

아스팔트鋪裝의 疲勞破壞特性에 관한 研究

A Study on the Characteristics of Fatigue Failure for Asphalt Pavement

徐 採 演*
Seo, Chae Yeon
李 啓 鶴**
Lee, Kye Hak

Abstract

The main object of this study are to investigate an effect of the characteristics of materials and to seize the behavior of fatigue failure of asphalt pavement with the results of laboratory tests for asphalt mixtures.

In order to prove the practical application of applied methods, the relationships between temperature, depth of asphalt layer, elastic modulus and the number of fatigue failure by the results of elastic theory and fatigue failure envelope are also considered.

要 旨

아스팔트鋪裝의 供用性を 低下시키는 하나의 原因으로 疲勞龜裂破壞를 들 수 있다. 本 研究에서는 아스팔트混合物의 疲勞破壞에 미치는 材料特性의 影響에 대해서 檢討를 하고 密粒度아스팔트 콘크리트에 대한 反覆침變形率制御試驗을 하여 疲勞破壞包絡線을 求했다. 다음에 彈性理論의 結果와 疲勞破壞包絡線으로부터 溫度·아스팔트層두께·下層의 彈性係數와 疲勞破壞回數의 關係를 考察했다.

1. 序 論

1.1 아스팔트鋪裝의 疲勞龜裂破壞

아스팔트鋪裝의 破壞形態는 여러가지가 있으나 一般적으로 다음과 같이 分類할 수 있다. 龜裂破壞는 反覆交通荷重에 의한 疲勞龜裂과 溫度差에 의한 溫度龜裂이 있으며 橫斷凹凸에 의한 破壞는 아스팔트의 流動現象과 交通荷重에 의한 路盤·路床의 沈下를 들 수 있으며 그외에 미끄

림 抵抗의 減少에 의한 破壞·아스팔트層의 剝離에 의한 破壞 등을 말한다. 최근의 鋪裝設計에서는 아스팔트層 두께를 두껍게하는 傾向이 보여 高速道路와 같은 主要幹線道路에서의 橫斷凹凸이 重要한 문제로 擡頭되고 있다.

그러나 아스팔트鋪裝의 overlay의 理由로서는 龜裂發生에 의한 것이 80% 가까이 占하고 있으며⁽¹⁾ 龜裂破壞의 防止도 하나의 重要한 課題라고 말할 수 있다. 龜裂破壞에 있어서도 여러가지의 形態가 있으나 아스팔트層의 疲勞龜裂은 鋪裝構造의 破壞라고 생각되어 鋪裝構造의 維持를 위

* 正會員·全南大學校 工科大學 教授
** 正會員·全南大學校 工科大學 教授

해서는 무엇보다 注意를 기울여야 할 문제이다. 疲勞龜裂은 오래동안의 交通荷重의 反覆載荷에 의해서 일어나는 것으로서 오래전부터 反覆載荷回數와 아스팔트混合物の 疲勞性狀에 관해서는 活潑한 研究가 이루어지고 있다^(2,3). 아스팔트層의 疲勞龜裂의 支配的인 要因에 대해서는 많은 研究가 이루어지고 있으며^(4,5) Pell⁽⁶⁾등에 의한 應力制御疲勞試驗에서는 反覆應力과 破壞回數의 關係를 나타내고 있으며 初期變形率로 實驗結果를 整理하면 材料의 特性에 의하지 않고, 破壞回數는 初期變形率에만 依存하고 있다는 사실이 發表되고 있으며 疲勞破壞는 變形率이 支配的인 要因으로서 생각되어 왔다. 本 研究에서는 疲勞龜裂이 아스팔트層下面에서 생기기 때문에 아스팔트層下面에 생기는 引張應力과 引張變形率의 兩쪽을 고려한 疲勞破壞包絡線을 破壞基準으로 했다.

1.2 아스팔트混合物の 材料特性에 대한 既往의 研究
아스팔트混合物の 材料特性에 관하여 오래전부터 靜的性狀에 대한 各種試驗이 行해졌다. 卽一軸強度試驗⁽⁷⁾ Marshall 安定度試驗⁽⁸⁾ 등이 있다. 그러나 아스팔트混合物の 材料의 動的性狀에 관해서는 지금까지 實用아스팔트만이 評價의 對象으로 되어 있는 것이 現狀이다⁽⁹⁾. 우리 나라에서는 一般的으로 아스팔트鋪裝要綱에 따라 密粒度아스팔트 콘크리트를 使用하고 있다. 또 最適아스팔트量은 Marshall 安定度試驗에 의해서 決定하고 있다. 그러나 여러外國에서는 이와같은 아스팔트混合물을 使用하지 않고 各地域에 적합한 獨自的인 아스팔트를 使用하고 있다. 예를들면 소련에서는 filler 분이 많은 아스팔트 콘크리트, 英國에서는 細砂分이 많은 아스팔트를 使用하고 있다⁽¹⁰⁾. 그러나 우리 나라에서는 氣象條件·交通量·資源의 문제 등 地域條件에 差가 있기 때문에 各地域에 적합한 아스팔트混合물을 고려할 필요가 있다. 따라서 本 研究에서는 疲勞破壞에서 본 아스팔트混合物の 材料特性을 環境·交通條件의 觀點에서 고찰해 본다.

2. 疲勞試驗

2.1 試驗材料

使用材料는 penetration 85~100의 密粒度아

스팔트 콘크리트이다. 使用骨材의 比重 및 아스팔트의 性質, 使用材料의 骨材配合比, 平均空隙率, 아스팔트의 骨材配合比, 粒度分布曲線은 紙面關係上 省略했다.

最適아스팔트量은 마샬安定度試驗(Marshall stability test)에 의해서 密粒度아스팔트 콘크리트를 5%로 했다. 密粒度아스팔트 콘크리트의 경우 마샬安定度試驗의 結果安定度·密度·空隙率·飽和度를 만족하는 最適아스팔트含量은 5.9%였다.

2.2 試驗方法 및 測定方法

試驗裝置는 反覆疇試驗이 可能한 電氣油壓 servo pulsar 이다. 또 試驗溫度의 調整은 냉동기가 달린 恒溫試驗裝置를 使用했다. 本 研究의 疲勞試驗에서는 2點支持된 4×4×30cm(密粒度)의 公試체의 중앙에 正弦의 強制兩振變位를 주게 되는 것이다. 시험중에는 시료중앙의 처짐진폭을 일정하게 유지하였다. 本 시험의 시험주파수는 5Hz, 시험온도는 0~20°C 이며 이와 같은 條件의 범위에서는 公試체는 彈性的 舉動을 한다고 생각해도 支障이 없다. 따라서 本 시험은 變形率制御의 疲勞試驗이라고 할 수 있다.

