

机场道面和地基在役动力响应试验研究

葛红斌

福建兆翔机场建设公司, 福建 厦门

收稿日期: 2022年7月7日; 录用日期: 2022年7月18日; 发布日期: 2022年7月27日

摘要

对实际服役状态下的机场水泥混凝土道面板, 布设传感器测试常见机型在飞机滑行状态下道面、基层顶面、地基的应力和应变, 获得道面板结构各深度、位置以及基层、地基的动力响应曲线, 各机型起落架作用下响应特征, 分析飞机滑行状态与动力响应曲线的内在关系, 推理道面板病害的产生原因, 对工程设计提出了优化建议。

关键词

机场道面, 飞机滑行, 动力响应, 应变, 绑定效应

Experimental Study on Dynamic Response of Airport Pavement and Foundation in Service

Hongbin Ge

Fujian Zhaoxiang Airport Construction Company, Xiamen Fujian

Received: Jul. 7th, 2022; accepted: Jul. 18th, 2022; published: Jul. 27th, 2022

Abstract

For the airport cement concrete pavement slab in actual service, sensors are arranged to test the stress and strain of the pavement, base top surface and foundation of common aircraft types under the taxiing state of aircraft, obtain the dynamic response curves of each depth and position of the pavement slab structure, base and foundation, and the response characteristics under the action of landing gears of various aircraft types, and analyze the internal relationship between the taxiing state of aircraft and the dynamic response curve. The causes of the diseases of the pave-

ment slab are deduced, and the optimization suggestions for the engineering design are put forward.

Keywords

Airport Pavement, Aircraft Taxiing, Dynamic Response, Strain, Binding Effect

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



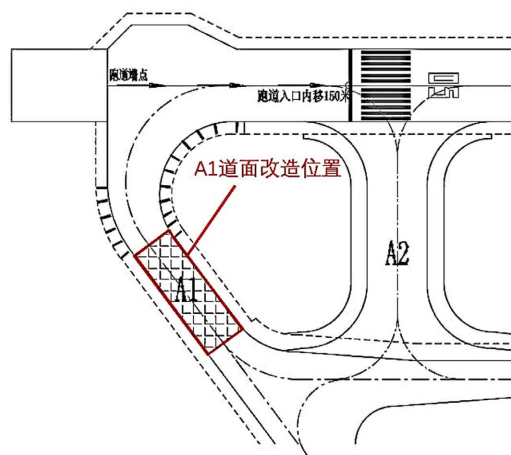
Open Access

1. 研究背景

飞机荷载作用下机场道面及地基的动力响应实测研究最为直接和有效[1], 但实际服役状态下的道面及地基结构动力测试试验较少, 国内仅浦东机场进行过跑道地基的实测研究[2], 国外以美国丹佛机场 16 块道面板试验区测试数据最丰富, 国内外许多学者利用丹佛机场的公开测试数据进行分析[1] [3] [4] [5] [6]。近年来计算机仿真分析不断发展, 以有限元建模分析为基础的数值分析方法逐渐成为主流, 但仍缺乏与实测结果的对比分析[7] [8] [9]。本研究通过在机场道面板边中部、板角、板中和轮迹带等区域布设传感器, 开展荷载作用下道面板动力响应特性研究, 旨在进一步完善相关理论, 对机场道面工程设计和病害预防提出积极建议。



(a) A1联络道卫星图



(b) A1联络道改造平面图

Figure 1. Location map of A1 connecting track of Gaoqi Airport

图 1. 高崎机场 A1 联络道位置图

2. 试验概况

厦门高崎国际机场于 1983 年建成通航, 1994 年实施了二期改扩建工程, 飞行区等级为 4E。A1 联络道在经历数十年的飞机重载循环作用下, 出现了板角断裂、车辙、断板等损害, 2019 年实施换板改造, 改造面积为 1088 m²。本研究选取 A1 联络道改造工程(图 1)飞机滑行轮迹经过板块布设传感器, 进行实际服役状态下的试验研究。

