公路高架桥交通引起的地面振动：分析和验证

陈 锋[1]，黄茂松[1]，竹宫宏和[2]
(1.同济大学地下建筑与工程系，上海 200092；2. 冈山大学环境理工学部，日本冈山市 7008530)

摘 要：针对普通公路高架桥引起的地面振动问题提出了一种预测地面响应的有效方法。该方法假设高架桥的桥墩在交通荷载下是刚体运动，根据实测数据求得基础承台的输入荷载，并进而由一个准三维有限元方法所得基础承台中心的阻抗函数以及地面响应的传递函数，可以预测周围地面的响应。无论是试验车的情况还是通常的繁忙交通工况，计算的结果和地面响应的实测数据符合得很好。这证明了该方法的可靠性以及对高架桥交通引起的地面振动的通用性。
关键词：高架桥；地面振动；准三维有限元方法；阻抗函数
中图分类号：U416 文献标识码：A 文章编号：1000－4548(2008)01－0086－07
作者简介：陈 锋(1977－)，男，浙江安吉人，博士，从事土动力学和环境振动等方面的研究。E-mail: wolfafeng@gmail.com。

Ground vibrations induced by heavy traffic on a highway viaduct: analysis and validation

CHEN Feng[1], HUANG Mao-song[1], TAKEMIYA Hirokazu[2]
(1. Department of Geotechnical Engineering,Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Environmental and Civil Engineering, Okayama University, Okayama 7008530, Japan)

Abstract: An effective method was proposed to predict the ground responses in the near field due to traffic on a highway viaduct. The basic assumption was that a pier of the viaduct was supposed to move as a rigid body, so that the motion at the footing center could be derived from the measured data at the pier. A pseudo-3-dimmentional FEM procedure was utilized to derive the impedance function at the footing center and the transfer functions at specified points in the near field. Further more, the ground responses were predicted and validated by the measured records. Good consistency was achieved for the cases of a test-run truck as well as ordinary traffic. Therefore, the present method was reliable and could be widely applied for viaduct traffic.
Key words: highway viaduct; ground vibration; pseudo-3-dimensional FEM; impedance function

0 引 言

随着城市交通的蓬勃发展，在各种大中城市中都陆续出现了高架桥以改善交通。这样，繁忙的交通也不会因为城市中的拥挤而停滞。然而，高架桥给交通带来了便利的同时，也增加了对周围的环境污染。本文将探讨因为繁忙的交通而引起的周围地面的振动。这些振动虽然不像地震那样会产生巨大的破坏性灾难，但是不可避免地给周围的居民，敏感仪器以及一些高科技的工厂带来困扰[1-3]。随着我国对社会和谐发展的重视，类似的环境振动问题也越来越得到相关部门的重视。

交通振动的问题包括很多方面，也已经有很多学者进行了研究。不过因为一般交通的随机性很强，难以给出很定量的解析。对于铁路交通的情况，因为荷载条件的单一性以及列车荷重的规律分布，可以得出比较精确的解析结果。很多学者已经对列车在不同速度情况下的振动作了比较全面的分析[3-5]。对于高速铁路高架桥的情况，也可以从列车荷载出发研究地面振动响应[6]。虽然公路交通情况随机性很强，对于汽车的种类以及速度都不确定，但对于高架桥的情况，因为地面振动的振源集中在桥梁的基础，又使得这种情况相对于普通的路面交通有些简单。Takemiya 和 Chen[1]已经对这个问题做过初步的研究，这里将进一步对这种方法的可靠性及广泛性进行探讨，以便对类似的交通引起的振动进行预测。

这里将根据日本冈山县交通局提供的一组数据[1]对公路高架桥引起的振动进行分析，并详细阐述分析

基金项目：中国博士后科学基金资助项目（20070410184）；上海市博士后科研资助计划项目（07R214145）
收稿日期：2007－01－23

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的方法。图 1（a）所示为现场的高架桥平面图以及周围的现场条件概况。高架桥也常常建在一些土质较软的地区以便将桥梁上的荷载通过桩基等基础传递到深层的持力层。图中斜纹的区域就是土层较软的部分，也是附近的居民受交通振动干扰较大的范围。图中给出的各个地面响应的测试点也在这个区域。图 1（b）给出了高架桥的立面图，可以看到桥梁由一个三跨梁和一个两跨梁构成，结构上的测试点分布在这个三跨梁上。图中 A 表示两端的桥台，B 表示用来减小桥梁变形的临时支撑，P 表示各个基础桥墩。这个三跨梁和 P4 的铰接是固定的，而在 P2 和 P6 的连接处沿桥轴方向是自由的。根据这种条件可以推测在上部荷载作用下，P4 处的作用力大于其它桥墩。因为测线在 P4 和 P6 之间，可见这两个桥墩对各测点响应的贡献是最大的。本文的数值计算将只考虑 P4 和 P6 对地面响应的贡献。

