HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	アスファルト混合物の流動を伴う領域の応力緩和現象と破壊に関する研究
Author(s)	森吉，昭博
Description	V-12
Citation	土木学会論文集，414，185-193
Issue Date	1990-02
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/40191
Type	journal article
File Information	moriyoshi_PJSCE414.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

【土木学会論文集　第414号／V-12　1990年2月】

アスファルト混合物の流動を伴う領域の応力緩和現象と破壊に関する研究

A RESEARCH ON FAILURE AND STRESS RELAXATION OF ASPHALTIC MIXTURES IN DUCTILE ZONE

森吉昭博*
By Akihiro MORIYOSHI

This paper describes the effects of stress relaxation on the mechanical behaviour of asphaltic mixtures in ductile zone. Stress relaxation tests were conducted in ductile zone under various loading conditions and examined the effects of stress relaxation on strain at failure, flexural strength and failure envelope of asphaltic mixtures. It is concluded that strain at failure of asphaltic mixtures increases with stress relaxation of asphaltic mixtures in ductile zone and stress relaxation of asphaltic mixtures have direct effects upon failure behaviour of asphaltic mixtures at various test conditions.

Keywords: *stress relaxation, asphaltic mixture, ductile failure*

1. まえがき

粘弾性挙動を示すアスファルト舗装は車両のような力学荷重や外気温の変動による熱荷重のもとで，クリープや応力緩和現象を示す．アスファルト舗装ではこれが一部で破壊現象につながっている．著者らはこのような現象でアスファルト混合物のクリープ現象と破壊との関係はすでに報告している[1),2)]．応力緩和現象は破壊との関係ではなく短時間から長時間にわたり単に線形領域で破壊に至らない応力緩和を伴う現象に関する研究が多い[3)~5)]．これらは主にアスファルト混合物またはアスファルト舗装体の内部に生ずる応力やひずみを推定するために用いられ，小ひずみ領域の研究が多い．アスファルト舗装は外気温が急に降下し，このためアスファルト舗装内部に熱応力が発生した後，一定温度が長時間継続した場合やアスファルトの表面遮水壁をもつ水利構造物で水位が一定速度で上昇し，ある位置で水が停止した場合，またこの繰返し作用を受ける場合では応力緩和とこれら破壊現象が密接な関係にあると思われる．このような場合のアスファルト混合物の破壊現象の解析はいままで限界ひずみまたは破壊包絡線という考え方が中心であったように思われる[6),7)]．

本研究はこのような応力緩和を伴うアスファルト混合物の応力緩和現象と破壊性状との関係について曲げ試験から検討したものである．ここでは応力緩和の程度を種々に変化させ，応力緩和の程度とアスファルト混合物の破壊時のひずみ，破壊強度の値および破壊包絡線との関係等についても検討した．実験の結果，アスファルト混合物の応力緩和はアスファルト混合物の破壊時のひずみが増加する好ましい現象であることが明らかにされた．

2. 実験方法および解析法

本研究で使用したアスファルトの性状と配合表は**Table 1, 2**に示す．アスファルト混合物の作成法は以下のとおりである．

アスファルトは2ポアズ（0.2 Ns/m²）相当の温度まで加熱し，これと加熱された骨材はミキサで3分間混合される．それらは30×30×5 cmの鋼製型枠に投入される．この後アスファルト混合物はアスファルトの粘度が30ポアズ（3 Ns/m²）の温度になったとき，線圧18 kgf/cm（176 N/cm）のローラコンパクタで24回転圧される．その後供試体は45°Cに保持された恒温室で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

* 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13西8）

Table 1 Composition of Mixtures (%).

Sieve Opening (mm)	Asphalt Concrete Type A	Asphalt Concrete Type B
13	100	100
10	88.4	92.0
5	67.0	68.0
2.5	48.5	47.0
1.2	34.4	36.0
0.6	28.5	25.0
0.3	16.9	13.9
0.15	8.9	7.2
0.074	7.5	6.1
Binder Content (%)	5.8	6.0

: Standard Mixture

Table 2 Properties of Asphalts.

No	Pen. (25℃, 100gr, 5sec)	$T_{R\&B}$ (℃)	P.I.
1*	95.0	47.0	-0.5
2	87.0	47.0	-0.4

*: Standard Asphalt

荷重 55.1 kgf(540 N)，トラバース走行速度 42 回/分の条件で 1 時間ニーディング作用を与えて再転圧される．これを室温まで冷却した後，実験用供試体はダイヤモンドカッタで所定の寸法に 6 面カットして作成される．

本研究で行った試験法は以下のとおりである．

（1） 曲げ試験

ここでは両端単純支持の 3 点曲げ試験を実施した．使用した機械はインストロン型万能試験機であり，この機械の容量は ±500 kgf(±4 900 N)，変形速度は 500～0.5 mm/分 である．使用した供試体の寸法は 2.5×2.5×26 cm で，スパン長は 20 cm である．荷重の記録はレクチグラフを用いた．

実験は以下の 3 種の方法で実施した[8]．

一定ひずみ速度の曲げ試験：通常実施される一定ひずみ速度の曲げ試験

応力緩和を伴う一定ひずみ速度の再載荷試験：一定ひずみ速度の曲げ試験である応力レベルまで載荷し，その後ある応力レベルまで応力緩和させる操作を 1 回または何回も繰り返し，その後一定ひずみ速度で載荷する試験

