

地震により空港アスファルト舗装に生じた 破損の評価と応急復旧方策

八谷好高¹・Jianjun YIN²・秋元恵一³

¹正会員 工博 運輸省港湾技術研究所土質部滑走路研究室長 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

²Dr. Eng., Guest Researcher, Runways Laboratory, Port and Harbor Research Institute, Ministry of Transport
(1-1, Nagase 3, Yokosuka 239-0826, Japan); Lecturer, Xian Highway University, P. R. China

³正会員 運輸省第四港湾建設局次長 (〒750-0025 下関市竹崎町4-6-1)

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ついて研究した。本論文では、まず、地震により生じた破損（ひび割れ）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。この構造評価にお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行っている。そして、破損の応急復旧工法について室内試験と試験施工により検討している。ここでは、破損として段差・陥没とひび割れを取り上げ、材料を空港内に常置しておき、補修時には大型設備・機械を用いることなく容易に製造・施工可能となる方法を、空港アスファルト舗装の応急復旧システムとして提案している。

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

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まず必要となる。

地震により空港土木施設、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、地盤の液状化が原因で、陥没、不同沈下、ひび割れが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、その後地盤が液状化しなくても空港舗装に被害の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、地盤の液状化を防止す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いものの、その反面、アスファルト舗装自体を工夫することにより地震に対処することも実際には難しいものと考えられる。

したがって、空港舗装の地震対策としては、まず地盤の液状化防止策を講じた上で、地震により舗装に破損が生じたら直ちに応急復旧するというものを探ることが現実的であろう。そうすることにより、地震災害時には航空による人員・物資の大量緊急輸送手段をひとまず確保し、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というシステムの構築が可能となる。

このような応急復旧が必要となる破損としては、上記のように、アスファルト舗装における段差・陥没とひび割れが考えられる。前者は、舗装表面の平坦性悪化となって航空機の運行に直接影響を及ぼすので、直ちに補修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、一般的に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こういった従来型の補修工法が期待できなくなるおそれ大きい。こ

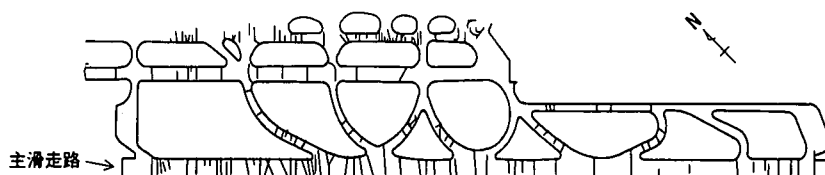


図-1 地震により空港舗装に生じたひび割れの位置

の状況に対処するためには、空港内に材料を常備しておき、わずかな設備・人員により破損を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危険のある破損に対する応急復旧システムを整備すべく、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ェイトデフレクトメータ(FWD)を用いた評価を実施している。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している。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

(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。この空港では液化化が生じておらず、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にはその位置を示してある。

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 本格的補修工事

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、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、基層50mmを粗粒度アスファルトコンクリート、表層50mmを密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、幅が比較的小さいひび割れについては上記と同様の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工事として、舗装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によるオーバーレイがなされた(オーバーレイ)。

この舗装を対象として、地震発生後2年間にわたって、FWDによるたわみ測定を継続して行い、ひび割れの程度の構造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(一部本格的補修工事後)に実施した。

FWDによる調査は、主として幅が大きなひび割れを対象に、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 健全部：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載荷板を設置し、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、荷重に近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。

