

文章编号: 1000-7598 (2010) 05-1368-07

传递函数分析在边坡振动台模型试验的应用探讨

蒋良潍, 姚令侃, 吴 伟, 徐光兴

(西南交通大学 土木工程学院道路与铁道工程系, 成都 610031)

摘 要: 传递函数分析对获取振动系统的动力特性参数及估算动力响应具有重要意义。边坡地震模拟振动台模型试验可求算两种传函: 反映边坡各点的场地地震动特征的绝对加速度传函(基于测点实测加速度时程)和反映坡体本身振动性质的相对加速度传函(基于测点与坡脚即台面间的实测加速度相对时程)。以弹性体振动方程分析和试验实测, 探讨了边坡振动台模型试验中动力特性参数计算的传函选择和以传递函数对动力响应的估算, 得出结论: (1) 不同于机械模态分析(以绝对传函的模和虚部计算动力特性参数具有等价性), 对于边坡模型试验, 绝对传函实部和模混入了台面加速度影响, 以绝对传函虚部或相对传函虚部才能正确计算动力特性参数; (2) 传递函数和台面输入波形 Fourier 谱的逐频相乘得到动力响应估算谱, 与测点实测响应 Fourier 谱吻合较良好, 这种估算方法有助于对不同地震波作用下的边坡动力响应作出总体评价, 并指导模型试验中地震波形的合理选取。

关 键 词: 边坡; 振动台; 模型试验; 传递函数; 动力特性; 频域响应

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Transfer function analysis of earthquake simulation shaking table model test of side slopes

JIANG Liang-wei, YAO Ling-kan, WU Wei, XU Guang-xing

(Department of Road & Railway Engineering, School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Transfer function analysis is an important method for obtaining dynamic characteristics parameters and estimating predictive dynamic response of vibration system. Through earthquake simulation shaking table model test of side slopes, transfer function of absolute acceleration and of relative acceleration could be obtained, which reflected the ground motion and the slope body's seismic vibration respectively. Based on vibration equation analysis of elastomer and its demonstration model test of a side slope, calculation of dynamic characteristics parameters and predictive estimation of seismic response with transfer function analysis were studied. Two pieces of conclusion have been reached: First, in calculation of dynamic characteristics parameters, using the imaginary part of absolute or relative acceleration transfer function could get more reasonable and accurate result than using amplitude and real part. Second, the predictive Fourier spectra of slope's seismic response could be estimated by multiplication of transfer function and Fourier spectra of input seismic excitation in frequency domain, and the estimation results was in accordance with model test data. It means that transfer function analysis is not only conducive to investigating slope's essential response feature under complicated and various seismic motions, but also help to designing the shaking table board's loading waveform of tests.

Key words: side slope; shaking table; model test; transfer function; dynamic characteristics; frequency domain response

1 前 言

随着大型基础设施及道路工程在高地震烈度区逐步兴建, 地震引起的边坡稳定性问题将日益凸现^[1-2]。5·12 汶川大地震震害暴露了高地震烈度区边坡稳定对道路等生命线工程的极度重要性, 地震

重灾区 14 个县(市)主要公路沿线大量崩塌, 滑坡使得公路瘫痪, 极大阻碍和延缓救援队伍和工程机械进入灾区, 加大了救灾难度。

地震作用下边坡动态特性的研究, 虽然理论分析和数值计算方面取得了较多有意义成果, 但由于动力问题的复杂性和岩土体的非线性特性, 利用振

收稿日期: 2008-12-23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)“汶川地震次生山地灾害形成机理与风险控制”(No. 2008CB425802); 中国博士后科学基金面上资助项目(No. 20070411163); 高等学校博士点科研基金新教师项目资助课题(No. 20070613011); 西藏自治区交通厅科技项目(No. XZJTKJ2006-01)。

第一作者简介: 蒋良潍, 男, 1974 年生, 博士, 博士后流动站在站人员(交通运输工程), 从事道路岩土工程、地震工程工作。

E-mail: jiangliangwei@swjtu.cn

动台模型试验进行物理模拟成为必不可少的研究和校核手段^[3-6]。地震模拟振动台试验的模型尺寸大、地震动输入参数及波形重复性可控,在岩土地震工程及土-结相互作用研究中应用广泛^[6-8]。

