

碾压混凝土筑坝的抗剪特性研究

彭 明 李 敏

(重庆涪陵石板水电站工程指挥部, 重庆涪陵, 408000)

摘 要 根据坝体碾压混凝土芯样作室内试验得出的物理力学性能指标, 经整理得出相关关系, 进而提出了供工程选用的层间接触面抗滑稳定计算中抗剪参数 f 、 c 。

关键词 碾压混凝土 弹性波速度 碾压混凝土层间结合面 抗剪断强度

1 前 言

碾压混凝土是 70 年代初发展起来的一项混凝土施工新技术, 由于它具有浇筑方法简单、施工速度快、水泥用量少、造价比常规混凝土低、温控要求低等诸多优点, 因而, 常用于大体积混凝土筑坝技术。

我国近 20 年来已建成铜街子、坑口、岩滩、观音阁、普定、石板水等 20 余座碾压混凝土坝, 取得了许多经验。目前在建的沙牌电站坝高 135 m, 居全国之首, 拟建项目如官地水电站拟采用碾压混凝土筑坝技术。用这种形式的筑坝技术目前发展迅速, 筑坝高度越来越高, 运用范围也越来越广, 形势喜人。但是作为一项新技术, 仍有它的不足之处, 尚待我们去认识和研究的, 诸如: 施工工艺与质量控制, 特别是施工过程中, 对最大骨料粒径和骨料级配以及混凝土配合比的控制、碾压层厚度、层间浇筑时间间隔的控制、层间浇筑垫层拌合物的必要性及其结合问题, 以及抗渗与防渗的处理等等, 都需待进一步研究和解决, 以求得碾压混凝土筑坝技术进一步完善和发展。

本文根据石板水电站坝体碾压混凝土芯样室内试验取得的成果, 加以整理, 得出一些规律性的东西, 供探讨。

2 试验概况

石板水电站位于重庆市丰都县境内的龙河中游, 最大坝高 84.1 m, 库容 1.05 亿 m^3 , 装机 4 台共 11.5 万 kW, 目前是重庆市最大的水力发电站。

2.1 试验条件

根据坝工设计计算及坝体稳定评价所需要运用的碾压混凝土相关参数的要求进行测试。实施办法: 在已建成的坝体上钻孔取芯 $\phi 15$ cm 的试样进行室

内试验。试验按照水利水电规程《水工碾压混凝土试验规程 SL 48-94》有关规定进行室内试验, 抗剪强度试验则由于当前混凝土试验规程尚未列入, 因而, 参照岩石试验规程《DLJ204-81 中 G306-81》执行。

2.2 试验成果

2.2.1 密度与波速

如图 1 所示, 200 余个试样测试结果, 密度在 $(2.27 \sim 2.48) g/cm^3$ 之间, 但绝大多数在 $2.40 g/cm^3$ 左右, 波速在 $(2.07 \sim 4.65) km/s$, 但绝大多数在 $3.5 km/s$ 以上且一般情况下成正增长。其中个别试件干密度为 $2.30 g/cm^3$, 波速为 $2.07 km/s$, 这表明试件内部结构可能存在问题, 因为钻孔取样很难避免芯样扭损等问题, 或者上坝混凝土骨料不匀。而在同样条件下成型的混凝土密度, 有的为 $2.26 g/m^3$, 其波速可达 $3.88 km/s$ 或更高一些, 就说明了结构和介质是影响波速传递的重要因素。

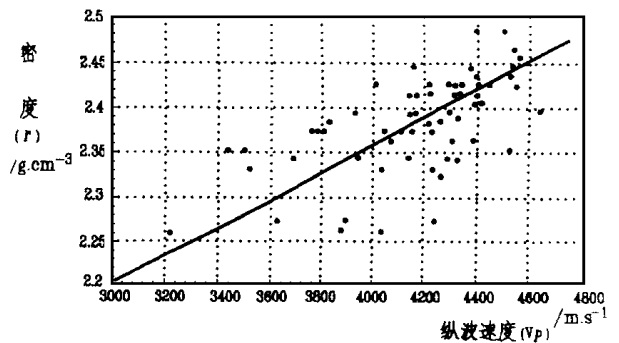


图 1 密度——弹性波速度关系图

2.2.2 单轴抗压强度与波速

如图 2 所示, 单轴抗压强度随波速的变化, 在波

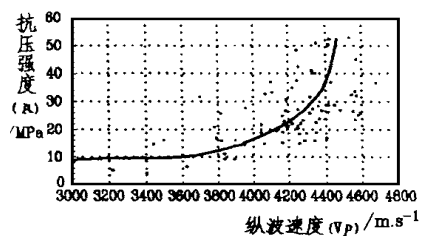


图 2 抗压强度——弹性波速度图

速为(3.20~3.80) km/s 时强度为 10 MPa 左右, 变幅较小。当波速达 4.00 km/s 时则强度迅速提高, 但当波速增长到 4.40 km/s 以后, 强度虽有提高, 但波速则趋近于一个常数。

