



# 不同护面块体潜堤的消浪特性试验研究

冯卫兵<sup>1</sup>, 陈凯华<sup>1</sup>, 薛波<sup>2</sup>, 许力源<sup>1</sup>

(1. 河海大学港口工程与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 92962部队, 广东 广州 510320)

**摘要:** 以斜坡式潜堤为研究对象, 通过物理模型试验的方法, 选取相对淹没水深、护面结构形式的糙渗系数、坡度等因素的变化对潜堤消浪特性的影响进行了研究。首先, 分析了在规则波作用下相对淹没水深、护面结构形式的糙渗系数、坡度等因素对潜堤透射系数的变化规律, 得到了各因素对潜堤透射系数影响程度, 同时给出了波浪在潜堤附近传播时沿程波高变化情况。其次, 采用与规则波相同的研究方法, 分析了在不规则波作用下相对淹没水深、护面结构形式的糙渗系数、坡度等因素对潜堤透射系数的变化规律, 得到了各因素对潜堤透射系数的影响程度, 并给出了波浪在潜堤附近的沿程变化情况。

**关键词:** 波浪; 潜堤; 透射系数; 反射系数; 三点法

中图分类号: U 656.2<sup>+</sup>1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)03-0035-06

## Lab research on wave dissipation characteristics of different armor blocks used in submerged breakwater

FENG Wei-bing<sup>1</sup>, CHEN Kai-hua<sup>1</sup>, XUE Bo<sup>2</sup>, XU Li-yuan<sup>1</sup>

(1. College of Coastal, Harbor and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Force 92962, Guangzhou 510320, China)

**Abstract:** Regarding the sloping submerged dikes as an object of study, using physical model test method, we research the wave dissipation characteristics of submerged breakwater by selecting different relative inundated depths and rough permeability coefficients of surface protection structure type. Firstly, we analyze the changing rule of the transmission coefficient of the submerged breakwater due to various factors under regular wave, get the degree of influence of various factors on the submerged transmission coefficient, and obtain the variation law of the wave height along the ducts near the submerged breakwater. Secondly, using the same research methods of regular waves, we analyze the changing rule on the variation of transmission coefficient of the submerged breakwater under irregular waves, we get the degree of influence of various factors on the transmission coefficient of the submerged breakwater, and obtain the change of the wave along the way near the submerged breakwater.

**Key words:** wave; submerged dike; transmission coefficient; reflection coefficient; three-point method

潜堤是一种常用的护岸工程建筑物<sup>[1]</sup>, 一般指的是淹没在水中的防护堤, 广义来讲, 在低潮以下或高、低潮之间的半潮堤也通称为潜堤。潜堤一般修建在近岸, 与岸线略微平行, 它的主要作用是消浪、防沙及导流<sup>[2]</sup>等。一方面, 它可以有效地消减进入堤后的波浪, 减少作用在建筑物上的波浪力<sup>[3]</sup>, 提高建筑物的安全系数; 另一方面, 由于进入堤后空间范围内的波高减小, 由外海进

入堤后的水体所挟带的泥沙就会有一部分沉积下来, 使滩面持续地淤高。港口工程中的潜堤起消浪减淤作用, 应能满足港内平稳要求及有效阻拦或减少泥沙进港的作用。而作为护岸工程的潜堤则要求起到消浪保滩护岸作用<sup>[4]</sup>。在海涂围垦工程中需满足加速淤积、围海造田的要求。潜堤的透射系数是评价潜堤消减波浪力的主要指标, 对潜堤透射系数的研究是分析潜堤阻挡和削弱外海波

收稿日期: 2013-04-15

作者简介: 冯卫兵(1960—), 男, 博士, 教授, 从事海洋水动力研究。

浪作用、防止海岸侵蚀的关键。

本文通过物理模型试验，考虑改变潜堤的结构参数，如堤身坡度、粗糙度、透水性等因素，研究斜坡式潜堤分别在规则波和不规则波作用下对潜堤消浪特性的影响，考察了斜坡式潜堤在规则波和不规则波作用下波浪传播的沿程变化。

