



三杆六脚透水架体护滩水力特性试验*

房世龙, 施小飞

(南通航运职业技术学院 交通工程系, 江苏 南通 226010)

摘要: 三杆六脚透水架体由于具有扰流消能等独特优越性, 曾在海防建筑物消波护面工程应用中取得良好效果。为了从机理上探究将其作为一种新型的岸滩防护技术的适用性和防护效果, 利用室内变坡水槽试验测量了三杆六脚透水架体附近的水流结构, 分析了防护体系对沿程流场三维流速和紊动强度分布的影响, 对比了防护前后床面附近单位质量水体能量的沿程变化情况, 由此研究了三杆六脚透水架体的防冲促淤机理。

关键词: 三杆六脚透水架体; 岸滩防护; 流场特性; 紊动强度

中图分类号: U 617.8

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)04-0157-06

Experiment on hydraulic characteristics of flow field near scaffolds constituted with three poles as new bank protection technology

FANG Shi-long, SHI Xiao-fei

(Department of Transportation Engineering, Nantong Shipping College, Nantong 226010, China)

Abstract: Scaffolds constituted with three poles which are used to protect the coast and breakwater gain a very good protection effect on account of their unique characteristics that poles which constitute the scaffolds can disturb the flow pattern and consume flow energy. In order to explore the feasibility and the effect of scaffolds constituted with three poles for the scour protection as a new kind of beach protection measures, the flow structure near the protection system is measured in the process of carrying out the flume experiment. The effect of scaffolds constituted with three poles for three dimensional velocities and turbulence intensity distribution is analyzed. By comparing the longitudinal distribution of energy of unit mass of fluid near the riverbed with the protection system or not, the protection mechanism of scaffolds constituted with three poles for river bank is concluded.

Keywords: scaffolds constituted with three poles; beach protection; hydraulic characteristics of flow field; turbulence intensity

岸滩防护工程是河道整治的重要组成部分, 也是防止岸滩冲刷和控导河势的有效措施。截至目前, 岸滩防护可采用的技术多种多样, 但从防护机理上可以分为抗冲型和导流型两类^[1-4]。抗冲型护滩技术采用在床面上布置提高抗冲刷能力的材料来保护河床, 导流型护滩技术通过改变受冲

床面附近水流结构来减小冲刷^[5]。由于自身固有特性、河流水沙特征等因素的影响, 无论是抗冲型还是导流型护滩技术都有其使用的局限性和适用范围。因此, 水利工作者一直致力于护滩技术的探索和创新。三杆六脚透水架体是一种完美结合抗冲型和导流型两种特性于一体的新型的岸滩

收稿日期: 2014-06-14

*基金项目: 交通运输部应用基础研究项目(2013329284210); 江苏省高校"青蓝工程"中青年学术带头人培养计划项目资助; 江苏省交通科学研究计划项目(2013Y27-04); 南通市社会事业科技创新与示范计划(HS2012014)

作者简介: 房世龙(1978—), 男, 博士, 副教授, 从事港口航道及海岸工程、河流泥沙工程、海洋工程等方面的研究工作。

防护技术,近年来在沿海防波护堤工程中得到广泛应用,并取得了良好的效果^[6-7]。工程实际应用证明三杆六脚透水架体投资少、锁性好、施工方便、稳定性高、护面层空隙率大,能够通过改变防护体系附近流场水力特性的方式来消杀波浪能量,进而实现对沿海堤岸的有效防护,具有扰流消能等独特的优越性^[8-9]。但目前对三杆六脚透水架体的研究主要集中在自身稳定性、护面层空隙率对波浪反射和爬高等水力性能影响等少数几个方面^[6-9],而没有利用其对内陆水域堤防岸滩进行防护的研究和应用。为了从机理上探究将其作为一种新型岸滩防护形式的适用性和防冲促淤效果,通过室内变坡水槽试验研究了三杆六脚透水架体防护区域内沿程流场水力特性,分析了三杆六脚透水架体的出现对沿程三维流速和紊动强度分布的影响;通过分析能综合水流流速和紊动强度双重影响的单位质量水体能量削减率的分布特性,揭示了三杆六脚透水架体的防冲促淤机理,研究成果能为三杆六脚透水架体防护岸滩的实际应用提供理论参考。

