

文章编号: 1005-0523(2016)04-0010-06

中美机场水泥混凝土道面加铺厚度设计方法对比分析

赵鸿铎, 陈峙昂

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要:通过计算不同荷重级别的设计飞机类型(波音-737、空客-300、波音-747)、不同厚度和模量的既有道面结构(面层、基层)、不同既有道面条件(主要状况为轻微或严重损坏)、不同加铺类型(水泥混凝土、沥青层)等 256 种工况下的加铺层厚度, 对中国民航机场道面设计规范中既有水泥混凝土道面加铺设计方法与美国联邦航空管理局、陆军工程兵团、Rollings 等加铺设计方法进行对比分析。结果表明, 在繁重交通荷载作用下加铺水泥混凝土时, 我国民航设计方法厚度在既有水泥道面结构较强计算结果相对保守; 加铺沥青层时, 在既有水泥道面结构不强时计算结果较为保守, 不符合经验预估范围。其它工况下与其它方法厚度设计结果相差不大。

关键词:机场; 水泥混凝土加铺; 沥青层加铺; 厚度设计

中图分类号: U416.224 文献标志码: A

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2016.04.002

据我国民航局发布的全国机场生产统计公报, 截止到 2014 年底, 我国民用机场总数达到 202 个 (不含港、澳、台), 这其中超过 90% 的跑道为水泥道面^[1]。近十几年, 各大机场航空交通量显著上升, 大型飞机比例有所提高, 早期修建的水泥道面的结构性能或表面功能不能继续满足通航要求。既有水泥道面上加铺水泥混凝土或沥青层, 可有效解决此问题。

至今, 国外已有较多加铺实例, 国内也已有数十条条跑道进行了沥青层加铺, 据我国机场道面 20 年的设计寿命推算, 其余近 1/3 的跑道将在未来十年实施加铺改造。一方面, 较大应用需求须对应较精确、具有较强适应性的道面加铺设计方法; 另一方面, 道面复杂的工程与气候条件、材料与结构组合、荷载与交通量变异性、不同设计方法的损坏指标差异性, 势必导致不同设计方法结果的差异化。因此, 有必要将我国加铺设计方法与美国先进设计方法的厚度计算结果进行对比, 分析我国现有设计方法的不足、国外先进设计方法可借鉴之处, 指出我国加铺厚度设计方法的适应特性。

1 加铺厚度设计(计算)方法

国内外众多机构有“厚度补差法”和“力学-经验法”两类厚度设计(计算)方法。厚度补差法是一种经验设计方法, 按经验得出当前设计寿命下所需面层总厚度, 再扣除既有道面厚度得到加铺厚度; 力学-经验法通过计算荷载作用下的道面结构响应量, 并将其与加铺厚度、设计寿命建立某种关系, 从而得到所需加铺厚度。相关设计方法提出的年鉴如下:

1946 年, 美国 COE 在 6 条跑道 53 个试验项目的基础上, 最早提出厚度补差法用于加铺设计^[2]。1975 年, 美国联邦航空局(Federal Aviation Administration, 下简称 FAA), 在资讯通告 AC150/5320-6C 指出, 加铺厚度采用厚度补差法这种经验法的方式, 并在 1995 年发布 6D 改良版本(此方法下简称 FAA(6D)法)进行厚度计算^[3-4]。1988 年, R S Rollings 等人在 Design of Overlay for Rigid Airport Pavement 报告中, 提出基于“弹性层状理论”的力学-经验法用于加铺设计(下简称 SCI 法), 以结构条件指数(Structure Condition Index, 以

收稿日期: 2016-04-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1433201)

作者简介: 赵鸿铎(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为道路与机场工程。

通讯作者: 陈峙昂(1992—), 男, 在读硕士研究生, 研究方向为机场复合道面结构行为与应用。

下简称 SCI) 作为设计指标, 利用 SCI 的衰减随荷载作用次数的关系, 通过 SCI 与道面结构性能的对应得到加铺厚度^[5]。1999 年, 我国《民用机场沥青混凝土道面设计规范(MH 5010-1999, 下简称 MH 法)》指出采用厚度补差法进行沥青混凝土加铺设计^[6]。2001 年, COE 发布了“统一设施标准”(Unified Facilities Criteria, 下简称 UFC 法), 其中道面加铺设计章节采用厚度补差法, 但也将 SCI 法作为备选方法录入^[2]。2009 年, FAA 发布最新资讯通告(AC 150/5320-6E)中的加铺设计方法, 利用基于有限元法计算的力学-经验法道面结构响应量, 求得加铺厚度(下简称 FAA(6E)法), 其过程通过“FAARFIELD”软件实现^[7]。2010 年, 我国新出《民用机场水泥混凝土道面设计规范(MHT 5004-2010, 下简称 MH 法)》, 其中水泥混凝土加铺厚度计算公式与原理完全参考厚度补差法, 仅对部分参数采用一定的取值修正^[8]。

