

凍上の影響を受けた高速道路の 縦断プロファイル特性

亀山修¹・川端伸一郎²・豊田邦男³・川村彰⁴・姫野賢治⁵

¹正会員 北海道工業大学助教授 工学部社会基盤工学科 (〒006-8585 札幌市手稲区前田7条15丁目4-1)
E-mail:kameyama@hit.ac.jp

²正会員 北海道工業大学助教授 工学部社会基盤工学科 (〒006-8585 札幌市手稲区前田7条15丁目4-1)
E-mail:kawabata@hit.ac.jp

³日本道路公団 北海道支社 札幌技術事務所 (〒004-0042 札幌市厚別区大谷地西5丁目12-15)
E-mail:Kunio.Toyota@jhnet.go.jp

⁴正会員 北見工業大学助教授 土木開発工学科 (〒090-8507 北見市公園町165番地)
E-mail:kawamura@stce2.civil.kitami-it.ac.jp

⁵フェロー会員 中央大学教授 理工学部土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)
E-mail:khimeno@civil.chuo-u.ac.jp

本研究では、寒波に見舞われた2000年と2001年の冬季に寒冷地の高速道路で測定した縦断プロファイルを解析し、凍上によってラフネスが増大した高速道路の縦断プロファイル特性を明らかにすることを目的とした。冬季におけるIRIの変動を解析した結果、切土部における冬季IRIの増加速度は凍結速度に依存すること、およびIRIの冬季最大増加量と最大切土高さには相関があることが分かった。また、切土部では、凍上によって縦断プロファイルに含まれる波長5.7m以上の長波長成分が増加し、その増加速度は凍結速度に大きく影響されることが分かった。さらに、凍上によって増加する長波長成分の中でも波長5.7~22.6mの成分の増加が冬季のIRIおよび舗装に作用する動荷重の増加をもたらすことを明らかにした。

Key Words : roughness, frost heave, IRI, PSD, octave-band, dynamic load

1. はじめに

車両と道路は路面を介して接していることから、路面が有する特性は道路利用者や沿道住民の安全性、快適性、経済性などに大きな影響を及ぼす。通常、路面の特性は、路面凹凸の波長によって表され、マイクロテクスチャ(波長0.5mm以下)、マクロテクスチャ(同0.5~50mm)、メガテクスチャ(同50mm~0.5m)、ラフネスの4つのカテゴリに分類される¹⁾。

ラフネスは、路面凹凸の波長が0.5~50mの範囲であり、車両もしくは乗員の動的応答特性に関連する乗り心地やころがり抵抗、車両の損傷など車両のオペレーティングコストに影響を与える。道路のラフネスを測定する方法としては、路面の凹凸を直接測定する方法に加え、路面の凹凸によってもたらされる車両の動的応答を測定する方法²⁾や乗員の主観的評価に基づく方法などがある³⁾。近年、世界各国では、慣性プロファイラを用いて路面の凹凸、すなわち縦断プロファイルを高速で測定する方法が

主流となっている。ラフネスの評価には、縦断プロファイルから算出されるパワースペクトル密度(PSD)に基づく評価方法が用いられたが、最近では、縦断プロファイルから算出される国際ラフネス指数(IRI)⁴⁾が広く用いられている。IRIは世界銀行によって開発された指標であり、2軸4輪の乗用車の1輪だけを取り出したクォーターカー(以後、QC)が80km/hで路面上を走行させたときに生じる上下方向の運動変位の累積値と走行距離の比によって表される。

ラフネスは、交通荷重や交通量と同様、気象条件や地理的条件などの影響によって季節変動することが知られている。特に寒冷地では、冬季に生じる道路の凍上によってラフネスが増加すると言われている。米国では、LTPP(舗装の長期供用性)モニタリングプログラムの一環として、4つの気候区分(Wet Freeze, Dry Freeze, Wet No Freeze, Dry No Freeze)において縦断プロファイル測定が実施された。調査結果をまとめたレポートでは、Dry Freeze, Wet No Freeze, Dry No Freeze においてはラフネ

スの季節変動は見られなかったが、Wet Freezeの気候区分であるニューハンプシャー州の道路では、1997年冬、凍上によってIRIが同年春の2倍に達したと報告されている⁹⁾。また、Doreらによれば、カナダのケベック州では、凍上による隆起が不同的に生じたこと（以後、不同隆起）によって1995年と1996年の冬季IRIが冬季前の約1.6～1.8倍に増加したことが報告されている⁹⁾。さらに、Doreらは、凍上によって生じる不同隆起の主な原因は、路床の土質の縦断方向における不均一性であると述べており、ある区間における冬季のIRI増加量を、舗装の供用年数、区間内で4m離れた2点における路床土の200通過百分率の平均とセミバリオグラム（空間的自己相関）、道路中央部の平均凍上量から推定する方法を提案している^{7)・8)}。

わが国でも、凍上による道路被害は、特に寒冷地における道路の維持管理において、古くから大きな問題であり、これに対処するために様々な調査、研究がおこなわれてきた。現在、道路の凍上対策としては置換工法が最も広く用いられている。これは、施工性および経済性を考慮に入れ、10年確率凍結指数から推定される凍結深さの70～100%を切込砕石や砂などの凍上を起しにくい材料で置き換える工法である。寒冷地における高速道路の凍上対策も置換工法が主であるが、寒波に見舞われた冬には道路の平坦性が悪化したという報告⁹⁾や、平年並みの寒さであっても、大規模な切土、オーバブリッジ、土被りの薄いボックスカルバート部などでは凍上によって道路に不陸が生じた例が報告されている¹⁰⁾。著者らは、2000年2～4月にかけて測定した道東自動車道の縦断プロファイルから求めたIRIの冬季変動を解析し、切土の占める割合が大きい区間では、凍結指数が最大となる3月中旬まで凍結指数の増加とともにIRIが増加し、4月中旬には、IRIが冬季前とほぼ同じレベルに回復することを明らかにしている¹¹⁾。

ラフネスは乗り心地や車両のオペレーティングコストに影響を及ぼすのみならず、舗装に作用する荷重にも大きな影響を及ぼす。ラフネスが大きくなると、路面に作用する走行車両の動的なタイヤ荷重（以後、動荷重）は増加し、舗装の破壊を促進することから、舗装マネジメントシステムの構築にとって不可欠である舗装の寿命推定においては、ラフネスの影響を考慮に入れる必要がある。Cebonを中心としたグループは、縦断プロファイルから計算される動荷重を路面に作用させたときに生じる舗装内部の応答から舗装の健全度や寿命を推定する方法を開発している¹²⁾。また、Chattiを中心としたミシガン州立大学のグループは、縦断プロファイルから計算することができる指標、動荷重指数（DLI：Dynamic Load Index）を開発し、DLIと舗装の損傷進行速度の関係から修繕時期を求める方法を提案している¹³⁾。

