“5.12”汶川地震对紫坪铺混凝土面板坝的影响及原因分析

陈生水，霍家平，章为民
(南京水利科学研究院，江苏 南京 210029)

摘 要：“5.12”汶川大地震导致紫坪铺混凝土面板堆石坝产生了最大为100 cm的沉降和60 cm的水平位移，如此大的地震永久变形，使得上游混凝土面板大面积脱空，库水位以上混凝土面板分期施工缝出现明显错台，面板垂直向接缝发生挤压破坏。在现场调查的基础上，对该坝地震损伤原因进行了分析，并对今后混凝土面板堆石坝的地震反应计算分析研究、抗震设计工作以及紫坪铺混凝土面板堆石坝震后修复原则提出了相应的建议。

关键词：“5.12”汶川地震；紫坪铺混凝土面板坝；地震损伤；损伤机理分析
中图分类号：TV641.4；P631.4 文献标识码：A 文章编号：1000－4548(2008)06－0795－07

作者简介：陈生水(1962－)，男，江苏高淳人，教授级高级工程师，博士，主要从事岩土工程的科学研究和技术咨询工作。E-mail: sschen@nhri.cn。

Analysis of effects of “5.12” Wenchuan Earthquake on Zipingpu Concrete Face Rock-fill Dam

CHEN Sheng-shui，HUO Jia-ping，ZHANG Wei-min
(Nanjing Hydraulic Research lnstitute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Zipingpu Concrete Face Rock-fill Dam was considerably damaged by “5.12” Wenchuan Earthquake. The site investigation showed that the maximum permanent settlement was about 100 cm and the horizontal displacement was about 60 cm as a result of the earthquake. The separation between the concrete face and the cushion layer plane was large in area, the dislocation of the construction joints of the concrete face above the reservoir water level was obvious, and the crushed damage of the vertical joints of the concrete face also occurred because of the permanent displacement due to the earthquake. Based on the field investigation, the damage mechanism was analyzed, and proposals were put forward on the future analytical computation of the earthquake effects on concrete face rock-fill dams, anti-earthquake design and the principle for the rehabilitation of the Zipingpu Concrete Face Rock-fill Dam damaged by the earthquake.

Key words: “5.12” Wenchuan Earthquake; Zipingpu Concrete Face Rock-fill Dam; earthquake damage; damage mechanism analysis

1 工程概况

紫坪铺水利枢纽工程位于四川省成都市西北 60 km 的都江堰市麻溪乡境内的岷江上游，下游距都江堰市9 km。拦河大坝为钢筋混凝土面板堆石坝。最大坝高156 m，坝顶高程884.00 m，坝顶全长663.77 m，坝顶宽12.0 m，上游坝面坡度为1∶1.4，高程840.00 m马道以上的下游坝面坡度为1∶1.5，高程840.00 m马道以下的下游坝面坡度为1∶1.4。大坝的平面布置和最大断面见图 1 和图 2。坝址以上控制流域面积22662 km^2，多年平均流量46 m^3/s，年径流量148亿m^3，水库正常蓄水位877.00 m，总库容11.12亿m^3，是一座以灌溉和供水为主，兼有发电、防洪、环境保护、旅游等综合效益的大（Ⅰ）型水利工程，也是都江堰和成都市的水源工程。该工程区位于龙门山断裂构造带南段，在北川—映秀与灌县—安县断裂之间，经国家地震局分析预报中心复核鉴定确认，坝址场地地震基本烈度为7度，50 a超越频率0.10和100 a超越频率0.02时的基岩水平峰值加速度分别为120.2 gal和259.6 gal。水库于2005年蓄水并开始发电。

