独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

Vol.48 No.4 December 2009

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION, PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

港湾空港技術研究所報告(REPORT OF PARI)

第 48 巻 第 4 号 (Vol. 48, No. 4), 2009年12月 (December 2009)

目 次(CONTENTS)

杭の軸直角方向抵抗性能を推定するための Chang のモデルに用いる地盤反力係数の新たな推定方法の提案菊池喜昭…… 3 (Horizontal Subgrade Reaction Model for Estimation of Lateral Resistance of Pile ······ Yoshiaki KIKUCHI) 断面修復を施したコンクリート床版の鉄筋腐食性状に関する検討 (Corrosion Behavior of Steel Bars in Reinforced Concrete Slabs Repaired by Partial Patching Ema KATO, Yoshikazu AKIRA, Mitsuyasu IWANAMI, Hiroshi YOKOTA) 水中音響レンズを用いた超音波式三次元映像取得装置の開発 ………松本さゆり・片倉景義・吉住夏輝…… 53 (Development of Underwater Three-Dimensional Imaging SONAR System with Acoustic Lens Sayuri MATSUMOTO, Kageyoshi KATAKURA, Natsuki YOSHIZUMI) 空港アスファルト舗装剥離の非破壊探査方法の提案 ………………………………………………………前川亮太・蘇凱・水上純一・坪川将丈…… 71 (Proposals of non-destructive methods to detect stripping damages in airport asphalt concrete layers Ryota MAEKAWA, Kai SU, Junichi MIZUKAMI, Yukitomo TSUBOKAWA) 水中鋼構造物の非接触式肉厚測定器の開発吉住夏輝・松本さゆり・片倉景義…… 89 (Development of Noncontact Thickness Gauging Equipment for Underwater Steel Structure Natsuki YOSHIZUMI, Sayuri MATSUMOTO, Kageyoshi KATAKURA) 流出油回収装置への蒸気エゼクタの応用 ·······藤田勇・吉江宗生・竹崎健二……109 (Steam-Driven Ejector Applied to Spilled Oil Recovery Isamu FUJITA, Muneo YOSHIE, Kenji TAKEZAKI)

空港アスファルト舗装剥離の非破壊探査方法の提案

前川 亮太*・蘇 凱**・水上 純一***・坪川 将丈****

要 旨

空港舗装の損傷の一形態である層間剥離現象を対象に、その発生の有無を効率的かつ客観的に探 査できる手法を構築した.

空港において層間剥離を探査する際,従来は打音調査法によって実施されてきた.この手法は, ハンマーで路面を叩いた時の反響音から剥離の有無を判別するものであるが,多くの人手と時間を 要するとともに,探査結果が調査者の主観に依存するという課題があった.

そこで,層間剥離の有無が路面温度に影響し得ることに着目し,赤外線を利用した非破壊探査手 法の構築を試みた.同時に,一般に舗装内の空洞探査に活用されている電磁波による手法について も,適用性を検証した.

現地空港での試行の結果, 概ね 6cm 以内の浅い位置の剥離に関しては, 赤外線による探査が, 打 音と同程度の高い探査精度を有することが確認できた. 一方, 電磁波による探査は深い位置の層間 剥離の検知に有効であることが確認できた. さらに, 赤外線探査の実施可能日について熱収支解析 により検討した. その結果, 比較的高緯度の空港においても, 晴天であれば剥離発生箇所と健全箇 所との間に探査可能な路面温度差が生じることが確認できた.

キーワード:アスファルト舗装,層間剥離,赤外線,電磁波

^{*} 空港研究センター主任研究官

^{**} Shanghai Metropolitan Expressway Investment and Development Co., Ltd. (元空港研究センター特別研究員)

^{***} 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長

^{****} 国土交通省港湾局技術企画課技術監理室

⁽元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主任研究官

^{〒239-0826} 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所

電話:046-844-5641 Fax:046-844-0255 e-mail:maekawa-r28a@pari.go.jp

Proposals of non-destructive methods to detect stripping damages in airport asphalt concrete layers

Ryota MAEKAWA* Kai SU ** Junichi MIZUKAMI *** Yukitomo TSUBOKAWA ****

Synopsis

An efficient and objective method of detecting the occurrence of layer de-bonding has been developed.

Normally "Hammer inspection method" is used to detect layer de-bonding in airports. In this method the surface of the runway is tapped with a hammer, and the occurrence of de-bonding is judged from the reflected sound. However this method requires much time and effort, and the inspection results are subjective and depend on the person doing the inspection.

Therefore the authors tried to develop a nondestructive inspection method using infrared light, based on the effect of layer de-bonding on the temperature of the pavement surface. At the same time the authors verified the validity of the ground penetrating radar method using electromagnetic waves that is commonly used for inspecting for cavities in pavements.

As a result of trials on site at an airport, it was confirmed that inspection using infrared light has the same high accuracy as the Hammer method for de-bonding in shallow locations within about 10cm of the surface. It was also confirmed that inspection by the ground penetrating radar (GPR) method is effective for detecting layer de-bonding in deep locations.

Based on these results, a rational method of inspection for layer de-bonding was developed and proposed using the characteristics of both infrared thermography and GPR.

Key Words: Asphalt Pavement, Layer De-bonding, Infrared image, Ground Penetrating Radar

^{*} Senior Researcher, Airport Research Centre

^{**} Shanghai Metropolitan Expressway Investment and Development Co., Ltd.

