

· 综 合 ·

护坡垫层渗透系数对面层波浪上举力的影响

任 意¹, 琚烈红², 冯卫兵¹

(1. 河海大学, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024)



摘要: 在工程应用中, 对于波浪作用下的护岸工程, 护坡通常采用面层-垫层-堤心土的设计模式, 其垫层一般采用反滤层结构。但在实际工程中垫层结构往往被简化, 直接将土工布铺设在砂层上。通过理论分析和模型试验, 主要针对这种垫层结构在波浪作用下所受的影响进行了研究, 得出了结论: 当面层渗透系数小于垫层渗透系数时, 在垫层内部会产生对面层的上举力, 从而可能引起面层失稳。该成果对类似工程有一定的借鉴作用。

关键词: 波浪; 面层; 垫层; 渗透系数; 上举力

中图分类号: TV 139.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)03-0014-05

Impact of revetment filer layer's permeability coefficient on wave uplift force acting on top layer

REN Yi¹, JU Lie-hong², FENG Wei-bing¹

(1. Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: In engineering applications, for the revetment engineering under the wave action, the surface layer-filer layer-subsoil design patterns are usually used for the slope protection with a filter layer structure as the cushion; but in the practical project, the cushion structure is often simplified, with the geotextiles directly laid on the sand. Based on the theoretical analysis and model test, we study the impact of the cushion structure under the wave action, and comes to the conclusion that when the top layer's permeability coefficient is less than that of the filer layer, the uplift force acting on the top layer will be generated inside the filer layer, which may lead to the instability of top layer. The results may serve as reference for the similar engineering.

Keywords: wave; top layer; filer layer; permeability coefficient; uplift force

河口、内湖、水库以及一些航道、内河的护岸工程, 通常受到波浪、水流动力作用, 为阻止这种动力作用破坏岸坡, 护坡常采用面层-垫层-堤心土这种结构模式。这种结构的外部面层通常为块石、块体或不透水混凝土板, 承受波浪、水流的直接作用, 其自重也起到对下层的压载作用; 垫层位于面层下方, 通常采用反滤层结构, 及由外向内逐渐减小块石体积, 一方面进一步削减透过面层的波浪、水流等对堤心土层的作用, 另一方面通过反滤防止堤心土的淘刷, 同时为面层提供支撑; 在垫层下方为堤心土, 并且一般在与垫

层间还铺设土工布。由于土工布孔径很小, 同时具有较好的渗透性, 应用非常广泛。大多数土工布设置在垫层底部和堤心土之间, 但在实际工程中往往简化了垫层结构, 直接将土工布设置在面层底部和砂层之间^[1-2]。这种简化的垫层结构形式在波浪作用下, 垫层渗透系数对面层上举力存在影响, 但相关研究较少, 本文将通过模型试验和理论分析, 对此进行研究。

垫层渗透系数对面层波浪上举力影响, 大多是在面层渗透系数较小、而垫层渗透系数较大的情况下比较明显, 文献[3-7]均有研究成果。相关研究中

收稿日期: 2015-08-18

作者简介: 任意 (1990—), 男, 硕士研究生, 从事港口、海岸及近海工程研究。

提出了一个重要的参数来反映这种影响,即与面层、垫层的渗透性系数和厚度有关的渗透长度 Λ :

$$\Lambda = \sqrt{\frac{k_F d_F d_T}{k_T}} \quad (1)$$

式中: k_T 、 k_F 分别为面层、垫层渗透系数; d_T 、 d_F 分别为面层、垫层厚度。

研究表明,当 $\Lambda \gg L$ (L 为面层外部水压力的特征长度) 时,面层外部和垫层内的水压力差别明显,垫层内的水压力几乎不受面层外部水压力变化的影响,而与渗透长度 Λ 相关;当 $\Lambda \ll L$ 时,面层外部和垫层内的水压力较小,垫层内的水压力随面层水压力而变化,垫层内的水压力大小受 L 的影响。

关于波谷最低时刻波浪作用下垫层内部的压强计算, Burger、Bezuijen 和 Breteler K, 以及 Bezuijen A 和 Breteler M K 等先后进行研究,由 Wolsink 推导, Burger 和 Van der Meer 公开的一个公式(2)表明,垫层内部的负压强比面层顶部的负压强绝对值小,因此面层顶部和底部存在压强差,其实质为垫层孔隙水会对面层产生上举力。

$$\phi_w = \left\{ \frac{1}{2} \Lambda \cos \alpha \tan \theta \left[1 - \exp \left(-\frac{\phi_b}{\Lambda \cos \alpha \tan \theta} \right) \right] + \frac{1}{2} \Lambda \sin \alpha \right\} \left[1 - \exp \left(\frac{-2z_1}{\Lambda \sin \alpha} \right) \right] \quad (2)$$