2008年5月12日，距紫坪铺大坝以西约17 km

收稿日期：2008－06－10

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

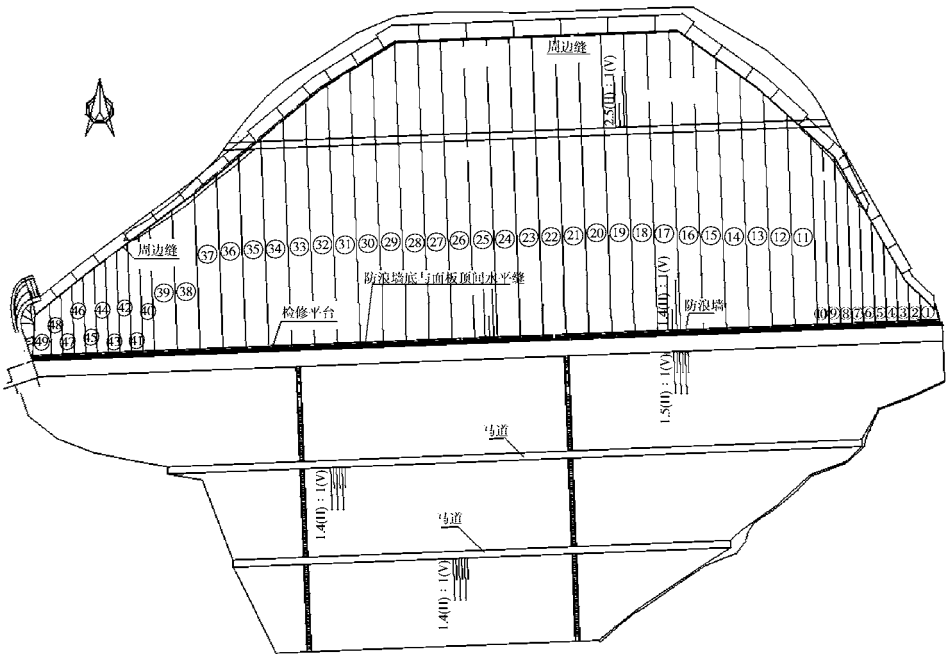


图 1 紫坪铺大坝平面布置图

Fig. 1 Layout of Zipingpu Concrete Face Rock-fill Dam

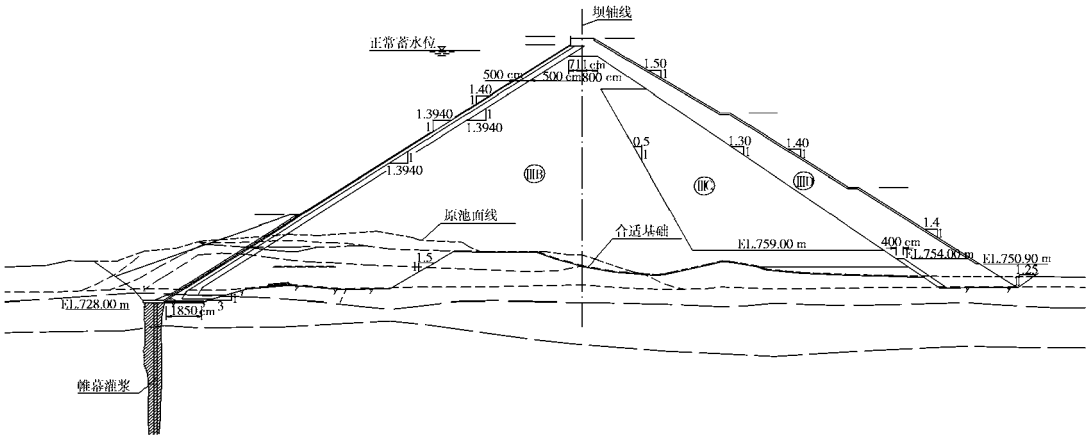


图 2 紫坪铺大坝典型断面图

Fig. 2 Typical section of Zipingpu Concrete Face Rock-fill Dam

的汶川县境内发生了里氏 8.0 级的大地震，震中烈度达 11 度，根据安装在大坝坝顶地震加速度仪测得的峰值加速度推算，坝体基岩地震加速度峰值超过 500 gal，烈度超过 9 度，远超过了大坝的设防烈度，造成了明显的损伤。

2　大坝震损情况及原因分析

迄今为止，国内外尚未有钢筋混凝土面板堆石坝经受过如“ 5.12 ”汶川地震这样高烈度地震的考验。为确保紫坪铺大坝安全，同时为今后面板坝的抗震设计和除险加固积累经验，“ 5.12 ”汶川大地震发生后，国家水利部在第一时间派出专家组赶赴大坝现场，对大坝经受地震后的损伤情况进行调查，较为全面地摸清了“ 5.12 ”汶川大地震对紫坪铺大坝造成的损伤。

