

## 가상암반층의 깊이를 고려한 아스팔트 포장체의 층별 탄성계수 추정기법의 개발

### A Study on the Backcalculation of Layer Moduli of Asphalt Pavement System by Contemplating the Depth to Virtual Bedrock

김수일\* · 이광호\*\*

Kim, Soo Il · Lee, Kwang Ho

#### Abstract

The computer program, MFPD, which is used to backcalculate the layer moduli of asphalt concrete pavement system is modified by contemplating the depth to virtual bedrock in this study. An algorithm to estimate the depth to virtual bedrock is developed through the analysis of FWD impulse load duration and the compression wave velocity of ground. For verification of the modified MFPD, FWD is fabricated and then FWD field tests and verification tests are carried out at the test sites. Plate loading tests and surface wave propagation tests are performed at FWD test sites. Laboratory tests (Marshall stability tests, unconfined compression tests) for sampled asphalt concrete specimens are also carried out. From comparison analysis, the validity and applicability of the modified MFPD are verified.

#### 요 지

본 연구에서는 비파괴 시험장비인 FWD를 사용하여 아스팔트 콘크리트 포장체 각 층의 탄성계수를 추정할 때 고려하여야 하는 가상암반층의 깊이를 FWD의 충격지속시간과 충격하중에 의한 포장체내의 압축파 속도로부터 산정할 수 있는 알고리즘을 제시하였다. 또한, FWD 시험자료를 입력치로하여 포장체 각 층의 탄성계수를 추정하는 전산 프로그램인 MFPD에 본연구에서 제시한 알고리즘을 적용 보완하였다. 보완된 MFPD의 탄성계수 추정결과에 대한 타당성을 살피기 위하여 FWD를 제작하여 현장시험을 실시하였으며 아울러 검증시험을 병행 실시하였다. 검증시험으로는 FWD 시험위치에서의 평판재하시험, 채취시료의 실내시험(마찰안정도시험, 압축시험), 표면파시험을 실시하였다. 이들 시험성과를 비교분석한 결과 가상암반층을 고려할 수 있도록 보완한 MFPD의 역산결과가 충분히 신뢰성 있음을 알 수 있었다.

#### 1. 서 론

다층 탄성이론에 의한 아스팔트 콘크리트 포장체

의 구조능력을 평가하기 위해서는 기본적으로 포장체 각 층의 탄성계수를 추정하여야 하며, 추정된 탄성계수의 정확도는 포장평가 시스템 전반에 영향을 주게 된다. 따라서 포장체 각 층의 탄성계수를 정확히 추정하기 위한 비파괴 시험장비와 분석기법

\* 정희원 · 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*\* 정희원 · 연세대학교 산업기술연구소 선임연구원

은 포장평가 체계에서 중요한 요소라 할 수 있다.

포장체의 구조능력 평가와 관련하여 1940년대 말 비파괴 시험장비로 정적 처짐측정장비인 Benkelman Beam<sup>(1)</sup>이 처음 소개되었으며 그 후, Benkelman Beam의 처짐측정체제를 자동화한 Deflectograph, Deflectometer<sup>(2)</sup>가 개발되었다. 정현 진동하중으로 포장 표면의 처짐을 유발하고 이를 측정하는 장비로 1960년대에 Dynaflect와 Road Rater가 개발되어 사용되고 있다.<sup>(3)</sup> 충격하중으로 포장 표면의 처짐을 유발하고 이를 측정하는 장비인 FWD는 1963년 Bretonniere<sup>(4)</sup>에 의해서 제작된 이후 WES, Dynatest, KUAB, Phoenix 모델등의 FWD(Falling Weight Deflectometer)가 개발되어 지금에 이르고 있다. Bohn 등<sup>(5)</sup>과 Hoffman 등<sup>(6)</sup>은 FWD가 실제 차량하중조건을 가장 잘 나타내며, 다른 장비와 비교하여 보다 신뢰성 있는 해석결과를 주는 장비임을 밝힌 바 있다.

한편, 포장체의 구조능력 평가방법으로 1970년대 이전까지는 대부분 비파괴시험으로 측정된 최대 처짐치를 포장의 구조능력 평가에 이용하였다. 최대 처짐치만을 이용한 포장평가 방법이 포장 구성층의 층별 평가에 미흡하며 포장체의 내하력은 특정 응력 또는 변형률과 높은 상관성이 있음이 밝혀진 후<sup>(7)</sup>, 처짐지수(deflection parameter)를 이용한 평가방법<sup>(8-11)</sup>과 처짐곡선(deflection basin)으로부터 포장체의 탄성계수를 역산 추정하고 포장체 내부의 특정 응력 또는 변형률을 산정 평가하는 방법<sup>(12-16)</sup>이 개발되어 현재는 주로 후자에 의한 포장평가 방법이 많이 사용되고 있다.

비파괴 시험자료인 처짐곡선으로부터 포장체 각 층의 탄성계수를 역산하는 방법은 실측 처짐곡선이 이론적 처짐곡선과 일치할 때까지 포장체 각 층의 탄성계수를 보정하는 것으로, 이와 같은 역산기법을 이용한 전산 프로그램으로는 1979년 Stubstad 등<sup>(17)</sup>에 의한 ISSEM4, 1983년 Irwin<sup>(18)</sup>의 MODCOMP2, 1984년 Uddin 등<sup>(19)</sup>에 의한 FPEDD1, 1985년 WES<sup>(20)</sup>의 BISDEF와 Jordahl<sup>(21)</sup>의 ELSDEF, 1989년 김수일 등<sup>(22,23)</sup>에 의한 MFPD가 있다. 그러나, 동적 처짐측정자료를 이용한 대부분의 역산기법은 정적 해석이론인 다층탄성이론등을 적용하기 때문에 역산시 이를 그대로 적용할 경우 실제적이지 못한 역산결과를 초래하게 되며, 이와 같은 문제점을 해

결하기 위하여 일정 가상암반층의 깊이를 경험상 반영하고 있다.<sup>(24)</sup>

본 연구에서는 비파괴 시험장비인 FWD를 이용하여 포장체 각 층의 탄성계수를 역산추정할 때보다 신뢰성 있는 역산결과를 도출할 수 있도록 FWD의 충격영향범위를 고려한 가상암반층의 깊이 추정 알고리즘을 제안하고자 한다. 또한, 가상암반층의 깊이 추정 알고리즘의 신뢰성 분석을 위하여 본 알고리즘을 적용 보완한 물성추정 역산기법 전산프로그램, MFPD의 역산 결과를 검증시험결과와 비교하고자 한다. 이에 MFPD에서 기본 비파괴 시험장비로 하는 FWD를 제작하여 FWD 시험을 실시하고자 하며, 아울러 검증시험으로 FWD 시험 위치에서의 평판 재하시험, 채취시료의 실내시험, 표면파시험을 실시하고자 한다.

