

寒冷地における舗装の ひび割れ被害の実態とその特徴

川端伸一郎¹・亀山修一²・金井利浩³・富澤健⁴・石田眞二⁵

¹ 正会員 博（工）北海道工業大学准教授 都市環境学科（〒006-8585 札幌市手稲区前田 7-15-4-1）
E-mail : kawabata@hit.ac.jp

² 正会員 博（工）北海道工業大学教授 都市環境学科（〒006-8585 札幌市手稲区前田 7-15-4-1）

³ 正会員 博（工）鹿島道路株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1）

⁴ 正会員 鹿島道路株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1）

⁵ 正会員 博（工）北海道工業大学准教授 都市環境学科（〒006-8585 札幌市手稲区前田 7-15-4-1）

北海道のような寒冷地では、低温が影響したと考えられる多数の舗装ひび割れが発生している。しかし、ひび割れ被害の実態を広域的に調べた事例は極めて少ない。そこで、北海道において舗装のひび割れ調査を実施した。調査は、20m 間隔で撮影した路面写真からひび割れを判別する方法で行い、凍結指数で分類した8路線（総延長800km）について実施した。横断方向のひび割れ（低温クラック）は、凍結指数と一義的な関係にあることが明らかとなった。縦断方向のひび割れ（凍上性クラック）は、凍結指数と関連しておらず、これは凍上対策の効果であると考えられた。また、凍上性クラックの特徴として、切土が盛土に比べて被害発生確率が高いことが示された。

Key Words: cold region, freezing index, low temperature cracking, frost heave

1. はじめに

北海道のような寒冷地では、本州などの温暖な地域と異なり、低温が影響したと考えられる多数の舗装ひび割れが発生している。舗装に生じたひび割れは、緊急に安全上の問題に直結する例は少ないものの、長期間放置すると舗装体の内部に雨水などが浸入し、凍結融解などの影響から、舗装寿命に大きく影響を与えてしまう。このため、ひび割れの抑制対策は、寒冷地における道路の維持管理上の継続的な課題と認識されている^{1),2)}。

低温に起因したひび割れは、発生方向によって原因が異なり、横断方向のひび割れは、表層アスファルトに対する温度応力によるもの（低温クラックと呼ばれている）、縦断方向は、主に路床の凍上によるものと考えられている。

既往の研究によると、低温クラックは凍結指数で800°C・days以上の地域から発生するとの報告³⁾や日最低気温または年最低気温が低温クラックの発生と関連するといわれている⁴⁾。

また、凍上による舗装の縦断ひび割れは、極寒地において頻繁にみられるものの、被害を報告した事例は比較的少ない。ただし、ひび割れに至らないまでも、凍上により変化する路面の縦断プロファイル

特性などが報告されており、切土部に被害が集中することや凍上によって縦断プロファイルに含まれる特定の波長成分が増加することなどが明らかにされている^{5),6)}。

以上のように、低温に起因した舗装の損傷被害は、原因を限定したものや局所的な調査が中心であり、被害の実態を総合的かつ広域的に調べた事例は極めて少ない。

そこで、本研究は北海道において実施した広域的な舗装のひび割れ調査から、ひび割れ被害の実態を明らかにし、その特徴について考察することを目的とした。

2. 調査概要

(1) 調査路線

本研究における調査エリアは北海道全域であり、調査路線は各地の10年確率凍結指数を基に国道から選定した。凍結指数とは日平均気温の累積値で、寒さの程度を表す気象パラメータである。ただし、凍結指数は年変動するため、道路設計においては確率統計手法による n 年確率凍結指数（多くは $n=10$ 年）を求めている。

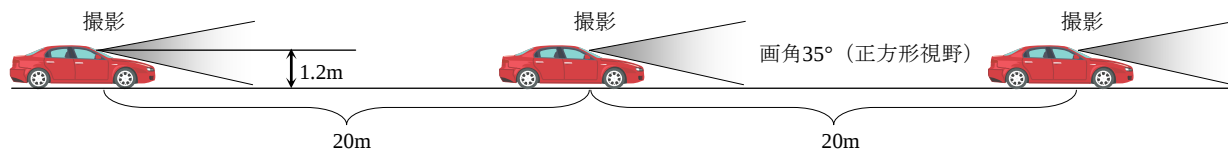


図-1 路面写真の撮影方法（シーンプロファイラ）

本研究では、北海道内の122地点（AMeDAS）の過去30年分の気温データから10年確率凍結指数を求めている。また、従来の指針等⁷⁾で示されている対数正規分布による n 年確率凍結指数は、真値よりも高い値を示すことが指摘されていることから、本研究においては、上位1/3データによる推定法⁸⁾により10年確率凍結指数を算出した。なお、以降の説明では、10年確率凍結指数を凍結指数と略称する。

表-1に示すように、路線選定に際しては、凍結指数 F を $400 \sim 1100^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$ の範囲で100刻み8段階に定め、AMeDAS観測点の位置情報から路線を選定した。なお、 $F = 400^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$ を最小値とした理由は、経験的ではあるが、同程度の F の地域（例えば札幌周辺）で低温による舗装の損傷をみる機会が比較的に少ないためである。

