

板ばねを用いた防振吊基礎の振動性状について

—非線型履歴特性を持つ系の動的特性について—

渡 辺 清 治
島 口 正 三 郎
奥 井 徹¹⁾
南 保 光²⁾

概 要

鍛造機械のように大きな衝撃を受けるものには周囲への障害を除去するため、ハンマーの基礎をばねで支持し振動を絶縁する方法が用いられている。今回対象となった基礎は、某工場において当社が設計施工した板ばねを用いたドロップ・ハンマー(5.0t, 3.0t, 2.0t, 1.0t)の振動絶縁基礎であり、この基礎を工場配置の関係上移設することになった。移設に当って現存基礎より防振効果のより良い基礎をと云う要求があり、現存基礎の稼動状況を調査、改良の資料とした。

その結果、設計上加味されなければならない種々の要素が解析より明らかとなり、これらの基礎の設計分野で全く新しい方法が立案実施されるようになった。今回はその過程として、板ばねを用いた吊基礎の振動性状と新しい基礎の防振効果について報告する。

1. 在来基礎の振動性状について

1.1. 既存基礎の概要

鍛造ハンマー等の防振支持は一般に図-1に見られるように外基礎と内部の吊基礎とに分けられる。吊基礎は外基礎にばねで支持されているのが普通である。吊基礎は鍛造効果を充分に行なうため、又打撃時の吊基礎の沈下速度を遅くし、防振効果を上げるために適当な重量を必要とし、外基礎はそれに対して充分に強固でなければならない。現存基礎は5 ton 基礎は単独に存在し、3 ton, 2 ton, 1 ton のものは、1 ton を中心に左右に2 ton と 3 ton を配し外基礎を3 ケー体とした型

	5.0tハンマー	3.0tハンマー	2.0tハンマー	1.0tハンマー
ストローク(cm)	118	118	106	87
シリンダー径(cm)	50.0	34.0	24.5	19.0
使用空気圧(kg/cm ²)	5~7	5~7	5~7	5~7
ハンマーヘッド W _n (kg)	4,300+800	1,700+300	1,200+100	500+250
吊 アンビル+フレーム W _m (kg)	57,000+800	27,600+250	23,000+100	8,750+250
基 吊基礎 W _i (kg)	55,000	30,000	30,000	7,600
礎 W _z =W _m +W _i (kg)	112,800	57,800	53,100	16,600
板 ばねの個数	12	6	6	4
吊 ボルトの数	24~45φ	12~30φ	12~30φ	8~20φ
外 基礎	外基礎 W _s (ton)	共通	89.2	
	外基礎の底面積 m ²	38	共通	50.7

表一 設計基礎資料

- 1) ㈱大林組名古屋支店 設計部 主任技師
- 2) ㈱大林組名古屋支店 設計部

式をもっている。吊基礎の支持方法は図-1に示す如く、吊基礎即ちイナシアブロックをかんざし状に突き抜いた梁を、外基礎に支持されたばねからボルトで吊ったものである。その他基礎用設計資料としては表一に示される如くである。

1.2. 測定方法

実測にあっては通常稼動している状態で行った。設計上必要資料は、ハンマー落下高、その速度、吊基礎の沈下量及び沈下速度、外基礎の固有周期及びその振巾などが主な必要データである。しかしこの中には測定困難なものもあり、測定したものは外基礎に変位計及び加速度計を設置し、吊基礎と外基礎との間に差動トランスを取付け、沈下速度と相対変位を取り、吊基礎にも加速度計を設置し、打撃時の外基礎と吊基礎の加速度伝達比を調べた。

