

的关系式 $\gamma_r = \sigma_r/c$, 换算的结果。 γ_r 最大处相差 5%。 这说明三维波的传播性质和二维 TS 波很不相同。 三维波的传播速度似与横向波数无关, 几乎以 TS 波的相速度传播。 这一比较说明在一些情况下用时间模式计算三维波的空间演化是可行的。

图 2 给出了理论计算的速度分布和 [1] 实测速度分布的比较。 空间模式优于时间模式。

三维亚谐波的增长率 γ , 随雷诺数 R 的变化有两方面因素。 若保持 A 不变, γ 随 R 均匀增大; 同时 R 增大 A 亦随之改变。 图 3 给出了二维 TS 波及三维亚谐波的幅值演化曲线。 其中:

$$\ln \frac{A}{A_0} = -2 \int_{R_0}^R \alpha_i dR; \quad \ln \frac{B}{B_0} = 2 \int_{R_0}^R \gamma_i dR.$$

在整个积分区间要求无量纲波数 $a = 10^3 \alpha_r/R$; $b = 10^3 \beta/R$ 不变。 显然在 $525 < R < 630$ 理论曲线与实测结果非常一致。 $R < 525$ 时, 与实验有偏差。 对此不宜太认真。 因这一位置刚好在振动片的下游, 三维波还没形成确定的相位^[1]。 $R > 630$ 时两者的偏差是由于非线性作用引起的。

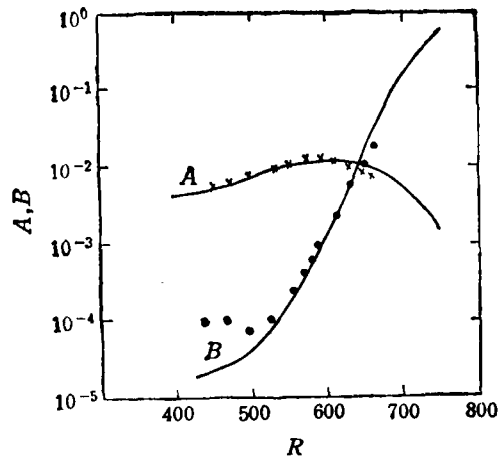


图 3 扰动幅值演化曲线

A TS 波 $A_0 = 0.0044$, B 三维亚谐波 $b = 0.33$
 $B_0 = 1.86 \times 10^{-3}$

—理论 · 实验^[1]

参 考 文 献

- [1] Kacharov, Yu. S. & Levchenko, V. Ya., *J. Fluid Mech.*, 138 (1984), 209—247.
[2] Herbert, T., AIAA paper No. 84-0009 (1984).
[3] Zhou, H., *Proc. R. Soc. Lond.*, A381 (1982), 407—418.

(本文 1991 年 12 月 22 日收到)

平原水库静冰压力推坡计算*

李洪升 曹富新 杨春秋
(大连理工大学工程力学系, 116023)

提要 本文进行了冰压力推坡计算研究, 即在冰推力下, 堤坝护坡结构强度校核问题, 采用不同方法计算了冰压力的推坡作用, 给出了计算实例。

关键词 冰压力, 护坡, 推坡计算

1. 引言

水库护坡的冰冻破坏是我国三北(东北、西北、华北)地区普遍存在的问题, 也是亟需解决的重大水利技术课题。尤其是水浅, 坝长库区开阔的平原水库, 护坡的冰冻问题一直是工程管理上的老大难问题。目前, 有关冰压力形成

的机理及冰压力取值问题还没有搞清楚, 静冰压力的推坡计算仍属空白。在工程上, 虽然采取了一些防冰冻的措施也是临时性的, 没有从根本上解决冰冻破坏问题。本文进行了冰压力推坡计算的研究, 可为坝体和护坡的防冰冻设计提供参数, 为冻害防治措施提供依据。