本研究では、1999年11月、2000年2～4月と2001年1～4月の毎週、および2001年5月に測定された道東自動車道の縦断プロファイルを解析し、冬季に生じる凍上の影響を受けた舗装の縦断プロファイル特性を明らかにすることを目的としている。さらに、測定した縦断プロファイルを用いてQCが走行した際に路面に生じる動荷重を計算し、凍上によってもたらされるラフネスの増加が動荷重に及ぼす影響について検討した。また、押出法ポリスチレンフォームを用いた断熱工法による凍上対策改良工事を実施した区間の縦断プロファイルを解析し、断熱工法の効果についても検討した。

2. 調査の概要

(1) 調査路線

調査を実施した路線は、1995年に供用が開始された道東自動車道、芽室 I.C. から池田 I.C. まで（k.p.218～k.p.249）の延長 31km、片側 1 車線のアスファルト舗装である。調査路線が位置する北海道十勝地方は、雪が少なく、寒さが厳しい地域であり、厳冬季における日平均気温は-20℃以下に達する。

調査を実施した2000年と2001年の冬季、および過去10年間（1989～1998年）の冬季の日平均気温の累積を図-1に示す。なお、日平均気温には、調査路線内にある音更帯広 I.C. から北に6.5km離れたアメダスデータ観測地点（駒場）の気温データを用いている。

2000年の調査を実施した冬季の凍結期間は1999年11月26日（以後、月日は11/26のように記す）～2000年3/29までの125日間、最大凍結指数 F_{max} は910℃days、2001年の調査を実施した冬季の凍結期間は2000年11/12～2001年3/17までの122日間、最大凍結指数 F_{max} は1005℃daysであった。過去10年間の最大凍結指数と比べ、2000年は約200℃days、2001年は約300℃days大きいことから、調査を実施した冬季はいずれも寒さが厳しかったことが分かる。

(2) 縦断プロファイルの測定

調査路線における左輪走行位置と右輪走行位置の縦断プロファイルを慣性プロファイラを用いて測定した。縦断プロファイルの測定は、1999年11/20（以後、1999年秋季）、2000年2/11～4/15と2001年1/16～4/21の毎週、および2001年5/21（以後、2001年春季）に実施した。

本研究で使用した慣性プロファイラは、図-2に示すように、測定車両後部のフレームに取り付けられた路車間変位センサと慣性測定ユニット（IMU）から構成される。路車間変位センサは左右後輪の直後に位置する非接触型のレーザセンサであり、路面と車両の距離を測定する。

IMUは2個の路車間変位センサの中間にあり、測定車両の鉛直加速度を測定する加速度計とロール角、ピッチ角を測定するジャイロで構成される。IMUによって測定された鉛直加速度から測定車両の鉛直変位を、ロール角とピッチ角から測定車両の姿勢角を算出し、これらと路車間変位センサによって測定された路車間距離からサンプリング間隔0.25mの縦断プロファイルが得られる。

IMUは測定車両の走行速度の影響を受けることから、縦断プロファイルの測定速度は一定であることが望ましい。当該路線の法定速度は70km/hであり、冬季の気象条件によってはそれ以下に引き下げられるケースもあることから、本調査では、縦断プロファイルの測定速度を65km/hに統一した。IMUの周波数応答帯域は0.4~12Hzであることから、速度65km/hで測定した際に本装置によって測定できる縦断プロファイルの波長範囲は約1.5~45mとなる。

また、湿潤路面では非接触型レーザセンサの測定が不可能になることから、測定開始前にタイヤに雪氷が付着していないことを確認するとともに、測定時の路面状態をビデオカメラで撮影した。解析にはビデオによって路面が乾燥状態であることを確認したデータを用いた。

3. 凍結深さの推定

現在、寒冷地における高速道路の凍上対策としては主として置換工法が用いられている。アスファルト舗装要綱に示されている十勝地方の10年確率凍結指数に基づいて調査路線の置き換え深さは1mに設定され、舗装厚と置き換え深さの差は凍上抑制層として碎石や砂などの非凍上性材料で置き換えられている。しかしながら、調査を実施した2000年と2001年の冬季は、平年と比べ著しく寒かったことから凍上が生じた可能性がある。

延長31kmにも及ぶ供用中の高速道路の凍結深さを実測することは非常に困難であることから、本研究では、図-1に示した凍結指数を式(1)に代入し、凍結深さを推定した¹⁰⁾。式(1)の妥当性については、伊福部¹⁰⁾、久保¹⁶⁾らが検討しており、推定された凍結深さと現場において実測された凍結深さは十分な精度で一致することが明らかになっている。

$$Z = \lambda_c \sqrt{\frac{172800\lambda F}{L_w}} \quad (1)$$

- Z : 凍結深さ (m)
- F : 凍結指数 (°Cdays)
- λ : 凍結時と未凍結時の平均熱伝導率 (W/m K)

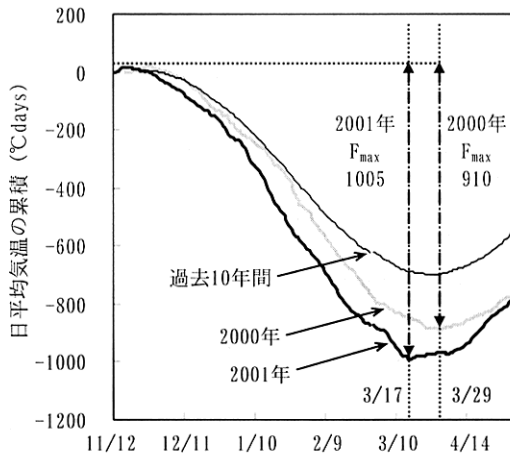


図-1 調査実施年の冬季における日平均気温の累積

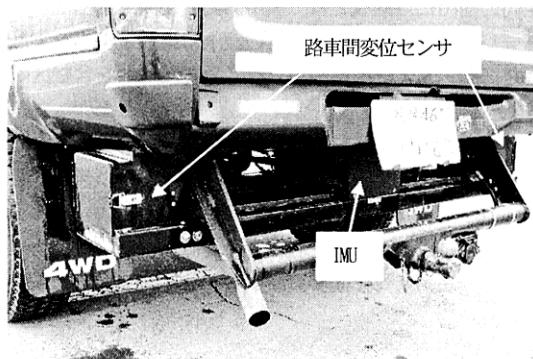


図-2 調査に用いた慣性プロファイラ

- L_w : 凍結潜熱 (J/m³)
- λ_c : 融解パラメータと熱比で表される係数

調査路線の舗装構造は均一であることから、凍結深さの推定に当たって、実際の舗装構造を図-3のように単純化した。凍結指数、および舗装構成層の層厚と表-1に示した北海道における道路材料の平均的な熱的定数^{17)、18)}から算出した λ 、 λ_c 、 L_w を式(1)に代入して得られた2000年および2001年の凍結深さと過去10年間の日平均気温を基に算出した凍結深さを図-4に示す。過去10年間の平均値から得られる最大凍結深さは1.07mであり、調査路線の置き換え深さとほぼ同等であった。しかしながら、2000年と2001年の凍結深さは平年よりもかなり大きく、2000年は2月中旬、2001年では1月下旬に凍結深さが1mに到達したと推定される。その後も凍結深さは増加し、2000年では3/29に最大凍結深さ1.21m、2001年では3/17に最

