

鉛直衝撃荷重が建物の柱に及ぼす応力の緩和に関する研究

Study of Relaxative Stress for Structural Column under Normal Impulsive Load

山本 嘉孝・小林 加奈*

Yoshitaka YAMAMOTO, Kana KOBAYASHI

1. はじめに

地震時に建造物に加わる荷重は水平振動と仮定している。そのため、地震力は建物に水平方向のせん断力が作用するものとして計算している。前年度の報告で、質量と落下距離を同一とした場合、地表に到達する衝撃力は緩衝材として用いたバネのバネ定数が弱く、長い方が地表の衝撃力が少ないことが示されている。それによって、直下型地震による、最下階の柱に作用する力を時間差で分散し柱の応力を減少させる。本報告は、質量の落下衝撃力、バネ定数、バネの衝撃緩和能力と力の伝達力等を種々の仮定の元に模擬計算したものである。

2. 種々の仮定

地震時に発生する衝撃力は建物の梁やスラブから柱を伝わって地表に到達する。そこで、各階の柱脚に一定の伸びしろとバネ定数を持つバネを設置しておく。そのとき、直下型地震により、建物に与える衝撃力が柱を通過する時間や、バネが一時的に保持できる能力と時間を次のように仮定する。これらを組み合わせ、建物の柱に作用する衝撃力を時間差で緩和できるようにする。

- ① バネは衝撃力の3分の1を一時保持する。
- ② バネが保持できる時間を仮定する。
- ③ 残りの3分の2は瞬時にバネを通過する。
- ④ 衝撃力が柱を通過する時間を仮定する。

※また、平成16年度の卒業研究より、バネのストロークが長いほど荷重を保持する能力が高いことが実証されている

力学的エネルギーは運動エネルギー、ばねの弾性エネルギーと位置エネルギーの和で求められる。

$$U = mv^2 / 2 + kx^2 / 2 + mga \quad (1)$$

3. エネルギー伝達速度のシミュレーション

3.1 一箇所にバネを配置した場合

バネに掛かる荷重を質量 m の小球と仮定した場合発生するエネルギーを U とする。小球がバネに接触すると上層から伝わったエネルギーの $1/3$ が一時的にバネに吸収される。残り $2/3$ のエネルギーはそのままバネを通り過ぎ下層の柱に伝わりと考える。また伝わったエネルギーがバネ上部に接触するまでの時間を 11 単位秒。バネに吸収された $U/3$ が下層の柱に伝わるまでの時間を 6 単位秒、残り $2U/3$ は一瞬にバネを通り過ぎると考えると通過する時間はゼロとなる。バネを通り過ぎたエネルギーがバネ下部から地盤面に到達するまでの時間は 8 単位秒とする。

図2、図3はそれぞれの力が移動する際に要する時間を表した。

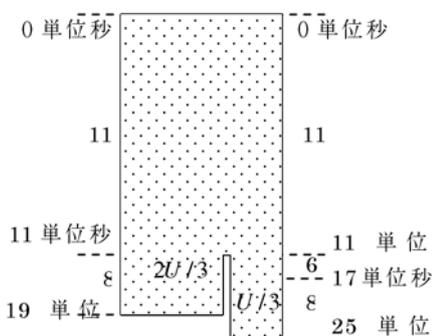
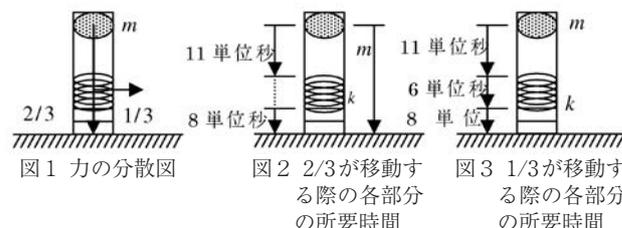


図4 力の分散と時間

よって、 U のうち $U/3$ は 6 単位秒遅れて下層へと伝わっていく。

3.2 二箇所にばねを配置した場合

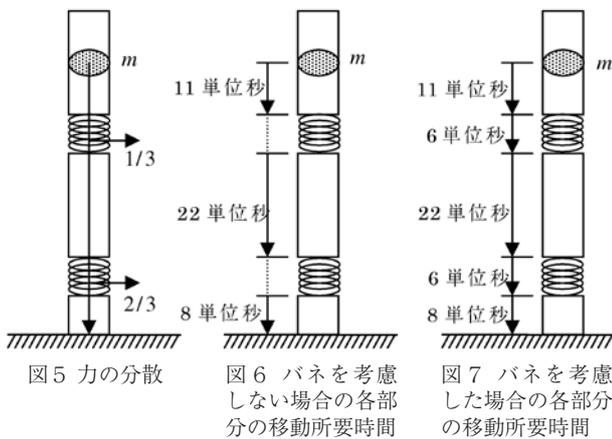
バネに掛かる荷重を質量 m の小球と仮定した場合

※平成18年度建築学科卒業生(現東京電気大)

合発生するエネルギーを U とする。小球がバネ 1 に接触すると上層から伝わったエネルギーの $1/3$ が一時的にバネに吸収される。残り $2/3$ のエネルギーはそのままバネを通り過ぎ下層の柱に伝わりと考える。バネ 2 に接触した場合も同様に質量は時間差で伝わっていく。

