

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

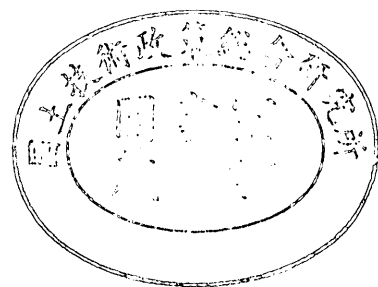
REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 11

NO. 3

SEPT. 1972

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第11巻 第3号 (Vol. 11, No. 3), 1972年9月 (Sept. 1972)

目 次 (CONTENTS)

1. An Analysis of the Hydraulic Transport of Solids in Horizontal
..... Tokuji YAGI, Tadasu OKUDE,
Shoji MIYAZAKI and Akio KOREISHI..... 3
(水平管路における土砂水力輸送の解析.....八木得次・奥出 律・宮崎昭児・是石昭夫)
2. 円柱の動揺に伴う造波抵抗 ——杭の波力応答と円形浮体の挙動への応用——
..... 伊藤喜行・木原 力..... 37
(Wave Making Resistance due to Oscillation of Circular Cylinder
.....Yoshiyuki ITO and Tsutomu KIHARA)
3. 柱状構造物の波力応答計算伊藤喜行・谷本勝利・小舟浩治..... 59
(Dynamic Response of an Offshore Platform to Random Waves
..... Yoshiyuki Ito, Katsutoshi TANIMOTO and Koji KOBUNE)
4. 波向線交差領域における波高分布 ——数値波動解析法の応用——
..... 伊藤喜行・谷本勝利・山本庄一..... 87
(Wave Height Distribution in the Region of Ray Crossings ——Application of
the Numerical Analysis Method of Wave Propagation——
.....Yoshiyuki ITO, Katsutoshi TANIMOTO and Shoichi YAMAMOTO)
5. 斜め入射部分重複波による質量輸送速度の分布に関する研究
..... 田中則男・入江 功・小笹博昭.....111
(A study on the velocity distribution of mass transport caused by diagonal partial
standing waves.....Norio TANAKA, Isao IRIE and Hiroaki OZASA)
6. 航空機荷重の路床・路盤への伝達機構に関する一研究
——巨人機の設計荷重——.....佐藤勝久・須田 潤.....141
(A Study on Aircraft Load Distribution through Bases to a Subgrade——Design
Load of a Jumbo Jet——.....Katsuhisa SATO and Hiroshi SUDA)
7. ブロック式けい船岸の設計について——非線形計画法による最適設計——
..... 高力健次郎.....167
(The application of SUMT to the Optimum Design of the block quay
.....Kenjiro KORIKI)

6. 航空機荷重の路床・路盤への伝達機構に関する一研究

——巨人機的设计荷重——

佐藤 勝久*, 須田 熙**

要 旨

大型航空機用空港アスファルト舗装における荷重の路床・路盤への伝達機構には不明な点が多いが、舗装体は性質が複雑で弾性理論だけでは解決がつかない。実際の空港用試験舗装上に、大型航空機に等しい荷重を載荷し、舗装の挙動を調べた。その結果、粒状材路盤の舗装と最近使用の多くなった安定処理路盤の舗装において、航空機荷重が路床・路盤へ伝達・分散する状況が明らかになった。

航空機の大型化は多様な脚および車輪の配置型式を生み、舗装厚の設計に対して設計条件を複雑化した。巨人機にみられるような脚間距離の小さな航空機では、他脚の影響を考慮しなければならない場合がある。各種深さの路床における応力や変位の分布を実測し、これらをもとに合理的な他脚の影響の換算法を考えてみた。安定処理路盤の場合は、等価な粒状材路盤に置き換えて、この換算法が流用できることも確かめた。

* 土質部 滑走路研究室

** 前土質部 滑走路研究室長

6. A Study on Aircraft Load Distribution through Bases to a Subgrade

—Design Load of a Jumbo Jet—

Katsuhisa SATO*

Hiroshi SUDA**

Synopsis

There have been lots of uncertain points regarding how an aircraft gear load transmits to bases and/or subgrade in an airport pavement for a large aircraft. As the properties of the materials of pavements are so complicated that they cannot be illustrated by only an elastic theory, some airport test pavements for large aircraft have been made and tested by full scale loadings—static and dynamic. The test results have made clear the state of transmission of a aircraft gear load to base and/or subgrade in the pavements with not only granular material bases but also stabilized material bases.

As the size and weight of aircraft have become larger, many kinds of arrangement of gears and wheels have appeared. This situation has complicated the design condition of airport pavements. In the case of an aircraft like a jumbo jet (B-747), the stresses from each gear overlap considerably at a very thick point of pavement because the distance between two gears of the aircraft has become smaller than that of a conventional large aircraft. So we must consider the influence in some cases of designing airport pavements. How to rationally consider the influence in design of airport pavements has been examined on the basis of the measured stresses and deflections in the subgrades of pavements. It has been demonstrated that a proposed way for a pavement with granular material bases can be also applied to a pavement with stabilized material bases. For it, a pavement with stabilized material bases must be converted into an equivalent pavement with granular material bases by using layer equivalencies.

* Member of Runways Laboratory, Soils Division

** Ex-Chief of Runways Laboratory, Soils Division

目 次

要 旨	141
1. ま え が き	145
2. 弾性理論による荷重伝達	145
2.1 弾性理論による応力および撓み	145
2.2 弾性理論での巨人機他脚の影響	147
3. 試験舗装での実測結果による荷重伝達	149
3.1 試験舗装の概要	149
3.2 荷重伝達の実測結果	151
3.3 弾性理論計算結果との比較	155
4. 巨人機他脚の影響の換算法	160
4.1 粒状材路盤での他脚の影響の換算法	160
4.2 安定処理路盤の場合の取り扱い方	163
5. あとがき	164
謝 辞	164
参考文献	164

1. まえがき

性質が複雑なアスファルト舗装の理論的解析は遅くされており、現在わが国のアスファルト舗装厚さの設計法は経験的手法といわれている CBR 法によっている。この CBR 法は路床や舗装材料の相対的強さを調べて、経験的設計曲線より設計する方法である。これに対し、Burmister により発表された撓み性舗装の設計法は、舗装を層状弾性体と考へて、弾性理論に基づき設計しようとするものである。

粒状材路盤を主体とした CBR 法を、多種多様な路盤材料と路盤構成を持つ最近の舗装に適用しようとする場合、いくつかの問題を生み、その適用の限界を感じさせる。また、経験的方法である CBR 法では、舗装表面を走行する荷重の複雑化にも適応して行けない。一方の Burmister 法などの弾性理論による設計法は、このような CBR 法のもつ欠点を打開するものではあるが、粘弾性および塑性の性質も持つ複雑な舗装構成材料を、弾性体に置き換えているため、理論結果が実際の舗装の挙動とは必ずしも一致せず、両者に無視できない差異の存在する場合も多い。したがって、このような理論的設計法は、今後の研究に期待しつつあるのが現状である。

CBR 法の持つ限界を突き破る合理的な設計法の確立を望む関係者の期待と、最近の研究の動向をみるときアスファルト舗装の設計でも、理論を中心にした方法に進んで行くであろうことは容易に想像できる。実際の舗装の挙動を十分正確に再現する理論の開発が望まれるわけであるが、このためには弾性理論を粘弾性理論や塑性理論へと拡張して行くとともに、一方で実験等によって実際の舗装体に生ずる応力、歪、撓みなどを、十分正確に認識しておくことも必要となる。

地盤や道路舗装での応力、歪、撓みなどの実測は、今までに数多く実施され、多くの結果が明らかにされているが、空港舗装、特に大型航空機用舗装での実験例は少なく、その挙動は不明な点が多い。この報告書では、未だ十分に明らかにされていない、大型航空機荷重による舗装、特に路盤の荷重伝達状況を、実際の試験舗装での載荷試験結果から求め検討を行なったものである。載荷試験は、砂路床上の野比試験舗装と、軟弱な粘性土路床上の載荷槽内試験舗装で行なわれた。

航空機の大型化、高速化は、その総重量の増大をもたらし、脚の配置型式や車輪の配置型式にも新しいタイプのものが種々現われてきた。ジャンボジェット機（巨人機）と呼ばれる B-747 は、1脚が4輪（複々車輪）の4

脚型式で、脚間距離は従来の大型航空機に比べてかなり小さい。（図-2.6参照）そのため、路床には各脚荷重が重ね合わさって作用し、1脚だけで舗装厚さを決めることは危険となる可能性がある。1層弾性理論をもとに CBR 法を使用して、B-747 の他脚の影響を検討した文献²⁾によれば、CBR が 2～3 といた小さいところでは、4脚全部を考慮して舗装厚さを設計した場合、従来の1脚だけを対象とした厚さの 40～50% 増となる。

粘弾性あるいは塑性の性質も合わせ持ついくつかの材料から成る多層構造の舗装体に、1層弾性理論を直接応用することには大きな問題があり、上述の結果の真偽性は疑わしい。アスファルト舗装の挙動を十分正確に表わす理論が存在しない現在、実験等により CBR 法を補正し、これを引続き利用して行くことはやむを得ないところである。4. では、試験舗装での荷重伝達効果の実測値をもとに、巨人機における合理的な他脚の影響の考慮の仕方を検討してみた。

2. 弾性理論による荷重伝達

2.1 弾性理論による応力および撓み

円形等分布荷重による多層構造中の変位や応力を、理論的に解く試みが、多くの研究者によってなされてきた。2層あるいは3層弾性体での変位や応力については整備された数表や図表が数多く発表されている。しかしこれらの多くは荷重中心点直下の値を対象としたものであった。2層弾性体の荷重中心点の変位は、Burmister 等³⁾によりほとんど解決されており、Jones による数表⁴⁾は3層弾性体の荷重直下の変位と応力を求める最も完備したものである。4層弾性体以上の多層構造の場合も、荷重直下の変位だけは、上田法⁵⁾ やナシメント法⁶⁾ によって近似的に計算は可能である。

空港舗装上に載る航空機荷重は、脚や車輪の配置が複雑で、各荷重は相互に干渉して舗装および路床に作用する。このような場合には、一車輪荷重直下の変位や応力を求めるだけでは十分ではない。複数の荷重で舗装や路床に生ずる変位や応力を求めるためには、円形等分布荷重による変位や応力を、1層あるいは多層構造中の任意の点で知る必要がある。

1層弾性体の場合には、1つの円形等分布荷重により弾性体中の任意の点に生ずる変位や応力は、完備された数表を用いることによって、容易に求めることができる。大型電子計算機を用いれば、有限要素法などの手法を応用して、複数の円形等分布荷重によって、多層弾性体中に生ずる変位や応力を厳密に解くことも可能であ

る。また、著者の提案した近似計算法⁷⁾を用いれば、大型電子計算機によらずに、ペンと計算尺のみで、複数の円形等分布荷重によって、多層弾性体中の任意の点に生ずる変位と応力が近似的に求まる。

舗装構造は一般に数層から成り、これを理論的に検討する場合には、層数を多くするほど実際の舗装に近くなる。しかし、現在のところ、4層以上では実用的な数表はなく、有限要素法などを利用した大型電子計算機による計算でも、各層の弾性定数(弾性係数やポアソン比)が明確でなく、これらの値の与え方によって、変位や応力の計算結果も大幅に変動する。また、実際の舗装の構成材料は、粘弾性的性質や塑性的性質も持ち、弾性理論に基づく解と実測結果との間には、かなりの差のある場合が多い。このようなことから、弾性理論による結果を舗装の設計や研究に利用する場合には、その定性的な特質を主に使用しているのが現状であろう。

舗装内の応力や変位の性状を検討するためには、1層、2層および3層弾性体での理論結果が使用されることが多かった。ここでは、1層および2層弾性体についての理論計算結果を用いて、円形等分布荷重の弾性体中での荷重伝達の定性的な状況を調べてみた。

図-2.1、2.2は1層弾性体での荷重の伝達状況で、通常舗装の設計で問題になる鉛直方向の撓みと応力について示してある。図-2.1は撓みについてであり、深さをパラメータに選び、荷重中心から半径方向の距離(オフセット) r を円荷重の半径 a で割った値と、沈下係数(F)と呼ばれる弾性体中の任意の点における撓みを規定する係数とで示した。図-2.2は鉛直応力の半径方向の分布を示し、撓みの場合と同様に深さをパラメータに選んである。縦軸は σ_z/p を意味する係数 K_z である。

