



聚氨酯碎石护坡波浪作用特性

丁 洁，董永福

(中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

摘要: 在风浪较大的河口地区, 堤坝采用聚氨酯碎石护坡。通过理论研究、现场监测和物理模型试验等方式, 分析聚氨酯碎石护坡的结构稳定性、波浪力分布和消浪效果。结果表明: 1) 在有效波高为 2.0~3.0 m 的波浪作用下, 边坡 1:2、厚 20~30 cm 的聚氨酯碎石护坡是稳定的; 2) 聚氨酯碎石护坡能有效降低波浪爬高, 设计中糙系数取 0.80~0.85; 3) 最大波压强不小于 $0.5\rho gH$ (海水密度、重力加速度与波高的乘积)。

关键词: 聚氨酯碎石; 护面结构; 波浪爬高; 波浪作用

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)04-0021-04

Characteristics of wave-structure interaction of PBA revetment

DING Jie, DONG Yong-fu

(Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: In the estuary area with heavy wind waves, polyurethane bonded aggregate (PBA) revetment is applied to the dams. By theoretical research, on-site monitoring, and physical model test, this paper studies structural stability, wave force distribution, and wave damping of PBA revetment. The results show: 1) Under significant wave height of 2.0~3.0 m, PBA revetment with thickness of 20~30 cm remains stable when the slope ratio is 1:2. 2) PBA revetment can effectively reduce wave run-up with a designed roughness coefficient of 0.80~0.85. 3) The maximum wave pressure is not less than $0.5\rho gH$ (the product of seawater density, gravitational acceleration, and wave height).

Keywords: PBA; revetment; wave run-up; wave force

沿海地区围堤、防波堤、护岸等斜坡式结构多采用人工块体护面, 以消弱波浪作用、降低波浪爬高。人工块体护面用量大、造价高, 如能在护面结构和材料选取等方面取得突破和创新, 可以取得良好的经济和社会效益。聚氨酯碎石护坡是利用聚氨酯优良的物理力学及黏结性能, 将碎石整合为一个强度大、多孔隙的整体结构, 孔隙结构通过吸收外荷载作用达到消浪、降低爬高的效果。国际上, 聚氨酯碎石常用于道路路面、河道防冲结构、堤坝护面, 相关研究与应用^[1-2]持续了 20 余年。在国内, 聚氨酯碎石常用于透水路面结构^[3-4], 并开展了大量关于结构设计与材料配

比、结构透水性能、材料强度与力学特性等研究; 在河口地区航道整治建筑物中, 作为堤身材料, 开展了空心块体生态堤结构^[5]等有关生态结构的研究, 但尚未能开展工程应用; 在内河航道工程护岸上, 作为护面结构开展了工程应用^[6-7], 也在波浪条件下开展了波浪爬高及波压力的室内试验研究^[8], 在风浪较大的河口地区堤坝上尚未开展过相关工程应用和研究。

本研究开展了风浪作用较大的河口地区的堤坝上聚氨酯碎石护坡的工程设计与应用, 并通过理论研究、现场监测与物理模型试验进行对比分析, 进一步对聚氨酯碎石护坡的结构稳定性、消

浪效果及波浪力分布特征开展研究。

1 基本情况

1.1 设计方案概况

护坡结构应用于横沙东滩某大型滩涂整治工程，现场试验位置选择在工程砂库北围堰上，总

长度 108 m。

堤坝采用袋装砂堤身，道渣贴坡后铺设 450 g/m² 无纺土工布与 30 cm 厚的碎石垫层，边坡坡度 1:2；碎石垫层外侧铺设聚氨酯碎石护坡，根据聚氨酯碎石厚度不同分为 3 段，坡顶厚度分别为 20、25、30 cm，每段长度 36 m。见图 1。