繰返し応力緩和試験：上記の操作を混合物がある応力レベルの間で破壊するまで繰り返す試験

これらの解析はいずれも弾性解を利用した．ここで曲げ強度は破壊時の荷重を，また曲げ応力はある時間の荷重を用いて棒状供試体の下縁部において弾性解より求めた[9]．一定ひずみ速度の曲げ試験，応力緩和を伴う一定ひずみ速度の再載荷試験，および繰返し応力緩和試験の各実験の応力およびひずみ等は以下ならびに Fig. 1 に示すように定義した．

一定ひずみ速度の曲げ試験：曲げ強度 σ_B，破壊時のひずみ ε_B

応力緩和を伴う 2 種の試験：上限設定応力 σ_u，下限設定応力 σ_l，繰返し載荷回数 i 回目の破壊時のひずみおよび曲げ強度 ε_{iB}，σ_{iB}

繰返し応力緩和試験：上限設定応力と下限設定応力との間で破壊したときの破壊時のひずみ，曲げ強度および破壊回数 ε'_B，σ'_B，N_B

曲げ強度と温度との関係で曲げ強度が極大値となる温度：脆化点温度

実験に用いた供試体の本数は一定ひずみ速度試験では 1 試験条件 1 本とし，他の試験では原則として 1 試験条件 3 本とした．

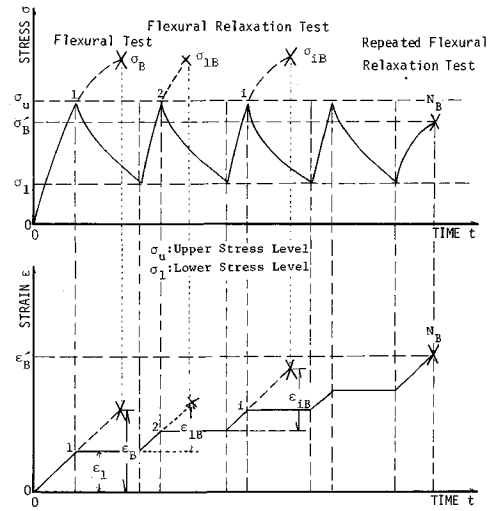


Fig. 1 Stress-Strain-Time Relationships in Three kinds of Flexural Tests.

3. 実験結果および考察

（1） 曲げ試験

a) 一定ひずみ速度の曲げ試験

一定ひずみ速度の曲げ試験の実験結果は Fig. 2 に示

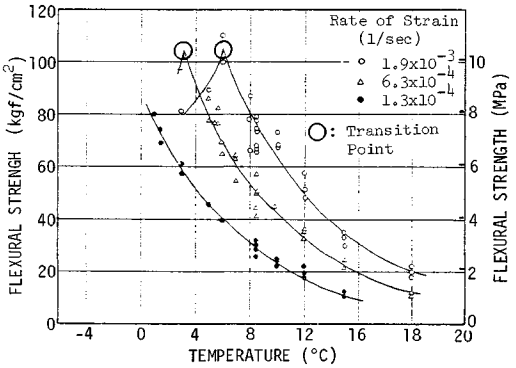


Fig. 2 Relation between Flexural Strength and Temperature.

Table 3　Flexural Relaxation Test.

	Flexural Strength(σ_B) (kgf/cm²),(MPa)		Temperature (℃)	Rate of Strain (1/sec)
Equi-Flexural Strength	74	7.3	1.2	1.3×10^{-4}
	74	7.3	5.7	6.3×10^{-4}
	74	7.3	8.5	1.9×10^{-3}
	29	2.8	8.5	1.3×10^{-4}
	29	2.8	13.0	6.3×10^{-4}
	29	2.8	17.0	1.9×10^{-3}
Equi-Rate of Strain	74	7.3	5.7	6.3×10^{-4}
	50	4.9	8.5	6.3×10^{-4}
	29	2.8	13.0	6.3×10^{-4}
Equi-Temperature	20	2.0	8.5	3.1×10^{-5}
	29	2.8	8.5	1.3×10^{-4}
	50	4.9	8.5	6.3×10^{-4}
	74	7.3	8.5	1.9×10^{-3}
	87	8.5	8.5	3.1×10^{-3}

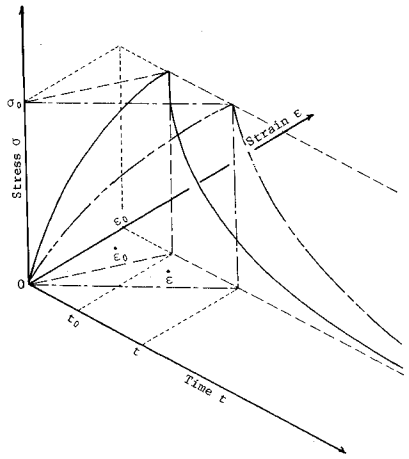


Fig. 3　Stress-Strain-Time Relationships (Flexural Strength is constant and Rate of Strain is Different).

