

考虑应力主轴旋转的路基服役性能试验系统研制及验证

崔新壮^{1,2} 包振昊¹ 杜业峰¹ 郝建文¹ 金青¹ 曹天才¹
张圣琦¹ 张小宁²

1. 山东大学, 山东济南 250061
2. 重庆大学, 重庆 400045

摘要: 为了精准复现交通荷载作用下公路路基三维应力状态与服役性能演化过程, 研制一种考虑应力主轴旋转的公路路基服役性能试验系统。路基服役性能试验系统主要是以加载系统为核心、全数字伺服控制系统及数据采集系统等辅助模块组成。根据交通荷载作用下路基土单元全应分量(3个正应力、3个切应力)的时程特征, 设计以4个动态作动器及3个静态作动器为核心的加载系统, 通过静动协同加载来实现不同层位路基土单元的应力主轴旋转效应。基于交通荷载作用下公路路基动力响应理论模型, 结合加载系统的机械结构与空间特征, 建立公路路基三维动应力复现理论, 并提出由“应力谱”到“加载谱”的转化方法。基于该试验系统, 开展汽车荷载作用下公路路基内部三维应力状态验证试验。结果表明, 各静动伺服作动器的实际输出荷载偏差低于1%, 表明研制的路基服役性能试验系统能够精准复现交通荷载作用下路基内部的三维应力状态; 路基内部的竖向动应力沿深度方向逐渐衰减, 土单元所经历的应力路径呈近似“心形”, 并且各动应力分量时程曲线与竖向动应力衰减规律均与理论计算结果有较高的吻合度。虽然该试验系统的加载装置在加载过程中位置不变, 但是依然可以通过“七缸联动、协调加载”的方式复现交通荷载“远-近-远”移动过程中路基工作区不同深度土单元的动力响应。因此, 该文研制的路基服役性能试验系统为开展真实应力条件下公路路基服役性能演化规律研究提供新思路、新方法和新技术。

关键词: 道路工程; 公路路基; 应力主轴旋转; 模型试验; 加载系统; 服役性能

中图分类号: U416.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2026)01-0115-14

DOI: 10.15951/j.tmgcxb.24060491

Development and verification of subgrade serviceability test system considering the principal stress rotation

Cui Xinzhuan^{1,2} Bao Zhenhao¹ Du Yefeng¹ Hao Jianwen¹ Jin Qing¹ Cao Tiancai¹
Zhang Shengqi¹ Zhang Xiaoning²

1. Shandong University, Jinan 250061, China
2. Chongqing University, Chongqing 400045, China

Abstract: A test system for the serviceability of highway subgrade considering the principal stress rotation was developed to accurately simulate the evolution of the three-dimensional stress state and assess the serviceability of the subgrade under traffic loads. The subgrade serviceability test system is composed of the core loading system and the auxiliary modules such as full digital servo control system and data acquisition system. The loading system with four dynamic and three static actuators was designed to achieve the rotation of the principal

基金项目: 国家自然科学基金(52027813, U22A20235, 52178429)、国家重点研发计划(2022YFB2601900)和山东省自然科学基金(ZR2020ME242)

作者简介: 崔新壮, 博士, 教授 **收稿日期:** 2024-06-27

stress axis in subgrade soil elements at various levels based on the coordination of static and dynamic loading. A theory for three-dimensional dynamic stress recurrence in highway subgrade was developed based on the theoretical model of the subgrade's dynamic response under traffic load and the loading system's mechanical and spatial characteristics, and furthermore a method of transforming the "stress spectrum" into the "load spectrum" was proposed. Using the test system, the three-dimensional stress state in the highway subgrade under vehicle load was examined. The results show that the actual output load deviation of each static or dynamic servo actuator is less than 1%, confirming that the developed subgrade serviceability test system can accurately simulate the three-dimensional stress state of the subgrade under traffic loads. The time history curves of each dynamic stress component and the attenuation pattern of vertical dynamic stress closely match the theoretical ones. The vertical dynamic stress in the subgrade gradually decreases with depth, and the stress path experienced by the soil element resembles a "heart shape." The "seven-cylinder linkage and coordinated loading" method can replicate the dynamic response of soil elements at various depths in the subgrade working area during the "far-near-far" movement of traffic loads, despite the loading device's position remaining unchanged. Therefore, the subgrade serviceability test system developed in this study introduces a new concept, approach, and technology for investigating the evolution of highway serviceability under actual traffic loads.

Keywords: highway engineering; highway subgrade; principal stress rotation; model test; loading system; serviceability

E-mail: cuixz@sdu.edu.cn

0 引言

随着“交通强国”国家战略的深入实施,我国公路交通基础设施建设高速发展,交通网络日趋发达,但公路结构服役寿命普遍偏低等问题逐渐显露,很难达到15年的设计寿命^[1-3]。路基作为路面的基础,在服役过程中长期承受交通荷载作用,从而引起路基永久变形的发展和动力性能的损伤,进而导致路面病害的产生,严重制约公路交通基础设施的高质量发展^[4-5]。究其原因,交通荷载作用下,路基土单元均会呈现复杂应力路径,应力主轴会不断发生旋转,从而大大加剧路基服役性能的衰变,严重缩短路基使用寿命^[6-9]。因此,在研究公路路基永久变形与回弹模量等服役性能演化的过程中考虑土单元应力主轴旋转至关重要。

室内单元体试验是研究交通荷载作用下路基动力特性的主要手段,众多学者采用循环三轴剪切仪和空心圆柱扭剪仪(HCA)开展了路基动力性能研究^[10-11]。由于循环三轴剪切仪仅能施加循环竖向偏应力,应力轴方向固定,因此无法实现土单元应力

主轴旋转的模拟^[12-13]。相较于循环三轴剪切仪,空心圆柱扭剪仪(HCA)能够通过改变轴力及扭矩实现土单元的应力主轴旋转^[14-15]。因此,许多学者基于HCA试验,开展了应力主轴旋转对土体动力性能的影响,例如: Xiao等^[16]、Parsanna等^[17]、Cui等^[18]和Tastan等^[19]揭示了应力主轴旋转效应对土体宏观动力特性演化规律的影响,指出应力主轴旋转效应加速土体内部超静孔压的发展,加剧了土体动力性能衰变。然而,空心圆柱扭剪仪(HCA)仅能模拟轴向应力 σ_z 、径向应力 σ_r 、环向应力 σ_θ 以及剪应力 $\tau_{z\theta}$ 等4个应力分量,不能精准复现交通荷载所引起的6个全应力分量。而且HCA等室内单元体试验试样尺度小,边界条件单一,与真实情况不符,难以反映真实服役条件下公路路基服役性能的演化规律。

为了克服室内单元体试验的局限性,国内外学者采用了大比尺模型试验及设备来研究路基动力性能,其中以竖向激振荷载模拟交通荷载作用的形式最为普遍。崔新壮等^[20]、Zhang等^[21]及Indraratna等^[22]采用了单点或双点竖向激振加载来模拟交通荷载作用,但是这种加载方式无法模拟真实交通荷载作用下路基土单元的应力主轴旋转效应。蒋红光、

边学成等^[23-24]及冷伍明等^[25]建立了大比尺铁路路基动力模型试验系统,采用由多个激振器组成的时序动力加载系统模拟列车移动荷载。虽然这种方式能够实现路基土单元应力主轴旋转的模拟,但对于研究公路路基服役性能演化规律存在一定限制,而且上述试验平台并不能针对路基不同层位服役性能开展研究。同模型试验不同的是,White等^[26]设计了能直接应用于室外路基表面加载的试验系统(APLT),虽然原位加载的形式实现了在道路修成前对路基服役性能的评估,但所采用的单点竖向加载的形式无法模拟循环交通荷载作用下的土单元应力主轴旋转效应,与实际情况存在一定差距。

针对以上研究的局限性,为了精准复现交通荷载“远-近-远”移动过程中路基工作区(车辆荷载引起的路基竖直动应力与路基路面结构自重引起的静应力之比在0.1~0.2时对应的深度范围)不同深度土单元的动力响应,本文设计并研制了考虑应力主轴旋转的公路路基服役性能试验系统。设计了以4个动态作动器及3个静态作动器为核心的加载系统,并从机械结构特征及动应力复现理论角度阐述了试验系统的设计原理。然后搭建了公路路基服役性能试验系统,并开展了汽车荷载作用下公路路基内部三维应力状态验证试验,验证了公路路基服役性能试验系统的有效性。

