地震波斜入射对高面板坝地震反应的影响。

岑威钧1.2,袁丽娜1,袁翠平3,张自齐1

(1.河海大学水利水电学院,江苏南京 210098; 2.水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室,江苏南京 210024;3.南京市水利规划设计院有限责任公司,江苏南京 210006)

摘要:为研究地震波斜入射对高面板坝地震反应的影响,根据地震波动入射理论,采用 FORTRAN 进行波动荷载的编程计算,并与大型通用有限元软件 ADINA 相结合,实现基于黏弹性人工边界的 地震波斜入射,研究 P 波和 SV 波分别以不同角度入射对高面板堆石坝地震反应的影响。结果表明,地震波斜入射时大坝地震动反应与垂直入射时明显不同,常规垂直入射的结果偏于不安全,因 此在高面板坝地震反应分析和抗震设计中应考虑地震波斜入射的影响。

关键词: 地震波斜入射; 地震反应; 黏弹性边界; 面板坝

中图分类号: TV641.1; TV312 文献标志码:A 文章编号: 1000-0844(2015)04-0926-07 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.04.0926

Influence on Seismic Response of High Concrete Face Rockfill Dams Due to Obliquely Incident Seismic Waves

CEN Wei-jun^{1,2}, YUAN Li-na¹, YUAN Cui-ping³, ZHANG Zi-qi¹

(1.College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China; 2.Key Laboratory of Failure Mechanism and Safety Control Techniques of Earth-rock Dam of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210024, Jiangsu, China; 3.Nanjing Water Planning and Designing Institute Co.Ltd., Nanjing 210006, Jiangsu, China)

Abstract: Oblique incidence plays a vital role in spatial variation, which has a considerable influence on high concrete face rockfill dams. This study uses seismic wave incidence theory to determine the influence of oblique incidence seismic waves on the seismic response of high dams. FOR-TRAN programming is applied to calculate the wave load, and finite element software ADINA is employed to achieve the oblique incidence seismic wave input based on the viscous-spring artificial boundary. Simultaneously, the impact of P wave and SV wave that have different incident angles is analyzed with respect to the seismic response of a high concrete face rockfill dam. From these results, it can be determined that the oblique incidence seismic wave is significantly different from the normal incidence. With an increase in the incident angle of P wave, the peak acceleration and peak displacement in the horizontal components gradually increase, while the peak acceleration and the peak displacement in the vertical components gradually reduce; this is opposite to the case of the incident SV wave. Therefore, the security of the dam cannot be ensured if only the influence of normal incidence is considered, and it is necessary to consider the oblique incidence of seismic waves in seismic response analysis and the seismic design of high concrete face rockfill dams.

Key words: obliquely incident seismic wave; seismic response; viscous-spring boundary; concrete

① 收稿日期:2014-11-27

基金项目:长江科学院开放研究基金(CKWV2012307/KY);水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室开放研究基金 (YK914019);国家自然科学基金(51009055);江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介:岑威钧(1977-),男,博士,副教授,主要从事土石坝工程结构安全分析及水工建筑物渗控研究。E-mail: hhucwj @163.com。

face rockfill dam

0 引言

随着我国西南地震区高土石坝建设的不断推 进,强震作用下高面板坝抗震安全问题受到广泛关 注。土石坝抗震分析中合理的地震动输入和相应的 地震动分析方法是大坝动力反应正确分析的关键所 在[1]。目前带地基的土石坝地震反应分析大多采用 传统的无质量地基固定边界模型,这样将导致地震 散射波无法透过坝基截断边界而在边界处发生波的 反射,反射波会再次作用于大坝,使大坝地震反应失 真。此外各点地震动输入基本采用同相位、等振幅、 均匀输入的方式。这对于坝址附近的深源地震是适 用的,此时入射的地震波可假定为垂直向上的平面 剪切波或平面压缩波。但当坝址附近发生浅源地震 时,地震波并非直入射。由于高土石坝为大跨度结 构,地震波斜入射引起的地面运动的非一致变化对 大坝地震反应有较大影响[2-4],因此有必要研究地震 波斜入射角度对土石坝地震反应的影响。为克服传 统方法的不足,本文以地震区某高面板坝为例,在坝 基截断边界处设置黏弹性人工边界,以考虑高坝大 范围坝基远域能量的逸散,即地基辐射阻尼。同时 采用基于黏弹性人工边界的地震波斜入射方式,对 坝基边界进行地震动非均匀输入,研究地震波不同 入射角度下面板坝的地震反应特性及变化规律。