兩端의 支持部分을 hinge로 하여 端部に 疇모멘트가 일어나지 않도록 노력했다. 支間은 16cm 이다. 아스팔트混合물은 粘彈性體이기 때문에 反覆試驗中에 시료 양단의 支持部 및 中央의 載荷部에 永久變形이 일어나 支持 head 및 載荷 head와 시료의 사이에 微小한 間隔이 생긴다. 이 간격이 생기므로 braun 管 oscilloscope로 관측하고 있는 荷重과 變位の 出力波形이 흐트러지므로 이와같은 상태가 되면 出力波形이 正常的으로 움직이도록 하기 위해 각 head를 조여야 하는데 이때 너무 세게 조이게 되면 그部分에서 公試체가 剪斷破壞를 일으키기 때문에 적당히 조인다. 또 壓密을 감소시키는 뜻에서 載荷面 및 支持面에 30×40mm의 銅板을 붙인다. 試驗中에 測定하는 것은 供試體中央部の 載荷荷重과 變位量이다. 荷重은 試驗機에 備置된 load cell에 의해서 測定하고 變位量은 시험기에 내장되어 있는 差動트란스 및 dial gauge로 測定했다.

2.3 試驗條件

- ① 載荷方法 ; 兩端單純支持의 中央 1 點載荷
- ② 供試體치수 ; 4×4×30cm (密粒度아스팔트 콘크리트)
- ③ 制御方法 ; 正弦波에 의한 兩振變形率制御
- ④ 試驗溫度 · 周波數 ; 0°~20°C, 5Hz

2.4 解析

아스팔트 混合物은 粘彈性物質인데 이 시험은 처짐 反覆兩振試驗으로서 시험중에는 彈性體로서 가정하고 보의 彈性理論에⁽¹¹⁾ 의해서 처짐량을 變形率量으로 修正해서 變形率試驗을 했다. 시험중의 측정은 荷重과 變位量이며 荷重 · 變位量은 둘다 braun 管 oscilloscope에서 읽은 값을 다음의 식(1)·(2)에 代入하여 $\epsilon \cdot \sigma$ 를 구했다.

$$\epsilon = \frac{6yh}{\rho^2} \dots\dots\dots(1)$$

$$\sigma = \frac{3pl}{2bh^2} \dots\dots\dots(2)$$

여기서,

- y ; 中央에서의 처짐량(cm)
- h ; 供試體의 높이(cm)
- ϵ ; 變形率
- σ ; 應力
- p ; 荷重
- l ; 支間
- b ; 供試體의 幅(cm)
- ρ ; 曲率半徑

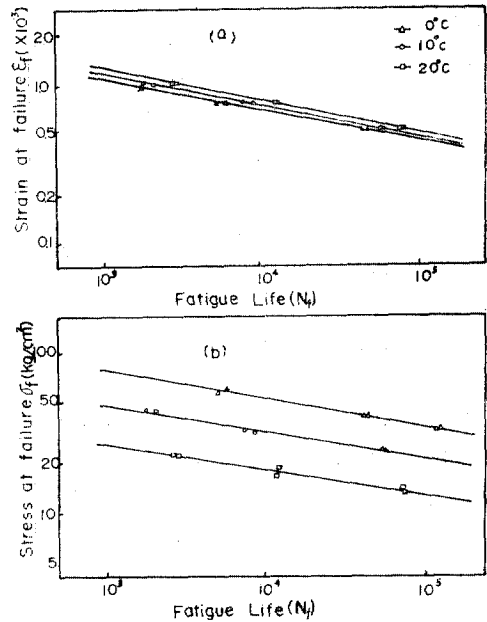
本 研究가 試圖한 變形率制御 疲勞試驗機는 2 點支持 1點載荷型의 보의 靑疲勞試驗機이며 本 試驗機에서는 공시체에 주어지는 變形率로부터 식(1)에 의해서 처짐량을 求해 처짐制御를 했다. 또 측정한 荷重은 식(2)에 의해서 引張應力으로 환산했다. 振幅이 一定한 反覆變形率을 주게 되면 應力은 載荷回數를 증가해감에 따라 느슨하게 감소하며 어느점에서 급격하게 저하한다. 이 장치는 예컨대 破壞點이 명확히 判別되는 것이

큰 特徵이다.

3. 疲勞破壞回數의 豫測

3.1 破壞回數와 破壞變形率 및 破壞應力의 關係

破壞回數(N_f)와 破壞變形率(ϵ_f)·破壞應力(σ_f)와의 관계는 그림 3-1 과 같다. 그림 3-1에서 알 수 있는 바와 같이 $\log N_f$ 와 $\log \epsilon_f$, $\log N_f$ 와 $\log \sigma_f$ 의 관계는 直線關係로 볼 수 있다. 그림 3-1 가운데 표시한 直線은 最小自乘法에 의해서 求한 것이다.



(a) Relationship between Strain and Fatigue Life
(b) Relationship between Stress and Fatigue Life

그림 3-1. Dense graded Asphalt Concrete

直線式을 $\log \epsilon_f = A_1 + B_1 \log N_f$, $\log \sigma_f = A_2 + B_2 \log N_f$ 라고 했을 때의 係數値는 표 3-1 과 같다. 또 그림 3-1로부터 다음과 같은 것을 알 수 있다.

표 3-1. Coefficients by graph of $\epsilon_f - N_f$, $\sigma_f - N_f$

$$\log \epsilon_f = A_1 + B_1 \log N_f, \log \sigma_f = A_2 + B_2 \log N_f$$

Kinds of Mixture	Penetration	Temp.(0°C)	A_1	B_1	A_2	B_2
Dense graded Asphalt Concrete	85~100	0	-2.45	-0.197	2.47	-0.176
		10	-2.40	-0.198	2.17	-0.157
		20	-2.40	-0.192	1.80	-0.136

- ① 溫度·載荷速度를 變化시켜도 直線은 거의 平行이다.
- ② 같은 破壞回數에 대하여 溫度가 높을수록 破壞變形率은 크고 破壞應力은 작다.
- ③ 周波數를 적게 하는 것은 溫度를 上昇시키는 것에 對應한다.
- ④ 같은 周波數·같은 溫度 그리고 같은 破壞回數라면 密度度아스팔트 콘크리트의 破壞變形率은 크게 破壞應力은 작게 된다.

3.2 疲勞破壞包絡線

3-1에서 言及한 바와 같이 破壞回數와 破壞變形率 및 破壞應力이란 兩對數 그래프에서 直線關係에 있다. 그래서 破壞回數를 一定하게 하여 거기에 相當하는 破壞變形率과 破壞應力을 兩對數 그래프에 plot 하면 疲勞破壞包絡線이 그려진다. 密度度아스팔트 콘크리트의 疲勞破壞包絡線은 그림 3-2와 같다. 그림 3-2로부터 疲勞破壞包絡線에 대한 다음과 같은 것을 알 수 있다.

- ① 疲勞破壞包絡線은 溫度·載荷速度에 依存하지 않는다.
- ② 疲勞破壞回數는 破壞應力과 破壞變形率로 決定하는 것이 可能하다.
- ③ N 回 疲勞破壞包絡線內部的 應力·變形率에서 N 回以上의 疲勞破壞回數가 期待된다.

