状や縮尺などに基づき実橋脚に作用する全抗力に換算する。その上で、実橋脚に作用する全抗力に相当する、設計標準に示されている流水が橋脚に及ぼす流水力の特性値<sup>3)</sup>(式(1))と比較する。

$$P = K \cdot A \cdot V_0^2 \quad (1)$$

ここに、 $P$ : 流水力の特性値

$K$ : 断面形状別係数

$A$ : 水深部の面積

$V_0$ : 表面流速

模型実験で求めた全抗力を実橋脚に作用する全抗力に換算する場合は、抗力を形状抵抗と造波抵抗とに分けて考える。実験で求めた全抗力に対して、形状抵抗分の荷重を差し引き、残りを造波抵抗分とし、それをフルードの相似則に基づき実物大の荷重に換算する。さらに実物における形状抵抗分の荷重を算出し、両者を足すことで、実物における全抗力とすることができる<sup>4)</sup>。

模型実験におけるレイノルズ数  $Re (=UD/\nu)$  は、実験の表面流速  $U=0.6\text{m/s} \sim 1.0\text{m/s}$ , 橋脚径  $D=0.1\text{m}$ , 水の動粘性係数  $\nu \approx 1.0 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$  から、 $6 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$  オーダーである。図5は流水中におかれた円柱およびその他の柱状物体の抗力係数  $C_D$  とレイノルズ数との関係を示したものである。実験条件と図3から模型実験の抗力係数は円形で 1.0, 長円形が 0.6, 翼形が 0.1 とした。一方、実験条件を設定する際に基準とした実橋脚では、 $U=3 \sim 4\text{m/s}$ ,  $D=1.6\text{m}$  で、 $Re \geq 5 \times 10^5$  の領域にあると考えられる。図5によれば、この領域では円形の  $C_D$  が急激に減少している。一方、翼形(流線形)の抗力係数は、円形よりさらに小さくなり、 $Re$  が  $10^6$  以上の領域では概ね  $0.03 \sim 0.001$  程度<sup>6) 7)</sup> になるとされている。そこで、換算する場合の実物における  $C_D$  は円形と長円形が 0.6, 翼形が 0.025 と想定した。

模型の全抗力を実物大に換算した例を表1に示す。換算の結果、円形と長円形は設計標準の特性値とおおむね一致し、翼形は特性値の約 60% と差異が見られた。この差異は、翼形に相当する式(1)に示す  $K$  の値が設計標準に示されておらず、長円形と同じ値としたためである。

表1に示した結果から、橋脚に作用する実際の流水力

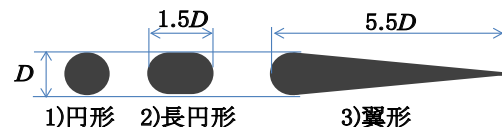


図4 橋脚模型の断面形状

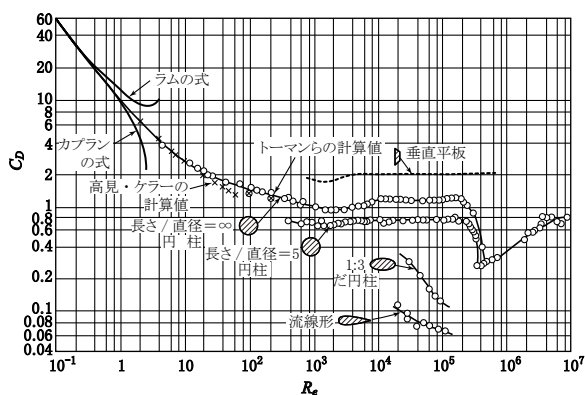


図5 円柱およびその他の柱状物体の抗力係数<sup>5)</sup>

表1 模型実験の抗力と実物への換算抗力および設計標準での特性値の例

断面形	実験条件			模型の実験値	実物換算	設計標準
	水深 (m)	流速 (m/s)	フルード数 $Fr$	全抗力 (N)	全抗力 (kN)	特性値 (kN)
円形	0.3	0.972	0.67	13.6	35.9	33.9
長円形	0.3	0.913	0.63	12.6	27.0	28.2
翼形	0.3	0.938	0.64	5.1	16.5	28.2

