

石晶,李伟.考虑劣化屈服老化裂纹后混凝土水库堤坝排水边坡抗震性研究[J].地震工程学报,2019,41(6):1506-1513.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1506

SHI Jing, LI Wei. Seismic Behavior of Drained Slopes on Concrete Reservoir Dams Considering Degradation Yield and Aging Cracks[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(6): 1506-1513. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1506

考虑劣化屈服老化裂纹后混凝土水库 堤坝排水边坡抗震性研究

石晶¹, 李伟²

(1. 长治职业技术学院, 山西 长治 046000; 2. 山西大学, 山西 太原 030013)

摘要: 针对在水库堤坝排水边坡混凝土裂纹的抗震性研究中,未考虑岩土体抗剪强度参数的劣化屈服效应以及混凝土裂纹的老化,存在抗震性判断结果准确率较差等问题,提出水库堤坝排水边坡混凝土考虑老化后产生裂纹的抗震性能研究方法。模拟强震下边坡混凝土的开裂破坏过程,根据 D-P 屈服准则,实现对闸墩混凝土材料的屈服判断。采用薄层整体单元模拟和分离式裂纹单元,实现混凝土裂纹的数值模拟,加载地震波后,获取混凝土裂纹的强震响应规律与破坏特征。实验结果可知,本文方法对坝体位移变化的研究精度高,得到的混凝土裂纹扩展范围更为准。运用本文方法对水库堤坝排水边坡混凝土的抗震性研究准确率以及可信度较高,说明本文方法具有一定的可取性。

关键词: 水库堤坝; 排水边坡; 混凝土裂纹; 抗震性研究; 本构模型; 屈服准则

中图分类号: TU652

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)06-1506-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1506

Seismic Behavior of Drained Slopes on Concrete Reservoir Dams Considering Degradation Yield and Aging Cracks

SHI Jing¹, LI Wei²

(1. Changzhi Vocational and Technology College, Changzhi 046000, Shanxi, China;

2. Shanxi University, Taiyuan 030013, Shanxi, China)

Abstract: In the study of the seismic behavior of concrete cracks in drained slopes on reservoir dams, neither the degradation yield effect of shear strength parameters of rock and soil nor the aging of concrete cracks are considered. This compromises the accuracy of the results of seismic evaluation. Therefore, a method of analysis of the seismic performance of drained slopes on reservoir dams, incorporating concrete cracks, was proposed in this paper. The cracking and failure process of slope concrete under a strong earthquake was simulated, and a judgment of the concrete material yield of the gate pier, according to D-P yield criteria, was made. The thin-layer integral element and separated crack element were used to simulate the concrete crack. After load-

收稿日期: 2018-11-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(81102833)

第一作者简介: 石晶(1977-), 女, 山西长治人, 讲师, 研究方向: 土木工程。E-mail: shij_77@163.com。

ing the seismic wave, the response and failure characteristics of the concrete cracks under a strong earthquake were obtained. Results showed that the method presented in this paper was highly accurate in studying the displacement change in a dam body; the crack propagation range of concrete obtained was also accurate, indicating the utility of the proposed method.

Keywords: reservoir dam; drained slopes; concrete crack; seismic resistance study; constitutive model; yield criterion

0 引言

我国是世界上兴修水利最早、拥有水利设施数量最多的国家之一。随着我国经济的高速发展,水利工程基础设施不断完善,水利建筑设施的安全性已成为关注的重点^[1]。混凝土施工是水利建设的主要环节,在水库堤坝排水边坡工程中,混凝土施工技术尤为重要,但在施工过程中存在质量差的问题,导致水库堤坝排水边坡混凝土的老化现象较为严重。对于水库堤坝,其发生危险的主要原因在于排水边坡混凝土的裂纹,地震等灾害的发生对含裂纹的混凝土影响较大,边坡失稳破坏形成的崩塌、滑坡、泥石流以及次生地质灾害,严重危及建筑物的正常使用和人们的生命财产安全,给国家的利益也带来了很大的损失。因此研究水库堤坝排水边坡混凝土裂纹的抗震性能十分重要,相关研究人员也给出了一些较好的方法。

文献[2]在考虑劣化效应的三峡库区某岸坡抗震性能研究中,将岩土体抗剪强度参数的劣化效应考虑在内,对岸坡的抗震性能进行分析,得出当三峡水库在不同特征水位下,随着水库水位的上升和地震加速度的增加,岸坡安全性降低,该分析过程以三峡水库为例分析其岸坡的地震安全性,但该方法未考虑混凝土裂纹老化对抗震性的影响,分析出的抗震性结果可靠性差;文献[3]对混凝土结构建筑物抗震加固强度测试仿真中,计算出峰值地震加速度,实现对混凝土结构建筑的抗震加固强度测试,但未得出加固后的综合抗震指数,导致测试出建筑抗震性准确度差。文献[4]在不排水的条件下对开挖边坡的抗震稳定性极限值进行深入分析,以极限分析上限定理为依据确定边坡稳定系数和不排水抗剪强度比值的关系等,运用该方法更适用于开挖边坡的稳定性评价,但是该方法实现步骤复杂,并且没有考虑到裂纹混凝土的老化问题,实用性不高。文献[5]通过对 6 根 HRB500E 高强抗震钢筋高钛重矿渣混凝土梁和 3 根 HRB335 普通钢筋高钛重矿渣混凝土

