

DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221724

深厚覆盖层高面板堆石坝长周期地震动动力响应

李慧敏^{1,2,3,4}, 翟宁欢¹, 赵梦蝶^{1,2,3,4}, 陈守开^{1,2,3,4}, 汪伦焰^{1,2,3,4}

(1. 华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450045; 2. 河南水谷创新科技研究院有限公司, 河南 郑州 450000; 3. 河南省黄河流域水资源节约集约利用重点实验室, 河南 郑州 450000; 4. 河南省水环境模拟与治理重点实验室, 河南 郑州 450000)

摘要:我国西南地区蕴藏着大量的水能资源,是当前和今后水电建设的重点区域,但大多存在深厚覆盖层、高地震烈度问题,其对高面板堆石坝正常运行的影响不可忽视。在100 m深厚覆盖层上,创建了100、200、300 m级高面板堆石坝的二维有限元模型,在长周期地震动和常规地震动作用下,采用弹塑性本构模型,研究同一深厚覆盖层上不同高度面板堆石坝的动力响应特征。结果表明,与常规地震动相比,长周期地震动对深厚覆盖层高面板堆石坝的加速度有很大影响,随着坝体高度的增加,坝体动力反应峰值加速度逐渐呈下降趋势,且在长周期地震动作用下,坝体越高,短时间内坝体的位移越大,造成的变形也越大,不利于大坝的抗震稳定。因此,在深厚覆盖层长周期地震频发地区修建面板堆石坝时,需将长周期地震动影响作为抗震稳定评价的一个关键环节。

关键词:长周期地震动;深厚覆盖层;高面板堆石坝;地震响应分析

中图分类号:TV312;TU435

文献标志码:A

文章编号:1000-7709(2023)08-0109-04

1 引言

我国西南地区蕴藏着大量的水能资源,但该地区地质条件复杂、地震烈度高,是长周期地震动的高发区。通常6.5~7.0级以上地震会产生丰富的长周期地震动,覆盖层越厚,越容易形成长周期地震动^[1]。且在深厚覆盖层的场地条件下,长周期地震动的峰值加速度会被显著放大^[2]。目前,关于长周期地震动对深厚覆盖层上大坝的影响主要集中在近断层地震动方面,DAVOODI M等^[3]比较了近断层脉冲地震动和远场地震动效应,得出近断层地震动的脉冲周期为大坝自振周期的1.5~4.0倍及其对土石坝非线性动力响应的影响;邹德高等^[4]采用规范谱人工波与近断层地震动对不同高度的面板堆石坝进行动力反应分析。这些研究为高面板堆石坝对长周期地震动的响应提供了研究方法,但有关长周期地震动对在深厚覆盖层上修建面板堆石坝产生的动力响应研究不多,尤其缺乏系统总结不同高度面板堆石坝动力响应的规律。因此,本文基于有限元方法,采用ABAQUS有限元分析软件仿真计算了在近断层地

震动、远场地震动及常规地震动作用下100 m深厚覆盖层上修筑不同高度面板堆石坝对长周期地震动响应的特征,识别出可能的破坏模式,并提出了动力响应的防治措施,旨在为类似工程的抗震安全评价提供参考。

2 地震动选取

根据现有地震动资料,具有明显的脉冲加速度及较长特征周期的地震动可视作为长周期地震动,其包含两种地震类型:①近断层地震动,相对持时较短,加速度峰值较大,脉冲性明显^[5];②远场长周期地震动,相对持时较长,具有丰富的低频分量,类简谐波运动较为明显,断层距较大可作为一个识别的特征^[6]。脉冲性地震动通常由 P_{GV}/P_{GA} 比值确定(P_{GV} 为地震动峰值速度; P_{GA} 为地震动峰值加速度), $P_{GV}/P_{GA} \geq 0.2$ 可作为识别脉冲性地震动的一个标志^[7],小于该值,特征周期较短,为无脉冲性地震动,即常规地震动。本文从PEER地震动数据库(美国天平洋地震动数据库)^[8]中选取我国台湾省集集地震中9条具有代表性的地震

收稿日期:2022-08-20, **修回日期:**2022-12-30

基金项目:国家自然科学基金项目(52009045)

