

文章编号: 2097-1974(2025)06-0065-07

DOI: 10.7654/j.issn.2097-1974.20250610

冲击载荷作用下典型道路有限元模型建模方法研究

吉新博, 辛振伟, 张永阔, 王 辉, 廉 政
(北京航天发射技术研究所, 北京, 100076)

摘要: 百吨级冲击载荷作用下道路响应复杂, 影响作业成败。基于弹塑性道路有限元模型能够模拟出冲击载荷作用下道路的沉降响应, 但数值计算仿真结果的准确性缺乏试验验证, 同时模型参数离散性较大, 难以结合工程实际确定, 不同参数设置对仿真结果的准确性影响较大, 难以支撑工程作业。为预示冲击载荷作用下道路响应情况, 保证作业成功, 选取典型道路路层结构, 设计冲击载荷等效试验, 研究冲击载荷作用下典型道路沉降响应特性。基于试验结果, 针对典型道路各层材质选取合适的本构模型, 研究通过含水率、压实度等工程参数确定黄土基层非线性本构模型参数修正方法, 建立典型道路有限元模型开展仿真。从路面峰值沉降量、残余沉降量、道路表面整体沉降的几何状态三个维度对比仿真结果与试验数据, 偏差在10%以内, 验证了典型道路有限元模型建模方法的有效性。相关研究成果可广泛应用于道路瞬态冲击响应仿真。

关键词: 冲击载荷; 道路; 沉降响应; 等效试验; 有限元模型

中图分类号: U416.01; V19

文献标识码: A

Research on Finite Element Modeling Method of the Typical Road Under Impact Load

Ji Xinbo, XIN Zhenwei, ZHANG Yongkuo, WANG Hui, LIAN Zheng
(Beijing Institute of Space Launch Technology, Beijing, 100076)

Abstract: The response of roads under hundred-ton-level impact loads is complex and affects the success of operations. Finite element models of elastoplastic roads can simulate road settlement responses under impact loads, but the accuracy of numerical simulation results lacks experimental validation. Additionally, model parameters exhibit significant variability, making it difficult to determine them in practical engineering applications. Different parameter settings greatly influence the accuracy of simulation results, making them difficult to support engineering operations. To predict the road response under impact loads and ensure operational success, this study selects a typical road layer structure and designs equivalent impact load tests to investigate the settlement response patterns of typical roads under impact loads. Based on experimental findings, appropriate constitutive models are selected for typical materials in each layer of the typical road. Methods are developed to adjust the nonlinear constitutive model parameters of loess subgrade through engineering parameters such as moisture content and compaction degree. A finite element model of the typical road is established for simulation. The simulation results are compared with experimental data in three dimensions: peak pavement settlement, residual settlement, and the geometric state of overall road surface settlement. The deviations are within 10%, verifying the effectiveness of the finite element modeling approach for typical roads. The related research results can be widely used in road transient impact response simulation.

Keywords: impact load; road; settlement response; equivalent experiment; finite element model

0 引言

日常使用工况中, 由于起重作业或其他特种作业等原因, 道路受到冲击载荷作用, 载荷量级达百吨级。道路受到冲击载荷的作用, 产生明显的塑性沉降变形与结构破坏, 情况严重时可能会影响设备稳定性, 导致作业无法进行。为确保顺利完成作业, 需要

开展冲击载荷作用下道路动态沉降仿真分析, 预示道路沉降响应, 支撑作业实施。

目前, 面向冲击载荷作用下道路沉降响应仿真需求, 一般采用数值模拟的方法, 建立道路模型, 施加冲击载荷, 研究道路整体沉降响应。冯锦艳等^[1]基于分层总和法, 在不考虑载荷作用过程的情况下计算

低等级沥青路面的整体沉降,周晓和等^[2]基于脆性开裂模型重点研究了冲击载荷作用下沥青面层的破坏与开裂过程,林钦栋等^[3]采用基于离散元与有限元耦合的显式数值分析方法,通过模型模拟冲击载荷作用下道路全时程沉降,从不同维度探索了冲击载荷作用下道路响应情况。

百吨级冲击载荷作用下,道路沉降响应复杂,理论分析与数值计算难以反映结果的准确性,需要开展等效试验进行验证。同时,受季节变换、局部降雨等影响,道路模型参数离散性大,经验取值与实际情况偏差较大,致使仿真结果无法有效预示实际情况。本文针对冲击载荷作用下典型道路有限元模型建模方法展开研究,确定典型道路结构,设计冲击载荷等效试验,获取试验数据,分析典型道路结构各层材质在冲击载荷下的动态响应特性,构建各层材质的本构模型。根据材质本构模型参数的实际物理意义,结合道路含水率、压实度,引入模型参数修正方法,确定模型参数,建立能够反映冲击载荷下道路沉降响应的典型道路有限元模型。依托典型道路有限元模型,开展冲击载荷下的仿真计算,对比分析仿真结果与试验数据,验证本文提出的典型道路有限元模型建模方法的有效性。

