

# 二滩拱坝运行期坝体水平位移分析

闵四海

(雅砻江流域水电开发有限公司二滩水力发电厂,四川 攀枝花 617000)

**摘要:**拱坝径向水平位移呈现“库水位升高或温降,坝体向下游位移,反之向上游位移”的变化规律;同时表现出“靠拱冠越近,位移越大”、“高程越高,位移越大”、“左岸大于右岸”的分布特点;定量分析成果表明,水压荷载是影响径向水平位移的主要因素,时效作用次之,温度位移相对较小。并且,呈现“库水位升高或温降,坝体向两岸位移,反之向河床回弹”的变化规律;同时表现出“左右1/4拱处位移较大,拱冠和拱端位移较小”、“高程越高,位移越大”的分布特点。

**关键词:**二滩拱坝;水平位移;特征值分析;时间过程分析;统计模型分析

中图分类号:TV642.4+2;TU196+.4

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2014)04-0094-08

## 1 引言

二滩水电站位于四川省攀枝花市雅砻江干流,系雅砻江梯级开发的第一座电站,电站以发电为主,总装机3300 MW,是20世纪我国建成的最大水电站。电站枢纽由混凝土双曲拱坝、泄洪建筑物、消能建筑物、输水建筑物和地下厂房等组成。

二滩拱坝坝高240 m,坝顶弧长774.69 m,作为我国建成的第一座200 m级特高拱坝,已成功运行十多年,对目前我国新投入运行的锦屏一级(305 m)、溪洛渡(坝高285.5 m)等特高拱坝的安全运行具有一定的参考作用,因此,分析二滩拱

坝运行期的坝体变形具有重要的工程参考价值。

二滩拱坝从1998年下闸蓄水以来,取得了大量的坝体变形监测数据,为掌握200 m以上特高拱坝坝体变形的影响因素、变化规律及特征等提供了宝贵的第一手资料。

## 2 水平位移监测仪器布置

二滩拱坝水平位移监测,主要利用拱坝垂线系统和外部变形观测网,其中垂线系统采用人工读数盘(人工)和垂线坐标仪(自动)观测,外部变形观测网采用大地测量法观测。水平位移监测布置图(如图1)。

为监测拱冠、拱肩及1/4拱圈等部位的水平

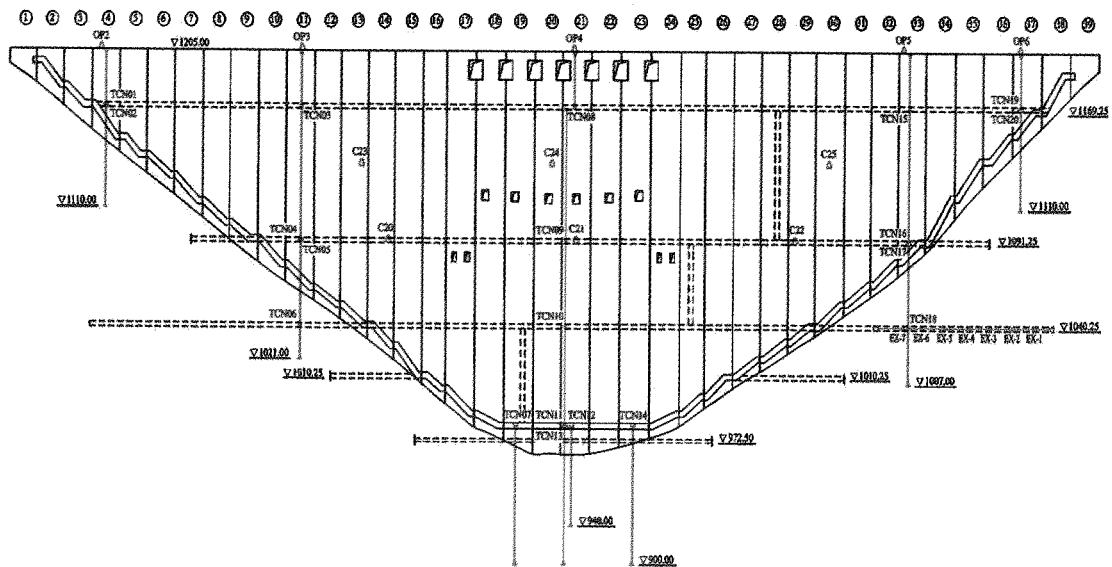


图1 水平位移测点布置图(上游立面)

