水　利　学　报

2017年7月　　SHUILI　XUEBAO　　第48卷　第7期

文章编号:0559-9350(2017)07-0866-08

基于MSA法的高心墙堆石坝地震沉降易损性分析

庞　锐[1]，孔宪京[1,2]，邹德高[1,2]，徐　斌[1,2]

（1. 大连理工大学 水利工程学院，辽宁 大连　116024；
2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点试验室，辽宁 大连　116024）

摘要：多条带分析法(MSA)是新近提出的一种针对离散强度因子的易损性分析方法，为结构安全评估提供了有效路径，但目前在土石坝工程领域应用较少。本文针对高心墙堆石坝，选取坝顶震陷率为性能指标，建议了轻度、中度和重度破坏三个等级；考虑地震动的随机性，采用MSA法开展了易损性研究，得到了不同破坏等级的易损性曲线和概率，为大坝的强震性能评价提供准则和参考；不同条带数量下地震易损性分析结果表明，适当减少水平条带数量，对易损性结果影响不大，这有利于计算工况的减少。

关键词：高心墙堆石坝；地震沉降变形；易损性分析；MSA法；破坏等级

中图分类号：TV641.4　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.13243/j.cnki.slxb.20170095

1　研究背景

我国已建、在建或拟建的200 m以上高心墙堆石坝有长河坝(240 m)、上寨(253 m)、糯扎渡(261.5 m)、两河口(293.5 m)和双江口(314 m)等。这些高坝大多位于我国西南、西北地区，地震强度高，一旦遭受地震破坏，将会产生严重后果，因此，需要对这些高坝大库进行地震风险分析。土石坝地震风险分析主要由地震危险性分析、地震易损性分析和地震灾害损失评估三部分组成[1]，其中，地震易损性分析可以预测在不同强度水平地震作用下大坝发生不同程度破坏的概率，是对大坝进行性能评估的重要途径之一。多条带分析法(MSA)是一种针对离散强度因子的地震易损性分析方法[2-3]，可以全面深入地了解在不断增强的地震动作用下结构性能水平变化情况和界限破坏状态。本文引入基于性能的高土石坝地震易损性分析方法，考虑输入地震动不确定性影响，采用三维静动力有限元数值模拟方法分析200 m高心墙堆石坝震后永久变形变化规律，最后基于MSA法，得到高心墙坝的地震易损性曲线和不同破坏等级的概率，并对不同条带数量下的易损性做对比分析。

2　MSA方法

2.1　MSA方法概述　多条带分析方法(Multiple Stripes Analysis，MSA)是一种主要基于非线性动力分析，通过把地震动放大或者缩小后计算结构响应参数，进而形成某一强度地震水平下的条带，并考察不同强度水平下结构响应值，得到多个条带，现已初步用于估算结构在遭遇不同强度地震作用的响应和分析结构的整体稳定能力。用不同的地震强度因子(intensity measure，IM)将地震动参数(如加

收稿日期：2017-02-06；网络出版日期：2017-07-21

网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20170721.1508.004.html

基金项目：国家重点研发计划(2017YFC0404900)；国家自然科学基金项目(51678113，51379028，51508071)；中央高校基本科研业务费(DUT17ZD219)

作者简介：庞锐(1991-)，男，河南商丘人，博士生，主要从事高土石坝极限抗震能力研究。E-mail：pangruipangpan@163.com

通讯作者：孔宪京(1952-)，男，江苏南京人，教授，博士生导师，主要从事岩土地震工程和高土石坝抗震研究。E-mail：kongxj@dlut.edu.cn

速度峰值 PGA，速度峰值 PGV 等)调整到不同强度水平，在这些强度水平的地震作用下，分别对结构进行分析，在此基础上得到性能参数(damage measure，DM)对应地震强度因子的多个水平条带，定义出结构的性能状态。通过对离散的水平条带个数和离散情况进行统计分析，可以得到结构反应的变化范围以及其分布形式[4]。多条带分析的主要步骤如下：(1)建立合适的有限元分析模型；(2)选择一系列地震动记录及强度因子IM(如地震峰值加速度PGA)；(3)选定结构响应性能参数DM(如心墙坝坝顶相对沉陷率)；(4)对某一强度水平地震动，选取不同的地震动记录，对结构进行非线性分析，得到一条IM-DM水平条带；(5)调整地震动强度水平，重复(1)—(4)步骤，得到一系列水平条带；(6)对不同地震动强度水平形成的水平条带进行统计分析，形成概率地震易损性曲线，评估不同界限状态下的结构抗震性能。