す．ここで脆化点は○印で示されている．

Table 3 で等強度とは曲げ強度がほぼ同一のことを示す．Table 3 と Fig. 2 より Table 3 の実験温度はほぼ脆化点温度よりも高く，いずれも流動を伴う破壊領域に位置していることは明らかである．

Fig. 3 は曲げ強度が同一であり，ひずみ速度および温度の異なる場合の応力・ひずみ・時間の関係を示す．この図で応力・ひずみ・時間の関係は応力・ひずみ面に投影するとこの条件の異なる2つの曲線が同一の曲線になると予想される．同一の曲線であれば応力・ひずみ・時間の関係はひずみ速度に換算することにより，すべての曲線の重ね合わせが可能であると思われる．

この場合，$\alpha=\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0=(\varepsilon/t)/(\varepsilon_0/t_0)=t_0/t$ の関係より，次式が得られる．

$$t_0=\alpha\cdot t \quad \cdots\cdots(1)$$

ここで，$\dot{\varepsilon}$：任意のひずみ速度 (1/s)

$\dot{\varepsilon}_0$：標準のひずみ速度 (1/s)

ε：任意のひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ における時間 t のひずみ量

ε_0：標準のひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_0$ における時間 t_0 のひずみ量

α：ひずみ速度換算係数

とする．

Fig. 4，5 は曲げ強度が 29 kgf/cm² (2.8 MPa)，74 kgf/cm² (7.3 MPa) の場合，標準のひずみ速度 (6.3×10^{-4} 1/s) に他のひずみ速度を換算し，上記の式について検討した結果を示す．この結果いずれも応力緩和過程における応力と時間との関係は温度およびひずみ速度に関係なくほぼ同一の曲線になることが確かめられた．しかし曲げ強度が異なる場合，上記同様にレオロジー性状が同一であるとは考えにくい．この場合先のような換算はできないがこの場合同じ換算係数 γ で一致する場合は次式が成立すると考えられる．

$$\sigma=\gamma\sigma_0 \quad \cdots\cdots(2)$$

$$\varepsilon=\gamma\varepsilon_0 \quad \cdots\cdots(3)$$

ここで，γ：換算係数

σ_0：標準のひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_0$ で載荷したとき時間 t_0 における応力

ε_0：標準のひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_0$ で載荷したとき時間

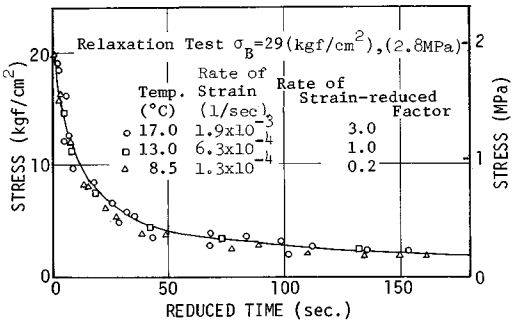


Fig. 4　Rate of Strain-Reduced Relaxation Curve (Flexural Strength : 29 kgf/cm²).

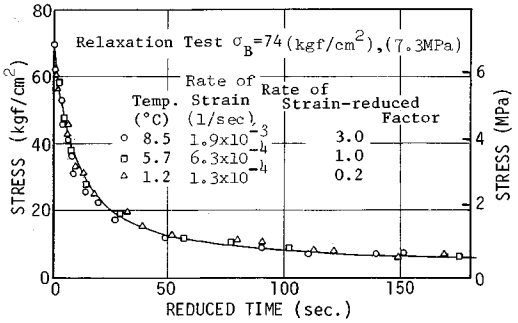


Fig. 5　Rate of Strain-Reduced Relaxation Curve (Flexural Strength : 74 kgf/cm²).

t_0 のひずみ

σ：任意のひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ で載荷したとき時間 t における応力

ε：任意のひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ で載荷したときの時間 t におけるひずみ

とする．

両式から γ を消去すれば $\sigma_0/\varepsilon_0=\sigma/\varepsilon$ が得られる．すなわちスチフネス（応力/ひずみ）が等しい場合は換算係数により，異なる応力・ひずみ曲線は重ね合わすことが可能となる．

Fig. 6 はこの考え方に基づき，上限設定応力，σ_u とひずみの比が 8 000 kgf/cm² (784 MPa) の場合，3 種のひずみ速度の曲げ試験より検討した結果を示す．明らかに 3 種の条件で行った応力緩和曲線はひずみ量が 9×10^{-3} から 8×10^{-4} と異なるにもかかわらず，ほぼ一致し，この妥当性が証明されたと考えてもよい．この考え方を拡張すると温度・ひずみ速度が変化しても同一のスチフネスとなる場合は 1 つの実験条件により他の実験条件の結果が予測可能となる．

Fig. 7 は以上の曲げ試験において同一のスチフネスとなる（等スチフネス）条件を種々の実験結果から捜し，スチフネス・時間曲線の同一のものを等応力緩和曲線として結んだ結果を示す．3 種の応力・ひずみ曲線で，いずれも原点よりほぼ直線的に等応力緩和曲線が伸びていることが確認された．この等応力緩和曲線はレオロジー的に同じような性状を結んだ線とも考えられるが，等応力緩和曲線が必ずしも最大荷重に対する割合が同一の点を結んだ線とはならず，むしろこの曲線は低応力側においては高応力側よりも最大荷重に対する割合の小さなものが多い．

以上より線形粘弾性領域のひずみは 0.1 % 以内とされているが[10]，このような大ひずみ領域でも線形粘弾性領域と同様に混合物の力学性状の規則性が存在することが明らかにされた．

b) 応力緩和を伴う一定ひずみ速度の再載荷試験

この試験は一定ひずみ速度である設定応力（上限設定応力）まで載荷し，その後応力緩和を行い，応力が 0 に達するかまたはある応力（下限設定応力）に達したとき，再度同一のひずみ速度で載荷し，供試体を破壊させる（繰返し載荷回数 1 回）．この試験におけるひずみと応力の時間との関係は **Fig. 1** に示す．このときの実験条件は **Table 4, 5** に示す．