は式(1)に基づいて算出できることを確認した。

### 3.1.2 実河川における流速と水深との関係

実橋梁における橋脚の振動や河川水位などの流水状況を長期にわたり実施した計測結果を用いて、流水力の振幅について検討した。

#### (1) 過去の出水履歴から求めた河川流速

実橋梁で増水した際の河川水位と流量の記録および河川断面から、増水時の橋梁付近での水深を求め、これを用いてマンニングの式に基づく平均流速  $V_m$  を算出した。 $V_m$  と表面流速  $V_0$  には  $V_m \cong 0.85V_0$  の関係<sup>3)</sup> があることを利用して求めた表面流速と水深との関係を図6の丸印で示す。これによれば、水深と表面流速の平均値には比例関係が見られる。

#### (2) 実河川での河川流速の計測

同じ橋梁において、実測の表面流速と橋脚周りの水深を長期計測した際の両者の関係を図5の×印で示した。橋脚周りの水深は計測期間中に最大2.03mまで上昇した。実測でも概ね水深の増加に比例して表面流速も速くなる傾向を示した。

#### (3) 河川流速の時系列変動

橋脚に作用する流水力には、流速の振幅 ( $\Delta V_0$ ) に伴う力の変動が想定される。水深と流速には比例関係が見られるとともに流速の振幅は流速が増すほど大きくなると思われる。図7は、計測された表面流速の振幅をその時の表面流速の平均値で除した「表面流速の平均流速当たりの振幅比  $R_v$ 」と水深との関係を示したものである。表面流速の振幅比と水深に比例関係があるとすれば、

その関係は式(2)で表すことができる。

$$R_v = 0.0448 \cdot h \quad (2)$$

ここに、 $R_v$ ：平均流速当たりの振幅比  
 $h$ ：水深 (m)

橋脚に作用する流水力は、平均流速とその振幅（時間的な流速の変動分あるいは時系列データにおける標準偏差に相当）および橋脚の抵抗係数  $C_D$  から抗力として算出できるものとする。具体的には、図5で水深に応じた流速の平均値が求まり、さらに図6で水深に応じた平均流速当たりの振幅比から流速の振幅を求め、これらと橋脚の断面形状に応じた  $C_D$  から流水力は求められる。

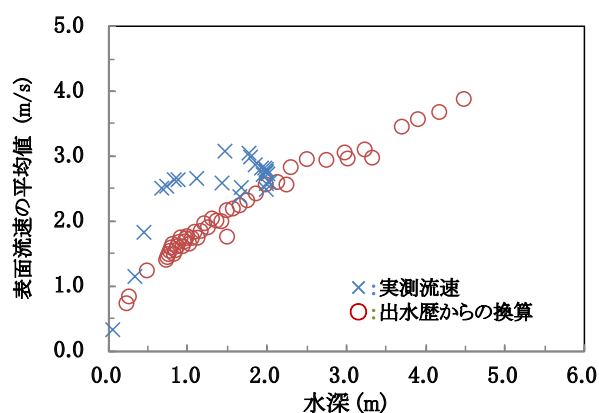


図6 表面流速と水深との関係

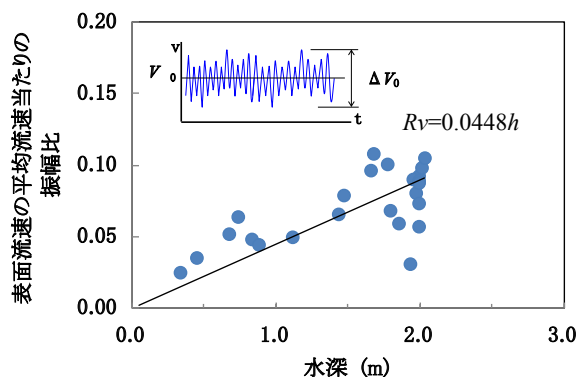
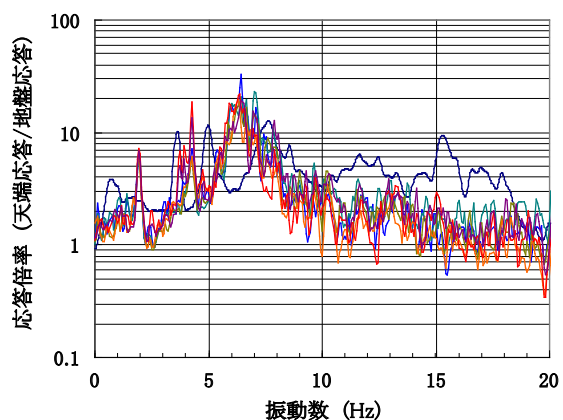


