

DOI: 10.11779/CJGE201801005

飞机主起落架移动荷载作用下道基动力响应分析

凌道盛^{1, 2}, 王云龙^{1, 2}, 赵 云^{1, 2}, 黄 博^{*1, 2}, 周燕国^{1, 2}

(1. 软弱土与环境土工教育部重点实验室(浙江大学), 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058)

摘要: 飞机起降过程中主起落架移动荷载引起的跑道道基土体循环动应力是导致跑道沉降和差异沉降的主要原因。采用移动荷载作用下跑道动力响应半解析有限单元法, 基于叠加原理分析了 B747-400 和 A380-800 客机主起落架轮组移动荷载作用下道基土体动应力响应规律。分析结果表明: 在 B747-400 和 A380-800 客机主起落架移动荷载作用下, 道基浅层土体竖向正应力沿横向呈倒锅底型分布, 荷载影响深度可达 13 m; 主起落架机轮分布对浅层道基土体竖向正应力影响较大, 对深层土体影响不大; 飞机移动速度对浅层道基土体竖向正应力分布影响较小, 但对深层土体影响较明显, 当飞机滑行速度达到 60~80 m/s 时, 荷载影响深度达静力分析时的 1.5~1.7 倍; 采用柔性道面板时, 浅层土体竖向正应力较刚性道面结构时增加约 50%, 荷载影响深度增加约 10%。

关键词: 主起落架; 移动荷载; 跑道道基; 动力响应; 荷载影响深度

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)01-0064-10

作者简介: 凌道盛(1968-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事交通岩土工程、计算土力学等方面的教学和科研。E-mail: dsling@zju.edu.cn。

Dynamic response of subgrade under moving loads of main landing gears

LING Dao-sheng^{1, 2}, WANG Yun-long^{1, 2}, ZHAO Yun^{1, 2}, HUANG Bo^{1, 2}, ZHOU Yan-guo^{1, 2}

(1. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The cyclic dynamic stress of runway subgrade soil induced by the moving loads of the main landing gears in the process of taking off and landing is the main cause of the settlement and differential settlement of runway. Based on the superposition principle, the dynamic responses of the subgrade soil under the moving loads of the main landing gears B747-400 and A380-800 are analyzed by using the semi-analytical finite element method. The results show that under the moving loads of main landing gears of B747-400 and A380-800, the vertical normal stress of subgrade of shallow soil is inverted as the pot type distribution, and the load influence depth can be up to 13 m. The distribution of the main loading gears has a greater influence on the vertical normal stress of shallow subgrade soil than the deep subgrade soil. The moving speed of aircrafts has an obvious effect on the distribution of the vertical normal stress of deep subgrade soil. Under the taking-off speed of 60~80 m/s, the load influence depth is 1.5~1.7 times than that of the static analysis. Compared with that of the rigid pavement, the vertical normal stress of shallow soil increases by about 50% and the load influence depth increases by about 10% for flexible panel.

Key words: main landing gear; moving load; runway subgrade soil; dynamic response; load influence depth

0 引言

在飞机移动荷载的长期作用下, 道基变形累积导致道面结构下不均匀沉降甚至开裂, 严重影响跑道的适航性。分析高速移动荷载作用下道基土体附加动应力对揭示道基变形累积规律具有重要意义。

飞机移动荷载作用下跑道动应力响应问题一直受到国内外学者的关注。利用 ANSYS 软件的静力有限元分析, 张献民等^[1-3]系统地研究了跑道面层和基层厚度与模量、道基土体模量以及起落架构型等对道面和

道基附加应力的影响, 指出适应 B747-400 飞机正常起降的道面结构也适应 A380-800 机型的正常起降, 为 A380-800 机型在中国的大型机场起降提供了理论依据。基于 ABAQUS 静力有限元分析, 采用弹簧单元模拟道面板间接缝传荷, 凌建明等^[4]分析了军用飞机

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973 计划”)项目(2014CB047005)

收稿日期: 2016-11-08

*通讯作者(E-mail: cehuangbo@zju.edu.cn)

8轮和16轮荷载作用下刚性道面结构的响应。呙润华等^[5]则基于自行编制的有限元程序分析单轮移动荷载作用下道基附加应力, 采用叠加原理获得飞机轮组荷载作用下道基附加应力分布。蔡迎春等^[6]利用拉格朗日差分法并假定道基土模型为Byrne液化模型, 通过施加正弦荷载计算单轮飞机荷载下粉砂土道基中的动力响应, 并通过单轮定点1:10缩尺激振试验进行验证。Marshall等^[7]利用美国联邦航空管理局的国家机场路面测试设备(NAPTF)研究不同轮组作用下飞机道面板的破坏、沥青道面车辙深度以及道基含水量变化对车辙深度的影响。凌道盛等^[8]提出了适用于非均匀道基动响应分析的半解析有限单元法, 系统地分析了单轮移动荷载作用下, 移动速度、刚柔性道面、道基不均匀性等因素对道基土体动应力响应的影响规律。此外还有学者研究了道面板中的应力变化^[9-12]、机场跑道软土地基的沉降问题^[13-15]以及列车荷载作用下分层地基的动力响应特征^[16]。

综上所述, 现有研究主要侧重于飞机静力荷载作用下道面板或道基中应力的变化, 动力研究也只是局限于单轮作用, 没有考虑飞机轮组及其移速效应, 本文采用凌道盛等^[8]提出的分析方法, 对比分析了轮组构型、移动速度和道面结构形式对道基中动应力响应的影响规律。

1 分析方法

为方便起见, 本文简单介绍文献[8]提出的半解析有限单元法。如图1所示半无限分析模型, 取飞机移动方向, 即纵向为x坐标轴正向, 坚直向上为y坐标轴正向, z轴正向按右手法则确定, 简称为横向。假设沿跑道横向模型几何和材料均匀, 移动荷载作用在跑道表面且关于xoy平面对称, 道面道基层间满足位移连续条件。

