

波音 777 型飞机载荷下机场跑道实测动力响应

阳 栋¹, 王志亮^{1,2}

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 对丹佛国际机场跑道实测道面应变以及弯沉信号进行分析, 研究了波音 777 型飞机在跑道上滑行时跑道的动力响应. 结果表明: 轮载离传感器越近, 道面应变和弯沉测量值越大; 横缝附近处弯沉有 3 个峰值点, 对应飞机的 3 个轮轴, 而纵缝板边中部和板中心处的弯沉呈半正弦形状, 只有 1 个峰值; 在横缝板边加载时, 相邻的未加载板与基层间发生脱空; 地基沉降占总沉降量的主要部分, 3.05~6.10 m 范围内地基发生的非弹性变形非常小, 可将 3.05 m 深度以下的地基视为弹性地基; 板横缝方向的应变表现为达到一定平台后有 3 次波动, 而纵缝方向的应变表现为 2 次拉压转换, 纵缝板边中部轮轴间的应变恢复显著, 易发生疲劳破坏; 板中部由于绑定效应引起中性面的偏移较大, 而板边中性面偏移较小, 故板边处可近似为脱离状态, 板中心应考虑绑定效应. 所得结论对机场跑道工程的优化设计与科学施工具有参考价值.

关键词: 机场跑道; 弯沉; 应变; 动力响应; 绑定效应; 波音 777

中图分类号: U416.216

文献标志码: A

Analysis of Measured Dynamic Response of Airport Runway Under Boeing 777 Loading

YANG Dong¹, WANG Zhiliang^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Pavement strain and deflection of Denver International Airport runway are analyzed to study dynamic response of the airport runway when Boeing 777 taxiing on it. The results show that the closer the wheel loads from the sensor, the greater the strain and deflection. There are three peak points for the deflection curve of location near the transverse joint, corresponding to the aircraft's three axles, while deflection curves for location near central slab and mid-longitudinal joint are semi-sinusoidal shaped, with only one

peak point. When loading at transverse joint edge, void occurs between slab and base for neighboring slab without loading. Settlement of foundation takes up the main part of total settlement amount of pavement, inelastic deformation occurring in depth of 3.05~6.10 m range is very small, which implies that the ground below 3.05 m depth can be regarded as elastic foundation. Transverse strain of slab shows three times fluctuating after reaching a certain level, while longitudinal strain displays twice transforming between tension and compression, and strain recovery between wheel loads at longitudinal joint edge is significant, which means more prone to fatigue damage. Offset of neutral plane due to bonding effect is greater at central slab than at the edge, so the interface between slab and base at the edge can be considered as separated, while bound state is employed at the center. These conclusions are useful as guidance for the optimum design and scientific construction of airport runways.

Key words: airport runway; deflection; strain; dynamic response; bonding effect; Boeing 777

现有的刚性机场跑道设计方法都是将飞机视为静载, 按静力理论进行道面厚度设计, 而实际上飞机从发动、滑行、起飞以及着陆, 其对道面的作用都是动荷载. 由于缺乏对飞机动力荷载的实测资料, 以及道面板-基层-地基体系动力分析的复杂性, 现有规范仍然是将飞机静载乘上一个经验放大因数, 以此来考虑飞机动力作用的影响, 而这种考虑缺乏实测数据的验证^[1]. 随着新式飞机的诞生, 引入了更大的荷载和更复杂的轮载构型, 有必要准确地确定飞机荷载下机场跑道各层的受力和变形, 为机场跑道的合理设计提供依据.

由于进行机场跑道动力响应的现场实测需要昂

收稿日期: 2013-11-04

基金项目: 国家自然科学基金(61179062, 51174145); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20120072110024); 中央高校基本科研业务费专项资金

第一作者: 阳 栋(1982—), 男, 博士生, 主要研究方向为机场跑道. E-mail: hunanyangdong@163.com

通讯作者: 王志亮(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为岩石动力学等. E-mail: cvewzL@tongji.edu.cn

贵的实验成本和耗时,研究人员往往采用数值方法来模拟刚性道面的响应^[2-11].在现场实测方面,许金余^[1]研究了 Q5-II 型和 J8-II 型飞机在试车振动、着陆和滑行时道面板的动弯沉响应,但是没有测量混凝土中的应变以及基层和地基的沉降.美国丹佛国际机场跑道实测项目是第一次比较完整地测量了各种机型滑行时产生的应变、弯沉以及温度和湿度等数据,并建立了公开的数据库^[12],基于此 Fang^[13]对应变与弯沉信号的形状与分布进行了初步分析;Brill^[14]对实测弯沉和应变的峰值进行统计分析,并与三维有限元计算结果进行了对比.迄今为止,尚没有文献针对新式飞机波音 777 作用下道面的系统响应做出全面的分析,本文对丹佛国际机场所有波音 777 作用下实测应变和弯沉数据进行深入处理,在此基础上研究了道面不同位置弯沉和应变的主要特征,对分层竖向位移和地基沉降特征做了详细探讨,同时对板与基层的绑定效应进行了尝试分析.

