

文章编号: 1000-7598 (2009) 07-1993-07

水下岩质边坡稳定性的模型试验研究

姜海西¹, 沈明荣^{1,2}, 程 石³, 肖汝诚¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 3. 沈阳建筑大学, 沈阳 110168)

摘 要: 随着三峡水利建设工程的进行, 许多原本位于水面以上且已趋于稳定的人工或自然岩质边坡将被淹没, 导致边坡稳定性降低, 而水的压力、冲击、渗流和侵蚀等综合作用, 给下岩质边坡的稳定性带来大量的不确定性。基于已有的水下土质边坡稳定性试验和下水岩质边坡有限元分析, 进行下水岩质边坡模型试验研究, 探讨在水位升降过程中和波浪作用下下水岩质边坡的稳定性和破坏机制。将结构面为 30° 和 50° 的两种岩质边坡模型布置在人工水槽中, 采用波流系统进行水位升降波浪冲击试验, 量测岩质边坡的应力变化。通过分析边坡各测点应力变化, 得出了一些有意义的结论: (1) 把边坡前部岩体划分成 3 个区域, 每个区域内应力变化规律相同; (2) 下水岩质边坡坡脚处应力集中最大, 破坏始于坡脚, 并由此产生的塑性区沿结构面逐渐同坡顶发展, 这与一般边坡从坡顶逐渐向下发展的开裂破坏形式完全不同; (3) 波浪对下水岩质边坡结构面的影响, 将随其倾角的变小而减弱。

关 键 词: 下水岩质边坡; 水槽; 波浪冲击; 模型试验; 稳定性分析

中图分类号: TU 458^{+.4}

文献标识码: A

Model test on stability of underwater rock slopes

JIANG Hai-xi¹, SHEN Ming-rong^{1,2}, CHEN Shi³, XIAO Ru-cheng¹

(1. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: With the construction of the Three Gorges Project, many natural and artificial rock slopes will be drown, then the stability of these slopes will reduce. The comprehensive factors of the water pressure, water leakage, water impaction and water corrosion will endanger the stability of underwater rock slope. Based on the model tests of the stability of soil slope and the analysis of the rock slope by the finite element method, the model tests of stability and damage mechanism of underwater rock slope are carried out, including the ascending and descending water level test and the wave impaction test. Some significant conclusions can be drawn from the model tests by measuring and analyzing the stress distributions with different structural angles (30° and 50°) slopes in the artificial wave tank. The rock slope can be divided into three regions in which the stress variation rule is the same. The results show that the stress concentration occurs to the slope toe, where failure begins, plastic zone develops upwards along the discontinuity, which is different from the downward failure mode happened to general slopes; it's also concluded that the effect of the wave on the slope discontinuity decreases with the slope angle.

Key words: underwater rock slope; water tank; wave impaction; model test; stability analysis

1 前 言

三峡大坝工程库区两岸有数百处大大小小的崩、滑体和危岩体, 现阶段或处于稳定状态, 或稳定性较差, 有的局部已经有明显的变形迹象, 严重影响了当地居民的生活和稳定, 成为三峡库区主要的地质灾害^[1-2]。

随着三峡工程的进行, 三峡库区水位逐渐升高,

建成后坝前正常蓄水位为 175 m。库岸的地下水位显著抬高, 岩石的含水率由不饱和变为饱和, 其内部应力及物理、化学性能发生显著变化, 其凝聚力及抗剪力大幅度下降, 强度急剧降低。同时, 三峡等蓄水后库区波浪浪高预计达到 1 m, 波浪的频率低, 持续时间较长, 在波浪的循环荷载作用下岩石的强度和模量会下降, 产生瞬态孔隙水压力和残余孔隙水压力, 因此波浪长期反复效应不容忽视。波

收稿日期: 2008-08-29

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (No. 50639090); 上海市重点学科建设项目资助 (No. B308)。

第一作者简介: 姜海西, 男, 1981 年生, 博士研究生, 主要从事桥梁结构理论与岩质边坡方向研究。E-mail: haixijiang@yahoo.com.cn

浪对坡岸的周期性作用会导致库岸失稳、坍塌,严重影响了边坡的稳定性,严重危及水库的正常运行和库区人民的生命财产安全。

波浪引起的海床孔隙水压力和应力可以引起海底失稳和海床液化,导致土体滑移和海洋结构的失稳,如 1969 年美国由于土体滑移,造成 3 个钢平台破坏,其中 B 平台翻倒并沿斜坡向下滑出 3 m,损失达一亿多美元^[3]。

