

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2010.01.019

软土地基上大型沉井基础安全监控模型

陈 松,陈志坚

(河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:为了提高软土地基上大型沉井基础稳定性评价和安全监控的有效性,以江阴长江公路大桥北锚碇沉井基础为对象,在研究影响其稳定和安全运营主要因素的基础上,探讨了监控系统的主要结构,并从基础位移监控、基础抗滑稳定监控和地基土稳定监控 3 个方面建立了散索鞍水平位移监控模型、沉井前侧地基土水平向反力监控模型和基底反力监控模型.在综合现场观测数据和数值模拟结果的基础上,探讨了监控模型中原因量的主要构成及其与监控效应量之间函数关系的确定方法,并给出了江阴长江公路大桥北锚碇沉井基础主要控稳模型——散索鞍水平位移监控模型在通车运营期的具体函数表达式.研究表明,基础变位是软土地基上大型沉井基础的主要控稳因素,通过安全监控模型对其进行控制能为建筑物的安全运营提供保障.

关键词:软土地基 沉井基础 锚碇 监控模型 江阴长江公路大桥

中图分类号:TU443.13 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2010)01-0087-06

目前,深厚软土地基上大型建筑物不断增多,其沉井基础规模也在不断扩大,施工方法也有很大创新.例如:江阴长江公路大桥北锚碇沉井基础(图 1)^[1],位于长江下游深厚冲积河漫滩上(基岩埋深达 80 m),主要功能是将大桥约 640 MN 的主缆力(水平分力约为 550 MN,垂向分力约为 270 MN)有效地传给地基,并使基础沉降和水平位移限制在容许值以内,以保证全桥的总体刚度.锚碇长 61.73 m,宽 48.50 m,高 20~30 m.沉井南北长 69 m,东西长 51 m,埋深 58 m,共设 36 个隔仓.为了获得更大的抵抗主缆拉力的稳定力矩,隔仓分区分别填充水、砂和片石,并将锚体相对沉井基础后偏 12 m 后座式布置.由于整个基础规模巨大,地基较软弱,受力巨大,允许变位值小(散索鞍水平位移不超过 10 cm,沉降不超过 20 cm),分区效应明显,故基础沉降、不均匀沉降、抗倾覆和抗滑稳定问题均十分突出^[2],因此监测和研究其变形变位过程对确保大桥结构安全具有十分

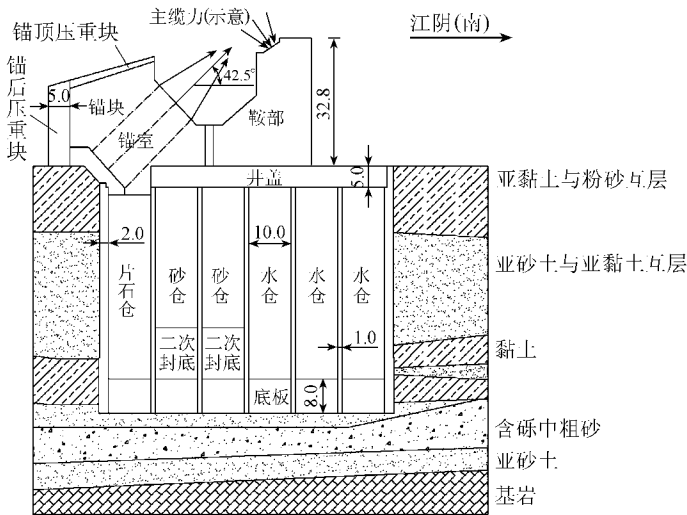


图 1 江阴长江公路大桥北锚碇沉井基础与地基土层(尺寸单位:m)

Fig. 1 Caisson foundation at north anchorage of Jiangyin Yangtze River Bridge and its soil strata (unit of size m)