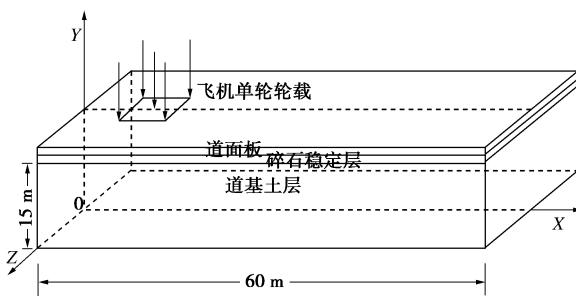


图1 飞机单轮移动荷载作用下跑道分析模型

Fig. 1 Runway analysis model under single-wheel moving loads of aircrafts

利用响应的对称性将位移表示的控制方程沿横向进行适当的正弦或余弦变换, 可得位移形式的变换域

控制方程:

$$(\mathbf{L}_1 \mathbf{D} \mathbf{L}_1^T - \omega \mathbf{L}_1 \mathbf{D} \mathbf{L}_0^T + \omega \mathbf{L}_0 \mathbf{D} \mathbf{L}_1^T - \omega^2 \mathbf{L}_0 \mathbf{D} \mathbf{L}_0^T) \bar{\mathbf{u}} = \rho \ddot{\mathbf{u}} \quad , \quad (1)$$

式中, \mathbf{D} 为材料系数矩阵,

$$\mathbf{L}_1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{L}_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$\bar{\mathbf{u}} = \{\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}\}^T$ 为变化域位移矢量, $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ 分别为沿坐标轴 x, y, z 方向的位移分量对应的正弦或余弦变换, ρ 为材料质量密度, $\ddot{\mathbf{u}}$ 为变化域内位移矢量关于时间的二阶导数, ω 为变化域内波数。

于是复杂的三维动力响应问题就简化为系列的二维问题求解。将变换域内的位移矢量 $\bar{\mathbf{u}}$ 在 xoy 平面内进行等参有限单元离散, 采用如下形式的位移:

$$\bar{\mathbf{u}} = \sum_{j=1}^n N_j \bar{\mathbf{u}}_j, \quad N_j = N_j \mathbf{I}_{3 \times 3}, \quad (4)$$

式中, $\bar{\mathbf{u}} = \{\bar{u}_j, \bar{v}_j, \bar{w}_j\}^T$ 为单元第 j 个节点的变换域内位移矢量, N_j 为单元第 j 个节点的插值形函数, $\mathbf{I}_{3 \times 3}$ 为 3 阶单位矩阵, n 为单元节点数。

为计算简便, 将单个飞机轮载简化为均匀分布的矩形荷载, 经过 Fourier 变换得变换域内的荷载:

$$\bar{\mathbf{T}}^a = \frac{H(\xi - \xi^a(t) + 1)H(\xi^a(t) - \xi + 1)}{L_t} E(\omega) \mathbf{T}^a, \quad (5)$$

式中, $H(\xi)$ 为阶跃函数, W_t 和 L_t 为等效轮印宽度和长度, $\xi = 2x/L_t$, $\xi^a(t) = 2x^a(t)/L_t$, $\mathbf{T}^a = \{T_x^a, T_y^a, 0\}^T$, $x^a(t)$ 为 t 时刻轮印中心点的 x 坐标, T_x^a , T_y^a 分别为纵向和竖向的单轮总轮载。

$$E(\omega) = \begin{cases} \sin(W_t \omega / 2) / (W_t \omega) & \omega \neq 0 \\ 1/2 & \omega = 0 \end{cases} \quad (6)$$

设地表任意节点的 x 坐标为 x_n , 其左邻节点和右邻节点坐标分别为 x_l 和 x_r 。根据虚功原理移动荷载在节点 x_n 处的等效节点力为

$$\bar{F}_n(\omega, t) = E(\omega) F_n(t) f(t) \mathbf{T}_a, \quad (7)$$

式中,

$$F_n(t) = F_{nl}(t) + F_{nr}(t) \quad , \quad (8)$$

$$F_{nl}(t) = \begin{cases} \frac{[\min(\xi_n - \xi_l, \xi^a(t) - \xi_l + 1)]^2 - [\max(0, \xi^a(t) - \xi_l - 1)]^2}{4(\xi_n - \xi_l)} & (\xi_l - 1 \leq \xi^a(t) \leq \xi_n + 1) \\ 0 & (\text{其它}) \end{cases} \quad (9)$$

表3, 4 分别给出了刚性和柔性道面跑道各层的主要几何和力学参数, 除道基土层厚度外, 其他参数同文献[8]。与文献[8]相同, 跑道各层采用线性粘弹性模型, 材料力学常量除弹性模量和泊松比外, 还有瑞利阻尼系数 α 和 β , 具体参见文献[8]。不难得得到道基土层的剪切波速约为 73 m/s。

表3 刚性道面跑道几何和力学参数

Table 3 Structural parameters of rigid pavements

结构层	厚度/m	弹性模量 /MPa	质量密度 /(kg·m ⁻³)	泊松比	阻尼常数 α/s^{-1}	阻尼常数 β/s
跑道板	0.4	36000	2400	0.20	0.1	0.001
水泥稳碎石层	0.4	1500	2100	0.25	0.1	0.002
道基土层	15.0	25	1800	0.30	1.0	0.010

表4 柔性道面结构层参数

Table 4 Structural parameters of flexible pavements

结构层	厚度/m	弹性模量 /MPa	质量密度 /(kg·m ⁻³)	泊松比	阻尼常数 α/s^{-1}	阻尼常数 β/s
沥青面层	0.2	1800	2380	0.20	0.1	0.001
水泥稳定碎石层	0.4	1500	2100	0.25	0.1	0.002
碎石垫层	0.3	200	2000	0.20	0.1	0.002
道基土层	15.0	25	1800	0.30	1.0	0.010

3 单轮荷载作用下道基土体动应力

为减少计算量, 本文先采用自行研发的程序分析飞机单轮移动荷载作用下道基土体动应力响应, 然后利用线性叠加原理, 分析飞机轮组作用下道基土体的动力响应。为便于比较, 本节给出刚性道面单轮移动荷载作用下道基土体动应力响应结果。计算过程中, 轮载移速分别为 20, 40, 60 和 80 m/s, 飞机单轮荷载和轮印尺寸取自 A380-800, 分别为 250 kN 和 0.5 m × 0.346 m。