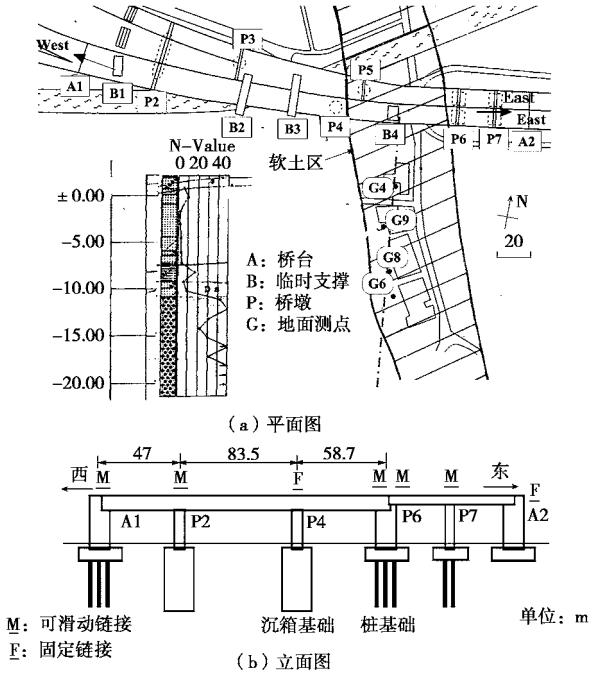


图 1 公路高架桥的平面图和立面图

Fig. 1 Plan view and front view of the highway viaduct

1 分析方法

1.1 刚性假设

因为上部荷载的复杂性以及桥梁结构的重要性，高架桥的桥墩通常都比较粗大。这样的混凝土结构，刚度是很大的，尤其相对于地表的软土而言。另外，对交通荷载的情况而言，变形是微小的。基于这样的条件，这里初步假设公路高架桥的交通荷载情况下，桥墩本身的运动是刚性的。

如图 2 所示，以 P4 为例，A 和 B 两点分布在桥墩的顶部和下部。如果假设直角坐标系的原点设置在桥墩底部 O 点，而各轴方向如图中所示，那么这两个测点坐标分别为 A(0，0，-7.2)和 B(1.5，0，-0.5)。因为刚体运动，在任何时刻，由 A 和 B 的位移，可以求得任何其它某点的位移。同时，刚体上任何点的转动位移是相同的。因此，可以求得桥墩底部 O 点的 6 自由度的位移，即

$$\begin{Bmatrix} \boldsymbol{u}_A(t) \\ \boldsymbol{u}_B(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}_A \\ \boldsymbol{C}_B \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \boldsymbol{u}_O(t) \\ \boldsymbol{\varphi}(t) \end{Bmatrix} = \boldsymbol{C}_{6\times6}\bar{\boldsymbol{u}}_O(t)_{6\times1} \quad , \quad (1)$$

式中，$\boldsymbol{u}_A$ 和 $\boldsymbol{u}_B$ 为 A，B 两点的平动位移，$\boldsymbol{u}_O$ 为 O 点的平动位移，$\boldsymbol{\varphi}$ 为转动位移；$\boldsymbol{C}$ 为几何转换矩阵，由 A，B 和 O 三点的相对位置确定。这样的刚性假设是否合理，可以在后面的计算中得到验证。

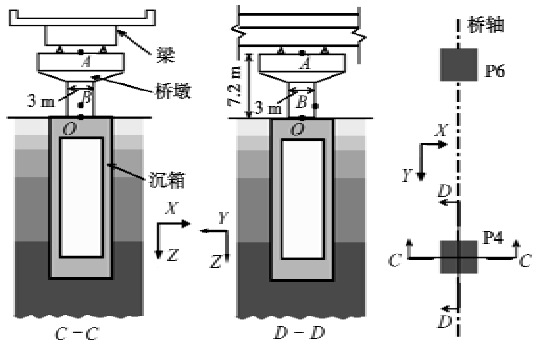


图 2 P4 桥墩上测点的布置

Fig. 2 Location of the observation points at pier P4

1.2 准三维轴对称模型

对场地响应而言，一般的基础虽然形状类型各异，其作用却与一个轴对称的类似基础没有什么差别。因此这里提出一种准三维的轴对称模型来求解基础振动引起的场地响应[7-8]。

对沉箱基础类型，由方形向圆形沉箱近似即可满足轴对称要求，没有什么问题。而对群桩基础而言，因为桩的分布特性，需要特别处理。

对土的节点，节点含 3 个平移自由度。在圆柱坐标系中表示为傅里叶级数展开：

$$\boldsymbol{U}(r,\theta,z) = \sum_{n=0}^{\infty} \boldsymbol{H}_n^{\mathrm{s}}(\theta)\boldsymbol{U}_n^{\mathrm{s}}(r,z) + \sum_{n=0}^{\infty} \boldsymbol{H}_n^{\mathrm{a}}(\theta)\boldsymbol{U}_n^{\mathrm{a}}(r,z) \quad , \quad (2)$$

其中，

$$\boldsymbol{H}_n^{\mathrm{s}}(\theta) = \mathrm{diag}(\cos n\theta, -\sin n\theta, \cos n\theta) \quad , \quad (3)$$

$$\boldsymbol{H}_n^{\mathrm{a}}(\theta) = \mathrm{diag}(\sin n\theta, \cos n\theta, \sin n\theta) \quad , \quad (4)$$

$$\boldsymbol{U}_n(r,z) = \{u_r \quad u_\theta \quad u_z\}_n^{\mathrm{T}} \quad , \quad (5)$$

