

大型飞机荷载作用下 SEA 道面结构响应分析

于俐婷, 蔡良才, 刘军忠, 王观虎, 张铎耀

(空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038)

摘要 利用 Bisar 及 ANSYS 建立新型环氧沥青混凝土道面(SEA)结构模型,通过分析 A380-800 飞机主起落架构造及多项荷载参数,对飞机荷载作用下 SEA 机场道面面层应力、应变及弯沉等结构响应进行分析,并拟合 Bisar 三阶差值三维弯沉图。结果表明,A380 飞机荷载作用在 SEA 道面上时,A380 飞机主起落架前六轮主要承受载荷,应力应变分布较为均匀,出现双峰值现象;后四轮纵向应力应变较横向大,易出现应力集中现象。大型飞机荷载作用于 SEA 环氧沥青混凝土道面弯沉值较小,相比普通 SAA 沥青道面,SEA 沥青混凝土道面具有较好的路面力学效应。

关键词 SEA 机场道面;A380-800 飞机;结构响应;ANSYS;Bisar

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.06.004

中图分类号 V212 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)06-0022-05

An Analysis of Structural Response for a Large Aircraft on SEA Pavement

YU Liting, CAI Liangcai, LIU Junzhong, WANG Guanhu, ZHANG Duoyao

(Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: By utilizing the new epoxy asphalt concrete pavement (SEA) structure model with the soft Bisar and ANSYS, the main gear configuration and multiple load parameters are analyzed. In the analysis, the influence of the stress and strain and the deflection on surface course pavement are not only calculated, but also the inflection three-dimensional interpolation picture fitted by Bisar. When the A380 aircraft is acting on the SEA pavement, the results show that the six wheels in front of main landing gear bear load mainly and the stress and strain distribute uniformity with double peak phenomena. But for the four wheels in rear, the stress and strain on the direction of Y are more than X with concentration phenomena. In addition, a large aircraft like A380 aircraft acting on the epoxy asphalt concrete pavement(SEA) has lesser deflection, having better mechanical effect compared with the normal asphalt concrete pavement (SAA).

Key words: SAE pavement;A380-800airport;structural response; ANSYS; Bisar

空客 A380-800 飞机(简称 A380)作为大型飞机的代表,最大起飞重量相比于一般通用民航飞机增长 41.09%,主起落架构型较复杂^[1]。且目前沥

青混凝土道面应用于很多国际大型民用机场,而我国机场主要采用水泥混凝土道面,为进一步与国际接轨,分析 A380 荷载作用于沥青混凝土道面的结

收稿日期: 2017-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(51578540)

作者简介: 于俐婷(1995—),女,浙江嘉兴人,硕士生,主要从事机场规划与勘测研究。E-mail:yukiytl@163.com

引用格式: 于俐婷,蔡良才,刘军忠,等. 大型飞机荷载作用下 SEA 道面结构响应分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(6): 22-26. YU Liting, CAI Liangcai, LIU Junzhong, et al. An Analysis of Structural Response for a Large Aircraft on SEA Pavement[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(6): 22-26.

构响应具有一定意义。

张献民等通过数值计算论证大型飞机 A380 在适应于 B747-400 飞机设计机型跑道起降的适应性,并且通过数值建模研究了多轮叠加效应下 A380 飞机作用于机场道面的响应深度^[1-2];刘子钰和赵鸿铎通过有限元建模分析了 A380 飞机多轮荷载组合作用下复合道面的结构响应^[3];凌建明等利用有限元模型分析了军用飞机在不同荷载组合作用下道面的应力和位移变化^[4];芮润华和凌建明利用数值计算方法分析了刚性道面和柔性道面的附加应力^[5];滕力鹏等分析了飞机荷载作用于水泥混凝土道面的响应深度^[6]。但是目前对于大型飞机作用于新型环氧沥青混凝土道面(SEA)的结构响应研究较少。

1 道路模型及荷载参数

1.1 SEA 机场道面结构

机场柔性道面设计通常采用 SMA13 型沥青混凝土(沥青玛蹄脂碎石混合物)作为机场道面的上面层,采用 AC20 型沥青混凝土作为机场道面的中面层和下面层,从而构成机场道面结构,这种设计可使机场道面具有良好的耐磨损性、修复简便性以及稳定性等。

