

アスファルト混合物の熱応力挙動に関する研究

A RESEARCH ON THERMAL BEHAVIOR OF ASPHALTIC MIXTURE

森吉昭博*・藤原正浩**

By Akihiro MORIYOSHI and Masahiro FUJIWARA

This paper describes the results of 3 kinds of thermal fracture tests of asphaltic mixture and stress relaxation test of asphaltic mixture in tension at low temperatures. Test results indicate that the difference between the fracture temperature and the temperature at intercept is about 20 °C under various thermal loading conditions, thermal stress under thermal repeated loading conditions corresponds to thermal stress under stress relaxation at constant temperature and the characteristics of stress relaxation under various thermal loading conditions is similar with that of stress relaxation in tension.

Keywords : asphaltic mixtures, thermal fracture, stress relaxation

1. ま え が き

アスファルト舗装は外気温が変動すると舗装体の温度も変化し、アスファルト舗装そのものが粘弾性挙動を示すため低温では亀裂、高温ではわだち掘れという破壊現象を生ずることが多い。このようにアスファルト舗装はコンクリート舗装の弾性的挙動とは異なり、その力学性状は時間、温度等に著しく依存することはよく知られている^{1),2)}。粘弾性挙動を示す材料は一定温度条件での応力-ひずみ関係でもヒステリシスを描くので³⁾、同一ひずみ量に対して条件によっては応力が異なる。従来アスファルト混合物の力学性状に関する研究ではこのようなヒステリシスの過程はほとんど考慮せず、一定温度時で、ピーク時の応力やひずみのみに注目して解析している⁴⁾。このため、あるひずみにおいては対応する応力が2種存在することとなり、ひずみ履歴や温度履歴を受けているものは正確にはひずみや温度だけでは応力は一義的には決定できないことになる。

最近寒冷地のアスファルト舗装で問題となっている横

断ひびわれ現象のように比較的溫度変化が緩やかでしかも長時間にわたる変化の場合はこのような影響の大きいことが予想される。Tuckett⁵⁾や佐藤⁶⁾、および著者ら⁷⁾はこのような理由とアスファルト混合物の熱応力破壊現象が多岐の因子に関係していることから比較的熱応力に影響の大きい因子について検討している。たとえばTuckettらはアスファルト量を変化させたり吸水性骨材を使用し、アスファルト混合物の熱疲労特性について検討し、佐藤らはアスファルトの老化などが熱応力特性に及ぼす影響について、また著者らは冷却速度や初期温度の影響についておのおの検討している。これらはいずれもアスファルト混合物の熱応力特性のみについて検討しており、この応力と他の力学性状との対比は行われておらず、熱応力の破壊性状の一般法則を得るまでには至っていない。本研究は温度履歴または時間履歴がアスファルト混合物に影響を与えると予想される熱応力試験を種々の条件で実施し、この実験から得られる性状と引張りの応力緩和試験から得られるものとの比較を行い、アスファルト混合物の熱応力特性を破壊に至るまで詳細に検討した結果について報告する。

2. 供 試 体

使用アスファルトは針入度級が80/100のストレート

* 正会員 工博 北海道大学助教授 工学部土木工学科
(〒060 札幌市北区北13西8)

** 学生会員 北海道大学大学院修士課程 工学部土木工学科
(同上)

アスファルトであり、このバインダーの性状は Table 1 に示すとおりである。また混合物の配合は Table 2 に示した。

供試体の作製法は次のとおりである。

アスファルトを 2 ポアズ (0.2 Ns/m^2) 相当の温度 (148°C) まで加熱し、これと加熱した骨材とをミキサーで 3 分間混合し、それを $30 \times 30 \times 5 \text{ cm}$ の鋼製型枠に投入する。このあと混合物が 30 ポアズ (0.3 Ns/m^2) の温度 (102°C) になったとき、線圧 18 kgf/cm (176.4 N/cm) のローラーコンパクターで 24 回転する。その後 45°C に保持された恒温室で養生の後、トラバース機構のあるホイールトラッキング試験機を用い荷重 55.1 kgf (540.0 N)、トラバース走行速度 42 回/分 ($30 \text{ cm}/6 \text{ 分}$) の条件でニーディング作用を 1 時間供試体に与える。その後常温で放置した試料より、ダイヤモンドカッターで熱応力試験の供試体は $2.5 \times 2.5 \times 26 \text{ cm}$ 、力学試験の供試体は $2.5 \times 2.5 \times 15 \text{ cm}$ の寸法に六面カットして供試体を切り出した。供試体の長さによる差異への影響は従来の研究より無視するに足るものであることがわかっている⁸⁾。

