

ISSN 1346-7328

国総研資料 第839号
平成 27 年 3 月

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.839

March 2015

空港アスファルト舗装に関するESWL算出プログラムの開発

伊豆 太

The Development of a Program to Calculate ESWL for Airport Flexible Pavement

Futoshi IZU

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

空港アスファルト舗装に関するESWL算出プログラムの開発

伊豆 太*

要 旨

空港アスファルト舗装の設計においては、施設老朽化にともない空港舗装工事の大半を占めるオーバーレイ等大規模改修を中心に経験的設計法が広く使われている。この経験的設計法の設計の過程で、ESWL（等価単車輪荷重）を求めることが必要であるが、ESWLはたわみ係数などを用いて求める必要があり、その過程はやや煩雑である。そこで、設計の利便性を高めるため、R（言語）を用いてプログラムを開発し諸計算を行った。

本研究の主な結論は以下の通りである。

- (1)プログラムで計算したたわみ係数について佐藤¹⁾の結果と比較した。その結果基本的に一致した。
- (2)新たにたわみ係数表を、佐藤¹⁾の作成した表より細かいピッチで作成した。また、利便性を考えマイクロソフトエクセルベースで作成した。
- (3)代表的な、一脚あたりの車輪数が異なる、いくつかの航空機に対して、空港舗装設計要領²⁾におけるたわみ係数の算出点よりも詳細に算出点を設定し、空港舗装設計要領²⁾におけるたわみ係数の算出法を検証した。空港舗装設計要領²⁾の算出法は精度的に十分であることがわかった。
- (4)たわみ係数表及びESWLの算出プログラムのソースコードを掲載公開するとともに概要を解説し、新たな航空機材への対応等についてユーザがプログラムの改良を行う助けとした。

開発したプログラム等は設計にあたっての基礎ツールとなるものであり、その活用により空港アスファルト舗装設計の効率化につながることを期待される。

キーワード：空港アスファルト舗装，経験的設計法，たわみ係数，ESWL

*空港研究部空港施設研究室長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国土交通省国土技術政策総合研究所
電話：0468-44-5034 Fax：0468-44-4471 e-mail: izu-h92y2@ysk.nilim.go.jp

The Development of a Program to Calculate ESWL for Airport Flexible Pavement.

Futoshi IZU*

Synopsis

The experimental design method is even now used frequently to design airport flexible pavements, especially for rehabilitation design (ex. overlay design) of aged facilities which increase. The design process must include the determination of ESWL (equivalent single wheel load) value has to be determined, which is calculated using deflection factors through a rather complicated process. For the convenience of airport flexible pavement design engineers, I have developed a program to calculate ESWL using R.

The results are

- 1) I compared the calculated deflection factors with ones calculated by Sato¹⁾ in the past and it almost agreed with the Sato's result¹⁾. I then made a csv file deflection table, which is calculated by shorter intervals than the ones of Sato's table¹⁾.
- 2) Using the program, I verified the points at which deflection factors are calculated in the airport pavement design guideline. They are verified for several aircrafts.
- 3) The program is listed in this note with an explanation.

This program is expected to be a fundamental tool for the efficient design of airport flexible pavement.

Key Words :airport flexible pavement, empirical design, deflection factor, ESWL

* Head of Airport Facility Division, Airport Department

目 次

1. はじめに	1
2. 空港アスファルト舗装の設計の流れ	1
2.1 空港アスファルト舗装の設計法	1
2.2 空港アスファルト舗装の経験的設計法とESWL	1
2.3 舗装厚算出の流れについての補足	2
2.4 たわみ係数とESWL	3
2.5 プログラム開発の必要性	3
3. たわみ係数の算出	4
3.1 たわみ係数の定義と算出方法	4
3.2 既往のたわみ係数表	4
3.3 作成したプログラムの算出結果と既往のたわみ係数表の比較	5
4. たわみ係数算出位置の検証	13
4.1 対象機材	13
4.2 計算方法	13
4.3 計算結果	14
4.4 考察	16
5. 作成したプログラムのソースコードと概要	16
5.1 R (言語) について	16
5.2 ソースコードと概要	16
5.3 プログラムの使用について	18
6. まとめ	19
7. おわりに	19
謝辞	19
参考文献	19
付録A	20
付録B	22

1. はじめに

空港アスファルト舗装の設計法については、平成20年に性能規定化されたが、具体的な性能照査方法を示している空港舗装設計要領及び設計例²⁾(以下空港舗装設計要領という。)及び空港舗装補修要領及び設計例³⁾(以下空港舗装補修要領という)には、性能照査方法として理論的設計法と経験的設計法が示されている。

新設の滑走路、誘導路等の空港アスファルト舗装の性能照査方法については、理論的設計法が主となったが、施設老朽化にともない空港舗装工事の太宗となっているオーバーレイ等大規模改修工事や、また、交通量の少ない比較的小型の航空機を対象とした空港整備の設計においては、経験的設計法が用いられることが多く、同設計法についても、その利便性や効率性の向上がまだまだ求められている状況にある。

経験的設計法においては、ESWL(等価単車輪荷重, equivalent single wheel load)が重要な役割を果たしている。このESWLについては、現在空港舗装設計要領²⁾において、主要な航空機材毎のESWL図が示されているものの、図の形で与えられているため、必ずしも使い勝手がよろしくない。また、図に示されていない航空機材に対応するなどの場合についてはESWLを直接算出する必要がある。空港舗装設計要領²⁾には、ESWLの算出方法についても示されているものの、その算出はたわみ係数を用いて行う必要があり、多少煩雑な過程を辿る必要がある。また、たわみ係数表は印刷物ベースのものであり、電子化がなされていない。

こうした点について、設計のより一層の利便性、効率性の向上を図ることを目的として、今回、フリーソフトRを用いて、たわみ係数とESWLを算出するプログラムを作成した。このプログラムを用いて、マイクロソフトエクセルベースのたわみ係数表を作成し、佐藤¹⁾の作成したたわみ係数表との比較等諸検討を行った。最後にプログラムのソースコードを掲載し、概要を解説している。

なお、たわみの表記について、佐藤¹⁾の港湾技研資料では、「撓み」となっているが、本稿では、「たわみ」に統一している。

2. 空港アスファルト舗装の設計の流れ

2.1 空港アスファルト舗装の設計法

空港舗装の設計は、平成20年7月に性能設計化されたが、性能照査方法として、空港舗装設計要領²⁾に理論的設計法と経験的設計法が示されている。

このうち、新設の滑走路、誘導路等空港アスファルト舗装の設計については、交通量が1万回未満の場合には、経験的設計法を用いることができるとされている。

一方、施設老朽化等に伴い、近年空港舗装工事の大半を占めている滑走路のオーバーレイ等大規模改修については、理論的設計法、経験的設計法どちらで照査してもよいこととなっているが、経験的設計法が用いられることが多い。なお、経験的設計法と理論的設計法の概要は以下の通りである。

① 経験的設計法

設計航空機荷重区分、設計反復作用回数、路床の設計CBRから舗装厚を算定する手法

- ・新設で設計反復作用回数が10000回未満の場合
 - ・補修設計の場合
- に適用できる。

② 理論的設計法

想定される航空機の諸元、交通量、各層の弾性係数等から疲労度を算出して舗装厚を算定する手法

両設計法について、将来的には、どちらかという理論設計法により歩み寄った方向でのさらなる統合が必要と考えるが、その間にはまだまだ検討すべき課題も多く、時間が必要であり、当分の間、経験設計法によっても設計を行う必要があると考えている。

2.2 空港アスファルト舗装の経験的設計法とESWL

ここで、空港アスファルト舗装の経験的設計法の概要について述べる。理論的設計法は、平成20年7月の性能設計化と同時に導入されたが、経験的設計法はこれ以前より空港舗装の設計法として用いられていた設計法であり、就航機材の交通量や路床の強さ等に応じ、必要な舗装厚を算定する方法、すなわち、設計航空機荷重区分、設計反復作用回数、路床の設計CBRから舗装厚を算定する方法である。

ここで、設計者サイド及び基準作成サイドからみた経験的設計法における大まかな流れを図-1に示す。

さて、ESWLがどのように使われるかであるが、まず、設計者サイドから設計の流れ(図-1左側フロー参照)をみると、最初に、当該空港の就航機材等から航空機の荷重に応じてカテゴリー化されたLA-1、LA-2等の設計荷重区分を決定する。例えばB747-400が主要航空機であれば、LA-1といった具合である。LA-1に対してはB747-400のように、空港舗装設計要領²⁾に各設計荷重区分毎に代表航空機が示されており、これにより代表航空機が決定される。続いて、各種就航予定機材の交通量を代表航空機の交通量(設計反復作用回数)に換算する必要があるが、

このとき、両機材のESWLの比の平方根を各種就航予定機材の交通量に乗じて換算を行うことが空港舗装設計要領²⁾に示されている。一般的な航空機材毎のESWLは図の形で空港舗装設計要領²⁾に示されているが、掲載されていない新規航空機材へ対応する場合など、場合によってはたわみ係数表までさかのぼって、ESWL値を算出することが必要となる。

次に、基準作成サイドからの設計の流れをみってみる。

(図-1右側フロー参照) 基準作成者には大きく2つの役割があり、①設計荷重区分毎の代表航空機に対する基準舗装厚の提示と②個別機材に対する深さ毎のESWLの提示がそれである。①、②とも各機材に対して、まず、たわみ係数を用いてESWLを算出する。①の場合、続いてCE (アメリカ陸軍工兵隊, corps of engineering) の式に基づき代表航空機に対する基準舗装厚を算出後、設計反復作用回数に応じた舗装厚を算出し、設計荷重区分、設計反復作用回数別の舗装厚の表 (例えば表-1, LA-3の場合) の作成・提示を行うといった流れとなる。

表-1 設計反復作用回数、路床の設計CBRに対応した基準舗装厚 (LA-3の場合)

(単位: cm)

路床の設計CBR	設計反復作用回数の区分		
	a	b	c
	6000回	10000回	20000回
2	133	140	150
2.5	118	125	133
3	107	113	121
3.5	98	103	111
...			
16以上	37	39	41

2.3 舗装厚算出の流れについての補足

次に、2.2で記述した内容について、具体的数式を交えて、補足的に少し詳しく記述する。

2.2で記した通り設計者サイドにおいて、設計反復作用回数の算出にあたり、各種就航予定機材の交通量を代表機種の交通量に換算する必要があるが、空港舗装設計要領²⁾には次式の通りの両機材のESWLの比の平方根

$$\sqrt{\frac{ESWL(\text{ある就航機材})}{ESWL(\text{代表航空機})}}$$

を各種就航予定機材の交通量に乗じて換算を行うことが示されている。

基準作成サイドにおいては、代表航空機に対する基準舗装厚を算出することが必要であるが、この基準舗装厚 t (mm) は、CE (アメリカ陸軍工兵隊, corps of engineering) が行った単車輪荷重の実験結果に基づき、路床CBR, ESWL, 単車輪の設置面積 A (mm²) の値から以下の式によって算出される。

$$\frac{t}{\sqrt{A}} = \sqrt{\frac{1}{0.057 \cdot \frac{CBR}{ESWL/A}} - \frac{1}{\pi}}$$

実際には、ESWLは舗装厚 t に依存するため、繰り返し計算等により求める必要がある。このように舗装厚の算定においては、ESWLを算出することが必要となる。

その後、設計反復作用回数 (設計対象航空機の交通量に換算された交通量) に応じて、以下の式により基準舗装厚の補正を行い設計反復作用回数に応じた設計舗装厚を算出する。

$$t_N = \alpha t$$

$$\alpha = 0.23 \cdot \log\left(\frac{N}{2}\right) + 0.15$$

ここで、 N : 設計反復作用回数

t_N : 設計反復作用回数 N に対応した舗装厚

t : 基準舗装厚

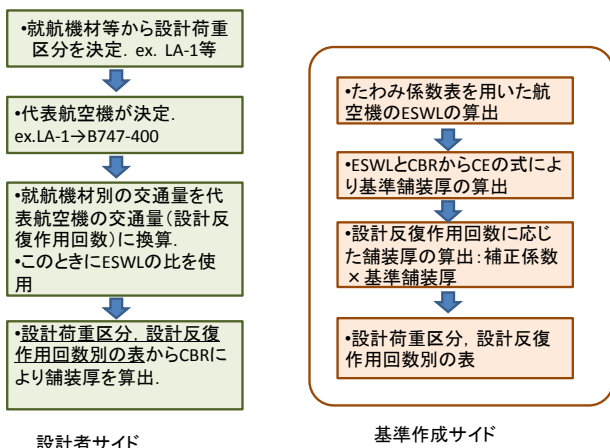


図-1 経験的設計法の流れ

2.4 たわみ係数とESWL

続いて、ESWLとたわみ係数について少し詳しく記述する。

(1) たわみ係数

空港舗装設計要領²⁾において、たわみ係数は、載荷圧 p_0 、載荷半径 l の鉛直円形等分布荷重による弾性率 E の半無限弾性体に生じる鉛直方向の変位 u_z を次式で表現したときの F として定義されている。

$$u_z = \frac{p_0 l F}{E}$$

(2) ESWL 等価単車輪荷重

空港舗装設計要領²⁾においては、空港アスファルト舗装におけるESWL (equivalent single wheel load, 等価単車輪荷重)とは1脚に複車輪や複々車輪など複数の車輪を持つ脚荷重の舗装への影響(路床のたわみ)が等しくなるよう換算した単車輪荷重とされている。