⁽Formerly Special Researcher, Airport Research Centre)

^{***} National Institute for Land and Infrastructure Management

^{****} Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Ports and Harbours Bureau

⁽Formerly National Institute for Land and Infrastructure Management)

³⁻¹⁻¹ Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5641 Fax : +81-46-844-2055 e-mail:maekawa-r28a@pari.go.jp

要	旨	
1.	背景と目的 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
2.	探査技術の原理 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
	2.1 赤外線探査 •••••••••••••••• 75	
	2.2 電磁波探査	
3.	実験結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
	3.1 予備実験 ••••••••••••••••••••••••••••••••••••	
	3.2 現地空港での実験 ····································	
4.	解析による赤外線探査の適用性検証 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
4	 4.1 熱伝導解析による剥離深度の推定 ······81 	
2	1.2 熱収支解析による赤外線探査実施可能条件の検証 83	
5.	まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・ 86	
謝	辞 •••••••	
参	考文献 ••••••••••••••••••••••••••••••••••••	

1. 背景と目的

近年,滑走路や誘導路のアスファルト舗装において, 層間剥離現象が散見されている.層間剥離現象が進行す ると舗装表面が隆起して剥がれるというブリスタリング 現象に至り,航空機の走行に重大な支障を来すおそれが あることから(写真-1),早期の発見及び対処が重要であ る.層間剥離の探査にあたっては従来,路面をハンマー で叩いた際の反射音を基に層間剥離の有無を推定する打 音探査法が用いられてきた(写真-2).しかし打音探査法 には一定の技術を持った測定者が多数必要であると同時 に,探査結果が測定者の主観に強く依存することが空港 管理上の支障となっている.

そこで本研究では,打音探査における前述の課題を克 服するため,赤外線技術および電磁波技術に着目し,新 たな層間剥離探査手法の構築を試みた.

赤外線技術はトンネル背後の空洞検知やコンクリート 構造物の異常部の検知など,主にコンクリートを対象と した構造物の健全性評価について実績があるが,アスフ ァルトコンクリートに対しては実績がない.一方で電磁 波技術は,アスファルト舗装の路面下数十cm以深の路 盤・路床における空洞調査に対しては活用されているが, 路面下10cm前後のアスファルト混合物内の層間剥離に 対しては実績がない.赤外線技術および電磁波技術を応 用して層間剥離の検知が可能となれば,探査機を車両に 搭載することにより走行しながら効率的な探査実施が期 待できることから,当該技術を対象にした.

なお本研究を進めるにあたり、国土技術政策総合研究 所と共同研究を行い、一連の探査手法の確立を試みた.



写真-1 ブリスタリング現象



写真-2 従来法(打音法)による剥離探査

2. 探査技術の原理

2.1 赤外線探査

赤外線技術を用いた剥離探査の原理は、物体の表面から放射される赤外線の強度を赤外線センサで計測し、その結果を温度分布に換算して画像化するものである.ア スファルト舗装に適用を図る場合、図-1に示すメカニズムにより、層間剥離の検知が可能になることが予想される.剥離を起こしている舗装は昼間、太陽光放射と舗装体の熱伝導により表面から内部が徐々に暖められ、層間に剥離(空気層)があると、断熱効果により表面付近の温度が周囲の健全部より高くなる.一方、夜間は、放射冷却により昼間と逆方向の熱移動が起こる.このとき、再び空気層が持つ断熱効果により、早く熱が奪われ、周囲より低温となる.空港舗装の調査は、航空機が飛ばない夜間に実施されるのが常なので、本研究では後者のメカニズムによる剥離の検知を試みた.



(測定時)
図−1 赤外線による剥離探査原理イメージ

なお、検知を試みる層間剥離として、実際の損傷現象 と既往の室内試験による研究成果をもとに、ブリスタリ ング現象による層間剥離、すなわちアスファルト混合物 層間の水分が舗装温度の上昇時に蒸気化して層間付着力 以上の蒸気圧が発生し上部のアスファルト混合物層を持 ち上げることで層間にまとまった空気層が介在する剥離 を想定した.大きさとしては舗装表面から数cm~数+cm の深度に存在し直径数+cm程度であるものを対象とした.

静止画による赤外線探査法で滑走路を撮影する場合に は、矩形状の範囲をカメラで少し重なりができるように 撮影と移動を繰り返しながら、いわゆる尺取虫のように 探査する必要が予想された(図-2).この方法では延長 3000m×幅60mの滑走路を対象と仮定すると、全区域の撮 影に要する時間は約200時間と試算され、探査にかかる作 業時間とコストが大きな障害となった.また画像データ の整理においても画像の歪み補正と接合のための画像処 理が必要で、熱画像の不連続性の発生が懸念された.







図-2 静止画の撮影とその補正方法

そこで、本研究では次に述べる連続式赤外線撮影を採 用した.この方法では、表-1に示す赤外線カメラを調査 車に搭載する.1ラインの幅(今回の測定では幅4.0m)で 1~5cm間隔による熱画像の連続スキャン方式を採用し、 走行しながら連続的に赤外線画像を撮影する.これによ り以下の利点が期待できた.