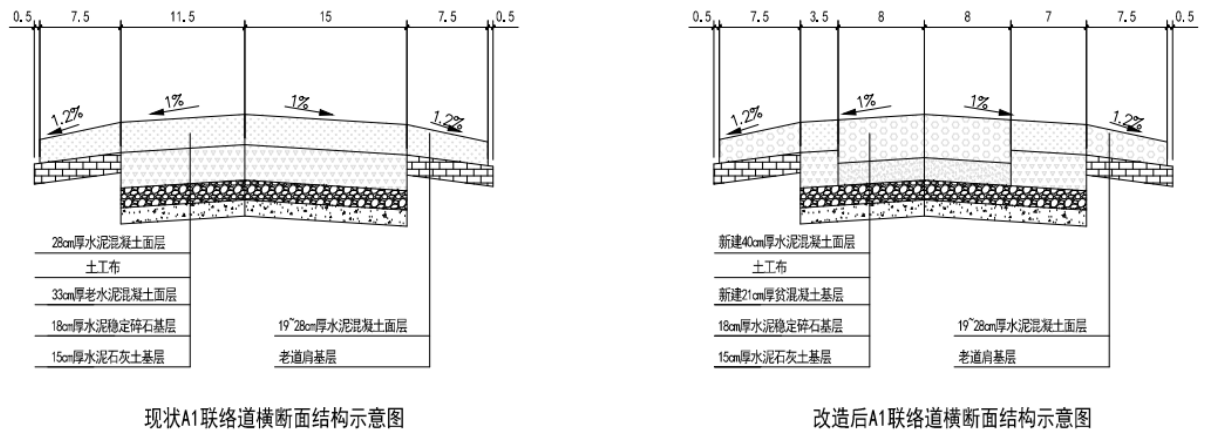


Figure 2. Cross section structure of A1 connecting road before and after reconstruction
图 2. A1 联络道改造前后横断面结构

2.1. A1 联络道测试板

A1 联络道尺寸为 16 m × 68 m，板块之间纵缝采用企口缝加拉杆，横缝采用假缝，横向施工缝采用传力杆平缝。改造后水泥混凝土设计 28 天抗弯拉强度为 5.0 Mpa，贫混凝土基层 7 天抗压强度不小于 10 Mpa，水泥混凝土道面的平均纹理深度要求不小于 0.8 mm，联络道改造前后板块断面结构示意图如图 2 所示。A1 联络道测试板块尺寸为 4 m × 4 m，位于滑行道中线右侧(第三仓)、A1 联络道中段，B737-700、B737-800 两种机型的右轮将完整经过测试板，A320-200、A321-200、A330-300 机型的右轮将在测试板的板边缘经过。

2.2. 传感器布置

道面状态信息的关键位置多在板边中部、板角、板中和轮迹带等，传感器布置如下表 1。

Table 1. Monitoring sensor of test board
表 1. 测试板监测传感器表

监测内容	传感器型号	平面布置	截面布置	监测数量	传感器编号
混凝土面板动态应变	DH1204 混凝土埋入式电阻应变计	板中、板角、板边	板顶、板底	6	板顶中 C170903083 板顶角 C170903123 板底中 C170903010 板底角 C170903122 板底边 C170903088 板底边 C170903079
基层顶面支撑状态及道基动应变	XHZ-410S 电阻式土压力计	板中、板角、板边	基层顶面、道基顶面及下部 300 mm 处	10	贫砼层板角 T190710 贫砼层板角 T190715 贫砼层板角 T190712 贫砼层板角 T190713 贫砼层板边 T190707 水稳基层板中 T190711 水稳基层板角 T190714 土基层板中 T190705 土基层板角 T190708 贫砼层板中 T190709

2.3. 飞机参数

根据厦门高崎国际机场常见机型,选取了起降频次较高的 B737-700、B737-800、A320-200、A321-200、A330-300 五种机型进行道面响应分析。本次的实测动力试验的飞机类型及主要参数见表 2, 实测的飞机架次全部以真实的载人状态。

Table 2. Aircraft parameters

表 2. 飞机参数表

机型	B737-700	B737-800	A320-200	A321-200	A330-300
最大滑行重量(KN)	703.30	792.60	774.00	834.00	2339.00
最大起飞重量(KN)	701.00	790.04	770.00	830.00	2330.00
最大着陆重量(KN)	586.20	663.80	645.00	735.00	1870.00
最大无燃油重量(KN)	552.20	627.50	605.00	695.00	1750.00
空机重量(KN)	376.60	414.30	405.29	476.03	1294.64
主起落架荷载分配系数 ρ	0.950	0.950	0.950	0.956	0.958
主起落架间距(m)	5.72	5.72	7.59	7.59	10.68
主起落架个数 n	2	2	2	2	2
主起落架构型	单轴双轮	单轴双轮	单轴双轮	单轴双轮	双轴双轮
主起落架轮胎压力 q (MPa)	1.39	1.47	1.14	1.36	1.42