梁进行正截面抗弯性能试验,但该方法的抗震性较差。文献[6]提出现浇柱预制梁混凝土框架结构抗震性能试验方法,为研究装配整体式混凝土框架结构的滞回性能、延性和耗能能力等抗震性能,并考察其在罕遇地震作用下进入弹塑性阶段的受力性能,但该方法的裂纹分布模拟结果的可信度较低。

为解决上述存在的问题,提出水库堤坝排水边坡混凝土裂纹的抗震性研究方法,分析不同水库水位在地震影响下相关参数变化,加强对水库堤坝排水边坡混凝土裂纹的抗震性系统研究,以此来降低地震灾害带来的负面影响。通过实验验证,采用本文方法对水库堤坝排水边坡混凝土裂纹的抗震性研究,在研究耗时、坝体位移变化精度和混凝土裂纹扩展范围等方面,说明本文抗震性研究方法耗时较短,精确度高,可以作为解决实际问题的参考方法。

1 材料与方法

1.1 材料来源

基于弹性损伤和连续介质理论,构建混凝土裂纹抗震模型^[7]。模型可对发生地震时,水库堤坝排水边坡混凝土裂纹的发展状态有效分析,准确反映混凝土在受到压力、拉力后抗压强度、剪力刚度降低等动力特征的变化。在强震影响下,混凝土单元达到开裂条件,开始出现裂纹,裂纹均匀分布在混凝土单元内部,此时混凝土进入开裂状态且根据对混凝土裂纹的成因分析,裂纹主要集中在水库闸墩的中部。

假定基岩材料为线弹性材料,采用线弹性单元。水库堤坝排水边坡的混凝土材料为弹塑性材料,采用弹塑性单元^[8],屈服准则应用 Drucker-Prager, D-P。D-P 准则通常表示为屈服面或屈服位置,它是关于任何应力组合下的弹性极限的假设。屈服准则的屈服函数为:

$$\alpha O_1 + \sqrt{R_2} - k = 0 \quad (1)$$

式中: O_1 和 R_2 分别为应力张量第一不变量和应力偏量第二不变量, α 和 k 均为屈服准则参数,得到:

$$O_1 = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 \quad (2)$$

$$R_2 = \frac{1}{6}[(\delta_1 - \delta_2)^2 + (\delta_2 - \delta_3)^2 + (\delta_3 - \delta_1)] \quad (3)$$

式中: δ 为应力张量或应力偏量,其与摩尔-库伦 (Coulomb Mohr C-M) 准则的参数 β 和 γ 间存在多种拟合方法,如等面积圆、内切圆以及外接圆等,如图 1 所示。

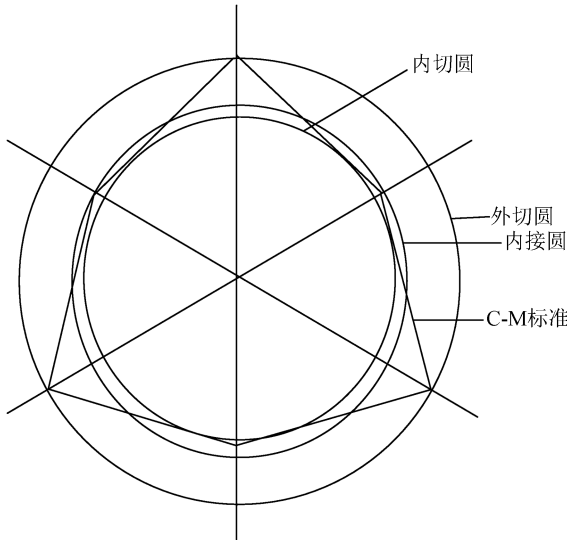


图 1 C-M 准则与 D-P 准则的拟合关系

Fig.1 Fitting relation between C-M criterion and D-P criterion

测得 C-M 准则的参数 β 和 γ ,根据不同的拟合关系获取 D-P 准则中的参数 α 和 k 。对水库堤坝排水边坡混凝土的屈服判断采用 D-P 准则,采用式 (4)对 D-P 准则参数和 C-M 进行外接圆拟合:

$$\alpha = \frac{2\sin\beta}{\sqrt{3}(3 - \sin\beta)}, k = \frac{6\gamma \cdot \sin\beta}{\sqrt{3}(3 - \sin\beta)} \quad (4)$$

1.2 材料的处理

本文选取的地震测试加载方案是将 EI Centro (N-S)波作为基岩地震输入^[9-10],其中地震的峰值为 0.319g,地震加速度时程如图 2 所示。本文方法研究水库堤坝排水边坡混凝土裂纹的抗震性能时,考虑三种水库水位变化情况^[11]:低水位水库的深度是 20 m,用于表述水库在枯水期的水位;高水位时水库水深 40 m,描述水库在丰水期的水位;空库是排除库水和坝体间流固耦合效应。

