

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

安倍隆二¹・岳本秀人²・鈴木拓雄³・木村清和⁴・田口 仁⁵

¹正会員 独立行政法人 北海道開発土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

²正会員 独立行政法人 北海道開発土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

³正会員 工修 山梨大学助手 工学研究科 (〒400-0415 甲府市武田4-3-11)

⁴正会員 工博 群馬工業高等専門学校助教授 環境都市工学科 (〒371-8530 前橋市鳥羽町580)

⁵正会員 工博 福田道路株式会社 技術研究所 (〒959-0415 新潟県西蒲原郡西川町大淵字中ノ島2031)

積雪寒冷地である北海道では、アスファルト舗装体の温度低下による温度応力クラック(以下、低温クラックと称す)が多数発生しているが、発生するメカニズムが明確に検証されていない。そこで低温クラックの発生するメカニズムを把握するために、応力解放法を適用し検討を行った。

本研究では、低温クラックのメカニズムを解明し対策工法を検討することを目的としている。寒冷期におけるアスファルト舗装体に発生する温度応力を応力解放法により計測した結果や低温クラックの発生するメカニズムの検討結果をまとめたものである。

Key Word : low temperature crack, stress release method, in-situ strain, in-situ stress, cold snowy regions

1. 調査目的

積雪寒冷地である北海道のアスファルト舗装は、温度応力に起因すると考えられている低温クラック(写真-1)が北海道の道東地方に多数発生¹⁾し、この抑制対策は重要な課題となっている。

本研究では、低温クラックの発生メカニズムを解明し、対策工法を検討することを目的としている。

低温クラックの発生初期は車輛の走行に大きな影響は与えないが、そのまま放置すると雨水等が浸透し、路盤・路床の支持力低下や凍結融解等によりアスファルト舗装体(以下、舗装体と称す)の構造的な破壊につながる危険性がある。また、低温クラックは経年変化に伴い、クラック幅の拡大やクラック本数が増加する特徴^{2,3)}を持っている。

低温クラックは道路内の力学的な拘束と深さ方向に温度勾配が存在することによる温度応力が原因と考えられることから、舗装体に生じている応力やひずみと低温クラックの発生には密接な関係があると考えられる。ここで、ひずみセンサー等を用いて経時計測等の通常の計測を行った場合に得られる値はセンサー設置時を基準とした相対的なものとなるが、応力解放法を適用すると弾性成分の絶対的な値(以下、現有応力・ひずみと称する)が得られるので、低

温クラックと応力・ひずみとの関係がより明確になると考えられる。

そこで本論文では木村らが開発したひずみセンサー⁴⁻⁷⁾を用いて応力解放法(オーバーコアリング法、以下OCと称する)を適用することにより、舗装体表面と内部の現有応力・ひずみを測定することとした。

2. 測定方法

(1) 応力解放法

本計測で用いた応力解放法とは舗装体に設けた測定点とその周囲との力学的な関係をOCにより遮断し、弾性復元を誘起させ、この時点のひずみを測定するものである。解放された応力は測定ひずみと舗



写真-1 低温クラックの発生状況

装体の弾性係数を用いて算出する。

(2) 作業工程

本計測で用いた応力解放法の模式図を図-1 に示す。この図は埋設型計測装置 (Solid Inclusion Cell, 以下, SI-Cell と称す) を用いた内部の応力測定の手順を示している。

- 直径 20mm でパイロットホールを穿孔し, その内部を洗浄, 乾燥させる。その後, 接着剤を流し込み, SI-Cell を挿入する。接着剤は 5 分硬化型のエポキシ樹脂を用いた。
- Cell のコネクタとコアドリルを接続し, コアドリルのリード線をデータロガーへ接続する。
- コアドリルで同心円に直径 68mm で OC を施し, その弾性復元ひずみを計測する。
- 所定の深さまで OC を施し, 応力解放終了の段階を示している。

舗装体表面の応力を計測する場合, 表面ユニット型計測装置 (Surface Unit Cell, 以下 SU-Cell と称す) を用いて同様の作業を行う。

本手法は OC 中でも解放ひずみの連続計測が可能であることが特徴であり, ここで言う「解放ひずみ」とは OC により解放, 計測された直読のひずみを指し, 現有ひずみとは大きさが等しく逆符号の関係にある。また, 現有応力・現有ひずみとは, 原位置で実際に生じている応力・ひずみを指し, 初期応力・初期ひずみとは異なる。初期応力がどの時点をと初期と捉えるかが曖昧なため, 計測した時点の現位置での応力・ひずみを現有応力・現有ひずみとした。

本手法は小径コアリングによる応力解放を行うため, 計測された現有ひずみから現有応力を求めるには SU-Cell の場合, 等方性体の構成方程式から算出する。また, SI-Cell の場合, 三層弾性体に任意の応力が作用する問題の解析解を用いて逆解析を行う必要がある。

(3) SU-Cell

SU-Cell は, 図-2 に示すようにひずみゲージおよび温度ゲージから構成されている。ゲージ長 30mm の 3 軸ロゼットゲージを用いているので, 舗装体表面での主値と主方向を算出できる。なお, 設置時には CH1 は走行方向 (X 方向), CH2 は横断方向 (Y 方向), CH3 は 45 度の方向となるようにひずみゲージと同様の要領で接着した。また, OC の際にはコア径が 68 mm となるように穿孔を行う。