伝わったエネルギーがバネ 1 上部に接触するまでの時間を 11 単位秒。バネ 1 に吸収されたエネルギーが下層の柱に伝わるまでの時間を 6 単位秒、残りのエネルギーは一瞬でバネ 1 を通り過ぎると考える。よって掛かる時間はゼロである。上から伝わってきたエネルギーがバネ 1 下部からバネ 2 に接触するまでに掛かる時間は 22 単位秒。それぞれのエネルギーがバネ 2 下部から地盤面に到着するまでの時間は 8 単位秒とする。

図 6、図 7 はそれぞれの力が移動する際に要する時間を表した図である。



力の分散、時間の関係を図 8 に表す。よって、エネルギー U は 6 単位秒ごとに $4U/9$ 、 $4U/9$ 、 $U/9$ の三回に分かれて地盤面へと伝わっていく。

3.3 三箇所にはねを配置した場合

バネに掛かる荷重を質量 m の小球と仮定した場合発生するエネルギーを U とする。小球がバネ 1 に接触すると上層から伝わったエネルギーの $1/3$ が一時的にバネに吸収される。残り $2/3$ のエネルギーはそのままバネを通り過ぎ下層の柱に伝わりと考える。バネ 2 に接触した場合も同様に質量は時間差で伝わっていく。

伝わったエネルギーがバネ 1 上部に接触するまでの時間を 11 単位秒。バネ 1 に吸収されたエネルギーが下層の柱に伝わるまでの時間を 6 単位秒、残りのエネルギーは一瞬でバネ 1 を通り過ぎる

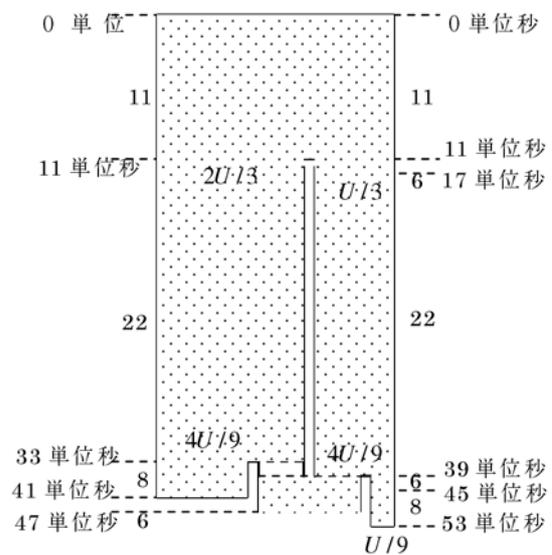
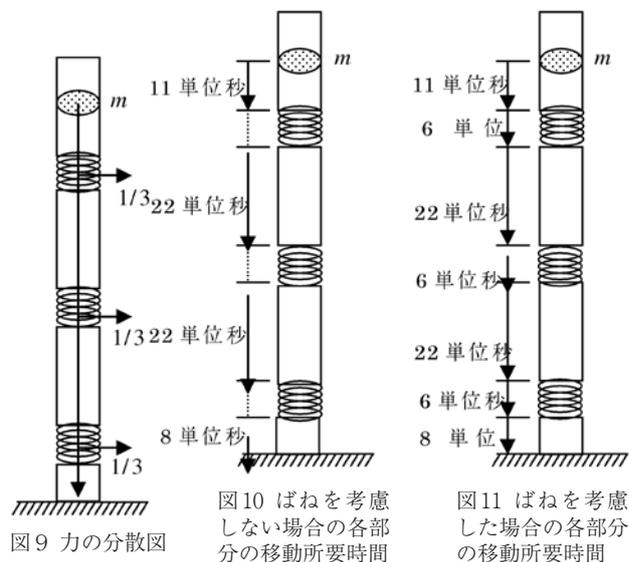


図 8 力の分散と時間

と考えると通過する時間はゼロである。上から伝わってきたエネルギーがバネ 1 下部からバネ 2 に接触するまでに掛かる時間は 22 単位秒。二層目も動揺と考える。それぞれのエネルギーがバネ 2 下部から地盤面に到着するまでの時間は 8 単位秒とする。図 10、図 11 はそれぞれの力が移動する際に要する時間を表した図である。



