

FWD에 의한 4층 아스팔트 포장 구조체의 층별 탄성계수 추정

Evaluation of Layer Moduli of 4 Layered Flexible Pavement Structures Using FWD

김 수 일* · 유 지 형**
Kim, Soo Il · Yoo, Ji Hyeung

Abstract

An inverse self-iterative procedure is developed to determine layer moduli which are significant for the structural evaluation of pavements in developing rational and analytical rehabilitation technique. Falling weight deflectometer(FWD) is adopted as a non-destructive testing(NDT)device. The layer elastic theory is used to interpret NDT data. The theoretical deflection basins of pavement structures obtained by full factorial design are used for a parametric study on the characteristics of deflection basins and regression analyses. Regression equations to estimate layer moduli of flexible pavements are proposed through the regression analyses of theoretical deflection basins. The relationships between the rate of change of moduli and deflections are developed for the efficient iteration. An inverse self-iterative procedure to ensure the accuracy of the layer moduli is proposed. Validity and applicability of the developed procedure are verified through various numerical model tests.

요 지

본 연구에서는 합리적이고 과학적인 포장 구조체의 유지 관리를 위하여 포장체의 구조적 상태를 평가 하는데 중요하게 사용되는 포장체 각 층의 탄성계수 추정 방법에 대하여 연구하였다. 차량하중에 의한 포장체의 구조적 거동을 측정하는 비파괴시험 방법으로서 Falling Weight Deflectometer(FWD)를 택 하였으며, 측정 결과를 합리적으로 해석하기 위하여 다층탄성이론에 근거한 해석 프로그램을 사용하였다. 국내에서 널리 사용되고 있는 고속도로 단면 모델에 요인배치법(factorial design)을 적용하여 쇄석 과 안정처리기층을 갖는 경우 각각에 대한 이론적 처짐특성을 분석하고, 이로부터 각 경우의 층별 탄성 계수 추정식을 제안하였다. 처짐 변화율에 따른 탄성계수 변화율에 관한 상관식을 4층 구조체 층별로 개발함으로써 FWD시험의 처짐으로부터 포장체 각 층의 탄성계수를 추정할 수 있는 보다 효율적이며 정 도가 높은 역산방법을 제안하고 이를 전산화하였다. 또한 4층 아스팔트 포장체의 실제 가능한 수치 모델 에 대한 검증을 통하여 본 연구에서 제안한 역산 방법의 신뢰성 및 타당성을 입증하였다.

*정회원 · 연세대학교 공과대학 교수, 토목공학과

**정회원 · 연세대학교 산업기술연구소 객원 연구원

1. 서 론

도로포장은 계속적인 차량의 통행으로 인하여 반복하중을 받게 되어 포장구조체의 내하력이 저하되고 종국에는 피로파괴에 도달하게 됨으로써 도로의 주행성, 안전성, 쾌적성이 저하되어 차량의 원활한 통행에 지장을 주게 된다. 이를 방지하기 위하여 항상 포장상태를 정확히 평가하고 적절한 유지 보수를 수행하는 것이 포장을 신설하는 것 못지 않게 중요한 일이다. 도로포장의 합리적이고 과학적인 유지관리를 위해서는 구조적 평가가 선행되어야 하며, 이를 위한 피로파괴 기준으로서 포장구조체에서 발생하는 응력과 변형률이 사용되고 있다. 이러한 응력과 변형률은 그 측정이 용이하지 않기 때문에 비교적 측정이 간단한 표면처짐을 이용하여 포장체 해석에 필수적인 포장체의 물성을 추정하는 연구에 노력을 기울이고 있다⁽¹⁾.

Scrivner, F.H.등⁽²⁾이 1971년 아스팔트 포장체를 2층 선형탄성구조체로 모델화하고 Dynaflect에 의한 처짐으로부터 각 층의 물성을 추정할 수 있는 방법을 제시한 이후, 여러 연구자들^(3, 4, 5)에 의하여 특정 비파괴시험 장비에 의한 처짐으로부터 포장체의 물성을 추정할 수 있는 도표 또는 추정식들이 제안되었다. 이러한 도해적 방법과 상관식에 의하여 추정되는 탄성계수는 그 정도가 낮으며 적용의 한계가 있다. 따라서 보다 정확한 포장구조체의 탄성계수를 추정하기 위한 노력으로서 다층탄성이론의 역산에 관한 연구가 시작되었으며, Irwin, L.H. 등⁽⁶⁾은 1977년 비파괴시험의 실측 처짐과 이론적 처짐이 일치할 때까지 각 층의 탄성계수를 보정하면서 현위치 탄성계수를 결정하는 역산반복기법(inverse self-iterative procedure)을 제안하였다. Uddin, W.등⁽⁷⁾은 1983년 강성 포장체에 대하여 이와 같은 방법을 적용한 전산 프로그램을 개발하였다. 이외에도 비파괴시험 장비 및 포장체의 유형에 따라 개발된 많은 전산 프로그램들이 현재 사용되고 있다^(8, 9). 그러나 이러한 방법들은 초기 탄성계수의 가정과 반복역산시의 탄성계수 보정방법에 따라 포장체 각 층의 추정 탄성계수의 정도와 효율성이 결정되는 것으로 알려져 있다. 김수일등⁽¹⁰⁾은 3층 아스팔트 포장체에 대한 이론적 처짐특성 분석을 통하여 초기 가정치로 사용되는 탄성계수 추정식과

합리적인 탄성계수 보정방법을 제안하고, 이를 도입하여 3층 아스팔트 포장체 각 층의 물성을 추정할 수 있는 보다 개선된 역산방법을 개발한 바가 있다.

본 연구에서는 이를 확장하여 4층 아스팔트 포장체에 대한 탄성계수 추정식과 합리적인 탄성계수 보정을 위한 처짐변화율과 탄성계수 변화율의 상관식을 제안함으로써 효율적이며 정도가 높은 4층 아스팔트 포장체 각 층의 물성을 추정할 수 있는 역산방법을 개발한다. 또한 실제 가능한 수치모델에 대한 적용과 최근에 Uddin, W.등⁽⁷⁾이 개발한 역산방법과 비교분석함으로써 본 연구에서 개발한 역산방법의 신뢰성 및 타당성을 검증하고자 한다.

2. 다층 탄성 해석

아스팔트 포장구조체와 같이 물성이 상이한 다층으로 구성된 연성구조체는 일반적으로 층탄성이론에 의하여 해석하게 되며, 이를 위하여 많은 전산 프로그램들이 개발되어 사용되고 있다. 이들은 Burmister, D.M.⁽¹¹⁾의 층탄성이론을 확장하여 매트릭스 기법을 적용한 Michelow, J.⁽¹²⁾의 다층탄성이론을 전산화한 것이다. 그 대표적인 것으로서 현재 가장 널리 사용되고 있는 ELSYM5와 최근에 Huang, Y.H.⁽¹³⁾에 의하여 개발된 SINELA를 들 수 있다. 이 두가지 프로그램들은 동일한 수치적분 방법을 적용하고 있지만 적분구간과 적분한계의 선정에 따라 약간 상이한 결과를 준다. 그림1은 표층, 기층, 보조기층과 노상의 탄성계수가 각각 80000, 40000, 5000, 200kgf/cm²이고, 각 층의 두께가 각각 25, 30, 60cm 및 무한대인 4층 아스팔트 포장구조체 위에 8.2ton 단축하중의 반인 4100kgf가 작용하는 경우 ELSYM 5 및 SINELA에 의하여 산정된 표면 처짐곡선을 비교 도시한 것이다.

