

混合坝型衔接坝段协调变形离心模型 试验与数值分析

李 永 江

(河南省燕山水库建设管理局, 河南 郑州 450003)

摘要: 通过离心模型试验和数值分析,模拟了某均质坝和斜墙分区坝混合坝的变形. 结果表明,填筑施工期大坝坝体沉降已基本完成,蓄水对坝体沉降的影响较小. 因筑坝材料、坝基岩土特性及坝体高度等因素的影响,不同坝型间存在差异沉降,但填筑施工期已基本完成差异沉降,蓄水运行期的差异沉降增量很小,沿坝顶纵向的整体协调性较好,坝体在填筑期、蓄水期及运行期的整体稳定性也较好.

关 键 词: 混合坝; 离心模型试验; 差异沉降; 数值分析

中图分类号: TV641.8

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2007)04-0066-05

Centrifugal and numerical analysis on the compatible deformation of the jointing blocks of a composite dam

LI Yong-jiang

(Yanshan Reservoir Construction Management Bureau of Henan Province, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The deformation of a composite dam is studied by means of centrifugal model test and numerical method. Most of the settlement is completed during the construction, and the impoundment has little effects on the settlement. Differential settlement is observed between different sections of the dam, which is mostly completed during the construction and is affected by the impoundment very slightly. The overall stability of different sections of the dam is very high during construction, impoundment and operation.

Key words: composite dam; centrifugal model test; differential settlement; numerical analysis

某水库采用均质坝和斜墙分区坝的混合坝型,因粘土与堆石料具有不同的工程特性,对均质坝体与斜墙分区坝体相衔接断面的受力变形特性及其差异沉降的控制;斜墙分区坝体间的粘土斜墙防渗体与堆石体的协调变形及其应力变形特性;以及如何评估与确定在施工及运营过程中大坝受力变形特性、坝体渗透特性、坝体整体沉降与差异沉降、坝体长期变形、坝体整体稳定性等工程特性,是亟待解决的工程问题.

利用数值分析与离心模型试验方法,模拟研究了均质坝体与斜墙分区坝体相衔接断面的变形特性及其差异沉降的控制;并模拟研究了填筑施工期、蓄水期以及运营期坝体变形特性、坝体长期变形特性及整体稳定性等工程特性.

收稿日期: 2007-04-19

作者简介: 李永江(1963-),男,河南沁阳人,高级工程师,主要从事水利工程的建设管理工作. E-mail: zz.lyj@163.com

1 离心模型试验及试验结果分析

1.1 离心模型试验相似理论

土工离心模型试验技术为土工模型创造出一个 N 倍重力加速度 (Ng) 的超重力环境,使缩尺 $1/N$ 的模型与原型几何对应点具有相同的应力条件,理论上,模型性状能代表原型,是力学相似性最好的物理模型试验方法^[1,2].

试验在南京水利科学研究院土工离心模型试验室 NHRI-89 型 50gt 的土工离心机上完成,其载荷能力为 50g-tons,转臂半径为 2.25 m,最大加速度为 250 g,模型箱净空尺寸为 687 mm×352 mm×477 mm(长×宽×高). 试验研究所涉及的离心模型相似律见表 1.

表 1 相关变量的相似律
Tab. 1 Similarity laws of the model test

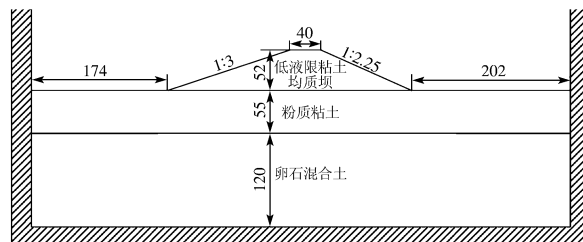
	物理量	量纲	原型	模型
几何相似	坝体高度 h	L	1	$1/N$
	坝顶宽度 d	L	1	$1/N$
	坝坡坡度 β	/	1	1
	地基厚度 h_g	L	1	$1/N$
物理力学相似	土体含水量 w	/	1	1
	土体密度 ρ	ML^{-3}	1	1
	土体强度 τ_f	$ML^{-1}T^{-2}$	1	1
	土体模量 E	$ML^{-1}T^{-2}$	1	1
荷载条件相似	离心加速度 a	LT^{-2}	1	n
	应力 σ	$ML^{-1}T^{-2}$	1	1
	蓄水位 h_w	L	1	$1/N$
	时间 t	T	1	$1/N^2$
性状相似	沉降 s	L	1	$1/N$

