

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.06.012

## 多机型影响下跑道结构层动态响应分析

蔡靖<sup>1</sup>, 张鑫<sup>1,2</sup>, 李岳<sup>1</sup>

(1. 中国民航大学机场学院, 天津, 300300; 2. 安徽民航机场集团有限公司, 合肥, 230000)

**摘要:** 基于丹佛机场跑道 5 年实测动态响应数据, 分析多机型滑行时道面板边角处的应变和位移特征, 对跑道各结构层多年压缩变形规律进行分析。结果表明, 对于不同起落架构型的飞机, 道面应变峰值与主起落架轮轴数量对应。混凝土道面板动态应变峰值随运营年限增加变化较小, 主要与实测机型有关。对于 B737 机型, 板底受拉应变小于板顶受压应变; 而 B747、B777 机型, 板底受拉应变大于板顶受压应变, 说明大飞机对混凝土道面损伤更为严重。基层动态位移响应在跑道各结构层中是最为敏感的, 压缩变形波动比较剧烈, 压缩率最大; 而垫层、土基压缩变形量和压缩率随运营年限逐渐趋于稳定。因此建议机场跑道在设计 and 施工时, 对板角和板边部位基层进行重点处理。

**关键词:** 多机型; 跑道; 动态响应; 应变; 压缩变形

**中图分类号:** U416.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2020)06-0930-07

## Analysis on Dynamic Response of Runway Structure Layers Under Multiple Aircraft Types' Impact

CAI Jing<sup>1</sup>, ZHANG Xin<sup>1,2</sup>, LI Yue<sup>1</sup>

(1. Airport College, Civil Aviation University of China, Tianjin, 300300, China; 2. Anhui Civil Aviation Airport Group Co. Ltd., Hefei, 230000, China)

**Abstract:** Based on the measured dynamic response data of the runway of Denver International Airport for five years, this paper analyzes the characteristics of strain and displacement at the corner and the edge of pavement under taxiing state of various types of aircraft, and further analyzes the law of compression deformation of the concrete pavement surface in different runway structural layers for many years. The results show that the peak strain of the pavement surface corresponds to the number of main landing gear axles for the aircraft with different landing gears. The dynamic strain peak of the concrete pavement changes little with the increase of the operating period, which is related to the type of aircraft. For the B737 aircraft, the tensile strain at the bottom of the pavement is less than the compressive strain at the top of the pavement, but the tensile strain at the bottom of the pavement is greater than the compressive strain at the top of the pavement for the B747 and B777 aircraft. These indicate that the damage of the concrete pavement caused by large aircraft is more serious. The dynamic response of the base layer is the most sensitive among the structural layers of the runway. The compression deformation fluctuates violently and the compression rate is the largest, while the compression deformation amount and compression rate of the subcrust and foundation tend to be stable with

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金(51808548)资助项目; 天津市科技支撑计划重点(14ZCZDGX00001)资助项目。

**收稿日期:** 2019-05-21; **修订日期:** 2019-12-02

**通信作者:** 蔡靖, 女, 教授, E-mail: caijing75@163.com。

**引用格式:** 蔡靖, 张鑫, 李岳. 多机型影响下跑道结构层动态响应分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(6): 930-936. CAI Jing, ZHANG Xin, LI Yue. Analysis on dynamic response of runway structure layers under multiple aircraft types' impact[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(6): 930-936.

the operating period. Therefore, it is suggested that the corner and edge of the pavement should be mainly treated during the design and construction of airport runway.