2.2 易损性统计分析 MSA法的最终目的是进行易损性分析。地震易损性分析中，对水平条带进行统计分析，求得达到各性能水平对应的地震记录条数，建立以地震动强度指标为横坐标，结构反应超过一定破坏界限水平的概率为纵坐标的曲线。

根据相关研究[5-6]，地震易损性符合双参数对数正态分布模型，可定义如下：

$$P_R(C|IM=X)=\Phi\left[\frac{\ln(X/\theta)}{\sigma}\right] \tag{1}$$

式中：$P_R(C|IM=X)$为地震强度$IM=X$作用下达到某性能水平的概率；$\Phi(\ )$为标准正态分布函数；$IM=X$为地震强度因子(如地震峰值加速度PGA或地震峰值速度PGV等)；θ、σ分别为达到某性能水平所需地震强度因子的对数平均值和对数标准差，可通过最大似然估计的方法求得。进而得到以地震强度因子IM为自变量的正态分布函数，绘制出易损性曲线。

双参数θ、σ可通过如下过程求得[7-8]：

$$P\left(z_j\right)=\binom{n_j}{z_j}p_j^{z_j}\left(1-p_j\right)^{n_j-z_j} \tag{2}$$

$$L\binom{\theta}{\sigma}=\prod_{j=1}^{m}\binom{n_j}{z_j}p_j^{z_j}\left(1-p_j\right)^{n_j-z_j} \tag{3}$$

$$L\binom{\theta}{\sigma}=\prod_{j=1}^{m}\binom{n_j}{z_j}\Phi\left(\frac{\ln\left(x_j/\theta\right)}{\sigma}\right)^{z_j}\left[1-\Phi\left(\frac{\ln\left(x_j/\theta\right)}{\sigma}\right)\right]^{n_j-z_j} \tag{4}$$

最后得到双参数θ、σ的最大似然估计值：

$$\binom{\hat{\theta}}{\hat{\sigma}}=\operatorname{argmax}\sum_{j=1}^{m}\left\{\ln\binom{n_j}{z_j}+z_j\ln\Phi\left(\frac{\ln(x_j/\theta)}{\sigma}\right)+\left(n_j-z_j\right)\ln\left[1-\Phi\left(\frac{\ln\left(x_j/\theta\right)}{\sigma}\right)\right]\right\} \tag{5}$$

3 强震记录选取与破坏等级划分

3.1 强震记录的选取 根据相关研究[9]，10～20条地震动记录可以较为精确地对结构进行地震需求估计。因此，本文选取我国西南地区某高土石坝工程的场地谱为目标反应谱，生成50年超越概率5%设计地震和100年超越概率2%设计地震2条人工波，并根据场地地震地质资料及目标反应谱，在PEER数据库里选取了13条吻合良好的实测强震记录，共15条地震波，这些波的震级为6.0～7.5，15条地震动记录见表1，反应谱如图1(其中粗黑线为目标反应谱)。

3.2 破坏等级划分 选择合适的评价指标来定量评价土石坝的震害等级，是目前土石坝抗震研究方面的关键。地震作用下坝体变形(如坝顶震陷)是土石坝的主要震害形式之一[10-16]，因此，采用坝体震后永久变形为衡量指标，对抗震性能进行评估，具有较强代表性，并且有可操作性。

