

基于正交试验法的海堤安全监控控制标准

胡 珩, 董志良

(中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 海堤施工期安全稳定受到多种因素的影响, 一直都是工程建设中的难点。施工监控是提高海堤施工期安全的有效方法, 但施工监控的质量很大程度上取决于监控控制标准的合理性, 合理有效的监控控制标准是保障施工安全的重要前提。目前工程应用中仍以经验控制为主, 缺乏理论依据。结合某海堤工程, 利用正交试验法对影响海堤稳定的各种因素进行分析, 得到了影响海堤稳定的最主要影响因素为内摩擦角, 并基于此分析了海堤安全系数与水平位移速率的关系, 最终提出了水平位移速率监控控制标准。工程实践表明, 该控制标准能较好地反映海堤变形特点, 具有较好的工程指导意义, 可为类似工程制定科学合理的控制标准提供参考。

关键词: 海堤稳定; 正交试验法; 水平位移速率; 施工监控; 控制标准

中图分类号: U656.31+4

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2014)03-0055-07

随着我国国民经济的快速发展, 土地资源短缺的问题日益突出, 围海造陆建设进入蓬勃发展的新时期, “十一五”期间, 广东省规划围海造陆面积达到 146 km^2 , 而全国计划每年通过围海造陆新增土地面积达到 700 km^2 , 相当于新加坡国土面积。围海造陆是一项复杂的系统工程, 涉及到多方面技术应用, 包括海堤形成、陆域吹填、软基处理等^[1], 施工工况复杂、难度大, 施工过程中存在着较大的安全风险, 为了保障工程的施工安全, 均要求在施工过程中开展施工安全监控, 《海堤工程设计规范》^[2]中也明确提出: “应根据海堤地质条件、施工条件等具体情况, 设置必要的施工期安全监测设施”。

开展施工监控必然涉及到监控控制标准的问题, 目前我国相关规范尚未对海堤监控标准提出明确的规定, 工程建设中仍以经验为主, 缺乏理论依据。福建省大唐宁德电厂海堤工程^[3]水平位移速率控制标准为 6 mm/d , 浙江省舟山大浦口集装箱码头的围堤工程^[4]为 5 mm/d , 温州龙湾海堤工程^[5]则为 3 mm/d , 可见不同工程所采用的控制标准存在较大差异, 根本原因就在于各工程的海堤结构型式、地质条件、施工工况等都不相同, 造成海堤在施工过程中变形特性也有所差异, 所以盲目套用以往工程经验数据并不科学, 也极易由于控制标准设置不当而误导工程施工, 甚至造成重大安全事故。本文基于正交试验法对某海堤的监控控制标准进行了简单探讨, 以期类似工程制定科学合理的监控控制标准提供有益的参考。

1 常用监控控制方法

目前, 工程中应用较多的控制方法主要有以下几种:

(1) 直观判断。主要是依据经验来判断, 具有较强的主观因素。失稳一般是个渐进的发展过程, 在内外因素共同作用下, 最终在海堤表面出现一些宏观的特征, 以此作为判断海堤出现失稳征兆之一。

(2) 变形总量。海堤处于非稳定条件时, 会以变形的方式进行调整, 在失稳发展过程中, 表现出某些变形总量的不断变化, 由此可以掌握海堤的稳定状态。工程中常用水位位移量作为判断稳定状态的一项指标。

收稿日期: 2013-09-26

基金项目: 交通运输部科研项目 (No. JTSBD2010-10-087); 中国交通建设股份有限公司科研项目 (No. 2008-ZJKJ-16)

作者简介: 胡 珩 (1983-), 男, 江苏泗阳人, 工程师, 硕士, 主要从事地基处理技术研究。

E-mail: hu8231@126.com

(3) 变形速率。随着海堤变形的发展,自身抵抗变形的能力不断减弱,时间效应上变形速率相应增大,当变形速率大于某一允许值时,破坏开始。工程中常用水平位移速率作为判断指标。

2 正交试验法

正交试验法是一种高效、快速、经济的试验设计方法,是研究多因素多水平的一种设计方法,根据数理统计学和正交性原理从全面试验中挑选出部分有代表性的点进行试验,这些有代表性的点具备了“均匀分散,齐整可比”的特点,试验次数少,且能反映客观事物的变化规律。

2.1 正交试验设计

根据正交试验法的原理,主要步骤如下:

(1) 根据实际情况,选择合适的正交表,记为 $L_n(r^m)$,其中 L 为正交表符号; r 为水平个数,即因素状态的个数; n 为正交表行数,即安排的计算次数; m 为正交表列数,即最多可安排因素的个数。

(2) 根据所确定的计算方案进行计算,求得正交试验设计方案结果。

(3) 根据试验结果分析,得出结论。对正交试验结果的分析,通常采用两种方法:一种是直观分析法或称极差分析法;另一种是方差分析法。本文主要采用极差分析法。

2.2 极差分析法

设 $A, B, \dots$ 表示不同的因素, r 为各因素水平数; A_i 表示因素 A 的第 i 水平($i=1, 2, \dots$); X_{ij} 表示因素 j 的第 i 水平值($i=1, 2, \dots; j=A, B, \dots$)。在 X_{ij} 下进行试验,得到正态分布的随机变量 Y_{ij} ;在 X_{ij} 下进行 n 次试验得到 n 个试验结果 $Y_{ijk}(i=1, 2, \dots, n)$,计算参数^[6]如下:

$$K_{ij} = \sum_{k=1}^n Y_{ijk} \quad (1)$$

式中: K_{ij} 为因素 j 在 i 水平下的统计参数; n 为因素 j 在 i 水平下正交试验次数; Y_{ijk} 为因素 j 在 i 水平下第 k 个试验指标值。

评价因素显著性的参数为极差 R_j ,其计算公式为:

$$R_j = \max\{k_1, k_2, \dots\} - \min\{k_1, k_2, \dots\} \quad (2)$$

极差越大说明该因素的水平改变时对试验结果影响就越大,极差最大的因素也就是最主要的因素,极差较小的因素为较次要的因素。

3 变形和稳定性分析

本工程为围海造陆工程,规划造陆面积约 24 km^2 ,其中涉及施工海堤总长度超过 15 km ,海堤采用砂袋围堰结合抛石的复合型结构形式,海堤护底、护脚、护面采用单块质量 $200 \sim 400 \text{ kg}$ 块石,堤心石采用 $10 \sim 400 \text{ kg}$ 开山石,堤身采用堤心砂吹填、砂袋子围堰等形式。海堤是本工程的重要组成部分,其施工质量与安全直接关系到整个工程能否顺利开展,是后续吹填、软基处理的基础,因此海堤施工期安全一直受到建设各方的广泛关注,成为工程建设的重点和焦点之一。

3.1 地质条件

由于本工程采用围海造陆工艺,表层广泛分布着一层新近吹填土层,根据钻孔揭示,场地地层自上而下分述如下:

①吹填土:黄褐色,稍湿~饱和,松散~中密,厚度 $4.3 \sim 10.1 \text{ m}$,平均厚度约 7.0 m ,以中细砂充填为主,局部夹粉土薄层及团块。实测击数 $4.0 \sim 29.0$ 击,平均 8.0 击。

①1 粉细砂:灰黑色~灰色,稍湿~饱和,松散~中密,含贝壳类碎片较多,实测击数 $8.0 \sim 16.0$ 击,平均 11.3 击。

②层淤泥质黏土:灰色~深灰色,流塑,厚度 $1.2 \sim 8.3 \text{ m}$,平均厚度约 6.0 m ,含少量有机质及腐殖质填

充有腥臭味,干强度、韧性中等。实测击数 1.0~10.0 击,平均 2.9 击。

②1 层粉质黏土:黄褐色~灰褐色,软塑~硬塑,干强度、韧性高。实测击数 7.0~17.0 击,平均13.0击。

③层中细砂:黄褐色~灰褐色,饱和,松散~中密,厚度 1.0~4.5 m,平均厚度约 2.5 m。实测击数 4.0~27.0 击,平均 13.7 击。

3.2 计算模型及参数

数值计算采用 PLAXIS 软件进行,土体单元本构关系选用 Mohr-Coulomb 模型,塑料排水板采用 Drain 单元模拟,计算深度取 14.75 m,海堤最大填筑高度为 8.9 m,左、右两侧水平影响范围分别取坡角外 27.0 和 37.0 m,海堤的典型断面如图 1 所示。左、右垂直边界只有竖向位移,均为不透水边界,底边界既无水平位移也无竖向位移,为透水边界。土体物理力学指标如表 1 所示。

