

アスファルト材料の温度応力評価手法

Evaluation of Thermal Stresses of Asphalt Mixtures

渡 部 貴 裕 万 木 正 弘
大 野 俊 夫 藤 澤 理

要 約

フィルダム等の表面遮水壁として利用されているアスファルト混合物に、極低温下において温度応力に起因する低温ひび割れが発生した場合、その遮水機能を著しく損なう恐れがある。本研究では、実構造物においてアスファルト混合物に生じる温度応力の評価手法の確立を目的として、リング拘束試験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を実施した。

研究の結果、低温ひび割れ抵抗性試験により、各種材料・配合のひび割れ発生温度を評価し、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ができること、温度応力解析により低温ひび割れ抵抗性試験のアスファルト及び拘束リングのひずみ履歴を的確に再現できること、実構造物での温度応力による低温ひび割れの評価手法として本解析システムを提案できることが明らかになった。

目 次

- I. はじめに
- II. 温度応力評価手法
- III. 低温ひび割れ抵抗性試験
- IV. 温度応力解析
- V. まとめ

I. はじめに

近年建設されるダムは、地形や地質の条件からコンクリートダムには適さない場合があり、地質等の条件が緩やかであるフィルダムが増加している。表面遮水型のフィルダムの場合、ダム表面の遮水壁には十分な遮水性と堤体に生じる変形への追従性が求められるため、それらの性能を有することが確認されているアスファルト材料による遮水壁の構築が有効である¹⁾²⁾。しかし、冬期間に外気温が-30℃近くになる寒冷地や標高の高い地点で施工されるアスファルト遮水壁では、温度応力が限界値を超えてひび割れが生じることがある(Photo 1)。そのため、温度応力やそれに伴うひび割れ発生の評価が必要不可欠となる。

本研究では、アスファルト材料に発生する温度応力とそれに伴うひび割れの発生を評価する手法として、リング拘束試験体を用いた低温ひび割れ抵抗性試験と、間接引張試験から材料定数を決定する粘弾性モデル有限要素温度応力解析を実施し、これらの手法の適用性を検討したものである。

II. 温度応力評価手法

1. アスファルト材料の温度応力

アスファルトは温度により性質が大きく変化する材料であり、常温時に粘弾性体、高温時には液体、極低温時には弾性体に極めて近



Photo 1 Thermal Crack of Asphalt Layer

い挙動を示す。したがって、温度低下に伴う収縮が起こった時、高温から常温では粘弾性体であるため、応力緩和の影響からひび割れを生じような温度応力は発生しない。しかし、温度が極低温になると応力緩和が起こらなくなり、温度応力は直線的に増加する。その応力が各材料・配合・温度で決まるひび割れ発生に対する引張限界強度を超えた場合にひび割れが発生する。

2. 検討フロー

アスファルト材料の温度応力評価は、今までにも試験や解析による検討が行われているが³⁾⁴⁾⁵⁾、本研究では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を組み合わせる実構造物に発生する温度応力を定量的に評価する方法を検討した。評価フローをFig.1に示す。本報文では評価フローのうち、開発したリング拘束試験体を用いた低温ひび割れ抵抗性試験の適用性と材料・配合や温度履歴を変えた場合のひび割れ温度やひび割れ発生時の物性値の相対評価と、粘弾性モデルによる温度応力解析の妥当性の確認を報告する。

キーワード：アスファルト材料、温度応力、低温、ひび割れ、温度応力解析、粘弾性モデル、クリープコンプライアンス

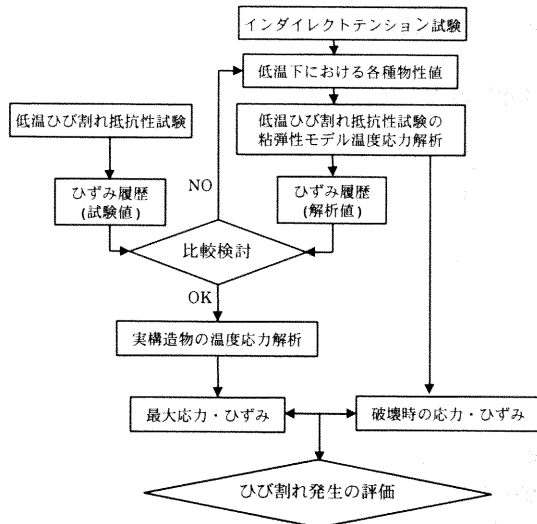


Fig.1 Evaluation Flow

III. 低温ひび割れ抵抗性試験

1. 試験概要

従来、アスファルト混合物の温度応力やそれに伴うひび割れを評価する試験としては、直方体の供試体を両端固定し、周囲の温度を低下させる方法がとられていた³⁾。しかし、この試験方法は端部への応力集中が起こりやすく試験結果がばらつく等の問題点がある (Table 1)。そこで、この問題点を解消するとともに、より精度よく評価できるリング拘束試験体を用いた低温ひび割れ抵抗性試験を開発した。なお、この試験方法はアスファルト混合物のみならず、アスファルト単体及びアスファルトマスキック等の遮水壁各層の混合物への適用も可能である。