3. 供試体の治具

従来の突き合わせ治具を用いたアスファルト混合物の熱応力試験での破壊位置は治具付近がほとんどで、かつ力学試験から求めた強度と比較して小さい応力で破壊するため、本研究の熱応力試験では袋状治具を使用した。これは $3 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 0.3 \text{ mm}$ の鋼板 4 枚と鋼製端子からなり、供試体端部を包みこむ形で接着する。なお、接着剤には従来どおりエポキシ樹脂を使用した⁹⁾。

なお、力学試験における供試体の治具の接着は突き合わせとした。

4. 試験装置

熱応力試験装置は供試体を実験水槽内で両端固定し、冷媒としてメタノールを使用し、恒温水槽とプログラム温度設定器を用いて任意の温度変化を与えることが可能である。温度制御は $\pm 0.1^\circ\text{C}$ の精度であり、荷重や水温などを測定する。

実験水槽内の温度測定は 3 か所で行い、デジタル記録した。荷重もデジタル記録する一方、アナログ記録計で記録しながらモニターも行った。

また、力学試験では一軸引張試験機を使用した。これは供試体に所定の変形を一軸方向に与えると同時に、そのときの荷重を荷重計を通して測定する。

主な使用機器およびその性能は付表-1 に示すとおりである。

Table 1 Properties of the Binder.

Penetration (25°C, 100g, 5sec)	86
Softening Point Temp. (°C)	47.8
P. I.	-0.4
Mixing Temp. (°C)	148.0
Compacting Temp. (°C)	102.0
Fraass Breaking Point (°C)	-13
Moriyoshi Breaking Point (°C)	-24

Table 2 Composition of Mixture.

Sieve Opening (mm)	Asphalt Concrete	
	Type	(%)
13	100.0	0
10	88.4	4
5	67.0	0
2.5	48.5	5
0.6	34.4	4
0.3	28.5	5
0.15	17.7	7
0.074	7.2	2
Binder Content	5.8	

5. 実験方法および解析

熱応力試験は応力の生じない状態で供試体を固定し（このときの温度を初期温度という）一定冷却速度で冷却し、破壊させる。このときの温度を破壊温度、応力を破壊強度とする。本研究では標準条件として、初期温度は $+10^\circ\text{C}$ 、冷却速度は $-30^\circ\text{C}/\text{h}$ とし、主に温度下降を途中で中断して一定温度を維持し、応力を緩和させる（このときの温度を緩和温度とよぶことにする）実験を行った。

この実験結果をもとに温度を横軸、応力を縦軸にとったグラフを作成し、描かれた曲線を熱応力曲線とした（応力は荷重を断面積で除して求める）。この曲線は高温の領域では下に凸の放物線状であるが、低温になると直線状になる。ここで直線状に転移した点を転移点、また直線を外挿して温度軸と交わった点の温度を切片温度とよぶことにする（Fig. 1 参照）。

繰り返し温度変化試験においては温度勾配はすべて $\pm 30^\circ\text{C}/\text{h}$ とし、各回の下限温度に対応する応力を上限応力、上限温度に対応する応力を下限応力と定義し、このときの切片温度¹⁰⁾ は一定冷却速度で最後に載荷したときの温度とする（Fig. 2 参照）。

一方、応力緩和の実験については熱応力試験、力学試験はともに時間経過に伴う応力の変化を、また、熱応力試験ではさらに応力緩和量や応力緩和による熱応力曲線の変化を切片温度の変化量で検討した。繰り返し温度変化試験においては極大値の応力を上限応力、極小値の応力を下限応力と定義した。

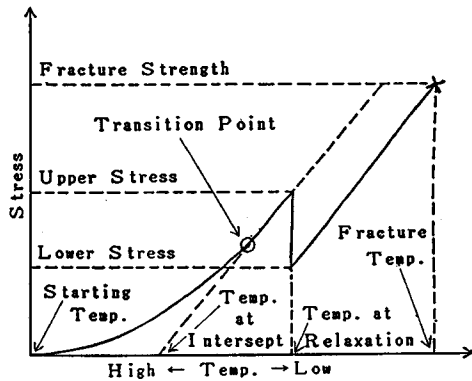


Fig. 1 General Concept of Thermal Stress~Temperature Relationships.

