

# 처짐곡선을 이용한 3층 아스팔트 포장 구조체의 물성 추정에 관한 연구

## A Study on Evaluation of Moduli of 3 Layered Flexible Pavement Structures using Deflection Basins

김	수	일*
Kim,	Soo	Il
김	문	겸**
Kim,	Moon	Kyum
유	지	형***
Yoo,	Ji	Hyeung

### Abstract

An inverse self-iterative procedure is developed to estimate layer moduli of 3 layered flexible pavement structures from FWD deflection basins. The theoretical deflection basins of pavement structures obtained by full factorial design are used for the parametric study on the characteristics of deflection basins and the regression analysis. The factorial design is performed for asphalt pavement structures with stabilized base layer and granular base layer, respectively. The initially assumed layer moduli by regression equations and relations between the rate of change of moduli and deflections are used in the procedure to ensure efficiency and accuracy of self-iterative model. The SINELA computer program is used for inverse self-iterative applications to determine theoretical responses. The computer program of this procedure is coded for personal computers and is verified through numerical model tests.

### 요 지

본 연구에서는 falling weight deflectometer(FWD)시험의 표면 처짐곡선으로부터 3층 아스팔트 포장 구조체의 물성을 추정할 수 있는 역산반복기법을 개발하였다. 안정처리기층과 쇄석기층을 갖는 포장구조체에 대한 요소설계를 실시하여 일련의 해석모델을 설정하고, 다층탄성해석에 의해 이들 해석모델의 이론적 처짐곡선을 산정하여 처짐특성 분석 및 탄성계수 추정식을 구하였다. 반복역산시 추정식에 의한 각 층 탄성계수를 초기 가정치로 하고, 탄성계수 변화율과 처짐 변화율의 관계를 구하여 이를 탄성계수 보정에 사용하였다. 다층탄성해석은 전산 프로그램 SINELA를 이용하였다. 처짐특성 분석을 통한 보다 효율적인 역산반복기법을 전산화하였으며, 수치모델을 통해 그 신뢰성 및 적용성을 검증하였다.

\*정회원 · 연세대학교 공과대학 교수, 토목공학과

\*\*정회원 · 연세대학교 공과대학 조교수, 토목공학과

\*\*\*정회원 · 연세대학교 대학원 박사과정, 토목공학과

## 1. 서 론

산업이 급속도로 발전함에 따라 교통량의 증가와 차량의 증량화로 인하여 기존 도로포장의 파손 및 내구력 저하가 가중되고 있는 현실을 살펴 볼 때, 보다 신속하고 과학적인 도로포장의 유지관리 체계의 개발은 매우 시급한 문제이다. 상용중인 도로의 보수시기 결정, 잔존수명 예측, 덧씌우기 설계 등 일련의 효율적인 도로 유지보수를 위해서는 도로포장의 상태를 정확히 평가하여야 한다. 이를 위해 가장 중요한 것은 포장구조체 각 층의 물성을 정확히 추정하는 것이다.

포장구조체 각 층의 물성을 추정하기 위하여, 포장체를 파괴하면서 실시되었던 CBR시험이나 평판재하시험에 비하여 대단히 신속하며 경제적인 비파괴시험들이 개발되어 사용되고 있다. 비파괴시험방법인 Benkelman beam을 이용한 포장체 표면의 처짐측정방법이 오래전부터 사용되어 왔지만 보다 신속하고 과학적인 비파괴시험방법이 요구되었다. 진동하중을 이용한 비파괴시험방법으로 포장구조체의 평가를 위한 노력은 1933년 German Research Society for Soil Mechanics에 의해 시도되기 시작하여 1960년 Heukelom, W.와 Foster, C. R.<sup>(1)</sup>이 본격화시켰다. 이러한 비파괴시험방법으로 1963년 Bretonniere, S.<sup>(2)</sup>가 deflectometre a boulet를 제작하면서 충격하중에 의한 비파괴시험방법인 falling weight deflectometer(FWD)가 개발되어 현재 dynatest 800 FWD와 같은 여러 유형의 FWD가 개발되어 사용되고 있다<sup>(3)</sup>. 또한 1960년대 말 미국의 Ohio도로국에서 포장평가를 위해 정현진동하중에 의한 비파괴시험방법인 dynaflect가 사용된 이후<sup>(4)</sup>, 같은 유형인 road rator, WES vibrator, FWHA vibrator 등이 개발되어 사용되고 있다.

이러한 진동을 이용한 비파괴시험방법은 자료가 풍부하며 경험에 의한 한계 처짐을 기준으로 도로포장을 평가하는 Benkelman beam시험과의 상관관계를 맺음으로써 독자적인 평가보다는 Benkelman beam시험방법에 의존하여 왔다. 그러나 Burmister, D. M.<sup>(5, 6)</sup>이 1943년과 1945년에 층탄성이론을 제시한 이후, 이를 바탕으로 1973년 Shell에 의한 BISTRO와 BISAR<sup>(7)</sup>, 1972년 Albom, G.에 의한 ELSYM5<sup>(8)</sup>, 1984년 Huang, Y. H.에 의한 SINELA<sup>(9)</sup>

등 다층탄성해석 전산 프로그램이 개발됨으로써 도로포장구조체의 이론적 해석이 가능해 졌다. 또한 Dorman, G.M.과 Edwards, J. M.<sup>(10)</sup>이 1967년 최대처짐은 포장구조체의 두께와 물성에 깊은 관계가 있으므로 최대처짐을 내하력 산정의 기준으로 사용하기에는 부적합함을 밝힘으로써 처짐을 이용한 경험적 평가방법은 변형을 또는 용력을 기준으로 하는 해석적 방법으로 전환되었으며, 진동을 이용한 비파괴시험 방법에 의한 포장구조체의 물성을 추정하는 연구가 활발히 진행되기에 이르렀다. Vaswani, N.K.<sup>(11)</sup>는 1971년 분산도(spreadability)와 최대처짐치로부터 2층 아스팔트 포장체의 물성을 추정할 수 있는 도표를 제시하였으며, 1979년 Koole, R.C.<sup>(12)</sup>는 기층의 물성을 아는 경우 FWD시험의 처짐율(deflection ratio)로부터 노상과 표층의 물성을 추정할 수 있는 일련의 도표를 제시하였다. 이러한 도해적 방법에 의해 추정된 물성은 그 신뢰성이 결여되어 있다. 따라서 1977년 Irwin, L.H.등<sup>(13)</sup>은 측정처짐치와 다층이론에 의해 산정된 처짐이 일치할 때까지 탄성계수를 보정하면서 현위치 탄성계수를 결정하는 역산반복기법(inverse self-iterative procedure)을 제시하였으며, Uddin, W.등<sup>(14)</sup>은 1983년 강성 포장구조체의 현위치 물성을 추정하기 위하여 이와같은 방법을 적용한 전산 프로그램을 개발하였다. 비파괴시험방법 및 포장체의 유형에 따라 많은 전산 프로그램이 개발되었으나 이들은 초기탄성계수 가정에 따라 정도 및 효율성이 좌우된다. 1985년 Uddin, W.등<sup>(15)</sup>은 일련의 이론적 처짐곡선을 회귀분석하여 얻은 각 층의 탄성계수와 처짐치의 상관관계식으로부터 초기탄성계수를 가정하는 개선된 방법을 제안하였다.

