

深厚覆盖层特性变化对沥青混凝土心墙坝动力反应影响研究

只炳成, 宋志强, 王飞

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要:在我国西部强震区修建的沥青混凝土心墙坝大多建于深厚覆盖层上,深厚覆盖层的存在明显改变了覆盖层底部传入到坝体的地震动特性。考虑了覆盖层厚度、土体动力特性参数和土层结构型式等因素的变化,建立二维有限元计算模型,基于一致输入方法分析了覆盖层对沥青心墙坝动力反应的影响规律。结果表明:沥青心墙顶部加速度放大系数并非随覆盖层厚度增加而逐渐增大,而是存在一个临界厚度,超过此厚度时,加速度放大系数有所降低;同一厚度下覆盖层土体动剪模量增加,则沥青心墙顶部加速度放大系数增大,随着饱和程度的增加,其加速度放大系数先增大后减小;覆盖层土体软弱细砂层的耗能作用使得覆盖层顶部加速度放大系数降低率达31.7%。

关键词: 沥青混凝土心墙坝; 覆盖层特性; 动力分析; 加速度放大系数

中图分类号:TV641.4⁺1

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2020)05-0189-06

Dynamic response of asphalt concrete core wall dam to the variations of deep overburden layers

ZHI Bingcheng, SONG Zhiqiang, WANG Fei

(Faculty of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Asphalt concrete core wall dams constructed in high seismic regions of western China are mostly built on deep overburden layers. The existence of a deep overburden layer obviously changes the seismic characteristics of the earthquakes in the transmission from the bottom of the overburden layer to the dam body. Factors such as the thickness, soil dynamic characteristics and structure form of the overburden layer are considered to establish a two-dimensional finite element model. Based on the uniform input method, the influence of overburden layer on the dynamic response of asphalt core wall dam was analyzed. The results show that the acceleration amplification factor at the top of the asphalt core wall does not increase gradually with the increase of the thickness of the overburden layer. Because there is a critical point of thickness increase, when the thickness exceeds this point, the acceleration amplification factor starts to decrease. Under the same thickness of the overburden layer, the dynamic shear modulus of the overburden increases with the acceleration amplification factor at the top of asphalt core wall, whereas the acceleration amplification factor first increases and then decreases with the increase of the saturation degree of the overburden layer. The energy dissipation function of soft fine sand in the overburden soil reduces the acceleration amplification factor of the layer top by 31.7%.

Key words: asphalt concrete core wall dam; characteristics of overburden layer; dynamic analysis; acceleration amplification factor

1 研究背景

在我国水能资源丰富的西部地区建坝需要注意

两个关键性问题,一个是河谷中多含深厚覆盖层等不良地质;二是西部地区地震频发。沥青混凝土心墙坝因其柔性大,适应变形能力强和抗震性能好等

收稿日期:2019-12-26; 修回日期:2020-05-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51479165)

作者简介:只炳成(1995-),男,天津静海人,硕士研究生,主要从事水工结构抗震研究。

通讯作者:宋志强(1981-),男,辽宁开原人,博士,教授,博士生导师,主要从事水工结构抗震和水电站厂房机组振动研究。

优点^[1-5],恰好满足了该地区筑坝的要求。我国在覆盖层上修建的沥青混凝土心墙坝存在较多工程实例^[6-7],例如新疆下坂地水利枢纽拦河大坝建于 148 m 厚覆盖层上,冶勒水电站大坝建于 400 m 厚覆盖层上。

