

文章编号: 1001-1455(2009)02-0155-07

# 减小高速列车荷载对地面结构损害的数值分析\*

孙伟<sup>1,2</sup>, 王建国<sup>2,3</sup>, 姜绍飞<sup>1,4</sup>

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168;

2. 新加坡国立大学防护技术中心, 新加坡 119260;

3. 重庆大学资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400030;

4. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350002)

**摘要:** 用数值模拟的方法研究无填充壕沟、注水壕沟和砼填充壕沟对地表高速列车荷载引起振动的防护能力。运用 LS-DYNA 软件, 对高速列车荷载作用下地面结构所产生的动力响应进行数值分析。通过数值模拟计算发现, 无填充壕沟和注水壕沟可以明显降低地面结构关键点上的加速度与应力幅值, 而砼填充壕沟并无明显降低结构中关键点上的加速度与应力值。对于地表高速列车荷载引起的地面结构振动, 无填充壕沟与注水壕沟都有明显的防护作用, 而砼填充壕沟的防护作用不明显。

**关键词:** 固体力学; 衰减效应; 数值分析; 地面结构; 瑞利波; 无填充壕沟; 注水壕沟; 砼填充壕沟

**中图分类号:** O342

**国标学科代码:** 130·1565

**文献标志码:** A

高速列车运行时将与地表相互作用, 导致地基土介质产生剧烈的振动并释放出大量的能量。这些能量大部分通过表面的瑞利波传播给邻近的结构, 特别是地面结构。由于频率为 4~50 Hz 的振动波可能导致邻近地面结构产生共振<sup>[1-3]</sup>, 从而威胁到结构内部生命和财产的安全。为了减轻或防止该种灾害, 防护措施是必要的。通过对在高速列车振动荷载作用下邻近地面结构有、无防护时的动力响应分析, 可以为邻近铁路的地面结构在列车提速后的抗振安全性评估以及防护结构的合理设计、布置和选材等相关技术提供理论依据。因此, 开展减小高速列车荷载对邻近地面结构损害的数值分析研究有重要的理论和现实意义。

防护结构的种类繁多, 既有质地较硬的砼填充结构和柱支撑结构, 又有质地较软的改良地质土, 还有构造较简单的无填充壕沟<sup>[4-5]</sup>。早期, R. D. Woods<sup>[6]</sup>将防护形式分为主动防护与被动防护 2 类, 并通过野外试验研究了壕沟的尺寸与布置对于表面波防护的影响。此后, T. M. Al-Hussaini 等<sup>[7]</sup>推导解析解, 并研究了不同尺寸与不同位置的壕沟对地表水平振动荷载的防护能力。由于壕沟结构缺少支撑而容易倒塌, 所以大多采用填充壕沟防护结构。文献<sup>[8-9]</sup>中采用边界元数值模拟的方法, 对比研究了防护结构在填充不同材料时, 改变防护结构尺寸与结构位置对防护结构的防护能力的影响。但现在对于地表列车动力荷载防护的数值模拟研究并不多, 且土介质和结构材料的模拟多采用理想的弹性模型<sup>[1]</sup>, 大多忽略空气冲击波对结构的影响。

本文中在文献<sup>[1]</sup>几何模型的基础上, 选用更适合岩土介质的弹塑性模型, 综合研究空气冲击波和土介质表面弹性波对邻近结构的影响。

## 1 模拟概况

采用 LS-DYNA 软件作为数值分析的工具<sup>[10,12]</sup>。使用 Arbitrary Lagrange-Euler(ALE)算法来计算流体介质及可能大变形的介质, 如空气、水和土体。对基础和混凝土填充壕沟的模拟则采用 Lagrange 算法, 而梁与柱的计算采用 Be-lytschko-Lin-Tsay 算法。对空气、水、土体、基础和混凝土填充壕沟采用实体 SOLID164 单元, 而对梁和柱则选用壳体 SHELL163 单元, 单元厚度统一设定为 0.6 m 以模拟梁的高度与柱的宽度。

本文的防护对象为 6 层高三跨度的钢筋混凝土框架结构, 结构高度为 18 m, 宽度为 12 m, 其中每层高度为 3 m, 每跨跨度为 4 m。框架结构中梁的截面尺寸为 300 mm×600 mm, 而柱的截面尺寸也为 300 mm×600 mm, 见图 1。铁路路堤

\* 收稿日期: 2007-10-31; 修回日期: 2008-01-23

基金项目: 新加坡国防科技局基金项目;

