

碎石聚氨酯护坡应用的初步研究¹

顾德华¹, Henk Jan Verhagen², Martin Van de Ven²

¹河海大学水利水电工程学院, 南京 (210098)

²代尔夫特科技大学土木工程与地球科学系, 代尔福特, 荷兰

E-mail : dehua.gu@gmail.com

摘要: 碎石聚氨酯护坡是一种新开发的水利技术。其结构与碎石沥青护坡相似, 不同的是碎石以聚氨酯粘合而不是沥青。为了研究碎石聚氨酯护坡在实际应用中的可行性, 对碎石聚氨酯护坡和碎石沥青护坡进行了以实验为主的比较研究; 进行了标准四点弯曲扫描频率实验、标准单调三点弯曲强度实验、孔隙率实验、坡上稳定性实验、波浪爬高实验、界面渗透率实验、相对抗磨损能力实验和一些在计算机堤坝安全评估分析程序 GOLFCLAP 中进行的计算。研究结果表明碎石聚氨酯护坡在实践中的应用是可行的。

关键词: 碎石聚氨酯护坡、碎石聚氨酯, 聚氨酯、碎石沥青护坡、护坡护岸

中图分类号: TV4

1. 引言

这些年来, 随着全球日益变暖和气候变化, 人们越来越关注沿海地区和河流沿线的岸坡保护; 碎石聚氨酯护坡的出现就是这种关注的成果之一。本研究是对碎石聚氨酯护坡在实践中应用可行性的初步研究。

当今, 为了保护岸坡免受波浪和水流的侵蚀, 很多方法如沉积物补给、防波堤、防浪堤、和护坡护岸等在世界各地被广泛的应用着。以最简单的一个护岸建筑为例, 其主要由三种材料组成: 砂土, 土工布(反滤层)和碎石; 除了碎石, 其他材料如预制混凝土块、沥青、草皮和刚性结构也应用地非常广泛; 它们既能独立使用, 也能混合使用。目前, 作为一种新兴技术和材料, 聚氨酯也已开始在各种水利工程中得到应用。

聚氨酯(PUR-polyurethane)在化工与塑料行业中是一种非常重要的材料, 在汽车、建筑、电子、近海原油和近海天然气管道防腐层等行业都有着广泛的应用。最近, 巴斯夫化工公司研制出一种用于建设护岸的特殊疏水聚氨酯组合料(弹性聚氨酯6551/100): 在标准混凝土搅拌机中将20-60mm的碎石与相当于其重量1.8%(取决于石块尺寸)的聚氨酯混合; 将此碎石聚氨酯混合物铺设到斜坡上作为护岸的表层, 厚度约为15-30cm。一天后, 碎石聚氨酯就会熟化并且在两天后达到最终强度; 即碎石聚氨酯护坡建造完毕。

碎石聚氨酯护坡和碎石沥青护坡具有相似的结构; 此外, 碎石聚氨酯的结构也和碎石沥青相似。所以此研究主要基于碎石聚氨酯与碎石沥青、碎石聚氨酯护坡与碎石沥青护坡的比较。表1^[6]给出了一些护岸常用规范和不同材料的比较。在碎石聚氨酯一栏, “研究项目”是指本研究中所作的工作; 问号是指研究中没有对此方面进行研究; 在此研究中, 做了七个实验, 它们是标准四点弯曲扫频实验、标准单调三点弯曲强度实验、碎石聚氨酯孔隙率实验、未硬化碎石聚氨酯坡上稳定性实验、碎石聚氨酯和土工布间界面透水性实验、波浪爬高实验、和相对抗磨损作用实验; 其次, 根据四点弯曲扫频实验和三点弯曲强度实验得出的结果运用计算机程序GOLFCLAP进行了一些计算, 比较了在不同的波浪荷载下碎石聚氨酯护坡和碎

¹本项目得到巴斯夫集团子公司Elastogran的资助, 在荷兰代尔夫特科技大学实验室完成

石沥青护坡满足稳定性要求的最小厚度。

表 1 护岸用不同材料的比较

规范类型	松散岩石	预制混凝土块	草坪	刚性结构	沥青	碎石聚氨酯
可达性	-	+	+	-	+	研究项目
建造和维护	++	0	+	0	-	研究项目
成本	视情况而定	视情况而定	视情况而定	视情况而定	视情况而定	视情况而定
沉降适应性	++	+	++	-	+	?
大荷载承受力	+	+	-	++	++	研究项目
风景协调性	视情况而定	视情况而定	视情况而定	视情况而定	视情况而定	视情况而定
所需空间	0	0	-	++	0	0

2. 方法

本研究包含的七个实验中，四点弯曲扫频实验和单调三点弯曲强度实验是标准材料特性实验；并且实验结果被应用到计算机程序GOLFKLAP中^[5]。其他5个实验是设计实验，研究了碎石聚氨酯和碎石聚氨酯护坡在水利应用中的性能。所有实验均在荷兰代尔夫特科技大学的水利学实验室及道路与桥梁实验室中完成^[6]。表2对所有实验的信息进行了汇总。

表 2 研究中进行的 7 项实验汇总

实验类型	主要任务	主要设备	试件
四点弯曲扫频实验	测量温度为 5、23、35、和 50 °C，频率为 0.5、1、2、4、8 和 10 Hz 时的碎石聚氨酯的硬度	四点弯曲梁疲劳实验设备，计算机	三个由 10/14 mm 黑色石灰石配制的 50x50x400 mm 试件，和三个由 8/11 mm 黄色石灰石配制的 50x50x400 mm 试件。
单调三点弯曲强度实验	测量荷载为 0.5mm/min 和 50mm/min 时碎石聚氨酯的抗折弯曲强度	通用实验设备 (UTM)，计算机	六个由 10/14 mm 黑色石灰石配制的 50x50x400 mm 试件，和六个由 8/11 mm 黄色石灰石配制的 50x50x400 mm 试件。
孔隙率实验	测量由两种不同等级的石块配制的碎石聚氨酯的孔隙率	密封木制模具，天平	三个由 16/32 mm 黄色石灰石配制的 25x25x25 cm 碎石聚氨酯试件，和三个由 8/11 mm 黄色石灰石配制的 25x25x25 cm 碎石聚氨酯试件。
渗透率实验	测量和比较在 1、2 和 3 米水压下碎石聚氨酯和土工布之间界面的渗透性。	水泵、钢管、水池、液压计和计算机	由 16/32 mm 黄色石灰石配制的 20x20x10 cm, 20x20x20 cm 和 20x20x30 cm 碎石聚氨酯试件；由 8/11 mm 黄色石灰石配制的 20x20x10 cm, 20x20x20 cm 和 20x20x30 cm 碎石聚氨酯试件。
波浪爬高实验	测量在规则波浪冲击下碎石聚氨酯护坡的粗糙度系数	水槽、波浪测量计和计算机	一个由 8/11 mm 黄色石灰石配制的 1:3 碎石聚氨酯斜坡；一个由 16/32 mm 黄色石灰石配制的 1:3 碎石聚氨酯斜坡；一个 1:3 光滑水泥斜坡。
相对抗磨损实验	比较不同材料抵抗磨损的能力	一个混凝土搅拌机、水泥和研磨料（两种粒径的花岗岩）	两个由 8/11 mm 黄色石灰石配制的碎石聚氨酯试件；两个由 16/32 mm 黄色石灰石配制的碎石聚氨酯试件；三个老化的碎石沥青试件，3 个预制混凝土块试件和一个胶体混凝土试件。
坡上稳定性实验	测量导致未硬化碎石聚氨酯在机织和非机织土工布上失稳的临界坡角	手推车、木板、起重机、机织和非机织土工布及照相机	由 16/32mm 黄色石灰石配制的未硬化堆积碎石聚氨酯。

