# 地下工程抗震分析中地震动输入方法研究

黄 胜[1]，陈卫忠[1]，伍国军[1]，郭小红[2]，乔春江[2]
(1. 中国科学院武汉岩土力学所 岩土力学与工程国家重点实验室，湖北 武汉 430071；
2. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司，湖北 武汉 430056)

**摘要：**提出一种新的基于无限元人工边界的合理的地震动输入方法，该方法考虑到地层的辐射阻尼和地震波在地层中的反射和散射，采用波场分解的方法给出地震波从底面垂直入射时不同边界面上的等效地震荷载的计算公式。同时进行算例考证，结果表明，采用固定边界计算结果会出现失真的扰动，而采用该方法其结果与解析解吻合得比较好。最后将该方法用于西藏嘎龙拉隧道三维地震动力分析中，得到一些有意义的结论。

**关键词：**地下工程；抗震分析；地震动输入方法；无限元动力人工边界；辐射阻尼；波场分解法
**中图分类号：**TV 144 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－6915(2010)06－1254－09

# STUDY OF METHOD OF EARTHQUKAE INPUT IN ASEISMIC ANALYSIS FOR UNDERGROUND ENGINEERING

HUANG Sheng[1]，CHEN Weizhong[1]，WU Guojun[1]，GUO Xiaohong[2]，QIAO Chunjiang[2]
(1. *State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering*，*Institute of Rock and Soil Mechanics*，*Chinese Academy of Sciences*，*Wuhan*，*Hubei* 430071，*China*；2. *Second Highway Consultants Co.*，*Ltd.*，*China Communications Construction Co.*，*Wuhan*，*Hubei* 430056，*China*)

**Abstract：**A new earthquake input method based on infinite element dynamic artificial boundary is proposed. In this new method，radiation damping of the strata and reflection，scattering of the seismic wave in the strata are both considered；and equivalent earthquake load formulae in different boundary surfaces for seismic waves vertically incident from the bottom of computational domain are deduced by using the wave field separation method. Meanwhile，a numerical example is given to verify the validity and accuracy of the method. The results show that the distortional disturbance appears in the result adopting fixed boundary，whereas the results using the method proposed tally with the results using analytical method well so as to prove the effectiveness of the presented method. At last，the new earthquake input method is applied to the three-dimensional aseismic analysis of Galongla tunnel，and some meaningful conclusions are drawn.

**Key words：**underground engineering；aseismic analysis；earthquake input method；infinite element dynamic artificial boundary；radiation damping；wave field separation method

## 1 引 言

地下工程抗震分析中，现在已开始普遍采用有限元动力分析法，该方法中关键的一环是合理的地震动输入方式。可以说，合理的地震动输入方式是正确进行抗震分析的基石，但是目前地震动输入方法还比较混乱，较多学者沿用地面建筑物的地震动输入方式，模型边界采用固定边界，仅从计算模型底部输入地震波，这是很不合理的一种操作方式。实际上，地下工程有它的特殊性，比如地层中存在辐射阻尼，外源地震波会在地层中发生反射和散射等，因此，套用地面建筑的地震输入方式是很不合适的。

合理的地震动输入方式实际上涉及 2 个层面的

**收稿日期：**2010－01－15；**修回日期：**2010－03－23
**基金项目：**国家自然科学基金面上项目(40772184)；国家自然科学基金重大国际合作(50720135906)；中国科学院西部行动计划(KJCX－YW－506)
**作者简介：**黄 胜(1982－)，男，2005 年毕业于武汉大学水利水电工程专业，现为博士研究生，主要从事岩土地下工程抗震方面的研究工作。E-mail：hsheng407@sina.com

问题：人工边界的选取和合理的地震波场处理方法。人工边界在物理意义上是用来等效体现无限地层辐射阻尼，目前已经发展了很多类，如黏性边界[1]、旁轴近似边界[2]、透射边界[3]、黏弹性边界[4]、无限元边界[4, 5]等。目前应用比较广泛的主要有 2 类边界：(1) 一类是廖振鹏等[3]提出的对一般无限域模型具有普遍适用性的人工透射边界；(2) 一类是基于动态子结构方法的人工边界，如黏性边界，黏弹性边界和无限元边界。后一类方法虽然比较粗略，但物理意义较清晰，易在通用有限元软件上实现，因此运用更广。

地震波场处理方法主要是一种波场分解的概念，地震总波场可以可分解为自由波场和散射波场，其中散射波由近场“地层－结构”体系产生。在这一方面，刘晶波等[6, 7]针对黏弹人工边界，提出散射波由人工边界吸收，入射波通过将其转化为作用于人工边界上的等效荷载的方法实现波动输入。孔戈[8]等基于多次透射边界，考虑了波场的分离，提出了一种简便的地震动输入方法，杜修力等[9, 10]采用黏弹边界，考虑到人工边界各边界面的地震波场的不同，分别给出了各边界面的地震等效荷载的解析应力公式，贺向丽和李同春[11]更进一步明确了波场分离的概念，并提出了基于黏弹边界的更一般化的计算地震等效荷载的公式。

本文基于无限元动力人工边界，采用波场分离的技术，提出了用于地下工程抗震分析的地震输入方式，给出了完整的计算地震等效荷载的实用公式，通过了算例的考证，并将其用于西藏嘎龙拉隧道三维地震动力分析中。