1 路基服役性能试验系统

为了实现路基土单元的应力主轴旋转效应,精准复现交通荷载作用下路基土单元的复杂应力路径,自主设计并研制了基于多缸联动的路基服役性能试验系统,如图1所示。路基服役性能试验系统主要是以加载系统为核心、全数字伺服控制系统及数据采集系统等辅助模块组成。加载系统主要由4个动态作动器、3个静态作动器、动压板、加载球头、静压板、油源泵站及水冷箱组成。通过多通道伺服静态加载模拟上覆结构的柔性静载约束,通过多通道伺服动态加载模拟路基土单元的应力主轴旋转,从而实现了交通荷载作用下路基土单元的三维动应力状态。其中,油源泵站为加载系统提供运行所需的动力,水冷箱则用来保持液压系统工作温度,防止机械结构损伤。全数字伺服控制系统基于执行器多核技术,实现了液压驱动多缸可解耦的实时协调加载控制技术,能够同时满足加载系统各项任务管理,包括各作动器独立控制加载、油源控制、数据读取及信息反馈等处理任务,多缸静动协调加载相位差控制在 1° 之内。数据采集系统主要由外置激光位移

传感器、静动作动器内置力及位移传感器、计算机等构成,实现了对加载层位路基本体的瞬时变形、永久变形、回弹模量、滞回曲线等重要指标数据的实时采集、分析与交互。

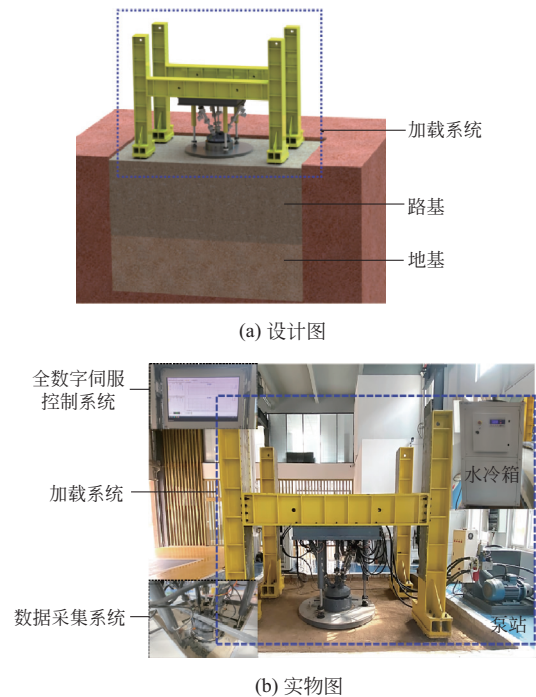


图1 路基服役性能试验系统

Fig. 1 Subgrade serviceability test system

2 设计原理

如图2所示,交通荷载的“远-近-远”快速移动会引起路线纵断面内路基土单元的应力主轴旋转。基于作者提出的非饱和路基土三维动力响应模型^[27],得到了不同层位路基土单元三维应力状态 $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xz}, \tau_{yz}, \tau_{xy})$,其中, x 表示车辆行驶方向, y 表示垂直行驶方向, z 表示竖直方向。

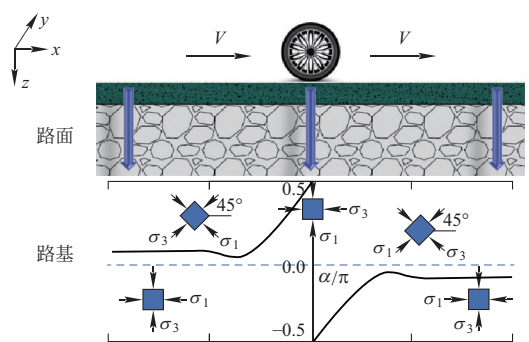


图2 交通荷载引起的路基土单元三维动应力状态

Fig. 2 Three-dimensional dynamic stress state of subgrade soil element caused by traffic load

为了实现在路基直接加载以模拟循环往复的交通荷载，在保证应力主轴旋转效应的基础上，通过力学分析与机械结构优化，确定了“七缸联动”的机械结构形式。图3展示了加载系统中核心加载装置的具体组成构件，加载球头上布设3个斜向动态作动器(1#、2#、3#)及1个竖向动态作动器(4#)，斜向动态作动器沿圆周等距分布，且与水平倾斜角度为 $\alpha = 60^\circ$ ；3个静态作动器(5#、6#、7#)也等距分布于静压板上，并与水平面垂直。所有静态和动态作动器上部均与顶板连接，其中斜向的动态作动器装配在顶板的滑轨内。4个动态作动器下端安

装于加载球头上并通过加载球头提供动态加载力，加载球头与动压板保持无摩擦接触。3个静态作动器下端安装于静压板上并施加不同竖向恒定静载至路基以模拟不同上覆荷载和柔性约束。为实现静动多缸协调加载互不干扰，构建了单点轴耦合加载模式，联合斜向动态作动器与竖向动态作动器集中作用于加载球头，并将加载球头与动压板以球铰的形式完全接触，以此形成多自由度加载，能够允许各动态作动器实现规定的机械加载动作，并能在行程范围内自由伸缩，最大程度减小因斜向加载而造成的机械能消耗。

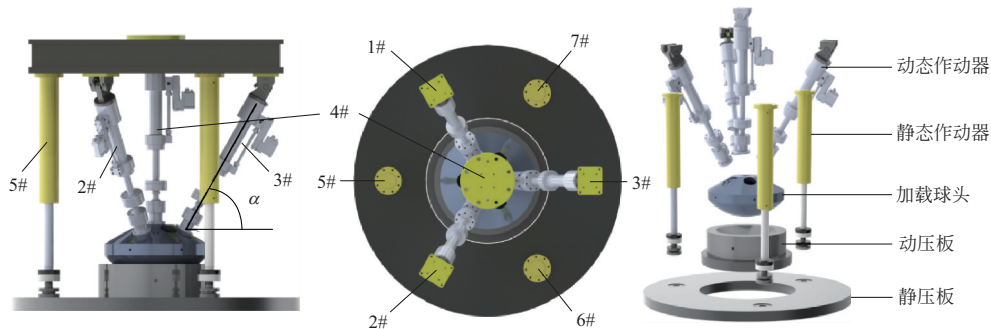


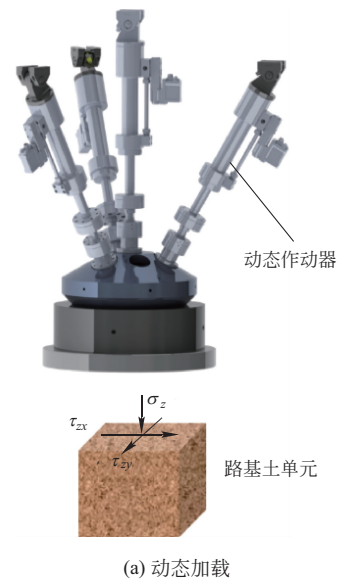
图3 加载装置组成

Fig. 3 Composition of loading device

加载系统可实现路基土单元6个动应力分量(σ_z 、 τ_{xz} 、 τ_{yz} 、 σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy})的施加，从而模拟交通荷载由远及近过程中自路面传递至路基的动应力特征。4个动态作动器循环加载过程中，动压板底面与加载土体表面之间存在摩擦力(图4(a))，从而产生水平方向剪应力 τ_{xz} 、 τ_{yz} 。静态作动器通过静压板对路基施加竖向静载，静动作动器协同加载(图4(b))，会使土单元在泊松效应下产生水平正应力 σ_x 、 σ_y ；而竖向正应力 σ_z 则直接通过4个动态作动器复合施加。基于上述原理，实现了交通荷载“远-近-远”移动过程中路基土单元三维应力状态的复现。

算参数同文献[27]一致，后续的验证过程也将沿用了该计算参数。在此基础上，为了最大限度地规避尺寸及边界条件造成的问题，确定了尺寸为直径×内径×内外径差=1750 mm×800 mm×475 mm的圆环式静压板。同时，为了保证加载系统能平稳施加荷载，动压板和静压板均采用Q345钢锻造，厚度均设置为80 mm。

依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)规定^[28]，对于软土和粒径较大的填土，承压板面积不应小于0.50 m²。本文基于非饱和路基土三维动力响应模型^[27]，通过试算不同路面结构、车辆轴重及速度条件下的路基动力响应规律，并以某时刻路基动应力影响范围的95%置信区间来论证动压板尺寸，最终确定了直径为800 mm的动压板底面尺寸。图5展示了部分典型工况下某时刻路基动应力影响范围的95%置信区间，可见800 mm直径的动压板能满足多种交通荷载工况的模拟。其中，具体的计



