

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0320

## 冲击载荷作用下路面结构的沉降及破坏特征\*

林钦栋<sup>1,2</sup>, 冯 春<sup>1</sup>, 唐德泓<sup>1</sup>, 李世海<sup>1,2</sup>, 殷凌云<sup>3</sup>, 王然江<sup>3</sup>

(1. 中国科学院力学研究所流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049;

3. 火箭军工程设计研究院, 北京 100011)

**摘要:** 随着公路在导弹的无依托随机发射中扮演更加重要的角色, 研究发射期间其在发射筒冲击载荷作用下的沉降及破坏特征对提高我国武器威慑力具有重要意义。选择低等级道路结构为研究对象, 基于河南省、山东省、云南省及广东省的低等级道路统计信息, 建立典型低等级道路结构的 1/4 简化计算模型, 采用一种基于有限元和离散元耦合的显式数值分析方法 CDEM, 并引入塑性-局部化-破裂耦合的本构模型, 实现冲击载荷作用下路面沉降的三维全时程模拟, 显式地展现裂纹萌生和扩展过程, 实现路面结构从连续状态到非连续状态的过渡。通过与落锤弯沉仪试验的监测结果对比验证道路简化模型的正确性及 CDEM 的计算精度, 随后各选取一个沥青混凝土和水泥混凝土道路结构进行数值模拟, 并从沉降量、破裂度、破坏特征等方面分析。计算结果表明: 沉降量时程曲线与冲击载荷时程曲线变化趋势一致, 沉降量在冲击载荷峰值点处达到最大值; 破裂面主要产生于冲击载荷急剧增大时期, 约占最终全部破裂面积的 97%; 破裂面大体分为路面结构层内的竖向破裂面和层间的水平破裂面, 破坏类型包括拉伸破坏与剪切破坏; 路面结构上部易产生环状破裂面, 下部易产生径向破裂面。

**关键词:** 低等级道路; 冲击载荷; 沉降与破坏; CDEM; 落锤弯沉仪

**中图分类号:** O342      **国标学科代码:** 13015      **文献标志码:** A

公路建设的迅速发展, 为现代战争实现军民融合提供了重要的基础依托。公路具有一定的承载能力, 是理想的导弹随机发射场地, 导弹发射期间发射筒底部对路面的作用可简化为冲击载荷, 因此研究冲击载荷作用下公路结构破坏特征对国防战略具有重要意义。

当前研究路面结构动力响应主要包括理论计算方法和数值计算方法。从理论计算角度分析, 路面结构大体分为刚性(半刚性)路面和柔性路面, 刚性路面多采用弹性地基上的薄板为基本力学模型, 柔性路面的力学模型一般采用层状体系(黏)弹性介质理论。从数值计算角度分析, 现有的研究中, 针对路面结构各层材料的数值计算方法以弹性有限元、弹塑性有限元为主, 视路面结构为连续介质, 将层间连接用单元描述。周晓和等<sup>[1]</sup>采用混凝土脆性开裂模型研究发射时场坪的动态响应与破坏形态。丰佩<sup>[2]</sup>采用 ABAQUS 和 ADAMS 对车载发射装置的起竖过程和发射过程进行动力学仿真计算, 分析无依托发射时场坪动态响应情况。Hu 等<sup>[3]</sup>采用 3 维 ABAQUS 有限元模型分析了路面结构在变交通载荷和环境条件下的应力应变关系。Wu 等<sup>[4]</sup>采用 ABAQUS 分析沥青面层在移动载荷作用下的动态响应特征。针对路面结构层间作用的数值方法主要包括接触对模型、Goodman 单元和弹簧与摩擦结合的层间接触模型。袁成林等<sup>[5]</sup>采用 ABAQUS 的 Contact Pair 模拟面面接触, 研究面面作用时的挤压、剪切及相应方向的位移情况。颜可珍等<sup>[6]</sup>选取 Goodman 模型, 采用不同剪切刚度的弹簧模型来模拟加铺层层间的接触状态。薛亮等<sup>[7]</sup>采用剪切弹簧模型, 主要通过定义滑移系数  $\alpha$  模拟路面特定结构层之间接触状态。黄宝涛等<sup>[8]</sup>采用分形理论和层间接触理论建立了层间接触模型。赵炜诚等<sup>[9]</sup>采用弹簧模型和摩擦模型结合的接触模型模拟层间作用。李彦伟等<sup>[10]</sup>建立了基于脱层失效理论的层间力学分析模型。

\* 收稿日期: 2018-08-29; 修回日期: 2018-11-14

第一作者: 林钦栋(1993—), 男, 硕士研究生, [linqindong@imech.ac.cn](mailto:linqindong@imech.ac.cn);

通信作者: 冯 春(1982—), 男, 博士研究生, 高级工程师, [fengchun@imech.ac.cn](mailto:fengchun@imech.ac.cn)。

现有的公路动力响应理论研究方法以弹性层状体系和黏弹性层状体系为主,属于连续介质范畴,难以合理反映路面结构及路基的损伤破坏特征,尤其是动态损伤破坏特征。此外,现有的公路动力响应数值研究方法以弹塑性有限元和黏弹塑性有限元为主,一定程度上增强了对复杂问题的适应性,但仍无法真实反映结构在冲击荷载作用下裂缝产生、扩展和复杂的接触作用过程。

本文试图通过一种基于FEM/DEM耦合的数值计算方法——连续-非连续单元方法(continuum discontinuum element method, CDEM),建立冲击荷载作用下低等级道路结构(县道、乡道、村道等)的计算模型,模拟裂缝产生、扩展及复杂的接触作用过程;通过与落锤弯沉试验结果对比,验证道路简化模型的正确性及CDEM方法的计算精度;并各选取一个沥青混凝土和水泥混凝土低等级道路结构进行数值计算与分析,研究其在冲击荷载作用下的沉降与破坏特征。

## 1 数值方法及本构模型

### 1.1 CDEM 概述

CDEM<sup>[11-13]</sup>是由中国科学院力学研究所自主研发的计算方法及软件,可定义为<sup>[14]</sup>:一种拉格朗日系统下的基于可断裂单元的动态显式求解算法。通过拉格朗日能量系统建立严格的控制方程,利用动态松弛法显式迭代求解,实现了连续非连续的统一描述,通过块体边界及块体内部的断裂来分析材料渐进破坏,可模拟材料从连续变形到断裂直至运动的全过程,结合了连续和离散计算的优势,连续计算采用有限元、有限体积及弹簧元等方法,离散计算则采用离散元法。

CDEM计算模型中有两个重要的基本模型:块体和界面。块体可以由一个或多个有限元单元组成,用于表征材料的连续特征。块体间以及块体内有限元单元间的接触面定义为界面,用来描述材料的非连续特征。界面包含真实界面和虚拟界面两部分,真实界面指块体间的界面,虚拟界面指块体内单元间的界面。在数值计算过程中,通过块体间及块体内单元间界面的破裂来模拟材料从连续到非连续的渐进破坏过程。CDEM计算模型如图1所示,该示意图中共包括5个块体,其中块体边界处的实线表示真实界面,块体内部的虚线表示虚拟界面。

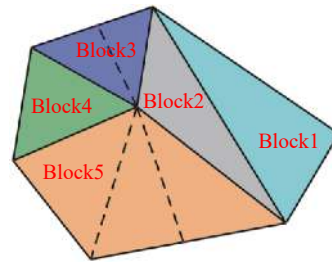


图1 CDEM计算模型

Fig. 1 The calculation model of CDEM

### 1.2 本构模型

本构模型的选取需考虑荷载特征,基于袁成林等<sup>[5]</sup>简化的某导弹发射时发射筒对路面的压力时程曲线,确定荷载具有动力(加卸载阶段)与静力(稳定段)混合特征,并咨询相关单位,确定此特征基本符合实况。本文研究的冲击荷载作用时间维持在秒量级,应变率大致为 $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 量级。张文清<sup>[15]</sup>指出各种材料的强度对应变率的敏感性存在一个门槛值,小于此值时强度随应变率的增加幅度较小,由李洪超<sup>[16]</sup>划分的混凝土应变率分类表可知, $10^{-5} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 为低应变率,应变率对材料的影响有限。另通过对冲击荷载时程曲线分析可知,稳定段占全时程的比例超过65%,模型主要处于静力阶段,本文在选择本构模型时不考虑应变率效应。

