

航空機に作用する揚力が滑走路の設計舗装厚に及ぼす影響

東洋大学大学院 学生会員 ○中島 宗嗣
東洋大学 フェロー会員 福手 勤

1. はじめに

我が国の空港舗装厚の設計には、米国の CE 法に準じた経験的な CBR 設計方法を使用することが一般的である。これに対し 2008 年 7 月に空港設計要領が改定され、疲労度を評価する理論的設計方法が定められた。滑走路中間部を走行している航空機は揚力が働く、走行速度が速いこと等の理由から、端部より舗装厚が減厚でき、端部に対する比率は経験的に 90%とされている。なお、滑走路長を L とすると、両端から $L/5$ の部分を「端部」、中央の $3L/5$ の部分を「中間部」としている。

本研究では、改訂された設計要領の理論的設計方法の考え方をを用いて、揚力や走行速度の舗装の荷重支持性能への影響求め、舗装厚のさらなる減厚の可能性を考察する。

2. 航空機の揚力の算定方法

揚力 (L) の算定には、以下の式を用いる。

$$L = \frac{1}{2} C_L \rho S V_i^2 \quad (1)$$

ここに、

L : 揚力(kN)、 C_L : 揚力係数、 ρ : 空気密度(kg/m^3)、 S : 翼の面積(m^2)、 V_i : 速度(km/hr)

3. 揚力係数の算定方法

離陸時、すなわち脚が滑走路面から離れる時点では、航空機の脚荷重 W と揚力 L は等しくなっていることから、

$$W - L = W - \frac{1}{2} C_L \rho S V_i^2 = 0 \quad (2)$$

となる。

ここに、 W : 航空機の脚荷重(kN)

算定には LA-1 の代表機種である B747-400D を使用し

た。B747-400D の脚荷重 W は 658(kN)、翼の面積は $541.16(\text{m}^2)$ とした。また、今回は離陸の場合のみを考えるものとする。

ビデオ撮影を羽田空港の C 滑走路 (延長 3000m) にて行い、速度を計測した結果、離陸時の速度は $315(\text{km}/\text{hr})$ となった。撮影当日 (平成 21 年 1 月 17 日) の東京地区の最高気温は $11(^{\circ}\text{C})$ であったことから、空気密度は $1.247(\text{kg}/\text{m}^3)$ とした。

以上の条件より計算された揚力係数は、式(2)より 0.11 となった。

4. 疲労解析

(1) 揚力の算定

式(1)を用いて走行中の揚力を算定した。 C_L は走行速度に関らず一定とした。滑走路中間部進入時 (端から 600m 地点) の速度 $147(\text{km}/\text{hr})$ より、揚力は $61(\text{kN})$ となり、中間部進入時の $W-L$ は $597(\text{kN})$ となった。舗装に加わる力を図 1 に示す。

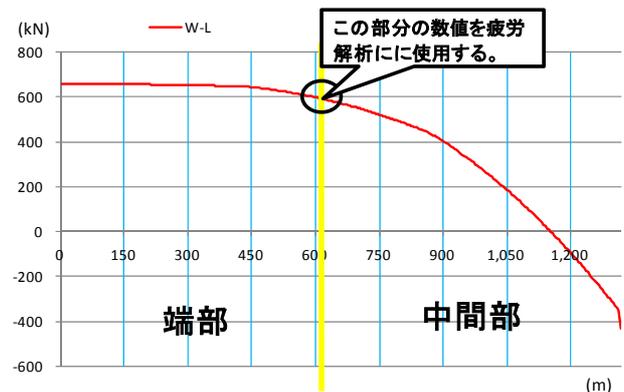


図 1 舗装に加わる力

(2) 照査条件の設定と舗装構造の仮定

端部の基準舗装厚を 110(cm) とした。中間部の舗装厚は、従来の設計法に基づき端部の 90% (99cm) とした。端部では B747-400D の脚荷重である $164.5(\text{kN})$ が載荷しているものとし、中間部ではその脚荷重が

ら中間部進入時の揚力を引いた 597(kN)を、一脚の車輪数 4 で除した 149(kN)が載荷しているものとした。設計条件を表 1 に示す。

表 1 設計条件

計算施設	滑走路中間部中央帯
走行条件	端部載荷時間 0.05(sec) 中間部載荷時間 0.01(sec) 断面方向標準偏差 60(cm)
温度条件	東京地区の月別平均気温を用いる
基準舗装厚(端部)	110(cm)
基準舗装厚(中間部)	99(cm)
粒状路盤弾性係数	200(MPa)
路床弾性係数	100(MPa)、CBR=10
舗装断面(端部)	表・基層15(cm)、上層路盤15(cm)、 下層路盤65(cm)
舗装断面(中間部)	表・基層15(cm)、上層路盤13(cm)、 下層路盤58(cm)