作者简介:李慧敏(1982-),男,博士、副教授、硕导,研究方向为PPP水环境治理,E-mail:lihuimin3646@163.com

通讯作者:赵梦蝶(1988-),女,博士、讲师、硕导,研究方向为高土石坝抗震,E-mail:zhaomengdie@ncwu.edu.cn

动。其中,远场地震动、近断层震动及常规地震动各 3 条,地震动信息见表 1。地震动记录中远场地震动断层距离大于 50 km;近断层脉冲地震动断层距离在 20 km 以内, P_{GA} 均大于 $0.15g$ 。图 1 为地震动加速度放大倍数谱。由图 1 可知,在 0~4 s 内,随着自振周期增大,长周期地震动的谱值明显大于常规地震动,远场地震动的谱值明显大于近断层地震动,即可能引起坝体较高的加速度反应。

表 1 地震动信息

Tab. 1 Earthquake information

地震类型	台站名称	P_{GA} /($m \cdot s^{-2}$)	P_{GV} /($m \cdot s^{-1}$)	P_{GV}/P_{GA}	断层距 /km
近断层地震动	TCU068	5.065	2.496	0.493	1.09
	TCU052	3.504	1.512	0.432	5.73
	TCU075	3.253	1.096	0.337	1.49
远场地震动	ILA004	0.717	0.297	0.414	88.89
	KAU008	0.261	0.066	0.253	108.75
	KAU033	0.295	0.116	0.393	120.97
常规地震动	TCU076	3.379	0.518	0.153	2.74
	TCU078	4.383	0.402	0.090	8.20
	TCU071	5.180	0.523	0.080	4.88

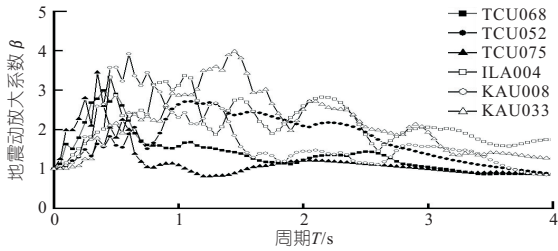


图 1 加速度放大倍数谱

Fig. 1 Acceleration magnification spectrum

3 计算模型与参数

仿真计算设计深厚覆盖层厚 100 m,面板堆石坝坝高分别对应 100、200、300 m 级。大坝上下游坡比分别为 1:1.7、1:1.6,坝顶宽度为 12 m,蓄水至坝高 $H-10$ 处,面板厚度为 $0.3+0.0035H$ (H 为坝高, m)。计算工况见表 2, 100 m 面板堆石坝与覆盖层有限元网格见图 2。

表 2 计算工况

Tab. 2 Calculated working conditions

工况	台站名称	覆盖层厚度/m	坝高/m	工况	台站名称	覆盖层厚度/m	坝高/m
1	TCU068	100	100	6	KAU033	100	300
2	TCU052	100	200	7	TCU076	100	100
3	TCU075	100	300	8	TCU078	100	200
4	ILA004	100	100	9	TCU071	100	300
5	KAU008	100	200				

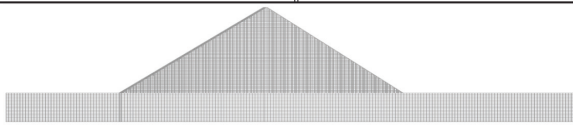


图 2 坝体与覆盖层二维有限元网格

Fig. 2 Two-dimensional finite element mesh of the dam body and overburden

本文有限元分析借鉴文献[9]中方法,即坝体堆石料和坝基覆盖层采用弹塑性本构模型,材料参数 G_0 、 K_0 、 M_g 、 M_f 、 α_f 、 α_g 、 H_0 、 H_{u0} 、 m_s 、 m_v 、 m_l 、 m_u 、 r_d 、 γ_{dm} 、 γ_u 、 β_0 、 β_1 分别为 1 000、1 400、1.8、1.38、0.45、0.4、1 800、3 000、0.5、0.5、0.2、0.2、180、50、4、35、0.022。面板采用线弹性模型,力学参数 $\rho_d = 2.5 \text{ kg/m}^3$, $E = 30 \text{ GPa}$, $\mu = 0.167$ 。有关模型相关参数的定义及确定方法见文献[10]。