그림1에서 알 수 있듯이 ELSYM5와 SINELA에 의하여 산정된 표면처짐은 하중재하 부근을 제외하고는 거의 같은 결과를 보여 주고 있다. 본 예제의 경우 ELSYM5에 의하면 재하지점에서 30cm 떨어진 지점의 처짐이 재하지점의 처짐보다 오히려 크게 산정되는 부정확한 결과를 준다. SINELA에서는 수치적분시 적분구간을 세분화함으로써 이러한 문제를 해결하였다. 따라서 본 연구에서는 다층탄성해석의 전산 프로그램으로서 SINELA를 사용하였다.

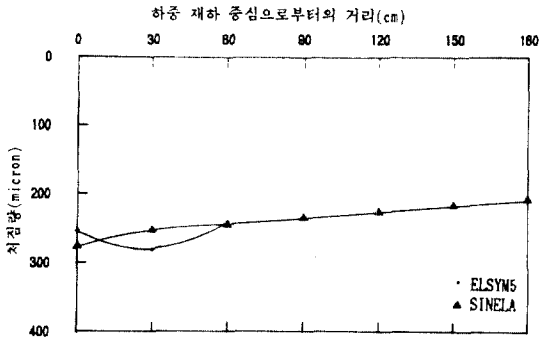


그림 1. ELSYM5와 SINELA에 의하여 산정된 표면처짐 곡선

3. 처짐곡선의 특성

3.1 비파괴시험 방법의 선정

포장구조체의 상태를 평가하기 위하여 수행되는 비파괴시험은 실제 차량의 재하로 인하여 발생하는 일련의 표면처짐을 측정하고 이를 분석함으로써 포장구조체의 구조적 상태를 평가하게 된다. 비파괴 시험 장비로는 실제 차량하중에 의한 벤켈만빔, 진동하중에 의한 Dynaflect, Road Rater 등, 충격하중에 의한 Falling Weight Deflectometer(FWD) 등이 개발되어 사용되고 있다. 이와 같은 비파괴 시험 장비들은 실제 계측에 이용되고 있지만 장비에 따라 차량하중, 진동하중과 같은 시험 하중 조건에 의하여 측정되는 처짐특성들이 서로 다르다. 또한 장비에 따라 시험의 신속성, 편리성에 차이가 있으며 계측범위도 제한을 받게 된다. 따라서 비파괴 시험장비의 선정에는 각 시험장비의 특성과 장단점을 충분히 고려하여 해석에 필요한 자료를 충분히 얻을 수 있고 계측치의 신뢰성이 좋은 장비를 선택하여야 한다.

Hoffman, M.S.과 Thompson, M.R.⁽¹⁴⁾은 FWD, Road Rater 모델 400B와 벤켈만빔을 비교하여 FWD가 실제 차량하중에 의하여 발생하는 포장도로의 처짐형상을 가장 잘 나타낼 수 있는 장비임을 밝힌 바 있다. 또한 Bohn, A.등⁽¹⁵⁾도 그림2에서와 같이 실제 차량과 FWD 하중조건에 의한 응력-시간 이력과 변형률-시간 이력을 비교하여 FWD가 포장구조체에 가해지는 차량하중조건을 가장 잘 나타낼 수 있는 장비라는 결론을 내린 바 있다. 따라서

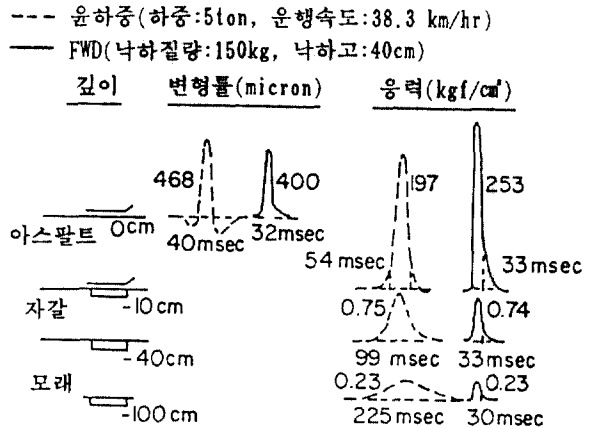


그림 2 실제차량조건과 FWD시험에서 비교된 응력-시간과 변형률-시간이력

본 연구에서는 비파괴시험 장비로서 FWD를 선정하고 이에 대한 이론적 처짐특성 분석을 통하여 FWD에 의한 처짐곡선으로부터 4층 아스팔트 포장구조체의 탄성계수를 추정할 수 있는 방법을 개발하였다.

3.2 해석 모델

현재 사용중인 아스팔트 포장은 보통 4층으로 구성된 다층구조체로 기층은 쇄석기층 또는 안정처리 기층으로 구성되어 있다. 국내의 도로 설계 및 해석에 주로 사용되고 있는 AASHTO 설계법에서는 8.2ton단축하중을 표준 축하중으로 하고 있으므로 비파괴시험중 재하하중의 조절이 가능한 FWD는 표준 축하중을 재현하기 위하여 직경이 30cm인 재하관 위에 4100kgf의 하중을 가함으로써 일련의 표면처짐을 측정한다. FWD 시험에서 실제로 가해지는 하중은 충격하중으로서 동적거동을 일으키게 된다. 그러나 Shao, K.J.등⁽¹⁶⁾은 FWD 시험의 동적해석 및 정적해석에 의하여 산정된 표면처짐을 비교한 결과 큰 차이가 없음을 밝히고 보다 해석이 용이한 정적해석을 FWD 시험의 다층탄성해석에 사용하도록 권하고 있다. 따라서 본 연구에서는 그림 3과 같이 아스팔트 표층, 쇄석기층 또는 안정처리 기층, 보조기층과 반부한 노상층으로 구성된 다층탄성구조체에 접지만경이 15cm이고, 접지압이 5.8kgf/cm²인 원형분포하중이 작용하는 해석모델을 설정

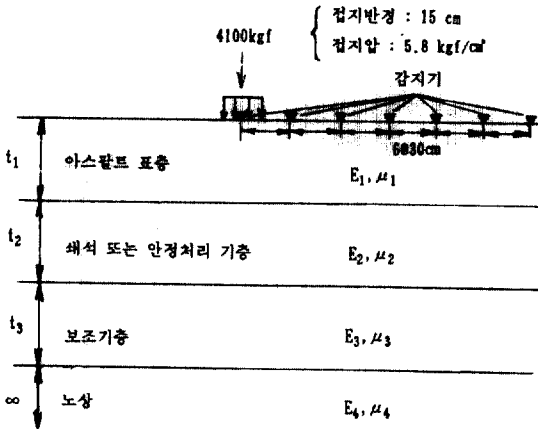


그림 3. 해석모델

한다. FWD시험에서는 하중재하 중심으로부터 30 cm 간격으로 설치된 7개의 감지기에서 표면처짐을 측정하게 되므로 다층탄성해석시 이와 같은 7개의 지점에서 이론적 표면처짐을 산정한다.