位移,在#4、#11、#21、#33和#37坝段5个断面布

收稿日期:2014-07-15

置了8条倒垂线和10条正垂线,组成5组正倒垂线组,共计20个测点。正、倒垂线测点布置情况 (详见表1)。  
二滩拱坝垂线系统的观测频次(人工每周1

表1 正、倒垂线测点布置一览表

序号	测点编号	所在坝段	垂线性质	仪器高程/m	量测区间
1	TCN1	4#	正垂线	1 171.05	1 203.50 m~1 171.05 m
2	TCN2	4#	倒垂线	1 169.50	1 171.05m~1 100.00 m
3	TCN3	11#	正垂线	1 171.05	1 203.50 m~1 171.05 m
4	TCN4	11#	正垂线	1 093.05	1 171.05 m~1 093.05 m
5	TCN5	11#	倒垂线	1 091.50	1 091.50 m~1 021.00 m
6	TCN6	11#	倒垂线	1 041.34	1 041.34 m~1 021.00 m
7	TCN7	19#	倒垂线	980.50	980.50 m~900.00 m
8	TCN8	21#	正垂线	1 171.05	1 203.50 m~1 171.05 m
9	TCN9	21#	正垂线	1 093.05	1 171.05 m~1 093.05 m
10	TCN10	21#	正垂线	1 043.05	1 093.05 m~1 043.05 m
11	TCN11	21#	正垂线	982.05	1 043.05 m~982.05 m
12	TCN12	21#	倒垂线(上游侧)	980.05	980.05 m~940.00 m
13	TCN13	21#	倒垂线(下游侧)	980.05	980.05 m~900.00 m
14	TCN14	23#	倒垂线	980.50	980.50 m~900.00 m
15	TCN15	33#	正垂线	1 171.05	1 203.50 m~1 171.05 m
16	TCN16	33#	正垂线	1 091.05	1 171.05 m~1 093.05 m
17	TCN17	33#	倒垂线	1 091.50	1 091.50 m~1 007.00 m
18	TCN18	33#	倒垂线	1 042.37	1 041.34 m~1 007.00 m
19	TCN19	37#	正垂线	1 171.05	1 203.50 m~1 171.05 m
20	TCN20	37#	倒垂线	1 169.50	1 171.05 m~1 100.00 m

表2 坝体径向水平位移特征值统计表

测点编号	部位	高程/m	最大值		最小值		最大年变幅	
			测值/mm	日期(年-月-日)	测值/mm	日期(年-月-日)	变幅/mm	年份
TCN1	4#坝段	1 203.50	3.86	2010-11-03	-1.29	2003-04-10	4.40	2010
TCN2		1 171.05	2.02	2007-12-12	-0.40	2008-06-11	2.19	2012
TCN3		1 203.50	61.11	2012-10-23	17.25	2002-05-09	39.78	2005
TCN4	11#坝段	1 171.05	51.90	2012-10-23	0.64	1998-05-12	29.81	2005
TCN5		1 091.50	20.70	2008-12-24	-0.47	1998-04-23	13.37	1998
TCN6		1 041.34	5.22	2012-10-31	-0.96	1998-05-09	2.41	1998
TCN7	19#坝段	980.50	6.35	2005-09-27	-0.28	1998-04-29	4.02	1998
TCN8	21#坝段	1 203.50	134.58	2012-10-23	44.47	2001-05-10	67.70	2005
TCN9		1 171.05	122.04	2012-10-23	12.05	1998-05-14	58.31	2005
TCN10		1 093.05	76.38	2012-12-26	-3.97	1998-05-01	30.54	2005
TCN11	23#坝段	1 043.05	39.54	2012-12-26	-1.79	1998-04-15	18.94	1998
TCN12		980.05	14.08	2011-12-07	-0.32	1998-03-05	8.52	1998
TCN13		980.05	12.24	2008-12-17	-1.50	1998-03-14	6.87	1998
TCN14	33#坝段	980.50	10.15	2009-10-28	-1.50	1998-04-17	5.52	1998
TCN15		1 203.50	44.85	2012-12-26	15.47	2001-05-10	27.83	2005
TCN16		1 171.05	40.15	2012-12-26	-0.73	1998-05-12	21.14	2005
TCN17	37#坝段	1 091.50	9.83	2004-01-26	-1.04	1998-05-01	7.23	1998
TCN18		1 041.34	1.50	2007-09-06	0.05	1998-03-04	1.07	1998
TCN19		1 203.50	5.43	2005-01-05	-1.97	1999-06-02	5.09	2005
TCN20		1 171.05	3.66	2005-01-05	-0.12	1999-06-01	3.22	1999

次,自动化每天2次)要高于外部变形观测网的观测频次(大地测量每季度1次),垂线的监测成果能够更加全面地反映坝体水平位移的变化规律。垂线人工与自动化监测成果总体趋势是一致

的,但由于垂线坐标仪和采集单元不同程度进行过维护和改造,导致自动化测值中不可避免地混入了部分系统误差和人为误差,可认为自动化监测成果的可靠性总体上要低于人工监测成果。因

此,本文以垂线人工监测数据作为坝体水平位移分析的主要依据。

### 3 特征值分析

#### 3.1 径向水平位移

统计坝体径向水平位移特征值(见表2)。因初期蓄水阶段部分测点观测数据不够连续完整,故表中相应测点特征值的统计时段不包括蓄水初期。

由上表可以看出:(1)各测点径向水平位移的最大值多发生在低温高水位季节(10~12月

份),坝顶径向位移最大值在3.86~134.58 mm之间,最大年变幅在4.40~67.70 mm之间;最小值一般发生在高温低水位季节(4~6月份)。(2)同一高程不同坝段,靠拱冠越近,径向位移越大。(3)同一坝段不同高程,高程越高,径向位移越大。

