

九州大学 工学部 正員 小 坪 清 真
九州工業大学 正員 ○高 西 照 彦
九州大学 工学部 正員 鳥 野 清
九州大学 工学部 正員 成 富 勝

1. まえがき 図-1に示すような鉱石整粒工場は、その最上層に設置された2台のクラッシャーの回転に起因する遠心力をうけて、微小な振動を生ずる。建屋の振動によって機械本体や付帯電気機器などに障害が生じないようにするためには、建屋の最大振動変位を高々100 μ mにおさえることが必要であるといわれている。通常、整粒工場は軟弱地盤上に築造されることが多く、そのため図-1に示すように、杭によって支持される形式が広く採用されている。軟弱地盤中に築造された杭基礎を有する構造物の水平方向の第1次の固有振動数は一般に小さいので、場合によっては、クラッシャーの回転によって生ずる強制振動の振動数(通常4 Hz程度)に近くなることがあり、そのため共振が生じて、構造物の変位が増大するという可能性がある。したがって設計に際しては、あらかじめ杭基礎構造物の振動解析を行い、その固有振動数および周期的強制外力による構造物の最大応答変位を精度よく推定することが必要となる。杭基礎構造物の振動解析に当たっては、杭および板基礎に対する地盤反力を適確に評価することが最も重要であるが、この点に関しては、現在までに信頼できる評価法が確立されているとはいえない。本論では、杭および板基礎に対する地盤反力を波動論を用いて求めるという方法に従って、図-1に示すような杭基礎構造物に対して振動解析を行い、同時に、操業中の鉱石整粒工場に対する振動変位の実測を行って、両者の結果を比較し、著者等の解析法の妥当性について2、3の考察を加えた。

2. 杭基礎構造物のモデル化と振動方程式

次に述べるような考え方に従って、図-1に示す杭基礎構造物を図-2に示すようにモデル化した。すなわち、(i)水平およびロッキング振動と振り振動とは連成しないとして互いに独立に取り扱う (ii)構造物の最大応答は(i)で得られたそれぞれの結果をその位相を考慮して重ね合わせることによって算出する (iii)上部構造物は集中質量系に置換する。質量は各層に集中させ、各層間のばね剛性については上部構造物を立体ラーメンとみなしてこれを算出する (iv)杭と上層地盤とは連続弾性体として解析し、両者の間に生ずる動的相互作用を波動論を用いて評価する (v)板基礎は剛体とする。またその側面と底面に対して平行および垂直方向に作用する地盤反力は、互いに他と連成しないとして、それぞれ単独に、適当に簡略化した仮定の下で波動論を用