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が適用できるものと考えて、以

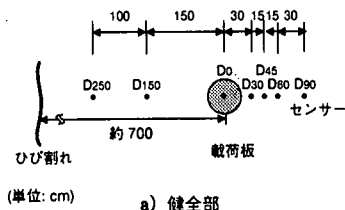


図-2 FWDによるたわみ測定方法

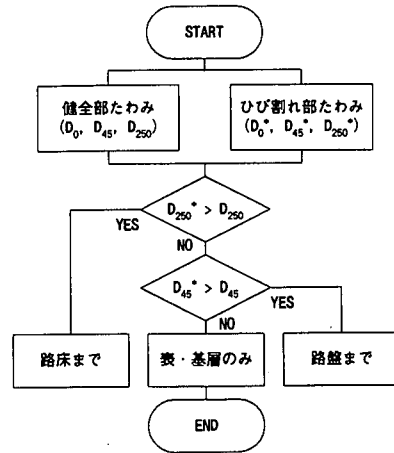


図-3 ひび割れの深さを判定するためのフロー

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）で得られたものと比較する。
- 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)⁶⁾を使用した。ひび割れのあるアスファルト舗装は本来多層弾性体と見なすことはできないものの、コンクリート舗装上にアスファルトオーバーレイを施工した舗装の構造解析をする場合にこの手法を採用している事例があること^{7), 8)}から、ここでもその方法を踏襲し、みかけ上の値として弾性係数を算出することにした。この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。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層から成っているため、逆解析においてはそれぞれ3層、4層として解析した。

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450mm離れた点のたわみ D_{45} が路盤と、そして載荷板中心から2,500mm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300mmを超えるまでには至らないこと、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⁹⁾。

たわみ測定点を層と関連づけるために、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、次の点が明らかになった。

- 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} はいずれも増加する。

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⁸⁾ので、上記の解析結果に従ってひび割れの到達深さが判定可能となる。これをフローチャートに表せば図-3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。

(2) ひび割れ程度の評価

上記のように、地震により主滑走路の横断方向に生じたひび割れのうち比較的幅の広いものについてFWDによるたわみ測定を行った。その結果として得られたFWDたわみの分布状況を図-4、図-5、図-6にまとめた（ひび割れ部のたわみは図-2b)に示す載荷板を設置した側のもの

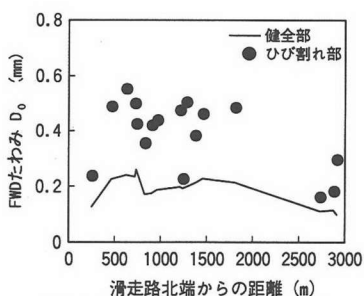


図-4 主滑走路における D_0 の分布

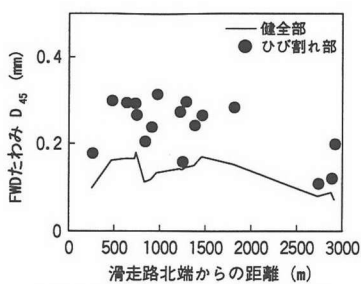


図-5 主滑走路における D_{45} の分布

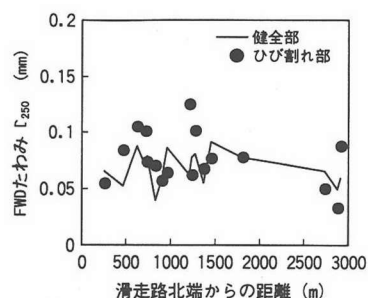


図-6 主滑走路における D_{250} の分布

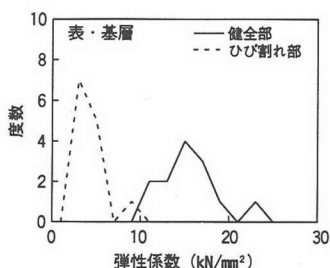


図-7 表・基層弾性係数の度数分布

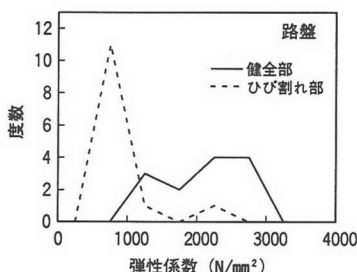


図-8 路盤弾性係数の度数分布

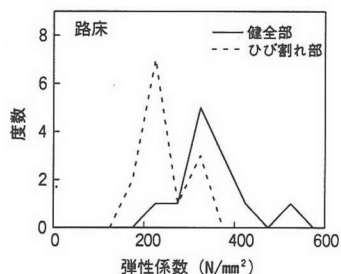


図-9 路床弾性係数の度数分布

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。

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みかけの弾性係数（以下では単に弾性係数と称する）について、その度数分布を図-7、図-8、図-9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、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（舗装構造は、表・基層(235mm)、路盤(900mm)、路床からなる3層構造となっている）。

