

含软弱土层的深厚河床覆盖层坝基动力特性研究

余 挺, 邵 磊

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072)

摘 要: 在强震区、含软弱土层的 500 m 级特厚覆盖层上建坝, 超出了现行设计规范的控制范围。开展了覆盖层厚度、输入地震波峰值、覆盖层中的软弱土层厚度等指标的敏感性分析, 揭示了深厚覆盖层地震反应的主要特征及坝基面加速度放大倍数分布的规律性。研究认为: 覆盖层厚度、输入加速度峰值、软弱土层厚度等指标与建基面放大倍数的衰减在变化规律上成正相关; 当输入地震波峰值加速度为 $0.5g$ 作用下, 含软弱土层的 500 m 级特厚覆盖层坝基中地震波总体以衰减为主, 建基面放大倍数小于 1; 覆盖层加速度放大倍数随高程变化的基本规律为先衰减后放大。当存在软弱土层时, 由于其滤波隔震作用会在土层内发生动力反应的二次衰减。基于上述分析, 进一步提出了覆盖层下部区域地震效应衰减、中部区域软弱土层二次衰减、顶部区域放大的加速度放大倍数分布模型, 编制了覆盖层加速度放大倍数建议值表, 研究成果可为含软弱土层的深厚河床覆盖层坝基工程设计提供重要参考。

关 键 词: 深厚覆盖层; 软弱土层; 动力特性

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2020) 01-0267-11

Study of dynamic characteristics of dam foundation on deep riverbed overburden with soft soil layer

YU Ting, SHAO Lei

(PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu, Sichuan 610072, China)

Abstract: The construction of dam on the 500 m-level thick overburden with soft soil layer in a strong earthquake zone is beyond the control scope of the current design specification. Through the sensitivity analysis on indicators such as overburden thickness, peak of input seismic wave and thickness of soft soil layer, the main characteristic of the seismic response of deep overburden and the distribution regularity of foundation surface acceleration amplification factor of the dam foundation are studied. According to the research, the overburden thickness, input acceleration peak and soft soil thickness are positively correlated with the attenuation of the amplification factor of the foundation surface. When the peak acceleration of the input seismic wave is $0.5g$, the earthquake responses in the 500-level ultra-thick overburden layer with weak soil layer are mainly attenuated, and the magnification factor of the foundation surface is less than 1. The basic law of the acceleration magnification of the overburden layer is first attenuation and then amplification with the elevation change. When there is a weak soil layer, the secondary attenuation of dynamic response will occur in the soil layer due to its filtering and seismic isolation effects. Based on the above analysis, an acceleration amplification factor distribution model of the attenuation of the overburden layer's lower part, the secondary decay of weak soil in the central area, and amplification of the top area are further proposed. A table of recommended values of overburden acceleration magnification factor is compiled. The research results can be used as a reference for future engineering design of dam foundation on deep bed overburden with soft soil layer.

Keywords: deep riverbed overburden; soft soil layer; dynamic characteristics

1 引 言

覆盖层是指经过各种地质作用而覆盖在基岩之上的松散堆积、沉积物的总称, 而河床深厚覆盖层,

一般指堆积于河谷底部, 厚度大于 40 m 的松散沉积物。在我国水电站建设过程中, 大量的河床钻孔资料揭示, 几乎所有河流现代河床中普遍堆积厚达数十米甚至上百米的覆盖层^[1-3]。表 1 总结了我国若

收稿日期: 2019-03-01

修回日期: 2019-09-13

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (973 计划) (No.2013CB036400)。

This work was supported by the National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2013CB036400).

第一作者简介: 余挺, 男, 1964 年生, 博士, 正高级工程师, 主要从事水利水电工程领域的研究、设计及管理工作。E-mail: yting@chidi.com.cn

通讯作者: 邵磊, 男, 1983 年生, 博士, 副高级工程师, 主要从事土石坝静动力计算的研究工作。E-mail: sl-fly@163.com

干条河流河床覆盖层厚度特征。

表 1 中国部分河流河床覆盖层厚度特征表
Table 1 Bed cover thickness characteristics of
some rivers in China

河流	最大厚度 /m	对应位置	覆盖层厚度总体特征
长江	90	江阴	长江三峡河段, 分布着深约 35~40 m 的近 90 个深槽。在长江下游河段, 镇江河段和江阴河段南支古深槽深度为 80~90 m, 南通河段为 70~80 m
黄河	110	王家滩	在黄河下游河段, 其沉积物厚度达到 20~60 m, 甚至达到 80 m, 如小浪底水电站坝址区覆盖层厚度一般为 40~50 m, 最厚达 70~80 m
金沙江	250	虎跳峡	梨园至观音岩坝址段, 覆盖层厚度小于 30 m, 其他坝址均揭示深厚覆盖层, 厚度以 40~80 m 为主, 上游(龙蟠盆地)局部厚达 100~250 m
雅砻江	60	楞古	上游两河口、牙根坝址部位, 覆盖层厚度小于 20 m, 其他坝址部位覆盖层厚度以 35~60 m 为主
大渡河	>420	冶勒	深厚覆盖层普遍分布, 厚度以 50~130 m 为主, 支流南桄河冶勒水电站坝址揭示厚度大于 420 m
岷江	96	十里铺	深厚覆盖层普遍分布, 厚度以 30~80 m 为主
乌江	25	索风营	覆盖层厚度以数米至十余米为多
澜沧江	50	托巴	覆盖层厚度多为 20~30 m
怒江	44	赛格	覆盖层厚度多为 20~40 m
南盘江	26	天生桥	覆盖层厚度多为 15~25 m
雅鲁藏布江	≈600	米林	在泽当雅鲁藏布江曲水大桥附近, 河床覆盖层厚度大于 50 m, 至拉萨一带, 河床覆盖层厚达 123 m, 而邻近古河床电测砂砾石层最大厚度甚至达 600 m。

在实际工程中, 为了节省投资和工期的需要, 或是水保、环保的要求, 甚至有时因为覆盖层太深, 想完全挖除建坝几乎是不可能的, 因此常常需要利用覆盖层建坝^[4-6]。表 2 统计了在我国部分覆盖层上的筑坝实例, 其中水电资源最为丰富的西南地区部分河流如大渡河、金沙江、岷江、雅砻江等河流中, 河床覆盖层分布范围非常广泛, 几乎从上游到下游都有发育^[7]。

河床深厚覆盖层不仅分布于我国, 在全球范围的河流中都有分布^[8-10], 表 3 统计了国外部分土石坝工程坝址区的河床覆盖层情况。

随着我国水电工程新一轮开发重心逐渐向西部地区大江大河干流的上游以及西藏地区转移, 工程坝址区普遍具有高海拔、高地震烈度、河床覆盖层深厚等显著特点^[11], 给筑坝设计与施工带来一些超出现行设计规范的新问题, 其中强震区深厚覆盖层坝基的抗震安全评价已成为当前水工结构工程领域

