高水头下深厚覆盖层高土石围堰应力变形分析

汪明元[1,2]，陈敬虞[1,3]，孙常青[2]，陈　云[2]

（1. 浙江大学岩土工程研究所，浙江 杭州 310027；2. 长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室，湖北 武汉 430010；3. 浙江嘉兴学院建筑工程学院，浙江 嘉兴 314001）

摘　要：乌东德水电站位于长江上游的金沙江，其土石围堰高74 m，河床砂卵石覆盖层厚70 m，上下游水头差达151 m，且设计在下游侧堰脚开挖70 m深的基坑，拟采用高86 m的混凝土防渗墙上接复合土工膜防渗。对该高水头下深厚覆盖层高土石围堰的应力变形特征进行了非线性有限元分析，模拟了堰体填筑、蓄水、下游侧降水与基坑开挖的过程，采用无厚度Goodman单元模拟堰体与防渗墙间的接触面。应力与变形分析的结果表明围堰的设计方案是可行的。此外，研究了覆盖层与围堰填料的参数，防渗墙的材料、厚度与墙底沉渣等因素的影响，对设计方案提出了建议。

关键词：土石围堰；高水头；深厚覆盖层；乌东德水电站；长江；应力与变形；数值分析

作者简介：汪明元(1972－　)，男，高级工程师，从事膨胀土与筑坝材料、土工数值方法、土石坝与边坡工程研究。

0　前　　言

深厚覆盖层地基上兴建土石坝，坝体与防渗体的应力变形状态和地基渗控是关键问题。在建的大渡河瀑布沟心墙坝高186 m，坝基砂卵石覆盖层厚70 m，覆盖层内设两道厚1.4 m的混凝土防渗墙，设计阶段进行了模型试验和数值分析[1-3]。而已建的黄河小浪底斜心墙堆石坝最大坝高151 m，河床覆盖层一般厚30～40 m，最大70 m，“七五”和“八五”攻关对其应力变形性状进行了研究[4-5]。

位于长江上游金沙江的乌东德水电站，预可研阶段设计的上游围堰高74 m，承受的最大水头差达151 m，河床砂卵石覆盖层厚70余米，具有深厚覆盖层、高水头、高堰体三个特点。堰体利用开挖料填筑，拟采用混凝土防渗墙上接复合土工膜防渗，防渗墙高86 m，上部斜铺土工膜竖向尺寸43 m。另外，设计在下游侧堰脚约50 m处开挖深达70 m的基坑。围堰须在一个枯水期内完建，并在超过100 m的高水头下运行3 a以上。此类工程在国内外罕见，其特点与前述两心墙坝及三峡工程二期围堰不同[6-7]，围堰的应力变形与坝坡的稳定性是设计方案成败的关键。

笔者采用非线性有限元对该围堰的应力变形特征进行了分析，模拟了填筑、蓄水、下游侧降水与基坑开挖的过程，采用无厚度Goodman单元模拟堰体与防渗墙的接触面，并研究了覆盖层与围堰填料的参数，防渗墙的材料、厚度与墙底沉渣等因素的影响，对设计方案提出了建议[8]。

1　研究方案

1.1　模型与参数

围堰上游坡比1∶2.25，下游坡比1∶1.75，上下游坡平台宽5 m，堰顶宽10 m，竣工期水位829.7 m，调蓄水后水位874.0 m，堰顶高程876.0 m。地基覆盖层分三层：砂卵石夹块石、夹土砂卵石、砂卵石夹块石；堰体采用石渣、石渣混合料、混合料、大块石填筑，断面见图1示。

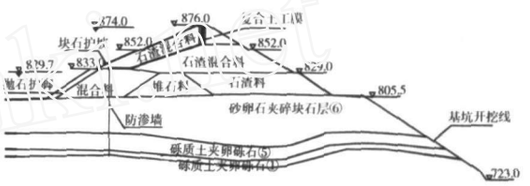


图1　乌东德深厚覆盖层高土石围堰典型断面

采用Duncan-Chang E-μ 非线弹性本构模型模拟填料和塑性混凝土，对刚性混凝土和基岩采用线弹性模型。对围堰填料、塑性混凝土、地基覆盖层均分别采用两套参数进行敏感性分析，共形成三套参数组合：第一套参数根据工程经验确定；第二套参数仅降低了围堰填料非线弹性本构参数；第三套参数根据试验成果，将覆盖层非线弹性本构参数增大[9]；其他均同第一套参数，分别见表1～3，其他参数见表4～5。

