

杭基礎を有する大型機械基礎の振動解析モデルに関する一考察

(株)大阪ガス 直井 彰秀 (株)ガスアンドパワー 藤原 義幸
(株)鴻池組 正会員 ○河西 寛 (株)鴻池組 正会員 春海 正和

1. はじめに

振動発生源を有する機械基礎の設計では、稼動時の最大振幅を制限値以内に収めるとともに機械の振動数と基礎構造物の固有振動数をできるだけ離すように、基礎コンクリートの体積や形状、杭の本数や配置等を設計することが重要となる。近年では、複雑な形状や構造の機械基礎であっても、これを忠実にモデル化した3次元解析等が可能になってきている。しかし、このような解析は費用と時間がかかるため、一質点系モデル等の簡易な振動解析モデルを用いて基本的な設計を行うのが一般的である。

本報告では、杭基礎を有する大型機械基礎を対象とした3次元FEMモデルによる解析結果を正解と位置付け、一質点系モデルによる再現性を検討し、一質点系モデルの適用性やモデル化時の留意点について述べる。

2. 構造物および地盤の概要

検討対象の機械基礎は、図-1に示す長さ約33.3m、幅約7.4m、厚さ1.8mのRC床版と、これより立ち上がる高さ約2.7mと1.7mのRC壁・梁による一体構造物であり、これを23本のPHC杭($\phi 700\text{mm}$, $l=40.0\text{m}$, 上部13.0mはPRC杭)により支持している。地盤は地表面から深度4~5m程度までが埋土層、その下にN値5程度の砂質土層が約10m、軟弱な粘性土層が約15m堆積している。基礎に載る機械の大部分はRC床版とRC壁・梁の上面にアンカーボルト等により固定されている。

3. 3次元FEMモデルによる検討

RC床版とRC壁・梁は8節点6面体線形弾性体要素により図-1に示すように分割し、機械の質量($W=548.4\text{t}$)は集中質量に離散化する。一方、杭基礎は各杭の杭頭位置の節点を支持する線形バネ要素(水平方向バネ、鉛直方向バネ、水平軸回りの回転バネ、水平方向と回転方向の間の連成バネ)にモデル化する。これらのバネ定数は、PS除層で得られた埋土層の弾性波速度($V_s=133\text{m/s}$)を用いて推定した変形係数より水平方向地盤反力係数を算定し、これを用いて弾性床上のはり理論に基づいてそれぞれ算出する¹⁾。表-1に杭一本当たりのバネ定数を示す。

解析結果より表-2に1~7次モードまでの固有振動数、有効質量比を示す。また、図-2に1次モードの振動モード形状を示す。これらの結果より、検討対象の機械基礎は有効質量比の累計が7次モードまででほぼ100%に達しており、短辺方向、長辺方向および鉛直方向の卓越振動モードの存在が認められる。つまり、今回のような機械基礎は高次モードの影響が極めて小さく、一質点系モデルの適用性が高いことを示している。

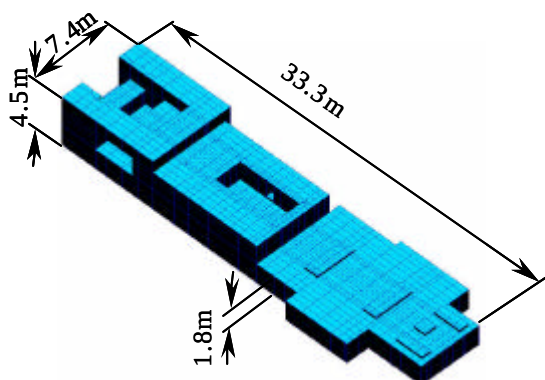


図-1 基礎の形状概要と要素分割

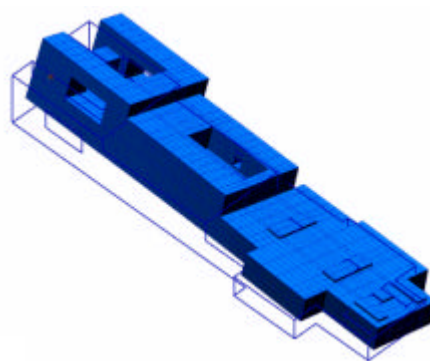


図-2 1次振動モードの鳥瞰図

キーワード 機械基礎, 振動解析モデル, 有限要素法, 一質点系モデル, 回転慣性質量

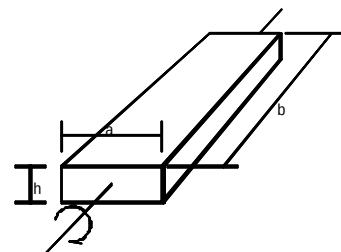
連絡先 〒541-0057 大阪府中央区北久宝寺町 3-6-1 TEL 06-6244-3617 FAX 06-6244-3676

