

基于土拱效应的桩网结构路基稳定性可靠度分析

李利峰,李二强,邓慧琳

(贵州工程应用技术学院,贵州 毕节 551700)

摘要:基于路基土拱效应的应力集中现象,并考虑荷载及土体参数的变异性,建立了桩网结构路基稳定性的可靠度计算模型,给出了可靠度分析的计算方法及流程。以某一典型高速公路桩网结构路基进行稳定性分析为例,分别利用安全系数法和可靠度方法设计了该桩网结构路基加固桩长度,并基于荷载及土体参数变异性,对可靠度指标进行了敏感性分析,结果表明:荷载及土体参数的变异性对桩网结构路基的稳定性影响显著,利用可靠度方法来计算桩网结构路基加固桩长度的设计更为安全和合理;需要特别注意第二层土的极限侧阻力及路基面附加荷载变异性的影响,而路基填料内摩擦角及加固桩极限端阻力可当作常量来处理。

关键词:桩网结构路基;加固桩长度;土拱效应;可靠度计算模型;可靠度指标

中图分类号:TU473.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2017)01-0079-05

Reliability analysis of stability evaluation of pile-supported embankment based on soil arching effect//LI Lifeng, LI Erqiang, DENG Huilin(*Guizhou University of Engineering Science, Bijie 551700, China*)

Abstract: Based on the phenomenon of stress concentration induced by the soil arching effect and the variability of loads and soil parameters, a model for reliability analysis of stability evaluation of the pile-supported embankment was built, and the reliability index calculation method and flow chart were presented in this paper. Taking a typical pile-supported embankment of a highway as an example for stability analysis, the reinforced pile length for the embankment was designed with the safety factor method and reliability index method, respectively, and sensitivity analysis of the reliability index was conducted based on the variability of loads and soil parameters. The results show that the variability of loads and soil parameters has a large influence on the stability of the pile-supported embankment, and it is more reliable and reasonable to use the reliability index method to design the reinforced pile length. The results also indicate that the limit lateral resistance of the second-layer soil and the variability of additional loads on the embankment surface should be given close attention, and the internal friction angle of embankment filling and the ultimate resistance of the reinforced pile can be treated as constants.

Key words: pile supported embankment; pile length; soil arching effect; model for reliability calculation; reliability index

桩网结构路基具有沉降小、施工速度快、稳定性高等优点,在我国高速铁路及高速公路建设中得到了广泛的应用^[1-3]。目前,对于桩网结构路基的设计主要依托于复合地基理论^[4],没有考虑到土拱效应的影响。由于桩身的刚度远远大于桩间软土,桩土之间会形成沉降差,从而在桩顶形成应力集中现象,此即所谓的土拱效应^[5-6]。由于路基土拱效应,桩顶所承担的土压力远远大于桩间土所承受的土压力及单桩范围内的平均土压力,单桩的稳定性将发生弱化。

现有的桩网结构路基设计中,主要利用安全系数来评价路基的稳定性^[7-8],但荷载及土体参数均具

有一定的不确定性^[9],因此利用安全系数来评价路基的稳定性具有一定的局限性。已有很多学者尝试利用可靠度方法来评价路基的稳定性,如梁燕等^[10]将洪水量作为随机变量,建立了路基抗冲刷稳定性的可靠度计算模型,并计算分析了影响路基抗冲刷稳定性的主要因素;龚文惠等^[11]考虑了含水量、孔隙比、固结度等影响因素的不确定性和随机性,利用模糊可靠度理论,对路基沉降进行了概率分析,计算发现确定性方法预测的路基沉降具有一定的局限性,可靠度方法预测路基沉降失效概率较为合理。目前对路基的可靠度研究较少,特别是桩网结构路基,本文基于土拱效应建立了桩网结构路基稳定性

