

深厚覆盖层液化对场地卓越周期及土石坝地震响应影响研究

刘升欢¹, 宋志强¹, 王 飞¹, 刘云贺¹, 刘 琛²

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043)

摘要: 针对软弱夹层受震液化对深厚覆盖层场地振动特性的改变以及其上高土石坝的地震响应影响开展研究。将含有软弱夹层的深厚覆盖层场地简化为三质点体系, 推导了软弱夹层液化后的场地卓越周期计算公式, 进而分析了液化层特征量对场地卓越周期及场地反应谱的影响规律; 应用剪切楔法研究了软弱夹层液化对深厚覆盖层上土石坝坝顶加速度放大系数的影响规律。结果表明: 夹层发生液化使得场地卓越周期增大, 增大程度与夹层液化程度、上覆层与液化层厚度比 λ_1 、液化层与下卧层厚度比 λ_2 密切相关; 液化使得场地类别至少增加一类; 液化后场地反应谱呈现短周期减震、长周期加震现象, 加震减震的分界线一般在 0.61-0.88 s 范围内, 反应谱平台段加宽; 液化使得覆盖层上高土石坝坝顶加速度放大系数明显增大, 放大作用随着软弱夹层液化程度的增加呈现下降的趋势, 在夹层较厚且重度液化时, 液化现象对覆盖层上高土石坝动力响应反而有消弱作用。

关键词: 深厚覆盖层; 高土石坝; 夹层液化; 场地卓越周期; 反应谱

中图分类号: TU435; TU311.3; TV641.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2021)04-0721-09

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2021.04.008

引 言

目前国内外普遍认识到, 场地液化对地震动有高频滤波和低频放大效应。孙锐等^[1]基于 2011 新西兰 6.3 级地震所得场地地震动资料, 发现液化场地在一定程度上抑制了反应谱中的高频成分, 同时显著地放大低频成分的规律。Youd 等^[2]通过对比分析五个液化场地实测地震记录, 得出了覆盖层液化导致场地反应谱短周期成分谱值减小、长周期成分谱值增大的结论。孙锐等^[3]采用实测地震记录和理论分析相结合的方法, 提出了液化土层加震效应明显大于减震效应, 长周期结构需要特定分析的建议。众多实测地震动记录、理论研究以及相关的震害调查资料均表明, 场地局部夹层液化, 不仅对地基基础造成震陷威胁, 还对地震波的长周期成分有显著的放大作用。中国西南地区水电资源丰富, 但存在强震频发、覆盖层深厚等不良地质条件, 大型水电工程选址难以避让。因此, 开展深厚覆盖层场地软弱夹层液化对场地卓越周期及土石坝地震响应影响研究具有重要的理论及实践意义。

目前针对覆盖层场地地震反应研究方法主要有解析法和有限单元法等数值分析方法, 前者根据土层结构的简化方式分为水平剪切层法、集中质量体系法等简化方法。有限元法^[4-5]虽能与静力变形、应力有限元分析结合分析覆盖层场地地震反应, 但对场地地震动参数的确定需要大量的经验统计资料或者实际场地条件观测记录, 并且需要大量现场或室内试验以确定场地土层介质的静、动力本构模型参数^[6]。解析法根据土层结构的简化方式分为水平剪切层法、集中质量体系法等简化方法, 因概念简单, 容易编程计算, 且在多年的实际应用中积累了丰富的经验更为大众接受。孙锐等^[7]建立了可液化场地的简化双质点体系, 理论推导出用于识别场地液化情况的自振频率判别公式, 从土体软化引起场地卓越周期变化的角度, 分析了液化对场地特性的影响。孙锐等^[8-9]采用改进的有效应力方法, 探究了薄土层液化对地表加速度反应谱的影响, 结果表明液化使得场地类别至少增加一类、平均增加二类。陈龙伟等^[10]建立了双层模型用于模拟实际水平场地, 提出了考虑液化层存在下的土表位移简化计算方法。

目前研究多针对于薄覆盖层, 对于深厚覆盖层

中软弱层的液化对场地自身动力特性及地表反应谱的影响机制及表现特征尚不明确,尤其是场地液化带来的长周期成分的显著放大效应对覆盖层-土石坝系统的抗震安全造成怎样的影响,是值得广泛关注和深入研究的课题。

本文将含有软弱夹层的深厚覆盖层简化为三质点体系,推导夹层液化导致场地卓越周期变化的理论解答,探讨液化特征量对场地卓越周期及对地表反应谱的影响机制和特征规律,研究了夹层液化对深厚覆盖层上高土石坝的地震响应的规律,揭示了液化层特征量对土石坝坝顶加速度动力放大系数的内在影响关系,为可液化深厚覆盖层上高土石坝抗震设计提供理论参考。

1 软弱夹层液化对场地卓越周期的影响

1.1 分析模型

将含有易液化软弱夹层的实际深厚覆盖层简化为三质点体系^[7],如图1所示。其中, $\rho_i, G_i, v_{si}, H_i, k_i$ ($i=1, 2, 3$)分别代表下卧层、软弱夹层和上覆盖层的密度、剪切模量、剪切波速、厚度和平均水平刚度。 k_{22} 为软弱夹层液化后的平均水平刚度。

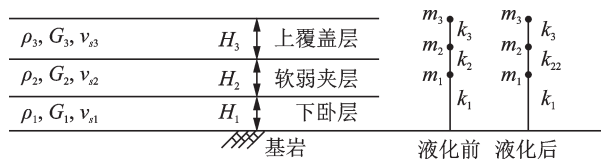


图1 含软弱夹层的简化三质点体系示意图

Fig. 1 Three-particle system model including a liquefiable intermediate layer

1.2 运动方程及求解

根据土动力学集中质量法原理,图1中三质点体系的自由运动方程为

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \\ \ddot{u}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

则体系频率方程为

$$\begin{vmatrix} k_1 + k_2 - m_1 \omega^2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 - m_2 \omega^2 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 - m_3 \omega^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (2)$$

