

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.11.003

# 基于 Hardin 骨架曲线的粗粒土非线性动本构模型

李扬波<sup>1a</sup>, 张家生<sup>1a,1b</sup>, 朱志辉<sup>1a,1b</sup>, 王 晔<sup>1a,1b</sup>, 陈文胜<sup>2</sup>

(1.中南大学 a.土木工程学院;b.高速铁路建造技术国家工程实验室,长沙 410075;

2.长沙理工大学 土木工程学院,长沙 410114)

**摘要:**为研究高速铁路路基粗粒土填料在列车荷载作用下的动力特性,使用大型动三轴实验仪对粗粒土填料开展了动力变形特性试验研究。以 Hardin-Drnevich 骨架曲线为基础,采用 Masing 准则构造了粗粒土加载、卸载的动应力-动应变关系滞回曲线;推导了粗粒土的 Hardin-Drnevich 骨架曲线和加载、卸载滞回曲线上增量剪切模量表达式。利用 ABAQUS 软件的 UMAT 子程序编制了基于 Hardin-Drnevich 骨架曲线和广义 Masing 准则的粗粒土非线性动本构模型子程序。通过与三轴试验结果比较,验证所建立粗粒土非线性动本构模型的正确性。将该本构模型应用到高速铁路路基动力响应分析中,模拟结果与模型试验数据吻合较好。相对于摩尔-库伦本构模型,该本构模型能够更好地反映铁路路基动力响应特性。

**关键词:**高速铁路;粗粒土;非线性动本构模型;动剪切模量;应力应变滞回曲线

**中图分类号:** TU44

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-582X(2018)11-019-12

## Study of nonlinear dynamic constitutive model of coarse grained soils based on Hardin-Drnevich skeleton curve

LI Yangbo<sup>1a</sup>, ZHANG Jiasheng<sup>1a,1b</sup>, ZHU Zhihui<sup>1a,1b</sup>, WANG Xuan<sup>1a,1b</sup>, CHEN Wensheng<sup>2</sup>

(1a. School of Civil Engineering and Architecture; 1b. National Engineering Laboratory for High Speed

Railway Construction, Central South University, Changsha 410075, P.R.China; 2. Changsha

University of Science and Technology, Changsha 410114, P.R. China)

**Abstract:** In order to study the dynamic deformation characteristics of subgrade filler of coarse grained soils for high speed railway, the consolidated undrained triaxial tests were carried out by large-scale triaxial test system. Firstly, based on Hardin-Drnevich skeleton curve, the dynamic shear stress-strain curves for loading and unloading were constituted by Masing rules, and the equations of incremental tangent shear modulus of the skeleton curve and hysteresis curves were derived. Using the secondary development platform of ABAQUS, the nonlinear dynamic model subprogram based on Hardin-Drnevich skeleton curve and Masing rules of coarse grained soil was compiled. Study results show the nonlinear dynamic model fit triaxial test results well as the program code was applied to dynamic response analysis of high speed railway. Compared to Mohr-Coulumb constitutive model, the nonlinear dynamic constitutive model can reflect dynamic response characteristics of railway subgrades better.

**收稿日期:** 2018-09-17

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51678576, 51378514, 51778067)。

Supported by the National Science Foundation of China(51678576, 51378514, 51778067).

**作者简介:** 李扬波(1986—),男,博士研究生,主要从事路基动力学研究,(E-mail)258251182@qq.com。

朱志辉(联系人),男,中南大学教授,博士,主要从事高速铁路相关研究,(E-mail)zzhh0703@163.com。

**Keywords:** high-speed railway; coarse grained soil; nonlinear dynamic constitutive model; shear modulus; stress-strain hysteresis curve

铁路运输是一种经济、安全和环保的运输方式,特别是高速铁路,已成为中国重点投资的关键基础设施工程。相对于承受列车动力荷载的桥梁、涵洞等基础结构,路基受外界环境影响更大,动力响应更复杂。粗粒土是铁路路基主要填筑材料,其动力响应及变形性能将决定铁路路基结构的工作性能。因此,研究粗粒土的动力特性对确保路基安全服役具有重要意义。冷伍明等<sup>[1]</sup>对重载铁路粗粒土填料开展了试验研究,分析了围压和含水率等因素对粗粒土填料动力特性及累积变形的影响。其他研究者<sup>[2-4]</sup>也对粗粒土填料的动静力特性开展了试验研究。Sun 等<sup>[5]</sup>分析了围压和循环应力比对粗粒土回弹模量的影响。Enomoto 等<sup>[6]</sup>开展了一系列中型和大型三轴试验,研究了未扰动级配良好粗粒土强度和变形特征,并通过共振柱试验研究了其小应变特性。Nguyen 等<sup>[7]</sup>分析了循环荷载作用下应力幅值和频率等因素对粗粒土累积变形的影响。Chen 等<sup>[8]</sup>提出了一个可考虑循环荷载下颗粒土应力应变关系的模糊集塑性模型。粗粒土的动应力-动应变关系对路基中动应力传递规律有重要影响,而以上研究大多针对粗粒土的动力稳定性和静力特性,对粗粒土动应力-动应变关系等动力特性的研究较少。