大凍結深さ 1.27m に達したと推定されることから、兩年ともに凍上が生じるための寒さの条件が十分備わっていたと考えられる。さらに、上部路体（以後、路床）に用いられている材料は、施工時に実施した凍上試験によって凍上性材料であることが判明していることから、調査を行った 2000 年と 2001 年の冬季では調査路線に凍上が生じた可能性が極めて高い。

4. 解析区間の抽出

著者らは、2000 年 2~4 月に測定された縦断プロファイルを解析した結果、切土の占める割合が大きい区間では、凍上によって冬季の IRI が増加することを明らかにしていることから¹¹⁾、本研究では、施工時の記録から、延長が 100m 以上となる盛土区間と切土区間を抽出し、これらの区間の縦断プロファイルを解析することとした。なお、区間の抽出に当たっては、供用開始後に断熱工法やオーバーレイなどの置換工法以外の凍上対策改良工事を実施した区間、および橋梁やボックスカルバートを含む区間は除外した。

抽出された切土区間の位置、延長、最大切土高さ、および盛土区間の位置、延長を表-2 に示す（以後、区間 C01~C18 の総称を切土部、E01~E18 を盛土部）。なお、本研究では、測定した左右輪走行位置の縦断プロファイルの内、左輪走行位置の縦断プロファイルを解析に用いた。

5. IRIの冬季変動

切土部と盛土部の 1999 年秋季 IRI、2000 年と 2001 年の調査期間における IRI の最大値（以後、冬季最大 IRI）、2001 年春季 IRI を図-5 に示す。盛土部と切土部の 1999 年秋季 IRI はほぼ同等であったが、冬季最大 IRI は、2000 年、2001 年ともに切土部の方が大きくなった。また、盛土部では兩年の冬季最大 IRI にほとんど差が見られなかったが、切土部では、最大凍結深さが大きい 2001 年の冬季最大 IRI は 4.6m/km となり、2000 年の冬季最大 IRI よりも約 1m/km 大きくなった。切土部、盛土部ともに、2001 年春季 IRI は 1999 年秋季 IRI とほぼ同じレベルに戻ることから、IRI の増加は冬季だけに見られる現象であることが分かる。

切土部において冬季最大 IRI が得られた測定日の度数分布を図-6 に示す。2000 年、2001 年ともに冬季最大 IRI を示した測定日は 3 月中旬（3/11~3/20）に集中しており、2000 年では全体の約 40%、2001 年では約 60%がこの期間に

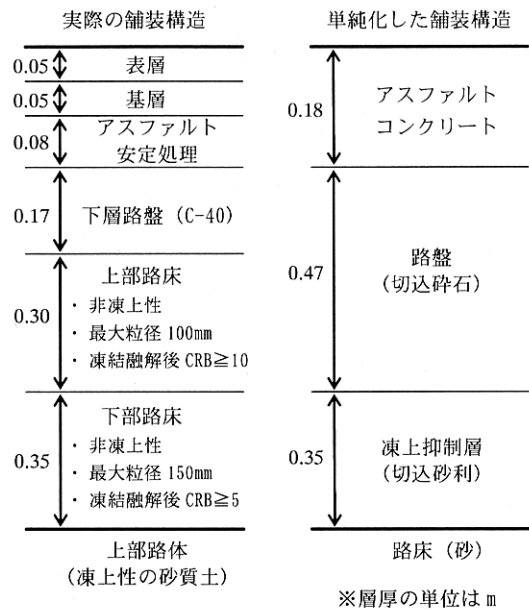


図-3 凍結深さの推定に用いた舗装構造

表-1 北海道における道路材料の平均的な熱的定数^{17)・18)}

材料	熱伝導率 (W/m K)	熱容量 ($\times 10^6$ J/m ³ K)	凍結潜熱 ($\times 10^6$ J/m ³)
アスファルト	1.153	1.875	0
コンクリート	1.153	1.875	0
切込碎石	1.348	1.737	33.5
切込砂利	1.396	1.863	46.9
砂	1.356	1.951	82.9

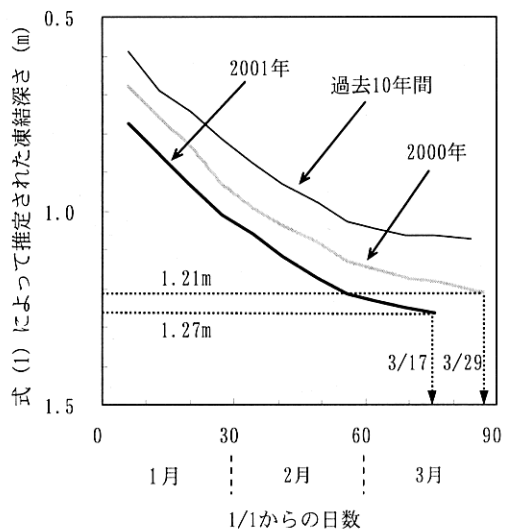


図-4 調査実施年の冬季における凍結深さ

表-2 抽出された解析区間

総称	区間	始点 k. p.	終点 k. p.	延長 (m)	最大切土 高さ (m)	総称	区間	始点 k. p.	終点 k. p.	延長 (m)
切土部	C01	218.02	218.28	260	13.12	盛土部	E01	219.40	219.60	200
	C02	218.74	218.96	220	14.05		E02	224.58	224.94	360
	C03	219.12	219.30	180	11.86		E03	225.24	225.40	160
	C04	219.72	220.20	480	8.88		E04	227.02	227.18	160
	C05	220.34	220.78	440	14.73		E05	227.38	227.74	360
	C06	222.74	223.42	680	38.72		E06	228.08	228.52	440
	C07	231.98	232.62	640	12.21		E07	228.74	228.84	100
	C08	236.30	236.56	260	17.02		E08	229.10	229.70	600
	C09	236.74	237.00	260	34.84		E09	233.50	233.86	360
	C10	239.64	239.84	200	10.85		E10	234.06	234.38	320
	C11	240.70	240.92	220	5.45		E11	237.56	237.82	260
	C12	241.16	241.38	220	13.51		E12	239.14	239.54	400
	C13	241.56	241.72	160	3.31		E13	242.38	242.50	120
	C14	242.76	242.94	180	5.12		E14	243.82	243.98	160
	C15	243.02	243.52	500	16.19		E15	244.00	244.10	100
	C16	246.46	246.80	340	14.65		E16	244.30	244.42	120
	C17	247.48	247.66	180	12.64		E17	245.38	245.70	320
	C18	248.28	248.64	360	11.78		E18	246.00	246.14	140