## 2　计算方法和原理

### 2.1　无限元边界

无限元在动力计算中充当吸收边界(quiet-boundary)的角色，为保证任何入射情况下均无反射波，单元本身引入了阻尼系数[5, 12]。

对纵波和横波，无限元阻尼系数分别为

$$d_{\mathrm{P}} = \frac{\lambda + 2G}{v_{\mathrm{P}}} = \rho C_{\mathrm{P}} \tag{1}$$

$$d_{\mathrm{S}} = \rho C_{\mathrm{S}} \tag{2}$$

式中：$G$ 为剪切模量，$\rho$ 为介质密度，$C_{\mathrm{P}}$ 为纵波波速，$C_{\mathrm{S}}$ 为横波波速。

这样将边界阻尼常数 $d_{\mathrm{P}}$，$d_{\mathrm{S}}$ 考虑到无限元中，无限元就能够充当吸收边界。

但是无限元人工边界有它自己的问题，无限元人工边界仅对内源问题有效，即对从有限域穿过人工边界进入无限域的外行波的模拟有效，对外源入射问题和散射问题(入射地震波作用下广义结构或局部地质、地形条件存在会引起地震波散)，无限元无法解决。为解决上述问题，本文针对 ABAQUS 中的无限元单元进行了二次开发。其中，外源问题通过对人工边界的二次开发得以解决，散射问题的解决有赖于专门的波场分离方法。

### 2.2　波场分离的方法

针对不同人工边界上的波场特点，将侧边界区总波场分为自由波场和散射波场，底边界区总波场分为入射波场和散射波场。其中自由波场是指当广义结构不存在时入射波在无限域中产生的波场，包含了入射波和反射波两者的贡献；散射波场是指在总波场中扣除已知的入射波场或自由波场后的部分。入射场或自由波场直接通过转换为应力边界条件施加在边界上，散射场在人工边界结点上引起的应力由无限元边界自动提供，无需在边界结点上附加额外的荷载。入射场或自由波场在简单地层条件下可由解析解给出，在复杂地层条件下需先对原始地层进行试算，给出数值解。

### 2.3　无限元动力人工边界运动方程

无限元人工边界的应力为

$$\boldsymbol{f}^{\mathrm{damp}} = d\boldsymbol{V} \tag{3}$$

式中：$d$为无限元阻尼系数，$\boldsymbol{V}$为介质粒子的振动速度。

由式(3)可以看到，无限元人工边界的应力仅与该无限元内结点该时刻的振动速度反应值相关，物理上相当于在边界结点每个方向施加一个一端固定的单向阻尼元件。

进一步，将无限元人工边界引入计算模型，这样整个“无限元－有限元”耦合封闭体系可以用统一的运动方程形式表示，即

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{u}} + \boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{u}} + \boldsymbol{K}\boldsymbol{u} = \boldsymbol{F} + (\boldsymbol{f} + \boldsymbol{f}^{\mathrm{damp}})A \tag{4}$$

式中：$\ddot{\boldsymbol{u}}$，$\dot{\boldsymbol{u}}$，$\boldsymbol{u}$ 分别为加速度、速度和位移向量；$\boldsymbol{M}$，$\boldsymbol{C}$，$\boldsymbol{K}$ 分别为体系的质量矩阵、材料阻尼矩阵、刚度矩阵；$\boldsymbol{F}$ 为其他外力向量；$\boldsymbol{f}$ 为自由地震波场(入射地震波场)在人工边界出引起的应力；$A$ 为节点的影响面积。

动力方程求解方面，隐式积分和显式积分方法均可采用。

### 2.4 无限元人工边界上的波动输入

从总体上看，由于地壳介质的密度由地表往下随地层深度而增大，按物理学中波在不同介质中传播的折射和反射定律，由地壳深部往地表传播的地震波其入射方向将逐渐接近垂直水平地表的竖向[13]，因此，在无限元人工边界上(盒形截断区域)纵波和横波均可以考虑为垂直入射情况。

2.4.1 P 波(纵波)波动输入

P 波在地层微元体中引起的应力主要是法向的正应力。对于底边的波动输入，由广义胡克定律可知，P 波在底边界产生的法向应力为

$$f_{\text{n-bot}} = \rho C_{\text{P}} V_{\text{P}} \tag{5}$$

式中：$V_{\text{P}}$ 为纵波到达底边时引起的介质粒子竖向振动速度。

无限元人工边界相应的法向应力为

$$f_{\text{n-bot}}^{\text{damp}} = d_{\text{n}} V_{\text{P}} \tag{6}$$

式中：$d_{\text{n}}$ 为法向阻尼系数，且 $d_{\text{n}} = d_{\text{P}} = \rho C_{\text{P}}$。

对于侧边的波动输入，根据广义胡克定律[14]，微元体中 P 波产生的水平正应力为竖向正应力的 $\dfrac{\lambda}{2G+\lambda}$ 倍，同时考虑到入射波场和反射波场的叠加，则 P 波在侧边界产生的法向应力为

$$f_{\text{n-side}} = \frac{\lambda}{2G+\lambda} \rho C_{\text{P}} (V_{\text{P-in}} - V_{\text{P-out}}) \tag{7}$$

其中，

$$2G + \lambda = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \tag{8}$$

$$C_{\text{P}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \tag{9}$$

式中：$E$ 为弹性模量，$V_{\text{P-in}}$ 为纵波入射波到达侧边时引起的介质粒子竖向振动速度，$V_{\text{P-out}}$ 为纵波自由面反射波到达侧边时引起的介质粒子竖向振动速度，$\lambda$ 为拉梅常数，$\nu$ 为泊松比。

由式(8)，(9)可得到

$$2G + \lambda = \rho C_{\text{P}}^2 \tag{10}$$

将式(10)代入式(7)得到

$$f_{\text{n-side}} = \frac{\lambda}{C_{\text{P}}} (V_{\text{P-in}} - V_{\text{P-out}}) \tag{11}$$