#### 3.2 切向水平位移

统计坝体切向水平位移特征值(见表3)。因初期蓄水阶段部分测点观测数据不够连续完整,故表中相应测点特征值的统计时段不包括蓄水初期。

表3 坝体切向水平位移特征值统计表

测点 编号	部位	高程 /m	向左岸变形最大值		向右岸变形最大值		最大年变幅	
			测值 /mm	日期 (年-月-日)	测值 /mm	日期 (年-月-日)	变幅 /mm	年份
TCN1	4#坝段	1 203.50	3.35	2008-12-17	0.00	2004-05-24	3.10	2010
TCN2		1 171.05	2.13	2008-12-03	0.11	1999-05-17	0.98	2008
TCN3		1 203.50	21.32	2005-12-26	10.14	2002-5-30	10.71	2009
TCN4	11#坝段	1 171.05	20.21	2009-01-07	1.10	1998-05-17	10.11	1998
TCN5		1 091.50	11.29	2009-01-07	-0.06	1998-04-10	6.15	1998
TCN6		1 041.34	2.01	2012-10-31	-0.77	1998-05-09	1.43	1998
TCN7	19#坝段	980.50	2.31	2008-08-20	-1.22	1998-05-04	2.51	2007
TCN8		1 203.50	10.84	2008-12-24	-3.64	2001-05-16	11.44	2004
TCN9		1 171.05	10.81	2008-12-24	-2.67	2001-05-16	10.51	2004
TCN10	21#坝段	1 093.05	8.67	2008-12-24	-2.02	1998-05-13	6.89	1998
TCN11		1 043.05	7.46	2008-12-24	-1.25	1998-01-05	6.60	1998
TCN12		980.05	3.40	1999-12-27	0.02	1998-01-05	2.94	1998
TCN13	23#坝段	980.05	4.14	2001-12-02	-0.73	1998-05-06	2.79	1998
TCN14		980.50	3.82	1998-10-26	-2.66	2007-11-28	3.63	1998
TCN15		1 203.50	-7.25	2001-04-13	-19.75	2008-12-24	9.05	2005
TCN16	33#坝段	1 171.05	-2.59	1998-05-12	-18.33	2008-12-24	7.79	2005
TCN17		1 091.50	0.44	1998-04-30	-10.30	2005-11-01	7.12	1998
TCN18		1 041.34	0.65	2001-03-14	-1.14	2008-10-08	1.10	1998
TCN19	37#坝段	1 203.50	0.89	2001-05-23	-2.90	2011-11-09	2.82	2001
TCN20		1 171.05	0.08	1999-05-31	-3.43	2011-11-09	2.23	1999

由上表可以看出:(1)切向水平位移总体表现为左岸坝段向左岸变形、右岸坝段向右岸变形的特征,左(右)岸坝段向左(右)岸变形的最大值多发生在低温高水位季节,左岸4#坝段、11#坝段坝顶向左岸位移最大值为3.35 mm和21.32 mm,右岸33#坝段、37#坝段坝顶向右岸位移最大值为-19.75 mm和-2.90 mm;左(右)岸坝段向右(左)岸变形的测值较小且一般发生在高温低水位季节。(2)左1/4拱(11#坝段)和右1/4拱(33#坝段)处切向变形较大,而拱端部位(4#坝段、37#坝段)切向位移较小。(3)同一坝段不同高程,高程越高,切向变形越大。

#### 4 时间过程分析

#### 4.1 径向水平位移

绘制蓄水以来坝体典型部位径向水平位移过程线(见图2)。

由以上各图可以看出:(1)坝体径向位移随库水位呈明显的年周期性变化,且与库水位正相关,即库水位上升,坝体向下游位移,反之则向上游回弹;同时,持续高水位作用时间越长,径向位移值越大。(2)蓄水初期,由于坝地质构造(断层、节理裂隙等)的压缩变形以及坝体的徐变等,坝体产生了较大的不可逆位移,之后时效位移发展趋缓或停止,逐步进入弹性工作状态。(3)坝基径向位移同样受库水位变化影响,存在缓慢的向下游的趋势性变化。