表1　围堰的材料参数（第一套）

名称	密度/(T·m^{-3})	K	n	G	F	D	φ/(°)	c/kPa	R_f
石渣混料	2.00	1100	0.60	0.30	0.33	0.22	40.0	0.0	0.83
混合料	2.00	1000	0.40	0.30	0.33	0.22	39.0	0.0	0.78
截流堤	2.09	1000	0.40	0.36	0.15	2.80	38.5	0.0	0.75
石渣料	2.00	1500	0.35	0.36	0.20	0.12	40.0	0.0	0.80
覆盖层①	2.23	1300	0.32	0.40	0.25	5.95	40.0	30.0	0.87
覆盖层⑤	2.34	1300	0.30	0.49	0.17	4.81	40.0	30.0	0.76
覆盖层⑥	2.40	1300	0.30	0.40	0.25	5.95	40.0	30.0	0.75
塑性砼 1	2.10	16628	0.24	0.34	0.02	0.30	39.0	1200.0	0.63
塑性砼 2	2.15	6800	0.01	0.39	0.11	1.03	34.5	540.0	0.75

表2　围堰的材料参数（第二套）

名称	密度/(T·m^{-3})	K	n	G	F	D	φ/(°)	c/kPa	R_f
石渣混料	2.00	900	0.40	0.35	0.17	5.50	36.0	0.0	0.75
混合料	2.00	850	0.34	0.35	0.18	5.00	35.8	0.0	0.78
堆石堤	2.09	900	0.40	0.36	0.15	2.80	37.5	0.0	0.70
石渣料	2.00	950	0.34	0.36	0.30	2.70	38.5	0.0	0.80

收稿日期：2006－07－30

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 3 围堰的材料参数（第三套）

名称	密度/(T·m^{-3})	K	n	G	F	D	φ/(°)	c/kPa	R_f
覆盖层①	2.23	2200	0.27	0.35	0.10	14.0	41.0	100.0	0.87
覆盖层⑤	2.34	1390	0.48	0.49	0.17	4.8	41.2	90.0	076
覆盖层⑥	2.40	2200	0.27	0.35	0.10	14.0	41.0	100.0	0.87

表 4 线弹性材料的参数

材料	密度/(T·m^{-3})	E/MPa	μ
基岩	2.5	2.0×10^4	0.2
墙底沉渣	2.3	1.0×10^3	0.25
C30 刚性砼心墙	2.45	2.5×10^4	0.167

表 5 防渗墙与堰体接触面的参数

摩擦角/(°)	凝聚力 c/MPa	破坏比	剪切劲度基数 K_s	剪切劲度指数 N_s	法向劲度 K_n
11	0.0	0.75	10000	0.65	1×10^8

复合土工膜的保护粘土层，其有效强度指标φ＝22°、c＝18.0 kPa。

1.2 数值分析的方案

制定了 10 个研究方案，见表 6，其中方案 1 为基本方案，方案 1～3 对覆盖层与填料参数的影响进行比较；方案 1 与方案 4、方案 2 与方案 5 比较防渗墙材料的影响；方案 1 与方案 6、方案 2 与方案 7 比较防渗墙厚度的影响；方案 1 与方案 10 比较塑性混凝土材料参数的影响；方案 1 与方案 8、方案 4 与方案 9 比较防渗墙底沉渣的影响。

表 6 数值分析的方案

编号	参数	防渗墙厚度/m	防渗墙材料	防渗墙底端
1	第一套	1.2	塑性混凝土 1	有沉渣
2	第二套	1.2	塑性混凝土 1	有沉渣
3	第三套	1.2	塑性混凝土 1	有沉渣
4	第一套	1.2	刚性混凝土	有沉渣
5	第二套	1.2	刚性混凝土	有沉渣
6	第一套	1.0	塑性混凝土 1	有沉渣
7	第二套	1.0	塑性混凝土 1	有沉渣
8	第一套	1.2	塑性混凝土 1	无沉渣
9	第一套	1.2	刚性混凝土	无沉渣
10	第一套	1.2	塑性混凝土 2	有沉渣

模拟的施工顺序为：地基初应力分析，分级填筑截流堆石堤，水下分级填筑上游混合料，水下分级填筑下游石渣料，施工防渗墙，下游抽水至地表，水上分级填筑石渣混合料，水上分级填筑上游面混合料，围堰分级蓄水，同时下游降水和基坑开挖。每级施荷分多个荷载步，采用中点增量法求解非线性方程组，均采用四边形等参单元。