- 1) 撮影時の走行速度が最大54km/h(スキャン間隔:5cm ピッチの場合)で,調査効率が飛躍的に向上する.
- 2)数cm刻みの撮影を繰り返すことで、画像の歪み補正の 必要が生じず、接合時に画像データに関する不連続 性がほとんど生じないので、接合の自動処理が容易 となる。
- 3)可視画像カメラを合わせて調査車に搭載し、同様の連続式撮影を実施することで、路面状態の観察画像と 赤外線画像の対比を行うことができる。

以上の利点から本研究では連続式赤外線撮影の方法を 用いた.使用した赤外線カメラ,可視画像カメラの仕様 を表-1に示す.

	項目	仕 様
	温度測定範囲	-50℃~2000℃(レンジ切替による)
赤外線	最小検知温度差	0. 08℃
カメラ	視野角	50° (約4m)
	画像データ画素数	256ドット/ライン
	撮影方式	単板3CCDライン方式
可視	視野角	50° (約4m)
画像カメラ	画像データ階調	RGB各256階調
N / /	画像データ画素数	標準260ドット/ライン
	計測分解能	最小10mmピッチ
	計測ピッチ	10mm (計測速度:0.5 ~ 10.8km/h)
共通	(縦断方向)	20mm (計測速度:1.0 ~ 21.6km/h)
仕様		25mm(計測速度:1.25~ 27.0km/h)
		50mm (計測速度:2.5 ~ 54.0km/h)
	連続計測距離	10km以上(記録メディアによる)

表-1 赤外線カメラおよび可視画像カメラの仕様

2.2 電磁波探査

電磁波は電場および磁場の振動伝播を利用した計測法 である.探査対象の物質内での電磁波速度は比誘電率に 依存する(比誘電率が大きくなると電磁波の伝播速度が 小さくなる)ことを利用して,アスファルトコンクリート 内の剥離(空気の存在)の有無を検知しようと試みた.

電磁波での測定時の際は,電磁波パルスを地表に置か れた送信アンテナから地中に放射し,受信アンテナで受 信する.送信アンテナから放射された電磁波は地中を伝 搬し,境界面などによって反射を受ける.境界をなす物 質の比誘電率の違いが大きいほど反射波強度は大きい. 反射係数と比誘電率の関係は式(1)のとおりである.

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \tag{1}$$

ここで、Rは反射係数(-1 $\leq R \leq 1$)、 ε_1 は第1層の比誘 電率、 ε_2 は第2層の比誘電率である.

式(1)から,異なる比誘電率の比率が反射波の大きさと 極性を決めることがわかる.例えば,アスファルト混合 物層の下に剥離がある場合,アスファルト混合物の比誘 電率は概ね5以下であり,空気の比誘電率は概ね1以下で あるため反射波の極性は反転せず,反射強度は空洞の無 い同程度の深度領域と比べると大きくなる.電磁波レー ダによる探査原理を図-3に示す.



図-3 電磁波レーダによる探査原理

3. 実験結果

3.1 予備実験

前述の想定どおりに赤外線による剥離探査が可能か否 かを把握するため,屋外試験フィールドにおいて意図的 に剥離箇所を設けた舗装を対象に剥離探査を試みた.

既設のアスファルト舗装を切削することにより直径 40cmの円形のくぼみを4箇所設け(写真-3),その上に板 状に締固められたアスファルト混合物を載せ(写真-4), その周囲にアスファルト混合物を敷きならし転圧した.4 箇所の剥離のうちA,BおよびCと設定した剥離は厚さを それぞれ5mm,10mm,20mmとし,剥離部は空隙とした. Dと設定した剥離は厚さを15mmとしつつ,水を注入する ことによって滞水状態とし,水の有無が赤外線による剥 離探査に与える影響の把握を試みた.

予備実験は6月に東京都内で実施した.昼間(14:00, 気温30°C),夕方(19:15,気温26°C)および夜間(23:30, 気温22°C)における赤外線による探査結果を図-4に示す.

予備実験の結果,当初の予想どおり昼間は剥離箇所の 路面温度が周辺健全箇所のそれよりも高く,夜間は剥離 箇所の路面温度が低くなることが把握できた.また,健 全箇所に対する剥離箇所の路面温度は,昼間は1.5°C程度 高く,夜間は0.5°C程度低くなり,健全箇所と剥離箇所の 路面温度差は昼間のほうが大きいものの,夜間であって も赤外線により検知可能な温度差が生じることが確認で きた.

滞水箇所(図中"D")は昼夜を問わず剥離箇所と周辺健 全箇所との路面温度差が小さかった.これは,水の熱伝 導性が空気と比べて大きいことから,耐水箇所剥離部が 断熱効果をあまり有せず,周辺健全部と同様に路面と深 部との間で熱の移動があったためと考えられる.



写真-3 予備実験(過程1)



写真-4 予備実験(過程2)



写真-5 予備実験(過程3)



3.2 現地空港での実験

(1)実験条件

赤外線および電磁波を用い,九州地方における実際の 空港滑走路での剥離探査実験を8月の晴天日に実施した.