(3) たわみ係数とESWLの関係

空港舗装設計要領²⁾には、具体的なESWLの求め方が記載されている。空港アスファルト舗装におけるたわみ係数からESWLを算出する方法は以下の通りである。図-2に示すように図左側に示すような複数の車輪荷重(この場合4輪)により生じる路床上部の鉛直方向のたわみ u_{zd} (の最大値)と等しい鉛直方向の最大たわみ u_{zs} を生じる図右側に示すような単車輪荷重がESWLである。

このとき、一輪あたりの接地面積 A (よって、接地半径 l も)を等しくするのがポイントで、 $u_{zd}=u_{zs}$ の関係から、たわみ係数 F_d 、 F_s を用いてESWLを求めることができ、

結局 $ESWL = \frac{1}{n_w} \frac{F_d}{F_s} P_d$ となる。(ここで、 n_w は車輪数)

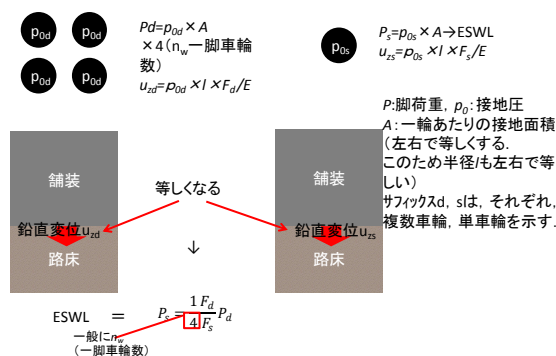


図-2 ESWLとたわみ係数の関係の概念

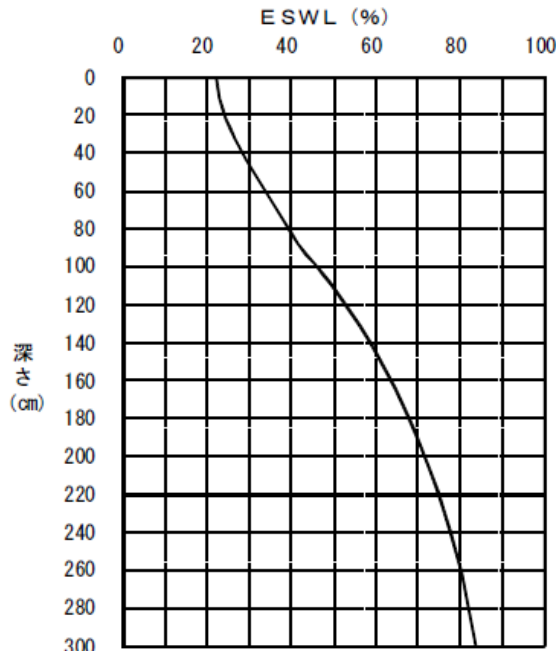
なお、複数の車輪荷重によるたわみ係数 F_d は、あらゆる位置における、各車輪によるたわみ係数 f の総和 f_d

$$f_d = \sum_{\text{車輪}=1}^{n_w} f$$

ここで、 n_w は車輪数の中の最大値である。なお、単車輪荷重のたわみ係数 F_s については車輪直下で最大となるので、この位置における値となる。

2.5 プログラム開発の必要性

このようにESWLは、経験的設計法によって空港アスファルト舗装の設計を行う場合に必要不可欠なものであるが、ESWL値は、現在、空港舗装設計要領²⁾の設計例に数ページを割いて掲載されており、機種毎に図-3のようなESWL図(横軸は、ESWL(kN)を脚荷重で除して正規化されたもの)により与えられている(図を使わない場合もしくは図に掲載されていない航空機に対してはやや煩雑な過程を経てたわみ係数から直接求める必要がある)。しかしながら、数値そのものを簡便に算出できる方が設計の利便性が高まると考えられることから、プログラムを作成することとした。



例図-1.15 B777-200

図-3 ESWL図の例²⁾

プログラムは、経験的設計法の場合で、特に以下の場合において活用が想定され、空港アスファルト舗装設計の効率化につながる事が期待される。

①施設老朽化等にもなう、近年空港アスファルト舗装工事の大半を占めている、滑走路、誘導路オーバーレイ等既存舗装の大規模改修の場合

③ 新設で設計反復作用回数が10000回未満の場合

①, ②の場合のうち、

- ・小型機に新型等が出現した場合や燃料調整等による影響を詳細に反映する場合(重量等が空港舗装設計要領²⁾に示されている値と異なる場合):特に小型機については、多くの型式が存在し、搭載エンジンの重量等の違いなどによるバリエーションが多く、要領等で全てを網羅することは困難であるという事情がある。

- ・比較的交通量が少ない空港の新設滑走路の設計で対象航空機が限定される場合:ある空港では、就航機材が限定されるため、この機材に対応した規準舗装厚を独自に作成している。

については、特にプログラムの活用による効果が大きいと考えられる。

3. たわみ係数の算出

3.1 たわみ係数の定義と算出方法

前述の通り空港舗装の経験的設計法においては、機材毎のESWLを算出することが必要であるが、これはたわみ係数を用いて算出することができる。

空港舗装設計要領²⁾においては、このたわみ係数として佐藤¹⁾により算出されたたわみ係数表を参照することとしている。

佐藤¹⁾は、円筒座標系における鉛直たわみの算出式からたわみ係数を算出しているが、今回、より簡単と考えられる構造力学公式集⁴⁾に記載されているせん断剛性 G 、ポアソン比 ν の半無限弾性体に半径 l 、載荷圧 p_0 の鉛直円形等分布荷重を載荷したとき(図-4参照)の鉛直方向の変位 u_z を求める式(Loveの解)を用いた。具体的には u_z は次式の通りである。

$$u_z = \frac{lp_0}{2G} \int_0^\infty \{z\xi + 2(1-\nu)\} e^{-\xi z} \frac{1}{\xi} J_1(\xi l) J_0(\xi r) d\xi \quad \text{式-1}$$

ここで、 l : 載荷荷重の半径

p_0 : 載荷圧 (p_0 ; $r \leq l$, 0 ; $r > l$)

G : せん断剛性 (= $E/2(1+\nu)$, E : 弾性率)

ν : ポアソン比

r : 載荷中心からの水平距離

z : 深さ

J_0, J_1 : 第0次及び1次の第一種ベッセル関数

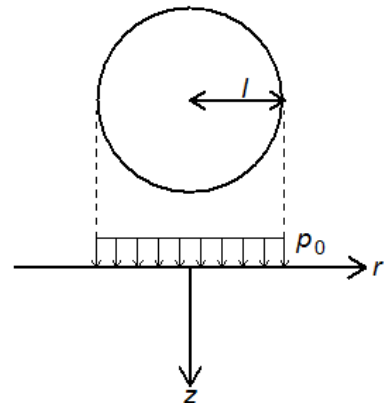


図-4 鉛直円形等分布荷重

2.4(1)で記述した通り空港舗装設計要領²⁾において、たわみ係数は、鉛直方向の変位 u_z を次式で表したときの F として定義されている。

$$u_z = \frac{p_0 l F}{E} \quad \text{式-2}$$

結局、式-1と式-2より、たわみ係数 F は、次式の通りとなる。

$$F = (1+\nu) \int_0^\infty \{z\xi + 2(1-\nu)\} e^{-\xi z} \frac{1}{\xi} J_1(\xi l) J_0(\xi r) d\xi \quad \text{式-3}$$

3.2 既往のたわみ係数表

佐藤¹⁾は、車輪のタイヤ接地半径 l で正規化した車輪中心からの水平方向距離、深さ毎にピッチの異なる以下のような2種類のたわみ係数表を作成している。

- ・たわみ係数表(1): 水平、深さ方向とも範囲は広いが、ピッチは粗い。

水平方向に $0 \sim 10l$ までは $0.25l$ 刻み、 $10l \sim 20l$ までは $0.5l$ 刻み、 $20l \sim 40l$ までは $1l$ 刻み。深さ方向は $0 \sim 15l$ まで $1l$ 刻みで算出。ポアソン比は 0.5 。有効数字は5桁。

- ・たわみ係数表(2): 水平、深さ方向とも範囲は狭いが、ピッチは細かい。

水平方向に $0 \sim 2l$ までは $0.25l$ 刻み、 $2l \sim 8l$ までは $0.5l$ 刻み、深さ方向は $0 \sim 10l$ まで $0.2l$ 刻みで算出。ポアソン比は 0.5 。有効数字は5桁。

なお、付録Aに佐藤¹⁾の作成したたわみ係数表を抜粋したものを示す。

3.3 作成したプログラムの算出結果と既往のたわみ係数表の比較

今回、たわみ係数を算出するプログラムを作成した。前述の通り、今回は、より簡易と考えられる、構造力学公式集⁴⁾に示されている半無限弾性体に対する鉛直円形等分布荷重載荷による鉛直変位を求める式-1を用いた。

計算精度を確認するため、作成したプログラムによる算出結果と佐藤¹⁾の算出した既往のたわみ係数表の値との比較を行った。

比較のために算出したたわみ係数の値を付録Bに示す。

作成したプログラムの算出結果とたわみ係数表(2)とは完全に一致した。たわみ係数表(1)とは、水平方向距離が大きくなると、有効数字の末尾(5桁目)が1異なる箇所などが数カ所あったが、実用上問題がないと判断される(なお、付録Bにおいて、異なる値を示した箇所については、二重枠で囲っている。)。この結果から、プログラムの計算精度には問題が無いと判断される。

そこで、実用的に必要と考えられる範囲を考慮し、水平方向は $0l \sim 10l$ の範囲について $0.1l$ ピッチで、深さ方向は $0.2l \sim 10l$ の範囲について $0.1l$ ピッチで、改めて、新たにマイクロソフトエクセルの表形式でたわみ係数表を作成した。作成したたわみ係数表を、表2~8に示す。また、視覚的にたわみ係数の深さ、水平方向距離の分布を捉えやすくするためRの図化機能を用いて鳥瞰図の形にしたものを参考に図-5に示す。

較結果から考慮すると、深さは $0.2l \sim 10l$ まで、タイヤ中心からの距離は $0l \sim 10l$ の範囲において、任意の深さ、中心からの距離におけるたわみ係数を十分な精度で算出することが可能であると考えられる。

なお、後述のESWLを算出するプログラムを用いれば、たわみ係数そのものを使う機会はあまり生じないと考えられるが、計算結果の検算や従来からのたわみ係数表を活用している設計者のため、たわみ係数表を掲載した。

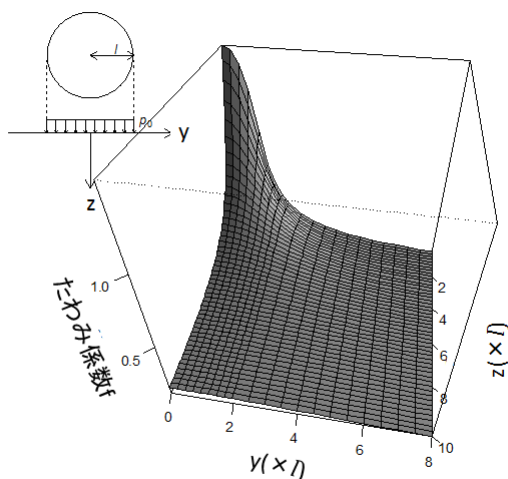


図-5 たわみ係数の中心からの距離、深さ方向分布

プログラムを用いた場合、佐藤¹⁾のたわみ係数表との比

表-3 たわみ係数表(その2)

Table with columns for distance (中心からの距離 × l) ranging from 1.6 to 2.9 and rows for depth (深さ × l) ranging from 0.2 to 10.0. The table contains numerical values for the deflection coefficient.

