

文章编号: 1000-4750(2014)02-0139-07

波浪作用下抛石潜堤的动态稳定数值模拟

胡宝琳¹, 姚文娟¹, 熊 胜¹, 崔湘基²

(1. 上海大学土木系, 上海 200072; 2. 上海华申工程建设监理咨询有限公司, 上海 200072)

摘 要: 抛石潜堤在港口工程中得到广泛应用, 该文运用离散单元法中的二维颗粒流方法建立了抛石潜堤模型, 分析了刚度和摩擦系数两个细观参数对模型分析的影响。结合工程实例, 合理确定了抛石潜堤颗粒流模型的细观参数, 克服了传统连续介质力学的宏观连续性假设, 形象而直观的模拟分析了抛石潜堤的动状稳定破坏。研究表明, 在波浪荷载作用下, 抛石重量是影响失稳的主要因素, 其次是堤顶宽度及断面坡度。抛石重量越大, 堤顶宽度越大, 断面坡度越缓, 则抛石潜堤的整体稳定性越好。应用此结论, 针对该工程, 对抛石潜堤进行了结构优化, 得到不同的抛石块体以及不同的断面形状的优化潜堤结构。

关键词: 斜坡式抛石潜堤; 动态稳定; 颗粒流; 结构优化; 数值模拟

中图分类号: TU318 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.09.0701

NUMERICAL SIMULATION OF DYNAMIC STABILITY FOR RIPRAP BREAKWATER UNDER WAVE LOADS

HU Bao-lin¹, YAO Wen-juan¹, XIONG Sheng¹, CUI Xiang-ji²

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. Shanghai Hua Shen Construction Supervision Advisory Limited Company, Shanghai 200072, China)

Abstract: Riprap breakwater has been widely used in port engineering. The model of riprap breakwater has been established by the two-dimensional particle flow method of discrete element methods, and the effect of two mesoscopic parameters including the stiffness and friction coefficient on model analysis has been analyzed. The parameters of the riprap breakwater particle flow model, which overcomes macro-continuity hypothesis in traditional continuum mechanics, have been determined by reasonably combining with engineering practice. Besides, the simulation analysis on the dynamic stability damage of the riprap breakwater has been made in a direct way. The research indicates that the weight of the breakwater is the main factor, which influences instability, and the second is the width of the levee crest and the grade of section. The overall stability of a riprap breakwater is better when the enrockment is heavier, the width of the levee crest is larger and the slope is slower. As for this project, structural improvement has been made for the riprap breakwater, and optimal submerged breakwater structures with different weight riprap and section shapes have been obtained by the application of this conclusion.

Key words: sloping riprap breakwaters; dynamic shape stability; particle flow; optimum structure; numerical simulation

近年来, 由于海洋生态、环保意识及海岸可持续发展等观念逐渐受到人们重视, 强调工程结构与

自然生态相和谐, 抛石潜堤被广泛用来保护海岸或其它海洋结构物^[1], 它不仅对自然岸滩影响较小,

收稿日期: 2012-09-25; 修改日期: 2013-01-23

通讯作者: 胡宝琳(1980—), 男, 安徽宿州人, 讲师, 博士, 从事结构抗震、水工结构及其力学性能(E-mail: hubaolintz@163.com).

作者简介: 姚文娟(1957—), 女, 江西南昌人, 教授, 博士, 从事水工结构及其力学性能研究(E-mail: wenjuan@mail.shu.edu.cn);

熊 胜(1986—), 男, 安徽安庆人, 硕士, 从事水工结构研究(E-mail: xsh19861006@163.com);

崔湘基(1953—), 男, 湖北武汉人, 高工, 学士, 从事长江口深水航道治理工程建设与回淤研究(E-mail: cjkjlb@163.com).