**Key words:** multiple aircraft types; runway; dynamic response; strain; compression deformation

预先在机场跑道各结构层埋设大量传感器并构建相应的监测系统是现今对机场跑道开展动力响应实测研究最为直接和有效的方法<sup>[1]</sup>,但这需要在机场建设时投入巨大的人力和物力,因而一直没有得到广泛采用。所以,针对实际飞机滑行状态下跑道各结构层动力响应较为完整的实测资料则较少。其中,Ledbetter针对飞机滑行状态下的道面动态响应进行了监测,但是没有对跑道内部各结构层的弯沉响应进行分析<sup>[2]</sup>;杨斐等依据浦东国际机场跑道地基实测数据,对道面的动态响应进行了数据分析,但缺乏对基层和垫层的实测与分析<sup>[3]</sup>;Fang对美国丹佛机场跑道实测数据进行了初步整理分析<sup>[4]</sup>;Brill基于有限元仿真,对不同机型作用下道面板弯沉与应变变形特征进行了研究,并与美国丹佛国际机场实测数据做了对比分析,但研究过程中没有对道面结构进行优化分析<sup>[5]</sup>;阳栋等通过分析丹佛机场跑道实测数据,研究了B777飞机滑行时跑道动力响应特征<sup>[6]</sup>;王兴涛等分析了波音747飞机滑行时道面不同位置弯沉和应变特征<sup>[7]</sup>;曾岳等详细分析了波音727飞机滑行时跑道动力响应规律<sup>[8]</sup>。以上研究仅分析了单一机型滑行状态下道面动态响应,并未对多种机型下机场跑道多年动态响应进行系统研究。随着仿真分析手段不断发展完善,针对飞机荷载作用下机场跑道动力响应的研究逐渐采用数值分析方法。其中周正峰等建立了机场跑道三维有限元模型,对水泥混凝土道面板接缝传荷能力进行了分析<sup>[9-10]</sup>,Kim等利用三维有限元对道面板接缝传荷等进行了研究<sup>[11]</sup>,凌建明等基于ABAQUS分析了大型军用飞机作用下道面结构响应<sup>[12]</sup>,以往研究主要针对有限元建模、道面板接缝传荷和结构响应,并未将仿真结果与实测进行对比分析,并对跑道各结构层作优化分析。

因此,本文基于美国丹佛国际机场实测数据库,选取了3种具有代表性的机型,在滑行状态下所测得的12万组跑道动态响应数据进行处理,分析跑道各结构层5年位移和应变响应规律,得到实际运行中机场跑道结构动态响应敏感层。进而利用ABAQUS仿真分析软件,基于丹佛机场跑道结构建立16块板三维有限元模型,针对跑道敏感层进行相应的参数优化分析研究。

## 1 丹佛国际机场跑道监测

1992年美国联邦航空管理局(FAA)对正在建设的丹佛国际机场水泥混凝土道面性能及动力响应进行了实测研究,该项目在34R/16L跑道起飞区建立了一个由16块刚性道面板组成的试验区,单块道面板长6.10 m,宽5.72 m,厚0.46 m,跑道结构及其参数如图1所示。试验区埋设了100个H形动态应变计和23个卡尔森应变计用于测量道面应变,50个线性差分位移传感器测量道面各层结构竖向位移,包括锚固在地下6.1 m处的单点位移计(Single-depth deflectometer, SDD)以及锚固在地下3.05 m处的多点位移计(Multiple-depth deflectometer, MDD),具体布置位置如图1,2所示。7个红外线传感器测定飞机纵向位置和36个轮载横向位置传感器测定飞机横向位置。该项目基于上述传感器建立了数据自动采集系统,试验基于多机型滑跑事件采集了1995—1999年5年的数据<sup>[13]</sup>。测试时主要沿着两条滑行路径进行数据采集,路径1是沿着D1—D2—D3—D4板的中部,路径2是沿D1—D2—D3—D4板与C1—C2—C3—C4板的接缝处。本文主要对这两条滑行路径上飞机满载时的传感器动态采集数据(位移和应变)进行分析。测试中只有在滑行路径上的传感器才能提供有效信息,因此根据7个红外传感器提供的飞机速度和位置数据,文中对测试数据进行前期处理,滤除滑行路径之外及距离飞机荷载较远响应较小的传感器采集数据,以此保证飞机荷载施加的有效性。

本文针对公开数据库中实测机型,选取主起落架构型具有代表性的B737(单轴双轮)、B747(双轴双轮)、B777(三轴双轮)作为研究机型对飞机满载实测数据进行分析。