低温ひび割れ抵抗性試験は、アスファルト材料の各種要因がアスファルトの低温ひび割れ抵抗性に及ぼす影響を把握するとともに、低温ひび割れに対する限界応力・限界ひずみの把握を目的としている。

Table 1 Outline of Two Examinations

	従来の試験方法	今回の試験方法
ひび割れ発生方法	直接引張による方法	線膨張係数の違いを利用した方法
供試体形状	直方体	リング状
測定項目	温度・応力・ひずみの測定が可能	温度・ひずみの測定が可能
破壊形態	応力集中により破壊することが多い	応力が等分布になり限界応力で破壊

Table 3 Test Factor

シリーズ	材料・配合	要因	項目	水準
I	基本から各水準のみを変更	材料・配合	アスファルト種類	StAs.60/80, 80/100, 100/120, 150/200 改質 A(針入度:62, 軟化点:57.5) B(針入度:99, 軟化点:87.4) C(針入度:221, 軟化点:64.5)
			アスファルト量	7.2%, 8.2%, 9.2%
			骨材粒度	上方粒度, 中央粒度, 下方粒度
			空隙率	1%, 2%, 2.5%, 3%
			植物繊維の添加量	0%, 0.3%
II	基本	拘束度 温度低下速度	拘束度(拘束体厚と供試体厚の組み合わせ)	拘束体厚: 10, 20 (mm) 供試体厚: 20, 40 (mm)
			温度低下速度	5, 10, 20 (°C/hour)
III		温度履歴	一定温度持続	温度: -15, -20, -25, -30, -35 (°C) 時間: 5, 10 (hour)
			温度繰返し	-20~-35°C (6.5 回) -20~-35°C (11.5 回)

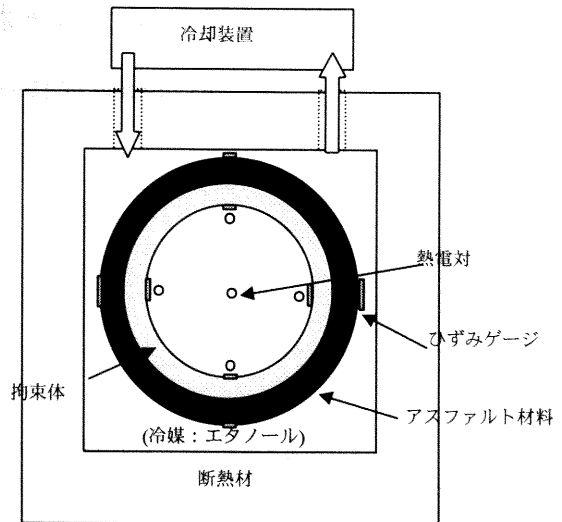


Fig.2 Ring-constraint Test

る。試験方法の概要を Fig.2 に示す。線膨張係数の小さいリング状の拘束体 (インバール製: 線膨張係数 $0.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) の外周にアスファルト材料を打設して供試体を作製し、水槽内で温度を低下させ、拘束体とアスファルト材料の線膨張係数の違いからひび割れを発生させる。試験の測定項目は水槽内温度、アスファルト外側と拘束体内側のひずみである。温度は水槽内を 5 本の熱電対で測定し、ひずみはひずみゲージを拘束体内側、アスファルト外側それぞれ 4 枚 (円周方向, 軸方向各 2 枚)、計 8 枚貼付して測定した。

2. 試験要因

試験に供したアスファルト混合物は StAs80/100, 上方粒度, 空隙率 2%, 植物繊維 0% で Table 2 に示す配合で、拘束体厚 20mm, 供試体厚 40mm を基本とした。基準のアスファルト量は 8.2% で、通常の道路舗装に比べアスファルト量が多い水工用アスファルト混合物である。アスファルト材料の低温ひび割れの発生に影響を与える項目には、材料や配合などの内的要因と、拘束度や温度履歴などの外的要因があり、本研究ではこれらの要因をシリーズ I ~ III に分けて試験を行った。各シリーズの試験要因及び水準を Table 3 に示す。