2.1　大坝变形

地震导致大坝产生了明显的变形。安装在坝顶上游防浪墙上的变形标点的观测结果表明，地震导致大坝坝顶瞬间产生了较大震陷，最大沉降值为 683.9 mm，位于坝顶河床中部大坝最大断面，由于余震和大坝震后应力、变形重分布，5 月 17 日，沉降量增大到 744.3 mm。震后沉降发展过程见图 3。从图 3 可以发现，地震发生后沉降速率迅速衰减，至 5 月 22 日已基本趋于稳定。图 4 给出了 5 月 17 日大坝震陷量沿坝轴线的分布。随着坝体堆石厚度的减小，震陷量变小。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

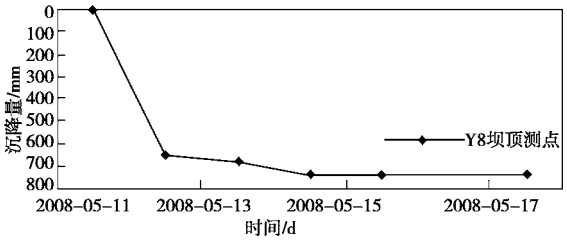
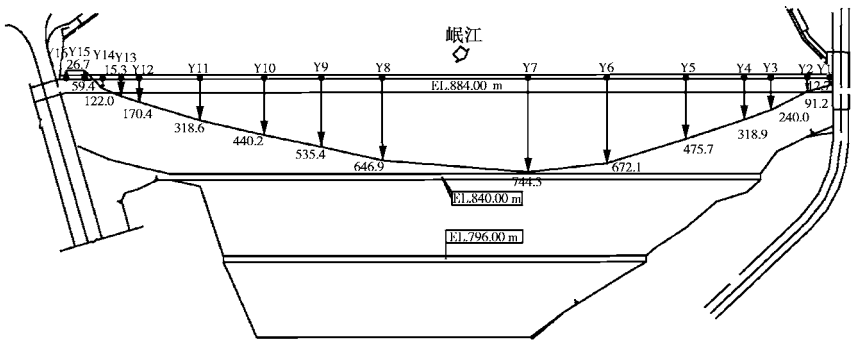


图 3 “ 5.12 ”汶川地震对紫坪铺大坝产生的附加沉降过程线

Fig. 3 Relationship between settlement and time of Zipingpu Concrete Face Rack-fill Dam due to “5.12” Wenchuan Earthquake

图 5 则是安装在堆石坝体内部水管式沉降仪观测到的沉降分布，从图中可以发现，随着坝体高程的增加，震陷量增大，安装在 850.00 m 高程处的 V25 沉降仪测得的最大沉降量为 810.3 mm。根据已有的研究成果[1]，850.00 m 高程以上坝体的沉降量将更大。显然，大坝内部观测仪器测得的坝体震陷量较上游侧防浪墙上的变形标点的观测结果大，这主要是防浪墙受上游混凝土面板约束所致。钻孔结果表明防浪墙底板下存在约 200 mm 脱空，这进一步证实了上述分析。因此，初步推算“ 5.12 ”汶川大地震导致紫坪铺大坝最大断面下游坝坡顶附近产生了约 100 cm 的震陷。图 6 为防浪墙上变形标点所测地震水平位移沿坝轴线的分布。从图中可以看出，地震导致大坝上游坝顶产生的水平位移指向下游，最大值为 199.9 mm。由于河谷形状的影响，左右两坝段的位移均指向河谷中央大坝最大断面处，岸坡较陡的左坝段位移较右坝段大，最大值为 226.1 mm。图 7 和图 8 分别为大坝下游坝坡和坝体内部所测水平位移的分布，可以发现，地震引起的下游坝坡的水平位移较上游防浪墙顶大，随着大坝高程增加，水平位移增大，下游坝坡 854.00 m 高程处的水平位移为 270.8 mm，可以推断，下游坝坡和坝顶交界处的水平位移将更大。图 8 给出了地震引起的坝顶路面和坝顶下游人行道的开裂情况，裂缝最大宽度达 630.0 mm，这进一步证实了下游坝坡和坝顶交界处的水平位移将更大的推断。