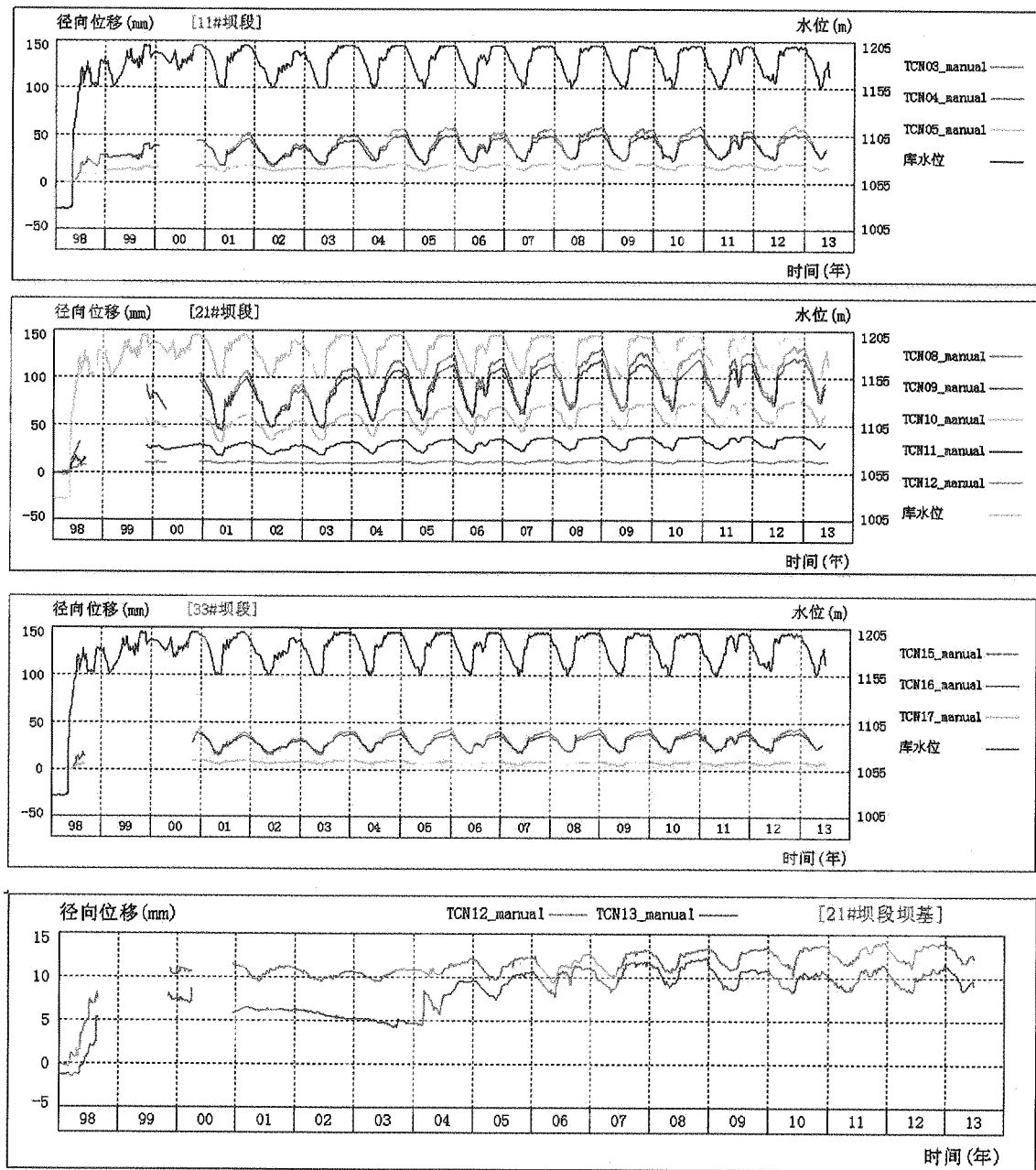
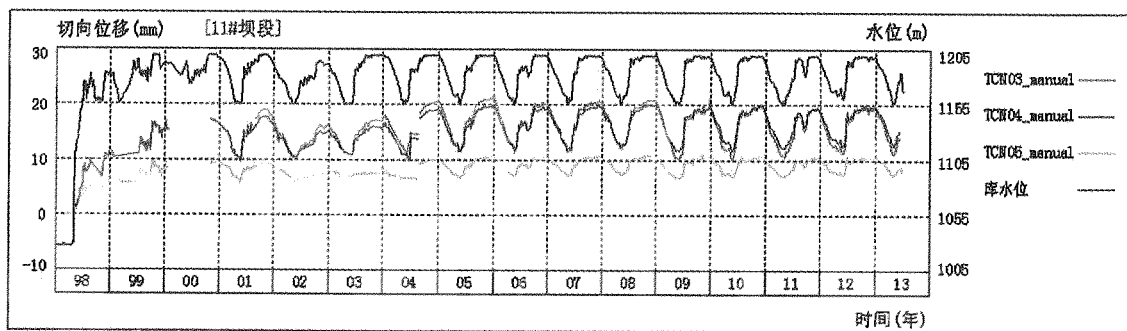