4. たわみ係数算出位置の検証

空港舗装設計要領²⁾においては、B747-400の場合について、ESWL算出の算定例が示されている。

まずたわみ係数であるが、2.4(3)で述べた通り、あらゆる位置における、各車輪によるたわみ係数 f の和

$$fd = \sum_{\text{車輪}=1}^{nw} f$$

の最大値が F_d となる。(ここで、 n_w は車輪数)

上述の算定例では、図-6の十字の位置(算出点)毎に各車輪によるたわみ係数 f の和 f_d を算出して(※十字は、車輪中心や車輪中心間の midpoint に設定されている)、和 f_d の中の最大値を F_d としている。

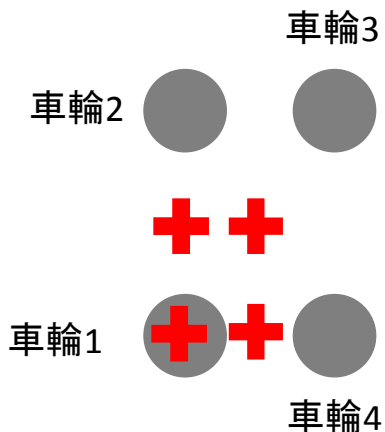


図-6 たわみ係数の算出位置

設計実務においては、あらゆる位置において f_d の計算を行うことは困難であり、算定例においては、計算の時間や手間等を考慮したためと考えられるが、たわみ係数の算出点は、図-6のように車輪中心や車輪中心間の midpoint となっている。しかしながら、実際には、最大値を示す位置は算出する深さ(舗装厚)が変化するのに伴い、随時変化しているはずである。これについて、今回作成したプログラムを用いて、深さを変えて、より細かく設定した算出点において算出を行い、算出点の違いによる算出値の違いに関する検証を行った。

4.1 対象機材

検証のために行った計算における対象機材は、1脚の車輪数等を考慮し、以下の3機種とした(いずれも満載時)。

- B747-400 (1脚4輪)
- B777-300 (1脚6輪)
- A320-200 (1脚2輪)

計算に必要な各機材の諸元としては、表-9に示す空港舗装設計要領²⁾に示されている値を用いた。

表-9 検討対象機材(満載時)の諸元

	B747-400	B777-300	A320-200
脚荷重(kN)	910.0	1396.0	319.0
複車輪の横中心間隔(cm)	111.8	140.0	92.7
複々車輪の縦中心間隔(cm)	147.3	290.0	-
タイヤ接地面積(cm ²)	1652.0	1574.0	1250.0
タイヤ接地半径(cm)	22.9	22.4	19.9

4.2 計算方法

理論的にESWLの値を算出するのは困難であるため、最大値と最大値を示す位置を数値計算により近似的に算出した。

B747-400については、1脚4輪であり、配置の対称性から最大値を示す位置は図-7(車輪を灰色の○で示す)におけるように、任意の車輪と縦車輪の midpoint と横車輪の midpoint を結ぶ長方形内のどこかにある。このため、対象領域を縦100分割、横100分割し、各分割点における値を算出・比較して、深さ毎の最大値とその位置を算出した。

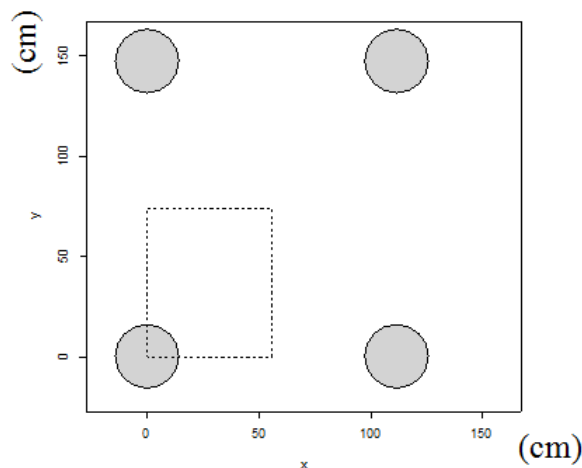


図-7 f_d の算出位置(B747-400)

B777-300については、1脚6輪であり、配置の対称性から最大値を示す位置は図-8に示すように四隅の任意の車輪と全車輪の中心を結ぶ長方形のどこかにある。このため、予備的に対象領域を縦25分割、横25分割し、概略の傾向をつかみ、改めて対象領域を設定し、その後、図-9に示すように、これを100分割し、分割点における値を算出・比較して、深さ毎の最大値とその位置を算出した。

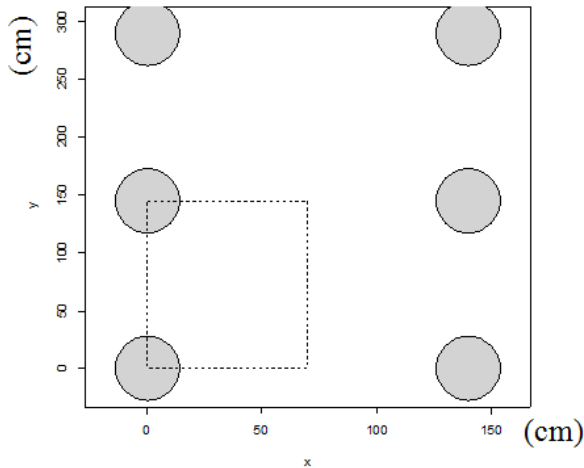


図-8 f_d の算出位置 (B777-300; 予備検討)

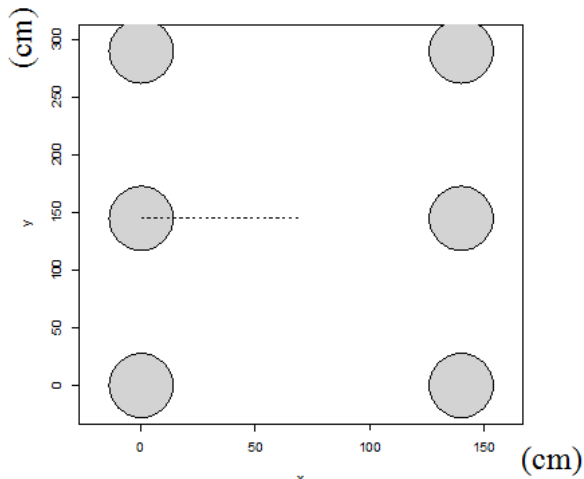


図-9 f_d の算出位置 (B777-300)

A320-200については、1脚2輪であり、図-10の通り最大値を示す位置は2輪を結んだ直線間のどこかにあるのは明らかである。このため、車輪の中点と車輪を結ぶ直線を100分割し、分割点における値を算出・比較して深さ毎の最大値とその位置を算出した。

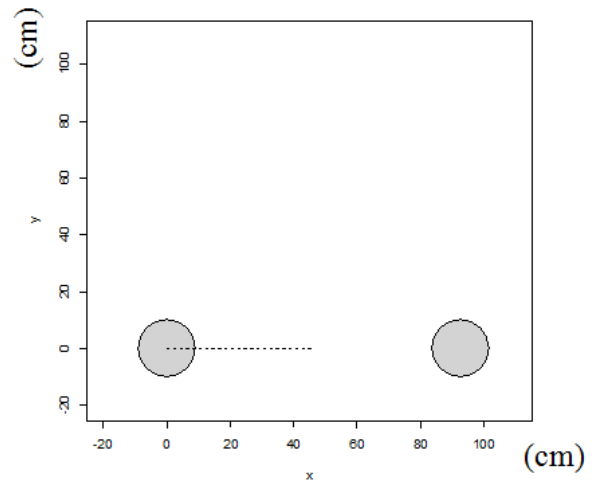


図-10 f_d の算出位置 (A320-200)

また、算出点の違いによる影響を検査するため、各対象機材毎にCBRが5~15の場合の基準舗装厚を算出し、比較してみた。実際の設計では、LA-1、LA-2等航空機の設計荷重区分に係る代表航空機に対する基準舗装厚が用いられるが、ここでは比較目的のため、各機材に対する基準舗装厚をあえて算出している。なお、計算時間の関係から、深さ10cmから300cmの間について2cmのピッチで計算したESWL値をスプライン補間して計算した。

4.3 計算結果

各対象機材毎の結果は以下の通りである。
B747-400の場合、深さが深くなるにつれて、最大値を示す位置は、図-11に示すようなやや複雑な軌跡を示した。

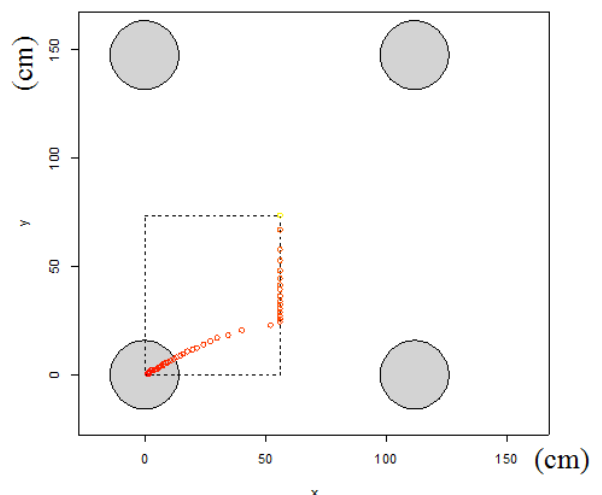


図-11 f_d が最大値を示す位置 (B747-400)

B777-300の場合、深さが深くなるにつれて、最大値を示す位置は、車輪直下から全車輪間中点（脚中心点）へと移動した。（図-12）

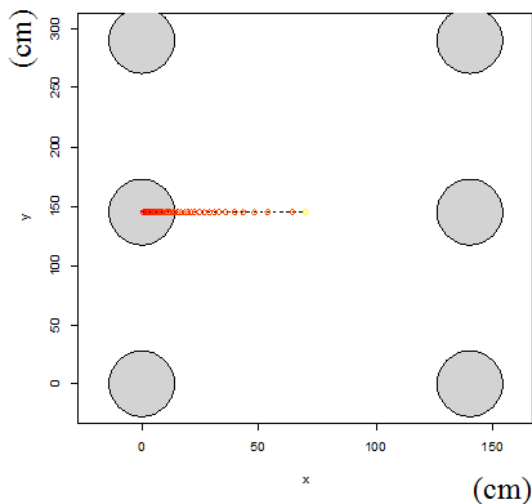


図-12 f_d が最大値を示す位置(B777-300)

A320-200の場合、深さが深くなるにつれて、最大値を示す位置は車輪直下から車輪間中点へと移動した。（図-13）

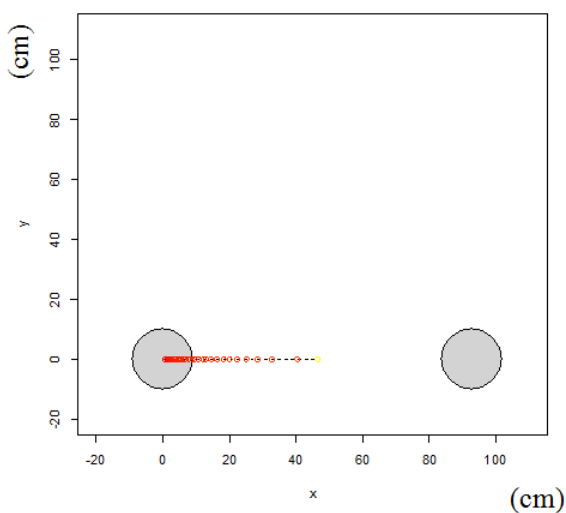


図-13 f_d が最大値を示す位置

対象機材毎のESWL(%)の違いを図14～16に示す。図中、実線が図-7, 9, 10の分割点で算出した結果、点線が空港舗装設計要領²⁾で示された位置で算出した結果である。

B747-400では、ESWL(%)の差(詳細-要領)は最大で1.3%、両者の比(詳細/要領)は最大で1.03となった。B777-300では、ESWL(%)の差は最大で0.7%、両者の比は最大で1.02となった。A320-200では、ESWL(%)の差は最大で1.5%、

両者の比は最大で1.02となった。

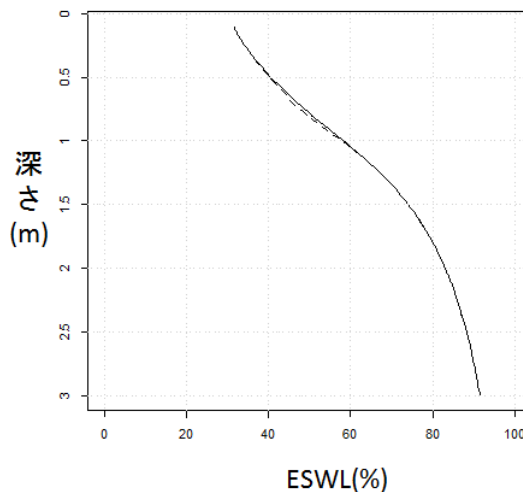


図-14 算出点の違いによる ESWL(%) 曲線の違い (B747-400)