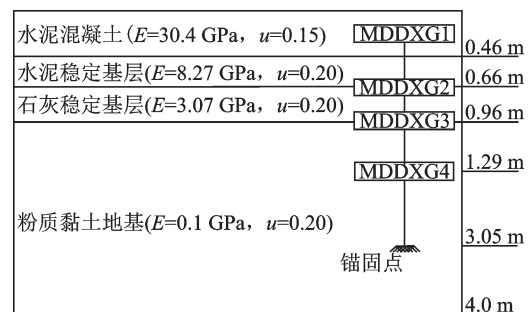


图1 丹佛机场跑道结构

Fig.1 Runway structure of Denver Airport

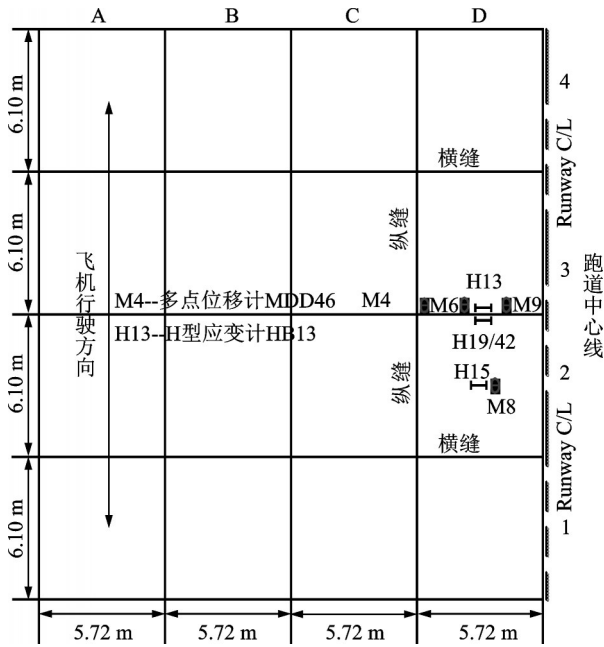


图2 传感器布置

Fig.2 Arrangement of sensors

## 2 3种机型动应变时程曲线分析

### 2.1 3种机型动应变时程曲线特征分析

收集整理美国丹佛机场跑道道面实测应变响应数据。针对传感器采集到的数据情况,以不同机型对应道面板部位选择不同的应变传感器作为分析对象,主要分析板边位置。B737选择同一位置处底部和顶部应变传感器HB19/HB42作为分析对象,B747机型选择HB19,B777机型选择HB13作为分析对象,结果见图3—5。

图3,4为D2板边同一位置板顶和板底应变计HB19/HB42所测得的应变响应时程曲线,图3,4中7438、7891、3915、1918为试验测试工况编号。由图3可知,板顶和板底的应变响应特征呈反对称。在飞机从D2板行驶至D3板传感器正上方时,应变峰值到达拐点,而后急剧增大;当飞机行驶至横缝正上方时,应变达到最大峰值,而后逐渐减小

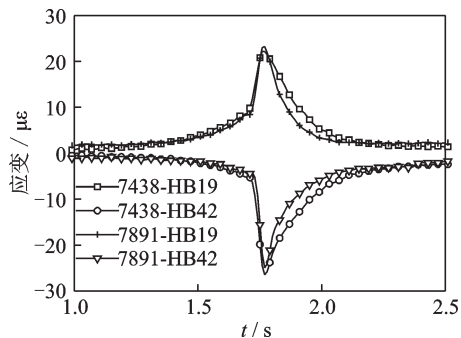


图3 B737板边应变时程响应

Fig.3 Time-history response of the strain of pavement edge (B737)

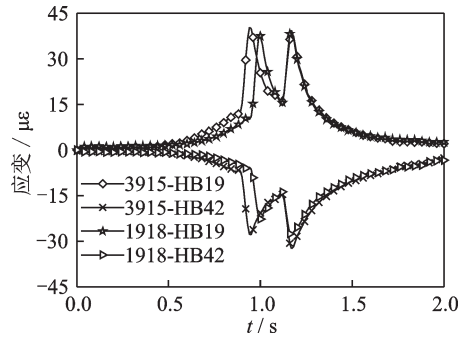


图4 B747板边应变时程响应

Fig.4 Time-history response of the strain of pavement edge (B747)

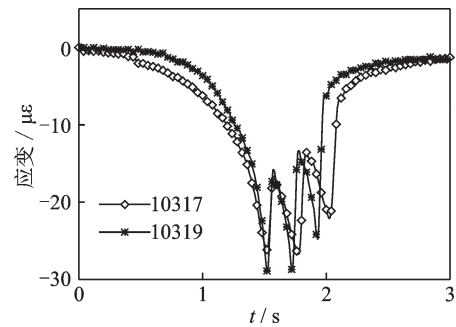


图5 B777板边顶部应变时程响应

Fig.5 Time-history response of the strain at the top of pavement edge (B777)