在 D-P 准则对边坡材料屈服判断的基础上,根据现场的勘探结果,对水库堤坝排水边坡混凝土闸墩的裂纹分布进行有限元模拟^[12],如图 3 所示。

在考虑实际存在裂纹的前提条件下,先从裂纹区域中截取宽度是 10 cm 的带状区域,通过薄层单元模拟^[13-14],确保混凝土与裂纹区域间的连续性;后

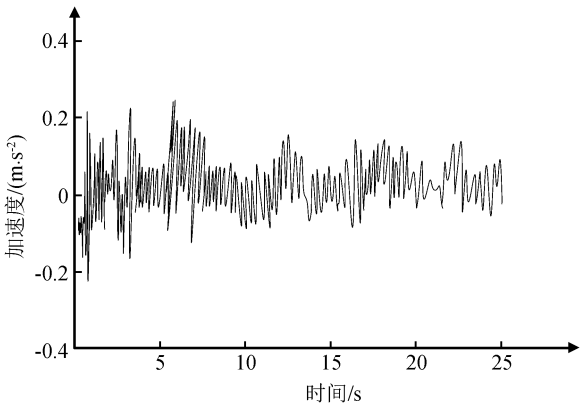


图 2 EI Centro 波加速度过程

Fig.2 Acceleration process of EI Centro wave

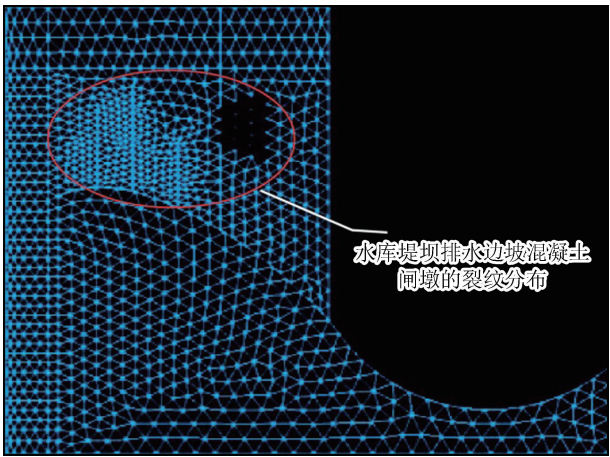


图 3 混凝土裂纹分布

Fig.3 Distribution of concrete cracks

分割裂纹区域,该过程采用分离式裂纹单元,分割单元的长度为 3 mm;最后假设出现裂纹的混凝土弹性模量减小^[15-17],且发生裂纹处混凝土弹性模量 D 与等效宽度 w 、混凝土抗拉强度 f_1 和裂纹扩展之间存在关系式 (5) 所示:

$$E = \frac{f_1^2 w}{2D} \quad (5)$$

式中: $w = \sqrt{Z}$, Z 表示裂纹的单元面积大小。当水库堤坝排水边坡混凝土裂纹扩展 E 未知时^[18-20],根据断裂能与混凝土抗拉强度 f_1 间关系,得到裂纹^[21-230]扩展数值模拟的修正式 (6):

$$E = \frac{f_1 w}{\omega} \quad (6)$$

式中: ω 表示出现软化且部分强度丧失后混凝土的分离裂纹宽度^[24-27]。

2 结果与分析

实验为探究本文水库堤坝排水边坡混凝土裂纹

的抗震性研究方法的有效性,将其实际应用于某水库的堤坝排水边坡混凝土考虑裂纹本构关系性能分析中,下面是具体的实验步骤:

- (1) 设定水库堤坝排水边坡混凝土裂纹关键部位的分布。
- (2) 分析水库坝顶混凝土裂纹位移反应情况。
- (3) 对闸墩的强震开裂过程进行模拟并具体分析。
- (4) 将本文研究方法与传统方法结果进行专家评价比较,实验评价角度为抗震性研究耗时、坝体位移变化精度和混凝土裂纹扩展范围。
- (5) 将本文研究方法与传统方法的抗震性研究准确率进行对比分析。
- (6) 将本文研究方法与传统方法的裂纹分布模拟结果的可信度进行对比分析。

图 4 为该水库堤坝排水边坡的混凝土裂纹关键部位。

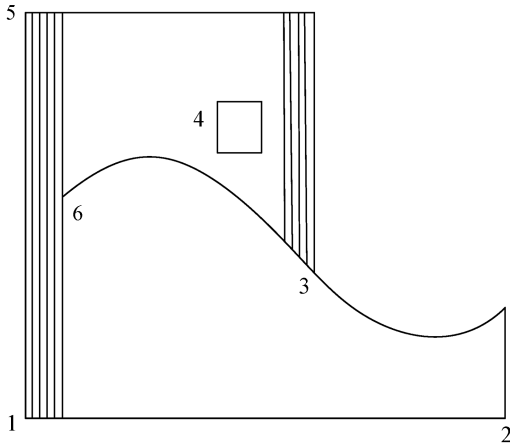


图 4 水库堤坝排水边坡混凝土裂纹关键部位
Fig.4 The key part of concrete crack of the drained slope on reservoir dam