1 地震波斜入射方法

对于地震动输入问题,通常在截断边界上采用 黏弹性边界和波场分解相结合的方法。通过将人工 边界的总波场分解为自由场和散射场来实现地震波 斜入射,并将自由场直接转化为应力施加在人工边 界上,而结构内部由近场进入远域的外行散射波由 黏弹性边界模拟。限于篇幅,有关黏弹性边界的相 关理论本文不再赘述,参考相关文献[5-7]。

半空间自由场在地震动作用下人工边界上任一 节点 *i* 的作用荷载为^[8]

$$F_{ij} = K_{ij}u_{ij} + C_{ij}u_{ij} + \sigma_{ij}A \tag{1}$$

式中:*F_{ij}为边界上i*点在*j*方向上的等效荷载;A 为节点*i*所代表的等效面积;*K_{ij}和C_{ij}分别为弹簧* 刚度和阻尼系数。

边界节点 *i* 的切向 *ξ* 和法向 η 等效应力分别表 示为

$$\sigma_{i\xi}(t) = G \left[u_{i\xi,\eta}(t) + u_{i\eta,\xi}(t) \right] = \rho c_{S}^{2} \left[u_{i\xi,\eta}(t) + u_{i\eta,\xi}(t) \right]$$
(2)

$$\sigma_{i\eta}(t) = (\lambda + 2G)u_{i\eta,\eta}(t) + \lambda \left[u_{i\eta,\eta}(t) + u_{i\xi,\xi}(t)\right]$$
$$= \rho c_{\rm P}^2 \left[u_{i\eta,\eta}(t) + \frac{\mu}{1-\mu} u_{i\xi,\xi}(t)\right]$$
(3)

式中: c_{s} 和 c_{P} 分别为 P 波和 SV 波的传播波速; ρ 和 μ 分别为介质密度和泊松比; $u_{i\xi,\eta}(t)$ 为自由场边 界节点i在 ξ 方向上关于 η 方向的偏导数,其余类 似。

1.1 P波斜入射下的等效应力计算

当 P 波以角度 α_1 入射时,反射 SV 波的角度为 β_1 ,反射 P 波和反射 SV 波的幅值放大系数分别为 A_1 和 A_2 。入射 P 波引起的位移时程为 $u_P(t)$,根 据式(2)、式(3),可求得计算模型边界上的等效应 力。地震波斜入射计算模型如图 1 所示。



图1 地震波斜入射计算模型

Fig.1 Calculation model subjected to obliquely incident waves

左侧边界上的等效应力为

$$\sigma_{ix}^{-x} = \frac{\lambda + 2G\sin^2\alpha_1}{c_P} \dot{u}_P (t - \Delta t_P^1) + A_1 \frac{\lambda + 2G\sin^2\alpha_1}{c_P} \cdot \dot{u}_P (t - \Delta t_P^2) + A_2 \rho c_S \sin 2\beta_1 \dot{u}_P (t - \Delta t_P^3)$$

$$\sigma_{iy}^{-x} = \frac{G\sin 2\alpha_1}{c_P} \dot{u}_P (t - \Delta t_P^1) - A_1 \frac{G\sin 2\alpha_1}{c_P} \cdot \dot{u}_P (t - \Delta t_P^3) + A_2 \sigma c_S \sin 2\beta_1 \dot{u}_P (t - \Delta t_P^3)$$