式中，u_r，u_θ 和 u_z 为柱坐标系下的位移，角标 s 和 a 分别代表关于 θ=0° 的轴的对称和反对称项，这样，位移向量可以表示为各个模态对称项和非对称项的组合。对光滑变形的情况，根据级数的概念，n=0 和 n=1 两个模态足以表述位移响应。n=0 时的对称项表

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

示沿 Z 轴的竖直运动，$n=0$ 时的反对称项表示绕 Z 轴的扭转运动；$n=1$ 时的对称项表示沿 X 轴（$\theta=0^{\circ}$）的平移和绕 Y 轴的转动（$\theta=90^{\circ}$），而 $n=1$ 时的反对称项表示沿 Y 轴（$\theta=90^{\circ}$）的平移和绕 X 轴的转动（$\theta=0^{\circ}$）。力向量也同样可以表示为傅里叶级数的形式。

埋置在土体中的桩离散为 2 节点的梁单元，每个节点含 6 个自由度，即 3 个平动成分和 3 个转动成分。如图 3 所示，根据到承台中心的距离不同桩群划分为若干个桩环，在剖面上有相应的虚桩。不同半径上的桩的响应用 $n=0$ 和 $n=1$ 两个谐波项来近似，只要各桩在整个运动过程中沿深度都基本保持初始的布局，这种近似是合理的。同样表示为傅里叶级数展开：

$$\bar{\boldsymbol{U}}(r,\theta,z)=\sum_{n=0}^{1}\bar{\boldsymbol{H}}_n^{\mathrm{sa}}(\theta)\bar{\boldsymbol{U}}_n^{\mathrm{sa}}(r,z)+\sum_{n=0}^{1}\bar{\boldsymbol{H}}_n^{\mathrm{as}}(\theta)\bar{\boldsymbol{U}}_n^{\mathrm{as}}(r,z)\,, \tag{6}$$

$$\bar{\boldsymbol{U}}(r,\theta,z)=\left\{u_{\mathrm{r}}\quad u_\theta\quad u_z\quad \phi_r\quad \phi_\theta\quad \phi_z\right\}^{\mathrm{T}}\,, \tag{7}$$

$$\bar{\boldsymbol{U}}_n^{\mathrm{sa}}(r,z)=\left\{u_r^{\mathrm{s}}\quad u_\theta^{\mathrm{s}}\quad u_z^{\mathrm{s}}\quad \phi_r^{\mathrm{a}}\quad \phi_\theta^{\mathrm{a}}\quad \phi_z^{\mathrm{a}}\right\}_n^{\mathrm{T}}, \tag{8}$$

$$\bar{\boldsymbol{U}}_n^{\mathrm{as}}(r,z)=\left\{u_r^{\mathrm{a}}\quad u_\theta^{\mathrm{a}}\quad u_z^{\mathrm{a}}\quad \phi_r^{\mathrm{s}}\quad \phi_\theta^{\mathrm{s}}\quad \phi_z^{\mathrm{s}}\right\}_n^{\mathrm{T}}, \tag{9}$$

式中，ϕ_{r}，ϕ_θ和ϕ_z 表示转动位移。对应的各傅里叶展开矩阵为

$$\bar{\boldsymbol{H}}_n^{\mathrm{sa}}(\theta)=\mathrm{diag}\left[\boldsymbol{H}_n^{\mathrm{s}}(\theta),\boldsymbol{H}_n^{\mathrm{a}}(\theta)\right], \tag{10}$$

$$\bar{\boldsymbol{H}}_n^{\mathrm{as}}(\theta)=\mathrm{diag}\left[\boldsymbol{H}_n^{\mathrm{a}}(\theta),\boldsymbol{H}_n^{\mathrm{s}}(\theta)\right], \tag{11}$$

桩的梁单元节点处的内力为

$$\bar{\boldsymbol{F}}(r,\theta,z)=\begin{Bmatrix}\boldsymbol{P}(r,\theta,z)\\ \boldsymbol{M}(r,\theta,z)\end{Bmatrix}=\sum_{n=0}^{1}\left(\bar{\boldsymbol{H}}_n^{\mathrm{sa}}\bar{\boldsymbol{F}}_n^{\mathrm{sa}}(r,z)+\bar{\boldsymbol{H}}_n^{\mathrm{as}}\bar{\boldsymbol{F}}_n^{\mathrm{as}}(r,z)\right), \tag{12}$$

$$\bar{\boldsymbol{F}}(r,\theta,z)=\left\{P_r\quad P_\theta\quad P_z\quad M_r\quad M_\theta\quad M_z\right\}^{\mathrm{T}}, \tag{13}$$

$$\bar{\boldsymbol{F}}_n^{\mathrm{sa}}(r,\theta,z)=\left\{P_r^{\mathrm{s}}\quad P_\theta^{\mathrm{s}}\quad P_z^{\mathrm{s}}\quad M_r^{\mathrm{a}}\quad M_\theta^{\mathrm{a}}\quad M_z^{\mathrm{a}}\right\}^{\mathrm{T}}, \tag{14}$$

$$\bar{\boldsymbol{F}}_n^{\mathrm{as}}(r,\theta,z)=\left\{P_r^{\mathrm{a}}\quad P_\theta^{\mathrm{a}}\quad P_z^{\mathrm{a}}\quad M_r^{\mathrm{s}}\quad M_\theta^{\mathrm{s}}\quad M_z^{\mathrm{s}}\right\}^{\mathrm{T}}, \tag{15}$$

