

碟簧桩帽壳体的动力分析

王润富, 章青, 邵国建, 卓家寿

(河海大学土木工程学院, 江苏南京 210098)

TU473.1

31-34

摘要:碟簧桩帽是一种新型的桩帽结构,它可以在保持冲量不变下减轻冲击力,避免桩头的冲击破坏.在实用中桩帽壳体下部常常出现裂缝,为此,将桩帽结构简化为一维杆系的计算简图,应用动力分析中的应力波解答进行分析,并考虑结构的应力集中现象和反复荷载的疲劳作用,得出了桩帽的应力解答,从而找出了桩帽壳体下部开裂的原因.文中进一步对减少应力集中现象的加肋、加厚等加固措施做了讨论分析.

关键词:桩;碟簧桩帽;动力分析;应力集中;疲劳

中图分类号: TU473.1

文献标识码: B

文章编号: 1006-7647(2000)02-0031-04

碟簧桩帽是最近出现的一种桩帽结构.它能在保持冲量不变的情况下缓和打桩过程中的冲击力,有效地保持桩头不被破坏,提高了打桩的效率,受到工程界的欢迎.碟簧桩帽内部的碟簧片,是承受桩锤荷载并将之传递到桩顶的主要受力部件;其外部的壳体起围护作用,上端自由,下端与桩帽底部固结,见图1.设计中壳体部分是作为不受力构件考虑的,但在使用过程中,常常发现壳体与底部连接的加肋部位出现开裂,实验资料也表明壳体本身存在相当大的应力.本文着重分析壳体的受力情况和引起破坏的原因.

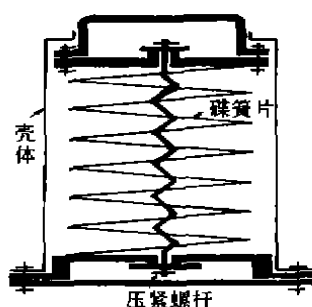


图1 碟簧桩帽示意图

1 碟簧桩帽减轻桩锤冲击力的机理

设桩锤的质量为 m , 在下落接近桩顶时的冲击速度为 v_0 , 根据动量-冲量的转换关系,有

$$mv_0 = Ft \quad (1)$$

其中 F 为作用于桩顶的冲击力, t 是作用时间.

由于动量 mv_0 是常量, 因此冲量 Ft 也是常量.

当 F 的作用时间 t 增加时, F 必然下降. 套于桩顶的碟簧桩帽增加了桩顶部分的弹性及其变形长度, 使冲击时间 t 增加, 因而减轻了冲击力 F 的峰值. 实测证明, 冲击力 F 约减少 $1/3$ 左右. 又有实测表明, 桩锤与桩顶的接触时间, 在无桩帽时约为 $t_1 = 0.005$ s, 在有碟簧桩帽时约为 $t_2 = 0.01$ s. 考虑到有碟簧桩帽时 F_2 随 t_2 的分布变化接近于正弦半波, 若将 F_2 作为常量, 并取 $0.75t_2$ 作为其作用时间, 则从式(1)可以大致估计出 $F_2/F_1 = 2/3$, 即 F_2 比 F_1 减小了近 $1/3$.

2 碟簧桩帽的一维波动分析

2.1 计算简图

碟簧桩帽的示意图如图1所示. 为了较准确地反映其实际工作状态, 在计算简图中考虑:

a. 桩锤作用于桩帽, 再传递到桩体和地基, 是一个沿轴向的纵波传播过程, 可以考虑为一维波动问题进行分析.

b. 桩帽的计算简图见图2(a). 其中: AB 为桩锤, 重 $10t$, 在撞击后到回弹前与桩帽共同运动, 桩锤的作用力为 8 MN , 10 MN , 12 MN 三种; BC 为桩帽, 重 71.2 kN , 其中包括随同波动的桩帽各部分, 即整个桩帽的重量, 桩帽可以简化为一维杆件, 其中波传播的途径为碟簧, 长 1.47 m , 其截面积 $A = \frac{\pi}{4}(D_1^2 - D_2^2) = 0.2489\text{ m}^2$; CD 为桩与地基部分, 对于 C 处, 作为杆 BC 的固定端, 因为桩受最大冲击时, 相应的贯入度很