重要的意义。另外,关于此类软土地基上的大型沉井基础的主要控稳因素是什么以及如何进行安全监控的研究还较少。为了提高软土地基上大型沉井基础稳定性评价和安全监控的有效性,本文以江阴长江公路大桥北锚碇沉井基础为研究对象,探讨其监控系统的主要结构,建立安全监控模型,并在综合现场观测数据和数值模拟结果的基础上,探讨监控模型参数的确定方法,给出主要控稳模型的函数表达式。

1 监控系统的构成

沉井基础具有整体性好、承载面积较大、施工期较长等特点,沉井基础、地基岩土体和上部结构三者共同承受各种荷载,三者的共同作用显著。软土地基上大型沉井基础所面临的主要工程问题是:(a)由于基础自重较大,地基软弱,因此基础沉降控制成为工程难点,工后基础垂向承载问题突出;(b)由于沉井施工会对周围土体产生大范围扰动,导致地基土物理力学性质恶化,而周边地基土物理力学性质对沉井基础的工作性态有很大影响,因此工后基础不均匀沉降和侧向稳定性等问题亦较突出;(c)地下水埋藏较浅区,扬压力对基底的影响显著且具有明显的季节性。

以江阴长江公路大桥北锚碇沉井基础为例,由于分区封底效应和锚碇后置施工影响,使得沉井基础自封底施工开始即逐步后倾(左旋),锚碇施工时这一趋势进一步加剧,至主缆架设,基础又逐步前倾(右旋)^[2]。另一方面,在桥缆架设完成之前,沉井基础及其周边地基土体主要承受上部锚碇的重力荷载,而桥缆架设完成后,在逐步增大的主缆力作用下,基础将出现垂向受压减弱、水平向受拉上拔、转动的趋势,而基底扬压力季节性作用又进一步加剧了这种趋势。在整个施工过程中,受结构体系转换的影响,地基土体受力状态及荷载大小均不断地发生变化,这既给施工控制造成困难,也使得稳定分析更为复杂。因此,构建适宜的监控系统并开展安全监控是施工过程中防患于未然的必然选择。

考虑上述主要工程问题的软土地基上的大型沉井基础监控系统包括以下几个部分:(a)外部变形监控系统。该系统测点布置在上部结构与沉井连接部位、沉井顶面及其周边地区,用于观测各测点之间的相对位移。(b)沉井内部应力监控系统。该系统测点主要布置在沉井内墙受力较集中的部位,用于观测沉井内部的应力。(c)沉井周边地基土反力和位移监控系统。地基土反力测点布置在沉井井壁外侧,而位移监控通过在地基土中布设测斜孔来实现。(d)沉井基底反力及孔隙水压力监控系统。该系统借助于沉井基底安装的土压力盒、孔隙水压力计进行观测。(e)环境因素监测系统,包括温度场变化监测系统等。该系统用于了解水化热、外界温度变化对大体积混凝土结构的影响,并为消除观测数据中的环境噪声提供依据。上述监控系统需使用经纬仪、全站仪、钢筋计、孔压计、混凝土应变计、土压力计、温度计、测斜仪等多种观测仪器,并需通过编制的软件系统进行数据采集和分析。由于江阴长江公路大桥北锚碇沉井基础安全监控系统测点数超过300个,测得的数据量大、种类多,因此对观测数据进行分析特别是建立相应的安全监控模型是非常必要的。

2 安全监控模型与建模方式

安全监控模型^[3-4]是指借助数学工具和物理力学原理建立的监控效应量(如位移和应变等)与原因量(如水压和荷载等)之间的函数关系式,它隐含了监控对象系统在外部因素影响下的响应,是对系统响应特征和规律的归纳。当给系统响应设定警戒指标后,安全监控模型还可作为安全判据,当监控效应量或原因量接近警戒指标时即需进行施工控制。从建模方式上来讲,安全监控模型可分为统计模型、确定性模型和混合模型3种,其中混合模型因具有统计模型和确定性模型二者的优点而常被采用。混合模型的建模过程是:首先以数值模拟和模型试验结果^[5-7]为基础找出安全监控的主要因子,建立监控效应量与响应量之间基本的函数关系,然后利用监测数据对这种关系进行验证,并将监测数据作为修正的依据,通过反分析和正分析确定模型中各监控效应量与响应量之间的函数关系,再以设计值为基础通过反馈分析拟定模型中各原因量的监控警戒指标。文献[4]对大跨径悬索桥重力式锚碇及其场区边坡综合安全评判模型的研究,即采用了混合模型建模方式,其主要难点是对监控目标工作性态的模拟^[8]以及原因量监控警戒指标的确定。