当前机场沥青道面主要病害为轮辙^[4],结合有关研究资料,轮辙主要发生在道面中面层,占车辙总量的 42%~60%,中面层材料对路面抗车辙能力有较大影响。新型环氧沥青材料抗车辙性、水稳定性、耐疲劳等性能较好,能够增强道面的抗轮辙性能。因而本文考虑将新型环氧沥青混凝土 EAC20 取代传统机场道面 SAA 结构中 AC20 型沥青混凝土作为机场道面的中面层,构成 SEA 机场道面结构^[4],见表 1。

表 1 SEA 机场道面参数

Tab. 1 Parameters of SEA airport pavement

层位	材料类型	弹性模量/MPa	泊松比	厚度/mm	密度/(kg·m ⁻³)
上面层	SMA13	620	0.3	50	2 400
中面层	EAC20	1 250	0.3	65	2 400
下面层	AC20F	717	0.3	65	2 400
上基层	ATB25	1 000	0.3	100	2 300
中基层	CTB	1 500	0.2	200	2 200
下基层	CTB	1500	0.2	200	2 200
土基	SG	40	0.4		1 800

1.2 飞机荷载及起落架构型参数

1.2.1 单轮荷载

A380 主起落架上一个机轮的静载 P 即为设计荷载^[7],按式(1)计算:

$$P = \frac{GK_z}{MN} \quad (1)$$

式中: G 为飞机的最大起飞重量; K_z 为主起落架荷载分配系数,一般取值 0.90~0.95,由于 A380 起落架结构较为复杂,在此处为简化计算, K_z 均采用统一数值; M 为主起落架个数; N 为一个主起落架上的轮数;

按照《民用机场水泥混凝土道面设计规范》(MH5004-2010)中规定方法,对飞机轮胎接地面积进行简化换算,以面积等代原则将机轮接地面积转化为矩形。

飞机轮印简化按式(2)计算:

$$\begin{cases} L = 35.55 \times (P_t/q)^{1/2} \\ W = 26.24 \times (P_t/q)^{1/2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: L 和 W 分别为换算过后矩形轮印的长度和宽度,mm; P_t 为飞机主起落架单轮轮载(本文采用平均分配),kN; q 为胎压,MPa。

1.2.2 起落架构型及换算

飞机起降及滑行时,荷载由起落架传递至机场道面,飞机以最大起飞重量荷载作用于机场道面时,对道面影响最不利,除此之外,起落架构型也将影响飞机荷载对机场道面的作用方式。

A380 主起落架构型包含双轴双轮和三轴双轮 2 种形式,采用全起落架布载形式,根据式(2)可得到 A380 主起落架构型换算后的等效构型见图 1。

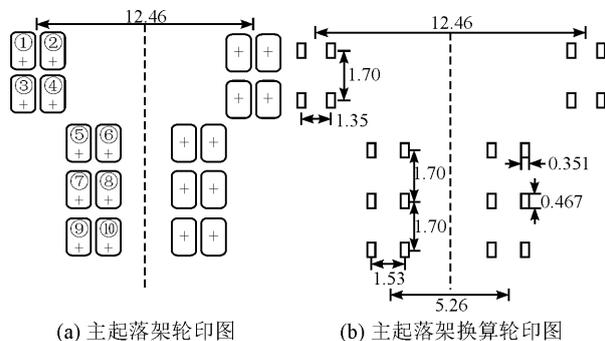


图 1 A380 轮印相关图示(单位:m)

Fig. 1 Related diagram of landing gear print of A380(unit:m)

综上所述可得 A380 起落架构型和荷载有关计算参数:最大起飞重量 5 650 kN;主起落架 4 个;轮数 4/6;主起落架构型,双轴(三轴)双轮;主起落架横向间距,5.26 m/12.46 m;主起落架纵向间距 1.7 m;主起落架轮距,1.53 m/1.35 m;主起落架荷载分配系数 0.951;主起落架单轮荷载 268.66 kN;轮压 1.5 MPa;轮印面积 0.167 m²;轮印长度 0.476 m;轮印宽度 0.351 m。