采用沉管法修建越江隧道时,沉管隧道水下基槽边坡合理坡率的确定,将直接影响到工程的工期和造价。基槽边坡的稳定性与合理坡率的确定是设计中必须慎重解决的一个问题。

由此可见,对水下岩质边坡稳定性问题地研究,有着重要的指导意义和经济意义。而目前波浪对水下边坡作用领域的研究主要集中在海底边坡和水土质边坡^[3-6],对水下岩质边坡的稳定性研究刚刚起步。

本次在 Ansys 数值模拟计算的理论指导基础上^[7-9],将 30° 和 50° 结构面倾角的顺层岩质边坡布置于装有造波机的人工水槽中,进行水位升降试验和采用不同波形的波浪,对岩质边坡进行冲击试验。通过分析边坡模型在两种荷载环境条件下的应力应变特性,研究水下岩质边坡的破坏机制和稳定性,探索水对水下边坡的影响程度,评价水下边坡稳定的计算方法。

2 水下边坡模型试验

2.1 试验设备

模型试验在同济大学水槽造波机系统中进行。波流水槽尺寸(长×宽×高)为 42.00 m×0.80 m×1.25 m,波流水槽的最大流速大于等于 0.7 m/s,最大流量为 0.3 m³/s,波浪力作用的形式为双向放水的规则波和不规则波,波浪作用的参数选择:水槽波的周期为 0.5~5.0 s,波高 3~21 cm。

2.2 试验内容

模型试验选取几何相似常数 $C_L = 10$,整体尺寸(高×宽)为 0.8 m×0.8 m。为了更好地模拟实际的岩质边坡和结构面的模拟,并与 ANSYS 计算模式相对应,将模型整体离散单元化,划分成小的长方形单元试块,最终利用角度构造板将这些单元试块搭砌成 30° 和 50° 两种结构面倾角的整体模型,单元试块的尺寸为 10 cm×10 cm×4 cm 和 15 cm×10 cm×4 cm 两种。模型的材料为水泥砂浆,结构面采用细砂来模拟,坡后用混凝土挡块限制边坡整体位移,边坡模型如图 1 所示。试验中将布置了 16 个测点

共 28 个土压力盒,布置于在边坡前几个结构面以及坡脚,测点布置见图 2。两种模型中最下面一层布置了 4 个测点,每个测点有一个土压力盒(编号为 23、24、27 和 28)。上面几层每个测点处有 2 个土压力盒(图中的 11(13),11 代表土压力盒编号 11 和 12,13 代表土压力盒编号 13 和 14,其他以此类推)。在 30° 的模型试验中,将边坡分坡脚、迎水面上、下部、第 3 层上、下部、第 5 层下部和第 5 层上部共 7 个部位。在 50° 的模型试验中重新分布压力盒布置点,只在第 5 层结构面布置 1 排压力盒,而在迎水面中部再布置 1 排压力盒,这样将边坡分成迎水面上、中、下部、第 3 层下部、第 3 层上部和第 5 层几个部位。边坡模型搭砌完成后,在波流水槽中分别进行升降水试验和波浪冲击试验。

波浪冲击试验为规则波浪冲击试验,选取最简单的正弦波浪,并取周期 T 和波高 H 作为试验参数,由于三峡库区多年实际观测的波高都未超过 1 m,根据模型几何相似常数 $C_L = 10$,得出模型试验中的波高值应该不超过 10 cm。为研究边坡在汛期洪峰来临时波浪波高比正常情况下的稳定性,进行了几组波高大于 10 cm 的波浪冲击试验。不同周期和波高的组合见表 1。整体模型试验过程如图 3 所示。