3. 实测土压力响应数据分析

3.1. 土基层和水稳基层响应特征

从土基层板中和水稳基层板的压力时程曲线(图 3)可以得出, 应力形态与理论分析结果形态基本一致。单轴双轮表现为单峰值、双轴双轮表现为双峰值, 与机型主起落架轮轴相对应, 轮轴个数决定了峰值个数。A330-300 由于双轴作用下产生双峰值, 且后一个峰值大于前一个峰值, 可见第二个轮轴荷载比第一个轮轴荷载大。主起落架轮轴为双轴以上的机型, 根据多峰值大小、前后轮轴间距可逆推算飞机滑行速度, 以 A330-300 为例, 设第一个峰值为 A 点, 第二个峰值为 B 点, AB 两点出现的时间间隔为 0.23 S, AB 两点的距离为 1.98 m, 故该飞机经过测试板的滑行速度为 8.6 m/S。

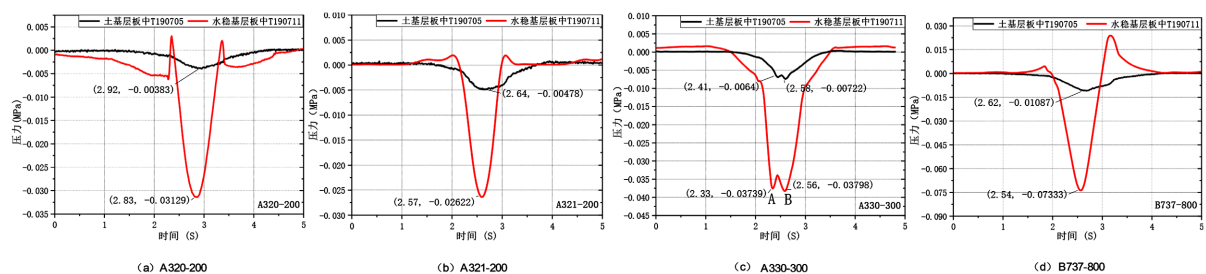


Figure 3. Pressure time history curve at different depths in the plate

图 3. 板中不同深度处压力时程曲线

滑行荷载作用下板下不同深度处主要表现为压力, 水稳基层承受的压力大于土基层承受的压力, 按图 3 的四种机型压力响应数据, 土基层只产生较小的弹性变形, 可视弹性地基, 经计算水稳基层承受的压力为土基层承受压力的 5.26~8.17 倍。飞机荷载作用下, 不同深度的压力峰值出现的时间基本没有滞

后性, 荷载经过时压力特性显著。一般各基层处于弹性变形, 且回复较快, 水稳基层承受的压力约为土基层承受压力的 5~10 倍。

A320-200、A321-200 两种机型的压力数据在峰值前后出现尖点突变, 分析认为两种机型的主起落架轮轴作用在板纵缝上, 当飞机轮轴刚刚到达测试板边缘时, 经过板纵缝的轮轴对板边形成突然的压力, 在板中位置的结构处将产生微微翘起的趋势, 因此呈现出拉压替换的状态; 当轮轴到达测试板中部时, 面板整体受压, 因此不同结构处承受压力最大值; 当轮轴即将行驶完测试板进入相邻面板时, 板中呈现类似荷载刚进入面板时的拉压替换状态, 故压力峰值前后产生尖点突变。板边、板角的数值明显大于板中数值, 在荷载应力循环作用下板角将先于板中出现疲劳破坏。

3.2. 贫混凝土基层响应特征

通过分析 A330-300 和 B737-800 作用下贫混凝土基层顶面压力时程曲线(图 4、图 5)可以发现, 测试板左侧板边距离轮轴较远, 因此尽管处在基层顶面位置, 所受到的荷载影响依然较小, 因此承受压力值较小。贫混凝土基层在板边及板角位置的数值比土基层、水稳基层大, 原因是贫混凝土基层在水稳基层之上, 压力作用随深度减小而增大, 受力更为直接。由于土压力盒埋设位置的不同, 因此各个位置压力峰值出现的时间略有先后差异。基层顶面压力峰值形状更加尖锐, 且峰值左右尖点突变值不明显, 但双轴引发的双峰值作用依然明显。

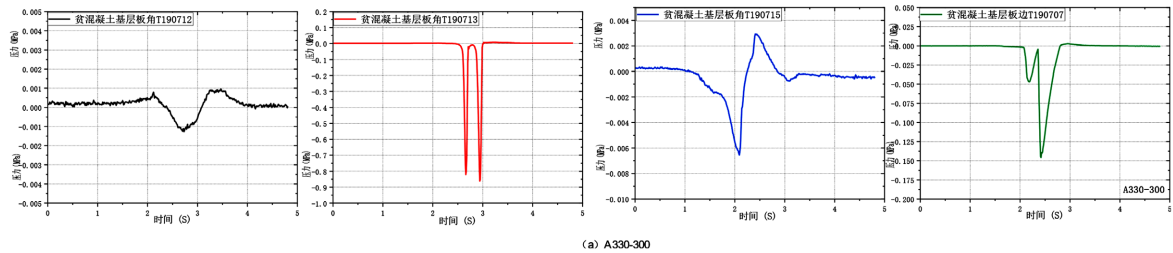


Figure 4. Pressure time history curve of lean concrete base top surface (A330-300)

