

## アスファルト材料の温度応力評価手法(その2)

### —AE計測による低温ひび割れの評価—

#### Evaluation of Thermal Stresses of Asphalt Mixtures (Part 2)

#### — Evaluation of cracking of asphalt mixtures by acoustic emission method—

渡 部 貴 裕 大 野 俊 夫  
藤 澤 理 万 木 正 弘<sup>1)</sup>

#### 要 約

アスファルト混合物は温度低下による収縮が大きく、この収縮が何らかの拘束を受けた場合には温度応力を生じ、寒冷地や標高の高い地点などでは限界値を超えて低温ひび割れが発生することがある。本研究では、アスファルトの低温ひび割れ評価方法として AE 計測によるリング拘束供試体を用いた低温ひび割れ抵抗性試験を開発し、低温ひび割れ発生メカニズムを検討した。その結果、AE 計測はアスファルト混合物に発生する微細ひび割れを測定することが可能であること、微細ひび割れを発生させる原因となる応力の違いにより微細ひび割れ発生開始温度が異なること、アスファルト混合物の微細ひび割れの発生開始温度はアスファルト混合物が弾性体に近い挙動を示す温度(転移点温度)から数℃低温側であること、改質アスファルトはストレートアスファルトに比べ、貫通ひび割れが発生するまでに多くの微細ひび割れが発生していることが明らかとなった。

#### 目 次

- I. はじめに
- II. 試験概要
- III. 各種要因による微細ひび割れの発生
- IV. 微細ひび割れの発生要因
- V. まとめ

#### I. はじめに

アスファルト混合物は十分な遮水性や変形への追従性があることなどから、フィルダム等の表面遮水壁として利用されている<sup>1)2)</sup>。しかし、アスファルト混合物は温度低下による収縮が大きく、この収縮が何らかの拘束を受けた場合には温度応力を生じる。低温下となることが想定される寒冷地や標高の高い地点などでは温度応力に起因する低温ひび割れが生じることがある。低温ひび割れの発生は、転移点温度や貫通ひび割れの発生温度等で評価が行われており<sup>3)</sup>、鹿島技研においてもひび割れ発生温度やアスファルト混合物の低温下における力学的挙動を把握する方法として、リング状の供試体を用いた低温ひび割れ抵抗性試験と粘弾性モデルを用いた温度応力解析法を開発した<sup>4)</sup>。

低温ひび割れの発生をさらに詳細に検討すると、低温ひび割れは温度低下に伴い徐々に微細ひび割れが発生し、それらのひび割れが互いにつながることによって貫通ひび割れに至ることが多い。また、微細ひび割れが発生し始めると、低温の繰返し等により当初の貫通ひび割れ発生温度より高温側で貫通ひび割れが発生することもある。そのため、微細ひび割れの発生開始を低温ひび割れの発生開始と捉え

ることもでき、低温ひび割れを評価する場合には微細ひび割れの発生による温度疲労を把握する必要がある。

本研究では、低温ひび割れの発生メカニズムを明らかにし、低温ひび割れを評価する指標の一つとして微細ひび割れ発生開始温度を適用することを目的に、AE 計測による微細ひび割れ測定方法の確立、アスファルト混合物に発生する微細ひび割れの把握、各種要因による微細ひび割れ発生の違いを検討した。

#### II. 試験概要

##### 1. アスファルト混合物の温度応力

アスファルト混合物は温度により性質が大きく変わる材料である<sup>5)</sup>。常温では粘弾性体の挙動を、低温時には極めて弾性体に近い挙動を示し、その性質が変わる温度は転移点温度と呼ばれている(Fig.1)。アスファルト混合物が温度低下により収縮する場合、粘弾性領域では応力緩和によりひび割れを発生するような応力は生じないが、弾性領域では温度応力が増加し、限界値を超えると貫通ひび割れが発生する。

##### 2. 試験方法

微細ひび割れは低温ひび割れ抵抗性試験の供試体に AE センサを取り付けて試験を行い測定した。低温ひび割れ抵抗性試験は線膨張係数の小さいリング状の拘束体(インパール製:線膨張係数  $0.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )の外周にアスファルト混合物を打設した供試体(Photo 1)を水槽内で温度を低下させ、拘束体とアスファルト混合物の線膨張係数の違いからひび割れを発生させる試験である。ひび割れの検知は拘束体とアスファルト混合物のひずみの変化から行う。

