水力冲填粉煤灰坝施工固结特性分析

张爱军^{1,2},骆亚生²,李

(1 西安理工大学 水利水电学院,陕西 西安 710048;2 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 用比奥固结理论计算了水力冲填粉煤灰坝的施工固结过程,从机理上分析了工程中上坝速度的合 理确定、坝基沉积灰对冲填坝固结的影响等问题。结果表明,坝下设置排水层可以大大加快坝体施工固结速度,平 均上坝速度在 0.3 m/d 以内, 坝体施工安全有保障。

[关键词] 粉煤灰;水力冲填;固结特性;坝体施工;比奥理论 [**中图分类号**] TV 42⁺ 3; TV 641. 6 [文献标识码] A [文章编号] 1671-9387(2004)11-0138-05

水力冲填法筑坝是通过水力输送一定浓度的筑 坝材料浆液到埂畦内,再利用人工或机械振动使浆 液排水固结形成坝体的一种施工技术。早在20世纪 70 年代,该技术在黄河中游地区黄土土坝施工中得 到广泛应用,形成了一套水坠坝施工方法。 这种方法 具有工效高、节省施工设备、节省投资 50% 以上等 特点,在当时受到各方面的重视,并得到了大面积推 广。 粉煤灰透水性强, 冲填固结速度快, 具有同饱 和砂土一样振动液化易加密的力学特性, 是一种理 想的冲填材料。近年来、出现了水力冲填粉煤灰筑坝 技术,该技术已经在许多火力发电厂灰库灰坝施工 中得到应用,并收到了良好的效果^[1]。目前的研究主 要集中在施工工艺 质量检测 稳定分析与渗流控制 等方面^[2~4],而有关从理论上把握粉煤灰冲填施工 的上坝速度,冲填体在施工和运行过程中固结程度 的变化,以及饱和超松软粉煤灰地基对冲填体固结 的影响等问题一直未得到很好地解决,严重影响了 该技术的大规模推广。本研究拟通过比奥固结理论, 对某工程粉煤灰冲填坝进行固结数值计算, 解决上 述工程中的实际问题,以期为水力冲填筑坝的推广 应用提供理论支持。

工程概况 1

某电厂一期灰场位于电厂南侧 2 km 的盐碱地 内,属于平地水力除灰坝,初期坝为粉质粘土碾压均 质坝, 平均坝高 3 6 m, 上游面坡度 1 2, 下游面坡 度1 25. 坝基为粉质粘土, 地下水位在自然地面 以下 0 8~ 1 0m。本次工程是在一期工程上采用上

游加高法加高,子坝在灰库内沉积的超松软粉煤灰 上直接填筑。灰场采用低浓度水力除灰,灰场大部分 面积被水覆盖,灰渣终年呈饱和状态,承载力极低, 最大深度为4m。灰坝加高采用水力冲填法进行,冲 填材料为库内的沉积灰渣,子坝坝高6m,坝顶高程 为 14.5 m,上下游边坡拟为 1 3.5。水力冲填施工 工艺流程为: 围埂修筑、畦块划分、人工踩扰或振动 器振密处理,冲填层表面平板振动器振密处理等。

数值计算的数学原理 2

灰坝在冲填过程中的固结特性可用饱和土的固 结理论模拟。饱和土的固结理论主要有太沙基一维 固结理论、太沙基-伦杜立克准三维固结理论和比 奥固结理论。比奥(Biot)将土骨架视为弹性体,从比 较严格的固结机理出发,准确反映孔隙水压力消散 和土骨架变形相互关系的三维固结方程,一般称之 为" 真三维固结理论 ", 是目前对饱和土而言较为精 确的固结理论。虽然比奥在推导过程中假定土体骨 架是弹性的,但用增量理论可以方便地推广到非线 性弹性上[5~7]。比奥固结方程可以写成如下形 त्तै^[5,6]:

$$- G \nabla^{2} \omega + \frac{G}{1 - 2\mu} \cdot \frac{\partial \epsilon_{v}}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} = 0,$$

$$- G \nabla^{2} \omega + \frac{G}{1 - 2\mu} \cdot \frac{\partial \epsilon_{v}}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y} = - \mathcal{Y},$$
(1)

$$\frac{\partial \epsilon_{v}}{\partial t} + \frac{K}{\mathcal{Y}_{v}} \nabla^{2} u = 0,$$