つぎに、凍結指数により区分された各路線の延長は、解析に利用できるデータ（後述する橋梁部とトンネル部を除いた延長）が100km以上になるよう配慮した。なお、凍結指数で選定される路線は、必ずしも連続したものではなく、北海道内広域に分散しており、各路線の詳細情報（交通量、舗装構成、供用年数など）は把握していない。

(2) 調査方法

本研究では、連続で撮影した路面写真からひび割れ状況などを数値化している。ここで、路面写真の撮影には、車両の車速パルスを基に、任意の距離間隔で自動的にシャッターを切る装置（シーンプロファイラ）を用いた⁹⁾。なお、撮影間隔は車両の走行速度などから、20m（60km/hで1.2秒間隔）とした。

図-1はシーンプロファイラによる路面撮影のイメージである。助手席側の路面から1.2mの高さに設置した一眼レフデジタルカメラ（Canon EOS Kiss Digital X）により、20m間隔で自動的に写真撮影が行われる。

撮影された写真から、ひび割れの状況と土工区分を目視で判別した。ひび割れは、写真内の奥行き20m範囲に対して、横断方向ひび割れ（以降、横断クラックと称す）は本数をカウントし、縦断方向ひび割れ（以降、縦断クラックと称す）は被害レベルを点数化した（表-1）。

ここで、凍上による縦断クラックは、写真-1のように車両走行位置とは無関係に道路中央部付近に発生することが多い。これは、中央部が路肩部よりも凍結が深部に達するためである。本研究では、写真

表-1 調査路線の概要と評価方法

調査路線		
路線 区分	10 年確率凍結指数（ F ）で路線を区分 F は 8 段階： $F=400\sim1100\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{days}$	
路線 延長	路線区分ごとに各 100km（計 8 路線 800km）	
評価項目と評価方法		
データ 間隔	評価項目	評価方法
20m (写真)	横断クラック	本数をカウント
	縦断クラック	目視で点数化（レベル 4 段階） 被害なし……………レベル 0 軽微なクラック……レベル 1 パッチング……………レベル 2 明瞭なクラック……レベル 3
	土工区分	解析対象：盛土，切土 V，切土 L， 切土 R，平地 解析対象外：橋梁，トンネル
100m (写真) (地図)	舗装明度 (写真)	道路区画線と路面の明度差
	方位（地図）	180°方向を 30°刻みで 6 分類 W（西），WNW（西北西）， NNW（北北西），N（北）， NNE（北北東），ENE（東北東）
	標高（地図）	100m 範囲の代表値



写真-1 凍上による縦断クラック

のようなクラックをレベル3と判断している。また、縦断クラックが多発している路線では、道路中央部付近にパッチングなどの補修が多いことから、これらをレベル2とした。なお、車両走行位置付近のパッチングについては、わだち掘れ等の補修と区別が付かないため評価には加えていない。

土工区分は、表-1に示す7種類に分類した。このうち、橋梁とトンネルは解析の対象外とするための抽出項目である。したがって、解析対象は、盛土、切土V、切土L、切土R、平地の5種類である。ここで、3種類の切土は、進行方向に対して、両切土（切土V）、左片切土（切土L）、右片切土（切土R）を表している。なお、この場合の進行方向とは、路線方位を 180° 範囲 30° 刻みで6分類にしたものであり、路線の標高と併せて電子地図により計測した（表-1）。平地とは、路面高さと周辺地盤高さが同一な場合であり、ほぼ例外なく市街地である。

つぎに、写真内の道路区画線と路面の明度を画像ソフトで100mごとに計測し明度差を求めた。これは、簡易的に舗装の劣化度を明度で表すことを目的としたものである。

(3) 気温観測路線におけるひび割れ調査

前述の(1)調査路線以外に、気温観測を実施する路線を定めた。これは、局所的な範囲で低温クラックが発生している特徴的な路線を予備調査によって選定し、気温と被害の関連性を考察することを目的としたものである。

本研究で定めた気温観測路線は、標高490mの峠道で山頂を境界にひび割れ被害が多発する特徴がある。調査対象とした路線延長は50kmで、(2)のひび割れ調査に加え、山頂を挟み標高がほぼ等しい2測点（標高150m）に対して、2009/11/1～2010/4/20の期間、1時間間隔で気温を観測した。

3. 調査結果と考察

(1) 調査路線の特徴と被害の全体傾向

図-2は凍結指数ごとの調査路線の土工区分割合である。ここで、前述したように、橋梁およびトンネルは解析の対象外としていること、さらに、3種類の切土を統合して表示しているため、同図は3分類となっている。調査路線の大部分は盛土であり、次いで切土の割合が高い。平地は凍結指数によっては20%弱を占める場合もあるものの、全体的には土工区分での比較に用いるほどのデータは含んでいないと判断した。