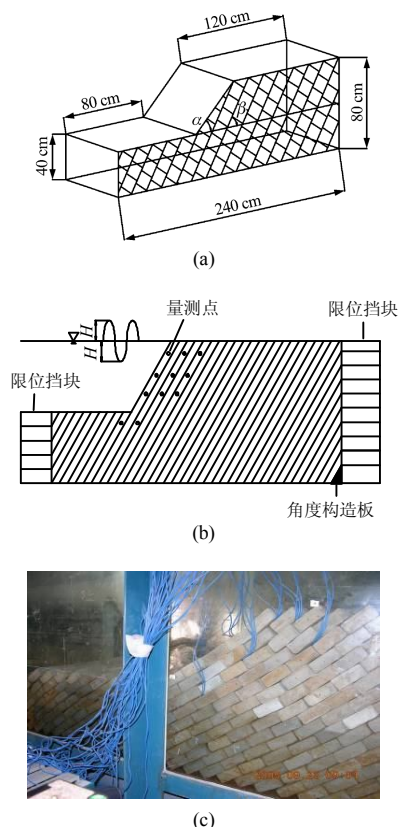


图 1 水下边坡模型示意图
Fig.1 Model of underwater rock slope

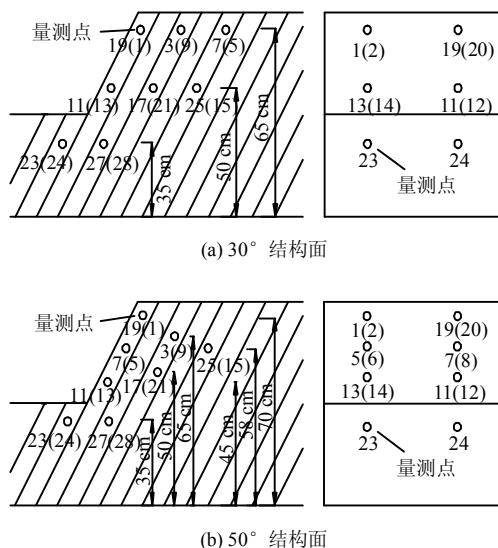


图2 结构面倾角模型试验测点布置图
Fig.2 Assignment of stress box

表1 周期-波高组合表
Table 1 Height and cycle of wave

波高 H / cm	周期 T / s									
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	
3	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
6	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
9	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
12	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
15	×	×	×	×	×	×	√	√	√	√
18	×	×	×	×	×	×	√	√	√	√
21	×	×	×	×	×	×	×	√	√	√

注：√代表两者组合，×代表无此组合。



图3 水下边坡模型试验过程
Fig.3 Process of model test of underwater rock slope

2.3 结构面模拟

岩体中的结构面是岩体中的软弱面，使得岩体具有不连续性，增加了岩体中应力分布及受力变形的复杂性，降低了岩体的力学强度和物理性能。通常，由于软弱夹层很薄，远小于岩体的几何尺寸，无法采用与岩体相同的几何相似比。夹层属弹塑性材料，虽然取变形模量合适，但其值很低，很难找出能同时满足二者要求的模拟材料。本次试验采用细砂填充试块模拟结构面，见图4。



图4 结构面模拟
Fig.4 Simulation of discontinuities

3 试验结果分析

3.1 升水试验

升水试验是通过在波流水槽中不断加水，量测在升水过程中边坡模型各部位应力变化，研究三峡库区水位提升过程中或汛期洪峰到达时库岸的水压力变化特性。

图5为各测点在结构面为30°和50°时升水状态下的应力与时间曲线。图6为构面为30°和50°时升降水坡内条状区域图。比较分析后认为，在相同升水条件下，两种不同结构面倾角情况时边坡内的水压力变化具有以下特征：

①在升水状态下结构面为30°和50°的模型，区域1坡脚处和迎水面下部的应力变化相似，各测点应力在匀速升水过程中呈线性增长，升水停止后应力不再变化，主要是水头所造成的压力。

②区域2的迎水面上部和第3层下部应力变化相似，结构面为30°时应力在水位停止后，继续增长，出现应力滞后现象，而在结构面为50°情况下应力在水位到达其高度时骤升，随后应力又快速下降一定幅度，最终保持稳定，这是由于毛细在较缓的倾角中起一定的作用，造成水压有所增加。而在较陡的结构面倾角情况下，水位的突然上升后产生了超孔隙水压，随着时间的推移，水逐渐向更远的岩体渗透，使得超孔隙水压减弱。

③区域3中第3层上部和第5层应力变化相似，结构面为30°时，孔隙水压力作用明显，各测点当水位较低且未淹没这些区域时，孔隙水压力随水位抬升而增长，水位到达这些区域时，应力线性增加。待水位停止升高后，孔隙水压力逐渐消散，最终趋于稳定，孔隙水压力对这个区域的稳定性影响不容忽视。而在结构面为50°情况下作用孔隙水压力影响微弱，其作用主要表现为沿结构面向上的发展，因此认为结构面倾角较大时孔隙水压力不易向上发展，水平向孔隙水压力的作用将有很程度的减弱。

