

# 大型立軸ポンプ及びポンプ場の連成振動解析

杉山道子\* 山下修示\*\*

## A Coupled Vibration Analysis for Large-sized Vertical Pumps and a Pumping Station

by Michiko SUGIYAMA, & Shuji YAMASHITA

The Finite Element Method (FEM) was used to predict vibration of large-sized vertical pumps, as well as that of the pump station where they were to be installed. When such pumping stations have a structural foundation with low rigidity, vibratory problems such as vibratory reaction between pumps, and increases in vibration, due to resonance caused by pump excitation frequencies and natural frequencies of the foundation, tend to occur. The following discusses an actual case of coupled vibration analysis and the effective application of resulting data in reinforcing the pumping station and installing additional pumps. The vibration levels of the pumps were found to be well below the allowable limit and the resonance phenomena was prevented.

**Keywords:** Coupled vibration analysis, Evaluation of pump vibration, Finite Element Method (FEM), Foundation structure, Natural frequency, Resonance phenomena, Vertical pump, Pump station

### 1. はじめに

ポンプの設計計画段階において、ポンプの振動を予測し低減を検討することは重要である。有限要素法 (FEM) による振動解析は振動予測及び共振回避を検討するために有効な手法である。

大型立軸ポンプの固有振動数には、基礎構造物の剛性が大きく影響する。一般的に、大型ポンプの基礎構造物にはある程度十分な剛性があり、この場合は、ポンプ単体の解析モデルに対し、基礎構造物の剛性と等価なばね要素による拘束を与えることで、十分な解析精度が得られる。

しかし、基礎構造物の剛性が低い場合は、ばね要素による拘束では解析精度確保が困難になるだけでなく、以下のような問題が発生する可能性がある。

- ・ 設置された複数のポンプ間での相互干渉による振動増大
- ・ ポンプ加振周波数と基礎構造物の固有振動数の一致による共振問題

このような問題を精度よく予測し回避するためには、ポンプと基礎構造物を連結したモデルによる連成解析が効果的である。

本稿では、ポンプ及び基礎構造物の連成解析による低振動化事例を報告する。本事例は、計画段階に解析により基礎構造物の固有振動数とポンプの振動を予測すると共に、基礎構造物補強案の有効性を評価し、ポンプ設計及び基礎工事施工に反映させたものであり、良好な結果が得られている。

### 2. ポンプの振動に対する基礎構造物の剛性の影響

大型ポンプの基礎は一般的にコンクリート構造物である。ポンプの基礎締結部の拘束条件は、基礎コンクリート構造物の形状及び物性値や支持条件で決まる剛性に依存するため、完全拘束より弱い拘束となる。この状態を解析に反映させるために、通常は基礎締結部にばね要素を定義する。

図1は、ばね要素で拘束した大型立軸ポンプのFEM解析モデルの例である。このばね定数を変化させたときの固有振動数の推移を図2に示す。

一般的な剛性の基礎に設置されている場合は、ばね定数の変化に対するポンプ固有振動数の変化は少なく、基

\* 風水力機械カンパニー 開発統括部 製品開発室 大型水力機器グループ

\*\* 新日本製鐵(株)

