

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

防災技術研究部 地盤防災研究室

主任研究員 佐溝昌彦

1. はじめに

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。このため増水時には、よりの確に橋脚基礎の健全性を評価する必要がある。これまで、増水時における微動から求める橋脚の固有振動数の変化で橋脚基礎の健全性を評価する技術を提案した^{1),2)}。一方で、橋脚と桁の固有振動数とがほぼ一致する橋脚などではその手法が有効でないという課題が残された。本稿では、固有振動数以外の指標として変位に着目した評価手法を検討する一環として、橋脚振動の解析モデル化と作用力の設定手順および作用力や基礎の根入れ長の変化が橋脚の振動特性に及ぼす影響について、実橋脚を対象として検討した結果について報告する。

2. 流水の影響を考慮した橋脚振動モデルの検討

2.1 橋脚振動解析モデルの概要

橋脚振動解析モデルの対象は、図 1 に示す直接基礎形式の橋脚とした。上部工は支間長 23.9m の上路鉸桁、橋脚の固有振動数は 11.3Hz である。

解析モデルは図 2 に示すような二次元モデルとし、基礎底面および側面はばねとダッシュポッドによって地盤に連結されるものとした。解析モデルで想定する外力は、①流水力、②地盤振動、を想定し、振動に影響する要因は、③付加質量、④地盤ばね（ダッシュポッド含む）とする。実橋脚の解析モデルの一例を図 3 に示す。モデルは 2 次元シェル要素を用いて FEM 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、桁に相当する重量の質点をモデルの天端に与えている。さらに、付加質量の質点は、各モデルのメッシュにおける節点部分に配置する。



図 1 対象橋脚

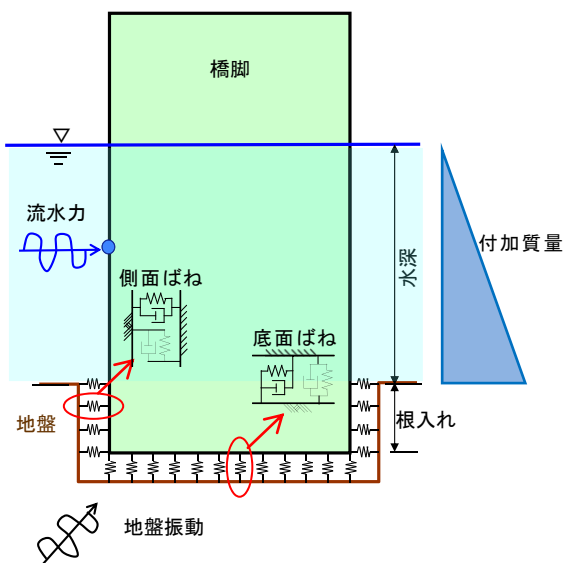
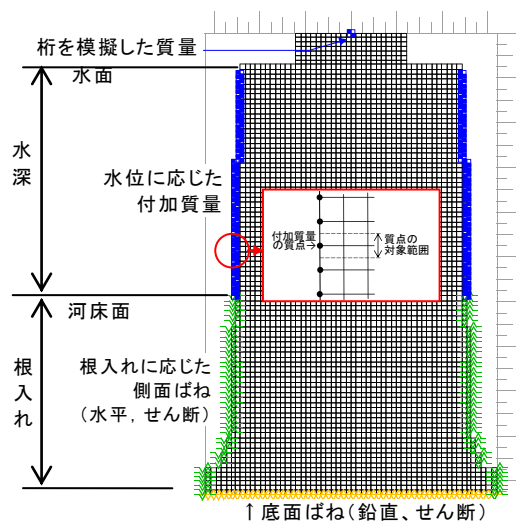


図 2 振動解析モデルと作用力のイメージ



(根入れ 4.444m、水位 5.0m) 単位:mm

図 3 実橋脚の解析モデルの一例

2.2 橋脚に作用する流水力の評価

橋脚に作用する流水力を評価するため、振動計測した橋脚において河川水位と表面流速も長期計測した。実測の流速データは連続する5分間分を記録し、5分間の表面流速データの平均値を「平均流速」、その間の流速の上下限の差を「振幅」として整理した。表面流速の平均値と水深との関係を図4に示す。実測では水深の増加に伴い表面流速も速くなる傾向を示している。また、出水歴からマンニングの式に基づき求めた表面流速と水深との関係と概ね一致した。