重庆大学西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室访问学者基金项目

作者简介: 孙伟(1982—), 男, 硕士研究生。

高 1.5 m, 顶面宽 6 m, 其中心点位于框架结构左侧 20.1 m 处。列车荷载为两线型脉冲荷载, 间距为 1.8 m, 脉冲时程见图 2。宽 1.5 m、深 6 m 的地下防护层设置在铁路路堤与框架结构之间且防护层的右侧与框架的左侧柱的距离为 2 m, 框架结构的基础底面在地下 1.5 m, 宽 3 m, 厚 0.9 m。为了节省计算成本, 数值计算模型划分为近场与远场 2 个区域, 近场区域单元平面尺寸均为 0.3 m × 0.3 m, 其中空气部分高、宽和厚分别为 21、42、0.3 m; 土体部分的高、宽和厚分别为 15、42、

0.3 m; 近场区域左侧到路堤中心点的水平距离为 7 m, 而近场区域右侧边到结构右侧柱的水平距离为 3 m。远场区域以近场区域为中心, 其高、宽和厚度分别为 90、90、0.3 m, 所用单元的单元长度由邻近近场区域的 0.3 m 逐渐递增到邻近边界处的 0.9 m。为了模拟远场区域的无限远边界条件, 左、右 2 个边界设置为水平方向固定边界, 底面设定为竖直方向固定边界。本文中假定为平面应变问题, 因此对整体模型也要设置厚度方向 (0.3 m 方向) 上的位移和转角固定边界条件 (即  $\epsilon_z = 0, \gamma_{yz} = \gamma_{zx} = 0$ ), 其分区结构模型及尺寸如图 3 所示。

## 2 材料模型与计算参数

### 2.1 铁路路堤与砟填充壕沟的材料模型和基本参数

均采用弹性模型, 其中柯西偏应变张量共旋率和压力的计算表达式为

$$s_{ij}^{\nabla n+1/2} = 2G\dot{\epsilon}_{ij}^{n+1/2}, \quad p^{n+1} = -K \ln V^{n+1}$$

式中:  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$  和  $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$  分别为材料的剪切模量和体积模量,  $E$  和  $\nu$  分别为材料的弹性模量和泊松比。  $V$  是单元的相对体积, 等于现时体积与初始体积的比值。模型中铁路路堤和砟填充壕沟的材料密度分别为 2.00, 2.40 g/cm<sup>3</sup>; 弹性模量分别为 332.5 MPa, 28 GPa; 泊松比分别为 0.33, 0.30<sup>[11]</sup>。

### 2.2 土体的材料模型和基本参数

采用帽子模型, 即屈服面给弹性区加一个帽子, 使弹性区不再开口, 见图 4, 其中  $f_1$  是破坏函数,  $f_2$  是帽子屈服函数,  $f_3$  是张力截断函数。如果定义  $J_1 = \sigma_{ii} = 3p, J_{2D} = \frac{1}{2} s_{ij} \cdot s_{ij}, s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} p$ , 这 3 个函数的具体表达式分别为

$$f_1 = \sqrt{J_{2D}} - [\alpha - \gamma \exp(-\beta J_1) + \theta J_1]$$

$$f_2 = \sqrt{J_{2D}} - \frac{1}{R} \sqrt{[X(\kappa) - L(\kappa)]^2 - [J_1 - L(\kappa)]^2}$$

$$X(\kappa) = X_0 - \frac{1}{D} \ln \left( 1 - \frac{\epsilon_v^v}{W} \right), \quad L(\kappa) = \begin{cases} \kappa & \kappa > 0 \\ 0 & \kappa \leq 0 \end{cases}, \quad f_3 = T - J_1$$

式中:  $\alpha, \beta, \gamma, \theta, R, D$  和  $W$  为材料常数,  $\epsilon_v^v$  为体积应变,  $T$  为拉应力强度<sup>[10]</sup>。

帽子模型中弹性部分的参数取自文献[1], 但文献[1]中缺少对塑性和破坏准则的描述, 因此, 本文中参考文献[11]中的帽子模型参数: 土体的密度为 2.0 g/cm<sup>3</sup>, 体积模量为 117.35 MPa, 剪切模量为 45 MPa,  $\alpha$  为 1.725 MPa,  $\beta$  为 9.724 × 10<sup>-3</sup> MPa<sup>-1</sup>,  $\gamma$  为 1.26,  $\theta$  为 0,  $R$  为 2.5,  $D$  为 0.67,  $W$  为 0.066,  $X_0$  为 0 MPa<sup>-1</sup>。