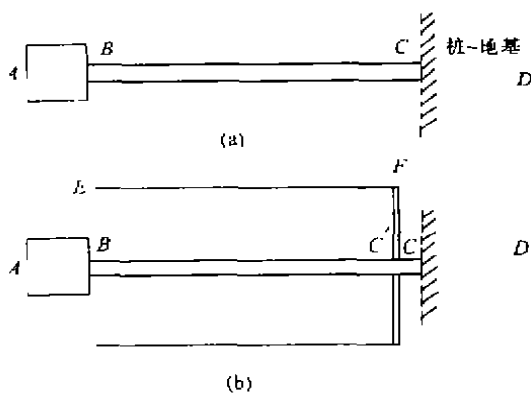


图2 一维波动计算模型

小,小于1mm/击,因此C处可作为固定端。

c. 进一步对壳体部分分析时的计算简图见图2(b).壳体也作为一维杆件,其上部为自由端,下部与桩帽底部C'处连接并共同变形与位移.壳体的单位体积重量为7.85t/m³.

2.2 一维波传播的几个基本解答

本文将以下几个一维波传播的解答应用于本问题的求解。

a. 常截面柱形杆中的纵波^[1](图3(a)).令杆件的轴向为x向,u为x向的位移,在m点取一微分段列出运动方程为

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2)$$

式(2)的通解是

$$u = f_1(x + ct) + f_2(x - ct) \quad (3)$$

其中 f_1, f_2 分别表示以均匀波速 c 向正负x向传播的两个波.当杆端受 σ 压应力后,在 t 时间内波传播到A,则受压部分 $OA = ct$ 缩短了 $\frac{E}{\sigma}ct$,杆端移动的速度,亦即受压部分各质点运动的速度 v 是

$$v = \frac{c\sigma}{E} \quad (4)$$

其中波速 c 可以由阴影部分OA的动量 $A_s c t \rho v$ 等于压力冲量 $A_s \sigma t$ 得出,即

$$A_s \sigma t = A_s c t \rho v \quad (5)$$

式中: A_s 为截面面积; ρ 为单位体积的质量.将式(4)代入式(5),就得到波速

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (6)$$

由式(6)和式(4)得出质点的运动速度为

$$v = \sigma / \sqrt{E\rho} \quad (7)$$

b. 固定端波的反射^[1](图3(b)).由于波的传播方程(2)是线性的,因此研究波的移动时可以应用叠加法.从两个相同的波相向运动相遇时的叠加结果,得出波在固定端反射的结果:应力加倍,即 2σ ,而速

度 $v=0$;反射后波的性质不变,即拉伸波仍为拉伸波,压缩波仍为压缩波。

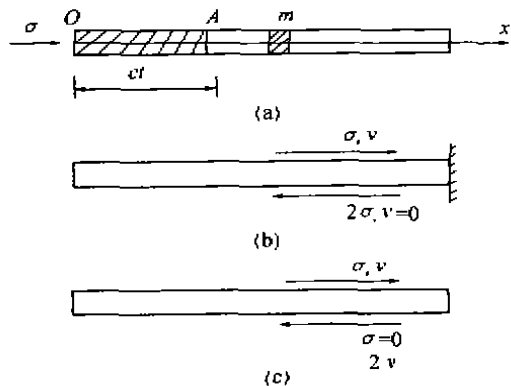


图3 常截面杆中的纵波

c. 自由端波的反射^[1](图3(c)).同样,由两个正负应力波相向运动相遇时的叠加结果,得出波在自由端的反射结果:应力 $\sigma=0$,而速度为 $2v$;反射后波的性质改变,即压缩波变成拉伸波,反之亦然。

d. 一端固定,在另一端受运动体撞击的问题^[1](图4(a)).设运动体以 v_0 初速碰撞杆件.将运动体看成刚体,在碰撞开始时 $t=0$,杆端各质点的速度为 v_0 ,而初始压力由式(7)得出

$$\sigma_0 = v_0 \sqrt{E\rho} \quad (8)$$

由于杆的阻尼力,运动体的速度 v 和压力 σ 都将逐渐降低;杆中各点的 v 和 σ 也同样逐渐降低;而波前以压力 σ_0 向前传播.于是得到沿杆长传播压应力 σ_0 的压缩波,如图4(b)所示。