在研究覆盖层上沥青混凝土心墙坝动力反应时,需要人为截取有限覆盖层范围作为计算边界,在满足此计算边界条件下,应用一致输入方法,得出的计算结果误差较小。

杨正权等^[8]考虑土体厚度变化、基岩地形变化及新建结构影响等因素,研究覆盖层结构特性变化对场地地震动的影响规律,得出覆盖层对场地地震动幅值影响显著;张敏聪^[9]考虑不同坝高、不同心墙曲率等因素,研究其对沥青混凝土心墙和坝体的影响,得出不同坝高和心墙曲率对坝体应力位移影响规律。王建祥等^[10]考虑不同主应力比、围压和振动频率等因素,研究浇筑式沥青混凝土的动力特性,得出不同因素对沥青心墙材料的影响程度。张波等^[11]采用有效地震动输入方式和本构模型,对深厚覆盖层(147.95 m)上的沥青混凝土心墙坝进行有限元动力特性分析,研究了覆盖层问题中坝体和坝基的应力和变形特点;余梁蜀等^[12]考虑围压、固结比等因素,研究其对沥青混凝土心墙动力特性的影响规律,得出围压和固结比增大有利于沥青混凝土抵抗动荷载;孟佳^[13]采用时程分析法研究分析了沥青混凝土坝在顺河向、横河向地震荷载作用下的动力响应特性,确定出坝体顶部是整体结构抗震薄弱处。然而对位于复杂覆盖层处的沥青混凝土心墙坝动力特性的研究成果较少,覆盖层特性如何影响沥青混凝土心墙坝是研究者们较为关心的问题。鉴于此,本文系统研究覆盖层特性变化对沥青混凝土心墙坝动力反应影响规律,基于土石材料的静动力本构,利用有效应力分析的有限元法^[14],探寻覆盖层厚度、土体动力特性参数和土层结构型式等因素变化对坝体动力反应的影响规律。

2 计算模型及工况

2.1 计算模型

参考某建于覆盖层上的土石坝工程,建立了一个厚度为 150 m 均质粗砂覆盖层、坝高为 150 m 的沥青混凝土心墙坝模型,其中坝顶宽为 10 m,上、下游坡度均为 1:2,心墙顶部宽度为 0.5 m,底部宽度为 1/100 的坝高。沥青混凝土心墙及覆盖层均采用四节点双线性平面应力四边形单元(CPS4),沥青心

墙与上、下游堆石采用 Goodman 接触,大坝与地基采用硬接触。余翔等^[15]认为坝坡底部到覆盖层截断边界的距离 D 与覆盖层厚度 H 的比值应取为 10,即 $D/H = 10$,进而使得侧向截断边界对动力计算结果带来的影响足够小。杨正权等^[16]认为侧向截断边界取坝踵和坝脚向上、下游延伸 3~5 倍的大坝加地基高度,即可达到所需的计算精度。本文构建有限元计算模型示意图如图 1 所示。

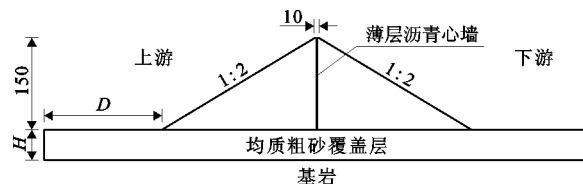


图1 均质粗砂覆盖层上沥青混凝土心墙坝地震反应分析模型示意图(单位:m)

2.2 静力与动力本构及参数

坝体与覆盖层材料静力本构采用邓肯-张 E-B 模型,涉及 10 个参数($\rho_{sat}, k, n, R_f, c, \varphi, P_a, K_b, n_b, K_{ur}/k$),静力参数中 ρ_{sat} 为材料密度; k 为反映一个大气压下材料加载的初始切线模量参数; n 为反映材料初始切线模量随围压变化的参数; R_f 为破坏比; c, φ 为材料的强度参数; P_a 为标准大气压; K_b 为反映 1 个大气压下材料加载的初始体变模量参数; n_b 为反映材料初始体变模量随围压变化的参数; K_{ur} 反映 1 个大气压下材料卸载的初始切线模量参数。弹性非线性模型能模拟土体材料屈服后的变形形状,此模型已被广泛应用,此处不再详细叙述。

坝体与覆盖层材料动力本构采用等效线性黏弹性模型,涉及 3 个参数(K, n, ν),动力参数中 K 为反映一个大气压下材料最大动剪切模量的参数; n 为反映材料最大动剪切模量随围压变化的参数; ν 为材料的泊松比。模型将覆盖层土体看作黏弹性体,通过动剪切模量 G 和等效阻尼比 λ 两个参数反映土体材料动力变形的非线性^[17]和黏滞性^[18],并与动剪应变存在如下关系:

$$G/G_{\max} = \frac{1}{1 + \gamma_d/\gamma_r} \quad (1)$$

$$\lambda/\lambda_{\max} = \left(\frac{\gamma_d/\gamma_r}{1 + \gamma_d/\gamma_r} \right)^m \quad (2)$$

