



斜坡式海堤工后沉降和越浪量研究^{*}

叶 飞

(浙江省水利水电工程质量与安全管理中心, 浙江 杭州 310012)

摘要: 针对斜坡式海堤工后沉降和越浪量问题, 以温州浅滩一期围涂斜坡式海堤为研究对象, 分析了海堤工后断面堤顶沉降量和断面形式。通过典型断面模型试验获得了不规则波作用下海堤工后平均越浪量, 分析了越浪量的影响因素。结果表明: 1) 南围堤和东围堤各断面堤顶沉降量是不均匀的, 沉降和泥沙淤积导致断面形式发生了明显的改变; 2) 采用波浪斜向入射系数对海堤工后平均越浪量进行修正, 南围堤和东围堤典型断面影响因素变化导致越浪量发生规律变化, 海堤工后越浪量满足规范要求。

关键词: 斜坡式海堤; 工后; 沉降; 越浪量

中图分类号: U 656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)05-0009-05

Research on post-construction settlement and wave overtopping of sloping seawalls

YE Fei

(Zhejiang Water Conservancy and Hydropower Engineering Quality and Safety
Management Center, Hangzhou 310012, China)

Abstract: In view of the problems of post-construction settlement and overtopping of sloping seawall, taking the Wenzhou Shoal phase I reclamation slope seawall as the research object, the post-construction seawall top settlement and cross-section form of the seawall are analyzed. The post-construction average overtopping of seawall under irregular wave is studied through the model test of typical section, and the influencing factors of overtopping are analyzed. The results show that: 1) The top settlement of each section for the south dike and the east dike are uneven, and the section form has been significantly changed due to settlement and sediment deposition. 2) The post-construction average overtopping of seawall is corrected by adopting the wave oblique incidence coefficient. The influencing factors change of typical sections for the south dike and the east dike leads to the regular change of overtopping, and the overtopping meets the requirements of specifications.

Keywords: sloping seawall; post-construction; settlement; overtopping

海堤地基多为软土, 建成后会产生很大的沉降量。地基沉降后波浪爬高越过堤顶的概率增加, 并使越浪量增大, 造成海堤损坏、财产损失和人员伤亡等严重后果。近年来, 国内外学者对斜坡式海堤开展了平均越浪量现场或模型试验研究, 并与经验公式进行对比分析。王登婷等^[1]研究了

风对海堤越浪量的影响, 提出对经验公式中的风校正因子进行修正; 陈铭辉等^[2]研究了斜坡堤平台和坡肩护面类型对越浪量的影响, 并推荐 van der Meer 公式对越浪量进行计算; 朱嘉玲等^[3]分析和讨论了波浪入射方向与斜坡堤越浪量的关系, 提出了修正的 Hebsgaard 越浪量公式; 安蒙华等^[4]

收稿日期: 2021-09-04

^{*}基金项目: 浙江省水利科技重点项目(RC2001)

作者简介: 叶飞(1981—), 男, 高级工程师, 研究方向为水利水电工程质量与安全管理。

建立了斜坡堤胸墙结构参数与越浪量之间的经验公式；张博文等^[5]基于海堤工程原型观测的波浪要素和越浪量分析，推荐了海堤工程设计规范公式；周雅等^[6]研究斜坡堤不同波要素和断面尺度对平均越浪量的影响，认为陈国平公式计算结果更加准确；Mase 等^[7]针对日本海堤特点，提出陆地或极浅水中建造的海堤波浪爬高和越浪量的预测公式；Troch 等^[8]对碎石堆斜坡堤上的波浪量进行现场测量，认为 van der Meer 公式和基于 Owen Besley 的修正公式较好；Amir 等^[9]基于平滑倾斜海堤越浪试验数据提出越浪量公式；Orimoloye 等^[10]研究单峰和双峰波作用下斜坡堤的越浪特征，认为 EuroOtop 公式越浪量与单峰波结果一致，但双峰波时需对 EuroOtop 公式进行修正；钟杰等^[11]研究涌浪作用下斜坡堤（单坡、无挡浪墙）的平均越浪量，推荐越浪量人工神经网络计算方法；倪琦^[12]研究斜坡堤越浪量的各影响因素，构建了基于人工智能算法的越浪量预测模型。