3.3 요인 배치법

처짐특성을 분석하기 위하여 그림 3과 같은 하중 조건하의 다층탄성구조체에 대하여 쇄석기층을 갖는 경우와 안정처리기층을 갖는 경우로 나누어 요인배치법(factorial design)을 실시하였다. 요인배치법은 시험결과에 가장 큰 영향을 미치는 요인들을 선정하고 이들의 변화에 의하여 구성될 수 있는 모든 조건을 통계적인 방법으로 설정함으로써 각 요인들의 시험결과에 미치는 상호영향을 효과적으로 조사할 수 있는 기법이다.⁽¹⁷⁾ 일정한 시험하중에 의하여 발생하는 다층탄성구조체의 표면처짐은 각 층의 탄성계수와 두께에 의존하기 때문에 각 층의 탄성계수와 두께를 요인으로 하는 3개 수준의 요인배치법을 실시하였다. 각 층의 두께는 국내에서 사용중인 고속도로중 아스팔트 포장체의 표준단면을 고려하여 선정하였으며, 탄성계수는 각 층의 재료에 대한 탄성계수의 범위 내에서 최대, 최소와 중간값을 3개 수준값으로 선정하였다. 포아송비는 일정 재료에 대하여 작은 범위 내에 있으며 탄성해석시 큰 영향을 미치지 않으므로 총별로 그 대표적인 값을 취하였다. 표 1은 쇄석기층을 갖는 경우의 요인배치법을 나타낸 것이다. 표 1에서 ()안의 값은 안정처리기층을 갖는 경우이다.

표 1과 같은 3수준 요인 배치법에 의하여 얻어지

표 1. 요인배치법

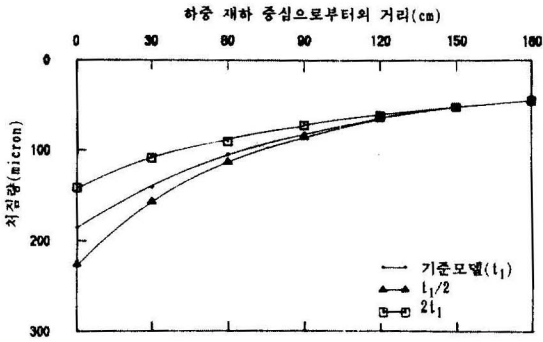
요 인	수 준	AC표층	기 층	보조기층	노 상
두께 (cm)	하	5	10	0	∞
	중	15	20	30	∞
	상	25	30	60	∞
탄성계수 (kgf/cm ²)	하	1000	1500 (4000)	1000	500
	중	4000	4000 (20000)	3000	1500
	상	7000	7000 (40000)	5000	3000
포아송비		0.03	0.35(0.30)	0.35	0.40

는 탄성계수와 두께의 조합들로 부터 쇄석기층과 안정처리기층을 갖는 경우 각각 $3^6 \times 2 = 1458$ 개씩 총 2916개의 해석모델이 구성된다. 본 연구에서는 이들 2916개 각각의 해석모델에 대하여 다층탄성해석에 의한 이론적 처짐곡선을 구하고, 이를 처짐 특성분석 및 탄성계수 추정식을 위한 기본 자료로 사용하였다.

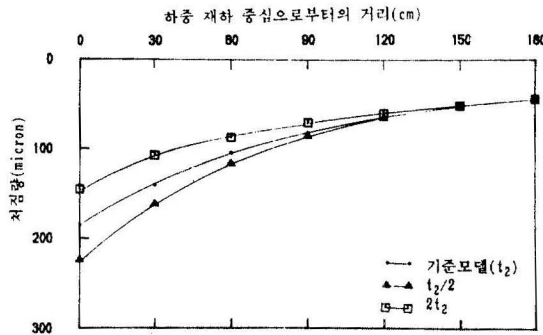
3.4 두께와 탄성계수가 처짐곡선에 미치는 영향

다층 탄성구조체에 일정 하중의 재하로 인하여 발생하는 표면처짐의 곡선 형상은 각 층의 탄성계수와 두께의 조합에 따라 결정된다. 다층탄성구조체에서 각 층의 두께와 탄성계수가 표면처짐에 미치는 영향을 살펴 보기 위하여 쇄석 및 안정처리기층을 갖는 4층 구조체 각각에 대하여 표1의 요인배치법에서 중수준을 기준모델로 하였다. 기준모델에서 두께에 대해서는 해당 층의 두께만, 탄성계수에 대해서는 해당 층의 탄성계수만 기준모델의 2배와 0.5배로 변화시켰을 때 다층탄성해석에 의하여 산정된 처짐곡선을 기준모델에 대한 처짐곡선과 비교하였다. 그림 4와 그림 5는 안정처리기층을 갖는 4층 아스팔트 포장구조체의 두께와 탄성계수 변화에 따른 표면 처짐곡선의 변화를 각각 도시한 것이다. 쇄석기층을 갖는 경우에도 동일한 경향을 보여 준다.

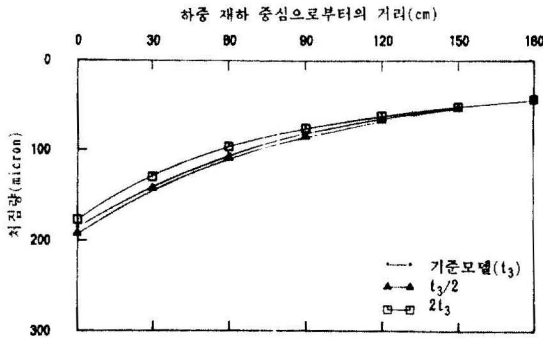
그림 4에서 보는 바와 같이 표층의 두께는 재하지점의 처짐 w_1 에 가장 큰 영향을 미치며, 재하지점에서 멀어질수록 그 영향은 감소하여 가장 멀리 떨어진 180cm되는 지점의 처짐 w_7 에는 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 기층의 두께 변화는 다른 지점의 처짐에 비하여 재하지점에서 30cm 떨어진 지점의 처짐 w_2 에 비교적 민감한 변화를 주고



a) 아스팔트 표층



b) 안정처리기층



c) 보조기층

그림 4. 안정처리기층을 갖는 경우의 두께 변화에 따른 처짐곡선

있으며, 보조기층의 두께는 다른 층의 두께에 비하여 처짐곡선에 미치는 영향이 작음을 알 수 있다. 또한 그림5에서 보듯이 노상토의 탄성계수는 처짐곡선에 가장 큰 영향을 미치며, 그 영향은 재하 지점에서 가장 멀리 떨어진 지점의 처짐 w_7 에 한층 크게 나타남을 알 수 있다. 표층의 탄성계수는 재하 지점의 처짐 w_1 에, 기층의 탄성계수는 재하 지점과 30cm 떨어진 지점의 처짐 w_1 과 w_2 에, 보조기층의

탄성계수는 재하 지점과 30, 60cm 떨어진 지점의 처짐 w_1, w_2, w_3 에 비교적 큰 영향을 주며, 이들의 탄성계수가 감소함에 따라 처짐곡선의 기울기는 증가함을 알 수 있다.