表 2 国内部分覆盖层上筑坝实例表
Table 2 Examples of dam construction on
overburden in China

工程名称	坝型	坝高 /m	覆盖层 /m
碧口	心墙土石坝	102.0	40.0
小浪底	斜心墙堆石坝	160.0	80.0
察汗乌苏	面板堆石坝	110.0	40.0
泸定	黏土心墙堆石坝	79.5	148.6
硃砂	砾石土心墙堆石坝	125.5	72.0
瀑布沟	砾石土心墙堆石坝	186.0	75.0
龙头石	沥青混凝土心墙堆石坝	72.5	70.0
深溪沟	闸坝	49.5	55.0
太平驿	闸坝	29.1	80.0
冶勒	沥青混凝土心墙堆石坝	125.0	>420.0
毛尔盖	土心墙堆石坝	147.0	51.0
多诺	混凝土面板堆石坝	112.5	41.7
猴子岩	混凝土面板堆石坝	223.5	85.5
长河坝	砾石土心墙堆石坝	240.0	79.3
黄金坪	沥青心墙堆石坝	95.5	130.0
狮子坪	砾石土心墙堆石坝	136.0	110.0
双江口	砾石土心墙堆石坝	314.0	67.8
金川	混凝土面板堆石坝	111.5	80.0
安宁	沥青混凝土心墙堆石坝	60.0	94.0
巴底	沥青混凝土心墙堆石坝	100.0	130.0
硬梁包	闸坝、面板堆石坝	38.0	116.0
米林	土质心墙堆石坝	150.0	>500.0

表 3 国外覆盖层上筑坝实例表
Table 3 Examples of dam construction on overburden
in foreign countries

工程名称	所属国家	坝型	坝高 /m	覆盖层 /m
塔贝拉	巴基斯坦	土斜墙堆石坝	147.0	230
阿斯旺	埃及	土斜墙堆石坝	122.0	250
马尼克 3 号坝	加拿大	黏土心墙土石坝	107.0	126
马特马克	瑞士	土斜墙堆石坝	115.0	100
谢尔蓬松	法国	心墙堆石坝	12.0	120
下峡口	加拿大	心墙堆石坝	123.5	82
塔里干	伊朗	黏土心墙土石坝	110.0	65
大角	加拿大	心墙堆石坝	91.0	65
佐科罗	意大利	沥青斜墙土石坝	117.0	100
圣塔扬娜	智利	面板砂砾石坝	113.0	30
普卡罗	智利	面板砂砾石坝	83.0	113
洛斯卡拉克莱	阿根廷	面板堆石坝	130.0	25
赛斯奎勒	哥伦比亚	心墙堆石坝	52.0	100
摩尔罗斯	墨西哥	心墙堆石坝	60.0	80
弗莱斯特列兹	奥地利	沥青面板堆石坝	22.0	>100
埃贝尔拉斯特	奥地利	沥青心墙堆石坝	26.0	>124
第一瀑布	加拿大	斜心墙土石坝	38.0	60
阿勒格尼	美国	堆石坝	51.0	55
聂赫拉奈思	捷克	斜墙砂砾坝	48.0	>50
威尔南哥	意大利	堆石坝	67.0	50

的研究热点。具体涉及到以下一系列的问题:坝址地震动参数及设计反应谱确定,坝基覆盖层动力参数指标的试验手段及成果合理性,动力计算模型,地震波输入方式对宽广深厚覆盖层抗震计算的影响,不同计算方法及边界假定在抗震计算中的合理选取,坝基覆盖层及坝体动力响应规律,坝基覆盖层砂层地震液化的评价,坝坡及覆盖层抗滑稳定分析等。其中,覆盖层坝基在地震作用下的动力响应规律是研究覆盖层上土石坝抗震稳定性的基础性问题之一,截止目前已建和在建的工程,或者由于河床覆盖层厚度并不太大,或者坝址地震烈度也不很高等原因,设计中大多按照现行规范进行大坝抗震稳定性计算分析,已能满足工程设计安全性、可靠性和经济性的要求。然而,对于建在超深厚乃至特厚覆盖层上尤其地震设防烈度又很高的高土石坝而言,出于在保证工程安全可靠的前提下使得工程合理可行的考虑,研究覆盖层坝基在地震作用下的动力响应规律是十分必要的。

在这些方面,国内已有学者开展了一些研究工作。如张雪东等^[12]进行了离心机振动台试验,研究了输入加速度峰值、土层特性对于地震动在深厚覆盖层中传播规律的影响。认为地震动经覆盖层传播后,低频成分被放大,高频被抑制;当输入地震波不变时,放大倍数随土体剪切刚度的增加而逐渐变大。王翔南等^[13]研究了一种适用于深厚覆盖层上高土石坝的静动力计算的黏弹性模型——等效线性化方法,分析中将残余体变分为残余孔压和残余变形,计算了高土石坝坝体残余变形、地震反应、残余孔压等特征量。周燕国等^[14]根据美国加州 Caltrans/CDMG 的两个井下台阵加速度记录,从时域和频域的角度分别分析了百米级易液化深厚覆盖层在不同地震波作用下的动力反应,提出了考虑层间波阻抗比放大和传播路径衰减的深厚覆盖层加速度放大效应简化函数。杨正权等^[15]建立了一个能够考虑覆盖层结构性沿竖直和水平方向都变化的场地地震反应分析模型,研究了覆盖层结构特性对地震反应的影响。之后又对比研究了黏弹性边界和传统固定边界及地基截断范围对大坝-地基系统动力反应的影响^[16],认为超深厚覆盖层上土石坝结构-地基系统,动力分析中将底部边界取到基岩表面、侧向边界取到坝踵和坝脚向上下游延伸 3~5 倍大坝加地基高度范围,并采用固定边界的边界处理方式,可以达到工程设计对计算精度的要求。邵磊等^[17]基于 ABAQUS 二次开发,提出了一种基于无限元-有限元耦合的动力计算方法,研究了超深厚覆盖层坝基

及上覆坝体中地震加速度传播过程与动变形发展过程,揭示了软弱土层的滤波隔振作用。

本文在以上工作的基础上,以规划中某水电站工程为研究对象,重点针对其含软弱土层的 500 m 级特厚覆盖层坝基,通过覆盖层厚度、输入地震波峰值、软弱土层厚度等因素的敏感性分析,探讨地震波在深覆盖层中的传播规律,研究建基面加速度放大倍数分布的规律性。

2 计算条件及参数

2.1 工程概况

2.1.1 基本布置

挡水建筑物采用土质心墙堆石坝,建基面最低高程为 2 930 m,正常蓄水位为 3 070 m,死水位为 3 015 m,坝顶高程为 3 080 m,最大坝高为 150 m。大坝上游 3 040 m 高程以下坝坡坡度为 1:2.5,3 040 m 高程以上坝坡坡度为 1:2.25,大坝下游坝坡坡度为 1:2.0。在心墙两侧和防渗墙下游心墙底部坝基面设置水平反滤层,心墙上游反滤层厚为 8 m,下游反滤层厚为 10 m,心墙底部基面水平反滤层厚为 2 m。在反滤层与堆石区之间设置过渡料层,过渡料区上、下游坡度均为 1:0.5。

2.1.2 覆盖层特征

坝址区河床覆盖层深厚,层次结构复杂。据钻孔揭示,河床覆盖层最大厚度达 500 m,按其物质组成、层次结构、成因、形成时代和分布情况等,自上而下(由新至老)可划为 4 大层。第①层:为第四系冰碛、冰水积(glQ^3 、 $fglQ^3$),平均厚约 130 m,由块碎石土及含砂的块砾石土组成。第②层:为第四系冲洪积堆积($al+plQ^3$),上覆于第①层,平均厚约 160 m,含(块)碎(卵)砾石砂层,粒径大小悬殊,分选性差,级配不良,粗颗粒未形成骨架。第③层:为第四系冲积、湖积堆积(alQ^3 、 lQ^3),含砾石中粗砂、中细砂、粉细砂和粉土层等组成的软弱土层,上覆于第②层,厚度一般为 227~245 m。第④层:为全新统冲积堆积(alQ^4),平均厚约 16 m。以砂卵砾石层为主,局部分布有灰黄色粉土、细砂层。地质剖面见图 1 所示。