内力矩阵的含义与位移矩阵的含义类似。

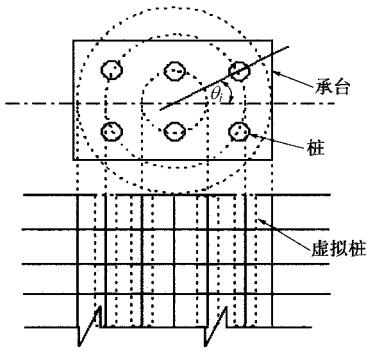


图 3 桩基础的准三维轴对称模型

Fig. 3 Pseudo-3D axisymmetric model of a pile foundation

埋置在土体中单桩的动刚度可以根据一般的梁结构分析得到。如图 3 所示，如果位于θ_i的单桩动力刚度为 $\boldsymbol{D}_{\mathrm{sp}}$，那么相应于位移和内力，第 n 个傅里叶展开项的动力刚度为

$$\boldsymbol{D}_{\mathrm{sp},n}^{\mathrm{sa}}(\theta_i)=\bar{\boldsymbol{H}}_n^{\mathrm{sa}-1}(\theta_i)\boldsymbol{D}_{\mathrm{sp}}\bar{\boldsymbol{H}}_n^{\mathrm{sa}}(\theta_i)\,, \tag{16}$$

$$\boldsymbol{D}_{\mathrm{sp},n}^{\mathrm{as}}(\theta_i)=\bar{\boldsymbol{H}}_n^{\mathrm{as}-1}(\theta_i)\boldsymbol{D}_{\mathrm{sp}}\bar{\boldsymbol{H}}_n^{\mathrm{as}}(\theta_i)\,, \tag{17}$$

当 $n\theta_i=k\pi/2$ (k=0,1, 2, …) 时上式中的逆矩阵不存在，此时该矩阵的对角元素对应于 $\bar{\boldsymbol{H}}_n$ 的非零元素的倒数。

如果距离承台中心 r 的桩环上共有 N_r 根桩，那么该桩环相应的动刚度为

$$\boldsymbol{D}_{\mathrm{Rp},n}^{r}=\sum_{i=1}^{N_r}\boldsymbol{D}_{\mathrm{sp},n}^{i}\,。 \tag{18}$$

为了便于轴对称模型的建立，需要将该动刚度沿转角方向平均分布。假设这样处理的动刚度为

$$\hat{\boldsymbol{D}}_{\mathrm{Rp},n}^{r}=\int_0^{2\pi}\bar{\boldsymbol{H}}_n^{-1}(\theta)\hat{\boldsymbol{D}}_{\mathrm{sp},n}\bar{\boldsymbol{H}}_n(\theta)\mathrm{d}\theta\,, \tag{19}$$

式中，$\hat{\boldsymbol{D}}_{\mathrm{sp},n}^{r}$ 为对应于半径 r 的桩环动刚度沿转角的分布密度。

桩基这种非轴对称的结构以轴对称的方式进行了简化处理，于是可以将三维问题化为二维问题，并由这种半解析的方法得到准三维的解。

基础的承台假设为刚性，这样承台中心和桩头各点在几何上就是主从关系。于是，周围土体对基础的阻抗作用最终可以聚集到承台中心 O 点，即

$$\bar{\boldsymbol{F}}_O(\omega)=\boldsymbol{K}_O(\omega)\bar{\boldsymbol{U}}_O(\omega)\quad, \tag{20}$$

式中，$\boldsymbol{K}_O$ 为综合考虑了土和基础相互作用的 O 点的阻抗函数。同时，也可以得到地面响应和承台中心的关系，即传递函数 $\boldsymbol{H}(\omega)$，

$$\boldsymbol{U}_G(\omega)=\boldsymbol{H}(\omega)\bar{\boldsymbol{U}}_O(\omega)=\boldsymbol{H}_{\mathrm{F}}(\omega)\bar{\boldsymbol{F}}_O(\omega)\quad, \tag{21}$$

式中，$\boldsymbol{U}_G$ 为地面响应，$\boldsymbol{H}(\omega)$和 $\boldsymbol{H}_{\mathrm{F}}(\omega)$分别表示对应于基础中心位移和作用力的传递函数，即在 O 点施加单位位移或者单位力时周围土体的响应，是频率的函数。因而只要知道基础中心的位移或者力向量，在频域内可以求得周围土体的响应。

1.3 反演思路

基于以上的假设和方法，可以提出一种根据现场测试结果广泛地预测周围地面响应的方法。首先根据桥墩上的 A 和 B 两点振动数据，可以由式（1）得到基础承台中心 O 点的对应时程数据 $\bar{\boldsymbol{u}}_O(t)$。经过傅里叶变换，即得 $\bar{\boldsymbol{U}}_O(\omega)$。然后根据式（8）可以得到从上部结构传递到基础的力向量 $\bar{\boldsymbol{F}}_O(\omega)$，进而由式（9）所得的传递函数求得周围的地面的响应。如果考虑多个基础的贡献，那么需要将各个基础引起的地面响应经过反傅里叶变换得到时程解，然后迭加。桥墩的刚体假设以及整个思路是否足够精确，通过现场测试的结果和求得的结果进行比较就可以进行验证。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2　案例现场条件和测试