2 计算模型建立

Bisar 计算模型在等代换算后得到输入轮印半径为 0.230 6 m,竖向荷载应力 1.608 MPa。由于软件内置荷载-应力、荷载-半径、应力-半径 3 种荷

载输入模式,为使计算结果更精确,分别在3种荷载模式下,依照表1设定的道面相关参数进行模拟分析。

参考相关资料,多数机场跑道宽45 m,由于飞机主起落架荷载在纵向(平行滑行方向)的显著影响范围为15 m,超过15 m后对计算结果影响甚微^[3],SEA机场道面基层与面层总厚度为68 cm。因此选取模型宽度45 m,纵向15 m,土基厚度932 cm,总厚度10 m。确定SEA机场道面有限元模型尺寸参数为45 m×15 m×10 m(垂直滑行方向×平行滑行方向×竖向,ANSYS利用局部坐标系),见图2。

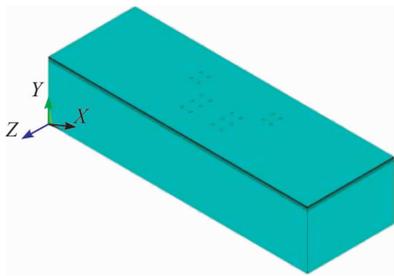


图2 SEA机场道面ANSYS模型

Fig. 2 ANSYS model of SEA airport pavement

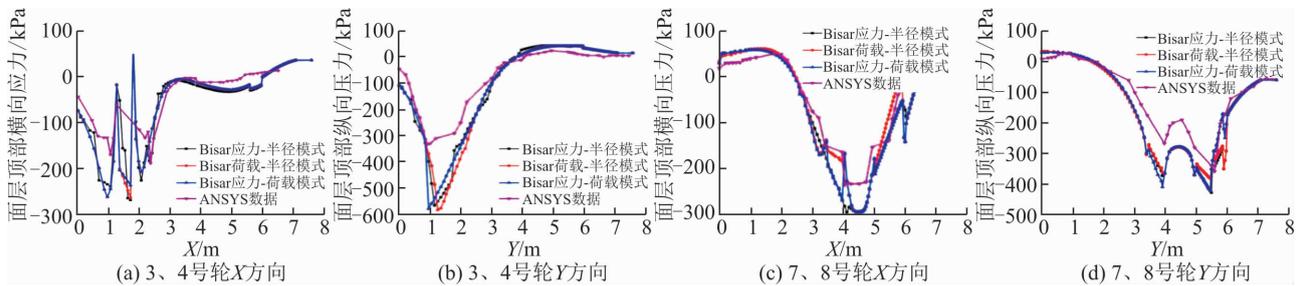


图3 应力值对比

Fig. 3 Comparison diagram of stress

如图3所示,2种软件应力计算结果较接近,但ANSYS计算结果值较Bisar计算结果值偏小,Bisar 3种荷载模式下计算结果值相差较小,应力最大值大致相等,应力峰值数值见表2。

表2 应力峰值表

Tab. 2 Form of stress peak

方向	软件	3,4号机轮		7,8号机轮	
		位置 X /m	应力值 /kPa	位置 X /m	应力值 /kPa
横向	Bisar	1.70	-268.73	4.41	-296.80
	ANSYS	2.35	-187.85	4.25	-234.46
纵向	Bisar	1.35	-535.42	3.90	-383.67
			5.48	-352.90	
	ANSYS	1.25	-393.11	3.96	-268.31
			5.58	-360.77	

分析图3及表2可得:

1)3,4号机轮处道面横断面作用以Y方向应力为

模型整体选用8节点SOLID45单元建立三维实体结构模型,每个节点有3方向自由度。整体模型依照表2中SEA机场道面参数分为8层,层与层之间利用布尔运算GLUE粘合,各层之间完全连续接触。上面层、中面层、下面层及上基层有限元网格尺寸划分为0.15 m,中基层及下基层为0.25 m,土基网格尺寸划分为0.5 m。模型整体底面施加全约束,平行于飞机滑行方向施加全约束,轮印处施加压力。