본 연구에서는 우리나라에서 상용중인 아스팔트 포장구조체의 단면과 물성에 대하여 이론적 처짐특성을 분석함으로써 FWD에 의한 처짐곡선으로부터 3층 아스팔트 포장구조체 각 층의 물성을 추정할 수 있는 전산 프로그램을 개발하고, 그 타당성을 수치모델을 통해 검증하고자 한다.

## 2. 다층탄성이론

포장구조체와 같이 물성이 상이한 층으로 이루어진 구조체를 해석할 수 있는 층탄성이론은 Burmister<sup>(5, 6)</sup>에 의해 발표되었으며, Michelow, J.<sup>(16)</sup>는

이를 확장하여 원형분포하중이 작용하는 경우 매트릭스를 사용한 다층탄성이론을 정립하였다. 그림 1은 최하단의 반무한층위에 일련의 수평층들로 구성된 다층탄성구조체를 3차원 극좌표계로 표시한 것이다.

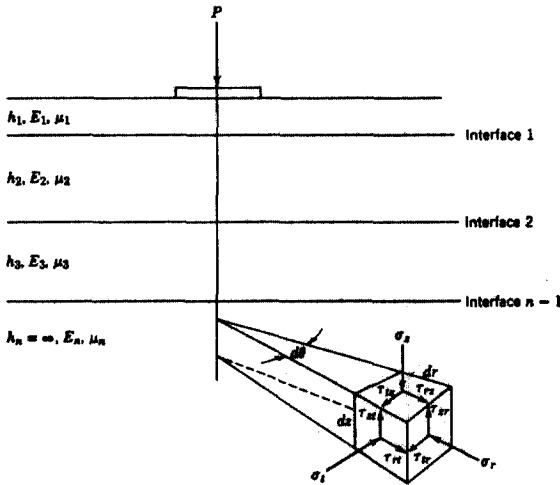


그림 1. Generalized multilayered elastic system

그림 1에서 각 층은 균질, 등방인 이상적인 탄성체로서 수평방향으로 무한하게 놓여 있으며, 모든 층들은 완전점합되어 있어 각 층의 경계면에서 변위 및 응력은 연속적으로 가정한다. 이러한 구조체의 임의의 지점에서의 수직응력,  $\sigma_z$ , 전단응력,  $\tau_{rz}$  수직변위,  $W$ , 수평변위,  $U$ 는 식(1)~식(4)와 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma_z = \frac{\partial}{\partial z} \left[ (2-\mu) \nabla^2 \phi - \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right] \quad (1)$$

$$\tau_{rz} = \frac{\partial}{\partial r} \left[ (1-\mu) \nabla^2 \phi - \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right] \quad (2)$$

$$W = \frac{1+\mu}{E} \left[ 2(1-\mu) \nabla^2 \phi - \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right] \quad (3)$$

$$U = -\frac{1+\mu}{E} \frac{\partial^2 \phi}{\partial r \partial z} \quad (4)$$

여기서,  $E$ 는 탄성계수,  $\mu$ 는 포아송비이며,  $\phi$ 는 평형방정식과 적합방정식을 만족하는 Love의 응력함수(stress function)로서 식(5)와 같이 0차 제1종 Bessel 함수,  $J_0(mr)$ 과 적분상수  $A, B, C, D$ 를 포함하는 식이다

$$\phi(r, z, m) = J_0(mr) \left[ (A+Bz)e^{mz} + (C+Dz)e^{-mz} \right] \quad (5)$$

식(5)를 식(1)~식(4)에 대입하면,  $i$ 번째 층에서의 응력 및 변위는 식(6)~식(9)와 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma_z^i = m^2 J_0(mr) \left\{ (1-2\mu) [B_i e^{mz} + D_i e^{-mz}] - m [(A_i + B_i z) e^{mz} + (C_i + D_i z) e^{-mz}] \right\} \quad (6)$$

$$\tau_{rz}^i = m^2 J_1(mr) \left\{ 2\mu [B_i e^{mz} - D_i e^{-mz}] + m [(A_i + B_i z) e^{mz} + (C_i + D_i z) e^{-mz}] \right\} \quad (7)$$

$$W^i = \frac{1-\mu_i}{E_i} m J_0(mr) \left\{ 2(1-2\mu_i) [B_i e^{mz} - D_i e^{-mz}] - m [(A_i + B_i z) e^{mz} + (C_i + D_i z) e^{-mz}] \right\} \quad (8)$$

$$U^i = \frac{1+\mu_i}{E_i} m J_1(mr) \left\{ B_i e^{mz} + D_i e^{-mz} + m [(A_i + B_i z) e^{mz} - (C_i + D_i z) e^{-mz}] \right\} \quad (9)$$

식(6)~식(9)를 매트릭스형태로 나타내면 식(10)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \sigma_z^i \\ \tau_{rz}^i \\ U^i \\ W^i \end{bmatrix} = [K(\mu_i, E_i)] [M(z, \mu_i)] [D(z)] \begin{bmatrix} A_i \\ B_i \\ C_i \\ D_i \end{bmatrix} \quad (10)$$

경계면에서 응력과 변위는 연속적이므로  $i$ 번째 경계면에서 식(11)이 성립된다.

$$\begin{bmatrix} A_i \\ B_i \\ C_i \\ D_i \end{bmatrix} = [K(\mu_i, E_i)] [M(h_i, \mu_i)] [D(h_i)] \begin{bmatrix} A_{i+1} \\ B_{i+1} \\ C_{i+1} \\ D_{i+1} \end{bmatrix} = [K(\mu_{i+1}, E_{i+1})] [M(h_i, \mu_{i+1})] [D(h_i)] \begin{bmatrix} A_{i+1} \\ B_{i+1} \\ C_{i+1} \\ D_{i+1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