図-3は、凍結指数と解析対象の土工区分全体を平均した横断クラックの関係である。なお、横断クラックは、20m範囲のクラック本数で表現している。同図から両者には一義的な関係がみられ、凍結指数が大きな箇所ほど横断クラックが多く発生することが明らかである。

同じく図-4は、凍結指数と縦断クラック（全体平

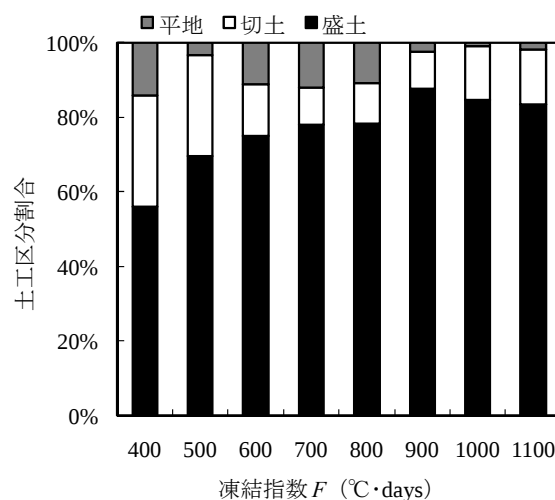


図-2 各路線の土工区分割合

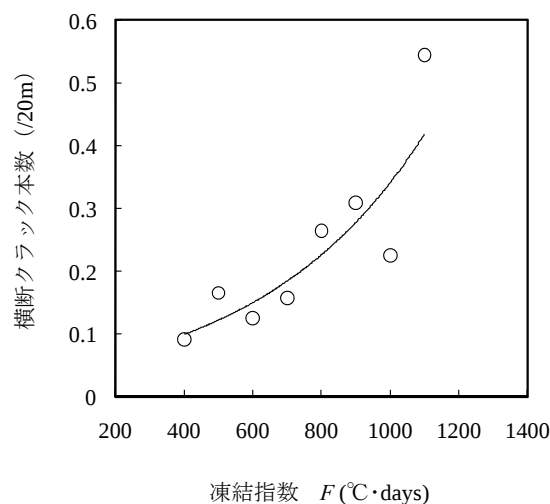


図-3 凍結指数と横断クラックの関係（全平均）

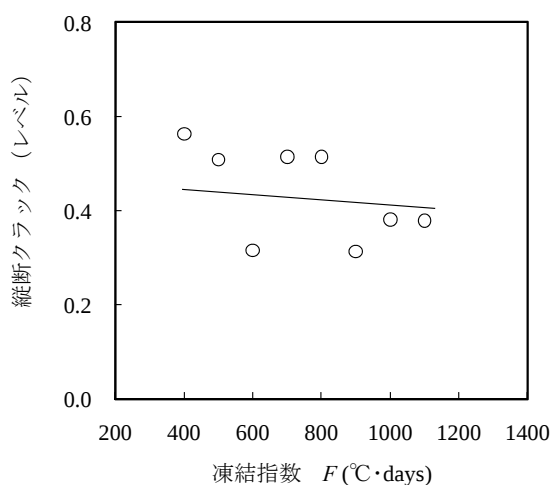


図-4 凍結指数と縦断クラックの関係（全平均）

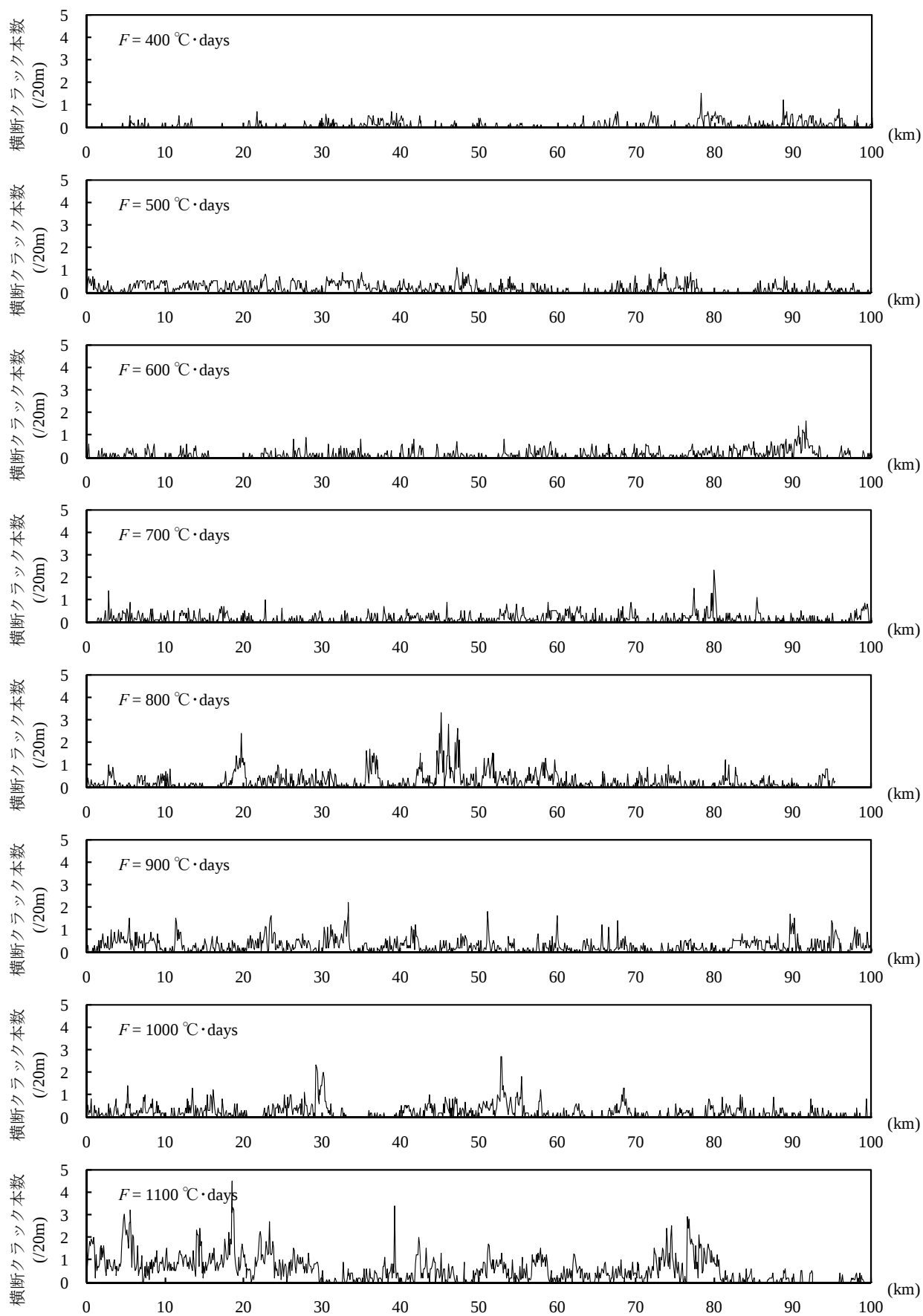


図-5 各路線で測定された横断クラック

均)の関係である。なお、縦断クラックは、被害を4段階で数値化し、延長から被害レベルの平均値を求めている。同図から、縦断クラックについては、図-3に示した横断クラックのような凍結指数との関係はみられないことが分かる。縦断クラックは主に凍上が原因と考えられるが、道路には凍結指数に応じた凍上対策(置換工法)が施されている。したがって、凍結指数と縦断クラックが互いに関連しないことは、凍上対策の効果であると判断できる。

(2) 横断クラック被害の特徴

図-3に示したように、横断クラックは凍結指数が増加するほど、被害が顕著に表れる傾向にあった。本節では、横断クラックの発生に関連する因子や被害の特徴について考察する。