通过调查国内外一些土石坝震害情况，得到地震强度和坝顶相对沉陷的相关性，如图2所示，在

表1　MSA分析时的地震动记录

地震波序号	地震名称	记录台站	震级	Rjb/km	时间间隔/s	PGA/g	年份
地震波1	Imperial Valley-06	Calexico Fire Station	6.53	10.45	0.005	0.277	1979
地震波2	Imperial Valley-06	El Centro Array #3	6.53	10.79	0.005	0.267	1979
地震波3	Mammoth Lakes-01	Long Valley Dam	6.06	12.56	0.005	0.430	1980
地震波4	Loma Prieta	Gilroy Array #4	6.93	13.81	0.005	0.276	1989
地震波5	Northridge-01	LA 00	6.69	9.87	0.010	0.263	1994
地震波6	Northridge-01	Sun Valley-Roscoe Blvd	6.69	5.59	0.010	0.277	1994
地震波7	Northwest China-03	Jiashi	6.10	9.98	0.020	0.300	1997
地震波8	TottoriJapan	SMN001	6.61	14.42	0.010	0.236	2000
地震波9	San SimeonCA	Templeton-1-story Hospital	6.52	5.07	0.005	0.435	2003
地震波10	NiigataJapan	NIGH12	6.63	9.93	0.005	0.417	2004
地震波11	IwateJapan	AKT023	6.90	11.68	0.010	0.368	2008
地震波12	IwateJapan	Kurihara City	6.90	12.83	0.010	0.422	2008
地震波13	DarfieldNew Zealand	DSLC	7.00	5.28	0.005	0.257	2010
地震波14	人工波1						
地震波15	人工波2						

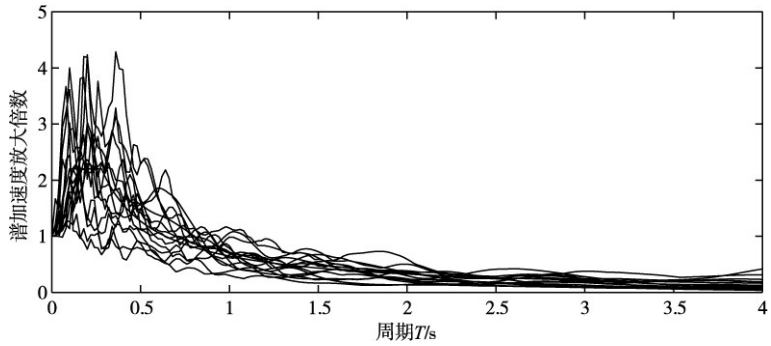


图1　地震加速度反应谱曲线

此基础上，一些学者对心墙堆石坝的震害程度进行了考查或建议。陈生水等[11]建议以坝顶震陷率小于1 %作为心墙堆石坝地震变形控制标准；赵剑明等[12]通过对长河坝工程进行极限抗震能力分析，指出最大震陷超过坝高的0.7 % ~ 0.8 %时可产生明显震害，导致严重后果；邵磊等[13]对高心墙堆石坝极限抗震能力进行了研究，其从地震永久变形角度考虑，震陷不超过坝高的1.2 %并且震陷不超过设计地震工况震陷1 m；文献[16-17]以坝顶相对沉陷率0.1 %、0.4 %、1 %为评价等级，分析了100 m高的南盘江云鹏水电站心墙坝达到轻微破坏、中等破坏和严重破坏的临界状态，并对不同坝高心墙坝从残余变形方面进行述评，并指出对小于100 m、100 ~ 200 m、200 ~ 250 m、250 ~ 300 m和300 m以上心墙坝，其极限抗震能力控制标准分别为2 %、1.5 %、1 %、0.85 %和0.75 %。Swaisgood[18]调查了69座土石坝(包括面板堆石坝、心墙堆石坝、水力冲填坝和土坝)，以坝顶相对沉陷率为指标，将震害情况分为4个破坏等级：完好(0.1 %以下)、轻微破坏(0.012 % ~ 0.5 %)、中等破坏(0.1 % ~ 1.0 %)和严重破坏(0.5 %以上)。本文参考以上相关安全评价和等级划分标准，建议首先以坝顶相对震陷率1.2 %为地震变形控制标准，然后对实际震害调查分析，以取均值的方式确定轻度破坏和中度破坏控制标准，分别为0.25 %(高心墙坝调整为0.5 %)和0.55 %(高心墙坝调整为0.8 %)。从地震永久变形角度考虑，基于200 m