1 丹佛机场项目及波音 777 简介

美国联邦航空管理局(FAA)1992 年启动了研究波特兰混凝土路面现场响应和性能的项目.随后,在正在建设的丹佛国际机场(DIA)34R 跑道起飞区的几块板上,在道面结构的各层中,安装了 460 个传感器,并建立了广泛的数据采集系统控制传感器和执行数据采集.数据自动采集始于 1995 年,一直延续到 1999 年,包含实时道面响应,实际的飞机交通信息,环境参数和天气条件等.

测试区域由 16 块板组成,每块板长 6.10 m,宽 5.72 m,厚度 0.46 m,板下为 0.20 m 厚的水泥稳定基层和 0.30 m 厚石灰稳定底基层,再往下是淤泥质黏土和基岩,地下水位埋深大于 30 m^[15],可忽略其对道面响应的影响,道面结构及参数如图 1 所示.接缝采用传力杆接缝(doweled joint)、假缝(dummy joint)和绞缝(hinged joint)三种形式,具体布置如图 2 所示.在路面层中埋置了 H 型应变计,测量混凝土路面不同深度的水平应变,线性差分位移传感器测量板和下面层的竖向位移,7 个红外线传感器测量飞机的纵向位置,36 个位置传感器测量轮载的横向位置^[16].当飞机轮载经过两排位置传感器时,会使传感器产生应变,轮载刚好在传感器上方时使该传感器产生最大响应,据此可大致确定飞机的行驶路径.

波音 777 系列飞机的最大起飞质量为 352 441 kg,由于前起落架只承担总质量的 5%,可以忽略其

对跑道的影响,主起落架为三轴双轮型,两轮中心间距 1.40 m,轴中心间距 1.46 m,左右两个起落架中心间距 10.97 m^[17],由于道面板宽 5.72 m,飞机行驶时,两个主起落架位于不同板上.

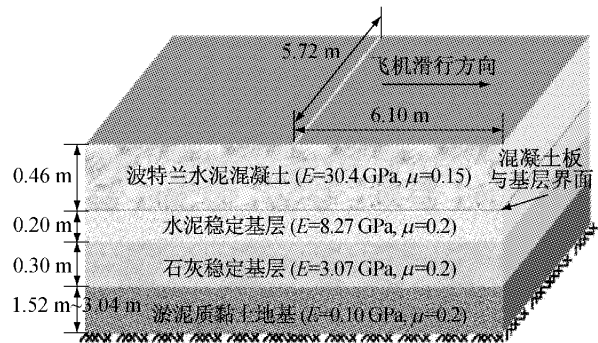


图 1 丹佛机场跑道结构图

Fig.1 Pavement structure of Denver Airport runway

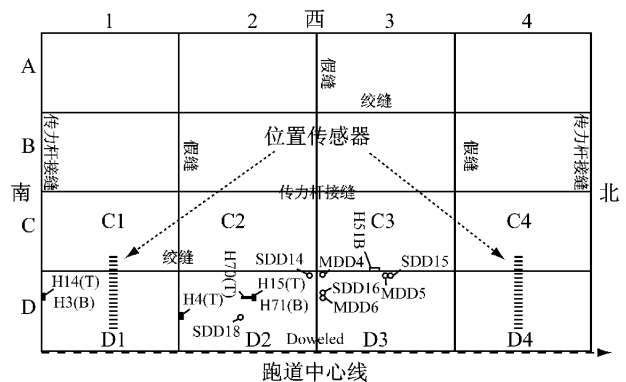


图 2 传感器与接缝分布图

Fig.2 Distribution of sensors and joints

2 数据采集及处理方法

温度、湿度、混凝土静应变(由于温度和湿度变化引起)和接缝位移数据每小时采集 1 次,混凝土动应变和结构层的竖向位移每秒采集 100 次,即时间间隔 0.01 s.低速测量一直持续,而高速测量仅当飞机经过安装传感器路面时才开始.采用红外线传感器触发高速数据采集,确定飞机的速度和位置.当飞机切割红外线触发器发射出的红外线时,所有的动态传感器开始采集,此时间点为实际的 0 点.在飞机轮载到达传感器之前和离开传感器之后,即在信号开始段和结尾段存在两个稳态的信号(其平台值受传感器自身状态和环境等的影响),在数据储存时,并不储存完整的动态弯沉和应变时程数据,而只储存包含峰值记录附近的时程数据,前后截断,并给出截断的时间点.由于受环境影响,在某些条件下,传

感器可能无反应,同时对于离轮载较远的传感器,信噪比小到一定程度时不予存储.数据存储时,把每一次飞机滑行作为一个独立事件,依次赋予事件编号,然后依据事件编号可以查询弯沉和应变信息^[14].