粗粒土力学特性的试验研究已取得较多成果,也有一些关于铁路路基填料动本构的研究<sup>[9]</sup>,但将粗粒土动本构应用在路基动力响应中的研究还未见报道。土体本构模型选择对动力响应数值模拟结果会产生重要的影响<sup>[10]</sup>,因此,有必要开展在铁路路基动力响应模拟中应用粗粒土动本构的研究。由于土体性质的复杂性,通用有限元软件中自带的土体本构模型较少,无法描述土体真实的动力特性。通常是根据土体类型对已有动本构模型<sup>[11-13]</sup>进行改进,并在通用有限元软件中进行二次开发。如费康等<sup>[14]</sup>在 ABAQUS 中开发了用于动力分析的等效线性模型,并通过一维场地的地震反应分析和心墙土石坝的三维动力分析等算例对其进行了验证。胡勤等<sup>[15]</sup>对 Ramberg-Osgood 土动力非线性本构模型进行了修正,并在 ABAQUS 中二次开发,进行了三维场地地震动非线性分析,分析了不同输入峰值的地震波对土体应力-应变关系的影响。邹炎等<sup>[16]</sup>在 ADINA 软件中开发了基于 Hardin 曲线的土体边界面本构模型,并利用动三轴试验对该模型进行了验证。张如林等<sup>[16]</sup>研究了基于达维坚科夫骨架曲线的软土非线性动力本构模型,并通过 FLAC3D 平台实现了该本构模型。

在高速铁路路基动力响应分析中,考虑外部因素影响的研究较多,如列车速度、轴重、轨道型式以及轨道不平顺<sup>[17-19]</sup>等,由于岩土材料的复杂性,内部因素也会对高速铁路路基的动力响应产生影响。在路基动力响应数值模拟中,通常采用 Drucker-Prager 等静力本构模型<sup>[18]</sup>,不能很好地反映列车荷载作用下路基的动力响应。因此,文中对铁路路基粗粒土填料开展了大型动三轴试验,在试验基础上建立了粗粒土非线性动本构模型,编制了相应的计算程序,并将粗粒土非线性动本构模型计算程序初步应用在高速铁路轨道-路基模型中,试图为路基动力计算提供合适的本构模型。

## 1 粗粒土动三轴试验

### 1.1 试验土样及仪器

为研究高速铁路路基粗粒土填料的动力特性,用碎石对初始粗粒土进行改良,其中初始粗粒土填料为细角砾土,含有灰色砂岩,最大粒径(用  $d$  表示)约 60 mm,试样的级配曲线如图 1 所示,满足《铁路路基设计规范》<sup>[20]</sup>中 B 组填料的要求。试样曲率系数  $C_c = 0.87$ ,不均匀系数  $C_u = 135$ ,试样的最大干密度为 2.208 g/cm<sup>3</sup>。

试验仪器采用 TAJ-2000 大型动静三轴试验仪,如图 2 所示,该仪器能对试样施加环向和轴向三维动静力荷载,可采用应力控制、应变控制和应变速率控制 3 种方式,同时该仪器能采集动应变、动应力、动孔隙水压力和体变等数据,并具有时变图形的实时数据处理功能。

### 1.2 试验方法

试验操作按照《铁路工程土工试验规范》<sup>[21]</sup>中相关方法开展,试验条件为固结不排水,试验步骤主要有压实、饱和、固结和加载。试样为高度 600 mm、直径 300 mm 的圆柱体,为保证试样压实度满足高速铁路路

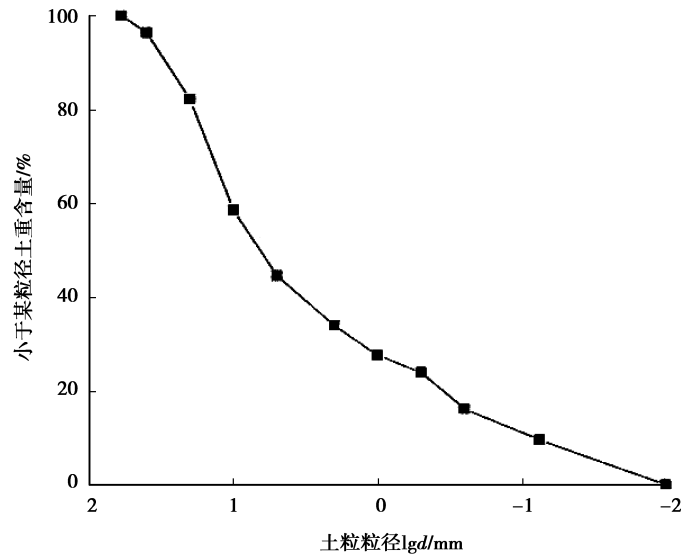


图 1 试样级配曲线

Fig.1 Particle size distribution curves of fill materials

基基床填料压实标准,试验中采用人工分 5 层进行击实,压实度控制在 0.97。试样采用真空抽气法饱和,首先对试样进行大于 2 h 的抽真空;然后让土样由下而上开始饱和,待试样上部出水 20 min 后,停止抽气并改用水头饱和法对试样进行饱和,直至孔隙压力系数大于 95% 时方可认为试样已经饱和。试样采用双向排水等压固结,当试样 30 min 内排水量小于 15 mL 时,方可认为试样固结完成,关闭排水阀。固结完成后在不排水条件下进行加载,加载采用应力控制的方式,在试样轴向逐级施加正弦波循环荷载,每级荷载循环 6 次,当应变波明显发散时停止加载。试验加载方案如表 1 所示,共计 9 组试验。

1.3 试验结果

在周期荷载作用下土体应力-应变关系呈现出明显的非线性,骨架曲线用来描述不同动力幅值作用下最大动应力和最大动应变之间的关系。在动三轴试验中,每级荷载取第 3 个循环的应力-应变滞回圈顶点处对应的数据,即动应力幅值及其对应的动应变,得到粗粒土填料动应力-动应变骨架曲线如图 3 所示。



