

考虑材料老化的加高重力坝地震动力响应分析

崔 激^{1,2}, 顾子涵¹, 吴 军³

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350; 2. 天津大学 中国地震局地震工程综合模拟与城乡抗震韧性重点实验室, 天津 300350; 3. 中国电建市政建设集团有限公司, 天津 300384)

摘要: 混凝土坝的动力响应随着混凝土龄期的增加、性能的退化会发生显著变化, 而加高重力坝还受到新老混凝土材料差异的影响。为研究重力坝运行期材料老化和加高重力坝新老混凝土性能差异对地震作用下动力响应特性的影响, 以加高的丹江口重力坝为例, 利用 ABAQUS 有限元分析软件进行地震动力响应分析。同时, 对比加高重力坝、拆除重建重力坝(即材料全新工况)以及按加高高度建造重力坝(即材料全老工况)3种工况下的地震响应情况, 分析加高重力坝在地震动力下随着混凝土材料性能老化的坝顶位移、关键点应力和塑性损伤的响应。研究结果表明: 随着混凝土材料老化程度增加, 加高重力坝坝体的动力响应总体优于材料全老工况, 同时劣于材料全新工况; 其中坝体损伤呈经老坝折坡处后向新老混凝土结合面向下延伸的趋势。加高重力坝可适应结构变化后的受力和变形, 同时兼具损伤破坏指标低、抗滑稳定性系数高的特点, 坝体综合抗震性能得到提高。

关键词: 加高重力坝; 材料老化; 损伤; 地震反应

中图分类号: TU4

文献标识码: A

Seismic dynamic response analysis of heightened gravity dam considering material aging

CUI Wei^{1,2}, GU Zihan¹, WU Jun³

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Engineering Simulation and Seismic Resilience of China Earthquake Administration, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 3. STECOL Corporation, Tianjin 300384, China)

Abstract: With the increase of concrete age and performance degradation, the dynamic response of concrete dam will change significantly. The heightened gravity dam is also affected by the difference between new and old concrete materials. In order to study the influence of the aging of gravity dam materials and the performance difference of new and old concrete in heightened gravity dams, taking the heightened Danjiangkou gravity dam as an example, the seismic dynamic response analysis is carried out by using the ABAQUS finite element analysis software. The demolition and reconstruction (the new material condition) and the construction according to the heightened height (the old material condition) are compared with the heightened condition, analyzing the responses of heightened gravity dams to the displacement of the crest, the stress at key points, and the plastic damage with the aging of the concrete material properties under seismic dynamics. The results show that with the increase of the aging degree of concrete materials, the dynamic response of the heightened gravity dam is generally better than that of the old materials and inferior to the new materials. The damage of the dam body tends to extend downward to the joint surface of the new and old concrete. The heightened gravity dam has the characteristics of strong adaptability, low damage index and high anti-sliding stability coefficient, which improve the comprehensive characteristics of the dam body. Besides, the weak parts such as the new and old joint surfaces should be reinforced and bonded to give full

收稿日期: 2023-01-09; 修回日期: 2023-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(52079092)

作者简介: 崔 激(1977—), 男, 教授, 博士, 主要从事水工结构方面的研究。E-mail: cuiwei@tju.edu.cn

play to the engineering benefits of heightening the gravity dam.

Key words: heightened gravity dam; material aging; damage; seismic response

0 引言

随着社会经济的快速发展,人们对水利资源的需求日益增加,对已建大坝进行加高是缓解水利资源供需关系的有效途径之一。但加高重力坝也带来诸多潜在安全隐患,例如旧坝体应力突变、新旧坝体混凝土材料性能差异、新老混凝土结合面开裂等,此类问题均可能导致加高重力坝在遭遇地震作用时出现非预期的损伤。

考虑混凝土坝老化的研究需首先对结构损伤模型进行选取和应用,连续损伤力学理论非常适合研究结构的损伤演化过程。早期 CERVERA 等^[1-2]采用损伤力学解决混凝土坝碱骨料问题;CAIAYIR 等^[3]和杜成斌等^[4]考虑损伤演化,模拟了混凝土重力坝的弹脆性损伤力学地震响应分析;李明超等^[5]采用了基于黏弹性边界的地震波动输入方法,结合塑性损伤模型分别分析了地震 P 波和 SV 波斜入射下坝体的动力响应。涂劲等^[6]以全级配大坝混凝土拉压转换全过程试验成果为基础,采用双折线模型的思路分析受拉损伤,构建了更接近混凝土拉压转换时真实状况的抗震损伤本构模型。张我华等^[7-8]、郭胜山等^[9]、翟亚飞等^[10]、闫肴雨等^[11]通过扩展理论或试验的方法,先后对损伤模型进行了改进和完善,并将其应用于重力坝地震响应上。在这些研究中,综合考虑了不同基岩对坝体损伤分布的影响、混凝土的残余变形及刚度退化,并对坝体与基岩的损伤发展过程进行预测,为科学反映重力坝在地震响应下的损伤演化过程提供了基础。但是以上损伤模型中,均未考虑混凝土大坝已有的老化损伤对坝体结构抗震性能的影响。

TEKIE 等^[12]指出,考虑老化特性的大坝模拟方法和计算分析是老化混凝土大坝的重要研究领域。可用于这一研究的方法有概率退化评估方法^[12]、损伤和断裂力学方法^[13]、无损检测方法等。NAYAK 等^[14]研究了老化混凝土重力坝的拉伸损伤演化过程。AZIZAN 等^[15]研究了碱骨料反应(alkali-aggregate reaction, AAR)和热化学反应的膨胀对混凝土强度的影响,得到 AAR 膨胀、抗压强度和弹性模量随时间变化的理论及相关经验公式。GORAI 等^[16]和 BURMAN 等^[17-18]通过考虑混凝土退化长期影响,并将其分别应用于坝基和坝库耦合系统的响应分析中。王怀亮等^[19]考虑混凝土老化对坝体动力损伤的影响,采用二维动力有限元和边界元混合法相结合的方法对丰满大坝的溢流坝段进行数值计算分析。牛志国等^[20]结合衰减函数建立老化损伤模型,分析现役混凝土老化坝的动力响应并评价其抗震安全性。可见,现有学者主要是在建立损伤模型基础上研究长期运行的老化重力坝地震动力响应,但对加高重力坝的非线性地震反应分析研究尚且较少。考虑到重力坝加高会导致混凝土材料老化性能差异,与常规按照整体材料一致进行地震分析存在明显不同,因此,对现正运行或计划建设的加高重力坝的抗震安全如何考虑材料老化因素的影响,是大坝抗震安全评价亟待解决的关键问题。

鉴于上述背景,本文在考虑混凝土材料老化及加高重力坝新老混凝土性能差异影响的情况下,建立丹江口加高重力坝某坝段的三维有限元模型,对其地震激励作用下的坝顶位移、关键点应力进行模拟分析,同时基于混凝土塑性损伤模型结合混凝土性能退化理论,对比分析坝体不同峰值加速度以及不同运行时间下的塑性损伤,揭示考虑材料老化下加高重力坝的动态响应规律和累积损伤破坏机理。

1 研究方法

1.1 塑性损伤模型

混凝土重力坝的破坏会经历损伤、开裂、开裂扩展延伸和失稳多个过程,目前在混凝土结构抗震方面常用的本构模型是由 LUBLINER 等^[21]建立的混凝土塑性损伤(concrete damage plasticity, CDP)模型,随后该模型经过 LEE 等^[22]加以改进其实用性更高。CDP 模型假定混凝土的破坏准则为拉裂和压碎,混凝土材料前期主要表现为线弹性和各向同性,通过各向同性损伤、各向同性拉伸和压缩的综合作用来考虑混凝土的非线性行为,将单轴应力-应变曲线(拉、压)转换为应力-塑性应变曲线,用来模拟准脆性材料在循环荷载下因损伤引起的材料性能退化现象。混凝土单轴受拉与受压应力-应变与开裂应变关系如图 1 和图 2 所示。