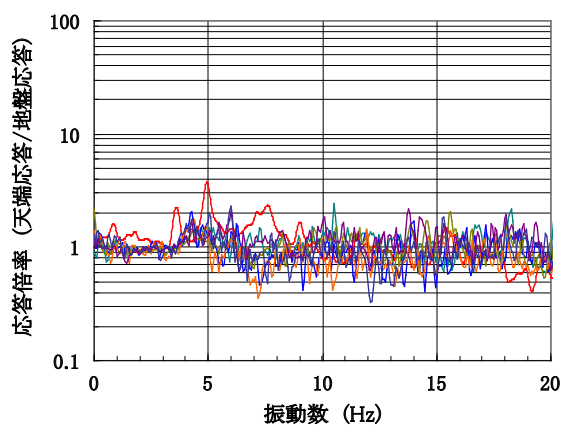
図7 平均流速あたりの振幅比と水深との関係

### 3.2 地盤振動の推定

複数の実橋脚において水位がない状態での橋脚天端と地盤で同時に複数回計測した速度の微動計測結果を基に、橋軸直角方向および鉛直方向それぞれについて、橋脚天端のスペクトルを地盤のそれで除したスペクトルの比（応答倍率）を求めた。その結果、0～20Hzの帯域で橋軸直角方向では天端の振動は地盤振動に対して概ね2～20倍増幅するのに対して、鉛直方向では概ね1倍であることがわかった（図8）。また、微動の速度振幅の実効値（RMS）の比較でも同様の結果が得られた。これは、振動の鉛直方向成分は地盤と橋脚天端とで一致することを示している。このことから、増水時の橋脚天



(a) 橋軸直角方向成分



(b) 鉛直方向成分

図8 水位がない状態での橋脚天端と地盤との応答倍率

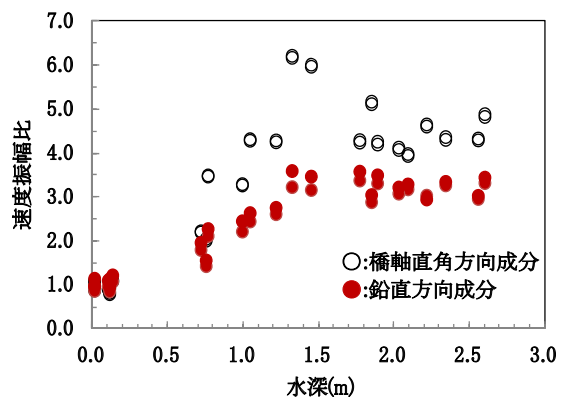


図9 実橋脚における水深と橋脚天端での速度振幅比との関係

端での鉛直方向成分の微動振幅からその時の地盤の微動振幅を仮定することとした。

増水時に水深に応じた橋軸直角方向と鉛直方向それぞれの地盤振動の速度振幅を推定するため、実橋脚の天端の上下流側それぞれで同時に微動計測した結果を基に、水深がない時の振幅を基準とした「速度振幅比」を求め、それと水深との関係を調べた。その結果、橋軸直角方向、鉛直方向ともに水深が増すに伴い速度振幅比が大きくなる傾向を示すことがわかった(図9)。また、橋軸直角

方向は鉛直方向よりも大きな振幅比となっている。これらは水深の増加に伴い地盤振動が大きくなることを示している。しかし、橋軸直角方向の振幅比の増分には橋脚の応答による影響が含まれており、橋軸直角方向の地盤振動の振幅が鉛直方向のそれよりも大きいとは限らず、その割合も不明である。そのため、増水時の地盤振動の推定において、地盤の橋軸直角方向の速度振幅比は少なくとも鉛直方向の速度振幅比と同等と仮定した。

#### 4. 流水力を考慮した橋脚振動モデルの検討

##### 4.1 橋脚振動解析モデルの概要

橋脚振動解析モデルの作成は、過去に長期にわたる現地計測を実施し、橋脚周りの水位変動や河川の流速およびその時の橋脚振動データが得られている、図10に示す直接基礎形式の単線橋脚<sup>1)</sup>を対象とした。

