



한국도로포장공학회지
第1卷 1號 1999年 10月
pp. 107~119

FWD와 유한요소해석을 이용한 줄눈콘크리트포장 평가법 개발

Development of Evaluation Method for Jointed Concrete
Pavement with FWD and Finite Element Analysis

윤경구* · 이주형** · 최성용***

Yun, Kyong Ku · Lee, Joo Hyung · Choi, Seong Yong

ABSTRACT

The joints in the jointed concrete pavement provide a control against transverse or longitudinal cracking at slab, which may be caused by temperature or moisture variation during or after hydration. Without control of cracking, random cracks cause more serious distresses and result in structural or functional failure of pavement system. However, joints may cause distresses due to its inherent weakness in structural integrity. Thus, the evaluation at joint is very important, and the joint-related distresses should be evaluated reasonably for economic rehabilitation.

The purpose of this paper was to develop an evaluation system at joints of jointed concrete pavement using finite element analysis program, ILLI-SLAB, and nondestructive testing device, FWD. To develop an evaluation system for JCP, a sensitivity analysis was performed using ILLI-SLAB program with a selected variables which might affect fairly to on the performance of transverse joints. The most significant variables were selected from precise analysis. An evaluation charts were made for jointed concrete pavement by adopting the field FWD data.

It was concluded that the variables which most significantly affect to pavement deflections are the modulus of subgrade reaction(K) and the modulus of dowel/concrete interaction(G), and limiting criteria on the performance of joints at JCP are 300pci, 500,000 lb/in, respectively. Using these variables and FWD test, a charts of load transfer ratio versus surface deflection at joints were made in order to evaluate the performance of JCP. Practically, Chungbu highway was evaluated by these evaluation charts and FWD field data for jointed concrete pavement.

For Chungbu highway, only one joint showed smaller value than limiting criterion of the modulus of dowel/concrete interaction(G). The rest joints showed larger values than limiting criteria of the modulus of subgrade reaction(K) and the modulus of dowel/concrete interaction(G).

Keyword : Jointed concrete pavement, FWD, ILLI-SLAB, Modulus of subgrade reaction, Modulus of dowel/concrete interaction

* 한국도로공사 책임연구원, 공학박사

** 강원대학교 토목공학과 박사과정

*** 한석엔지니어링 구조부



요 지

줄눈콘크리트포장의 줄눈은 슬래브의 온도나 습도변화에 의한 구속변형에 의해 슬래브 내부에 종방향 균열이나 횡방향 균열이 발생하는 것을 제어할 목적으로 설치한다. 이러한 줄눈은 줄눈부에서의 불연속성의 원인이 되어 두 슬래브 사이의 하중전달기능을 감소시키며, 상대적으로 취약함을 지녔기 때문에 손상을 유발시킬 수 있는 가능성을 지니고 있다. 따라서, 줄눈콘크리트포장 줄눈부 손상유형 및 정도에 대한 객관적이고 과학적인 평가가 이루어져야 합리적이고 경제적인 보수방법을 결정할 수 있다.

본 연구는 콘크리트포장 해석프로그램인 ILLI-SLAB를 이용하여 줄눈 평가시스템을 개발하고 이를 FWD 시험결과에 이용하여 줄눈콘크리트포장의 상태를 평가하고자 하였다. 이를 위해, 먼저 줄눈부에 영향을 줄 수 있는 변수를 선정하고, ILLI-SLAB를 사용하여 민감도 분석을 실시하여 줄눈부에 영향을 크게 미치는 변수를 찾았다. 이러한 변수들을 분석해 줄눈부의 하중전달효과 및 포면 처짐의 관계를 나타내어, 현장에서 FWD를 실시하여 얻은 하중전달효과와 재하위치의 포면 처짐값을 이용해 줄눈콘크리트포장을 평가하였다.

그 결과 노상지지력 계수(K)와 다웰/콘크리트 상호관계 계수(G) 두 변수가 가장 크게 영향을 미침을 알 수 있었으며, 그 임계값은 각각 300 pci와 500,000 lbs/in.임을 알 수 있었다. 이 두 변수와 현장 FWD 시험을 이용하여 줄눈콘크리트포장의 평가시스템을 개발하였으며, 실제 중부고속도로에서 실시한 FWD 측정치를 이용해 평가한 결과 한 개의 줄눈부만이 다웰/콘크리트 상호관계 계수가 임계값보다 낮고, 대부분 줄눈부의 두 인자값이 임계값 이상으로 콘크리트포장 줄눈부가 양호함을 알 수 있었다.

핵심용어 : 줄눈콘크리트포장, FWD, ILLI-SLAB, 노상지지력 계수, 다웰/콘크리트 상호관계 계수

1. 서 론

아스팔트포장은 표층이 휨응력에 저항하지 못하고 하중을 받으면 표층의 응력이 그대로 노반에 전달하여 하중을 지지하는 반면, 콘크리트포장은 콘크리트 슬래브가 구조체로서의 높은 휨강도와 큰 탄성계수를 가지므로 휨응력 및 전단력에도 저항을 하게 된다. 따라서, 콘크리트포장은 아스팔트포장에 비하여 내구성 및 중차량에 대한 적용성이 뛰어나며 장기간 공용성을 지닌다. 이와 같은 특성을 지닌 콘크리트 포장은 국내 고속도로에서 1983년에 88고속도로를 시초로 하여 고속도로에서 계속적으로 증가하는 추세이며, 이들 대부분이 줄눈콘크리트포장이다.

이러한 줄눈콘크리트포장의 줄눈은 슬래브의 온도나 습도변화에 의한 구속변형에 의해 슬래브 내부에 발생하는 종방향 균열이나 횡방향 균열발생을 제어할 목적으로 설치하나, 때때로 포

장손상의 원인이 된다. 이는 줄눈부에서의 불연속성 때문에 두 슬래브 사이의 하중전달기능을 감소시키며, 상대적으로 구조적 취약함을 지녔기 때문이다. 그러므로 줄눈콘크리트포장 줄눈부 손상유형 및 정도에 대한 객관적이고 과학적인 평가가 이루어져야 합리적이고 경제적인 보수방법을 결정할 수 있다.

본 논문은 줄눈콘크리트포장에서 가장 취약한 줄눈부와 포장체의 구조적 거동을 콘크리트포장 해석 프로그램인 ILLI-SLAB를 이용하여 줄눈 평가시스템을 개발하여 평가하고자 하는데 목적이 있다. 즉, 국내 콘크리트포장 표준단면을 이용하여 평가시스템을 개발하여, 현장에서 실시한 FWD(Falling Weight Deflectometer) 시험을 통해 얻은 결과 값으로 줄눈콘크리트포장을 평가하고자 하였다.

