

積雪寒冷地の空港舗装の劣化対策に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 24 年度～平 27 年度

担当チーム：寒地道路保全チーム

研究担当者：木村 孝司, 丸山 記美雄,
安倍 隆二, 上野 千草,
井谷 雅司

【要旨】

本研究では、積雪寒冷地における空港舗装の劣化診断技術および補修方法の開発を行うことを目的としている。本研究の成果では、北海道の空港で多く発生しているブリスタリング現象を診断する方法として電磁波レーダおよび真空透気試験を用いる方法を開発した。また、舗装の劣化度を評価する方法として FWD 試験による手法を提案した。さらに、補修に関する対策工法や配合設計手法を検討した内容を「ブリスタリング対策の施工の手引き」に反映させた。

キーワード：積雪寒冷地、空港舗装、劣化診断技術、補修、ブリスタリング

1. はじめに

北海道に民航機が利用できる空港は 13 空港あり、内訳は国管理空港が 4 空港、共用空港が 1 空港、特定地方管理空港が 2 空港、地方管理空港が 6 空港である。国管理空港は設置者および管理者が国土交通省であり、共用空港は設置者および管理者は防衛省である。また、特定地方管理空港は空港の設置者が国土交通省、管理は地方自治体、地方管理空港は、設置者および管理者は北海道である。

道内の空港は供用してから 10～40 年程度経過している（表-1）。そのため、必要に応じて補修は行われているが、舗装体の劣化が進行している状況にある。本研究では積雪寒冷地における空港舗装の劣化診断技術および補修方法の開発を行うことを目的に検討したものである。

2. 積雪寒冷地におけるブリスタリングの発生状況

2000 年 7 月に名古屋空港の滑走路で発生したブリスタリングの事例では、供用中に表層が剥がれ、補修のために一時滑走路が閉鎖された。これ以降道内の空港でもブリスタリングの発生が確認され、補修工事が行われている。

ブリスタリングとはアスファルト層間等に存在す

る水が日射による舗装体の温度上昇に伴い蒸発し、水蒸気圧により表層が持ち上げられることによって発生する舗装の変状である（図-1）。図-2 に飽和水蒸気圧と舗装体温度の関係を示す。舗装体温度が高

表-1 道内空港の供用年月および供用年数

空港名	滑走路名	供用年月	供用年数	備考	管理区分
新千歳空港	A滑走路	昭和63年7月	27年9ヶ月	滑走路延長3000m	国管理空港・共用空港
	B滑走路	平成8年4月	20年0ヶ月	滑走路延長3000m	
函館空港		平成11年3月	17年1ヶ月	滑走路延長3000m	国管理空港
	釧路空港	平成12年11月	15年5ヶ月	滑走路延長2500m	国管理空港
稚内空港		昭和63年10月	27年6ヶ月	滑走路延長2000m	国管理空港
		平成21年11月	6年5ヶ月	滑走路延長2200m	
札幌飛行場		平成16年3月	12年1ヶ月	滑走路延長1500m	共用空港
旭川空港		平成9年2月	19年2ヶ月	滑走路延長2500m	特定地方管理空港
帯広空港		昭和60年11月	30年7ヶ月	滑走路延長2500m	特定地方管理空港
中標津空港		平成9年3月	19年1ヶ月	滑走路延長2000m	地方管理空港
女満別空港		平成12年2月	16年2ヶ月	滑走路延長2500m	地方管理空港
紋別空港		平成11年11月	16年7ヶ月	滑走路延長2000m	地方管理空港
利尻空港		平成11年6月	16年10ヶ月	滑走路延長1800m	地方管理空港
礼文空港		昭和53年6月	37年10ヶ月	滑走路延長800m	地方管理空港
奥尻空港		平成18年3月	10年1ヶ月	滑走路延長1500m	地方管理空港

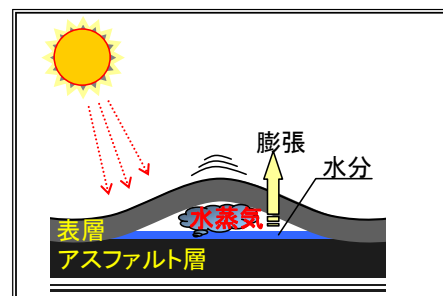


図-1 ブリスタリング現象

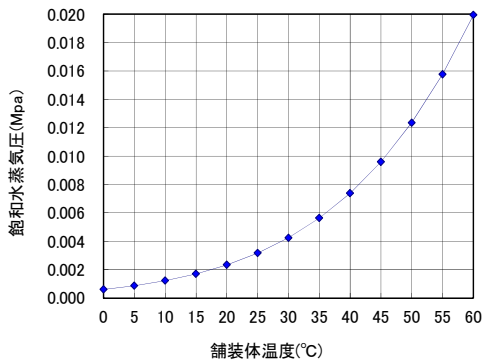


図-2 飽和水蒸気圧と舗装体温度の関係

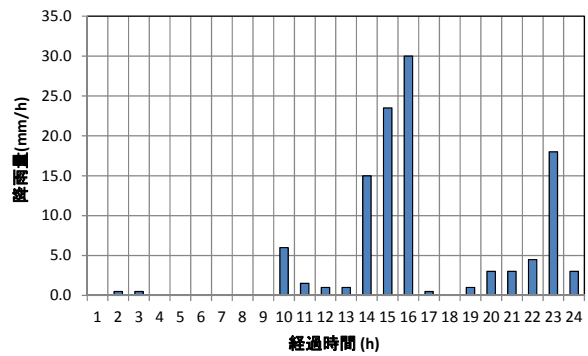


図-5 ブリスタリング発生前日(6月28日)の降雨量(B空港)

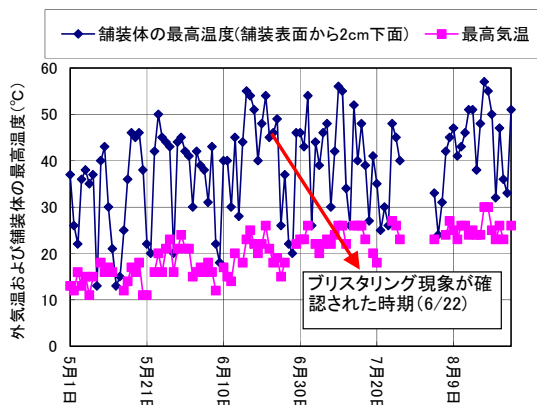


図-3 舗装体温度(A空港)



写真-1 施工継ぎ目の開いた状況

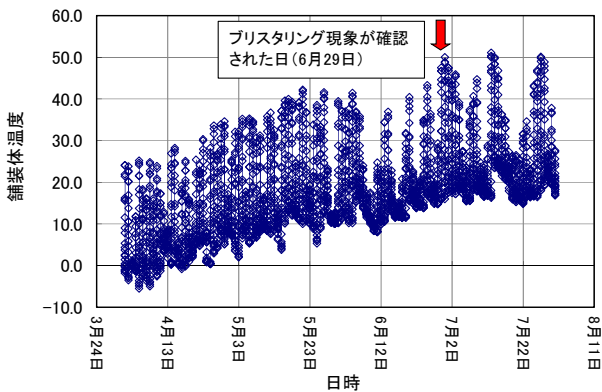


図-4 舗装体温度(B空港)

いほど飽和水蒸気圧が高く、外気温が高いほどブリスタリングが発生しやすい気象条件となる。

北海道内の多くの空港でもブリスタリングの発生が確認されており、近年の異常気象の影響により、北海道でも初夏において急激に気温が上昇する日が多々発生しており、特に6月頃の降雨が多い時期と気温上昇が重なった際に、ブリスタリングが多く発生していると考えられる。図-3、図-4にA空港およ

びB空港におけるブリスタリング発生時の舗装体温度を示す。どちらの空港も6月下旬にブリスタリングが確認され、その時期の舗装体温度は50℃以上になっている。また、B空港ではブリスタリングの発生を確認した前日に降雨があり、舗装体に多くの水分が含まれていた状況にあったと考えられる(図-5)。

寒冷な北海道においてブリスタリングが多く発生する理由として、表層混合物(密粒度アスコン20F)の配合設計や寒冷な気象条件が要因と考えられる。

以下に北海道においてブリスタリングが多く発生する要因を示す。

- ① 表層の老朽化を抑制する対策として表層混合物のアスファルト量を多めに設定することにより、空隙率が小さくなり、表層が不透水層になっていること。
- ② 冬期間に舗装体温度が低下し、舗装体が収縮することにより施工継ぎ目が開きやすくなり、雨水等が入りやすい状況になっていること(写真-1)。
- ③ 施工継ぎ目から水が供給され、舗装体に水分が残留したり、層間に水が浸透し、融解時に凍結融解作用が発生し、層間剥離を促進していること。

3. 劣化診断技術の検討

ブリスタリング対策の検討を行う際には、ブリスタリング発生箇所範囲や個数の把握、採取コアを用いた舗装体のマーシャル安定度試験による強度、舗装体に含まれる水分量、層間剥離の有無等を調査して、舗装体の健全度の評価を行うのが一般的な手法である（写真-2、3参照）。

ブリスタリング発生箇所範囲や個数の把握を行う方法としては、打音検査、赤外線サーモグラフィ¹⁾、目視による調査方法が用いられる。しかし、現在利用されている調査方法は、舗装体内部の状況までは把握できる調査方法とはなっていない。

このため、本研究では遮水ダムにおいてブリスタリングの調査実績²⁾を有する電磁波レーダによる探査技術を用い、空港舗装体内部の劣化診断技術の一手法としての適用可能性を検討した。また、遮水ダムにおいては真空透気試験³⁾を用い、表層混合物の透水および不透水性を評価する方法も用いられているので、併せて適用を検討した。

ブリスタリングによる損傷以外の診断技術である空港アスファルト舗装の構造評価法としては、実際の空港舗装においてFWD試験を実施し、測定した舗装表面のたわみ量を用い構造評価を行った。調査地点の舗装構造（アスファルト混合物厚、路盤厚）、調査時の舗装表面温度、標準的な各層の変形係数、载荷条件を用い、多層弾性プログラムGAMESにより算出した規準たわみ $D_{0,cr}$ を算出し、荷重補正した D_0 たわみ量を用い構造評価を行った。

また、FWD試験で得られた D_0 たわみ量を用い、舗装体の健全度についても検討を行った。



写真-2 ブリスタリングの確認状況



写真-3 ブリスタリングが発生した箇所から採取した無水コア

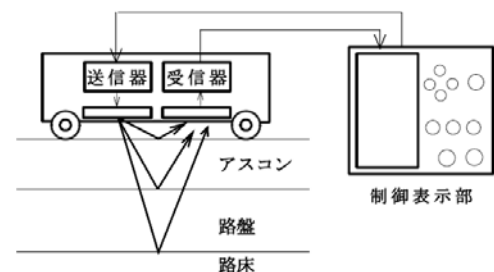


図-6 測定原理の概略図

4. 電磁波レーダによる劣化診断技術の検討

4.1 電磁波レーダによる試験方法および試験条件

電磁波レーダによる空港舗装体内部の劣化診断技術（以下、電磁波レーダ）の適用可能性を検討するため、室内試験を実施した。室内試験で使用した電磁波レーダの仕様は、ハンディタイプの測定機器であり、アンテナ周波数2,600MHz、測定深度は400mmまで可能な機種を使用した。