图2 典型测点径向位移与库水位过程线  
程线(见图3)。

4.2 切向水平位移

绘制蓄水以来坝体典型部位切向水平位移过



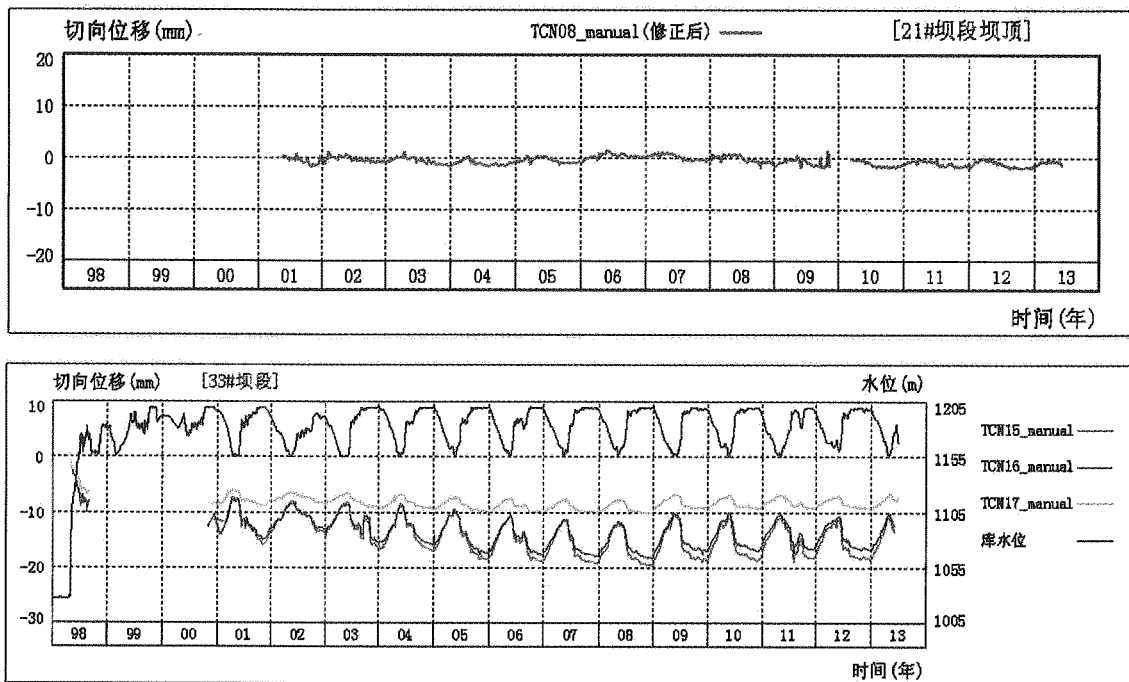


图3 典型测点切向位移与库水位过程线

由以上各图可以看出:(1)坝体切向位移变化规律不明显。左右1/4拱部位(11#坝段、33#坝段)有年周期性变化,测值变幅较大;拱端(4#坝段、37#坝段)测值变幅较小;拱冠21#坝段年周期性规律不强,测值变化平稳。(2)切向位移主要受库水位变化影响,表现为库水位升高,坝体向两岸位移,反之则向河中回弹;拱冠21#坝段受库水位变化影响不明显。(3)蓄水初期,左右岸坝段分别产生了向两岸的不可逆变形,此后时效位移逐渐收敛,基本趋于稳定。

### 5 统计模型分析

通过以上定性分析可知,坝体水平位移具有一定的时空分布及变化规律,主要受库水位和温度等荷载因素及不可逆变形的影响,此外还与自身结构特性(坝基条件、体型、材料特性等)有关。为进一步确定各种因素的影响程度,选取测值规律性较好的典型测点建立统计模型进行定量分析。考虑前期数据不太完整,本次确定的建模时段为2001年5月~2013年6月。

#### 5.1 统计模型

影响大坝位移量的主要作用因子是水压荷载、温度荷载,主要因素是坝体混凝土材料特性、坝基材料特性以及各种作用效应的时效及残余变

形分量等,采用以下数学模型表示坝体某一点的位移 $\delta$ :

$$\delta = \delta_H + \delta_T + \delta_\theta$$

式中  $\delta_H$  为大坝上、下游水位引起的弹性位移分量; $\delta_T$  为温度变化引起的弹性位移分量; $\delta_\theta$  为非弹性位移分量,即时效位移分量。

根据坝工理论分析成果,拱坝坝体任一点的水压位移一般与坝前水深  $H$  及其二、三、四次方成比例,可以将水压位移分量  $\delta_H$  表示成上述因子的线性组合形式:

$$\delta_H = a_0 + \sum_{i=1}^4 a_i H^i$$

式中  $a_0, a_i$  为水压因子回归系数。

二滩拱坝内部温度场已趋向稳定,混凝土水化热已释放完毕,而坝体边界温度的变化是由于环境气温的季节性变化引起的,考虑坝体混凝土温度滞后边界温度的相位,温度位移分量  $\delta_T$  采用多段平均气温的线性组合形式表示:

$$\delta_T = b_0 + b_1 T_0 + b_2 T_7 + b_3 T_{10} + b_4 T_{20} + b_5 T_{30}$$

式中  $T_0, T_7, T_{10}, T_{20}, T_{30}$  为当天、前7天、10天、20天、30天的平均气温; $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$  为温度因子回归系数。

对于运行正常的大坝来说,时效位移的一般规律是:初期变化快,后期变化慢,最终趋于稳定。

结合二滩拱坝具体情况,拟定时效因子为  $\theta$  和  $\ln(1 + \theta)$ ,即时效位移分量  $\delta_\theta$  表示为:

$$\delta_\theta = c_0 + c_1\theta + c_2\ln(1 + \theta)$$

式中  $\theta$  为从正式蓄水日1998年5月1日至观测日的累计天数除以100; $c_0$ 、 $c_1$ 、 $c_2$  为时效因子回归系数。

综上,由各位移分量叠加得到坝体位移表达式为:

$$\delta = \sum_{i=1}^4 a_i H^i + b_1 T_0 + b_2 T_7 + b_3 T_{10} + b_4 T_{20} + b_5 T_{30} + c_1\theta + c_2\ln(1 + \theta) + C$$

式中  $C$  为合并各位移分量回归系数中的常数项,即  $C = a_0 + b_0 + c_0$ 。

### 5.2 计算结果

根据上述统计模型,对坝体水平位移典型测点实测数据进行逐步回归分析,通过分析计算,水平位移分量分解及统计成果(见表4、表5),典型坝段测点实测值、拟合值及各分量过程线(见图4)。