式中: ϕ_w 为压强差; Λ 为特征长度; α 为护坡坡角; θ 为水压力作用方向与水平面夹角; ϕ_b 为波峰面高度; z_1 为垫层内孔隙水高度。

1 垫层内部波浪压强计算

波浪作用下,护坡面层和垫层的压强随着波峰和波谷的交替,也会形成正、负的变化。护坡面层破坏失稳大多是受波谷最低时刻的负压作用。下面先通过理论分析来研究波谷最低时刻护坡面层及垫层的波浪压强。为分析方便,作如下简化:

- 1) 相对于土层来说,垫层结构的内部具有不可渗透的特性。
- 2) 土层内的流体可以看成在沿斜坡方向上做一维线性的流动。
- 3) 面层的渗透性主要集中在块体的交界处,假设为均匀的渗透。
- 4) 假定面层的块体不会移动。
- 5) 土层中的孔隙水水头在

一个波周期内保持不变。6) 外部时变波浪荷载可以简化为静压,由参数 ϕ_b 描述。

为分析方便,假设波浪作用下波谷最低时刻面层顶部压强分布为 $p_T(x, t)$, 见式(3), 此时负压强达到最大(最大压强记为 P_{\max}), 并符合这种形式(图1)。

$$P_T(x, t) = \frac{\phi_b}{2} \sin \frac{2\pi x}{l} \sin \frac{2\pi t}{T} \quad (0 < x < l/2) \quad (3)$$

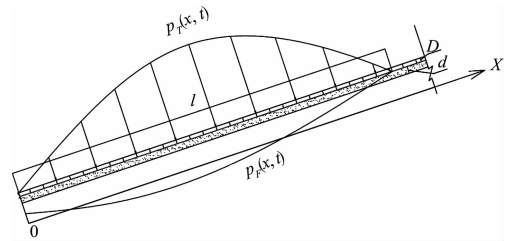


图1 式(3)假定的面层压强分布

式中: l 为波浪在护坡上的作用范围,与波高 H 和破波参数 ξ (或称 Irribarren 数) 有关。其中,破波参数形式为:

$$\xi = \tan \alpha / \sqrt{\frac{2\pi H}{gT^2}} \quad (4)$$

式中: α 为护坡坡角; H 为波高; T 为周期。

利用边界条件,在 $x=0$ 处,有:

$$\frac{\partial P_F}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

并且,在 $x=l/2$ 处,不考虑边界对出流的影响,设

$$\frac{\partial^2 P_F}{\partial x^2} = 0 \quad (6)$$

利用这些条件,求得垫层中同步的波浪压强分布为:

$$P_F = \frac{\phi_b}{2 \left(1 + \frac{4\pi^2 \Lambda^2}{l^2} \right)} \left[\sin \frac{2\pi x}{l} - \frac{2\pi}{l} \frac{\Lambda}{1 + e^{\frac{1}{\Lambda}}} \exp \left(\frac{x}{\Lambda} \right) + \frac{2\pi}{l} \cdot \frac{e^{\frac{1}{\Lambda}} \Lambda}{1 + e^{\frac{1}{\Lambda}}} \exp \left(-\frac{x}{\Lambda} \right) \right] \sin \frac{2\pi t}{T} \quad (7)$$

垫层内同步负压强分析结果表明,其绝对值比面层顶部负压强绝对值小,两者差别主要为系数项 $1/(1 + 4\pi^2 \Lambda^2 / l^2)$ 以及边界条件。当 Λ 较大(垫层渗透系数较面层大)时,垫层内波浪压强绝对值较小。当 $\Lambda = 0.5$ 和 $\Lambda = 0.05$ ($l = 1 \text{ m}$) 时,式(7)计算的垫层内部压强 P_F 及面层与垫层压强

差 $P_T - P_F$ 见图 2 (其中最大相对压强差 P/P_{max} 分别为 0.81、0.09)。可见, 随着 Λ 的减小, 垫层内部与面层顶部的压强差逐渐减小, 垫层内部孔隙水对面层的上举力也相应减小。

