

V—30 インダイレクト・テンション法によるアスファルト 混合物の変形係数簡易測定法に関する研究

北海道大学 学生員 山田 裕之
同上 正員 上島 壮
同上 正員 菅原 照雄

1. ま え が き

Indirect Tension 法は古くからコンクリートなどの材料試験で圧裂、或は割裂試験と呼ばれ、引張り強さを測定するために用いられ、純粋な引張り試験が極めて難しいこの種の材料には便利に使われてきた。アスファルト混合物についてもかなり以前から用いられてきてはいるが、アスファルト混合物の場合には比較的変形が大きく、さらにその力学的性質がひずみ速度に依存するため、ひずみ速度を正確に知ることが難しいこの方法は単に強さの目安をつける程度の利用に止どまっていた¹⁾²⁾。しかしアスファルト混合物の引張特性が重要であるにもかかわらず、直接引張り試験が技術的に困難で、限られた領域でしかデータを求めることが出来ない³⁾⁴⁾ことから、1970年頃からにわかにこの方法に関心が高まり、Kennedy^{5~9)}らによってある幅を持つ円弧状の載荷板を用いて行う試験法が提案され、さらにそのような状態での応力状態が弾性解で求められるようになった。載荷板に曲率と幅をもたせることによって垂直方向の変形量も正確に求められ、さらに水平方向のふくらみを測定することによってポアソン比、変形係数等も求めることが可能になった。それ以降アメリカではこの装置を用いマーシャル試験供試体を使って、変形係数の測定や材料の疲労試験が広く行われるようになった^{10~12)}。なお1982年には A S T M にも 5, 25, 40℃でのアスファルト混合物の変形係数測定法¹³⁾として正式に採用されるに至った。

著者らは、この方法を用いて、

- a. 広範囲な温度領域における変形係数の測定
- b. 温度応力による破壊温度の限界変形係数からする推定法の開発
- c. 荷重制御によるアスファルト混合物の疲労破壊性状の究明

等について各種の検討を行った。本報告はそれらの成果の一部を報告しようとするものである。

2. 試験の方法ならびに解析法

図-1は弾性解による試料中の応力の発生の状況を示したものである。これらの応力、ひずみ、ポアソン比ならびに変形係数は次の式によって求められる。図-1において供試体の中心点における引張り応力、ポアソン比、弾性係数、ひずみは次のように示される。

$$\text{引張り応力} \quad \sigma_r(\text{kg/cm}^2) = \frac{2P}{\pi a t} \left(\sin 2\alpha - \frac{a}{2R} \right) \quad (1)$$

$$\text{ポアソン比} \quad \nu = \frac{\left[\int_{-R}^R \sigma_{rx} dr + DR \int_{-R}^R \sigma_{rx} dr \right]}{\left[\int_{-R}^R \sigma_{\theta\theta} dr + DR \int_{-R}^R \sigma_{\theta x} dx \right]} \quad (2)$$

$$\text{弾性係数} \quad E(\text{kg/cm}^2) = \frac{P'}{tX} \cdot \left[\int_{-R}^R \frac{\sigma_{rx}}{P} dr - \nu \int_{-R}^R \frac{\sigma_{\theta x}}{P} dr \right] \quad (3)$$

$$\text{ひずみ} \quad \varepsilon = X \left[\int_{-R}^R \frac{\sigma_{rx}}{P} dr - \nu \int_{-R}^R \frac{\sigma_{\theta x}}{P} dr \right] \quad (4)$$

ここで、 t : 供試体の厚み(cm)