的可靠度分析模型,且考虑路基面附加荷载和土体力学参数的随机性,利用计算得到的路基稳定性可靠度指标来指导设计加固桩的长度。

1 桩网结构路基稳定性可靠度分析

1.1 路基稳定性安全系数法计算模型

图 1 为桩网结构路基典型结构及计算示意图,该路基加固桩采用正方形布置形式,桩径为 a ,桩中心间距为 s ,桩帽为正方形,边长为 b 。路基填筑高度为 H ,平均密度为 ρ ;加固桩进入地基第 i 层土层的深度为 l_i ,在第 i 层土层中的极限侧阻力为 q_{si} ,加固桩极限端阻力为 q_p 。图 1 中 q 为路基面附加荷载,由于路基土拱效应,荷载将会在桩顶上方出现应力集中现象,因此会对路基加固桩的稳定性产生不利影响; p 为桩顶所承受的荷载。

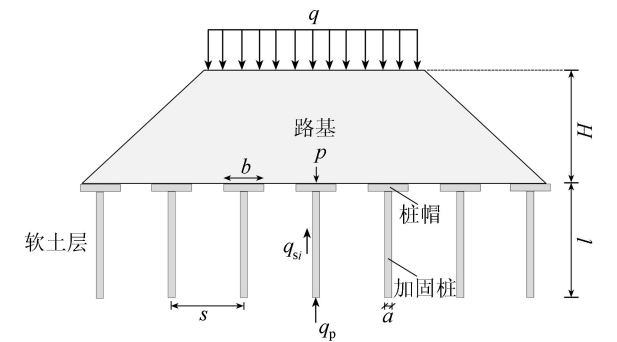


图 1 桩网结构路基典型结构及计算示意图

由 JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》,单桩极限承载力 R_a 主要由桩侧摩阻力以及桩端承载力提供,因此桩网结构路基加固桩的极限承载力计算公式为

$$R_a = \mu_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + \alpha q_p A_p \tag{1}$$

式中: u_p 为加固桩桩身周长, $u_p = \pi a$; α 为桩端天然地基土的承载力折减系数,取值范围为 0.4 ~ 0.6; A_p 为加固桩桩身截面面积, $A_p = \pi a^2 / 4$ 。

土拱效应引起的桩顶上方应力的集中程度直接受到路基填料特性以及桩土差异沉降等因素的影响。德国 EBGeo^[12] 考虑了路基填料内摩擦角、桩土差异沉降及路基的几何特性,基于 Zaeske 的多拱理论^[13] 推导得到了路基土拱计算公式。根据德国 EBGeo 土拱计算公式,桩间土所承担的应力 $\sigma_{v,r}$ 计算公式为

$$\sigma_{v,r} = \lambda_1^x \left(\gamma + \frac{q}{H} \right) \left\{ H(\lambda_1 + \lambda_2 h_g^2)^{-x} + h_g \left[\left(\lambda_1 + \frac{\lambda_2 h_g^2}{4} \right)^{-x} - (\lambda_1 + \lambda_2 h_g^2)^{-x} \right] \right\} \tag{2}$$

其中 $\lambda_1 = \frac{1}{8}(s - b)^2$ $\lambda_2 = \frac{s^2 + 2bs - b^2}{2s^2}$

$$\chi = \frac{b(K_s - 1)}{s\lambda_2} \qquad \gamma = \rho g$$

$$K_s = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \qquad h_g = \frac{s}{2}$$

式中: φ 为填料内摩擦角; h_g 为假定的土拱高度,取一半的桩间净距; λ_1 、 λ_2 、 χ 为中间过渡变量。

因此,桩顶所承受的荷载 p 的计算公式为

$$p = A_p \sigma_{v,p} = A_p \left[(\gamma H + q - \sigma_{v,r}) \frac{A_s}{A_p} + \sigma_{v,r} \right] \tag{3}$$