### 2.3 框架结构的砟梁、柱与基础的材料模型和基本参数

采用 MAT\_PLASTIC\_KENEMATIC 模型模拟在动力荷载作用下混凝土梁、柱和基础的材料性能, 其屈服应力函数

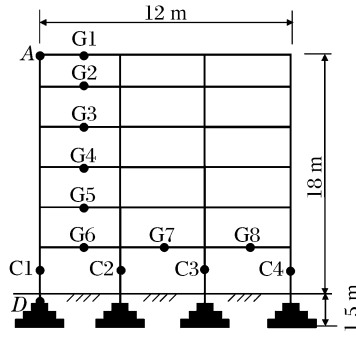


图 1 结构细部尺寸与关键点位置  
Fig. 1 Structural dimension and key-point positions

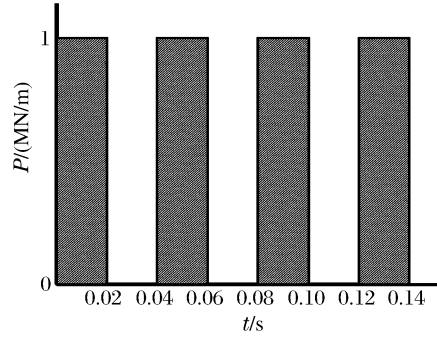


图 2 列车瞬时荷载时程  
Fig. 2 Train-induced loading

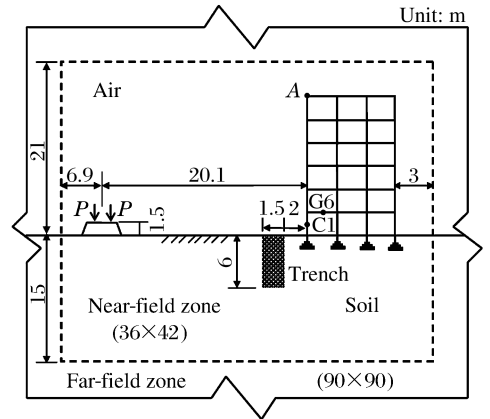


图 3 主体结构尺寸和有限元分区模型  
Fig. 3 Two-dimensional model and FEM zones

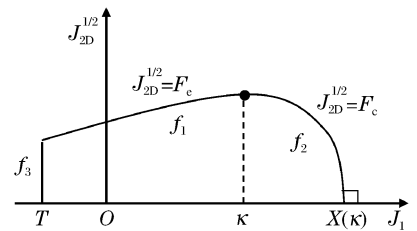


图 4 土体的帽子模型  
Fig. 4 Cap model of soils

$$\delta_y = [1 + (\dot{\epsilon}/C)^{1/\eta}] (\delta_0 + \beta E_p \epsilon_{eff}^p)$$

式中： $C$ 、 $\eta$  和  $\beta(0 < \beta < 1)$  为常数， $E_p$  为塑性硬化模量， $\epsilon_{eff}^p$  为相对塑性应变， $\delta_0$  为初始屈服应力，应变率  $\dot{\epsilon} = \sqrt{\dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}}$ 。混凝土的材料模型<sup>[12]</sup>参数如下：密度为 2.4 g/cm<sup>3</sup>，泊松比为 0.30，弹性模量为 40 GPa，初始屈服应力为 35 MPa，切变模量为 4 GPa，硬化因数为 0.5。侵蚀单元的失效应变假定为 0.8，其他参数取 LS-DYNA 的默认值。

### 2.4 空气和水的材料模型与基本参数

用 MAT\_NULL 材料模型模拟空气，其状态方程为  $p = S_0 + S_1\mu + S_2\mu^2 + S_3\mu^3 + (S_4 + S_5\mu + S_6\mu^2)e$ ，其中  $e$  为单位体积内能，压缩指数  $\mu = (\rho/\rho_0) - 1$ ， $\rho$ 、 $\rho_0$  分别表示当前密度和初始密度。假定空气为理想气体，所以  $S_0 = S_1 = S_2 = S_3 = S_6 = 0$ ， $S_4 = S_5 = 0.4$ ，其初始密度和内能分别为 1.25 kg/m<sup>3</sup>、0.25 J/cm<sup>3</sup>。

对于水，采用和空气相同的材料模型，但状态方程为

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2 \right]} \left[ 1 - (D_1 - 1)\mu - D_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - D_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2 + (\gamma_0 + \alpha \mu)e$$

式中： $\rho_0 = 1.0$  g/cm<sup>3</sup>， $D_1 = 1.92$ ， $D_2 = -0.096$ ， $D_3 = 0$ ， $\gamma_0 = 0.35$ ， $C = 1.65$ ， $\alpha = 0$ 。