2.2.3 弹性模量与波速

影响芯样变形的因素, 除与上述强度因素相似, 即与结构、组成材料性质直接有关外, 还受控于测试方法、环境等因素。因而其变化比较复杂, 见图 3。

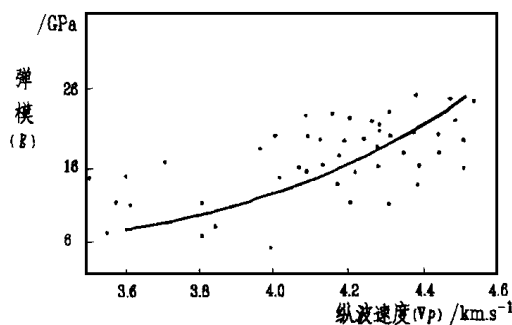


图 3 弹性模量——弹性波速度图

2.2.4 密度与剪断系数

剪切(断)系数是相同性质的物体遭受外力作用, 产生剪切破坏, 经计算得出的。剪切系数与密度之间的关系, 应该具有较好的规律性。但作为碾压混凝土在材料性质, 如组成物质成份、总体结构状况、压实功能等方面应该说具有其均匀的一面。但混凝土的运输、上坝铺筑、骨料选用及配合比等因素的影响也是存在的。更何况剪切破坏还受施加的法向荷重的影响, 一般情况下, 随荷重增加而增大, 故两者关系不十分明显。120 余个剪切系数值不尽相同, 其范围大致在 1.81~4.0 之间。

2.2.5 弹性模量与单轴抗压强度

弹性模量与单轴抗压强度测值, 其相关关系比较明显, 反映出抗压强度增高其弹性模量也随之增高这一规律, 见图 4。

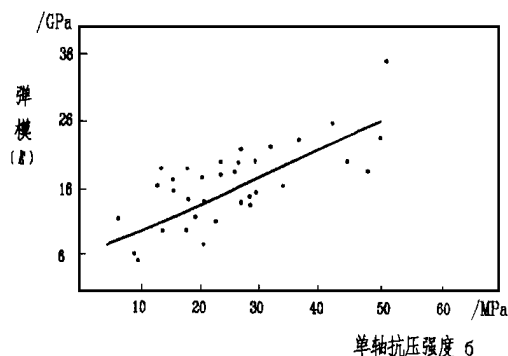


图 4 弹性模量——单轴抗压强度图

2.2.6 层内层间抗剪强度

抗剪(断)强度成果值列于表 1。

表 1 抗剪(断)强度成果值表

| | 抗剪断强度 /MPa | | 抗剪强度 /MPa | |
|----|------------|------|-----------|------|
| | f | c | f | c |
| 1 | 1.14 | 1.88 | 0.74 | 0.32 |
| 2 | 1.00 | 2.16 | 0.89 | 0.16 |
| 3 | 1.21 | 1.82 | 0.95 | 0.10 |
| 4 | 1.16 | 2.32 | 0.86 | 0.36 |
| 5 | 1.47 | 2.42 | 0.99 | 0.22 |
| 6 | 1.33 | 2.22 | 1.06 | 0.42 |
| 7 | 1.24 | 2.50 | 0.94 | 0.36 |
| 8 | 1.14 | 2.26 | 0.91 | 0.32 |
| 9 | 1.18 | 2.44 | 0.95 | 0.23 |
| 10 | 1.27 | 2.56 | 0.88 | 0.20 |
| 11 | 1.30 | 2.32 | 0.92 | 0.36 |
| 12 | 1.01 | 2.14 | 0.77 | 0.44 |
| 13 | 1.31 | 2.04 | 0.75 | 0.78 |
| 14 | 1.35 | 1.82 | 0.82 | 0.15 |
| 15 | 1.45 | 2.45 | 0.95 | 0.35 |
| 16 | 1.40 | 2.65 | 0.78 | 0.35 |
| 17 | 1.42 | 1.90 | 0.90 | 0.26 |
| 18 | 1.05 | 2.15 | 0.70 | 0.07 |
| 19 | 1.34 | 1.85 | 0.85 | 0.40 |
| 20 | 1.30 | 1.92 | 0.71 | 0.13 |

