

关于混凝土四面体截流材料的探讨

蔡启龙¹,严毅²,刘锦碧²

(1.三峡大学土木水电学院,湖北 宜昌 443002;2.中国葛洲坝集团公司,湖北 宜昌 443002)

摘要 通过对比混凝土四面体与特大块石这两种截流材料的抗冲稳定性和施工的方便性,分析了混凝土四面体截流材料在工程应用中存在的问题。指出 ①混凝土四面体密度、综合稳定系数、化引球形粒径都偏小,在龙口的抗冲稳定性不如特大块石;②混凝土四面体制作麻烦,成本高,占地面积大,装运困难,抛投强度低,施工不如特大块石方便;③在截流施工中宜优先使用特大块石,慎用混凝土四面体。

关键词 截流材料 混凝土四面体 大块石料 抗冲稳定性 截流施工

中图分类号:TV855;TU528 文献标识码:B 文章编号:1006-7647(2006)06-0062-04

Discussion on tetrahedron concrete for river closure//CAI Qi-long¹, YAN Yi², LIU Jin-bi²(1. College of Civil & Hydroelectric Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. China Gezhouba Group Corporation, Yichang 443002, China)

Abstract: Some problems existing in practical application of tetrahedron concrete in river closure construction are analyzed through the comparison of its effect with that of oversize rock in stability of erosion control and convenience in construction. It is concluded that the stability of erosion control of tetrahedron concrete is inferior to that of oversize rock at the closure gap because the density and the stability coefficient of tetrahedron concrete as well as its size are relatively small, and that tetrahedron concrete is inconvenient in construction because of some difficulties in manufacturing, loading and transportation, high cost, large area to be occupied, and low dumping intensity. Therefore, in river closure construction, oversize rock is more suitable.

Key words: material for river closure; concrete tetrahedron; oversize rock material; stability of erosion control; river closure construction

在进行水利水电工程建设时,为了使水工建筑物能在干地上施工,需进行施工导流。在施工导流中必须采取工程措施将河道水流截断,把河水引至导流泄水建筑物下泄,以便展开主体建筑物的施工,这就是截流。

截流是水利水电工程建设重要的里程碑,它是一项紧张而复杂的工作,特别是在水深流急、软基河槽、流量及落差较大等条件下进行截流,则更是一项艰巨而繁重的任务。随着戗堤的进占,龙口宽度越来越窄,水流遭受急剧的约束,龙口流速和落差急剧增长,截流水力条件越来越困难。为了确保截流成功,在截流遇到困难的时候国内外工程中曾广泛采用混凝土块体作截流材料。混凝土块体主要有四面体、六面体(立方体)、四脚体及构架(见图 1),到底采用哪一种形式的混凝土块体更好,评价不一。我国使用最广泛的截流材料是混凝土四面体,在葛洲坝大江截流、三峡工程导流明渠截流等工程中都运用了这种形式的截流材料。本文主要对混凝土四面体进行探讨。

混凝土四面体在以往的工程截流中虽然发挥了重要的作用,但笔者认为,与大块石相比,用混凝土四面体作截流材料存在着一些问题,因此在现有施工技术水平 and 采用特大型施工机械进行施工的条件下,大量使用混凝土四面体作为截流材料并不是最佳选择。

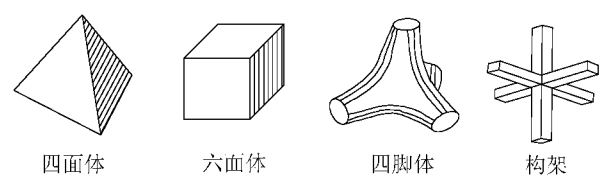


图 1 混凝土块体截流材料示意图

1 混凝土四面体的抗冲稳定问题

作为截流材料,最重要的是在入水后能迅速稳定下来,即使在动水的冲击下也不产生滑动和滚动,所以希望混凝土四面体能在龙口较高流速水流的作用下具有良好的抗冲稳定性。抛投材料的抗冲稳定性与抛投块体的密度、综合稳定系数和尺寸大小有