赤外線カメラを車両上部に積載し、走行しながら連続 的に路面温度を撮影した.走行1回あたりの測定幅は5m とし、速度約10km/hの走行をしながら1cm²ごとに0.08°C の精度で温度を測定した.測定車両の模式図を図-5に、 外観を写真-6および写真-7に示す.この測定方法により、 延長約3,000m幅員60mの滑走路全体を2晩の夜間作業(夜 間23時~翌朝5時で2晩)で測定できた.従来の打音調査 法は、測定者数にもよるが同等の滑走路の調査に概ね一 週間程度を要することから、赤外線の利用による作業効 率の向上が確認できた.



図-5 測定車両模式図



写真-6 赤外線および電磁波測定車両(前面)



写真-7 赤外線および電磁波測定車両(背面)

表-2 測定車両に登載した機器

	項目	住 様
	温度測定範囲	-50℃~2000℃(レンジ切り替えによる)
	最小検知温度差	0.08°C
赤	測定精度	±0.5%(レンジフルスケール)
外	測定波長	8∼13µ m
禄 力	視野角	50℃(約5.5m)
×	画像データ画素数	256ドット/ライン
ラ	使用温度	$0^{\circ}\mathrm{C} \sim 40^{\circ}\mathrm{C}$
	外形寸法	192 (W) × 144 (H) × 229 (D) mm
	重量	3. 4kg
	アンテナ周波数	1.0GHz(中心周波数)
	パルス反復周波数	100KHz
電	サンプリング周波数	約150MHz~100GHz
磁	トリガー方式	測距輪式エンコーダ
波 レ	探査速度	0.5~100km/h
1	探查深度	約1m (測定物質によって異なる)
ダ	電源	バッテリー
	データライン	SMC型同軸ケーブル
	解析ソフト	"Image Anelyzer",利得調整他
	計測分解能	最小1 cmピッチ
	撮影速度	計測ピッチ1cm:0.5~10.8km/h
		計測ピッチ2cm:1.0~21.6km/h
共		計測ピッチ2.5cm:1.25~27km/h
通		計測ピッチ 5 cm : 2.5~54.0km/h
仕	記録メディア	コンパクトフラッシュおよびHDD
禄	連続計測距離	10km以上(記録メディアによる)
	同調撮影データ	 ・赤外線画像
		 路面可視画像
		・電磁波探査記録

(2) 剥離が推定される箇所の路面温度分布

実験によって得られた熱画像を幅4.0m×長さ10mの範囲で整理した結果の例を図-6に示す.滑走路の起点から距離940~950m付近で得られた熱画像を図の上部に示した.またその下には,熱画像と同時に取得した可視画像も合わせて示した.可視画像では,過去の打音調査で層間剥離が発生していると推定された箇所が白いチョークで囲われている.当該の範囲においてチョークで囲われた箇所は2箇所ある(図中実線矢印).





一方,熱画像には \$ 20~40cm程度の斑点状の低温部が いくつか認められる(図中黒矢印).これらは,打音調査 で層間剥離と推定された箇所あるいはその近傍に生じて いる.新たに発生したか,あるいは過去の打音調査で認 識できなかったのかは不明であるが,これらの低温部は 層間剥離が発生している可能性が高いと考えられた.



図-8 路面温度分布(図-5中の側線(2))



図-9 測定結果(滑走路その2)





図-7および図-8は、図-6の熱画像で示した直線(1)と(2) に沿って表面温度分布を求めたものである.赤外線カメ ラの最小検知温度差が0.08℃(表-2参照)でありまた舗 装の熱特性が完全均質ではないため若干のばらつきが認 められるが直線(1)に沿った表面温度はほぼ27℃前後で 一定である.それに対し、直線(2)に沿った表面温度分布 では,層間剥離発生が疑われる部分において,他の箇所 に比べて最大で約0.6~0.7℃の温度低下が認められた.



図-9は滑走路端から距離2172~2182m付近で得られた 熱画像と可視画像を示したものである.可視画像を見る と,過去の打音調査で3箇所の層間剥離がこの範囲に推定 されたことがわかる.層間剥離の大きさは直径30~40cm 程度である.3箇所のうち,2175mおよび2177m付近のも のについては,熱画像で斑点状の低温部として認識でき たが,2180m付近のものについては表面温度の異常を認 識することが難しかった.

このことは表面温度分布について整理した図-10およ び図-11を見ると明確にわかる.ここで図-10および図-11 は図-9の熱画像上の直線(3)と(4)に沿った表面温度分布 を示したものである. 直線(3)の表面温度分布では、打音 調査でマーキングされた部分に着目すると、他の箇所に 比べて最大で約0.5~0.6℃の温度低下が認められ,層間剥 離の発生が継続していると考えられる.一方,直線(4)の 表面温度分布では、マーキングされた部分について、温 度低下は認められなかった.この理由は不明確であるが, いくつかのマーキング箇所について、小径の孔を削孔し て層間剥離部の空気を抜きアスファルト混合物層を密着 させた形跡を確認しており、その部分では図-9と同様に 赤外線画像で明瞭な温度差が生じなかった(たとえば図 -6において青矢印で示した1個所).同様に当該個所では 確認を行わなかったが、同じような補修が施されていた 可能性がある.

(3) 打音調査およびコア抜き結果との照合 次に,赤外線探査と電磁波探査を同時に実施しつつ,探 査結果を打音調査およびコア抜きの結果と照合した(打 音の一週間後に赤外線,電磁波およびコア抜きを実施).