不同设计方法的区分要素包括设计方法种类、飞机荷载处理方式、道面响应计算理论、损坏指标。飞机荷载处理方式包括设计飞机法和损伤叠加法。设计飞机法是将所有飞机交通量换算成设计飞机交通量进行计算的方式; 损伤叠加法是分别计算各飞机对道面的疲劳损伤并采用 Miner 定律进行叠加的计算方式。目前的道面响应计算方法包含 Westergaard 板边解析理论(下简称 Wes.)、弹性层状理论(Layer Elastic Theory, 下简称 LET)、三维有限元方法(Three-Dimensional Finite Element Method)。各方法的要素详见表 1。

表 1 不同厚度设计方法要素

Tab.1 The key point of different thickness design methods

| 各方法 年限 | COE 1946 | FAA(6C) 1975 | FAA(6D) 1995 | SCI(Rollings) 1988 | UFC(COE) 2001 | FAA(6E) 2009 | MH 法 1999(沥青) 2010(水泥) |
|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------------|--------------------------|-----------------|------------------------------|
| 设计方法 种类 | 厚度补差 | 厚度补差 | 厚度补差 | 力学-经验 | 力学-经验 | 力学-经验 | 厚度补差 |
| 荷载处理 方式 | 设计飞机 | 设计飞机 | 设计飞机 | 设计飞机 | 损伤叠加 | 损伤叠加 | 损伤叠加 |
| 响应计算 理论 | Wes. | Wes. | Wes. | LET | Wes. or LET | 3D-FEM or LET | Wes. |
| 损坏 指标 | 50%损坏 | 疲劳开裂 车辙过大 | 疲劳开裂 车辙过大 | SCI 降至 某 值 | 疲劳开裂 车辙过大 SCI 降至某值 | 疲劳开裂车辙 过大 | 疲劳开裂 车辙过大 |

2 飞机荷载与道面结构条件拟定

2.1 飞机荷载拟定

为了使各类设计方法能够具有相同的设计条件, 须采用设计飞机法进行对比。通过查询上海某机场机型数据, 可选用机场常用中型荷载飞机 B-737 和超重型荷载飞机 B-747, 并可限定荷载范围; 选用重型荷载飞机 A300, 使 3 种设计飞机荷载重量逐渐递增, 便于结果对比。交通量拟定采用繁重荷载, 即采用换算后的各类飞机的交通量上限 (AC150-5320-6D 中, B-737、A-300 上限为年起飞次数 25 000 次, B-747 年起飞次数为 6 000 次)。

故拟定三类设计飞机及航空交通量如表 2 所示。

表 2 设计飞机荷载拟定示意图

Tab.2 The aircraft load assumed

| 机型 | 行程 类型 | 荷载类型 | 起飞重量 kN(lb) | 主起落架 分配系数 | 主起落 架个数 | 起落架构型 | 胎压/MPa | 年起飞 次数 |
|-------|----------|------|----------------|--------------|------------|-------|--------|-----------|
| B-737 | 中短程 | 中型 | 556(125 000) | | 2 | 双轮 | 1.4 | 25 000 |
| A-300 | 中远程 | 重型 | 1 601(360 000) | 0.95 | 2 | 双轴双轮 | 1.16 | 25 000 |
| B-747 | 远程 | 超重型 | 3 560(800 000) | | 4 | 双轴双轮 | 1.38 | 6 000 |

2.2 道面结构拟定

不同时期我国各地建设的道面结构各不相同,为了综合考虑强度不同的道面对于上述荷载的应力响应,应设置多个等级的道面,通过改变基层不同的材料(级配碎石基层与水泥稳定碎石基层作为代表)以及既有道面和基层(20,30,40 cm)的厚度即可。故拟定由弱到强的四种既有道面结构,如表2~表6所示。

表3 结构 s_1 —较弱结构Tab.3 Structure s_1 —quite weak structure

| 结构层 | 厚度/cm (in.) | 模量/ MPa | 泊松 比 | 弯拉强度/ MPa(psi) |
|-------|----------------|--------------------------|---------|-------------------|
| 水泥混凝土 | 20(8) | 30 000 | 0.15 | 4.83(700) |
| 级配碎石 | 20 | 600 | 0.35 | — |
| 土基 | — | 40/(MN·m ⁻²) | 0.35 | — |