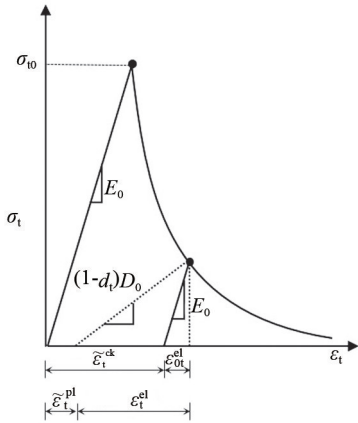


图 1 混凝土单轴受拉应力-应变关系

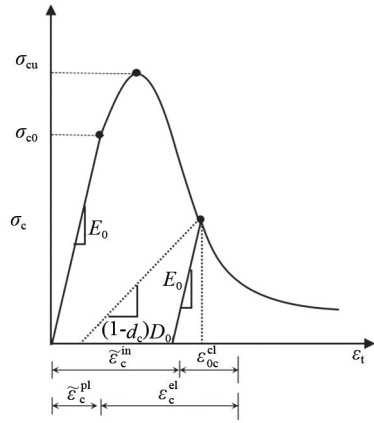


图 2 混凝土单轴受压应力-应变关系

Fig. 1 Uniaxial tensile stress-strain relationship of concrete

Fig. 2 Uniaxial compressive stress-strain relationship of concrete

混凝土在受拉和受压情况下的应力-应变曲线,表达式为

$$\sigma_t = (1-d_t)E_0(\varepsilon_t - \tilde{\varepsilon}_t^{pl}) \tag{1}$$

$$\sigma_c = (1-d_c)E_0(\varepsilon_c - \tilde{\varepsilon}_c^{pl}) \tag{2}$$

式中: $\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$ 、 $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$ 分别为受拉和受压等效塑性应变; E_0 为初始弹性模量; d 为损伤因子,取值在 0(无损伤)到 1(完全损伤)之间,下标 t 和 c 分别为拉伸和压缩。

本文中混凝土重力坝的破坏主要体现在受拉损伤方面。此外考虑混凝土材料的“单边效应”,即在对混凝土材料进行施加循环荷载作用的试验时,力的作用方向改变时材料刚度会有所恢复的现象。在设置参数时,假定受拉刚度恢复参数 $\omega_t = 0$,受压刚度恢复参数 $\omega_c = 1$ 。

1.2 混凝土老化的退化指标

AZIZAN 等^[15]得到了退化混凝土在不同龄期弹性模量和抗压强度的变化数据,拟合提出一个经验关系,为

$$E(t_a) = 0.0175t_a^3 - 3.4054t_a^2 + 29.807t_a + E_0 \tag{3}$$

$$f_{ck}(t_a) = -4 \times 10^{-8}E^2(t_a) + 0.0013E(t_a) + f_{ck0} \tag{4}$$

式中: E_0 为初始弹性模量; t_a 为老化时间; f_{ck} 为混凝土抗压强度; f_{ck0} 为初始混凝土抗压强度。

混凝土抗拉强度的变化与弹性模量的变化比例相同,表达式为

$$f_t = f_{t0} \left(\frac{E}{E_0} \right) \tag{5}$$

式中: E_0 为初始弹性模量; f_t 为退化后的混凝土抗拉强度; f_{t0} 为初始抗拉强度。

1.3 混凝土坝体地震破坏评价指标

目前,许多学者^[23-26]利用损伤指数来定量描述结构的破坏程度,建立大坝损伤评价指标用于评估抗震安全风险。张社荣等^[27]根据大坝损伤因子($D \geq 0.75$)及损伤区沿坝体宽度方向的长度,建立了以损伤区的贯穿程度为参数的大坝局部损伤评价指标,为

$$D_m = \max \left(\frac{l_{mi}}{L_{mi}} \right) \tag{6}$$

式中: l_{mi} 为局部破坏区域 m 内的第 i 个水平截面上损伤大于 0.75 区域的长度; L_{mi} 为局部破坏区域 m 内的第 i 个水平截面在坝体上的总长度。

整体损伤累积破坏指标考虑对局部损伤指标的加权平均,本文从能量角度出发,以损伤耗散能作为权重系数,同时反映结构整体破坏指标与破坏的集中现象和破坏沿大坝不同部位的分布相关,定义整体损伤累积破坏指标,为

$$D_M = \frac{\sum_{m=1}^N E_m D_m}{\sum_{m=1}^N E_m} \tag{7}$$

式中: D_m 为局部损伤评价指标; E_m 为大坝局部破坏区域 m 上的损伤耗散能; N 为局部破坏区域总数。

抗滑稳定性系数:

$$K = \frac{f'N + c'A}{S} \quad (8)$$

式中: f' 为抗剪断摩擦系数; c' 为抗剪断黏聚力; N 为滑动面正压力; A 为滑动面面积; S 为滑动面滑动力。

2 地震动力响应分析

2.1 加高重力坝三维有限元模型

为满足南水北调中线工程蓄水调水需求,丹江口大坝在初期工程基础上续建加高,坝顶高程由 162.0 m 增加到 176.6 m,正常水库蓄水位由 152.0 m 提高到 172.2 m,下游面贴坡增厚约 12 m。加高后坝体结构尺寸和有限元模型如图 3 所示。

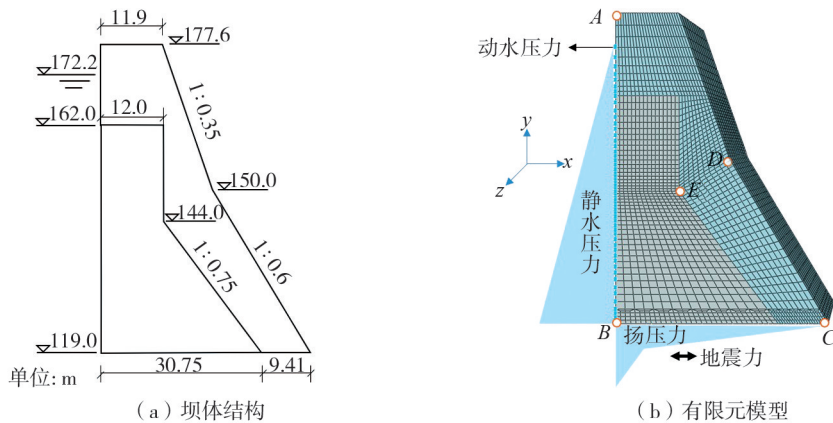


图3 坝体结构尺寸和有限元模型

Fig.3 Dam structure dimensions and finite element model

模型中有 16380 个缩减积分 C3D8R 单元,共 19942 个节点。定义以大坝左下角为中心的全局直角坐标系, y 轴竖直向上, x 轴水平指向下游,对重点研究部位(坝踵、坝趾和折坡处)网格进行加密处理。坝体部分在 z 轴方向进行法向约束。数值模型按坝体一次建成的结果进行计算,不考虑分期加高;按照上游水位 172.2 m,下游无水的情况进行计算,需考虑上游静水压力、动水压力、扬压力及坝体自重产生的应力及变形情况。荷载设置方面,分 2 步施加荷载:第一步施加静荷载,包括:重力、静水压力和扬压力;第二步施加动荷载,包括地震力和动水压力。其中,选取历史上记录的典型强震 Kocali 地震波作为输入地震荷载,如图 4 所示。实际工程中丹江口重力坝新老混凝土结合面采用凿槽槽和增设锚筋的方法进行了处理,有学者对新老混凝土粘结面进行了剪切和劈拉试验^[28-29],结果表明,粘结面的抗剪强度和抗拉强度均高于混凝土材料,所以本文采用共节点方式对结合面进行处理。动水压力的施加采用 Westergaard 方法,在水平地震下竖直刚性坝面受到的动水压力为

$$P_{\max} = \frac{7}{8} \alpha \sqrt{H_0 h} \quad (9)$$

式中: P_{\max} 为动水压力值; H_0 为水深; h 为计算点位置处水深; α 为该点加速度系数。

材料参数方面,坝体材料的物理力学参数由现场试验确定,如表 1 所示,在动力分析时由于要考虑应变率效应,弹性模量和强度参数按扩大 1.3 倍处理。为了研究不同运行期加高重力坝的地震动力响应问题,在初始状态即坝体混凝土没有退化的情况下,混凝土材料参数按养护 28 d 的材料性质选取,随着混凝土的老化,弹性模量、抗拉强度和抗压强度等材料参数按式(3)~式(5)取值。混凝土拉伸应力-应变关系随老化时间的变化情况,如图 5 所示。由图可知,随着老化时间增加混凝土的抗拉强度逐渐减小。混凝土损伤因子随开裂应变的变化情况,如图 6 所示。