2.1.3 抗震等级

中国地震局地球物理研究所根据相关标准^[18]与坝址区工程地质条件,得到坝址区 50 年超越概率 10%地震动峰值加速度为 0.20g~0.30g,对应地震基本烈度为Ⅷ度。设计加速度代表值的概率水准,

对壅水建筑物应取基准期 100 年内超越概率 2%。根据工程场地所处的区域工作背景与地震地质环境,结合工程经验判断,此设计概率下的场地基岩地震动参数水平一般在 0.5g 以上。

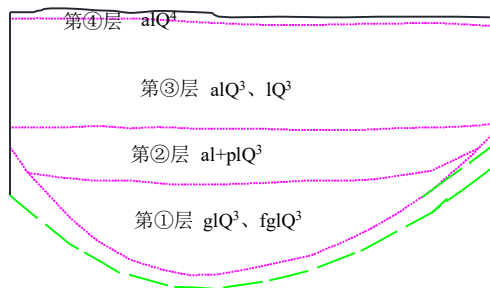


图 1 地质剖面图

Fig.1 Geological cross-section

2.2 输入地震波

在场址区附近对工程场地地震危险性贡献最大的主要潜源区见表 4 所示。

表 4 主要潜源对坝址峰值加速度贡献率近似值表 (50 年超越概率 10%)

Table 4 Approximate values of contribution rate of main potential sources to peak acceleration at dam site (over 10% exceeding probability in 50 years)

潜源区	1 [#]	2 [#]
概率贡献百分比/%	99.99	0.01

通过地震危险性概率分析,坝址 50 年超越概率 10%的基岩水平峰值加速度为 258.8g, 100 年超越概率 2%的基岩水平峰值加速度为 528.9g, 100 年超越概率 1%的基岩水平峰值加速度为 624.0g。

输入地震波采用场地谱人工地震波,为 100 年 2%的概率水平,水平向加速度峰值为 0.55g,如图 2 所示,竖向加速度峰值为水平向的 2/3。

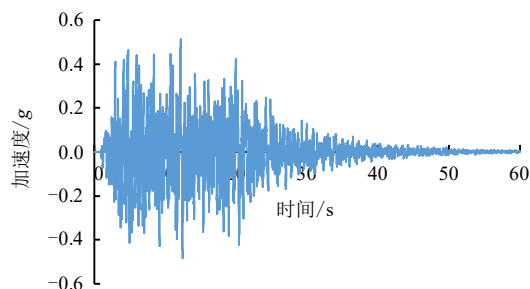


图 2 场地谱顺河向水平加速度时程

Fig.2 Site spectrum horizontal acceleration time history along the river

2.3 计算方法与参数

计算采用等效线性法进行,考虑了地震输入对

阻尼计算频率的影响^[19],瑞利阻尼模型采用 Hardin 等建议的考虑两个频率的阻尼矩阵的算法^[20-22]:

$$[C] = \frac{2\xi w_i w_j}{w_i + w_j} [M] + \frac{2\xi}{w_i + w_j} [K] \quad (1)$$

式中: $[C]$ 为阻尼矩阵; $[M]$ 为质量矩阵; $[K]$ 为刚度矩阵; ξ 为振型阻尼比; w_i 、 w_j 为自振频率。计算中, w_i 取基频 w_1 ; w_j 综合考虑地震波的频谱特性,选取地震波卓越频率相近的土石坝的某一高阶自振频率,构成动力响应的主要参与振型。 w_j 的取值综合考虑了地震波的频谱特性与坝体和覆盖层自振特性,体现了高阶自振周期与地震卓越周期可能迁合的影响。计算根据大坝及覆盖层坝基典型剖面如图 3 所示,建立的二维有限元模型如图 4 所示,其中大坝坝高为 150 m,覆盖层总厚度为 500 m,模型边界采用刚性约束。覆盖层自下而上水平分层,厚度分别为:第①层为 140 m、第②层为 160 m、第③层为 180 m、第④层为 20 m。主要材料的动剪模量参数 k 、 n 见表 5,动模量衰减与阻尼曲线见图 5,图中 G 为动剪模量, D 为阻尼比, γ_d 为动剪应变幅值。

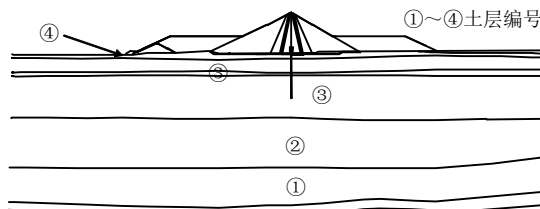


图 3 大坝及覆盖层坝基典型剖面示意图

Fig.3 Typical sections of dam foundation and overburden

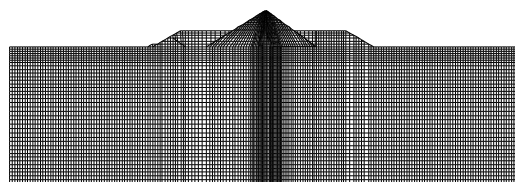


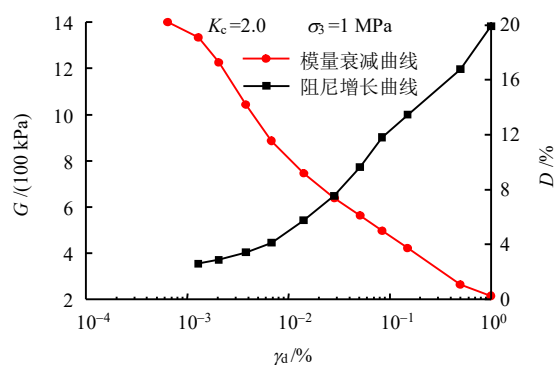
图 4 二维有限元网格

Fig.4 Two-dimensional finite element grid

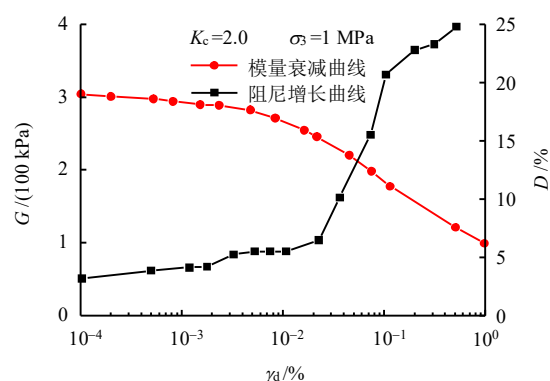
表 5 动力计算参数表

Table 5 Dynamic calculation parameters

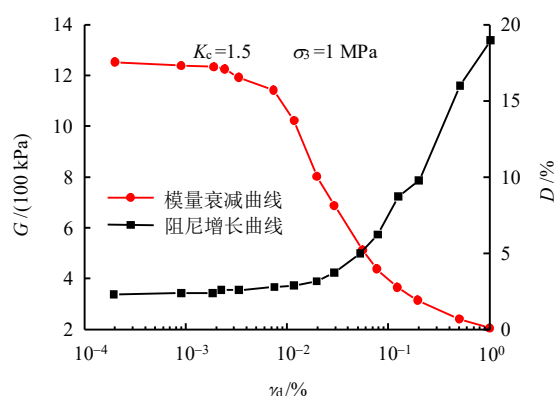
材料名称	k	n	材料名称	k	n
覆盖层④	4 734	0.38	过渡	4 200	0.42
覆盖层③	701	0.56	反滤	2 830	0.54
覆盖层②	4 898	0.38	心墙	1 609	0.53
覆盖层①	4 898	0.38	压重	1 500	0.48
堆石	4 665	0.42	—	—	—