式中: $\sigma_{v,p}$ 为桩顶应力; A_s 为加固桩影响范围面积, $A_s = s^2$ 。

由于路基中心位置处加固桩所承担的荷载最大,因此该位置处加固桩的稳定性最差,本文对该位置处的加固桩进行稳定性分析。根据式(1)(2)分别计算得到中心位置处加固桩的极限承载力及所承担的荷载,由安全系数定义便能得到桩网结构路基稳定性安全系数 f_s 的计算公式为

$$f_s = \frac{R_a}{p} \tag{4}$$

1.2 路基稳定性可靠度计算模型

由式(1)~(4)可知,桩网结构路基稳定性与路基面附加荷载、土体参数及路基物理尺寸等因素密切相关。由于土体的物理性质复杂多变、试验条件受限及试验误差等因素,影响桩网结构路基稳定性的路基填料内摩擦角 φ 、加固桩极限侧阻力 q_{si} 、加固桩极限端阻力 q_p 、路基面附加荷载 q 等具有一定的变异性,因此需要将这些参数处理成随机变量;而路基物理尺寸及土体密度 ρ 的变异性通常非常小^[14],可忽略其变异性,因此本文将路基物理尺寸及土体密度考虑成常量。根据可靠度理论^[15],将加固桩极限承载力及所承受的荷载分别看成材料抗力效应及荷载效应,可建立桩网结构路基稳定性极限状态方程:

$$Z = g(\varphi, q_{si}, q_p, q) = R_a - p = \mu_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + \alpha q_p A_p - A_p \left[(\gamma H + q - \sigma_{v,r}) \frac{A_s}{A_p} + \sigma_{v,r} \right] = 0 \tag{5}$$

可靠度方法是将荷载及土体参数的不确定性用服从某种概率分布的随机变量来代替,利用可靠度指标 β 及失效概率 p_f 代替安全系数来评价桩网结构路基的稳定性,因此能够弥补安全系数法不能考虑路基面附加荷载及土体参数变异性的局限性。桩网结构路基稳定性可靠度指标 β 及失效概率 p_f 的计算方法有很多种,包括验算点法、一次二阶矩法等,而蒙特卡罗方法是其中最为常用及有效的一种方法。根据可靠度理论,失效概率 p_f 及可靠度指标 β 的计算公式为

$$p_f = P(Z \leq 0) \quad (6)$$

$$\beta = \Phi^{-1}(1 - p_f) \quad (7)$$

式中 $\Phi(\cdot)$ 为标准正态累积分布函数。

采用蒙特卡罗方法计算失效概率 p_f 和可靠度指标 β 时,首先设定样本容量 N ,根据各个随机变量的概率分布函数分别各自随机抽取 M 个样本,得到 M 组随机变量样本;然后分别将这 M 组随机变量样本代入式(6)得到桩网结构路基稳定性的失效概率,并将失效概率 p_f 代入式(7),进一步得到可靠度指标 β 。本文在应用蒙特卡罗法时,利用自编 Matlab 程序求解失效概率 p_f 及可靠度指标 β ,取样本数量 $M=10^7$ 。

2 可靠度计算方法及流程

由于桩网结构路基的稳定性主要取决于加固桩极限承载力及桩顶所承受的荷载,而加固桩极限承载力取决于加固桩长度,因此桩网结构路基设计中的关键是选择合适的加固桩长度,使得路基稳定性满足相应的设计要求。加固桩长度设计流程如下:①首先假定一个桩长 l_1 ,根据式(2)计算该桩长下加固桩的极限承载力 R_a ;②利用式(3)计算该加固桩所承受的荷载 P ;③在得到 R_a 及 P 后,利用式(5)建立该桩网结构路基稳定性的极限状态方程;④根据统计得到的相关随机变量的均值及变异系数,利用蒙特卡罗方法计算得到 l_1 桩长时该桩网结构路基稳定性的可靠度指标 β_1 ,若 β_1 大于给定的目标可靠度指标 β_{sat} ,则减小桩长;反之则加大桩长;⑤重复前4步,直到某一桩长 l 时计算得到的可靠度指标等于目标可靠度指标,此时的 l 即为该桩网结构路基加固桩设计所需的最小值。