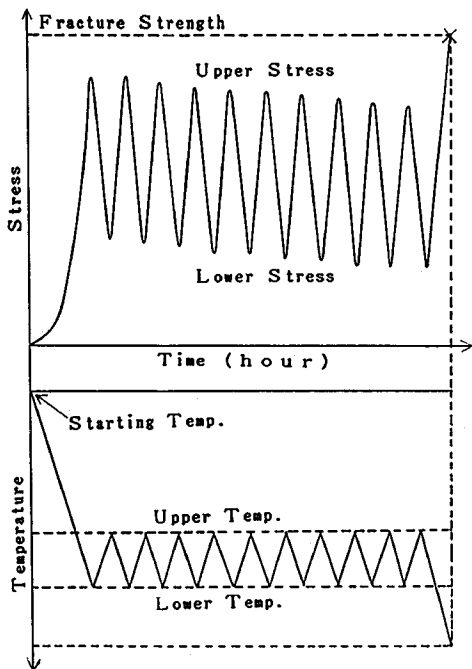


Fig. 2 Concept of Thermal Repeated Loading Condition.

6. 実験条件

(1) 一定冷却速度試験

この試験は緩和時間を設けず、一定冷却速度で単純に冷却・破壊させる。ばらつきの状況を調べるために同じ条件で供試体 10 本について行った。その結果、供試体 10 本におけるばらつきは熱応力曲線の直線部分において温度にして $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、応力にして $\pm 2 \text{ kgf/cm}^2$ (0.2 MPa) の範囲に収まっていた。この程度のばらつきは特に同一条件につき複数の供試体で実験するに及ばないと判断し、以下の実験では原則として 1 条件につき 1 本の供試体で行った。

(2) 緩和時間 10 時間の実験

この実験は緩和温度まで一定冷却速度で低下させ、その温度に到達した後は応力のかかった状態（応力の大きさは時間とともに減少する）で 10 時間一定温度を維持する。その後緩和中に破壊しない供試体は再び一定冷却速度で冷却、破壊させる。Table 3 に示す温度それぞれを緩和温度にとって実験を行った。

上記実験のほか、比較対象として以下のような実験も行った。

(3) 冷却速度を変化させた実験

-30°C/h 以外の温度勾配で行った一定冷却速度試験である。Table 4 に示す冷却速度について行った。

(4) 初期温度を変化させた実験

$+10^{\circ}\text{C}$ 以外の初期温度で行った一定冷却速度試験である。Table 4 に示す初期温度について行った。

(5) 緩和時間が 10 時間以上の実験

緩和時間を、緩和温度 -20°C の場合については 31 時間と 108 時間の 2 種の設定で行った。また、緩和温度 -25°C の場合についても特に時間を限定せずに行った (Table 3 参照)。

(6) 繰り返し温度変化試験

初期温度、温度勾配は一定 ($\pm 30^{\circ}\text{C/h}$) で、下限温度と上限温度を設定し、この間で繰り返し温度変化を行うものである (Fig. 2 参照)。繰り返し回数は 10 回とした。上・下限温度差 10°C について下限温度 -25°C 、 -20°C の 2 種行った。さらに、下限温度 -25°C 、上限温度 -20°C でサイクル内のそのいずれかに 20 分間の温度一定の時間を設けた設定では都合 2 種行った (Table 5 参照)。

(7) 応力緩和の力学試験

以上は熱応力試験機による実験であるが、これは一軸引張試験機を使用したものである。この実験の場合、一定の緩和温度下でひずみ $\epsilon = 2.6 \times 10^{-4}$ の一定の値を瞬間的に与えて、その後の応力の変化を測定した。緩和温度は -5°C 、 -10°C 、 -15°C 、 -20°C の 4 種をとり、測定は最大荷重が発生してから 1000 秒後までの応力変化について行った。緩和弾性率を求めることを目的に行った実験であるが、本研究ではこの結果と熱応力試験に基づく応力緩和との間での比較・検討のためにデータを使用した。