매트릭스,  $[X_i]$ 를 식(12)와 같이 놓으면, 식(11)은 식(13)과 같이 쓸 수 있다.

$$[X_i] = 4(\mu_i - 1) [M(h_i, \mu_i)]^{-1} [K(\mu_i, E_i)]^{-1} [K(\mu_{i+1}, E_{i+1})] [M(h_i, \mu_{i+1})] \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} A_i \\ B_i \\ C_i \\ D_i \end{bmatrix} = \frac{[D(h_i)]^{-1} [X_i] [D(h_i)]}{4(\mu_i - 1)} \begin{bmatrix} A_{i+1} \\ B_{i+1} \\ C_{i+1} \\ D_{i+1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

무한 깊이에서의 응력 및 변위는 0으로 생각할 수 있으므로 식(1)~식(4)에 의하면  $n$ 번째 층의 적분상수,  $A_n = B_n = 0$ 이 됨을 알 수 있다.

또한 표면에  $P(m)J_0(mr)$ 의 등분포하중이 작용

한다면  $(\tau_{rz})_{z=0}=0$ 이고,  $(\sigma_z^1)_{z=0}=-P(m)J_0(mr)$   
 이므로 식(14)와 식(15)가 성립한다.

$$mA_1 + 2\mu_1 B_1 + mC_1 - 2\mu_1 D_1 = 0 \quad (14)$$

$$mA_1 + (2\mu_1 - 1)B_1 - mC_1 + (2\mu_1 - 1)D_1 = P(m)/m^2 \quad (15)$$

식(14)와 식(15)를 매트릭스로 나타내고, 식(13)과 순차적으로 결합하면 식(16)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ P(m)/m^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & 2\mu_1 & m & -2\mu_1 \\ m & 2\mu_1 - 1 & -m & 2\mu_1 - 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_n \\ D_n \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\frac{\pi^{-1}}{\pi} \frac{[D(h_i)]^{-1} [X_i] [D(h_i)]}{4(\mu_i - 1)} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ C_n \\ D_n \end{bmatrix}$$

식(16)으로부터  $C_n, D_n$ 을, 식(13)에 의해 순차적으로  $A_i, B_i, C_i, D_i$ 를 구하게 되면, 식(1)~식(4)를  $m$ 에 관해 수치적분함으로써 응력 및 변위를 산정할 수 있다.

반경이  $a$ 인 원형등분포하중,  $P_0$ 가 작용하는 경우 Hankel변환을 적용하면  $P(m) = aP_0 J_1(ma)$ 이 되므로 변위 및 응력의 산정식은 식(17)~식(20)과 같다.

$$\sigma_z = aP_0 \int_0^\infty J_1(ma) \sigma_z^i dm \quad (17)$$

$$\tau_{rz} = aP_0 \int_0^\infty J_1(ma) \tau_{rz}^i dm \quad (18)$$

$$W = aP_0 \int_0^\infty J_1(ma) W^i dm \quad (19)$$

$$U = aP_0 \int_0^\infty J_1(ma) U^i dm \quad (20)$$

### 3. 처짐특성 분석

#### 3.1 해석 모델

현재 우리나라의 도로 설계 및 해석에 사용되고 있는 AASHTO설계법은 바퀴압이 75~85 psi인 18 kips단축하중을 표준축하중으로 하고 있다<sup>(17)</sup>. 비파괴시험중 재하하중 조절이 가능한 FWD를 사용하게 되면 표준하중과 같은 9 kips(4100 kgf)의 시험하중을 재하함으로써 응력상태에 따른 비선형을 고려하지 않고도 포장구조체의 물성을 추정할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 그림 2와 같이 아스팔트 표층, 쇄석 또는 안정처리기층, 반무한층으로 가정된 노상등 3층 아스팔트 포장구조체 표면에 접지반경이 15cm(5.9")이고, 접지압이 5.8kgf/cm<sup>2</sup>(82.3psi)인 하중이 작용하는 해석모델을 설정한다<sup>(18)</sup>. 처짐의 측정위치는 FWD시험을 고려하여 하중재

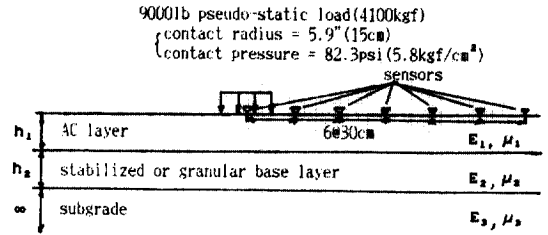


그림 2. Analysis model

하 중심부터 30cm간격으로 7개 지점으로 한다.

처짐특성을 분석하기 위하여 그림 2와 같은 하중조건하의 구조체에 대하여 안정처리기층과 쇄석기층을 갖는 경우로 나누어 요소설계(factorial design)를 하였으며, 이는 표 1과 같다. 각 층의 두께는 우리나라에서 상용중인 아스팔트 포장의 설계단면을 고려하고, 탄성계수는 각 층의 재료에 대한 가능한 범위내<sup>(15, 19, 18)</sup>에서 각각 상, 중, 하의 3개 수준으로 요소설계를 하였다. 포아송비는 일정 재료에 대해 작은 범위에 있으며, 탄성해석시 큰 영향을 미치지 않으므로 아스팔트 표층 및 안정처리기층은 0.30, 쇄석기층은 0.35, 노상토는 0.40으로 가정하였다<sup>(17)</sup>. 표 1에서 각 층의 탄성계수만의 ( ) 안의 값은 쇄석기층인 경우이다.

표 1. Factorial design in the case of stabilized base

factors	levels	AC layer	base layer	subgrade
thickness (cm)	low	5	10(10)	∞
	medium	15	20(20)	∞
	high	25	30(30)	∞
modulus (kgf/cm <sup>2</sup> )	low	10000	4000(1500)	500
	medium	40000	20000(4000)	1500
	high	70000	40000(7000)	3000
Poisson's ratio		0.30	0.30(0.35)	0.40

( ): granular base

표 1의 안정처리기층을 갖는 경우와 쇄석기층을 갖는 경우 각각에 대해 층 두께와 탄성계수의 조합은 3<sup>3</sup>으로 243개씩 총 486개의 해석모델이 얻어진다. 본 연구에서는 486개의 해석모델에 대해 다층탄성해석 프로그램인 SINELA를 이용하여 이론적 처짐곡선을 구하고, 이를 처짐특성 분석 및 탄성계수 추정식을 위한 자료로 사용한다.