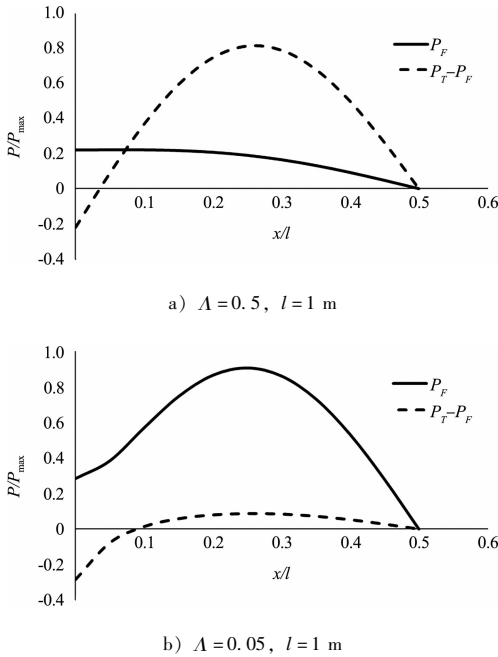


图 2 式(7)得到的垫层内部压强分布

2 物理模型试验

波浪作用下, 护坡垫层内部压强计算理论分析表明, 随着垫层内部渗透系数相对于面层不断增大, 面层所受上举力也随着增大。下面通过物理模型试验, 测量护坡面层和垫层内的波浪压强, 对此进行进一步研究。

2.1 试验方法和组次

试验岸坡断面见图 3, 坡度为 1:3, 面层采用 100 mm × 100 mm × 14 mm 开孔块体防护, 孔径 18 mm。其下方垫层包括上层的土工布和下方的厚 50 mm 砂石层, 再下方为堤心土。断面前方水深为 0.5 m。

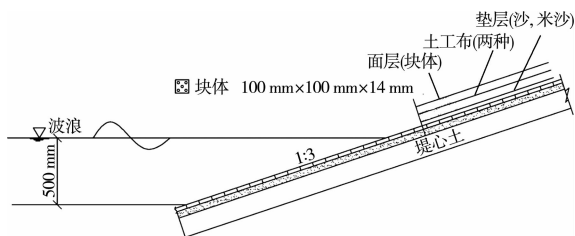


图 3 试验护坡断面

试验分别在面层顶面 (块体表面)、垫层顶面 (砂层上方) 和垫层底面 (砂层下方) 布置了压强测点, 以测量面层顶部和垫层等不同部位的压强分布, 各测点布置见图 4。

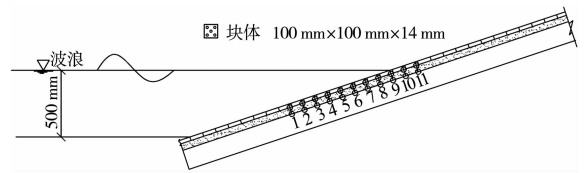


图 4 面层顶面和垫层顶面/底面压强测点布置

试验波浪要素组次见表 1, 各试验组次破波参数 ξ 为 0.11 ~ 0.29, 波高 H 为 9.8 ~ 25.3 cm, 周期 T 为 1.2 ~ 2.4 s。

表 1 试验波浪条件

T/s	H/cm	ξ
1.2	9.8	1.57
	12.0	1.39
	14.0	1.39
	15.6	1.31
	17.8	1.21
1.4	20.4	1.12
	10.2	1.85
	11.9	1.71
	13.9	1.58
	16.0	1.46
1.6	18.3	1.36
	20.0	1.30
	10.1	2.14
	11.9	1.97
	14.2	1.80
1.8	16.0	1.69
	18.1	1.59
	20.0	1.51
	10.3	2.38
	12.2	2.18
2.4	13.9	2.04
	16.3	1.88
	18.3	1.78
	19.9	1.70
	11.6	2.87
2.4	14.0	2.62
	16.3	2.42
	19.0	2.24
	22.2	2.08
	25.3	1.95

本次试验最重要的是土工布和垫层渗透系数的模拟。土工布自身质量相对于面层块体可忽略,其对面层的主要影响是渗透系数。在实际应用过程中,土工布随着使用时间的增长,土工布中的孔隙会被水流中的细颗粒堵塞,造成其渗透系数降低。因此试验考虑这种条件下对面层稳定性的不利影响,选取了一种渗透系数相对较小的土工布进行试验,这种土工布的渗透系数与工程实际应用多年后的土工布渗透系数接近。垫层也考虑到颗粒粒径对垫层水压力的影响,选取了沙和米沙进行模拟。试验使用的土工布渗透系数、厚度和垫层的渗透系数、颗粒粒径见表2。