本文利用可靠度方法计算桩网结构路基稳定性及确定加固桩长度时,需要作出以下假定:①随机变量的均值和变异系数在同一土层范围内均相同;②各随机变量之间是相互独立的,不考虑各随机变量之间的相关性。

3 工程实例分析

3.1 典型计算工况

取某一典型桩网结构路基进行稳定性分析,基本参数如下:路基填筑高度 $H=6$ m,坡高比为 $1:1.5$,路基填料密度 $\rho=2.0$ t/m³,内摩擦角 $\varphi=40^\circ$;加固桩直径 $a=0.5$ m,正方形布置,中心间距 $s=1.8$ m;桩帽形状为正方形,宽度 $b=1$ m。地基土层有两层,第一层厚度为 5 m,加固桩极限侧阻力 $q_{s1}=15$ kPa;第二层厚度为 25 m,加固桩极限侧阻力 $q_{s2}=25$ kPa,加固桩极限端阻力 $q_p=200$ kPa;路基面

附加荷载 $q=40$ kPa。

3.2 加固桩长度的常规设计

利用基于土拱效应的桩网结构路基稳定性的确定性计算公式(式(4))计算得到不同加固桩长度下该桩网结构路基稳定性的安全系数如表1所示。由表1可知,随着加固桩长度的增加,加固桩极限承载力会显著增大,而加固桩所承受的荷载不变,因此路基稳定性安全系数显著增大。该桩网结构路基稳定性的安全系数随加固桩长度的加长基本呈现线性增大。根据 TB 10621—2014《高速铁路设计规范(试行)》,可以取该桩网结构路基稳定性的安全系数控制值 $F_s=1.3$ 。由表1可知,当加固桩长度为 18.8 m时,路基稳定性安全系数刚好为 1.3 ,满足规范对安全系数控制值的设计要求,因此该桩网结构路基的加固桩长度至少需要设计 18.8 m。

表1 不同加固桩长度下路基稳定性安全系数

加固桩长度 l /m	路基稳定性安全系数 f_s	加固桩极限承载力 R_a /kN	桩顶荷载 p /kN
16.1	1.1	569.4	518.4
17.5	1.2	624.4	518.4
18.8	1.3	675.4	518.4
20.1	1.4	726.5	518.4
21.4	1.5	777.5	518.4

3.3 加固桩长度的可靠度设计

根据前文所建立的路基稳定性可靠度计算模型,可假定路基填料内摩擦角 φ 、桩侧第一层土的极限侧阻力 q_{s1} 、桩侧第二层土的极限侧阻力 q_{s2} 、加固桩极限端阻力 q_p 、路基面附加荷载 q 为相互独立的正态随机变量,各计算参数的均值分别为: $\varphi=40^\circ$, $q_{s1}=15$ kPa, $q_{s2}=25$ kPa, $q_p=200$ kPa, $q=40$ kPa。由文献[15]可知, φ 的变异系数大致为 $0.1 \sim 0.4$; q_{s1} 、 q_{s2} 的变异系数大致为 $0.1 \sim 0.2$; q_p 、 q 的变异系数大致为 $0.1 \sim 0.3$ 。将这5个随机变量的变异系数 δ 依次分成如表2所示的3种变异程度 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 进行分析,利用 Matlab 自编的程序,计算得到了在表2所示的3种变异程度下,不同的加固桩长度对应的该桩网结构路基稳定性可靠度指标如表3所示。由表3可知,这5个随机变量的变异性对可靠度指标有着显著的影响。随着计算参数变异性的增加,可靠度指标显著减小,失效概率显著增大,因此加固桩长