且造价便宜,又能达到保护海岸或其它海洋结构物的功效,而且满足生态、环保要求。

目前,国内外很多学者通过波浪水槽模型试验和有限元动力模拟分析来获得坝体在设计波浪荷载作用下的稳定性能。波浪水槽模型试验需要非常昂贵的成本,使得有限元成为一种主要的分析手段,但是由于有限元方法主要用于分析连续体结构,而抛石潜堤是离散体结构,抛石之间是点与点接触,所以有限元方法对抛石潜堤的研究具有一定的局限性。

颗粒流软件 PFC (Partical Flow Code)属于离散单元法的一种^[2-3],采用圆盘模拟颗粒介质的运动及其相互作用,抛石之间的相互作用通过颗粒之间的接触本构模型表达,通过设定细观参数实现材料的宏观力学性质。该软件已应用于试验类材料基本特性、颗粒物质动力响应和岩石类介质破裂等基础性问题的科学研究^[4-5]。该文根据抛石潜堤是典型的散体材料集合体的特点,应用 PFC 进行数值模拟,斜坡式抛石潜堤,获得潜堤在波浪荷载作用下的稳定破坏特性以及优化的潜堤结构。

1 模型细观参数研究

在运用 PFC2D 软件模拟抛石潜堤在波浪力作用下失稳破坏之前,首先必须确定抛石潜堤的模型细观参数,模型的细观参数与试样本身的宏观参数存在很大的差异,细观参数微小的变化很可能引起模拟结果的重大变化,所以细观参数的确定很重要且很有必要。目前的数值模拟研究通常都是从宏观开始,由宏观-细观力学量之间某种对应关系出发,通过宏观力学参数的反分析得到细观参数^[6-8]。数值模拟试验的具体过程是,通过调整接触模型相关的细观参数,使数值结果接近试验结果,从而得出一组恰当的细观模型参数,进而可以利用这些参数进行其他加载条件下的数值模拟^[9]。

1.1 颗粒流基本原理

该方法将物体离散成有代表性的多数颗粒单元,颗粒间的相互作用被处理成随模型内颗粒接触力之间平衡状态而发展的一种动态过程。通过跟踪颗粒组合体内各个颗粒的运动,确定颗粒之间的接触力和位移。颗粒的运动是由于墙体的运动或体力的作用引起的颗粒扰动在颗粒组合体内传播而产生的。在计算过程中,以牛顿第二定律与力-位移为基础,对整个模型进行循环计算,其过程如图 1

所示。

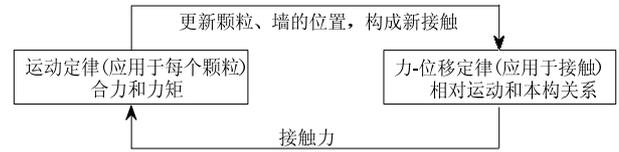


图 1 计算过程循环

Fig.1 The calculation cycle

1.1.1 力-位移定律

通过力-位移定律,把相互接触的两部分的力与位移联系起来,在颗粒流模型中,接触类型有“球-球”接触和“球-墙”接触两种。

1.1.2 运动定律

单个颗粒的运动是由作用于其上的合力和合力矩决定的,可以用颗粒内一点的线速度与颗粒的角速度来描述。运动方程由两组向量方程表示,一组描述合力与线性运动的关系,另一组表示合力矩与旋转运动的关系。

1.2 接触本构

材料的本构特性是通过接触本构模型来模拟的。颗粒间的接触本构模型有刚度模型、滑动模型和粘结模型。刚度模型提供了接触力与相对位移间的弹性关系;滑动模型则强调切向和法向接触力使得两接触颗粒可以发生相对滑动;而粘结模型则是限制总的法向和切向力,使得在连接强度范围内发生接触。本文主要介绍本次模拟所用的模型。

1.2.1 线性接触模型

该模型假定两个接触颗粒为刚度串联作用,则法向接触刚度 k_n 和切向接触刚度 k_s 为:

$$k_n = \frac{k_n^A k_n^B}{k_n^A + k_n^B} \quad (1)$$

$$k_s = \frac{k_s^A k_s^B}{k_s^A + k_s^B} \quad (2)$$

式中: k_n^A 为颗粒 A 的法向接触刚度; k_n^B 为颗粒 B 的法向接触刚度; k_s^A 为颗粒 A 的切向接触刚度; k_s^B 为颗粒 B 的法向接触刚度。

1.2.2 滑动模型

滑动模型是两个接触体(颗粒-颗粒或颗粒-墙)的固有特性。它假设没有法向抗拉强度,允许在抗剪强度内发生滑动。如果不采用接触连接,该模型一直处于激活状态。也就是说,接触连接模型优先于滑动模型。这两种模型都是对颗粒点接触的本构行为进行了描述。另一方面,平行连接描述的则是存在于两个颗粒间的粘性材料的本构行为。上述两