④对于边坡整体而言，升水试验中的孔隙水压力，对结构面的边坡30°比50°时作用影响要明

显, 即当结构面倾角变陡时, 边坡前部各部位与大量水介质的距离变短, 孔隙水压力的影响作用减弱。因此, 结构面倾角越小, 升水条件下水压力的影响范围越大。

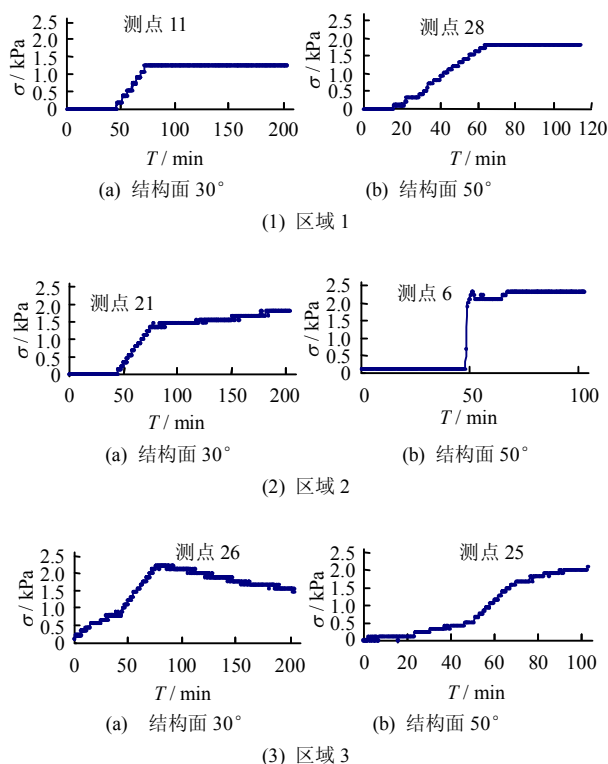


图 5 升水状态下不同区域应力-时间曲线

Fig.5 Relationship between stress and time in up water level test in different sections

从升水试验中各部位应力随时间变化曲线可见, 升水过程中结构面倾角为 30° 和 50° 时, 坡内应力变化相同区域呈条状分布, 结构面倾角 50° 比 30° 各区域相对比较狭窄, 见图 6。

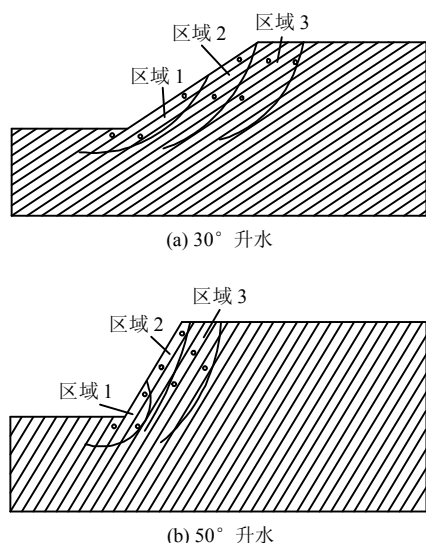


图 6 升水状态下坡内应力变化条状区域划分

Fig.6 Division of stress in up water level test

3.2 降水试验

降水试验是通过在波流水槽中不断抽水, 量测降水过程中边坡模型各部位应力变化, 研究三峡库区水位下降过程中或汛期结束后库岸水压力变化特性。由结构面为 30° 和 50° 模型降水试验结果可以看出, 降水条件下也可把两种结构面倾角的岩质边坡前部也划分为 3 个区域, 应力变化相同区域呈条状分布, 且区域划分和升水试验是相同的 (图 6)。

图 7 为降水状态下不同区域应力-时间曲线。区域 1 内各测点在匀速降水过程中应力成线性降低, 降水停止后应力不再变化, 都是由于水位下降而产生的压力变化, 由于接近边坡的临空面, 与孔隙水压无关。区域 2 内结构面为 30° 时, 应力在水位停止下降后反而缓慢增长, 表明存在孔隙水压力, 50° 情况下应力在降水结束后不变, 表明孔隙水压力作用影响不大。区域 3 在两种结构面情况下各部位变化趋势相同, 随着水位降低, 各测点应力不断减小, 水位不变后水沿着结构面向四周渗透而孔隙水压也将逐渐降低。对边坡整体而言, 当结构面倾角变陡, 边坡前部各部空隙水压力影响作用明显减弱。