表2 试验垫层

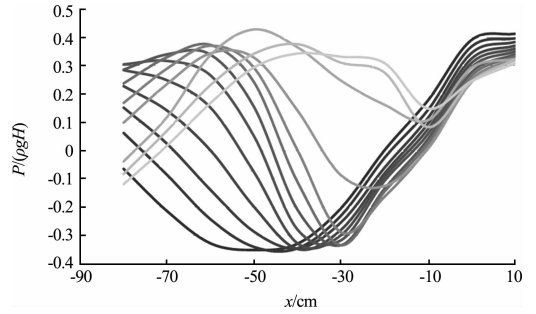
材料	类别	$k/(cm/s)$	d 或 d_{50}/mm
土工布	1	0.035	$d=0.4$
	2	0.320	$d=2.0$
垫层	沙	0.010	$d_{50}=0.37$
	米沙	0.100	$d_{50}=2.73$

2.2 试验结果分析

试验结果分析主要分为两个方面,首先是对波浪作用下,护坡面层和垫层等不同部位的压强大小及分布进行分析;然后对垫层不同渗透系数条件下的面层最大净压强差(面积上合成上举力)进行对比分析。

关于波浪作用下,护坡面层、垫层的压强变化过程及分布,由于试验组次较多且规律类似,下面仅取波高 $H=12\text{ cm}$ 、周期 $T=1.2\text{ s}$ 为例来说明。

一个波浪周期过程主要包括波峰作用时波浪在斜坡上上爬、破碎,以及波谷作用时波面沿斜坡回落降低。图5、6分别表示波峰和波谷作用过程中,护坡垫层内波浪压强分布随时间推移的过程(图中曲线随时间推移由深变浅,每相邻两条曲线间隔 0.05 s)。由图可见,面层顶部波浪压强在一个波浪周期内由零增大到最大值,然后再减小到零或负,位于静水位以下的面层在波谷达到最低时会达到负压强绝对值最大(最大负压强出现在4#、5#测点之间,测点分布见图4),此时一般被认为是护坡面层最容易失稳的时刻,即位于波面以下处的面层所受波浪上举力最大。



注:横坐标为斜坡坡面对应位置,其中0代表静水位和斜坡的交点,负值为水下斜坡坡面,正值为水上。纵坐标为该位置所测得的压强,图6同。

图5 波峰作用坡面压强过程(爬高破碎)

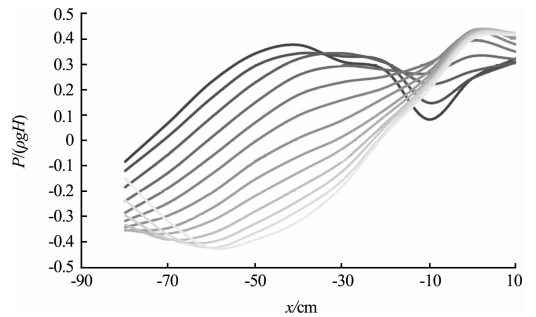
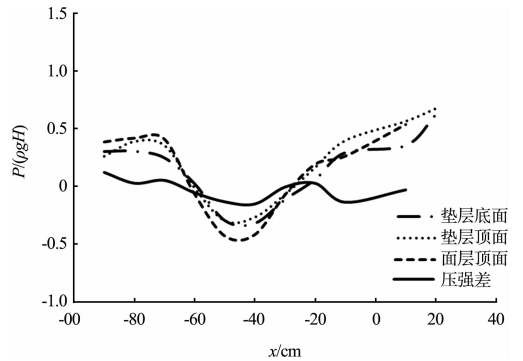


图6 波谷作用坡面压强过程(破碎后回落)

在波谷最低时刻,沿护坡面不同测点的波浪压强分布见图7,垫层顶面与底面的压强差较小,垫层顶面与面层顶面的压强差较大。这个压强差的实质即为形成垫层内部孔隙水对面层(包括土工布)的上举力。



注: $H=12\text{ cm}$, $T=1.2\text{ s}$, $t=0.24\text{ s}$ 。

图7 波浪作用坡面各层压强分布

试验土工布分别采用土工布1和土工布2,土工布下垫层分别采用沙和米沙,针对4种不同垫层试验组次进行了多组波浪试验,并分析了波谷作用时面层顶部和垫层内部的最大相对压强差,其最大相对压强差的试验结果相对于破波参数 ξ 分布见图8。

