

DOI: 10.11779/CJGE201510022

# 多轮组车辆荷载下公路地基的附加动应力

魏星<sup>1</sup>, 王刚<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400044)

**摘要:** 基于移动集中点荷载作用下的地基附加动应力的理论解, 采用数值积分方法计算了移动圆形均布荷载下地基的附加动应力。将交通荷载简化为移动的均布圆形荷载, 对比分析了荷载作用半径、荷载移动速度对地基附加动应力的影响规律。分析结果表明: 浅层地基和深层地基中的附加动应力分布规律有所差异; 荷载移动速度对地基中各应力分量的影响规律与地基深度密切相关; 地基中的附加应力分布曲线具有良好的归一化规律。在单个轮轴荷载计算方法的基础上, 采用叠加法对多轮组车辆荷载作用下的地基附加动应力进行了研究。计算结果表明: 应力的叠加效应和荷载移动速度效应对深层地基的影响较浅层地基更为显著; 多轮组车辆荷载作用下, 应力路径形式变得更为复杂。

**关键词:** 移动车辆荷载; 循环心形路径; 移动速度; 地基

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)10-1924-07

**作者简介:** 魏星(1977-), 女, 博士, 副教授, 主要从事土的本构理论、数值分析等方面的研究工作。E-mail: weixinghl@163.com。

## Induced dynamic stresses in subsoil of road subjected to moving vehicle load with wheel groups

WEI Xing<sup>1</sup>, WANG Gang<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The single wheel load of vehicle is simplified as a uniform circular pressure acting on the road surface, then an integral solution method for calculating the induced stresses in subsoil due to a single moving wheel load is proposed based on the theoretical solution of Eason. An integral program for the proposed integral solution is coded so as to numerically evaluate the induced dynamic stresses. The cases of elastic half-space solid subjected to single wheel load with different acting radii and moving velocities are analyzed by the program. The calculated results reveal that the effect of acting radius and moving velocity on induced stresses depends on the depth of the soil element, and the distribution curves of induced dynamic stresses can be normalized to be one group of curves. The induced dynamic stresses due to a group of wheel load are evaluated using the superposition method. The effects of stress superposition and the moving velocity are more significant for deeper soil elements in subsoil, which results in complicated stress paths.

**Key words:** moving wheel load; heart-shape stress path; moving velocity; subsoil

## 0 引言

交通荷载是一种作用位置按一定速度移动的、长期重复作用的荷载, 其在地基中引起的应力路径既不同与地震、海浪等动荷载, 也不同于循环三轴与循环直剪试验的应力路径。研究表明: ①移动荷载作用下地基中土单元的竖向和水平向正应力差值和水平剪应力随荷载作用点的位置变化而连续变化, 是一种主应力轴连续旋转的心形应力路径<sup>[1-6]</sup>; ②地基中附加动应力的变化幅值不仅与土性及荷载大小相关, 还受到荷载移动速度的影响, 当移动速度达到地基土体的 Rayleigh 波速时, 动应力响应将急剧增大<sup>[7-8]</sup>。

Eason<sup>[7]</sup>通过积分变换, 研究了匀速移动荷载作用下均质弹性半空间体的三维稳态问题, 得到了积分形式表达的附加动应力的理论解。De Barrors等<sup>[9]</sup>计算了表面和内部移动点荷载在黏弹性半空间体中的应力响应。Ishihara<sup>[11]</sup>将交通荷载简化为弹性半空间上的均布荷载, 基于 Boussinesq 解得到了地基土单元的应力变化。Hung等<sup>[10]</sup>研究了黏弹性半空间体在4种典型车辆荷载作用下的稳态响应问题。王常晶等<sup>[8, 11]</sup>基于弹性

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51209179)

收稿日期: 2014-11-26

半空间 Euler-Bernoulli 梁模型分析了列车移动荷载引起的地基土单元的应力变化。边学成等<sup>[12]</sup>基于 2.5 维有限元方法分析了列车荷载在地基中引起的动应力变化。薛富春等<sup>[13]</sup>采用大规模三维有限元方法分析了移动荷载作用下高速铁路轨道-路基-地基耦合系统振动加速度的空间分布特征。这些研究探讨了移动荷载在地基中产生附加动应力的计算方法, 揭示了交通荷载下地基中应力路径的典型规律及其复杂性。

本文针对公路地基的附加动应力问题, 将车辆的轮轴荷载简化为作用于公路路面的圆形均布荷载, 基于 Eason 的理论解, 给出单个移动圆形面积荷载下的地基附加动应力的积分求解方法, 并编制相应的积分算法程序; 基于所编制程序, 计算分析荷载作用半径、荷载移动速度对地基的附加动应力的影响, 探讨地基附加动应力分布规律; 采用叠加法对多轮组车辆荷载作用下的地基附加动应力进行研究, 探讨在不同的移动速度作用下, 地基荷载叠加效应对浅层和深层地基的应力变化过程的影响。