1 冲击载荷下典型道路沉降特性分析

1.1 典型道路路层结构确定

根据道路路面材质,等级公路可划分为水泥道路与沥青道路两种。水泥道路采用水泥混凝土铺筑路面,属于典型刚性路面;沥青道路采用沥青混凝土作为路面,是一种柔性路面。冲击载荷作用下,水泥混凝土路面的刚度、抗弯强度强于沥青混凝土路面,有利于载荷传递与扩散,水泥道路整体承载能力一般大于沥青道路。为研究等级公路承载能力边界,选取沥青道路开展有限元模型建模方法研究。

沥青道路路层结构主要包括土基层、铺筑基层和沥青面层。铺筑基层通常将石灰土、级配碎石等材料覆盖在压实土基层上形成,铺筑基层上方铺设沥青面层,形成整体沥青道路结构。典型低等级单面层沥青道路的道路结构包含压实土基层、石灰土基层(铺筑基层)、沥青面层,涵盖了沥青道路的主要路层结构。本文将以此典型低等级单面层沥青道路作为对象展开研究,该典型低等级单面层沥青道路结构如表1所示。

表1 低等级单面层沥青道路结构

Tab.1 Typical pavement structure of low-grade single-layer asphalt road

| 道路路层划分 | 路层厚度/mm |
|--------|---------|
| 沥青面层 | 45 |
| 石灰土基层 | 160 |
| 土基层 | 2 000 |

1.2 冲击载荷等效试验

基于低等级单面层沥青道路,采用一种半径为0.75 m的圆形气囊装置,固定在试验道路上方,通过控制气囊内部气体压力变化,开展冲击载荷等效试验。按照表1中低等级单面层沥青道路典型道路结构铺筑沥青道路,道路长度3 m,宽度3 m,道路前后、左右两侧建设挡土结构。黄土土质结构松散,具有湿陷性,试验道路以黄土作为压实土基层,土基层厚度为2 m,2 m以下为原状土。通过开展黄土材料级试验,确定试验黄土基层最佳含水率为16.8%,塑限17.6%,液限29.4%。参照《公路路基设计规范JTG D30—2015》^[4],控制黄土基层的压实度为94%,平均含水率为17%。采用式(1)计算试验黄土基层稠度 ω_c ,其中 ω_l 表示黄土液限, ω_p 表示黄土塑限, ω 表示黄土实际含水率,以平均含水率代替,通过计算得到试验黄土基层的稠度为1.05。

$$\omega_c = (\omega_l - \omega) / (\omega_l - \omega_p) \quad (1)$$

在黄土基层上依次铺设160 mm石灰土基层与45 mm沥青面层,在黄土基层与石灰土基层、石灰土基层与沥青面层的层间接合处,以及沥青面层表面预埋位移传感器,监测冲击载荷施加过程中道路各层结构位移变化情况。冲击载荷等效试验开展期间环境温度为15.8℃,试验过程中气囊内部气体压力曲线如图1所示,对地最大冲击载荷约为97 t。

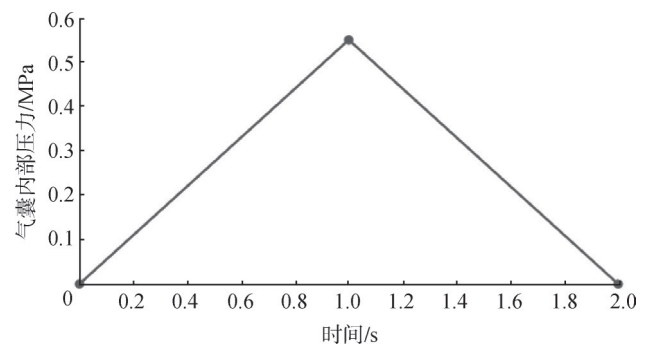


图1 气囊内部压力曲线

Fig.1 Airbag internal pressure curve

1.3 沉降响应特性分析

图2展示了冲击载荷作用下试验道路的剖面变形情况。受冲击载荷作用，沥青面层在载荷作用边缘区域（A处）产生环状裂纹，黄土基层发生塑性变形（B处），道路整体向下沉降，形成永久弯沉盆。采用水准仪测量试验前后气囊下方道路各点位的高程差，将数据处理后获取气囊下方道路弯沉盆信息，计算得到试验后载荷中心处道面最大残余沉降量为253 mm。