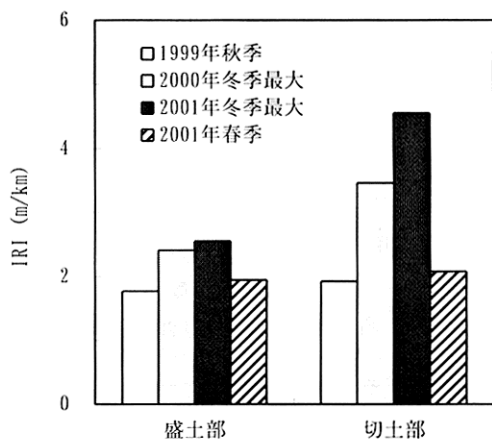


図-5 盛土部と切土部の IRI

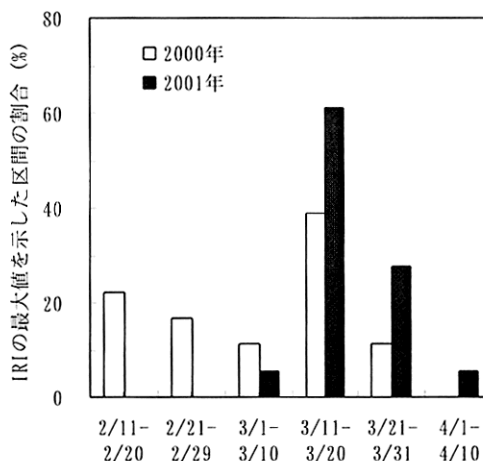


図-6 最大 IRI を示した測定日の度数分布 (切土部)

IRI の最大値を迎えた。最大凍結指数を示した日は、2000 年では 3/29、2001 年では 3/17 であることから、両年ともに冬季の IRI は最大凍結指数 (最大凍結深さ) を示した日近傍でピークを迎えたことが分かる。

既往の研究によると、飽和土の凍上速度は、上載圧力と凍結の進行速度 (凍結速度) に依存すると言われていた¹⁹⁾。調査路線の舗装構造と使用材料は同じであることから、仮に、土質と土被り圧力を同一と見なすと、切土

部に生じる凍上の影響は凍結速度に依存することになる。式 (1) に示したように、凍結深さは凍結指数の関数として表されるため、凍結指数の増加割合は凍結速度とほぼ同義と考えられる。そこで、2000 年と 2001 年における凍結指数の増加割合と IRI の関係を解析し、凍結速度が冬季の IRI に及ぼす影響について検討した。

2000 年と 2001 年の凍結指数の内、路床近傍にまで凍結が進行したと考えられる凍結指数が 500°Cdays (凍結深さ

約 1m) 以下になった日から最大凍結指数を示した日の 2 週間後までの凍結指数を図-7 に示す。本研究では、最大凍結指数を示した日以前を凍結期、それ以後を融解期と称することとした。また、同図に示したように、凍結期における凍結指数の増加割合は同じではなく、2000 年では 3/4、2001 年では 2/21 を境に凍結指数の増加割合が変化することから、凍結期には凍結速度が異なる 2 つの期間が存在すると考えられる。そこで、同図に示すように、これら 2 つの期間を凍結進行期と凍結緩和期と称し、それぞれの期間における凍結指数の回帰式の傾き (s) を求めた。2001 年の s は、2000 年よりも、凍結進行期で約 1°C、凍結緩和期では約 3.2°C 大きくなったことから、2001 年は、2000 年と比べ凍結進行期の凍結速度が大きく、さらに、凍結緩和期になると両年の凍結速度の差が拡大したことが分かる。

全ての切土区間において凍結進行期、凍結緩和期、融解期の IRI を 1999 年秋季 IRI で除した値 (以後、IRI 比) を求めた。2000 年と 2001 年における切土部の IRI 比を図-8 に示す。2001 年では、IRI 比は、凍結進行期および凍結緩和期において大きく増加し、融解期になると急激に減少した。凍結進行期と凍結緩和期を比較した場合、IRI 比の増加速度 (以後、IRI 増加速度) は凍結進行期の方が大きくなった。これは、図-7 に示したように、凍結進行期の凍結速度が凍結緩和期よりも大きいことに起因すると考えられる。一方、2000 年では、2001 年と同様、IRI 比は凍結進行期で増加し、融解期になると減少する傾向が見られたが、凍結速度が小さい凍結緩和期では IRI 比はほぼ一定となった。また、2000 年と 2001 年の凍結進行期を比べた場合、IRI 増加速度は凍結速度が大きい 2001 年で大きく、さらに、両年の凍結速度の差が大きい凍結緩和期では、2001 年の IRI 増加速度が 2000 年よりも著しく大きくなった。以上のことから、冬季における IRI の増加速度は、凍結進行期と凍結緩和期における凍結速度の影響を大きく受けると考えられる。

2000 年および 2001 年の冬季最大 IRI と 1999 年秋季 IRI の差 (以後、冬季 IRI 増加量) と最大切土高さの関係を図-9 に示す。2000 年、2001 年の相関係数はともに 0.6 程度であり、強い相関があるとは言えないが、最大切土高さが大きい区間ほど冬季 IRI 増加量が大きくなる傾向が見られた。この原因としては、切土高さによって日射量が変化し、凍結深さや凍結速度が大きくなる可能性があることや大規模な切土面になるほど雨水や湧水などの量が増加することなどが考えられるが、本研究の内容では、断定的な理由を説明することは難しい。切土高さと凍土の関係性を明らかにするためには、今後、詳細な地盤調査が必要である。

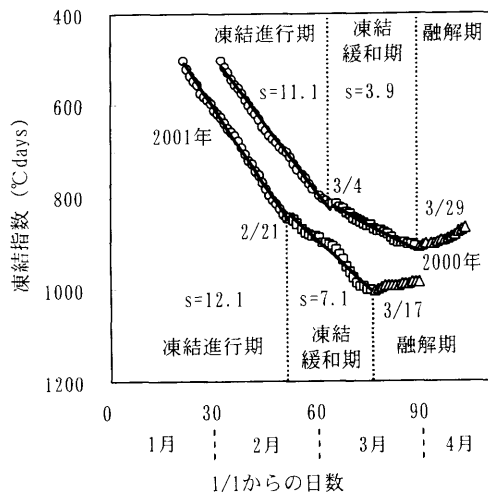


図-7 調査実施年における凍結指数の回帰式の傾き (s)