式中: γ_d 和 γ_r 分别为动剪应变和参考剪应变。

表 1 为沥青混凝土心墙坝和覆盖层土体的静、动力参数。

2.3 地震动输入

选取峰值加速度为 0.2 g,持时为 30 s 的人工

地震波,采取水平向和竖直向双向输入,输入的地震波加速度时程如图 2 所示。

表 1 静力(E-B 模型)特性参数和动力(等价黏弹性模型)特性参数

结构类型	静力计算参数										动力计算参数		
	$\rho_{sat}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	k	n	R_f	P_a	K_b	n_b	K_{ur}/k	K	n	ν
上下游堆石	2150	0	52.0	1100	0.35	0.82	100	600	0.10	2	2339	0.50	0.35
沥青混凝土心墙	2422	370	25.4	429	0.60	0.88	100	944	0.50	2	1979	0.40	0.35
粗砂覆盖层	2060	46	53.5	1031	0.36	0.90	100	810	-0.16	2	3895	0.46	0.45
细砂覆盖层	1590	46	30.0	180	0.75	0.60	100	140	0.20	2	680	0.64	0.45

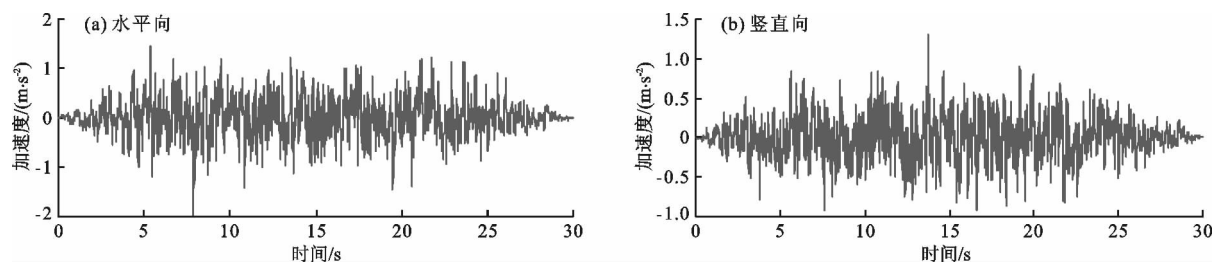


图 2 模型计算输入的水平与竖直向地震波加速度时程

2.4 计算工况

为考虑覆盖层厚度、土体动力特性参数和土层结构型式等因素的变化,表 2 列出 19 种模型计算工况。

表 2 模型计算工况

工况	覆盖层剪切模量系数 K	覆盖层厚度/m	覆盖层材料组成	覆盖层结构型式	泊松比 ν
1	3895	40	均质粗砂	型式 1	0.45
2	3895	100	均质粗砂	型式 1	0.45
3	3895	150	均质粗砂	型式 1	0.45
4	3895	300	均质粗砂	型式 1	0.45
5	3895	400	均质粗砂	型式 1	0.45
6	3895	500	均质粗砂	型式 1	0.45
7	680	150	均质粗砂	型式 1	0.45
8	1530	150	均质粗砂	型式 1	0.45
9	2215	150	均质粗砂	型式 1	0.45
10	3895	150	均质粗砂	型式 1	0.30
11	3895	150	均质粗砂	型式 1	0.35
12	3895	150	均质粗砂	型式 1	0.40
13	3895	150	均质粗砂	型式 1	0.49
14	仅含有粗砂(3895)	150	均质粗砂	型式 1	0.45
15	粗(3895)-细(680)	150	粗砂-细砂	型式 2	0.45
16	粗(3895)-细(680)	150	粗砂-细砂	型式 3	0.45
17	粗(3895)-细(680)	150	粗砂-细砂	型式 4	0.45
18	粗(3895)-细(680)	150	粗砂-细砂	型式 5	0.45
19	粗(3895)-细(680)	150	粗砂-细砂	型式 6	0.45