展开并化简得

$$\omega^6 - \left(\frac{k_1 + k_2}{m_1} + \frac{k_2 + k_3}{m_2} + \frac{k_3}{m_3} \right) \omega^4 + \left[\frac{k_1 k_2 + k_2 k_3 + k_1 k_3}{m_1 m_2} + \frac{k_2 k_3}{m_2 m_3} + \frac{(k_1 + k_2) k_3}{m_1 m_3} \right] \omega^2 - \frac{k_1 k_2 k_3}{m_1 m_2 m_3} = 0 \quad (3)$$

令

$$\begin{cases} \frac{b}{a} = - \left(\frac{k_1 + k_2}{m_1} + \frac{k_2 + k_3}{m_2} + \frac{k_3}{m_3} \right) \\ \frac{c}{a} = \frac{k_1 k_2 + k_2 k_3 + k_1 k_3}{m_1 m_2} + \frac{k_2 k_3}{m_2 m_3} + \frac{(k_1 + k_2) k_3}{m_1 m_3} \\ \frac{d}{a} = - \frac{k_1 k_2 k_3}{m_1 m_2 m_3} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $k_i = \frac{G_i}{H_i} = \frac{\rho_i v_{si}^2}{H_i}$ ($i=1, 2, 3$),并假设各土层

密度一样,即 $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3$,则有

$$\begin{cases} \frac{b}{a} = - \left(\frac{v_{s1}^2}{H_1^2} + \frac{v_{s2}^2}{H_2^2} + \frac{v_{s3}^2}{H_3^2} + \frac{v_{s2}^2}{H_1 H_2} + \frac{v_{s3}^2}{H_2 H_3} \right) \\ \frac{c}{a} = \frac{v_{s1}^2 v_{s2}^2}{H_1^2 H_2^2} + \frac{v_{s2}^2 v_{s3}^2}{H_2^2 H_3^2} + \frac{v_{s1}^2 v_{s3}^2}{H_1^2 H_3^2} + \frac{v_{s2}^2 v_{s3}^2}{H_1 H_2 H_3} + \frac{v_{s1}^2 v_{s3}^2}{H_1^2 H_2 H_3} + \frac{v_{s2}^2 v_{s3}^2}{H_1 H_2 H_3^2} \\ \frac{d}{a} = - \frac{v_{s1}^2 v_{s2}^2 v_{s3}^2}{H_1^2 H_2^2 H_3^2} \end{cases} \quad (5)$$

式(3)可简化为

$$\omega^6 + \frac{b}{a} \omega^4 + \frac{c}{a} \omega^2 + \frac{d}{a} = 0 \quad (6)$$

求解上式,并取其最小值为卓越频率,则有

$$\omega^2 = \frac{-1 + i\sqrt{3}}{2} \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} + \frac{-1 - i\sqrt{3}}{2} \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} - \frac{b}{3a} \quad (7)$$

其中, $p = \frac{c}{a} - \frac{b^2}{3a^2}$, $q = \frac{2b^3}{27a^3} - \frac{bc}{3a^2} + \frac{d}{a}$ 。

则场地卓越周期为

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi / \left[\frac{-1 + i\sqrt{3}}{2} \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} + \frac{-1 - i\sqrt{3}}{2} \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} - \frac{b}{3a} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

同理可求软弱夹层液化后场地卓越周期 T' 。定

义场地卓越周期的上升比 δ 为

$$\delta = \frac{T' - T}{T} \quad (9)$$

$$\text{令: } \lambda_1 = \frac{H_3}{H_2} = \frac{m_3}{m_2}; \lambda_2 = \frac{H_2}{H_1} = \frac{m_2}{m_1}; P_1 = \frac{G_3}{G_2} = \frac{v_{s3}^2}{v_{s2}^2}; P_2 = \frac{G_2'}{G_2} = \frac{v_{s2}^{\prime 2}}{v_{s2}^2}; P_3 = \frac{G_2}{G_1} = \frac{v_{s2}^2}{v_{s1}^2}。$$

并假设剪切波速和深度存在以下关系

$$v_s = mh^n \quad (10)$$

式中 取 $m=100$, 取 $n=0.28^{[11-13]}$, 并取各土层 2/3 处的剪切波速为该土层的平均剪切波速。则式(9) 可写为

$$\delta = \left(\frac{\frac{-1+\sqrt{3}}{2}L_1 + \frac{-1+\sqrt{3}}{2}L_2 - \frac{M_1}{3}}{\frac{-1+\sqrt{3}}{2}L_3 + \frac{-1+\sqrt{3}}{2}L_4 - \frac{N_1}{3}} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \quad (11)$$

式中 L_1, L_2, L_3, L_4 为由 M_1 和 N_1 共同决定的相关系数, 其中

$$\begin{cases} M_1 = -P_1P_3 - \lambda_1\lambda_2(P_3\lambda_1 + \lambda_1\lambda_2) - \lambda_1(P_1P_3 + P_3\lambda_1) \\ N_1 = -P_1P_3 - \lambda_1\lambda_2(P_2P_3\lambda_1 + \lambda_1\lambda_2) - \lambda_1(P_1P_3 + P_2P_3\lambda_1) \end{cases}$$

由式(11)可知, 场地卓越周期上升比 δ 主要由三个特征量决定: 上覆盖层与软弱层的厚度比 λ_1 , 软弱层与下卧层的厚度比 λ_2 和软弱夹层液化后与液化前的剪切模量比 P_2 。

为了验证本文三质点体系解答的合理性, 作者基于易液化深厚覆盖层 La Cienega 场地台阵实测记录^[14], 选用子层周期求和法进行对比说明。计算结果表明: 三质点体系与子层周期求和法对液化前场地卓越周期 T 解答差异较小, 为 9.7%; 且对于液化后场地卓越周期 T' , 三质点体系更为合理地考虑了夹层位置和液化现象对场地卓越周期的影响。所以本文将含有易液化夹层的实际深厚覆盖层简化为三

质点体系, 在一定程度上满足工程精度要求。

1.3 液化层特征量对场地卓越周期影响

在实际高土石坝工程建设中, 覆盖层深度较浅的情况, 一般会全挖除, 因此本节重点探讨含有软弱夹层的深厚覆盖层。根据水利工程地质条件特点, 假定夹层厚 10 m, 选取上覆盖层与液化夹层厚度比 λ_1 取值范围为 1-20、软弱夹层与下卧层厚度比 λ_2 取值范围为 0.05-1, 故覆盖层总厚度在 30-410 m 范围内。液化使得软弱夹层的剪切模量降低到原来的 1/50-1/300^[15-17], 本文选取夹层液化后与液化前的剪切模量比 P_2 分别为 1/50, 1/100 和 1/200。