到0。分析B737机型实测数据可以发现:板顶受压应变均大于板底受拉应变,其中板底的最大拉应变为 $23.2 \mu\epsilon$ ,板顶的最大压应变为 $26.5 \mu\epsilon$ 。通过对比图3—5可以发现:3种机型滑行时,板边顶部和底部动态应变特征基本上一致;主要区别在于B747和B777分别具有2个和3个峰值。这是因为B747和B777机型主起落架构型为双轴和三轴,而B737机型为单轴。对于B747机型,板底受拉应变峰值 $37 \mu\epsilon$ 大于板顶受压应变的峰值 $30 \mu\epsilon$ ,其应变响应特征与B737机型相反。而混凝土的受拉性能远小于受压性能,从而说明B747机型滑行时较B737飞机对道面损伤严重。

### 2.2 多机型动态应变响应峰值分析

基于上述3种机型滑行时道面动态应变响应特征,以应变传感器HB13和HB19采集到的动态应变时程响应曲线上最大值作为峰值对3种机型满载滑行时道面板D2板边实测应变峰值数据进行统计汇总。选取1996—1999年共计4年的实测数据为样本,结果见表1。

从表1可以看出,对于B737机型,从1996—1999年,板边底部峰值应变变化较小,保持在 $20 \mu\epsilon$ ;对于B747机型,板边底部应变峰值变化也较小,基本在 $30 \mu\epsilon$ ;B777机型,板边顶部较为稳

表 1 3种机型板边实测应变峰值统计

Table 1 Statistics of measured peak strain at the edge of pavement of three types of aircraft

年份	机型	不同滑行事件应变峰值/ $\mu\epsilon$					
1996	B737	20.4	22.2	23.0	19.6	23.2	25.2
	B747	40.3	28.2	39.4	35.4	30.6	32.7
	B777	-28.9	-26.8	-28.4	-22.3	-24.5	-27.1
1997	B737	20.9	19.6	23.3	21.4	22.1	23.7
	B747	33.5	32.8	28.6	33.5	29.4	30.1
	B777	-26.3	-30.6	-24.1	-23.8	-25.2	-28.4
1998	B737	21.1	20.5	23.0	22.2	19.3	20.1
	B747	30.9	25.6	21.9	19.6	20.0	30.9
	B777	-28.4	-27.5	-28.2	-23.8	-25.8	-26.7
1999	B737	23.0	20.9	20.1	21.1	22.1	21.6
	B747	28.3	29.1	26.7	30.5	31.3	27.9
	B777	-20.8	-25.1	-24.3	-22.2	-21.9	-26.6

定,约为 25  $\mu\epsilon$ 。但从丹佛机场 1995—1999 年间平均每年 46 万起降架次来看,在跑道运营初期飞机累积作用并没有对混凝土道面力学性能产生较为明显的影响。因此在机场运营初始 5 年内,不宜从应变角度对道面力学状态进行深入分析研究。

### 3 多机型跑道各结构层动态位移响应分析

#### 3.1 多机型弯沉响应动态位移特征分析

根据多点位移计布置位置(图 1),每个多点位移计由 4 个分层位移计组成。在测量过程中由于水泥混凝土道面板自身竖向压缩变形极其微小,因此 MDDXG1 ~ MDDXG2(X 表示多点位移计编号,1、2 为分层位移计编号)所测位移为水泥稳定基层(简称基层)的竖向压缩变形。MDDXG2 ~ MDDXG3、MDDXG3、MDDXG4 依次监测石灰稳定基层(简称垫层)、粉质黏土地基(简称土基)以及部分粉质黏土地基的竖向压缩变形。

##### 3.1.1 B737 机型跑道各结构层动态位移特征分析

依据数据库中 B737 机型所采集到的数据,分别选取板边 MDD9 和板角 MDD4 所测数据进行分析。同时,在综合考虑传感器测点布置、飞机滑行质量以及速度等因素下,优先对位置传感器的实测数据进行分析。选取具有代表性板边、板角的飞机满载实测数据,然后用同一测点的 G1 所测数据减去 G2 所测数据得到基层压缩变形;G2 所测数据减去 G3 所测数据得到垫层压缩变形;G3 所测数据即为土基压缩变形,可得到跑道各结构层位移响应,结果见图 6、7。