而 P 波在侧边界产生的切向应力为 0，即

$$f_{\tau\text{-side}} = 0 \tag{12}$$

对侧边无限元人工边界，无限元人工边界相应的法向内力为 0，即

$$f_{\text{n-side}}^{\text{damp}} = 0 \tag{13}$$

竖向内力包含入射波和反射波的合效应，即

$$f_{\tau\text{-side}}^{\text{damp}} = d_{\tau} (V_{\text{P-in}} + V_{\text{P-out}}) \tag{14}$$

式中：$d_{\tau}$ 为切向阻尼系数，且 $d_{\tau} = d_{\text{S}} = \rho C_{\text{S}}$。

2.4.2 S 波(横波)波动输入

S 波在地层微元体中引起的应力主要是切向的剪应力。对 S 波，与 P 波类同，得到：

(1) 底边：

$$f_{\tau\text{-bot}} = \rho C_{\text{S}} V_{\text{S}}, \quad f_{\tau\text{-bot}}^{\text{damp}} = d_{\tau} V_{\text{S}} \tag{15}$$

(2) 左右侧边：

$$f_{\text{n-side}} = 0, \quad f_{\tau\text{-side}} = \rho C_{\text{S}} (V_{\text{S-in}} - V_{\text{S-out}}) \tag{16}$$

$$f_{\text{n-side}}^{\text{damp}} = d_{\text{n}} (V_{s\text{-in}} + V_{s\text{-out}}), \quad f_{\tau\text{-side}}^{\text{damp}} = 0 \tag{17}$$

(3) 前后侧边：

$$f_{\text{n-side}} = 0, \quad f_{\tau\text{-side}} = 0 \tag{18}$$

$$f_{\text{n-side}}^{\text{damp}} = 0, \quad f_{\tau\text{-side}}^{\text{damp}} = d_{\tau} (V_{\text{S-in}} + V_{\text{S-out}}) \tag{19}$$

式中：$C_{\text{S}}$ 为横波波速，$V_{\text{S}}$ 为横波到达底边时引起的介质粒子竖向振动速度，$V_{\text{S-in}}$ 为横波入射波到达侧边时引起的介质粒子竖向振动速度，$V_{\text{S-out}}$ 为横波自由面反射波到达侧边时引起的介质粒子竖向振动速度。

将以上各分项力(式(5)，(6)，(11)～(19))综合起来，得到边界上施加的等效地震力：

(1) P 波入射情况

① 底边界面：

$$F_{BZ}^{-Z} = (f_{\text{n-bot}} + f_{\text{n-bot}}^{\text{damp}}) A = (\rho C_{\text{P}} V_{\text{P}} + d_{\text{n}} V_{\text{P}}) A \tag{20}$$

② 左侧边界面：

$$\left.\begin{aligned} F_{BX}^{-X} &= (f_{\text{n-side}}^{-X} + f_{\text{n-side}}^{\text{damp}-X}) A = \frac{\lambda}{C_{\text{P}}} [V_{\text{P-in}}(t-\Delta t_1) - \\ &\quad V_{\text{P-out}}(t-\Delta t_2)] A \\ F_{BZ}^{-X} &= (f_{\tau\text{-side}}^{-X} + f_{\tau\text{-side}}^{\text{damp}-X}) A = d_{\tau} [V_{\text{P-in}}(t-\Delta t_1) + \\ &\quad V_{\text{P-out}}(t-\Delta t_2)] A \end{aligned}\right\} \tag{21}$$

③ 右侧边界面：

$$\left.\begin{aligned} F_{BX}^{+X} &= -F_{BX}^{-X} \\ F_{BZ}^{+X} &= F_{BZ}^{-X} \end{aligned}\right\} \tag{22}$$

④ 前边界面：

$$\left.\begin{aligned} F_{BY}^{-Y} &= F_{BX}^{-X} \\ F_{BZ}^{-Y} &= F_{BZ}^{-X} \end{aligned}\right\} \tag{23}$$

⑤ 后边界面：

$$\left.\begin{aligned} F_{BY}^{+Y} &= -F_{BX}^{-X} \\ F_{BZ}^{+Y} &= F_{BZ}^{-X} \end{aligned}\right\} \tag{24}$$

(2) S 波入射情况

① 底边界面：

$$F_{BX}^{-Z} = (f_{\text{n-bot}} + f_{\text{n-bot}}^{\text{damp}})A = (\rho C_{\text{S}} V_{\text{S}} + d_{\tau} V_{\text{S}})A \tag{25}$$

② 左侧边界面：

$$\left.\begin{aligned} F_{BX}^{-X} &= (f_{\text{n-side}}^{-X} + f_{\text{n-side}}^{\text{damp}-X})A = d_{\text{n}}[V_{\text{S-in}}(t-\Delta t_3) + \\ &\quad V_{\text{S-out}}(t-\Delta t_4)]A \\ F_{BZ}^{-X} &= (f_{\tau\text{-side}}^{-X} + f_{\tau\text{-side}}^{\text{damp}-X})A = \rho C_{\text{S}}[V_{\text{S-in}}(t-\Delta t_3) - \\ &\quad V_{\text{S-out}}(t-\Delta t_4)]A \end{aligned}\right\} \tag{26}$$

③ 右侧边界面：

$$\left.\begin{aligned} F_{BX}^{+X} &= F_{BX}^{-X} \\ F_{BZ}^{+X} &= -F_{BZ}^{-X} \end{aligned}\right\} \tag{27}$$

④ 前边界面：

$$F_{BX}^{-Y} = (f_{\tau\text{-side}}^{-Y} + f_{\tau\text{-side}}^{\text{damp}-Y})A = d_{\tau}[V_{\text{S-in}}(t-\Delta t_3) + V_{\text{S-out}}(t-\Delta t_4)]A \tag{28}$$