### 1 物理模型试验

#### 1.1 试验设备及仪器

试验是在河海大学海岸动力实验室的波浪试验水槽中进行的，水槽长80 m，宽1 m，高1.8 m。水槽一侧安装推板式不规则造波机系统，由计算机自动控制试验所需要的波浪要素；另一侧安放了消浪设备。水槽安放模型的试验段纵向分为各0.5 m宽的两部分，一部分安放模型断面，一部分起到波浪二次反射的效果。模型试验布置见图1。波高数据采用电容式浪高仪测量，潜堤前后布置了15个波高仪，1#~3#是用来进行潜堤前波高分析；4#~9#用来测量潜堤附近的波高变化；10#~15#用来测量潜堤后波高变化，确定潜堤后稳定波浪要素<sup>[5]</sup>。

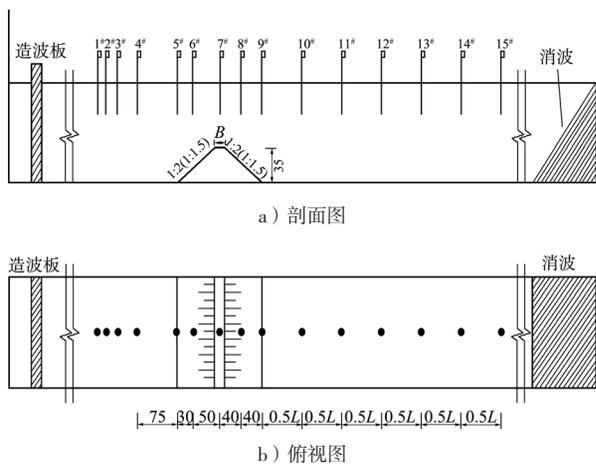


图1 模型及波高仪布置<sup>[5]</sup>

波浪要素的测量采用中国水利水电科学研究院生产的DJ800型多功能监测系统，它是由监测仪和各种传感器组成的数据采集和数据处理系统。数据采集是巡回式的，取得一个测点的数据大约需要400 μs（包括选中通道号、模数转换盒数据传送等时间）。因此，采样频率随着测点数量的增

加而降低，最小采集时间间隔为1 ms。

#### 1.2 试验方法

模型试验分别采用规则波和不规则波作为入射波浪。不规则波的谱型选用JONSWAP谱。试验分为2部分，即波浪透射试验与波浪反射试验。各组试验波浪要素特征值由计算机输入，控制造波机产生所需要的波列。每组试验重复两次，以确定试验数据的可靠性，取两组数据的平均值作为试验值<sup>[6]</sup>。测定波浪在潜堤传播的堤后稳定波高和波浪的沿程变化，根据波长的变化，在堤后1倍波长范围外每0.5L放一根波高仪，共布置3~6根波高仪测量堤后透射波高，并随入射波长的变化进行调整。试验模型前后坡坡度分别取m=1.5, 2.0，堤顶宽B=20 cm。由于潜堤本身的堤顶高度不变，堤顶高度为35 cm，所以采用不同的水深变化来取得不同的堤顶淹没深度R。试验水深d分别为50,40,35,30 cm，入射波波长L分别为1.5,2.0,2.5,3.0 m。对于各个水深每个人射波长率定10 cm的入射波高，对没有潜堤的情况下对造波参数进行反复率定，以确定试验的入射波高大小。

#### 1.3 影响因素分析

潜堤的消浪问题。以堤后的相对波高 $H_t/H$ 作为消浪标准，则堤后相对波高与其各影响因素之间关系的表达式可写为：

$$K_t = \frac{H_t}{H} = f\left(\frac{R}{H}, \frac{H}{L}, \frac{d}{H}, \frac{B}{H}, m_1, m_2, \varphi, K_\Delta\right) \quad (1)$$

式中： $H_t$ 为堤后稳定波高； $H$ 为试验波浪入射波高； $R$ 为潜堤顶面到静水面的距离（堤顶在静水面以上取正，堤顶在静水面以下取负）； $L$ 为入射波浪的波长； $d$ 为静水水深； $B$ 为潜堤的顶宽； $m_1, m_2$ 分别为潜堤前后坡的坡度； $\varphi$ 为来波波向同堤轴线间的夹角； $K_\Delta$ 为堤面的糙率及透水性系数。

本次试验采取同一种坡度，即前坡与后坡坡度相同。考虑正向波作用，不考虑来波波向同堤轴线间的夹角 $\varphi$ 对透射系数的影响（取 $\varphi=1$ ）。结合本次试验所考虑的因素对堤后相对波高的影响，式（1）可写成为：

$$K_t = \frac{H_t}{H} = f_2\left(\frac{R}{H}, \frac{H}{L}, m_1, m_2, K_\Delta\right) \quad (2)$$

