

港湾技研資料

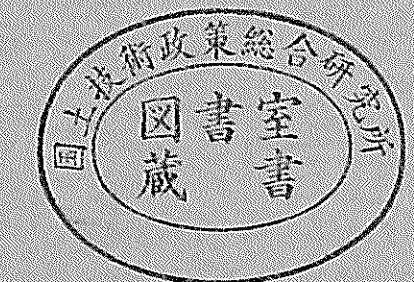
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 904 June 1998

空港アスファルト舗装の地震災害時応急復旧システム

八	谷	好	高
室	園	正	徳
殷		建	軍
中	村		健
今	井	泰	男

運輸省港湾技術研究所



目次

要旨	3
1.はじめに	4
2.被災した空港アスファルト舗装の構造評価	4
2.1 概要	4
2.2 ひび割れ程度の評価	7
2.3 ひび割れ補修方法の効果	9
3.応急復旧方策	12
4.段差・陥没補修用材料に関する室内試験	13
4.1 市場・文献調査	13
4.2 概略室内試験	14
4.3 詳細室内試験	15
4.4 長期貯蔵性試験	17
5.ひび割れ補修用材料に関する室内試験	18
5.1 市場・文献調査	18
5.2 室内試験	18
5.3 長期貯蔵性試験	19
6.現場試験による補修工法の検証	20
6.1 試験計画	20
6.2 段差・陥没補修工事	22
6.3 ひび割れ補修工事	25
6.4 走行載荷試験による検討	25
7.まとめ	27
8.おわりに	27
参考文献	27

Urgent Repair Method for Earthquake Induced Distress of Airport Asphalt Pavements

Yoshitaka HACHIYA*
Masanori MUROZONO**
Jianjun YIN***
Takeshi NAKAMURA**
Yasuo IMAI****

Synopsis

An urgent repair system for earthquake induced distress in airport asphalt pavements such as cracks, faults and potholes was established. In this process, the structural evaluation of both earthquake induced distress and the subsequent repairing measures was first conducted, and the urgent repair system for the distress was investigated.

In the former, Falling Weight Deflectometer (FWD) was used to measure deflections at both cracked and uncracked sections. As a result, the following findings are obtained.

- (1) The structural condition of crack can be evaluated by deflections, elastic modulus of component layer backcalculated from the deflections and load transfer efficiency.
- (2) The layer in which cracks are developed by an earthquake might be detected. Most cracks reach the base course, and some of them go through the base course and penetrate into the subgrade.
- (3) The sealing is not effective as the repairing measure from a structural viewpoint, but both the patching and the overlay are effective.

Cracks, faults and potholes must be repaired immediately after an earthquake. As the urgent repair method for each distress, the system in which the resources are stored in airports and repair works are conducted easily without larger manufacturing and construction facilities are established. Based on both laboratory tests and field investigations, the following procedures are suitable for repairing urgently the earthquake induced distress.

- (1) For repairing faults and potholes, two measures are developed; one is for wide area, and the other is for small area. Hot mixed asphalt material with pulverized asphalt, cold mixed polymer material is recommended for the former, the latter, respectively.
- (2) For repairing cracks, cold asphalt material, which is advantageous in sealing works, is recommended.

Key Words: airport asphalt pavement, earthquake, urgent repair, crack, fault, pothole

* Chief, Runways Laboratory, Geotechnical Engineering Division

** Member, Runways Laboratory, Geotechnical Engineering Division

*** STA Fellow (Lecturer, Department of Highway, Xian Highway University, China)

**** Senior Research Engineer, Geotechnical Engineering Division

空港アスファルト舗装の地震災害時応急復旧システム

八谷好高*
室園正徳**
殷 建軍***
中村 健**
今井泰男****

要旨

地震災害時に空港アスファルト舗装に生ずる破損に対する応急復旧システムの構築方策を提案した。その過程では、まず地震により生じた破損（ひび割れ）自体ならびにその後の補修工事の効果について構造的観点からの評価を実施したのち、応急復旧工法について検討している。

構造評価についてはひび割れ部と健全部でフォーリングウエイトデフレクトメータ (FWD)によるたわみ測定を実施している。その結果、以下のような知見が得られた。

- (1) ひび割れの構造的評価は、たわみの大きさ自体のほか、たわみから逆解析された舗装各層の弾性係数、ひび割れ部の荷重伝達率といった指標により行うことが可能である。
- (2) ひび割れが入っている深さについても推定可能で、地震により生じたひび割れは、ほとんどが路盤に到達しており、その一部は路床にまで達している。
- (3) 補修工事として実施されたパッチングとオーバーレイは構造的観点からの有効性が確認されたが、シーリングについてはそのような効果はない。

応急復旧の対象として段差・陥没とひび割れという舗装の破損を取り上げた。いずれの場合も、その応急復旧には材料を空港内に常置しておき、使用時には大型設備・機械を用いることなく容易に製造・施工可能な方法を用いることを考えた。この応急復旧工法開発の過程では室内試験と試験施工を実施している。一連の試験の結果、以下に示す方法が空港アスファルト舗装の応急復旧システムとして妥当なものであると考えられた。

- (1) 段差・陥没補修工法として、簡易機械を用いた大量施工用ならびに人力による小規模用のものを考えた。前者については粉末アスファルト加熱混合物が、後者については樹脂系常温混合物が材料として適している。
- (2) ひび割れ補修工法としては、特に充填性の点で優れているアスファルト系常温注入材料を用いるものが適している。

キーワード：空港アスファルト舗装，地震，応急復旧，段差，陥没，ひび割れ

* 土質部滑走路研究室長

** 土質部滑走路研究室

*** STAフェロー（中国西安交通大学道路工学科講師）

**** 土質部主任研究官

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1, 電話：0468-44-5026, Fax：0468-44-4471, E-mail：hachiya@cc.phri.go.jp

1.はじめに

道路、鉄道が“線”であるのに対して、空港が“点”であることから、地震災害時には航空輸送の重要性が高い。そのため、地震により空港施設に被害が生じた場合には、これらの被害を迅速に復旧することにより航空機の運航を確保することが必要となる。

空港土木施設、特に空港舗装に生ずる被害としては、1964年の新潟地震ならびに1989年のロマブリータ地震のときに、陥没、不同沈下、ひび割れが、縦横断方向に地盤の液状化が原因で生じたことが報告されている^{1), 2)}。ロマブリータ地震のときには液状化の生じていない箇所では被害がみられなかったとしているが、その後地盤の液状化がなくても空港舗装に被害が生ずることが明らかになっている。その例として、1993年の釧路沖地震ならびに北海道南西沖地震においては、地盤の液状化はみられなかったものの、滑走路、誘導路のアスファルト舗装に横断ひび割れが生ずるといった被害がみられている^{3), 4)}。

このことから、地盤の液状化防止対策を取るだけでは空港舗装の地震による被害を防止することが難しく、その反面舗装自体を工夫することにより地震に対処することも現実的には難しいものと考えられる。したがって、地震により空港舗装に破損が生ずることを避けることはできず、その場合には直ちに応急復旧することにより航空による人員・物資の大量緊急輸送手段をひとまず確保して、その後他の輸送手段が復旧されてから舗装全体を全面的に補修することにより空港機能を完全に復旧することとなる。

応急復旧が必要な空港舗装の破損としては、段差・陥没とひび割れが考えられる。前者は、航空機の運行に直接影響を及ぼすので、平坦性を回復するために直ちにパッチングをしなければならない。後者については、これを放置しておく、舗装内に雨水などが浸入して路床・路盤を軟弱化させ、最終的には舗装を破壊させるまでに至るので、材料を注入するなどしてふさぐ必要がある。

段差・陥没、ひび割れを補修するためには、加熱アスファルト材料が用いられることが多い。しかし、地震災害時にはアスファルトプラントが倒壊するといった理由により材料が出荷されないばかりでなく、施工機械や人員の点からも応急復旧工事として従来型の補修工法が期待できなくなるおそれも強い。この状況に対処するためには、空港事務所等に材料を常備しておき、最低限の設備・人員により迅速に復旧することが必要になろう。

このようなことを背景にして、段差・陥没、ひび割れといった地震災害時に空港アスファルト舗装に生ずる破損に対する応急復旧システムを整備すべく、試験研究を実施した。これは、地震による破損の舗装構造的観点からの評価と応急復旧工法の開発の2つから構成される。

前者においては、まず地震によりひび割れが生じた空港アスファルト舗装の構造状態についてフォーリングウエイトデフレクトメータ (FWD)を用いた評価を実施した。このひび割れについては、その後シーリング、パッチング、オーバーレイといった3種類の補修が行われたので、それらの工法の有効性についてもFWDを用いて検証している。

その結果を受けて、後者においては、具体的な補修工法について検討している。まず、段差・陥没、ひび割れに対する応急復旧システムの基本方針について明らかにする。そして、補修用材料に関わる現状調査・室内試験によって材料の選定を行ったあと、試験施工ならびに載荷試験によりそれらを用いた応急復旧工法について検証している。

2.被災した空港アスファルト舗装の構造評価

2.1 概要

1995年1月の兵庫県南部地震により一部の空港ではアスファルト舗装に被害が生じた。この空港内では液状化が生じておらず、滑走路ならびに誘導路における横断方向のひび割れが主たる被害であった。図-1にはその状況を示してある。

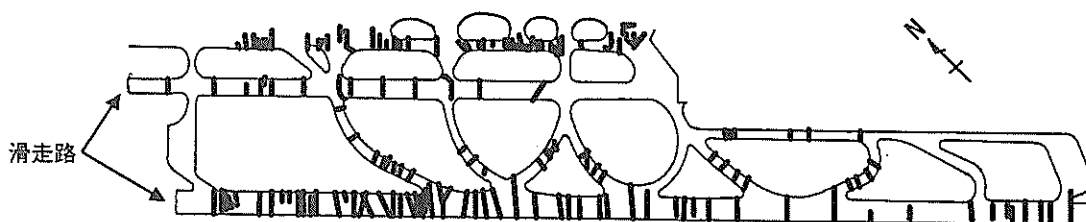


図-1 地震により空港舗装により生じたひび割れの位置

生じたひび割れについては以下に示すように3度に分けて補修が行われている。

- ① 応急措置
- ② 復旧工事
- ③ 本格的補修

まず、地震直後に実施された応急措置では、ひび割れをふさぐために加熱アスファルト系注入材料が充填された（シーリング）。その後実施された復旧工事では、ひび割れ幅が比較的大きいひび割れに対してその左右2mにわたって、厚さ100mmの部分切削し、表層50mmを密粒度アスファルトコンクリート、基層50mmを粗粒度アスファルトコンクリートにより打換える工法（パッチング）が採られた。このとき、ひび割れ幅が比較的小さいひび割れについてはアスファルト材料が充填された（シーリング）。そして、最終的には本格的補修として、全面にわたって下層40mmの粗粒度アスファルトコンクリート、上層50mmの密粒度アスファルトコンクリートでオーバーレイする方法が採用された（オーバーレイ）。

この空港のアスファルト舗装を対象として、地震発生後2年間にわたって、FWDによるたわみ測定を行い、ひび割れの程度の評価方法とひび割れ補修方法の効果について検討した。FWDを用いた舗装構造調査は、震災直後の1995年2月の調査（応急措置後）に引き続いて、1995年10月（復旧工事後）、そして1996年2月と1997年2月（一部本格的補修後）に実施した。

FWDによる調査は、ひび割れ幅が大きなひび割れ部を対象に、主滑走路を中心に20箇所程度で行った。たわみ測定位置は、1箇所あたり以下に示す3地点である（図-2）。

- ① ひび割れなし：調査対象ひび割れの手前約7mの位置に載荷板を設置し、たわみを測定した。
- ② ひび割れ近傍（前）：載荷板がひび割れにできる限り接するようにひび割れの手前に設置し、たわみを測定した。
- ③ ひび割れ近傍（後）：載荷板がひび割れを越えた位置でできる限りひび割れに接するように載荷板を設置し、たわみを測定した。

具体的な構造評価方法には、たわみ自体に注目するものとたわみ曲線を逆解析することにより得られる弾性係数に注目するものがある。前者はたわみが大きい場合ほど構造上も問題があると判定する方法で、荷重に遠い点のたわみは舗装下部の構造状態（路盤、路床）、荷重に近い点のものは舗装全体の構造状態を表すとされている⁵⁾。後者については、得られた弾性係数の値が小さい場合にその層に何らかの構造上の問題があるとみなす方法であ

る。

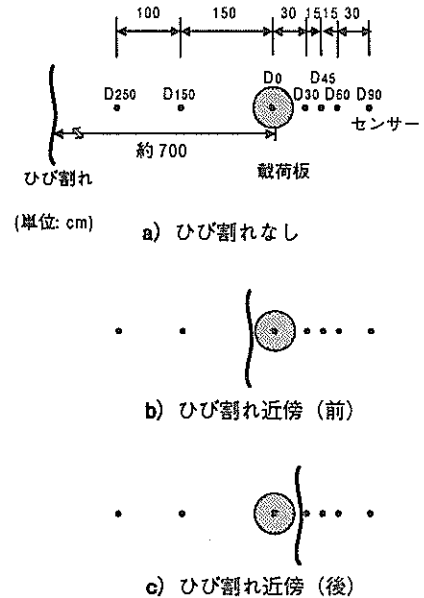


図-2 FWDによるたわみ測定方法

ここで対象とした舗装にひび割れが生じた場合の影響を把握する場合にも、基本的にはこの方法を踏襲して、以下に示す2とおりの手法を用いた。

- ① ひび割れ近傍で得られたたわみ曲線をひび割れから離れた箇所（健全部）で得られたものと相对比较する。
- ② 逆解析による弾性係数について、ひび割れ近傍と健全部とを比較する。