3. 四点弯曲扫频实验

进行四点弯曲扫频实验的目的是为了得到碎石聚氨酯的硬度，此硬度是GOLFCLAP计算中所必需的，图1显示了实验用装置（装置中不是碎石聚氨酯试件）。



图 1 四点弯曲扫频实验设备

图2和图3显示了实验结果；其中‘B’表示由10/14 mm黑色石灰石配制的试件，‘Y’表示由8/11 mm黄色石灰石配制的试件。‘B’或‘Y’后的号码是指温度(°C)。

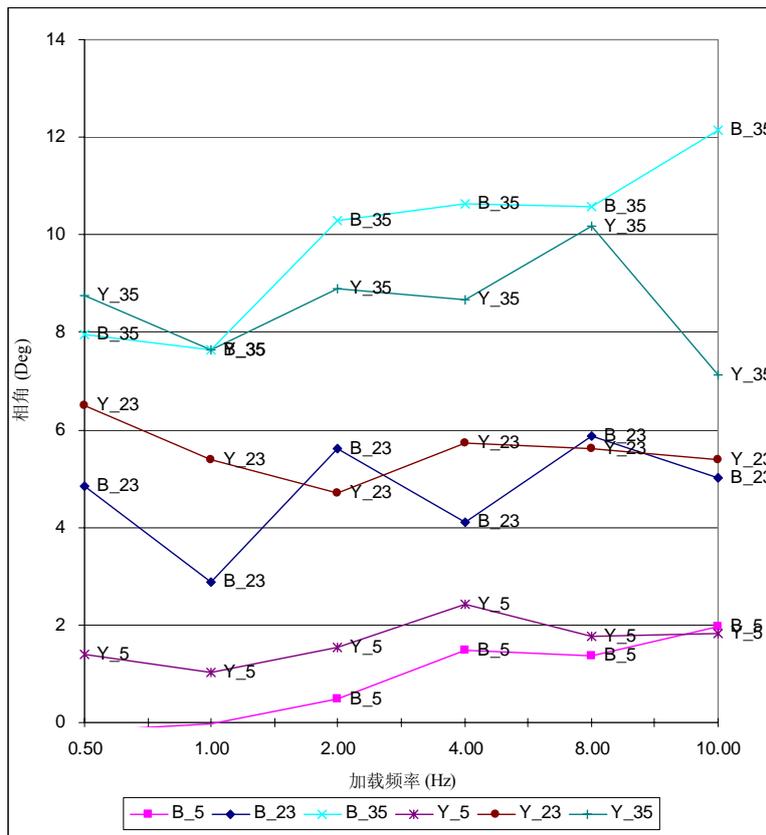


图 2 四点扫频实验中测得的碎石聚氨酯的硬度

图2中的曲线图表明碎石聚氨酯的硬度在一定温度下与所受荷载的频率无关。但温度对硬度的影响较大，在5 °C和50 °C之间，碎石聚氨酯的硬度在500 Mpa和3000 Mpa间变化；而

且随着温度的升高，硬度会降低；23 °C和35 °C间的硬度差异与35 °C和50 °C间的硬度差异相近；但是5 °C和23 °C温度之间的硬度差异较为明显。

此外，碎石聚氨酯的硬度也因石块的类型不同而有所不同。总的来说，由8/11 mm黄色石灰石配制的试件硬度高于由10/14 mm黑色石灰石配制的试件硬度；原因也许是这两种石块 的性质和级配不同（8/11 mm黄色石灰石的密度是1464kg/m³而10/14 mm黑色石灰石的密度为1380 kg/m³）。要了解不同的石块性质和粒径大小如何影响碎石聚氨酯的硬度，仍需进一步的研究。测试中还发现这两种不同的碎石聚氨酯间的硬度差异会随着温度的升高而变小；这也许表明温度越高，不同石块类型的影响就会越小。

另一个实验中得到的结果是相角，相角在实验程序中被定义为：

$\Phi=360fs$ ，其中，

f=负荷频率(Hz)

s=试件中心峰力和峰挠度之间的相位差（秒）

正常情况下，当相角等于零度时，表明材料具有弹性；在0和90度之间时，表明材料是粘弹性的；等于90度时，则说明材料是粘性的。

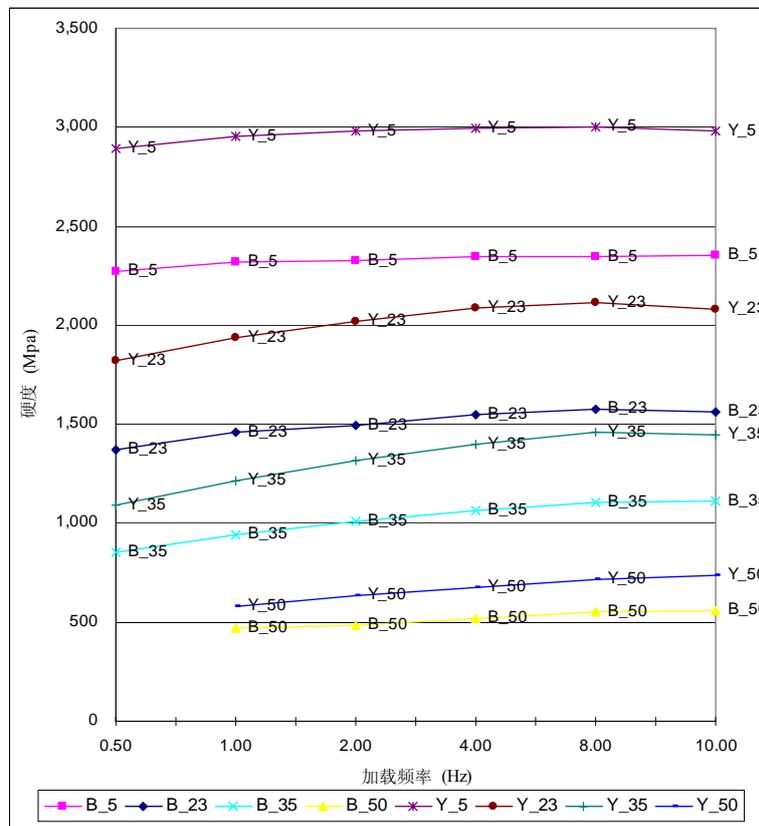


图 3 四点弯曲扫频实验相角结果图

如图3所示，两种碎石聚氨酯的相角相近。在5、23和35 °C温度下，两种相角分别保持在1、5和9度左右并有2、3和4度的裕度。所以碎石聚氨酯在较低或正常温度下基本是一种弹性的材料。在50 °C温度下，实验结果因测量误差而被忽略，因为过小的荷载导致仪器接受的信号不稳定；以至于电脑程序很难基于这些分散的信号计算出相角的可靠值。^[11]