逆解析については、主滑走路末端部等精度よく実行できない舗装構造もあることから、上記のように、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-3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-1にまとめた。これから、調査したひび割れのほとんどは、表・基層を貫通して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。この判定にはたわみの平均値に対する t 検定を採用した。

表-1 推定されたひび割れ深さ

北端からの 番号	たわみ差		ひび割れ 深さ
	D_{250}	D_{45}	
1	無	有	路盤
2	有	有	路床
3	有	有	路床
4	有	有	路床
5	無	有	路盤
6	有	有	路床
7	無	有	路盤
8	無	有	路盤
9	有	有	路床
10	無	無	表・基層
11	有	有	路床
12	有	有	路床
13	無	有	路盤
14	無	有	路盤
15	無	有	路盤
16	無	有	路盤
17	有	有	路床

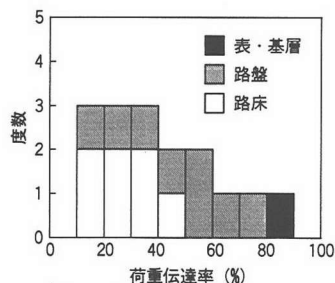


図-10 荷重伝達率の度数分布

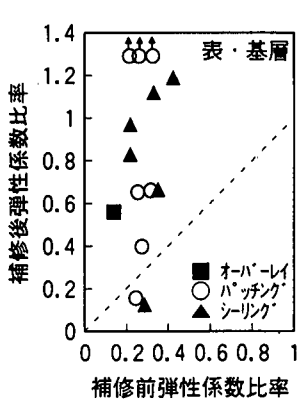


図-11 補修による表・基層弾性係数の変化

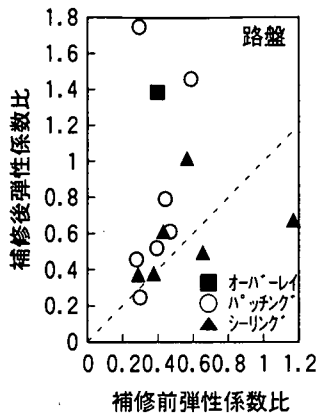


図-12 補修による路盤弾性係数の変化

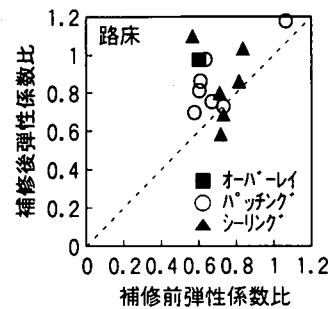


図-13 補修による路床弾性係数の変化

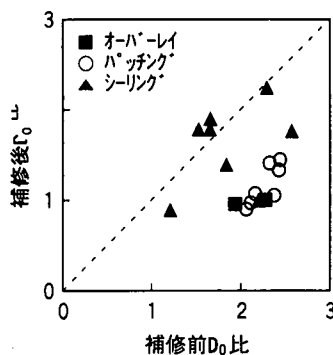


図-14 補修による D_0 の変化

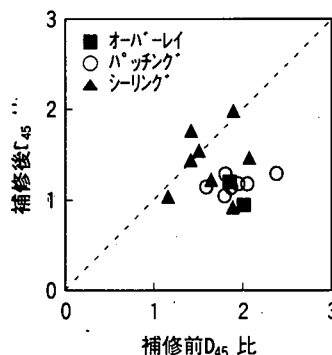


図-15 補修による D_{45} の変化

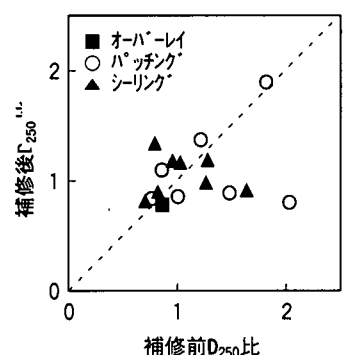


図-16 補修による D_{250} の変化

ひび割れ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¹⁰⁾。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)に示すひび割れをはさんだ点のたわみ)。図-10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、調査したひび割れは構造的には問題のあるものと考えられる。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ひび割れの程度は推定できることになる。