不同的 λ_2 取值情况下, 液化程度以及 λ_1 对 δ 的影响如图 2 所示。从图 2 可以看出, 针对不同的 λ_2 取值情况, λ_1 对场地卓越周期上升比 δ 的影响模式有三种: 当 λ_2 较小时, 即图 2(a) 中取 $\lambda_2=0.05$ 的情况, δ 随 λ_1 值的增大而增大, 且 δ 较小 ($P_2=1/100$, 则 $\delta \leq 0.75$); 当 λ_2 为中等值时, 即图 2(b) 中取 $\lambda_2=0.1$ 的情况, δ 随 λ_1 值的增大先增大后减小, 拐点在 λ_1 为 5 附近; 当 λ_2 较大时, 即图 2(c) 中取 $\lambda_2=1$ 的情况, δ 随 λ_1 值的增大而减小, 且 δ 较大 ($P_2=1/100$, 则 $\delta \geq 1.19$)。

不同的 λ_1 取值情况下, 液化程度以及 λ_2 对 δ 的影响如图 3 所示。从图 3 可以发现, 针对不同的 λ_1 取值情况, λ_2 对场地卓越周期上升比 δ 的影响模式仅有一种, 即 δ 随 λ_2 的增大呈现增大的趋势; 且 λ_1 值越小, δ 上升的幅度也就越大, 在相同液化程度 ($P_2=1/100$) 下, 当 $\lambda_1=1$ 时, δ 在 26.1%-546.9% 范围内, 当 $\lambda_1=20$ 时, δ 在 73.0%-119% 范围内。

结合图 2 和 3 可知, 不论 λ_1 和 λ_2 取值如何, δ 均随液化程度的加深 (P_2 的减小) 呈现增大的规律, 且 λ_1 值越小, λ_2 值越大, δ 随 P_2 上升的幅度也就越大。总体而言, 软弱夹层液化使得场地卓越周期显著改变, 在 P_2 取为 1/100 的情况下, δ 最小取值为 26%, 相比

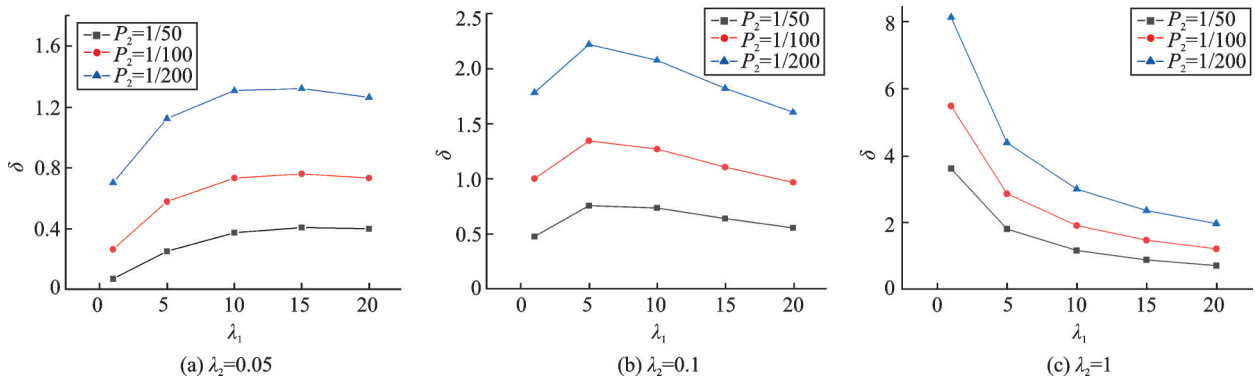
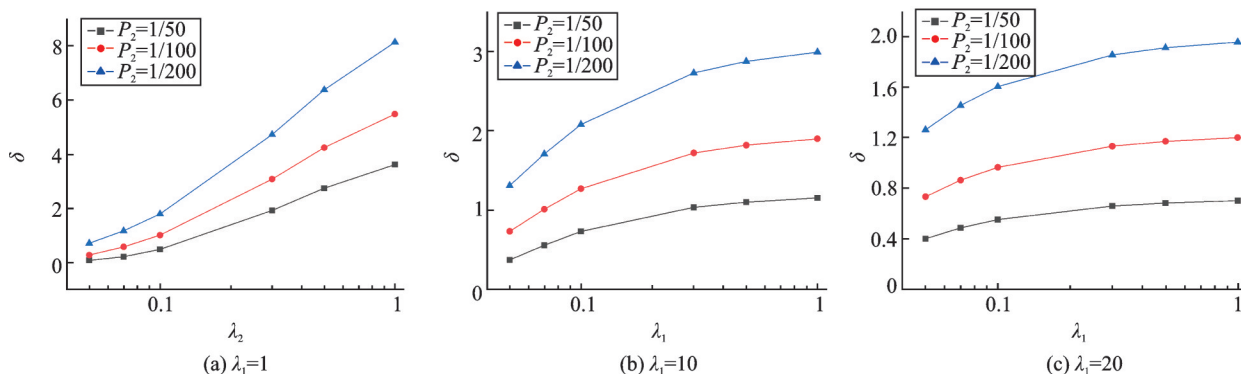


图 2 不同 λ_2 取值情况下, 场地卓越周期上升比 δ 与 λ_1 及 P_2 的关系图

Fig. 2 Plots of δ versus λ_1 and P_2 for three different values of λ_2

图3 不同 λ_1 取值情况下,场地卓越周期上升比 δ 与 λ_2 及 P_2 的关系图Fig. 3 Plots of δ versus λ_2 and P_2 for three different values of λ_1