图 4. 贫混凝土基层顶面压力时程曲线(A330-300)

李健等[10]提出板角加载段的斜率小于卸载段曲线的斜率, 板边加载段的斜率大于卸载段斜率, 从压力时程曲线亦验证了此观点。由于飞机进入测试板后, 与板角的土压力盒距离越来越小, 板角的压力逐渐增加, 当轮轴经过土压力盒附近时压力出现峰值, 因此是缓慢增加的一个过程, 斜率较小, 当飞机行驶完进入相邻板块时, 土压力盒所在的板块突然卸载, 从而产生卸载斜率较大的现象。板边处的压力加载段的斜率大于卸载段曲线的斜率, 是由于板边处的土压力盒突然受到飞机滑入测试板的压力, 使得荷载产生的压力突然增大, 斜率较大, 而飞机经过土压力盒时产生压力峰值, 随后在板块上滑行逐渐进入相邻板块, 荷载产生的压力有一个缓慢降低的过程, 因此卸载段斜率相对较小, 双轴机型亦有此规律。

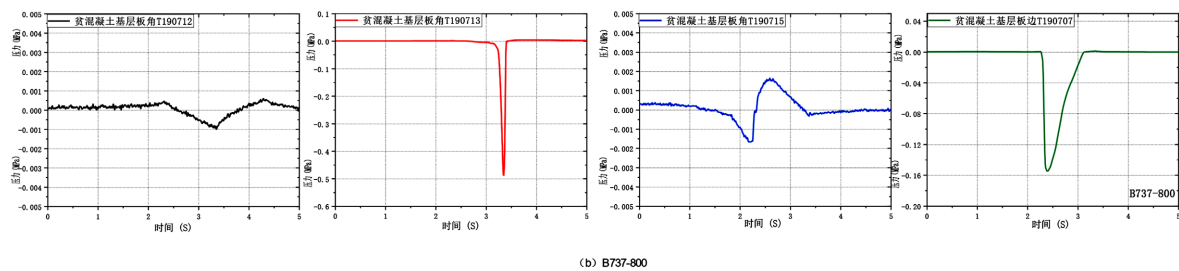


Figure 5. Pressure time history curve of lean concrete base top surface (B737-800)

图 5. 贫混凝土基层顶面压力时程曲线(B737-800)