(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も、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月における測定値、すなわち、地震後4回にわたる調査のうち、1, 3, 4回目のデータを使うことにし、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。

図-2に示したたわみ測定値のうち路盤が1層から成る主滑走路中間部におけるものについて逆解析した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)を取り、補修前後で比較した。図-11、図-12、図-13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値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には測定地点によるばらつきが大きい。工法による効果の違いは明らかにはなっていない。

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を、補修前と補修後とで対比する形で表した。図-14、図-15、図-16はそれぞれ、主滑走路上において測定したたわみ D_0 、 D_{45} 、 D_{250} である(D_{250} には一部データ欠損あり)。 D_{250} に比べて、 D_0 、 D_{45} は補修後の値が

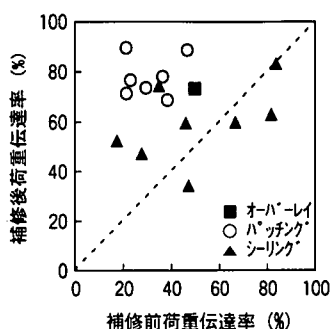


図-17 補修による荷重伝達率の変化

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、パッチングの補修によってたわみ比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。このことから、オーバーレイならびにパッチングにおいては、補修の効果が非常に大きい反面、シーリングについては補修の効果はみられないといえよう。

荷重伝達率について、補修前後のものを対比したのが図-17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な反面、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。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らるべきであろう。

3. 応急復旧方策

上記のように、わが国内外での事例調査から、地震により空港舗装に生ずる破損としては、地盤に液状化が生じない限り、ひび割れと段差・陥没が主たるものであることがわかった。地震災害時における空港の重要性については規模といったものによる差を設ける必要はなく、その応急復旧方策は、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、迅速・大量補修が要求さ

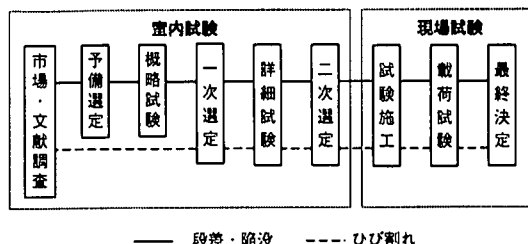


図-18 応急復旧方策開発のフロー

れる場合とそれ以外の場合に分けて検討することが合理的であろう。ひび割れ、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。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

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。これは補修必要量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 ひび割れに直接注入可能なもの
- ③ アスファルト混合物との付着性が良好なもの

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する必要がある。この点は室内試験の条件として反映させることは難しいので、最終的には現場試験により検証しなければならないと考えた。そこで、適切な補修用材料を見出して、地震災害時応急復旧方策を確立するために、室内試験と現場試験の2つからなる試験研究を実施することとした。そのフローを図-18に示す。

室内試験は一次選定と二次選定からなる¹¹⁾。まず、市

表-2 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							

場調査、文献調査により、目的に適合する材料を数種類選定する（一次選定）。段差・陥没、ひび割れ補修用材料のうち、前者については、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による補修方法を検証して、最終的な決定を行うという位置づけである。ここで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している。具体的には、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、それぞれのみを用いるものを採用した。また、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. 室内試験による材料の選定

(1) 段差・陥没補修用材料

a) 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、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、そのほとんどがアスファルト系常温混合物であるが、最近では樹脂を用いた高強度のものも開発されている。このほか、大量施工可能な材料としては、製造時に加熱が必要となるものの、粉末アスファルトを用いるものも開発されている。