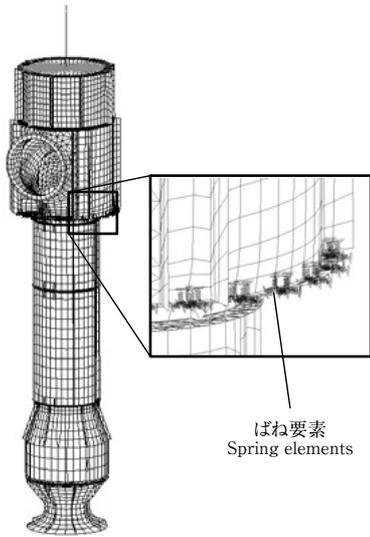


図1 FEM解析モデル

Fig. 1 Pump model for FEM analysis

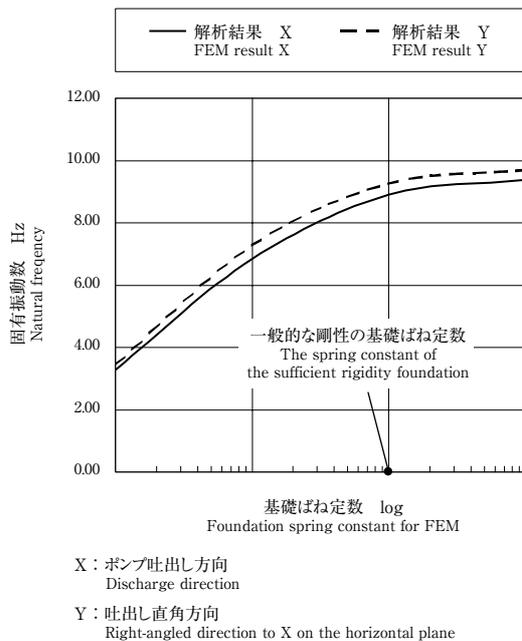


図2 基礎ばね定数によるポンプ固有振動数の推移

Fig. 2 Transition of natural frequencies vs the foundation spring constant

礎ばね定数の見積誤差は、解析精度にあまり影響しない。一方、基礎ばね定数が低くなると固有振動数は急激に下がる傾向にある。このような低いばね定数をもつ基礎に設置されるポンプの振動予測をする場合、基礎ばね定数の見積誤差は解析精度に大きな影響を与え、結果の信頼性低下につながる。解析精度を確保するためには、ポン

プと基礎構造物との連成解析が有効である。

基礎構造物の剛性が低くなる原因として、コンクリート床の厚さなどの形状的な要因だけでなく、コンクリート床の支持条件や地盤の脆弱さなどが挙げられる。

剛性の低い基礎にポンプが設置された場合、ポンプの固有振動数が下がるだけでなく、ポンプの固有振動数が、基礎構造物を介して伝わる他のポンプの加振による振動の周波数と一致して共振したり、ポンプの加振周波数と基礎構造物の固有振動数の共振により基礎及びポンプの振動が増大したりする危険がある。特に後者のような基礎構造物の共振問題が発生した場合、ポンプ側のエンジニアリングだけでは対策が困難となり、基礎の補強等の大規模な対策が必要になる。

ポンプと基礎構造物との連成解析は、ポンプ機場の計画段階に前述のような振動を予測し、振動増大を回避するエンジニアリングをポンプ及び基礎構造物に対し実施することを可能にする。

