

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

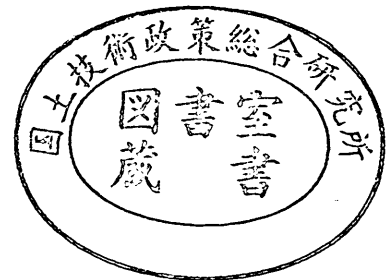
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 28

NO. 1

MAR. 1989

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第28巻 第1号 (Vol. 28, No. 1), 1989年3月 (Mar. 1989)

目 次 (CONTENTS)

1. 波による汀線付近の水位上昇量
——波崎海洋研究施設における現地観測——
.....加藤一正・柳嶋慎一・磯上知良・村上裕幸..... 3
(Wave Set-up near the Shoreline ——Field Observation at HORF——
.....Kazumasa KATOH, Shin-ichi YANAGISHIMA, Tomoyoshi ISOGAMI
and Hiroyuki MURAKAMI)
2. 円形回転水路による底泥の巻き上がりと沈降に関する実験的研究
.....村上和男・菅沼史典・佐々木均.....43
(Experimental Investigation on Erosion and Deposition of Fine
Cohesive Sediments in an Annular Rotating Channel
.....Kazuo MURAKAMI, Fuminori SUGANUMA and Hitoshi SASAKI)
3. 航空機荷重作用下における空港埋設管の挙動
.....深海正彦・佐藤勝久・小林正樹.....77
(Behaviour of Buried Pipes under Loading of Aircraft
.....Masahiko FUKAMI, Katsuhisa SATO and Masaki KOBAYASHI)
4. 高温再圧密による海成粘土の年代効果の再現
.....土田 孝・小林正樹・水上純一・田中政典... 121
(Duplication of Aged Clay by Consolidating Clay Slurry at
High Temperature
.....Takashi TSUCHIDA, Masaki KOBAYASHI, Jun-ichi MIZUKAMI
and Masanori TANAKA)
5. 覆砂工法における砂層探査装置に関する実験
.....木原純孝・白井一洋・篠原文人... 149
(Experiments on Ultrasonic Sand Layer Profiler System in
Capping Constructions
.....Sumitaka KIHARA, Kazuhiro SHIRAI and Taketo SHINOHARA)

3. 航空機荷重作用下における空港埋設管の挙動

深海正彦*・佐藤勝久**・小林正樹***

要 旨

従来、空港舗装下に埋設される管きょは鉄筋コンクリート管等の剛性管が大半を占めていたが、その施工性や耐腐食性に若干の問題があり、それらを解決する一方策としてプラスチック素材からなる強化プラスチック複合管の使用が考えられた。しかし、当該管きょは可撓性（たわみ性）であるため、大重量の載荷にさらされる空港舗装下での使用可能性の検討が必要とされた。

本研究は、このような背景を受けて、強化プラスチック複合管ならびに鉄筋コンクリート管を埋設した実物大の舗装に実航空機と同等の荷重を載荷し、断面の挙動を把握すると同時に、繰返し載荷に対する安定性を確認した。

その結果、強化プラスチック複合管を埋設した断面の供用性が十分なものであることが確認され、さらに、従来不明確であった空港舗装下における可撓性管の設計法に関する一試案を提示することができた。

キーワード：地下構造物，強化プラスチック複合管，鉄筋コンクリート管，空港舗装，載荷試験

* 土質部 滑走路研究室
** 土質部 滑走路研究室長
*** 土質部 土性研究室長

3. Behaviour of Buried Pipes under Loading of Aircraft

Masahiko FUKAMI*

Katsuhisa SATO**

Masaki KOBAYASHI***

Synopsis

Rigid pipes, for example concrete pipes, have been mainly used for airport buried pipes. These types of pipes, however, have some construction problems and corrosion problems. Therefore, some new pipes (FRPM pipes, Fiberglass Reinforced Plastic Mortar pipes) which are made of plastic materials are considered to be used in order to solve these problems. But the FRPM pipes are rather flexible and the behaviour of the pipes under aircraft loading has not been made clear.

Then, such subjects have been studied based on loading tests on prototype models. As a result, the behaviour of the FRPM pipes has been made clear and the applicability of the pipes to airport constructions has been confirmed. Moreover, the design method of the FRPM pipes has been proposed.

Key Words: Underground Structure, Conduit, FRPM Pipe, Concrete Pipe, Airport Pavement, Loading Test

* Member of Runways Laboratory, Soils Division

** Chief of Runways Laboratory, Soils Division

*** Chief of Soil Mechanics Laboratory, Soils Division

目 次

要 旨	77
1. ま え が き	81
2. 研究の背景	81
2.1 空港埋設管の現況	81
2.2 現行設計法とその問題点	82
3. 実規模モデル試験	84
3.1 試験概要	84
3.2 試験断面	84
3.3 試験方法	89
4. 初期静的載荷における管および舗装の挙動	89
4.1 概 要	89
4.2 地中応力の分布	91
4.3 管に発生するモーメントと管周方向の軸力	95
4.4 管長手方向のひずみ分布	101
4.5 地表面沈下	102
5. 繰返し載荷における管および舗装の挙動	102
5.1 概 要	102
5.2 塑性的挙動の推移	102
5.3 弾性的挙動の推移	104
6. 空港埋設管の適用性	105
6.1 試験結果からみた適用性	105
6.2 施工の良否が管の適用性に及ぼす影響	105
7. 空港埋設管の新しい設計法の提案	108
7.1 概 要	108
7.2 管に作用する地中応力分布のモデル化	108
7.3 管に発生するモーメントの算定法	113
7.4 管変形量の算定法	117
8. 結 論	119
9. あとがき	120
参考文献	120

1. まえがき

従来、空港舗装下に埋設される管きょは、鉄筋コンクリート管等の大重量で剛な構造物が大半を占めていたが、これらの構造物は施工性あるいは工期面さらには耐腐食性等にいくつかの問題点があった。このため、現在進行中の東京国際空港沖合展開工事においても、工期短縮が必要不可欠とされることから、一般にコンクリート基礎を必要とせず、養生期間の削減が期待でき、施工期間の大幅短縮が可能な可撓性管（強化プラスチック複合管）の利用可能性を検討する必要がある。

しかし、現行の空港埋設管に関する設計要領¹⁾においては、鉄筋コンクリート管あるいはボックスカルバート等の剛な構造物に対する設計法のみが記載されており、しかも比較的浅い場所（100cm以浅）に埋設される管については、管に作用する地中応力の考え方、発生モーメント算定時の考え方等に関してあいまいな点が多い。

そこで本研究では、昭和61年度～62年度の2か年にわたり、港湾技術研究所野外実験場内に実物大の舗装下に可撓性管と剛性管を埋設したモデルを作製し、その上にB-747航空機と同等の脚を持つ走行荷重車を走行させ、それらの挙動を観察し、解析することとした。

昭和61年度は、第二港湾建設局と共同で実施した「東京空港埋設管応力解析調査²⁾」として位置づけられ、主に東京国際空港沖合展開工事において実施工される断面を用いた可撓性管使用断面の供用性実証試験的な意味の強い試験であった。

昭和62年度は、昭和61年度の結果を踏まえ、舗装構造、管種（剛性管、可撓性管）、管理設状況（砂地盤、粘性土地盤）を変化させて載荷試験を実施し、各因子の変化に対する埋設管の挙動の変化ならびに管が舗装に及ぼす影響を観察することにより、様々な条件下において管に作用する地中応力の傾向を推定し、管が舗装に与える影響についても検討した³⁾。また、実物大試験において把握できなかった変化因子（管径の変化、埋設深の変化）についても有限要素法を用いた解析により検討し、大まかな傾向を推定した。

以上の結果から、設計条件が変化した場合の管の挙動変化、管に作用する地中応力の変化、また管が舗装に及ぼす影響についても大まかな傾向をつかんだ。さらに、これらの結果を総合し、空港舗装下における可撓性管の設計法に関する一試案を提示した。

2. 研究の背景

2.1 空港埋設管の現況

近年、航空機輸送に対する需要は飛躍的な伸びを示し、新空港の建設あるいは既存空港の拡張工事が目白押しであり、それらの空港の各施設が着々と形作られている（東京国際空港沖合展開工事、関西国際空港建設工事、新東京国際空港第二期工事等）。そのなかで、空港施設としては比較的目立たない存在ではあるものの、空港の供用性に大きな影響を与える施設の一つが、空港舗装下に埋設される配管系である。配管の目的には、電力輸送、通信システム、諸ケーブルの保護、航空機への燃料および水の供給、航空機からの汚水あるいは空港施設に降る雨水の排除等がある。一般に、雨水や汚水の排除に利用される地下構造物は、大きく剛性構造物と可撓性構造物に分類することができる。前者としては、ボックスカルバートあるいは鉄筋コンクリート管、陶管等があり、後者としては、鋼管等の金属管、プラスチック管、強化プラスチック複合管（Fiberglass Reinforced Plastic Mortar 管、以降 FRPM 管と略す）等がある。

従来空港舗装下の埋設管は剛な構造物が多く、なかでも鉄筋コンクリート管がその大半を占めていた。その原因の最も大きなものは、一般道路と比べ著しく厳しい荷重条件下にさらされることが明白であり、それに耐え、しかも舗装に悪影響を与えないものでなければならないことから、変形の生じにくい構造物でしかも比較的手軽に施工できるものが良いということであった。しかし今後の空港建設において、従来どおり鉄筋コンクリート構造物のみで配管系を整備することに対して若干の危惧が生じている。以下にそのいくつかを列挙する。

- ① 一般に大重量であり、その運搬、布設が容易でない。
- ② 脆性材料からできているため施工時のショックにより破損する可能性が高い。
- ③ 鉄筋コンクリート管の施工には一般にコンクリート基礎が必要とされ、養生期間が必要である。
- ④ 場所打ちボックスカルバート等も、③同様養生期間が必要である。
- ⑤ 軟弱地盤上の施工において不同沈下が生じた場合、可撓性管に比べて沈下追従性が悪く、継手部からの漏水の可能性が高いと思われる。
- ⑥ 雨水・汚水の停滞により化学反応が促進され、酸、塩基が発生した場合、それらに腐食されやすい。このため管内部が劣化し、構造的に不十分なものとなる可能性もある。

：以上の問題点のうち，①，②は施工時の問題点，③，④は工期面での問題点，⑤，⑥は構造・材料上の問題といえる。⑤に関しては継手部の改良，⑥に関してはコンクリート管内部をプラスチック材料でコーティングする解決策が試みられ，コンクリート管の可能性も広がっている。しかしその他の問題点を鑑みた場合，現在進行中の供用開始年度の決まっている空港建設工事現場においては，少しでも工期短縮が必要とされるために，上記の③，④に掲げた工期面での問題点は致命的なものであるといえる。

そこで，コンクリート基礎を必要とせず工期短縮が期待できる可撓性管の使用可能性を検討し，その適用を拡大していく必要があるものと考えられる。また，プラスチック素材からなる可撓性管の使用が可能であるなら，上記①，②，⑤，⑥も同時にクリアーできる可能性がある。

以上のような背景により，従来どおりのコンクリート管一辺倒の設計ではなく，各々の空港建設の現場状況に応じて，施工面，工期面，構造・材料面を総合的に評価し，最も有利となる管種決定法ならびに各管種に対する設計・施工法の確立が望まれている。

2.2 現行設計法とその問題点

埋設管設計法の基本因子は，大きく分けると①管の耐荷力，②管に作用する死荷重，③管に作用する活荷重の三つである。このうち①は管固有の能力であり，管種とその形状が決まればおのずから決定される。②は施工時に発生するものであり，特に空港舗装下に限って特殊性が認められるわけではないので，他の構造物，例えば下水道管の設計要領における管に作用する死荷重の考え方に準拠しても，現在までの実績からみて大きな問題はないと考えられる。一方，③に関しては，作用する活荷重の大きさおよび分布が，一般車両によるものと航空機によるものとは大きく異なるため，既存のものに準拠するのは不十分と考えられ，別途空港埋設管独自の検討が必要である。

空港舗装下埋設管に関する既存の設計・施工要領には，「空港排水施設，地下道，共同溝設計要領¹⁾」（運輸省航空局，以降設計要領という）があるが，本要領は対象管としてPC管，鉄筋コンクリート管等の剛性管のみを掲げており，可撓性管に関する記述はない。このため，可撓性管に発生する応力(モーメント)の考え方は，下水道等の設計に使用されているものに準拠せざるを得ない状況である。

航空機荷重により地中構造物に作用する鉛直方向地中応力としては，設計要領では，航空機荷重が45°に分散

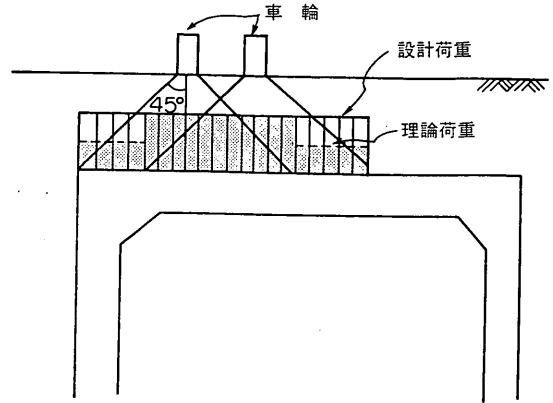


図-1 鉛直地中応力の分布方式

表-1 航空機荷重による鉛直地中応力

(単位：kgf/cm²)

深さ (cm)	L A-0 (680tf)	L A-1 (350tf)
100	2.79	1.45
150	1.76	0.94
200	1.43	0.73
250	1.17	0.61
300	0.96	0.50
350	0.79	0.41
400	0.67	0.35

するとし，図-1のような分布方式をとり，表-1のような値を一般に用いている。

なお，45°荷重分散とした場合，深さ h における鉛直方向地中応力は次式のようになり，その値は影響車輪数が増加するごとに凹凸を繰返し，深さと応力が必ずしも比例しない。そこで，修正値として計算値を包絡する曲線を想定し，これに基づき決定した鉛直応力が表-1である。

p = 影響荷重/応力の分布面積

$$= (N \times W) / ((L + 2h) \times (B + 2h)) \quad (1)$$

ここに，

p : 鉛直方向地中応力 (kgf/cm²)

W : 車輪荷重 (kgf)

N : 影響車輪数 (個)

L : 車輪の接地長 (cm)

B : 車輪の接地幅 (cm)

h : 深さ (cm)

可撓性管に作用する地中応力と発生モーメントおよび

表-2 K の値

管 頂	管 側	管 底
0.079	-0.045	0.011

表-3 K' の値

縦たわみ	横たわみ
-0.030	0.030

変形量については、「下水道用硬質塩化ビニル管 道路埋設指針」（以降現行指針という）があり、曲げモーメントの算定は、次式により行っている。⁴⁾

$$M = K \times p \times R^2 \quad (2)$$

ここに、

M：曲げモーメント (kgf・cm/cm：単位長当り)

K：曲げモーメント算定係数 (表-2参照)

p：鉛直地中応力 (kgf/cm²)

R：管厚中心半径 (cm)

変形量の算定は、次式により行っている。

$$D = K' \times p \times R^4 / (E \times I) \quad (3)$$

ここに、

D：管変形量 (cm)

K'：たわみ算定係数 (表-3参照)

p, R：同上

E：管弾性係数 (kgf/cm²)

I：管壁断面二次モーメント (cm⁴/cm：単位長当り)

ここで各算定式と K および K' の値は、通常の弾性理論に基づく構造力学的手法により誘導したものである。計算式の誘導に当って、活荷重作用時の管に作用する地中応力分布を図-2のように仮定している。

剛性管に作用する地中応力と発生モーメントについては、設計要領に規定があり、曲げモーメントの算定は、JIS A 5303 の解説に基づき、次式により求めることとされている。

$$M = K'' \times p \times R^2 \quad (4)$$

ここに、

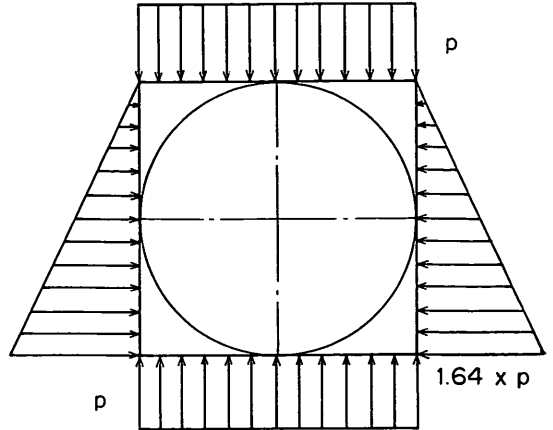
M：曲げモーメント (kgf・cm/cm：単位長当り)

K''：支承条件による曲げモーメント係数

p：鉛直地中応力 (kgf/cm²)

R：管厚中心半径 (cm)

この場合の K'' の値は、支承条件によって変化するとされており、基本的な支承条件と K'' の値は表-4の関係が用いられている。

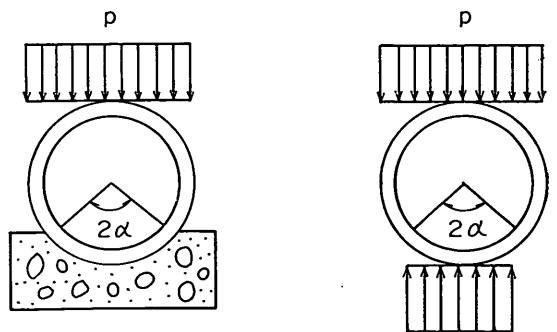


※ p…活荷重による単位面積当りの鉛直応力

図-2 活荷重による応力分布 (可撓性管)

表-4 K'' の値

	コンクリート90°巻	コンクリート120°巻	コンクリート180°巻
K'' 値	0.303	0.243	0.220
形状			



※ P…単位面積当りの鉛直応力

a. コンクリート基礎

b. 砂または土基礎

図-3 活荷重による応力分布 (剛性管)

剛性管の場合にも可撓性管の場合と同様、基本的には図-3の a に示すように管に作用する応力分布を仮定し、構造力学的に K'' の値を求めているが、応力分布の仮定にいくつかの違いがある。一つは基礎を有する場合であ

り、その場合には固定アーチとして解く。ただし、図-3のa中の 2α の位置（コンクリート基礎面）で固定されたアーチとして解くと、基礎の剛性が貧弱な場合には危険側の設計となるため、 $2\alpha > 90^\circ$ の場合には、 $2\alpha = 120^\circ$ で有効支承角 110° 、 $2\alpha = 180^\circ$ で同 125° として解く。その他基礎のない場合には、図-3のbに示すように、管底への反力は常に管底全面に作用するのではなく、管施工時の状況に応じて変化させて K'' の値を算定している。この点に関しては、管周材料や施工状況を設計に反映し得る設計体系を採っているものと考えられる⁵⁾。

以上航空機荷重作用時における現行設計法の概略を述べた。これに対する問題点を指摘すると、航空機荷重により地中に発生する鉛直応力について、①荷重分散形状としてポストノード法に基づく 45° 分散を用いているが、舗装の分散効果や、路床材料の違いによる分散効果の違いを設計に反映していない、②地中構造物をもつ見かけの弾性係数に依存して、地中応力の集中、解放が生じると考えられるため、常に 45° 分散では個々の状況を設計に反映していない、等がある。

可撓性管に作用する地中応力と発生モーメントおよび変形量については、①設計上の発生モーメントおよび変形量は、実測値と極端な差はないか、②地中応力分布形状の仮定が適当か否か、③現行設計によれば、管周材料のいかんにかかわらず応力分布形状は一定であるが、その仮定が適当か否か、等がある。

また、剛性管に作用する地中応力と発生モーメントについては、可撓性管の場合の①、②と同様の問題点と、③空港舗装下では、基本的に基礎を巻くこととされているが基礎の効用はどのようなものか、等がある。

以上いくつかの問題点を指摘したが、本研究ではこれらの問題点ならびに管と舗装との相互作用に着目し、航空機荷重作用下における次の項目について検討をする。

- ① 地中埋設管に作用する鉛直地中応力の大きさ
- ② 舗装構造による荷重分散効果

- ③ 地中埋設管に作用する地中応力分布形状（管の種類、管周材料の違いに起因する変化）
- ④ 地中埋設管に発生するモーメントと変形
- ⑤ 埋設管の存在が舗装構造に与える影響（地表面の沈下）
- ⑥ 繰返し载荷により管が受ける影響と管の存在が舗装の劣化に及ぼす影響

3. 実規模モデル試験

3.1 試験概要

本試験は、実物大の管を舗装下に埋設し、実物と同等の荷重を载荷して行われた。断面は全部で10断面を作製し、そのうち7断面（A、B、C、D、E、F、G）を有管部、3断面（Z1、Z2、Z3）を無管部とした（図-4参照）。

昭和61年度においては、東京国際空港沖合展開工事において実際に使用される断面（FRPM管使用、サンドイッチ舗装）を対象とし、载荷時の管自体の挙動、管の存在が舗装に与える影響、さらには繰返し载荷に対する安定性の検討を行った。昭和62年度においては、昭和61年度の結果を踏まえ、管種、舗装構造、路床条件（管周材料）を変化させて同様の検討を行った。管種は、FRPM管外圧1種、同2種、鉄筋コンクリート管（推進管）の3種類を用いた。舗装構造の種類としては、昭和61年度にはサンドイッチ舗装を採用し、昭和62年度にはそれより若干荷重分散効果の小さい標準舗装を採用した。また、路床条件としては、昭和61年度に砂路床のみを採用したが、昭和62年度には粘性土路床も一部採用した。

なお昭和62年度の試験は、载荷試験の時期が盛夏となり、表層アスファルトコンクリート（以降アスコンと略す）の流動化が懸念されたため、繰返し载荷に対する安定性試験は行わなかった。