このような市場調査ならびに文献調査結果を踏まえて選定した5種類の段差・陥没補修用材料の特徴をまとめると、表-2のようになる。

b) 力学特性試験

選定した段差・陥没補修用材料について、まずマーシャル安定度試験を行って、力学特性を調べた。

マーシャル安定度試験用供試体は、空港アスファルト

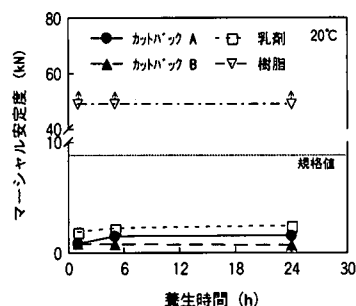


図-19 マーシャル安定度の経時変化 (20℃)

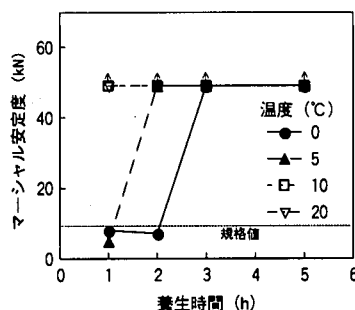


図-20 樹脂系常温混合物の早期マーシャル安定度

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¹²⁾。供試体作製時の温度は5, 20℃の2種類である（粉末アスファルト加熱混合物以外）。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¹³⁾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¹⁴⁾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。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-19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、いずれも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時間経過すると規格値を超える極めて大きな値を示すことがわかる。

この結果から工法-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たので、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℃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-20）。これより、温度が0℃

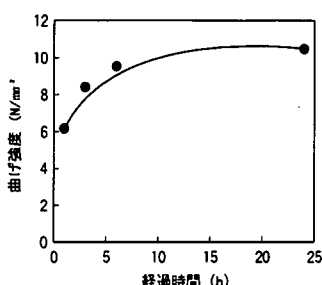


図-21 樹脂系常温混合物の経時変化

では2～3時間、5℃では1～2時間経過すれば供用可能となること、10℃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は、60℃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と考えられた。

以上の結果から、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。前者の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。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。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ある。また、後者の樹脂系常温混合物は20kg入りで袋詰めされたもので、袋の中には骨材と主剤が混合されたものと別容器入り硬化剤と一緒に入っている。結合剤の主成分はエポキシ樹脂（ポリメルカプタン）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。骨材は最大粒径5mmである。

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-21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。施工後1, 3時間経過時に行ったホイールトラッキング試験の結果としても非常に高い動的安定度が得られており、この材料によれば補修後短時間での供用開始が可能であることが認められる。また、粉末アスファルト加熱混合物の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。

c) 長期貯蔵性試験

材料の長期貯蔵性については、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ことによって検討した。貯蔵期間としては、樹脂系混合物、

表-3 長期貯蔵による吸光度比の変化

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

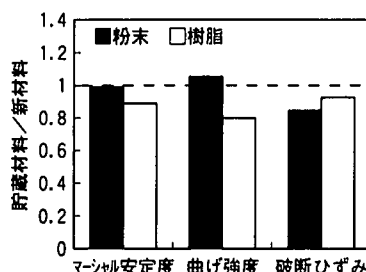


図-22 長期貯蔵による段差・陥没補修用材料の力学特性の変化

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。ここでは、長期貯蔵材料、新材料の吸光度比を調べ、長期貯蔵による劣化程度を、劣化に起因する物質の生成・消失に対応した両者の比率により定量化した。その結果をまとめた表-3から、粉末アスファルトは20%程度、樹脂系材料（硬化剤）は5%程度の劣化が認められる。

次に、混合物の力学特性について調べた。図-22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。

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。

(2) ひび割れ補修用材料

a) 市場・文献調査

ひび割れ補修用注入材料のうち、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¹⁵⁾。したがって、本研究の目的に適合すると考えられ

