

输水隧洞动态监控指标拟定方法

杨 阳¹, 何勇军^{1,2}, 徐海峰¹, 李宏恩¹, 尹志灏¹

(1. 南京水利科学研究院大坝安全与管理研究所, 江苏 南京 210029;

2. 水利部大坝安全管理研究中心, 江苏 南京 210029)

摘要: 为确保输水隧洞工程运行期的安全, 需针对工程特点建立有效的动态监控指标。在分析研究输水隧洞监测方法、工程运行安全影响因素的基础上, 选择内外水压力、温度、隧洞衬砌混凝土和围岩变形等影响因子, 构建输水隧洞安全监控指标模型, 按照置信区间法原理拟定监控指标。将长时段监测数据分段分析处理, 同时引入移动平均滤波算法, 提出了输水隧洞动态监控指标的拟定方法。实例计算结果表明, 所提出的方法能确定测点的动态监控指标。

关键词: 输水隧洞; 监控指标; 动态监控; 影响因素

中图分类号: TV698.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2018)05-0081-05

Determination method of dynamic monitoring indexes for water conveyance tunnels// YANG Yang¹, HE Yongjun^{1,2}, XU Haifeng¹, LI Hongen¹, YIN Zhihao¹ (1. Dam Safety Management Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Dam Safety Management Center of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract: To ensure the safety of the water conveyance tunnels in the operation period, effective dynamic monitoring indexes should be established according to the engineering characteristics. Based on the analysis of the monitoring methods and the influence factors of operation security, a safety monitoring model of water conveyance tunnel is established. The proposed model considers the influence factors such as internal and external water pressure, temperature, deformation of lining concrete and surrounding rock. The monitoring indexes are determined by the confidence interval method. The long-period monitoring data are segmented and analyzed, and the moving average filtering algorithm is introduced to determine the dynamic monitoring indexes for water conveyance tunnels. The calculation result of an engineering example shows that the dynamic monitoring indexes at measuring points can be determined by the proposed method.

Key words: water conveyance tunnel; monitoring indexes; dynamic monitoring; influence factors

为了对水资源进行合理调配, 国内近年开始了引汉济渭、引大济淠、滇中调水等大量输调水工程的建设, 输水隧洞是这些工程的主要建筑物。由于输水隧洞的安全直接关系到工程供水系统的稳定, 其安全研究成为近年来的热点^[1]。大量学者从洞室结构、岩体稳定性、施工特征等角度进行了研究^[2-3], 此外还通过施工期的超前预报来确保工程施工期的安全^[4-5]。然而由于输水隧洞距离长, 工程穿越的地质条件复杂, 外在环境多样, 同时输水隧洞安全研究受到岩土力学理论及勘测技术的限制, 目前, 缺少评估输水隧洞运行期安全状况的有效手段^[6]。考虑到输水隧洞的安全状况取决于设计、施工的合理性, 但也能通过工程运行期的安全监测予以反映, 输水隧洞监测信息可为工程安全分析评估提供科学依据, 因此确定输水隧洞的监控指标是实现输水隧

洞安全管理重点^[7]。由于隧洞工程性态、外在环境的不断变化, 在监控指标的基础上, 建立输水隧洞的动态监控指标更能适应输水隧洞的安全监控需求^[8]。为此, 本文在分析研究输水隧洞监测方法、工程运行安全影响因素的基础上, 选择内外水压力、温度、隧洞衬砌混凝土和围岩变形等影响因子, 构建输水隧洞安全监控指标模型, 按照置信区间法原理拟定监控指标。将长时段监测数据分段分析处理, 同时引入移动平均滤波算法, 提出了输水隧洞动态监控指标的拟定方法。同时, 结合实际工程监测数据, 验证分析方法的可行性。

1 输水隧洞监测方法

输水隧洞因工程地质条件、埋深及施工方法等差异, 监测方法根据所需监控的项目不同也会不同。

输水隧洞安全监测的监测类型^[9-10]主要包括:变形监测、渗透压力监测、应力应变监测等。施工期监测主要包括围岩变形、松弛、裂化的监测和爆破振动监测;运行期重点监测工程长期运行稳定状态,包括围岩和衬砌结构的应力应变、金属结构的应力应变、内外水压力、渗漏、地表沉降监测等。监测项目一般依据工程规模、重要性、地质条件等因素选取。如工程断面岩体完整性差、地质条件变化较大,则施工时应针对施工段前方岩体进行监测;在高地应力脆性岩体中施工,有可能产生岩爆,需要对岩爆进行监测或预测;对于浅埋隧洞,运行期的地表沉降和拱顶沉降量是极其重要的,需要对其进行监测。