## 2. 역산반복기법 전산 프로그램 MFPD

역산반복기법은 해석 대상 포장체 각 층의 탄성계수를 가정한 후 특정 하중이 가해질 때의 이론적 처짐곡선을 실측 처짐곡선과 비교하여, 그 차가 허용 범위 내에 들 때까지 각 층의 탄성계수를 반복적으로 보정함으로써 현위치 탄성계수를 추정하는 방법이다. 역산 해석시 각 층의 두께는 설계도면 또는 시험시 보령자료에 의해 알 수 있으므로 기지의 값으로 하며, 포아송비는 재료특성(일반적 적용치 - AC층: 0.3, 쇠석기층: 0.35, 노상: 0.4)을 고려하여 적용한다.<sup>(22,23)</sup>

본 연구에서 사용하고자 하는 역산반복기법 전산 프로그램, MFPD는 Uddin 등에 의해 개발된 FPEDD1과의 해석결과 비교를 통해 탄성계수 추정 및 보정횟수면에서보다 정확하고 효율적이며, 또한 암반층이 존재하는 경우도 해석가능함이 밝혀진바 있다.<sup>(23,25)</sup> MFPD의 이론적 처짐곡선은 4.1 ton(접지압: 5.8 kg/cm<sup>2</sup>, 접지반경: 15 cm)의 FWD 하중이 가해질 경우의 하중 재하중심과 재하중심으로부터 각각 30, 60, 90, 120, 150, 180 cm 떨어진 지점의 처짐치 7개( $w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6, w_7$ )를 기준으로 한다. MFPD의 초기 탄성계수 가정치는 실측 처짐곡선을 이용한 추정식에 의하여 산정된 값이나 임의로 가정된 값을 사용한다. 표층, 기층, 보조기층, 노상 탄성계수의 보정은 각각  $w_1, w_2, w_3, w_7$ 을 기준

(3층 포장체의 경우:  $w_1, w_2, w_7$ 을 기준)으로 하게 되며, 각 탄성계수의 보정량은 실측 및 이론적 처짐의 차이로부터 결정된다. MFPD에서는 다층 탄성해석을 위한 부프로그램으로 암반층이 노상하부에 존재하는 경우 실제적인 경계조건을 만족할 수 있도록 SINELA를 수정한 전산 프로그램 SINRB를 사용하고 있다. 그림 1은 MFPD의 전산 흐름도를 보여주고 있다.

### 3. 가상암반층을 고려한 MFPD

일반적으로 포장 구조체를 다층 탄성모델화하여 해석하는 경우 포장체를 물성이 다른 3층 또는 4층 구조로 단순화하고 이를 정적 해석한다. 또한, 포장 구조의 해석을 위한 물성추정에는 비파괴 시험장비의 동하중에 의하여 유발된 일련의 처짐치를 다층 탄성이론에 적용하여 포장체 각 층의 탄성계수를 역산하는 정적 해석방법을 이용하게 된다. 이 때, 동하중에 의한 처짐치를 정하중에 의한 것으로 가정하여 탄성계수를 추정할 경우 실제적이지 못한 결과를 얻게 된다.<sup>(24,26)</sup> 이와 같은 이유는 비파괴 시험시 일정 시간 충격하중의 지속으로 포장 표면에서 연직 하향으로 충격영향범위가 결정되며, 동하중에 의한 처짐치는 이와 같은 충격영향 범위의 물성만에 의존하기 때문이다. 따라서, 충격영향 범위 이하의 물성은 비파괴 시험시 처짐곡선의 형성에 영향을 주지 못하는 것으로 평가할 수 있으며, 이와 같은 동적 처짐곡선을 이용하여 포장체 각 층의 탄성계수를 역산할 때 충격영향범위 이하의 처짐에 영향을 주지 않는 물성이 매우 큰 가상암반층이 존재하는 것으로 가정을 하여야 실제적인 해석결과와 도출이 가능하다.

WES(U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station), Mamlouk 등은 비파괴 시험자료인 처짐곡선을 이용하여 포장체 각 층의 탄성계수를 추정할 때 가상암반층을 고려하여야 실제적인 해석결과와 도출이 가능함을 밝혔으며, 가상암반층의 위치를 포장 표면 연직하향 6 m 지점으로 하여 이를 해석에 적용하고 있다.<sup>(26)</sup> 또한, Yazdani 등<sup>(24)</sup>도 Multidepth Deflectometer를 사용한 가상암반층의 영향 평가를 실시하여 해석상 고려하는 가

상암반층의 일반적 깊이를 포장 표면 연직하향 6 m로 제안한 바 있다. 한편, FWD 시험시 충격 지속시간을 0.03초로 하여 이를 고려하고 노상 물성에 대한 압축파속도<sup>(27)</sup>가 400 m/초인 일반적인 경우로 가정했을 때 충격의 영향범위를 대략 6 m(0.015 초×400 m/초)로 평가할 수 있으나, 이와 같은 일반적 가정은 노상의 종류 및 상태에 따라 다르게 평가되기 때문에 충격영향범위를 충분히 해석에 반영하지 못하는 결과를 초래할 수 있다.

최근 Uddin 등<sup>(26)</sup>과 Scullion 등<sup>(28)</sup>은 해석상 노상하부에 존재하는 가상암반층의 정확한 위치를 추정하기 위하여 FWD나 Dynaflect의 재하하중에 의해 유발된 압축파나 처짐측정자료를 이용하는 방법을 제안한 바 있다. 그러나, Scullion 등의 처짐측정치를 이용하는 방법은 이론적으로 그 타당성이 정립된 것은 아니며 초기 연구단계에 있는 실정이다. Uddin 등은 비파괴 시험시 하중재하 중심에서 가장 멀리 떨어진 측정점의 처짐치를 근거로 하는 예측관계식(predictive relationships)으로부터 노상물성을 결정하여 압축파 속도를 추정하고 비파괴 시험장비의 하중재하 주파수를 고려하여 가상암반층의 깊이를 추정할 수 있는 이론적 근거를 제시한 바 있다.