弹塑性本构模型表达式为:

$$K = K_0 P_a (P' / P_a)^{m_v} \quad (1)$$

$$G = G_0 P_a (P' / P_a)^{m_s} \quad (2)$$

加载和再加载的塑性模量为:

$$H_1 = H_0 P' H_f (H_v + H_s) H_{dm} H_{den} \quad (3)$$

其中 $H_f = (1 - \eta / \eta_f)^4 \quad (4)$

$$\eta_f = (1 + 1/\alpha_f) M_f \quad (5)$$

$$H_v = 1 - \eta / M_g \quad (6)$$

$$H_s = \beta_0 \beta_1 e^{-\beta_0 \zeta} \quad (7)$$

$$H_{dm} = \exp [(1 - \eta / \eta_{max}) \gamma_{dm}] \quad (8)$$

$$\zeta = P' [1 - ((1 + \alpha_f) / \alpha_f) \eta / M_f]^{1/\alpha_f} \quad (9)$$

式中, K_0 、 m_v 均为弹性体积模量参数; G_0 、 m_s 均为弹性剪切模量参数; H_0 、 β_0 、 β_1 、 γ_{dm} 均为材料参数,由试验确定; η 为应力比。

卸载时塑性模量为:

$$H_u = H_{u0} \left(\frac{\eta_u}{M_g} \right)^{-\gamma_u} \quad \left| \frac{\eta_u}{M_g} \right| < 1 \quad (10)$$

$$H_u = H_{u0} \quad \left| \eta_u / M_g \right| \geq 1 \quad (11)$$

计算时,为了能够反映坝体在长历时地震加速度中坝体自身的动力反应,所有地震动时程输入取 20 s 至结束。

4 计算结果

对 100 m 深厚覆盖层上 100、200、300 m 级面板堆石坝进行长周期地震动和常规地震动作用下的二维有限元动力响应计算,将结果数据绘制成关系曲线,分析在同一深度覆盖层上不同坝高条件下坝体顶部加速度响应和位移时程的变化规律,并与常规地震动作用下的结果进行分析比较。

图 3 为近断层地震动、常规地震动和远场地震动作用下坝体顶部的加速度反应峰值。由图 3 可知,在 100 m 深厚覆盖层下,针对不同类型的地震动,随着坝体高度的增加,其坝顶的峰值加速度反应均呈逐渐削弱趋势,100 m 坝体顶点加速度反应最剧烈;此外,随着地震动加速度峰值的增大,其下降趋势逐渐增加。同时,在深厚覆盖层的影响下,长周期地震动的放大效果相对于常规地

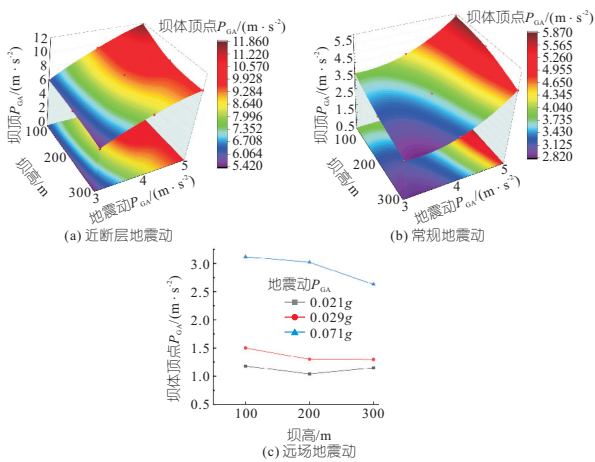


图 3 近断层地震动、常规地震动和远场地震动坝顶加速度峰值

Fig. 3 Peak acceleration of dam crest for near-fault ground motion, conventional earthquakes and far-field vibration

震动更加显著。而远场地震动随着坝高的增加,加速度削弱趋势并不明显,但远场地震动峰值越大,坝顶加速度峰值衰减趋势就越明显。

对比修筑在 100 m 深厚覆盖层上不同高度坝体的加速度数值曲线,认为不论长周期地震动还是常规地震动的作用,坝顶加速度峰值响应均随坝体高度的增加呈明显减弱趋势,这是由于坝体越高,堆石坝在动力作用下的累积剪应变越大,造成坝体自身阻尼比增大,进而削弱了地震动对坝体的影响;此外,长周期地震动中远场地震动虽然输入地震动的峰值加速度不大,但坝顶的加速度峰值响应放大的程度相对更大,且随着远场地震动的持时越长,其放大作用效果越显著。

图 4 为工况 2 地震波作用下的坝体阻尼,图 5 为动剪切模量和等效阻尼比与剪应变关系。由图 4.5 可知,随着剪应变的增加,坝体自身阻尼增大,坝体自身阻尼的积累作用明显,地震动产生的能量削减越大。

