空港舗装の既設アスファルト混合物に対する はく離抵抗性評価方法の適用検討

河村 直哉¹・伊豆 太²・坪川 将丈¹

¹ 正会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所 空港研究部 空港施設研究室
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

E-mail : kawamura-n92y2@mlit.go.jp

² 非会員 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 空港舗装研究グループ
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

本論では、はく離の生じた空港の既設アスファルト混合物の判別方法として、修正ロットマン試験によるはく離抵抗性評価方法の適用性を検証した。その結果、はく離抵抗性の指標（残留圧裂強度比）が、はく離の生じたアスファルト混合物で低くなることを示し、本方法が判別に適用できることを確認した。その上で、空港舗装などから採取したコアを修正ロットマン試験により評価し、空港舗装の既設混合物に関する修正ロットマン試験の暫定規格値を提案した。

Key Words : airport, asphalt pavement, stripping, modified Lottman test, moisture damage

1. はじめに

滑走路等のアスファルト舗装において、基層以深のアスファルト混合物（以下、混合物）にはく離¹⁾が生じ、はく離に起因すると考えられるポットホールが突発的に発生することがある（写真-1）。突発的な破損は滑走路等の閉鎖につながるため、こうした破損を防ぐことが、空港舗装の維持管理における重要課題となっている。

防止策として、非破壊調査や解体調査においてはく離の生じた層（以下、はく離層）を特定し、はく離層をその後の切削打換え工事で切削することが挙げられる。解体調査においては、コアの外見やマーシャル安定度などを評価しているが²⁾、切削すべきはく離層を適切に判別できているとは言えない状況にある。そのため、コアを用いてはく離層を判別するための新たな方法が必要である。

本松ら³⁾や東ら⁴⁾は、排水性舗装の既設基層混合物のはく離抵抗性を評価することを目的として、それぞれ加圧透水式はく離促進試験（以下、透水式試験）、修正ロットマン試験⁵⁾によるはく離抵抗性評価方法を検討し、特に本松らは、はく離抵抗性の指標である残留圧裂強度比が、はく離の生じた混合物で低くなることを示している。著者らは、これらの試験を空港舗装のはく離層の判別に適用

できると考え、簡便な試験器具で実施できる修正ロットマン試験の適用性を検討してきた⁶⁾。

修正ロットマン試験において残留圧裂強度比がはく離の生じた混合物で低くなることについて、排水性舗装の基層混合物にはく離が生じていたと推定される現場で検証した例はあるものの⁴⁾、検証例は少ない。この試験を空港舗装のはく離層の判別に適用する上で、さらなる検証を行うことが重要であると考え。

本論ではまず、修正ロットマン試験で得られる残留圧裂強度比の、はく離の進行に伴う変化を評価した。その結果、はく離の生じた混合物の残留圧裂強度比は、健全な混合物と比較して低くなることを確認した。その上で、空港舗装などから採取したコアを評価し、空港の既設混合物に関する修正ロットマン試験の暫定規格値を提案した。

写真-1 空港舗装のポットホール

2. 修正ロットマン試験について

(1) 本研究における試験手順

図-1 に本研究における修正ロットマン試験の手順を示す。この試験で得られるはく離抵抗性の指標は、採取した状態のコアの圧裂強度（標準圧裂強度）と、はく離を促進させた後の圧裂強度（残留圧裂強度）の比である残留圧裂強度比である。圧裂強度の算出式は式(1)に示す。

これ以降、残留圧裂強度比を TSR (Tensile Strength Ratio) という。

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi dl} \quad (1)$$

ここに、 σ_t : 圧裂強度 (MPa), P : 破壊時の最大荷重 (N),
 d : コアの厚さ (mm), l : コアの直径 (mm)

(2) 既往研究の試験手順に対する変更点

東らの試験手順⁴⁾に対して以下の2点を変更した。

- ・ 強制浸水時の水分飽和度（空隙に対するコアに浸水した水の体積割合）について、東らは60～80%とすることを規定しているが、本研究は規定しない。この規定は空隙率7%の室内作製供試体を想定したものであり、空隙率7%未満のコアでは、規定を満足しないことがあるためである。
- ・ 標準圧裂強度を求める場合の水浸養生条件について、混合物内部の温度を確実に25℃にするため、養生時間を20分から1時間に変更した。