表5 结构 s_3 —稍强结构Tab.5 Structure s_3 —strong structure

| 结构层 | 厚度/cm (in.) | 模量/ MPa | 泊松 比 | 弯拉强度/ MPa(psi) |
|-------|----------------|--------------------------|---------|-------------------|
| 水泥混凝土 | 30(12) | 30 000 | 0.15 | 4.83(700) |
| 水稳碎石 | 30 | 2 800 | 0.2 | — |
| 土基 | — | 40/(MN·m ⁻²) | 0.35 | — |

表4 结构 s_2 —稍弱结构Tab.4 Structure s_2 —weak structure

| 结构层 | 厚度/cm (in.) | 模量/ MPa | 泊松 比 | 弯拉强度/ MPa(psi) |
|-------|----------------|--------------------------|---------|-------------------|
| 水泥混凝土 | 30(12) | 30 000 | 0.15 | 4.83(700) |
| 级配碎石 | 30 | 600 | 0.35 | — |
| 土基 | — | 40/(MN·m ⁻²) | 0.35 | — |

表6 结构 s_4 —较强结构Tab.6 Structure s_4 —quite strong structure

| 结构层 | 厚度/cm (in.) | 模量/ MPa | 泊松 比 | 弯拉强度/ MPa(psi) |
|-------|----------------|--------------------------|---------|-------------------|
| 水泥混凝土 | 40(16) | 30 000 | 0.15 | 4.83(700) |
| 水稳碎石 | 40 | 2 800 | 0.2 | — |
| 土基 | — | 40/(MN·m ⁻²) | 0.35 | — |

根据相关规范^[5],加铺混凝土弯拉强度可取 5.17 MPa(750psi),模量可取 34 000 MPa 地基反应模量可取 $k=40 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-3}$ (147pci)。级配碎石厚度当量系数可取 1.0,水泥碎石厚度当量系数可取 1.4,加铺沥青层模量取 1 379 MPa(200 000psi)。

2.3 水泥混凝土加铺条件拟定

拟定加铺前既有道面的 3 种条件及其加铺方式:

1) 既有道面状况较差,大部分板出现结构性损坏,难以继续使用。取 $C=0.35$ (厚度补差法公式中既有道面厚度折减系数)或 $SCI=55$,此时宜进行隔离式或直接式加铺设计。

2) 既有道面状况良好,板面、板角处有初期裂缝,但处于不发展状态,可修复,取 $C=0.75$ 或 $SCI=80$,此时宜进行隔离式或直接式加铺设计。

3) 既有道面状况优秀,道面混凝土板完整,无构造裂缝,取 $C=1.00$ 或 $SCI=100$ 此时可进行结合式加铺设计。

上述文字部分摘自我国 MH 法,其中参数 SCI (structure condition index,衡量既有道面结构状况的参数)的数值取自 SCI 法和 $FAA(6E)$ 法的推荐取值,参数 C 取自厚度补差法公式(1):

$$h_0 = \alpha(h_d^r - Ch_E^r)^{1/r} \quad (1)$$

式中: h_0 ——加铺厚度;

h_d ——假定即有道面面层不存在时,计算所需的新道面的设计厚度;

h_E ——即有道面厚度;

C ——旧混凝土板折减系数,按即有道面破损情况取值,见上文拟定数值;

α ——加铺沥青层时, $\alpha=2.5$ ($FAA6D$ 法和我国 MH 法规定)或 3.0(UFC 法规定);加铺水泥板时, $\alpha=1$;

r ——加铺沥青层时, $r=1$ 。加铺水泥混凝土板时,新旧道面层间联接形式采用结合式时, $r=1$;采用部分

结合式时, $r=1.4$; 采用隔离式时, $r=2$ 。

至此,所有参数均已拟定完毕,各设计方法具有了相同或相近的设计条件,可进行各方法的加铺厚度计算。

3 加铺设计各方法厚度计算结果

按上述拟定条件进行计算,水泥混凝土加铺设计厚度计算结果见表 7,沥青层加铺设计厚度计算结果见表 8。按不同情况分别将表中结果绘制于图 1~图 2 中(对于水泥混凝土加铺方式仅选取 3 张图作为代表,便于查看差异趋势)。