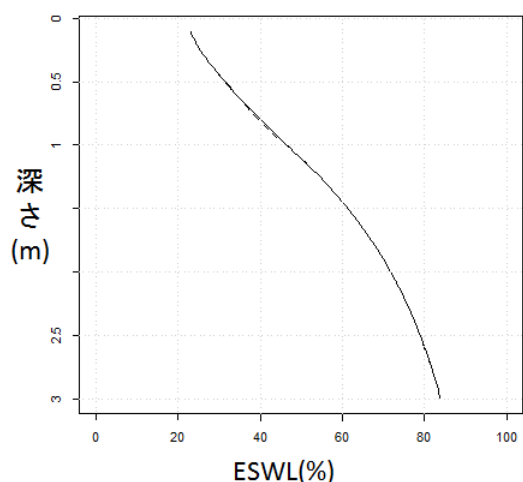


図-15 算出点の違いによる ESWL(%) 曲線の違い (B777-300)

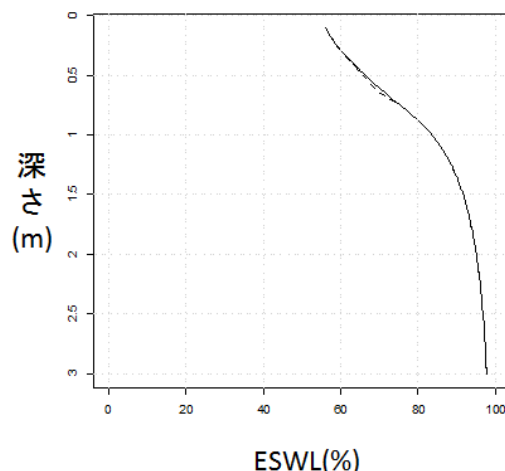


図-16 算出点の違いによる ESWL(%) 曲線の違い (A320-200)

各機材毎にCBRが5~15の場合の算出点の違いにより生じる基準舗装厚の差(詳細-要領)を算出した結果を表-10に示す。

表-10 算出点の違いによる基準舗装厚の差

CBR	基準舗装厚の差(cm)		
	B747-400	B777-300	A320-200
5	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.2
8	0.2	0.0	0.6
9	0.7	0.0	0.8
10	1.4	0.0	0.6
11	1.3	0.3	0.4
12	1.4	0.9	0.4
13	1.5	1.1	0.3
14	1.2	0.9	0.2
15	0.9	0.7	0.2

4.4 考察

上述のように、空港舗装設計要領²⁾に示される算出点で算出した場合と、より詳細に算出した場合のESWLの相違は以下のように軽微であり、計算コスト等を考慮すると空港舗装設計要領²⁾の算出位置は概ね妥当と考えられる。

- 算出点の違いによるESWL曲線について違いはあるが、わずかである。両者の比(詳細/要領)は、B747-400で1.03, B777-300で1.02, A330-200で1.02となった。
- 確認のため、CBRが5~15の場合に基準舗装厚を算出し比較してみた(※実際には、LA-1, LA-2等航空機の設計荷重区分に係る代表航空機に対する基準舗装厚が用いられるが、ここでは比較のため、各機材に対する基準舗装厚を算出してみた。)

なお、計算時間の関係から、詳細な算出点に対しては深さ2cmピッチで計算されたESWL値をスプライン補間して計算した。生じた差は、基準舗装厚数十cmに対して最大1cm程度であった。

5.作成したプログラムのソースコードと概要

今回、たわみ係数とESWLを算出するプログラムをR(言語)を用いて作成した。

5.1 R(言語)について

Rは、統計計算と図化のための言語及び環境である。GNUプロジェクトであり、オープンソースかつGNU(General Public Licence)の基でフリーソフトとして利用可能である。但し、完全に無保証である。

豊富で広範な統計計算機能以外にも、数値計算についても多くの機能を有していることと図化も容易で豊富な機能を有していることから、今回、このRを用いてたわ

み係数とESWL算出のためのソースコードを記述することとした。

Rは、windows, Unix等のプラットフォームで作動するが、各地のミラーサイトからダウンロードし、ユーザーパソコンにインストールする必要がある。日本では、例えば筑波大等のミラーサイトからダウンロードできる。なお、Rのダウンロードやインストールなどについては、Rに関する書籍等が広く刊行されているのでそれらを参照されたい。(例えば参考文献5), 6)等)

また、インタープリタ型言語であり、処理速度をあげるためには、データをベクトルとして扱う等多少のテクニックを必要とされる。

Rのプログラムを実行させる場合、ソースコードをコピー&ペーストでコマンドプロンプト以降に貼り付けるか、Rの標準エディタの機能を利用して行う。

5.2 ソースコードと概要

作成したプログラムのソースコードを示すとともにその概要を説明する。

(1) たわみ係数算出プログラム

図-17にたわみ係数算出のためのプログラムを示す。

R(言語)において#から始まる行はコメント文(コメントを記載するための文で実行されない文)を表す。また、プログラム本体にコメント以外で全角文字が入り込むと誤動作の原因となるので注意が必要である。できれば、コメントを含め全角文字は使わない方が無難である。

```

###
wz<-function(x,y,z){
  (1+nu)*(z*x+2*(1-nu))*exp(-z*x)/x*besselJ(x*1,1)*besselJ(x*y,0)
}
###
#####
k<-1
i<-1
j<-1
nu<-0.5

yi<-c(seq(0,10,0.1))
zj<-seq(0.2,10,0.1)

fd<-matrix(0,length(yi),length(zj))
fdd<-matrix(0,length(yi),length(zj))

for(y in yi){
  for(z in zj){
    fd[i,j]<-integrate(wz,lower=0,upper=Inf,y=y,z=z,l=l,rel.tol=1e-7)$value
    fdd[i,j]<-integrate(wz,lower=0,upper=Inf,y=y,z=z,l=l,rel.tol=1e-7)$abs.error
    j<-j+1
  }
  i<-i+1
  j<-1
}

fd<-signif(fd,5)
fd<-t(fd)
rownames(fd)<-zj
colnames(fd)<-yi

write.table(fd,file="f/asawa7.csv")
#####

```

図-17 たわみ係数算出プログラム

(a)は、ユーザー関数wzを定義している部分である。Rでは、ユーザー関数は関数名<function(x)のように定義する。ここでは、式-3の右辺中の被積分関数wzを定義している。besselJ()は、第一種のベッセル関数を計算するRの組み込み関数である。なお、組み込み関数の詳細については、コマンドプロンプト以降に?関数名とするとヘルプが立ち上がり参照することができるので、詳細については適宜そちらを参照されたい。また、Rでは代入は<-とするのが一般的である。

(b)は、初期値の設定をしている部分である。なお、ijは後述の行列fdの添え字を指定するための変数である。nuはポアソン比であり、ここでは佐藤¹⁾に倣って0.5としている（半無限弾性体の材料係数について、弾性率Eは式中に現れてこないため、ポアソン比のみを設定）。

yi及びzjは、算出位置を定めている部分である。タイヤ接地半径ℓで正規化した深さで0.2～10の範囲について0.1間隔と、水平方向は0～10の範囲について0.1間隔としている。seq()は、一連の規則的な数列(ベクトル)を発生させる関数であり、ここでは、初期値から最終値まで一定の間隔の数列を作るため使用した。

続いて、計算したたわみ係数の格納のため行列fdを予め必要な次元で定義している。

fddは、計算結果の誤差を格納するための行列であり、通常、行列を参照する必要はないが結果に疑問が生じたときに参照するとよい。

(c)は、たわみ係数を算出する部分である。このため、前述のユーザ定義の関数wzを0～∞までの区間で積分する必要があるが、これには、Rに標準で実装されている積分のための関数integrate()を使用した。ただし、toleranceについて、計算精度を確保するため、デフォルトの値ではなく、rel.tolとして10⁻⁷を用いている。

(b)で設定した深さ、半径方向の位置でたわみ係数を算出するため、Rの繰り返しループを実現する関数for()を用いた。for()においては、制御変数が、繰り返し値として指定されたベクトルの値をとって繰り返し計算が行われる。

(d)は、計算された結果を収めた行列fdをcsvで出力するための準備と出力を行う部分である。

関数signif()は指定した有効桁数で丸めるための関数である。ここでは、計算結果に対して、有効数字5桁を指定している。t()は行列を転置する関数、rownames(), colnames()は、それぞれ、行、列に名前をつける関数（ここでは、正規化された深さ、水平距離）である。わざわざ行列を転置したのは、Rでは行列をcsvファイルに出力すると行列の縦横が逆になるためである。結果は、csv形

式（値がカンマで分離された形式。エクセル等で読み込める。）で出力される。なお、ここでファイル名はf/asawa.csvとしているが、これはユーザが任意に変更・設定できる。fはドライブ名であり、asawaがファイル名、csvは拡張子である。ドライブ名とファイル名の間には/を置く必要がある。

なお、タイヤ接地半径で正規化された任意の深さ、車輪中心からの水平距離のたわみ係数を求めるには、yとzを指定し、すなわちy<-、z<-として、

```
integrate(wz,lower=0,upper=Inf,y=y,z=z,l=1,rel.tol=1e-7)$value
```

をコマンドプロンプト以降に入力、もしくは多くの点に対して計算するなどの場合はプログラムを書き換えればよい。

ただし、3.3で述べた通り佐藤¹⁾との比較は、深さは0.2ℓ～10ℓまで、ダイヤ中心からの距離は0ℓ～10ℓで行っていること、また深さが0.2ℓより浅い場合には精度の低下やこのままの設定では計算が収束しない等の問題があるので、y, zを設定する場合はこの範囲で設定するのがよい。

なお、} (a), } (b), } (c)等は、説明の便宜上付与したものであり、実際のコードには}以降は含まれないことに留意されたい。

また、(b)で1(※ℓ)=1としている。これは式-3で表されるたわみ係数Fが、y=aℓ, z=bℓにおいてもy=a, z=bにおいても等しいためである。（これは式-3を置換積分することで簡単に確認できる。）

(2) ESWL算出プログラム

次にESWL算出のためのプログラムについて述べる。ソースコードは図-18に示している。以下概要を説明する。

```
###
wz<-function(x,y,z,l){
  (1+nu)*(z*x+2*(1-nu))*exp(-z*x)/x*besselJ(x*1,1)*besselJ(x*y,0)
}
###
} (a)

#####
kyori<-function(x,y)sqrt(sum((x-y)^2))
###
} (b)

###
eswl<-function(z,l,cr,cw,nw){
  fd<-0
  for(i in 1:dim(cr)[1]){
    kiyoc<-0
    for(j in 1:nw){
      y<-kyori(cr[i,],cw[j,])
      kiyoc<-kiyo+integrate(wz,lower=0,upper=Inf,y=y,z=z,l=1,rel.tol=1e-7)$value
    }
    fd[i]<-kiyo
  }
  y<-0
  fs<-integrate(wz,lower=0,upper=Inf,y=y,z=z,l=1,rel.tol=1e-7)$value#;print(fs);print(fd)
  return(c(which.max(fd),
    1/nw*max(fd)/fs*pd))
}
} (c)
```

図-18 ESWL算出プログラム

```
###
nw<-4

cwx<-c(0,0,111.8,111.8)
cwy<-c(0,147.3,0,147.3)

cwk<-cbind(cwx,cwy)
cw<-cw/100

pd<-910
A<-1652
A<-A/100^2
k<-sqrt(A/pi)

nu<-0.5
###

###
cr<-cw/2
###

###
z<-1.4
eswl(z,l=1,cr=cr,cw=cw,nw=nw)[2]
###
```

図-18 ESWL算出プログラム (続き)

(a)は、ユーザー関数wzを定義している部分であり、これは、先述のたわみ係数算出プログラムと同様である。

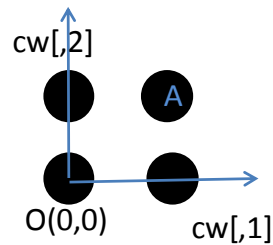
(b)は、2次元座標で表される点x(x0,x1)とy(y0,y1)の間の距離を計算する関数kyoriを定義している部分である。

(c)は、ESWLを計算するための関数eswlを定義している部分である。内側のforループにおいては、たわみ係数の総和を算出するある点において脚の各車輪によるたわみ係数を計算し総和をとって、変数kiyoに代入している。続いて、外側のforループにおいては、たわみ係数の総和を算出するすべての点について、内側のforループを実行するとともに、各点毎のたわみ係数の総和kiyoをあらためて、変数ベクトルfdに格納している。最終的にfdのうち最大のものを用いて、ESWLをfdとfsから求めている。関数eswlは、返り値として2値のベクトルを返すが、ESWL値はこのうち2つめの値である。

なお、これら3つの関数については、基本的にユーザが変更する必要が生じることはほとんどないと考えている。

(d)は、航空機の脚荷重の諸元に関する部分である。いくつかの変数が使われているが、ユーザーが変更する必要があるのは5つの変数nw, cwx, cwy, pd, Aである。nwは車輪数(2,4,6を想定)、cwxは車輪毎の機首方向車輪座標、cwyは車輪毎の機首直角方向車輪座標(cwx, cwyは車輪数nwの長さのベクトルであり、それぞれnw個の数値を入力することが必要である。)、pdは脚荷重(kN)、Aは接地面積(cm²)である。(図-19参照)プログラムのユーザーは、空港舗装設計要領²⁾の設計例や航空機メーカーから公表されている航空機諸元、運航者から提供される情

報等を参照し、まず、ESWLを求めようとする対象航空機の一脚あたりの輪数、配置、脚荷重、接地面積などの諸元に変更・設定する必要がある。なお、ユーザーが変更する必要がある部分については、図-18中において灰色がけをして示している。



入力項目(適宜プログラムソースを修正の上使用)

- 脚荷重: pd (kN)
- 車輪数: nw (2, 4, 6を想定)
- 一輪あたりの接地面積: A (cm²)
- 各車輪のx,y座標: cw (cm). 左下を原点(0,0)とし, x,y ≥ 0. cwxがx, cwyがy.