1 流场水力特性研究试验系统

1.1 试验装置

三杆六脚透水架体护滩水力特性试验采用矩形断面自循环变坡水槽,试验水槽长16 m、宽0.8 m、深0.9 m,水槽两侧为玻璃槽壁,下游端支撑结构的铅直升降能使水槽坡度在一定范围内变化,可调的最大底坡为11‰。试验水槽进口处设置多道消力栅,起到校直水流流向及抑制涡流产生的作用。水槽进口流量由超声波多普勒流量计测量,水位由水槽下游端的尾门控制,上下游水位由测针读取,试验过程中各测流垂线上的流速由超声波多普勒流速仪测量。

1.2 三杆六脚透水架体特性

三杆六脚透水架体是由预制的3根长度相等的钢筋混凝土杆件于各自中点处相互垂直正交连接而成的一种空间结构单元(图1)。应用于岸滩防护工程实际的透水架体原型的高度 H 为0.98 m,

杆件长 L_s 为1.2 m(图1a))。透水架体的杆件由密度为 $2.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 的混凝土材料预制而成,每根杆件采用正方形横截面,截面尺寸为 $a \times a = 12 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$ (图1b))。为了满足几何相似和质量相似的要求,室内水槽试验采用的三杆六脚透水架体模型的高度 h 为1.6 cm,模型杆件由密度为 $2.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 的硬塑料预制而成,杆件长度 l_s 为0.02 m,杆件所采用的正方形横截面的尺寸为 $a' \times a' = 2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ (图1c))。

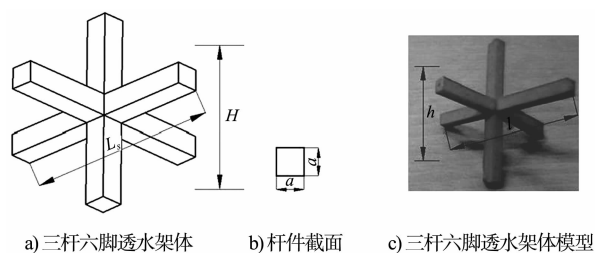


图1 三杆六脚透水架体

1.3 试验布置及工况

为了研究三杆六脚透水架体对护滩工程实施区域流场特性的影响,距水槽入口8 m处沿水槽轴线方向布设了长为100 cm、宽为80 cm、抛投密度为0.26个/cm²的三杆六脚透水架体防护层,考虑到工程施工的实际情况和水槽试验中较好的二维水流条件的保持,三杆六脚透水架体采用随机和均匀抛投的方式横向铺满水槽底部,试验采用顺水流向为 X 方向(纵向),与纵向坐标轴在水平面内垂直的为 Y 方向(横向),与坐标平面垂直的为 Z 方向(垂向),坐标原点位于水槽中轴线上三杆六脚透水架体防护体系上游边缘的床面处,试验运行过程中利用超声波多普勒流速仪对三杆六脚透水架体防护范围内水槽中轴线上 $x/L = 0.0$ 、 0.1 、 0.3 、 0.5 、 0.7 、 0.9 、 1.0 等不同位置处的7条具有代表性的测流垂线上的各项水力要素进行测量和对比分析,实际测量范围为 $0 \leq x \leq 100 \text{ cm}$,见图2。测量垂线上的纵向、横向和垂向流速分别用 u 、 v 和 ω 表示,并利用行进流速 U_0 无量纲化,测量垂线上各量测点的位置高度 z 用行进水深 H_0 无量纲化,纵向紊动强度、横向紊动强度和垂向

紊动强度分别用 $\sigma_x = \sqrt{u'u'}$ 、 $\sigma_y = \sqrt{v'v'}$ 和 $\sigma_z = \sqrt{\omega'\omega'}$ 表示, 并用来流剪切流速 $u_{*,\infty}$ 无量纲化。试验运行过程中的来流流量 Q_∞ 为 $0.027 \text{ m}^3/\text{s}$, 来流流速 U_∞ 为 0.24 m/s , 来流水深 H_∞ 为 0.14 m , 来流剪切流速 $u_{*,\infty}$ 为 1.12 cm/s 。