電磁波レーダによる探査の測定原理の概略図を図-6に示す。電磁波レーダは、電磁波を送信器から地中に向けて放射（以下、送信波）し、反射した電磁波（以

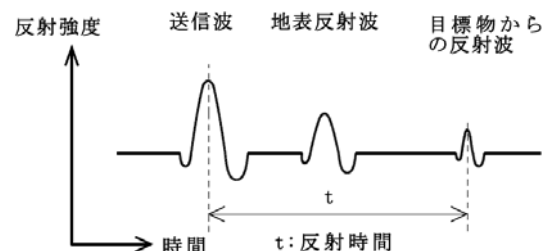


図-7 送信波と反射波

下、反射波)を受信アンテナで受信する測定原理を利用している。図-7に示すように送信波の一部は地表面で反射されるが、残りは地中に入り周囲と比誘電率が異なる反射物質の境界面で反射され、再び地表に戻り、受信器に到達する。反射波の波形についても比誘電率の異なる材料の組み合わせにより異なる波形を示す特徴がある。

電磁波レーダは、比誘電率の異なる境界面で電磁波が反射する原理を利用しており、境界面までの深さ d は、比誘電率 ϵ_r および反射時間 t を用いて式(1)²⁾から求めることができる。

$$d = \frac{V \times t}{2} = \frac{CO}{2 \times \sqrt{\epsilon_r}} \times t \quad (1)$$

ここで、

d : 境界面までの深さ (m)

V : 媒質中の電磁波の伝達速度 ($= CO / \sqrt{\epsilon_r}$ m/s)

CO : 真空中の電磁波の伝達速度 ($= 2.997 \times 10^8$ m/s)

t : 反射時間 (s)

ϵ_r : 比誘電率

式(1)を用いることにより、層間剥離や水分が残留している位置を推定することが可能となる。また、比誘電率の異なる2種類の物質の境界面からの反射強度 R

は式(2)²⁾から求めることができる。

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (2)$$

ここで、

R : 反射強度

ϵ_{r1} : 上層の比誘電率

ϵ_{r2} : 下層の比誘電率

式(2)を用いることにより、上層の比誘電率が下層と比較し高い場合は、電磁波レーダの反射強度のピーク値がプラス方向になり、上層の比誘電率が下層と比較し低い場合は、反射強度のピーク値がマイナス方向になる。なお、今回使用した電磁波レーダは、パルス幅が1 (nsec, 1×10^{-9} 秒) 前後のパルス状の電磁波を用いた。

表-2に比誘電率の概略値を示す。空気の比誘電率は1、水は81、アスファルト混合物は5程度、金属は ∞ である。表に示す材料の反射波の電波速度は金属が一

表-2 比誘電率の概略値

材料	比誘電率
アスファルト混合物	5程度
空気	1
水	81
金属	∞

	表層と基層間:層間剥離
	表層と基層間:層間接着

	L=30.0cm	L=30.0cm	L=30.0cm	L=30.0cm	L=30.0cm
供試体番号	①	②	③	④	⑤
表層(t=5cm)					
層間の状況					
基層(t=5cm)					
鉄製のプレート(t=2cm)					
表層と基層間の接着状態	層間接着	層間接着	層間剥離	層間剥離	層間剥離

図-8 室内試験の供試体

表-3 室内試験の試験条件

試験番号	試験目的	試験条件	供試体番号					水浸の条件	表層に使用したAs混合物	基層に使用したAs混合物
			①	②	③	④	⑤			
			層間の接着状況							
			層間接着	層間接着	層間剥離	層間剥離	層間剥離			
1-1	水分の影響を把握	基層部の含水比(%)	0	0	0	0	0	水浸0分	密粒度アスコン20F	排水性舗装(⑤の供試体は排水性と密粒度の2層構造)
1-2			0	0	0.2	0.2	0.2	水浸30分		
1-3			0	0	0.3	0.3	0.3	水浸2日間		
2-1			0	0	0	0	0	水浸0分		
2-2			0	0	1.6	2.0	1.6	水浸30分		
2-3			0	0	2.1	2.5	2.1	試験番号2-2に水50g注入		
2-4			0	0	2.6	3.0	2.6	試験番号2-2に水100g注入		
2-5	0	0	3.1	3.5	3.1	試験番号2-2に水150g注入				
3-1	層間剥離の影響を把握	表層と基層間の剥離厚さ(mm)	0	0	0	0	0	水浸0分	密粒度アスコン20F	粗粒度アスコン
3-2			0	0	1	1	1			
3-3			0	0	2	2	2			
3-4			0	0	3	3	3			

番早く、水、アスファルト混合物、空気の順になる。

図-8に室内試験の供試体を示す。プリスタリング現象による剥離や水分に着目した室内試験を実施した。

室内試験では、最下面に比誘電率が ∞ である鉄製のプレートを敷き、下面の境界面が分かりやすいような構造とした。表層は空港舗装で一般的に使用される密粒度アスコン20Fを用い、①～②の供試体は表層と基層間が層間接着した条件とした。③～⑤の供試体は供試体を交換できるように層間が接着していない層間剥離の条件で試験を実施した。①～②と③～⑤を比較することで層間剥離の影響を確認することとした。

室内試験の試験条件を表-3に示す。試験番号1-1～2-5までは、舗装体に含まれる水分の影響を把握する目的で実施し、試験番号3-1～3-4は層間剥離の影響を把握するために実施した。

電磁波レーダから得られた測定波形の評価方法を図-9に示す。測定波形は空気と表層の境界で反射された表面波を100%とし、層間剥離および水分の影響による反射波の波形のピーク値との比率を反射強度率と定義した。層間剥離による反射波の波形のピーク値はマイナス方向、水分によるピーク値はプラス方向を用

い評価した。また、測定した反射波の測定画像についても併せて評価した。

4.2 室内試験の結果

室内試験から得られた反射波形や反射波の測定画像から層間剥離や水分の影響を把握した。

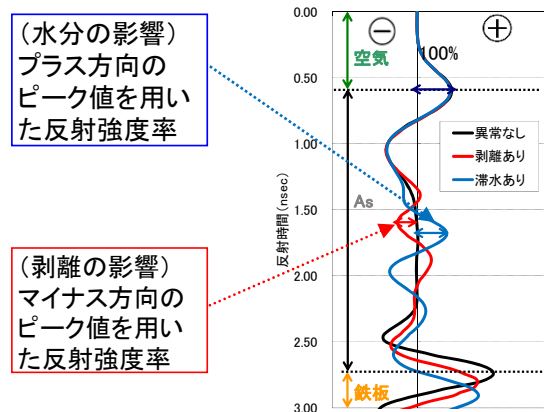


図-9 測定波形の評価方法

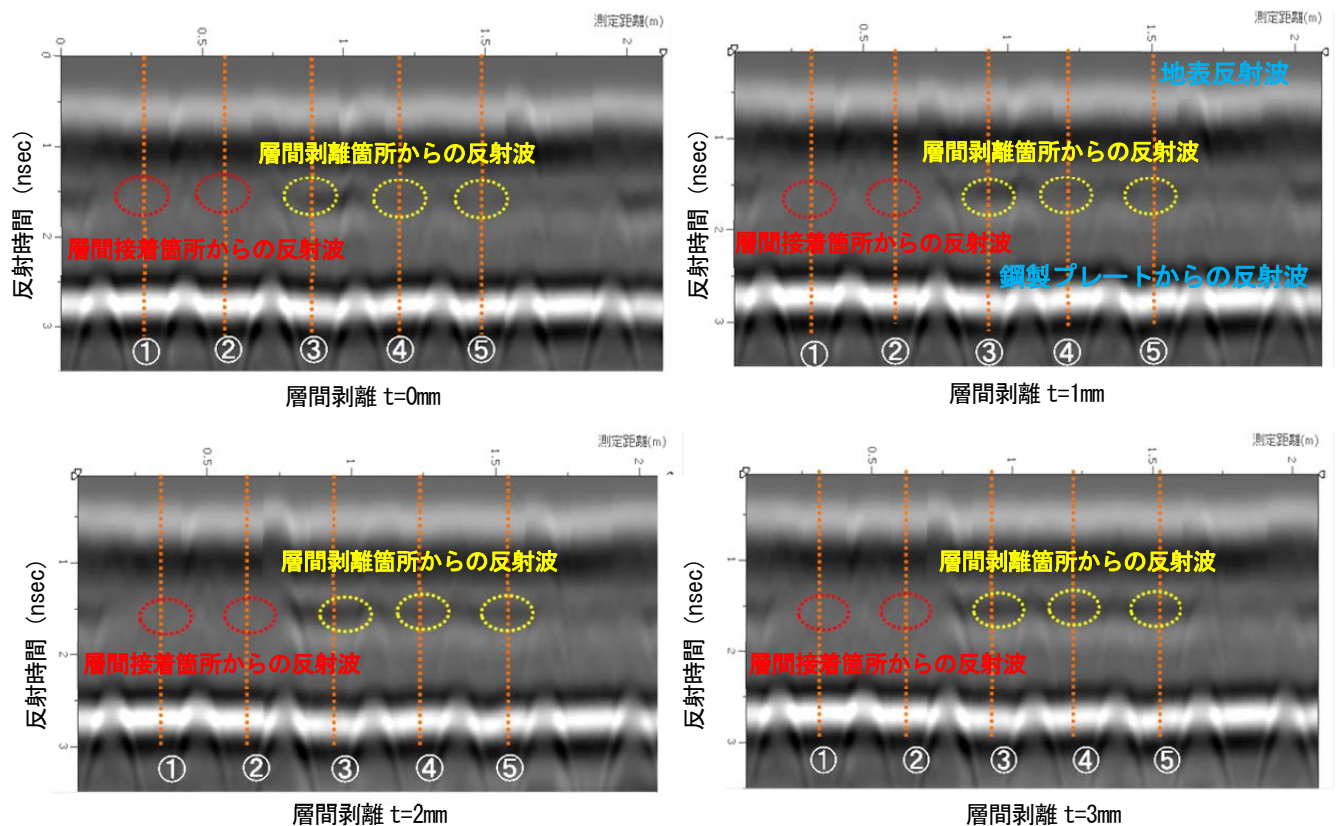


写真-4 反射波の測定画像（層間剥離の影響）

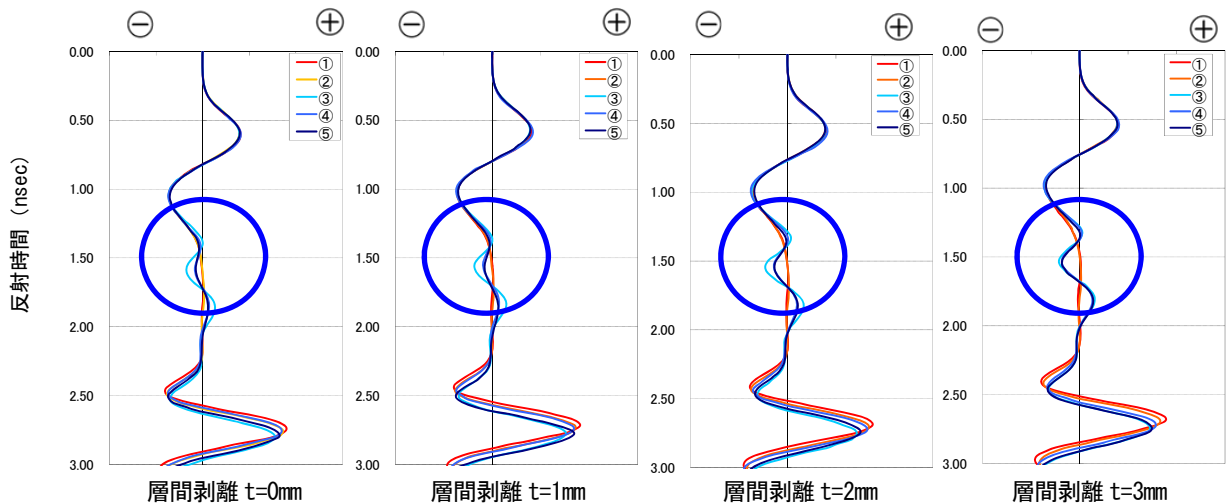


図-10 反射波の波形（層間剥離の影響）

4.2.1 層間剥離の影響

表-3に示す試験番号3-1～3-4の室内試験は層間剥離の影響を確認した。剥離厚さ $t=1\sim 3\text{mm}$ の保持については、プラスチックのプレートを供試体の隅角部の層間に挟み、層間厚さを調整した。写真-4に反射波の測定画像を示す。赤色の破線で囲まれた範囲は、層間剥離が発生していない箇所を示し、黄色の破線で囲まれている範囲は、層間剥離している箇所を示している。一般的に測定画像の表示は波形のプラス方向が白色、波形のマイナス方向は黒色で表示される。なお、写真に示すプラス方向の波形である地表反射波や鉄製プレートからの反射波は白色に表示された。赤色の破線で囲まれている1.50 nsec付近の層間剥離が発生していない範囲(①, ②)は、黒色や白色の層は確認されず、均一な灰色の層となって表示された。