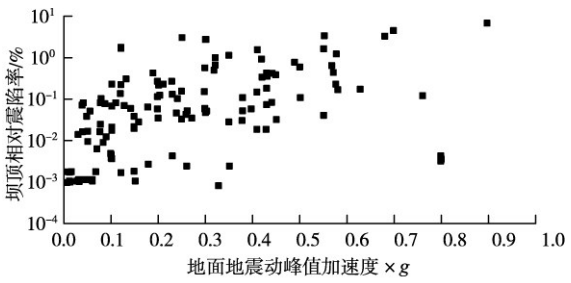


图2　坝顶相对震陷率与地震峰值加速度关系[11]

高三维心墙堆石坝，建立了坝顶相对震陷率0.5 %、0.8 %和1.2 %三个破坏界限状态，并建议分别对应轻度破坏、中度破坏和重度破坏三种破坏等级。

4 算例分析

4.1 计算模型 本文以200 m高规则三维心墙堆石坝为例，采用大连理工大学工程抗震研究所自主开发的岩土工程非线性有限元分析程序GEODYNA，进行有限元非线性静、动力反应和永久变形分析。本文心墙坝坝顶长度460 m、坝底长度60 m，坝顶宽度18 m，河谷为岸坡坡度为1∶1的对称河谷。心墙顶部宽度6 m，心墙上、下游各设水平宽1m的反滤区和两层水平宽2 m的过渡区。上下游采用不同坝壳堆石料。大坝分61层填筑，填筑完成开始蓄水，上游蓄水至坝顶以下25 m，下游最终水位达到距离坝底24 m。坝底基岩长1 078 m，深75 m，宽670 m。坝体分区如图3所示。三维心墙堆石坝有限元网络如图4所示，共划分73 648个结点，71 892个单元。由于主要考察坝体震后整体变形，为减少计算量，本文不考虑不同特性材料之间的接触问题。

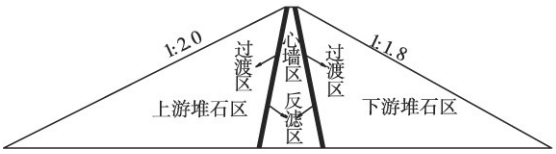


图3 坝体分区

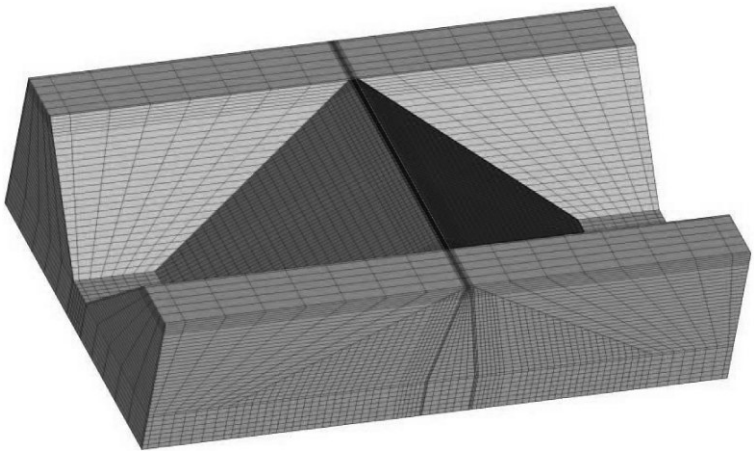


图4 三维心墙坝有限元网格

4.2 计算本构模型和材料参数 堆石体静力计算采用邓肯E-B模型进行模拟，动力计算采用基于等效黏弹性模型的等效线性分析方法进行分析[19]，永久变形计算采用等价结点力法[20]和邹德高等改进的沈珠江残余变形模型[19]。各模型堆石料参数如表2—表4所示。

4.3 地震反应分析 选取地震峰值加速度*PGA*为地震强度因子，进行逐级调幅，调幅步长为0.05*g*，直到所有地震动记录经调幅后，坝体震后变形基本完全达到或超过坝顶相对震陷率1.2 %水平（重度破坏，经有限元计算*PGA*=0.8*g*基本满足要求），因此调幅范围为0.1*g*到0.8*g*，即对每条地震波调幅15次。地震动输入同时考虑顺河水平向、竖向和坝轴水平向3个方向输入，竖向加速度峰值取水平