根据上述成果表和过程线图,可以看出以下特征:

#### (1) 水压位移分量

影响坝体水平位移的主要因素是库水位,各测点径向位移水压分量变幅在2.29~53.22 mm之间,约占总变幅的45%~69%,平均占55%;切向位移水压分量变幅在2.22~7.54 mm之间,约占总变幅的44%~81%。水压位移分量的空间分布规律表现为:同一高程径向位移水压分量呈“拱冠最大,11#坝段次之,33#坝段最小”分布;切向位移水压分量左岸略大于右岸;同一坝段水压

位移分量随高程增大而增大;这与二滩拱坝的结构特点相符。

#### (2) 温度位移分量

环境温度变化对坝体水平位移有一定影响,各测点径向位移温度分量变幅在0.62~15.95 mm之间,约占总变幅的9%~30%,平均占17%;切向位移温度分量变幅在0.39~1.96 mm之间,约占总变幅的9%~22%。温度位移分量的变化规律表现为:温降坝体向下游位移的同时向两岸位移,温升坝体向上游位移同时向河床回弹,这与定性分析的结论一致。

#### (3) 时效位移分量

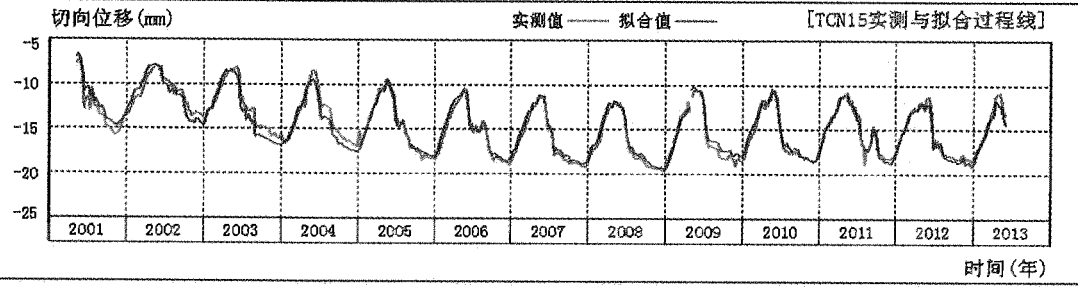
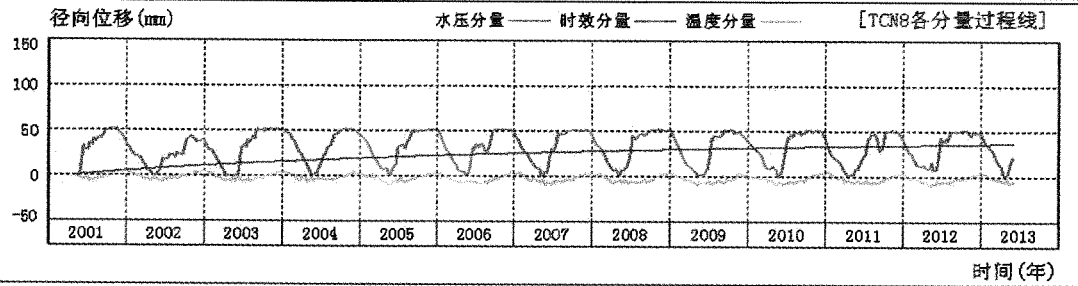
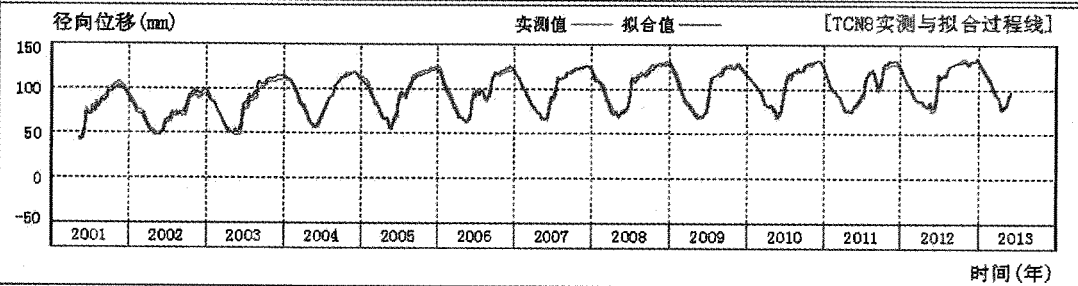
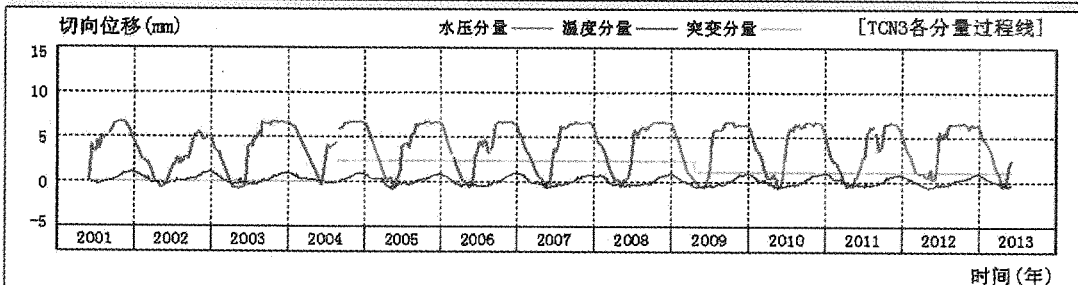
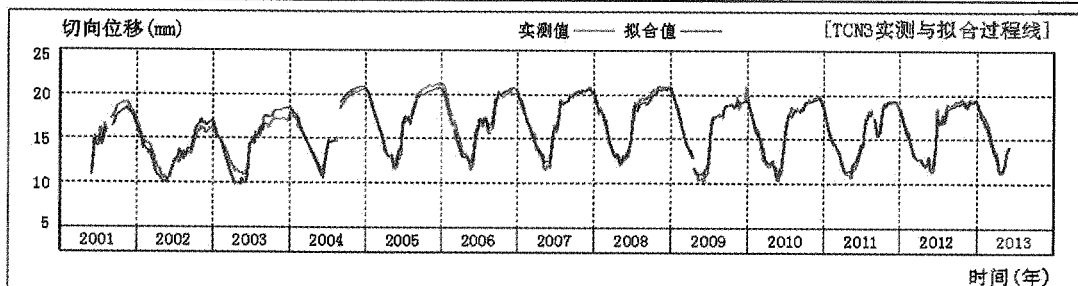
前期时效位移对坝体水平位移有重要影响,随着时间推移和加卸载次数增加,这种影响逐步减小;2001年5月至2013年6月,坝体径向位移时效分量变幅在0.74~36.64 mm之间,约占总变幅的16%~43%,平均占28%;左岸11#坝段切向位移已无时效分量,右岸33#坝段切向位移时效分量变幅在1.90~6.89 mm之间,约占总变幅的42%~45%,左右岸有差异,很可能是因为右岸坝基软弱蚀变带和断层的压缩变形所致。时效位移分量的变化规律表现为:在持续水压荷载作用下,坝体产生向下游和两岸的时效位移,前期增长较快,后期趋缓并逐步收敛;至2013年,坝基径向位移(TCN5、TCN12、TCN17)已基本稳定,坝顶径向位移尚未完全稳定,左岸11#坝段切向位移已经稳定,右岸33#坝段中上部还有少量的时效位移。