 $u_{P}(t - \Delta t_{P}^{2}) - A_{2}\rho c_{s} \cos 2\beta_{1} u_{P}(t - \Delta t_{P}^{3})$ (4) 式中: $\sigma_{ix}^{-x} \pi \sigma_{iy}^{-x} \beta$ 别为左侧边界节点*i*的水平向和 竖向荷载,下标*x*和*y*分别代表水平向和竖向,上 标代表左侧节点所在人工边界的外法线方向,与坐 标轴方向相反取为负号; $\Delta t_{P}^{1} \sim \Delta t_{P}^{3}$ 分别为左侧边界 入射 P 波、反射 P 波和反射 SV 波的延迟时间。

模型底侧边界节点的等效应力为

A

$$\sigma_{ix}^{-y} = \frac{G\sin 2\alpha_1}{c_P} \dot{u}_P(t - \Delta t_P^4) - A_1 \frac{G\sin 2\alpha_1}{c_P} \cdot \dot{u}_P(t - \Delta t_P^5) - A_2\rho c_S \cos 2\beta_1 \dot{u}_P(t - \Delta t_P^6) \\ \sigma_{iy}^{-y} = \frac{\lambda + 2G\cos^2\alpha_1}{c_P} \dot{u}_P(t - \Delta t_P^4) + \frac{\lambda + 2G\cos^2\alpha_1}{c_P} \dot{u}_P(t - \Delta t_P^5) - A_2\rho c_S \sin 2\beta_1 \dot{u}_P(t - \Delta t_P^6)$$

(5)

2015 年

式中: σ_{ix}^{-y} 和 σ_{iy}^{-y} 分别为底侧边界节点*i*的水平向和 竖向荷载; $\Delta t_{P}^{4} \sim \Delta t_{P}^{6}$ 分别为底侧边界入射 P 波、反 射 P 波和反射 SV 波的延迟时间。

模型的右侧边界节点的等效应力为

$$\sigma_{ix}^{x} = -\frac{\lambda + 2G\sin^{2}\alpha_{1}}{c_{P}}\dot{u}_{P}(t - \Delta t_{P}^{7}) - \frac{1}{c_{P}}\dot{u}_{P}(t - \Delta$$

$$A_1 \frac{\lambda + 2G\sin^2 \alpha_1}{c_P} \dot{u}_P (t - \Delta t_P^{\$}) - A_2 \rho c_S \sin 2\beta_1 \dot{u}_P (t - \Delta t_P^{\$})$$

$$\sigma_{iy}^{x} = -\frac{G\sin 2\alpha_{1}}{c_{P}}\dot{u}_{P}(t - \Delta t_{P}^{7}) + A_{1}\frac{G\sin 2\alpha_{1}}{c_{P}}\dot{u}_{P}(t - \Delta t_{P}^{8}) + A_{2}\rho c_{S}\sin 2\beta_{1}\dot{u}_{P}(t - \Delta t_{P}^{9})$$
(6)

式中: σ_{ix}^{x} 和 σ_{iy}^{x} 为右侧边界节点*i*的水平向和竖向荷载; $\Delta t_{P}^{2} \sim \Delta t_{P}^{2}$ 分别为右侧边界入射 P 波、反射 P 波和反射 SV 波的延迟时间。

1.2 SV 波斜入射下的等效应力计算

当 SV 波以角度 α_2 入射时,P 波的反射角度为 β_2 ,反射 P 波和反射 SV 波的幅值放大系数分别为 A'_1 和 A'_2 。入射 SV 波引起的位移时程为 $u_s(t)$ 。 根据式(2)和式(3)可求得模型边界上的等效应 力^[9]。地震波斜入射计算模型与图 1 相同。