图 4 中 1、2 和 3 处分别表示水库堤坝的坝踵、坝趾和水库堤坝与闸墩的交汇处,闸门与堤坝的交汇处(牛腿)为位置 4,位置 5 和 6 分别为水库堤坝顶部以及迎水面的中部,以图 4 为基础对水库坝顶混凝土裂纹位移反应进行相关分析。

2.1 水库坝顶混凝土裂纹位移反应分析

在不同水位条件下,水库坝顶混凝土裂纹在地震加速度影响下的位移时程如图 5 所示。将位移变化沿排水边坡上游一侧值设为正值,下游一侧位移变化值为负。在 3.5~6 s 时三种水位条件下,坝顶混凝土裂纹位移的变化情况较其他时间段的变化明

显,此时的水库堤坝处于危险状态,坝顶混凝土裂纹位移变化峰值较地震波峰值晚大约 2 s 左右,同时坝顶混凝土裂纹的位移变化第二峰值在 6 s 时出现,后期随着地震的加载,坝顶的位移变化逐渐变弱

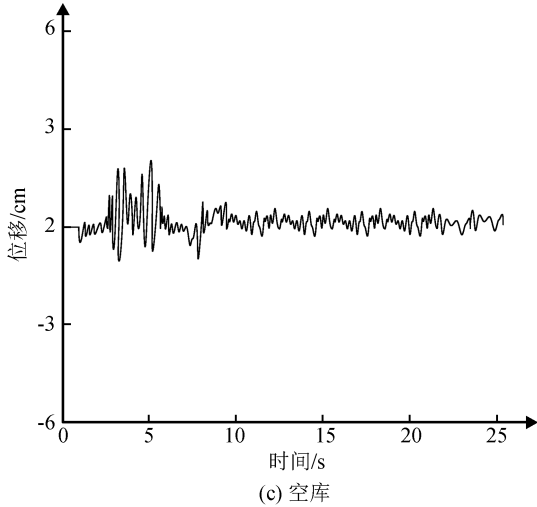
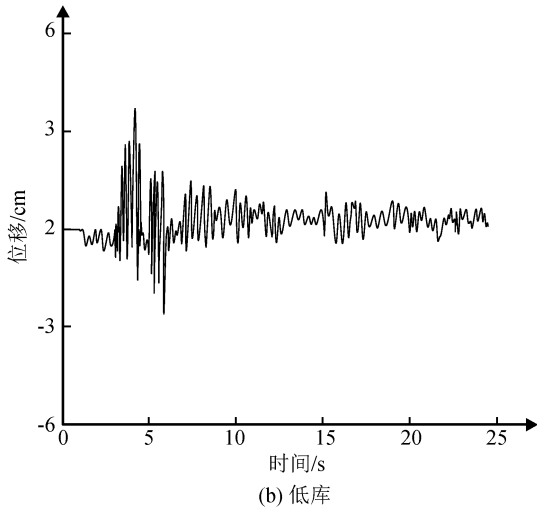
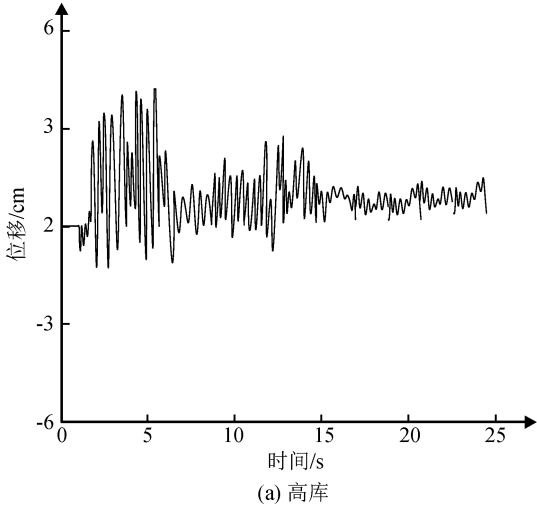


图 5 水库坝顶混凝土裂纹的位移时程
Fig.5 Displacement time history of concrete crack at the crest of reservoir dam

并处于平稳变化。分析图中位移变化可知,当水库水位处于高库时,水库堤坝排水边坡坝顶混凝土裂纹的位移变化最大,说明水库坝顶混凝土裂纹在高水位时其抗震性能差;水库堤坝在水库处于空库状态在时坝顶混凝土裂纹位移变化最小,说明当水库中水位低时混凝土裂纹的抗震性强,证明高水位存在的坝体动力耦合作用,影响水库堤坝排水边坡混凝土考虑裂纹本构关系。