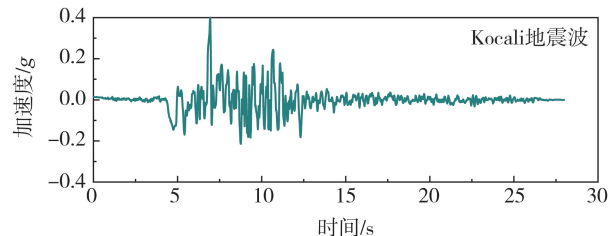


图4 输入地震波

Fig.4 Input seismic waves

表 1 模型的材料参数

Table 1 Material parameters of the model

材料	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	容重 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
老坝体混凝土	25	0.167	24.00	10	1.2
新坝体混凝土	25	0.167	24.00	10	1.2
基岩	21	0.220	27.53	—	—

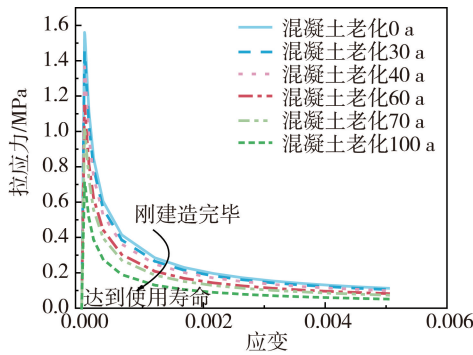


图 5 混凝土拉伸应力-应变参数随老化时间的变化

Fig. 5 Variation of concrete tensile stress-strain parameters with aging time

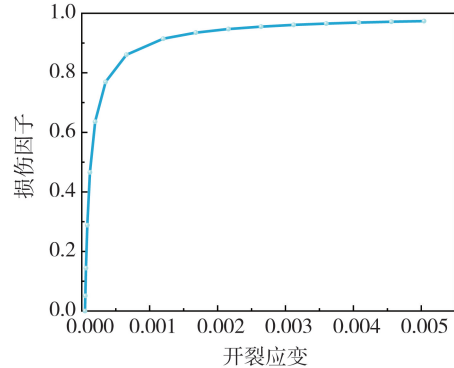


图 6 混凝土损伤因子随开裂应变变化

Fig. 6 Variation of concrete damage factor with cracking strain

为了更好地了解混凝土老化的加高重力坝的地震动力响应情况,并与拆除重建(即材料全新工况)和假定设计之初就按加高高度进行建造(即材料全老工况)2种工况进行比较。其中,材料全新工况为 A 组,加高老化工况为 B 组,材料全老工况为 C 组。到 2013 年丹江口大坝加高完成,距 1973 年大坝建成,原重力坝已经运行 40 a 左右,即坝体混凝土已经老化 40 a,此时,新加高部分混凝土龄期为 0 a;老坝体混凝土龄期 70 a 时,新加高部分混凝土龄期为 30 a;老坝体混凝土龄期 100 a 时,新加高部分混凝土龄期为 60 a。研究对照工况分组如表 2 所示。

表 2 研究对照工况分组

Table 2 Study control condition grouping

距老坝建成时间/a	40	70	100
拆除重建(全新)	工况 A	工况 A	工况 A
新老混凝土结合加高	工况 B	工况 B	工况 B
设计之初就按加高高度建造(全老)	工况 C	工况 C	工况 C

2.2 工程实例验证

现在最常用的地震波输入方式是基于黏弹性边界的方式输入地震波,将地震波转换为节点力的形式施加在地基边界节点上。由于网格大小与波长有一定的数量关系要求,所以满足精度要求也比较困难。而且由于本文关注点在于老化加高重力坝本身的动力响应,所以假定地基为刚性体。

采用经典的 Koyna 大坝验证该输入方法对计算重力坝塑性损伤精度的影响。该大坝在 1967 年 12 月 11 日遭受了里氏 6.5 级的地震。大坝高 103 m,底部宽 71 m。水深取 91.75 m。取某非溢流坝段进行研究,有限元模型和考虑地基辐射阻尼效应的 Koyna 重力坝整体模型如图 7 所示。定义以大坝左下角为中心的全局直角坐标系, y 轴竖直向上, x 轴水平指向下游。

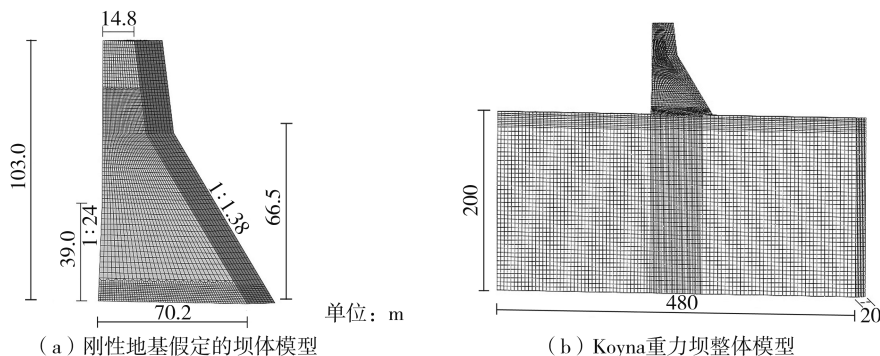


图 7 Koyna 重力坝有限元模型

Fig. 7 Finite element model of Koyna gravity dam

大坝的材料参数如表3所示,假定地基为刚性,第一步输入地震波之前,所受静力荷载包括重力和静水压力,第二步将地震波一致激励输入到重力坝底部,输入的横向和竖向地震波如图8所示,将地震波转换成等效节点力的方式进行输入。对2种方法的损伤情况进行了对比,如图9所示。结果表明假定地基为刚性的情况下,在坝底一致输入地震波结果偏大,但具有良好的精度。

表3 Koyna地震波所需材料参数

Table 3 Material parameters for Koyna ground motion

材料	密度/(kg/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比	初始压缩屈服应力/MPa	最终压缩破坏应力/MPa	拉伸破坏应力/MPa	剪切波速/(m/s)	压缩波速/(m/s)
坝体	2643	31.027	0.15	13.0	24.1	2.9	—	—
基岩	2700	25.500	0.25	—	—	—	1943	3366