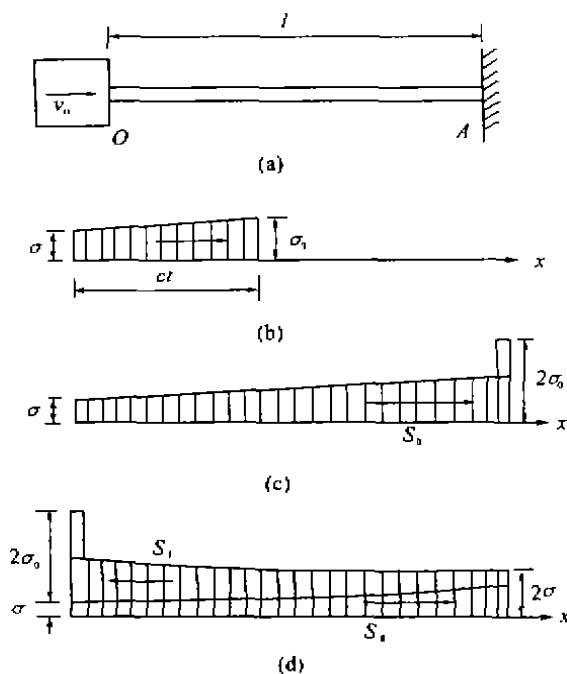


图4 撞击问题

在任一微段上,例如对于杆端O,运动方程为

$$M \frac{dv}{dt} + \sigma = 0 \quad (9)$$

其中 M 是杆截面单位面积上所受运动体的质量. 将式(7)的 v 代入式(9), 得

$$\frac{M}{\sqrt{E\rho}} \cdot \frac{d\sigma}{dt} + \sigma = 0 \quad (10)$$

从式(10)解出

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{\sqrt{E\rho}}{M} t\right) \quad (11)$$

式(11)表示杆端 O 点的应力随时间变化过程, 并在 $0 \leq t < \frac{2l}{c}$ 时段适用.

当 $t = \frac{2l}{c}$ 时, 波前压力为 σ_0 的压缩波从固定端反射后将返回到运动体与杆端的接触处 O . 由于运动体的速度不会突然改变, 运动体与杆端仍保持一起运动, 因此波将被反射回来, 在 O 点发生与固定端相同的反射(即 O 点相当于固定端), 因此接触处 O 点的压应力将突然增大 $2\sigma_0$, 如图 4(d)所示.

在碰撞过程中, 在每段周期 $T = \frac{2l}{c}$ 的终结, 由于波前压力 σ_0 又传回到杆端 O , 并发生反射, 都将发生压应力突然增大 $2\sigma_0$ 的现象.

经过时间 $T, 2T, \dots, nT$ 之后, 在 $nT < t < (n+1)T$ 时段内的总压应力可以从微分方程求解. 对于最大应力值, 可以表示为如下的拟合公式

$$\sigma = \sigma_0 \left(\sqrt{\frac{M}{E\rho}} + 1 \right) \quad (12)$$

e. 变截面杆中波的反射^[2]. 设杆件 1 和杆件 2 在端部相连, 它们的弹模、质量密度、截面积分别为 E_1, ρ_1, A_1 和 E_2, ρ_2, A_2 . 当波 u_a 沿杆件 1 向前传播到两杆件连接处时, 形成一个沿杆件 2 向前传播的折射波 u_c 和在杆件 1 中沿反方向行进的反射波 u_b .

反射波的作用力 F_b (合力) 和位移 u_b 可表示为

$$F_b = F_a \frac{\alpha' - 1}{\alpha' + 1}, \quad u_b = -u_a \frac{\alpha' - 1}{\alpha' + 1} \quad (13)$$

其中 F_a 和 u_a 是入射波的作用力和位移, α' 是比值

$$\alpha' = \sqrt{\frac{m_2 E_2 A_2}{m_1 E_1 A_1}} \quad (14)$$

其中 $m_1 = \rho_1 A_1, \quad m_2 = \rho_2 A_2 \quad (15)$

对于本例而言, 将桩帽简化为杆件 BC , C 端以右是桩和地基的共同体(图 2), 桩和地基的共同体可以看成是在 C 点连接的另一杆件. 考虑到桩和地基共同体的 m_2 和 A_2 远大于桩帽的 m_1 和 A_1 , 因此 α' 值非常大. 由此可见, C 点接近于固定端的情况, 波的反射可以按固定端的公式计算, 所以图 2 中 C 点作为固定端处理是合适的.