(a) 动态加载

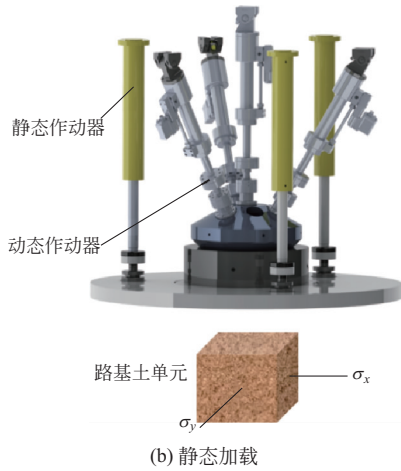


图4 加载原理图
Fig. 4 Loading principle

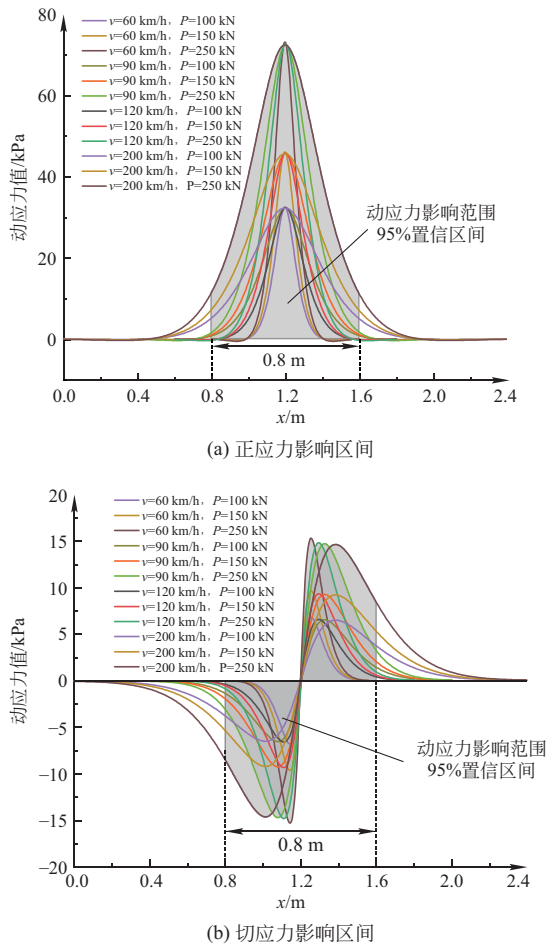


图5 动应力影响区间

Fig. 5 Influence interval of dynamic stress

为了真实复现交通荷载“远-近-远”快速移动过程中在路基工作区不同深度土单元三维动力响应，需要对所施加的动应力谱(σ_z 、 τ_{xz} 、 τ_{yz})进行修正。图6展示了动应力谱空间分布修正的原理，其

中图6(a)为真实状态下交通荷载“远-近-远”快速移动过程中在路基工作区深度内应力场空间分布情况，图6(b)为试验系统加载过程中动压板正下方空间区域内应力场空间分布情况，图6(c)为交通荷载作用下路基工作区某一深度处土单元动应力时程曲线与应力场空间分布曲线。如图6(a)所示，真实情况交通荷载“远-近-远”移动过程中，在路基工作区某一深度所引起的动应力场是分布不均的，然而图6(b)中试验系统加载过程中在动压板正下方空间区域内某一深度处所引起的应力场是近似均布荷载。由此可见，试验系统在加载区域内某一深度处所引起的应力场与真实情况中交通荷载“远-近-远”移动所引起的动应力场不完全符合。为了解决上述问题，在计算各个动态作动器加载谱过程中首先需要对所施加的动应力谱空间分布进行修正。具体修正方法如下：

将通过现场实测或理论模型计算得到的应力谱在加载圆域内进行积分，如式(1)所示：

$$F_{修}(t) = \iint \sigma(t) drd\theta \quad (1)$$

式中： r 为极径， $0 \leq r \leq 400 \text{ mm}$ ； θ 为极角， $0 \leq \theta \leq 2\pi$ ； $\sigma(t)$ 为通过现场实测或理论模型计算得到的 t 时刻下土单元动应力分量； $F_{修}(t)$ 为修正后动压板施加的加载力时程曲线。根据式(1)得到试验系统在 x 、 y 、 z 方向上所需要实现的合力分别为：

$$F_{z修}(t) = \iint \sigma_z(t) drd\theta \quad (2)$$

$$F_{x修}(t) = \iint \tau_{zx}(t) drd\theta \quad (3)$$

$$F_{y修}(t) = \iint \tau_{zy}(t) drd\theta \quad (4)$$

式中： $\sigma_z(t)$ 、 $\tau_{xz}(t)$ 、 $\tau_{yz}(t)$ 分别为路基土单元的竖向正应力、 x 方向水平切应力以及 y 方向水平切应力，可通过现场实测或理论计算得到。

结合各动态作动器的机械结构形式及路基土单元应力状态，可得到3个斜向动态作动器所需加载力：

$$F_{z修}(t) = F_1(t) \times \sin\alpha + F_2(t) \times \sin\alpha + F_3(t) \times \sin\alpha \quad (5)$$

$$F_{x修}(t) = -\frac{1}{2}F_1(t) \times \cos\alpha - \frac{1}{2}F_2(t) \times \cos\alpha + F_3(t) \times \cos\alpha \quad (6)$$

$$F_{y修}(t) = -\frac{\sqrt{3}}{2}F_1(t) \times \cos\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}F_2(t) \times \cos\alpha \quad (7)$$

式中： $F_1(t)$ 、 $F_2(t)$ 、 $F_3(t)$ 分别为1#、2#、3#动态作动器加载力时程曲线； α 表示斜向作动器水平倾斜角度，本文 $\alpha = 60^\circ$ 。根据式(5)~式(7)，即可得到1#、2#、3#动态作动器的加载谱。

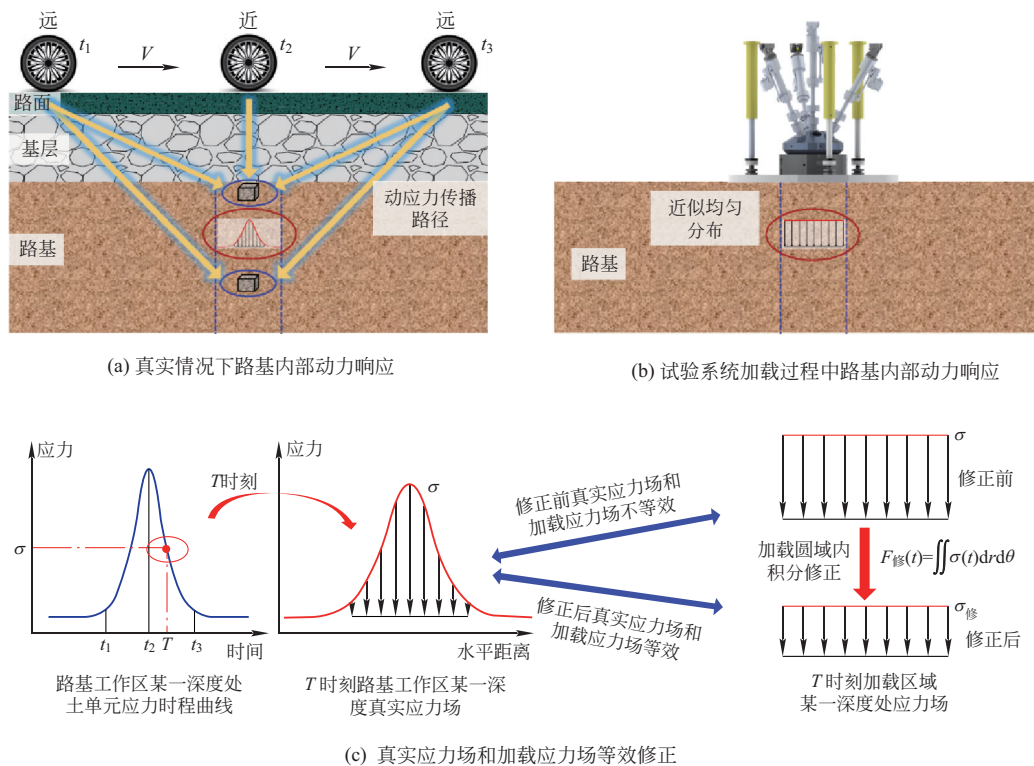


图 6 加载区域应力场修正原理

Fig. 6 Principle of stress field correction in loading region

上覆结构柔性静载约束通过计算上覆路面和路基荷载得到。其中，动压板加载区域内土体的上覆荷载的施加通过 4# 竖向动态作动器实现，静压板加载区域内土体的上覆荷载则由 5#、6#、7# 静态作动器同时提供。各个作动器静态加载力可以表示为：

$$F_4(t) = \pi R_d^2 \sigma_{\text{上覆}} \quad (8)$$

$$F_{5,6,7}(t) = \frac{\pi(R_s^2 - R_d^2) \sigma_{\text{上覆}}}{3} \quad (9)$$

式中： R_d 为动压板半径； R_s 为静压板半径； $F_4(t)$ 为 4# 动态作动器加载力时程曲线； $F_{5,6,7}(t)$ 为 5#、6#、7# 静态作动器加载力时程曲线； $\sigma_{\text{上覆}}$ 为上覆结构作用下土单元的静应力， $\sigma_{\text{上覆}} = \sum G_i H_i$ ， G_i 表示上覆结构第 i 层重度， H_i 表示上覆结构第 i 层厚度。根据式 (8)~式 (9) 即可得到 5#、6#、7# 静态作动器和 4# 动态作动器的加载谱。