図-12 赤外線および電磁波による探査結果



写真-8 コア抜き結果 (図-11の地点)

探査結果の例を図-12に示す. 図-12の赤外線による結 果のうち,丸印に示す箇所は周囲に対して相対的に0.2 ℃ 程度路面温度が低いと測定され,剥離があるものと推定 された. 当該箇所をコア抜きした結果は写真-8のとおり であり,路面から6cmの位置に乾いた状態の層間剥離が 確認できた. このとき,電磁波では剥離を検知すること ができなかった.

電磁波により剥離が検知できた例を図-13に示す. 路面 から約20cm下の深い位置に剥離が存在していた. この剥 離は,赤外線および打音では検知することができなかっ た.

ー連の実験の結果を図-14に示す.剥離が乾いた状態で あれば路面から概ね6cmまでの浅い位置について,打音 と赤外線が同等の精度を有することが確認できた.電磁 波は深い位置の剥離探査に優れるものの,浅い位置の探 査精度は赤外線および打音と比べて劣ることが確認でき た.





写真-9 コア抜き結果(図-12の地点)

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
赤外線	0	0	×	×	×	×
打音	0	×	0	×	×	×
電磁波	×	×	×	0	0	×
コアの 様子	↓ 5.9cm 剥離 ↓ 5.8cm 剥離	↓ 5.1cm 剥離 ↓ 4.5cm 剥離	↓4.1cm ↓4.7cm 剥雜	↓ 8.0cm 0.7cm 剥離 (滞水)	↓ 6.0cm ↓ 5.4cm 剥難	↓ 5.6cm ↓ 6.5cm 剥離なし

図-14 赤外線・打音・電磁波による探査結果比較

実際の空港舗装において舗装表面が剥がれるという致 命的現象を防ぐためには、浅い位置の探査がより重要で あることから、今回試行した探査手法(電磁波と赤外線) については、浅い位置の剥離を高い精度で検知できる赤 外線が有効であると考えられる.赤外線による探査は、 打音探査と比べて客観的かつ極めて効率的であることか ら、実際の空港では定期的に赤外線を用いて剥離探査を 行いつつ、剥離が推定される箇所は打音調査で再度入念 に探査して、補修工事を行うか否かを判断することが現 実的であると考えられる.

4. 解析による赤外線探査の適用性検証

4.1 熱伝導解析による剥離深度の推定

前章までに述べたように,滑走路を対象に赤外線撮影 を行い,舗装表面の熱画像を取得した結果,表面温度で 最大で約0.2~0.7℃低下している斑点状の箇所が熱画像 に認められた.そしてこれらは打音調査で層間剥離と推 定された箇所あるいはその近傍に認められ,層間剥離の 可能性が高い箇所と考えられた.この調査結果に対し, 層間剥離を考慮した熱伝導解析結果を比較して剥離箇所 の深度の推定を行った.

舗装構造の熱伝導解析についてはいくつかの方法が提 案されている.ここでは赤外線撮影を行った現場空港の 健全な構造を有する舗装の内部温度をまず再現できるよ うに、2次元軸対称有限要素法に基づく熱伝導解析のパラ メーターをチューニングし、続いてそのパラメーターを 用いて層間剥離を有する舗装構造の熱伝導解析を行い、 層間剥離の疑いが強い箇所の実測結果との比較を行った. なお、層間剥離の疑いがあまりないのに低温部が認めら れた事例については、モデル化の複雑さと入力定数設定 の難しさから熱伝導解析を実施しなかった.

熱伝導支配方程式を式(2)に示す.説明のしやすさのため1次元で表している.

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{K}{c \cdot \rho} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{q}{\rho c}$$
(2)

ここに, θ:舗装温度[K] t:時間[s] K:熱伝導率[W/m・K] c:比熱容量[J/kg・K] ρ:密度[kg/m³] q:日射量[W/m²] である. 熱伝導解析で考慮する気象条件は、大気温、日射量、 風速の3種類とした.アスファルト舗装の内部温度の推定 に関する既往の研究から、アスファルト舗装表面と空気 層の熱量の授受は風速の影響を非線形に受ける.そこで 次式に示すように空気層の熱伝導率Kと風速wの関係を 表現した.

$$K = A \times w^2 + B \times w + K_0 \tag{3}$$

ここに,

- A,B:定数
- w:風速[m/s]
- K₀:風速が0のときの熱伝導率[W/m·K]



図-15 解析断面の模式図

図-15に解析モデルを模式的に示す.軸対象とし空港ア スファルト舗装表面の直上に仮想的に厚さ1mの空気層 を設けた.この大気層の上端に大気温の時刻歴変化,舗 装表面に日射量の時刻歴変化を与えた.また境界条件と して,解析断面の左右および下端を断熱境界としている. この解析モデルを用いて,層間剥離のない健全な舗装体 の熱伝導解析をまず行い,現地空港の舗装体内部温度の 計測結果と解析結果を比較し,解析精度の検証を行うと ともに,入力パラメーターの決定を行った.

名称	層厚	K	с	ρ
	(m)	(W/m∙	(J/kg•K)	(kg/m^3)
		K)		
アスファルト	0.213	1.3	920	2300
安定処理				
既設アスコン	0.130	1.3	920	2300
オーバーレイ	0.210	1.2	020	2200
アスコン	0.310	1.5	920	2300
空気層	1.000	5.0	c*p:277	7,150 B=8.0

表-3 解析モデルの各層厚と入力定数

解析モデルの各層の層厚と解析に用いた入力定数の値 を表-3に示す. なお,仮想的な空気層の入力定数はパラ メトリックに変化させ,現地空港で測定された夏季2週間 の舗装温度データと解析結果の比較を行い,解析精度の 検証を行った.