3.3. 结构不同位置处响应特征

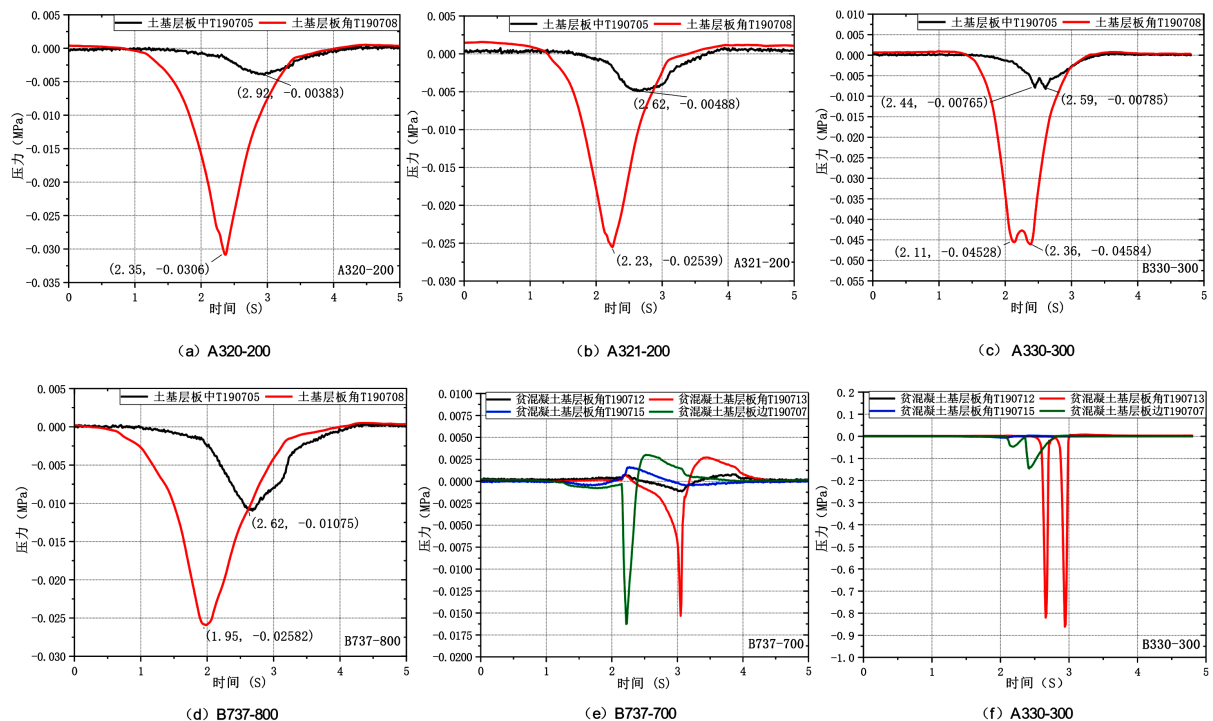


Figure 6. Pressure time history curve at different positions of the structure

图 6. 结构不同位置的时程曲线

不同位置处压力响应时间最直观的特点是峰值具有明显的先后顺序(图 6), 位于与飞机刚驶入测试板最近的板角与板边的土压力盒响应最快, 板中、较远的板角响应滞后, 时程曲线的特性与前述分析一致。越靠近轮轴处的土压力盒承受的压力越大, 越远离轮轴的压力盒承受的压力越小。从基层顶面的响应情况分析, 板角与板边承受的压力最大, 远远超过其他位置的压力, 以现有的板块尺寸分析, 面板右上角、下边缘承受的压力最大, 最容易出现疲劳破坏与损伤, 在双轴主起落架或大载荷飞机的作用下应力循环次数更多、更集中, 因此出现病害的可能性最大。

3.4. 不同机型起落架作用下响应特征

不同机型起落架作用下压力的响应特征主要表现为峰值数量及压力大小(图 7)。主起落架轴数对应峰值数, 且后一个峰值一定大于前一个峰值, 可以由相邻峰值推算出飞机滑行速度。飞机荷载作用下板角与板边的压力值较大, 这是由于轮轴基本在板角或板边上方滑过造成最直接的受压态势, 可见板块分缝设计时, 纵向分缝若能尽量避开后轮轨迹线, 有利于改善板块受力, 延长道面寿命。

从土基层、水稳基层、贫混凝土基层的受压情况来看, 不同机型作用下, 各基层的压力形变基本为弹性变形, 复原较快, 基层服役状态良好。

4. 实测动应变响应数据分析

4.1. 板顶与板底位置响应特征

根据面板动应变时程曲线(图 8、图 9), 动应变传感器的布置方向与飞机滑行方向一致, 与纵缝平行。实测响应数据截取包含峰值附近的时程数据, 前后截断, 起点相对时间为零。从峰值情况看, 无论飞机

主起落架轮轴尺寸和个数如何变化,板顶、板底都呈现相反的状态,板顶承受压应变,板底承受拉应变,拉应变相较于压应变有所滞后,原因是板顶较快承受荷载。

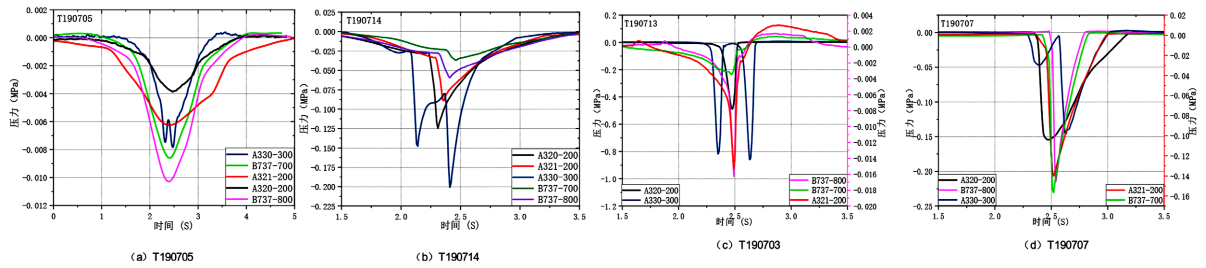


Figure 7. Strain time history curve under the action of landing gear of different models