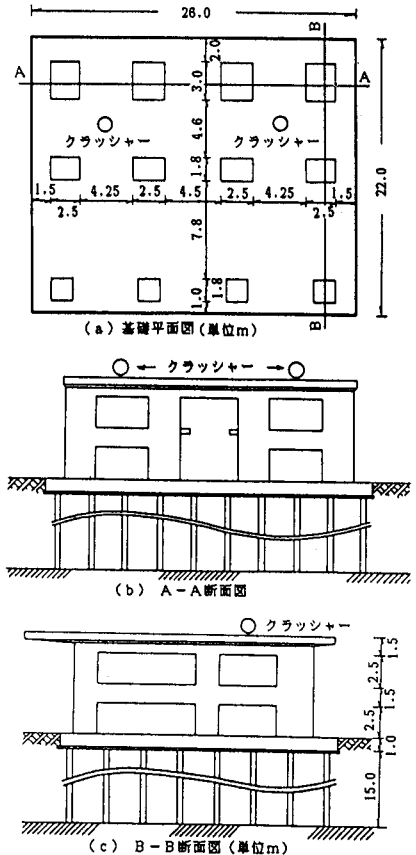


図-1 鉱石整粒工場の概要図

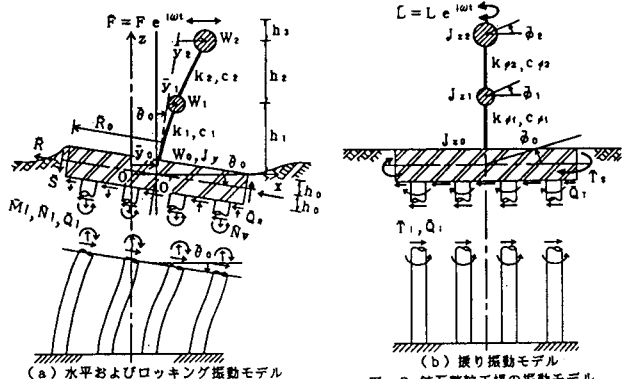


図-2 鉱石整粒工場の振動モデル

いて算出する。x方向およびy軸まわりの回転に対する振動方程式は、図-2(a)を参照して、次式のように得られる。

$$(W_2/g) \{ \ddot{y}_0 + \ddot{\theta}_0(h_1+h_2) + \ddot{y}_2 \} + k_2(\bar{y}_2 - \bar{y}_1) + c_2(\dot{\bar{y}}_2 - \dot{\bar{y}}_1) = \bar{F} \quad (1)$$

$$(W_1/g) \{ \ddot{y}_0 + \ddot{\theta}_0 h_1 + \ddot{y}_1 \} - k_2(\bar{y}_2 - \bar{y}_1) - c_2(\dot{\bar{y}}_2 - \dot{\bar{y}}_1) + k_1 \bar{y}_1 + c_1 \dot{\bar{y}}_1 = 0 \quad (2)$$

$$(W_0/g) \ddot{y}_0 + \ddot{Q} + \ddot{R} + \ddot{Q}_R - k_1 \bar{y}_1 - c_1 \dot{\bar{y}}_1 = 0 \quad (3), \quad (J_y/g) \ddot{\theta}_0 + (W_2/g) \{ \ddot{y}_0 + \ddot{\theta}_0(h_1+h_2) + \ddot{y}_2 \} (h_1+h_2) + (W_1/g) \{ \ddot{y}_0 + \ddot{\theta}_0 h_1 + \ddot{y}_1 \} h_1 + \bar{M} + \bar{M}_N + \bar{M}_Q + \bar{M}_U + \bar{M}_R + \bar{M}_S = \bar{F} (h_1+h_2+h_3) \quad (4)$$

$$z \text{ 軸回りの振りに関する振動方程式は図-2(b)を参照して、次式のように得られる。}$$

$$(J_{z2}/g) \ddot{\phi}_2 + k_{\phi 2}(\bar{\phi}_2 - \bar{\phi}_1) + c_{\phi 2}(\dot{\bar{\phi}}_2 - \dot{\bar{\phi}}_1) = \bar{L} \quad (5), \quad (J_{z1}/g) \ddot{\phi}_1 - k_{\phi 2}(\bar{\phi}_2 - \bar{\phi}_1) - c_{\phi 2}(\dot{\bar{\phi}}_2 - \dot{\bar{\phi}}_1) + k_{\phi 1}(\bar{\phi}_1 - \bar{\phi}_0) + c_{\phi 1}(\dot{\bar{\phi}}_1 - \dot{\bar{\phi}}_0) = 0 \quad (6)$$

$$(J_{z0}/g) \ddot{\phi}_0 - k_{\phi 1}(\bar{\phi}_1 - \bar{\phi}_0) - c_{\phi 1}(\dot{\bar{\phi}}_1 - \dot{\bar{\phi}}_0) + \bar{T} + \bar{T}_Q + \bar{T}_S + \bar{T}_T = 0 \quad (7)$$