이를 위해 줄눈콘크리트 포장체 평가시스템 개발을 위하여 줄눈콘크리트 포장에서 가장 취약한 줄눈부에 영향을 줄 수 있는 변수를 선정



하고, 포장해석 프로그램인 ILLI-SLAB를 사용하여 민감도 분석을 함으로써 줄눈부에 영향을 크게 미치는 변수를 찾았다. 이러한 변수를 세밀히 분석해 줄눈부의 하중전달효과 및 표면 처짐의 관계를 나타내어, 현장에서 FWD 측정을 실시하여 얻은 하중전달효과와 재하위치의 표면 처짐을 통해 줄눈콘크리트 포장체를 평가할 수 있었다.

2. 비파괴 시험기구와 유한요소법

2.1 FWD

사용된 비파괴 시험기구인 FWD는 일정 질량의 추를 어느 높이에서 충격완화 장치가 붙어있는 재하판에 낙하시켜 포장표면에 충격하중을 가하고 동시에 가속도계의 원리를 이용하여 표면의 처짐을 측정하는 비파괴시험 방법이다. FWD에 의한 충격하중은 정적 및 정상진동 재하장치 보다 실제의 주행 운하중에 보다 근사하다고 보고되고 있다.(1)

가속도계는 재하판 중심에 한 개가 있고 30cm 간격으로 6개 배열되어 있다. 발생하중의 크기는 7~120kN 이고 재하시간은 0.025sec이다. 처짐측정에 관한 조작의 대부분은 컴퓨터를 이용해 자동화되어 있다. FWD는 포장면에 충격하중을 재하하여 표면의 처짐을 측정해 그 자료의 역산을 통해 포장구성단면 각 층의 물성을 파악하고 향후 예상 교통량을 감안한 포장체의 잔존수명을 예측할 수 있다. 특히, 콘크리트 포장의 경우 줄눈 균열부의 하중전달기능 파악 및 포장슬래브 하부의 공동예측 등을 수행할 수 있다.

2.2 ILLI-SLAB

1920년에 Westergaard⁽⁷⁾⁽⁸⁾가 박판이론(thin plate theory)을 근거로 강성포장을 해석하기 위한 고전적인 수치해석방법을 제시한 이후, 근래의 컴퓨터발전과 함께 Tabatabaie에 의한

ILLI-SLAB, Tayabji 와 Colley 에 의한 JSLAB, 미국육군 공병연구소에 의한 WESLIQUID AND WESLAYER, 켄터기 주립대학에서 개발된 KSLAB, 플로리다 주립대학에서 개발된 FEACONS 등 여러 포장구조 해석용 프로그램들이 개발되었다.

1977년 Tabatabaie⁽⁶⁾에 의해 개발된 ILLI-SLAB는 줄눈과 균열에서 하중전달이 존재하거나 존재하지 않은 하나 또는 두층의 콘크리트 포장에 대해 구조적으로 해석하기 위하여 2차원 유한요소 프로그램으로 Winkler 기초 위에 있는 Medium thick plate theory에 기초를 두고 있다. 이 프로그램은 1987년에 기능이 더 추가되어 온도차에 의한 Curling 분석이 가능하게 되었다. 1994년 에 개정된 ILLI-SLAB는 노상지지 특성의 선택이 다양해지고 비선형 온도에 대한 Curling 분석이 가능하다. 또한 콘크리트와 다웰의 상호관계 인자를 고려하여 줄눈 콘크리트 포장에서 더욱 정확한 하중전달을 산출 할 수 있다.⁽³⁾

3. FWD에 의한 현장시험

3.1 현장시험

현장 시험은 중부고속도로 곤지암 IC 근처 상행선 25.500 Km~25.146Km 지점에서 실시하였다. 가로줄눈에 실제로 다웰바가 삽입되었는지를 확인하고자 철근 탐사기를 사용하여 다웰바의 설치유무, 다웰바의 삽입 간격 등을 알아 보았으며, 육안에 의한 포장표면의 파손조사를 실시하였다. 그리고 비파괴시험기인 FWD를 사용하여 슬래브 중앙과 줄눈부에서 측정을 실시하였다.

3.1.1 측정위치

FWD를 이용하여 콘크리트 포장체의 구조지력과 하중전달효과를 파악 할 수 있다. 이러한 결과 값을 얻기 위한 측정위치는 Fig. 1과 같이 슬래브의 중심부와 주행선 바깥쪽 바퀴통



과부분을 따라 줄눈부의 콘크리트포장 표면 충격하중을 타격하여 Geophone을 이용하여 처짐을 측정하였다. 이때 슬래브 중심부에 FWD하중을 타격하여 구조지력과 측정에 따른 슬래브 기울임 보정계수(B)를 산출할 수 있다. 또한 하중전달효과를 파악하기 위해 바퀴통과부분의 줄눈부에 FWD하중을 타격하여, 하중이 재하된 쪽의 처짐(Δ_l)과 하중이 재하되지 않은 쪽의 처짐(Δ_{ul})의 처짐비에 측정에 따른 슬래브 기울임 보정계수(B)를 곱하여 하중전달효과를 산출하였다.

측대			
추월선			
주행선	바퀴통과부분 →	× ····	× ····
노면		중심부	줄눈부

Fig.1 FWD Measurement Location

3.1.2 하중전달효과

일반적으로 하중전달효과는 하중이 재하되지 않은 쪽의 처짐량과 하중이 재하된 쪽의 처짐량 비로 나타낸다. FWD 시험을 통해 측정된 처짐 결과를 가지고 다음 식(1)에 의해 하중전달효과(ΔLT)을 계산할 수 있다.

$$\Delta LT = 100 \times \left(\frac{\Delta_{ul}}{\Delta_l} \right) \times B \quad (1)$$

- 여기서, ΔLT : 하중전달에 따른 처짐, %
- Δ_{ul} : 하중이 재하되지 않은 쪽의 처짐량, inch
- Δ_l : 하중이 재하된 쪽의 처짐량, inch
- B : 측정에 따른 슬래브 기울임 보정계수

B값은 측정에 따른 슬래브 기울임 보정계수로 줄눈부의 실제 처짐비를 구하기 위해 슬래브의 전체적인 기울기를 보정하는 것으로, 슬래브의 중앙에 FWD하중을 타격하여 타격점의 처짐(d_0)과 타격점으로부터 12in. 떨어진 위치의 처짐(d_{12})을 가지고 다음 식(2)을 사용하여 구한다.

$$B = \frac{d_{0 \text{ center}}}{d_{12 \text{ center}}} \quad (2)$$

3.2 FWD 현장 측정결과

Fig. 2 ~ Fig. 3은 Fig. 1과 같은 측정위치에 비파괴 시험기인 FWD로 측정된 결과이다. 이때 FWD 충격하중은 9,000 lb (4.1ton)크기로 타격하였다. 먼저 슬래브 중심부에 FWD하중을 타격하여 슬래브 기울임 보정계수를 구하고, 바퀴통과부분의 줄눈부에 FWD하중을 타격하여 재하위치의 처짐과 재하하지 않은 쪽의 처짐을 구하여 식(1)에 의해 하중전달효과를 산정하였다.

