

文章编号:1002-3682(2015)04-0048-07

散抛块石对海底电缆冲击力的计算分析*

纪君娜^{1,3}, 刘晓青², 刘 臻^{3*}

(1. 山东省胶东调水工程棘洪滩水库管理处, 山东 青岛 266111;
2. 中交烟台环保疏浚有限公司, 山东 烟台 264000; 3. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100)

摘 要:为保证琼州海峡海底电缆的安全性和可靠性,拟对掩埋深度未达到设计要求地段的海底电缆进行抛石保护。抛石过程中,块石由于沉降和水流作用具有一定的速度,会对海底电缆产生冲击力,甚至对电缆造成破坏。根据工程海区环境动力因素,对抛石施工过程中散抛块石所受浮力、流体阻力及水平推动力进行推导,获得块石在垂直方向和水平方向的运动方程,推导获得块石对海底电缆冲击力的计算公式,并确定冲击力的影响因素。结合抛石工艺和海底电缆的设计强度,选取各影响因素的不同值进行计算,结合计算结果对冲击力影响因素进行对比分析,为抛石工程提供合理建议,设计安全的施工方案。

关键词:散抛块石;冲击力;施工安全

中图分类号: TV312 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1002-3682.2015.04.006

琼州海峡海底电缆工程是中国第 1 个 500 kV 超高压、长距离及大容量的跨海联网工程,在世界上同类工程中列第 2 位。该工程对提高海南电网运行质量,加快南方电网发展,实现“全国联网”具有重大意义^[1]。由于海洋环境的特殊性,海底电缆经常遭受各种原因的破坏。海底电缆一旦损坏,造成的影响和损失巨大,因此必须对海底电缆采取保护措施。常用的保护措施包括埋深、冲埋、套管和抛石等^[2]。对琼州海峡海底电缆进行抛石保护的目的在于:在海底电缆已进行埋深保护的基础上,对埋深未达到设计要求的海缆区段以及海缆悬空段进行保护^[3]。但散抛块石沉降时会对海底电缆产生冲击力,对海缆产生一定程度的破坏。这是一个复杂且严重的问题,尤其是对于跨空段电缆。综合考虑抛石水深、施工工艺、工程海区环境动力要素等条件,本文对块石冲击力进行了计算分析,根据计算结果对工程施工提供了建议。

1 计算分析

经分析可知,散抛块石冲击力主要取决于抛石块体下降至海底电缆处的矢量速度,该速度主要由块石水平向运动速度及竖向沉降速度组成。块石的沉降速度受到块石比重、形状特点、流体运动特征等多方面因素的影响;块石水平速度则与块石比重和水流流速

* 收稿日期:2015-05-16

资助项目:山东省自然科学基金项目——振荡浮子波能发电装置水动力学问题研究(JQ201314)

作者简介:纪君娜(1981-),女,硕士,主要从事海岸工程方面研究. E-mail:6121475@qq.com

* 通讯作者:刘 臻(1979-),男,副教授,博士,主要从事海岸工程方面研究. E-mail:liuzhen@ouc.edu.cn

(王佳实 编辑)

有关。

1.1 抛石块体沉降的动力学特征

一个物体在静止的无限液体中沉降时,最初由于重力大于浮力作用而加速,随着物体运动速度的增加,液体对物体的阻力增大,经过一段距离后,重力、浮力与阻力平衡,物体将匀速下沉,该速度称为自由沉降速度^[4]。

物体沉降时所受到的阻力是绕流阻力,它是由表面阻力和形状阻力两部分组成的。表面阻力是由液体的粘滞性和流速梯度产生的切向作用力;形状阻力是因边界层的分离,物体后部产生漩涡,使该区域内压力为负值,阻止物体向前运动而形成的,形状阻力的大小取决于物体的形状和流速。为说明抛石块体在液体中的运动状态,先从球体入手,然后再讨论任意形状块石的沉降速度。

球体在液体中沉降分 3 种状态:1)层流沉降时,流线紧贴球体,只受表面阻力的作用;2)紊流沉降时,边界层分离,球的后部产生漩涡,阻力主要是形状阻力;3)过渡状态沉降时,表面阻力和形状阻力应同时考虑。由于海洋动力环境复杂,故抛石块体在液体中的沉降状态主要为紊流沉降。