以速度 80 km/h、轴重 160 kN 汽车荷载作用下路基土单元三维动力响应为例，计算了各个作动器的加载谱，如图 7 所示。本文所取路基土单元均为车轮行驶路径正下方一点，在当前模拟状态下， τ_{xy} 和 τ_{yz} 基本为 0，结合式 (4)~式 (7)，可知 1# 和 2# 动态作动器加载谱完全一致。

图 6(a) 还展示了交通荷载“远-近-远”移动过

程中动应力由上部结构向下传播的路径。由图可知，对于路基工作区深度内任一土单元，当交通荷载由远端驶近或向远端驶离时，动应力会斜向传播至土单元。只有当交通荷载行驶至土单元正上方时，动应力才会竖直向下传播至土单元。而对于试验系统动压板正下方空间区域内任意深度处土单元所受到的动应力主要是由上部施加荷载竖直向下传播而来的。因此，对于不同深度处土单元真实情况下的动力响应与加载系统作用下不同深度处土单元动力响应是否存在差异还需进一步论证。为了证明所研发的路基服役性能模拟系统能够精准复现交通荷载“远-近-远”移动过程中路基不同深度处土单元动力响应，我们通过有限元数值模拟的方法，建立了整个试验系统全尺寸三维数值模型，将数值分析结果与理论计算结果^[27]进行对比(图 8)。其中，理论计算结果反映的是交通荷载“远-近-远”移动过程中路基工作区不同深度内土单元动力响应，且在当前模拟状态下， τ_{xy} 和 τ_{yz} 基本为 0，因此在图 8 中并未体现。由图可知，加载系统作用下动压板正下方空间区域内不同深度处土单元动力响应与理论计算结果一致。可以说明，本文所研发的模型试验系统可以精准复现交通荷载“远-近-远”移动过程中路基工作区不同深度内土单元动力响应。另外，本文还将在

3.2 节对不同深度处土单元动力响应的试验测量结果和理论计算结果进行对比。

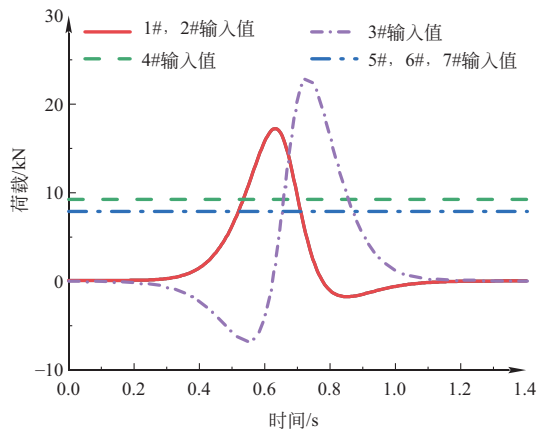


图7 各作动器加载谱

Fig.7 Load spectrum of each actuator

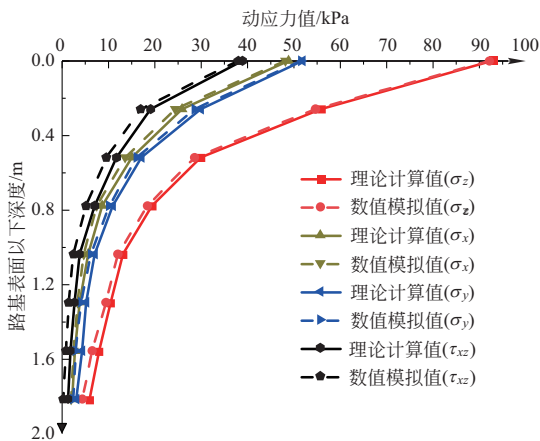


图8 不同深度处土单元动应力对比

Fig.8 Comparison of dynamic stress values of soil elements at different depths

3 试验系统验证

3.1 试验方案

参照《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)要求^[29],设计并搭建了由3.5 m厚地基及2.5 m厚路基组成的槽内路基-地基模型,其尺寸为 $l_1 \times l_2 \times l_3 = 5 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ 。其中, l_1 为行车方向长度, l_2 为与行车方向垂直的横向方向长度, l_3 为竖直方向深度。模型试槽四周均采用270 mm厚砌体墙包围,并在内侧铺设防水层。此外,为减小应力反射对路基动应力产生的影响,在试槽内侧四周铺设了聚四氟乙烯薄膜。试槽内路基地基所用填料的相关参数如表1所示。

本文采用自主研发的三维动态土压力传感器

(RDSPS)^[30]来获得试验系统加载下不同层位路基土单元的三维动应力状态。如图9所示,在加载位置中心区域分别选取距离路基表层0 m、0.25 m、0.50 m、1.00 m、1.50 m、2.50 m等6处测点布置RDSPS,分别标记为 $K_1 \sim K_6$ 。试验系统验证试验的具体方案如表2所示。

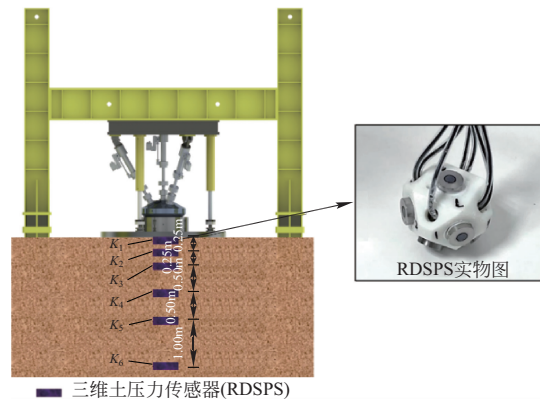


图9 传感器埋设方案

Fig.9 Layout scheme of sensors

表1 试槽土体参数

Table 1 Parameters of test soil

土体类型	塑限/%	液限/%	最佳含水率/%	最大干密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
粉土	23.7	28	13.2	1.62

表2 验证试验具体工况

Table 2 Cases of verification test

试验工况	轴重/kN	速度/ $(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$
工况一	160	80
工况二	100	80
工况三	100	120

3.2 试验结果对比分析

图10展示了工况一下各个作动器输入曲线与输出曲线的对比图。其中,1#、2#、3#作动器输入荷载峰值分别为17.848 kN、24.468 kN,输出荷载峰值为17.753 kN、24.399 kN,峰值偏差分别为0.53%、0.28%;4#、5#、6#、7#作动器输入值分别为7.891 kN、9.248 kN,输出值为7.887 kN、9.246 kN,偏差分别为0.05%、0.02%,可见各静动伺服作动器的实际输出荷载偏差低于1%,能够完全满足试验机规范要求^[31-33]。

图11~图14展示了路基工作区不同深度处(0 m、0.5 m、1 m、1.5 m)土单元三维动力响应试验测量

值与理论计算值的对比分析结果。由图 11 可知，无论是动应力响应波形，还是动应力响应峰值，路基服役性能试验系统模拟下的试验测量结果均与理论计算结果吻合得很好。以图 11(a) (工况一) 为例，动应力 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 峰值的试验测量值为 24.907 kPa、29.117 kPa、71.481 kPa，对应理论计算值分别为 24.840 kPa、28.006 kPa、72.591 kPa，误差分别为 0.27%、3.97%、1.53%；切应力 τ_{zx} 峰值的试验测量值为 20.010 kPa，对应理论计算值为 19.933 kPa，误差为 0.39%。其他测点处模型试验值和理论计算值的比对结果已列于表 3 中。由图 11~图 14 可知，随着路基深度的增加，加载区域内土单元三维动力响应的复现精度略有降低，但不同深度各测点处试验测量值和理论计算值之间的误差依然处在可接受范围内。因此本文研制的路基服役性能试验系统可以精准模拟路基工作区不同深度土单元的三维动力响应。

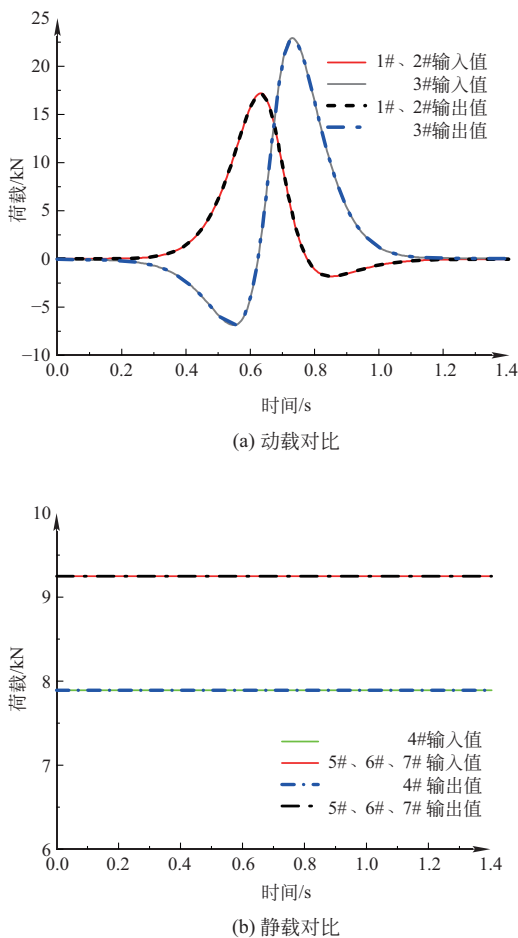


图 10 各作动器加载谱输入值-输出值对比
Fig. 10 Comparison of input value and output value of each actuator loading spectrum