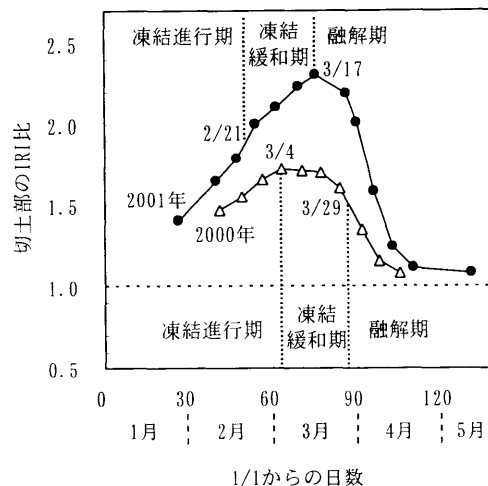


図-8 調査実施年における切土部の IRI 比

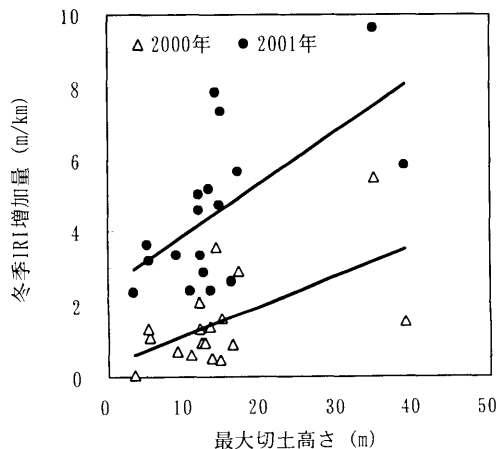


図-9 最大切土高さと冬季 IRI 増加量の関係

6. 縦断プロファイルの波状特性の冬季変動

縦断プロファイルの波状特性の冬季変動を解析するために、測定された縦断プロファイルのパワースペクトル密度 (PSD) を算出した。2000 年、2001 年ともに冬季 IRI 増加量が最大であった切土区間 C09 における 1999 年秋季と 2001 年の冬季最大 IRI を示した 3/28 の PSD を図-10 に示す。PSD による道路の平坦性評価方法と基準を定めた ISO-8608²⁰⁾ では、道路のクラス (A~H) に応じて PSD の上限、平均、下限値が定められていることから、最も厳しい基準であるクラス A の上限値を同図に併せて示す。秋季の PSD は、ほぼ全ての波数においてクラス A の基準を満たしており、ラフネスは非常に良好であると評価される。しかしながら、冬季の PSD は、波数が大きい範囲では秋季と変わらないものの、波数が小さい範囲では秋季よりも大きい値を示し、特に、波数が 0.1cycle/m (波長 10m) 近傍では、PSD が 3 階級下のクラス D の上限値にまで達する。

このように、冬季における縦断プロファイルの PSD は、波数帯によって増加量が異なることから、算出された PSD に ISO-8608 に基づいたオクターブバンド分析を適用した。ただし、前述したように、測定に用いた慣性プロファイラが測定できる縦断プロファイルの波長は約 1.5~45m であることから、本研究では、表-3 に示す 5 つのオクターブバンドに含まれる PSD の RMS を解析に用いることとした。

これら 5 つのオクターブバンドにおいて、2001 年の冬季最大 RMS と 1999 年秋季 RMS の差 (以後、冬季 RMS 増加量) を求めた。切土部の冬季 RMS 増加量を盛土部の冬季 RMS 増加量で除した値を図-11 に示す。中心波数 (n_c) が 0.25cycle/m 以上のオクターブバンドでは、切土部の冬季 RMS 増加量は盛土部の 1.5~1.8 倍程度であるのに対し、 n_c が 0.125 cycle/m 以下のオクターブバンドでは、切土部の冬季 RMS 増加量は盛土部の 3 倍以上に達することから、凍上によって縦断プロファイルに含まれる波長 5.7m 以上の長波長成分が増加すると考えられる。

切土部における凍結期と融解期の長波長成分の変動を解析するために、 n_c が 0.125cycle/m 以下のオクターブバンドの凍結進行期、凍結緩和期、融解期の RMS を 1999 年秋季 RMS で除した値 (以後、RMS 比) を求めた。2000 年および 2001 年における切土部の RMS 比を図-12、図-13 にそれぞれ示す。両年ともに、凍結期における RMS 比の増加量は、 n_c が 0.125 と 0.0625cycle/m のオクターブバンドにおいて大きくなったことから、凍上によって増加する長波長成分の中でも、特に、波長 5.7~22.6m の成分の増加量が大きいことが分かる。また、両年の RMS 比の増加速度 (以後、RMS 増加速度) を比較した場合、いずれのオク

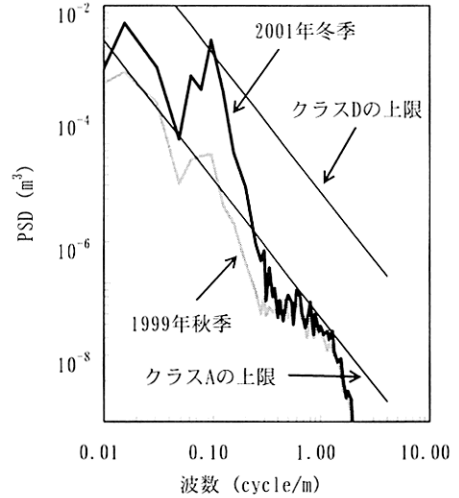


図-10 1999 年秋季と 2001 年冬季の PSD (切土区間 C09)

表-3 解析に用いたオクターブバンド

中心波数 n_c cycle/m	下限波数 cycle/m	上限波数 cycle/m
0.0312 (32.1)	0.0221 (45.2)	0.0442 (22.6)
0.0625 (16.0)	0.0442 (22.6)	0.0884 (11.3)
0.125 (8.0)	0.0884 (11.3)	0.1768 (5.7)
0.25 (4.0)	0.1768 (5.7)	0.3536 (2.8)
0.5 (2.0)	0.3536 (2.8)	0.7071 (1.4)

() の中は波長 (単位:m)

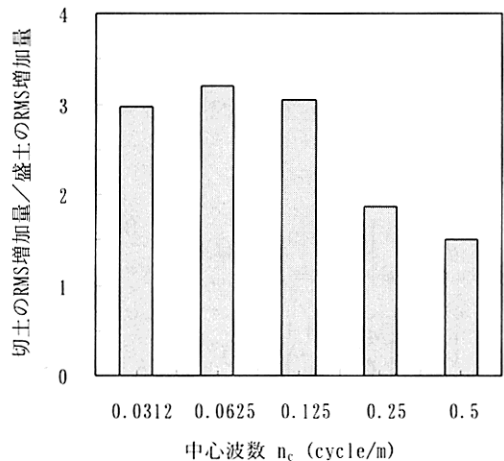


図-11 切土部と盛土部の冬季RMS増加量の比較

ターブバンドにおいても、凍結進行期および凍結緩和期ともに凍結速度が大きい2001年の方が大きくなった。したがって、縦断プロファイルに含まれる波長5.7m以上の長波長成分の増加速度は、凍結進行期と凍結緩和期における凍結速度の影響を大きく受けると考えられる。

切土部における2001年の冬季RMS増加量と冬季IRI増加量の相関係数を図-14に示す。 n_c が0.125と0.0625cycle/mのオクターブバンドの相関係数は0.8以上となり、それ以外のオクターブバンドの相関係数よりも大きくなったことから、凍上によってもたらされる波長5.7~22.6mの成分の増加が冬季におけるIRIの著しい増加の原因と考えられる。

7. 舗装に作用する動荷重の冬季変動

ラフネスが大きくなると、舗装に作用する動荷重が増加し、舗装の破壊を促進する。したがって、凍上によってもたらされるラフネスの増加が動荷重に及ぼす影響を明らかにすることは極めて重要であり、寒冷地における舗装の構造設計および寿命推定に有用な情報を与える。

そこで、本章では、1999年秋季および2001年の1~5月の縦断プロファイルを用いて輪荷重49kN（静荷重）のQCを80km/hで走行させたときに路面に生じる動荷重を計算し、凍上が動荷重に及ぼす影響について検討した。なお、動荷重の計算には、Hardyらによる研究で使用された線形QCモデルを用いた²⁰⁾。