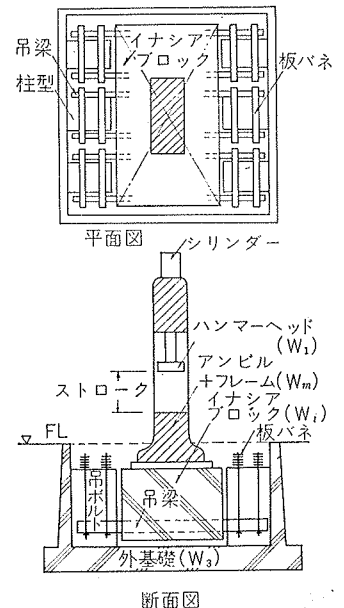


図-1 基礎の概要

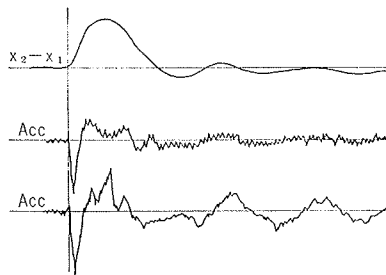
1.3. 測定結果

測定結果について表記すると表一2の如くなる。また測定記録波形を示すと、図一2及び図一3のとおりである。

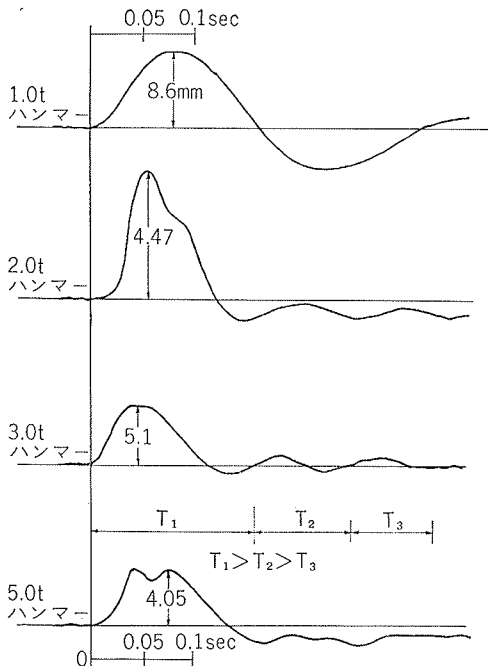
ton	f_1	f_2	x_1	x_2-x_1	Acc-1	Acc-2	h
1.0	—	—	—	—	—	—	—
2.0	9.5 (10.0)	9.5 (10.0)	0.8~20.0	0.66~3.16	3.28~18.1	62.9~433	0.172
3.0	5.0 (5.0~9.09)	5.0 (5.0~9.09)	0.9~37.5	0.95~7.21	5.55~18.4	798.3~2617	0.544 0.187
5.0	4.76 (4.76~5.26)	4.76 (4.76~5.26)	0.7~46.3	0.46~6.95	3.5~34.5	127.8~1486	0.54 0.058

表一2 測定結果

f : 固有振動数(c/s) α : 伝達率(A_{cc-1}/A_{cc-2})
 x_1 : 外基礎変位(μ) h : 減衰常数
 x_2-x_1 : 吊基礎-外基礎=相対変位(mm)
 A_{cc-1} : 外基礎の加速度(gal)
 A_{cc-2} : 吊基礎の加速度(gal)



図一2 実測波形



図一3 各ハンマー相間変位

1.4. 測定結果の考察

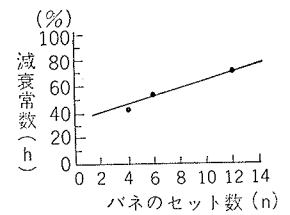
実測結果から問題となる点を拾い出して見ると、波形より観察すると、1) 1.0 tハンマーを除いて他のものは、ダンピング効果はかなり大きい様に思われるこ

と 2) 打撃時の停止ラインがもとのラインに戻っていない。3) 波形の周期が後になる程早くなっている。4) 吊基礎の打撃時の沈下量がかかなり小さい等々の事が注目される。次に設計上の問題点を取り上げると

a) 固有周期について 設計上の固有周期は静的沈下量から求められる。これらハンマーの静的沈下量は建設当時の記録から、バネは設計指示値よりやや固く出来ているがほぼ設計通りの沈下を示している。実測波形からの固有周期は、この波形の性状からは色々問題点があり、一般的にとり方も難しいので初波の倍数を取り合えずの固有周期としたが、1.0 tハンマーを除いて皆バネ剛化の現象が見られる。

b) 変位について、打撃時の変位量が設計値より小さい事は、打撃時のハンマーのストロークに左右される点もある。又固有周期も重要な因子の一つであるが、バネが剛化されたとして、変位記録より求めた速度からハンマー落下高などを推定すると、ほぼうなずける値となる。

c) 減衰に関して、各ハンマーの減衰常数をとりあえず求めて見ると表一2に表わされている如く、1.0~5.0 tと順を追って大きくなる。これを板バネ1セットがもつ減衰力の集積と考えて、バネの数と減衰常数の関係を図に描くと図一4のような関係が得られる。