7. 結果および考察

(1) 温度による応力緩和量の違い

Table 3 および Fig. 3 には各緩和温度での応力の緩和量を（緩和時間 10 時間、その他）示した。これより、緩和温度が転移点よりも高温側では転移点に近いほど応力緩和量が大きいように思われる¹¹⁾。その理由としては

転移点温度を境にして応力緩和の程度が異なることと、
 応力緩和初期の応力の大きさが異なることが考えられる。

以上より熱応力試験で行われるような温度変化状況、
 すなわち、初期温度が等しく、温度低下とともに応力増加の進行する条件のもとでは時間当たりの応力緩和量は
 転移点付近で最大となると考えられる。

(2) 熱応力曲線の変化

応力緩和の結果、熱応力曲線の直線部は、ほぼ温度軸
 に平行に低温側に移動した。移動量は切片温度によって
 示されるように、それはまた応力緩和量にも対応している。
 ただし、前述のように低温ではすみやかな応力低下
 が期待できないこと、低温・高応力の場合には簡単に破壊
 にいたることから、緩和による熱応力曲線の移動には
 一定の限界があるものと思われる。

また、緩和温度 -27°C の場合では(実験条件のうち
 最低の緩和温度である)他のものと比較して傾きが相当
 小さくなり、かつ破壊強度も著しく小さくなった。これは
 一定冷却速度で -27°C の緩和温度まで低下させたとき、
 供試体の破壊音がわずかに聞こえることから微細な
 亀裂が供試体内に発達していそうなこと、またその微小
 亀裂が応力緩和中に広がったためと考えられる¹²⁾。

加えて、初期温度が低温である場合も応力緩和の場合
 と同様、熱応力曲線も温度軸に平行に低温側に移動する。
 そこで、応力緩和10時間の実験結果を切片温度で比較
 すると、Table 3, 4に示すように、たとえば緩和温度 -20°C
 で応力緩和10時間の場合と初期温度 -10°C の場合の
 切片温度とがほぼ同一であることがわかる。

さらに、冷却速度が小さい場合には同じ初期温度でも
 熱応力曲線が低温側へと移動し、この場合の熱応力曲線
 の変化を切片温度で比較すると、Table 3, 4に示すよう
 になり、たとえば緩和温度 -18°C ・緩和時間10時間の
 場合と冷却速度 $-1^{\circ}\text{C}/\text{h}$ の場合の切片温度とがほぼ同一
 であることがわかる。なお、冷却速度が小さいことはその
 冷却の過程で応力緩和が進むことを意味しているの

Table 3 The Results of the Thermal Fracture Test with Relaxation.

Temp. at Relaxation (°C)	Time of Relaxation (hour)	Stress at Relaxation		Temp. at Intercept (T ₁) (°C)	Fracture Temp. (T ₂) (°C)	Fracture Strength		T ₁ -T ₂ (°C)
		f (kgf/cm ²)	(MPa)			(kgf/cm ²)	(MPa)	
-5	10	1.9	0.18	-9.2	-28.9	34.9	3.42	19.7
-10	10	4.3	0.42	-10.3	-23.0	20.7	2.03	12.7
-15	10	4.7	0.45	-13.6	-32.4	33.8	3.31	18.8
-18	10	9.4	0.92	-14.5	-33.6	36.4	3.57	19.1
-20	10	8.7	0.85	-13.0	-28.5	27.1	2.66	15.5
-22	10	9.1	0.89	-13.5	-34.7	37.8	3.70	21.2
-25	10	7.7	0.75	-13.8	-33.4	38.6	3.78	19.6
-27	10	7.2	0.70	-7.7	-32.1	36.8	3.61	24.4
-20	31	9.3	0.86	-16.8	-34.7	36.1	3.54	17.9
-20	108	15.7	1.53	-17.6	-32.9	31.6	3.10	15.3

Table 4 The Results of the Thermal Fracture Test (Rate of Cooling, Starting Temperature : Variable).