图 5 给出了不同轮载移动速度时跑道中心点 ($x=30$)、对称面内 ($z=0$)、距道基顶面 1.2 m 处土体的动应力 (纵向正应力 σ_x , 坚向正应力 σ_y , 横向正应力 σ_z 和纵向竖直平面内的剪应力 τ_{xy} , 其中正应力以拉为正) 时程曲线。图中 A 和 B 点分别代表时程曲线的峰值点和谷值点。

由图 5 可见, 飞机单轮移动荷载在道基内的动应力响应以坚向正应力和纵向竖直平面内剪应力为主, 其中坚向正应力幅值为 7.20 kPa, 剪应力幅值为 2.97 kPa。与文献[8]的结果相似, 单轮荷载的移动速度对浅层道基土体坚向正应力影响不大, 而对纵向正应力、横向正应力、平面内剪应力的影响很大。

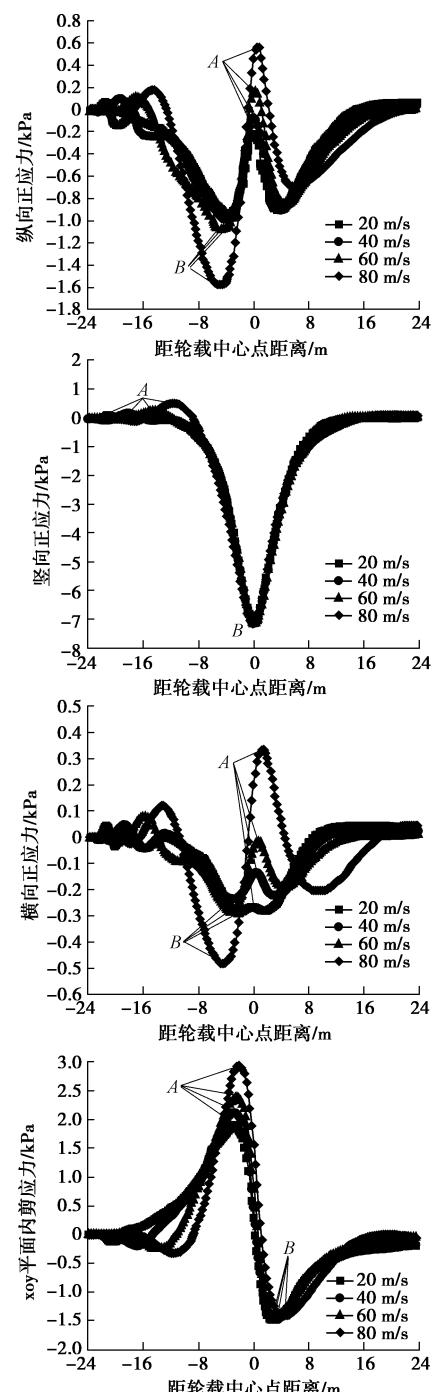


图5 单轮移动荷载作用下道基土体 (1.2 m 深) 动应力时程

Fig. 5 Time-history curves of dynamic stress of subgrade soil 1.2 m in depth under moving loads

图 6 进一步给出了该点纵向竖直平面内各应力分量对应的动应力路径。与静载下的心形应力路径不同, 考虑速度效应的应力路径呈带“犄角”的蛋形, 且随移动速度增加呈逆时针方向转动, “犄角”逐渐增大。

图 7 给出了图 5 中各应力时程曲线峰值 (A 点) 和谷值 (B 点) 随荷载移动速度的变化曲线。由图 7 可知纵向、横向正应力和纵向竖直平面内剪应力峰值和谷值均随速度变化较大, 尤其是当速度达到 80 m/s 时, 峰值快速增大, 谷值则快速减小, 表明当荷载移

动速度接近土体剪切波速时, 荷载移速对道基土体动应力的响应影响显著。相对而言, 浅层土体竖向正应力峰值随移速变化较小。

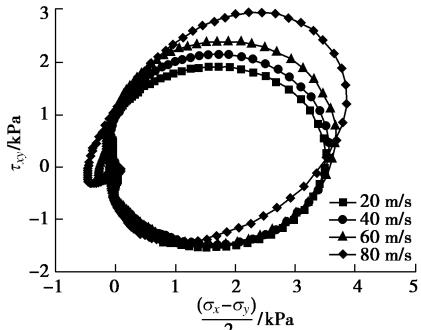


图 6 不同单轮移动速度下道基内动应力路径

Fig. 6 Time-history curves of dynamic stress of subgrade under moving loads with different velocities

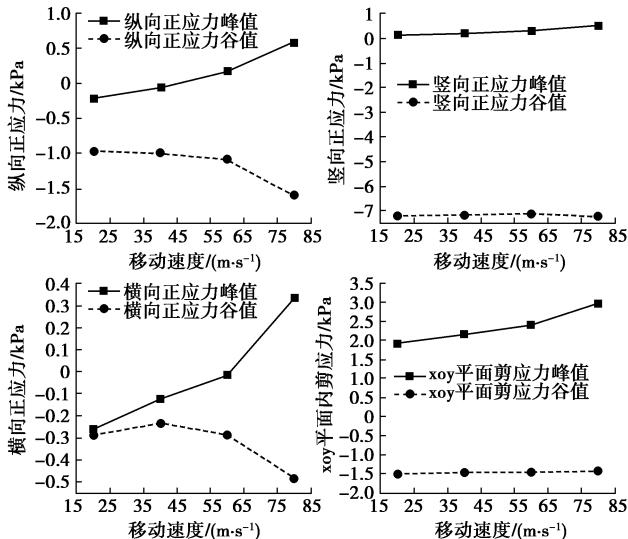


图 7 1.2 m 深度处道基土体应力分量峰值随速度变化曲线

Fig. 7 Variation of stress peak value with velocity in subgrade soil at depth of 1.2 m