种本构行为可以同时存在。因此，如果没有接触连接，滑动模型可以与平行连接并行存在。

以摩擦系数 μ [无量纲] 定义滑动模型， μ 取两个接触体的最小摩擦系数。重叠值是否小于或等于 0 作为判断有无法向强度的标准。如果重叠值小于或等于 0 那么法向力和切向力都等于 0。发生滑动的判别条件为：

$$F_{\max}^s = \mu |F_i^n| \quad (3)$$

如果 $|F_i^s| > F_{\max}^s$ ，那么下个循环内将发生滑动，并将 $|F_i^s|$ 赋值为 F_{\max}^s ，即：

$$F_i^s \leftarrow F_i^s (F_{\max}^s / |F_i^s|) \quad (4)$$

1.3 细观参数分析

1.3.1 刚度分析

运用 PFC2D 建立抛石潜堤模型时，首先需要确定的参数是模型中的颗粒法向刚度和切向刚度。数值试验表明，颗粒刚度过小时，抛石潜堤模型在抛石自重作用下达到稳定时，抛石潜堤堤顶高度将会下降，与抛石潜堤的设计尺寸偏离较大。刚度越大，抛石在自重作用下的颗粒间的压缩量就越小，这样抛石潜堤的原设计标高才会得以实现。鉴于此，在建立抛石潜堤 PFC2D 模型时，为了很好的达到抛石潜堤的设计标高，更真实的反应出抛石潜堤的受力特性和动力响应，该文拟采用的颗粒刚度不应小于 10^7N/m ，最好为 10^8N/m 或 10^9N/m 。

1.3.2 摩擦系数分析

自然休止角度被认为是最大的静止坡角。对于松散状态下的离散颗粒材料，自然休止角度大致与颗粒的峰值摩擦角相等^[10]。可以利用这一自然现象，通过数值试验来模拟颗粒圆筒之间的摩擦系数与摩擦角(自然休止角度)之间的关系，从而近似地得到等效内摩擦角与摩擦系数的关系式，从工程力学的宏观角度上，这是可行的。

在 PFC2D 中，对于固定的颗粒粒径和孔隙率，研究认为颗粒间的内摩擦角大小主要是取决颗粒之间的摩擦系数的大小。而现场考察能得到松散堆积体的 φ 值(即内摩擦角)实测数据，为实现在 PFC2D 中对实际松散堆积体的模拟，确定实测数据中内摩擦角 φ 与 PFC2D 中摩擦系数 f 的对应关系，是完成 PFC2D 模拟波浪作用下抛石潜堤稳定破坏的必要条件，以下重点讨论实测数据中内摩擦角 φ 与 PFC2D 中摩擦系数 f 的关系公式。

数值试验条件：1) 选择颗粒的线性接触刚度模

型；2) 控制初始孔隙率为 0.2；3) 固定的颗粒接触模量、法向和切向的刚度比值($k_n / k_s = 1.0$)。

则细观参数(摩擦系数)和内摩擦角之间的关系：

$$\varphi = \lambda(f)$$

式中： φ 为颗粒材料的内摩擦角； f 为颗粒之间的摩擦系数。

为了得到内摩擦角和摩擦系数的关系，一系列的数值模拟试验是必须的。如图 4 所示，利用在重力作用下，一定尺寸的颗粒在固定的四面墙体内生成，为了不让墙体与颗粒之间的摩擦影响结果，设置墙体-颗粒的摩擦系数与颗粒-颗粒之间的摩擦系数一致。计算不平衡力满足要求后，去掉上面和右面的墙体，使颗粒能够在自重作用下自由堆放，直到达到最终平衡状态，此刻的自然休止角度，可以认为等效于松散堆积体材料的内摩擦角。