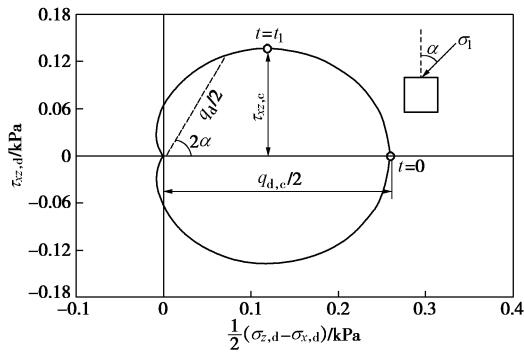


图 1 交通荷载引起的移动线下方地基土单元的应力变化  
Fig. 1 Stress path of soil element induced by traffic load under moving line

### 1 地基中的应力路径特点及描述

单个移动的交通荷载在移动线正下方的地基土单元中产生的应力路径在正应力差-剪应力空间中呈典型的心形路径, 如图 1 所示。图中:  $\sigma_{z,d}$  为附加竖向动应力;  $\sigma_{x,d}$  为附加水平动应力;  $\tau_{xz,d}$  为附加水平动剪应力;  $\sigma_1$  为大主应力;  $\alpha$  为  $\sigma_1$  与竖向的夹角;  $q_d$  为动偏应力;  $t$  为荷载运动的相对时间, 假定当轮轴荷载作用面积的中心点位于该土单元正上方时  $t=0$ 。由于荷载作用位置连续变化, 移动轮轴荷载将不仅导致地基中竖向应力的变化, 且产生了变化的水平动剪应力, 附加动应力的连续变化将引起主应力的连续旋转。定义动偏应力  $q_d$  为

$$q_d = [(\sigma_{z,d} - \sigma_{x,d}) + 4\tau_{xz,d}^2]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

由图可见,  $q_d$  定义了应力路径的轴线的长度, 且  $q_d$  在  $t=0$  时刻达到峰值。定义  $q_d$  的峰值为动偏应力幅值, 记为  $q_{d,c}$ 。  $\tau_{xz,d}$  在  $t=t_1$  时刻达到峰值, 定义该峰值为水平动剪应力的幅值, 记为  $\tau_{xz,c}$ 。

$$\begin{cases} q_{d,c} = (q_d)_{\max} = (\sigma_{z,d} - \sigma_{x,d})_{t=0} \\ \tau_{xz,c} = (\tau_{xz,d})_{\max} = (\tau_{xz,d})_{t=t_1} \end{cases}, \quad (2)$$

式中,  $q_{d,c}$ ,  $\tau_{xz,c}$  描述了应力空间中心形应力路径横轴和纵轴的长度, 是定义这一心形应力路径的基本参数。为了描述心形应力路径的横、纵轴方向的相对比例关系, 引入参量  $R_\tau$ :

$$R_\tau = \tau_{xz,c} / q_{d,c}, \quad (3)$$

式中,  $R_\tau$  为动水平剪应力与动应力幅值的比值。

探讨荷载作用面积、移动速度等对心形应力路径基本参量  $q_{d,c}$ ,  $\tau_{xz,c}$  和  $R_\tau$  的影响规律, 将有助于揭示荷载作用的相关因素对不同深度处地基附加动应力的影响机理及影响规律。

### 2 考虑作用面积影响的单个轮轴荷载在地基中产生的应力

图 2 给出了多轮组荷载作用下的地基附加动应力的计算简图。  $P_1$ ,  $P_2$  和  $P_3$  为一组沿  $Ox$  轴移动的轮轴荷载, 移动速度均为  $V$ 。  $M$  点为移动线下方深度  $z$  处的一个土单元, 作用在其上的应力分量见图 2 (b)。现有的沉降计算中往往将轮轴荷载视为作用于路面的圆形均布荷载<sup>[14-15]</sup>。本文沿用这一假设, 基于 Eason 的理论解, 给出图 2 中单个轮轴荷载作用下土单元  $M$  点的附加动应力的计算方法。

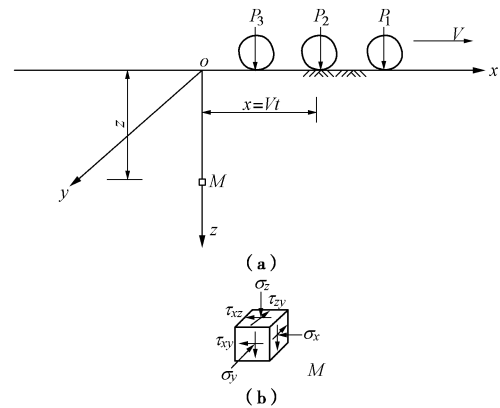


图 2 多轮组荷载作用下的地基

Fig. 2 Sketch of subsoil subjected to moving wheel group

#### 2.1 单个移动面积荷载作用下的地基附加动应力

Eason<sup>[7]</sup>假设地基为弹性半无限体, 基于动力平衡方程, 通过积分变换研究了匀速移动的点荷载作用下地基中附加动应力的分布规律, 给出了积分形式的附加动应力理论解, 该应力积分公式存在奇异点, 不能