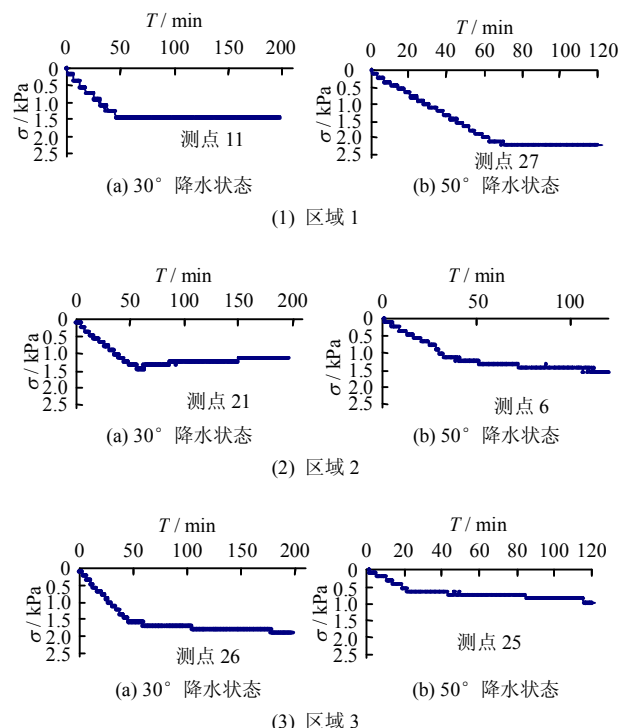


图 7 降水状态下不同区域应力-时间曲线

Fig.7 Relationship between stress and time in down water level test in different sections

3.3 规则波浪冲击试验

应用 Fourier 分析方法将许多个正弦波组合成

各种形状来研究实际情况,即研究水下边坡在波浪冲击作用下的破坏机制和稳定性,可以选择最接近实际波形且形式简单的正弦或余弦波的作用,获得边坡各部位在波浪冲击下的动力反应。由于试验中波浪运动速度和波动幅度都是较小的,可以当作微幅波来讨论。

3.3.1 结构面倾角为 30° 模型规则波浪冲击试验

模型结构面倾角为 30° 时,当 $T=3.5$ s,在不同波高情况下分析边坡不同部位的应力变化,应力-波高曲线如图 8(a)所示。当 $T=4.5$ s,其变化规律同 $T=3.5$ s,如图 8(b)所示。由图可见,①边坡各部位应力随着波高增大而增加,这与微幅波理论中波高越大,波浪压强绝对值和波浪能量越大^[10]相吻合;②随着波高增加,边坡各部位应力反应也有差别,也可以考虑将按照离边坡临空面的距离将水下边坡划分成 3 个区域,见图 9。

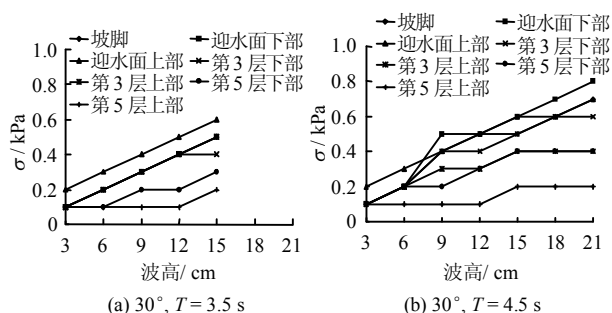


图 8 30° 时不同周期的应力-波高曲线

Fig.8 Relationship between stress and wave height of different wave periods of 30° model

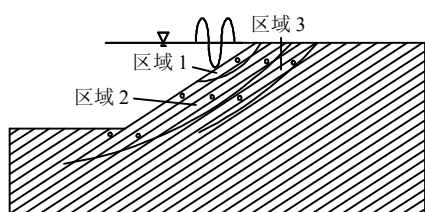


图 9 结构面为 30° 边坡在规则波浪冲击下应力变化区域划分示意图

Fig.9 Division of stress of 30° model in regular wave test

区域 1 为临空面上部区域,区域内应力变化趋势最明显,应力随波高增加而明显增大。区域 2 为边坡临空面区域下部、前几个结构面和坡脚位置,各测点应力变化趋势相同,应力随波高增加而增大,增大幅度比区域 1 内要小。区域 3 距离临空面最远,各测点应力变化不明显,只有在波高很大的情况下才有所增加。由以上区域划分可以看出,距离波浪冲击面越近,应力变化越明显,同时也表明,波浪能量在向边坡内部传递的过程中不断损失;

