

桥墩局部冲刷防护工程特性研究综述

房世龙¹ 陈 红¹ 王 岗²

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 安徽省长江河道管理局, 安徽 芜湖 241000)

摘要 系统地总结了近年来应用于实际工程和室内实验研究的桥墩局部冲刷防护工程措施, 如抛石防护、扩大基础防护、混凝土铰链排防护、四角混凝土块防护、护圈防护、桥墩开缝防护、墩前排桩防护和淹没槛防护等, 并对这些传统防护工程措施的防护机理、防护效果和防护优缺点进行了论述和评价, 对完美结合实体抗冲和减速不冲防护特性于一体的四面体透水框架群防护方法的研究现状进行了详尽的介绍, 并介绍了桥墩局部冲刷防护措施的工程应用实例。

关键词 桥墩; 局部冲刷; 防护工程; 防护特性; 四面体透水框架群

中图分类号: U443.86

文献标识码: A

文章编号: 1006-764X(2007)04-0084-06

Properties of protection engineering against local scouring around piers//FANG Shi-long¹, CHEN Hong¹, WANG Gang²
(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Changjiang Waterway Administrative Bureau of Anhui Province, Wuhu 241000, China)

Abstract : The engineering protection measures against local scouring around piers applied to practical projects and laboratory tests in recent years were systematically summarized, such as riprap protection, foundational enlargement, concrete mattress, tetragonal concrete blocks, circular collar, pier slots, layout of sacrificial piles and submerged sills in front of piers, etc., and the protection mechanism and effect of these measures as well as their advantages and disadvantages were discussed and appraised. Moreover, the current research on the tetrahedron permeable frame protection measure, which was superior to the conventional measures and characterized by the combination scouring control and deceleration to avoid scouring, was introduced in detail. Finally, the application of the protection measures against local scouring around piers in practical projects was presented.

Key words : pier; local scouring; protection engineering; protection property; tetrahedron permeable frames

冲积性河流中桥墩周围的局部冲刷几乎是一个不可避免的问题, 这种桥墩附近局部河床床面的下切现象, 通常是由桥墩周围水流的三维边界层分离所产生的高强度的水流紊动和旋涡体系所引起的, 关系到桥梁基础的稳定。因此, 桥梁设计工作者在进行桥梁基础设计时, 必须考虑采取一些防护工程对桥墩周围的床面进行护底防护, 以保证桥墩的安全与稳定。迄今为止, 桥墩局部冲刷防护工程一直是防止河槽中桥墩周围床面冲刷、桥墩失稳和桥梁水毁的重要措施之一。Brice 等^[1]把桥墩局部冲刷防护工程措施定义为“同桥墩自身设计相结合或被独立布设于桥墩周围的、用于控制或防止桥墩周围床面冲刷的一类工程措施”。Chiew^[2]按防护机理把传统的桥墩局部冲刷防护工程措施分为两类, 一类是实体抗冲防护, 指在桥墩周围的床面上放置一些实体材料, 以提高其抗冲刷能力, 从而使桥墩免于被其附近的下降水流及旋涡体系掏底失稳的工程措施; 另一类是减速不冲防护, 指在桥墩周围设计一些

装置或通过改变桥墩自身结构, 来改变桥墩周围的水流, 以削弱或抑制水流冲刷力的工程措施。

近年来研究过的实体抗冲防护工程措施, 主要包括抛石防护、扩大桥墩基础防护、混凝土铰链排防护、填充混凝土模袋防护、四脚混凝土块防护和 A-JACKS 结构单元防护等; 减速不冲防护工程措施, 主要包括护圈防护、桥墩的部分或整体开缝防护、墩前排桩防护、墩前淹没翼墙防护、墩前淹没底槛防护和墩前淹没角槛防护等。但是, 因为传统的桥墩局部冲刷防护工程措施有一定的使用局限性和适用范围, 所以本文又对完美结合实体抗冲和减速不冲防护特性于一体的四面体透水框架群防护方法的研究现状进行了详尽的介绍。最后, 本文介绍了桥墩局部冲刷防护措施的工程应用实例。