另一方面，随着温度的升高，相角会增加，也表明在较高的温度下，碎石聚氨酯会变得更具有粘弹性。

四点扫频率实验的主要结论是：碎石聚氨酯的硬度取决于温度，石块 的尺寸和性质；在

较低温度下(5 °C)，碎石聚氨酯的硬度小于老化碎石沥青的硬度（大约5000 Mpa）；碎石聚氨酯基本上是弹性的。

4. 单调三点弯曲强度实验

标准单调三点弯曲强度实验是在室温(20-25°C)下进行的破坏实验以获得碎石聚氨酯的抗折强度（和其它数据如正切劲度）。共有四个10/14 mm黑色石灰石试件和四个8/11 mm黄色石灰石试件以50 mm/min的荷载进行测试；两个10/14 mm黑色石灰石试件和两个8/11 mm黄色石灰石试件以0.5 mm/min的荷载进行测试。^[2]

试件被放置在通用实验仪(UTM)中，图4为示意简图。因为试件的表面太粗糙，所以使用金属板作为试件和圆柱支撑或负荷辊之间的接触界面。

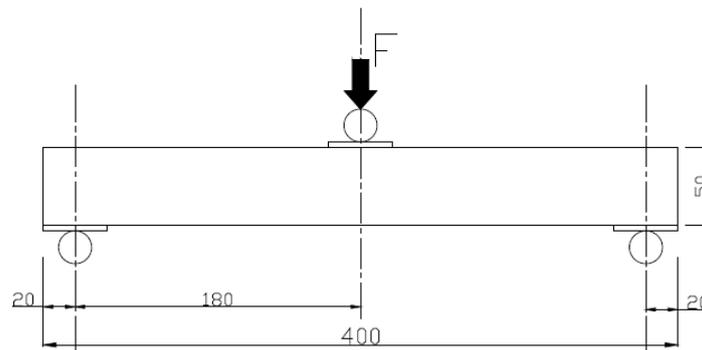


图 4 单调三点弯曲强度实验设置图

实验过程中对试件进行编号并使用文字和照片记录下实验的结果，具体来说，即对断裂处的横截面和断裂的位置进行拍照记录。荷载为50 mm/min时，试件先稍稍弯曲，然后在20秒内突然折断；荷载为0.5 mm/min时，试件一般在实验开始大约20分钟后突然折断（见表4）。

表 3 单调三点弯曲强度实验破坏结果

10/ 14 mm 黑色石灰石试件			8/ 11 mm 黄色石灰石试件	
试件	放置	中间被破坏	放置	中间被破坏
试件 1	顶面朝上	否	顶面朝外	是
试件 2	顶面朝外	是	顶面朝外	否
试件 3	顶面朝外	否	顶面朝外	否
试件 4	顶面朝外	是	顶面朝外	否
试件 5	顶面朝外	是	顶面朝外	是
试件 6	顶面朝外	是	顶面朝外	是

表 4 单调三点弯曲强度实验

试件和荷载	最大负荷 [kN]	位移 [mm]	总能量 [J]	E 正切 [Mpa]	σ [Mpa]
黑色,10/14 mm,50 mm/min,4 个试件平均数	0.31	0.85	0.95	800.43	2.66
黑色,10/14 mm,0.5 mm/min,2 个试件平均数	0.26	1.27	0.94	615.77	2.23
黄色,8/11 mm,50 mm/min,4 个试件平均数	0.36	1.12	0.86	934.75	3.15
黄色,8/11 mm,0.5 mm/min,2 个试件平均数	0.26	1.45	1.11	686.78	2.24
黑色,10/14 mm,所有 6 个试件平均数	0.29	0.99	0.95	738.88	2.51
黄色,8/11 mm,所有 6 个试件平均数	0.33	1.23	0.95	852.09	2.84

实验结果见表5。一般来说，8/11 mm黄色石灰石试件的强度比10/14 mm黑色石灰石试件

的强度大；此外，较高加载速度下的强度高于较低加载速度下的强度。

此外，实验中发现碎石聚氨酯的强度有时不取决于石块间粘结点的强度。在实验中，通过施加额外的防护措施（避免试件断裂下落时受到设备框架下方金属部件的破坏），发现黄色试件6的横截面有若干石块被破坏成带有完好耦合点的两部分（见图5）。由此证明，粘结点的强度有时比石块本身的强度要大。



图 5 单调三点弯曲强度实验中黄色试件 6 受破坏的横截面

此外单调三点弯曲强度的实验结果表明碎石聚氨酯强度取决于石块的大小和性质；不同的粘合连接（结构）也可能影响碎石聚氨酯的性能。但是碎石聚氨酯的强度与碎石沥青相比要高的多（碎石沥青的强度一般不大于1 Mpa）。^[5]

5. 孔隙率实验

孔隙率会影响材料的耐磨性、耐久性和其它属性^[8]，所以对6个碎石聚氨酯试件进行了孔隙率实验。孔隙率（VIM）为：

$$VIM=100 (d_m-d_a) d_m \text{ vol\%} \quad (\text{聚氨酯的重量可以忽略})$$

其中，

$$d_m=\text{无空隙混合物密度}(\text{kg/m}^3)$$

$$d_a=\text{有空隙混合物密度}(\text{kg/m}^3)$$

在实验中，为了获得碎石聚氨酯试件不含孔隙的密度，试件被放置在水中，通过测量重量的差异得出无空隙试件的体积。

实验结果由计算实验数据的平均值得出。从中可以看出由16/32 mm黄色石灰石配制的碎石聚氨酯试件和由8/11 mm黄色石灰石配制的碎石聚氨酯试件之间的孔隙率差异不明显。此结论对渗透率实验有重要的参考意义。

表 5 孔隙率实验结果

试件	B1	B2	B3	S1	S2	S3
$D_d(\text{kg/m}^3)$	1463	1427	1475	1425	1382	1393
$D_w(\text{kg/m}^3)$	1912	1889	1919	1878	1852	1858
孔隙率 (-)	0.45	0.46	0.44	0.45	0.47	0.47
Bnumber= 16/32mm 黄色石试件灰石符号						
Snumber= 8/11mm 黄色石试件灰石符号						
D_d = 干堆积密度						
D_w =湿堆积密度						

6. 未硬化碎石聚氨酯坡上稳定性实验

碎石聚氨酯护岸建设的主要方式是搅拌混合料并铺设到斜坡上，所以坡上稳定性实验的目的在于了解堆积的未硬化碎石聚氨酯可以稳定在何种角度的斜坡上^[9]。实验中，碎石聚氨酯和木板间的界面放置了两种不同的土工布，机织和非机织的。把未硬化碎石聚氨酯堆积在斜坡上后，在1分钟内逐渐、均匀地调节坡度（从0度开始，每2秒钟提高1度），以避免不同硬化程度的影响。关于实验设置，请见图6，其中，照相机用于记录倾角和时间间隔。