表2 邓肯E-B模型参数

材料	ρ/(kg/m^3)	K	n	R_f	K_b	m	φ_0/(°)	$\Delta\varphi$/(°)	c/kPa
上游堆石料	2107	1300	0.40	0.709	1300	−0.04	55.3	8.1	0
下游堆石料	2044	1250	0.34	0.754	680	0.01	53.0	6.6	0
反滤料	2041	1360	0.31	0.710	850	0.05	56.2	8.8	0
过渡料	2054	1300	0.26	0.700	700	0.01	53.2	7.2	0
心墙料	2250	430	0.45	0.770	350	0.38	33.0		130.5

表3　等效黏弹性模型参数

材料	K	n
上游堆石料	2 485	0.58
下游堆石料	2 027	0.58
反滤料	2 458	0.58
过渡料	2 093	0.57
心墙料*	20.2(K_1)、845(K_2)	0.604

表4　改进沈珠江残余变形模型参数

材料	c_1/%	c_2	c_3	c_4/%	c_5
上游堆石料	6.82	1.35	0.00	54.7	1.33
下游堆石料	10.28	1.37	0.00	26.6	1.24
反滤料	10.02	1.26	0.00	48.3	1.23
过渡料	10.02	1.26	0.00	48.3	1.23
心墙料	0.00	0.00	0.00	26.0	1.02

注：*心墙料动力计算采用沈珠江模型[21]模拟

向的2/3。动力计算时，地震动通过黏弹性边界结合等效荷载的形式在有限元模型边界处输入，以模拟有限域与无限域的相互作用[22]。对于每个计算工况，在静、动力计算后，进行三维心墙堆石坝永久变形计算，共得到225组大坝的响应。地震波峰值加速度PGA与坝顶沉陷率关系的MSA水平条带如图5。

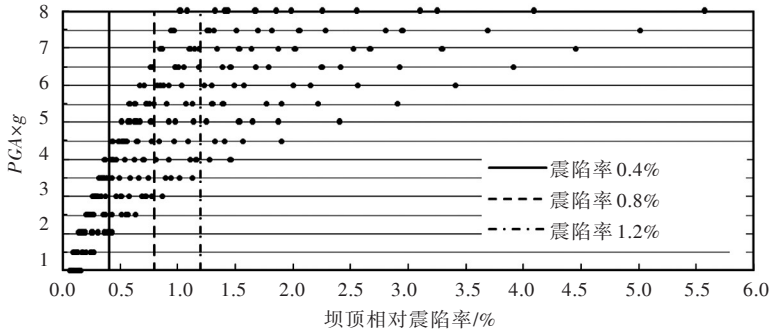


图5　坝顶相对震陷率与PGA关系的MSA水平条带

4.4　地震易损性分析　根据2.2节MSA易损性统计分析方法，求得易损性曲线所需的参数θ、σ，计算结果如表5所示。将表5的θ、σ带入式(1)，得到以峰值加速度为变量的易损性概率曲线，如图6所示。以坝顶相对震陷率为大坝破坏评价指标，由图6可知：(1)输入地震动峰值加速度为0.3 g时，坝体发生轻度破坏的概率为55.4 %，不易发生中度破坏和重度破坏；峰值加速度为0.4 g时，坝体发生轻度破坏的概率为89.6 %，发生中度破坏的概率为32.2 %，不易发生重度破坏；峰值加速度为0.5 g时，坝体已完全能够发生轻度破坏，发生中度破坏的概率为63.8 %，发生重度破坏的概率为28.1 %。(2)峰值加速度为0.6 g时，坝体发生中度破坏的概率为84.5 %，发生重度破坏的概率为51.4 %。(3)峰值加速度为0.7 g时，坝体已完全能够发生轻度破坏和中度破坏，发生重度破坏的概率为71.0 %。

表5　大坝地震易损性曲线参数值

破坏性能指标	破损等级					
坝顶最大震陷率	轻度破坏		中度破坏		重度破坏	
	θ	σ	θ	σ	θ	σ
	3.32	0.26	4.54	0.27	5.90	0.30