1) 弘前大学 教授

キーワード: アスファルト材料, 温度応力, 低温ひび割れ, AE 計測, 微細ひび割れ, 内部拘束応力, 外部拘束応力

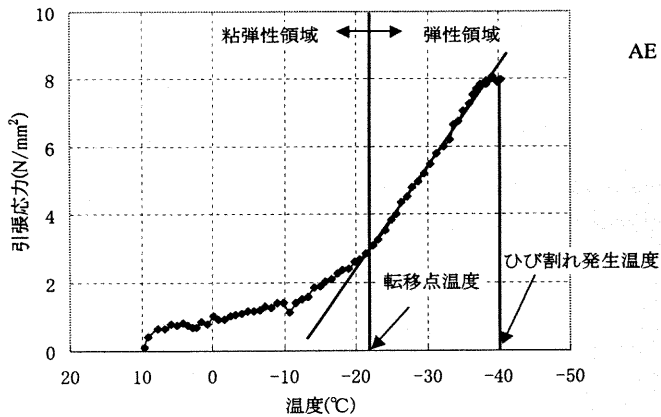


Fig.1 Transition Temperature

AE 計測は材料が破壊する過程で発生する微小音を検知する方法で、これまでも材料試験や異常監視等に幅広く利用されており、微細ひび割れの発生音を検知することが可能であると考えられる。

### 3. 微細ひび割れの測定

最初に AE 計測によって微細ひび割れの測定が可能か否かを確認した。各試験ケースとも Fig.2 のように温度の低下にともない AE 数が増加して、ある温度でその数は激減した。その温度はひずみの変化から測定したときの貫通ひび割れ発生温度と同等の温度であった。これは、AE 数がひび割れを測定していることを示しており、AE で微細ひび割れの計測が可能である。

### 4. AE 計測方法

AE 計測により測定される値の名称と定義を Table 1 に示す。AE 計測により微細ひび割れを検知できることは確認できたが、AE 計測は周波数フィルタやしきい値などの設定値により検知する音の大きさや検知できる範囲が変わる。そのため、最適な周波数、しきい値を設定しなければ測定値が異なることが考えられる。そこで、フィルタ、しきい値等の設定値を決めるための事前検討として Table 2 に示す試験を実施し、フィルタ及びしきい値の影響を把握し最適な値を決定した。

フィルタの試験結果を Fig.3 に示す。ケース 1～3 の試験の結果、AE 発生数に差は無く、アスファルト混合物の微細ひび割れは周波数  $10^5 \sim 10^6 \text{ Hz}$  で発生している微小音が多い。そのため、フィルタは周波数  $10^5 \sim 10^6 \text{ Hz}$  で測定可能である。

増幅率の試験結果を Fig.4 に示す。増幅率が大きいほど AE 数は多くなるが、これは増幅率が大きいほどより微小な音を検知することが可能となるためであり、増幅率が大きすぎる場合にはノイズが多くなり、微細ひび割れ発生温度を特定することができなかった。そこで、増幅率は 10dB とし、10dB の増幅率で検知できる大きさの微細ひび割れ発生時の微小音のみを検知することとした。その場合でも、ノイズが含まれているため、微細ひび割れ発生開始温度は単位時間内 AE 発生数が 10 回を越えた温度と設定した。

本測定では各設定値を Table 3 のように設定して試験を行った。

### Ⅲ. 各種要因による微細ひび割れの発生

アスファルト混合物は材料や温度履歴により貫通ひび割れが発生する温度が異なるため、微細ひび割れの発生開始温度も材料や温度履歴により異なり、貫通ひび割れが発生するまでの微細ひび割れの

