

水泥道面传力杆裹附混凝土应力响应模拟分析

袁捷^{1,2}, 鲁行², 黄崇伟³, 孙陈², 殷巍²

(1. 民航飞行区设施耐久与运行安全重点实验室, 上海 201804;

2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 3. 上海理工大学交通运输工程系, 上海 200093)

摘要: 通过数值模拟分析了温度和荷载单独和叠加作用条件下的机场道面传力杆裹附混凝土的应力响应. 使用 Westergaard 的温度梯度理论公式对有限元模型进行了准确性验证. 模拟计算结果表明: 在温度单独作用下, 传力杆对道面板的挠曲有约 15% 的约束作用; 荷载单独作用在板角传力杆滑动端上方时, 混凝土内产生的应力最大; 荷载作用下的最大应力仅在传力杆滑动端裹附的混凝土中产生. 负温度梯度不利于降低受荷板的传力杆裹覆混凝土的应力集中, 正温度梯度对其有利.

关键词: 机场道面; 传力杆; 应力响应; 数值模拟; 温度与荷载叠加

中图分类号: U416.216

文献标志码: A

Simulation on the Stress Response of Concrete Around Dowels in Airport Rigid Pavement

YUAN Jie^{1, 2}, LU Hang², HUANG Chongwei³, SUN Chen², YIN Wei²

(1. Key Laboratory of infrastructure durability and operation safety in Airfield of CAAC, Shanghai 201804, China; 2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Department of Transportation Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The stress response of concrete around dowels in airport rigid pavement under the individual action and superposition of temperature gradient and aircraft load was studied with finite element method (FEM) simulation. The model was validated by analytical equations under temperature gradient proposed by Westergaard. The results show that the dowels have approximately 15% of restraint on the deflection of the joint under temperature gradient. When the sole aircraft load is applied on the corner of the slab and above the sliding end of the dowel, the stress in the concrete sees its

maximum. The maximum stress under sole load is only produced in concrete around the sliding end of dowels. Negative gradient is disadvantageous as to the stress concentration of concrete produced by aircraft load, while the positive gradient is advantageous.

Key words: airport pavement; dowel; stress response; numerical simulation; superposition of temperature and load

接缝是水泥道面的重要组成部分, 通常分为胀缝、缩缝、施工缝三种, 主要用以释放温度造成的道面内应力. 我国机场道面设计规范规定在胀缝、部分缩缝和缩缝处的施工缝宜设置传力杆^[1]. 传力杆的设置可以起到增加传荷能力、减小面板最大主应力、缓解路面板脱空和错台的发展速度等作用^[2-5].

在传力杆设计理论体系中, 采用 Friberg 提出的理论公式^[6], 以 Timoshenko 和 Lessels 提出的理论模型为基础^[7]. Timoshenko 将传力杆视为弹性介质中的半无限长悬臂梁, 传力杆受到荷载作用后在弹性介质中产生波浪形的弯曲, 混凝土对传力杆的支承应力与弹性介质的压应变或者传力杆的挠度成比例. 在传力杆的设计方法中, 主要考虑的问题是混凝土对传力杆的支承应力是否在混凝土的承受范围内, 但是此设计方法对传力杆系统是否有效和耐久工作的考虑过于简单, 因为由于传力杆和混凝土的材料性质的差异, 以及接缝结构的特异性, 在传力杆的裹附混凝土中极易出现应力集中, 从而导致结构损伤, 进而使传力杆系统的荷载传递能力逐渐失效^[8], 所以不能仅仅笼统地考虑混凝土的支承应力. 传力杆裹附混凝土的应力集中, 混凝土的塑性变形, 疲劳损伤都是亟待研究的问题.

目前国内外对于道面传力杆和混凝土相互作用

收稿日期: 2018-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(51678444)

第一作者: 袁捷(1971—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为机场场道工程. E-mail: yuanjie@tongji.edu.cn

通信作者: 黄崇伟(1983—), 男, 工学博士, 主要研究方向为道路设计与分析理论, 有轨电车轨下基础.