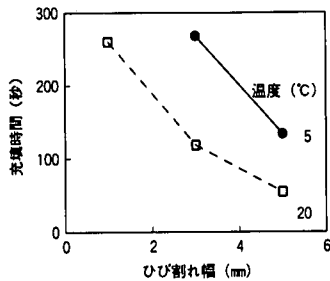


図-23・ひび割れ幅と充填時間

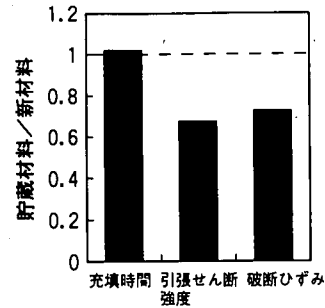


図-24 長期貯蔵によるひび割れ補修用材料の力学特性の変化

るものは、製造ならびに施工時に特別な装置・措置を必要としない常温注入材料である。これには樹脂系、アスファルト系と2種類がある。前者については、多くの種類の中から、作業性がよく、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。

b) 室内試験

この2種類の常温注入材料の充填性について調べた。試験方法は、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）、材料を隙間上部から注入するというもの¹⁰⁾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。結果を図-23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当であるとわかったので、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、長くなることがわかる。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。

上記のアスファルト系材料の引張せん断強度は時間の経過とともにわずかながら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。なお、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¹⁶⁾。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。

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が適しているものと考えられる。この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。

c) 長期貯蔵性試験

アスファルト系常温注入材料の長期貯蔵性として、1年間屋内貯蔵した場合の特性変化について検討した。

まず、材料自体の成分変化については、(1)と同様に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と、劣化は3%程度にすぎず、1年間の貯蔵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-24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。

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と考えられる。

5. 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と同じ方法により補修し、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。

(1) 試験計画

試験に用いた舗装ならびに補修箇所は、図-25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（の補修対象部分を設けている。

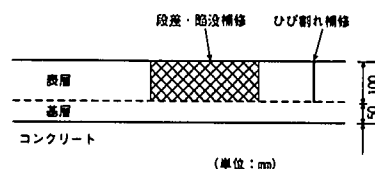
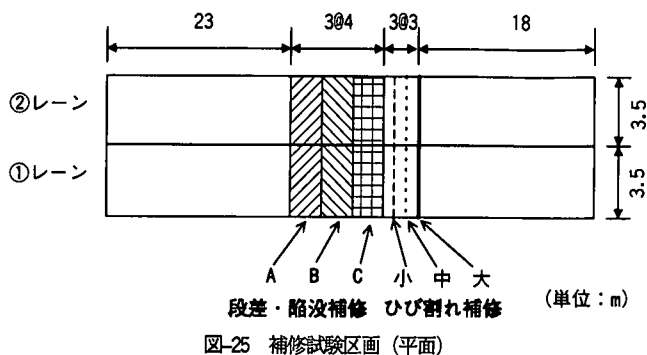


表-4 粉末アスファルト加熱混合物の1バッチあたりの使用量

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

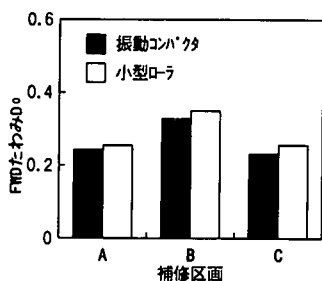


表-5 段差・陥没補修用材料の締固め度

補修区画	転圧方法	締固め度 (%)
A	振動コンパクタ	94.0
	小型ローラ	96.1
B	振動コンパクタ	94.6
	小型ローラ	96.4
C	振動コンパクタ	89.0
	小型ローラ	91.5

表-6 ひび割れ充填時間

ひび割れ幅 (mm)	充填時間
3	24分50秒
6.5	16分 8秒
10	11分58秒

段差・陥没補修区画はそれぞれ幅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-26)。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の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)にわたってカットにより設けている。具体的なひび割れ幅は、3mm、6.5mm、10mm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。

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、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 (載荷重910kN)

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。わだちぼれ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た。

(2) 段差・陥没補修工事

a) 材料製造

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、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-4に1バッチあたりの使用量を示す)。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によれば、骨材の投入・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。この装置に代わるものとして室内試験時に用いた1バッチ100kg練りの小型のものがあるので、補修規模を適切に想定して製造装置を選定することが必要