図-15に示す線形QCモデルの運動方程式は式(2)で表される²⁰⁾。

$$[M]\ddot{q} + [C]\dot{q} + [K]q = Q \quad (2)$$

ここで、 q はバネ上質量とバネ下質量の変位(m)、 Q は動荷重(N)、 M は質量マトリックス、 C はダンピングマトリックス、 K はスティフネスマトリックスであり、以下のように表される。

$$q = \begin{Bmatrix} z_s \\ z_u \end{Bmatrix}, \quad Q = \begin{Bmatrix} 0 \\ c_t \dot{u} + k_t u \end{Bmatrix},$$

$$[M] = \begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m_u \end{bmatrix}, \quad [C] = \begin{bmatrix} c_s & -c_s \\ -c_s & c_s + c_t \end{bmatrix},$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_s & -k_s \\ -k_s & k_s + k_t \end{bmatrix}$$

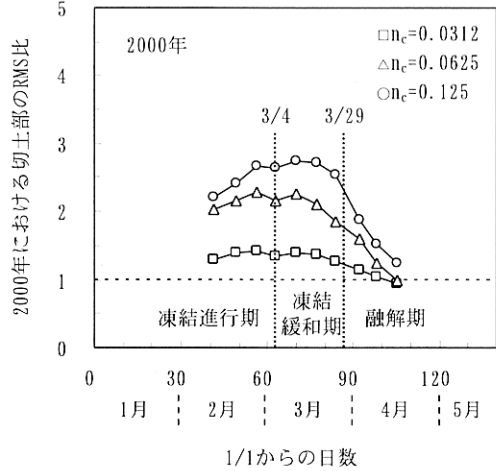


図-12 2000年における切土部のRMS比

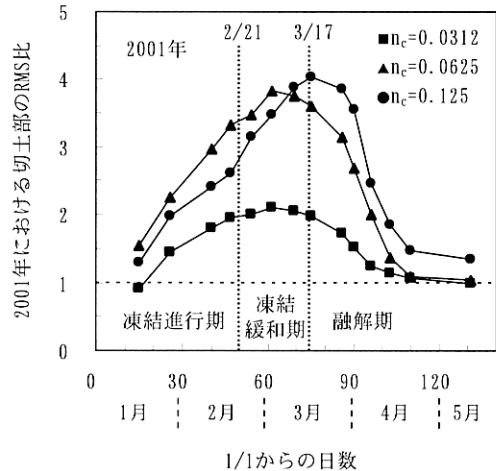


図-13 2001年における切土部のRMS比

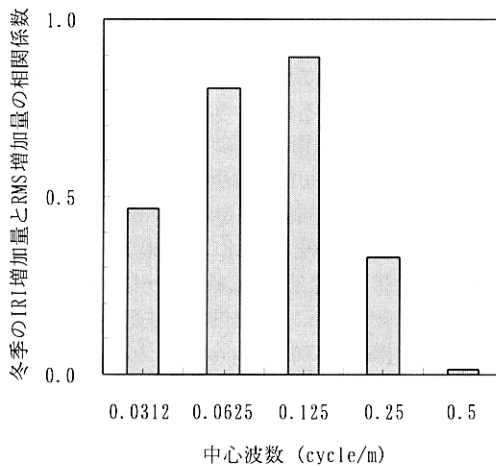


図-14 冬季のIRI増加量とRMS増加量の相関係数

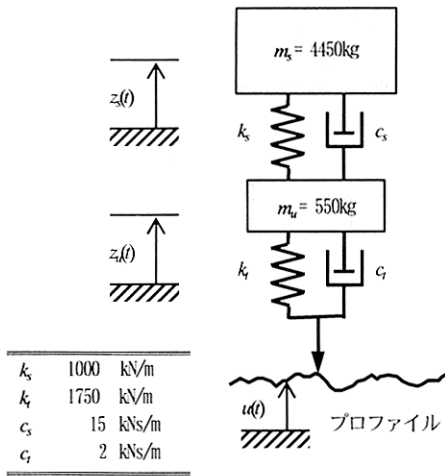


図-15 動荷重の計算に用いたQCモデル²³⁾

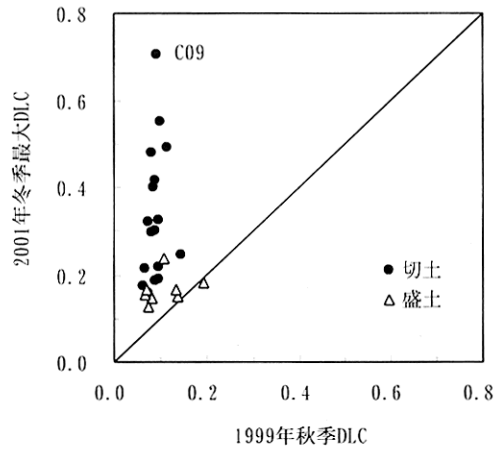


図-16 1999年秋季DLCと2001年冬季最大DLCの関係

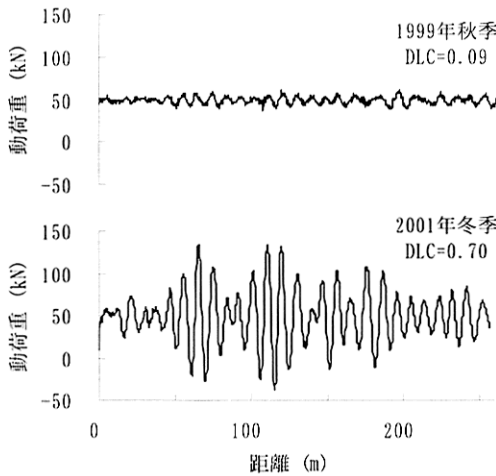


図-17 1999年秋季と2001年冬季の動荷重(切土区間C09)

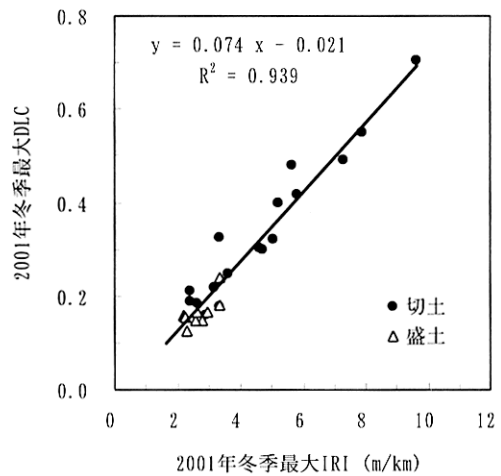


図-18 2001年の冬季最大IRIと冬季最大DLCの関係

ASTMでは、シミュレーションによって大型車の応答を計算する場合、過渡現象の影響を除去するために、入力する縦断プロフィールの延長は160mより長くすることが望ましいと述べていることから²³⁾、ここでは、表-2に示した切土部と盛土部の中で延長が160mより長い区間を解析に用いることにした。これらの区間の縦断プロフィールを入力し、式(2)を解いて得られた動荷重から動荷重係数(DLC)を求めた。なお、DLCは、動荷重の標準偏差を静荷重で除した値であり、一般的な道路では、0.1~0.3の範囲になると言われている²³⁾。