当然のことながら、 z の増加とともに、荷重直下の F あるいは K_z は減少し、 z が0から $5a$ ぐらいで特に減少が大きい。また図から、 z が大きくなるほど、載荷重の影響は半径方向に遠くまで及び、 $|dw/dr|$ 、 $|d\sigma_z/dr|$ の値は小さくなっていることがわかる。同じ深さで比較した場合、 $|dw/dr|$ の方が $|d\sigma_z/dr|$ よりも小さくなっている。 z が0あるいは $1a$ といった小さいところでは F の場合に比べ、 K_z は r/a の小さな領域でほとんど0に近くなる。

2層弾性体について同様な解析を試みたのが図-2.3、2.4で、いずれも上層の厚さ t を $3a$ とし、上下層の境界面での鉛直の撓みと応力を対象としている。用いた2層弾性体での解は、日本大学理工学部交通工学科の三浦裕二氏の方法によるもので、文献⁷⁾の付録-2に示されてい

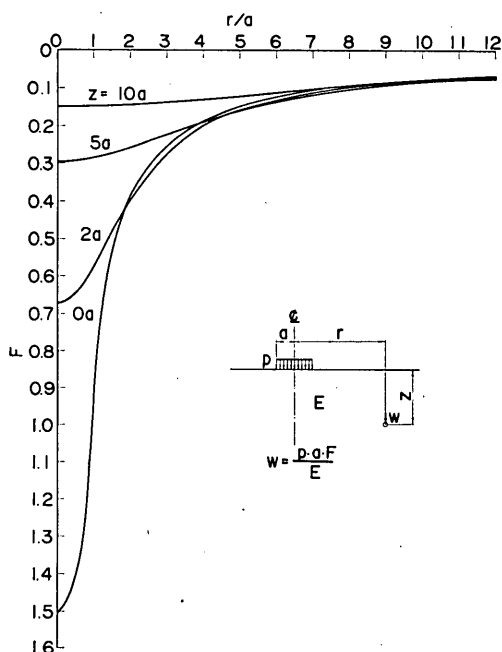


図-2.1 1層弾性体での荷重伝達状況(沈下係数)

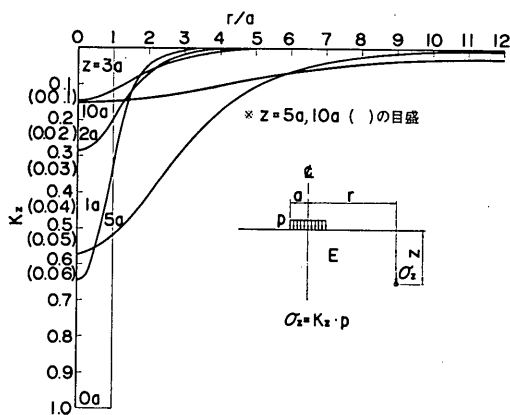


図-2.2 1層弾性体での荷重伝達状況(鉛直応力)

るので参照されたい。弾性係数 E_1 の層を舗装、 E_2 を路床と考えれば、荷重直下(オフセット0)での F や K_z の値を検討することにより、表層、基層、路盤などの荷重分散効果が比較できる。また、半径方向の F や K_z の分布から、表層、基層、路盤の荷重伝達の状況を推察できる。

E_2 を一定と考えれば、 E_1 の増加は E_1/E_2 も大きくし、図から上層の荷重分散効果と荷重伝達状況が判明する。

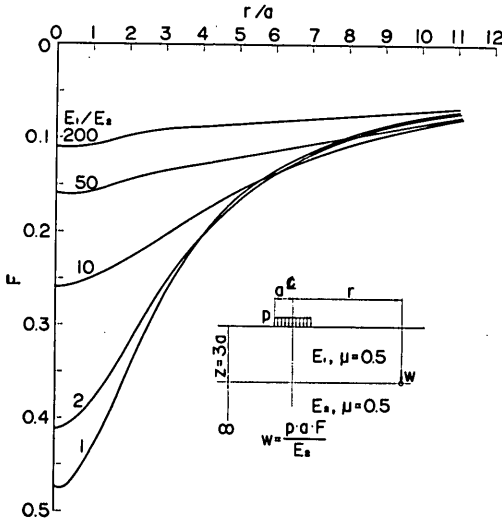


図-2.3 2層弾性体での荷重伝達状況(沈下係数)

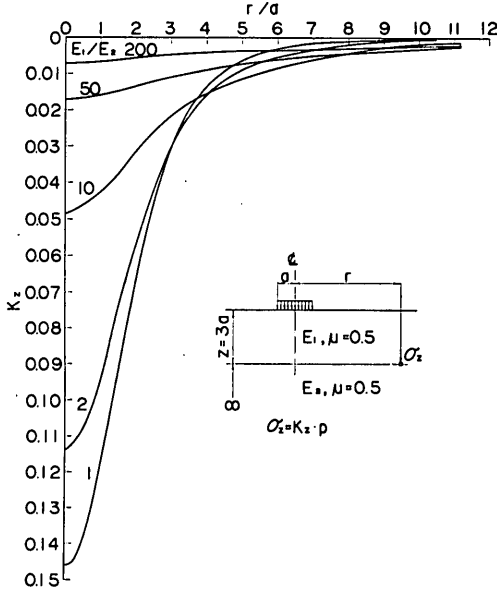


図-2.4 2層弾性体での荷重伝達状況(鉛直応力)

図-2.3, 2.4 を図-2.1, 2.2 と比較することによって、上層(主に路盤)に弾性係数の大きな良質の材料を使えば、それは舗装厚さを増加させたのと同じ効果のあることがわかる。たとえば、図-2.3, 2.4 で E_2 を一定とし $E_1/E_2=2$ が $E_1/E_2=10$ になった場合(E_1 が5倍になっている)は、 F , K_z のどちらについても、 $E_1/E_2=10$ の曲線が図-2.1, 2.2 の曲線でほぼ $z=5a$ に対応している。すなわち、 E_1/E_2 を2から10にしたことは、舗装厚

さを $3a$ から $5a$ にしたのと同じ効果を持つわけである。このような路盤の特質は、CBR 法による舗装厚さの設計の際使われる等値換算係数との関連において、4.2 で詳しく検討される。

2.2 弾性理論での巨人機他脚の影響

現在のわが国のアスファルト舗装厚さの設計法は、道路、空港を問わず、経験的手法といわれる CBR 法によって⁸⁾。空港用舗装に対する CBR 法による舗装厚さの設計では、航空機の多車輪荷重は、それらと同じ効果を有する等価単車輪荷重(ESWL)に換算し、この ESWL を用いて路床の CBR と舗装厚さとの間の関係を求める⁹⁾。

ESWL の換算には、C.R. Foster と A.G. Ahlvin などの研究¹⁰⁾ をもとに、1層弾性体の撓みを応用している。すなわち、各深さに対して、複数車輪下で生ずる撓みと等しい撓みを生じさせるような単車輪(接地面積は複数車輪一輪の接地面積と同じにとる)荷重を、弾性論を用いて求めるわけである。図-2.5は1層弾性体の沈下係数(F)を種々のオフセットに対して深さとの関係で示したもので、ESWL の換算に利用される。この換算法とより精密な沈下係数を与える数表は、文献2)に示されているので参照されたい。

近年の航空機の大型化、高速化はめざましいものがあり、ジャンボジェット機、SST、エアバスなどの新型機が続々登場してくる。航空機の総重量の増大は、脚の配置型式や車輪の配置型式でも、新しいタイプを生んでいる。図-2.6には、従来の代表的航空機である DC-8-63 と、ジャンボジェット機(B-747)の脚および車輪配置を示し、両者を比較してみた。図からわかるように、4脚型式の B-747 の脚間距離は、DC-8-63 のような主脚が2つのものに比べかなり小さくなっている。

今までの航空機の脚間距離は、脚相互が影響を及ぼさない程大きかったので、1脚だけを対象にして ESWL を算出し、舗装厚さの設計曲線を作成すればよかった。しかし、B-747 のように脚間距離が小さくなってくると、2.1 の結果などから判断して、舗装下部では他脚の影響がかなり大きくなることが推察され、このような影響を考慮した舗装厚さの設計が必要となることも考えられる。

B-747 の場合を例にとり、1層弾性体の撓みから ESWL を換算し、舗装厚さの設計曲線を作成する CBR 法によって、他脚の影響の程度を調べてみる。図-2.7は従来の1主脚を対象にした設計曲線で、図-2.8, 2.9にはそれぞれ主脚2つ(図-2.6の I と II)および主脚4つ(全

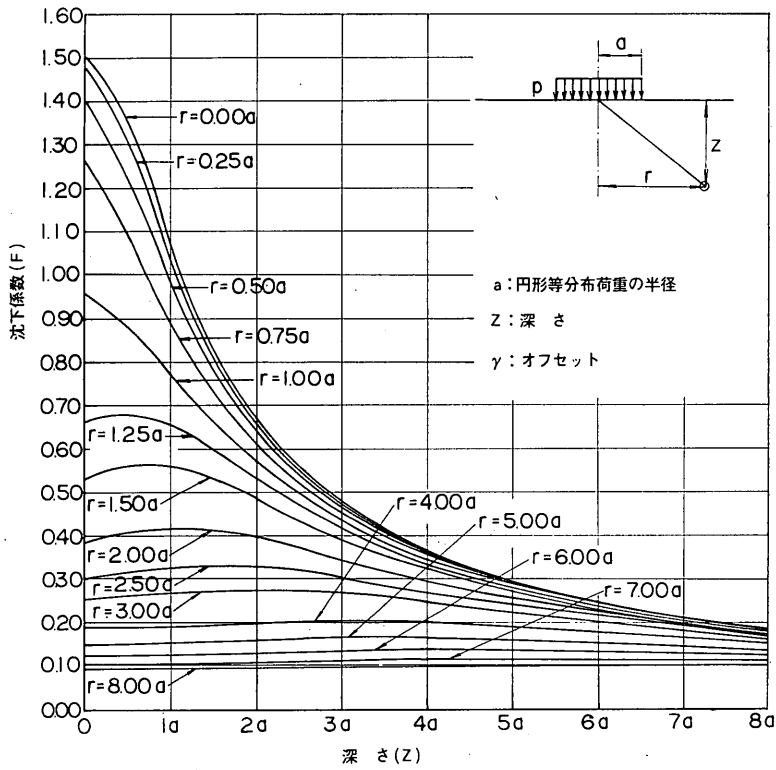


図-2.5 円形等分布荷重が作用する1層弾性体の沈下係数 (ポアソン比 0.5)

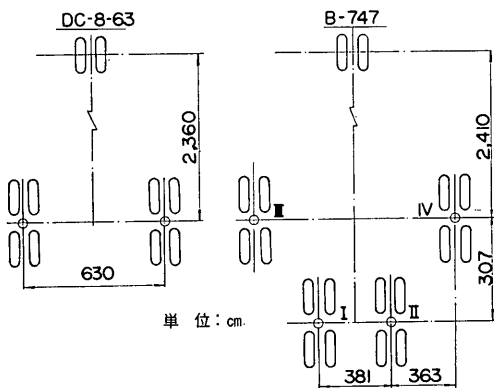


図-2.6 大型航空機の脚および車輪配置

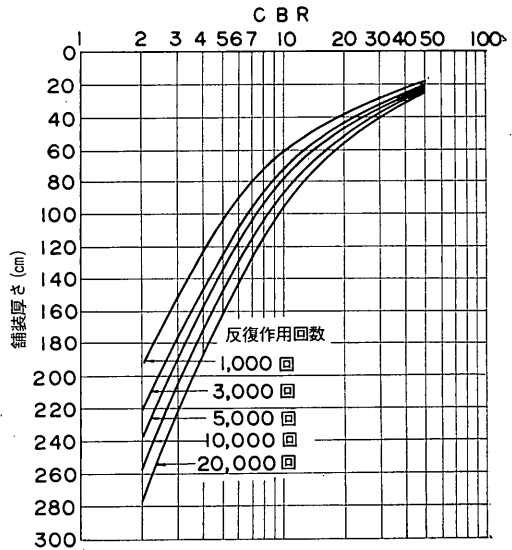


図-2.7 B-747の1脚だけを考慮した場合の舗装厚さ設計曲線 (満載時)