直接积分。但是该积分奇异点具有极限，因此本文在极限分析的基础上，采用梯形积分算法计算点荷载下的附加动应力。

对于移动作用的任意面积荷载，可将荷载作用面积划分为一系列微小的面积单元，将面积单元上的荷载简化为点荷载，在移动点荷载梯形积分算法的基础上，沿荷载作用面积进行积分，可得到任意面积荷载作用下的附加动应力的解答。图3给出了圆形均布荷载导致的地基附加动应力的积分求解方法。

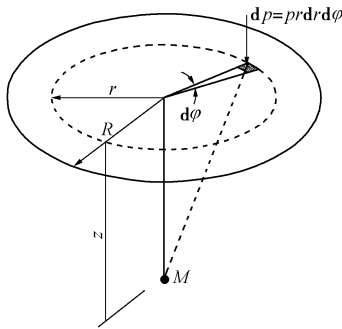


图3 圆形均布荷载下的积分算法示意图

Fig. 3 Integral algorithm for circular uniform pressure

根据该积分方法，编制了相应的程序，分析了单个轮轴荷载 $P_2$ （见图2）作用下地基中的附加动应力。计算中，采用的移动速度比 $\alpha_s=0.02$ ， $\alpha_s=V/V_s$ ， $V$ 为荷载移动速度， $V_s$ 为地基土体的剪切波速。为了分析荷载作用半径的影响，假设荷载作用半径 $R$ 分别为0，0.25，0.5及1 m。假设移动荷载 $P_2$ 的大小为 $\pi$ ，简化后的均布荷载作用 $p=1/R^2$ 。此外，计算中采用的地基的泊松比 $\nu=0.25$ 。图4和图5给出了荷载作用半径 $R$ 分别为0.25 m和1 m时地基中的附加应力分量与深度的关系曲线。图6（a）和图6（b）给出了 $t=0$ 时刻、不同作用半径下的地基中附加竖向动应力和水平动应力值沿深度的变化曲线。由于 $t=0$ 时刻水平动剪应力为0，因此，图6（c）绘制了 $t=t_1$ 时刻的水平动剪应力峰值沿深度的变化曲线。需要说明的是，随着深度的增加，水平动剪应力达到其峰值的时间 $t_1$ 逐渐向后推移。

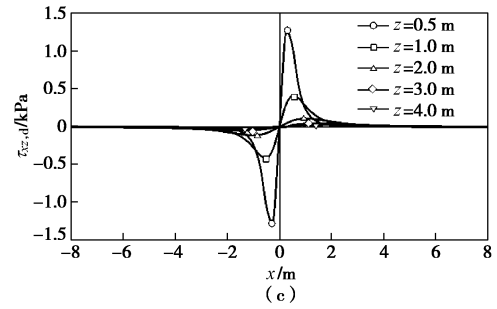
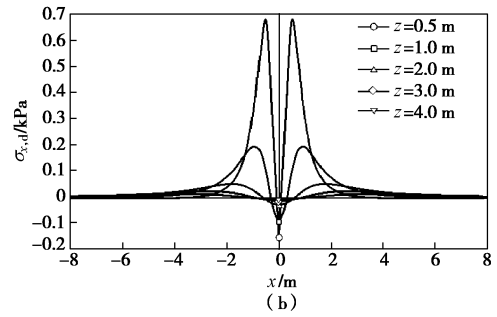
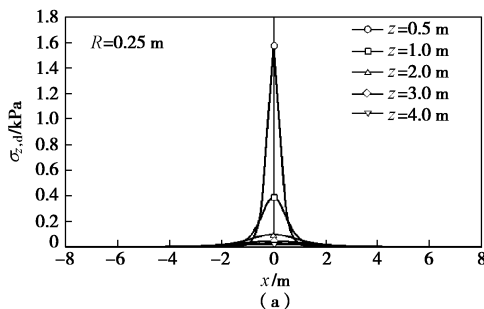
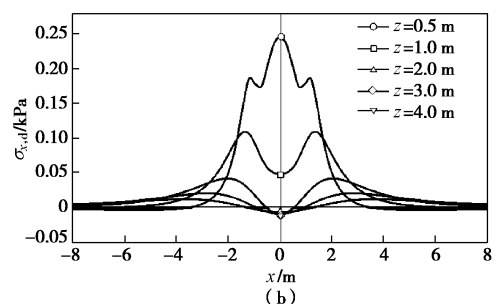
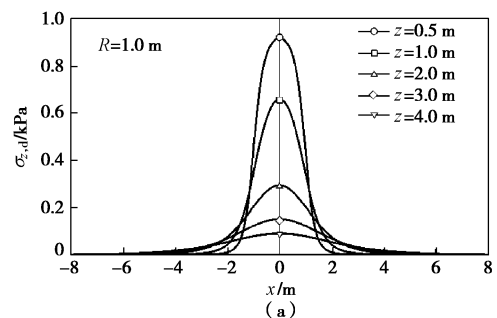