Table 2 Mix Proportion of Asphalt Mixture

種類	As 量	骨材配合率(%)				
		6号砕石	7号砕石	スクリーンガス	細砂	石粉
密粒度混合物	8.2	22	13	33.5	19	12.5

3. 温度変化

アスファルト混合物に与える温度変化はシリーズⅠとⅡは温度低下速度が -10°C/hr の一定値を基本とした。シリーズⅢの温度変化を Fig.3 に示す。一定温度持続は温度を低下途中で、ある一定値に保つ試験であり、 $+10^{\circ}\text{C}$ で1時間保持した後、一定速度 (10°C/hr) で温度を低下させて、所定の温度で一定時間 (5 又は 10hr) 持続し、再び温度を低下させ (10°C/hr) ひび割れが発生した時点で試験を終了した。ただし、温度持続中にひび割れの発生を確認した場合は、その時点で試験を終了した。また、温度繰返し試験は同様の手順で、温度を持続する代わりに上限温度と下限温度間の上昇、下降を設定回数だけ繰り返した。

4. 試験結果

(1) ひび割れ発生温度

シリーズⅠ～Ⅲのひび割れ発生温度を Fig.4 に示す。ひび割れは全試験体で半径方向に一箇所のみ発生した。破壊面では試験体の粗骨材が破壊していた。Fig.4 (a) に示すシリーズⅠ試験のひび割れ発生温度をみると、アスファルト種類を変えた場合にひび割れ発生温度は $-36\sim-63^{\circ}\text{C}$ の範囲にあり、最大 27°C 程度の差があった。それに対して他の内的要因は $-36\sim-40^{\circ}\text{C}$ の範囲で最大 4°C 程度の差であり、アスファルトの種類を変えた場合に比較すると影響は小さい結果であった。

Fig.4 (b) シリーズⅡ試験より、拘束度が大きくなるとひび割れ発生温度が 3°C 程度、温度低下速度が速くなった時にもひび割れ発生温度は 3°C 程度高くなっていることが分かる。アスファルト混合物は拘束度によりひび割れ発生温度が異なり、また温度低下速度が速いときには内部に生じる温度差で内部応力も生じ、高い温度でひび割れが発生すると考えられる。

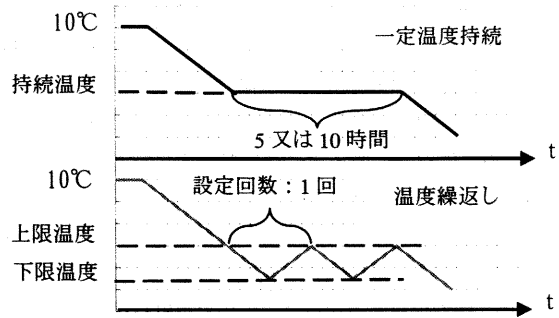
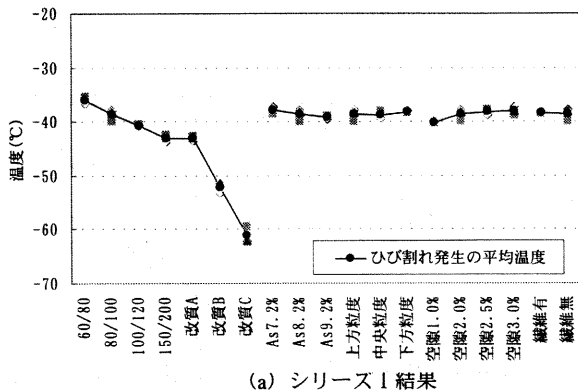


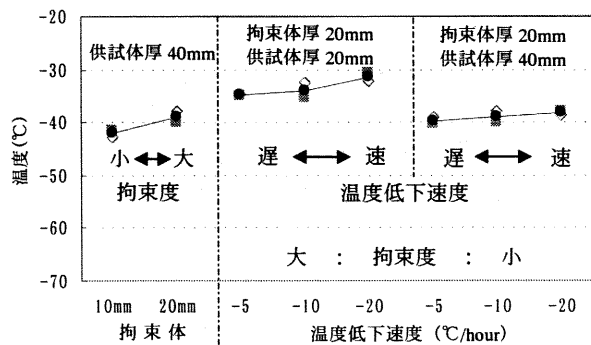
Fig.3 Temperature History

Fig.4 (c) からシリーズⅢ試験では温度が低く持続時間が長い時にひび割れ発生温度が $4\sim 5^{\circ}\text{C}$ 高くなり、Fig.4 (d) では同じ温度間の繰返しでも回数が多くなるとひび割れ発生温度が $3\sim 4^{\circ}\text{C}$ 高くなった。ある温度以下の極低温にさらされるとアスファルト混合物に温度疲労が起こることが原因と思われ、ある温度以下となる時間が長く、回数が多いほど温度疲労の影響を大きく受けるため、高い温度でひび割れが発生すると考えられた。