3.2 試験断面

(1) 舗装構造

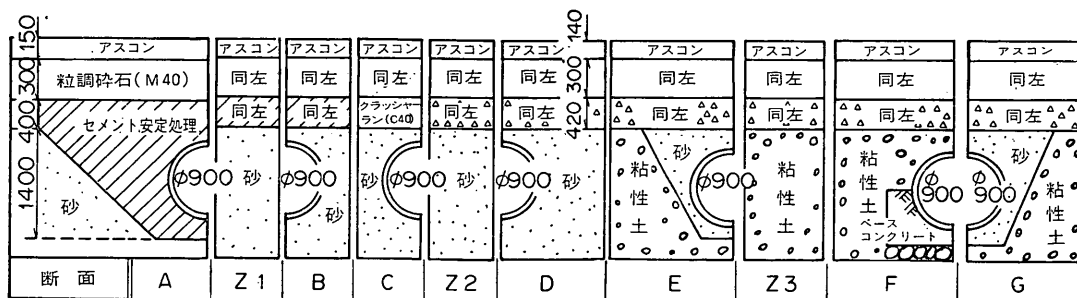


図-4 実規模試験断面

舗装構造は、2種類を対象とした。一つは、「空港アスファルト舗装構造設計要領⁹⁾」(運輸省航空局)に基づく標準舗装であり、もう一つは、下層路盤としてセメント安定処理層を用いることによりサンドイッチ型の構成とした舗装である(以降サンドイッチ舗装と略す)。設計条件は、砂路床部については、設計 CBR を10%、設計荷重を LA-1 (B-747 相当)、反復作用回数をサンドイッチ舗装で 10,000回、標準舗装で 5,000回とした。また、粘性土路床部についても砂路床部と同様の舗装を採用した。この場合、舗装構造としては非常に弱い断面になっている。なおサンドイッチ舗装部のセメント安定処理層厚は、下層路盤として考え、クラッシャーランに対するセメント安定処理材の等価値を 1.3 として決定した。今回の試験舗装においては、A, B, Z1 断面にサンドイッチ舗装、C, D, E, F, G, Z2, Z3 断面に標準舗装を適用した。

試験舗装は、当所野外実験場内に、いったん路床下部まで掘削、整正した後施工した。施工管理は、「空港土木工事共通仕様書⁷⁾」(運輸省航空局、以降共通仕様書と略す)の規定に従った。路盤の締固め度は95%を目標とし、全断面について目標が達成されていることを確認した。

サンドイッチ舗装の下層路盤として使用されたセメント安定処理材については、現場養生円柱供試体によりその強度を確認した。試験の結果、一軸圧縮強度で約 60 kgf/cm²、 $E_{50}=13,800\text{kgf/cm}^2$ であった。

表層、基層に用いた密粒度アスコン、粗粒度アスコンについては、共通仕様書に準拠した材料を使用し、施工後コア抜取りによる密度試験を行った結果、マーシャル試験(共通仕様書の基本施設①、③)による基準密度の98%以上を満足していた。

(2) 対象とした埋設管

埋設管は大きく分けて FRPM 管と鉄筋コンクリート

表-5 管の物理特性

管種	FRPM 管 (1種)	FRPM 管 (2種)	鉄筋コンクリート管
管軸方向弾性係数 (kgf/cm ²)	90,000	90,000	350,000
管周方向弾性係数 (kgf/cm ²)	225,000	150,000	350,000
管軸方向ポアソン比	0.12	0.12	0.15
管周方向ポアソン比	0.3	0.3	0.15

管の2種類を対象とした。FRPM 管においては、外圧1種管と2種管の2種類を対象とし、鉄筋コンクリート管では比較的強度の高い推進管を対象とした。なお管の断面形状は、すべて内径 90cm で、肉厚は FRPM 管で 1.8cm (管径の2%)、鉄筋コンクリート管で 9 cm である。また管の物理特性を表-5に示す。

(3) 路床施工と管の埋設

路床材料は2種類を対象とした。一つは野外実験場の現場砂であり、もう一つは東京国際空港沖合展開工事現場の路体を形成する東京都の建設残土である。本建設残土は、関東ローム等の粘性土が主成分であり、現場でのトラフィカビリティ確保のため 8 kg/m³の消石灰が添加されたものである。

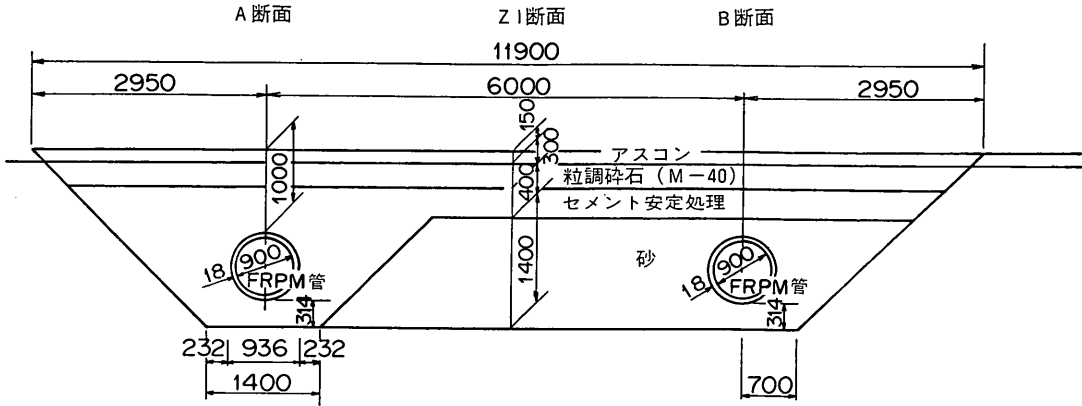
それぞれの材料の現場 CBR 値は、砂が10%前後の高い値、建設残土が1~2%の低い値であった。

路床の締固めは、一層の締固め厚を薄くし、無管部については小型振動ローラーにより転圧し、有管部については小型タンパー等により締固めた。特に管底、管側部は、突き棒による人力締固めで十分な締固め度が確保できるよう留意した。その結果、砂路床部の全地点において、JIS A 1210 による土の締固め試験の第2法⁹⁾による

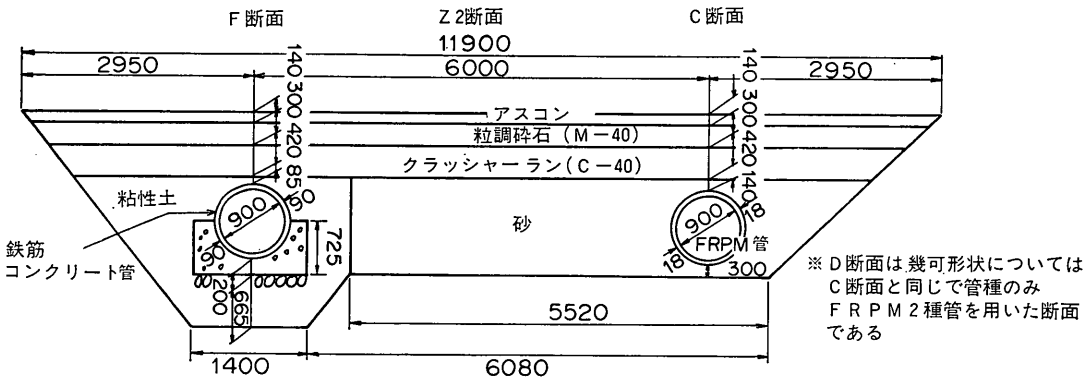
表-6 各試験断面の特徴

断面	A	B	Z1	C	D	Z2	E	F	G	Z3
舗装構造	サンドイッチ舗装			標準舗装						
管種	FRPM 1種	無管	FRPM 1種	FRPM 2種	無管	FRPM 1種	鉄筋コンクリート管	無管		
路床材料	砂						粘性土			
管周処理	セメント安定処理材巻き	無	—	無	無	—	砂巻き	無	砂巻き	—
基礎	無							有	無	

※管理設深はすべて 100cm

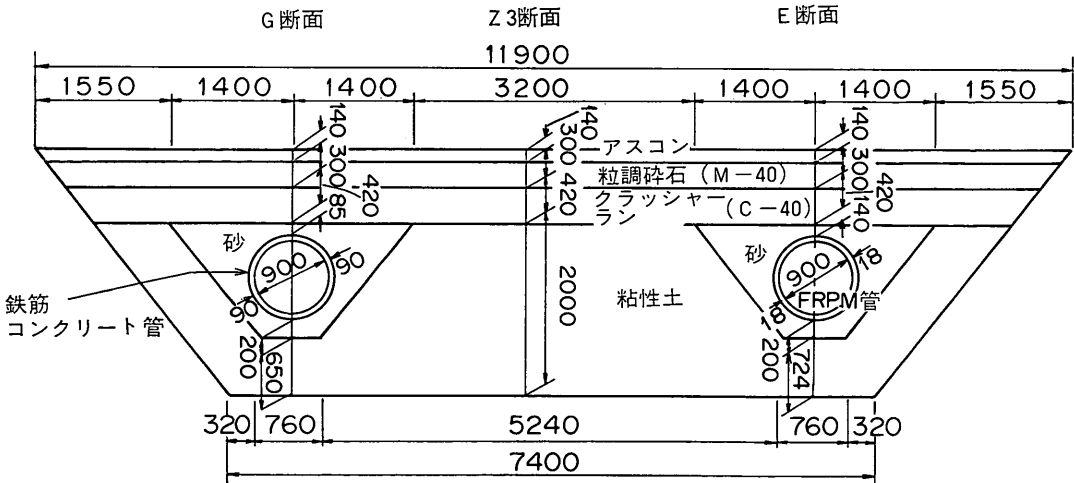


(1) A, B, Z1断面



※ D断面は幾可形状については C断面と同じで管種のみ FRPM 2種管を用いた断面である

(2) F, C, Z2断面

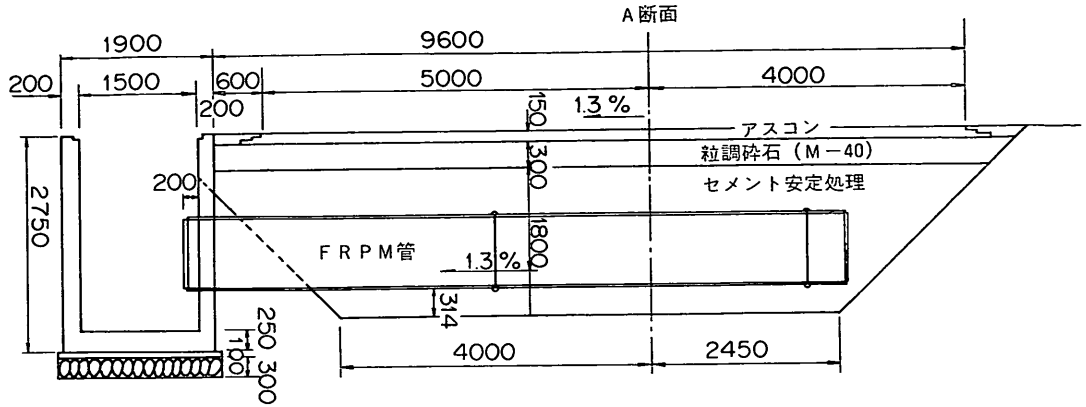


(単位: mm)

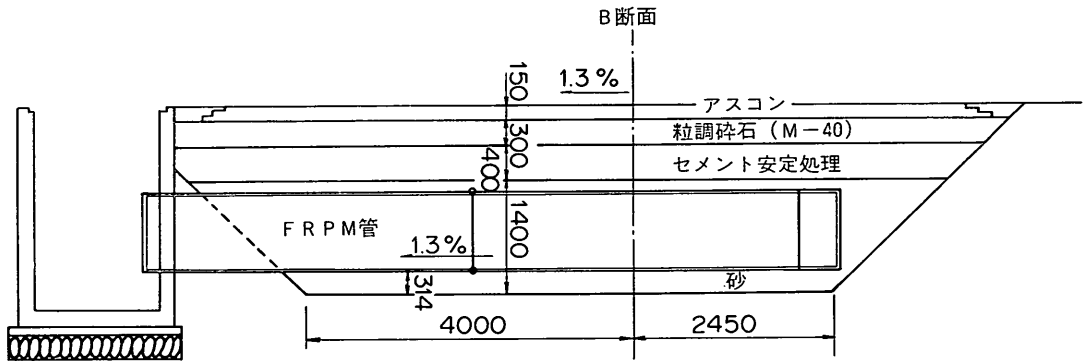
(3) G, E, Z3断面

図-5 試験断面詳細図 (横断面)

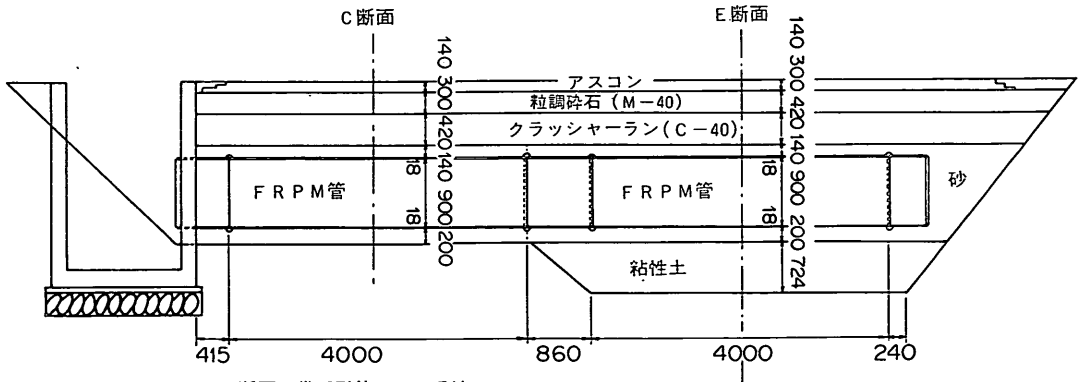
航空機荷重作用下における空港埋設管の挙動



(1) A断面

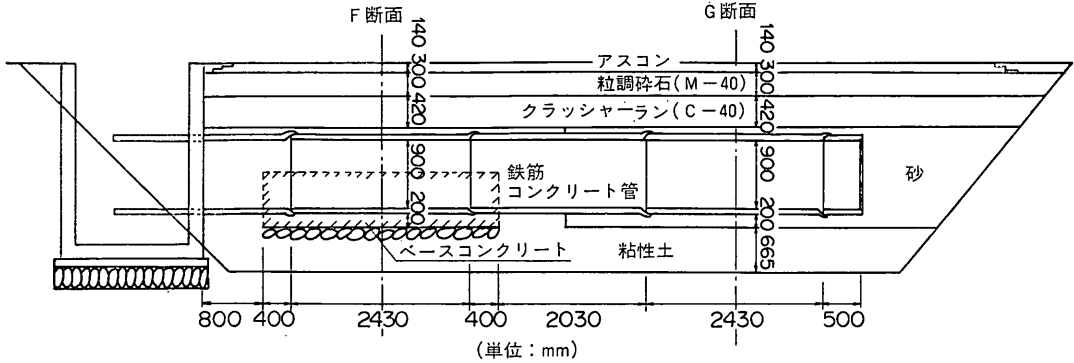


(2) B断面



※ D断面は幾可形状については
C断面と同じで管種のみ
FRPM 2種管を用いた断面
である

(3) C, E断面



(4) F, G断面

図-6 試験断面詳細図(縦断面)

最大乾燥密度の90%以上の締固め度が確保された。

また粘性土中に管を埋設する場合、基本的には良質な砂で管を巻いて埋設した。これは軟弱な粘性土中に直接管を埋設する場合、管が安定せず、また突き棒での締固めもしにくくなり、施工上不利となることを勘案しての対策である。一方、コンクリート基礎を有する鉄筋コンクリート管断面では、それらの心配はないと考えられるため、直接粘性土に埋設した。

(4) 試験断面図

以上(1)~(3)で説明した舗装構造、管種、路床材料を組み合わせて、有管部7タイプ、無管部3タイプの試験断面を作製した。各試験断面の特徴を表-6に示す。なお、断面の詳細は、図-5、図-6のとおりである。

(5) 計器の配置と設置状況

計器は、①管ひずみ計、②管変形計、③地表面、管底沈下計、④土圧計の4種類を取り付けた。各断面における設置計器の種類と設置状況の概略を図-7に示す。なお土圧計は、D断面を除くすべての有管部において管頂部と管側部に設置すると共に、無管部の深さ100cmにも設置した。特にZ3断面、E断面、G断面においては、平面的な地中応力の分散状況を観察する目的で、図中()で囲んだ場所にも設置した。

以下、各計器の設置状況の詳細について示す。

① 管ひずみ計

管周ひずみ計は管周方向30°ピッチで管の内側と外側のおのおの、管軸、管周の2方向に貼付した。また、管長手方向のひずみ計は、A、B断面では管内側上部に管軸方向のみ、C、E、F、G断面では管外側上下部に管軸方向のみに貼付した。

② 管変形計

管径変化を計測するために、市販の変位計と取り付け

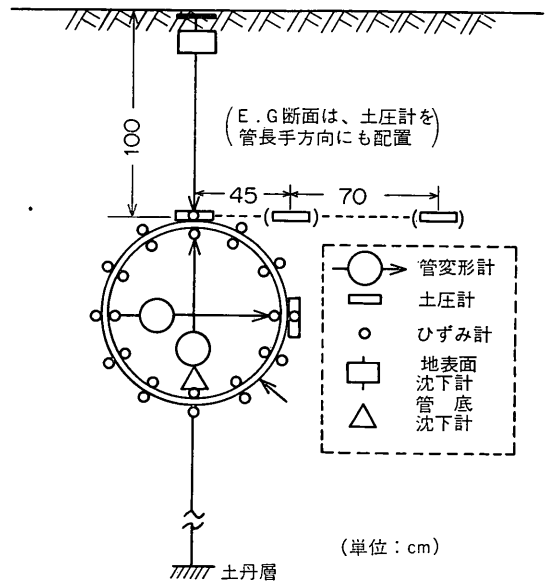


図-7 計器配置

治具を使い鉛直、水平の2方向に設置した。

③ 地表面沈下計、管底沈下計

地表面沈下計は、変位計を固定した沈下板をアスコン底面に定着し、管頂部に不動点を取ったロッドとの相対変位を計測するように設置した。地表面の絶対沈下量は、管底沈下量と管径鉛直変化量を考慮して求められる。管底沈下量は、不動点から立ち上げたロッドと管との相対変位を測るように設置した。今回の場合、不動点は野外実験場の土丹層(-6m付近)である。

④ 土圧計

土圧計は、容量5 kgf/cm²のものを主に使用した。またすべての土圧計は、近傍を単粒径の細砂で包み、れき

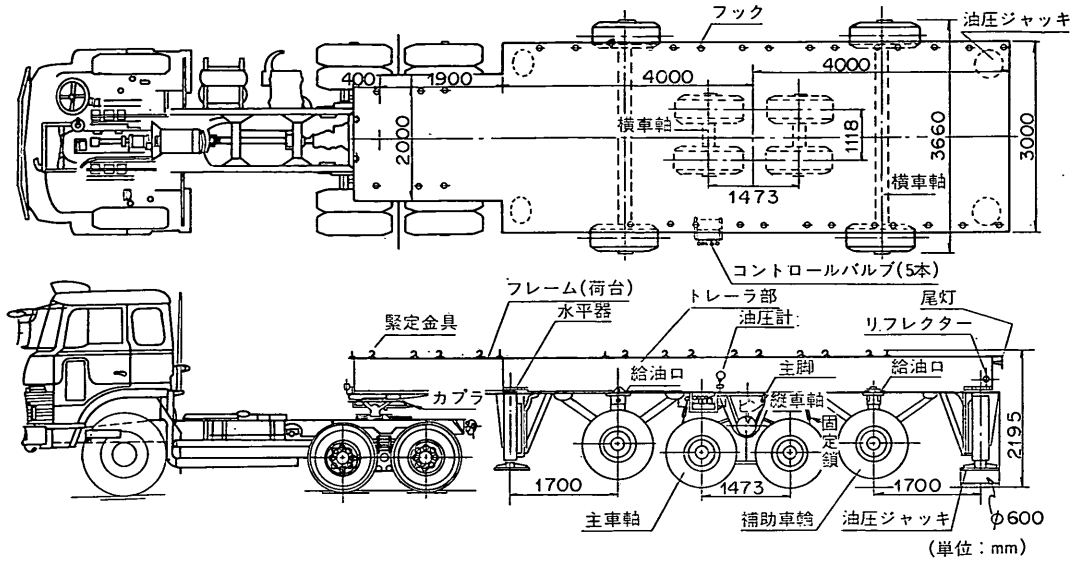


図-8 原型走行荷重車

材等の先端接触による応力集中を防いだ。

3.3 試験方法

全対象断面に対し静的な載荷試験を実施した。載荷方法は2種類で、一つは複々輪載荷、一つは単輪載荷である。また、サンドイッチ舗装断面に対しては、航空機荷重の繰返し載荷の影響を把握するために、繰返し載荷試験も行った。

(1) 複々輪載荷試験

本試験は、当研究所が所有する原型走行荷重車(図-8)を荷重として、各断面の載荷試験を行うものである。原型走行荷重車は、B-747-200B型航空機と同じ形状、同じ脚荷重(82.5tf)の主脚を装備しており、実航空機による載荷と同じ状態を再現できるものである。なお、試験時には、変位計付き不動梁を載荷脚の車輪の中間に挿入し、載荷時の地表面沈下量も測定した。

(2) 単輪載荷試験

複々輪載荷の場合には主脚で載荷したが、単輪載荷試験の場合には、直径45cm、厚さ約3cmの鋼製の円盤で載荷する。この場合、反力を原型走行荷重車に求め、荷重発生装置としては手動の100tfジャッキを用いた。このため、単輪載荷の場合には荷重を自由に变化させることができる。載荷の状況を写真-1に示す。

(3) 繰返し載荷試験(対象断面:A, B, Z1)

本試験は、繰返し載荷に伴う弾性的な挙動の変化と塑性的な挙動の変化の把握を目的としている。

試験法は基本的には複々輪載荷試験であり、原型走行

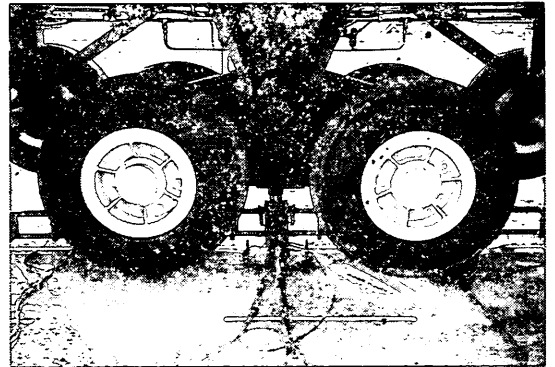


写真-1 単輪載荷試験の状況

荷重車による対象断面上の繰返し走行が所定の回数に達するつど複々輪載荷試験を行うものである。所定の回数としては、1, 10, 100, 500, 1,000回、以降1,000回毎で10,000回までとした。