(4) SI-Cell

図-3, 4 にそれぞれ SI-Cell のモデル図と舗装体への設置状態を示す。ここで重要なのは SI-Cell はエポキシ樹脂製の円柱筐体内部にゲージ長 2mm の 3 軸ロゼットゲージと 1 軸ゲージがそれぞれ 2 枚ずつと 1 枚の温度ゲージが配置されている構造となっている点である。つまり SI-Cell では 8 方向のひずみを同時に計測できるので三次元の力学状態を把握で

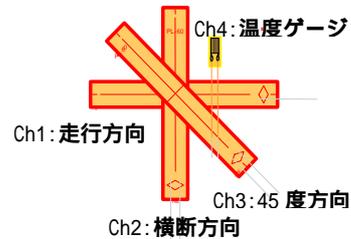


図-2 ゲージモデル図(SU-Cell)

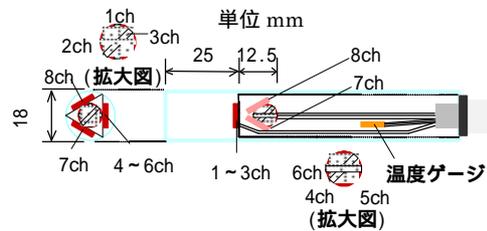


図-3 ゲージモデル図(SI-Cell)

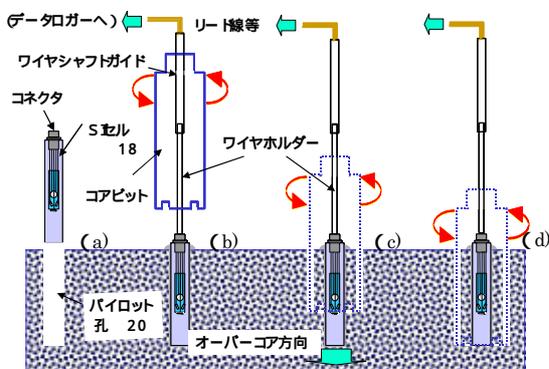


図-1 作業工程模式図

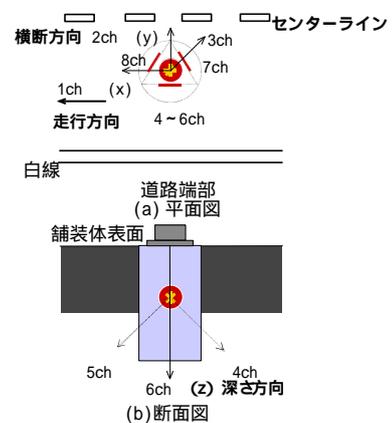


図-4 ゲージの方向(SI-Cell)

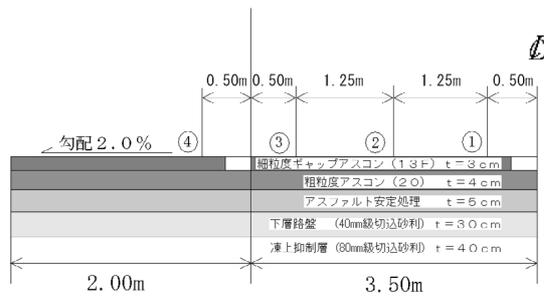


図-5 計測箇所の舗装構成図

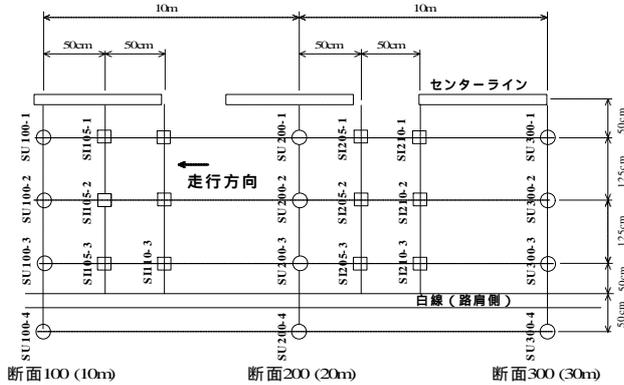


図-6 計測箇所の平面図

きるのだが、ひずみゲージが直接接触しているのは筐体であるエポキシ樹脂である。一方、設置したSI-Cellは接着剤を用いて舗装体と一体化されているので、結局のところひずみゲージは筐体と接着剤を介して舗装体に生じる力学変化を検出することになる。こうした介在物の存在を無視した測定を行うことも一つの方法であるが、測定値の精度を向上させるためにはこのような介在物の存在を考慮した弾性論に基づいた解析解を構築し、それを計測値に適用する必要がある。そのような定式化と計測値への適用方法は木村ら⁴⁾によって行われているので詳細な説明は省略するが、定式化は一樣応力場の仮定の下で行われており、筐体、接着剤および舗装体の物性値とOC半径などの各種幾何条件を設定した上でSI-Cellが検出したひずみ値を所定のプログラムへ入力することで舗装体の応力値を得ることができる。