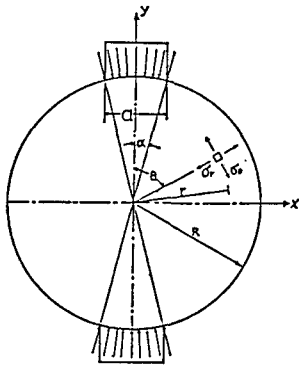


図-1 応力解析および応力分布図

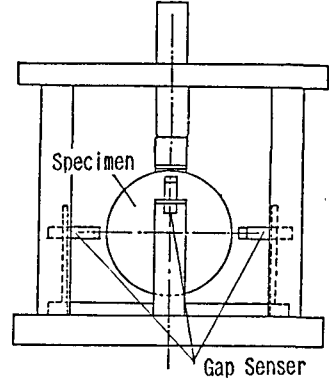
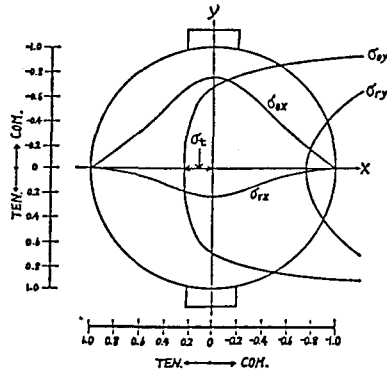


図-2 荷重ジグ

- P : 荷重 (kg)
 DR : 荷重 P にいたるまでの垂直方向変位 Y と水平方向変位 X との比
 P'/X' : 荷重-変位曲線において線形な部分の荷重と水平方向変位との比 (kg/cm)
 (破壊試験で変形係数を求める場合の計算)
 X : 全水平方向変位量 (cm)
 l : 引張りひずみを計算する長さ (ここでは 0.127cm)

以上の式から、本研究で用いた供試体直径 10.16 cm、載荷板の幅 2.54 cm に対しては、次の式が与えられる。破壊、疲労破壊も取扱うため載荷板の幅を ASTM などに示されるものよりも大きくとっている。

$$\text{引張り応力 } \sigma_t \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 0.05866 \frac{P}{X} \quad (5) \quad \text{ポアソン比 } \nu = \frac{0.1298 DR - 1.3766}{-0.5 DR - 0.0633} \quad (6)$$

$$\text{弾性係数 } E \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) = \frac{P'}{X'} (0.2596 + 1.0 \nu) \quad (7) \quad \text{ひずみ } \epsilon = X \left(\frac{0.0290 + 0.0922 \nu}{0.1298 + 0.5 \nu} \right) \quad (8)$$

以上の式は動的試験および静的試験の両方に適用が可能である。載荷装置としてはインストロン 1350 型 (容量 10 トン) 動的試験装置を用いた。この装置に恒温装置を取付け、長時間試験では -15 ないし 40℃、短時間では -25℃ 程度の試験が可能にした。これらの装置を図-2、3 に示す。測定値の記録、処理にはコンピューターを用いた。縦方向ならびに横方向ひずみの測定には非接触変位計 AEC-2525 型、1.5 mm、3 mm および 4 mm の 3 種を用いた。

静的試験においては載荷速度を変化させ、動的試験では周波数を変化させた。なお、本研究に用いたアスファルト混合物はアスファルト量 5.8% の密粒アスファルト・コンクリートである。

3. データ処理

本装置により得られた測定値の荷重、水平及び垂直変位データをフロッピーディスクに出力し、そののち各解析プログラムにしたがって所要の数値を求めた。疲労試験の場合は、15 ないし 60 秒間隔で測定値をフロッピーディスクに記録し、北大大型計算機センターの SAS (Statistical Analysis System) を用いて解析を行った。