なお、弾性的な挙動は各複々輪載荷試験の結果から求め、塑性的な挙動は各走行回数終了時点の無載荷状態を追跡することにより求めた。

4. 初期静的載荷における管および舗装の挙動

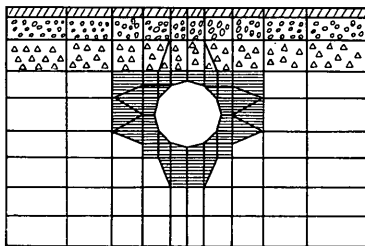
4.1 概要

ここでは、現場試験によって得られた結果を地中応力、管に発生するモーメント、管に発生する管周方向の軸力、管長手方向のひずみ、地表面沈下の各項目につい

表-7 有限要素解析対象断面

対象断面	舗装構造	管種	管径	埋設深	路床材料	管周処理	基
Z'	舗装なし	—	—	—	砂	—	—
Z1	サンドイッチ舗装	—	—	—	砂	—	—
Z2	標準舗装	—	—	—	砂	—	—
Z3	標準舗装	—	—	—	粘性土	—	—
A	サンドイッチ舗装	FRPM 1種	90cm	100cm	砂	セメント安定処理材	—
B	サンドイッチ舗装	FRPM 1種	90cm	100cm	砂	—	—
C	標準舗装	FRPM 1種	90cm	100cm	砂	—	—
C'	標準舗装	FRPM 1種	90cm	180cm	砂	—	—
C''	標準舗装	FRPM 1種	130cm	100cm	砂	—	—
D	標準舗装	FRPM 2種	90cm	100cm	砂	—	—
E	標準舗装	FRPM 1種	90cm	100cm	粘性土	砂 巻き	—
E'	標準舗装	FRPM 1種	90cm	100cm	粘性土	—	—
F	標準舗装	コンクリート管	90cm	100cm	粘性土	—	コンクリート基礎
F'	標準舗装	コンクリート管	90cm	100cm	砂	—	コンクリート基礎
G	標準舗装	コンクリート管	90cm	100cm	粘性土	砂 巻き	—
G'	標準舗装	コンクリート管	90cm	100cm	砂	—	—

FRPM管断面



鉄筋コンクリート管断面

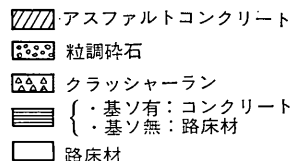
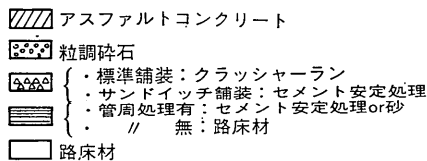
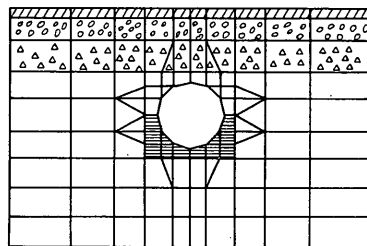


図-9 有限要素解析メッシュ

て整理し解析した。また、現場試験結果のみでは十分な傾向が把握できなかった点や、実測された傾向の確認、あるいは現場試験にない断面の挙動を推定するために有限要素解析を行った。有限要素解析の計算対象断面とインデックスの対応を表-7に、基本メッシュを図-9に、有限要素解析に用いた要素の諸元を表-8に示す。このメッシュ要素の構成材料を変えることで様々な断面に対応させた。また、管径、管理設深を変化させる場合は、条件に応じてメッシュを変化させた。計算上の荷重としては30tf単輪載荷を想定し、等分布荷重18.86kgf/cm²を45cm幅で分布させた。なお各要素の弾性係数の決定は、

表-8 対象要素の物理定数(その1)

管種	弾性係数 (kgf/cm ²)	ポアソン比	断面二次モーメント (cm ⁴)	断面積 (cm ²)
FRPM 1種 (φ900)	225,000	0.3	0.486	1.8
FRPM 1種 (φ1,300)	225,000	0.3	1.465	2.6
FRPM 2種 (φ900)	150,000	0.3	0.486	1.8
鉄筋コンクリート (φ900)	350,000	0.15	60.75	9.0

航空機荷重作用下における空港埋設管の挙動

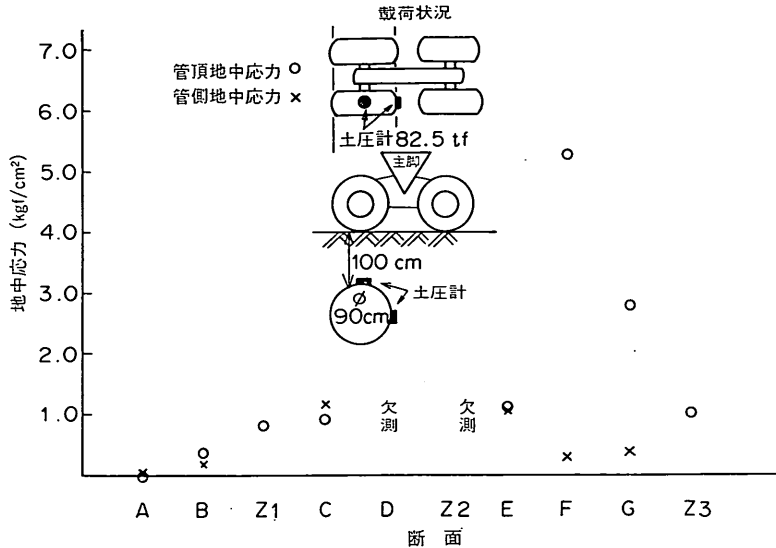


図-10 載荷時地中応力（複々輪載荷）

表-8 対象要素の物理定数（その2）

材 料	弾性係数 (kgf/cm ²)	ポアソン比
アスファルト	7,000	0.35
粒調砕石	3,000	0.3
クラッシャーラン	2,000	0.3
セメント安定処理	12,000	0.3
コンクリート基礎	350,000	0.15
砂	1,000	0.3
粘性土	160	0.35

CBR値が求められたものについては、過去の研究結果⁹⁾に基づき100×CBRとした。円柱供試体による一軸圧縮試験結果から直接求めた場合は、現場施工と供試体作製状況の違いを考慮して0.85倍¹⁰⁾の値を用いた。またアスファルトの弾性係数は、試験当時温度が高かったことを考慮して小さめの値とした。

4.2 地中応力の分布

(1) 複々輪載荷試験による鉛直地中応力レベル

複々輪載荷試験による100cm深の管頂部に作用する鉛直応力レベルを図-10に示す。載荷状態は着目断面真上に脚の車輪1個が載った状態である。結果から、FRPM管埋設断面に比べて鉄筋コンクリート管埋設断面の応力集中度の高いことが明らかである。その値は現行設計レベルの1.45kgf/cm²（100cm深）を大きく越えていることがわかる。ただしこれは、管頂部の1点での値である

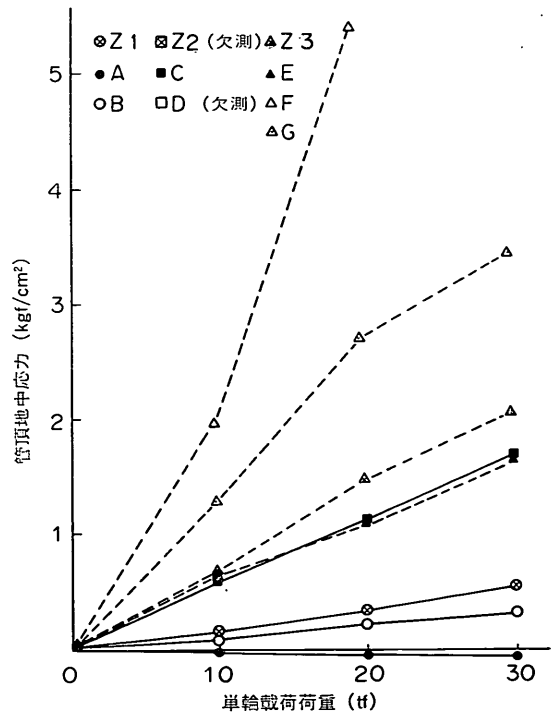


図-11 荷重変化に伴う地中応力の変化

ため、この値に基づいて設計用鉛直応力を推定することは問題があると考えられる。

(2) 単輪載荷試験による鉛直地中応力レベル

図-11に単輪載荷試験で荷重レベルを変化させた場合

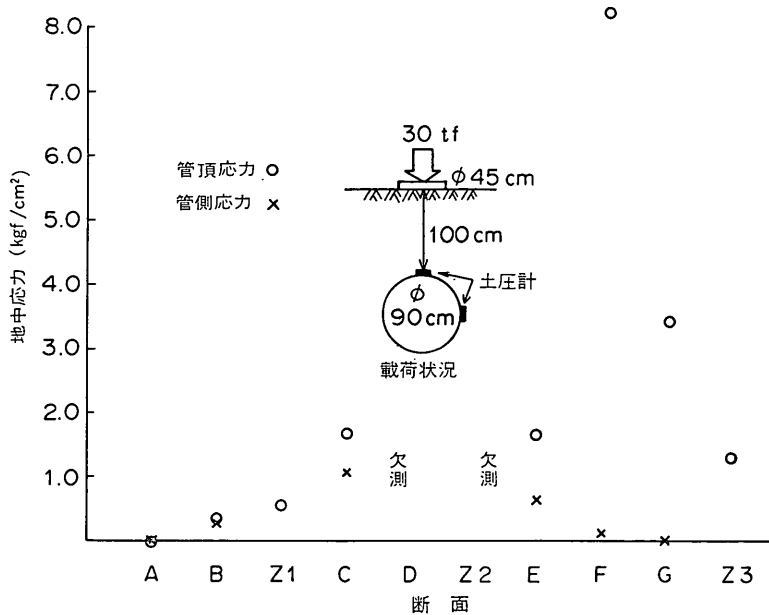


図-12 载荷時地中応力 (30tf 単輪载荷)

の鉛直応力を示す。どの断面の計測値も、荷重の増加に伴い、ほぼ直線的に増加している。また、荷重30tfの結果を図-12に示す。断面間の相対関係は、複々輪载荷の場合とほぼ合致しているようである。またオーダーは、全断面において複々輪载荷の方が小さめであるが、その傾向は、C、E断面で比較的顕著であると思われる。

(3) 管に作用する側方地中応力の挙動

複々輪载荷と30tfの単輪载荷のそれぞれについて、管に作用する鉛直応力と管に作用する側方応力の比（以降、管側応力比と略す）を示したのが図-13である。B断面を除く断面について複々輪载荷試験による値が大きい。これは単輪载荷の場合、側方応力の大半は管変形に起因する受働土圧であると考えられるのに対し、複々輪载荷の場合には隣の輪荷重に起因する地中応力も影響するためと考えられる。

次に各断面での違いを考察する。

FRPM管使用断面と鉄筋コンクリート管使用断面に分けると、FRPM管使用断面では管変形に伴う側方受働土圧が期待できるのに対し、鉄筋コンクリート管ではほとんど期待できないことがわかる。この結果は、現行設計法の仮定を一部裏付けるものである。

また、FRPM管使用断面において管周状態の違う場合がC断面とE断面である。E断面はC断面に比べて管周材料の弾性係数が小さい。結果はC断面の方が管側応力比が高く、管周材料の弾性係数に応じて期待しうる管

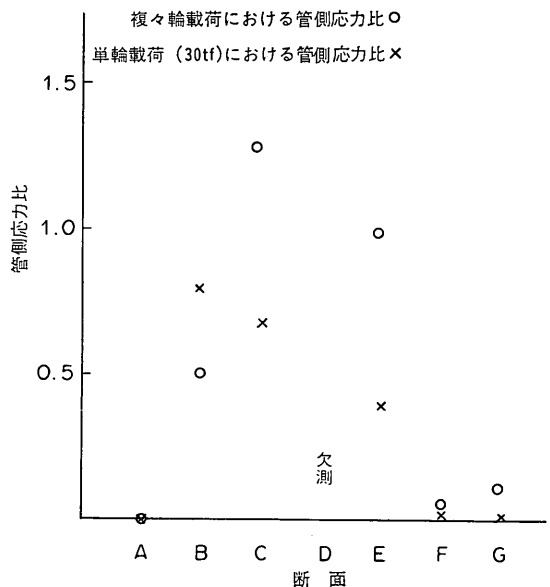


図-13 管側応力比の比較

側応力を変化させるべきであることがわかる。現行設計法ではこの点に関する考慮はない。

さらに、管に作用する鉛直応力が変化した場合の管側応力比を図-14に示す。管周材料が砂の場合（B、C断面）には、ほぼ一定か、荷重増加に伴って若干の増加が認められるが、管周材料が粘性土（E断面）の場合に

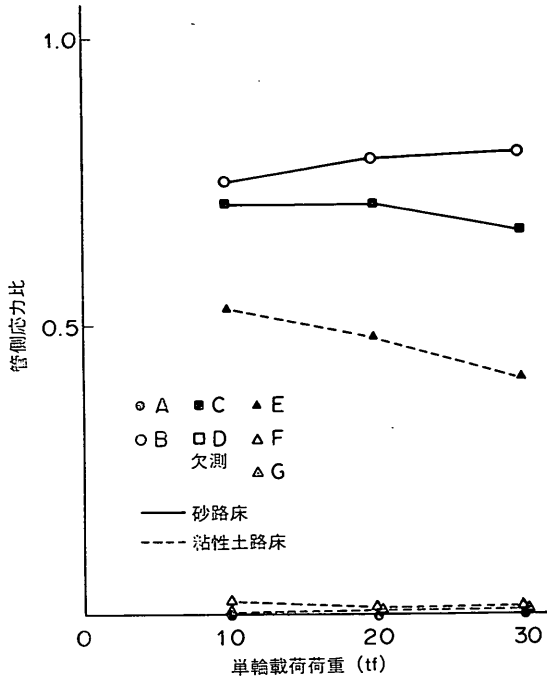


図-14 荷重変化に伴う管側応力比の変化

は、荷重増加に伴い若干の低下が認められる。これは、粘性土の場合、荷重中に塑性変形を生じるためと考えられる。

(4) 鉛直地中応力の分布形状

E断面、G断面、Z3断面では、荷重時の地中応力分布形状を観測するために、管頂深(100cm)のレベルに平面的に土圧計を配置した。その際、有管部のE、G断面においては、管長手方向、管長手直角方向の応力分布を観測するために両方向に配置した(計器配管は図-7参照)。この地点での30tf単輪載荷試験結果を図-15~図-17に示す。図-15が無管断面(Z3)、図-16がFRPM管埋設断面(E)、図-17が鉄筋コンクリート管埋設断面(G)での結果である。無管断面の場合、実測結果によ

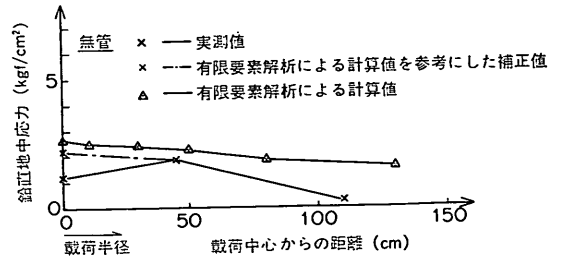


図-15 鉛直地中応力の分布形状 (Z3断面)

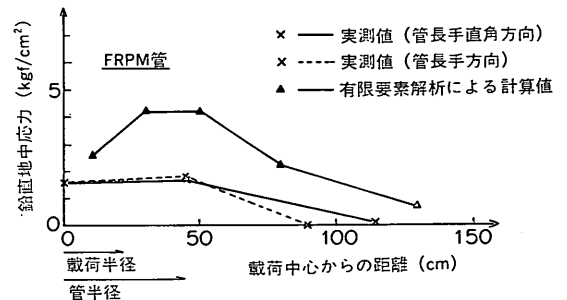


図-16 鉛直地中応力の分布形状 (E断面)

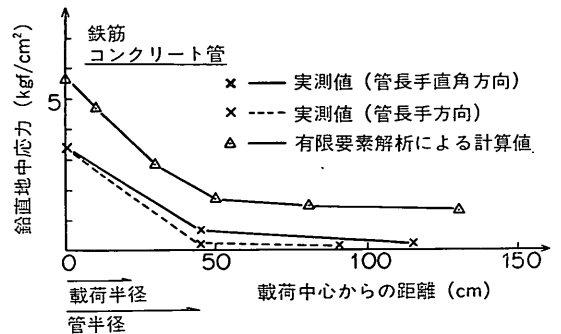


図-17 鉛直地中応力の分布形状 (G断面)

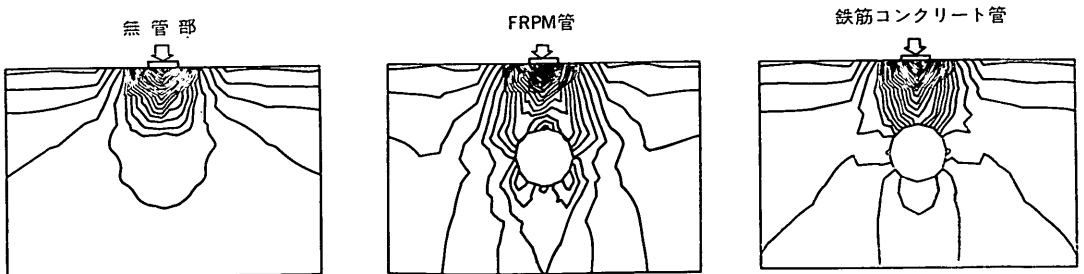


図-18 鉛直地中応力のコンターライン

れば載荷中心で地中応力の低下が見られるが、有限要素解析の結果から明らかに妥当ではないと判断し補正した。

これらの結果によれば、FRPM 管理設断面では載荷中心部での応力低下が認められるのに対し、鉄筋コンクリート管理設断面では逆に応力の集中傾向が顕著に現われている。有限要素解析結果の鉛直応力コンターを図-18に示してあるが、この結果からもその傾向は明らかである。これは管の見かけの弾性係数の違いに起因するものと考えられ、舗装構造が同じであっても管の種類によって設計時の鉛直作用応力を変える必要があることがわかる。

また図-16、図-17において、管長手方向と管長手直角方向の応力分布状態の実測値を比較すると、管の種類を問わず両者の傾向はほぼ等しいことがわかる。

以上は、粘性土路床に標準舗装を用いた場合の結果であるが、その他の場合についての傾向を知るために、有限要素解析を行った結果を示す。結果は、無管部、FRPM 管部、鉄筋コンクリート管部別に整理し、それぞれ図-19、図-20、図-21に示す。

a) 無管断面

無管部の解析によると、①サンドイッチ舗装の Z1 断面は、標準舗装の Z2 断面よりも応力レベルは低い、②路床として砂を用いた Z2 断面より粘性土を用いた Z3 断面の方が応力レベルは低い、という結果である。

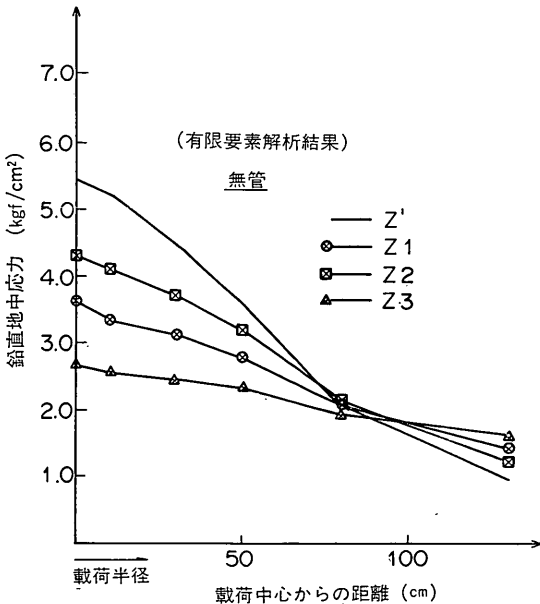


図-19 鉛直地中応力の分布形状（無管）

①は、舗装構造の違いに起因する荷重分散効果の差が出たものである。②は、粘性土路床の場合には、舗装に比べて路床の弾性係数が極端に小さいため、荷重分散の大半が舗装内で受け持たれ、路床部へ広く応力が分散された結果と考えられる。

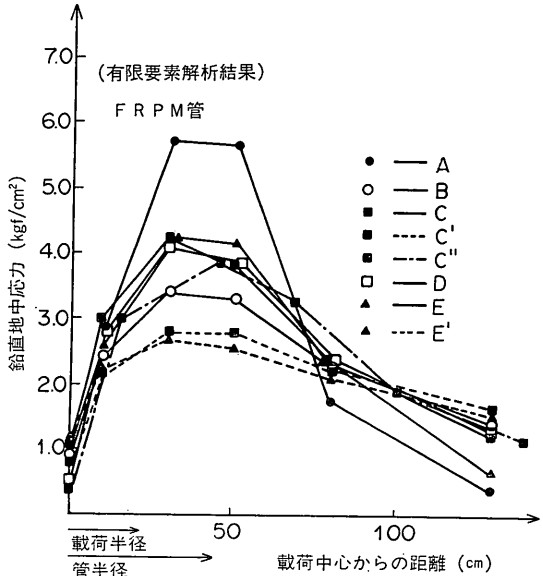


図-20 鉛直地中応力の分布形状（FRPM 管）

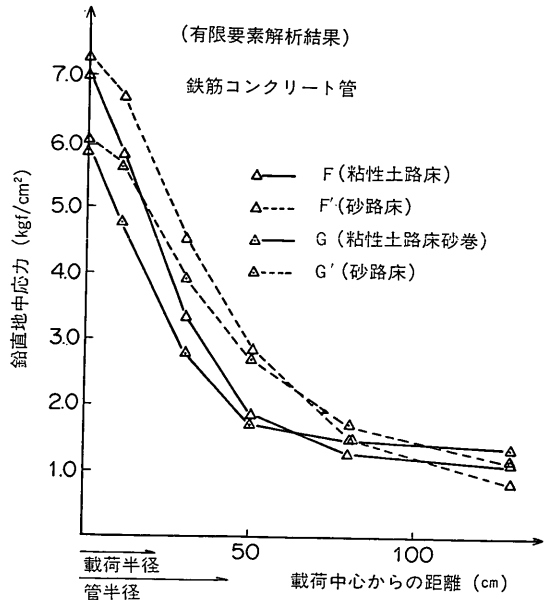


図-21 鉛直地中応力の分布形状（鉄筋コンクリート管）

b) FRPM 管埋設断面

全断面とも荷重中心（管中心）で応力が低下し、管側部上部付近で最大値が発生する。なおA断面では、他断面と比較して管側部上部での応力集中が著しいが、これはセメント安定処理層内に発生する応力であり、比較的弾性係数の大きいセメント安定処理部に応力が集中した結果と考えられる。したがって、管に動く応力そのものではないことに注意しなければならない。