2. 静冰压力推坡计算

2.1 受力分析 将护坡简化为地基板模型,

* 国家自然科学基金和城乡建设科学技术基金联合资助项目。

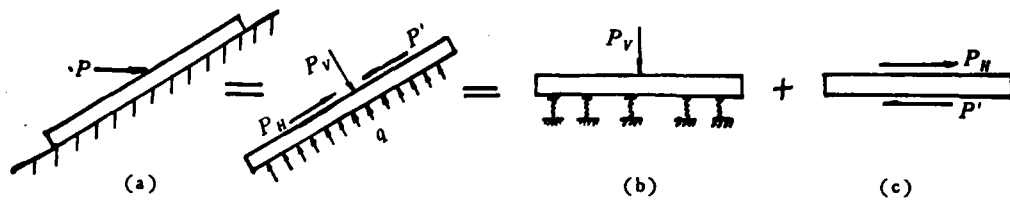


图1 护坡受力分析

并将其作为研究对象,受力情况如图 1(a),可以简化为图 1(b)、(c)的叠加。 P 为冰压力总和, P_V 、 P_H 分别为垂直坡面和平行坡面的分力, P' 是护坡板与坝体的摩擦力, q 是弹性地基反力。

2.2 按弹性地基板计算 一个大板支承于弹性地基上,并沿 x 轴承受等距离载荷 P ,如图 2 所示。其挠度公式为

$$W = W_0 + \sum_{m=2,4,6,\dots} Y_m \cos \frac{m\pi x}{a} \quad (1)$$

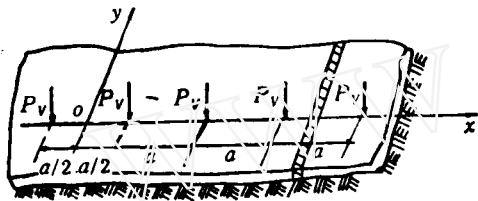


图 2

式中

$$W_0 = \frac{P\lambda}{2\sqrt{2ak}} e^{-\lambda y/\sqrt{2}} \left(\cos \frac{\lambda y}{\sqrt{2}} + \sin \frac{\lambda y}{\sqrt{2}} \right) \quad (2)$$

$$Y_m = A_m e^{-\beta_m y} \cos \gamma_m y + B_m e^{-\beta_m y} \sin \gamma_m y \quad (3)$$

使用符号

$$\mu_m = \frac{m\pi}{a}, \quad \frac{k}{D} = \lambda^2,$$

则

$$2\beta_m^2 = \sqrt{\mu_m^4 + \lambda^4} + \mu_m^2,$$

$$2\gamma_m^2 = \sqrt{\mu_m^4 + \lambda^4} - \mu_m^2$$

其中, k 为基础模数, D 为板的抗弯刚度。

最大挠度发生在载荷 P 作用点,对(1)式求解得到

$$W_{\max} = \frac{P\lambda}{2\sqrt{2ak}} + \frac{P\lambda^2}{ak} \sum_{m=2,4,6,\dots} \frac{\gamma_m}{\sqrt{\lambda^4 + \mu_m^4}} \quad (4)$$

对一个板仅作用一个孤立载荷的特殊情况,即令(4)式中的 $a = \infty$,则有

$$W_{\max} = \frac{P\lambda^2}{2\sqrt{2}\pi k} \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{du}{1+u^2} = \frac{P\lambda^2}{8k} \quad (5)$$

最大拉应力在板底部载荷作用点处,为

$$(\sigma_r)_{\max} = 0.275(1+\nu) \frac{P}{h^2} \log \frac{Eh^3}{kb^4} \quad (6)$$

h 为板厚, E 、 ν 为板的弹性模量及泊松比,当载荷作用在方形 $u \times u$ 面积上时,取 $\nu = 0.57u$ 。

2.3 按弹性地基梁计算 根据文克勒 (E. Winkler) 假设,作用于梁上每单位长度内的地基反力为 ky 。若梁上的载荷集度为 $q(x)$,根据梁的理论可得挠度方程

$$EJ \frac{d^4 y}{dx^4} = -q(x) - ky \quad (7)$$

令 $\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4EJ}}$, 对方程改写并求解一般解为

$$y = e^{-\beta x} (A' \cos \beta x + B' \sin \beta x) + e^{-\beta x} (C' \cos \beta x + D' \sin \beta x) - \frac{q(x)}{k} \quad (8)$$

对于单个集中载荷作用在长梁上,根据初始条件可求得

$$A' - B' = 0, \quad C' - D' = -\frac{P}{8\beta^3 EJ}.$$

则梁的弯矩为

$$M(x) = \frac{P}{4\beta} [e^{-\beta x} (\cos \beta x - \sin \beta x)] - \frac{P}{4\beta} \eta_1 \quad (9)$$