1.2 抛石块体竖向运动微分方程的推导

抛石块体沉降过程中在垂直方向主要受到 3 个作用力,分别为:块体的重力 G_w 、块体所受的浮力 G_f 及块体受到的流体阻力 D 。其中,块体的重力和浮力在整个运动过程中保持不变,两者的合力可记为 $G=G_w-G_f$;流体阻力 D 与沉降速度的平方成正比,表达式为

$$D = fv^2 \quad (1)$$

式中, f 为阻力系数; v 为块石的沉降速度。

根据牛顿第二运动定律,可得:

$$m = \frac{dv}{dt} = G - fv^2 \quad (2)$$

式中, m 为抛石块体的质量。

为了考察沉降速度 v 与抛石水深 h 之间的关系,对式(2)进行变换可得:

$$m \frac{dv}{dh} \frac{dh}{dt} = G - fv^2 \quad (3)$$

即

$$mv \frac{dv}{dh} = G - fv^2 \quad (4)$$

式(4)即为抛石块体沉降速度 v 沿水深 h 变化的描述方程,分析等式两端可得:

$$\frac{m}{2} \frac{dv^2}{dh} = G - fv^2 \quad (5)$$

令 $Y=v^2$, 得:

$$\frac{m}{2} \frac{dY}{dh} = G - fY \quad (6)$$

式(6)为非齐次线性微分方程,假设该方程的通解为:

$$Y = Ce^{nh} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6),得:

$$\frac{m}{2}Cr e^{rh} = G - fCe^{rh} \quad (8)$$

整理可得:

$$\left(\frac{m}{2}r + f\right)Ce^{rh} = G \quad (9)$$

对于式(6)对应齐次方程($G=0$)而言,由于 $Ce^{rh} \neq 0$,即

$$r = -\frac{2f}{m} \quad (10)$$

因此, $Y = Ce^{-\frac{2f}{m} \cdot h}$ 。

假设 C 为 h 的函数,即

$$Y = C(h)e^{-\frac{2f}{m} \cdot h} \quad (11)$$

将式(11)代入式(6),可得:

$$\frac{m}{2}C(h)\left(-\frac{2f}{m}\right)e^{-\frac{2f}{m} \cdot h} + \frac{m}{2}C'(h)e^{-\frac{2f}{m} \cdot h} = G - fC(h)e^{-\frac{2f}{m} \cdot h} \quad (12)$$

由上式可得:

$$\frac{m}{2}C'(h)e^{-\frac{2f}{m} \cdot h} = G \quad (13)$$

由该式可得 $C'(h)$ 的表达式:

$$C'(h) = \frac{2}{m}Ge^{\frac{2f}{m} \cdot h} \quad (14)$$

对该式左右两边积分可得:

$$C(h) = \frac{1}{f}Ge^{\frac{2f}{m} \cdot h} + c \quad (15)$$

将该式代入式(11),可得:

$$Y(h) = \left(\frac{1}{f} \cdot Ge^{\frac{2f}{m} \cdot h} + c\right)e^{-\frac{2f}{m} \cdot h} \quad (16)$$

即

$$Y(h) = \frac{1}{f}G + ce^{-\frac{2f}{m} \cdot h} \quad (17)$$

式(17)即为沉降速度沿水深变化的表达式。

为了求解常数 c ,需考虑该方程的初始条件:抛石块体离开驳船或漏斗时的初速度为 0,即当 $h=0$ 时, $V=0$ 。

代入式(17),可得:

$$c = -\frac{1}{f}G \quad (18)$$

将式(18)代入式(17)可得:

$$Y(h) = \frac{G}{f}(1 - e^{-\frac{2f}{m} \cdot h}) \quad (19)$$

即

$$v^2(h) = \frac{G}{f}(1 - e^{-\frac{2f}{m} \cdot h}) \quad (20)$$

即

$$v(h) = \left[\frac{G}{f} (1 - e^{-\frac{2f}{\alpha} h}) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