3 关于抗剪强度的采用

3.1 两种筑坝方式抗剪强度的力学分析

碾压混凝土筑坝施工与常态混凝土筑坝不同, 一般情况下就重力坝而言, 常态混凝土的抗剪强度较高, 坝的稳定主要取决于坝基接触面或地基的深层滑动。石板水电站为碾压混凝土重力坝, 故其抗滑稳定问题应该考虑的因素, 除坝基接触面或基础深层滑动外, 由于施工工作面大, 加之层面又多, 施工过程中很难避免突然出现一些意想不到的问题, 而这些问题又没有引起足够重视。或者出于自然环境的限制或其他因素的影响, 碾压过程中产生的大量的水平接触缝没有得到及时的或必要的处理。无疑, 这些缝的存在将会在大体积混凝土中产生潜在的软弱面, 在坝工设计计算和坝体稳定评价中, 必需知道这些层间缝的抗剪参数。另外, 本次试验还安排了一定数量的层内抗剪强度试验, 以便对各个坝段进行较全面的复核。

3.2 抗剪试验成果

本次试验共进行了层间、层内抗剪(断)强度试验 20 组, 计 100 余个芯样试件的强度值, 初步可得出以下看法:

(1) 芯样抗剪(断)强度中的摩擦系数变化幅度小, 而凝聚力则波动大, 同时, 从对试件剪断面的观察及测值分析, 可以看出碾压混凝土的抗剪(断)强度, 层内大于层间, 这与其它许多碾压混凝土工程一

样,反映出的规律一致。作为碾压混凝土筑坝技术,提高碾压混凝土层间结合强度,是保证坝体抗滑稳定安全的关键所在。

(2)层内与层间两者抗剪(断)强度值,总体而言相差不大,因此,可以认为碾压混凝土层间结合还是比较好的。但如果把不同坝段,或同一坝段不同高程地方的实测资料,分组进行组合计算,则抗剪(断)强度值出现了差别,如4坝段 $\tau = 1.21\sigma + 1.82$ (MPa),而5坝段 $\tau = 1.47\sigma + 2.4$ (MPa)。另外,虽然同样是5坝段的芯样,但由于高程不同而出现的差别,在413.484~425.787m范围内取样测试得出的 $\tau = 1.16\sigma + 2.32$ (MPa),而在423.484~440.484m高程范围采取的芯样测定的 $\tau = 1.47\sigma + 2.42$ (MPa)。出现这一现象,很可能与碾压混凝土的配合比(骨料方面)、层间铺面的处理及水泥砂浆强度、不同时期采用的碾压设备及工艺等有关。

(3)抗剪(摩擦)试验成果,无论是取自层内或层间试样,剪断后再行复位重作摩擦试验,或者将沿层间接触缝已经断裂开的试样,使其重合并把它们整合好再行试验,求得的摩擦系数在一般情况下($f = 0.8$ 左右)变化幅度不太大。但与上述情况雷同,试验成果值与坝段和高程有关,特别是接触层间上、下面相当平整且接触面皆系水泥砂浆时,摩擦系数较之其他各测试组的小。为此,曾采用一个断开的试体,将其复位并在不同法向力条件下,进行单点法摩擦试验测试,结果是摩擦系数只有0.65, $c = 0.33$ MPa。

3.3 试验成果用于碾压混凝土层间抗剪计算问题的探讨

在碾压混凝土坝施工中,由于坝体施工采取碾压填筑的方式成型,从而存在大量的水平层间接触缝,这些缝是大体积混凝土中出现的薄弱面。设计计算碾压混凝土层间抗剪稳定问题,目前国内仍然采用混凝土与岩体接触坝基抗滑稳定计算式,即

$$K = \frac{fW + cA}{P}$$

式中 K —— 抗剪断强度安全系数;

f —— 抗剪断摩擦系数;

c —— 单位抗剪断凝聚力;

A —— 滑动面的面积;

W —— 作用于坝体上全部荷载对滑动平面的法向分力;