1.2 离心模型试验内容

离心模型试验的具体内容见表 2,模型 MY1 ~ MY4 在模型箱中的布置见图 1.

表 2 离心模型试验模型具体布置
Tab. 2 Arrangement of centrifugal model tests

模型编号	模拟原型	位置	坝型	原型坝高/m
MY1	2+650 坝段	二级阶地均质坝段	均质坝	10.4
MY2	4+475 坝段	河槽段	斜墙分区坝	32.2
MY3	3+300 坝段	二级阶地分区坝	斜墙分区坝	17.4
MY4	衔接坝段	均质坝与斜墙坝衔接	/	/



(a) 模型 MY1 布置图

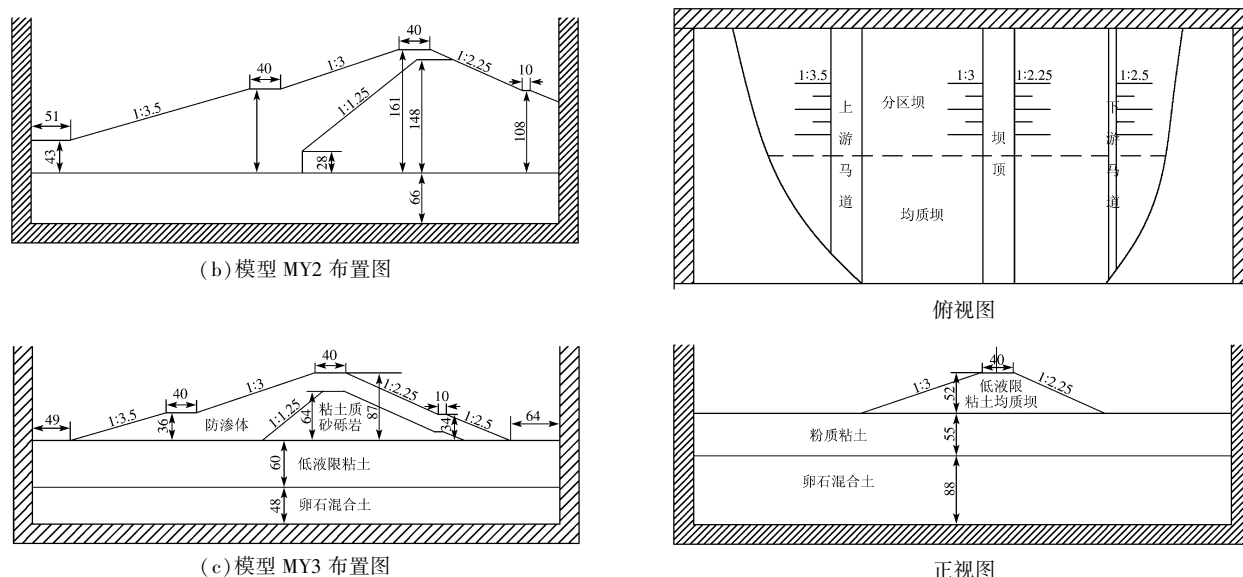


图 1 模型布置图 (单位: mm)

Fig. 1 Arrangement of model test MY1 ~ 4 (unit: mm)

1.3 离心模型试验结果及分析

离心模型试验的结果见表 3. 由表 3 可见, 填筑施工期各坝型均产生沉降, 蓄水运行期沉降的发展均十分有限. 随着坝体从河岸方向向河槽方向伸展, 因坝型不同而产生了差异沉降, 但已在填筑施工期基本完成, 蓄水运行期的差异沉降增量很小, 沿坝顶纵向的整体协调性较好.