図-1 本研究における修正ロットマン試験の手順

3. はく離の進行に伴う TSR の変化

水と荷重によるはく離発生過程を再現した混合物を実験的に作製し、はく離の進行に伴う TSR の変化を修正ロットマン試験で評価した。

(1) 実験フロー

図-2 に実験フローを示す。まず、WT 供試体を作製した。次に、WT 試験機を用いて2条件（水浸、非水浸）の走行試験を行い、はく離を進行させた状態とはく離が生じていない状態の WT 供試体を作製した。その後、走行試験未実施の WT 供試体も含め、WT 供試体よりコアを採取し、修正ロットマン試験を実施した。以下、各項目を詳述する。

(2) WT 供試体の作製

a) WT 供試体の配合

配合は2種類（以下、配合AとB）とした。表-1に使用材料を示す。配合AとBの骨材は、5,6,7号砕石以外同じとし、アスファルトも同じストレートアスファルト60/80とした。骨材粒度は、空港土木工事共通仕様書⁷⁾の基層用粒度の中央粒度とした（図-3）。アスファルト量は配合Aで4.4%、配合Bでは4.6%とした。

使用材料の配合時のはく離抵抗性として、表-2に粗骨材の剥離面積率（舗装調査・試験法便覧A017⁸⁾）と修正ロットマン試験で求めた混合物の TSR を示す。粗骨材の剥離面積率はほぼ同じであったが、TSRは配合Aの方が高かった。

図-2 実験フロー

表-1 使用材料

骨材	5, 6, 7号 (配合A)	硬質砂岩 (福岡県産)
	5, 6, 7号 (配合B)	硬質砂岩 (茨城県産)
	砕砂	硬質砂岩 (埼玉県産)
	細目砂	川砂
石粉		石灰岩
アスファルト		ストレートアスファルト60/80

b) WT 供試体の作製

WT 供試体の作製方法は、舗装調査・試験法便覧 B003⁸⁾ に準拠した。寸法は、長さ 500mm、幅 300mm、厚さ 55mm とした。締固め度は、空港舗装の品質管理基準の下限値である 98% とした。この締固め度における WT 供試体の空隙率は、配合 A で 6.0%、配合 B では 6.2% である。

(3) WT 試験機を用いた走行試験

a) 走行条件

表-3 に走行試験の条件を示す。条件は、舗装調査・試験法便覧 B004⁸⁾ (水浸ホイールトラッキング試験方法) に準拠したが、以下の 4 点を変更した。

- ・はく離を進行しやすくするために、走行前の水浸養生時間は、鎌田らの検討⁹⁾を参考に 18 時間とし、荷重は通常の 1.25 倍である 858N とした。
- ・走行速度は、可能な限り試験法便覧の条件に近づけるため、使用試験機の最高速度の 7.7 往復/min とした。
- ・水浸走行条件の走行回数は、はく離初期からはく離が

図-3 骨材粒度

表-2 使用材料のはく離抵抗性

	配合 A	配合 B
粗骨材の剥離面積率(%)	38	35
TSR	0.87	0.79

表-3 走行試験の条件

項目	単位	設定
水位	-	WT供試体上面
水浸走行前の水浸養生時間	時間	18
非水浸走行前の気中養生時間	時間	5
走行時の温度	°C	60
載荷荷重	N	858
走行速度	往復/分	7.7
走行距離	mm	430
トラバース速度	mm/min	100
トラバース幅	mm	250
走行回数 (水浸条件の場合)	配合 A 配合 B	往復 1,100~1,300 1,100~1,350 1,100, 1,250 1,200, 1,350
走行回数 (非水浸条件の場合)	配合 A 配合 B	

着色箇所は、試験法便覧と異なる条件

進行した状態(標準圧裂強度を求めたコアの割裂面に対する、割裂面のはく離部の面積比(以下、標準剥離率という)が最大で 20~30%)となる走行回数とし、予備試験に基づき 1,100 から 1,350 往復で設定した。

- ・非水浸走行条件の走行回数は、水浸走行条件の比較対象とするため、水浸走行条件の設定範囲で設定した。

b) 走行試験後に採取したコアのはく離状況

図-4 に水浸走行条件における走行回数と標準剥離率の関係を示す。1 プロットは、3 本のコアの平均値である。水浸走行条件では、標準剥離率は約 2~30% であった。非水浸走行条件でも、コアの割裂面でアスファルトが骨材から剥がれた部分が確認されたが、標準剥離率で表すと 0.5% 以下であった。