Fig. 8 は一定ひずみ速度である応力まで載荷し，その後ほぼ 0 まで応力緩和させ，その後すぐ一定ひずみ速度の曲げ試験を行ったときの破壊性状を応力緩和のない通常の一定ひずみ速度の破壊性状を用い正規化した結果で

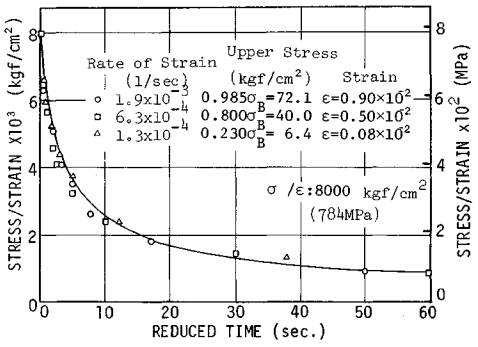


Fig. 6 Reduced Relaxation Curve in Equi-Stiffness.

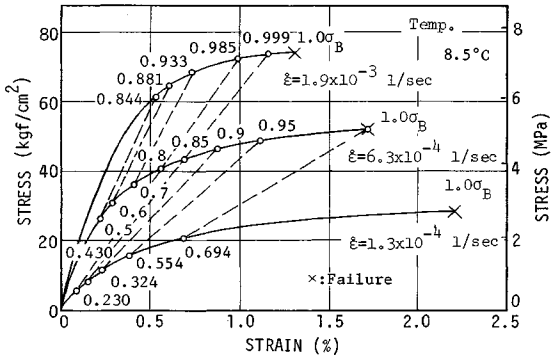


Fig. 7 Equi-Stiffness Curves in Flexural Test.

Table 4 Flexural Repeated Relaxation Test (Lower Stress Level : Variable).

Rate of Strain (1/sec)	Flexural Strength(σ_f) (kgf/cm²),(MPa)		Upper Stress Level ($\times\sigma_f$)	Lower Stress Level ($\times\sigma_f$)	Temp. (℃)
1.9×10^{-3}	74	7.3	0.7	0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5	8.5
6.3×10^{-4}	50	4.9	0.7	0, 0.1, 0.2 0.3, 0.4, 0.5	8.5
1.3×10^{-4}	29	2.8	0.7	0, 0.1, 0.2 0.3, 0.4, 0.5	8.5

Table 5 Flexural Repeated Relaxation Test (Upper Stress Level : Variable).

Rate of Strain (1/sec)	Flexural Strength(σ_f) (kgf/cm²),(MPa)		Upper Stress Level ($\times\sigma_f$)	Lower Stress Level ($\times\sigma_f$)	Temp. (℃)
1.9×10^{-3}	74	7.3	0.1, 0.2, 0.3 0.4, 0.5, 0.6 0.7, 0.8, 0.9 0.95, 1.0	0	8.5
6.3×10^{-4}	50	4.9	0.1, 0.2, 0.3 0.4, 0.5, 0.6 0.7, 0.8, 0.9 0.95, 1.0	0	8.5
1.3×10^{-4}	29	2.8	0.1, 0.2, 0.3 0.4, 0.5, 0.6 0.7, 0.8, 0.9 0.95, 1.0	0	8.5

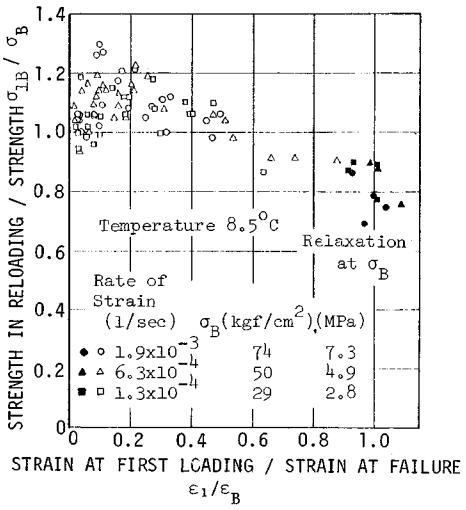


Fig. 8 Normalized Strength-Strain at Failure Relationship in Flexural Relaxation Test.

ある．ここで一定ひずみ速度における曲げ強度は σ_B，破壊時のひずみは ε_B，応力緩和後の一定ひずみ速度の再載荷試験から得られる曲げ強度は σ_{1B}，またこのときの設定ひずみは ε_1 とした．Fig. 8 において再載荷後の曲げ強度（σ_{1B}）は上限設定応力レベル（σ_U）に依存するが，これはすなわち設定ひずみ（ε_1）に依存することを意味する．再載荷後の曲げ強度（σ_{1B}）は（1.05～1.2）σ_B の極大値をとり，さらに 0.5 ε_B 付近で σ_{1B} は σ_B とほぼ一致し，さらに ε_1 が大きくなると σ_{1B} は σ_B よりも小さくなり，0.7 σ_B の値まで低下する．この傾向は曲げ強度の大きさに無関係である．このように σ_{1B} が σ_B より大きくなる原因の1つとしてアスファルト混合物のひずみ残留に伴う応力硬化現象が考えられる．この図中の黒丸は応力・ひずみ曲線の荷重最大（曲げ強度に相当）付近で応力緩和した結果を示す．曲げ強度は最大荷重付近で応力緩和させた後では元の曲げ強度の8割程度となる．