### 2.5 模拟结果验证

本文的模拟结果与文献[1]结果的比较见图 5。当本文材料模型全部为弹性模型时，A 点竖直方向上的加速度幅值与文献[1]中的幅值相近。但当土介质采用帽子模型和框架结构的基础、梁和柱采用动力硬化模型时，A 点的幅值要明显小于文献[1]中的幅值。现实中的土介质与框架结构材料不可能是理想的弹性体，特别在离振源很近时，所以本文中选用帽子模型和动力硬化模型更具实际意义。A 点虽然在竖直方向上的加速度幅值与文献[1]中的幅值相近，但仍有差别。这由以下 2 方面因素综合造成：首先，本文中采用单点高斯积分方法，并引入人工粘性控制沙漏；此外，本文中选用弹性材料模拟时，为土介质添加了刚度阻尼控制因数，并设定土介质的阻尼因数为 0.1。

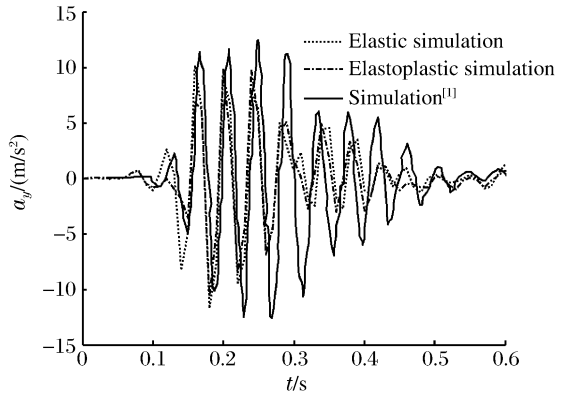


图 5 本文与文献[1]中的 A 点加速度响应的对比  
Fig. 5 Comparison of accelerations at point A with Reference [1]'s results

## 3 高速列车荷载下无防护结构的动力分析

### 3.1 结构柱的分析

柱是框架结构中主要受压构件，框架结构柱通过基础与地基相连。本文中的土质地较硬，因此在寻找结构柱的危险点时将地面结构简化为悬臂梁。结构柱的危险点可能出现在结构柱与土介质接触处。C1 到 C4 是地表面从左到右

4 根结构柱上的中点单元，见图 1 和 3。根据表 1 可知，柱单元 C1 到 C4 中的有效应力逐渐减少，其中最大有效应力出现在 C1 点，为 5.05 MPa，从 C1 到 C2 有效应力减小了 51.2%，C2 到 C3 和 C3 到 C4 有效应力减小了 9.3% 和 6.8%，这是由于下面 2 种消散方式共同作用所致。(1) 邻近振源一侧的柱吸收了瑞利波中的大部分能量，产生了较大的动力响应。所以从 C1 到 C2 有效应力减小最多。(2) 瑞利波沿传播方向呈几何消散。因此，从 C2 到 C3 和 C3 到 C4 减少的数值不大，且消散的百分比相近。因此，邻近振源一侧的框架结构柱受列车荷载影响最大，C1 单元被选为地面结构柱上的可能失稳的危险点，并作为下面评定防护层防护能力的检测点。

### 3.2 结构梁的分析

梁是框架结构中的主要受弯构件。梁跨中处容易产生较大的变形，从而可能导致结构局部破坏甚至整体失稳。因此，本文中选取单元 G1 到 G8 作为框架梁的可能危险点。

高速列车荷载所引起的框架梁的动力响应可能与框架柱的相似，即靠近振源一侧的梁受到的动力影响大。根据表

表 1 结构柱与结构梁上危险点的有效应力

Table 1 Effective stresses in some key points

结构点	有效应力/MPa	结构点	有效应力/MPa	结构点	有效应力/MPa
C1	5.05	G1	0.22	G5	0.54
C2	2.46	G2	0.34	G6	1.07
C3	2.23	G3	0.36	G7	0.58
C4	2.08	G4	0.48	G8	0.52

1 可知,在水平方向上最大的有效应力出现在 G6 单元,为 1.07 MPa,而从结构的底层到顶层,框架梁中的有效应力逐步递减,最大有效应力仍出现在 G6 单元。因此,G6 单元被选为框架结构梁上可能失稳的危险点,并作为下面评定防护层防护能力的检测点。

### 3.3 结构的整体振动分析

A 点是框架结构上邻近振源一侧的最高点。如果将地面结构简化为悬臂梁来进行整体振动分析,同时梁柱截面在整个计算过程中保持不变,那么受到振动时 A 点的位移最大,所以选取 A 点的加速度作为下面评定防护层防护能力的检验依据。

### 3.4 空气冲击波对结构的影响

如图 6 所示,空气第一波冲击动力荷载在 0.07 s 时到达框架结构表面,冲击波对框架顶部影响不大,从框架顶部到底部,空气压力逐渐增大,而框架结构底部最大空气压力也仅为 110 Pa,这是因为本文中采用线荷载,无法模拟实际高速列车沿垂直于平面方向运动产生的冲击波,因此空气冲击波强度较弱。高速列车荷载产生的冲击波对邻近结构的影响是否重要仍有待研究。