Fig. 2는 각 줄눈에 FWD 시험을 하였을 때 측정된 처짐을 나타낸 것으로 하중을 재하한 쪽의 처짐(d_0)과 하중을 재하하지 않은 쪽의 처짐(d_{12})의 차이를 보여주고 있다. 또한, Fig. 3은 각 줄눈의 하중전달효과를 나타낸 것으로 Fig. 2에서 나타난 두 처짐의 비에 기울임 보정계수를 곱하여 산정한 것이다.

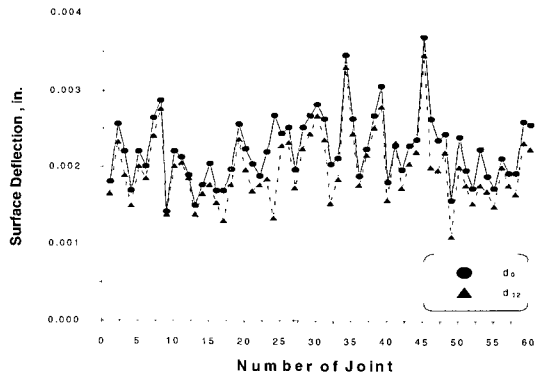


Fig. 2 Surface Deflection from Test

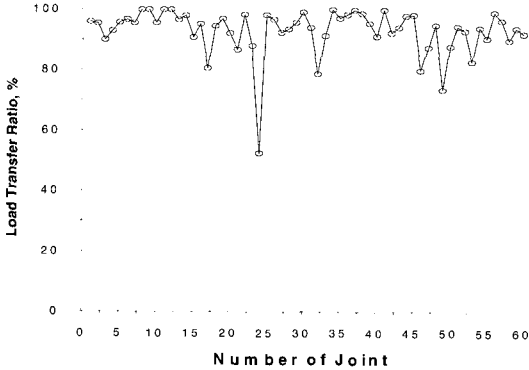


Fig. 3 Load Transfer Ratio from FWD

하중전달효과가, 17번, 24번, 32번, 49번 줄눈부의 다른 줄눈에 비해 적게 나타났으며, 특히 24번 줄눈부에서 하중전달효과가 현저히 떨어짐을 알 수 있다. 육안조사에 의하면 17번, 32번 줄눈부에서 균열이 발견되었으며, 24번, 49번 줄눈부에서는 외적인 손상은 발견되지 않았다.

4. 유한요소해석에 의한 줄눈콘크리트포장 분석

4.1 표준모델

줄눈콘크리트포장에서 가장 취약한 줄눈부 거동에 영향을 주는 변수를 선정하기 위하여 유한

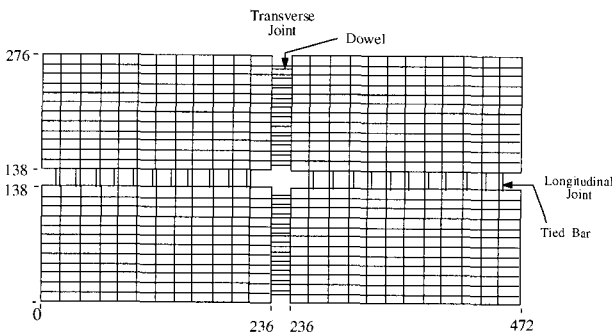


Fig. 4 Finite Element Model of Chung-Bu Highway (unit : inch)

요소해석을 하였다. Fig. 4는 중부고속도로에서 사용된 표준단면을 모델링한 것으로, 줄눈콘크리트포장의 구조적 거동에 실제 변수가 미치는 영향을 분석하기 위한 민감도 분석(Sensitivity Analysis)의 기준이 되는 모델이다. 이 모델은 236×138 in.(600×350 cm)크기를 갖은 4개의 슬래브로 구성되어, 기초는 Winkler Foundation으로 가정하였고 그 위에 6 in.(15cm) 두께를 갖은 린콘크리트와 12 in.(30cm) 두께의 콘크리트 포장 두 개의 층으로 이루어져 있다. 표준단면의 물성치는 다음과 같이 정하였으며, 이 모델에 적용된 하중은 FWD 비파괴 시험기에서 사용한 충격하중으로 Fig. 5와 같이 차량의 바퀴가 통과하는 줄눈부에 등가단축하중 18kips(8.2 ton)에서 한 쪽 바퀴만 고려한 9kips(4.1 ton)를 재하하였다.

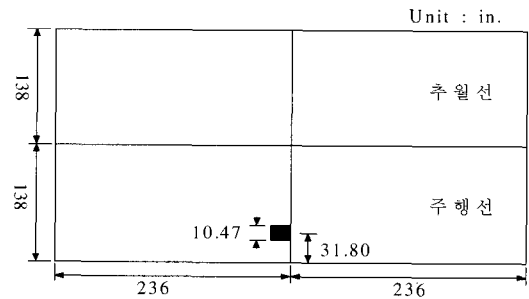


Fig. 5 Configuration of FWD Loading (unit : inch)

- 노상지지력계수 = 320 psi (8.858 kg/cm³)
- 콘크리트의 탄성계수 = 4.00×10⁶ psi
(2.81×10⁵ kg/cm²)
- 린콘크리트의 탄성계수 = 1.80×10⁶ psi
(1.27× kg/cm²)
- 콘크리트의 포아송 비 = 0.20
- 다웰/콘크리트 상호관계 계수 = 1.900.000
lbs/in.(339.000 kg/cm)
- 골재의 맞물림효과 = 1000 psi
(70.3 kg/cm²)
- 다웰바 = 지름 1.25 in.(3.2cm),