Starting Temp. (°C)	Rate of Cooling (°C/h)	Temp. at Intercept (T ₁) (°C)	Fracture Temp. (T ₂) (°C)	Fracture Strength		T ₁ -T ₂ (°C)
				(kgf/cm ²)	(MPa)	
+10	-30	-9.3	-28.6	37.0	3.63	19.3
+10	-12	-8.8	-30.5	37.0	3.63	21.7
+10	-6	-12.0	-28.9	31.8	3.12	16.9
+10	-3	-9.1	-31.9	36.8	3.61	22.8
+10	-1	-14.7	-31.4	32.6	3.19	16.7
0	-30	-10.8	-30.4	37.2	3.65	19.6
-10	-30	-12.8	-30.1	36.8	3.61	17.3
-15	-30	-16.0	-36.3	29.4	2.88	20.3
-17	-30	-18.2	-34.9	33.6	3.29	16.7

Table 5 The Results of the Thermal Repeated Fracture Test.

Upper Temp. (°C)	Lower Temp. (°C)	Temp. at Intercept (T ₁) (°C)	Fracture Temp. (T ₂) (°C)	Fracture Strength		T ₁ -T ₂ (°C)
				(kgf/cm ²)	(MPa)	
-20	-10	-14.9	-33.6	41.0	4.02	18.7
-25	-15	-12.0	-29.0	34.5	3.38	17.0
-25	-20*	-14.5	-31.6	36.2	3.54	17.1
-25*	-20	-13.1	-29.9	33.9	3.32	16.8

* Relaxation Time : 20 minutes

で、以上より、低温における大きな応力の発生を避ける
 ためには、緩慢な冷却よりも、転移点付近まで急速に冷却
 を行い、その後応力緩和を行った場合の方が、より短
 時間に熱応力曲線が低温側へと移行することが期待でき
 る。

(3) 緩和時間に伴う応力の変化

Fig. 3, 4, 5に示すように時間当たりの応力緩和量は
 経過時間に応じて減少する。この傾向は緩和時間が10
 時間を上回る場合についても同様である。

ただし、緩和温度 -25°C の場合について緩和時間が

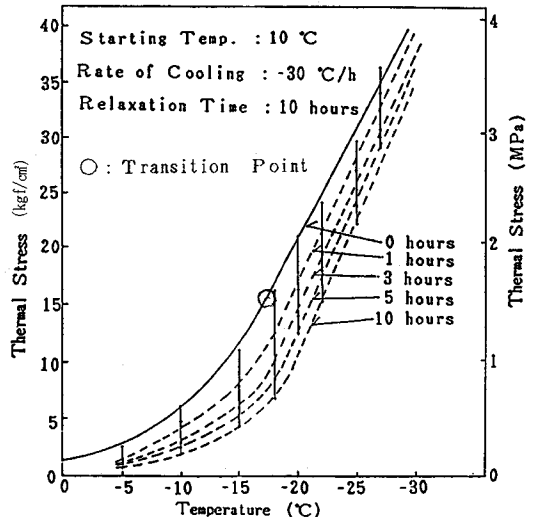


Fig. 3 Effect of Relaxation Time on Stress Relaxation.

60 時間程度で、応力が再び急速に低下した。このとき、その後一定冷却速度で載荷しても応力の上昇はみられなかったため、混合物は破壊したと考えられる。このように緩和温度が低く、緩和時間が長期におよぶと破壊にいたることがあると思われる。

(4) 力学試験との対応

Fig. 4 は力学試験による緩和による応力変化の結果と熱応力試験での応力緩和の結果を合わせて示した。これと熱応力試験での緩和による応力変化とを比較すると、傾向が類似していることがわかる。すなわち、熱応力試験での応力緩和は低温の領域において力学試験の間には一定の対応があるといえる。ただし力学試験の場合、たとえば温度が -15°C の場合と -20°C の場合とで応力にわずしかし差異がみられない点などは特に熱応力試験の場合と異なっている。これは両者で初期における応力のかけかたが異なること、すなわち、力学試験では瞬間的にひずみが加わるのに対して、熱応力試験では温度低下に伴って徐々にひずみが増加するという差異があることに起因するものと思われる。このため、熱応力試験におけるひずみや緩和に伴う弾性率の変化についての推定を行うまでには至らなかった。