消浪特性的研究，即基于式（2），对各因子

进行试验并确定其值。本次试验主要考虑的影响因素为: 入射波高及波长、堤顶到静水面的距离、潜堤的前后坡坡度、堤面的糙率及透水性系数。

从已有的试验结果可以知道, 影响波浪在潜

堤上传播的主要因素有: 相对淹没水深 $R/H$ , 相对堤顶宽度 $B/H$ , 而潜堤的前后坡坡度 $m$ 和堤面的糙率及透水性系数被认为是次要因素, 影响程度较小。

表1 规则波与不规则波试验要素值

规则波			不规则波		
水深/cm	波高/cm	平均周期/s	水深/cm	有效波高/cm	谱峰周期/s
50	9.70	0.996	50	10.30	1.246
	9.60	1.177		10.40	1.459
	10.40	1.365		10.60	1.707
	9.98	1.565		10.40	1.962
40	10.00	1.000	40	10.10	1.255
	9.99	1.231		10.10	1.538
	9.89	1.448		10.30	1.796
	9.96	1.673		10.50	2.107
35	9.85	1.040	35	10.00	1.303
	10.00	1.271		10.40	1.595
	9.89	1.502		10.40	1.875
	10.00	1.753		10.30	2.188
30	10.00	1.050	30	10.00	1.344
	10.10	1.316		10.40	1.641
	10.10	1.581		11.00	1.985
	10.10	1.844		10.80	2.306

本次试验的波浪要素参考《波高取值对斜坡堤胸墙结构设计影响的探讨》和《斜坡式建筑物波要素的设计标准探讨》中关于波高取值的描述确定波高水深比值在 $1/5 \sim 1/3$ , 平均周期与谱峰周期根据波长取值反推得到, 入射波波长 $L$ 分别为1.5, 2.0, 2.5, 3.0 m。波长的取值根据波长与堤宽的比决定。

## 2 潜堤对规则波的消浪作用

### 2.1 $R/H$ 的变化对消浪特性的影响

$R$ 为静水位到潜堤堤顶的高度, 它直接影响到波浪反射、越堤和波浪在潜堤上的破碎形态, 是影响潜堤消浪的重要因素<sup>[7]</sup>。选取波高仪所测得的波高值的平均值作为堤后稳定波高 $H_t$ ,  $K_t = \frac{H_t}{H}$ 与 $R/H$ 的关系见图2。

由图2可以看出, 透射系数随着相对淹没水深 $R/H$ 的增加而减小。随着水深的增加, 由出水堤变

成淹没堤, 透射系数逐渐增大, 消浪作用逐渐减弱。当相对淹没水深 $R/H$ 由0.0变化为-1.5时, 透射系数由0.4增大到0.9。

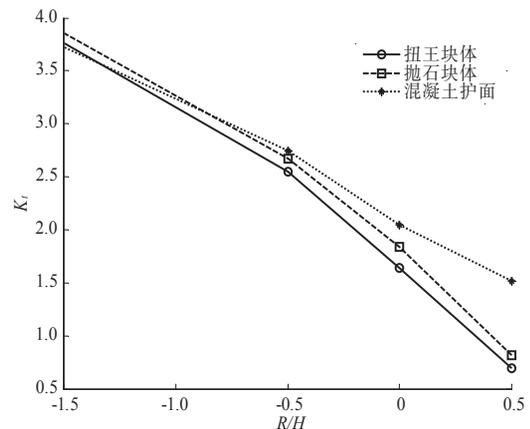


图2  $R/H$ 与 $K_t$ 之间关系 (规则波)

### 2.2 不同护面块体对消浪特性的影响

本次试验采用扭王块体、抛石块体和混凝土3种护面结构形式, 混凝土护面的潜堤可以认为是

比较光滑的不透水潜堤，而扭王块体护面和抛石块体护面的潜堤则是有一定粗糙度的透水潜堤<sup>[8]</sup>。随护面块体的糙渗系数变化对潜堤消浪作用的影响见图3。