切土部と盛土部における1999年秋季DLCと2001年冬季最大DLCの関係を図-16に示す。秋季DLCは、全ての区間において0.3以下となり、一般的な道路におけるDLCの範囲内となった。一方、冬季最大DLCは、盛土部では秋季DLCとほぼ同じレベルを示したが、切土部では、秋季DLCの平均

3.8倍になった。特に、同図に示した切土区間C09では、冬季最大DLCは約0.70に増加した。

切土区間C09における1999年秋季の動荷重、および2001年の冬季最大DLCを示した測定日(3/28)の動荷重を図-17に示す。秋季の動荷重は輪荷重の49kN近傍にあり、区間内における変動はほとんど見られないが、冬季では、動荷重が大きく変動し、95パーセンタイルは輪荷重の約2倍となる102kNに達したと推定される。

切土部および盛土部における2001年の冬季最大DLCと冬季最大IRIの関係を図-18に示す。IRIの広範囲に渡り、IRIが増加するとDLCが直線的に増加する傾向が明確に見られる。また、同図に示したように、回帰式のR値は非常に高いことから、この回帰式を用いることによって冬季のIRIからDLCを推定することが可能であると言える。

2001年冬季最大DLCと1999年秋季DLCの差(以後、冬季DLC

増加量)と、表-3に示した5つのオクターブバンドの2001年冬季RMS増加量の相関係数を図-19に示す。 n_c が0.0625および0.125cycle/mのオクターブバンドの相関係数は0.8以上となり、他のオクターブバンドよりも大きな値を示した。したがって、凍上によって生じる縦断プロフィール中の波長5.7~22.6mの成分の増加が舗装に作用する動荷重の増加をもたらすことが分かる。

8. 断熱工法の効果の検証

道東自動車道では、1996年以降、冬季のラフネスが悪化した箇所に地下排水工改良、置換増厚、オーバーレイ、断熱工法などの凍上対策の改良がおこなわれてきた。2000年冬季後から2001年冬季前までの期間では、厚さ5cmの押出法ポリスチレンフォームを下部路床(図-3参照)の上に敷設する断熱工法を路肩部と走行車線に適用したことから、ここでは、断熱工法を適用した切土区間の縦断プロフィールを解析し、断熱工法の効果について検討した。なお、解析対象とした切土区間は、k.p. 221.28~k.p. 221.46の延長160m、最大切土高さは10.3mである。

当該切土区間における1999年秋季のIRI、および2000年と2001年の調査期間におけるIRIの変動を図-20に示す。断熱工法を適用する前の2000年冬季では、寒さが厳しくなるにしたがってIRIが増加する傾向が見られ、最大で秋季IRIよりも2.33m/km増加した。一方、断熱工法を適用した後である2001年冬季でも寒さが厳しくなるにしたがってIRIが増加する傾向が若干見られるが、秋季IRIとの差は2000年冬季の約4分の1となる0.57m/kmであったことから、断熱工法によって冬季IRIの増加を大幅に抑制することができると言える。

1999年秋季、および2000年と2001年の冬季最大IRIを示した測定日の縦断プロフィールにオクターブバンド分析を適用した結果を図-21に示す。2000年、2001年ともに、冬季RMSは、 n_c が0.125cycle/m以下のオクターブバンドにおいて秋季RMSよりも大きくなった。しかしながら、両年冬季のRMSを比較すると、断熱工法適用後の2001年の方が小さくなったことから、断熱工法には、凍上によってもたらされる波長5.7m以上の長波長成分の増加を抑制する効果があると考えられる。

図-21と同じ縦断プロフィールを用いて計算した動荷重を図-22に示す。2000年冬季のDLCは1999年秋季の約2倍となり、非常に大きな動荷重が舗装に作用したと推定されるが、断熱工法を適用したことで2001年冬季のDLCは秋季DLCとほぼ同じレベルにまで減少した。

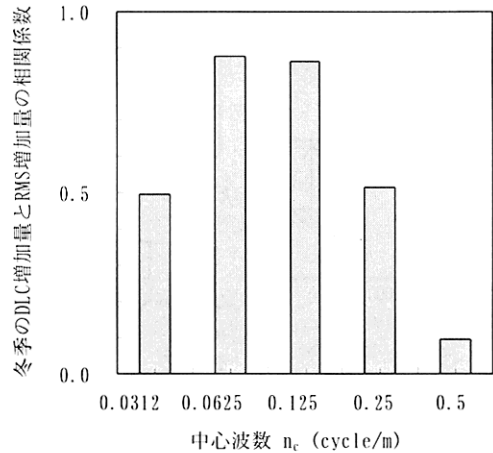


図-19 2001年冬季のDLC増加量とRMS増加量の相関係数

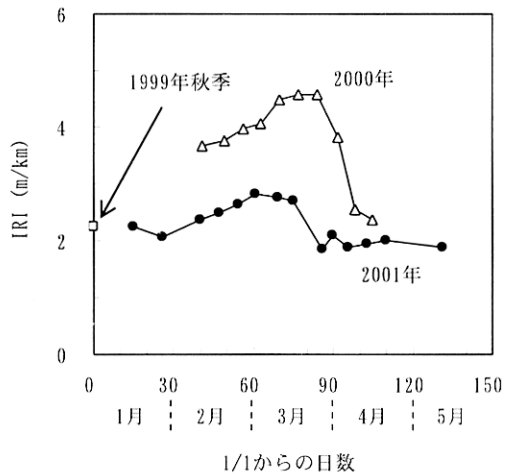


図-20 断熱工法を適用した切土区間のIRI

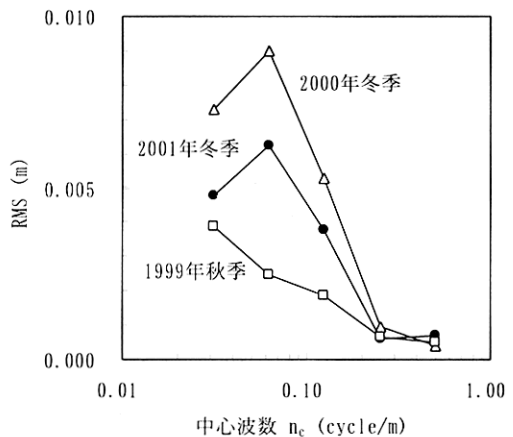


図-21 断熱工法を適用した切土区間のRMS

9. 結論

1999年秋季、2000年2~4月と2001年1~4月の毎週、および2001年春季に道東自動車道において縦断プロファイル測定を実施し、凍上によってラフネスが増大した高速道路の縦断プロファイル特性について解析した。