このうち、②の弾性係数に注目する方法はひび割れ部と健全部における各層の値を直接比較するものなので、信頼性の高い逆解析結果が得られればその信頼度も当然高いものとなる。たわみの逆解析による弾性係数の推定にあたっては、多層弾性理論による舗装の逆解析プログラム(LMBS)⁹⁾を使用した。計算における層構成は、表・基層（アスファルト安定処理層を含む）、路盤、路床の構成とした。このうち、路盤は主滑走路の中間部と端部でその構成が大きく異なり、前者では1層、後者では2層から成る。図-3に解析に用いたモデルを示した。

これに対して、①の方法については、たわみ測定点（荷重からの距離）と層との関連づけを確実なものとする必要がある。ここでは、載荷板中心のたわみ D_0 が表・基層と、載荷板中心から45cm離れた点のたわみ D_{45} が路盤と、そして載荷板中心から250cm離れた点のたわみ D_{250} が路床と密接に関係しているものと考えた。それは、ここ

で解析した舗装の表・基層厚が最大でも30cmを越える程度にまでは至らないこと、たわみセンサーの精度を考えるとできるだけ大きなたわみの値を用いたいことに基づいている⁷⁾。

これを行うために、表-1に示す厚さの異なる3種類の舗装構造（3層系モデル）を考え、弾性係数を種々に変化させることによって感度解析を実施した。その結果をまとめた図-4、図-5、図-6から次の点が明らかになった。

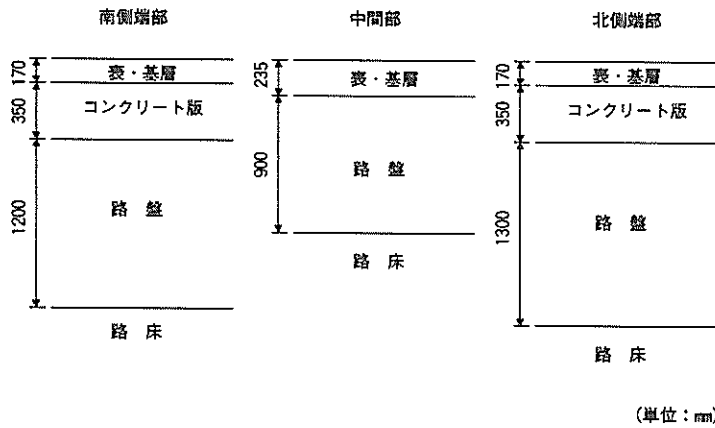


図-3 解析に用いた舗装構造モデル

表-1 感度解析に用いた舗装構造

舗装構造	項目	表・基層	路盤	路床
L	厚さ (mm)	150	600	-
M		235	900	-
H		300	1200	-
L-H	弾性係数 (N/mm ²)	500 - 12000	250 - 3000	50 - 1000
L-H	ポアソン比	0.30	0.30	0.35

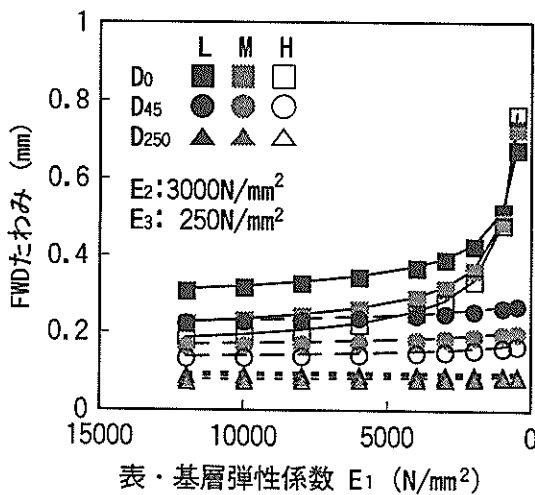


図-4 表・基層弾性係数によるたわみの変化

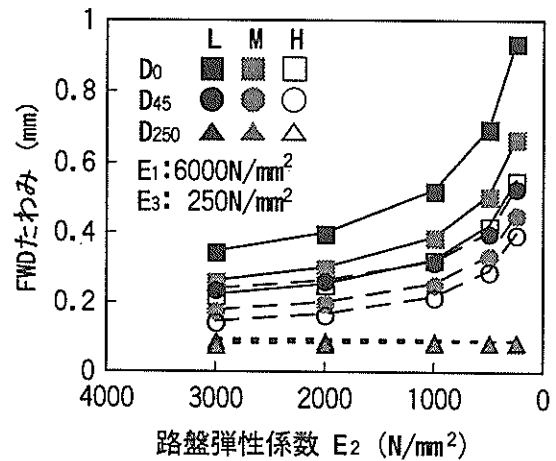


図-5 路盤弾性係数によるたわみの変化

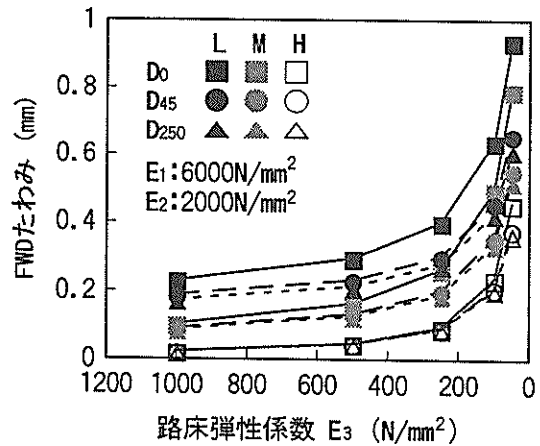


図-6 路床弾性係数によるたわみの変化

①表・基層の弾性係数(E_1)が減少すると、 D_0 は増加するものの、 D_{45} はわずかの増加に留まり、そして D_{250} はほとんど変化しない。

②路盤の弾性係数(E_2)が低下すると、 D_{250} はほぼ一定値を保持するものの、 D_0 、 D_{45} はともに著しく増加する。

③路床の弾性係数(E_3)が低下すると、 D_0 、 D_{45} 、 D_{250} のいずれも増加する。

ひび割れがあることはみかけ上弾性係数が低下することと等価であると考えられるので、上記の解析結果に従ってひび割れの有無が判定可能となる。これをフローチャートに表せば図-7のようになる。この場合には、健全部たわみ(D_0 、 D_{45} 、 D_{250})とひび割れ部たわみ(D_0^* 、 D_{45}^* 、 D_{250}^*)を比較することが基本である。まず、 D_{250}^* が D_{250} よりも非常に大きければひび割れは路床にまで到達しているものと判定する。そのような差が D_{250} にはなく、 D_{45} のみにある場合にはひび割れは路盤にまで到達していると判定する。そして D_0 のみに差がある場合にはひび割れは表・基層に留まっていると判定する。

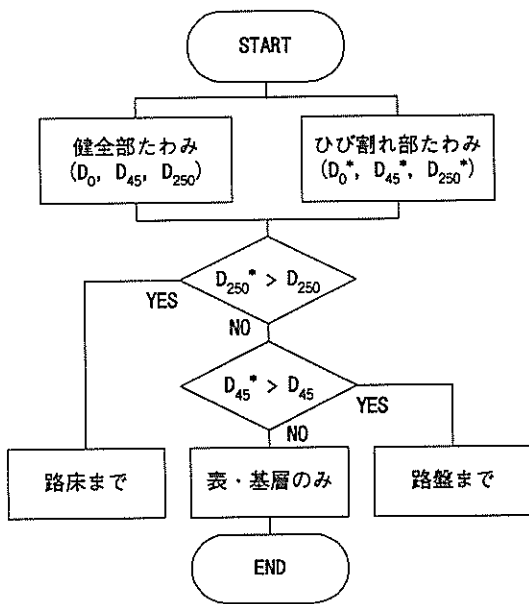


図-7 ひび割れの深さを判定するためのフロー

2.2 ひび割れ程度の評価

主滑走路におけるFWDたわみの分布状況を図-8、図-9、図-10にまとめた(ひび割れ部のたわみは荷荷板を設置した側のもの)。健全部とひび割れ部のたわみをみると、 D_0 においては両者の差が著しく大きいものの、 D_{45} ではそれが小さくなり、そして D_{250} ではほとんど差がみられない

ものが多くなっている。

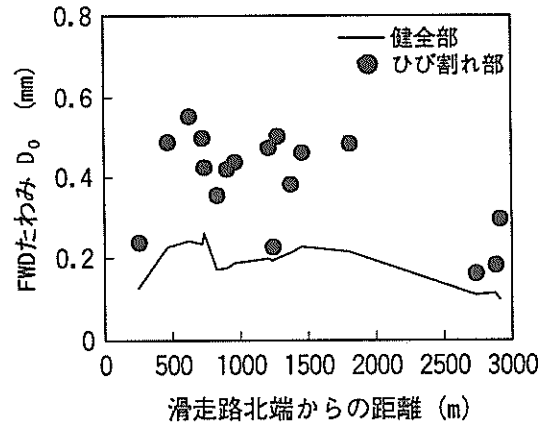


図-8 主滑走路における D_0 の分布

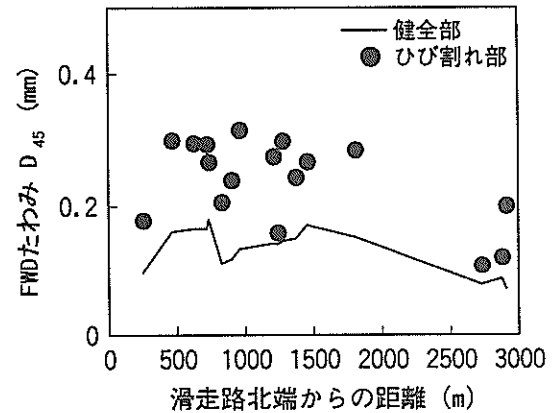


図-9 主滑走路における D_{45} の分布

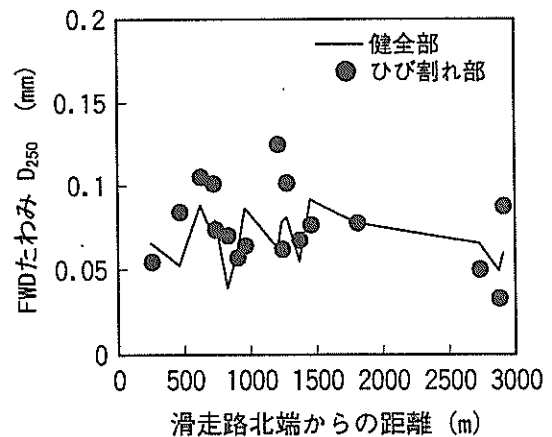


図-10 主滑走路における D_{250} の分布

たわみ曲線を逆解析することにより得られた健全部とひび割れ部の弾性係数について、その度数分布を図-11、図-12、図-13にまとめた。表・基層では健全部とひび割れ部の差が極端に大きいものとなっているのに対し、層の位置が深くなると、特に路床になると両者の差は比較的小さいものとなっている。これらの図は、主滑走路の中間部におけるデータの解析結果を示したものである（主滑走路末端部はコンクリート舗装上にアスファルトオーバーレイを施した舗装構造であり、解析精度上の問題から使用していない）。この範囲内における舗装構造は、表・基層(23.5cm)、路盤(90cm)、路床からなる3層構造である。

この結果をより定量的に表すために、健全部の弾性係数に対するひび割れ部の弾性係数の比率（弾性係数比率）を計算して、度数分布の形にして図-14に示した。表・基層については程度のひどいひび割れが大部分であるのに対して、路盤ではひび割れの程度がひどいものから軽度なものまでに分散し、さらに路床ではひび割れの程度はそれほどひどいものではないことが推定される。

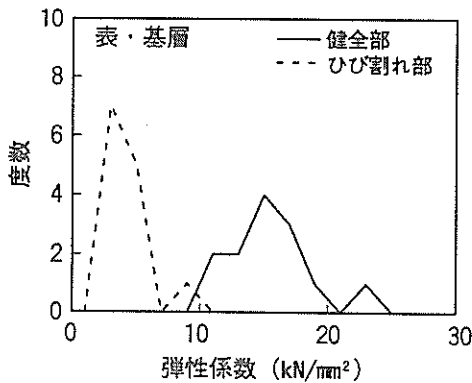


図-11 表・基層弾性係数の度数分布

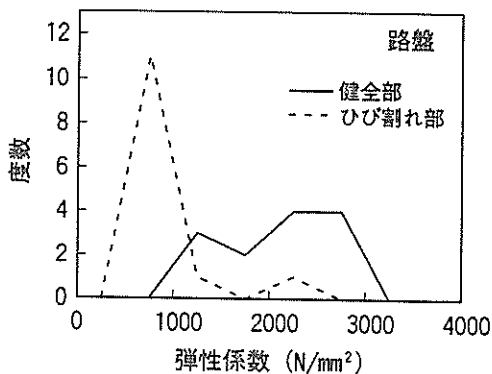


図-12 路盤弾性係数の度数分布

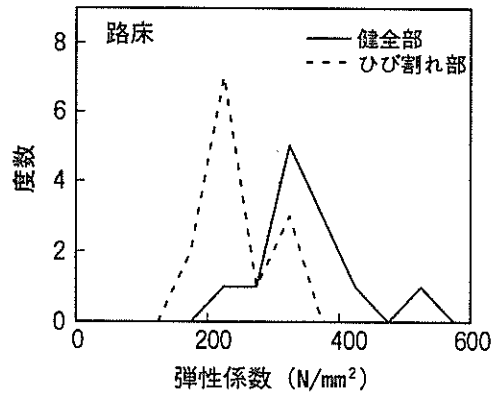


図-13 路床弾性係数の度数分布

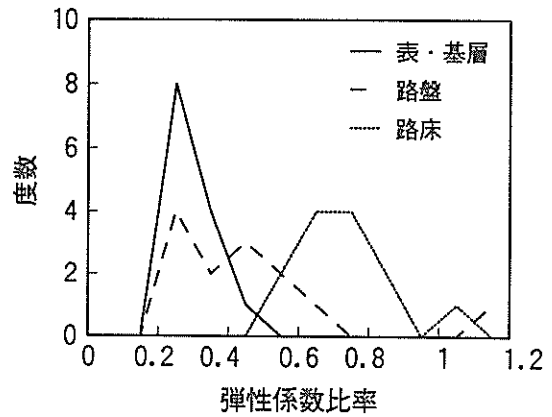


図-14 弾性係数比率の度数分布

逆解析については、上記のように、主滑走路末端部等実行できない舗装構造もあることから、2.1で記したように、たわみの値そのものに注目する方法についても検討した。得られたたわみについて、図-7に示したフローチャートに従って、ひび割れが入った深さを判定した結果を表-2にまとめた。これから、ひび割れのほとんどは、表・基層を貫通して(写真-1)路盤に到達しており、しかもその半数近くは路床にまで達していることがわかる。その反面、表・基層で留まっているものはほとんどないこともわかる。この判定には(1)式で表されるたわみの平均値に対する t 検定を採用した。

$$|a_1 - a_2| \leq t_{\alpha/2} \cdot \sqrt{\frac{s_1^2}{n-1} + \frac{s_2^2}{m-1}} \quad (1)$$

ここに、

a_1, a_2 : ひび割れ部と健全部におけるFWDたわみの平均値、
 n, m : ひび割れ部と健全部におけるFWDたわみの測定数、

s_1, s_2 : ひび割れ部と健全部におけるFWDたわみの標準偏差,
 $t_{\alpha/2}$: 危険率 α に対応した t .