3 结果分析

3.1 道面板弯沉分析

单点弯沉计的锚固点在地下 6.1 m 处,弯沉计埋置在混凝土板厚度的中部,故测量得到的弯沉数据为板中弯沉计相对于锚固点的竖向位移.图 3 和图 4 为特征位置处单点弯沉计在波音 777 不同飞行事件下的典型弯沉时程曲线图.图例中的数字为飞机滑行时的事件编号(即表示不同飞行事件),对每个弯沉计分别给出了 4 个事件的弯沉曲线. SDD14, SDD16, SDD15, SDD18 分别为板角、横缝板边、纵缝板边中部和板中心的弯沉计.从图中可以看出,板角及横缝板边弯沉有 3 个峰值点,对应飞机的 3 个轮轴,而纵缝板边中部和板中心的弯沉呈半正弦形状,只有 1 个峰值,对应中间轮轴,同时板中心弯沉对称性最好.对于某个弯沉计,影响弯沉的主要因素是轮载到传感器的距离,而温度、湿度以及滑行速度影响为次要因素.轮载离传感器越近,弯沉则越大,同时弯沉曲线上的峰值突起越严重,残留变形也越大.

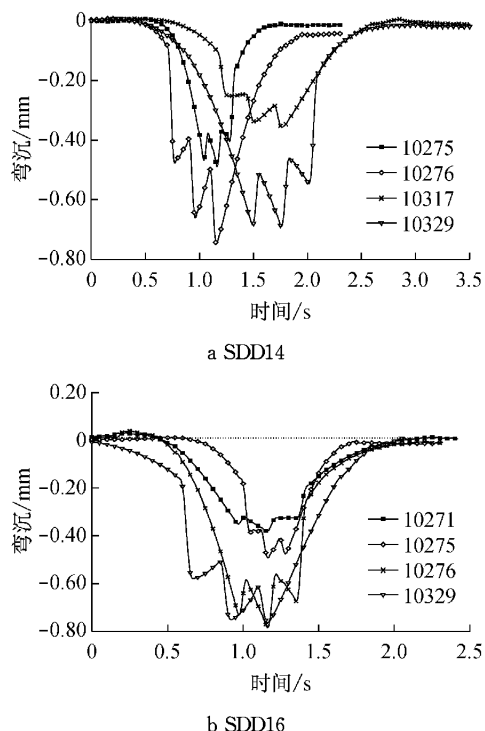


图 3 横缝板边弯沉时程曲线

Fig. 3 Deflection time histories of position near transverse joint edge

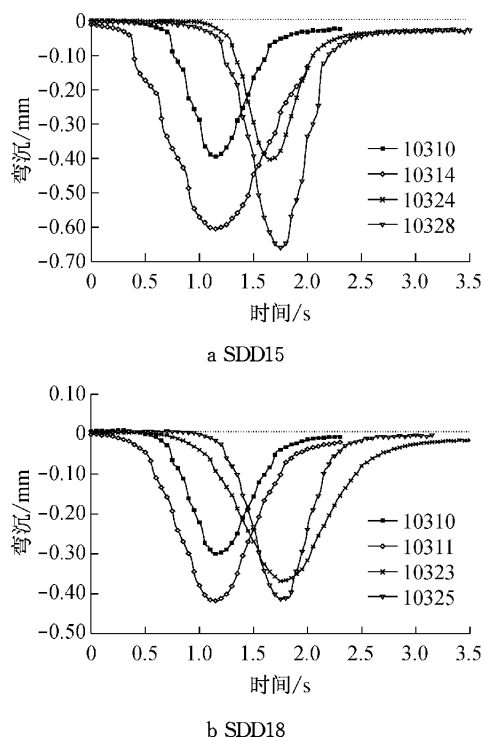


图 4 两横缝中间弯沉计测得的弯沉时程曲线

Fig. 4 Deflection time histories of position in the middle of two neighboring transverse joints

对于 D2-D3 接缝南侧的弯沉计 SDD14,当飞机由南向北行驶时(如图 3a 中 10329 事件),弯沉信号的上升段比较平缓,而下降段比较陡峭.这是因为由南向北行驶时,第一个轮轴在到达 SDD14 前(第一个峰值前),一直位于 D2 板上,行驶中只是轮轴到 SDD14 弯沉计距离减小,造成弯沉逐渐增大,不存在突然加载的情况,如果接缝没有传力作用,则当第一个轮轴到达 SDD14 弯沉计位置时,弯沉值最大,如果接缝的传力系数为 1,则相当于板中加载.当第二个轮轴到达弯沉计时,弯沉值最大.在当第三个轮轴到达传感器后,飞机继续向前行驶则跨过接缝,轮载完全坐落在 D3 板上,此时 D2 板突然卸载,表现为卸载段较大的斜率.当飞机由北向南行驶时(如图 3a 中 10276 事件),则情况完全相反,即弯沉信号开始段由于突然加载斜率较大,结束段斜率较小,最大弯沉发生在第三个轮轴到达弯传感器时,而且弯沉峰值间的差别比由南向北行驶时要大,表明接缝传力时存在方向性.