以降、水浸走行条件で作製したコアをはく離コア、非水浸走行条件で作製したコアを健全コア、走行試験未実施の供試体から採取したコアを走行なしコアという。

(4) 修正ロットマン試験によるコアの TSR 評価

a) 評価方法

図-1 の手順で、走行試験後に採取したコアを評価した。

水分飽和度(空隙に対する、強制浸水で浸透した水の体積割合)を求めるために、強制浸水前のコアの重量と空隙率、および、強制浸水後のコアの重量を求めた後、強制浸水前のコアの空隙率から空隙の体積を、強制浸水前後のコアの重量差から浸透した水の体積を算出した。

TSR は、1 枚の WT 供試体から採取した 3 本のコアの標準圧裂強度と 3 本のコアの残留圧裂強度より求めた。

標準圧裂強度を求めたはく離コア、健全コアおよび走行コアの割裂面の剥離率を求めることで、各コアの標準剥離率も求めた。

a) 配合 A

b) 配合 B

図-4 水浸走行における走行回数と標準剥離率の関係

b) 評価結果

図-5 に標準剥離率と TSR の関係を示す。両配合ともに、はく離コアの TSR は、健全コアや走行なしコアのそれよりも低かった。配合 A のはく離コアの TSR は、ばらつきが大きく、標準剥離率の増加に伴う変化は明確でなかった。一方、配合 B のはく離コアの TSR は、標準剥離率が約 5% 以下では 0.7 以上であり、標準剥離率が約 10% 以上では 0.7 よりも低くなったが、標準剥離率の増加に伴う TSR の変化は殆どなかった。

以上より、混合物にはく離が生じると、修正ロットマン試験で得られる TSR は低くなることが示され、TSR はく離の生じた混合物の判別に適用できると考えられる。

(5) はく離により TSR が低くなる原因の考察

はく離が生じると **TSR** が低くなる原因は、はく離が生じることによる残留圧裂強度の低下度合いが標準圧裂強度のそれ以上に大きいためである。残留圧裂強度が低下する原因は、はく離コアの強制浸水時の水分飽和度が空隙率によらず、健全コアのそれよりも高いことを考慮すると (図-6)、はく離コアでは温水養生時に、はく離がより促進されやすくなることが考えられる。

なお、はく離コアの水分飽和度が高くなる原因については、同じ空隙率でもはく離コアと健全コアの空隙構造が異なり、はく離コアでははく離による水道が形成された可能性が考えられる。

4. 空港舗装の既設混合物に関する修正ロットマン試験の規格値検討

空港舗装などから採取したコアの TSR を評価するとともに、空港舗装の既設混合物に関する修正ロットマン試験の規格値を検討した。

(1) 空港舗装などで採取したコアの評価

a) 採取コア

空港舗装および港湾空港技術研究所の試験舗装においてコアを採取した。表-4 にコア採取位置付近の舗装の劣化状況，コアの深さ，本数および外見を示す。コアは，直径 100mm であり，複数の基層を各層 50mm にカットした後に試験に供した。採取本数は 1 箇所につき原則 6 本としたが，作業時間の制約，または，はく離による損傷が大きかったことから，場所によっては 6 本未満となった。

b) TSR の評価

図-1 の試験手順でコアを評価した。図-7 に評価結果を示す。基層が砂利化していた A 工区のコアの TSR は 0.67 であり、基層 2 層目下面にはく離が確認された B 工区の基層 2 層目コアの TSR は 0.55 であった。その他の工区

a) 配合 A

b) 配合 B

図-5 標準剥離率と TSR の関係

図-6 配合 A のコアの空隙率と水分飽和度の関係

(水に起因する変状が殆どない舗装)のコアの TSR は 0.7 以上であった。水による劣化 (はく離や混合物の砂利化) が確認された層の TSR は相対的に低かった。

(2) 規格値の検討

a) 規格値の検討

試験結果を踏まえて TSR の規格値を検討する。加えて、Maupin ら¹⁰⁾は残留圧裂強度を水の作用で将来低下し得る強度としていることから、著者らは残留圧裂強度もはく離層の評価に重要な指標であると考え、残留圧裂強度の規格値も検討する。