图 8 给出了不同移动速度时竖向正应力幅值随深度变化曲线。参考文献[3]取 0.1 倍自重应力为荷载影响深度。由图可看出, 移动速度对浅层土体竖向动应力影响较小, 对深层土体影响较大, 速度越快, 移动荷载影响深度越大, 4 种移动速度条件下荷载影响深度分别为 2.12, 2.15, 2.19, 2.29 m。

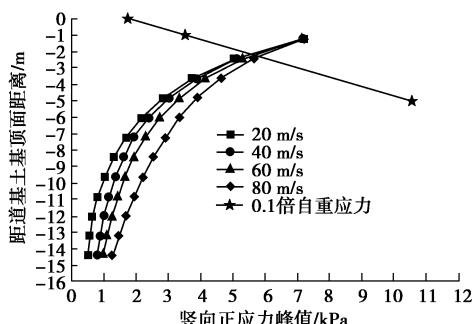


图 8 竖向正应力幅值随深度变化曲线

Fig. 8 Variation of vertical stress with depth

4 轮组荷载作用下道基土体动应力

本文以常见的波音 B747-400 客机和目前最大的空客 A380-800 客机的主起落架为例, 分析主起落架移动荷载作用下道基土体动应力响应及不同起落架轮组构型对道基土体动应力响应的影响。

4.1 道基土体动应力横向分布

为方便起见, 沿跑道横向设 9 条纵向轴线, 两种机型主起落架轴线和机轮分布分别如图 3, 4 所示。其中 *A* 轴线是主起落架的中轴线, *C, E, G, I* 分别为各个轮印的轴线, *B, D, F, H* 为各轮印之间或轮印与中轴线之间的中线。为方便比较轮组构型对道基土体动应力的影响, 两种飞机单轮荷载均取 250 kN。另外, 本节采用刚性道面分析模型。

图 9, 10 分别给出 B747-400 和 A380-800 飞机以 60 m/s 滑行经过跑道中点附近时道基土体内竖向正应力分布图(跑道纵向剖面)。

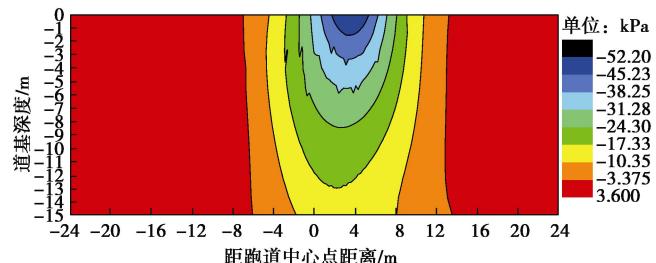


图 9 B747-400 飞机主起落架移动荷载作用下道基土体竖向正应力云图

Fig. 9 Vertical stress of subgrade soil under moving loads of main landing gears of B747-400 aircraft

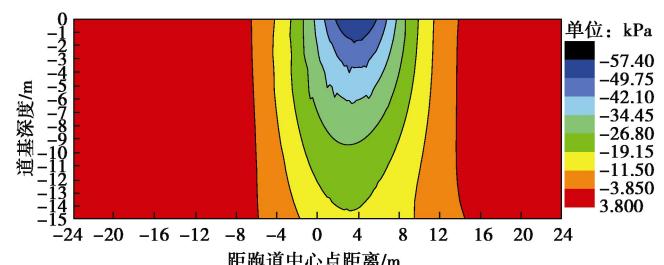


图 10 A380-800 飞机主起落架移动荷载作用下道基土体竖向正应力云图

Fig. 10 Vertical stress of subgrade soil under moving loads of main landing gears of A380-800 aircraft

从图 9, 10 中可知, B747-400 和 A380-800 飞机移动荷载作用下道基竖向正应力的纵向影响范围为 20 m 左右。

图 11, 12 分别给出 B747-400 和 A380-800 飞机以 60, 80 m/s 滑行时主起落架荷载引起的道基 1.2 m 土体深度处各轴线对应位置竖向正应力时程曲线。从图中可知, B747-400 飞机最大竖向正应力在 *B* 轴线, 偏向中心线, *A, B, C, D, E* 轴线应力时程曲线差别

较小。由于主起落架后侧两组机轮间距较大, A380-800 客机主起落架移动时道基浅层土体竖向最大正应力出现在 C 轴线, 偏向后侧机轮。由图还可以看出, 由于 A380-800 客机机轮数量多, 主起落架总荷载大, 相应最大土体竖向正应力较 B747-400 客机大。此外, 各轴线原最大竖向正应力到达时间与对应位置处机轮到观测点的距离有关。

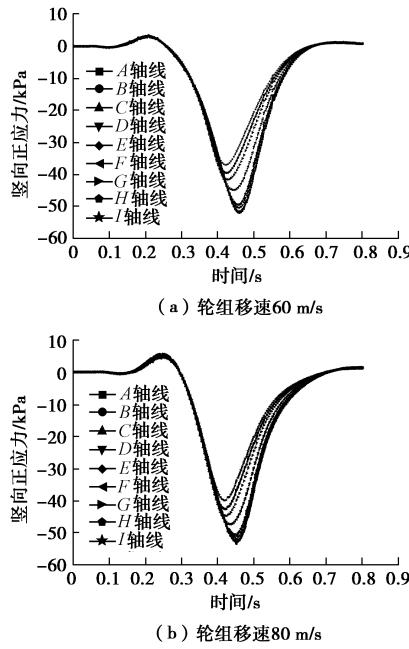


图 11 B747-400 飞机主起落架移动荷载作用下道基土体(1.2 m)

竖向正应力时程曲线

Fig. 11 Time history curves of vertical stress in subgrade soil (1.2 m) under moving loads of main landing gear of B747-400 aircraft