(3) ひずみ算定および疲労度解析

まず、表 1 の条件で滑走路端部の疲労度を算定し、この疲労度が 1.0 になる時の設計交通量を求める。なお、ひずみ算定には多層弾性解析プログラム (GAMES)を用いた。設計疲労曲線は、アスコン層では式(3)を、路床では式(4)を用いる。1)

$$N_f = 7.681 \times 10^{-6} \times \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{6.333} \times \left(\frac{1}{E}\right)^{3.374} \quad (3)$$

ここに、 N_f : 破壊に至るまでの繰返し回数、 ϵ : アスコン層下面の引張ひずみ、 E : アスコン層の変形係数(MPa)

$$N_f = \frac{10^{-29.298}}{\epsilon^{11.213}} \quad (4)$$

ここに、 ϵ : 路床上面の圧縮ひずみ

滑走路端部のアスコン下面の疲労度が 1.0 となる交通量は、約 10 万回となった。疲労度を月別に振り分けて示すと表 2 のようになる。なお、端部の載荷時間については誘導路の走行速度 32(km/hr)を用いたため、0.05(sec)とし変形係数は表 2 のようになる。

表 2 滑走路端部の変形係数と累積疲労度

温度(°C)	10	15	20	25	30	35	累積
対象月	1.2	3.12	4.11	5.10	6.7.9	8	
変形係数(MPa)	8,700	5,800	3,600	1,900	1,000	280	
アスコン最大ひずみ(μ)	162	205	272	381	553	761	
アスコン疲労度	0.08	0.09	0.10	0.11	0.08	0.01	1.00
路床最大ひずみ(μ)	506	537	568	613	665	763	
路床疲労度	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.07	0.09

(2)で算定した W-L=149(kN)を舗装に加わる力とする。アスコン層の変形係数は、撮影から求めた中間

部の速度 147(km/hr) を考慮して、載荷時間 0.01(sec)を与えた。これより滑走路中間部の疲労度を算定した。結果を表 3 に示す。

表 3 滑走路中間部の変形係数と累積疲労度

温度(°C)	10	15	20	25	30	35	累積
対象月	1.2	3.12	4.11	5.10	6.7.9	8	
変形係数(MPa)	13,000	8,700	5,500	3,000	1,400	450	
アスコン最大ひずみ(μ)	127	159	210	295	443	663	
アスコン疲労度	0.06	0.07	0.08	0.09	0.09	0.03	0.90
路床最大ひずみ(μ)	455	487	521	568	634	745	
路床疲労度	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.05	0.06

このことから、中間部での累積疲労度は 0.90 となることがわかり、滑走路端部に比べて現在の 0.9×端部舗装厚よりも、さらに減厚が可能であることがうかがえた。

5. まとめと今後の課題

航空機の揚力を考慮した疲労度計算を用いると、滑走路中間部の舗装厚を端部の 90%より減厚できる可能性があることがわかった。

今回の検討は単一機材であること、着陸機を考慮したものではないことから、揚力が舗装の疲労度に与える影響を相対的に比較したものである。

今後の課題として以下の点が挙げられる。

- ① 滑走路縦断方向に細かく速度を算定することにより、縦断方向の舗装厚の低減パターンの最適化を検討する。
- ② アスコン層の深さ方向の温度と変形係数の季節毎、時刻毎の影響を検討する。
- ③ 着陸時の脚荷重が舗装に及ぼす影響を考慮する。

謝辞

本研究では、揚力算定にあたり東洋大学工学部機械工学科前教授 加藤洋治氏から、また疲労度解析にあたり国土技術政策総合研究所 水上純一氏、並びに日本工営株式会社 福岡知久氏から、丁寧かつ熱心なご指導を賜りました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省航空局：空港舗装設計要領、2008.7
- 2) 土木学会：多層弾性理論による舗装構造解析入門、舗装工学ライブラリー3、2005.4
- 3) 水木新平、桜井一郎：図解雑学飛行機のしくみ、ナツメ社、2003.12