图 2 TAJ-2000 大型动静三轴试验仪

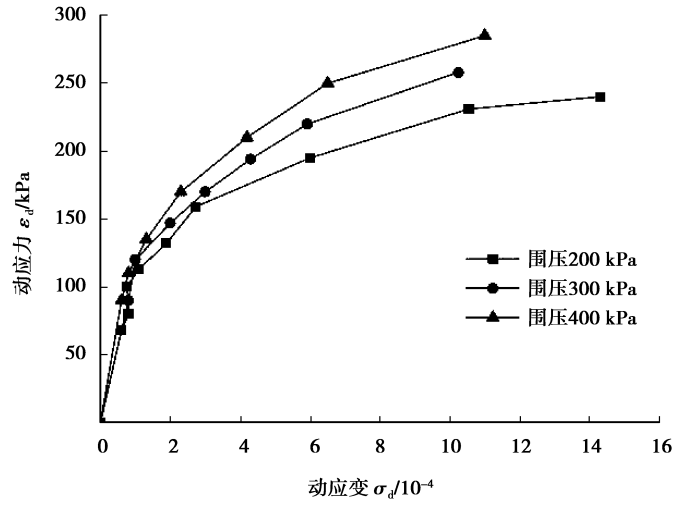
Fig.2 TAJ-2000 Large-scale triaxial equipment

表 1 试验加载方案

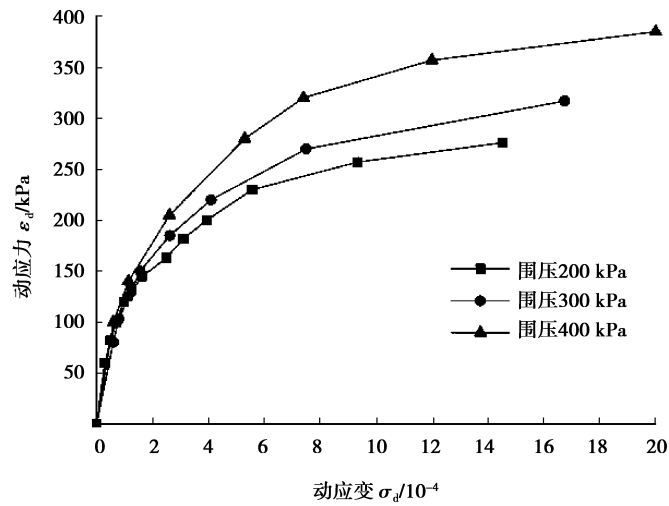
Table 1 Test scheme of dynamic load

围压/kPa	加载频率/Hz	动应力幅值与围压的比值
200	1,3,5	0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,...
300	1,3,5	0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,...
400	1,3,5	0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,...

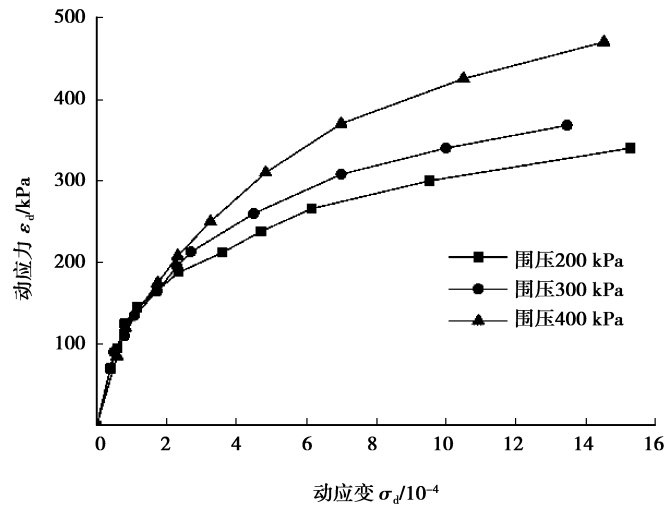
由图 3 可知,试样在不同幅值周期荷载下动应力-动应变关系呈现出非线性,且具有应变硬化的特征。动应变较小时,试样的动应力-动应变骨架曲线呈现出近似线性特性;动应变较大时,试样的动应力-动应变骨架曲线逐渐呈现出非线性特性,且动应变越大非线性特征越明显。相同频率作用下,围压越大,试样的动



(a) 1 Hz



(b) 3 Hz



(c) 5 Hz

图 3 粗粒土骨架曲线

Fig.3 The skeleton curve of coarse grained soils

应力-动应变骨架曲线就越高,说明试样的动强度随着围压的增加而增加,这是由于围压增大,土颗粒接触更紧密,颗粒间咬合力更大,表现为其强度提高。

## 2 粗粒土非线性动本构模型

### 2.1 粗粒土动应力-应变骨干曲线

试验结果表明粗粒土试样的非线性特征近似为双曲线关系,采用双曲线模型(式 1)对其动应力-动应变关系进行拟合。列车荷载频率与车厢长度及其运行速度有关,以高速铁路运行速度为 300 km/h 估算,车厢长度为 25 m,因此选择频率为 3 Hz 的试验数据进行拟合,拟合结果见表 2。由表 2 可知,粗粒土试样动应力-动应变关系符合双曲线关系。

$$\sigma_d = \frac{\varepsilon_d}{a + b\varepsilon_d}, \quad (1)$$

式中: $\varepsilon_d$  为弹性动应变, $\sigma_d$  为动应力, $a$ 、 $b$  为试验参数。

表 2 双曲线模型拟合参数

Table 2 Parameters of hyperbolic model

围压/kPa	$a$	$b$	$R^2$	初始动弹性模量 $E_0$ /MPa
200	0.000 94	2.708 7	0.979	1 063
300	0.000 74	2.416 8	0.981	1 351
400	0.000 68	1.966 0	0.972	1 470

Hardin<sup>[22]</sup>指出在周期循环荷载作用下,土体动应力-动应变骨干曲线为双曲线型,而压缩模量和剪切模量可由式(2)进行转换<sup>[23]</sup>:

$$\gamma = \varepsilon(1 + \mu), \quad (2)$$

$$\tau = \frac{1}{2}\sigma, \quad (3)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}. \quad (4)$$