본 연구에서는 탄성계수 추정 역산 프로그램과 연계하여 초기 포장체 각 층의 탄성계수 추정치로부터 각 층의 압축파 속도를 산정하고 FWD 시험의 충격지속시간을 고려하여 가상암반층의 깊이를 추정하며, 추정된 가상암반층의 깊이를 재차 역산해석에 적용하여 포장체 각 층의 탄성계수를 반복적으로 보정할 수 있는 알고리즘을 제시하고자 한다. 그림 2는 본 알고리즘을 역산기법 전산프로그램 MFPD와 연계하여 나타낸 것으로 4층 포장구조를 대상으로 한 것이다. 그림 2에서 입력치는 그림 1의 MFPD와 동일하며, 이 중  $H_4$ 는 노상 상부에서 가상암반층까지의 깊이로 가정된 값이다. 또한,  $V_p$ 은 각 층의 탄성계수( $E_i$ )로부터 산정된 압축파 속도이며,  $g$ 는 중력가속도,  $\mu_1$ 과  $\mu_2$ 은 각각 각 층 재료의 포아송비와 단위중량이다.

따라서, 이와 같은 알고리즘을 적용, 보완한 MFPD는 각 반복역산 단계별 가상암반층의 추정 깊이를 전 단계와 비교하여 그 차가 허용범위에 들면 가상암반층의 깊이 및 포장체 각 층의 탄성계수를

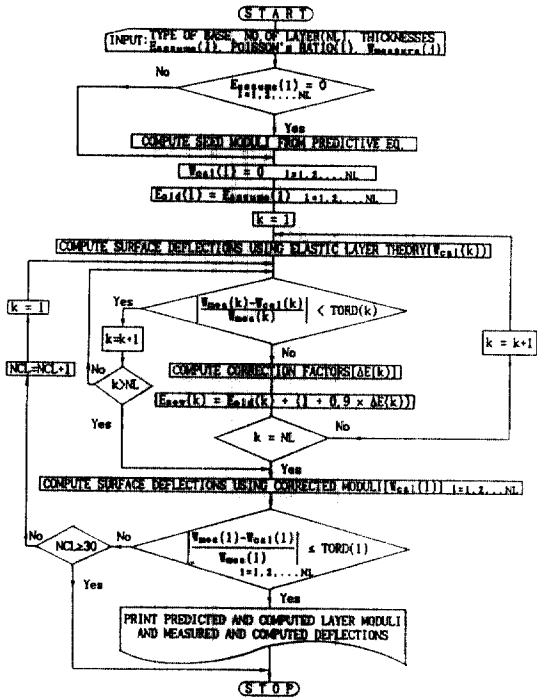


그림 1. MFPD의 전산 흐름도

출력하게 된다. 보완한 MFPD의 적용범위는 FWD 충격영향범위 이내에 암반층이 존재하지 않는 경우에 한하며, 암반층이 충격영향범위 이내나 충격영향한계 부근(약 6m 깊이 내외)에 위치한다고 판단될 경우는 그 위치를 정확히 파악, 해석에 적용하여야 한다.

#### 4. FWD의 제작

FWD는 충격을 도로표면에 가하고 이에 따른 표면처짐을 측정하는 포장구조 해석용 비파괴 시험장비이다. 따라서, FWD는 하중재하장치, 하중측정장치, 처짐측정장치로 구성되며 이를 구성도로 나타내면 그림 3과 같다.

본 연구를 위하여 제작한 FWD(사진 1)는 다음과 같은 재하 및 측정 체계를 갖추고 있다. 하중은 일정 질량을 연직으로 자유낙하시킴에 의하여 도로표면에 스프링(고무판)으로 연결된 판에 충격력으로 작용하게 된다. 이 때 하중은 수직샤프트에 의하여 수직으로 작용하도록 유도된다. 하중의 크기는 질량크