图 6 未硬化碎石聚氨酯斜坡稳定性实验设置

关于实验结果，请见表7。结果显示，在机织土工布上，大约在15度斜坡时，碎石聚氨酯开始失稳；在非机织土工布上，大约在斜坡为27度时，碎石聚氨酯开始失稳，在大约37度斜度上完全散落。

表 6 斜坡稳定性实验结果

第一次实验				第二次实验			
机织	开始	开始失稳	完全散落	机织	开始	开始失稳	完全散落
时间	16:15:40	16:16:14	16:16:30	时间	17:53:58	17:54:32	17:54:46
角度(度)	0.0	14.8	18.9	角度(度)	0.0	15.6	21.1
非机织	开始	开始失稳	完全散落	非机织	开始	开始失稳	完全散落
时间	16:21:54	16:22:56	16:23:38	时间	7:45:34	7:46:30	17:46:50
角度(度)	0.0	27.2	34.7	角度(度)	0.0	27.2	33.0

实验结果表明土工布的类型影响未硬化碎石聚氨酯在斜坡上的稳定性；未硬化碎石聚氨酯在非机织土工布上比较稳定。此外，第一次实验结果和第二次实验结果基本上没有差异，表明配制和应用之间的较短延迟不会有显著影响，前提是只要此间隔小于操作要求间隔（大约20分钟）。常用护坡的坡度为1:3和1:4，即18度和14度左右，所以碎石聚氨酯应用在护岸上基本没有问题。

7. 碎石聚氨酯和土工布之间界面的渗透性

虽然已经证明碎石聚氨酯的渗透性非常高^[4]，但是仍然需要注意在配制过程中流到土工布上的聚氨酯，因为它可能会在一定程度上阻塞界面，从而影响整个结构的渗透性和稳定性。所以此渗透实验的目的是研究碎石聚氨酯和土工布之间界面的渗透性^[10]。实验是由两种不同级配的石料配制的不同厚度的碎石聚氨酯试件在不同水压下进行的。此研究中渗透率系数定义为：

$$K=Q/A \text{ (m/s)}$$

其中，

K=渗透率系数，

Q=过水流量

A=流程横截面积

六个不同的试件均由碎石聚氨酯，土工布和木制模具共同制成；先在每一个模具的底部钉上土工布，再将碎石聚氨酯灌注入木制模具中，三者一起进行实验。图7显示的实验装置用于测量1、2、和3m三种不同水头下带有土工布的碎石聚氨酯的渗透率；水压是由水泵和与之相连的垂直钢管产生的，通过把不同量的水泵入垂直钢管可获得从0.8m到3m以上的不同水头；透过试件的水量可以通过测量21.9x1.35 m²水池中的水量的变化来进行计算。对每一个试件和每一个水头，实验重复两次。



图 7 渗透率实验装置

从图8中可以看出由16/32mm黄色石灰石配制的试件的阻塞情况比由8/11 mm黄色石灰石配制的试件的阻塞情况严重；其原因可能是8/11 mm石灰石试件的石块和聚氨酯间的触点和触面比较多，所以在较小石块配制的试件中，聚氨酯自上而下流到土工布上的流程比较大石块配制的试件中的流程要长，相对而言损耗也较多。