1 传统的桥墩局部冲刷防护工程特性研究

1.1 实体抗冲防护工程措施研究

1.1.1 抛石防护

抛石防护是主要的一种桥墩防护工程措施, 其

工作原理一是抛石对床沙起保护作用,增加床沙起动或扬动所需的流速;二是抛石可以增大桥墩附近局部糙率,对于减小桥墩附近流速也起到一定的积极作用,如图 1(a)所示。

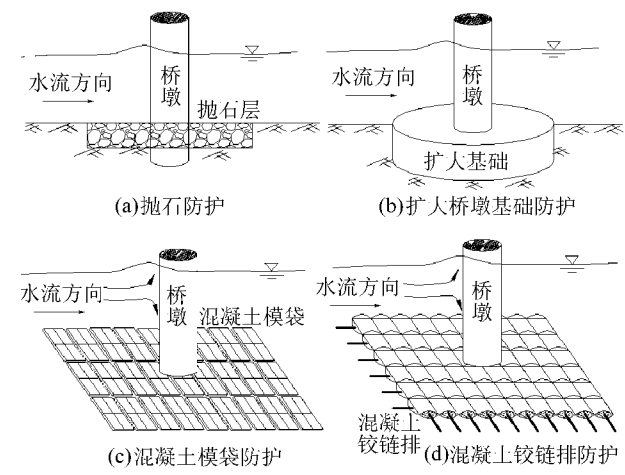


图 1 实体抗冲防护工程措施

近年来,很多学者对影响抛石防护效果的各种特征参数,如抛石粒径 d_{50} 、布设高度 h 、抛石厚度 t 、抛投范围 c 和抛石级配 σ_g 等进行了研究。

国内外关于抛石粒径的研究成果很多^[3-5],其中最具有代表性的是 Richardson 等^[6]为美国高速公路管理局推荐的抛石石料的中值粒径:

$$\frac{U_0^2}{(\rho g - 1)gd_{50}} = \frac{2.890}{K} \quad (1)$$

式中: d_{50} 为抛石粒径,mm; U_0 为行近流速,m/s; ρ 为泥沙密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度; K 为墩形系数,圆头矩形柱墩采用 1.5,矩形桥墩采用 1.7。

与抛石粒径相同,抛石层的布设高度也影响着防护效果。Laursen 等^[7]的研究结果表明,抛石层放置于床面以下的防护效果比直接把抛石石料倾倒在桥台周围床面上的防护效果更好。如果直接抛投于桥梁墩、台周围,会引起更大的冲刷以至威胁桥台的安全。但是,Lin^[8]的系列实验成果表明,清水冲刷条件下,抛石层应放置于与床面齐平的高度,动床条件下,当平均行近流速为临界摩阻流速的 2.5 倍左右时,放置高度的影响可以忽略不计。

一直以来对抛石层布设厚度的研究并不是很多,通用的原则是抛石至少应为 2 层。Lin^[8]的试验研究发现,抛石层越厚,整体性越好,防护效果也就越佳。而 Bonasoundas^[3]认为抛石层的厚度至少应为抛石粒径的 3 倍, Richardson 等^[6]也给了同样的建议。但是, Lin^[8]的室内实验研究成果表明,当墩前行近流速为临界摩阻流速的 2.5 倍左右时,抛石层布设厚度的影响可以忽略不计。

抛石防护范围对防护效果的影响较大,因为桥

墩周围床面上的动水压力比不受扰动水流中的动水压力要大几倍。过去选择抛石防护范围的通用规则是至少要大于不采取任何防护措施时的冲刷坑范围。Richardson 等^[6]建议抛石防护范围至少应为 2 倍的桥墩宽度,这个宽度是从桥墩表面算起的。Lin^[8]的实验结果表明,随着布设范围的增大,抛石层的防护能力几乎线性增加。

抛石级配对抛石层的防护效果也有重要的影响。因为级配较好的抛石能保证抛石层的结构稳定,并能防止防护层下的细粒床沙从抛石石料之间的孔隙流失。抛石级配对防护效果影响的研究成果较少,通用的规则是采用那些粒径分布曲线较光滑的抛石,级配较差的抛石所组成的抛石层也可以通过在抛石层与床面之间布设反滤层的方法来提高防护效果。但是,应尽可能地采用级配较好的抛石,因为在某些情况下,布设反滤层是相当困难的。而对于那些布设于河床床面以下的抛石层来说,无需布设反滤层^[6,9]。

抛石防护至今仍是大、中型桥梁桥墩最广泛采用的防护形式,它具有取材方便、施工简单、能适应地形变化等优点。但抛石防护的整体性较差,运用过程中的维护费用和工作量较大,特别是当流速为临界摩阻流速的 2.5 倍以上、河床床面有较大河床形态出现时,抛石将被埋置到最大冲刷坑深处,导致抛石层彻底失去防护作用。