길이 20 in.(50cm), 간격 12 in.(30cm)
 탄성계수 2.90×10^7 psi (2.04×10^6 kg/cm²)
 타이바 = 지름 0.63 in.(1.6cm),
 길이 31.5 in.(80cm), 간격 30 in.(75cm)
 탄성계수 2.90×10^7 psi (2.04×10^6 kg/cm²)
 줄눈틈 = 0.25 in. (0.64cm)

4.2 포장의 구조적 거동에 영향을 미치는 변수

줄눈콘크리트포장의 구조적 거동에 설계 변수가 미치는 영향을 분석하기 위해 민감도 분석을 실시하였다. 변수로는 골재의 맞물림효과, 콘크리트의 탄성계수, 린콘크리트의 탄성계수, 줄눈틈, 콘크리트의 포아송비, 다웰바의 탄성계수, 노상지지력 계수, 다웰/콘크리트의 상호관계 계수 등 8가지를 선택하였다. 골재의 맞물림효과는 100~3000 psi, 콘크리트의 탄성계수는 $3.0 \times 10^6 \sim 5.0 \times 10^6$ psi, 린콘크리트의 탄성계수는 $1.5 \times 10^6 \sim 2.4 \times 10^6$ psi, 줄눈틈은 0.01~0.50 in., 콘크리트의 포아송비는 0.11~0.30, 다웰바의 탄성계수는 $2.0 \times 10^7 \sim 3.0 \times 10^7$ psi, 노상지지력 계수는 100~700 pci, 다웰/콘크리트의 상호관계 계수는 $1.0 \times 10^5 \sim 4.0 \times 10^5$ lbs/in로 각 변수의 최대 최소치로 범위를 정하였다. 민감도 분석의 결과는 FWD 하중을 재하한 슬래브의 가로줄눈의 처짐으로 나타내어 각 변수 값의 변화에 따른 처짐의 차이를 고찰하였다.

골재의 맞물림효과 계수는 100, 200, 500, 1000, 1500, 2000, 3000 psi 로 변화를 주었다. Fig. 6은 골재의 맞물림효과 변화에 따른 줄눈부의 처짐을 나타낸 것이다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 골재의 맞물림효과는 처짐 변화에 영향을 주지 못함을 알 수 있다. 이는 다웰바의 설치로 인해 골재의 맞물림 효과는 줄눈부 처짐에 영향이 미미하게 작용하기 때문인 것으로 사료되어진다.

콘크리트의 탄성계수 값은 3.0×10^6 , 3.5×10^6 , 4.0×10^6 , 4.5×10^6 , 5.0×10^6 psi로 고려하였다. Fig. 7과 같이 콘크리트의 탄성계수가 커질수록

처짐이 감소함을 알 수 있으나, 그 차이는 미소하므로 줄눈부에 큰 영향을 미치는 변수가 아니다. 린콘크리트의 탄성계수는 1.5×10^6 , 1.8×10^6 , 2.1×10^6 , 2.4×10^6 psi 로 변화를 주어 줄눈부의 처짐을 살펴보았다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 린콘크리트 탄성계수의 변화는 처짐에 거의 영향이 없음을 알 수 있다.

줄눈틈 0.10, 0.20, 0.25, 0.50in.(2.5, 5.1, 6.4, 12.3 mm)로 고려하여 줄눈부의 처짐을 Fig. 9에 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 줄눈틈이 벌어지면 다소 처짐이 증가하나 그 차이는 크지 않음을 알 수 있다. 콘크리트의 포아송비는 고강도 콘크리트인 경우에 포아송비인 0.11에서부터 0.15, 0.20, 0.25, 0.28, 0.30 으로 변화를 주어 분석한 결과 Fig. 10에서 볼 수 있듯이 처짐의 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 콘크리트 포아송비는 줄눈콘크리트 포장의 줄눈부에 큰 영향을 주지 않은 것으로 볼 수 있다. 다웰바의 탄성계수는 2.0×10^7 , 2.5×10^7 , 2.9×10^7 , 3.0×10^7 psi 으로 변화를 주어 줄눈부의 처짐을 알아보았다. Fig. 11에서와 같이 다웰바의 탄성계수의 변화에 따른 줄눈부의 처짐은 큰 차이가 없음을 볼 수 있다.

노상지지력 계수(K)는 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 pci 로 고려하여 줄눈부의 처짐을 알아보았다. Fig. 12는 7가지 노상지지력에 대한 줄눈부 처짐을 나타내고 있는데 노상지지력 계수가 증가할수록 처짐은 상당히 감소하는 것을 볼 수 있으며 200 pci 이하에서는 처짐이 크게 증가하는 것을 알 수 있다.

다웰/콘크리트 상호관계 계수(G)는 1.0×10^5 , 2.0×10^5 , 5.0×10^5 , 1.0×10^6 , 2.0×10^6 , 3.0×10^6 , 4.0×10^6 lbs/in.로 변화에 따른 줄눈부의 처짐을 Fig. 13에 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 이 계수의 증감에 따른 처짐의 차이도 크음을 알 수 있으며, 이는 줄눈부 거동에 이 다웰/콘크리트 상호관계 계수(G)가 상당한 영향을 미침을 알 수 있다.