B断面とC断面は、舗装構造のみが違う場合である。分布形状は同様であるが、最大応力レベルは剛性の高いサンドイッチ舗装のB断面の方が低い。これは実測値と同傾向である。

C断面とC'断面は、管の埋設深が違う場合の比較である。C断面は100cm深、C'断面は180cm深の場合である。当然C'断面はC断面に比べると応力レベルは低い、同時に応力分布形状も変化し、管側部での応力集中傾向が緩和されるようである。

C断面とC''断面は管の埋設深は同じで、管半径のみが違う場合である。C断面は半径45cm、C''断面は半径65cmを想定した。この場合、半径の大きいC''断面の方に最大応力レベルの若干の低下と最大応力発生位置の移動が認められる。最大鉛直応力発生位置が半径の増加に伴って外側に若干移動する。

C断面とD断面は、管種が違う場合である。C断面は1種管、D断面は2種管を想定している。この場合、ほとんど有意な差は認められないようである。

C断面とE断面とE'断面は砂路床中への埋設、粘性土路床中砂巻き、粘性土路床中直接埋設の各場合を想定している。C断面とE断面はほとんど変化しないが、E'断面は応力レベルの低下が見られる。C断面とE断面の差があまりないことは実測値からも認められ、粘性土路床中に管を埋設する場合には、砂巻きにすることにより、砂路床中への埋設の状態に近づけることができそうである。

c) 鉄筋コンクリート管埋設断面

全断面において管頂部の応力集中傾向の著しいことがわかる。

F断面とG断面の主な違いは、基礎コンクリートの有無である。最大応力レベルは、下方への沈下拘束傾向の強い、基礎のあるF断面の方が高い。この傾向は、実測からも明らかである。

F断面とF'断面は、それぞれ、粘性土路床の場合と砂路床の場合である。有限要素解析の結果によれば、F断面よりF'断面で大きめの地中応力が発生している。したがって、今回得られた粘性土路床での実測値から砂

路床の場合を推定するとすれば、割増しした値を適用すべきと考えられる。

4.3 管に発生するモーメントと管周方向の軸力

A～G断面について、複々輪載荷の場合と単輪載荷の場合における管に発生するモーメントと管周方向の軸力を図-22～図-28に示す。複々輪載荷試験結果の図中のa, b, c, dは、対象断面に対する脚の相対位置を示すものである。相対位置とインデックスの対応は図-29のとおりである。なお、計測したひずみからモーメントおよび軸力への換算には、次の関係式を用いた。

① ひずみから応力への換算¹¹⁾

$$\sigma_x = E_x \cdot (\epsilon_x + \nu_x \cdot \epsilon_y) / (1 - \nu_x \cdot \nu_y) \quad (5)$$

$$\sigma_y = E_y \cdot (\epsilon_y + \nu_y \cdot \epsilon_x) / (1 - \nu_x \cdot \nu_y) \quad (6)$$

ここに、

σ_x : 管軸方向応力 (kgf/cm²)

σ_y : 管周方向応力 (kgf/cm²)

ϵ_x : 管軸方向ひずみ

ϵ_y : 管周方向ひずみ

E_x : 管軸方向弾性係数 (kgf/cm²)

E_y : 管周方向弾性係数 (kgf/cm²)

ν_x : 管軸方向ポアソン比

ν_y : 管周方向ポアソン比

② 応力からモーメント、管周方向軸力への換算

$$M = (\sigma_{yout} - \sigma_{yin}) \cdot (I/t) \quad (7)$$

$$N = \sigma_{yout} - (\sigma_{yout} - \sigma_{yin})/2 \quad (8)$$

ここに、

M : 管発生モーメント (kgf・cm/cm : 単位長当り)

N : 管発生管周方向軸力 (kgf/cm²)

σ_{yin} : 管周方向管内側応力 (kgf/cm²)

σ_{yout} : 管周方向管外側応力 (kgf/cm²)

t : 管肉厚 (cm)

I : 管壁断面2次モーメント (cm⁴/cm : 単位長当り)

(1) 複々輪載荷における脚相対位置とモーメントの関係

全般的にどの相対位置による載荷でも、モーメントの発生形状に大きな差は認められないが、管に最大モーメントを発生させる相対位置は管種によって若干異なる。

A～EまでのFRPM管使用断面では、d位置の載荷、すなわち車輪の一つが対象断面の真上に載った状態が管に最大モーメントを発生させ、鉄筋コンクリート管を用いたF断面では、前の2車輪が対象断面を挟む状態、G断面では、脚中心に対象断面がくる状態が管に最大モーメントを発生させる。現行設計法の仮定では脚中

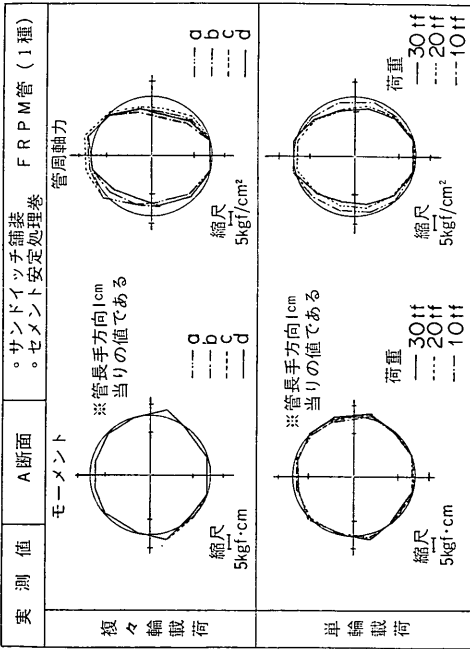


図-22 管に発生するモーメントと管周方向の軸力

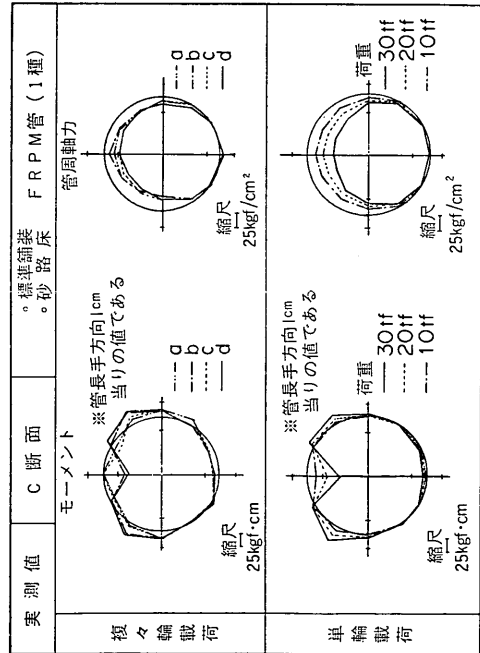


図-24 管に発生するモーメントと管周方向の軸力

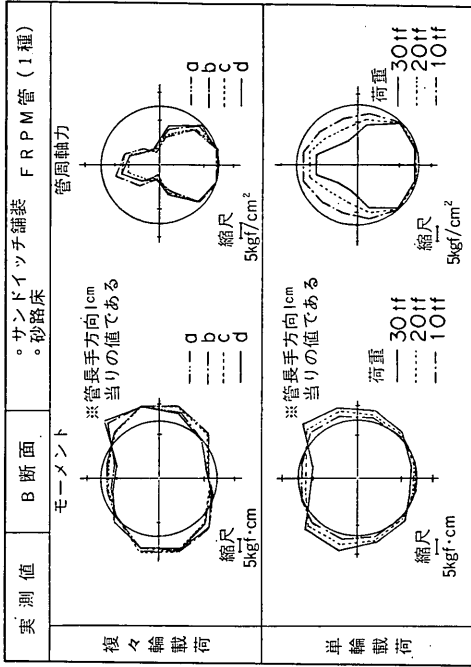


図-23 管に発生するモーメントと管周方向の軸力

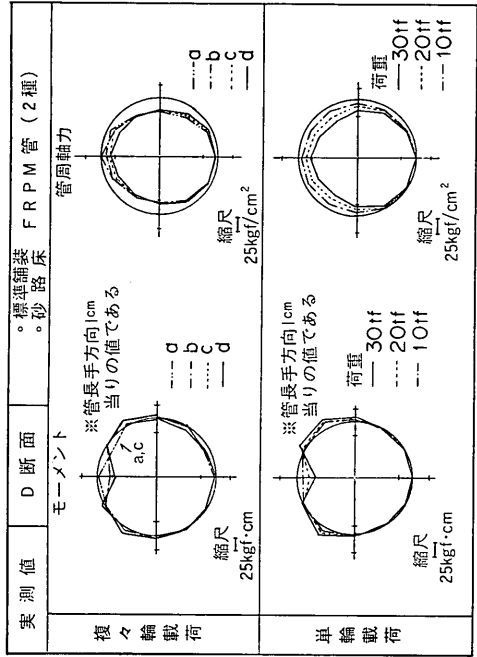


図-25 管に発生するモーメントと管周方向の軸力

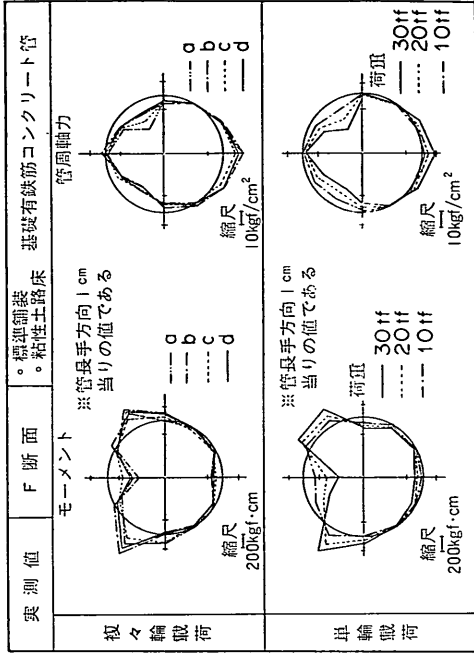


図-27 管に発生するモーメントと管周方向の軸力

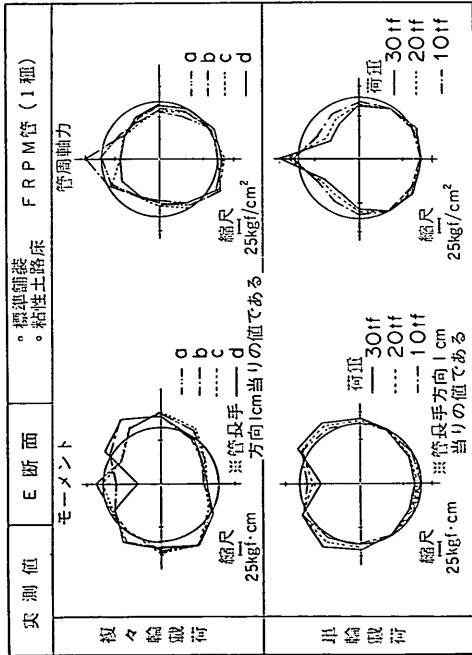


図-26 管に発生するモーメントと管周方向の軸力

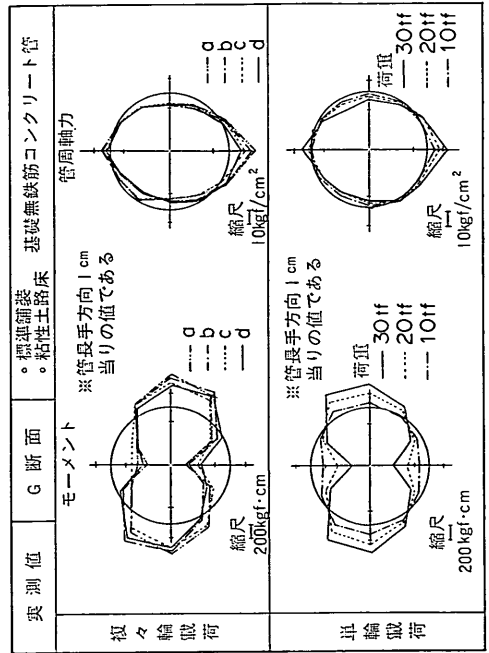


図-28 管に発生するモーメントと管周方向の軸力

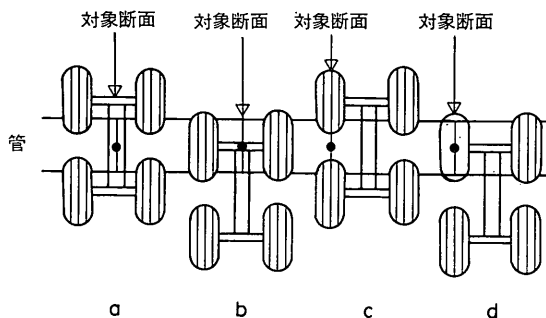


図-29 対象断面と脚の相対位置

心が対象断面の真上に載った場合に最も厳しい条件になるが、可撓性の FRPM 管については仮定が当てはまらないことがわかる。

(2) 複々輪載荷と単輪載荷における発生モーメントの比較

管に発生するモーメントを尺度として、B-747型脚による複々輪載荷が単輪載荷荷重でどの程度に相当するか比較してみると、各断面において若干の程度の差はあるものの、大体30tf程度の単輪載荷により複々輪載荷と同様の状態となるようである(図-22～図-28参照)。ただし、モーメントの発生形状は異なり、単輪載荷の場合には主に管の上半分にモーメントの発生が集中しているが、複々輪載荷の場合には管の下側にもモーメントの発生がみられる。この傾向は、標準舗装下に FRPM 1種管を埋設した場合に顕著であり、剛性のより低いFRPM 2種管では、複々輪載荷においても管の上側にしかモーメントは発生せず、逆に剛性の高い鉄筋コンクリート管

では単輪載荷においても管下側にモーメントの発生がみられる。これらのことより管に発生するモーメントの分布は、管の剛性に依存して変化することがわかる。すなわち、剛性の低い管ほど局所的な変形により作用応力を吸収し他に影響を伝えない傾向があり、他方剛性の高い管は局所的な変形が許されず、このため管全体に影響が及ぶものと考えられる。

(3) 個々の断面における発生モーメントおよび軸力の比較

実測結果(図-22～図-28参照)から FRPM 管と鉄筋コンクリート管に発生する最大モーメントの値に大きな差のあることがわかる。その結果を図-30に示す。管種以外の条件が等しいE断面とG断面を比較すると、複々輪載荷時の発生最大モーメントの値で約10倍近い差がある。これは、剛性の高い鉄筋コンクリート管の場合、地中応力が集中する傾向があり、さらに変形が許されないために管側方からの受働土圧がほとんど期待できないために生じた結果であると考えられる。

FRPM 管使用断面においては、サンドイッチ舗装構造の適用により(A, B断面)、標準舗装の場合(C断面)に比べて発生モーメントが非常に小さくなっていることがわかる。これは、サンドイッチ舗装の荷重分散効果の大きさを示すものと考えられる。

FRPM 管の1種管(C断面)と2種管(D断面)の比較では、剛性の高い1種管の方に大きなモーメントの発生がみられる。

鉄筋コンクリート管の基礎の有無による差は、F断面とG断面の比較により把握できる。基礎のあるF断面で

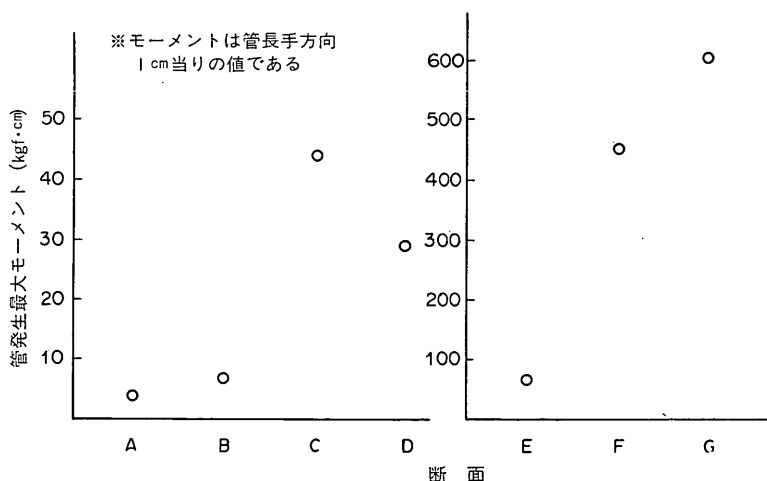


図-30 管に発生する最大モーメントの比較

は管の上部のみにモーメントの発生がみられ、その値はG断面より小さく押えられている。これは、基礎のあるF断面では管の側方変形が基礎で拘束され、その結果管頂部のモーメントが小さく押えられたものである。この結果から基礎コンクリートの管保護効果が確認できる。

次に各断面に発生した管周方向の軸力に着目する。

鉄筋コンクリート管を使用した断面では、管側部に圧縮傾向が顕著に認められ、管頂、管底部では逆に張張り傾向がある。

この軸力分布傾向から推察すると、少なくとも管側方からの圧縮応力はかかっておらず、このことから鉄筋コンクリート管では側方応力が期待できないことが明らかである。他方、FRPM管では、管の上半分のみに一様圧縮軸力が作用する傾向がある。この傾向から、管の上半分に半径方向の一様外圧的な圧縮応力が作用しているか、あるいは管上部に圧縮軸力を生じさせる水平圧縮応力が作用していることが推察できる。これより、FRPM管の現行設計法において側方受働土圧を期待していることは妥当であると考えられる。なお、管の下側半分

における軸力の発生が極端に小さいことから、管下部では半径方向の一様外圧的な応力等は働いていないことが推察できる。

(4) 管中央部と管端部における発生モーメントの比較

A～G断面はすべて管中央部付近に位置している。しかし、三次元的に考えた場合、管の見かけの剛性は端部で最も低い可能性があると考え、管端部（継手付近）への載荷を試みた。対象断面としては、FRPM管ではE

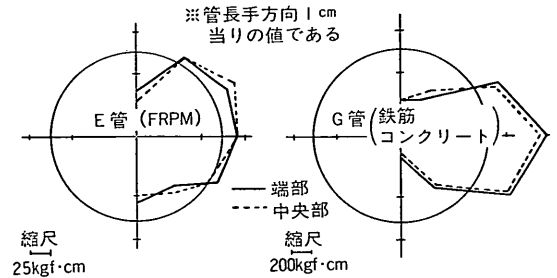


図-31 管中央部載荷と管端部載荷における発生モーメントの比較

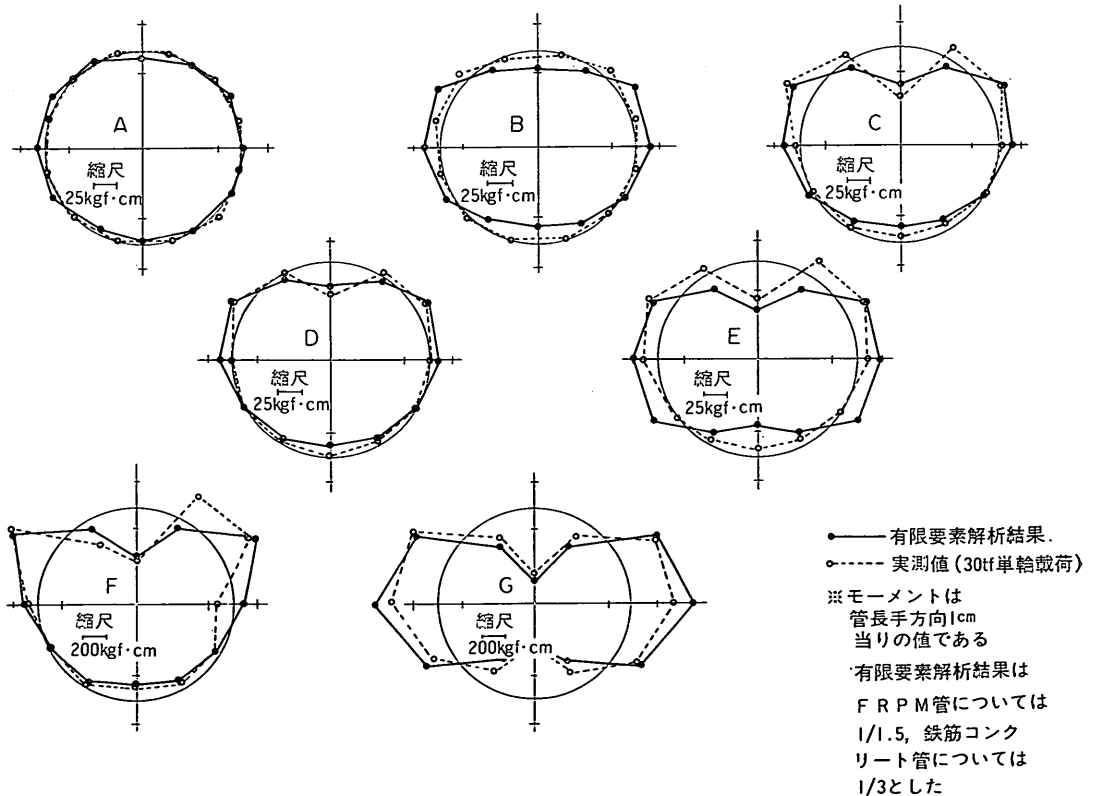


図-32 有限要素解析による発生モーメント

断面の管端部、鉄筋コンクリート管ではG断面の管端部とした。載荷方法は複々輪載荷とし、脚の配置は管中央部の載荷において最大モーメントをもたらした配置とした。その結果は図-31で、管中央部と管端部で大きな差のないことが認められる。