(5) 計測時期

応力解放法の計測時期については、以下の2通りの方法を実施した。

a) 現有ひずみの計測

SU-CellとSI-Cellを設置後、OCを行う時点での舗装体表面および内部の現有ひずみの計測を行う。

b) インターバル計測

SU-CellとSI-Cellを設置後、舗装体表面および内部の現有ひずみを40時間、10秒間隔でインターバル計測を行う。

表-1 SU-Cell 応力解放測定実施日時・気象条件

測定点	実施日時	気温	路面温度
SU100-1	2004/1/17 15:32	-	1.3
SU100-2	2004/1/17 15:08	-	2.0
SU100-3	2004/1/17 14:46	-	2.9
SU100-4	2004/1/18 14:03	3.6	2.1
SU200-1	2004/1/19 10:39	-4.0	2.8
SU200-2	2004/1/18 15:39	-1.3	3.5
SU200-3	2004/1/19 10:17	-4.0	3.5
SU200-4	2004/1/19 9:56	-4.0	0.3
SU300-1	2004/1/18 14:57	-0.1	5.6
SU300-2	2004/1/18 14:39	2.9	5.5
SU300-3	2004/1/18 14:19	3.6	5.7
SU300-4	2004/1/18 13:56	3.6	6.3

表-2 SI-Cell 応力解放測定実施日時・気象条件

測定点	ゲージ位置 (深さ方向)	OC径 (mm)	実施日時	気温	路面温度	SI-cell 内部温度
SI105-1	(4cm深部)	68	2004/1/18 15:35	-1.3	-1.1	2.1
SI105-2	(4cm深部)	124	2004/1/18 16:00	-2.5	-2	1.0
SI105-3	(4cm深部)	68	2004/1/18 15:16	-1.3	0	1.1
SI110-3	(8cm深部)	68	2004/1/18 15:00	-0.1	2.4	1.5
SI210-1	(8cm深部)	68	2004/1/19 11:28	-1.2	-0.5	-1.7
SI210-2	(8cm深部)	68	2004/1/18 14:12	3.6	5.3	1.0
SI210-3	(8cm深部)	68	2004/1/19 10:48	-4.0	-2.2	-1.9
SI205-1	(4cm深部)	68	2004/1/19 11:50	-2.3	0.2	-1.0
SI205-2	(4cm深部)	68	2004/1/18 14:30	2.9	4.4	0.9
SI205-3	(4cm深部)	68	2004/1/19 11:06	-4.2	-3.1	-1.0

表-3 インターバル測定実施日時・気象条件

測定点	ゲージ位置 (深さ方向)	実施期間	最低気温	最低温度				
SU200-1		始 1/17 17:24	-13.6	(路面) -10.6				
		終 1/19 10:37						
SU200-3		始 1/17 17:27		-13.6	(路面) -11.2			
		終 1/19 19:28						
SU200-4		始 1/17 17:27			-13.6	(路面) -11.2		
		終 1/19 19:28						
SI205-1	(4cm深部)	始 1/17 15:30				-13.6	(SI-Cell内部) -7.7	
		終 1/18 12:05						
SI205-3	(4cm深部)	始 1/17 14:40					-13.6	(SI-Cell内部) -9.0
		終 1/19 19:40						
SI210-1	(8cm深部)	始 1/17 17:00	-13.6					(SI-Cell内部) -7.2
		終 1/19 11:15						
SI210-3	(8cm深部)	始 1/17 15:00		-13.6				(SI-Cell内部) -7.4
		終 1/19 19:40						

3. 測定箇所の概要

測定箇所は独立行政法人 北海道開発土木研究所が所有している苫小牧寒冷地試験道路で試験を実施した。この試験道路は3種1級、舗装計画交通量250以上1000台未満(台/日)で設計され、図-5に示す舗装構成である。また、舗装履歴は平成12年3月に竣工後、3年10ヶ月経過(平成16年1月現在)しているが、交通荷重は一般交通の供用はなく、試験車両が試験時に通過する程度の交通条件である。測定番号は図-6に示すように、今回の計測では基準点から10m、20mおよび30mの断面で計測を行った。測定方法、断面番号および断面内での位置については、SI i-j, SU i-j (i:断面番号, j:断面内位置)と表示した。断面内での位置を規定する各数字は図-5で図示した ~ に対応し、以下の表記とした。

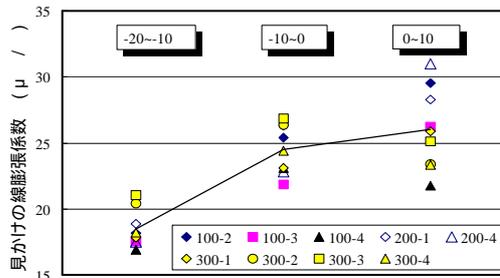


図-7 測定温度範囲とみかけの線膨張係数の関係

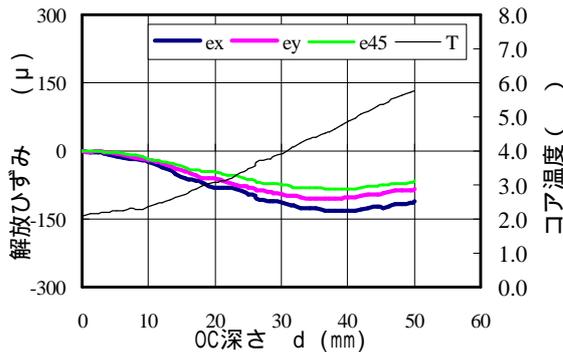


図-8 SU100-2 の解放ひずみ曲線

- j=1 対向車線側わだちの中央部 (IWP)
- j=2 車線中央 (BWP)
- j=3 路肩側わだちの中央部 (OWP)
- j=4 路肩

また、断面番号 i を 3 桁の数字で規定しているが 3 桁目の数値が同じ場合には同じ断面内位置番号 j をもつ測定点同士は同一の測定点としてみなすこととした (例えば, SU200-1, SI205-1 および SI210-1 の組み合わせ)。これは、舗装体表面と内部での応力やひずみ勾配を論じる際には同一の計測点である必要があるが、SU-Cell と SI-Cell の設置方法の違いからそれが不可能だからである。