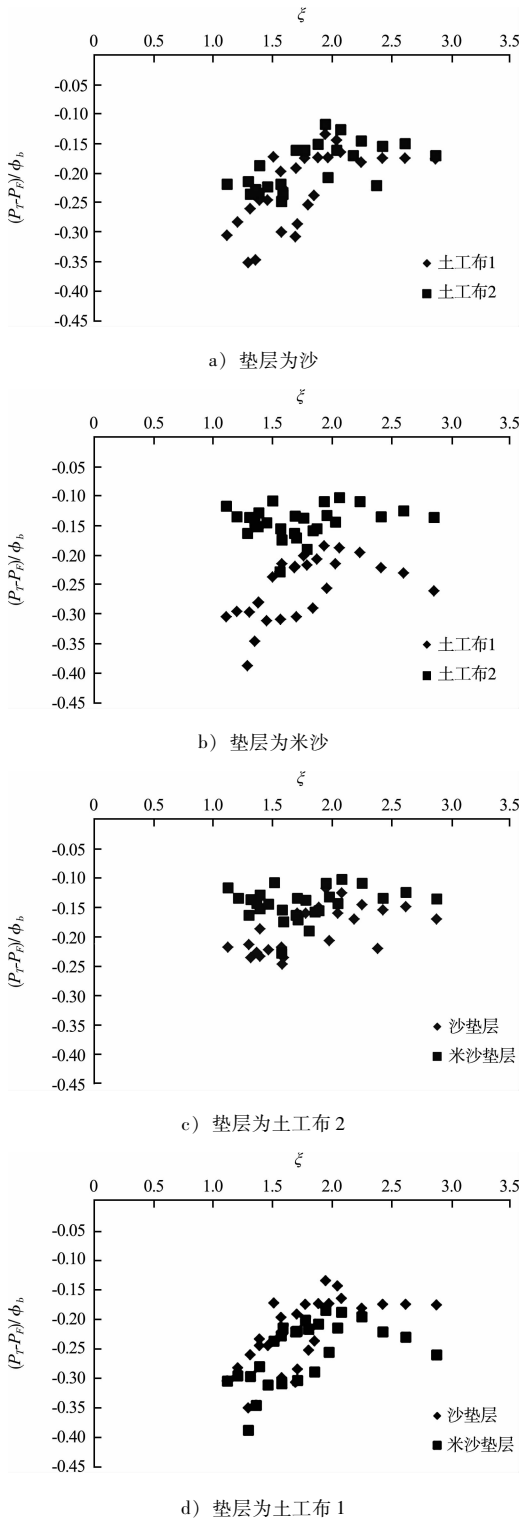


图8 面层与垫层压强对 ξ 分布

比较发现，当垫层相同时，采用渗透性较差的土工布 1 对面层的最大相对压强差比土工布 2 更大，而这种差别对于土工布下方采用米沙时更为明显（图 8b），也就是采用渗透系数较大的米沙时，其最大相对压强差更大。当采用渗透性较

好的土工布 2 时，垫层内的水体都较易透到堤外，即面层最大相对压强差差别不大，而由于米沙的渗透性更好，其面层上下的压强差甚至更小（图 8c）。当采用渗透性较差的土工布 1 时，垫层采用米沙时面层的相对压强差比采用沙时更大（图 8d）。这是由于土工布渗透系数降低后，垫层相对面层渗透性越好，面层的最大相对压强差越大，与之前的理论分析结果一致。

由于面层顶面和土工布底面在波谷最低时刻的最大相对压强差的实质是垫层内部孔隙水对面层（包括土工布）的上举力，可见随着面层渗透系数的降低或垫层渗透系数的变大，在波谷作用时会导致面层所受上举力的增大，一旦这个上举力超过面层的水下自重，则会引起面层失稳。实际工程中，土工布在使用过程中会发生淤堵，其渗透系数会大大降低，在波浪作用下也会导致面层所受上举力增大，可能引起护坡失稳。

举例说明，本次试验中，当 $T = 1.4\text{ s}$ 、 $H = 20\text{ cm}$ （即 $\xi = 1.30$ ）时，最大相对压强差的绝对值达到最大，此时不同面层/垫层组合下的上举力大小见表 3。

表 3 上举力		Pa
材料	土工布 1	土工布 2
沙	70.14	42.58
米沙	77.65	32.56

经计算，该试验条件下的面层水下自重约为 35.86 Pa。对比可知，当面层/垫层组合为土工布 1/沙垫层、土工布 2/沙垫层和土工布 1/米沙垫层时，上举力超过了面层水下自重，根据理论分析此时将可能发生面层失稳，而试验结果也与理论分析一致。

3 结论

1) 在波浪作用下，护坡通常采用面层-垫层-堤心土这种结构形式，理论分析和模型试验表明，当面层渗透系数小于垫层渗透系数时，在波谷作用的最低时刻，由于垫层内部负压强绝对值小于面层顶部负压强的绝对值，会产生垫层内部孔隙水对面层的上举力。当该上举力大于面层水下自重时，会引起面层失稳。

(下转第 39 页)