現地空港では舗装表面から深度-2cm, -10cm, -20cmの 位置に熱電対を埋設して舗装温度を測定している.解析 結果の例を図-16に示す.解析誤差(=FEM-計測)は2 週間(=384時間)にわたってスパイク状に変動している ものの,仮想の空気層に表-3に示した入力定数を用いる ことによって,測定値に対して約±5℃の範囲内で再現で きることが分かった.



図-16 健全な舗装構造の内部温度に対する解析誤差

表-3に示した現地空港の舗装モデルと入力定数を用い て層間剥離した舗装構造を想定した熱伝導解析を行った. 解析では現地計測との比較を行うので,赤外線撮影を実施したときと同じ気象条件を用いた.層間剥離の空隙厚 さは1mmと仮定し,空隙の深度はオーバーレイアスコン のうち,施工境界(表層と基層の境界)である深度-5cm, 剥離の空隙幅は10,30,50cmと設定した.解析メッシュは 幅4mとして,その中央に空隙を再現した.

図-17に解析結果を示す.解析で得られた舗装表面の温度と解析モデル境界からの距離の関係で表している.解析結果をみると、剥離の直上にある中央部は他の位置と比べて表面温度が低くなっており、下に凸となるような温度分布を示している.この傾向は空隙幅が大きいほど顕著である.また同図には、赤外線撮影で得られた舗装表面の温度(図-8参照)も示した.現地の計測結果と解析結果を比較すると、解析結果と現地計測結果は類似しており、斑点状に温度が低下している箇所は、内部に層間剥離が存在している可能性が高い.また空隙幅は10~30cmと推定される.



4.2 熱収支解析による赤外線探査実施可能条件の検証

前章において,空港アスファルト舗装の層間剥離は, 熱赤外線画像による舗装表面温度分布からある程度検出 可能であることを明らかにした.しかしながら,層間剥 離に起因する舗装表面温度差は,アスファルト混合物内 の熱伝導特性の違いによるものであることから,この温 度差の大きさには気象条件が大きく影響するものと考え られる.そこで,熱伝導,熱伝達,放射の影響を考慮し た有限要素法による熱収支解析を実施し,層間剥離に起 因する舗装表面温度差と気象条件との関係を検討した. さらに,那覇空港と新潟空港における経験から,熱赤外 線画像より低温部を容易に判別するためには,目安とし て少なくとも 0.2°C 以上の温度差が生じていることが望 ましいと考えられたことから,この目安値以上の舗装温 度差が発生すると考えられる調査可能日数について検討 した.

(1) 解析手法

図-18 に熱収支解析モデルを示す. 舗装内部の熱の流 れを(4)式による熱伝導方程式で, 顕熱輸送量を(5)式によ るアスファルト混合物と大気との間の熱伝達で, 舗装表 面への日射・舗装表面からの反射日射・大気からの赤外 放射・舗装表面からの赤外放射の熱収支による正味放射 量を(6)式でそれぞれ考慮した. なお, 地表面に水分が無 いと仮定し, 潜熱は考慮していない.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$
(4)

$$Q = h(T_s - T_a) \tag{5}$$

$$E = S\alpha + \varepsilon\sigma(T_a^4 - T_s^4) \tag{6}$$

- T : 舗装温度[K]
- t :時間[s]
- λ : 熱伝導率[W/m/K]
- c :比熱[kJ/kg/K]
- ρ :密度[kg/m³]
- x,z:空間座標[m]
- Q:顕熱輸送量 [W/m²]
- h: 熱伝達率[W/m²/K]
- T_s : 舗装表面温度[K]
- *T_a*: 気温[K]
- E:舗装面が吸収する正味放射量[W/m²]
- S:日射量[W/m²]
- α :日射吸収率
- *ε*:輻射率
- σ:ステファン・ボルツマン定数

 $(=5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4).$

解析モデルは2次元モデルとした.各層の厚さならび に剥離の直径は実際の空港舗装におけるものを参考とし た.層間剥離の厚さについては不明であることから,採 取したコアの層間の状況からここでは1mmと設定した. また,図-18 に示す舗装構造を設定するにあたり,上層 路盤材料種類や路盤厚の違いが層間剥離に起因する舗装 表面温度差に及ぼす影響が小さいことを確認している. 舗装表面温度に大きく影響すると考えられるアスファル ト混合物の熱特性値については,表-4に示すように,文 献調査によるもののほか,試験舗装から切り出した密粒 アスファルト混合物(最大骨材粒径 20mm,アスファル ト量 5.6%,空隙率 3.2%)を用いて室内試験により測定 した値を使用した.

熱収支解析では、非定常有限要素解析により舗装表面 温度の経時的変化を算出するため、以下の理由から前日 の午前8時を計算開始時刻とし、この時刻における気温 ならびにアスファルト混合物平均温度を初期値として設 定した.