두께와 탄성계수가 처짐곡선에 미치는 영향을 분석한 결과 노상토의 탄성계수는 재하 지점에서 가장 멀리 떨어진 지점의 처짐 w_7 만으로 추정할 수 있을 것으로 나타났다. 그러나 그의 층의 탄성계수는 특정 지점의 처짐만으로 추정이 곤란하며 처짐곡선의 형상을 나타내는 일련의 처짐지수와 층두께에 의하여 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

3.5 처짐곡선에 의한 탄성계수 추정식

포장구조체 각 층의 두께와 탄성계수는 3.4에서 분석한 바와 같이 각 축점의 처짐치와 처짐형상에 밀접한 관계를 보여 준다. 재하 지점에서 180cm 떨어진 지점의 처짐치 w_7 은 노상의 탄성계수 E_4 에만 영향을 받으므로 E_4 는 식(1)과 같이 w_7 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$E_4 = f(w_7) \quad (1)$$

표층, 기층과 보조기층의 탄성계수는 처짐형상에 의존하며, 처짐형상은 각 층의 두께에도 영향을 받는다. 따라서 노상을 제외한 i 층의 탄성계수 E_i 는 식(2)와 같이 각 층의 두께와 처짐형상을 나타내는 일련의 처짐지수들의 함수로 표시할 수 있다.

$$E_i = f(t_j, w_k, A, SPR_n, SCI, F_i, TS_m, \dots) \quad (2)$$

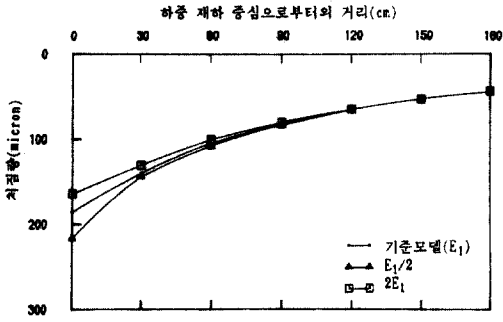
여기서 t_j 는 j 층의 두께, w_k 는 K 번째 축점의 처짐량이며, A 는 재하 중심부터 90cm 떨어진 지점까지의 처짐곡선의 면적으로서 식(3)과 같다. SPR_n 은 재하 중심부터 120cm 또는 180cm 떨어진 지점까지 처짐곡선의 분산도로서 식(4)와 같으며, SCI 는 표면곡률지수로서 식(5)에 의하여 산정되는 값이다. 또한 F_i 와 TS_m 은 R_i 를 하중재하 중심부터 i 번째 축점까지의 거리라고 할 때 식(6) 및 식(7)과 같이 표시되는 처짐곡선의 기울기이다. 이러한 처짐지수들의 산정시 처짐량은 micron, 층두께와 하중재하 중심부터 축점까지의 거리는 cm로 나타낸 값을 사용하였다.

$$A = 30/2 \{w_1 + 2(w_2 + w_3) + w_4\} \quad (3)$$

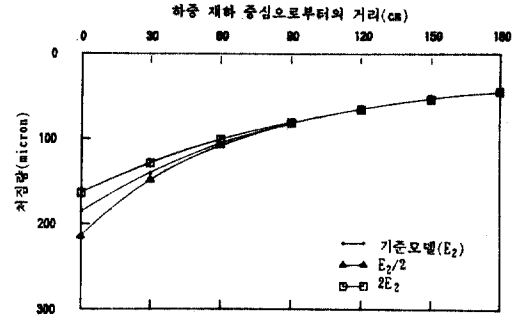
$$SPR_n = \frac{\sum w_i}{nw_1} \times 100(\%) \quad n=5, 7 \quad (4)$$

$$SCI = w_1 - w_2 \quad (5)$$

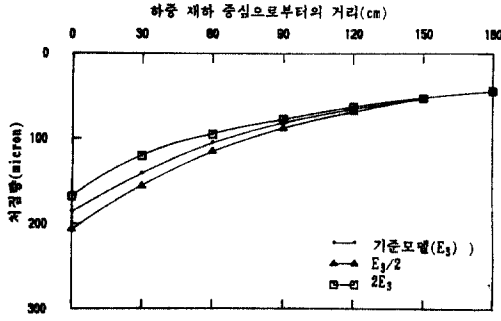
$$F_i = (w_1 - w_{i+2})/R_{i+1} \quad i=1, 2, \dots, 5 \quad (6)$$



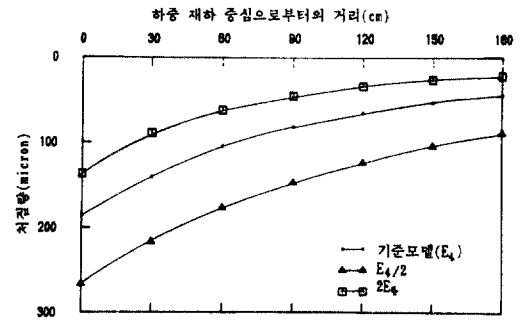
a) 아스팔트 표층



b) 안정처리기층



c) 보조기층



d) 노상

그림 5. 안정처리기층을 갖는 경우의 탄성계수 변화에 따른 처짐곡선

$$TS_m = (w_i - w_m) / R_m \quad m=2, 3, \dots, 7 \quad (7)$$

본 연구에서는 식(1) 및 식(2)와 같은 각 층의 탄성계수 추정식을 구하기 위하여 2916개 해석모델의 이론적 처짐곡선들을 회귀분석의 통계자료로 사용하였다. 회귀분석은 SPSS의 Package중 STEPWISE 프로그램⁽¹⁶⁾을 이용하였다.

STEPWISE는 입력된 일련의 독립변수들중에서 종속변수와 상관성이 높은 독립변수들을 선택하여 결정계수 r^2 이 가장 높은 회귀분석식을 다중회귀의 분산분석을 통하여 순차적으로 구하는 전산 프로그램이다. 본 연구에서는 STEPWISE 이용시 처짐특성을 나타내는 일련의 처짐지수 또는 이들의 합수를 독립변수로, 각 층의 탄성계수항을 종속변수로 입력함으로써 노상토에 대해서는 결정계수 r^2 이 0.99 이상으로 상관성이 극히 높은 탄성계수 추정식을, 그외 층에 대해서는 r^2 이 0.80 이상으로 상관성이 비교적 높은 탄성계수 추정식을 얻을 수 있었다. 표 2와 표 3은 선택 및 안정처리기층을 갖는 경

우 각 층의 탄성계수 추정식을 얻기 위한 회귀분석 결과를 나타낸 것이다. 표에서 번호는 입력된 처짐 특성변수들중에서 분산분석에 의하여 선택된 처짐 특성변수의 일련 번호이며, t-value와 sig.t는 각각 검정통계량의 유의수준을 나타내는 값이다.

이와 같은 회귀분석 결과로부터 얻어지는 각 경우의 층별 탄성계수 추정식은 식(8)과 같으며, 탄성계수항은 상수항 C와 분산분석에 의하여 선택된 m개의 처짐특성변수항의 합으로 쓸수 있다. 여기서 K_i 는 각 경우의 회귀분석에 의하여 구한 i번째 처짐 특성변수의 계수이다.

$$\text{탄성계수항} = C + \sum_{i=1}^m K_i * (\text{처짐특성변수}), \quad (8)$$

본 추정식의 신뢰성을 살펴보기 위하여 2916개 해석모델의 탄성계수와 이들의 이론적 처짐곡선으로부터 본 추정식에 의하여 산정된 탄성계수를 비교하였다. 그림 6은 안정처리기층을 갖는 경우 이들의 분포를 평균, 최대 및 최소값, 표준편차로 도시 한것이다. 선택기층을 갖는 경우에도 비슷한 분