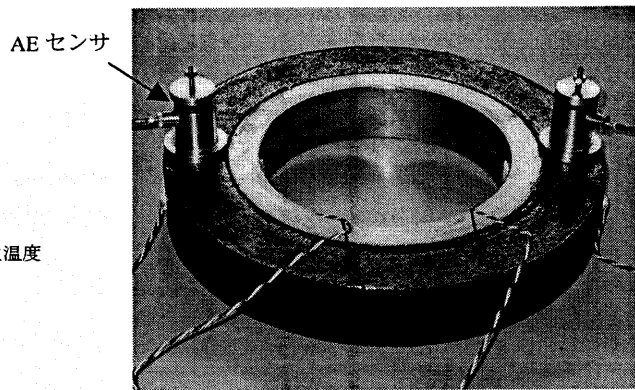


Photo 1 Specimen of Low Temperature Cracking Test

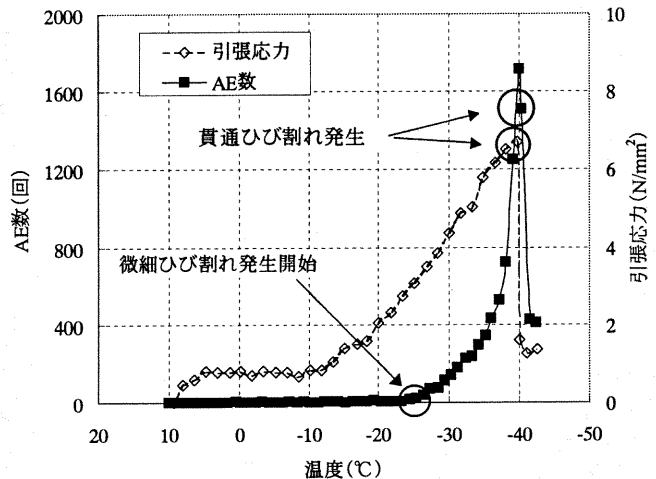


Fig.2 Measurement of AE Monitoring and Strain Gauge

Table 1 Definition of terms

| 名称           | 定義                                 |
|--------------|------------------------------------|
| 単位時間内 AE 発生数 | 測定間隔 (6 分間) に発生した AE 数             |
| AE 累積数       | 測定中に発生した AE の総数<br>(試験開始～貫通ひび割れ発生) |
| 微細ひび割れ発生開始温度 | AE 発生数が増加し始める温度                    |
| 貫通ひび割れ発生温度   | AE 発生数が激減する温度                      |

Table 2 Test Cases

| ケース | 検討項目       | 設定値                           |
|-----|------------|-------------------------------|
| 1   | フィルタ       | $10^5 \sim 10^6 \text{ Hz}$   |
| 2   |            | $0 \sim 10^6 \text{ Hz}$      |
| 3   |            | $10^5 \sim \infty \text{ Hz}$ |
| 4   | 増幅率 (しきい値) | 0dB                           |
| 5   |            | 10dB                          |
| 6   |            | 20dB                          |

Table 3 Set Value for AE monitoring

| 設定項目         | 設定                                     |
|--------------|----------------------------------------|
| 周波数          | $10^5 \text{ Hz} \sim 10^6 \text{ Hz}$ |
| 増幅率          | 10dB                                   |
| 微細ひび割れ発生開始温度 | 単位時間内 AE 発生数が 10 回を越えた温度               |

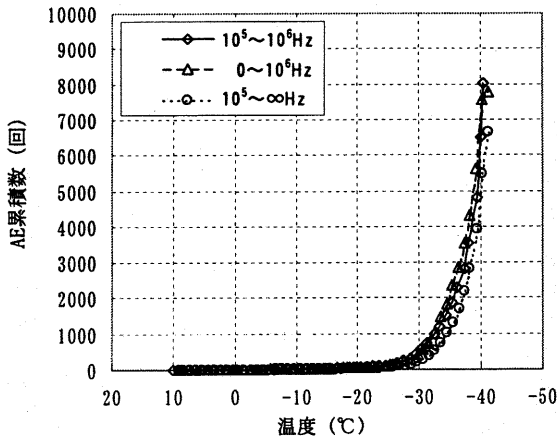


Fig.3 Effect of Filter Value

発生状況も異なると考えられる。そこで、アスファルトの種類、拘束度、温度履歴を要因に取り上げて試験を実施した。アスファルト混合物は Table 4 に示す配合を用い、StAs80/100、拘束度 20-40 (拘束体厚-供試体厚)、温度履歴-10℃/hour を基本とし、Table 5 に示す各水準で行った。アスファルトは針入度の異なるストレートアスファルト 4 種類と改質アスファルト 3 種類を使用し、一定温度持続、温度繰返しは Fig.5 に示す履歴で試験を行った。一定温度持続は-10℃/hour で温度を低下し、所定の温度で 10 時間持続した後、再び温度を低下させて貫通ひび割れが発生した時点で終了とした。温度繰返しは同様の手順で、温度持続の代わりに上限温度と下限温度の間に温度の上昇と下降を設定サイクルだけ繰り返した。

#### 1. 各要因のひび割れ温度への影響

貫通ひび割れ発生温度、微細ひび割れ発生開始温度及び転移点温度を Fig.6 に示す。各試験ケースで 2 供試体ずつ試験を実施したが、2 供試体による温度差は小さいため平均値を示す。ほぼ全試験ケースで高温側から転移点温度、微細ひび割れ発生開始温度、貫通ひび割れ発生温度の順であった。転移点温度と微細ひび割れ温度の温度差は温度履歴の影響を受けないが、アスファルトの種類によって異なり、ストレートアスファルトで-2.4℃、改質アスファルトで-5.3℃であった。微細ひび割れ発生開始温度と貫通ひび割れ発生温度