边坡动力响应与动荷载(强度、频谱)和自身动力特性(自振频率、阻尼)均有关。道路工程边坡坡形、土性复杂多样,尤其所受地震作用的波形幅值、频谱等均具一定非确定性,无论模型试验,还是数值分析,输入地震波形均只能是随机过程的某几个确定性实现,因此坡体动力响应总体规律应更从内因加以把握,即以传递函数(也称频率响应函数)所描述的坡体自身的动力特性。传递函数决定了地震动输入和响应输出的一种对应关系^[9-10],在复杂的非确定性地震动输入下,边坡的动力响应总体规律与自身传递函数密切相关。同时,自振频率、阻尼比等动力特性参数以传函辨识得到,对动力数值模拟中的参数取值也非常重要。

由加速度传感器量测原理,模型试验中测点的加速度实际是以试验室地面为参照系的绝对加速度^[11]。绝对加速度时程确定某点的场地地震动,如同于地震区划,决定该点对其上构筑物的地震输入。但对于边坡体本身,作为受振主体,振动响应基于边坡体的动力形变,即参照系应固定于坡脚(模型试验中为台面)并随台面一起运动。从坐标变换观点,坡体与坡脚间的相对加速度相当于将坡脚视为固定不动下的坡体振动加速度“纯粹”响应。

与此对应,根据试验可求算两种传递函数:绝对加速度传函和相对加速度传函。由于动力特性参数是由传函分析而得到,有必要针对这种“坐标变换”的影响加以考虑。同时,根据传递函数原理,可以试图对各种确定输入下的输出响应进行估算,探寻坡体动力响应的总体规律。本文以振动方程分析及模型试验实测,探讨了边坡振动台模型试验动力特性参数计算的传函选择和以传递函数进行频域动力响应估算的适用性。

2 振动方程与传递函数定性讨论

2.1 边坡振动台模型试验特点

振动台模型试验台面激励(振动输入),常采用实测地震加速度时程(天然波)或根据目标反应谱生成的人工合成加速度波。为控制地震动峰值、持时和频谱特征3要素,模型试验以台面加速度作为激励输入的衡量基准。模型实测加速度从埋置于各测点的加速度计时间采样得到,为绝对加速度。

边坡体本身振动基于坡体与坡脚的相对运动,

地震引起的边坡稳定性一定程度由这种相对形变所决定。振动台模型试验中,测点的绝对加速度响应实际混杂入了台面加速度,传函建立和动力特性参数识别须针对这种“坐标变换”问题加以区分。

2.2 边坡模型水平振动方程与测点振动方程

设边坡的动力形变由自下而上传来的剪切波产生。考虑边坡具有一定坡角,可简化为直角梯形截面,计及黏滞阻尼的边坡受迫振动方程表示为

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{G}{\rho} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{1}{B/n-z} \frac{\partial u}{\partial z} \right] + \frac{c}{\rho} \frac{\partial u}{\partial t} = -a_g \quad (1)$$

式中: ρ 、 G 、 c 分别为边坡模型岩土的质量密度、动剪切模量、阻尼系数; u 为相对于台面的坡体水平位移 $u(z,t)$; z 为距台面的垂直高度; B 、 n 分别为坡底宽度、坡面坡度; a_g 为台面输入地震水平加速度时程 $a_g(t)$ 。

利用代换 $p = B/n - z$, 式(1)化为 $u(p,t)$ 的振动方程,则与三角形截面剪切楔法^[12]方程一致,可按分离变量式 $u(p,t) = \sum \Phi_k(p) q_k(t)$ 分解出振型方程,求得各阶自振频率 ω_k 及对应振型 Φ_k 。第 k 阶振型对应的 z 高程处广义坐标 q_k 振动方程为

$$\frac{\partial^2 q_k}{\partial t^2} + 2\lambda\omega_k \frac{\partial q_k}{\partial t} + \omega_k^2 q_k = -\eta_k a_g \quad (2)$$

式中: η_k 为第 k 阶振型参与系数,与 $\Phi_k(p)$ 有关; ω_k 为第 k 阶自振频率; λ 为第 k 阶模态的阻尼比, $\lambda = c/(2\rho\omega_k)$ 。

当发生与某阶自振频率吻合的共振时,其他阶振型对响应基本不产生影响。式(2)还表明, λ 与各阶自振频率有关,与高程无关。振动台模型试验中,振型及边界条件影响实际已反映于各测点实测数据中,因此经振型分解化简,边坡各高程在共振频域附近仍表现为单自由度黏滞阻尼振动形式,仅方程右端包含与振型参与系数有关的项。