(1) 計測日時および条件

a) SU-Cell

SU-Cell を用いた応力解放測定の実施日時、気温および路面温度を表-1 に示す。1/17 に実施した箇所の外気温は欠測である。外気温は $-4.0 \sim +3.6$ 、路面温度は $+0.3 \sim +6.3$ の条件で試験を実施した。

b) SI-Cell

SI-Cell を用いた応力解放測定の実施日時、気象条件、測定条件等を表-2 に示す。外気温は $-4.2 \sim +5.3$ 、路面表面温度 $+0.3 \sim +6.3$ 、SI-Cell 内部温度 $-1.9 \sim +2.1$ の条件で試験を実施した。舗装体の厚さ方向の温度応力を把握するため、深さ 4, 8cm の位置に SI-Cell のひずみゲージを設置した。

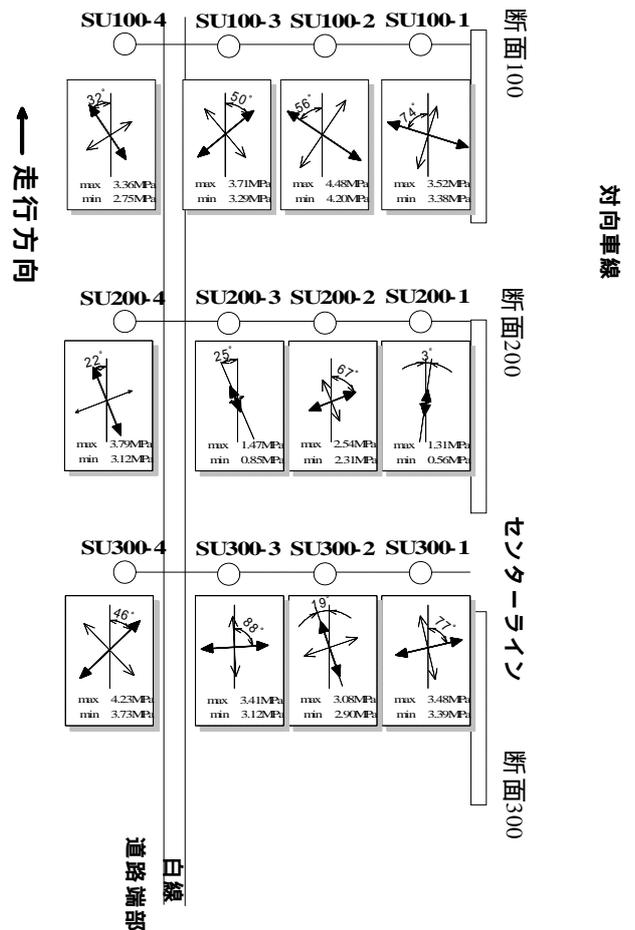


図-9 各測定地点での最大主応力とその方向

c) インターバル計測

SU-Cell と SI-Cell を用いたインターバル測定の実施日時、気象条件等を表-3 に示す。最低気温は -13.6 、最低舗装表面温度 $-11.2 \sim -10.6$ 、最低 SI-Cell 内部温度は $-9.0 \sim -7.2$ の条件で 40 時間の連続計測を行なった。

4. SU-Cell 法の測定結果

(1) みかけの線膨張係数

OC による応力解放時には、切削水等の影響により計測点近傍の温度が変化するので、そのような場合には各計測点の線膨張係数を用いて応力解放により得られたひずみを補正する必要がある。SU-Cell の各センサーにより得られた「みかけの線膨張係数」を求めた。なお、ここで得る線膨張係数を計測する際には 11μ / の線膨張係数を持つ材料のひずみゲージを用いるので、アスファルト混合物のコアに設置したひずみゲージから求めた線膨張係数は真の線膨張係数とは異なっているため、「みかけの線膨張係数」と定義した。みかけの線膨張係数を決定する際には、OC 後に採取したコアを所定の温度まで冷

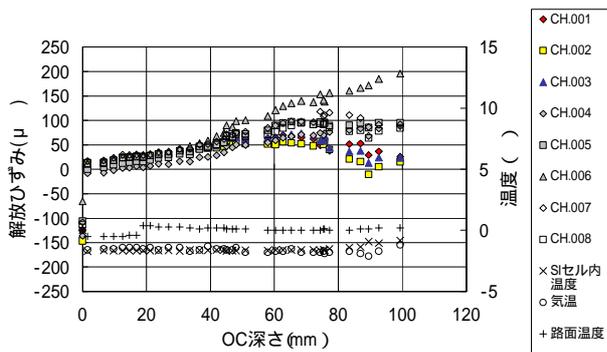


図-10 解放ひずみ曲線(SI210-1)