実際のポンプ機場の計画段階に実施した、ポンプと基礎構造物の連成解析による振動低減のエンジニアリング事例を以下に示す。

### 3. 振動低減エンジニアリング事例

#### 3-1 概要

対象となるポンプ場は、冷却水用海水取水ポンプ場である。図3に示すように、水槽床に打設した複数本の細い杭で鉄筋コンクリート構造のポンプ床を支持する構造

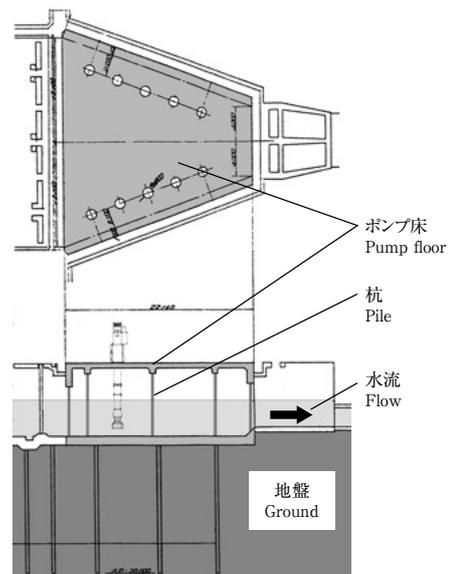


図3 海水取水ポンプ場

Fig. 3 Seawater intake pump station

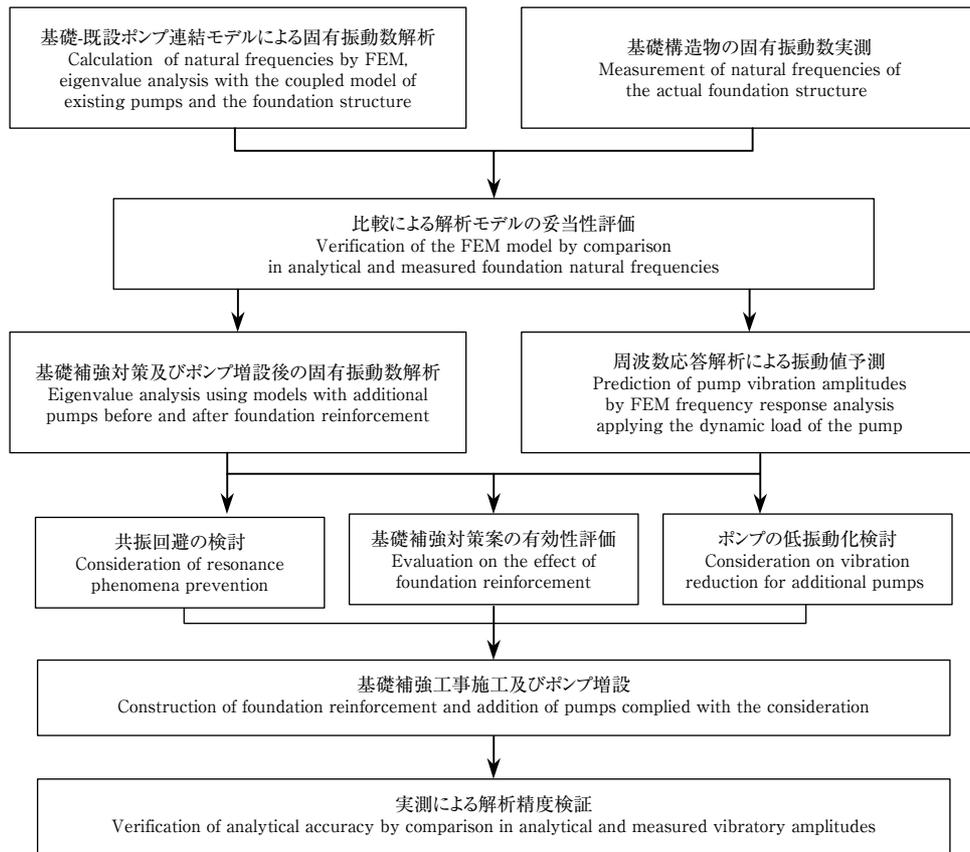


図4 検討の流れ

Fig. 4 Flow of the consideration

である。床側面に接する地盤は脆弱であり、支持剛性は極めて低い。口径600 mm及び700 mmの立型ポンプ2台ずつ、合計4台の既設ポンプに加え、口径900 mmの立型ポンプ2台を増設するにあたり、以下の内容を検討した。

- (1) 増設ポンプ動荷重によるポンプ床及び既設ポンプへの影響
- (2) 既設ポンプ動荷重による増設ポンプの振動
- (3) 増設ポンプ床部分を500 mm増打する基礎補強案の妥当性評価

図4に本検討の流れを示す。本検討に基づき、既設ポンプの加振による増設ポンプの共振を回避する設計をするとともに、ポンプの振動を低減する基礎補強を施工し、ポンプの低振動化を実現した。

表1は各ポンプの要項である。

3-2 固有振動数解析

図5に解析モデルを示す。以下の二つの条件で固有振動数解析を実施した。

条件① 既設ポンプ4台が設置されている条件

表1 ポンプ要項

Table 1 Pump specifications

	増設ポンプ Additional pump	既設ポンプ Existing pump	
台数 Number of pumps	2	2	2
口径 (mm) Discharge size	φ 900	φ 700	φ 600
吐出し量 (m <sup>3</sup> /min) Capacity	147	71.5	50
全揚程 (m) Total head	17	21	50
回転速度 (min <sup>-1</sup> ) Speed	593	990	980
原動機 (kW) Power	550	355	560

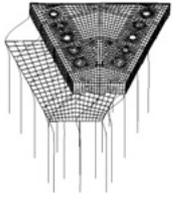
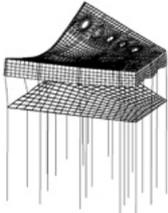
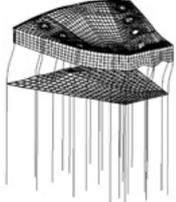
条件② 基礎補強案を実施後に口径900 mmポンプ2台を増設した条件