同时，地震还导致防浪墙结构缝多处开裂或发生挤压破坏，防浪墙和坝顶路面开裂（宽度达到 30.00 mm），见图 9。坝顶路面与两岸坡出现最大为 200.00 mm 的沉降差，坝体最大断面附近 840.00 m 高程以上下游坝坡浅层堆石体明显破坏，见图 10 和图 11。



注：●表示永久位移标点，↟表示位移方向，箭头旁的数字表示位移大小，单位为mm

图 4 大坝坝顶地震后沉降分布

Fig. 4 Distribution of settlement of dam top after the earthquake

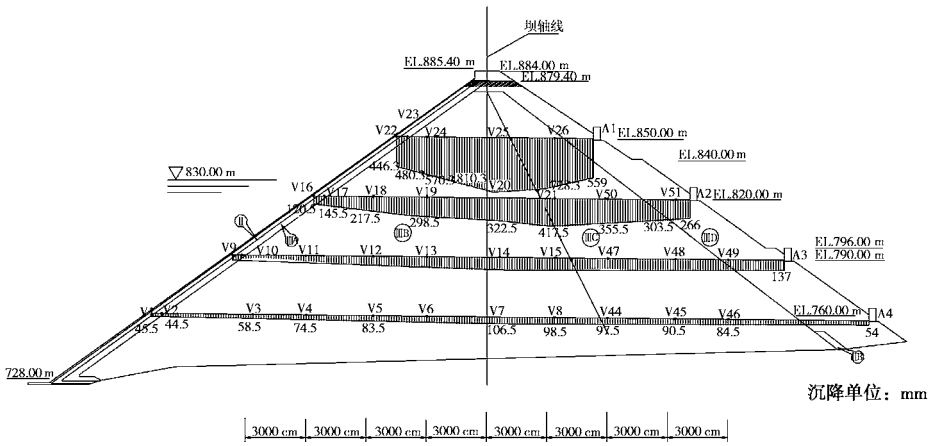
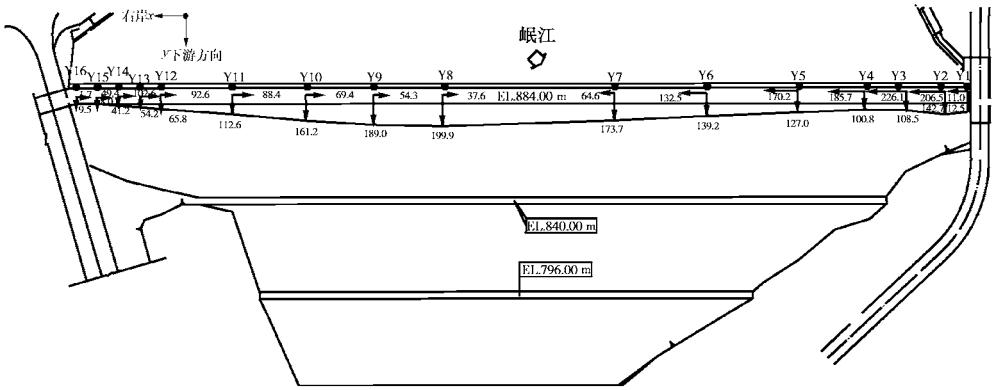


图 5 大坝 0+251 断面地震后坝体内部沉降量沿高程分布

Fig. 5 Distribution of internal settlement of dam along elevation after the earthquake (section 0+251)