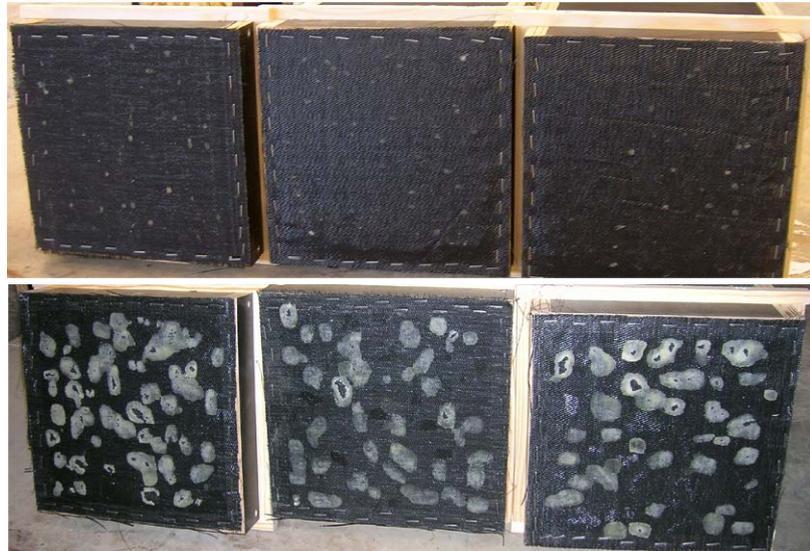


图 8 8/11mm 石块试件 (上) 和 16/32 mm 石块试件 (下) 阻塞程度

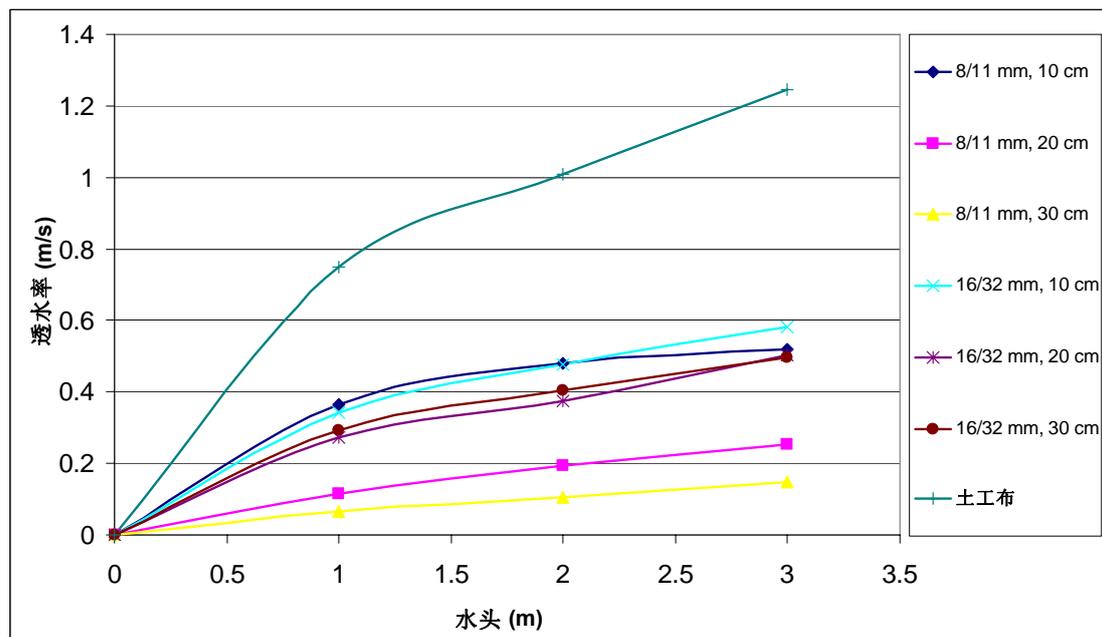


图 9 渗透率实验结果图

图9汇总了实验结果，其中，“8/11 mm,10 cm”是指由8/11 mm黄色石灰石配制的10 cm厚的试件；其它定义类似。

图9表明：

1.对于10cm厚度而言，由8/11mm黄色石灰石配制试件的渗透率与由16/32mm黄色石灰石配制试件的渗透率相近。

2.16/32mm黄色石灰石配制试件的渗透率比8/11mm黄色石灰石配制试件的渗透率大的多。

3.不同厚度的小尺寸石块试件的渗透率差异大于不同厚度大尺寸石块试件的渗透率差异；所以小石块试件的渗透率更容易受到厚度变化的影响。

4.对于小尺寸石块，20cm试件的渗透率比30cm试件大，这是符合常理的；但对于大尺寸石块，20cm试件的渗透率比30cm试件的渗透率稍小。

关于以上第4项所描述的现象，有几种可能的原因。一方面，当制作试件时，一些聚氨酯流到土工布的表面上，在一定程度上阻塞了土工布，影响渗透率；此外，这种情况在大尺寸石块试件上发生的程度要比小尺寸石块试件严重，也许会导致20cm大石块试件的渗透率比30cm大石块试件的渗透率大。但另一方面，实验后三个试件上的土工布均被剥下且进行比较，发现20cm试件的土工布上聚氨酯的含量与30cm试件上聚氨酯的含量基本相同；更重要的是，测量误差也可能影响实验结果特别是大尺寸石块试件的实验结果，因为其排水量比较大，造成水池中的波浪也比较大，从而导致较大的测量误差。总而言之，根据此实验的结果很难判定土工布上聚氨酯对于渗透率的影响程度。

渗透率实验的结论：对于不同的厚度，碎石聚氨酯和土工布之间界面的渗透率更容易受到石块尺寸与级配的影响；但是土工布上残留的聚氨酯对渗透率的影响仍需进一步的研究。

8. 波浪爬高实验

具有较高渗透率的碎石聚氨酯可以降低护岸的波浪爬高（波浪荷载），从而降低堤顶高程并减少工程预算；所以对其降低波浪爬高的效果进行定量分析是比较有意义的^[10]。为此，本研究对两个碎石聚氨酯斜坡和一个水泥平滑斜坡进行了若干实验，测得波浪爬高，并计算其粗糙度系数，然后与其它材料进行比较，定量分析了碎石聚氨酯护坡降低波浪爬高的能力。



图 10 波浪爬高实验用试件

第一个实验在水槽中的平滑水泥斜坡上进行。使用由16/32mm黄色石灰石配制的碎石聚氨酯护坡模型进行的第二个实验和使用由8/11mm黄色石灰石配制的碎石聚氨酯护坡模型进行的第三个实验均在装满沙子的木制斜坡模具中进行，沙子上面覆盖一块土工布，土工布的上层是碎石聚氨酯；碎石聚氨酯层的尺寸大约是210x75x10 cm（8/11mm黄色石灰石）和210x75x15 cm（16/32mm黄色石灰石）（见图10）。实验中所应用的波浪荷载为规则波($\xi=1.5-4$, $H/L=0.004-0.03$; $\xi=\tan(\alpha)/\sqrt{H/L}$, 其中 α =斜坡角度)并记录斜坡上十个连续波浪的爬高高度；例如，如果一个波浪的最高点达到第六根线和第七根线之间的区域，就记录为65 cm。最后，结合这三次实验的结果计算出碎石聚氨酯的波浪爬高降低系数和粗糙度系数。

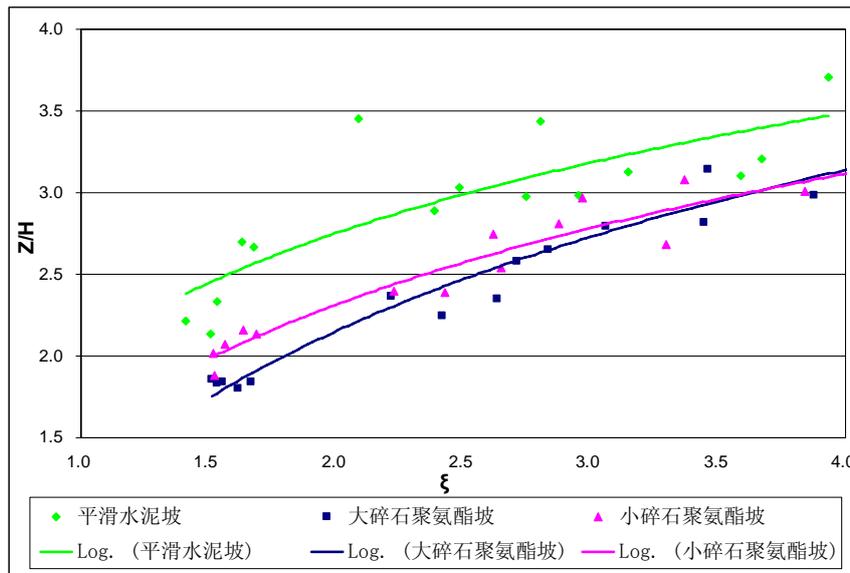


图 11 波浪爬高实验结果($Z/H - \xi$)

图11显示了实验结果，其中，横轴代表的是破波系数(ξ)，竖轴是指波浪爬高高度(Z)与波高(H)的比例。通过比较水泥平滑斜坡和碎石聚氨酯斜坡间的 Z/H 值就可以得出碎石聚氨酯护坡的波浪爬高降低系数，最后计算出碎石聚氨酯的粗糙度系数(γ)；由16/32mm黄色石灰石配制的碎石聚氨酯的粗糙度系数大约为0.7至0.9；由8/11mm黄色石灰石配制的碎石聚氨酯的粗糙度系数大约为0.8至0.9。（见图12）。

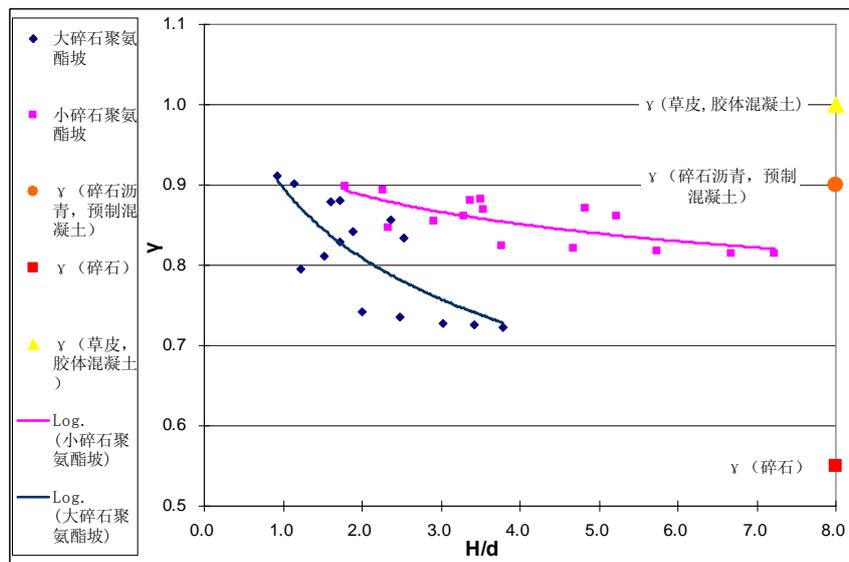


图 12 波浪爬高实验结果($\gamma - H/d$)