1.3 抛石块体水平运动方程的推导

假设块石为球体,块石水平方向的运动主要受到水流的水平推动力作用。因此,假设块石的质量为 m ,则其所受推动力与块石运动速度的关系为:

$$F = m \frac{du}{dt} \quad (22)$$

式(22)中,推动力 F 的表达式可写为:

$$F = \eta \rho_w d^2 (u_0 - u) \quad (23)$$

$$m = \frac{1}{6} \rho_s \pi d^3 \quad (24)$$

式(23)、(24)中, η 为阻力系数; ρ_w 和 ρ_s 分别为水和块石的密度; u 为块石水平方向的运动速度; u_0 为水流流速; d 为块石直径。

将式(23)、(24)代入式(22),可得:

$$\frac{du}{dt} = \frac{6\eta\rho_w}{\pi\rho_s d} (u_0 - u)^2 \quad (25)$$

将上式进行积分,可得:

$$u = u_0 - \frac{1}{at + b} \quad (26)$$

式(26)中, b 为积分常数; $a = \frac{6\eta\rho_w}{\pi\rho_s d}$ 。由于块石在脱离漏斗的瞬间水平速度为 0,即 $t=0$ 时, $u=0$ 。根据上述初始条件可得 $b=1/u_0$,并代入式(26)得:

$$u = \frac{au_0^2 t}{au_0 t + 1} \quad (27)$$

式(27)即为块石水平运动速度方程,式中 t 由漏斗底高与块石沉降速度共同决定,阻力系数 η 取值为 0.65 计算^[5]。

1.4 散抛块石的冲击力

无跨空情况在海底电缆无跨空条件下,块石对海底电缆冲击力可按动量定理考虑,即块石到达电缆时所拥有的动量全部转换为对海底电缆的冲量。

跨空情况在海底电缆敷设过程中,由于地形地质原因,某些位置可能出现电缆跨空的状况。上述电缆可假设为简支梁进行抛石冲击力计算。考虑最不利情况:块石作用于电缆的跨中位置,则根据机械能守恒原理^[6]可得:

$$\frac{1}{2}mv^2 + (mg - \rho g V)\Delta_d = 2 \int_0^{L/2} \frac{M^2(x)}{2EI} dx \quad (28)$$

式(28)中, ρ 为水的密度; V 为石子的体积; EI 为电缆截面的抗弯刚度; L 为电缆的跨度。等式左边第一项为块石动能,第二项为块石接触海底电缆后减小的势能;等式右边为海底电缆变形产生的应变能。

若假设 Δ_d 为电缆受冲击荷载时跨中的挠度, F_d 为冲击荷载,则式(28)可改写为:

$$\frac{1}{2}mv^2 + (mg - \rho g V)\Delta_d = 2 \int_0^{L/2} \frac{M^2(x)}{2EI} dx = \int_0^{L/2} \frac{F_d^2}{4EI} x^2 dx = \frac{F_d^2 L^3}{96EI} \quad (29)$$

已知 $F_d = \frac{48EI}{L^3} \Delta_d$, 整理式(29)可得:

$$\frac{1}{2}mv^2 + (mg - \rho gV)\Delta_d = \frac{24EI}{L^3}\Delta_d^2 \quad (30)$$

求解式(30), 即可得 Δ_d 的值。

令块石在海底电缆上跨中产生的静力挠度 $\Delta_{st} = \frac{(mg - \rho gV)L^3}{48EI}$, 则式(30)变为:

$$\Delta_d^2 - 2\Delta_{st}\Delta_d - \frac{mv^2L^3}{48EI} = 0 \quad (31)$$

考虑到实际工程情况, 电缆产生的挠度远小于跨长。因此, 式(28)中的势能变化项可忽略不计, 整理式(31)可得:

$$\Delta_d = \sqrt{\frac{mv^2L^3}{48EI}} \quad (32)$$

再令动力放大系数 $K_d = \frac{\Delta_d}{\Delta_{st}}$, 则块石跨空冲击力的大小可表示为:

$$F_d = K_d(mg - \rho gV) \quad (33)$$

2 计算结果及分析

根据上述理论推导, 结合实际工程情况, 无跨空情况下计算获得的不同密度散抛块石在不同流速(0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m/s)和漏斗底高度(2, 5 m)条件下的冲击力分别如图 1a, 图 1b 和图 2a 所示。由图可见, 块石冲击力随块石尺寸的增大而增大, 块石尺寸越大, 增速越快; 块石冲击力随块石密度增大而增大, 不同密度块石冲击力变化随块石尺寸增加而增加; 对比分析图 1a 与图 1b 可知, 漏斗底高度 2 m 和 5 m 条件下, 块石冲击力基本相同, 漏斗底高度对块石冲击力影响较小; 分析图 2a 可知, 块石冲击力随水平流速增加而增加, 块石尺寸越大, 增量越大。

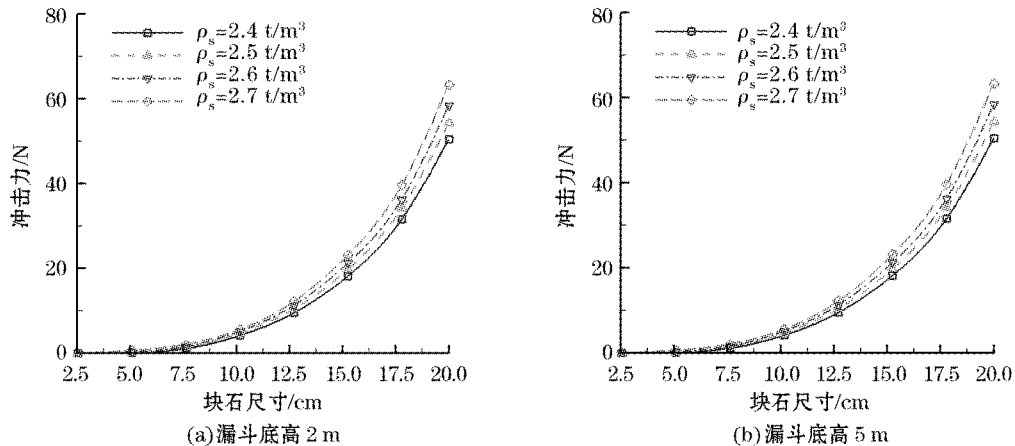


图1 水平流速 0.5 m/s 条件下的散抛块石冲击力(无跨空情况)

Fig.1 The impact force caused by scattered riprap under the case of horizontal flow velocity of 0.5 m/s (No across the empty)

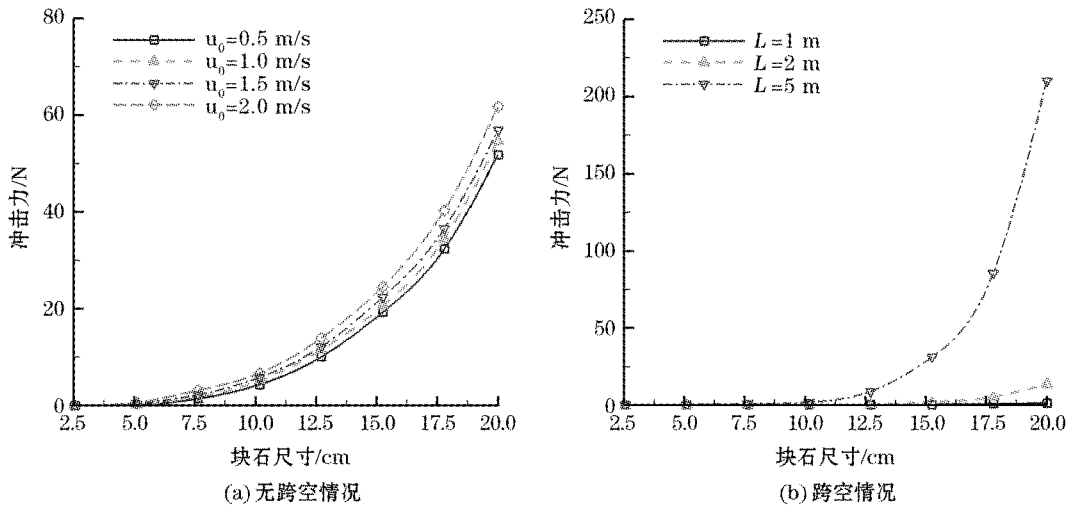


图 2 漏斗底高 2.0 m 条件下散抛块石冲击力

Fig. 2 The impact force caused by scattered riprap under the case of funnel bottom height of 2.0 m