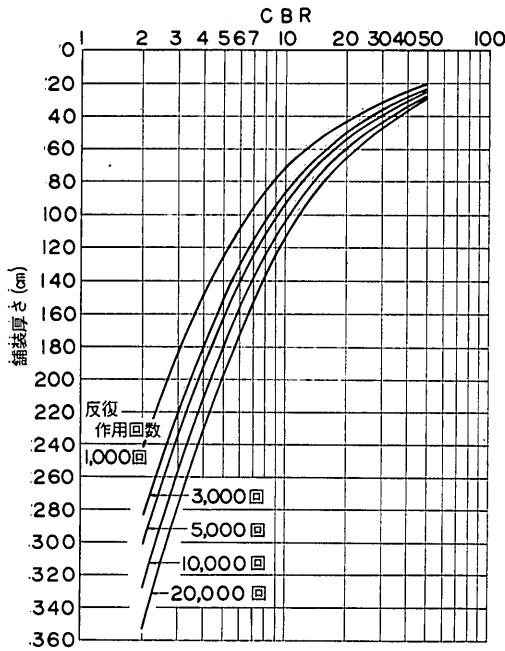


図-2.8 B-747の中央2脚を考慮した場合の舗装厚さ設計曲線（満載時）

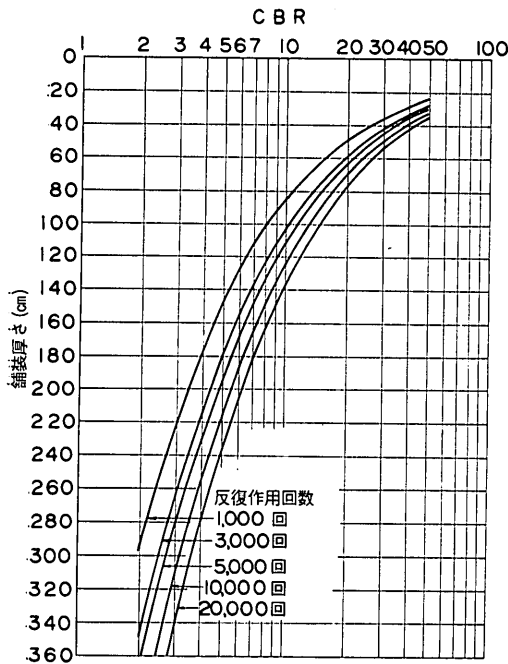


図-2.9 B-747の全4脚を考慮した場合の舗装厚さ設計曲線（満載時）

主脚)を考慮した場合の設計曲線が示されている。これらの図を比較検討することにより、舗装および路床を一樣な弾性体と考えた場合での、舗装厚さに及ぼす脚相互の影響の程度がわかる。

2.1の図-2.1からもわかるように、舗装表面からの深さの小さい範囲では、オフセット方向の F の変化は大きく、したがって、CBRが大きく舗装厚さの小さい部分では、他脚の影響による舗装厚さの増加もわずかである。CBRが小さく舗装厚さが大きくなるにしたがい、他脚の影響も大きくなり、CBRが2~3といったところでは、2脚を考慮した場合の舗装厚さは、1脚だけを対象とした舗装厚さの約25%増にもなり、4脚全部を考慮した場合には、約50%も大きくなる。

CBRが大きく舗装厚さの小さい場合は、他脚の影響による舗装厚さの増加は小さいが、この場合でも、路床あるいは地盤内の舗装表面からの深さの大きな部分では他脚の影響を大きく受けるので、路床あるいは地盤の強度のチェックの際に、この影響を考慮する必要がある。

以上1層系の弾性論を用いて巨人機他脚の影響の程度を調べてみた。しかし、実際の舗装は多層系であり、その構成材料も粘弾性あるいは塑性的性質を持ち、それらの合成された舗装体の挙動はきわめて複雑であるので、1層系の弾性体と考えて計算したESWLが、はたしてそのまま適用できるかどうかは大いに疑問である。

弾性理論を用いると、一樣な半無限弾性体では各車輪による影響が弾性体内のどこまでも及ぶことになり(図-2.1および図-2.3参照)、B-747で4脚全部を考慮した場合のESWLは、深さが大きくなると、複々車輪1脚だけのESWLの約2倍の大きさにもなる¹¹⁾。実際には各車輪が舗装全体に影響を及ぼすとは考えられず、当然その影響の限界が存在するものと思われる。また、荷重の影響の及ぶ範囲内でも、その影響の様子は弾性論によるものとは当然異なる。しかし、粘弾性や塑性的性質も加味しての荷重伝達機構や歪、応力、撓みなどの理論的解明がまだ行われていない現在、近似的に弾性理論を使用し、それを実験等で補正していかねばならない。

3. 試験舗装での実測結果による荷重伝達

3.1 試験舗装の概要

路盤の荷重伝達機構を明確に、脚間距離の小さな巨人機に対し、脚相互の影響を合理的に考慮する方法を見出すために、弾性理論から導びかれた結果を踏まえて、実際の試験舗装で各種載荷試験が実施された。

図-3.1は砂地盤上の撓性舗装の支持力機構を解明し、併せ各種路盤の強度の合理的な評価法を確立するために、半径27m、幅8mで円形に製作された野比試験舗装の断面図である。17区画、24種類の試験舗装の各区画には、路盤の荷重分散効果および伝達機構を調査するために、路床の上に土圧計や沈下計などの測定計器が埋設された。土圧計は路床内10cmの所に埋められ、土と土圧計表面との接触がよくなるように考慮した。

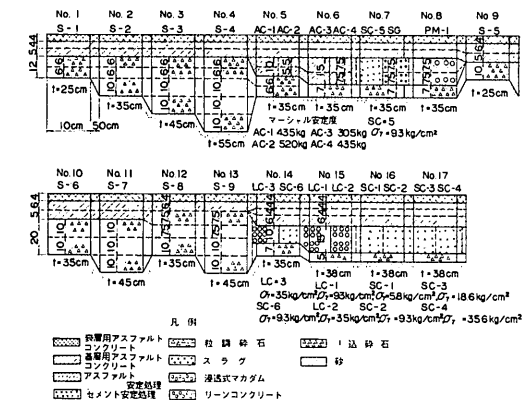


図-3.1 野比試験舗装断面図

舗装に大型航空機と同等な荷重を作用させるために、原型走行荷重車¹²⁾が使われた。この荷重車の主車輪の配置は複々車輪型式で、図-3.3の載荷用実物大試験車輪と全く同じであり、これは大型航空機の主脚の寸法でもある。主車輪に使われたタイヤは、やはり大型航空機に実際に使用されているもので、タイヤ内圧は14kg/cm²に調整された。文献¹³⁾からタイヤ接地圧は13.4kg/cm²になる。4つの主車輪にかかる荷重(脚荷重と呼ぶ)を表-3.1に示すように変化させ、この3種類の脚荷重でそれぞれ載荷試験を行なった。標準荷重は脚荷重が73.7tonで、ほぼ巨人機B-747の満載時の脚荷重75.1tonに等しい。

表-3.1 走行荷重車主脚荷重およびタイヤ圧

項	目	測定値
タイヤ	内圧	14kg/cm ²
タイヤ	接地圧	13.4kg/cm ²
主脚荷重	標準荷重	73.6 ton
	軽荷重A	63.2 ton
	軽荷重B	50.4 ton

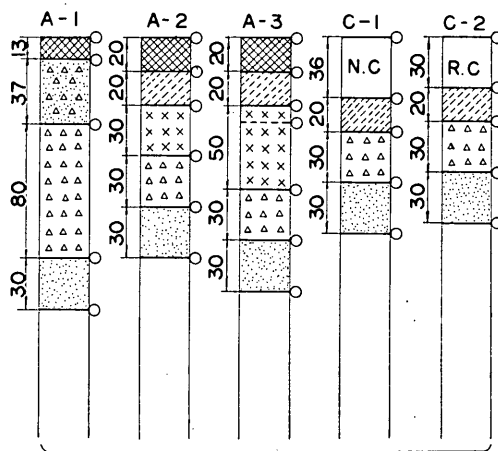
静的載荷試験においては、荷重車を移動することにより、測定計器と荷重との相対的な位置が変えられた。ま

た、荷重車を走行させて動的な測定も行なわれた。写真-3.1は原型走行荷重車による円形試験舗装上での載荷試験の状況を示す。



写真-3.1 原型走行荷重車による載荷試験の状況

軟弱な粘性土路床上の大型航空機用舗装の設計法の研究¹⁴⁾のために、原型載荷槽¹⁵⁾内の関東ローム路床の上に、図-3.2に示す5種類の試験舗装が製作された。いずれの舗装も総厚は1mを越え、路盤は3層以上から成る多層路盤である。舗装各層には土圧計、沈下計、歪計などを埋設し、載荷によって舗装内部に生ずる応力や変位の測定を行なった。舗装への載荷はオイルジャッキと図-3.3に示す載荷用実物大試験車輪を用いて行なった。写真-3.2はこの載荷試験の状況で、反力梁と車輪の間にセットされたオイルジャッキによる静的載荷試験である。多



※凡例は図-3.1と同じ(A-1~A-3の表層、基層は分けて示していない。)

図-3.2 載荷槽内試験舗装断面図

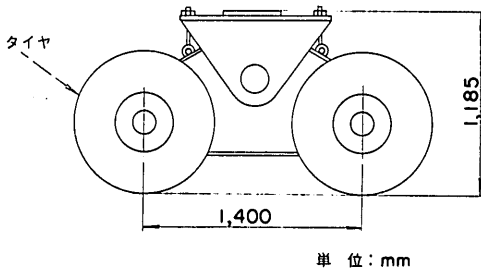
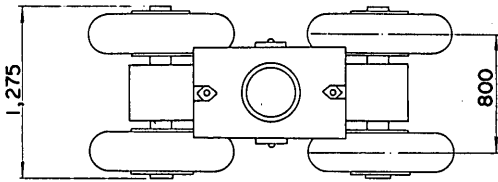


図-3.3 載荷用実物大試験車輪

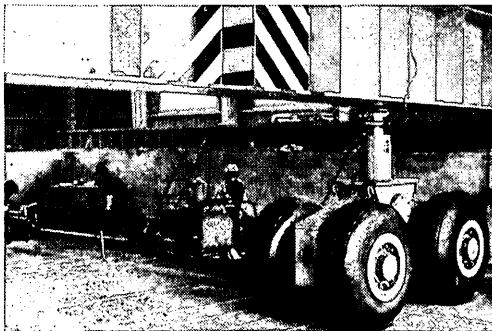


写真-3.2 実物大試験車輪による載荷試験の状況

層路盤の荷重伝達の状況は、野比試験舗装の場合と同様に、試験車輪を移動させて、測定計器と荷重との相対位置を変化させることによって調べた。

3.2 荷重伝達の実測結果

弾性体と考えた舗装での荷重伝達の様子は、2.の1層あるいは2層弾性理論に基づく検討からかなり明確になった。しかし、前述したように実際の舗装構成材料は、粘弾性および塑性的性質も所有しており、単純に弾性論を適用することはできない。しかも、粘弾性あるいは塑性的性質を加味した理論的解析は、今その緒についた段階であり、舗装の設計等にその成果が応用されるまでに

は、相当の時日を要しよう。このような客観状勢を考慮するとき、なお試験舗装等での実験解析の必要性が認識される訳である。

現在までに多くの地盤や舗装で載荷試験あるいは動態調査等が実施され、弾性理論等も応用して実験解析が試みられてきたが、荷重の伝達機構の実験的研究という点では、米国陸軍工兵隊 (Corps of Engineers) の研究¹⁶⁾ が名高い。これは均一な砂地盤上に円形の等分布荷重を1つあるいは2つ作用させ、地盤内に生ずる応力、撓み、歪などを測定して、1層弾性理論結果との比較において荷重伝達の状況を調べたものである。

今回問題となった巨人機の他脚の影響をみる場合には多層構造の実際の舗装を使用する必要がある。しかも、最近の大型航空機の1脚はほとんど4つの車輪(複々車輪、図-2.6参照)から成っているため、実際の航空機あるいは同様な車輪配置を持つ試験用の脚を使用して、舗装へ載荷を行なうことも必要となる。このような条件を満たす載荷試験が、いくつかの大型航空機用の試験舗装上で行なわれた。これらについては前節の試験舗装概要で述べた。ここでは得られた実験結果に基づいて、実際の舗装体内で、特に路盤効果を考慮した荷重伝達の状況を検討してみる。

野比試験舗装での実験結果の一部が図-3.4~3.12で、路床応力と路床および路面の沈下に対するものである。表-3.1に示す3種類の荷重による試験結果は、全く同じ傾向にあるので、値が大きく結果が判別しやすい標準荷重で代表して示した。動的な載荷試験も行なわれたが、ここでは実測結果の量と3.3における弾性理論結果との比較検討の都合を考慮し、静的載荷試験結果についてだけ示した。

図-3.4は、表層・基層が全く同じで、粒調砕石路盤の厚さを変えたNo. 1~4の路床鉛直応力の分布を示すもので、荷重車の主脚を土圧計との関連において、図中に示すような位置に置いたときの値を、それぞれプロットしてある。わかりやすくするために、図のように各測定値を滑らかな曲線で結んである。土圧計の深さ(舗装厚さ+10cm)が65cm程度では、各深さごとに車輪直下で最大の応力を示しており、舗装厚さが大きくなるにしたがって、ピークの値は小さくなる。また、荷重中心からの水平距離が大きなところでは、厚い舗装での応力が薄い舗装より大きな値を示し、遠くまで荷重が伝達され、その影響も大きいことがわかる。