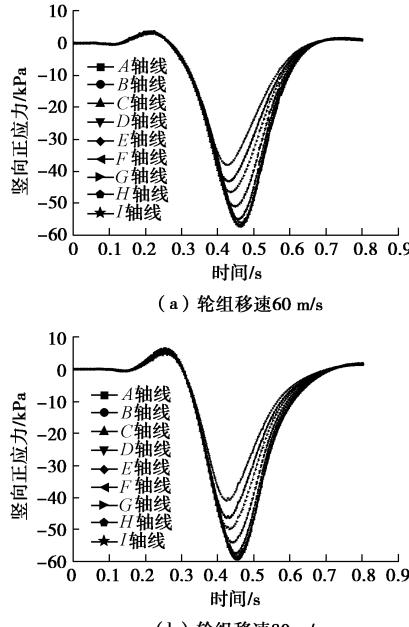


图 12 A380-800 飞机主起落架移动荷载作用下道基土体(1.2 m)

竖向正应力时程曲线

Fig. 12 Time-history curves of vertical stress in subgrade soil (1.2 m) under moving loads of main landing gears of A380-800 aircraft

B747-400 和 A380-800 客机主起落架轮组荷载作用下不同深度道基土体最大竖向动应力横向分布如图 13, 14 所示。

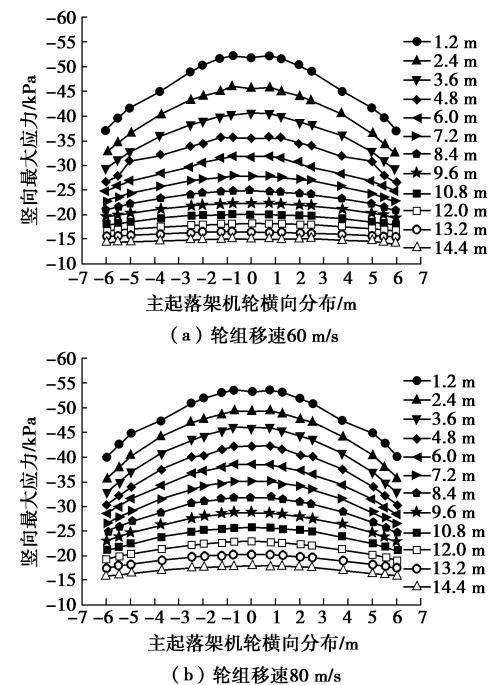


图 13 B747-400 移动荷载作用下最大竖向应力横向分布图
Fig. 13 Transverse distribution of maximum vertical stress under moving loads of B747-400 aircraft

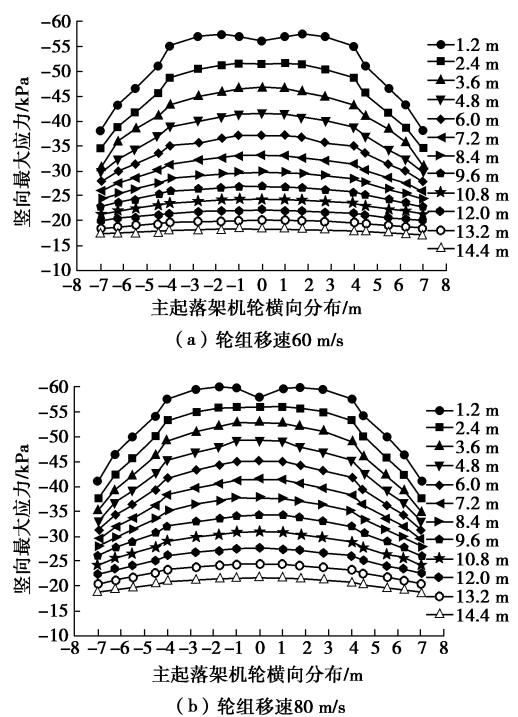


图 14 A380-800 移动荷载作用下最大竖向应力横向分布图
Fig. 14 Transverse distribution of maximum vertical stress under moving loads of A380-800 aircraft

由图 13, 14 可以看出, 轮组移动荷载引起道基土

体动应力在时空两个尺度上叠加作用，导致竖向动应力沿横向呈现中间大，两侧小的倒锅底型分布，高动应力分布到后轮组外缘。由图还可以看出，轮组荷载作用的叠加效应在道基浅层土体中表现的尤为明显。此外，由于空客 A380-800 主起落架机轮多于波音 B747-400，前者产生的动应力水平高于后者。于此同时，空客 A380-800 后两轮组各有 6 个机轮，比波音 B747-400 各多 2 个，导致 A380-800 主起落架作用下浅层土体竖向动应力分布呈双峰型，跑道移动速度增加表现越明显，而 B747-400 则没有产生类似分布现象。

4.2 道基动应力竖向分布

从图 13, 14 可以看出，对于 B747-400 飞机，B 轴线处竖向动应力最大；对于 A380-800 飞机，C 轴线处竖向动应力最大。图 15 给出两种机型不同移速情况下道基竖向动应力随深度变化曲线

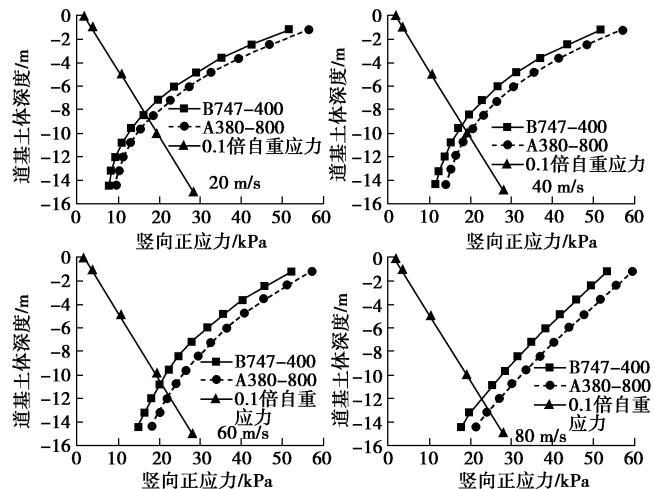


图 15 移动荷载下道基土体竖向最大动应力随深度变化

Fig. 15 Variation of vertical maximum dynamic stress with depth under moving loads