図-19 航空機材に対応して設定が必要な変数

(e)は、たわみ係数を算出する位置の座標を計算する部分である。ここでは、空港舗装設計要領²⁾に従い脚の各車輪の直下または中点としている。この部分については、例えば6輪で機首方向車輪間隔が一定でないなど複雑な脚内車輪配置の場合にはユーザが変更する必要がある。

(f)は、ESWLを算出する部分である。関数eswlの一連の引数のうち、ユーザーが設定する必要があるのは、深さzだけである。z<-の部分について深さを変更・設定すればよい。

一連の計算が終了すると、結果は、ESWL (kN) として、コンソールに出力される。

なお、繰り返しになるが、図-18中の } (a), } (b), } (c)等は、説明の便宜上付与したものであり、実際のコードには }以降は含まれないことに留意されたい。

5.3 プログラムの使用について

プログラムの使用については、本プログラム(改変したものを含め)を営利目的で販売、頒布するなど以外の利用は基本的に自由に使用していただいて構わない。また、算出された結果についての責任は負いかねるので、あくまでユーザーの自己責任のもとで使用することを条件としておく。

6. まとめ

本研究の結果をまとめると以下の通りである。

- (1)R（言語）を用いたたわみ係数算出及びESWLを算出するためのプログラムを作成した。
- (2)プログラムで算出したたわみ係数について佐藤¹⁾の結果と比較した。その結果基本的に一致した。
- (3)新たにたわみ係数表を、佐藤¹⁾の作成した表より細かいピッチで作成した。また、活用の利便性を考えマイクロソフトエクセルベースで作成した。
- (4) 代表的な、一脚あたりの車輪数が異なる、いくつかの航空機に対して、空港舗装設計要領²⁾におけるたわみ係数の算出点よりも詳細に算出点を設定し、空港舗装設計要領²⁾におけるたわみ係数の算出法を検証した。空港舗装設計要領²⁾の算出法は精度的に十分であることがわかった。
- (5)たわみ係数表及びESWLの算出プログラムのソースコードを掲載公開するとともに概要を解説し、新たな航空機材への対応等についてユーザがプログラムの改良を行う助けとした。

これらの結果は、空港アスファルト舗装の設計にあたり、支援ツール・資料として設計の利便性を高めることを通じてその効率化につながる有用なものとなると考えている。

7. おわりに

今回作成したプログラムを用いることにより、経験的設計法に基づく設計の効率化が図られることが期待される。

一方で、我が国の航空輸送を支えてきたB747、いわゆるジャンボジェット機が退役の時期を迎え、航空輸送の主力がB777となっている中で、これまでB747であったLA-1の航空機荷重区分の代表航空機や基準舗装厚の見直しの必要性についてもなんらかの検討を行っていくことが課題であると考えられる。この点については、理論設計法への移行や統合も含めて検討していく必要がある。

(2015年2月16日受付)

謝辞

最後に、今回、自らプログラミングを行ってみたが、過去大型電算機による大がかりな計算を必要として時代に比べ、同様の計算をパソコンで手軽かつ簡易に数値計

算を行うことができるようになったことについて計算機の発達の早さに驚くとともに開発言語自体に起因するプログラム開発のしやすさや利便性についても隔世の感を禁じ得ないところである。

一方で、改めて、佐藤滑走路研究室長の港湾技研資料を読み直し、その先見の明に対して感銘を受けるとともに自らの知見の限界を知り空港舗装について研究、技術開発を行っていくことの重要性を感じた次第である。

また、査読者の皆様におかれては、ご多忙のところ、貴重なご意見、ご指導をいただきありがとうございます。改めて感謝の意を表明いたします。

参考文献

- 1)佐藤勝久：CBR法によるアスファルト舗装厚設計のための撓み係数表，港湾技研資料，No.81，1969年
- 2)一般財団法人 港湾建設技術総合センター：空港舗装設計要領及び設計例，2013年
- 3)一般財団法人 港湾建設技術総合センター：空港舗装補修要領及び設計例，2013年
- 4) 土木学会：構造力学公式集，2006年，p.432.
- 5)舟尾暢男：The R Tips，オーム社，2012年
- 6)石田基広：R言語逆引きハンドブック，C&R研究所，2012年
- 7)<http://www.r-project.org/>，2015年2月

付録 A 佐藤¹⁾のたわみ係数表(抜粋)

表-A.1 たわみ係数表(1) (抜粋)

附表-1 たわみ係数表(1)					
(ポアソン比 $\nu=0.5$ の場合)					
$\rho=0.00r$	$x(r)$	F	5	0.29145E 000	
	0	0.15000E 001	6	0.24498E 000	
	1	0.10607E 001	7	0.21109E 000	
	2	0.67082E 000	8	0.18535E 000	
	3	0.47434E 000	9	0.16515E 000	
	4	0.36380E 000	10	0.14889E 000	
	5	0.29417E 000	11	0.13553E 000	
	6	0.24660E 000	12	0.12435E 000	
	7	0.21213E 000	13	0.11488E 000	
	8	0.18605E 000	14	0.10674E 000	
	9	0.16565E 000	15	0.99669E-001	
	10	0.14926E 000			
	11	0.13580E 000			
	12	0.12457E 000			
	13	0.11504E 000			
	14	0.10687E 000			
15	0.99779E-001				
$\rho=0.25r$	$x(r)$	F	$\rho=0.75r$	$x(r)$	F
	0	0.14763E 001	0	0	0.12590E 001
	1	0.10401E 001	1	0.88776E 000	0.61172E 000
	2	0.66376E 000	2	0.45090E 000	0.35267E 000
	3	0.47162E 000	3	0.28813E 000	0.24293E 000
	4	0.36253E 000	4	0.20981E 000	0.18448E 000
	5	0.29349E 000	5	0.16453E 000	0.14844E 000
	6	0.24619E 000	6	0.13518E 000	0.12409E 000
	7	0.21187E 000	7	0.11467E 000	0.10657E 000
	8	0.18588E 000	8	0.99532E-001	
	9	0.16552E 000	9		
	10	0.14916E 000	10		
	11	0.13573E 000	11		
	12	0.12451E 000	12		
	13	0.11500E 000	13		
	14	0.10684E 000	14		
15	0.99751E-001	15			
$\rho=0.50r$	$x(r)$	F	$\rho=1.00r$	$x(r)$	F
	0	0.14013E 001	0	0	0.95493E 000
	1	0.98020E 000	1	0.77623E 000	0.57207E 000
	2	0.64334E 000	2	0.43424E 000	0.34450E 000
	3	0.46362E 000	3	0.28361E 000	0.24025E 000
	4	0.35876E 000	4	0.20904E 000	0.18327E 000
			5	0.16367E 000	0.14780E 000
			6	0.13471E 000	0.12372E 000
			7	0.11438E 000	
			8		
			9		
			10		
			11		
		12			
		13			

表-A.2 たわみ係数表(2) (抜粋)

附表-2 撓み係数表(2)			8.8	0.16936E 000
(ポアソン比 $\nu=0.5$ の場合)			9.0	0.16565E 000
$\rho=0.00 r$	$x(r)$	F	9.2	0.16209E 000
			9.4	0.15868E 000
			9.6	0.15541E 000
			9.8	0.15227E 000
			10.0	0.14926E 000
	0.0	0.15000E 001		
	0.2	0.14709E 001		
	0.4	0.13927E 001		
	0.6	0.12862E 001		
	0.8	0.11713E 001		
	1.0	0.10607E 001		
	1.2	0.96029E 000		
	1.4	0.87186E 000		
	1.6	0.79500E 000		
	1.8	0.72846E 000		
	2.0	0.67082E 000		
	2.2	0.62070E 000		
	2.4	0.57692E 000		
	2.6	0.53847E 000		
	2.8	0.50450E 000		
	3.0	0.47434E 000		
	3.2	0.44741E 000		
	3.4	0.42325E 000		
	3.6	0.40147E 000		
	3.8	0.38174E 000		
	4.0	0.36380E 000		
	4.2	0.34743E 000		
	4.4	0.33243E 000		
	4.6	0.31864E 000		
	4.8	0.30593E 000		
	5.0	0.29417E 000		
	5.2	0.28327E 000		
	5.4	0.27313E 000		
	5.6	0.26369E 000		
	5.8	0.25486E 000		
	6.0	0.24660E 000		
	6.2	0.23885E 000		
	6.4	0.23157E 000		
	6.6	0.22471E 000		
	6.8	0.21824E 000		
	7.0	0.21213E 000		
	7.2	0.20636E 000		
	7.4	0.20088E 000		
	7.6	0.19568E 000		
	7.8	0.19075E 000		
	8.0	0.18608E 000		
	8.2	0.18158E 000		
	8.4	0.17732E 000		
	8.6	0.17325E 000		

$\rho=0.25 r$	$x(r)$	F
	0.0	0.14763E 001
	0.2	0.14459E 001
	0.4	0.13659E 001
	0.6	0.12596E 001
	0.8	0.11471E 001
	1.0	0.10401E 001
	1.2	0.94340E 000
	1.4	0.85825E 000
	1.6	0.78410E 000
	1.8	0.71971E 000
	2.0	0.66376E 000
	2.2	0.61496E 000
	2.4	0.57222E 000
	2.6	0.53458E 000
	2.8	0.50126E 000
	3.0	0.47162E 000
	3.2	0.44510E 000
	3.4	0.42128E 000
	3.6	0.39977E 000
	3.8	0.38028E 000
	4.0	0.36293E 000
	4.2	0.34632E 000
	4.4	0.33145E 000
	4.6	0.31778E 000
	4.8	0.30516E 000
	5.0	0.29349E 000
	5.2	0.28266E 000
	5.4	0.27259E 000
	5.6	0.26319E 000
	5.8	0.25441E 000
	6.0	0.24619E 000
	6.2	0.23848E 000
	6.4	0.23123E 000
	6.6	0.22440E 000
	6.8	0.21796E 000
	7.0	0.21187E 000
	7.2	0.20611E 000
	7.4	0.20065E 000
	7.6	0.19548E 000
	7.8	0.19056E 000

付録 B 比較のため算出したたわみ係数値（横欄：車輪中心からのタイヤ接地半径 ℓ で正規化された距離，縦：タイヤ接地半径 ℓ で正規化された深さ）※佐藤¹⁾の表と値が異なる部分を二重線で枠囲いしている。

表 B.1 たわみ係数表(1)との比較(その1)

		中心からの距離 $\times \ell$							
		0	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75
深さ \times ℓ	1	1.0607	1.0401	0.98020	0.88776	0.77623	0.66329	0.56304	0.48098
	2	0.67082	0.66376	0.64334	0.61172	0.57207	0.52792	0.48260	0.43868
	3	0.47434	0.47162	0.46362	0.45090	0.43424	0.41462	0.39305	0.37048
	4	0.36380	0.36253	0.35876	0.35267	0.34450	0.33457	0.32325	0.31090
	5	0.29417	0.29349	0.29145	0.28813	0.28361	0.27803	0.27152	0.26425
	6	0.24660	0.24619	0.24498	0.24298	0.24025	0.23684	0.23281	0.22824
	7	0.21213	0.21187	0.21109	0.20981	0.20804	0.20582	0.20317	0.20013
	8	0.18605	0.18588	0.18535	0.18448	0.18327	0.18174	0.17992	0.17781
	9	0.16565	0.16552	0.16515	0.16453	0.16367	0.16258	0.16128	0.15976
	10	0.14926	0.14916	0.14889	0.14844	0.14780	0.14700	0.14603	0.14491
	11	0.13580	0.13573	0.13553	0.13518	0.13471	0.13410	0.13336	0.13251
	12	0.12457	0.12451	0.12435	0.12409	0.12372	0.12325	0.12268	0.12201
	13	0.11504	0.11500	0.11488	0.11467	0.11438	0.11400	0.11355	0.11302
	14	0.10687	0.10684	0.10674	0.10657	0.10633	0.10603	0.10567	0.10524
	15	0.099779	0.099751	0.099669	0.099532	0.099341	0.099096	0.098799	0.098451