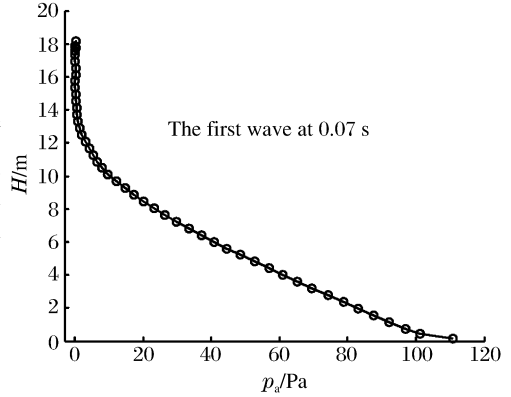


图 6 第一冲击荷载作用下邻近振源一侧框架结构上空气压力的竖向分布  
Fig. 6 Air pressure distribution on the structure surface faced to source

## 4 高速列车荷载作用下有防护结构的动力分析

### 4.1 无填充壕沟防护下的结构动力分析

分析无填充壕沟防护地面框架结构的能力,选 A、C1 和 G6 作为测试点。引入最大幅值减小率  $R_f$  的概念来评估防护层对于地面结构的防护能力,  $R_f = (1 - R_{wt}/R_{nt}) \times 100\%$ , 其中  $R_{wt}$  为有防护下的结构动力响应,  $R_{nt}$  为无防护下的结构动力响应。