図-3.5では舗装厚さが35cm(土圧計の深さ45cm)のものを集め、路盤材料の違いによる荷重の伝達効果を調

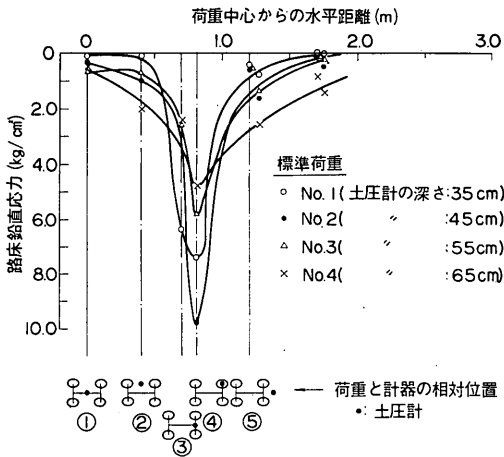


図-3.4 路床鉛直応力の分布
(野比試験舗装, 粒調碎石路盤)

べてみた。舗装厚さおよび表層・基層の厚さがわずかに異なるリーコンクリート路盤を除いて、他の路盤材料については、荷重伝達効果はあまり明瞭ではない。図-2.4を参照し、ある1つの水平面で鉛直応力の総和が脚荷重に等しくならねばならないことを考えると、車輪直下のピークの値が粒調碎石路盤(No. 2)の $\frac{1}{3}$ 程度である各安定処理路盤の舗装では、その分が遠くまで荷重伝達されているはずである。しかし、この程度の舗装厚さでは、その効果は測定結果には表われていない。安定処理路盤の効果については、後に舗装厚さの大きな載荷槽内試験舗装の結果で検討してみる。

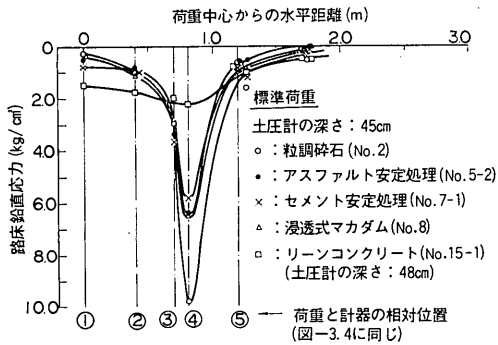


図-3.5 路床鉛直応力の分布
(野比試験舗装, 各種路盤)

図-3.6~3.8は沈下測定結果をとりまとめたもので、弾性沈下と塑性沈下を加えた全沈下で示してある。ここに示した静的載荷試験の結果では、測定の都合上弾性沈下は求まっていない。図-3.6は、No. 4を例にとって載荷時の路床および路面の沈下の分布を示したもので、荷

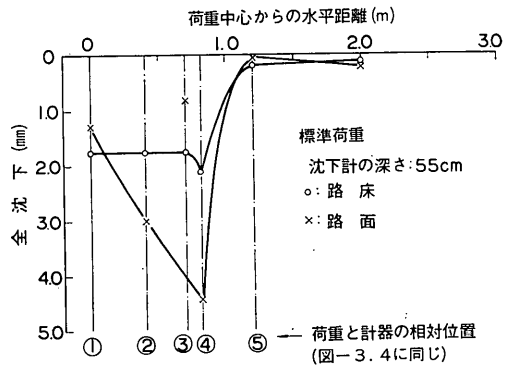


図-3.6 路床および路面の全沈下の分布
(野比試験舗装, No. 4)

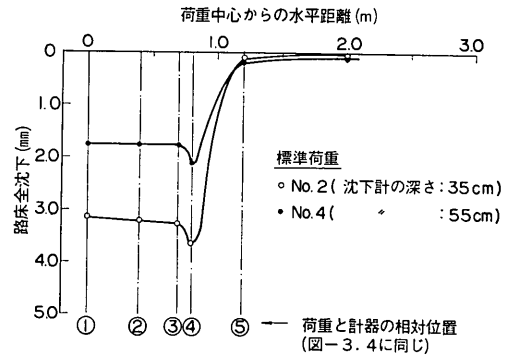


図-3.7 路床全沈下の分布
(野比試験舗装, 粒調碎石路盤)

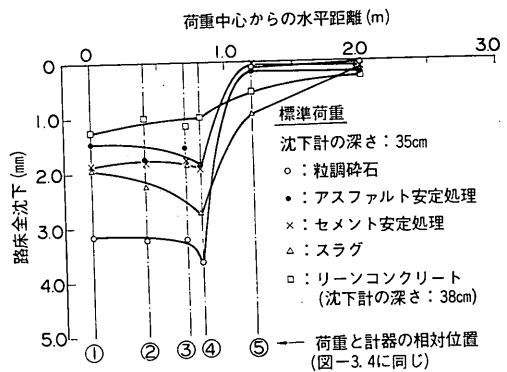


図-3.8 路床全沈下の分布
(野比試験舗装, 各種路盤)

重車と計器の関係は、図-3.4の場合と同様である。一部で路床の全沈下が路面の全沈下より大きく測定されているが、このような所では舗装の一部が膨張しているものと考えられる。このような現象は弾性論だけでは説明のつ

航空機荷重の路床路盤への伝達機構の一研究

かない問題で、舗装構成材料の塑性的性質に起因するものと想像される。図-3.7, 3.8は応力の図-3.4, 3.5に対応するもので、路盤の厚さの影響、路盤材料の影響をみよとしたものである。応力の場合同様に、一応の傾向はみられるが、それらはさほど顕著なものではない。これらの影響については、以下に示す野比試験舗装のNo. 11区画での試験結果と載荷槽内試験舗装での試験結果の解析をとおして、より明確になってくる。

野比試験舗装の No. 11(粒調碎石路盤) の路床内の舗

装表面からの深さが 125, 160, 200cm の各位置に、鉛直土圧計、水平土圧計をセットにして埋設した。これらの計器を用いた試験結果の一部を図-3.9~3.12に示す。図-3.9, 3.10は鉛直応力に対するもので、図-3.11, 3.12は水平応力に対するものである。試験舗装、土圧計の埋設状態、走行荷重車などの相互の関係から、図中に示すような計器と荷重車主脚の相対位置における各応力の測定が行なわれた。

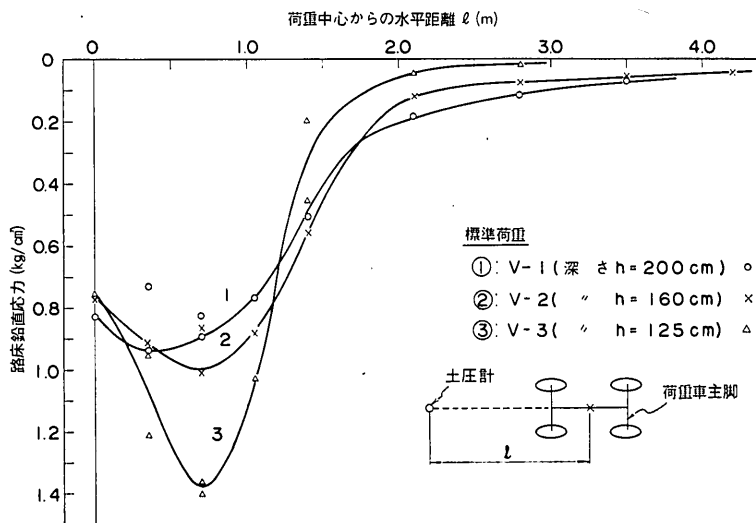


図-3.9 路床鉛直応力の分布(野比試験舗装, No. 11) ①

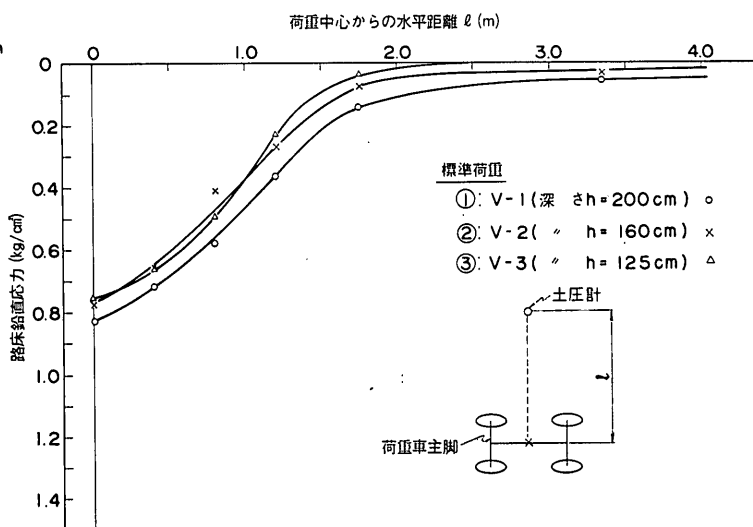


図-3.10 路床鉛直応力の分布(野比試験舗装, No. 11) ②

鉛直応力の測定結果を示す図-3.9, 3.10から、舗装表面からの深さが大きくなるほど、荷重は遠くまで伝達され、その影響も大きくなることが理解される。この傾向は2.に示した1つの円形等分布荷重による弾性理論結果とも等しい。しかし、図-3.9の場合には最大応力は荷重中心から40~70cmの点に生じており、図-3.10ではいづれの深さでも荷重車中心で最大応力となっている。これらの特質については、次節で弾性理論との比較において検討してみる。

図-3.11, 3.12は路床水平応力の荷重中心からの水平距離(オフセット)との関係である。どちらも荷重車主脚の長軸方向の水平応力を測定しているが、オフセットの取り方は図中に示すとおり、長軸方向と長軸に垂直方向の2種類である。両者の比較から、図-3.11のような場合の方が、オフセットの影響がはるかに大きいことがわかる。深さによる応力の変化と、オフセットによる応力の変化の傾向は、鉛直応力の場合とはほぼ同様であるが、水平応力の場合は、オフセットが大きくなると、表面からの深さが160cmで一番大きな値を示している。最大の水平応力は、図-3.11の場合はオフセットが40cm程度で、図-3.12では荷重中心(オフセット0)で生じている。

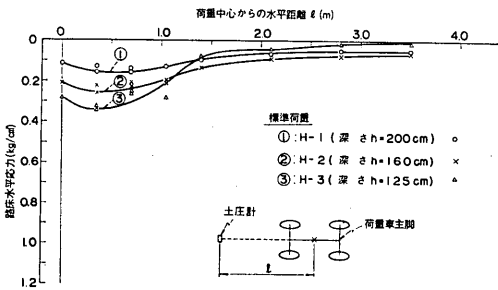


図-3.11 路床水平応力の分布
(野比試験舗装, No. 11) ①

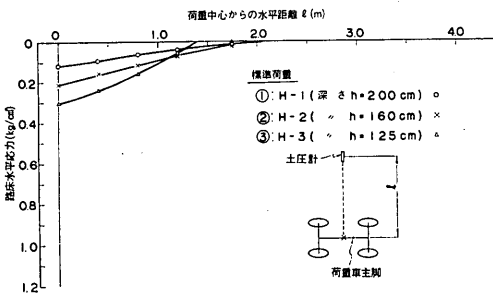


図-3.12 路床水平応力の分布
(野比試験舗装, No. 11) ②

軟弱な粘性土路床上のアスファルト試験舗装(図-3.2のA-1~3舗装)での試験結果のうち、脚荷重76tonに対するものをまとめて図-3.13, 3.14に示す。この脚荷重は大型航空機DC-8-63の脚荷重に等しく、巨人機B-747の脚荷重75.1tonにほぼ等しい。舗装厚さの大きな各舗装の路盤は、図-3.2に示されるように多層路盤構造で、野比試験舗装では調べられなかった多層路盤の影響も明らかにすることができた。また、A-2, A-3舗装には、粒状材のほかに、セメント安定処理材やアスファルト安定処理材なども使用されており、安定処理路盤の荷重分散効果ならびに荷重伝達状況がより明確になった。路盤内の応力、沈下、歪なども測定されたが、ここでは一番問題となる路床の鉛直応力と弾性沈下についての結果が示されている。舗装体での各層の挙動については、文献(14)で詳しく論じられているので省略し、舗装を一体の構造と考えて、荷重伝達状況をみようとしたものである。