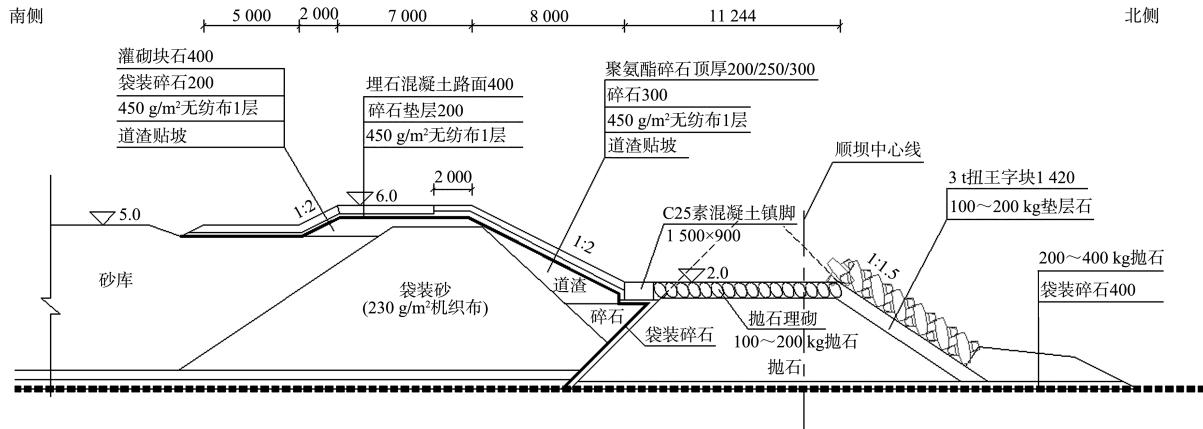


图 1 聚氨酯碎石护坡试验断面 (高程: m; 尺寸: mm)

1.2 现场监测与物模试验

1.2.1 现场监测方案

在聚氨酯碎石护坡上(厚度 25 cm)，沿断面方向等距离安装 6 个波浪压强测点，在外侧平台

(2.0 m) 上设置 1 个压力式水位计和 1 个压力式波浪传感器，同步采集水位和波浪数据。波浪压强测点及波浪、水位监测点布置见图 2。

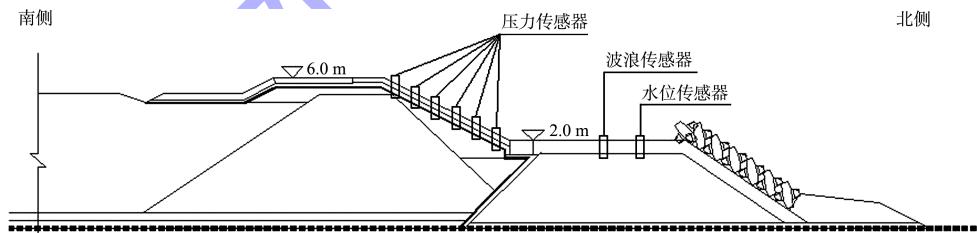


图 2 监测断面

1.2.2 室内物理模型试验

断面物理模型试验^[9]在水槽中进行，用来研究聚氨酯碎石护坡结构的稳定性、波浪爬高以及波压力分布规律。试验采用正态模型，按照 Froude 数相似律设计。根据模型砂的选取、设计水位、波浪要素、试验断面及试验设备条件等因素，模型几何比尺取 1:15。试验采用的聚氨酯及碎石与原型密度一致，聚氨酯碎石护坡满足重力相似。护面厚度满足几何相似，在相同级配规律条件下，孔隙率与原型相同。根据相关研究成果^[10-12]，为满足护面受

力与原型满足重力相似，当几何比尺取 1:15 时，块石粒径比尺取 1:10。波浪按重力相似准则模拟，不规则波波谱采用 JONSWAP 谱，每组试验不规则波波数大于 150 个，每组试验重复 3 次。

在聚氨酯护坡外表面和内表面分别安装波浪测点同步测量压强。点位布置与现场监测点位布置相同。断面物理模型试验开展了表 1 所示的两组水位及波浪条件的研究，波浪压强测量研究组次见表 2。波浪爬高在坡度为 1:3 的单坡结构上，采用 50 a 一遇设计水位和波浪条件开展试验研究。

表1 物理模型试验水文条件

水位/m	$H_{1\%}/m$	$H_{4\%}/m$	$H_{5\%}/m$	$H_{13\%}/m$	H_m/m	T_m/s	L/m
50 a一遇 5.59	4.63	4.08	3.98	3.48	2.39	7.84	63.4
不利水位 3.50	3.63	3.22	3.14	2.76	1.92	7.66	54.3

表2 波浪压强测量物理模型试验组次

物模试验组别	水位/m	波高 $H_{13\%}/m$	边坡坡比	厚度/cm
1	3.50	2.76	1:2	20
2	3.50	2.76	1:2	30
3	5.59	3.48	1:2	20
4	5.59	3.48	1:2	30