図-8 に、舗装から採取したコアや 3 章で作製したコアに関する標準圧裂強度と残留圧裂強度の関係を示す。図

表-4 空港および試験舗装のコア採取位置付近の劣化状況、採取コアの深さ、本数および外見

		A工区	B工区	C工区	D工区	E工区	F工区	試験舗装
舗装の劣化状況		水に起因する可能性があるポットホールやひび割れを確認	水に起因すると考えられる変状は殆ど確認されていない					
採取コアの深さと本数	基層1層目	2本 ×1箇所	4本 ×1箇所	6本 ×1箇所	4本 ×1箇所	6本 ×1箇所	6本 ×3箇所	6本 ×4箇所
	基層2層目	-	4本 ×1箇所	6本 ×1箇所	-	6本 ×1箇所	-	-
	基層3層目	-	-	6本 ×1箇所	-	-	-	-
コアの外見		表基層間で層間剥離、基層1層目が砂利化(写真-2a))	基層2と3層目で層間剥離、2層目下面にはく離(写真-2b))	外見に変状なし

a) A工区基層コア採取周囲の混合物
写真-2 A,B工区より採取した混合物やコア
b) B工区基層2層目のコア下面

図-7 空港および試験舗装より採取したコアのTSR
(赤：コアの下面がはく離か周囲の混合物が砂利化)

では、標準圧裂強度を求めたコアのうち、割裂面にはく離が確認されたコアを塗りつぶして示した。

ここでは、割裂面のはく離の有無によって、コアにはく離が生じている危険性のあるエリア（以下、危険エリアという）を検討した。割裂面にはく離が確認されたコアのTSRは0.8未満であった。また、その殆どの残留圧裂強度は0.7MPa未満であった。以上より、TSR0.8未満かつ残留圧裂強度0.7MPa未満を危険エリアとして設定した。

なお、危険エリア外で、かつ、残留圧裂強度が0.7MPa以下のエリアについては、TSRは0.8以上と高い一方で、強度としては相対的に低いとも考えられるため、このエリアの取り扱いについては、今後より多くのサンプルを

図-8 各種コアの標準圧裂強度と残留圧裂強度の関係

用いて検討したい。

b) 既往研究で検討されたコアに対する評価

東らは、修正ロットマン試験を用いた同様の検討を行っており⁴⁾、排水性混合物が側方流動を起こした2つの現場（“現場C”および“現場D”）の基層からコアを採取し、修正ロットマン試験を実施している。

現場CおよびDのコアには、はく離が生じていた可能性があり、その試験結果より推定される現場CとDのTSRはそれぞれ、0.30～0.55、0.60～0.75であり、残留圧裂強度はそれぞれ、0.20～0.40MPa、0.40～0.55MPaであった。これらを図-8で評価すると、危険エリアに入ることを確認できる。

なお、設定した危険エリアは、限られたサンプルに基づく暫定的なものであるため、より多くのサンプルを用いてその妥当性を検証する必要がある。

5. コアの厚さが TSR および残留圧裂強度に及ぼす影響

提案した危険エリアは、厚さ 50～55mm のコアに基づくものであるが、実務では厚さ 50mm を確保できない場合もあり得る。東らは、厚さ 50mm と 63.5mm では TSR に殆ど差がないと報告しているが⁴⁾、50mm 未満の厚さでは検討していない。そこで、50mm 以下の厚さにおいて、厚さが TSR および残留圧裂強度に及ぼす影響を検討した。

(1) 評価方法

a) 評価手順

厚さ 30, 40 および 50mm の WT 供試体 (空隙率 4.3%, 空隙率 7.0%, いずれも走行試験未実施) からコアを採取し、図-1 の試験手順でコアを評価した。40mm と 50mm のコアの TSR は、5 本ずつのコアの標準および残留圧裂強度で求めた。30mm のコアの TSR は、結果がばらつくと考え 10 本ずつで求めた。

b) 使用材料と配合

WT 供試体の材料と配合は、5, 6, 7 号碎石に輝緑岩 (粗骨材の剥離面積率 43%) を使用したこと以外、表-1 に示した配合 B と同じである。

(2) 評価結果

表-5 にコアの厚さに対する TSR を示す。厚さの増減に伴う TSR の変化の傾向は空隙率によって異なり、TSR に対する厚さの影響は明確に確認されなかった。同程度の標準剥離率のコアを評価しても (例えば図-5b の標準剥離率 10% 付近)、TSR に 0.1 程度の違いが生じることを考慮すると、本検討で得られた厚さによる TSR の違いは大きくないと考えられる。

表-6 には、コアの厚さに対する残留圧裂強度を示す。加えて、残留圧裂強度の変動係数も示す。残留圧裂強度に関しても、厚さの増減に伴う変化の傾向は空隙率によって異なり、厚さの影響は明確に確認されなかった。30～50mm の残留圧裂強度の違いは、変動係数を考慮すると有意な差ではなく、ばらつきの範囲内であると考えられる。