力の分散、時間の関係を図 12 に示す。よって、エネルギー U は 6 単位秒ごとに 4 回に分かれて地盤面へと伝わっていく。

4. 柱間にバネを設けた場合の模擬計算

4.1 1層の場合

基準位置をバネの上部とした。基準位置から見て高さ a の位置から質量 m の小球を落下させる。

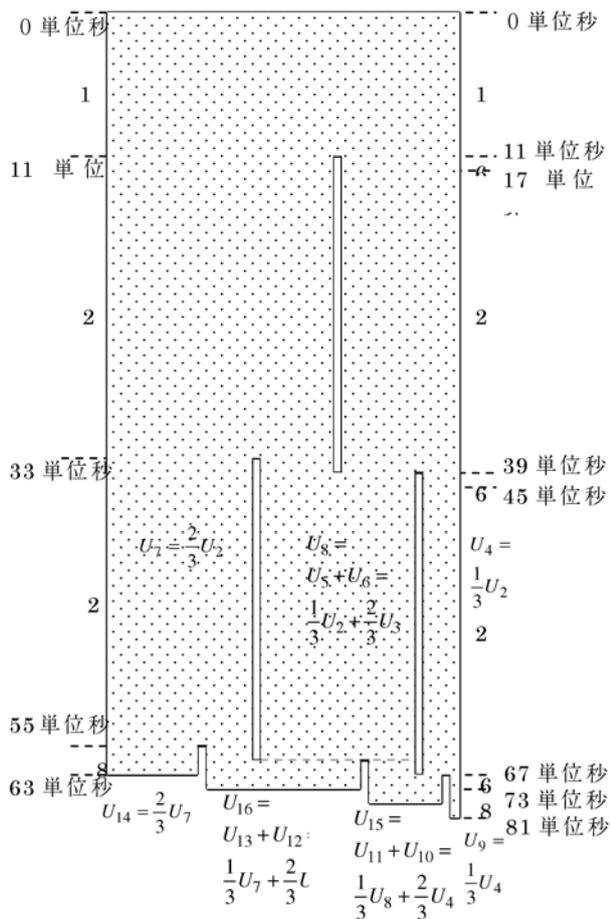


図12 力の分散と時間

そのときの小球の初速度は0、接触直後の速度は v と考える。バネの縮みは a' である。また落下高さはバネの縮みと等しい($a=a'$)と考える。(1)式から

$$\text{式から } U = mv^2/2 + mga' \text{ となる。}$$

そして、バネに1/3だけ力が吸収されるとききの力学的エネルギーは、(1)式から、上層から伝わった力のうち1/3をバネが負担すると考える。また、バネが a' まで縮みきったとき動きは静止しているから、速度はゼロである。よって、運動エネルギーはゼロになる。そして $a=a'$ であるから、 U は次式となる。

$$\begin{aligned} U &= W/3 + 0 + ka'/2 + mga' \\ &= (mv^2/2 + mga')/3 + ka'/2 + mga' \\ &= mv^2/6 + ka'/2 + 4mga'/3 \end{aligned}$$

4.2 2層の場合

基準位置をバネ②上部とする。基準位置から見て高さ $2a$ の位置から小球を落下させる。そのと

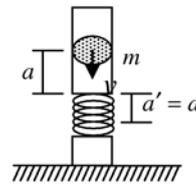


図13

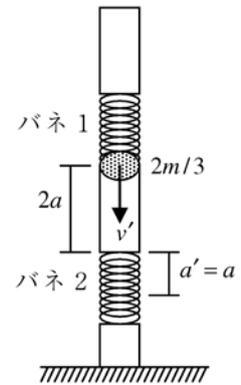


図14

きの小球の初速度は v 、バネ②に接触直後の速度は v' と考える。バネの縮みは a' とする。また、バネの縮みは落下高さの1/2である($a=a'$)。

ここで、上部より1/3の力が伝わった場合(図14)

①小球がバネに接触した瞬間の力学的エネルギーは(1)式から弾性エネルギーはゼロである。

$$U_1 = U/3 + mv'^2/2 + 2mga$$

②バネ2が基準位置から a' まで縮みきったときの力学的エネルギーは

$U = mv^2/2 + ka'/2 + 2mga$ で、伝わった力 $U/3$ のうち1/3をバネが負担すると考える。また、バネは縮みきっているので静止していると考え、速度はゼロとなる。よって運動エネルギーはゼロである。

$$U_2 = \left(\frac{1}{3} \times \frac{1}{3} U \right) + 0 + \frac{1}{2} ka + mg(2a)$$

$$U_2 = \frac{1}{3} U + \frac{1}{2} ka + 2mga$$

4.3 上部より2/3の力が伝わった場合(図15)

①小球がバネに接触した瞬間の力学的エネルギーは(1)式から弾性エネルギーはゼロであるので、

$$U_1 = 2U/3 + mv'^2/2 + 0 + mg(2a)$$

②バネ2が基準位置から a' まで縮みきったときの力学的エネルギーは(1)式から上層から伝わった力 $2U/3$ のうち1/3をバネが負担すると考える。

また、バネは縮みきっているので静止していると考え、速度はゼロとなる。よって運動エネルギーはゼロである。

$$U_2 = \left(\frac{1}{3} \times \frac{2}{3} U \right) + 0 + \frac{1}{2} ka + mg(2a)$$

$$= 2U/9 + ka/2 + 2mga$$

このときバネ1から遅れて伝わってきた $U/3$ のうちバネ2に吸収されなかった力も同時に下部に伝わっていく。そして、バネに吸収されなかった力

$$U_3 = \left(\frac{2}{3} \times \frac{1}{3} U \right) + \frac{1}{2} mv^2 + mg(2a)$$

$$= 2U/9 + mv^2/2 + 2mga$$

下部に伝わる力を U とすると $U = U_2 + U_3$ なので、

$$U = 2U/9 + ka/2 + 2mga + 2U/9 + mv^2/2 + 2mga$$

4.3 3層の場合

図15のように3層の柱に地震力が作用した時、軸方向力 m が働いたとする。 m の落下速度を v とし、バネ1の縮み長さを a_1 、バネ2の縮み長さを a_2 、バネ3の縮み長さを a_3 とする。基準点を柱1の中央に設けたときの力学的エネルギー U は