表2に解析結果を示す。モード図は基礎構造物の変形を見るため、ポンプを省いて表示している。

本解析モデルの妥当性を評価するため、機場にて固有

表2 固有振動数解析結果

Table 2 Natural frequencies by FEM eigenvalue analysis

モード Mode		水平運動モード Horizontal mode	ポンプ床1次モード 1st mode of pump floor	ポンプ床2次モード 2nd mode of pump floor
固有振動数 Natural frequency	条件① Original	6.18 Hz	11.81 Hz	16.8 Hz
	条件② Reinforced	6.02 Hz	11.81 Hz	15.90 Hz
モード図 Mode shape				

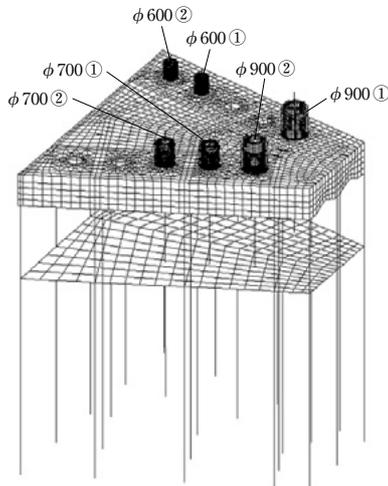


図5 FEM解析モデル  
Fig. 5 Analysis model

振動数を実測した。図6は測定点及び鉛直方向加速度の周波数分析結果である。ピークとなる周波数が機場の固有振動数を示す。これらの周波数は表2に示す固有振動数解析結果とよく一致しており、解析モデルは適切であると評価できる。

本解析結果から、機場全体の2次モードが既設ポンプの回転周波数成分（N成分）と近いこと、共振により基礎の振動が通常より大きいことが推測される。ただし、本機場は既に長時間の運用実績があり、既設ポンプの振動が許容値内にあること、基礎の状態が目立った不具合がないことなどから、基礎の強度に対し加振力は十分に小さいと推測できる。しかしながら、既設ポンプの振動が基礎を介して増設ポンプに伝わりやすいことが考えられるため、既設ポンプの加振周波数と増設ポンプの固有振動数の一致を回避することが望ましい。本固有振動数

解析で、増設ポンプの軸横振動の固有振動数が既設ポンプのN成分と近い結果であったため、水中軸受を追加し、軸の固有振動数を上げる対策を実施した。

また、表2に示す条件②の解析結果から、補強対策実施後も機場の固有振動数は増設ポンプの加振周波数と一致しないことが推測され、補強対策による悪影響はないと判断できる。

### 3-3 振動予測と補強の妥当性評価

ポンプ運転による振動を予測するため、周波数応答解析にて振動変位を求めた。

加振力として、

- ・モータの不釣合いによる横方向変動荷重
- ・インペラ不釣合い及び流体による横方向変動荷重
- ・軸スラストによる鉛直方向変動荷重

を考慮した。

加振周波数は回転速度の周波数であるN成分を与えた。特定の周波数成分の振動値には他の周波数成分の振動は加算されないため、同一回転速度のポンプが運転される場合について各ポンプの振動値を予測した。加振する台数は実運用を考慮して決定した。なお、口径600 mmと口径700 mmの既設ポンプの回転速度は若干異なるが、安全のため同じ加振周波数として扱った。

表3に補強を施さない状態の基礎での解析結果を示す。表3、運転状態のポンプ（加振ポンプ）は○、停止しているポンプは×で示している。振動値は原動機頂部の値であり、Xはポンプ吐出し方向、Yは吐出し直角方向、Zは鉛直方向を示す。いずれの運転条件でも、増設ポンプの振動値が許容値（80 μmP-P）を超える結果となった。