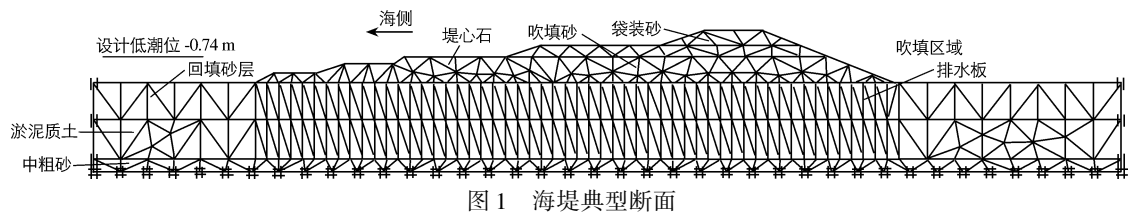


图 1 海堤典型断面

Fig.1 Typical horizontal section of seawall

表 1 土体物理力学性能指标

Tab.1 Physico-mechanical properties of soils

土 层	天然重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/ $^{\circ}$
吹填砂	18.0	9 000	0.30	2.0	25.0
回填砂	18.0	12 000	0.35	0.1	20.0
抛石层	19.0	16 000	0.30	4.0	30.0
淤泥或淤泥质土	16.0	2 000	0.28	9.5	6.0
中粗砂	19.6	16 000	0.33	0.1	30.0

注:吹填砂土层中混有少量淤泥。

3.3 变形分析

由于本工程的特殊性,围海造陆面积较大,海堤长度较长,不同位置处的地质条件差异明显,造成不同断面的海堤变形规律也有所不同,在此仅就所选取的海堤断面进行简单分析,计算结果见图 2。

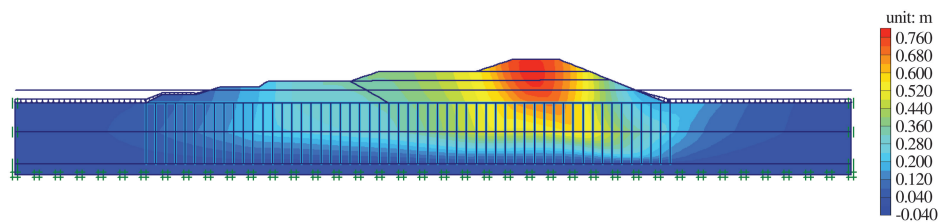


图 2 海堤变形示意

Fig.2 Diagram of displacement of seawall

从图中可以看出:最终计算沉降量为 0.78 m,最大沉降量发生在袋装砂顶,而现场实测最终沉降量为 0.66 m,这是因为现场沉降板埋设较晚,实测沉降量中未包括部分前期沉降量,总体上计算值与实测值基本吻合,表明本文数值计算所采用的数学模型和计算参数可行,能够较好反映本海堤在填筑过程中变形特点,为后续正交试验法对比分析提供了基础模型和计算参数。

3.4 稳定性分析

PLAXIS 软件中提供了 phi-c 折减法进行安全稳定性分析^[7],该方法通过逐步减小土体的内摩擦角和黏

聚力,直至结构破坏,以反映土体在加载条件下的安全性状。本海堤经过两级填筑施工,海堤最终安全系数为 1.143,略大于《海堤工程设计规范》(SL 435-2008)中对三级海堤在非常用运行条件 I (施工期)情况下的安全系数 1.10 的要求,且由于海堤施工过程中同时在围区内进行吹填施工,相当于对海堤进行了反压处理,提高了海堤的整体稳定性,海堤基本是安全稳定的,这也被工程实践所验证。

图 3 为完成填筑后海堤的模拟滑移面情况。可以看出:深部滑移面是位于下部软弱夹层(即淤泥质土层)的底部,这与现场实测的测斜管最大水平位移的深度是相互吻合的,这充分说明下部软土层是影响整个海堤稳定的关键所在。

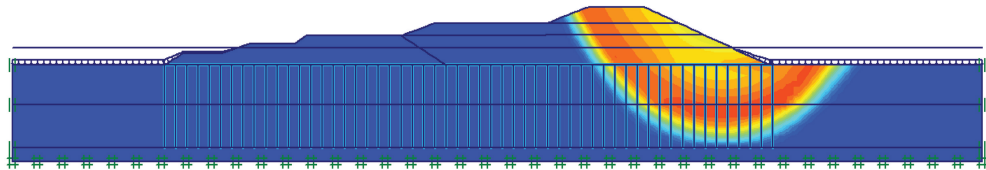


图 3 海堤滑移面示意
Fig.3 Schematic diagram of sliding surface of seawall

4 影响因素分析

影响海堤稳定的因素很多,包括海堤结构型式、地质条件、水位情况、地应力等,这些因素直接或间接地对海堤安全性产生了显著的影响,同时各种影响因素之间还相互交织,使问题相当复杂。影响本海堤稳定的主要土层为下部淤泥质土层,因此将该土层作为影响因素分析的主要对象。为了简化问题,在前人^[8-10]研究成果的基础上,本文将主要影响因素概括为如下几方面:①不饱和重度;②弹性模量;③地下水位;④黏聚力;⑤内摩擦角。