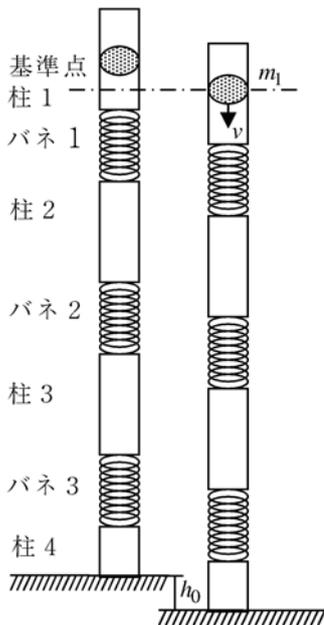


図15

$U = mv^2/2 + kx^2/2 + mga$ 式から

m = 軸方向力、 v = 速度、 g = 重力、 h = 基準点からの距離、 k = バネ定数、 x = バネの縮み長さとする。地震が発生すると、最初に地盤が下がる現象が起こる。

この現象により生まれる、力学的エネルギーを求める。バネの働きは関係していないので、弾性エネルギーはゼロ。基準点から下向きの力なので位置エネルギーはマイナスになる。よって、

$$U_o = \frac{1}{2} Mv_o^2 - Mgh_o \quad (2)$$

このとき v_o = 沈下速度、 h_o = 沈下深さとする。

4.4 一層目の計算

① 軸方向力 m が、バネ1に接触した瞬間の力学的エネルギー U_1 を求める。バネに接触する前なので弾性エネルギーはゼロ。基準点から下向きの力なので位置エネルギーはマイナスになる。また、地盤沈下時のエネルギーも加わる。よって、

$$U_1 = m_1 v^2 / 2 - m_1 g h_1 + 0 + U_o$$

$$= m_1 v^2 / 2 + Mv_o^2 - m_1 g h_1 - Mgh_o \quad (3)$$

② (3)式のエネルギーの2/3がバネ1に吸収されずそのまま通過する。つまり弾性エネルギーは生じず、位置エネルギーと運動エネルギーだけが発生する。バネを存在していないものと考えるので、軸方向力は m_1 のままである。バネ1の自然長さは h^1 とする。柱2に到達した瞬間のエネルギー U_2 は $2U_1/3$ と位置エネルギー、運動エネルギーを合わせたものである。よって、

$$U_2 = \frac{2}{3} U_1 + \frac{1}{2} m_1 v^2 - m_1 g (h_1 + a_1)$$

$$= \frac{5}{6} m_1 v^2 + \frac{1}{3} Mv_o^2 - \frac{5}{3} m_1 g h_1 - m_1 g a_1 - \frac{2}{3} Mgh_o \quad (4)$$

③ (4)式のエネルギーの1/3がバネ1に吸収される。バネが縮んでいる間の力学的エネルギー U_3 は $U_1/3$ とバネ1の力学的エネルギーを合わせたものである。バネの軸方向力を m_2 とし、バネ内を m_2 が伝わるスピードは柱内で変化しないものとする。よって、

$$U_3 = \frac{1}{3} U_1 + \frac{1}{2} m_2 v^2 - m_2 g (h_1 + x_1) + \frac{1}{2} kx_1^2$$

$$= \frac{1}{6} m_1 v^2 + \frac{1}{2} m_2 v^2 + \frac{1}{6} Mv_o^2 - \frac{1}{3} m_1 g h_1$$

