

后填芯法降低悬索桥锚碇散索鞍位移研究

王 建, 张怀远, 柴丽莎

(河海大学水利水电学院, 南京 210098)

摘要: 为避免软基上悬索桥锚碇的散索鞍在大缆拉力下发生过大位移而危及桥梁结构, 提出了锚碇沉井隔仓的后填芯法, 利用填芯体重量产生的反向力矩抵消大缆拉力产生的力矩, 实现散索鞍位移补偿和控制。在分析散索鞍位移对主塔鞍座水平位移影响的基础上, 基于最优化原理给出了填芯量的确定方法, 分析了后填芯过程中锚碇基础稳定安全系数的变化, 指出后填芯法施工不会降低锚碇稳定性。最后, 探讨了后填芯法的施工工艺, 并结合某大桥锚碇进行了实例计算。

关键词: 沉井; 锚碇; 散索鞍; 位移; 后填芯法

中图分类号: TV 139.1 **文献标志码:** **文章编号:** 1672 1683(2014)04 0198-04

Reduction of Cable Saddle Displacement in Anchorage of Suspension Bridge Using Post Filling Method

WANG Jian¹, ZHANG Huaiyuan¹, CHAI Lisha¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Large displacement can occur in the cable saddle of the anchorage of suspension bridge built on the soft foundation under large pulling force, which can endanger the bridge structure. In order to prevent this, a post filling method with the anchorage of open caisson was proposed. The reverse torque caused by the weight of filling body can balance out the torque produced by the large pulling force, which can compensate and control the displacement in the anchorage. Based on the analysis of the impacts of displacement in the anchorage on horizontal displacement of main tower saddle, the determination method of filling quantity was proposed using the optimization principle. The variation of safety coefficient of anchorage foundation during the post filling process was investigated, which suggested that the construction using post filling method would not decrease the stability of anchorage. Finally, the construction technique of post filling was discussed and an example was introduced for an anchorage of bridge with the post filling method.

Key words: caisson; anchorage; cable saddle; displacement; post filling

随着对桥梁跨越能力要求的不断提高, 悬索桥越来越成为跨越大江大河的主要方案。重力式锚碇作为锚固悬索桥主缆的一种型式, 是悬索桥安全的关键结构之一, 最好要求它不发生任何位移。但对于建造在深厚覆盖层中的锚碇基础, 若无有效的措施, 在大缆拉力下, 散索鞍容易发生较大的位移, 从而改变整个大桥内力状态, 对体系安全产生不利影响。因此, 限制散索鞍的变形是设计中需解决的重要问题。

在深厚覆盖层上建造重力式锚碇时, 沉井是广泛采用的基础型式, 如江阴大桥北锚、泰州大桥南锚和北锚。沉井隔仓尾部常充填砂、片石或素混凝土(统称为填芯), 以增加沉井的自重, 提高锚碇的稳定性。沉井填芯通常在锚体施工前

完成。锚碇尾部有时还设置后浇块, 后浇块一般在架梁期浇筑, 起配重作用, 抵消由于大缆拉力引起的锚碇偏转, 减小散索鞍位移, 改善整个大桥的内力状态。然而, 后浇块配重混凝土通常所需的方量很大, 因此费用较高。

考虑到沉井尾部填芯体产生的弯矩与大缆拉力产生的弯矩方向相反, 因此, 如果能将填芯推迟到架梁期与箱梁拼接、桥面铺装等过程同步进行, 同样可以起到配重作用, 实现控制散索鞍位移的目的, 但工程投资与锚体尾部额外浇筑配重混凝土相比显著降低。基于这一想法, 本文从力学分析和施工的角度, 研究后填芯法控制散索鞍位移的可行性以及相应的设计理论和施工方法。

收稿日期: 2013-12-16 修回日期: 2014-02-21 网络出版时间: 2014-06-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.04.001.html>

作者简介: 王 建(1975-)男, 江苏通州人, 副教授, 博士, 主要从事岩土工程安全监测、健康诊断以及结构数值计算方面研究。E-mail: Wang_jian@hhu.edu.cn