道路结构主要包括路面结构和路基两部分。针对路面结构,引入塑性-局部化-破裂耦合模型描述冲击荷载下的变形及破裂过程,该结构由单元及虚拟界面(显式地实现裂纹的萌生、扩展过程)两部分组成,其中将两个单元的交界面定义为虚拟界面。单元的受力变形采用有限元进行计算,并引入理想弹塑性模型表征冲击荷载下道路结构出现的塑性变形特征;虚拟界面的受力变形通过离散元(数值弹簧)实现,并引入考虑局部化过程的塑性模型实现损伤断裂过程。

单元的本构模型采用Mohr-Coulomb理想弹塑性模型(含最大拉应力本构),采用下式判断单元的应力是否已经达到或超过Mohr-Coulomb准则<sup>[17]</sup>

$$\begin{cases} f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi + 2C \sqrt{N_\varphi} \\ f^t = \sigma_3 - T \\ h = f^t + \alpha^p (\sigma_1 - \sigma^p) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $C$ 、 $\varphi$ 、 $T$  为块体的黏聚力、内摩擦角及抗拉强度,  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  和  $\sigma_3$  为块体的最大、中间和最小主应力,  $N_\varphi$ 、 $\alpha^p$ 、 $\sigma^p$  为常数, 可表述为

$$\begin{cases} N_\varphi = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \\ \alpha^p = \sqrt{1 + N_\varphi^2} + N_\varphi \\ \sigma^p = T N_\varphi - 2C \sqrt{N_\varphi} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $f^s$  是判断块体是否满足剪破坏准则的指标,  $f^t$  是判断块体是否满足拉破坏准则的指标,  $h$  是判断块体当前所处应力区域的指标。如果  $f^s \geq 0$  且  $h \leq 0$ , 则发生剪切破坏; 如果  $f^t \geq 0$  且  $h > 0$ , 则发生拉伸破坏。

虚拟界面的本构模型采用脆性断裂本构模型(特殊的 Mohr-Coulomb 应变软化模型), 采用下式进行拉伸破坏的判断及法向接触力的修正<sup>[17]</sup>

$$\left. \begin{array}{l} \text{if} \quad -F_n(t_1) \geq T(t_0) A_c \\ \text{then} \quad F_n(t_1) = -T(t_0) A_c \\ \quad \quad T(t_1) = 0 \end{array} \right\} \quad (3)$$

式中:  $T(t_0)$  为初始时刻的抗拉强度 (Pa),  $A_c$  为弹簧的特征面积 ( $\text{m}^2$ ),  $F_n(t_1)$  为  $t_1$  时刻弹簧的拉力 (N),  $T(t_1)$  为  $t_1$  时刻的抗拉强度 (Pa)。

采用下式进行剪切破坏的判断及切向接触力的修正

$$\left. \begin{array}{l} \text{if} \quad F_s(t_1) \geq F_n(t_1) \tan \varphi + c(t_0) A_c \\ \text{then} \quad F_s(t_1) = F_n(t_1) \tan \varphi + c(t_0) A_c \\ \quad \quad c(t_1) = 0 \end{array} \right\} \quad (4)$$

式中:  $F_s(t_1)$  为  $t_1$  时刻的剪切力 (N),  $F_n(t_1)$  为  $t_1$  时刻的拉力 (N),  $c(t_0)$  为  $t_0$  时刻的黏聚力 (Pa),  $c(t_1)$  为  $t_1$  时刻的黏聚力 (Pa)。

路基不存在虚拟界面, 保持连续介质特征, 采用理想弹塑性 Mohr-Coulomb 模型。

## 2 计算模型及验证

### 2.1 计算模型

当前我国的公路大体分为高/中/低三个等级, 多数高等级公路(如高速公路、一级公路等)在设计初期已考虑军民融合的宗旨, 基本符合战时需求, 针对低等级公路(包括沥青混凝土、水泥混凝土、沥青碎石等类型), 因在我国公路里程中仍占据一定比例, 且建设初期较少考虑军民融合的宗旨, 因此本文研究的道路结构集中于县道、乡道、村道等低等级公路。从路面层数、材料类型、厚度等方面考虑, 基于河南省、山东省、云南省及广东省的低等级路面结构调研结果, 并咨询交通部及相关高校, 确定在我国的公路路面层设计中, 沥青混凝土和水泥混凝土为主要材料, 故本文主要针对低等级公路中的沥青混凝土和水泥混凝土 2 类公路建立数值计算模型。不同公路具有不同的结构特征, 针对此种现象, 必须对公路结构进行简化。基于四省份的路面结构调研资料及与相关机构探讨, 从路面结构的各层厚度及材料等方面确定当前我国低等级公路典型结构特征, 以此建立数值计算模型。

#### 2.1.1 几何模型

典型公路由路面结构和路基组成, 将路面结构简化为 2~3 层, 所研究的问题关于横向( $x$  方向)、纵向( $y$  方向)对称, 取 1/4 建立计算模型, 考虑到水泥混凝土路面的“分块现象”, 取其中一部分作为面

层,并根据低等级公路的路面特征,暂未考虑配筋等内部结构。其中,沥青混凝土公路结构如图 2(a)所示,面层宽 2 m,基层和垫层宽 2.5 m,路基尺寸为 8.5 m×10.0 m×9.0 m,面层底部与路基顶部高程相同。水泥混凝土公路结构如图 2(b)所示,考虑水泥混凝土路面的分块现象,混凝土板长 2.5 m,宽 2 m,基层与垫层宽 2.5 m,路基尺寸为 8.5 m×9.0 m×9.0 m。两图中面层顶部的红色区域(1/4 圆)为冲击载荷作用区域。

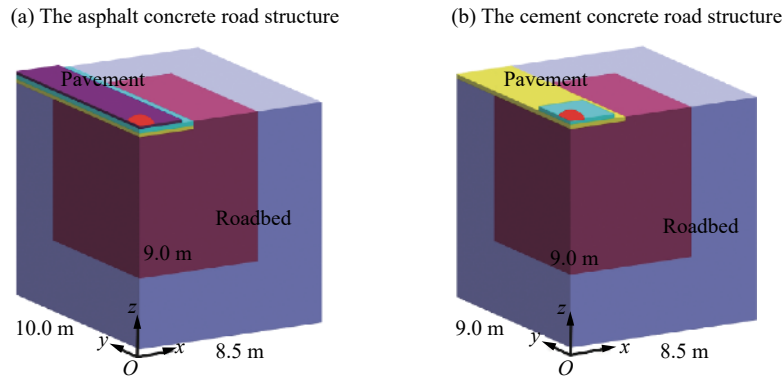


图 2 典型公路结构计算模型

Fig. 2 The calculation models of typical pavement structures

### 2.1.2 冲击载荷及边界条件

导弹发射期间发射车的支柱和发射筒均与路面产生相互作用,本文主要研究发射筒。通过对袁成林等<sup>[5]</sup>简化的某导弹发射时发射筒对路面的压力时程曲线分析,确定曲线大致分为急剧增大-动态平稳-急剧降低 3 个阶段。从作用时间、峰值、变化趋势等方面对比分析,数值计算采用的冲击载荷时程曲线选取冯锦艳等<sup>[18]</sup>一文中的曲线,如图 3 所示,持续时间约为 1.65 s,作用区域为 1/4 圆,半径为 0.9 m,峰值强度为 0.79 MPa,具有明显的 4 阶段特征。