从图 6、7 发现:土基的压缩变形量远大于基层

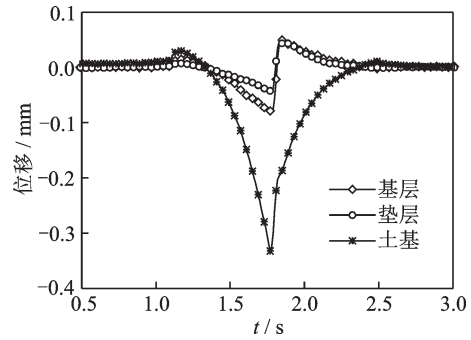


图 6 B737 机型板边各结构层位移响应

Fig.6 Displacement response of different runway structural layers of pavement edge of B737

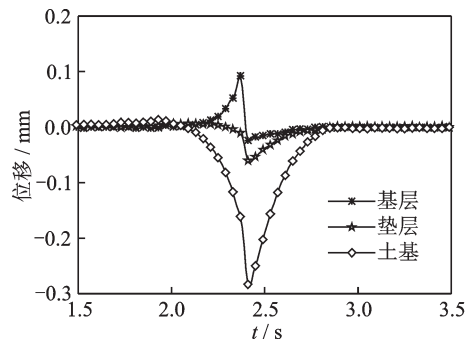


图 7 B737 机型板角各结构层位移响应

Fig.7 Displacement response of different runway structural layers of pavement corner of B737

和垫层,荷载位于板边、板角时其值分别为 0.35 mm 和 0.29 mm,数值占比达到总位移量的 74%。这表明土基压缩变形是造成道面位移响应的主要因素之一。另外在基层和垫层发生竖向压缩变形的同时,还产生了向上的位移,导致了道面板与基层的分离,分离幅度达到 0.1 mm。

##### 3.1.2 B747 机型动态位移特征分析

由于篇幅限制,对于 B747 机型数据分析结果,仅列出板边实测位移分析结果(图 8)。

从图 8 看出,B747 机型作用下基层和垫层压缩变形量增大,分别达到 0.16 mm 和 0.065 mm,且波动更为明显,最大波动值达 0.24 mm;土基变形

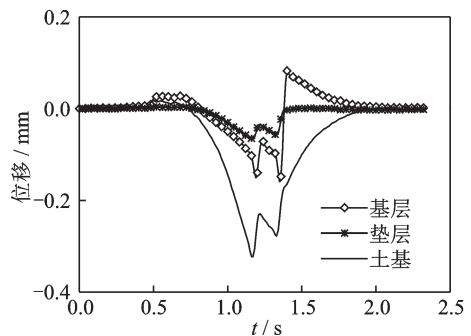


图 8 B747 机型板边各结构层位移响应

Fig.8 Displacement response of different runway structural layers of pavement edge of B747

量为0.323 mm,占道面位移的63.5%。

### 3.1.3 B777机型动态位移特征分析

这里仅对B777机型滑行状态下板角实测跑道动态位移响应进行分析,结果见图9。

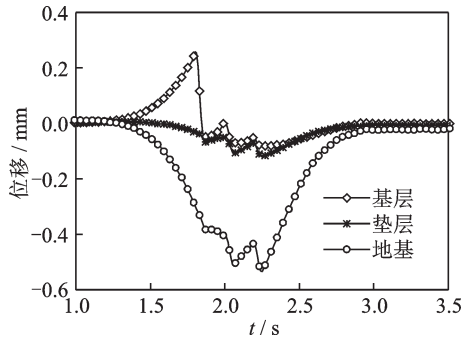


图9 B777机型板角各结构层位移响应

Fig.9 Displacement response of different runway structural layers of pavement corner of B777

由图9可以看出,垫层压缩变形较B737作用下增大,最大值为0.12 mm,基层与道面板之间发生分离的幅度达到0.25 mm,较B737、B747作用下更大。土基变形量最大为0.53 mm,达到道面板总位移的72%。表明起落架构型和荷载大小会影响结构层位移响应特征。

### 3.2 多机型动态位移峰值分析

基于以上对B737机型5年实测数据的筛选处理,对跑道各结构层位移响应曲线的最大值即峰值进行统计分析,结果见表2—4及图10。

从图10可知,从1996—1999年,对于B737机型滑行状态下,板角部位跑道各结构层压缩变形最大,板边其次,板中较小;基层、土基压缩变形波动较大,垫层则较为稳定,在0.1 mm以下;土基压缩变形量在板中和板边部位逐渐减小并趋于稳定,到