⑤ 后边界面：

$$F_{BX}^{+Y} = F_{BX}^{-Y} \tag{29}$$

其中：

$$\Delta t_1 = l / C_{\text{P}}, \quad \Delta t_2 = (2D - d) / C_{\text{P}} \tag{30}$$

$$\Delta t_3 = l / C_{\text{S}}, \quad \Delta t_4 = (2D - d) / C_{\text{S}} \tag{31}$$

式中：$X$，$Y$，$Z$ 分别为 3 个坐标轴方向，其中 $X$，$Y$ 为 2 个水平向，$Z$ 为竖向；$F_{BX}^{-Z}$，$F_{BX}^{-X}$，$F_{BZ}^{-X}$，$F_{BX}^{+X}$，$F_{BZ}^{+X}$，$F_{BX}^{+Y}$ 和 $F_{BX}^{-Y}$ 为等效地震荷力，其中，上标代表人工边界外法线方向，下标代表力分量方向，与坐标轴一致为正，相反为负；$D$ 为底面到地表的竖直距离，$l$ 为节点到底面的竖直距离；$\Delta t_1$，$\Delta t_2$ 分别表示 P 波入射波和反射波到达侧边结点时的时间延迟；$\Delta t_3$，$\Delta t_4$ 分别表示 S 波入射波和反射波到达侧边结点时的时间延迟。

对较软的土层或者地层较为复杂的情况，存在非线性，此时地震波在边界上产生的地震应力分项不再由上述公式给出，而是先利用相关软件试算无地下结构的地层得到地震应力分项和质点振动速度，由上述公式计算得到人工边界相应的应力分项，最后再叠加各应力分项计算得到等效地震力。

## 3　算例验证

现验证基于无限元人工边界的地震动输入方法的可靠性。如图 1 所示的三维弹性半空间模型，从底部垂直入射平面 P，S 波，入射波位移时程曲线如图 2 所示，求三维弹性半空间内各点的位移反应。外源地震动输入采用 2 种思路，一种是本文提出的基于无限元人工边界同时考虑波场分离的地震输入方式，另一种思路是基于固定边界的地震输入方式，仅从计算模型底部输入地震波。

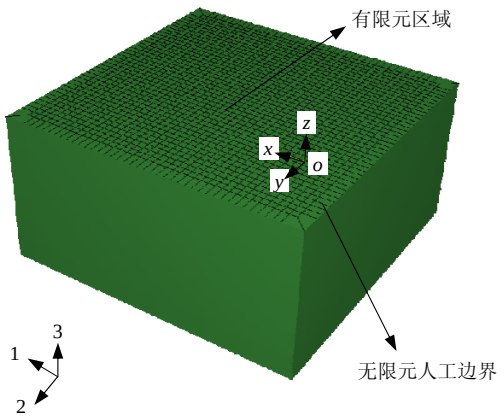



图 1　模型整体离散网格

Fig.1　Integral discrete meshes

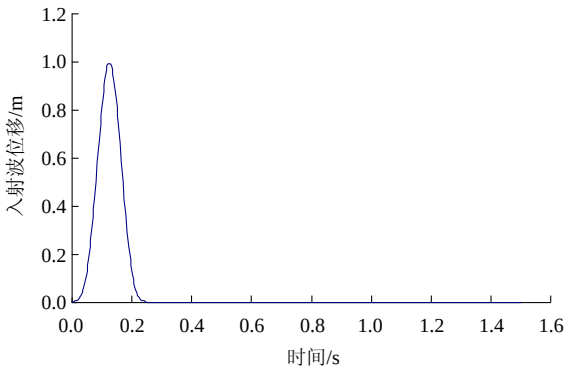
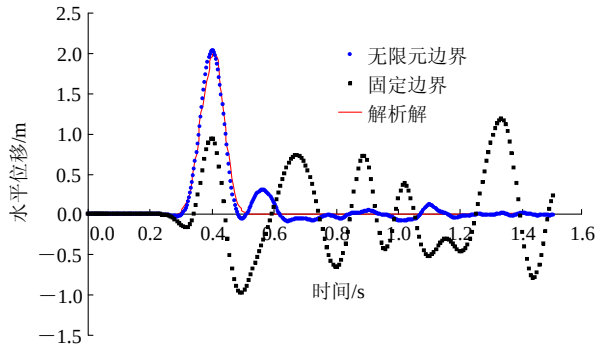



图 2　入射波位移时程曲线

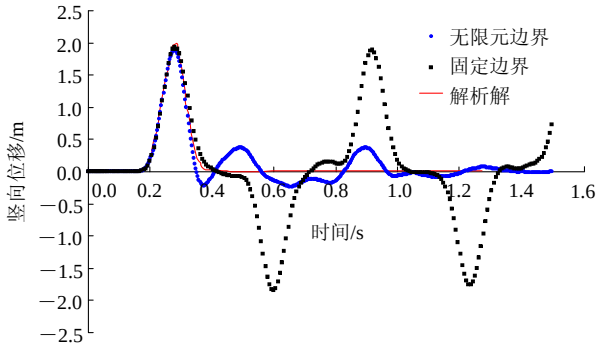
Fig.2　Velocity time-history curve of incident wave

介质弹性模量 $E=1.323\times10^{10}$ Pa，泊松比 $\nu=0.25$，质量密度 $\rho=2\ 700\ \mathrm{kg/m^2}$，截取 762 m(长)×762 m(宽)×381 m(高)的长方形有限区域进行计算，用六面体单元剖分，单元尺寸为 $\Delta x=\Delta y=19.05$ m，采用 ABAQUS 显式积分算法，自动时间增量步。