1.1.2 扩大桥墩基础防护

扩大桥墩基础防护是指在施工阶段先将钢围堰埋入河床面以下一定深度,再进行下部桩基施工,基础施工完成后在床面以上预留一定高度封顶,然后在顶面上放置桥墩的防护工程措施,如图 1(b)所示。该防护方法的主要工作原理是利用扩大桥墩基础的顶面消杀墩前下降水流的淘刷力。

近年来的实验研究表明,影响扩大桥墩基础防护效果的主要因素为基础顶面的放置高度和扩大桥墩基础头部向上游的伸出长度。

Laursen 等^[7]和 Parola 等^[10]按防护效果的差异把桥墩基础顶面所在的位置分成 3 类:第一类是当扩大桥墩基础顶面位于河床面之上时,出露部分引起了更大的冲刷深度;第二类是当扩大桥墩基础顶面位于冲刷坑内时,扩大桥墩基础的顶面消杀了部分向下水流和马蹄形旋涡的冲刷力,进而削减了桥墩周围的冲刷坑深度,特别是当扩大桥墩基础的顶面恰好位于河床床面处时,减冲效果最为明显,此后随着顶面埋置深度的增加,防护作用减弱;第三类是当扩大桥墩基础顶面位于桥墩周围最大冲刷坑深度之下时,其防护作用消失。Parola 等^[10]认为,扩大桥

墩基础向上游伸出的部分倾向于防护河床床面免受马蹄形旋涡的冲刷,从而减小了冲刷坑的深度。国内很多学者提出了设计扩大桥墩基础桥墩局部冲深的计算方法及顶面埋置深度与宽度的关系,并认为扩大桥墩基础顶面低于河床面越多,宽度应越小,以埋置于床面以下1~2m为宜,宽度应与马蹄形旋涡活动宽度相适应,一般不应该小于1m^[11-14]。

尽管大量的研究证明,当向上游伸出长度为2倍墩径的扩大桥墩基础顶面与河床面平齐时,防护效果十分明显,但是,Breusers等^[15]不建议使用此种防护形式,除非能精确预测河床床面高程的变化。因为洪水期间,在桥址处的一般冲刷、收缩冲刷和河道横向摆动的共同作用下,河床床面通常会下切到某一高程,致使扩大桥墩基础顶部高出河床床面,扩大桥墩基础的出露通常会引起更大的冲刷,而这种墩、基结合引起的冲刷深度更甚于桥墩单独引起的冲刷坑深度。

1.1.3 混凝土模袋和混凝土铰链排防护

混凝土模袋是利用高强化纤材料编织成双层并能控制一定间距的袋体。混凝土模袋防护是指在模袋内部充填混凝土(或砂浆)使之形成一个刚性的板状防冲块体,并能适应地形变化而紧贴在岸坡或河床上从而起到抗冲刷作用的混凝土类防护技术(图1(c))。混凝土铰链排是利用铰链将混凝土板块连接起来而形成的防护实体(图1(d))。

Fothorby等^[16]应用混凝土铰链排和混凝土模袋对桥墩局部冲刷进行防护的水槽试验表明,混凝土模袋起到软性模板作用,混凝土通过压力吹填至密实成型,具有强度高、整体性强、防冲刷性能好、施工速度快、浇筑时柔性大、可以水下施工、造价适中等优点,特别是在抛石材料稀缺的情况下,是很好的替换物。但是,该方法施工较为复杂,当水下地形较陡时防护效果不是很好,特别是当水深较大、水流较急时,水下施工难度大,施工后适应河床变形的能力较差,下部边缘处易受淘刷。混凝土铰链排护岸具有整体性好、取材容易、能工厂化生产、机械化施工、质量易控制等优点,但造价较高,并需防止抛锚破坏。

1.1.4 四脚混凝土块防护

四脚混凝土块(tetrapods)起初被用于海岸防护。1993年,Bertold^[17]对四脚混凝土块进行了桥墩局部冲刷防护的可行性研究。结果发现,桥墩本身所特有的勾连性使得与抛石石块尺寸和质量相当的四脚混凝土块的稳定性更好,防护效果更佳。但是,用四脚混凝土块防护取代传统的抛石防护还有一定的难度,一方面是因为四脚混凝土块的造价比抛石防护要高得多;另一方面,四脚混凝土块需要精确地布置