^{* [}收稿日期] 2004-06-21 [基金项]] 国家高技术发展计划项目(2001AA242071-02) [作者简介] 张爱军(1964-),男,山西阳高人,高级工程师,在读博士,主要从事水利水电工程土工研究。 陕晋两省水坠坝试验研究工作组 水坠坝研究成果汇编(第3集),1973~1979. 0

-7

式中, $\epsilon = - \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial \omega}{\partial y}\right)$ 为体应变; $\nabla^2 = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}$ 为拉普拉斯算子; ω, ω 为单元体 x, y 方向上的位移; u 为土体的孔隙水压力; K 为土体的渗透系数; λ 为水的重度; λ 为土体的干重度; μ 为土体的泊桑比; G 为土体的剪切模量, $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$, 其中 E 为土体的变形模量。

式(1)中两个方向的位移 ω, ω 和孔隙水压力 u 为计算基本未知量。 为了考虑土体的非线性特性,土体的变形模量 采用邓肯- 张模型,对于卸荷情况由简布公式计算, 即

$$E_{i} = E_{i} = k P_{a} \left(\frac{\sigma_{s}}{P_{a}} \right)^{n}$$
(2)

采用三角形单元对坝体进行离散,共划分了 292 单元,174 结点,对于重点考虑的子坝坝基和子 坝填筑体本身,进行网格加密。单元网格划分如图 1 所示。



Fig 1 Layout of calculation grid

粉煤灰水力冲填的施工工艺一般是: 先修筑围 埂和边埂, 在围埂内再修筑围畦分畦冲填, 围埂和边 埂的修筑需进行夯打和拍打, 其填筑密度与普通冲 填区不同。冲填方式也分为间歇冲填与连续冲填两 种, 间歇冲填为冲填一层后停冲一段较长的时间, 等 浆液脱水固结后接着冲下一层: 连续冲填的停冲时 间较短, 冲填速度快。由于挡灰坝的设计断面较小, 围埂断面也小, 且是用粉煤灰填筑而成, 因此, 以间 歇式冲填方法为多, 并且在停冲期间还增加人工踩 扰和平板振动器振密两道工序, 以加速冲填层的固 结。在计算中考虑到围埂的断面较小, 不考虑其影 响; 对于人工踩扰和平板振动器振密在计算中也较 难考虑, 将之作为一种安全储备。施工中冲填是间歇 式的,但计算中认为其填筑是匀速增加的,这样简化 可以反映整体填筑效果,也是合理的。为了模拟施工 填筑的过程,计算中结合时间步长的划分,将填筑高 程划分为若干段逐级施加。参照文献[1]与其他工程 的经验,本研究模拟计算了0 10,0 15,0 30 m/d 3 种施工进度下坝体的固结过程。上述 3 种施工进 度对应的坝体填筑完成时间分别为 20,40,60 d。

计算所用的参数值见表 1, 表 1 中的数据均是 通过专门试验得到的。考虑到固结过程中土体不断 压密, 其渗透系数将逐渐变小, 计算时对渗透系数试 验值进行适当折减。施工进度为 0 10, 0 15, 0 30 m/d 时的计算时间步长分别为 2, 4, 6 d。

Table 1Parameters of calculation									
土类 Classification of soil	干密度/ ^(kN ・m⁻³) Dry density	饱和密度/ (kN · m ⁻³) Zero air voids density	渗透系数/ (µm · s ⁻¹) Coefficient of pem eability	摩擦角/() Internal friction coefficient	凝聚力/kPa Cohesion	邓肯- 张模型参数 Param eters of Duncan Chang model			
						R_f	K	n	μ
粘土 Clay	15 10	19.55	2 90	31. 10	14 00	0 78	113 80	0 64	0 23
沉积灰 Sedment fly ash	8 68	14 64	2 92	29. 20	14 00	0 56	67.17	0 28	0 24
冲填灰 A lluvial fly ash	10 31	15 62	2 82	33 00	5 00	0 57	147. 50	0 31	0 24
棱体 Rockfill	18 30	21.50	1. 00	36 20	8 00	0 69	552 50	0 61	0 38
坝基土 Soil of dam foundation	15 00	20 12	1.00	34 70	10 00	0 59	156 40	0 57	0 28