図一4

2. 板ばねの動特性について

2.1. 一般性状

一般に履歴特性と云われるものは元来動的には減衰性を示すものとして取扱われて来たが、板バネのように板間に摩擦が作用することにより非線型履歴特性をもつ系はバネ特性にも影響し、静的に求められたバネ常数と動的に求められたバネ常数は必ずしも一致しない。このことは今迄の測定からも、バネの理論からもある程度は明らかにされているが設計値として評価出来る迄には致っていない。板バネを鍛造ハンマー等の基礎の防振材として使用する場合には、これらのバネ常数及び減衰力の評価が明らかでないと基礎の防振効果を充分あげることが出来ない。

板バネの特性として、コイルバネと異なる点は板間摩擦のため荷重-撓み曲線が一本の直線にならず、図一5に示される如き履歴現象を示す。従って荷重と撓みとは一義的に定まらず、板バネに載荷し復元力をもたせた振動系では系の静止位置が一定せず、固有周期

も振巾（ばねの有効動き）によって異なるという特殊な性質を示すようになる。

2.2. 板間摩擦について

板ばねに載荷した場合、加荷時のばね常数は摩擦を考えないばね常数より大きく、減荷時のそれは小さくなる性質をもつ。

板間摩擦を考えない時の静荷重による撓み $\delta = W/K$
 板間摩擦を考えた時の静荷重による加荷時の撓み

$$\delta_{I} = \frac{5(1-\mu)}{5+\mu} \cdot \delta = \alpha_1 \cdot \delta \quad \alpha_1 = \frac{5(1-\mu)}{5+\mu}$$

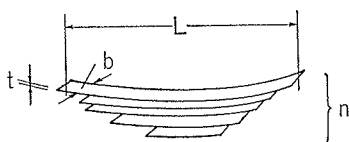
板間摩擦を考えた時の静荷重による減荷時の撓み

$$\alpha_{II} = \frac{5(1+\mu)}{5+\mu} \cdot \delta = \alpha_2 \cdot \delta \quad \delta_2 = \frac{5(1+\mu)}{5+\mu}$$

ここに μ = 板間摩擦係数

$$\mu = J(10 - 0.05b) \frac{t\sqrt{n-1}}{L+420} \dots \text{(経験式)}$$

b : 板巾(mm) t : 板厚(mm) n : 板ばね枚数
 L : 全スパン(mm) J : 補正係数 0.4~0.9



(Jは荷重の大きいもの程、使用期間が長くなる程、板間注油の小さい程、錆の発生が多い程大きくなってゆく傾向を示す)

上記より

$$\delta_{I} = \frac{W}{Kd_1} = \alpha_1 \delta = \alpha_1 \frac{W}{K}$$

$$\delta_{II} = \frac{W}{Kd_2} = \alpha_2 \delta = \alpha_2 \frac{W}{K}$$

$$\text{故に } Kd_1 = K/\alpha_1, \quad Kd_2 = K/\alpha_2$$

で表わされる。

図-5の内、 δ を中心とする小範囲の $P \sim \delta$ のループを平行四辺形とみなせば図-6の如くなり、ループの力方向の巾 f は、

$$f = (\delta_{II} - \delta_I)K \text{ となる。}$$

$$\therefore f = \frac{10\mu}{5+\mu} W = \mu \cdot W$$

$$\mu = 10\mu/5 + \mu$$

f は板ばねの静荷重 W に対する全摩擦力であり、 μ は荷重に対する板ばねのもつ摩擦係数である。

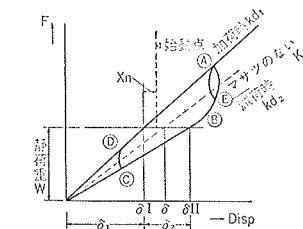


図-5

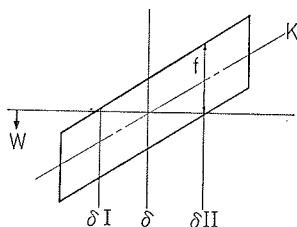


図-6

板ばねの荷重～撓み曲線は、図-5のようになり加荷と減荷を繰返す時はA③C④Aの経路をたどる。即ち、B③、④Aの直線部とA③、C④の曲線部に区別する事が出来る。この曲線部を「移り曲線」と呼び、荷重 P が摩擦力 f より小さい時は、A③Aの経路をたどり「移り曲線」のみが現われて直線部は出て来ない。