表 5 给出了不同移速时两种飞机的轮组荷载影响深度。

表 5 荷载影响深度

Table 5 Load influence depths

轮组移速 /(m·s ⁻¹)	B747-400/m		A380-800(静载)
	B747-400/m	A380-800/m	文献[3]/m
20	8.30	8.91 (1.15 倍)	7.78
40	9.24	10.13 (1.30 倍)	7.78
60	10.59	11.74 (1.51 倍)	7.78
80	11.97	12.98 (1.67 倍)	7.78

由图 15 和表 5 可见，移动速度对竖向动应力沿深度分布的影响明显，对深层土体竖向动应力影响尤其显著。主起落架移动速度 80 m/s 时，两种机型在深层土体产生的附加动应力可达 20 m/s 时的 2 倍左右，空

客 A380-800 飞机的荷载影响深度达到静力荷载作用下的 1.67 倍。在道基深度 1.2 m 处，文献[3]中 A380-800 飞机引起的竖向附加应力为 37 kPa，飞机移速 60 m/s 时在相同深度处引起的竖向动应力最大值为 57.4 kPa，是静力下的 1.55 倍。可见飞机移动速度对竖向动应力以及道面的长期累积沉降的影响不可忽视，采用静力分析方法将低估附加动应力水平和荷载影响深度，导致实际累积沉降大于预测值。由于空客 A380-800 主起落架的机轮数量大于波音 B747-400，前者的荷载影响深度是后者的 1.1 倍。

4.3 道基动应力时程和路径

图 16 给出不同移速下单轮荷载和两种飞机主起落架轮组荷载作用下距道基顶面 1.2 m 处竖向正应力的时程曲线。从图中可知，单轮荷载土体竖向正应力峰值为 7.20 kPa，B747-400 和 A380-800 飞机主起落架荷载作用下土体正应力峰值为 52.17, 57.40 kPa，是单轮时的 7.25 倍和 7.97 倍。由图 16 还可以看出，轮组移速对浅层土体竖向动应力影响小。与单轮移动荷载作用相似，轮组作用前方土体竖向正应力为拉应力，并且随着移速增加而不断增大。

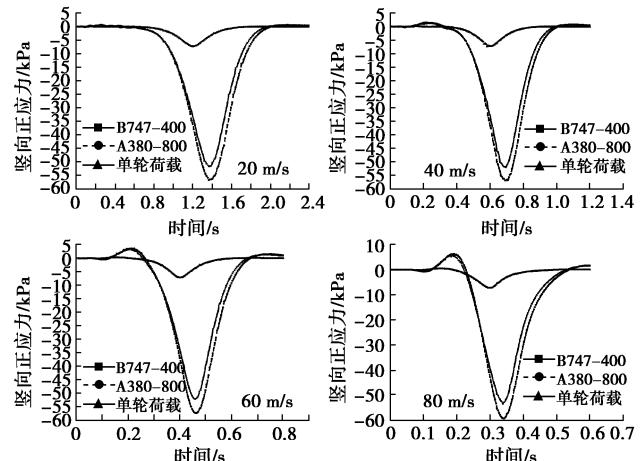


图 16 不同移速下单轮和轮组作用时道基中动应力时程

Fig. 16 Time-history curves of dynamic stress in subgrade under single wheel and wheel groups with different speeds

图 17, 18 给出 B747-400 和 A380-800 飞机不同移速下道基土层 1.2 m 深度处纵向竖直面内，在 B, C 轴线处的动应力路径。与单轮移动荷载作用下道基土体动应力路径相比可知，两种机型主起落架轮组移动荷载引起的土体动应力路径与单轮移动荷载相似，呈带“犄角”的蛋形，且也随移动速度的增加呈逆时针转动。不同的是，受机轮动力叠加作用影响，动应力路径没有单轮时光滑。

5 道面结构对道基动应力响应影响

飞机跑道道面结构可分为刚性道面和柔性道面，

本节分析道面结构形式对道基土体动应力响应的影响。限于篇幅仅列出波音 B747-400 飞机、移动速度 60 m/s 时道基土体动应力响应。

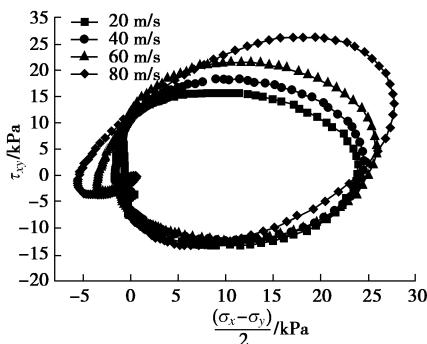


图 17 B747-400 飞机作用时道基动应力路径

Fig. 17 Dynamic stress paths of subgrade under loads of B747-400 aircraft

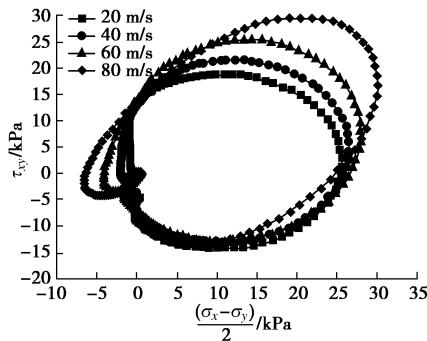


图 18 A380-800 飞机作用时道基动应力路径

Fig. 18 Dynamic stress paths of subgrade under loads of A380-800 aircraft

图 19, 20 分别给出柔性道面道基土层 1.2 m 深度处各轴线对应位置土体竖向正应力时程曲线和竖向正应力峰值横向分布图。对比刚性道面结果可知, 柔性道面条件下, 道基浅层土体最大竖向应力仍然出现在 B 轴线附近, 与刚性道面相同, 但竖向应力峰值达到 78.07 kPa, 是刚性道面的 1.5 倍。随着深度的增加, 道面结构形式对土体竖向动应力的影响逐渐减小。

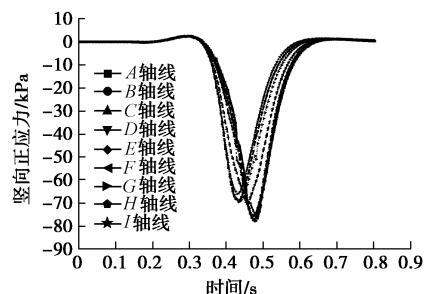


图 19 柔性道面道基 1.2 m 深度处土体竖向动应力时程曲线

Fig. 19 Time-history curves of dynamic stress of flexible pavements in subgrade soil at depth of 1.2 m