图 1 的平面图所示的高架桥梁大致是东西走向，并有个微小的弧度，曲率为 1/800 m^{-1}。因为离心作用，运动中的车辆对桥梁横向有附加作用，进而在基础上增加正交于桥轴的横向作用力和耦合的弯矩。这种离心作用对地面响应的影响主要体现在垂直于桥轴的平面上，即面内响应。汽车在桥梁上通行时相对桥轴不可避免的偏心作用，使得桥梁有微小摇摆。

该测试是在图中所示的高架桥梁上，一辆 20 t 的试验卡车以 75 km/h（21 m/s）的速度分别由东向西，由西向东通过整座桥梁。其间，在桥梁上，桥墩上，以及周围的各测试点设置了加速度计，同时记录了正交的 3 个方向振动的时间历程。试验车通过的情况，振动记录时间为 40 s。另外，通常交通的情况也进行了测试，记录时间为连续的 60 min。

这些测试点在桥梁上的分布如图 1 (b) 所示。A1，P2，P4，P6 是设置在桥台 A1，桥墩 P2 等的顶部，而 B1，B2，B3 和 B4 是在桥梁的各跨中临时支撑的对应位置。地面上的测试点分布在图 1（a）中的斜线软土区域，标注为 G4，G9，G8 和 G6，测线大致沿垂直于桥轴的方向，位于 P4 和 P6 之间。

2.1　地面振动

地面响应的测试点分布在 P4 和 P6 之间的软土区，显然 P4 和 P6 两个基础成为最主要的振源，对这个区域振动的贡献最大。由于 P4 桥墩和桥梁的固结链接，A1->A2 的东行情况，使得 P6 处的响应在试验车经过 P4 之后才比较明显。因此，可以预见周围地面的响应也主要来自于 P4 基础的振动。对于 A2->A1 的西行情况，同样在试验车经过 P4 之后，P6 的响应很明显得减弱。P6 基础对地面响应的贡献也主要是在试验车在 P6 和 P4 之间通行的区间内，因而 P4 的贡献依然是主要的。因此对普通的交通情况，车辆来来往往，在这些地面的测试点的响应，P4 基础的贡献是主要的。

图 4 给出了试验车行驶时，P4 和 P6 桥墩底部测点（图中为 P4-k 和 P6-k）以及地面测点的响应傅里叶频谱。G4，G9，G8 和 G6 依次远离高架桥的桥轴，大致正交于桥轴的测试线的方向也大致就是高架桥交通作用下的波动传播方向。由于波动在分层土体中不可避免的消散作用，从图 4 看到地表响应的傅里叶频谱和桥墩底部的响应相差很大，基本上 2.5 Hz 以下和 10 Hz 以上的部分被过滤掉了。图 5 所示为通常交通工况下地面响应的实测结果。除了因为多车辆行驶引起响应幅值较大外，频谱上的规律上是基本一致的。比较 G8 和 G6 处的响应可以发现，图 4 和图 5 都显示距离高架桥轴较远的 G6 点的响应反而较大。这种似乎有悖于常理的现象却是高架桥交通作用下通常的现象，例如文献[6]中关于新干线高架桥引起的地面响应的研究中也有提及。这种现象一方面反映了贡献来自于不同的基础，另一方面也反映了响应在空间的分布具有一定的方向性，即沿不同方向递减规律是不一样的。

经过在分层土体中的传播，波动的傅里叶频谱主要分布在 3.5 Hz 左右的比较集中的范围。下面将通过该场地的表面波弥散特性进行分析。

2.2　土层的表面波弥散特性

图 6 所示为现场分层土体的表面波弥散曲线，v_{ph} 和 v_{gr} 分别表示相速度和群速度。面内波动是指 P-SV 波的传播特性，在地表也就是瑞利波（Rayleigh wave）的弥散特性；面外波动是指 SH 波的传播特性，在分层土体地表也就是乐夫波（Love wave）的弥散特性。土体浅层的软土特性基本决定了地面响应的特征。

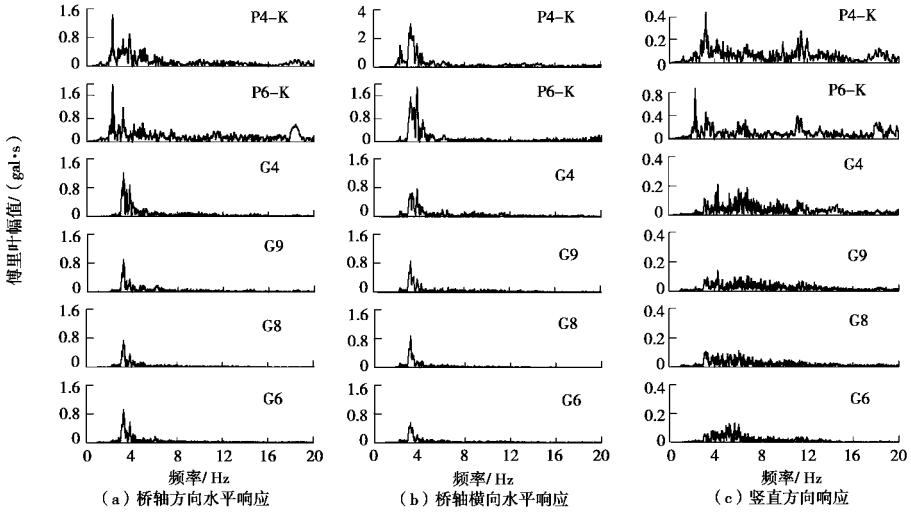


图 4 桥墩底部和地面各测试点的加速度傅里叶频谱（试验车东行工况）

Fig. 4 Fourier spectra of the acceleration responses on ground surface and pier bottoms, and measured records for eastbound test-run