以沉井基础为例,影响其沉降的主要因素是基础和上部结构质量、地基承载力,而地基承载力又受到持力层地基岩土体物理力学性质、基础侧壁摩阻力、基础底部与地基岩土体接触面积、基底所受扬压力等因素的影响,其中,地基岩土体物理力学性质指标的确定最为关键。文献[6-7]采用基于三维比奥固结理论和土体邓肯-张非线性弹性模型的土工计算程序,对江阴长江公路大桥北锚碇沉井基础二次封底后地基土体材料

参数、地基土渗透特性与上覆巨型基础施工荷载之间的关系进行了分析,得出了上覆基础施工过程中地基土非线性变化规律,以及施工荷载会使地基土渗透性减小,而地基土渗透性减小对基础稳定性有利的结论.这说明地基土体的非线性特征对基础稳定有重要的影响,而基础与地基土相互作用关系十分复杂.文献[6-7]所用土工计算程序在地基土体非线性弹性参数反演分析中发挥了重要作用,这也证明了该土工计算程序在研究大型沉井基础与地基土共同作用方面的适用性.本文采用该土工计算程序对江阴长江公路大桥北锚碇及其地基基础进行施工过程的数值模拟,在得到沉井变位的基础上,通过位移反演分析,对实测的锚碇施工开始后沉井的沉降和不均匀沉降、架缆开始后散索鞍水平位移等变形特征进行拟合分析,得到了各施工阶段地基土体参数变化规律,并获得了一系列计算成果与实测成果拟合曲线.图 2 给出了主缆力水平向分力与散索鞍水平位移之间的关系.从图 2 可以看出,计算结果与实测结果拟合程度较好,这证明了所选计算模型、边界条件和地基土体参数的适用性和可靠性.

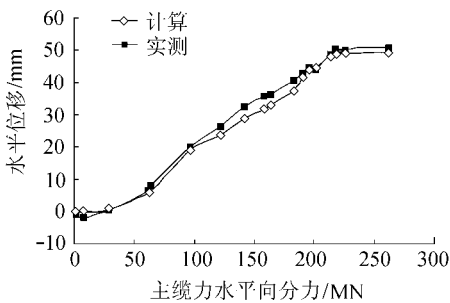


图 2 主缆力水平向分力与散索鞍水平位移之间的关系

Fig. 2 Relationship between horizontal component force of main cable force and horizontal displacement of cable saddle