$$- m_2 g h_1 - m_2 g x_1 - \frac{1}{3} Mgh_o + \frac{1}{2} kx_1^2 \quad (5)$$

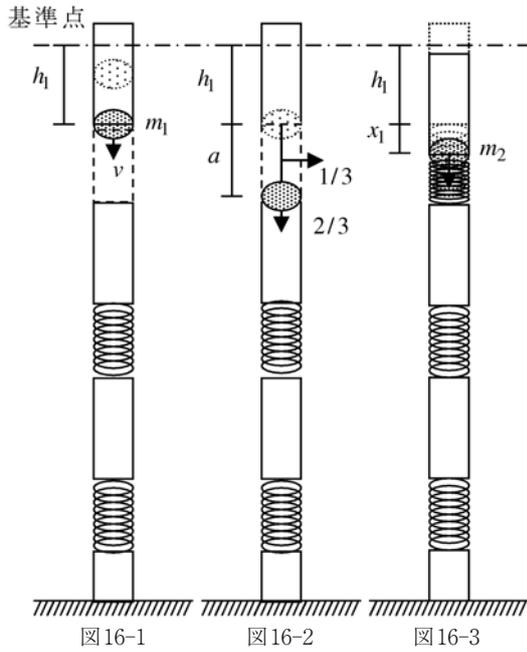


図16-1

図16-2

図16-3

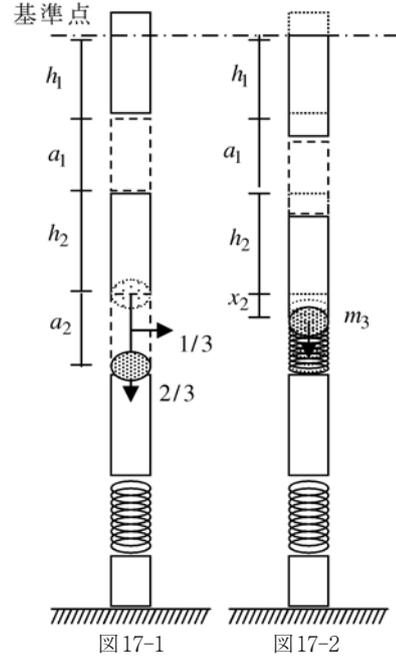


図17-1

図17-2

II：二層目の計算

① (5)式のエネルギーの2/3がバネ2に吸収されないで、そのまま通過する。つまり弾性エネルギーは生じず、位置エネルギーと運動エネルギーだけが発生する。バネを存在していないものと考えるので、軸方向力は m_1 のままである。バネ2の自然長さは a_2 とする。柱3に到達した瞬間のエネルギー U_4 は $2U_2/3$ と位置エネルギー、運動エネルギーを合わせたものである。よって、 U_4 は

$$\begin{aligned} U_4 &= \frac{2}{3}U_2 + \frac{1}{2}m_1v^2 - m_1g(h_1 + a_1 + h_2 + a_2) \\ &= \frac{19}{18}m_1v^2 + \frac{2}{9}Mv_o^2 - \frac{19}{9}m_1gh_1 - m_1gh_2 \\ &\quad - \frac{6}{3}m_1ga_1 - m_1ga_2 - \frac{4}{9}Mgh_o \end{aligned} \quad (6)$$

② (6)式のエネルギーの1/3がバネ2に吸収される。バネが縮んでいる間の力学的エネルギー U_5 は $U_2/3$ にバネ2の力学的エネルギーを合わせたものである。バネの軸方向力を m_3 とし、バネ内を m_3 が伝わるスピードは柱内と変化しないものとする。よって、

$$\begin{aligned} U_5 &= \frac{1}{3}U_2 + \frac{1}{2}m_3v^2 - m_3g(h_1 + a_1 + h_2 + x_2) + \frac{1}{2}kx_2^2 \\ &= \frac{5}{18}m_1v^2 + \frac{1}{2}m_3v^2 + \frac{1}{9}Mv_o^2 - \frac{5}{9}m_1gh_1 - \frac{1}{3}m_1ga_1 \\ &\quad - m_3gh_1 - m_3gh_2 - m_3ga_1 - m_3gx_2 - \frac{2}{9}Mgh_o + \frac{1}{2}kx_2^2 \end{aligned} \quad (7)$$

③ (7)式のエネルギーの2/3がバネ2に吸収されずそのまま通過する。つまり弾性エネルギーは生じず、位置エネルギーと運動エネルギーだけが発生する。バネを存在していないものと考えるので、軸方向力は m_1 のままである。バネ2の自然長さは h_2 とする。柱3に到達した瞬間のエネルギー U_6 は $2U_3/3$ と位置エネルギー、運動エネルギーを合わせたものである。よって、 U_6 は

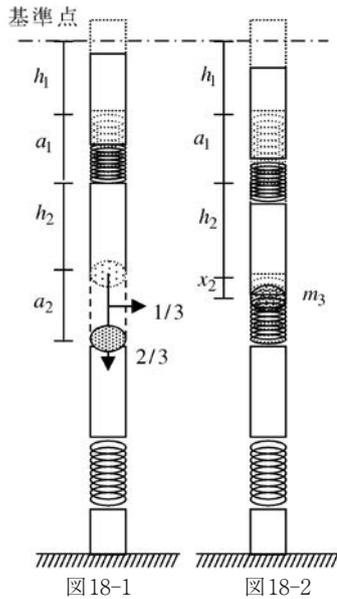
$$\begin{aligned} U_6 &= \frac{2}{3}U_3 + \frac{1}{2}m_1v^2 - m_1g(h_1 + a_1 + h_2 + a_2) \\ &= \frac{11}{18}m_1v^2 + \frac{1}{3}m_2v^2 + \frac{1}{9}Mv_o^2 - \frac{11}{9}m_1gh_1 - m_1ga_2 \\ &\quad - m_1ga_1 - m_1ga_2 - \frac{2}{3}m_2gh_1 - \frac{2}{3}m_2gx_1 - \frac{2}{9}Mgh_o \\ &\quad + \frac{1}{3}kx_1^2 \end{aligned} \quad (8)$$

④ (8)式のエネルギーの1/3がバネ2に吸収される。バネが縮んでいる間の力学的エネルギー U_7 は $1/3U_3$ とバネ2の力学的エネルギーを合わせたものである。バネの軸方向力を m_3 とし、バネ内を m_3 が伝わるスピードは柱内と変化しないものとする。よって、

$$\begin{aligned} U_7 &= \frac{1}{3}U_3 + \frac{1}{2}m_3v^2 - m_3g(h_1 + a_1 + h_2 + x_2) + \frac{1}{2}kx_2^2 \\ &= \frac{1}{18}m_1v^2 + \frac{1}{6}m_2v^2 + \frac{1}{2}m_3v^2 + \frac{1}{18}Mv_o^2 - \frac{1}{9}m_1gh_1 \\ &\quad - \frac{1}{3}m_2gh_1 - \frac{1}{3}m_2gx_1 - m_3gh_1 - m_3gh_2 - m_3ga_1 \\ &\quad - m_3gx_2 - \frac{1}{9}Mgh_o + \frac{1}{6}kx_1^2 + \frac{1}{2}kx_2^2 \end{aligned} \quad (9)$$