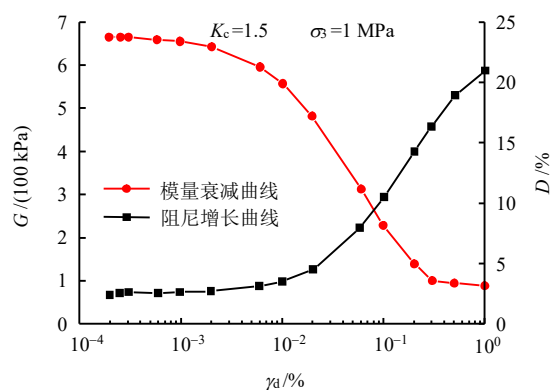
(a) 覆盖层④



(b) 覆盖层③



(c) 堆石料



(d) 心墙料

图5 主要材料的模量衰减和阻尼增长曲线
Fig.5 Modulus attenuation and damping growth curves of major materials

3 深厚覆盖层建基面放大倍数敏感性分析

3.1 覆盖层厚度的影响

图6统计了105个国内外已建的覆盖层上的水电工程,按照覆盖层深度统计:0~50 m约30个,50~100 m约60个,100~150 m约10个,150 m以上5个。其中50~100 m厚的覆盖层约占了统计总数量的一半,超过500 m级的超深厚覆盖层尚无工程先例。

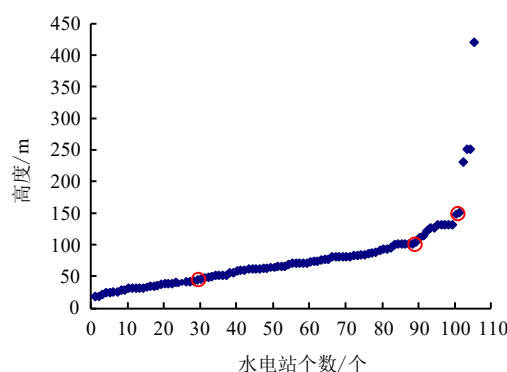


图6 坝址区覆盖层深度统计
Fig.6 Overburden depth statistics of dam site area

随着覆盖层厚度的增加,对建基面地震加速度放大倍数的规律性与敏感性进行了研究,因此在计算中暂不考虑软弱土层的影响,③层的参数用④层代替(表5)。根据西南地区多个工程坝址区的地震安全性评价报告,百年超越概率2%的地震加速度峰值较多集中于0.1g~0.2g之间,故研究了峰值加速度为0.2g作用下的坝轴线建基面放大倍数与覆盖层厚度变化的关系,取覆盖层厚度为50、100、150、200、250、300、400、500 m,计算结果如图7所示。可见,覆盖层厚度由50 m增加到500 m,坝轴线建基面放大倍数由1.51减小为0.91,减少幅度约

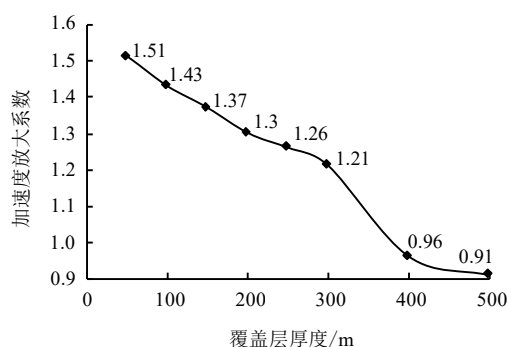


图7 建基面放大倍数与覆盖层厚度变化的关系曲线
Fig.7 Relation curve between magnification of foundation surface and thickness of overburden

为40%。覆盖层厚度小于300 m, 建基面加速度放大倍数大于1, 覆盖层中地震动总体以放大为主; 覆盖层厚度大于400 m, 建基面加速度放大倍数小于1, 覆盖层中地震动总体以衰减为主。可见覆盖层厚度是影响地震作用效应的主要因素之一。

3.2 输入地震波峰值加速度的影响

研究不同地震加速度峰值对500 m级覆盖层坝基建基面放大倍数的影响, 在计算中同样不考虑软弱土层的影响, ③层的参数用④层代替。设基岩高程为0 m, 基岩输入峰值加速度分别取为0.1g、0.2g、0.3g、0.4g、0.5g, 对应竖向加速度取水平加速度的2/3。数值模型见图4, 参数见表5, 得到覆盖层内水平、竖向加速度随高程的变化见图8。

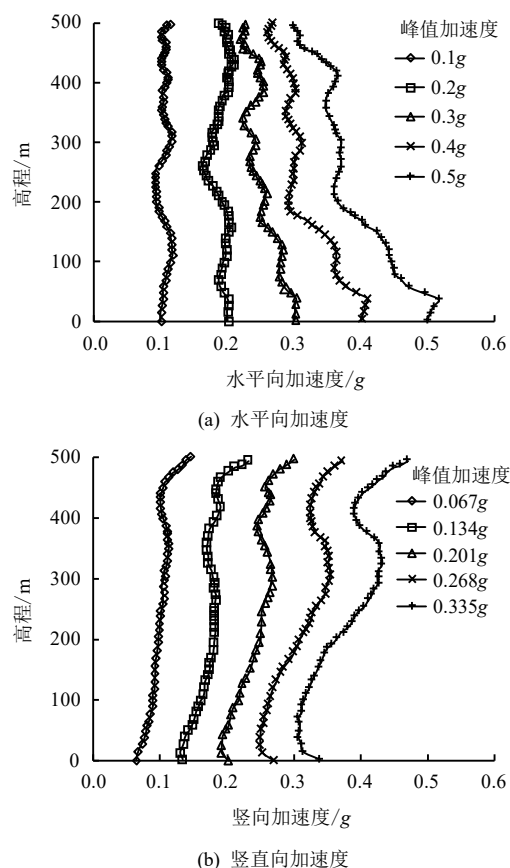


图8 不同输入加速度峰值条件下的覆盖层加速度值
Fig.8 Acceleration values of overburden under different input acceleration peaks

由图可知, 水平峰值加速度分别取0.1g、0.2g、0.3g、0.4g、0.5g, 其对应的建基面水平加速度值分别为0.110g、0.182g、0.231g、0.272g、0.295g; 竖向加速度值分别为0.146g、0.231g、0.300g、0.372g、0.470g。也就是说, 当输入峰值加速度为0.5g时, 覆盖层建基面的水平加速度衰减了约40%; 随着峰值降低, 建基面加速度与输入加速度峰值的比值逐

渐增大, 当峰值加速度为0.1g时, 建基面水平加速度放大约10%。可以看出, 500 m级覆盖层地震反应受输入加速度峰值的影响较大, 峰值大于0.2g, 地震波在覆盖层中总体以衰减为主, 峰值越大, 衰减越多; 峰值小于0.2g, 地震波在覆盖层中总体以放大为主, 峰值越小, 放大越多。