图 7. 不同机型起落架作用下应变时程曲线

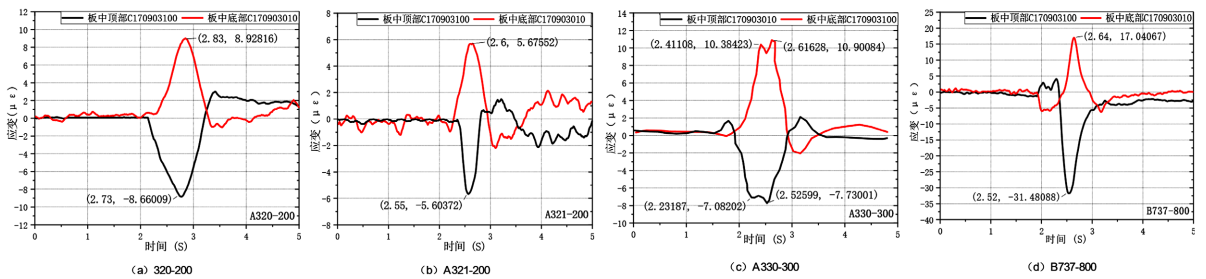


Figure 8. Strain time history curve of top and bottom in panel

图 8. 面板板中顶部与底部应变时程曲线

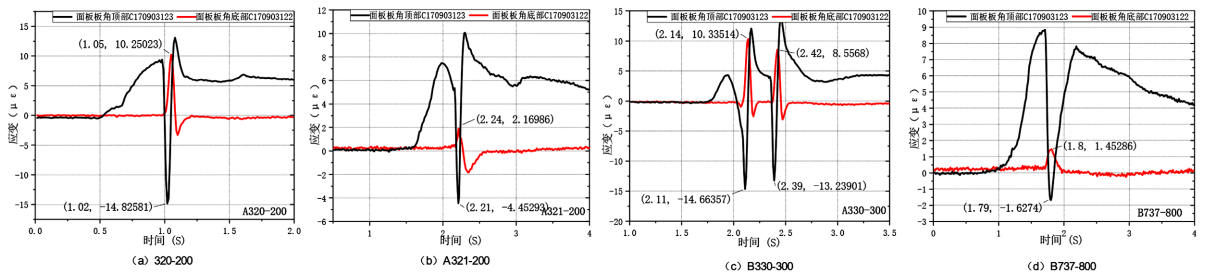


Figure 9. Strain time history curve of top and bottom of panel corner

图 9. 面板板角顶部与底部应变时程曲线

峰值数量与轮轴数量相等,每个轮轴对应应在板顶、板底引发一个波峰,压应变峰值大于等于拉应变峰值,且在轮轴到达时应变呈现拉压变换的趋势,但轮轴到达后稳定为拉应变或压应变。在轮轴驶离传感器后,仍可监测到拉压变换后的回复变形。飞机轮子经过区域形变最大,道面结构受压大小随深度递减,面层板顶、板底的应变形态呈现相反趋势。

4.2. 面板不同位置处响应特征

图 8 板中位置与图 9 板角位置相比较,板角位置的动应变传感器距离轮轴较近,应变响应较板中灵敏和剧烈。板角与板中位置的变化形式一致,基本呈现板顶受压、板底受压的趋势,板顶较板中的应变峰值依然超前产生,与瞬时受力时间相关;板角较板中所受的应变峰值更尖锐,双轴作用下更加明显,应力荷载集中现象非常显著,因此板角更容易出现损坏现象,在应力循环作用下也容易出现疲劳破坏,建议加强对道面板板角的设计措施,例如增加板角处的厚度或对板角设计配筋等。

与板中峰值不同，板角峰值形态更不具规则性。一个原因是板角的应变传感器直接承载，变化起伏较大；另一个原因是飞机滑行状态下与板块接触有关，当飞机刚接触测试板时，板角的传感器一端受拉形成拉应变，当飞机滑行到传感器正中间时形成压应变，离开时的状态也符合该推论，因此在峰值前后形成显著的拉压替换现象。值得一提的是，应变传感器由于较高的灵敏度，因此在承受荷载作用后回复到零点速度较慢，有一个漂回零点的过程。

4.3. 不同机型起落架作用下响应特征

不同机型作用下应变与压力的规律趋同，机型主起落架轴数对应峰值数，双轴起落架的后峰值比前峰值大(图 10)。直接经行传感器上方的轮轴产生较大的应变值，同时峰值更加尖锐，在峰值出现前几乎所有机型都出现拉压应变交替出现的情况，这与面板形变、机型滑行状态密切相关。

主起落架为双轴或多轴形式的机型增加了受力循环次数，加剧面板结构的损害进程，更容易造成疲劳破坏，板块分缝设计应重点考虑尽量避开多轴型的飞机滑行路径，可在道面设计时增加芳纶纤维增强韧性或增加道面厚度，有利于多轴型飞机或超大型飞机的滑跑。