図-5は、各路線で測定された横断クラックである。なお、この関係を路線ごとに平均したものが図-3である。図-5の関係からも、凍結指数の増加による横断クラックの発生頻度の違いが明らかである。また、同図からは $F=800^{\circ}\text{C}\cdot\text{days}$ を境界として、被害が多くなるようである。前述したように、既往の研究³⁾においても $F=800^{\circ}\text{C}\cdot\text{days}$ 以上の地域から横断クラックが発生すると報告されており、本結果の傾向とも一致している。

つぎに、アスファルト混合物は、紫外線による経年劣化により褐色化することが知られている¹⁰⁾。また、路面は供用年数に応じてアスファルトが摩耗し、骨材の色が強調されるため、年数が長いほど白色化した印象を受けることが多く、経年的に変色するアスファルト路面の色特性を調べた既往研究もある¹¹⁾。

調査時の印象から、横断クラックが多い箇所の舗装面は、供用年数が長く白色化していると感じられたことから、撮影された写真から路面の明度(100%が白、0%が黒を表す)を測定した。この際、路面写真は、撮影時刻や地形条件などによって日射条件が異なることから、道路区画線(白線)の明度を基準にした明度差で表すこととした。

この路面明度は、道路区画線を基準とした簡易指標であり、道路区画線の濃淡などによっても数値が変化するものであるが、サンプル写真による路面色

の印象(白色度)に連動して数値が変化することを確認できたことから、概略値として供用年数に類する値として用いることとした。

図-6は、被害が顕著な $F=800^{\circ}\text{C}\cdot\text{days}$ 以上の路線における路面明度と横断クラックの関係である。この関係から、路面が白色化するに従い、横断クラックの本数が増加する傾向がみられる。白色化が経過年数を表すとすれば、横断クラックはアスファルト混合物の経年劣化に関連して被害が増大しているといえる。

一方、縦断クラックについても同様の整理をしたが、このような傾向は見られなかった。縦断クラックは路床の凍上に起因するものであり、舗装の経年劣化とは無関係であることが再認識された。