以上より本検討では、50mm 以下のコアについて、厚さが TSR および残留圧裂強度に及ぼす影響は明確に確認されなかった。この要因として、式(1)に示したように、圧裂強度の算出において厚さの影響が考慮されていることも可能性として考えられる。

表-5 コアの厚さに対する TSR

	コアの厚さ (mm)		
	30	40	50
空隙率 4.3%	0.72	0.69	0.68
空隙率 7.0%	0.43	0.45	0.50

表-6 コアの厚さに対する残留圧裂強度

		コアの厚さ (mm)		
		30	40	50
空隙率 4.3%	残留圧裂強度 (MPa)	0.57	0.61	0.58
	変動係数 (%)	7.3	9.2	6.8
空隙率 7.0%	残留圧裂強度 (MPa)	0.30	0.33	0.37
	変動係数 (%)	14.0	8.0	5.1

6. まとめ

本検討で得られた結論を以下に示す。

- (1) 混合物にはく離が生じると、修正ロットマン試験で得られる TSR は低くなることを示し、この TSR をはく離の生じた混合物の判別に適用できることを確認した。
- (2) はく離が生じると TSR が低くなる原因として、はく離により混合物内部に水道が形成され、強制浸水時の水分飽和度が高くなるため、温水養生時に、はく離がより促進されやすくなる可能性が考えられる。
- (3) 修正ロットマン試験で得られる TSR と残留圧裂強度の規格値を、コアの割断面のはく離の有無によって検討した。その結果、割断面にはく離が確認されたコアの殆どが、TSR 0.8 未満かつ残留圧裂強度 0.7MPa 未満であった。本研究では、TSR 0.8 未満かつ残留圧裂強度 0.7MPa 未満を危険エリアとして設定した。なお危険エリアは、限られたサンプルに基づく暫定的なものであるため、より多くのサンプルによりその妥当性を検証する必要がある。
- (4) 厚さ 50mm 以下のコアでは、厚さが TSR および残留圧裂強度に及ぼす影響は明確に確認されなかった。この要因として、圧裂強度の算出で厚さの影響が考慮されていることも可能性として考えられる。

参考文献

- 1) (社) 土木学会：舗装工学，pp.287，1995。
- 2) 国土交通省航空局・国土交通省国土技術政策総合研究所監修，(一財) 港湾空港総合技術センター発行：空港舗装補修要領及び設計例，2015。
- 3) 本松資朗，神谷恵三，松本大二郎，山田優：既設基層混合物のはく離抵抗性の評価方法に関する研究，土木学会舗装工学論文集，Vol.9，pp.73-79，2004。

- 4) 東滋夫, 篠塚政則, 坂本健次, 金井利浩: アスファルト混合物のはく離抵抗性評価方法に関する研究, 道路建設, No.672, pp.32-38, 2004.
- 5) Asphalt Institute: Superpave Mix Design: Superpave Series No. 2 (SP-2), pp.61, 2001.
- 6) 河村直哉, 森川嘉之, 伊豆太: 既設アスファルト混合物のはく離抵抗性評価方法の検討, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.70, I_131-I_138, 2014.
- 7) 国土交通省航空局監修, (一財) 港湾空港総合技術センター発行: 空港土木工事共通仕様書, 2015.
- 8) (社) 日本道路協会: 舗装調査・試験法便覧, 第3分冊, 2007.
- 9) 鎌田修, 山田優: アスファルト混合物のはく離抵抗性の評価と改善に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.760, pp. 63-74, 2004.
- 10) Maupin G. W.: Assessment of Stripped Asphalt Pavement, Transportation Research Record, No.1228, pp.17-21, 1989.

STRIPPING RESISTANT TEST METHOD FOR EVALUATING STRIPPED ASPHALT MIXTURE EXISTING IN AIRPORT PAVEMENT

Naoya KAWAMURA, Futoshi IZU and Yukitomo TSUBOKAWA

This paper investigates applicability of a stripping resistant test method (modified Lottman test) as the method to evaluate stripped asphalt mixture existing in airport pavement. In order to validate the applicability, stripping resistance of asphalt mixtures that are various extents of stripping is evaluated by the method. The authors confirm that an index of stripping resistance called tensile strength ratio decreases due to stripping and therefore, the index can be one to evaluate stripped asphalt mixture. Moreover, the authors suggest thresholds for detecting progressive stripping based on the evaluation of cores taken from both airport pavements and laboratory fabricated specimens.