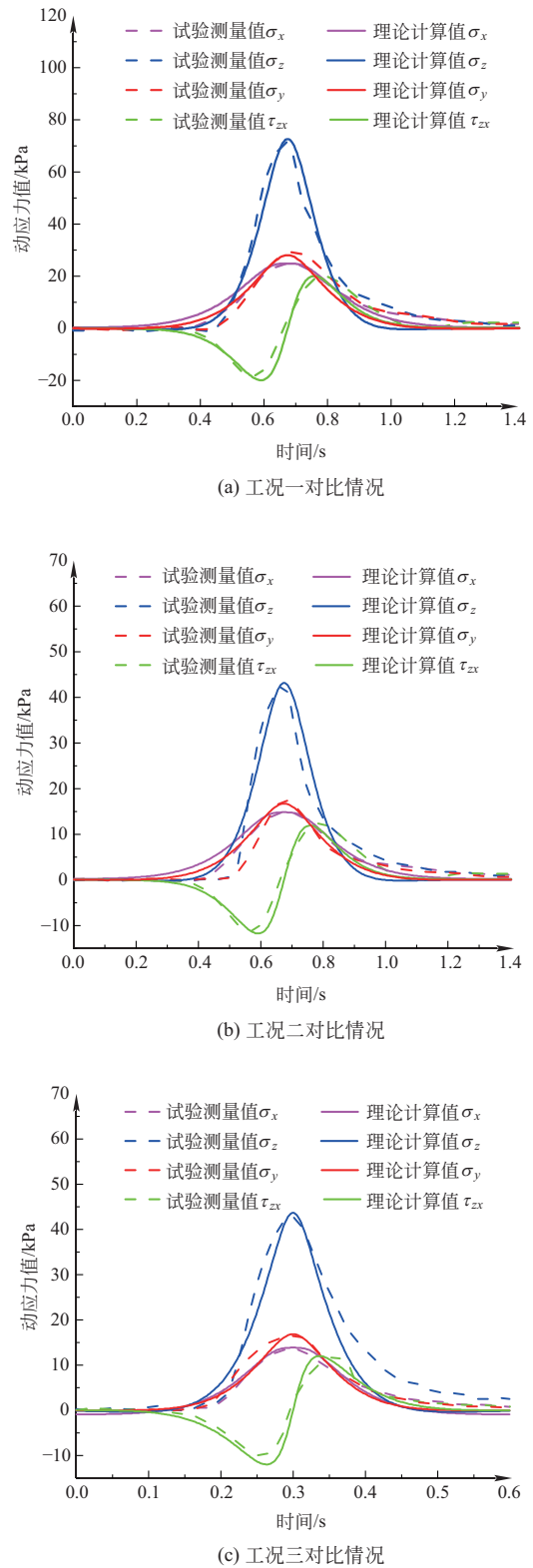
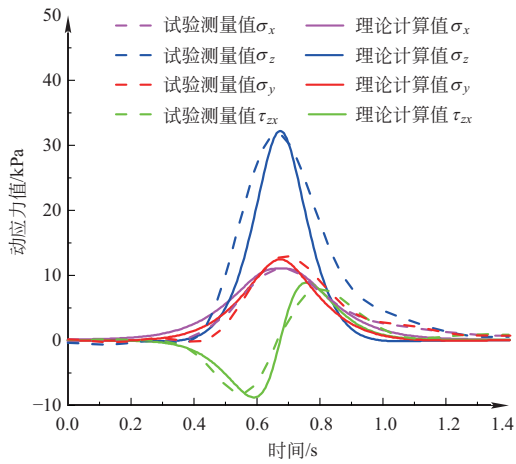
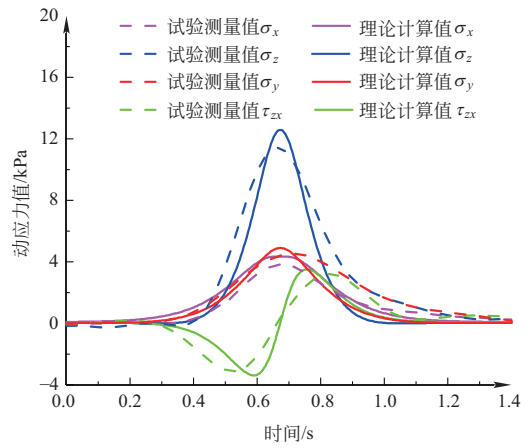


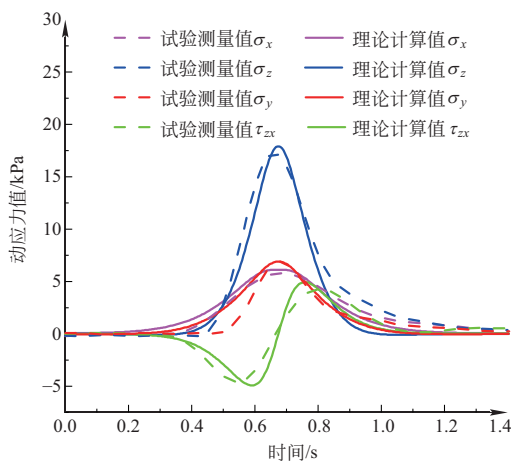
图 11 K_1 测点不同工况下动应力分量
试验值与理论计算值对比
Fig. 11 Comparison of experimental values with theoretical values of dynamic stress components under different cases at point K_1



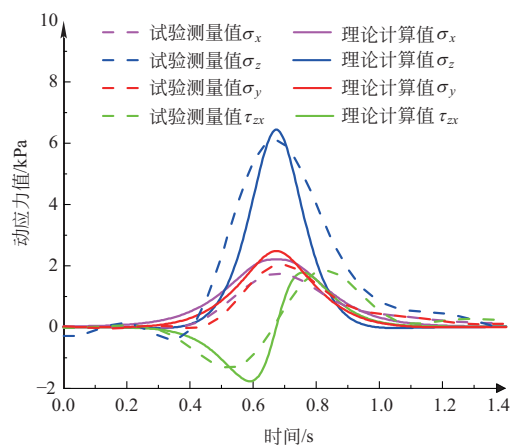
(a) 工况一对比情况



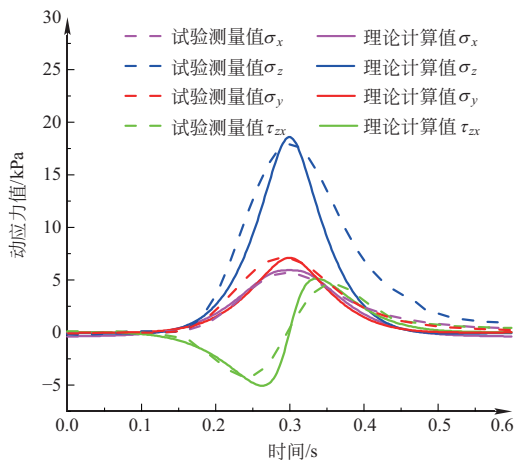
(a) 工况一对比情况



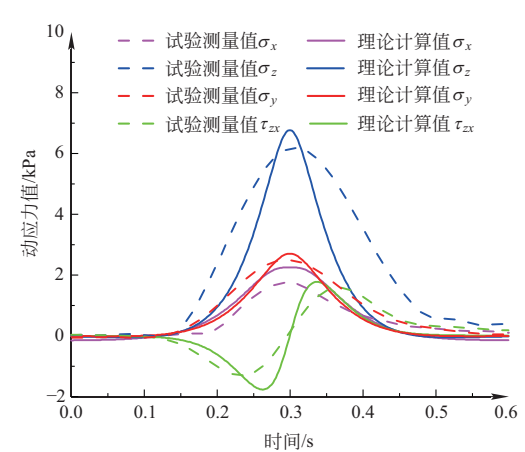
(b) 工况二对比情况



(b) 工况二对比情况



(c) 工况三对比情况



(c) 工况三对比情况

图 12 K_3 测点不同工况下动应力分量
试验值与理论计算值对比

Fig. 12 Comparison of experimental values with theoretical values of dynamic stress components under different cases at point K_3

图 13 K_4 测点不同工况下动应力分量
试验值与理论计算值对比

Fig. 13 Comparison of experimental values with theoretical values of dynamic stress components under different cases at point K_4