4. 静的試験によるアスファルト混合物の引張り強度

図-4 は変形速度を 1, 10, 100 mm/min の 3 段階に変化させ、また温度を -20 から 20℃ まで 5℃ 間隔で

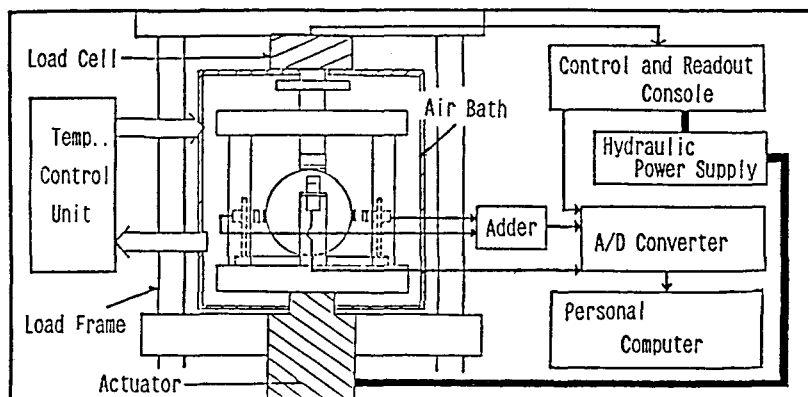


図-3 装置の概要

変化させて得られた引張り強さと温度との関係を示したものである。図に示すように引張り強さは変形速度と温度に大きく影響されていることがわかる。この3本の曲線はほぼ平行しており、強度が 20 kgf/cm^2 以上では同一強度レベルで見れば、ひずみ速度1桁の差は6ないし 8°C の温度差を与える。またここで得られた引張り強さと温度の関係は曲げ試験によって得られたもの¹⁴⁾と非常に良く似ている。この試験領域では引張り強さの最高値は 60 kgf/cm^2 をこえる。また引張り強さは従来求められてきた曲げ強さのおおむね60ないし70パーセントになっている。一方この方法によって得られた破壊ひずみも曲げ試験によって得られたものよりも低い値を示した。

また図-5は突き固め回数を変化させることによって得られた空隙率の異なるアスファルト混合物についての試験の結果を示したものであり、これによれば引張り強さは空隙率にかなり影響されていることがわかる。このことからこの方法は空隙率に敏感な試験ということが出来る。この方法によって得られた値のバラツキは比較的小さく、供試体の製作の容易さを考慮すると、曲げ試験に比較して実験も容易であり、充分に実用に供しうるものと考えられる。

5. 動的試験によるアスファルト混合物の変形係数

動的試験では波形はサイン波とし载荷周波数を1, 3, 10 Hzの3段階に変化させた。この試験では1つの供試体で -15 から 20°C まで段階的に温度を変化させ、順次変形係数を測定した。この方法によれば従来の変形係数の測定法にくらべ容易に測定することが可能である。動的試験での荷重は種々の予備的な実験を行って決定した。それらによれば载荷板を供試体に密着させるためのプレローディングと適切な試験荷重の選択が重要な意味を持つ。一方、疲労による性状の変化を出来るだけ小さくする配慮が必要である。この実験では100万回の载荷で疲労破壊が発生すると予測

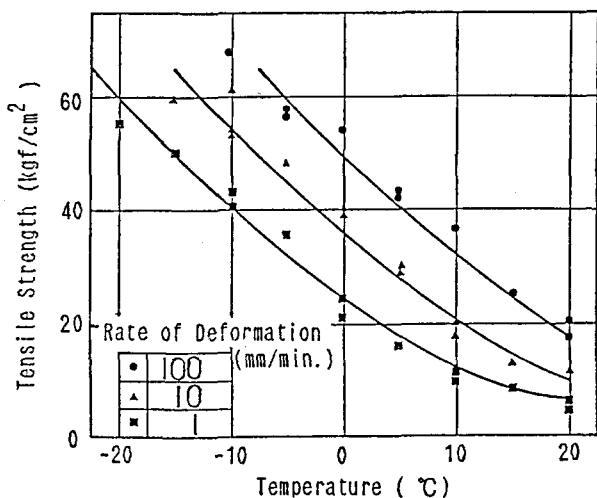


図-4 引張り強度と温度との関係

される応力レベルを用いて変形係数の測定を実施した。

図-6は計測された水平、垂直ひずみ波形と荷重の波形を示したものである。図-7は、変形係数と温度との関係を示したものである。また図-8はこれらをもとに横軸に荷重時間を取り基準温度を0℃にとって既往の研究¹⁵⁾で得られたシフトファクターを用いてマスターカーブを描いたものである。

これらの結果によれば低温領域では従来求められてきた変形係数に比べかなり高い値が得られた。これはいずれもひずみが 10^{-4} 以下でのものであり、在来の方法に比べてより実際条件に近いものと考えることが出来る。