则粗粒土试样的骨架曲线可表示为

$$\tau_d = \frac{G_{\max}\gamma_d}{1 + \gamma_d/\gamma_r}, \quad (5)$$

式中: $\tau_d$  为动剪应力; $\gamma_d$  为动剪应变; $\gamma_r$  为参考剪应变; $G_{\max}$  为初始最大剪切模量。

参数初始最大剪切模量  $G_{\max}$ <sup>[21]</sup> 为

$$G_{\max} = kP_a \left(\frac{\sigma'_1}{P_a}\right)^n, \quad (6)$$

式中: $k$ 、 $n$  分别为试验参数, $P_a$  为大气压力, $\sigma'_1$  为平均有效主应力。

参考剪应变为

$$\gamma_r = \frac{\tau_y}{G_{\max}}. \quad (7)$$

其中在动三轴试验中, $\tau_y$  可由摩尔-库伦破坏理论求得

$$\tau_y = \frac{1}{2} \cos\varphi \left( \sigma_1 - \sigma_3 + \frac{2c \cos\varphi + (\sin\varphi - 1)(\sigma_{1c} + \sigma_{3c})}{1 - \sin\varphi} \right), \quad (8)$$

式中: $c$ 、 $\varphi$  分别为黏聚力和内摩擦角; $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$  为主应力; $\sigma_{1c}$ 、 $\sigma_{3c}$  分别为轴向和侧向固结压力。

### 2.2 粗粒土的粘滞特性

#### 2.2.1 滞回曲线

在动应力-应变关系研究中,常用描述土体粘滞特性的理论主要分为等效线性模型和 Masing 型非线性

模型两大类。等效线性方法不直接寻求滞回曲线具体的表达式,是用一个等效剪切模量和阻尼比代替不同应变幅值下剪切模量和阻尼比,即用骨干曲线上  $G=G(\gamma_d)$  来反映土体的非线性,用  $\lambda=\lambda(\gamma_d)$  来反映阻尼比随剪应变的变化,将非线性问题简化为线性问题。

Masing 提出借助骨干曲线直接找出滞回曲线的数学表达式。其认为滞回曲线中加载分支和卸载分支均与骨架曲线的形状一致,但滞回曲线上动应力-动应变坐标比尺是骨架曲线上的 2 倍;在荷载反向后的瞬时,其剪切模量等于最大剪切模量  $G_{\max}$ 。按照 Masing 准则可写出基于 Hardin-Drnevich 骨架曲线滞回圈卸载段与再加载段的数学表达式为

$$\frac{\tau \pm \tau_d}{\tau_y} = \frac{\gamma \pm \gamma_d}{\gamma_y} / \left( 1 + \left| \frac{\gamma - \gamma_d}{2\gamma_y} \right| \right) \quad (9)$$

### 2.2.2 阻尼比

土的阻尼比为实际的阻尼系数  $c$  与临界阻尼系数  $c_{cr}$  的比值,可表示为

$$\lambda = \frac{c}{c_{cr}} = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} \quad (10)$$

式中: $\Delta W$  为一个周期内损耗的能量, $W$  为作用的总能量。如图 4 所示, $\Delta W$  可用滞回曲线所围的面积表示,一个周期内动荷载作用的总能量  $W$  等于原点到最大幅值点连线下的  $\Delta OAB$  的面积。

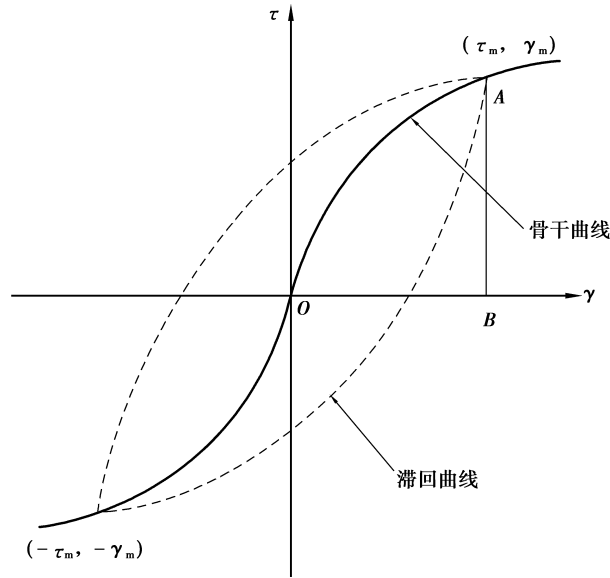


图 4 滞回曲线及骨架曲线

Fig.4 Skeleton curve and stress-strain hysteresis curves

## 3 粗粒土非线性动本构模型二次开发

### 3.1 增量剪切模量表达式

在有限元分析中,非线性本构模型实现的关键步骤为找出增量步内的应力-应变关系。因此,在任意时刻应变增量下,可采用该时刻下相应的切线剪切模量来表示其对应的土体模量大小<sup>[15]</sup>。根据式(8)对等号两边同时对应变  $\gamma$  求偏导,可得在骨架曲线上任意时刻对应的剪切模量为

$$G_d = \frac{\partial \tau}{\partial \gamma} = G_{\max} / (1 + \gamma_d / \gamma_r)^2 \quad (11)$$

式中: $\gamma_d$  为动剪应变; $\gamma_r$  为参考剪应变; $G_d$  为动剪切模量。

在任意时刻增量下,滞回曲线上的剪切模量可表示为

$$G_d = \frac{\partial \tau}{\partial \gamma} = G_{\max} / \left( 1 + \left| \frac{\gamma_d \pm \gamma_{dm}}{2\gamma_r} \right| \right)^2 \quad (12)$$