对于接缝北侧的弯沉计,当飞机由南向北行驶时,弯沉计信号形状与飞机由北向南行驶时,接缝南侧弯沉计信号的形状相似,依此类推.由于 SDD15, SDD18 弯沉计位于两个横缝距离中间,弯沉时程曲线中不会出现隆起.比较不同位置的弯沉可以发现,

板中心的弯沉最小,板角附近的弯沉最大。

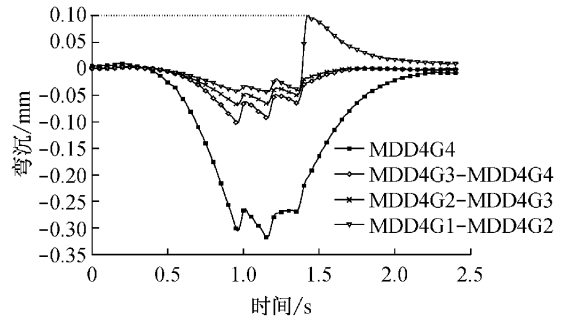
3.2 分层竖向位移分析

每个多点弯沉计有 4 个传感器,对于第 4 个多点弯沉计 MDD4,用 MDD4G1, MDD4G2, MDD4G3, MDD4G4 分别表示第 4 个多点弯沉计的第 1,2,3,4 个传感器,埋置深度分别为 0.23, 0.68, 0.99 和 1.29 m,对应于混凝土中部,石灰稳定基层顶部,地基顶部和地基内部,锚固点在地下 3.05 m 处。MDD4G4 测得的弯沉为传感器 MDD4G4 相对于锚固点的向下位移(即 1.29~3.05 m 范围内的变形),用 MDD4G3-MDD4G4 即得到地基内部 0.99~1.29 m 范围内的变形, MDD4G2-MDD4G3 得到石灰稳定基层(底基层) 0.68~0.99 m 的变形,而 MDD4G1-MDD4G2 得到的是板和水泥稳定基层(顶基层)相对于 0.68 m 深处的竖向变形。图 5 是典型事件的多点弯沉时程图, MDD4 位于板角, MDD5 位于纵缝板边中部。从图中可见,板角处的分层竖向位移都有 3 个峰值,对应于飞机的 3 个轮轴,而纵缝板边中部 MDD5 处的分层竖向位移均为半正弦状,只有 1 个峰值对应中间轮轴。MDD4G4 与锚固点之间的变形远大于其他分层的变形,这验证了飞机行驶时,地基沉降占总沉降量的主要部分。在横缝板边多点弯沉计 MDD4G1 处,出现向上的变形,这是因为当飞机轮载跨过接缝完全落在 D2 板上时, D3 板不直接受力,接缝处基层受压向下运动, MDD4 所在 D3 板与基层在横缝处发生脱空,而两横缝中间的弯沉计 MDD5,不会出现板与基层的脱离,板和石灰稳定基层之间的竖向变形非常小。

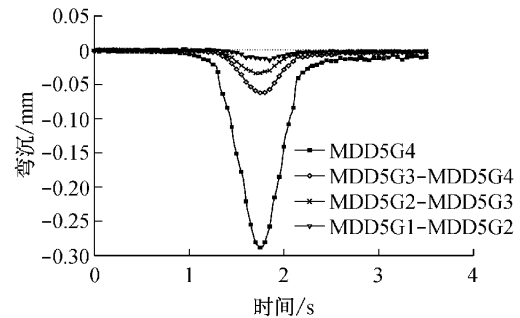
3.3 地基沉降分析

图 6 为埋设在混凝土板中,相邻位置处的单点弯沉计和多点弯沉计信号时程对比图。图例中包含事件编号和传感器编号,如 10324SDD15 表示在 10324 事件时, SDD15 的测量信号。由于 SDD15 的锚固点在 6.1 m,而 MDD5G1 的锚固点在 3.05 m,故 SDD15 的弯沉大于 MDD5G1,其差值为 3.05~6.10 m 地基的变形;同时 SDD15 信号的时间宽度略大于 MDD5G1,两个弯沉的残留变形非常接近,故认为 3.05~6.10 m 范围内地基没有发生非弹性变形,可将 3.05 m 深度以下地基视为弹性地基,在有限元计算时,用温克尔地基代替。由图 6b 可以看出,当行车路径靠近板边弯沉计时,轮轴到达前板产生隆起,表现为水平线上位移,而且多点弯沉计 MDD6G1 的隆起略大于 SDD16。SDD16 和 MDD6G1 的残留变形较小(2%以内), SDD15 和 MDD5G1 的残留变形较