于桥墩周围,施工难度较大。

1.2 减速不冲防护工程措施研究

1.2.1 护圈防护

通常来说,减速不冲防护方法更经济实用,特别是桥址附近没有足够多的石料可供开采时。护圈防护方法是典型的减速不冲防护方法,它是通过利用护圈顶面阻挡和消杀下降水流,减小马蹄形旋涡强度的原理进行防护的,如图2(a)所示。

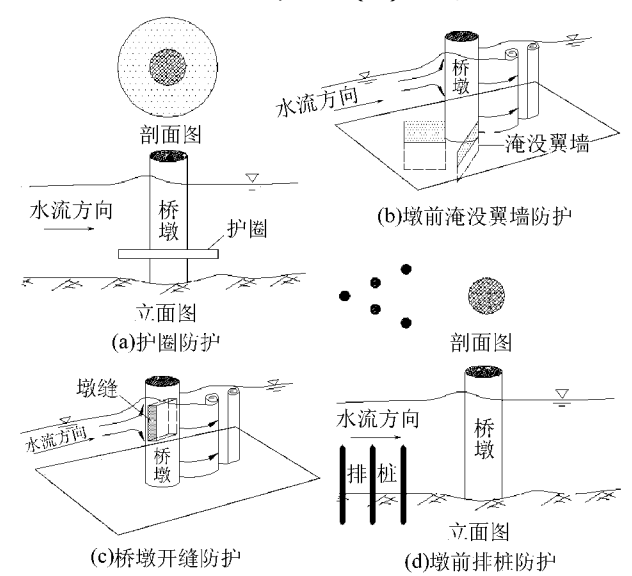


图2 减速不冲防护工程措施

大多数的研究成果都表明,影响护圈防护效果的主要因素为护圈的放置高度、护圈的尺寸和护圈的形式。Dargah^[18]研究认为,桥墩周围的护圈把流场分成3个区域,分别为护圈以上的水流区域、护圈以下的水流区域和河床床面上的水流区域。3个区域都存在马蹄形旋涡体系。但是,边界层分离的位置出现在第一和第二区域的护圈边缘部位。当圆形护圈位于床面以上0.25倍水深时,床面附近的旋涡强度没有被有效地缩减。当圆形护圈位于床面以上0.05倍水深时,床面附近的旋涡强度变得更弱了。桥墩竖直对称面上的平衡冲刷深度的测量结果表明,当护圈被放置于床面以下0.015倍水深处时,冲刷坑深度的减消最为明显,防护效果也就最好。此时的冲刷深度相对于无护圈防护时的最大冲刷深度减小量达50%~70%。

总之,护圈防护方法能起到防护桥墩周围床面免受冲刷的作用,特别是清水冲刷条件下把护圈布置在与河床床面平齐的位置时,防护效果更加明显。但是,动床冲刷条件下,河床形态的出现和传播可能使护圈下部的桥墩暴露于水流中,导致护圈失效,或者可能由于桥址处的一般冲刷与收缩冲刷结合作用而导致护圈高出河床面而造成护圈失效。

针对护圈防护的不足,Odgaard等^[19]提出了用

护圈结合淹没翼墙作为桥墩局部冲刷防护的措施。研究结果发现,淹没翼墙(如图 2(b)所示)能使墩前的行近水流向上翻转,进而缩减了桥墩周围的水流;而护圈则能破坏墩前的马蹄形旋涡和削弱下降水流的冲刷能力。因此,两者结合作用效果更加显著。

1.2.2 桥墩开缝防护

墩前迎水面的下降水流和形成于冲刷坑前缘绕桥墩两侧流向下流的马蹄形旋涡的共同作用导致了桥墩周围床面的泥沙被侵蚀,所以控制和减少冲刷的一个途径就是削减下降水流和马蹄形旋涡的强度,或者完全阻止这两种水流结构的形成。图 2(c)所示的桥墩墩体开缝能起到削弱马蹄形旋涡和下降水流强度的作用,是很好的桥墩局部冲刷防护方法之一。