E-mail: hcwei@126.com



扫码
查看
作者
扩展
介绍

的力学行为方面有一定的研究. 由于试验观测混凝土的损伤规律比较困难, 使用有限元模拟传力杆和混凝土相互作用成为一些研究者的主要研究手段. 诸多学者如蒋应军和戴经梁^[9-11]、Kuo^[12]、Maitra^[13]、刘旭峰^[14]等虽使用 3D 有限元对传力杆和混凝土界面接触应力进行了分析, 但对于界面接触应力的影响因素并没有进行深入研究, 例如温度翘曲的影响, 未考虑到道面温度和荷载叠加作用效果.

本文针对传力杆裹附混凝土细部应力集中这一问题进行深入研究, 重点考察已有研究未涉及的温度这一影响因素, 分析正负温度梯度和三种位置荷载的叠加作用效果, 进而得到温度、三种位置荷载单独作用产生的应力集中分布规律, 以及温度荷载叠加后的应力集中的变化规律.

1 有限元模型

1.1 模型及参数设置

有限元模型的尺寸根据实际机场道面尺寸确定, 如图 1 所示, 模型中材料参数为: 水泥混凝土为热-弹性, 弹性模量为 36 000 MPa, 泊松比为 0.15, 密度为 2 400 kg · m⁻³, 热膨胀系数为 10⁻⁵ °C⁻¹; 基层为纯弹性, 弹性模量为 1 400 MPa, 泊松比为 0.2, 密度为 2 300 kg · m⁻³; 传力杆为纯弹性, 弹性模量为 2 × 10⁵ MPa, 泊松比为 0.3. 模型在混凝土板和传力杆接触的部分使用更密的网格, 如图 1 所示. 在传力杆孔口周围划分规则细密的网格, 如图 2 所示.

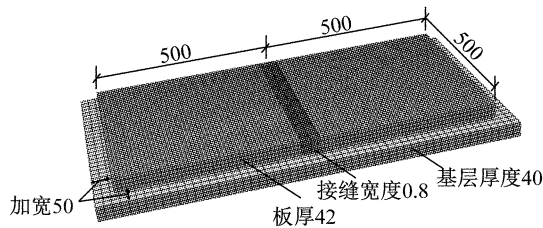


图 1 有限元模型尺寸 (单位: cm)

Fig.1 Dimension of finite element model (unit: cm)

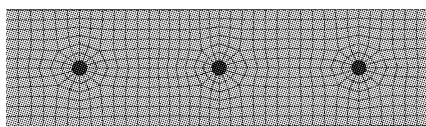


图 2 传力杆周围混凝土网格划分

Fig.2 Meshes of concrete around dowels

实际情况中, 传力杆一端会做防粘处理以保证其在混凝土中可自由滑动, 故模型中传力杆依据实

际情况一端使用 tie 连接, 另一端设置摩擦系数 0.8, 且交错布置. 共设置 14 根传力杆, 其间距为 0.35 m, 按照图 3 中所示编号 1~14, 黑色区域为加载位置. 其中奇数号的传力杆在受荷板中的一端为滑动端, 偶数号的传力杆在受荷板中的一端为固定端, 在非受荷板中则相反. 飞机荷载采用 B-737-800 机型, 主起落架构型为单轴双轮, 轮印长宽为 0.435 m × 0.3 m, 轮胎压力为 1.47 MPa, 横向轮距为 0.86 m. 加载位置考虑如图 3 所示三种位置, 分别为板边中心, 板角传力杆滑动端, 以及板角传力杆固定端. 为使后文叙述简洁, 三种荷载位置使用代码 L-Mid (load-middle), L-CUB (load-corner- unbonded), L-CB (load-corner-bonded).

温度与荷载的叠加方法: 为了使模型和实际情况更加吻合, 分两步进行, 道面板在温度作用下先产生变形, 其后荷载作用在变形后的道面板上.

设板的上部比板的下部温度低时为“负温度梯度”, 板的上部比板的下部温度高时为“正温度梯度”. 根据实际温度测量结果, 沿板竖向的温度梯度约为 20 °C · m⁻¹, 因此上下温度差如果为负温度梯度设为 -8 °C, 如果为正温度梯度则设为 8 °C.