竖向加速度随高程的传播规律与水平加速度不同, 输入地震加速度峰值从0.1g~0.5g变化时, 覆盖层内加速度随高程总体都呈放大趋势。

3.3 覆盖层中软弱土层厚度的影响

由于软弱土层的存在, 会导致覆盖层及大坝的动力反应与一般大坝动力反应规律不同, 因此有必要研究软弱土层的厚度对建基面放大倍数的影响。计算工况为图3所示模型与图4所示网格, 覆盖层③层的厚度分别取为0、75、125 m, 分别得到加速度放大系数(0 m为覆盖层坝基中无软弱土层工况), 并计算在输入峰值加速度0.2g和0.5g作用下的地震反应。数值模型见图4, 参数见表5。建基面高程设为0 m, 计算得到覆盖层沿坝轴线方向加速度放大倍数随高程的变化, 如图9所示。

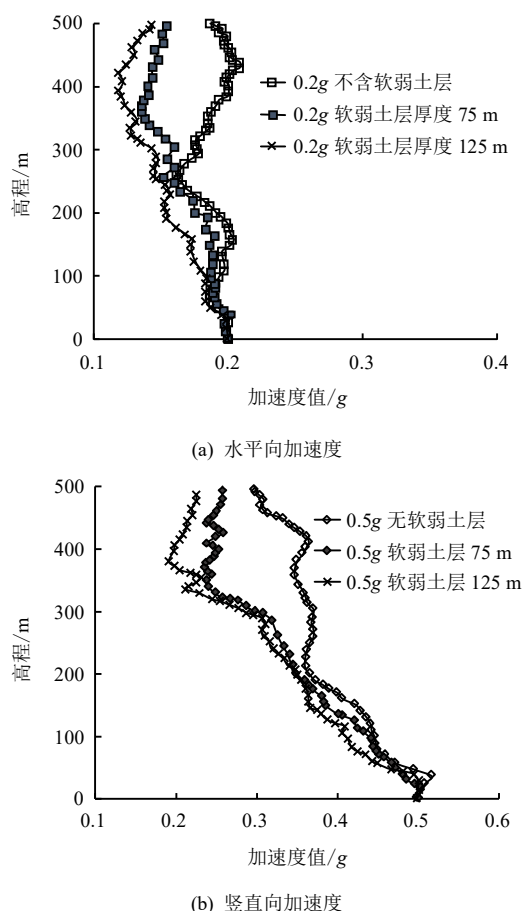


图9 覆盖层坝基加速度值随高程变化
Fig.9 Variations of acceleration values of overburden dam foundation with elevation

由图可见,在峰值为0.2g情况下,3种工况建基面的放大倍数依次为0.91、0.79、0.71;在峰值为0.5g情况下,为0.59、0.50、0.45。覆盖层中软弱土层的存在,减小了地震反应,且软土层越厚,滤波隔震作用越明显。不同的峰值加速度作用,地震反应衰减的程度也不同,对比无软弱土层与存在厚度125 m软弱土层的工况,峰值为0.2g、0.5g对应的建基面放大系数分别衰减了约21%、24%。

4 含软弱土层的深厚覆盖层坝基加速度放大倍数分布模型与建议表

总结不同覆盖层厚度、不同软弱土层厚度、不同输入加速度峰值条件下放大倍数随着高程的变化曲线,得到的简化示意图如图10所示,实线为无软弱土层的变化、虚线为有软弱土层二次衰减后的变化。据此将覆盖层分为3层,分别为:底部覆盖层、中间软弱土层、上部覆盖层,地震波传播经过这3层分别有不同的变化,绘制了覆盖层放大倍数随高程分布的示意图,如图11所示。

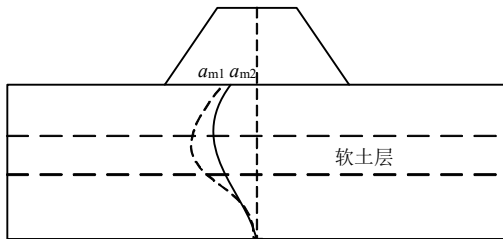


图10 加速度放大倍数随高程变化示意图

Fig.10 Diagram of acceleration amplification with elevation

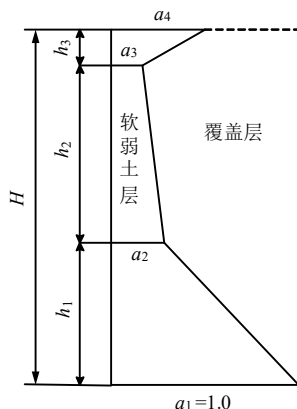


图11 覆盖层动态分布系数示意图

Fig.11 Diagram of dynamic distribution coefficient of overburden

可见,图11示出的覆盖层动态分布系数示意图共由8个参数确定,分别为 H 、 h_1 、 h_2 、 h_3 、 a_1 、 a_2 、

a_3 、 a_4 。其中, H 为覆盖层厚度, h_1 为覆盖层底面到软弱土层底面的距离, h_2 为软弱土层的厚度, h_3 为软弱土层顶面到建基面的距离, a_1 为覆盖层底面(基岩)输入加速度放大倍数, a_2 为软弱土层底面加速度放大倍数, a_3 为软弱土层顶面加速度放大倍数, a_4 为建基面加速度放大倍数。下面研究8个参数的取值方法与依据。

设 $a_1=1.0$ 为已知条件, H 、 h_1 、 h_2 、 h_3 为自变量、 a_2 、 a_3 、 a_4 为因变量。

设底部覆盖层 h_1 层衰减的斜率为 k_1 ,中间软弱土层 h_2 层二次衰减的斜率为 k_2 ,上部覆盖层 h_3 层放大的斜率为 k_3 ,有

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= \frac{h_1}{a_2 - a_1} \rightarrow a_2 = a_1 + \frac{h_1}{k_1} \\ k_2 &= \frac{h_2}{a_3 - a_2} \rightarrow a_3 = a_2 + \frac{h_2}{k_2} \\ k_3 &= \frac{h_3}{a_4 - a_3} \rightarrow a_4 = a_3 + \frac{h_3}{k_3} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

自变量需确定2组参数:第1组是控制变量覆盖层分层高度 h (h_1 、 h_2 、 h_3)、第2组是衰减率 K (k_1 、 k_2 、 k_3)。通过找到分层高度 k 即可得到 a_2 、 a_3 、 a_4 的值。

确定 k_1 、 k_2 、 k_3 时,考虑到影响深厚覆盖层动力反应的因素较多,如覆盖层厚度、覆盖层中各土层结构分布及土性参数、软弱土层的厚度及分布、上覆大坝坝高与体型、地震波峰值及其频谱特性等,需要在大量的数值计算结果、原型监测数据等基础资料的基础上,进行统计归纳。目前,受限于深厚覆盖层基础资料与受强震作用下原型观测资料的匮乏,确定 k_1 、 k_2 、 k_3 的值,并给出有说服力的动态分布系数图存在不小的难度。但我们可以换一个思路,通过数值计算给出各因素作用下的动态分布系数建议值表,研究过程如下:

(1) 考虑覆盖层厚度 H ,给出6组高度的放大倍数随高程变化的曲线;6组高度 H 的工况分别为:50、100、200、300、400、500 m。

(2) 在每一高度 H 组里考虑软弱土层的厚度 h_2 ,给出4组放大倍数随高程变化的曲线;4组软弱土层厚度 h_2 的工况分别为:0、0.05 H 、0.15 H 、0.25 H ,其他厚度可根据插值得到。