これに対し Fig. 9 は上限設定応力を曲げ強度の 70 % に設定し，下限設定応力ならびに載荷速度を変化させ，下限設定応力が破壊性状に与える影響を検討するため破壊時のひずみおよび曲げ強度を正規化して整理した結果を示す．ここで一定ひずみ速度の曲げ試験の破壊時のひずみは ε_B，応力緩和させ再載荷したときの破壊時のひずみは ε_{1B}，全ひずみは $\varepsilon_1+\varepsilon_{1B}$ と定義した．これより再載荷後の破壊時のひずみおよび全ひずみは下限設定応力にほとんど影響されずほぼ一定値となるように思われる．

Fig. 10, 11 は温度 8.5°C，ひずみ速度 1.9×10^{-3} 1/s で載荷し，上限設定応力および下限設定応力を変化させ，

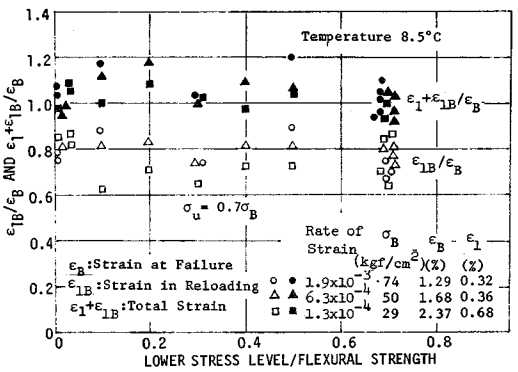


Fig. 9 Effects of Lower Stress Levels on Failure Behaviors of Flexural Relaxation Test.

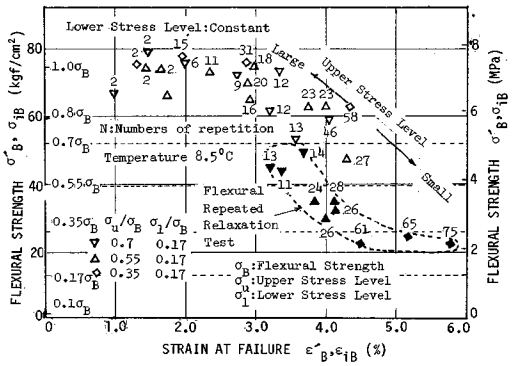


Fig. 10 Effects of Upper Stress Levels on Failure Behaviors of Repeated Flexural Relaxation Test and Flexural Relaxation Test.

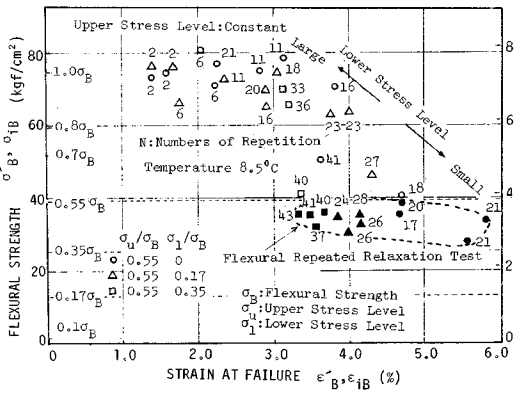


Fig. 11 Effects of Lower Stress Levels on Failure Behaviors of Repeated Flexural Relaxation Test and Flexural Relaxation Test.

2回以上の繰返し応力緩和を実施した後，再度一定ひずみ速度の曲げ試験を行った結果を整理したものである．このときの実験条件は Table 6 に示す．図中の黒塗り印は繰返し応力緩和試験における破壊性状を示し，他の印

Table 6 Flexural Repeated Relaxation Test (Upper and Lower Stress Level : Variable).

Temperature (℃)	Rate of Strain (1/sec)	Upper Stress Level ($\times\sigma_B$)	Lower Stress Level ($\times\sigma_B$)
		1.0	0
		1.0	0.17
		1.0	0.35
		0.8	0
		0.8	0.17
		0.7	0.1
8.5	1.9×10^{-3}	0.7	0.17
	σ_B = 74kgf/cm²(7.3MPa)	0.7	0.35
		0.55	0
		0.55	0.1
		0.55	0.17
		0.55	0.35
		0.35	0.17
		0.35	0

は応力緩和を伴う一定ひずみ速度の再載荷試験の結果であり，図中の数字は繰返し載荷回数または破壊回数を示す．

Fig. 10 は下限設定応力が同一で，上限設定応力が変化したときの結果である．曲げ強度と破壊時のひずみとの関係は小ひずみ領域で曲げ強度はほぼ同一で，その後破壊時のひずみの増大とともに曲げ強度は小さくなる傾向にある．この同一の曲げ強度となるときの破壊時のひずみの範囲は上限設定応力が小さくなるに伴い，広くなる．すなわち破壊時のひずみは同じ曲げ強度で比較すると上限設定応力が小さいものほど大きくなる傾向にある．破壊に至るまでの回数は黒印と比較すると上限設定応力が 0.7 σ_B の場合 13 回，0.55 σ_B で 26 回，0.35 σ_B では 67 回と上限設定応力がわずかに小さくなるだけで破壊に至るまでの回数は著しく多くなる．