表 3 各组模型的结果比较

Tab. 3 Comparison of centrifugal model test results

模 型 编 号	原型坝高 / m	模 拟 坝 型	填筑完成时		蓄水运行后	
			最大沉降/ cm	相对量/ %	最大沉降/ cm	相对量/ %
MY1	10.4	均质坝	10.9	1.05	15.0	1.44
MY2	32.2	分区坝	36.6	1.14	38.4	1.20
MY3	17.4	分区坝	21.9	1.26	24.0	1.38
MY4	10.4	均质坝	10.9	1.05	14.4	1.38
	17.4	分区坝	21.5	1.24	24.3	1.40

根据试验结果计算出均质坝和分区坝两种坝型在 $\nabla 107.32 \text{ m} \sim \nabla 117.72 \text{ m}$ 高程范围内的差异沉降见图 2. 可见, 在填筑完成时刻, 从坝顶向下, 分区坝的沉降逐渐大于均质坝, 最大差异沉降为 20.6 cm; 在水库蓄水运行后, 这一差异沉降略有增加, 最大为 22.8 cm. 这是由于接近坝基的深度范围内均质坝的沉降十分有限, 而同一高程的分区坝仅位于约 $1/3$ 坝高处, 因而这一范围内的差异沉降不会对整个大坝的运行产生太大影响. 在靠近坝顶的范围内, 均质坝与分区坝的差异沉降较小, 说明这样的过渡坝段工作性状是稳定的, 不同坝型的衔接坝段沉降比较协调.

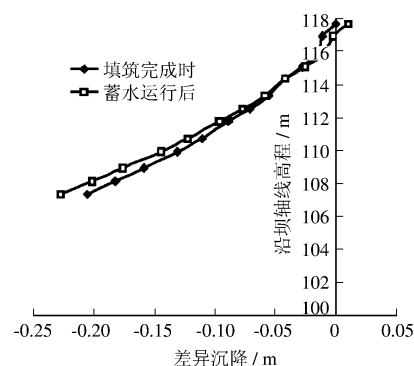


图 2 模型 MY4 坝轴线上的差异沉降沿坝高的分布

Fig. 2 Differential settlement with the height of dam of model test MY4

2 坝体协调变形的数值分析

2.1 计算模型及网格划分

本次计算分析采用沈珠江院士建议的南水双屈服面弹塑性本构模型^[3,4]. 为研究均质坝段和斜墙分区坝段、斜墙分区坝段中粘土斜墙防渗体与堆石体的协调变形, 针对桩号 2+650 均质坝、3+300 斜墙分区坝及 4+457 斜墙分区坝建立有限元分析模型. 3 个典型坝体断面有限元分析的网格剖分见图 3. 其中, 2+650 断面共剖分单元 894 个、节点 974 个; 3+300 断面共剖分单元 603 个、节点 654 个; 4+457 断面共剖分单元 752 个、节点 787 个.