図-3.13が路床上面の鉛直応力についての結果であり、図-3.14が弾性沈下についてである。試験舗装での1区画の大きさの関係で、計器と試験車輪との相対位置は図中のように取られ、オフセットも2.8mが限度であった。図-3.13のA-1舗装の結果は舗装表面から160cmの値であり、図-3.9の土圧計の深さ160cmの値と比べた場合、両者の絶対値にはかなりの差がある。これは次節で再度検討するが、両舗装の路床・路盤の違いによるものと、土圧計に付随した計測上の問題の2点が考えられる。しかし、この問題はA-1, A-2, A-3舗装を相対的に比較する場合には考慮する必要はない。

図-3.13のA-2, A-3舗装の結果をA-1舗装の結果と比べてみると、安定処理路盤の効果が明瞭に認められる。すなわち、A-2, A-3舗装の厚さは、A-1舗装より小さいにもかかわらず、その最大応力はA-1舗装以下であり、オフセットの大きなところでは、A-2, A-3舗装の値の方がA-1舗装の値より大きくなり、荷重の伝達効果もよいことを示している。図-3.14の弾性沈下量についても、図-3.13の鉛直応力でいえた傾向がそのまま存在する。しかも両図でA-1, A-2舗装の結果をみると、両者がほとんど一致していることがわかる。鉛直応力でオフセットが1m程度まではA-2舗装の値がやや小さいが、全体的にみた場合は、この差は無視して、両舗装はほぼ等価な舗装であると考えても差しつかえなさそうである。

図-3.4~3.8でもわずかに認められるが、オフセットに対する応力と沈下の分布を比較したとき、最大の応力

航空機荷重の路床路盤への伝達機構の一研究

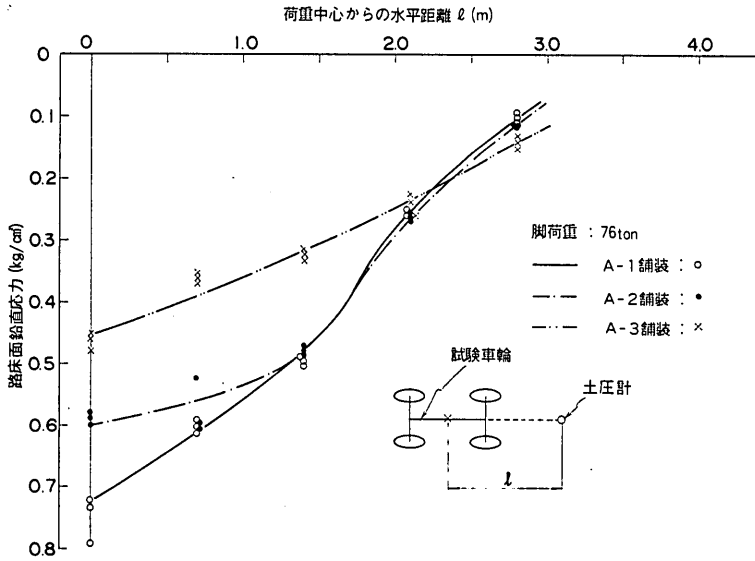


図-3.13 路床面鉛直応力の分布 (載荷槽内試験舗装)

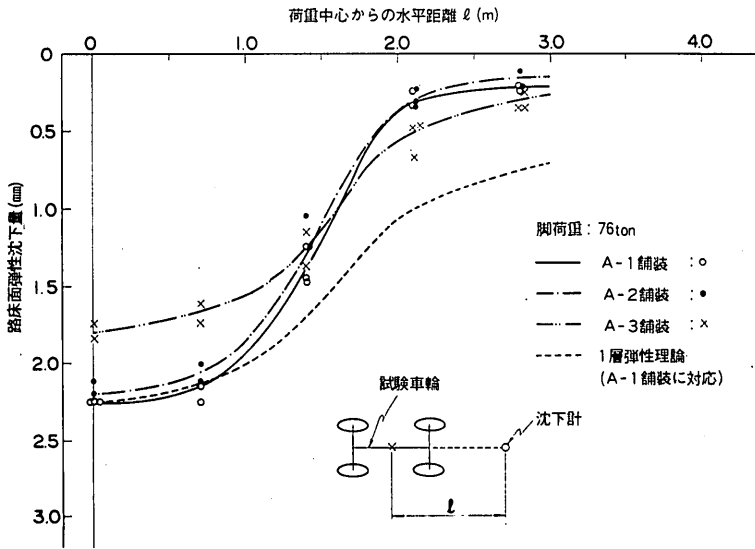


図-3.14 路床面弾性沈下量の分布 (載荷槽内試験舗装)

あるいは沈下に対するあるオフセットでの値の比は、大きなオフセットでは応力に対する方が大きい。このような特質は次節の弾性理論との比較で詳しく論じられるが、この点で実験結果が弾性理論による結果(2.参照)とまったく反対の傾向を示しているということは、実験解析の必要性を再めて認識させるものであろう。

3.3 弾性理論計算結果との比較

前節では、実際の試験舗装上に大型航空機荷重に対応

する荷重を載荷した時の、路床あるいは舗装体に生ずる応力や変位の実測結果を示し、実測値に基づく舗装、特に路盤の荷重伝達の様子を調べた。ここでは、実験結果のもつ意義をより明確にするために、弾性理論の結果などと、実験結果とを比較し検討を加えた。

弾性理論の計算の条件としては、表-1に示す値を用い、タイヤ接地面は円形等分布荷重に置き換えて計算した。ブシネスクの式を用いた弾性計算と図-3.24に示す弾性

計算を除いて、他の弾性計算は全て既存の数値を利用して行なわれた。1層弾性理論の場合、応力計算については文献17)に示される数表を、沈下量は文献2)の数表を用いて、どちらもポアソン比0.5として計算した。複数の車輪による路床や路面の応力、沈下などは、各車輪ごとに数表から計算された値を加え合わせるにより求める。

図-3.15, 3.16は、野比試験舗装のNo.1とNo.4を例にとり、路床鉛直応力の実測値を、1層弾性理論による結果と比較したものである。荷重位置の①や②を除き、実測結果が理論結果よりかなり大きい。実測結果の全体分布を眺め、路床面上の鉛直応力の総和が脚荷重に等しくならねばならないという力の釣合を考慮した場合、土圧計による鉛直応力の測定に問題の含まれていることが推察される。文献16)の円形等分布荷重によって砂地盤内に生ずる応力の測定結果でも、地表面からの深さが小さい所では、実測値が1層弾性理論の結果より20~30%も大きくなっている。図-3.15, 3.16で実測値の

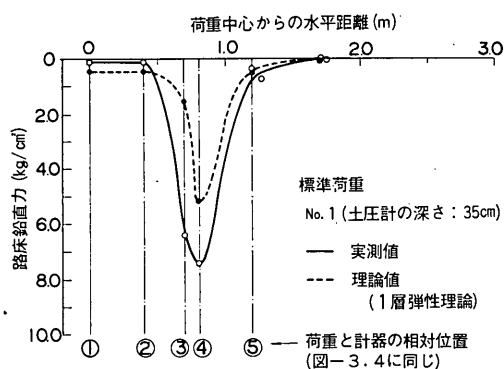


図-3.15 路床鉛直応力の実測値と弾性理論値の比較 (野比試験舗装, No.1)

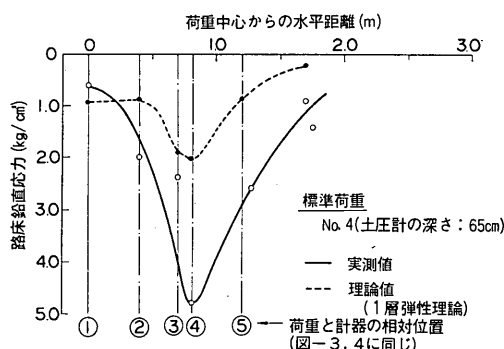


図-3.16 路床鉛直応力の実測値と弾性理論値の比較 (野比試験舗装, No.4)

示す曲線と理論曲線とは傾向が同じで、理論の鉛直応力の総和が脚荷重に等しくなるので、この場合の実測値は実際に路床上に生じている応力より大きな値を測定していることになる。一般に、土中の土圧計は応力集中により実際の応力より大きな値を測定する傾向にあり¹⁸⁾、これが上述のような結果の一原因になっているものと考えられる。応力集中度は土の種類や状態、土圧計の特性によって変化し、図-3.15, 3.16で実測値と理論値の比が一定でないのもこのためであろう。

図-3.17~3.19は、野比試験舗装のNo.11における、砂路床内の応力測定結果のうちの鉛直応力に関するものを、1層弾性理論結果と比較したものである。最大応力を示すオフセットを理論でみると、深さ125cmで約40cmであるが、他はオフセット0、すなわち荷重中心で生じている。図-3.15, 3.16なども合せ判断すると、複々車輪荷重を受けた1層弾性体で、最大応力の生ずる位置は、表面から浅い所では車輪直下で生じ、しだいに荷重中心方向へ移行し、かなり深くなると、荷重中心で生ずるようになる。この性質は、多層弾性体に対しても言うことができ、実際の舗装体でも言える¹⁹⁾一般的なものである。図-3.17~3.19の実測結果の最大応力は、オフセット40~70cmで測定されているが、これは走行荷重車の主脚の各車輪の荷重が平均していないためと考えられる。タイヤプリントによる各車輪荷重の実測結果²⁰⁾によれば、主脚前輪が各々18.1tonなのに対し、後輪はそれぞれ18.7tonと、後輪へかかる荷重がやや大きく、後2輪の中間に土圧計が来たとき(オフセット70cm)、最大応力を示す傾向にある。しかし、舗装構成材料によっても異なるが、粒状材路盤の場合には、図-3.13や図-3.14の載荷槽内試験舗装での実測結果から判断して、荷重が各車輪に平均して作用すれば、弾性理論の結果同様に深さが160cm程度では、荷重中心で最大応力が生ずるようになる。

このような測定上の条件を考慮した場合でも、図-3.18, 3.19では、実線の値が点線の値より大きい部分が多く、鉛直応力の総和が脚荷重に等しくなるという力の釣合で、点線が釣合い条件にあることから、土圧計による実測値になお応力集中の影響が含まれているものと考えられる。この場合の土圧計測上の応力集中度は、図-3.15, 3.16の場合と比べて、やや小さくなっているようである。土圧計の応力集中度は、砂などを使った検定から一応求まる¹⁸⁾が、このように土圧計の設置深さにより、応力集中度が変化することが予想され、この現象の解明が十分なされていない現段階では、測定値から応力集中の

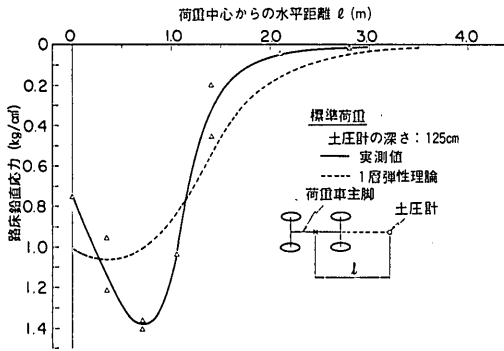


図-3.17 路床鉛直応力の実測値と弾性理論値の比較 (野比試験舗装, No. 11) ①

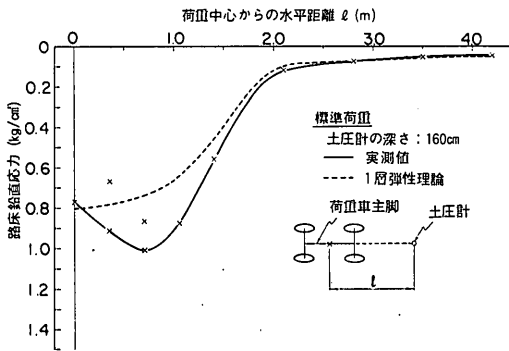


図-3.18 路床鉛直応力の実測値と弾性理論値の比較 (野比試験舗装, No. 11) ②

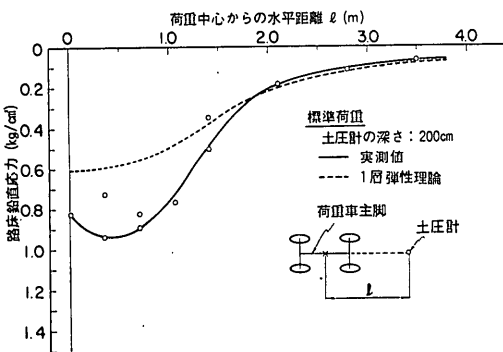


図-3.19 路床鉛直応力の実測値と弾性理論値の比較 (野比試験舗装, No. 11) ③

影響を完全に排除して、真の土中応力を求めることはほとんど不可能なようである。しかし、同一土圧計による測定結果には、応力集中の影響は一定の割合で含まれるので、結果を相互に比較検討するような場合には問題はない。したがって、路盤の荷重伝達機構の定性的研究あるいは4.の巨人機他脚の影響の検討等には、3.2の