式中的 η_1 函数可查表求得^[1], 已知梁的弯矩,梁中应力就可知了。当有多个集中力作用梁上时,可采用叠加原理处理。

3. 计算实例

泥河水库是一个典型的平原水库。其参数

为：护坡砼板厚 $h = 15\text{cm}$ ，弹性模量 $E = 2.6 \times 10^6 \text{N/cm}^2$ ，泊松比 $\nu = 0.17$ ，地基为均质粘土，模数 $k = 100 \text{N/cm}^3$ ，坝体上游边坡比为 1:3。

3.1 冰压力的确定 冰压力由现场实测得到，其值取为 18.0N/cm^2 ，且认为冰压力沿冰厚是均匀分布。在进行推坡计算时，首先将冰压力转换为护坡面上的力，根据转轴公式，求出作用于护坡面上的力 p_H （水平方向）和 p_V （垂直方向）分别为

$$p_H = p \cos \alpha \sin \alpha = 5.7 (\text{N/cm}^2)$$

$$p_V = p \sin^2 \alpha = 2.0 (\text{N/cm}^2)$$

3.2 推坡计算结果

(1) 弹性地基板算法 应用公式(6)计算由 p_V 产生的拉应力。对本例的具体情况，取受载面积为 $u \times u = 100 \times 100 (\text{cm})$ ，则 $b = 0.57u = 57\text{cm}$ 。在方形面积上的总力取为当量力 P_V ，即以斜坡上的总力作用在方形面积上。

$$P_V = p_V \cdot A = 2.0 \times 116 / \sin \alpha$$

$$\times 100 = 66 \text{kN}$$

其中 A 为斜坡面面积。将有关数据代入式(6)，求得

$$(\sigma_r)_{\max} = 0.275(1 + 0.17) \frac{66 \times 10^3}{15^2}$$

$$\times \log \frac{2.6 \times 10^6 \times 15^3}{100 \times 57^4} = 868 \text{kPa} (86.8 \text{N/cm}^2)$$

上面计算的是 P_V 作用在护坡板中产生的拉应力，还应考虑由 P_H 作用产生的应力。假定由 P_H 产生的应力沿板厚均匀分布，则

$$(\sigma_r)_H = p_H = 57 \text{kPa} (5.7 \text{N/cm}^2)$$

把二者叠加起来即为护坡板中的总拉应力

$$\sigma_r = (\sigma_r)_{\max} + (\sigma_r)_H = 925 \text{kPa} (92.5 \text{N/cm}^2)$$

作用在护坡上总拉力(计算宽度为 100cm)

$$F = \sigma_r \times 100 \times 15 = 138.8 \text{kN}$$

(2) 弹性地基梁算法 从坝体上沿纵向切取单位宽度($b = 1\text{cm}$)的一段作弹性地基梁计算，在这里把总冰压力分成 4 个集中力作用于梁上(见图 3)。总冰力 $P_V = 659 \text{N}$ ，其中 $P_A = P_C = P_D = 146.4 \text{N}$ ， $P_B = 219.8 \text{N}$ ，这样分配是模拟冰压力沿冰厚的实际分布情况(由实测

结果)。

计算结果为

$$\sigma_r = (\sigma_r)_V + (\sigma_r)_H$$

$$= 815 + 57 = 872 \text{kPa} (87.2 \text{N/cm}^2)$$

同样，作用于护坡上的总力 F (仍按 100cm 宽度)为

$$F = \sigma_r \times 100 \times 15 = 130.8 \text{kN}$$

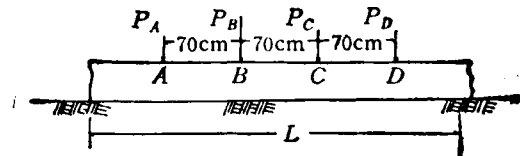


图 3 弹性地基梁算法

4. 计算结果分析与讨论

本文计算结果与有限元法和实测结果均列在表 1。

表 1 推护计算结果(宽度 100cm)

方法	本文方法		有限元法	实测值
	弹性基板	弹性基梁		
总推力(kN)	138.8	130.8	122.5	149.0
应力(kPa)	925	872	817	993
误差(%)	6.8	12.2	17.7	—