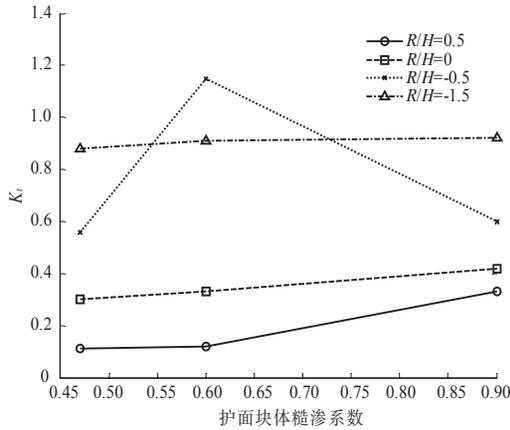


图3 护面块体糙渗系数与消浪关系

由图3可知，随着潜堤护面结构形式的糙渗系数的增加，透射系数增大。从能量角度来说，波浪行进至潜堤时，在遇到光滑不透水的潜堤时，波浪发生越堤、破碎损耗和堤前反射，能量损失较小，堤后稳定波高较大；而在遇到粗糙透水的潜堤，波浪在堤前由于摩擦损耗及破碎，并有一部分能量反射回去，能量损失较大，堤后稳定波高较小。

### 2.3 不同坡度对消浪特性的影响

研究堤坡坡度对消浪的影响，一般指潜堤前坡坡度。本次试验考虑了 $m=1.5$ 和 $m=2.0$ 两种坡度来观察坡度变化对潜堤消浪效果的影响。坡度变化对潜堤消浪作用的影响见图4。

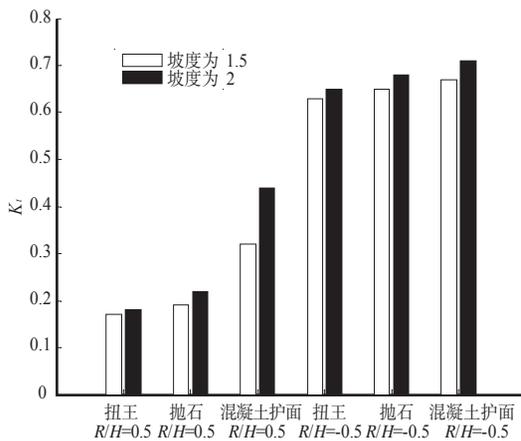


图4 规则波作用下，坡度变化对于消浪的影响

由图4可以看出，随着潜堤前坡坡度的变缓，透射系数增大，其变化趋势较缓，约为0.03。潜堤前坡坡度较陡，波浪在堤前反射较大<sup>[9]</sup>，堤上水深迅速变浅，波峰迅速变陡发生破碎；而潜堤前坡坡度较缓，波浪在堤前反射较小。

### 2.4 波浪沿程变化

通过改变潜堤护面结构形式、前坡坡度 $m$ ，对波浪在潜堤上的传播将会产生不同的影响效果。波浪经过潜堤传播时，波高将发生一定的变化。波高的沿程变化图中，纵坐标 $H$ 为潜堤断面沿程的波高值，横坐标 $x$ 为波高仪的位置，其值为各波高仪到第一根波高仪之间的距离。

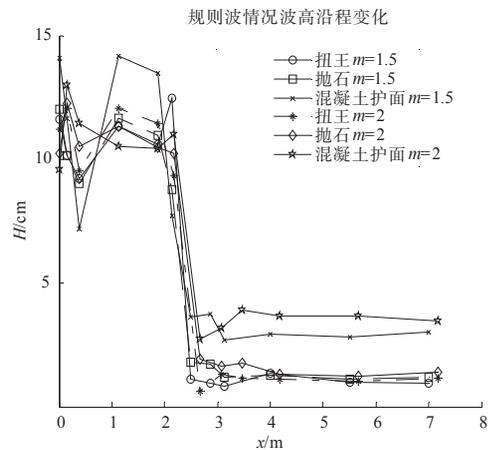


图5 规则波波高沿程变化

从图5中可以看出，当波浪传播至潜堤所在的位置 ( $x=1\sim 2$  m) 时，由于水深突然变浅而发生雍水现象，波高迅速增大，潜堤上的波高大于入射波高。有的波浪在潜堤上发生破碎，潜堤上的破碎波高也大于入射波高，波浪破碎后，使得破碎后的波高小于入射波高，在堤后经过一段距离的传播后，堤后波高趋于稳定，达到堤后稳定波高。

### 3 潜堤对不规则波的消浪作用

在实际的工程中，所遇到的通常都是不规则波问题，所以对不规则波作用下潜堤的消浪作用的研究是非常有必要的。在不规则波作用下，入射波高选用JONSWAP谱得到的有效波高 $H_s$ ，堤后稳定波高同规则波一样选取1倍有效波长以外布置的3~5根波高仪所测得的波高值的平均值 $H_t$ 。