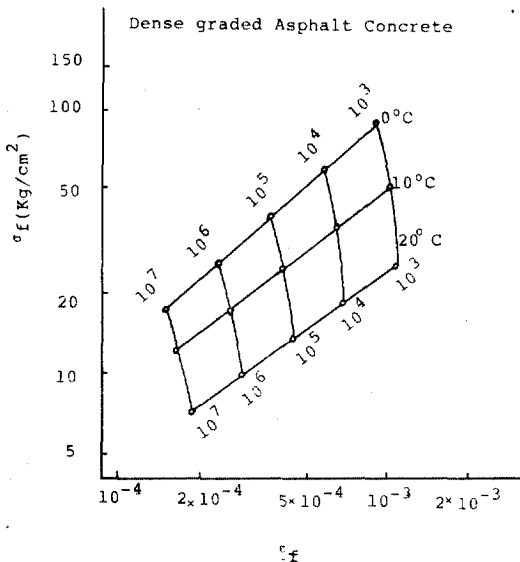


그림 3-2. Fatigue Failure Envelope

- ④ 疲勞破壞包絡線은 低溫이 되면 左上으로 움직이고 高溫이 되면 右下로 움직인다.
- ⑤ 疲勞破壞包絡線은 周波數를 크게 하면 左上으로 움직인다. 이것은 高周波數는 低溫과 對應하게 된다. 即 動的試驗에 있어서도 時間-溫度換算法則⁽¹²⁾이 成立하는 것을 나타내고 있다.

4. 二層理論 解析方法

4.1 Burmister의 層理論

아스팔트 혼합물의 疲勞破壞回數는 아스팔트層 下面의 引張應力과 引張變形率에 의해서 疲勞破壞包絡線으로부터 決定된다. 아스팔트鋪裝은 屬構造이며 引張應力과 引張變形率을 求하려면 層理論이 필요하다. 現在 層構造를 解析하는데에는 彈性理論이 쓰여지고 있다. 鋪裝體를 彈性體로 보는 것은 문제가 많으나 실제의 荷重時間이 극히 짧고 變位가 적은 것 등으로 보아 材料가 彈性的으로 舉動한다고 생각하는 것은 適當하다고 본다.

彈性解析法으로서는 Burmister의 層理論⁽¹³⁾이 唯一한 嚴密解이다. 이 理論은 半無限體의 應力을 求한 Boussinesq의 理論을 多層體에 적용한 것으로서 다음과 같은 假定을 하여 應力과 變位를 求하고 있다.

- ① 各層 各같이 等方·等質인 彈性體이다.
- ② 各層 各같이 水平方向에서는 無限하다. 또 最下層만이 깊이 方向으로 無限하다.
- ③ 最上層의 表面에서는 圓形等分布荷重만이 作用하고 最下層의 無限깊이에 있어서는 應力·變位 各같이 0이 된다.
- ④ 境界面이 거칠 경우 인접層간에 있어서는 剪斷應力·鉛直應力·水平變位·鉛直變位가 같다.

또 그림 4-A에 나타낸 三次元軸對稱彈性論의 一般解는 다음과 같다.

$$u = \int_0^{\infty} \{A_0 \xi + B_0 \sqrt{1+z\xi}\} e^{\xi z} - (C_0 \xi - D_0 \sqrt{1-z\xi}) e^{-\xi z} \xi^2 J_1(\xi r) d\xi$$

(水平變位)

$$w = - \int_0^{\infty} \{ (A_0 \xi - B_0 2\sqrt{1-2\nu} - z\xi) e^{\xi z} + (C_0 \xi + D_0 2\sqrt{1-2\nu} + z\xi) e^{-\xi z} \} \xi^2 J_0(\xi r) d\xi$$

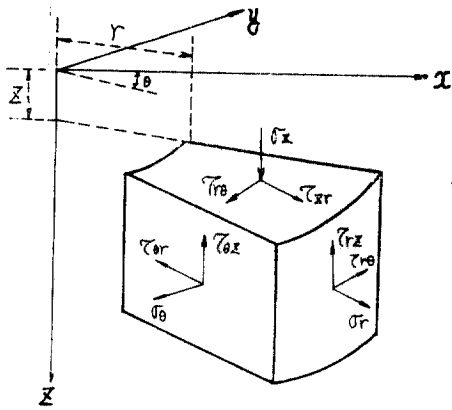


그림 4-A. Stress due to Cylindrical Co-ordinates

$$\begin{aligned}
 & e^{-\xi z} \xi^2 J_0(\xi r) d\xi \quad (\text{鉛直變位}) \\
 \sigma_x = 2\mu \int_0^\infty \{ & (-A_0 \xi + B_0 \overline{1-2\nu-z\xi}) \\
 & e^{\xi z} + (c_0 \xi + D_0 + D_0 \overline{1-2\nu+z\xi}) \\
 & e^{-\xi z} \xi^3 J_0(\xi r) d\xi \quad (\text{鉛直應力}) \} \dots(4.1) \\
 \tau_{rz} = 2\mu \int_0^\infty \{ & (A_0 \xi + B_0 \overline{2\nu+z\xi}) e^{\xi z} \\
 & + (c_0 \xi - D_0 \overline{2\nu-z\xi}) e^{-\xi z} \} \cdot \xi^3 J_1 \\
 & (\xi r) d\xi \quad (\text{剪斷應力}) \\
 \sigma_r = 2\mu \int_0^\infty \{ & [A_0 \xi + B_0 \overline{1+2\nu+z\xi}) \\
 & e^{\xi z} - (c_0 \xi - D_0 \overline{1+2\nu-2\xi}) e^{-\xi z}] \\
 & \xi^3 J_0(\xi r) d\xi - \frac{1}{r} \int_0^\infty \{ (A_0 \xi + B_0 \\
 & \overline{1+z\xi}) e^{\xi z} - (c_0 \xi - D_0 \overline{1-z\xi}) \cdot \\
 & e^{-\xi z} \} \xi^2 J_1(\xi r) d\xi \} \quad (\text{水平應力})
 \end{aligned}$$

여기서

$J_m(\xi r)$; m 次의 第 1 種 Bessel 函數
 r ; 포아손比
 μ ; $E/2(1+r)$

또 그림 4-B 와 같이 圓形等分布荷重이 作用할 경우 이것을 하나의 函數로 나타낸다.

$$f(r) = \begin{cases} P_0 ; r < a \\ 0 ; r > a \end{cases}$$

Hankel 變換을 利用하면 다음과 같은 式이 된

$$\begin{pmatrix} \xi & 1 & -\xi & 1 & \xi & -1 \\ \xi & -2(1-2\nu_1) & \xi & 2(1-2\nu_1) & -\xi & -2(1-2\nu_2) \\ -\mu_1 \xi & \mu_1(1-2\nu_1) & \mu_1 \xi & u_1(1-2\nu_1) & -\mu_1 \xi & -u_2(1-2\nu_2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \\ C_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \dots(4.4)$$