大,能达到 8%。



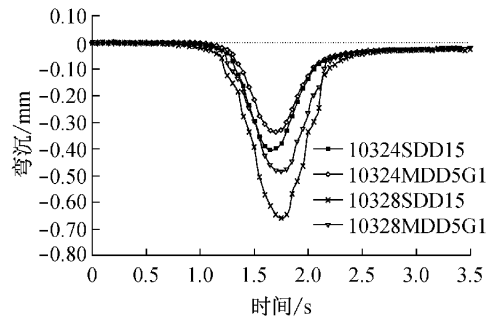
a 10271 事件 MDD4



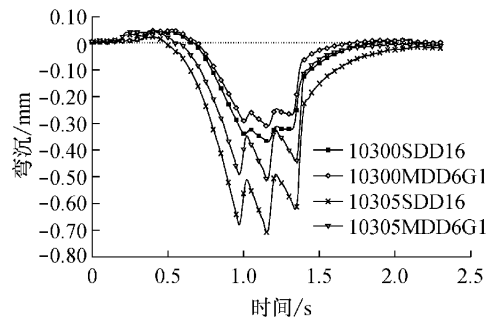
b 10320 事件 MDD5

图 5 分层竖向变形图

Fig.5 Vertical deformation of different layers



a SDD15 与 MDD5G1 对比



b SDD16 与 MDD6G1 对比

图 6 临近位置处单点和多点弯沉计信号对比

Fig.6 Comparison of signals of single and multiple deflection meters in a nearby region

3.4 动态应变数据分析

图 7 为不同位置应变计测得的应变时程图。其

中 HB4T 位于横缝板边中部, HB15T 位于板中部. 应变计长度方向与横缝平行, 在应变的起始段和结束段没有反向应变, 当顶部应变计受压时, 有 3 个峰值与轮轴对应. 对于板中顶部应变计 HB15T, 当顶部为拉应变时, 应变信号呈半正弦形状. 此种情况表示应变计在弯沉盆之外, 板在弯沉盆范围内向下弯曲, 顶部受压; 而在弯沉盆之外, 板向上弯曲, 从而顶部水平受拉. HB51B 和 HB70T 为长度方向与纵缝平行的应变计, 分别位于纵缝板边中部和板中. 其中 HB51B 为底部应变计, 应变信号表现为压—拉—压变换状态, 轮轴到达时受拉; 而 HB70T 为顶部应变

计, 表现为拉—压—拉变换, 轮轴到达时受压, 这样相当于增大了循环荷载的应力范围. 同时当轮载在 HB51B 附近时, 轮轴间的应变回复量非常大, 飞机经过时, 相当于 3 次加载循环, 增加了应力循环次数, 而对于与横缝平行的应变计, 轮载经过时, 应变维持在一定水平然后波动. 所以 HB51B 应变计附近 (纵缝板边中部) 最容易发生疲劳破坏, 这也解释了裂缝经常从纵缝板边中部开始的原因. 板边应变计 (HB4T, HB51B) 的峰值突起比板中 (HB15T, HB70T) 明显, 而且横缝板边应变最大, 板中应变最小, 横缝方向的应变大于纵缝方向的应变.