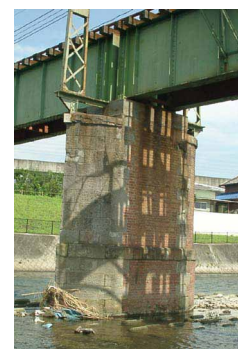


図10 対象橋脚

図11に実橋脚を対象としてFEMによりモデル化した一例を示す。躯体は2次元シェル要素を用いてモデル化しており、FEMモデルにおける躯体の重量が実橋脚の想定重量と一致するよう単位体積重量を調整している。また、天端には桁を模擬した質点を、躯体と地盤との境界部のうち、側面は水平およびせん断ばねを基礎底面には鉛直およびせん断ばねを配している。また、各ばねにはダッシュポットをモデル節点に並列に接続している。

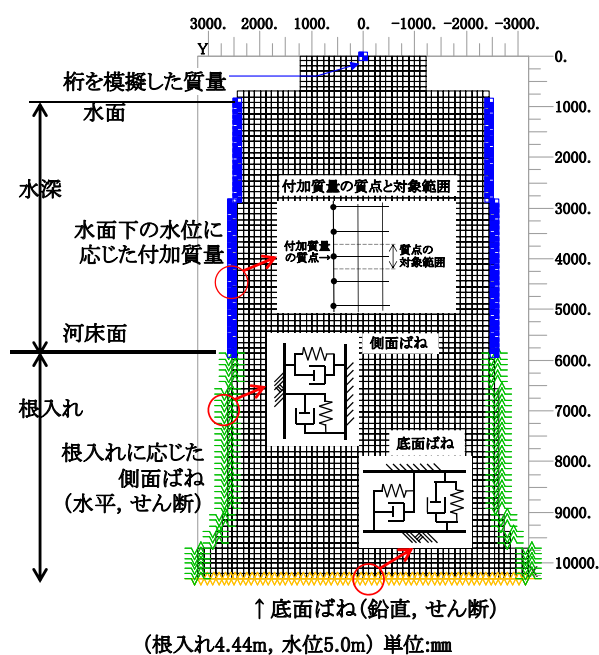


図11 実橋脚の解析モデルの一例

#### 4.2 付加質量のモデル化

水中など流体中にある構造物が振動する場合、流体の抵抗により空気中で振動するよりも揺れにくくなり、あたかも物体の質量が増加したかのような効果を生ずる。この増加した質量のことを付加質量といい、質量の増加に伴い見かけの固有振動数が低下する影響が考えられる。

今回は、後藤・土岐の近似式<sup>8)</sup>を用いて付加質量をモデル化した。この近似式は、円柱構造物に作用する動水圧を3次元的に算出し、それをその時の振動加速度で除すことで付加質量を算出するものである。今回モデル化した橋脚は舟形断面を有しているが、小坪<sup>9)</sup>の研究によれば、水中構造物の付加質量は流れと直角方向の構造物の躯体幅と同じ投影面を持つ円柱の体積に相当する水の重量よりは大きくならないとしていることから、円柱の直径を流れ直角方向の橋脚躯体幅と同じ値としている。

#### 4.3 減衰定数の設定

解析モデルのダッシュポットの減衰定数  $c$  は、振動計測した実橋脚において、列車通過後の残留振動の振幅の減衰過程から算出した減衰定数を用いた。水深が異なる条件における多くの計測結果を基に算出したところ、水深に関係なく概ね  $c=0.135$  であったため、ここではこの値を用いた。

表2 逆解析で求めた地盤反力係数

箇所	成分	地盤反力係数	
底面	鉛直	420.57	MN/m <sup>3</sup>
	せん断	140.19	MN/m <sup>3</sup>
側面	水平	280.38	MN/m <sup>3</sup>
	せん断	93.46	MN/m <sup>3</sup>

表3 解析条件

地盤反力係数比 $K_h/K_v$	根入れ長 (m)	根入れ比	水深 (m)
2/3	0	0.00	1.0
	2.13	1.33	2.7
	4.46	2.79	5.0