该问题的自由地表位移解析解为考虑行波延迟后放大 2 倍的入射位移时程。图 3(a)，(b)分别给出 S 波入射下地表水平位移时程和 P 波入射下地表竖向位移时程。由图 3 可以看出，根据本文提出的方法所得到的结果和理论解吻合得比较好，具有较好的计算精度；而基于固定边界的地震动输入方式与理论解相差比较大，其中，采用固定边界求得的地表水平位移峰值大概只有理论解的一半，且位移波动并没有随时间增长出现衰弱的趋势，而是出现了反复振荡，求得的地表竖向位移峰值与理论解接近，但是结果也出现了不真实的振荡。




(a) S 波




(b) P 波

图 3　S，P 波入射下地表竖向位移时程曲线

Fig.3　Time-history curves of surface horizontal displacements of shear and longitudinal wave incidences

位移结果出现振荡的原因是采用固定边界后，向外传播的地震波在边界处又反射回模型，引起失真的扰动。实际上地震波向远场传播时能量是逐渐逸散的，因此固定边界给出的结果是不合理的，无限元人工边界能够很好的体现这种能量逸散的效果，体现了地层辐射阻尼效应，从而能给出合理的结果。

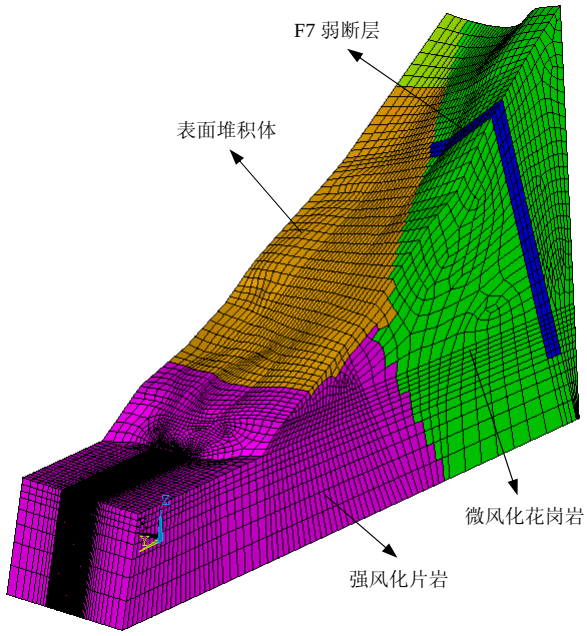
## 4　工程实例

### 4.1　基本资料

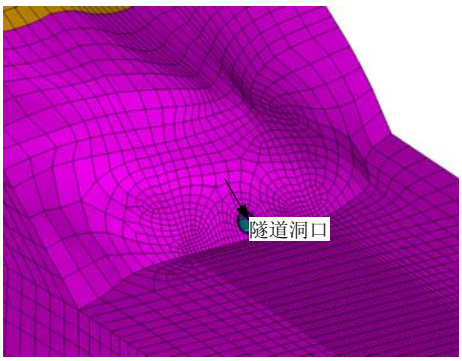
嘎龙拉隧道位于西藏林芝地区波密县和墨脱县交界处，是扎墨公路新建工程的控制性工程，隧道横穿岗日嘎布山山脉，全长约 3 300 m，最大埋深约 833 m。项目区域地震活动强烈，工程场地历史上遭受过的 IX 度地震烈度影响来自于近场区外 1950 年察隅—墨脱 8.6 级大地震。近场区处于印度洋板块与欧亚板块之间的缝合带附近，处在 6 条区域性活动断裂带影响范围内，其中最主要的 NW 嘉黎断裂带嘎龙寺断裂在进洞口附近通过，NNE 向的扎木—马尼翁断裂北段位于隧道西侧 300 m 以外，近场区具备发生 7.0～7.5 级地震的构造条件(扎木—马尼翁断裂南段具备发生 8.0 级以上地震的构造条件)。

### 4.2　计算模型和计算方案

震害调查表明，隧道洞口段是地震破坏的集中部位，同时进洞口附近有嘎龙寺活断裂通过，因此计算模型取为隧道进口区段，计算模型范围为：沿隧道轴线方向取 969 m 的范围，沿隧道横向往轴线左右侧各取 117 m 的范围，竖直方向范围从洞口处地表铅直向下取 173 m(见图 4，其中，图 4(b)为显




(a) 整体有限元网络




(b) 细部

图 4　隧道洞口段有限元模型

Fig.4　Finite element meshes of tunnel portal section

示出材料分区，无限元人工边界未在图上显示)。

计算模型采用“有限元+无限元”的耦合计算模型，有限元区域采用三维八结点六面体减缩积分单元和六结点退化单元进行离散，边界采用三维无限元单元，共划分 97 065 个单元，104 354 个节点。单元尺寸取为主要地震波波长的 1/8，平均尺寸为 15 m，有限截断模型边界均采用三维无限元动力人工边界。采用通用有限元软件 ABAQUS 进行计算，初衬厚度为 20 cm，二衬厚度为 50 cm。

围岩及衬砌混凝土力学参数见表 1。由于地震频率比较低，在较低的应变速率下岩石的弹性模量提高不多，而且弹性模量随应变率提高而增加的幅度，对各种岩石是不同的，因此为保守计，材料弹性模量仍取静弹性模量。计算采用 Rayleigh 阻尼，按照 5%阻尼比[9, 16]，确定 Rayleigh 阻尼的 2 个比例系数为 $\alpha = 0.589$，$\beta = 0.000\ 995$。