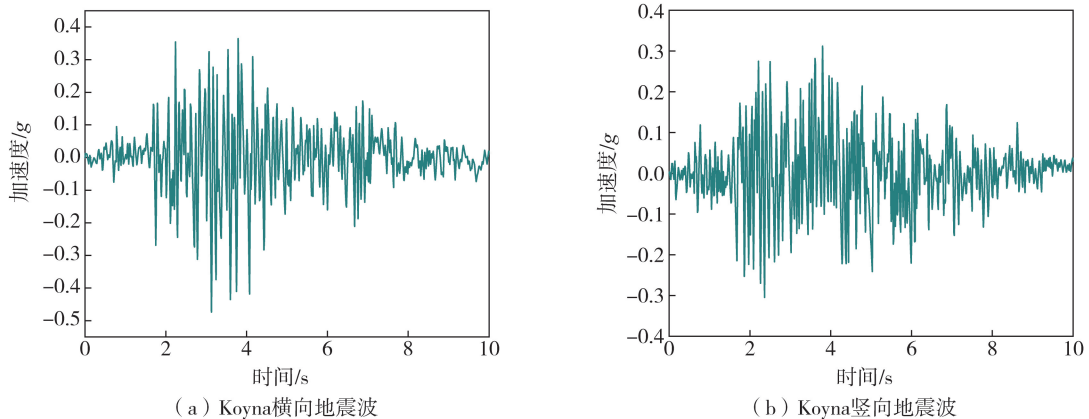


图8 Koyna地震波输入

Fig. 8 Koyna seismic input

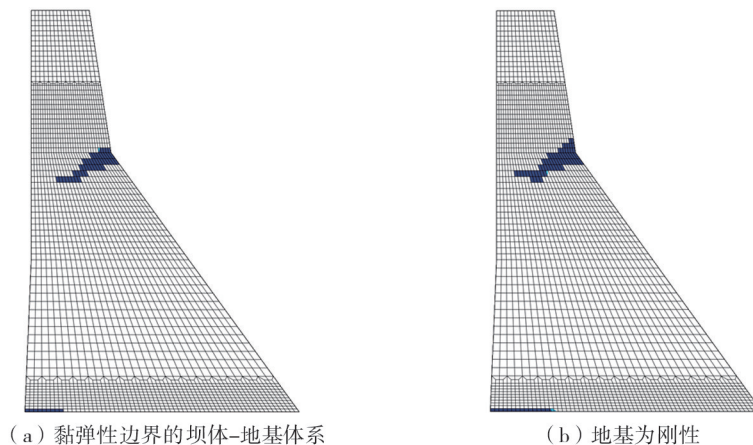


图9 2种输入方式下Koyna重力坝塑性损伤比较

Fig. 9 Comparison of plastic damage of Koyna gravity dam under two input methods

2.3 坝顶位移

坝顶位移是校核计算的重要参考依据,图10为3种工况重力坝在地震激励下的水平坝顶位移。纵向对比不同龄期位移响应变化,以工况A为例,3个龄期下7s左右最大横向坝顶位移分别为10.09、12.04、19.03 mm,且波峰数随龄期增大明显减少,工况B、工况C存在相同趋势,即随老化时间增加,整体坝顶位移响应增大,摆动幅值增大,波峰数减少因此频率减小。横向对比3种工况的位移动态响应,运行70a时,地震激励后7s左右3种工况横向坝顶位移分别为12.04、16.84、18.71 mm,可以看出,工况C的横向坝顶位移最大,其次为工况B,工况A的位移最小,工况A的位移摆动频率最大,其次为工况B,工况C的频率最小。分析其原因是随运行时间增加,重力坝材料性能发生老化,进而引起坝体混凝土的刚度减小和柔性增大,使得坝体在地震动力下的位移响应增大,反应时间增加,固有频率下降。

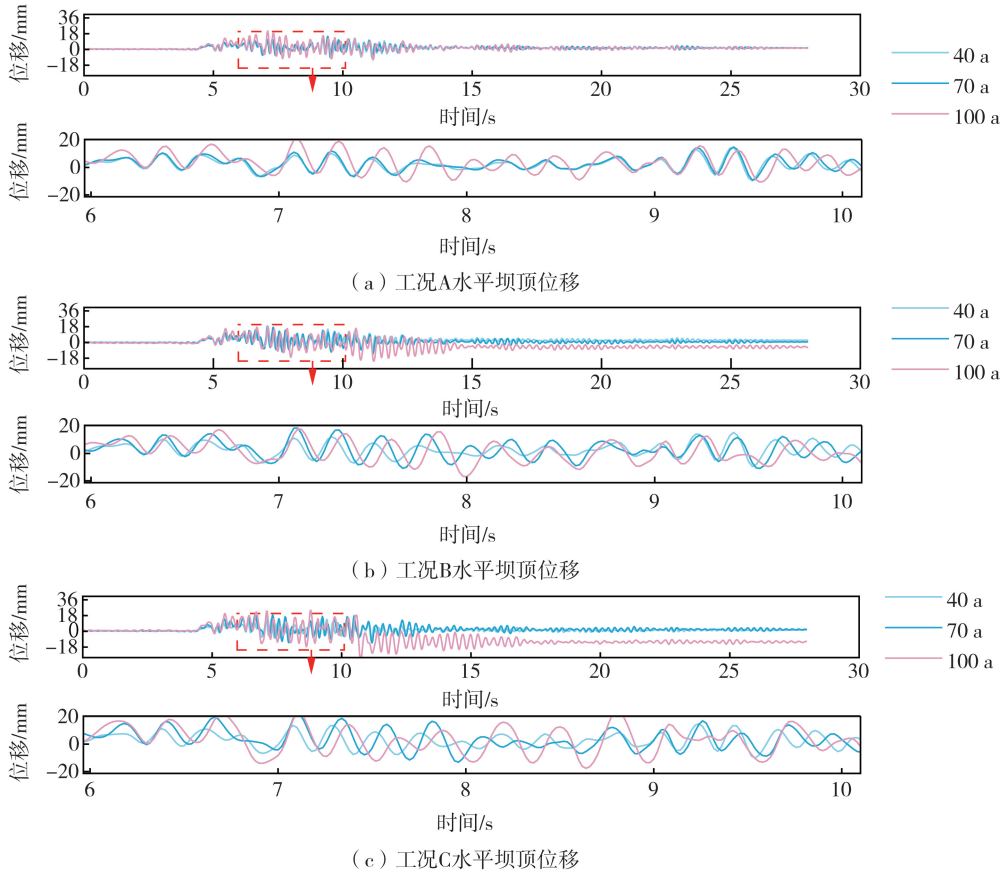


图 10 坝顶横向位移动态响应

Fig. 10 Dynamic response of dam crest lateral displacement

坝顶横向位移动态响应极值,如图 11 所示。随着混凝土老化时间的增加,以工况 B 为例,大坝向上游的位移响应极值分别为 14.67、19.39、20.99 mm,3 种工况均呈明显增大趋势,且增速放缓;工况 B 下大坝向下游的位移响应极值分别为 9.64、13.31、21.50 mm。3 种工况同样呈增大趋势,但增速明显加快。

结合图 5 混凝土老化特性及式(3)弹性模量变化经验公式分析其原因,重力坝混凝土刚度随龄期或结构运行时间增长呈非线性减小,即增长幅度逐渐放缓,上游位移响应主要受此因素影响,因此同工况下位移极值呈下凹型增长,3 种工况对比下可以看出,随坝体老化程度增大,工况 C 的位移极值最大,其次为工况 B,工况 A 的位移极值最小;下游位移响应虽同样受非线性刚度变化影响,但更关键影响因素分析为:随大坝运行时间增加,在大坝动力响应下,下游折坡位置产生的损伤更大,且在加高重力坝新老混凝土交界面处,受粘合效果影响新浇混凝土相对老混凝土有向下滑移趋势,即结合面处地震响应会有所扩大,因此运行时间长或老化程度高的工况会造成更大的位移响应,由此导致同工况下位移极值呈下凹型增长,可以看出,工况 C 的位移极值最大,其次为工况 B,工况 A 的位移极值最小。

2.4 关键点应力

取坝踵、坝趾和折坡点作为关键点进行应力分析,3 种工况的最大主应力响应情况如图 12 所示。以新老工况 B 在坝踵处应力响应情况为例,不同龄期下其最大主应力极值分别为 1.363、1.025、0.732 MPa,3 种工况在不同关键点的应力响应呈相同变化趋势,即随混凝土老化时间增加,关键点最大主应力响应均下降。以 3 种工况 70 a 龄期时不同关键点应力响应值进行对比,3 种工况坝趾处最大主应力动态响应分别为 0.097、0.102、0.087 MPa,可以看出工况 B 的坝趾处最大主应力动态响应最显著,其次为工况 A,工况 C 的该处响应

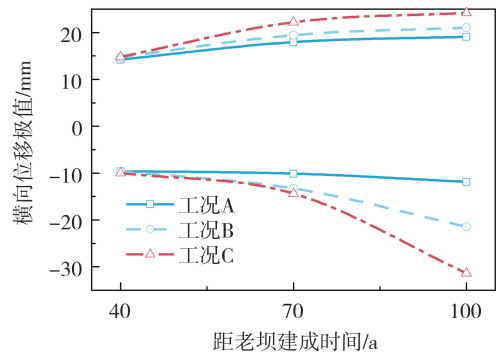


图 11 坝顶横向位移动态响应极值

Fig. 11 Extreme value of dynamic response of lateral displacement of dam crest

最小;3种工况坝踵处最大主应力动态响应分别为1.452、1.025、1.030 MPa,可以看出工况A的坝踵处最大主应力动态响应最显著,工况B和工况C的该处响应差别不大;3种工况折坡处最大主应力动态响应分别为1.378、1.442、1.011 MPa,可以看出工况A和工况B的折坡处最大主应力动态响应较显著,且二者相差不大,工况C的该处响应较小。