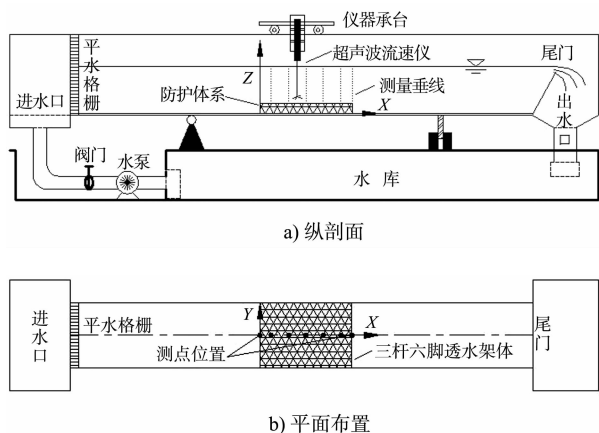


图2 试验装置

2 试验结果及分析

2.1 沿程三维流速分布

为了研究三杆六脚透水架体的出现对护滩工程实施水域流场水力特性的影响, 对防护区域内位于水槽中轴线不同位置处的测流垂线上的三维流速进行测量和分析。

图3是防护区域内沿水槽中轴线按一定间距布置的测流垂线上的纵向流速分布。通过与相同工况下无三杆六脚透水架体时的垂线纵向流速分布的对比分析可以看出, 三杆六脚透水架体的出现引起了整个水深范围内纵向流速分布的重新调整, 垂线上的纵向流速分布被很明显地划分为流速减速区和流速加速区两个部分, 而分界点的位置会随着透水架体抛投密度的不同而变化。流速减速区位于河床面附近 $0 < z/H_\infty \leq 0.33$ 的水深范围内, 在此范围内各测流垂线上的纵向流速都随着水深的增加而几乎线性增大, 但均小于无三杆六脚透水架体时相应位置处的纵向流速值, 而且各测流垂线上的纵向流速均在近床面位置处取得极小值。流速减速区内垂线流速分布特征表明, 三杆六脚透水架体是一种完美结合实体抗冲和减

速不冲防护特性于一体的护滩技术, 不仅能够利用构成自身的实体材料来提高床面泥沙的抗冲刷能力, 更为重要的是三杆六脚透水架体所具有的透水性能允许部分水流穿越透水架体所构成的防护层, 而防护层内透水架体的实体杆件就能通过扰流作用消杀水流的能量, 使流经其内部的水流的纵向流速明显减小, 进而有效减弱了纵向水流挟带泥沙流失造成床面冲刷的能力。另外, 三杆六脚透水架体不仅能够有效削减穿越其内部的水流的纵向流速, 也能使防护层顶面以上一定水深范围内的纵向流速受到不同程度的削减。流速加速区位于 $0.33 \leq z/H_\infty < 1.0$ 的水深范围内, 在此范围内各测流垂线上的纵向流速都随着水深的增加而增大, 而且都大于无三杆六脚透水架体时相应位置处的纵向流速值。流速加速区内纵向流速分布特性表明, 三杆六脚透水架体具有一定程度的阻水作用, 能使防护区域内各测流垂线所对应的有效水深减小, 所以防护层以上的测流垂线上的纵向流速会相应增大。综合分析减速区和加速区内纵向流速的分布特征发现, 三杆六脚透水架体护滩技术能够通过将无防护措施时位于床面附近的较大的纵向流速转移到距离床面较远的水体中去的方式有效减小防护区域内近床面各位置处的水流的纵向流速, 从而在一定程度上抑制了水流对床面的冲刷作用。

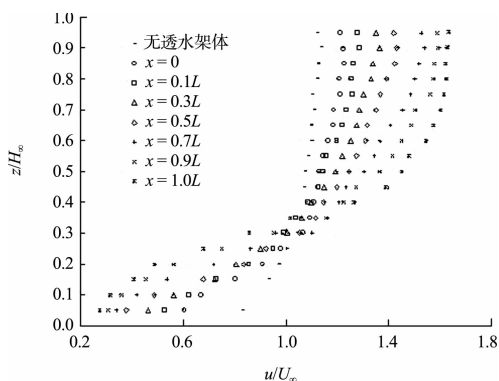


图3 纵向流速分布

图4是三杆六脚透水架体所构成的防护体系内部不同水深处的纵向流速沿程减速率。可以看出, 在三杆六脚透水架体所构成的防护体系内部各位置处的纵向流速都有不同程度的减小, 但水

深相同时纵向流速减速率会随着水流在防护体系内流经的距离的增加而增大。这主要是因为防护体系内部流动的距离越长，就有越多的透水架体杆件参与对水流的扰动，水流所具有的能量被耗散得就越多，所以纵向流速的减速率也就越大。这也说明护滩工程实际应用过程中可以通过加大三杆六脚透水架体的布设长度来取得最优的纵向流速减速率。而对于同一测流垂线上的纵向流速而言，减速率会随着水深的减小而增大，各测流垂线上的纵向流速的减速率均在近床面各位置处具有极大值。在三杆六脚透水架体防护体系尾水端床面附近的纵向流速的减速率可达 70%，而防护区域内近床面各位置处的平均减速率也达到了 53%。既然纵向流速是影响床面推移质泥沙输沙率的最重要因素，采用三杆六脚透水架体护滩后，床面附近纵向流速的大幅度削减必然会使输沙率大大降低，将十分有利于河床床面的冲刷防护。