2 结构稳定性分析

聚氨酯碎石护坡在聚氨酯黏结剂的黏结作用下形成整体,提高了碎石材料的强度,同时其多孔隙结构消散与吸收了波浪冲击力。目前,聚氨酯碎石护坡的护面及边坡尚无有效理论公式计算确定。根据欧洲相关机构研究成果和示范工程应用情况,聚氨酯碎石护坡厚度取值范围为10~30 cm。物理模型试验采用20、30 cm两种厚度开展试验研究,现场工程采用了20、25、30 cm共3种厚度,通过测量和观察的方式判断结构稳定性。

根据室内物理模型试验成果,对厚度分别为20和30 cm、边坡坡比1:2的聚氨酯碎石护坡(碎石粒径20~40 mm)结构开展研究。结果表明堤顶、斜坡及坡脚处的聚氨酯碎石护坡均为稳定状态。

在现场监测时段里,出现了几组波浪较大的情况,各组监测水位和波高见表3。在这几组波浪作用下,聚氨酯碎石护坡结构稳定、防护效果良好。

表3 结构特征与水文条件

现场监测组别	水位/m	波高 $H_{13\%}/m$	边坡坡比	厚度/cm
1	4.35	2.38	1:2	25
2	4.51	2.02	1:2	25
3	4.78	3.92	1:2	25
4	4.36	3.50	1:2	25

因此,综合现场监测情况和物理模型试验结果可以认为,在1:2边坡坡度下,20~30 cm厚的聚氨酯碎石护坡可抵御 $H_{13\%}$ 不小于3.0 m的波浪作用。

3 波浪爬高分析

聚氨酯碎石护坡通过多孔结构吸收波能,有

效减小了波浪爬高。

根据行业标准,斜坡堤波浪爬高计算公式如下:

$$R = K_\Delta R_1 H \quad (1)$$

$$R_1 = K_1 \operatorname{th}(0.432M) + [(R_l)_m - K_2] R(M) \quad (2)$$

$$M = \frac{1}{m} \left(\frac{L}{H} \right)^{1/2} \left(\operatorname{th} \frac{2\pi d}{L} \right)^{-1/2} \quad (3)$$

$$(R_l)_m = \frac{k_3}{2} \operatorname{th} \frac{2\pi d}{L} \left(1 + \frac{\frac{4\pi d}{L}}{\operatorname{sh} \frac{4\pi d}{L}} \right) \quad (4)$$

$$R(M) = 1.09 M^{3.32} \exp(-1.25M) \quad (5)$$

式中: R 为波浪爬高(m); K_Δ 为与斜坡护面结构形式有关的糙渗系数; R_1 为 $K_\Delta = 1$ 、 $H = 1$ m 时的波浪爬高(m); H 为建筑物所在处进行波的波高(m); M 为与斜坡的 m 值有关的函数, m 为斜坡坡度系数; $(R_l)_m$ 为相应于某一 d/L 时的爬高最大值(m), L 为波长(m); d 为建筑物前水深(m); $R(M)$ 为爬高函数; K_1 、 K_2 、 K_3 为系数, 按规范[9]取值。

在结构边坡尺度和波浪条件相同的情况下, 式中 R_1 、 M 、 $(R_l)_m$ 、 $R(M)$ 等与护面结构的糙渗系数都无关。因此, 护面结构的糙渗系数 K_Δ 是一个相对独立的计算参数, 波浪爬高 R 与之成线性关系。结合有关聚氨酯碎石护坡波浪爬高的研究成果、物理模型试验, 研究聚氨酯碎石材料的糙渗系数 K_Δ 。

1) 相关研究(与混凝土板护面的对比)。荷兰代尔夫特科技大学等机构对巴斯夫公司生产的聚氨酯碎石护坡开展了波浪爬高研究, 研究表明: 由于聚氨酯碎石护坡的粗糙表面和多孔隙构造具有高导水率特征, 大部分波能耗散发生在波浪爬高过程中。与不透水的护坡(混凝土板护面)相比, 聚氨酯碎石护坡的波浪爬高可显著降低15%~25%。根据行业标准, 混凝土板的糙渗系数为0.9。因此, 在相