综合分析以上动态响应情况,总体呈下降趋势,其原因为混凝土材料性能退化,坝体刚度降低,大坝在地震下的能量耗散更加均匀,反应剧烈程度减小。从不同工况在关键点应力上的大小差异可以看出,以坝趾处最大主应力关系最为明显,加高重力坝中新混凝土的收缩会对老混凝土产生应力,尤其是拉应力,因此与其他工况相比较,由于应力集中的影响,老坝体对新加高部分坝体的动力响应有放大作用。

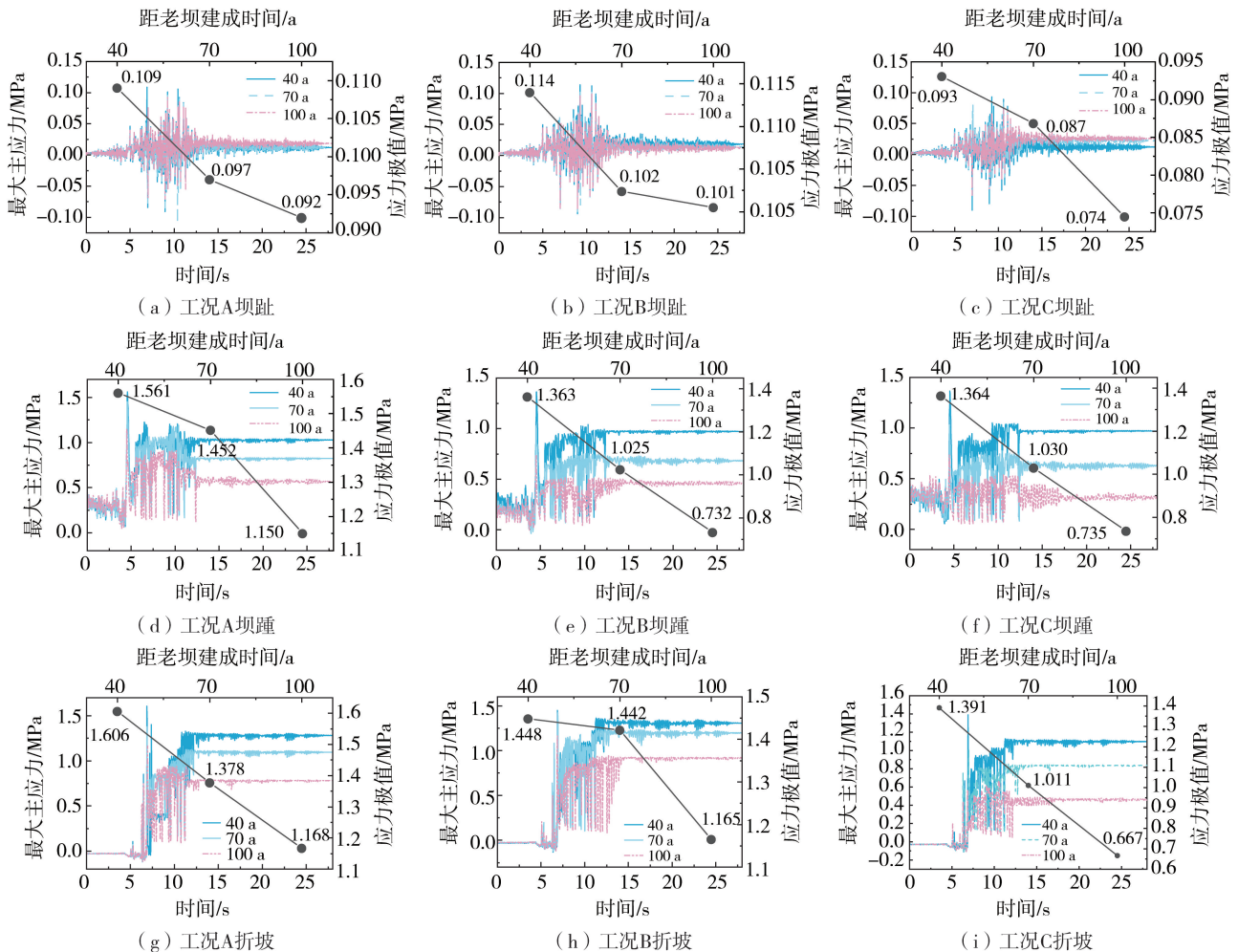


图12 3种工况的最大主应力响应

Fig. 12 The maximum principal stress response of three conditions

取坝体最大主应力峰值时刻和坝体最小主应力峰值时刻,得到坝体随混凝土老化时间增加的最大主应力云图,如图13所示。按坝体龄期横向比较,最大主应力达到峰值瞬间,最大拉应力集中在坝体下游颈部,以工况B为例,不同龄期最大主应力峰值分别为1.58、1.25、0.74 MPa,可以看出随坝龄增长,坝体颈部拉应力峰值逐渐减小,同时下游面的拉应力区域明显增大;在最小主应力达到峰值瞬间,最大拉应力集中在上游面,工况B不同龄期最小主应力峰值分别为1.11、1.07、0.95 MPa,可以看出随龄期增大,坝体上游面拉应力峰值逐渐减小,同时上游面拉应力区域也明显增大。按不同工况竖向比较,可以看出工况C的拉应力区域面积最大,其次为工况B,工况A的面积最小。在最大主应力峰值时刻,坝体向上游摆动,工况B相对于工况A来说,老坝体对折坡位置的动力响应有放大作用;在最小主应力峰值时刻,坝体向下游摆动,工况B相对于工况C来说,新加高坝体对老坝体有维稳作用。

综合以上结果,作为主要研究工况的加高重力坝在坝顶位移、关键点应力响应方面,劣于材料全新工况,同时优于材料全老工况。具体表现为:在变形方面,位移动态响应和摆动频率较全新工况体现出不足,但相

较全老工况则体现出更好的安全性与适用性;在受力方面,加高重力坝的新老结合面会扩大一定的动力响应问题,但同时老坝体也起到维稳作用。从大坝稳定的角度来讲,水平层间缝和新老混凝土结合面均容易成为大坝失稳的弱面^[30],应采取相应的加固措施,处理好新老结合面的粗糙度。因此,为满足工程需要,对重力坝进行加高仍是综合坝体安全性能和建设成本考量的优先方案。