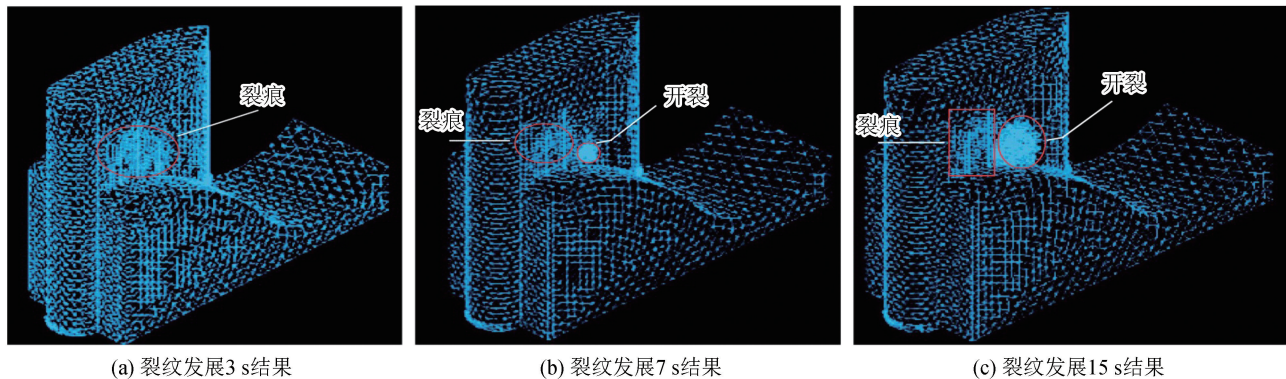


图 6 强震下混凝土裂缝产生与发展过程

Fig.6 Formation and development of concrete crack under strong earthquake

情况分析可知,在地震影响下,本文研究方法得出闸墩在原有的裂纹基础上产生新的裂纹,且裂纹急速扩展,当输入地震时间在 3~7 s 时,闸墩出现较大面积的混凝土裂纹面积同时,裂纹扩散到水库堤坝厚度的一半,在 15 s 后,闸墩混凝土的裂纹面积增大时,出现坝体破裂。造成该现象的原因,主要是由于闸墩原本存在较多的混凝土裂纹,并且混凝土的老化现象严重降低坝体的刚性,增强了地震反映,造成地震影响下闸墩的快速开裂以及裂纹的急剧扩散,因此造成闸墩的抗震性差。

2.3 两种方法的专家评价结果

实验为进一步验证水库堤坝排水边坡混凝土考虑裂纹本构关系研究方法的有效性,采用专家评价法对本文研究方法进行评价,为突出本文研究方法的优点,将其与传统研究方法的专家评价结果进行比较,实验评价角度为抗震性研究耗时、坝体位移变化精度和混凝土裂纹扩展范围。专家对不同方法的评价结果如表 1 所列。

从抗震性研究耗时可以看出,本文抗震性研究方法的专家评价结果得分高。在研究耗时、坝体位移变化精度和混凝土裂纹扩展范围方面均在 90 分以上,且平均得分也高于 95 分,说明本文抗震性研究方法耗时较短。而传统方法的三峡库区某岸坡抗震性能研究的抗震性能耗时得分在 64.1~75.2 分

2.2 闸墩强震开裂过程模拟与分析

由上述实验分析可知,在高库水位时,水库堤坝受到的地震应力大于低库和空库水位,实验采用本文研究方法,对高库水位下水库闸墩受地震影响的裂纹破坏过程进行分析。图 6 为高水库条件下闸墩混凝土裂纹的地震开裂过程模拟结果,图中加深区域为模拟得出的裂纹张开和闭合裂纹。

根据图 6 和实际水库堤坝排水边坡混凝土裂纹

之间变化,平均得分为 69.9 分,说明传统方法三峡库区某岸坡抗震性能分析所需的时间较长。故专家对本文水库堤坝排水边坡混凝土考虑裂纹本构关系研究方法评价较高。

从坝体位移变化精度和混凝土裂纹扩展范围得分情况可以看出,本文研究方法对坝体位移变化的研究精度高,得到的混凝土裂纹扩展范围准确。

2.4 两种方法的抗震性研究准确率对比分析

为了验证本文方法的有效性,对水库堤坝排水边坡混凝土考虑裂纹本构关系研究准确率进行对比分析。对比结果如图 7 所示。

根据图 7 可知,本文进行对比实验时,准确率高 于 60% 时准确性更好。当实验次数为 3 时,传统水库堤坝排水边坡混凝土考虑裂纹本构关系研究准确率为 55%,本文水库堤坝排水边坡混凝土考虑裂纹本构关系研究准确率为 91%;当实验次数为 6 时,传统水库堤坝排水边坡混凝土考虑裂纹本构关系研究准确率为 56%,本文水库堤坝排水边坡混凝土考虑裂纹本构关系研究准确率为 94%;当实验次数为 10 时,传统水库堤坝排水边坡混凝土考虑裂纹本构关系研究准确率为 69%,本文水库堤坝排水边坡混凝土考虑裂纹本构关系研究准确率为 95%。传统方法的抗震性研究准确率在 88%~95% 区间;本文方法的抗震性研究准确率在 49%~69% 区间,本文方法

表 1 专家对不同方法的评价结果(分)