2 围堰与防渗墙的应力变形特征

根据基本方案（方案 1）的计算结果分析堰体与防渗墙的应力变形特征。堰体的最大竖向位移 99.4 cm，位于堰体 1/2 坝高附近；向上游位移的最大值 26.8 cm，位于上游坝坡中部；向下游位移的最大值 45.6 cm，位于防渗墙上部。堰体最大主应力最大值 2.59 MPa，最小主应力最大值 1.31 MPa，位于堰体的中底部。防渗墙的位移、应力与应力水平沿高程的分布见图 2～6 示。水平位移最大值 45.0 cm，在高程 818.4 m 处，沉降最大值 21.0 cm，位于防渗墙顶部。最大主应力最大值 5.99 MPa，最小主应力最大值 1.41 MPa，位于防渗墙底部，局部存在较小的拉应力，防渗墙应力水平最大值 0.66，表明具备相当的安全裕度。

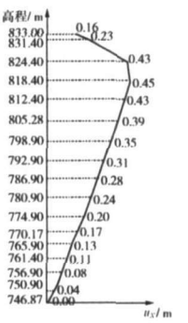


图 2 防渗墙的水平位移分布（方案 1）

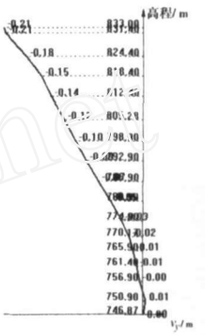


图 3 防渗墙的竖向位移分布（方案 1）

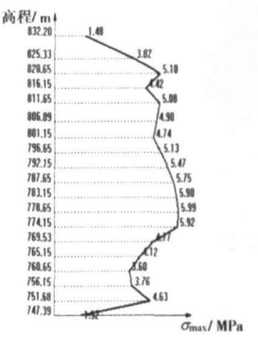


图 4 防渗墙的最大主应力分布（方案 1）

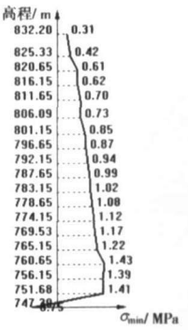


图 5 防渗墙的最小主应力分布（方案 1）

防渗墙顶部土工膜位移分布见图 7～10。水平段土工膜最大水平位移 36.0 cm，最大竖向位移 48.0 cm；斜铺段土工膜最大水平位移 42.0 cm，最大竖向位移 84.0 cm；竖

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

直段土工膜最大水平位移 36.0 cm，最大竖向位移 84.0 cm。

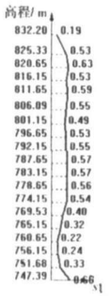


图 6 防渗墙的应力水平分布（方案 1）

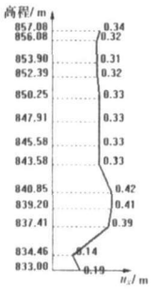


图 7 斜铺段土工膜的水平位移分布（方案 1）

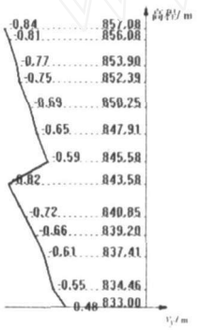


图 8 斜铺段土工膜的竖向位移分布（方案 1）

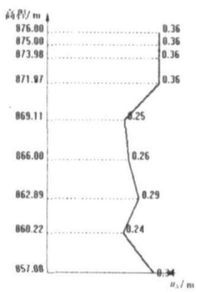


图 9 竖直段土工膜的水平位移分布（方案 1）

可见从防渗系统的应力与变形状态分析，围堰处于安全状态，设计方案是可行的。

3 参数敏感性分析

将各方案计算成果列于表 7～9 以便对比。

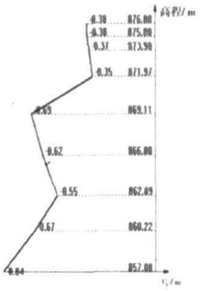


图 10 竖直段土工膜的竖向位移分布（方案 1）

表 7 各方案堰体的应力与位移最大值

方案	沉降/cm	向上游水平位移/cm	向下游水平位移/cm	大主应力/MPa	小主应力/MPa
1	99.4	26.8	45.6	2.59	1.31
2	101.0	29.5	46.2	2.60	1.31
3	81.3	38.4	38.3	2.64	1.30
4	96.7	25.8	45.3	2.58	1.30
5	99.9	29.3	47.8	2.60	1.30
6	116.0	35.6	44.3	2.65	1.33
7	119.0	40.4	44.3	2.66	1.33
8	99.5	28.00	45.00	2.59	1.31
9	96.5	25.7	46.7	2.58	1.30
10	101.0	26.3	44.2	2.60	1.31