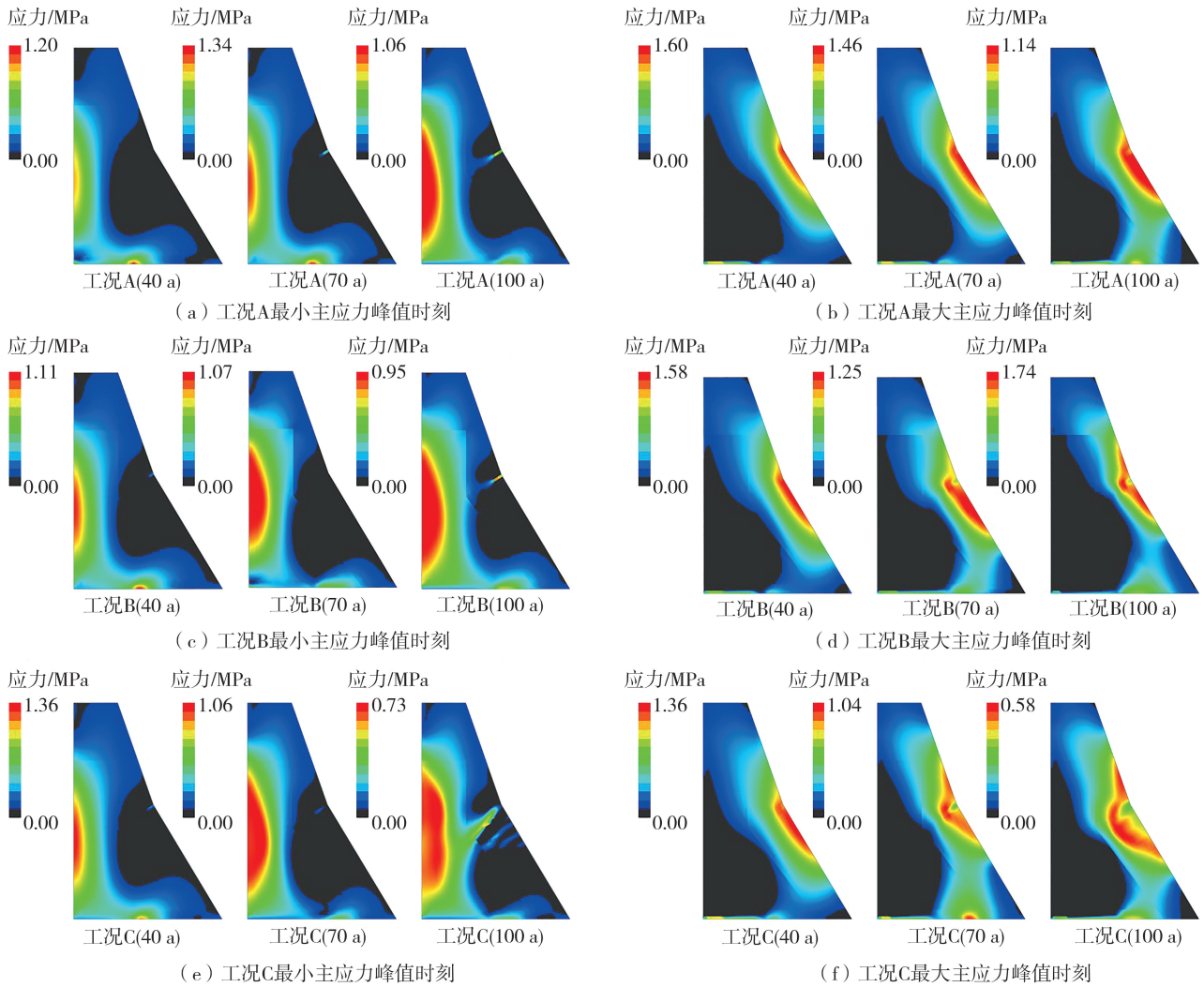


图 13 坝体峰值应力分布

Fig. 13 Peak stress distribution of dam body

2.5 塑性损伤分析

2.5.1 不同峰值加速度下的塑性损伤

对刚加高完成的重力坝进行动力分析,地震波计算工况如表 4 所示,以老混凝土龄期 40 a 为例,不同峰值加速度的地震波作用下,重力坝塑性损伤云图如图 14 所示。由图可知,在峰值加速度为 0.1 g 的地震波作用下,重力坝在坝踵处只有轻微损伤出现,即除坝踵位置外整体都处于弹性状态;在峰值加速度为 0.2 g 时,重力坝坝踵部位损伤长度延伸;在峰值加速度为 0.3 g 时,重力坝折坡位置处出现较大的损伤开裂,裂缝斜向下 45° 延伸,坝踵部位的损伤长度已经出现了较大延伸;继续增加峰值加速度,当取到 0.4 g 时,折坡处的损伤裂缝继续延伸至新老混凝土交界面处,折坡位置下方的混凝土出现了区域性损坏;当峰值加速度从 0.4 g 增加到 0.5 g 时,折坡处的损伤裂缝水平向上游延伸,坝踵处的裂缝接近贯穿。峰值加速度取 0.4 g 时,损伤响应较为明显且无溃坝破坏风险,为更好地研究后续随运行时间变化的损伤演化情况,同时不发生贯穿溃坝现象,取损伤变化更为典型的峰值加速度 0.4 g 进行研究。综合以上响应情况,随峰值加速度的增加,加高重力坝的损伤开裂程度明显增大,坝踵处受

表 4 地震波计算工况

Table 4 Seismic wave calculation conditions

坝 段	地震波强度/g	地震波类型
丹江口加高重力坝	0.1、0.2、0.3、0.4、0.5	Kocali 波

拉损伤破坏愈发严重,并沿坝基面向下游扩展,坝体混凝土损伤集中在下游折坡处,并向新老混凝土结合面和上游面扩展。

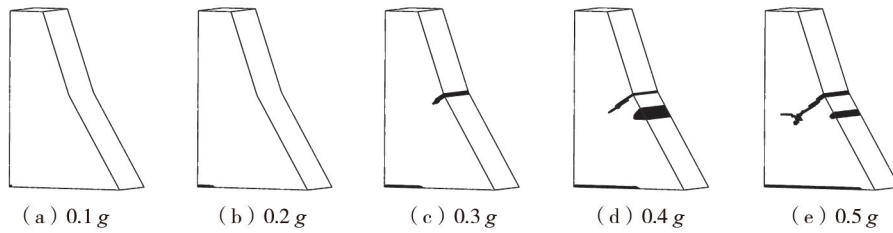


图14 不同峰值加速度下的损伤破坏特征

Fig. 14 Damage characteristics of different peak accelerations

2.5.2 不同运行时间下的塑性损伤

对比分析峰值加速度为 $0.4g$ 的地震波作用下3种工况在不同运行时间下的地震塑性损伤发展过程。3种工况在不同混凝土龄期遭遇地震下的破坏模式不同,如图15所示。工况B下,大坝运行期40a时遭遇地震坝体折坡处损伤开裂斜向下 45° 延伸 10.0 m ;70a时,折坡处损伤开裂斜向下 45° 后向上游延伸,损伤长度共 16.9 m ;100a时,折坡处损伤开裂到新老混凝土结合面后水平向上游延伸,沿结合面向下扩展,折坡下方裂缝也开裂到新老混凝土结合面,主裂缝长 19.8 m 。工况C下,受老化程度影响,坝体损伤更为显著。40a时,折坡处损伤开裂斜向下 45° 延伸 11.8 m ;70a时,折坡位置损伤斜向下 45° 延伸 11.8 m 后水平向上游延伸,在折坡下方位置也出现损伤。100a时,折坡位置损伤斜向下 45° 延伸约 13.2 m 后水平向上游延伸共计 21.9 m ,接近贯通,折坡下方裂缝趋势相近,与折坡位置裂缝平行,在坝踵上方出现了较大区域损伤。