实验中发现卷跃波浪冲击下 ($\xi=1.5-3$)，由16/32mm黄色石灰石配制的碎石聚氨酯斜坡的波浪降低效果比由8/11mm黄色石灰石配制的碎石聚氨酯斜坡的波浪降低效果好（见图11）。原因可能是卷跃波浪与上涌波浪冲击形态的不同产生了不同的冲击效果；与上涌波浪相比，在卷跃波浪的冲击下，护坡表层的渗透性对波浪爬高降低效果具有较高的积极影响；而由16/32mm黄色石灰石配制的碎石聚氨酯试件的渗透率较高（见图9），所以由其制作的斜坡降低卷跃波浪爬高的效果较好。^[7]

这也可以解释图11中16/32mm石灰石配制的碎石聚氨酯的蓝色走向线为什么比由8/11mm石灰石配制的碎石聚氨酯的粉红色走向线降落地更为迅速。

鉴于碎石沥青的粗糙度系数大约为0.9，可知碎石聚氨酯的波浪爬高降低能力要比碎石沥青好；图11中包含了草皮、胶体混凝土、碎石沥青、预制混凝土块和毛石基的粗糙度系数以供比较和参考^[1]。通过比较，实验结果表明碎石聚氨酯的粗糙度系数低于除毛石基之外的其它护坡常用材料。

9. 相对抗磨损能力实验

因为碎石聚氨酯的强度比碎石沥青的强度高很多，因此波浪冲击力的侵蚀不是影响碎石聚氨酯护坡稳定的重要因素。然而，水流中碎石的冲刷与撞击可能会导致碎石聚氨酯的损坏及结构的失稳。所以本实验旨在通过常用护坡材料间相对抗磨损能力的比较得到对碎石聚氨酯耐磨损能力的初步了解。

因此，本实验选择了易于操作的并且可以提供直观结果的相互比较方法。此实验在混凝土搅拌机中进行，其中搅拌舱的内部表面覆盖有不同的试件：两块由16/32mm黄色石灰石配制的碎石聚氨酯圆盘，两块8/11mm黄色石灰石配制的碎石聚氨酯圆盘，三块预制混凝土块圆盘，一块胶体混凝土圆盘和三块碎石沥青圆盘；所有这些试件的厚度大约为10cm左右。用水泥固定好各试件后加入水和两种不同级配的花岗岩作为研墨料，转动搅拌舱，两天后就可以观察到试件的相对磨损程度。（见图13）



图 13 相对抗磨损能力实验装置

- 预制混凝土块试件

所有三个预制混凝土块试件表面上几乎没有发现任何明显的磨损迹象；只有少许水泥被磨蚀，表面一些较小的石块有部分暴露；其中一个试件的角落有一个被磨蚀的小孔。

- 胶体混凝土试件

试件表面的胶体水泥完全剥落；顶部的石块表面暴露且光滑圆润；但试件的整个表面仍比较平坦，未观察到明显的空洞与凹凸处。换言之，试件表面仅剥落了若干小石块，对整体性几乎没有影响。试件表面最低点和最高点之间的高差小于1cm。表面上石块间的所有缝隙均被较小的碎石（主要是研磨材料）填充；因为花岗岩的强度较大，填充在缝隙中的碎石粒可能会在一定程度上降低磨损的效果。

- 由8/11mm黄色石灰石配制的碎石聚氨酯试件

一部分石块从试件上被剥落并且与研磨材料混合在水中；两个试件的表面都不平坦，凹凸不平；表层的石块表面平滑圆润；石块间的缝隙中有许多碎石粒；此外，通过触摸发现表层石块表面的聚氨酯外包层已被完全磨蚀。两个试件表面最深孔的深度大约为-3.5 cm（‘-’指由预制混凝土块试件表面最高点向下测量，下文类同），其它点从-0.5至-2.5 cm不等，平均表面高度大约为-1.5 cm。

- 由16/32 mm黄色石灰石配制的碎石聚氨酯试件

同样，一部分石块从试件上被剥落且与研磨材料混合在水中；表面十分不平整，表层石块表面平滑圆润，石块间的缝隙中有许多碎石粒；表层石块表面几乎没有聚氨酯包裹，这与由8/11 mm黄色石灰石配制的碎石聚氨酯试件的状况相似。两个试件中最深孔的深度大约为-3.5 cm，其它表面上的点从0至-3 cm不等，平均表面高度大约为-2 cm。

- 碎石沥青试件

许多石块被剥落且与其他石料混合在水中；两个试件的表面遭到严重破坏，表层的石块表面光滑圆润；石块间仍残留一些沥青但因缝隙较大，没有在石块间发现太多的碎石粒。观察到两个最深孔的深度大约为-4.5 cm和-5 cm，甚至试件底部的水泥和木板也已暴露可见。其他点从-4至-1 cm不等。（见图14）



图 14 碎石沥青，预制混凝土块和碎石聚氨酯试件相对耐磨损能力实验结果

结果表明人工玄武岩强度最大。聚氨酯石块试件的磨蚀程度位于这些胶体混凝土试件和碎石沥青试件之间（请见图14和15）。所有四个碎石聚氨酯试件的表面粗糙且不平整；一些石块被剥落并且与磨蚀材料相混合，并且发现许多磨蚀材料进入缝隙中；此外，通过触摸感觉，顶层石块周围没有聚氨酯。碎石沥青试件被严重磨蚀。一些沥青和混凝土料被移出并且三个试件中的两个试件受到严重损害。甚至可以看到其中一个位于底部的白色木板。此外因为

较大的间隙，只能发现一些小的磨蚀材料。其中一个碎石沥青试件在缝隙中具有较少的侵蚀和较多的磨蚀材料。这也许因为它位于相对比碎石沥青强度高的人工玄武岩试件和胶体混凝土试件之间；所以对碎石沥青试件的磨蚀作用或多或少的被削弱。



图 15 由 8/11mm 和 16/32mm 碎石配制的碎石聚氨酯试件的抗磨损实验结果

当比较碎石聚氨酯试件和碎石沥青试件时应注意一点。碎石聚氨酯试件是在配制50天之后直接用于实验的；但是碎石沥青试件是从最少在20天之前建成的堤防上采集的，这就意味着测试的碎石沥青试件的属性与刚做碎石沥青属性是不同的。

10.GOLFKLAP 应用

依照《荷兰2004堤防安全评估指南》^[1]的要求，碎石沥青护岸的安全评估包括实际层厚和安全要求层厚之间的比较。得到安全要求层厚有两种方法，一种较为简便，另一种比较精确；比较简单的方法是根据图16所示图表推导安全要求厚度，此图表由早期的计算机程序和相关数据计算总结而得；比较详细和精确的方法是通过计算机程序GOLFKLAP^[3]的最新版本1.2进行的。由表7中对应的老化程度和灰泥比例可在简便的方法（方法3）和精确的方法（方法4）中做出相应的选择；其中，将沥青中灰泥的含量作为选择指标之一，因为它决定着与石块混合物的厚度和稳固性。