表1 计算参数表

3 结果与分析

3.1 固结过程中孔隙水压力消散的规律

饱和灰体的固结过程是土体骨架不断压密, 孔 隙水不断排出的过程。在荷载施加的初期, 由于孔隙 水来不及排出, 外加荷载, 必定引起孔隙水压力的提 高, 随着时间的延续, 土体中孔隙水的渗透作用使部 分土体孔隙水向外渗透, 相应土中的孔隙水压力会 减小, 有效应力增加, 土体压密, 孔压消散, 这个消散 过程就是土体固结过程。施工过程中, 一方面, 坝体 填筑高度不断上升, 外加荷载不断增加, 必然引起相 应坝体和坝基内的孔隙水压力增加; 另一方面, 坝体 内的孔隙水压力还引起渗流, 使孔隙水不断排出, 又 使孔压降低。当坝体内荷载增大为主导时(施工进度 加快), 孔隙水压力增大; 当渗透固结为主导时(决定 于土的性质和边界条件), 孔压减小。因此, 坝体和坝 基内孔压增加或降低决定于施工速率, 土的性质及 其边界条件。

加高子坝下有一层 4 m 厚,处于过饱和状态下 的沉积灰层,在坝体加高过程中必然引起该层灰的 固结,该层灰的稳定性决定着整个坝体的稳定性。

图 2 为子坝坝基沉积灰层底部位于子坝坝轴线 上,80号节点的孔隙水压力随时间变化的过程曲 线,反映了子坝坝基沉积灰底层孔压消散的过程,结 合施工荷载增加曲线可知,不论那种计算工况,孔压 值均随施工荷载的增加而增加,在施工荷载施加完 毕后,即在坝体冲填完成后,子坝坝基沉积灰底部的 孔压很快消散为 0, 从孔压最大到孔压消散完毕的 时间随是否设排水层而有所不同, 一般在 6~ 10 d。 在设排水层的情况下,孔压消散较快,而不设排水层 相对较慢,但不同施工进度间孔压消散的速度相差 不大。绝大多数情况下, 孔压消散到最大值的 80% 所需要的历时为 2~4 d, 即荷载卸除后 2~4 d 后, 固结度达到 80%。这说明坝基粉煤灰的透水性较 好, 排水固结速度较快, 这一点对施工安全十分有 利。总的看来,设排水层较不设排水层的超孔隙水压 力值小,施工进度快较施工进度慢的超孔隙水压力 值大,但施工加载引起的超孔隙水压力最大只有 18 7 kPa, 对坝体的安全不会造成太大影响。

孔隙水压力系数是坝体施工期稳定分析与变形 控制的一个主要参考指标,孔隙水压力系数可由孔 隙水压力值与该点单位面积上覆土柱的重力比求 得,计算式为

$$B = \frac{u}{\gamma_m h},$$
 (3)

式中, B 为孔隙水压力系数; u 为孔隙水压力值 (kPa); h 为土柱的高(m); λ_{m} 为土体的饱和重度值 (kN / m^{3})。



孔隙水压力系数反映坝体内孔隙水压力相对于 坝体静应力的大小,一般其值超过 0 7~ 0 8 时,说 明孔隙水压力太大,会对坝体的稳定性造成较大影 响。因为子坝坝轴线上坝基沉积灰底部 80 号结点的 孔压在整个坝体中最大,计算得到其孔隙水压力系 数随时间变化的过程线(不设排水层,施工进度为 0 30 m/d)见图 3。



载的增加而增加,但与孔压时程线不同的是,最大值 发生在施工荷载施加完毕前8d,而不是施工结束之 日。表明施工期间对坝体造成不利影响的时段并非 在施工荷载最大时,而是在其以前。但从量值上看, 此时孔隙水压力系数最大值为0133。因此认为,在 计算工况下坝体安全可以保证。

图 4 是子坝坝基顶部坝轴线上 78 号节点在不 同工况时的孔压时程曲线,设排水层时,该节点在排 水层的底面,可以反映排水层内部的孔压情况。从图 4 可以看出,不设排水层时,从施工结束到孔压消散