表4 坝体径向位移分量分解成果表

测点	坝段	高程 /m	水压分量 /mm			温度分量 /mm			时效分量 /mm			各分量占比 /%		
			最大	最小	变幅	最大	最小	变幅	最大	最小	变幅	水压	温度	时效
TCN3	11#	1 203.50	28.21	-1.69	29.90	4.10	-3.83	7.93	11.48	0	11.48	61	16	23
TCN4		1 171.05	22.30	-0.85	23.15	3.28	-3.20	6.48	9.10	0	9.10	60	17	23
TCN5		1 091.50	4.97	-1.06	6.04	0.97	-0.22	1.19	1.51	0	1.51	69	14	17
TCN8		1 203.50	52.13	-1.09	53.22	5.44	-10.51	15.95	36.64	0	36.64	50	15	35
TCN9	21#	1 171.05	45.25	-1.16	46.41	5.31	-9.39	14.70	32.11	0	32.11	50	16	34
TCN10		1 093.05	24.47	-0.54	25.01	1.84	-3.56	5.40	20.77	0	20.77	49	11	41
TCN11		1 043.05	12.30	-0.27	12.57	0.85	-1.41	2.26	10.37	0	10.37	50	9	41
TCN12		980.05	1.83	-0.46	2.29	0.51	-0.11	0.62	2.19	0	2.19	45	12	43
TCN15	33#	1 203.50	18.16	-0.43	18.59	3.92	-6.95	10.87	7.35	0	7.35	51	30	20
TCN16		1 171.05	14.14	-0.84	14.98	3.62	-3.87	7.49	5.08	0	5.08	54	27	18
TCN17		1 091.50	2.86	-0.15	3.01	0.31	-0.48	0.79	0.74	0	0.74	66	17	16

表5 坝体切向位移分量分解成果表

测点	坝段	高程 /m	水压分量 /mm			温度分量 /mm			时效分量 /mm			各分量占比 /%		
			最大	最小	变幅	最大	最小	变幅	最大	最小	变幅	水压	温度	时效
TCN3		1 203.50	6.75	-0.79	7.54	1.15	-0.81	1.96	0	0	0	79	21	0
TCN4	11#	1 171.05	6.27	-0.25	6.52	0.79	-0.71	1.50	0	0	0	81	19	0
TCN5		1 091.50	2.53	-0.61	3.14	0.75	-0.14	0.89	0	0	0	78	22	0
TCN15		1 203.50	0.11	-6.71	6.82	1.12	-0.68	1.80	0	-6.89	6.89	44	12	44
TCN16	33#	1 171.05	0.23	-5.64	5.87	0.82	-0.52	1.34	0	-5.83	5.83	45	10	45
TCN17		1 091.50	0.11	-2.11	2.22	0.24	-0.15	0.39	0	-1.90	1.90	49	9	42