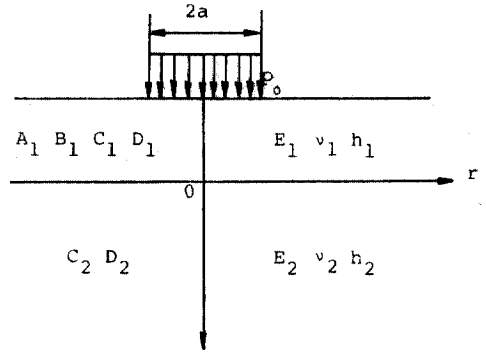


그림 4-B. Two-layered Elastic Body of Structural Model

다.

$$\begin{aligned}
 f(r) &= \int_0^\infty \left[\int_0^\infty f(\lambda) J_0(\xi \lambda) \lambda d\lambda \right] J_0(\xi r) \xi d\xi \\
 &= \int_0^\infty \left[\int_0^a P_0 \cdot J_0(\xi \lambda) \lambda d\lambda \right] J_0(\xi r) \xi d\xi \\
 &= \int_0^\infty \left[\frac{\lambda}{\xi} J_1(\xi \lambda) \right]_0^a J_0(\xi r) d\xi \\
 f(r) &= P_0 a \int_0^\infty J_1(\xi a) J_0(\xi r) d\xi \dots(4.2)
 \end{aligned}$$

4.2 二層構造

本 研究에서는 二層構造理論과 다음 假定들에 의하여 解析 하였다.

- ① 境界面은 完全히 거칠다.
- ② 各層內의 彈性係數는 一定 하다.
- ③ 포아손比는 모두 0.5 이다.

그림 4-B 와 같은 二層構造의 경우 應力·變位는 第 1 層·第 2 層으로 區別해서 생각해야 한다. z 가 無限大로 應力·變位는 消失되므로 $A_2 = B_2 = 0$ 가 된다. 따라서 決定해야 할 常數는 $A_1 \cdot B_1 \cdot C_1 \cdot D_1 \cdot C_2 \cdot D_2$ 의 6 개가 된다. 또 境界面이 거칠다는 假定에서 다음과 같이 말할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 z = -h \text{ 일 때 } & \sigma_{z1} = f(r), \tau_{rz1} = 0 \\
 z = 0 \text{ 일 때 } & \sigma_{z1} = \sigma_{z2}, \tau_{rz1} = \tau_{rz2}, u_1 = u_2, w_1 = w_2 \\
 & \dots(4.3)
 \end{aligned}$$

境界條件을 Matrix 로 表示하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{pmatrix} \mu_1\xi & 2\mu_1\nu_1 & \mu_1\xi & -2\mu_1\nu_1 & -\mu_2\xi & 2\mu_2\nu_2 \\ -\xi e^{-h\xi} & (1-2\nu_1+h\xi)e^{-h\xi} & \xi e^{h\xi} & (1-2\nu_1-h\xi)e^{h\xi} & 0 & 0 \\ \xi e^{-h\xi} & (2\nu_1-h\xi)e^{-h\xi} & \xi e^{h\xi} & -(2\nu_1+h\xi)e^{h\xi} & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ C_2 \\ D_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{P_0 a J_1(\xi a)}{2\mu_1 \xi^3} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$z=0, r=0$ 일때 $\sigma_{z_1} \cdot \sigma_{r_1} \cdot \varepsilon_{r_1}$ 은 다음과 같이 된다.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{z_1} &= 2\mu_1 \int_0^\infty \{-A_1\xi + B_1(1-2\nu_1) + C_1\xi + D_1(1-2\nu_1)\} \xi^3 d\xi \\ \sigma_{r_1} &= \mu_1 \int_0^\infty \{A_1\xi + B_1(1+4\nu_1) - C_1\xi + D_1(1+4\nu_1)\} \xi^3 d\xi \\ \varepsilon_{r_1} &= \frac{1}{E} \{ (1-\gamma_1)\sigma_{r_1} - \nu_1\sigma_{z_1} \} \end{aligned} \right\} \dots (4.5)$$

실제로 계산을 할 경우 ξ 을 변화시켜서 Matrix를 數值的으로 풀어 決定된 常數를 식(4.5)에 代入하여 數值積分을 하면 境界條件을 解析的으로 풀지않아도 應力・變形率을 計算할 수가 있다.

4.3 疲勞破壞包絡線과 層理論을 利用한 疲勞破壞回數 算定法

本 研究에 있어서의 疲勞破壞回數 算定法은 各層의 여러條件을 決定하여 二層理論을 利用해서 아스팔트層 下面의 引張應力과 引張變形率을 求하여 疲勞破壞包絡線으로 부터 疲勞破壞回數를 결정하는 것이다. 포아슨比는 二層 다같이 0.5로 했다.

4.4 荷重條件

輪荷重 p 를 $5t^{(14)}$ 으로 하고 接地半徑 a 는 竹下의 式⁽¹⁵⁾을 利用해서 $a=12+p=17cm$ 로 했다. 또 載荷條件은 圓形等分布載荷로 接地壓 $P = \frac{1000p}{\pi a^2} = 5.51kg/cm^2$ 이다.

4.5 아스팔트層의 彈性係數

아스팔트層의 彈性係數⁽¹⁶⁾은 溫度・載荷速度에 의해서 크게 달라진다. 재하시간을 구하기 위해서는 실험에 의한 應力・變形率 pulse와 實際의 道路에서의 應力・變形率 pulse의 關係를 찾아 낼 필요가 있다.

動的試驗의 載荷時間을 靜的載荷時間으로 變換하는 데에는 f 를 周波數라 할 때 $t = \frac{1}{2\pi f}$ ⁽¹⁷⁾을 利用하려고 한다. 아스팔트 혼합물은 일반적으로 時間-溫度換算法則이 성립하므로 탄성계수의 master curve를 그리는 것이 可能하게 된다. 本 研究에서는 shift factor의 값을 靜的試驗

과 Van der poel의 nomograph⁽¹⁸⁾에서 推定했다. 材料에 대한 탄성계수의 master curve는 그림 4-1과 같다. 이 master curve를 利用하여 주파수와 아스팔트층의 온도를 알면 아스팔트층의 탄성계수를 결정할 수 있다.

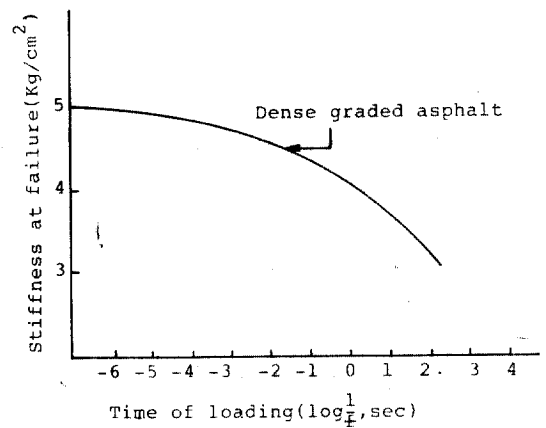


그림 4-1. Master Curve for Stiffness

4.6 下層의 彈性係數

일반적으로 上層路盤材는 粒度調整材料가 쓰여지고 있으며 탄성계수는 대개 $3,000kg/cm^2$ 이며 下層路盤材料는 Crusher run이 쓰여지며 彈性係數는 대개 $2,000kg/cm^2$ 이라고 하는 것이 과거의 연구로 부터 알려지고 있다. 路床 CBR值는 材料 및 自然條件에 의해서 크게 다르며 2에서 20⁽¹⁹⁾정도로 예상하여 CBR值에서 탄성계수에로의 換算을 $E=100CBR$ 라고 하면 탄성계수는 200에서 $2,000kg/cm^2$ 의 사이에 있다고 생각할 수 있다. 二層構造解析에서는 路盤・路床의 탄성계수를 하나로 취급할 필요가 있으며 等值彈性率의 理論을 도입하여 下層의 탄성계수를 500에서 $2,000kg/cm^2$ 로 해서 解析을 했다.