4.1 正交试验方案

为了便于试验数据处理,确定因素的水平数为 4,具体取值情况如表 2 所示。假设各因素之间无交互作用,对所确定的 5 种因素选择正交表 $L_{16}(4^5)$ 来安排试验,即 4 水平 5 因素的正交试验,试验次数为 16 次,具体试验计划如表 3 所列。

表 2 各因素取值和水平
Tab.2 Values of each factor and level

水平数	A	B	C	D	E	水平数	A	B	C	D	E
1	16.0	2 000	-0.74	9.5	6.0	3	14.0	1 200	+0.26	11.0	15.0
2	20.0	3 000	-1.24	15.0	10.0	4	22.0	1 600	+0.76	7.5	7.0

注: A-不饱和重度, B-弹性模量, C-地下水位, D-黏聚力, E-内摩擦角。

表 3 正交试验计划表
Tab.3 Schedule of orthogonal design

试验编号	A	B	C	D	E	试验编号	A	B	C	D	E
1	1	1	1	1	1	9	3	1	3	4	2
2	1	2	2	2	2	10	3	2	4	3	1
3	1	3	3	3	3	11	3	3	1	2	4
4	1	4	4	4	4	12	3	4	2	1	3
5	2	1	2	3	4	13	4	1	4	2	3
6	2	2	1	4	3	14	4	2	3	1	4
7	2	3	4	1	2	15	4	3	2	4	1
8	2	4	3	2	1	16	4	4	1	3	2

注: A-不饱和重度, B-弹性模量, C-地下水位, D-黏聚力, E-内摩擦角。

4.2 试验结果分析

试验结果如表 4 所示,本次试验各组安全系数均大于 1.10,说明海堤安全稳定,最小安全系数为试验 15,该组对应的弹性模量、内摩擦角、黏聚力均为最小,水位也是最低的情况下发生的;最大安全系数为试验 13,该组对应的内摩擦角、黏聚力均为最大,地下水位最高的情况下发生的。可见,内摩擦角、黏聚力、地下水位对该海堤的稳定性影响还是比较显著的,而不饱和重度、弹性模量的影响则相对较小。

表 4 安全系数统计

Tab. 4 Statistics of safety factors

试验编号	1	2	3	4	5	6	7	8
安全系数	1.143	1.304	1.338	1.224	1.248	1.312	1.355	1.344
试验编号	9	10	11	12	13	14	15	16
安全系数	1.344	1.238	1.312	1.306	1.360	1.289	1.125	1.313

按式(1)和(2)即可以得到各影响因素在各水平下的统计值,具体计算结果见表 5。

表 5 极差分析

Tab. 5 Analysis of range

水 平	影响因素				
	A(不饱和重度)	B(弹性模量)	C(地下水位)	D(黏聚力)	E(内摩擦角)
K1	5.009	5.095	5.080	5.093	4.850
K2	5.259	5.143	4.983	5.320	5.316
K3	5.200	5.130	5.315	5.137	5.316
K4	5.087	5.187	5.177	5.005	5.073
极差 R	0.250	0.092	0.332	0.315	0.466
影响力排名	E>C>D>A>B				

由表 5 可以看出:对于本海堤工程而言,5 种影响因素的影响程度依次为:内摩擦角、地下水位、黏聚力、不饱和重度、弹性模量,其中内摩擦角作用明显强于其它各项影响因素,这一结论与前人^[8,11]的研究成果也有所差异,这也说明不同的海堤、边坡、岸坡工程,各种影响因素在稳定性中所起到的作用也是有所不同的。因此不应盲目套用以往的工程经验,而应针对具体的工程案例进行针对性分析,才能得到更加符合工程实际的结果。

5 水平位移速率控制标准

通过正交试验法分析得出本海堤稳定的主要影响因素为内摩擦角。基于最主要影响因素再进行施工安全监控则更具有针对性,也更能准确把握海堤施工期变形特点,所制定的监控控制标准也能更真实反映海堤填筑过程中的变化情况。