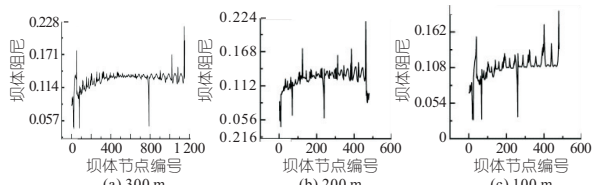


图 4 TCU052 波作用下的坝体阻尼

Fig. 4 Dam damping under the action of TCU052 wave

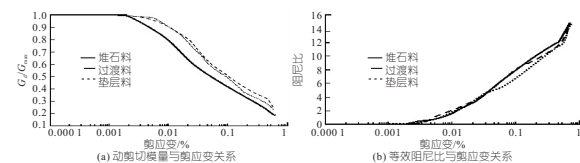


图 5 动剪切模量和等效阻尼与剪应变关系曲线

Fig. 5 Dynamic shear modulus and equivalent damping ratio versus shear strain curve

图 6、7 分别为三种坝高在不同类型的地震动作用下的坝顶水平位移及沉降时程。以近断层 TCU068 的地震动、非脉冲性 TCU071 的地震动及远场 ILA004 的地震动为例,在 0.5g 峰值的地震动施加下,近断层地震动的坝体顶部位移均发生在极短的时间内,这与其地震动特性一致,即随着坝高的增加,其水平位移与沉降峰值也逐渐增大,如坝高 300 m 的水平位移在 0.52 s (13.12 s ~ 13.64 s) 内达到最大值 3.99 m,增幅 0.9 m;在 1 s 左右沉降达到 1.6 m,增幅 1.2 m。但常规地震动的坝体顶部水平位移和沉降是一个逐渐累积的过程,随着坝高的增加,其最大位移和沉降变化幅度不大。而对于远场地震动,坝体顶部动力水平位移和沉降量是一个趋于长持时、长上下波动的趋势,波动峰值非常密集,这与远场地震动特性一致。其他加速度规律类似。该方法适用于探究深厚覆盖层上面板堆石坝的动力响应规律的总结,其将地震动分为顺河向和垂直向进行双向输入,该结论在坝体三维效应中同样适用,但二维模型忽略了地震动的三维效应,需要在三维模型中输入坝轴向地震动再进行更为精确的模拟计算。

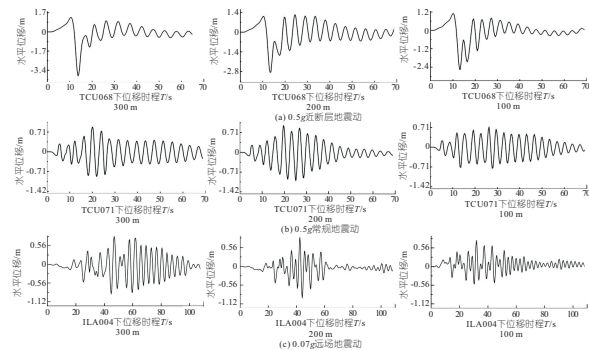


图 6 不同地震动作用下的坝顶水平位移

Fig. 6 Dam horizontal displacement under different vibration

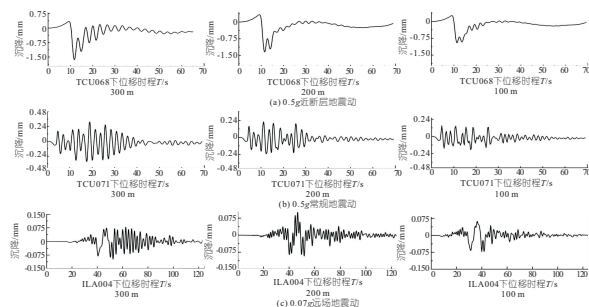


图 7 不同地震动作用下的坝顶沉降

Fig. 7 Dam settlement under different vibration

5 结论

本文归纳总结了 100 m 深厚覆盖层上不同米级高面板堆石坝在长周期地震动下的响应规

律,即坝顶峰值响应加速度随坝高增加呈现逐渐衰减的规律;远场地震动对坝体的加速度有很大的放大效应,对坝体加速度反应有长持时的影响。

参考文献:

[1] 战吉艳,陈国兴,刘建达,等.远场大地震作用下大尺度深软场地的非线性地震效应分析[J].岩土力学,2013,34(11):3229-3238.

[2] 胡聿贤.地震工程学(第2版)[M].北京:地震出版社,2006.

[3] DAVOODI M, JAFARI M K, HADIANI N. Seismic response of embankment dams under near-fault and far-field ground motion excitation[J]. Engineering geology,2013,158:66-76.