桥墩开缝依据其位置不同可分为桥墩整体开缝、床面附近桥墩开缝和水面附近桥墩开缝 3 种形式。Kumar 等^[20]的研究认为,桥墩墩体开缝的防护效果取决于缝的宽度、长度及其与水流方向的夹角。当缝的宽度为 0.25 倍墩径、上端到达水面并把缝开到桥墩无防护措施最大冲刷坑底面位置处时,开缝防护效果最好。当其他条件不变时,随着水流冲击角的增大,冲刷坑的深度也增大,防护作用减小。当水流冲击角达到 45°时,墩周冲刷坑深度为无防护措施时的最大冲刷坑深度,开缝的防护作用完全消失。Chiew^[2]针对后两种形式进行的研究表明,当河床床面附近桥墩开缝时,位于底部边界层的行近水流就好像一个水平方向的射流加速通过开缝,由于墩前的下降水流与这个水平射流垂直,所以下降水流的方向被偏转,冲刷能力被削弱了。水面附近的桥墩墩体开缝能使部分水流经缝隙流向下游,有效缩减了墩前水深,由于水深的减小,表面旋滚的强度变大,因为表面旋滚与马蹄形旋涡有相反的旋转方向,所以随着两者之间相互作用的加强,马蹄形旋涡的强度被削减了,进而减小了冲刷坑的深度。

但是,在实际运用过程中,桥墩墩体上的开缝很有可能被漂浮物或冰排等堵塞,导致开缝失效。由于河床摆动等因素造成的桥墩前行近水流方向的改变使得开缝与水流方向不一致时,也会导致开缝失去防护作用。

1.2.3 墩前排桩防护

墩前排桩防护(sacrificial piles protection)是指在桥墩上游按一定规则布设一定数量的桩群,当桥墩处于桩群的尾流区域时,用于桥墩局部冲刷防护的排桩本身就会受到水流的冲刷,所以它能使墩前的高速水流方向产生偏离,并能在后部形成一个尾流区域,有效削减了桥墩周围旋涡体系的紊动强度,从而有效地遏制了桥墩周围的局部冲刷,如图 2(d)所示。

通常情况下,排桩防护效果取决于排桩中桩的数量、桩相对于桥墩的尺寸、桩伸出水面的高度(即部分出露或完全淹没)、桩群的布设形势以及桩群与桥墩的相对位置。桩群的布设形式多种多样,但是最好的布设形式是三角形布设,其中三角形的锐角顶点指向上游。当水流偏离桥墩轴线方向时,排桩的防护效果减小,甚至完全消失。Melville 等^[21]对采用最佳布设形式的排桩的防护试验表明,当桩的数量增加时,桩群的布设范围就越大,桩群的尾流区域也就越大,所以防护能力也相应提高,排桩防护最大能减小 50%左右的冲刷深度。此外,当每一根桩都被放在上游桩的尾流区时,会使得整个桩群的尾流区域范围变大,因此防护效果就提高了。他们的研究也发现,排桩距桥墩越近,防护效果越好;不伸出水面的排桩的防护效果要比伸出水面时好。

墩前排桩防护方法的防护效果很好,特别是在清水冲刷条件下。但是,防护工程设计过程中,不建议采用墩前排桩这种防护形式。因为在动床冲刷条件下,河床床面形态(沙纹、沙丘等)的传播会影响排桩的防护效果。另外,桥墩前水流的流向经常因河床横向摆动等因素的影响而改变,这也会严重影响排桩的防护效果。

1.2.4 淹没槛防护

淹没槛防护就是将一定几何尺寸的底槛或角槛埋置于桥墩迎水面上游一定距离处,通过影响水流的冲刷能力来防护桥墩周围床面的一项工程措施。

Chow 等^[22]对淹没底槛防护的研究结果表明,底槛与桥墩迎水面的距离、底槛高度和底槛的倾斜角度都会影响其防护效果。底槛距离桥墩迎水面为 4.3 倍墩径时,冲刷坑深度减少 41%,防护效果最好;当底槛相对于水流方向的夹角 $\alpha = 90^\circ$,即竖直放置时,防护效果最好;底槛的高度小于 0.3 倍水深时,随着底槛高度的增加防护效果也越显著。在淹没底槛防护研究的基础上,Yeoh^[23]对淹没角槛防护的研究结果表明,当角槛的 $0^\circ < \theta < 180^\circ$ 时,防护效果随着 θ 角的减小而减小, $\theta = 60^\circ$ 时的防护效果最好,但角槛周围的冲刷深度最大。当 $\theta > 180^\circ$ 时,角槛的防护机理与同尺度的底槛的防护机理相似,防护效果也没有很大的差异。墩前淹没槛防护在清水和动床冲刷条件下的防护效果都很好。但是,当水流方向摆动等因素造成水流方向与淹没槛横轴方向不垂直时,淹没槛将彻底失去防护作用。