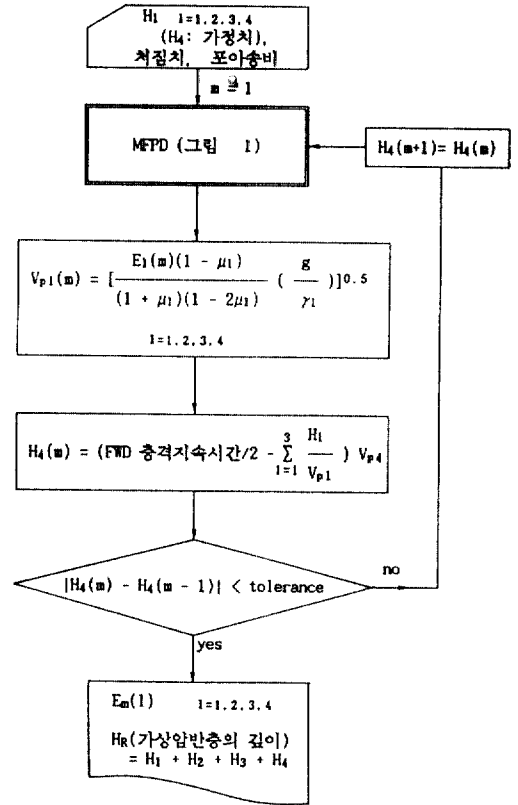


그림 2. 가상암반층의 깊이추정 알고리즘

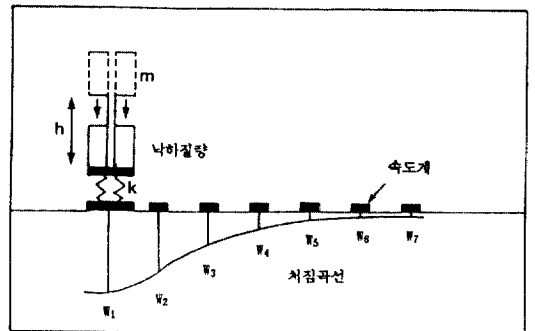
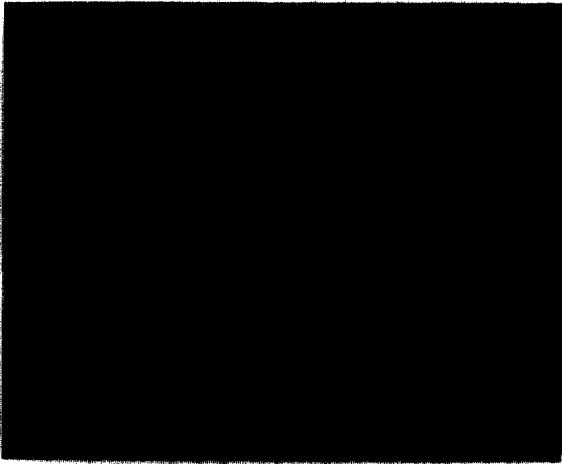


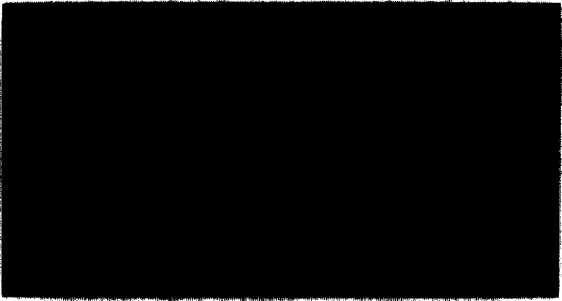
그림 3. FWD의 개념도

기와 낙하높이에 따라 조절되며, 재하판 상부에 놓인 하중계(Load Cell)로 측정된다. 처짐은 재하중심과 그 곳으로부터 30cm 간격으로 놓인 7개의 속도계(Geophone)에 의하여 측정된다.

FWD 하중계와 속도계의 검정은 시간영역에서의 해(Time Domain Solution)를 이용하는 방법을 적



(a) FWD 몸체



(b) 속도계에 의한 처짐 측정

사진 1. FWD 몸체 및 속도계

용하였으며, 검정에 사용한 주요 장비로는 하중계의 경우 INSTRON ASIA사의 Repeated Vibration Apparatus(50 ton), 속도계의 경우 LING DYNAMIC SYSTEM사의 Modular Power Amplifier, V631 Vibrater(table type), Accerlometer, Gap Detector, FFT Analyzer 등을 사용하였다.<sup>(25)</sup>

하중계와 속도계는 측정결과를 analog voltage로 출력하며, 출력결과는 하중계의 경우 KYOWA DPM 310, 속도계의 경우 KYOWA DA 510BX(8ch.) 증폭계를 거쳐 개인용 컴퓨터에 내장된 DT 2821 A/D Converter로부터 수치화된다. 최종적인 처짐 곡선은 수치화된 속도계의 출력결과를 수치 적분하여 현지 화면 출력 또는 저장된다. 이와 같은 FWD 측정체계를 계통도로 나타내면 그림 4와 같다.

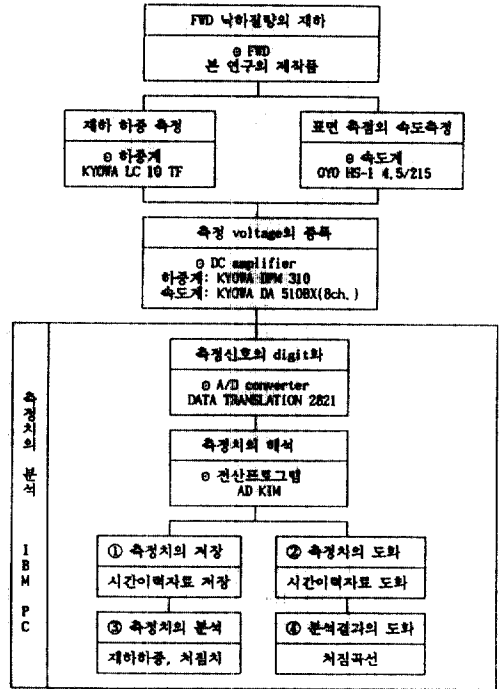


그림 4. FWD 측정체계의 계통도

## 5. FWD 현장시험 및 시험자료의 해석

FWD 현장시험은 경부고속도로 만남의 광장 - 판교간 확장공사구간 중 만남의 광장 공사측점 3+040과 3+060 사이의 확장부 신설 포장체 5개소, 구 포장체 4개소에서 실시하였다. FWD 시험을 실시한 각 지점에서의 포장단면 및 FWD 시험 자료는 표 1과 같다. 표 1에서 아스팔트 층의 두께  $H_1$ 과  $H_2$ 는 코어(core)를 채취하여 측정된 값이며,  $H_3$ 는 설계도면을 근거로 한 값이고,  $H_4$ 는 노상 상부에서 암반층까지의 깊이로 현장지형 조건을 고려하여 추정된 값이다.

본 연구에서는 검증시험 결과와의 비교에 앞서 가상암반층의 깊이에 따른 포장체 각 층의 탄성계수 추정결과를 비교함으로써 본 연구에서 보완한 MFPD의 이론적인 타당성 분석을 실시하였다. 따라서, 역산은 가상암반층의 깊이를 고려하지 않은 경우, 가상암반층의 깊이를 일반적으로 적용하고 있는 6m로 한 경우, 그리고 가상암반층의 깊이를 충격영향평가로 산정한 경우 등 3가지로 나누어