1 后填芯法原理

1.1 力矩平衡与变形补偿

如图 1 所示,架缆后,随着钢箱梁拼装和桥面铺装,大缆对散索鞍产生拉力 T 。若选择沉井底面中心为转动点,则其荷载效应可以分解为水平分力 T_x 、铅直分力 T_y 以及弯矩 M_t 。其中, T_x 和 M_t 引起散索鞍产生向江心的水平位移为 ΔX_A , T_y 和 M_t 引起散索鞍发生竖向位移为 ΔY_A 。由于大缆拉力与水平面夹角较小,因此 ΔX_A 要显著大于 ΔY_A 。与此同时,由于大缆拉力与水平面夹角很小,使得桥梁内力反应对 ΔX_A 更为敏感,因此,控制散索鞍处的水平位移在桥梁设计中十分重要。

后填芯法的工作原理是:将沉井尾部隔仓的填芯时间推迟到架梁期进行,而不是象常规一样在锚体施工前完成,这样,就可以利用填芯重量对沉井底部中心 O 产生的反向力矩 M_w 来抵消 M_t 和 T_y 引起的散索鞍水平位移,起到变形补偿的作用。

1.2 效益分析

与锚体尾部额外浇筑配重混凝土相比,“后填芯法”在经济效益和工程效益方面均有明显优势:

在经济效益方面,节省了混凝土的工程量,降低了投资。以江阴长江公路大桥为例,为了控制散索鞍位移,架梁期同时在锚体尾部浇筑配重混凝土 5 000 m^3 ,工程投资数百万元。若采用后填芯法,可以节省大量费用。

在工程效益方面,由于后填芯体积大,因此有效重量更大,效果更为显著。例如,即使仅考虑尾部最后一排填芯量,江阴大桥北锚片石填芯约 13 000 m^3 ,泰州大桥南北锚混混凝土填芯分别为 13 000 m^3 和 19 000 m^3 。尽管填芯体对沉井底面中心的力臂小于锚体尾部配重混凝土,但总的力矩仍然要大得多,因此位移控制效果更好^[1-3] 见图 1。

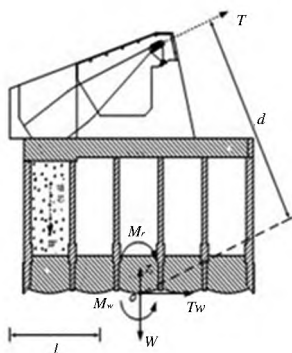


图 1 后填芯法施工时沉井受力示意

Fig. 1 Force acting on caisson foundation during post filling

2 后填芯法设计与优化

2.1 锚碇位移对主塔鞍座位移影响分析

为进行后填芯法的设计和优化,首先要明确锚碇位移对主塔鞍座的影响程度。由图 2 可知,从位移控制角度,希望主塔鞍座 B 不受锚碇散索鞍 A 位移影响而产生大的水平位移,即控制 B 点位移最小。

令 A, B 点坐标分别为 $(X_A, Y_A), (X_B, Y_B)$, 假设大缆拉力不因散索鞍位移而变化,则 AB 之间的距离也不发生变化,即

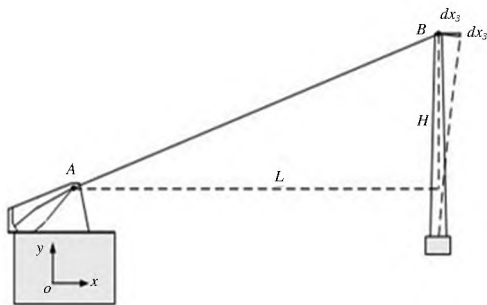


图 2 锚碇位移对主塔鞍座位移影响

Fig. 2 Displacement of tower saddle caused by anchorage displacement

$$(X_A - X_B)^2 + (Y_A - Y_B)^2 = \text{const} \quad (1)$$

对式(1)两边取微分,有

$$(X_A - X_B)(dX_A - dX_B) + (Y_A - Y_B)(dY_A - dY_B) = 0 \quad (2)$$

根据主塔的变形特征(图 2), 式(2)可近似写成

$$(X_A - X_B)(dX_A - dX_B) + (Y_A - Y_B) dY_A = 0 \quad (3)$$

下面分两种情况讨论散索鞍变形对主塔鞍座变形的敏感性:

1 散索鞍仅发生水平位移 ΔX_A , 而 $\Delta Y_A = 0$, 则根据式(3), 有

$$\Delta X_B = \Delta X_A \quad (4)$$

2 散索鞍仅发生竖向位移 ΔY_A , 而 $\Delta X_A = 0$, 则根据式(3), 有

$$\Delta x_B = \frac{(Y_A - Y_B)}{(X_A - X_B)} \Delta y_A = \eta \Delta y_A \quad (5)$$

其中

$$\eta = \frac{H}{L} \quad (6)$$

式中: L, H 分别为散索鞍与主塔鞍座之间的水平距离和垂直距离。

对比式(4)和式(5)可以看出, 散索鞍发生相等的水平位移或竖向位移时, 引起的主塔鞍座的水平位移是不同的, 且前者显著大于后者(L 一般约为 $2 \sim 3$ 倍左右)。

综合上述分析, 当散索鞍发生位移时, 引起的主塔鞍座水平位移为

$$\mu = \Delta X_A + \eta \Delta Y_A \quad (7)$$

式中: μ 为由散索鞍变位引起的主塔鞍座位移; η 为桥梁结构对散索鞍垂直位移敏感系数, 与散索鞍到主塔鞍部距离以及夹角 θ 等因素有关, 可按式(6)计算, 也可以通过有限元分析后确定; ΔX_A 和 ΔY_A 为散索鞍的水平位移和竖向位移量^[4]。

2.2 散索鞍位移计算

ΔX_A 和 ΔY_A 由大缆拉力和填芯量确定, 方法如下:

取基底中心 O 为转轴点, 整体受力系统可分解为:

1 大缆拉力的水平分力 T_x , 作用于 O 点;

2 大缆拉力的竖直分力 T_y , 作用于 O 点;

3 大缆拉力引起的力矩 M_T , 以 O 点为转动点;

4 后填芯体自重 W , 作用于 O 点;

5 后填芯体自重引起的力矩 M_w , 以 O 点为转动点;

$$M = M_T - M_w = T \cdot d \cdot W \cdot l \quad (8)$$

$$F_x = T_x \quad (9)$$

$$F_y = T_y - W \quad (10)$$

式中: M 为合力矩; F_x 和 F_y 分别为水平向与竖直向的合力, 均作用于基底中心 O ; d 和 l 分别为大缆拉力及填芯重量对 O 的作用力臂。

$$\Delta X_A = \alpha_1 \cdot F_x + \alpha_2 \cdot F_y + \alpha_3 \cdot M \quad (11)$$

$$\Delta Y_A = \beta_1 \cdot F_x + \beta_2 \cdot F_y + \beta_3 \cdot M \quad (12)$$

式中: $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 分别作用于基底中心 O 的单位水平力、单位竖直力及单位力矩时引起的散索鞍水平位移; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 分别作用于基底中心 O 的单位水平力、单位竖直力及单位力矩引起的散索鞍竖向位移 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ 称为载常数, 可通过有限元计算获得^[5]。

2.3 填芯量的确定与优化

从结构设计角度, 最优设计应保证主塔鞍座水平位移最小, 即

$$U = |u| = \sqrt{(\Delta X_A + \eta \Delta Y_A)^2} = \min \quad (13)$$

令

$$\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3] \quad (14)$$

$$\beta = [\beta_1, \beta_2, \beta_3] \quad (15)$$

$$F(\mu, W) = u \left\{ \begin{matrix} T_x \\ T_y \\ M_T \end{matrix} \right\} + \frac{W}{W_0} \left\{ \begin{matrix} 0 \\ -W \\ -M_W \end{matrix} \right\} \quad (16)$$