### 3.2 탄성계수와 두께가 처짐곡선에 미치는 영향

다층탄성구조체에 일정 하중의 재하로 인해 발생하는 처짐은 각 층의 탄성계수 및 두께에 의존한다. 각 층의 탄성계수와 두께가 처짐곡선에 미치는 영향을 살펴 보기 위하여 표 1의 중간수준에 대한 해석모델을 기준모델로 삼고, 탄성계수에 대해서는 해당층의 탄성계수만, 두께에 대해서는 해당층의 두께만 기준모델의 2배 및 0.5배로 변화시켰을 때 SINELA에 의해 구한 처짐곡선을 기준모델에 대한 처짐곡선과 비교하였다. 그림 3과 그림 4는 안정처리기층을 갖는 경우 탄성계수와 두께가 처짐곡선에 미치는 영향을 각각 도시한 것이다.

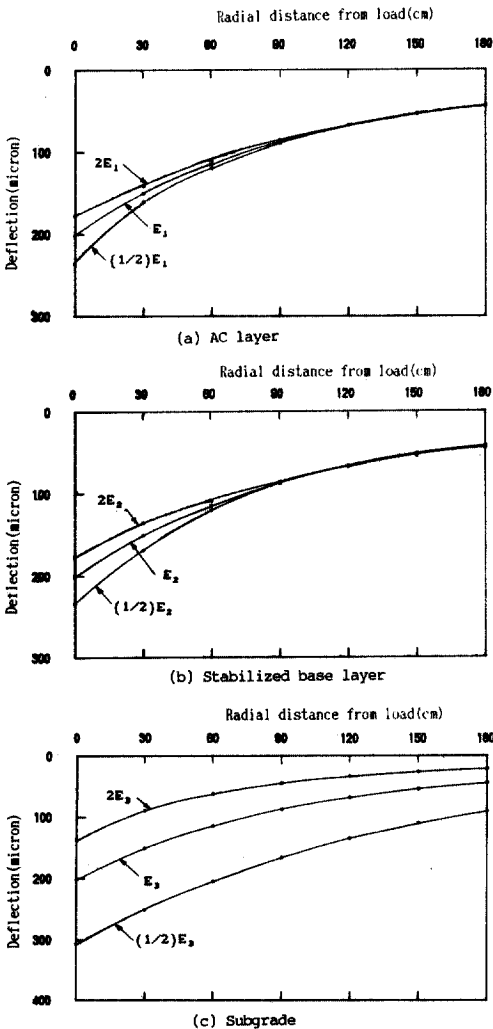


그림 3. Effect of rate of change in moduli on theoretical FWD deflections

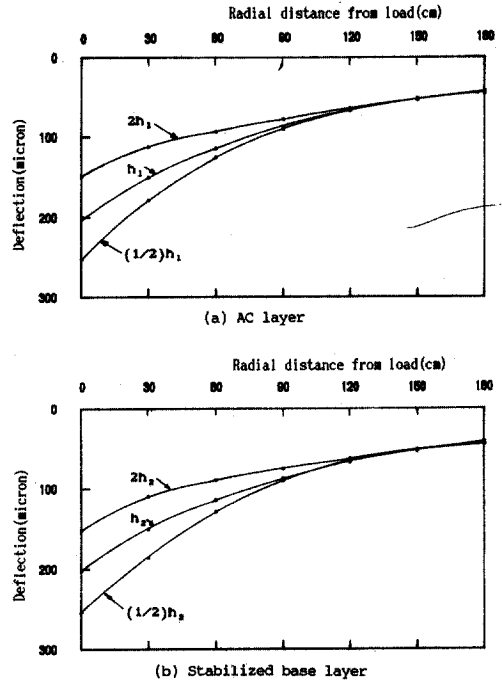


그림 4. Effect of rate of change in thicknesses on theoretical EWD deflections

그림 3에서 보는 바와 같이 노상토의 탄성계수는 처짐곡선에 가장 큰 영향을 미치는 반면, 표층 및 기층의 탄성계수는 하중재하 지점의 처짐( $W_1$ )에 가장 큰 영향을 준다. 그러나 거리가 멀어질수록 그 영향은 감소하여 하중재하 지점에서 180cm 떨어진 지점의 처짐( $W_7$ )에는 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 또한 표층 및 기층의 탄성계수가 감소함에 따라 처짐곡선의 기울기는 증가한다. 그림 4에서 보듯이 표층의 두께는 하중재하 지점의 처짐( $W_1$ )에, 기층의 두께는 하중재하 지점에서 30cm 떨어진 지점의 처짐( $W_2$ )에 가장 큰 영향을 미치며,  $W_7$ 에는 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 쇄석기층을 갖는 경우에도 동일한 경향을 보여 준다.

### 3.3 처짐곡선에 의한 탄성계수 추정

포장구조체 각 층의 두께 및 탄성계수는 3.2절에서 분석한 바와 같이 각 측정점의 처짐치와 처짐형상에 밀접한 관계를 보여 주고 있다. 하중재하 지점에서 180cm 떨어진 지점의 처짐치,  $W_7$ 은 노상토의 탄성계수,  $E_3$ 에만 영향을 받으므로 식(21)과 같이  $E_3$ 를  $W_7$ 의 함수로 나타낼 수 있다. 또한 표층의

탄성계수,  $E_1$ 과 기층의 탄성계수,  $E_2$ 는 처짐형상에 의존하며, 처짐형상은 각 층의 두께에 영향을 받으므로,  $E_1$ 과  $E_2$ 는 식(22)와 같이 각 층의 두께와 처짐형상을 나타내는 일련의 처짐지수의 함수로 표시할 수 있을 것이다.

$$E_3 = f(W_j) \quad (21)$$

$$E_i = f(h_i, W_j, F_k, TS_k, SPR) \quad i=1, 2 \quad (22)$$

여기서  $W_j$ 는 FWD의  $j$ 번째 감지기에서의 처짐,  $h_i$ 는  $i$ 층의 두께,  $F_k$ 와  $TS_k$ 는 처짐형상의 기울기를 나타내는 처짐지수로서 식(23), 식(24)와 같으며, SPR은 분산도(spreadability)로서 식(25)와 같다.