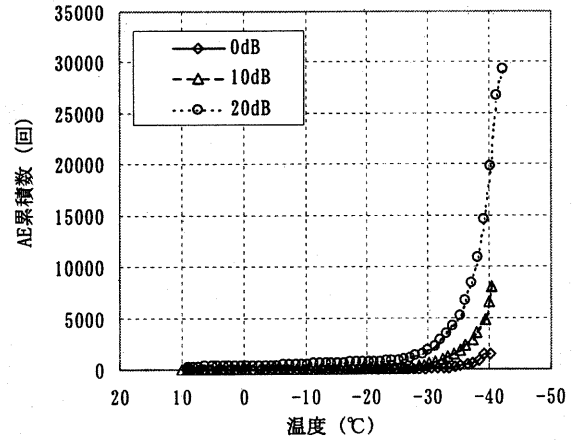


Fig.4 Effect of Amplification Ratio

の温度差はアスファルトの種類や温度履歴によって異なり-9.8℃~-23.7℃であった。

アスファルト混合物はアスファルトの種類及び配合が同じであれば、温度履歴や拘束度によらず転移点温度と微細ひび割れ発生開始温度がほぼ同じ温度であった。貫通ひび割れ発生温度は拘束度や温度履歴に影響された。したがって、微細ひび割れ発生開始温度も転移点温度と同様に材料、配合によって決定される材料特性であると考えられる。各温度は高温側から転移点温度、微細ひび割れ発生開始温度、貫通ひび割れ発生温度の順であるため、アスファルト混合物は温度低下に伴い転移点温度で弾性体に近い性状に変化し、さらに 2~-5℃低温になると微細ひび割れが発生し始めると思われる。各温度はアスファルトの種類の影響が大きく、改質アスファルトではストレートアスファルトに比べ各温度とも低くなり、各温度間の温度差も大きい。

#### 2. 各要因の AE 発生数への影響

単位時間内 AE 発生数、AE 累積数を Fig.7 に示す。各試験ケースの単位時間内 AE 発生数、AE 累積数は、改質アスファルトを使用し

Table 4 Mix Proportion of Asphalt Mixture

| 種類     | As 量 | 骨材配合率(%) |      |         |    |      |
|--------|------|----------|------|---------|----|------|
|        |      | 6号砕石     | 7号砕石 | スリ-コングス | 細砂 | 石粉   |
| 密粒度混合物 | 8.2  | 22       | 13   | 33.5    | 19 | 12.5 |

Table 5 Test Cases

| 要因       | 水準          |                                   |
|----------|-------------|-----------------------------------|
| アスファルト種類 | ストレートアスファルト | 60/80, 80/100<br>100/120, 150/200 |
|          | 改質アスファルト    | A, B, C                           |
| 拘束度      | 拘束体厚-供試体厚   | 20-20<br>20-40<br>10-40           |
|          | 一定低下速度      | -10℃/hour                         |
| 温度履歴     | 一定温度持続      | -20℃ 10hour<br>-35℃ 10hour        |
|          | 温度繰返し       | 0℃~-25℃ 11回                       |
|          |             | -10℃~-20℃ 11回                     |
|          |             | -10℃~-25℃ 11回                     |

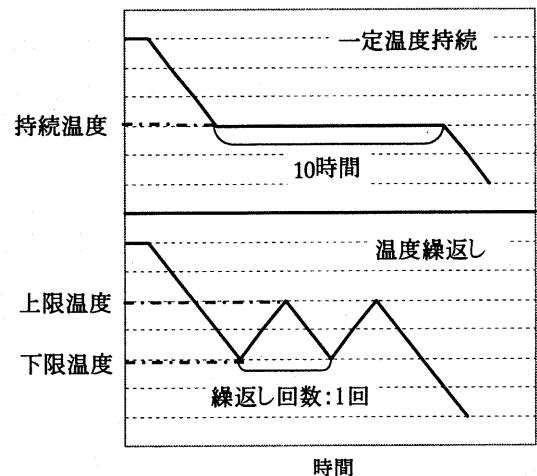


Fig.5 Temperature History

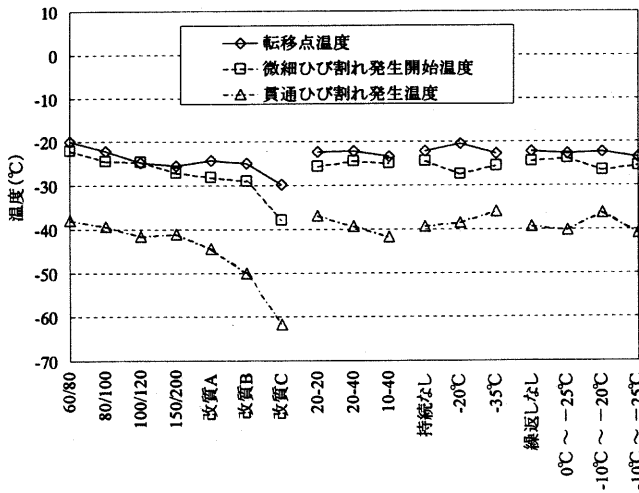


Fig.6 Temperature of Cracking and Transition

た場合に多い。改質アスファルトはストレートアスファルトに比べて、貫通ひび割れが発生するまでに多くの微細ひび割れが発生することが分かる。

温度履歴では、温度上昇によるひび割れが修復することが考えられる。温度繰返しの1サイクルごとの微細ひび割れ発生数を Fig.8 に示す。上限温度0°Cの繰返しは上限温度-10°Cの繰返しに比べ、2サイクル目以降もあまり AE 発生数が減少しない。上限温度0°Cでは微細ひび割れが修復し、再度微細ひび割れが発生しているために2サイクル目以降もあまり減少せず、上限温度-10°Cでは修復していないために2サイクル目以降は極端に減少すると考えられる。ただし、上限温度0°Cでも2サイクル目以降の AE 発生数が徐々に減少しており、ひび割れが完全には修復していないと思われる。