表-4 逆解析に用いた物性値と幾何学条件

幾何学条件	OC半径	パイロットホール半径	SI-cell半径
	0.034 (m)	0.010 (m)	0.009 (m)
物性値	アスファルト混合物	接着剤	SI-cell
ヤング率E(MPa)	12.00×10^3	3.00×10^3	2.94×10^3
ポアソン比	0.35	0.35	0.35

却後、ゆっくりと室温にまで温度を上昇させたときの温度とひずみの関係から算出した。このときに、ひずみを計測するゲージは OC 時に使用したものをそのまま用いるので、チャンネル毎のみかけの線膨張係数を直接得ることができ、より精度よく温度補正を行うことが可能である。

図-7 は得られたみかけの線膨張係数を $-20 \sim 10$ 、 $-10 \sim 0$ 、 $0 \sim 10$ の温度範囲に三等分割した線膨張係数を示すが、対象とした温度範囲によってみかけの線膨張係数の値に差が現れていることが分かる。舗装体の温度が低いほどみかけの線膨張係数の値は小さくなり、かつ、その傾向は温度が低ければ低いほど著しくなっている。なお、SU-Cell の測定結果に対する温度補正は、路面温度が 0 を下回ったときに $-10 \sim 0$ のみかけの線膨張係数、0 を上回ったときに $0 \sim 10$ のみかけの線膨張係数の各チャンネルの値を採用することとした。また、今回の計測では、路面温度は約 $-15 \sim +5$ の範囲で変動している。

また、ここでのみかけの線膨張係数は路面から採取したコア(非拘束状態)から求めたものであるが、直接、路面(拘束状態)から求めることもできる。詳細は後述する。

(2) 舗装体表面の現有応力

図-8 は SU-Cell による OC 後の解放ひずみの一例であるが、今回の調査では穿孔深さが $45 \sim 50\text{mm}$ で解放ひずみが収束しているものと考え、現有値としてはこの付近の平均値の逆符号値を採用することとし、等方性体の構成方程式によって計測点の現有応力を求めた。

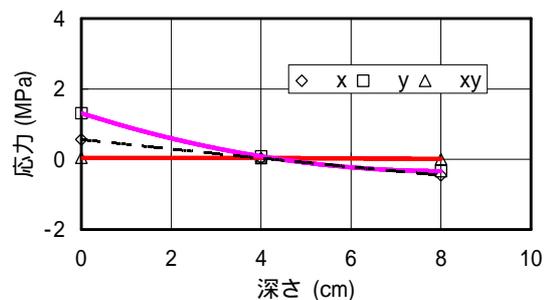


図-11 舗装体表面と内部の応力勾配(200-1)

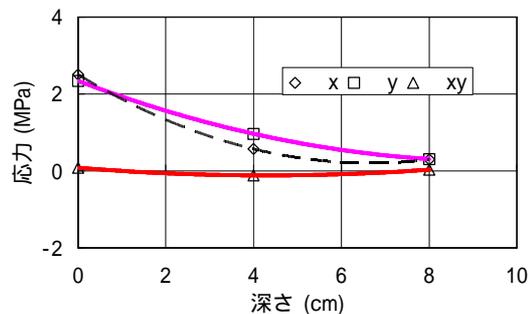


図-12 舗装体表面と内部の応力勾配(200-2)

ここでは、アスファルト混合物のヤング係数を $E=12,000\text{MPa}$ 、ポアソン比を $n=0.35$ とした⁸⁾。

図-9 に、各地点での最大主応力とその方向を示す。ここで、 x は走行方向、 y は横断方向の主応力方向を示す。断面 200 と断面 300 においては路肩において最も大きな最大(引張)主応力が発生している傾向が見られる。また、全体的に舗装体表面に引張応力が発生していることが分かる。しかしながら、主応力方向は規則性のない試験結果となっておりこれは骨材とバインダの界面が道路に対してランダムであることにも起因していると考えられる。今回の試験結果は比較的寒さの厳しくない路面温度条件(1~6)であるため、更に低い温度での試験データの蓄積が必要である。

5. SI-Cell 法の測定結果

SU-Cell での計測と同様に OC による温度上昇があるため、現有応力を算出する際にはみかけの線膨張係数を用いて計測結果に温度補正を行った。図-10 は測点 SI210-1 での OC 時の解放ひずみを示したものであり OC 深さが增大するに従って解放ひずみが収束していく傾向のあることがわかる。なお今回の調査では最大の OC 深さで得た解放ひずみを含む最終の 3 点の平均から現有値を算出するための値として採用した。また、表-4 に現有値を算出する際の逆解析に用いた物性値を示す。

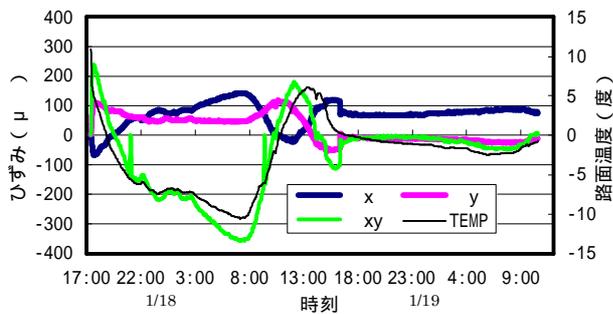


図-13 インターバル計測結果 (SU200-1)