이와 같이 줄눈콘크리트 포장에 줄눈부에 영향을 미칠수 있는 변수들에 대하여 분석을 실시

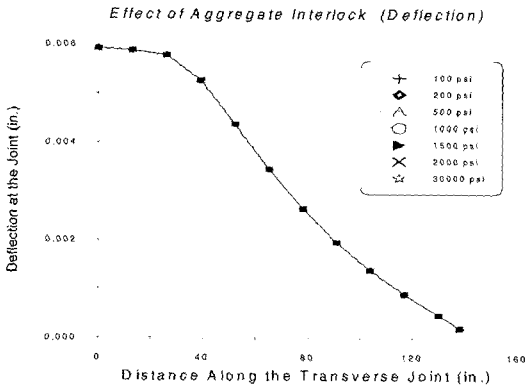


Fig. 6 Effect of Aggregate Interlocking on Pavement Responses

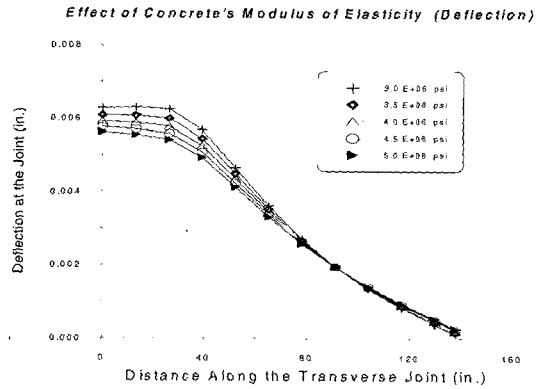


Fig. 7 Effect of Concrete's Modulus of Elasticity on Pavement Responses

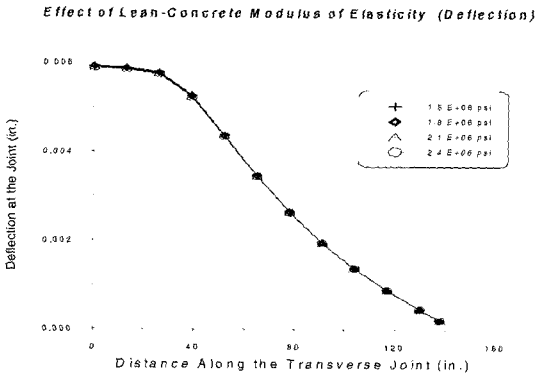


Fig. 8 Effect of Lean Concrete's Modulus of Elasticity on Pavement Responses

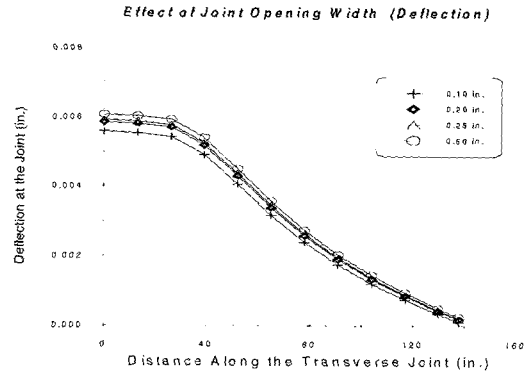


Fig. 9 Effect of Joint Opening Width on Pavement Responses

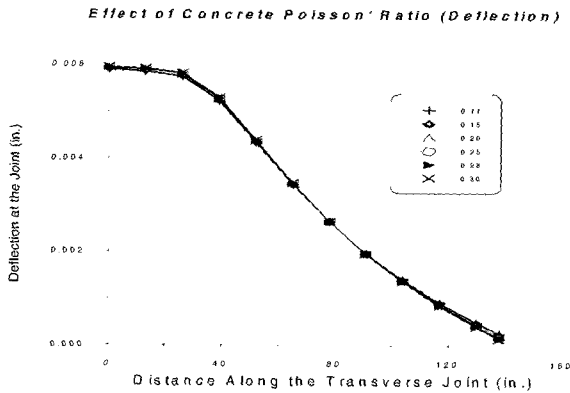


Fig. 10 Effect of Concrete Poisson's Ratio on Pavement Responses

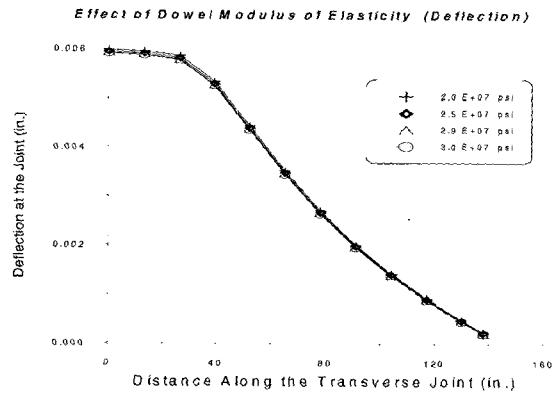


Fig. 11 Effect of Dowel Modulus of Elasticity on Pavement Responses



Effect of Modulus of Subgrade Reaction (Deflection)

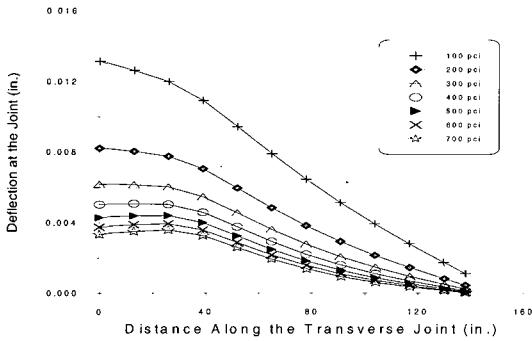


Fig. 12 Effect of Modulus of Subgrade Reaction on Pavement Responses

하였다. 그 결과 노상지지력 계수(K)와 다웰/콘크리트의 상호관계 계수(G)를 제외하고 나머지 변수들은 처짐에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있었으며, 노상지지력 계수와 다웰/콘크리트 상호관계 계수에 따라서 줄눈부의 처짐 차이가 커짐으로 줄눈부의 거동에 가장 큰 영향을 미치는 변수임을 알 수 있다.

5. 콘크리트포장 줄눈 평가시스템 개발 및 적용

5.1 콘크리트포장 평가시스템 개발

앞장에서 노상지지력 계수(K) 손실과 다웰/콘크리트 상호관계 계수(G) 감소는 줄눈부의 처짐을 증가시킴을 알 수 있었다. 따라서, 포장을 평가할 목적으로 다양한 범위의 K와 G에 대해 민감도 분석을 수행하여, 하중재하 위치에서의 표면 처짐과 하중전달효과에 대한 관계를 알아보았다. 포장 슬래브의 표면 처짐과 하중전달효과는 FWD 비파괴 검사장치를 이용하여 쉽게 얻어지기 때문에 선택하였다.

Table 1은 민감도 분석에 사용된 계수 값의 범위를 정리한 것이다. 포장 시스템을 분석하기 위해, 표면 처짐과 하중전달효과는 다른

Effect of Modulus of Dowel/Concrete Interaction (Deflection)

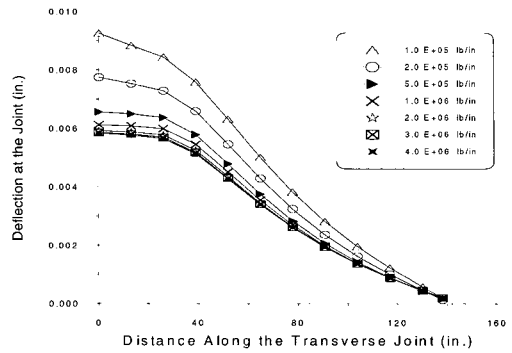


Fig. 13 Effect of Modulus of Dowel/Concrete Interaction on Pavement Responses

변수들을 일정하게 유지하면서 하나의 계수(K 또는 G)를 변화시켜 산정 하였다. 다른 모든 변수와 하중의 재원은 앞에서 언급한 표준 줄눈콘크리트 포장 모델의 경우와 같게 유지하였다.