针对边界条件:考虑对称性,模型四周及底部边界采用法向位移约束。因荷载具有动力(加卸载阶段)与静力(稳定段)混合特征,为消除位移约束带来的应力波反射影响,将地下边界内侧 3 m 厚模型设置为高阻尼作为消波层。

### 2.1.3 计算过程

计算过程分为静态计算与动态计算 2 阶段,利用静态计算模拟路面铺装过程并获取铺装后道路结构的应力、位移等信息,随后位移清零,保持应力状态,认定此时为仅受重力作用的道路结构正常工况。随后基于静态计算获取的应力场,在面层顶部的部分区域施加冲击载荷,进行动态计算,分析动力冲击过程。

### 2.1.4 材料参数

CDEM 中包括块体和界面两个基本模型,本文中在界面上引入数值弹簧表述层间作用,因此材料参数包括表现材料连续性的块体的材料参数及数值弹簧的材料参数。块体的材料参数基于试验获取,数值弹簧的材料参数,大体分为强度类(黏聚力、抗拉强度、摩擦角)和刚度类(法向刚度、切向刚度),强度类依据“两者取弱”的原则,基于弹簧两侧块体的弱值进行选取,刚度类则考虑两侧的粗糙度,因路面结构两层间存在表面粗糙度  $\Delta l$ ,则依据路面结构中各层的弹性模量  $E$ ,将  $E/\Delta l$  作为数值弹簧的刚度。计算所用部分材料参数如表 1 所示。

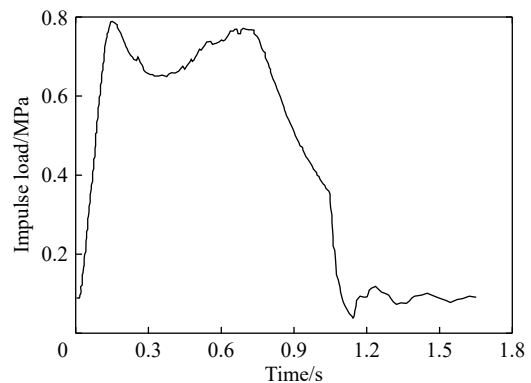


图 3 冲击载荷时程曲线<sup>[18]</sup>

Fig. 3 Time curve of impulse load<sup>[18]</sup>

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

类型	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa	内摩擦角/(°)
沥青混凝土	2 400	0.7	3	0.6	40
水泥混凝土	2 400	30	3.18	2.01	50
水泥稳定碎石	2 410	1.4	1.6	0.4	45
石灰土	1 800	0.4	0.4	0.2	29
路基	1 700	0.07	0.04	0.01	20

2.1.5 研究内容

根据研究目的, 选择 4 个研究内容, 分别为: (1) 面层顶部荷载中心点沉降量; (2) 面层顶部  $x$ 、 $y$  方向沉降量; (3) 破裂度  $D$ : 已破裂面占可破裂面的比例, 可破裂面包括虚拟界面和真实界面, 计算公式如下式所示, 用以分析裂缝数量及变化趋势; (4) 路面结构各层破坏特征。

$$D = \frac{S_r}{S_t} \tag{5}$$

式中:  $S_r$  为已发生破裂的截面面积,  $S_t$  为可发生破裂的截面面积。

2.2 数值方法验证

CDEM 可实现冲击载荷作用下路面结构由完整状态到裂纹萌生、扩展状态的全时程模拟, 显式地展现裂纹扩展过程, 更有助于对实际工况的分析, 因此选用 CDEM 进行此次数值计算。落锤弯沉仪可近似实现短时间内冲击载荷的施加过程, 且载荷时程曲线与冲击载荷时程曲线的趋势、峰值大体一致, 因此采用落锤弯沉仪现场试验探讨道路简化模型的正确性及 CDEM 方法的计算精度。

表 2 弯沉仪技术参数

Table 2 The technical parameters of FWD

加载盘半径/m	荷载脉宽/ms	荷载峰值/MPa
0.15	30~40	0.25~1.27

2.2.1 技术参数与材料参数

以交通部公路研究中心试验场试验道路的落锤弯沉试验作为抽象模型校核依据, 选取水泥混凝土路面结构一个, 弯沉仪技术参数如表 2 所示。归一化的荷载时程曲线如图 4 所示。

为便于观察荷载的变化规律及不同时刻的荷载相较于峰值荷载的比值, 对荷载的时程曲线进行归一化操作, 定义归一化的比值  $\gamma$  为

$$\gamma = \frac{P_t}{P_{\max}} \tag{6}$$

式中:  $P_t$  为  $t$  时刻的荷载,  $P_{\max}$  为荷载的最大值, 可知  $\gamma$  的取值范围为 [0,1], 荷载归一化比值  $\gamma$  的时程曲线如图 4 所示。

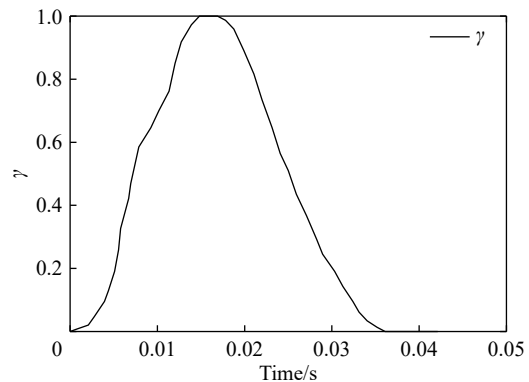


图 4 荷载归一化比值  $\gamma$  的时程曲线

Fig. 4 The time history curve of load normalization ratio  $\gamma$

水泥混凝土路面结构按照力学性质可以分为 4 个材料层, 各层材料参数由现场提供, 如表 3 所示, 落锤弯沉仪荷载峰值 25 t, 对应应力 0.89 MPa。

表 3 现场材料参数

Table 3 Field material parameters

材料	$E$ /GPa	$\mu$
水泥混凝土	27	0.15
沥青混凝土	1	0.3
粒料	0.7	0.3
路基	0.2	0.4

2.2.2 实测数据与计算结果对比

现场实测沉降曲线与数值计算沉降曲线形状相似, 且沉降响应峰值相对于荷载峰值均落

后 5 ms。各监测点的最大沉降量如图 5 所示,当  $0.0\text{ m} < x < 1.8\text{ m}$  时,实测沉降值与数值计算沉降值变化趋势相同,最大沉降量与  $x$  具有近似的线性关系,现场实测的最大沉降值均大于数值计算值,误差在 10% 以内,两者拟合程度较高。因此通过与落锤弯沉试验结果对比分析,验证了道路简化模型的正确性及 CDEM 方法的计算精度。

基于山东、云南、河南和广东四省低等级道路的调研结果,选取沥青混凝土和水泥混凝土道路结构各一个,利用 CDEM 数值计算方法,分析路面结构的沉降及破坏特征,各层厚度及材料如表 4 所示。

表 4 路面材料类型及厚度

Table 4 Type and thickness of pavement material

种类	面层	基层	垫层
沥青混凝土	12 cm 沥青混凝土	20 cm 水泥稳定碎石	15 cm 石灰土
水泥混凝土	18 cm 水泥混凝土	18 cm 石灰土	-

### 3 沥青混凝土路面

沥青混凝土路面结构的数值模型如图 6 所示(未展示路基),其中红线范围(半径 0.9 m 的 1/4 圆)内为冲击载荷作用区域,冲击载荷范围内的单元网格如图 7 所示,整个道路模型共 257 130 个单元。