相对施工期,输水隧洞在运行期受到的荷载类型较多,荷载组合相对复杂。同时运行期相对施工期监测项目增多,为实现输水隧洞长期安全监控,需着重关注运行期的监测信息。如对围岩和衬砌的应力应变监测,一般采用多点位移计、滑动式位移计、多向应变计进行监测;对围岩和衬砌之间的相对变形和受力监测,相对变形一般采用测缝计监测,围岩与衬砌间的接触压力通常采用压力盒监测;针对钢筋、锚索、锚杆等金属构件的监测,可以采用粘贴在构件表面的应变片,也可以直接采用钢筋计、锚杆应力计、锚索测力计;针对内外水压力的监测,主要通过在不同位置埋设渗压计进行监测,或将渗水引流集中测量渗漏量。此外,还需测量输水隧洞的其他信息,包括环境量和水质。环境量主要包括温度、气压等,水质包括水污染、酸碱度、氯离子成分等。

2 运行期动态影响因素及指标因子

输水隧洞的埋深、高跨比、围岩的种类和力学性质、支护方式、隧洞的结构和尺寸都会对隧洞稳定产生影响,此外隧洞所处部位断层的分布、裂隙水压、地震都会对隧洞运行稳定性带来影响。在输水隧洞进入运行期后,其结构尺寸等因素较为稳定,但受力条件、地质状况及自身混凝土材料性能都逐渐产生变化,甚至劣化,导致输水隧洞运行性态产生动态变化。其中,地质构造、岩体结构、衬砌支护材料性能是影响隧洞岩体稳定性的关键因素。随着输水隧洞通水运行,工程途经的不同地质结构、结构面、裂隙、断层及褶曲等都会产生变化,衬砌支护混凝土逐渐碳化、老化、开裂,抗压抗拉性能下降,钢筋锈蚀,锚索松弛。这些动态变化的因素都会直接影响到输水隧洞运行稳定。通过分析围岩应力应变等相关监测数据,可以间接获得不同结构断面、裂隙及断层、衬砌混凝土强度等的变化信息。

此外,输水隧洞在运行期承受内外水压力同时

作用,外水压力通常会对隧洞稳定性造成不利影响,是影响围岩稳定的重要不利因素。这主要表现在,隧洞开挖时洞周形成自由面,透水性的围岩在开挖面上形成渗压梯度,增加了周围围岩向洞内运动的推动力。正常运行时,外水压力转化为静水压力,裂隙饱和水和孔隙水压力使得岩体的有效压应力减小,岩体的应力状态恶化,随着围岩中的含水量和饱和度的增加,降低了岩体的变形模量和强度,造成围岩的不稳定。对输水隧洞的渗透压力进行监测,是最为直观有效地获取隧洞内外水压力的途径。

因此,围岩和衬砌结构的应变、变形监测数据,内外水压力监测数据,应作为输水隧洞监控诊断的主要指标因子。借助不同监测仪器,获得输水隧洞的岩体、衬砌变形,内外水压力监测数据,考虑隧洞衬砌与围岩共同承受内、外水压力荷载及其他荷载的作用,才能建立有效的监控模型^[11-12]。

3 输水隧洞监控模型

以围岩变形,围岩和衬砌裂缝开合度作为监控指标,并考虑输水隧洞受到水压力、温度、围岩裂隙及断层等因素变化的综合影响,输水隧洞的监控模型基本关系式^[13-15]表示为

$$\delta = \delta_p + \delta_T + \delta_\theta \quad (1)$$

式中: δ 为总变形量; δ_p 为水压力对应的变形分量; δ_T 为温度变化对应的变形分量; δ_θ 为围岩徐变、地质结构、裂隙变化、混凝土老化等因素综合作用对应的变形分量,通常称为时效分量。

a. 水压力对应的变形分量。在输水隧洞受到对称均匀外水压力 P 作用下,径向变形和 P 成正比,隧洞的水压力对应的变形分量可以表示为

$$\delta_p = a_1 P \quad (2)$$

式中: P 为观测日当天的外水压力; a_1 为回归系数。

b. 温度变化对应的变形分量。温度变化对应的变形分量是由于隧洞衬砌混凝土和围岩温度变化引起的位移,因此,从力学观点来看,温度变化对应的变形分量应选择混凝土和基岩的温度计测值作为因子。当隧洞衬砌混凝土和围岩布设有足够数量的内部温度计时,其测值可以反映温度场的变化情况,可以用实测温度作为因子,温度变化对应的变形分量可以表示为