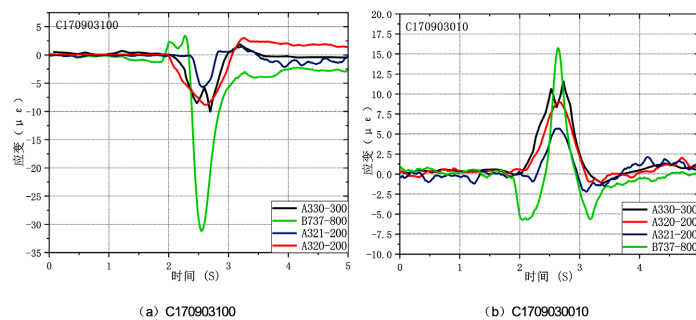


Figure 10. Pressure time history curve under the action of landing gear of different models

图 10. 不同机型起落架作用下的压力时程曲线

5. 界面绑定效应分析

面板与基层之间不存在物理上的绑定，也不存在粘聚力，如果面板与基层界面处于完全脱离状态，那么面板顶面和底面的应变绝对值应该相等。我们可以通过比较板顶和板底应变传感器的应变值推测面板与基层的绑定程度。面板上部与下部的应变传感器距离板顶面和底面的距离并不同，因此采用修正方法用测量的应变外推面板顶面与底面的应变进行比较[4]。假定板内应变呈线性分布，采用如下公式计算面板顶面和底面的修正峰值应变。

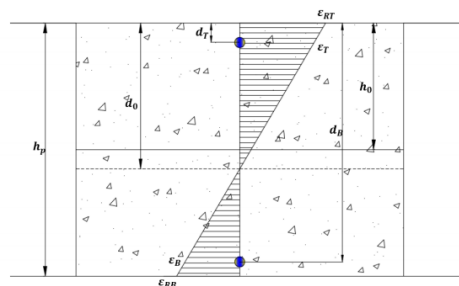


Figure 11. Distribution of vertical strain of concrete slab under compression

图 11. 砼板受压竖向应变分布图

$$\varepsilon_1 = (\varepsilon_B - \varepsilon_T) / (d_B - d_T) \quad (5-1)$$

$$\varepsilon_{RB} = \varepsilon_T + (h_p - d_T) \varepsilon_1 \quad (5-2)$$

$$\varepsilon_{RT} = \varepsilon_T - d_T \varepsilon_1 \quad (5-3)$$

式中： ε_1 表示单位面板深度的应变变化值； d_T 、 d_B 分别表示面板上部和下部应变传感器到表面的距离； ε_T 、 ε_B 分别表示面板上部和下部应变传感器测量的峰值应变； ε_{RT} 、 ε_{RB} 分别表示经过修正计算得到面板顶面和底面的峰值应变； h_p 表示混凝土的深度(如图 11 所示)。

为评估绑定效应，此处采用面板中性面(应变为 0)相对于中平面(面板厚度的一半 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：

$$d_0 = -\varepsilon_T / \varepsilon_1 + d_T \quad (5-4)$$

$$e = (d_0 - h_0) / h_0 \quad (5-5)$$

选取 A330-200、A330-321、A330-300 三种机型的板角和板中实测数据进行计算分析，其中 A330-300 为双轴双轮，产生的应变有两个峰值，分别作了计算。

5.1. 板角部位

板角部位选取板顶 C170903123 与板底 C170903122 传感器分析界面绑定效应，计算偏移率见表 3。

Table 3. Neutral plane offset of plate angle caused by binding effect

表 3. 板角由绑定效应引起的中性面偏移

机型编号	板顶应变 / $\mu\varepsilon$	板底应变 / $\mu\varepsilon$	板顶应变(修正) / $\mu\varepsilon$	板底应变(修正) / $\mu\varepsilon$	中性面 /m	中平面/m	偏移率
A320-200	-14.82	10.25	-19.00	14.42	0.227	0.20	0.135
A321-200	-4.45	2.17	-5.55	3.27	0.252	0.20	0.260
A330-300	-14.66	10.33	-18.8	14.50	0.226	0.20	0.130
A330-300	-13.24	8.56	-16.87	12.19	0.232	0.20	0.160

5.2. 板中部位

板中部位选取板顶 C170903100 与板底 C170903010 传感器分析界面绑定效应，计算偏移率见表 4。

Table 4. Neutral plane offset caused by binding effect in plate

表 4. 板中由绑定效应引起的中性面偏移

机型编号	板顶应变 / $\mu\varepsilon$	板底应变 / $\mu\varepsilon$	板顶应变(修正) / $\mu\varepsilon$	板底应变(修正) / $\mu\varepsilon$	中性面/m	中平面/m	偏移率
A320-200	-8.66	8.93	-11.59	11.86	0.198	0.20	-0.010
A321-200	-5.60	5.67	-7.48	7.55	0.199	0.20	-0.005
A330-300	-7.08	10.38	-9.99	13.29	0.172	0.20	-0.140
A330-300	-7.73	10.90	-10.84	14.01	0.174	0.20	-0.130