于液化前卓越周期 0.716 s,按照郝冰等^[17]以场地卓越周期作为场地类别评价标准的建议来判断,液化现象使得场地类别至少增加一类。

2 液化对覆盖层场地高土石坝地震响应的影响

2.1 覆盖层上高土石地震响应解析计算方法

本节采用剪切楔法计算深厚覆盖层上高土石坝的地震响应。均质土坝因坝料土体与覆盖土层剪切模量相差并不悬殊,故考虑覆盖层与坝体的相互作用,将其视为一个统一的体系^[18]。计算简化模型如图4所示,其中, H' , G' , ρ' , ξ' 分别为坝体的高度、剪切模量、密度和阻尼比; H , G , ρ , ξ 分别为含软弱夹层覆盖层的总厚度、等效剪切模量、等效密度和阻尼比,坝体水平位移为 u' ,覆盖层水平位移为 u 。

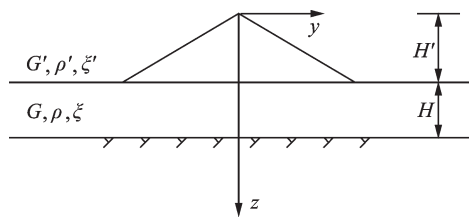


图4 覆盖层上的土石坝剪切楔法示意图

Fig. 4 Shear wedge method of earth dam on overburden

则对于覆盖层上的土石坝有运动微分方程

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u'}{\partial t^2} + 2\xi'\omega \frac{\partial u'}{\partial t} - \frac{G'}{\rho'} \left(\frac{\partial^2 u'}{\partial z^2} + \frac{1}{z} \frac{\partial u'}{\partial z} \right) = -\ddot{u}_g(t) & (z < H') \\ \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + 2\xi\omega \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{G}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = -\ddot{u}_g(t) & (H' < z < H' + H) \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{边界条件: } u(H', t) = u'(H', t); \quad G \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=H'} =$$

$$G' \frac{\partial u'}{\partial z} \Big|_{z=H'}; \quad \frac{\partial u'}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0; \quad u \Big|_{z=H'+H} = 0.$$

求得土石坝-覆盖层体系的自振频率为

$$\omega_n = \frac{a_n}{H} \sqrt{\frac{G'}{\rho'}} \quad (13)$$

式中 a_n 为下列方程式的一组根

$$m \tan(qa_n) = \frac{J_0(a_n)}{J_1(a_n)} \quad (14)$$

式中 m 为刚度比, $m = (G'/\rho') / (G/\rho)$; q 为刚度系数, $q = mH/H'$ 。

振型及振型参与系数的乘积为

$$\begin{cases} \varphi_{\frac{z}{H}, n\eta n} = \frac{2J_0\left(a_n \frac{z}{H'}\right)}{a_n N_n} & (z < H') \\ \varphi_{\frac{z}{H}, n\eta n} = \frac{2M_n}{a_n N_n} & (H' < z < H' + H) \end{cases} \quad (15)$$

式中 M_n 和 N_n 为由 m , q 和 a_n 决定的相关系数。利用反应谱计算加速度反应最大值时,一般只需计算前3-4阶振型,此次计算取其前3阶振型,则坝体各高程的加速度反应为

$$\ddot{u}_{a, \max} = \sqrt{\sum_{j=1}^3 \ddot{u}_{a, j, \max}^2} = \sqrt{\sum_{j=1}^3 \left| \varphi_{\frac{z}{H}, n\eta n} \right|^2 S_{a, n}} \quad (16)$$

式中 S_a 为加速度反应谱。

2.2 液化对场地加速度反应谱影响

由于现有抗震规范未涉及液化对设计反应谱参数调整的规定,即设计反应谱不会因为土层液化而发生改变,无法利用设计反应谱研究液化对土石坝地震响应的影响。因此,本文首先开展了深厚覆盖层场地软弱夹层液化对场地加速度反应谱的影响研究,在利用式(16)计算坝体各高程的加速度反应时, S_a 采用液化修正后的场地加速度反应谱。

假定高土石坝建在总厚度为 120 m 的覆盖层上,其中软弱夹层厚度 H_2 分别取为 5, 10 和 20 m。在总厚度 H 一定的前提下,仅选定不同的 λ_1 值就

可使得软弱夹层位于深厚覆盖层的上部、中部和下部(λ_2 值可由总厚度 H 、夹层厚度 H_2 及参数 λ_1 算出)。场地土类型为中硬土,土层剪切波速采用前节经验公式,且该深厚覆盖层场地平均剪切波速为 310 m/s。

根据《水工建筑物抗震设计规范 GB51247-2018》判断,该场地为 II 类场地。故根据 II 类场地规范反应谱合成三条相关系数小于 0.3 的人造地震

波,而后将人造地震波作用于 2.1 节中的简化三质点体系,可得液化前、后的地表加速度时程,并将之转换成场地加速度反应谱。将三条人工合成地震波所得反应谱进行平均处理,得到不同计算组合不同液化程度下的液化前、后地表加速度反应谱,结果如图 5-7 所示,并在图中标识出减震、加震分界线处周期值。将各计算组合下液化前与液化后($P_2=1/100$)的场地反应谱对比如表 1 所示。

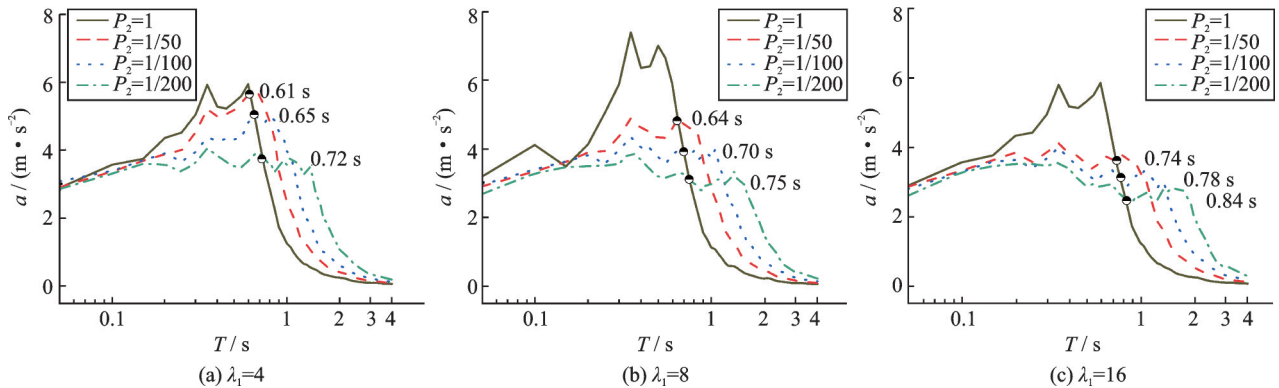


图 5 $H_2=5\text{ m}$,不同 λ_1 取值下场地加速度反应谱

Fig. 5 The site acceleration response spectrum for different values of λ_1 for $H_2=5\text{ m}$