③从应力数值上分析,波高较大时区域 2 内应力值很大,甚至超过临空面上部,试验中发现,波高较大时,坡脚处有部分试块发生较大位移和个别试块脱落现象,这些部位在波浪动力循环作用下容易发生破坏,可以认为边坡在波浪作用下可能破坏面是从坡脚开始,沿着各结构层的下部向上发展。

模型结构面倾角为 30° 时,同一波高下不同周期情况下边坡各部位应力变化可以从应力图分析得出,应力-周期曲线如图 10 所示。由图可见,①在同一波高波浪下,当周期在较小值范围 ($T \leq 3.5$ s) 内增大时,边坡各部位应力总体上也增大,说明周期较小时,波浪能量传播距离较短,损失较大;当周期增大时,波浪能量传播比较完全;当周期较大 ($T \geq 4$ s) 时,边坡应力变化有增加,也有减小,笔者认为当周期增大后,波浪冲击边坡后有反射波,反射波与下一个波形叠加,导致规则波波形失真,且失真后的波形是随机的,所以应力也是随机的。②同一波高波浪作用下,按照同一周期不同波高情况下划分的 3 个区域来看,各区域内应力变化趋势也是相同的,区域 1 内边坡临空面上部随着周期增大,应力增加比较明显;区域 2 内各部位在波浪波高较大时,随着周期的增加,应力变化比较明显;区域 3 内各部位应力反应不明显。

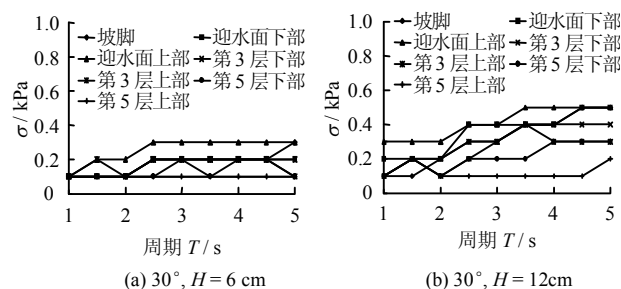


图 10 30° 时不同高度的应力-周期曲线

Fig.10 Relationship between stress and wave height of different wave heights of 30° model

3.3.2 结构面倾角为 50° 模型规则波浪冲击试验

模型结构面倾角为 50° 时,同一周期不同波高情况下,边坡不同部位的应力变化可以从应力图分析得出,应力-波高变化曲线如图 11 所示。由图可见,①随着波高的增加,边坡各部位应力也增加,这与波高越大,波浪的压强绝对值和波浪能量越大相吻合。②随着波高增加,同样可以将按照离边坡的临空面的距离将水下边坡划分成 3 个区域,见图 12,区域 1 为临空面上部和中部,区域内各部位应力反应最为明显,增幅最大;区域 2 内为边坡临空

面下部、前几个结构面和坡脚位置,各部位应力反应都随着波高增加反应比较明显,但增幅比区域 1 内要小;区域 3 内各部位应力反应不明显,只有在波高很大的情况下才有所增加。从区域 1~3 可见,距离波浪冲击坡面位置越远,波浪能量损失越大,应力反应越不明显。③在结构面倾角 50° 的模型试验中,波高较小时波峰波谷均在边坡临空面上部区域内,边坡临空面上部区域水压力最大,为波浪最大冲击区域。当波高较大时,波谷位置到达临空面中部,在波浪爬升到临空面上部的过程中,要克服各种阻力,能量有所损失,此时边坡临空面中部区域的波浪冲击水压力最大,为最大冲击作用区域,其次为上部区域,下部区域波浪冲击水压力最小。④区域 2 内各部位应力增加与波高增加呈线性关系,随着波高的增大,这些部位在波浪动力循环作用下容易发生共同破坏。在试验中还发现,波高达到最大值时,坡脚处有部分试块发生较大位移和个别试块脱落现象。