5. 構造解析에서 본 材料特性

5.1 溫度와 彈性係數와의 關係

master curve와 shift factor에서 走行速度를 시속 80km/hr로 했을 때의 材料의 탄성계수와 온도의 關係는 그림 5-1과 같다. 溫度가 높

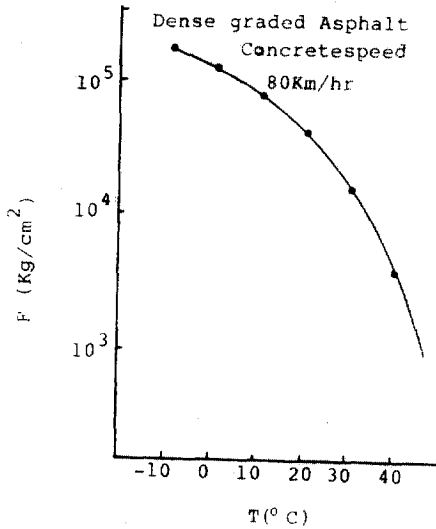


그림 5-1. Relationship between Temperature and Elastic Modulus

올라갈수록 탄성계수는 감소한다. 그리고 감소의 비율은 高温이 될수록 커진다. 이와같은 傾

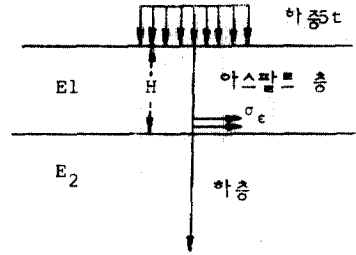


그림 5-A. Pavement Section

向은 아스팔트층이 많은 재료일수록 크다.

5.2 二層構造의 引張應力과 引張變形率

二層構造의 鋪裝體斷面은 그림 5-A 와 같다. Burmister의 層理論을 材料에 適應 시키기 위하여 다음과 같은 條件을 提示 했다.

- ① 溫度 T ; 0°C , 10°C , 20°C , 30°C , 40°C
- ② 아스팔트層두께 H ; 5cm, 10cm, 15cm, 20cm
- ③ 下層의 탄성계수 E_2 ; $500\text{kg}/\text{cm}^2$, $1,000\text{kg}/\text{cm}^2$

표 5-1. Results of Structural Analysis and Number of Fatigue Failure(Dense graded Asphalt Concrete)

T $E_1(\text{kg}/\text{cm}^2)$	H (cm)	$E_2=500\text{kg}/\text{cm}^2$					$E_2=1,000\text{kg}/\text{cm}^2$				
		σ (kg/cm^2)	ϵ	N_f (回)	垂直應力 (kg/cm^2)	처짐 (mm)	σ (kg/cm^2)	ϵ	N_f (回)	垂直應力 (kg/cm^2)	처짐 (mm)
0°C 130,000	5	-89.8	-4.54×10^{-4}	1.46×10^6	1.88	1.55	-65.7	-3.35×10^{-4}	7.71×10^4	2.55	0.913
	10	-42.2	-2.13×10^{-4}	7.68×10^5	0.652	0.857	-34.7	-1.76×10^{-4}	2.21×10^5	0.964	0.528
	15	-24.6	-1.24×10^{-4}	1.28×10^7	0.329	0.586	-21.0	-1.07×10^{-4}	2.74×10^7	0.503	0.367
	20	-16.2	-8.15×10^{-5}	1.15×10^8	0.199	0.444	-14.1	-7.14×10^{-5}	2.32×10^8	0.309	0.281
10°C 77,000	5	-71.3	-6.13×10^{-4}	6.43×10^5	2.38	1.76	-49.3	-4.30×10^{-4}	4.18×10^4	3.12	1.02
	10	-36.5	-3.12×10^{-4}	2.13×10^5	0.878	1.00	-29.0	-2.51×10^{-4}	6.95×10^5	1.28	0.613
	15	-21.9	-1.87×10^{-4}	3.19×10^6	0.454	0.695	-18.3	-1.57×10^{-4}	7.88×10^6	0.686	0.433
	20	-1.46	-1.25×10^{-4}	2.51×10^7	0.278	0.530	-12.5	-1.08×10^{-4}	5.41×10^7	0.429	0.334
20°C 40,000	5	-50.4	-8.46×10^{-4}	2.28×10^5	3.08	2.02	-31.7	-5.49×10^{-4}	2.10×10^4	3.85	1.15
	10	-29.4	-4.89×10^{-4}	3.81×10^4	1.25	1.21	-22.2	-3.76×10^{-4}	1.47×10^5	1.77	0.732
	15	-18.5	-3.06×10^{-4}	4.38×10^5	0.671	0.855	-14.8	-2.50×10^{-4}	1.33×10^6	0.994	0.530
	20	-12.6	-2.09×10^{-4}	3.23×10^6	0.419	0.660	-10.4	-1.75×10^{-4}	8.80×10^6	0.637	0.416
30°C 16,000	5	-26.6	-1.17×10^{-3}	6.71×10^2	4.09	2.38	-13.6	-6.57×10^{-4}	1.32×10^4	4.72	1.30
	10	-19.9	-8.53×10^{-4}	3.53×10^3	1.96	1.55	-13.4	-6.01×10^{-4}	2.02×10^4	2.61	0.916
	15	-13.6	-5.78×10^{-4}	2.41×10^4	1.12	1.13	-10.0	-4.41×10^{-4}	1.09×10^5	1.60	0.695
	20	-9.72	-4.11×10^{-4}	1.53×10^5	0.726	0.895	-7.44	-3.26×10^{-4}	5.36×10^5	1.07	0.563
40°C 4,000	5	-5.15	-1.29×10^{-3}	4.80×10^2	5.14	2.78	-0.432	-5.37×10^{-4}		5.34	1.46
	10	-7.76	-1.55×10^{-3}	1.78×10^2	3.31	2.12	-3.40	-8.98×10^{-4}	3.50×10^3	3.95	1.22
	15	-6.55	-1.26×10^{-3}	5.29×10^2	2.17	1.69	-3.51	-8.16×10^{-4}	6.06×10^3	2.81	1.03
	20	-5.16	-9.70×10^{-4}	2.09×10^3	1.51	1.42	-3.00	-6.66×10^{-4}	1.85×10^4	2.04	0.904

/cm², 1,500kg/cm², 2,000kg/cm²

온도를 알면 그림 5-1에서 재료의 아스팔트층의 탄성계수 E_1 을 알게 된다. 위의 조건을 2층構造에 적용하여 아스팔트層下面의 引張應力 σ 와 引張變形率 ϵ 의 解析結果는 표 5-1과 같다. 또 표 5-1에는 아스팔트 表面의 처짐량과 아스

팔트層下面의 垂直應力을 나타냈다. 단 表面처짐은 5t 輪荷重이 通過할 때의 彈性처짐이다. 그림 5-2, 5-3은 溫度와 引張變形率·溫度와 引張應力圖이다.