Ⅲ：3層目の計算

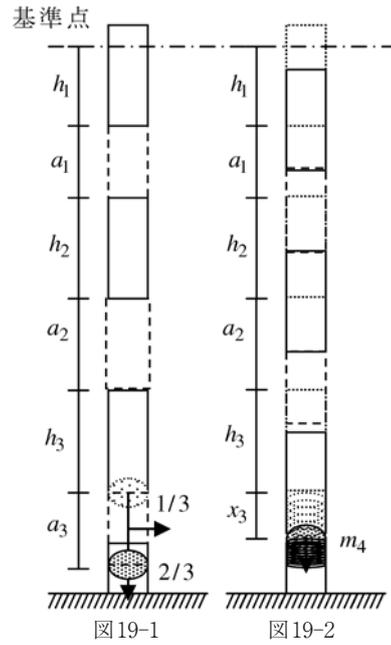
① (9)式のエネルギーの2/3がバネ3に吸収されずそのまま通過する。つまり弾性エネルギーは生じず、位置エネルギーと運動エネルギーだけが発生する。バネを存在していないものと考えるので、軸方向力は m_1 のままである。バネ3の自然長さは h_3 とする。柱4に到達した瞬間のエネルギー U_8 は $2U_4/3$ と位置エネルギー、運動エネルギーを合わせたものである。よって、



$$\begin{aligned}
 U_8 &= \frac{2}{3}U_4 + \frac{1}{2}m_1v^2 - m_1g(h_1 + a_1 + h_2 + a_2 + h_3 + a_3) \\
 &= \frac{65}{54}m_1v^2 + \frac{4}{27}Mv_o^2 - \frac{65}{27}m_1gh_1 - \frac{5}{3}m_1gh_2 - m_1gh_3 \\
 &\quad - \frac{7}{3}m_1ga_1 - \frac{5}{3}m_1ga_2 - m_1ga_3 - \frac{8}{27}Mgh_o \quad (10)
 \end{aligned}$$

② (10)式のエネルギーの1/3がバネ3に吸収される。バネが縮んでいる間の力学的エネルギー U_9 は $U_4/3$ にバネ3の力学的エネルギーを合わせたものである。バネの軸方向力を m_4 とし、バネ内を m_4 が伝わるスピードは柱内と変化しないものとする。よって、

$$\begin{aligned}
 U_9 &= \frac{1}{3}U_4 + \frac{1}{2}m_4v^2 \\
 &\quad - m_4g(h_1 + a_1 + h_2 + a_2 + h_3 + x_3) + \frac{1}{2}kx_3^2 \\
 &= \frac{19}{54}m_1v^2 + \frac{1}{2}m_4v^2 + \frac{2}{27}Mv_o^2 - \frac{19}{9}m_1gh_1 - m_1gh_2 \\
 &\quad - \frac{6}{3}m_1ga_1 - m_1ga_2 - m_4gh_1 - m_4gh_2 - m_4gh_3 \\
 &\quad - m_4ga_1 - m_4ga_2 - m_4gx_3 - \frac{4}{9}Mgh_o + \frac{1}{2}kx_3^2 \quad (11)
 \end{aligned}$$



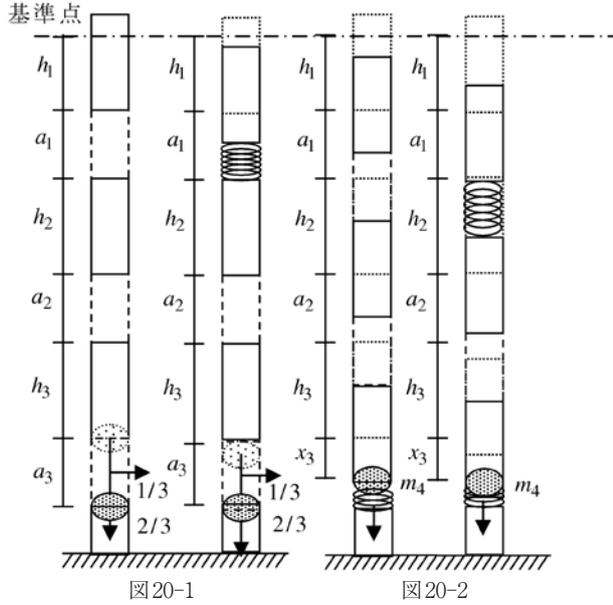
③ (10)、(11)式のエネルギーは同時に柱3に伝わる。

$$\begin{aligned}
 U_5 + U_6 &= \frac{16}{18}m_1v^2 + \frac{1}{3}m_2v^2 + \frac{5}{6}m_3v^2 + \frac{2}{9}Mv_o^2 - \frac{16}{9}m_1gh_1 \\
 &\quad - m_1gh_2 - \frac{4}{3}m_1ga_1 - m_1ga_2 - \frac{2}{3}m_2gh_1 - \frac{2}{3}m_2gx_1 \\
 &\quad - m_3gh_1 - m_3gh_2 - m_3ga_1 - m_3gx_2 - \frac{4}{9}Mgh_o \\
 &\quad + \frac{1}{3}kx_1^2 + \frac{1}{2}kx_2^2 \quad (12)
 \end{aligned}$$

