

近断层脉冲型地震动对重力坝 损伤特性影响研究

李 兵¹,傅蜀燕²

(1. 江西赣禹工程建设有限公司,南昌 330200;2. 云南农业大学 水利学院,昆明 650201)

[摘 要] 以我国西南某重力坝为研究对象,建立损伤仿真模型,从 PEER 强震数据库中选取实测近断层脉冲型及无脉冲型地震动,从损伤程度、位移响应以及耗能特征 3 个角度,对比研究近断层脉冲型地震动对重力坝损伤特性的影响规律。结果表明,近断层脉冲型地震动作用后的重力坝损伤程度、位移响应以及耗能特征均比无脉冲型地震动更为显著,表明近断层脉冲型地震动会对重力坝造成更为严重的损伤破坏,在重力坝抗震设计中应加以关注。

[关键词] 重力坝;近断层地震动;塑性损伤;位移响应;损伤耗能

[中图分类号] TV642.3 [文献标识码] A [文章编号] 1006-7175(2023)04-0034-04

Study on the Influence of Near Fault Pulse Ground Motion on the Damage Characteristics of Gravity Dams

LI Bing¹, FU Shu-yan²

(1. Jiangxi Ganyu Engineering Construction Co. Ltd., Nanchang 330200, China; 2. Water Conservancy College of Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: In this paper, a damage simulation model of a gravity dam in southwest China is established. The effects of near fault pulsed ground motions on the damage characteristics of gravity dam are studied from the perspective of damage degree, displacement response and energy consumption characteristics. The results show that the damage degree, displacement response and energy dissipation characteristics of the gravity dam after the near-fault pulsed ground motion are more significant than those of the non-pulsed ground motion, indicating that the near-fault pulsed ground motion will cause more serious damage to the gravity dam, which should be paid more attention to in the seismic design of gravity dam.

Key words: gravity dam; near fault ground motion; plastic damage; displacement response; damage energy consumption

[收稿日期] 2022-10-23

[基金项目] 国家自然科学基金(52069029)

[作者简介] 李 兵(1986-),男,江西上饶人,工程师,主要从事水利水电工程监理、施工及管理工作。

[通信作者] 傅蜀燕(1976-),女,云南普洱人,副教授,硕士,主要从事水利工程安全监测与风险管理研究工作。

1 概 述

大量震害资料显示,近断层脉冲型地震动对结构具有更为显著的影响。目前,对近断层脉冲型地震动的研究主要集中在钢筋混凝土框架结构及桥梁结构的动态响应行为方面。如张淑云等^[1]对 RC 框排架结构进行了近断层脉冲型地震动作用下的易损性分析,结果发现相比于非脉冲型地震动,近断层脉冲型地震动对 RC 框排架结构造成了更为显著的破坏。陈扬等^[2]对近断层脉冲型地震动作用下的大跨斜拉桥的地震响应特征进行了分析,结果发现相比于非脉冲型地震动,近断层脉冲型地震动作用下的大跨度斜拉桥的内力和位移均有一定放大效应。随着研究工作的不断深入,部分学者开始研究近断层脉冲型地震动对大坝抗震性能影响。如杨贵等^[3]对深厚覆盖层土石坝近断层地震动加速度响应进行了研究,结果发现近断层脉冲型地震动作用下

的动力响应远高于非脉冲型地震动。

目前,针对近断层脉冲型地震动对重力坝损伤特性的影响研究较少。为了更全面地了解近断层脉冲型地震动对重力坝损伤特性的影响规律,本文以我国西南某重力坝为研究对象,建立损伤仿真模型,从 PEER 强震数据库中选取实测近断层脉冲型及无脉冲型地震动,从损伤程度、位移响应以及耗能特征 3 个角度对比研究近断层脉冲型地震动对重力坝损伤特性的影响规律。

2 近断层脉冲型地震动选取

本文从 1999 年台湾地区 Chi-Chi 地震及 1994 年日本 Kobe 地震中选取具有脉冲型和非脉冲型特征的地震动记录,所选地震动均来自 PEER 强震数据库,将所有地震波统一调幅为 0.2g,见表 1。 PGA 、 PGV 分别表示地震动峰值加速度、峰值速度, $PGV/PGA>0.2s$ 时的速度脉冲特性较为明显^[4]。