### 3.1 $R/H_s$ 的变化对消浪特性的影响

从图6可以看出, 不规则波在相对淹没水深  $R/H_s$  的变化作用下与规则波相类似。对于3种护面块体, 随着  $R/H_s$  的增加, 透射系数都呈减小趋势。出水堤 ( $R/H_s=0.5$ ) 时, 透射系数最小, 消浪效果明显。在相同  $R/H_s$  下, 混凝土护面块体消浪系数最大。当静水位在堤顶高度以上 ( $R/H_s < 0$ ), 即为潜堤时, 随着水深的增加, 透射系数增大, 由 0.45 增加到 0.92, 消浪作用减弱。

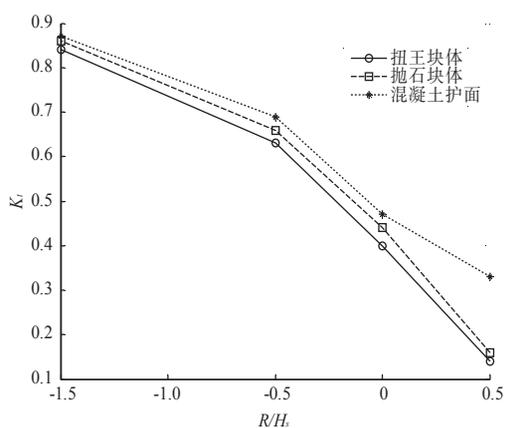


图6  $R/H_s$ 与 $K_t$ 的关系

### 3.2 不同护面块体糙渗系数对消浪特性的影响

从图7的试验结果可以看出, 潜堤在不规则波作用下, 透射系数随着护面结构形式的糙渗系数增大而增大。比如在淹没堤 ( $R/H_s=-0.5$ ) 情况下, 护面结构形式由混凝土护面变为扭王块体护面, 透射系数减小 0.19 左右, 可以看出护面结构形式的改变还是对潜堤的消浪作用有一定的影响, 相比相对淹没水深对消浪的影响较小, 是潜堤透射系数的次要因素。

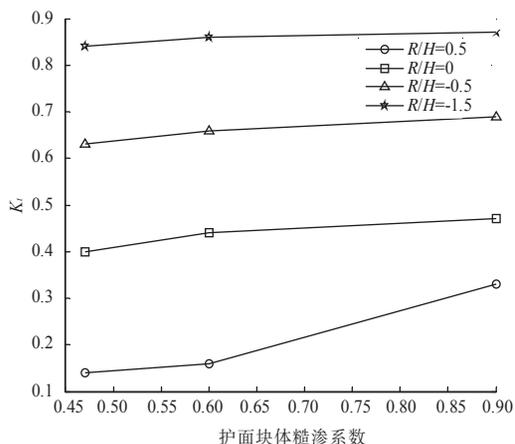


图7 不同糙渗系数对消浪的影响

### 3.3 不同坡度对消浪特性的影响

从图8可以看出, 随着潜堤前坡坡度的变小, 透射系数缓慢增大。就扭王块体护面来说, 前坡坡度由 1.5 变化为 2.0, 相对淹没水深由 0.5 变化为 -1.5, 透射系数的变化分别是 0.03, 0.02, 0.01, 0.00, 前坡坡度对潜堤的消浪效果影响及其微小。

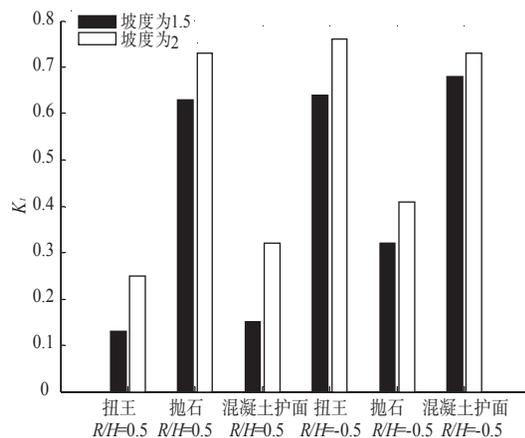


图8 坡度变化对于消浪的影响

### 3.4 波浪的沿程变化

从波高的沿程变化 (图9) 中可以看出, 对于 3 种护面块体, 当波浪传播至潜堤所在的位置时, 波浪发生雍水现象, 潜堤上的有效波高大于入射波高, 有的波浪发生破碎, 波浪能量损耗, 堤后波高小于入射波高, 经过一段距离的传播后, 堤后波高趋于稳定。其中混凝土护面的堤后波高最大, 由混凝土护面光滑、透水性差所致。