2.3 传递函数

传递函数是振动系统动力特性在频域内的表现形式,描述了系统对输入激励在频域中的传递特性。输入振动的各频率成分通过该系统时,系统对输入的一些频率成分进行响应放大,对另一些频率成分响应衰减,系统振动响应因此具有新的频率分布,这种动力特性由传函来定量表达^[13]。因此,动力特性是动力响应规律的内因,传函具有重要意义^[9-10]。

在振动台模型试验中,动力特性测试以平稳高斯白噪声作为台面输入激励时程 $a_g(t)$, 测点 j 实测的加速度 $a_j(t)$ 为绝对加速度时程,差值 $[a_j(t) -$

$a_g(t)$ 为测点与坡脚间的相对加速度时程。

由式(2)按 Fourier 分解下的简谐激励振动分析, 相对加速度传函 $H_a(\omega, z)_r$ 和绝对加速度传函 $H_a(\omega, z)$ 分别为

$$H_a(\omega, z)_r = \sum_{k=1}^N \frac{\phi_k \eta_k \omega^2}{(\omega_k^2 - \omega^2) - i2\lambda \omega_k \omega} \quad (3)$$

$$H_a(\omega, z) = 1 + H_a(\omega, z)_r \quad (4)$$

式中: i 为虚数单位, $i = \sqrt{-1}$ 。

传递函数是以频率为自变量的复函数, 不妨记两种传函实部分别为 $H_a(\omega, z)_r^R$ 和 $H_a(\omega, z)^R$, 虚部分别为 $H_a(\omega, z)_r^I$ 和 $H_a(\omega, z)^I$, 模(幅值)分别为 $|H_a(\omega, z)_r|$ 和 $|H_a(\omega, z)|$ 。

2.4 两种传函在动力特性参数辨识中的理论差别

普通黏滞阻尼振动的模态分析中(如机械模态分析), 一般采用绝对传函, 且以模(幅值)和虚部来分析都是等价的, 只是取虚部可减小相邻模态的影响^[11]。然而, 对于边坡振动台模型试验, 由式(4)中看出, $|H_a(\omega, z)|$ 混入了台面加速度, 影响传递函数曲线形状, 在阻尼比半功率法计算中无法按 0.707 倍峰值取半功率点, 因此取 $|H_a(\omega, z)|$ 来分析不能正确反映坡体与台面的相对运动特性, 与取虚部也是不等价的。

由式(3)、(4), 理论上, $H_a(\omega, z)_r^I = H_a(\omega, z)^I$, 即绝对传函和相对传函虚部相等, 两者等价。

3 传递函数辨识与应用

3.1 传递函数计算动力特性参数

式(3)、(4)定性分析表明了两种传函在动力特性参数识别上的理论差别, 同时发生 k 阶共振 $\omega = \omega_k$ 时, 其他阶振型基本不产生影响, 式(3)中 Σ 符号去掉。在模型试验中, 可通过平宽谱的白噪声激励, 以振动系统对其“调理”后的响应谱反算传递函数, 提取某阶共振峰附近的曲线代表该阶模态结果, 求取动力特性参数。白噪声测试下, 测点 j 的绝对(或相对)加速度传递函数由式(5)计算^[13]。

$$H_a(\omega, z_j) = \frac{G_{XY}(\omega, z_j)}{G_{XX}(\omega)} \quad (5)$$

式中: $G_{XX}(\omega)$ 为台面激励时程 $a_g(t)$ 的自功率谱; $G_{XY}(\omega, z_j)$ 为测点响应 $a_j(t)$ 或 $[a_j(t) - a_g(t)]$ 与台面激励 $a_g(t)$ 的互功率谱。

传函曲线各峰值对应的频率近似为各阶固有频率 ω_k , 该频率下各测点的传函峰值归一化后构成

加速度振型。阻尼比由半功率带宽法计算, 经式(3)、(4)推导, 振型 Φ_k 和振型参与系数 η_k 被消去, 为常用的

$$\lambda = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\omega_0} \quad (6)$$

式中: ω_0 为峰值对应的固有频率; ω_1 、 ω_2 分别为峰值两侧等于峰值的 0.5 倍(以传函虚部)或 0.707 倍(以相对传函的模)处所对应的频率, 且 $\omega_1 < \omega_2$ 。

式(6)表明, 阻尼比与振型和振型参与系数无关, 即在同一阶自振频率下各高程测点传函算出的阻尼比应相等。而且, 半功率带宽法准确性要求传函曲线在峰值两侧基本对称。上述 2 点应是计算中传递函数选择的实用依据。