表-2 推定されたひび割れ深さ

箇所	たわみ差		ひび割れ 深さ
	D ₂₅₀	D ₄₅	
B07	無	有	路盤
B14	有	有	路床
B19	有	有	路床
B22	有	有	路床
B23	無	有	路盤
B27	有	有	路床
B28	無	有	路盤
B30	無	有	路盤
B35	有	有	路床
B36	無	無	表・基層
B37	有	有	路床
B38	有	有	路床
B40	無	有	路盤
B46	無	有	路盤
B52	無	有	路盤
B56	無	有	路盤

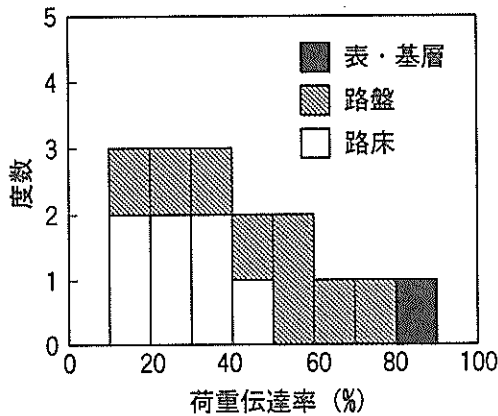


図-15 荷重伝達率の度数分布

ひび割れ部においては荷重伝達機能も重要な評価項目であり、ここではコンクリート舗装において用いられている荷重伝達率として定量的な評価を行った⁸⁾。この場合の荷重伝達率は $D_{45} / \{(D_0 + D_{45}) / 2\} \times 100(\%)$ で計算される(D_0, D_{45} は図-2 c)に示すひび割れを挟んだ点のたわみ)。図-15には主滑走路上のひび割れ部における荷重伝達率の度数分布を示してある。50%以下のものが多数を占めていることから、主滑走路上のひび割れには構造的にかなり

問題のあることがわかる。また、荷重伝達率はひび割れ到達深さによって異なることも明らかで、深部にまで達しているものほど荷重伝達率も小さいことが認められる。逆に言えば、荷重伝達率に注目することによってもひび割れの程度は推定できることになる。

2.3 ひび割れ補修方法の効果

前述の3種類のひび割れ補修工法の効果については、逆解析により求められた舗装各層の弾性係数とたわみの値自体に注目して検討した。たわみについては測定時の温度の影響を受けるため、2月における測定データ、すなわち、1, 3, 4回目のものを使うことにし、補修工事の前後で直近のものを、それぞれ、補修前、補修後としている。

主滑走路中間部におけるたわみ測定値の逆解析結果である舗装各層の弾性係数について、健全部のものに対するひび割れ部のものの比(弾性係数比率)を取り、補修前後で比較した。図-16、図-17、図-18は、それぞれ、表・基層、路盤、路床のデータである。全体的には、いずれの層においても、補修工事を行うことによって弾性係数比率は増加することが認められる。特に、表・基層においては、他の層に比較して小さい補修前の比率が補修によって著しく増加することがわかる。これは、補修工事がオーバーレイ、パッチング、シーリングといずれをとっても表・基層部分に関わるものであることから、補修の効果が顕著に現れたのであろう。補修工法が同じであっても弾性係数比率には測定地点によるばらつきが大きいいため、工法による効果の違いは明らかにはなっていない。

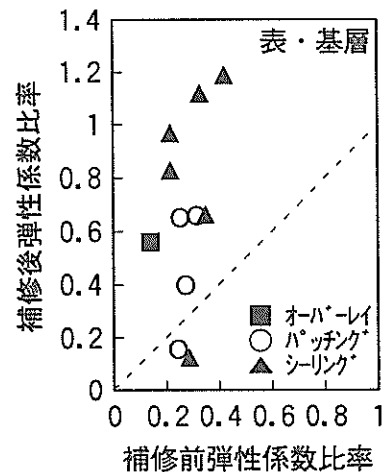


図-16 補修による表・基層弾性係数比率の変化

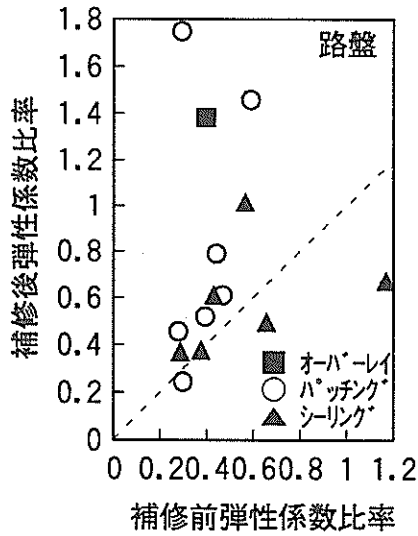


図-17 補修による路盤弾性係数比率の変化

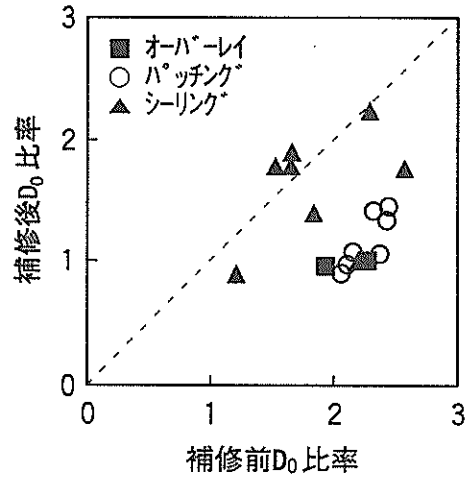


図-19 補修によるD₀の変化

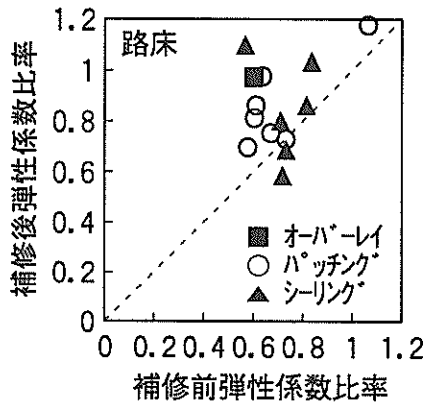


図-18 補修による路床弾性係数比率の変化

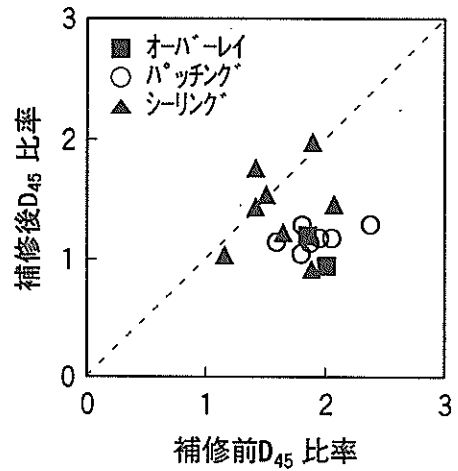


図-20 補修によるD₄₅の変化

これと同様に、たわみについても健全部に対するひび割れ部の比率を、補修前と補修後とで対比する形で表した(図-19、図-20、図-21はそれぞれ、 D_0 、 D_{45} 、 D_{250})。 D_{250} に比べて、 D_0 、 D_{45} では補修後の比率が補修前よりも小さくなっている、すなわちひび割れ部と健全部でのたわみの差が小さくなっていることがわかる。これは、弾性係数についてもみられたように、補修工法が舗装の表・基層のみに関わるものであることから推定される点である。また、これらの図では、弾性係数比率の場合と異なり、工法による補修効果の違いが明確になっている。特に、舗装の浅い部分の構造状態を表す指標である D_0 、 D_{45} においては、オーバーレイ、パッチング補修によってたわみ比率が大幅に低下しており、しかも箇所による違いもあまりないことがわかる。

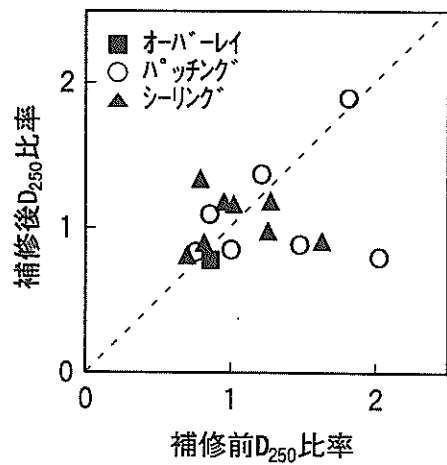


図-21 補修によるD₂₅₀の変化

工法による補修効果を詳しく調べるために、路盤までひび割れが入っていると判断された主滑走路中間部ならびに端部のひび割れ部におけるたわみ比率をまとめた（それぞれ図-22、図-23）。この図から、オーバーレイならびにパッチングにおいては、工事によるたわみ比率の減少（特にD₀ならびにD₄₅）が著しく、補修の効果が非常に大きいことがわかる。この反面、シーリングについては工事によってもたわみ比率の減少はみられず、補修の効果はみられないようである。

図-24は、シーリング工法の効果について、ひび割れ到達深さが表・基層、路盤、路床となっているひび割れ部（主滑走路中間部）のデータを用いて詳しく調べたものである。路床にひび割れが入っている箇所については補修効果がみられるようであるが、それ以外についてはこれとは異なる結果も得られていることからわかるように、本来雨水対策を目的としているシーリング工法には、それによる構造回復を期待すべきではないであろう。

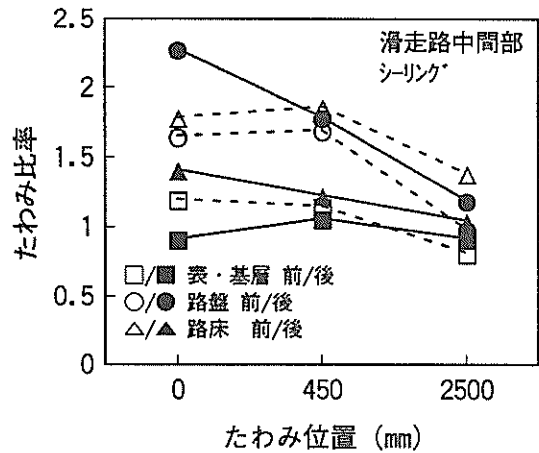


図-24 シーリングの効果（中間部）

荷重伝達率について、補修前後のものを対比したのが図-25である。この場合にも補修工法の違いが明らかであり、パッチングとオーバーレイの補修効果が顕著である反面、シーリングの効果は小さいことがわかる。

以上の点を総括すると次のようにまとめられる。

まず、地震により空港アスファルト舗装に生じたひび割れは表・基層を貫通するものであり、ほとんどは路盤にまで、なかでも一部は路床にまで到達していることが推定される。ひび割れ補修工法としてはオーバーレイならびにパッチングの効果が顕著なものと認められるものの、深い部分までを補修するものではないことも明らかである。なお、シーリングについては、構造状態の回復には結びつかないと考えるべきであろう。