$$F_k = \frac{W_{k-1} - W_{k+1}}{W_k} \quad (23)$$

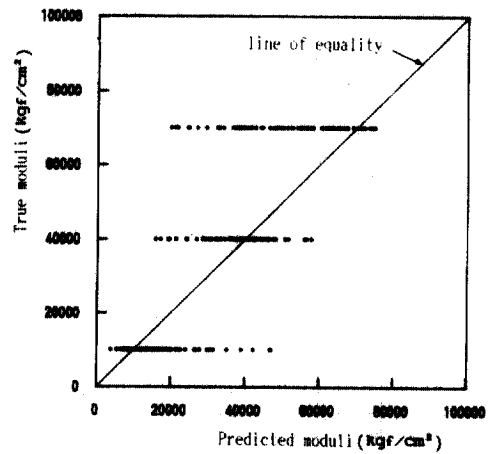
$$TS_k = \frac{W_1 - W_k}{R_k} \quad (24)$$

$$SPR = \frac{\sum_{i=1}^7 W_i}{7W_1} \times 100(\%) \quad (25)$$

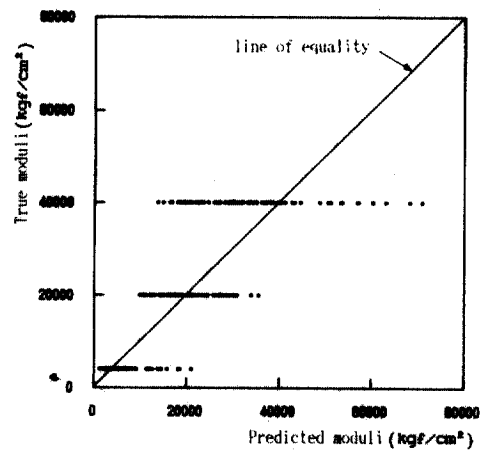
본 연구에서는 식(21) 및 식(22)와 같은 각 층의 탄성계수 추정식을 구하기 위해서 표 1의 요소설계에 의한 486개 해석모델의 이론적 처짐곡선들을 회귀분석의 통계자료로 사용하였다. 회귀분석은 일련의 독립변수들중에서 종속변수와 상관성이 높은 변수부터 순차적으로 선택하여 결정계수,  $r^2$ 가 가장 높은 회귀곡선식을 구하는 SPSS Package중 STEPWISE 프로그램(19)을 이용하였다. 이와 같은 방법으로 구한 각 층의 탄성계수 추정식을 안정처리기층을 갖는 경우는 표 2에, 쇠석기층을 갖는 경우는 표 3에 나타내었다. 여기서 처짐의 단위는 micron, 두께는 cm, 탄성계수는  $\text{kgf/cm}^2$ 이다.

표 2와 표 3에서 보는 바와 같이 노상토의 탄성계수에 대해서는  $r^2$ 가 0.99이상으로 상관성이 극히 높고, 표층 및 기층의 탄성계수에 대해서는  $r^2$ 가 0.80 이상으로 비교적 높은 상관관계를 보여 준다. 탄성계수 추정식의 신뢰성을 살펴 보기 위하여 안정처리기층을 갖는 경우 243개 해석모델의 탄성계수와 이에 대한 이론적 처짐곡선으로부터 본 연구의 회귀분석에서 구한 추정식에 의해 산정된 탄성계수의 분포도를 그림 5에 도시하였다. 쇠석기층을 갖는 경우도 비슷한 분포를 보여 준다.

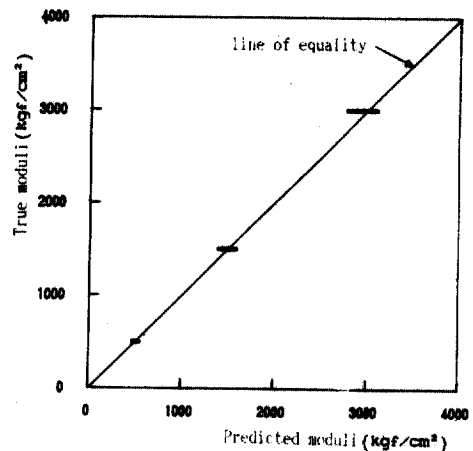
그림 5에서 보듯이 노상토의 탄성계수는 최대오차 9.8% 이내로 추정이 가능하지만, 표층 및 기층의



(a) AC layer



(b) Stabilized base layer



(c) Subgrade

그림 5. Scatter plot of predicted and true moduli

II 2 Stepwise regression for moduli of pavement structure with stabilized base

dependent variable	independent variable	coefficient	$\beta$	t-value	sig. t	$r^2$
$\log_{10} (E_3)$	$\log_{10} (W_7)$	-0.97259	-0.99859	-291.900	0.0000	0.99718
	const.	4.76149	-	829.809	0.0000	
$\log_{10} (E_1/E_3)$	$\log_{10} (F_2)$	-3.49968	-1.88261	-12.088	0.0000	0.80371
	$F_3$	1.72625	1.17389	9.236	0.0000	
	$TS_6$	0.07561	0.18890	5.619	0.0000	
	$F_4^2$	-1.88039	-0.82783	-6.597	0.0000	
	$SPR^2$	-0.00028	-0.70424	-4.316	0.0000	
	$1/h_1$	0.63431	0.09281	2.607	0.0097	
	const.	0.82939	-	5.855	0.0000	
$\log_{10} (E_2/E_3)$	$\log_{10} (F_3)$	-5.70448	-2.33897	-19.611	0.0000	0.85725
	$h_1$	-0.04225	-0.65414	-20.530	0.0000	
	$\log_{10} (h_2)$	-1.35021	-0.50438	-15.713	0.0000	
	$F_4^2$	1.57114	0.62743	6.457	0.0000	
	$1/F_2$	-0.31779	-0.62528	-11.007	0.0000	
	const.	2.09914	-	10.214	0.0000	