[4] 邹德高,韩慧超,孔宪京,等.近断层脉冲型地震动作用下面板堆石坝的动力响应[J].水利学报,2017,48(1):78-85.

[5] 李雪红,王文科,吴迪,等.长周期地震动的特性分析及界定方法研究[J].振动工程学报,2014,27(5):685-692.

[6] 温群昊.远场长周期地震动特性研究[D].上海:华东交通大学,2014.

[7] LIAO W I, LOH C H, WAN S. Earthquake responses of RC moment frames subjected to near-fault ground motions[J]. The structural design of tall buildings,2001,10(2):219-229.

[8] Peer strong motion database, <https://ngawest2.berkeley.edu/site>

[9] XU B, ZHOU Y, ZOU D. Numerical simulation on slabs dislocation of Zipingpu concrete faced rockfill dam during the Wenchuan earthquake based on a generalized plasticity model[J]. The scientific world journal,2014,7(1):1-5.

[10] 周扬.汶川地震紫坪铺面板堆石坝震害分析及面板抗震对策研究[D].大连:大连理工大学,2012.

Long-period Seismic Dynamic Response of High Face Rockfill Dam with Deep Overburden

LI Hui-min^{1,2,3,4}, ZHAI Ning-huan¹, ZHAO Meng-die^{1,2,3,4}, CHEN Shou-kai^{1,2,3,4}, WANG Lun-yan^{1,2,3,4}

(1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 2. Henan Water Valley Innovation Technology Research Institute Co., Zhengzhou 450000, China; 3. Henan Key Laboratory of Water Resources Conservation and Intensive Utilization in the Yellow River Basin, Zhengzhou 450000, China; 4. Key Laboratory of Water Environment Simulation and Management in Henan Province, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: With many hydropower resources, Southwest China is a crucial area for current and future hydropower construction. However, most southwestern regions have deep overburden problems and high seismic intensity. The impact of these problems on the regular operation of high-face rockfill dams cannot be ignored. This paper established two-dimensional finite element models of 100 m, 200 m, and 300 m high-face rockfill dams on 100 m-deep overburden. Under the action of long-period ground motion and conventional ground motion, the elastic-plastic constitutive model was used to study the dynamic response characteristics of face rockfill dams with different heights on the same deep overburden. Compared with conventional ground motions, the results show that long-period ground motions significantly influence the acceleration of deep overburdened high-face rockfill dams. As the height of the dam body increases, the peak acceleration of the dynamic response of the dam body gradually decreases. Moreover, under the action of long-period ground motion, the higher the dam body is, the greater the displacement increment of the dam body in a short time. In this way, the resulting deformation is also more significant, which is not conducive to the seismic stability of the dam. Therefore, when building panel rockfill dams in areas with deep overburden and frequent long-period earthquakes, the effect of long-period ground shaking should be considered as a part of seismic stability evaluation.

Key words: long period-ground motion; deep overburden; high concrete face rockfill dam; seismic response analysis

(上接第 104 页)

Response Relationship Between Sediment Discharge Ratio with Water Flow and Sediment Factors in Three Gorges Reservoir

ZHANG Qian-qian^{1a,1b}, TONG Si-chen^{1a,1b}, LONG Xiao-ping², JIANG Pin-feng^{1a,1b}

(1a. School of River and Ocean Engineering; 1b. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Yangtze Ecology and Environment Co., Ltd., Wuhan 430062, China)

Abstract: In order to study the response relationship between sediment discharge ratio (SDR) and influencing factors under actual water and sediment conditions, based on the measured water and sediment data of the Three Gorges Reservoir (TGR) from 2003 to 2018, this paper discussed the response relationship between SDR and various influencing factors on the basis of analyzing the characteristics of water and sediment from the reservoir, and established the formula of SDR in the main flood season. The results show that the correlation between SDR and single factor is not obvious, indicating that the SDR is affected by multiple factors. From the perspective of reservoir operation and regulation, the SDR is negatively related to the flood detention time, and the sediment discharge efficiency should be improved by shortening the flood detention time; From the perspective of incoming water and sediment, the greater the amount of sediment entering the reservoir, the greater the sediment discharge ratio of fine sediment is; Coarse sediment, on the contrary, is characterized by more coming and less discharging. In the main flood season, the relationship between the SDR and the proposed expression is good. This study can provide reference for the operation of TGR.

Key words: Three Gorges Reservoir; sediment deposition; sediment discharge ratio; influencing factors