表 1 脉冲型/非脉冲型地震记录表

地震动特征	地震事件	工况	震级	台站	断层距 /km	PGA / $cm \cdot s^{-2}$	PGV / $cm \cdot s^{-1}$	PGV/PGA /s
脉冲型	Chi-Chi	A	7.62	TCU051	7.64	160.21	53.85	0.34
	Kobe	B	6.90	Takatori	1.47	603.96	124.68	0.21
非脉冲型	Chi-Chi	C	7.62	TCU071	5.8	528.57	52.30	0.10
	Kobe	D	6.90	Kakogawa	22.5	225.44	21.81	0.10

3 近断层脉冲型地震动对重力坝损伤特性影响研究

3.1 工程概况及有限元模型

本文采用文献[5]中的重力坝,坝高 97m,正常蓄水位 83m。以坝高 50m 为分界线,坝高 50m 以上采用低标号 C15 混凝土、50m 以下采用高标号 C20 混凝土。坝基大部分属于 II 类基岩,表层地质条件略差,属于 III 类基岩。基于有限元软件,建立重力坝损伤仿真模型,见图 1。坝体为塑性损伤材料,坝基为线弹性材料。静力荷载包括正常蓄水位下的静水压力、淤沙压力、扬压力及自重。动水压力以 Westergaard 附加质量法施加。在地基底部及四周施加黏弹性边界来模拟远域地基辐射阻尼的影响^[6]。计算采用材料参数见表 2。

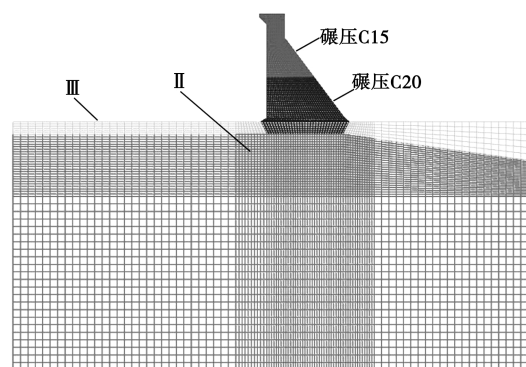


图 1 重力坝材料分区图

表 2 材料参数表

材料	C ₁₈₀ 15	C ₁₈₀ 20	II 类	III 类
密度/ $kg \cdot m^{-3}$	2 500	2 500	2 675	2 625
弹模 E_d /GPa	34.50	37.50	14	7
泊松比 ν	0.18	0.18	0.22	0.24
抗拉强度/MPa	1.20	1.61	1.04	0.77

3.2 近断层地震动对坝体损伤区域的影响研究

图 2 为不同工况作用后坝体损伤分布图。其中,工况 A 和工况 C 分别表示 Chi-Chi 地震动中的脉冲型和非脉冲型地震动作用后的结果,工况 B 和工况 D 分别表示 Kobe 地震动中脉冲型和非脉冲型地震动作用后的结果。工况 A 作用后,坝体折坡处附近出现多条裂缝,最为严重的一条已经贯穿上下游坝体,同时坝踵处也出现贯穿坝底的裂缝;工况 C 作用后,折坡处附近仅出现一

条裂缝,且并未贯穿上下游,坝踵处损伤程度与工况 A 类似;工况 B 作用后,坝体折坡处附近出现多条裂缝,且在折坡处下游侧出现大范围损伤区域,同时坝踵处也出现贯穿坝底的裂缝;工况 D 作用后,折坡处附近仅出现一条细小裂缝,坝踵处出现轻微损伤。从不同工况作用后的重力坝损伤程度来看,近断层脉冲型地震动作用后的坝体损伤破坏程度明显高于非脉冲型地震动作用后的结果。