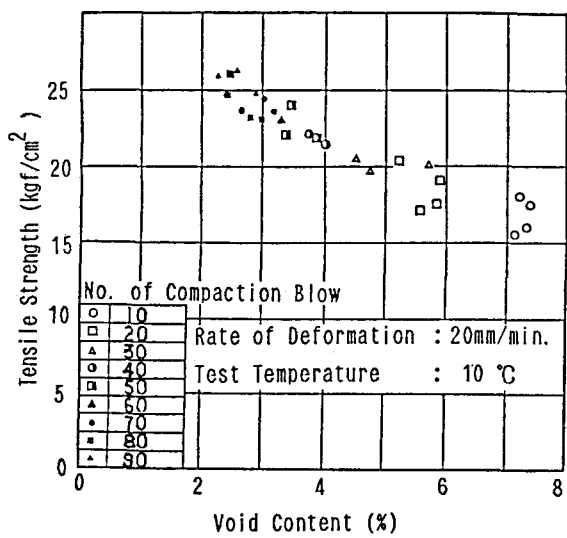


図-5 空隙率が引張り強さに与える影響

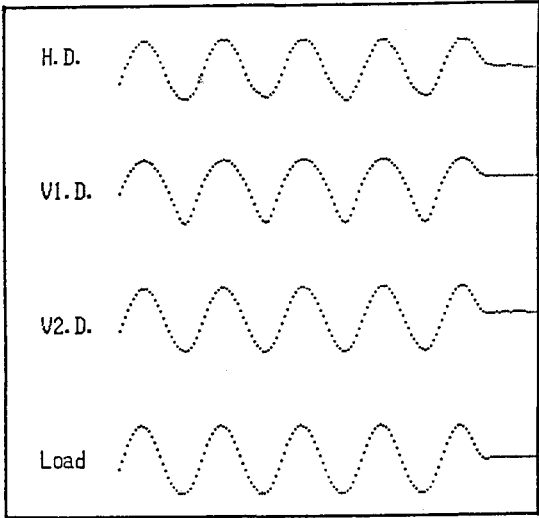


図-6 水平、垂直方向の変形
ならびに荷重の波形

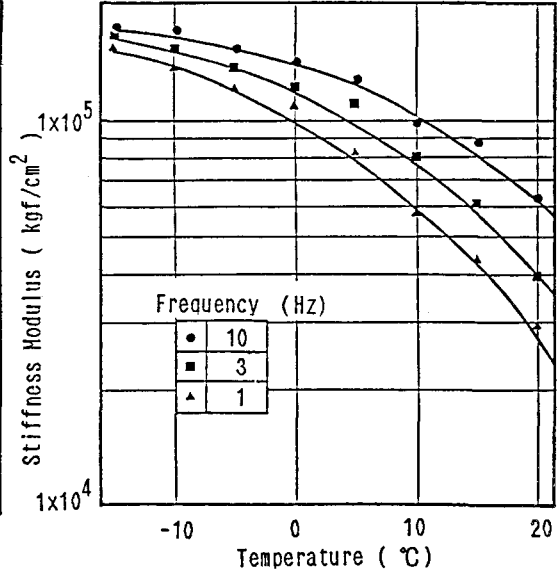


図-7 変形係数と温度との関係

6. アスファルト混合物の疲労破壊試験結果

疲労試験は荷重制御方式をとり、-5、0、10℃の3つの温度でそれぞれ荷重レベルを変化させて、荷重回数を10サイクル/秒として疲労破壊回数を求めた。疲労試験の場合には荷重板のカド張りによる供試体表面の切断を避けるためエッジを水平に削った荷重板を使用した。

荷重回数の増加にともなって垂直、水平変形量は次第に増加する。破壊以前においてはこの増加は直線的であるが破壊が近づくにつれて増加の程度は大きくなる。この研究では荷重一回当たりの垂直変形量の増加の割合が直線区間のその2.5倍になる点を破壊と定義して処理した。図-9は縦軸に、与えた応力を、横軸に疲労破壊回数を目盛ってそれらの結果を示したものである。いずれも両対数紙上で直線的な関係が得ら