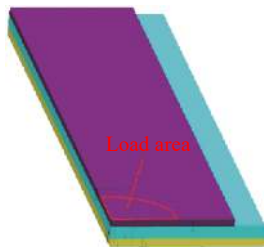


图 6 路面结构模型

Fig. 6 Pavement structure model

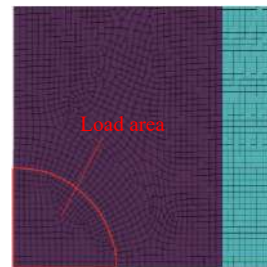


图 7 路面结构俯视图

Fig. 7 Top view of pavement structure

#### 3.1 沉降特征

##### 3.1.1 面层顶部荷载中心点沉降量

路面结构局部沉降量云图如图 8 所示,黑色线段为裂缝。荷载中心点沉降量时程曲线如图 9 所示。由图 8~9 可知:(1)同一时刻荷载中心点沉降量最大,面层顶部的沉降量云图为环状;(2)荷载中心点沉降量时程曲线与冲击载荷时程曲线变化趋势保持一致,具有明显的 4 阶段特征;(3)最大瞬时沉降量位于冲击载荷第一、二阶段的交界点处,与冲击载荷的峰值点相对应。

##### 3.1.2 $x$ 、 $y$ 方向沉降量

路面结构顶部  $t=0.2\text{ s}$  和  $t=1.65\text{ s}$  时刻  $x$ 、 $y$  方向沉降量如图 10~11 所示。由图可知:(1)因冲击载荷的作用范围为 1/4 圆,同一时刻,  $x$ 、 $y$  方向沉降量变化趋势基本一致,但因  $x$ 、 $y$  方向的路面结构尺寸及约束条件存在差异,其沉降量曲线的变化趋势及同一径向距离处的沉降量存在一定差异;(2)  $x$ 、 $y$  方向沉降量曲线出现较明显的拐点,表明此位置处界面发生破裂,出现裂缝,应力场发生突变,导致沉降量随距离变化不一致。

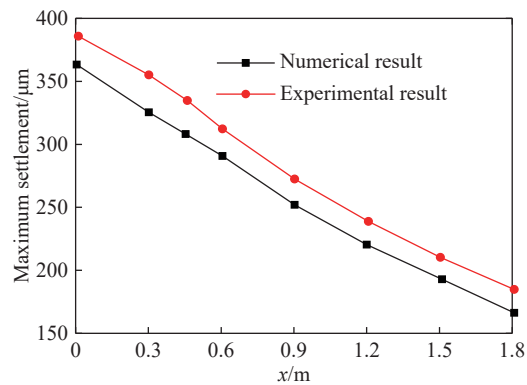


图 5 不同位置最大沉降量对比

Fig. 5 Comparison of maximum settlement at different locations

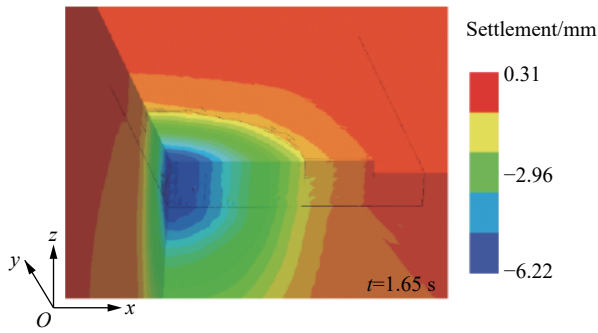


图 8 路面结构局部沉降量云图  
Fig. 8 Local settlement nephogram

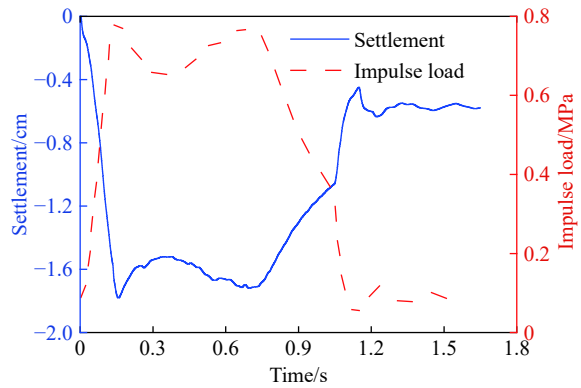


图 9 荷载中心点沉降量  
Fig. 9 Settlement in the center of load area

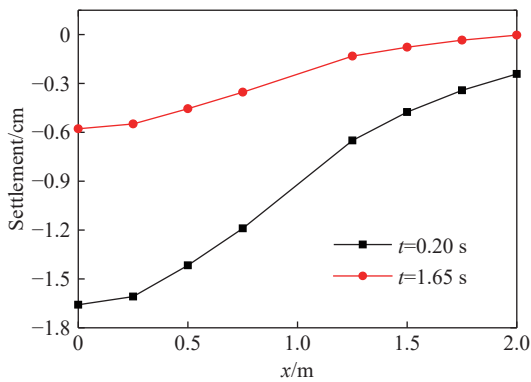


图 10 x 方向沉降量  
Fig. 10 Settlement in x direction

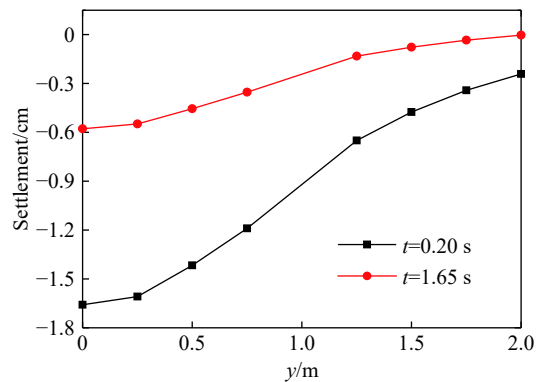


图 11 y 方向沉降量  
Fig. 11 Settlement in y direction

### 3.2 破坏特征

#### 3.2.1 破裂度时程曲线

冲击载荷结束时刻的裂缝分布如图 12 所示,可破裂面的破裂度时程曲线如图 13 所示。由图 12~13 可知:(1)因冲击载荷作用区域为 1/4 圆,面层产生环状裂纹,且位于冲击载荷作用区域外侧;(2)破裂度时程曲线具有明显的两阶段特征,冲击载荷的增大与减小均会导致界面破裂,但破裂主要发生在冲击载荷急剧增大时期,占最终全部破裂面积的 97%,最终时刻的破裂度为 6.22%,路面仍具有较强的承载能力。

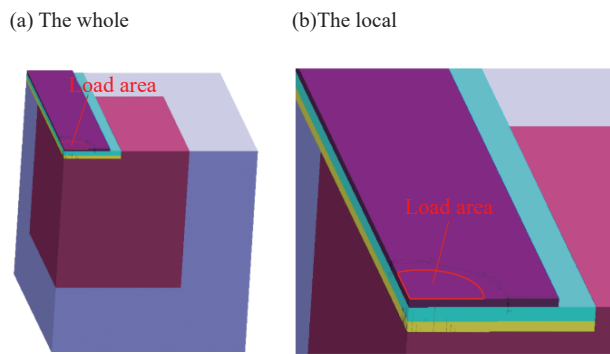


图 12 裂缝分布示意图  
Fig. 12 Crack distribution diagram

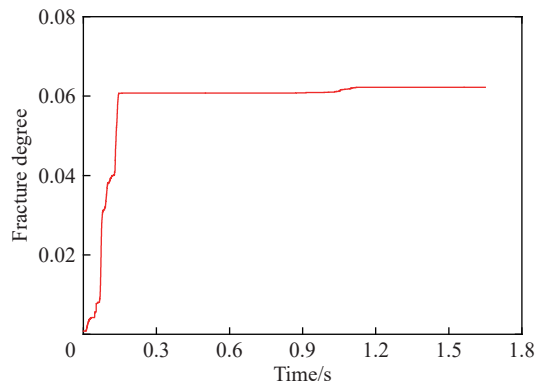


图 13 可破裂面的破裂度  
Fig. 13 Fracture degree of rupturable face

### 3.2.2 面层破裂面初始破坏云图

面层为图 12(b) 中路面结构的最上层, 裂缝的分布如图 14 所示, 破裂面初始破坏云图如图 14~15 所示。由图 15 可知: (1) 面层产生环状裂纹, 且位于冲击载荷作用区域外侧; (2) 面层破裂面主要产生于 0~0.2 s 的冲击载荷急剧增大时期, 形状主要为环状, 后续仍有破坏产生, 但数量较少, 且主要发生在横向, 与环状破裂面贯通; (3) 面层内破裂面均为竖向, 无水平破裂面产生, 初始破坏形式均为拉伸破坏。