2 桥墩周围四面体透水框架群抛投防护

现有的桥墩局部冲刷防护工程措施都存在一些缺点和不足,在一定条件下,这些缺点和不足甚至会

引发整个防护工程的溃败,进而影响桥墩的稳定和桥梁的安全运行。因此,河海大学水环境综合治理试验厅提出了桥墩周围四面体透水框架群抛投防护方法。桥墩周围四面体透水框架群防护方法是一种完美结合减速不冲与实体抗冲防护特性于一体的新型防护工程措施,其工作原理是利用框架群的消能减冲作用使桥墩周围水流的紊动强度减小,从而使泥沙落淤,达到防护桥墩周床面的目的。

笔者的模型试验成果表明^[24],当四面体透水框架群布设密度满足桥墩局部冲刷整体防护要求时,桥墩前缘近墩处有新月形冲刷坑出现,因此,在保证整体防护效果的前提下,应尽可能减小四面体透水框架群的整体布设密度,加大新月形冲刷坑范围内框架群的布设密度;当采用的防护范围大于无任何防护措施时的冲刷坑范围时,随着防护范围的增大,防护效果就越好;框架群的矩形布设形式较圆头矩形布设形式的防护效果好。相同条件下的进一步研究表明,框架群的防护效果也取决于墩前行近流速、水深和框架群的整体布设密度。冲刷坑深度随着行近流速和水深的增大而增大,但是当二者各自达到某一值时,冲刷坑深度随水深的变化不是很明显;冲刷坑深度随着框架群整体布设密度的增加而减小,当布设密度趋向于某一极大值时,冲刷坑深度趋向于极小值,防护效果最好,但此时随着布设密度的增加,冲刷坑深度的减小量并不是很大。

3 桥墩局部冲刷防护工程应用实例

抛石防护取材方便,施工简单,所以是使用历史较早、使用频率较高的一种防护措施。但是该种防护方法的维护费用较高,维护周期较短^[7-8]。横跨纽约斯克哈里(Schoharie)河的斯鲁维(Thruway)大桥的水毁,引起美国高速公路管理局对由于桥墩冲刷导致桥梁水毁问题的高度重视,该桥采用的就是抛石防护措施,主要原因就是没有定期维护。对位于福顿(Fordon)的威池赛尔大桥(Weichsel)桥墩抛石防护的费用统计表明,每个桥墩的抛石总量价值11 000美元,而每年的维护费用就要100美元^[25]。扩大桥墩基础防护方法也是比较传统的桥墩局部冲刷防护方法之一,我国陕西石泉汉江大桥墩基冲刷防护中使用了该方法,并取得了很好的防护效果^[26]。美国亚利桑那州东北部河流中的桥墩基础也都采用该防护方法,但是由于该桥墩附近河岸处的采石场过度开采,使得桥墩附近床面严重下切,致使扩大桥墩基础高出河床面,从而引起了更大程度的冲刷^[27]。混凝土模袋、沙袋、混凝土铰链排和混凝土块防护的工程应用也很广泛。位于我国江苏省境内的苏通大桥在

群桩基础施工前采用抛投袋装沙防护,保证了群桩基础的顺利施工。陇海线新沂河桥则采用了混凝土铰链排进行浅基防护,取得了很好的防护效果。混凝土铰链排防护也是美国亚利桑那州所有的桥墩局部冲刷最普遍使用的防护方法^[27],主要是因为该方法不需要很高的维护费用,使用周期长,可靠性高。近年来,随着桥梁基础施工技术的提高,越来越多的桥墩采用局部或整体开缝的防护方法。群桩组合墩就是桥墩整体开缝的一种典型实例,这种桥墩的优点是可以把墩桩打到桥位所在河床的永久性基岩面上,提高了桥墩基础的抗冲刷能力。我国近年来修建的桥梁都采用这种防护方法,比较著名的有南京长江二桥、苏通大桥等。美国南部达科他州的Big Sioue河大桥采用了墩前排桩防护方法。Chang等^[28]对该方法的防护效果进行了现场观测,发现3根桩位于桥墩上游,其排列方式如图2(d)所示,桩间距约为3倍桩径,观测结果表明缩减了44%的冲刷深度。Paice等^[29]对英国某河口处有潮汐影响和无潮汐影响的3座大桥进行了墩前排桩防护,并对桥墩局部冲刷防护效果进行了现场调查,结果表明,没有冲刷坑出现。国内未见淹没槛防护的工程应用实例,美国亚利桑那州西北部的一些桥梁由于洪水期的一般冲刷致使扩大桥墩基础顶面出露,导致了扩大桥墩基础前很大程度的局部冲刷,为了防止局部冲刷,该州结合了混凝土铺底防护和淹没槛防护方法对该桥桥墩进行了二次防护^[27]。