		2	2.25	2.5	2.75	3	3.25	3.5	3.75
深さ \times ℓ	1	0.41613	0.36516	0.32470	0.29209	0.26536	0.24312	0.22434	0.20828
	2	0.39787	0.36103	0.32837	0.29975	0.27478	0.25305	0.23409	0.21750
	3	0.34773	0.32546	0.30413	0.28404	0.26535	0.24813	0.23236	0.21797
	4	0.29788	0.28452	0.27111	0.25786	0.24497	0.23256	0.22073	0.20952
	5	0.25637	0.24806	0.23945	0.23070	0.22191	0.21319	0.20463	0.19628
	6	0.22320	0.21779	0.21208	0.20614	0.20007	0.19390	0.18772	0.18157
	7	0.19676	0.19308	0.18915	0.18500	0.18070	0.17627	0.17175	0.16719
	8	0.17545	0.17286	0.17006	0.16708	0.16395	0.16070	0.15734	0.15392
	9	0.15805	0.15616	0.15411	0.15191	0.14958	0.14714	0.14460	0.14198
	10	0.14363	0.14222	0.14068	0.13901	0.13724	0.13537	0.13342	0.13139
	11	0.13153	0.13045	0.12926	0.12798	0.12660	0.12514	0.12361	0.12201
	12	0.12125	0.12040	0.11947	0.11846	0.11737	0.11622	0.11500	0.11372
	13	0.11242	0.11174	0.11100	0.11019	0.10932	0.10839	0.10741	0.10637
	14	0.10476	0.10421	0.10361	0.10295	0.10224	0.10148	0.10068	0.099832
	15	0.098052	0.097605	0.097111	0.096571	0.095987	0.095361	0.094696	0.093993

表 B.2 たわみ係数表(1)との比較(その2)

中心からの距離 $\times \ell$

	4	4.25	4.5	4.75	5	5.25	5.5	5.75
1	0.19439	0.18226	0.17158	0.16209	0.15361	0.14599	0.13910	0.13283
2	0.20293	0.19008	0.17868	0.16852	0.15942	0.15123	0.14383	0.13711
3	0.20488	0.19299	0.18218	0.17235	0.16340	0.15523	0.14777	0.14094
4	0.19898	0.18909	0.17984	0.17123	0.16321	0.15575	0.14881	0.14236
5	0.18821	0.18044	0.17300	0.16590	0.15916	0.15276	0.14670	0.14097
6	0.17549	0.16953	0.16370	0.15804	0.15256	0.14727	0.14218	0.13730
7	0.16261	0.15805	0.15353	0.14906	0.14468	0.14039	0.13620	0.13213
8	0.15044	0.14693	0.14340	0.13989	0.13639	0.13293	0.12952	0.12617
9	0.13930	0.13658	0.13381	0.13103	0.12824	0.12545	0.12267	0.11992
10	0.12929	0.12715	0.12496	0.12274	0.12049	0.11823	0.11597	0.11370
11	0.12036	0.11865	0.11689	0.11510	0.11328	0.11144	0.10958	0.10771
12	0.11239	0.11101	0.10959	0.10814	0.10665	0.10513	0.10360	0.10204
13	0.10529	0.10416	0.10300	0.10180	0.10058	0.099321	0.098042	0.096744
14	0.098943	0.098016	0.097054	0.09606	0.095038	0.093989	0.092918	0.091826
15	0.093254	0.092482	0.091679	0.090847	0.089989	0.089106	0.088201	0.087276

	6	6.25	6.5	6.75	7	7.25	7.5	7.75
1	0.12712	0.12188	0.11706	0.11261	0.10849	0.10466	0.10109	0.097767
2	0.13099	0.12539	0.12024	0.11551	0.11113	0.10708	0.10331	0.099797
3	0.13466	0.12889	0.12357	0.11865	0.11410	0.10987	0.10593	0.10226
4	0.13636	0.13078	0.12558	0.12073	0.11621	0.11198	0.10802	0.10431
5	0.13556	0.13046	0.12565	0.12111	0.11683	0.11280	0.10899	0.10539
6	0.13262	0.12814	0.12387	0.11979	0.11590	0.11220	0.10867	0.10531
7	0.12818	0.12436	0.12066	0.11710	0.11366	0.11036	0.10719	0.10414
8	0.12288	0.11966	0.11652	0.11346	0.11048	0.10759	0.10479	0.10208
9	0.11719	0.11450	0.11185	0.10925	0.10670	0.10420	0.10176	0.099379
10	0.11144	0.10919	0.10697	0.10476	0.10259	0.10045	0.098337	0.096266
11	0.10583	0.10395	0.10208	0.10022	0.098366	0.096531	0.094714	0.092920
12	0.10048	0.098901	0.097322	0.095742	0.094165	0.092594	0.091031	0.089480
13	0.095430	0.094103	0.092767	0.091424	0.090077	0.088730	0.087384	0.086041
14	0.090716	0.089592	0.088455	0.087309	0.086155	0.084997	0.083835	0.082672
15	0.086334	0.085376	0.084404	0.083421	0.082429	0.081429	0.080423	0.079413

表 B.3 たわみ係数表(1)との比較(その3)

中心からの距離 $\times l$

	8	8.25	8.5	8.75	9	9.25	9.5	9.75
1	0.094653	0.091733	0.088990	0.086406	0.083970	0.081667	0.079489	0.077424
2	0.096520	0.093453	0.090576	0.087872	0.085327	0.082927	0.080659	0.078513
3	0.098832	0.095622	0.092612	0.089784	0.087123	0.084614	0.082245	0.080005
4	0.10083	0.097566	0.094492	0.091598	0.088868	0.086289	0.083852	0.081544
5	0.10200	0.098790	0.095755	0.092883	0.090163	0.087584	0.085137	0.082814
6	0.10211	0.099068	0.096169	0.093408	0.090777	0.088271	0.085881	0.083602
7	0.10121	0.098399	0.095705	0.093121	0.090644	0.088270	0.085993	0.083810
8	0.099452	0.096915	0.094463	0.092097	0.089813	0.087611	0.085487	0.083440
9	0.097059	0.094801	0.092605	0.090471	0.088399	0.086389	0.084440	0.082551
10	0.094234	0.092244	0.090297	0.088394	0.086536	0.084723	0.082956	0.081234
11	0.091150	0.089407	0.087692	0.086007	0.084353	0.082732	0.081143	0.079588
12	0.087941	0.086419	0.084914	0.083429	0.081964	0.080520	0.079100	0.077704
13	0.084705	0.083377	0.082058	0.080751	0.079457	0.078177	0.076912	0.075664
14	0.081510	0.080350	0.079195	0.078045	0.076903	0.075769	0.074645	0.073531
15	0.078400	0.077386	0.076373	0.075361	0.074353	0.073349	0.072350	0.071357

	10	10.5	11	11.5	12	12.5	13	13.5
1	0.075465	0.071830	0.068532	0.065524	0.062770	0.060239	0.057905	0.055745
2	0.076479	0.072715	0.069308	0.066208	0.063376	0.060778	0.058387	0.056177
3	0.077884	0.073962	0.070419	0.067200	0.064265	0.061578	0.059107	0.056829
4	0.079357	0.075309	0.071648	0.068322	0.065289	0.062513	0.059963	0.057612
5	0.080606	0.076506	0.072783	0.069392	0.066293	0.063452	0.060839	0.058429
6	0.081427	0.077366	0.073657	0.070261	0.067144	0.064277	0.061632	0.059187
7	0.081718	0.077785	0.074165	0.070828	0.067747	0.064898	0.062260	0.059813
8	0.081467	0.077732	0.074264	0.071043	0.068049	0.065263	0.062670	0.060253
9	0.080721	0.077232	0.073962	0.070900	0.068034	0.065349	0.062835	0.060479
10	0.079558	0.076339	0.073297	0.070424	0.067715	0.065160	0.062752	0.060483
11	0.078066	0.075127	0.072324	0.069657	0.067122	0.064716	0.062434	0.060271
12	0.076333	0.073666	0.071104	0.068647	0.066296	0.064049	0.061906	0.059861
13	0.074433	0.072026	0.069696	0.067446	0.065279	0.063196	0.061196	0.059278
14	0.072429	0.070263	0.068152	0.066102	0.064114	0.062192	0.060336	0.058547
15	0.070372	0.068426	0.066519	0.064655	0.062838	0.061071	0.059356	0.057695

表 B.4 たわみ係数表(1)との比較(その4)

		中心からの距離 $\times \ell$							
		14	14.5	15	15.5	16	16.5	17	17.5
深さ $\times \ell$	1	0.053742	0.051877	0.050138	0.048513	0.046989	0.045559	0.044213	0.042944
	2	0.054131	0.052229	0.050457	0.048802	0.047253	0.045800	0.044434	0.043147
	3	0.054721	0.052766	0.050946	0.049249	0.047663	0.046176	0.044780	0.043466
	4	0.055439	0.053425	0.051553	0.049808	0.048178	0.046652	0.045220	0.043875
	5	0.056200	0.054133	0.052212	0.050422	0.048750	0.047185	0.045718	0.044340
	6	0.056922	0.054819	0.052861	0.051036	0.049330	0.047733	0.046235	0.044827
	7	0.057538	0.055420	0.053445	0.051599	0.049872	0.048253	0.046732	0.045302
	8	0.057997	0.055890	0.053918	0.052071	0.050338	0.048710	0.047178	0.045736
	9	0.058270	0.056197	0.054251	0.052421	0.050699	0.049077	0.047547	0.046104
	10	0.058344	0.056328	0.054426	0.052631	0.050937	0.049335	0.047821	0.046388
	11	0.058221	0.056279	0.054439	0.052695	0.051042	0.049475	0.047988	0.046576
	12	0.057914	0.056059	0.054294	0.052613	0.051014	0.049492	0.048043	0.046663
	13	0.057441	0.055683	0.054001	0.052394	0.050858	0.049390	0.047988	0.046648
	14	0.056824	0.055168	0.053576	0.052048	0.050582	0.049175	0.047827	0.046534
	15	0.056087	0.054534	0.053035	0.051590	0.050198	0.048858	0.047568	0.046328
		18	18.5	19	19.5	20	21	22	23
深さ $\times \ell$	1	0.041747	0.040614	0.039542	0.038525	0.037558	0.035765	0.034135	0.032647
	2	0.041934	0.040787	0.039701	0.038672	0.037696	0.035884	0.034238	0.032738
	3	0.042228	0.041059	0.039954	0.038907	0.037914	0.036073	0.034404	0.032884
	4	0.042607	0.041412	0.040282	0.039213	0.038199	0.036323	0.034624	0.033078
	5	0.043042	0.041818	0.040663	0.039570	0.038534	0.036619	0.034886	0.033311
	6	0.043501	0.042252	0.041072	0.039956	0.038899	0.036944	0.035177	0.033572
	7	0.043955	0.042684	0.041484	0.040348	0.039272	0.037282	0.035483	0.033850
	8	0.044375	0.043091	0.041876	0.040725	0.039635	0.037617	0.035791	0.034132
	9	0.044740	0.043449	0.042227	0.041069	0.039970	0.037933	0.036087	0.034408
	10	0.045031	0.043744	0.042523	0.041364	0.040263	0.038217	0.036360	0.034668
	11	0.045236	0.043962	0.042751	0.041599	0.040502	0.038460	0.036600	0.034903
	12	0.045349	0.044097	0.042904	0.041765	0.040679	0.038652	0.036800	0.035105
	13	0.045369	0.044146	0.042977	0.041859	0.040790	0.038789	0.036954	0.035269
	14	0.045295	0.044108	0.042970	0.041879	0.040833	0.038868	0.037059	0.035392
	15	0.045135	0.043988	0.042885	0.041826	0.040807	0.038887	0.037112	0.035471

表 B.5 たわみ係数表(1)との比較(その5)

中心からの距離 $\times \ell$

	24	25	26	27	28	29	30	31	32
1	0.031284	0.030030	0.028873	0.027802	0.026807	0.025881	0.025017	0.024209	0.023452
2	0.031364	0.030101	0.028936	0.027858	0.026858	0.025927	0.025059	0.024247	0.023486
3	0.031493	0.030216	0.029038	0.027950	0.026940	0.026001	0.025126	0.024308	0.023541
4	0.031665	0.030369	0.029176	0.028073	0.027051	0.026102	0.025217	0.024391	0.023617
5	0.031874	0.030556	0.029343	0.028224	0.027188	0.026226	0.025330	0.024494	0.023712
6	0.032108	0.030767	0.029535	0.028398	0.027346	0.026370	0.025461	0.024614	0.023822
7	0.032360	0.030996	0.029743	0.028588	0.027520	0.026529	0.025607	0.024748	0.023945
8	0.032619	0.031234	0.029962	0.028789	0.027704	0.026699	0.025764	0.024893	0.024079
9	0.032876	0.031473	0.030183	0.028993	0.027894	0.026875	0.025927	0.025044	0.024219
10	0.033122	0.031704	0.030400	0.029197	0.028084	0.027052	0.026093	0.025199	0.024364
11	0.033348	0.031921	0.030606	0.029393	0.028269	0.027227	0.026258	0.025354	0.024510
12	0.033549	0.032117	0.030797	0.029576	0.028446	0.027395	0.026418	0.025506	0.024654
13	0.033718	0.032288	0.030967	0.029744	0.028608	0.027553	0.026570	0.025652	0.024794
14	0.033853	0.032430	0.031113	0.029890	0.028754	0.027697	0.026710	0.025788	0.024926
15	0.033950	0.032540	0.031231	0.030014	0.028881	0.027824	0.026837	0.025913	0.025048