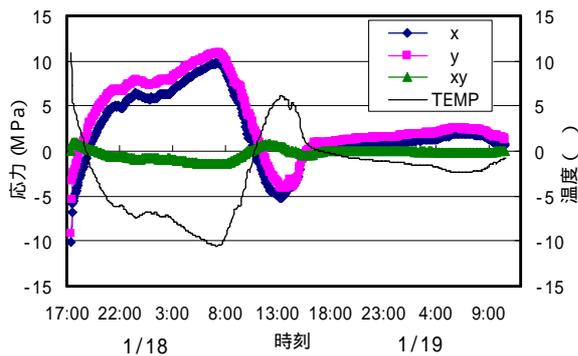


図-14 インターバル計測結果 (現有応力)

(1) 舗装体内部の応力勾配

図-11, 12 は SI-Cell 法と SU-Cell 法から得られた現有応力を XY 平面 (図-4 参照) での成分に着目して深さ方向の変化として示したものである。なお, 200-1 は SU200-1, SI205-1 および SI210-1 の組み合わせを, 200-2 は SU200-2, SI205-2 および SI210-2 の組み合わせであることを意味し, それぞれ同一の計測点として見なすことで深さ方向の応力変化を図示している。両計測点の表面では引張り応力が高く, 深さ方向に向かって圧縮側に移行していることがわかる。また, 図-11, 12 で示したような 200-1 と 200-2 の他に, SU200-3, SI205-3 および SI210-3 の計測結果の組み合わせを用いて同様のグラフを得ることができるが, 他の 2 つのものとはほぼ同様の傾向であることが認められたのでこれは省略した。

6. インターバル計測結果

(1) SU-Cell 法による測定結果

SU-Cell によるインターバル計測では, 1月17日午後5時半頃から19日午前10時頃までを計測期間とし, SU200-1, SU200-3, および SU200-4 の地点で実施した。いずれの計測点においても時刻に対するひずみと温度の変動の傾向は同一であったことから, 図-13 に SU200-1 でインターバル計測を実施した結果を例示する。横軸は時間, 縦軸はひずみと計測点

表-5 最高・最低内部温度の現有応力

測定点	最高内部温度			最低内部温度		
	(1/18 15:00頃, 約0.6)			(1/18 18:10頃, 約-17.2)		
	x	y	xy	x	y	xy
SI210-1 (8cm深部)	-0.715	-0.668	-0.062	0.554	0.798	0.056
SI210-3 (8cm深部)	-0.96	-1.052	0.062	0.121	0.146	0.174

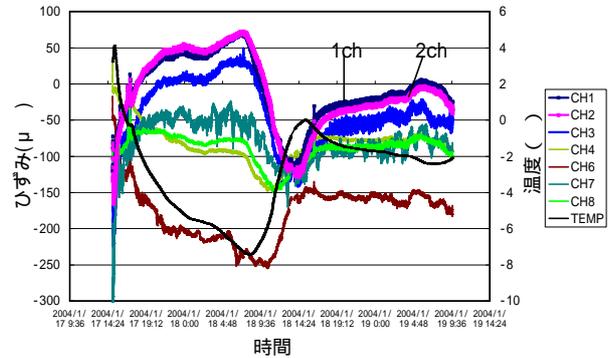


図-15 インターバル計測結果 (SI210-3)

での路面温度である。なお, インターバル計測終了後に 0C を行うことで現有応力が計測できるので, その値をインターバル計測期間中の値に加えることによって舗装体実際に生じていた応力にシフトさせることができるが, この図はそのような処置を行ったものである。

測定開始直後は, 急激に冷やされていき, そのまま 18 日午前 7 時 10 分頃に今回の計測期間中でもっとも低い温度となっている。

そして, このときに最も大きい引張のひずみが生じていたことが分かる。その後は路面温度の上昇と共に引張の状態は緩和されていき, 18 日午後 1 時 20 分頃の最大温度付近で最も大きな圧縮ひずみを生じ, その後の温度低下とともに引張側に推移していることが分かる。

図-14 にインターバル計測の現有応力を示す。この現有応力はインターバル計測終了時に現有応力になるようにオフセットしているため, 路面に実際に生じている現有応力である。この図から X 方向 (走行方向), Y 方向 (横断方向) とともに低い温度になると現有応力 (引張応力) が増加し, 温度が高くなると内部応力が緩和されているのが分かる。

(2) SI-Cell 法による計測結果

図-15 は SI-Cell によるインターバル計測結果であるが, 図-13 と同様に舗装体実際に生じていた応力にシフトさせたものである。

図-4 で示したように CH1, CH2, CH3 の方向はそれぞれ走行方向, 横断方向, 45 度方向であるが, 深さ 8cm

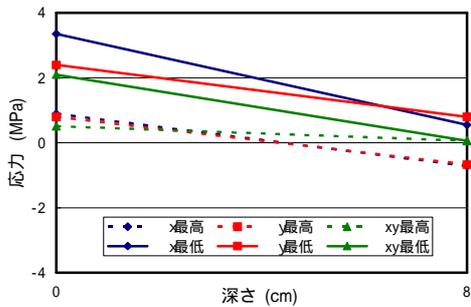


図-16 最高および最低温度における応力値の深さ方向変化 (200-1)