图4 移动荷载作用半径  $R=0.25$  m 时地基中的应力分量

Fig. 4 Stress components induced by moving load with  $R=0.25$  m

不同作用半径的移动荷载在地基中引起的附加竖向动应力和水平动剪应力的变化规律较为相似，但是地基中的附加水平动应力的分布规律则较为复杂。对比图4（b）、图5（b）和图6（b）可见，在浅层地基中（ $z=0.5$  m， $1.0$  m）不同作用半径的移动荷载产生的附加水平应力方向并不一致，但随着深度的增加，附加水平应力分布规律趋于一致。此外，在荷载大小不变的情况下，作用半径的减小，将导致浅层地基中的应力的幅值急剧增大，随着深度的增加不同作用半径荷载对应的地基附加应力值及其变化规律逐渐趋于一致。



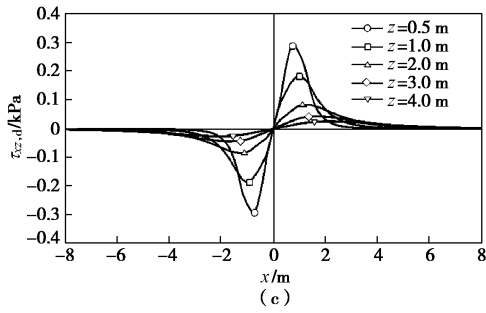


图 5 移动荷载作用半径  $R=1.0$  m 时地基中的应力分量

Fig. 5 Stress components induced by moving load with  $R=1.0$  m

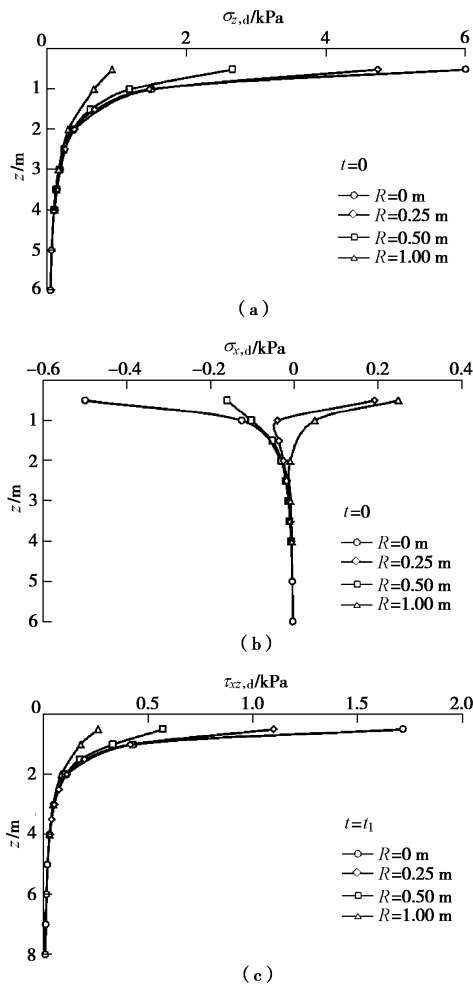


图 6 荷载作用半径对附加动应力分量的影响

Fig. 6 Effect of acting radius of load on stress components

在已有的研究中, 部分学者将移动的车轮荷载简化为移动的点荷载。根据图6的计算结果, 随着深度的增加, 不同作用面积的荷载产生的附加动应力均逐渐趋于点荷载对应的附加动应力。

### 2.2 荷载作用的归一化效应

对图4~6的计算结果进行如下处理, 将坐标 $x$ 和 $z$ 除以半径 $R$ , 将应力值除以均布荷载 $p$ , 得到不同作用半径的圆形均布荷载产生的地基附加动应力分量的空间分布曲线可由同一族曲线表达, 与作用半径及均布

荷载大小无关, 归一化后的曲线显示了良好的规律性。图7由图6归一化得到, 给出了作用半径 $R>0$ 的面积荷载产生的附加动应力。在空间 $\sigma_{z,d}/p - z/R$ 中, 不同作用半径的圆形均布荷载产生的地基附加动应力分量与深度间关系可归一化为一条曲线。这种归一化规律, 与静荷载作用下的地基附加应力计算的方法类似, 为建立用于计算移动面积荷载作用下的地基附加动应力的实用方法提供了可能的途径。

此外, 归一化的曲线也显示了比值 $z/R$ 与水平动应力方向变化过程的相关性, 结果表明在 $z/R=1.6$ 左右时,  $t=0$ 时刻的水平动应力 $\sigma_{x,d}$ 将出现方向的变化, 小于该深度 $\sigma_{x,d}$ 为正值, 大于该深度 $\sigma_{x,d}$ 为负值。