表 1　围岩及衬砌混凝土力学参数

Table 1　Mechanical parameters of surrounding rock and tunnel lining

| 材料 | 密度 /(kg • m$^{-3}$) | 弹性模量 /GPa | 泊松比 | 波速/(m • s$^{-1}$) 纵波 | 波速/(m • s$^{-1}$) 横波 |
|---|---|---|---|---|---|
| 强风化黑云母石英片岩 | 2 300 | 2.0 | 0.30 | 1 082 | 578 |
| 微风化黑云母花岗岩 | 2 500 | 20.0 | 0.25 | 3 098 | 1 789 |
| F7 弱断层 | 2 300 | 1.0 | 0.30 | 765 | 409 |
| 堆积体 | 2 000 | 0.3 | 0.30 | 449 | 240 |
| 初砌混凝土 | 2 500 | 25.5 | 0.20 | – | – |
| 二砌混凝土 | 2 500 | 28.0 | 0.20 | – | – |

计算方法为“前期隐式静力分析+后期显示动力时程分析”(ABAQUS Standard+Explicit)，采用 ABAQUS Standard 隐式算法处理开挖支护静力计算，接着接力静力计算，将静力计算的结果导入 ABAQUS Explicit 显式计算模块中，采用显式算法处理地震问题。

### 4.3　地震动输入

隧道位于基岩之上(中)，基于计算分析得到本项目工程场地的地震基本烈度为 VIII 度。采用西藏地震局提供的《扎墨公路嘎隆拉隧道工程场地地震安全性评价报告》中推荐的人工合成地震波，进洞口按 50 a 10%超越概率考虑(见图 5)，地震动输入分 3 个方向，水平横向和纵向设计地震动峰值加速度为 0.325 g，竖向设计地震动峰值加速度取为水平向的 2/3。计算中将加速度时程曲线积分得到速度时程曲线，然后按本文的方法计算得到等效地震荷载作为地震输入。因三维地震计算耗时太长，计算分析中采用包含地震峰值加速度的持时 5 s 的振动加速度记录作为依据，保留了原有的频谱特性和峰值特性。计算时同时考虑了 P，S 波相位差的影响，其相位差按照表 1 中的波速进行换算。

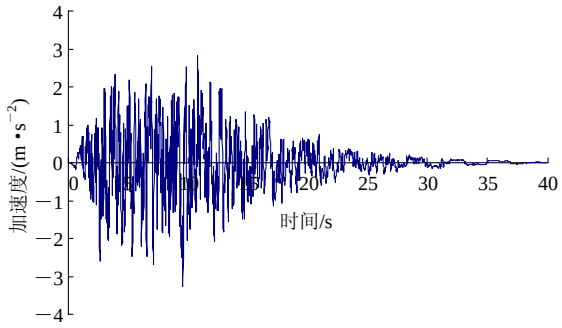
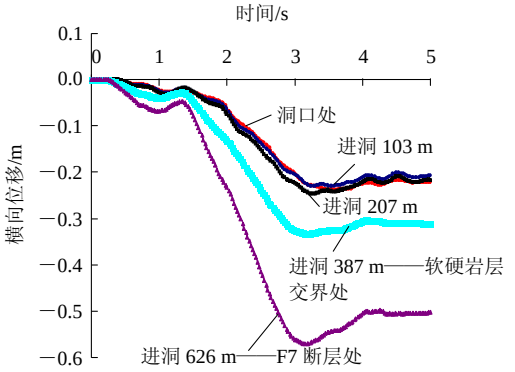



图 5　50 a 10%超越概率的人工波

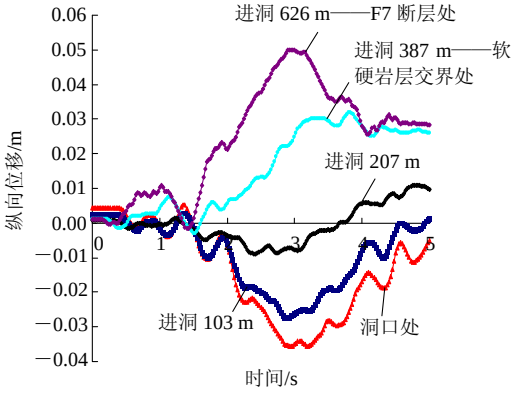
Fig.5　Artificial wave of 10% probability of exceedance in 50 years

### 4.4　计算结果与分析

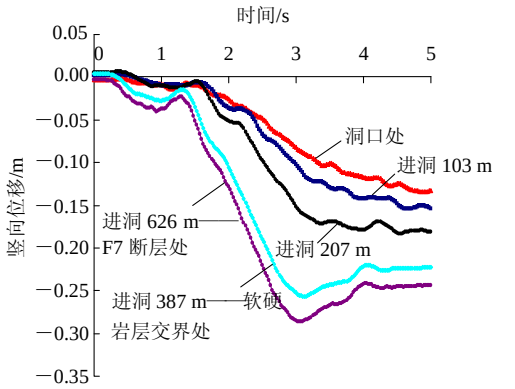
图 6(a)～(c)分别为隧道各位置处拱顶横向位移、纵向位移和竖向位移随时间变化曲线(其中，横向位移为垂直隧道轴线方向的位移，纵向位移为沿隧道轴线方向的位移，竖向位移为隧道竖直方向位移)，由图 6 可以看出，3 个方向位移最大位置均出现在 F7 断层处，一般地段位移最大位置出现在软硬岩层交界处。对横向位移，F7 断层位置位移最大值约为 57 cm，软硬岩层交界处最大位移值约为 33.4 cm，洞口、进洞 103 和 207 m 处横向最大位移相差不大，均在 23 cm 左右。对纵向位移，位移整体要比横向位移低一个量级，其变形不是控制因素，其中，F7 断层位置位移最大值约为 5 cm，软硬岩层交界