Fig. 14와 Fig. 15는 각각 FWD 하중에 의한 포장표면 처짐과 하중전달효과와 다웰/콘크리트 상호관계 계수(G)의 관계를 여러 노상지지력 계수(K)에서 보여주고 있다. Fig. 14에서 노상지지력 계수가 300pci 이상인 경우는 노상지지력 계수 변화에 따른 처짐 차이가 적어짐을 알 수 있으나, 노상지지력 계수가 300pci 이하일 경우는 노상지지력 계수의 변화에 따른 처짐 차가 커짐을 알 수 있다. 이는 노상이 양호한 지지조건이 300pci 이상임을 나타내고 있다. 또한, Fig. 14와 Fig. 15에서 노상이 양호한 지지조건인 300pci 이상인 경우에 대해서 다웰/콘크리트 상호관계 계수가 500,000 lb/in. 이상인 경우는 표면

Table 1 Modulus Values Used in the Sensitivity Analysis

Modulus	Value
K (pci)	100, 200, 300, 400, 500, 600, 700
$G \times 10^4$ (lbs/in)	20, 30, 50, 75, 100, 200, 300, 400

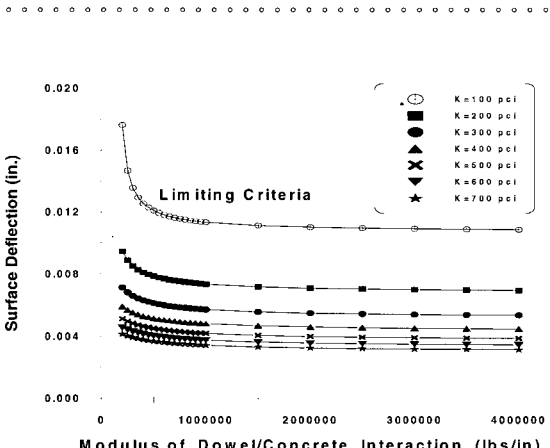


Fig. 14 Variation of Surface Deflection at the Joint with Modulus of Dowel/Concrete Interaction

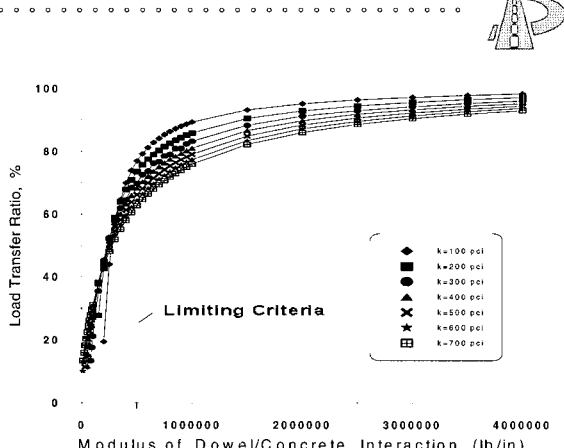


Fig. 15 Variation of Amount of Load Transfer Across the Joint with Modulus of Dowel/Concrete Interaction

처짐이 일정하고, 하중전달효과가 좋으나, 500,000 lb/in. 이하에서는 표면 처짐이 상당히 증가하고, 하중전달효과가 떨어짐을 알 수 있다. 즉, 양호한 지지조건인 노상인 경우 다웰/콘크리트 상호관계 계수의 임계값은 500,000 lb/in. 임을 나타내고 있다.

이와 같은 민감도 분석으로부터, 다웰바와 콘크리트 주위와 상호관계 계수가 감소하거나 노상지지력 계수가 감소하면, 줄눈콘크리트 포장시스템이 파괴될 수 있음을 알아보았다. 즉, 줄눈콘크리트 포장이 위에서 언급한 노상지지력 계수와 다웰/콘크리트 상호관계 계수에 의해 구조적으로 평가할 수 있다.

위와 같이 분석한 결과를 가지고 실제 포장을 평가할 목적에서 Fig. 16과 Fig. 17를 나타내었다. Fig. 16은 줄눈부의 하중전달효과와 Fig. 5에서 하중을 재하한 위치의 표면처짐을 7가지 다른 노상지지력 계수(K) 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 pci에 대해서 보여주고 있다. 각 K 값에 대한 하중전달효과는 다웰/콘크리트 상호관계 계수(G)가 200,000 ~ 4,000,000 lbs/in까지 변함에 따라 표면처짐을 그린 것이다.

유사하게 Fig. 17은 줄눈부의 하중전달효과와 재하 위치의 표면처짐의 관계를 10가지 다른 다웰/콘크리트 상호관계계수(G)에 대해서 그린 것이다. 이들 계수는 20×10^4 , 25×10^4 , 30×10^4 ,

35×10^4 , 50×10^4 , 75×10^4 , 100×10^4 , 200×10^4 , 300×10^4 , 400×10^4 lbs/in 이다. 다시 말해, 이 그림은 각 G 값에 대해 노상반발계수(K)가 100~700 pci 까지 변함에 따른 하중전달효과와 표면 처짐 관계를 그린 것이다. 만약 포장의 표면 처짐과 줄눈의 하중전달효과를 알고 있다면 이들 그림을 사용할 수 있다. 즉 줄눈부에서 비파괴 시험을 하여 얻은 표면 처짐과 하중전달효과를 사용해 그림으로부터 추정할 수 있고, 그 줄눈부가 구조적으로 적당한지 결정된 임계값과 비교할 수 있다.

이들 그림을 사용하여 줄눈부를 평가할 수 있는지를 검산하여 보면 다음과 같다. FWD 시험으로부터 재하위치에서의 표면 처짐은 0.010in. (0.25 mm) 이고 줄눈부의 하중전달효과는 70% 인 결과를 얻었다고 가정한다. 이 결과치로 Fig. 16과 Fig. 17를 사용하여 K와 G 값을 산정하면, 노상지지력 계수(K)는 130 pci이고, 다웰/콘크리트 상호관계 계수(G)는 61×10^4 lbs/in 이다.