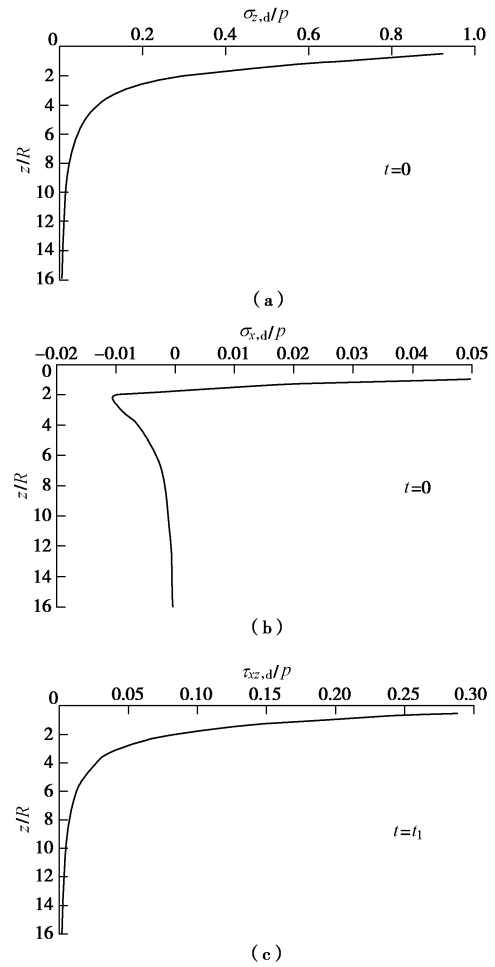


图 7 归一化的应力与深度的关系曲线

Fig. 7 Normalized relationship between stress components and depth  $z$

### 3 荷载移动速度对附加动应力的影响

为了分析速度对附加动应力路径的影响, 需要探讨速度对附加动应力的各分量及心形应力路径的相关参数的影响。由于所编制的附加应力积分程序基于 Eason 的理论解, 因此本文的积分程序可以考虑荷载

移动速度对附加动应力的影响。

### 3.1 移动速度对附加动应力分量的影响

图 8 (a) 和 (b) 给出了不同深度处地基中  $t=0$  时刻的附加竖向动应力和水平动应力随速度比  $\alpha_s$  增大的变化过程。随着  $\alpha_s$  的增加,  $\sigma_{z,d}$  和  $\sigma_{x,d}$  逐渐增大, 当速度接近于 Rayleigh 波速  $V_R$  时,  $\sigma_{z,d}$  和  $\sigma_{x,d}$  急剧增加。

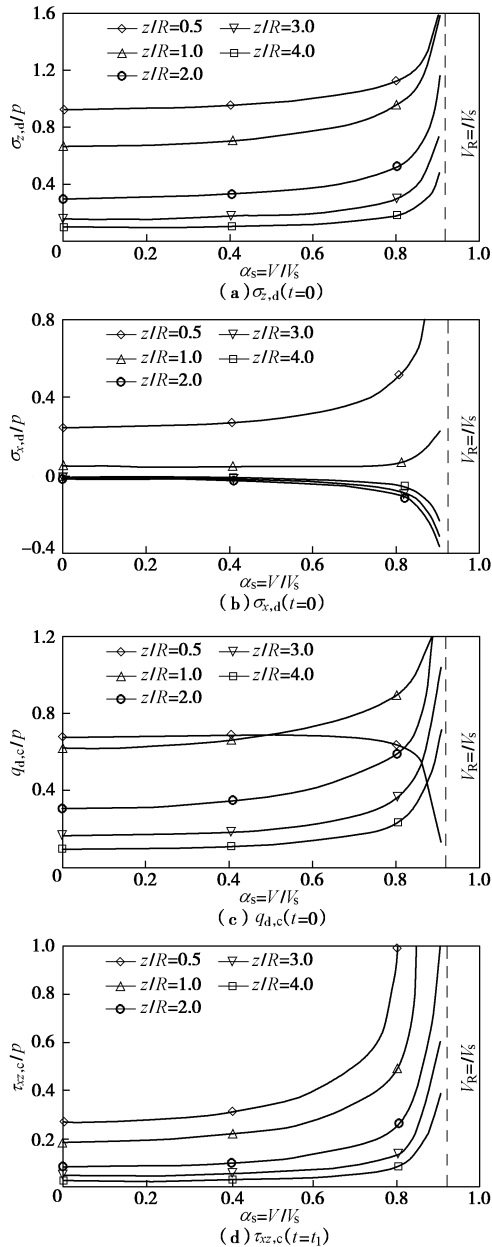


图 8 附加应力随深度的变化曲线

Fig. 8 Variations of induced dynamic stresses with depth  $z$

动偏应力幅值  $q_{d,c}$  可由图 8 (a)、(b) 直接计算, 所得到的  $q_{d,c}$  的变化曲线见图 8 (c)。由于,  $t=0$  时刻的水平动应力  $\sigma_{x,d}$  在浅层地基和深层地基的方向不同, 且在  $z/R=0.5$  深度处移动速度增加对  $\sigma_{x,d}$  的增大效应十分显著, 这导致浅层地基  $z/R=0.5$  处的动偏应力幅值  $q_{d,c}$  随着速度的增大先出现非常小幅的增加, 然