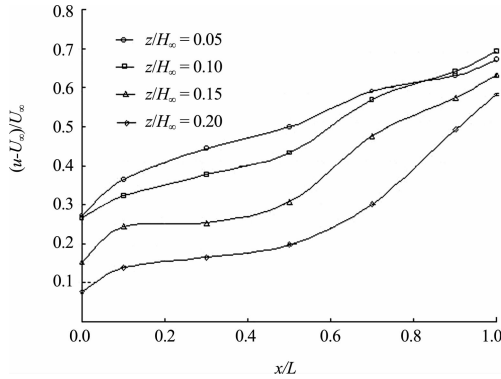
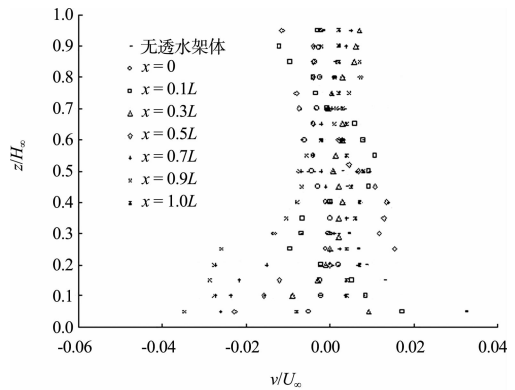
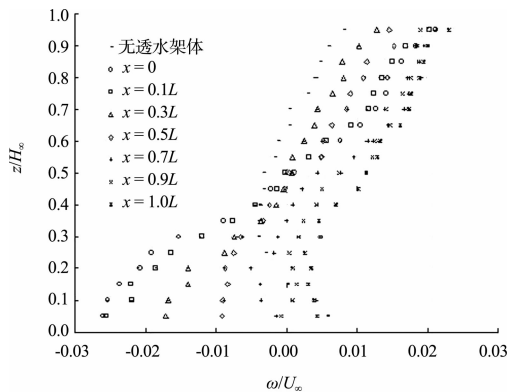


图4 透水架体内部纵向流速减速率

图5是防护区域内沿水槽中轴线按一定间距布设的测流垂线上的横向和垂向流速分布情况。由图5可知，三杆六脚透水架体的出现对防护区域内各测流垂线上横向和垂向流速分布也有不同程度的影响，但与纵向流速相比，影响程度较小。对比无三杆六脚透水架体时的垂线横向流速分布发现，防护区域内各测流垂线上的横向流速都有不同程度的增大，特别是在近床面各位置处，三杆六脚透水架体的出现使得水体的横向交换增强，但由于受扰动而增加的横向流速的数量级较小，不会对床面冲刷起明显的作用。



a) 横向



b) 垂向

图5 流速分布

由防护区域内各测流垂线上的垂向流速分布可知，在 0.3 倍水深以上直至自由水面的范围内，垂向流速几乎均为正值，但与无透水架体时相比都有不同程度的增大。而从床面至 0.3 倍水深范围内的垂向流速为负值，这说明三杆六脚透水架体的出现使得床面附近有向下水流出现，向下水流是由三杆六脚透水架体自身所具有的阻水作用引起的，这与水中绕流体上游迎水面阻水而形成向下水流的原理类似，虽然在此水深范围内向下水流的流速会随着水深的增加而减小，但各测流垂线的向下流速均在床面附近各位置处具有极大值，特别是在防护体系迎水面顶冲点（即 $x/L = 0$ ）附近向下水流的流速具有最大值。由于向下水流是引起床面冲刷的最主要的因素之一，所以最大向下水流流速值所在的三杆六脚透水架体防护体系迎水面顶冲点附近床面有发生边缘冲刷破坏的趋势^[8]，但由于水槽试验所对应工况下的向下水流流速值的数量级较小，不会对床面有明显的边缘冲刷破坏的作用。而距离三杆六脚透水架体防护体系迎水面顶冲点（即 $x/L = 0$ ）越