关。与大块石截流材料相比,混凝土四面体的密度低、综合稳定系数较小、化引球形粒径相对偏小,其在龙口的抗冲稳定性不是太好,而块石料的抗冲稳定性能优于混凝土四面体。

1.1 密度的影响

能反映截流材料稳定性的是其极限抗冲流速,在截流水力计算中,无论是立堵还是平堵,国内外广泛采用的截流材料的稳定计算式是伊兹巴什公式:

$$v = k\sqrt{2g\frac{\rho_s - \rho}{\rho}d}$$

式中: v 为截流材料的极限抗冲流速; d 为截流材料化引为球体时的化引直径; ρ_s 为截流材料的密度; ρ 为水的密度; g 为重力加速度; k 为综合稳定系数。

从伊兹巴什公式可以看出,若其他情况完全相同,截流材料的密度对其稳定是有较大影响的。材料密度越大,极限抗冲流速越高,稳定性越好。混凝土四面体内除了吊钩钢筋外,一般是不配筋的,基本上是素混凝土,其密度约为 2400 kg/m^3 ,而块石料的密度在 $2500\sim 3300\text{ kg/m}^3$ 之间,比混凝土的密度大。

假设现有形状和尺寸完全相同的混凝土四面体和块石,取混凝土的密度 $\rho_{\text{混凝土}} = 2400\text{ kg/m}^3$,块石的密度 $\rho_{\text{石}} = 3000\text{ kg/m}^3$,先不考虑其他因素而仅考虑密度影响的情况下,根据伊兹巴什公式可以计算得

$$\frac{v_{\text{石}}}{v_{\text{混凝土}}} = 1.20$$

从计算结果可以看出,与混凝土四面体形状和尺寸相同的大块石因为密度的影响,极限抗冲流速比混凝土四面体的高了 20% ,表明块石料的抗冲稳定性高于混凝土四面体。

如果需要抵抗的极限抗冲流速相同,同样根据伊兹巴什公式,有

$$k\sqrt{2g\frac{\rho_{\text{石}} - \rho}{\rho}d_{\text{石}}} = k\sqrt{2g\frac{\rho_{\text{混凝土}} - \rho}{\rho}d_{\text{混凝土}}}$$

所以
$$\frac{d_{\text{混凝土}}}{d_{\text{石}}} = 1.43$$

$$\frac{V_{\text{混凝土}}}{V_{\text{石}}} = 2.92$$

$$\frac{W_{\text{混凝土}}}{W_{\text{石}}} = 2.34$$

式中: $d_{\text{混凝土}}$ 和 $d_{\text{石}}$ 分别为混凝土四面体和块石化引为球体时的化引直径; $V_{\text{混凝土}}$ 和 $V_{\text{石}}$ 分别为混凝土四面体和块石的体积; $W_{\text{混凝土}}$ 和 $W_{\text{石}}$ 分别为混凝土四面体和块石的质量。

混凝土四面体化引为球体时的化引直径为块石化引为球体时化引直径的 1.43 倍,要抵抗相同的流速,混凝土四面体体积为块石体积的 2.92 倍,质量

是块石的 2.34 倍。也就是说,在不考虑其他因素而仅考虑密度的影响,密度为 3000 kg/m^3 的 8.5 t 块石与 20 t 的混凝土四面体稳定性是相同的。换句话说,由于密度的影响,要在相同的流速下稳定,混凝土四面体的质量要远远大于块石的质量。

模型试验表明,在三峡工程导流明渠截流最困难的时段, 20 t 的混凝土四面体也会被冲走。工程中为了增加混凝土四面体的稳定性,预制了 52 块加铁四面体,即在体积为 8 m^3 的四面体中加入 11.5 t 钢材,使其质量达到 30 t ,其目的就是增加四面体的密度,使密度达到 3250 kg/m^3 ,从而大大增强其抗冲性能,使其在关键时刻发挥作用。这也从一个侧面说明了混凝土材料的密度偏低,不利于混凝土四面体在水中的稳定。

1.2 综合稳定系数

根据伊兹巴什公式可知,材料的 k 值越高则其抗冲流速就越高。 k 值主要与截流材料的形状及其所处的边界条件有关。

以目前实际工程中广泛采用的立堵截流为例,截流材料的 k 值,根据试验研究,伊兹巴什等人建议对一般块石材料取 $k = 0.9$ 。我国的有些研究者建议对于一般块石,平底抗滑时取 $k = 0.9$;边坡上裹头块石稳定时取 $k = 1.02$ 。而对于混凝土四面体在平底河床上的稳定,在河床糙率 $n \leq 0.03$ 时, $k = 0.50\sim 0.53$;当 $n > 0.035$ 时, $k = 0.68\sim 0.71$ ^[1]。混凝土四面体的 k 值比一般的块石材料低。