표 2 섹시기충을 갖는 경우 탄성계수 추정식을 위한 회귀분석 결과

탄성계수항	차점 특성		계수(k)	t-value	sig. t	r ²
	번호(i)	변수				
log _s (E _s)	1	log _s (w _s)	-1.01799	-371.326	0.0000	0.9969
	2	1/w _s ³	-212.05626	-12.414	0.0000	
	상수(C)		4.83716	919.140	0.0000	
log _s (E _v /E _s)	1	SPR _s	0.03105	10.274	0.0000	0.8622
	2	log _s (t _s)	-0.65570	-9.274	0.0000	
	3	1/F ₂	-0.32970	-6.466	0.0000	
	4	1/F ₂ ²	-0.04679	-5.738	0.0000	
	5	1/F ₂ ³	0.05785	13.726	0.0000	
	6	1/SPR _s	-63.16145	-15.240	0.0000	
	7	1/F ₃	0.57595	13.394	0.0000	
	8	log _s (F ₂)	0.24583	12.906	0.0000	
	9	1/A ₁ ²	7.20240	6.101	0.0000	
	상수(C)		1.99082	9.741	0.0000	
log _s (E _a /E _s)	1	log _s (w _s)	-0.43746	-4.642	0.0000	0.8054
	2	log _s (F ₂)	-1.25841	-11.326	0.0000	
	3	t _s	-0.00040	-9.486	0.0000	
	4	SCF	-0.000047	-14.925	0.0000	
	5	TS _s ²	0.01895	13.397	0.0000	
	6	1/TS _s ²	-3.34830	-19.643	0.0000	
	7	1/TS _s	2.62892	15.549	0.0000	
	8	SPR _s ²	0.00023	12.474	0.0000	
	9	1/w _s ²	-70.14559	-5.596	0.0000	
	10	1/t _s	0.72103	4.713	0.0000	
	11	t _s	-0.00267	-4.339	0.0000	
상수(C)		-0.55318	3.696	0.0002		
log _s (E _v /E _v)	1	1/SCF	-112.53135	-6.353	0.0000	0.8753
	2	F ₂ ²	-0.07794	-13.008	0.0000	
	3	1/A ₂ ²	131.17895	13.312	0.0000	
	4	t _s	-0.00557	-11.190	0.0000	
	5	log _s (F ₂)	-2.03442	-24.728	0.0000	
	6	1/F ₁	-0.09304	-11.287	0.0000	
	7	log _s (F ₂)	-1.11326	-16.627	0.0000	
상수(C)		-0.58685	-24.126	0.0000		

표를 보여 준다.

그림 6에서 보듯이 노상토의 경우는 편차가 매우 작아 비교적 양호한 탄성계수 추정이 가능하므로 본 연구의 추정식을 사용할 수 있다. 그러나 그외 층의 경우는 매우 큰 편차를 보이고 있어 본 연구에서 제안한 추정식만으로 각 층의 탄성계수를 직접 추정하기는 곤란한 것으로 판단된다. 따라서 보다 정도를 높이기 위하여 추정식에 의하여 산정되는 탄성계수를 초기 가정치로 하는 역산방법을 개

표 3 안정처리기충을 갖는 경우 탄성계수 추정식을 위한 회귀분석 결과

탄성계수항	차점 특성		계수(k)	t-value	sig. t	r ²
	번호(i)	변수				
log _s (E _s)	1	log _s (w _s)	-1.04481	-290.541	0.0000	0.9941
	2	1/w _s ³	-311.66800	-12.992	0.0000	
	상수(C)		4.69397	708.324	0.0000	
log _s (E _v /E _s)	1	A ²	-0.00031	8.270	0.0000	0.7990
	2	log _s (t _s)	0.25174	-10.698	0.0000	
	3	TS _s	-0.18174	8.156	0.0000	
	4	log _s (F ₂)	2.76354	20.036	0.0000	
	5	log _s (F ₂)	-0.78654	-4.032	0.0000	
	6	1/SPR _s ²	-2410.6071	-12.424	0.0000	
	7	1/F ₁	0.22763	7.415	0.0000	
	8	F ₁	0.95171	8.334	0.0000	
	9	1/F ₅	0.10836	5.732	0.0000	
	10	1/SCI	7.43370	6.230	0.0000	
	11	TS _s ²	-0.02676	-5.026	0.0000	
상수(C)		0.34191	2.945	0.0033		
log _s (E _v /E _v)	1	log _s (F ₂)	-6.70496	-32.519	0.0000	0.8094
	2	t _s	-0.02959	-33.733	0.0000	
	3	t _s	-0.0198	-23.269	0.0000	
	4	log _s (F ₂)	2.07103	7.859	0.0000	
	5	1/F ₁	-0.26920	-16.160	0.0000	
	6	F ₂	1.24832	12.431	0.0000	
	7	TS _s ²	-0.02839	-17.697	0.0000	
	8	TS _s ²	0.04784	16.379	0.00000	
	9	1/F ₅	-0.52975	-7.881	0.0000	
	10	1/A ²	483.36799	4.860	0.0000	
	11	log _s (F ₂)	-1.91056	-6.387	0.0000	
	12	1/F ₂ ²	0.03118	4.960	0.0000	
상수(C)		-0.95657	9.296	0.0002		
log _s (E _v /E _v)	1	F ₅	-8.24613	-30.530	0.0000	0.8669
	2	w _s	0.00146	9.680	0.0000	
	3	1/F ₁	-0.14794	-22.542	0.0000	
	4	F ₂ ²	-0.22239	-25.750	0.0000	
	5	t _s ²	-0.00031	-22.074	0.0000	
	6	F ₂ ²	5.64273	20.095	0.0000	
	7	t _s	-0.01020	-17.035	0.0000	
	8	1/A ₂ ²	142.68446	13.187	0.0000	
상수(C)		3.03977	41.215	0.0000		

발한다.

4. 층별 탄성계수 추정 기법의 개발

포장구조체의 표층, 기층과 보조기층의 탄성계수는 본 추정식만에 의해 추정할 경우 그 정도가 매우 낮다. 따라서 보다 정도가 높은 탄성계수를 추

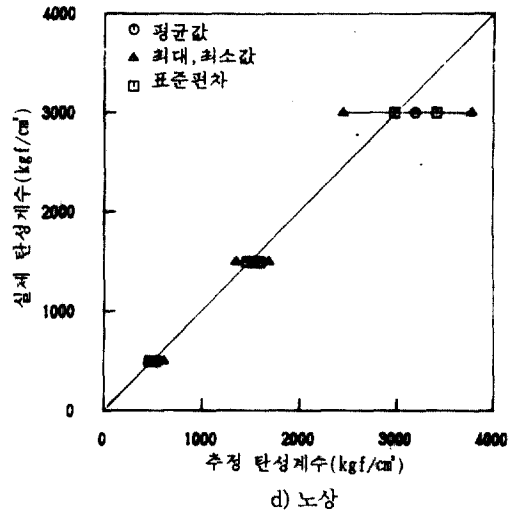
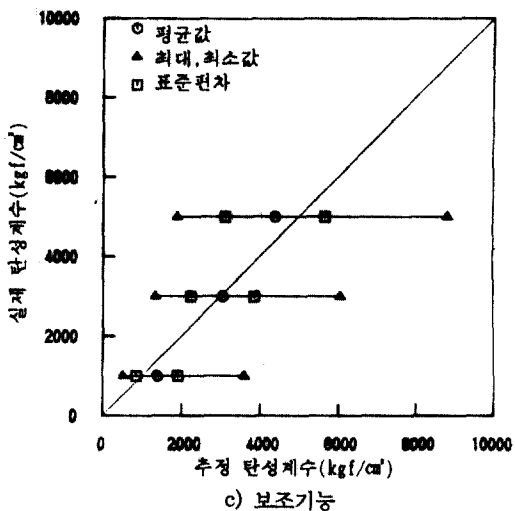
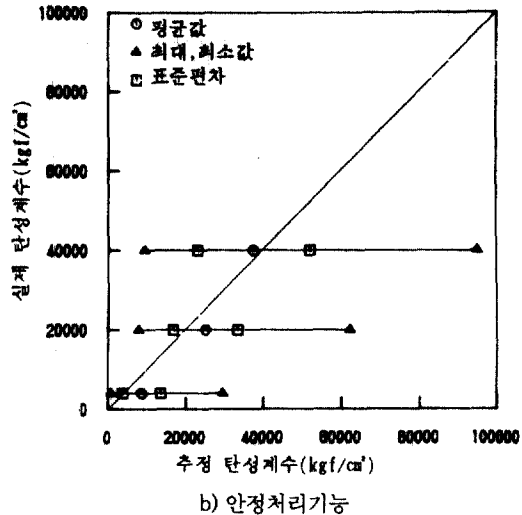
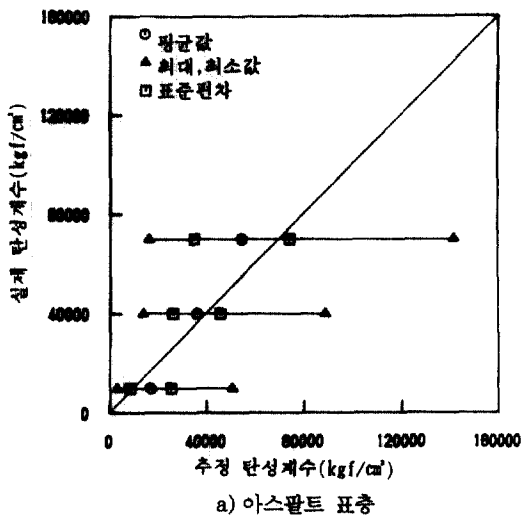