4.5　不同条带数量易损性对比　图7和图8对比了15支条带、10支条带、8支条带和5支条带数量下的易损性曲线及破坏概率。可以看出：15支条带、10支条带和8支条带数量下易损性结果基本一致，5支条带数量时易损性结果与其它数量条带差别较大，并且随着破坏等级的增大，不同条带数量对易损性结果的影响有所减小；在轻度破坏等级下，5支条带的计算结果与其它三支结果差别极大，表明了结果的不准确性；在重度破坏情况下，并不是条带数量差别越大，易损性结果差别越大；不同地震强度对条带数量产生的易损性结果差别也有一定影响。产生这些规律的原因与坝顶相对震陷率分布的离散性、产生不同破坏等级时的不同强度地震范围内条带数量等因素有关，需要进一步探究其影响规律和影响程度。

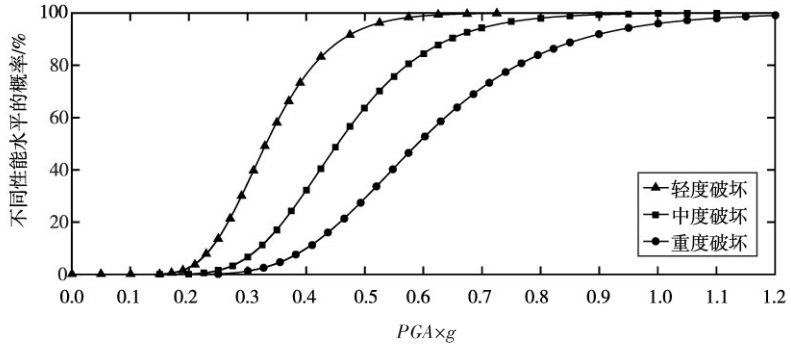


图6　大坝地震易损性概率曲线

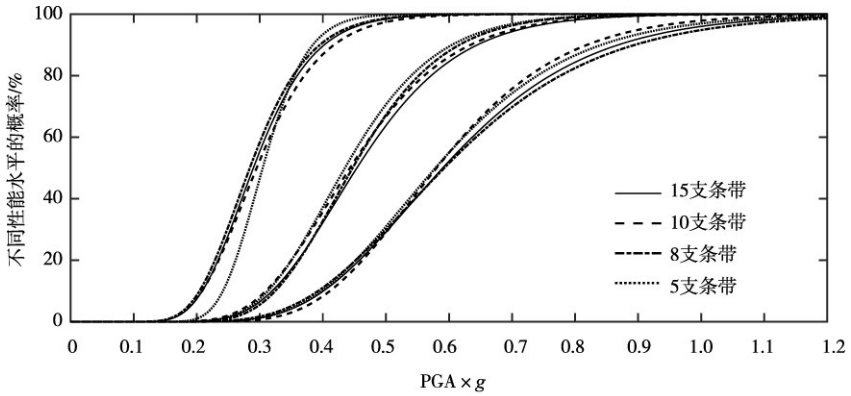


图7　不同条带数量大坝地震易损性曲线

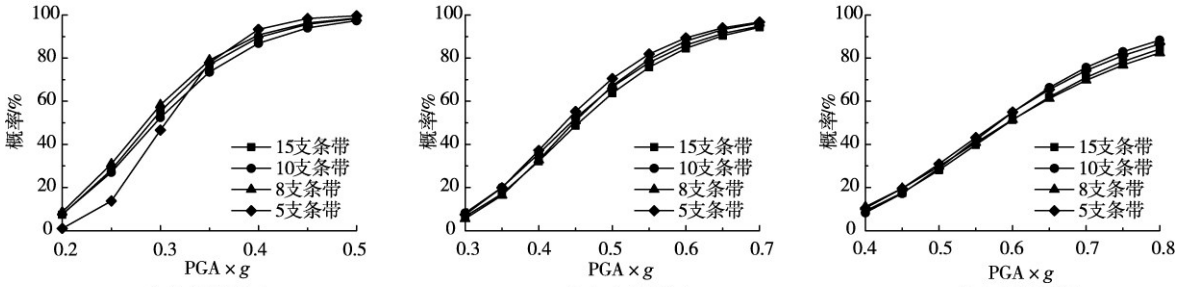


图8　不同条带数量大坝地震易损性概率

5　结论

考虑地震动输入的随机性，本文将MSA方法应用到三维高心墙堆石坝抗震性能评估领域，基于坝顶相对沉陷率这一性能指标，建议了适用于高心墙堆石坝安全评估的破坏等级划分标准，并探讨了划分依据，确定了轻度破坏、中度破坏和重度破坏的三级抗震性能水平。