$$\delta_T = \sum_{i=1}^m b_i T_i \quad (3)$$

式中: T_i 为第 i 个温度计的测值; b_i 为回归系数; m 为温度计的个数。

c. 时效分量。隧洞变形时效分量产生的原因复杂,它综合反映隧洞混凝土和围岩的徐变、塑性变

形以及围岩地质构造的压缩等时效因素的作用效果,同时还包括隧洞混凝土裂缝引起的不可逆位移以及自生体积变形。隧洞开挖并及时支护后,在考虑支护与围岩的联合作用时,围岩可当作黏弹性体^[13]。当隧洞开挖后立即支护时,洞壁的径向位移和时间有如下关系:

$$u_t = u_{\max}(1 - e^{-\beta t}) \quad (4)$$

式中: t 为时间; u_t 为时刻 t 的径向位移; u_{\max} 为洞室变形量的最终稳定值; β 为参数。为应用方便,式(4)可用下式代替:

$$u_t = t/(A + Bt) \quad (5)$$

式中: A 、 B 为参数,由实测资料经回归分析确定^[8]。

针对不同工程类型,时效分量的数学模型可选择指数函数、双曲函数、多项式、对数函数、指数函数(或对数函数)附加周期项、线性函数。考虑到输水隧洞多种因素的复杂作用,通常认为正常运行的输水隧洞,时效分量变化的规律为初期变化急剧,后期渐趋稳定。按照式(5)的形式,时效因子通常选为 θ 和 $\ln\theta$ (θ 为观测日减去基准日的天数除以100),因此变形的时效分量可表达为

$$\delta_\theta = c_1\theta + c_2\ln\theta \quad (6)$$

式中: c_1 、 c_2 为系数。

4 输水隧洞动态监控指标拟定方法

在输水隧洞监控模型的基础上,可以进行输水隧洞监控指标的拟定。常用的监控指标的拟定方法包括极限状态法、结构分析法、置信区间法和典型监控效应量的微小概率法。其中,极限状态法和结构分析法需分析工程地质条件及受力特征,建立有限元仿真模型,但输水隧洞地质条件复杂,岩土体力学参数较难准确获取,据此较难拟定多个不同断面的监控指标。微小概率分析法通过分析对结构强度或稳定不利的荷载组合所产生的效应量,并根据以往观测资料来估计监控指标,但需要有长期监测资料,且工程需真正遭遇较不利荷载组合,但输水隧洞本身遭遇不利工况的情况较少,且输水隧洞工程各异,很难找到类似工程进行类比。因此按照微小概率法拟定监控指标难度较大^[16]。

置信区间法在国内外被普遍采用,其基本原理是统计理论的小概率事件^[17-18],即根据以往的观测资料用统计理论或有限元方法建立效应量与荷载之间的数学模型,并用这些模型计算在各种荷载作用范围内的监测量 \hat{y} 与实测值 y 的差值,若该差有 $1-\alpha$ (α 为显著性水平)的概率落到置信区间 $(-\Delta, \Delta)$ 范围内,可将 Δ 作为监控指标,且测值过程无明显趋势性变化,则认为工程运行正常,反之则认为异常。

常的,此时相应的监测效应量的监控指标为 $y_m = y \pm \Delta$ 。因此,本文按照置信区间法,利用统计模型计算得到的数据拟定监控指标。

输水隧洞的安全运行性态是随着时间和外在因素动态变化的。伴随现代计算机和自动化控制技术的发展,工程安全监测数据采集可以做到一日多次实时传输。在获得最新数据后,可以在分析模型中纳入新的数据,剔除旧的数据,确保数据长度不变的条件下,建立逐时间段的统计模型。在统计模型计算结果的基础上,进行平滑滤波得到不同时间段的监控指标,实现基于监控系统的实时动态监控目的。本文按照时间顺序,选取最新时段分析建模。在监测数据的时间序列上建立一个固定可滑动的时间窗口^[19],伴随新数据的不断获取,截取包含最新时段时间窗内的数据进行建模分析,形成移动统计模型。例如,到当前时刻,总测次为 n 次,设定对应时间窗的测次固定为 N ,且 $n > N$,可以取 n 次测量中最新的 N 次测量数据进行分析。多次计算中,不断引入新的数据,放弃旧的数据,形成一种动态实时的分析过程。第 i 次测量获得对应的监控模型为

$$\delta_i = \delta_{p_i} + \delta_{T_i} + \delta_{\theta_i} \quad (7)$$

式中: δ_{p_i} 为第 i 次测量后最新的 N 次水压力数据对应的变形分量; δ_{T_i} 为第 i 次测量后最新的 N 次温度监测数据对应的变形分量; δ_{θ_i} 为第 i 次测量后最新的 N 次测量数据对应的实效分量。