同的结构尺度和波浪条件下，可以估计聚氨酯碎石材料的糙渗系数为 0.68~0.77。

2) 工程现场监测。根据现场对聚氨酯碎石护坡和附近乱石混凝土(类似抛石外浇筑混凝土)护坡爬高的同步量测，分别为 4.45~4.90 m 和 5.23~5.93 m。与乱石混凝土相比，聚氨酯碎石护坡降低波浪爬高约 20%~23%。结合波浪条件，估算得聚氨酯碎石材料的糙渗系数为 0.75~0.85。

工程现场爬高获取数据不稳定，可能存在一定误差。总体上，以上两种方式结果较为接近。因此，在工程设计中，取 0.80~0.85 是安全的。

4 波压强特征分析

现场监测与物理模型试验条件并不是一一对应的。一是现场水文要素的不确定性，监测结果未能与物理模型试验完全匹配；二是现场监测的聚氨酯碎石护坡厚度与物理模型试验也不一致。因此，对两项波压强数据进行处理：先将测量波压强值扣减净水压强，以消除水位不同的问题；再将压强值经公式 $P/(\rho g H)$ 处理为相对波压强，以消除波高不同的问题。

4.1 波压力分布形态

现场监测得到护面上波压力分布形态与室内试验有一定相似性。水位附近波浪力最大；水位以上部分，波压力越往上越小，衰减较快；水位以下部分，波压力越往下越小，但较水位以上的区域衰减较慢，见图 3。这与栅栏板、混凝土面板等面板型护面结构受力分布相似。

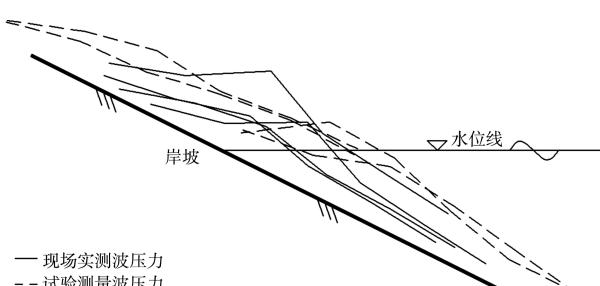


图 3 实测与物模波压力分布

4.2 波压强值

经公式 $P/(\rho g H)$ 处理后，现场测得的每组相对波浪压强最大值为 0.35~0.68。相近波高下

(组 1 和组 2, 组 3 和组 4)，水位越高，相对波压强越小；相近水位下(组 1 和组 4、组 2 和组 3)，波高越大，相对波压强越小，均成反比特征，见图 3 和表 4、5。

表 4 现场监测组相对波浪压强 $P/(\rho g H)$

点位	现场监测组 1	现场监测组 2	现场监测组 3	现场监测组 4
1	0.24	0.08	0.16	0.13
2	0.37	0.22	0.26	0.21
3	0.68	0.55	0.35	0.37
4	0.44	0.29	0.22	0.21
5	0.38	0.20	0.19	0.17
6	0.32	0.14	0.15	0.11

室内物理模型试验测得的每组相对波浪强最大值为 0.50~0.64，且与水位、波高关系不大，见表 5。

表 5 室内试验对照组相对波浪压强 $P/(\rho g H)$

点位	物模试验组 1	物模试验组 2	物模试验组 3	物模试验组 4
1	0.16	0.18	0.24	0.21
2	0.30	0.39	0.32	0.64
3	0.31	0.52	0.52	0.61
4	0.42	0.45	0.47	0.41
5	0.50	0.52	0.36	0.26
6	0.47	0.54	0.26	0.27

与物理模型试验比较，在波高较大的情况下，现场监测的相对波浪压强 $P/(\rho g H)$ 偏小。经现场调查，这可能是现场波高监测点设在堤脚平台处，在波浪较大的时段，波浪反射作用影响大。同时，由于研究监测点位未连续布置，最大波压强可能有漏测情况，根据物理模型试验结论，聚氨酯碎石护坡上最大波压强不小于 $0.5\rho g H$ 。

5 结语

1) 聚氨酯碎石护坡是利用具有生物亲和性化学黏结剂聚氨酯(PU)的优良物理力学及黏结性能，将碎石强化整合为一个坚固、稳定多孔隙的整体结构，从而实现吸收外荷载作用，达到消浪、防冲的效果。本研究选择了风浪较大的河口堤坝，开展了护面结构设计与结构特性研究等，并首次在大风浪地区应用了 20、25、30 cm 共 3 种厚度的聚氨酯碎石护坡结构。

(下转第 75 页)