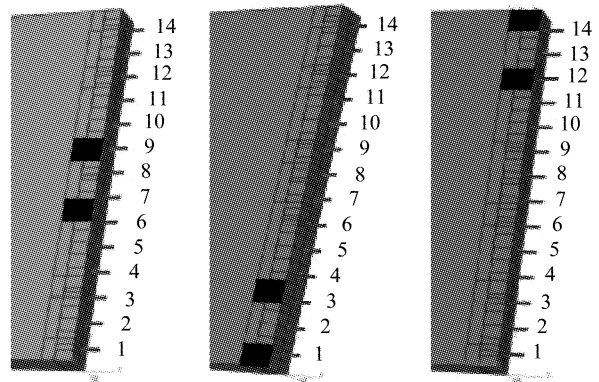


图 3 传力杆布设和编号及加载位置

Fig.3 Distribution and numbering of dowel and loading area

1.2 模型准确性验证

有限元模型的准确性通过将计算结果与 Westergaard 的解析解对比实现. 解析解假设板为半无限板条和无限长板, 板底充分支撑, 温克勒地基, 无板重. Westergaard 解析解沿板横向中心线的板竖向位移值 δ_i 为^[15]:

$$\delta_i = -\delta_0 \frac{2\cos \lambda \cosh \lambda}{\sin^2 \lambda + \sinh^2 \lambda} \left[(-\tan \lambda + \tanh \lambda) \cdot \right]$$

$$\cos \frac{y}{1\sqrt{2}} + (\tan \lambda + \tanh \lambda) \sin \frac{y}{1\sqrt{2}} \sinh \frac{y}{1\sqrt{2}} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{b}{l\sqrt{8}} \quad (2)$$

$$l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)k}} \quad (3)$$

$$\delta_0 = \frac{l^2(1+\nu)\alpha t}{h} \quad (4)$$

式中： E 为板的弹性模量； ν 为泊松比； α 为混凝土的热膨胀系数； t 为板上下温度差(板上-板下)； b 为板的宽度； y 为 y 轴上的距离(与交通方向垂直)； k 为地基反应模量； h 为板厚。

计算负温度梯度为 -8°C 时的板竖向位移，与解析解进行对比。由于解析解未考虑基层的传荷，而使用综合地基反应模量，且不考虑板重，板长无限，故本研究除了计算实际情形(板长 $L=5\text{ m}$ ，混凝土密度 $\rho_s=2\,400\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) 以外，还计算了几乎没有板重和基层重的情形(为避免模型计算不收敛，混凝土密度 ρ_s 和基层密度 ρ_b 取 $1\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)，板长很长即 $L=20\text{ m}$ 的情形，以及无基层板的情形。计算得到位移如图 4 所示(图中 NB 代表无基层)。

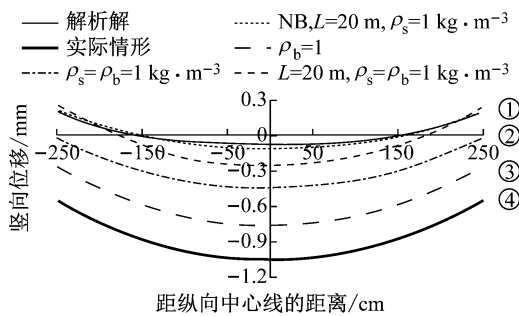


图 4 板的竖向位移计算值与理论值比较

Fig.4 Comparison of computed results and theoretical results on vertical displacement of slab

从图 4 中可知，当无基层，板长很长且密度为 $1\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时，板的竖向位移曲线和理论解几乎完全重合，充分说明了有限元计算的准确性。有基层时 ($L=20\text{ m}$, $\rho_s=\rho_b=1\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) 板的挠曲线在板中位置略有不同。从图 4 中挠曲线① ($L=20\text{ m}$, $\rho_s=\rho_b=1\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) 过渡到④(实际情形)，先后反映了板长、板密度、基层密度的影响。

2 单独作用下的传力杆裹附混凝土应力分析

2.1 温度梯度的单独作用效果

在正负温度梯度作用下，板会产生温度翘曲，以

负温度梯度为例，板的形态见图 5，板边向上翘曲。从图 6 可看出，设置传力杆的板在传力杆的约束作用下挠度降低约 15%，传力杆对翘曲的约束作用是温度梯度下传力杆周围混凝土的应力集中的主要原因。