利用三维有限元分析方法进行基于永久变形的土石坝地震易损性分析，得到强震作用下不同等级破坏的易损性曲线和概率，为大坝的强震性能评价提供准则和参考。结果表明：本文200 m高三维标准心墙堆石坝在0.3g地震强度下，会发生一定概率的轻度破坏，不易发生中度破坏和重度破坏；在0.5g地震强度下，发生中度破坏的概率已经非常大，但重度破坏概率还较小，表明本心墙坝具有较强的抗震能力；在0.7g地震强度下，达到较高的重度破坏概率，所以为提高极限抗震破坏能力，需要对本高土石坝采取一定的抗震措施，比如碾压密实等。

最后本文探讨了不同条带数量对大坝地震易损性分析结果的影响，可以看出，适当减少水平条带数量，对易损性结果影响不大，这有利于减少计算工况数量；但是较少的条带数量会对易损性结

果产生一定影响，尤其对轻度破坏下的计算结果。

MSA方法目前在各类工程领域中的应用仍处于起步阶段，在土石坝工程领域还未见相关应用报道，尚需更多研究，本文将该方法引入到土石坝安全评价领域，分析了大坝易损性，表明其具有良好适用性。进一步考虑地震作用和土石坝材料参数的随机性，并引入心墙坝破坏的其他性能指标，如反滤料液化、心墙开裂等，也是一个值得深入分析的课题。

参 考 文 献：

[1] 张楚汉，金峰，王进廷，等．高混凝土坝抗震安全评价的关键问题与研究进展[J]．水利学报，2016，47(3)：253-264．

[2] BRADLY B A．A generalized conditional intensity measure approach and holistic ground-motion selection[J]．Earthquake Engineering & Structural Dynamics，2010，39(12)：1321-1342．

[3] TIN L，HASELTON C B，BAKER J W．Conditional spectrum-based ground motion selection．PartI：Hazard consistency for risk-based assessments[J]．Earthquake Engineering &Structural Dynamics，2013，42(12)：1847-1865．

[4] 张海明，易伟建，邝世杰．带脉冲效应近场纪录的概率地震反应分析[J]．武汉理工大学学报，2010，32(9)：184-187．

[5] KARIM K R，YAMAZAKI F．Effect of earthquake ground motions on fragility curves of highway bridge piers based on numerical simulation[J]．Earthquake Engineering & Structural Dynamics，2001，30(12)：1839-1856．

[6] 沈怀至，金峰，张楚汉．基于性能的重力坝-地基系统地震易损性分析[J]．工程力学，2008，25(12)：86-91．

[7] BAKER J，CORNELL C．Vector-Valued Ground Motion Intensity Measures for Probabilistic Seismic Demand Analysis[R]．Palo Alto：Stanford University，2006．

[8] DANIEL S，ARMEN D K．Improved seismic fragility modeling from empirical data[J]．Structural Safety，2008，30(4)：320-336．

[9] SHOME N．Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures[D]．Stanford University，1999．

[10] OZKAN M Y．A review of considerations on seismic safety of embankments and earth and rock-fill dams[J]．Soildynamics and Earthquake Engineering，1998，17(7/8)：439-458．

[11] 陈生水，李国英，傅中志．高土石坝地震安全控制标准与极限抗震能力研究[J].岩土工程学报，2013，35(1)：59-65．

[12] 赵剑明，刘小生，陈宁，等．高心墙堆石坝的极限抗震能力研究[J]．水力发电学报，2009，28(5)：97-102．

[13] 邵磊，迟世春，李红军．高心墙堆石坝极限抗震能力初探[J]．岩土力学，2011，32(12)：3826-3882．

[14] KALKAN Y，POTTS L V，BILGI S．Assessment of vertical deformation of the ataturk dam using geodetic observations[J]．Journal of Surveying Engineering，2016，142(2)：04015011．