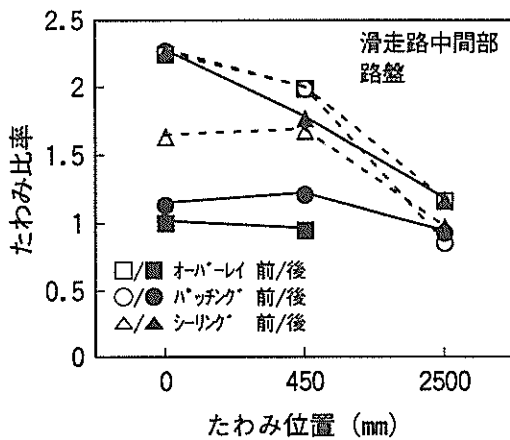


図-22 工法による補修効果の違い（中間部）

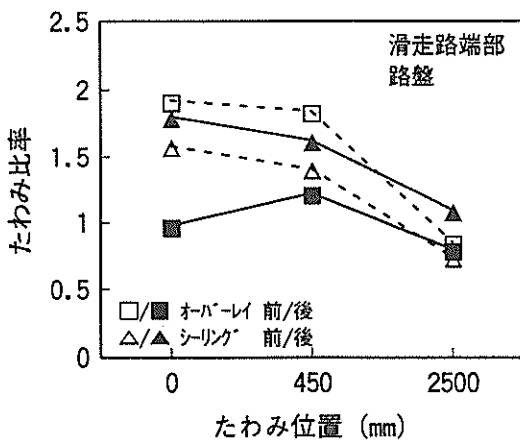


図-23 工法による補修効果の違い（端部）

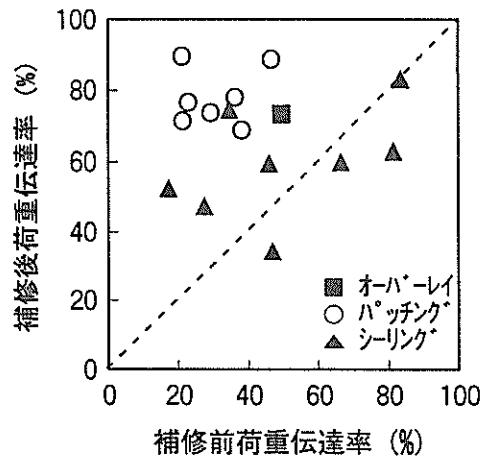


図-25 補修による荷重伝達率の変化

3. 応急復旧方策

わが国の空港ネットワークは、東京、大阪といった主要空港を中心とするハブアンドスポークシステムをとっている。地震災害時における空港の重要性については規模による差を設ける必要はなく、地震発生確率、就航便数、舗装面積、代替輸送機関等を考えて、被災時における空港の補修方策は、迅速・大量補修が要求される場合とそれ以外の場合に分けて検討するほうが合理的であろう。

地震により空港舗装に生ずると考えられるひび割れと段差・陥没のうち、より迅速な対応が求められる後者の補修方法については、この考え方に従って以下のように二つの具体策について検討することにした。

- ① 工法-1：簡易機械施工，すなわち，常置可能な小型装置を使用する材料製造・施工方法
- ② 工法-2：人力施工，すなわち，スコップ等のみで作業可能な材料製造・施工方法

したがって，工法-1用材料としてはある程度まとまった数量が容易に製造できること，工法-2用材料としては少ない労力で製造可能なことが要求されるが，空港内に備蓄された材料により製造可能で，破損箇所を直ちに応急復旧可能となるものでなければならないことは共通している。このほか，両者に対して共通に要求される事項としては，以下のものが挙げられる。

- ① 通常の表層用材料程度の強度特性を有するもの
- ② 施工後短時間で交通解放可能なもの
- ③ 広範囲の自然条件下で製造・施工可能なもの
- ④ 倉庫等で数年間保管可能なもの
- ⑤ 本復旧までの間十分な耐久性を有するもの
- ⑥ 通常の補修工事においても利用可能なもの

具体的に検討すべき項目は，骨材・結合材の材料物性，力学特性，硬化特性，施工性，貯蔵性といったものである。

段差・陥没ほど迅速さが必要とはされないひび割れの応急復旧策については，材料の製造やひび割れ部の切削作業を必要とせず，空港内に備蓄されている材料をそのままひび割れに注入する方法を考えた。これは空港規模等によらず同一とした。この材料については以下の特性が要求される。

- ① 製造済みで現地でそのまま使用可能なもの
- ② アスファルト混合物との付着性が良好なもの
- ③ ひび割れに直接注入可能なもの

このほか，交通開放時期，保存性，耐久性等については段差・陥没補修用材料に対するものと同様の性能が要

求され，具体的な検討項目としては，材料物性，ひび割れ充填性，付着性，硬化特性，施工性，貯蔵性が挙げられる。

これらの項目については実際の補修工事における施工上の制約を考慮した上で検討しなければならない。この点を室内試験の条件として反映させることは難しいので，材料の有用性については現場試験により最終的に検証しなければならない。したがって，現場試験施工においては実工事と同様の施工方法を用いた上で，荷重に対する耐久性を航空機と同等の荷重を使用して検討する必要がある。

このような要求性能を満足する段差・陥没補修用ならびにひび割れ補修用材料を見出して地震災害時応急復旧システムを開発するために，室内試験と現場試験の2つからなる試験研究を実施した。そのフローを図-26に示す。

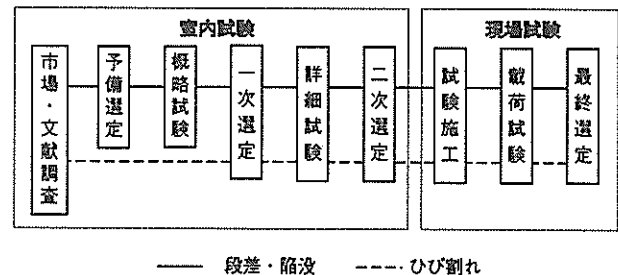


図-26 応急復旧システム開発のフロー

室内試験は一次選定と二次選定からなる⁹⁾。まず，市場調査，文献調査により，今回の目的に適合する材料を数種類選定する（一次選定）。2種類の補修用材料のうち，段差・陥没補修用のものについては，まず予備選定として，市場・文献調査により数種類を選定したのち，概略室内試験により候補を1，2種類に絞り込むことによって一次選定を行う。一次選定終了後，詳細な室内試験を行って，段差・陥没補修用ならびにひび割れ補修用材料を選定する（二次選定）。

現場試験は室内試験により選定した材料の検証を経て，最終選定を行うという位置づけである。段差・陥没補修用材料としては工法-1，工法-2用にそれぞれ1種類を使用し，その施工方法も振動コンパクタ，小型ローラのみを用いるものを採用した。ひび割れ補修用材料としては1種類を選定し，ひび割れ幅を数種類として検証を実施している。

4. 段差・陥没補修用材料に関する室内試験

段差ならびに陥没を応急的に復旧する場合に使用する材料に関する室内試験結果を、市場・文献調査（予備選定）、概略室内試験（一次選定）、詳細室内試験（二次選定）の順にまとめる。

4.1 市場・文献調査

補修用材料として本研究の目的に適合すると思われるものは、いうまでもなく製造時に加熱を必要としない常温混合物である。常温混合物として現在市販されているものは、そのほとんどがカットバックアスファルトを使用したものである。この特徴については以下のようにまとめられる。

- ① 貯蔵可能で必要量を現場に運んで補修できる
- ② 施工時の温度管理が不要で使いやすい
- ③ 小規模の補修に対しては経済性に優れている
- ④ 加熱アスファルト混合物に比べ安定性に劣る

上記のうち④の理由により、常温混合物は暫定的に使用される場合が多いものの、最近では樹脂を用いた高強度のものが開発されているなど、長期的な使用も指向されるようになってきている。また、加熱を要するものの、大量施工が可能と考えられる粉末アスファルトを用いた加熱混合物も最近開発されている。

このような現状を踏まえて、本研究の目的に適合すると思われる段差・陥没補修用材料を分類すると図-27のようになる。以下では、それぞれの材料について概要をまとめる。

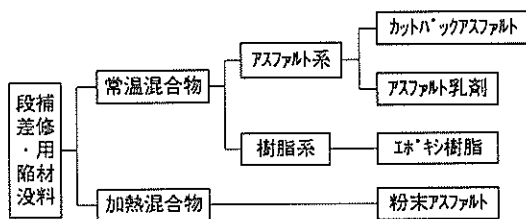


図-27 段差・陥没補修用材料の分類

(1)アスファルト系常温混合物

アスファルト系常温混合物は、高速道路の補修に使用される常温材料の8割を占めるほど一般的に用いられているものの、耐用期間として3箇月程度のもものが3割、6箇月程度のもものが6割で、大半が1年はもたない¹⁰⁾ことから、その耐久性には問題があろう。しかし、本復旧までの応

急復旧用としては使用可能であると考えられる。

このアスファルト系常温混合物には、カットバックアスファルトを用いるもの、アスファルト乳剤を用いるものの2種類がある。いずれも袋詰めされた状態で市販されており、使用時には開封してそのまま使用するようになっている。

段差・陥没補修用材料として使用されることの多いカットバックアスファルト常温混合物は、混合物中の溶剤が完全に蒸発するまでは強度が非常に小さいものの、施工は容易で、接着性・耐久性に優れている。また、貯蔵期間は1~2箇月のもものが多く、6箇月~1年が可能なものもある。

アスファルト乳剤常温混合物は以前から数多く使用されているものの、アスファルト乳剤中の水分蒸発ならびに混合物の硬化が遅く、強度発現までに長い時間を必要とするとの欠点があった。しかし、最近になってこれらを改善したものも開発されている。

以上の調査結果に基づき、概略室内試験に供すべき材料として、骨材最大粒径5mmで、製造者の異なるカットバックアスファルト常温混合物2種類（A、Bと称す）と、骨材最大粒径13mmであるアスファルト乳剤常温混合物1種類を選定した。

(2)樹脂系常温混合物

樹脂系常温混合物に使用されている樹脂は、エポキシ、メタクリル酸メチル、ポリウレタン、ポリエステルなどである。このうち、本研究の目的に適合するものは、硬化収縮特性、接着性、施工性を考慮するとエポキシ樹脂であると考えられる。エポキシ樹脂常温混合物は、主剤、硬化剤、骨材を一緒に混合することによって製造され、強度発現時間は20℃で1時間未満である。

この材料についても概略室内試験用に1種類を選定した。製品は最大粒径13mmの骨材と主剤が混合されたものに別容器入の硬化剤と一緒に袋詰めされた状態（20kg入）で販売されている。施工時には開封後両者を十分に混合して使用するようになっている。

(3)加熱混合物

常温混合物は小規模工事を対象としたものと位置づけられ、工法-1用材料としては適さないことが懸念される。また、大量施工が可能な通常加熱アスファルト混合物は、その製造にあたって規模の大きなアスファルトプラントが必要となり、今回対象とする材料としては適切ではない。そこで、簡易装置を用いて比較的容易に製造でき、規模の大きい補修が可能となる粉末アスファルトを用いた加熱アスファルト混合物を考えた。この材料を大量補修用のものとして選定し、概略室内試験に供した。

表-3 予備選定した段差・陥没補修用材料の特徴

材 料	貯蔵 期間	製 造	敷 設	転 圧	養 生	交通 開放	気象 条件
アスファルト系常温混合物							
カットバックアスファルト A	3-6箇月	◎	○	○	◎	◎	◎
カットバックアスファルト B	1年	◎	○	○	◎	◎	◎
アスファルト乳剤	3箇月	○	◎	◎	△	○	×
樹脂系常温混合物	3-5年	○	◎	○	△	◎	◎
粉末アスファルト加熱混合物	-	△	◎	○	◎	◎	○

◎非常に良 ○良 △やや悪 ×悪

粉末アスファルトはアスファルト自体がマイクロカプセル化されたものであり、ストレートアスファルトの粒子が有機質高分子膜で包みこまれている。そのため、常温においても相互に癒着することがないので、骨材と一緒に袋詰めしておけば、施工時には開封して加熱するだけで使用可能となる。

段差・陥没の応急復旧を対象とした備蓄可能な材料として、上記の市場・文献調査に基づいて選定した5種類の特徴をまとめると、表-3のようになる。

4.2 概略室内試験

4.1に示した市場調査ならびに文献調査により選定した5種類の段差・陥没補修用材料について、マーシャル安定度試験を行って、力学特性を調べた。

(1)試験方法

マーシャル安定度試験用供試体は、空港アスファルト舗装構造設計要領に記されている突固め回数75回の条件にて作製した¹¹⁾。供試体作製時の温度は5、20℃の2種類である。

作製した供試体は、引き続き同じ温度にて所定の時間(1, 5, 24時間)養生し、その温度を保持したまま試験に供した。マーシャル安定度試験の方法は舗装試験法便覧に記されているもの¹²⁾に準じている(供試体の養生方法、試験温度は除く)。なお、粉末アスファルトを用いる場合は、骨材を最大粒径13mmの密粒度アスファルトコンクリートのものに適合するように調整したものを使用し、170℃にて供試体を作製後、5、20℃に保った恒温室内にて養生し、24時間経過後試験に供した。

(2)試験結果

温度が20℃の場合のマーシャル安定度の経時変化について図-28に示した(粉末アスファルト加熱混合物は除く)。アスファルト系常温混合物は、乳剤を用いたものが比較的大きなマーシャル安定度を有するものの、い

れも9kNという材料規格は満足しない。これは時間が経過しても同様である。これに対して、樹脂系常温混合物は、作製してから1時間経過すると極めて大きな値を示すことがわかる。

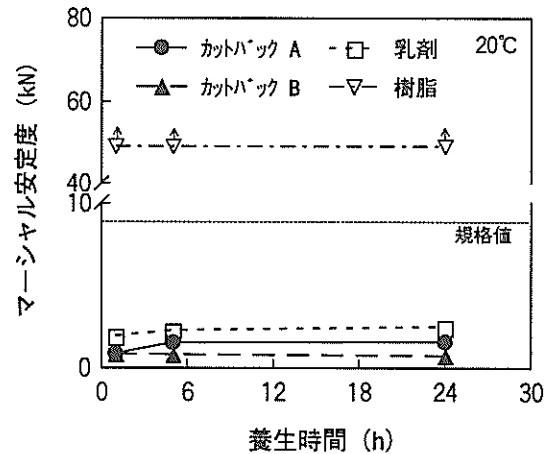


図-28 マーシャル安定度の経時変化 (20℃)

寒冷期を想定して実施した5℃の温度条件下においては、アスファルト系常温混合物は20℃の場合に比較すると若干大きめの値を示すものの、上記の空港舗装の規格を満足するまでには至らない(図-29)。樹脂系常温混合物は、供試体作製後1時間程度では強度発現が不十分であるが、5時間が経過すれば十分な強度を示すようである。