(5) 有限要素法によるシミュレーション結果

有限要素法を用いて各断面をシミュレーションし、発生モーメントの分布形状を求めた。なお今回の有限要素解析では二次元モデルを適用したため、管長手方向の応力分散が考慮できず、その結果、発生モーメントは大きめの値となった。このため、発生最大モーメントレベルをほぼ実測レベルに合わせ目的で、FRPM管使用断面では1/1.5、鉄筋コンクリート管使用断面では1/3を乗じて整理した。二次元モデルでは帯状等分布荷重が載荷板幅(45cm)で無限に続く場合に相当し、実測値は直径45cmの円形載荷板による載荷結果である。そこで、一般に用いられる土質力学的手法¹²⁾により、管がない場合における両者(帯状載荷、円形載荷)の鉛直応力(100cm深)を比較すると3:1程度であった。管発生モーメントが鉛直応力に比例すると仮定するならば、今回用いた1/3、1/1.5の係数はオーダー的にそれほどおかしな値

ではないと考えられる。

計算の結果を図-32に示す。図中には単輪載荷試験の実測値も同時に記入してある。これによればサンドイッチ舗装のB断面でのモーメントが実測値よりも大きめとなっていることがわかる。この原因としては、サンドイッチ舗装の管長手方向の応力分散効果が標準舗装より大きく、その補正が十分しきれていないことが考えられる。しかし、標準舗装使用の各断面に関しては、絶対値の大小はともかく、モーメント分布形状の特徴に関しては、ある程度シミュレーションできていると考えられる。そこで、このモデルを用いて、実規模試験では扱えなかった断面をシミュレーションし、いくつかの変化因子が管に発生するモーメントに及ぼす影響を調べてみた。

a) 管理設深の変化

図-33に管理設深が変化した場合を示す。基本断面はC断面である。埋設深が100cmから180cmに変化するのに伴い、管に発生するモーメントは約半分に低減している。

b) 管径の変化

図-34に管径が変化した場合を示す。基本断面はC断

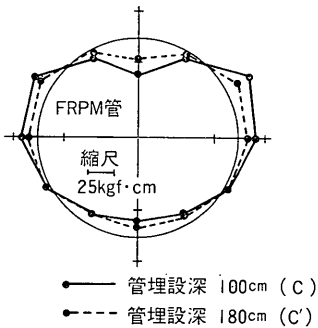


図-33 管理設深変化の影響

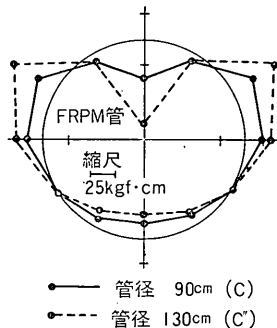


図-34 管径変化の影響

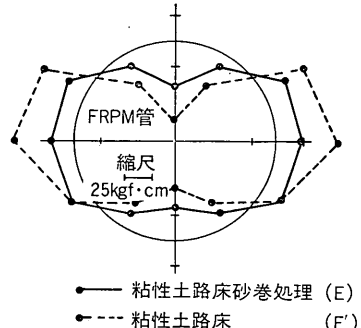


図-35 管周処理の効果

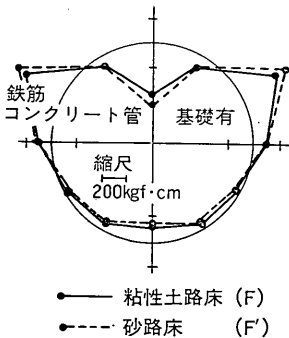


図-36 管周材料の変化の影響

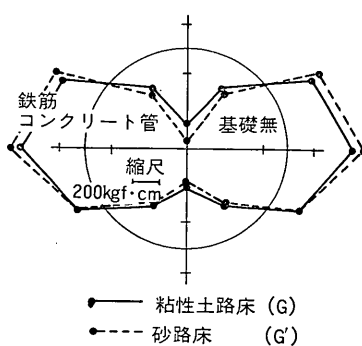


図-37 管周材料の変化の影響

※モーメントは管長手方向1cm当りの値である

面である。管直径が90cmから130cmに変化するのに伴い、管に発生するモーメントは2倍以上に増大する。

c) 管周処理の効果 (FRPM管)

図-35は粘性土中にFRPM管を埋設する場合、管周処理(砂巻き)の有無がどのような影響をもたらすかをシミュレーションした結果である。粘性土路床への直接埋設(E'断面)に比べ、砂巻き処理した場合(E断面)のモーメントが小さく押えられている。

d) 鉄筋コンクリート管における管周材料の変化

図-36、図-37は、それぞれF、G断面において路床材料が粘性土から砂に変化した場合の結果である。管がFRPM管の場合には、管周材料の弾性係数が大きいほど発生モーメントは小さく押えられることが、実測と有限要素解析の両方で確認されたのに対し、鉄筋コンクリ

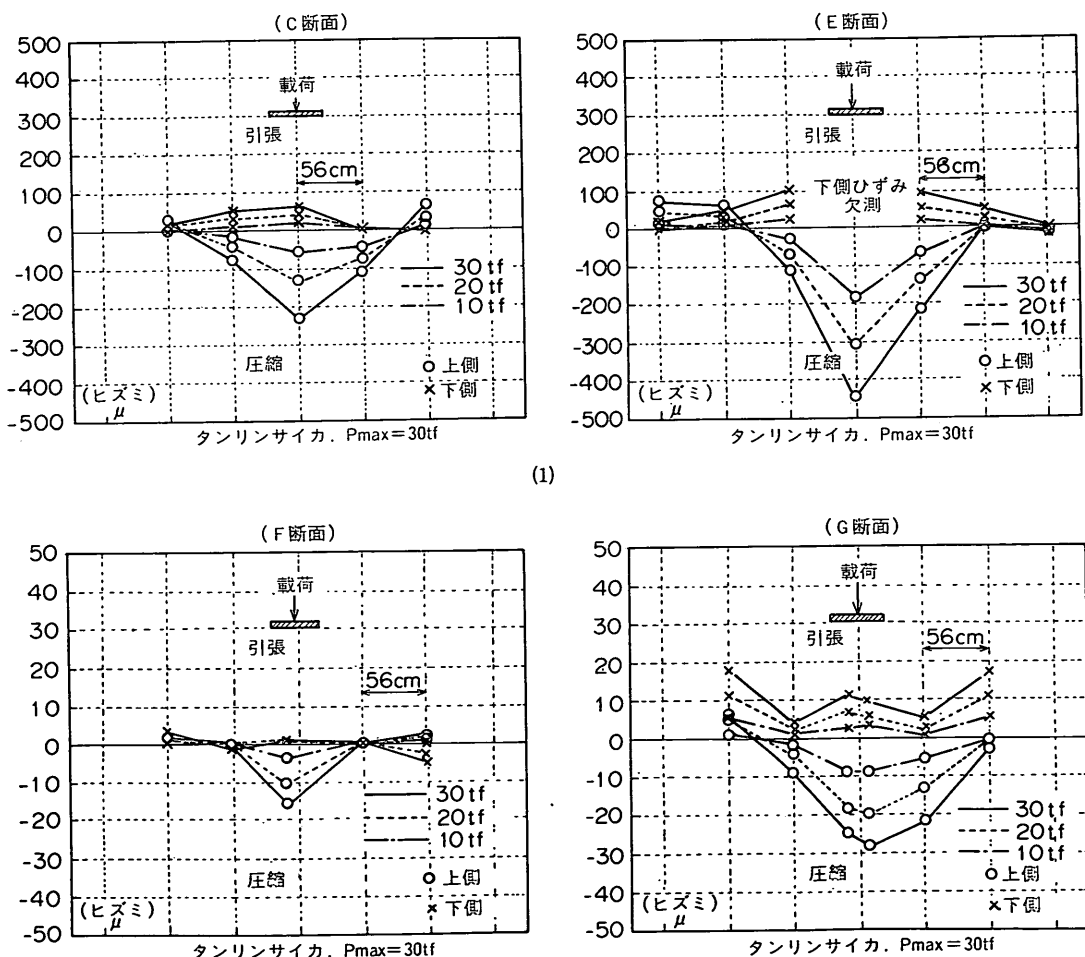
ート管の場合には、基礎の有無にかかわらず管周材料の弾性係数の大きい場合において大きなモーメントを生じる。

これは、可撓性管の場合、管周材料の弾性係数の増大が側方応力の増加に結びつきモーメントの低減をもたらすのに対し、鉄筋コンクリート管の場合、管周材料の弾性係数にかかわらず管側方からの応力は期待できず、他方、鉛直応力は前出の図-21に示したように管周材料の弾性係数に比例して若干増大するためである。

4.4 管長手方向のひずみ分布

30tf単輪載荷時における管頂部、管底部外側の管長手方向のひずみ分布を図-38に示す。

C、E断面の比較により管周材料の違いに起因するFRPM管発生ひずみの違いをみると、管周材料に粘性



(1)

(2)

図-38 管長手方向のひずみ分布

土を使用したE断面では、舗装構造全体の変形が大きく、それに追従した管の変形から管ひずみも大きくなっている。

F、G断面の比較により基礎の有無に起因する鉄筋コンクリート管発生ひずみの違いをみると、基礎のあるF断面では、基礎で補強された管底部のみならず管頂部のひずみも十分小さく押えられ、また、ひずみ発生範囲も狭い。これらのことから、基礎の効果が確認できる。

4.5 地表面沈下

地表面沈下量の測定は、各断面に設置された地表面沈下計により、載荷輪直下の沈下量が把握できるはずであったが、当該計器が地中埋め殺しのために、施工時の中立点移動等によるオーバースケール補正が不可能となり、精確な計測を期待できない断面がいくつかあったことから、統一的な沈下量としては、不動梁に取り付けた変位計で計測した載荷脚中間地点の沈下量を用いた。

各断面の複数載荷時における地表面沈下量を図-39に示す。載荷脚と管の相対位置は図中に示すとおりである。

サンドイッチ舗装部(A, B, Z1断面)に着目し、無管部と有管部を比較する。管をセメント安定処理材巻きとしたA断面は、無管部(Z1断面)の約半分であり、安定処理をしていないB断面でも無管部より若干小さい。今回対象としたサンドイッチ舗装断面の場合、次のことがいえるようである。①管が存在しても沈下量は増加しない。②管をセメント安定処理材等の剛な材料で保

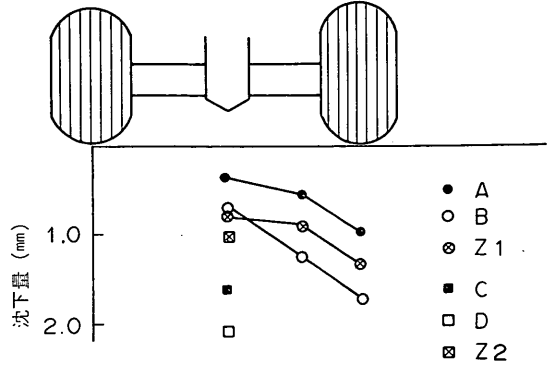


図-40 地表面沈下量

護した場合には、沈下量を低減することができる。ただし①については載荷脚中心部での結果に基づくものであり、載荷輪直下での沈下量は図-40に示すように、やはり有管部(B断面)が無管部(Z1断面)より大きい。以上のことより、FRPM管を埋設した部分では、管の見かけの弾性係数が路床砂より小さいことに起因する沈下量の増加が考えられるが、管を剛な材料で巻くことにより、見かけの弾性係数を上げてやれば、沈下量は十分小さく押えられるものと思われる。また、サンドイッチ舗装断面に関しては、標準的な舗装を施した無管部のZ2断面における沈下量をすべての断面で下回っていることから、管の存在に起因する沈下量の増加は十分押えられていると思われる。

一方標準舗装部(C, D, E断面)では、管の存在が顕著に影響し、管の見かけの弾性係数が小さい(D断面: 2種管)ほど沈下量は大きい。

5. 繰返し載荷における管および舗装の挙動

5.1 概要

本章では、FRPM管使用断面に航空機荷重が繰返し載荷された場合に、管および舗装にどのような影響をもたらすかを検討した。

対象断面はサンドイッチ舗装使用のA, B, Z1断面とし、載荷方法は前出原型走行荷重車による管長手直角方向の繰返し走行である。また、走行回数は10,000回とした。

5.2 塑性的挙動の推移

塑性的挙動は、着目走行回数終了後における無載荷時の計測値から、走行試験前の計測値を初期値として引くことにより把握した。

載荷回数に伴う、わだちばれ、管底沈下、管径変化、管長手方向の発生応力、発生モーメントの塑性的挙動の

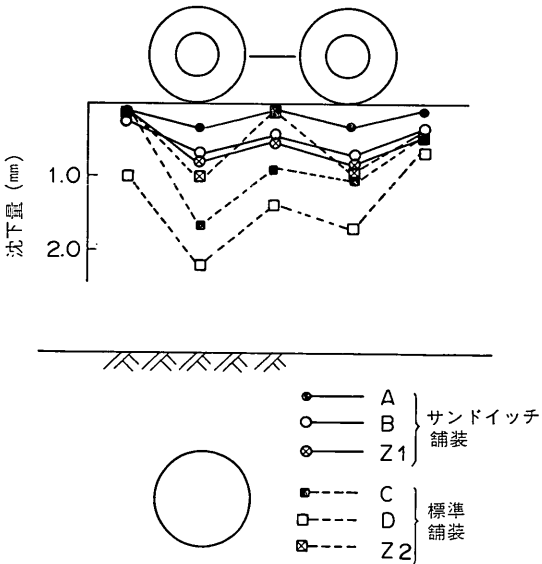


図-39 地表面沈下量

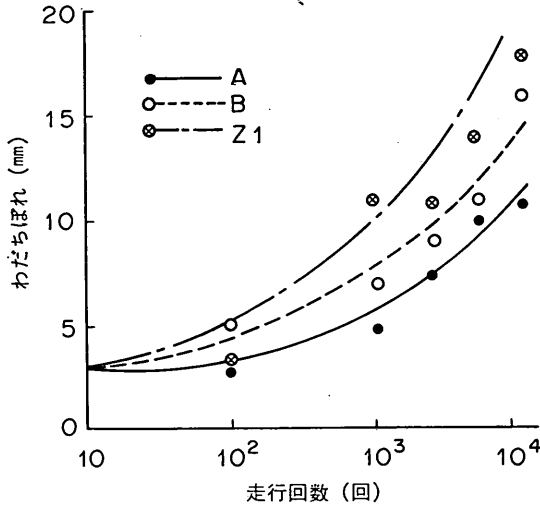


図-41 わだちぼれの推移

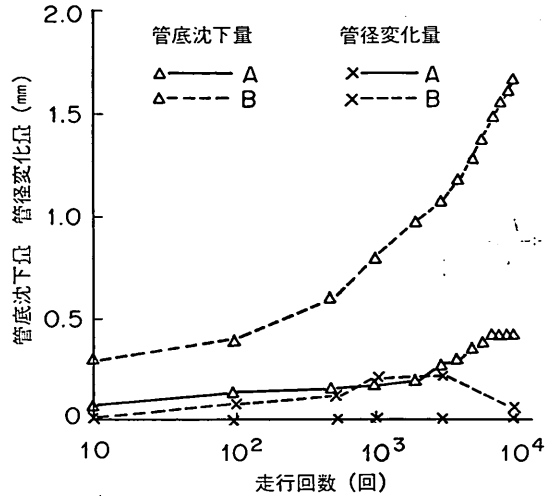


図-42 管底沈下, 管径変化の累積

推移を順に図-41～図-44に示す。なお、上記の着目項目のうち、わだちぼれ、管底沈下の塑性的挙動とは、舗装構造の塑性変形そのものであり、管径変化、管長手方向の発生応力、発生モーメントの塑性的挙動とは、舗装構造の塑性変形に起因して管に累積されるものを指す。

わだちぼれの進行傾向は無管部（Z1断面）が最も大きく、次いでFRPM管直接埋設部（B断面）、最も小さいのが管周セメント安定処理部（A断面）である。各断面の載荷時弾性沈下量が、 $B > Z1 > A$ であったことを考えると、塑性変形の進行傾向と弾性変形の大きさは、必ずしも比例しないと考えられる。

管底沈下、管径変化については、A断面の管は、管底

沈下のみ若干進行し、管径変化は10,000回の載荷を通してほぼ0である。一方B断面の管も、管径変化はあまり進行せず、それに比べて管底沈下が顕著に進行している。この状況より、管を含む構造の全体沈下は認められるものの、一般に危惧されるような管断面の変形は、それほど生じないことが確認できた。また全体沈下も管周処理により低減されることがわかった。

管長手方向に累積される応力は、管内頂部に貼付した管長手方向ひずみ計により把握した。

A、B断面の管共、脚輪の走行線直下で応力の増加がみられるが、A管では1,000回以降の応力増加がわずかであるのに対し、B管では1,000回以降も増加している。

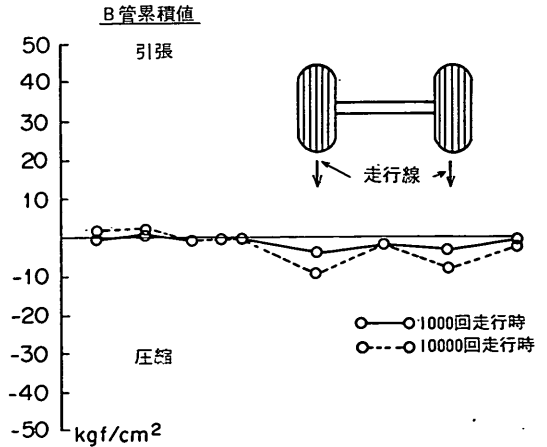
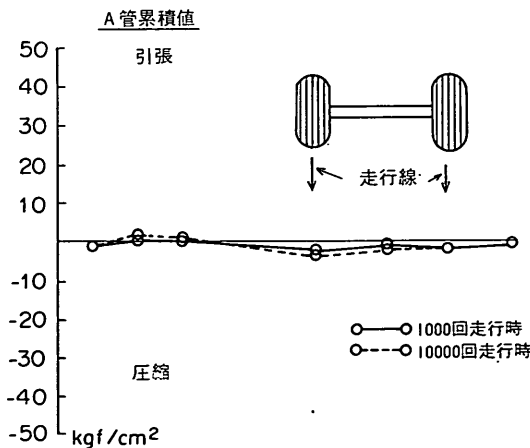


図-43 管長手方向の応力の累積

ただし、その大きさは10,000回走行後で10kgf/cm²程度であり問題となるレベルではない。

A断面の管に累積されるモーメントは極めてわずかで

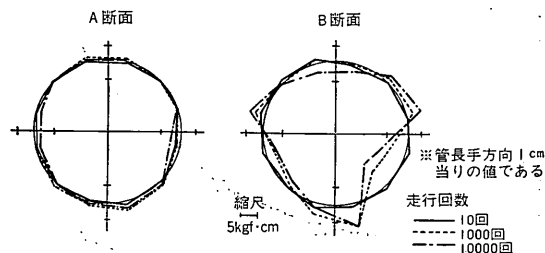


図-44 モーメントの累積

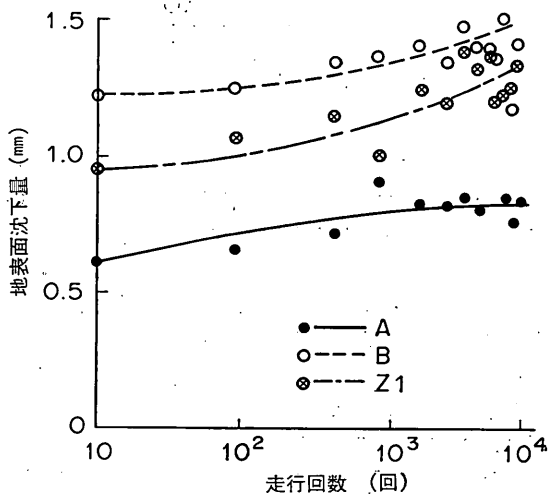


図-45 地表面沈下（弾性値）の推移

ある。一方、B断面の管の場合はそれより大きく、最大8 kgf·cm程度が生じている。ただし、10,000回走行後の値の7割近くが1,000回走行時に発生しており、その後の進行はわずかである。なお、B断面の管に累積されるモーメントの形状が逆三角形であることより、鉛直方向だけでなく管側下部からの応力が働いてくることがわかる。

5.3 弾性的挙動の推移

断面の耐荷重能力は載荷時の弾性変形により把握できると考えられる。ここでは、各走行回数終了時の載荷時弾性的挙動の推移を観察することにより、各断面における耐荷重能力の推移を比較検討することとした。各走行回数終了時の地表面沈下、管底沈下、管径変化、管長手

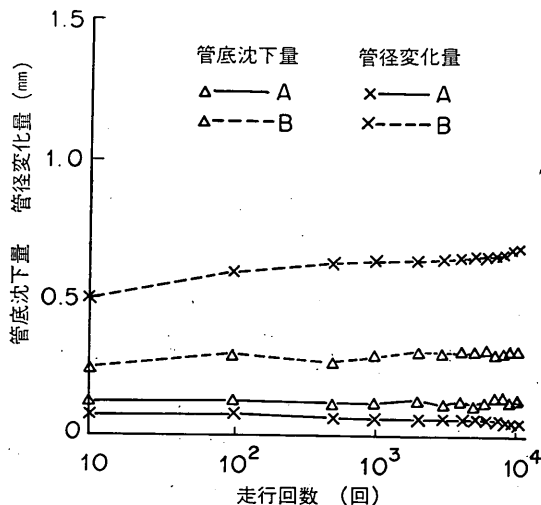
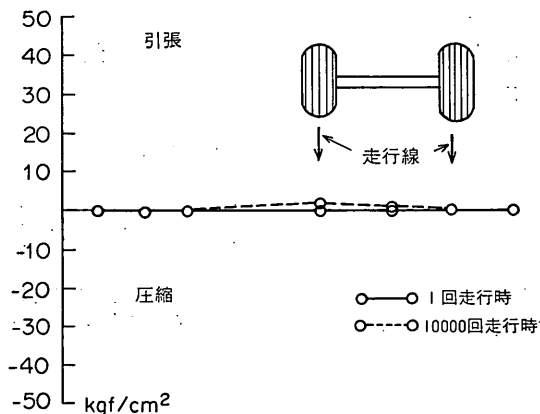