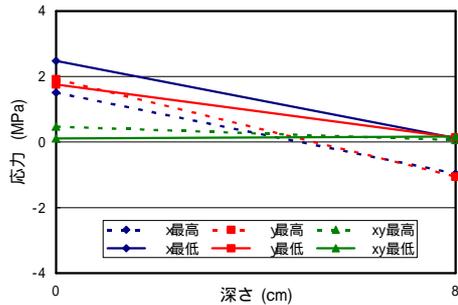


図-17 最高および最低温度における応力値の深さ方向変化 (200-3)

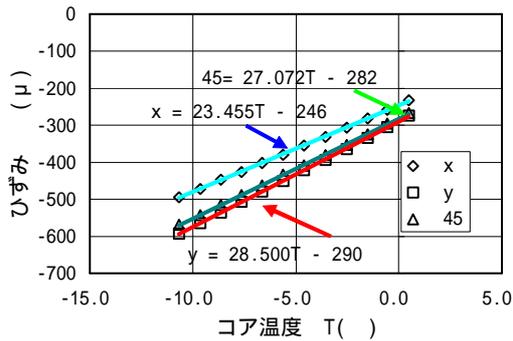


図-18 応力解放後のみかけの線膨張係数

の位置でも温度の影響があり、低温時には引張ひずみが生じ、温度が上昇すると圧縮ひずみが生じていることがわかる。

表-5 には舗装体の深さ 8cm の位置における最高内部温度時および最低内部温度時の XY 平面内の応力の値を示す。最低内部温度時の応力が最高内部温度時の応力よりも明らかに大きくなっていることが確認できる。

(3) 温度変化による深さ方向の応力分布

インターバル計測の SU-Cell, SI-Cell の計測結果から得られた最高および最低温度における各応力の深さ変化を図-16, 17 に示す。ここに, 200-1 と 200-3 はそれぞれ SU200-1, SI210-1 の組み合わせ, SU200-3, SI210-3 の組み合わせであることを示す。それぞれの最高温度を破線で、最低温度を実線で示

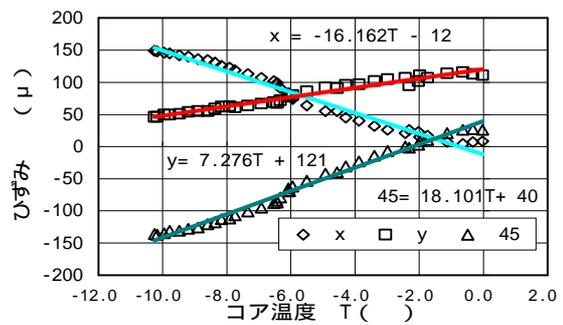


図-19 応力解放前のみかけの線膨張係数

表-6 応力解放前後のみかけの線膨張係数

計測点 No.	線膨張係数 a ($me /$)					
	CH.1 : e_x		CH.2 : e_y		CH.3 : e_{45}	
	コア	路面	コア	路面	コア	路面
SU200-1	23.455	-16.162	28.5	7.276	27.072	18.101
SU200-3	21.78	-11.55	24.65	12.72	26.63	11.23
SU200-4	25.025	-10.64	20.817	6.85	22.64	15.598

しているが、いずれも最低温度での応力値が大きくなる傾向が見られた。なお、これらのグラフでは図-11, 12 のグラフから 4 cm 深部での計測結果を省略したものに相当するが、そのようにすることによってグラフを直線で示し、最低温度時と最高温度時での応力の差異を明確に示すためである。以上の計測結果から、温度がさらに低い場合にはより大きな引張が路面に生じることが予想されるので、日内の温度変動により路面に負荷される繰り返し応力などが低温クラックの発生につながるものと推察することができる。

7. 応力解放前後のみかけの線膨張係数の変化

アスファルト舗装路面は方向によって程度の異なる拘束を受けていると考えられるため、舗装体の温度が変化した場合には方向ごとに異なる応力やひずみが生じると予想される。そこで温度に対するひずみ変化の傾きをみかけの線膨張係数として求め、この値を指標として拘束の多寡を検討することとした。例えば、同一物質であるが拘束条件の異なる複数の部材が十分に緩やかな温度上昇環境下におかれた場合、拘束の全くない材料はその物質がもつ線膨張係数に従ったひずみを生じるが、拘束が大きいほど生じるひずみ量は小さくなり、このときにみかけの線膨張係数を求めるとすればその値はその物質がもつ本来の線膨張係数よりも小さくなると考えられるからである。そこで非拘束状態であると想定できるコア(OC 計測を行うことで成形されたもの)と拘束状態であると想定できる OC 実施前の路面の場合でのみかけの線膨張係数を求めて両者の差異を確認する。

(1) 応力解放後（コア）のみかけの線膨張係数の算出法

SU200-1 の OC 後のコアに対してみかけの線膨張係数を求めた結果の一例を図-18 に示す。最低温度約 -10 から開始して自然に温度を 0 付近まで上昇させた場合の結果であり、横軸と縦軸はそれぞれコア表面温度 T 、ひずみ となっている。3 方向のゲージの T - 関係に対して各々近似直線を引き、この傾きをそれぞれのゲージの（非拘束時の）みかけの線膨張係数とする。

(2) 応力解放前（路面）のみかけの線膨張係数の算出法

一例として、SU200-1 での結果を図-19 に示す。図-13 のインターバル計測結果から、-10 から 0 の点でかつ温度上昇域である領域のみに着目して、3 方向のゲージの近似直線を求め、それらの傾きをもって（拘束時の）みかけの線膨張係数とした。