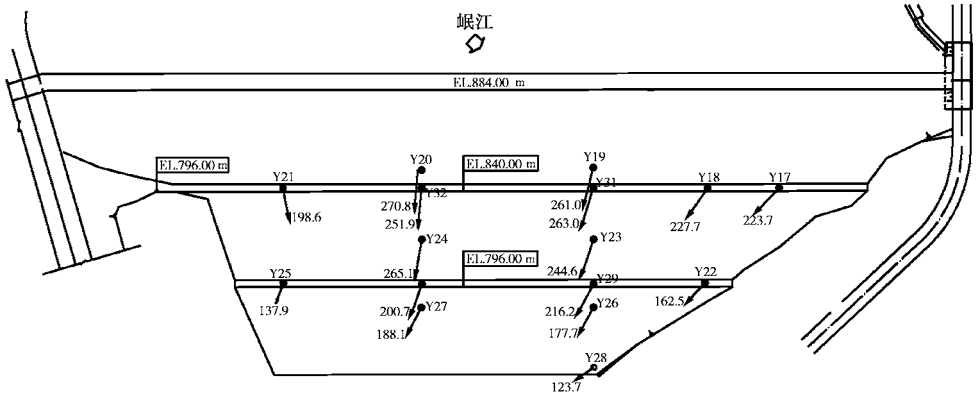
© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



注：●表示永久位移标点，↟表示位移方向，箭头旁的数字表示位移大小，单位为mm

图 6 大坝坝顶震后水平位移矢量分布

Fig. 6 Distribution of vectors for horizontal displacement of dam top after the earthquake



注：●表示永久位移标点，↟表示位移方向，箭头旁的数字表示位移大小，单位为mm

图 7 大坝下游坡水平位移矢量分布

Fig. 6 Distribution of vectors for horizontal displacement of downstream dam slope

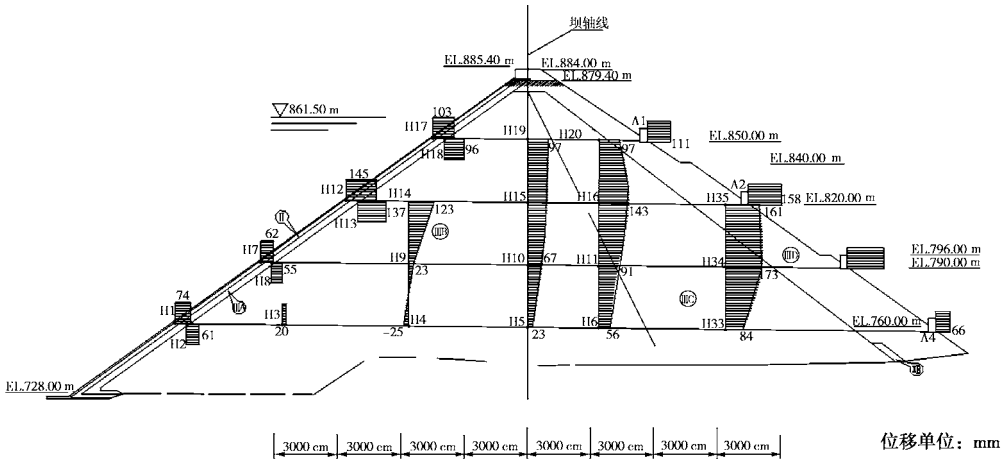


图 8 大坝 0+251 断面地震后坝体内部水平位移沿高程分布

Fig. 8 Distribution of internal horizontal displacement of dam along elevation after the earthquake (section 0+251)



（a）防浪墙和坝顶路面开裂　（b）两岸防浪墙接缝处出现拉裂　（c）大坝最大断面附近防浪墙挤压破碎

图 9 地震导致防浪墙和坝顶路面开裂

Fig. 9 Cracks of wave protection walls and dam top pavements aroused by the earthquake

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



图 10 地震导致下游坝坡与坝顶路面开裂

Fig. 10 Cracks of downstream dam slope and dam top aroused by the earthquake



图 11 地震导致坝肩与坝体产生沉降差

Fig. 11 Differential settlement between dam abutment and dam body aroused by the earthquake

2.2 大坝防渗系统

“512”汶川大地震导致紫坪铺大坝堆石体产生了明显的变形，从而使得大坝防渗系统受到了程度不同的损伤，主要表现为：

（1）大坝 845.00 m 高程处二、三期混凝土面板间施工缝发生明显错台，施工缝间钢筋被扭曲成“Z”型，参见图 12 和图 13。#5～#12 面板间施工缝错台差为 150～170 mm，#14～#23 面板间施工缝错台差为 120～150 mm，#30～#42 面板间施工缝错台差为 20～90 mm。我们认为，二、三期面板间施工缝发生错台的主要原因是由于大坝堆石体的地震永久变形，地震导致大坝震陷，使得面板受到一向下的摩擦力作用[2]，导致三期面板在施工缝这一结构相对薄弱部位发生错台。由于紫坪铺大坝二、三期面板施工缝为一水平缝，且地震时库水位（828.65 m）比该施工缝处高程低，从而使错台现象加重。