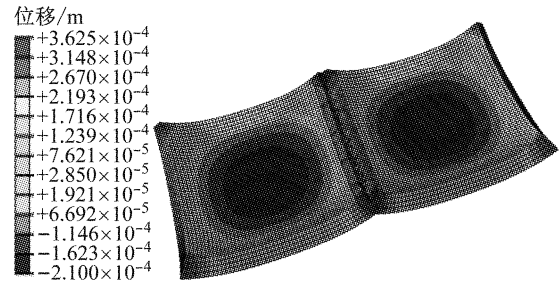


图 5 混凝土板在负温度梯度 -8°C 影响下的翘曲 (放大 2 000 倍后的效果)

Fig.5 Warping of slab under negative temperature gradient -8°C (magnified 2 000 times)

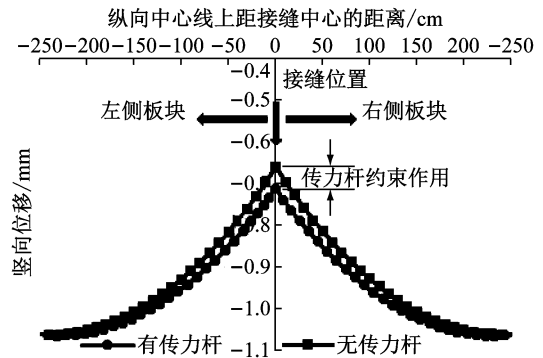


图 6 传力杆对温度翘曲的约束作用(以负温度为例)

Fig.6 Restriction of temperature curling by dowels

由于传力杆的模量和强度均比混凝土大很多，故在传力杆和裹附混凝土的相互作用过程中，混凝土必定先出现破坏或损伤，且最易在孔口处出现应力集中，见图 7b。为了进一步分析传力杆裹附混凝土的应力状态，在传力杆圆周上在圆周上划分角度作为混凝土位置的标定(见图 7c)，角度从孔口底部逆时针方向增大，根据右手定则判定的法向方向指向混凝土外部。按照此角度规定，提取温度梯度作用下最大主应力在传力杆圆周的应力。正负温度梯度引

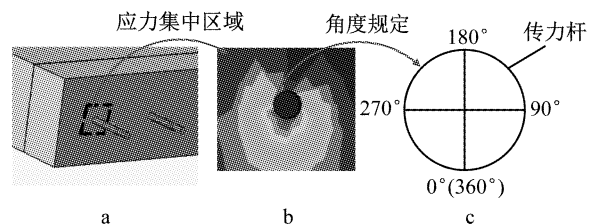


图 7 分析传力杆周围应力集中的角度规定

Fig.7 Definition of angle around dowels

起的最大主应力的最大值出现在 6 号传力杆固定端的圆周上,正温度梯度下出现在 13 号杆固定端,分布如图 8 所示. 根据最大主应力屈服准则,最大主应力超过单轴拉伸屈服强度时,产生屈服. 负温度梯度产生的最大主应力未出现压应力且绝对值较大,正温度梯度产生的最大主应力有压应力,并且绝对值较小. 从而可知负温度梯度更容易引起混凝土的破坏.

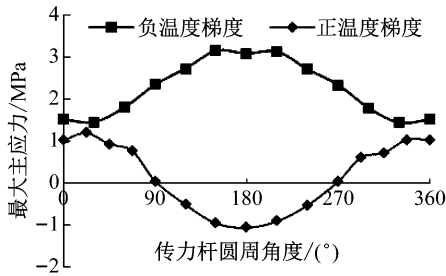


图 8 温度梯度作用下传力杆裹附混凝土最大主应力

Fig.8 The maximum principal stress of concrete around dowel under temperature gradient

2.2 荷载的单独作用效果

在荷载单独作用下,传力杆裹附混凝土的应力如图 9 所示. 从图中可见,在三种荷载单独作用下混凝土会出现明显的应力集中. 可以看到以下规律:作用在板角的荷载引起的混凝土应力集中大于板边荷载引起的应力集中,作用在传力杆滑动端上的荷载引起的混凝土应力集中大于作用在传力杆固定端上的荷载引起的混凝土应力集中,且混凝土的应力集中突出反映于传力杆滑动端裹附的混凝土(表 1).