項目		備考	
	密度	2,361 (kg/m ³)	室内試験による実測値
	熱伝導率	1.11 (W/m/K)	室内試験による実測値(JISA 1412-2, 40°C)
アフファルト	比熱	0.89 (kJ/kg/K)	室内試験による実測値
アスクテルト	輻射率	0.92	室内試験による実測値(JIS R 3106, 3107)
化口初	日射吸収率熱伝達率	1.0	
		7.8+4.5v (W/m ² /K)	日本建築学会(1987)より
		v: 風速 (m/s)	
+ 1 \ 1	密度	2,400 (kg/m ³)	セメント協会(1995)より
セノント	熱伝導率	1.20 (W/m/K)	ロオ機械学会(1094)とり
女定处理树	比熱	0.90 (kJ/kg/K)	日本版版于云(1980)より

表-4 熱収支解析に使用したパラメータ



図-18 熱収支解析モデル図





①今回の検討で着目する翌日深夜の時間帯まである程度の計算助走期間が必要である。

②昼間の日射により上昇した舗装温度が、日没後に低下する状態を考慮する必要がある。

③熱電対を埋設したアスファルト試験舗装の温度測定結果から、アスファルト混合物層内部の深さ別温度が最も均一となる時間帯である。

また,アスファルト試験舗装の温度測定結果から,この時刻における気温とアスファルト混合物平均温度の関係を検証し,初期値として設定するアスファルト混合物 平均温度を,この時刻の気温+6℃と設定した.

(2) 解析手法の妥当性の検証

前章における那覇空港での適用性調査時に測定した気 象条件(気温,日射量,風速)を使用し,調査時に実測 した舗装表面温度と熱収支解析により求めた舗装表面温 度を図-19に示す.表面温度の実測値と解析値との誤差 は最大1°C程度であり,剥離部と健全部との間の温度差 については実測値と解析値がほぼ一致している.このこ とから,当該解析手法により,剥離部と健全部との間の 表面温度差を非常に精度良く推定できると考えられる.

(3) 剥離深さと気象条件が舗装表面温度差に及ぼす影響

国内6都市(札幌,仙台,新潟,東京,大阪,那覇) の気象条件を使用して,剥離部と健全部との間に生じる 表面温度差を熱収支解析により算出した.季節・天候条 件としては,**表-5**に示す4ケースについて,AMeDAS のデータを使用した.

まず,層間剥離の深さによる影響を検討した.熱収支 解析により求めた東京における剥離部と健全部との表面 温度差の経時変化を図-20に示す.層間剥離の深さは6cm ならびに 12cm に設定した.層間剥離の位置が深い場合 は,浅い場合に比べて表面温度差は小さくなり,適用性 調査の経験による目安値である 0.2°C 以上の温度差が発 生するのは,夏季晴天時の天候においてのみ,非常に短 時間に限られることがわかる.

対象都市	札幌,仙台,新潟,東京,大阪,那覇
禾笜	夏季:6~8月
子即	秋季:9~11月
	晴天:昼夜ともに「晴」もしくは「快晴」
工品	曇天:昼夜ともに「曇」「薄曇」「曇時々晴
入侠	/雨」「曇一時晴/雨」のいずれかで,日降水
	量が0mm
データ種類	気温,風速,日射量

表5	熱収支解析に使用	した気象条件データ
----	----------	-----------



(a) 層間剥離深さ 6cm





次に,調査に適した気象条件について検討した.図-20 をみると,剥離部と健全部との間の表面温度差は天候や 季節に大きく左右され,比較的大きな温度差が生じるの は晴天時であり,且つ秋季よりも夏季の方が温度差は大 きくなる傾向が確認できる.これは、曇天時よりも晴天 時、秋季よりも夏季の方が、日中に舗装表面温度が大き く上昇し、日没後に大きく低下することから、熱伝導特 性の違いによる剥離部と健全部との温度差が顕著に現れ ると考えられる.つまり、日射量が少ない曇天時のよう に昼夜の舗装温度差が小さい場合には、熱赤外線画像に よる剥離の検出は困難になると考えられる.



図-21 最大舗装温度差の重回帰分析結果

(4) 調査可能な気象条件の検討

前節で示したとおり,層間剥離に起因する舗装表面温 度差の大きさは気象条件に大きく左右されることから, 調査可能な気象条件を事前に推定できることが望ましい. そこで,国内6都市の気象条件を用いた熱収支解析結果 (剥離深さ8cmの場合)から,深夜の最大舗装表面温度 差を目的変数,一日の気温差,日中の積算日射量,一 日の平均風速を説明変数として重回帰分析を行った.重 回帰分析結果を図-20に,重回帰式を(7)式に示す.なお, それぞれの説明変数同士の相関は低いことを確認してい る.

$\Delta T_{nav} = 0.0134 \Delta T_{air} + 0.0294 Q$

$$-0.0174v + 0.123$$
 (7)

ここに,

 ΔT_{pav} :最大舗装表面温度差(絶対値)[°C] ΔT_{air} :一日の気温差(最高気温-最低気温)[°C] Q:日中の積算日射量[kW·h/m²] v:一日の平均風速[m/s]

この重回帰式により推定した各都市の最大舗装表面温 度差と、熱収支解析により得られた最大舗装表面温度差 の相関は非常に高いことから、この重回帰式により、一 日の気温差、日射量、風速を入力することにより、深夜 に生じうる最大舗装表面温度差を精度良く推定すること が可能であると考えられる.