（2）大坝#5～#6、#23～#24 面板结构缝挤压破坏，多块混凝土面板出现宽度 0.5～2 mm 不等的裂缝。其中#3～#4，#11～#12，#15～#16，#20～#21，#21～#22，#23～#24，#25～#26，#35～#36 面板结构缝局部挤压破坏。#23～#24 面板结构缝挤压破坏较为严重，破坏一直延伸至目前库水位（821 m）高程以下，见图 14。初步判断，上述面板间结构缝发生挤压破坏是坝体地震永久变形引起的作用在面板上的摩擦力与地震动应力联合作用的结果，#5～#6 面板间结构缝由于位于较为陡峭的左坝肩附近，动力反映较为强烈，动应力较大，挤压破坏较为明显；而#23～#24 面板结构缝位于大坝最大断面附近，该处地震永久变形最大，



图 12 地震导致混凝土面板堆石坝防渗面板受损

Fig. 12 Damage of anti-seepage face of Zipingpu Concrete Face Rock-fill Dam aroused by the earthquake



图 13 施工缝间钢筋被扭曲成“Z”型

Fig. 13 Distorted Z-type steel bars of construction joints



图 14 #23～#24 面板结构缝发生挤压破坏

Fig. 14 Crushed damage of joints between concrete faces #23 and #24

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

地震永久变形引起的作用在面板上的摩擦力一般也应最大，所以挤压破坏较为严重。其它板间结构缝发生挤压破坏的部位主要位于二、三期混凝土面板错台处，该处为面板结构较为薄弱的部位。

（3）大坝左岸 845 m 高程以上三期面板发生大面积脱空，右岸三期面顶部（879.4 m 高程附近）也全部脱空，最大值达 230 mm。大坝左坝肩附近二期面板顶部也发生脱空，最大值为 70 mm。面板脱空的主要原因是地震导致大坝堆石体产生的永久变形，地震永久变形随着坝高的增大而增大，而混凝土面板的整体性相对较好，面板与坝体的变形不相协调导致面板与坝体间发生脱空，一般随着高程的增加，脱空值增大，这也是三期面板顶部脱空值最大的原因。

(4)地震导致混凝土面板周边缝产生明显的变位，其中安装在左坝肩 833 m 高程附近的 Z2 号三向测缝计测得周边缝的沉降量、张开度、剪切位移分别从震前的 1.59，11.99 和 4.67 mm 增加到 92.85，57.85 和 13.42 mm，右坝肩靠近河床底部 745 m 高程附近的 Z9 三向测缝计测得周边缝的变位值更大，其沉降量、张开度、剪切位移分别从震前的 10.82，6.03 和 9.08 mm 增加到 53.86，34.89 和 58.39 mm，其中剪切位移在震后的第二天迅速增长为 104.24 mm，已远超过室内试验得出的周边缝允许变位值 30 mm，周边缝其它部位变位在周边缝允许变位值范围内。

2.3 大坝渗流量

渗流量及其水质的变化是评价大坝安全的重要指标。紫坪铺水库大坝坝后设置了量水堰，2005 年 10 月水库下闸蓄水以来，即开始渗流量观测，结果见图 15。从图中可知，渗流量与库水位密切相关，随着库水位的增加或降低，渗流量相应增减，但稍有滞后。大坝历史实测最大渗流量为 51.19 L/s，时间为 2006 年 10 月 30 日，对应库水位为 874 m。

地震前后的渗流量对比表明，地震发生后，无论是水库水位保持基本不变或逐渐降低，大坝的渗流量均逐渐增加，渗流量由地震前（5 月 10 日）的 10.38 L/s 上升到 2008 年 6 月 1 日的 18.82 L/s（目前渗流量基本维持在 19.0 L/s 左右；与震前相比，渗流水质在震后的 1～2 d 较浑浊，并夹带泥沙，以后水质变清，至今未出现再次混浊。