P —— 作用于坝体上全部荷载对滑动平面的切向分力。

上式值得研究的是,碾压混凝土层间抗剪与坝基接触面抗剪特性是有区别的,作为坝基接触面是混凝土与岩体之间的抗剪,即混凝土与岩体在外力作用下,混凝土与岩体接触带之间所具有的抵抗剪切的能力,属于两种不同性质介质结合面抗剪问题,而碾压混凝土层间接触面的抗剪,是混凝土上、下两个碾压层接触面在外力作用下,接触面之间具有的抗剪切的能力,属于同一介质结合面的抗剪。形式上两者的作用都是承担抵抗外力,但由于构成联合承担抗力结合体的物质成份(接触层面介质)不同,所产生的抗力的条件、结果及其破坏机制则大不一样。碾压混凝土由于水泥用量少且较干硬,在运输或卸料以及平仓过程中,有可能会产生骨料的分离,为此导致沿层厚实度的差异和不均匀性,由于结构的非均匀性而产生强度的离散性。可是,碾压混凝土又是根据人为设计与施工成型来控制其物质成份及结构的,所以,其接触层面既为同一介质而结构又可以认为无显著差异。因此,碾压混凝土,特别是针对混凝土与岩体接触层面而言,可以说还是比较均匀的。因为地质条件变化复杂,如存在的软弱夹层,其展布、规模、充填物质及其成份、性状、水理性质和岩性的变化,在同一岩性条件下岩体结构差异也是十分明显的,如节理裂隙的发育程度、频率、大小、长短、张开度、走向组合等因素是随工程地质单元而变化的,这是碾压混凝土所不具备的。另外,混凝土与工程岩体和混凝土与混凝土,它们对混凝土温度应力的约束也是不同的。如果再考虑到坝基滑动不是沿着混凝土与岩体接触面,而是沿着岩体浅层或深层滑动,则两者边界条件及胶着性质就截然回异,抗剪强度的变幅显然会大不一样。所以,坝基抗滑稳定计算考虑采用的综合安全系数,就要比碾压混凝土层间抗滑稳定计算的因素更多,以弥补复杂因素之不足。目前,层间的抗滑稳定计算采用坝基的稳定计算式,实际上是没有反映碾压混凝土层间的抗剪特性的。表现不合理的方面在公式运用时,都以摩擦系数乘以坝体总荷载以及凝聚力乘以坝基总面积,再分别比上总的水平推力,而两者的安全系数抗剪断值都取3.0,并没有反映出稳定性好的应该安全系数小,稳定性差的安全系数高的特点。如果对稳定性好的摩擦系数采用较小的安全系数,凝聚力采用大一些的安全系数,对坝体进行稳定安全校核,就有可能得出既保证了安全又较理想的结果。国内一些碾压混凝土坝和本次试验成果,都反映出碾压混凝土层间抗剪(断)摩擦系数变化范围较小,经过二滩、铜街子、官地等几个工程统计得出,抗剪断强度在一般情

况下,摩擦系数为 1.17~1.4,凝聚力为 1.0~2.5 MPa 之间。本次试验摩擦系数为 1.01~1.47,凝聚力为 1.82~2.65 MPa,相比之下略显得高了一点。碾压混凝土抗剪摩擦系数稳定性好的特点,不论是层面结合很好的,或是剪断后复位重复再剪切,其摩擦系数变化都有限,抗剪断的摩擦系数比抗剪摩擦系数值约大 15%~25% 左右。但本次试验由于情况较复杂,摩擦系数变化幅度较大一些,可是在一般抗剪断的摩擦系数值都大于 1.0 这一点上又是相似

的,这对坝体的抗滑稳定来说,是非常有利的。也就是说,假定在层间无粘结的情况下,依靠摩擦来稳定,也具有一定的安全度。而层间的粘结力更为其稳定性增大了安全度。

作者简介

彭明 男 重庆涪陵石板水电站施工处副处长 石板水电站工程监理办公室主任 工程师

李敏 男 重庆市涪陵石板水工程指挥部大坝标长 高级工程师

(收稿日期:1998-12-28)

(上接第 27 页)