図-46 管底沈下、管径変化（弾性値）の推移

A管弾性値



B管弾性値

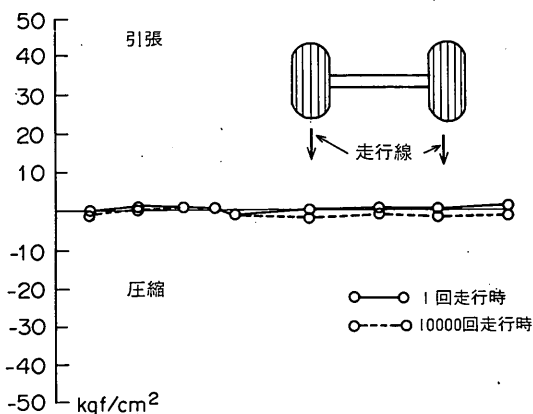


図-47 管長手方向の応力（弾性値）の推移

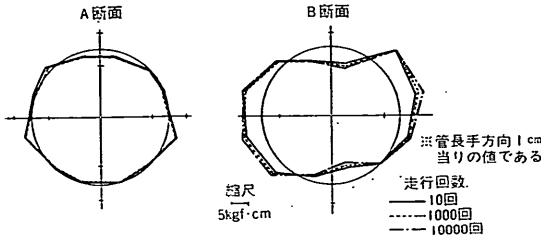


図-48 発生モーメント（弾性値）の推移

方向の応力、管に発生するモーメントの載荷時弾性変化量を、順に図-45～図-48に示す。

地表面沈下については、A、B、Z1断面共、走行回数の増加に伴う増加が認められるが、増加傾向（グラフの傾き）は、Z1>B>Aの順である。これは、前節で述べたわだちぼれの進行傾向の順と同じである。このことから、地表面沈下量の増加は、わだちぼれに起因する舗装強度の低下がその主要因である可能性が高い。このように、地表面沈下量の増加は認められるものの、それは管の存在に起因するものではないといえよう。

管底沈下、管径変化については、A断面の管では、管底沈下、管径変化ともにはば変動がない。一方B断面の管では、管径変化に若干の増加が認められるが、これも地表面沈下の増加同様、わだちぼれの進行に起因する舗装構造の荷重分散効果の低下が影響したものと思われる。

管長手方向の応力については、A、B断面の管共、走行回数に伴う若干の変化はあるものの、その値はわずかであり問題はない。

管に発生するモーメントについては、A断面の管では、ほとんど変化が認められない。B断面の管では、走行回数に伴う若干の増加が認められるが、これもわだちぼれに起因するものと考えられる。

6. 空港埋設管の適用性

6.1 試験結果からみた適用性

まず初期静的載荷試験結果からFRPM管の空港埋設管としての適用性を評価する。当初FRPM管の使用に対し危惧すべき点が二つあった。一つは、管自体が航空機荷重に耐えられるかどうかという点で、もう一つは、管の可撓性が舗装に大変形をもたらし、管理設部における舗装強度の低下を促進しないかという点であった。しかし試験結果によれば、載荷時の管発生モーメントは予想を大きく下回るものであり、管の変形もわずかであった。そのため管の破壊には至らず、管理設部の地表面沈

下もわずかであった。ただし管の存在による影響は顕著に認められ、舗装構造が等しい場合には、管の存在による沈下量の増大が認められた。しかし、この影響は、サンドイッチ舗装等の若干荷重分散効果の大きい舗装を適用するか、あるいは剛性の高い材料で管を巻き、見かけの弾性係数を上げてやることで取り除くことができる。今回の断面についていえば、有管部にサンドイッチ舗装を施したA、B断面の沈下量は標準舗装を施した無管断面の沈下量より小さく押えられ、有管の影響は除かれている。このように比較的浅い場所におけるFRPM管の使用は、舗装への影響という意味で若干の問題がありそうであるが、それも上述した方法により解決することができる。したがって、初期静的載荷試験結果によれば、FRPM管の空港埋設管としての適用性が、ある程度確認できたものと考えられる。

次に繰返し載荷に対する評価を示す。対象としたA、B、Z1断面に関する結果の一覧を表-9に示す。表には、傾向だけでなく10,000回走行時の変化量等絶対値を示しているが、A、B両断面共に問題にすぎ大変形等は認められず、10,000回走行時も健全な断面を保っていることが確認できた。

また、管の存在に起因して生じたと考えられる断面強度の低下等は特に認められなかった。

これらのことより、サンドイッチ舗装下にFRPM管を埋設したA、B断面については、繰返し載荷に対する安定性も含めて十分供用に耐えうる断面であると考えられる。ただし、繰返し載荷に対する本評価は、今回の試験条件である砂質土地盤上に布設された管についてのものであり、粘性土地盤上の管の場合には、必ずしも同様の評価になるとは限らない。その場合には、不同沈下等の因子が大きく影響してくるものと思われ、別途検討することが必要である。

6.2 施工の良否が管の適用性に及ぼす影響

以上のように、今回行われた試験の範囲内でFRPM管の空港埋設管としての適用性が確認できた。そしてこの結果は、本研究のために作製された実規模供試体に基づくもので、十二分な施工管理のもとで作製された理想的な構造物に対する結果であると考えられる。しかし実際の現場では、施工のばらつき等により必ずしも理想的な構造物が作製されているとは限らない。特に、埋設管の施工では、管底部、管側部の締固めは人力に頼らざるを得ず、その作業も困難なため締固め不十分となりやすい状況にある。また、FRPM管等の可撓性管の上部では、管の変形を危惧するために転圧不足となったり、あるいは管の見かけの弾性係数が小さいために転圧時の

表-9 繰返し載荷試験結果一覧

項目	地点	塑性的挙動	弾性的挙動
地表面沈下	A	—	最大0.7mm程度の沈下 走行回数に伴い若干沈下進行
	B	—	最大1.4mm程度の沈下 走行回数に伴い沈下進行
	Z1	—	最大1.3mm程度の沈下 走行回数に伴い若干沈下進行
わだちぼれ	A	最大11mm沈下(10,000回)	—
	B	最大16mm沈下(10,000回)	—
	Z1	最大18mm沈下(10,000回)	—
管底沈下	A	1,000回走行時で0.45mm沈下 走行回数に伴い沈下進行	0.13mm沈下 走行回数によらずほぼ一定
	B	1,000回走行時で1.7mm沈下 走行回数に伴い沈下進行	0.3~0.4mm沈下 走行回数に伴い若干増加
管径変化	A	±0.02mm以下	管径縮小0.06mm 走行回数によらずほぼ一定
	B	管径伸張 最大0.26mm 2,000回程度がピーク	管径縮小0.5mm 走行回数に伴い若干増加
管長手応力	A	最大4 kgf/cm ² (圧縮) 1,000回以前に収束	最大2 kgf/cm ² (引張) 走行回数に伴い若干増加
	B	最大10kgf/cm ² (圧縮) 1,000回以降も増加傾向	最大3 kgf/cm ² (圧縮) 走行回数によらずほぼ一定
管周モーメント	A	最大3 kgf・cm/cm 1,000回以前に収束	最大4 kgf・cm/cm程度 走行回数によらずほぼ一定
	B	最大7~8 kgf・cm/cm 1,000回以降も若干増加傾向	最大7 kgf・cm/cm程度 走行回数によらずほぼ一定

反力が十分取れず、転圧不足となる場合がある。実施工を考えた場合、不幸にして上述の施工不良に陥った場合をも想定した適用性の検討を行う必要がある。ここでは有限要素法によるシミュレーションを行い、その傾向を把握した。以下その方法を説明する。

有限要素解析に使用したモデルは、基本的には4.で説明したものと同じで、荷重は30tf単輪載荷を想定した。解析メッシュは図-49に示すものとし、舗装構造は標準舗装、路床は弾性係数1,000kgf/cm²の砂路床である。また管は、内径90cmのFRPM 1種管および鉄筋コンクリート管とした。シミュレーションにおける施工不良のモデル化は、管近傍要素の弾性係数を低下させることにより行った。その際対象とする管近傍要素をメッ

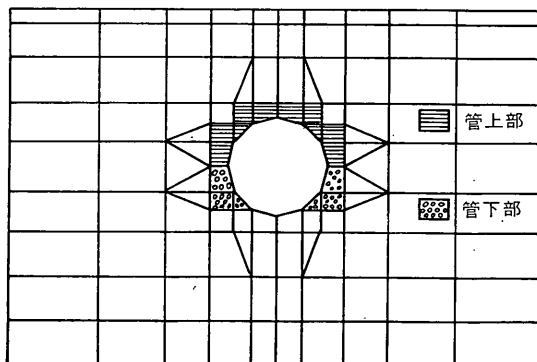


図-49 解析モデルのメッシュ構造

航空機荷重作用下における空港埋設管の挙動

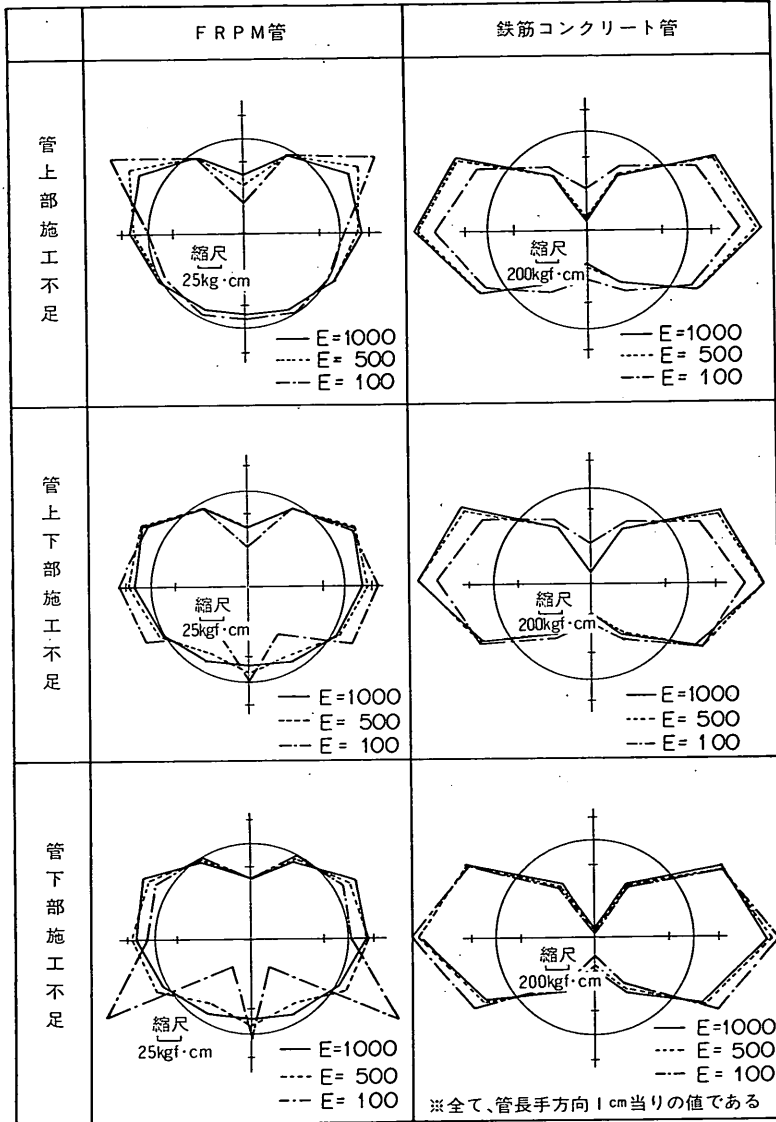


図-50 施工不良が発生モーメントに及ぼす影響

シュ図中に示すように、管上部と管下部に分け、それぞれが単独で施工不良となった場合と、両方同時に施工不良となった場合の3パターンを解析した。また管近傍要素の弾性係数は、基準値を $1,000\text{kgf/cm}^2$ とし、 500kgf/cm^2 、 100kgf/cm^2 と低下させてその場合の挙動を解析した。

解析結果を図-50に示す。FRPM管の場合には、弾性係数が小さくなった部分でモーメントが卓越してくるのがわかる。これは弾性係数の低下が受働土圧の低下に直接影響し、その部分の変形が卓越するためであろう。ま

た、管上部、管側下部のそれぞれが単独で施工不良となった場合は、上下同時に施工不良となった場合よりも危険側となるのがわかる。とりわけ、実施工において施工不良の生じやすい管下部の施工不良で最も顕著なモーメント増加が認められ、FRPM管の発生モーメントには、施工の良否が非常に大きな因子として働くことがわかる。したがって、例えば、矢板を用いた施工のように、いったん埋め戻し土を転圧した後、矢板を引抜くような施工法は、管周材料の締固め度を著しく低下させる危険性があり避けなければならない。また、締固め不足

を防止する一方策として管周をセメント安定処理材等で巻く方法が考えられる。これは、セメント安定処理材が硬化した時点で砂より格段に大きい弾性係数を持つからである。

一方、鉄筋コンクリート管の場合には、管下部の施工不足の場合を除けば危険側には働かず、弾性係数の低下に伴ってむしろ発生モーメントは小さくなる傾向がある。管下部の施工不良の場合には、FRPM管同様モーメントの増加が認められ、管下部の十分な締固めが重要であることがわかる。一般に用いられている鉄筋コンクリート管に対する基礎は、締固め不足を回避する意味においても有効な役割を果たしているといえる。

以上のことから、特にFRPM管において空港埋設管として所定の適用性を確保するためには、十分な施工管理のもとに管周材料の締固めを行うことが必要であり、矢板を用いた施工のように締固め度を低下させる危険性を持つ施工法は避けるべきである。また、締固め不足が生じにくいような施工方法（基礎、安定処理材巻き）を採用することも有効な手段であると考えられる。

7. 空港埋設管の新しい設計法の提案

7.1 概要

設計法を提案するに当たって、まず設計要領および現行指針で述べている現行設計法の考え方により、実際の挙動が設計値として推定できるか否かを検討してみる必要がある。もし、今回の試験の実測値に基づき推定される管に作用する応力分布形状と現行設計法で仮定している応力分布形状がほぼ等しければ、現行設計法を若干修正するだけでよい。しかし、それが極端に違う場合には、新しい形で設計法を提案する必要がある。そのため、ここでは今回行われた複々輪載荷試験結果をもとに、実測された管に発生するモーメントおよび軸力と類似の状況を発生させる地中応力分布のモデル化を試み、現行設計法で用いられているモデル分布との比較を行った。なお、4.2に述べたとおり、実際に発生する地中応力分布は複雑な形状をなすと考えられるが、ここでは、それと等価な応力分布を推定するものである。

7.2 管に作用する地中応力分布のモデル化

管長1cmの円環を対象にいくつかのパターンの分布荷重を作用させ、管に発生するモーメントと軸力を構造的に算定し¹³⁾、実測値（モーメント、軸力）に近づくように応力分布を変化させつつ繰返し計算で収束させた。

A～G断面についての推定応力分布を図-51～図-57に示す。図中には複々輪載荷試験の実測結果も記入した。

A断面では実測モーメントが非常に小さく、発生は管側下部のみに若干認められる。本断面はセメント安定処理材で全巻きにされ、ほとんどの応力をセメント安定処理層が受けていると考えられるため、管に作用する応力のモデル化はあまり意味がないが、あえてモデル化すれば管半径方向に作用する一様外圧的な応力分布が考えられる。

B, C, D, E断面（FRPM管使用）は、ほぼ同様のモデル分布の組み合わせで実測値を再現することができる。それぞれのモデルの違いを以下に示す。

- ① 舗装構造の違いB断面（サンドイッチ舗装）とC, D, E断面（標準舗装）を比較すると、C, D, E断面の応力レベルが高く、また鉛直応力の分布幅が狭い。
- ② 管種のみ違うC断面（1種管）とD断面（2種管）を比較すると、分布モデル形状は相似であるが1種管に比べ2種管に作用する応力レベルは約半分である。
- ③ 管周状態（路床材料）のみ違うC断面（砂路床）とE断面（粘性土路床）を比較すると、側方応力分布形状のみ若干異なり、側方応力のトータルは、C断面の方が大きい。

以上の傾向は、それぞれ次の状況を反映した結果と考えられる。

- ① 舗装構造の荷重分散効果は、サンドイッチ舗装のほうが大きい。
- ② 剛性の低い管は、剛性の高い管に比べて応力集中が生じにくい。
- ③ 可撓性の管の場合、管側部の材料の弾性係数が大きいほど側方受働土圧が大きい。

なお、B, C, D, E断面の応力モデル分布形状で、管下部の一様外圧分布を軸方向に置き換えてある。これは、管下部にも一様外圧分布を仮定すると、管周方向の軸力が管底部にも発生し、実測値に合致しないからである。実測値によれば、管底部軸力は非常に小さい。モデル化した応力状態は、例えば管側下部と周辺埋め戻し材料との摩擦により管側下部で管が支えられ、管底には地中応力の影響が及ばないような場合に対応していると考えられる。

F, G断面（鉄筋コンクリート管使用）の場合には側方応力を作用させず、鉛直応力のみ作用する応力分布モデルを仮定し、ほぼ実測に合致するモーメント、軸力形状を再現できた。なお、基礎コンクリートを有するF断面では、基礎が管の側方変形を拘束し、その結果管側部に反力が生じる。この反力の分布は管変形の最も大きい

航空機荷重作用下における空港埋設管の挙動

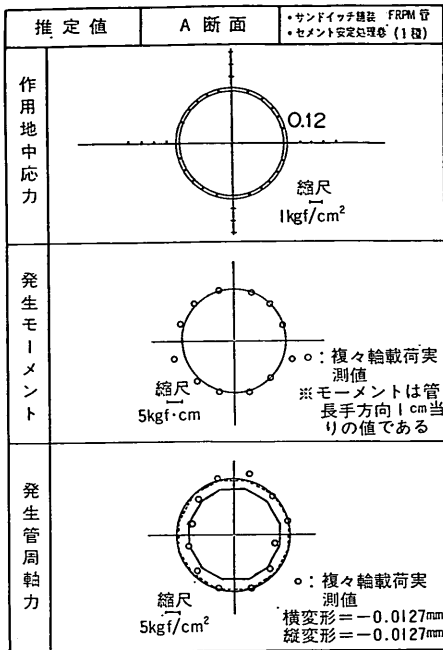


図-51 管に作用する応力分布形状の推定

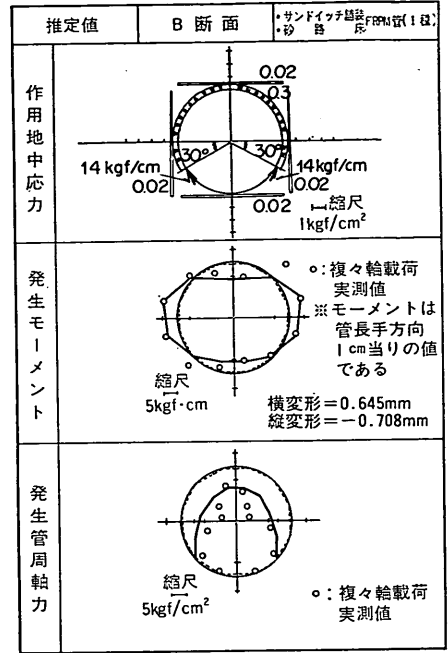


図-52 管に作用する応力分布形状の推定

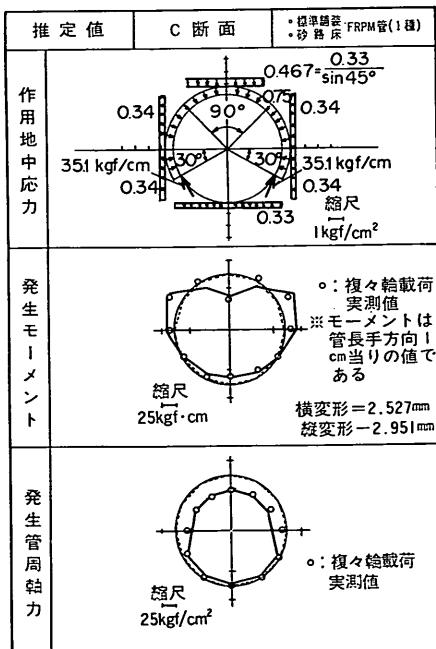


図-53 管に作用する応力分布形状の推定

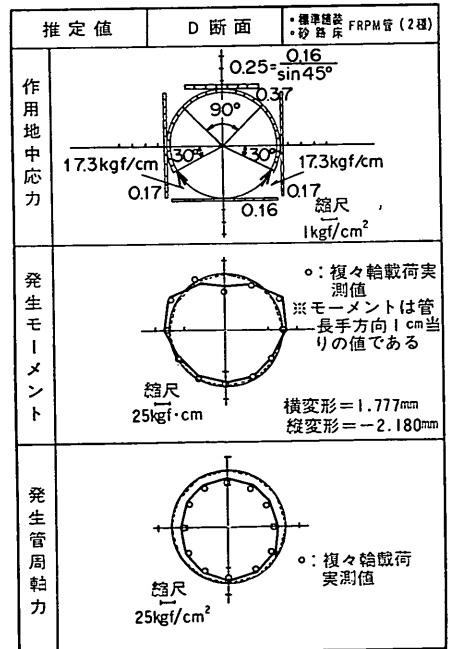


図-54 管に作用する応力分布形状の推定

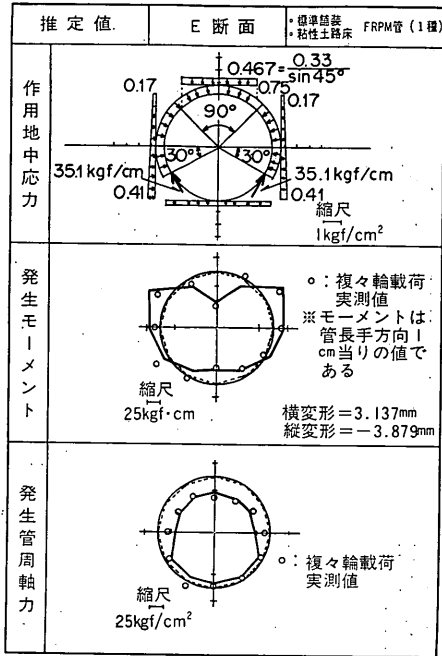


図-55 管に作用する応力分布形状の推定

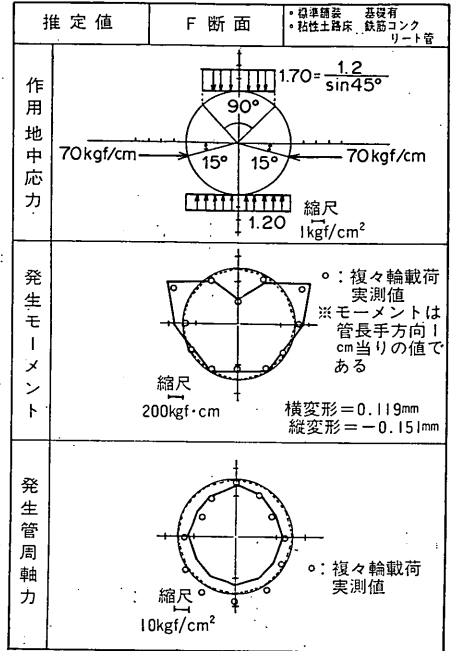


図-56 管に作用する応力分布形状の推定

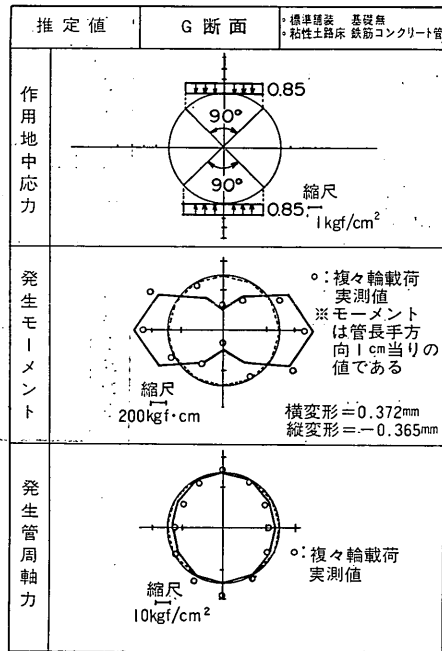


図-57 管に作用する応力分布形状の推定

管真横で最大値となり、管底部で0となることが予想されたが、今回は反力を集中荷重でモデル化した。この場合、反力の作用点はコンクリート基礎上面（管真横）ではなく、それより若干下側に作用させることで実測値との合致をみた。このことから、基礎のある鉄筋コンクリート管は、基礎面で拘束されるのではなく、その若干下側で拘束されていると考えられる。