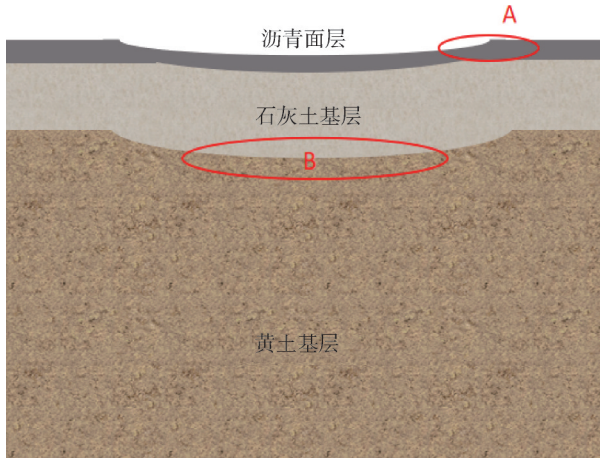


图2 冲击载荷作用下道路整体变形情况

Fig.2 Overall deformation of the road under impact load

道路各层位移传感器的数据变化如表2所示。在冲击载荷作用下，沥青道路整体结构发生塑性变形，载荷中心位置道面产生约253 mm的残余沉降。试验前后沥青面层厚度无明显变化，石灰土基层厚度由160 mm压缩至144 mm，土基层发生沉降约237 mm。黄土基层受到冲击压缩产生塑性变形，约占试验道路整体沉降的93.7%，石灰土基层塑性变形约占试验道路整体沉降的6.3%，冲击载荷作用下试验沥青道路沉降主要由黄土基层的塑性变形产生。同时，根据位移传感器测试数据，冲击载荷消失后，道路整体产生约

14 mm的向上回弹量。

表2 冲击载荷作用下试验道路动态响应情况

Tab.2 Typical pavement structure of low-grade single-layer asphalt road

| 试验道路路层结构 | 试验前各层厚度/mm | 试验后各层厚度/mm | 道路整体变形占比/% |
|----------|------------|------------|------------|
| 沥青面层 | 45 | 45 | 0 |
| 石灰土基层 | 160 | 144 | 6.3 |
| 土基层 | 2 000 | 1 763 | 93.7 |
| 道路整体结构 | 2 205 | 1 953 | 100 |

2 典型道路材质本构模型构建

百吨级冲击载荷作用下道路发生塑性沉降，常规道路多层连续弹性体系无法适用。为模拟冲击载荷作用下典型沥青道路的沉降响应现象，本节在多层连续体系的基础上，研究黄土、石灰土、沥青等沥青道路典型材质本构模型，确定典型道路材质本构模型。

2.1 黄土基层本构模型

沥青道路受到冲击载荷的作用，压力首先作用于沥青表层，并通过石灰土基层向下传递至土基层，土基层受到压应力作用。当土基层受到的压应力超过其弹性承载极限时，就会表现出无法恢复的压缩屈服现象^[5]，形成塑性沉降。目前，道路行业中常用多孔介质弹性模型、MC模型、DP模型、线弹性模型等弹性、塑性模型针对土基层的力学现象开展仿真计算。土基层采用弹性模型开展仿真，无法模拟塑性变形行为。塑性模型中，MC模型、DP模型等由于本构模型局限性，无法反映土基层受压导致的屈服现象。为模拟具有凝聚力的土基层在压力作用下的屈服现象，采用修正DP帽盖模型，引入压缩屈服力学本构，能够反映土基层的大体积应变，土基层不同本构模型特性如表3所示^[6]。

表3 土基层不同本构模型特性^[6]

Tab.3 Summary of soil constitutive model characteristics

| 土基层本构模型 | 本构模型特性 |
|----------|---|
| MC模型 | 塑性模型，模型基于剪切破坏准则，无法模拟土基层受压屈服现象 |
| DP模型 | 忽略了材料的非线性，难以反映土基层受压屈服现象 |
| 修正DP帽盖模型 | 在DP模型基础上，增加塑性帽盖屈服面，引入压缩导致的屈服，能够模拟土基层的大体积应变现象 |
| 临界状态塑性模型 | 可以反映土基层的压缩硬化性质与受压屈服现象，指数形式的硬化规律仅适用于 ABAQUS/Standard |