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

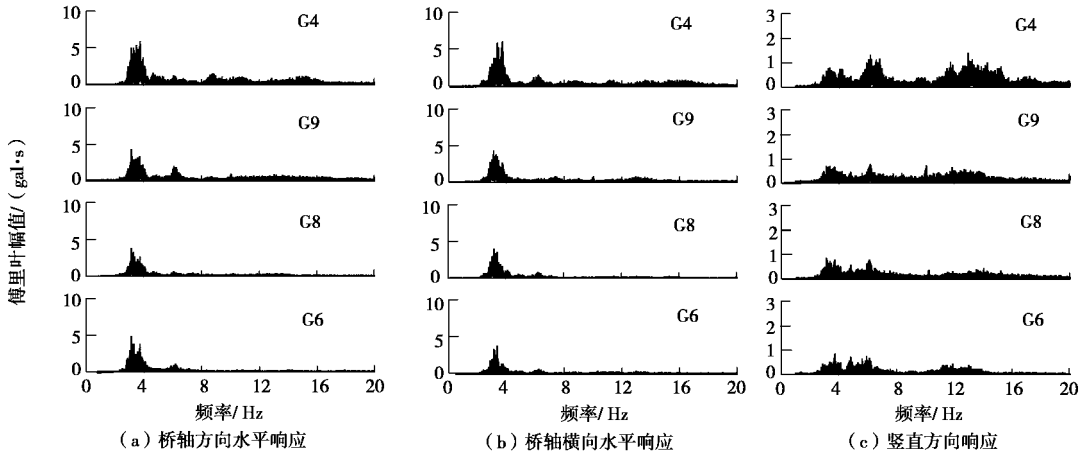


图 5 地面各测试点的加速度傅里叶频谱（通常交通工况）

Fig. 5 Fourier spectra of the acceleration responses on ground surface, and measured records for the case of ordinary traffic

对于高架桥周围的地面振动情况，面外波动对应于沿桥轴方向的水平响应，其它两个响应成分对应于面内波动。图中的实线表示群速度 v_G，虚线表示相速度 v_{ph}。群速度反映了波能量的传播，其最小值的频率对应于最大能量团块的传播，也就是最适合波传播的频率，称为艾里相（Airy phase）频率。由图可知，面外波动第一模态的艾里相频率约为 2.9 Hz，而面内波的约为 4.5 Hz。图 4 中桥墩底部的响应频谱也反映了高架桥产生的振动在 2～4 Hz 范围内比较突出，也是土中波传播比较容易的频率范围，因而显然地表的响应在这个频率范围是卓越的。地表测点的响应傅里叶频谱也已经证实了这一点。

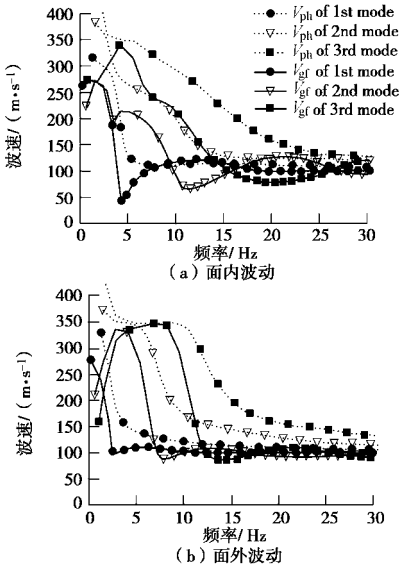


图 6 表面波弥散曲线

Fig. 6 Surface wave dispersion curves of the soil

3 解析结果分析

3.1 计算模型概述

图 7 所示为 P4 沉箱基础和周围土体的轴对称有限元模型。图中基础承台中心 O 点也即和桥墩的连接点，这里桥墩和基础的连接简化为一点。O 点含 6 个自由度，相应的从上部结构传递下来也就有 6 个作用力成分。沉箱基础的顶部承台在这个模型中是作为刚体处理的，而沉箱的其它部分，跟土体一样按普通实体单元处理。对于 P6 的桩基础，桩被离散为梁单元，对于轴对称模型，根据桩与基础中心的距离而以环形布置[7]。沉箱内部填入的是地表土体。基础周围的土体沿深度逐渐由软变硬，图中大致在深度为 13 m 处为软硬的分界处。整个模型的底部简化为基岩。横向的远处利用薄层单元设置传送边界，而避免了波动在人工边界的反射问题[9]。