本研究で得られた結論は、以下の通りである。

- 盛土部では、2000年および2001年の冬季において、IRIの増加はほとんど見られなかったが、切土部では、両年ともに、凍上によってIRIは増加し、最大凍結指数を示す日近傍でピークを迎えた。
- 2000年および2001年の調査期間を凍結進行期、凍結緩和期、融解期に分割し、凍結進行期と凍結緩和期における凍結速度と冬季IRIの関係について解析した。その結果、冬季IRIの増加速度は凍結進行期と凍結緩和期の凍結速度に依存することが分かった。
- 冬季IRI増加量と最大切土高さの相関係数は約0.6となり、最大切土高さが大きくなるほど冬季IRI増加量が大きくなる傾向が見られた。
- 切土部と盛土部の縦断プロファイルのオクターブバンド分析を行った結果、凍上によって縦断プロファイルに含まれる波長5.7m以上の長波長成分が増加し、その増加速度は凍結進行期と凍結緩和期の凍結速度によって大きく影響されることが分かった。また、凍上によって増加する長波長成分の中でも、特に、波長5.7~22.6mの成分の増加が冬季におけるIRIの著しい増加の原因であることが分かった。
- 1999年秋季および2001年冬季の縦断プロファイルを用いて舗装に作用する動荷重とDLCを計算した。冬季最大DLCは、盛土部では秋季DLCとほぼ同等であったが、切土部では秋季DLCの平均で3.8倍に達した。また、凍上によって生じる波長5.7~22.6mの成分の増加が舗装に作用する動荷重の増加をもたらすことを明らかにした。
- 断熱工法適用前後の縦断プロファイルを解析した結果、断熱工法には、凍上によって生じる長波長成分の増加を抑制し、冬季におけるIRIおよび動荷重の増加を大幅に減少する効果があることが分かった。

謝辞：本研究の遂行にあたり、(株)朋栄、日本航空電子工業(株)、および(株)小野測器にご協力いただきました。ここに記して深く感謝いたします。

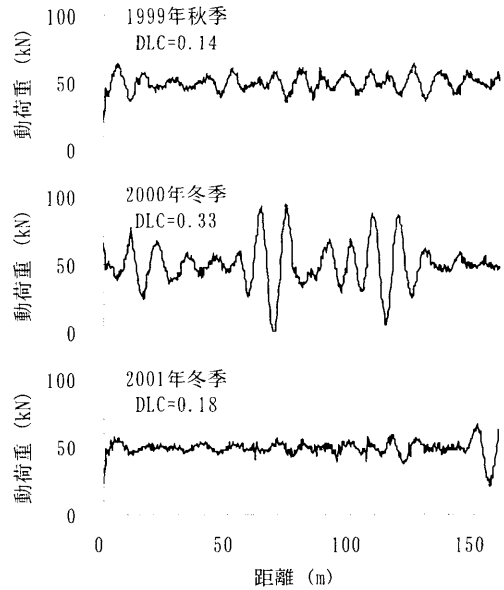


図-22 断熱工法を適用した切土区間の動荷重

参考文献

- 1) PIARC: Technical committee report on surface characteristics, 1978.
- 2) ASTM: Standard guide for classification of automated pavement condition survey equipment, Standard No. E1656-94.
- 3) ASTM: Standard guide for conducting subjective pavement ride quality ratings, Standard No. E1927-98.
- 4) Sayers, M.W. and Gillespie, T.D.: The international road roughness experiment, A basis for establishing a standard scale for road roughness measurements, Transportation Research Record, No.1084, pp. 76-85, TRB, 1986.
- 5) Karamihas, S.M., Gillespie, T.D., Pepera, R. W. and Kohn, S.D.: Guidelines for longitudinal pavement profile measurement, NCHRP Report 434, TRB, 1999.
- 6) Dore, G. and Savard, Y.: Analysis of seasonal pavement deterioration, 77th Annual meeting of the Transportation Research Board, 1998.
- 7) Dore, G., Flamand, M. and Tighe, S.: Prediction of winter roughness based on the analysis of subgrade soil variability, Journal of the Transportation Research Record, TRR, No. 1755, pp. 90-96, TRB, 2001.
- 8) Dore, G. and Pierre, P.: Development of a rational design procedure for pavements subjected to frost action, Proceedings of the 9th International Conference on Asphalt Pavements, ISAP, 2002.
- 9) 地盤工学会北海道支部、火山灰質土の工学的分類委員会：火山灰土の利用と性質、地盤工学会北海道支部、1997.
- 10) 瀬在武、三嶋信雄、菊池勝三：寒冷地における凍上対策—現行凍上対策の問題点と凍上試験法—、日本道路公団試験所報告、pp.13-33, 1985.

- 11) 亀山修一, 川端伸一郎, 豊田邦男, 川村彰, 笠原篤: 寒冷地的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/V1-60, pp. 51-60, 2003.
- 12) Hardy, M.S.A. and Cebon, D.: Importance of speed and frequency in flexible pavement response, *Journal of Engineering Mechanics*, 120 (3), pp.463-482, ASCE, 1994.
- 13) Chatti, K. and Lee, D.: Development of new profile-based truck dynamic load index, *Journal of the Transportation Research Board*, TRR, No. 1806, pp. 149-159, TRB, 2002.
- 14) Aldrich, H.P.: Frost Penetration below Highway and Airfield Pavements, Bulletin 135, HRB, National Research Council, 1956.
- 15) 伊福部宗夫: 北海道における道路の凍上・凍結深さおよび置換率に関する研究, 土木試験所報告, 北海道開発局, 26号, 1962.
- 16) 久保宏: 道路舗装の凍上とその対策, 土と基礎, Vol.29, No.2, pp.9-14, 1981.
- 17) 久保宏: 積雪寒冷地舗装の凍上対策, 土木学会誌, Vol. 64, No. 2, pp. 10-16, 1979.
- 18) 土質工学会: 土の凍結—その理論と実際—, 土質基礎工学ライブラリー23, pp.186-190, 1994
- 19) 高志勤, 益田稔, 山本英夫: 土の凍結膨張率に及ぼす凍結速度, 有効応力の影響に関する研究, 雪氷, 36, 2, pp. 1-20, 1974.
- 20) ISO-8608: Mechanical vibration, Road surface profiles, Reporting of measured data, ISO.
- 21) Hardy, M.S.A. and Cebon, D.: Resopnse of continuouas pavements to moving dynamic load, *Journal of Engineering Mechanics*, 119 (9), pp.1762-1780, ASCE, 1993.
- 22) Cebon, D.: Handbook of vehicle-road interaction, Swets & Zeitlinger publishers, ISBN-90-265-1554-5, Netherland, 1999.
- 23) ASTM: Standard practice for simulating truck response to longitudinal profiles of vehicular traveled surfacaes, Standard No. E2034-99, ASTM.

(2005. 5. 6 受付)

CHARACTERISTICS OF LONGITUDINAL PROFILE OF EXPRESSWAY AFFECTED BY FROST HEAVE

Shuichi KAMEYAMA, Shinichiro KAWABATA, Kunio TOYODA,
Akira KAWAMURA and Kenji HIMENO

To analyze the characteristics of the longitudinal profile affected by frost heave, the longitudinal profile of an expressway in a cold region of Japan measured weekly from February to April of 2000 and from January to May of 2001 was analyzed. It was found that the increasing speed of winter IRI in cut segment greatly depended on the freezing speed and the maximum increment of winter IRI related to the maximum height of cut. The analysis of wave characteristics of the longitudinal profile showed that the content of long wavelength (>5.7m) was increased by the frost heave and its increasing speed was greatly affected by the freezing speed. It was also shown that the increase of wavelength 5.7-22.6m content due to frost heave caused an increase of dynamic load and the IRI in winter.