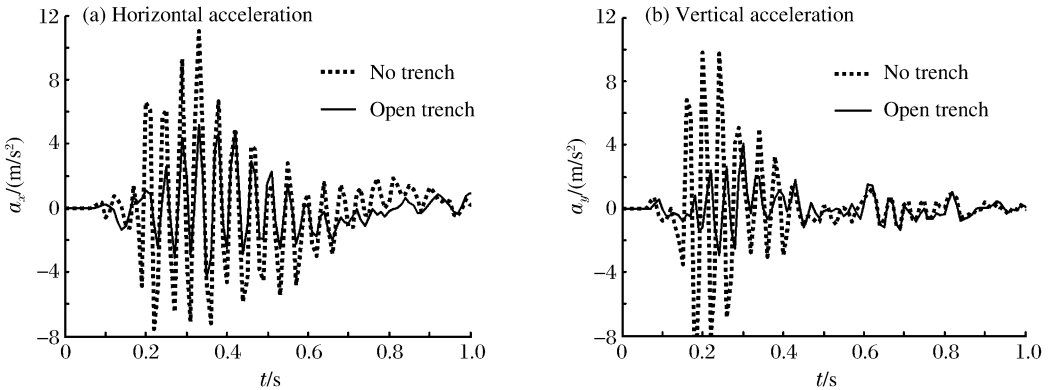


图 7 有、无壕沟防护下 A 点的水平加速度和竖直加速度时程

Fig. 7 Comparison of horizontal and vertical accelerations at point A

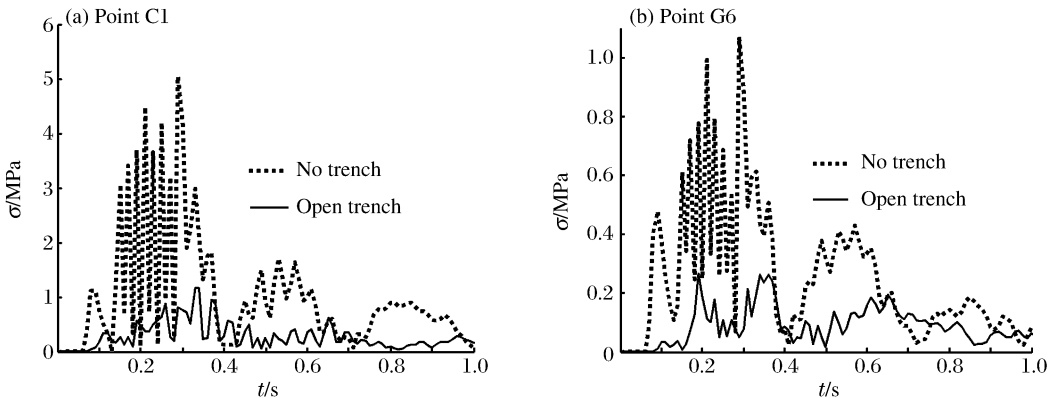


图 8 有、无壕沟防护下 C1 点和 G6 点的有效应力时程

Fig. 8 Comparison of effective stresses at point C1 and point G6

由图 7 可知,瑞利波经由地表的土体介质约在 0.08 s 时传播到框架结构,A 点开始振动,此后经过数次瑞利波的作用,A 点的水平加速度约在 0.34 s 时达到最大值,分别是无防护下的 11 m/s<sup>2</sup>和无填充壕沟防护下的 5.2 m/s<sup>2</sup>,最大幅值减小了 53%,然后又经过 14~15 个周期,约在 1 s 时 A 点的水平加速度基本上降低到 0。和水平方向上动力响应相似,在无防护条件下 A 点的竖直方向上的加速度最大值为 9.8 m/s<sup>2</sup>,出现在 0.2 s,而相同周期上壕沟防护下 A 点的最大值仅为 2.0 m/s<sup>2</sup>,此后又经过 1 个周期,壕沟防护下的 A 点达到最大值 4.06 m/s<sup>2</sup>,最大值减小了 59%。

由图 8 可知,在无填充壕沟防护下,结构柱单元 C1 中有效应力的最大幅值从 5.04 MPa 减小到了 1.17 MPa,减小了 77%。梁单元 G6 中有效应力的最大幅值则由 1.07 MPa 降低到 0.27 MPa,减小了 75%,说明无填充壕沟可以有效地阻碍和消弱地表瑞利波的传播,从而减小框架结构的振动,达到降低框架梁和框架柱中有效应力的目的。

### 4.2 注水壕沟防护下的结构动力分析

由图 9 可知,在注水壕沟防护下,A 点水平方向上的加速度值减小到 5.3 m/s<sup>2</sup>,与无填充壕沟的 5.17 m/s<sup>2</sup>相当,而竖向加速度减少到 2.7 m/s<sup>2</sup>,小于无填充壕沟的 4.06 m/s<sup>2</sup>;水平方向和竖直方向的加速度减小率分别为 52%和 72%。同时观察图 10 可知,虽然注水后壕沟同样可以有效地减小 A 点的加速度,但结构柱上的 C1 单元和结构梁上的 G6 单元中的有效应力最大值分别减小到 1.93 MPa 和 0.52 MPa,最大值的减小率分别为 62%和 51%,小于无填充壕沟的 77%和 75%。因此无填充壕沟在注水后仍然可以有效地减小地面结构的动力响应,但对结构梁和结构柱中危险点的防护能力减弱。