3.2 传递函数对频域动力响应估算

对于线性振动系统, 若传函已确定, 频域响应规律由输入振动的频谱所决定。因此, 由传递函数可以估算振动响应对输入地震波的频域放大或衰减作用^[9]:

$$F(\omega, z_j) = H_a(\omega, z_j)F(\omega) \quad (7)$$

式中: $F(\omega)$ 为台面输入加速度 $a_g(t)$ 的 Fourier 谱; $F(\omega, z_j)$ 为加速度响应时程(或相对时程)的 Fourier 谱估算值。

由于地震的波形幅值、频谱等均具有一定非确定性, 无论模型试验还是数值分析的输入波形均仅为随机过程的某几个确定性实现, 若利用传递函数进行频域响应估算, 可以体现边坡动力响应的内因作用, 得到复杂的非确定性地震动输入下边坡动力响应的总体规律。

4 单面坡振动台模型试验验证

4.1 试验设计与波形加载

为进一步明确及验证前述定性分析结论, 论文研究进行了单面坡振动台模型试验。试验在西南交通大学道路与铁道工程铁道部开放试验室的电液伺服单向地震模拟振动台上进行, 包括动力特性试验(白噪声)和动力响应试验(天然和人工地震波)两部分。振动台模型箱尺寸为 3.5 m×1.5 m, 台面最大负载能力 250 kN, 最大振动加速度为 1.2g, 最大振动速度为 0.4 m/s², 最大动位移±100 mm。

边坡模型在叠层式柔性模型箱中填筑, 岩土材料采用 40%角砾, 36%粗砂, 24%黏土混合配制, 质量密度控制为 2.06 g/cm³, 含水率为 9%, 与采样点的天然状态基本一致。

边坡模型断面呈直角梯形, 底宽 3.2 m, 顶宽 0.9 m, 净高 1.93 m, 坡角为 40° (图 1)。叠层式

柔性模型箱可容许一定的水平变形,且在模型箱与模型间衬垫橡胶膜以减小模型动力边界效应。



图1 层状剪切变形模型箱与模型边坡(俯视)

Fig.1 Overlooking of laminar shear box and the slope model

模型坡表共埋设6个沿坡面均匀分布的水平加速度传感器(A5~A2),垂直距离均约32 cm,台面加速度时程由对振动台作动器提供开环控制的水平加速度计A0采集,如图2所示。

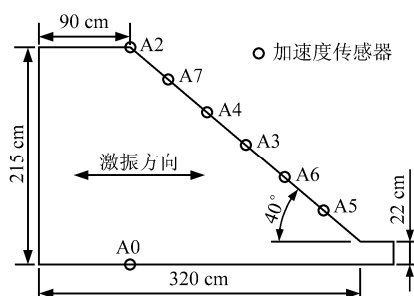


图2 边坡模型剖面与加速度测点布置

Fig.2 Profile of slope model and arrangement of acceleration measuring points

动力特性测试在各次动力响应测试前后进行,台面加速度输入为随机生成的平稳高斯白噪声,如图3所示,持时约60 s以消除随机干扰和瞬态效应。

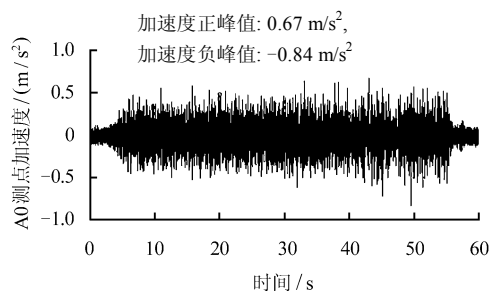
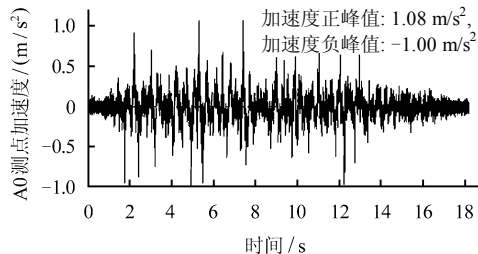


图3 台面输入的白噪声时程

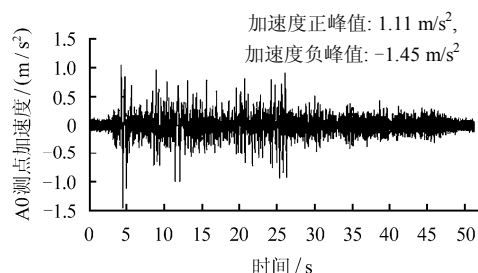
Fig.3 Table board's input time history of white noise