而文献[2-3]认为: k 值应考虑戗堤端头坡度、河床底面糙度、块石、混凝土四面体块及单体、串体的影响。根据几个工程截流的实际经验验算,块石的抗冲综合稳定系数 k 值在设计中立堵采用 0.7 左右,平堵采用 0.9 左右。由于对混凝土四面体的稳定系数 k 尚缺乏系统的研究,根据葛洲坝工程的部分试验资料整理得到的 k 值不是常数,而是随岩面糙率及块体高度 t 与水深 h 之比在 $0.6\sim 0.8$ 范围内变化。串体的稳定情况比单体复杂得多,除了相串的单体因素外,还取决于串联方式和每个块体入水后在不均匀流场中的位置,以及不等重块体的排列顺序等因素。串体的稳定系数 k 可参照表1的试验资料选用。从表中可以看出无论是单块还是串体,大块石料的稳定系数 k 要稍高一些。

表1 单块及等质量串体的稳定系数 k 值

块体种类	单个块体	2个一串	3个一串	4个一串
混凝土四面体	0.70	0.73	0.77	0.81
大块石	0.72	0.76	0.79	≥ 0.81

无论是块体还是串体,通常都是按单个材料去研究截流材料的稳定系数,而群体抛投石料的稳定

系数 k 由于群体的相互干涉效应、群体的相互遮蔽作用及球体层在动水中的孔隙率等等因素的影响,与单个石块的稳定系数 k 是不同的。试验成果和理论分析结果表明 抛投单个石块 $k = 0.89$, 群体抛投混合料 $k = 0.93$, 群体抛投均匀石块 $k = 1.07^{[4]}$ 。实际截流中,除了混凝土四面体是单个抛投的,块石料往往是一车一车地群体抛投,群体抛投的不论是均匀料还是混合料其稳定系数 k 都比单块抛投时的大,群体抛投的块石 k 值要比单个抛投的混凝土四面体的大。

总之,与块石相比,混凝土四面体的 k 值要小些,其在截流中的稳定性能不如块石好,密度也较低,抵抗同一流速的计算质量比块石的大好几倍,体积和质量巨大的混凝土四面体在龙口的稳定性不如体积和质量都小得多的块石。例如前苏联布拉茨克工程截流时试抛 15 t 的混凝土四面体都站不稳,但抛 6 ~ 10 t 左右的密度为 3 000 kg/m³ 的辉岩块石就稳定了^[1]。这说明在一些截流工程中被当作重要“武器”的混凝土四面体虽然看起来非常巨大,但其实际威力并不大。

1.3 材料的化引直径

伊兹巴什公式中,材料粒径采用的是其化引为球形时的化引直径 d 。对于边长为 a 的立方体,化引成球形时的直径 $d = 1.24a$; 边长为 a, b, c 的长方体 $d = 1.24 \sqrt[3]{abc}$; 边长为 a 的四面体 $d = 0.61a$ 。如果采用边长相同的截流材料,四面体化引成球形时的直径只有立方体化引成球形时直径的 49%。而要使两者化引成球形时的直径 d 相同,则四面体的边长将是立方体边长的 2.03 倍。

用混凝土四面体作截流材料,主要是因为混凝土材料的块体可以预制成设计要求的大小,一般都预制成正四面体,质量有 10 t, 15 t, 20 t 等规格。如三峡工程导流明渠截流就准备了 1 400 多块边长为 4.14 m、体积达 8.2 m³、质量达 20 t 的混凝土正四面体。虽然单块混凝土四面体尺寸可以做得较大,但其化引成球形时的直径并不大,通过加大尺寸来增加其抗冲稳定性的效果并不明显。而实际工程中的大块石多是接近球体、正方体或长方体的,很少有四面体形状的块石,其化引成球形的直径也较大,因此抗冲流速大、稳定性好。

2 混凝土四面体的施工问题

在截流施工过程中,为了最大限度地减小截流材料流失量,必须高强度地进行抛投,若采用混凝土四面体为截流材料,不仅混凝土四面体的制作、装运比较麻烦,而且往往会大大降低抛投强度。从施工的角度来考虑,块石料要优于混凝土四面体。