目前针对新建海堤越浪量及其影响因素的研究较多，但由于沉降或泥沙淤积导致海堤工后堤顶下降和堤前坡度发生明显的变化影响了海堤越浪量，此时越浪量是否满足规范要求，需要通过模型试验进行验证，因此开展海堤工后沉降和越浪量研究十分必要。本文以温州浅滩一期围涂斜坡式海堤为例，分析海堤工后堤顶沉降量以及沉降和泥沙淤积对断面形式的影响，结合不同断面的堤顶沉降量、堤前泥沙淤积情况和波浪因素，选择典型模型试验断面研究平均越浪量，分析越浪量的影响因素，判定海堤工后越浪量是否满足规范要求，为类似软土地基海堤工后越浪量的研究提供参考。

1 工程概况

温州浅滩一期围涂斜坡式海堤位于瓯江口灵昆岛下游，由南围堤、东围堤、北围堤和一座排水涵闸组成，具体位置见图 1，其中南围堤长 5 929.23 m，2007 年 1 月开工，2011 年 6 月完工；

东围堤长 3 538.04 m，2006 年 3 月开工，2010 年 10 月完工；北围堤长 5 287.75 m，2003 年 4 月开工，2006 年 3 月完工。围堤顶部均有防浪墙，堤顶高程按不允许越浪设计，设计潮位和波浪要素均为 50 a 一遇。海堤地基为淤泥软土地基，造成海堤工后产生了不同程度的地基沉降。此外，瓯江口上游来水带来大量的泥沙，在堤前外侧形成了不同厚度的泥沙淤积。2020 年对海堤不同断面沉降量和泥沙淤积进行了测量。由于北围堤内侧已建设公路，其断面形式已变为路基结合断面，因此沉降量分析和越浪量研究主要以南围堤和东围堤为主。

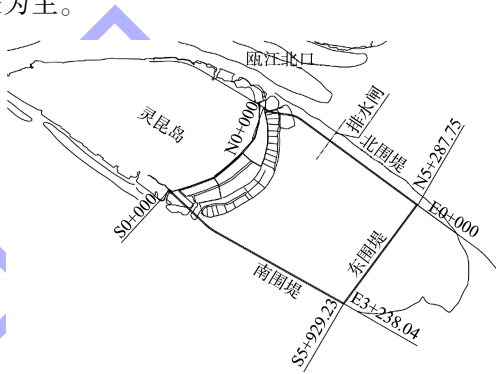
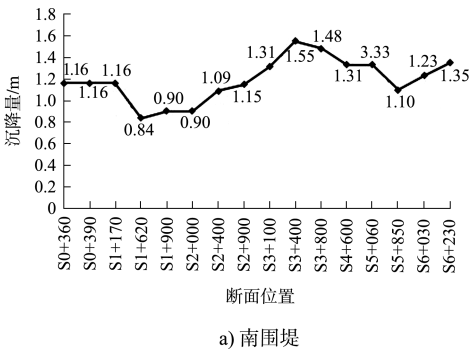


图 1 工程平面布置

2 海堤工后沉降量分析

南围堤防浪墙设计高程为 8.3 m 和 9.1 m，工后高程在 7.14~8.00 m，平均沉降量为 1.19 m；沉降量最大断面是 S3+400 断面，为 1.55 m；最小断面是 S1+620 断面，为 0.84 m。东围堤防浪墙设计高程为 8.33 m 和 8.53 m，工后高程在 7.15~7.62 m，平均沉降量为 1.02 m；沉降量最大断面是 E2+030 和 E3+500 断面，为 1.18 m；最小断面是 E4+070 断面，为 0.90 m。堤顶不同断面的沉降量见图 2。



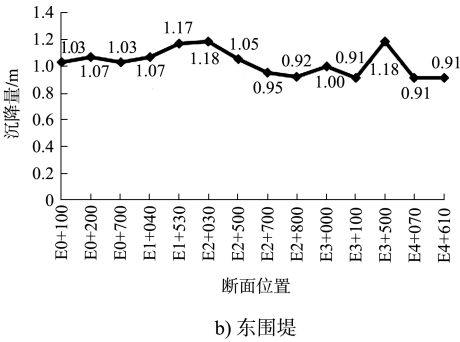


图 2 海堤工后不同断面堤顶沉降量

为了反映南围堤和东围堤堤顶沉降的不均匀程度，定义不均匀系数：

$$\varepsilon_x = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

式中： ε_x 为不均匀系数； n 为试验断面数量； x_i 为断面堤顶沉降量； \bar{x} 为断面沉降量均值。计算得到南围堤和东围堤的不均系数分别为 0.048 和 0.025，均存在一定程度的不均匀沉降，并且南围堤堤顶沉降量的不均匀程度大于东围堤。