5.1 安全系数与内摩擦角关系

位移总量法是累积值,并不能反映阶段变化情况,在进行安全控制时往往会忽略关键点的控制,对施工安全监控不利,而水平位移速率恰恰是对关键点的控制。基于最主要影响因素(内摩擦角),不考虑其他影响因素的条件下,在此重点分析水平位移速率与海堤安全系数之间的关系。具体计算结果见表 6 和图 4。

表 6 对比分析(基于内摩擦角)

Tab. 6 Comparison of the calculated results (based on angle of internal friction)

编 号	1	2	3	4	5	6
内摩擦角/°	6	8	10	12	16	20
安全系数	1.143	1.261	1.309	1.310	1.310	1.316
最大水平位移速率/(mm·d ⁻¹)	8.00	5.20	4.70	4.00	3.40	3.40

从表 6 可见:最主要影响因素(内摩擦角)对海堤的稳定作用非常明显,内摩擦角从 6° 提高到 10° ,其海堤安全系数即可以达到《海堤工程设计规范》(SL 435-2008)中最高安全系数标准 1.30 的要求。从图 4 可见,当内摩擦角增加到 10° 以上时,安全系数即基本保持不变,而 10° 也基本是软土的内摩擦角范畴,这也验证了之前所述的下部软土层是影响整个海堤稳定的关键所在。

5.2 安全系数与位移速率关系

为了保证施工监控的有效性,将表 6 计算得到的最大水平位移速率乘以 0.7 的系数作为不同内摩擦角条件下的水平位移速率值,即可以得到图 5 所示的安全系数与水平位移速率的关系图,可以看出:当内摩擦角小于 10° ,水平位移速率大于 3.30 mm/d ,海堤安全系数基本随着水平位移速率的增加呈线性减小的趋势,对海堤的安全稳定非常不利,这一结论与图 4 结论相对应。

基于以上分析,针对本海堤建议采用 3.0 mm/d 的水平位移速率监控控制标准,近 1 年多的工程实践也表明该标准切实可行,符合本工程实际情况,取得了较好的监控效果,达到了预期目的,保障了海堤施工安全。

6 结 语

本文利用正交试验法对某海堤安全稳定影响因素进行了分析,并基于最主要影响因素建立了安全系数与水平位移速率之间的关系,最终提出了水平位移速率监控控制标准,主要得到了以下几点结论:

(1)不同的海堤工程,各种影响因素在其稳定中所起的作用也有所不同,应针对具体的海堤工程案例进行针对性分析,才能得到更加符合工程实际的结果,不宜盲目套用以往工程经验成果。

(2)基于正交试验法确定海堤稳定的最主要影响因素,并以此为基础制定海堤安全监控控制标准的方法切实可行。

(3)结合本海堤工程的实际情况,提出了 3.0 mm/d 的水平位移速率监控控制标准,实践表明该标准能够较好反映海堤变形特点,具有较好的工程指导意义。

参 考 文 献:

- [1] 董志良,张功新,李燕,等. 大面积围海造陆创新技术及工程实践[J]. 水运工程, 2010(10): 54-67. (DONG Zhi-liang, ZHANG Gong-xin, LI Yan, et al. The innovation of large-area reclamation engineering and practice in projects[J]. Port & Waterway Engineering, 2010(10): 54-67. (in Chinese))
- [2] SL 435-2008, 海堤工程设计规范[S]. (SL 435-2008, Code for design of sea dike project[S]. (in Chinese))
- [3] 陈元智. 福建大唐宁德电厂海堤施工期岩土监测实例分析[J]. 福建地质, 2007, 26(3): 172-178. (CHEN Yuan-zhi. Case analysis of rock and soil monitoring in the seawall construction of Datang Ningde thermal power plant[J]. Geology of Fujian, 2007, 26(3): 172-178. (in Chinese))
- [4] 朱高峰. 软土地基海堤工程监测稳定控制标准探讨[J]. 水运工程, 2009(2): 126-129. (ZHU Gao-feng. Stability control standard for seawall engineering on soft ground[J]. Port & Waterway Engineering, 2009(2): 126-129. (in Chinese))
- [5] 俞先伟,沈跃君,郑烨. 某海堤工程软基加固及原型观测施工期安全监控[J]. 浙江水利科技, 2003(1): 43-47. (YU Xian-wei, SHEN Yue-jun, ZHENG Ye. Soft soil reclamation and prototype observation of construction period in seawall project