根据表3中土基层不同本构模型特性比较，修正DP帽盖模型、临界状态塑性模型都能够模拟冲击载荷作用下土基层的塑性变形现象。沥青道路在冲击载

荷作用下的塑性变形行为计算是典型的非线性动力学问题，在ABAQUS中，需采用Explicit模块进行模拟。考虑计算方法与土基层本构模型特点，采用修正

DP帽盖模型模拟土基层在冲击载荷作用下的塑性变形行为。修正DP帽盖模型的屈服面包含两部分,分别为剪切失效面 F_s 、帽盖屈服面 F_c ,如图3所示。同时,在 F_s 和 F_c 之间,ABAQUS采用渐变曲线 F_t 光滑连接。

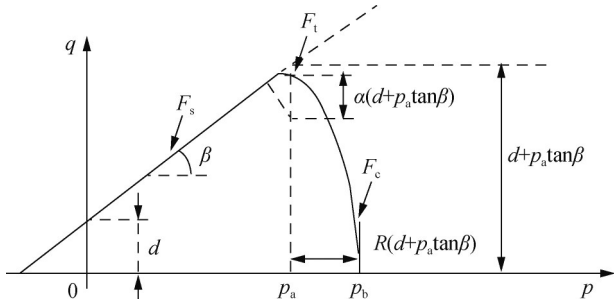


图3 修正DP帽盖模型屈服面

Fig.3 Modified yield surface of the DP cap model

修正DP帽盖模型的剪切失效面 F_s 表达式如下^[5]:

$$F_s = q - p \tan \beta - d = 0 \quad (2)$$

式中 p 和 q 分别为等效压应力和Mise等效应力; β 为土的摩擦角; d 为土的内聚力;等效压应力 p 的计算公式为

$$p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 \quad (3)$$

式中 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 分别为第一主应力、第二主应力和第三主应力。

在 π 平面上,DP屈服面 F_s 为圆形或椭圆形。在ABAQUS/Explicit中,屈服面 F_s 为圆形,表达式为^[5]

$$F_s = \sqrt{[p - p_a]^2 + \left[\frac{Rt}{(1 + \alpha - \alpha/\cos\beta)} \right]^2} - R(d + p_a \tan\beta) = 0 \quad (4)$$

式中 R 为控制盖形状的材料参数; α 为定义屈服面平移的一个小值(通常为0.01~0.05); p_a 代表体积非弹性应变驱动硬化/软化的演化参数。

为使屈服面光滑,在线性剪切失效面和帽盖曲面之间加入一个过渡曲面 F_t ,其表达式为^[5]

$$F_t = \sqrt{(p - p_a)^2 + \left[t - \left(1 - \frac{\alpha}{\cos\beta} \right) (d + p_a \tan\beta) \right]^2} - \alpha(d + p_a \tan\beta) \quad (5)$$

在修正DP帽盖有限元仿真模型中,需要给定的参数包括土体弹性模量 E ,内聚力 d ,内摩擦角 β 以及土体的硬化曲线等相关内容。根据相关研究结果,影响冲击载荷作用下道路沉降最主要的因素是土基强度^[7],有限元仿真中对模拟冲击载荷作用下道路土基层塑性沉降有较大影响的参数主要为土基层弹性模量 E 和土基层强度参数 d, β ,因此重点针对土基层弹性模量、强度参数进行修正,其余参数通过查阅相关标

准文件确定。

2.2 石灰土基层本构模型

典型低等级单面层沥青道路路面结构中,冲击载荷作用下,石灰土基层产生一定的塑性变形,变形量在整个路面结构变形中占比为6.3%。MC模型是基于Mohr-Coulomb屈服准则开发的经典塑性模型,常用于仿真分析岩土工程中单调加载的材料响应问题,对分析冲击载荷作用下石灰土基层的压缩变形具有适用性。为反映冲击载荷下石灰土基层的塑性变形,在弹性阶段采用线弹性模型、塑性阶段采用MC塑性模型表征石灰土的力学特性。

Mohr-Coulomb屈服准则由库伦于1773年提出,在岩土工程中应用广泛,该准则反映出作用在某一截面上的剪应力和正应力满足表达式(6)时,材料发生屈服。

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c \quad (6)$$

式中 c 表示道路中石灰土层的黏聚力; φ 表示石灰土层的内摩擦角,二者可由主应力表示为

$$F = \sigma_1 - \sigma_3 - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi - 2c \cos \varphi = 0 \quad (7)$$