(5) 繰り返し温度変化試験との対応

繰り返し温度変化試験において最初に下限温度に到達してからの経過時間と上限応力との関係は Fig. 5 に示す。これより、上・下限温度差が 10°C の場合、および繰り返し温度変化時に上・下限温度で 20 分間の一定温度の時間を設けたそれぞれの場合の応力の低下の程度は一定温度下での応力緩和の場合とほとんど変わらず、数回の繰り返し回数で混合物が破壊する場合は応力の低下が著しいことが確かめられているので、10 回程度での繰り返し温度変化による影響はないように思われる (Table 5 参照)。

(6) 破壊強度および破壊温度への影響

混合物の破壊強度および破壊温度はばらつきが大きいですが、Table 4 に示すような結果となり、概して以下のような傾向がみられる。

まず、破壊強度は、緩和時間 10 時間のもとの一定冷却速度のそれとではいずれも有意な差がないと思われる。しかし、緩和温度 -20°C 、緩和時間が長時間のもの結果をみると、緩和時間が長く、熱応力曲線が低温側であるものも破壊強度はほとんど変化しないように思われる。また、初期温度の異なる条件のもとでも同様の傾向があり、破壊強度の大きさはほぼ同一であった。一方、冷却速度の異なる場合冷却速度が遅くなると若干

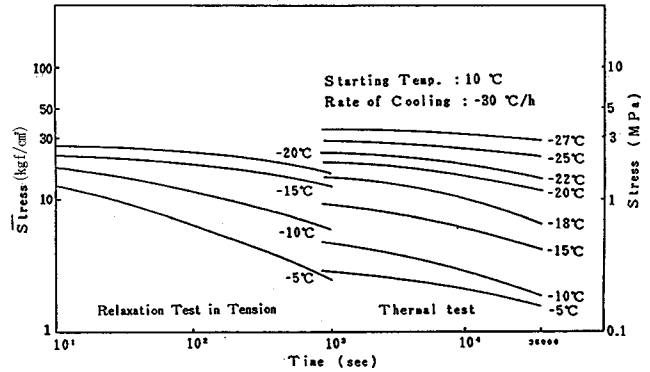


Fig. 4 Stress~Time Relationship of Relaxation Test in Tension and Thermal Test.

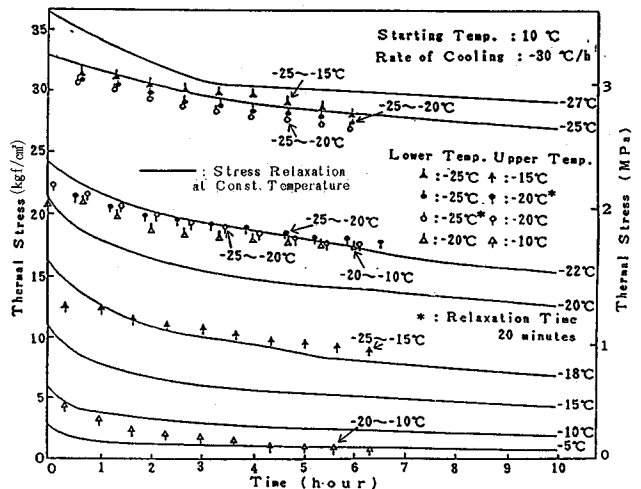


Fig. 5 Relation between Thermal Stress under Stress Relaxation at Constant Temperature, Thermal Stress under Thermal Repeated Loading and Time.

破壊強度が小さくなる傾向にある。

一方、破壊温度については緩和時間を設けた実験条件および、その他のものも一般に熱応力曲線の移動に応じて一定冷却速度のそれより低温側となっている。切片温度との関係を見ると、破壊温度は一般的には切片温度に対して 20°C ほど低い温度にあるということが出来る。

また、繰り返し温度変化試験での破壊強度、破壊温度については Table 5 に示すようであり、応力緩和の場合と類似の傾向がみられた。

一例みられたような緩和時間中におけるアスファルト混合物の破壊は過去の長時間にわたる繰り返し温度変化試験においてもみられたものであるが、破壊に至るまでの条件についてはいまだ説明されていない。