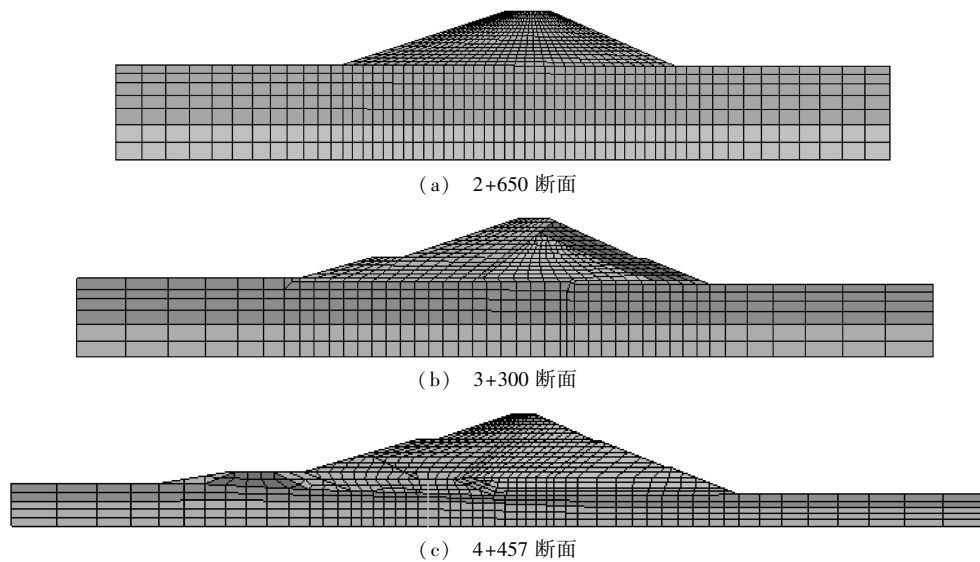


图3 有限元计算模型网格剖分图
Fig. 3 Cross section of FEM meshing

2.2 计算参数及工况

参照相应坝体和坝基材料的 Duncan 模型参数, 依据工程经验类比确定本次计算的南水双屈服面弹塑性模型参数见表 4. 分 2 种工况研究坝体协调变形及应力变形特性: ①填筑施工期(坝体填筑至坝顶); ②蓄水期(蓄水至正常蓄水位 $\nabla 106.00\text{ m}$).

表4 计算参数
Tab. 4 Calculation parameters of FEM

材 料	γ_d /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	φ /($^{\circ}$)	$\Delta\varphi$ /($^{\circ}$)	R_f	K	n	K_b	m	C_d /%	n_d	R_d	K_{ur}
坝体防渗料	1.74	25	0	0.9	240	0.67	39	0.62	0.82	0.8	0.81	480
反滤料(过渡料)	1.57	34	5	0.83	260	0.6	218	0.19	0.72	1.4	0.78	520
开挖料(坝体)	1.87	34	13	0.87	255	0.4	159	0.18	0.65	1.8	0.83	510
强风化石渣	2.09	42	11	0.83	250	0.31	55	0.34	0.66	1.5	0.83	700
坝基 Q_2 粘土	1.58	27.8	0	0.78	200	0.5	110	0.45	0.75	0.94	0.75	400
Q_2 卵石混凝土	1.97	45.4	6.5	0.83	450	0.4	120	0.34	0.55	1.1	0.8	900
Q_3 卵石混凝土	1.97	45.4	6.5	0.83	380	0.45	120	0.34	0.58	1.1	0.78	760
Q_4 卵石混凝土	1.94	45.2	6.5	0.84	320	0.54	120	0.25	0.62	1.2	0.78	800

2.3 计算结果及分析

计算结果表明, 随着坝体的填筑加高, 坝体的沉降不断增大, 在坝体竣工时达最大值. 2+650 断面坝体最大沉降为 12.6 cm, 发生在坝轴线偏下游侧 $\nabla 110.5\text{ m} \sim \nabla 111.3\text{ m}$ 高程处; 3+300 断面坝体最大沉降为 19.1 cm, 发生在防渗体中 $\nabla 108.4\text{ m}$ 高程处, 同一高程处的粘土质砂砾岩开挖料填筑部分坝体的最大沉降为

18.4 cm;4+457 断面坝体最大沉降为 32.8 cm,发生在粘土质砂砾岩开挖料填筑部分▽ 104.2 m 高程处,同一高程处的防渗体的最大沉降为 29.7 cm.