式中: α, β 为载常数矩阵; $F(\mu, W)$ 为荷载列阵, 由实际所施加大缆荷载及填芯重量构成; W 为填芯重量; W_0 是从结构和地基承载力角度所允许的最大允许填芯重量; μ 为大缆总荷载的百分比, 根据后填芯起始时间确定, 例如, 若在钢箱梁拼接完成后实施后填芯, 则 $\mu < 1$ 。

根据式(11)-式(16), 散索鞍位移控制目标函数可写成

$$U = \sqrt{\alpha F(\mu, W) + \eta \beta F(\mu, W)}^2 = \min \quad (17)$$

约束条件为

$$0 < W < W_0 \quad (18)$$

式(17)-式(18)实际是一个简单的边界约束优化问题, 有大量现成的求解器可以使用。本文借助 Visual FORTRAN 自带的 IMSL 函数库中的 LCONF 子程序进行求解^[9]。

3 后填芯施工对锚碇稳定的影响分析

由于填芯体是逐步充填的, 大缆受荷过程中锚碇的总重量低于设计值, 因此, 需要考虑稳定安全系数是否能够满足设计要求。锚碇稳定安全系数包括抗滑稳定和抗倾覆稳定, 这里给出充填过程中抗滑稳定不低于设计值的证明。

设计抗滑安全系数为

$$[K_0] = \frac{[(W' + W) - \Delta F_y] \cdot f + F_A}{\Delta F_x} \quad (19)$$

式中: W' 为整个锚碇及沉井基础除后充填体以外的重量; f 为基底与土体的摩擦系数; F_A 为锚前土体抗力; ΔF_x 和 ΔF_y 分别为大缆拉力的水平分力及竖向分力。

若采用后充填法, 假设充填量与大缆荷载等比例施加, 比例系数为 $\lambda (0 \leq \lambda \leq 1)$, 则大缆荷载增加过程中, 锚碇的抗滑安全系数为

$$[K_\lambda] = \frac{[(W' + \lambda \cdot \Delta F_y) \cdot f + F_A]}{\lambda \cdot \Delta F_x} \geq \frac{[(\lambda \cdot W' + \lambda \cdot W) - \lambda \cdot \Delta F_y]}{\lambda \cdot \Delta F_x} = [K_0] \quad (20)$$

即: 大缆承受荷载过程中, $[K_\lambda] \geq [K_0]$, 稳定安全系数不低于设计值, 抗滑稳定是有保证的。从式(20)可以看出: 若抗力与滑动力比例增加, 则稳定安全系数等于设计稳定安全系数; 而实际上在“后充填”之前, 已有结构自重已经具有相当一部分抗力, 因此充填过程中其安全系数要高于设计安全系数。

对于抗倾覆问题, 上述原理同样适用, 因此抗倾覆安全系数也不低于设计值。证明方法与此类似, 此处不再赘述。

4 后填芯的施工工法探讨

4.1 施工工法

后填芯法的缺点是注浆时承台已经浇筑, 必须设置专门的素混凝土灌注通道。但是该缺点能够克服, 即可以从锚碇尾部的沉井侧面预留泵送混凝土管道以及人员通道, 施工步骤见图 3, 施工方案如下:

1 在沉井接高时, 在井壁设置梯子并预留孔口, 安装部分泵送混凝土管道, 满足泵送混凝土和人员交通需求;

2 沉井下沉到位封底, 在隔仓底部预先放置水泵, 这样可为素混凝土注浆提供一个干的施工场地; 若在架缆前先抽干仓内水体, 可增加填芯的有效重量, 提高效果;

3 灌注除“后填芯”(如尾部的最后 1 排隔仓或其部分)以外的所有隔仓内的素混凝土;

4 浇筑承台和上部锚体, 架设大缆, 拼装焊接钢箱梁;