图 3、4 为南围堤和东围堤的设计断面和沉降断面。由于沉降和泥沙淤积，使堤前水深和沉降断面形式较设计时均发生了明显的改变，堤前断面坡度明显变缓。从堤顶到堤底的坡度变化特点是：防浪墙坡度较陡，消浪平台无坡度，护坡坡度较缓，泥沙淤积面坡度更缓，南围堤 S3+400 和 S4+600 断面的坡面四角空心方块护面部分消失。张博文、Troch、Orimoloye、舒叶华等^[13]和陈国平等^[14]推荐了海堤工程设计规范公式、van der Meer 系列公式（如 EurOtop2007 和 EurOtop2018 公式）、陈国平公式等对平均越浪量进行计算，但公式都有相应的使用范围且主要用于新建海堤，预测海堤工后越浪量会产生很大的误差。因此，本文拟通过模型试验研究平均越浪量。

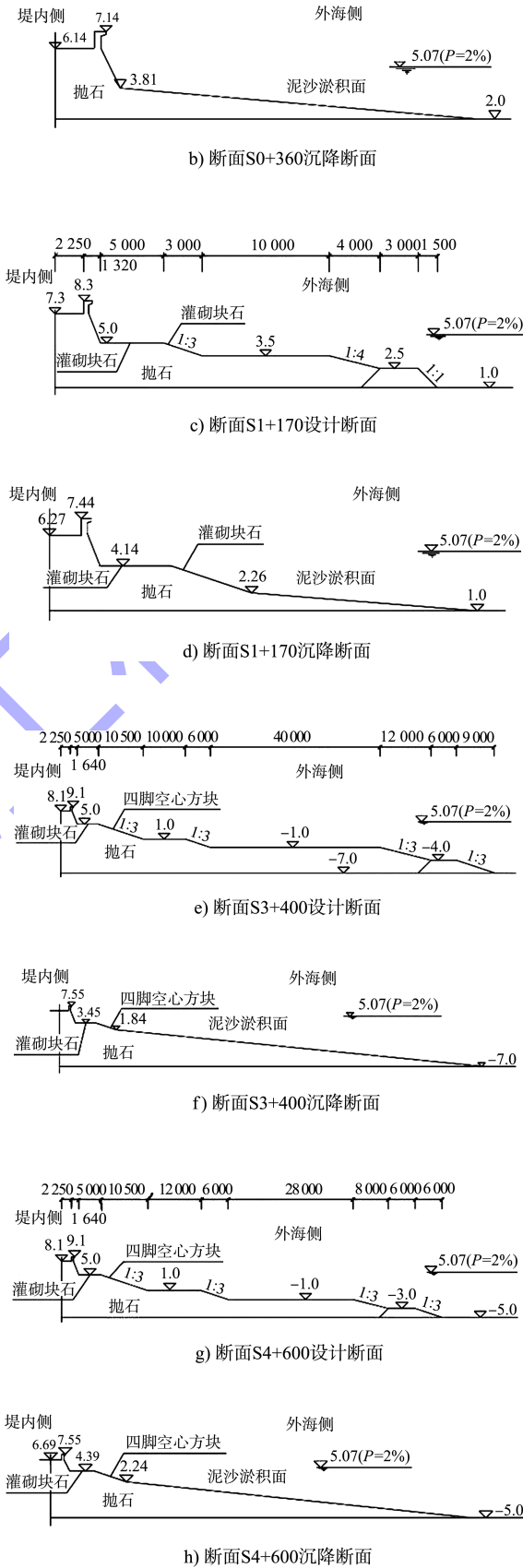
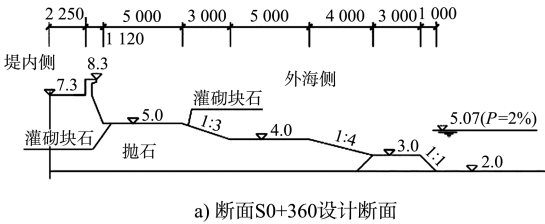