	33	34	35	36	37	38	39	40
1	0.022740	0.022071	0.021439	0.020843	0.020280	0.019745	0.019239	0.018757
2	0.022771	0.022099	0.021466	0.020867	0.020302	0.019766	0.019258	0.018775
3	0.022822	0.022146	0.021508	0.020907	0.020338	0.019799	0.019289	0.018804
4	0.022892	0.022209	0.021567	0.020961	0.020388	0.019845	0.019331	0.018843
5	0.022978	0.022289	0.021640	0.021028	0.020450	0.019903	0.019385	0.018893
6	0.023079	0.022382	0.021726	0.021107	0.020524	0.019971	0.019448	0.018952
7	0.023193	0.022487	0.021823	0.021198	0.020607	0.020049	0.019521	0.019020
8	0.023317	0.022602	0.021930	0.021297	0.020699	0.020135	0.019601	0.019095
9	0.023448	0.022724	0.022043	0.021403	0.020798	0.020228	0.019688	0.019176
10	0.023583	0.022850	0.022162	0.021514	0.020902	0.020325	0.019779	0.019262
11	0.023720	0.022979	0.022283	0.021628	0.021010	0.020426	0.019874	0.019352
12	0.023857	0.023108	0.022405	0.021743	0.021119	0.020529	0.019972	0.019444
13	0.023990	0.023235	0.022526	0.021858	0.021228	0.020633	0.020070	0.019537
14	0.024117	0.023357	0.022643	0.021970	0.021335	0.020735	0.020168	0.019630
15	0.024236	0.023473	0.022755	0.022078	0.021439	0.020835	0.020264	0.019722

表 B.6 たわみ係数表(2)との比較(その1)

		中心からの距離 $\times \ell$							
		0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75
梁さ	0.2	1.4709	1.4459	1.3663	1.2123	0.93975	0.68260	0.54146	0.45275
	0.4	1.3927	1.3659	1.2812	1.1274	0.90780	0.69845	0.55595	0.46236
	0.6	1.2862	1.2596	1.1782	1.0419	0.86719	0.69763	0.56619	0.47235
	0.8	1.1713	1.1471	1.0754	0.96169	0.82236	0.68431	0.56834	0.47901
	1	1.0607	1.0401	0.98020	0.88776	0.77623	0.66329	0.56304	0.48098
	1.2	0.96028	0.94340	0.89472	0.82039	0.73073	0.63795	0.55211	0.47838
	1.4	0.87186	0.85825	0.81913	0.75949	0.68704	0.61051	0.53732	0.47198
	1.6	0.79500	0.78410	0.75273	0.70474	0.64586	0.58246	0.52014	0.46269
	1.8	0.72846	0.71971	0.69448	0.65567	0.60751	0.55474	0.50164	0.45136
	2	0.67082	0.66376	0.64334	0.61172	0.57207	0.52792	0.48260	0.43868
	2.2	0.62070	0.61496	0.59831	0.57237	0.53948	0.50236	0.46356	0.42523
	2.4	0.57692	0.57222	0.55853	0.53706	0.50961	0.47821	0.44490	0.41141
	2.6	0.53847	0.53458	0.52323	0.50533	0.48224	0.45555	0.42684	0.39754
	2.8	0.50450	0.50126	0.49177	0.47674	0.45719	0.43437	0.40953	0.38385
	3	0.47434	0.47162	0.46362	0.45090	0.43424	0.41462	0.39305	0.37048
	3.2	0.44741	0.44510	0.43832	0.42747	0.41319	0.39623	0.37742	0.35753
	3.4	0.42325	0.42128	0.41548	0.40617	0.39385	0.37912	0.36265	0.34507
	3.6	0.40147	0.39977	0.39478	0.38674	0.37606	0.36320	0.34872	0.33314
	3.8	0.38174	0.38028	0.37595	0.36897	0.35965	0.34838	0.33560	0.32175
	4	0.36380	0.36253	0.35876	0.35267	0.34450	0.33457	0.32325	0.31090
4.2	0.34743	0.34632	0.34302	0.33767	0.33047	0.32169	0.31162	0.30058	
4.4	0.33243	0.33145	0.32855	0.32383	0.31746	0.30967	0.30068	0.29077	
4.6	0.31864	0.31778	0.31521	0.31103	0.30537	0.29842	0.29038	0.28147	
4.8	0.30593	0.30516	0.30288	0.29916	0.29412	0.28790	0.28067	0.27263	
5	0.29417	0.29349	0.29145	0.28813	0.28361	0.27803	0.27152	0.26425	
5.2	0.28327	0.28266	0.28084	0.27786	0.27380	0.26876	0.26288	0.25629	
5.4	0.27313	0.27258	0.27095	0.26826	0.26460	0.26006	0.25472	0.24873	
5.6	0.26369	0.26319	0.26171	0.25929	0.25598	0.25186	0.24701	0.24155	
5.8	0.25486	0.25441	0.25307	0.25088	0.24788	0.24413	0.23972	0.23472	
6	0.24660	0.24619	0.24498	0.24298	0.24025	0.23684	0.23281	0.22824	
6.2	0.23885	0.23848	0.23737	0.23556	0.23307	0.22995	0.22626	0.22206	
6.4	0.23157	0.23123	0.23022	0.22856	0.22628	0.22342	0.22004	0.21618	
6.6	0.22471	0.22440	0.22348	0.22196	0.21987	0.21724	0.21413	0.21058	
6.8	0.21824	0.21796	0.21711	0.21572	0.21380	0.21138	0.20851	0.20523	
7	0.21213	0.21187	0.21109	0.20981	0.20804	0.20582	0.20317	0.20013	
7.2	0.20635	0.20611	0.20540	0.20421	0.20258	0.20052	0.19807	0.19526	
7.4	0.20088	0.20065	0.19999	0.19890	0.19739	0.19549	0.19322	0.19061	
7.6	0.19568	0.19548	0.19486	0.19385	0.19245	0.19069	0.18858	0.18616	
7.8	0.19075	0.19056	0.18999	0.18905	0.18775	0.18611	0.18415	0.18189	
8	0.18605	0.18588	0.18535	0.18448	0.18327	0.18174	0.17992	0.17781	
8.2	0.18158	0.18142	0.18093	0.18011	0.17899	0.17757	0.17587	0.17390	
8.4	0.17732	0.17717	0.17671	0.17595	0.17490	0.17358	0.17199	0.17015	
8.6	0.17325	0.17311	0.17268	0.17197	0.17100	0.16976	0.16827	0.16655	
8.8	0.16936	0.16923	0.16883	0.16817	0.16726	0.16609	0.16470	0.16309	
9	0.16565	0.16552	0.16515	0.16453	0.16367	0.16258	0.16128	0.15976	
9.2	0.16209	0.16197	0.16162	0.16104	0.16024	0.15922	0.15799	0.15656	
9.4	0.15868	0.15857	0.15824	0.15770	0.15694	0.15598	0.15482	0.15348	
9.6	0.15541	0.15531	0.15500	0.15448	0.15377	0.15287	0.15178	0.15052	
9.8	0.15227	0.15217	0.15188	0.15140	0.15073	0.14988	0.14885	0.14766	
10	0.14926	0.14916	0.14889	0.14844	0.14780	0.14700	0.14603	0.14491	

表 B.7 たわみ係数表(2)との比較(その2)

		中心からの距離 $\times \ell$							
		2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	3.75
深 さ \times ℓ	0.2	0.39047	0.34388	0.30754	0.27831	0.25425	0.23409	0.21692	0.20213
	0.4	0.39686	0.34830	0.31070	0.28065	0.25604	0.23548	0.21803	0.20303
	0.6	0.40472	0.35423	0.31520	0.28410	0.25873	0.23761	0.21975	0.20443
	0.8	0.41164	0.36024	0.32013	0.28810	0.26197	0.24025	0.22192	0.20623
	1	0.41613	0.36516	0.32470	0.29209	0.26536	0.24312	0.22434	0.20828
	1.2	0.41760	0.36828	0.32827	0.29557	0.26855	0.24595	0.22682	0.21043
	1.4	0.41609	0.36932	0.33049	0.29822	0.27125	0.24851	0.22916	0.21255
	1.6	0.41196	0.36831	0.33122	0.29984	0.27325	0.25062	0.23123	0.21449
	1.8	0.40572	0.36545	0.33047	0.30034	0.27444	0.25215	0.23290	0.21617
	2	0.39787	0.36103	0.32837	0.29975	0.27478	0.25305	0.23409	0.21750
	2.2	0.38886	0.35536	0.32510	0.29814	0.27429	0.25327	0.23476	0.21844
	2.4	0.37906	0.34872	0.32086	0.29564	0.27302	0.25285	0.23491	0.21895
	2.6	0.36879	0.34139	0.31583	0.29236	0.27104	0.25181	0.23453	0.21904
	2.8	0.35829	0.33357	0.31020	0.28846	0.26846	0.25022	0.23367	0.21870
	3	0.34773	0.32546	0.30413	0.28404	0.26535	0.24813	0.23236	0.21797
	3.2	0.33727	0.31719	0.29775	0.27923	0.26182	0.24562	0.23064	0.21688
	3.4	0.32699	0.30889	0.29117	0.27412	0.25794	0.24274	0.22857	0.21544
	3.6	0.31697	0.30063	0.28449	0.26881	0.25380	0.23957	0.22620	0.21372
	3.8	0.30726	0.29250	0.27778	0.26337	0.24945	0.23616	0.22357	0.21173
	4	0.29788	0.28452	0.27111	0.25786	0.24497	0.23256	0.22073	0.20952
4.2	0.28886	0.27675	0.26451	0.25233	0.24039	0.22882	0.21771	0.20713	
4.4	0.28020	0.26921	0.25802	0.24682	0.23576	0.22498	0.21457	0.20458	
4.6	0.27190	0.26191	0.25167	0.24136	0.23112	0.22108	0.21132	0.20190	
4.8	0.26396	0.25486	0.24548	0.23598	0.22650	0.21714	0.20800	0.19913	
5	0.25637	0.24806	0.23945	0.23070	0.22191	0.21319	0.20463	0.19628	
5.2	0.24912	0.24151	0.23361	0.22553	0.21738	0.20925	0.20123	0.19338	
5.4	0.24219	0.23522	0.22795	0.22048	0.21292	0.20534	0.19783	0.19044	
5.6	0.23557	0.22917	0.22247	0.21557	0.20854	0.20147	0.19444	0.18749	
5.8	0.22924	0.22337	0.21718	0.21079	0.20425	0.19766	0.19106	0.18453	
6	0.22320	0.21779	0.21208	0.20614	0.20007	0.19390	0.18772	0.18157	
6.2	0.21743	0.21244	0.20715	0.20164	0.19598	0.19022	0.18442	0.17863	
6.4	0.21191	0.20730	0.20240	0.19728	0.19200	0.18661	0.18117	0.17572	
6.6	0.20664	0.20236	0.19782	0.19305	0.18812	0.18308	0.17797	0.17284	
6.8	0.20159	0.19763	0.19340	0.18896	0.18436	0.17963	0.17483	0.16999	
7	0.19676	0.19308	0.18915	0.18500	0.18070	0.17627	0.17175	0.16719	
7.2	0.19213	0.18871	0.18504	0.18117	0.17714	0.17299	0.16874	0.16443	
7.4	0.18769	0.18451	0.18109	0.17747	0.17369	0.16979	0.16579	0.16173	
7.6	0.18344	0.18047	0.17728	0.17389	0.17035	0.16667	0.16291	0.15907	
7.8	0.17936	0.17659	0.17360	0.17043	0.16710	0.16364	0.16009	0.15647	
8	0.17545	0.17286	0.17006	0.16708	0.16395	0.16070	0.15734	0.15392	
8.2	0.17169	0.16926	0.16664	0.16384	0.16090	0.15783	0.15466	0.15142	
8.4	0.16808	0.16580	0.16334	0.16071	0.15794	0.15504	0.15205	0.14898	
8.6	0.16461	0.16247	0.16015	0.15768	0.15506	0.15233	0.14950	0.14659	
8.8	0.16127	0.15926	0.15708	0.15475	0.15228	0.14970	0.14702	0.14426	
9	0.15805	0.15616	0.15411	0.15191	0.14958	0.14714	0.14460	0.14198	
9.2	0.15495	0.15317	0.15124	0.14916	0.14696	0.14465	0.14224	0.13976	
9.4	0.15197	0.15029	0.14846	0.14650	0.14442	0.14223	0.13995	0.13759	
9.6	0.14909	0.14751	0.14578	0.14393	0.14195	0.13988	0.13771	0.13547	
9.8	0.14631	0.14482	0.14319	0.14143	0.13956	0.13759	0.13554	0.13340	
10	0.14363	0.14222	0.14068	0.13901	0.13724	0.13537	0.13342	0.13139	