3 道面结构响应分析

利用Bisar及ANSYS软件数值模拟并分析A380静态荷载作用下机场道面结构响应变化规律。选图1中3、4、7及8号轮横向中轴处道面横断面,分析机场道面结构应力、应变及表面弯沉。

3.1 应力响应分析

应力响应结果见图3,图3(a)、(b)为3、4号轮横向中轴处的道面横断面X、Y方向应力值对比,图(c)、(d)为7、8号轮横向中轴处的道面横断面X、Y方向应力值对比。

主,7、8号机轮处道面横断面X、Y方向应力分布均匀。

2)3、4号机轮横向中轴处道面横断面Y方向应力较大,表现为单峰值最大值,存在应力集中现象。

3)7、8号机轮横向中轴处道面横断面X方向表现为单峰值最大值,Y方向应力出现明显双峰值现象。

4)3、4、7、8号机轮横向中轴处道面横断面应力值峰值均出现于轮载下方,同一软件计算下X方向应力峰值较Y方向应力峰值小,3、4号机轮横向中轴处道面横断面X方向应力峰值相比7、8号机轮处道面横断面X方向应力峰值低,Y方向应力峰值高约30%。

3.2 应变响应分析

应变响应见图4,(a)、(b)为3、4号轮横向中轴处道面横断面X(Y)方向应变对比,(c)、(d)图为7、8号轮横向中轴处道面横断面X(Y)方向应变对比。

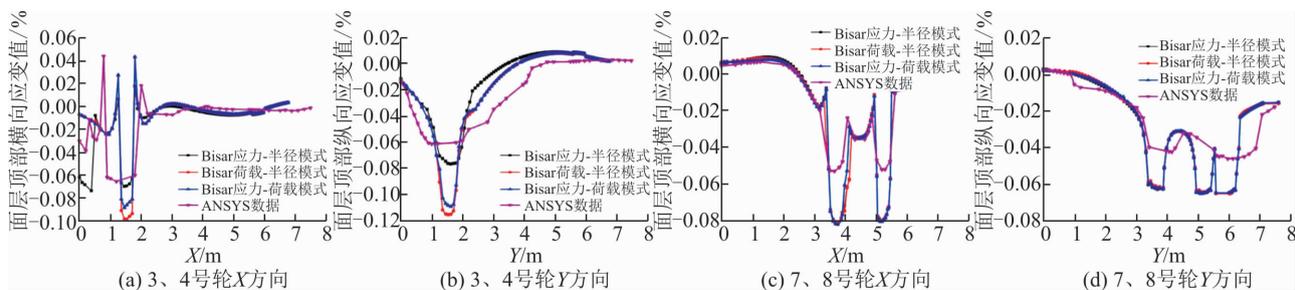


图 4 应变值对比图

Fig. 4 Comparison diagram of strain

如图 4 所示,ANSYS 计算结果值比 Bisar 计算结果值偏小。3、4 号轮横向中轴处道面横断面的应变值在 Bisar 3 种荷载模式计算下相差较大,7、8 号轮横向中轴处道面横断面计算结果值相差较小,应变峰值见表 3。

表 3 应变峰值表

Tab. 3 Form of strain peak

方向	软件	3、4 号机轮		7、8 号机轮	
		位置 X /m	应变值 /%	位置 X /m	应变值 /%
横向	Bisar	1.45	-0.099	3.75	-0.081
	ANSYS	1.35	-0.066	5.17	-0.080
纵向	Bisar	1.53	-0.115	3.64	-0.053
	ANSYS	1.28	-0.061	5.17	-0.052
	Bisar			3.75	-0.063
	ANSYS			5.25	-0.065
	Bisar			3.90	-0.042
	ANSYS			5.43	-0.046

分析图 4 及表 3 可得:

1) 3、4 号机轮处道面横断面 Y 方向应变结果值比 7、8 号机轮处大,其余峰值差距相对较小,X 方向应变峰值均大于 Y 方向应变峰值。

2) 3、4、7、8 号机轮横向中轴处道面横断面应变结果值峰值均出现于轮载下方,7、8 号机轮 X 方向应变表现为双峰值。

3.3 弯沉分析

利用 MATLAB,使用三阶插值方法,分别拟合 Bisar 3 种计算模式所得结果的弯沉响应曲面,见图 5。

如图 5 所示,应力-半径模式下所得曲面无断点,拟合效果最好,其余 2 种模式所得曲面均存在断点处。ANSYS 可直接输出云图,见图 6,前 6 轮处道面弯沉值比后 4 轮大,荷载主要由前 6 轮所在主起落架承担。

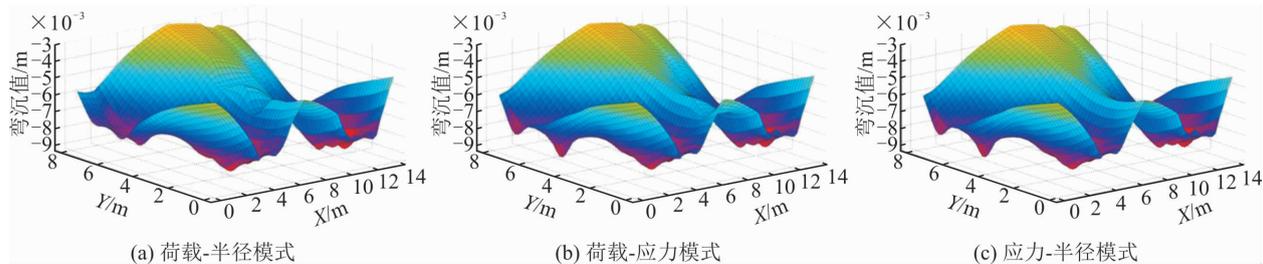


图 5 Bisar 弯沉响应拟合曲面图

Fig. 5 Response fitting surface of Bisar

SEA 机场道面平行滑行方向不超过 15 m,垂直滑行方向约 20 m。Bisar 所得最大弯沉值约为 9 mm,ANSYS 所得最大弯沉值约为 1 mm,可见 SEA 机场道面具有较好的弯沉效应。

4 结论

1) 利用 Bisar 及 ANSYS 软件数值模拟 SEA 机场道面在 A380 荷载作用下的结构响应,结果表明 2 种软件计算值较接近,但 ANSYS 计算结果值较 Bisar 计算结果值偏小。Bisar 3 种荷载模式下应力

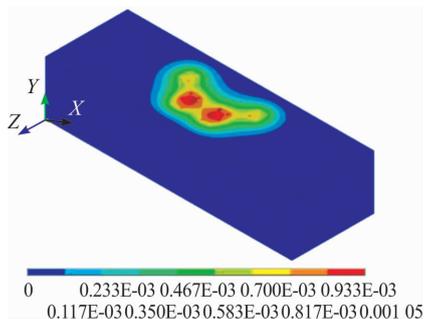


图 6 ANSYS 弯沉图

Fig. 6 Inflection diagram of ANSYS

根据图 5 及图 6 可得,A380 荷载作用范围在

及弯沉计算结果值相差较小,最大值大致相等,而应变计算结果有所偏差。由于 Bisar 软件为数值运算,而 ANSYS 软件为有限元分析,相比较而言 ANSYS 软件单元划分处理与连接、计算方法模拟计算结果较为接近实际情况。

2)计算并分析关键断面的应力效应,总结得出 A380 前六轮承受大部分载荷,道面应力应变分布较为均匀,部分结果曲线出现双峰值现象,后四轮平行滑行方向应力比垂直滑行方向大,易出现应力集中现象。

3)分析应变响应结果得出,应变结果值峰值均出现于轮载下方对应道面。后 4 轮处道面横断面平行滑行方向应变结果值比前 6 轮处大,其余峰值差距相对较小。前六轮垂直滑行方向应变表现为双峰值,垂直滑行方向应变峰值均大于平行滑行方向应变峰值。