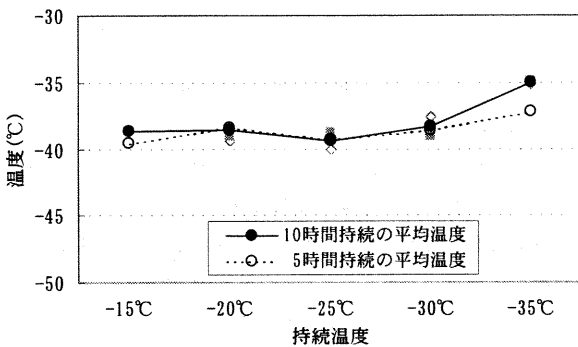
これらの試験結果より低温ひび割れ抵抗性を向上させるには、アスファルト種類を変えることが極めて効果的であることが分かった。他の内的及び外的要因の影響はアスファルト種類の影響に比べて小さいが、同一配合であっても拘束度、温度低下速度、温度履歴によりひび割れ発生温度が高くなることが分かった。このことはひび割れ発生温度が実構造物の拘束条件に影響されること、急激な温度低下や数年に及ぶ温度の繰返しを受けた場合には、温度疲労が原因で通常よりも高い温度でひび割れが発生する可能性があることを示している。



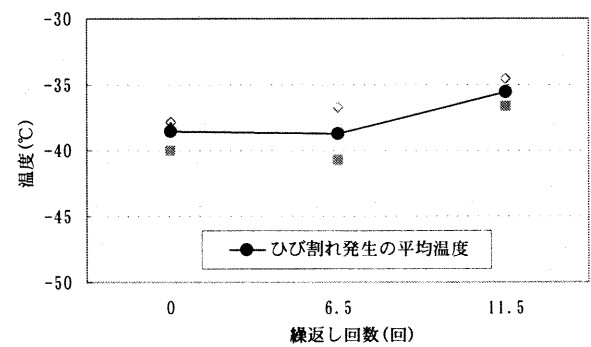
(a) シリーズⅠ結果



(b) シリーズⅡ結果



(c) シリーズⅢ 一定温度持続



(d) シリーズⅢ 温度繰返し

Fig.4 Temperatures of Thermal Cracking

(2) ひび割れ発生時のひずみ

ひび割れ抵抗性試験におけるアスファルト外側及び拘束体内側のひび割れ発生時のひずみの測定値と、アスファルト混合物を物性値一定の弾性体と仮定した計算⁶⁾で求めた値(計算値)を比較した。アスファルト内側のひずみは測定ができないため計算値のみを示す。

Fig.5 (a) に拘束体内側の測定値と計算値の例を示す。アスファルト種類、拘束度、温度低下速度を変えたケースで測定値と計算値に大差がないのに対し、繰返し試験では測定値が計算値より 40×10^{-6} 程度小さくなった。応力緩和や温度疲労を受けアスファルト混合物が拘束体を締め付ける力が減少したためと思われる。

アスファルト混合物の測定値と解析値の例を Fig.5 (b) に示す。アスファルト外側では全ケースで測定値が計算値より大きくなった。これは計算値がアスファルト混合物のクリープやアスファルト混合物の物性値が温度により異なることを考慮していないことが原因と考えられる。本試験の場合、アスファルト内側でひび割れが発生すると考えられ、アスファルト内側のひずみが限界ひずみとなるが、試験では厳密な値が求められないが、限界ひずみはアスファルト外側と同様にクリープや計算時の物性値の違い等の影響からアスファルト内側の計算値より大きいと推定される。