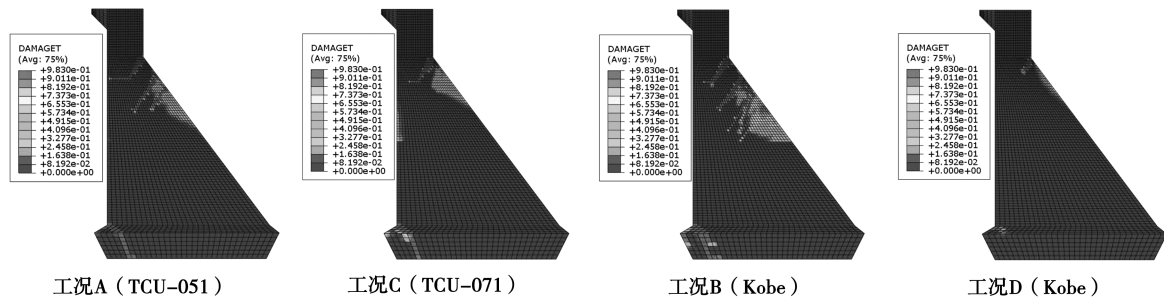


图 2 不同工况重力坝损伤分布图

3.3 近断层地震动对重力坝位移的影响研究

图 3 为不同工况作用后的坝顶顺河向位移时程曲线图。4 种工况中的静力作用结果是相同的,作用后坝顶产生 0.533cm 的位移。工况 A 作用后,坝体残余位移为 -0.122cm,表明工况 A 地震动使坝顶产生 0.655cm 的变形;工况 C 作用后,坝体残余位移为 0.352cm,表明工况 C 地震动

使坝顶产生 0.181cm 的变形;工况 B 作用后,坝体残余位移为 -0.788cm,表明工况 B 地震动使坝顶产生 1.321cm 的变形;工况 D 作用后,坝体残余位移为 0.464cm,表明工况 D 地震动使坝顶产生 0.069cm 的变形;近断层脉冲型地震动作用后的重力坝坝顶位移响应更为显著,表明近断层脉冲型地震动对重力坝造成更为严重的损伤破坏。

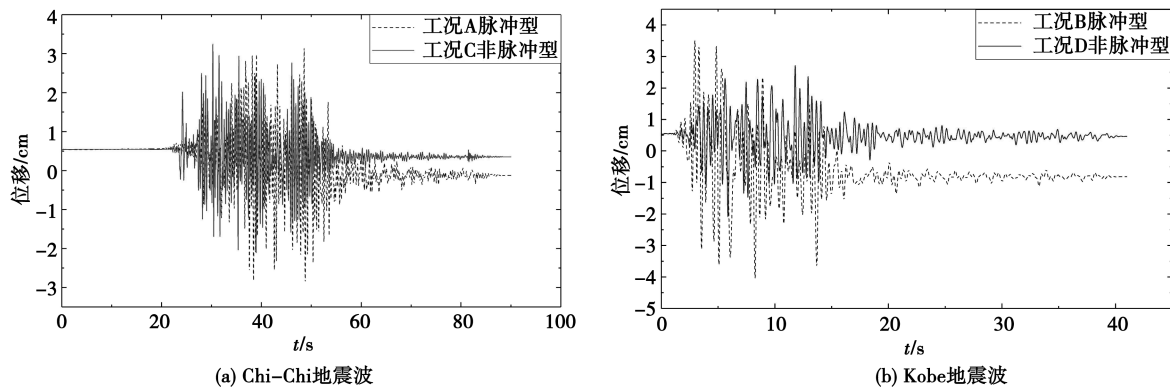


图 3 不同工况坝顶顺河向位移时程曲线图

3.4 近断层地震动对重力坝损伤耗能影响研究

图 4 为不同工况作用后的坝体损伤耗能时程曲线图。工况 A 作用后,坝顶损伤耗能为 $8.26\text{kJ} \cdot \text{m}$;工况 C 作用后,坝顶损伤耗能为 $5.89\text{kJ} \cdot \text{m}$;工况 B 作用后,坝顶损伤耗能为 $11.41\text{kJ} \cdot \text{m}$;工况 D 作用后,坝顶损伤耗能为