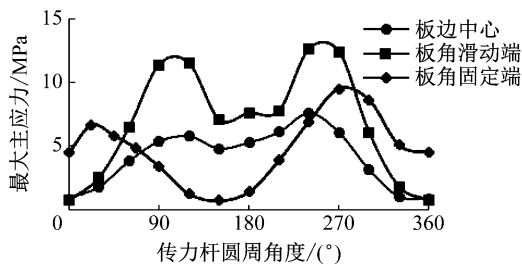


图 9 荷载作用下传力杆裹附混凝土最大主应力

Fig.9 The maximum principal stress of concrete around dowel under aircraft load

表 1 荷载作用下混凝土最大主应力极值位置

Tab.1 Location of greatest maximum principal stress in concrete under aircraft load

荷载作用位置	板边中心	板角滑动端	板角固定端
最大主应力位置	9 号传力杆滑动端	1 号传力杆滑动端	14 号传力杆滑动端

3 温度、荷载叠加作用下的传力杆裹附混凝土应力分析

3.1 温度梯度和板边中心荷载叠加

从图 10 中可以看到温度梯度和板边中心荷载叠加作用对各应力的影响. 可以看到负温度梯度使最大主应力提高约 26.9%,正温度梯度使最大主应力的降低约 37.6%.

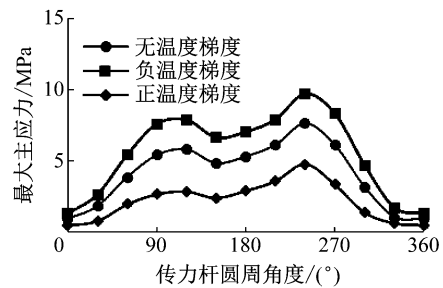


图 10 传力杆裹附混凝土的最大主应力 (L-Mid 和 ΔT 叠加)

Fig.10 The maximum principal stress of concrete around dowel (under superposition of L-Mid and ΔT)

3.2 温度和板角荷载叠加(荷载于传力杆滑动端)

从图 11 中可以看到温度梯度和板角滑动端荷载叠加作用对最大主应力的影响. 负温度梯度使最大主应力升高约 15.2%,正温度梯度使最大主应力降低约 15.3%.

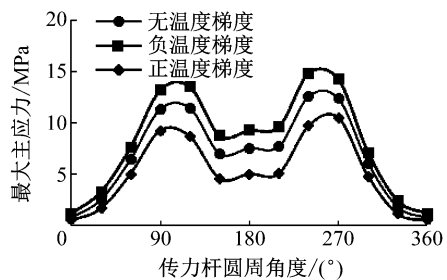


图 11 传力杆裹附混凝土的最大主应力 (L-CUB 和 ΔT 叠加)

Fig.11 The maximum principal stress of concrete around dowel (under superposition of L-CUB and ΔT)

3.3 温度和板角荷载叠加(荷载于传力杆固定端)

从图 12 中可以看到温度梯度和板角固定端荷载叠加作用时最大主应力的变化. 负温度梯度对混凝土的应力集中不利,最大主应力升高 18.5%,正温度梯度使最大主应力降低约 21.0%.

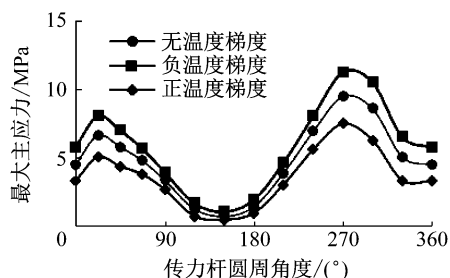


图 12 传力杆裹附混凝土的最大主应力 (L-CB 和 ΔT 叠加)

Fig. 12 The maximum principal stress of concrete around dowel (under superposition of L-CB and ΔT)

4 结论

本研究使用数值模拟分析了温度和荷载单独作用和叠加作用条件下的机场道面接缝处传力杆裹附混凝土的应力响应,主要结论如下:

(1) 使用 Westergaard 的解析解对有限元模型的准确性进行了验证. 数值解与理论值的差异主要来自是否使用实体基层、板长、板重.

(2) 在温度单独作用下,传力杆对温度翘曲有约 15% 的挠度约束作用.