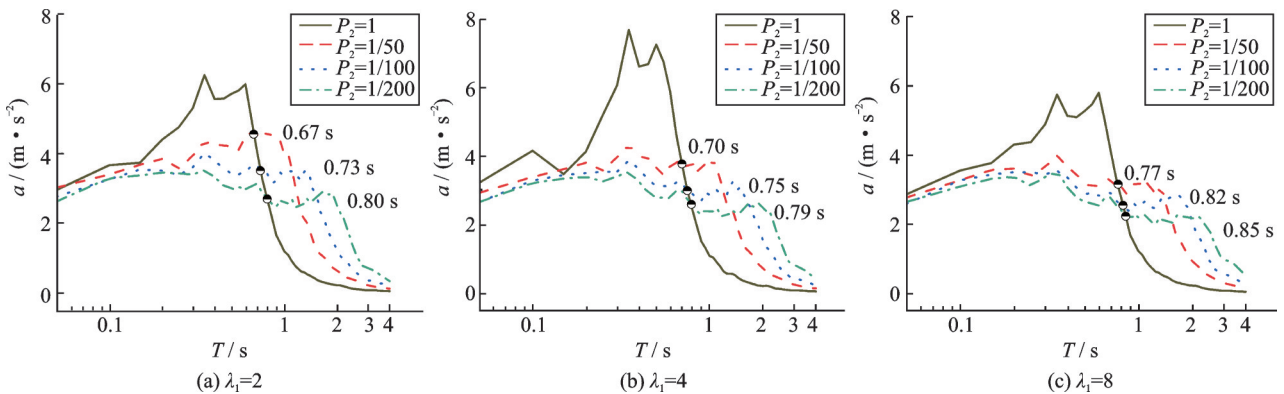


图 6 $H_2=10\text{ m}$,不同 λ_1 取值下场地加速度反应谱

Fig. 6 The site acceleration response spectrum for different values of λ_1 for $H_2=10\text{ m}$

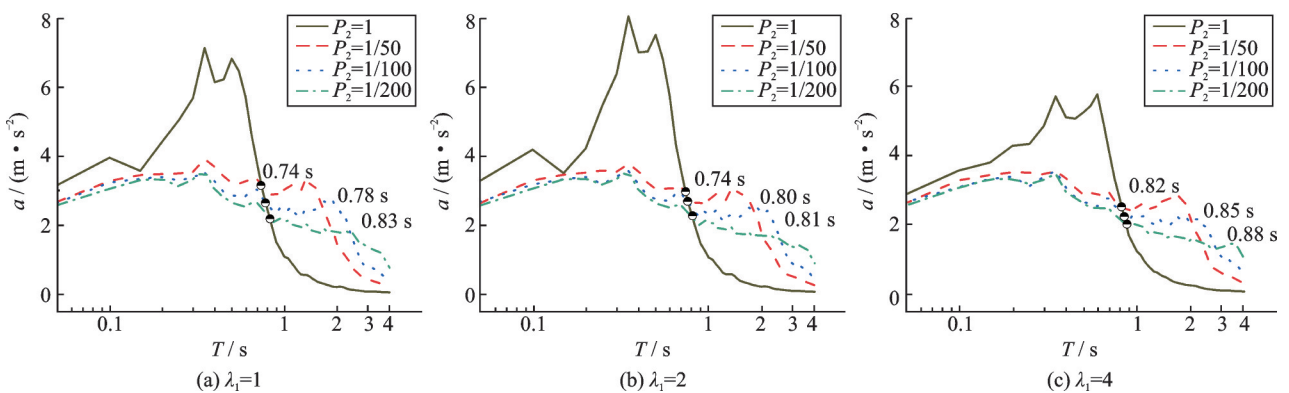


图 7 $H_2=20\text{ m}$,不同 λ_1 取值下场地加速度反应谱

Fig. 7 The site acceleration response spectrum for different values of λ_1 for $H_2=20\text{ m}$

图 5 为 H_2 取为 5 m 时,各 λ_1 取值下地表加速度反应谱。从图 5(a)可以发现,当取 $\lambda_1=4$ 时,即液化程度低的时候,反应谱变化不明显,而随着液化程度

的加重(P_2 的降低),场地低频加震、高频减震作用逐渐趋于明显,具体表现为反应谱平台段所包含周期范围扩大,开始出现下降段的特征周期也随之延长,

平台段反应谱值有所下降,减震、加震分界线周期值有所增大,且此规律在其余图中均有体现。当 λ_1 增大时,即图 5(b)中取 $\lambda_1=8$ 、图 5(c)中取 $\lambda_1=16$ 的情况,在液化程度较轻时,液化对地震动低频加震、高频减震作用就已凸显。当液化程度相同(取 $P_2=1/100$)时,结合表 1 中的数据可知,随着 λ_1 的增大,即夹层埋深的加大,液化场地反应谱最值下降 18.9%,特征周期延长 0.50 s,减震、加震分界线增大 0.13 s,且液化场地对地震动的低频加震程度远大于高频减震程度,最大加震程度为 451.8%。

为探究夹层厚度变化对液化前、后反应谱的影响,在确保上覆盖层厚度不变的前提下,仅改变液化夹层厚度 H_2 ,故 λ_1 值随之发生改变。当 H_2 分别取为 10 和 20 m 时,各 λ_1 取值下地表加速度反应谱如图 6 和 7 所示。 P_2 和 λ_1 对场地反应谱的影响规律和图 5