由表 1 可见，本文的计算结果与实测值比较吻合，用于推坡计算是有效的，可供工程设计防冰冻结构参考应用。

在推坡计算中，冰压力的取值是十分重要的，国内外对这个问题都开展了研究，但到目前为止，只提出了相应的经验公式^[2,3]，在具体应用上都有一定的局限性。本文计算中采用了实测值。由于对实测结果的不同简化方法，也将对最终的计算结果有很大影响。本文主要讨论的是在冰推力下堤坝护坡结构强度校核问题，有关冰力计算模型的建立及冰荷载的确定将在另文中讨论。

由于冰压力推坡作用机理比较复杂，目前的研究还只是初步的。对于不连续体的其它形式的护坡，本文的方法需加以修正方可应用。

参 考 文 献

- [1] 杜庆华等, 材料力学(下册), 北京, 人民教育出版社(1963), 496—497.
[2] Xianzhi, S. Study on Ice static pressure on ice cover in reservoir. IAHR ICE Symposium(1988),

472—482.

- [3] Gordon, F. N. Cox, A preliminary investigation of thermal ice pressures, Cold Regions Science and Technology, (1984), 9. 221—229.

(本文于1991年9月15日收到)

人体落地冲击力冲量的分析和计算*

钟奉依 薛问西 明 明

(西安矿业学院, 710054)

摘要 本文根据人体落地受伤是受冲击力的大小、冲击作用时间长短以及冲击力矩(如扭伤)等因素所致的事实出发, 将人体着地瞬间看作撞击过程, 以冲击力的冲量和冲量矩作为人体和各关节所承受的冲击作用的度量。利用多刚体系统动力学理论及计算方法给出了计算总撞击冲量及关节内冲量、冲量矩的算法; 编制了相应的计算程序。以垂直落地为例所作的计算与已有结果一致。

关键词 人体, 着地, 缓冲, 关节内力

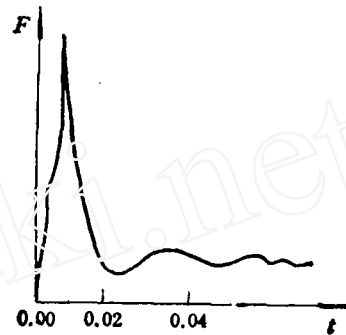


图 1

腾空而后落地是最常见的运动形式之一。当人体自高处落下着地时, 都会受到地面的冲击作用。这种冲击对训练不当或缺乏防护的人往往超过其生理耐限而造成组织或器官的损伤。据调查^[1], 在跳伞运动中, 因着陆姿势不当而造成的损伤占着陆伤的 90%。因此研究人体着地冲击力的特征及其在全身的分布状况, 对预防运动损伤有重要意义。对着地时的冲击力的已有研究^[2-4], 还仅限于力的分析, 未计及冲击力矩的作用。而研究方法均是通过测定位移或加速度而求力, 前者由于以差商代替微商, 求出的加速度误差较大; 后者由于肌肉的弹性, 传感器固定不易, 所得加速度亦不准确。

落地的力学过程, 随姿态而异。实验资料表明, 多数垂直落地的冲击力呈图 1 所示之状况^[5], 峰值很高, 历时很短, 变率很大的时间不到 20ms。而在这段时间以内, 各环节的位置几乎没有变化。因此这一段时间内的位移可以忽略不计。将着地冲击力变率很大的一段看作撞

击过程。以冲击冲量和冲量矩作为人体和各关节所承受的冲击作用的度量。这些量可利用多刚体系统动力学的理论和方法来计算。

冲量的计算不需要加速度, 只需要冲击过程始末的速度, 比求冲击力要简单些。

关节内力在解剖意义上是很复杂的。但总是由于骨节内部组织间的挤压和拉伸所致。为了区分受伤的可能类型, 下面将关节内力分为控制力和约束力。

1. 关节的运动学结构

将人体看成由 15 块刚体连结而成的有根树型系统^[7](图 2)。采用多刚体系统动力学 R/W 描述方法和规则编号^[8]。取上躯干为 B_1 , 地面为 B_0 。在环节 B_k 上取连体基 $(O_k, e_1^k, e_2^k, e_3^k)$ 。铰 O_k 的运动学特征为对应关节的解剖结构所决定。 O_k 固定在 B_k 上。设 B_k 相对于其内

* 国家自然科学基金资助课题。