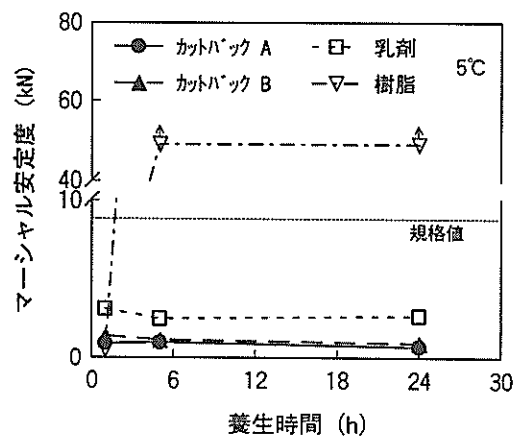


図-29 マーシャル安定度の経時変化 (5℃)

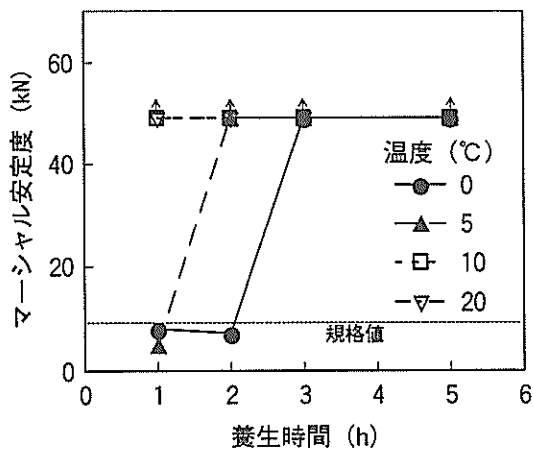


図-30 樹脂系常温混合物の早期マーシャル安定度

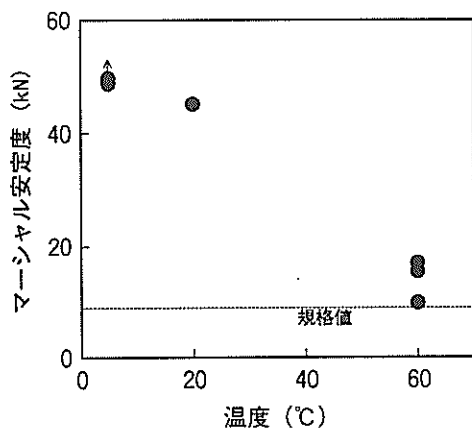


図-31 粉末加熱アスファルト混合物のマーシャル安定度

以上の結果から工法-2用材料としては樹脂系常温混合物が適していると判断される。この材料について、施工後の交通開放時期を明確にするために、温度 0, 5, 10, 20°C において養生時間を1, 2, 3, 5時間としたときのマーシャル安定度を測定した(図-30)。これより、温度が0°Cでは2~3時間、5°Cでは1~2時間経過すれば供用可能となること、10°C以上では1時間未満でも供用可能であることがわかる。

工法-1用材料と想定した粉末アスファルトを用いた加熱混合物のマーシャル安定度を図-31に示す。マーシャル安定度は、60°Cの温度においても規格値である9kN以上となっていることから、この材料は強度でみれば十分なものであることが認められる。

4.3 詳細室内試験

4.2の概略室内試験の結果、工法-1用材料として粉末アスファルトを用いた加熱混合物、工法-2用材料として樹脂系常温混合物の適用性が高いことが認められたので、この材料の性状について詳細な検討を加えた。

(1)材料

粉末アスファルト加熱混合物は、最大粒径13mmの骨材を用い、マーシャル安定度が9kN以上となるように配合設計を行っている。使用した粉末アスファルトは水分0.88%で、2, 0.59mmふるい通過分がそれぞれ100, 92.9%となっているもので、骨材の粒径分布は図-32に示すようなものである。最適アスファルト量は8.5%で、そのときのマーシャル安定度は12.4kNとなっている。

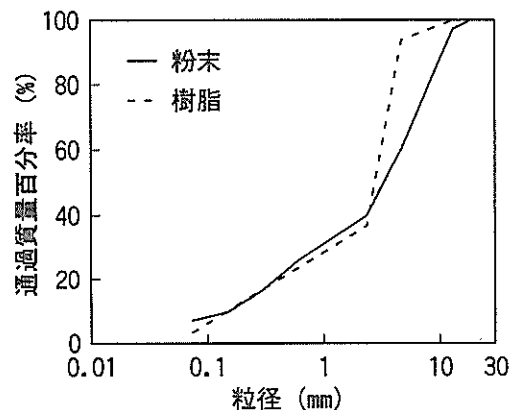


図-32 段差・陥没補修用材料の骨材合成粒度

樹脂系常温混合物は20kg入りで袋詰めされたもので、袋の中には骨材(23.2kg)と主剤(0.7kg)が混合されたものとプラスチック容器に入った硬化剤(0.5kg)が一緒に入っている(写真-2)。結合剤の主成分はエポキシ樹脂(ポリメルクブタン)であり、主剤と硬化剤を6:4の割合で配合するようになっている。また、骨材は最大粒径5mmで、その粒径分布は図-32のようになっている。

(2)試験方法

試験としては、曲げ試験とホイールトラッキング試験を実施した。

曲げ試験は、幅50mm、長さ300mm、厚さ50mmの供試体を用い、中央1点荷方式により実施した(樹脂系常温混合物の材齢は7日)。このときの荷重速度は1, 100mm/minの2種類で、試験温度は5, 20, 40°Cの3種類であった。樹脂系常温混合物については、施工後の時間経過に伴う性状変化を調べることを目的として、施工後1, 3, 6, 24時間の時点においても試験を実施した(温度20°C, 載

荷速度100mm/min)。

ホイールトラッキング試験は、舗装試験法便覧に準拠して60℃の温度において実施した(材齢7日)。このほか、樹脂系常温混合物については、施工後の経時変化を調べるために、1, 3時間経過後にもホイールトラッキング試験を実施している(供試体作製ならびに試験時の温度は20℃)。

(3)試験結果

図-33に曲げ強度が温度に応じて変化する状況をまとめた。樹脂系常温混合物、粉末アスファルト加熱混合物とも、温度が高いほど、また、載荷速度が低いほど、強度も小さくなるのがわかる。また、両者のうちでは後者のほうが強度が小さくなっている。図-34に示すように、破断時のひずみは樹脂系常温混合物のほうが小さく、樹脂系常温混合物の硬くてもろいという特徴が顕著に見られる。

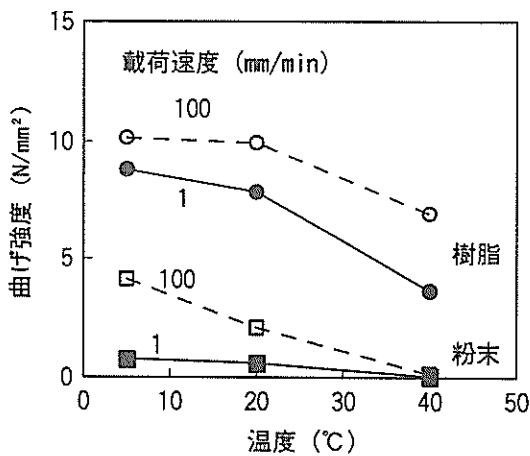


図-33 曲げ強度と温度

樹脂系常温混合物の曲げ強度が施工後の時間経過に伴って変化する状況を図-35に示した。曲げ強度としては、施工後6時間経過すると最終強度にほぼ近い値が得られ、1時間程度でも最終強度の60%程度の値が得られている。ホイールトラッキング試験の結果として温度20℃で施工後1, 3時間における動的安定度をみれば非常に高い値が得られていることから、この材料によれば施工後短時間での供用開始が可能であることが認められる。

粉末アスファルト加熱混合物の力学特性について、通常の加熱アスファルト混合物と対比したものが図-36, 図-37である(それぞれ、曲げ強度、破断ひずみ)¹³⁾。粉末アスファルト加熱混合物よりも通常加熱アスファルト混合物のマーシャル安定度が5割程度大きいことを反映して、粉末アスファルト加熱混合物のほうが曲げ強度は小さく、破断ひずみは大きくなっているのがわかる。ホイールトラッキング試験における動的安定度(60℃)は1,200回/mmとなっており、空港舗装の応急復旧を対象としたものとしては十分であると思われる。

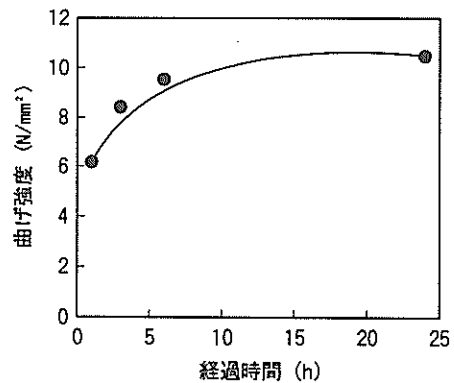


図-35 樹脂系常温混合物の経時変化

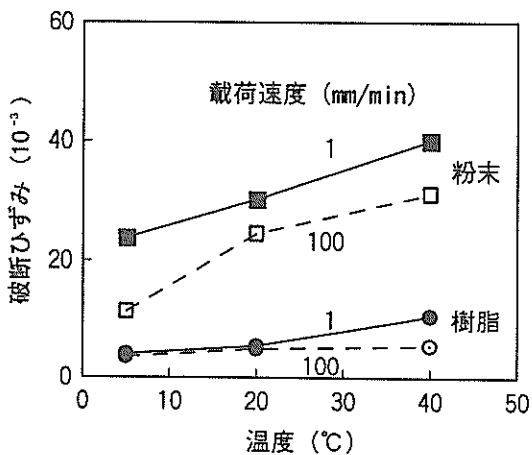


図-34 破断ひずみと温度

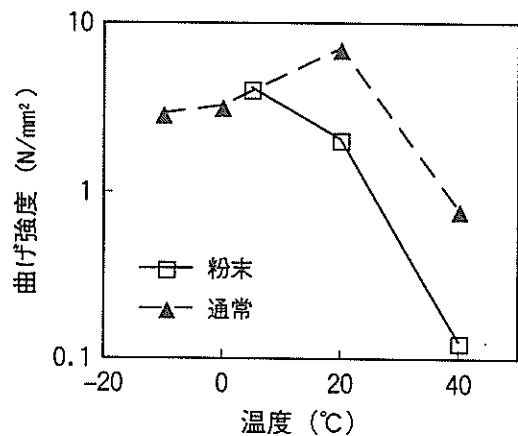


図-36 粉末混合物と加熱混合物の曲げ強度

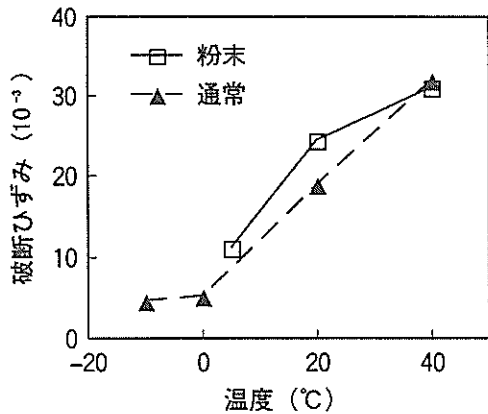


図-37 粉末混合物と加熱混合物の破断時ひずみ

以上の検討結果を総括すれば、段差・陥没補修用材料としては、工法-1、工法-2のそれぞれを対象とした場合、粉末アスファルトを用いた加熱混合物、樹脂系常温混合物が適しているとまとめられる。

4.4 長期貯蔵性試験

以上の試験の結果に基づいて選定した材料の長期貯蔵性について検討した。その方法は、製造後間もない新しい材料と長期間屋内で貯蔵した材料の特性を比較するというものである。貯蔵期間としては、樹脂系混合物、粉末アスファルトが、それぞれ、4年8箇月、3年10箇月である。

まず、混合物を製造する前の構成材料自体の長期安定性について、赤外線吸収スペクトル試験により調べた。一般的に、長期貯蔵による劣化程度は、長期貯蔵材料の吸光度比* に対する新材料の吸光度比の比率、すなわち劣化程度率で定量化できる。試験結果の例として粉末アスファルトの場合を図-38に示した。この材料の I_1 は波数** 1720 cm^{-1} における赤外線の吸収であり、この波数における透過率の低下はアスファルトの酸化により生じたカルボニル基の存在を意味している(劣化によってカルボニル基は増加する)。 I_2 はベンゼン環による赤外線吸収を表している。樹脂系常温混合物(硬化剤)の場合は、 I_1 が波数2900 cm^{-1} における赤外線吸収、すなわちアミンによるもので、 I_2 が波数1390 cm^{-1} すなわちメチレンによる赤外線吸収である(劣化によってアミンは減少する)。表-4にまとめた吸光度比と劣化程度率から、粉末アスファルトは20%程度、樹脂系常温混合物(硬化剤)は5%程度の劣化が認

* $-\log(I_0/I_1) / -\log(I_0/I_2)$ によって計算される。 I_1 は劣化現象を示す成分、 I_2 は劣化の影響を受けない成分を意味する。

** $=v/c$ で定義される (v : 振動数, c : 光速)。

められる。

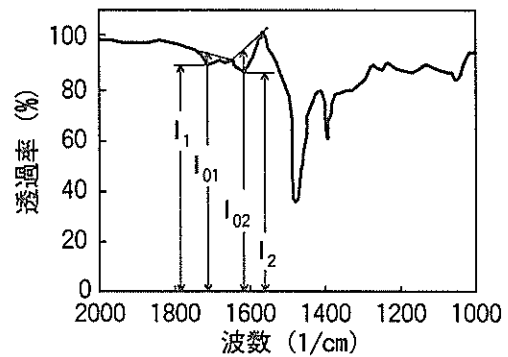


図-38 赤外線透過率(粉末アスファルト)