表2 板中各结构层位移峰值

Table 2 Peak displacement of each structural layer in the center of pavement

年份	结构层	不同滑行事件位移峰值/mm					
1996	基层	0.010	0.025	0.010	0.010	0.014	0.013
	垫层	0.005	0.009	0.004	0.008	0.008	0.011
	土基	0.112	0.166	0.104	0.208	0.182	0.176
1997	基层	0.030	0.060	0.041	0.028	0.024	0.015
	垫层	0.021	0.022	0.014	0.009	0.011	0.018
	土基	0.193	0.177	0.136	0.109	0.158	0.163
1998	基层	0.033	0.015	0.046	0.013	0.029	0.014
	垫层	0.020	0.009	0.018	0.010	0.024	0.008
	土基	0.115	0.075	0.111	0.114	0.113	0.113
1999	基层	0.012	0.037	0.055	0.023	0.029	0.024
	垫层	0.006	0.031	0.035	0.002	0.019	0.007
	土基	0.102	0.08	0.089	0.061	0.098	0.081

表3 板边各结构层位移峰值

Table 3 Peak displacement of each structural layer in the edge of pavement

年份	结构层	不同滑行事件位移峰值/mm					
1996	基层	0.04	0.05	0.08	0.05	0.04	0.08
	垫层	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06	0.04
	土基	0.32	0.24	0.26	0.26	0.32	0.33
1997	基层	0.08	0.03	0.02	0.02	0.09	0.11
	垫层	0.04	0.03	0.03	0.04	0.02	0.03
	土基	0.25	0.25	0.12	0.21	0.14	0.19
1998	基层	0.12	0.2	0.18	0.10	0.09	0.13
	垫层	0.05	0.04	0.05	0.05	0.03	0.04
	土基	0.17	0.13	0.15	0.14	0.16	0.12
1999	基层	0.12	0.08	0.1	0.11	0.09	0.09
	垫层	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.03
	土基	0.14	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15

表4 板角各结构层位移峰值

Table 4 Peak displacement of each structural layer in the corner of pavement

年份	结构层	不同滑行事件位移峰值/mm					
1996	基层	0.202	0.135	0.037	0.002	0.240	
	垫层	0.050	0.049	0.047	0.032	0.045	
	土基	0.208	0.313	0.258	0.209	0.208	
1997	基层	0.054	0.102	0.009	0.171	0.089	
	垫层	0.049	0.047	0.052	0.054	0.048	
	土基	0.246	0.233	0.305	0.281	0.274	
1998	基层	0.220	0.033	0.025	0.023	0.027	
	垫层	0.048	0.068	0.064	0.056	0.066	
	土基	0.249	0.315	0.288	0.244	0.299	
1999	基层	0.191	0.026	0.022	0.093	0.143	
	垫层	0.075	0.074	0.071	0.093	0.069	
	土基	0.235	0.211	0.278	0.280	0.291	

1999年分别达到0.1 mm和0.15 mm水平,而板角部位压缩量一直保持在0.3 mm左右。

通过表3和表4中实测位移峰值进行加权平均得到各结构层年平均压缩变形,并根据式(1)计算出B737机型作用下跑道各结构层压缩率,结果见表5。

$$\text{结构层压缩率} = \frac{\text{结构层压缩变形量}}{\text{结构层厚度}} \times 1000 \quad (1)$$

从表5可以看出,从1996—1999年,相应部位基层压缩率远大于垫层和土基,且变化幅度较大,其中1998年板边基层压缩率最大达到0.683%。垫层压缩率相对稳定。虽然土基变形量占总位移量是最大的,但压缩率较小,且逐年减小。对于基层、垫层和土基,板角部位压缩率最大。采用同样方法获得B747和B777机型作用下跑道各结构层的压缩率见表6和表7。