式中: $\gamma_{dm}$ 为滞回曲线加卸载转折点处剪应变。

### 3.2 加卸载判断

滞回曲线上加卸载的判断将直接影响剪切模量的大小,因此,应准确判断土体的加卸载状况。在三维状态下研究土的非线性动力反应时,通常可采用八面体应力-应变关系表示土的应力-应变关系。可选择以八面体剪应变判断土体的加载或卸载状况,其表达式为

$$\gamma_0 = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2}, \quad (13)$$

式中: $\gamma_0$ 表示八面体剪应变; $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 为3个主应变。

判断是否发生加载或者卸载的方法为

$$\gamma_0 \Delta \gamma_0 < 0, \quad (14)$$

式中: $\gamma_0$ 表示当前八面体剪应变; $\Delta \gamma_0$ 为任意时刻增量下的土体应变增量。

### 3.3 雅克比矩阵推导

土体的三维粘弹性模型可表示为

$$\sigma_{ii} = K \epsilon_v + 2G \epsilon_{ii} + \eta_k \dot{\epsilon}_v + 2\eta_G \dot{\epsilon}_{ii}, \quad (15)$$

$$\sigma_{ij} = G \gamma_{ij} + \eta_G \dot{\gamma}_{ij}, (i, j = 1, 2, 3 \text{ 且 } i \neq j), \quad (16)$$

式中: $K$ 为土体体积模量; $\eta_k$ 为体积粘滞系数; $G$ 为剪切模量; $\eta_G$ 为剪切粘滞系数; $\epsilon_v$ 为体积应变; $\epsilon_{ij}$ 为应变偏量。

使用有限元方法求解非线性动力问题时,雅克比矩阵的定义将直接影响其收敛速度。采用中心差分法推导雅克比矩阵,中心差分法的通项为

$$\dot{f}_{t+\frac{1}{2}\Delta t} = \frac{\Delta f}{\Delta t}, \quad (17)$$

$$f_{t+\frac{1}{2}\Delta t} = f_t + \frac{\Delta f}{2}, \quad (18)$$

式中: $t$ 为时间; $f$ 为任意可导函数。

则雅克比矩阵可写为

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} A & B & B & 0 & 0 & 0 \\ B & A & B & 0 & 0 & 0 \\ B & B & A & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C \end{pmatrix}. \quad (19)$$

雅克比矩阵各元素分别为

$$A = \frac{\partial \Delta \sigma_{ii}}{\partial \Delta \epsilon_{ii}} = K + 2G + \frac{2(\eta_k + 2\eta_G)}{\Delta t},$$

$$B = \frac{\partial \Delta \sigma_{ii}}{\partial \Delta \epsilon_{jj}} = K + \frac{2\eta_k}{\Delta t},$$

$$C = \frac{\partial \Delta \sigma_{ij}}{\partial \Delta \epsilon_{ij}} = G + \frac{2\eta_G}{\Delta t}.$$

## 4 程序验证

基于 Hardin-Drnevich 骨架曲线和符合广义 Masing 准则,在 ABAQUS 软件 UMAT 平台中建立了粗粒土非线性动本构模型子程序,并与粗粒土大型动三轴试验结果进行比较,验证程序的正确性。模型为直径 300 mm、高 600 mm 的圆柱体,围压分别为 200 kPa、300 kPa、400 kPa,动轴模型计算参数如表 3 所示。通过施加与三轴试验相同的动力荷载,得到弹性模量与轴向应变关系曲线以及动应力-动应变滞回曲线。

表 3 本构模型计算参数

Table 3 Calculation parameters of constitutive models

围压/kPa	200	300	400
$\gamma_{ref}/10^{-4}$	3.5	4.0	4.3

由图 5 可知,粗粒土非线性动本构能较好地反映粗粒土填料在不同围压下弹性模量与轴向应变之间的非线性关系。图 6 所示为围压为 300 kPa,动应力幅值为 300 kPa 时,文中模拟与大型动三轴试验得到的动应力-动应变滞回圈。可知,在动力荷载作用下,文中模拟所得动应力-动应变滞回曲线与动三轴试验的动应力-动应变滞回曲线吻合较好,即该动本构能够较好地模拟出动力循环荷载作用下粗粒土填料的滞后性特征。