2.3. 動変位について

図-5の如き特性をもつ系に運動エネルギーが作用した場合、その変位は摩擦力により逐次減衰し、 δ_2 の範囲内では復元力と摩擦力が等しくなった任意の位置でどこでも静止し得る。

運動エネルギーが作用した時の変位は、エネルギー量は一定でも δ_2 の範囲内が動き出す位置（以下始動点という）により異なる。即ち、 $E_K = \frac{1}{2}mV^2 = \text{const}$ とした場合、摩擦力のない系では、 $E_K = \frac{1}{2}Kx^2$ となるが摩擦力を有する系では、

$$E_P = \frac{x_n}{\delta_2} \cdot f \cdot x + \frac{1}{2} K d_1 \cdot x^2$$

x_n : δ_1 から δ_2 範囲内の任意の始動点迄の変位量 (cm) となり、その変位量は始動点の位置により一定でなく

$$x_1 = \delta_1 \left\{ -\frac{\mu}{\delta_2} \cdot x_n + \sqrt{\left(\frac{\mu}{\delta_2} \cdot x_n\right)^2 + \frac{V^2}{\delta_{1g}}}\right\}$$

μ : 摩擦係数

となる。又摩擦力による履歴特性をもつ系では半振巾は半周期毎に δ_2 の倍数の差がつ減少し、粘性減衰において振巾が一定比で減少してゆく性状とは様相を異にする。

2.4. 固有周期について

一般に一質点系の固有周期は、 $T = 2\pi\sqrt{M/K} \doteq 0.2\sqrt{\delta}$ で表わされ、粘性減衰自由振動の周期は、 $1/\sqrt{1-h^2}$ の比で周期毎に伸び静止には無限の時間を要するが、摩擦力をもつ系では周期は1サイクル毎にちぢまり有限時間内に静止する。摩擦力による履歴減衰の場合、振巾の大きい時のループは扁平なほぼ平行四辺形であるが、振巾の小さい時は縦長の長方形となる。

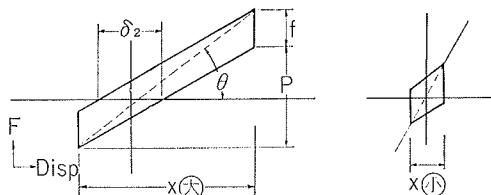


図-7

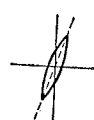


図-8

特に変位が小さく図-5の「移り曲線」の範囲内で動く時は図-8の如くなる。この図から傾向的に読みとれる事は、変位によるループの対角線と x 軸とのなす角 θ が、

変位の大きいときは相対的に小さく、変位の小さい時は大きい事であり、いづれもループ直線部のx軸となす角より大きい事である。対角線の $\tan \theta$ を動変位時の等価バネ常数とみなし対角線常数 K_D とすれば、

$$K_D = \tan \theta = \frac{P+f}{x} = \frac{K \cdot x + K \cdot \delta_2}{x} = K \left(1 + \frac{\delta_2}{x}\right)$$

$$K, \delta_2 \dots \text{const}$$

となり、変位置に逆比例する。

周期を $T' = 0.2\sqrt{\delta_D} = 0.2\sqrt{W/K_D}$ とすれば、

$$T' = 0.2\sqrt{\frac{W}{K(1+\delta_2/x)}} = T \cdot \frac{1}{\sqrt{1+\delta_2/x}}$$

と書ける。半振巾が半周期毎に $n\delta_2$ の差で減少してゆく性状を考えれば、この系の自由振動は一周期毎に固有周期が短くなってゆく特性がうなづける。殊に変