(3) h_1 的高度足够大,本文计算取 $h_1 > 0.5H$,即深埋软弱土层不做考虑。因为软弱土层若处于深厚覆盖层的深部,由于埋深大,不会发生液化等破坏现象,本文取 $h_1 = 0.60H$ 。

(4) 考虑上覆大坝坝高 H^* , 本文取为 150 m。

(5) 作出以上工况在 0.50g、0.45g、0.40g、0.35g、0.30g、0.25g、0.20g、0.15g、0.10g 等 9 个地震波峰值加速度条件下的放大倍数随高程变化的曲线, 给出每条曲线的 a_2 、 a_3 、 a_4 值, 制成放大倍数建议表 (见表 6~11)。

需要说明以下几点:

(1) 覆盖层深度为 50 m 的情况, 软弱土层在

工程中一般会考虑全挖除, 因此本成果表不予考虑。

(2) 软弱土层的材料选取表 5 中③层的参数。

(3) 本成果表尚没有反映覆盖层中软弱土层的分布、上覆大坝的体型与坝高、地震波频谱特性等因素的影响, 但这些均属于次要因素。

(4) 对于深厚覆盖层坝基地震加速度放大倍数的确定, 本成果表在研究其主要影响因素的基础上揭示了其规律性, 可用作今后工程设计中的参考。

表 6 覆盖层放大倍数分布建议值 ($H=50$ m, $h_1=30$ m)

Table 6 Recommended values of overburden magnification distribution ($H=50$ m, $h_1=30$ m)

$h_2=0$ m				$h_2=0.05H(2.5$ m)				$h_2=0.15H(7.5$ m)				$h_2=0.25H(12.5$ m)			
A	a_2	a_3	a_4	A	a_2	a_3	a_4	A	a_2	a_3	a_4	A	a_2	a_3	a_4
0.10g	—	—	1.62	0.10g	—	—	—	0.10g	—	—	—	0.10g	—	—	—
0.15g	—	—	1.58	0.15g	—	—	—	0.15g	—	—	—	0.15g	—	—	—
0.20g	—	—	1.51	0.20g	—	—	—	0.20g	—	—	—	0.20g	—	—	—
0.25g	—	—	1.28	0.25g	—	—	—	0.25g	—	—	—	0.25g	—	—	—
0.30g	—	—	1.20	0.30g	—	—	—	0.30g	—	—	—	0.30g	—	—	—
0.35g	—	—	1.11	0.35g	—	—	—	0.35g	—	—	—	0.35g	—	—	—
0.40g	—	—	0.94	0.40g	—	—	—	0.40g	—	—	—	0.40g	—	—	—
0.45g	—	—	0.86	0.45g	—	—	—	0.45g	—	—	—	0.45g	—	—	—
0.50g	—	—	0.84	0.50g	—	—	—	0.50g	—	—	—	0.50g	—	—	—

注: A 为地震波峰值加速度。

表 7 覆盖层放大倍数分布建议值 ($H=100$ m, $h_1=60$ m)

Table 7 Recommended values of overburden magnification distribution ($H=100$ m, $h_1=60$ m)

$h_2=0$ m				$h_2=0.05H(5.0$ m)				$h_2=0.15H(15$ m)				$h_2=0.25H(25$ m)			
A	a_2	a_3	a_4	A	a_2	a_3	a_4	A	a_2	a_3	a_4	A	a_2	a_3	a_4
0.10g	—	—	1.56	0.10g	1.39	1.38	1.42	0.10g	1.35	1.29	1.31	0.10g	1.33	1.22	1.23
0.15g	—	—	1.47	0.15g	1.28	1.28	1.33	0.15g	1.19	1.08	1.24	0.15g	1.16	1.09	1.13
0.20g	—	—	1.43	0.20g	1.16	1.13	1.15	0.20g	1.13	0.97	1.03	0.20g	1.02	0.95	0.95
0.25g	—	—	1.21	0.25g	0.98	0.96	1.03	0.25g	0.92	0.86	0.95	0.25g	0.87	0.81	0.88
0.30g	—	—	1.10	0.30g	0.92	0.89	0.97	0.30g	0.90	0.80	0.91	0.30g	0.85	0.71	0.85
0.35g	—	—	0.99	0.35g	0.87	0.83	0.90	0.35g	0.86	0.72	0.86	0.35g	0.82	0.67	0.81
0.40g	—	—	0.93	0.40g	0.81	0.77	0.84	0.40g	0.8	0.69	0.81	0.40g	0.79	0.62	0.76
0.45g	—	—	0.88	0.45g	0.80	0.74	0.79	0.45g	0.78	0.63	0.78	0.45g	0.76	0.56	0.74
0.50g	—	—	0.82	0.50g	0.76	0.72	0.76	0.50g	0.76	0.61	0.73	0.50g	0.73	0.51	0.69

表 8 覆盖层放大倍数分布建议值 ($H=200$ m, $h_1=120$ m)

Table 8 Recommended values of overburden magnification distribution ($H=200$ m, $h_1=120$ m)

$h_2=0H(0$ m)				$h_2=0.05H(10$ m)				$h_2=0.15H(30$ m)				$h_2=0.25H(50$ m)			
A	a_2	a_3	a_4	A	a_2	a_3	a_4	A	a_2	a_3	a_4	A	a_2	a_3	a_4
0.10g	—	—	1.42	0.10g	1.23	1.19	1.26	0.10g	1.16	1.09	1.11	0.10g	1.06	1.03	0.98
0.15g	—	—	1.35	0.15g	1.11	1.06	1.17	0.15g	1.02	1.03	1.06	0.15g	0.99	0.96	0.94
0.20g	—	—	1.30	0.20g	1.01	0.98	1.05	0.20g	0.96	0.93	0.95	0.20g	0.95	0.88	0.88
0.25g	—	—	1.12	0.25g	0.95	0.89	0.96	0.25g	0.91	0.85	0.80	0.25g	0.90	0.79	0.82
0.30g	—	—	0.97	0.30g	0.88	0.85	0.89	0.30g	0.82	0.78	0.83	0.30g	0.81	0.74	0.79
0.35g	—	—	0.92	0.35g	0.85	0.79	0.82	0.35g	0.79	0.70	0.76	0.35g	0.77	0.68	0.72
0.40g	—	—	0.86	0.40g	0.81	0.75	0.78	0.40g	0.77	0.68	0.71	0.40g	0.73	0.63	0.68
0.45g	—	—	0.82	0.45g	0.78	0.71	0.75	0.45g	0.74	0.63	0.68	0.45g	0.66	0.59	0.63
0.50g	—	—	0.77	0.50g	0.75	0.68	0.71	0.50g	0.71	0.59	0.65	0.50g	0.64	0.55	0.59

表 9 覆盖层放大倍数分布建议值 ($H=300\text{ m}$, $h_1=180\text{ m}$)

Table 9 Recommended values of overburden magnification distribution ($H=300\text{ m}$, $h_1=180\text{ m}$)

