

模拟分层填筑下压实度对土石坝应力变形及边坡稳定的影响

翁红兴

(深圳市水务规划设计院有限公司江西分公司,江西 南昌 330000)

摘要:土石坝的施工大多采用分层碾压、逐级填筑的方式进行,以压实度和最优含水率作为设计控制指标,其强度指标和压缩特性直接影响到大坝的长期运行稳定.为探讨压实度对土石坝应力变形的影响,在合理模拟施工过程和不同压实度工况基础上,运用二维有限元模拟土石坝分层碾压过程,分析不同填筑高程和压实度对坝体应力变形及坝坡稳定的影响.结果表明:土石坝施工期坝体应力变形、坝坡稳定与压实度密切相关,高坝影响更为敏感,严格控制压实标准,可有效减小土石坝自身沉降变形.

关键词:分层填筑;压实度;应力变形;边坡稳定;有限元;土石坝

中图分类号:TV139.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-4701(2018)03-0180-05

0 引言

随着土石坝的设计及施工技术的不断发展,在建和已建的高坝中土石坝已占有相当的比例,坝体的变形及稳定都是保证大坝安全必须考虑的问题^[1].土石坝通常采用当地土石材料碾压而成,随着填筑高度的增大,填筑土料围压增大,水平向膨胀,致使孔隙率减小,从而产生较大的沉降变形,易形成局部裂缝或坝高不足,对坝体不利^[2].施工期沉降密切影响土石坝的应力变形,沉降量是评价土石坝设计及施工的重要指标,因而在合理模拟土石坝施工的基础上研究压实度对土石坝的影响尤为重要^[3].土石坝分层模拟通常将几个实际施工层作为一个填筑层考虑,刘喜珠等^[4]以百米级高坝为例,研究模拟层数对坝体变形的影响,提出分层厚度可取0.1倍坝高.周爱红等^[5]对模拟层数的选取标准进行了研究,提出坝体分层可按疏-中-密的原则选取.

以往的土石坝施工模拟中,考虑填筑土料压实度对土石坝影响研究较少^[6-8],施工期数值模拟主要着重于研究分层碾压层数的确定及土石坝应力变形过程,未能反应土体压实度对沉降变形的影响.为此,本文在借鉴相关土石坝施工期分层填筑模拟的基础上,通过调查选取合适的压实度及力学参数,建立二维有限元数值模型,旨在探究压实度对土石坝应力变形及边坡稳定的影

响,以期为土石坝的设计和施工提供理论参考。

1 土石坝逐级施工分级加载模拟

将土石坝施工简化为平面应力应变问题,进行弹性数值模拟分析,初始应力场为筑坝地壳中未受到外界扰动的天然应力.坝体填筑前,坝基在历史地壳运动中已完成固结沉降,将该结果作为第一步分析,然后进行后续土石坝的施工模拟.在分层碾压填筑过程中,第一层土料反复压实后,再进行第二层碾压施工直至填筑到坝顶.当第I层竣工时,载荷是第I层及第I层以下土料自重之和,分层填筑模拟法在土石坝沉降数值模拟分析中得到广泛运用.研究表明,选取模拟层数时应综合考虑坝高、工程精度要求,选取几个实际施工层作为一个模拟层,从坝底到坝顶采用疏-中-密的原则选择填筑层数^[9].

采用有限元法可以进行随时间推进的工况模拟,按时间顺序可以自动将这些分析连接到一起,来模拟土石坝施工期分层填筑的过程.具体表现为激活或者不激活该区域,以地基自重产生的应力场作为初始应力场,按大坝填筑顺序依次激活各单元来模拟坝体施工过程^[10].当模拟第I层填筑时,以上一层结束时为初始应力条件,并只有第I层及其以下各层坝体来承担荷载,I层以上表现为未激活,变形稳定后再填筑下一层,

网格及边界条件对所有的分析都是相同的。

2 算例分析

2.1 计算模型

在土石坝施工模拟应力应变分析中,坝体材料采用弹塑性本构模型,在屈服点之前应力-应变成正比,屈服之后应力-应变曲线完全水平,土的塑性用塑性增量理论表达。为模拟土石坝施工过程假定坝料填筑重力荷载为一次性施加,施工前认为坝基已经沉降完成,以坝基自重产生的天然应力场作为初始应力场。坝基上

下游设置为无限区域并施加水平约束,坝基底面各方向均为完全约束,即坝基只能发生竖向沉降,坝体部分均不设置约束。边坡稳定分析采用常用的刚体极限平衡法,该方法有着深厚的理论基础,陈祖煜^[12]对此介绍得较为详细,鉴于版面限制,在此不在赘述。