#### 4.4 地盤反力係数の設定

鉛直地盤反力係数  $K_v$  と水平地盤反力係数  $K_h$  との比 ( $K_h/K_v$ ) を 2/3 と仮定し、実橋脚 (根入れ 4.44m・水深 0m のとき) の 1 次の固有振動数が 11.3Hz となるように逆解析によって地盤反力係数を設定した。また、底面のせん断ばねは、鉛直・水平ばねのそれぞれ 1/3 の値、側面については両側へのばね配置を考慮し、水平・せん断ばねのそれぞれ 1/2 の値とした。ここで、逆解析により決定したモデルの地盤反力係数を表 2 に示す。

### 5. 解析モデルによる支持と流水条件別の感度分析

#### 5.1 解析モデルの検証

解析では、水深に応じた流速の平均値とその振幅から求めた流体力および地盤振動をそれぞれ 300 秒間の波形データとして入力し、橋脚天端での変位と速度の時刻歴応答を求めた。速度の時刻歴応答波形のフーリエスペクトルから卓越振動数を求め、変位応答波形から変位振幅の RMS を算出した。なお、流体力の作用位置は深さ方向の流速の分布を考慮し、設計標準<sup>3)</sup> に流体力の作用位置として示されている河床から 0.6h ( $h$ : 水深) の位置に最も近い節点とした。

解析モデルを用いた増水時の橋脚変位の RMS と実測の変位 (速度波形の積分値により算出) の RMS とを比

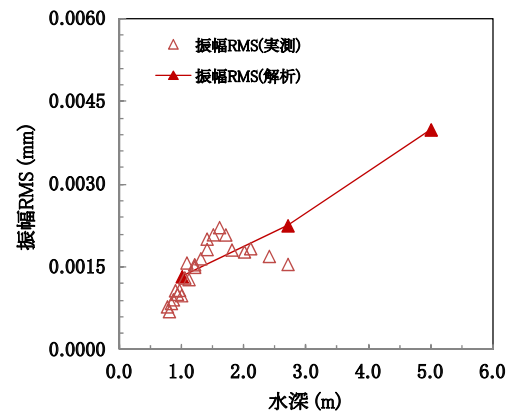


図12 水深と変位振幅 RMS との関係

表4 水深別の流体力

水深 (m)	表面流速の平均値 (m/s)	表面流速の平均値あたりの振幅比	表面流速の振幅 (m/s)	表面流速の抗力 $P=K \cdot A \cdot V_0^2$ (N)	表面流速の抗力の振幅 (N)	作用位置 (0.6h) 根入れ 4.44m の時の河床面からの距離 (m)	平均流速 $V_m$ (m/s)	平均流速の変動幅 (両振幅) (m/s)	平均全抗力 (N)	平均全抗力の変動分 (N)
1.0	2.60	0.045	0.116	2567	5	0.6	2.21	0.10	232	0.5
2.7	3.00	0.121	0.363	9228	135	1.2	2.55	0.31	832	12.2
5.0	4.00	0.224	0.896	30380	1524	3.0	3.40	0.76	2741	137.5

特集：防災技術

較することにより、解析モデルの検証を行った。水深と変位振幅の RMS との関係について、実測値と解析値の比較をしたのが図 12 である。この図から、実測の変位振幅の RMS と解析による変位振幅の RMS とが概ね一致していることがわかる。このことから、提案した解析モデルおよび作用力のモデルが適正であると判断した。

5.2 解析条件

提案した解析モデルを用いて、実橋梁を対象として、橋脚基礎の支持条件や流水条件を変化させた場合の橋脚の固有振動数と橋脚天端の変位との関係を求め、橋脚天端の変位が健全性の指標として活用できるかを分析した。解析条件を表 3 に、水深別の流水力を表 4 に示す。なお、 $K$  の値は実橋脚が流線形であることから 0.025 とした。

(1) 地盤反力係数の設定

根入れの変化に対する橋脚の固有振動数の感度が異なる条件での比較を行うため、鉛直地盤反力係数  $K_v$  と水平地盤反力係数  $K_h$  との比 ( $K_h/K_v$ ) を 2/3 と設定した。

(2) 根入れの設定

対象とした実橋脚の根入れ長は約 4.46m であり、根入れ比 (根入れ長を橋脚躯体幅 1.6m で除したもの) は 2.79 である。解析では根入れ比が概ね半分となる 1.33 と根入れがない 0.00 の 3 パターンを設定した。