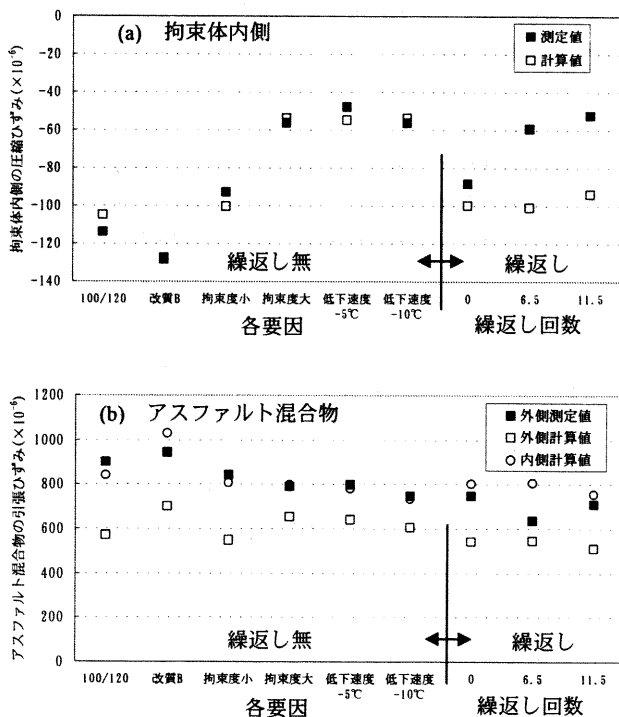


Fig.5 Strains at Thermal Cracking

(3) ひび割れ発生時の応力

低温ひび割れ抵抗性試験ではひび割れ発生時の応力を直接測定できない。また、上記の計算では温度疲労の影響を考慮できないため、弾性ひずみ分と考えられる拘束体内側の戻りひずみ(ひび割れが発生した瞬間のひずみ変化量)から求めた力とアスファルト混合物の力の釣り合いを用いて、式(1)より応力を算出した。

$$\sigma_a = \frac{e_s \times E_s \times A_s}{A_a} \quad (1)$$

ここで、 σ_a :アスファルト混合物の応力(N/mm²)

e_s :拘束体内側の戻りひずみ E_s :拘束体の弾性係数(N/mm²)

A_s :拘束体断面積(mm²) A_a :アスファルト混合物断面積(mm²)

応力の算出結果を Fig.6 に示す。ひび割れ発生時の応力は約 6N/mm²、繰返しの試験ケースでは全断面有効として計算しているため、3N/mm²程度であり約 50%減少した。繰返し試験の応力の低下は温度疲労の影響と思われる。破壊強度試験によるアスファルト混合物の圧裂強度は 6~7N/mm²であり⁴⁾、本試験のひび割れ発生時の応力と大差のない値であった。また、繰返し試験による応力の減少率も過去の研究⁴⁾と同程度の値であった。

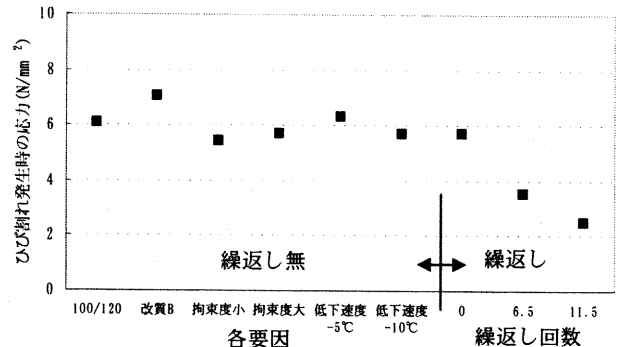


Fig.6 Stresses at Thermal Cracking

(4) 変形係数

アスファルト混合物の応力-ひずみ(アスファルト外側)の関係は Fig.7 に示すように、応力緩和する領域(曲線部)と弾性挙動を示す領域(直線部)に分けられ、その変化点は転移点と呼ばれている。変形係数(傾き)は温度低下に伴い増加し、転移点より低温では一定値となる。本試験では変形係数が 15000~20000N/mm²程度で一定値となっていることから、アスファルト混合物は変形係数が 15000~20000N/mm²となると、弾性挙動を示し応力緩和を生じないと考えられる。ただし、計算に用いた応力はアスファルト混合物の平均応力であり、アスファルト外側の応力は平均応力より小さいため、変形係数は 15000N/mm²より小さい可能性があると考えられる。

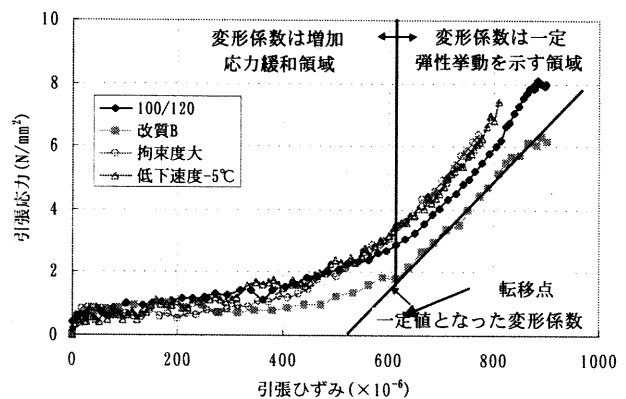


Fig.7 Stress-Strain

(5) 転移点温度

アスファルト混合物の転移点温度は弾性挙動を示す領域に変化する温度、すなわち応力緩和の限界温度である。Fig.8 に示すように拘束度や温度履歴等を変化させたケースにおいては同様な温度-応力曲線となる傾向であり、各ケースの転移点温度は-20℃付近であった。しかし、アスファルトの種類を変えたとき、特に改質アスファルトを用いた場合だけ曲線が低温側に移動しており、転移点温度が低くなっていた。この結果より、転移点温度は拘束度や温度履歴