专家编号	本文研究方法			传统研究方法		
	研究耗时	坝体位移变化精度	混凝土裂纹扩展范围	研究耗时	坝体位移变化精度	混凝土裂纹扩展范围
1	96.6	95.7	96.2	65.2	60.2	67.5
2	98.5	94.8	93.5	64.1	64.7	65.8
3	96.3	92.2	95.4	65.2	65.4	61.8
4	93.1	95.6	94.5	65.6	67.3	67.3
5	95.3	95.7	94.8	75.2	66.2	65.6
6	96.2	92.4	95.6	70.6	64.5	68.2
7	95.6	98.5	96.5	71.5	74.3	74.8
8	98.2	94.6	97.6	65.2	75.2	64.8
9	95.6	95.4	97.2	73.2	75.6	68.6
10	96.2	95.3	95.6	74.4	74.2	64.3
11	96.6	91.3	94.6	75.1	74.5	74.7
12	95.5	94.3	93.2	70.2	71.2	67.2
13	98.2	92.3	96.1	68.9	70.0	65.3
14	96.3	93.1	95.6	66.8	72.6	66.8
15	94.9	94.6	93.8	70.2	73.5	67.2
16	96.6	95.0	94.3	71.3	69.9	70.2
17	97.1	94.6	95.5	70.9	70.3	63.1
18	98.0	92.8	94.0	69.3	71.5	65.0
19	93.8	91.9	96.2	67.9	70.9	66.8
20	94.6	94.7	92.9	69.6	71.6	64.2
平均得分	96.2	94.2	95.2	69.5	70.2	70.0

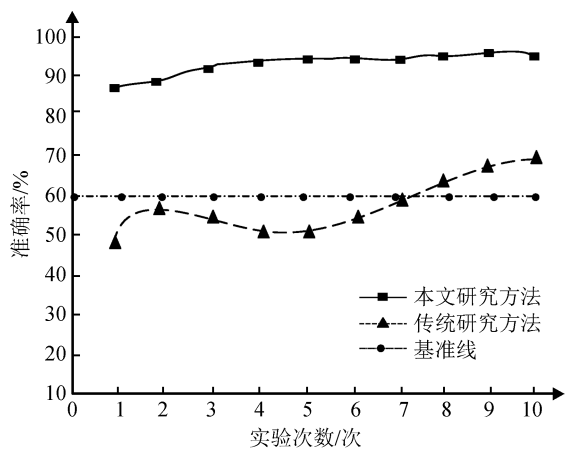


图 7 两种不同方法的抗震性研究准确率对比结果

Fig.7 Comparison of accuracy of two different methods in earthquake resistance study

的抗震性研究准确率比传统方法的抗震性研究准确率高,说明本文方法具有较高的抗震性研究准确率。

2.5 两种方法的裂纹分布模拟结果可信度对比分析

为了进一步验证本文方法的有效性,将本文研究方法与传统方法的裂纹分布模拟结果的可信度进行对比分析。对比结果如图 8 所示。

根据图 8 可知,当实验次数为 4 时,传统研究方法的裂纹分布模拟结果的可信度为 19%,本文

研究方法的裂纹分布模拟结果的可信度为 29%;当试验次数为 8 时,传统研究方法的裂纹分布模拟结果的可信度为 44%,本文研究方法的裂纹分布模拟结果的可信度为 60%;当实验次数为 16 时,传统研究方法的裂纹分布模拟结果的可信度为 76%,本文研究方法的裂纹分布模拟结果的可信度为 98%。说明本文研究方法的裂纹分布模拟结果的可信度比传统研究方法的裂纹分布模拟结果的可信度高。

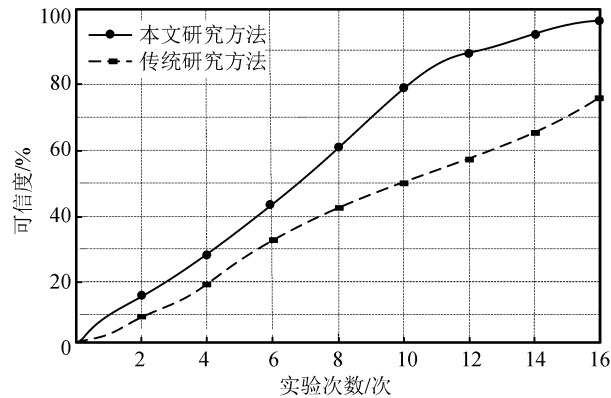


图 8 两种不同方法的裂纹分布模拟结果可信度对比结果

Fig.8 Reliability comparison of simulation results of crack distribution with two different methods

3 结 论

本文提出的水库堤坝排水边坡混凝土研究方法考虑了裂纹本构关系,选用水库堤坝排水边坡混凝土裂纹本构模型,对水库堤坝在 seismic 影响下的混凝土裂纹的产生和破损过程进行模拟;采用 Drucker-Prager 屈服准则在实现对水库闸墩混凝土材料屈服性判断的基础上,融合水库闸墩裂纹的实地分析结果;采用薄层单元模拟,确保混凝土与裂纹区域间的连续性,后采用分离式裂纹单元,计算得出裂纹区域的薄层单元弹性模量值;通过加载 EI Centro(N-S)波,并分析在水库不同水位下混凝土裂纹变化情况,实现对水库堤坝排水边坡混凝土裂纹的抗震性研究。实验结果表明:本文研究方法对水库堤坝排水边坡混凝土材料的抗震性分析用时短,抗震性研究准确率高,且裂纹分布模拟结果的可信度较高。