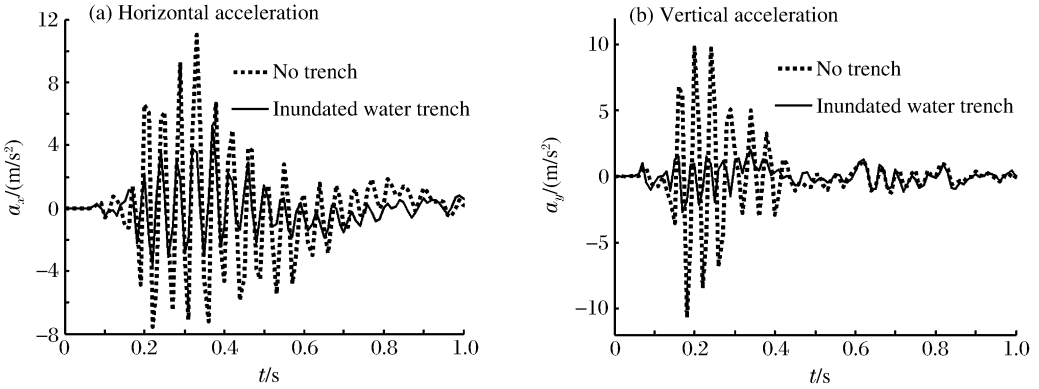


图 9 有、无注水壕沟时 A 点的水平加速度和竖直加速度历程

Fig. 9 Horizontal and vertical accelerations at point A

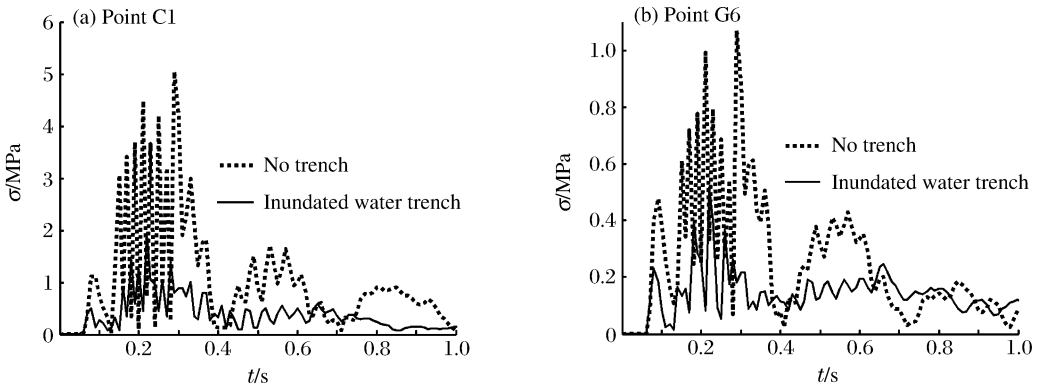


图 10 有、无注水壕沟时 C1 点和 G6 点上的有效应力历程

Fig. 10 Comparison of effective stress at point C1 and point G6

### 4.3 混凝土填充壕沟防护下的结构动力分析

由图 11 可知,在混凝土填充壕沟防护下,A 点水平方向加速度的最大幅值减小到 7.9 m/s<sup>2</sup>,减小率为 28%,而竖向加速度的最大幅值降低到 7.24 m/s<sup>2</sup>,减小率为 26%,同时混凝土填充壕沟防护下 A 点振动曲线的振型、相位、振幅、周期与无防护下 A 点振动特征十分接近。从图 12 可知,柱单元 C1 与梁单元 G6 中的有效应力最大幅值分别降低到 4.47、1.04 MPa,仅减小了 11%、3%,而有、无防护作用下的两条振动曲线十分相似。上述结果表明,混凝土填充壕沟并不能有效地阻碍地表瑞利波的传播,所以在混凝土防护下的地面结构产生了与无防护时相近的动力响应。因此,混凝土填充壕沟对瑞利波的防护能力不明显。

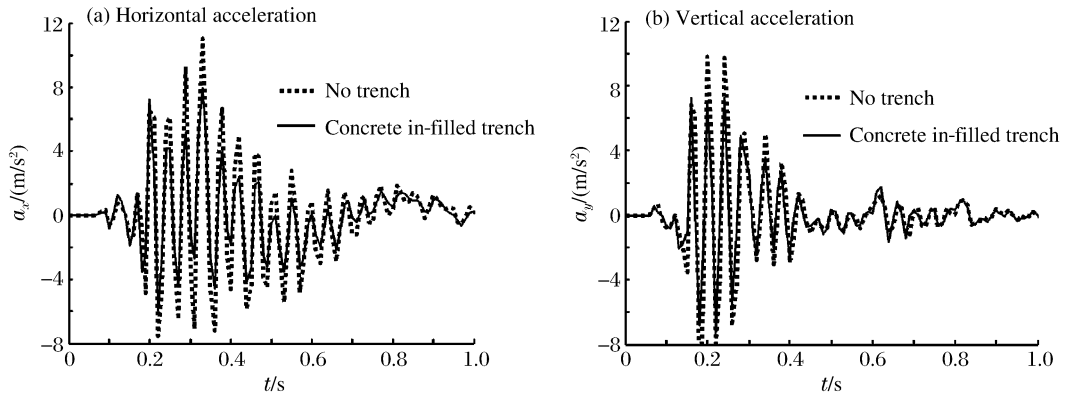


图 11 有、无砼填充壕沟时 A 点的水平加速度和竖直加速度时程

Fig. 11 Horizontal and vertical accelerations at point A

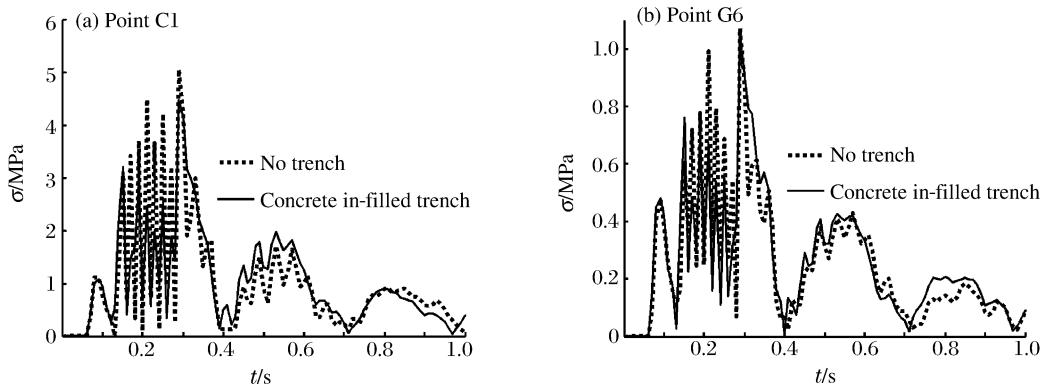


图 12 有、无砼填充壕沟时 C1 点和 G6 点上的有效应力时程

Fig. 12 Comparison of effective stresses at point C1 and point G6

## 5 结论

通过数值模拟分析了高速列车荷载作用下地面框架结构的动力响应,并对比了框架结构在有、无防护层时的动力响应特征。通过这些比较,可以得到如下结论。

(1)在水平方向上,邻近振源一侧的框架柱与框架梁受列车荷载的影响最大。竖直方向上,框架梁上有效应力的最大值随着楼层的增加而减小。

(2)无填充壕沟对列车振动荷载的防护作用明显。在自然环境下,无填充壕沟容易受到雨水、雪水和地下水的影响而变成注水壕沟,虽然注水壕沟的防护能力有所减弱,但仍然可以有效地削弱高速列车荷载对邻近结构的动力影响。