#### IV. 微細ひび割れの発生要因

Ⅲ章で拘束度や温度履歴などを変えて試験を行ったが、アスファルトの種類が同じであれば微細ひび割れ発生開始温度に差はなかった。しかし、貫通ひび割れ発生温度は条件により差があるため、微細ひび割れの発生過程は異なっていると思われる。微細ひび割れの発生過程が異なる原因としては、ひび割れを発生させる応力状態に違いがあるためと考えられる。

ひび割れの発生に関係する応力は、供試体内部の温度差や骨材と

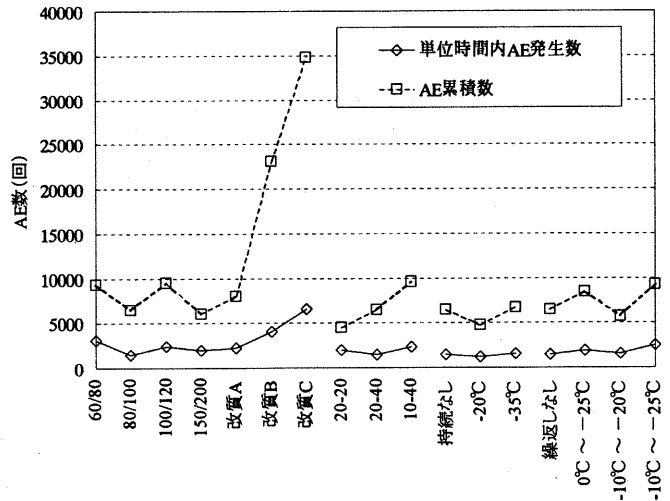


Fig.7 Number of AE

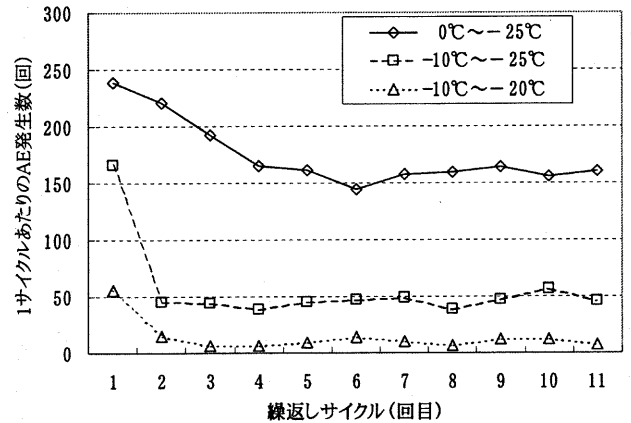


Fig.8 Number of AE Per 1 Cycle of Temperature Repetition

アスファルトの線膨張係数の違いにより発生する内部拘束応力と、外部の拘束体により拘束されることで発生する外部拘束応力に大別できる。そこで、アスファルト混合物の種類と拘束状態の組合せにより作用する応力の状態を変えた供試体で試験を行い、応力状態と微細ひび割れの発生の関係を検討した。試験ケースを Table 6 に示す。内部拘束応力による微細ひび割れの発生状況は骨材粒度の異なるアスファルト混合物とアスファルトモルタルによる試験と、供試体に1cm間隔で熱電対を入れて供試体内部の温度差を測定すること

Table 6 Test Cases

| 混合物の種類     | 拘束状態    |         |
|------------|---------|---------|
|            | 供試体(mm) | 拘束体(mm) |
| アスファルト混合物  | 40      | なし      |
|            | 40      | 10      |
|            | 40      | 20      |
|            | 20      | 20      |
| アスファルトモルタル | 40      | なし      |
|            |         | 20      |
| アスファルト単体   | 40      | なし      |
|            |         | 20      |

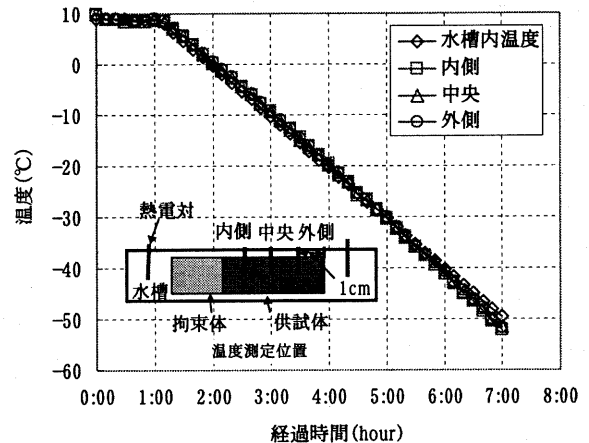


Fig.9 Temperature in Specimen

で確認した。外部拘束応力による微細ひび割れの発生状況は拘束体の有無、拘束体厚と供試体厚の比による拘束度を変えて検討した。全ての試験ケースでアスファルトは StAs80/100 を使用し、温度変化は  $-10^{\circ}\text{C}/\text{hour}$  で一定とした。