Fig. 11 は上限設定応力が同一で，下限設定応力が変化したときの結果を示す．ここでも小ひずみ領域で曲げ強度はほぼ同一になるものの，その後曲げ強さはひずみの増大とともにしだいに小さくなる．ここでは下限応力が小さくなるに伴い，曲げ強度が同一となる破壊時のひずみの範囲は広くなる傾向にある．しかしながら，黒印に示した繰返し応力緩和試験の破壊回数は **Fig. 10** にみられるように上限設定応力が変化したときほど顕著に変化しない．

c) 繰返し応力緩和試験

繰返し応力緩和試験の破壊性状と上限設定応力の関係は **Fig. 12** に示す．このときの実験条件は **Table 6** に示す．ここでは一定ひずみ速度の曲げ試験から得られた曲げ強度を σ_B，上限設定応力を σ_U，下限設定応力を σ_l，繰返し応力緩和試験における曲げ強度を σ'_B，として上限設定応力が繰返し応力緩和試験を実施したときの曲げ強度に及ぼす影響について検討した．繰返し応力緩和試験の曲げ強度 σ'_B と上限設定応力 σ_U との比は下限設定応力が変化してもほぼ一定の 0.86 の値となり，一方繰返し応力緩和試験の曲げ強度 σ'_B と曲げ強度 σ_B との比は下限設定応力に関係なく，上限設定応力と曲げ強度の比（σ_U/σ_B）に比例する．

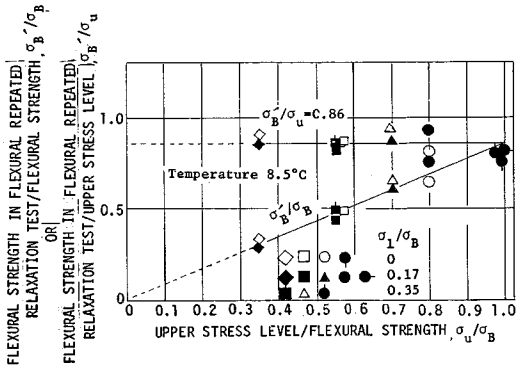


Fig. 12 Relation between Failure Behavior of Repeated Flexural Relaxation Test and Upper Stress Level.

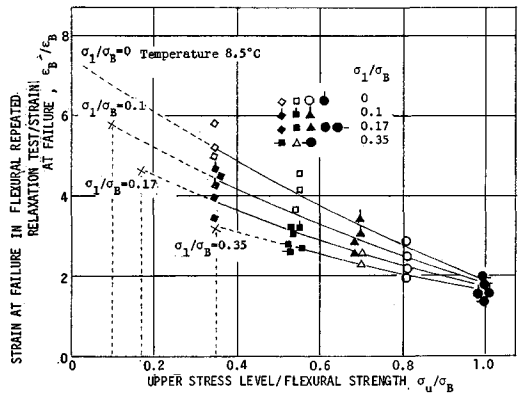


Fig. 13 Effects of Upper Stress Levels and Lower Stress Levels on Strain at Failure in Repeated Flexural Relaxation Test.

Table 7 Flexural Repeated Relaxation Test.

Flexural Strength(σ_B) (kgf/cm²),(MPa)		Upper Stress Level ($\times\sigma_B$)	Lower Stress Level ($\times\sigma_B$)
86	8.4	0.6	0.1
86	8.4	0.7	0.2
86	8.4	0.8	0.3

繰返し応力緩和試験の破壊時のひずみ ε'_B の値は上限設定応力や下限設定応力の大きさに影響されることは当然であるが，これらは整理すると **Fig. 13** が得られる．これより繰返し応力緩和試験の破壊時のひずみは上限設定応力が小さければ，また下限設定応力が小さければおのおの大きくなる．また **Fig. 13** より繰返し応力緩和試験の破壊時のひずみの値は上限設定応力，下限設定応力，および曲げ強度に依存するように思われる．

Fig. 14 は一定ひずみ速度の破壊時のひずみ ε_B とこれらの比をパラメーターとして，上限設定応力および下限

設定応力との関係を整理した結果を示す．図中に示す実線は Fig. 13 における関係より求めたものであり，点線は推定曲線である．また図中に示す白い丸印はアスファルトコンクリートタイプAの配合でタイプ2のバインダーを使用した混合物について温度 8.5°C，ひずみ速度 1.8×10^{-3} 1/s で実験を行った結果である．この混合物の実験条件は Table 7 に示す．この混合物は繰返し応力緩和試験に使用した一連のアスファルトコンクリートタイプBの混合物とは配合およびバインダーが異なるにもかかわらず Fig. 14 にみられるごとく，この結果はこれらの配合から求めた曲線とほぼ一致した．

一定ひずみ速度試験で破壊包絡線は破壊の基準の1つになっている．繰返し応力緩和試験においてもこの破壊包絡線がこの曲線と同一であるかはアスファルト混合物の配合設計上きわめて重要な問題であるといえよう．この意味で繰返し応力緩和試験から得られる曲げ強度 σ_B' および破壊時のひずみ ε_B' が一定ひずみ速度試験の曲げ強度 σ_B および破壊時のひずみ ε_B との比較をすることは意味があると思われる．

Fig. 15 は一定ひずみ速度の曲げ試験と繰返し応力緩和試験の破壊性状を設定応力をパラメーターに整理したものである．明らかに繰返し応力緩和試験の破壊点は曲げ強度と破壊時のひずみの関係で一定ひずみ速度のそれよりも，曲げ強度は小さく，かつ破壊時のひずみは大きくなる領域にある．このため繰返し応力緩和試験の結果は一定ひずみ速度の破壊包絡線より高ひずみ側に位置し，上限設定応力と下限設定応力の等しい場合，すなわちクリープ試験はこれに対応すると考えられる破壊包絡線上に位置する．この考え方はすでに著者が報告したクリープ試験の破壊包絡線の結果と一定ひずみ速度の曲げ