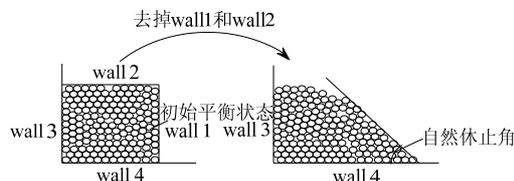


图 4 自然休止角形成示意图

Fig.4 Schematic diagram of the formation of the natural angle of repose

将抛石粒径分别设置为 0.1m、0.2m、0.3m 和 0.4m 进行大量的数值计算，得出不同抛石粒径在不同摩擦系数下的摩擦角值，见表 1。

表 1 不同抛石粒径在不同摩擦系数下的摩擦角值

Table 1 The friction angle values of different size of riprap under different friction coefficients

抛石粒径 r/m	摩擦系数 f															
	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1	2	5	10	20	30	40	50	60	70	80
0.1	3	13	26	33	32	39	42	39	43	55	50	48	48	50	43	49
0.2	3	13	20	22	25	29	38	47	55	37	44	52	44	44	36	37
0.3	6	7	15	26	24	39	33	40	36	42	43	47	39	39	42	38
0.4	4	12	21	23	55	32	52	38	58	54	47	47	33	50	53	53

然后将细观参数(摩擦系数)和内摩擦角之间的关系进行曲线拟合，拟合公式如下：

$$\varphi = 5.0393 \ln(f) + 29.869, \quad r = 0.1\text{m} \quad (5)$$

$$\varphi = 4.6925 \ln(f) + 26.087, \quad r = 0.2\text{m} \quad (6)$$

$$\varphi = 4.472 \ln(f) + 24.898, \quad r = 0.3\text{m} \quad (7)$$

$$\varphi = 4.9415 \ln(f) + 31.001, \quad r = 0.4\text{m} \quad (8)$$

查阅相关资料，得出石块的摩擦角为 $40^\circ \sim 45^\circ$ ，这样我们可以通过已拟出的公式，求出不同粒径下内摩擦角所对应的摩擦系数。

2 工程实例

拟采用长江口深水航道治理工程二期工程整治建筑物工程 SIIA 标促淤潜堤工程 4060 段~4500 段潜堤横截面,该段横截面施工设计图如图 5 所示,该段竣工图如图 6 所示,对比施工设计图和竣工图,发现抛石潜堤在施工过程中以及施工后主要因水流波浪力和河床沉陷而受到一定的损坏,抛石潜堤的堤高由 2.7m 减小至 1.98m,说明水流波浪力和河床沉陷两个因素一起使得堤高减小了 0.72m,由于该段地基最终沉降量为 12cm,所以,水流波浪力使得潜堤堤高减小了 0.6m。

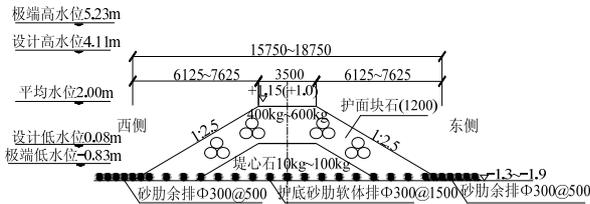


图 5 4+060~4+500 段潜堤横截面图

Fig.5 Cross section of dike of section 4+060 to 4+500

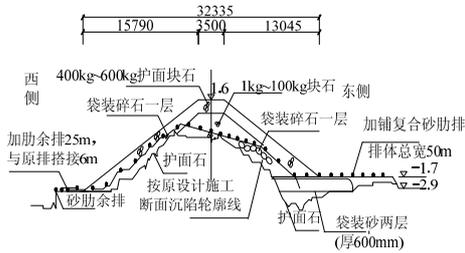


图 6 4+060~4+500 段竣工图

Fig.6 Built drawings of section 4+060 to 4+500

3 数值计算分析

3.1 截面设计尺寸及抛石材料参数

依据实际工程,拟定抛石潜堤的横截面尺寸如图 7 所示,潜堤堤顶宽 3.5m,堤底宽 17.0m,斜坡坡度 1:2.5,堤高 2.7m。其中,潜堤横截面外围铺设 400kg~600kg 护面块石,堤心铺设 10kg~100kg 堤心石,护面块石轮廓以及堤心石轮廓尺寸见图 7。