表 7 碾压混凝土芯样物理力学性能试验成果表

| 坝段 | 孔号 | 芯样编号 | 密度 r /g·cm ⁻³ | 弹模 E /GPa | 强度 R /MPa | 弹强比 |
|----|-----|------|-------------------------------|----------------|----------------|-----|
| 三 | 3-2 | F | 2.36 | 19.17 | 24.00 | 799 |
| 四 | 4-2 | E | 2.39 | 18.93 | 22.80 | 830 |
| 四 | 4-2 | E | 2.43 | 20.00 | 26.47 | 756 |
| 五 | 5-2 | C | 2.43 | 22.77 | 40.73 | 559 |
| 五 | 5-2 | D | 2.41 | 19.87 | 22.90 | 868 |
| 六 | 6-2 | G | 2.36 | 18.80 | 36.10 | 521 |
| 六 | 6-2 | G | 2.35 | 22.63 | 38.10 | 594 |
| 八 | 8-2 | N | 2.42 | 18.30 | 23.10 | 792 |

性较好,含粗骨料多且分布较均匀者,密度能够达到 2.40 g/m³ 以上,满足设计密度要求。

(2) 碾压混凝土弹模量一般在 19.0~22.8 之间,通常密度较大的芯样,弹性模量值较大,与碾压混凝土性能试验成果基本吻合。

(3) 弹强比在 600~830 之间,比灰岩骨料碾压混凝土弹强比减少约 50%,与碾压混凝土性能试验成果基本一致。

5 混凝土中粗骨料优化效益

石板水电站碾压混凝土重力坝初步设计坝体混凝土及碾压混凝土总方量为 57 万 m³,其中碾压混凝土占 80%。初步设计阶段,碾压混凝土骨料在距大坝约 17 km 外的茶园料场开采,开采和加工强度高、运输强度大,给山区公路带来很大压力,初步设计坝体最高月浇筑强度 3.8 万 m³,相应的骨料加工和运输至少在 3 万 m³ 以上。为降低工程投资,减轻茶园料场开采加工和龙河至茶园公路的运输压力,提出开采左岸砂岩作为混凝土及碾压混凝土粗骨

料。经试验分析,该料场原岩品质和储量完全能满足混凝土及碾压混凝土对粗骨料质量的要求。经测算,在开采、加工、场内运输、贮存等条件相同情况下,减少运输距离 17 km。整个坝体若用粗骨料 50 万 m³,每 m³ 运价 25 元,仅此项可节省投资 1 250 万元。

6 结 语

(1) 由于碾压混凝土一般为大体积混凝土,根据坝体不同部位对混凝土强度要求有所不同,因此,对粗骨料的选择是只要能达到力学指标即可。试验证明,岩石强度一般在 40~100 MPa 即可应用;石板水电站采用砂岩代替灰岩作粗骨料后,节省投资近千万元,效益十分可观。

(2) 碾压混凝土骨料的选择,应进行综合比较分析,在技术上可行、经济上合理的条件下,宜优先选择靠近建筑物附近的料场。有利于减少机械设备的投入,降低工程造价。

(3) 石板水电站采用砂岩作粗骨料,使 100 号碾压混凝土的弹性模量只有 15.5 GPa,弹强比只有 844,极限拉伸值大于 0.85 × 10⁻⁴,比灰岩作骨料配制的碾压混凝土弹性模量降低约 50%,极限拉伸值提高 30%,其它工程的试验也证明了这一点。说明采用适宜的岩石也能提高碾压混凝土的抗裂性。

作者简介

彭明 男 重庆涪陵石板水电站施工处副处长 石板水电站工程监理办公室主任 工程师

(收稿日期:1998-12-28)

省学会科普工作委员会举行年会

1999 年 2 月 2 日,四川省水力发电工程学会科普工作委员会在成都水电校召开 1998 年年会。出席会议的有省学会领导和科普工委在蓉的委员 10 余人。袁辅中主任委员主持了会议。省学会副理事长兼秘书长樊天龙首先致辞并讲话,肯定了科普工委 1998 年所做的工作(成功地完成了夏令营和《水电明珠》的编写工作),为科普工委 1999 年的工作提出了建议。学会理事长、电力局马怀新副局长在百忙之中到会并讲话,提出了对科普工委工作的希望和建议,期望科普工作委员会的工作更上一层楼,并预祝大家新年快乐。接着,袁辅中主任委员向与会代表介绍了工委 1998 年开展的工作以及 1999 年的工作计划安排,并交与会代表讨论,袁辅中主委还向与会代表传达了刚刚结束的省学会常务理事会议精神。代表们对袁主委提出的计划安排进行了研讨。在完成了预定的议程后会议圆满结束。

本刊记者 李燕辉