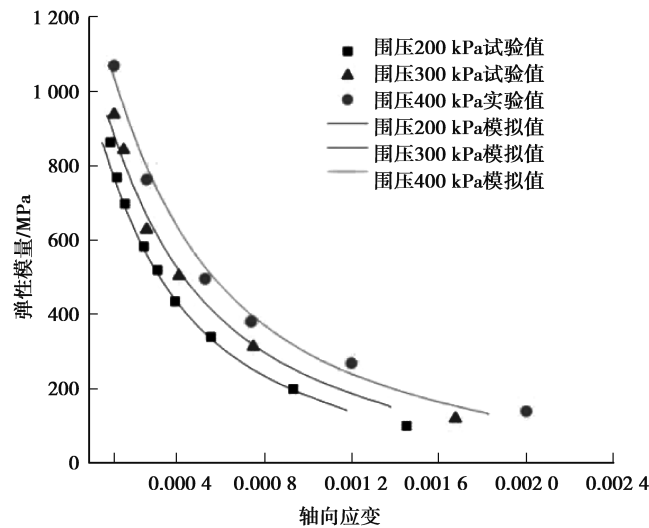


图 5 动弹性模量计算值与试验值对比

Fig.5 Comparisons of simulated elastic modulus and test data

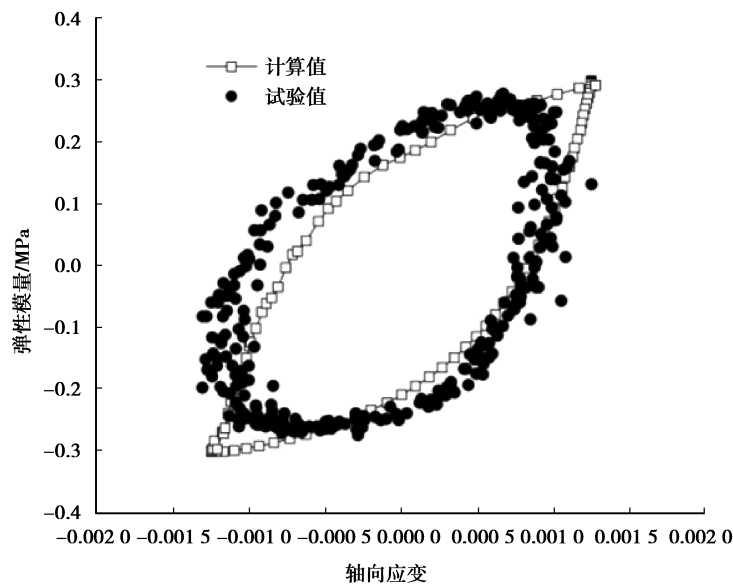


图 6 计算应力-应变滞回曲线与试验值对比

Fig.6 Comparisons of simulated stress-strain hysteresis curves and test data



通过模拟结果与试验结果比较可知,文中模拟结果与试验结果吻合较好,能够正确地反映粗粒土的非线性与滞后性,表明文中所开发粗粒土非线性动本构的正确性。

### 5 高速铁路路基动应力分析

文中数值模型参数按高速铁路建造技术国家工程实验室的 1:1 足尺无砟轨道-路基模型取值,如图 7 所示。支承层及以上结构均采用线弹性模型,扣件刚度为 45 MN/m,阻尼系数为 35 kN·s/m,其余参数如表 4 所示。路基部分分别用 ABAQUS 自带的摩尔-库伦本构模型和文中建立的粗粒土非线性动本构模型。路基各层及地基摩尔-库伦模型参数如表 5 所示;粗粒土非线性动本构模型中  $E_{max}$  为 200 MPa,参考剪应变  $\gamma_r$  等于 0.000 34。根据模型试验,选择以轴重 17 t、速度 350 km/h 的工况对路基动应力响应进行研究,文中将列车荷载进行简化,不考虑不平顺激励及多个移动荷载相互之间的影响,将列车荷载简化为单个移动荷载直接施加在钢轨上,加载曲线如图 8 所示<sup>[24]</sup>,加载位置如图 9 所示。在路基动应力响应研究中,竖向动应力沿深度方向衰减规律是关注的重点<sup>[15-16]</sup>。因此,文中将粗粒土非线性动本构模型子程序应用到高速铁路路基动力响应计算中,分析路基竖向动应力沿深度方向的衰减规律,数据采集点位于轨道中线下路基不同深度处。

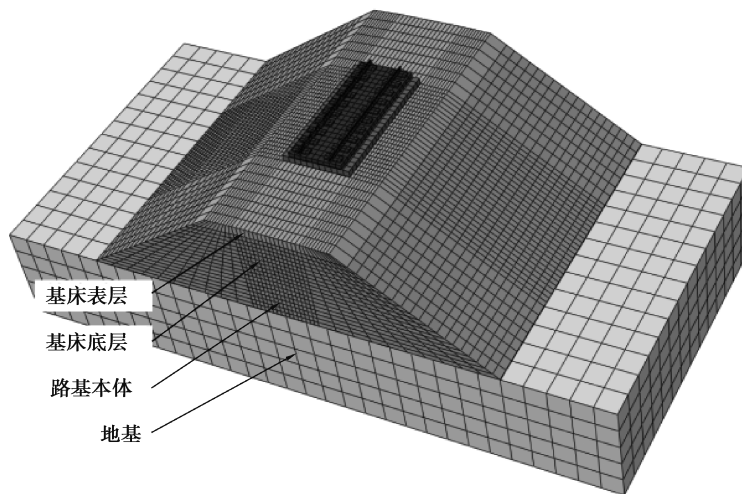


图 7 轨道-路基模型

Fig.7 Track-enbankment numerical model

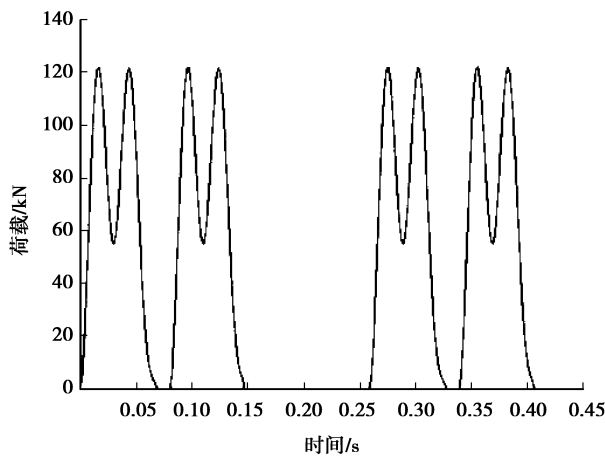


图 8 荷载时程曲线

Fig.8 Time history of load

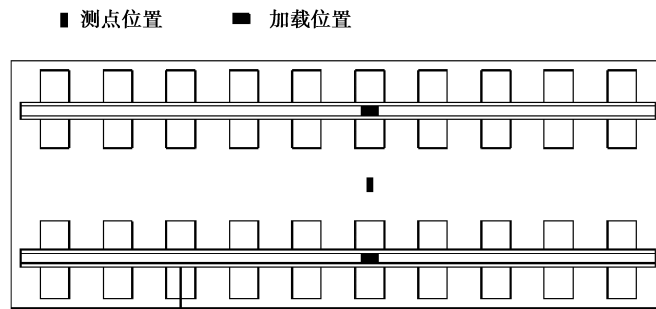


图 9 加载及测点位置示意图

Fig.9 Layout of loading and dynamic stress measuring points

表 4 轨道结构参数

Table 4 Parameters of rail system

结 构	参 数		
	$E/\text{GPa}$	$\nu$	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^{-3})$
钢轨	210	0.300	7 830
板式轨道板	35	0.167	2 500
CA 砂浆	9	0.200	2 500
支承层	27	0.200	2 400