3 江阴长江公路大桥北锚碇沉井基础安全监控模型

采用上述建模方法,并以江阴长江公路大桥北锚碇沉井基础的设计值作为警戒指标^[9],从分别监控基础位移、基础抗滑稳定和地基土稳定的角度建立监控模型.这 3 种模型的重点监控因子分别是锚碇散索鞍水平位移、沉井前侧地基土水平向反力、沉井基底反力.3 种模型各自的基本特点为:(a)散索鞍水平位移监控模型.该监控模型又称为沉井前倾安全监控模型,用于监控上部结构和沉井基础的前倾稳定性.由于散索鞍水平位移直接影响到该长跨度悬索桥的全桥刚度,故该监控模型是锚碇建后至成桥、通车阶段最重要的监控模型.(b)沉井前侧地基土水平向反力监控模型.该模型是前一模型的辅助模型,即通过对前侧地基土水平向反力发挥情况的监测来对沉井前侧地基土稳定性和沉井变形情况进行监控.(c)基底反力监控模型.该模型用于基础抗滑稳定性和不均匀沉降监控.其中,散索鞍水平位移监控模型的监控预警条件为水平位移迅速增大或累计值接近 100 mm,前者预示可能出现前倾稳定问题,后者则是考虑全桥受力尤其是北塔受力而在设计过程中采用的控制指标.沉井前侧地基土水平向反力监控模型的监控预警条件为深部土体应力水平迅速提高或地基土水平向反力远大于静止土压力.基底反力监控模型的监控预警条件为基础满足抗滑稳定要求的同时避免地基土反力水平接近地基土承载力,即要求地基土体提供足够的反力支撑基础并为其提供抗滑力,同时避免地基土体自身出现承载稳定问题.

3.1 模型中原因量分析与函数关系式的建立

a. 散索鞍水平位移监控模型.数值模拟结果表明,散索鞍负向和正向水平位移主要是由于锚碇相对沉井后置而发生前倾、锚碇和沉井基础在巨大主缆力作用下发生前倾位移和锚碇的剪切位移造成的,因此,散索鞍水平位移监控模型函数关系式可写成

$$\Delta = f(M, F_h) \tag{1}$$

式中: Δ ——散索鞍水平位移,mm; M ——以沉井基础底面中心为假想转动轴的转矩,MN·m; F_h ——主缆力水平向分力,MN.这 3 个量均以指向架缆方向为正.

b. 沉井前侧地基土水平向反力监控模型.考虑到沉井基础顶面的水平位移是引起前侧地基土挤压反力水平提高的主要因素,锚碇和沉井基础的转角大小会影响受挤压土体的分布深度,地基土本身的稳定能力会影响应力分布和水平,将沉井前侧地基土水平向反力监控模型函数关系式写成

$$R = f(\Delta', \theta, h, C_i) \tag{2}$$

式中: R ——沉井前侧地基土水平向反力,压为正,MPa; Δ' ——沉井基础顶面水平位移,mm; θ ——锚碇和沉井基础的转角,(°); h ——基础埋置深度,m; C_i ——反映沉井前侧地基土物理力学性质变化的指标,地基土强化时其值为正,反之为负.

c. 基底反力监控模型.基底反力一方面承担了锚碇和沉井基础的垂向荷载,另一方面也是建筑物与地

基土间抗滑力的来源。前者决定了其数值不应该太大,否则可能超越或接近地基土承载力,而后者则要求反力维持在一个比较合适的水平,应增加基底的摩阻力,以避免沉井基础发生比较大的水平位移。沉井基底反力主要与以下几个因素有关:基底以上部分的垂向荷载和由此引起的位移(沉降和不均匀沉降)、基底超静孔隙水压力消散情况、基底地基土承载力,后两者与天然地基土的物理力学性质有关。因此,基底反力监控模型函数关系式可写为

$$\sigma_v \leq \frac{f_a}{K_b} \quad \sum \sigma_v S \mu_c \geq \frac{F_D}{K_s} \quad (3)$$

式中: σ_v ——基底承受的垂向应力,MPa; f_a ——经宽深修正后的基底地基土承载力特征值,MPa; K_b, K_s ——承载安全系数和抗滑稳定安全系数; S ——基底垂向承载面积, m^2 ; μ_c ——基底摩擦系数; F_D ——作用在基底面的水平向拖曳力, MN。式(3)没有考虑沉井侧壁的摩阻力。实际上,这种力在沉井没有发生明显的向前位移时并不是很大,可将其作为安全储备。由于基础持力层所在含水层与地表水体有良好的水力联系,因此在水位期,孔隙水压力将明显提高,沉井基础受到的浮托力也会随之增加,进而会削弱沉井基础对持力层土体的有效正向应力,使得基础抗滑稳定性降低。而基底水平向拖曳力大小主要受主缆力水平向分力 F_h 和基础前侧地基土水平向反力的影响,因此对基底反力监控模型函数关系式的抗滑稳定部分加以改进,即

$$\frac{\sum (\sigma_v - \sigma_w) S \mu_c}{K_s} \geq F_h - R \quad (4)$$

式中 σ_w 为地表水水位变化时的基底孔隙水压力增量, MPa。值得说明的是,水位的日变化对上述关系式的影响并不显著,需要考虑的是水位的季节性变化即年变化^[7]。