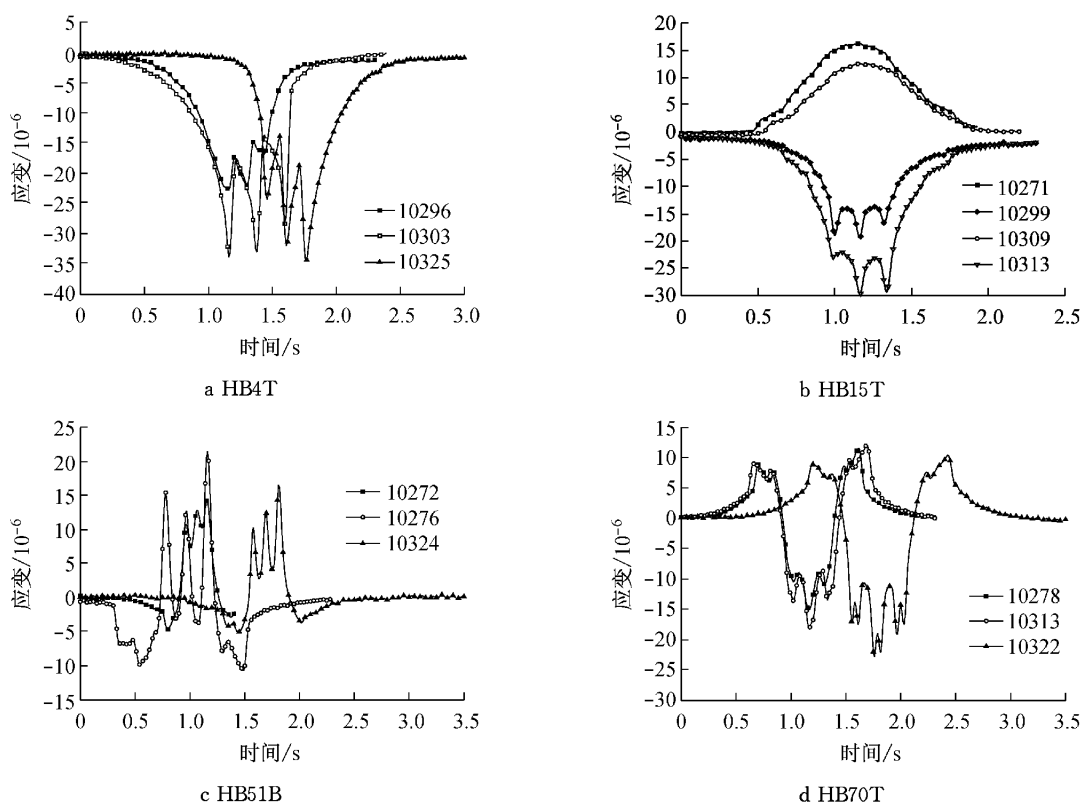


图7 不同位置处应变时程图

Fig.7 Strain time histories of different positions

3.5 界面绑定效应分析

板和基层之间不存在物理上的绑定, 也不存在黏聚力. 如果板与基层界面处于完全脱离状态, 那么板顶面和底面的应变绝对值应该相等. 于是, 可以通过比较板顶面和底面的应变值来估计板与基层的绑定程度. 板上部和下部应变计距离板顶面和底面的距离不同, 因此, 采用修正方法用测量的应变外推板顶面和底面的应变, 然后进行比较. 假定板内应变呈线性分布, 采用下面公式计算板顶面和底面的修正峰值应变:

$$\epsilon_1 = (\epsilon_B - \epsilon_T) / (d_B - d_T) \quad (1)$$

$$\epsilon_{RB} = \epsilon_T + (h_p - d_T) \epsilon_1 \quad (2)$$

$$\epsilon_{RT} = \epsilon_T - d_T \epsilon_1 \quad (3)$$

式中: ϵ_1 表示单位板深度的应变变化值; d_T, d_B 分别表示板上部和下部应变计到表面的距离; ϵ_T, ϵ_B 分别表示板上部和下部应变计测量的峰值应变; $\epsilon_{RT}, \epsilon_{RB}$ 分别表示经过修正计算得到板顶面和底面的峰值应变; h_p 表示混凝土的深度 (如图 8).

为了评估绑定效应, 此处采用板中性面 (应变为 0) 相对于中平面 (板的一半厚度 h_0) 的偏移率 e 来进行定量分析, 其中中性面位置 d_0 的计算公式为

$$d_0 = -\epsilon_T / \epsilon_1 + d_T \quad (5)$$

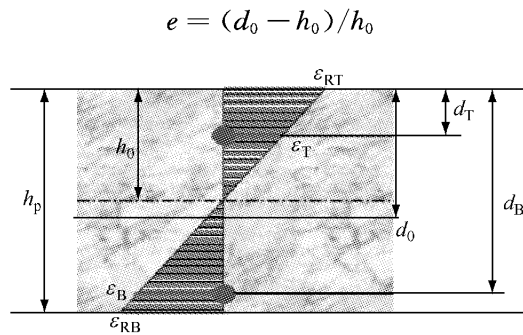
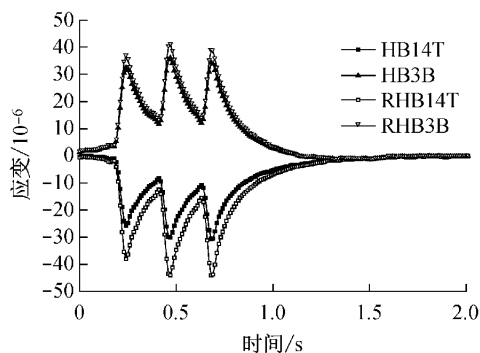