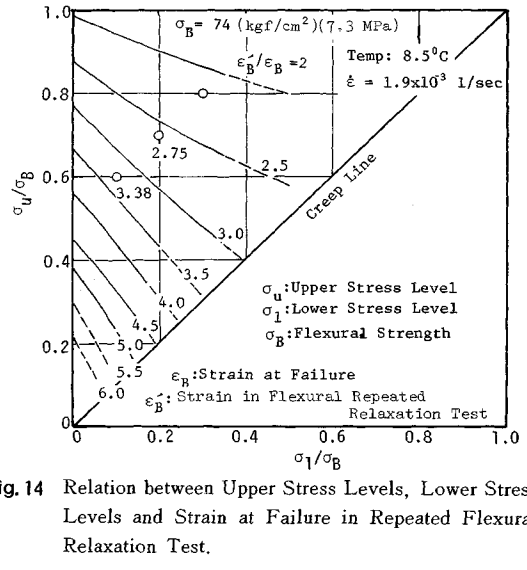


Fig. 14　Relation between Upper Stress Levels, Lower Stress Levels and Strain at Failure in Repeated Flexural Relaxation Test.

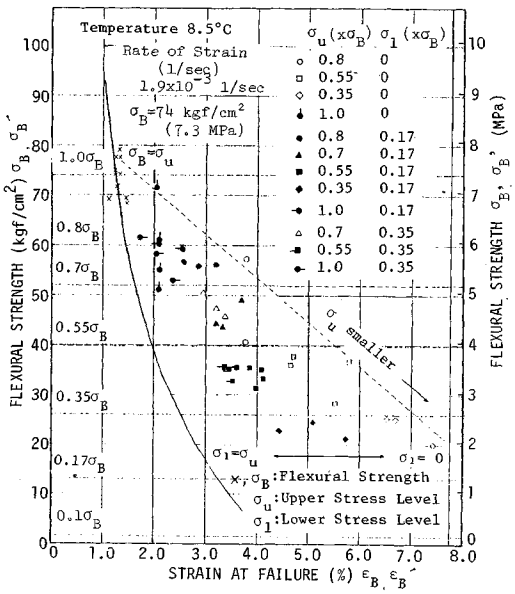


Fig. 15　Failure Behaviors of Flexural Test and Repeated Flexural Relaxation Test (Temperature and Rate of Strain is constant).

試験のそれとが一見矛盾しているように思えるが[11]，この原因は応力緩和の有無と関係があると思われる．Fig. 15 における実験条件は温度 8.5°C，ひずみ速度 1.9×10^{-3} 1/s であり，このときの曲げ強度は 74 kgf/cm² (7.3 MPa) である．このような条件において下限設定応力が0の場合，曲げ強度や破壊時のひずみは上限設定応力に依存するものの，一番大きな値となることはすでに確認しているので，下限設定応力が0で上限設定応力が変化したときこの破壊点（曲げ強度と破壊時のひずみとの対応点）をすべて結ぶ（破壊包絡線）と，この破壊点と一定ひずみ速度の破壊包絡線で挟まれた領域がこの曲げ強度における繰返し応力緩和試験の破壊領域になるといえる．

Fig. 15 で繰返し応力緩和試験から得られた破壊包絡線は一定ひずみ速度の破壊包絡線よりも勾配は緩やかであり，上限設定応力が小さくなるとともに破壊包絡線に沿って高ひずみ領域へ，また下限設定応力が小さくなるとしだいに破壊時のひずみは高ひずみ領域へとそれぞれ移動する．以上の実験は温度およびひずみ速度が同一であるが，次にこれらが異なる場合で応力・ひずみ曲線が異なるものについて上限設定応力と下限設定応力を変化させ，繰返し応力緩和試験における破壊包絡線の形状について検討した．

Fig. 16 はこれらの結果を示したものである．ここでは Fig. 15 と同様，破壊線は下限設定応力が小さくなるとともに破壊包絡線の形状をそのままにして高ひずみ領

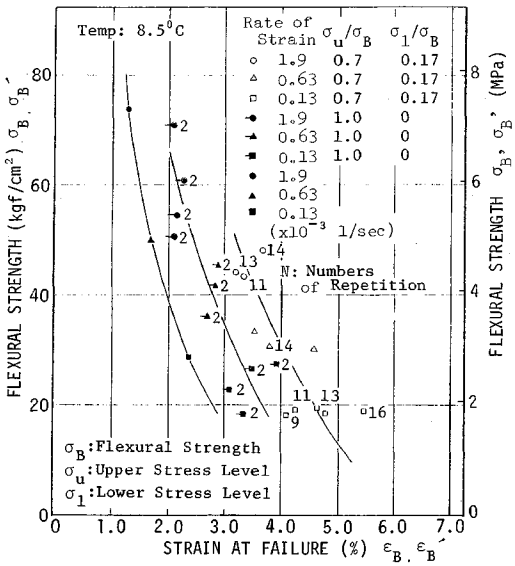


Fig. 16 Failure Behaviors of Flexural Test and Repeated Flexural Relaxation Test (Rate of Strain is Different).