$h_2=0H(0\text{ m})$				$h_2=0.05H(15\text{ m})$				$h_2=0.15H(45\text{ m})$				$h_2=0.25H(75\text{ m})$			
A	a_2	a_3	a_4	A	a_2	a_3	a_4	A	a_2	a_3	a_4	A	a_2	a_3	a_4
0.10g	—	—	1.33	0.10g	1.12	1.06	1.08	0.10g	1.08	1.01	1.05	0.10g	1.01	0.97	0.97
0.15g	—	—	1.28	0.15g	1.04	0.98	1.03	0.15g	1.00	0.97	0.99	0.15g	0.97	0.91	0.91
0.20g	—	—	1.21	0.20g	0.98	0.92	0.97	0.20g	0.95	0.89	0.92	0.20g	0.93	0.84	0.84
0.25g	—	—	1.05	0.25g	0.92	0.86	0.90	0.25g	0.90	0.80	0.86	0.25g	0.86	0.77	0.79
0.30g	—	—	0.93	0.30g	0.87	0.78	0.85	0.30g	0.82	0.75	0.80	0.30g	0.80	0.71	0.75
0.35g	—	—	0.86	0.35g	0.84	0.76	0.79	0.35g	0.78	0.69	0.73	0.35g	0.75	0.66	0.69
0.40g	—	—	0.79	0.40g	0.79	0.72	0.73	0.40g	0.75	0.64	0.69	0.40g	0.72	0.59	0.65
0.45g	—	—	0.76	0.45g	0.75	0.66	0.69	0.45g	0.72	0.61	0.65	0.45g	0.64	0.56	0.61
0.50g	—	—	0.71	0.50g	0.72	0.63	0.66	0.50g	0.69	0.57	0.62	0.50g	0.62	0.53	0.57

表 10 覆盖层放大倍数分布建议值 ($H=400\text{ m}$, $h_1=240\text{ m}$)

Table 10 Recommended values of overburden magnification distribution ($H=400\text{ m}$, $h_1=240\text{ m}$)

$h_2=0H(0\text{ m})$				$h_2=0.05H(20\text{ m})$				$h_2=0.15H(60\text{ m})$				$h_2=0.25H(100\text{ m})$			
A	a_2	a_3	a_4	A	a_2	a_3	a_4	A	a_2	a_3	a_4	A	a_2	a_3	a_4
0.10g	—	—	1.16	0.10g	1.03	0.93	0.98	0.10g	0.97	0.87	0.93	0.10g	0.94	0.83	0.89
0.15g	—	—	1.11	0.15g	0.99	0.89	0.93	0.15g	0.94	0.81	0.91	0.15g	0.91	0.76	0.83
0.20g	—	—	0.96	0.20g	0.96	0.86	0.86	0.20g	0.88	0.76	0.85	0.20g	0.86	0.71	0.78
0.25g	—	—	0.88	0.25g	0.91	0.81	0.82	0.25g	0.84	0.70	0.78	0.25g	0.81	0.64	0.72
0.30g	—	—	0.84	0.30g	0.86	0.77	0.77	0.30g	0.79	0.63	0.72	0.30g	0.76	0.58	0.66
0.35g	—	—	0.78	0.35g	0.82	0.70	0.73	0.35g	0.77	0.60	0.67	0.35g	0.72	0.53	0.61
0.40g	—	—	0.73	0.40g	0.77	0.66	0.68	0.40g	0.72	0.56	0.62	0.40g	0.68	0.49	0.56
0.45g	—	—	0.69	0.45g	0.73	0.63	0.64	0.45g	0.68	0.52	0.57	0.45g	0.62	0.45	0.53
0.50g	—	—	0.64	0.50g	0.69	0.59	0.61	0.50g	0.64	0.49	0.54	0.50g	0.59	0.42	0.50

表 11 覆盖层放大倍数分布建议值 ($H=500\text{ m}$, $h_1=300\text{ m}$)

Table 11 Recommended values of overburden magnification distribution ($H=500\text{ m}$, $h_1=300\text{ m}$)

$h_2=0H(0\text{ m})$				$h_2=0.05H(25\text{ m})$				$h_2=0.15H(75\text{ m})$				$h_2=0.25H(125\text{ m})$			
A	a_2	a_3	a_4	A	a_2	a_3	a_4	A	a_2	a_3	a_4	A	a_2	a_3	a_4
0.10g	—	—	1.10	0.10g	0.94	0.85	0.93	0.10g	0.89	0.79	0.85	0.10g	0.85	0.72	0.80
0.15g	—	—	1.05	0.15g	0.91	0.82	0.89	0.15g	0.85	0.76	0.82	0.15g	0.82	0.69	0.73
0.20g	—	—	0.91	0.20g	0.87	0.78	0.84	0.20g	0.82	0.72	0.79	0.20g	0.79	0.66	0.71
0.25g	—	—	0.83	0.25g	0.84	0.75	0.81	0.25g	0.79	0.68	0.75	0.25g	0.77	0.62	0.67
0.30g	—	—	0.77	0.30g	0.80	0.71	0.76	0.30g	0.76	0.63	0.71	0.30g	0.72	0.57	0.62
0.35g	—	—	0.72	0.35g	0.76	0.68	0.71	0.35g	0.71	0.57	0.64	0.35g	0.67	0.53	0.58
0.40g	—	—	0.68	0.40g	0.73	0.65	0.66	0.40g	0.69	0.53	0.59	0.40g	0.64	0.49	0.54
0.45g	—	—	0.64	0.45g	0.70	0.61	0.63	0.45g	0.66	0.50	0.54	0.45g	0.60	0.44	0.49

5 结 论

本文在考虑地震波频率特性、加速度峰值以及覆盖层与软弱土层的厚度等影响因素的基础上，研究地震波在覆盖层内的传播规律，分析覆盖层及软弱土层各项指标与地表加速度放大倍数之间的相互关系，并探讨性地提出含软弱土层的深厚覆盖层坝基地震加速度放大倍数建议表。主要结论总结如下：

(1) 输入峰值加速度 0.5g 作用下，含软弱土层的 500 m 级特厚覆盖层坝基中地震波总体以衰减为主。

(2) 覆盖层厚度、输入加速度峰值、软弱土层

厚度与建基面放大倍数的衰减成正相关。覆盖层中不存在软弱土层时，覆盖层厚度超过 400 m 或输入加速度峰值超过 0.2g，覆盖层坝基建基面的放大倍数一般情况下小于 1；覆盖层中存在软弱土层时，由于其具有一定的滤波隔震作用，使得建基面放大倍数趋小。

(3) 提出了覆盖层下部区域地震效应衰减，中部区域软弱土层二次衰减，顶部区域放大的加速度放大倍数分布模型，据此编制了覆盖层加速度放大倍数建议值表，通过插值查询可得到不同情况下的覆盖层加速度放大倍数，可供实际工程中快速查询参考。