層間剥離が発生している範囲(③, ④, ⑤)は、波形のマイナス方向である黒色に表示され、層間剥離が厚くなるに伴い、より明確な黒色の層が表示された。また、測定画像による評価では、概ね2mm以上の層間剥離があれば、黒色の層を確認することができた。

図-10に反射波の波形、図-11に層間剥離に伴うマイナス方向とプラス方向の反射強度率(平均値)を示す。なお、反射強度率の平均値は、供試体番号③～⑤の単純平均である。青色の実線で囲まれている1.50 nsec付近の位置に着目すると、層間剥離の厚さが大きくなるに伴い、プラス方向よりマイナス方向のピーク値が大きくなることが確認された。これは層間剥離している空気層の厚さが反射強度率に影響を与えているためと考えられる。また、層間接着の供試体の波形は概ね

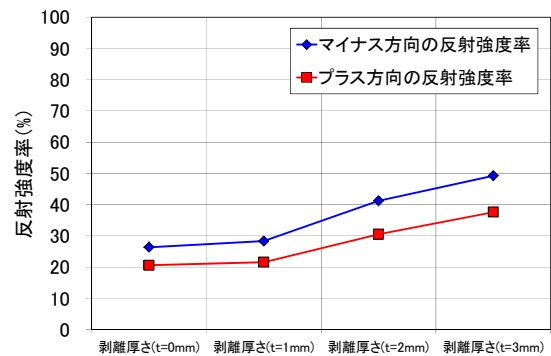


図-11 マイナス方向とプラス方向の反射強度率(平均値)

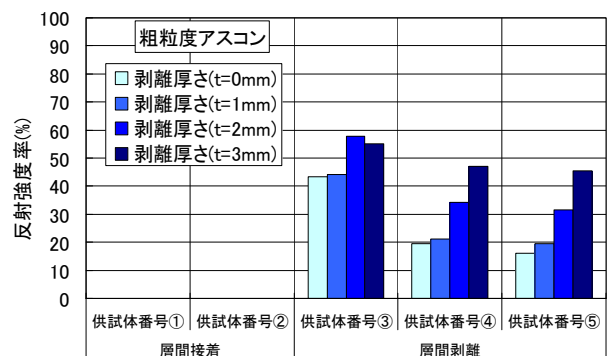


図-12 層間剥離による反射強度率

直線となっていることが確認できた。

図-12に層間剥離による反射強度率を示す。層間接着した供試体番号①, ②の反射強度率は0となり、層間剥離に起因する空気層の影響を受けていないことが分かる。層間剥離した供試体番号③～⑤は剥離厚さが大きくなるに伴い、反射強度率が大きくなることを

確認できた。

4.2.2 水分の影響

a) 含水比が高い場合

ブリスタリング現象が生じる含水比の目安値は、1.0%以上とされている⁴⁾。表-3に示す試験番号2-1～2-5の室内試験では、含水比を調整し試験を行った。写真-5に排水性舗装の供試体を用い、水分量を変動させた反射波の測定画像（含水比が高い場合）の試験結果を示す。試験では排水性舗装（供試体番号③、④）、排水性舗装と密粒度アスコン13Fが2層構造になった供試体（供試体番号⑤）を使用した。室内試験の結果、

黄色の破線で囲まれた層間の測定画像が、含水比の増加に伴い、波形のマイナス方向である黒色からプラス方向の白色に変化し、含水比が2.1～2.5%まで上昇すると測定画像でも確認できることが分かった。

図-13に反射波の波形（含水比が高い場合）、図-14に水分の増加に伴うマイナス方向とプラス方向の反射強度率（平均値）を示す。含水比が大きくなるに伴い、青色の実線で囲まれている1.50 nsec付近のマイナス方向の波形の振幅が小さくなり、プラス方向の波形の振幅が大きくなっていることが確認できた。