2.3 桩帽中的最大波动压应力

a. 初始压应力 $\sigma_0 = \frac{P}{A}$. 初始压应力由锤击力 P 作用于桩帽产生. 桩帽中波传播是通过碟簧传递的, 其截面积 $A = 0.2489 \text{ m}^2$. 当锤击力为 8 MN, 10 MN, 12 MN 时, 按 $\sigma_0 = P/A$, 得出初始波压应力分别为 (负号表示压应力) - 32.1 MPa, - 40.2 MPa, - 48.2 MPa.

b. 按两端固定杆计算最大压应力, 由式(12)得

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_0 \left(\sqrt{\frac{M}{\rho l}} + 1 \right) = \sigma_0 \left(\sqrt{\frac{MA}{\rho l A}} + 1 \right) = \\ &\sigma_0 \left(\sqrt{\frac{10/g}{7.12/g}} + 1 \right) = 2.1851 \sigma_0 \quad (16) \end{aligned}$$

当锤击力为 8 MN, 10 MN, 12 MN 时, 将 σ_0 代入式(16), 得桩帽中最大压应力分别为 - 70.1 MPa, - 87.8 MPa, - 105.3 MPa.

2.4 壳体中最大波动应力计算

由图 2(b)可见, 壳体 EF 可以作为一端自由, 一端固定的杆件, 壳体下端 F 固定于底板, 与桩帽下部 C' 共同变形和位移, 即 F 与 C' 的 v 相同. 又根据式(7), $\sigma = v \sqrt{E\rho}$, 应力与质点速度 v 成线性关系, 且壳体与桩帽主体都是钢材, 其 E, ρ 相同, 因此在壳体底部的波动应力相同于桩帽底部的应力绝对值.

壳体是作为一端自由, 一端固定的杆, 在波传播过程中, 波传播到固定端, 以 $v = 0, \sigma \times 2$ 的方式进行反射, 这时波的性质保持不变; 而当波传到自由端时, 以 $\sigma = 0, v \times 2$ 的方式进行反射, 这是波的性质改变, 例如压缩波变为拉伸波. 又由于上式所示的应力与质点速度 v 成线性关系, 因此波在一端固定, 一端自由杆件上的传播, 其应力绝对值相同于在两端固定端的传播, 即应力绝对值相同于 2.3 中列出的数值, 但拉、压应力交替重复发生.

实测壳体中的平均应力是 69.6 MPa(5, 9, 13, 15 号测点); 78.7 MPa(11 号测点); 112.1 MPa(3, 8 号测点). 这些实测的壳体应力值, 与上述分析得出的 2.3 中所列出的应力值(绝对值)是较为接近的. 因此上述分析的结果可作为壳体实测应力的验证.

2.5 壳体破坏应力的分析

如上分析得出, 在波动过程中壳体的最大拉应力为 2.3 中所得的绝对值. 在校核壳体是否破坏时, 还应考虑下列因素:

a. 壳体应力的偏心放大系数 $\eta_1 = 1.266$, 这是从实测得出的最大偏心放大系数(比平均应力的增大倍数).

b. 壳体下部肋与底板的应力集中系数 $\eta_2 = 2.0$, 这是从有限单元法分析得出的应力集中系数,

并参考孔口的应力集中系数而得出的。

c. 壳体受长期反复加载,即交变应力作用下的疲劳折减系数 $\eta_3 = 0.59^{[3]}$ 。

d. 壳体(钢材)的极限破坏应力 $\sigma_b = 333 \text{ MPa}^{[3]}$ 。

引起结构不安全的实际应力是 $\sigma_1 = \sigma_{\max} \eta_1 \eta_2$;
结构抵抗破坏的强度 σ_R 是

$$\sigma_R = \sigma_b \eta_3 = 333 \text{ MPa} \times 0.59 = 196.5 \text{ MPa}$$

由此,对结构的安全性校核情况见表 1。

表 1 壳体结构的安全性校核

锤击力/MN	实际应力 σ_1 /MPa	强度 σ_R /MPa
8	$2 \times 1.266 \times 70.1 = 177.5$	196.5
10	$2 \times 1.266 \times 87.8 = 222.3$	196.5
12	$2 \times 1.266 \times 105.3 = 266.6$	196.5

从表 1 可见,在锤击力为 10 MN 和 12 MN 时, $\sigma_1 > \sigma_R$,将引起肋与底板之间的拉裂,结构处于不安全状态。实际最大锤击有时甚至达到 13 MN,因此在长期重复荷载作用下,实际碟簧桩帽下部肋与底板出现开裂现象与上述分析结论符合。