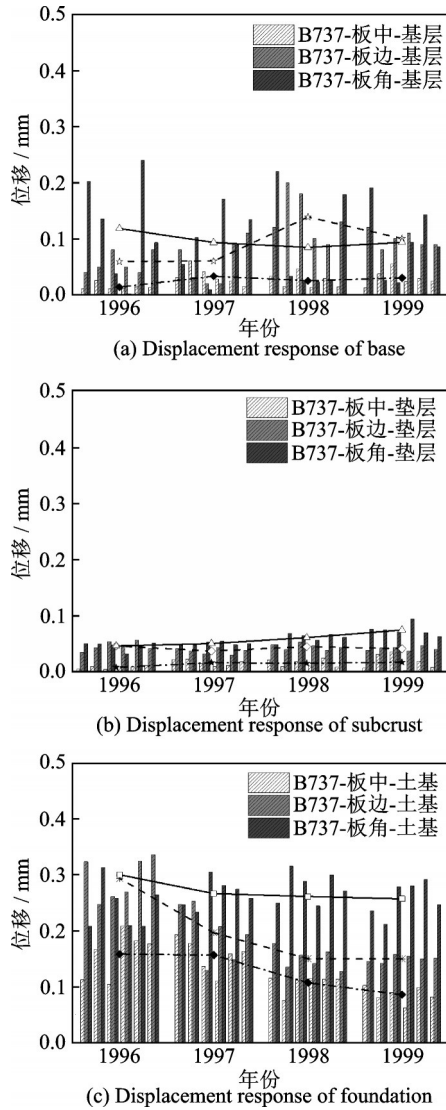


图 10 B737 下跑道各结构 5 年位移峰值变化规律

Fig.10 Variation law of 5 year peak displacement of different structure layers(B737)

表 5 B737 下跑道各结构层压缩率

Table 5 Compression ratio of different structure layers of runway(B737)

年份	位置	基层/‰	垫层/‰	土基/‰
1996	板边	0.28	0.15	0.14
	板角	0.62	0.15	0.10
1997	板边	0.29	0.11	0.10
	板角	0.43	0.25	0.09
1998	板边	0.68	0.14	0.07
	板角	0.33	0.31	0.09
1999	板边	0.49	0.13	0.07
	板角	0.48	0.37	0.08

由表 6 可知,与 B737 相比,B747 滑行状态下,板边和板角部位基层压缩率总体变大,最大增加 50%;相比基层,垫层和土基压缩率则较小,且相对稳定,板角部位压缩率总体大于板边,说明板角是道面最不利部位。

表 6 B747 下跑道各结构层压缩率

Table 6 Compression ratio of different structure layers of runway(B747)

年份	位置	基层/‰	垫层/‰	土基/‰
1996	板边	0.403	0.182	0.156
	板角	0.919	0.208	0.187
1997	板边	0.321	0.166	0.172
	板角	0.546	0.242	0.180
1998	板边	0.333	0.143	0.171
	板角	0.656	0.249	0.189
1999	板边	0.428	0.124	0.156
	板角	0.633	0.332	0.193

表 7 B777 下跑道各结构层压缩率

Table 7 Compression ratio of different structure layers of runway(B777)

年份	部位	基层/‰	垫层/‰	地基/‰
1996	板边	0.48	0.22	0.19
	板角	0.57	0.25	0.23
1997	板边	0.62	0.14	0.19
	板角	0.82	0.19	0.19
1998	板边	0.78	0.13	0.20
	板角	1.11	0.26	0.23
1999	板边	0.86	0.14	0.20
	板角	0.70	0.30	0.25

从表 7 可以看出,对于 B777 机型,从 1996—1999 年,相比 B747,基层压缩率波动增大,最大达到 1.108‰,而垫层和土基压缩率相比基层则较小,保持在 20% 左右,且相对比较稳定。

通过上文对跑道 5 年实测动态响应分析可知,跑道各结构层中基层动态响应波动最为明显,压缩变形最大,土基和垫层则相对比较稳定,且板角动态响应最为显著,板边次之。这与机场跑道实际运营中板角和板边易发生损伤较为相符。从分析结果还可以看出,土基和垫层压缩变形规律不受基层波动较大的影响,因此,土基和垫层的动态响应无法实时反映道面的力学状态。而对于基层而言,由于其与混凝土道面板直接接触,动态响应较为敏感,能够直接反映飞机滑行状态下的道面力学状态,因此基层健康状况与道面状况具有紧密联系。由此可以看出基层对于跑道整体结构性能的重要性。另外,土基作为压缩变形最大的结构层,对跑道道面基顶位移影响很大。

## 4 结 论

(1) 混凝土道面动态应变响应规律总体上一致,对于不同起落架构型的飞机,道面应变峰值与主起落架轮轴数量对应。在 B737 和 B777 飞机荷

载作用下,道面板板顶的压应变大于板底拉应变,而在B747飞机荷载作用下应变效应规律则与之相反。表明B747飞机荷载对混凝土道面板造成的损伤大于B737和B777飞机荷载,进而说明大飞机对混凝土道面损伤更为严重。