动力响应试验的台面加速度输入分别为根据

川藏公路通麦段地震危险性评估的场地地震反应谱进行三角级数合成的人工地震波,见图4(a),美国1940年Elcentro地震的实测天然地震波形,见图4(b)。



(a) 通麦人工波



(b) Elcentro地震波

图4 台面输入地震波

Fig.4 Table board's input time history of seismic wave

4.2 2种传递函数的辨识结果差异

取坡面中下部的A6及中上部的A7测点进行比较。将白噪声测试得到的A6、A7测点加速度响应时程代入式(5)计算,分别得到两测点的绝对传函和相对传函,实部、虚部和模分别示于图5。

由式(4)、(5)定性分析结论和白噪声测试结果(图5),得到以下认识:

(1) 相对传函实部与绝对传函实部相差1,二者曲线仅沿纵轴整体平移。当 ω 较小($\omega < 5$ Hz)时, $H_a(\omega, z)_r^R \approx 0$, $H_a(\omega, z)^R \approx 1$,呈现随台面运动的刚体性质;当 ω 较大($\omega > 35$ Hz)时, $H_a(\omega, z)_r^R \approx -1$, $H_a(\omega, z)^R \approx 0$ 。实测结果与式(3)和式(4)作 $\omega \rightarrow 0$ 或 $\omega \rightarrow \infty$ 的极限分析相符。

(2) 相对传函与绝对传函的虚部相等,在图5(b)中两曲线是重合的,因此,二者作动力特性分析等价,且虚部曲线在峰值两侧较为对称,用以计算动力特性参数误差较小。

(3) 相对传函与绝对传函的模相差较大。式(4)表明,绝对传函的模计算动力特性有系统误差。而图5(c)表明,相对传函的模由于在峰值两侧曲线很不对称,用以计算阻尼比将会有较大误差。

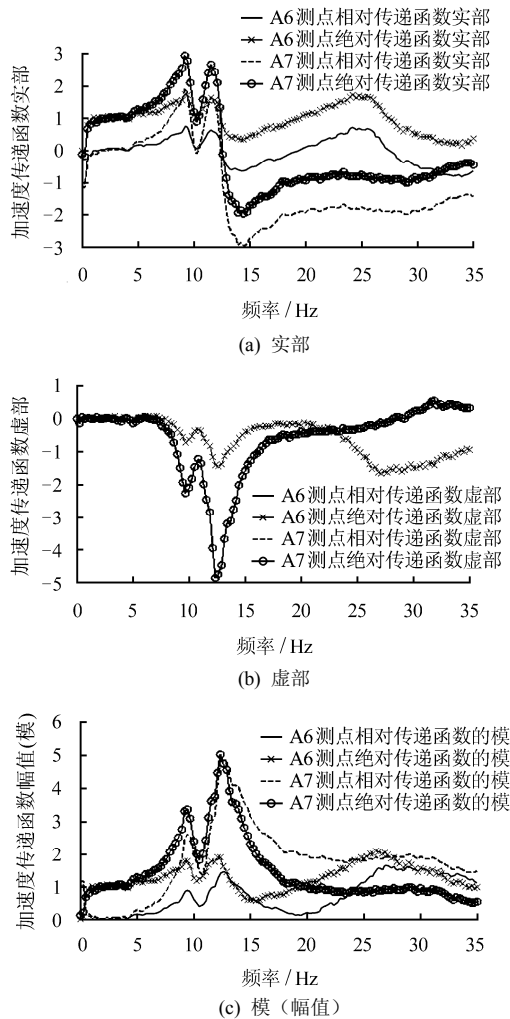


图5 A6、A7测点的绝对、相对传函比较

Fig.5 Absolute acceleration transfer function compared with relative acceleration transfer function (point A6, A7)