표 1. FWD 현장시험 자료

시험 지점	각 층 두께(cm)				포장상태	표면 온도 (°C)	5일간 평균 대기 온도 (°C)	FWD 처짐치(micron)							비고
	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>3</sub>	H <sub>4</sub>				W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>	W <sub>4</sub>	W <sub>5</sub>	W <sub>6</sub>	W <sub>7</sub>	
1	-	16.0	45.0	1000.	신설포장	25.	24.	595.6	333.6	147.9	75.1	51.6	43.4	36.8	H <sub>1</sub> : AC 표층 H <sub>2</sub> : AC 기층 H <sub>3</sub> : 보조기층 H <sub>4</sub> : 노상 (일반층까지의 추정깊이)
2	-	16.0	45.0	1000.	"	35.	23.	634.8	325.1	140.4	69.7	47.8	40.3	35.0	
3	-	16.5	45.0	1000.	"	29.	23.	479.1	274.6	134.6	67.2	41.7	36.3	30.8	
4	-	21.2	45.0	1000.	"	29.	23.	452.3	281.0	169.3	103.7	68.0	53.6	44.6	
5	-	20.0	45.0	1000.	"	31.	23.	622.4	360.7	219.9	129.8	82.5	65.5	54.5	
6	5.6	24.4	55.0	1000.	구포장	29.	23.	337.9	193.0	115.5	70.2	44.3	33.9	27.4	
7	5.4	24.6	55.0	1000.	"	28.	23.	301.1	158.6	94.7	56.3	34.6	26.6	21.3	
8	6.1	23.9	55.0	1000.	"	27.	23.	310.0	167.4	101.4	66.2	43.1	32.6	4.8	
9	6.1	23.9	55.0	1000.	"	27.	23.	269.9	133.9	82.8	54.3	35.5	27.2	21.4	

실시하였다. 가상암반층을 고려치 않은 역산결과는 표 2와 같다. 또한, 가상암반층의 깊이를 6m로 한 경우의 역산결과는 표 3, 가상암반층의 깊이를 충격영향평가 방법으로 산정한 경우의 역산결과는 표 4와 같다.

가상암반층의 영향을 고려치 않은 경우 시험 대상 포장체의 탄성계수 추정 결과는 표 2에서 보는 바와 같이 E<sub>3</sub>와 E<sub>4</sub>, 즉 보조기층의 탄성계수가 노상의 탄성계수보다 작은 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 포장체의 성층 구조적 측면에서 비 실제적인 것으로 판단된다.

충격영향평가 방법으로 가상암반층을 고려한 표 4의 분석결과를 살펴보면 가상암반층의 깊이가 포장물성에 따라 약 4m에서 7m까지 평가되고 있다. 이와 같은 결과는 일반적으로 가정하고 있는 가상암반층의 깊이 6m에 비해 -33%에서 +17%까지 변하는 범위지만 노상의 탄성계수 추정치를 기준으로 살펴보면 -20%에서 +10%까지의 차이만을 보인다. 이와 같은 차이는 충격영향 깊이의 결정에 큰 영향을 미치는 노상의 물성에 따른 결과로 판단된다. 지점 6은 충격영향평가에 의한 분석결과로도 가상암반층의 깊이가 6m로 평가된 경우로 표 3과 표 4에서 포장체 각층의 탄성계수 추정결과는 동일하다.

본 연구의 분석범위에서 살펴보면, 가상암반층의 깊이를 6m로 하여 추정된 노상 탄성계수가 1375 kg/cm<sup>2</sup>보다 클 경우, 충격영향평가에 의한 해석결과는 가상암반층의 깊이를 6m보다 크게 평가하며 또한 노상의 탄성계수도 6m의 가상암반층으로 해석한 결과보다 크게 평가하고 있다. 이에 반하여, 가상암반층의 깊이를 6m로 하여 추정된 노상 탄성계수가 1375 kg/cm<sup>2</sup>보다 작을 경우, 충격영향평가에 의한 해석결과는 가상암반층의 깊이를 6m보다 작게 평가하며 또한 노상의 탄성계수도 6m의 가상암반층으로 해석한 결과 보다 작게 평가하고 있다.

가상암반층의 깊이를 일률적으로 6m로 하여 해석하는 경우는 실제 노상의 물성이 일반적인 경우보다 매우 크거나 작을 때 FWD 시험시의 충격영향 깊이와 상이할 수 있으며, 이와 같은 경우 물성추정면에 있어서 신뢰성 저하의 가능성이 클 것으로 판단된다.

## 6. 검증시험 결과와의 비교분석

FWD 시험자료를 근거로 충격영향평가에 의해 가상암반층의 깊이를 추정할 수 있도록 보완한 전산 프로그램, MFPD가 신뢰성 있는 결과를 주고 있는

표 2. FWD 현장 시험분석 결과(가상암반층을 고려하지 않은 경우)

시험 지점	보정 회수	탄성계수 추정결과				FWD 처짐치(micron)				
		E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>4</sub>	*	w <sub>1</sub>	w <sub>2</sub>	w <sub>3</sub>	w <sub>7</sub>
1	10	-	12822.	784.	1607.	1	595.6	333.6		36.8
						2	598.0	335.0	-	36.8
						3	0.4	0.4		0.0
2	8	-	9664.	842.	1698.	1	634.8	325.1		35.0
						2	631.7	325.8	-	35.0
						3	-0.5	0.2		0.0
3	6	-	16276.	941.	1915.	1	479.1	274.6		30.8
						2	477.2	274.3	-	30.8
						3	-0.4	-0.1		0.0
4	3	-	13162.	1012.	1352.	1	452.3	281.0		44.6
						2	454.5	281.6	-	44.7
						3	0.5	0.2		0.2
5	10	-	8521.	860.	1110.	1	622.4	360.7		54.5
						2	620.9	359.6	-	54.6
						3	-0.2	-0.3		0.2
6	30	12031.	9720.	1150.	2200.	1	337.9	193.0	115.5	27.4
						2	342.7	192.3	115.2	27.4
						3	1.4	-0.4	-0.3	0.0
7	30	11305.	10998.	1388.	2811.	1	301.1	158.6	94.7	21.3
						2	297.5	160.0	93.3	21.2
						3	-1.2	0.9	-1.5	-0.5
8	6	11140.	10677.	1408.	2444.	1	310.0	167.4	101.4	24.8
						2	308.6	167.8	99.9	24.8
						3	-0.5	0.2	-1.5	-0.0
9	4	6444.	13770.	2008.	2788.	1	269.9	133.9	82.8	21.4
						2	273.1	134.9	81.6	21.9
						3	1.2	0.8	-1.5	2.3

E<sub>i</sub>: 포장체 i 층의 탄성계수 추정치(단위: kg/cm<sup>2</sup>)

\* 1: 측정치, 2: 계산치, 3: 오차(%)