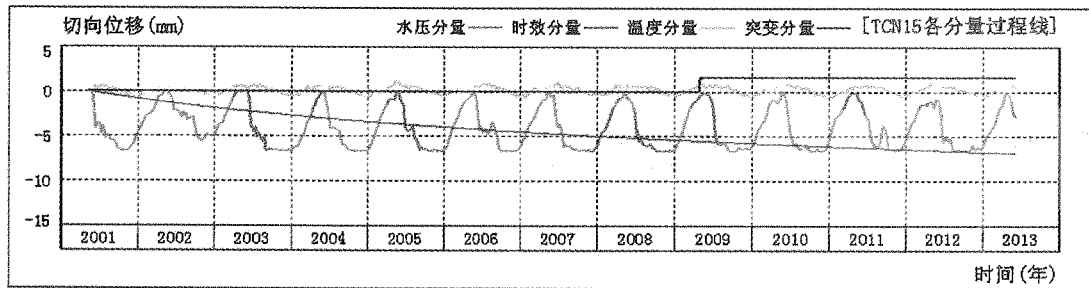


图4 典型坝段坝体径向水平位移实测值、拟合值及各分量过程线

## 6 结论

本文通过对二滩拱坝水平位移实测资料进行分析,可以得出以下结论:

(1)拱坝径向水平位移呈现“库水位升高或温降,坝体向下游位移,反之向上游位移”的变化规律;同时表现出“靠拱冠越近,位移越大”、“高程越高,位移越大”、“左岸大于右岸”的分布特点;定量分析成果表明,水压荷载是影响径向水平位移的主要因素,时效作用次之,温度位移相对较小,三者平均占比依次为55%、28%、17%。

(2)拱坝切向水平位移呈现“库水位升高或温降,坝体向两岸位移,反之向河床回弹”的变化规律;同时表现出“左右1/4拱处位移较大,拱冠和拱端位移较小”、“高程越高,位移越大”的分布特点;定量分析成果表明,左岸11#坝段切向位移主要受水压和温度作用影响,水压分量和温度分量分别占80%、20%,已无时效分量,右岸33#坝

段切向位移主要受水压和时效作用影响,温度分量相对较小,三者平均占比依次为46%、44%、10%,左右岸坝段时效作用的这种差异很可能是因为右岸坝基存在软弱岩带和断层。

(3)坝体存在向下游和两岸的时效位移,时效位移初期发展迅速,增长较快,之后逐渐变慢并趋于收敛;坝基径向位移至2013年已基本稳定;坝顶径向位移尚未完全稳定;左岸切向位移已基本稳定,右岸中上部高程仍未稳定。

### 参考文献:

[1] 吴中如. 水工建筑物安全监控理论及其应用[M]. 北京: 高度教育出版社, 2003

### 作者简介:

闽四海(1976-),男,湖南常德人,工程师,雅砻江流域水电开发有限公司二滩水力发电厂水工部副主任。

(责任编辑:卓政昌)

## 三峡工程2014年试验性蓄水于9月15日启动

据悉,根据国家防总的批复,三峡工程2014年试验性蓄水将于9月15日正式启动。根据国家防总的批复,一般情况下,9月15日至9月底,三峡水库下泄流量不小于10000立方米每秒;10月下泄流量不小于8000立方米每秒;11月至12月下泄流量按葛洲坝[0.00% 资金研报]下水位不低于39.0米和三峡电站保证出力对应的流量控制,10月底或11月份争取蓄至175.0米。各阶段具体水位控制可根据上下游实时雨水情及其预测、防汛抗旱形势、上游水库蓄水状况和重庆市主城区河段泥沙淤积情况经批复作适当调整。实时水情显示,10日14时,三峡入库流量23000立方米每秒,出库流量25900立方米每秒,坝前水位162.76米,高于往年同期水位。

## 四川雅砻江两河口水电站项目获国家发改委核准

2014年9月10日从省发改委获悉,雅砻江两河口水电站项目获国家发改委核准。两河口水电站位于四川甘孜州雅江县境内的雅砻江干流上,电站总装机为300万千瓦,年发电量110亿千瓦时,工程动态总投资664.57亿元。水库淹没影响和建设征地涉及甘孜州雅江县、道孚县、理塘县、新龙县的20个乡镇、82个行政村。省发改委表示,此项目将对合理开发利用雅砻江干流水能资源,增加四川省电网电力供应,满足电网用电增长需要,改善四川省电网电源结构和供电质量,促进民族地区经济和社会发展起到重要作用。

## 2014年南方七省(区)施工暨水电站运行管理专委会学术年会在湘召开

9月2日,“2014年青云贵州粤桂湘七省(区)施工暨水电站运行管理专业委员会学术年会”在湖南长沙顺利召开。各学会的领导、专家共计130余人参加了会议。会议共收到论文110余篇,内容涵盖施工组织设计、施工技术应用、工程设计方案优化、科研试验、关键技术创新,电厂发电运行、设备维护、运行监控与管理,水库调度管理、工程质量控制等诸多方面,题材广泛、见解独特,具有很高的理论和实践价值。