表 7 水泥混凝土加铺厚度计算结果汇总

Tab.7 The cement concrete overlay thickness of different methods

| 机 结 型 构 | COE(UFC)法 | | | | | | | | | | | | | | | FAA(6D)法 | | | | | MH 法 | | | | FAA(6E)法 | | | SCI 法 | | | | | | | | | |
|------------|-----------|------|--------|------|--------|------|--------|------|--------|------|--------|------|--------|------|--------|----------|--------|------|--------|-----|--------|-----|--------|-----|----------|-----|--------|-------|--------|-----|--------|-----|---------|--|----|--|--|
| | C=0.35 | | C=0.35 | | C=0.75 | | C=0.75 | | C=1.00 | | C=0.35 | | C=0.35 | | C=0.75 | | C=0.75 | | C=1.00 | | C=0.35 | | C=0.35 | | C=0.75 | | C=0.75 | | SCI=55 | | SCI=80 | | SCI=100 | | 结合 | | |
| | 隔离式 | 直接式 | 隔离式 | 直接式 | 隔离式 | 直接式 | 隔离式 | 直接式 | 隔离式 | 直接式 | 隔离式 | 直接式 | 隔离式 | 直接式 | 隔离式 | 直接式 | 隔离式 | 直接式 | 隔离式 | 直接式 | 隔离式 | 直接式 | 隔离式 | 直接式 | 隔离式 | 直接式 | 隔离式 | 直接式 | 隔离式 | 直接式 | 隔离式 | 直接式 | 结合 | | | | |
| B-737 | s_1 | 35.9 | 35.0 | 33.9 | 29.6 | 18.0 | 32.0 | 30.0 | 29.5 | 25.0 | 14.3 | 33.4 | 31.3 | 30.9 | 26.4 | 33.6 | 32 | 13.8 | 15.5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | s_2 | 31.0 | 28.5 | 25.5 | 20.0 | 5.0 | 28.0 | 25.5 | 20.5 | 15.5 | 3.0 | 30.2 | 27.6 | 23.5 | 18.0 | 28.5 | 21.4 | 3.3 | <10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | s_3 | 27.0 | 24.6 | 20.1 | 15.2 | 1.8 | 26.5 | 24.0 | 18.5 | 14.0 | 1.8 | 28.8 | 26.3 | 21.6 | 16.5 | 26.8 | 18.5 | 2 | <10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | s_4 | 21.0 | 19.5 | <0 | <0 | <0 | 20.3 | 19.0 | <0 | <0 | <0 | 23.6 | 21.8 | <0 | 3.0 | 13.0 | 13.0 | <0 | <10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A-300 | s_1 | 51.6 | 49.6 | 50.2 | 45.8 | 32.8 | 41.5 | 39.5 | 39.5 | 35.0 | 23.2 | 41.8 | 39.7 | 39.8 | 35.2 | 38.6 | 37.3 | 19.8 | 31.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | s_2 | 47.5 | 45.0 | 44.0 | 38.0 | 20.5 | 36.5 | 33.5 | 31.0 | 25.0 | 10.6 | 38.3 | 35.4 | 33.3 | 27.0 | 36.6 | 31.8 | 9.2 | 19.5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | s_3 | 44.0 | 41.5 | 40.5 | 34.0 | 17.2 | 33.5 | 31.0 | 28.0 | 22.0 | 8.1 | 36.5 | 33.7 | 31.2 | 25.1 | 35.2 | 29.6 | 8 | <10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | s_4 | 39.5 | 36.0 | 31.0 | 24.0 | 5.2 | 27.5 | 25.0 | 11.0 | 9.0 | <0 | 29.7 | 27.1 | 15.6 | 11.8 | 13.0 | 13.0 | 3.8 | <10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-747 | s_1 | 51.6 | 49.6 | 50.2 | 45.8 | 32.8 | 34.5 | 32.5 | 32.0 | 27.4 | 16.3 | 41.1 | 39.0 | 39.1 | 34.6 | 38.9 | 37.7 | 18.0 | 28.5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | s_2 | 47.5 | 45.0 | 44.0 | 38.0 | 20.5 | 35.0 | 32.5 | 29.5 | 23.5 | 9.6 | 37.3 | 34.5 | 32.1 | 25.9 | 34.3 | 28 | 8 | 17.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | s_3 | 44.0 | 41.5 | 40.5 | 34.0 | 17.2 | 26.5 | 24.5 | 18.5 | 14.0 | 2.0 | 34.6 | 31.9 | 29.0 | 23.0 | 32.7 | 25.1 | 6 | <10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | s_4 | 39.5 | 36.0 | 31.0 | 24.0 | 5.2 | 19.0 | 18.3 | <0 | <0 | <0 | 28.4 | 26.0 | 13.0 | 10.1 | 13.0 | 13.0 | 5.6 | <10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