$$\text{上式において、}\bar{Q}\text{は杭頭せん断力の総和、}\bar{R}\text{および}\bar{Q}_R\text{は板基礎の側面および底面に作用する水平方向の地盤反力、}\bar{M}\text{は杭頭モーメントの総和、}\bar{M}_N, \bar{M}_Q, \bar{M}_U, \bar{M}_R, \bar{M}_S\text{はすべてy軸まわりのモーメントであり、}\bar{M}_N\text{および}\bar{M}_Q\text{は杭頭軸力およびせん断力にもとづくモーメントを、}\bar{M}_U\text{および}\bar{M}_R\text{は板基礎の底面に作用する垂直および平行方向の応力にもとづくモーメントを、}\bar{M}_S\text{は板基礎の側面に作用するせん断力にもとづくモーメントを表す。また}\bar{T}\text{は杭頭の振りモーメントの総和、}\bar{T}_Q, \bar{T}_S, \bar{T}_T\text{はすべてz軸まわりの振りモーメントであり、}\bar{T}_Q\text{は杭頭せん断力によるモーメントを、}\bar{T}_S\text{および}\bar{T}_T\text{は板基礎の側面および底面のせん断力にもとづく振りモーメントを表す。gは重力の加速度。なお、図-2中に示したその他の記号については説明を省略する。}$$

$$3. \text{ 数値計算結果}$$

数値計算に用いた主な諸定数値は次の通りである。

上部構造物については $W_2=1114t$, $W_1=1064t$, $W_0=1567t$, $J_y=88474t\text{m}^2$, $J_{z2}=98625t\text{m}^2$, $J_{z1}=97908t\text{m}^2$, $J_{z0}=152386t\text{m}^2$, $k_1=1.410^7t/m$, $k_2=2.410^8t/m$, $k_{\phi 1}=1.510^9t\text{m/rad}$, $k_{\phi 2}=2.510^9t\text{m/rad}$ 。

板基礎周辺地盤については単位体積重量 $1.8t/m^3$, せん断弾性定数 $6500t/m^2$, ポアソン比 0.45 , 杭周辺地盤については単位体積重量 $1.4t/m^3$, せん断弾性定数 $400t/m^2$, ポアソン比 0.49 である。杭については半径 $0.2m$, 管厚 $7.9mm$, 伸び剛性 $207690t$, 曲げ剛性 $4124t\text{m}^2$, 見掛けの単位体積重量 $1.89t/m^3$, 杭本数 80 本, 杭間隔は $2.7 \times 2.9m$ である。図-1に示す杭基礎構造物が振幅一定（加振力 $F=23t$, 加振モーメント $L=85t\text{m}$ ）の調和波外力をうけたときの応答計算結果の一例を図-3, 4, 5に示す。図-3, 4は上部構造物最上層隅角点の共振曲線を描いたものである。図-4中には第1次の共振振動数ならびに 4.25Hz （クラッシャーによる加振外力の振動数）における上部構造物の振動形を書き加えている。図-5は加振振動数が 4.25Hz における各層隅角点の最大変位を示したものである。