### 1. 内部拘束応力による微細ひび割れ

供試体の内部の温度測定結果を Fig.9 に示す。供試体と水槽内の温度差はほとんどなく  $-40^{\circ}\text{C}$  のときに約  $1^{\circ}\text{C}$ 、供試体内部の温度差は最大  $0.7^{\circ}\text{C}$  であった。供試体と水槽内及び供試体内部の温度差は小さいことから、供試体の温度差から発生している内部拘束応力極めて小さく、そのほとんどはアスファルトと骨材の線膨張係数の違いから発生している可能性が高い。

各混合物の拘束体がない供試体（以下自由収縮供試体）の単位時間内 AE 発生数を Fig.10 に示す。アスファルト混合物では微細ひび割れ発生開始温度が  $-25^{\circ}\text{C}$  付近、アスファルトモルタルが  $-32^{\circ}\text{C}$  付近であり、アスファルト単体では微細ひび割れが発生しなかった。自由収縮供試体には外部拘束が作用しないため、微細ひび割れは内部拘束応力により発生するものであり、微細ひび割れ発生開始温度は内部拘束応力による微細ひび割れ発生開始温度であると言える。アスファルト単体では内部拘束応力による微細ひび割れは発生せず、アスファルト混合物とアスファルトモルタルでは内部拘束応力による微細ひび割れが発生する。混合物の種類によっても微細ひび割れ発生開始温度には差があり、粗骨材の含まれるアスファルト混合物では粗骨材とアスファルトの線膨張係数の違いで  $-25^{\circ}\text{C}$  から、細骨材のみ含まれるアスファルトモルタルでは細骨材とアスファルトの線膨張係数の違いで  $-32^{\circ}\text{C}$  から内部拘束応力が作用し微細ひび割れが発生していると考えられる。

### 2. 外部拘束応力による微細ひび割れ

次に外部拘束応力による微細ひび割れの発生を検討する。外部拘束応力による微細ひび割れは自由収縮供試体と拘束体のある供試体（以下拘束供試体）に差が現れるときから発生し始める。自由収縮供試体と拘束供試体を比較すると両曲線は Fig.11 に示すように  $-35^{\circ}\text{C}$  くらいまでは同様に AE 発生数が増加し、 $-35^{\circ}\text{C}$  より低温になると拘束供試体で AE 発生数が急増する。そのため、アスファルト混合物は  $-35^{\circ}\text{C}$  付近から外部拘束による微細ひび割れが発生し始めると考えられる。

同様にアスファルトモルタル、アスファルト単体も比較すると、アスファルト単体の拘束供試体では貫通ひび割れが発生するときのみ AE 発生数が増加するが、AE 発生数はごくわずかでその後すぐに貫通ひび割れが発生しており、アスファルト単体の貫通ひび割れは少ない微細ひび割れが短い時間で進展している。アスファルトモルタルの拘束供試体で AE 発生数が急増する温度はアスファルト混合物と同じ  $-35^{\circ}\text{C}$  付近からであった。アスファルトモルタルでは内部拘束応力が作用して微細ひび割れが発生した後  $2\sim 3^{\circ}\text{C}$  温度が低下すると、外部拘束応力が作用し始める。

拘束度の異なるときの温度-AE 累積数曲線を Fig.12 に示す。III 章で示したように拘束度が異なる場合でも、微細ひび割れ発生開始温度はほぼ等しい。しかし、AE が急増する温度、すなわち外部拘束応力が作用する温度が異なっている。拘束度は外部拘束応力の発生開始温度に関与し、拘束度が大きいほど高温側から外部拘束応力が作用し始める。