参考文献

- [1] 罗守成. 对深厚覆盖层地质问题的认识[J]. 水力发电, 1995(4): 21-25.
LUO Shou-cheng. Cognition of geological problems of thick overburden layer[J]. **Water Power**, 1995(4): 21-25.
- [2] 鲁慎吾, 任德昌. “深厚覆盖层建坝研究”成果综述[J]. 四川水力发电, 1986(4): 34-38.
LU Shen-wu, REN De-chang. Summary of research results on building dams with deep overburden[J]. **Sichuan Water Power**, 1986(4): 34-38.
- [3] 石金良. 大渡河河床深厚覆盖层及其工程地质问题[J]. 四川水力发电, 1986(3): 10-17.
SHI Jin-liang. Deep overburden and engineering geology of Dadu river bed[J]. **Sichuan Water Power**, 1986(3): 10-17.
- [4] 许强, 陈伟, 张倬元. 对我国西南地区河谷深厚覆盖层成因机理的新认识[J]. 地球科学进展, 2008, 23(5): 448-456.
XU Qiang, CHEN Wei, ZHANG Zhou-yuan. New views on forming mechanism of deep overburden on river bed in southwest of China[J]. **Advance in Earth Science**, 2008, 23(5): 448-456.
- [5] 张建华, 严军, 吴基昌, 等. 瀑布沟水电站枢纽工程关键技术综述[J]. 四川水力发电, 2006, 25(3): 8-11.
ZHANG Jian-hua, YAN Jun, WU Ji-chang, et al. Summary of optimization for Pubugou hydropower project[J]. **Sichuan Water Power**, 2006, 25(3): 8-11.
- [6] 何蕴龙, 曹学兴, 冯蕊, 等. 长河坝高土质心墙堆石坝抗震安全性研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2014, 47(1): 1-7.
HE Yun-long, CAO Xue-xing, FENG Rui, et al. Study of seismic safety of Changheba high rockfill dam with earth core[J]. **Engineering Journal of Wuhan University**, 2014, 47(1): 1-7.
- [7] 贾金生, 袁玉兰, 马忠丽. 2005 年中国与世界大坝建设情况[C]//水电 2006 国际研讨会论文集. 昆明: [出版社不详], 2006.
JIA Jin-sheng, YUAN Yu-lan, MA Zhong-li. Dam construction in China and the world in 2005 [C]// Proceedings of the International Symposium on Hydropower 2006. Kunming: [s. n.], 2006.
- [8] FISK H N, MCFARLAN E. Late quaternary deltaic deposits of the Mississippi river(local sedimentation and basin tectonics)[J]. **Geological Society of America**, 1995, 62: 279-302.
- [9] BYRNE J R, WILKINSON B H. Transgressive deltaic sedimentation in central Texas estuary[J]. **AAPG Bulletin**, 1997, 61: 527-545.
- [10] DALRYMPLE R W, ZAITLIN B A. High-resolution sequence stratigraphy of a complex, incised valley succession, Cobequid bay-Salmon river estuary, bay of Fundy, Canada[J]. **Sedimentology**, 1994, 41: 1069-1091.
- [11] 裴向军, 黄润秋. “4·20”芦山地震地质灾害特征分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2013, 40(3): 257-262.
PEI Xiang-jun, HUANG Run-qiu. Analysis of characteristics of geological hazards by “4·20” Lushan earthquake in Sichuan, China[J]. **Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition)**, 2013, 40(3): 257-262.
- [12] 张雪东, 魏迎奇, 张紫涛, 等. 深厚覆盖层中地震动传播规律离心模拟试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2017, 15(4): 272-277.
ZHANG Xue-dong, WEI Ying-qi, ZHANG Zi-tao, et al. Dynamic centrifuge modeling research on the law of earthquake motion[J]. **Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research**, 2017, 15(4): 272-277.
- [13] 王翔南, 张向韬, 董威信, 等. 深厚覆盖层上心墙堆石坝强震动力响应分析[J]. 地震工程学报, 2015, 37(2): 349-354.
WANG Xiang-nan, ZHANG Xiang-tao, DONG Wei-xin, et al. Dynamic behavior analysis of a core wall rockfill dam sited on deep overburden layers under strong earthquake loading[J]. **China Earthquake Engineering Journal**, 2015, 37(2): 349-354.
- [14] 周燕国, 谭晓明, 陈捷, 等. 易液化深厚覆盖层地震动放大效应台阵观测与分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(7): 1282-1291.
ZHOU Yan-guo, TAN Xiao-ming, CHEN Jie, et al. Observations and analyses of site amplification effects of deep liquefiable soil deposits by geotechnical downhole array[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 39(7): 1282-1291.
- [15] 杨正权, 刘小生, 赵剑明, 等. 考虑深厚覆盖层结构特性的场地地震反应分析研究[J]. 水力发电学报, 2015(1): 175-182.
YANG Zheng-quan, LIU Xiao-sheng, ZHAO Jian-ming, et al. Study on ground seismic response analysis

- considering structural characteristics of deep overburden layer[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2015(1): 175-182.
- [16] 杨正权, 赵剑明, 刘小生, 等. 超深厚覆盖层上土石坝动力分析边界处理方法研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(增刊): 138-143.
YANG Zheng-quan, ZHAO Jian-ming, LIU Xiao-sheng, et al. Study on boundary processing method for dynamic analysis of earth-rock fill dam on super-deep overburden layer[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2016, 49(Suppl.): 138-143.
- [17] 邵磊, 余挺, 徐强. 无限元在超深厚覆盖层坝基动力分析中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 7(2): 1537-1543.
SHAO Lei, YU Ting, XU Qiang. Dynamic analysis on super-deep overburdened layer foundation based on infinite element method[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2017, 7(2): 1537-1543.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB18306—2015 中国地震动参数区划图[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB18306—2015 Seismic ground motion parameters zonation map of China[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [19] 迟世春, 陶静园, 贾宇峰. 土石坝动力反应分析的阻尼模型及计算频率[J]. 黑龙江大学工程学报, 2013, 4(1): 1-7.
CHI Shi-chun, TAO Jing-yuan, JIA Yu-feng. Damping models and calculated frequencies of earth-rock dams[J]. **Journal of Engineering of Heilongjiang University**, 2013, 4(1): 1-7.
- [20] 楼梦麟, 殷琳. 关于高土石坝地震反应分析中的阻尼模型的讨论[J]. 水利发电学报, 2009, 28(6): 103-107.
LOU Meng-lin, YIN Lin. Discussion on damping models for seismic response analysis of high earth dams[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2009, 28(6): 103-107.
- [21] 楼梦麟, 潘旦光. 滞后阻尼在土层时域分析中的应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(3): 281-285.
LOU Meng-lin, PAN Dan-guang. Hysteretic damping application in time domain analysis of soil layer[J]. **Journal of Tongji University(Natural Science)**, 2004, 32(3): 281-285.
- [22] 邹德高, 徐斌, 孔宪京. 瑞利阻尼系数确定方法对高土石坝地震反应的影响研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 797-803.
ZOU De-gao, XU Bin, KONG Xian-jing. Study of influence of different methods for calculating Rayleigh damping coefficient on high earth-rock dam seismic response[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(3): 797-803.
- [23] 冷伍明, 张期树, 徐方, 等. 新型预应力路基坡面法向附加应力扩散规律分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(10): 3987-4000.
LENG Wu-ming, ZHANG Qi-shu, XU Fang, et al. Diffusion behavior of additional stress perpendicular to the slope surface in a new prestressed subgrade[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(10): 3987-4000.
- [24] 冷伍明, 艾希, 徐方, 等. 新型预应力路基水平向附加应力扩散规律研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(8): 1445-1454.
LENG Wu-ming, AI Xi, XU Fang, et al. Study on the diffusion law of horizontal additional stress in a new prestressed subgrade[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(8): 1445-1454.
- [25] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016.
ZHANG Zhi-lun. Elastic mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2016.
- [26] 易思蓉. 铁道工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2016: 220-221.
YI Si-rong. Railway engineering[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2016: 220-221.
- [27] 铁道部第三勘察设计院集团有限公司. TB 10625—2017 重载铁路设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd. TB 10625—2017 Code for design of heavy haul railway[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.

上接第266页