左侧边界上的等效应力为

$$\sigma_{ix}^{-x} = \rho c_{\mathrm{S}} \sin 2\alpha_{2} \dot{u}_{\mathrm{S}} (t - \Delta t_{\mathrm{SV}}^{1}) - A_{1}^{'} \frac{\lambda + 2G \sin^{2} \beta_{2}}{c_{\mathrm{P}}} \cdot \frac{1}{c_{\mathrm{P}}} \cdot \frac{1}{c_{\mathrm{SV}}} \left(t - \Delta t_{\mathrm{SV}}^{2} \right) - A_{2}^{'} \rho c_{\mathrm{S}} \sin 2\alpha_{2} \dot{u}_{\mathrm{S}} (t - \Delta t_{\mathrm{SV}}^{3}) - A_{2}^{'} \rho c_{\mathrm{S}} \sin 2\alpha_{2} \dot{u}_{\mathrm{S}} (t - \Delta t_{\mathrm{SV}}^{3}) + A_{1}^{'} \frac{G \sin 2\beta_{2}}{c_{\mathrm{P}}} \cdot \frac{1}{c_{\mathrm{P}}} \cdot \frac{1}{c_{\mathrm{P}}} \cdot \frac{1}{c_{\mathrm{P}}} \left(t - \Delta t_{\mathrm{SV}}^{1} \right) + A_{1}^{'} \frac{G \sin 2\beta_{2}}{c_{\mathrm{P}}} \cdot \frac{1}{c_{\mathrm{P}}} \cdot \frac{1}{c_$$

 $\dot{u}_{s}(t - \Delta t_{sv}^{2}) + A'_{2}\rho c_{s}\cos 2\alpha_{2}\dot{u}_{s}(t - \Delta t_{sv}^{3})$ (7) 式中: σ_{ix}^{-x} 和 σ_{iy}^{-x} 分别为左侧边界节点*i*的水平向和 竖向荷载: $\Delta t_{sv}^{1} \sim \Delta t_{sv}^{3}$ 分别为左侧边界入射 SV 波、 反射 P 波和反射 SV 波的延迟时间。

模型底侧边界的等效应力

$$\sigma_{ix}^{-y} = \rho c_{\rm S} \cos 2\alpha_2 \dot{u}_{\rm S} (t - \Delta t_{\rm SV}^4) + A_1^{\prime} \frac{G \sin 2\beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm S} (t - \Delta t_{\rm SV}^5) + A_2^{\prime} \rho c_{\rm S} \cos 2\alpha_2 \dot{u}_{\rm S} (t - \Delta t_{\rm SV}^6) \\ \sigma_{iy}^{-y} = -\rho c_{\rm S} \sin 2\alpha_2 \dot{u}_{\rm S} (t - \Delta t_{\rm SV}^4) - A_1^{\prime} \frac{\lambda + 2G \cos^2 \beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm SV} + \frac{1}{2} \frac{\lambda + 2G \cos^2 \beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm SV} + \frac{1}{2} \frac{\lambda + 2G \cos^2 \beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm SV} + \frac{1}{2} \frac{\lambda + 2G \cos^2 \beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm SV} + \frac{1}{2} \frac{\lambda + 2G \cos^2 \beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm SV} + \frac{1}{2} \frac{\lambda + 2G \cos^2 \beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm SV} + \frac{1}{2} \frac{\lambda + 2G \cos^2 \beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm SV} + \frac{1}{2} \frac{\lambda + 2G \cos^2 \beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm SV} + \frac{1}{2} \frac{\lambda + 2G \cos^2 \beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm SV} + \frac{1}{2} \frac{\lambda + 2G \cos^2 \beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm SV} + \frac{1}{2} \frac{\lambda + 2G \cos^2 \beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm SV} + \frac{1}{2} \frac{\lambda + 2G \cos^2 \beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm SV} + \frac{1}{2} \frac{\lambda + 2G \cos^2 \beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm SV} + \frac{1}{2} \frac{\lambda + 2G \cos^2 \beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm SV} + \frac{1}{2} \frac{\lambda + 2G \cos^2 \beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm SV} + \frac{1}{2} \frac{\lambda + 2G \cos^2 \beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm SV} + \frac{1}{2} \frac{\lambda + 2G \cos^2 \beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm SV} + \frac{1}{2} \frac{\lambda + 2G \cos^2 \beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm SV} + \frac{1}{2} \frac{\lambda + 2G \cos^2 \beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm SV} + \frac{1}{2} \frac{\lambda + 2G \cos^2 \beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm SV} + \frac{1}{2} \frac{\lambda + 2G \cos^2 \beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm SV} + \frac{1}{2} \frac{\lambda + 2G \cos^2 \beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm SV} + \frac{1}{2} \frac{\lambda + 2G \cos^2 \beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm SV} + \frac{1}{2} \frac{\lambda + 2G \cos^2 \beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm SV} + \frac{1}{2} \frac{\lambda + 2G \cos^2 \beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm SV} + \frac{1}{2} \frac{\lambda + 2G \cos^2 \beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm SV} + \frac{1}{2} \frac{\lambda + 2G \cos^2 \beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm SV} + \frac{1}{2} \frac{\lambda + 2G \cos^2 \beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm SV} + \frac{1}{2} \frac{\lambda + 2G \cos^2 \beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm SV} + \frac{1}{2} \frac{\lambda + 2G \cos^2 \beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm SV} + \frac{1}{2} \frac{\lambda + 2G \cos^2 \beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm SV} + \frac{1}{2} \frac{\lambda + 2G \cos^2 \beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm SV} + \frac{1}{2} \frac{\lambda + 2G \cos^2 \beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm SV} + \frac{1}{2} \frac{\lambda + 2G \cos^2 \beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm SV} + \frac{1}{2} \frac{\lambda + 2G \cos^2 \beta_2}{c_{\rm P}} \cdot \dot{u}_{\rm SV} + \frac{1}{2} \frac{\lambda$$