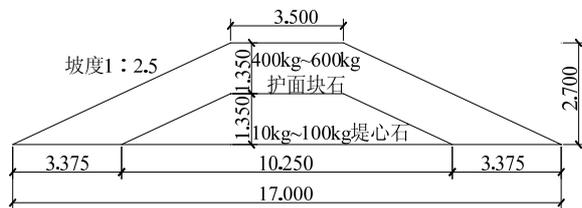


图 7 抛石潜堤截面设计尺寸图

Fig.7 The design size of riprap breakwater section

3.2 抛石潜堤 PFC2D 数值模型

建立抛石潜堤 PFC2D 数值模型如图 8 所示,

潜堤外围铺设 400kg~600kg 护面块石,堤心铺设 10kg~100kg 块石。



图 8 抛石潜堤 PFC2D 数值模型

Fig.8 The PFC2D numerical model of riprap breakwaters

为简化分析,这里忽略抛石潜堤所在河床处的土体沉降,假设河床为刚性,抛石潜堤内部微观参数拟定如表 2 所示。

表 2 抛石潜堤模型微观参数表

Table 2 The model parameter table of riprap breakwater

石块	法向刚/(N/m)	切向刚/(N/m)	密度/(kg/m ³)	孔隙率	摩擦系数
抛石护面	1×10 ⁹	1×10 ⁹	3000	0.2	20
堤心石	1×10 ⁹	1×10 ⁹	3000	0.2	15

3.3 波浪荷载选取

考虑到抛石潜堤所受的波浪荷载是随着时间和空间而不断地无规律的变化,这样研究抛石潜堤在波浪力作用下的破坏将会非常困难。由此,该文选取一组最不利波浪荷载,对抛石潜堤进行稳定性破坏分析。

查找工程资料,选取 25 年一遇的波浪要素如表 3 所示。

表 3 25 年一遇的波浪要素表

Table 3 Factor of the wave occurred once in 25 years

波高/m	水深/m	波长/m	周期/s
2.28	5.23	52.3	7.756

3.4 波浪荷载加载

针对上述波浪荷载要素,运用 Fluent 软件建立波浪水槽对斜坡潜堤受力进行分析^[11-12],此实例设计波浪要素的波浪周期为 7.756s,而根据本文所运用的造波消波理论进行造波时,需要等到 3 个~4 个周期后波浪水槽中的波浪方能稳定,需要选择波浪稳定的时候进行分析,所以我们将抛石潜堤迎浪面上点的波浪压强在 30s~37.8s 一个周期的数据提取出来,然后以周期循环加载的方式对 PFC2D 抛石潜堤离散元数值模型进行加载并进行稳定性分析,波浪水槽示意图如图 9 所示,软件计算 36s 时潜堤迎浪面压强分布如图 10 所示。

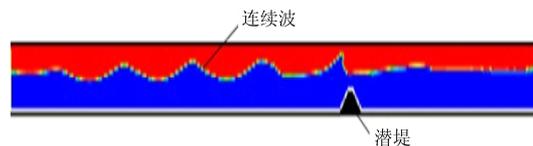


图 9 波浪水槽示意图

Fig.9 Schematic diagram of wave flume

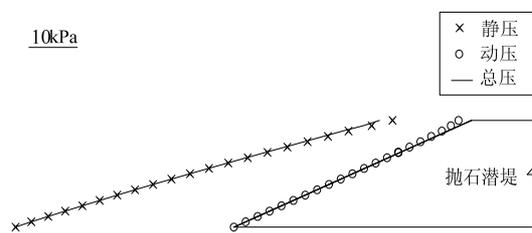


图 10 36s 时潜堤迎浪面压强分布图

Fig.10 The pressure distribution of the riprap breakwater when the time was 36s

3.5 计算结果对比及分析

由于数值模拟假定河床是刚性的，所以设定其边界条件为刚性墙，不考虑河床沉陷的影响，只考虑水流波浪力对抛石潜堤高度的影响，抛石潜堤在波浪荷载作用下的最终破坏图如图 11 所示，抛石潜堤的最终破坏平衡高度为 2.02m，由此得到抛石潜堤受波浪力作用而减小的高度为 0.68m，而实际工程因波浪力作用而减小的高度为 0.60m，数值模拟对实际工程的相对误差为 13.3%，由于数值模拟得出减小的高度值大于实际工程的高度值，所以数值模拟出的结果偏安全。据此分析，运用 PFC2D 离散元软件分析抛石潜堤的稳定性是可行的，可以对工程进行一定的指导和优化作用。