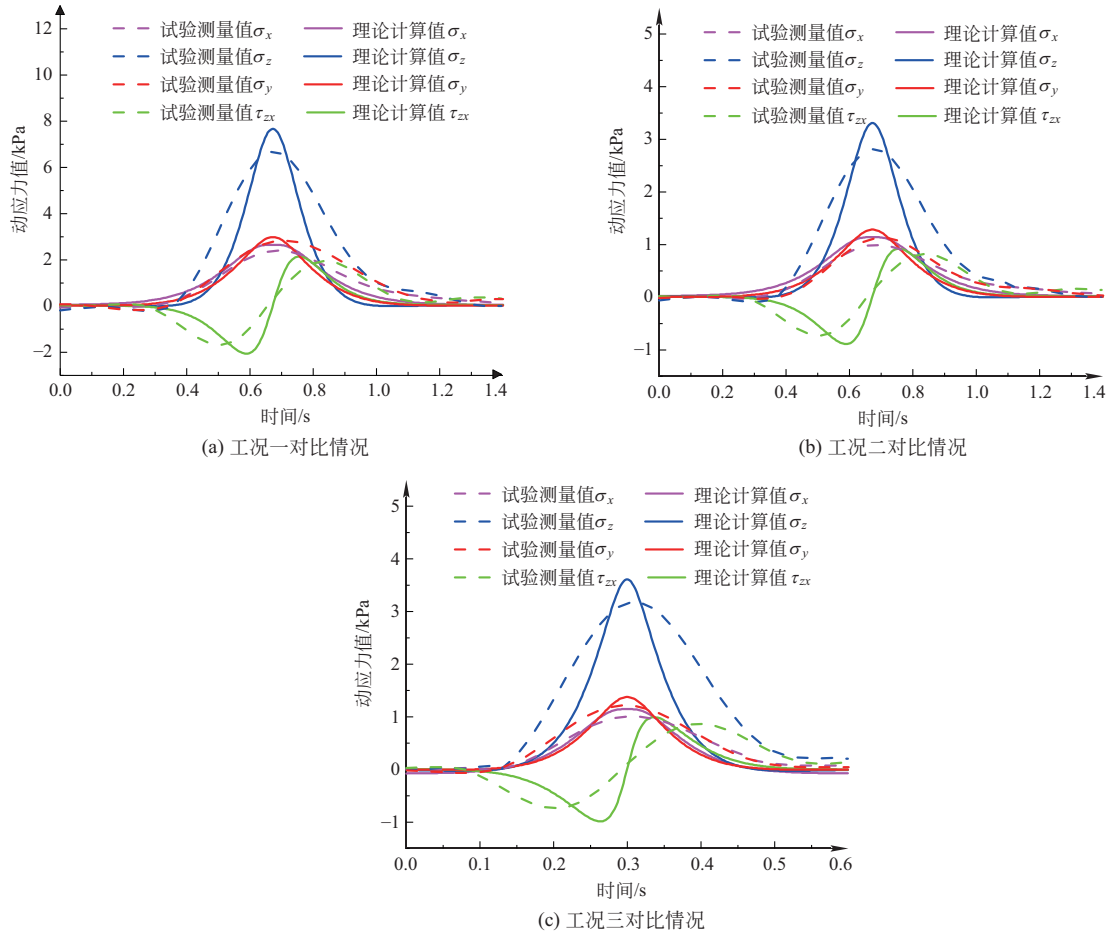


图 14 K_5 测点不同工况下动应力分量试验值与理论计算值对比

Fig. 14 Comparison of experimental values with theoretical values of dynamic stress components under different cases at point K_5

表 3 各测点不同工况下动应力分量峰值对比

Table 3 Comparison of peak values of dynamic stress components at different measuring points under different cases

试验 工况	动应 力分 量	K_1			K_3			K_4			K_5		
		理论计算 值/kPa	试验测量 值/kPa	偏差	理论计算 值/kPa	试验测量 值/kPa	偏差	理论计算 值/kPa	试验测量 值/kPa	偏差	理论计算 值/kPa	试验测量 值/kPa	偏差
工 况 一	σ_x	24.840	24.907	0.27%	10.989	11.022	0.30%	4.297	3.754	12.64%	2.615	2.263	13.46%
	σ_y	28.006	29.117	3.97%	12.402	12.898	4.00%	4.845	4.461	7.93%	2.773	2.692	2.92%
	σ_z	72.591	71.481	1.53%	32.147	31.636	1.59%	12.560	11.588	7.74%	7.651	6.654	13.03%
	τ_{xz}	19.933	20.010	0.39%	8.847	7.832	11.47%	3.448	3.047	11.63%	2.105	1.911	9.22%
工 况 二	σ_x	14.749	14.785	0.24%	6.128	5.774	5.78%	2.202	1.735	21.21%	1.128	0.855	24.20%
	σ_y	16.624	17.302	4.08%	6.910	6.449	6.67%	2.449	2.025	17.31%	1.272	1.116	12.26%
	σ_z	43.090	42.363	1.69%	17.911	17.257	3.65%	6.437	6.099	8.75%	3.299	2.803	19.10%
	τ_{xz}	11.838	12.310	3.99%	4.929	4.270	13.37%	1.771	1.840	3.90%	0.907	0.809	10.80%
工 况 三	σ_x	13.856	13.615	1.74%	5.887	5.635	4.28%	2.253	1.740	22.77%	1.144	0.976	15.56%
	σ_y	16.813	16.467	2.06%	7.064	6.995	0.98%	2.704	2.496	7.69%	1.372	1.212	11.66%
	σ_z	43.678	42.764	2.09%	18.560	17.871	3.71%	6.771	6.184	8.67%	3.607	3.174	12.00%
	τ_{xz}	12.002	11.743	2.16%	5.097	4.572	10.30%	1.758	1.585	9.84%	0.991	0.865	12.71%

图 15 展示了一个加载周期内 K_1 测点处土单元在工况一下的应力路径及应力主轴旋转情况(φ 表示主应力轴与 x 轴的夹角)。由图 15(a)可知,当每个加载周期开始前,测点 K_1 处土单元应力路径位于 A 点,此时各应力分量均为 0,土单元处于初始应力状态。随着加载力施加,土单元应力主轴逐渐偏离 x 轴,到 B 点时土单元偏应力差为 0,处于纯剪切状态,应力主轴旋转了 45° 。此后,土单元应力路径以逆时针方向依次经过点 B 、点 C 及点 D ,当应力路径位于点 D 时,偏应力差达到最大,水平剪应力 τ_{xz} 为 0,土单元处于纯三轴剪切状态,应力主轴旋转了 90° 。而后加载过程中土单元应力路径依次经过点 D 、点 E ,并最终到达点 A ,至此土单元经历一次应力循环,呈现近似“心形”应力路径。由图 15(b)可知,在每个加载周期过程中,土单元应力主轴先是顺时针旋转 90° ,然后再逆时针旋转 90° ,在整个过程中,应力主轴旋转了 180° 。

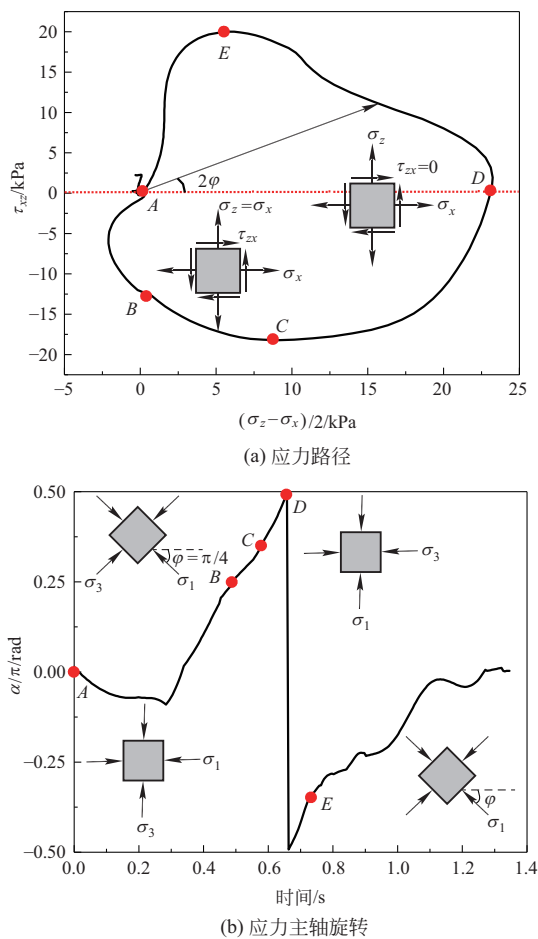


图 15 工况一 K_1 测点土单元应力路径及应力主轴旋转
Fig. 15 Stress path and rotation of principal stress axis of soil element at point K_1 under case 1