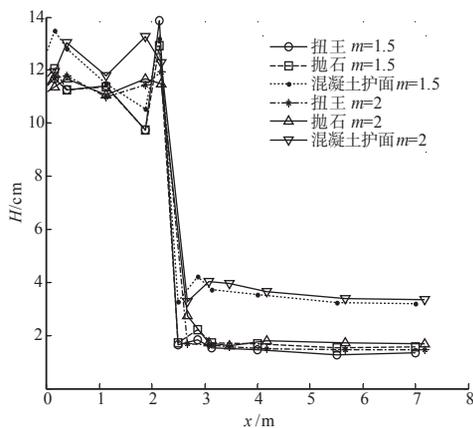


图9 波浪沿程变化

## 4 结论

本文通过物理模型试验的方法研究了潜堤在

规则波和不规则作用下的消浪特性。在规则波情况下，随着相对淹没水深 ( $R/H$ ) 的增加，潜堤的透射系数逐渐减小<sup>[10]</sup>；随着潜堤的护面结构形式的糙渗系数的增加，透射系数增大；随着潜堤前坡坡度的变缓，透射系数增大，其变化趋势较缓。从试验数据可以看出，相对淹没水深 ( $R/H$ ) 的影响最大，护面结构形式的影响次之，坡度的影响最小。

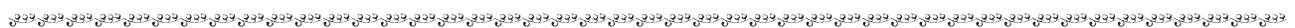
在不规则波情况下，随着相对淹没水深 ( $R/H_s$ ) 的增加，潜堤的透射系数逐渐减小<sup>[11]</sup>；随着护面结构形式的糙渗系数的增加，潜堤的透射系数增大。从试验数据可以看出，坡度陡的潜堤消浪效果要好于坡度缓的潜堤。相对淹没水深 ( $R/H$ ) 的影响最大，护面结构形式的影响次之，坡度的影响最小。

**参考文献：**

[1] 南京水利科学研究院. 波浪模型试验规程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.  
 [2] 陈杰, 蒋昌波, 曹永港, 等. 斜坡上潜堤透射系数试验研究[J]. 中国科技论文在线, 2008(7): 516-523.

[3] Goda Y, Suzuki Y. Estimation of incident and reflected wave in random wave experiments[C]// Proceeding of the 15th Coastal Engineering Conference:ASCE,1976:828-845.  
 [4] JTJ 298—1998 港口工程技术规范[S].  
 [5] 顾民权. 海港工程设计手册(中册)[M]. 北京: 人民交通出版社, 1994.  
 [6] Kobayashi Nobuhisa, Meis Leslie E, Ota Takao, et al. Irregular breaking wave transmission over submerged porous breakwater [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2007(3): 104-116.  
 [7] 顾家龙, 任汝述, 薛鸿超. 海岸动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.  
 [8] JTJ 213—1998 海港水文规范[S].  
 [9] Nelson R C. Wave heights in depth limited condition[C]// Sixth Australian Conference on Coastal and Ocean Engineering, 1983: 210-215.  
 [10] 严恺. 海岸工程[M]. 北京: 海洋出版社, 2002.  
 [11] 张日向, 刘圆, 蒲高军. 潜堤结构形式及其透射系数研究[J]. 海洋工程, 2003, 21(4): 81-85.

( 本文编辑 武亚庆 )



( 上接第28页 )

[24] Anders S, Lohaus L. Optimized high-performance concrete in grouted connections [C]// Tailor Made Concrete Structures—Walraven & Stoelhorst. The Netherlands,2008.  
 [25] 顾祥林. 混凝土结构基本原理[M]. 上海: 同济大学出版社, 2004.  
 [26] 周志祥. 高等钢筋混凝土结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.  
 [27] BS 8004 British Standard Code of Practice for Foundation [S].

[28] 汪基伟. 水工钢筋混凝土结构学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.  
 [30] 曾青松. 钢管桩桩芯混凝土设计的探讨[J]. 中国港湾建设, 2004 (5): 34-40.  
 [29] 范崇仁. 水工钢结构[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.  
 [31] API,RP2A—WSD Planning Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms—working Stress Design [S].

( 本文编辑 武亚庆 )