2.1 制作与堆存

混凝土四面体必须进行预制,施工工序繁多。首先要进行砂石骨料的加工,然后进行混凝土的拌制。如果永久拌和系统没有形成,则要增加临时拌和系统。最后在预制场地安装完模板并加固好,混凝土通过搅拌运输车运到现场,由吊车和料罐转运至仓内,用插入式振动棒振捣密实。达到一定强度后方能拆模,养护一段时间达到必要的强度后才能使用。混凝土四面体的预制速度慢,工期长,施工繁琐。

如果采用特大块石材料,可以利用工程开挖料中的大块石,如三峡导流明渠截流的全部特大块石料都来自基坑开挖。如果不够,可专门开挖特大块石备料,采用成型爆破技术,一般可获得足够的大块石料,这样施工强度高,工期较短,钻爆施工相对简便。特大块石的成本比混凝土四面体要低,单位体积的块石料成本一般只有混凝土四面体的 1/10 左右,从经济的角度来看用特大块石代替混凝土四面体可以降低截流工程的造价。

因为混凝土四面体不方便多层叠放,只能一块一块地单层存放,预制和堆存需要占用大量场地,且预制场往往离截流戗堤较远,截流前还要进行转运。例如,三峡导流明渠截流时,预制了 52 块加铁四面体,预制场的占地面积约 5 000 m²,早已准备好的 1 400 块混凝土四面体开始存放在下游 5 号和 6 号料场,占地面积 13.9 万 m²。截流前全部转运至临近上游戗堤的 7 号料场,占地面积约 1.5 万 m²,平均每平方米才存放 0.77 m³ 的截流材料。而大块石可以方便地堆高 8 ~ 10 m,如 13 号特大石料场占地 0.9 万 m²,可以堆存 6 万 m³ 的特大石料,平均每平方米可存放 6.67 m³ 的截流材料,是前者的 8.7 倍。截流工程需要储备足够的截流材料,备料量往往非常巨大,相对于块石料场,混凝土四面体料场使用效率低,需要占用更大的场地。此外,截流完成后如果截流材料还有剩余,大块石料可以方便地用于围堰填筑,混凝土四面体处理起来则麻烦得多。

无论是材料的制作还是存放,混凝土四面体材料需要耗用大量的资源,成本高。大块石则具有明显的优势,截流材料最好选用这种当地的自然材料,只有在缺乏特大型施工机械或由于地质因素造成大块石获得率很低的情况下才考虑使用混凝土四面体。

2.2 材料的装运

混凝土四面体由于体积庞大,无法用正铲或装载机挖掘设备装车,必须采用起吊设备进行吊装,其装车速度和效率大大降低。

笔者在三峡导流明渠截流中曾经尝试用 CAT992 装载机装运 20 t 的混凝土四面体,其额定斗容为 10.3 m³,从理论上讲装载 8.2 m³ 的混凝土四面

体是没有问题的。但其重心低,易滑动而不易滚动,装载机操作手费了九牛二虎之力都无法把它装进斗里,只得用吊车进行吊装。吊装的效率要比装载机的效率低得多。用 CAT992 装载土石料,装满 1 辆 77 t 的 CAT777 自卸汽车的时间为 3 ~ 5 min。笔者统计过用 40 t 汽车吊给 1 辆 CAT777 自卸汽车吊装 2 块 20 t 的四面体,所用时间是装载机装载土石料的 10 倍左右。这是因为每吊装 1 块料,先要搭梯子爬到四面体顶部穿钢丝绳、挂吊钩。吊到车厢后,还要把梯子搬到车厢里解钢丝绳、摘钩。需要 3 位工人配合工作,效率非常低,且要在 4 ~ 5 m 高的车顶爬上爬下,不安全。

四面体常常采用自卸汽车运输,由于其形状不规则、边长较大,运输非常不便,自卸汽车的容量利用率非常低。例如实际工程中都是采用 32 t 的自卸汽车运 1 块 20 t 的四面体,或者用 77 t、85 t 的自卸汽车运 2 块 20 t 的四面体,只能达到额定装载量的 60% 左右。四面体的装运效率低下,为了保证龙口四面体的抛投强度,只有增加吊装和运输设备的数量。