图 3 南围堤设计断面和沉降断面（高程：m；尺寸：mm）

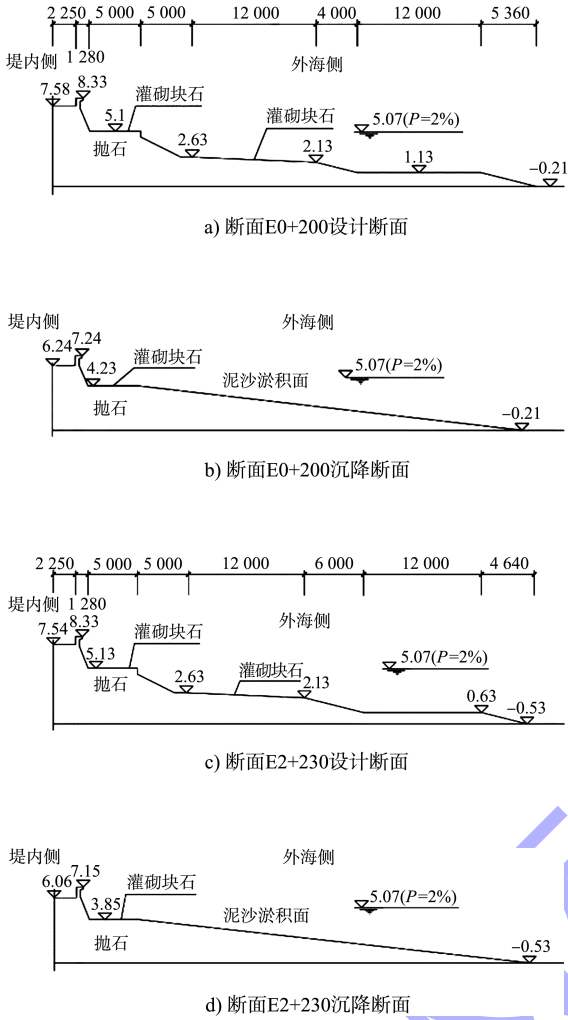


图 4 东围堤设计断面和沉降断面（高程：m；尺寸：mm）

表 1 试验设计波浪要素

围堤	堤段	重现期/a	平均波高 H/m	特征波高 $H_{13\%}/m$	周期 T/s	波长 L/m	水深 d/m
南围堤	S0+000—S0+700	50	1.88	1.94	11.3	61.1	3.08
	S0+700—S3+000	50	1.88	2.60	11.3	73.9	4.58
	S3+000—S5+220	50	1.75	2.58	11.3	87.6	6.58
东围堤	E0+000—E4+900	50	2.02	2.90	11.7	87.6	6.08

3.4 模型试验断面的选择

从图 3 可知，南海堤泥沙淤积最严重的断面为 S3+400，结合堤顶沉降量确定 S0+360、S1+170、S3+400 和 S4+600 这 4 个典型断面进行模型试验。从图 4 可知，东围堤泥沙淤积最多的断面为 E0+200，结合堤顶沉降量确定 E0+200 和 E2+030 两个典型断面进行模型试验。考虑泥沙淤积以细沙为主，且经过多年淤积固结，泥沙淤积面可认为是不可渗透光滑条件。对选择的典型断面开展越浪量模型试验，S0+360 和 S1+170 断面模型

3 模型试验

3.1 试验布置

试验在长波浪水槽中进行，水槽长 50 m、宽 0.8 m、深 1.0 m。水槽的一端配有消浪缓坡，另一端配有推板式不规则波造波机，由计算机控制模型试验所需要的波浪要素。水槽纵向分为两部分，每部分宽均为 0.4 m，一部分布置海堤工后试验断面，另一部分用以消除波浪的二次反射。

3.2 模型设计和测量方法

试验采用正态模型，按重力相似准则设计。模型比尺根据场地条件和工程的平面尺寸进行确定，坡面四脚空心方块采用水泥加铁粉配制，质量偏差与几何尺寸误差均满足试验规程要求。模型高程用水准仪控制，长度用钢尺测量，波高采用电容式数字波高仪测量。平均越浪量采用有机玻璃接水箱收集并测量水质量，每个断面试验 3 次，取 3 次测量平均值作为结果。

3.3 试验水位和波浪模拟

试验断面水位为 50 a 一遇设计高潮位 5.07 m，南围堤和东围堤不同堤段的波浪要素见表 1。试验采用不规则波 JONSWAP 波谱，试验开始前需要进行波浪要素率定，将造波机产生的波要素和设计波要素进行比较，满足规范规定的允许误差。