考虑实际工程特点与电缆抗弯刚度等条件,跨空长度分别取 1.0、2.0 和 5.0 m,计算获得的散抛块石跨空冲击力如图 2b 所示。由图 2b 可见,跨空情况下跨空长度和块石尺寸对块石冲击力影响较大。块石冲击力随跨空长度增加而增加,尤其是对于大尺寸块石。块石尺寸大于 10.0 cm 时,块石冲击力随跨空长度增加而迅速增加,增量明显。

3 结 论

本研究通过理论推导和计算结果分析了块石密度、块石尺寸、水流流速、漏斗底高度及跨空长度对块石冲击力的影响,通过分析可发现:

1) 块石冲击力随着块石密度和块石尺寸增加而增加,当块石尺寸小于 5.0 cm 时,冲击力小于 1 N,当块石尺寸达到 20.0 cm 时,各流速条件下冲击力均大于 50 N。因此,对电缆外层进行初步保护是必要的。

2) 漏斗底高度对块石冲击力影响较小。

3) 块石冲击力随着水平流速增加而增加,对大尺寸块石影响尤其明显。因此,建议选择潮流流速较低时刻进行施工。

4) 跨空长度对不同尺寸的散抛块石跨空冲击力影响不同。块石尺寸小于 10.0 cm 时,不同跨空长度冲击力差异不大;当块石尺寸大于 10.0 cm,冲击力随跨空长度增大而迅速增大。实际工程中因避免大尺寸块石在有跨空情况下与电缆直接接触,防止冲击破坏。建议对海底电缆跨空处尤其跨空长度较大的工程位置以 2.5~5.0 cm 块石填充保护,适当增加内层保护抛石量,再进行外部抛石。

参考文献:

- [1] 陈凯华. 海南联网海缆敷设施工与防护[J]. 南方电网技术, 2009, 3(5): 25-26.
- [2] 王裕霜. 国内外海底电缆输电工程综述[J]. 南方电网技术, 2012, 6(2): 26-30.
- [3] 王裕霜. 500 kV 海底电缆后续抛石保护工程建设[J]. 电力建设, 2012, 33(8): 116-118.

- [4] 李玉柱. 工程流体力学[M]. 北京:清华大学出版社,2006:249-255.
[5] 陈玉璞. 流体动力学[M]. 南京:河海大学出版社,1990:201-207.
[6] 王铎. 理论力学[M]. 北京:高等教育出版社,2009:245-247.

Calculation and Analysis of Riprapping Impact to Submarine Cable

JI Jun-na^{1,3}, LIU Xiao-qing², LIU Zhen³

(1. Jihongtan Reservoir Management Section of Management Bureau of Water Diversion
from the Yellow River into Qingdao of Shandong Province, Qingdao 266111, China;

2. Cccc. TDC Yantai Enviromental Protection Dredging Co., LTD, Yantai 266400, China;

3. Collge of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: In order to ensure the safety and reliability of submarine cable in the Qiongzhou Strait, riprap protection will be carried out for the submarine cable which has been laid in the area where the buried depth of the cable do not meet the design requirements. However, the scattered block stones could induce impact force to the submarine cable at the time of riprapping and even cause the damage of the cable. According to the environmental dynamic factors in the riprap-work area, the buoyancy, fluid drag force and horizontal impetus that the scattered stones were subjected to during the riprap-work are deduced, thus obtaining the vertical and horizontal motion equations of the block stones, the calculation formula of the impact force and the factors influencing the impact force. Combining with the riprap technology and the design strength of the submarine cable, different values of the influencing factors are chosen for the calculation. Based on the calculation results, the factors influencing the impact force are contrasted and analyzed, and reasonable suggestions are proposed for the safe operation of the riprap-work and the design of safe working scheme.

Key words: dumped rockfill; impact force; engineering safety