上述3种监控模型用于监控不同的安全问题,但其相互间存在明显的关联和制约关系。如沉井基础的水平位移和转动决定了基础前侧地基土水平向反力的大小,而后的发挥则限制了沉井基础的变形变位发展;在沉井基础发生转动的过程中,基底前半幅土压力上升而后半幅土压力降低则会对基底反力的监控造成明显影响,同样,基底反力的增大,也可一定程度上抑制沉井基础的变位发展。这种关联和制约关系的存在,决定了监控模型中监控因子处于动态变化过程中,监控函数关系式和监控因子监控警戒指标的确定需全面考虑整个基础与周边地基土体的工作性态特征。另外,3种模型中,散索鞍水平位移监控模型是锚碇完建后的主要控稳模型,其他2个模型主要在锚碇施工过程中发挥重要作用。这主要是因为锚碇完建后,地基土所承受的垂向荷载已大部分施加完毕,并将在梁主缆敷设、箱梁架设、通车运营各阶段由于基础承担上拔力而使得对基底土的垂向压力有所减弱,相应的基础沉降趋势将被抑制;同时,地基土承担的水平向荷载则是在锚碇后置块浇筑时逐步达到负的最大值,虽然此时基础变位特征为后倾,诱发的是基础后侧地基土的水平向反力,但所用模型及其警戒指标与前倾时相近。

3.2 通车运营期控稳监控模型的函数表达式及监控指标

如前所述,成桥阶段及工后最重要的安全监控模型是散索鞍水平位移监控模型,而水平位移的大小又受基础转动、平动和锚碇剪切变形的影响。其中,转动部分是沉井分区封底和后座式锚碇施工过程中的监控重点之一。江阴长江公路大桥开始箱梁吊装后,由于转动加剧,散索鞍水平位移增量一度超出警戒水平,后在锚碇后方浇筑5m厚的锚后压重块并增加锚顶压重而增加6.76 GN·m的后倾力矩,才使得转动趋势逐步趋于稳定,此时箱梁荷载完成近70%,此后,基础转动基本被遏制。因此,需以锚后压重块浇筑结束时间为分界点拟定安全监控指标。

考虑压重块影响,则满荷载通车条件下,散索鞍水平位移监控模型的函数表达式为

$$\Delta = f(M, F_h) = 90 \sin(aM - 18^\circ) + (bF_h - 1.3) + cF_h \quad (5)$$

式中 a, b, c 分别为沉井基础转角与转矩、锚碇和沉井基础水平位移与主缆力水平向分力、锚碇本身剪切变形与主缆力水平向分力的比值,满荷载通车条件下 ($M = 18.47 \text{ GN} \cdot \text{m}$, $F_h = 260 \text{ MN}$), 其取值分别为 $1.12 \times 10^{-3}/(\text{MN} \cdot \text{m})$, $5.68 \times 10^{-2} \text{ m/MN}$, $9.7 \times 10^{-2} \text{ m/MN}$ 。满荷载通车条件下计算所得散索鞍最大正向水平位移为48.4 mm,远小于设计允许的100 mm。

若不增加锚后和锚顶压重块,则满荷载通车条件下最大正向水平位移为61.5 mm,仍小于100 mm,但基础最大转动角将从目前的0.09°增加到近0.15°,沉井顶面南、北两侧的沉降将从2000年3月实测得到的

-8.7 mm和23.3 mm增加到-11.9 mm和29.8 mm,沉井前侧地基土反力水平略有增加但影响深度(即土压力超过静止土压力水平的范围)从-17 m增加到-32 m,从而丧失了很大的安全储备.与文献[6]计算结果相比,在同样不考虑锚后和锚顶压重而考虑地基土渗透特性变化情况下所得到的满荷载通车条件下的散索鞍水平位移明显减小,分别为74.5 mm和100.8 mm,说明地基土渗透特性变化对基础稳定性影响显著,而考虑应力场和渗流场耦合作用能使得结果更为精确.