그 다음 줄눈콘크리트포장을 유한요소 프로그램인 ILLI-SLAB로 분석한다. 이때 위의 계수를 사용하면 표면 처짐은 0.010011 in. 이고, 하중전달효과는 80.32 % 이다. 위와 같은 절차에서 보여주듯이, 포장 결과는 원래 가정한 값과 거의 일치한다. 그러므로, Fig. 16과 Fig. 17은 비파괴 시험기에서 측정된 하중전달효과와 표면 처짐을

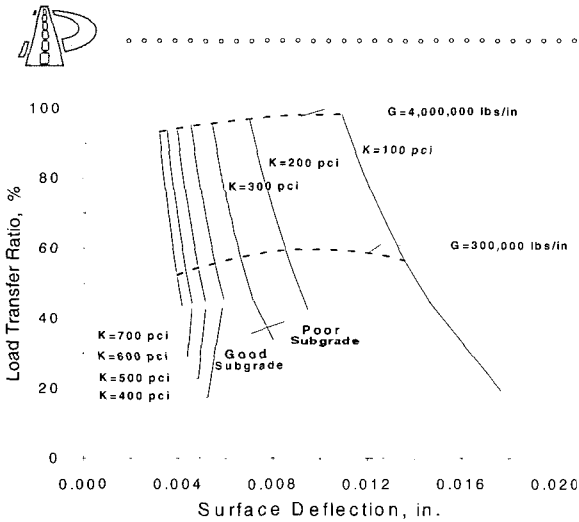


Fig. 16 Load Transfer Ratio Versus Surface Deflection for Various Modulus of Subgrade Reaction While Modulus of Dowel/Concrete Interaction Varies

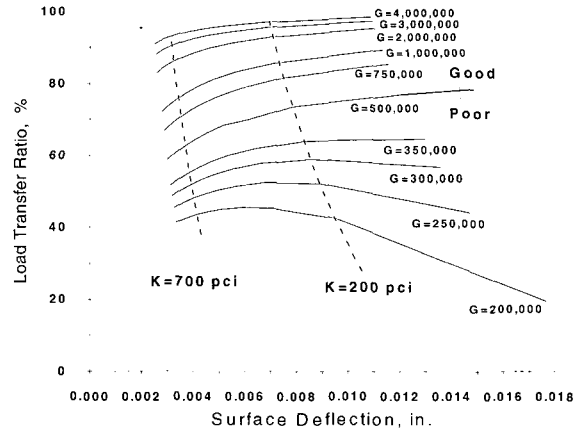


Fig. 17 Load Transfer Ratio Versus Surface Deflection for Various Modulus of Dowel/Concrete Interaction While Modulus of Subgrade Reaction Varies

사용하여 다웰/콘크리트 상호관계 계수와 노상 반발 계수를 추정할 수 있다는 결론을 얻었다.

5.2 포장평가법 현장적용

앞 절에서 볼 수 있듯이, 노상반발계수(K)와 다웰/콘크리트 상호관계 계수(G)가 강성포장 즉 줄눈콘크리트포장의 구조적 거동 영향을 평가할 수 있는 중요한 두 가지 변수라는 것을 알 수 있었다. 그러므로, 이러한 계수들과 실제 현장에서 시험으로 얻은 값을 사용하여 줄눈콘크리트포장의 거동을 평가할 수 있다. 평가과정은 다음과 같다.

먼저 각 줄눈부에 FWD장치를 사용하여 하중이 재하된 쪽의 처짐과 하중이 재하되지 않은 쪽의 처짐을 산정한 후, 이 두 처짐값으로 하중 전달효과를 계산한다. 평가기준인 두변수와 현장시험 결과치와의 관계를 나타낸 Fig. 16과 Fig. 17을 사용해 각 줄눈의 하중전달효과와 FWD하중을 재하한 쪽의 처짐에 따른 노상지지력 계수와 다웰/콘크리트 상호관계 계수를 구한다. 이때 Fig. 16은 노상지지력 계수를 구할 때 사용하고, Fig. 17은 다웰/콘크리트 상호관계 계수를 구할 때 사용한다. 이 변수들의 계수값과 앞 절에서 언급한 이 두 변수들의 임계값과 비

교하여 포장체를 평가한다.

실제 현장시험을 한 측정치를 가지고 줄눈콘크리트포장을 평가해보았다. Table 2는 중부고속도로의 다웰바 설치구간에서 비파괴시험한 결과와 Fig. 16과 Fig. 17를 사용해 노상지지력 계수(K)와 다웰/콘크리트 상호관계 계수(G)를 산정한 것을 나타낸 것이다. 여기서 d_0 는 하중이 재하된 쪽의 처짐이고, d_{12} 는 하중이 재하되지 않은 쪽의 처짐을 나타내고 있다. ΔLT 는 하중전달효과로 d_{12} 를 d_0 으로 나눈 뒤 측정에 따른 슬래브 기울임 보정계수(B)를 곱해 백분율로 나타내었다.

중부고속도로 다웰바 구간을 분석하면 다음과 같다. Table 2에서 볼 수 있듯이, 몇 줄눈을 제외하고, 노상지지력 계수(K)와 다웰/콘크리트 상호관계 계수(G)계수가 높다. 대부분의 계수값은 노상지지력 계수는 700 pci 이상, 다웰/콘크리트상호관계 계수는 4,000,000 lbs/in.이상이므로 임계값보다 높은 값을 갖음을 알 수 있다. 이때 임계값은 앞 절에서 언급한 $K>300pci$ $G>500,000$ lbs/in.를 사용하였다. 이 중부고속도로의 다웰구간을 분석해보면, 포장의 줄눈 거동이 매우 양호하며 훌륭한 지지 조건을 가진 포장 슬래브라 사료되어진다. 그러나, 줄눈 24번을



보면 지지조건은 양호하나, 다웰/콘크리트 상호
관계 계수가 350,000 lbs/in. 임계값보다는 높지
만 다른 줄눈에 비해 매우 낮음을 알 수 있다.

이는 다웰바 근처의 콘크리트가 약화되고 줄눈
의 하중전달 기능을 잃어 간다는 것을 나타낸
다.