그림 6. 안정처리기층을 갖는 경우의 추정 탄성계수와 실제 탄성계수의 분포도

정하기 위하여 다층탄성이론의 반복적인 역산에 의하여 포장구조체 각 층의 탄성계수를 결정하는 역산반복기법을 개발한다.

4. 1 탄성계수 변화율에 따른 처짐 변화율

역산반복기법에서는 각 층의 탄성계수를 반복적으로 보정하여야 한다. 본 연구에서는 보다 효율적인 보정을 수행하기 위하여 처짐특성의 분석 결과를 토대로 탄성계수 변화율에 대한 처짐 변화율의 관계를 제안한다. 이론적 처짐곡선의 특성을 분석한 3. 4의 결과에 의하면, 하중재하 중심에서 가장

멀리 떨어진 지점의 처짐 w_7 은 노상토의 탄성계수 E_4 의 변화에 의하여 가장 크게 영향을 받는다. 또한 표층의 탄성계수 E_1 과 두께 t_1 의 변화는 하중재하 지점의 처짐 w_1 에 가장 크게 영향을 미치며, 기층의 탄성계수 E_2 와 두께 t_2 의 변화는 하중재하 중심부에서 30cm 떨어진 지점의 처짐 w_2 에, 보조기층의 탄성계수 E_3 의 변화는 하중재하 중심부에서 60cm 떨어진 지점의 처짐 w_3 에 비교적 크게 영향을 미친다. 따라서 i 층의 탄성계수 변화율 ΔE_i 와 해당 층의

탄성계수 변화에 비교적 크게 영향을 받는 j번째 지점의 처짐 변화를 Δw_j 사이의 상관관계식은 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta E_1 &= f(t_1, \Delta_1) \\ \Delta E_2 &= f(t_2, \Delta w_2) \\ \Delta E_3 &= f(\Delta w_3) \\ \Delta E_4 &= f(\Delta w_7) \end{aligned} \quad (9)$$

쇄석 및 안정처리기층을 갖는 4층 구조체에 대한 각 층의 두께와 탄성계수가 상이한 9개씩의 해석모델을 기준모델로 하고, 각 기준모델에서 해당 층의 탄성계수만 일정한 비율로 증감시켰을 때 산정된 이론적 처짐을 기준모델의 처짐에 대한 백분율로 산정하여 이를 식(9)의 관계식을 구하기 위한 회귀 분석 자료로 사용하였다. 탄성계수의 변화가 없을 때 처짐의 변화도 없으므로 원점을 지나는 다차회귀분석을 실시하여 결정계수 r^2 이 0.9 이상인 상관관계식을 얻었다. 이와 같이 구한 처짐 변화율에 대한 탄성계수 변화율의 관계식은 반복역산기법 개발시 각 층의 탄성계수에 대한 보정계수의 산정에 사용한다.

4.2 역산반복기법의 전산 알고리즘

역산반복기법에서는 초기 가정 탄성계수에 대한 이론적 처짐곡선을 비파괴시험에 의한 실측 처짐곡선과 비교하여 그 차이가 허용 범위내에 들 때까지 각 층의 탄성계수를 반복적으로 보정함으로써 해당 층의 탄성계수를 결정하게 된다. 역산 해석시 각 층의 두께는 설계도면 또는 시험의 보링자료에 의하여 알 수 있으므로 기지의 값으로 하고, 포아송비는 재료특성을 고려하여 가정한다. 하중조건과 측정점의 위치는 그림3과 같이 FWD시험을 고려하여 하중재하 중심부터 30cm 간격으로 7개 지점으로 한다.

역산은 이와 같은 FWD시험 조건하에서 각 층의 초기 탄성계수를 적절히 가정함으로써 시작된다. 본 프로그램은 본 연구에서 제안한 추정식에 의하여 산정된 값 또는 임의로 가정된 값을 초기 가정 탄성계수로 사용한다. 반복역산은 초기 가정 탄성계수에 대한 이론적 처짐과 실측 처짐을 비교하여 노상, 보조기층, 기층, 표층의 순서로 각 층의 탄성계수를 보정하게 되며, 다음 층의 처짐 산정시 전층의 보정 탄성계수가 사용된다. 전체 층의 탄성계수가 보정되면 1회 보정이 완료되며, 1회의 보정

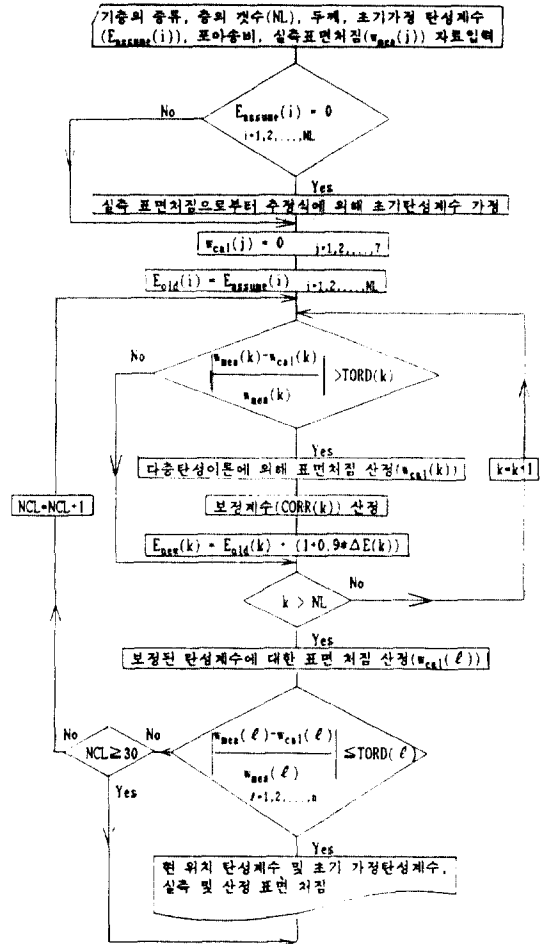


그림 7. 역산반복기법의 전산 프로그램 흐름도

탄성계수에 대한 이론적 처짐과 실측 처짐의 차가 허용범위 내에 들지 않으면 같은 방법으로 허용범위 내에 들 때까지 보정횟수를 거듭하면서 반복수행하게 된다. 반복역산시 각 층의 탄성계수 보정을 위한 비교기준으로서 처짐곡선의 특성을 고려하여 표층에 대해서는 w_1 , 기층에 대해서는 w_2 , 보조기층에 대해서는 w_7 을 선택하였으며, 각 층의 보정계수는 해당 층의 비교기준이 되는 지점에서 보정 전의 산정 처짐을 실측 처짐에 대한 백분율로 구하여 이를 4.1에서 얻은 처짐 변화율에 따른 탄성계수 변화율의 상관관계식에 대입함으로써 얻게 된다. 그림 7은 역산반복기법을 전산화한 프로그램의 흐름도를 나타낸 것이다.