4.3 2种传函计算的动态特性参数结果比较

由各测点传函的第一阶峰值及所对应的频率,以及半功率带宽法计算式(6),按绝对传函(或相对传函)虚部与相对传函的模计算出试验模型的一阶固有频率、一阶加速度振型和一阶阻尼比,如于图6所示。可见,按照绝对传函(或相对传函)虚部和相对传函的模计算,固有频率结果上差别不大(绝对误差小于0.3 Hz),加速度振型则完全一致。但按相对传函的模计算得到的阻尼比在模型下部严重偏小($0.06 < \lambda < 0.1$),模型中上部才与用传函虚部计算的结果一致($\lambda = 0.105$)。由式(6)推导过程知,由于振型和振型参与系数与阻尼比无关,同一阶自振频率下的阻尼比不应随测点高度而不同,因此振动台模型试验实测表明,以相对传函的模计算阻尼比误差较大,而采用虚部来计算较为合理准确。

4.4 以传递函数对频域动力响应的估算

按式(7)将动力响应试验的两种台面输入波形(图4)的Fourier谱与以白噪声测试求取的绝对

(或相对)传函逐频进行复数相乘,得到响应时程的Fourier估算谱。图7为以绝对、相对传函估算的Fourier谱与实测响应谱的对比。

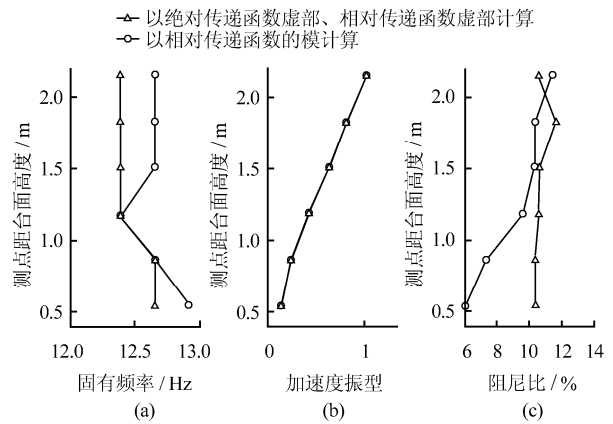


图6 根据振动台模型试验数据计算的动态特性参数
Fig.6 Dynamic characteristics obtained with measured data of shaking table model test of slope

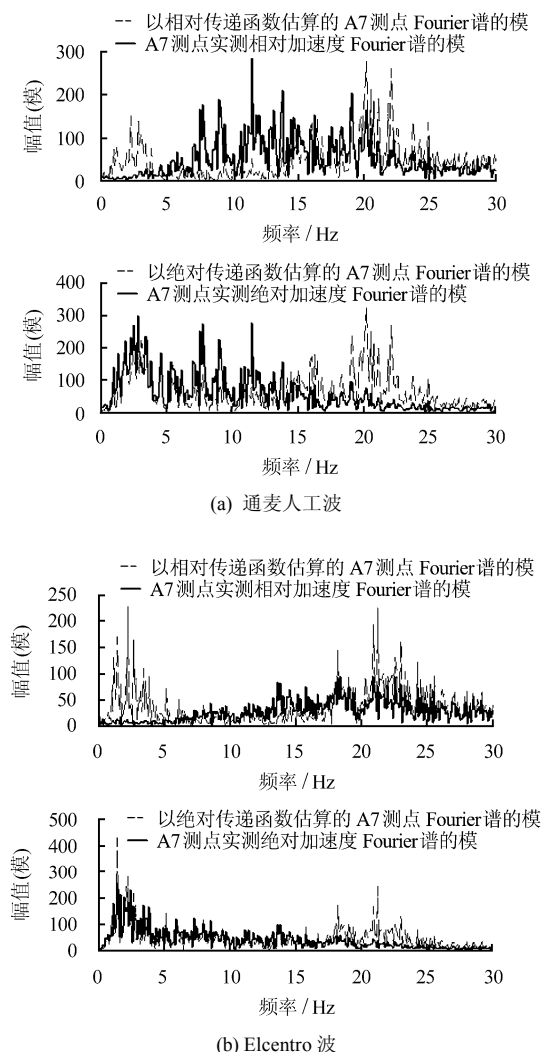


图7 传函估算响应Fourier谱和实测Fourier谱(A7测点)
Fig.7 Measured Fourier spectra compared with estimating spectra calculated by transfer function (point A7)

结果表明, 绝对传函的估算谱与实测谱在低频段($\omega < 15 \text{ Hz}$)非常吻合, 高频段($15 \text{ Hz} < \omega < 30 \text{ Hz}$)估算谱偏大。由于3段式场地地震反应谱表明地震波的有效频率一般小于10 Hz, 以绝对传函估算动力响应是适合的。对于Elcentro地震波, 相对传函估算谱与实测相对加速度谱在高频段($15 \text{ Hz} < \omega < 30 \text{ Hz}$)符合。