注:表中“<0”代表计算结果为负值;SCI 设计法中“<10”表示设计厚度小于 10 cm,其结果仅对其它方法作对比参考。

表 8 沥青层加铺厚度计算结果汇总

Tab.8 The asphalt concrete overlay thickness of different methods

| 方法 | B-737 | | | | A-300 | | | | B-747 | | | |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | s_1 | s_2 | s_3 | s_4 | s_1 | s_2 | s_3 | s_4 | s_1 | s_2 | s_3 | s_4 |
| COE (UFC)法 | 52.0 | 21.2 | 10.7 | -18.2 | 91.2 | 60.5 | 48.6 | 15.8 | 91.2 | 60.5 | 48.6 | 15.8 |
| FAA(6D)法 | 48.3 | 26.3 | 23.3 | 3.0 | 70.5 | 45.3 | 39.0 | 15.8 | 53.3 | 42.3 | 23.4 | 1.3 |
| MH 法 | 51.0 | 31.3 | 24.9 | 0 | 71.0 | 49.3 | 41.2 | 8.6 | 69.5 | 47.0 | 37.1 | 6.4 |
| SCI 法 | 40.0 | 35.5 | <10 | <10 | 61.5 | 49.0 | 18.0 | <10 | 57 | 42 | 10 | <10 |
| FAA (6E)法 | 42.0 | 19.0 | 12.0 | 5.0 | 49.0 | 33.0 | 26.0 | 5.0 | 47 | 30 | 22 | 5.0 |

注:表中“<0”代表计算结果为负值;SCI 设计法中“<10”表示设计厚度小于 10 cm,其结果仅对其它方法作对比参考。

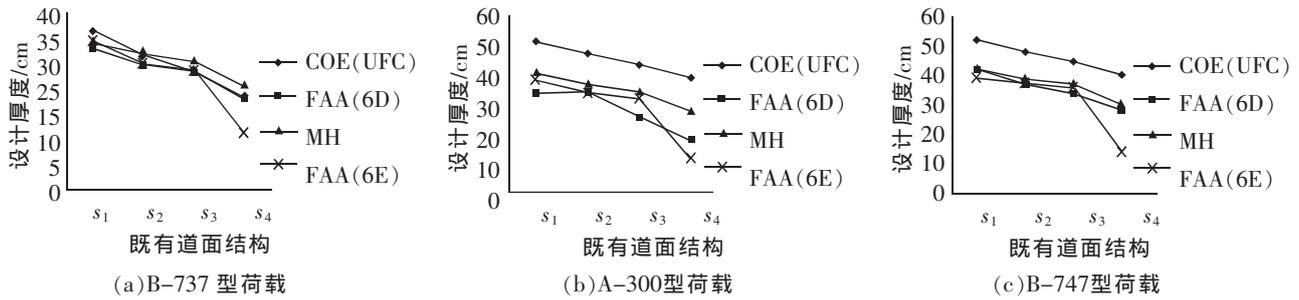
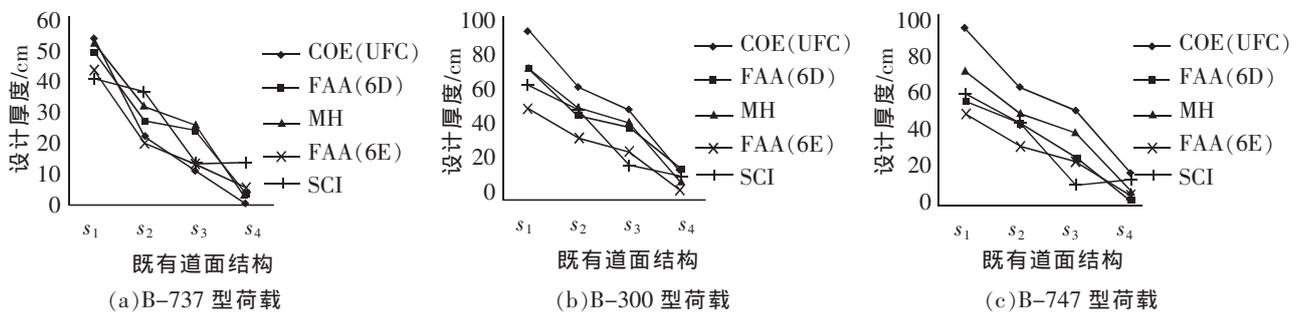
图1 $C=0.35$ 或 $SCI=55$, 3种飞机荷载条件下水泥混凝土板加铺设计厚度Fig.1 Design thickness of cement concrete overlay under three kinds of aircraft loading when $C=0.35$ or $SCI=55$ 