Table 2 Results of Joint Evaluation for Chungbu Highway

Joint	d ₀ (in.)	d ₁₂ (in.)	ΔLT (%)	K (pci)	G (lbs/in.)
1	0.001811	0.001654	95.87	> 700	> 4,000,000
2	0.002559	0.002323	95.31	> 700	> 4,000,000
3	0.002205	0.001890	90.00	> 700	4,000,000
4	0.001693	0.001496	92.79	> 700	> 4,000,000
5	0.002205	0.002008	95.63	> 700	> 4,000,000
6	0.002008	0.001850	96.76	> 700	> 4,000,000
7	0.002638	0.002402	95.60	> 700	> 4,000,000
8	0.002874	0.002756	100.00	> 700	> 4,000,000
9	0.001417	0.001378	100.00	> 700	> 4,000,000
10	0.002205	0.002008	95.63	> 700	> 4,000,000
11	0.002126	0.002047	100.00	> 700	> 4,000,000
12	0.001890	0.001850	100.00	> 700	> 4,000,000
13	0.001496	0.001378	96.71	> 700	> 4,000,000
14	0.001772	0.001654	98.00	> 700	> 4,000,000
15	0.002047	0.001772	90.87	> 700	4,000,000
16	0.001693	0.001535	95.23	> 700	> 4,000,000
17	0.001693	0.001299	80.58	> 700	2,500,000
18	0.001969	0.001772	94.50	> 700	> 4,000,000
19	0.002559	0.002362	96.92	> 700	> 4,000,000
20	0.002244	0.001969	92.11	> 700	> 4,000,000
21	0.002047	0.001693	86.83	> 700	3,500,000
22	0.001890	0.001772	98.44	> 700	> 4,000,000
23	0.002205	0.001850	88.13	> 700	3,500,000
24	0.002677	0.001339	52.50	> 700	350,000
25	0.002441	0.002283	98.23	> 700	> 4,000,000
26	0.002520	0.002323	96.80	> 700	> 4,000,000
27	0.001969	0.001732	92.40	> 700	> 4,000,000
28	0.002520	0.002244	93.52	> 700	> 4,000,000
29	0.002677	0.002441	95.74	> 700	> 4,000,000
30	0.002835	0.002677	99.17	> 700	> 4,000,000
31	0.002638	0.002362	94.03	> 700	> 4,000,000
32	0.002047	0.001535	78.75	> 700	2,500,000
33	0.002126	0.001850	91.39	> 700	> 4,000,000
34	0.003465	0.003307	100.00	550	> 4,000,000



Table 2 Results of Joint Evaluation for Chungbu Highway(continued)

Joint	d ₀ (in.)	d ₁₂ (in.)	ΔLT (%)	K (pci)	G (lbs/in.)
35	0.002638	0.002441	97.16	> 700	> 4,000,000
36	0.001890	0.001772	98.44	> 700	> 4,000,000
37	0.002244	0.002165	100.00	> 700	> 4,000,000
38	0.002677	0.002520	98.82	> 700	> 4,000,000
39	0.003071	0.002795	95.58	700	> 4,000,000
40	0.001811	0.001575	91.30	> 700	> 4,000,000
41	0.002283	0.002323	100.00	> 700	> 4,000,000
42	0.001969	0.001732	92.40	> 700	> 4,000,000
43	0.002283	0.002047	94.14	> 700	> 4,000,000
44	0.002362	0.002205	98.00	> 700	> 4,000,000
45	0.003701	0.003465	98.30	500	> 4,000,000
46	0.002638	0.002008	79.93	> 700	2,100,000
47	0.002362	0.001969	87.50	> 700	3,300,000
48	0.002441	0.002205	94.84	> 700	> 4,000,000
49	0.001575	0.001102	73.50	> 700	2,500,000
50	0.002402	0.002008	87.79	> 700	3,200,000
51	0.001969	0.001772	94.50	> 700	> 4,000,000
52	0.001732	0.001535	93.07	> 700	> 4,000,000
53	0.002244	0.001772	82.89	> 700	3,000,000
54	0.001890	0.001693	94.06	> 700	> 4,000,000
55	0.001732	0.001496	90.68	> 700	> 4,000,000
56	0.002126	0.002008	99.17	> 700	> 4,000,000
57	0.001929	0.001772	96.43	> 700	> 4,000,000
58	0.001929	0.001654	90.00	> 700	> 4,000,000
59	0.002598	0.002323	93.86	> 700	> 4,000,000
60	0.002559	0.002244	92.08	> 700	4,000,000

6. 결 론

줄눈콘크리트포장의 줄눈부 손상 원인 및 손상 정도를 합리적이고 정량적으로 평가하기 위하여 유한요소법을 이용하여 평가시스템을 개발

하였으며. 이를 현장 FWD 측정결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 줄눈콘크리트포장의 줄눈부 거동에 큰 영향을 미치는 변수를 확인하고자 콘크리트포장 유한요소해석 프로그램인 ILLI-SLAB를 이용하



여 민감도 분석한 결과, 노상지지력 계수와 다웰/콘크리트 상호관계 계수(G)가 여러 변수 중에 가장 큰 영향을 미치는 변수임을 알 수 있었다.

2. 노상지지력 계수와 다웰/콘크리트 상호관계 계수를 분석한 결과 각각 300 pci와 500,000 lbs/in가 줄눈콘크리트포장의 줄눈부 거동에 중요한 영향을 미치는 임계값임을 확인하였다.

3. 콘크리트포장 유한요소해석 프로그램인 ILLI-SLAB와 줄눈부 비파괴검사 FWD를 이용하여 줄눈콘크리트포장의 줄눈부 손상정도를 해석이론에 의해 평가할 수 있는 평가시스템을 개발하였다.

4. 중부고속도로 354m 구간에 적용하여 평가해 본 결과, 이 구간에서는 하나의 줄눈부만이 다웰/콘크리트 상호관계 계수가 임계값보다 낮고, 대부분 줄눈부의 두 인자값이 임계값 이상으로 콘크리트포장 줄눈부가 양호함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Hoffman, M. S. and Thompson, M.R., "Backcalculating Nonlinear Resilient Moduli from Deflection Data," TRR 852, TRB, 1982, pp.42-51.
2. Ioannides, A. M., "Analysis of Slabs-on-Grade for a Variety of Loading and Support Conditions," Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1984
3. Khazanovich, L., "Structural Analysis of Multi-Layered Concrete Pavement Systems," Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1994
4. Korovesis, G. T., "Analysis of Slab-On-Grade Pavement System Subjected to Wheel and Temperature Loadings," Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1990
5. Ozbeki, M. A., "Structural Evaluation of Jointed Concrete Pavements," Ph.D. Thesis, the Pennsylvania State University, 1984.
6. Tabatabaie, A. M., "Structural Analysis of Concrete Pavement Joint," Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1978
7. Westergaard, H. M., "New Formulas for Stresses in Concrete Pavements of Airfields", Transactions, American Society of Civil Engineering, Vol. 113, 1948, pp. 425-439.
8. Westergaard, H. M., "Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis ", Public Road, 1926, pp. 25-35.
9. 윤 경구, 유태석, " 줄눈콘크리트 포장의 줄눈 손상 해석 및 대책 연구", 한국도로공사 연구 보고서, 1996.