II 3 Stepwise regression for moduli of pavement structure with granular base

dependent variable	independent variable	coefficient	$\beta$	t-value	sig. t	$r^2$
$\log_{10} (E_3)$	$\log_{10} (W_7)$	-0.99888	-1.02682	-148.319	0.0000	0.99838
	$W_7^3$	0.00000001	0.02988	4.316	0.0000	
	const.	4.7880	-	486.186	0.0000	
$\log_{10} (E_1/E_3)$	$\log_{10} (F_2)$	-4.12293	-2.34920	-23.974	0.0000	0.89778
	$\log_{10} (F_3)$	5.25086	2.18063	11.435	0.0000	
	$F_4$	-2.29515	-0.76898	-8.989	0.0000	
	$1/h_1$	3.74935	0.54858	18.088	0.0000	
	$F_3^2$	-0.17627	-0.33114	-4.572	0.0000	
	$1/TS_4^2$	-0.08580	-0.06749	-2.722	0.0070	
	$F_2^2$	0.02183	0.12090	2.688	0.0077	
	$h_2^2$	0.00007	0.04949	2.171	0.0309	
	const.	2.95392	-	12.317	0.0000	
$\log_{10} (E_2/E_3)$	$\log_{10} (W_7)$	1.59197	1.23890	10.317	0.0000	0.84985
	$F_3^2$	-0.07893	-0.16762	-2.511	0.0127	
	$\log_{10} (h_1)$	-0.27078	-0.18659	-2.267	0.0243	
	$h_2$	-0.01226	-0.23648	-8.327	0.0000	
	$1/TS_2$	-3.12297	-1.97128	-12.434	0.0000	
	$1/TS_5$	1.07929	0.84504	3.419	0.0007	
	$\log_{10} (TS_6)$	-1.54717	-1.00653	-5.244	0.0000	
	$1/TS_3^2$	0.80228	0.57072	3.354	0.0009	
	$h_1^2$	-0.00051	-0.29993	-3.799	0.0002	
	$1/F_4^2$	0.07000	0.32245	5.179	0.0000	
const.	-0.90408	-	-3.420	0.0007		

탄성계수는 최대오차가 각각 370%와 426%로 본 추정식을 직접 사용하기에는 곤란할 것으로 판단된다.

#### 4. 역산반복기법

포장구조체의 표층과 기층에 대해서 3.3절에서 언급한 바와 같이 추정식만에 의해 추정된 탄성계수는 그 정도가 낮다. 따라서 본 연구에서는 각 층의 탄성계수를 가정하고 이에 대한 이론적 처짐곡선을 다층탄성해석에 의해 산정한 후 실측 처짐곡선과 비교함으로써, 그 차가 허용범위내에 들 때까지 탄성계수를 반복적으로 보정하여 현위치 탄성계수를 추정하는 역산반복기법(inverse self-iterative procedure)을 적용한 전산프로그램을 개발하였다.

##### 4.1 탄성계수 변화율에 따른 처짐 변화율

역산반복기법의 적용시 탄성계수를 반복적으로 보정하여야 하는데, Uddin등<sup>(15)</sup>은 층별로 일정한 보정계수를 적용하고 있어 비효율적인 방법을 사용하고 있다. 본 연구에서는 탄성계수 변화율에 대한 처짐 변화율의 관계를 밝힘으로써, 보다 효율적인 보정계수를 적용하였다.

그림 3과 그림 4에서 보듯이  $W_7$ 은  $E_3$ 에,  $W_1$ 은  $E_1$ 과  $h_1$ 에,  $W_2$ 는  $E_2$ 와  $h_2$ 에 가장 큰 영향을 받는다. 따라서 각 층의 두께와 탄성계수가 상이한 9개의 해석모델을 기준모델로 하고, 해당 층의 탄성계수만  $\pm 5\%$ 까지는 1%씩,  $\pm 10\%$ 부터  $\pm 90\%$ 까지는 10%씩 증감시켰을 때 산정된 이론적 처짐을 기준모델의 처짐에 대한 백분율로 구하였다. 이와 같은 결과에 대해서 노상의 탄성계수 변화율  $\Delta E_3$ 는  $\Delta W_7$ 의 함수로, 표층의 탄성계수 변화율,  $\Delta E_1$ 은  $\Delta W_1$ 과  $h_1$ 의 함수로, 기층의 탄성계수 변화율,  $\Delta E_2$ 는  $\Delta W_2$ 와  $h_2$ 의 함수로 하여 원점을 지나는 다차 회귀분석(polynomial regression)을 실시하였다. 각 회귀곡선식은 식(26)~식(28)과 같다.

$$\Delta E_3 = -1.24997(\Delta W_7) + 0.00942(\Delta W_7)^2 - 0.00002(\Delta W_7)^3 \quad (26)$$

$$\Delta E_1 = (-45.650/h_1 - 1.682)(\Delta W_1) + (2.83/h_1 - 0.086)(\Delta W_1)^2 + (-0.047/h_1 + 0.002)(\Delta W_1)^3 \quad (27)$$

$$\Delta E_2 = (-114.100/h_2 - 1.800)(\Delta W_2) + (9.031/h_2 - 0.153)(\Delta W_2)^2 + (-0.199/h_2 + 0.005)(\Delta W_2)^3 \quad (28)$$

식(26)~식(28)을 역산반복기법 적용시 탄성계수 보정계수로 사용한다.

#### 4.2 역산반복기법의 알고리즘

역산반복기법에서는 초기 가정된 탄성계수에 대한 이론적 처짐곡선이 시험하중으로 인해 발생된 포장구조체 표면의 실측 처짐곡선과 허용오차 내에 들 때까지 각 층의 탄성계수를 반복 보정하여 현위치 탄성계수를 결정한다. 해석시 각 층의 두께는 설계도면 또는 시험시 보링자료에 의해 알 수 있으므로 기지의 값으로 하고, 포아송비는 재료 특성을 고려하여 가정한다. 하중조건은 그림 2와 같이 FWD시험하중으로 7개 축점에서 처짐을 산정한다. 역산은 이와 같은 조건하에서 각 층의 탄성계수를 적절히 가정하여야 하는데, 본 프로그램은 초기 가정치를 임의로 입력시킬 수 있으나, 반복역산

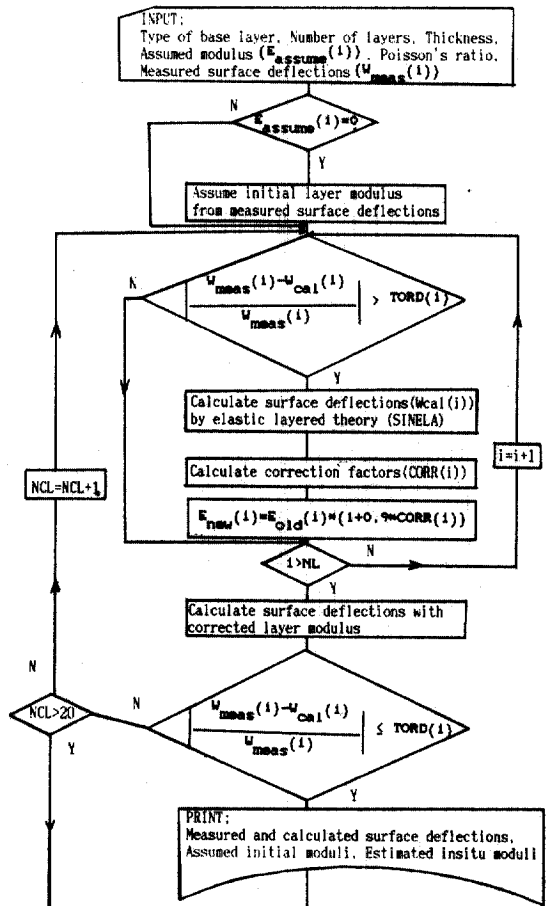


그림 6. Flow chart



을 효율적으로 하기 위하여 본 연구에서 제안한 추정식으로부터 산정된 탄성계수를 초기가정치로 한다.