为了降低噪音的影响,对历史 i 组诊断模型监控指标 $\Delta_{m1}, \Delta_{m2}, \dots, \Delta_{mi}$ 计算得到的数据进行移动平滑滤波计算,得到融入第 i 次测量数据后的模型平滑拟合值。公式可表示为

$$\bar{\Delta}_i = \frac{1}{3} \sum_{j=i-2}^i \Delta_{mj} \quad (i = 3, 4, \dots, n) \quad (8)$$

式中 $\bar{\Delta}_i$ 为第 i 次测量数据后的模型平滑拟合值。

通过实测值及模型平滑拟合值,取不同显著性水平,可以得到对应的动态监控指标,对于第 i 次测量后计算得到的监控指标 $\bar{\Delta}_i$,可以建立监控值的安全区间。对于 t 时刻的实时状态,通过模型计算出预报值 y_t ,得到监控指标最大值为 $y_t + \bar{\Delta}_i$,监控指标最小值为 $y_t - \bar{\Delta}_i$ 。由于监控指标 $\bar{\Delta}_i$ 是按照监控状态变化的,其监控值的范围也是变化的,从而实现用动态监控范围进行实时监控。

5 工程算例

某输水工程由水库、水源枢纽工程、泵站、输水隧洞等组成,其中水库至目的地距离长达214 km。

工程某段隧洞监测断面布置有3套多点位移计(3测点式,测点深度分别为10.0 m、4.0 m和

1.5 m)、3 组锚杆应力计(3 测点式,测点深度分别为 3.5 m、2.0 m 和 0.8 m)、3 支测缝计(分别位于隧洞的顶部、左侧和右侧)、8 支钢筋计(分别位于隧洞的顶部、左侧、右侧和底部)和 3 支渗压计(分别位于隧洞的顶部、左侧和底部),用于监测隧洞围岩的深部变形、支护锚杆的应力变化、围岩与衬砌接缝处的开合度变化、衬砌的外水压力和衬砌钢筋的应力等。

选择该断面的多点位移计(符号为 M)和测缝计(符号为 J)的监测数据建立统计模型,数据系列起止日期为 2010 年 9 月 19 日至 2012 年 11 月 9 日。采用逐步回归分析计算统计模型参数,分为 3 个计算时段:2010 年 9 月 19 日至 2012 年 9 月 9 日、2010 年 10 月 19 日至 2012 年 10 月 9 日、2010 年 11 月 19 日至 2012 年 11 月 9 日,时段标记 i 分别为 1、2、3。其中水压力对应的变形分量考虑外水压力的 1、2、3 次项。由于大多数测点都有伴测温度数据,因此温度变化对应的变形分量按式(3)选择多点位移计和测缝计的伴测值作为因子。时效分量选择时间的对数函数与线性函数组合。得到单次监控模型为

$$\delta = \delta_p + \delta_T + \delta_\theta = a_1 P + \sum_{i=1}^m b_i T_i + c_1 \theta + c_2 \ln \theta \quad (9)$$

表 1 为该断面多点位移计和测缝计监测数据第一组时段模型的复相关系数和剩余标准差计算结果。图 1 为多点位移计 M-2-1 实测及拟合位移过程线。

表 1 某断面多点位移计和测速计监测数据模型复相关系数及剩余标准差

编号	复相关系数	剩余标准差
M-1-1	0.77	0.12
M-1-2	0.84	0.51
M-1-3	0.79	0.20
M-2-1	0.99	0.03
M-2-2	0.89	0.02
M-2-3	0.94	0.02
M-3-1	0.88	0.06
M-3-2	0.92	0.06
M-3-3	0.99	0.03
J-1	0.87	0.08
J-2	0.96	0.11
J-3	0.93	0.20