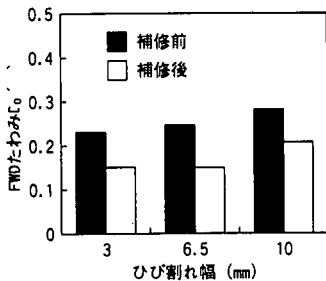


図-28 補修前後のたわみ（ひび割れ）

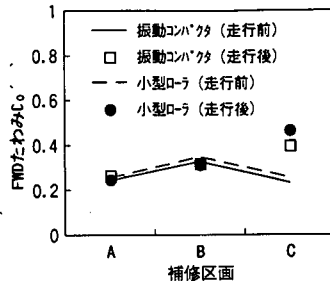


図-29 走行載荷によるたわみの変化（段差・陥没）

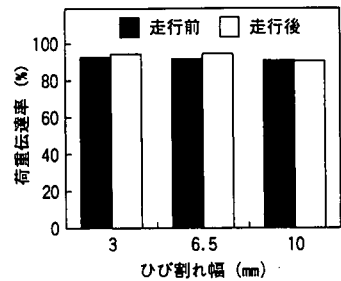


図-30 走行載荷による荷重伝達率の変化

であらう。

工法-2用材料として用いた樹脂系常温混合物は、現場で混合・製造する必要がある、人力のみによる方法と簡易ミキサによる方法（容量0.1m³）を用いた。試験の結果、1回当たりの製造可能量は、それぞれ、40kg、80kgとわかった。また、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分程度時間短縮が可能であることもわかった。したがって、樹脂系常温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。

b) 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。応急復旧作業時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30kg）を用い、②レーンでは小型ローラ（質量620kg）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コンクリー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。

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-5に示す。振動コンパクタ、小型ローラという施工方法では、いずれの材料も大型施工機械を使用する通常工事の場合と同じように転圧することは難しいことがわかる。特に樹脂系常温混合物（C区画）についてはその点が顕著に認められる。

荷重が250kNの場合のFWD最大たわみ D_0 に注目して、補修工法の効果を検討した（図-27）。樹脂系常温混合物を用いたC区画は材料自体の締固め度は小さかったものの、 D_0 は通常加熱アスファルト混合物を用いたA区画

とほぼ同程度のものとなっていることがわかる。これに対して、粉末アスファルト加熱混合物を用いたB区画においては、A区画と同等の締固め度が得られているものの、他の区画に比べてたわみは大きくなっている。

(3) ひび割れ補修工事

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は、通常340g入りのものが市販されているが、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3、6.5、10mmのそれぞれに対して、340、1,500、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材料を連続的に注入していった。所要作業時間について表-6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ことがわかる。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。ひび割れ補修前と直後に測定したFWD最大たわみ D_0 をみると（図-28）、補修により D_0 が大きく低下しており、2.で述べた現地調査とは異なる結果となっている。試験施工ではひび割れの充填が確実にできたことから、現地では充填が十分に行えなかったものと推察される。

(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ける航空機主脚荷重の繰返し走行による性状変化として、FWDたわみとわだちばれに注目した。

まず、図-29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 D_0 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 D_0 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。

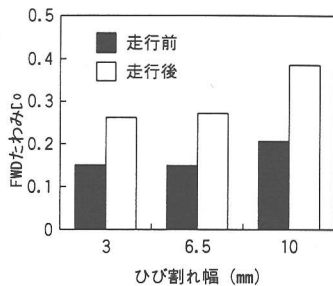


図-31 走行載荷によるたわみの変化
(ひび割れ)

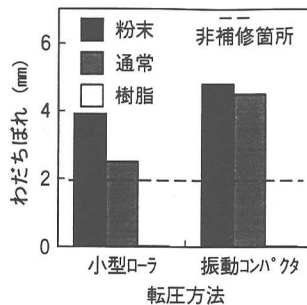


図-32 繰返し走行後のわだちぼれ
(段差・陥没)