表2 不同变异程度计算参数所对应的变异系数

计算参数	不同变异程度时的变异系数		
	$\delta=\delta_1$	$\delta=\delta_2$	$\delta=\delta_3$
φ	0.1	0.25	0.4
q_{s1}	0.1	0.15	0.2
q_{s2}	0.1	0.15	0.2
q_p	0.1	0.20	0.3
q	0.1	0.20	0.3

表 3 不同加固桩长度下路基稳定性可靠度指标				
加固桩长度 l/m	不同变异程度时路基稳定性可靠度指标 β			路基稳定性安全 系数 f_s
	$\delta=\delta_1$	$\delta=\delta_2$	$\delta=\delta_3$	
17.1	3.00	2.15	1.43	1.17
19.7	3.76	3.00	2.09	1.37
22.3	4.77	3.94	3.00	1.57

度需要设计得更长。如加固桩长度 $l=17.1\text{ m}$, 当计算参数的变异程度由 δ_1 增加到 δ_2 时, 可靠度指标 β 由 3.00 降低到 2.37; 而当计算参数的变异程度增加到 δ_3 时, 可靠度指标则进一步降低到 1.68。

根据 Q/CR 9127—2015《铁路路基极限状态设计暂行规范(试行)》^[16], 可以假定该桩网结构路基稳定性的目标可靠度指标为 3.00。由表 3 可知, 当计算参数的变异程度为 δ_1 时, 加固桩长度 $l=17.1\text{ m}$ 时就能够满足目标可靠度指标的设计要求, 但此时路基稳定性安全系数 $f_s=1.17$, 并不满足安全系数控制值的设计要求; 当计算参数的变异程度为 δ_2 时, 加固桩长度 $l=19.7\text{ m}$ 时才能满足目标可靠度指标的设计要求, 而此时路基稳定性安全系数 $f_s=1.37$, 能够满足安全系数控制值的设计要求; 当计算参数的变异程度为 δ_3 时, 加固桩长度 $l=22.3\text{ m}$ 时才能满足目标可靠度指标的设计要求, 而此时路基稳定性安全系数 $f_s=1.57$, 远大于规范对路基稳定性安全系数控制值的设计要求。

对安全系数法以及可靠度方法的计算结果进行比较可知, 安全系数法由于忽略了荷载及土体参数变异性的影响, 计算得到的加固桩长度不受任何不确定性因素的影响, 因此具有一定的局限性。可靠度方法能够有效地考虑荷载及土体变异性的影响, 且随着荷载及土体参数的变异性的增大, 路基稳定性可靠度指标显著减小, 需要增大加固桩的长度才能满足规范对目标可靠度指标的设计要求。因此, 利用可靠度方法来指导桩网结构路基加固桩长度的设计较为安全和合理。

3.4 可靠度指标对计算参数变异性的敏感性分析

为了分析各随机变量的变异性对可靠度指标的影响程度, 取加固桩长度 $l=17.1\text{ m}$, 对路基稳定性可靠度指标关于各计算参数(φ 、 q_{s1} 、 q_{s2} 、 q_p 、 q) 进行敏感性分析, 结果如表 4 所示。当分析其中某一计算参数的变异性对可靠度指标的影响时, 其他计算参数的变异系数保持不变。

由表 4 可知, 随着计算参数 φ 、 q_{s1} 、 q_{s2} 、 q_p 、 q 变异性的增大, 可靠度指标均会显著减小, 失效概率均会显著增大。此外, q_{s2} 、 q 的变异性对可靠度指标影响最为显著; q_{s1} 的变异性对可靠度指标的影响次之; φ 、 q_p 的变异性对可靠度指标的影响非常小, 可忽略