由于某实际工程覆盖层的厚度已达到 500 m 超深度^[16],因此构造了 40~500 m 厚度不同的 6 个覆盖层场地模型,同时为使数据具有可比性,此 6 个模型均采用均质粗砂覆盖层材料这一相同型式,对应工况 1、2、3、4、5 和 6。土体特性参数分析中,本文选取动剪切模量系数 K 取不同数值,对应工况 3、7、8 和 9,以及泊松比 ν 取不同数值,对应工况 3、10、11、12 和 13;本文为了研究覆盖层不同土层结构型式的影响,构造了 6 种不同土层结构型式,对应工况 14~19。覆盖层各结构型式详见下文。

3 结果与分析

3.1 覆盖层厚度的影响

图 3 为覆盖层厚度对不同部位加速度放大系数的影响,由图 3 可以看出,沥青心墙顶部以及覆盖层顶部加速度放大系数并非随覆盖层厚度增加而逐渐增大,而是存在一个临界厚度,超过此厚度时,加速度放大系数有所降低。覆盖层厚度为 150 m 时沥青心墙顶部加速度放大系数达到最大,最大值为 3.34;覆盖层厚度为 400 m 时,覆盖层顶部加速度放大系数达到最大,最大值为 1.7。主要是因为超过临界厚度后,覆盖层对反应谱存在明显影响,使反应谱峰值向长周期方向移动。

图 4 为不同覆盖层厚度对覆盖层顶部加速度反应谱的影响,由图 4 可以看出,虽然在 300 m 厚度以上反应谱值显著增加,对应基本周期变大,但沥青心

墙顶部和覆盖层顶部加速度放大系数并没有明显增加(见图3)。

3.2 覆盖层土体动力特性的影响

图5为动剪切模量系数 K 对不同部位加速度放大系数的影响。由图5可以看出,随着覆盖层动剪切模量系数的增加,覆盖层顶部加速度放大系数变化不大,

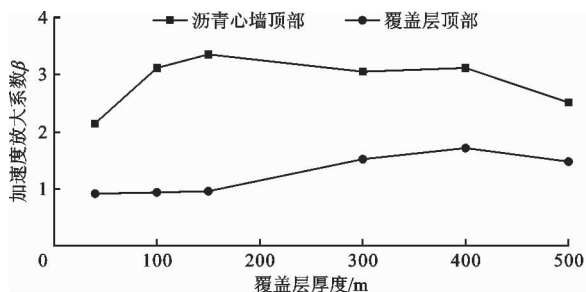


图3 覆盖层厚度对不同部位加速度放大系数的影响

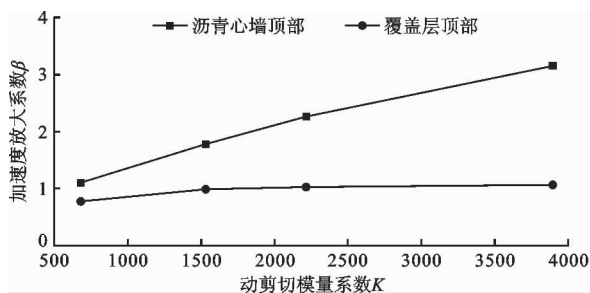


图5 动剪切模量系数 K 对不同部位加速度放大系数的影响

压缩波在不同饱和程度的土体中的传播速度不同。饱和程度越高,压缩波传播越快,土体孔隙水来不及排出,导致土体难以压缩;饱和程度降低时,压缩波传播速度变慢,导致土体容易压缩。本文以泊松比来表示覆盖层土体饱水程度^[19],泊松比越大,土体越接近饱和^[20]。

图7为泊松比 ν 对沥青心墙顶部加速度放大系数的影响。

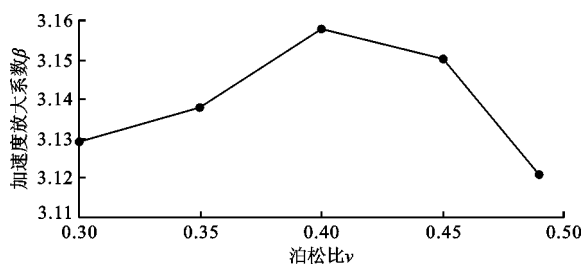


图7 泊松比 ν 对沥青心墙顶部加速度放大系数的影响

由图7可以看出,随着泊松比的增大,沥青心墙顶部加速度放大系数先增大后减小,产生此现象的原因在于随着饱和程度增大,模型的频率增大,周期减小,对应的反应谱增大,沥青心墙顶部加速度放大