実測結果の利用が可能なのである。

図-3.17~3.19の実測結果から No. 11 舗装の荷重伝達状況を見ると、路床を含めて舗装を1層弾性体で置き換えた理論結果より実測の荷重の分散効果は小さい。下から上へ弾性係数の大きくなる多層弾性体では、1層弾性体よりその荷重分散効果は大きいので、実測結果との差もさらに大きくなる。粘弾性あるいは塑性的性質を持つ材料から成る複雑な舗装では、荷重伝達の状態もまた複雑なものがあり、弾性理論を直接適用することは困難であるようだ。

図-3.20 では、野比試験舗装 No. 11 の路床水平応力の実測結果を、1層弾性理論結果と比較してある。両者は定量的には勿論のこと、定性的にも対応していない。鉛直応力の場合、その定性的特質は1層弾性体でも多層弾性体でもほとんど同じである。これに対し、水平応力は、1層弾性体の場合と多層弾性体の場合とで、かなり様子が異なる²¹⁾。図-3.20 の場合は、実際には複雑な性質を持つ材料から成る多層構造の舗装体を、1層系のしかも弾性体で置き換えているので、実測結果と理論結果の比較はさらに困難なものになるであろう。

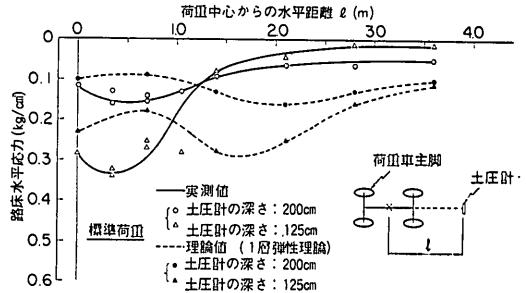


図-3.20 路床水平応力の実測値と弾性理論値の比較 (野比試験舗装, No. 11)

載荷槽内試験舗装の実測結果については、文献14)で弾性理論の結果と比較検討し考察を加えてある。ここでは、路盤の荷重分散効果に関するものを再掲した。図-3.21 は、A-1舗装の実測結果を、1層弾性理論結果と比較したものである。土圧計測にともなう応力集中の影響を、鉛直応力の総和を脚荷重と比較することにより調べてみた。図-3.3に示すように、載荷用実物大試験車輪の車輪配置は、縦間隔と横間隔は異なり、応力分布も縦方向(図中のx方向)と横方向(図中のy方向)では異なるが、大体の応力分布の形は、縦方向の応力分布を半径とする円分布よりは小さく、縦方向応力分布を長軸、横方向応力分布を短軸とする楕円分布よりも大きいものと推定される。土圧分布を円と仮定した場合、および楕

円と仮定した場合の両者について、鉛直応力の総和を求めたものが表-3.2である。大体の目安として両者の平均をとると、A-1舗装では74ton、A-2舗装では80ton、A-3舗装では74tonとなり、載荷重76tonにほぼ近い値となることから、測定された応力の値には、野比試験舗装の試験結果の場合のように、応力集中の影響が大きく含まれてはいないものと考えられる。

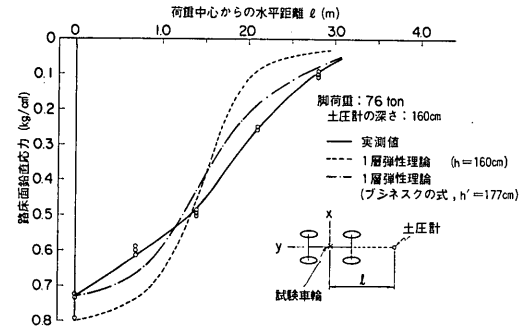


図-3.21 路床面鉛直応力の実測値と弾性理論値の比較 (載荷槽内試験舗装, A-1舗装)

表-3.2 路床面鉛直応力の合計

	土圧分布円 (実測値)	土圧分布楕円*	平均
A-1 舗 装	83.1 ton	66.0 ton	74 ton
A-2 舗 装	90.7	69.8	80
A-3 舗 装	81.4	66.3	74

* 縦方向土圧分布には実測値を、横方向土圧分布には計算値を使用した。

図中に一点鎖線で示す曲線は、1層弾性理論に基づく結果で、荷重中心での実測値と理論値が等しくなるような深さに対するものである。図-3.22はA-3舗装について同様な比較を行なったもので、この場合には h' が大きすぎ、円形等分布荷重による応力を計算する数表が用いられない。1層弾性体の場合には、深さが約50cm以上では、円形等分布荷重として計算した鉛直応力も集中荷重として計算した値も、ほとんど差がなくなるので、図-3.21の場合も含めて、輪荷重を集中荷重に置き換えて、ブシネスクの式²²⁾を用い応力計算した。これら一点鎖線と実測結果を示す実線とは比較的よく一致している。粒状材路盤のA-1舗装により対応を示す弾性理論が、安定処理路盤のA-3舗装でも、厚さを大きくすることにより、同様によい対応にあることは、安定処理路盤の舗装と等価な粒状材路盤の舗装厚さが存在することを意味する。文献14)では、粒状材路盤のA-1舗装厚さ h と1層弾性理論の厚さ h' とを関連づけることにより、安定

処理路盤のA-3舗装の1層弾性理論の厚さ h' から、等価の粒状材路盤の舗装厚さを換算し、安定処理材の等価換算係数(等価値)を計算している。アスファルト安定処理が2.2、セメント安定処理が1.9という値が求まっている。

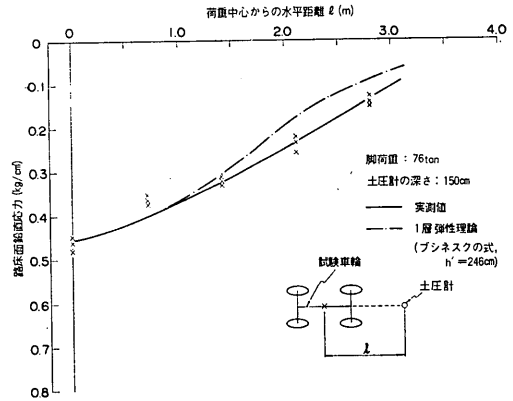


図-3.22 路床面鉛直応力の実測値と弾性理論値の比較 (載荷槽内試験舗装, A-3舗装)

実際の舗装は少なくとも3層以上の多層構造であるという点を考慮して、多層弾性体での理論計算もなされた。計算法はオランダのシェル石油中央研究所で開発されたもので、A-2舗装について図-3.23のような境界条件を与えて計算を行なった。その結果を図-3.24に実測値とともに示した。両者は定量的には一致しないが、定

計算条件

130 cm	表層・基層	20	$E = 10,000$ $\mu = 0.25$
	アスファルト 安定処理	20	同上
	セメント 安定処理	30	$E = 150,000$ $\mu = 0.4$
	切込碎石	30	$E = 3,000$ $\mu = 0.4$
	山 砂	30	$E = 1,000$ $\mu = 0.4$
	路 床		$E = 400$ $\mu = 0.4$

(注) E: 弾性係数(kg/cm²)
 μ : ポアソン比

図-3.23 多層弾性理論計算の条件

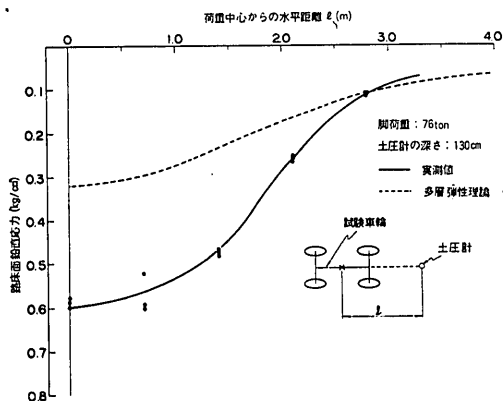


図-3.24 路床面鉛直応力の実測値と弾性理論値の比較 (戦壕内試験舗装, A-2舗装)

性的な傾向をみることはできる。境界条件の与え方は問題のあるところであるが、現実の舗装体により近い多層理論によらねば解決しない問題も数多く、その適切な利用は十分に考慮されねばならない。

図-3.24 の場合、理論の荷重分散、伝達効果が非常に大きいのにに対し、実測結果のそれらは理論の半分程度で、舗装体内の脚重の影響範囲についても、弾性体とした場合はほぼ無限に近いのが、実測では数mと推定される。図-3.4, 3.9, 3.10, 3.13 などを用いて、粒状材路盤の舗装での脚重の影響範囲を、実測値に基づいて求めたのが図-3.25 である。各実測結果を外挿することにより1脚の影響範囲は出された。図の実線は1脚の長軸方向についてであり、点線は短軸方向についてである。実線あるいは点線より下側の部分は脚重の影響を受ける部分で、この図を用いれば、舗装あるいは路床の任意の点

で、脚荷重の影響の有無を知ることができる。巨人機B-747の脚間距離 3.8m に対しては、表面からの深さが1.35~1.5m 以上になると影響が生ずるが、それ以下の深さでは対象脚荷重による荷重中心点の応力に他脚の影響は入っていない。

以上弾性理論との比較において、試験舗装での応力の実測結果の検討を行なった。次に、沈下測定結果の検討を行なう。

図-3.26は、野比試験舗装の区画 No.2 における沈下測定結果を、1層弾性理論の結果と比較したものである。応力の場合と異なり、弾性定数が決まらないと理論で沈下量は求まらない。しかし、沈下量は沈下係数 (F) に比例する²³⁾ので、図には F の値をプロットし、実測値と間接的に比較した。ただしこの場合、実測の沈下量は全沈下であるので、理論の弾性沈下との比較もこの点を加味してなされねばならない。塑性沈下を含んだ全沈下ですら、荷重位置⑤での実測値はほとんど0に近く、その程度のオフセットではなおかなりの沈下量を示す理論

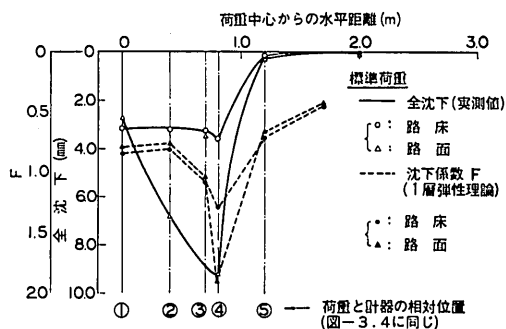


図-3.26 路床沈下の実測値と弾性理論値の比較 (野比試験舗装, No.2)

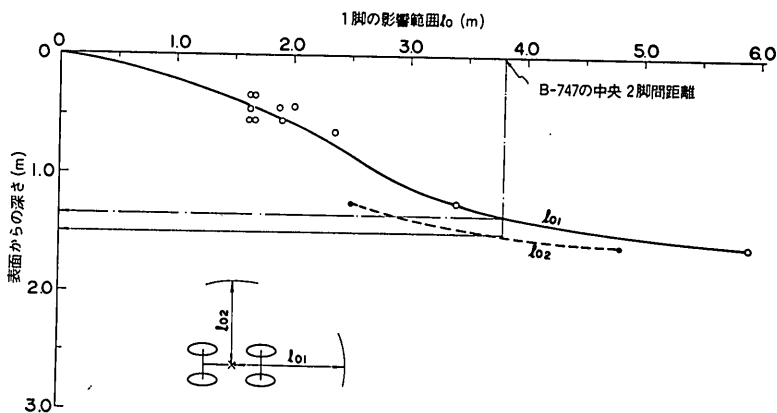


図-3.25 脚荷重の影響範囲 (粒調碎石路盤)

と対称的である。

図-3.14 は載荷槽内試験舗装の弾性沈下に対するものであるが、図中にはA-1舗装の実測結果と比較するための、1層弾性理論結果もあわせ示してある。この場合、理論計算から求まる荷重中心での沈下量が実測値に等しくなるように弾性係数を決めてやった。オフセットが約1mまでは実測結果と理論結果とがよく対応しているが、しだいに両者の差は開いて行く。図-3.26 の場合も含めて、オフセットが大きくなると理論値に比し、実測値はずっと小さい値になる。この程度は図-3.17~3.19 の鉛直応力の場合に比べてはるかに大きく、弾性体の仮定による差異のほか、何らかの原因がありそうである。

Corps of Engineers の砂地盤での研究¹⁶⁾でも同様な結果が示されており、この理由として、弾性係数が変化することを挙げている。すなわち、砂は完全な弾性体でないため、歪量によりポアソン比や弾性係数などの弾性定数が変化するわけで、地盤あるいは舗装体中でも、歪の状態に対応して弾性定数が変化している。弾性定数のうち、弾性係数の影響が支配的であることが弾性理論等からいえるので、ポアソン比の変化は無視して考える。砂地盤の歪測定の結果をみると、オフセットの大きなところでは、歪は小さくなっている。歪が小さければ弾性係数は大きく、当然沈下量は小さくなる。このような現象は粘弾性や塑性の性質を持つ舗装の場合にも予想され、上述の説明が図-3.24 などの結果にも適用できそうである。