$2.63\text{kJ} \cdot \text{m}$ 。近断层脉冲型地震动作用后,坝体产生的损伤耗能明显高于非脉冲型地震动作用后产生的损伤耗能,表明近断层脉冲型地震动对重力坝造成的损伤破坏影响显著高于非脉冲型地震动。

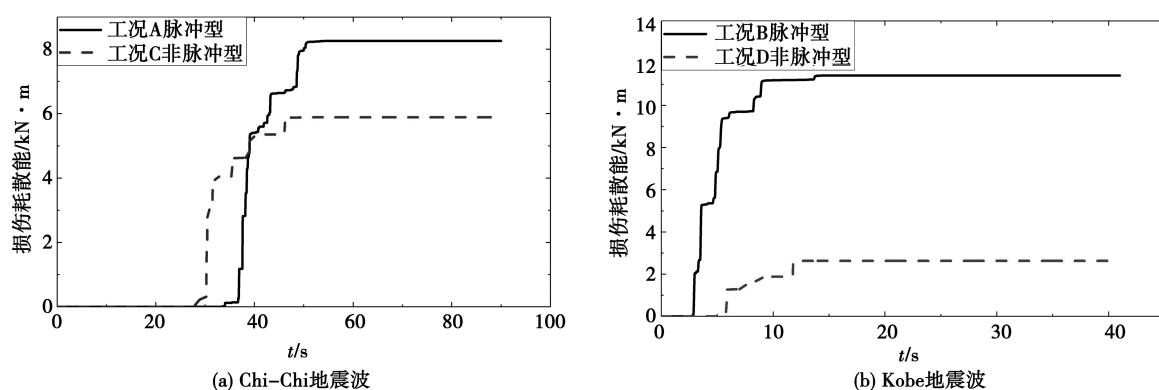


图4 不同工况坝体损伤耗能时程曲线图

4 结 论

本文以我国西南某重力坝为研究对象,建立损伤仿真模型,从 PEER 强震数据库中选取实测近断层脉冲型及无脉冲型地震动,从损伤程度、位移响应以及耗能特征 3 个角度,对比研究了近断层脉冲型地震动对重力坝损伤特性的影响规律。结论如下:

1) 近断层脉冲型地震动作用后的坝体损伤程度、位移响应以及耗能特征均比无脉冲型地震动更为显著,表明近断层脉冲型地震动会对重力坝造成更为严重的损伤破坏。

2) 本文仅考虑水平向近断层脉冲型地震动对重力坝损伤特性的影响规律,水平向和竖向地震动耦合作用下的结果如何还需进一步研究。

[参考文献]

[1] 张淑云,周杰,黄磊,等. 近断层地震作用下 RC 框排

架结构易损性研究[J]. 地震工程学报, 2021, 43 (2): 369-374.

[2] 陈扬,张铭,王秋良,等. 近断层脉冲型地震动作用下大跨斜拉桥的地震响应特征分析[J]. 公路, 2022, 67 (1): 97-104.

[3] 杨贵,陈转转,胡先鸿. 深厚覆盖层土石坝近远断层地震动加速度响应分析[J]. 河南科学, 2022, 40 (8): 1237-1243.

[4] 邹德高,韩慧超,孔宪京,等. 近断层地震动作用下面板堆石坝的加速度分布系数[J]. 水利学报, 2018, 49 (10): 1236-1242.

[5] 史俊飞,张燎军,马天晓,等. 考虑强震能量持时的混凝土重力坝损伤累积效应研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31 (6): 174-179.

[6] 刘晶波,谷音,杜义欣. 一致黏弹性人工边界及黏弹性边界单元[J]. 岩土工程学报, 2006 (9): 1070-1075.

编辑部版权声明

为扩大本刊及作者知识信息交流渠道,加强知识信息推广力度,本刊已许可中国知网、万方数据、维普资讯、超星域出版及其系列数据库产品中,以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。该著作权使用费及相关稿酬,本刊均用作为作者文章发表、出版、推广交流(含信息网络)以及赠送样刊之用途,即不再另行向作者支付。凡作者向本刊提交文章发表之行为即视为同意我社上述声明。

《水利科技与经济》编辑部