地震发生后渗流量逐渐增加，可能是防渗系统受损所致，但综合渗流水质情况看，主要可能是地震激活的基岩裂隙所产生的裂隙水所致。由于地震作用，坝址处岩层原有的节理裂隙将产生振动、错位，导致原来岩层闭合的节理裂隙张开、增大、错位和贯通，形成渗流通道，从而导致渗流量增加。至于大坝震后的 1～2 d 水质较震前浑浊原因，初步分析认为，由于地震作用，大坝堆石体受到挤压、错动，坝料颗粒间产生破碎形成细颗粒，在降雨和渗流水作用下，细颗粒被带出，从而导致渗流水质变混浊。

需要指出的是，尽管目前大坝的渗流量与国内外同类正常运行的大坝相比仍属正常范围，但考虑到渗流量及其水质变化是判别大坝安全性最重要的指标，建议今后加强大坝的渗流量监测，特别注意渗流水质的变化，必要时对渗流水中的沉淀物进行物理化学分析，从而更为准确地判别渗流水的来源。

目前美国、日本、欧洲等国的大坝抗震设防原则是：在运行基准地震（OBE）作用下，要求大坝基本上不发生震损，保持正常运行功能；在最大设计地震（MDE）作用下，大坝容许发生一定震损，但不影响大坝的蓄水功能。之前世界上还没有任何一座面板坝经受过像“5.12”汶川大地震这样强的地震考验。根据对近期大坝安全监测资料的初步分析，尽管地震对紫坪铺大坝造成明显的损伤，渗流量也有一定程度的增加，但紫坪铺大坝经受了远超过其设防烈度的大地震，表现尚能满足上述原则，说明大坝的设计和施工质量是令人满意的，在目前水位下整体是稳定安全的。

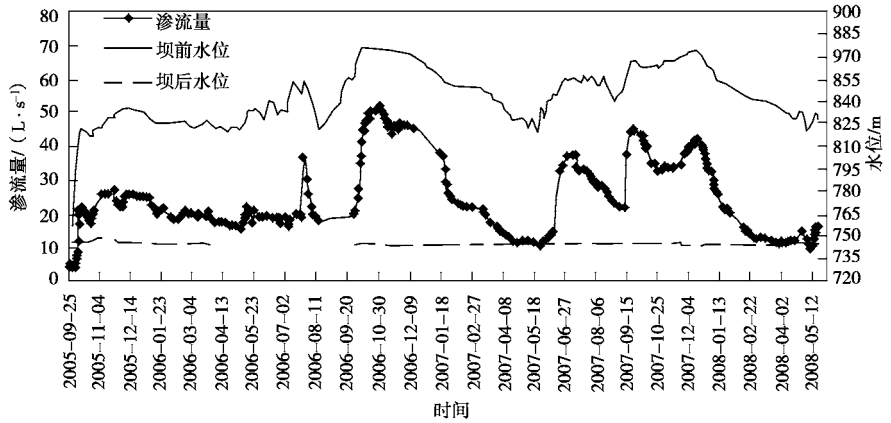


图 15 大坝渗流量－时间过程线

Fig. 15 Seepage amount-time hydrograph of dam

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3　启示和建议

根据对紫坪铺混凝土面板堆石坝经受汶川“ 5.12 ”大地震的损伤情况介绍和原因分析，有以下几点启示和建议：

（1）地震导致紫坪铺大坝坝体上下游边坡均向内部收缩，坝体断面变小，收缩最大处位于大坝最大断面附近下游坝坡，其值达 920 mm（垂直于坝坡表面），随着坝体高程降低，坝坡向坝体内部的收缩量逐渐减小[3]。究其原因，主要是坝体堆石料在高围压和地震循环荷载作用下颗粒破碎而发生体积收缩的结果。但现行的土石坝动力计算分析方法和常规振动台模型试验由于没有和不能考虑坝体堆石料的这一剪缩特性，得出的结果是坝体上下游边坡，特别是下游边坡均向外部隆起，这显然不符合实际。因此，堆石坝的动力数值计算模型应能合理反映堆石料在高围压和地震循环荷载作用下颗粒破碎特性，同时应该采用与原型坝应力水平相同的离心机振动台模型试验来研究面板堆石坝的地震动力反应。