図-15に水分の増加に伴う反射強度率を示す。室内試験の結果、含水比が0%から1.6～2.0%に増加する

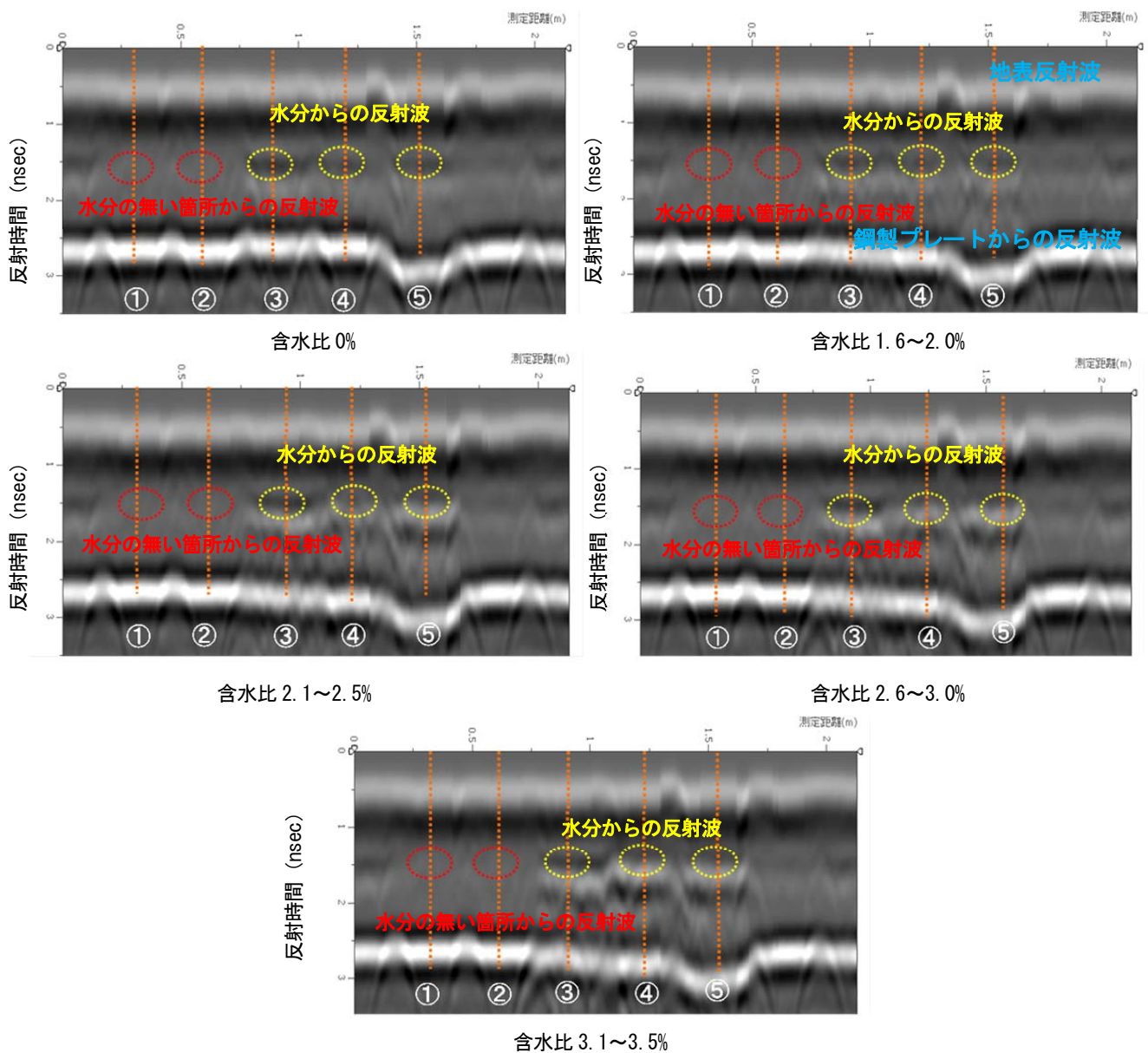


写真-5 反射波の測定画像（含水比が高い場合）

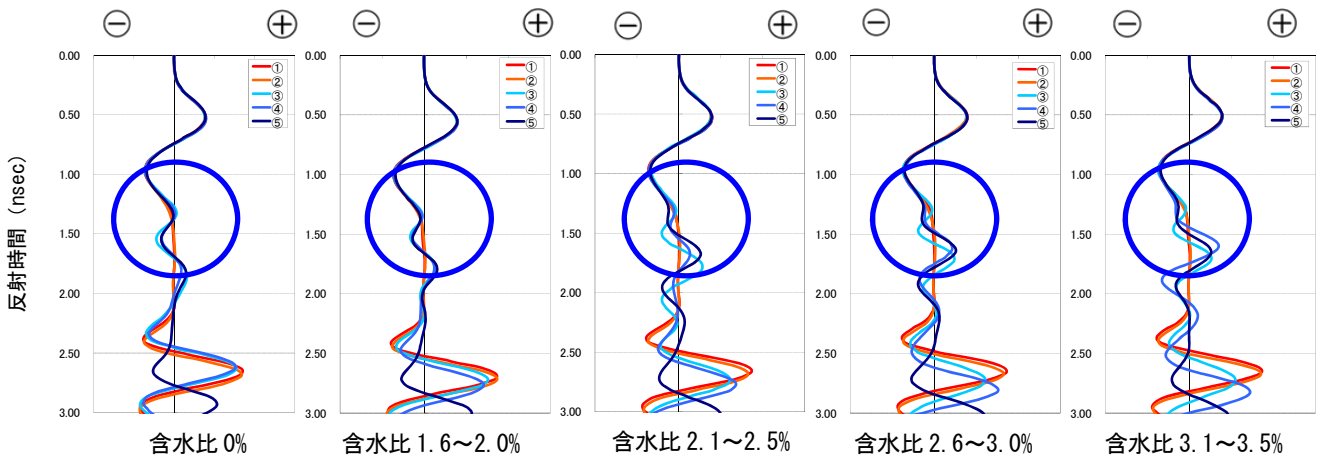


図-13 反射波の波形（含水比が高い場合）

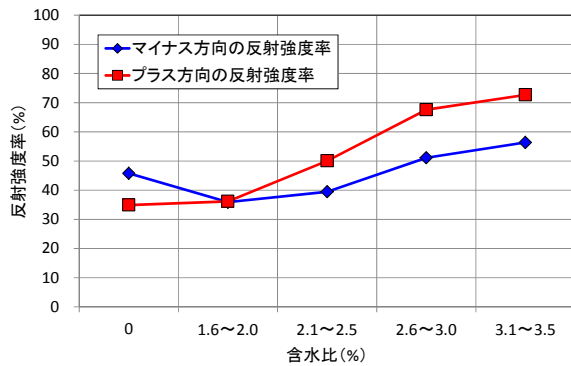


図-14 水分の増加に伴うマイナス方向とプラス方向の反射強度率（平均値）（含水比が高い場合）

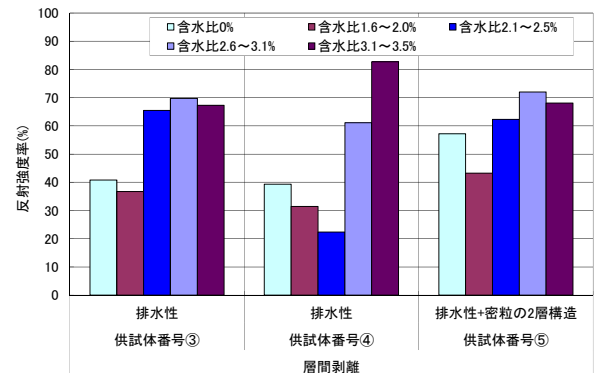


図-15 水分の増加に伴う反射強度率（含水比が高い場合）

に伴い反射強度率は低下した。更に水を注入すると反射強度率が増加する傾向を示した。以上の結果から、ある一定の含水比を境に、反射強度率は低下から増加の方向に変化することを確認した。これは、図-14に示すように空隙内の空気がマイナス方向の振幅のピーク値を大きくする働きがあるのに対して、空隙内の水分の存在がプラス方向の振幅を大きくする働きがあり、その影響と考えられる。

b) 含水比が低い場合

表-3に示す試験番号1-1~1-3の室内試験では、含水比0%、0.2%、0.3%の供試体を用い実施した。写真-6に粗粒度アスコンの供試体を用いた反射波の測定画像（含水比が低い場合）を示す。含水比0%の供試体内、供試体番号③は、層間剥離の影響を受けている黄色の破線で囲まれている1.50 nsec付近の位置に着目すると、波形がマイナス方向の影響を受け、やや黒色の層が一部見られた。含水比が0.2~0.3%の供試体（供試

体番号③~⑤）では、黄色の破線で囲まれている箇所において水分や層間剥離の影響による黒色や白色の層状の測定画像は明確に確認できなかった。

図-16に反射波の波形、図-17に水分の増加に伴うマイナス方向とプラス方向の反射強度率（平均値）を示す。反射強度率は水分の影響よりも層間剥離によるマイナス方向の影響を強く受ける試験結果となった。水分が増加すると図-16に示す青色の実線で囲まれる層間剥離箇所の1.50nsec付近の波形の振幅がプラス方向に移動するため、層間剥離と水分の影響が重なり、波形の振幅が小さくなったと考えられる。

図-18に水分の増加に伴う反射強度率を示す。水分の増加に伴い、層間剥離箇所の1.50nsec付近の波形に影響が現れ、反射強度率が低下することが確認できた。層間剥離が無い室内試験の条件であれば、剥離の影響を排除できるため、水分の増加によるプラス方向の振幅の移動が分かりやすくなると推察される。

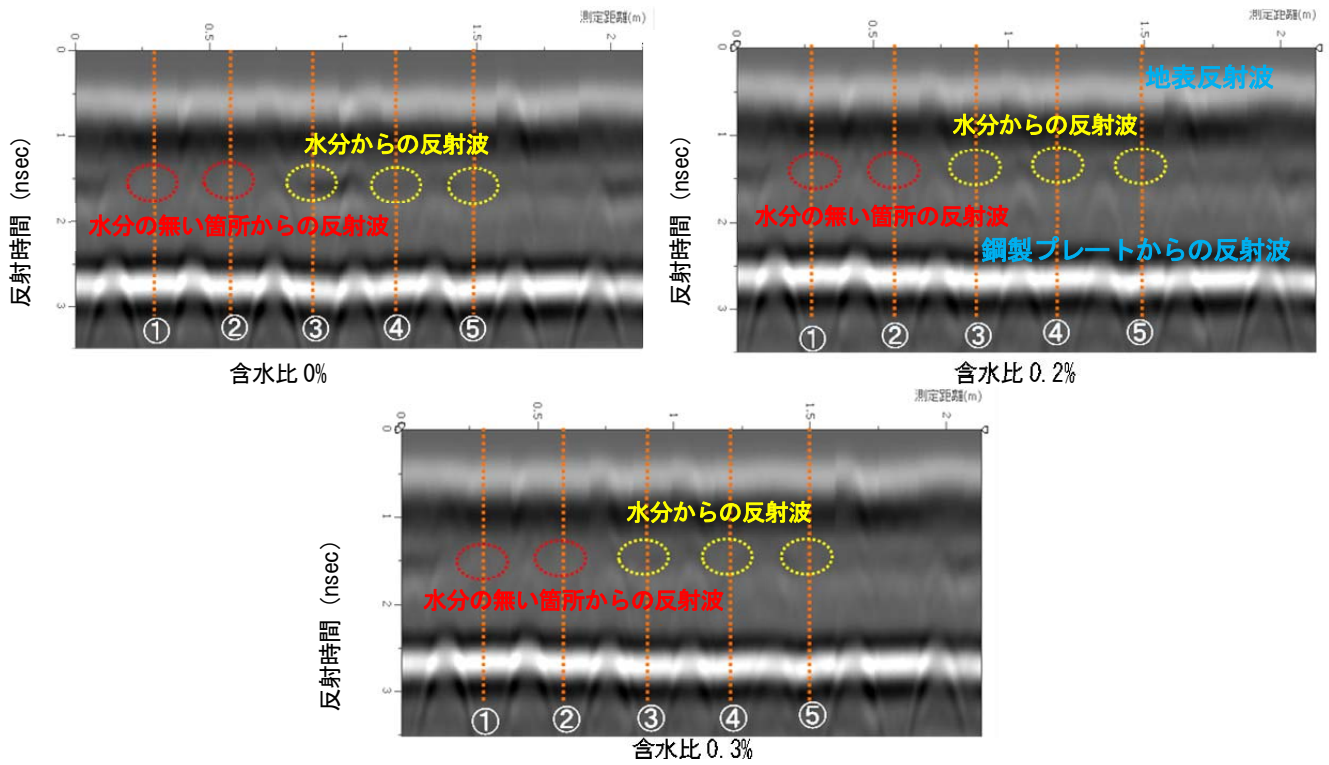


写真-6 反射波の画像 (含水比が低い場合)

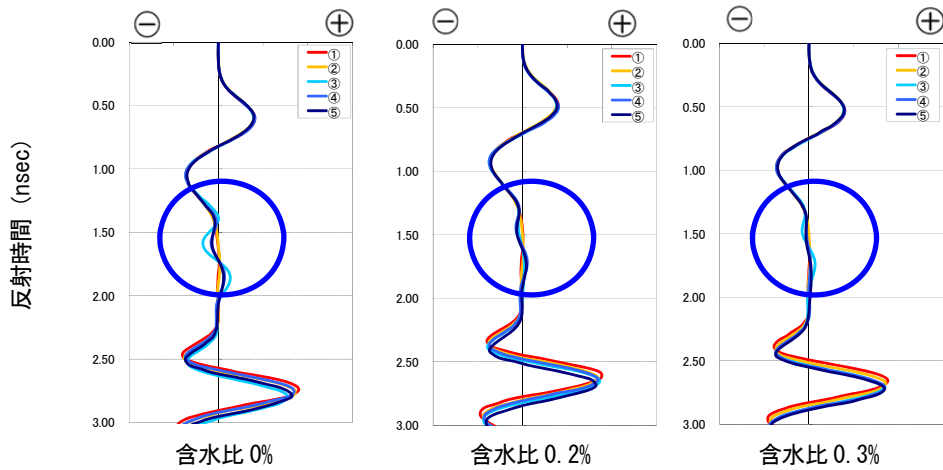


図-16 反射波の波形 (含水比が低い場合)

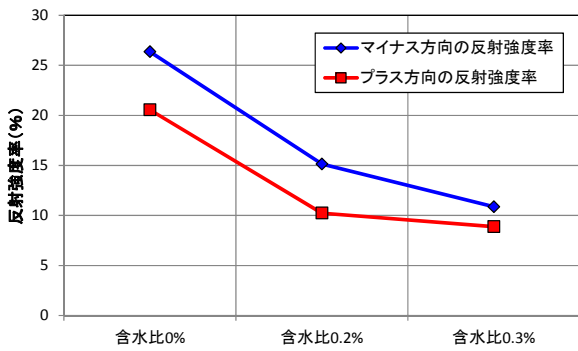


図-17 水分の増加に伴うマイナス方向とプラス方向の反射強度率 (平均値), (含水比が低い場合)

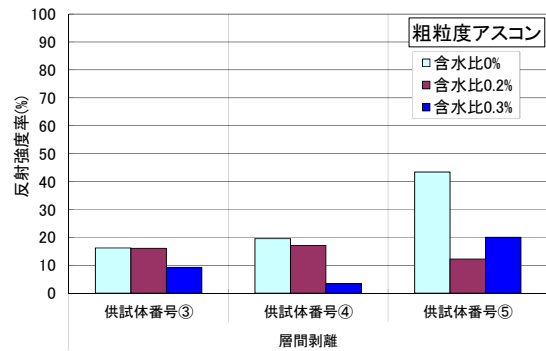


図-18 水分の増加に伴う反射強度率 (含水比が低い場合)

4.3 現地調査

4.3.1 調査方法

北海道内の空港でプリスタリングが発生した取付誘導路において電磁波レーダを用い現地調査を実施した。現地調査では、実際の水分の分布状況や層間剥離の状況を把握するため、無水のコアカッタを用いたコア採取（以下、無水コア）による調査、電磁波レーダを用いた非破壊試験による水分と層間剥離の探査、および打音検査を実施した。現地調査で採取した無水コアは、剥離箇所の確認、および室内試験で水分量や空隙率等を測定した（表-4）。

電磁波レーダの測定方法を図-19に示す。プリスタリング箇所の中心部を通過させ、横断方向および縦断方向に各々1m測定した。無水コアの採取位置はプリスタリング発生箇所の中心部から採取した。現地調査箇所の選定方法は、プリスタリング発生箇所の内、打音検査で異音が生じた箇所を選定し調査を実施した。

表-4 調査項目

試験項目	調査内容
① 電磁波レーダによる非破壊試験	コア採取箇所の電磁波レーダによる、剥離箇所や水分の把握
② 打音検査	舗装体内の層間剥離を把握
③ 水分量試験	無水のコアカッタによりコア採取後、室内試験により水分量や空隙率等を測定
④ 無水コアの状況撮影	無水コアの写真撮影による剥離箇所の確認やコア状況の把握