これまで述べた結果は、日平均気温から算出される凍結指数からの考察である。しかし、横断クラック(低温クラック)は、急激な温度低下によりアスファルト層内に生じた温度勾配による温度応力が原因と考えられており^{2),12)}、既往の研究でも日最低気温との関連性も示されている⁴⁾。

図-7は、気温観測路線における横断クラックと路線標高の関係である。当該路線は、狭小範囲で特徴的な被害がみられる路線として選定したものであり、

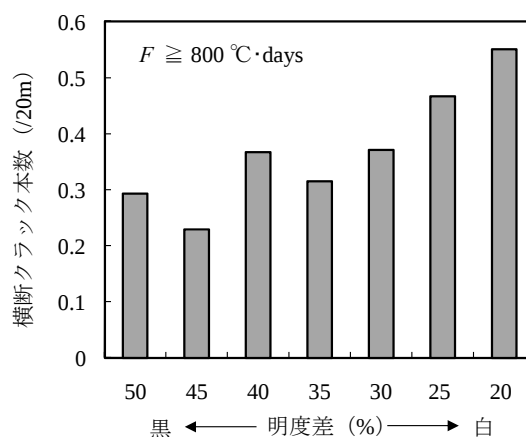


図-6 路面明度と横断クラックの関係

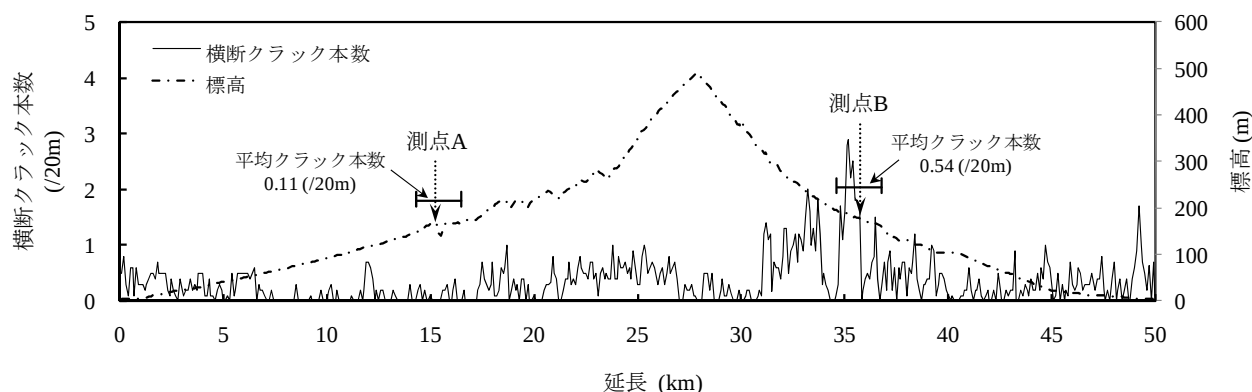


図-7 気温観測路線で測定された横断クラックと測点情報

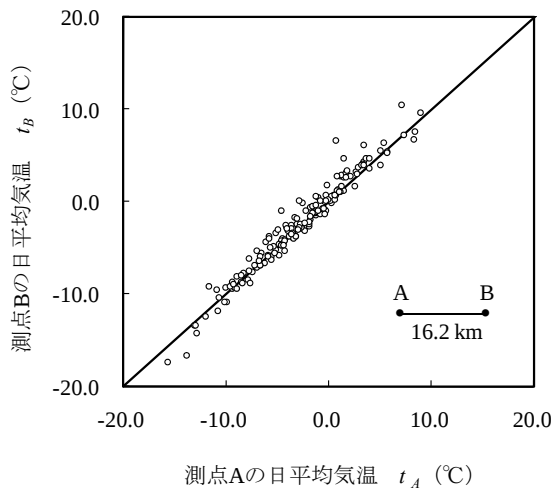


図-8 測点 A・B における日平均気温の比較

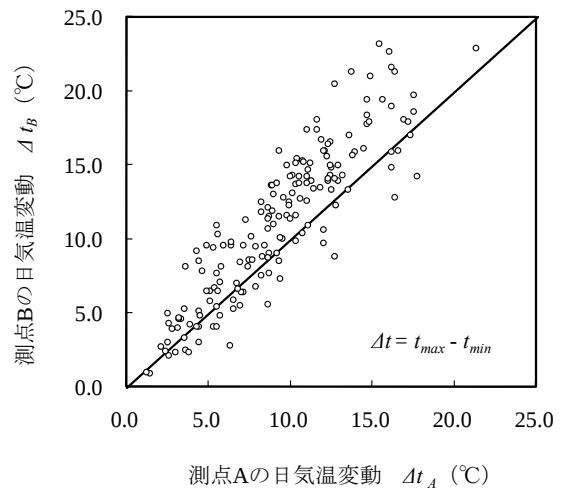


図-9 測点 A・B における日気温変動量の比較

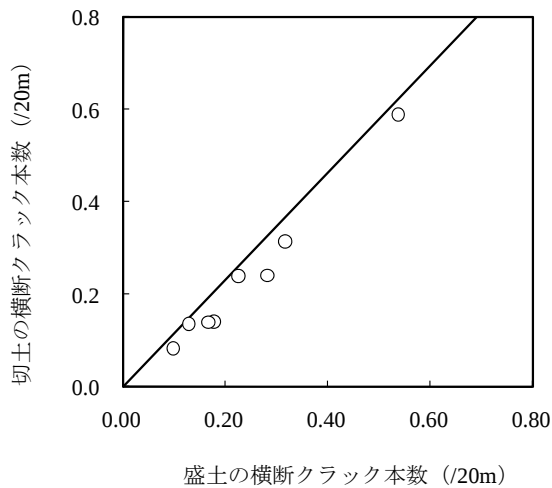


図-10 横断クラックの土工区分比較

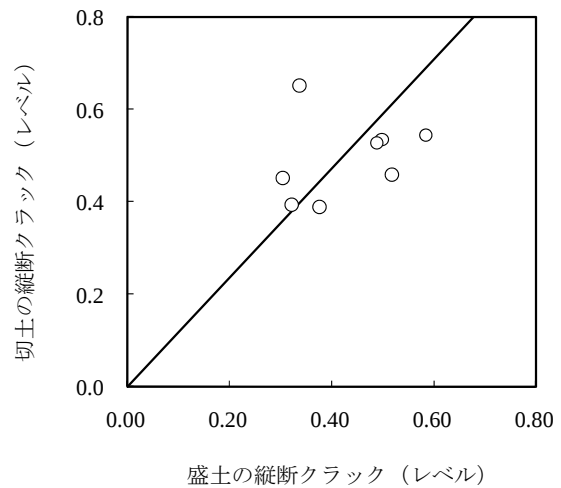


図-11 縦断クラックの土工区分比較

山頂部を境界にクラックが多発する特徴がある。なお、この路線の凍結指数は、近隣の AMeDAS データから $F \approx 850^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$ である。この路線内に標高がほぼ等しく、被害程度の異なる 2 測点（測点 A、B）を決め温度観測を行った。ここで、測点 A は被害が少ない箇所（前後 1km 範囲の平均クラック本数 0.11）、測点 B は被害が多い箇所（クラック本数 0.54）を代表している。