 $\dot{u}_{s}(t \rightarrow \Delta t_{sv}^{s}) + A'_{2}\rho c_{s}\sin 2\alpha_{2}\dot{u}_{s}(t \rightarrow \Delta t_{sv}^{s})$ (8) 式中: σ_{ix}^{-y} 和 σ_{iy}^{-y} 分别为底侧边界节点*i*的水平向和 竖向荷载: $\Delta t_{sv}^{4} \sim \Delta t_{sv}^{6}$ 分别为底侧边界入射 SV 波、

反射 P 波和反射 SV 波的延迟时间。 模型右侧边界的等效应力为

$$\sigma_{ix}^{x} = -\rho c_{S} \sin 2\alpha_{2} \dot{u}_{S} (t - \Delta t_{SV}^{7}) + A_{1}^{'} \frac{\lambda + 2G \sin^{2}\beta_{2}}{c_{P}}$$

$$\dot{u}_{\rm S}(t - \Delta t_{\rm SV}^{\rm s}) + A_2^{\prime} \rho c_{\rm S} \sin 2\alpha_2 \dot{u}_{\rm S}(t - \Delta t_{\rm SV}^{\rm s})$$

$$\sigma_{iy}^{x} = -\rho c_{\rm S} \cos 2\alpha_2 \dot{u}_{\rm S}(t - \Delta t_{\rm SV}^{\rm 7}) - A_1 \frac{G \sin 2\beta_2}{c_{\rm P}} \bullet$$

 $\dot{u}_{s}(t - \Delta t_{sv}^{s}) - A_{2}^{'}\rho c_{s}\cos 2a_{2}\dot{u}_{s}(t - \Delta t_{sv}^{s})$ (9) 式中: $\sigma_{ix}^{x} \pi \sigma_{iy}^{x}$ 为右侧边界节点i的水平向和竖向荷载; $\Delta t_{sv}^{7} \sim \Delta t_{sv}^{9}$ 分别为右侧边界入射 SV 波、反射 P 波和反射 SV 波的延迟时间。以上各式中上标的意 义与 P 波入射时相同。

2 地震波斜入射下面板坝地震反应分析

2.1 计算模型

某地震区面板堆石坝,最大坝高为132.50 m, 坝顶高程156.80 m,坝顶宽10 m,上游坝坡坡比1 :1.40,下游坡坡比1:1.57。坝址地震烈度 Ш度。 混凝土趾板置于弱风化基岩上,河床部位除趾板及 下游60 m范围内开挖至基岩外,其余置于清理后 的砂砾石覆盖层上,两岸置于经清理后的基岩上。 大坝有限元计算模型如图2所示。



图 2 大坝有限元计算模型

Fig.2 FEM calculation model for the dam

混凝土材料采用线弹性模型,弹性模量 28 GPa,泊松比 0.167。坝体堆石料动力本构模型采用 等效线性黏弹性模型¹⁰,在 ADINA 中进行二次开 发,其中各坝料最大剪切模量的模量系数和指数见 表 1。