根据有关资料^[1], 类似工程以及 70 年代水坠坝 冲填施工的速度一般控制在 0 15 m/d 以下或按 0 15 m/d 控制。计算中选取 0 10, 0 15, 0 3 m/d 3 个速度, 以 3 个施工进度下坝体的固结反映不同施 工进度的影响。施工进度快则坝体内部产生的孔压 大, 反之产生较小的孔压, 计算结果也明显反应出这 种趋势, 与常理推断相吻合。从量值上看, 施工进度 增加 1 倍, 产生的孔隙水压力值也会以大致倍数增 加。这个结论可以用来初步估计不同施工进度产生 的最大孔压值的大小。从以上分析可以看出, 3 种施 工进度下孔压值均不高, 不致引起坝体稳定问题, 另 外不同施工进度下孔压的消散速度基本一致(图 5 中孔压消散时间有一定区别的原因是计算步长不一 为零大约需 4~ 6 d, 各种施工进度的孔压消散速度 大致相当; 在设排水层时, 该处的孔压很小, 几乎为 零, 说明排水层的排水减压效果十分明显。最大孔压 值出现在不设排水层且施工进度为 0 3 m /d 时, 其 最大值为 22 kPa, 该值大小也不会影响工程安全。

图 5 为子坝坝体内部坝轴线上 76 号节点处孔 压的时程曲线,该点位于子坝坝轴线上,高程为 10 5 m。其孔压分布规律与子坝坝基基本一致,只 是量值上略小一点。说明子坝内部孔压消散的速度 也很快。



致, 在低施工进度下计算步长太大, 没有计算出真实的拐点), 设与不设排水层对固结孔压以及孔压消散的影响较施工进度大。因此, 在不设排水层的情况下, 可以适当减慢施工进度, 避免出现施工安全问题。

实际的施工观测表明, 坝体孔压消散很快, 在坝体填筑完成后 2~6 d 坝体各处孔压消散为零, 表明本次计算结果是合理的。

4 结 论

(1) 在饱和松软沉积粉煤灰地基上进行水力冲 填坝施工是可行的。

(2)粉煤灰透水性能好,固结快,是进行冲填施 工的理想材料。水力冲填粉煤灰坝孔隙水压力消散

- 很快,可以保证一般施工强度下的施工安全。 (3)设与不设排水层对孔压消散速度的影响较 施工进度大。因此,在沉积饱和粉煤灰上进行水力冲
- 填坝施工时,应该在沉积灰表面设置一定厚度的排 水层。

[参考文献]

- [1] 邵生俊,李炳林,张勇华,等 平原地区水力冲填粉煤灰筑坝技术研究[J]. 水利学报, 2002, (2): 35-41.
- [2] 张爱军, 邢义川, 大坝电厂挡灰坝静动力稳定分析[J]. 西北水资源与水工程, 1995, (4): 39-44.
- [3] 张爱军, 邢义川, 骆亚生, 等. 韩城发电厂灰场三向渗流分析[J]. 西北水资源与水工程, 1995, (3): 58-62
- [4] 周树华, 衡曹阳, CH ICOU RA SN, 等. 粉煤灰的密实度检测及其比较试验[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000, (sl): 74-78
- [5] 钱家欢, 殷宗泽 土工原理与计算[M] 北京: 水利电力出版社, 1996
- [6] 钱家欢, 殷宗泽 土工数值分析[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991.
- [7] 张爱军, 谢定义, 复合地基三维数值分析[M]. 北京: 科学出版社, 2004

A nalysis of consolidation characteristics in construction of hydraulic filling fly ash dam

ZHANG A i- jun^{1,2}, L UO Ya-sheng², L I Peng²

(1 Institute of W ater R esources and Hydro⁻electric Engineering, X i'an University of Technology, X i'an, S haanx i 710048, China, 2 College of W ater R esources and A rchitectural Engineering, N orthwest A & F University, Yang ling, S hannx i 712100, China)

Abstract: The consolidation process in construction of hydraulic filling fly ash dam is calculated and analyzed by using the Biot's consolidation theory, and some problems such as advisable confirming construction speed and influences coming from consolidation of hydraulic filling fly ash dam caused by sediment ash of dam foundation, etc, are analyzed by mechanism. The results show: setting drainage layer in the dam foundation can greatly expedite the consolidation speed of dam. In the case of average filling speed less than 0.3 m/d, the safety of dam can be secured

Key words: fly ash; hydraulic filling; characteristic of consolidation; dam construction; Biot's consolidation theory