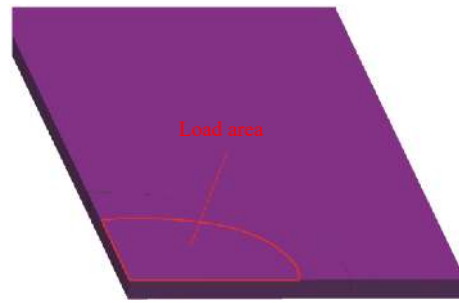


图 14 面层裂缝分布示意图

Fig. 14 Crack distribution diagram of surface course

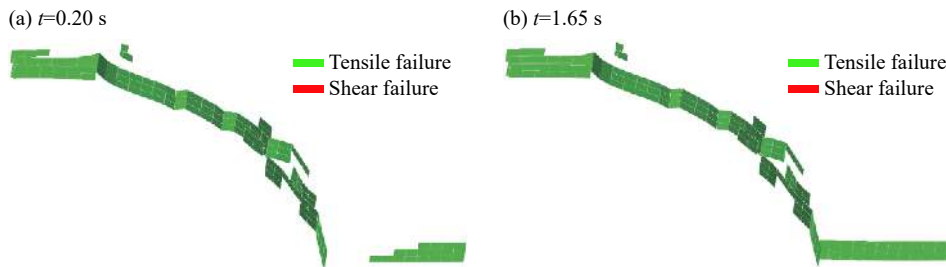


图 15 面层初始破坏云图

Fig. 15 Initial damage nephograms of surface course

### 3.2.3 基层破裂面初始破坏云图

基层为图 12(b) 中路面结构的中间层, 裂缝的分布如图 16 所示, 红色实线部分为面层顶部的冲击载荷作用区域, 虚线为实线的竖向投影, 破裂面初始破坏云图如图 17 所示。由图 16~17 可知: (1) 基层破裂面主要产生于 0~0.2 s 的冲击载荷急剧增大时期, 破裂面总体为竖向, 存在少量水平破裂面, 层间未产生破裂面; (2) 除环状破裂面外, 出现径向破裂面, 破裂面的初始破坏类型总体为拉伸破坏, 极少数为剪切破坏; (3) 基层与面层的环形破裂面的形状、尺寸大体相同, 但因面层的应力扩散效应导致存在部分差异。

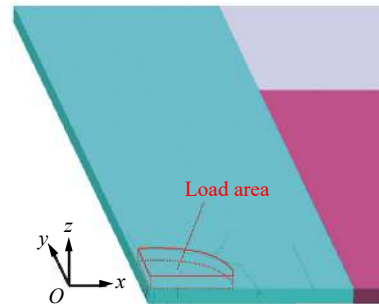


图 16 基层裂缝分布示意图

Fig. 16 Crack distribution diagram of base course

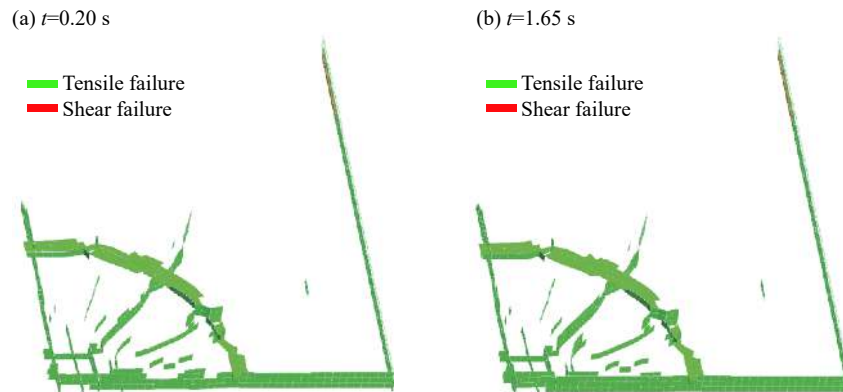


图 17 基层初始破坏云图

Fig. 17 Initial damage nephograms of base course



### 3.2.4 垫层破裂面初始破坏云图

垫层为图 12(b) 中的最下层, 裂缝分布如图 18 所示, 破裂面初始破坏云图如图 19 所示, 由图 18~19 可知: (1) 破裂面主要产生于 0~0.2 s 的冲击载荷急剧增大时期, 位于垫层层内及与路基的交界面处, 其中层内破裂面主要为竖向, 与下部路基的水平交界处产生水平破裂面; (2) 垫层内存在大量的径向破裂面, 但无明显的环状破裂面产生; (3) 竖向破裂面的初始破坏类型为拉伸破坏, 水平破裂面的破坏类型总体为剪切破坏。

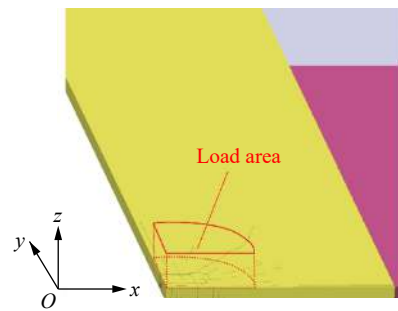


图 18 垫层裂缝分布示意图

Fig. 18 Crack distribution diagram of bed course

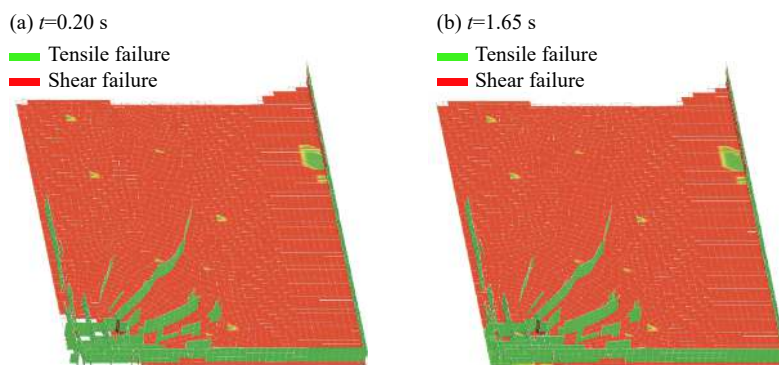


图 19 垫层初始破坏云图

Fig. 19 Initial damage cloud nephograms of bed course

## 4 水泥混凝土路面

水泥混凝土路面结构的数值模型如图 20 所示(未展示路基), 其中红线范围(半径 0.9 m 的 1/4 圆)内为冲击载荷作用区域, 冲击载荷范围内的单元网格如图 21 所示, 整个道路模型的单元数为 140 554。