(12)式のエネルギーの2/3がバネ3に吸収されずそのまま通過する。つまり弾性エネルギーは生じず、位置エネルギーと運動エネルギーだけが発生する。バネを存在していないものと考えるので、軸方向力は m_1 のままである。バネ3の自然長さは h_3 とする。柱4に到達した瞬間のエネルギー U_{10} は $2(U_5 + U_6)/3$ と位置エネルギー、運動エネルギーを合わせたものである。よって、

$$\begin{aligned}
 U_{10} &= 2(U_5 + U_6)/3 + \frac{1}{2}m_1v^2 \\
 &\quad - m_1g(h_1 + a_1 + h_2 + a_2 + h_3 + a_3) \\
 &= \frac{43}{54}m_1v^2 + \frac{2}{9}m_2v^2 + \frac{5}{9}m_3v^2 + \frac{4}{27}Mv_o^2 - \frac{59}{27}m_1gh_1 \\
 &\quad - \frac{5}{3}m_1gh_2 - m_1gh_3 - \frac{17}{9}m_1ga_1 - \frac{5}{3}m_1ga_2 - m_1ga_3 \\
 &\quad - \frac{4}{9}m_2gh_1 - \frac{4}{9}m_2gx_1 - \frac{2}{3}m_3gh_1 - \frac{2}{3}m_3gh_2 - \frac{2}{3}m_3ga_1 \\
 &\quad - \frac{2}{3}m_3gx_2 - \frac{8}{27}Mgh_o + \frac{2}{9}kx_1^2 + \frac{1}{3}kx_2^2 \quad (13)
 \end{aligned}$$

④ (13) 式のエネルギーの1/3がバネ3に吸収される。バネが縮んでいる間の力学的エネルギー U_{11} は $(U_5+U_6)/3$ とバネ3の力学的エネルギーを合わせたものである。バネの軸方向力を m_4 とし、バネ内を m_4 が伝わるスピードは柱内と変化しないものとする。よって、



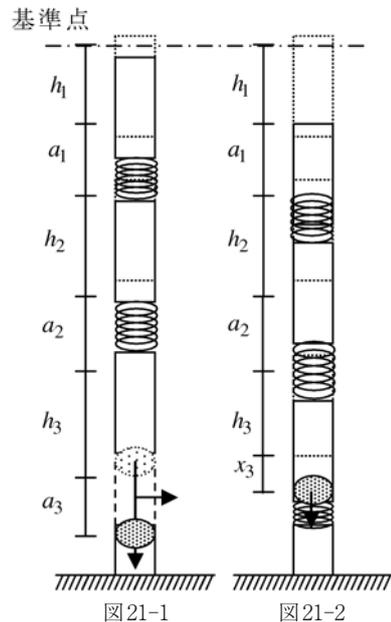
$$\begin{aligned}
 U_{11} &= \frac{1}{3}(U_5 + U_6) + \frac{1}{2}m_4v^2 \\
 &\quad - m_4g(h_1 + a_1 + h_2 + a_2 + h_3 + x_3) + \frac{1}{2}kx_3^2 \\
 &= \frac{25}{54}m_1v^2 + \frac{1}{9}m_2v^2 + \frac{5}{18}m_3v^2 + \frac{1}{2}m_4v^2 + \frac{2}{27}Mv_o^2 \\
 &\quad - \frac{16}{27}m_1gh_1 - \frac{1}{3}m_1gh_2 - \frac{4}{9}m_1ga_1 - \frac{1}{3}m_1ga_2 - \frac{2}{9}m_2gh_1 \\
 &\quad - \frac{2}{9}m_2gx_1 - \frac{1}{3}m_3gh_1 - \frac{1}{3}m_3gh_2 - \frac{1}{3}m_3ga_1 - \frac{1}{3}m_3gx_2 \\
 &\quad - m_4gh_1 - m_4gh_2 - m_4gh_3 - m_4ga_1 - m_4ga_2 - m_4gx_3 \\
 &\quad - \frac{4}{27}Mgh_o + \frac{1}{9}kx_1^2 + \frac{1}{9}kx_2^2 + \frac{1}{2}kx_3^2
 \end{aligned} \tag{14}$$

⑤ (14) 式のエネルギーの2/3がバネ3に吸収されずそのまま通過する。つまり弾性エネルギーは生じず、位置エネルギーと運動エネルギーだけが発生する。バネを存在していないものと考えるので、軸方向力は m_1 のままである。バネ3の自然長さは h_3 とする。柱4に到達した瞬間のエネルギー U_{12} は $2U_7/3$ と位置エネルギー、運動エネルギーを合わせたものである。よって、

$$\begin{aligned}
 U_{12} &= \frac{2}{3}U_7 + \frac{1}{2}m_1v^2 - m_1g(h_1 + a_1 + h_2 + a_2 + h_3 + a_3) \\
 &= \frac{28}{54}m_1v^2 + \frac{1}{9}m_2v^2 + \frac{1}{3}m_3v^2 + \frac{1}{27}Mv_o^2 - \frac{29}{27}m_1gh_1 \\
 &\quad - m_1gh_2 - m_1gh_3 - m_1ga_1 - m_1ga_2 - m_1ga_3 - \frac{2}{9}m_2gh_1 \\
 &\quad - \frac{2}{9}m_2gx_1 - \frac{2}{3}m_3gh_1 - \frac{2}{3}m_3gh_2 - \frac{2}{3}m_3ga_1 - \frac{2}{3}m_3gx_2 \\
 &\quad - \frac{2}{27}Mgh_o + \frac{2}{28}kx_1^2 + \frac{1}{3}kx_2^2
 \end{aligned} \tag{15}$$