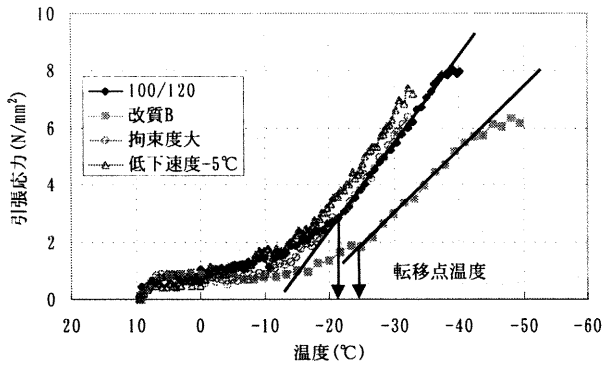


Fig.8 Transition Point

は無関係で、主にアスファルトの種類から決まる材料特性であることが分かる。

IV. 温度応力解析

実構造物のひび割れ発生評価は、実構造物の拘束条件、形状等が試験とは異なるため、簡易的な推定方法として解析により求める必要がある。今までもアスファルト混合物の温度応力を解析により求めた例はあるが³⁰⁾、本研究ではFig.9のようなMaxwell要素とVoigt要素を組み合わせた形の粘弾性モデルを用い、モデルの材料定数を間接引張試験（インダイレクトテンション試験）で求める手法で解析を行った。

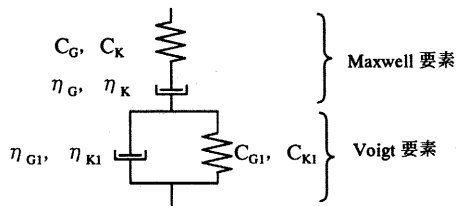


Fig.9 Viscoelastic Model

1. インダイレクトテンション試験

SHRP 規格にあるインダイレクトテンション試験はアスファルト混合物の強度、ひずみを間接引張により求める試験である。試験方法はFig.10に示すとおりで、恒温槽内で温度を一定に保ちながら載荷し、荷重と供試体中央部の鉛直及び水平方向のひずみを測定する。

インダイレクトテンション破壊試験は実構造物に比べ載荷速度が速い試験である。しかし、実構造物では載荷速度が遅く、クリープひずみも発生するため、この試験において実構造物の載荷条件を模擬しているとは言えない。そこで、今回は破壊強度や破壊ひずみを得ることではなく、応力、ひずみからクリープコンプライアンスを把握する⁷⁾ことを目的に、インダイレクトテンションクリープ試験を実施した。試験要因をTable 4に示す。

2. 材料定数の決定

クリープコンプライアンスをアスファルト混合物の変形特性とし

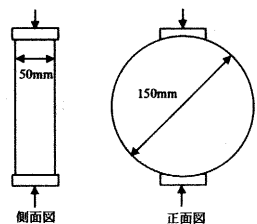


Fig.10 Indirect Tension Test

Table 4 Test Factors

要因	水準
試験温度	+10, 0, -10, -20, -30(°C)
載荷荷重	破壊荷重の10,30,50(%)
載荷速度	0.8, 12.5, 50(mm/min)
載荷時間	500,1000,2000(sec)