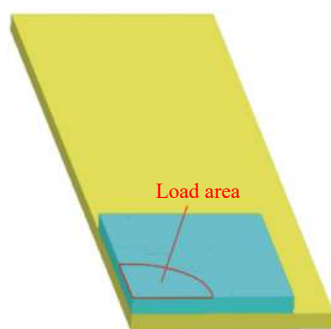


图 20 路面结构模型

Fig. 20 Pavement structural model

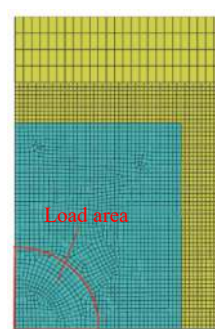


图 21 模型俯视图

Fig. 21 Top view of model

### 4.1 沉降特征

#### 4.1.1 面层顶部荷载中心点沉降量

路面结构局部沉降量云图如图 22 所示, 可知与沥青混凝土路面结构沉降量云图大体一致, 面层顶部荷载中心点沉降量时程曲线如图 23 所示。由图 22~23 可知: (1) 面层顶部荷载中心点沉降量最大, 且顶部沉降量云图为环状; (2) x 方向路面结构与路基交界面处出现局部的红色区域, 表明此

处路面结构发生翘起,与路基分离,且与冲击载荷区域(蓝色)存在较明显的不连续现象,经分析,这是由于此时的水泥混凝土路面结构因层数少,基层材料参数弱,冲击载荷扩散效果较差,沉降集中于冲击载荷作用区域,裂缝的产生导致应力传递受到影响,因此沉降发生明显拐点,发生不连续现象;且因基层的环状裂纹半径偏小,环状裂纹外侧  $x$  方向基层基本无裂纹产生,近似为连续状态,此区域内的基层靠近冲击载荷区域  $z$  向位移为负,导致随  $x$  坐标值增大,逐渐出现翘起现象;(3)沉降量变化趋势同冲击载荷变化趋势一致,具有明显的四阶段特征,与沥青混凝土路面结构沉降量变化趋势一致。

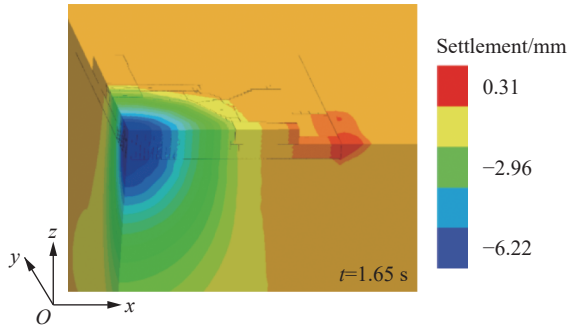


图 22 路面结构局部沉降量云图  
Fig. 22 Local settlement nephogram

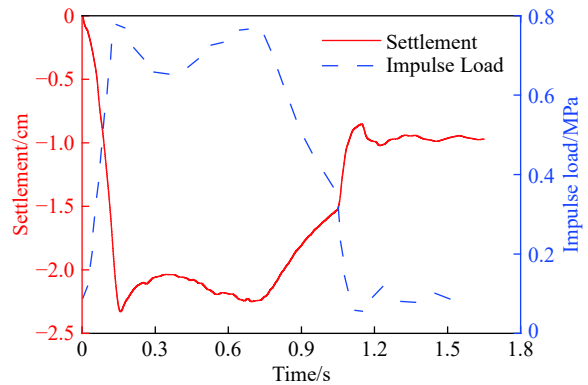


图 23 荷载中心点沉降量  
Fig. 23 The settlement in the center of load area

#### 4.1.2 $x$ 、 $y$ 方向沉降量

路面结构顶部  $t=0.2\text{ s}$  和  $t=1.65\text{ s}$  时刻  $x$ 、 $y$  方向沉降量如图 24~25 所示,由图可知:(1)因冲击载荷的作用范围为  $1/4$  圆,同一时刻,  $x$ 、 $y$  方向沉降量的变化趋势基本一致,但因路面结构尺寸及约束条件的差异,其沉降量曲线的变化趋势仍存在一定差异;(2)  $x$ 、 $y$  方向沉降量出现较明显的拐点,证明此位置处界面发生破裂,产生裂缝,应力场发生突变,导致沉降量随距离变化不一致。

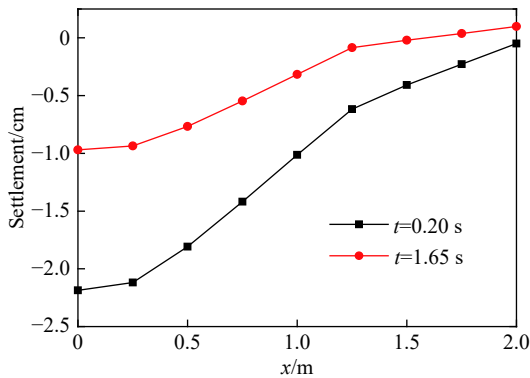


图 24  $x$  方向沉降量  
Fig. 24 Settlement in  $x$  direction

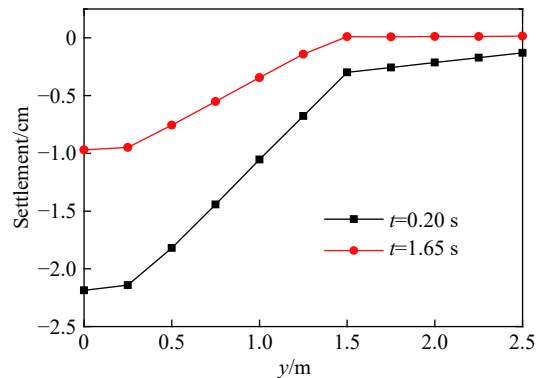


图 25  $y$  方向沉降量  
Fig. 25 Settlement in  $y$  direction

### 4.2 破坏特征

#### 4.2.1 破裂度时程曲线

冲击载荷结束时刻的裂缝分布如图 26 所示,可破裂面的破裂度时程曲线如图 27 所示。由图 26~27 可知:(1)面层产生明显的环状裂缝,且位于冲击载荷作用区域外侧;(2)破裂度时程曲线具有明显的两阶段特征,冲击载荷的增大与减小均会导致界面破裂,但破裂主要发生在冲击载荷急剧增大时期,占最终全部破裂面积的 92%,最终时刻的破裂度为 12.07%,路面仍具有较强的承载能力。

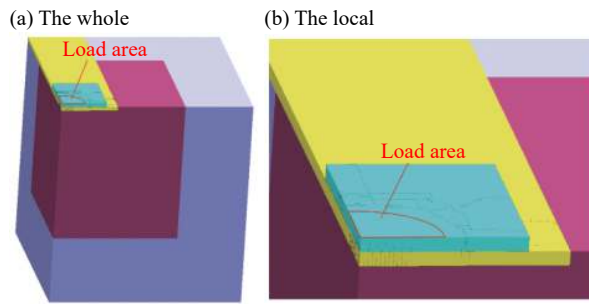


图 26 裂缝分布示意图

Fig. 26 Crack distribution diagrams

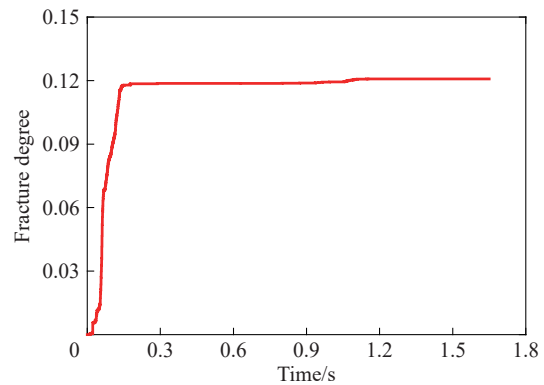


图 27 可破裂面的破裂度

Fig. 27 Fracture degree of rupturable face

#### 4.2.2 面层破裂面初始破坏云图

面层即为图 26(b) 中路面结构的最上层, 裂缝的分布如图 28 所示, 破裂面初始破坏云图如图 29 所示。由图 28~29 可知: (1) 面层内部破裂面主要为竖向, 破坏类型包括剪切破坏和拉伸破坏, 靠近荷载中心点主要为拉伸破坏, 远离荷载中心点主要为剪切破坏; (2) 环状破裂面内外侧均有纵向与横向破裂产生, 由于  $y$  方向悬臂较  $x$  方向长, 径向破裂面在边缘处偏向  $x$  方向; (3) 面层和基层的水平交界面处有大量破裂面产生, 靠近冲击载荷作用区域为剪切破坏, 远离冲击载荷作用区域为拉伸破坏。