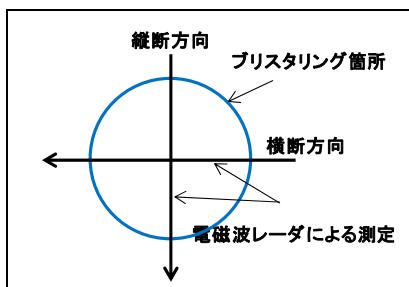


図-19 電磁波レーダの測定方法

4.3.2 調査結果

写真-7, 8 に無水コアの状況を示す。この写真はコア採取直後の撮影である。黄色の実線で囲われた箇所は層間剥離が発生していた位置である。No1～No6の無水コアは、全てのコアが表層と基層間に層間剥離が発生していた。No1, No3, No4のコアは表面から深さ30～40cmの位置でも層間剥離が見られた。無水コアの状況を確認すると、層間剥離位置付近や層間位置付近に水による濡れが多く見られた。図-20, 図-21 に無水コアの含水比を示す。プリスタリングが発生する

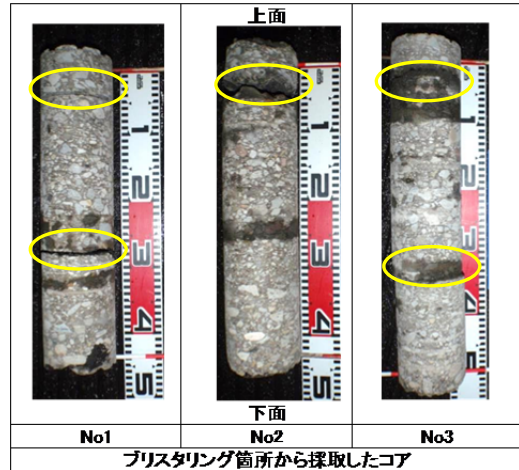


写真-7 無水コアの状況 (No1～No3)

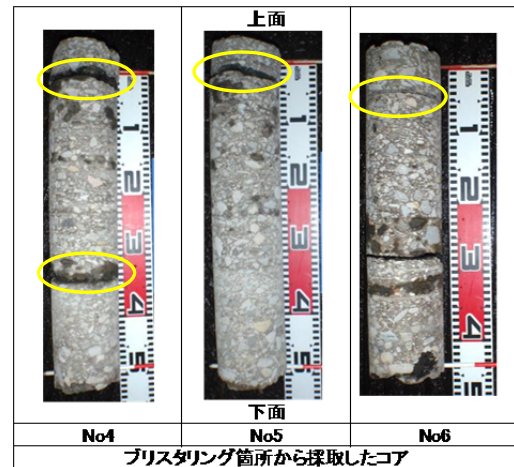


写真-8 無水コアの状況 (No4～No6)

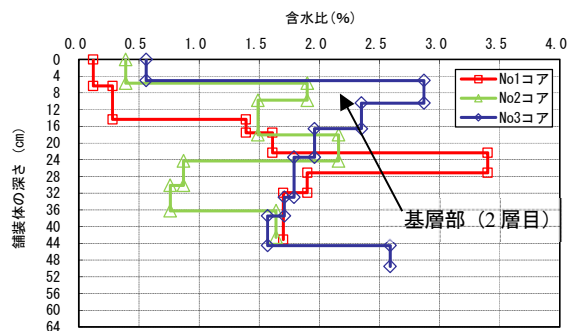


図-20 無水コアの含水比 (No1～No3 コア)

含水比の目安値は1.0%以上⁴⁾とされており、全てのコアがこの値以上の含水比を含んでいる層のあることが確認された。表層の直下の層である基層部(2層目)に着目すると、No2, No3, No4, No5のコアは含水比1.0%以上であった。

図-22, 図-23 に無水コアの空隙率を示す。一般的に

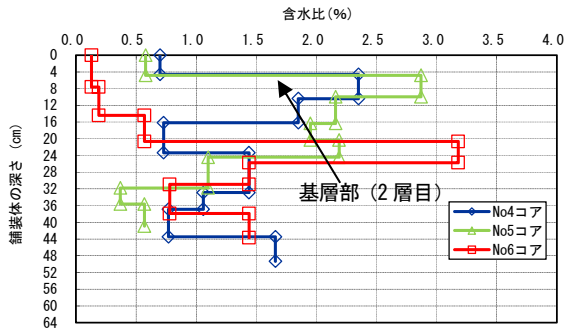


図-21 無水コアの含水比 (No4~No6 コア)

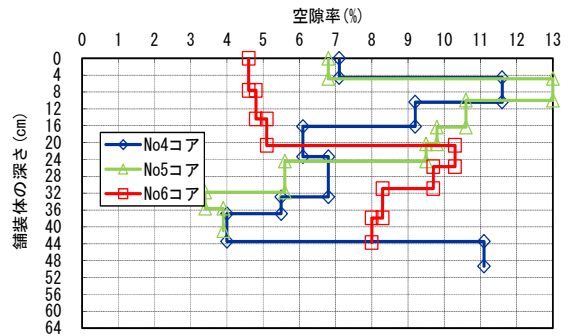


図-23 無水コアの空隙率 (No4~No6 コア)

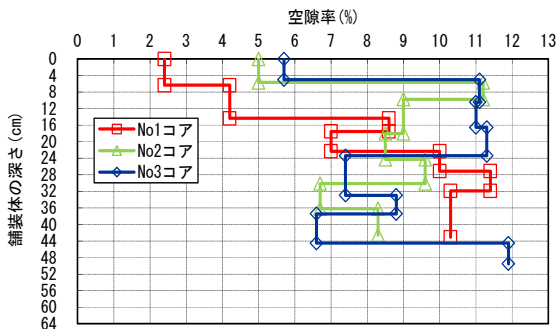


図-22 無水コアの空隙率 (No1~No3 コア)

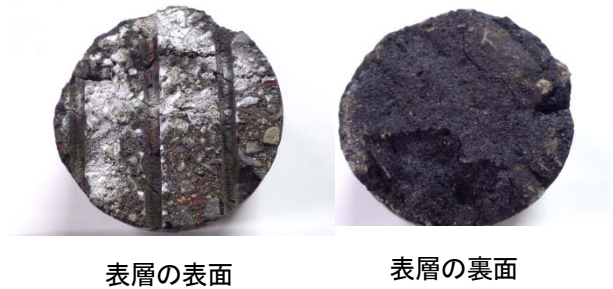


写真-9 無水コアの状況 (No4)

不透水の目安は空隙率 3%以下であり、今回採取したコア本数 6 本の内、No1 コアの表層の空隙率は 3%以下であったが、その他の表層のコアは 3%以上であった。空隙率 3%以上の代表的な事例として No4 コアの表層の表面および裏面を観察すると(写真-9)、表面は骨材が露出し粗く見えるが、裏面は細粒分の多いアスファルトモルタルで覆われ、空隙率は 7%程度と比較的高いにも拘わらず、剥離面は面的に透水しにくい材料で覆われており、ブリスタリングが発生した一要因と考えられる。また、基層部において含水比が 2%以上の高い層に着目すると、10%以上の高い空隙率となっており、水分を保持できる空間が混合物中にあることを確認した。

写真-10 に電磁波レーダによる測定画像を示す。ブリスタリングが発生した中心部の位置は、横断方向で 50cm の位置となる。図-24 に電磁波レーダによる反射波形を示す。反射波形はブリスタリング発生箇所と発生箇所から 20~30cm 離れた反射波形や無水コアの含水比も合わせて示した。水色の破線で囲われた箇所は電磁波レーダにより確認された水分および剥離や空隙による空気の影響が強い箇所である。

以下に各コアの電磁波レーダによる評価を示す。

a) No1 コア

電磁波レーダによる測定画像では、舗装表面~10cm の範囲内に黒と白の層が幅 30cm 程度あり、ブリスタリングが発生していることが確認された。

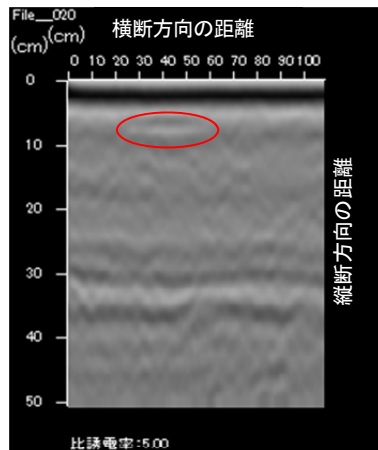
反射波形に着目すると舗装表面から 5cm の位置にプラス側のピーク値を持つ反射波が確認された。この位置は表層と基層部の層間の位置である。ブリスタリング発生箇所とブリスタリングが発生していない 80cm の位置を比較すると、どちらもプラス側にピーク値は見られるが、ブリスタリング発生箇所は、マイナス側にも波形の振幅のピーク値が見られる。これは層間剥離による空気の影響を受けたためと考えられる。

なお、表面付近の反射波形と比較し振幅が小さいのは、深度が深くなるに伴い反射波形が減衰するためである。

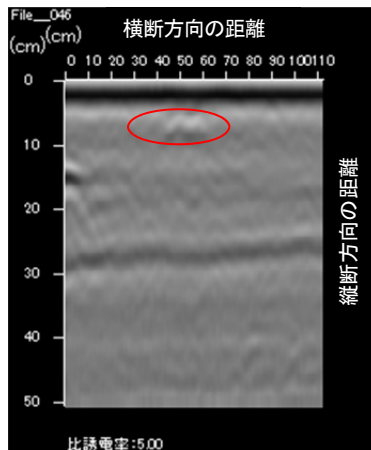
b) No2 コア

電磁波レーダによる測定画像では、舗装表面~10cm の範囲内に白と黒の層が幅 20cm 程度あり、ブリスタリングが発生している箇所が確認された。

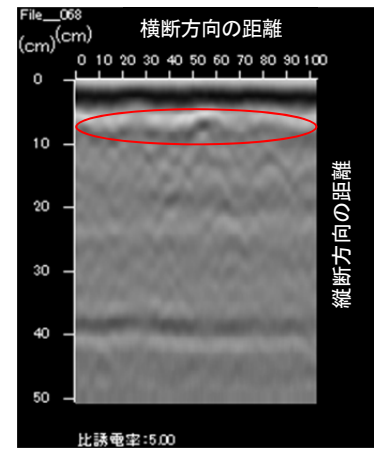
発生箇所の反射波形に着目すると、表面から 7cm 程度の位置にプラス側のピーク値を持つ反射波が確認された。この位置は表層と基層間付近である。発生箇所