さらに、実際に調査可能な日数について検討した.実際の空港での調査では、深夜に制限区域内に入場し、早朝には退場しなければならない.図-19と図-20に示すように、舗装表面温度差は早朝に近づくにつれて小さくなる傾向があることから、夜間から早朝まで効率的に調査を実施するためには、調査終了時点である早朝でも0.2°C以上の温度差が発生していることが望ましい.図-22は熱収支解析により算出した深夜に生じる最大舗装表面温度差と午前6時の舗装表面温度差を比較したものである. これによれば、深夜に発生する最大舗装表面温度差が0.25°C以上あれば、早朝6時の時点においても0.2°C以上の温度差が生じていることとなる.



図-22 早朝と最大の舗装温度差の関係



以上の検討を踏まえ, AMeDASの2006年1月から12 月までの毎日の気象データ(ただし雨天時のデータを含む)と(4)式を用い, 札幌, 東京, 大阪における調査可能 日数を検討した結果を図-23 に示す.これによれば、比較的高緯度の札幌においても、春から秋にかけて、熱赤外線画像を用いた層間剥離の検出が可能であることがわかる.

5. まとめ

今回,空港舗装の損傷の一形態である層間剥離現象を 対象に,その発生の有無を効率的かつ客観的に探査でき る手法の構築を試みた.当該研究によって得られた知見 は以下のとおりである.

- (1)赤外線の適用により、測定者の主観によらない測定結果の客観性を確保しつつ、従来の打音法と比べて探査 効率を著しく高い層間剥離探査手法を構築することができた。
- (2)路面以下概ね 6cm までの浅部の剥離について, 赤外線 探査と打音探査が同程度の精度を有することが確認で きた.
- (3)層間剥離の位置が浅い場合,舗装温度が日中に大きく 上昇し日没後に大きく低下する夏季や晴天時に,層間 剥離に起因する舗装表面温度差が大きくなる.
- (4) 一日の気温差,日中の積算日射量,一日の平均風速から,層間剥離に起因する舗装表面温度差を推定することが可能である.
- (5) 調査実施可能日を検討した結果,比較的高緯度の空 港においても,春から秋にかけて調査が可能である.

謝辞

本研究の実施にあたっては、横浜国立大学の早野公敏 先生に多大なる助言をいただいた.また、現地空港での 実験実施にあたっては、国土交通省九州地方整備局港湾 空港部の方に多大なるご協力をいただいた.ここに記し、 感謝の意を表します.

参考文献

魚本健人(2003):コンクリート構造物の検査・診断―非 破壊検査ガイドブックー,理工図書,237pp.

久保宏・八谷好高・長田雅人・平尾利文・浜昌志(2004): 最近の空港アスファルト舗装の損傷と改良工法について、土木学会舗装工学論文集、第9巻、pp.35-40. 財団法人土研センター(2005):土木コンクリート構造物 のはく落防止用赤外線サーモグラフィによる変状調 査マニュアル, pp.108.

- セメント協会(1995):重交通専門委員会報告書,(社)セ メント協会,239 p.
- 日本機械学会(1986): 伝熱工学資料改訂第4版, pp. 320-322.
- 日本建築学会(1987):建築設計資料集成 環境, pp. 97-134.
- 坪川将丈・水上純一(2007):熱赤外線による空港舗装の 層間剥離検出法に関する研究,土木学会舗装工学論 文集,第12巻,pp.17-23.
- 早野公敏・水上純一・鈴木哲雄(2007):層間剥離したア スファルト舗装の表面温度分布特性に関する実験的 検討,地盤工学ジャーナル, Vol.2, No.1.

港湾空港技行	将研究所報告 第48巻第4号
	2009.12
編集兼発行人	独立行政法人港湾空港技術研究所
発 行 所	 独立行政法人港湾空港技術研究所 横須賀市長瀬3丁目1番1号 TEL. 046(844)5040 URL. http://www.pari.go.jp/
印刷所	昭和情報プロセス株式会社

Copyright © (2009) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は,港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって,本報告 書の全部または一部の転載,複写は港湾空港技術研究所理事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。

CONTENTS

Horizontal Subgrade Reaction Model for Estimation of Lateral Resistance of Pile
Yoshiaki KIKUCHI ····· 3
Corrosion Behavior of Steel Bars in Reinforced Concrete Slabs Repaired by Partial Patching
Ema KATO, Yoshikazu AKIRA, Mitsuyasu IWANAMI, Hiroshi YOKOTA 23
Development of Underwater Three-Dimensional Imaging SONAR System with Acoustic Lens
53 Sayuri MATSUMOTO, Kageyoshi KATAKURA, Natsuki YOSHIZUMI
Proposals of non-destructive methods to detect stripping
damages in airport asphalt concrete layers
Ryota MAEKAWA, Kai SU, Junichi MIZUKAMI, Yukitomo TSUBOKAWA 71
Development of Noncontact Thickness Gauging Equipment for Underwater Steel Structure
89 Natsuki YOSHIZUMI, Sayuri MATSUMOTO, Kageyoshi KATAKURA
Steam-Driven Ejector Applied to Spilled Oil Recovery
······ Isamu FUJITA, Muneo YOSHIE, Kenji TAKEZAKI ·····109