图 8 道面应变分布示意图

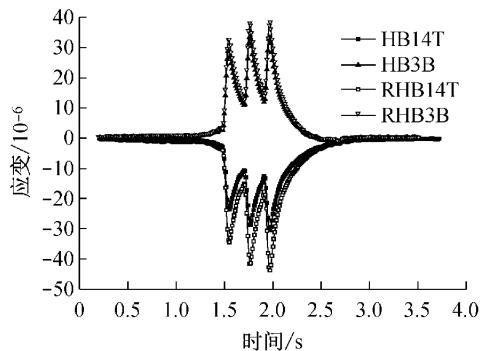
Fig.8 Distribution of pavement strain

3.5.1 板边部位

图 9 表示由板上部和下部应变计测得的应变信号以及根据公式线性推算得到的表面应变时程图。其中 HB14T, HB3B 分别表示板上部、下部应变计测量的应变, RHB14T, RHB3B 分别表示经过修正得到的板顶面和底面应变。从图中可以看出,板顶面应变跟上部应变相差比较大,表面的应变信号峰值更大。故比较不同位置的应变时,不能用应变计测量的信号直接比较,而需要经过换算得到表面的应变再行比较。



a 10209 事件



b 10320 事件

图 9 板边应变计 HB14T 和 HB3B 测量的应变时程图

Fig.9 Strain time histories recorded by strain gages HB14T and HB3B at slab edge

表 1 列出了由 HB14T 和 HB3B 计算得到的两

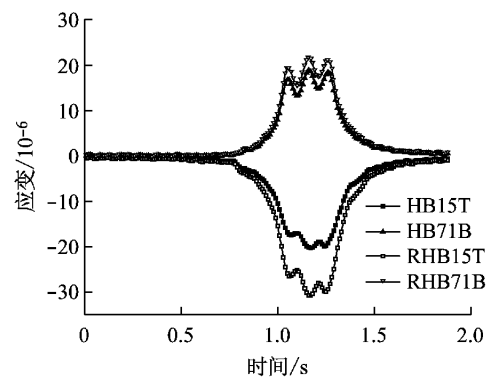
个典型飞行事件中 3 个不同轮轴到达时中性面的位置及偏移率,在板边时,无论是假缝、绞缝还是传力杆接缝,绑定效应引起的中性面偏移率都小于 8%。

表 1 横缝板边(HB14T 处)由绑定效应引起的中性面偏移
Tab.1 Offset of neutral surface caused by bonding effect at slab edge(HB14T location)

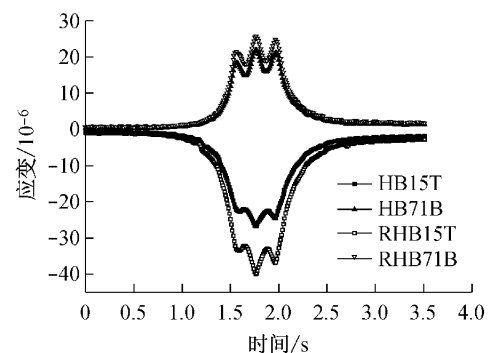
事件编号	中性面/m	中平面/m	偏移率
10209	0.227 3	0.223 6	0.016 5
	0.231 9	0.223 6	0.036 9
	0.237 7	0.223 6	0.063 0
10320	0.227 6	0.223 6	0.017 8
	0.233 9	0.223 6	0.046 0
	0.239 6	0.223 6	0.071 5

3.5.2 板中部位

图 10 是板中应变计 HB15T 与 HB71B 测量的板上部和下部应变时程以及修正后得到的表面应变。表 2 为由典型事件计算得到的中性面偏移率。由表 1 和表 2 可知,在板边时绑定效应较小,而板中由于绑定引起的中性面偏移率在 20%左右,因此在跑道设计时必须考虑板中部混凝土与基层间的绑定效应,而板边可以近似认为处于脱离状态。



a 10272 事件



b 10322 事件

图 10 板中应变计 HB15T 和 HB71B 测量的应变时程图

Fig.10 Strain time histories recorded by strain gages HB15T and HB71B in the mid slab

表 2 板中(HB15T 处)由绑定效应引起的中性面偏移
Tab. 2 Offset of neutral surface caused by bonding effect in mid slab(HB15T location)

事件编号	中性面/m	中平面/m	偏移率
10272	0.261 200	0.228 3	0.144
	0.268 000	0.228 3	0.174
	0.269 400	0.228 3	0.180
10322	0.278 105	0.228 3	0.218
	0.278 308	0.228 3	0.219
	0.273 888	0.228 3	0.199

4 结论

(1) 轮载离传感器越近,道面的应变和弯沉越大;横缝板边的弯沉峰值点与轮轴对应,有 3 个峰值,而且具有明显的方向性,而纵缝板边中部和板中心处弯沉呈半正弦形状,只有 1 个峰值,跑道各分层的竖向变形也具有同样的规律. 弯沉盆内板底水平受拉,板顶水平受压,而在弯沉盆外则相反. 横缝板边加载时,临近未加载板与基层发生脱空;地基沉降占总沉降量的主要部分,3.05~6.10 m 范围内地基的非弹性变形非常小.