(3) 水深の設定

水深の設定は、初期条件である 0.0m、1.0m と長期計測時の最高水位である 2.7m、当該橋梁位置での最高水位に相当する 5.0m を設定した。

(4) 外力の設定

モデルに作用させる外力として、増水に伴う地盤振動の増幅分と流速の振幅分を作用させることとした。なお、流水力の作用位置は根入れが変化した場合でも同一節点に作用させることとした。

(5) 付加質量の設定

水深と付加質量の関係として投影面積を基準にして算出したものを用いた。

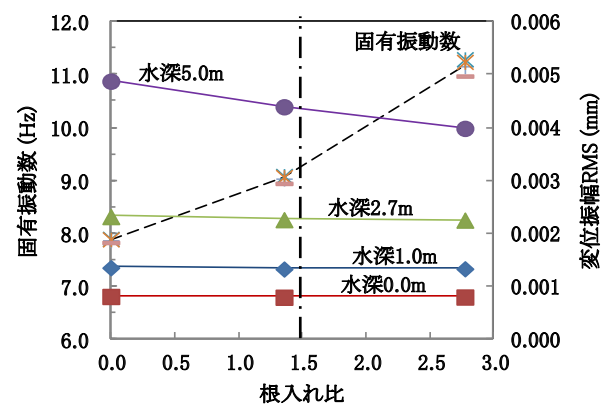


図 13 解析に基づく根入れ比に対する固有振動数と変位振幅の RMS の感度分析

5.3 橋脚支持条件と水理条件の感度分析

図 13 には、根入れ比に対する固有振動数と変位振幅の RMS の感度分析結果を示す。これによれば、固有振動数は付加質量の影響から水深によって若干の違いが生じるものの概ね同じ程度の値であり、根入れ比の減少に対して顕著な低下傾向を示す。一方、変位振幅の RMS ではいずれの水深も根入れ比に関係なくほぼ一定の値を示している。なお、図中の一点鎖線は、一般的に安定と判断される根入れ比である 1.5 を示しており、これを下回る場合は安定性が低いといえる。根入れ比 1.5 を閾値としてこれを下回る状況を識別できるか否かが、橋脚基礎の健全性指標としての要件といえる。分析の結果、対象とした流線形状の橋脚では、根入れに対する橋脚の変位の感度は固有振動数よりも低いことを確認した。

6. おわりに

河川増水時における橋脚基礎の健全性評価を橋脚天端の変位に着目して実施する手法を検討するため、橋脚に作用する流水力や地盤振動などの設定手順を整理した上で、増水時の橋脚振動を推定するために作成した流水を考慮した 2 次元 FEM モデルに入力した。さらに、実橋脚を対象とした安定性に対する橋脚の変位と固有振動数の感度分析を行った。その結果、今回の解析条件下 (断面が流線形の橋脚) では橋脚天端の変位振幅の RMS は固有振動数に比べて適切な指標とは言い難い。なお、橋脚の断面形状や基礎の支持条件 (地盤ばね) によっては変位の感度が高くなる可能性がある。今後は適用できる条件の精査を行っていく必要がある。

文献

- 1) 佐溝昌彦, 渡邊諭, 淵脇晃, 杉山友康, 岡田勝也: 河川増水時における鉄道橋脚の固有振動数の特定方法の提案, 土木学会論文集 F, Vol.66, No.4, pp.524-535, 2010.10
- 2) 渡邊諭, 佐溝昌彦: 常時微動計測による橋脚基礎のヘルスマニタリングシステム, 鉄道総研報告, Vol.25, No.7, 2011.7
- 3) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物, 丸善, p.55, 2004.4
- 4) 椎貝博美: 水理実験法, p.37, 森北出版, 1976
- 5) 日本機械学会編「機械工学便覧 A5 流体工学」13 章, 丸善
- 6) 高木英樹, 清水幸丸, 小段範久: 水泳における自己推進時抵抗に関する流体力学的研究, 日本機械学会論文集, B 編, 64 (618), p.405-411, 1998
- 7) 東昭: 流体力学, 朝倉書店, p.74-77, 1993
- 8) 後藤尚男・土岐憲三: 水中橋脚の振動と耐震設計に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第 100 号, 土木学会, 1963
- 9) 小坪清真: 楕円形水中橋脚に働く地震力とその弾性振動, 土木学会論文集, 第 120 号, 土木学会, 1965