而沥青心墙顶部加速度放大系数却逐渐增大。

图6为不同动剪切模量系数 K 对覆盖层顶部加速度反应谱的影响。由图6可以看出,随着动剪切模量系数的增大,反应谱平台段逐渐向短周期方向移动,对应频率增大,覆盖层土体刚性增强,阻尼效果减弱,沥青心墙顶部加速度放大系数增大。

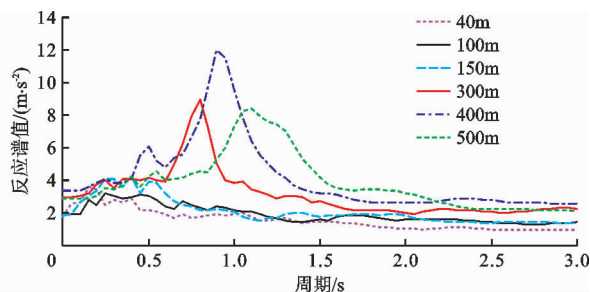


图4 不同覆盖层厚度对覆盖层顶部加速度反应谱的影响

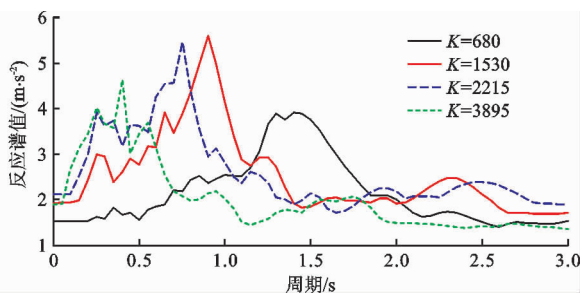


图6 不同动剪切模量系数 K 对覆盖层顶部加速度反应谱的影响

系数增大。当沥青心墙顶部加速度放大系数达到一定峰值时,饱和程度增大,模型刚性增强,周期更小,对应的反应谱段为降低趋势,沥青心墙顶部加速度放大系数也随之减小。

3.3 覆盖层土层结构型式的影响

为探寻土层结构型式变化对坝体动力反应的影响,本文构造了6种不同的覆盖层结构型式,见图8,对应计算工况为14~19。

图9为软弱细砂层对覆盖层中轴线处加速度放大系数的影响,图10为软弱细砂层对覆盖层顶部加速度反应谱的影响,由图9和10可以看出,无软弱层的覆盖层,覆盖层中轴线处加速度放大系数随高度逐渐增加,而含有软弱细砂层的覆盖层,在覆盖层中部(软弱细砂层区域)出现明显的折点,加速度放大系数大为降低,覆盖层顶部加速度放大系数降低率达31.7%。软弱细砂层的存在限制了覆盖层顶部加速度响应,这是由于软弱细砂层动剪切模量较低,对输入的地震动起到明显的“吸能”作用。软弱细砂层的存在使得覆盖层顶部加速度反应谱值小于无软弱细砂层反应谱值。可见覆盖层对输入的地震

动传播影响显著,软弱细砂层的存在会大幅降低覆盖层的加速度响应。

图11为不同型式软弱细砂层对覆盖层顶部及沥青心墙顶部加速度放大系数的影响,图12为不同型式软弱细砂层对覆盖层顶部加速度反应谱的影响。由图11和12可以看出,软弱细砂层不同结构

型式对覆盖层顶部加速度放大系数影响不大,但对沥青心墙顶部加速度放大系数影响较大,型式2中沥青心墙顶部加速度放大系数较型式4增大1.2;型式2中覆盖层顶部加速度反应谱值大于型式4的反应谱值,且频率增大,对应周期小,沥青心墙顶部加速度响应增大。