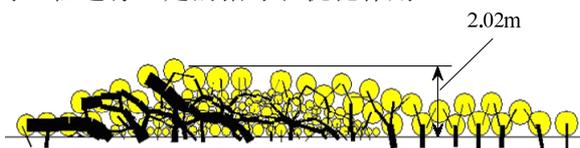


图 11 抛石潜堤最终破坏图

Fig.11 The eventually destroyed diagram of riprap breakwater

4 抛石重量与截面尺寸对抛石潜堤稳定的敏感分析

众所周知，抛石重量、堤顶宽度和斜坡坡度是影响抛石潜堤稳定性的三个重要参数，下面将以潜堤破坏高度为研究对象进行抛石潜堤稳定的敏感性分析。由于上述三个参数拥有不同的量纲，所以随着参数的变化，通过参数变化百分比来进行敏感分析比较合理。破坏高度随着堤顶宽度、斜坡坡度和抛石重量变化数据如表 4~表 6 所示。

表 4 潜堤破坏高度随堤顶宽度变化数据表

Table 4 The data sheet of breakwater failure height with the change of crest width

堤顶宽/m	增加百分比/(%)	破坏高度/m	变化量/m
2.0	—	0.387	—
2.5	25	0.361	-0.026
3.0	20	-0.085	-0.446
3.5	16.67	-0.053	0.032

表 5 潜堤破坏高度随斜坡坡度变化数据表

Table 5 The data sheet of breakwater failure height with the change of slope angle

斜坡坡度	增加百分比/(%)	破坏高度/m	变化量/m
1 : 1.5	—	0.371	—
1 : 2.0	21.13	0.361	-0.01
1 : 2.5	18.0	-0.03	-0.391
1 : 3.0	15.46	-0.001	0.029

表 6 潜堤破坏高度随抛石重量变化数据表

Table 6 The data sheet of breakwater failure height with the change of riprap weight

抛石重量/kg	增加百分比/(%)	破坏高度/m	变化量/m
350	—	0.681	—
450	28.57	0.361	-0.32
550	22.22	0.351	-0.01
650	18.18	-0.009	-0.36

研究表明，在波浪荷载作用下，抛石重量越大，堤顶宽度越大，断面坡度越缓，破坏高度越小，则抛石潜堤的整体稳定性越好。根据表 4~表 6 数据内容，变化量为正数时代表破坏高度增加，为负数时代表破坏高度减小。由表中数据可知，变化量基本上为负值，说明随着堤顶宽度的增加、斜坡坡度的减缓和抛石重量的提高，抛石潜堤的破坏高度不断地减小，抛石潜堤在波浪荷载作用下的稳定性越来越好。总体来说，当堤顶宽度从 2.0m 增加至 3.5m 时(堤顶宽度提高 75%)，破坏高度减小 0.44m；当斜坡坡度从 1 : 1.5 变缓至 1 : 3(角度减小 82.80%)，破坏高度减小 0.372m；当抛石重量从 350kg 增加至 650kg(抛石重量增加 85.7%)，破坏高度减小 0.69m。通过换算，当堤顶宽度、斜坡坡度和抛石重量均增加 100%时，潜堤破坏高度变化量分别为 0.587m、0.449m 和 0.805m。通过比较三者的破坏高度变化量，我们发现，抛石重量对抛石潜堤稳定性的影响比截面尺寸(堤顶宽度和斜坡坡度)要大，抛石潜堤稳定性对抛石重量较为敏感，其次是堤顶宽度和斜坡坡度。

5 工程优化分析

针对上述工程，保持潜堤斜坡坡度等其它截面尺寸和波浪要素不变，通过增加抛石重量和堤顶宽度，分别进行抛石重量优化分析和截面优化分析，从而使得该抛石潜堤在波浪荷载作用下不会受到大的破坏，这对于工程有一定的指导意义。