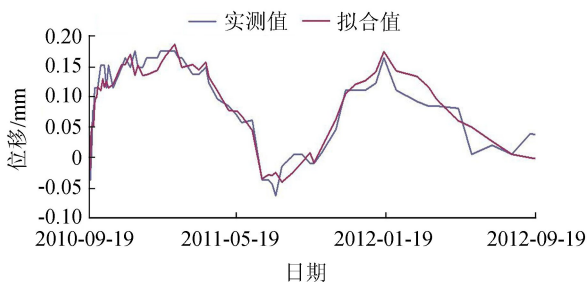


图 1 多点位移计 M-2-1 实测及拟合位移过程线

从表 1 可以看出大部分多点位移计测点和测缝计测点监测数据的建模结果较好,复相关系数较高,表明所建立的回归模型精度较高。

选择建模结果较好的 4 个测点数据,进行指标计算,显著性水平取 0.975,实时监控中时间到达第 2 和第 3 时段末期,计算机开始自动计算并保存,在第 3 个时段末,对应 3 个监控指标值为 Δ_{m1} 、 Δ_{m2} 、 Δ_{m3} (表 2),进行均值滤波得到对应部位的动态监控指标 $\bar{\Delta}_3$ (表 2),作为第 3 时段后的监控指标。实时监控中,结合实时数据获得指标区间,对于时刻 t ,对应的模型拟合值为 y_t ,则对应的最大监控指标值为 $y_t + \bar{\Delta}_3$,最小监控指标值为 $y_t - \bar{\Delta}_3$ 。

表 2 多点位移计及测缝计监控指标值 mm

测点编号	Δ_{m1}	Δ_{m2}	Δ_{m3}	$\bar{\Delta}_3$
M-2-1	0.210	0.188	0.175	0.191
M-3-2	0.140	0.125	0.116	0.127
M-3-3	0.142	0.127	0.118	0.129
J-2	0.089	0.080	0.074	0.081

6 结 语

针对输水隧洞地质条件复杂、外在环境多样,监测类型多样的特点,分析了输水隧洞施工期和运行期的监测项目,并着重研究了影响运行工程安全性的动态影响因素和指标因子特点;针对内外水压力、温度、隧洞衬砌土和围岩的徐变等时效因素,研究了输水隧洞安全监控指标模型和指标构建方法;在此基础上,引入移动平均滤波算法,提出了输水隧洞动态监控指标的拟定方法。结合某个输水隧洞多点位移计和测缝计的多年监测数据,计算得到了对应测点的动态监控指标。

参考文献:

- [1] 洪开荣. 我国隧道及地下工程近两年的发展与展望隧道建设[J]. 隧道建设, 2017, 37(2): 123-134. (HONG Kairong. State of art and prospect of tunnels and underground works in China[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(2): 123-134. (in Chinese))
- [2] 王江. 秦岭特长输水隧洞软岩段断面设计与施工[J]. 铁道建筑, 2017(4): 76-79. (WANG Jiang. Cross section design and construction method of Qinling Super-long Diversion Tunnel in soft rock[J]. Railway Engineering, 2017(4): 76-79. (in Chinese))
- [3] 刘亚鹏. 引汉济渭秦岭隧洞 TBM 段软岩大变形研究[D]. 西安:西安理工大学, 2015.
- [4] 张星. 焠盾构法施工超前地质预报初探[D]. 北京:北京市市政工程研究院, 2016.
- [5] 黄霄寒. 综合物探技术在隧道岩溶超前预报中的应用研究[D]. 成都:成都理工大学, 2016.
- [6] 何勇军, 范光亚, 徐海峰, 等. 输水隧洞安全监控与预