図-3.14 で、オフセットが1m程度まで比較的良好に実測値が1層弾性理論に一致している。このことは、1層弾性理論を応用して複数車輪荷重をESWLに換算する現在のCBR法を用いる場合、各車輪間隔が1m以内であれば、現在の方法で十分であるが、それ以上の車輪間隔になると、この方法でESWLを計算することには、少なからぬ問題が生じてくることを示している。航空機の総重量の増大は、脚および車輪数を増加させ、1脚に12も車輪を付けた機種も予定されているので、現在のCBR法をなお適用して行く場合には、早急に合理的なESWLの計算法を確立する必要がある。

4. 巨人機のお脚の影響の換算法

4.1 粒状材路盤での他脚の影響の換算法

3.2でも述べたが、図-3.13と図-3.14を比較すると最大の鉛直応力あるいは弾性沈下と、あるオフセットでの応力あるいは沈下との比は、応力の方が大きい。この理由は前節において詳しく説明した。巨人機のお脚の影響を調べる場合、2.2の弾性理論では、CBR法にのっとり沈下係数を用いた。しかし、実測結果に基づいて検討する場合、沈下の結果を用いることは、前述のような事実から安全側に過ぎる恐れがあるので、応力の測定結果を使用することにする。しかも、このような他脚の影響が問題になるのは、かなり舗装が厚い場合とか路床の深い部分や地盤内などに対してであり、通常地盤の支持力の検討は、地盤内に働くせん断応力と土のせん断強度とを比較して行なわれる²⁴⁾ので、応力に基づいて他脚の影響度を調べることは、この点でも合理的であろう。この節では、粒状材路盤の舗装で他脚の影響を調べ、その影響の合理的な換算法を提案し、次節において安定処理材を路盤に使用した舗装における換算法を検討することにする。

図-3.25 からわかるように、舗装厚さが135~150cm以下では、設計対象の脚の中心点直下の路面および舗装には、他脚の影響は及ばない。したがって、巨人機のお脚の影響の解析には図-3.9~3.13が用いられる。図-3.13の場合2.8mのオフセットまでしか測定ができなかったため、脚間距離が3.8mの巨人機のお脚の影響をみるには十分でない。しかし、図-3.9~3.12が砂路床に対する結果であるのに対し、図-3.13は軟弱な粘性土路床であるので、路床土の相違の影響を調べるために利用することができる。図-3.9の土圧計の深さ160cmに対する結果と、図-3.13のA-1舗装に対する結果を比較した。図-3.13の結果は外挿し、オフセット3mでの応力が最大応力の何パーセントになっているかを調べた。図-3.9の場合が7%で、図-3.13のA-1舗装は8%になっている。路盤がやや異なり、路床が大きく異なるにもかかわらず、両者の差はわずかで、この程度の深さになると、路床土の差異が荷重分散効果に及ぼす影響は、無視できるほどに小さいものであることが実測結果からは判断される。このような事実にのっとり、巨人機のお脚の影響は図-3.9~3.12に基づいて検討することにする。

図-3.25 からわかるように、舗装厚さが135~150cm以下では、設計対象の脚の中心点直下の路面および舗装には、他脚の影響は及ばない。したがって、巨人機のお脚の影響の解析には図-3.9~3.13が用いられる。図-3.13の場合2.8mのオフセットまでしか測定ができなかったため、脚間距離が3.8mの巨人機のお脚の影響をみるには十分でない。しかし、図-3.9~3.12が砂路床に対する結果であるのに対し、図-3.13は軟弱な粘性土路床であるので、路床土の相違の影響を調べるために利用することができる。図-3.9の土圧計の深さ160cmに対する結果と、図-3.13のA-1舗装に対する結果を比較した。図-3.13の結果は外挿し、オフセット3mでの応力が最大応力の何パーセントになっているかを調べた。図-3.9の場合が7%で、図-3.13のA-1舗装は8%になっている。路盤がやや異なり、路床が大きく異なるにもかかわらず、両者の差はわずかで、この程度の深さになると、路床土の差異が荷重分散効果に及ぼす影響は、無視できるほどに小さいものであることが実測結果からは判断される。このような事実にのっとり、巨人機のお脚の影響は図-3.9~3.12に基づいて検討することにする。

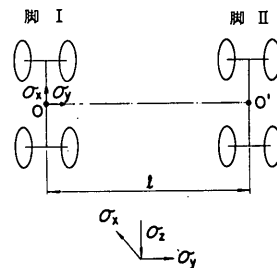


図-4.1 脚荷重による応力

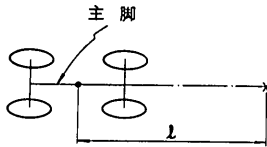


図-4.2 脚荷重とオフセット

図-4.1の脚Iを中心に他脚の影響を与えてみる。脚Iによって荷重中心直下の路床面上に生ずる応力を、図のように $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ とする。脚IIによって点Oに生ずる応力は、グッシュを付けて $\sigma'_x, \sigma'_y, \sigma'_z$ で表わす。3.3でも述べたように、舗装厚さが150cmを越えると、図-3.3のような車輪配置の脚荷重による最大の路床面鉛直応力は、荷重中心点に生ずるようになる。したがって、 σ_z は脚Iによって生ずる最大の路床面鉛直応力ということになる。表-4.1は、脚間距離を種々に変えた場合の σ'_z と σ_z の比をパーセントで表わしたもので、カッコ内の値は図-4.2のような方向にオフセットをとって測定した結果に基づくものである。表には深さ125cmの結果も示してあるが、鉛直応力に対しては、オフセットが3mでもやはり他脚の影響はない。図-4.3は表-4.1の結果を図示

表-4.1 鉛直応力に対する他脚の影響 ($\sigma'_z/\sigma_z \times 100(\%)$ の値)

深さ (cm)	l (m)						
	荷重		3.0	3.4	3.8	4.2	4.6
125	標準荷重		0 (0.7)	0 (0.3)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
	軽荷重B		0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
160	標準荷重		3.0 (7.0)	2.5 (6.0)	2.0 (5.0)	1.5 (4.0)	1.0 (3.0)
	軽荷重B		(4.7)	(3.6)	(2.8)	(2.3)	
200	標準荷重		6.5 (10.7)	5.4 (8.3)	4.3 (6.5)	3.2 (5.0)	2.7 (4.0)
	軽荷重B		(9.2)	(6.6)	(5.1)	(4.1)	

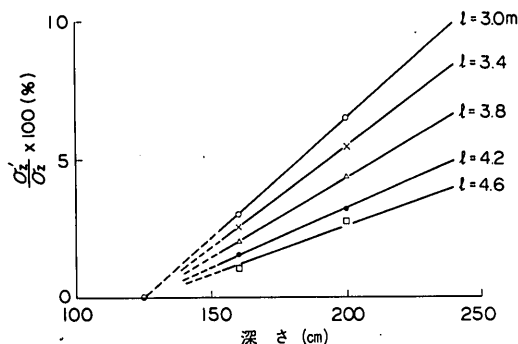


図4.3 σ'_z/σ_z と深さの関係

したもので、深さ160cmと深さ200cmの結果は、直線で結ばれている。

水平応力については、図-3.11, 3.12をもとに他脚の影響が調べられた。図-3.12からわかるように、いずれの深さに対しても、オフセットが2m以上では、 σ'_x/σ_x は0になり、巨人機の場合、他脚の影響による σ_x の変化はない。3.2で述べたように、試験舗装と走行荷重車の関係で、 σ_y の測定はできなかった。そこで、荷重車主脚と土圧計の関係を図-3.11のようにとり、求まる値を一応 σ_y, σ'_y と考えて、オフセットと σ'_y/σ_y の関係を求めたのが表-4.2である。表-4.1に比べその影響の程度は大きく、深さが125cmでもオフセット4m程度まではわずかに影響が存在する。しかし、この結果は其の σ_y に対するものでなく、影響の程度は実際には全体にもっと小さくなるものと考えられる。

表-4.2 水平応力に対する他脚の影響 ($\sigma'_y/\sigma_y \times 100(\%)$ の値)

深さ (cm)	l (m)						
	荷重		3.0	3.4	3.8	4.2	4.6
125	標準荷重		3.8	2.9	1.8	0	0
	軽荷重B						
160	標準荷重		26.9	25.0	23.0	21.2	19.2
	軽荷重B		17.0	13.0	10.0		
200	標準荷重		31.2	30.6	30.0	28.2	25.0
	軽荷重B		31.0	23.7	18.2	14.6	10.0

脚中心点の応力 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ は主応力であり、この場合最大せん断応力は $(\sigma_z - \sigma_x)/2$ か $(\sigma_z - \sigma_y)/2$ である²⁴⁾。脚Iだけによる最大せん断応力を τ_{max1} 、脚Iに脚IIの影響が入ったときの最大せん断応力を τ_{max2} とすると、弾性理論によれば σ_x の方が小さいので、

$$\frac{\tau_{max2}}{\tau_{max1}} = \frac{(\sigma_z + \sigma'_z) - (\sigma_x + \sigma'_x)}{\sigma_z - \sigma_x} \quad (4.1)$$

である。

オフセットが2m以上の場合、 σ'_x は0であるので、式(4.1)は次のようになる。

$$\frac{\tau_{max2}}{\tau_{max1}} = \frac{\sigma_z + \sigma'_z - \sigma_x}{\sigma_z - \sigma_x} \quad (4.2)$$

しかし、 σ_x, σ_y の値は σ_z に比べるとずっと小さく、式(4.2)に及ぼす影響も小さいものと考えられる。もし σ_x, σ_y を無視することができる場合には、式(4.2)は、

$$\frac{\tau_{max2}}{\tau_{max1}} = \frac{\sigma_z + \sigma'_z}{\sigma_z} \quad (4.3)$$

となる。例として、深さが 160cm でオフセットが 3m の場合に、式 (4.2) から求まる値と式 (4.3) から求まる値とを比較してみた。それらの値は 1.037 と 1.03 で、両者に大きな差はない。しかも、CBR 法の精度、適用条件等を考慮したとき、式 (4.2) を用いることは煩雑であるばかりで、必ずしも合理的でない。CBR 法をもとに巨人機他脚の影響を検討する場合、式 (4.3) を用いることにする。

応力は、脚 II、III の影響により 6% 増加したが、これと同じ効果は脚 I の荷重を 6% 増加させることによっても得られる。

以上述べてきたことを総合すると、粒状材路盤の舗装での巨人機他脚の影響の換算法は次のようになる。すなわち、従来のように図-2.7 から基準舗装厚を求め、図-4.4 を用いて他脚の影響によって最大せん断応力がどの程度増加するかを読み取る。この割合で設計脚荷重を増

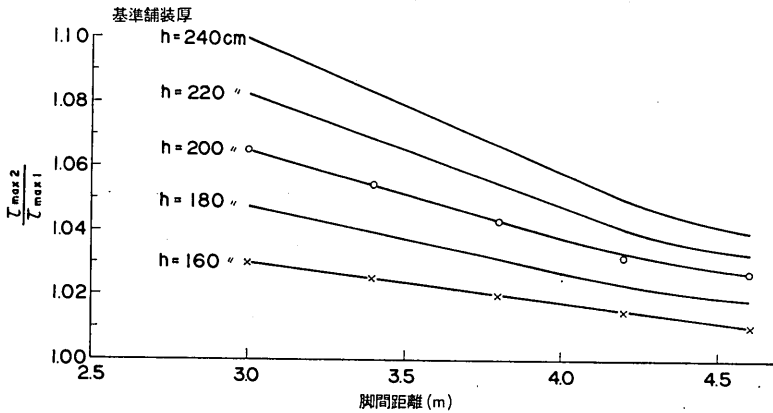


図-4.4 脚間距離と τ_{max2}/τ_{max1} の関係

同様に CBR 法の特徴を考慮した場合、図-4.3 で深さ 160cm と 200cm の値を直線で結ぶことには、大きな問題はないものと考えられる。式 (4.3) は次のように変形できるので、図-4.3 を用いて、図-4.4 のような任意の脚間距離に対する一般的に関係が求まる。

$$\frac{\tau_{max2}}{\tau_{max1}} = 1 + \frac{\sigma_z'}{\sigma_z} \quad (4.4)$$

この図-4.4 を用いれば、3~4.6m の脚間距離の他脚の影響が、基準舗装厚 160~240cm に対して求まる。たとえば、CBR=3、反復作用回数=5,000回の場合、図-2.7 から B-747 の基準舗装厚は 190cm で、図-2.6 に示す脚 I に対して脚 II、III の影響を考慮すると、最大せん断応力は、1 脚だけの場合より脚 II で 3.8%、脚 III で 2% 増加するので、合計で約 6% 増になる。