그림으로 부터 다음과 같은 것을 알수 있다.

① 溫度가 높ی 올라갈수록 引張變形率은 증

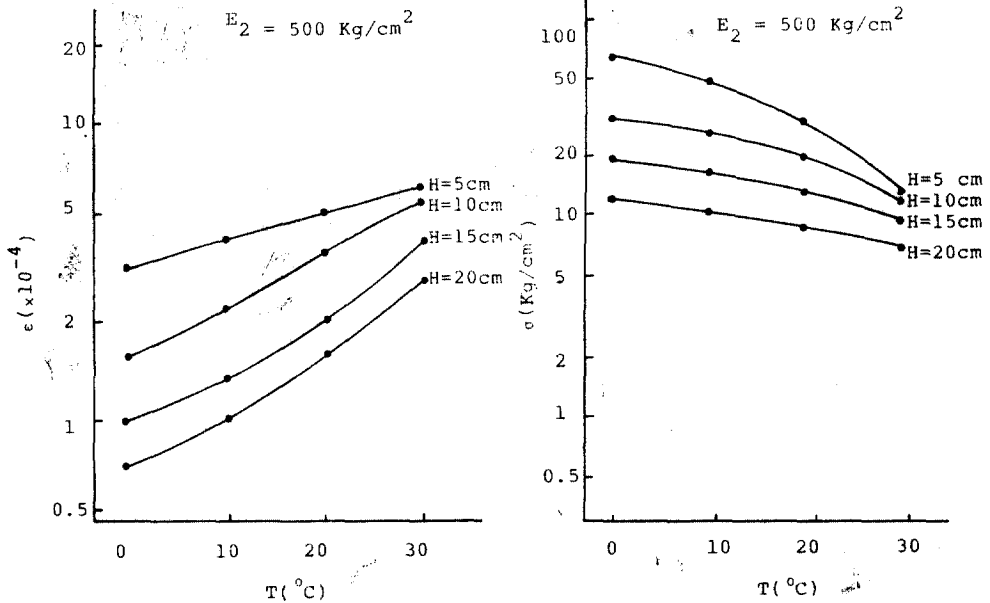


그림 5-2. Relationship between Temperature and Strain, Stress

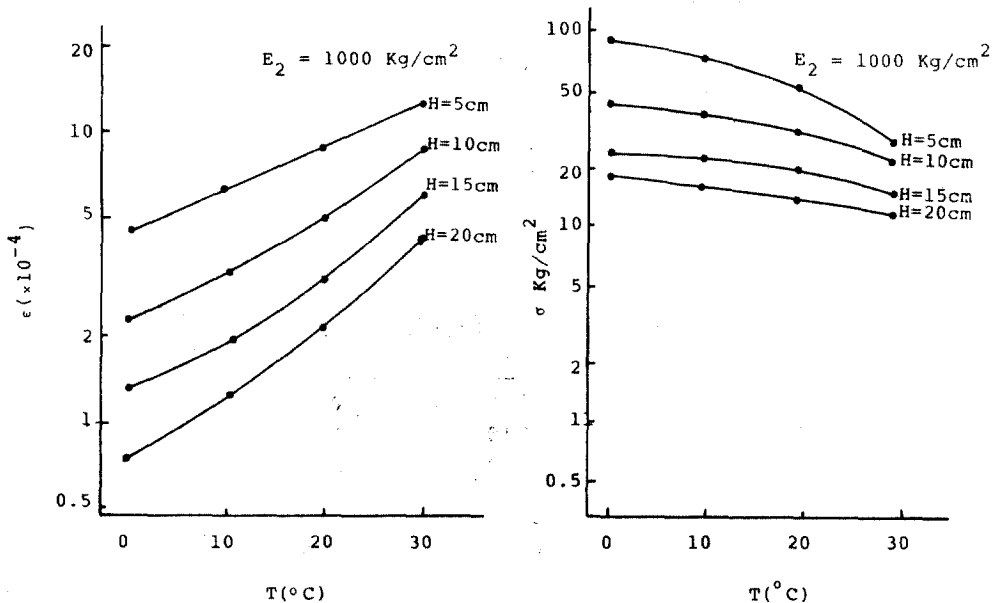


그림 5-3. Relationship between Temperature and Strain, Stress

가하며 引張應力은 減少한다.

- ② 아스팔트層두께가 두꺼워지면 引張應力·引張變形率 다같이 減少하는 傾向이 있다.
- ③ 下層의 彈性係數가 커지면 引張應力·引張變形率 다같이 減少한다.

④ 아스팔트層두께가 두꺼워지면 引張變形率은 溫度의 影響을 크게 받으며 引張應力은 溫度의 影響을 그다지 받지 않는다.

⑤ 鋪裝構造와 溫度가 같으면 引張變形率은 크게 되며 逆으로 引張應力은 작게 된다.

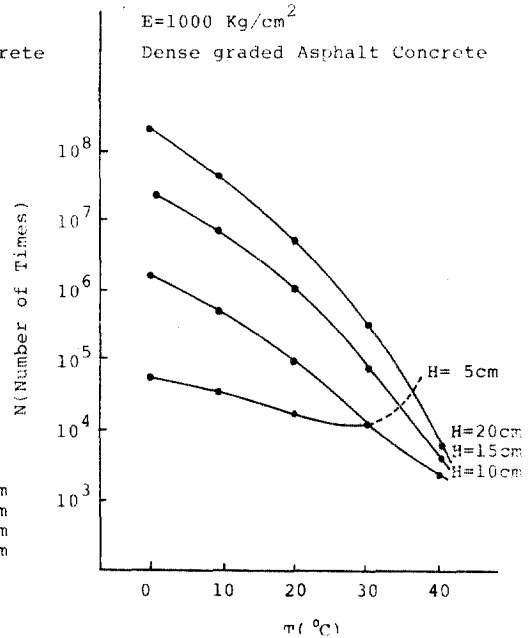
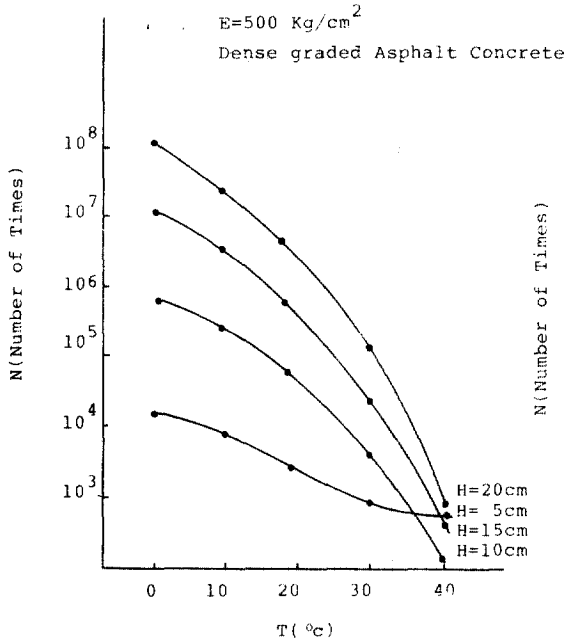