表 7 老化碎石沥青应用要求

铺设时容许灰泥含量的负偏差 [质量百分比]	运行年数 (年)				
	0 - 5	6 - 10	11 - 15	16 - 20	> 20
0 - 0,5	3	3	3	3	4
0,6 - 1,0	3	3	3	4	4
1,1 - 1,5	3	3	4	4	4
1,6 - 2,0	3	4	4	4	4
>2.0	4	4	4	4	4

在此项研究中，将新制碎石沥青和老化碎石沥青的安全要求厚度分别与碎石聚氨酯的安全要求厚度相比较。依照表8，参考代尔夫特理工大学道路和铁路工程系提供的实验数据，得到方法3可应用于新制碎石沥青，方法4则应用于老化碎石沥青（运行至少达20年以上）。

鉴于碎石聚氨酯和碎石沥青结构相似，且碎石聚氨酯护岸和碎石沥青护岸也比较类似，

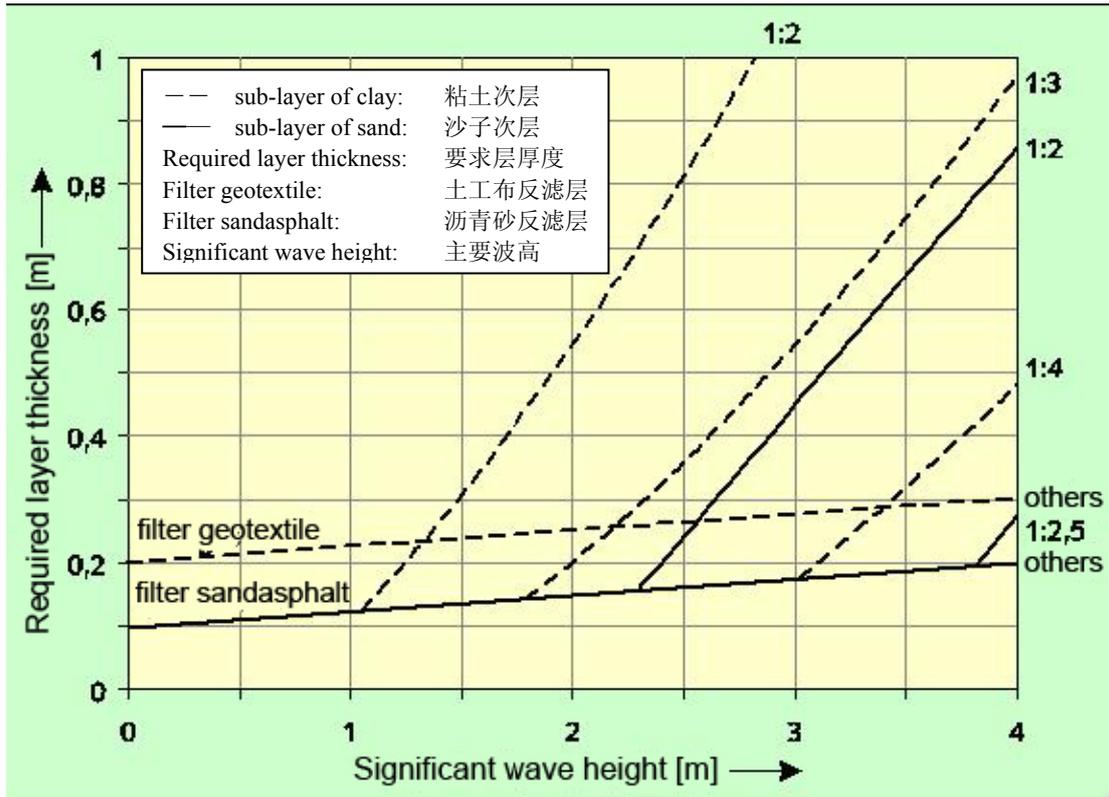


图 16 沥青护岸层厚设计参考图

可知计算程序GOLFKLAP也应适用于碎石聚氨酯护岸；此外，GOLFKLAP计算中所需的大部分碎石聚氨酯的力学性质的数据已由本研究中的四点弯曲扫频实验和单调三点弯曲强度实验中测得。所以方法4同样适用于碎石聚氨酯护岸。不过，程序GOLFKLAP计算需要疲劳特征曲线，而碎石聚氨酯的疲劳特征曲线尚未研究；所以在此项计算中，假设碎石聚氨酯的疲劳线与老化碎石沥青的疲劳线相同；此假设是非常保守的，因为从四点弯曲扫频实验和三点弯曲强度实验结果中都可以发现碎石聚氨酯的弹性要大于碎石沥青。

GOLFKLAP是一种计算机程序，用于碎石沥青护岸的设计和安全评估计算。它可以计算波浪荷载对护岸造成的弯曲应力，并且与破坏应力相比较以确认建筑是否会失稳或者遭到破坏。GOLFKLAP在计算材料中的弯曲应力时，护岸被简化为一个由多个小弹簧支撑的弹性梁；所以其结构可以通过层厚、硬度系数、材料的疲劳强度、和地基反力系数进行模拟；波浪荷载被简化为表面上一系列的三角荷载。（见图17）。

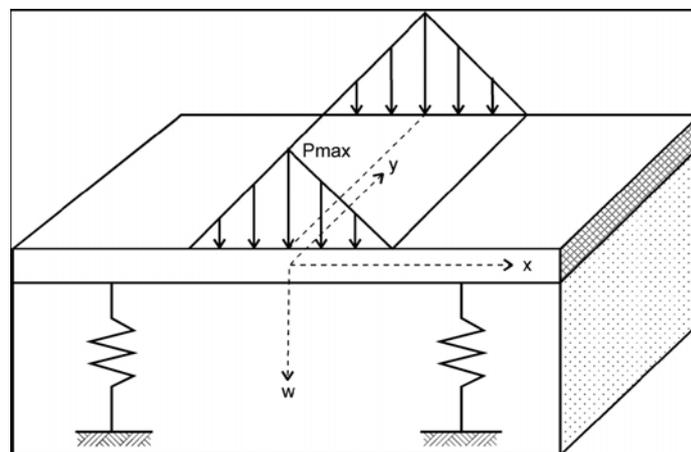


图 17 GOLFKLAP 计算护岸简图

在此研究中，护岸的最低要求层厚（安全要求层厚）被作为比较用的参数。最小要求厚度是指当Minor Sum（GOLFKLAP 输出数据）等于1时的最小层厚；当Minor Sum大于1时，表示护岸会受到破坏。

在图16中，横轴是指设计波浪高度，竖轴是指碎石沥青层的厚度。有两种垫层可作为参考条件—砂土和粘土；对于每种垫层，有若干曲线或直线作为参照，推导出基于一定设计波高的最小要求层厚。在此研究中，只参考了一种垫层（粘土）和一种坡度(1:3)。从图16中得到新制碎石沥青在不同波浪荷载下的最小厚度（见表9）。

碎石聚氨酯和老化碎石沥青的最小要求厚度利用GOLFKLAP 1.2进行计算；表8提供了主要的输入参数；其中，老化碎石沥青的硬度是从在代尔夫特科技大学道路和铁路工程实验室中进行的实验结果中获取的，‘a’和‘log(k)’是疲劳曲线的系数和截距。