形が微小になり、ループが「移り曲線」の範囲内で動く場合は周期は極端にちぎまり静止する。

2.5. 減衰について

図-9に示されるように、動変位による復元力が摩擦力より小さいときには、始動点の移動のみで振動性状を示さず、復元力が摩擦力より大きい場合でも自由に振動しうるかしないかの境目（クリティカル）が存在し、その境目は始動点の位置により異なり、任意の点 x_n における動変位置 x は、

$$x = \left(2 - \frac{x_n}{\delta_2}\right)\delta_2 = 2\delta_2 - x_n$$

となる。

摩擦力による履歴特性を持つ系では、半振巾は半周期毎 δ_2 の倍数の差ずつ減少してゆき、粘性減衰の減少と様相を異にする。今この系の減衰率を h とすと、

$$h = \Delta W / W$$

$$\Delta W = \text{損失エネルギー}$$

$$W = \text{復元エネルギー}$$

で表わされるものとする、

$$\Delta W = fx$$

$$W = 1/2kx^2 \text{ であり}$$

$$h = 2f/K \cdot x/x^2 = 2f/K \cdot 1/x \text{ と}$$

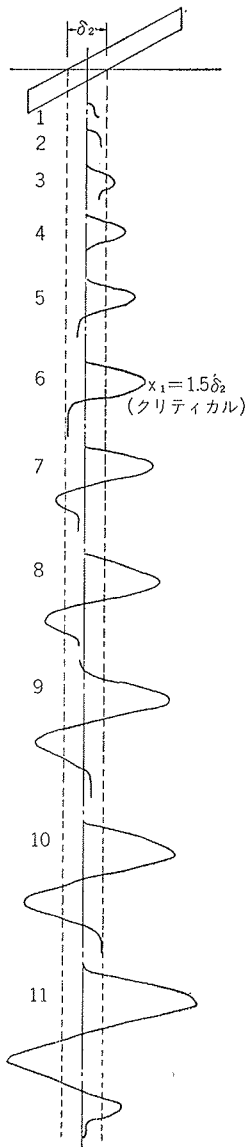


図-9

なる。 $(2 \cdot f / K \dots \text{const})$

上式より、減衰率は動変位 x が大きくなれば小さくなり、 x が小さくなれば大きくなる傾向を示す。

この様な減衰を片対数グラフに示すと、粘性減衰の場合と異なり曲線で描かれる。

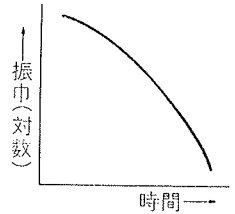


図-10 減衰曲線

3. 吊基礎設計への指針として

吊基礎設計施工の実情と、これらに対する測定追跡の解明から今後の吊基礎設計施工のあり方が、自ら明らかとなって来る。最後に締めくくりとして注目すべきこれらの点をまとめて見ると、

3.1. 外基礎と吊基礎について

吊基礎による防振の基本的な最も重要な問題は、吊基礎の打撃時の撓み（沈下量）を十分に伸ばしてやる事である。そのためバネの設計上の留意は勿論であるが、外基礎が堅硬で十分なバネ力を持っていないければ吊基礎のバネのみでエネルギーを吸収することが出来ず、外基礎も振動することとなる。

即ち、理論的には外基礎質量 m_1 、バネ常数 $K_1 = k_1$

A_1 、吊基礎質量 m_2 、バネ常数 K_2 の比を出来るだけ大きくとることが望ましいことであるが、一般にこれらの工場の存在する場所は軟弱な地盤が多く、 K_1 の値には期待がやすい場合が多い。従って、防振は基礎底面積 A_1 と質量 m_1 に依存することが多くなる。

何れにせよ防振効果として最も重要なことは、吊基礎の沈下速度を出来るだけ遅くすること、外基礎の角振動数 ω を上げることに帰着する。

今、紙面の関係から新しい基礎についての設計基礎データのみを示すと表-3の如くなる。

	5.0tハンマー	3.0tハンマー	2.0tハンマー	1.0tハンマー
吊 基 礎	アンビル+フレーム(kg)	59,250	28,800	23,950
吊基礎 W_1 (kg)	132,750	50,700	26,000	表-1と同じ
基礎 $W_2 = W_m + W_{k\phi}$ (kg)	192,000	79,500	50,000	
バネの個数	24	10	6	
静撓み (cm)	4.04	3.98	4.01	
沈下量 (mm)	(27)	(25)	(-)	
外基礎 W_3 (ton)	共通	820.0		
外基礎の底面積 (m ²)	共通	180.9		

