

(株)神戸製鋼所 正会員 中 西 光
同 同 渡 田 凱 夫

1. まえがき 本報は、道路上に設けられた落石防護工などを対象として、衝撃力を受ける骨組構造物の応答を計算する一つの方法を示すものである。この種の構造物の実用設計計算式を作成することを目的として、構造系をつぎのようにモデル化して弾塑性衝撃応答をできるだけ簡略に求めることを考える。①骨組自体の質量は無視できるものとし、骨組構造を一つのバネとして取り扱う。②バネの力と変形の関係については、塑性ヒンジ理論を用いた弾塑性解析を行なう。③サンドクッションなどの緩衝材を有する場合には、その緩衝材もバネに置換する。以下に、塑性ヒンジ理論を用いたエネルギー法による骨組構造の弾塑性解析を述べるとともに、落石防護工の衝撃応答をシミュレートすることを考え、緩衝材(砂)の動特性についての若干の実験結果およびその結果を用いた落石防護工の衝撃応答の試算結果を述べる。

2. 塑性ヒンジ理論に基づく骨組の弾塑性解析 材料の応力-歪み関係として完全弾塑性体と考え、塑性ヒンジの形成の条件として $(M/M_0)^2 + (N/N_0)^2 = 1$ とする。ここで M および N は材端の曲げモーメントおよび軸力であり、 M_0 および N_0 は全断面塑性のときのモーメントおよび軸力である。いま部材 ij の i 端および j 端の部材力をそれぞれ S_i および S_j (ともに 3×1 のベクトル) と表わし、 i 端のみに塑性ヒンジが形成されるとすると、塑性ヒンジ形成の条件式は

$$\|B S_i\|^2 = 1, \quad S_i = [N_i \ Q_i \ M_i]^T, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{N_0} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{1}{M_0} \end{bmatrix} \quad (1)$$

となる。 Q_i は i 端のせん断力である。格点 i の変位を U_i (3×1)、格点 j のそれを U_j とし、変位 U_i を弾性部分 U_{ei} と塑性部分 U_{pi} に分けて、 $U_i = U_{ei} + U_{pi}$

$$\begin{bmatrix} S_i \\ S_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{ii} & k_{ij} \\ k_{ji} & k_{jj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{ei} \\ U_j \end{bmatrix} \quad (2)$$

とする。 $k_{ii} \dots$ はともに 3×3 の弾性時の部材剛性行列である。このとき $S_i = (1 - \mu_i) [k_{ii} U_i + k_{ij} U_j] \dots \dots \dots (3)$ が成り立つとする。 μ_i は $0 < \mu < 1$ のスカラーである。式(1)~(3)より

$$\mu_i = 1 - 1 / \|B(k_{ii} U_i + k_{ij} U_j)\|^2, \quad S_j = (1 - \mu_i) k_{ji} U_i + (k_{jj} - k_{ji} k_{ii}^{-1} k_{ij}) U_j$$

となる。したがって、 i 端に塑性ヒンジを生じたとときの部材 ij の剛性行列はつぎに示すものとなる。

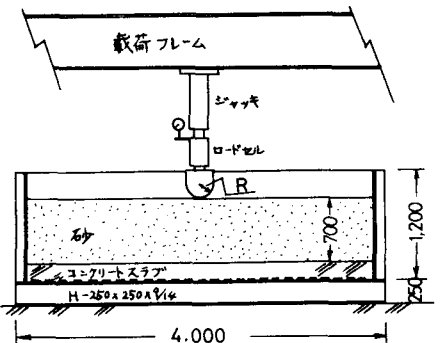
$$\begin{bmatrix} (1 - \mu_i) k_{ii} & (1 - \mu_i) k_{ij} \\ (1 - \mu_i) k_{ji} & k_{jj} - \mu_i k_{ji} k_{ii}^{-1} k_{ij} \end{bmatrix}$$

部材 ij の両端に塑性ヒンジを生ずるときの部材剛性行列は同様に

$$\begin{bmatrix} (1 - \mu_i) k_{ii} & (1 - \mu_i) k_{ij} \\ (1 - \mu_j) k_{ji} & (1 - \mu_j) k_{jj} \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} \mu_i &= 1 - 1 / \|B(k_{ii} U_i + k_{ij} U_j)\|^2 \\ \mu_j &= 1 - 1 / \|B(k_{ji} U_i + k_{jj} U_j)\|^2 \end{aligned}$$

である。塑性ヒンジが形成された場合には、これらの修正された部材剛性行列を用いて歪みエネルギーあるいは全ポテンシャルエネルギーを求め(エネルギー法の数値解析については文献¹⁾等を参照)

3. 落石防護工の緩衝材(砂)の動特性についての実験 落石防護工の緩衝部(砂層)をとり出して、砂層厚も70cmとした場合の静的載荷実験および重錘落下による衝撃実験を行なった。図1に静的載荷実験の概要および重錘の諸元を示す。砂層は湿润状態で、含水率は約7%である。図2に二体の重錘についての実験で得られた荷重-



重錘	重量	質量	半径R
A	0.28 t _w	0.0286 t	30 cm
B	0.86	0.0878	45

図1 静的載荷実験の概要および重錘

変位関係を示す。この荷重-変位関係を図中に示したように直線AおよびBで近似すると、それぞれの場合のバネ定数 k_A および k_B と表わす)は、 $k_A = 6.18 \text{ t/m}$ 、 $k_B = 1.44 \text{ t/m}$ である。