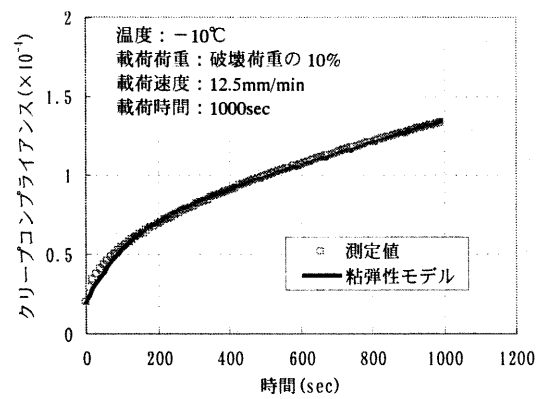


Fig.11 Creep Compliance

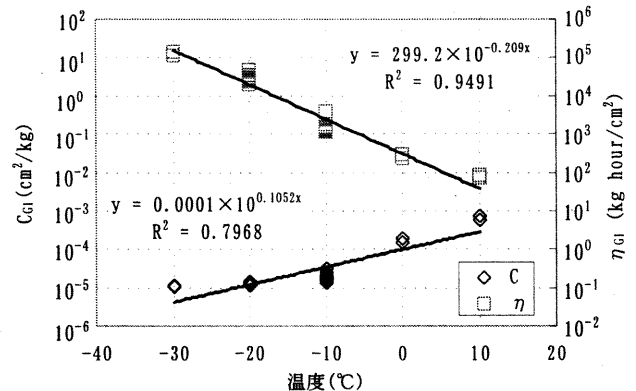


Fig.12 Relation between Temperature and Creep Compliance

て解析に取り入れるため、材料定数を変えた粘弾性モデルを試験結果にフィッティングさせ、最も一致した値をその試験結果に対する粘弾性モデルの材料定数 ($C_G, \eta_G, \dots, C_K, \eta_K$) として決定した。フィッティングは粘弾性モデルでのクリープコンプライアンス曲線と測定値の誤差の2乗和を最小にするように行った。StAs80/100の基本配合で行った試験のフィッティング結果の一例をFig.11に示す。

得られた材料定数を試験温度との関係で整理したグラフの一例をFig.12に示す。図中の同一温度上には載荷荷重や載荷速度等を変えて行った全試験データをプロットしてある。アスファルト材料のクリープコンプライアンスは応力依存性が大きいと考えられていたが、同図上でばらつきがほとんどないことから、クリープコンプライアンスの応力依存性は温度依存性に比べて小さいことが分かった。他の材料定数においても温度依存性が卓越していたため、Table 5に示すように各材料定数を温度の関数として表すことにした。

Table 5 Relation between Temperature and Creep Compliance

	体積変形 (G)	せん断変形 (K)
$C(\text{cm}^2/\text{kg})$	$0.0001 \times 10^{0.1052x}$	$0.00006 \times 10^{0.0748x}$
$\eta (\text{kg hour}/\text{cm}^2)$	$299.2 \times 10^{-0.209x}$	$1292.2 \times 10^{-0.1847x}$
$C_I(\text{cm}^2/\text{kg})$	$0.00046 \times 10^{0.1953x}$	$0.0002 \times 10^{0.1897x}$
$\eta_I(\text{kg hour}/\text{cm}^2)$	$72.6 \times 10^{-0.1767x}$	$133.5 \times 10^{-0.1946x}$

3. 低温ひび割れ抵抗性試験の検証

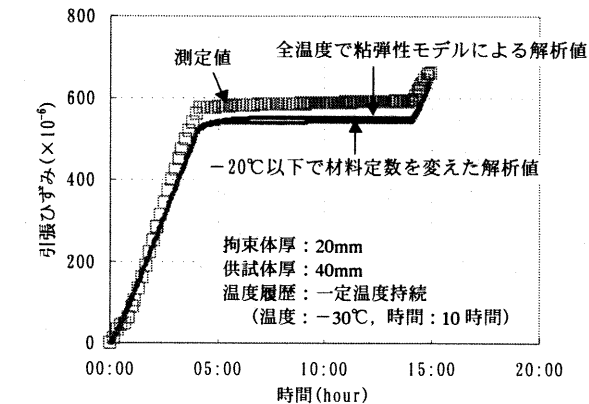
インダイレクトテンション試験で決定した材料定数の妥当性を確認するため、低温ひび割れ抵抗性試験をモデルケースとして解析を行い、測定したひずみと解析で得られたひずみを比較した。ただし、解析の材料定数には全温度で粘弾性モデルを用いたケースと、転移点温度以下ではアスファルト混合物の性質が変わるた

Table 6 Thermal and Mechanical Properties

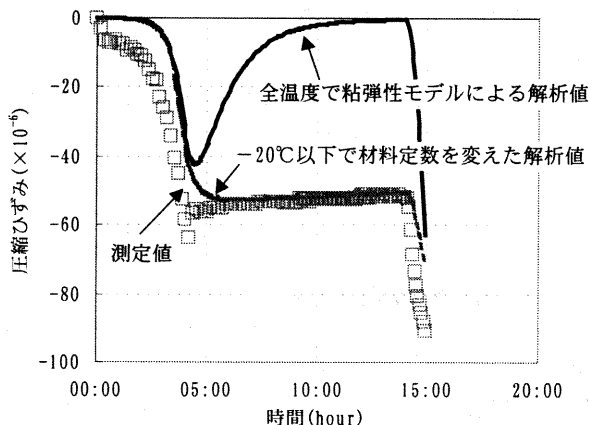
	拘束体	アスファルト混合物
熱伝導率(W/m/℃)	81.4	2.3
密度(kg/m ³)	8000	2350
比熱(kJ/kg/℃)	1.68	1.68
線膨張係数(μ/℃)	0.5	25
弾性係数(N/mm ²)	141120	—
ポアソン比	0.25	—