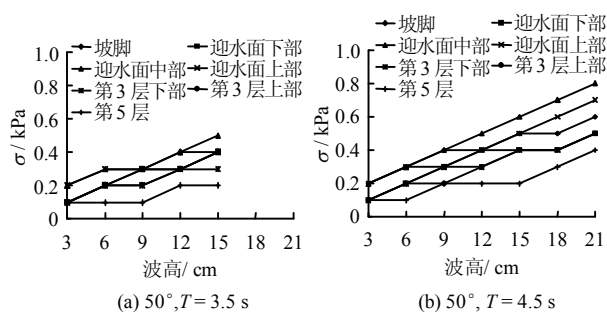


图 11 50° 时不同周期的应力-波高曲线

Fig.11 Relationship between stress and wave height of different wave periods of 50° model

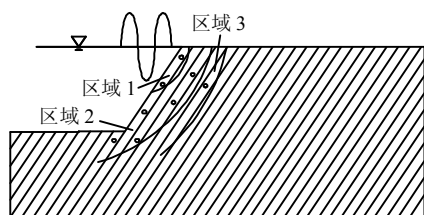


图 12 结构面为 50° 边坡在规则波浪冲击下应力变化区域划分示意图

Fig.12 Division of stress of 50° model in regular wave test

模型结构面倾角为 50° 时,同一波高下不同周期情况下边坡各部位应力-周期曲线见图 13。由图可见,①在结构面为 50° 模型试验中,在同一波高波浪下,随着周期的变化规律和结构面为 30° 模型试验相同。②同一波高波浪作用下,按照同一周期不同波高情况下划分的 3 个区域来看,各个区域内随着周期增加应力变化趋势也是相同。区域 1 内各

部位随周期增大,应力增加比较明显;区域 2 内各部位在波浪波高较大时,随着周期的增加,应力变化比较明显;区域 3 内各部位应力变化不明显。

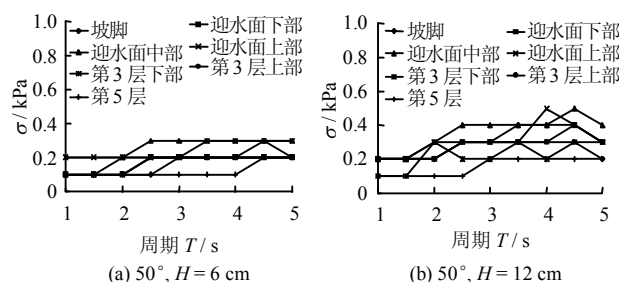


图 13 50° 时不同高度的应力-周期曲线

Fig.13 Relationship between stress and wave height of different wave heights of 50° model

4 结 论

通过进行水下岩质边坡在升水和降水过程中和规则波浪作用下应力变化模型试验,得出如下结论:

(1) 根据升降水试验和波浪冲击试验,把边坡前部划分成 3 个区域,每个区域内应力变化规律相同,但两种试验情况下区域划分有区别。数值模拟计算可以根据这一规律,并结合模型几何相似常数选取、波浪组合的选取,进一步完善模型计算工作,选取合理稳定的模型尺寸、单元大小和波浪荷载形式,提高计算精度和效率。

(2) 在升水和降水情况下,结构面倾角变陡时孔隙水压力对边坡的影响作用明显减弱。

(3) 在波浪动力循环作用下,水下边坡坡脚存在应力集中现象,波高较大时坡脚处发现有部分试块发生较大位移和个别试块脱落现象,边坡破坏最容易在坡脚处发生,并由此产生的塑性区沿结构面逐渐坡顶发展,这与一般边坡从坡顶逐渐向下发展的开裂破坏形式完全不同。

(4) 结构面为 50° 时水下岩质边坡内部应力值比结构面为 30° 时大,是由于结构面变陡后,边坡前部各区域离波浪作用位置距离变短,波浪能量损失较小,即边坡结构面倾角越小,波浪荷载循环作用对水下岩质边坡的影响越弱。

(5) 规则波浪的周期与波高两个参数中,波高是影响波浪能量大小的主要因素。在同一周期波浪作用下,随着波高增加,波浪能量越大,两种结构面角度的边坡各区域应力峰值越大。随着周期由小变大,两种结构面角度的边坡各区域应力成增加趋势,但变化趋势并不大,是由于高频波浪作用下能量损失较快,波浪作用并不完全,同时周期大小和波浪能量传播完全程度相关,在同一波高波浪作用

下, 周期越大, 波浪能量在坡内传播越完全, 这与线性微幅波理论相符, 也验证了模型和波浪模拟的合理性;