つぎに表1に重錘落下実験の結果を示す。重錘落下高さは3mおよび5mの2種類とした。表1最右欄の減衰比は、粘性減衰を持つ1質点線形バネ系において、質量 m が初速度 $\sqrt{2gH}$ で運動する場合の最大加速度が

$$\ddot{x} = \omega \sqrt{\frac{2gH}{1-k}} e^{-h\omega t_0} \sin \sqrt{1-k} \omega t_0$$

$$\omega = \sqrt{k/m}, \quad t_0 = \frac{2}{\omega \sqrt{1-k}} \tan^{-1} \left(\frac{1-k}{h} \right), \quad g: \text{重力加速度}, H: \text{落下高さ}, k: \text{バネ定数}, m: \text{質量}, h: \text{減衰比}$$

となることから、実験で得られた最大加速度やバネ定数その他の諸元を上式に代入して、 h と求めたものである。

4. 落石防護工の衝撃応答の試算 図3に示す解析モデルについてAおよびBの2種類の重錘が高さ3mあるいは5mから落下する場合の応答の試算を行なう。計算は、2質点の運動方程式を立て、初期条件として質量 m_2 (重錘)の初速度を与えてRunge-Kutta-Gill methodにより数値積分を行なうものである。その際、各時刻ステップで質量 m_2 が存在する格点③が強制変位として前述の弾塑性解析を行なって質量 m_2 (砂床版)が受ける反力を算定する。

バネ定数 k および減衰比 h には、上述の実験で得られた値を用い、また部材断面諸元については、全部材ともヤング係数を 2×10^7 、断面積を 1.455×10^{-2} 断面2次モーメントを 6.04×10^{-6} 、 M_0 および N_0 とそれぞれ95.88および523.8、 m_2 を0.2429とした(単位: t, m, sec)。

計算の結果を図4~7に示す。図中のI~IVの曲線は表1の重錘落下実験に対応したものである。この試算では塑性ヒンジは生じていない。

5. あとがき 質量 m_2 の加速度計算値が実験値に比べて相当小さい値となっているが、この値はもちろん質量 m_2 の値や床版の剛性に由来する。これらについてもさらに実験的に検討していきたいと考えている。

参考文献
1) 渡田ら:「エネルギー法によるケーブル構造の解析」第26回年次学術講演会要集

参考文献

1) 渡田ら:「エネルギー法によるケー

ブル構造の解析」第26回年次学術講演会要集

図6 部材1上端の曲げモーメント

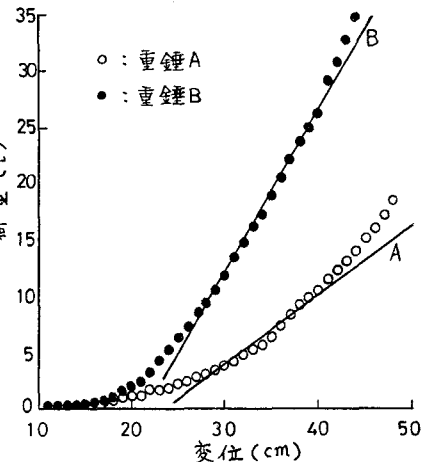


図2 荷重-変位関係(静的載荷実験結果)

表1 重錘落下実験の結果

	落下高さ	重錘	最大加速度	減衰比
I	3m	A	20.8 g	0.453
II	3	B	21.7	0.284
III	5	A	35.8	0.194
IV	5	B	33.2	0.146

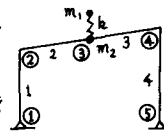


図3 解析モデル

表2 格点座標

	X	Y
1	0	0
2	0	-4.8
3	4.0	-5.55
4	8.0	-6.3
5	8.0	0

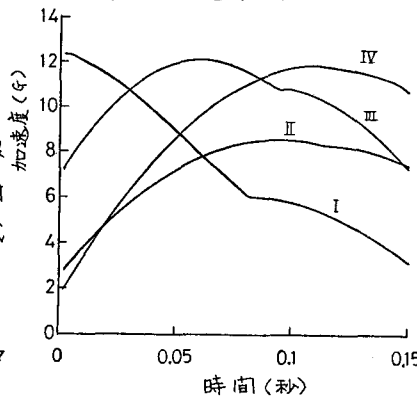


図4 落錘の加速度

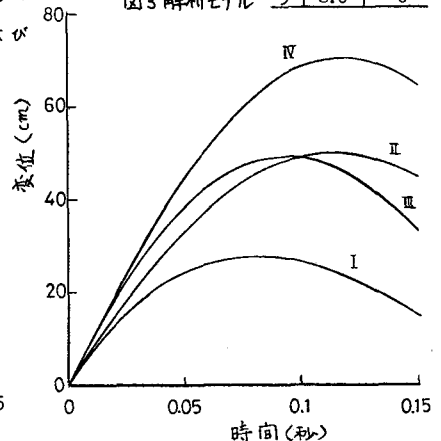
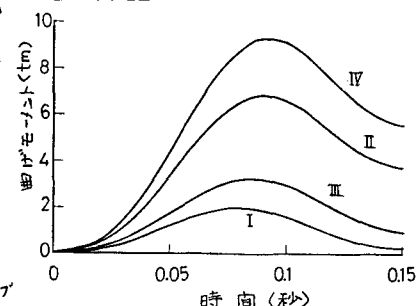


図5 落錘の変位

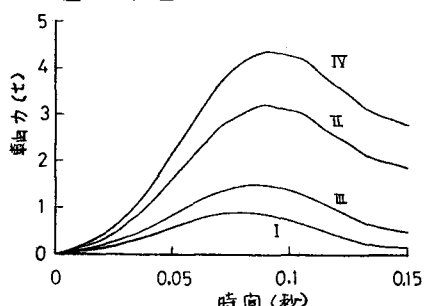


図7 部材1の軸力