4 海堤工后平均越浪量分析

由于海堤所在区域波浪为斜向波，在断面试验中未考虑波浪入射角 β 的影响，因此需要对平均越浪量进行修正。波浪斜向入射系数 O_r 计算公式如下^[15]：

$$O_r=1-0.000\ 152\beta^2\tag{2}$$

式(2)的适用范围为 $0^\circ<\beta\leq 60^\circ$ ，当 $\beta>60^\circ$ 时，

取 60° 计算。表 2 给出了南围堤和东围堤典型断面越浪量测量和修正结果。

表 2 平均越浪量试验测量与修正							
围堤	断面	水深 d/m	堤顶超高 H_c/m	坡陡 H/L	平均越浪量 $q/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1})$	入射角 $\beta/(^\circ)$	修正平均越浪量 $q/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1})$
南围堤	S0+360	3.07	2.07	0.031	0.004 0	88	0.001 8
	S1+170	4.07	2.37	0.025	0.004 0	88	0.001 8
	S3+400	12.07	2.48	0.020	0.012 6	88	0.005 7
	S4+600	10.07	2.48	0.020	0.009 3	88	0.004 2
东围堤	E0+200	5.28	2.17	0.023	0.013 3	45	0.009 2
	E2+030	5.60	2.08	0.023	0.034 8	45	0.024 0

由表 2 可知，从整体上看，南围堤的越浪量要小于东围堤。对于南围堤，S3+400 和 S4+600 断面具有相同的波浪要素和堤顶超高，且堤前坡度变化相差不大，但 S3+400 断面的越浪量较大，堤顶有跃浪，原因在于 S3+400 断面的堤前水深较大，水深增大导致越浪量增大；S0+360 和 S1+170 断面的越浪量相同，堤顶有少量跃浪，虽然 S1+170 断面堤顶超高大于 S0+360 断面，堤顶超高使越浪量减小，但 S1+170 断面的堤前水深大于 S0+360 断面，而坡陡却小于 S0+360 断面，堤前水深增加和坡陡减小导致越浪量增大，因此综合考虑堤前水深、堤顶超高和坡陡对越浪量的影响，两个断面越浪量相同。对于东围堤，E2+030 和 E0+200 断面具有相同的波浪要素并且坡度变化相差不大，但 E2+030 断面的平均越浪量明显高于 E0+200 断面、堤顶有越浪，原因在于 E2+030 断面不仅堤顶超高比 E0+200 断面小，而且堤前水深也较 E0+200 断面大。

《浙江省海塘工程技术规定》中关于“允许部分越浪海塘的越浪量计算”规定，设计频率波浪下的最大允许越浪量为 $0.05\text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ 。南围堤和东围堤在 50 a 一遇设计高潮位和波浪条件下，海堤工后平均越浪量均能满足规范的要求。另外，在波浪连续作用 3 h 下，南围堤 S3+400 和 S4+600 断面四角空心方块表面整体未发现明显变形，不丧失护坡功能，因此判断断面护坡整体稳定。

5 结论

1)南围堤堤顶沉降量最大断面是 S3+400 断

面、最小断面是 S1+620 断面，东围堤堤顶沉降量最大断面是 E2+030 和 E3+500 断面、最小断面是 E4+070 断面，南围堤堤顶沉降量不均匀程度要大于东围堤。

2)南围堤和东围堤的堤顶沉降和泥沙淤积导致断面形式发生了明显变化，堤前坡度明显变缓，南围堤断面护面四角空心方块部分消失。

3)南围堤平均越浪量最大断面是 S3+400 断面、最小断面是 S0+360 和 S1+170 断面，越浪量主要取决于堤前水深、堤顶超高和坡陡等影响因素；东围堤平均越浪量最大断面是 E2+030 断面，越浪量主要取决于堤顶超高和堤前水深等影响因素。南围堤和东围堤的平均越浪量在 $0.001\ 8\sim0.024\text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ ，均小于 $0.05\text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ ，能够满足规范要求。

参考文献：

[1] 王登婷,尹畅安. 风对越浪量影响的模型试验研究[J]. 水运工程, 2009(10): 1-5.

[2] 陈铭辉,周益人. 斜坡堤坡肩及平台护面类型对越浪量的影响[J]. 水运工程, 2013(3): 45-47.

[3] 朱嘉玲,王震,陈凌彦,等. 斜向波作用下斜坡堤平均越浪量的试验研究[J]. 水运工程, 2016(5): 9-13, 18.

[4] 安蒙华,蒋勤. 超标准潮波作用下越浪量及越浪流特性研究[J]. 中国港湾建设, 2017, 37(6): 11-16.

[5] 张博文,薛鹏宇. 原型观测试验下平均越浪量的计算公式[J]. 水运工程, 2019(2): 15-21.

[6] 周雅,林登荣,李庆银,等.不规则波作用下斜坡堤越浪量试验研究[J].水道港口, 2016, 37(4): 331-335.