为研究坝体沉降随压实度变化过程,以江西某均质土坝为例进行施工模拟。计算模型选取大坝最大横剖面,坝顶高程 184.00 m,最大坝高 32.70 m,上游坝坡 1:2.65~3.72,下游坝坡 1:2.25~2.58。采用疏-中-密原则对坝体分 12 层进行施工模拟,赋予有限元模型材料属性和边界条件,得到网格剖分图如图 1。

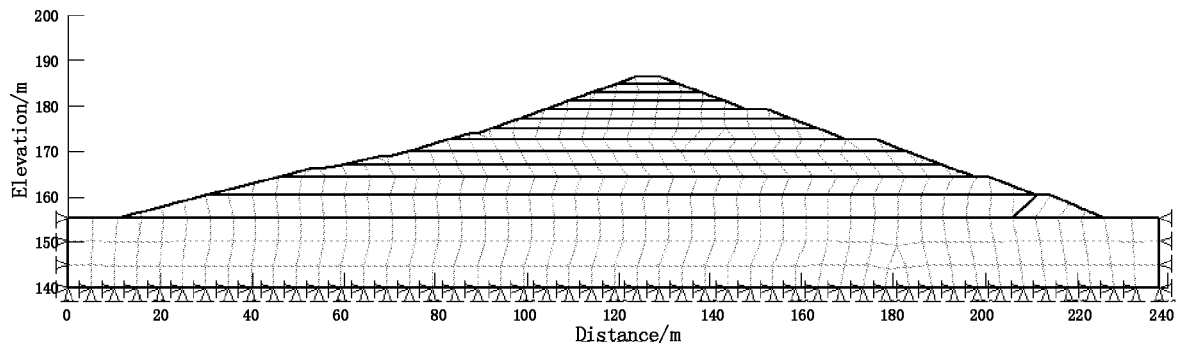


图 1 坝体典型剖面网格及边界条件

2.2 参数选取及计算方案

坝体填筑土料的力学性质直接影响到坝体变形及应力计算结果,选取施工期质检样本数据,并结合国内外均质土坝调查资料中的材料性质,确定不同压实度下

填土的力学参数,具体见表 1。为研究不同压实度对土石坝自身沉降变形的影响,分别取压实度为 90%~98%,本文主要研究土石坝沉降变形,因此简化模型计算时忽略坝基沉降变形影响。

表 1 坝料物理力学参数表

	压实度 /%	弹性模量 /MPa	重度 /(kN/m ³)	内摩擦角 /(°)	黏聚力 /kPa	泊松比	膨胀角 /(°)
坝体填土	94	35.6	18.43	25.2	22.1	0.25	0
	95	39.3	19.21	26.5	23.7	0.25	0
	96	43.0	19.89	27.4	25.4	0.25	0
	97	46.5	20.43	28.6	26.7	0.25	0
	98	49.8	20.96	29.5	28.9	0.25	0
排水棱体坝基	99	53.2	21.48	30.2	30.3	0.25	0
		200	20.56	34	5	0.3	0
		20000	22.54	36	5	0.3	0

3 计算结果分析

3.1 位移沉降分析

选取不同的土料压实度对应的力学参数及不同的

填筑高程,计算得到坝体施工期最大竖向沉降值及最大水平位移值,如表 2 所示。为分析沉降位移值随压实度变化规律,根据计算中各监控点沉降位移值绘制沉降位移变化对压实度变化曲线,如图 2~5 所示。

选取典型断面变形沉降云图如图 6、图 7 所示,竣

表2 不同填筑高程与压实度最大竖向沉降及水平位移统计表

大坝填筑高程/m	沉降(位移)/mm	不同压实度对应的沉降					
		94	95	96	97	98	99
169.50	最大竖向沉降	-497.10	-469.50	-444.40	-422.20	-404.60	-388.20
	坝体水平最大正位移	55.13	52.10	49.34	46.91	44.97	43.17
	坝体水平最大负位移	-41.22	-38.94	-36.87	-35.04	-33.58	-32.23
176.50	最大竖向沉降	-854.30	-799.40	-756.60	-718.80	-688.70	-660.80
	坝体水平最大正位移	97.85	88.48	83.74	79.56	76.23	73.15
	坝体水平最大负位移	-98.84	-88.52	-83.78	-79.60	-76.27	-73.18
184.00	最大竖向沉降	-1386.00	-1260.00	-1152.00	-1058.00	-986.70	-939.60
	坝体水平最大正位移	185.30	155.70	136.20	120.70	111.90	106.40
	坝体水平最大负位移	-206.30	-171.70	-148.00	-130.40	-119.10	-112.70