지를 검증하기 위하여, 실제 현장에서 FWD 시험과 병행하여 검증시험을 실시하였다. 검증시험으로는 평판재하시험, 시료 채취에 의한 실내시험, 표면파 시험을 실시하였으며, 검증방법으로 각 검증시험자

료를 분석하여 표 4의 역산결과와 비교하였다. 표 5는 각 지점 별로 실시한 검증시험의 유형을 보여 주고 있다. 지점 2와 지점 5에서의 검증시험은 경 부고속도로 확장 공사일정 및 교통통제 등의 관계로

표 3. FWD 현장 시험분석 결과(6m 깊이의 가상압반응을 가정한 경우)

시험 지점	보정 회수	탄성계수 추정결과				FWD 처짐치(micron)					
		E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>4</sub>	*	w <sub>1</sub>	w <sub>2</sub>	w <sub>3</sub>	w <sub>7</sub>	
1	6	-	10741.	1173.	956.	1	595.6	333.6	-	36.8	
						2	592.9	333.1			36.9
						3	-0.5	-0.2			0.3
2	7	-	7765.	1227.	1009.	1	634.8	325.1	-	35.0	
						2	632.6	324.7			35.0
						3	-0.4	-0.1			0.0
3	7	-	13096.	1439.	1169.	1	479.1	274.6	-	30.8	
						2	481.5	273.6			30.7
						3	0.5	-0.4			-0.3
4	5	-	11698.	1598.	837.	1	452.3	281.0	-	44.6	
						2	444.9	281.0			44.5
						3	0.2	0.0			0.2
5	5	-	7333.	1311.	681.	1	622.4	360.7	-	54.5	
						2	623.7	362.1			54.5
						3	0.2	0.4			0.0
6	30	14443.	8483.	1684.	1375.	1	337.9	193.0	115.5	27.4	
						2	338.0	184.2	113.8	26.9	
						3	0.0	-4.6	-1.5	-1.8	
7	12	15990.	9502.	1903.	1686.	1	301.1	158.6	94.7	21.3	
						2	296.9	158.0	95.8	21.5	
						3	-1.4	-0.4	1.2	0.9	
8	17	15001.	9011.	1898.	1501.	1	310.0	167.4	101.4	24.8	
						2	310.3	167.5	103.3	24.6	
						3	0.1	0.1	1.5	-0.8	
9	18	16985.	9101.	2799.	1717.	1	269.9	133.9	82.8	21.4	
						2	265.8	134.3	82.8	21.8	
						3	-1.5	0.3	0.0	1.8	

E<sub>i</sub>: 포장체 i 층의 탄성계수 추정치(단위: kg/cm<sup>2</sup>)

\* 1: 측정치, 2: 계산치, 3: 오차(%)

부득이 유보하였다.

### 6.1 평판재하시험과의 결과 비교

평판재하시험을 통한 탄성계수의 결정은 반복 재

하-제하를 실시 대상지반을 안정화시킨후 재하시  
자료를 이용하는 방법<sup>(29)</sup>을 택하였다. 표 6은 평판  
재하시험 결과를 FWD 시험결과와 비교한 것으로  
지점 1과 지점 3에서의 보조기층과 노상의 탄성계



표 4. FWD 현장시험 분석결과(충격영향평가로 가상압반층을 고려한 경우)

시험 지점	보정 회수	탄성계수 및 R 추정결과					FWD 처짐치(micron)				
		E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>4</sub>	R	*	w <sub>1</sub>	w <sub>2</sub>	w <sub>3</sub>	w <sub>7</sub>
1	18	-	9942.	1371.	841.	491.	1	595.6	333.6		36.8
							2	597.7	332.7	-	36.7
							3	0.4	-0.3		-0.3
2	20	-	7279.	1341.	909.	506.	1	634.8	325.1		35.0
							2	637.0	324.7	-	35.1
							3	0.3	-0.1		0.3
3	21	-	13338.	1443.	1090.	548.	1	479.1	274.6		30.8
							2	480.0	275.6	-	30.8
							3	0.2	0.4		0.0
4	22	-	11065.	1828.	723.	473.	1	452.3	281.0		44.6
							2	455.0	281.6	-	44.5
							3	0.6	0.2		-0.2
5	19	-	6970.	1672.	530.	416.	1	622.4	360.7		54.5
							2	619.6	359.5	-	54.6
							3	-0.4	-0.3		0.2
6	30	14443.	8483.	1684.	1375.	600.	1	337.9	193.0	115.5	27.4
							2	338.0	184.2	113.8	26.9
							3	0.0	-4.6	-1.5	-1.8
7	27	14890.	9342.	1835.	1825.	685.	1	301.1	158.6	94.7	21.3
							2	299.9	158.3	94.9	21.6
							3	-0.4	-0.2	0.2	1.4
8	26	14995.	8997.	1888.	1534.	640.	1	310.0	167.4	101.4	24.8
							2	310.3	167.6	103.0	25.0
							3	0.1	0.1	1.5	0.8
9	26	16200.	9001.	2636.	1891.	705.	1	269.9	133.9	82.8	21.4
							2	268.8	134.9	81.7	21.4
							3	-0.4	0.7	-1.3	0.0

E<sub>i</sub>: 포장체 i 층의 탄성계수 추정치(단위: kg/cm<sup>2</sup>)

R: 포장표면에서 연직하향 가상압반층까지의 추정깊이(단위: cm)

\*1: 측정치, 2: 계산치, 3: 오차(%)

수를 비교한 것이다. 표 6에서 평판재하시험 결과를 기준으로 할 때 FWD 시험으로 추정된 탄성계수는 최대 +30% 정도의 오차를 보이고 있으나, 타기관<sup>(29)</sup>

에서 분석한 바 있는 검증 오차정도와 비교할 때 대체로 만족할만한 수준으로 판단된다.