Mohr-Coulomb屈服准则在应力空间中为一个六棱锥体表面,如图4所示。

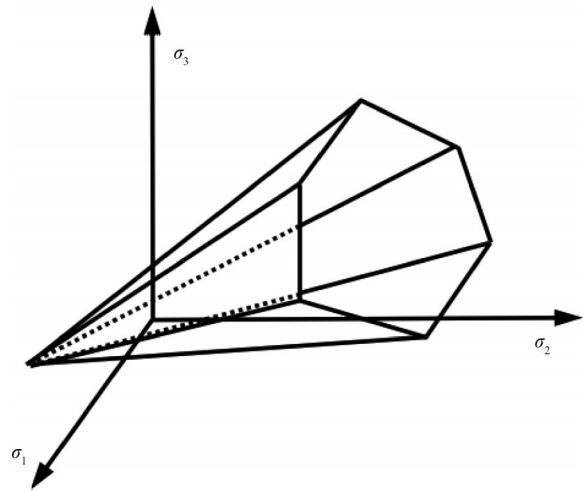


图4 应力空间中的Mohr-Coulomb屈服准则^[8]

Fig.4 Mohr-Coulomb yield criterion in the stress space

2.3 沥青层本构模型

冲击载荷作用在低等级单面层沥青道路,沥青面层压缩变形很小,厚度基本上不发生变化,但在冲击区域外侧出现环状裂纹。分析认为,沥青层的作用主要是扩散冲击载荷对道路的应力。冲击载荷作用下,沥青面层局部位置应力超过劈裂强度时,沥青面层发生脆性断裂,因此采用添加脆性断裂的线弹性模型模拟沥青面层在冲击载荷作用下的力学特性。

3 模型参数修正确定方法研究

1.3 节试验测试数据表明, 冲击载荷作用下, 沥青道路沉降主要由土基层的塑性变形产生。同时, 影响冲击载荷作用下道路沉降最主要的因素是土基层强度^[6]。本节重点研究典型道路有限元模型中黄土基层弹性模量、强度参数的修正与确定方法。

3.1 黄土基层弹性模量修正确定方法

土体弹性模量具有较大的离散性, 受土的类型影响较大。在陕西等黄土地区, 土体静态弹性模量参数 E_0 确定方法如式(8)所示^[9]:

$$E_0 = 64K^{3.88}\omega_c^{2.23} \quad (8)$$

式中 K 表示路基土的压实度; ω_c 表示路基土的稠度。

在冲击载荷作用下, 路面发生瞬时塑性沉降, 土基采用动态弹性模量更能拟合真实路面的动态响应过程。国内学者的研究表明, 土基动态模量均值约为承载板的静态模量均值的2~3倍^[10], 同时参照美国《AASHTO设计指南》, 将土基设计静态模量乘以3得到土基层的动态弹性模量 E_m 。

$$E_m = 3 \times E_0 \quad (9)$$

3.2 土基层强度参数修正确定方法

土体的强度是土体力学性质好坏的直接表现, 而土体的强度主要表现为土体的抗剪强度。在修正DP帽盖模型中, 土体抗剪强度主要由土体的黏聚力 c 、内摩擦角 β 两个参数表示。因此通过调研相关资料, 结合土力学原理, 研究含水率、压实度对土基层黏聚力、内摩擦角的影响。

陕西地区黄土是黏土的一种, 根据现有研究成果^[11-12], 黄土地区路基黏聚力与压实度、含水率的关系分别如式(10)、式(11)所示:

$$d = -3016K^2 + 5984K - 2948 \quad (10)$$

$$d = 13.43 + 51.2e^{[-1.250(\omega - 0.12)^2]} \quad (11)$$

综合考虑含水率与压实度对黄土路基黏聚力的影响, 黄土路基黏聚力表达式为

$$d = 0.5 \times (-3016K^2 + 5984K - 2948) + 0.5 \times (13.43 + 51.2e^{[-1.250(\omega - 0.12)^2]}) \quad (12)$$

陕西地区黄土压实度、含水率对土基层内摩擦角的影响如式(13)、式(14)所示^[11, 13]:

$$\beta = -1740K^2 + 3401K - 1629 \quad (13)$$

$$\beta = \arctan(-0.002\omega^2 + 0.046\omega + 0.407) \quad (14)$$

由于含水率对黏聚力影响较大, 对内摩擦角影响较小^[14], 内摩擦角主要受压实度影响, 将式(13)、式(14)合并考虑, 结合不同压实度、含水率下陕西黄土内摩擦角的实际测量结果, 压实度对内摩擦角的

影响系数取值范围按照0.7~0.9进行取值, 含水率对内摩擦角的影响系数相应地在0.3~0.1范围内取值。本文综合考虑含水率与压实度对黄土路基内摩擦角的影响, 压实度对内摩擦角的影响系数取0.7, 含水率对内摩擦角的影响系数取0.3, 获得黄土路基内摩擦角表达式为

$$\beta = 0.7 \times (-1740K^2 + 3401K - 1629) + 0.3 \times \arctan(-0.002\omega^2 + 0.046\omega + 0.407) \quad (15)$$