基本一致,不再赘述。针对夹层三种埋深位置情况,取相同液化程度(P_2 均为 1/100),结合表 1 可以发现:随着 H_2 逐渐加厚,液化场地反应谱最值下降,特征周期和减震、加震分界线增大。其中,减震、加震分界线最大延长 0.13 s,发生在夹层埋置于覆盖层上部的情况下;随着 H_2 逐渐加厚,相较于液化减震作用加强程度,其最大加震程度显著提高,最大可达 1163.4%。

综合表 1 来看,在取 $P_2=1/100$ 下,液化场地反应谱特征周期变化范围一般在 0.85-2.35 s 内,减震、加震分界线变化范围一般在 0.65-0.85 s 内,即加震周期的范围一般在 0.65-4.00 s 内。而高土石坝的第一阶自振周期一般在 1.0 s 以上^[19-21],处于反应谱加震的周期范围内,因此有必要开展覆盖层液化对高土石坝地震响应影响研究。

表 1 各计算组合下液化前、后场地加速度反应谱对比表

Tab. 1 Comparison of acceleration response spectrum before and after liquefaction

计算组合	$P_2=1$		$P_2=1/100$					
	最大值/($m \cdot s^{-2}$)	T_g/s	最大值/($m \cdot s^{-2}$)	T_g/s	最大减震	最大加震	分界线/s	
$H_2=5$ m	$\lambda_1=4$	5.93	0.6	4.90	0.85	17.3%	114.4%	0.65
	$\lambda_1=8$	7.37	0.5	4.32	1.05	41.3%	272.6%	0.70
	$\lambda_1=16$	5.83	0.6	3.97	1.35	32.0%	451.8%	0.78
$H_2=10$ m	$\lambda_1=2$	6.24	0.6	4.01	1.35	35.7%	562.4%	0.73
	$\lambda_1=4$	7.66	0.5	3.86	1.50	49.6%	680.5%	0.75
	$\lambda_1=8$	5.79	0.6	3.49	1.70	40.5%	846.4%	0.82
$H_2=20$ m	$\lambda_1=1$	7.13	0.5	3.51	1.95	50.7%	1143.4%	0.78
	$\lambda_1=2$	8.03	0.5	3.54	2.20	55.6%	1163.4%	0.80
	$\lambda_1=4$	5.75	0.6	3.37	2.35	41.4%	1053.2%	0.85

2.3 液化对土石坝地震响应影响研究

假定前节深厚覆盖层上建有碾压的良好级配料的高土石坝,坝高为 200 m,坝体剪切波速取为 180

m/s ^[18]。剪切楔法求得坝顶加速度放大系数 β ,如表 2 所示。其中,采用夹层液化前的场地反应谱计算所得与设计反应谱计算所得 β 平均相差为 8.8%,所以前节所得场地反应谱在一定工程范围满足要求。

表 2 各反应谱计算所得高土石坝坝顶加速度放大系数 β 表

Tab. 2 β at the top of high earth-rock dam calculated by each response spectrum

计算组合	设计反应谱		场地反应谱			
	液化前	液化前	$P_2=1/50$	$P_2=1/100$	$P_2=1/200$	
$H_2=5$ m	$\lambda_1=4$	1.98	2.31	3.26	3.09	2.47
	$\lambda_1=8$	1.99	2.18	3.20	2.83	2.53
	$\lambda_1=16$	2.11	2.22	3.09	2.74	2.57
$H_2=10$ m	$\lambda_1=2$	1.96	2.16	2.87	2.65	2.21
	$\lambda_1=4$	1.98	2.12	2.76	2.47	2.22
	$\lambda_1=8$	2.11	2.20	2.71	2.44	2.34
$H_2=20$ m	$\lambda_1=1$	1.94	2.21	2.76	2.59	1.95
	$\lambda_1=2$	1.97	2.16	2.60	2.44	2.03
	$\lambda_1=4$	2.10	2.17	2.56	2.31	2.06

图8给出了不同的 H_2 下, β 与 P_2^{-1} 关系图。从图8(a)可以发现,当 $H_2=5$ m时,对于软弱夹层处于覆盖层整体中的不同埋深位置(即 λ_1 取不同的值)的夹层在受震液化后地上高土石坝坝体地震响应都明显被放大,结合表2可知 β 最大增幅可达46.7%;且 β 随夹层软化程度加重(P_2^{-1} 的增大)而呈现减小的趋势,但仍比液化前的大。从图8(b)可以发现,在相同埋深位置相同液化情况下, H_2 变厚后的 β 比 $H_2=5$ m下的明显减小,但仍比液化前的大。从图8(c)中可以发现,当 H_2 增大至20 m时,相同埋深位置相同液化情况下的 β 比图8(a),(b)中的呈现减小的趋势。在软化程度较重($P_2=1/200$)情况下,坝顶响应出现比液化前减小的情况,此时 β 最大降幅为11.7%,说明覆盖层中较厚的夹层重度液化时,对其上高土石坝地震响应有消弱的作用。综合图8(a),

(b)和(c)来看,对于夹层软化程度较低($P_2^{-1}\leq 100$)的情况,液化后的 β 呈现随 λ_1 增大而减小的趋势,即夹层位置越靠近覆盖层下部,对地上高土石坝结构受震安全性越有利;对夹层软化程度较高($P_2^{-1}=200$)的情况,液化后的 β 呈现随 λ_1 增大而增大的趋势,究其原因是该情况下坝体与覆盖层体系的自振周期被严重延长。

综合来说,覆盖层场地上高土石坝结构地震响应在深厚覆盖层场地受震液化后有显著变化: β 在夹层液化后被明显放大,且随着液化程度的加深逐渐减小。夹层液化后,总体上 β 比液化前的大,仅当夹层厚度 H_2 较厚、软化程度较深($P_2^{-1}=200$)时, β 出现比液化前的有所减小的情况。在软化程度较低时, β 随 λ_1 增大而减小;在软化程度比较深时, β 随 λ_1 增大而增大。随着 H_2 的加厚, β 呈现减小的趋势。