注:位移以竖直向上和水平向下游方向为正,最大负位移表示大坝向上游产生变形。

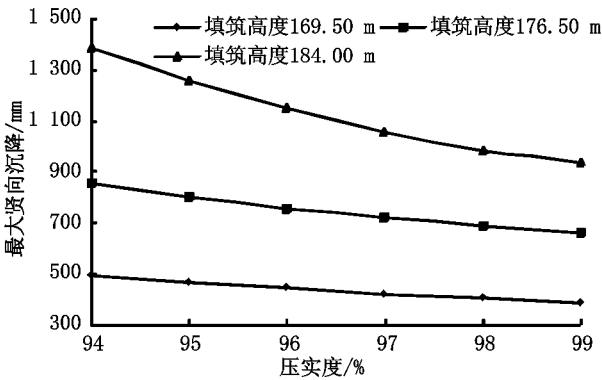


图2 最大竖向沉降图

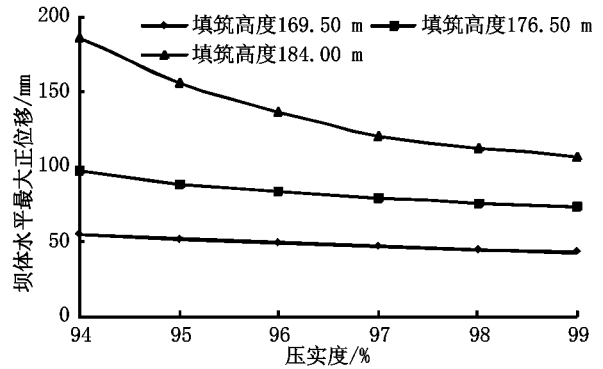


图3 坝体水平最大正位移图

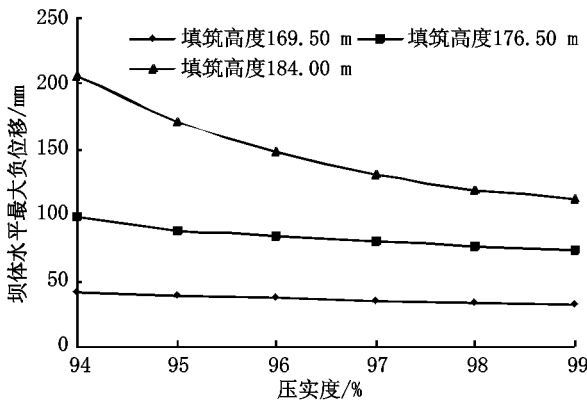


图4 坝体水平最大负位移图

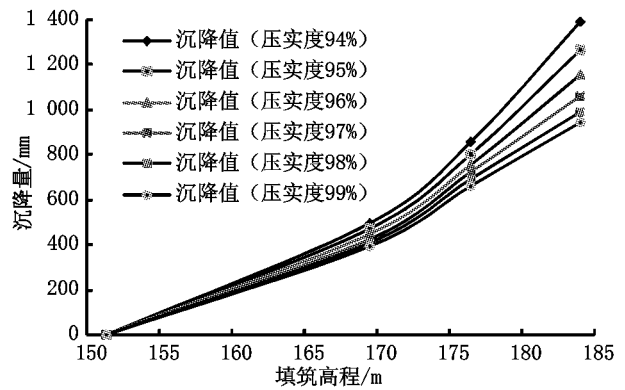


图5 填筑高程与沉降值曲线图

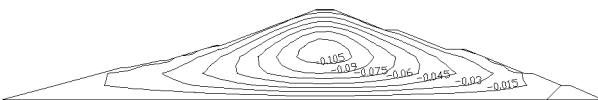


图6 184.00 m 高程竖向沉降

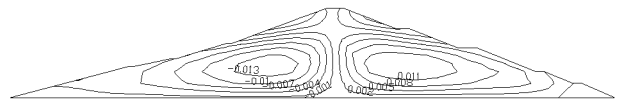


图7 184.00 m 高程水平位移

工期水平位移和竖向沉降等势线均以坝轴线呈对称分布,基本符合土石坝施工期沉降变形规律。坝体最大沉降发生在坝体中部,竖向位移分布近似呈圆环形向外扩

散分布,相比水平位移,大坝变形主要以竖向沉降为主。分析上述表格与图形可得出以下结论:

(1)不同的压实度与填筑高程时沉降值变化规律

为:压实度越大,土料密实,颗粒之间孔隙变小,致使坝体沉降值变小,坝高较低时沉降值变化较小,压实度影响不明显,随着坝体施工填筑抬高,土体上部荷载逐渐增大,压实度对沉降值影响愈明显。完建期最大坝高下,压实度从94%提高到97%时,沉降值减小328 mm,从97%提高到99%沉降值减小118.4 mm,这表明沉降值对低压实度较敏感,随着压实度增大并逐步趋于稳定。因此,在高坝设计施工期,应当严格控制压实度。

(2)在相同压实度下,坝体最大沉降值均随着填筑高程增大而增大,并且在低高程下变化缓慢,接近坝顶高程变化急剧,间接说明模拟土石坝施工期按疏-中-密原则选择填筑层数是可取的。

(3)坝体水平位移变化趋势均与沉降值相同,并受坝高和压实度影响,但水平位移变化值较沉降值小,因此土石坝施工期监控应以竖向沉降值为主。

3.2 应力计算分析

选取不同的土料压实度对应的力学参数及不同的填筑高程,计算得到坝体施工期最大水平及竖向应力值。为分析坝体最大水平及竖向应力随压实度变化规律,根据计算中各监控点应力值绘制应力随压实度变化曲线,如图8~9所示。

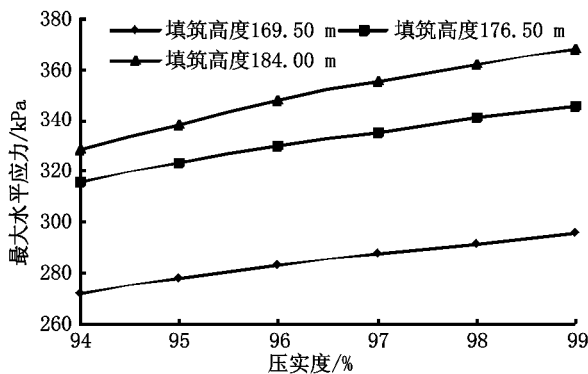


图8 最大水平应力随压实度变化图

从上述表格与折线图可以看出:

(1)随着压实度的提高,水平及竖向应力值近似呈线性增长的趋势。同时,在完建期最大坝高下压实度从94%提高到99%时,最大水平、竖向应力增幅均在12%左右,并且在同一点竖向应力值较水平应力值大,符合土石坝施工期应力变化规律。

(2)在相同的压实度下,最大水平、应力值均随着填筑高程增大而增大,并且最大水平及竖向应力在较低高程时增幅较大,接近最大高程时增幅较小。

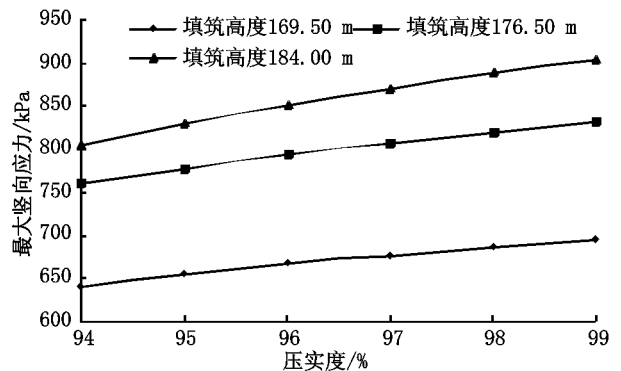


图9 最大竖向应力随压实度变化图

3.3 坝坡稳定计算分析

在土石坝的设计中,坝体的上、下游边坡稳定影响大坝的安全和经济效益。为研究不同压实度对边坡稳定性的影响,在合理模拟分层填筑条件下,以完建期最大坝高应力计算为初始条件,将应力分析结果用于坝体上、下游边坡稳定计算中,并绘制上、下游坝坡安全系数随压实度变化过程线如图10所示。