図-3 上部構造物最上層隅角点の共振曲線

図-4 上部構造物最上層隅角点の共振曲線および振動形

図-5 基礎および各層の隅角点の最大変位の理論値（ 4.25Hz ）

図-6 基礎および各層の隅角点の最大変位の実際値（ 4.25Hz ）

図-7 基礎および各層の隅角点の最大変位の実際値（ 4.25Hz ）

図-8 基礎および各層の隅角点の最大変位の実際値（ 4.25Hz ）

図-9 基礎および各層の隅角点の最大変位の実際値（ 4.25Hz ）

図-10 基礎および各層の隅角点の最大変位の実際値（ 4.25Hz ）

図-11 基礎および各層の隅角点の最大変位の実際値（ 4.25Hz ）

図-12 基礎および各層の隅角点の最大変位の実際値（ 4.25Hz ）

図-13 基礎および各層の隅角点の最大変位の実際値（ 4.25Hz ）

図-14 基礎および各層の隅角点の最大変位の実際値（ 4.25Hz ）

図-15 基礎および各層の隅角点の最大変位の実際値（ 4.25Hz ）

図-16 基礎および各層の隅角点の最大変位の実際値（ 4.25Hz ）

図-17 基礎および各層の隅角点の最大変位の実際値（ 4.25Hz ）

図-18 基礎および各層の隅角点の最大変位の実際値（ 4.25Hz ）

図-19 基礎および各層の隅角点の最大変位の実際値（ 4.25Hz ）

図-20 基礎および各層の隅角点の最大変位の実際値（ 4.25Hz ）

図-21 基礎および各層の隅角点の最大変位の実際値（ 4.25Hz ）

図-22 基礎および各層の隅角点の最大変位の実際値（ 4.25Hz ）

図-23 基礎および各層の隅角点の最大変位の実際値（ 4.25Hz ）

図-24 基礎および各層の隅角点の最大変位の実際値（ 4.25Hz ）

図-25 基礎および各層の隅角点の最大変位の実際値（ 4.25Hz ）

図-26 基礎および各層の隅角点の最大変位の実際値（ 4.25Hz ）

図-27 基礎および各層の隅角点の最大変位の実際値（ 4.25Hz ）

図-28 基礎および各層の隅角点の最大変位の実際値（ 4.25Hz ）

図-29 基礎および各層の隅角点の最大変位の実際値（ 4.25Hz ）

図-30 基礎および各層の隅角点の最大変位の実際値（ 4.25Hz ）

図-31 基礎および各層の隅角点の最大変位の実際値（ 4.25Hz ）

図-32 基礎および各層の隅角点の最大変位の実際値（ 4.25Hz ）

図-33 基礎および各層の隅角点の最大変位の実際値（ 4.25Hz ）

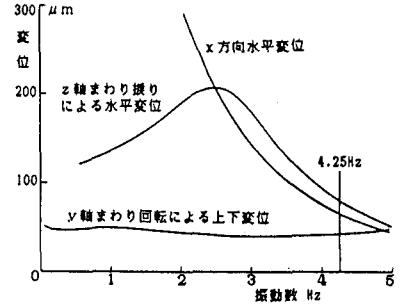


図-3 上部構造物最上層隅角点の共振曲線

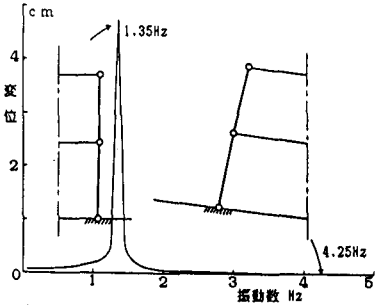


図-4 上部構造物最上層隅角点の共振曲線および振動形

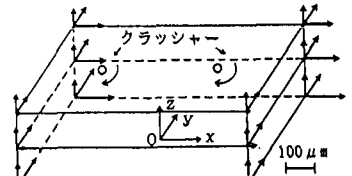


図-5 基礎および各層の隅角点の最大変位の理論値（ 4.25Hz ）

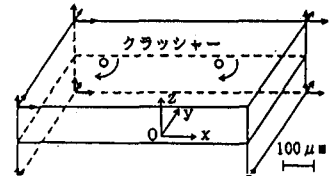


図-6 基礎および各層の隅角点の最大変位の実際値（ 4.25Hz ）

4. 実測結果および考察

図-1に示した鉬石整粒工場に対して振動振幅の実測を行って得た結果を図-6に示す。図-5と6から理論値に比べて実測値の方が多少小さいことがわかる。また、各層の水平方向の最大変位の分布をみると、理論では、下層ほどその値が大きくなっており、それは実測結果とは逆の傾向を示している。実際には、杭先端は基盤に弾性支持されているにもかかわらず、解析においては杭先端は基盤に剛結されているという仮定を採用したためにこのような結果が生じたのではないかとと思われる。杭先端の弾性を考慮した理論については現在研究中である。