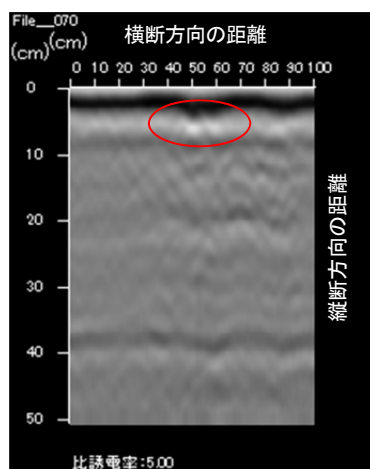
No1



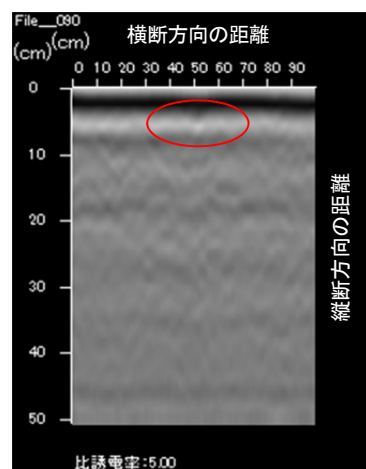
No2



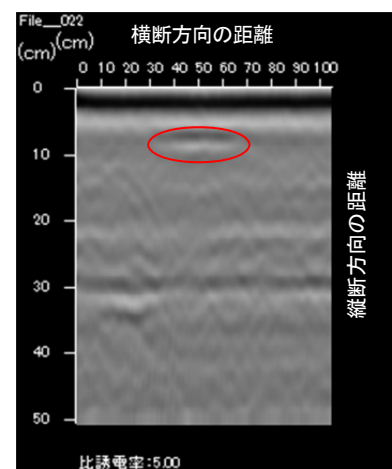
No3



No4



No5



No6

写真-10 電磁波レーダによる測定画像

所と発生していない 80cm の位置を比較すると、波形が異なり、プラス側のピーク値がさらに大きい反射波であり、空気の影響よりも水分の影響を強く受けている反射波形と考えられる。

c) No3 コア

電磁波レーダによる測定画像では、舗装表面～10cm の範囲内においてプリスタリングの中心部以外にも白と黒い層が確認され、表層と基層付近に水分および剥離や空隙内の空気の影響が広い範囲で及んでいると推察される。

発生箇所の反射波形に着目すると、プリスタリング発生箇所では表面から 7cm 程度の位置にプラス側の振幅のピーク値を持つ反射波が確認された。この位置は表層と基層間付近である。

発生箇所と発生していない 20cm の位置では波形が異なり、発生箇所は、プラス側のピーク値がさらに大きい反射波であり、空気よりも水分の影響を強く受けている反射波形である。

d) No4 コア

電磁波レーダによる測定画像では、舗装表面～10cm の範囲内でプリスタリングの中心部付近に白と黒い層が幅 10cm 程度確認された。

発生箇所の反射波形に着目すると、表面から 7cm 程度の位置にプラス側のピーク値を持つ反射波が確認された。この位置は表層と基層間付近である。発生箇所と発生していない 20cm の位置を比較すると、波形が異なり、発生箇所はプラス側のピーク値がさらに大きい反射波であり、空気よりも水分の影響を強く受けている反射波形である。

e) No5 コア

電磁波レーダによる測定画像では、プリスタリング発生箇所の中心部で舗装表面～10cm の範囲内にやや小さい画像の変化は見られるが、明確には分からない結果となった。

発生した箇所の反射波形に着目すると、舗装表面から 6cm 程度の深度の位置に水分の影響を受けたプラ

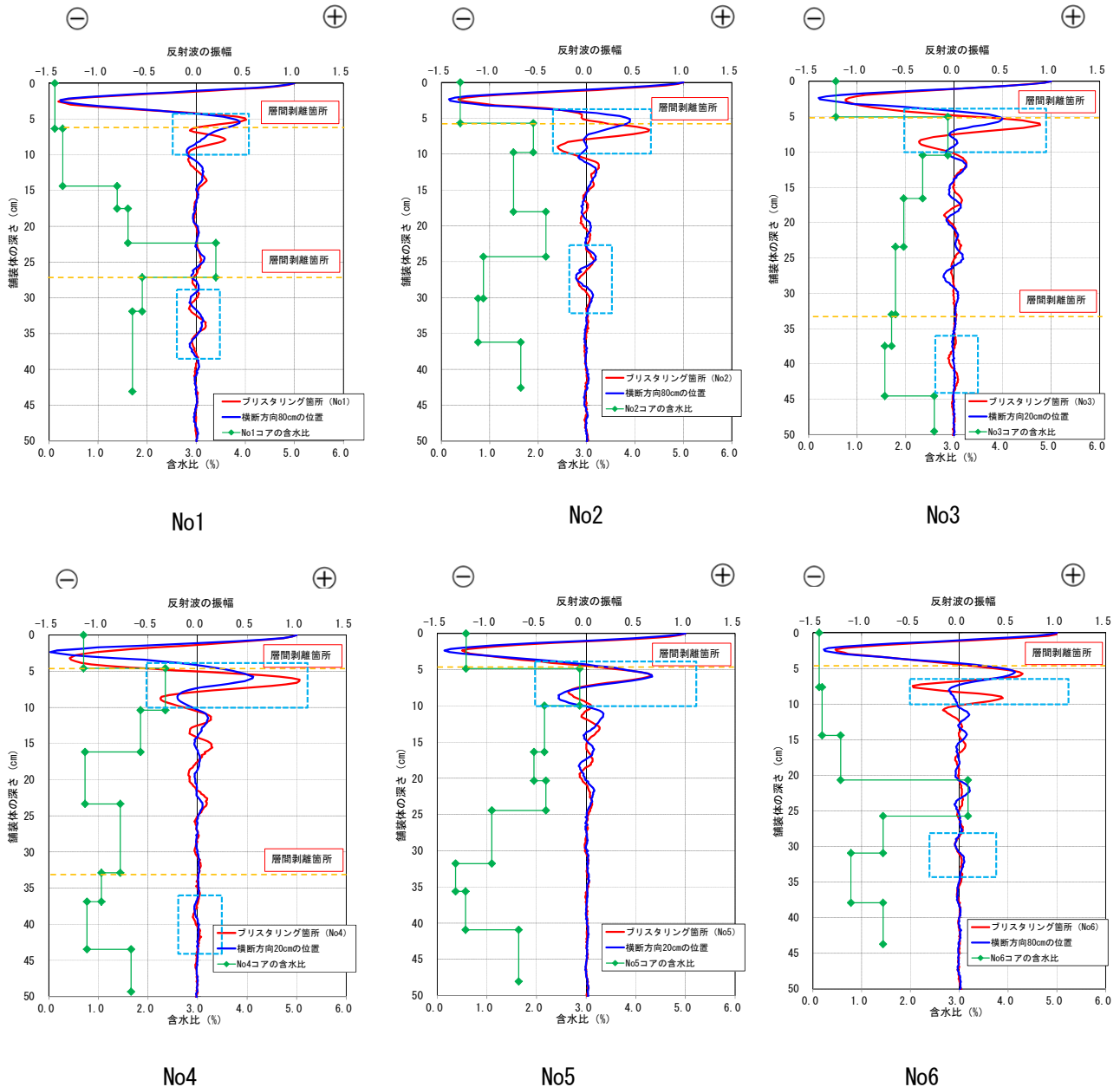


図-24 電磁波レーダによる反射波形

ス側のピーク値を持つ反射波が確認された。

f) No6 コア

舗装表面～10cmの範囲内に黒と白の層が幅30cm程度あり、プリスタリングが発生していることが確認できた。反射波形に着目すると舗装表面から6cm程度の位置にプラス側のピーク値を持つ反射波が確認された。この位置は表層と基層部の層間の位置である。

発生箇所と発生していない80cmの位置を比較すると、波形が異なり、発生箇所や発生していない箇所はプラス側にピーク値は見られるが、発生箇所は層間剥離の影響を受けマイナス側にもより大きな波形の振幅のピーク値が見られる。これは層間剥離による空気

の影響を受けたと考えられる。

4.4 電磁波レーダによるプリスタリング検知の適用性

電磁波レーダを用いた室内試験や室内試験の結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 表層と基層間が層間剥離しているプリスタリング箇所は、測定画像により概ね検知することが可能であった。

室内試験では層間剥離2mm程度以上、含水比2%程度以上の試験条件で検知が可能であった。

そのため、測定画像による検知は、ある一定以上の剥離厚さやある一定量以上の水分が確保されなければ検知ができないと考えられる。

- (2) 反射波形による評価では、表層基層間に層間剥離を有するプリスタリングが発生した箇所において、表層と基層間の位置に水分によるプラス側のピーク値がある反射波が確認されたことや、空気の影響によるマイナス側にピーク値を持つ波形が確認され、プリスタリング箇所を検知することが可能であった。

以上の結果より、電磁波レーダの測定画像により層間剥離を検知する場合、ある一定以上の剥離厚さ、およびある一定量以上の水分が無いと評価は難しいと考えられる。ただし、反射強度率を活用することにより、測定画像では検知できない箇所も適用可能になる箇所もあることを確認した。

5. 真空透気試験による劣化診断技術

真空透気試験は遮水ダムのアスファルト表面遮水壁の遮水機能を確認するために利用されている。写真-11に示す真空透気試験装置は所定の負圧を与え、その圧力上昇の度合いから遮水性を非破壊で短時間に確認する試験である。この試験の方法や基準値は定められたものではなく、既設ダム毎に試験条件や基準値が定められているのが一般的である。試験方法は文献³⁾を参考にし、試験前に0.09MPaの負圧を与え、1分間保持後の昇圧基準値が+0.003MPa/min以下であれば透気性がないと評価した。この試験条件の他に、0.07MPaの負圧を与え、昇圧基準値が0.007MPa/minとしている事例も見られる。

表-5に真空透気試験に関わる室内試験の試験項目と試験内容を示す。真空透気試験に用いる供試体は空隙率を2~7%程度に調整した供試体(30cm×30cm×5cm)を用い室内試験を実施した。また、使用した供試体から1枚当たり3個のコアを採取し加圧透水試験を行い、透水係数を求めた。

図-25に空隙率と透水係数の関係を示す。一般的に空隙率3.0%以下は不透水(透水係数:1×10⁻⁷cm/s以下)の目安値とされているが、今回の試験結果も同様な結果が示された。

図-26に真空透気試験による透水性と空隙率の関係を示す。図中の透水とは真空透気試験で透水性が確認された供試体、遮水は透水性が確認されなかった供試体である。真空透気試験で透水性が確認できた供試体

は空隙率3%以上の供試体であり、加圧透水試験の結果と同様な結果が得られた。

表-6に北海道の空港内において滑走路のショルダー部で実施した真空透気試験の結果を示す。調査箇所はプリスタリングが発生している近傍を調査した。負圧を0.07~0.09MPa程度かけた条件で現地試験を行った。

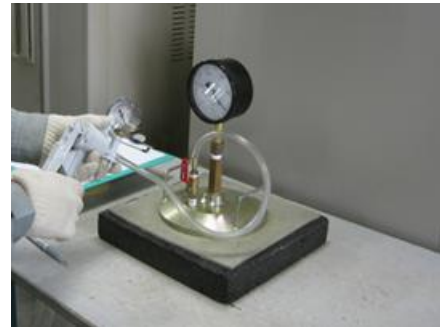


写真-11 真空透気試験装置

表-5 室内試験

試験項目	試験内容
真空透気試験	空隙率を2~7%程度に調整した供試体(30cm×30cm×5cm)を用い、アスファルト混合物の透水機能の評価を行う。
加圧透水試験	空隙率を2~7%程度に調整した供試体(30cm×30cm×5cm)から3個のコア(φ10cm)を採取し、アスファルト混合物の透水機能の評価を行う。