표 5. 각 지점 별로 실시한 검증시험

FWD 시험 지점	평판재하 시험	실내시험 (core채취)	표면파 시험
1	0	-	-
2	-	-	-
3	0	0	-
4	-	0	0
5	-	-	-
6	-	0	-
7	-	0	-
8	-	0	0
9	-	-	0

표 6. FWD 시험자료의 역산 결과와 평판재하 시험 결과의 비교

지점	층구분	탄성계수(kg/cm <sup>2</sup> )		비 고
		평판재하 시험	FWD 시험	
1	보조 기층	1005	1371	포장굴착후 보조기층 상부에서 시험실시
	노상	877	841	포장굴착후 노상상부에서 시험실시
	보조 기층	1392	1443	보조기층 상부에서 시험실시

6.2 실내시험과의 결과 비교

또한, 본연구에서는 FWD 시험실시 위치에서 보링 채취한 아스팔트 콘크리트 시편에 대하여 실내시험(마찰안정도시험, 압축시험)을 실시하고 이를 분석한 결과와 충격영향평가로 가상암반층을 고려한 FWD 시험의 역산결과를 비교하였다. 표 7은 실내시험 결과와 FWD 시험 역산결과를 나타낸 것으로 실내 시험에 의해서 결정된 탄성계수는 FWD 시험시 온도조건과 같게 보정을 하여 FWD 시험조건과 동일한 조건에서 각 탄성계수 값을 비교할 수 있도록 하였다. 온도 보정은 Franklin의 관계식<sup>(30)</sup>을 이용하였다.

표 7을 살펴보면 AC 기층의 압축시험 결과는 FWD 시험결과와 잘 일치하고 있다. 그러나, 마찰 안정도에 의한 AC 표층의 탄성계수추정 결과와 FWD 시험결과는 약간의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 지점 4를 제외한 지점 6, 7, 8의 경우에 있어서 표층의 두께가 각각 56 mm, 54 mm, 61 mm로 마찰 안정도 시험에 필요한 규격(직경 100 mm, 높이 63.5 mm)에 미치지 못하기 때문에 발생한 오차로 판단된다.

6.3 표면파시험과의 결과 비교

도로 포장표면 등에서 실시하는 표면파시험은 변형률 상태가 실제보다 매우 작은 상태에서의 초기 탄성계수를 결정하기 때문에 FWD 시험 결과와 직접 비교를 할 수는 없으며, 간접적으로 비교 대상 각 탄성계수의 비(ratio)나 정도로 FWD 시험 결과를 평가할 수 있다. 표 8은 표면파 전달시험을 실시한 결과로 신설 포장인 지점 4, 구포장의 차륜 통과부(wheel path)와 차선 중앙부인 지점 8과 지점 9에서 각각 전단파 및 압축파시험을 실시하고, 이중 파의 극성을 이용하여 파전달속도의 측정에 비교적 신뢰성을 주고 있는 전단파를 기준으로 분석한 것이다. 전단파속도의 제곱( $v_s^2$ )은 탄성계수에 비례하고 탄성계수는 온도에 따라 변하기 때문에 지점 별 탄성계수의 비를 통한 분석을 위하여 표 8에서의  $v_s^2$ 는 표면온도 27°C로 전환하여 나타낸 값이다.

표 8에서 지점 4와 지점 9를 살펴보면 표면파시험에 의해 추정된 탄성계수비(지점 4의 탄성계수/지점 9의 탄성계수)는 0.79이며 FWD의 결과에 의한 탄성계수비는 0.78로 서로 비슷한 수준을 보이고 있다. 지점 8의 경우를 지점 9와 비교할 때 표면파 시험에 의한 탄성계수비는 0.90이며 FWD의 결과에 의한 탄성계수비는 0.92이다. 이와 같은 표면파시험에 의한 분석결과로부터 FWD 시험에 의한 탄성계수의 추정방법이 일관성 있는 추정결과를 주고 있음을 알 수 있다.

이상과 같은 분석결과를 살펴볼 때 가상암반층의 영향평가에 의한 방법이 보다 실제적인 역산결과를 줄 수 있다고 판단된다. 따라서, 본 연구 개발의 가상암반층 깊이추정 알고리즘은 포장체 각 층의 탄성계수 추정에 효율적으로 이용될 수 있을 것으로

표 7. FWD 시험자료의 역산 결과와 실내시험 결과의 비교

지점	충구분	① 마찰 안정도 (kg)	② ①에 의한 탄성계수결정 (kg/cm <sup>2</sup> )	③ 시험시편 의 온도 (°C)	④ FWD시험시 총 내부온도 (°C)	온도 보정 계수	④의 조건으로 전환된 ②의 탄 성계수(kg/cm <sup>2</sup> )	FWD현장 시험결과 (kg/cm <sup>2</sup> )	오차 (%)
3	표층	647.	20095.	20.0	26.7	0.643	13049.	13338.	+ 2.2
4	표층	690.	21865.	20.0	25.3	0.707	15458.	11065.	- 28.4
6	표층	765.	25493.	20.0	32.2	0.448	11427.	14443.	+ 26.4
	AC기층 <압축시험>		9252.	21.1	22.2	0.930	8604.	8483.	- 1.4
7	표층	807.	27316.	20.0	31.1	0.482	13171.	14890.	+ 13.0
	AC기층 <압축시험>		10023.	21.1	21.4	0.983	9849.	9342.	- 5.1
8	표층	649.	20101.	20.0	29.4	0.540	10840.	15001.	+ 38.3

표 8. FWD 시험자료의 역산 결과와 표면파(전단파)시험 결과의 비교

지점	파전달속도 $v_s$ (m/sec)	$v_s^2(v_s^2 \times \text{탄성계수})$	FWD 역산결과(kgf/cm <sup>2</sup> )	비고
4	1297	1363156 (←1682209)	12913 (←11065)	표면파시험시 표면온도:20°C FWD 시험시 표면온도:29°C (각 경우 27°C 로 전환)
8	1244	1547536	14995	표면파시험시 표면온도:27°C
9	1311	1718721	16200	FWD 시험시 표면온도:27°C
탄성 계수비	지점 4 ----- 지점 9	0.79	0.78	
	지점 4 ----- 지점 8	0.90	0.92	

판단된다.

## 7. 결 론

본 연구는 FWD를 이용한 아스팔트 콘크리트 포장체 각 층의 탄성계수를 추정할 때 고려하여야 하는 가상압반층의 깊이 설정에 관한 것으로 이론적 고찰과 FWD 현장시험 및 검증 시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 포장물성에 따른 압축파속도와 FWD 하중의 충격지속시간을 분석하는 방법으로 가상압반층의 깊이를 추정할 수 있는 알고리즘을 제시하였으며, 이를 역산기법 전산 프로그램, MFPD에 적용 보완

하였다.