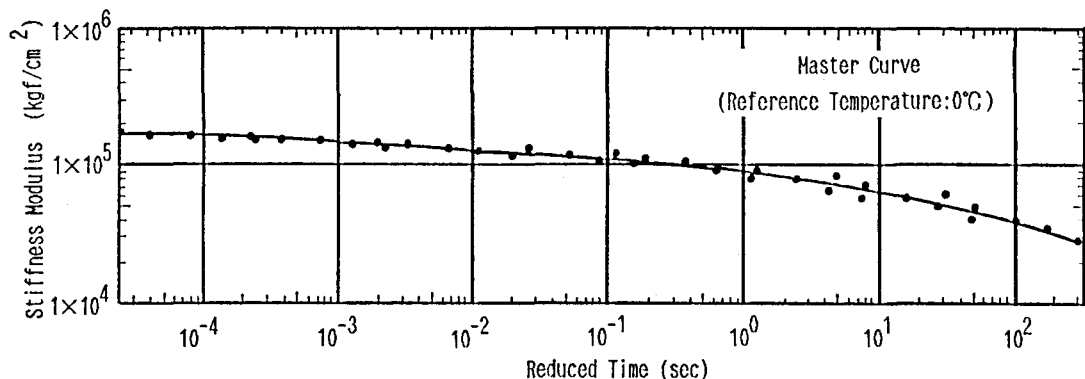


図-8 変形係数のマスターカーブ

れた。この結果によれば、温度の低いところでは高い応力レベルにあっても大きな疲労抵抗を示し、疲労曲線の勾配は高い温度で大になっている。アスファルト混合物は疲労が進むにつれて変形係数が次第に低下してゆく。それを模式図で示したものが図-10である。この低下の程度は温度の低い領域ではあまり顕著ではなく、0℃以下では載荷初期の80ないし90パーセントで破壊が発生するのに対して、5℃以上の温度では60ないし70パーセントに至るまで破壊しない。この現象は在来の研究の結果¹⁶⁾と良く一致している。これらの疲労破壊曲線は次式によって示すことが出来る。

$$N_f = A\sigma^B \quad (9)$$

ここで N_f : 疲労破壊回数
 σ : 与えた応力
 A, B : 定数

これらの定数はこの段階では決定することは出来ないが、破壊回数の多い部分での研究が進めばこれを決定することが可能になろう。なお繰返し載荷時における供試体の発熱に付いての予備的な実験の結果、-5℃、応力10kgf/cm²、1万回載荷で温度変化は見られず、5℃、応力10kgf/cm²で2万回載荷後0.5℃程度であった。これはほとんど無視できる程度と考えられる。

また、疲労試験中のひずみ硬化現象に関しても若干の考察を試みた。この試験ではひずみ速度が大きいので、疲労破壊時には破壊回数が約千回のときでも、その破壊断面は光沢を失うが、試料を数時間室温に放置することによって光沢を完全に回復する。このことはアスファルト混合物にひず

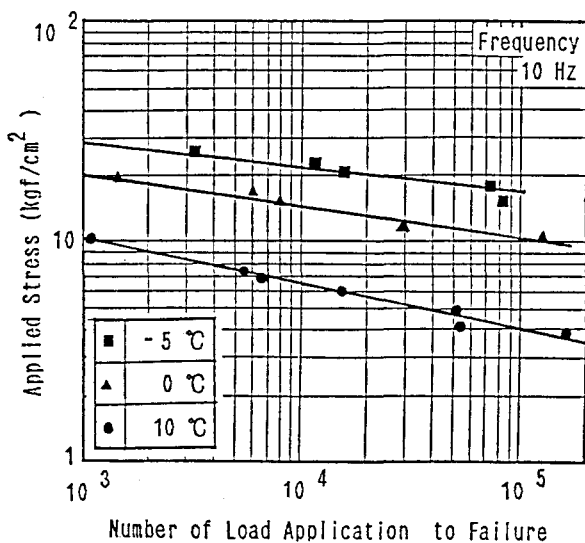


図-9 疲労破壊曲線

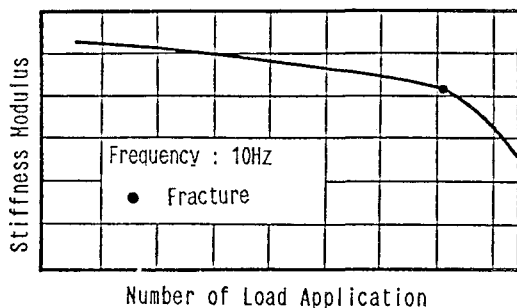


図-10 繰返し載荷中の変形係数の低下

み硬化現象が存在することを示すが、一方またそれが容易に回復する性質のものであることを示す。従ってそれがその後のアスファルト混合物の性状を支配するに至ることはないと思われる。これらは従来あまり明らかにされていなかった大変興味ある結果である。