5.3. 计算结果分析

从计算结果看，在飞机滑行荷载作用下，道面板板角位置中性面偏移率较大，偏移率趋近 20%，道面板板中位置中性面偏移率较小，因此可以认为板角位置的混凝土与基层具有一定的粘聚力，绑定效应

较为明显,故认为板角与基层的绑定需求大于板中与基层的绑定需求。这与阳栋[4]等学者提出的板中部由于绑定引起的中性面偏移率 20%左右,板边可近似认为处于脱离状态的研究结论有差异,初步考虑与道面结构构造、板角和板边与基层是否脱粘等有关。由于本试验研究基于新建道面且现场查明无脱粘现象,监测数据是可信的,但理论分析可进一步讨论。

建议在道面设计时,应当考虑面层混凝土与基层间的绑定效应,重点关注板角的绑定效应。道面板角位置中性面偏移率比板中位置大,板角与基层的绑定效应较为明显。在道面设计时,应当考虑面层混凝土与基层间的粘聚需求和绑定效应,理论上板边角受力较大,板角易形成翘曲,容易产生脱黏现象,建议采取增大板边和板角的设计厚度、科学施工降低翘曲度等措施。

6. 结论

1) 飞机滑行对道面结构的动力响应形态,主起落架轮轴个数决定了动力响应峰值个数,且后一个峰值大于前一个峰值,道面结构各层(面板、各基层、土基)在此方面的动力响应表现一致。

2) 基层的动力响应主要表现为压力,轮压直接作用区基本上为压力,远离轮轴区因变形协调会产生拉压变换,但拉力值很小。滑行荷载作用下,水稳基层承受的压力远大于土基层承受的压力,土基层一般只产生较小的弹性变形,可视为弹性地基,而水稳基层顶面承受的压力约为土基层顶面承受压力的 5~10 倍左右的量级。

3) 面板的动力响应时程呈现为拉压变换,在任一时刻板顶、板底都呈现相反的态势,即任一点当板顶承受压应变时,板底承受拉应变,压应变峰值大于拉应变峰值或基本相当。一般情况下板角和板边动力响应较板中更为敏感和剧烈,且板角较板中所受的应变峰值更尖锐,双轴作用下更加明显,应力荷载集中现象非常显著,因此板角更容易出现损坏现象。从基层顶面的响应情况分析,板角与板边承受的压力最大,远超过其他位置的压力,最容易出现疲劳破坏与损伤,在双轴主起落架或大载荷飞机的作用下应力循环次数更多、更集中,因此出现病害的可能性更大,建议在状态监测或人工巡检病害时重点围绕板角、板边展开。

4) 面板与基层存在界面绑定效应,板角与基层绑定效应较其它部位更为强烈,实际服役中更容易出现脱粘现象导致病害。现行规范设计面板最不利位置按板边考虑,尚未考虑板角与基层的界面绑定效应,建议关注板角与基层的粘聚行为,加强板角设计,避免板角出现翘曲或断裂病害。

5) 机场水泥混凝土道面结构形式基本相似,具有可类比性。本研究基于机场实际运行状态下的道面结构实测动力响应试验成果,可作为有限元分析结果的对比验证,在工程实践及道面结构设计方面亦具有一定的指导意义。

致 谢

感谢福州大学胡昌斌教授和张佳斌硕士在本试验监测及分析中给予的帮助。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Fang, Y.W. (2000) Analysis of Load Responses in PCC Air-Port Pavement. *International Journal of Pavement Engineering*, 1, 1-14. <https://doi.org/10.1080/10298439908901693>
- [4] 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.
- [5] 曾岳,陈建峰.飞机滑行下机场跑道实测动力响应分析[J].结构工程师,2016,32(4):85-91.

- [6] 王兴涛, 陈建峰, 叶观宝, 等. 波音 747 型飞机跑道滑行力学响应[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(2): 1-9.
- [7] 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.
- [8] Kim, J. and Hjelmstad, K.D. (2003) Three-Dimensional Finite Element Analysis of Doweled Joints for Airport Pavements. *Transportation Research Record*, **1853**, 100-109. <https://doi.org/10.3141/1853-12>
- [9] 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.
- [10] 李健, 王海明, 关新春. 不同飞机载荷下机场跑道实测动力响应[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(16): 294-299.