計測された表面流速の振幅をその時の平均流速で除した「平均流速当たりの振幅比」と水深との関係を示したものが図5である。これによれば、平均流速の振幅比と水深との間には比例関係があり、線形近似が可能である。橋脚に作用する流水力は、図4および図5の関係から、水深に応じた平均流速およびその振幅が求められ、それと橋脚形状に応じた抵抗係数 C_D および、平均流速から平均的な流水力が、振幅からその流水力の時間的変動分が、算出できる。

2.3 増水時における地盤振動の推定

増水時における橋脚には流水力だけでなく地盤からの振動も加わっており、解析モデルで考慮する必要がある。そこで、増水時の地盤振動の推定を試みた。複数の実橋脚における水位がない状態での微動計測結果から、鉛直方向成分では地盤と橋脚天端の速度振幅の実効値 (RMS) がほぼ一致することがわかった。このことから、増水時の橋脚天端での鉛直方向成分の速度振幅からその時の地盤振動が推定できると考えた。さらに、水位がない状態での地盤の速度振幅の RMS と橋脚天端での速度振幅の RMS との比を速度振幅比とし、水深との関係を調べた。この結果、水深が増すに伴い速度振幅比が大きくなる傾向があることがわかった (図6)。なお、流下方向も水深の増加に伴い速度振幅比が増加するが、増加分に橋脚の応答分が含まれており、その割合は不明である。そのため、流下方向の地盤振動は、少なくとも鉛直方向の速度振幅比が増幅していると仮定し、鉛直方向と同じ振幅比で作用させることとした。

2.4 逆解析による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、実橋脚における根入れ 4.44m と水位が 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