4 结 语

本文系统地论述和评价了抛石防护、扩大桥墩基础防护、混凝土铰链排防护、混凝土模袋防护、四角混凝土块防护、护圈防护、桥墩开缝防护、墩前排桩防护和淹没槛防护以及桥墩周围四面体透水框架群抛投防护等桥墩局部冲刷防护工程措施的防护机理、防护效果、防护优缺点和防护工程应用实例。近年来的桥梁基础设计中几乎都是采用把桥墩直接埋置到永久性基岩面以下深度的方法,但此种设计方法的工程造价很高,致使桥梁建设的整体性价比降低,而且桥墩周围冲刷坑深度较大时,坑内水流结构对桥墩整体稳定性的影响很大且很难预测,再说在某些复杂的地质条件下,永久性基岩面也不易确定。另外,桥墩基础施工过程中,施工围堰周围也会发生冲刷,其冲刷现象类似桥墩附近冲刷。所以对桥墩局部冲刷防护工程防护特性的研究仍是十分必要的。由于桥墩局部冲刷现象的复杂性和传统防护工程措施本身固有的局限性,至今还没有一个具有充分理论依据并被证明是完全有效的防护方法,因此,新型桥墩局

部冲刷防护措施及其与传统防护工程措施结合运用防护效果的研究就具有很重要的现实意义。

参考文献：

[1] BRICE J C ,BLODGETT J C. Countermeasures for hydraulic problems at bridge[R]. Washington D. C. :Federal Hwy. Administration ,1978.

[2] CHIEW Y M. Scour prediction at bridge piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,1992 ,118(9) :1260-1269.

[3] BONAUSOUNDAS M. Stromungsvorgang und Kolkproblem[R]. Munich :Technical Univ. of Munich ,1973.

[4] QUAZI M E ,PETERSON A W. A method for bridge pier riprap design[C]//First Canadian Hydraulics Conf. . Edmonton , Canada :University of Alberta ,1973 96-106.

[5] 陆浩. 抛石防护桥墩冲刷水力计算[J]. 泥沙研究 ,1993 (3) :46-52.

[6] RICHARDSON K J ,DAVIS ,S R. Evaluating scour at bridges [R]. Washington D. C. :Federal Hwy. Administration ,1993.

[7] LAURSEN E M ,TOCH A. Scour around bridge piers and abutment[R]. Iowa City ,Iowa :Iowa Highway Research Board , 1956.

[8] LIM F H. Riprap protection and failure mechanics at bridge piers pier[D]. Singapore :Nanyang Technological University , 1998.

[9] 刘宝山. 对桥墩基础抛石防护的水力计算及实践的几点认识[J]. 泥沙研究 ,1984(3) :54 - 63.

[10] PAROLA A C ,MAHAVADI S K ,BROWN B M ,et al. Effects of rectangular foundation geometry on local pier scour[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,1993 ,129(1) :35-40.

[11] 蒋焕章. 桥墩冲刷防护[J]. 公路 ,1994(8) :1-8.

[12] 赵殿英 ,田伟平. 桥墩局部冲刷的护坦减冲防护[J]. 西安公路交通大学学报 ,1998 ,18(4) :161-163.

[13] 周玉利 ,崔洪才. 桥墩局部冲刷护坦防护的试验研究 [J]. 西安公路交通大学学报 ,1999 ,19(7) :36-38.

[14] 王亚玲 ,孙建民. 桥梁墩台的护坦防护局部冲刷深度计算[J]. 长安大学学报 ,2004 ,24(6) :37-39.

[15] BREUSERS H N C ,RAUDKIVI A J. Scouring[M].

Rotterdam :A. A. Balema ,1991 28-33.