7. 結 論

Indirect Tension 法によってアスファルト混合物の性状を求めた結果、アスファルト混合物の引張り性状が比較的高い精度で求められた。また動的な非破壊試験によって広範囲な温度領域で変形係数が容易に求められ、標準化の困難であった疲労試験にも充分利用できるものであることが明らかにされた。今後の課題として載荷時間（周波数）の疲労破壊への影響、現場切取り供試体への適用、より温度の高い領域への適用などが検討される必要があろう。

お わ り に

本研究の実施にあたり、高松康広、加藤洋一、横山 稔君の協力を得た。ここに感謝の意を表するものである。なお本研究は昭和 58,59年度文部省科学研究費補助金、試験研究費の交付を受けて実施したものである。

参考文献

1. 山之内 浩, 巻内 浩, 上島 壮 “圧裂試験によるアスファルト混合物の破断強さについて” 土木学会第23回年次学術講演会 講演概要集第 4部門1968.
2. Livneh, M. and E. Shklarsky, “The Splitting Test for Determination of Bituminous Concrete Strength,” Proc. A A P T, Vol.31, 1962..
3. Heukelom, W. , “Observations on the Rheology and Fracture of Bitumens and Asphalt Mixes,” Proc. A A P T, Vol.35, 1966.
4. Epps, J. A., C. L. Monismith, “Influence of Mixture Variables on the Direct Tensile Properties of Asphalt Concrete,” Proc. A A P T, Vol.39, 1970.
5. Hadley, W. O., W. R. Hudson, and T. W. Kennedy, “Correlation of Indirect Tensile Test Results with Stability and Cohesimeter Values for Asphalt-Treated Materials,” Proc. A A P T, Vol.39, 1970.
6. Vila, J. M. and R. L. Terrel, “Influence of Accelerated Climatic Conditioning on Split Tension Deformations of Asphalt Concrete,” Proc. A A P T, Vol.44, 1975.
7. Anagnos, J. M. and T. W. Kennedy, “Practical Method of Conducting the Indirect Tensile Test,” Research Report 98-10, Center for Highway Research, The University of Texas at Austin, Aug. 1972.
8. Gonzalez, G., T. W. Kennedy, and J. N. Anagnos, “Evaluation of the Resilient Elastic Characteristics of Asphalt Mixtures Using the Indirect Tensile Test,” Research Report Number 183-6, Center for Highway Research, The University of Texas at Austin, Nov. 1975.
9. Adedimila, A. S. and T. W. Kennedy, “Fatigue and Resilient Characteristics of Asphalt Mixtures by Repeated-Load Indirect Tensile Test,” Research Report 183-5, Center of Highway Research, The University of Texas at Austin, 1975.
10. Schmidt, R. J., “A Practical Method for Measuring the Resilient Modulus of Asphalt Treated Mixes,” Transport Research Record, No.404, T R B, 1977.
11. Kennedy, T. W., “Characterization of Asphalt Pavement Materials Using the Indirect Tensile Test,” Proc. A A P T, Vol.46, 1977.
12. Cheetham, A., R. Haas, G. Kennenpohl, and D. Beam, “Improved Characterization of Sulfur-Asphalt Materials for Structural Analysis,” S T P, No.724, A S T M, 1980.
13. A S T M. Standard, “Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures” D 4123 -82, 1982.
14. 森古昭博, 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 No. 210, 1973.
15. T. Sugawara, “Mechanical Response of Bituminous Mixture Under Various Loading Conditions” Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements” 1972.
16. 笠原 篤, 菅原照雄 “繰返し載荷過程におけるアスファルト混合物の動的性状の変化について” 土木学会論文報告集 No.235, 1975.