표 4. 쇠석기층을 갖는 경우의 본 연구와 Uddin등의 결과 비교

(단성계수:kgf/cm)

두께(cm)			구분	본 연구					Uddin등 (FPEDD1)				보정횟수
t ₁	t ₂	t ₃		E _{AC}	E _{base}	E _{subb}	E _{subg}	E _{AC}	E _{base}	E _{subb}	E _{subg}		
25	20	30	실제값	10000.0	4000.0	3000.0	1500.0	4	10000.0	4000.0	3000.0	1500.0	4
			추정값	8781.0	3412.7	3845.6	1486.8		21565.7	3670.6	3670.6	1502.3	
			역산값	10041.9	3665.5	3190.4	1497.5		13203.8	3142.8	3142.8	1498.6	
			오차(%)	0.4	-8.4	6.3	-0.2		32.0	-21.4	-21.4	-0.1	
15	10	30	실제값	70000.0	7000.0	5000.0	3000.0	1	70000.0	7000.0	5000.0	3000.0	6
			추정값	64861.8	8705.9	4994.1	3128.9		77700.0	3687.0	3687.0	2968.8	
			역산값	71073.6	7100.0	4994.1	2999.3		77700.0	5290.2	3929.0	2960.1	
			오차(%)	1.5	1.4	-1.1	0.0		11.0	-24.4	-21.4	-1.3	
10	15	35	실제값	30000.0	3000.0	2000.0	1000.0	4	30000.0	3000.0	2000.0	1000.0	5
			추정값	25630.9	2977.0	1911.0	1011.0		31502.7	2450.2	2450.2	989.2	
			역산값	29306.8	3078.6	2016.9	998.0		31502.7	2450.2	2450.2	989.2	
			오차(%)	-2.3	2.6	0.8	-0.2		5.0	-18.3	22.5	-1.1	
20	25	40	실제값	50000.0	5000.0	4000.0	2000.0	2	50000.0	5000.0	4000.0	2000.0	7
			추정값	66130.4	4508.5	3606.0	2031.0		64385.5	4389.8	4389.8	2103.3	
			역산값	52368.7	4508.5	4143.7	1997.2		41424.7	6300.0	3972.7	2005.8	
			오차(%)	4.7	-9.8	3.6	-0.1		-17.2	26.0	-0.7	0.3	

표 5. 안정처리기층을 갖는 경우의 본 연구와 Uddin등의 결과 비교

(단성계수:kgf/cm)

두께(cm)			구분	본 연구					Uddin등 (FPEDD1)				보정횟수
t ₁	t ₂	t ₃		E _{AC}	E _{base}	E _{subb}	E _{subg}	E _{AC}	E _{base}	E _{subb}	E _{subg}		
25	20	30	실제값	10000.0	20000.0	3000.0	1500.0	2	10000.0	20000.0	3000.0	1500.0	2
			추정값	8199.7	19633.8	3234.0	1499.1		13769.2	15219.9	2772.4	1508.7	
			역산값	9617.3	19633.8	3082.3	1499.2		11796.4	15219.9	2772.4	1498.3	
			오차(%)	-1.8	-1.8	2.7	-0.1		18.0	-23.9	-2.0	-0.1	
5	20	30	실제값	40000.0	20000.0	1000.0	1500.0	2	40000.0	20000.0	1000.0	1500.0	9
			추정값	34760.1	21905.5	1553.8	1593.4		23418.1	13300.0	1518.1	1450.5	
			역산값	40982.1	19142.3	1005.2	1500.7		32827.6	21000.0	825.2	1487.7	
			오차(%)	2.5	-4.3	0.5	0.1		-17.9	5.0	-17.5	-0.8	
10	15	35	실제값	30000.0	20000.0	2000.0	1000.0	3	30000.0	20000.0	2000.0	1000.0	7
			추정값	26052.9	21983.9	1878.3	1004.4		29496.3	11024.12	2269.1	996.0	
			역산값	26052.9	21983.9	2060.0	995.1		33749.1	19017.4	1887.2	993.5	
			오차(%)	-13.1	9.9	4.0	-0.5		12.5	-4.9	-5.6	-0.7	
8	15	39	실제값	50000.0	20000.0	4000.0	2000.0	4	50000.0	20000.0	4000.0	2000.0	5
			추정값	37625.2	27722.6	3723.0	2109.7		36471.8	21000.08	2711.7	2007.7	
			역산값	50771.5	19965.9	3965.9	2012.0		49557.9	21000.0	4018.6	1972.2	
			오차(%)	1.5	-0.2	3.6	0.6		-0.9	5.0	0.5	-1.4	

4.3 수치모델에 의한 검증 및 결과 비교

본 연구에서 개발한 역산반복기법의 신뢰성 및 타당성을 검증하기 위하여 실제 사용되고 있는 4층 아스팔트 포장구조체의 수치모델을 쇠석과 안정처리기층을 갖는 경우로 나누어 선정하고 이에 대한

수치검증을 실시하였다. 또한 본 연구에서 개발된 역산기법의 신뢰성 및 효율성을 가장 최근에 Uddin등®에 의하여 개발되어 사용되고 있는 FPEDD1의 결과와 비교하였다. 수치검증 방법으로서 각 수치모델에 대한 이론적 처짐곡선을 실측 처

침곡선으로 간주하고 본 연구의 역산반복기법 또는 FPEDD1에 의하여 역산된 탄성계수를 수치모델 본래의 탄성계수와 비교하였다. 표 4와 표 5는 본 연구의 요인배치법에서 사용된 두께와 탄성계수 범위 내의 수치모델, 표층의 물성이 기층보다 작은 경우, 표층의 두께가 기층보다 두꺼운 경우 등 대표적인 수치모델에 대한 본 연구의 역산기법과 FPEDD1에 의한 역산결과를 해석과 안정치기층을 갖는 4층 구조체에 대하여 각각 비교한 것이다. 표에서 추정값은 탄성계수 추정식에 의하여 구한 초기 가정 탄성계수이고, 역산값은 본 역산기법 또는 FPEDD1에 의하여 얻어진 탄성계수이다. 오차는 수치모델 본래의 탄성계수인 실제값과 역산값의 차에 대한 백분율로서 신뢰성을 나타내는 값이다.