表 8 各方案防渗墙的应力与位移最大值

方案	沉降/cm	水平位移/cm	最大主应力/MPa	最小主应力/MPa	应力水平
1	21.00	45.00	5.99	1.41	0.66
2	20.00	46.00	5.86	1.50	0.70
3	13.00	28.00	5.19	1.54	0.60
4	4.00	45.00	15.29	1.44	0.98
5	3.00	46.00	13.82	1.43	0.73
6	31.00	44.00	7.30	1.46	0.82
7	30.00	44.00	7.20	1.48	0.75
8	21.00	45.00	5.97	1.47	0.67
9	3.00	47.00	18.94	1.42	0.99
10	32.00	44.00	3.06	1.41	0.72

表 9 各方案土工膜位移的最大值

方案	水平土工膜水平位移/cm	水平土工膜竖向位移/cm	斜铺土工膜水平位移/cm	斜铺土工膜竖向位移/cm	竖向土工膜水平位移/cm	竖向土工膜竖向位移/cm
1	36.00	48.00	42.00	84.00	36.00	84.00
2	34.00	65.00	42.00	83.00	42.00	83.00
3	17.00	51.00	28.00	69.00	28.00	69.00
4	36.00	44.00	43.00	84.00	37.00	83.00
5	36.00	62.00	48.00	82.00	43.00	82.00
6	31.00	65.00	41.00	96.00	27.00	92.00
7	28.00	81.00	45.00	95.00	36.00	92.00
8	35.00	48.00	41.00	85.00	36.00	85.00
9	32.00	44.00	43.00	84.00	37.00	84.00
10	34.00	51.00	41.00	86.00	36.00	86.00

3.1 覆盖层与填料参数的比较

方案 2 与方案 1 相比，地基覆盖层参数不变，围堰填料非线性本构的参数降低，堰体竖向位移和水平位移增加；防渗墙的水平位移略有增加，沉降略有降低，大主应力减小，小主应力增大，拉应力和应力水平增大；水平段土工膜竖向位移增大。

方案 3 与方案 1 相比，围堰填料参数不变，地基覆盖层非线性本构的参数增大，堰体竖向位移和向下游水平位移减小；防渗墙的沉降和水平位移有较大降低，最大主应力减小，最小主应力增大，应力水平降低；水平段土工膜的水平位移及其它段土工膜的水平位移和竖向位移有较大

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

降低。

防渗墙的变形量与分布规律主要受地基覆盖层和上游面混合料的非线性变形参数 k、n 和泊松比的控制，覆盖层和混合料越密实，刚性越大，处于其中的防渗墙变形量越小。因防渗墙大部分处于覆盖层中，其应力和变形对覆盖层更为敏感，刚性较大的覆盖层对防渗墙的侧向约束能力大，使墙体的水平位移和应力水平降低，安全裕度增大。

3.2　防渗墙混凝土塑性与刚性的比较

方案 4 与方案 1 相比，均采用第一套参数，方案 1 防渗墙采用塑性混凝土，而方案 4 采用刚性混凝土；方案 5 与方案 2 相比，均采用第二套参数，方案 2 防渗墙采用塑性混凝土，而方案 5 采用刚性混凝土。

从计算结果的对比可见，相对填料和覆盖层，防渗墙很薄，其水平位移主要受填料和覆盖层的刚性控制，而与其自身的弹性模量关系不大，但防渗墙的沉降量与其自身弹性模量关系明显。当覆盖层和围堰填料参数相同，与塑性混凝土相比，刚性混凝土防渗墙的水平位移基本不变，竖向位移降低较多，拉应力和应力水平增大，最大主应力增加到超过 10 MPa，最大值 15 MPa。防渗墙采用塑性混凝土和刚性混凝土方案均可行，但塑性混凝土的应力状态较好，安全裕度更大。

3.3　塑性混凝土防渗墙参数的比较

方案 1 与方案 10 相比，覆盖层和填料均采用第一套参数，防渗墙厚 1.2 m；方案 1 采用塑性混凝土参数 1，其模量基数 k 为 16628；而方案 10 采用塑性混凝土参数 2，其模量基数 k 为 6800。方案 1 和方案 10 所得的防渗墙最大竖向位移分别为 21.0、32.0 cm，最大主应力的最大值分别为 5.99、3.06 MPa，拉应力最大值分别为 0.75、0.41 MPa。可见，与参数 1 相比，塑性混凝土参数 2 的模量更小，适应变形的能力更大，应力状态良好，安全裕度较大。