3 降低应力集中现象的探讨

为了防止碟簧桩帽下部的开裂,可以从降低应力

集中现象着手,由于下部肋与底板交界处几何形状的突变,导致了局部应力集中现象,因此,下面应用有限单元法对三种模型作了对此分析(具体尺寸略)。

模型 A:无肋,壳体与底板直接连接;模型 B:加肋,沿圆周适当布置肋板;模型 C:壳体底部适当加厚(沿周围向均匀加厚),再与底板连接。

- 分析结果:模型 A,B,C 的应力集中系数(表示壳体与底板交界处的应力与上部应力的比值)分别为 5.90,2.76,1.70。

从上述分析可见,不加肋的方案 A 应力集中系数太高,不宜采用;加厚壳体方案较好,但施工不便;实际可行的是适当加密肋板的布置,使碟簧桩帽不致发生破坏裂开。

参考文献:

[1] 铁木辛柯,左地尔.弹性理论[M].徐芝伦等译.北京:人民教育出版社,1964.465~478.
[2] 徐佑在,刘光满.桩的动测新技术.北京:中国建筑出版社,1989.117~119.
[3] 杜庆华.工程力学手册[M].北京:高等教育出版社,1964.1644~1657.

(收稿日期:1998-10-23 编辑:张志琴)

·小资料·

我国现有坝高在 100 m 以上的混凝土面板堆石坝

在我国用振动碾修建混凝土面板堆石坝起始于 20 世纪 80 年代,至今不过 10 余年,但发展很快,现在已建成和在建中的就有近 80 座,其中坝高超过 100 m 的有以下 12 座,见表 1。天生桥一级混凝土面板堆石坝,高 178 m,仅低于马来西亚在建中的巴昆(坝高 205 m)和墨西哥已建成的阿瓜米尔帕(坝高 187 m),居世界的第三位。另据有关报道,在近 1~3 年内,我国有一批大型水电站将开工修建,其中就有坝高超过 100 m 的混凝土面板堆石坝,见表 2。水布垭坝高 233 m,建成后,将超过巴昆坝成为世界上最高的混凝土面板堆石坝。

表 1 已建和在建坝高超过 100 m 的混凝土面板堆石坝

序号	坝名	地点	河流	坝高/m	坝顶长/m	坝身体积/万 m ³	面板面积/万 m ²	库容/亿 m ³	装机/万 kW	完建年
1	天生桥一级	广西隆林贵州安龙	南盘江	178	1104	1768	16.8	102	120	1999
2	乌鲁瓦提	新疆和田	喀拉喀什河	138	486	677	7.58	3.4	6	在建中
3	珊溪	浙江文成	飞云江	133	418	571	6.1	19.2	20	在建中
4	白溪	浙江宁海	白溪	124.3	415	370	3.62	1.6	1.8	在建中
5	黑泉	青海大通	宝库河	123.5	434	544	7.9	1.8	1.2	在建中
6	芹山	福建周宁	穆田溪	122	286	310	4.2	2.75	7	在建中
7	白云	湖南城步	巫水	120	200	170	2.8	3.6	5.4	1988
8	古洞口	湖北兴山	古夫河	120	182	225		1.38	4.5	1999
9	高塘	广东怀柔	白水河	110.7	288	192	2.64	0.96	3.6	在建中
10	鱼跳	重庆南川	大溪河	110	220	163		0.95	4.8	在建中
11	茄子山	云南龙陵	苏帕河	106	250	130		1.21	1.6	在建中
12	柴石滩	云南宜良	南盘江	103	297	242	2.64	4.37	6	在建中

表 2 拟建的坝高超过 100 m 的混凝土面板堆石坝

序号	坝名	地点	河流	坝高/m	坝顶长/m	坝身体积/万 m ³	面板面积/万 m ²	库容/亿 m ³	装机/万 kW
1	公伯峡	青海循化、化隆	黄河	127	423	455		6.2	150
2	紫坪铺	四川都江堰	岷江	159	826	913	12.68	11.12	76
3	洪家渡	贵州黔西	六冲河	182	465	870	7.64	49.25	54
4	三板溪	贵州锦屏	清水江	178	433	960	9.4	37.5	100
5	水布垭	湖北巴东	清江	233	584	1566		45.8	160

(吴冀高供稿)