表 8 GOLFKLAP 主要输入参数

	新制碎石聚氨酯	老化碎石沥青
斜坡倾斜度	0.33	0.33
地基承载力(Mpa/m)	30 (粘土)	30 (粘土)
硬度(Mpa)	3000	4500
分布系数	0.35	0.35
水深 (m-NAP)	10	10
a	6	6
log(k)	3.3	1

表9给出了在不同的波浪荷载（设计波高）下，新制碎石聚氨酯，新制碎石沥青和老化碎石沥青的最低要求层厚汇总。总而言之，在相同的波浪荷载下，与新制碎石沥青和老化碎石沥青相比较，新制碎石聚氨酯需要的最小层厚最小。

表 9 要求最小层厚比较汇总

H _s (m)	T _g (s)	厚度 (m)		
		新制碎石聚氨酯	新制碎石沥青	老化碎石沥青
2.5	5.53	0.21	0.36	0.98
3	6.06	0.31	0.54	1.35
3.5	6.55	0.43	0.75	1.77
4	7	0.56	0.97	2.2

11. 总结

根据所有实验结果和GOLFKLAP的计算，此研究的结论如下：

- 在较低温度下，碎石聚氨酯的硬度低于老化碎石沥青的硬度。其硬度因温度、石料级配和性质的不同而不同；温度越高，硬度越低；但在一定温度、不同负荷频率下，碎石聚氨酯的硬度基本不变。
- 碎石聚氨酯的强度高于碎石沥青。其值基本稳定，但有时因为其特定的开放性结构而有所波动；此外，其强度不完全由粘结力决定，有时粘结点的强度要大于石块本身的强度。
- 对于用8/11mm石块和16/32mm石块配制的试件，它们的孔隙率基本相同。
- 与在机织土工布上的碎石聚氨酯相比，在非机织土工布上碎石聚氨酯更稳定；只要配制和应用间的延迟在要求的范围内，较短的延迟对坡上稳定性没有影响。鉴于一般而言护岸的坡度是1/3或1/4，碎石聚氨酯适用于实际的现场施工。
- 对于小尺寸的碎石聚氨酯，石块级配和阻塞点的影响都可以忽略不计；但对于大尺寸

的碎石聚氨酯，则需要考虑这些影响因素；此外，鉴于由8/11mm黄色石灰石配制的碎石聚氨酯的孔隙率与由16/32mm黄色石灰石配制的碎石聚氨酯的孔隙率相似，石块级配的影响大于阻塞点的影响。换言之，对于大尺寸的石块，石块的粒径决定着碎石聚氨酯和土工布之间界面的渗透率，而不是阻塞点。

- 由16/32mm黄色石灰石配制的碎石聚氨酯斜坡的粗糙度系数范围是0.7至0.9；由8/11mm黄色石灰石配制的碎石聚氨酯斜坡的粗糙度系数范围是0.8至0.9；它们的粗糙度系数均小于草皮、胶体混凝土、预制混凝土块和碎石沥青的粗糙度系数；但大于毛石基的粗糙度系数。不同的碎石聚氨酯斜坡由于其不同的渗透率在卷跃波浪的冲击下可能具有不同的降低波浪爬高的效果。

- 预制混凝土块强度最大。碎石聚氨酯的抗磨损能力比碎石沥青好但比胶体混凝土差。
- 在相同的波浪荷载下，碎石聚氨酯护岸所需最小层厚小于碎石沥青护坡。

总之，与碎石沥青相比较（见表10），碎石聚氨酯是一种高强度的渗透性材料；碎石聚氨酯护岸相对而言施工简便且便于维护；应当能成为一种适用于护岸等水利应用的新材料。

表 10 碎石聚氨酯护岸和碎石沥青护岸间的比较

标准类型	碎石沥青护岸	碎石聚氨酯护岸
可达性	+	+
建造和维护	-	+
成本	视情况而定	视情况而定
沉降适应性	+	?
大荷载承受力	+	++
风景协调性	视情况而定	视情况而定(+)
所需空间	0	0

12.致谢

本研究得到了Elastogran GmbH, BASF Group的大力支持。本文作者在此感谢代尔夫特理工大学水力学实验室、道路和铁路工程实验室，并且感谢在所有实验的设计和操作中给与大力帮助的老师、同事与同学们。

参考文献

- [1] Anongmous. De Veiligheid van de Primaire Waterkeringen in Nederland, Voorschrift Toetsen op Veiligheid voor Detweede Toetsronde 2001-2006 (VTV) [R]. 303-310, Den Haag: Ministerie van Verkeer en Waterstaat., 2004
- [2] Anongmous. Standaard RAW Bepalingen 2005 [R]. CROW, 1084 p. 2005
- [3] De Looff, A., Hart, R., Montauban, K., and Van de Ven, M. GOLFKLAP. 测定波浪对柏油混凝土堤防结构的冲击模式 [R]. 代尔夫特理工大学土木工程系, 2005
- [4] Evertz, T. 弹性体护岸—海岸线保护新方法 [D]. 博士论文. Hamburger Wasserbauschriften: 汉堡—汉堡工业大学, 德国 (未出版), 2007
- [5] Gu, D. 用于堤防安全性调查的一些 ELASTOCOAST 的重要力学性能(VTV 2004) [D]. 硕士小论文. 代尔夫特, 荷兰: 代尔夫特理工大学土木工程系, 2007
- [6] Gu, D. 碎石聚氨酯护岸和碎石沥青护坡的水利特性比较 [D]. 硕士论文. 代尔夫特, 荷兰: 代尔夫特理工大学土木工程系, 2007
- [7] K. d'Angremond and F.C. van Roode. 防浪堤和堵口坝 [M]. 代尔夫特: 代尔夫特大学出版社, 2001
- [8] Pilarczyk, K. 堤防和护岸 [M]. Lisse: A.A. Balkema, 1998
- [9] Pilarczyk, K. 护岸设计 [M].
- [10] Schiereck, G.J. 护底和护岸简介 [M]. 代尔夫特: 代尔夫特大学出版社, 2001
- [11] Anongmous. Onderzoek Open Steen Asphalt Havendammen Oosterschelde

PRELIMINARY STUDY OF PUR-REVTMENT'S APPLICATION

Dehua Gu¹, Henk Jan Verhagen², Martin van de Ven²

1 Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, 210098

2 Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, PO Box 5048, 2600 GA Delft, The Netherlands

Abstract

PUR-revetment is a newly developed method for hydraulic application. Its structure is similar to that of open stone asphalt revetment, but the crushed stones are glued by polyurethane (PUR) instead of bitumen. To study the feasibility of applying PUR-revetment, a research based on the comparisons between PUR-revetment and open stone asphalt revetment was carried out, for which, a standard four-point bending frequency sweep test, a standard monotonic three-point bending strength test, a porosity test, a stability on slope test, a wave run-up test, an interface permeability test, a relative resistance to abrasive action test and some calculations in GOLFKLAP were done. It suggests PUR-revetment is applicable in practice.

Keywords: *PUR-revetment, PUR-stone, polyurethane, open stone asphalt revetment, bank protection*

作者简介: 顾德华, 男, 1981 年生, 荷兰代尔伏特科技大学水利工程与环境流体力学系硕士, 河海大学水工结构专业硕士, 主要研究方向是海岸工程与水工结构。