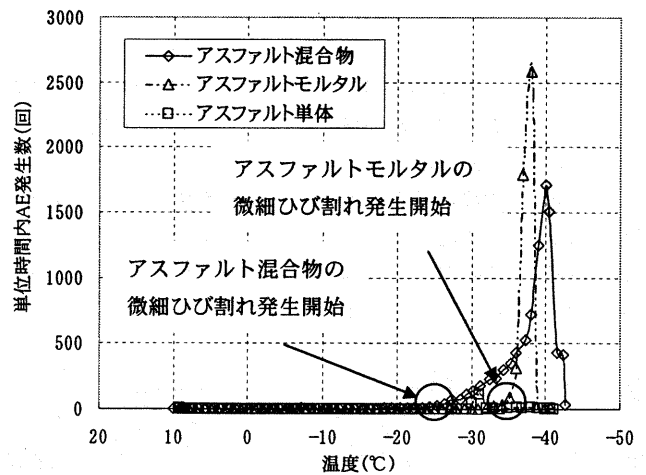


Fig.10 AE Events With No Restraining Body

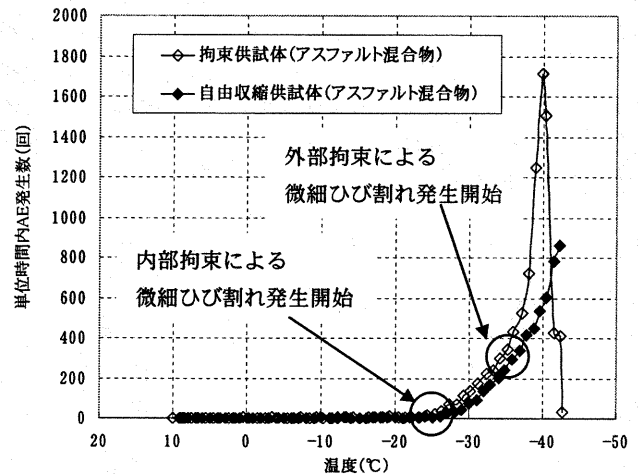


Fig.11 AE Events with a Restraining Body

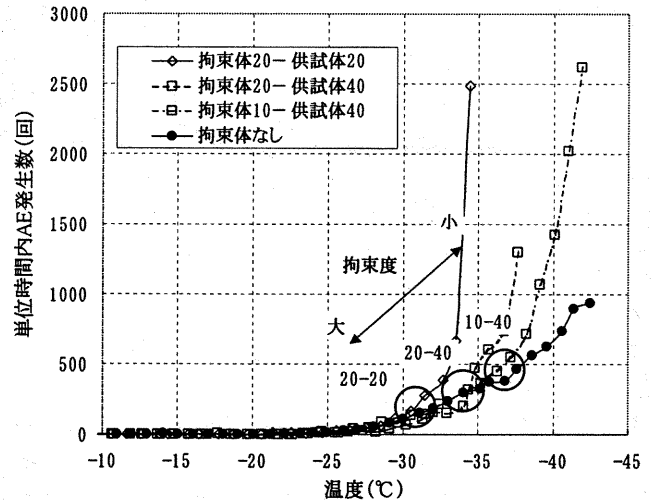


Fig.12 AE Events With Difference Restraining

### 3. 貫通ひび割れの発生

内部拘束応力のみを作用させた場合では、一定温度低下速度で  $-55^{\circ}\text{C}$  付近まで温度低下させても貫通ひび割れは発生しなかったため、貫通ひび割れは外部拘束応力による微細ひび割れにより発生すると考えられる。外部拘束応力は拘束度や温度履歴に影響されるため、貫通ひび割れ発生温度は拘束度、温度履歴により異なる。

拘束度の貫通ひび割れに対する影響は、拘束度が大きいほど外部拘束応力が高温時から作用するために、貫通ひび割れも高温で生じる。もし、完全に拘束されている状態であれば内部拘束応力が作用すると同時に、外部拘束応力も作用し始めるため、 $-28^{\circ}\text{C}$ 付近で発生するものと思われる。

一方、温度履歴の貫通ひび割れに対する影響は3パターンあると考えられる。

- 内部拘束応力が作用する温度より高温側の温度変化
- 内部拘束応力が作用する温度と外部拘束応力が作用する温度の間の温度変化
- 外部拘束応力が作用する温度より低温側の温度変化

パターンaについては内部拘束応力による微細ひび割れも発生しない温度帯であるため影響はなく、パターンcについては外部拘束応力も作用しているため、すぐに貫通ひび割れが発生する (Fig.13)。パターンbについては内部拘束応力による微細ひび割れが発生しているが、外部拘束による微細ひび割れは発生していないため、すぐに貫通ひび割れが発生することはない。ただし、長期間の温度持続や繰返しがあった場合には、貫通ひび割れに至る温度帯であると考えられ、内部拘束応力のみによる貫通ひび割れの発生は今後、検討する必要がある。