图 16(a) 为各工况下 K_1 测点土单元的应力路径

对比图。由图 16(a)可知,各工况下试验测量值与理论计算值应力路径较为吻合,并且土单元应力路径的变化规律基本一致,但仍然存在一定差异。主要原因有:理论模型中将非饱和路基视为完全弹性体,且各向同性,所以应力路径理论值是关于 x 轴对称的;而实际情况中,路基土体为黏弹塑性体,且具有各向异性和非均匀性等特点,在循环荷载作用下,路基土体存在一定的黏滞性,导致应力路径的试验值并不关于 x 轴对称,与理论值难免会存在差异,且文献[35]的现场实测结果也验证了这一结论。图 16(b)为工况一下不同测点处土单元应力主轴旋转试验测量结果和理论计算结果之间的对比图。由图可知,不同测点处土单元应力主轴旋转试验测量结果和理论计算结果基本一致。由此可见,本文所研发的模型试验系统能够精准复现交通荷载“远-近-远”移动过程中路基工作区不同深度处的土单元应力主轴旋转。

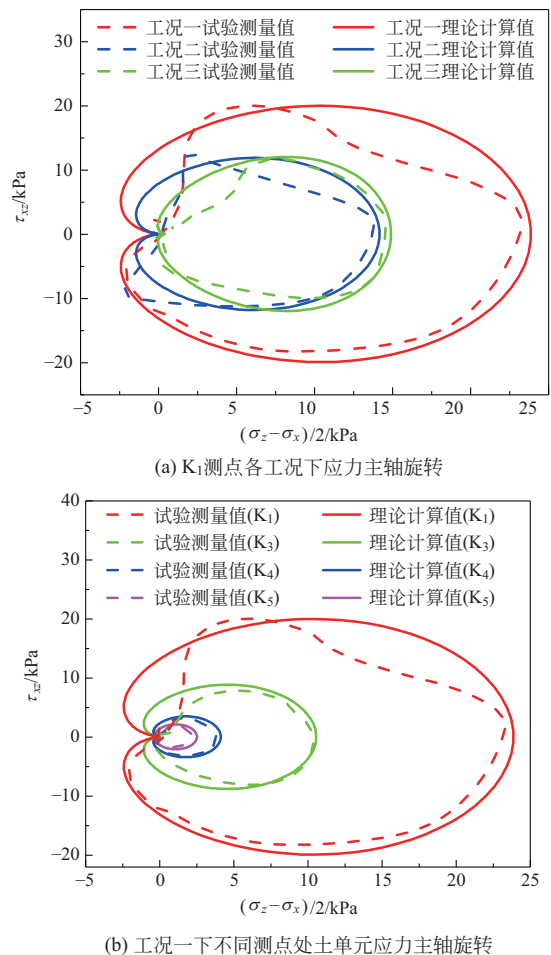


图 16 应力主轴旋转对比
Fig. 16 Comparison of rotation of principal stress axis

图 17 展示了不同工况下竖向动应力 σ_z 的理论计算值与试验测量值的竖向衰减情况对比。由图 17 可

知,各工况下竖向动应力沿深度方向的衰减规律相同。随着深度的增加,衰减速度由快变慢,试验测量结果与理论计算结果基本吻合。以工况一为例, K_1 测点和 K_4 测点处的竖向动应力试验值分别为71.481 kPa、11.588 kPa,衰减了83.79%,这与现场实测结果较为相近^[34]。可见,路基服役性能试验系统在深度方向上也具有良好的模拟精度,可以真实模拟交通荷载作用下路基内部的应力状态。

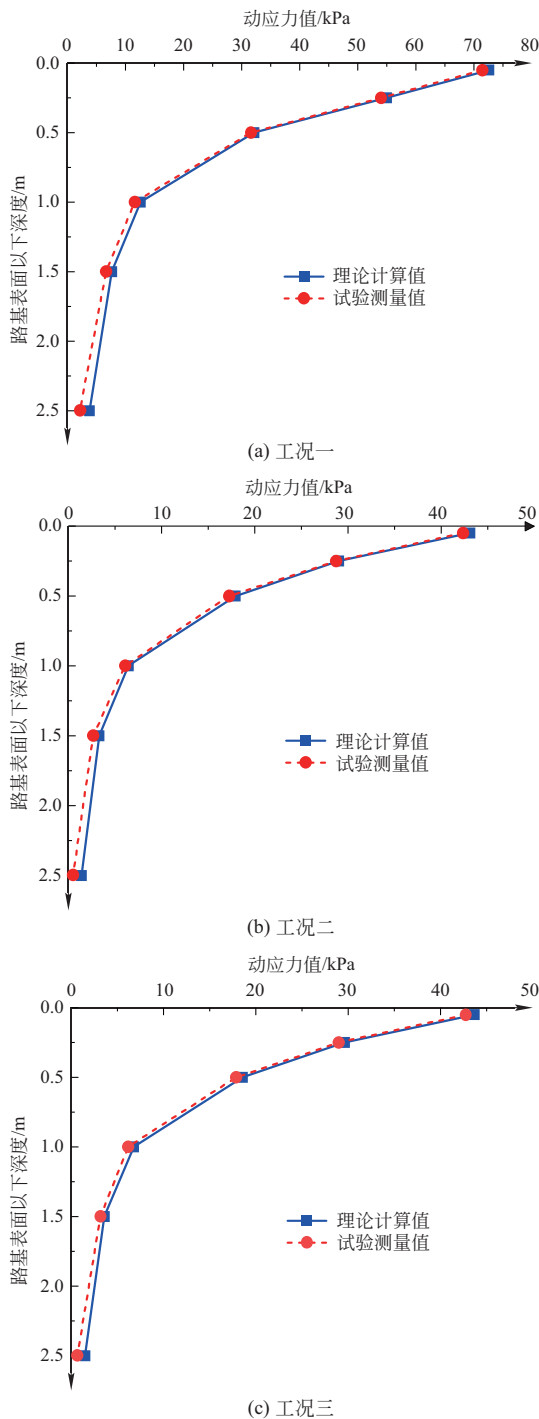


图 17 竖向动应力 σ_z 随深度方向分布

Fig. 17 Variation of vertical dynamic stress σ_z with depth

4 结 论

为了精准模拟循环交通荷载作用下路基三维应力状态及服役性能演化过程,本文研制了一种考虑应力主轴旋转的公路路基服役性能试验系统,以三维动应力谱为目标谱,通过多通道实时迭代控制,多缸静动协同加载,从而精准复现路基内部的三维动应力状态与应力主轴旋转效应,并开展了真实模拟路基内部应力状态的验证试验,可得到以下结论:

(1) 根据交通荷载作用下路基全动应力分量(3个正应力、3个切应力)的时程特征,构建了单点轴耦合加载模式,设计了以4个动态作动器和3个静态作动器为核心的加载系统,通过静动协同加载来实现不同层位路基土单元的应力主轴旋转效应。

(2) 基于交通荷载作用下公路路基动力响应理论模型,结合加载系统的机械结构与空间特征,建立了公路路基三维动应力复现理论,并在室内组建了以加载系统为核心、全数字伺服控制系统及数据采集系统等辅助模块组成的公路路基服役性能试验系统。

(3) 试验表明,各静动伺服作动器的实际输出荷载偏差均低于1%;路基内部的动应力沿深度方向逐渐衰减,土单元呈现近似“心形”应力路径,且各动应力分量时程曲线与竖向动应力衰减规律均与理论计算结果有较高的吻合程度。虽然该试验系统的加载装置在加载过程中位置不变,但是依然可以通过“七缸联动、协调加载”的方式复现交通荷载“远-近-远”移动过程中路基工作区不同深度土单元的动力响应。

因此,本文研制的路基服役性能试验系统能够精准复现真实交通荷载作用下公路路基三维动应力响应。利用该试验系统可以实现交通荷载作用下公路路基永久变形与回弹模量等动力参数演化规律的研究,为进一步研究交通荷载作用下公路路基服役性能提供重要的支撑作用。另外,试验系统以三维动应力谱为目标谱,通过多缸静动协同加载的方式来实现交通荷载作用的模拟,不仅适用于公路路基服役性能研究,还可推广至高速铁路、重载铁路、轨道交通以及航运机场等工程路基或道基服役性能的研究。该试验系统在一些特殊土路基服役性能与寿命等方面的研究也具有较大的优势。后期该试验系统与路基服役环境模拟系统结合后,还可用来研究复杂服役环境与交通荷载耦合作用下路基服役性能演化规律。该试验系统对于交通基础设施路基路