8. 結 論

以上より得られた結論をまとめると次のようなことが

いえる。

(1) 時間当たりの応力緩和量は、緩和温度が転移点付近で最大となる。このとき、熱応力曲線は最も低温側に移行しており、切片温度も最低である。

(2) 応力緩和を伴った場合と、冷却速度を変化させた場合、初期温度の異なる場合、および繰り返し温度変化を与えた場合の熱応力曲線で切片温度が同一の場合は熱応力挙動が同じであると思われる。

(3) 応力緩和曲線の形状については力学試験と熱応力試験との間に類似した傾向がみられる。

(4) 一般に破壊温度はその混合物の最後に載荷したときの切片温度より約20°C低い温度となる。

(5) 繰り返し温度変化を与えたときの下限温度時の熱応力の値は、一定温度を保持したときの応力緩和時の同時刻のそれと類似しているように思われる。

以上本研究ではアスファルト混合物の熱応力特性を温度履歴や経過時間の影響のみについて検討したが、現在現地から採取した切取供試体についても同様の実験を行っており、また熱疲労や舗装構造と亀裂との関係等についても検討しているのでいずれ機会をみて発表する予定である。

この研究を遂行するにあたり電気工学科 深井一郎教授をはじめ上島 壮、高橋 将各氏に貴重なご助言をいただいた。また本論文作成にあたり徳永良雄、水野雅博、辻 英明各君に大変御世話になった。ここに感謝の意を表する。

付表-1 主な機器とその性能

デジタルプログラム設定器 (CHINO製DP3型)	設定出力精度±0.1%以内
デジタル指示調節計 (CHINO製D1型)	設定精度入力スパンの±0.1%
恒温水槽 (西独Haake製 N3-T型)	調節精度±0.01°C、水槽寸法54.5×60.5×104.0cm
デジタルレコーダー (CHINO製 プロセスV DR030)	30点入力可能
荷重計 (共和製LIII-ITE)	容量1トン(9.8kN)、圧縮引張両用変形量0.033mm/1000kg/Full
引張試験機	容量2トン、最大油圧140kg/cm ² 、調節圧力±5kg/cm ²

参 考 文 献

- 1) 菅原照雄・上島 壮・森吉昭博：アスファルト混合物の低温領域におけるレオロジー挙動，土木学会論文報告集，第234号，pp.131~141，1975年2月。
- 2) 森吉昭博・上島 壮・菅原照雄：アスファルト混合物の破壊強度に関する研究，土木学会論文報告集，第210号，pp.77~84，1973年2月。
- 3) Ferry, J. D. : Viscoelastic Properties of Polymers, John Wiley and Sons, Inc. 1970.
- 4) Pagen, C.L. : Dynamic Structural Properties of Asphalt Pavement Mixtures, Proc. 3rd. Int. Conf. on Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. 1, pp. 290~315, 1972.
- 5) Tuckett, G. M., Jones, G. M. and Littlefield, G. : The Effects of Mixture Variables on Thermally induced Stresses in Asphaltic Concrete, PAAPT, Vol. 39, pp. 703~744, 1970.
- 6) 八谷好高・福手 勤・佐藤勝久：老化に伴うアスファルトコンクリートの性状変化，運輸省港湾技術研究所報告，Vol. 22, No. 2, pp. 268~287, 1983年6月。
- 7) 森吉昭博・水沢 隆：アスファルト混合物の熱応力試験に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第384号，V-7, pp.137~141, 1970年8月。
- 8) 森吉昭博・新田 登：脆性領域におけるアスファルト混合物の破壊に関する研究，土木学会論文報告集，第390号，V-8, pp.219~224, 1988年2月。
- 9) 7) ibid
- 10) Haas, R. C. G. and Anderson, K. O. : A Design Subsystem for the Response of Flexible Pavements at Low Temperatures, PAAPT, Vol. 38, pp. 179~223, 1969.
- 11) 森吉昭博：繰り返し温度変化を受けるアスファルト混合物の温度応力に関する研究，土木学会第40回年次学術講演会講演概要集，1985年。
- 12) 北岡善文・片倉浩司・森吉昭博・菅原照雄：アスファルト混合物の破壊に関する研究—温度パターンの異なる温度応力試験について—，土木学会第38回年次学術講演会講演概要集，1983年。

(1987.11.5・受付)