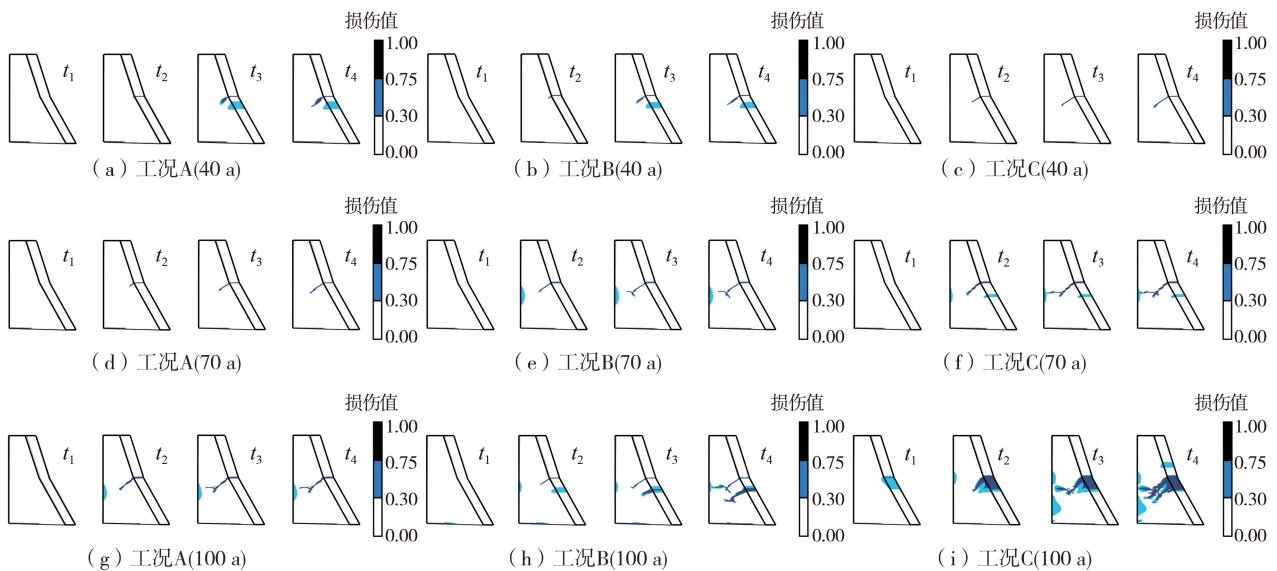


图15 不同工况损伤开裂模式

Fig. 15 Damage extension process under different working conditions

由此总结出加高重力坝在地震作用下的塑性损伤特点,即加高重力坝的主裂缝一定是从加高部分的折坡位置向老坝折坡位置进行扩展延伸的,向上游延伸的同时沿新老混凝土结合面斜向下延伸。而材料全老工况主裂缝斜向下延伸的长度更长,次裂缝与主裂缝平行向上发展。分析其原因是新老混凝土结合面作为加高重力坝失稳的弱面,存在弹性模量不同引起体积变化等问题,会不可避免地产生若干剪应力,更易产生损伤。为了定量分析地震对混凝土重力坝在不同运行期的破坏,在进行非线性动力学分析后,用式(6)和式(7)计算局部和全局损伤指标,如图16所示。以整体损伤指标为例,工况A不同运行期下损伤指标分别为 0.49 、 0.54 、 0.77 ,工况B为 0.56 、 0.75 、 0.78 ,工况C为 0.56 、 0.82 、 0.91 。由整体趋势可以看出,随运行期增加,大坝发生地震时损伤指标均增大,其中,工况A的损伤指标最小,工况C损伤整体情况明显大于工况B。具体分析增长趋势差异可以看出:①工况B、工况C坝体上部和坝踵处损伤指标差距均呈增大趋势,但整体上仍保持相近,均为下凹型增长;②工况C损伤指标呈明显上凹型增长,且工况C与工况B损伤指标差距随

运行期增加先增大后减小,在运行期 40 a 和 100 a 时损伤指标基本相同,运行 70 a 时差距最大。

不同运行期时工况 A 抗滑稳定性系数分别为 4.53、4.45、3.65,工况 B 为 4.32、3.74、3.58,工况 C 为 4.33、3.48、3.25,如图 17 所示,由图可知,随大坝运行期增加,大坝遭遇地震后的抗滑稳定性系数也减小。整体情况而言,工况 A 抗滑稳定性系数最大,工况 B 明显较工况 C 稳定。其中,工况 A 的抗滑稳定性系数减小的速度逐渐加快,工况 B、工况 C 的抗滑稳定性系数减小的速度逐渐减慢。

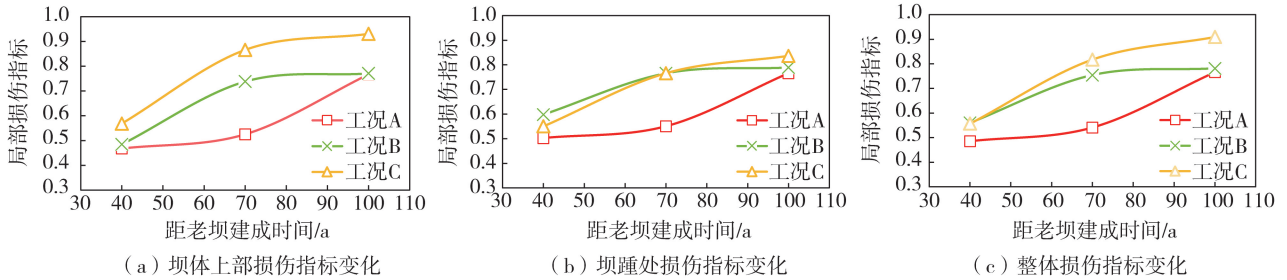


图 16 损伤指标变化

Fig. 16 Variation of damage indicators

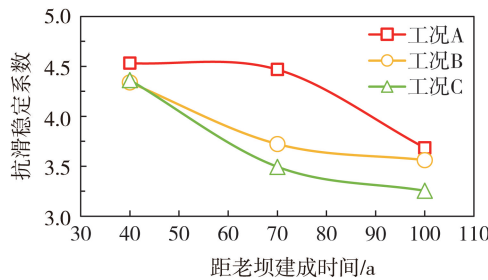


图 17 抗滑稳定性系数变化

Fig. 17 Coefficient variations of anti-skid stability

分析以上结果表明,由于坝体老化程度不同所产生的影响,加高重力坝工况 B 的局部与整体损伤指标整体高于材料全新工况,同时低于材料全老工况,抗滑稳定性较材料全新工况不足,但优于材料全老工况。对于材料全新工况,由于混凝土坝仍处于早期弹性模量低、强度低且徐变率高的适应阶段,因此地震响应后塑性损伤破坏逐渐增大,抗滑稳定性劣化速度加快,但总体仍优于另外 2 种存在老化混凝土工况;对于材料全老工况,大坝在经过初期适应后各项性能已经稳定,结构性态不断调整,大坝变形增幅减小,因此地震响应后损伤指标增长逐渐趋缓,抗滑稳定性系数减小速度放缓;作为主要研究工况的加高重力坝兼具性能稳定与损伤破坏指标低的特点,老坝体对荷载变化进行适应性调整,新坝体对老坝体具有增加稳定和减缓老化的作用,在一定运行期范围可达到材料全新工况的安全性及稳定性,使大坝综合特性得到一定的改善和加强。

3 结论

本文依据混凝土力学性能退化计算公式,基于混凝土塑性损伤本构模型对加高重力坝进行不同运行期的地震动力响应分析,研究考虑混凝土老化的情况下,加高重力坝在地震激励下的非线性动力响应问题,揭示不同运行期加高重力坝的动态响应和累积损伤破坏机理。主要结论如下:

1) 坝顶的最大横向相对位移响应随大坝运行期增长而增大,其中材料全老工况最大横向相对位移响应最显著,其次为加高老化工况,材料全新工况位移响应相对较小。加高重力坝受混凝土老化性能非线性变化影响,上游位移响应增幅渐缓;由于下游折坡及新老结合面处动态响应得到扩大,下游位移响应增幅增大。

2) 坝踵、坝趾和折坡位置随大坝运行期增长最大主应力极值均减小,对比坝踵位置:加高老化工况与材料全老工况最大主应力极值较小且相差不大,材料全新工况下最大主应力极值较大;对比坝趾位置:加高老化工况最大主应力极值最大,其次为材料全老工况,材料全新工况应力极值相对较小。对比折坡位置:加高老化工况与材料全新工况最大主应力极值较大且相差不大,材料全老工况下最大主应力极值较小。加高重力坝受混凝土材料老化影响,关键点应力呈减小趋势,且新老结合面处更易产生拉应力,老坝体对加高部分动力响应起明显放大作用。

3) 在地震作用下, 3 种工况遭遇地震后的塑性损伤与破坏模式各不相同, 加高重力坝与另外 2 种工况不同在于, 坝踵处受拉损伤破坏沿坝基面向下游扩展, 坝体混凝土损伤集中在下游折坡处, 并向新老混凝土结合面和上游面扩展。通过计算局部与整体损伤指标和抗滑稳定性系数分别比较其破坏程度和稳定程度, 材料全老工况破坏程度最高, 稳定性最低, 材料全新工况破坏程度最低而稳定性较高, 加高老化工况的性能居于两者之间。加高重力坝可适应结构变化后的受力和变形, 同时, 兼具损伤破坏指标低、抗滑稳定性系数高的特点, 坝体综合抗震性能得到提高。

参考文献:

- [1] CERVERA M, OLIVER J, FARIA R. Seismic evaluation of concrete dams via continuum damage models[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1995, 24(9): 1225-1245.
- [2] CERVERA M, OLIVER J, MANZOLI O. A rate-dependent isotropic damage model for the seismic analysis of concrete dams[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1996, 25(9): 987-1010.
- [3] CALAYIR Y, KARATON M. A continuum damage concrete model for earthquake analysis of concrete gravity dam-reservoir systems[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2005, 25(11): 857-869.
- [4] 杜成斌, 苏擎柱. 混凝土坝地震动力损伤分析[J]. *工程力学*, 2003, 20(5): 170-173.
DU Chengbin, SU Qingzhu. Dynamic damage of concrete gravity dams under earthquake excitation[J]. *Engineering Mechanics*, 2003, 20(5): 170-173. (in Chinese)
- [5] 李明超, 张佳文, 张梦溪, 等. 地震波斜入射下混凝土重力坝的塑性损伤响应分析[J]. *水利学报*, 2019, 50(11): 1326-1338, 1349.
LI Mingchao, ZHANG Jiawen, ZHANG Mengxi, et al. Plastic damage response analysis of concrete gravity dam due to obliquely incident seismic waves[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(11): 1326-1338, 1349. (in Chinese)
- [6] 涂劲, 李德玉, 郭胜山, 等. 动态循环荷载下大坝混凝土拉压转换损伤本构模型构建及影响研究[J]. *水利学报*, 2021, 52(8): 927-935.
TU Jin, LI Deyu, GUO Shengshan, et al. Damage constitutive model including tension-compression conversion for dam concrete under dynamic cyclic loading[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(8): 927-935. (in Chinese)
- [7] 张我华, 邱战洪, 余功栓. 地震荷载作用下坝及其岩基的脆性动力损伤分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(8): 1311-1317.
ZHANG Wohua, QIU Zhanhong, YU Gongshuan. Analysis of brittle dynamic damage in dam and rock foundation due to earthquake[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(8): 1311-1317. (in Chinese)
- [8] 邱战洪, 张我华, 任廷鸿. 地震荷载作用下大坝系统的非线性动力损伤分析[J]. *水利学报*, 2005, 36(5): 629-636.
QIU Zhanhong, ZHANG Wohua, REN Tinghong. Nonlinear dynamic damage analysis of dam and rock foundation under the action of earthquake[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(5): 629-636. (in Chinese)
- [9] 郭胜山, 陈厚群, 李德玉, 等. 重力坝与坝基体系地震损伤破坏分析[J]. *水利学报*, 2013, 44(11): 1352-1358.
GUO Shengshan, CHEN Houqun, LI Deyu, et al. Seismic Damage and failure analysis of gravity dam and foundation system[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(11): 1352-1358. (in Chinese)
- [10] 翟亚飞, 张燎军, 崔丙会, 等. 脉冲型地震作用下重力坝整体损伤破坏研究[J]. *水力发电学报*, 2021, 40(8): 132-140.
ZHAI Yafei, ZHANG Liaojun, CUI Binghui, et al. Damage characteristics analysis of gravity dam subjected to pulse-type ground motions[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2021, 40(8): 132-140. (in Chinese)
- [11] 闫春丽, 涂劲, 李德玉, 等. 两种非线性模型下重力坝强震破坏机理研究[J]. *水力发电*, 2022, 48(3): 53-59, 93.
YAN Chunli, TU Jin, LI Deyu, et al. Study on failure mechanism of gravity dams under strong earthquakes with two nonlinear models[J]. *Water Power*, 2022, 48(3): 53-59, 93. (in Chinese)
- [12] TEKIE P B, ELLINGWOOD B R. Seismic fragility assessment of concrete gravity dams[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2003, 32(14): 2221-2240.
- [13] VALLIAPPAN S, CHEE C. Ageing degradation of concrete dams based on damage mechanics concepts[C] // International symposium on computational structural engineering. School of Civil & Environmental Engineering, University of New South Wales, Sydney, NSW 2052, Australia; Infrastructure Division, Hyder consulting Pty. Ltd. Locked Bag 6503, North Sydney, NSW 2060, Australia, 2009.
- [14] NAYAK P, MAITY D. Seismic damage analysis of aged concrete gravity dams[J]. *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, 2013, 14(5): 424-439.
- [15] AZIZAN N Z N, MANDAL A, MAJID T A, et al. Numerical prediction of stress and displacement of ageing concrete dam due to alkali-aggregate and thermal chemical reaction[J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2017, 64(6): 793-802.
- [16] GORAI S, MAITY D. Numerical investigation on seismic behaviour of aged concrete gravity dams to near source and far source ground motions[J]. *Natural Hazards*, 2021, 105(1): 943-966.
- [17] BURMAN A, MAITY D, SREEDEEP S, et al. The behavior of aged concrete gravity dam under the effect of isotropic degradation caused by hydro-chemo-mechanical actions[J]. *International Journal of Engineering Studies*, 2009, 1(2): 105-122.
- [18] BURMAN A, MAITY D, SREEDEEP S, et al. Long-term influence of concrete degradation on dam-foundation interaction[J]. *International Journal of Computational Methods*, 2011, 8(3): 397-423.

- [19] 王怀亮,周志宇. 长期运行老化混凝土重力坝地震反应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(1): 183-188.
WANG Huailiang, ZHOU Zhiyu. Seismic analysis of concrete gravity dams with aging effects[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2015, 35(1): 183-188. (in Chinese)
- [20] 牛志国,王玉良. 地震作用下混凝土坝的老化损伤分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30(1): 59-61.
NIU Zhiguo, WANG Yuliang. Ageing damage analysis of concrete dam under seismic loading[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(1): 59-61. (in Chinese)
- [21] LUBLINER J, OLIVER J, OLLER S, et al. A plastic-damage model for concrete[J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25(3): 299-326.
- [22] LEE J, FENVES G L. A plastic-damage concrete model for earthquake analysis of dams[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1998, 27(9): 937-956.
- [23] 沈怀至,张楚汉,寇立夯. 基于功能的混凝土重力坝地震破坏评价模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(12): 2114-2118.
SHEN Huaizhi, ZHANG Chuhan, KOU Lihang. Performance-based seismic damage assessment model for concrete gravity dams[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2007, 47(12): 2114-2118. (in Chinese)
- [24] 范书立,陈明阳,陈健云,等. 基于能量耗散碾压混凝土重力坝地震损伤分析[J]. 振动与冲击, 2011, 30(4): 271-275.
FAN Shuli, CHEN Mingyang, CHEN Jianyun, et al. Seismic damage analysis of a concrete gravity dam based on energy dissipation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(4): 271-275. (in Chinese)
- [25] 章明旭,王进廷. 高混凝土坝抗震安全风险评估框架[J]. 水力发电学报, 2020, 39(11): 13-20.
ZHANG Mingxu, WANG Jinting. Framework for seismic safety risk assessment of high concrete dams[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(11): 13-20. (in Chinese)
- [26] 姚倩茹,宋志强,王飞,等. 基于综合破坏指数的混凝土重力坝易损性分析[J]. 应用力学学报, 2022, 39(1): 104-112.
YAO Qianru, SONG Zhiqiang, WANG Fei, et al. Vulnerability of concrete gravity dams based on a comprehensive destruction index[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2022, 39(1): 104-112. (in Chinese)
- [27] 张社荣,王高辉,庞博慧,等. 强震持时对混凝土重力坝损伤累积破坏的影响[J]. 水力发电学报, 2013, 32(2): 201-207, 227.
ZHANG Sherong, WANG Gaohui, PANG Bohui, et al. Influence of strong motion duration on accumulated damage of concrete gravity dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(2): 201-207, 227. (in Chinese)
- [28] 毛钟毓,党发宁. 地震作用下某重力坝加高前后塑性损伤分析[J]. 西安工业大学学报, 2018, 38(2): 127-133.
MAO Zhongyu, DANG Fanning. Analysis of plastic damage of being heightened concrete gravity dam subjected to the earthquake[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2018, 38(2): 127-133. (in Chinese)
- [29] 金宇松. 混凝土重力坝加高新老混凝土粘结有限元分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
JIN Yusong. Finite element analysis of bond between new and old concrete for concrete gravity dam heightening[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019. (in Chinese)
- [30] 王玉杰,杨海涛,周兴波,等. 新老混凝土结合面对重力坝稳定性影响的研究[J]. 水力发电学报, 2016, 35(3): 121-128.
WANG Yujie, YANG Haitao, ZHOU Xingbo, et al. Study on influence of contact sliding along new-old concrete joint interfaces on gravity dam stability[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(3): 121-128. (in Chinese)