3.4　防渗墙厚度的比较

方案 1 与方案 6，均采用第一套参数和塑性混凝土防渗墙，方案 1 防渗墙厚 1.2 m，而方案 6 为 1.0 m；方案 2 与方案 7，均采用第二套参数和塑性混凝土防渗墙，方案 2 防渗墙厚 1.2 m，而方案 7 为 1.0 m。

从计算结果可见，当覆盖层和围堰填料参数相同，防渗墙采用塑性混凝土，其厚度由 1.2 m 减为 1.0 m 时，墙体的沉降增大，最大主应力增大，最大值 7.3 MPa，拉应力和应力水平增大，土工膜的竖向位移增大。防渗墙厚 1.2 m 和 1.0 m 均可行，但 1.2 m 厚防渗墙的最大主应力、拉应力和应力水平较小，安全裕度更大。

3.5　防渗墙底端沉渣的影响

方案 1 与方案 8 采用塑性混凝土防渗墙，方案 4 与方案 9 采用刚性混凝土防渗墙，填料和覆盖层均采用第一套参数，方案 1、4 考虑防渗墙底端有 40 cm 的沉渣，方案 8、9 防渗墙底端与基岩接触。计算结果显示：方案 1 与方案 8 差别很小；而方案 9 与方案 4 相比，防渗墙的拉应力由 1.08 MPa 增大到 1.40 MPa。可见当防渗墙采用塑性混凝土时，沉渣的影响不明显；防渗墙采用刚性混凝土时，防渗墙底端沉渣可在一定程度上改善墙体的应力状态。

4　结论与建议

(1) 从堰体和防渗墙的应力与变形状态分析，围堰处于安全状态，设计方案可行。

(2) 防渗墙的变形规律主要受覆盖层和上游侧混合料的变形参数控制，覆盖层和上游侧混合料越密实，刚性越大，防渗墙变形量越小。防渗墙的应力与变形对覆盖层更敏感，当覆盖层刚性增大，防渗墙的水平位移和应力水平降低，安全裕度增大。

(3) 当防渗墙塑性混凝土模量较小，其适应变形能力较大，应力状态更好，安全裕度较大。建议防渗墙采用塑性混凝土，其变形指标应尽量小，综合强度与变形指标两方面进行配方研究，选用“高强低弹”的材料。

(4) 防渗墙厚 1.2 m 和 1.0 m 的方案均可行，墙厚 1.2 m 时，墙体的最大主应力、拉应力和应力水平更小，安全裕度更大，且防渗效果更好。

(5) 当防渗墙刚性较大，墙底沉渣可在一定程度上改善墙体应力状态；当防渗墙较柔软，沉渣的影响不明显。

(6) 建议尽量夯实防渗墙附近的覆盖层，适当提高防渗墙附近填料的密实度，以增强其对防渗墙的约束能力，改善墙体的应力状态。

参考文献：

[1] 卢廷浩，汪荣大. 瀑布沟土石坝防渗墙应力变形分析[J]. 河海大学学报，1998,**26**(2): 41－44.

[2] 傅少君，陈胜宏. 瀑布沟堆石坝防渗体自适应有限元分析[J]. 岩土力学，2006,**27**(3): 499－504.

[3] 刘麟德，唐剑虹. 瀑布沟土石坝体及防渗墙的离心模型试验和数值分析[J]. 岩土工程学报，1994,**16**(2):38－47.

[4] 李凤鸣，饶锡保. “七五国家攻关”小浪底斜墙堆石坝离心模型试验研究[R]. 长江科学院，1990.

[5] 杜延龄. “八五国家攻关”高堆石坝关键技术问题研究[R]. 中国水利水电科学研究院，1995,**11**:28－30.

[6] 包承纲. 三峡工程深水高土石围堰的研究与实施[R].中国长江三峡开发总公司，长江科学院，长江委设计院，2002.

[7] 汪明元，程展林，李青云. 三峡工程二期深水围堰工程性状反分析研究[R]. 长江科学院，2006.

[8] 汪明元，陈　云，孙常青. 乌东德水电站预可研阶段土石围堰应力变形数值分析研究[R]. 长江科学院，2005.

[9] 丁红顺，龚壁卫，定培中. 乌东德水电站预可研河床深厚覆盖层力学特性研究[R]. 长江科学院，2005.

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net