⑥ (15) 式のエネルギーの1/3がバネ3に吸収される。バネが縮んでいる間の力学的エネルギー U_{13} は $U_7/3$ とバネ3の力学的エネルギーを合わせたものである。バネの軸方向力を m_4 とし、バネ内を m_4 が伝わるスピードは柱内と変化しないものとする。よって、

$$\begin{aligned}
 U_{13} &= \frac{1}{3}U_7 + \frac{1}{2}m_4v^2 \\
 &\quad - m_4g(h_1 + a_1 + h_2 + a_2 + h_3 + x_3) + \frac{1}{2}kx_3^2 \\
 &= \frac{1}{54}m_1v^2 + \frac{1}{18}m_2v^2 + \frac{1}{6}m_3v^2 + \frac{1}{2}m_4v^2 + \frac{1}{54}Mv_o^2 \\
 &\quad - \frac{1}{27}m_1gh_1 - \frac{1}{9}m_2gh_1 - \frac{1}{9}m_2gx_1 - \frac{1}{3}m_3gh_1 \\
 &\quad - \frac{1}{3}m_3gh_2 - \frac{1}{3}m_3ga_1 - \frac{1}{3}m_3gx_2 - m_4gh_1 - m_4gh_2 \\
 &\quad - m_4gh_3 - m_4ga_1 - m_4ga_2 - m_4gx_1 - \frac{1}{27}Mgh_o \\
 &\quad + \frac{1}{18}kx_1^2 + \frac{1}{6}kx_2^2 + \frac{1}{2}kx_3^2
 \end{aligned} \tag{16}$$



5. おわりに

建物の最下階の柱に作用する衝撃を緩和するために各階の柱に衝撃吸収バネを設置すれば、衝撃エネルギーを時間差で分散できることが分かった図23から、エネルギー U_8 が最初に地盤へと伝わ

る。その後、 U_{16} 、 U_{17} の順に伝わり、最後に U_{13} が伝わることになる。今後、質点の上下振動特性を精密に把握することが必要になる。また、バネや柱材が衝撃エネルギーをどのように伝えるかを検証する必要がある。

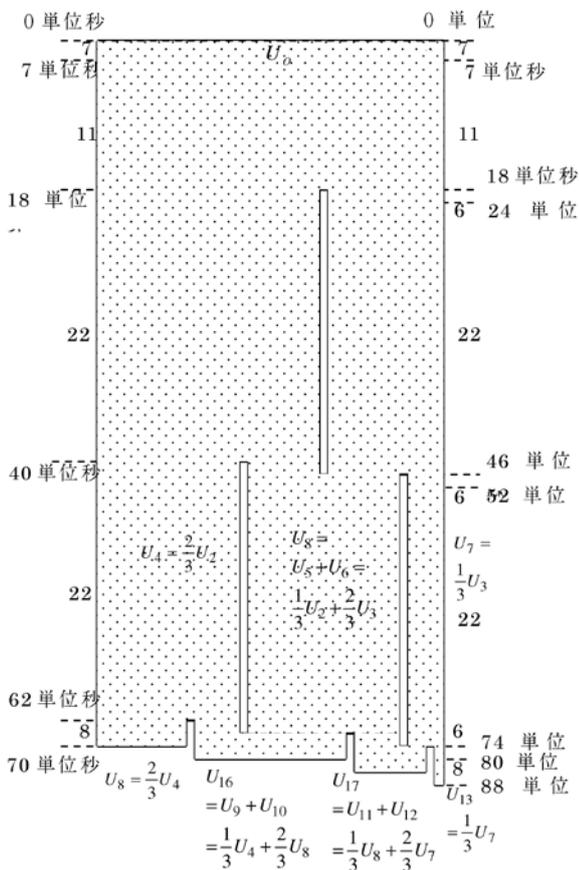
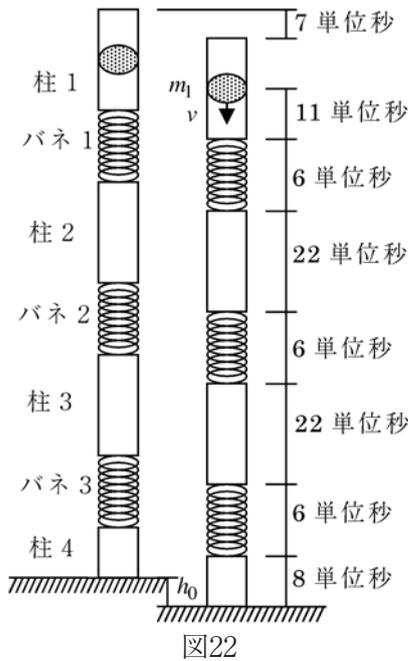


図23