参考文献(References)

- [1] 刘炎,张迎宾,何毅,等.考虑土体抗拉强度的边坡永久位移极限分析[J].地质力学学报,2018,24(6):855-862.
LIU Yan, ZHANG Yingbin, HE Yi, et al. Limit Analysis of Permanent Displacement for Slope Considering The Tensile Strength of Soil[J]. Journal of Geomechanics, 2018, 24(6): 855-862.
- [2] 王晨玺杰,邓华锋,张恒宾,等.考虑劣化效应的三峡库区某岸坡抗震性能分析[J].长江科学院院报,2018,35(1):112-116.
WANG Chenxijie, DENG Huafeng, ZHANG Hengbin, et al. Seismic Behavior of a Typical Bank Slope of Three Gorges Reservoir in Consideration of Degradation of Rock Mass Mechanical Properties[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(1): 112-116.
- [3] 丁声荣,霍艳华.混凝土结构建筑物抗震加固强度测试仿真[J].计算机仿真,2017,34(8):429-432.
DING Shengrong, HUO Yanhua. Strength Test and Simulation of Seismic Strengthening of Concrete Structures[J]. Computer Simulation, 2017, 34(8): 429-432.
- [4] 卞洁,裴广龙,张飞,等.不排水条件下开挖边坡稳定性极限分析[J].长江科学院院报,2017,34(5):115-119.
BIAN Jie, PEI Guanglong, ZHANG Fei, et al. Limit Analysis of Excavation Slope Stability Under Undrained Condition[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(5): 115-119.
- [5] 孙金坤,陈伟,汪杰,等.HRB500E 高强抗震钢筋高钛重矿渣混凝土梁裂缝试验研究[J].工程抗震与加固改造,2016,38(3):78-84.
SUN Jinkun, CHEN Wei, WANG Jie, et al. Experimental Re-

- search on the Cracks of HRB500E High-strength Anti-seismic Steel Bar High-titanium Heavy-slag Concrete Beams[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016, 38(3): 78-84.
- [6] 黄远,张锐,朱正庚,等.现浇柱预制梁混凝土框架结构抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2015,36(1):44-50.
HUANG Yuan, ZHANG Rui, ZHU Zhenggeng, et al. Experimental Study on Seismic Performance of Frame with Precast Beams and Cast-in-place Columns[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(1): 44-50.
- [7] 申丽婷,李小军.核电站双钢板混凝土组合墙体面内抗震性能试验研究[J].工业建筑,2016,46(12):57-61.
SHEN Liting, LI Xiaojun. Experimental Study of in-plane Seismic Performance of Double Steel Plate Reinforced Concrete Composite Wall for Nuclear Power Plants[J]. Industrial Construction, 2016, 46(12): 57-61.
- [8] 吴从晓,邓雪松,赖伟山,等.扇形铅粘弹性阻尼减震混凝土框架结构节点抗震性能试验对比研究[J].工程抗震与加固改造,2017,39(5):81-87.
WU Congxiao, WU Congxiao, LAI Weishan, et al. Experimental Comparison Study on Earthquake Resistance Performance of Joint in Amortization Concrete Frame with Sector Lead Viscoelastic Damper[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2017, 39(5): 81-87.
- [9] 邱春杰,方从启,张俊萌,等.受腐蚀钢筋混凝土墩柱抗震性能研究[J].四川建筑科学研究,2016,42(1):79-84.
QIU Chunjie, FANG Congqi, ZHANG Junmeng, et al. Research of Seismic Behavior of Corrosive Reinforced Concrete Bridge Piers[J]. Sichuan Building Science, 2016, 42(1): 79-84.
- [10] 李悦,谢丹妮,陈适才,等.装配式混凝土结构的抗震性能研究现状与分析[J].建筑技术,2015,46(3):261-265.
LI Yue, XIE Danni, CHEN Shicai, et al. Present Research and Analysis on the Seismic Performance of Precast Concrete Structures[J]. Architecture Technology, 2015, 46(3): 261-265.
- [11] 王永泉,韦芳芳,瞿丽华,等.钢筋混凝土框架梁后锚固节点抗震性能研究[J].施工技术,2016,45(21):9-14.
WANG Yongquan, WEI Fangfang, QU Lihua, et al. Seismic Performance Study for Post-installed Joint in Beams Connected with Reinforced Concrete Framework[J]. Construction Technology, 2016, 45(21): 9-14.
- [12] 姜俊铭,马建勋,付靓.柔性连接的配筋砌体墙混凝土框架抗震性能理论研究[J].科学技术与工程,2015,15(8):103-110.
JIANG Junming, MA Jianxun, FU Liang. Theoretical Research on Seismic Performance of RC Frame with Reinforced Masonry Wall in the Flexible Connection[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(8): 103-110.
- [13] 刘昱杰,宋志强,王建.基于能量法的水电站厂房抗震性能分析[J].水利水电技术,2018,49(3):39-45.
LIU Yujie, SONG Zhiqiang, WANG Jian. Energy Approach-