表-4 吸光度比と劣化程度率

材料	貯蔵	吸光度比	劣化程度率
粉末アスファルト	新	0.538	1.219
	長期	0.656	
樹脂系材料 (硬化剤)	新	1.518	0.955
	長期	1.449	

次に、混合物の力学特性について調べた。図-39は、段差・陥没補修用材料のマーシャル安定度、曲げ強度、破断ひずみである(新材料に対する長期貯蔵材料の比)。樹脂系混合物は、マーシャル安定度で1割、曲げ強度で2割程度の低下がみられるものの、マーシャル安定度9kNという空港アスファルト舗装表層の材料規定自体は満足している。これに対して、粉末アスファルト加熱混合物には長期貯蔵による強度低下はみられない。なお、両者とも、破断ひずみは長期貯蔵に伴って低下するようである。

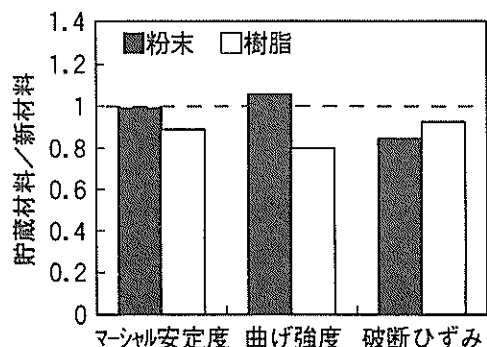


図-39 長期貯蔵による段差・陥没補修用材料の力学特性の変化

以上のことから、両者とも、材料自体には長期貯蔵による劣化がいく分認められるものの、混合物としての力学特性でみれば応急復旧用材料として十分使用可能であると判断できる。

5. ひび割れ補修用材料に関する室内試験

ひび割れを応急復旧する場合に使用する材料については、市場・文献調査により選定した2種類の材料を室内試験に供し、その結果から最終的に1種類を選定した。

5.1 市場・文献調査

ひび割れ補修用注入材料を、その使用形態で分類すると図-40のようになる。ここでの検討の対象となるのは注入型材料であるが、このうち加熱注入材料は幅5mm以下のひび割れに対しては入りにくいいため、V字状に切削した上で注入することが必要になるとされている¹⁰⁾。したがって、本研究の目的に適合すると考えられるものは、製造ならびに施工時に特別な装置を使用しない常温注入材料である。これには樹脂系、アスファルト系の常温注入材料の2種類があり、それらの性状を比較したものが表-5である。これから、アスファルト系材料は樹脂系材料と比較すると、浸透性、付着性、耐水性といった点で優れていることがわかる。

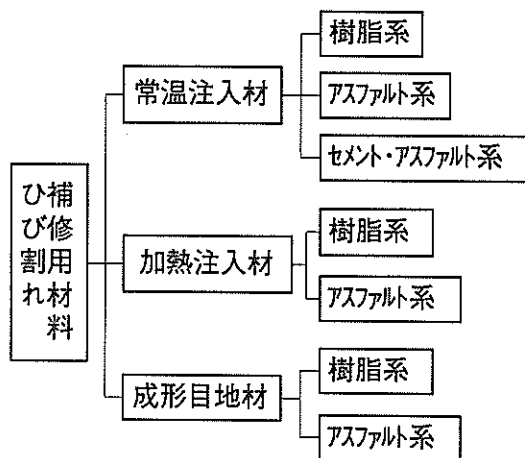


図-40 ひび割れ補修用材料の分類

室内試験に供するものとして、アスファルト系材料から1種類、樹脂系材料からは作業性が良く、比較的接着性もあると思われるウレタン系のものを1種類選定した。選定したアスファルト系材料は、加熱注入材料と比較して

はるかに優れた浸透性を有しており、施工後短時間で交通開放が可能であるほか、ゴム成分を有しているため接着性に優れている。また、選定したウレタン系材料は、一液性のため計量や混合の手間が必要なく、作業性に富み、しかも接着性にも優れている。

表-5 ひび割れ補修用材料の特徴

項目	樹脂系			アスファルト系
	ポリウレタン系	ポリリファイト系	シリコン系	
作業性	△～○	△～○	△～○	○～◎
耐熱性	△～○	△～○	○～◎	△
耐候性	△	○	○	○
耐久性	△	△	○	△
浸透性	○	○	×	◎
付着性	○	○	○～△	◎
耐油性	○	◎	×	×
耐水性	△	○	○	◎
耐薬品性	×～○	△～○	○～◎	○

◎非常に良 ○良 △やや悪 ×悪

5.2 室内試験

上記の市場・文献調査により選定した2種類の常温注入材料、すなわち、アスファルト系材料とウレタン系材料に対して、充填性試験と引張せん断試験を実施した。

(1) 試験方法

充填性試験の方法は、図-41に示すように、2個の亚克力製の箱を、両者の間に1, 3, 5mmの隙間ができるように並べ（ひび割れに相当）、そして、注入材料を、各材料ごとの指定の方法に従って、隙間上部から充填するというものである。試験結果は隙間が全部充填されるまでに必要な時間として得られる。なお、試験時の温度は5, 20℃の2種類を用いた。

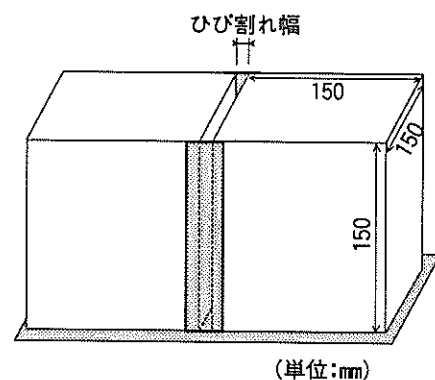


図-41 充填性試験方法

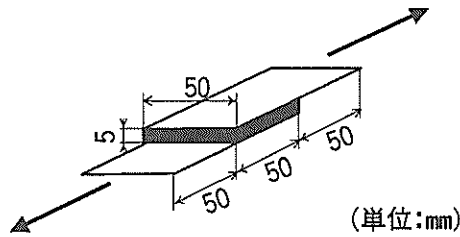


図-42 引張せん断試験方法

引張せん断試験は、2枚のスレート板の間に材料を充填し、十分に固化した後にスレート板を両方に引張るというものである(図-42)¹⁴⁾。この試験は、温度が5、20℃、載荷速度が1mm/minの条件で実施した。

(2)試験結果

充填性試験の結果を図-43に示した。ウレタン系材料は流動性がほとんどなく、今回対象としたひび割れ補修用には不適當であったので、ここではアスファルト系材料のみを示してある。充填時間は、ひび割れ幅が小さいほど、温度が低いほど、長くなることわかる。このことから、幅が小さいひび割れについては、冬季の場合、この材料によっても対応が難しいものと思われる。

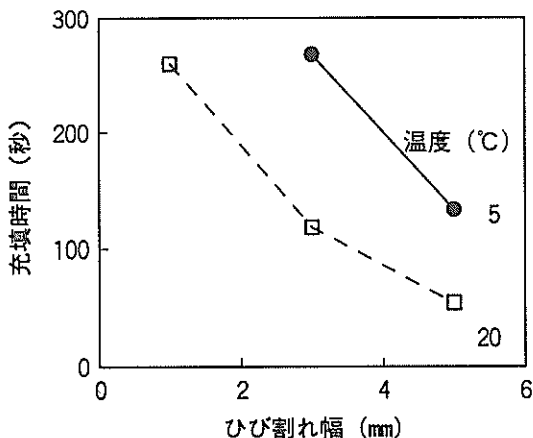


図-43 ひび割れ幅と充填時間

選定したアスファルト系材料の引張せん断強度について図-44にまとめた。強度が時間の経過とともに徐々に増加していく傾向がみられ、施工後タイヤへの付着の心配がないことが確認できればその時点で交通解放可能となるものと考えられる。また、温度による強度の差もほとんどみられず、注入が行なえればその強度については季節によらずに確保できるものと考えられる。

以上のことから、ひび割れ補修用材料としては、アスファルト系のもので適しているものと考えられる。

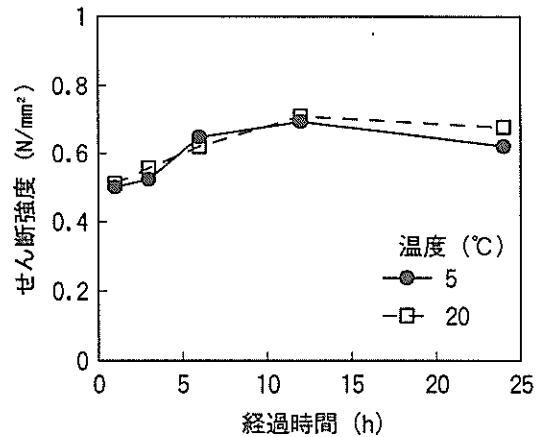


図-44 引張せん断強度の経時変化

5.3 長期貯蔵性試験

上記の検討によりひび割れ補修用材料として選定されたアスファルト系常温注入材料の長期貯蔵性について、段差・陥没補修用材料と同様の方法により検討した。長期貯蔵材料の貯蔵期間は12箇月(室内貯蔵)である。

(1)材料

アスファルト系常温注入材料は、ゴム入りアスファルトを主成分とする主剤と硬化剤(キシレン・特殊硬化剤)を混合することによって製造されている。硬化後(7日間室内養生後)の円錐針入度、軟化点が70mm、97℃といった物理特性を有している。

(2)試験

まず、材料自体の成分変化については、劣化によりカルボニル基が生成されることから、粉末アスファルトの場合と同様の赤外線吸収スペクトル試験を行った。吸光度比は、新材料、長期貯蔵材料のそれぞれの場合で、0.691、0.712であり、劣化程度率は1.030と、劣化は3%程度にすぎず、1年間では実質的に劣化しないとみなせよう。

次に、力学特性について検討した。図-45には充填性試験結果(充填時間)、引張せん断試験結果(強度、破断ひずみ)を示した(新材料に対する長期貯蔵材料の比率)。長期貯蔵の影響としては、充填時間についてはほとんど差がみられないものの、引張せん断強度、破断ひずみについては3割程度の低下がみられている。

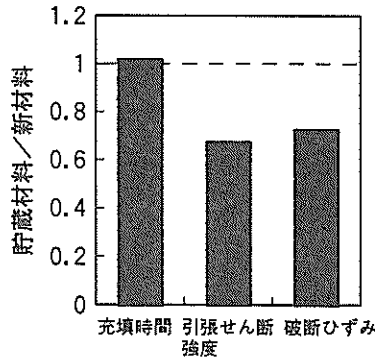


図-45 長期貯蔵によるひび割れ補修用材料の力学特性の変化

以上のことから、材料の成分変化は認められないものの、力学特性には劣化がみられるので、保存可能期間を超えて貯蔵した材料は使用しないことが望ましい。しかし、地震が舗装構造に及ぼす影響が著しい場合には、暫定的に使用してよからう。

6. 現場試験による補修工法の検証

上記の室内試験により選定した材料を用いた地震災害時の応急復旧工法を検証するために、現場試験を実施した。この試験は、人為的に設けた段差・陥没ならびにひび割れを実際に補修し、その上を航空機荷重を繰返し走行させるといった手順から成っている。

6.1 試験計画

試験に用いた舗装構造ならびに補修箇所・方法は、図-46に示すとおりである。舗装の広さは幅7m、長さ62mであり、その構造は既設のローラ転圧コンクリート舗装上に、50mm厚の粗粒度アスファルトコンクリートによる基層ならびに100mm厚の密粒度アスファルトコンクリートによる表層を施工したものとなっている。この舗装の中央部分に段差・陥没用に3区画、ひび割れ用に1箇所を補修対象部分を設けている。

段差・陥没補修用区画はそれぞれ幅7m、長さ4mの広さを有し、いずれも表層部分を撤去した後に、区画ごとに異なった材料を使用して補修を実施している(図-47)。B区画では上記の室内試験に基づいて選定した材料である工法-1用の粉末アスファルト加熱混合物、C区画では工法-2用の樹脂系常温混合物を用いた。これらとの対比をするために、A区画においては通常を表層用加熱アスファルトコンクリート(骨材最大粒径13mm、マーシャル安定度9kN以上)を用いている。

ひび割れ補修用箇所では幅の異なる3本のひび割れを表層部分の全厚(100mm)に舗装全幅(7m)にわたって設けている。具体的なひび割れ幅は、3mm(小)、6.5mm(中)、10mm(大)である。補修用材料としては、上記の室内試験によって選定したアスファルト系常温材料を用いた。

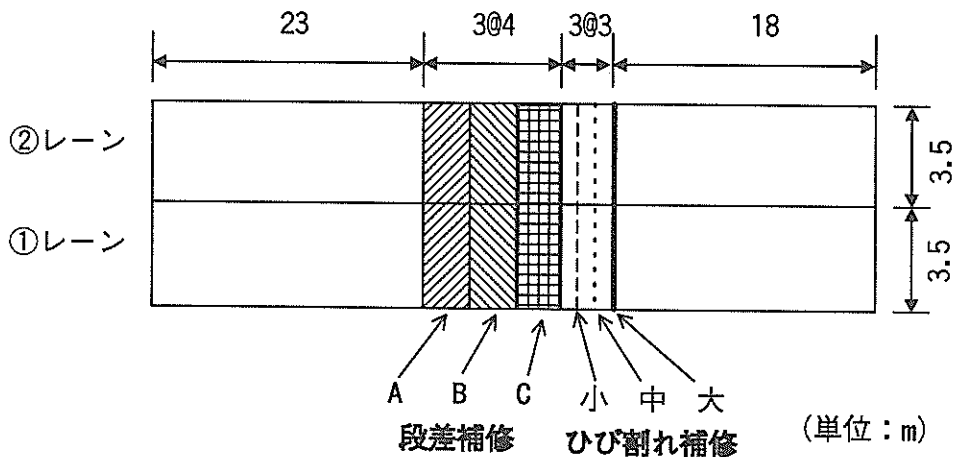


図-46 補修試験区画(平面)