正常蓄水位下,2+650 断面坝体无水^①,蓄水期 3+300 断面和 4+457 断面坝体和坝基的沉降分布见图 4. 3+300 断面坝体最大沉降为 19.6 cm,发生在防渗体中▽ 109.6 m 高程处,同一高程处的粘土质砂砾岩开挖料填筑部分坝体的最大沉降为 19.1 cm;4+457 断面坝体最大沉降为 33.1 cm,发生在粘土质砂砾岩开挖料填筑部分▽ 104.2 m 高程处,同一高程处的防渗体的最大沉降为 29.7 cm.

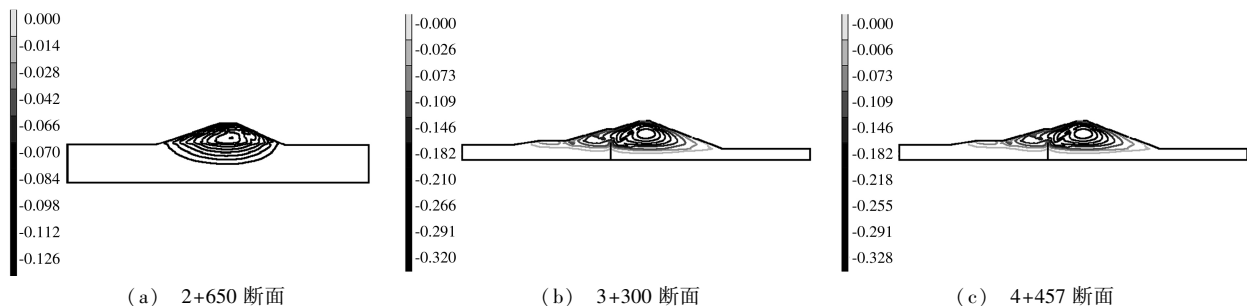


图 4 典型断面的沉降

Fig. 4 Settlement of a typical section

根据填筑施工期大坝应力变形计算结果整理的不同坝型的差异沉降见表 5. 从表 5 可见,不同坝型的坝体存在差异沉降. 主要原因是不同坝型的筑坝材料力学性质的差异,以及不同坝型地段坝基岩土特性的差异.

表 5 不同坝型变形差异

Tab. 5 Difference of settlement in different dam sections

断面桩号	坝 型	原型坝高/ m	坝基岩性	最大沉降/ cm	
				填筑施工期	蓄 水 期
2+650	粘土均质坝	10	上部为 Q_2 低液限粘土层,下部为 Q_2 卵石混合土层.	12.6	
3+300	斜墙分区坝	17.4	上部为 Q_2 低液限粘土层,下部为 Q_2 卵石混合土层.	19.1	19.6
4+457	斜墙分区坝	33.2	上部为 Q_4 卵石混合土层,下部为 Q_3 卵石混合土层.	32.8	33.1

3 结 语

(1) 大坝坝体沉降在填筑施工期已基本完成,大坝蓄水对坝体沉降的影响较小,蓄水运行期沉降的发展均十分有限.

(2) 因筑坝材料、坝基岩土特性及坝体高度等因素的影响,不同坝型间存在差异沉降,不过在填筑施工期已基本完成,蓄水运行期的差异沉降增量很小,沿坝顶纵向的整体协调性较好.

(3) 坝体填筑期与蓄水期,斜墙分区坝体内斜墙防渗体与堆石体间相衔接处的应力与应变较协调,未存在相互错动.

(4) 离心模型试验结果表明,该水库大坝各类型坝体在填筑期、蓄水期及运行期的整体稳定性较好.

参 考 文 献:

[1] 章为民,徐光明. 土石坝填筑过程的离心模拟方法[J]. 水利学报, 1997, (2): 8-13.
[2] 南京水利科学研究院. 土工试验技术手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
[3] 朱百里,沈珠江. 计算土力学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990.
[4] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.

① 2+650 均质坝处原地面高程高于▽ 106.3 m,正常蓄水条件下无水.