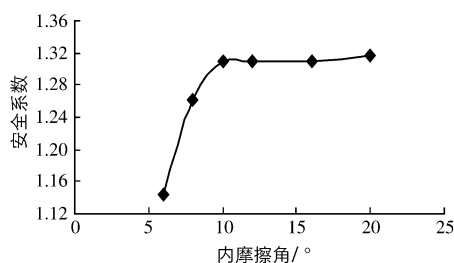


图 4 安全系数与内摩擦角关系

Fig. 4 Relationship between safety factors and angle of internal friction

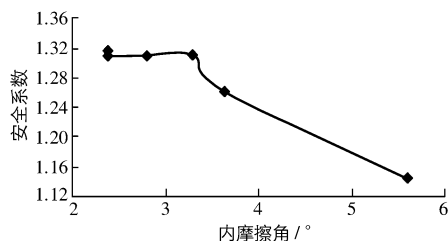


图 5 安全系数与水平位移速率关系

Fig. 5 Relationship between safety factor and horizontal displacement rate

- [J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2003(1): 43-47. (in Chinese))
- [6] 张旭辉, 龚晓南, 徐日庆. 边坡稳定影响因素敏感性的正交法计算分析[J]. 中国公路学报, 2003, 16(1): 36-39. (ZHANG Xu-hui, GONG Xiao-nan, XU Ri-qing. Orthogonality analysis method of sensibility of factor of slope stability[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(1): 36-39. (in Chinese))
- [7] BRINKGREVE R B J, BROERE W, WATERMAN D, et al. PLAXIS Version 8 reference manual[M]. Netherland: Delft University of Technology, 2002: 125-127.
- [8] 吕晓光, 崔可锐, 李丹, 等. 基于 Plaxis 的土质边坡稳定性影响因素分析[J]. 安徽建筑工业学院学报: 自然科学版, 2010, 18(3): 67-71. (LV Xiao-guang, CUI Ke-rui, LI Dan, et al. Soil slope stability factors analysis based on Plaxis[J]. Journal of Anhui Institute of Architecture & Industry(Natural Science), 2010, 18(3): 67-71. (in Chinese))
- [9] 唐晓松, 郑颖人. 水位下降过程中超孔隙水压力对边坡稳定性的影响[J]. 水利水运工程学报, 2007(1): 1-6. (TANG Xiao-song, ZHENG Ying-ren. Effect of excess pore water pressure on stability of slopes under drawdown condition[J]. Hydro-Science and Engineering, 2007(1): 1-6. (in Chinese))
- [10] 黄勇博, 孙树林, 周宏博. 土质堤防边坡稳定安全系数影响因素研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(11): 2607-2611. (HUANG Yong-bo, SUN Shu-lin, ZHOU Hong-bo. Analysis of safety coefficient influencing factors for soil embankment slope stability[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(11): 2607-2611. (in Chinese))
- [11] 周世良, 王义山, 魏建锋, 等. 基于有限差分法的边坡稳定影响因素分析[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2010, 29(5): 737-740. (ZHOU Shi-liang, WANG Yi-shan, WEI Jian-feng, et al. Influence factors of slope stability based on finite difference method[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2010, 29(5): 737-740. (in Chinese))

Monitoring control standard for seawall based on orthogonal design

HU Heng, DONG Zhi-liang

(CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co. , Ltd. , Guangzhou 510230, China)

Abstract: The seawall stability influenced by many factors has always been one of the difficult problems in engineering construction. Construction monitoring is an available method to improve the safety of the seawall, which has been widely used in seawall construction of hydraulic engineering and port-waterway engineering. However, the quality of the construction monitoring mostly depends upon reasonableness of the control standard, and a reasonable and available monitoring control standard is the important prerequisite to ensure the construction monitoring. At present, in the current engineering practice the control standard is still mainly based on engineering experiences, lacking in appropriate theoretical basis. Taking a seawall project as a case study, many factors of the seawall stability are analyzed with the orthogonal design, and it is found that the most important factor impacting the seawall stability is the angle of internal friction. And based on this point for analyzing the relationship between the safety factors and the horizontal displacement rates, the monitoring control standard of the horizontal displacement rates is put forward. The engineering practice, showing that the control standards can well reflect the deformation characteristics of the seawall, can provide a lot of references for similar works in the development of scientific and reasonable control standards.

Key words: seawall stability; orthogonal design; horizontal displacement rate; construction monitoring; control standard