作为边坡的内在动力特征, 在边坡无损伤情况下, 在某一量级白噪声下识别的传函在该量级地震下不会有较大变化, 则频域响应规律仅由该量级输入地震波的频谱所决定。因此, 采用传递函数特别是绝对传函进行动力响应的频谱估算, 有助于在千变万化地震动输入下对边坡模型的动力响应规律作出总体把握, 可更有针对性地指导试验的地震输入波形加载设计, 避免波形选择上以偏盖全, 体现边坡地震模型试验的代表性。

虽然Elcentro波的加速度峰值(正负峰平均值 1.28 m/s^2)大于通麦波(正负峰平均值 1.04 m/s^2), 但图7表明, Elcentro波A7测点的Fourier分量(按绝对传函估算及实测谱)却明显小于通麦波, 表明边坡中上部对通麦波的频谱响应更明显。同样, 相对加速度估算谱与实测谱的高频段($15 \text{ Hz} < \omega < 30 \text{ Hz}$)也反映相同现象。因此可以推断, A7测点在通麦波作用下的绝对、相对响应加速度均大于Elcentro波, 结论与实测加速度放大系数(加速度响应峰值与台面加速度输入峰值之比)结果相符, 见图8。

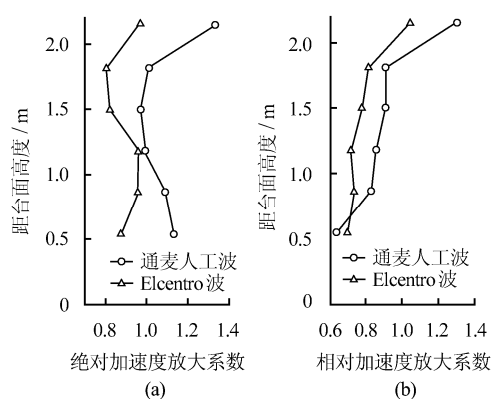


图8 各测点的加速度放大系数
Fig.8 Acceleration amplified coefficients of model

以传递函数对频域动力响应估算的前提条件是白噪声量级和输入地震波量级差别不大, 由于土的应力-应变关系具有非线性, 线弹性系统假设仅在小应变范围内近似。通麦波的相对传函估算谱在 $8 \text{ Hz} < \omega < 12 \text{ Hz}$ 与实测谱相差较大, 可能与小量级

白噪声传函辨识误差和土剪切模量-剪应变的非线性关系有关。

5 结 论

边坡振动台模型试验可以获取两种传函: 反映边坡测点处的场地地震动特征的绝对加速度传函(基于测点实测加速度时程)和反映坡体本身的振动性质的相对加速度传函(基于测点与坡脚即台面间的实测加速度相对值)。本文以振动方程分析及模型试验实测数据, 探讨了边坡振动台模型试验的动力特性参数计算的传函选择和以传递函数进行频域动力响应估算的适用性, 得到如下结论:

(1) 对于边坡振动台模型试验, 绝对传函的模由于掺杂台面加速度, 不能用于动力特性计算; 而相对传函的模由于曲线在峰值两侧不对称, 阻尼比计算误差较大。绝对传函、相对传函的虚部相等, 适于计算动力特性参数。

(2) 采用传递函数尤其是绝对传函进行动力响应的频谱估算是可行的, 传函估算谱与实测谱较为吻合。谱Fourier分量大小代表了边坡响应的幅值及频率分布, 与加速度放大系数结果相符。这种估算有助于对非确定性地震动输入下边坡模型动力响应规律的总体把握, 且更有针对性地指导模型试验的地震输入波形选择。

参 考 文 献

- [1] 李宁, 程国栋, 谢定义. 西部大开发中的岩土力学问题[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(3): 268—272.
LI Ning, CHENG Guo-dong, XIE Ding-yi. Geomechanics development in civil construction in Western China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(3): 268—272.
- [2] 刘红帅, 薄景山, 刘德东. 岩土边坡地震稳定性分析研究评述[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(1): 164—171.
LIU Hong-shuai, BO Jing-shan, LIU De-dong. Review on study of seismic stability analysis of rock-soil slopes[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(1): 164—171.
- [3] 翟阳, 韩国城. 边坡对土坝稳定影响的振动台模型试验研究[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 1996, (4): 67—71.
ZHAI Yang, HAN Guo-cheng. Shaking table test on effect of slope on stability of fill dam[J]. Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering),