- 警技术研究进展[J]. 东北水利水电, 2014, 32(10): 48-50. (HE Yongjun, FAN Guangya, XU Haifeng, et al. Research progress of safety monitoring and early warning technology for water conveyance tunnel [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2014, 32(10): 48-50. (in Chinese))
- [7] 吴中如, 顾冲时. 重大水工混凝土结构病害检测与健康诊断[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [8] 刘志宽. 输水隧洞检测和安全评价[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [9] 范光亚, 何勇军, 李宏恩, 等. 超长输水隧洞多种类传感器数据传输方式[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(3): 85-88. (FAN Guangya, HE Yongjun, LI Hongen, et al. Information communication method of multiple sensors for super long distance water delivery tunnel[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(3): 85-88. (in Chinese))
- [10] 王晓哲. 环锚无粘结预应力混凝土衬砌隧洞在线监测及安全评价研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [11] 吴中如, 顾冲时, 苏怀智, 等. 水工结构工程分析计算方法回眸与发展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(5): 395-405. (WU Zhongru, GU Chongshi, SU Huaizhi, et al. Review and prospect of calculation analysis methods in hydro-structure engineering [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2015, 43(5): 395-405. (in Chinese))
- [12] 郑东健, 顾冲时, 吴中如. 边坡变形的多因素时变预测模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 107-110. (ZHENG Dongjian, GU Chongshi, WU Zhongru. Time series evolution forecasting model of slope deformation based on multiple factors [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 107-110. (in Chinese))
- [13] 吴中如. 水工建筑物安全监控理论及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [14] 赵二峰. 大坝安全的监测数据分析理论和评估方法[M]. 南京: 河海大学出版社, 2018.
- [15] 顾冲时, 吴中如. 大坝与坝基安全监控理论和方法及其应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 2006.
- [16] 李占超, 侯会静. 大坝安全监控指标理论及方法分析[J]. 水力发电, 2010, 36(5): 64-67. (LI Zhanchao, HOU Huijing. Theory and Methods on Dam Safety Monitoring Indexes[J]. Water Power, 2010, 36(5): 64-67. (in Chinese))
- [17] WANG S W, GU C S, BAO T F. Observed displacement data-based identification method of deformation time-varying effect of high concrete dams[J]. Science China (Technological Sciences), 2018, 61(6): 906-915.
- [18] 尹雪岩. 因子分析多元统计方法在过程监控中的应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2011.
- [19] 邓可卉. 古代中国与古希腊回归年长度测算中若干问题的比较研究[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版), 2006, 35(1): 117-122. (DENG Kehui. A comparison study on some problems of the observation and calculation of the Solar year in ancient China and Greece [J]. Journal of Inner Mongolia Normal University(Natural Science Edition), 2006, 35(1): 117-122. (in Chinese)) (收稿日期: 2018-05-02 编辑: 雷燕)

(上接第 26 页)

- [8] 高有斌, 刘汉龙, 张敏霞, 等. 强夯加固地基的土体竖向位移计算方法研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2671-2676. (GAO YouBin, LIU Hanlong, ZHANG Minxia, et al. Simplified calculation method of soil vertical displacement under dynamic compaction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2671-2676. (in Chinese))
- [9] 贺成斌, 赵明华, 马宾辉, 等. 格栅套筒加筋碎石桩复合地基沉降计算方法[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(2): 88-94. (HE Chengbin, ZHAO Minghua, MA Binhui, et al. Calculation method for settlement of composite foundation reinforced with geogrid-encased stone columns[J]. Advance in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(2): 88-94. (in chinese))
- [10] 彭渊, 刘刚, 严其芳, 等. 空箱对某深厚软土地基水闸翼墙及桩基础位移的影响[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(3): 61-65. (PENG Yuan, LIU Gang, WANG Wenshuang. Effect of the empty container on displacement of wings and pile foundation of the sluice in deep soft soil foundation[J]. Advance in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(3): 61-65. (in chinese))
- [11] 王斯海, 陈海军, 王世坚. 不同土层结构场地强夯振动效应研究[J]. 施工技术, 2016(增刊 1): 15-19. (WANG Sihai, CHEN Haijun, WANG Shijian. Study on vibration effect by dynamic compaction in different site condition of soil layer[J]. Construction Technology, 2016(Sup1): 15-19. (in Chinese))
- [12] 姚仰平, 张北战. 基于体应变的强夯加固范围研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(9): 2663-2671. (YANG Yangping, ZHANG Beizhan. Reinforcement range of dynamic compaction based on volumetric strain[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(9): 2663-2671. (in Chinese))
- [13] 王保田, 唐劲柏. 强夯碎石桩的发展及成桩机理分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1999, 27(6): 30-34. (WANG Baotian, TANG Jinbai. Development of DRM and analysis of column-formation mechanism[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 1999, 27(6): 30-34. (in chinese))
- [14] 雷国辉, 赵维炳, 施建勇. 锤击打入桩与土的共同作用分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1999, 27(2): 55-59. (LEI Guohui, ZHAO Weibing, SHI JianYong. Analysis of interaction between driven pile and soil[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 1999, 27(2): 55-59. (in chinese)) (收稿日期: 2018-06-19 编辑: 骆超)