図-8 は、測点 A・B の日平均気温の比較である。ちなみに、両測点は直線距離で 16.2km 離れている。この関係から両測点の日平均気温は、ほぼ同値であることが分かり、凍結指数を算出した場合には相違はないことになる。

これに対して、図-9 は日最高気温と日最低気温の差から求めた日気温変動量の関係である。日平均気温では、両測点に明確な違いはみられなかったが、日気温変動量は、被害が顕著な測点 B で大きくなる傾向を示している。本研究では、路線の詳細情報を把握していないため推論を含むが、本結果のように狭小範囲においても気温の変動特性に違いがある場

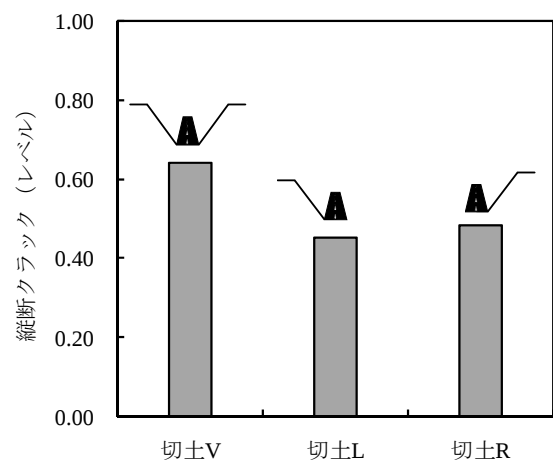


図-12 切土の種類と縦断クラックの関係

合には、クラックの発生に大きく影響する可能性が高いと考えられる。

(3) 縦断クラック被害の特徴

道路の凍上被害が切土部に集中することや^{5),6)}、盛土高さによって凍上量が変化するなど¹³⁾、土工の種類（盛土・切土の区別、盛切の高さ）は、凍上と深く関連することが知られている。

図-10 は、凍結指数ごとに盛土と切土の横断クラックを比較したものである。同じく図-11 は、縦断クラックの関係である。両図の関係から明らかなように、横断クラックは、盛土と切土で有意な差は無く土工区分とは無関係である。これに対して、縦断クラック（凍上性クラック）は、切土部の値が総じて大きく被害が現れやすい傾向がみられ、本研究のような広域調査によっても、従来から指摘されているような結果が得られたことになる。

切土部に凍上被害が集中しやすいのは、凍上に必要な水分が集まりやすいことや、日射が遮られ凍結深さが深部に達することが理由として挙げられる。路面の日射条件は、路線方位や切土形状などに支配されるものと考えられるが、このような条件と凍上被害の関係を調べた事例は少ない。ただし、関連研究では、切土の法面方位と凍結深さの関係などが整理されており、凍上被害の軽減のために法面方位を考慮することが重要であると指摘されている^{14),15)}。