远, 床面附近向下水流的流速值就越小, 靠近防护体系尾水端向下水流消失, 这说明向下水流对三杆六脚透水架体所防护的床面冲刷的作用效果随着防护体系布设长度的增大而减弱, 所以可以采用增大防护体系布设长度的方式来减轻或避免边缘冲刷破坏。

2.2 沿程三维紊动强度分布

三杆六脚透水架体防护区域内沿水槽中轴线按一定间距布设的测流垂线上的纵向、横向和垂向紊动强度分布见图 6。

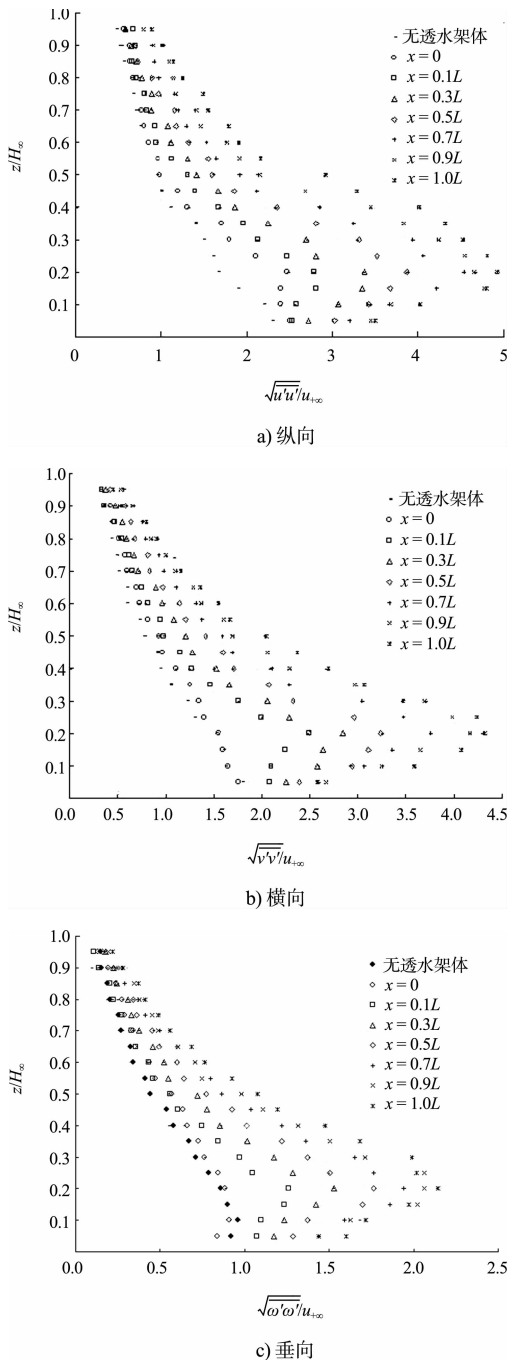


图 6 紊动强度分布

通过对比分析相同位置测流垂线上不同方向的紊动强度值发现, 纵向紊动强度值最大, 而垂向紊动强度值最小, 这说明参与河床塑造过程中纵向水体紊动的作用要大于横向和垂向。对比无三杆六脚透水架体时的垂线紊动强度分布规律发现, 三杆六脚透水架体的出现使得各个测流垂线上纵向、横向和垂向紊动强度都有不同程度的增加, 而且距离防护体系迎水面顶冲点 (即 $x/L=0$) 越远, 相同水深处各个方向的紊动强度值就越大。三杆六脚透水架体也使得各测量垂线上的纵向、横向和垂向紊动强度在水深方向均按两个特征区域分布, 而特征区域分界点的位置会随着透水架体抛投密度的不同而变化。试验研究所采用的透水架体抛投密度使得大于 0.2 倍水深后各个方向的紊动强度值几乎都随着水深的增加而线性减小, 自由水面附近各个方向的紊动强度具有最小值。从床面到约 0.2 倍水深的范围内, 各测流垂线上的纵向、横向和垂向紊动强度几乎都随着水深的增加而增大, 0.2 倍水深处的紊动强度值最大, 而近床面处各个方向的紊动强度值最小。