在不同的道路环境下, 确定路基含水率与压实度, 而后计算土基层弹性模量、黏聚力、内摩擦角等力学参数, 确定典型道路有限元模型参数。

4 典型道路有限元模型仿真方法验证

4.1 典型道路有限元模型

按照冲击载荷等效试验, 采用典型道路有限元模型开展仿真计算。在冲击载荷等效试验中, 场地长3 m, 宽3 m, 有效建设深度约2.205 m, 2.205 m以下为道路原状土。在典型道路有限元模型中, 道路模型大小与场地长、宽一致, 模型深度约2.205 m, 其中沥青面层厚度为45 mm, 石灰土基层厚度160 mm, 黄土基层厚度2 000 mm。仿真过程中在沥青面层圆形区域内施加压力曲线, 压力曲线与图1保持一致, 模拟实际过程中试验道路地面受到圆形气囊冲击载荷。典型道路有限元仿真模型如图5所示。

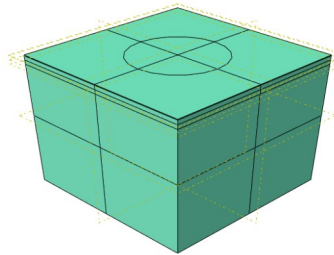


图5 典型道路有限元模型

Fig.5 Finite element model of the typical road

4.2 模型参数与边界条件

4.2.1 模型边界条件

在典型道路有限元模型中, 模型4个侧面对称约束, 模拟试验道路四周挡土结构对道路的约束作用, 模型底面固支约束, 模拟道路底部约束情况, 确保仿真模型与冲击等效试验过程中道路边界条件一致。

4.2.2 模型参数确认

试验道路中黄土基层的压实度为94%, 稠度为1.05, 根据式(8)计算黄土基层静态弹性模量大小为

$$E_0 = 64 \times 0.94^{3.88} \times 1.05^{2.23} = 56 \text{ MPa} \approx 60 \text{ MPa} \quad (16)$$

根据式(9)计算黄土基层的动态弹性模量:

$$60 \times 3 = 180 \text{ MPa} \quad (17)$$

结合式(12)、式(15),综合考虑含水率与压实度对土体黏聚力、内摩擦角的影响,通过黄土基层的含水率、压实度,计算确定黏聚力、内摩擦角。试验过程中黄土基层的压实度为94%,平均含水率为17%,最终确定仿真中黄土土基内摩擦角为28.1°,黏聚力为13.9 kPa。试验道路黄土基层本构模型参数如表4所示。

表4 试验条件下黄土基层本构模型参数

Tab.4 The parameters of constitutive model of soil base under natural conditions

| 路层 | 密度/ ($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$) | 动态弹性模 量/MPa | 黏聚力/ kPa | 内摩擦 角/(°) | 泊松比 |
|-----|---|----------------|-------------|--------------|------|
| 土基层 | 1 800 | 180 | 13.9 | 28.1 | 0.35 |

在使用弹塑性模型表征石灰土层力学特性过程中,弹性本构需要定义石灰土层的弹性模量和泊松比,塑性本构需要定义石灰土的内摩擦角和黏聚力。参考《公路沥青路面设计规范 JTG D50—2017》^[15],确定石灰土基层模型参数如表5所示。

表5 石灰土基层模型参数

Tab.5 The model parameters of lime soil layer

| 路层 | 密度/ ($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$) | 弹性模量/ MPa | 泊松比 | 内聚力/ kPa | 内摩擦角/ (°) |
|------|---|--------------|------|-------------|--------------|
| 石灰土层 | 1 750 | 600 | 0.25 | 200 | 25 |

沥青面层弹性模量、泊松比采用《公路沥青路面设计规范 JTG D50—2017》^[15]中给出的推荐值,确定沥青面层弹性模量与泊松比。冲击载荷等效试验期间环境温度为15.8 °C,沥青面层劈裂强度取15 °C下的推荐值1.5 MPa。沥青面层模型参数如表6所示。

表6 沥青面层模型参数

Tab.6 The model parameters of asphalt layer

| 路层 | 密度/($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$) | 弹性模量/ MPa | 泊松比 | 劈裂强度/ MPa |
|------|-------------------------------------|--------------|------|--------------|
| 沥青面层 | 2 500 | 2 500 | 0.25 | 1.5 |