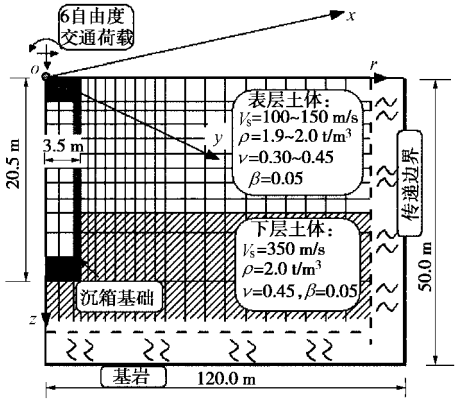


图 7 P4 沉箱基础－土体有限元模型

Fig. 7 FEM model of the caisson foundation P4 and the soil

根据前述的思路，由现场测试得到的桥墩上两点的响应推算出基础承台中心的响应，进而根据求得的阻抗函数可以得到从上部结构传递到基础的作用力。图 8 所示即为 P4 基础上的作用力。图中 X 表示沿桥轴的方向，Y 是垂直于桥轴的水平方向，而 Z 是竖直方向。由于桥梁的曲率，车辆通过时的离心作用，使得沿桥轴正交方向的水平作用力 P_Y 较大，也导致跟其

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

耦合的绕桥轴方向的弯矩 M_X 较大。M_Z 则因为车辆相对桥轴的偏心行驶，以及桥梁本身的结构特点，水平作用力各成分共同作用使得弯矩很大。傅里叶频谱显示了作用力的频率分布集中在 2～4 Hz 之间，这也是与图 4 中桥梁结构的响应一致的。这里的 6 个作用力成分中，P_X 和 M_Z 对地面响应的面外成分贡献较大，其余 4 项主要对面内响应产生作用。

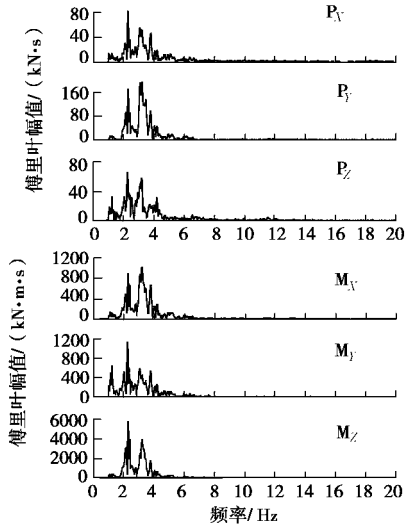


图 8 P4 基础的有效作用力傅里叶频谱

Fig. 8 Fourier spectra of the effective input loads at P4

交通振动这样的小变形问题，可以通过各个基础对地面响应的贡献在时域内简单叠加得到总的响应。沿观测点线的区域因为 P4 和 P6 的贡献占绝对地位，这里只叠加了这两个基础的影响，即

$$\boldsymbol{u}_{\mathrm{g}}^{\mathrm{T}}(t)=\boldsymbol{u}_{\mathrm{g}}^{\mathrm{P4}}(t)+\boldsymbol{u}_{\mathrm{g}}^{\mathrm{P6}}(t)。\tag{22}$$

因为 P4 桥墩和桥梁的固定链接，该处的限制作用最大，因而得出的 P4 基础的作用力数倍于 P6 基础，这也是符合图 4 中地面响应的规律的。

3.2　地面响应结果分析

图 9 所示为计算所得的试验车东行工况下各观测点的响应。比较图 4 的实测结果，发现计算结果和实测数据是基本一致的。通过比较 G8 和 G6 处的响应可以发现，计算结果也同样显示了距离高架桥轴较远的 G6 点的响应较大。在靠近高架桥的 G4 测点，两个水平响应的幅值相差无几，但是从这 4 个测点的数据看来，随着离开高架桥的距离，面内响应衰减得较快。这也是计算结果和实测数据一致的地方。各响应成分的傅里叶频谱跟图 4 也比较吻合，响应的卓越频率在 3.5 Hz 左右。这也充分证明了桥墩的刚性基本假设是合理的。

基于试验车工况的合理验证，这里进一步对通常的交通状况也进行了计算。因为交通流量的增加，桥梁结构上的变形幅度也会相应地增大，这对于本文的基本假设或许是个考验。这里依然假设桥墩是刚性的。通过同样的解析流程，得到相应的地面响应。而图 10 即为计算所得的频域响应。比较图 5 的实测地面响应，显然结果是满意的。除了竖直响应在频率分布上的偏差有点明显之外，水平响应的两个成分都保持了 3.5 Hz 左右的卓越特性，无论是频率分布还是响应的幅值，都符合得很好。因此，总的来说，对通常的繁忙交通，桥墩结构的刚性假设以及本文提出的预测方法都是合理的，可靠的。

在本研究的基础上，下一步工作将考虑在高架桥附近设置隔振措施，探讨设计的合理性，以期达到最佳的工程要求。

4　结　　论

根据公路高架桥的结构特点，提出了一种预测高架桥交通引起的地面响应的有效方法，并通过与实测数据的比较，可行性得到了验证。通过假设高架桥桥墩的刚性，可以由结构上的实测数据求得桥墩底部的响应，进而将高架桥交通的问题简化为地表振源沿高