（2）堆石体的地震永久变形是导致混凝土面板及其接缝损伤的直接原因，但目前常用的无厚度的接触单元法或有厚度的薄层单元法显然很难合理模拟堆石体和混凝土面板在地震荷载作用下的相互作用机理，不能得出混凝土面板的大面积脱空和施工缝错台等现象。因此，有必要研究并提出能正确反映堆石体和混凝土面板在地震荷载作用下的相互作用机理的力学模型和相应的计算分析方法。

（3）混凝土面板板间接逢的结构型式对其破坏有着重要影响。紫坪铺大坝二、三期混凝土面板接缝为水平向的施工缝，地震产生的惯性力和堆石体向下变形所产生的摩擦力容易导致面板在施工缝处向外挤出而发生错台。如果二、三期混凝土面板接缝为垂直于面板的施工缝，错台发生的可能性将降低。但在地震惯性力和由于堆石体变形对面板产生向下的摩擦力联合作用下，面板接缝很可能发生挤压破坏，为了减轻或避免地震对混凝土面板接缝的破坏，建议在接缝内嵌入一定厚度的刚度相对较低的嵌缝材料，如硬橡胶或衫木板等，以确保其有一定适应变形的能力。由于坝体最大断面处地震永久变形最大，该处面板的接缝处理更应注意这一点。

（4）地震波的传播方向、河谷形状以及地震发生时的库水位等对大坝地震损伤有明显影响。“ 5.12 ”汶川大地震震中位于紫坪铺大坝以西，而紫坪铺大坝坝轴线为东西向，河谷形状为左岸较为陡峭，右岸相对平缓，河谷宽高比约为 4：1。因此，主震沿坝轴向强烈的地震惯性力和堆石体地震变形产生的摩擦力导致混凝土面板板间垂直结构缝多处发生挤压破坏，河谷形状较为陡峭的左坝肩面板板间结构缝破坏程度明显大于右坝肩，库水位以上面板的损伤明显大于库水位以下。因此，在对面板坝进行地震安全评价时，有必要寻找对大坝安全最不利的荷载组合，以确保大坝的地震安全。

（5）“ 5.12 ”汶川大地震后，紫坪铺大坝又经受了多次余震，其中 6 级以上余震 5 次，但原型观测资料表明，大坝最大断面 850 m 高程处的沉降量不足 10 mm（坝顶防浪墙 60.4 mm 沉降主要是脱空和应力重分布所致），二、三期面板错台量几乎没有发生变化[3]。考虑到紫坪铺面板堆石坝经受“ 5.12 ”汶川大地震后，堆石体密度增大，抵抗地震变形的能力有了一定提高，大坝修复后抗震能力不会受到削弱，同时，紫坪铺大坝再遭遇类似“ 5.12 ”汶川这样大地震的可能性很小，因此，建议紫坪铺大坝的修复工作可参照设计标准，适当增设相应的抗震加固措施，本着恢复原功能的原则进行。

参考文献：

[1] 陈生水，沈珠江. 堆石坝的地震永久变形分析[J]. 水利水运科学研究, 1990(3): 277－286. (CHEN Sheng-shui, SHEN Zhu-jiang. Analysis of seismic permanent deformation of rock fill dam[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1990(3): 277－286. (in Chinese))

[2] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京：中国水利水电出版社, 1999. (SHEN Zhu-jinag. Theoretical soil mechaics[M]. Beijing: China Water Power Press, 1999. (in Chinese))

[3] 水利部紫坪铺大坝现场专家组. “ 5.12 ”地震后紫坪铺混凝土面板堆石坝安全监测与现场检查资料分析报告[R]. 2008. (Site Expert Group of Zipingpu Concrete Face Rock-fill Dam of the Chinese Ministry of Water Resources. Safety monitoring and analysis of field investigation data of Zipingpu Concrete Face Rock-fill Dam after Wenchun“ 5.12 ” Earthquake[R]. 2008. (in Chinese))

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net