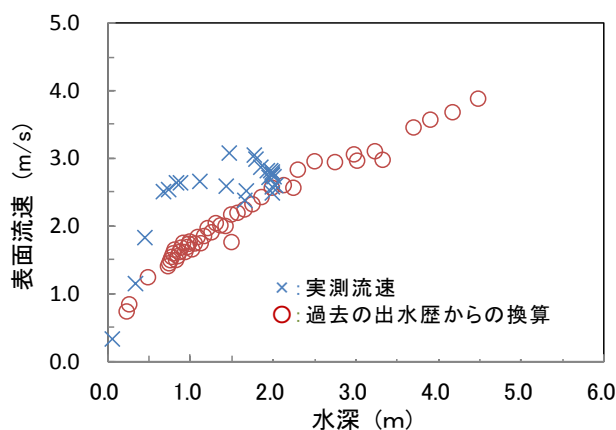


図4 表面流速の平均値と水深との関係

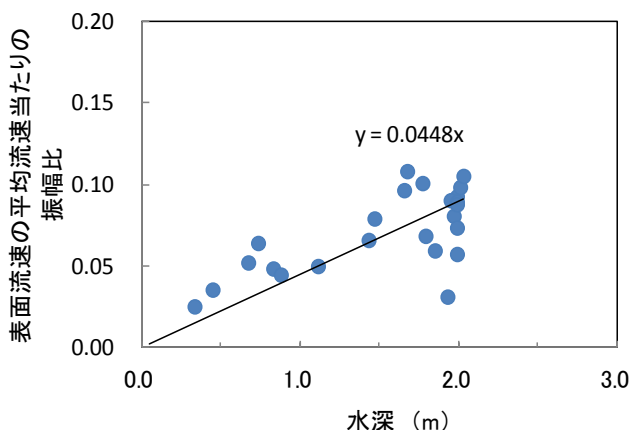


図5 平均流速当たりの振幅比と水深との関係

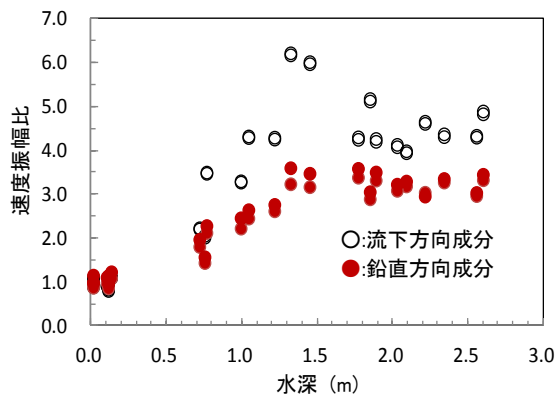


図6 実橋脚における水深と橋脚天端での速度振幅比との関係

地盤反力係数を設定した。また、せん断ばねは、鉛直・水平ばねのそれぞれ 1/3 の値、側面については橋脚の両側へのばね配置を考慮し、実際の水平・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 1 に示す。

表 1 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 ³
	せん断	140.19	MN/m ³
側面	水平	280.38	MN/m ³
	せん断	93.46	MN/m ³

2.5 減衰定数の設定

解析モデルのダッシュポッドに用いる減衰定数の設定は、振動を計測した橋脚において、列車通過後の残留振動振幅の減衰過程から算出した減衰定数を用いた。ここでは、多くの計測結果を基に算出した結果、水深に関係なく概ね $c=0.135$ であったため、この値を用いた。

2.6 付加質量のモデル化

水中にある構造物が振動する場合、水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。水中の円柱構造物に作用する付加質量の理論値は様々な検討が行われており、ここでは、模型実験や実物大橋脚への適用を検討した結果、後藤・土岐の近似式³⁾により付加質量を求めることとした。

3. 解析モデルによる支持条件と流水条件別の感度分析

3.1 解析モデルの検証

橋脚天端の速度波形を実測値と解析値それぞれのフーリエスペクトルを求め比較したところ、両者のスペクトル振幅および卓越振動数はよく一致した。また、変位振幅の実効値(RMS)もよく一致しており、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ことを確認した。

さらに、ある計測時間における水深と流速の振幅に伴う変位振幅の RMS との関係について、実測値と解析値とを比較したものが図 7 である。実測では水深 2.7m が最大であったが、計測期間内の水深の変化と変位振幅の RMS との関係と解析値による両者の比例関係とがよく一致している。

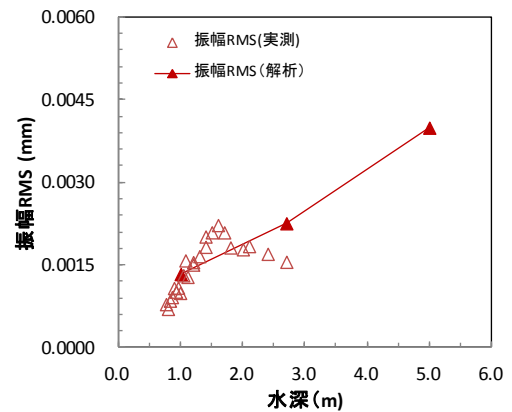


図 7 水深と変位振幅 RMS との関係

3.2 解析条件

解析条件を表 2 に示す。解析では流水力および地盤からの振動を 300 秒間の波形データとして入力し、時刻歴応答を求める。出力は橋脚天端での速度応答波形および変位応答波形である。速度応答波形からフーリエスペクトルを求め、卓越振動数を求める。また、変位応答波形から、変位振幅の RMS を算出する。さらに、水深に応じた流水力(抗力)を表 3 に示した。

表 2 解析条件

地盤ばね比 kh/kV	根入れ長 (m)	水深 (m)
2/3	0	1.0
	2.13	2.7
1/6	4.46	5.0

表 3 解析に用いた流水力の値

水深 (m)	表面流速 (m/s)	表面流速 の振幅率	表面流速 の振幅 (m/s)	表面流速の 抗力 $P=K \cdot A \cdot V_0^2 \cdot 9800$ (N)	表面流速 振幅の抗 力(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 (m/s)	平均流速 の変動幅 (両振幅)	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