4.3 仿真结果验证

基于4.1节建立的典型道路有限元模型,设置道路各层模型参数,0~2 s为施加重力,2~4 s在沥青路面圆形区域内按照图1中的压力曲线施加冲击载荷。提取冲击载荷中心处道路垂向位移时程曲线,如图6所示。

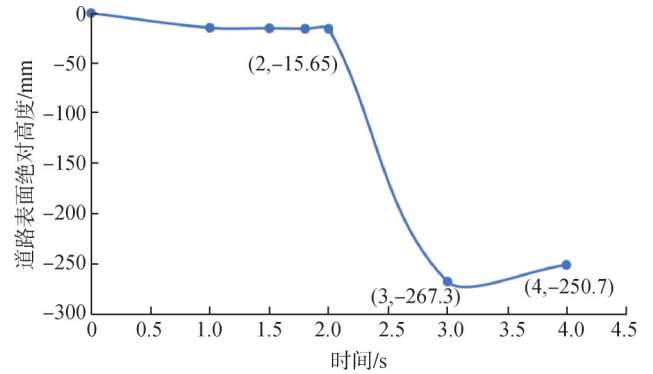


图6 道路位移时程曲线仿真结果

Fig.6 Simulation results of road displacement time-history curve

冲击载荷作用下,评价道路能否支撑开展作业的主要指标为道路路面峰值沉降量和载荷消失后道路路面的残余沉降量^[1],其中道路路面峰值沉降量是残余沉降量与道路回弹量的总和。分析道路位移时程曲线仿真结果,2 s时刻重力步平衡后,道路绝对高度为-15.65 mm,3 s冲击载荷最大时刻,道路绝对高度为-267.3 mm,4 s时刻施加冲击载荷后,道路绝对高度为-250.70 mm,计算得出载荷中心道面最大残余沉降量仿真结果为235.05 mm,回弹变形量为16.60 mm。对比仿真结果与试验数据,如表7所示,在路面峰值沉降量、残余沉降量两个维度上,仿真模型计算结果与试验测量数据偏差分别为5.75%、7.09%,仿真结果与试验数据基本一致,验证了典型道路有限元模型的准确性。

表7 仿真结果与试验数据对比

Tab.7 Comparison table of simulation results and test data

| 数据类型 | 试验数据 | 仿真结果 |
|------------|--------|--------|
| 最大残余沉降量/mm | 253.00 | 235.05 |
| 回弹变形量/mm | 14.00 | 16.60 |
| 峰值沉降量/mm | 267.00 | 251.65 |

提取冲击载荷作用区域道路水平直线上各点的垂直位移,绘制冲击载荷作用下道路仿真模型表面弯沉盆,与冲击载荷等效试验获取的道路真实弯沉盆对比分析,如图7所示。在道路表面整体沉降的几何维度上,基于典型道路有限元模型开展的仿真结果中道路表面的沉降现象与冲击载荷等效试验中道路沉降现象基本一致,在冲击载荷作用中心区域道路表面产生最大沉降,由载荷中心区域沿水平方向向外,道路表面沉降逐渐减小,验证了本文提出的典型道路有限元模型建模方法的有效性。

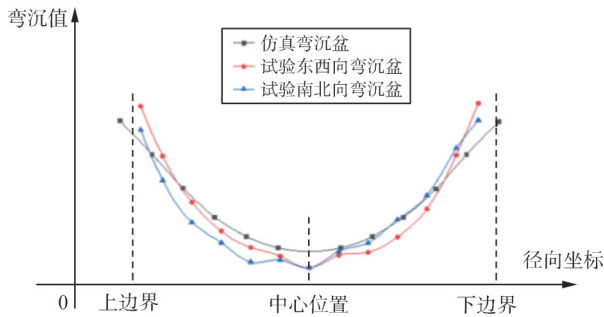


图7 道路仿真弯沉与试验数据弯沉对比

Fig.7 Comparison of road deflection between simulation and test data

5 结束语

本文开展冲击载荷作用下典型道路有限元模型建模方法研究。以典型低等级单面层沥青道路为研究对象，通过气囊装置设计冲击载荷等效试验，获取冲击载荷作用下典型道路沉降响应特性。基于道路沉降响应特性，确定典型道路各层材质本构模型。冲击载荷作用下影响道路沉降最主要的因素是土基强度，通过黄土基层含水率、压实度等工程参数研究其本构模型中反映土基强度相关参数的修正方法。建立典型道路有限元模型开展仿真，从路面峰值沉降量、残余沉降量、道路表面整体沉降的几何状态三个维度对比试验数据与仿真结果，偏差均在10%以内，验证了本文提出的典型道路有限元模型建模方法的有效性，相关研究成果可广泛应用于道路瞬态冲击响应仿真中。

参考文献

[1] 冯锦艳, 郭志培, 于志全. 冲击载荷下低等级沥青路沉降计算方法探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(S2): 889-893.
FENG Jinyan, GUO Zhipei, YU Zhiquan. Study on the settlement calculation method of low-grade asphalt pavements under impact loads[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12 (S2): 889-893.