图2 3种飞机荷载条件下的沥青层加铺设计厚度

Fig.2 Design thickness of asphalt concrete overlay under three kinds of aircraft loading

4 加铺设计方法分析评价

4.1 水泥混凝土加铺

由表7、图1对比可得,美国军方设计方法代表——COE(UFC)法的计算厚度最大,比其它方法相对保守;Rollings改良的设计方法——SCI法的计算厚度变化范围大,应结合更多现场数据进行失效指标的标定(即确定SCI由100降低至何值时将道面认定失效),以此准确计算所需道面厚度。

加铺水泥混凝土板时,我国MH法(MHT 5004-2010)设计厚度相比于FAA(6D)法和FAA(6E)法较为接近,比FAA两种方法稍厚,详见表9。计算可得MH法平均比FAA两种方法略厚——比FAA(6D)法厚3.2 cm(11.5%)、比FAA(6E)法厚3.4 cm(12.1%)。

考虑到FAA(6E)法是FAA在FAA(6D)法基础上结合新的计算理论以及足尺试验数据所得^[7],可以认为FAA(6E)法计算结果相对可靠。从较多工况下与FAA(6E)厚度结果吻合或较小偏差,可以认为我国MH设计方法在繁重交通条件下具有较高的设计水准;但是,计算结果中也包括少数差异较大的工况——如既有道面结构取较强结构时(如 s_4 假定),此时无论交通荷载为何种飞机,我国MH法均得到较为保守的设计厚度,这不符合实际经验,且相比FAA(6E)法也有较大偏差。

通过板边弯矩影响图进行厚度迭代计算,使计算过程十分繁琐、耗时巨大,是我国MH法的不足之处。相比于附带设计曲线图的FAA(6D)法和附带FAARFIELD计算程序的FAA(6E)法,效率较低,且易受到不同人员习惯不同导致的计算误差或错误。可借鉴FAA(6D)法,绘制设计曲线图,或编制计算程序,方便相关人员操作,提高效率。

从厚度计算角度看,我国MH法对加铺方式不够敏感:采取隔离式相比于部分结合式加铺,平均加铺厚度仅增加3.4 cm(12.5%)。考虑到部分结合式加铺很难把握实际路面层间接触方式,从而难以把握道面寿命,也易出现局部损坏;完全结合式加铺的施工技术较难满足,故本论文推荐在加铺水泥混凝土板时使用隔离式加铺方式。

表 9 水泥混凝土加铺 MH 法与 FAA(6D)法、FAA(6E)加铺厚度对比表
Tab.9 The cement concrete overlay design thickness of MH, FAA(6D) and FAA(6E)

| 飞机 型号 | 结构 | MH 法与 FAA(6D)法 设计厚度之差/cm | | | | 差值占 MH 法设计 厚度百分比/% | | | | MH 法与 FAA(6E)法 设计厚度之差/cm | | 差值占 MH法设计 厚度百分比/% | |
|----------|-------|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|-----------------------|---------------|---------------|---------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| | | C=0.35 隔离式 | C=0.75 隔离式 | C=0.35 直接式 | C=.075 直接式 | C=0.35 隔离式 | C=0.75 隔离式 | C=0.35 直接式 | C=0.75 直接式 | C=0.35 或 SCI=55 隔离式 | C=0.75 或 SCI=80 隔 离式 | C=0.35 或 SCI=55 隔 离式 | C=0.75 或 SCI=80 隔离式 |
| | | B-737 | s_1 | 1.4 | 1.4 | 1.3 | 1.4 | 4.2 | 4.2 | 4.5 | 5.3 | -0.2 | -1.1 |
| | s_2 | 2.2 | 3.0 | 2.1 | 2.5 | 7.3 | 7.6 | 12.8 | 13.9 | 1.7 | 2.1 | 5.6 | 8.9 |
| | s_3 | 2.3 | 3.1 | 2.3 | 2.5 | 8.0 | 8.7 | 14.4 | 15.2 | 2.0 | 3.1 | 6.9 | 14.4 |
| | s_4 | 3.3 | 0 | 2.8 | 0 | 14.0 | 12.8 | 0 | 0 | 10.9 | 0 | 46.2 | 0 |
| A-300 | s_1 | 0.3 | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.7 | 0.5 | 0.8 | 0.6 | 3.2 | 2.5 | 7.7 | 6.3 |
| | s_2 | 1.8 | 2.3 | 1.9 | 2.0 | 4.7 | 5.4 | 6.9 | 7.4 | 1.7 | 1.5 | 4.4 | 4.5 |
| | s_3 | 3.0 | 3.2 | 2.7 | 3.1 | 8.2 | 8.0 | 10.3 | 12.4 | 1.3 | 1.6 | 3.6 | 5.1 |
| | s_4 | 2.2 | 4.6 | 2.1 | 2.8 | 7.4 | 7.7 | 29.5 | 23.7 | 17.0 | 2.9 | 57.2 | 18.6 |
| B-747 | s_1 | 6.6 | 7.1 | 6.5 | 7.2 | 16.1 | 16.7 | 18.2 | 20.8 | 2.2 | 1.4 | 5.4 | 3.6 |
| | s_2 | 2.3 | 2.6 | 2.0 | 2.4 | 6.2 | 5.8 | 8.1 | 9.3 | 3.0 | 4.1 | 8.0 | 12.8 |
| | s_3 | 8.1 | 10.5 | 7.4 | 9.0 | 23.4 | 23.2 | 36.2 | 39.1 | 1.9 | 3.9 | 5.5 | 13.4 |
| | s_4 | 9.4 | 0 | 7.7 | 0 | 33.1 | 29.6 | 0 | 0 | 15.7 | 0.3 | 55.3 | 2.3 |