(a) 横向




(b) 纵向




(c) 竖向

图 6　隧道各断面位置处位移时程曲线

Fig.6　Time-history curves of displacements of tunnel sections

处最大位移值约为 3.2 cm。对竖向位移，F7 断层位置位移最大值约为 28.7 cm，软硬岩层交界处最大位移值约为 25.7 cm，洞口、进洞 103 和 207 m 处竖向最大位移分别为 13，15 和 18 cm，相差不大。

由位移计算结果可以看出，对隧道洞口段，震后隧道破坏严重的位置出现在软弱断层处和软硬岩层交界处，这也是与隧道震害调查的结论一致的。震后隧道最大横向变形达到 57 cm，出现在软弱断层处，因此针对隧道穿越断层部位应采取特别的抗震措施。另外，比较洞口、进洞 103 和 207 m 处的震中变形，地震响应并没有随进洞距离增大而出现衰减，这是因为隧道从洞口往里 400 m 范围均为强风化黑云母石英片岩(V 类围岩)，且埋深比较浅，这样整个软弱地层震后位移响应都会比较大。

图 7 为隧道各位置处拱底最大主应力随时间变化曲线。由图 7 所示，最大主应力响应规律与上述位移的规律大致一致。由图 9 所示，与位移响应的规律大致一致，大主应力最大值出现在 F7 断层处，一般地段大主应力最大值出现在软硬岩层交界处。其中，F7 断层位置震中大主应力最大值为 8.1 MPa，软硬岩层交界处为 4.2 MPa，洞口处应力值偏小，大主应力最大值约为 1.2 MPa，进洞 103 和 207 m 处应力峰值相差不大，分别为 2.3 和 2.5 MPa。

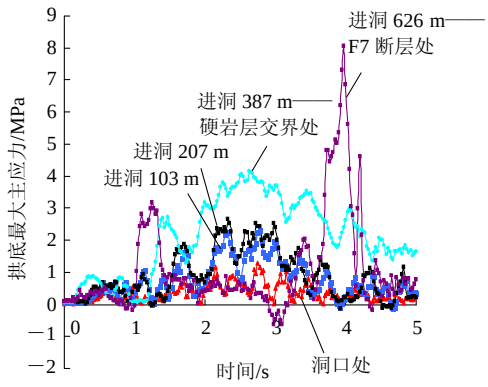



图 7　隧道各断面位置处拱底最大主应力时程曲线

Fig.7　Time-history curves of the maximum principal stress at the bottom of tunnel side wall of tunnel sections

由应力计算结果可以看出，地震中隧道软硬岩层交界处和断层处是地震破坏的集中区域，因震中拱底部位出现的最大拉应力峰值水平较高，对这些部位应采取特殊的抗震措施来降低地震的损害。洞口、进洞 103 和 207 m 处震中应力峰值不是很高，可通过加强配筋满足强度要求。

表 2，3 列出了各断面位置隧道横截面各部位位移和最大主应力数值。由表 2，3 可见，软硬岩层交界处和软弱断层处变形和应力值较大，对隧道同一断面，横截面不同位置位移值相差不大，应力值最大出现在拱底部位。

表 2　各断面位置隧道各部位地震位移值

Table 2　Seismic displacements of tunnel parts of different cross-sections

| 断面位置 | 横向位移最大值/cm | | | 纵向位移最大值/cm | | | 竖向位移最大值/cm | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 拱顶 | 拱腰 | 拱底 | 拱顶 | 拱腰 | 拱底 | 拱顶 | 拱腰 | 拱底 |
| 洞口处 | −23.1 | −22.8 | −22.5 | −3.5 | −3.6 | −3.3 | −12.0 | −11.9 | −11.5 |
| 进洞 103 m | −22.3 | −22.1 | −21.7 | −2.8 | −2.6 | −2.5 | −13.2 | −12.8 | −12.7 |
| 进洞 207 m | −25.1 | −24.6 | −24.3 | 1.1 | 1.3 | 1.2 | −16.6 | −16.5 | −16.2 |
| 软硬岩层交界处 | −33.4 | −33.3 | −33.1 | 3.2 | 3.5 | 3.6 | −25.7 | −25.8 | −25.9 |
| F7 断层处 | −57.0 | −57.2 | −57.5 | 5.0 | 5.5 | 5.6 | −28.7 | −28.8 | −28.7 |

表 3　各断面位置隧道各部位地震应力值

Table 3　Seismic maximum principal stresses of tunnel parts of different cross-sections

| 断面位置 | 大主应力最大值/MPa | | |
|---|---|---|---|
| | 拱顶 | 拱腰 | 拱底 |
| 洞口处 | 0.81 | 1.56 | 1.67 |
| 进洞 103 m | 0.89 | 1.50 | 2.21 |
| 进洞 207 m | 1.31 | 1.07 | 2.52 |
| 软硬岩层交界处 | 1.31 | 2.22 | 4.20 |
| F7 断层处 | 7.25 | 7.33 | 8.06 |

## 5　结　论

由以上计算和分析可以得到如下结论：

(1) 简单的采用“固支边界+底部输入地震波”的方式分析地下工程地震动力响应是不尽合理的。边界单纯采用固支边界处理会导致向外传播的地震波在固支边界处又反射回模型，导致计算出的地震响应出现失真的扰动和振荡，实际上地震波向远场传播时能量是逐渐逸散的，固支边界无法体现这种辐射阻尼。底部输入地震波是套用地面建筑物的地震输入方式，实际上对地下工程，计算区域侧边地震动影响也应计入，另外，地震波在地层中还有反射和散射问题，这些都不是简简单单在底部输入地震波就能体现的。

(2) 本文提出的基于无限元人工边界的地震动输入方法考虑了地下工程地震响应的特殊性，具有足够的计算精度，是一种有效的分析方法。其中，无限元人工边界考虑到了地层辐射阻尼的效应，能够很好的体现这种能量逸散的效果。采用波场分解技术的地震动输入方法考虑到了侧边界地震动的输入，考虑了地震反射波和散射波的影响，比较符合实际。