- based Analysis on Seismic Performance of Powerhouse of Hydropower Station[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(3): 39-45.
- [14] 鲁亮,刘霞.一种体外预应力钢筋混凝土摇摆框架抗震性能研究[J].振动与冲击,2017,36(9):179-185.
- LU Liang, LIU Xia. Aseismic Performance of an External Prestressed Rocking Reinforced Concrete Frame[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(9): 179-185.
- [15] 郑捷,左河山,李文博,等.设计因素对 RC 框架结构地震易损性的影响[J].地震工程学报,2016,38(4):491-497.
- ZHENG Jie, ZUO Heshan, LI Wenbo, et al. Influence of Design Factors on Seismic Fragility of RC Frame Structures[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(4): 491-497.
- [16] 包超,杜永峰,刘勇,等.结构抗震鲁棒性分析方法研究[J].地震工程学报,2015,37(3):660-666.
- BAO Chao, DU Yongfeng, LIU Yong, et al. Study on Seismic Robustness of Structure[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(3): 660-666.
- [17] 杨建华,彭立顺.基于滞回曲线以及结构动力方程的混凝土结构抗震稳定性分析[J].地震工程学报,2018,40(3):444-449.
- YANG Jianhua, PENG Lishun. Seismic Stability Analysis of Concrete Structures Based on Hysteretic Curves and Structural Dynamic Equations [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(3): 444-449.
- [18] 于婷婷,顾圣平,邵雪杰,等.考虑降雨拉张裂缝作用的库岸边坡稳定性分析[J].人民黄河,2017,39(4):104-107.
- YU Tingting, GU Shengping, SHAO Xuejie, et al. Stability Analysis of Reservoir Bank Slope Considering Tensile Crack by the Action of Rainfall[J]. Yellow River, 2017, 39(4): 104-107.
- [19] 胡添翼,游梦陶,陆天琳,等.一种改进的空间相关系数在水库高边坡外观变形监测中的应用[J].长江科学院院报,2017,34(7):41-47.
- HU Tianyi, YOU Mengtao, LU Tianlin, et al. Application of an Improved Spatial Correlation Coefficient to Exterior Deformation Monitoring of High Slope in Reservoir Area[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(7): 41-47.
- [20] 刘爱娟,郑路,刘铁新,等.考虑动态临界加速度的地震边坡永久位移研究[J].地震工程学报,2017,39(5):81-87.
- LIU Aijuan, ZHENG Lu, LIU Tiexin, et al. Study of Seismic Slope Permanent Displacements with Dynamic Critical Acceleration[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(5): 81-87.
- [21] 罗方悦,张嘎.水库区均质边坡安全可靠度实用分析方法[J].长江科学院院报,2017,34(7):106-110.
- LUO Fangyue, ZHANG Ga. Simplified Analysis of Safety Reliability of Homogeneous Slopes in Reservoir Area[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(7): 106-110.
- [22] 熊炜,刘可,范文.秦巴山区浅层滑坡内动力地质成因分析[J].地质力学学报,2018,24(3):642-645.
- XIONG Wei, LIU Ke, FAN Wen. Analysis on Internal Dynamic Geological Genesis of Shallow Landslide in QIN-BA MOUNTAIN AREA[J]. Journal of Geomechanics, 2018, 24(3): 642-645.
- [23] 张社荣,于茂,王超,等.不同横缝状态影响下混凝土重力坝抗爆性能研究[J].河海大学学报(自然科学版),2017,45(6):509-514.
- ZHANG Sherong, YU Mao, WANG Chao, et al. Effect of Contraction Joint State on the Anti-knock Performance of Concrete Gravity Dam[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(6): 509-514.
- [24] 王惠,申波,刘盼盼,等.钢筋混凝土空腹夹层板起拱的静力性能分析[J].贵州大学学报(自然科学版),2017,34(6):90-97.
- WANG Hui, SHEN Bo, LIU Panpan, et al. Analysis of the Static Performance of Arch Camber of the Reinforced Concrete Open-web Sandwich Plate[J]. Journal of Guizhou University (Natural Science), 2017, 34(6): 90-97.
- [25] 段茜,金涛,邱吉,等.复合加载工况下 PA66 的屈服行为研究[J].太原理工大学学报,2018,49(4):344-347.
- DUAN Qian, JIN Tao, QIU Ji, et al. Yield Behavior of PA66 Under Combined Loading[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2018, 49(4): 344-347.
- [26] 杨斌,陈闯,韦仕荣,等.大跨径连续刚构桥长期下挠影响因素分析[J].贵州大学学报(自然科学版),2017,34(6):125-131.
- YANG Bin, CHEN Chuang, WEI Shirong, et al. Experimental Research and Nonlinear Finite Element Analysis on Shear Behavior of Regional Confined Concrete Beams[J]. Journal of Guizhou University (Natural Science), 2017, 34(6): 125-131.
- [27] 闫鲁华,闫晓鹏,王志华,等.基于随机骨料的混凝土模型抗侵蚀性能模拟研究[J].太原理工大学学报,2016,47(5):664-668.
- YAN Luhua, YAN Xiaopeng, WANG Zhihua, et al. Numerical Simulation on Penetration Behavior of Concrete Based on Random Aggregate [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2016, 47(5): 664-668.