表 4 可靠度指标与计算参数变异系数的关系								
计算参数	变异系数变化范围	可靠度指标 β			可靠度指标变化量 $\Delta\beta$			
		$\delta=\delta_1$	$\delta=\delta_2$	$\delta=\delta_3$	$\delta=\delta_1$	$\delta=\delta_2$	$\delta=\delta_3$	
φ	0.1~0.4	3.00~2.63	2.28~1.94	1.75~1.43	0.37	0.34	0.32	
q_{s1}	0.1~0.2	3.00~2.17	2.55~1.75	2.21~1.43	0.83	0.80	0.78	
q_{s2}	0.1~0.2	3.00~1.68	2.80~1.54	2.64~1.43	1.32	1.26	1.21	
q_p	0.1~0.3	3.00~2.57	2.32~1.91	1.83~1.43	0.43	0.41	0.40	
q	0.1~0.3	3.00~1.74	2.79~1.57	2.61~1.43	1.26	1.22	1.18	

不计。因此, 利用可靠度指标指导加固桩长度设计时, 需要特别注意第二层土的极限侧阻力 q_{s2} 及路基面附加荷载 q 的变异性对路基稳定性的影响, 而 φ 、 q_p 可当作常量来处理。

4 结 语

本文基于土拱效应建立了桩网结构路基稳定性的安全系数法计算模型, 在此基础上考虑荷载及土体参数为正态随机变量, 建立了桩网结构路基稳定性的可靠度分析模型, 给出了基于土拱效应的桩网结构路基稳定性可靠度分析模型的计算方法和流程。结合桩网结构路基典型设计工况, 分别利用安全系数法和可靠度方法对桩网结构路基加固桩长度进行了计算, 并对两种计算方法的计算结果进行了对比。计算结果表明: 利用可靠度方法指导加固桩长度设计时, 需要特别注意第二层土的极限侧阻力 q_{s2} 及路基面附加荷载 q 变异性的影响, 而路基填料内摩擦角 φ 及加固桩极限端阻力 q_p 可当作常量来处理。可靠度方法能够考虑荷载及土体参数变异性的影响, 弥补了安全系数法的局限性, 在对桩网结构路基进行设计计算时, 应将常规设计方法与可靠度方法相结合, 以可靠度指标去指导加固桩长度的设计。

参考文献:

[1] 杨果林,王亮亮. 桩网复合地基加筋垫层土工格栅变形机理研究[J]. 中国铁道科学, 2011, 32 (5): 8-12. (YANG Guolin, WANG Liangliang. Research on the deformation mechanism of geogrid reinforced cushion for pile-net composite foundation[J]. China Railway Science, 2011, 32(5) :8-12. (in Chinese))

[2] 宗国庆,蒋慧. 真空(堆载)预压法在高速公路软土地基处理中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2002, 22 (6): 41-43. (ZONG Guoqing, JIANG Hui. Consolidation of soft foundations with vacuum preloading method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2002, 22 (6):41-43. (in Chinese))

[3] 许小健,干洪,张金轮. 沉降预测广义 Usher 模型参数确定的优化算法[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30 (5): 73-76. (XU Xiaojian, GAN Hong, ZHANG Jinlun.