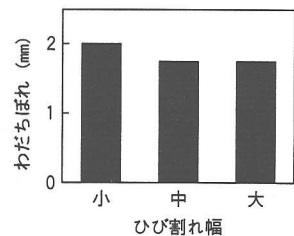


図-33 繰返し走行後のわだちぼれ
(ひび割れ)

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る¹⁷⁾。

ひび割れ補修箇所については図-30に荷重伝達率、図-31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-28に示した補修前後の D_0 では補修の効果が顕著であったが、繰返し走行載荷によりそれは消失したものと考えられる。

繰返し走行載荷前後における補修区画の表面性状変化として、わだちぼれについて図-32 (アスファルト混合物による段差・陥没補修)、図-33 (ひび割れ補修)に示した。

段差・陥没補修箇所においては、使用材料による違いが顕著で、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-32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。

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-33)。なお、ひび割れ幅による違いはほとんど認められない。

以上に述べた試験施工の結果、段差・陥没、ひび割れのいずれも、ここで用いた方法によれば応急的に復旧できることが確認できた。ただし、段差・陥没の補修に際して、樹脂系常温混合物を使用する場合には振動コンパクタを用いた1層施工によること、粉末アスファルト加熱混合物の場合には小型ローラを使用することが必要で

ある。また、ひび割れ補修の場合には、今回用いた材料によっても構造的な機能回復とはならないことに注意すべきである。

6. まとめ

地震により生じた空港アスファルト舗装の破損ならびにその応急復旧方策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部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。シーリングに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、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。

7. 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応急方策について、材料を空港内に常備しておくことを前提としたものを検討した。これらの材料は貯蔵に伴う品質の低下が懸念されるので、より長期間保存したときの品質を確認して、応急復旧に限定した場合の材料保存期間を見極める必要が今後あるものと考えている。

参考文献

- 1) 運輸省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，稲富隆昌，上部達生，井合 進，風間基樹，松永康男，藤本健幸，菊池喜昭，宮井真一郎，関口信一郎，藤本義則：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，上部達生，井合 進，風間基樹，山崎浩之，松永康男，関口信一郎，水野雄三，藤本義則：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) American Association of State Highway and Transportation Officials: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.
- 8) Hachiya, Y., Sato, K. and Kawakami, A.: Thickness Design of Asphalt Overlays on Concrete Pavement, 7th International Conference on Design, Construction and Performance of Asphalt Pavements, Vol. 1, pp. 61-72, 1992.
- 9) Yin, J., Hachiya, Y. and Nakamura, T.: 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.
- 10) Hachiya, Y. and Sato, K.: Nondestructive Evaluation Method of Concrete Pavement by FWD, 土木学会論文集，第420号，V-13, pp. 303-309, 1990.
- 11) 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旧用材料，土木学会，舗装工学論文集，第2巻，pp. 257-262, 1997.
- 12) 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.
- 13) (社) 日本道路協会：舗装試験法便覧，1069p., 1989.
- 14) 運輸省航空局：空港土木工事共通仕様書，航空振興財団，1993.
- 15) 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.
- 16) 八谷好高，梅野修一，佐藤勝久：アスファルトコンクリートの層間付着におけるタックコートの効果，土木学会論文集，No. 571/V-36, pp. 199-209, 1997.
- 17) 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.

(1998. 4. 16受付)

EVALUATION AND URGENT REPAIR METHOD FOR EARTHQUAKE-INDUCED DISTRESS OF AIRPORT ASPHALT PAVEMENTS

Yoshitaka HACHIYA, Jianjun YIN and Keiichi AKIMOTO

An urgent repair system for earthquake induced distress in airport asphalt pavements such as cracks, faults and potholes is studied. In the paper, 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 then investigated. In the former, Falling Weight Deflectometer (FWD) was used to measure deflections at both cracked and uncracked sections. The urgent repair method in which the resources are stored in airports and repair works are conducted easily without larger manufacturing and construction facilities is proposed, as a result of both laboratory tests and field investigations.