后随着速度的增加迅速下降。该深度处的发展规律与其他深度处的动偏应力幅值的发展规律相反。

水平动剪应力幅值  $\tau_{xz,c}$  随速度比  $\alpha_s$  变化的计算稍显复杂。由于其出现的时刻  $t_1$  随深度变化而变化, 因此, 需要计算轮轴荷载的移动过程中的水平动剪应力的整个变化过程, 通过比较确定其最大值。由此得到幅值  $\tau_{xz,c}$  的变化曲线见图 8 (d)。不同深度处的  $\tau_{xz,c}$  随速度比  $\alpha_s$  的发展规律较为一致, 随着  $\alpha_s$  的增加,  $\tau_{xz,c}$  单调增加, 且当速度接近于 Rayleigh 波速  $V_R$  时,  $\tau_{xz,c}$  出现激增现象。

### 3.2 移动速度对应力路径的影响

图 9 给出了深度  $z/R=0.5$  和  $z/R=3.0$  处的地基应力路径随速度变化的曲线。图 9 (a) 表明, 对于  $z/R=0.5$  处的浅层地基, 随着速度的增加, 心形应力路径的横轴在速度较低时, 随着速度的增加缓慢地小幅增加, 但是随着速度的继续增加出现明显降低, 而纵轴则随着速度的增加而单调增加且增幅远大于横轴, 因此比值  $R_r$  随着  $\alpha_s$  的增加呈现加速增大的趋势。此外, 在  $\alpha_s$  较大时, 应力路径出现不规则的角点, 这与荷载低速移动下的地基中的应力路径形状有所不同。对于深层地基  $z/R=3.0$  处, 随着荷载移动速度的增加, 心形路径的横轴和纵轴均随着移动速度的增加而单调增加, 呈现出图 9 (b) 的变化规律, 不同移动速度下的应力路径形状十分相似。随着  $\alpha_s$  的增加, 动偏应力和动剪应力的幅值都显著地增加, 尽管动剪应力幅值增幅略大, 但比值  $R_r$  不会出现急剧增加。

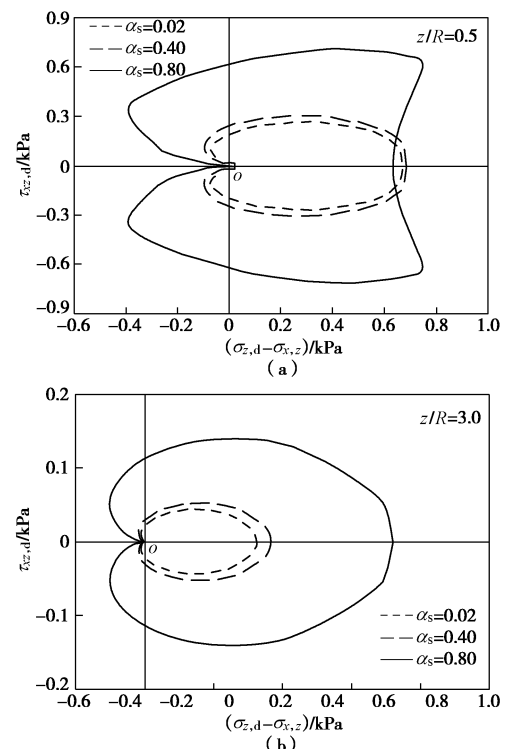


图 9 速度对应力路径影响

Fig. 9 Effect of moving speed on stress paths

由图 9 可见, 荷载的移动速度对浅层地基和深度地基的应力路径的影响规律完全不同, 其影响可以表达为对移动速度数参量  $q_{d,c}$ ,  $\tau_{xz,c}$  和  $R_t$  的影响。在交通荷载作用下的土体变形特性的模拟及沉降计算中, 应该考虑荷载移动速度对应力路径产生的影响。

### 4 多轮组车辆的附加动应力

假设存在一组 3 个轮轴的移动荷载, 轮轴荷载作用半径均为  $R$ , 荷载中心距  $3.6R$ , 轮轴荷载具有相同的移动速度  $V$ , 该问题的计算模型如图 2 所示。在单轮轴荷载作用下地基中附加动应力的积分算法中, 地基被假设为弹性半无限体, 因此多轮组荷载在地基中产生的附加动应力可在单轮轴荷载计算结果的基础上采用叠加法计算。

图 10 给出了  $z/R=0.5$  深度处不同移动速度的多轮组荷载作用导致的应力路径。图中应力路径的发展过程为  $o \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow o$ 。应力路径中的  $o$  点, 对应于图 2 中车辆在  $ox$  轴上  $\pm\infty$  位置; 应力路径中的  $A$  点对应于多轮组荷载中任一轮轴的作用中心位于土单元  $M$  的正上方; 应力路径中的  $B$  点对应于任意两个轮轴荷载中间点位于土单元  $M$  的正上方。对比图 10 和图 9a 可发现, 浅层地基中多轮组荷载的产生的附加应力的相互叠加效应并不显著。