目前水利水电工程中已广泛使用特大型施工机械,截流施工中大多采用大容量的挖掘机、装载机和自卸汽车。在 20 世纪五六十年代,装运 10 ~ 15 t 的大块石料是比较困难的。现在有了 9.6 m³ 的德马克 H135 正铲、10.3 m³ 的装载机、77 t 和 85 t 的自卸汽车,这些设备可以非常方便地装运 10 ~ 15 t 的大块石料,装运强度和装运效率远远高于吊车装运混凝土四面体,从而保证了龙口抛投材料的供应。

此外,当围堰完成使命需要拆除时,混凝土四面体所在的戗堤部位往往在水下挖除。以现有的施工设备,水下开挖块体质量为 20 t 的混凝土四面体相当困难,所以三峡导流明渠截流只是在不需要拆除的三期上游土石围堰戗堤上使用混凝土四面体,需要拆除的三期下游土石围堰戗堤就没有使用。特大块石水下开挖只是困难些,可以在需要拆除的围堰戗堤上使用。从围堰拆除的角度来考虑,应尽量不用混凝土四面体。

2.3 抛投施工

混凝土四面体块体大,自卸汽车在抛投时车斗里只有 1 ~ 2 块四面体,举斗卸料时车体跳动比较大,直接卸料抛投风险也大,故多采用堤头集料、推土机赶料的形式进行抛投。大块石料中往往混有较小的石块或石碴,卸料时车体跳动情况要好一些,可以更多地采用直接卸料抛投的形式。根据三峡大江截流资料,截流抛投材料按堤头集料、推土机赶料占 1/3,汽车直接抛填占 2/3,截流戗堤实际能达到的卸车密度为 2.09 车/min,堤头集料和直接卸料各占

1/2 时,实际能达到的卸车密度为 1.91 车/min。全部按堤头集料、推土机赶料的方式时,实际能达到的卸车密度只有 1.25 车/min^[5]。可见尽量用自卸汽车直接卸料,可以大大提高抛投强度,混凝土四面体的卸料形式不利于高强度的抛投。

采用堤头集料、推土机赶料的形式,四面体由于边长尺寸大,推土机推送比较困难,特别是同时推送数块质量达 20 t 的混凝土四面体,效率非常低。混凝土四面体重心低,不容易滚动,即使用推土机推入水中,四面体往往聚集在戗堤边坡的上部,用不了多长时间,四面体就会露出水面,与后面推入的四面体互相嵌在一起,推土机推送就更困难了。这样推土机不得不花较长的时间赶料,降低了截流的抛投强度。此外,大量混凝土四面体聚集在戗堤边坡的上部,增大了堤头坍塌的风险,对安全不利。大块石用推土机推送起来则容易得多,且容易直接滚落到戗堤底部。

由于以上原因,在截流中抛投混凝土四面体会降低抛投强度。截流施工中为了减少截流材料的流失,往往不惜代价,集中一切资源保证高强度抛投,所以大量使用混凝土四面体而导致抛投强度降低是得不偿失的。

3 结 语

混凝土四面体这种人工截流材料由于自身的原因,其抗冲稳定性能不是太好,尺寸和质量都小得多的特大块石完全可以达到同样的效果;从施工的角度讲,混凝土四面体的制作、堆存、装运和抛投等方面存在诸多问题,造成混凝土四面体成本高,给截流施工带来诸多不便,影响了截流施工的力度。若采用特大块石则不存在这些问题。在现有施工技术水平和采用特大型施工机械进行施工的条件下,截流施工中不宜大量采用混凝土四面体作为截流材料,而应更多地考虑使用特大块石。

参考文献:

- [1] 肖焕雄. 施工导流工程 [M]. 北京:水利电力出版社, 1985.
- [2] 郑守仁,王世华,夏仲平,等. 导流截流及围堰工程 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2005.
- [3] 陈忠儒,陈义武,陈义东. 高落差截流简述 [J]. 人民长江, 2003, 34(11): 43-45.
- [4] 肖焕雄. 施工导截流与围堰工程研究 [M]. 北京:中国电力出版社, 2002.
- [5] 蒋养成,周厚贵,孙志禹. 长江三峡大江截流工程 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 1999.

(收稿日期:2006-03-17 编辑:高建群)