今回の分布応力のモデルの推定は、実測モーメントと軸力に基づいて行われ、実測地中応力を考慮して決定したものではないが、確認のために図-58、図-59に実測応力値と推定応力値の関係を示す。両者は、ほぼ同程度のレベルであり、各断面間における実測値の変化傾向も十分再現されている。このことから、応力分布のモデルの妥当性が確認できる。なお、F断面の実測鉛直応力が極端に高い値をとっているのは、局所的な応力集中の結果であり、モデル化した値と違うのは不自然ではない。

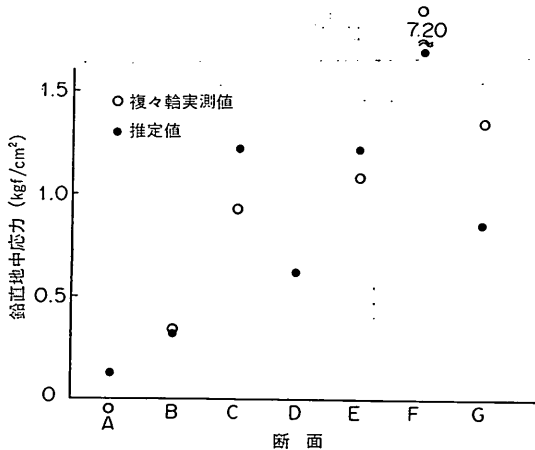


図-58 実測地中応力と推定地中応力の比較（管頂部）

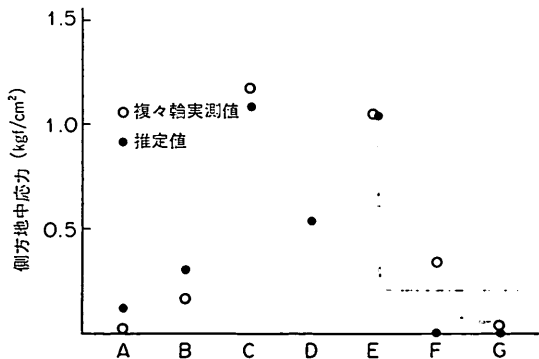


図-59 実測地中応力と推定地中応力の比較（管側部）

次に、現行設計法で仮定している応力分布に基づくモーメント、変形を実測値と比較し、その仮定の妥当性を検討するとともに、今回推定したモデル分布と比較してみる。

地中応力の分布形状ならびに鉛直応力の値を、現行設計法に基づき決定した場合の管発生モーメント、軸力および変形量を図-60～図-62に示す。

FRPM管使用のA, B, C, D, E断面では、舗装構造、管種、管周材料のいかんにかかわらず鉛直応力は 1.45 kgf/cm^2 の等分布、側方応力は管底部で $1.64 \times$ （鉛直応力）の値となる三角形分布を仮定した。その結果求める値は、モーメント、軸力、変形量のすべてが非常に過大見積りとなっている。とりわけ、設計に関して支配的なモーメントと変形量が実測値よりかなり大きい。

鉄筋コンクリート管使用のF断面では、基礎コンクリート巻きのため、半断面の固定アーチとして解き、鉛直応力は 1.45 kgf/cm^2 の等分布、側応力はなしとした。この場合、最大モーメントは固定端で発生するが、実測値では固定端付近の値は小さく管頂部で最大値が発生する。これは、コンクリート基礎上面は固定端となっていないことに起因するものである。現行設計法でもこの点に関する修正がなされており、 180° コンクリート基礎においては、その全部を基礎として期待せず、 125° の基礎で固定された固定アーチとして解いている。しかしその場合でも固定端には大きなモーメントが発生することになるが、実際にはその傾向は認められず、現行仮定の不確かさが指摘できる。

G断面では、モーメント分布形状はほぼ妥当と思われるが、その値は実測より大きく作用応力レベルに問題がありそうである。

以上のことから、現行設計法による仮定は、全般的に過大な設計につながる可能性があり、その傾向はFRPM管において特に顕著である。

そこで、現行仮定を一部修正することにより実測値に近づけることができるか否か検討してみた。

FRPM管については、次の2パターンの修正を考えた。

仮定① 鉛直応力を現行の 1.45 kgf/cm^2 から各断面での実測値に修正し、側方応力を底部で $1.64 \times$ （鉛直応力値）となる直角三角形分布とする（図-63のa参照）。

仮定② 鉛直応力を現行の 1.45 kgf/cm^2 から各断面での実測値に修正し、側方応力は管側での実測応力の2倍が底部で作用する直角三角形分布とする（図-63のb参照）。

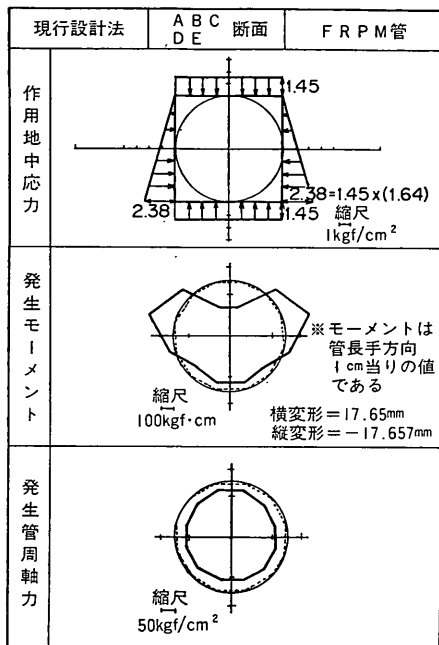


図-60 現行設計法による発生モーメントと軸力

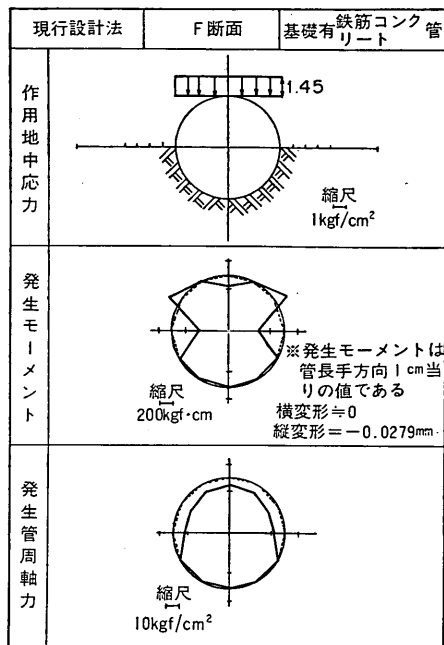


図-61 現行設計法による発生モーメントと軸力

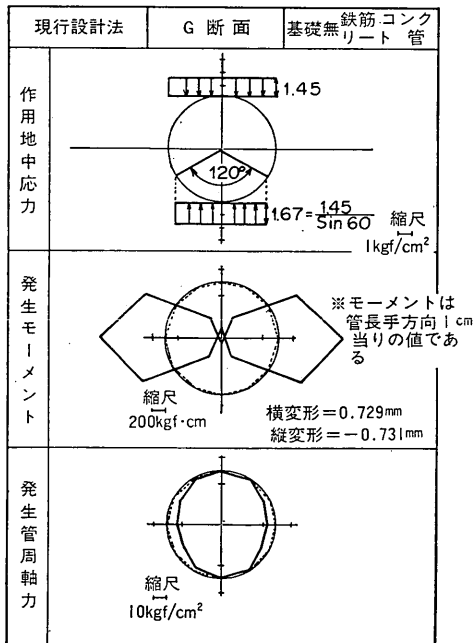


図-62 現行設計法による発生モーメントと軸力

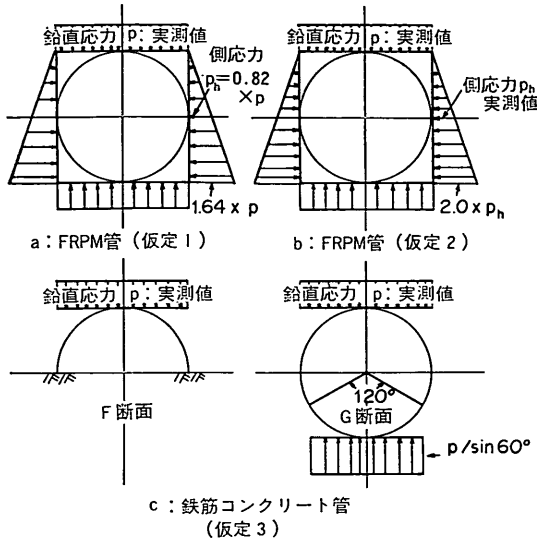


図-63 仮定応力分布の形状

また、鉄筋コンクリート管については、次の1パターンを考えた。

仮定③ 鉛直応力を現行の 1.45kgf/cm^2 から各断面で実測された値とする（その他の仮定は変更なし、図-63のc参照）。

結果を図-64、図-65に示す。図には、①、②、③の仮定に基づく値、現行仮定に基づく値、前節で求めた推定モデル分布に基づく値を示す。

これらの結果から、実測応力を用いて現行仮定を一部

修正しても、今回推定したモデル分布のように根本的に応力分布形状を変えなければ、実測値に近づけることはできないことがわかる。特にFRPM管の変形量についてはオーダーの違うことがわかる。

したがって、特にFRPM管に関しては、現行設計法の応力分布モデルは現実の状態を反映し得ないものであり、応力レベルの修正と共に応力分布形状の修正も必要であることがわかる。

以上の結果から、可撓性管の現行設計法の考え方は、現実の状況を反映するものではなく、これにより様々な設計条件に応じて管に発生するモーメントや管変形量を求めることには限界があることがわかった。そこで、ここでは、試験結果と有限要素法によるシミュレーション結果をもとに、個々の設計因子の変動に対して管に発生するモーメントと管変形量の変化を整理し、それらに基づく設計曲線と補正係数という形で設計値の提示を試みた。

7.3 管に発生するモーメントの算定法

以下にモーメントの設計曲線を提示するが、実測値や有限要素解析結果の整理の過程における変化量は、すべて基本断面に発生する値で正規化したものである。

FRPM管の場合、基本断面は、今回の実規模試験で用いたC断面（FRPM管使用、管径90cm、埋設深100cm、砂路床）とし、鉄筋コンクリート管の基本断面は、C断面において管種のみ鉄筋コンクリート管としたものを用いた。また有限要素法によるシミュレーションで用いた荷重は、30tf単輪載荷を想定した45cm幅の等分布

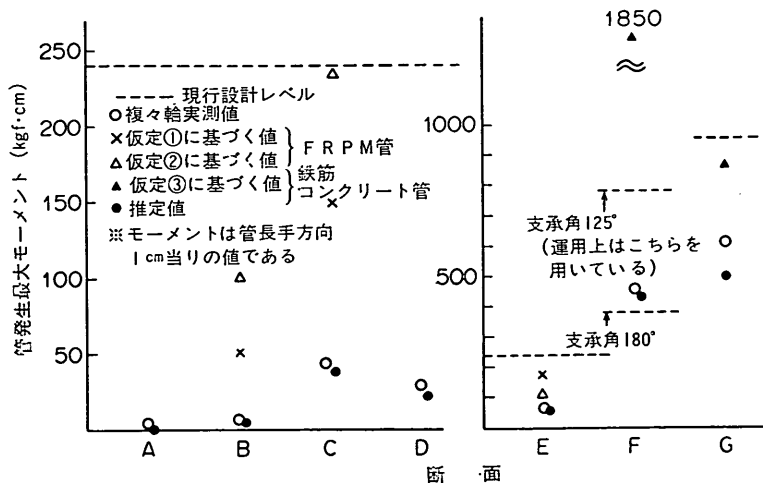


図-64 仮定応力分布に基づく発生モーメントと実測による発生モーメントの比較

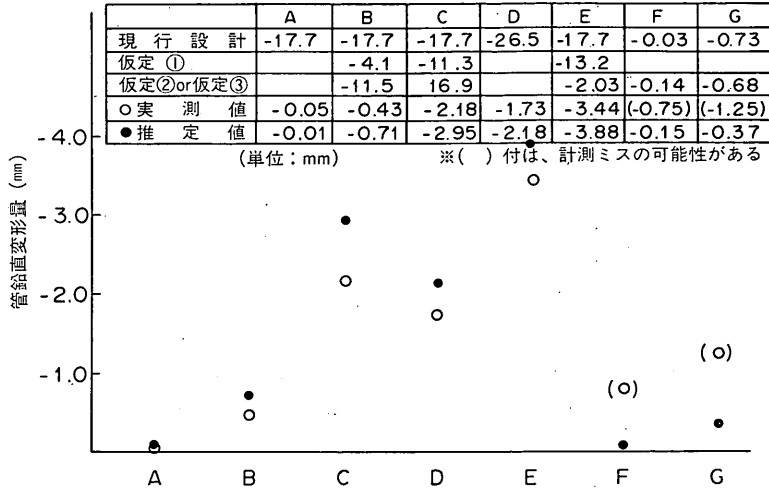


図-65 仮定応力分布に基づく管変形量と実測による管変形量の比較

荷重である。

なお、鉄筋コンクリート管に関しては、従来の実績に基づいて様々な設計条件に対応した設計法が確立されており、実測値と現行設計値の違いもFRPM管ほどではなく安全サイドであった。このため今後の設計に当っては、現行設計法で対応することで大きな問題はないと思われるが、参考のために、基礎のないコンクリート管に関する試算曲線も示す。

(1) 管埋設深の変化に起因するモーメントの変化

有限要素解析において、管埋設深のみを変化させ、発生最大モーメントの変化を正規化してプロットしたのが図-66、図-67である。図中の○印が計算値であり、実線はその点を結ぶ近似曲線である。また、一点鎖線は、今回の有限要素解析で用いたモデルが二次元であり、管長

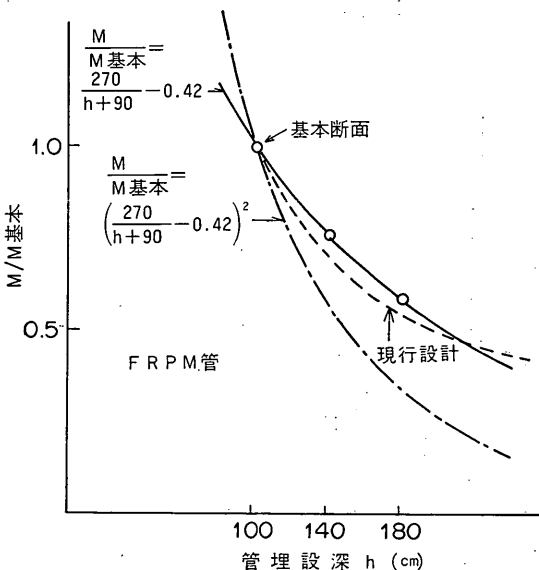


図-66 管埋設深の変化に起因する発生モーメントの変化 (FRPM管)

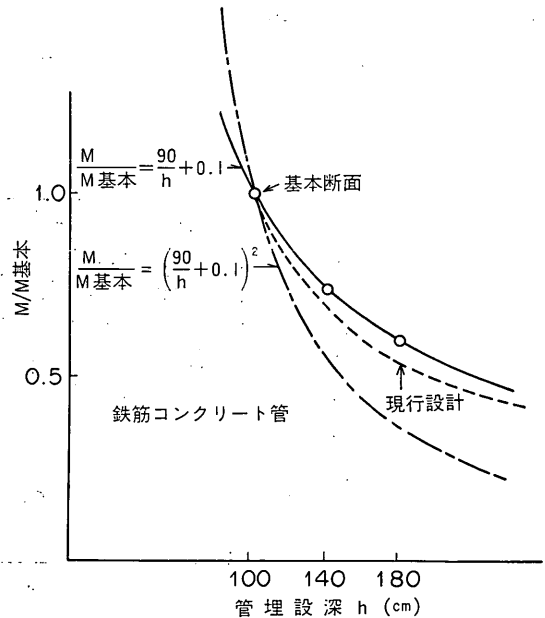


図-67 管埋設深の変化に起因する発生モーメントの変化 (鉄筋コンクリート管)

手方向の荷重分散が考慮されていないことを補正する意味で記入しており、算定方法としては実線の値を2乗したものである。これは、管に発生するモーメントが管に作用する応力に比例するであろうという仮定と、管に作用する応力の実測結果（図-16、図-17参照）によれば、管直角方向の応力分散状況と管長手方向の応力分散状況は、ほぼ同様であったことに基づき、このように決定したものである。なお、設計曲線としては安全側の値を採るべきと考えられるため、基本埋設深100cmを越える場合には実線、それより浅い場合には一点鎖線を採用する。結果によれば、管埋設深の増加に伴う発生モーメントの減少傾向は、FRPM管の方が若干大きいようである。また、現行設計法に比べると若干大きめの値となっているが、ほぼ同様の傾向であることがわかる。

(2) 管半径の変化に起因する発生モーメントの変化

(1)と同様の方法により、管半径のみを変化させた場合の発生最大モーメントの変化を正規化してプロットしたのが図-68、図-69である。なお、管半径のみ変化させる場合には、埋設深が一定のため地中応力の分散形状はそれほど変わらず、二次元モデルを用いることによる不都合は生じないと考え、補正は行っていない。

結果によれば、管半径の増加に伴う発生モーメントの増加率は、FRPM管の方が大きい。また現行設計法と比較すると、FRPM管では大きめ、鉄筋コンクリート

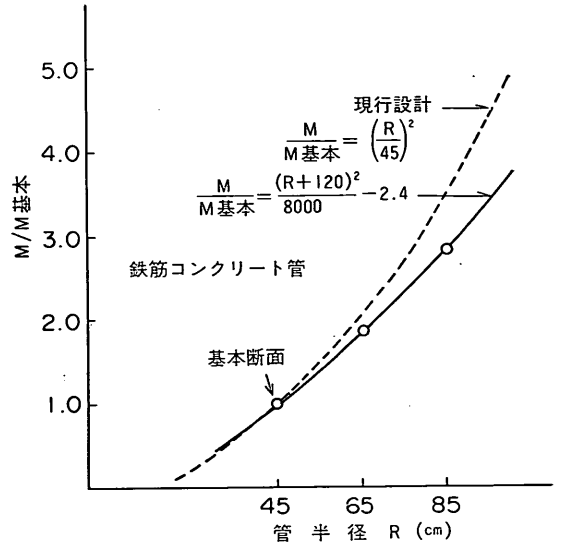


図-69 管半径の変化に起因する発生モーメントの変化（鉄筋コンクリート管）

管では小さめの値となった。

(3) 荷重変化に起因する発生モーメントの変化

荷重が変化した場合の発生モーメントの変化を30tf単輪載荷試験による実測値に基づき図-70に整理した。正規化は各断面の30tf載荷時の発生モーメントで行った。結果から、舗装構造、管周材料、管種を問わず、荷重とモーメントはほぼ比例することがわかる。

(4) 管周材料の違いに起因する発生モーメントの変化
管周埋め戻し材料の弾性係数の違いに起因する発生モーメントの違いを図-71、図-72に示す。

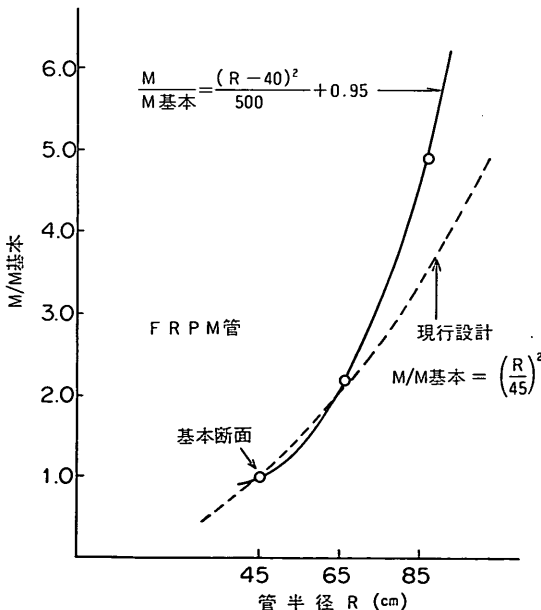


図-68 管半径の変化に起因する発生モーメントの変化（FRPM管）

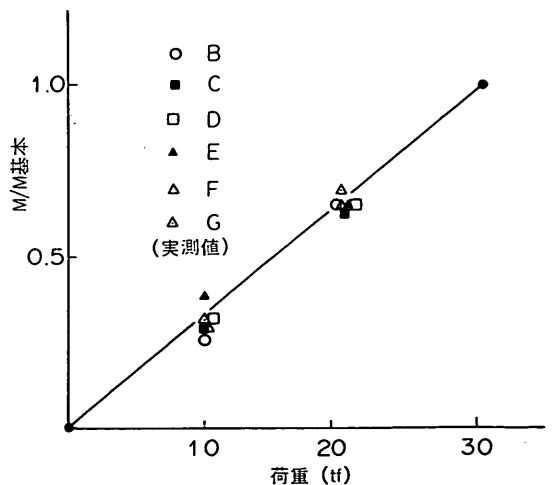


図-70 荷重変化に起因する発生モーメントの変化

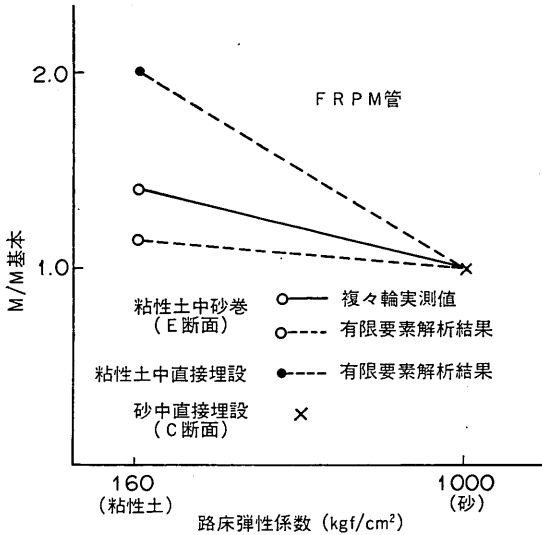


図-71 管周材料の違いに起因する発生モーメントの変化 (FRPM 管)