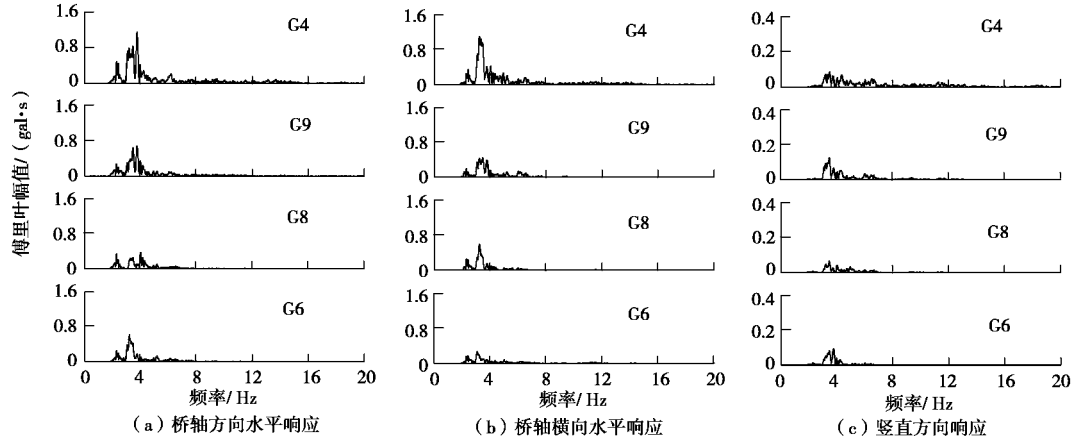


图 9 地面响应的解析结果（试验车东行工况）

Fig.9 Fourier spectra of the computation results of the ground responses for eastbound test-run

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

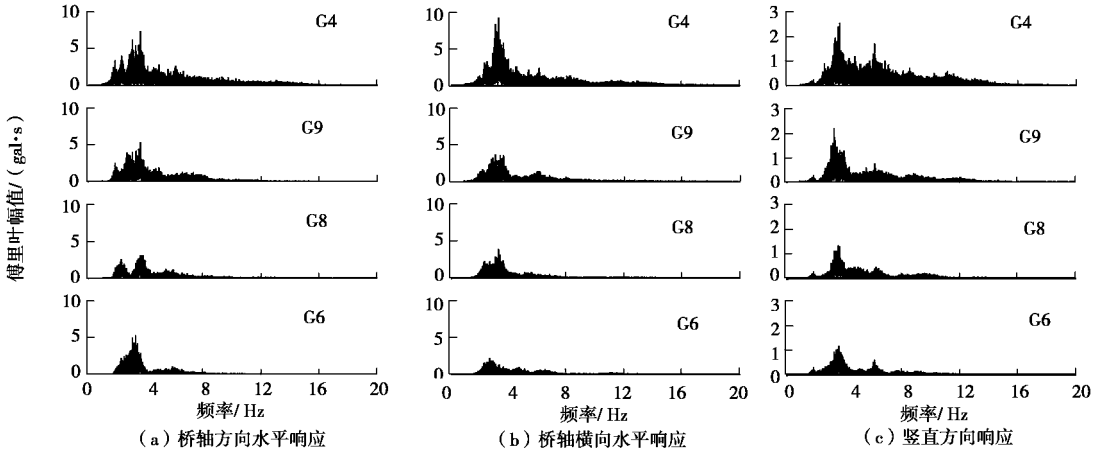


图 10 地面响应的解析结果（通常交通工况）

Fig. 10 Computing results of the ground responses for the case of ordinary traffic

架桥方向分布的问题。该方法避免了普通交通荷载本身的随机性和复杂性，简化了预测地面响应的思路。由于本方法对通常的高架桥结构都适合，具有相当的广泛性，而预测结果的准确性也足以满足工程要求，因此有一定的应用价值。

参考文献：

[1] TAKEMIYA H, CHEN F. Traffic-induced vibrations from viaduct: hybrid procedure of measurement and FEM analysis for prediction and mitigation of ground motions[J]. Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, JSCE, 2006, **62**(2): 204 – 214.

[2] TAKEMIYA H, CHEN F, IDA K. Ground vibration prediction and mitigation by WIB for traffic on continuous multi-span viaduct on soft site[C]// Sixth European Conference on Structural Dynamics. Eurodyn, 2005: 1317 – 1322.

[3] HUNG H H, YANG Y B. A review of researches on ground-borne vibrations with emphasis on those induced by trains[J]. Proceedings of the National Science Council, Part A, 2001, **25**(1): 1 – 16.

[4] SHENG X, JONES C J C, THOMPSON D J. Prediction of ground vibration from trains using the wavenumber finite and boundary element methods[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006(293): 575 – 586.

[5] LARS H. Simulations and analyses of train-induced ground vibrations in finite element models[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, **23**(5): 403 – 413.

[6] TAKEMIYA H, CHEN F, SHIMABUKU J. Vibration mitigation alongside of shinkansen train viaduct by combined foundation connecting beam and WIB[J]. Proceedings of Railway Mechanics, JSCE, 2006(10): 31 – 36.

[7] TAKEMIYA H. Three-dimensional seismic analysis for soil-foundation-superstructure based on dynamic substructure method[J]. Journal of Structural Engineering and Earthquake Engineering, JSCE, 1985, **2**(1): 139s – 149s.

[8] TAKEMIYA H. Ring-pile analysis for a grouped pile foundation subjected to base motion[J]. Journal of Structural Engineering and Earthquake Engineering, JSCE, 1986, **3**(1): 195s – 202s.

[9] KAUSEL E, ROESSET J M. Stiffness matrices for layered soils[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1981, **71**(6): 1743 – 1761.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net