(3) 对于三种荷载位置,作用在板角传力杆滑动端上方时,混凝土内产生应力最大. 混凝土的应力集中突出反映于传力杆滑动端裹附的混凝土.

(4) 温度和荷载叠加时,不论荷载作用在何种位置,负温度梯度均不利于传力杆裹覆混凝土的应力集中,正温度梯度对其有利,因此在温度骤降时行车更容易造成传力杆系统的损坏.

参考文献:

- [1] 中国民用航空局. 民用机场水泥混凝土道面设计规范: MH/T5004—2010[S]. 北京: 中国民用航空局, 2010.
Civil Aviation Administration of China. Specifications for airport cement concrete pavement design: MH/T5004—2010 [S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2010.
- [2] 石春香, 杨群, 郭忠印. 公路隧道水泥路面板底脱空有限元分析[J]. 公路交通科技, 2008, 25(11): 6.
SHI Chunxiang, YANG Qun, GUO Zhongyin. Finite element analysis on void beneath cement concrete pavement slab in highway tunnel [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(11): 6.
- [3] 锁利军, 王秉纲, 陈拴发, 等. 接缝设传力杆水泥混凝土面层结构力学分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2008, 28(3): 30.
SUO Lijun, WANG Binggang, CHEN Shuanfa, et al. Numerical analysis of mechanics of concrete overlay in transverse joint with dowel bars [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2008, 28(3): 30.
- [4] 陈骁, 宋祖科. 旧水泥混凝土路面缩缝加设传力杆的力学效应分析[J]. 工程力学, 2013(1): 339.
CHEN Xiao, SONG Zuke. Mechanics effectiveness and analysis of the contraction joint added dowel bar on old cement concrete pavement [J]. Engineering Mechanics, 2013(1): 339.
- [5] XUE Wang, LI Tiantian. 2014 Numerical mechanical analysis of concrete pavement with dowels in transverse joints [C] // 14th COTA International Conference of Transportation Professionals: Safe, Smart, and Sustainable Multimodal Transportation Systems. Changsha: American Society of Civil Engineers (ASCE), 2014: 1020-1031.
- [6] FRIBERG B F. Design of dowels in transverse joints of concrete pavements [J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1940, 195(1), 1076.
- [7] TIMOSHENKO S, LESSELS J M. Applied elasticity [M]. Pennsylvania: Westinghouse Technical Night School Press, 1925.
- [8] 李洛克. 水泥混凝土路面传力杆的传荷失效机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
LI Luoke. Research on the load transfer failure mechanism for dowel bar in concrete pavement [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [9] 蒋应军. 重载交通水泥混凝土路面材料与结构研究[D]. 西安: 长安大学, 2005.
JIANG Yingjun. Study of concrete pavement materials and structure under heavy-load transportation [D]. Xi'an: Chang'an University, 2005.
- [10] 蒋应军, 戴经梁. 传力杆与混凝土界面的接触应力[J]. 中国公路学报, 2007, 20(2): 29.
JIANG Yingjun, DAI Jingliang. Contact stresses at interfaces between dowels and surrounding concrete [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007(2): 29.
- [11] 蒋应军, 张伟宏. 传力杆对接缝传荷能力及临界荷位处应力的影响[J]. 工程力学, 2009, 26(3): 21.
JIANG Yingjun, ZHANG Weihong. Influence of dowel bars on load transfer efficiency and thermal stresses in cement concrete pavement [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(3): 21.
- [12] KUO C M, HALL K T, DARTER M I. Three-dimensional finite element model for analysis of concrete pavement support [J]. Transportation Research Record, 1995(1505): 119.
- [13] MAITRA S R, REDDY K S, RAMACHANDRA L S. Load transfer characteristics of dowel bar system in jointed concrete pavement [J]. Journal of Transportation Engineering, 2009, 135(11): 813.
- [14] 刘旭峰. 水泥混凝土路面接缝传荷衰变试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
LIU Xufeng. Study on the decay of load transfer on cement concrete pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [15] WESTERGAARD H M. Analysis of stresses in concrete pavements due to variations of temperature [C] // Proceedings of the 6th Annual Meeting. Washington D C: Highway Research Board, 1927: 201-215.