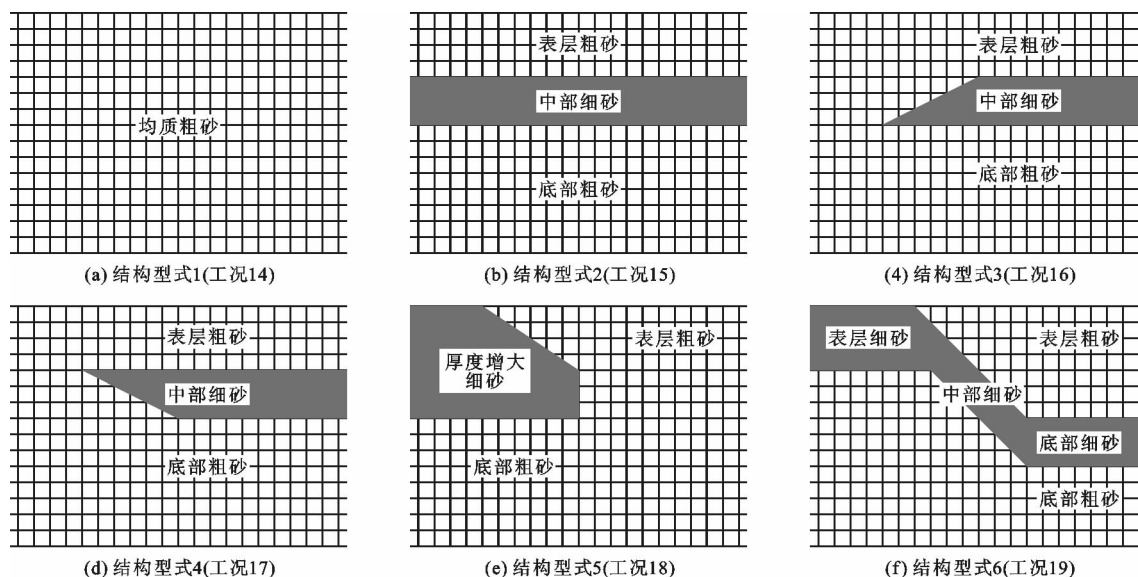


图8 6种不同覆盖层结构型式示意图及对应计算工况

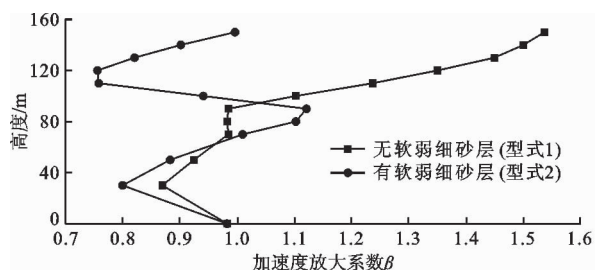


图9 软弱细砂层对覆盖层中轴线处加速度放大系数的影响

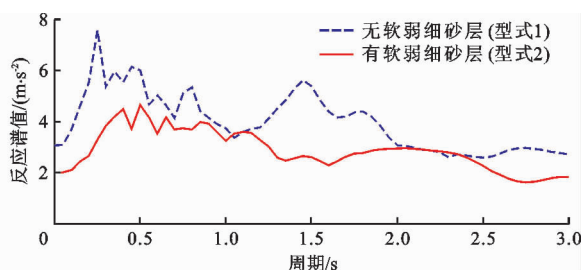


图10 软弱细砂层对覆盖层顶部加速度反应谱的影响

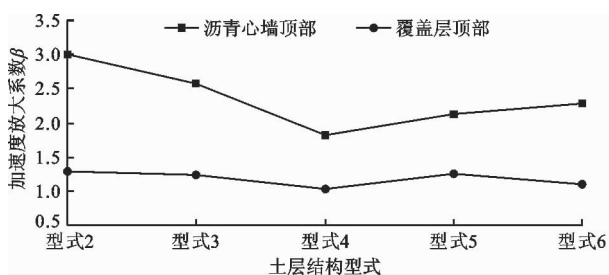


图11 不同型式软弱细砂层对覆盖层顶部及沥青心墙顶部加速度放大系数的影响

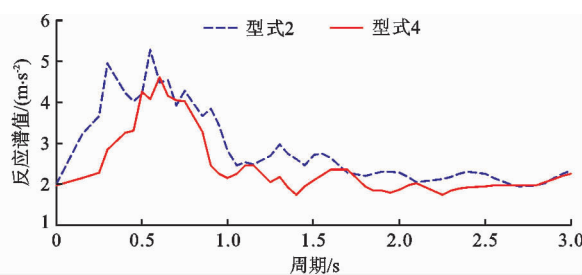


图12 两种型式软弱细砂层对覆盖层顶部加速度反应谱的影响

4 结论

通过研究覆盖层厚度、土体动力特性参数和土层结构型式得出沥青混凝土心墙坝动力反应规律,为以后复杂覆盖层场地抗震安全研究打下基础。本

文的主要结论为:

(1) 沥青心墙顶部加速度放大系数并非随覆盖层厚度增加而逐渐增大,而是存在一个临界厚度,超过此厚度时,加速度放大系数有所减小。覆盖层厚度为150 m时沥青心墙顶部加速度放大系数达到最

大,最大值为3.34。

(2)同一厚度的覆盖层动剪切模量系数越大,则沥青心墙顶部加速度放大系数越大;随着饱和程度的增大,沥青心墙顶部加速度放大系数先增大后减小。

(3)覆盖层土体软弱细砂层的存在大大降低了坝体-地基体系的加速度放大系数,覆盖层顶部加速度放大系数降低率达31.7%,可见软弱细砂层对输入的地震动有明显的“吸能”作用。对于不同结构型式的软弱细砂层,覆盖层顶部加速度放大系数变化不大,但沥青心墙顶部加速度放大系数存在明显差异。

参考文献:

- [1] 王为标,张应波,朱悦,等. 沥青混凝土心墙石渣坝的有限元计算分析[J]. 水力发电学报, 2010, 29(4): 173-178.
- [2] 王为标,申继红. 中国土石坝沥青混凝土心墙简述[J]. 石油沥青, 2002, 16(4): 27-31.
- [3] 杨丰春. 百米级高沥青混凝土心墙坝抗震能力与破坏模式研究[D]. 西安:西安理工大学, 2017.
- [4] 张合作,罗光其,程瑞林. 百米级碾压式沥青混凝土心墙坝关键技术探讨[J]. 水力发电, 2018, 44(7): 47-50+79.
- [5] 谭毅源,李应科. 沥青混凝土心墙坝设计综述[J]. 云南水力发电, 2015, 31(3): 32-34.