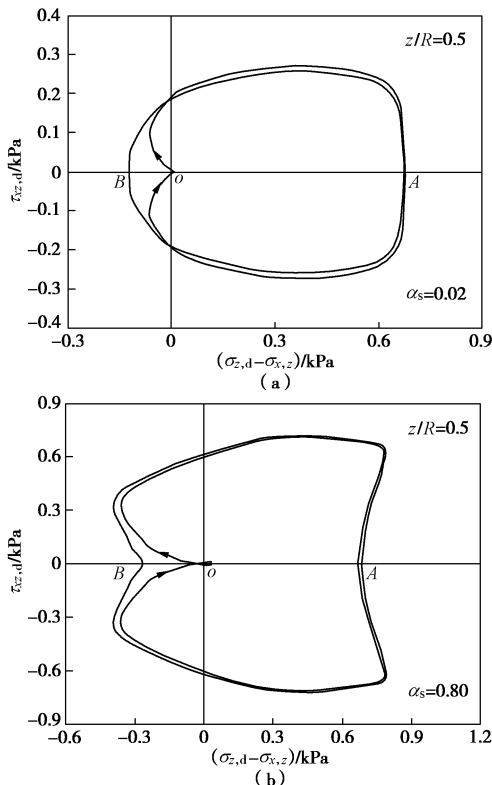


图 10 多轮组移动荷载作用下的应力路径 ( $z/R=0.5$ )

Fig. 10 Stress paths under moving wheel group load ( $z/R=0.5$ )

多轮组移动荷载在深层地基  $z/R=3.0$  处产生的应力路径如图 11。车辆低速移动时 ( $\alpha_s = 0.02$ ), 地基中

的应力路径的发展过程为  $o \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow o$ , 如图 11 (a) 所示。其中,  $o$  点对应于车辆在  $\pm\infty$  处;  $A, B, C$  点分别对应于多轮组荷载中荷载  $P_1, P_2$  和  $P_3$  的中心点位于土单元  $M$  正上方。如图 11 (b) 所示, 车辆高速移动时 ( $\alpha_s = 0.80$ ), 地基中的应力路径的发展过程为  $o \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow D \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow o$ 。其中,  $o$  点对应于车辆在  $\pm\infty$  处;  $A, E, C$  对应于荷载  $P_1, P_2$  和  $P_3$  的作用中心点位于土单元  $M$  的正上方。对比图 11 和图 9 (b) 可见, 多轮组移动荷载作用下, 由于应力的叠加效应, 深层地基中的应力路径出现了反复波动现象, 速度对深层地基的应力变化及应力叠加效应影响较浅层地基更为显著。与单个轮轴移动荷载的作用相比, 多轮组移动荷载在深层地基中产生的应力路径更为复杂。

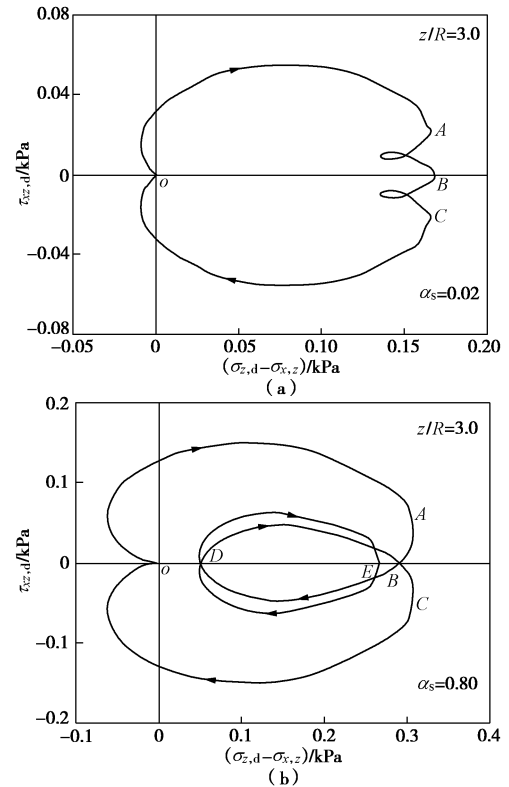


图 11 多轮组移动荷载作用下的应力路径 ( $z/R=3.0$ )

Fig. 11 Stress paths under moving wheel group load ( $z/R=3.0$ )

### 5 结 论

本文基于Eason给出的移动点荷载在弹性地基中产生的附加应力的积分形式的理论解, 提出了移动面积荷载作用下地基的附加动应力的计算方法, 并编制了相应的计算程序; 在计算程序的基础上, 计算了单个移动面积荷载作用下地基中的附加动应力分量, 探讨了荷载作用面积、移动速度对地基附加动应力的影响规律, 分析了附加动应力的归一化特点; 基于叠加原理分析了多轮组车辆荷载在地基中产生的应力路径及其规律。得到了如下规律:

(1) 荷载的作用半径对浅层地基的附加动应力的影响显著,但随着深度的增加,不同作用面积的荷载和点荷载(荷载大小相同)在地基中产生的附加动应力逐渐趋于一致。

(2) 荷载移动速度对地基中附加动应力分量及其幅值的影响规律与深度密切相关,荷载移动速度较高时,浅层地基和深层地基中的应力路径存在显著差异。

(3) 在长度/ $R$ -应力/ $p$ 空间中,不同作用半径的圆形面积荷载产生的地基附加动应力的空间分布曲线可归一化为同一族曲线,与荷载作用半径及均布荷载大小无关。

(4) 多轮组车辆荷载在地基中产生的附加动应力叠加效应对浅层地基影响较小,而对深层地基影响显著,这使得多轮组车辆荷载作用下深层地基中的应力路径十分复杂。

#### 参考文献:

- [1] ISHIHARA K. Soil behavior in earthquake geotechnics[M]. New York: Oxford University Press Inc, 1996.
- [2] LEKARP F, ISACSSON U, DAWSON A. State of the art. I: resilient response of unbound aggregates[J]. Journal of Transportation Engineering, ASCE, 2000, **126**(1): 66 - 75.
- [3] POWRIE W, YANG L A, CLAYTON C R I. Stress changes in the ground below ballasted railway track during train passage[J]. Proceedings of Institution of Mechanical Engineering, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2007, **221**(2): 247 - 262.
- [4] GRÄBE P, CLAYTON C. Effects of principal stress rotation on permanent deformation in rail track foundations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2009, **135**(4): 555 - 565.
- [5] 蒋建群, 周华飞, 张土乔. 弹性半空间体在移动集中荷载作用下的稳态响应[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(4): 440 - 444. (JIANG Jian-qun, ZHOU Hua-fei, ZHANG Tu-qiao. Steady-state response of an elastic half-space under a moving point load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(4): 440 - 444. (in Chinese))
- [6] 丁智, 葛国宝, 魏新江, 等. 地铁列车运营引起的地基土应力状态变化分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 2): 647 - 651. (DING Zhi, GE Guo-bao, WEI Xin-jiang, et al. Variation of stress state of foundation soils induced by running subway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 647 - 651. (in Chinese))
- [7] EASON G. The stresses produced in a semi-infinite solid by a moving surface force[J]. International Journal of Mechanics A: Solids, 1965, **2**(6): 581 - 609.
- [8] 王常晶, 陈云敏. 移动荷载引起的地基应力状态变化及主应力轴旋转[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(8): 1698 - 1704. (WANG Chang-jing, CHEN Yun-min. Stress state variation and principle stress axes rotation of ground induced by moving loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(8): 1698 - 1704. (in Chinese))
- [9] DE BARROS F C P, LUCO J E. Response of a layered viscoelastic halfspace to a moving point load[J]. Wave Motion, 1994, **19**(2): 189 - 210.
- [10] HUNG H H, KUO J, YANG Y B. Reduction of train-induced vibrations on adjacent buildings[J]. Structure Engineering and Mechanics, 2001, **11**(5): 503 - 518.
- [11] 王常晶, 陈云敏. 列车移动荷载在地基中引起的主应力轴旋转[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, **44**(5): 950 - 954. (WANG Chang-jing, CHEN Yun-min. Principal stress axes rotation in ground induced by train moving load[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2010, **44**(5): 950 - 954. (in Chinese))
- [12] 边学成, 胡婷, 陈云敏. 列车交通荷载作用下地基土单元体的应力路径[J]. 土木工程学报, 2008, **41**(11): 86 - 92. (BIAN Xue-cheng, HU Ting, CHEN Yun-min. Stress path in soil element of ground under moving traffic loads[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, **41**(11): 86 - 92. (in Chinese))
- [13] 薛富春, 张建民. 移动荷载作用下高速铁路轨道-路基-地基耦合系统振动加速度的空间分布特征[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(12): 2179 - 2187. (XUE Fu-chun, ZHANG Jian-min. Spatial distribution of vibration accelerations in coupled rail-embankment foundation system on high-speed railway under moving loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(12): 2179 - 2187. (in Chinese))
- [14] SAKAI A, SAMANG L, MIURA N. Partially-drained cyclic behavior and its application to the settlement of a low embankment road on silty-clay[J]. Soils and Foundations, 2003, **43**(1): 33 - 46.
- [15] 魏星, 黄茂松. 交通荷载作用下公路软土地基长期沉降的计算[J]. 岩土力学, 2009, **30**(11): 3342 - 3346. (WEI Xing, HUANG Mao-song. A simple method to predict traffic-load-induced permanent settlement of road on soft subsoil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(11): 3342 - 3346. (in Chinese))