- Optimization algorithms for parameters of generalized Usher model of settlement prediction [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2010, 30 (5): 73-76. (in Chinese))
- [4] 孙新彪. 高速铁路 CFG 桩复合地基承载特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [5] 曹卫平, 陈仁朋, 陈云敏. 桩承式加筋路堤土拱效应试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29 (3): 431-437. (CAO Weiping, CHEN Renpeng, CHEN Yunmin. Experimental investigation on soil arching in piled reinforced embankments [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29 (3): 431-437. (in Chinese))
- [6] TEZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: John Wiley & Sons, 1943.
- [7] 魏永幸, 薛新华. 无砟轨道桩-网结构路基设计方法研究[J]. *高速铁路技术*, 2010, 1 (1): 22-26. (WEI Yongxing, XUE Xinhua. Design method of pile-net composition foundation of ballastless track[J]. *High Speed Railway Technology*, 2010, 1 (1): 22-26. (in Chinese))
- [8] 蒋鑫, 凌建明, 谭炜, 等. 高速公路填砂路基边坡稳定性分析[J]. *铁道工程学报*, 2008 (9): 1-6. (JIANG Xin, LING Jianming, TAN Wei, et al. Slope stability analysis of sand embankment for expressway engineering[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2008 (9): 1-6. (in Chinese))
- [9] 蒋文华, 李典庆, 周创兵, 等. 考虑参数空间变异性的非饱和土坡可靠度分析[J]. *岩土力学*, 2014, 35 (9): 2569-2578. (JIANG Shuihua, LI Dianqing, ZHOU Chuangbing, et al. Reliability analysis of unsaturated slope considering spatial variability [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35 (9): 2569-2578. (in Chinese))
- [10] 梁燕, 李家春, 李萍, 等. 考虑洪水大小随机性的路基抗冲刷可靠度评价[J]. *公路交通科技*, 2013, 30 (1): 50-55. (LIANG Yan, LI Jiachun, LI Ping, et al. Evaluation of subgrade reliability in erosion of flood considering uncertainty of flood volume [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2013, 30 (1): 50-55. (in Chinese))
- [11] 龚文惠, 姜友生, 王元汉. 膨胀土路基沉降的模糊可靠度[J]. *岩土力学*, 2004, 25 (8): 1340-1342. (GONG Wenhui, JIANG Yousheng, WANG Yuanhan. Fuzzy reliability for settlement of expansive soil roadbed [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25 (8): 1340-1342. (in Chinese))
- [12] EBGeo. Empfehlungen für den entwurf und die berechnung von erdkörpern mit bewehrungen aus geokunststoffen [M]. Berlin: German Geotechnical Society, 2010.
- [13] van EEKELEN S J M, BEZUIJEN A, LODDER H J, et al. Model experiments on piled embankments: part II [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2012, 32: 82-94.
- [14] 吴坤铭, 王建国, 谭晓慧. 基于可靠度分析确定刚性抗滑桩锚固深度[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34 (2): 237-242. (WU Kunming, WANG Jianguo, TAN Xiaohui. Determination of anchorage depth for rigid anti-slide piles based on reliability analysis [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34 (2): 237-242. (in Chinese))
- [15] 高谦. 土木工程可靠性理论及其应用[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2007: 57-66.
- [16] 中国铁路总公司. 铁路路基极限状态设计暂行规范(试行): Q/CR 9127—2015 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2014.
- (收稿日期: 2015-11-17 编辑: 熊水斌)
- +++++
- (上接第 26 页)
- [11] RAO S, SHIRLAL K G, VARGHESE R V, et al. Physical model studies on wave transmission of a submerged inclined plate breakwater [J]. *Ocean Engineering*, 2009, 36 (15): 1199-1207.
- [12] 刘丹. 波浪对两层潜式水平板的作用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [13] BURKE J E. Scattering of surface waves on an infinitely deep fluid [J]. *Journal of Mathematical Physics*, 1964, 5 (6): 805-819.
- [14] PATARAPANICH M. Maximum and zero reflection from submerged plate [J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 1984, 110 (2): 171-181.
- [15] NALLAYARASU S, CHEONG H F, SHANKAR N J. Wave induced pressures and forces on a fixed submerged inclined plate [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 1994, 18 (1): 289-299.
- [16] 王科. 潜式水平板型防波堤消浪效果研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2001.
- [17] LEE M M, CHWANG A T. Scattering and radiation of water waves by permeable barriers [J]. *Physics of Fluids*, 2000, 12 (1): 54-65.
- [18] ISAACSON M, PREMASIRI S, YANG G. Wave interactions with vertical slotted barrier [J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 1998, 124 (3): 118-126.
- [19] 俞聿修. 随机波浪及其工程应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2000.
- (收稿日期: 2015-11-20 编辑: 骆超)