5 钢箱梁全部焊接完成后, 在桥面铺装过程中, 灌注“后填芯”部分的素混凝土, 该过程可结合桥面铺装过程逐步分仓完成。

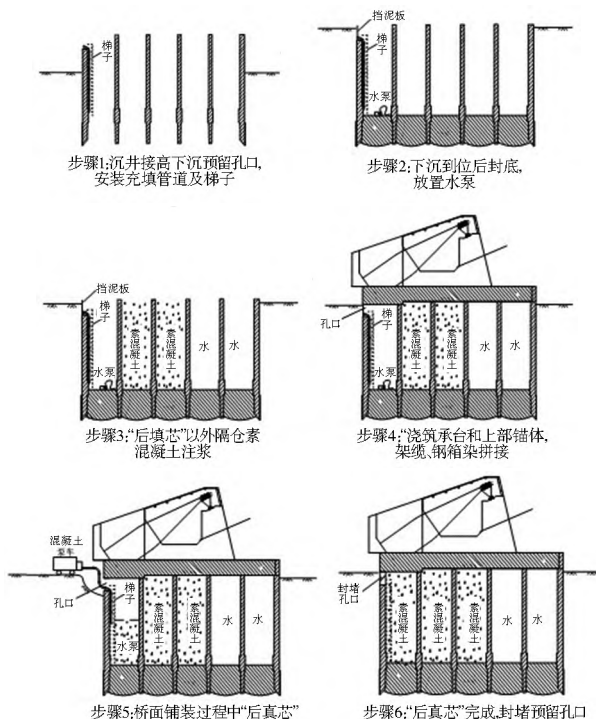


图 3 后填芯的施工步骤

Fig. 3 Construction steps of post filling

4.2 监测配合

为了尽量减小散索鞍位移, 后填芯进度应与架梁进度协调。在此过程中, 还应加强散索鞍水平位移监测和沉降监

测,并根据观测数据适时调整填芯进度。

5 计算实例

某大型悬索桥南锚采用沉井基础,基础平面尺寸 67.9 m×58 m,深 41 m。基础建造在深厚覆盖层上,基岩埋深约 200 m。由于地基模量低,导致大缆恒载下散索鞍位置可能产生较大位移,根据实测数据反演计算,预测水平位移在 12 cm 左右,对主塔内力较为不利。因此,如何控制散索鞍位移,特别是钢箱梁焊接及主鞍座固定以后散索鞍的位移,具有重要意义。

根据有限元计算,当在沉井底面中心作用单位水平力、竖向力及力矩时,在散索鞍位置引起的水平位移和竖向位移见表 1。

表 1 散索鞍位置引起的水平位移和竖向位移

Table 1 Saddle position caused by horizontal displacement and vertical displacement

荷载类型,数值	散索鞍水平位移/cm	散索鞍垂直位移/cm
水平力,1 MN	$\alpha_1 = 5.81 \times 10^{-3}$	$\beta_1 = 4.53 \times 10^{-4}$
铅直力,1 MN	$\alpha_2 = 0$	$\beta_2 = 6.25 \times 10^{-3}$
力矩,1(MN·m)	$\alpha_3 = 3.37 \times 10^{-4}$	$\beta_3 = -4.89 \times 10^{-5}$

大缆恒载对沉井底面中心的水平力、竖向力和力矩分别为 349 MN、129 MN、22 210 MN·m。若假设沉井尾部最后一排“后填芯”,则填芯量为 13 610 m³,填芯体重心至沉井底面中心的距离为 26.12 m;假设混凝土重度为 2.4 kN/m³(架缆前抽干沉井隔仓内的水),则其对沉井中心的竖向荷载为 327 MN,产生的力矩为 8 532 MN·m。根据式(14)-式(16),有

$$\alpha = [5.81 \times 10^{-3}, 0, 3.37 \times 10^{-4}] \quad (21)$$

$$\beta = [4.53 \times 10^{-4}, 6.25 \times 10^{-3}, -4.89 \times 10^{-5}] \quad (22)$$

$$F(\mu, W) = \mu \begin{Bmatrix} 349 \\ 129 \\ 22210 \end{Bmatrix} + \frac{W}{327} \begin{Bmatrix} 0 \\ -327 \\ -8532 \end{Bmatrix} \quad (23)$$