表4は基礎補強対策を実施した場合の解析結果である。振動値は許容値以下になり、対策の効果が期待でき

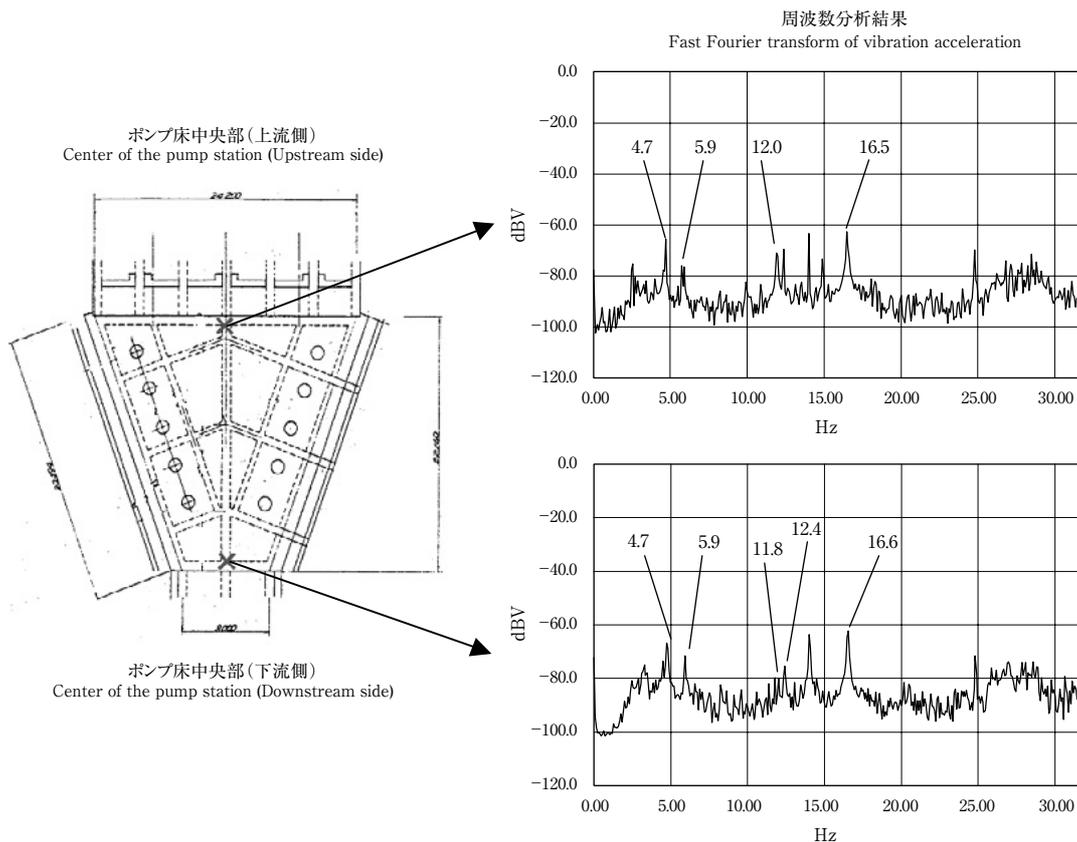


図6 振動測定箇所及び計測結果  
Fig. 6 Measurement points and FFT of actual vibration acceleration at the pump station

表3 周波数応答解析結果 (基礎補強なし)

Table 3 Results of frequency response analysis by FEM on original pump floor

ポンプ Pump		運転状態 Operating condition	既設ポンプ加振時の振動値(μmP-P) Vibration amplitude with existing pumps driven			ポンプ Pump		運転状態 Operating condition	増設ポンプ加振時の振動値(μmP-P) Vibration amplitude with additional pumps driven		
			X	Y	Z				X	Y	Z
増設 Additional	φ 900-①	×	105.48	14.46	6.35	増設 Additional	φ 900-①	○	94.40	76.05	20.05
	φ 900-②	×	54.12	24.16	4.45		φ 900-②	○	95.26	76.82	20.10
既設 Existing	φ 700-①	×	6.12	4.08	5.59	既設 Existing	φ 700-①	×	13.53	6.92	13.24
	φ 700-②	○	61.24	69.70	8.73		φ 700-②	×	8.76	0.46	8.41
	φ 600-①	○	33.29	13.88	7.10	φ 600-①	×	11.83	0.08	5.84	
	φ 600-②	○	30.79	28.80	5.47	φ 600-②	×	7.95	0.58	3.67	

○ : 運転 Operated × : 停止 Stopped

表4 周波数応答解析結果 (基礎補強あり)