め、転移点温度を -20°C と仮定して転移点温度以下で弾性体に近い一定値に変えたケースの2ケースを検討対象とした。 -20°C 以下の材料定数は、Maxwell要素のみのモデルとし、破壊試験の変形係数から決定した。その値は体積変形、せん断変形共に $C_0=7.0\times 10^{-6}$ 、 $\eta_0=1.0\times 10^7$ で一定である。解析で用いた拘束体、アスファルト混合物の熱定数他はTable 6の通りとした。解析結果の一例をFig.13に示す。

(a) 図よりアスファルト外側のひずみは測定値と両解析値が比較的一致している。しかし、(b) 図の拘束体内側のひずみは -20°C 以下で材料定数を変えた場合には比較的一致しているが、全温度で粘弾性モデルとしたケースは一定温度持続中にひずみが0となり測定値と一致しなかった。この原因は全温度で粘弾性モデルとすると、転移点温度でのアスファルト混合物の性質変化を再現できず、転移点温度以下でも応力緩和をしたためと考えられる。本解析手法は、転移点温度以下では今回用いた粘弾性モデルでアスファルト混合物を表すことはできないと考えられるが、アスファルト混合物の材料定数を弾性体に近い一定値に変えることで、アスファルト外側、拘束体内側のひずみの解析値は測定値を再現できる。



(a) アスファルト外側のひずみ



(b) 拘束体内側のひずみ

Fig.13 Strain History of Test and Analysis

V. まとめ

低温下におけるアスファルト材料の温度応力とそれに伴い発生するひび割れの評価手法の確立を目的として、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を行った結果、以下のことが明らかになった。また、本評価手法を用いることで、定量的に評価することが難しかったアスファルト混合物の温度応力やそれに伴うひび割れの発生を評価可能であることも確認できた。

1. 低温ひび割れ抵抗性試験

- リング拘束法によりアスファルト混合物にひび割れを発生させ、ひび割れ発生温度等を測定することが可能であり、試験条件毎のひび割れ発生温度を相対的に比較評価できる。
- ひび割れ発生温度はアスファルトの種類による影響が極めて大きい。しかし、同一配合であっても拘束度、温度低下速度、温度履歴の違いでひび割れ発生温度は高くなることがある。
- ひび割れ発生時の応力は 6N/mm^2 程度である。ただし、温度疲労を受けた場合にひび割れ発生応力は全断面有効とした場合、 3N/mm^2 程度まで減少する。
- 転移点温度は拘束度・温度履歴等の影響を受けず材料により決まり、転移点温度より低温になると応力緩和をしなくなる。その時の変形係数は材料・拘束度・温度履歴等によらず、 $15000\sim 20000\text{N/mm}^2$ より小さい値で一定となると考えられる。

2. 温度応力解析

- アスファルト混合物は転移点温度以下で性質が変化し応力緩和しなくなるため、転移点温度以下で弾性体に近い材料定数に変えることで、アスファルト混合物に発生する温度応力を的確に再現できる。
- インダイレクトテンション試験で粘弾性モデルの材料定数を決定できる。
- アスファルト混合物のクリープコンプライアンスは応力依存性に比べ温度依存性が卓越している。そのため、材料定数は温度の関数として表すことができる。

本研究は菅原照雄北海道大学名誉教授の指導を得て実施したもので、ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 重松和男, 加形 護; フィルダム表面アスファルト遮水壁工法について, ダム工学 (1992.12), pp.45~59.
- 伊藤金通, 川島文治, 塚田智之; 八潮ダムの設計と施工, 電力土木 (1995.1), pp.23~33.
- 重松和男, 榎原 健, 内藤 匠; アスファルトフェーシング工法の開発研究 (その4), 鹿島建設技術研究所年報第21号 (1972), pp.27~42.
- 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, (1987.3).
- 天野隆明, 森吉昭博, 鏡 慎, 笠原彰彦; アスファルト舗装の熱応力と変形の粘弾性解析, 土木学会論文集 (1997.5), pp.23~32.
- 大串雅信; 材料力学通論, 工学図書 (1966).
- 山田嘉昭; 塑性・粘弾性, 培風館, (1980).