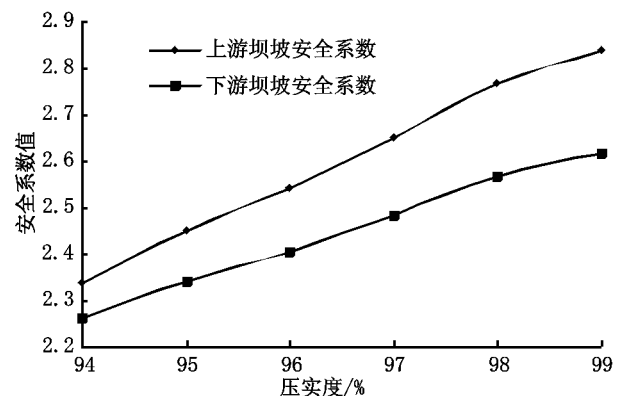


图10 上、下游坝坡安全系数变化图

由该曲线可知,大坝上、下游坝坡安全系数随压实度提高近似呈线性增长,且变化显著。每提高一压实度,上、下游坝坡安全系数平均增幅3.14%和4.32%。因此,在施工过程中严格控制压实度对于提高坝坡稳定性有积极的作用。

4 结论

通过模拟土石坝分层填筑下,不同压实度对坝体沉降变形、应力及坝坡稳定的影响,得出以下结论:

(1)在同一筑坝高程下,随着压实度增大,坝体沉

降变形逐渐减小,应力及上、下游坝坡安全系数均逐渐增大;在同一压实度下,随着坝高填筑增大,坝体沉降变形、应力均不同程度上的增大。

(2)在土石坝施工填筑期,通过合理选择合适的筑坝材料能有效控制坝体自身压缩变形。

(3)坝体竖向沉降受压实度影响较大,高坝变化更敏感。因此,高坝施工中严格控制压实标准,可有效达到降低自重引起的压缩沉降变形,从而达到降低总沉降变形的目的。

参考文献:

- [1] 李斌. 坝高超 200 m 土石坝坝坡稳定风险控制标准[J]. 人民黄河, 2016, 38(11): 104 ~ 107.
- [2] 邓海忠, 吴学林. 江西病险水库地质勘察与病害成因分析[J]. 中国农村水利水电, 2005(02): 83 ~ 85.
- [3] 赵晨生. 高心墙堆石坝耦合施工进度与质量的实时控制研究[D]. 天津大学, 2012.
- [4] 刘喜珠, 练继建, 何龙军, 等. 面板堆石坝填筑仿真及堆石料参数影响研究[J]. 水利水电技术, 2010, 41(4): 32 ~ 35.
- [5] 周爱红, 袁颖, 何国峰. 模拟填筑层数及水位对坝体变形及稳定性的影响[J]. 长江科学院院报, 2015(05): 110 ~ 114.
- [6] 牛运光. 土石坝裂缝原因分析与防治处理措施综述[J]. 大坝与安全, 2006(5): 61 ~ 66.
- [7] 郭靖, 赵红华, 李守巨. 上游水位变化对堆石坝变形特性影响分析[J]. 水利学报, 2015(S1): 291 ~ 295.
- [8] 张岩, 燕乔. 分期填筑对高面板堆石坝应力变形的影响研究[J]. 水电能源科学, 2010, 28(04): 93 ~ 95 + 160.
- [9] 孙锴, 彭立, 杜勇立, 等. 基于 FLAC ~ (3D) 的煤矸石路堤沉降与应力分析与现场测试对比研究[J]. 公路工程, 2014(01): 83 ~ 87 + 98.
- [10] 江德军, 黄会宝, 柯虎, 等. 土石坝填筑数值模拟中分层数影响研究[J]. 人民长江, 2015, 46(S1): 130 ~ 131 + 136.
- [11] 陈群, 唐岷. 强度参数的不确定性对土石坝坝坡失稳概率的影响[J]. 岩土工程学报, 2008(11): 1594 ~ 1599.
- [12] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析: 原理、方法、程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.

编辑: 张绍付

Influence of compactness on stress deformation of earth – rock dam and slope stability under Stratified filling

WENG Hongxing

(Jiangxi Branch Shenzhen Water Planning & Design Institute Co. Ltd, Nanchang 330000, China)

Abstract: The construction of earth rock dam is mostly used in the way of stratified compaction and step by step construction, taking the degree of compaction and the optimum water content as the design control standard, the strength and compression characteristics of the dam directly affect the stability of the dam. In order to investigate the effect of compaction on stress deformation, based on the reasonable simulation of dam construction process and the selection of different compaction degrees, by using the finite element simulation of dam layered rolling process, analysis of different filling height and degree of compaction effect of stress deformation and slope stability of the dam. The study shows that stress deformation and slope stability are closely related to the degree of compaction during the construction period, and the influence of high dam is more obvious, strict control of compaction standard can effectively reduce the settlement deformation of earth rock dam.

Key words: Stratified filling; Compactness; Stress Deformation; Slope stability; Finite element

翻译: 翁红兴