[16] FOTHERBY L M ,JONES J S. The influence of sedfootings on pier scour depths[C]//Hydraulic Engineering Conf. ,Reston : ASCE ,1993 922-927.

[17] BERTOLDI D. Tetrapods as a scour countermeasure[C]// Hydraulic Engineering Conference ,San Francisco :ASCE , 1993 :1385-1390.

[18] DARGAHI B. Controlling mechanism of local scouring[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,1990 ,116(10) :1197-1214.

[19] ODGAARD A J. Scour prevention at bridge piers[J]. Hydraulic Engineering ,1987 ,24(5) :523-527.

[20] KUMAR V ,RANGARAJU K G ,VITTAL N. Reduction of local scour around bridge piers using slot and collar[J]. J Hydraulic Engineering ,ASCE ,1999 ,125(12) :1302-1305.

[21] MELVILLE B W ,HADFIELD A C. Use of sacrificial piles as pier scour countermeasures [J]. Journal of Hydraulic Engineering ,1999 ,125(2) :1221-1224.

[22] CHOW K H ,OOI S K. Scour protection around a bridge pier [D]. Singapore :Nanyang Technological University ,1996.

[23] YEOH T. E. Scour protection at bridge piers using a dihedral plate[D]. Singapore :Nanyang Technological University ,1997.

[24] 房世龙 ,唐洪武. 透水框架布设形式对桥墩局部冲刷防护的影响[J]. 人民长江 ,2005 ,36(7) :63-65.

[25] POSEY C J. Test of scour protection at bridge pier[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,2004 ,130(12) :1173-1183.

[26] 郇仲焕. 新沂河桥的浅基防护[J]. 铁道建筑 ,1991(4) : 13-15.

[27] ITTY I P. Arizona state government bridge scour program [C]//Proceedings of the Second Inter-National Symposium on Scour and Erosion on River Sedimentation ,Singapore :ASCE , 2004 :1123-1132.

[28] CHANG F F M ,KARIM M. An experimental study of reducing scour around bridge piers using piles[R]. Pierre :Rep. ,South Dakota Dept. of Highways ,1972.

[29] PAICE C ,HEY R. The control and monitoring of local scour at bridge piers[C]//Hydr. Conf. . New York :ASCE ,1996 : 1061-1066.

(收稿日期 2006-04-18 编辑 熊水斌)

(上接第 83 页)

[20] 王光谦 ,刘家宏 ,李铁键. 黄河数字流域模型原理[J]. 应用基础与工程科学学报 ,2005 ,13(1) :1-8.

[21] JURGEN G ,LAWRENC W M. TOPAZ overview[R]. El Reno : USDA-ARS ,Graze lands Research Laboratory ,1999.

[22] 李纪人. 遥感和地理信息系统在分布式流域水文模型研制中的应用[J]. 水文 ,1997(3) :8-12.

[23] 尼葛洛庞蒂. 数字化生存[M]. 胡泳 ,译. 海口 :海南出版社 ,1996.

[24] 刘家宏 ,王光谦 ,李铁键. 黄河数字流域模型的建立和应用[J]. 水科学进展 ,2006 ,17(2) :186-195.

[25] 王浩 ,雷晓辉 ,秦大庸. 基于人类活动的流域产流模型构建[J]. 资源科学 ,2003 ,25(6) :14-18.

[26] ZALEWSKI M ,McCLAIN M. Ecohydrology :a list of scientific activities of IHP-V projects 2.3/2.4 ,Technical Documents in Hydrology ,No.21[R]. Paris :UNESCO ,1998 :1-2.

[27] 水利电力部水文局. 中国水资源评价[M]. 北京 :水利电力出版社 ,1987.

[28] 王浩 ,秦大庸 ,陈晓军. 水资源评价准则及其计算口径 [J]. 水利水电技术 ,2004 ,35(2) :1-4.

[29] 王浩 ,王建华 ,秦大庸. 流域水资源合理配置的研究进展与发展方向[J]. 水科学进展 ,2002 ,15(1) :123-128.

[30] 游进军 ,甘泓 ,王浩. 水资源配置模型研究现状与展望 [J]. 水资源与水工程学报 ,2005 ,16(3) :1-5.

[31] 王浩. 水资源配置系统. 中国资源百科全书 :水资源卷 [M]. 北京 :中国大百科全书出版社 ,1996.

(收稿日期 2006-10-08 编辑 熊水斌)