表-3

表中、機械の仕様については表-1と同様である。

これらの資料をもとにして防振設計を行ったものであるが、その結果表-4に示される如く良好な防振効果を上げることが出来た。

	f	X_1	$X_2 - X_1$	A _{cc-1}	A _{cc-2}	α	h
ton 1.0	10.5	4.3~7.0	6.7~7.7	6.6~6.5 4.5~5.1	2984.5 3556.0	0.0022 0.0018	0.44
ton 2.0	10.5	78.0	4.8~2.8	37.1~35.4	1841.5 2159.0	0.0201 0.0164	0.68
ton 3.0	10.0	62.9	3.8~5.13	29.9~14.9 51.5~59.5	2159.0 2758.0	0.0239 0.0216	0.532
ton 5.0	10.0	174~197	6.2~6.9	90.8~82.8	1555.5 3597.2	0.0584 0.0230	0.70

表-4 測定結果

f_1 : 外基礎固有振動数(c/s)

f_2 : 吊基礎固有振動数(c/s)

x_2 : 外基礎変位(μ)

$x_2 - x_1$: 吊基礎-外基礎=相間変位(mm)

A_{cc-1}: 外基礎の加速度(gal)

A_{cc-2}: 吊基礎の加速度(gal)

h: 減衰常数

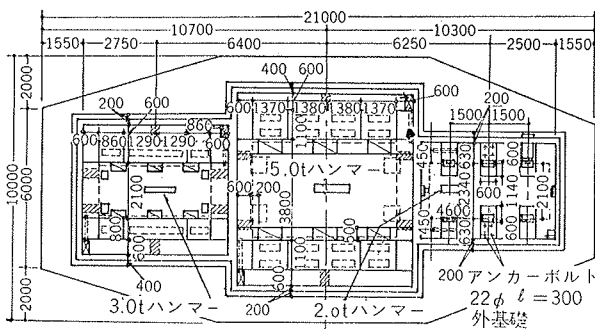


図-11 新基礎配置図

3.2. バネ設計に当って

3.2.1. 実作業ストロークと最大ストロークについて

一般に吊基礎のバネ設計に当って打撃エネルギーとしては、最大ストロークを採用している。これは板バネの様に剛化作用が行われるものに対しては難点となる。又逆に作業ストロークで設計することもエネルギー過少評価となり危険性が伴うことになる。従って板

バネを使って基礎を設計する場合、両者を考えて最大値での安全性と最小値でも撓みが出られる様、剛化作用を考慮して設計しなければならない。

3.2.2. 減衰性について

減衰性は前項で述べた如く、いわゆる粘性減衰の型ではなく摩擦減衰の型をとり、減衰性の問題はバネ剛化の問題とも重要な関係にあり、総 Ton 数の大きなハンマー、即ちバネの個数が多くなると、オーバーダンピングをしバネ剛化の現象になるため、板バネ設計に当っては、撓みが出られる様バネに対して多少苛酷な条件を強いた方が防振効果は良いと見られる。

何れにせよ、この種の基礎の設計は外基礎が安定し吊基礎は打撃時の撓みが出られる様配慮することが防振効果を上げるポイントとなる。

4. むすび

鍛造ハンマーの防振支持について一連の実験と新しい防振支持の方法を試みたが、これらの問題については、まだまだ未知の事が多く今後の研究問題を残して一段落と云った感がある。

今後共これらの問題は重要な事であり、特に履歴特性と減衰の問題は、耐震壁のあり方についても通じる処もあり、今後の研究に期する処が大きい。

参考文献

- 渡辺清治, 奥井徹, 南保光, 島口正三郎: 板バネを用いた防振吊基礎の振動性状について (非線型履歴特性を持つ系の動特性について) 建築学会学術講演梗概集 (近畿) (昭和46年11月)
- 田治見宏: 建築振動学 (コロナ社)