表 1 大坝土石料动力本构模型计算参数 Table 1 Calculation parameters of the dynamic constitutive model for dam materials

材料	模量系数 K	指数 n
坝体堆石料	1 400	0.56
坝体砂砾石料	1 350	0.51
垫层料	1 650	0.67
过渡层料	1 500	0.69
砂砾石覆盖层	1 250	0.59

采用 ElCentro 地震波作为输入地震动荷载,加速度时程曲线见图3,地震波反应谱见图4。地震动激励总时间为20s,步长为0.02,入射P波和入射 SV 波分别为竖向和水平向地震波,其加速度峰值分别为 2.06 m/s² 和 2.10 m/s²,地震动激励由模型 左下方输入。









2.2 结果分析

高面板堆石坝在受到地震动激励时,随着入射 角度的增加坝体的地震反应不同。下面主要从坝体 的加速度和动位移极值、加速度反应谱和放大系数 来研究不同入射角度下坝体的动力反应。

2.2.1 P波入射时的大坝地震反应

P 波地震动激励方向与竖向夹角分别为 0°、 15°、30°、45°、60°、75°和 90°。当 P 波以不同角度入 射时,坝体的加速度和动位移极值见表 2。

表 2 P 波入射时坝体加速度和动位移极值

 Table 2
 Extreme values of acceleration and dynamic displacement of the dam during the incidence of P wave

入射角度 -	加速度/(m・s ⁻²)		动位移/cm	
	水平向	竖向	水平向	竖向
0°	1.990	3.056	0.162	3.521
15°	2.016	2.736	1.193	3.354
30°	2.297	2.333	2.202	2.904
45°	2.386	1.946	2.967	2.265
60°	2.962	1.755	3.405	1.603
75°	3.035	1.608	3.455	1.050
90°	3.848	1.560	5.530	0.877

P波入射时随着入射角度的增加,大坝水平向 地震反应逐渐增大,而竖直向地震反应逐渐减小,这 是因为P波对水平向地震动的贡献随入射角度的 增加而增大,对竖向地震动的贡献随入射角度的增 加而减小。当入射角度为90°时,水平向加速度极 值较垂直入射时增加了1.858 m/s²,竖向加速度极 值较垂直入射时减小了1.496 m/s²。坝体动位移与 加速度极值的变化规律一致。当入射角度为90° 时,水平向动位移极值较垂直入射时增加5.368 cm,竖向动位移极值较垂直入射时减小了2.644 cm。其中坝体的加速度和动位移极值皆在坝体上 部位置,随着入射角度的不同,动位移极值的位置也 有差别。限于篇幅仅给出P波以0°、30°、60°和90° 角入射时的坝体竖向动位移等值线图(图5)。

图 6 给出 P 波垂直(0°)、30°以及 60°入射时坝 顶中心 A 点的加速度反应谱。水平向加速度反应 谱幅值的最大值出现在周期为0.3s左右,并且反应 谱幅值随着入射角度的增加而逐渐增大,在其他时 段内坝顶加速度反应谱幅值随入射角度变化不明 显;竖向加速度反应谱幅值的最大值在周期为 0.2 s 左右处,并随入射角度的增加而逐渐减小,在其他时 段内入射角度对坝顶加速度反应谱幅值影响较小。 因此入射角度对坝体顶部的水平向和竖向加速度反 应谱幅值都有一定的影响。

在面板表面上选取特征点 B、C 和 D 点,位置 见图 3。对于 P 波,重点讨论竖向加速度放大系数 与入射角度的关系,这 3 个特征点的结果见图 7。



图 5 P波不同入射动位移等值线图(单位:cm)

Fig.5 Dynamic displacement contour of P wave with different incident angles (Unit:cm)





加速度放大系数定义为某一角度入射情况下该点的 竖向加速度极值与入射 P 波加速度最大竖向分量 的比值。由于地震波以 90°角入射时,竖向分量为 0,因此不考虑 90°入射的加速度放大系数。由图 7 可见,同一入射角度下,随着特征点高程的增加,竖 向加速度放大系数逐渐增大,并且离坝顶越近加速 度放大越明显。不同高程特征点的放大系数变化趋 势和幅度稍有不同。B 点的放大系数随入射角度单 调增大,在入射角度为 75°时是垂直入射的 2.13 倍; C 点和D 点的放大系数呈先减小后增大的趋势,在



