

I-326 剛体形状の影響による平板の落下衝撃力

専修大学北海道短大
室蘭工業大学

正員 三上敬司
正員 松岡健一

日本大学生産工学部
専修大学北海道短大
電力中央研究所

正員 能町純雄
正員 金子孝吉
正員 伊藤千浩

1. まえがき

電力中央研究所では、原子力発電所格納施設への衝撃荷重に対する完全余裕度を検討するために種々の衝撃実験を行っている。荷重としては、 N_2 圧搾ガスによって鋼製の硬質な模擬飛来物（ハンマー）をスラブに中速度で衝突させた場合のものである。この実験の目的は、その先端形状をフラット半球、円錐、中空円筒とした場合に鉄筋コンクリートスラブおよびプレストレストコンクリート製スラブが耐衝撃性に関してどのような影響を及ぼすか検討するために行った。^{1), 2)}

そこで、本論文は、ハンマーの種々の形状に関する影響をHertz理論を用いて衝撃力等を求めた。^{3), 4)} その理論値と実験より求められた衝撃力等との比較検討を行った。

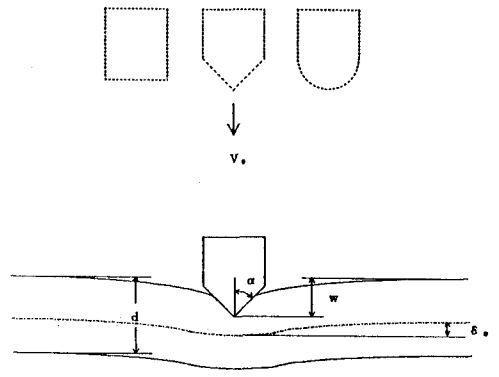


図-1 本論におけるモデル

2. 理論解析

図-1に示したように、密度 ρ 、ポアソン比 ν 、弾性係数 E 、厚さ d である無限平板上へ質量 M 、半径 a の剛体（先端形状がそれぞれ平底、球底、錐底）が衝突速度 V_0 で衝突した場合の衝撃力 P を求める。半径方向 r 、円周方向 θ とし、無限平板の中立軸の鉛直変位 δ に関する平板の振動方程式は、次式となる。

$$\rho d \frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} + D \left[\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right] \delta = P \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、板の剛度： $D = E d^3 / 12(1 - \nu^2)$

平板の局部変位は重錐の底の形状によって以下に示す式となる。

$$w = k P^n \quad \left. \begin{array}{ll} \text{平底の場合} & n=1 \quad k = \frac{1-\nu^2}{2Ea} \\ \text{錐底の場合} & n=1/2 \quad k = \left(\frac{(1-\nu^2)\pi}{2E a n \alpha} \right)^{\frac{1}{n}} \\ \text{球底の場合} & n=2/3 \quad k = \left(\frac{9(1-\nu^2)^2}{16E^2 a} \right)^{\frac{1}{n}} \end{array} \right\} \quad \dots \dots \dots (2)$$

(1) 式を $\delta = r J_0(r \xi)$ とおいてBessel変換し、さらに逆変換した式、(2) 式と剛体の運動方程式をそれぞれLaplace変換して、さらに逆変換すると衝撃力 $P(t)$ に関する非線形積分方程式となる。

$$k P^n(t) + \frac{1}{\beta} \int_0^t P(\tau) d\tau + \frac{1}{M} \int_0^t P(\tau) (t - \tau) d\tau = V_0 t \quad \dots \dots \dots (3)$$

ただし、平底の場合 $P = V_0 e^{-b\omega t} \sin(\omega_1 t) / k \omega_1$ 、ところで、 $\beta = 8 \sqrt{\rho D d}$

$$b = \sqrt{3Ma/2\rho/4d^2} \quad , \quad \omega = 1/Mk, \quad \omega_1 = \omega \sqrt{1 - b^2}$$

3. 数値計算例

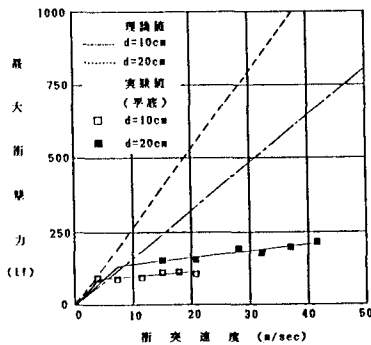
表-1には、実験の供試体の物性値を示し、供試体の寸法は150cm×150cm×20cmであり、重錘の質量 M は