図-12 は、縦断クラックを3分類した切土で比較したものである。なお、縦断クラックについては、図-4 に示したように凍結指数による明確な相違がないため、凍結指数で区別せず全平均としている。同図から両切土（切土 V）が最も被害レベルが高く、2種類の片切土（切土 L・R）は同程度であることが分かる。両切土の被害レベルが高いことは、片切土に比べて日射量が少なくなるためと考えられる。

つぎに、各切土に対して路線方位とクラックの関係を整理した。図-13 に示したように、両切土は北北西（NNW）～西北西（WNW）にかけて被害が少なくなっている。この方位は一日で最も気温が高くなる午後に路面への日射量が大きくなる路線方位である。図-14 は左片切土の関係であり、北北西（NNW）～西（W）の範囲で被害が少ない。すなわち、日射を受けやすい方向の路線ほど被害が少なくなっている。これとは逆に、図-15 に示した右片切土は、対称的に東北東（ENE）～北（N）の範囲で被害が少なく、これらの結果から日射の影響として路線方位と凍上被害の関連性が示されたと考えられる。

4. まとめ

低温に起因した舗装のひび割れ被害の実態把握を目的に、北海道において広域的なひび割れ調査を実施した。ひび割れ被害の特徴など得られた結果は、以下の通りである。

- 凍結指数と横断クラックには、一義的な関係がみられ、凍結指数の増加に伴い横断クラックも増加する傾向が明らかとなった。これに対して、縦断クラックは凍結指数との関連性がみられず、

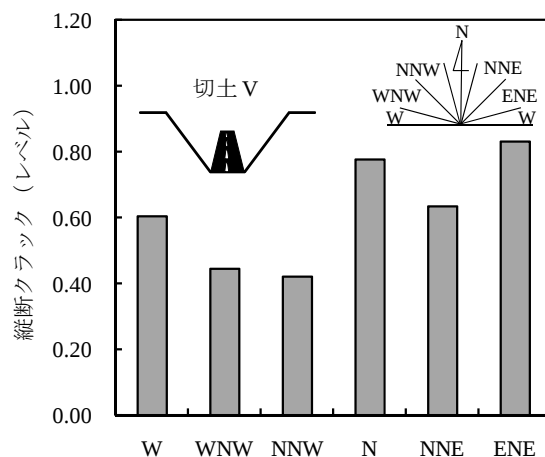


図-13 両切土（切土 V）における路線方位と縦断クラックの関係

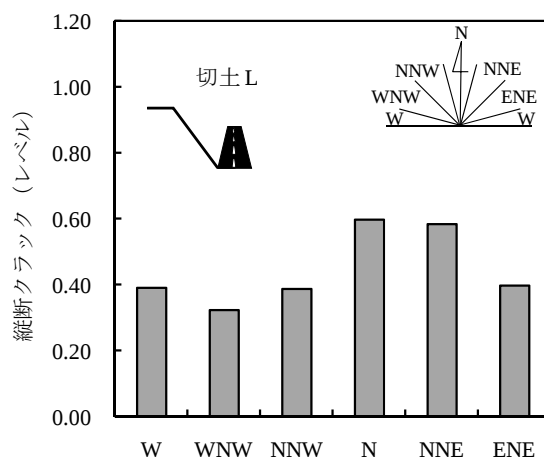


図-14 左片切土（切土 L）における路線方位と縦断クラックの関係

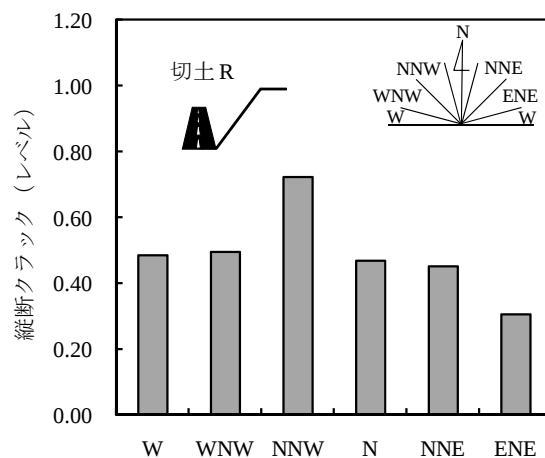


図-15 右片切土（切土 R）における路線方位と縦断クラックの関係

理由としては凍上対策の効果と考えられた。

- ・横断クラックは、凍結指数 $F = 800^{\circ}\text{C}\cdot\text{days}$ を境界として、被害が多くなる傾向にあり、既往の研究で示されている値とも一致していた。
- ・路面の明度を測定した結果、横断クラックが経年的に増加していることが分かった。これに対して、縦断クラックは明度との関係が見られず舗装の経年劣化とは無関係であった。
- ・狭小範囲においても気温の変動特性に違いがある場合には、横断クラックの発生に大きく影響する可能性が高いと考えられた。
- ・横断クラックは、土工区分と無関係であるのに対して、縦断クラック（凍上性クラック）は、切土部に被害が現れやすい傾向がみられた。
- ・切土の種類で縦断クラック被害を比較すると、断面が V 字型の両切土が最も被害を受け易いことが明らかとなった。これは、片切土に比べて日射量が少なくなるためと考えられた。
- ・3 種類の切土に対して、路線方位と縦断クラックの関係を整理した結果、日射の影響として路線方位と凍上被害の関連性が示された。