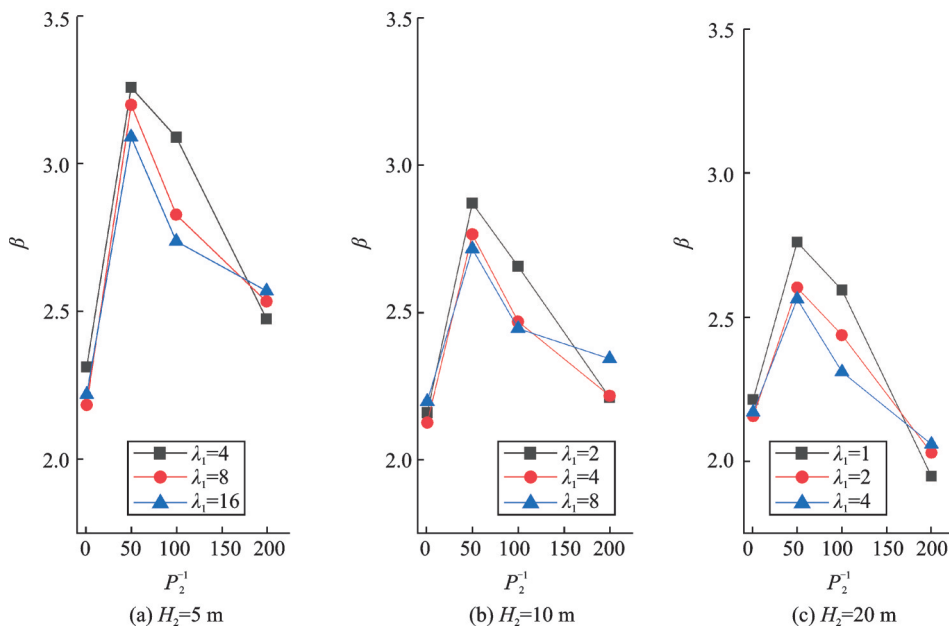


图8 不同软弱夹层厚度 H_2 下,地上高土石坝坝顶加速度放大系数 β 与 P_2^{-1} 关系图

Fig. 8 Relationship between P_2^{-1} and β for different H_2

3 结论

本文将含有软弱夹层的深厚覆盖层简化为三质点体系,推导夹层液化导致场地卓越周期变化的理论解答,探讨液化特征量对场地卓越周期及对地表反应谱的影响机制和特征规律,应用剪切楔法研究了夹层液化对深厚覆盖层上高土石坝的地震响应的规律,具体结论如下:

(1)软弱层液化使得场地卓越周期增大,增大程度与夹层液化程度、上覆层与液化层厚度比 λ_1 、液化层与下卧层厚度比 λ_2 密切相关:① λ_1 对场地卓越周期上升比 δ 的影响模式有三种:当 λ_2 值较小时, δ 随

着 λ_1 的增大而增大;当 λ_2 为中等值时, δ 随着 λ_1 的增大先增大后减小;当 λ_2 值较大时, δ 随着 λ_1 的增大而减小;②无论 λ_1 取值如何, δ 均随着 λ_2 的增大而增大,且 λ_1 值越小 δ 上升的幅度也就越大;③ δ 随着软弱夹层软化程度的加重而增大, δ 最小为26%,液化现象使得场地类别至少增加一类。

(2)液化后场地反应谱呈现短周期减震,长周期加震现象,加震、减震的分界线一般在0.61-0.88 s范围内;随着夹层液化程度的加重,夹层 λ_1 值和厚度 H_2 的增加,低频加震、高频减震作用逐渐加强,反应谱平台段所包含周期范围扩大,开始出现下降段的特征周期也随之延长,平台段反应谱值下降,减震、加震分界线周期值增大;对于 $P_2=1/100$,特征周期

变化范围一般在 0.85-2.35 s 内。

(3) 软弱夹层液化使得高土石坝坝顶加速度放大系数 β 明显增大, 软弱夹层越薄、位置越靠近上部, 放大作用越明显; 在夹层软化程度较低时, β 随 λ_1 增大而减小; 在夹层软化程度较深时, β 随 λ_1 增大而增大。随着 H_2 的加厚, β 呈现减小的趋势。虽然 β 随着软弱夹层软化程度 P_2^{-1} 的增加呈现下降的趋势, 但仅在较厚的夹层重度液化时, 对其上高土石坝地震响应较液化前有消弱的作用。