(3) 非拘束（コア）と拘束（路面）状態におけるみかけの線膨張係数の比較

表-6 に温度域を -10 から 0 に限定して、非拘束と拘束状態の両者でのみかけの線膨張係数を比較した結果を示す。非拘束と拘束状態でのみかけの線膨張係数を比較すると、前者よりも後者の方が方向による差異が大きかつ値の絶対値は小さいことがわかる。同一の温度変化域であるのにも関わらずみかけの線膨張係数の値にこのような差異が生じるということは、コアは非拘束状態であり路面は拘束状態であるといった想定が正しいことを示唆している。さらに、拘束状態では CH.1(走行方向)のみかけの線膨張係数が最も小さい値となっており、この方向の拘束が最も大きいことを示唆しているとともに、負号であることから温度が低下するほど引張ひずみを生じることを意味しており、一般的に考えられている低温クラックの発生機構とも合致している。

8. 低温クラックの発生メカニズムの推定

応力解放法により低温クラックの発生メカニズムを推定した。

(1) 温度低下による引張応力の発生原因

図-11, 12 から舗装体の温度が低下すると、表面に近いほど大きな引張応力になることが確認された。また、図-13, 14 から気温変化に伴う舗装体の温度変動により、舗装体に繰り返しの引張と緩和のサイクルが生じていることが確認でき、寒冷期の場合は舗装体が疲労することによってクラックが誘発されると考えられる。

(2) 寒い地域に多く発生する理由

表-5、図-14, 16 および図-17 から舗装体温度の低下が大きいほど引張応力が大きく働くことが確認されたが、このことは、過去の調査結果^{1, 2)}のように低温クラックは凍結指数が大きく、引張応力に対する抵抗が弱い舗装厚の薄い箇所での被害が多い傾向にあるという結果とも一致している。

(3) 横断方向に発生する原因

図-9, 11, 12 および図-14 から舗装体には走行方向と横断方向の引張応力が同時に発生することを確認した。また、表-6、図-18 および図-19 から縦断方向は横断方向よりも拘束が大きいために低温になるほど引張り応力が大きくなることと考えられ、縦断方向では疲労を蓄積しやすいと推察できるので、その方向に直交する横断方向にクラックが生じやすいと推察できる。

9. まとめ

- 1) 低温クラックのメカニズムを解明するために応力解放法を適用することで、舗装体に発生する引張応力や引張ひずみが測定でき、応力解放法は低温域の舗装体に発生する応力を計測できる有効な方法であることが確認できた。
- 2) 応力解放法を適用することにより、低温クラックのメカニズムの検討を行った結果、温度応力により、低温クラックが発生していることや温度勾配が大きいほど舗装体には温度応力が大きく働いていることが確認された。
- 3) 低温時に発生する引張応力は走行方向、横断方向に働き、縦断方向については、拘束の影響が大きいことが確認された。

10. 今後の課題

応力解放法により低温クラックのメカニズムについて検討を行ったが、今後、更に低温下での舗装体に発生するデータを蓄積し検証を行いたい。

参考文献

- 1) 阿部, 小笠原, 野竹: 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, V-257, pp.514-515, 1993
- 2) 小栗, 高橋, 蛸子: 低温クラックの抑制のためのアスファルト選定について, 開発土木研究所月報 No542, pp.28-33, 1998
- 3) 北海道開発局土木試験所 舗装研究室: アスファルト舗装道路の横断ひびわれに関する調査研究報告書, pp.12-14, 1985

- 4) 木村, 平島, 黒瀬, 菊池: 小型埋設ひずみ計を用いた初期応力測定の開発トンネルと地下, vol. 134, No7, pp. 573-581, 2003
- 5) 木村, 黒瀬, 田口, 帆苅: 埋設型ひずみ計を用いた密粒度アスファルト混合物の現有ひずみの計測, 土木学会第57回年次学術講演会, V-61, pp. 121-122, 2002
- 6) 鈴木, 田口, 帆苅, 種: アスファルトコンクリート表面における現有ひずみの計測: 土木学会第57回年次学術講演会, V-61, pp. 121-122, 2002
- 7) 種, 黒瀬, 木村, 田口: 応力解放法による現道のアスファルト舗装における応力測定の基礎研究, 土木学会舗装工学論文集, 第8巻, pp. 233-242, 2003
- 8) 中川, 島多, 小笠原: 美々試験道路における構成厚の異なる舗装の長期パフォーマンス (中間報告), 開発土木研究所月報 No513, pp. 25-39, 1996

BASIC STUDY ON LOW-TEMPERATURE CRACKING OF ASPHALT PAVEMENT USING STRESS RELEASE METHOD

Ryuji ABE, Hideto TAKEMOTO, Takuo SUZUKI, Kiyokazu KIMURA and Hitoshi TAGUCHI

Many pavements in Hokkaido, a cold, snowy region, experience thermal stress cracking (hereafter low-temperature cracking) due to low temperature. The causal mechanisms of such cracking are not understood. We used the stress release method to clarify those mechanisms. Our study aimed to examine measures against low-temperature cracking. To this end, we summarized the results of thermal stress measurements in asphalt pavement body during the cold season taken by stress release method, and examination results of causal mechanisms of low-temperature cracking.