반복역산은 초기 가정 탄성계수에 대한 이론적 처짐과 실측 처짐의 차이에 의해 노상, 표층, 기층 순으로 탄성계수를 보정하게 되며, 다음 층의 처짐 산정시 전 층의 보정 탄성계수가 사용된다. 전체 층의 탄성계수가 보정되면 1회 보정이 완료된다.

$W_1$ 은 표층,  $W_2$ 는 기층의 탄성계수 변화에 가장 큰 영향을 받으며  $W_7$ 은 노상의 탄성계수 변화에만 의존하므로, 이를 각 층의 탄성계수 보정의 비교 기준으로 하였다. 각 층의 탄성계수는 식(29)에 의해 보정하게 되며, 여기서  $CORR(i)$ 는 식(26) - 식(28)의  $\Delta E_i$ 로서 상관성을 고려하여 90%만 보정하였다.

$$E_{new}(i) = E_{old}(i)(1 + 0.9CORR(i)) \quad (29)$$

1회의 보정 탄성계수에 대한 이론적 처짐과 실측처짐의 차가 허용오차내에 들지 않으면 같은 방법으로 허용오차내에 들때까지 반복 수행한다. 허용오차는 처짐의 실측치에 대한 산정치의 백분율로 나타내며, 노상에 관련된  $W_7$ 에 대해서는  $TORD(3) = 0.1\%$ , 표층에 대한  $W_1$ 은  $TORD(1) = 0.5\%$ , 기

층에 대한  $W_2$ 는  $TORD(2) = 0.3\%$ 로 하였다. 그림 6은 이와 같은 역산방법을 전산화한 프로그램의 흐름도를 나타낸 것이다. 다층탄성해석은 Huang<sup>9)</sup>에 의해 개발된 전산프로그램 SINELA를 사용하였다.

### 5. 수치모델에 의한 검증

본 연구에서 개발한 반복역산의 신뢰성 및 타당성을 검증하기 위하여 현실성 있는 3층 아스팔트 포장구조체의 모델을 안정처리기층을 갖는 경우와 쇄석기층을 갖는 경우로 나누어 선정하고, 이에 대한 수치검증을 실시하였다. 각 수치모델에 대한 이론적 처짐곡선을 실측 처짐곡선으로 간주하고, 본 연구의 반복역산에 의해 추정된 탄성계수를 수치모델 본래의 탄성계수와 비교하였다. 실제 가능한 34개 수치모델에 대한 수치검증을 실시하였으며, 8회 보정에 의해 노상은 최대 0.3%내로, 표층과 기층은 최대 10%내로 매우 양호한 역산 결과를 보여주었다. 표 4와 표 5는 요소설계에 사용되지 않은 경우, 안정처리기층이 표층보다 물성이 큰 경우, 기층 두께가 요소설계의 최대치보다 큰 40, 50, 60cm인 경우와 비교적 정도가 떨어지는 경우의 수치모

표 4. Moduli estimated by FWD deflection basin(with stabilized base)

(micron)

$h_1$ (cm)	$h_2$ (cm)		$E_1$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$E_2$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$E_3$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_4$	$W_5$	$W_6$	$W_7$
22	25	true	50000.0 (48676.3)	30000.0 (28391.5)	2000.0 (1881.4)	119.5	89.1	72.6	59.9	49.0	40.5	33.8
		estimate	51178.9	29598.1	2000.9	119.0	89.1	72.6	59.8	49.0	40.5	33.8
		error(%)	2.4	-1.3	0.0	-0.4	0.0	0.0	-0.2	0.0	0.0	0.0
15	50	true	20000.0 (26154.1)	4000.0 (1278.6)	1500.0 (1485.3)	286.3	167.8	109.3	81.4	64.2	51.7	43.1
		estimate	20071.1	3987.9	1497.4	286.5	168.2	109.5	81.6	64.3	51.8	43.1
		error(%)	0.4	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.0
25	30	true	70000.0 (57666.2)	4000.0 (4531.1)	500.0 (494.3)	315.1	281.1	246.8	209.5	180.8	155.0	133.6
		estimate	65068.5	4531.1	499.1	315.7	280.3	245.8	208.6	180.3	154.8	133.6
		error(%)	-7.0	13.3	-0.1	0.2	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3	-0.1	0.0
20	10	true	15000.0 (15031.7)	30000.0 (24421.2)	3000.0 (3059.8)	191.2	100.9	65.7	44.7	32.5	25.2	20.5
		estimate	15447.6	27482.3	3004.6	190.4	101.2	65.6	44.6	32.4	25.1	20.5
		error(%)	3.0	-8.4	0.2	-0.4	0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.4	0.0
20	40	true	20000.0 (20108.1)	10000.0 (7056.7)	1500.0 (1443.0)	202.9	127.9	97.8	78.7	64.4	52.7	44.4
		estimate	19983.8	10042.9	1500.3	202.8	127.8	97.8	78.7	64.4	52.7	44.4
		error(%)	-0.1	0.4	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

표 5. Moduli estimated by FWD deflection basin(with granular base)