[2] 周晓和, 马大为, 任杰, 等. 某导弹无依托发射场坪动态响应与破坏形态研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2014, 37(2): 77-81.
ZHOU Xiaohu, MA Dawei, REN Jie, et al. Study on the dynamic response and failure modes of a missile without a fixed launch pad[J]. Weapon Materials Science and Engineering, 2014, 37(2): 77-81.

[3] 林钦栋, 冯春, 唐德泓, 等. 冲击载荷作用下路面结构的沉降及破坏特征[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(11): 109-122.
LIN Qindong, FENG Chun, TANG Dehong, et al. Settlement and failure characteristics of pavement structures under impact loads[J]. Explosion and Impact, 2019, 39(11): 109-122.

[4] 中华人民共和国交通运输部. 公路路基设计规范: JTG D30—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway subgrades, JTG D30—2015[S]. Beijing: China Communication Press, 2015.

[5] 费康. ABAQUS岩土工程实例详解[M]. 北京: 人民邮电出版社,

2017.
FEI Kang. Detailed explanation of ABAQUS geotechnical engineering example[M]. Beijing: People's Post and Telecommunications Press, 2017.

[6] 吉新博, 卢卫建, 吕琛, 等. 不同冲击载荷下典型路面结构的动态弯沉响应[J]. 兵工学报, 2024, 45(1): 299-311.
JI Xinbo, LU Weijian, LYU Chen, et al. Dynamic deflection response of typical pavement structure under different impact loads [J]. Journal of Ordnance, 2024, 45(1): 299-311.

[7] 金晶, 尚晓江, 丁桦. 地下结构震动响应数值方法研究[J]. 兵工学报, 2008, 29(1): 85-89.
JIN Jing, SHANG Xiaojiang, DING Hua. Investigation of numerical method of the vibration response of underground structure[J]. Journal of Ordnance, 2008, 29(1): 85-89.

[8] 陈洁. 各项异性的摩尔库伦屈服准则及其在道路路堤中的应用[D]. 南京: 东南大学, 2021.
CHEN Jie. Anisotropic Mohr Coulomb yield criterion and its application in road embankment[D]. Nanjing: Southeast China University, 2021.

[9] 覃绮平. 土基回弹模量影响因素及其相关关系研究[D]. 西安: 长安大学, 2005.
TAN Qiping. Study on influencing factors and correlation of resilience modulus of soil base[D]. Xi'an: Chang'an University, 2005.

[10] 王旭东. 沥青路面材料动力特性与动态参数[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
WANG Xudong. Dynamic characteristics and dynamic parameters of asphalt pavement materials[M]. Beijing: People's Communications Press, 2008.

[11] 赵杰, 魏东旭, 胡永飞, 等. 不同压实度下黄河下游路基土强度指标相关性研究[J]. 西南公路, 2013(2): 89-91.
ZHAO Jie, WEI Dongxu, HU Yongfei, et al. Study on the correlation of subgrade soil strength index in the lower Yellow River under different compaction degrees[J]. Southwest Highway, 2013(2): 89-91.

[12] 李倩. 新疆地区路面覆盖下路基温湿度变化规律及力学性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
LI Qian. Study on variation law of subgrade temperature and humidity and mechanical properties under pavement coverage in Xinjiang[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.

[13] 石磊. 击实黄土强度特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
SHI Lei. Study on strength characteristics of compacted loess[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.

[14] 王丽. 路基含水率对其技术性能影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
WANG li. Study on the influence of subgrade moisture content on its technical performance[D]. Huhahaote: Inner Mongolia Agricultural University, 2009.

[15] 中华人民共和国交通运输部. 公路沥青路面设计规范: JTG D50—2017[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway asphalt pavement, JTG D50—2017[S]. Beijing: China Communication Press, 2017.

作者简介

吉新博 (1998—), 男, 工程师, 主要研究方向为发射总体技术。
辛振伟 (1992—), 男, 工程师, 主要研究方向为发射总体技术。
张永阔 (1993—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为发射总体技术。
王辉 (1996—), 男, 工程师, 主要研究方向为发射总体技术。
廉政 (1991—), 男, 工程师, 主要研究方向为发射总体技术。