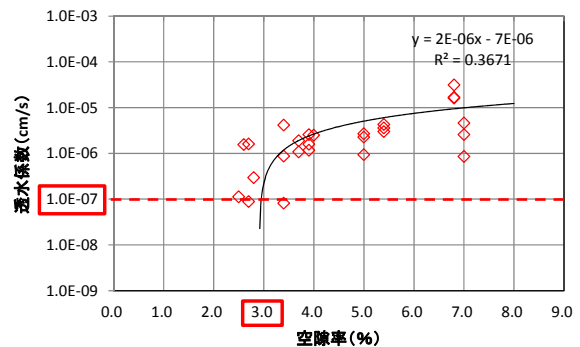


図-25 空隙率と透水係数の関係

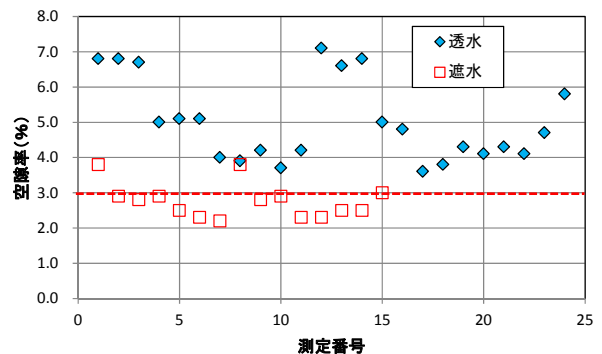


図-26 透気性と空隙率の関係 (真空透気試験)

表-6 現地試験の結果

	初期値 (MPa)	1分後 (MPa)	2分後 (MPa)	昇圧値 (MPa)	判定
調査箇所1	-0.070	-0.070	-0.066	0.004	不透水
調査箇所2	-0.080	-0.042	-0.018	0.062	透水性
調査箇所3	-0.090	0.000	0.000	0.090	透水性
調査箇所4	-0.091	-0.078	-0.072	0.019	透水性
調査箇所5	-0.089	-0.076	-0.067	0.022	透水性

調査箇所1の初期値の負圧は0.07MPaまでしか負圧をかけられなかったため、0.07MPaの試験条件の昇圧基準値0.007MPa/minを準用すると、不透水と評価できる。また、その他の箇所は透水性と評価できる。

5.1 真空透気試験の適用性

室内で空隙率を変動させた供試体を用い試験を実施した結果、真空透気試験は透水性を評価できると考えられる。また、現地試験ではグルーピングが施工されていない誘導路等や表層施工時の品質管理に適用が可能である。さらに、配合設計時にプリスタリングが発生しにくい表層混合物の配合設計の検討に活用できると考えられる。

6. FWD試験による劣化診断技術

「空港舗装補修要領及び設計例」⁵⁾では空港舗装の健全度を評価する方法としてFWD試験を用いる手法が定められている。評価方法では測定したD₀たわみ量を標準載荷荷重147KNで荷重補正した荷重補正後D₀たわみ(D_{0-cor})と規準たわみ量D_{0-cri}を用いる。

規準たわみ量は調査地点の舗装構造、調査時の舗装表面温度、標準的な各層の変形係数、載荷条件を用い、多層弾性解析プログラムGAMESにより算出するものである。舗装体の評価は式(1)を用いてたわみ比を算出し、1.0以上の場合、構造上問題がある可能性があるとしている⁵⁾。

$$R = D_{0-cor} / D_{0-cri} \quad (1)$$

ここに、

R：たわみ比

D_{0-cri}：規準D₀たわみ(μm)

写真-12にA空港で測定したFWD試験装置を示す。FWD試験装置の載荷荷重は、A空港の基準舗装厚が90cm以上であるので、載荷荷重は147KN以上とした。

図-27にA空港の滑走路においてFWD試験を行った結果を用い解析したたわみ比を示す。たわみ比は0.2

～0.5程度の範囲内にあり構造的な損傷は受けていないと判断できる。滑走路の端部は静止荷重を受ける箇所であるため、滑走路の中では厳しい交通条件となっているが、中間部と比較しても大きな差は見られない。ただし、滑走路内にはクラックの発生や、パッチングで補修された箇所も多く見られる。そのため、クラック発生箇所やパッチング箇所付近においてFWD試験を行った。試験結果を図-28に示す。路面損傷部においてもたわみ比は1.0未満となり、構造的な破損としては評価されなかった。ただし、健全部とたわみ比を比較すると、路面損傷部のたわみ比が大きいことを確認した。クラック発生箇所や補修箇所においてコアを採取した結果、貫通したクラックは無いが舗装体の中間部までに及ぶクラックや層間剥離が発生したコアが確認された。

以上の結果から、たわみ比が1.0未満であっても、健全部と比較することにより舗装体を評価できることを確認した。

図-29にC空港の航空機が駐機するエプロンにおいてFWD試験を実施した結果を示す。エプロンはアスファルト混合物で施工され、表層は半たわみ性舗装である。表層にクラックが発生し、層間剥離も発生している状況であった。この空港は基準舗装厚が90cm未満であるので、載荷荷重98KN以上のFWD試験装置を用いた。FWD試験の結果はD₀たわみ量で比較した。健全部とクラック等の発生した損傷箇所を比較すると、損傷部はD₀たわみ量が大きいことが確認され、FWD試験により損傷部の評価ができることを確認した。

6.1 FWD試験の適用性

「空港舗装補修要領及び設計例」ではFWD試験を用いた舗装体の健全度を評価する場合、たわみ比を用い、1.0以上の場合には構造上問題がある可能性が高いと評価できる。ただし、滑走路以外の誘導路でも試験を実施したが1.0を越える調査箇所は確認されなかった。

現状では構造的な破壊による全層打ち換えの事例は少なく、FWD試験装置による評価方法として、たわみ比やD₀たわみ量を用い、健全部と相対比較し評価することで補修箇所を抽出することが可能である。

補修計画を立案する場合は、路面性状調査に基づく評価(PQI)が基本となるが、FWD試験やコア採取等の試験データを活用することにより適切な補修工法を選定することが可能である。



写真-12 FWD 試験装置

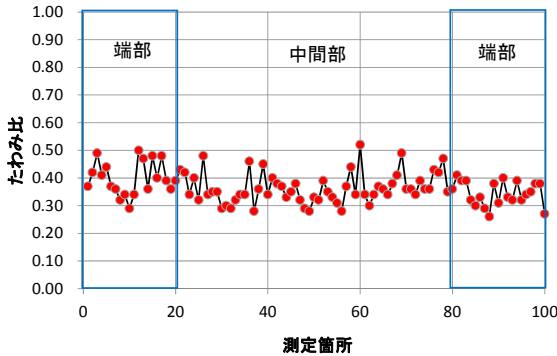


図-27 FWD 試験結果 (A 空港)

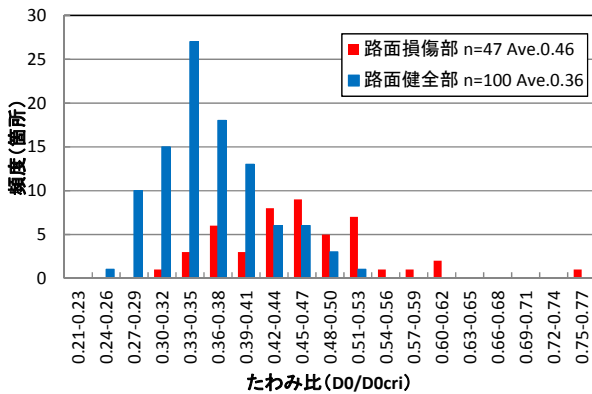


図-28 路面健全部と路面損傷部の比較 (A 空港)

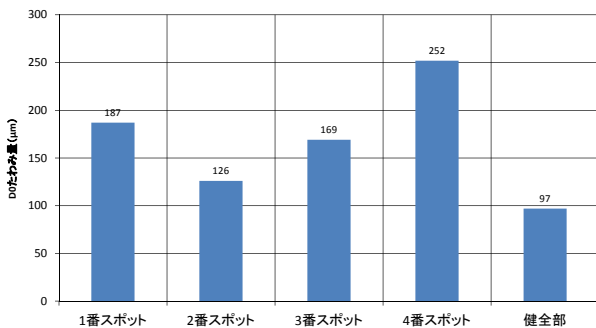


図-29 FWD 試験結果 (C 空港)

7. プリスタリングの対策方法

7.1 室内試験

プリスタリングの対策工法を検討するために表-7に示す室内試験を実施した。室内試験ではプリスタリングの発生を抑制する目的とした配合設計、タックコート、および施工継目に関する項目を実施した。

7.1.1 配合設計の検討

プリスタリング対策を目的として、プリスタリングの発生を抑制する目的で配合設計を検討した。

試験に用いた供試体は空港舗装の表層で用いられる密粒度アスコン 20F を用いた。図-30 に室内試験で用いたアスファルト量と空隙率の関係を示す。混合物の合成粒度は同一とし、アスファルト量を 4.5～6.5%の範囲内で 0.5%毎に変動させ、空隙率はそれに伴い 2～7%に設定された供試体を用いた。使用したアスファルトはストレートアスファルトおよびポリマー改質アスファルトⅡ型を用いた。

a) トラバース試験

プリスタリングは表層混合物が不透水になると発生しやすくなる。そのため、供用後の状態を想定しトラバース試験を行った。試験はホイールトラッキング試験機を用い、空隙率を 2～7%程度に調整した供試体 (30cm×30cm×5cm) の上をトラバース走行させる試験である (接地圧 0.63MPa, 試験温度+60℃, 写真-13)。所定の回数を走行後、真空透気試験を行ない透気性の評価を行った。

試験結果を図-31 に示す。空隙率 3%未満の供試体はアスファルトの種類に関わらず不透水と評価された。空隙率が 3%以上になると、空隙率が大きくなるに伴い不透水になるまでの回数が増加する傾向が見られた。また、ストレートアスファルトを用いた供試体とポリマー改質アスファルトⅡ型を用いた供試体を比較すると、ポリマー改質アスファルトⅡ型を用いた混合物は、不透水になるまでの回数が多いことを確認した。以上の結果から、空隙率を大きくすることや改質アスファルトⅡ型の使用はプリスタリング対策としての効果を有することを確認した。

b) 低温カンタプロ試験

低温時の骨材飛散抵抗性を評価するために低温カンタプロ試験を実施した。試験条件は供試体養生温度を-20℃、試験時の室温を-20℃で実施した。図-32 に低温カンタプロ試験の試験結果を示す。空隙率が高くなるに伴い低温カンタプロ損失量が増加し、空

表-7 室内試験

試験名	試験内容
配合設計の検討	①真空透気試験 ②トラバース走行試験 低温カンタプロ試験
タックコートの検討	①タックコートの乾燥時間の試験 ②層間引張試験
施工観目部の検討	①引張接着試験 ②曲げ試験