すでに、高速道路では過去の被害事例などから盛土と切土で置換厚を変える凍上対策工法が実施されている¹⁶⁾。しかし、一般道に関しては被害事例なども少なく、このような対応には至っていない。

同じく、低温クラックに関しても具体的な対策が普及していないのが現状である。このため、本研究の結果は、これらの被害対策の必要性を今後に検討するための基礎資料になるものと考えている。

参考文献

- 1) 小栗学, 高橋守人, 蛭子恭好: 低温クラック抑制のためのアスファルトの選定について, 北海道開発土木研究所月報, No.542, pp.28-33, 1998.
- 2) 安倍隆二, 岳本秀人, 鈴木拓雄, 木村清和, 黒瀬雅詞, 田口仁: 応力解放法によるアスファルト舗装の低温クラックに関する基礎研究, 北海道開発土木研究所月報, No.634, pp.17-26, 2006.
- 3) 安部篤, 小笠原章, 野竹俊雄: 北海道における低温ク

- ラックの発生実態について, 土木学会第 50 回年次学術講演会講演概要集 (V), pp.514-515, 1995.
- 4) 小笠原章, 安部篤, 野竹俊雄: 気温とアスファルトゼイ化点が低温クラックに与える影響, 土木学会第 50 回年次学術講演会講演概要集 (V), pp.512-513, 1995.
- 5) 亀山修一, 川端伸一郎, 豊田邦男, 川村彰, 笠原篤: 寒冷地の高速道路における平坦性の季節変動に関する研究, 土木学会論文集, No.742, VI-60, pp.51-60, 2003.
- 6) 亀山修一, 川端伸一郎, 豊田邦男, 川村彰, 姫野賢治: 凍上の影響を受けた高速道路の縦断プロファイル特性, 土木学会論文集, No.802, V-69, pp.223-234, 2005.
- 7) 日本道路協会: 舗装設計施工指針 (平成 18 年度版), pp.171-174, 2006.
- 8) 川端伸一郎, 亀山修一, 高見雅三, 神谷光彦: 凍結指数推定における各種確率分布モデルの適合性, 土木学会論文集 C, Vol.65, No.3, pp.716-727, 2009.
- 9) 浅田拓海, 石田真二, 谷下雅義, 原文宏, 亀山修一: 「シーニックバイウェイ北海道」指定ルートのシーケンス景観の評価に関する研究, 土木学会論文集 D, Vol. 65, No. 1, pp.77-87, 2009.
- 10) 草場敏宏, 内田昌秀, 村山翔一: アスファルト表面遮水壁保護層の変色と紫外線量の測定, 土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集 (V), pp.163-164, 2006.
- 11) 上島壯: 高解像度衛星画像によるアスファルト路面の色特性の解析, 土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集 (V), pp.68-69, 2001.
- 12) 森吉昭博, 上島壯, 菅原照雄: アスファルト混合物の破壊強度に関する研究, 土木学会論文集, No.210, pp.57-64, 1973.
- 13) 横田聖哉, 三嶋信雄, 三浦清一: 地下水位を考慮した実用的な凍上量の設定法, 土木学会論文集, No.574, VI-36, pp.21-31, 1997.
- 14) 宗岡寿美, 土谷富士夫, 武田一夫, 辻 修, 伊藤隆広: 寒冷少雪地域における切土法面の設計・施工と保全問題, 土と基礎, Vol.50, No.1, pp. 7-9, 2002.
- 15) 宗岡寿美, 土谷富士夫, 辻 修, 武田一夫: 冬期の気象環境が斜面の積雪・凍結に及ぼす影響, 雪氷, Vol.66, No.2, pp.217-226, 2004.
- 16) 地盤工学会北海道支部: 寒冷地地盤工学, 中西出版, pp.88-89, 2009.

CHARACTERISTICS OF CRACKING ON ASPHALT PAVEMENTS IN COLD REGIONS

Shinichiro KAWABATA, Shuichi KAMEYAMA, Toshihiro KANAI,
Ken TOMISAWA and Shinji ISHIDA

In cold regions like Hokkaido, cracking of asphalt pavements occurs due to low temperature. However, there are very few records of cracking damage over a wide area. Therefore, cracking of asphalt pavements was investigated in Hokkaido. Cracking was identified from photos taken at 20m intervals along roads. Eight routes (a total length of 800km) were investigated to check if there was correlation with freezing index. It was clarified that transverse (low temperature) cracking could be correlated with freezing index, but that longitudinal (frost heave) cracking could not. This was considered to be due to the effect of the replacement method. It was also found that the probability of damage was higher in cut than in fill, and this was understood to be a characteristic of frost heave cracking.