2) MFPD를 이용한 현위치 포장체의 분석모델을 설정하기 위하여 하중재하장치, 하중측정장치, 처짐 측정장치로 구성된 FWD를 제작하였다.

3) 가상압반층을 고려하여 보완된 MFPD의 물성 추정 결과의 신뢰성 분석을 위하여 FWD 시험위치에서 검증시험을 실시하였다. 검증시험으로는 평판재하시험, 채취시료의 실내시험(마찰안정도시험, 압축시험), 표면파시험을 실시하였으며, 이들 시험의 분석결과로부터 압축파 속도를 분석하여 가상압반층의 깊이를 추정할 수 있게 보완된 MFPD의 역산결과가 충분히 신뢰성 있음을 확인하였다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 특정연구개발 지원사업으로 수행된 것으로, 본 연구를 가능케 한 관계당국에 감사를 드립니다.

## 参 考 文 献

1. Sargious, M., *Pavement and Surfacing for Highways and Airports*, Applied Science, London, 1975.
2. Yoder, E.J. and Witzak, M.W., *Principles of Pavement Design*, 2nd ed., John Willy & Sons, New York, 1975.
3. Lytton, R.L. and Smith, R.E., "Use of Nondestructive Testing in the Design of Overlays for Flexible Pavements", *TRR 1007*, TRB, Washington, D. C., 1985, pp. 11-19.
4. Bretonniere, S., "Etude D'un deflectometre a Boulet", *Bulletin de Liaison des Laboratoires Routines*, No. 2, Paris, 1963, pp. 27-36.
5. Bohn, A., Ullidtz, P., Stubstad, R., and Sorensen, A., "Danish Experiments with the French Falling Weight Deflectometer", *Proceedings of 3rd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Ann Arbor, 1972, pp. 1119-1128.
6. Hoffman, M.S. and Thompson, M.R., "Comparative Study of Selected Nondestructive Testing Device", *TRR 852*, TRB, Washington, D.C., 1982, pp. 32-41.
7. Dorman, G.M. and Edward, J.M., "Developments in the Application in Practice of a Fundamental Procedure for the Design of Flexible Pavements", *Proceedings of 2nd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Ann Arbor, 1967, p. 99.
8. 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", *Report No. 123-6*, Texas Transportation Institute, 1971.
9. Vaswani, N.K., "Method for Separately Evaluation Structural Performance of Subgrades and Overlaying Flexible Pavement", *HRR 362*, HRB, Washington, D.C., 1971, pp. 48-62.
10. Vaswani, N.K., "Determining Moduli of Materials from Deflections", *Journal of the Transportation Engineering Division*, Vol. 103, No. TE 1, ASCE, 1977, pp. 125-141.
11. AASHTO, *AASHTO Interim Guide for Design of Pavement Structures*, AASHTO, 1972.
12. 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, University of Texas, Austin, 1985.
13. Sharma, J. and Stubstad, R.N., "Evaluation of Pavement in Florida by Using the Falling Weight Deflectometer", *TRR 755*, TRB, Washington, D.C., 1980, pp. 42-48.
14. Claessen, A.I.M., Valkering, C.P., and Ditsmarsch, R., "Pavement Evaluation with the Falling Weight Deflectometer", *Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 45, Minnesota, 1976, pp. 122-157.
15. Molenaar, A.A.A. and Van Gorp, A.P.M., "Structural Performance Model and Overlay Design Method", *TRR 888*, TRB, Washington, D.C., 1982, pp. 31-37.
16. Ullidtz, P., "Overlay and Stage by Stage Design", *Proceedings of 4th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Ann Arbor, 1977, pp. 624-635.
17. Stubstad, R.N. and Sharma, J., "Deriving Mechanistic Properties of Pavements from Surface Deflections", *Proceedings of International Conference on Computer Applications in Civil Engineering*, Roorkee, India, 1979, pp. 57-62.
18. Irwin, L.H., *User Guide to MODCOMP2*, Cornell University, Ithaca, NY, 1983.
19. Uddin, W., "A Structural Evaluation Methodology for Pavements Based on Dynamic Deflections", *Ph. D. Dissertation*, Department of Civil Engineering, University of Texas, Austin, 1984.
20. Bush, A.J., *Computer Program BISDEF*, WES, 1985.
21. Jordahl, P., *ELSDDEF User's Guide*, Brent Rauhut Engineers, Austin, 1985.
22. 김수일, 유지형, "처짐곡선을 이용한 3층 아스팔트 포장체의 물성추정에 관한 연구", *대한토목학회논문집*, 제9권, 제4호, 대한토목학회, 1989, pp. 97-107.
23. 김수일, 유지형, "FWD에 의한 4층 아스팔트 포장 구조체의 층별 탄성계수 추정", *대한토목학회논문집*, 제10권, 제2호, 대한토목학회, 1990, pp. 67-78.

24. Yazdani, J.I. and Scullion, T., "Comparing Measured and Theoretical Depth Deflections under a Falling Weight Deflectometer Using a Multidepth Deflectometer", *TRR 1260*, TRB, Washington, D. C., 1990, pp. 216-225.
25. 이광호, 아스팔트 콘크리트 포장체의 구조적 능력 평가에 관한 연구, 박사학위논문, 연세대학교, 1992.
26. Uddin, W., Meyer, A.H. and Hudson, W.R., "Rigid Bottom Considerations for Nondestructive Evaluation of Pavements", *TRR 1070*, TRB, Washington, D.C., 1988, pp. 21-29.
27. Prakash, S., *Soil Dynamics*, McGraw-Hill, 1981, p. 62.
28. Scullion, T., Uzan, J. and Paredes, M., "MODULUS: A Microcomputer-Based Backcalculation System", *TRR 1260*, TRB, Washington, D.C., 1990, pp. 180-191.
29. Ruth, B.E., Tia, M., Bloomquist and Badu-Tweneboah, K.B., "Structural Characterization and Stress Analysis of Flexible Pavment Systems", *Final Report 245-D78*, University of Florida, 1987.
30. Majidzadeh, K. and Ilives, G.J., "Flexible Pavement Overlay Design Procedures Volume 1", *FHWA-RD-81-032*, FHWA, 1981.

(接受 : 1993. 6. 19)