- 1996, (4): 67—71.
- [4] 张平, 吴德伦. 动荷载下边坡滑动的试验研究[J]. 重庆建筑大学学报, 1997, 19(2): 80—86.
ZHANG Ping, WU De-lun. A shaking-table test research on rock slope[J]. **Journal of Chongqing Jianzhu University**, 1997, 19(2): 80—86.
- [5] 于玉贞, 邓丽军, 李荣建. 砂土边坡地震动力响应离心模型试验[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(6): 789—792.
YU Yu-zhen, DENG Li-jun, LI Rong-jian. Centrifuge model test of the seismic response behavior of a sand slope[J]. **Journal of Tsinghua University (Science and Technology)**, 2007, 47(6): 789—792.
- [6] LIN M L, WANG K L. Seismic slope behavior in a large-scale shaking table model test[J]. **Engineering Geology**, 2006, 86: 118—133.
- [7] 凌贤长, 郭明珠, 王东升, 等. 液化场地桩基桥梁震害响应大型振动台模型试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 7—10, 22.
LING Xian-chang, GUO Ming-zhu, WANG Dong-sheng, et al. Large-scale shaking table model test of seismic response of bridge of pile foundation in ground of liquefaction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(1): 7—10, 22.
- [8] 武思宇, 宋二祥, 刘华北, 等. 刚性桩复合地基抗震性能的振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 77—82.
WU Si-yu, SONG Er-xiang, LIU Hua-bei, et al. Shaking table test study on aseismic behavior of rigid pile composite foundation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(1): 77—82.
- [9] 林鹏, 卓家寿. 岩质高边坡开挖爆破动力特性的传递函数研究[J]. 河海大学学报, 1997, 25(6): 122—125.
- [10] 崔江余, 杜修力. 河谷自由场地震动经验传递函数研究[J]. 水利学报, 2001, (10): 58—61.
CUI Jiang-yu, DU Xiu-li. Study on empirical transfer function of gorge freefield ground motion[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2001, (10): 58—61.
- [11] 傅志方, 华宏星. 模态分析理论与应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.
- [12] 顾淦臣. 土石坝地震工程[M]. 南京: 河海大学出版社, 1989.
- [13] 王济, 胡晓. MATLAB 在振动信号处理中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 知识产权出版社, 2006.

2010 年全国工程地质学术年会

(一号通知, 福州 2010-11-17—19)

会议主办单位: 中国地质学会工程地质专业委员会

会议承办单位: 福州大学(环境与资源学院、紫金矿业学院) 福建省土木建筑学会

会议协办单位(排名不分先后, 其余协办单位将在会议 2 号通知中发布): 福建工程学院 福建省地质学会 紫金矿业集团股份有限公司 福建省建筑设计研究院 福建省地质工程勘察院 福建省交通规划设计院 福建省水利水电勘测设计研究院 福建岩土工程勘察研究院 福建省林业勘察设计院 福州市勘测院

会议时间与地点: 2010 年 11 月 17 日—11 月 19 日, 福州

会议主题: 工程地质与海西建设

具体议题包括: 工程地质环境与城市发展 风化岩残积土及软土的工程性质及处理 隧道、地铁等地下空间开发中的工程地质问题 复杂气候环境下地质灾害及其防治 边坡与基坑工程 工程地质勘察、测试、监测与物探新技术 资源能源开发的工程地质问题 工程地质教育与人才培养

会议秘书组及联系方式: 福建省福州大学旗山校区环境与资源学院资源与城乡建设系 邮政编码: 350108

联系人: 樊秀峰(13960883269) 王 浩(13850112066) 电子信箱: geo2010@126.com

大会网站: <http://er.fzu.edu.cn/geo2010.jsp>

会议论文征集: 论文题目由论文撰写者根据大会主题和议题自由选定。

会议论文应为未正式发表过的最新成果。部分论文择优在《工程地质学报》正刊发表, 其余论文以《工程地质学报》增刊发表, 版面费 150 元/页。论文格式请严格按《工程地质学报》编排格式编排, 具体见网站: <http://www.enggeo.org>。

论文全文于 2010 年 6 月 15 日以前电子邮件发到大会议论文集编写组。论文篇幅尽量控制在 6 页以内。

联系地址: 100029 北京 9825 信箱《工程地质学报》宋玉环收 标题请注明“2010 年会投稿”

电子邮箱: engineer2003@mail.igcas.ac.cn

联系电话/传真: 010-82998121