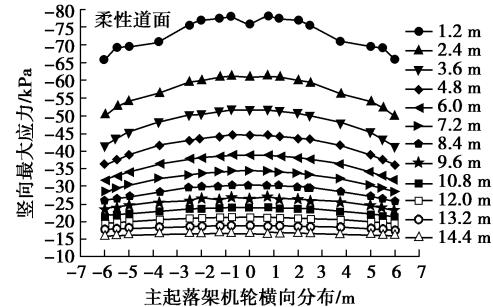


图 20 柔性道面道基土体最大竖向应力横向分布图

Fig. 20 Transverse distribution of maximum vertical stress in subgrade soil under flexible pavements

图 21 给出 B747-400 飞机刚性道面板和柔性道面板竖向正应力峰值随深度变化图。从图中可知, 浅层道基土体在 1.2 m 深度处刚性道面板竖向最大正应力为 52.17 kPa, 柔性道面板竖向最大正应力为 78.07 kPa, 较刚性道面大约 50%, 而深层道基中的差别相对较小为 11.28%。刚性道面板和柔性道面板下荷载影响深度分别为 10.59, 11.63 m, 相差约 10%。

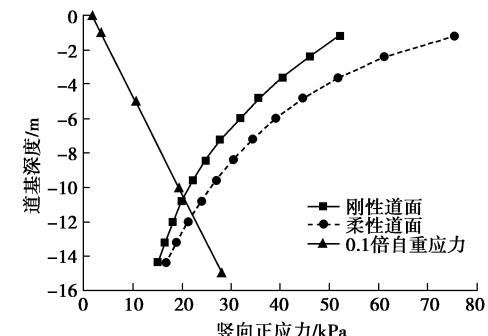


图 21 不同道面结构形式竖向动应力随深度变化

Fig. 21 Dynamic vertical stress with depth under different kinds of pavements

图 22 给出刚性道面和柔性道面两种道面结构形式下道基 1.2 m 深度处土体纵向竖直面内动应力路径。由图可知柔性道面下的动应力路径与刚性道面的动应力路径形状相似, 都是带有“犄角”的蛋形。

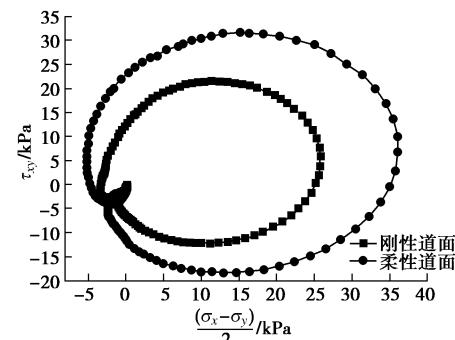


图 22 不同道面结构形式道基动应力路径

Fig. 22 Dynamic stress paths of subgrade with different kinds of pavements

综上可知, 柔性道面结构跑道道基中动力响应和荷载影响深度都要比刚性道面结构时大, 更容易引起飞机跑道沉降和差异沉降, 影响跑道的适航性。

6 结 论

本文采用移动荷载作用下机场跑道动力响应分析半解析有限元法, 基于叠加原理对比分析了飞机主起落架轮组移动荷载作用下道基土体动应力响应规律, 得出以下 4 点结论。

(1) B747-400 和 A380-800 客机主起落架移动荷载作用下道基浅层土体竖向正应力呈倒锅底型分布, 竖向正应力可达 60 kPa, 荷载影响深度达 13 m。

(2) 主起落架机轮分布对浅层道基土体竖向正应力影响较大, 对深层土体影响不明显, 荷载影响深度取决于主起落架分担的荷载。

(3) 飞机移动速度对浅层道基土体竖向应力分布影响较小, 但对深层土体影响较明显, 当飞机滑行速度为 60~80 m/s 时, 荷载影响深度是静力分析时的 1.5~1.7 倍, 采用静力分析方法将低估飞机移动荷载的影响深度, 以及道面的沉降和差异沉降。

(4) 采用柔性道面结构时, 跑道土体竖向正应力和荷载影响深度都较刚性道面结构时明显增加。其中浅层土体竖向正应力幅值增加约 50%, 荷载影响深度增加约 10%。

参 考 文 献:

- [1] 张献民, 薛华鑫, 董倩, 等. 飞机跑道荷载响应深度变化规律[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(4): 427~432. (ZHANG Xian-min, XUE Hua-xin, DONG Qian, et al. Influencing depth under aircraft loads of runway[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(4): 427~432. (in Chinese))
- [2] 张献民, 董倩, 吕耀志. 飞机主起落架构型对道面力学响应的影响[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(4): 675~681. (ZHANG Xian-min, DONG Qian, LÜ Yao-zhi. Mechanical responses of pavement under aircrafts with different main landing gears[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(4): 675~681. (in Chinese))
- [3] 张献民, 刘小兰, 董倩. 大型飞机 A380-800 在既有跑道起降的适应性研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(9): 1812~1818. (ZHANG Xian-min, LIU Xiao-lan, DONG Qian. Study on the landing adaptability of A380-800 aircraft load based on the existing pavement[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(9): 1812~1818. (in Chinese))
- [4] 凌建明, 刘文, 赵鸿铎. 大型军用飞机多轮荷载作用下水泥混凝土道面的结构响应[J]. 土木工程学报, 2007, 40(4): 60~65. (LING Jian-ming, LIU Wen, ZHAO Hong-duo. Mechanical responses of rigid airport pavement to multiple-gear military aircraft loadings[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(4): 60~65. (in Chinese))
- [5] 戈润华, 凌建明. 飞机荷载作用下道面地基附加应力特征[J]. 同济大学学报, 2001, 29(3): 288~293. (GUO Run-hua, LING Jian-ming. Additional stresses of pavement subgrade resulted from aircraft loads[J]. Journal of Tongji University, 2001, 29(3): 288~293. (in Chinese))
- [6] 蔡迎春, 郑元勋, 刘忠玉, 等. 飞机荷载作用下粉砂土路基动力响应研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2863~2868. (CAI Ying-chun, ZHENG Yuan-xun, LIU Zhong-yu, et al. Study of dynamic response of silty sand subgrade loaded by airplane[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2863~2868. (in Chinese))
- [7] MARSHALL K G, THOMPSON R. Assessing damage to airport pavement structures due to complex gear loads[J]. Journal of Transportation Engineering, 2006, 132(11): 888~897.
- [8] 凌道盛, 张凡, 赵云, 等. 飞机荷载作用下非均匀道基动力响应分析[J]. 土木工程学报, 2017(2): 97~109. (LING Dao-sheng, ZHANG Fan, ZHAO Yun, et al. Dynamic response in inhomogeneous subgrade subjected to moving aircraft load[J]. China Civil Engineering Journal, 2017(2): 97~109. (in Chinese))
- [9] HUANG Y H. Finite element analysis of slabs on elastic solid[J]. Journal of Transportation Engineering, 1974, 100(2): 403~416.
- [10] HAMMONS M I. Advanced pavement design: finite element modeling for rigid pavement joints report II: model development[R]. Washington DC: Federal Aviation Administration, US Department of Transportaion, 1998.
- [11] 郑飞, 翁兴中. 飞机荷载下水泥混凝土道面板应力计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(4): 8~15. (ZHENG Fei, WENG Xing-zhong. Calculating methods of stress for cement concrete pavementslab under plane loads[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(4): 8~15. (in Chinese))
- [12] 姚炳卿. 考虑接缝传荷能力的机场刚性道面板的有限元分析方法[J]. 土木工程学报, 1993, 26(3): 22~31. (YAO Bing-qing. Analysis of airport rigid pavement slab considering load transfer capacity of joint by finite element[J].)

- China Civil Engineering Journal, 1993, **26**(3): 22 - 31. (in Chinese))
- [13] 陈新法, 干 钢. 飞机跑道动土压试验研究[J]. 工程力学, 1997, **14**(增刊): 540 - 545. (CHEN Xin-fa, GAN Gang. Experimental study on earth pressure of aircraft runway[J]. Engineering Mechanics, 1997, **14**(S0): 540 - 545. (in Chinese))
- [14] 蔡袁强, 刘新峰, 郭 林, 等. 飞机荷载作用下超载预压软土地基的长期沉降[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, **47**(7): 1157 - 1163. (CAI Yuan-qiang, LIU Xin-feng, GUO Lin, et al. Long-term settlement of surcharge preloading foundation in soft clay area induced by aircraft loads[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2013, **47**(7): 1157 - 1163. (in Chinese))
- [15] 王广德, 韩黎明, 柴震林, 等. 飞机动荷载作用下场道地基沉降[J]. 地下空间与工程学报, 2013, **9**(4): 939 - 945. (WANG Guang-de, HAN Li-ming, CHAI Zhen-lin, et al. The runway subgrade settlement induced by moving aircraft loading[J]. Chinese Journal of Underground Space and
- Engineering, 2013, **9**(4): 939 - 945. (in Chinese))
- [16] 边学成, 陈云敏. 列车移动荷载作用下分层地基响应特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(1): 182 - 189. (BIAN Xue-cheng, CHEN Yun-min. Characteristics of layered ground responses under train moving loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(1): 182 - 189. (in Chinese))
- [17] MH/T5004—2010 民用机场水泥混凝土道面设计规范[S]. 2010. (MHT 5004—2010 Specifications for airport cement concrete pavement design[S]. 2010. (in Chinese))
- [18] 赵成刚, 白 冰. 土力学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 北京交通大学出版社, 2009. (ZHAO Cheng-gang, BAI Bing. Principles of soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, Beijing Jiaotong University Press, 2009. (in Chinese))
- [19] MH 5010—1999 民用机场沥青混凝土道面设计规范[S]. 2000. (MHT 5010—2010 Specifications for asphalt concrete pavement design for civil airport[S]. 2000. (in Chinese))

第十届全国基坑工程研讨会（第1号征文通知）

由中国建筑学会建筑施工分会基坑工程专业委员会主办, 兰州理工大学承办的“第十届全国基坑工程研讨会”将于2018年9月在甘肃省兰州市召开。

主办单位: 中国建筑学会建筑施工分会基坑工程专业委员会

承办单位: 兰州理工大学

协办单位(排名不分先后): 中铁西北科学研究院; 兰州大学; 西北民族大学; 兰州交通大学; 甘肃土木工程科学研究院; 《岩土工程学报》编辑部; 《岩土力学》编辑部(待增补)

会议主题: ①基坑工程设计理论与实践及其新进展、行业的发展趋势; ②基坑工程施工和监测领域的技术、新工法和新设备; ③基坑工程及特殊岩土层中的地下水问题及控制技术; ④基坑施工对周围环境的影响评估与控制技术; ⑤地铁深基坑工程中的设计、施工与监测技术; ⑥黄土、软弱土等特殊

土地区基坑设计与施工的关键技术; ⑦深基坑工程支护结构与降水相关问题数值模拟研究; ⑧超深基坑工程的设计、施工与监测的关键技术; ⑨基坑工程领域的信息化技术及其应用; ⑩重、大、特基坑工程的典型案例和基坑工程事故分析。

重要日期安排: ①2018年4月30日前提供论文电子版一份, 发送至邮jikenghy2018@163.com。②论文将组织学术委员会专家评审, 录用通知及修改意见将在2018年5月31日前通知作者。③作者根据修改意见和排版要求定稿, 于2018年6月20日前将修改稿和修改说明电子版发到会议组委会。

会议秘书处联系地址: 甘肃省兰州市七里河区兰工坪路287号, 兰州理工大学土木工程学院(730050)。联系人: 周勇 13119308411, 叶帅华13893624445, 韦正德13639330876, 杨校辉 15095338032。会议论文提交电子邮箱: jikenghy2018@163.com。

(第十届全国基坑工程研讨会会务组 供稿)