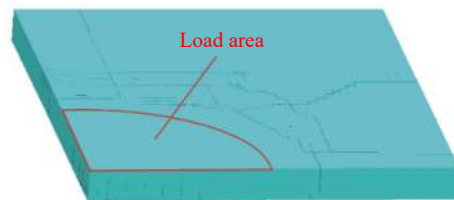


图 28 面层裂纹分布示意图

Fig. 28 Crack distribution diagram

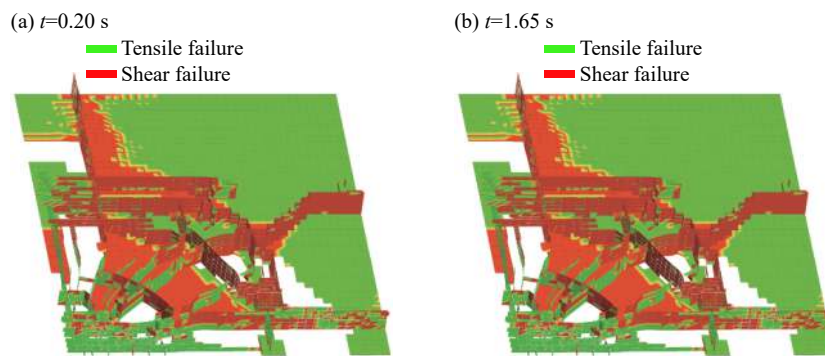


图 29 面层初始破坏云图

Fig. 29 Initial damage nephograms of surface course

#### 4.2.3 基层破裂面初始破坏云图

基层为图 26(b) 中路面结构的最下层, 裂缝的分布如图 30 所示, 破裂面初始破坏云图如图 31 所示。由图 30~31 可知: (1) 破裂面包括基层内部的竖向破裂面与基层与路基水平交界面处的水平破裂面, 层内出现明显的环状裂缝与径向裂缝; (2) 破坏类型随空间位置发生变化, 水平破裂面靠近冲击载荷作用区域为剪切破坏, 远离冲击载荷作用区域为拉伸破坏。

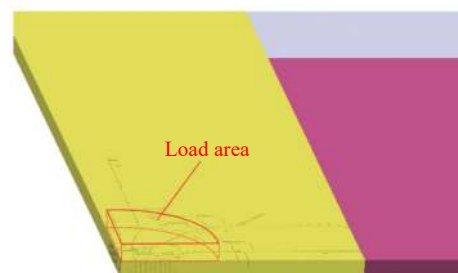


图 30 基层裂纹分布示意图

Fig. 30 Crack distribution diagram

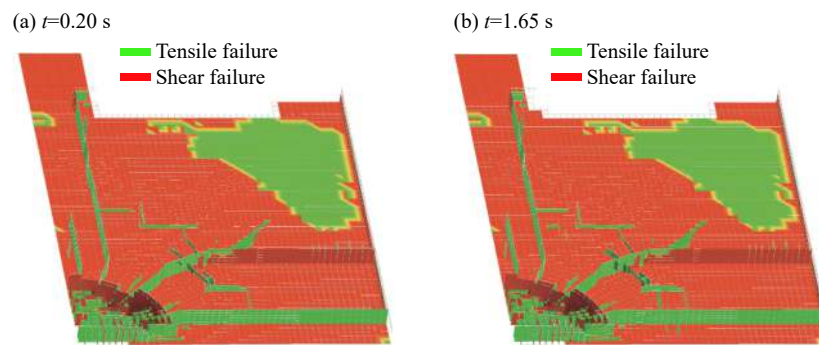


图 31 基层裂纹分布示意图

Fig. 31 Crack distribution diagram

## 5 讨 论

主要针对沉降量特征及破裂面空间分布特征进行分析。

### (1) 沉降量特征。

冲击载荷作用下,因路面结构的力学性能高于路基,其类似于一个“硬板”,起传递与扩散冲击载荷的作用。路面整体性越好,路面传递与扩散动载的能力越强,路面沉降量越小。(a)冲击载荷处于时刻变化状态,因此沉降量也并非保持定值,变化趋势与冲击载荷保持一致,且在峰值点处达到沉降量最大值;(b)伴随载荷急剧增长,路面结构产生众多裂缝,不仅路面结构整体性发生改变,也对应力传递造成影响,因此沉降量变化趋势发生变化,面层顶部径向沉降量曲线出现拐点;(c)当前路面大致分为刚性、柔性和半刚性路面三种类型,通常刚性路面的刚度及抗弯强度强于柔性路面,在本文中,沥青混凝土路面(柔性路面)为三层路面结构,而水泥混凝土路面(刚性路面)为二层路面结构,因 20 cm 的水泥稳定碎石(基层)的存在,沥青混凝土路面的整体力学性能更优,导致其沉降量小于水泥混凝土路面。

### (2) 破裂面空间分布特征。

(a)冲击载荷作用区域为 1/4 圆,因路面顶部应力尚未扩散,载荷区域竖向应力大,沉降量大,但外侧应力低,沉降量小,两侧位移及应力的不均匀性导致出现环状裂缝。(b)针对层内破裂面,自路面结构上部向下,伴随上层结构应力扩散效果的增强,环形破裂面逐渐消失;其次因泊松效应,向对称边界运动,因此出现径向破裂面,尤其是当环状破裂面消失后,多出现径向破裂面;(c)部分层间出现水平破裂面,当上下两层的材料参数存在较大差异,下层无法对上层进行有效承载,导致上层存在滑动趋势,易产生剪切破坏的水平破裂面,但远离荷载区域处会出现拉伸破坏的破裂面。

## 6 结 论

(1)基于当前冲击载荷作用下路面沉降、破坏的研究现状,提出一种基于 FEM/DEM 耦合的数值模型方法 CDEM,并建立低等级道路结构的三维计算模型,路面结构采用塑性-局部化-破裂耦合模型,层间引入潜在接触,模拟裂缝产生、扩展和复杂的接触作用过程。(2)基于 CDEM 算法及构建的低等级道路数值模型,通过与落锤弯沉仪现场试验结果对比,验证了道路简化模型的正确性及 CDEM 方法的计算精度。(3)选取典型的低等级沥青混凝土和水泥混凝土道路结构进行计算分析,结果表明:(a)沉降量曲线与冲击载荷时程曲线变化趋势一致,具有明显的阶段性特征;(b)沉降量峰值点与冲击载荷峰值点保持一致,为第一、二阶段交界点;(c)冲击载荷区域外侧出现环状裂缝,径向的沉降量曲线在此处出现明显拐点;(d)破裂面主要产生于冲击载荷急剧增大时期,约占最终全部破裂面积的 97%,但最终的破裂度为 6.22%~12.07%,路面结构仍具有较强的承载能力;(e)破裂面大体分为路面结构层内的竖向破裂面和层间的水平破裂面,破坏类型包括拉伸破坏和剪切破坏,随空间位置发生变化;(f)路面结构上部多出现明显的环状破裂面,但下部多出现明显的径向破裂面,无明显环状破裂面。