4.2 沥青层加铺

由表 8、图 2 对比可得,加铺沥青层时,在繁重交通荷载条件下,各设计方法所得计算厚度较大,超出经验预估范围。其原因在于厚度补差公式中的放大系数 α (公式(1)中的 $\alpha, \alpha=2.5$ 或 3.0);假设通过先前计算得到所需总水泥混凝土的厚度约为 40 cm,扣除较强既有道面结构折减后的厚度(40 cm),可得所需加铺水泥混凝土道面厚度最小约为 10 cm。将其乘此放大系数 α 后,可得所需最小加铺沥青层厚度为 25 cm,因此在既有道面结构不够强的条件下(我国各地早期建设的道面,如 2.2 假定),若面向未来的较繁重交通(如交通荷载较大或交通量较大,如 2.1 节假定)进行加铺设计,则会得到较大的沥青层计算厚度,这种现象可称之为厚度补差法(经验法)中的“系数放大效应”。这是我国 MH 法(MH 5010-1999)的不足之处。而在采用力学-经验法理论时(LET 或 3D-FEM),如 FAA(6E)法则不会出现这种现象。

与水泥混凝土加铺设计相同,COE(UFC)法的计算厚度最大,比其它方法相对更保守;SCI 法的计算厚度变化范围大,计算厚度数据仅作对比参考。我国 MH 法较 FAA(6D)法较为接近,但相比 FAA(6E)法有一定差异,详见表 9。计算可得 MH 法平均比 FAA(6D)法厚 3.8 cm (9%)、比 FAA(6E)法厚 11.8 cm (31.6%)。

由拟定条件数据、厚度计算结果及上述分析可得,沥青层加铺设计的厚度补差法在繁重交通情况下难免会得到较为保守的厚度。考虑到未来我国大多数机场会为了减少经济损失而采用不停航施工的方式进行加铺改造,即采用沥青层加铺方式,因此我国规范(MH 5010-1999)中沥青层加铺设计方法有待改良,结合足尺试验数据及各地设计参数,更新计算理论与模型(可借鉴 FAA(6E)法的三维有限元计算方式),以更好地适应各机场加铺需求。

5 结论

- 1) 既有水泥混凝土道面上加铺水泥混凝土时,我国 MH 法(MH5004-2010)的厚度计算结果具有繁重

表 10 沥青层加铺 MH 法与 FAA(6D)法、FAA(6E)加铺厚度对比表
 Tab.10 The asphalt concrete overlay design thickness of MH, FAA(6D) and FAA(6E)

| | B-737 | | | | A-300 | | | | B-747 | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | s_1 | s_2 | s_3 | s_4 | s_1 | s_2 | s_3 | s_4 | s_1 | s_2 | s_3 | s_4 |
| $\Delta=h(\text{MH})-h(\text{FAA}[6\text{D}])/\text{cm}$ | 2.7 | 5.0 | 1.6 | -3.0 | 0.5 | 4.0 | 2.2 | -7.2 | 16.2 | 4.7 | 13.7 | 5.1 |
| $\Delta h/h(\text{MH})/\%$ | 5.3 | 15.8 | 6.3 | 0 | 0.7 | 8.0 | 5.3 | -83.7 | 23.3 | 10.0 | 36.9 | 79.7 |
| $\Delta h=h(\text{MH})-h(\text{FAA}[6\text{E}])/\text{cm}$ | 9.0 | 12.3 | 12.2 | -5.0 | 22.0 | 16.3 | 15.2 | 3.6 | 22.5 | 17.0 | 15.1 | 1.4 |
| $\Delta h/h(\text{MH})/\%$ | 17.6 | 39.2 | 48.9 | 0 | 31.0 | 33.0 | 36.9 | 41.9 | 32.4 | 36.2 | 40.7 | 21.9 |