表 B. 8 たわみ係数表(2)との比較(その3)

		中心からの距離 $\times \ell$							
		4.00	4.25	4.50	4.75	5.00	5.25	5.50	5.75
深 さ \times ℓ	0.2	0.18925	0.17793	0.16789	0.15893	0.15089	0.14362	0.13703	0.13102
	0.4	0.18998	0.17853	0.16840	0.15936	0.15126	0.14394	0.13730	0.13126
	0.6	0.19114	0.17950	0.16922	0.16006	0.15185	0.14446	0.13775	0.13165
	0.8	0.19265	0.18077	0.17029	0.16098	0.15265	0.14515	0.13836	0.13218
	1.0	0.19439	0.18226	0.17158	0.16209	0.15361	0.14599	0.13910	0.13283
	1.2	0.19626	0.18389	0.17299	0.16333	0.15470	0.14695	0.13995	0.13359
	1.4	0.19814	0.18556	0.17448	0.16465	0.15587	0.14799	0.14087	0.13442
	1.6	0.19994	0.18720	0.17596	0.16598	0.15707	0.14907	0.14185	0.13530
	1.8	0.20156	0.18873	0.17738	0.16729	0.15827	0.15016	0.14284	0.13620
	2.0	0.20293	0.19008	0.17868	0.16852	0.15942	0.15123	0.14383	0.13711
	2.2	0.20401	0.19121	0.17982	0.16963	0.16048	0.15224	0.14478	0.13800
	2.4	0.20475	0.19208	0.18075	0.17059	0.16143	0.15316	0.14566	0.13884
	2.6	0.20514	0.19268	0.18147	0.17137	0.16225	0.15398	0.14647	0.13962
	2.8	0.20519	0.19298	0.18195	0.17196	0.16291	0.15468	0.14717	0.14032
	3.0	0.20488	0.19299	0.18218	0.17235	0.16340	0.15523	0.14777	0.14094
	3.2	0.20426	0.19272	0.18217	0.17253	0.16371	0.15564	0.14824	0.14145
	3.4	0.20333	0.19217	0.18191	0.17250	0.16385	0.15590	0.14858	0.14185
	3.6	0.20212	0.19137	0.18143	0.17226	0.16380	0.15600	0.14879	0.14214
	3.8	0.20066	0.19033	0.18074	0.17184	0.16359	0.15595	0.14887	0.14231
	4.0	0.19898	0.18909	0.17984	0.17123	0.16321	0.15575	0.14881	0.14236
4.2	0.19710	0.18765	0.17877	0.17045	0.16267	0.15540	0.14862	0.14230	
4.4	0.19506	0.18604	0.17753	0.16951	0.16198	0.15492	0.14831	0.14213	
4.6	0.19289	0.18429	0.17614	0.16843	0.16116	0.15432	0.14788	0.14184	
4.8	0.19059	0.18242	0.17463	0.16722	0.16022	0.15359	0.14734	0.14146	
5.0	0.18821	0.18044	0.17300	0.16590	0.15916	0.15276	0.14670	0.14097	
5.2	0.18575	0.17837	0.17128	0.16448	0.15800	0.15182	0.14596	0.14039	
5.4	0.18323	0.17623	0.16947	0.16297	0.15674	0.15080	0.14513	0.13973	
5.6	0.18067	0.17404	0.16760	0.16139	0.15542	0.14969	0.14421	0.13899	
5.8	0.17809	0.17180	0.16567	0.15974	0.15402	0.14851	0.14323	0.13818	
6.0	0.17549	0.16953	0.16370	0.15804	0.15256	0.14727	0.14218	0.13730	
6.2	0.17289	0.16724	0.16170	0.15630	0.15105	0.14597	0.14107	0.13636	
6.4	0.17030	0.16494	0.15967	0.15452	0.14950	0.14463	0.13992	0.13537	
6.6	0.16772	0.16264	0.15763	0.15272	0.14792	0.14325	0.13871	0.13433	
6.8	0.16515	0.16034	0.15558	0.15090	0.14631	0.14183	0.13747	0.13325	
7.0	0.16261	0.15805	0.15353	0.14906	0.14468	0.14039	0.13620	0.13213	
7.2	0.16011	0.15578	0.15148	0.14722	0.14303	0.13892	0.13490	0.13098	
7.4	0.15763	0.15353	0.14944	0.14538	0.14138	0.13744	0.13358	0.12981	
7.6	0.15519	0.15130	0.14741	0.14354	0.13971	0.13594	0.13224	0.12861	
7.8	0.15279	0.14910	0.14540	0.14171	0.13805	0.13444	0.13089	0.12740	
8.0	0.15044	0.14693	0.14340	0.13989	0.13639	0.13293	0.12952	0.12617	
8.2	0.14812	0.14479	0.14143	0.13808	0.13474	0.13143	0.12815	0.12493	
8.4	0.14585	0.14268	0.13949	0.13629	0.13310	0.12992	0.12678	0.12368	
8.6	0.14362	0.14061	0.13757	0.13452	0.13146	0.12842	0.12541	0.12243	
8.8	0.14144	0.13857	0.13568	0.13276	0.12984	0.12693	0.12404	0.12117	
9.0	0.13930	0.13658	0.13381	0.13103	0.12824	0.12545	0.12267	0.11992	
9.2	0.13721	0.13462	0.13198	0.12932	0.12665	0.12398	0.12131	0.11866	
9.4	0.13517	0.13269	0.13018	0.12764	0.12508	0.12252	0.11996	0.11741	
9.6	0.13317	0.13081	0.12841	0.12598	0.12353	0.12107	0.11862	0.11617	
9.8	0.13121	0.12896	0.12667	0.12435	0.12200	0.11965	0.11729	0.11493	
10.0	0.12929	0.12715	0.12496	0.12274	0.12049	0.11823	0.11597	0.11370	

表 B.9 たわみ係数表(2)との比較(その4)

中心からの距離 $\times \ell$

	6.00	6.25	6.50	6.75	7.00	7.25	7.50	7.75	8.00
0.2	0.12551	0.12045	0.11579	0.11147	0.10746	0.10374	0.10026	0.097010	0.093964
0.4	0.12572	0.12064	0.11595	0.11162	0.10760	0.10386	0.10037	0.097107	0.094053
0.6	0.12607	0.12094	0.11622	0.11186	0.10781	0.10405	0.10055	0.097268	0.094199
0.8	0.12654	0.12136	0.11660	0.11219	0.10811	0.10432	0.10079	0.097489	0.094400
1.0	0.12712	0.12188	0.11706	0.11261	0.10849	0.10466	0.10109	0.097767	0.094653
1.2	0.12779	0.12248	0.11759	0.11309	0.10892	0.10505	0.10145	0.098095	0.094953
1.4	0.12853	0.12314	0.11820	0.11364	0.10942	0.10550	0.10186	0.098469	0.095296
1.6	0.12933	0.12386	0.11885	0.11423	0.10996	0.10600	0.10231	0.098882	0.095675
1.8	0.13015	0.12462	0.11954	0.11486	0.11053	0.10652	0.10280	0.099328	0.096085
2.0	0.13099	0.12539	0.12024	0.11551	0.11113	0.10708	0.10331	0.099797	0.096520
2.2	0.13181	0.12615	0.12095	0.11617	0.11174	0.10764	0.10383	0.10028	0.096972
2.4	0.13261	0.12690	0.12166	0.11682	0.11235	0.10821	0.10437	0.10078	0.097436
2.6	0.13336	0.12761	0.12233	0.11746	0.11296	0.10878	0.10490	0.10128	0.097905
2.8	0.13405	0.12828	0.12297	0.11808	0.11354	0.10933	0.10542	0.10178	0.098372
3.0	0.13466	0.12889	0.12357	0.11865	0.11410	0.10987	0.10593	0.10226	0.098832
3.2	0.13519	0.12943	0.12411	0.11918	0.11462	0.11037	0.10642	0.10273	0.099278
3.4	0.13564	0.12990	0.12459	0.11966	0.11509	0.11084	0.10687	0.10317	0.099706
3.6	0.13598	0.13028	0.12499	0.12008	0.11552	0.11126	0.10729	0.10358	0.10011
3.8	0.13622	0.13057	0.12533	0.12044	0.11589	0.11165	0.10768	0.10397	0.10049
4.0	0.13636	0.13078	0.12558	0.12073	0.11621	0.11198	0.10802	0.10431	0.10083
4.2	0.13640	0.13089	0.12575	0.12095	0.11646	0.11225	0.10831	0.10462	0.10114
4.4	0.13634	0.13092	0.12585	0.12110	0.11665	0.11248	0.10856	0.10488	0.10142
4.6	0.13617	0.13085	0.12586	0.12117	0.11677	0.11264	0.10875	0.10510	0.10165
4.8	0.13591	0.13070	0.12579	0.12118	0.11684	0.11275	0.10890	0.10527	0.10185
5.0	0.13556	0.13046	0.12565	0.12111	0.11683	0.11280	0.10899	0.10539	0.10200
5.2	0.13513	0.13014	0.12543	0.12098	0.11677	0.11279	0.10903	0.10547	0.10211
5.4	0.13461	0.12975	0.12514	0.12077	0.11664	0.11272	0.10901	0.10550	0.10217
5.6	0.13401	0.12928	0.12478	0.12051	0.11645	0.11260	0.10895	0.10548	0.10220
5.8	0.13335	0.12874	0.12435	0.12018	0.11620	0.11243	0.10883	0.10542	0.10218
6.0	0.13262	0.12814	0.12387	0.11979	0.11590	0.11220	0.10867	0.10531	0.10211
6.2	0.13183	0.12748	0.12332	0.11935	0.11555	0.11192	0.10846	0.10516	0.10201
6.4	0.13098	0.12677	0.12273	0.11885	0.11514	0.11160	0.10820	0.10496	0.10187
6.6	0.13009	0.12601	0.12208	0.11831	0.11469	0.11123	0.10790	0.10473	0.10168
6.8	0.12915	0.12520	0.12139	0.11773	0.11420	0.11081	0.10756	0.10445	0.10146
7.0	0.12818	0.12436	0.12066	0.11710	0.11366	0.11036	0.10719	0.10414	0.10121
7.2	0.12717	0.12347	0.11989	0.11643	0.11309	0.10987	0.10677	0.10379	0.10092
7.4	0.12613	0.12256	0.11909	0.11573	0.11248	0.10935	0.10632	0.10340	0.10060
7.6	0.12507	0.12161	0.11826	0.11500	0.11184	0.10879	0.10584	0.10299	0.10024
7.8	0.12398	0.12065	0.11740	0.11424	0.11118	0.10820	0.10533	0.10255	0.099861
8.0	0.12288	0.11966	0.11652	0.11346	0.11048	0.10759	0.10479	0.10208	0.099452
8.2	0.12176	0.11865	0.11561	0.11265	0.10976	0.10695	0.10423	0.10158	0.099018
8.4	0.12063	0.11763	0.11469	0.11182	0.10902	0.10629	0.10364	0.10106	0.098559
8.6	0.11949	0.11659	0.11376	0.11098	0.10826	0.10561	0.10303	0.10052	0.098079
8.8	0.11834	0.11555	0.11281	0.11012	0.10749	0.10491	0.10240	0.099958	0.097578
9.0	0.11719	0.11450	0.11185	0.10925	0.10670	0.10420	0.10176	0.099379	0.097059
9.2	0.11604	0.11344	0.11088	0.10836	0.10589	0.10347	0.10110	0.098783	0.096522
9.4	0.11488	0.11238	0.10991	0.10747	0.10508	0.10273	0.10043	0.098172	0.095970
9.6	0.11373	0.11132	0.10893	0.10657	0.10426	0.10198	0.099739	0.097548	0.095404
9.8	0.11258	0.11026	0.10795	0.10567	0.10343	0.10121	0.099043	0.096912	0.094825
10.0	0.11144	0.10919	0.10697	0.10476	0.10259	0.10045	0.098337	0.096266	0.094234

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 839 March 2015

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5018