(3) 将本文的方法用于西藏嘎龙拉隧道三维地震动力分析中，得到一些有意义的结论：对隧道洞口段，震后隧道破坏严重的位置出现在软弱断层处和软硬岩层交界处，对这些部位应采取必要的抗震措施来降低地震的损害；对隧道围岩软弱且埋深较浅段，震后也易发生破坏，需采取一定的抗震措施。

本文针对地下工程地震动力响应分析，提出了一种新的基于无限元人工边界的合理的地震动输入方法，考虑到了地层的辐射阻尼和地震波在地层中的反射和散射，采用波场分解的方法给出了地震波从底面垂直入射时不同边界面上的等效地震荷载的计算公式，避免了目前一些地震输入方法的不足，便于在通用有限元软件上实现，是一种适用性很强的方法。

**参考文献(References)：**

[1] LYSMER J，KULEMEYER R L. Finite dynamic model for infinite media[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division，ASCE，1969，95(4)：859－877.

[2] CLAYTON R，ENGQUIST B. Absorbing boundary conditions for acoustic and elastic wave equations[J]. Bulletin of the Seismological Society of America，1977，67(6)：1 529－1 540.

[3] 廖振鹏，黄孔亮，杨柏坡，等. 暂态波透射边界[J]. 中国科学(A 辑)，1984，(6)：556－564.(LIAO Zhenpeng，HUANG Kongliang，YANG Baipo，et al. Transmitting boundary of transient wave[J]. Science in China(Series A)，1984，(6)：556－564.(in Chinese))

[4] 吴鸿庆，任　侠. 结构有限元分析[M]. 北京：中国铁道出版社，

2000.(WU Hongqing，REN Xia. Finite element analysis for structures[M]. Beijing：China Railway Publishing House，2000.(in Chinese))

[5] Hibbitt，Karlsson and Sorensen，Inc.. ABAQUS theory manual and analysis user′s manual[R]. Pawtucket：Hibbitt，Karlsson and Sorensen，Inc.，2002.

[6] 刘晶波，吕彦东. 结构－地基动力相互作用问题分析的一种直接方法[J]. 土木工程学报，1998，31(3)：55－64.(LIU Jingbo，LU Yandong. A direct method for analysis of dynamic soil-structure interaction[J]. China Civil Engineering Journal，1998，31(3)：55－64.(in Chinese))

[7] 邱流潮，金　峰. 地震分析中人工边界处理与地震动输入方法研究[J].岩土力学，2006，27(9)：1 502－1 504.(QIU Liuchao，JIN Feng. Study of method of earthquake input and artificial boundary conditions for seismic soil-structure interaction analysis[J]. Rock and Soil Mechanics，2006，27(9)：1 502－1 504.(in Chinese))

[8] 孔　戈，丁海平，金　星，等. 多次透射边界在 ANSYS 软件中的应用[J]. 工程抗震与加固改造，2005，27(2)：67－70.(KONG Ge，DING Haiping，JIN Xing，et al. The application of multi-transmitting boundary in ANSYS[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting，2005，27(2)：67－70.(in Chinese))

[9] 杜修力，赵　密. 基于黏弹性边界的拱坝地震反应分析方法[J]. 水利学报，2006，37(9)：1 063－1 069.(DU Xiuli，ZHAO Mi. Analysis method for seismic response of arch dams in time domain based on viscous-spring artificial boundary condition[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2006，37(9)：1 063－1 069.(in Chinese))

[10] 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 Jianfeng，DU Xiuli，HAN Qiang，et al. An approach to numerical simulation for external source wave motion[J]. Engineering Mechanics，2007，24(4)：52－58.(in Chinese))

[11] 贺向丽，李同春. 重力坝地震波动的时域数值分析[J]. 河海大学学报，2007，35(1)：5－9.(HE Xiangli，LI Tongchun. Numerical analysis of seismic wave-motion of gravity dam in time domain[J]. Journal of Hohai University(Natural Science)，2007，35(1)：5－9.(in Chinese))

[12] 黄　胜，陈卫忠，杨建平，等. 地下工程地震动力响应及抗震研究[J]. 岩石力学与工程学报，2009，28(3)：483－490.(HUANG Sheng，CHEN Weizhong，YANG Jianping，et al. Research on earthquake-induced dynamic responses and aseismic measures for underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2009，28(3)：483－490.(in Chinese))

[13] 陈厚群. 坝址地震动输入机制探讨[J]. 水利学报，2006，12(12)：1 417－1 423.(CHEN Houqun. Discussion on seismic input mechanism at dam site[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2006，12(12)：1 417－1 423.(in Chinese))

[14] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京：水利电力出版社，1990：222－231.(ZHOU Weiyuan. Advanced rock mechanics[M]. Beijing：China Water Power Press，1990：222－231.(in Chinese))

[15] 高　峰. 地下结构动力分析若干问题研究[博士学位论文][D]. 成都：西南交通大学，2003.(GAO Feng. Research on some problems in dynamic analysis of underground structures[Ph. D. Thesis][D]. Chengdu：Southwest Jiaotong University，2003.(in Chinese))

[16] 刘晶波，杜义欣，闫秋实. 黏弹性人工边界及地震动输入在通用有限元软件中的实现[J]. 防灾减灾工程学报，2007，27(增)：37－42.(LIU Jingbo，DU Yixin，YAN Qiushi，et al. Method implementation on earthquake input and visco-elastic artificial boundary in general finite element software[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering，2007，31(Supp.)：37－42.(in Chinese))