表 5 路基计算参数

Table 5 Parameters of soil

结 构	参 数					
	$E/\text{GPa}$	$\nu$	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^{-3})$	$\eta$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{°})$
基床表层	0.20	0.27	2 200	0.028	32	65
基床底层	0.12	0.33	2 000	0.040	25	26
路基本体	0.06	0.36	1 900	0.045	22	23
地基	0.06	0.35	1 900	0.045	22	23

注:表 5 中  $E$  表示弹性模量,  $\nu$  表示泊松比,  $\rho$  表示密度,  $\eta$  表示阻尼比,  $c$  表示黏聚力,  $\varphi$  表示内摩擦角

将文中建立的非线性动本构模型计算结果与摩尔-库伦本构模型计算结果,以及足尺无砟轨道-路基模型试验得到的结果进行对比。衰减系数表示不同深度处动应力与基床表层表面动应力的比值,如图 10 所示。相对于摩尔-库伦本构模型,文中建立的粗粒土动本构模型计算得到路基动应力沿深度方向的衰减规律。与试验结果具有较好的一致性。在动力荷载作用下,粗粒土非线性动本构模型中土体弹性模量能够随着应变水平的变化而变化,而在摩尔-库伦本构模型中,土体弹性模量不变。因此,文中所建立的粗粒土非线性动本构比摩尔-库伦本构模型有较大的优越性,能够更好地适用于高速铁路路基动力响应分析。

## 6 结 论

在大型动三轴试验基础上建立了粗粒土非线性动本构模型,并编制相应程序应用到轨道-路基模型中开展动力分析。得到如下结论:

1) 试验结果表明,粗粒土动强度随着围压的增大而增大,有应变硬化的趋势;粗粒土动应力-动应变骨架

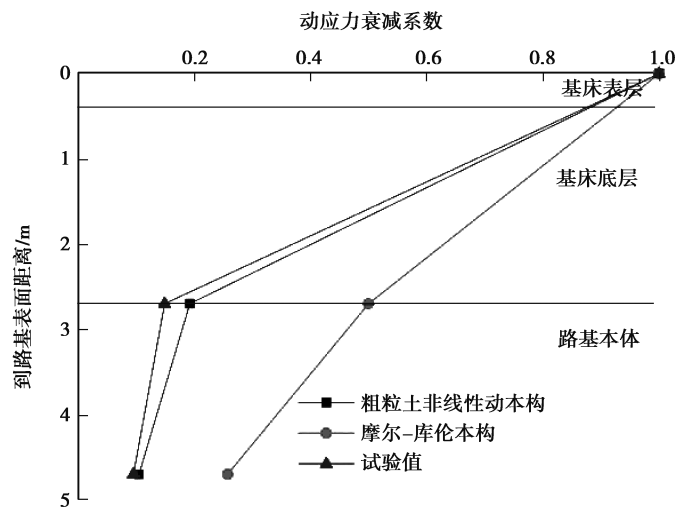


图 10 动应力衰减系数对比

Fig.10 Comparisons of attenuation quotients

曲线符合双曲线,可用 Hardin-Drnevich 模型描述。

2)以 Hardin-Drnevich 骨架曲线为基础,采用 Masing 法则构造了粗粒土加载、卸载的动应力-动应变关系滞回曲线。并推导了骨架曲线以及卸载、再加载滞回曲线上增量剪切模量。

3)开发了三维空间下基于 Hardin-Drnevich 骨架曲线和符合广义 Masing 准则的粗粒土非线性动本构模型子程序。并通过与粗粒土大型动三轴试验结果比较,验证了该本构模型的正确性。

4)将粗粒土非线性动本构模型子程序应用到轨道-路基模型中,与采用传统摩尔-库伦模型模拟结果和足尺模型试验结果比较,初步证明该本构模型能够更好地适用于高速铁路路基动力响应分析。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 冷伍明,周文权,聂如松,等.重载铁路粗粒土填料动力特性及累计变形分析[J].岩土力学,2016,37(3): 728-736.  
LENG Wuming, ZHOU Wenquan, NIE Rusong, et al. Analysis of dynamic characteristics and accumulative deformation of coarse-grained soil filling of heavy-haul railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(3): 728-736.(in Chinese)
- [ 2 ] 蔡袁强,赵莉,曹志刚,等.不同频率循环荷载下公路路基粗粒填料长期动力特性试验研究[J].岩石力学与工程学报, 2017,36(5):1238-1246.  
CAI Yuanqiang, ZHAO Li, CAO Zhigang, et al. Experimental study on dynamic characteristics of unbound granular materials under cyclic loading with different frequencies[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36 (5):1238-1246.(in Chinese)
- [ 3 ] 王子寒,王鹏举,景晓昆,等.粗粒土颗粒接触力学特性及细观接触模型研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(8): 1980-1992.  
WANG Zihan, WANG Pengju, JING Xiaokun, et al. A study on inter-particle contact behaviors and micro contact models of coarse-grained soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2018,37(8): 1980-1992.(in Chinese)
- [ 4 ] 彭凯,朱俊高,伍小玉,等.不同泥皮粗粒土与结构接触面力学特性实验[J].重庆大学学报,2011,34(1):110-114.  
PENG Kai, ZHU Jungao, WU Xiaoyu, et al. Experiments on influence of slurry kinds on mechanical behavior of interface between gavel and concrete[J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(1):110-114.(in Chinese)
- [ 5 ] Sun Q D,Indraratna B,Nimbalkar S. Effect of cyclic loading frequency on the permanent deformation and degradation of railway ballast[J]. Géotechnique,2014,64(9):746-751.
- [ 6 ] Enomoto T, Hassan Qureshi O, Sato T, et al. Strength and deformation characteristics and small strain properties of undisturbed gravelly soils[J]. Soils and Foundations, 2013, 53(6): 951-965.
- [ 7 ] Nguyen N S, François S, Degrande G. Discrete modeling of strain accumulation in granular soils under low amplitude cyclic loading[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 62: 232-243.
- [ 8 ] Chen C, Kong L W, Liu X Q, et al. A fuzzy set plasticity model for cyclic loading of granular soils[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2016, 9(6): 445-449.