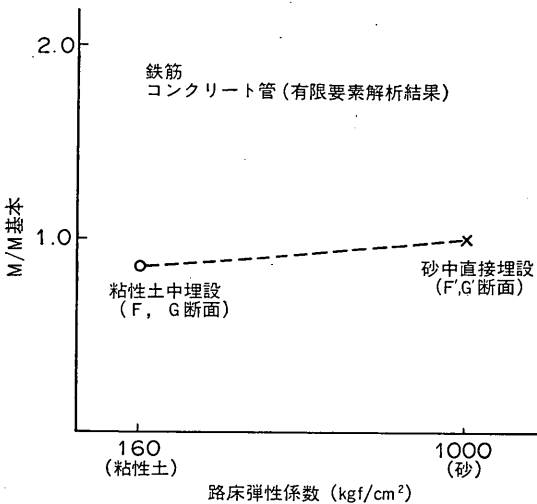


図-72 管周材料の違いに起因する発生モーメントの変化 (鉄筋コンクリート管)

FRPM 管の場合、埋め戻し材料の弾性係数が小さくなるとモーメントの増加が認められる。ただし、小さい弾性係数の材料 (粘性土) に埋設する場合、管周のみ大きい弾性係数の材料 (砂) で巻くことにより、モーメントの増加はかなり押えられていることがわかる。これより、設計に当って粘性土路床への管理設を対象とする場合には、管を砂巻きとし、基本砂路床断面の 4 割増し程度のモーメントを考えればよいと思われる。

一方、鉄筋コンクリート管の場合は FRPM 管とは逆に、管周材料の弾性係数が小さいほどモーメントは小さくなるようである。したがって、砂より弾性係数の大きい管周材料の場合には若干の割増しが必要であろう。弾性係数 2,000kgf/cm² 程度で約 1~2 割程度の割増しである。

(5) 舗装構造の違いに起因するモーメントの変化

下層路盤を、クラッシャーラン (標準舗装) からセメント安定処理材 (サンドイッチ舗装) に変えた場合のモーメントの変化を図-73 に示す。FRPM 管使用断面において実測値と有限要素法による計算結果がかなり違うが、実測値の場合、舗装構造の違いだけでなく、試験時期 (標準舗装: 盛夏, サンドイッチ舗装: 冬) の違いに起因するアスコンの弾性係数の違いも影響していると思われる。そこで、変化因子が舗装構造のみである有限要

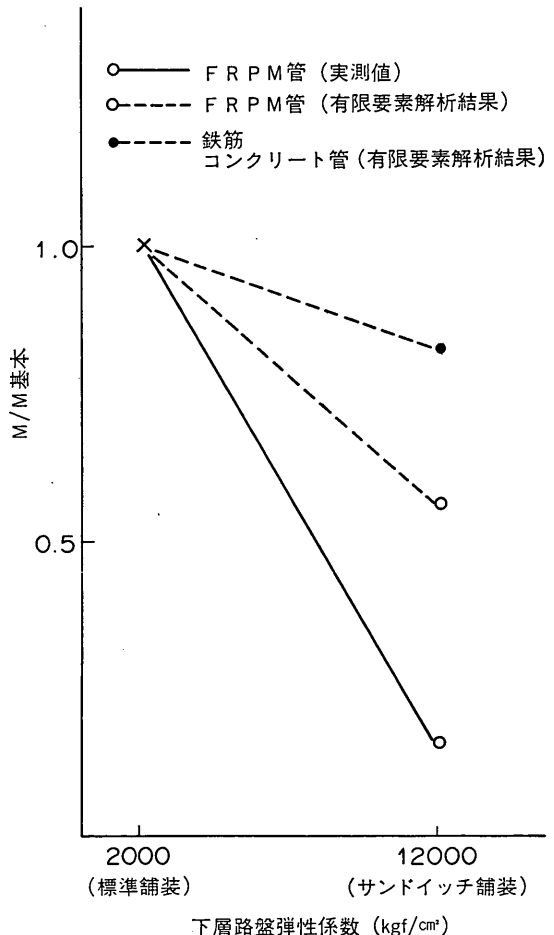


図-73 舗装構造の違いに起因する発生モーメントの変化

素解析による結果に基づくと、下層路盤にセメント安定処理材を適用した場合のモーメント割引率は、FRPM管で4割、鉄筋コンクリート管で1割程度を採用するのが妥当であろう。

(6) 設計曲線と補正係数

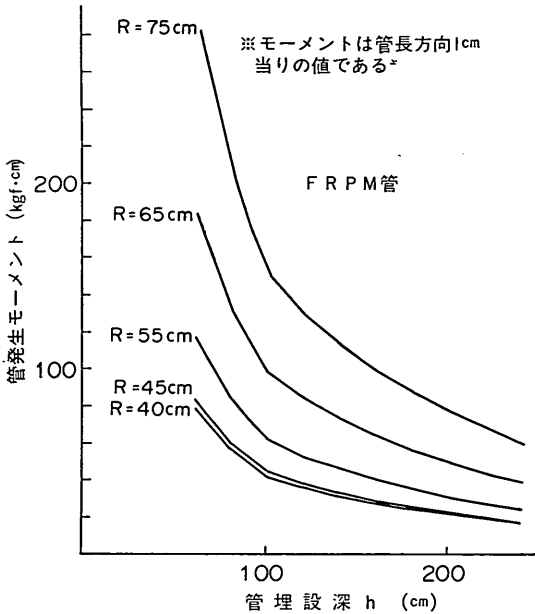


図-74 発生モーメントの設計曲線 (FRPM管)

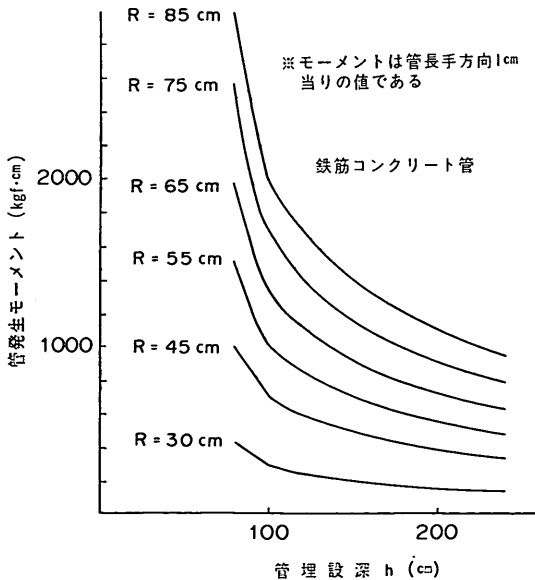


図-75 発生モーメントの設計曲線 (鉄筋コンクリート管)

表-10 モーメント補正係数

(1) 航空機荷重

管種 \ 荷重	LA-0	LA-1
FRPM管	1.92	1.0
鉄筋コンクリート管	1.92	1.0

(2) 管周材料弾性係数 (E : kgf/cm²)

管種 \ 管周材料	粘性土(砂巻き) E=160	砂 E=1,000
	FRPM管	1.4
鉄筋コンクリート管	1.0	1.0

(3) 舗装構造 (下層路盤弾性係数 E : kgf/cm²)

管種 \ 舗装構造	標準舗装 下層路盤 E=2,000	サンドイッチ舗装 下層路盤 E=12,000
	FRPM管	1.0
鉄筋コンクリート管	1.0	0.85

以上(1)~(5)の結果に基づいた設計曲線と補正係数を図-74、図-75、表-10に示す。なお、設計曲線の作製に必要な基本断面における発生モーメントの値は、FRPM管については複々輪載荷試験の実測値 (C断面 : 44kgf·cm) を、鉄筋コンクリート管については、粘性土路床中埋設部 (G断面) において実測された値を、有限要素解析により砂路床の場合に補正した値 (700kgf·cm) を用いた。

7.4 管変形量の算定法

可撓性管使用断面の設計においては、載荷時の管変形も大きな断面決定因子であり、設計時における把握が必要である。

ここでは、前節で用いた手法と考え方に基づき同様の解析を行い、管変形量に関する設計曲線と補正係数を試算した。前節同様、個々の設計因子の変化に対する管変形量の傾向を図-76~図-80に示し、最後に設計曲線と補正係数を図-81、表-11に示す。

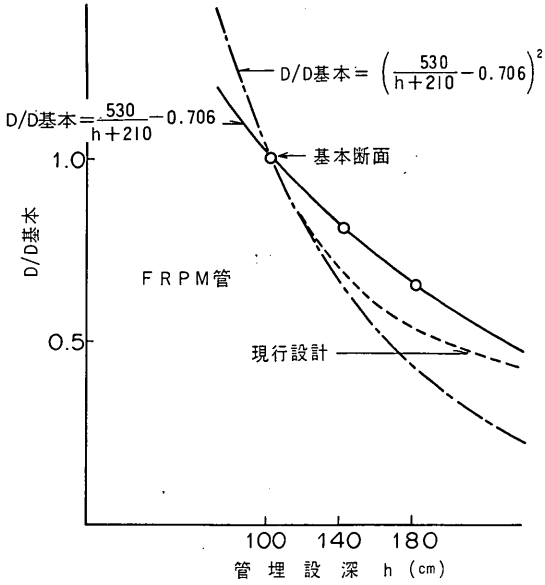


図-76 管埋設深の変化に起因する管変形量の変化 (FRPM管)

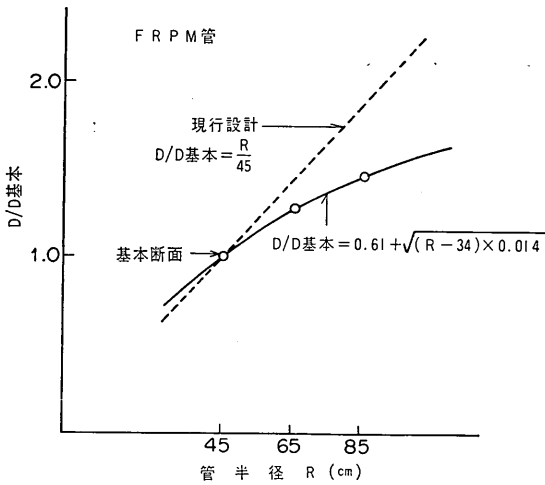


図-77 管半径の変化に起因する管変形量の変化 (FRPM管)

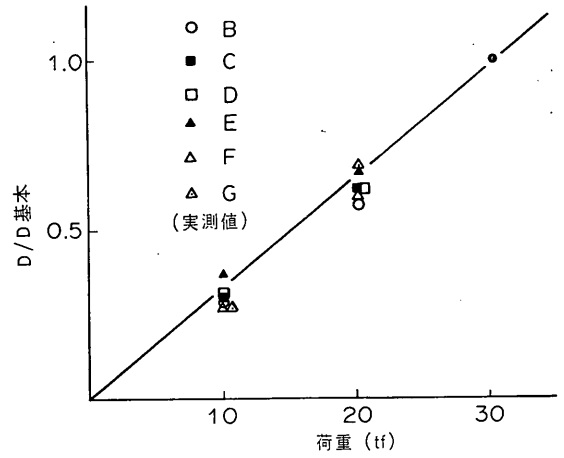


図-78 荷重変化に起因する管変形量の変化

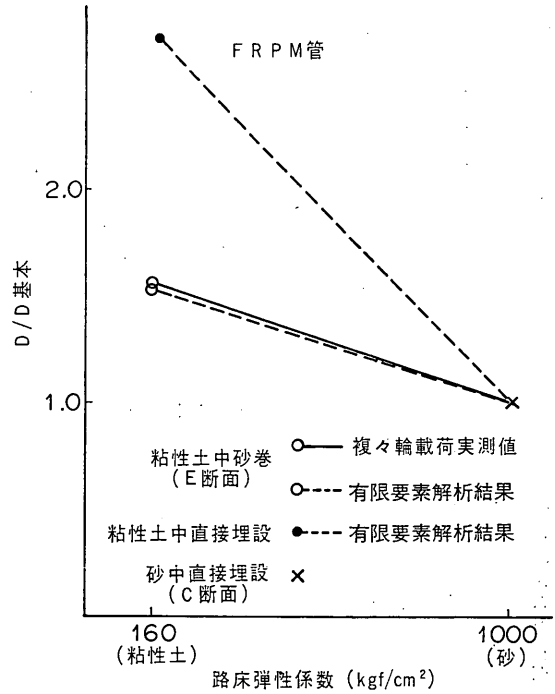


図-79 管周材料の違いに起因する管変形量の変化 (FRPM管)

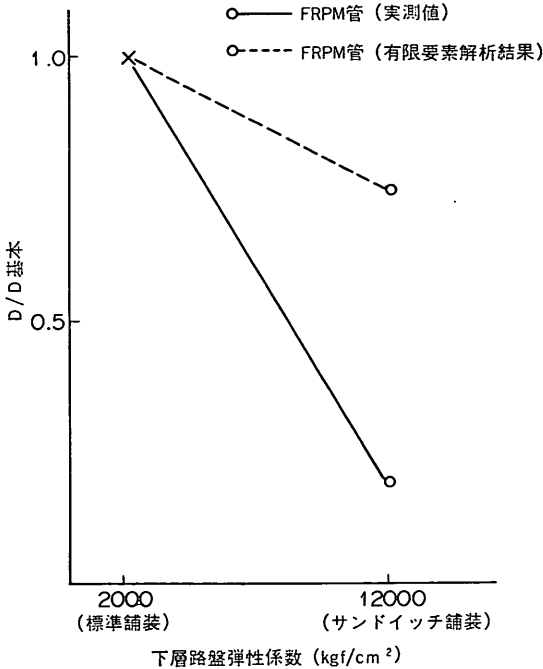


図-80 舗装構造の違いに起因する管変形量の変化 (FRPM管)

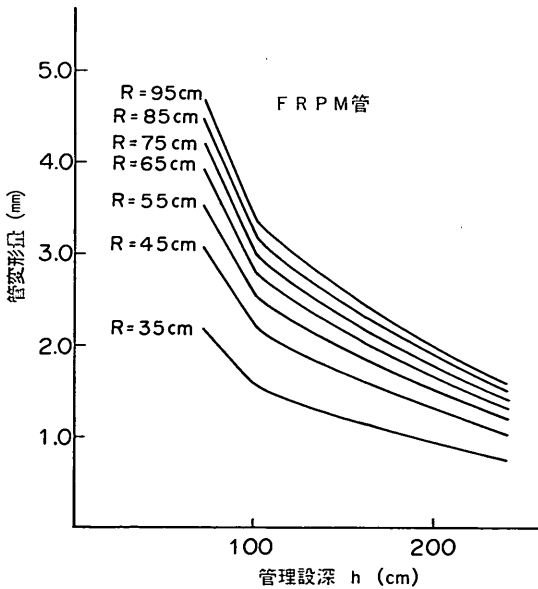


図-81 管変形量の設計曲線 (FRPM管)

表-11 変形量補正係数

(1) 航空機荷重		
荷重	LA-0	LA-1
管種		
FRPM 管	1.92	1.0

(2) 管周材料弾性係数 (E : kgf/cm^2)		
管周材料	粘性土 (砂巻き) $E=160$	砂 $E=1,000$
管種		
FRPM 管	1.6	1.0

(3) 舗装構造 (下層路盤弾性係数 E : kgf/cm^2)		
舗装構造	標準舗装 下層路盤 $E=2,000$	サンドイッチ舗装 下層路盤 $E=12,000$
管種		
FRPM 管	1.0	0.75

8. 結論

本研究では、従来不明確であった航空機荷重作用下における埋設管、特に可撓性管の挙動を把握するとともに、それらの設計値に係る試案を提示することができた。主要な結論について以下に記す。

(1) 設計法に関して

- ① 航空機荷重載荷時に管に作用する鉛直地中応力の大きさは、舗装構造、管の刚性、管周材料により変化し、荷重分散効果の大きい舗装構造の採用や、見かけの剛性の低い管の使用により、比較的小さくなる傾向がある。現行設計法ではこれらの点に対する考慮が不明確である。
- ② 可撓性管に作用する応力の分布は、応力の大半が半径方向に作用する一様外圧的な形状をとり、現行設計法の仮定とは大きく異なる。このため現行設計法に基づき算定されるモーメントは、実際に発生するモーメントに比べて非常に過大な見積りとなる。またその分布形状自体も断面条件に応じて変化するため、種類の応力分布形状に基づく現行設計法には、限界があると考えられる。
- ③ 刚性管に作用する応力の分布形状は、現行設計法による分布形状の仮定に、ほぼ近いものと考えられる。したがって、刚性管の設計は現行設計法で対応可能と考えられる。

- (2) 試験対象管の空港埋設管としての適用性に関して
- ① 可撓性管の場合、管の存在により地表面の沈下は

増大し、その傾向は舗装の荷重分散効果や管の見かけの剛性に反比例する。このため、可撓性管の使用に当っては、荷重分散効果の大きい舗装構造を採用したり、管を安定処理材で巻くこと等により地表面沈下を低減することが必要であろう。

- ② 可撓性管の場合、管を取り巻く埋め戻し材の締固めの程度が管に発生するモーメントや管変形量に大きく影響を及ぼし、特に管側下部における締固め不足は大きなモーメントを発生させる危険性がある。このため、矢板を用いた施工法のように、管周材料の締固め度を低下させる方法は、避けなければならない。
- ③ 剛性管の場合には、可撓性管ほど締固め度に敏感ではないが、管底部の締固め不足は、可撓性管と同様管に不利になるため注意が必要である。基礎コンクリートの使用は、この対策としても有効である。
- ④ 可撓性管使用のサンドイッチ舗装断面に対する繰返し載荷試験の結果、可撓性管の存在が舗装に及ぼす悪影響等は特に認められず、10,000回の繰返し載荷後も十分な供用性を保っていたことから、実際の空港における使用に耐え得る断面であることが確認された。
- (3) 今回実施した実規模試験による実測結果と、有限要素解析による計算結果に基づき、可撓性管の設計モーメントおよび管変形量を求める設計曲線を提案した。なお、剛性管については、現行の設計法で対応可能と考えられるが、参考のためにモーメント設計曲線を求めた。

9. あとがき

今回、活荷重作用時の空港舗装下埋設管の挙動についていくつかの検討を行い、それらの結果に基づく設計曲線の提示を試みた。その結果、管自体の挙動（発生モーメント、管変形量）に関していくつかの設計曲線と補正係数を提案することができた。しかし、管の存在が舗装構造に与える影響に関しては、いくつかの断面における地表面沈下量の相対比較のみに終り、不明確なまま残されている。また、その影響をどの程度に押えるのが妥当かという問題も残されており、別の方向からのアプローチが必要と考えられる。このような問題点は残されているものの、「可撓性管を比較的浅い位置に埋設した場合、航空機荷重作用時に管の大変形が生じ、舗装に多大な悪影響をもたらすのではないか？」といった当初の危

惧は、想像していたほどではないことがわかり、空港舗装下における可撓性管の適用可能性をある程度確認できた。今後は残された問題の検討と、今回有限要素解析により推定した結果の確認を行い、より信頼性の高い設計法を構築していくことが必要であろう。

(1988年11月30日受付)

謝 辞

本研究を実施するにあたり、昭和61年度の共同研究において精力的に事に当たられた第二港湾建設局の担当者、ならびに繰返し載荷試験の実施において御援助いただいた第三港湾建設局に対し厚くお礼申し上げます。また、本文をまとめるにあたって、終始精力的な協力をおしななかった、滑走路研究室上中正志君に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 運輸省航空局：空港排水施設、地下道、共同溝設計要領，昭和58年10月，153P.
- 2) 運輸省第二港湾建設局：東京空港埋設管応力解析調査報告書，昭和62年3月，336P.
- 3) 運輸省港湾技術研究所：埋設管応力調査報告書，昭和62年10月，139P.
- 4) 財団法人国土開発技術研究センター：下水道用硬質塩化ビニル管道路埋設指針，昭和58年3月，pp. 65～74.
- 5) 全国ヒューム管協会：ヒューム管設計施工要覧，昭和61年6月，pp. 80～86.
- 6) 運輸省航空局：空港アスファルト舗装構造設計要領，1982年，86P.
- 7) 運輸省航空局：空港土木工事共通仕様書，昭和61年3月.
- 8) 土質工学会：土質試験法，昭和54年12月，pp. 278～284.
- 9) W. Heukelom and A. J. G. Klomp: Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavements during and after Construction, Proc. of International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, August 1962, p. 669.
- 10) 佐藤勝久，他：空港舗装用安定処理土の基本的性質，港湾技研資料，No. 598，1987年9月，pp. 15～16.
- 11) 例えば土木学会：土木工学ハンドブック，上巻，昭和49年11月，p. 135.
- 12) 例えば土木学会：土木工学ハンドブック，上巻，昭和49年11月，p. 280.
- 13) 例えば土木学会：構造力学公式集，昭和52年9月，pp. 405～412.