70kgf、半径 $r=4.9\text{cm}$ である。また、理論解析においても同様の値を用いている。

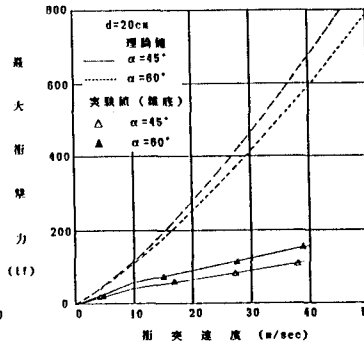
図-2は、重錘の先端形状がそれぞれ平底、錐底、球底に関する最大衝撃力と衝突速度との関係である。平板の厚さ $d=10\text{cm}$ の場合、低速度での立ち上がりの傾きは理論値と実験値と比較的よく一致しているが、 $d=20\text{cm}$ では、理論値の方が2倍近くの傾きを示している。さらに、高速度になるとコンクリートスラブは、表面の局部破壊、スポーリング破壊などが生じて傾きが急に変化をして緩くなり、一方、理論値は立ち上がりの傾きと同じ傾きで直

表-1 供試体の物性値

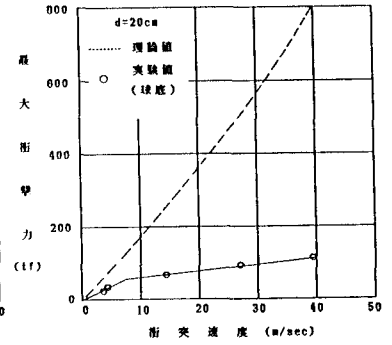
先端形状	密度 (tf/m^3)	静弾性係数 (tf/m^2)	ポアソン比
平底	2.2	2.31×10^7	0.16
錐底 $\alpha=45^\circ$ $\alpha=60^\circ$	2.21	2.19×10^7	0.19
	2.19	2.03×10^7	0.15
球底	2.26	2.26×10^7	0.17



(a) 平底の場合



(b) 錐底の場合



(c) 球底の場合

図-2 最大衝撃力と衝突速度の関係図

線的に増加している。さらに、図-1(b)、(c)に関しても平底の場合と同様な傾向にあるが、理論値はそれぞれ二次、三次曲線で増加している。実験値の方は、スラブの表面および裏面が $V_0=10(\text{m/sec})$ の前後で局部破壊やスポーリング破壊を起こして直線の傾きが急に緩やかになる。

4. あとがき

低速度の衝撃力は、 $d=10\text{cm}$ の平底の場合、比較的理论値と一致したが、 $d=20\text{cm}$ の低速での衝撃力は、先端形状に関係なく2倍近く大きい値となった。また、速度が大きくなるにつれて、理論値と実験値とは徐々にかけ離れた値となった。最大衝撃力と衝突速度との関係で、急激に傾きが緩やかになると言うことは、衝突速度が $10(\text{m/sec})$ あたりで、スラブが弾性的な挙動から塑性的な挙動へ移行していると思われる。今後は、板厚の影響、表面破壊の影響について検討を行うつもりである。

本論文においての数値計算は、文部省科学研究費（試験研究(1)-課題番号:62850089）の補助を受けて北海道大学大型計算機センターのHITAC-682Hを使用して行った。

[参考文献]

- 1) H.Ohnuma, C.Itho, S.G.Nomachi: Dynamic Response and Local Rupture of Reinforced Concrete Beams and Slabs under Impact Loading、8th SMIRT、1985.
- 2) 伊藤千浩: 鉄筋コンクリートスラブの衝撃特性に及ぼす飛来物先端形状の影響、電力中央研究所報告、1985.
- 3) 三上敬司ほか: 剛体の落下衝撃力による平板の動的応答、土木学会北海道支部論文報告集、第45号、PP.187~192、1989.
- 4) 岩崎正二: 衝撃荷重を受ける平板の動的応答解析、岩手大学工学部研究報告、Vol.37、1984.