式中: α 、 β 为载常数矩阵; μ 为设定的大缆荷载施加百分比; W 为填芯重量; $F(\mu, W)$ 为荷载列阵,由实际所施加的大缆荷载及填芯量构成。

则散索鞍位移控制目标函数为

$$U = \sqrt{\alpha F(\mu, W) + \eta \beta F(\mu, W)}^2 = \min \quad (24)$$

约束条件为

$$0 \leq W \leq 327 \quad (25)$$

若取 $\mu=1$,则解式(24)、式(25)得: $W=327$ MN, $U=5.8$ cm。对应锚室散索鞍水平位移和垂直位移分别为 6.45 cm、-1.75 cm。也就是说,即使后填芯量取最大值,主塔鞍座水平位移仍达到 5.8 cm。其原因在于大缆荷载引起的散索鞍位移比后填芯体引起的反向位移大得多,后者无法全部抵消前者。

若取 $\mu=0.18$,即仅考虑钢箱梁拼装完成后由桥面沥青

层铺装等引起的大缆荷载,则解式(24)、式(25)得: $W=157.2$ MN, $U=0.0$ cm。也就是说,若在钢箱梁拼成整体后固定主塔鞍座,那么只需 48% 的最大允许填芯量,就可以抵消后续大缆荷载引起的锚碇变形对主塔的影响。

若取式(24)中的 μ 为变量,同时约束填芯量等于最大填芯量 327 MN,那么解得 $\mu=0.375$, $U=0.0$ cm。也就是说,最大允许填芯量可以抵消 37.5% 的大缆恒载,即在钢箱梁拼装中期就可以开始实施后填芯。

6 结语

填芯通常是在锚碇沉井基础承台施工前灌注的,这可以提高锚碇的整体抗滑能力,但对减小大缆荷载下的散索鞍位移基本不起作用。鉴于此,本文提出后填芯法,以较低代价实现散索鞍位移控制。通过对后填芯法的控制散索点位移及其施工方法进行分析,认为在架梁期进行后充填施工,锚碇稳定安全系数不低于设计值,不存在稳定问题。为了提高填芯体的有效重量,可以在架缆前抽干待填芯隔仓内水体。填芯过程中,应配合散索鞍水平位移和垂直位移监测,实现散索鞍位移最优控制。

“后填芯法”与锚体尾部额外浇筑配重混凝土相比,节省了混凝土的工程量,降低了投资,而且,由于后填芯体体积大,有效重量更大,效果更为显著。具有明显的经济效益和工程效益。

参考文献(References):

[1] 周世忠. 江阴长江公路大桥北锚碇的施工与控制. [J] 国外桥梁, 2000(4): 56-59. (ZHOU Shi zhong. Construction and Control of North Anchorage of Jiangyin Yangzi Highway Bridge [J]. Foreign Bridge, 2000(4): 56-59. (in Chinese))

[2] 许宏亮, 凤懋润. 江阴长江大桥锚碇变位限值的研究[A]. 中国公路学会桥梁学会论文集[C]. 1995. (XU Hong liang, FENG Mao run. Research on Variable limit Value of Jiangyin Yangtze River Bridge Anchorage[A]. Set to the Chinese Institute of Highway Bridge[C]. 1995. (in Chinese))

[3] 孙钧. 地下工程设计理论与实践[M]. 北京:地质出版社, 1997. (SUN Jun. Theory and Practice of Design of Underground Engineering[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997.)

[4] IMSL Fortran Library User's Guide, MATH LIBRARY Volume 2 [M]. Visual Numerics, Inc, 2003 XIE Ke xin, HAN Jian, Lin Your lian. Methods of Optimization (Modified Edition) [M]. Tianjin University Press, 2004.

[5] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1998. (ZHU Bo fang. Finite Element Method and its Application[M]. Beijing: China Water Power Press, 1998. (in Chinese))

[6] 解可新, 韩健, 林友联. 最优化方法(修订版)[M]. 天津大学出版社, 2004. (JIE Ke xin, HAN Jian, LIN Your lian. The Optimization Method(Revised Edition) [M]. Tianjin University Press, 2004. (in Chinese))