（Ⅰ－27）ひずみ速度効果を考慮した鋼管はりの準静的解析

防衛大学校　土木工学教室　正員　○星川　辰雄
同　　　　　　上　　　　正員　石川　信隆

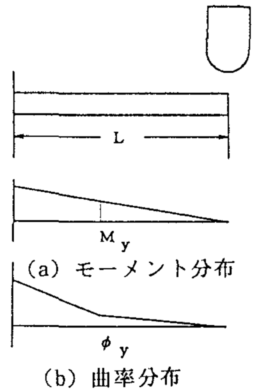
１．緒言　　物体の衝撃問題は、その衝突速度に応じ静的、準静的、動的および超高速問題に区分される。オープン式鋼製砂防構造物に巨礫が衝突する現象は、衝突速度が 10m/sec 以下と比較的低速度であり[1]、静的あるいは準静的 (ひずみ速度効果を考慮した静的) 問題とみなして良いと考えられる。しかし、準静的解析法についてはその解法が十分に確立されていない。そこで本研究では、単純な鋼管片持はりを対象として、静的問題に時間の概念を取り入れることにより、準静的問題として最大応答変位を求める方法を開発したものである。

２．準静的解析法－その１　　ここでは、N. Jones ら[2]の研究に対し、ひずみ速度効果の影響を考慮することにより、準静的解析法の確立を試みる。N.Jones らは、片持はりへの衝突による最大応答変位を、剛塑性理論を適用して、次式で提案している。

$$W_f = \frac{M^2V_0^2}{3mM_P}\left\{\frac{1}{(1+\bar{\alpha})^2} - 1 + 2\ln(1+\bar{\alpha}) + \bar{\alpha}(3+2\bar{\alpha})(1+\bar{\alpha})^2\right\} \tag{1}$$

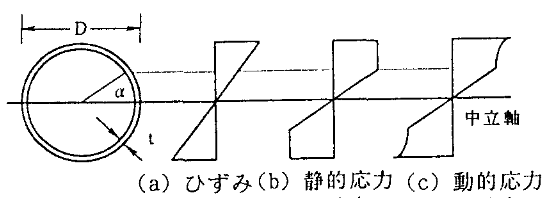
ただし、$\bar{\alpha} = mL/2M$ 、W_f :応答変位、M :衝突物の質量、m :はりの単位長さ当たり質量、V_0 :衝突速度、M_P : 降伏モーメント、L :はり長さ。ここで、巨礫のような比較的重量の大きな物体が鋼管はりに衝突する場合は、$mL \ll M$ ゆえ、$\bar{\alpha} \fallingdotseq 0$ となり、次式のようになる。

$$W_f = MV_0^2L/2M_P \tag{2}$$



図－１　モーメントおよび曲率分布図

次に、上記の式にひずみ速度効果の影響を導入する。まず、図－１のように片持はりのモーメント分布および曲率分布を仮定して、荷重～変位関係および支点部の曲率～載荷点変位関係を得る。ここで、Perrone ら[3]は、衝突物の全運動エネルギーの 1/2 が吸収された時点でのひずみ速度効果を導入すれば、解析結果は実験結果に良く一致すると報告している。したがって、荷重～変位関係から運動エネルギーの 1/2 をはりが吸収した時点での変位を求め、この変位での $d\phi/dW(=a)$ を曲率 ϕ ～変位 W 関係から求める。一方、曲率速度は次式により与えられる。



図－２　ひずみ、応力分布図

$$\begin{aligned}\dot{\phi} &= d\phi/dt = (d\phi/dW)\cdot(dW/dt)\\ &= a\cdot dW/dt = a\cdot V\end{aligned} \tag{3}$$

ここで、$dW/dt(=V)$ は変位速度であり、運動エネルギーの 1/2 が吸収された状態での速度は $V = V_0/\sqrt{2}$ であり、これを式 (3) に代入して $\dot{\phi}$ を算定すると、動的塑性モーメント M_P^d が、図－２のようなひずみ分布および応力分布を用いて、次式のように算定される。

$$M_P^d = \frac{4R^2t\sigma_y}{\sin\alpha}\left(\frac{1}{2}\alpha - \frac{1}{4}\sin 2\alpha\right) + 4R^2t\int_{\alpha}^{\frac{\pi}{2}} {}_d\sigma_y \sin\theta d\theta \tag{4}$$

ただし、${}_d\sigma_y = \sigma_y \cdot \{1.202 + 0.04\log(\dot{\phi}R\sin\theta)\}$ (5)