图 7 面板特征点竖向加速度放大系数与入射 角度之间的关系曲线

Fig.7 Relationship curves of vertical acceleration amplification coefficient and incident angle of P wave of points B, C and D

30°入射时达到最小值,在75°入射时放大系数分别 是垂直入射的1.68倍和1.45倍。P波以大角度入 射时竖向加速度放大系数的变幅较大,这主要是由 于随入射角度的增加地震动非一致特性就越明显, 以至于入射角度较大时加速度放大系数较大。

2.2.2 SV 波入射时的大坝地震反应

根据坝基材料参数计算可得 SV 波斜入射的临 界角度约为 37°^[11],因此 SV 波斜入射时的选择角 度应小于此角度。表 3 为 SV 波以不同角度入射时 坝体加速度和动位移极值。

当 SV 波入射时,随着入射角度的增加,水平向 加速度和动位移极值逐渐减小,竖直向加速度和动 位移极值逐渐增大,主要是因为 SV 波对水平向地震 动的贡献随入射角度的增加逐渐减小,而对竖向地震 动的贡献随入射角度的增加而增大。其中坝体的最 大加速度和动位移均在坝体顶部,SV 波以 0°、10°、20° 和 30°角度入射的动位移等值线图如图 8 所示。



图 8 SV 波不同入射动位移等值线图(单位:cm) Fig.8 Dynamic displacement contour of SV wave with different incident angles (Unit:cm)

表 3 SV 波入射坝体加速度和动位移极值

 Table 3
 Extreme values of acceleration and dynamic displacement

入射角度	加速度/(m・s ⁻²)		动位移/cm	
	水平向	竖向	水平向	竖向
0°	6.332	2.341	15.540	0.563
5°	5.525	2.434	15.430	2.369
10°	4.845	2.604	15.110	4.318
15°	4.786	2.631	14.580	6.244
20°	4.683	2.801	13.890	8.015
25°	4.554	3.175	13.060	9.594
30°	4.391	3.581	12.280	10.870
35°	4.371	3.590	10.230	11.400

of the dam during the incidence of SV wave

图 9 给出了 SV 波垂直入射、15°入射以及 30° 入射时坝顶中心 A 点的加速度反应谱。当 SV 波 入射时,水平向加速度反应谱幅值的最大值在周期 为 0.5 s 左右处,并且随着入射角度的增加幅值逐渐 减小,而竖向加速度反应谱幅值整体逐渐增大。因 此入射角度的变化对坝体顶部加速度反应有一定影 响,尤其对竖向加速度反应影响更为显著。

图 10 为面板表面特征点 B、C 和 D 点的水平 向加速度放大系数与入射角度的关系曲线。加速度 放大系数定义为该点的水平向加速度极值与入射地 震波加速度水平向分量的比值。同一入射角度下,



图 9 SV 波不同入射角度加速度反应谱 Fig.9 Acceleration response spectrums of SV wave with different incident angles

随着特征点高程的增加水平向加速度放大系数逐渐 增大;同一特征点随着入射角度的增加水平向加速 度放大系数逐渐增大,B点与C点在大角度入射时 加速度放大系数增加比较明显,D点由于位于坝体 底部,加速度放大系数变化不大。入射角度为 35° 时,B点和C点的水平向加速度放大系数分别为垂 直入射的 1.24 倍和 1.31 倍,而 D 点变化不大。这 主要是由于大角度入射时地震动非一致特性更明 显,使得加速度放大系数变幅增大。

3 结语

地震波斜入射时,面板坝的地震反应与垂直入



Fig.10 Relationship curves of horizontal acceleration amplification coefficient and incident angle of SV wave of points B, C and D

射时明显不同。随着入射角度的增加,P波入射时 面板坝的竖向地震反应逐渐减小,而水平向逐渐增 大;SV 波入射时与P波规律正好相反。此外,与垂 直入射相比,地震波斜入射对坝顶加速度反应谱幅 值也有很大影响,地震波以不同角度斜入射对坝顶 区域的局部稳定性不利。面板不同部位的水平向和 竖向加速度放大系数也随着入射角度的变化而变 化。因此只有合理考虑地震波的入射角度问题,才 能更加准确地反映高面板堆石坝的地震反应特性。

参考文献(References)

[1] 陈厚群.坝址地震动输入机制探讨[J].水利学报,2006,37 (12):1417-1423.