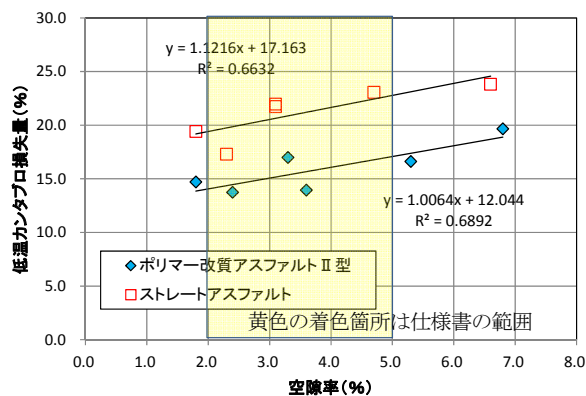


図-32 低温カンタプロ試験結果

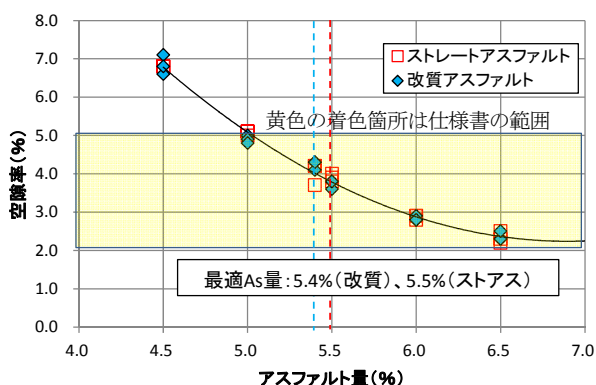


図-30 アスファルト量と空隙率の関係



写真-13 トラバース試験状況

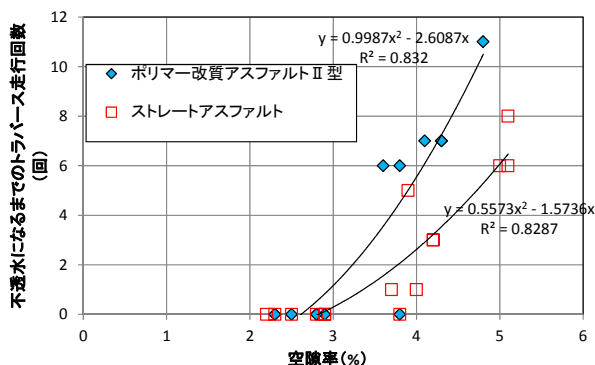


図-31 供試体空隙率と不透水になるまでのトラバース回数

隙率を低下させることが有効である結果となった。

また、ポリマー改質アスファルトII型とストレートアスファルトを使用した混合物を比較すると、ポリマー改質アスファルトII型を使用することで骨材飛散抵抗性が向上することが確認できた。

以上の結果、プリスタリングを抑制するためには、空隙率を高めることが有効であるが、耐久性を考慮すると空隙率を下げる必要がある。

現在、プリスタリング対策として配合設計を行う場合、空隙率を4%程度に設定している実績が多い。4%程度の空隙率の目標設定は、透水性の確保や耐久性を考慮すると適切な目標設定と考えられる。

7.1.2 タックコートの検討

層間剥離はプリスタリングの発生要因となるため、タックコートに関する室内試験を実施した。室内試験は、密粒度アスコン 20F の供試体 (30cm×30cm×5cm) の上にタックコート 0.3l/m² 塗布後、タックコートが分解するまでの時間を計測した。なお、試験温度は 5℃、10℃、20℃、30℃で実施した。使用したタックコートは、カチオン乳剤である PK-4 を 1 種類、改質アスファルト乳剤である PKR-T を 1 種類、および付着性が高く速乾性が高いとされる改質系アスファルト乳剤 PKM-T を 2 種類用いた。

図-33 に養生時間とタックコートの乾燥時間の関係を示す。養生温度が低下するに伴い乾燥時間は長くなるが、タックコートの種類による乾燥時間の違いは見られなかった。

また、タックコートの乳剤が完全に分解した供試体とタックコートが分解していない 2 層構造の供試体を作製し、層間引張試験を実施した。図-34 に試験結果を示す。どの種類においてもタックコートが

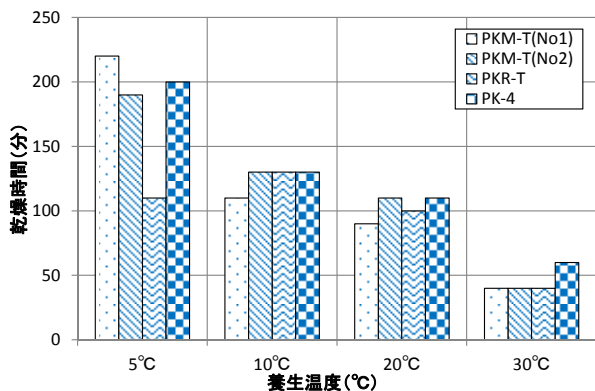


図-33 養生温度とタックコートの乾燥時間の関係

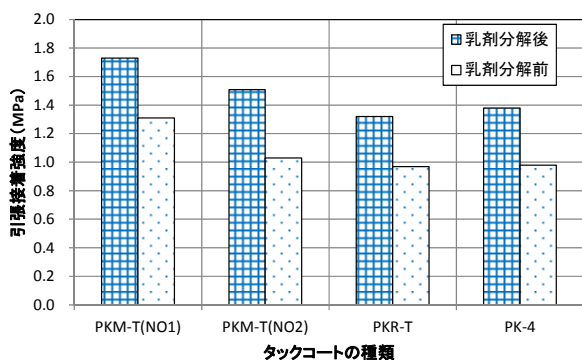


図-34 層間引張試験結果

分解している試料と分解していない試料を比較すると、分解した試料は分解していない試料より大きな引張接着強度を示した。また、分解していない試料の内、PK-4とPKR-Tはブリスタリングが発生する目安値の1MPa以下となった。さらに、PKM-TはPK-4やPKR-Tと比較し引張接着強度が高いことを確認した。

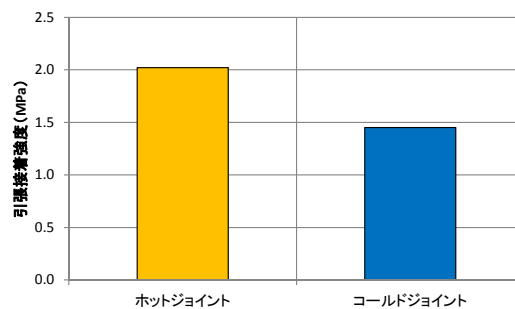
空港舗装では夜間作業の場合が多く、乾燥しにくい現場条件も想定されるが、乳剤が完全に分解しない状態で舗装を行うと層間剥離を誘発する可能性があることを確認した。そのためには、路面ヒーターによる路面乾燥等を必要に応じて実施することが望ましい。

7.1.3 施工継目部の検討

施工継目の開口部から浸入した水分はブリスタリングを発生させる要因となる。そのためには、施工継目部が開かない対策が必要である。

室内試験では、施工継目部が開きにくい施工方法であるホットジョイントに関する試験を実施した。

図-35に引張接着試験の試験結果を示す。ホットジョイントとコールドジョイントの引張接着強度を



	破断位置		
	No1	No2	No3
ホットジョイント	混合物	混合物	混合物
コールドジョイント	施工継目部	施工継目部	施工継目部

図-35 引張接着試験結果

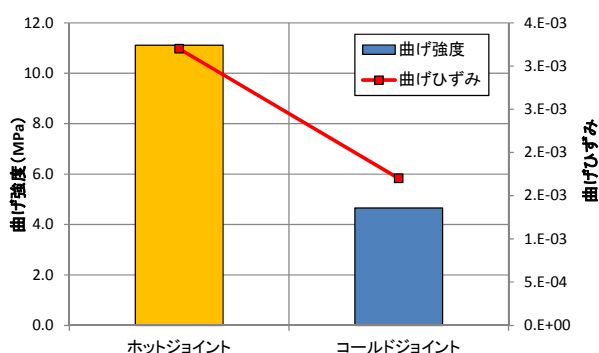


図-36 曲げ試験結果

比較した結果、ホットジョイントはコールドジョイントと比べて引張接着強度が高い結果となった。また、破断面に着目すると、コールドジョイントは施工継目部の位置で破断したが、ホットジョイントは施工継目部ではない混合物の位置で破断しており、ホットジョイントはコールドジョイントと比較し、施工継目部が開きにくい構造であることを確認した。

図-36に曲げ試験の結果を示す。ホットジョイントは混合物と一体化しているため、コールドジョイントと比較し、曲げ強度も高く、曲げひずみも大きい試験結果が得られ、施工継目部が構造上の弱点となりにくいことを確認した。

7.1.4 ブリスタリング対策

室内試験においてブリスタリング対策の検討を行った結果を以下に示す。

1) 配合設計

トラバース試験を行った結果、空隙率が大きくなるに伴い透水機能の持続性は高まるが、耐久性は低下することが確認された。また、ポリマー改質アスファルトⅡ型を用いることで、空隙率を保持する持

続性が高まることが確認された。

現在、ブリスタリング対策として配合設計を行う場合、空隙率を4%程度に設定している実績が多い。4%程度の空隙率の目標設定は、透水性の確保や耐久性を考慮すると適切な目標設定と考えられる。

2) タックコート

タックコートの乾燥時間は、タックコートの種類に関わらず養生温度が低下すると、養生時間が長くなることが確認された。また、乳剤が分解しない状態で舗設すると層間付着力が低下する。そのためには、路面ヒーターによる路面乾燥等を必要に応じて施工することが望ましい。

3) 施工継目部

ホットジョイントはコールドジョイントと比較し、施工継目地部が開きにくい構造であることを確認した。

8. ブリスタリング対策の施工の手引き

道内の空港においてブリスタリングによる舗装の破損が確認されており、対応策が喫緊の課題となっている。そこで、本研究成果をとりまとめ「ブリスタリング対策の施工の手引き」（以下、手引き書）に反映させた。手引き書は、ブリスタリング対策を目的とした舗装改良設計および工事の発注・監理を効果的に実施するための留意点を整理したものである。

「手引き書」では電磁波レーダ等の非破壊試験の調査方法、対策工法としての配合設計、空隙率の保持、層間付着力の確保、ホットジョイントの活用等に関すること、施工時の留意点等を示している。

参考文献

- 1) 国土交通省航空局：空港舗装補修要領及び設計例，pp.Ⅱ-9-10，平成23年4月
- 2) 伊藤隆彦，管野克美，後藤英一：電磁波レーダのアスファルト表面遮水壁診断への適用性の検討，土木学会論文集No.540/V I-31，pp.157-169，1996.6
- 3) 土木学会舗装工学委員会：舗装工学ライブラリー8，アスファルト遮水壁工，pp.189-190，2012.
- 4) 久保宏，八谷好高，長田雅人，平尾利文，浜昌志：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.35-40，2004.12，
- 5) 国土交通省航空局：空港舗装補修要領，pp.Ⅱ-9-10，付録-14-21，平成23年4月

MEASURES AGAINST DETERIORATION OF CONCRETE PAVEMENT IN COLD SNOWY REGIONS

Budget : Grants for operating expenses General account

Research Period : FY 2012-2015

Research Team : Road Maintenance Research Team

Author : KIMURA Takashi

MARUYAMA Kimio

ABE Ryuji

UENO Chigusa

ITANI Masashi

Abstract : At airports in cold, snowy regions, the bristaring phenomenon of swelling up the pavement body is generated, there is an airport where the measures industrial method is executed, too and it is an important investigation item for planning the measures industrial method to understand the generation realities of bristaring and the generation factor. The one to report on the result of executing the indoor examination and the field investigation of the detection of the delamination in the airport pavement inside of the body part that becomes the generation factor of the bristaring phenomenon and moisture by using the inquiry technology with the electromagnetic radiation radar in this report. It was confirmed that the inquiry technology with the electromagnetic radiation radar was an examination method the possibility of application there in the detection of the delamination and moisture under a certain constant condition as a result of the indoor examination and the field investigation. It was confirmed that there was possible that was able to extract the part that was not able to be detected by the measurement image by using the reflection intensity ratio.

《Keywords : electromagnetic radiation radar, non destructive examination, airport pavement, moisture, and delamination》