- [9] 周文权,冷伍明,刘文劼,等.低围压循环荷载作用下饱和粗粒土的动力特性与骨干曲线模型研究[J].岩土力学,2016,37(2):415-423.  
ZHOU Wenquan, LENG Wuming, LIU Wenjie, et al. Dynamic behavior and backbone curve model of saturated coarse-grained soil under cyclic loading and low confining pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(2): 415-423. (in Chinese)
- [10] 邹炎,景立平,崔杰,等.基于 Hardin 曲线的土体边界面本构模型在 ADINA 软件中的实现[J].岩土力学,2015,36(1):75-82.  
ZOU Yan, JING Liping, CUI Jie, et al. Hardin curve based boundary surface constitutive model of soil and implementation in ADINA software[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(1): 75-82. (in Chinese)
- [11] Iwan W D. On a class of models for the yielding behavior of continuous and composite systems[J]. Journal of Applied Mechanics, 1967, 34(3): 612-624.
- [12] Pyke R M. Nonlinear soil models for irregular cyclic loading[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1979, 105(6): 715-726.
- [13] Martin P P, Seed H B. One dimensional dynamic ground response analysis[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1982, 108(7): 935-952.
- [14] 费康,刘汉龙.ABAQUS 的二次开发及在土石坝静、动力分析中的应用[J].岩土力学,2010,31(3):881-890.  
FEI Kang, LIU Hanlong. Secondary development of ABAQUS and its application to static and dynamic analyses of earth-rockfill dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 881-890. (in Chinese)
- [15] 胡勤,戚承志.Ramberg-Osgood 土动力非线性模型在 ABAQUS 软件上的开发及应用[J].岩土力学,2012,33(4):1268-1274.  
HU Qin, QI Chengzhi. Development and application of Ramberg-osgood soil dynamic nonlinear constitutive model on ABAQUS code[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 1268-1274. (in Chinese)
- [16] 张如林,楼梦麟.基于达维坚科夫骨架曲线的软土非线性动力本构模型研究[J].岩土力学,2012,33(9):2588-2594.  
ZHANG Rulin, LOU Menglin. Study of nonlinear dynamic constitutive model of soft soil based on Davidenkov skeleton curve[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2588-2594. (in Chinese)
- [17] 刘钢,罗强,张良,等.列车荷载作用下无砟轨道路基动应力特性分析[J].铁道学报,2013,35(9):86-93.  
LIU Gang, LUO Qiang, ZHANG Liang, et al. Analysis on the dynamic stress characteristics of the unballasted track subgrade under train loading[J]. Journal of The China Railway Society, 2013, 35(9): 86-93. (in Chinese)
- [18] 薛富春,张建民.移动荷载作用下高速铁路路基动应力的空间分布[J].铁道学报,2016,38(1):86-91.  
XUE Fuchun, ZHANG Jianmin. Spatial distribution of dynamic stresses in embankment of high-speed railway under moving loads[J]. Journal of The China Railway Society, 2016, 38(1): 86-91. (in Chinese)
- [19] 陈仁朋,江朋,段翔等.高速铁路板式无砟轨道不平顺下路基动应力的概率分布特征[J].铁道学报,2016,38(9):86-91.  
CHEN Renpeng, JIANG Peng, DUAN Xiang, et al. Probability distribution of dynamic stress of high-speed subgrade under slab track irregularity[J]. Journal of The China Railway Society, 2016, 38(9): 86-91. (in Chinese)
- [20] 中华人民共和国铁道部.TB10001-2016 铁路路基设计规范[S].北京:中国铁道出版社,2016.  
State Railway Administration of the People's Republic of China. TB 1001-2016 Code for design on subgrade of railway[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2016. (in Chinese)
- [21] 中华人民共和国铁道部.TB10102-2010 铁路工程土工试验规程[S].北京:中国铁道出版社,2010.  
The Ministry of Railways of the People's Republic of China. TB 1001-2016 Code for soil test of railway engineering [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2010. (in Chinese)
- [22] Hardin B O, Drnevich V P. Shear modulus and damping in soils: design equations and curves[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1972, 98(7): 667-692.
- [23] 谢定义.土动力学[M].北京:高等教育出版社,2011.  
XIE Dingyi. Soil dynamics[M]. Beijing: High Education Press, 2011. (in Chinese)
- [24] 王启云,张家生,孟飞,等.高速铁路路基模型列车振动荷载模拟[J].振动与冲击,2013,32(6):43-46.  
WANG Qiyun, ZHANG Jiasheng, MENG Fei, et al. Simulation of train vibration load on the subgrade testing model of high-speed railway[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(6): 43-46. (in Chinese)