CHEN Hou-qun. Discussion on Seismic Input Mechanism at Dam Site[J].Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(12): 1417-1423. (in Chinese)

[2] 赵剑明,刘小生,陈宁,等.强震区高面板堆石坝抗震安全性评价[J].西北地震学报,2011,33(3):233-238.

ZHAO Jian-ming,LIU Xiao-sheng, CHEN Ning, et al.Seismic Safety Evaluation for High Concrete Faced Rocked Dam in Strong Earthquake Area[J].Northwestern Seismological Journal,2011,33(3):233-238.(in Chinese)

[3] 吴兆营.倾斜入射条件下土石坝最不利地震动输入研究[D].哈 尔滨:中国地震局工程力学研究所,2007.

WU Zhao-ying.Study of the Worst Seismic Motion Input for Earth-dam Seismic Stability under the Oblique Incidence Condition[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2007. (in Chinese) [4] 张树茂,周晨光,邹德高,等.地震波倾斜入射对土石坝动力反应的影响[J].水电能源科学,2014,32(8):72-75.

ZHANG Shu-mao,ZHOU Chen-guang,ZOU De-gao,et al.Influence of Oblique of Seismic Waves on Dynamic Response to Rock-fill Dam[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(8): 72-75. (in Chinese)

- [5] Deeks A J, Randolph M F. Axisymmetric Time-domain Transmitting Boundaries [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1994,120(1):25-42.
- [6] 刘晶波,王振宇,杜侈力,等.波动问题中的三维时域粘弹性人 工边界[J].工程力学,2005,22(6):46-51.
 LIU Jing-bo, WANG Zhen-yu, DU Xiu-li, et al. Three-dimensional Visco-Elastic Artificial Boundaries in Time Domain for Wave Motion Problems[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22 (6):46-51.(in Chinese)
- [7] 杜侈力,赵密,王进廷.近场波动模拟的人工应力边界条件[J]. 力学学报,2006,38(1):49-56.
 DU Xiu-li, ZHAO Mi, WANG Jin-ting. A Stress Artificial Boundary in FEA for Near-field Wave Problem[J].Journal of Mechanics,2006,38(1):49-56.(in Chinese)
- [8] 赵建锋,杜修力,韩强,等.外源波动问题数值模拟的一种实现 方式[J].工程力学,2007,24(4):52-58.
 ZHAO Jian-feng, DU Xiu-li, HAN Qiang, et al. An Approach to Numerical Simulation for External Source Wave Motion[J].
 Engineering Meehanies,2007,24(4):52-58.(in Chinese)
- [9] 赵源,杜修力,李立云.地震动入射角度对地下结构地震响应的 影响[J].防灾减灾工程学报,2010,30(6):624-630. ZHAO Yuan,DU Xiu-li,LI Li-yun.The Effect of Obliquely Incident Seismic Waves on Dynamic Response of Underground Structures[J].Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2010,30(6):624-630.(in Chinese)
- [10] 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 Gan-chen, SHEN Chang-song, CEN Wei-jun. Earthquake Engineering for Earth-rock Dams[M]. Beijing: China Water Resource and Hydropower Press,2009.(in Chinese)
- [11] 赵密,杜侈力,刘晶波,等.P-SV 波斜入射时成层半空间自由 场的时域算法[J].地震工程学报,2013,35(1):84-90. ZHAO Mi,DU Xiu-li,LIU Jing-bo,et al.Time-domain Method for Free Field in Layered Half Space under P-SV Waves of Oblique Incidence[J].China Earthquake Engineering Journal, 2013,35(1):84-90.(in Chinese)