그림 5-4. Relationship between Temperature and Number of Fatigue Failure

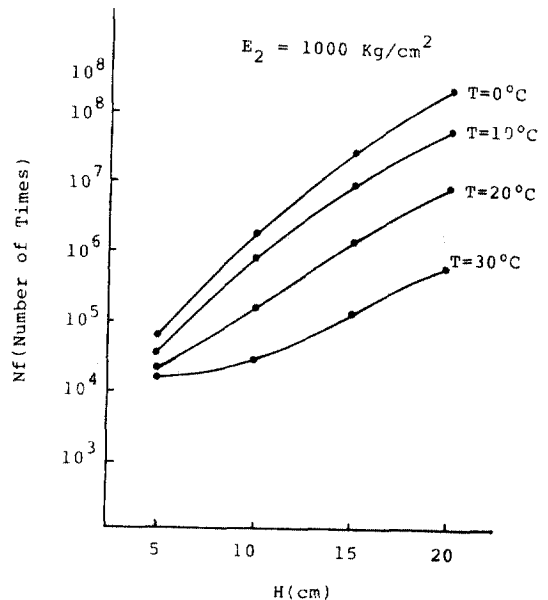
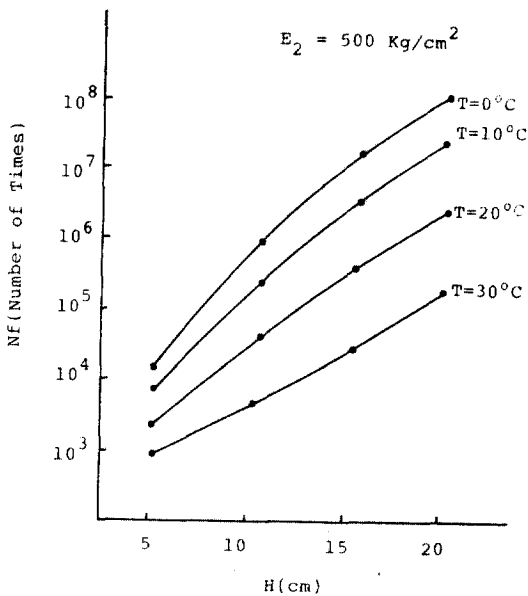


그림 5-5. Relationship between Depth of Asphalt Layer and Number of Fatigue Failure

이와같은 傾向은 高溫이 되면 성립하지 않는다. 그 理由는 溫度가 높이 올라감에 따라 아스팔트 혼합물의 탄성계수가 低下하기 때문이다.

5.3 疲勞破壞包絡線과 層理論을 利用한 疲勞破壞回數 算定結果

5-2에서 求한 引張應力·引張變形率과 疲勞破壞包絡線에서 求한 疲勞破壞回數 N_f 는 표 5-1과 같다. 疲勞破壞回數와 溫度의 關係를 그림 5-4에 나타낸다. 疲勞破壞回數와 아스팔트層 두께의 關係를 그림 5-5에 나타낸다.

그림으로부터 다음과 같은 것을 알 수 있다.

- ① 피로파괴회수는 온도가 높을수록 작게 되며 어느 온도이상이면 크게 된다. 이것은 高溫이 되면 引張應力·引張變形率이 極度로 작아지기 때문이다.
- ② 아스팔트層두께가 두꺼워지면 어떤 재료든지 피로파괴회수는 크게 되는 경향이 있으며 일반적으로 재료에 의한 파괴회수의 차는 작게 되며 아스팔트層두께가 얇아지면 피로파괴회수는 작게 된다.
- ③ 下層의 彈性係數가 클수록 疲勞破壞回數도 크게 된다.

그러나 이것들은 어디까지나 彈性計算의 結果이며 下層이 引張力을 받을 것으로 생각되나 실제의 道路下層이 引張力을 받는다고는 생각되지

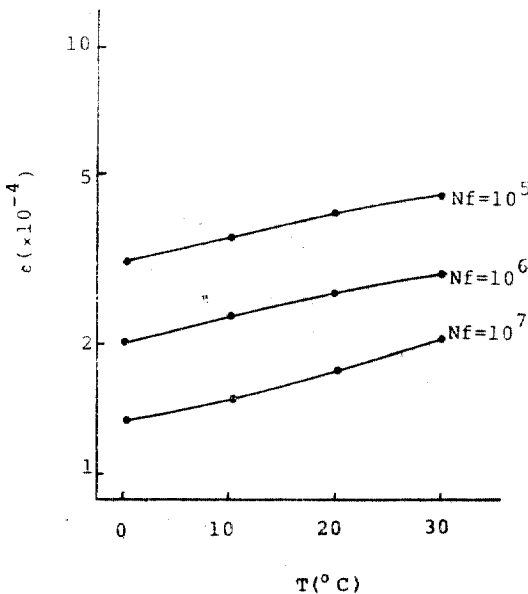


그림 5-6. Allowable Strain

는 않고 解析結果와는 다른 상태라고 생각 할 수 있다.

5.4 材料의 許容應力과 許容變形率

그림 5-6, 5-7은 疲勞破壞回數가 10⁵회, 10⁶회, 10⁷회의 密粒度아스팔트 콘크리트의 온도와 引張變形率, 온도와 引張應力의 關係를 나타내고 있다. 即 그림 5-6은 어느溫度의 許容變形率, 그림 5-7은 許容應力을 나타내고 있다. 그림으로부터 다음과 같은 것을 알 수 있다.