综合上述分析可知, 三杆六脚透水架体护滩技术由于自身杆件的扰流作用使得每条测流垂线上不同水深处的各个方向的紊动强度都较无透水架体时有不同程度的增加, 各个方向的紊动强度也几乎都在距离床面约 0.2 倍水深处具有极大值。因为水流紊动强度的增加有利于床面推移质泥沙的起动, 所以由于三杆六脚透水架体对水流干扰而造成紊动强度的增加会对床面冲刷起到一定的积极作用。但由于近床面各位置处的紊动强度值相对于无透水架体时的增加量并不是很大, 而且三杆六脚透水架体也通过大幅削减穿越其内部的水流的纵向流速的方式有效降低了水流挟带泥沙流失造成床面冲刷的能力, 所以三杆六脚透水架体的出现所引起的近床面紊动强度的增加对床面冲刷的促进作用不一定会很明显。为了综合考虑由于三杆六脚透水架体的出现所造成的近床面各

位置处的紊动强度的增加和流速的减小对床面冲刷的共同作用效果，可以采用单位质量水体能量削减率作为衡量指标。单位质量水体能量削减率是指三杆六脚透水架体削减防护体系内部各位置处单位质量水体能量的百分率，可用 $(1 - E_s/E_0) \times 100\%$ 来表示， E_s 为三杆六脚透水架体防护体系内部各位置处单位质量水体能量， E_0 为无三杆六脚透水架体时相同位置处单位质量水体能量，而单位质量水体能量为各测量位置处单位质量水体的动能和紊动能之和，可以由 $(u^2 + v^2 + \omega^2 + \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2) / 2$ 求得。图 7 是三杆六脚透水架体防护体系内部不同水深处单位质量水体能量削减率的沿程变化情况。由图 7 可以看出，各测流垂线上的单位质量水体能量削减率均随水深的减小而增大，而且均在床面附近达到了极大值。这说明三杆六脚透水架体对近床面各位置处水体能量的削减作用最为明显，平均削减率可达到 68.8%，而在防护体系尾水端床面附近单位质量水体能量的削减率最大可达 82.3%。虽然并没有对无限增大透水架体防护体系布设长度后单位质量水体能量削减率变化情况的研究，但本文试验所对应工况下三杆六脚透水架体防护体系内部相同水深处的单位质量水体能量削减率会随着与防护体系迎水面顶冲点的距离的增加而增大，而且均在防护体系尾水端取得极大值。这说明水流在穿越防护体系时流经的距离越长，参与扰流消能的杆件就越多，水体能量的耗散量就越大，水流对床面泥沙的冲刷作用能力也就越小。既然水体能量是决定床面冲刷程度的最本质因素，而三杆六脚透水架体能够通过很大程度上有效削减近床面各位置处水体能量的方式实现对床面冲刷的有效防护，这就说明三杆六脚透水架体由于自身杆件的扰流作用所增加的防护体系附近水体的紊动并不能对床面冲刷起明显作用，而三杆六脚透水架体主要

是通过有效削减近床面各位置处纵向流速的方式来实现对床面冲刷发展的抑制。

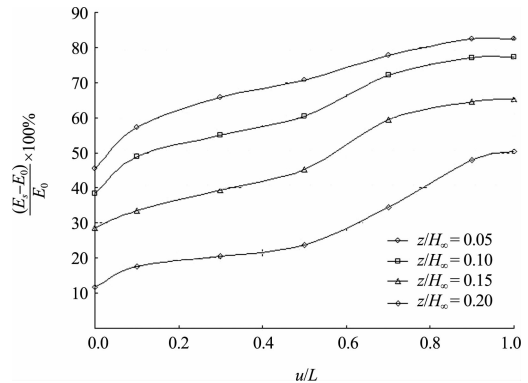


图 7 单位质量水体能量削减率沿程变化

3 结论

1) 三杆六脚透水架体的出现引起了防护区域内沿程流场三维流速分布的重新调整，使得防护体系内部近床面各位置处的纵向流速被大幅削减，从而大大降低了水流挟带泥沙流失造成床面冲刷的能力。

2) 自身所具有的阻水作用能够使得三杆六脚透水架体防护体系迎水面顶冲点附近一定范围内产生向下水流，向下水流有使防护体系发生边缘冲刷破坏的趋势，但较小的向下流速所造成的破坏作用并不明显，而边缘冲刷破坏也可以通过加大防护体系布设长度的方式来减轻或避免。

3) 三杆六脚透水架体的杆件的扰流作用，在各个方向紊动强度不同程度的增加，会对床面冲刷具有一定的促进作用，而防护体系能够在很大程度上有效削减近床面各位置处的单位质量水体能量。由此可见，杆件的扰流作用所增加的防护体系附近水体的紊动并不能对床面冲刷起主导作用，而三杆六脚透水架体主要是通过大幅削减近床面各位置处纵向流速的方式来实现对床面冲刷发展的有效抑制。