なお、抗力を算出する際の特徴値 K は、現地で想定されるレイノルズ数 (10^6) と実橋脚の断面形状 (流線形) を考慮し、 $K=0.025$ を用いた。

3.3 解析結果

図 8 は、固有振動数と変位振幅の RMS の根入れ比に対する感度分析の例を示す。これによれば、固有振動数は水深による付加質量の影響から若干の違いはあ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 は、いずれの水深で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 を示している。固有振動数あるいは変位振幅の RMS を指標としてこの閾値を下回る状況を判別できるかが、橋脚基礎の健全性評価指標の目安といえる。今回の解析例では、変位振幅の RMS は固有振動数に比べて根入れ比に対して感度が低いことが確認できた。

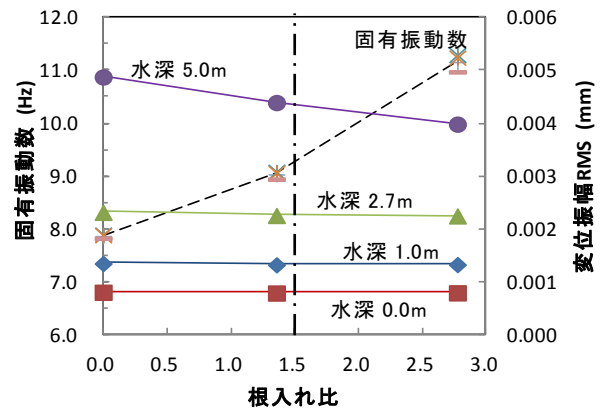


図 8 解析による固有振動数(破線)と変位(実線)の根入れ比に対する感度分析例

4. 増水時の微動を用いた健全性評価手法

増水時の微動を用いた橋脚基礎の健全性評価手法の適用に関するフローを図 9 に示す。微動から求める固有振動数では橋脚基礎の健全性評価が困難な場合には、変位による根入れに対する感度分析を行い、その適用を検討する。

なお、変位による感度分析は、対象とする橋脚での実測データを蓄積し、今回紹介した一連の手順に基づき各要因と水深との関係を明らかにした上で、実施することを想定している。

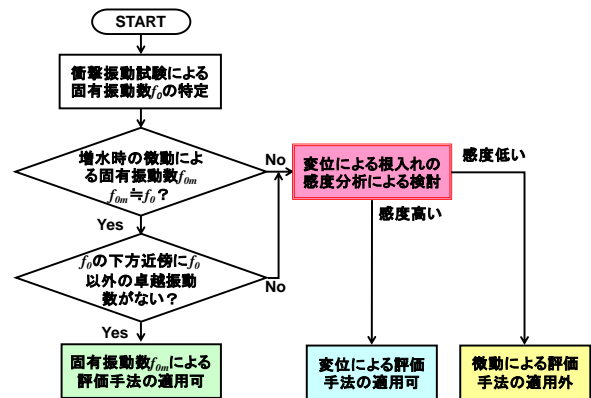


図 9 増水時の微動を用いた健全性評価手法の適用に関するフロー

5. おわりに

ある橋脚を対象として、流水の影響を考慮した振動解析に用いる 2 次元 FEM モデルを作成する際に増水時の橋脚への作用力となる付加質量や流水力および地盤振動の設定方法を整理した。また、水理条件と支持条件を変化させた場合の固有振動数と変位振幅の RMS の感度分析を行ない、根入れ比に対する変位振幅 RMS の感度が固有振動数に比べて低いことを示した。なお、他の橋脚に適用する際には、同様な手順に従って検討する。

参考文献

- 1) 渡邊諭, 佐溝昌彦, 淵脇晃, 杉山友康: 微動から得られる固有振動数を用いた増水時の橋脚健全度評価, 鉄道総研報告, 第 21 巻, 第 1 号, 2007.1
- 2) 渡邊諭, 佐溝昌彦, 輿水聡, 杉山友康: 増水時における橋脚基礎の洗掘に対するリアルタイム健全性評価システム, 地盤工学会研究発表会, 2009.7
- 3) 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.