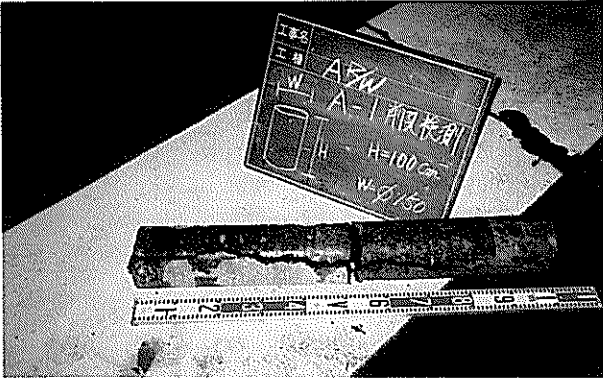


写真-1 ひび割れの貫通状況



写真-4 粉末アスファルト加熱混合物の製造状況



写真-2 樹脂系常温混合物の骨材・主剤と硬化剤



写真-5 樹脂系常温混合物の人力による製造状況

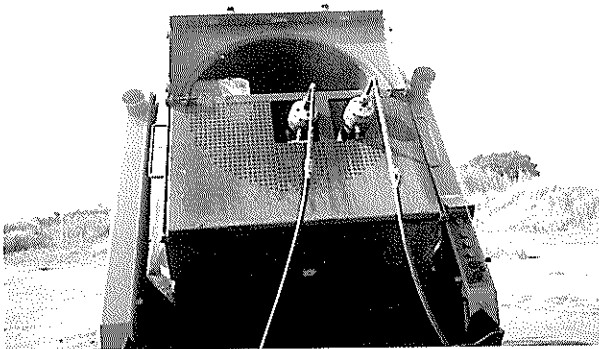


写真-3 粉末アスファルト加熱混合物製造用簡易装置

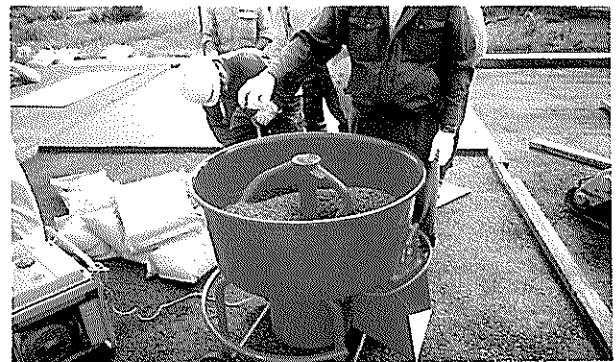


写真-6 樹脂系常温混合物の簡易ミキサによる製造状況

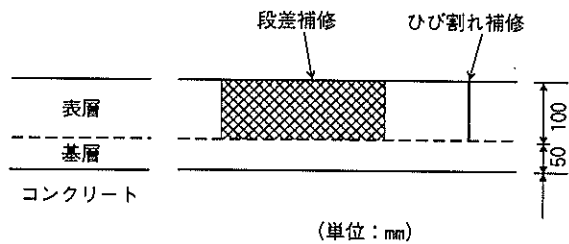


図-47 補修試験区画 (断面)

これらの補修工法を検証するために、補修箇所上を航空機荷重を繰返し走行させることによって走行前後の性状の違いについて検討した。具体的には、図-48に示すように、①レーン、②レーンのそれぞれについて、B-747型航空機と同一の車輪型式を有する主脚型載荷装置（原型走行荷重車）を用いて1,000回の繰返し走行を行った。繰返し走行前後には、FWDを用いたたわみ測定を、非補修箇所、段差・陥没補修箇所、ひび割れ補修箇所において車輪通過線上で行っている。FWDは載荷板直径が450mmで、載荷重が最大250kNの装置である。また、横断方向の凹凸量については補修箇所ならびに非補修箇所において計測し（横断プロフィロメータ使用）、わだちぼれとして定量化した。

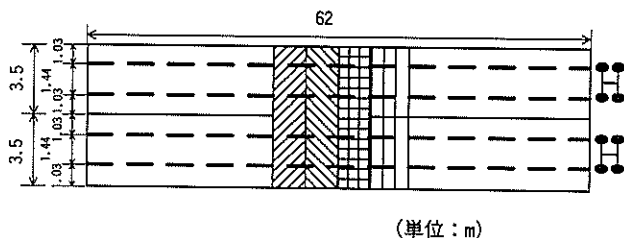


図-48 繰返し走行レーン

6.2 段差・陥没補修工事

(1)材料

工法-1用材料である粉末アスファルト加熱混合物の製造は、まずあらかじめ計量しておいた骨材を簡易製造装置に投入してガスバーナにて加熱した後、粉末アスファルトを追加投入・加熱することにより行った（表-6に配合

を示す）。材料の製造に要する時間は、今回用いた一度に1tの材料が製造可能な小型トラック搭載型の装置（写真-3、写真-4）によれば、骨材の投入（クレーン使用）・加熱に20分、粉末アスファルトの投入・混合に10分の合計30分程度であることがわかった。

1バッチ当たりの製造量を今回用いたもの程度にするとこのようにクレーン等の設備も必要となってしまう。これに代わるものとして室内試験時に用いた1バッチ100kg練りの小型装置も考えられる。これによれば骨材の投入等も全て人力で行うことができ、1回の製造に必要な時間は少なくできる。したがって、この材料を実際に用いる場合には、適切に想定した補修規模に応じて製造装置を選定することが必要である。すなわち、小規模の補修の場合には小型装置が有利であろうが、比較的規模の大きい補修の場合には今回の現場試験に用いたものによるほうが結局製造時間は短いものとなろう。これを考慮に入れて、大型装置を用いるとなった場合にはクレーン等を使用しなくてもいいような手段、すなわち、投入方法を工夫したり、1回当たりの材料を少なくしたりといった手段を講じなければならない。

表-6 粉末アスファルト加熱混合物の配合

材料	6号 砕石	7号 砕石	粗砂	細砂	スクリーニングス	石粉	粉末 アスファルト
配合 (kg)	400	180	250	60	90	20	85

工法-2用材料として用いた樹脂系常温混合物については、使用時に現場で材料を混合することが必要であり、今回は人力のみによる方法（写真-5）と簡易ミキサによる方法（写真-6）を用いた。人力による方法では、コンクリートパネル（幅0.9m、長さ1.8m）上で材料を混合するという一般的なものを採用したところ、1回当たり40kg（2袋）が製造可能であった。これに対して簡易ミキサによる方法では、容量0.1m³の装置を用いれば1回当たり80kg（4袋）が製造可能とわかった。材料の製造に要する時間は、幅3.5m、長さ4m、厚さ50mmの区画の場合で、前者が60分、後者が40分と、後者によれば20分程度施工時間が短縮できることがわかった。したがって、樹脂系混合物の場合には簡易ミキサによる混合方法を標準としてよいものと考えられる。



写真-7 振動タンパによる転圧



写真-10 ひび割れ注入作業の状況

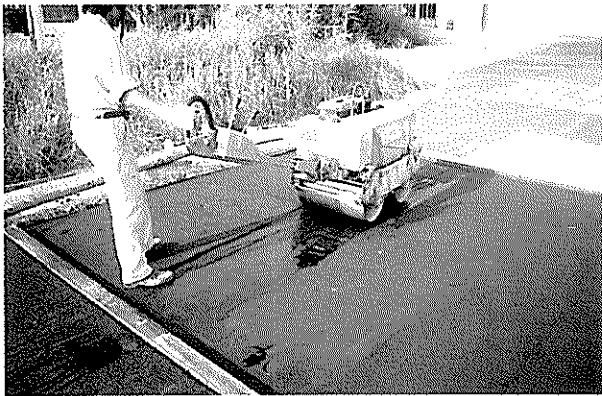


写真-8 小型ローラーによる転圧



写真-11 ひび割れの充填状況

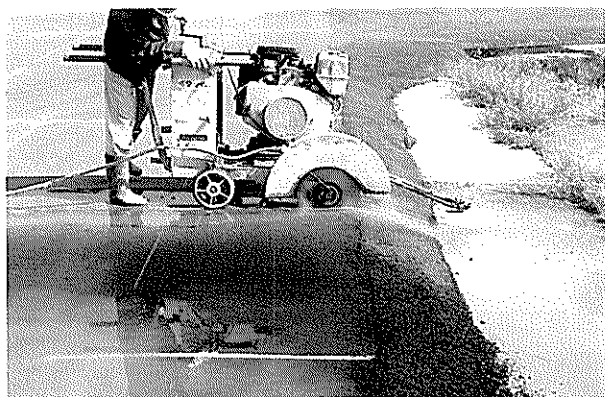


写真-9 ひび割れの作製状況

A区画に用いた通常加熱アスファルトコンクリートは、上記のとおり骨材最大粒径13mm、マーシャル安定度が9kN以上となっている材料であり、市中アスファルトコンクリートプラントで製造されたものを使用した。使用した骨材の配合割合は表-7に示すとおりで、その合成粒度は図-49のようになる。アスファルトとしてはストレートアスファルト60-80を用いた。これらによるアスファルトコンクリートの力学特性は表-8のようなものである。

表-7 通常加熱混合物の骨材配合割合

材料	6号 碎石	7号 碎石	粗砂	細砂	スクリーニングス	石粉
配合割合 (%)	36	16	23	10	10	5

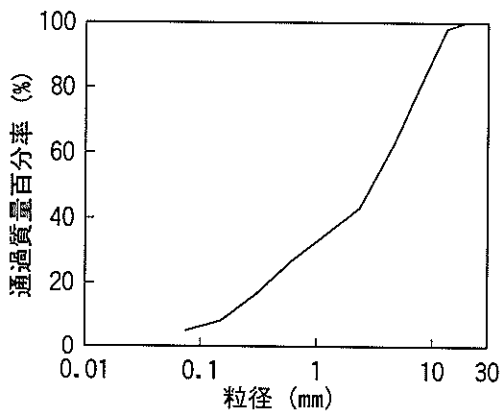


図-49 通常加熱混合物の骨材合成粒度

表-8 通常加熱混合物の力学特性

アスファルト量 (%)	密度 (g/cm ³)	空隙率 (%)	飽和度 (%)	安定度 (kN)	フロー値 (1/100cm)
5.5	2.369	3.6	77.8	10.7	29

30kg, 写真-7) を用い、②レーンでは小型ローラ (質量620kg, 写真-8) を用いた。

粉末アスファルト加熱混合物については、振動コンパクタによる転圧、小型ローラによる転圧とも特に問題はなく、通常加熱アスファルトと同様の施工を行うことができた。これに対して、樹脂系常温混合物の場合、振動コンパクタによる転圧には問題はみられなかったものの、小型ローラによる転圧では施工表面が波状を呈するなど確実な施工ができないものと考えられた。また、この材料は製造後30分程度経過すると急激に硬化し始めるため、迅速な施工が望まれることもわかった。

荷重が250kNの場合のFWD最大たわみD₀に注目して、補修工法の効果を検討した (図-50)。粉末アスファルト加熱混合物を用いたB区画においてたわみが最大となっているが、これは室内試験でみられたような材料の力学特性が反映されているのであろう。樹脂系常温混合物を用いたC区画は通常加熱アスファルト混合物を用いたA区画とほぼ同程度のたわみとなっていることがわかる。ちなみに、補修の対象となっていない既設部分においてD₀が0.2mm程度となっていることを考えると、今回用いた補修作業の方法は日常的な補修には適用すべきではないものと思われる。

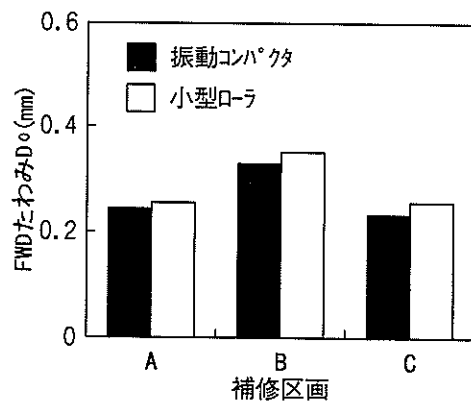


図-50 段差・陥没箇所における補修前後のたわみ

(2)補修作業

補修作業は、表層部分が100mmの厚さとなっているため、50mm厚の2層施工により行われた。応急復旧作業を実際に行う場合に使用できる施工機械は通常工事の場合とは異なることを想定して、転圧方法として2種類を用いた。具体的には、①レーンでは振動コンパクタ (質量

補修工事完了後に、直径100mm、厚さ100mmのコアを採取して密度を調べた結果を表-9に示す。振動コンパクタ、小型ローラという今回用いた施工方法ではいずれの材料も十分に転圧することは難しいことがわかる。特に樹脂系材料についてはその点が顕著に認められる。

表-9 段差・陥没補修用材料の密度

補修区画	段差補修材料	転圧方法	密度 (g/cm ³)	締固め度 (%)	基準密度 (g/cm ³)
A	通常加熱アスファルト混合物	振動コンパクタ	2.223	94.0	2.366
		小型ローラ	2.274	96.1	
B	粉末アスファルト加熱混合物	振動コンパクタ	2.168	94.6	2.292
		小型ローラ	2.209	96.4	
C	樹脂系常温混合物	振動コンパクタ	1.941	89.0	2.180
		小型ローラ	1.995	91.5	

6.3 ひび割れ補修工事

補修の対象となるひび割れは、上記のように、あらかじめ3mm, 6.5mm, 10mm幅のものを①, ②レーンの全幅(7m)にわたって設けておいた。これは、舗装表面から深さ100mmまでカットを入れることによる(写真-9)。