		(micron)										
$h_1$ (cm)	$h_2$ (cm)		$E_1$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$E_2$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$E_3$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_4$	$W_5$	$W_6$	$W_7$
15	20	true	4000.0 (46737.3)	4000.0 (3833.9)	1500.0 (1502.0)	286.3	197.2	127.5	87.7	64.6	50.2	41.1
		estimate	40539.7	3932.2	1499.5	286.4	197.6	127.6	87.7	64.6	50.2	41.1
		error(%)	1.3	-1.7	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
22	25	true	5000.0 (56230.8)	5000.0 (3910.2)	2000.0 (1939.0)	168.2	123.0	88.4	65.4	49.3	39.2	31.8
		estimate	50526.1	5018.8	1993.4	167.8	123.0	88.6	65.6	49.5	39.3	31.8
		error(%)	1.1	0.4	-0.3	-0.2	0.0	0.2	0.3	0.4	0.3	0.0
25	30	true	10000.0 (13063.2)	1500.0 (2288.2)	500.0 (503.0)	627.4	447.2	330.5	252.8	196.2	158.2	128.9
		estimate	9953.0	1497.6	501.9	627.4	446.5	329.7	251.1	195.5	156.9	129.0
		error(%)	-0.5	-0.2	0.4	0.0	-0.2	-0.2	-0.7	-0.4	-0.8	0.1
15	50	true	20000.0 (39477.6)	3000.0 (2408.8)	1500.0 (1463.1)	322.7	188.4	155.4	82.5	63.4	50.9	42.2
		estimate	20233.4	3010.0	1501.9	321.2	188.0	115.3	82.3	63.6	50.8	42.2
		error(%)	1.2	0.3	0.1	-0.5	-0.2	-0.1	-0.2	0.3	-0.2	0.0
5	60	true	40000.0 (27353.5)	1500.0 (1914.6)	500.0 (509.7)	949.2	482.8	304.8	233.1	185.6	151.8	126.9
		estimate	39486.0	1500.7	500.1	950.5	482.6	304.8	233.1	185.6	151.8	126.9
		error(%)	-1.3	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

델중 대표적인 것과 이에 대한 역산 결과를 나타낸 것이다. ( )안의 수치는 반복역산시 추정식에 의해 산정된 초기 가정 탄성계수이다.

표 4와 표 5에서 보듯이 표층이 25cm, 안정처리 기층이 30cm인 경우 기층에 대해 13.3%로 가장 큰 역산오차를 보이지만, 그 외에는 매우 양호한 결과를 보여 준다. 특히 안정처리기층의 물성이 표층보다 큰 경우와 요소설계에 사용되지 않은 수치모델에 대해서도 비교적 정확도가 높은 역산결과를 보여 주고 있다. 이는 본 연구의 역산반복기법의 적용성을 입증하는 것이다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 안정처리기층과 쇄석기층을 갖는 3층 아스팔트 포장구조체에 대한 요소설계를 통해서 이론적 처짐특성을 분석하고, 이를 바탕으로 한 FWD시험의 표면 처짐곡선으로부터 포장체 각 층의 물성을 추정할 수 있는 역산반복기법에 관하여 연구하였다. 이론적 처짐곡선의 특성을 분석함으로써 하중재하 지점에서 먼 축점일수록 그 표면처짐

은 노상의 탄성계수에만 큰 영향을 받으며, 표층 및 기층의 탄성계수와 두께는 처짐곡선의 형상을 나타내는 기울기와 같은 일련의 처짐치수에 관련이 깊음을 밝히고, 이들의 관계로부터 각 층의 탄성계수 추정식을 제안하였다. 탄성계수 추정식에 의해 초기 탄성계수를 가정하고 반복역산시 효율적인 탄성계수 보정을 함으로써 보다 정도가 높은 역산반복기법을 개발하여 이를 전산화하였으며, 수치검증을 통해 그 적용성을 입증하였다.

## 參 考 文 獻

1. Heukelom, W. and Foster, C. R., "Dynamic Testing of Pavements", *Jr. of the Structural Division, ASCE*, 1960, pp. 1-28.
2. Bretonniere, S., "Etude D'un deflectometre a Boulet", *Bulletin de Liaison des Laboratoires Routines*, No. 2, Paris, 1963.
3. Ullidtz, P., *Pavement Analysis*, Elsevier, 1987, pp.254-256.
4. Majidzadeh, K. and Kumar, V., *Manual of Operation*

- and Use of Dynaflect for Pavement Evaluation, The Ohio Department of Transportation, The Asphalt Institute, 1983, pp27-138.
5. Burmister, D. M., "The Theory of Stress and Displacement in Layered Systems and Applications to the Design of Airport", *Proceedings, 3rd Annual Meeting*, HRB, 1943, pp.126-148.
  6. Burmister, D. M., "The General Theory of Stresses and Displacement in Layered System", *Jr. of Application Physics*, Vol. 16, 1945, pp. 89-94.
  7. Jong, D. I. D., Peutz, M.G.F., and Korswagen, A.R., "Computer Program BISAR, layered Systems Under Normal and Tangential Surface Loads", Koninklijke /Shell-Laboratorium, Amsterdam, *External Report AMSR. 0006. 73*, 1973.
  8. Ahlborn, G., *Elastic-Layered System with Normal Load*, Institution of Transportation and Traffic Engineering, Univ. of California, Berkeley, 1972.
  9. Huang, Y. H., *FPMANUAL(Flexible Pavement Analysis Computer Program Manual)*, Univ. of Kentucky, 1972.
  10. Dormon, G. M. and Edwards, J. M., "Developments in the Application in Practice of a Fundamental Procedure for the Design of Flexible Pavements", *Proceedings, 2nd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Ann Arbor, 1967, p.99.
  11. Vaswani, N. K., "Method for Separately Evaluating Structural Performance of Subgrades and Overlaying Flexible Pavements", *HRB 362*, High Research Board, 1971, 48-62.
  12. Koole, R. C., "Overlay Design Based on Falling Weight Deflections Measurements", *Research Record 700*, Transportation Research Board, 1979.
  13. Irwin, L. H., "Determination of Pavement Layer Moduli from Surface Deflection Data for Pavement Performance Evaluation", *Proceedings, 4th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavement*, Vol. I, Ann Arbor, 1977, pp.831-840.
  14. Uddin, W., Nazarian, S., Hudson, W. R., Meyer, A. H., and Stokoe II, K. H., "Investigations into Dynaflect Deflections in Relation to Location/Temperature Parameter and Insitu Material Characterization of Rigid Pavements", *Research Report 256-5*, Center for Transportation Research, Univ. of Texas at Austin, 1983.
  15. Uddin, W., Meyer, A. H., Hudson, W. R., and Stokoe II, K. H., "Project-Level Structural Evaluation of Pavements Based on Dynamic Deflections", *TRR 1007*, TRB, 1985, pp.37-45.
  16. Michelow, J., *Analysis of Stresses and Displacements in an n-Layered Elastic System under a Load Uniformly Distributed on a circular Area*, California Research Cooperation, California, 1963, pp.1-33.
  17. AASHTO, *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1986*, AASHTO, Washington, D. C., 1986, pp. II.13- III.85.
  18. Yoder, E. J. and Witzczak, M. W., *Principles of Pavement Design*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 1975, pp.504-553.
  19. Hull, C. H. and Nie, N. H., *SPSS Update 7-9*, McGraw-Hill, New York, 1981.

(接受: 1989. 2. 15)