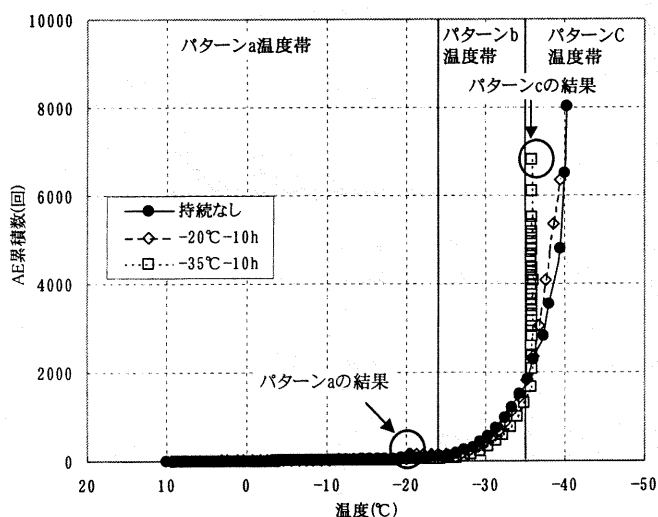


Fig.13 Result of Keeping at Constant Temperature

#### 4. アスファルト混合物の低温ひび割れ

これまでの検討の結果、アスファルト混合物に発生する低温ひび割れは次の過程で発生すると考えられる。

常温では粘弾性体であるアスファルト混合物は温度低下により転移点温度で弾性体に近い材料へと変化する。さらに温度が $2\sim 5^{\circ}\text{C}$ 低下すると内部拘束応力により微細ひび割れが発生し始める。内部拘束応力は粗骨材とアスファルトの線膨張係数の違いが原因と考えられる。その後、温度低下を続けると外部拘束応力からも微細ひび割れを発生して貫通ひび割れに至る。外部拘束応力が作用し始める温度は拘束度に依存し、拘束度が大きいほど高温側で作用し始めるため、貫通ひび割れも高温で生じる。内部拘束応力による微細ひび割れは外部拘束応力による微細ひび割れに比べ小さいため、それだけで短期間のうちに貫通ひび割れに至ることはないと思われる。

#### V. まとめ

アスファルト混合物の低温ひび割れ発生メカニズムを明らかにするため、AE計測による低温ひび割れ抵抗性試験を実施した結果、以下のことが分かった。また、アスファルト材料の低温ひび割れの発生温度をまとめると Table 7 のとおりとなる。

- AE計測によりアスファルト混合物に発生する微細ひび割れを測定することが可能である。
- 拘束度、温度履歴は微細ひび割れ発生開始温度に影響しない。改質アスファルトを用いたときに、他のアスファルトに比べて微細ひび割れ発生開始温度は低下する。
- アスファルト混合物は温度低下により転移点温度で材料の性質が変わり、さらに $2^{\circ}\text{C}\sim 5^{\circ}\text{C}$ 低下したときから微細ひび割れが発生する。微細ひび割れが発生してから貫通ひび割れが発生するまでの温度差は、拘束度やアスファルトの種類に影響される。
- 改質アスファルトはストレートアスファルトに比べ、微細ひび割れ発生開始から貫通ひび割れが発生するまでの温度差が大きく、貫通ひび割れが発生するまでに多くの微細ひび割れが発生する。
- 微細ひび割れを発生させる応力には内部拘束応力と外部拘束応力があり、微細ひび割れが発生する温度は応力の種類により異なる。アスファルト混合物では内部拘束応力による微細ひび割れ発生開始温度が $-25^{\circ}\text{C}$ 、外部拘束応力による微細ひび割れ発生開始温度は $-25^{\circ}\text{C}$ よりも低温であり、拘束度が大きいほど高温で外部拘束応力が作用し始める。また、試験を行った範囲内では、貫通ひび割れは外部拘束応力による微細ひび割れが発生した後生じた。

Table 7 Difference of Cracking Temperature

| 混合物の種類           | 転移点温度                 | 微細ひび割れ発生開始温度          |                         | 貫通ひび割れ発生温度              |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
|                  |                       | 内部拘束                  | 外部拘束                    |                         |
| アスファルト混合物 (StAs) | $-22^{\circ}\text{C}$ | $-24^{\circ}\text{C}$ | 内部拘束より低温<br>(拘束度により異なる) | 外部拘束より低温<br>(拘束度により異なる) |
| アスファルト混合物 (改質)   | $-30^{\circ}\text{C}$ | $-38^{\circ}\text{C}$ |                         |                         |
| アスファルトモルタル       | $-21^{\circ}\text{C}$ | $-32^{\circ}\text{C}$ |                         |                         |

#### 参考文献

- 伊藤金通, 川島文治, 塚田智之; 八潮ダム設計と施工, 電力土木, (1995.1), pp23-33.
- 重松和男, 加形 護; フィルダムアスファルト遮水工法について, ダム工学, (1992.12), pp.45-59.
- 菅原照雄; アスファルト舗装の温度応力亀裂発生予測法の開発に関する研究, 昭和61年度科学研究費補助金研究成果報告書, 1987.
- 渡部貴裕, 万木正弘, 大野俊夫, 藤澤 理; アスファルト材料の温度応力評価手法, 鹿島技術研究所年報第48号, (2000), pp.45-50.
- 菅原照雄; アスファルト混合物の物性, 1984.