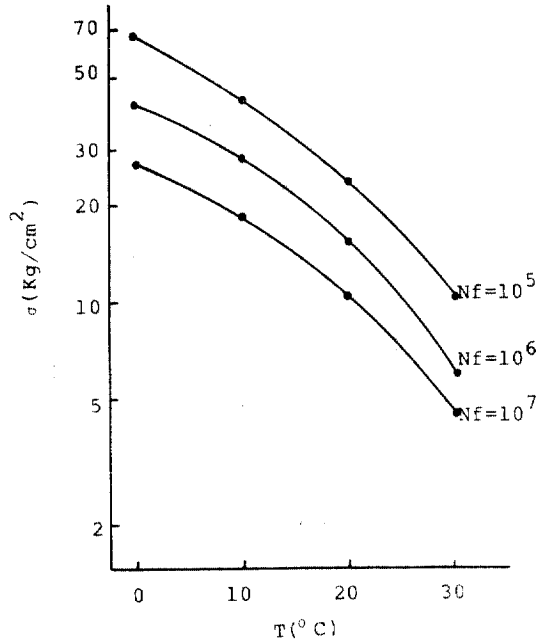


그림 5-7. Allowable Stress

- ① 아스팔트層에 의해서 材料의 許容變形率은 대략 決定된다. 이것은 아스팔트 혼합물속에 骨材는 變形하지 않고 아스팔트만이 變形한다고 생각 할 수 있는 것이 하나의 理由라고 생각된다.
- ② 材料의 許容應力은 許容變形率과 같이 아스팔트層에 의해서 決定되지 않는다. 아스팔트 혼합물속의 應力은 骨材의 맞물림 상태나 接觸상태에 의해서 크게 左右된다. 그러기 때문에 許容應力은 아스팔트層만이 아니고 骨材의 配合比에 의해서 크게 影響을 받는다고 생각된다.

密粒度아스팔트 콘크리트는 許容變形率은 크게 되고 반대로 許容應力은 작게 된다. 그러나

재료의 피로파괴회수의 相異를 許容變形率・許容應力으로 부터 判斷할 수 없다. 왜냐 하면 같은 溫度에 대해서 材料의 彈性係數는 다르며 層構造가 같을지라도 彈性二層解析에 의한 아스팔트層下面의 變形率과 應力은 달라지기 때문이다. 即 재료의 相異에 의한 疲勞破壞回數의 大小를 算定하는 데에는 재료의 許容變形率・許容應力과 彈性解析에 의한 變形率・應力을 함께 생각하지 않으면 안된다.

6. 結 論

疲勞破壞包絡線과 層理論을 적용해 보면 鋪裝體의 疲勞破壞回數가 求해진다. 이 結果로부터 다음과 같은 것을 알 수 있다.

- ① 溫度가 높아지면 疲勞破壞回數가 작아지는 傾向이 있다.
- ② 아스팔트層 두께가 두꺼워지면 疲勞破壞回數가 크게 된다.
- ③ 路盤・路床의 強度가 커지면 疲勞破壞回數도 커진다.
- ④ 破壞回數에 대한 許容變形率은 아스팔트量에 의해서 대략 決定된다고 보여 지는데 許容應力은 骨材 및 아스팔트의 복잡한 관계가 되어있어 일률적으로 決定할 수 없다.
- ⑤ 疲勞破壞回數에서 생각하면 아스팔트量의 增加는 일반적으로 疲勞破壞回數를 크게 하는 傾向이 있다. 그러나 실제 鋪裝에의 適用範圍는 限定되어 있어 綜合的 判斷으로는 輕交通道路에서 路盤・路床의 強度가 큰 地域에서 効果的이라고 생각된다.

그렇지만 本 研究에서는 構造解析을 彈性二層理論을 適用하고 있으며 實際의 道路의 狀態와는 약간 다르다고 생각된다. 彈性理論에서는 特히 溫度가 높을 경우 혹은 아스팔트層 두께가 얇을 경우에는 下層이 큰 引張應力을 받게 되지만 實際의 路盤・路床이 引張力을 받는다고는 생각하지 않는다. 그러기 때문에 그와 같은 경우에는 本 研究의 結果로는 信賴性이 낮으며 今後 檢討의 餘地가 있다고 생각된다. 또 本 研究에서는 材料特性에 관해서 疲勞破壞를 主體로 檢討했으나 다른 破壞要因에 대해서도 考察할 필요가 있다고 본다.

감사의 말

본 연구는 1985년도 한국과학재단의 연구과제지원에 의해 수행되었으며 지원해주신 한국과학재단 당국에 깊은 감사를 드립니다.

參 考 文 獻

1. Monismith, C.L., "Rutting Prediction in Asphalt Concrete Pavements", *TRR*, No. 616. pp. 2~7, 1976.
2. Barksdale, R.D., "Practical Application of Fatigue and Rutting Tests on Bituminous Base Mixes", *Proc. of AAPT*, Vol. 47, pp. 115~159, 1978.
3. Van Dijk, W., "Practical Fatigue Characterization of Bituminous Mixes", *Proc. of AAPT* Vol. 44, pp. 38~74, 1975.
4. Miner, M.A., "Cumulative Damage in Fatigue", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 12, Part a, pp. 159~164, 1975.
5. Kallas, B.F. and Puzinauskas, V.P., "Flexure Fatigue Tests on Asphalt Paving Mixtures", American Society for Testing and Materials, Special Technical Publication, No. 508, 1972.
6. Pell, P.S., Fatigue Characteristics of Bitumen and Bituminous Mixes. *Int. Conf. on the Structural Design of Asphalt Pavements*, pp. 310~323, 1962.
7. Kingham, R.I. and B.F. Kallas, Laboratory Fatigue and its Relationship to Pavement Performance. *Proc. 3rd Int. Conf. on the Structural Design of Asphalt Pavements*, pp. 849~865, 1972.
8. J.A. Epps and C.L. Monismith, "Influence of Mixture Variable on the Flexural Fatigue Properties of Asphalt Concrete" *Proc. AAPT* Vol. 38, pp. 423~463, 1969.
9. W. Heukelom and A.J.G. Klomp, "Road Design and Dynamic Loading" *Proc. Assoc. of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 33 pp. 72~125, 1964.
10. W. Van Dijk, "Practical Fatigue Characterization of Bituminous Mixes" *Proc. AAPT* Vol. 44, pp. 84~101, 1975.

11. Yoder, E.J. and Witczak. M.W., "*Principles of Pavement Design*, 2nd Ed. *John Wiley & Sons*, pp. 529~ , 1975.
12. 菅原照雄 外, 土木材料 III (アスファルト), 共立出版, pp. 40~42, 1977.
13. Burmister, D.M. "The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Soil Systems", *Jour. of Applied Physics*, Vol. 16, pp. 89~96, 126~127, 296~302, 1945.
14. D. Croney, "*The Behavior of Road Materials under Repeated Loading*" The Design and Performance of Road Pavements, Chapter 13, pp. 368~392, 1973.
15. 竹下春見, "アスファルト舗装に関する対数グラフの應用", 道路, pp. 726~731, 1965.
16. 山内幸夫, "アスファルト舗装のわたち堀れ", アスファルト, Vol. 21, No. 117, pp. 37~45, 1978. P.S. Pell, J.M. Hanson, "Behavior of Bituminous Road Base Materials under Repeated Loading" *Proc. AAPT* Vol. 42, pp. 200~229, 1973.
17. 菅原照雄 外, 土木材料 III (アスファルト), 共立出版, pp. 38, 1977.
18. C. Van der Poel, "A General System Describing the Viscoelastic Properties of Bitumens and its Relation to Routine Test Data" *Journal of Applied Chem.* Vol. 4, Part 5, pp. 221~236, May, 1954.
19. "*Shell Design Charts for Flexible Pavement*". 5th Reprint 1972, Shell Int. Petroleum Co., Ltd.
(接受: 1986. 9. 12)