- [6] 党林才,刘荣丽,王仁坤. 利用覆盖层建坝的实践与发展[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2009.
- [7] 朱晟. 沥青混凝土心墙堆石坝三维地震反应分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 2933-2938.
- [8] 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, 34(1): 175-182.
- [9] 张聪敏. 高沥青混凝土心墙坝不同坝体结构的动力特性研究[D]. 西安:西安理工大学, 2019.
- [10] 王建祥,唐新军,何建新,等. 考虑多因素的浇筑式沥青混凝土动力特性研究[J]. 材料导报, 2018, 32(12): 2085-2090.
- [11] 张波,王赞,李智慧,等. 深覆盖层沥青混凝土心墙坝动力特性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2006, 17(5): 87-89.
- [12] 余梁蜀,晋晓海,丁治平. 心墙沥青混凝土动力特性影响因素的试验研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32(3): 194-197+206.
- [13] 孟佳. 寒区沥青混凝土心墙坝静动力特性研究[D]. 西宁:青海大学, 2018.
- [14] K·太沙基. 理论土力学[M]. 徐志英,译. 北京:地质出版社, 1960.
- [15] 余翔,孔宪京,邹德高,等. 土石坝-覆盖层-基岩体系动力相互作用研究[J]. 水利学报, 2018, 49(11): 1378-1385+1395.
- [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(S2): 138-143.
- [17] 刘颖,谢君斐. 砂土震动液化[M]. 北京:地震出版社, 1984.
- [18] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1996.
- [19] 高武平,陈宇坤,刘芳. 天津浅部地层的泊松比特征初步分析[J]. 地震工程学报, 2014, 36(1): 47-53.
- [20] 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.