一方、脚荷重と路床面の鉛直応力の関係は、図-4.5 のようにほぼ比例するので、式 (4.4) の関係とあわせて考えると、脚荷重の増加率と同じ割合で最大せん断応力も増加することになる。この事実から、巨人機他脚の影響を設計脚荷重に置き換えて考えることができる。たとえば、前述の例の場合、脚 I の中心点直下の最大せん断

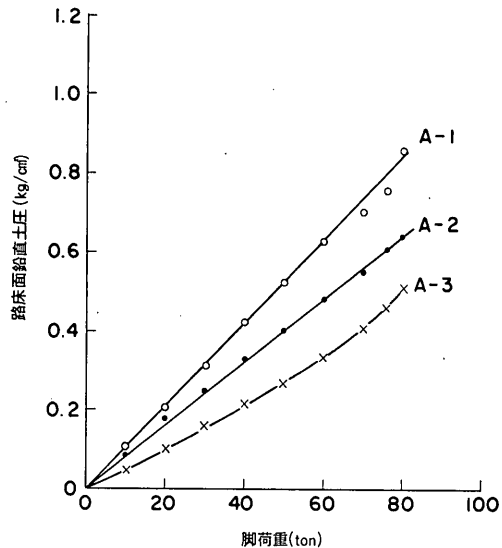


図-4.5 脚荷重と路床面鉛直応力の関係 (載荷槽内試験舗装)

加し、その荷重で舗装厚さを設計すれば、他脚の影響も含んだ安全な舗装が設計されることになる。また、路床あるいは地盤内の支持力の検討を、載荷重によって生ず

るせん断応力と土とせん断強度の比較によって行なう場合には、図-4.4を流用して、任意の深さでの他脚の影響によるせん断応力の増加がわかるので、他脚の影響を考慮した支持力の検討が容易に行なえることになった。

4.2 安定処理路盤の場合の取り扱い方

4.1 には路盤材に粒状材を使用した舗装の舗装厚さを設計する場合の巨人機の他脚の影響の換算法について述べた。しかし、交通諸条件の激化、良質な石材の不足などから、舗装の路盤材にセメントあるいはアスファルトなどによる安定処理材が使用されることが多くなってきた。このような安定処理材は、一般に粒状材よりも路盤効果は良く、安定処理材を使用した舗装の厚さは、粒状材路盤の基準舗装厚さよりも低減できることがわかっている。CBR 法によれば、この低減の割合は、各種の実験や経験で得られている等値換算係数（または等価値）に基づく²⁵⁾。

2.1 の弾性理論による検討および 3.2 の実測結果（図-3.13, 3.14 参照）は、安定処理路盤の舗装と路盤効果がほぼ等価な粒状材路盤の舗装が存在することを示している。図-3.13, 3.14 から、載荷槽内試験舗装のA-1舗装とA-2舗装とは、荷重分散効果がほぼ等しく、等価な舗装と考えられる。3.3 でも述べたが、応力に基づいて

表-4.3 路盤材料の等直換算係数

材 料 名	混合方式	主 な 材 質	等値換算係数
瀝青安定処理材	中央プラント加熱混合	マーシャル75回, 安定度500kg 以上	2.0
		マーシャル75回, 安定度350kg~499kg	1.5
浸透式マカダム	—	—	1.0
セメント安定処理材 またはソイルセメント	中央プラント混合	$\sigma_7 \geq 50\text{kg/cm}^2$	1.5
		$30\text{kg/cm}^2 \leq \sigma_7 < 50\text{kg/cm}^2$	1.3
リーコンクリート	中央プラント混合	$\sigma_7 \geq 100\text{kg/cm}^2$	2.0
		$80\text{kg/cm}^2 \leq \sigma_7 < 100\text{kg/cm}^2$	1.5
表層, 基層のアスファルトコンクリート	中央プラント加熱混合	—	2.0
粒度調整碎石	中央プラント混合	—	1.0

安定処理材の等価値を求めてみると、アスファルト安定処理が 2.2, セメント安定処理が 1.9 という値になった¹⁴⁾。当初試験舗装を設計する時点で、安定処理材の等価値として、空港アスファルト舗装構造設計要領²⁶⁾で規定する表-4.3の値を用いたことと、弾性沈下の図-3.14で、A-1舗装とA-2舗装の結果がほぼ一致していることを考慮すると、安定処理材の等価値は表-4.3の方が妥当であ

表-4.4 各設計法での路盤材料の等直換算係数

層	材 料 名	FAA法 (空港)	アスファルト協会 法(空港)	カナダ法 (空港)	AASHO (道路)	アスファルト舗 装要綱(道路)	土木学会答申 (空港)
表層・ 基層	中央プラント加熱混合アスコン	—	—	2.0	3.14	2.86	基層M>400kg...1.5
	低安定度路上混合アスコン	—	—	—	1.43	—	—
	サンドアスファルト	—	—	—	2.88	—	—
路	アスファルト安定処理	1.5	滑走路長1500m以下 輪荷重 6.8 ton以下では2.0 滑走路長1500m以上では1.5。ただし M>340kg (75回)	1.5	粗粒混合2.14 サンド スファルト1.79	M>350kg (50回)...2.28 M>250kg (50回)...1.85	M=300kg ...1.5(50回)
	セメント安定処理	$\sigma_7 > 53\text{kg/cm}^2$...1.5		—	$\sigma_7 > 46\text{kg/cm}^2$...1.64 $\sigma_7 > 28\text{kg/cm}^2$...1.43 $\sigma_7 > 28\text{kg/cm}^2$...1.07	$\sigma_7 = 30\text{kg/cm}^2$...1.57	$\sigma_7 > 20\text{kg/cm}^2$...1.3
	浸透式マカダム	—	—	1.5	—	1.57	—
盤	リーコンクリート	—	—	2.0	—	—	$\sigma_7 = 50 \sim 210$ kg/cm ² ...1.5
	マカダム	—	—	1.5	—	1.0	—
	石灰処理	—	—	—	1.07~2.14	—	—
	粒度調整碎石	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

σ_7 : 1 週間 1 軸圧縮強度

M: マーシャル安定度

るのかもしれない。

いずれにしても、適当な等価値によれば、安定処理路盤の舗装は、荷重分散、伝達効果の等しい粒状材路盤の舗装へ換算することができる。換算された粒状材路盤の舗装に対しては、4.1 に述べた方法にしたがえば、他脚の影響を考慮することができる。逆に、他脚の影響を考慮して粒状材路盤の舗装厚さを決定し、適当な安定処理材の等価値を用いれば、他脚の影響を考慮した安定処理路盤の舗装厚さが求まることになる。

表-4.4には各種設計法での等価値を比較してあるが、これらは相互に少しずつ異なる。これはそれぞれの等価値が決められた基準が異なるためである。今、我々は路盤効果を等しくするような等価値を決めるのに十分な結果はない。しかし、載荷槽内試験舗装の実測結果から求めた等価値と表-4.3, 4.4の値などの相違は、CBR法で巨人機の他脚の影響を検討する場合は、さほど問題にならない程度であるので、とりあえずは表-4.3, 4.4などの値を使用することによって、舗装厚さや路床および地盤内の支持力の検討の際、巨人機の他脚の影響を考慮すればよからう。

5. あとがき

弾性理論は舗装の挙動を定性的に把握する場合に極めて有用である。大型航空機用の試験舗装で求めた応力や変位の実測結果を、弾性理論に基づく結果と比較しながら検討し、舗装、特に路盤の荷重分散、伝達効果の解明に努めた。

粒状材路盤のほかに、いくつかの安定処理路盤についても試験を実施し、それらの路盤効果のもつ特質を明らかにした。理論および実測の両面から、荷重伝達状況を検討した結果、安定処理路盤は等価の粒状材路盤に置き換えられることが確かめられた。

実測から得られた路盤の荷重伝達の結果を用いて、脚間距離の小さな巨人機の他脚の影響の程度を調べた。粒状材路盤の場合について、合理的な他脚の影響の換算法を提案し、安定処理路盤の場合には、等価な粒状材路盤に置き換えることにより、粒状材路盤に対する方法が適用できることも確めた。

実測結果の一部には弾性理論との比較検討を加えたが粘弾性や塑性といった性質も持つ舗装体の荷重伝達の状況は極めて複雑であり、両者の対応には非常に多くの問題が残されている。舗装の設計法が、経験を主体としたCBR法から、理論を中心とした方法へと移りつつある現在、より合理的な理論の開発が待たれるわけであるが、

同時に理論との対比のために、舗装の挙動を十分正確に把握しておくことも要求される。この報告書では、航空機荷重による舗装の挙動の一部を明らかにした。これが新しい理論ならびに設計法の開発の一助になれば幸である。

謝 辞

載荷槽内試験舗装は運輸省港湾技術研究所と新東京国際空港公団との共同研究として製作されたもので、空港公団の多くの方々との協力のもとに実験が遂行された。本報告書でもその実験結果の一部を利用している。ここに改めて関係各位に御礼申し上げる。

また、利用した2層弾性体の変位、応力の厳密解は、日本大学理工学部三浦裕二先生に御願して作成していただいた数表に基づいている。ここに深く感謝申し上げる次第である。多層構造の弾性計算については、シェル石油株式会社に計算を御願したもので、関係各位に謝意を表したい。

(1972年6月30日受付)

参 考 文 献

- 1) 植下 協: 舗装構造の力学, 道路建設, 1968年1月, p. 59.
- 2) 佐藤勝久: CBR法によるアスファルト舗装厚設計のための挽み係数表, 港湾技研資料 No. 81, Sept. 1969.
- 3) 1)と同じ, pp. 59~63.
- 4) A. Jones: Table of Stresses in Three-Layer Elastic Systems, H.R.B. Bulletin 342, 1962, pp. 176~214.
- 5) 土質工学会: 土質工学ハンドブック, 技報堂, 1965年10月, pp. 787~790.
- 6) 1)と同じ, pp. 60~62.
- 7) 須田 熙, 佐藤勝久: 複数円形等分布荷重による多層弾性体中の変位と応力の近似計算法, 港湾技研資料, No. 146, 1972年9月.
- 8) 須田 熙: 空港瀝青舗装の舗装厚設計法に関する調査研究—空港舗装に関する調査研究第6報, 港湾技研資料 No. 52, 1968年6月, p. 6.
- 9) 8)と同じ, pp. 7~38.
- 10) C.R. Foster, R.G. Ahvlin: A.S.C.E. Vol. 84, No. S.M.2, May 1958, Part 1, pp. 1647-1~1647-12.
- 11) 2)と同じ, p. 22.

航空機荷重の路床路盤への伝達機構の一研究

- 12) 須田 熙: 原型載荷槽および原型走行荷重車の製作について—空港舗装研究用施設, 港湾技研資料 No. 97, 1970年3月, pp. 24~30.
- 13) 須田 熙, 佐藤勝久, 阿部洋一: 航空機タイヤの平均接地圧に関する一考察, 港湾技術研究所報告, 第9巻, 第2号, 1970年6月, pp. 39~59.
- 14) 須田 熙他: 静的載荷試験による空港舗装の実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第9巻, 第3号, 1970年9月, pp. 89~156.
- 15) 12) と同じ, pp. 6~24.
- 16) Corps of Engineers: Investigations of Pressures and Deflections for Flexible Pavements, Report No. 4 Homogeneous Sand Section, W.E.S. of U.S. Army, Technical Memorandum No. 3-323, Dec. 1954.
- 17) R.G. Ahlvin, H.H. Ulery: Tabulated Values for Determining the Complete Pattern of Stresses, Strains, and Deflections beneath a Uniform Circular Load on a Homogeneous Half Space, H.R.B. Vol. 1962, No. 342, 1962.
- 18) 市原松平, 熊谷泰彦, 田中益弘: 土圧計の応力集中に関する実験, 第5回土質工学研究発表会講演集, 1970年6月, pp. 165~168.
- 19) 14) と同じ, p. 109.
- 20) 13) と同じ, p. 57.
- 21) 14) と同じ, p. 131.
- 22) 5) と同じ, p. 1317.
- 23) 2) と同じ, p. 5.
- 24) 吉識雅夫, 金沢 武: 材料力学明解, 養賢堂, 1966, pp. 35~43.
- 25) 運輸省航空局: 空港 アスファルト 舗装構造設計要領, 1970, pp. 34~36.
- 26) 25) と同じ, pp. 36~38.