ここで、${}_d\sigma_y$:動的降伏応力[4]、σ_y : 静的降伏応力、R :鋼管半径。よって、式 (4) の M_P^d を用いて次式により最大応答変位を算定する。

$$W_f = MV_0^2 L/2M_P^d \tag{6}$$

3．準静的解析法－その２　　ここでは、応答時間 T_{end} を求めることにより、ひずみ速度効果を導入する。まず静的弾塑性解析により荷重～変位関係を得る。次に、衝突を受けるはりの加速度～時間関係、速度～時間関係および変位～時間関係を図－３のように仮定する。ここで、荷重～変位曲線上の任意の２点（A点，B点）を考える。この点の荷重、変位をそれぞれ (P_1,δ_1) 、(P_2,δ_2) とする。ここで、加速度は $P = M\alpha$ から $\alpha = P/M$ として求められ、各点の加速度を α_1 、α_2 とすると、それぞれ $\alpha_1 = P_1/M$ 、$\alpha_2 = P_2/M$ として与えられる。さて、加速度が α_1 から α_2 へと線形的に変化すると仮定して、この際の時間増分を Δt とすると、B点における速度 V_2 および変位 δ_2 は次式により与えられる。

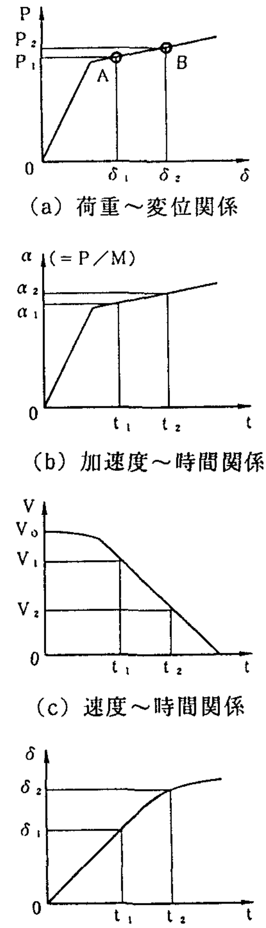
$$V_2 = V_1 - (\alpha_1 + \alpha_2)\Delta t/2 \tag{7}$$

$$\delta_2 = \delta_1 + (V_1 + V_2))\Delta t/2 \tag{8}$$

ここで、式(7)を式(8)に代入して Δt を求めると、

$$\Delta t = \frac{2V_1 - \sqrt{4V_1 - 4(\alpha_1 + \alpha_2)(\delta_2 - \delta_1)}}{\alpha_1 + \alpha_2} \tag{9}$$

このようにして、A点からB点に変化する際に要する時間 Δt が求められ、これを衝突直後から衝突物の全運動エネルギーを構造物が吸収するまで繰り返して行う。得られた応答時間 T_{end} によって最大曲率を除することにより、平均的な曲率速度 $\dot{\phi}_{ave}$ を、$\dot{\phi}_{ave} = \phi_{max}/T_{end}$ により算定する。この $\dot{\phi}_{ave}$ を用いて２項で述べた方法により動的降伏応力を算定し、荷重～変位関係を得る。得られた荷重～変位関係を用いて、はりの吸収エネルギー U が、衝突物の運動エネルギー E に等しくなるような最大応答変位 δ_{end} を算定する。



(a) 荷重～変位関係

(b) 加速度～時間関係

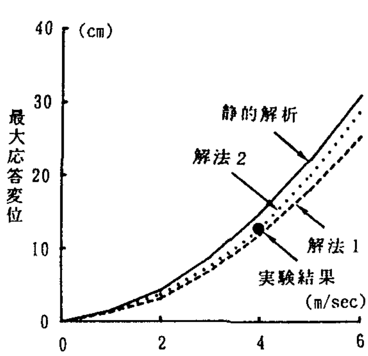
(c) 速度～時間関係

(d) 変位～時間関係

図－３　加速度、速度、変位 ～ 時間関係

4．数値計算例　　鋼管径 89.1mm、肉厚 3.2mm、スパン長 90cm の鋼管固定はりに対し、$W = 150kgf$ の重錘が衝突する場合について、速度をパラメータとした最大応答変位の相違を明らかにする。

図－４に計算により得られた最大応答変位～衝突速度関係を示す。図において、解法１および２とは、前記の解析法その１およびその２を意味する。図より、解法１は剛塑性体とみなしての解であるのに対し、解法２は弾塑性体としているので解法１の方が若干小さめの変位を表しているが、いずれの方法も静的解析結果に比べひずみ速度効果の影響により小さな変位となることが認められる。また、図中の ● 印は著者ら[5]が行った実験結果を示したもので、これからも本解析法の妥当性が認められる。



図－４　応答変位 ～ 衝突速度関係

参考文献 1)（財）砂防・地すべり技術センター，鋼製砂防構造物委員会：鋼製砂防構造物設計便覧　2) N. Jones : Structural Impact, Cambridge University Press, 1989　3) Perrone et al.:A simplified method to account for plastic rate sensitivity with large deformation, Journal of Applied Mechanics, 46, 811-16,1979　4) 高橋ら：ひずみ速度効果を考慮した鉄筋コンクリートはりの衝撃曲げ応答解析，構造工学論文集，Vol.32 A，pp.669～682，1986年3月　5) 斉藤ら：鋼管片持はりの衝撃吸収エネルギーに関する基礎的研究，土木学会論文集，第386号/I－8，pp.321～328，1987年10月