(2)在机场刚投入使用的5年里,混凝土道面板动态应变峰值受机场累积起降架次影响较小,主要与实测机型有关。B737机型对道面板应变影响最小,B747其次,B777最大。

(3)道面板边和板角的动态位移响应规律一致,峰值数量对应于主起落架轮轴数量。道面板板角和板边会与基层发生部分分离现象。由于基层位于道面板下方且直接与道面板接触,在直接承担于来自道面的飞机荷载的同时又反作用于道面,因此其位移压缩率在跑道结构层中最大且波动较大;土基位移压缩率是最小的且逐年减小并趋于稳定,垫层居中且其位移压缩率相对稳定。由此可以得出:基层力学性能的优劣直接关系到跑道道面的力学性能状况,直接影响到道面的运行健康状况。另外,作为跑道结构中压缩变形量最大的结构层,土基的位移压缩率虽然最小,但对道面总体的压缩变形的影响是非常大的。据此建议机场跑道在设计 and 施工时对板角和板边部位基层和土基进行着重处理。

#### 参考文献:

- [1] FAA. Denver international airport program database [EB/OL]. (2012-04-03)[2019-10-12]. <http://www.airporttech.tc.faa.gov/Databases/Denver-Instrumentation>.
- [2] LEDBETTER R H. Pavement response to aircraft dynamic loads. Volume III :FAA-RD-74-39-III[R].USA: FAA, 1975.
- [3] 杨斐,杨宇亮,孙立军.飞机起降荷载作用下的场道地基沉降[J].同济大学学报(自然科学版),2008,36(6):744-748.  
YANG Fei, YANG Yuliang, SUN Lijun. Settlement of runway subgrade under moving aircraft loads [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2008, 36(6):744-748.
- [4] FANG Yingwu. Analysis of load responses in PCC airport pavement [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2000, 1(1):1-14.
- [5] BRILL D. R. Three-dimensional finite element analysis in airport pavement design [J]. International Journal of Geomechanics, 2001, 1(3):273-290.
- [6] 阳栋,王志亮.波音777型飞机荷载下机场跑道实测动力响应[J].同济大学学报(自然科学版),2014,42(10):1550-1556.  
YANG Dong, WANG Zhiliang. Analysis of measured dynamic response of airport runway under Boeing 777 loading [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(10):1550-1556.
- [7] 王兴涛,陈建峰,叶观宝,等.波音747型飞机跑道滑翔力学响应[J].交通运输工程学报,2016,16(2):1-9.  
WANG Xingtao, CHEN Jianfeng, YE Guanbao, et al. Mechanical responses of Boeing 747 running on runways [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016, 16(2):1-9.
- [8] 曾岳,陈建峰,王志亮.波音727型飞机跑道滑翔的动态响应实测研究[J].路基工程,2016,184(1):13-18.  
ZENG Yue, CHEN Jianfeng, WANG Zhiliang. Field research on dynamic response of airport runway to taxiing of Boeing 727 Aircraft [J]. Subgrade Engineering, 2016, 184(1):13-18.
- [9] 周正峰,凌建明,袁捷.机场水泥混凝土道面接缝传荷能力分析[J].土木工程学报,2009,42(2):112-118.  
ZHOU Zhengfeng, LING Jianming, YUAN Jie. 3-D finite element analysis of the load transfer efficiency of joints of airport rigid pavement [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(2):112-118.
- [10] 周正峰,凌建明.基于ABAQUS的机场刚性道面结构有限元模型[J].交通运输工程学报,2009,9(3):39-44.  
ZHOU Zhengfeng, LING Jianming. Finite element model of airport rigid pavement structure based on ABAQUS [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(3):39-44.
- [11] KIM J, HJELMSTAD K D. Three-dimensional finite element analysis of doweled joints for airport pavements [J]. Transportation Research Record, 2003, 1853:100-109.
- [12] 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 Jianming, LIU Wen, ZHAO Hongduo. Mechanical responses of rigid airport pavement to multiple-gear military aircraft loadings [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(4):60-65.
- [13] 张鑫.基于延长寿命的跑道结构参数优化研究[D].天津:中国民航大学,2018.  
ZHANG Xin. Research on the optimization of pavement structure parameters based on life extension [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2018.

(编辑:张蓓)