(6) 根据规则波浪冲击试验结果, 各区域应力规则周期变化, 并与波浪波形对应, 波峰、波谷处出现应力正负峰值;

(7) 对比升降水试验和波浪冲击试验可知, 结构面倾角越小, 边坡在升降水时水作用反应越强烈, 稳定性相对较低。波浪冲击试验中边坡水动力反应越低, 其稳定性相对较高。同时, 前者应力变化幅度要远大于后者, 表明边坡在升降水过程中的水作用反应比较强烈, 但是, 波浪的无限次循环作用可能会造成岩质边坡结构面的疲劳破坏, 这种破坏是一个长期缓慢的过程, 容易被忽视, 需引起重视。

参考文献

- [1] 王尚庆. 长江三峡滑坡监测预报[M]. 北京: 地质出版社, 1999: 1—11.
- [2] 刘文平, 时卫民, 孔位学, 等. 水对三峡库区碎石土的弱化作用[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1857—1861.
LIU Wen-ping, SHI Wei-min, KONG Wei-xue, et al. Weakening effect of water on gravel-soil in Three Gorges Reservoir area[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(11): 1857—1861.
- [3] 顾小芸. 海底边坡稳定性分析方法综述[J]. 力学进展, 1989, 19(1): 50—59.
GU Xiao-yun. State of the art: analytical methods of submarine slope stability[J]. **Advances in Mechanics**, 1989, 19(1): 50—59.
- [4] DIMAKIS P, ELVERHØI A, HØEG K, et al. Submarine slope stability on high-latitude glaciated Svalbard—Barents Sea margin[J]. **Marine Geology**, 2000, 162: 303—316.
- [5] ZOU Zhi-li, WANG Shu-ping. Study of model experimental and numerical simulation for long-shore currents[J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2001, 41(6): 731—738.
- [6] 包太, 刘新荣, 税月. 波浪作用下边坡动力反应相似模拟研究[J]. 港工技术, 2004, (4): 1—3.
BAO Tai, LIU Xin-rong, SHUI Yue. Under water-induced the simulation test research on slope dynamic response[J]. **Port Engineering Technology**, 2004, (4): 1—3.
- [7] 沈明荣, 邓海荣. 水下岩质边坡在波浪作用下的稳定性分析[J]. 工程地质学报, 2006, 14(5): 609—615.
SHEN Ming-rong, DENG Hai-rong. Finite element analysis of submerged rock slope stability under wave action[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2006, 14(5): 609—615.
- [8] 熊将, 王涛, 盛谦. 库区边坡稳定性计算的改进Sarma法[J]. 岩土力学, 2006, 27(2): 323—326.
XIONG Jiang, WANG Tao, SHENG Qian. Improved Sarma method for computing slope stability in reservoir region[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(2): 323—326.
- [9] 谭晓慧, 王建国, 王印. 边坡稳定的非线性有限元分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2047—2050.
TAN Xiao-hui, WANG Jian-guo, WANG Yin. Nonlinear finite element analysis of slope stability[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(8): 2047—2050.
- [10] 邱大洪. 波浪理论及其在工程上的应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985: 1—100.
- [11] CAO Wen-gui, ZHAO Ming-hua, TANG Xue-jun. Study on simulation of statistical damage in the full process of rock failure[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(2): 184—187.
- [12] 曹文贵, 赵明华, 刘学成. 基于 Weibull 分布的岩石损伤软化模型及其修正方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3226—3231.
CAO Wen-gui, ZHAO Ming-hua, LIU Cheng-xue. Study on the model and its modifying method for rock softening and damage based on weibull random distribution[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(19): 3226—3231.
- [13] 杨圣奇, 徐卫亚, 韦立德, 等. 单轴压缩下岩石损伤统计本构模型与试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(2): 200—203.
YANG SHeng-qi, XU Wei-ya, WEI Li-de, et al. Statistical constitutive model for rock damage under uniaxial compression and its experimental study[J]. **Journal of Hohai University(Natural Sciences)**, 2004, 32(2): 200—203.
- [14] 李树春, 许江, 李克钢, 等. 基于 Weibull 分布的岩石损伤本构模型研究[J]. 湖南科技大学学报, 2007, 22(4): 225—229.
LI Shu-chun, XU Jiang, LI Ke-gang, et al. Study on the model for rock softening and damage based on weibull random distribution[J]. **Chinese Journal of Hunan University of Science and Technology**, 2007, 22(4): 225—229.

上接第 1992 页