본 역산기법에 대한 수치검증 결과 9회 이내의 보정에 의하여 노상의 탄성계수는 최대 오차 0.6% 내의 매우 정도가 높은 역산결과를 주었으며, 그외 다른 층의 경우 최대 오차 10% 내외의 매우 양호한 탄성계수를 얻을 수 있었다. 또한 기층의 물성이 표층보다 큰 경우, 각 층의 탄성계수와 두께가 요인배치법에서 사용된 수치의 범위내에서 임의의 값을 갖는 경우, 국내 아스팔트 포장의 표준단면을 갖는 경우 등에 대해서도 정도가 높은 역산결과를 보여 주었다.

한편 FPEDD1에서 노상 탄성계수의 경우 최대 오차 1.4%로 매우 정도가 높은 역산 결과를 주고 있지만, 그외 다른 층은 최대 오차 32%로 본 역산 방법에 비해 비교적 큰 오차를 보여 주고 있다. 이는 각 층의 탄성계수 초기치를 가정할 때 FPEDD1의 추정치가 본 연구에 비하여 실제값과 큰 차이가 있을 뿐만아니라, 반복역산시 탄성계수 보정방법이 서로 상이하기 때문인 것으로 판단된다. FPEDD1에서는 표층의 두께가 25cm인 경우에 비교적 큰 역산 오차를 주고 있는데, 이는 FPEDD1의 개발시 고려한 층두께 범위를 넘기 때문에 역산오차가 본 연구의 역산방법보다 큰 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 채택한 요인배치법에 의한 초기 탄성계수의 추정식, 처짐 변화율과 탄성계수 변화율의 관계를 이용한 탄성계수 보정방법은 포장구조체의 물성을 추정하는데 보다 정확하고 효율적이라는 것을 알 수 있다. FWD시험에 의하여 처짐곡선을 정확히 측정하고, 본 연구에서 개

발한 역산방법에 의하여 아스팔트 포장구조체 각 층의 탄성계수를 추정함으로써 보다 과학적인 유지관리에 유용하게 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 비파괴시험에 의하여 측정되는 처짐곡선으로부터 4층 아스팔트 포장구조체 각 층의 탄성계수를 추정할 수 있는 해석적 방법에 관하여 연구하였다. 국내에서 널리 사용되는 고속도로 단면 모델에 대한 이론적 처짐특성을 분석함으로써 4층 아스팔트 포장구조체 각 층의 탄성계수 추정식을 제안하였다. 탄성계수 추정식만으로는 정도 높은 각 층의 탄성계수를 추정할 수 없었으며, 역산반복기법을 개발함으로써 효율적이며 정도가 높은 아스팔트 포장체 각 층의 탄성계수 추정이 가능하였다. 본 역산기법에서는 FWD의 이론적 처짐특성 분석을 토대로 각 층의 탄성계수 변화율과 해당 층의 탄성계수 변화에 비교적 크게 영향을 받는 지점의 처짐 변화율과의 상관관계식에 의하여 각 층의 탄성계수를 보정하는 방법을 제안하였으며, 이를 적용한 역산반복기법을 전산화하였다.

수치모델을 통한 검증결과 본 연구에서 개발된 역산방법에 의하여 추정된 탄성계수는 9회 이내의 보정으로 노상층의 경우 약 0.6% 이내의 역산결과를 그외 다른 층의 경우 약 10% 이내의 역산 오차를 가지므로 그 효율성 및 신뢰성이 입증 되었다. 또한 본 역산방법을 기층의 물성이 표층보다 큰 경우와 국내 고속도로의 표준단면을 갖는 수치모델에 대하여 적용하여도 정도가 높은 역산결과를 보여 주고 있어, 그 타당성이 입증되었다.

감사의 글

본 연구는 과기처의 '88 특정 연구(건설분야)의 일환으로 수행중인 연구의 일부로서, 본 연구를 위해 지원하여 주신 관계 당국에 깊이 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Majidzadeh, K., "An Overview of Deflection Parameters for Performance Analysis," *Proceedings, International Symposium on Bearing Capacity of Roads and Airfields, Trondheim, Norway, 1982*, pp.22-30.

2. Scrivner, F.H., Michalak, C.H., and Moore, W. M., "Calculation of the Elastic Moduli of a Two Layer Pavement System from Measured Surface Deflections," *Part I and Part II, Report No. 123-6A and 123-6*, Texas Transportation Institute, College Station, 1971.
3. Vaswani, N.K., "Method for Separately Evaluation Structural Performanc of Subgrades and Overlaying Flexible Pavement," *Highway Research Record No. 326*, Highway Research Board, Washington, D. C., 1971, pp.48-62.
4. Wang, M.C., "Pavement Layer Evaluation from Deflection Basin," *Proceedings, International symposium on Bearing Capacity of Roads and Airfields*, Trondheim, Norway, 1982, pp. 816-825.
5. Newcomb, D.E., "Development and Evaluation of a Regression Method to Interpret Dynamic Pavement Deflections," *Ph.D., Dissertation*, Univ. of Washington, 1986.
6. 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*, Univ. of Michigan, Ann, Arbor, 1977, pp.831-840
7. Uddin, W., Nazarian, S., Hudson, W.R., Meyer, A.H., and Stokoe II, K.H., "Investigations into Dynaflect Deflections in Relations to Location/Temperature Parameters and Insitu Material Charterization of Rigid Pavements," *Research Record 256-5*, Center for Transportation Research, University of Texas at Austin, 1983.
8. Uddin, W., Meyer, A.H., Hudson, W.R., and Stokoe II, K.H., "A Structural Evaluation Methodology for Pavements Based on Dynamic Deflections," *Research Report 387-1*, Center for Transportation Research, Univ. of Texas at Austin, 1985.
9. Wang, M.C., and Anani, B.A., "Evaluation In Situ Elastic Moduli from Road-Rater Deflection Basin," *Transportation Research Record No. 810*, Transportation Research Board, Wasington, D. C., 1980, pp.54-57.
10. 김수일, 김문겸, 유지형, "처짐곡선을 이용한 3층 아스팔트 포장구조체의 물성 추정에 관한 연구", *대한토목학회논문집*, 제9권, 제1호, 1989, pp.126-148.
12. Micheolw, J., *Analysis of Stresses and Displacements in an n-Llyered Elastic Systim Uniformly Distribution on a Circular Area*, California Research Cooperation, California, 1963.
13. Huang, Y.H., *FPMANUAL(Flexible Pavement Analysis Computer Program Manual)*, Univ. of Kentucky, 1972.
14. Hoffman, M.S, and Thompson, M.R., "Comparative Study of Selected Nondestructive Testing Device," *Transportation Reseach Record No. 852*, Transportation Reseach Board, Washington, D, C., 1982, pp.32-41.
15. Bohn, A., Ullidtz, P., Stubstad, R., and Sorensen, A., "Danish Experiments with the French Falling Weight Deflectometer," *Proceedings, 3rd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Univ. of Michigan, Ann Arbor, 1972, pp.1119-1128.
16. Shao, K.Y., Roesset, J.M., and Stokoe II, K.H., "Dynamic Interpretation of Dynaflect and Falling Weight Deflectometer Tests on pavement Systems," *Research Report 437-1*, Center for Transportation Research, Univ. of Texas at Austin, 1986.
17. Connor, W.S. and Marvin, Z., *Fractional Factorial Experiment Design for Factors at Three Levels*, National Bureau of Standards Applied Mathematics Series 54, 1954.
18. Uull, C.H., and Nie, N.H., *SPSS Update 7-9*, McGraw-Hill, New York, 1981.

(接受 : 1989. 10. 23)