(2) 当飞机轮轴跨过接缝,由一块板加载到另外一块板时,接缝前方板横缝方向应变信号加载段存在突变,而接缝后方板应变信号的卸载段存在突变,横缝板边处的弯沉信号也有同样的规律. 在弯沉盆内,应变峰值与轮轴对应,板边轮轴间的应变恢复显著,从而轮载引起的峰值更突出. 在板中处应变信号接近于对称,横缝方向的应变表现为达到一定平台后的 3 次波动,而纵缝方向的应变表现为 2 次拉压转换,纵缝板边中部轮轴间的应变恢复显著,更容易发生疲劳破坏.

(3) 板中部由于板和基层绑定效应引起的中性面偏移率在 20% 左右,且受湿度和温度影响较小,绑定效应较稳定;无论何种接缝类型,板边处绑定效应引起的中性面偏移率小于 10%,故板边处可近似为脱离状态,板中心处应考虑绑定效应.

致谢:感谢美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration)和 David R. Brill 博士为本文提供了原始数据.

参考文献:

- [1] 许金余. 机场刚性道面动力分析[M]. 西安:西北工业大学出版社,2002.
XU Jinyu. Dynamic analysis of rigid airport pavement[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2002.
- [2] Vajarasathira K, Muzaffer Y, Edward C T. Aircraft-pavement

- interaction in runway analysis[J]. Journal Structure Engineering, 1984,110(5): 1008.
- [3] 郑小平,王尚文. 机场道面动态响应分析[J]. 航空学报, 1990, 11(3):146.
ZHENG Xiaoping, WANG Shangwen. Dynamic analysis of airport pavement[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1990,11(3): 146.
- [4] Taheri M R, Zaman M M, Alvappillai A. Dynamic response of concrete pavements to moving aircraft[J]. Applied Mathematic Modelling, 1990, 14(11): 562.
- [5] Brill D R, Parsons I D. Three-dimensional finite element analysis in airport pavement[J]. The International Journal of Geomechanics, 2001, 1(3):273.
- [6] Kim S M, Moon C W, McCullough B F. Airport pavement response under moving dynamic aircraft loads[C]//Designing, Constructing, Maintaining, and Financing Today's Airport Projects. Orlando: American Society of Civil Engineers, 2002: 1-10.
- [7] Kim J, Hjelmstad K D. Three-dimensional finite element analysis of doweled joints for airport pavements [R]. Washington D C: Transportation Research Record, 2003.
- [8] Cao C Y, Zhong Y, Sun A. Dynamic response of rigid airport pavements under a moving aircraft load with variable velocities [C]//International Conference on Transportation Engineering 2007. Chengdu: American Society of Civil Engineers, 2007: 192-197.
- [9] 钟阳,曹长勇. 飞机起降过程中机场道面的动力响应[J]. 动力与控制学报, 2008, 6(1): 83.
ZHONG Yang, CAO Changyong. Dynamic response of airport pavement when airplane takes off or lands[J]. Journal of Dynamics and Control, 2008, 6(1): 83.
- [10] Sawant V. Dynamic analysis of rigid pavement with vehicle-pavement interaction[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2009, 10(1): 63.
- [11] 翁兴中,寇雅楠,颜祥程. 飞机滑行作用下水泥混凝土道面板动响应分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(14):79.
WENG Xingzhong, KOU Yanan, YAN Xiangcheng. Dynamic response of cement concrete pavement under aircraft taxiing load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(14): 79.
- [12] Denver international airport (DIA) instrumented pavement database[DB/OL]. [2013-09-08]. <http://www.airporttech.tc.faa.gov/denver/dbbrws/saircraft.asp>
- [13] Fang Y W. Analysis of load responses in PCC airport pavement [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2000,1 (1):1.
- [14] Brill D R. Field verification of a 3d finite element rigid airport pavement model [R]. Washington D C: Federal Aviation Administration, 2000.
- [15] Pottorff T E. Water levels in the Denver Basin bedrock aquifers[R]. Denver: Colorado Division of Water Resources, 2011.
- [16] Dong M Y, Hayhoe G F, Fang Y W. Runway Instrumentation at Denver International Airport: dynamic sensor data processing[C]//Aircraft/Pavement Technology In the Midst of Change. Washington D C: American Society of Civil Engineers, 1997: 363-378.
- [17] Boeing Commercial Airplane Group. 777-200LR/300ER airplane characteristics for airport planning, document D6-58329-2[R]. Chicago: The Boeing Company, 2004.