これらのひび割れの補修には室内試験により選定されたアスファルト系常温注入材料を用いた。通常、主剤はプラスチック容器に、硬化剤はガラスびんに入っている。通常市販されているものは340g入りであるが、今回はこれに加えて1,500gと3,500g入りのものも用意し、ひび割れ幅に応じて使い分けた。すなわち、幅3mm, 6.5mm, 10mmのそれぞれに対して、340g入り, 1,500g入り, 3,500g入りを用いた。

施工にあたっては長さ7mのひび割れの端部から連続的に注入していった(写真-10)。所要作業時間について表-10にまとめた。室内試験と同様に、ひび割れ幅が小さい場合ほど必要作業時間も長くなるのがわかる。なお、ひび割れの充填度については、施工後採取したコアによりほぼ100%であることが確認できている(写真-11)。

ひび割れ補修前後に測定したFWDたわみから計算した荷重伝達率の変化について図-51に示した。補修前の値が十分大きいこともあってひび割れ補修の効果は顕著でない。しかし、これはひび割れ深さが100mmと実際の地震被災時に見られるものとは大きく異なっていることに注意すべきである。FWD最大たわみD₀でみた場合には、補修の効果が顕著に現れていることがわかる(図-52)。

表-10 ひび割れ充填時間

ひび割れ幅 (mm)	充填時間
3.0	24分50秒
6.5	16分8秒
10.0	11分58秒

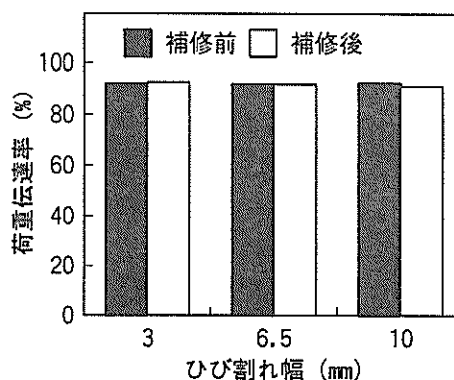


図-51 補修前後におけるひび割れの荷重伝達率

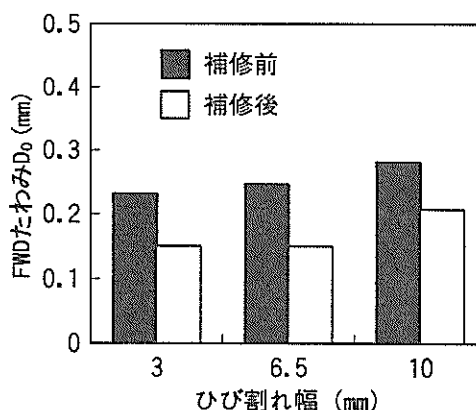


図-52 ひび割れの補修前後におけるFWD最大たわみ

6.4 走行載荷試験による検討

段差・陥没ならびにひび割れ補修箇所において、B-747型航空機主脚荷重の1,000回繰返し走行によって生ずる性状変化として、FWDたわみとわだちばれに注目した。

まず、図-53に段差・陥没補修区画における走行載荷前後のFWD最大たわみD₀を示す。A, B区画、すなわちアスファルト混合物を用いた場合にはこの程度の走行載荷の影響はみられないものの、樹脂系常温混合物を使用したC区画においては走行載荷によりD₀は2倍程度にまで上昇し

ている。目視観察によればこの区画の周辺部分において今回施工した上下層間に剥離が認められたことから、これがたわみ増大の原因ではないかと推測される。このことは、樹脂系常温混合物を使用する場合には1層による施工を考える必要があることを意味していよう¹⁵⁾。

ひび割れ補修箇所については図-54に荷重伝達率、図-55にFWD最大たわみを示した。荷重伝達率については繰返し走行載荷による低下といった現象はみられないものの、たわみについては走行載荷の影響が明らかになっている。特に、ひび割れ幅の大きい箇所ではその傾向が著しい。

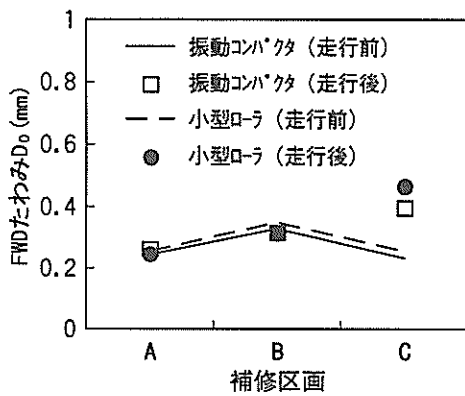


図-53 走行載荷によるたわみの変化 (段差・陥没)

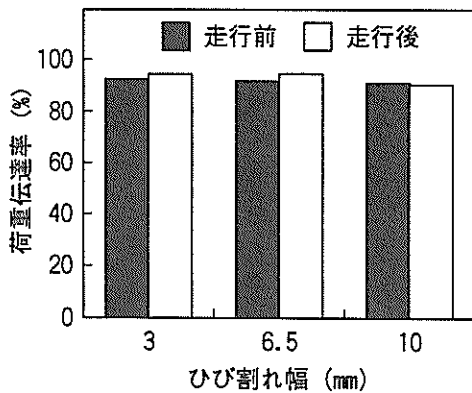


図-54 走行載荷による荷重伝達率の変化

繰返し走行載荷前後における補修区画の性状変化として、わだちぼれについて図-56 (アスファルト混合物による段差・陥没補修)、図-57 (ひび割れ補修) に示した。

段差・陥没補修箇所においては、使用材料の違いが顕著で、樹脂系常温混合物ではわだちぼれの発生は認められないのに対し、アスファルト混合物では図-56に示すよ

うに2~5mm程度のわだちぼれが生じている。このうち、粉末アスファルトを用いた区画は通常加熱アスファルト混合物の区画よりも明らかに大きな値となっている。このアスファルト混合物の区画においては、転圧方法による影響も顕著に認められ、振動コンパクタを用いた区画では小型ローラによる区画よりもわだちぼれが大きい。なお、これらの補修箇所でのわだちぼれは非補修箇所(1.95mm)より大きなものとなっている。

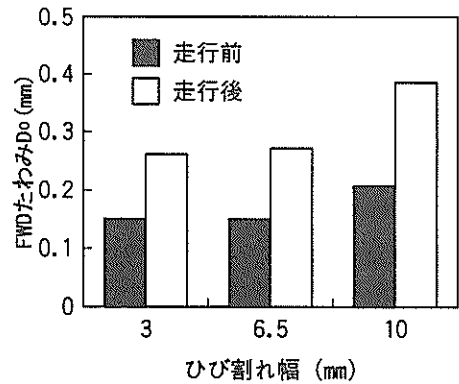


図-55 走行載荷によるたわみの変化 (ひび割れ)

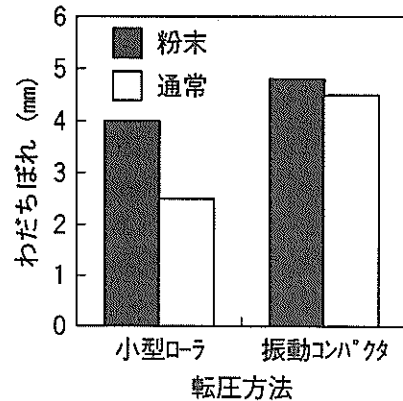


図-56 繰返し走行後のわだちぼれ (段差・陥没)

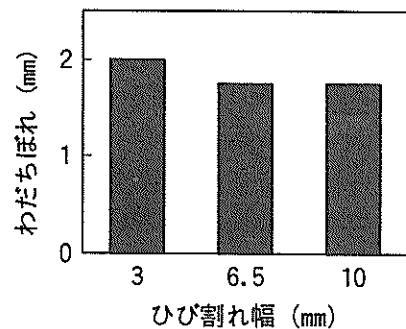


図-57 繰返し走行後のわだちぼれ (ひび割れ)

ひび割れを補修した箇所においては、段差・陥没補修箇所よりもわだちぼれは小さく、非補修箇所と同程度のものとなっている（図-57）。なお、ひび割れ幅による違いはほとんど認められない。

7. まとめ

地震により空港アスファルト舗装に破損が生じた場合の応急復旧システムに関して以下のような知見が得られた。

- (1) 空港アスファルト舗装に生ずる地震による破損は、地盤の液状化がない場合には、ひび割れや段差・陥没が主たるものである。ひび割れは、表・基層を貫通し、ほとんどは路盤に、一部は路床にまで到達している。
- (2) ひび割れの到達深さは、FWDによるたわみ測定結果であるたわみ自体、たわみ曲線の逆解析結果である舗装各層の弾性係数、たわみから計算されるひび割れの荷重伝達率を用いることにより推定可能である。
- (3) オーバーレイならびにパッチングによるひび割れの補修は、舗装の比較的浅い部分に関して大きな効果がある。シーリングではそのような効果は期待できない。
- (4) 段差・陥没の補修方法として簡易機械施工によるものならびに人力施工によるものの2システムを、ひび割れの補修方法として補修規模によらずに適用可能な常温材料によるシステムを提案した。
- (5) 段差・陥没補修用材料として、大量補修を必要とする場合には粉末アスファルト加熱混合物が、小規模補修で十分とされる場合には樹脂系常温混合物の適用性が高い。
- (6) ひび割れ補修用材料としては、特に充填性の点で優れているアスファルト系常温注入材料が適している。

8. おわりに

“地震に強い”空港舗装とするためには、地盤の液状化対策を十分に行うとともに、舗装自体の耐震性を高める必要があるとの方針が打ち出されている。後者については、現時点では種々の点からみて実行が難しいと考えられるので、本文に示したように、ひび割れ、段差・陥没といった液状化を伴わない場合の破損に対する補修方法について検討した。

ひび割れ、段差・陥没といった破損のうち、航空機の運行に直接大きく関わるものは後者であり、これについては破損があった場合に直ちに応急復旧することが要求されるのに対し、前者については比較的時間に余裕のある対応でいいと考えられる。そこで、後者については特

に十分な検討を行い、大量施工を対象としたもの、小規模補修を対象にしたものの2種類を考えた。どちらを用いるかについては、災害時における航空輸送の位置付けや破損程度といったことを考慮して決定すればよい。

いずれにしても、補修用材料を空港内に常備しておくことが前提であるが、特に小規模補修用と考えた樹脂系常温混合物は貯蔵に伴う品質の低下が懸念される場所である。これはひび割れ補修用材料についても同様の問題である。今回は、メーカーによる品質保証期間を超過したものについても一部試験を実施できたが、今後はより長期間保存した場合の品質を確認して、応急復旧用材料ということ考えた材料保存期間を適切に定める所存である。

本研究を遂行するにあたり、大阪航空局には現地調査において便宜を図っていただいたほか、貴重な資料を提供していただくなど多大な協力をいただきました。また、当所構造部地盤震動研究室井合 進室長を始めとする空港土木に関する技術問題協議会技術基準等整備委員会空港土木施設耐震設計技術の開発ワーキンググループのメンバーならびに長岡工業高等専門学校佐藤勝久教授、神戸大学西 勝教授・吉田信之助教授には貴重なご意見をいただきました。さらに、建設省船舶防災センタには一部材料の提供をしていただきました。記して謝意を表します。

(1998年 3月31日受付)

参考文献

- 1) 第一港湾建設局新潟港工事事務所：新潟空港災害復旧工事報告，92p., 1967.
- 2) 稲富隆昌，風間基樹：1989年ロマブリータ地震港湾・空港被害報告，港湾技研資料，No.691, 55p., 1990.
- 3) 上田 茂ほか：1993年釧路沖地震港湾施設被害報告，港湾技研資料，No.766, 454p., 1993.
- 4) 稲富隆昌ほか：1993年北海道南西沖地震による港湾施設被害報告，港湾技研資料，No.791, 449p., 1994.
- 5) たとえば，阿部長門，丸山暉彦，姫野賢治，林 正則：たわみ評価指標に基づく舗装の構造評価，土木学会論文集，No. 460/V-18, pp. 41-48, 1993.
- 6) 姫野賢治，井上武美；FWDによる舗装の診断，アスファルト，第35巻，第175号，pp.9-20, 1993.
- 7) Jianjun YIN, Yoshitaka HACHIYA and Takeshi NAKAMURA: Structural Evaluation for Airport Asphalt Pavements with Earthquake Induced Cracks, 土木学会，舗装工学論文集，第2巻，pp. 81-88,

1997.

- 8) 八谷好高, 佐藤勝久, 田中孝士: コンクリート舗装構造の非破壊評価法の開発ーフォーリングウエイトデフレクトメーターによるー, 港湾技術研究所報告, Vol. 26, No. 2, pp. 465-492, 1987.
- 9) 八谷好高, 殷 建軍, 室園正徳: 空港アスファルト舗装の被災時応急復旧用材料, 土木学会, 舗装工学論文集, 第2巻, pp. 257-262, 1997.
- 10) 新留正道: 舗装の補修用材料の実態調査結果, 日本道路公団技術情報, No.92, pp.40-48, 1988.
- 11) 運輸省航空局: 空港アスファルト舗装構造設計要領, 航空振

興財団, 78p., 1990.

- 12) (社) 日本道路協会: 舗装試験法便覧, 1069p., 1989.
- 13) 八谷好高, 梅野修一, 中村 健, 野田 工: 再生アスファルト混合物の基本的性状, 港研資料, No. 836, 15p., 1996.
- 14) 八谷好高, 梅野修一, 今井泰男, 中村 健, 室園正徳: 空港アスファルト舗装の新しいタックコート材料の開発, 港湾技研資料, No.885, 20p., 1997.
- 15) 池田孝久, 茨木龍雄, 岡崎治義: 長期保存用常温合材の開発 (その2), 土木学会第45回年次学術講演会講演集, 第V部, pp.118-119, 1990.

港湾技研資料 No. 904

1998. 6

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 あんざい

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan

Copyright © (1998) by P.H.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.H.R.I.

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。