5.1 抛石块体重量优化分析

针对该工程的破坏情况，保持潜堤斜坡坡度等其它截面尺寸和波浪要素不变，对抛石重量进行优

化, 将抛石重量范围增加至 450kg~650kg, 建立模型如图 12 所示。

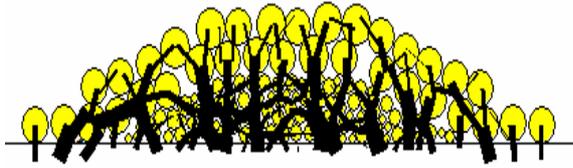


图 12 抛石重量优化分析模型

Fig.12 The riprap weight optimization analysis model

抛石重量优化分析最终破坏图如图 13 所示, 根据模拟结果, 抛石潜堤迎浪面特别是迎浪面堤顶部位受波浪荷载作用有所挤压变形, 堤顶迎浪面处第一层护面块石略有隆起, 堤顶高度基本无变化。但总体来说, 抛石潜堤在 25 年一遇的波浪荷载作用下基本上能够维持原设计截面尺寸不会发生破坏, 据此分析, 将抛石重量范围优化增加至 450kg~650kg 后, 潜堤可以抵抗 25 年一遇的波浪荷载力。



图 13 抛石重量优化分析最终破坏图

Fig.13 The eventually destroyed diagram of the riprap weight optimization analysis model

5.2 截面尺寸优化分析

针对该工程, 保持潜堤斜坡坡度等其它截面尺寸和波浪要素不变, 对截面尺寸进行优化, 将堤顶宽度从原来的 3.5m 增至 4.0m, 抛石重量仍为 400kg~600kg, 建立模型如图 14 所示。



图 14 堤顶宽度为 4.0m 时的潜堤优化分析模型

Fig.14 The optimization analysis model when the crest width was 4.0m

截面尺寸优化使得堤顶尺寸增加至 4.0m 后, 该潜堤在波浪荷载作用下的最终破坏图如图 15 所示, 据模拟结果分析, 抛石潜堤堤顶的第一层护面块石在波浪荷载作用下受到破坏, 抛石潜堤的最终破坏平衡高度为 2.02m。据此分析, 将堤顶宽度增加至 4.0m 后, 潜堤还是无法抵抗 25 年一遇的波浪荷载力。

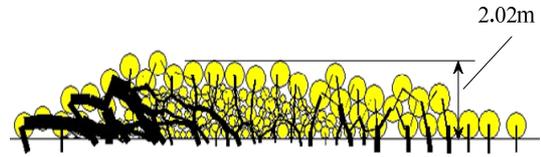


图 15 堤顶宽度为 4.0m 时的潜堤最终破坏图

Fig.15 The eventually destroyed diagram of the optimization analysis model when the crest width was 4.0m

继续优化增加潜堤堤顶宽度, 将其增至 4.5m, 保持潜堤斜坡坡度等其它截面尺寸和波浪要素不变, 抛石重量仍为 400kg~600kg, 建立模型如图 16 所示。

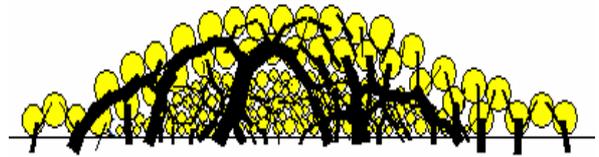


图 16 堤顶宽度为 4.5m 时的潜堤优化分析模型

Fig.16 The optimization analysis model when the crest width was 4.5m

截面尺寸优化使得堤顶尺寸增加至 4.5m 后, 该潜堤在波浪荷载作用下的最终破坏图如图 17 所示, 据模拟结果分析, 抛石潜堤迎浪面特别是迎浪面堤顶部位受波浪荷载作用稍微有所变形, 抛石潜堤背浪面堤底处有所变形和失稳, 但堤顶高度基本无变化。因为影响抛石潜堤消浪功能的主要因素是潜堤的堤高, 所以据此分析, 将堤顶宽度优化增加至 4.5m 后, 潜堤可以抵抗 25 年一遇的波浪荷载力。



图 17 堤顶宽度为 4.5m 时的潜堤最终破坏图

Fig.17 The eventually destroyed diagram of the optimization analysis model when the crest width was 4.5m

6 结论

该文采用二维颗粒流程序合理确定了抛石潜堤模型的细观参数, 模拟分析了某工程实例抛石潜堤的稳定破坏, 并对抛石潜堤进行了抛石重量优化分析和截面优化分析。得出如下结论:

(1) 二维颗粒流程序能够模拟工程实例中抛石潜堤的稳定破坏, 且模拟分析和工程实例所得的结果基本一致。

(2) 二维颗粒流程序能够很好的模拟抛石潜堤的动态平衡和动态失稳过程。

(3) 在波浪荷载作用下, 抛石重量是影响失稳的主要因素, 其次是堤顶宽度及斜坡坡度。抛石重量越大, 堤顶宽度越大, 断面坡度越缓, 则抛石潜堤的整体稳定性越好。

(4) 针对抛石潜堤在波浪作用下的破坏作用, 运用颗粒流离散元方法可以对抛石潜堤进行优化, 得到不同抛石块体以及不同断面形状和优化潜堤结构。

参考文献:

- [1] Rambabu A C, Mani J S. Numerical prediction of performance of submerged breakwaters [J]. *Ocean Engineering*, 2005, 32: 1235—1246.
- [2] Bardet J P, Proubet J. Shear-band analysis in idealized granular material. [J] *Journal of Engineering Mechanics*, 1992, 118(2): 397—415.
- [3] Huang H, Detournay E, Bellier B. Discrete element modeling of rock cutting. [J] *Rock Mechanics for Industry*, 1999, 1: 123—130.
- [4] 周健, 池毓蔚, 池永, 等. 砂土双轴试验的颗粒流模拟[J]. *岩土工程学报*, 2000, 22(6): 701—704.
Zhou Jian, Chi Yuwei, Chi Yong, et al. Simulation of biaxial test on sand by particle flow code [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(6): 701—704. (in Chinese)
- [5] Xu Y, Kafui K D, Thomson C, et al. Effects of material properties on granular flow in soil using DEM simulation [J]. *Particulate Science and Technology*, 2002, 20(2): 109—124.
- [6] 刘文白, 王大栋. 桩-桶基础抗压承载力试验的颗粒流数值模拟[J]. *中国水运*, 2009, 9(7): 238—240.
Liu Wenbai, Wang Dadong. Simulation of compressive bearing capacity test of pile- bucket foundation with particle flow code [J]. *China Water Transport*, 2009, 9(7): 238—240. (in Chinese)
- [7] 贾敏才, 王磊, 周健. 基坑开挖变形的颗粒流数值模拟[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(5): 612—617.
Jia Mincai, Wang Lei, Zhou Jian. Simulation of soil deformation due to pit excavation with particle flow code [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2009, 37(5): 612—617. (in Chinese)
- [8] 刘汉龙, 杨贵. 土石坝振动台模型试验颗粒流数值模拟分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2009, 29(5): 479—484.
Liu Hanlong, Yang Gui. PFC^{2D} numerical analysis of model testing of earth and rock-fill damon shaking table [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2009, 29(5): 479—484. (in Chinese)
- [9] 刘汉民, 高德清, 陈育民, 李国英. 筑坝反滤料动模量和阻尼比试验的颗粒流模拟[J]. *防灾减灾工程学报*, 2009, 29(4): 361—367.
Liu Hanlong, Gao Deqing, Chen Yumin, Li Guoying. Simulation of dynamic modulus and damping ratio test on filter material by particle flow code [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2009, 29(4): 361—367. (in Chinese)
- [10] 龚晓南. 高等土力学[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 1998: 257—258.
Gong Xiaonan. *Advanced soil mechanics* [M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 1998: 257—258. (in Chinese)
- [11] 李凌, 林兆伟, 尤云祥, 缪国平. 基于动量源方法的黏性流数值波浪水槽[J]. *水动力学研究与进展*, 2007, 22(1): 76—82.
Li Ling, Lin Zhaowei, You Yunxiang, Miao Guoping. The numerical wave flume of the viscous fluid based on the momentum source method [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2007, 22(1): 76—82. (in Chinese)
- [12] 周勤俊, 王本龙, 兰雅梅, 刘桦. 海堤越浪的数值模拟[J]. *力学季刊*, 2005, 26(4): 629—633.
Zhou Qinjun, Wang Benlong, Lan Yamei. Numerical simulation of wave overtopping over seawalls [J]. *Quarterly of Mechanics*, 2005, 26(4): 629—633. (in Chinese)