由于集中质量法及剪切楔法的局限性, 本文所考虑的深厚覆盖层仅局限于水平成层场地土, 并未涉及其他复杂地质地形情况。另外, 本文假设软弱夹层在震动之初就已经发生液化, 事实上软弱夹层液化一般发生在地震动中后期, 且越是弱震液化出现时间越靠后。关于其他复杂情况下深厚覆盖层液化现象及其对场地特性及其上建筑物地震响应的影响, 尚需进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 孙 锐, 赵倩玉. 液化与非液化场地加速度反应谱对比[J]. 岩土力学, 2014, 35(S1): 299-305.
SUN Rui, ZHAO Qian-yu. Comparison between acceleration response spectra on liquefaction and non-liquefaction sites [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35 (S1): 299-305.
- [2] Youd T L, Carter B L. Influence of soil softening and liquefaction on spectral acceleration[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(7): 811-825.
- [3] 孙 锐, 袁晓铭. 液化土层对地表加速度反应谱的影响[J]. 世界地震工程, 2004, 20(3): 33-38.
SUN Rui, YUAN Xiao-ming. effect of soil liquefaction on response spectrum of surface acceleration[J]. World Earthquake Engineering, 2004, 20(3): 33-38.
- [4] 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.
YANG Zhengquan, LIU Xiaosheng, ZHAO Jianming, et al. Study on ground seismic response analysis considering structural characteristics of deep overburden layer [J]. Journal of Hysroelectric Engineering, 2015, 34(1): 175-182.
- [5] 杨正权, 刘小生, 赵剑明, 等. 深厚覆盖层场地地震反应分析研究[C]. 第三届全国水工抗震防灾学术交流会, 2011: 487-492.
- [6] Liyanapathirana D S, Poulos H G. A numerical model for dynamic soil liquefaction analysis[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22(9): 1007-1015.
- [7] 孙 锐, 袁晓铭. 基于强震记录快速识别场地液化的频率下降率法[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1372-1379.
SUN Rui, YUAN Xiao-ming. The method of frequency decrease rate for fast identification of site liquefaction from surface acceleration records[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 29(9): 1372-1379.
- [8] 孙 锐, 袁晓铭. 场地液化对反应谱影响评价[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(S1): 173-180.
SUN Rui, YUAN Xiaoming. Evaluation for effect of site liquefaction on response spectrum[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(S1): 173-180.
- [9] 孙 锐, 袁晓铭. 液化土层地震动模拟计算方法及验证[J]. 岩土力学, 2007, 28(S1): 759-764.
SUN Rui, YUAN Xiao-ming. Method of simulating seismic ground motion in liquefiable soil layer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(S1): 759-764.
- [10] 陈龙伟, 袁晓铭, 孙 锐. 水平液化场地土表位移简化理论解答[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3823-3828.
CHEN Long-wei, YUAN Xiao-ming, SUN Rui. A simplified theoretical solution of displacement in horizontal liquefiable soil strata [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(12): 3823-3828.
- [11] 程祖锋, 李 萍, 李 燕, 等. 深圳地区部分岩土类型剪切波速与深度的关系分析[J]. 工程地质学报, 1997, 5(2): 163-168.
Cheng Zufeng, Li Ping, Li Yan, et al. Analysis of relationship between shear wave velocity and depth of some types of soil and rock in Shenzhen Region[J]. Journal of Engineering Geology, 1997, 5(2): 163-168.
- [12] 陈国兴, 徐建龙, 袁灿勤. 南京城区岩土体剪切波速与土层深度的关系[J]. 南京建筑工程学院学报, 1998, 45(2): 32-37.
Chen Guoxing, Xu Jianlong, Yuan Canqin. Relation between depth and shear wave velocity of soil and bed rock in Nanjing City [J]. Journal of Nanjing Institute of Technology, 1998, 45(2): 32-37.
- [13] 周燕国. 土结构性的剪切波速表征及对动力特性的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
Zhou Yan-guo. Shear wave velocity-based characterization of soil structure and its effects on dynamic behavior [D]. Hangzhou: Zhejiang Univerity, 2007.
- [14] 周燕国, 谭晓明, 陈 捷, 等. 易液化深厚覆盖层地震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] 丰万玲, 石兆吉. 判别水平土层液化势的孔隙水压力

- 分析方法[J].工程抗震,1988,(4):30-33.
- Feng Wanling, Shi Zhaoji. Pore water pressure analysis method for judging liquefaction potential of horizontal soil layer[J]. Earthquake Resistance of Engineering, 1988,(4):30-33.
- [16] YASUDA S, NAGASE H, KIKU H, et al. A simplified procedure for the analysis of the permanent ground displacement[C]. 3rd Japan-US Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction, Technical Report NCEER-91-0001,1991:225-236.
- [17] 郝冰,张彦,曲淑英,等.场地卓越周期的计算及其工程应用[J].水利与建筑工程学报,2016,14(5):144-150.
- HAO Bing, ZHANG Yan, QU Shuying, et al. Calculation of site predominant period and its engineering applications[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering,2016,14(5):144-150.
- [18] 顾淦臣,沈长松,岑威钧.土石坝地震工程学[M].北京:中国水利水电出版社,2009.
- GU Ganchen, Shen Changsong, Cen Weijun. Earthquake Engineering for Earthrock Dams [M]. Beijing: China Water and Power Press, 2009.
- [19] 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.
- YANG Fengchun. Study about seismic capacity and failure mode on hundred [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.
- [20] 於文欢.高土石坝地震动力特性分析[D].兰州:兰州交通大学,2015.
- YU Wenhuan. Study on dynamic characteristics of high earth-rockfill dam under earthquake[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2015.
- [21] 杨正权,刘小生,汪小刚,等.高土石坝地震动力反应特性大型振动台模型试验研究[J].水利学报,2014,45(11):1361-1372.
- YANG Zheng-quan, LIU Xiao-sheng, WANG Xiaogang, et al. Study on dynamic response characteristics of high rock-fill dam in earthquake by large-scale shaking table model tests[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2014,45(11):1361-1372.

Influence of liquefaction of deep overburden on the site predominant period and seismic response of the earth-rock dam

LIU Sheng-huan¹, SONG Zhi-qiang¹, WANG Fei¹, LIU Yun-he¹, LIU Chen²

(1.State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2.China Railway First Survey and Design Institute Group Co. Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: This paper investigates the influence of liquefaction of the weak interlayer on the vibration characteristics of the deep overburden and the seismic response of the high earth-rock dam. Initially, the deep overburden site with liquefiable interlayer is simplified into a three-particle system and the calculation formula of predominant period of site after liquefaction of soft interlayer is derived. Furthermore, the effects of the characteristic parameters of the liquefiable interlayer on the site predominant period and the response spectrum of the site are analyzed. Then, the effect of liquefaction of soft interlayer on acceleration amplification factor of the earth-rock dam on deep overburden is studied by shear wedge method. The results show that the liquification of the interlayer increases the site predominant period, and the degree of this increase is mainly related to the degree of softening of the liquefiable layer, the ratio of the overburden layer thickness to the thickness of the liquefiable layer λ_1 and the ratio of the liquefiable layer thickness to the thickness of the substratum layer λ_2 . Liquefaction adds at least one class to the site category. The surface acceleration spectrum after liquefaction presents the phenomenon that the short-period of the acceleration spectrum decreases while the long-period increases, the division line between increasing and decreasing is generally 0.6-0.9 s, and the platform section of the response spectrum is widened. Liquefaction makes acceleration amplification factor of the high earth-rock dam on overburden obviously increase, and the magnification decreases with the increase of degree of softening of the liquefiable layer. When the interlayer is thick and heavily liquefied, the seismic response is weaker than that before liquefaction.

Key words: deep overburden site; high earth-rock dam; liquefaction of the interlayer; predominant period of site; acceleration spectrum

作者简介: 刘升欢(1996-),男,硕士研究生。电话:18853856530;E-mail:898541905@qq.com

通讯作者: 宋志强(1981-),男,博士,教授,博士生导师。E-mail:szhiq2004@126.com