(3)混凝土防护墙对列车振动荷载的防护作用不明显。有、无防护作用下地面结构的动力响应曲线变化不大。结构柱和结构梁中危险点的有效应力最大幅值也无明显降低。

## 参考文献:

- [1] Adam M, von Estorff O. Reduction of train-induced building vibrations by using open and filled trenches[J]. Computers and Structures, 2005,83:11-24.
- [2] 刘维宁,夏禾,郭文军. 地铁列车振动的环境响应[J]. 岩石力学与工程学报,1996,15:386-393.  
LIU Wei-ning, XIA He, GUO Wen-jun. Study of vibration effects of underground trains on surrounding environments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996,15:386-393.
- [3] 洪俊青,刘伟庆. 地铁对周边建筑物振动影响分析[J]. 振动与冲击,2006,25(4):142-145.  
HONG Jun-qing, LIU Wei-qing. Analysis of effects induced by subway train on surrounding building vibration[J]. Journal of Vibration and Shock, 2006,25(4):142-145.
- [4] Davies M C R. Dynamic soil structure interaction resulting from blast loading[C]//Leung C F, Lee F H, Tan G T S. Proceedings of the International Conference on Geotechnical Centrifuge Modelling. Rotterdam, Balkema, 1994:

319-324.

- [5] Pei H T, Zheng Y F, Tin L J. Three-dimensional analysis of the screening effectiveness of hollow pile barriers for foundation-induced vertical vibration[J]. *Computers and Geotechnics*, 2008,35(3):489-499.
- [6] Woods R D. Screening of surface waves in soils[J]. *ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, 1968;951-979.
- [7] Al-Hussaini T M, Ahmad S. Design of wave barriers for reduction of horizontal ground vibration[J]. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, 1991,117(4):616-639.
- [8] Hung H H, Kuo J, Yang Y B. Reduction of train-induced vibrations on adjacent buildings[J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2001,11(5):503-518.
- [9] Yang Y B, Hung H H. A parametric study of wave barriers for reduction of train-induced vibrations[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1997,40:3729-3747.
- [10] Hallquist J O. LS-DYNA theoretical manual[M]. USA: Livermore Software Technology Corp, 1998:1638-1642.
- [11] WANG Zhi-liang, LI Yong-chi, WANG Jian-guo. Study of stress waves in geomedia and effect of a soil cover layer on wave attenuation using a 1-D finite-difference method[J]. *Computers and Geosciences*, 2006,32:1535-1543.
- [12] 时党勇,李裕春,张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进行显式动力分析[M]. 北京:清华大学出版社,2005:150-165.

## Reduction of high-speed train-induced building vibrations by protective trenches

SUN Wei<sup>1,2</sup>, WANG Jian-guo<sup>2,3\*</sup>, JIANG Shao-fei<sup>1,4</sup>

(1. *School of Civil Engineering, Shenyang Jian Zhu University, Shenyang 110168, Liaoning, China;*

2. *Centre for Protective Technology, National University of Singapore, Singapore 119260, Singapore;*

3. *State Key Laboratory of China Southwest Resource Exploitation and Environmental Disaster Control Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;*

4. *School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, Fujian, China* )

**Abstract:** Numerical analyses for structure-soil interaction were carried out to investigate the attenuation effect of open, inundated water and concrete-filled trenches on high-speed train loading-induced Rayleigh wave propagation. The acceleration and effective stress at some key points of a six-storey surface structure were comparatively studied with commercial software LS-DYNA for the protection of open trenches, inundated water trenches, concrete-filled trenches and no protection. Numerical results reveal that open trenches even inundated with water can effectively reduce peak acceleration and effective stress. However, concrete-filled trenches are not effective in the attenuations of peak acceleration and effective stress. Therefore, an open trench is still a good choice as a temporary protection barrier, though it is susceptible to collapse without effective support.

**Key words:** solid mechanics; attenuation effect; numerical analysis; surface structure; Rayleigh wave; open trench; inundated water trench; concrete-filled trench

\* Corresponding author: WANG Jian-guo

E-mail address: jgwang@mech.uwa.edu.au