Table 4 Results of frequency response analysis by FEM on reinforced pump floor

ポンプ Pump		運転状態 Operating condition	既設ポンプ加振時の振動値(μmP-P) Vibration amplitude with existing pumps driven			ポンプ Pump		運転状態 Operating condition	増設ポンプ加振時の振動値(μmP-P) Vibration amplitude with additional pumps driven		
			X	Y	Z				X	Y	Z
増設 Additional	φ 900-①	×	57.87	4.75	6.42	増設 Additional	φ 900-①	○	76.13	60.18	14.57
	φ 900-②	×	27.49	14.71	7.25		φ 900-②	○	76.66	60.53	14.65
既設 Existing	φ 700-①	×	5.63	1.98	5.42	既設 Existing	φ 700-①	×	11.15	2.87	11.31
	φ 700-②	○	63.71	68.63	3.58		φ 700-②	×	8.05	0.18	7.91
	φ 600-①	○	45.50	29.13	7.45	φ 600-①	×	11.16	0.34	5.63	
	φ 600-②	○	47.40	29.83	9.69	φ 600-②	×	7.56	0.86	3.38	

○ : 運転 Operated × : 停止 Stopped

表5 増設ポンプ振動値  
Table 5 Vibration amplitudes of additional pumps

Unit:  $\mu\text{mP-P}$ 

	測定対象ポンプ (増設ポンプ) Measured pump (Additional pump)	解析結果 Analysis results on vibration amplitude			実測値 Measurement on vibration amplitude during actual operation		
		X	Y	Z	X	Y	Z
既設ポンプ運転 Exiting pumps driven	$\phi$ 900-①	57.87	4.75	6.42	13.00	18.00	3.00
	$\phi$ 900-②	27.49	14.71	7.25	7.00	11.00	2.00
増設ポンプ運転 Additional pumps driven	$\phi$ 900-①	76.13	60.18	14.57	20.00	16.00	3.00
	$\phi$ 900-②	76.66	60.53	14.65	10.00	15.00	5.00

ることから、本対策案は実施された。

なお、対策後の振動値は許容値を下回るものの、大きい値となることが懸念されたため、モータの残留不釣り合い量を小さくする対策をとった。

### 3-4 実測による検証

表5は、ポンプ増設後に実測した増設ポンプの振動値と解析結果の比較である。

既設ポンプ運転による停止状態の増設ポンプの振動値は、特に吐出し直角方向 (Y)、鉛直方向 (Z) で解析結果と実測値がよく一致している。

増設ポンプ運転による増設ポンプ振動値は、実測値が解析結果に比べ小さくなっているが、これは、実機原動機の残留不釣り合い量を解析での見積りより小さくしたためと考えられる。

既設ポンプ増設ポンプともに振動値は許容値を十分に下回り、振動問題の発生なく運用されている。

## 4. まとめ

大型立軸ポンプは、構造上の理由で固有振動数と運転による加振周波数が近く、共振問題が発生しやすい。このため、計画段階での振動低減・共振回避の検討は不可

欠である。特に、ポンプを設置する基礎構造物の剛性を十分に確保できない場合、振動問題を回避するために、基礎構造物も含めた対策が必要となる場合がある。ポンプと基礎構造物を連結したモデルによる連成解析は、このような振動予測・低振動化のエンジニアリングを実施するための有効な手段である。

本稿では、実際の機場にて実施した低振動化エンジニアリングの一例を報告した。解析による事前検討結果を反映した基礎の補強とポンプ設計を実施し、振動問題の回避を実現した。解析精度は実測で検証されている。

機器と機場の連成解析は、機器単体での検討に比べ大規模なものになるが、機場のコンパクト化やポンプの可変速化などに対応した振動回避のエンジニアリングとして有益であり、重要な技術である。このような連成解析を精度よく実施するためには、機器単体の固有振動数解析精度が高いことはもとより、土木構造物の適切なモデル作成技術や地盤剛性の見積精度が必要である。当社では、豊富な検証から蓄積したモデル作成や拘束条件定義のノウハウに基づく、高精度の固有振動数予測を実現し、機器並びに機場の低振動化に効果をあげている。