[15] HAN B，ZDRAVKOVIC L，KONTOE S，et al．Numerical investigation of the response of the Yele rockfill dam during the 2008 Wenchuan earthquake[J]．Soil Dynamics and Earthquake Engineering，2016，88(9)：124-142．

[16] 王笃波，刘汉龙，于陶，等．基于变形的土石坝地震易损性分析[J]．岩土工程学报，2013，35(5)：814-819．

[17] 田景元，刘汉龙，伍小玉．高土石坝极限抗震能力的评判角度及标准述评[J]．防灾减灾工程学报，2013(S1)：128-131，137．

[18] SWAISGOOD J R．Embankment dam deformations caused by earthquakes[C]//2003 Pacific Conference on Earthquake Engineering[CD-ROM]．Christchurch，2003．

[19] 孔宪京，邹德高．紫坪铺面板堆石坝震害分析与数值模拟[M]．北京：科学出版社，2014．

[20] SERFF N，SEED H B，MAKDISI F I，et al．Earthquake induced deformations of earth dams[R]．Berkeley：University of California，1976．

[21] 沈珠江，徐刚．堆石料的动力变形特性[J]．水利水运科学研究，1996(2)：143-159．

[22] 周晨光，孔宪京，邹德高，等．地震波动输入方法对高土石坝地震反应影响研究[J]．大连理工大学学报，2016，56(4)：382-389．

Seismic subsidence fragility analysis of high CRFDs based on MSA

PANG Rui[1], KONG Xianjing[1,2], ZOU Degao[1,2], XU Bin[1,2]

(1. *School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian* 116024, *China*;
2. *State Key Laboratory of Coastal & Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian* 116024, *China*)

Abstract: MSA is a fragility analysis method which is recently proposed and in view of discrete intensity factor, provides an effective approach for structural safety evaluation. However, this method is less applied in the field of earth-rockfill dams engineering. In this paper, crest settlement ratio is selected as the performance evaluation index in view of HCRFD, the seismic subsidence damage of HCRFDs was suggested dividing in mild, moderate and severe damage three standards. Considering the uncertainty of earthquake, fragility analysis is carried out with MSA, and the fragility curves and probability corresponding different damage grades are acquired, which can provide criterion and reference for the dam evaluation under the strong earthquake. In addition, seismic fragility analysis results of different stripe numbers show that decreasing the number of horizontal stripe appropriately has little influence on the result of fragility, thus it is conducive to the reduction of calculation conditions.

Keywords: high CRFDs; seismic subsidence deformation; fragility analysis; MSA method; damage grades

(责任编辑：王冰伟)

(上接第865页)

Study on the design of joint sealing material and failure mechanism of adhesive layer under water pressure and deformation

LI Bingqi[1], ZHANG Yuchi[1], LI Zeyang[2], LIU Xiaonan[3]

(1. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100038, *China*;
2. *Mathematics, The University of Manchester, Manchester*, M13 9PL, *United Kingdom*;
3. *Beijing University of Chemical Technology, Beijing* 100029, *China*)

Abstract: The damage and leakage of contraction joint in hydraulic structure will impact the safety of the structure. In this work, the authorsintroduce Cohesive Zone Model (CZM) into Finite Element Model (FEM) to simulate the damage process of joint sealing material under water pressure and deformation based on the tunnel across Yellow River on middle route of the South-north Water Transfer Project. We compare the results from simulation analysis with the strain-pressure curve from indoor pump-in test, and propose the fracture energy of CZM which fitted to bonding layer of joint sealing material. Furthermore, the impact of the width of contraction joint and the depth of joint sealing material on ability of resist to water pressure are discussed, which prove the validity of parameters. We also analyze the relation among contraction joint deformation, width of contraction joint, depth of joint sealing material and carrying capacity under the situation that the system bearing deformation and water pressure. The results provide theoretical foundation for physical mechanics design of joint sealing material and guidance for structure design of contraction joint.

Keywords: CZM; interfacial debonding; reverse water pressure; FEM; contraction joint; joint sealing material; failure mechanism

(责任编辑：王冰伟)