## 参考文献:

- [1] 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. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.2014.02.030.  
ZHOU Xiaohe, MA Dawei, REN Jie, et al. Dynamic response and failure mode of a missile unsupported random launching site [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2014, 37(2): 77–81. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.2014.02.030.
- [2] 丰佩. 某车载垂直发射装置结构设计与动力学仿真分析 [D]. 南京: 南京理工大学, 2015: 55–72.
- [3] HU X D, FARUK A N M, ZHANG J, et al. Effects of tire inclination (turning traffic) and dynamic loading on the pavement stress-strain responses using 3-D finite element modeling [J]. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2017, 10(4): 304–314. DOI: 10.1016/j.ijprt.2017.04.005.
- [4] WU J M, LIANG J P, ADHIKARI S. Dynamic response of concrete pavement structure with asphalt isolating layer under moving loads [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2014, 1(6): 439–447. DOI: 10.1016/S2095-7564(15)30294-4.
- [5] 袁成林, 马大为, 张震东. 层间接触与弹性模量对某导弹场坪动载的影响 [J]. *火力与指挥控制*, 2016, 41(3): 53–56, 61. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0640.2016.03.014.  
YUAN Chenglin, MA Dawei, ZHANG Zhendong. Effect of interface condition and elastic modulus on launching site asphalt pavement [J]. *Fire Control & Command Control*, 2016, 41(3): 53–56, 61. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0640.2016.03.014.
- [6] 颜可珍, 江毅, 黄立葵, 等. 层间接触对沥青加铺层性能的影响 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2009, 36(5): 11–15.  
YAN Kezhen, JIANG Yi, HUANG Likui, et al. Effect of bond condition on overlay performance [J]. *Journal of Hunan University (Natural Science)*, 2009, 36(5): 11–15.
- [7] 薛亮, 张维刚, 梁鸿颖. 考虑层间不同状态的沥青路面力学响应分析 [J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2006, 22(4): 575–578. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1922.2006.04.011.  
XUE Liang, ZHANG Weigang, LIANG Hongjie. The mechanical response analysis of asphalt pavement in different interface condition between layers [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science)*, 2006, 22(4): 575–578. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1922.2006.04.011.
- [8] 黄宝涛, 廖公云, 张静芳. 半刚性基层沥青路面层间接触临界状态值的计算方法 [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2007, 37(4): 666–670. DOI: 10.3321/j.issn:1001-0505.2007.04.024.  
HUANG Baotao, LIAO Gongyun, ZHANG Jingfang. Analytical method of interlayer contact fettle in semi-rigid-base bituminous pavement [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2007, 37(4): 666–670. DOI: 10.3321/j.issn:1001-0505.2007.04.024.
- [9] 赵炜诚, 许志鸿, 黄文. 混凝土面层与贫混凝土基层的层间作用对荷载应力和弯沉的影响 [J]. *中国公路学报*, 2003, 16(4): 9–15. DOI: 10.3321/j.issn:1001-7372.2003.04.003.  
ZHAO Weicheng, XU Zhihong, HUANG Wen. Influence of load stress and deflection on interfacial interaction between Portland concrete pavement and lean concrete base [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2003, 16(4): 9–15. DOI: 10.3321/j.issn:1001-7372.2003.04.003.
- [10] 李彦伟, 穆柯, 石鑫, 等. 基层层间接触状态对沥青路面力学响应影响 [J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2014, 34(2): 38–44. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2014.02.007.  
LI Yanwei, MU Ke, SHI Xin, et al. Impact of base-surface contact conditions on mechanical response of asphalt pavement [J]. *Journal of Chang'an University(Natural Science Edition)*, 2014, 34(2): 38–44. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2014.02.007.
- [11] 冯春, 李世海, 刘晓宇. 半弹簧接触模型及其在边坡破坏计算中的应用 [J]. *力学学报*, 2011, 43(1): 184–192. DOI: 10.6052/0459-1879-2011-1-lxxb2010-080.  
FENG Chun, LI Shihai, LIU Xiaoyu. Semi-spring contact model and its application to failure simulation of slope [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2011, 43(1): 184–192. DOI: 10.6052/0459-1879-2011-1-lxxb2010-080.
- [12] 杨长卫, 张建经, 张明, 等. 双面高陡岩质边坡地震滑坡机制的研究 [J]. *岩土力学*, 2013, 34(11): 3261–3268. DOI: 10.16285/j.rsm.2013.11.021.  
YANG Changwei, ZHANG Jianjing, ZHANG Ming, et al. Analysis of landslide mechanisms of a high steep rock hill with two-side slopes under ground shaking [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(11): 3261–3268. DOI: 10.16285/j.rsm.2013.11.021.
- [13] 冯春, 李世海, 周东, 等. 爆炸载荷作用下岩石损伤破裂过程的数值分析 [J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(7): 1262–1270. DOI: 10.11779/CJGE201407010.

- FENG Chun, LI Shihai, ZHOU Dong, et al. Numerical analysis of damage and crack process of rock under explosive loading [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(7): 1262–1270. DOI: 10.11779/CJGE201407010.
- [14] 郭汝坤. 基于原位试验和 CDEM 的边坡灾变状态分析评价方法研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2016: 43–44.
- [15] 张文清. 冲击载荷下松软煤力学特性及对煤与瓦斯突出的影响 [D]. 安徽 淮南: 安徽理工大学, 2015: 2–6.  
ZHANG Wenqing. Study on mechanical property of soft coal under impact load and its effect to coal and gas outburst [D]. Huainan, Anhui: Anhui University of Science & Technology, 2015: 2–6.
- [16] 李洪超. 岩石 RHT 模型理论及主要参数确定方法研究 [D]. 北京市: 中国矿业大学 (北京), 2016: 22–23.  
LI Hongchao. The study of the rock RHT model and to determine the values of main parameters[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2016: 22–23.
- [17] 李世海, 王理想, 冯春, 等. 煤层自燃防治与高温爆破安全技术中的若干力学问题 [J]. *爆破*, 2015, 32(3): 1–9, 16. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2015.03.001.  
LI Shihai, WANG Lixiang, FENG Chun, et al. Several mechanical problems on prevention of spontaneous combustion of coal and safety controlling in high-temperature blasting [J]. *Blasting*, 2015, 32(3): 1–9, 16. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2015.03.001.
- [18] 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. Discussion on settlement calculation methods of the low level asphalt pavement under action of impact load [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2016, 12(S2): 889–893.

## The settlement and damage characteristics of pavement structure under impulse load

LIN Qindong<sup>1,2</sup>, FENG Chun<sup>1</sup>, TANG Dehong<sup>1</sup>, LI Shihai<sup>1,2</sup>, YIN Lingyun<sup>3</sup>, WANG Ranjiang<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Engineering Design Institute of Rocket Force, Beijing 100011, China)

**Abstract:** As the road plays a more important role in the missile's unsupported random launch, it is of great significance to study the settlement and damage characteristics under the impulse load of the launching cylinder to improve the weapon deterrent force of China. The object of study is low grade road structure. Firstly, based on the statistical information of low-grade road structures in Henan, Shandong, Yunnan and Guangdong provinces, a 1/4 simplified calculation model for typical low-grade road structures is established. An explicit numerical analysis method CDEM based on FEM and DEM is introduced, and a plastic-localized-rupture coupled constitutive model is introduced to realize three-dimension full-time simulation of pavement settlement under impulse load, explicitly reveal the process of crack initiation and expansion, and realize the transition of the pavement structure from continuous state to discontinuous state. The correctness of the road numerical model and the calculation accuracy of CDEM are verified by comparing with the results of Falling Weight Deflectometer. Then the typical asphalt concrete and cement concrete road structures are selected for numerical simulation and analyzed from the aspects of the settlement, fracture degree and damage characteristics. The results show that the settlement time-history curve is consistent with the trend of the impulse load, and the settlement reaches the maximum at the peak point of the impulse load; the fracture surface is mainly generated during the period of sharp increase of the impulse load, accounting for 97% of the final total fracture area; the fracture surface is roughly divided into the vertical surface in the layer and the horizontal fracture surface between the layers, the failure type includes tensile failure and shear failure; the upper part of the pavement structure produces an annular fracture surface, and the lower part produces a radial fracture surface.

**Keywords:** low-grade road; impulse load; settlement and damage; CDEM; FWD

(责任编辑 王小飞)