4. 一質点系モデルによる検討

一質点系モデルによる解析は回転慣性質量をパラメータとして行う。具体的には、回転慣性質量を基礎コンクリートの体積と等価な直方体に近似して算出するケース(A)と、基礎の断面形状を用いて回転中心軸の高さを RC 床版の上面、中心および下面に設定して算出する 3 ケース(B, C, D)の合計 4 ケースとする。回転中心軸の水平位置は全て幅 7.4m の RC 床版の中央に一致させ、基礎コンクリートの質量は一様分布、機械の質量は集中質量として扱う。ただし、ケース A の回転慣性質量は基礎コンクリートの一様分布質量に機械の質量も含め、次式により算出する。

$$J = \int_W r^2 dW = W \cdot \frac{a^2 + h^2}{12}$$

ここに、 W ：基礎と機械の総質量(=2151t)
 a ：基礎の幅(=7.4m)
 h ：基礎の換算高さ(=860/7.4/33.3=3.49m)
 b ：基礎の長さ(=33.3m)



一方、バネ定数は表-1 に示す杭一本当たりのバネ定数を用い、杭配置を考慮した基礎のバネ定数(鉛直方向バネ、短辺方向断面の水平方向バネ、回転方向バネ、水平方向と回転方向の連成バネ)を算出する¹⁾。表-3 に杭基礎のバネ定数を、表-4 に回転慣性質量と固有振動数の関係を示す。

今回の条件では、回転慣性質量の違いにより水平と回転に関する卓越振動数が最大 3 割程度異なる結果となっている。表-2 に示す 3 次元 FEM 解析結果の卓越振動数(短辺水平方向：4.08～6.42Hz、鉛直方向：7.70～9.13Hz)と比較すると、ケース D の結果が最も再現性がよいと考えられる。なお、図-2 に示すモード図で揺れが大きい高さ 2.7m の RC 壁を有する基礎部分を取り出し、ケース D の方法で一質点系モデルに置換した場合、水平方向の卓越振動数は 3 次元 FEM 解析結果と一致する結果となった。

5. まとめと今後の課題

杭基礎を有する複雑な形状の機械基礎の振動解析モデルは、基礎コンクリート底面(杭頭)を回転中心軸の高さ位置として算出した回転慣性質量を有する一質点系モデルに置換可能である。また、基礎の振動特性が一樣でないと考えられる場合には、ブロック別に一質点系モデルを適用することも有効な方法となり得る。

今後は、実構造物における振動測定を行い、今回提案した振動解析モデルの妥当性について検証する予定である。

表-1 杭 1 本当たりのバネ定数

鉛直方向バネ K_v	(kN/m)	27.1×10^4
水平方向バネ $K_1 = 4EIb^3$	(kN/m)	16.7×10^4
回転方向バネ $K_4 = 2EIb$	(kN.m/rad)	36.4×10^4
連成バネ $K_2 = 2EIb^2$	(kN/rad)	17.4×10^4

ここに、 EI ：杭の曲げ剛性、 β ：杭の特性値

表-2 3 次元 FEM モデルによる固有値解析結果

次数	振動数 (Hz)	有効質量比(累計)(%)		
		長辺方向	短辺方向	鉛直方向
1	4.08	0(0)	70(70)	0(0)
2	6.42	4(4)	14(83)	0(0)
3	6.55	88(92)	1(84)	1(1)
4	7.70	6(99)	0(84)	49(50)
5	9.13	1(100)	0(84)	49(99)
6	11.56	0(100)	2(86)	1(100)
7	12.32	0(100)	13(100)	0(100)

表-3 杭基礎のバネ定数

鉛直方向バネ $K_{yy} = n \times K_v$	(kN/m)	62.4×10^5
水平方向バネ $K_{xx} = n \times K_1$	(kN/m)	38.4×10^5
回転方向バネ $K_{qq} = n \times K_4 + \sum_i x_i \cdot K_v$	(kN.m/rad)	43.5×10^6
連成バネ $K_{xq} = n \times K_2$	(kN/rad)	40.1×10^5

ここに、 n ：杭本数、 x ：杭群中心からの距離

表-4 一質点系モデルの回転慣性質量と固有振動数

ケース	回転慣性質量 J (t・m ²)	振動数(Hz)		
		鉛直方向	水平方向	回転方向
A	12000	8.56	6.15	9.97
B	13490	8.56	6.10	9.47
C	16060	8.56	6.00	8.82
D	22120	8.56	5.71	7.90

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 下部構造編，pp.346-354，平成 8 年 12 月