交通条件下的较高设计水准,其设计厚度比 FAA(6D)法和 FAA(6E)法稍厚,平均比 FAA(6D)法厚 3.2 cm (11.5%)、比 FAA(6E)法厚 3.4 cm(12.1%);

2) 既有水泥混凝土道面上加铺水泥混凝土时,我国 MH 法(MH5004-2010)采用板边弯矩影响图进行厚度迭代计算,使计算过程十分繁琐、耗时巨大,可借鉴 FAA 设计方法,绘制设计曲线图或编制计算程序,方便设计人员操作,提高效率;

3) 既有水泥混凝土道面上加铺水泥混凝土时,从设计方法的厚度计算角度推荐采用隔离式加铺方式;

4) 既有水泥混凝土道面上加铺沥青层时,我国 MH(MH 5010-1999)法平均比 FAA(6D)法厚 3.8cm (9%)、比 FAA(6E)法厚 11.8 cm(31.6%)。由于厚度补差法的“系数放大效应”,我国各地早期建设的道面若采用 MH 法(MH 5010-1999)进行设计,则面向未来的繁重交通条件,则往往会得到较大的沥青层设计厚度,超出经验预估范围;

5) 我国民航现行机场道面加铺设计方法改良可行方向:对于水泥混凝土加铺设计方法,可借鉴 FAA(6D)法,绘制设计曲线图或编制计算程序,方便相关人员操作,提高效率;对于沥青层加铺设计方法,需重新研究计算理论与结构模型(可借鉴 FAA(6E)法的三维有限元计算方式),结合我国各地民航机场设计参数,进行室内外足尺试验并验证,以适应各机场加铺需求。

参考文献:

- [1] 中国民用航空局. 全国机场生产统计公报[EB/OL]. [Http://www.caac.gov.cn/H1/H2/](http://www.caac.gov.cn/H1/H2/), 2015.
- [2] Unified Facilities Criteria. Pavement Design for Airfields (UFC 3-260-02)[S]. Washington DC:U S Army Corps of Engineers, 2001.
- [3] Advisory Circular(AC 150/5320-6C). Airport Pavement Design and Evaluation[S]. Washington DC:Federal Aviation Administration, 1978.
- [4] Advisory Circular(AC 150/5320-6D). Airport Pavement Design and Evaluation[S]. Washington DC: Federal Aviation Administration, 1995.
- [5] Rollings R S. Design of overlays for rigid airport pavements[R]. Washington DC:Federal Aviation Administration, 1988.
- [6] MH 5010-1999. 民用机场沥青混凝土道面设计规范[S]. 北京:中国民用航空总局, 2000.
- [7] Advisory Circular(AC 150/5320-6E). Airport Pavement Design and Evaluation[S]. Washington DC:Federal Aviation Administration, 2009.
- [8] MH5004-2010. 民用机场水泥混凝土道面设计规范[S]. 北京:中国民用航空总局, 2010.

Comparative Analysis of Overlay Thickness Design for Sino–American Airport Cement Concrete Pavement

Zhao Hongduo, Chen Zhi'ang

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804)

Abstract: For overlay design of airport pavement, this paper compares and analyzes methods of overlay thickness design between Civil Aviation Administration of China (CAAC) and the U.S.A Corps of Engineers, the U.S.A Federal Aviation Administration (etc.) by calculating thickness value of overlay under more than 256 working conditions, including different designing aircraft (Boeing-737, Airbus-300 and Boeing-747), different existing pavement conditions (mainly slight, or serious damage), different overlay types (cement concrete or asphalt concrete). Results show that value for cement concrete overlay calculated by CAAC is a little more conservative when existing pavement is strong. However, for asphalt concrete overlay, CAAC's value is apparently conservative and not in correspondence with the experience estimates when existing pavement is not strong enough. No apparent thickness values in different overlay thickness designs can be figured out under the other conditions.

Key words: airport; cement concrete overlay; asphalt concrete overlay; thickness design

(责任编辑 王建华)