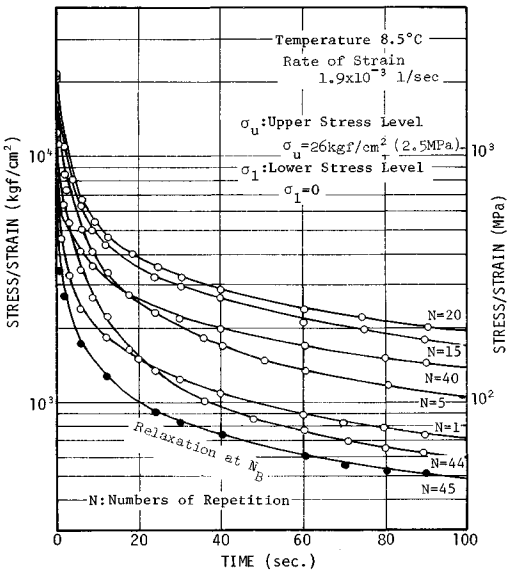


Fig. 17 Relation between the Ratio of Stress to Strain and Time in Repeated Flexural Relaxation Test.

域にずらしたと同じような形状となる．図中に示した数字は繰返し応力緩和試験における破壊回数であるが，曲げ強度の大きさが異なっても上限設定応力ならびに下限設定応力が曲げ強度に対して一定の値をとるならば，破壊回数もほぼ同一となる．図中に示した黒塗りの印は一定ひずみ速度の曲げ試験の結果を示す．

繰返し応力緩和過程における応力緩和性状は載荷回数が多くなるに伴い，しだいに緩和性状が変化する．Fig. 17 は下限設定応力を 0，上限設定応力を 26 kgf/cm² (2.5 MPa) に設定したときの応力とひずみの比を載荷時間との関係で載荷回数をパラメーターとして整理したものである．ある時間における応力とひずみの比は載荷回数の増加とともにしだいに大きくなり（応力緩和性状が悪くなる），その後ある載荷回数を境にしてしだいに小さくなる（応力緩和性状が良くなる）．図中に示す黒塗りの印は繰返し応力緩和試験で破壊するときの結果を示す．

4. ま と め

以上で得られた結論は要約すると以下のようである．

（1） 流動を伴う領域において応力緩和曲線は等スチフネスであれば，温度，ひずみ速度が異なる場合でも換算係数が既知であると 1 種類の実験結果より他の条件における曲線の推定が可能である．

（2） 曲げ強度に関係なく，破壊時のひずみの 5 割以内まで載荷し，その後応力が 0 になるまで緩和させると，その後の曲げ強度は一定ひずみ速度の曲げ強度より若干大きくなるが，破壊時のひずみの 5 割以上載荷した場合は逆に小さくなる傾向にある．

（3） 応力緩和を何回も伴う一定ひずみ速度の再載荷試験において下限設定応力または上限設定応力が小さくなると破壊時のひずみは大きくなる．

（4） 繰返し応力緩和試験から得られた破壊包絡線は一定ひずみ速度の曲げの破壊包絡線よりも勾配は緩やかで，上限設定応力または下限設定応力が小さくなるとともに，高ひずみ領域へと移動し，かつこの移動する範囲はクリープ試験と一定ひずみ速度の破壊包絡線との間に位置するように思われる．

（5） 曲げ強度が異なっても上限設定応力ならびに下限設定応力が曲げ強度に対して一定の値をとれば，破壊回数はほぼ同一となる．

（6） 繰返し応力緩和試験の曲げ強度 σ_B' と一定ひずみ速度の曲げ試験の曲げ強度 σ_B との比は下限設定応力に関係なく，上限設定応力と曲げ強度の比に比例する．

（7） 繰返し応力緩和試験において応力とひずみの比は繰返し載荷回数とともに大きくなり，応力緩和性状が悪くなるが，破壊回数に近くなると小さくなり，応力緩和性状が見掛け上よくなる状態となる．

以上本研究で得られた結果は室内試験のものであり，アスファルト舗装は施工条件の影響がきわめて大きい．したがってさらにこの結果と現場での研究との関係を明らかにする必要がある．

参 考 文 献

1） 工藤忠夫・菅原照雄：水工用アスファルト混合物のク

リープ挙動に関する研究，土木学会論文報告集，第201号，pp. 113～122，1972年5月.
2) 森吉昭博・菅原照雄：流動を伴う領域におけるアスファルト混合物のレオロジーならびに破壊挙動について，土木学会論文報告集，第279号，pp. 127～135，1978年11月.
3) Monismith, C. L., Secor, G. A. and Secor, K. E. : Temperature induced stresses and deformation in asphaltic concrete, Proc. Assn. Asphalt Paving Tech., Vol. 34, pp. 248～285, 1965.
4) Monismith, C. L. and Secor, K. E. : Viscoelastic behavior of asphalt concrete pavement, Proc. Internat. Conf. on Structural Design of Asphalt Pavements, Univ. of Michigan, pp. 476～498, 1962.
5) Secor, K. E. and Monismith, C. L. : Analysis and interrelation of stress-strain-time data for asphalt concrete, Trans. Soc. Rheology, Vol. 8, 1965.
6) Pagen, C. A. : Rheological response of bituminous concrete, Hwy. Res. Record, No. 67, pp. 1～26, 1965.
7) Alexander, R. L. : Limits of linear behavior of an asphalt concrete in tension and compression, Thesis, D. Eng. Univ. of California, 1964.
8) 石川 洋・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（第3報）—繰り返し応力緩和試験における破壊—，第32回土木学会年次学術講演会講演概要集，第5部.
9) 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. 57～64，1973年2月.
10) National Cooperative Highway Research Program Report 39 : Factors Involved in the Design of Asphaltic Pavement Surfaces, Highway Research Board, 1967.
11) 2) ibid.

(1989. 6. 23・受付)