4)根据计算弯沉值,拟合 Bisar 弯沉响应曲面并输出 ANSYS 弯沉云图,Bisar 所得最大弯沉值约为 9 mm,ANSYS 所得最大弯沉值约为 1 mm,可见 SEA 机场道面具有较好的弯沉效应,抗轮辙能力较强。分析总体结构响应可得 SEA 环氧沥青混凝土机场道面相比普通 SAA 沥青机场道面具有较好的路面力学效应。

参考文献(References):

- [1] 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 X M, LIU X L, DONG Q. Take-Off and Landing Adaptability of A380-800 Large Aircraft on Existing Pavement[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2016,42(9):1812-1818. (in Chinese)
- [2] 张献民,刘小兰.基于多轮叠加效应的 A380-800 响应深度研究[J].中外公路,2016,36(5):37-41.
ZHANG X M, LIU X L. Response Depth Analysis of A380-800 Aircraft Based on Multi-Wheel Stack Effect [J]. Journal of China and Foreign Highway,2016,36(5):37-41. (in Chinese)
- [3] 刘子钰,赵鸿铎. A380-800 飞机荷载作用下复合道面的结构响应分析[J].西部交通科技,2014(2):69-74.
LIU Z Z, ZHAO H D. Structure Response Analysis of Composite Pavement under A380-800 Aircraft Load [J]. Western China Communication Science & Technology, 2014(2): 69-74. (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 J M, LIU W, ZHAO H D. 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] 芮润华,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 R H, LING J M. Additional Stresses of Pavement Subgrade Resulted from Aircraft Loads[J]. Journal of Tongji University,2001,29(3):288-293. (in Chinese)
- [6] 滕力鹏,柴震林,袁捷,等.机场水泥混凝土道面飞机荷载影响深度分析[J].公路工程,2013,38(3):100-103.
TENG L P, CHAI Z L, YUAN J, et al. Analysis of Influence Depth for Airport Cement Concrete Pavement induced by Aircraft Load[J]. Highway Engineering, 2013, 38(3):100-103. (in Chinese)
- [7] 蔡良才.机场规划设计[M].北京:解放军出版社,2002:30-59.
CAI L C. Airfield Planning and Design [M]. Beijing: People Liberation Army Press, 2002:30-59. (in Chinese)
- [8] 钱振东,孟凡奇,曾靖.高性能沥青混凝土机场道面结构[J].东南大学学报,2015,45(3):575-580.
QIAN Z D, MENG F Q, ZENG J. Airfield Pavement with High Performance Asphalt Concrete[J]. Journal of Southeast University,2015,45(3):575-580. (in Chinese)
- [9] 徐贵,李光元,许巍,等.适应大型飞机的机场半柔性道面的力学数值分析[J].公路工程,2015,40(4):121-134.
XU G, LI G Y, XU W, et al. Mechanics Numerical Analysis of Semi-Flexible Compound Pavement for Large Aircraft[J]. Highway Engineering,2015,40(4):121-134. (in Chinese)
- [10] DEJONG D L, PEUTZ M F G, KORSWAGEN A R. Layered Systems under Normal and Tangential Surface Loads[J]. Computer Program BISAR AMSR, 2006, 30(1): 123-125.
- [11] SAAD B, MITRI H, POOROOSHASB H. Three-Dimensional Analysis of Flexible Conventional Pavement Foundation[J]. Journal of Transportation Engineering,2005,131(6):460-469.
- [12] TSCHEGG E K, EHART R J A, INGRUBER M M. Ingruber, Fracture Behavior of Geosynthetic Inter layers in Road Pavements[J]. Journal of Transportation Engineering,1998,30(5):457-464.
- [13] WABAZA K A. Performance Based Model for Flexible Pavement Structure Overlay Design [J]. Journal of Transportation Engineering, 2005, 125(5): 149-159.
- [14] PLATI C, LOIZOS A. Estimation of In-situ Density and Moisture Content in HMA Pavements Based on GPR Trace Reflection Amplitude Using Different Frequencies [J]. Journal of Applied Geophysics,2013,97:3-10.
- [15] TAN Y Q, WANG H P, MA S J. Quality Control of Asphalt Pavement Compaction Using Fibre Bragg Grating Sensing Technology [J]. Construction and Building Materials,2014,54:53-59.

(编辑:姚树峰)