面结构设计具有重要价值。

参考文献

- [1] 汪双杰, 马涛, 张伟光, 等. 沥青路面长期性能研究的经验与挑战[J]. 科学通报, 2020, 65(30): 3228-3237. (WANG Shuangjie, MA Tao, ZHANG Weiguang, et al. Experience and challenges of long-term performance research on asphalt pavement [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(30): 3228-3237. (in Chinese))
- [2] 郑健龙, 吕松涛, 刘超超. 长寿命路面的技术体系及关键科学问题与技术前沿[J]. 科学通报, 2020, 65(30): 3219-3227. (ZHENG Jianlong, LÜ Songtao, LIU Chaochao. Technical system, key scientific problems and technical frontier of long-life pavement[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(30): 3219-3227. (in Chinese))
- [3] 王林, 韦金城, 张晓萌, 等. “四个一体化”破解长寿命沥青路面技术瓶颈[J]. 科学通报, 2020, 65(30): 3238-3246. (WANG Lin, WEI Jincheng, ZHANG Xiaomeng, et al. “Four integrations” to solve the technical bottleneck of long-life asphalt pavement [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(30): 3238-3246. (in Chinese))
- [4] 蔡袁强, 于玉贞, 袁晓铭, 等. 土动力学与岩土地震工程[J]. 土木工程学报, 2016, 49(5): 9-30. (CAI Yuanqiang, YU Yuzhen, YUAN Xiaoming, et al. Soil dynamics and geotechnical earthquake engineering [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(5): 9-30. (in Chinese))
- [5] 《中国公路学报》编辑部. 中国路基工程学术研究综述·2021[J]. 中国公路学报, 2021, 34(3): 1-49. (Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's subgrade engineering Research · 2021 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(3): 1-49. (in Chinese))
- [6] 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 Changjing, CHEN Yunmin. Stress state variation and principal stress axes rotation of ground induced by moving loads [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(8): 1698-1704. (in Chinese))
- [7] DU Z B, QIAN J G, ZHANG J W, et al. Elastoplastic modeling cyclic behavior of natural soft clay with principal stress rotation under traffic loading[J]. Acta Geotechnica, 2023, 18: 3643-3660.
- [8] THEVAKUMAR K, INDRARATNA B, FERREIRA F B, et al. The influence of cyclic loading on the response of soft subgrade soil in relation to heavy haul railways [J]. Transportation Geotechnics, 2021, 29: 100571.
- [9] 崔新壮, 包振昊, 郝建文, 等. 重载公路路基动力响应现场测试与三维空间分布规律[J]. 中国公路学报, 2023, 36(10): 75-83. (CUI Xin Zhuang, BAO Zhenhao, HAO Jianwen, et al. Field test and three-dimensional spatial distribution of dynamic response of heavy-duty highway subgrades [J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(10): 75-83. (in Chinese))
- [10] YASUHARA K, MURAKAMI S, SONG B W, et al. Postcyclic degradation of strength and stiffness for low plasticity silt [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(8): 756-769.
- [11] 熊焕, 郭林, 蔡袁强. 交通荷载应力路径下砂土地基变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 662-669. (XIONG Huan, GUO Lin, CAI Yuanqiang. Deformation behaviors of sandy subgrade soil under traffic load-induced stress path [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(4): 662-669. (in Chinese))
- [12] 张勇, 孔令伟, 郭爱国, 等. 循环荷载下饱和软黏土的累积塑性应变试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1542-1548. (ZHANG Yong, KONG Lingwei, GUO Aiguo, et al. Cumulative plastic strain of saturated soft clay under cyclic loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1542-1548. (in Chinese))
- [13] 钱建国, 杜子博. 纯主应力轴旋转下饱和软黏土的循环弱化及非共轴性[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(8): 1381-1390. (QIAN Jianguo, DU Zibo. Cyclic degradation and non-coaxiality of saturated soft clay subjected to pure rotation of principal stress axis [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(8): 1381-1390. (in Chinese))
- [14] 潘华, 陈国兴. 动态围压下空心圆柱扭剪仪模拟主应力轴旋转应力路径能力分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1701-1706, 1712. (PAN Hua, CHEN Guoxing. Analysis of capabilities of HCA to simulate stress paths for principal stress rotation under dynamic confining pressure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1701-1706, 1712. (in Chinese))
- [15] 童朝霞, 张建民, 张嘎. 考虑应力主轴循环旋转效应的砂土弹塑性本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1918-1927. (TONG Zhaoxia, ZHANG Jianmin, ZHANG Ga. An elastoplastic constitutive model of sands considering cyclic rotation of principal stress axes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(9): 1918-1927. (in Chinese))
- [16] XIAO J H, JUANG C H, WEI K, et al. Effects of principal stress rotation on the cumulative deformation of normally consolidated soft clay under subway traffic loading [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(4): 04013046.
- [17] PRASANNA R, SINTHUMAN N, SIVATHAYALAN S. Effects of initial direction and subsequent rotation of principal stresses on liquefaction potential of loose sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, 146(3): 04019130.
- [18] CUI X Z, LI X Y, DU Y F, et al. Macro-micro numerical analysis of granular materials considering principal stress rotation based on DEM simulation of dynamic hollow cylinder test [J]. Construction and Building Materials, 2024, 412: 134818.
- [19] TASTAN E O, CARRARO J A H. Effect of principal stress rotation and intermediate principal stress changes on the liquefaction resistance and undrained cyclic response of Ottawa sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2022, 148(5): 04022015.
- [20] 崔新壮. 交通荷载作用下黄河三角洲低液限粉土地基累积沉降规律研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(1):

- 154-162. (CUI Xinzhuang. Traffic-induced settlement of subgrade of low liquid limit silt in Yellow River delta[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(1): 154-162. (in Chinese))
- [21] ZHANG X, ZHAO C F, ZHAI W M, et al. Investigation of track settlement and ballast degradation in the high-speed railway using a full-scale laboratory test[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2019, 233(8): 869-881.
- [22] INDRARATNA B, NGO T, FERREIRA F B, et al. Large-scale testing facility for heavy haul track[J]. Transportation Geotechnics, 2021, 28: 100517.
- [23] 蒋红光, 边学成, 陈云敏, 等. 高速铁路轨道-路基列车移动荷载模拟的全比尺加速加载试验[J]. 土木工程学报, 2015, 48(9): 85-95. (JIANG Hongguang, BIAN Xuecheng, CHEN Yunmin, et al. Full-scale accelerated testing for simulation of train moving loads in track-subgrade system of high-speed railways[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(9): 85-95.(in Chinese))
- [24] 边学成, 蒋红光, 申文明, 等. 基于模型试验的高铁路基动力累积变形研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(6): 112-119. (BIAN Xuecheng, JIANG Hongguang, SHEN Wenming, et al. Study of accumulative deformation of high-speed railways based on physical model testing[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(6): 112-119. (in Chinese))
- [25] 冷伍明, 梅慧浩, 聂如松, 等. 重载铁路路基足尺模型试验研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(4): 1-6, 18. (LENG Wuming, MEI Huihao, NIE Rusong, et al. Full-scale model test of heavy haul railway subgrade[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(4): 1-6, 18. (in Chinese))
- [26] WHITE D J, VENNAPUSA P K R. In situ resilient modulus for geogrid-stabilized aggregate layer: a case study using automated plate load testing [J]. Transportation Geotechnics, 2017, 11: 120-132.
- [27] CUI X Z, LI X Y, HAO J W, et al. Dynamic response of unsaturated poroelastic ground underlying uneven pavement subjected to vehicle load [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 156: 107164.
- [28] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))
- [29] 公路路基设计规范: JTG D30—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015. (Specifications for design of highway subgrades: JTG D30—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese))
- [30] CUI X Z, DU Y F, BAO Z H, et al. Field evaluation of the three-dimensional dynamic stress state of the subgrade induced by the heavy-haul train load [J]. Transportation Geotechnics, 2023, 38: 100903.
- [31] 试验机 通用技术要求: GB/T 2611—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022. (Testing machines—General requirements: GB/T 2611—2022 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2022. (in Chinese))
- [32] 轴向加力疲劳试验机: JJG 556—2011[S]. 北京: 中国质检出版社, 2012. (Axial force fatigue testing machines: JJG 556—2011 [S]. Beijing: China Quality Standards Publishing Media, 2012. (in Chinese))
- [33] 电液伺服动静万能试验机: JB/T 8612—2015[S]. 北京: 机械工业出版社, 2016. (Electro-hydraulic servo controlled static-dynamic universal testing machines: JB/T 8612—2015 [S]. Beijing: China Machine Press, 2016. (in Chinese))
- [34] CUI X Z, DU Y F, HAO J W, et al. Three-dimensional spatial stress state of highway subgrade under vehicle load: experimental evidence and evaluation model [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2023, 24(1): 2268795.

崔新壮(1974—),男,博士,教授。主要从事岩土工程、路基动力学、交通基础设施及智能建造方面的研究。

包振昊(1998—),男,博士研究生。主要从事岩土力学与动力学方面的研究。

杜业峰(1995—),男,博士研究生。主要从事岩土力学与动力学方面的研究。

郝建文(1995—),男,博士研究生。主要从事岩土力学与动力学方面的研究。

金青(1976—),女,博士,副教授。主要从事岩土力学方面的研究。

曹天才(1998—),男,博士研究生。主要从事岩土力学与动力学方面的研究。

张圣琦(1999—),男,硕士。主要从事岩土力学与动力学方面的研究。

张小宁(1993—),男,博士,助理研究员。主要从事岩土力学方面的研究。