实测和计算结果表明,成桥后锚碇剪切变形是散索鞍正向水平位移的主要构成部分,约占 $1/2$,而基础转动和平动分别占 $1/6$ 和 $1/3$,其中基础转动被控制在一个较低的水平,这既对前倾安全起到了很大作用,又削弱了基础的不均匀沉降.实测资料反馈分析结果显示,江阴长江公路大桥北锚碇沉井基础地基承载力安全储备大(3.5倍以上)、抗滑稳定性好(满荷载通车条件下抗滑稳定安全系数为3.7).

值得说明的是,式(5)未考虑地震和风荷载的影响,因为地震和风荷载引起的位移具有突变性,不能通过前期观测资料进行拟合.数值模拟结果表明,大桥在遭遇设计地震烈度(7度)的情况下,考虑满荷载通车的最不利荷载组合,散索鞍瞬时水平位移增量为70 mm,其总体位移达124 mm,已超出100 mm的限制,基础仍维持目前略微前倾的状态,而抗滑稳定安全系数大幅降低为2.3.但从纵向地震效应研究结果^[10]来看,大桥北塔在考虑结构与地基土共同作用的情况下,结构变柔,内力反应减小,位移反应增大.另外,散索鞍正向水平位移中的锚碇剪切变形部分所占比例较大,且部分可恢复.因此,上述瞬时位移导致的桥梁受力状态改变,对桥梁长期健康和安全运营影响较小.

4 结 语

本文以江阴长江公路大桥北锚碇沉井基础安全监控为例,探讨了作为悬索桥锚碇基础的大型隔仓式沉井,实施安全监控而需布置的内部应力、外部变形监控系统的类别,并采用混合建模方式建立了基础位移监控、地基土稳定监控等模型,进而对控稳的散索鞍水平位移监控模型的函数表达式和监控指标的确定进行了研究,证明了采用沉井分区封底和锚后压重的合理性.本文还利用上述监控模型对该大型锚碇沉井基础遭遇设计地震烈度(7度)的安全和稳定状态进行了评估.研究表明,目前该基础在地基承载力、前倾稳定、沉降控制等方面均有较大安全裕度,但遭遇不利工况时,其前倾仍将是监控重点.综合而言,深埋大型沉井基础的稳定性在采用合理工法的情况下较容易满足要求,但由于体积庞大,运营期的安全问题较为突出,表现为基础的侧倾比较容易发生.而采用本文所建立的安全监控模型,可以使软土地基上大型沉井基础的安全监控更有针对性.

参考文献:

- [1] 周世忠. 江阴长江公路大桥综述[J]. 水运工程, 2000(1): 55-58. (ZHOU Shi-zhong. A general account of Jiangyin Yangtze River Highway Bridge[J]. Port & Waterway Engineering, 2000(1): 55-58. (in Chinese))
- [2] 吉林, 冯兆祥, 周世忠. 江阴大桥北锚沉井基础变位过程实测研究[J]. 公路交通科技, 2001, 18(3): 33-35. (JI Lin, FENG Zhao-xiang, ZHOU Shi-zhong. Study on Jiangyin Bridge north anchoring sunk shaft foundation displacement process[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2001, 18(3): 33-35. (in Chinese))
- [3] 吴中如, 顾冲时, 沈振中, 等. 大坝安全综合分析和评价的理论、方法及其应用[J]. 水利水电科技进展, 1998, 18(3): 2-6. (WU Zhong-ru, GU Chong-shi, SHEN Zhen-zhong, et al. Theory and application of dam safety synthetical analysis and assessment[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1998, 18(3): 2-6. (in Chinese))
- [4] 陈志坚, 周世忠, 卓家寿. 大跨径悬索桥地基基础安全监控模型的研究思路及技术路线[J]. 中国工程科学, 2002, 4(6): 20-24. (CHEN Zhi-jian, ZHOU Shi-zhong, ZHUO Jia-shou. Technical methods to make safety monitoring and forecast models for the foundation of long suspension bridges[J]. Engineering Science, 2002, 4(6): 20-24. (in Chinese))
- [5] 李永盛. 江阴长江公路大桥北锚碇模型试验研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 1995, 23(2): 134-140. (LI Yong-sheng. Experimental study on the north anchorage of the Jiangyin Yangtze Bridge[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1995, 23(2): 134-140. (in Chinese))
- [6] 胡应德, 叶枫, 陈志坚. 土体邓肯-张非线性弹性模型参数反演分析[J]. 土木工程学报, 2004, 37(2): 54-57. (HU Ying-de, YE feng, CHEN Zhi-jian. Back-performing analysis for parameters of Duncan-Chang nonlinear-elastic soil model[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(2): 54-57. (in Chinese))

- [7] 李筱艳,陈志坚,董学武,等. 长江下游桥梁工程地基土体渗透特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(10):1692-1696. (LI Xiao-yan, CHEN Zhi-jian, DONG Xue-wu, et al. Study on permeability of foundation soil of bridges on lower reaches of Yangtze River[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(10): 1692-1696. (in Chinese))
- [8] 赵启林,陈斌,卓家寿. 悬索桥锚碇及地基基础中的力学问题研究动态[J]. 水利水电科技进展,2001,21(1):22-26. (ZHAO Qi-lin, CHEN Bin, ZHUO Jia-shou. Developments in mechanical analysis of suspension bridges' anchorage and foundation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2001, 21(1): 22-26. (in Chinese))
- [9] 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 monitoring of the north anchorage of Jiangyin Yangtze River Highway Bridge[J]. Foreign Bridges, 2000(4): 56-59. (in Chinese))
- [10] 胡世德,范立础. 江阴长江公路大桥纵向地震反应分析[J]. 同济大学学报:自然科学版,1994,22(4):43-48. (HU Shi-de, FAN Li-chu. The longitudinal earthquake response analysis for the Jiangyin Yangtze River Bridge[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1994, 22(4): 43-48. (in Chinese))

Monitoring model for safety of large caisson foundation in soft soil

CHEN Song, CHEN Zhi-jian

(College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to raise the stability of evaluation and the effectiveness of safety monitoring of large caisson foundations in soft soil, the caisson foundation at the north anchorage of the Jiangyin Yangtze River Bridge was examined as an example. Based on studies on the factors influencing its stability and safe operation, the main structure of the monitoring system was discussed. Three monitoring models respectively for the horizontal displacement of cable saddles, the horizontal reaction force of the foundation soil in front of the caisson and the reaction force at the foundation bottom were established for evaluation of the following three monitoring aspects: the displacement of the foundation, the anti-sliding stability of the foundation, and the stability of the foundation soil. On the basis of the observed data and numerical simulation results, the main components of the cause quantity in the monitoring models and its relationship with the effect quantity were discussed. A specific expression during the period of traffic operation was proposed for the main monitoring model of the caisson foundation at the north anchorage of the Jiangyin Yangtze River Bridge, that is, the monitoring model for the horizontal displacement of cable saddles. The results show that the displacement of the foundation is the control factor for large caisson foundations in soft soil. The monitoring model is helpful to the safe operation of similar structures.

Key words: soft soil; caisson foundation; anchorage; monitoring model; Jiangyin Yangtze River Bridge