

시멘트 콘크리트 포장체 줄눈부의 거동해석

Analysis of Joint Behavior in Cement Concrete Pavements

변근주 * 이 상 민 ** 오 임 갑 주 *** 한 봉 완 ****
Byun, Koun Joo Lee, Sang Min Yim, Garb Joo Han, Bong Wan

ABSTRACT

Joints are provided in cement concrete pavements to control transverse and longitudinal cracking that occur due to restrained deformations caused by moisture and temperature variations in the slab. But the construction of joints reduces the load-carrying capacity of the pavement at the joints, and pavements have been deteriorated by cracks at the slab edges along the joints due to traffic loads. Therefore, it is important to analyze the behavior of joints accurately in the design of cement concrete pavements.

In this study, the mechanical behavior of cement concrete pavement slabs is analyzed by the plate-finite element model, and Winkler foundation model is adopted to analyze the subgrades. The load transfer mechanism of joints are composed of dowel action, aggregate interlocking, and tied-key action, and the analytical program is developed using these joint models.

1. 서론

아스팔트 포장에 비해 고도의 시공 기술을 필요로 하는 시멘트 콘크리트 포장은 1970년대 초, 김포가도의 일부와 목호-삼척간의 국도에 처음 도입되었다. 이들 경우는 모두 재래의 막서와 거푸집을 사용하여 인력으로 시공되었는데, 경험과 기술의 부족으로 결국은 철거되거나 아스팔트 덧씌우기로 보수되었다.

그 후 점차적인 기술의 축적과 고급인력의 배출로 인하여 순수한 우리의 기술로 시멘트 콘크리트 포장을 설계, 시공할 수 있게 되었는데, 88 올림픽 고속도로와 중부 고속도로의 건설이후 국도의 포장 및 기존 아스팔트 콘크리트 도로 등에 시멘트 콘크리트 포장이 널리 이용됨에 따라, 포장체의 구조적 거동 평가에 대한 이론정립의 필요성이 대두되고 있다. 또한 시멘트 콘크리트 포장화선의 주요원인 및 사용중 유지관리에 가장 문제가 되어온 줄눈부의 거동 평가 및 해석모델의 제안이 시급한 실정에 있다.

현재까지 국내의 시멘트 콘크리트 포장은 미국이나 일본의 경험적 설계법에 의하여 설계되어 왔지만

국내의 하중조건 및 지반상태를 고려한 실제 구조거동을 해석하여 그 결과를 설계에 반영하지는 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 가로줄눈의 하중전달을 콘크리트 슬래브와 다우얼바의 상호 연결작용(dowel action)과 콘크리트 슬래브 단면의 골재 맞물림작용(aggregate interlock action)으로 나누고, 세로줄눈의 하중전달은 타이드 키 작용(tied-key action)으로 분류한 다음, 각각의 경우를 모형화하여 시멘트 콘크리트 포장체의 거동을 해석하고, 그 특성을 분석하는데 연구의 목적을 둔다.

2. 시멘트 콘크리트 슬래브와 지반의 해석

본 연구에서는 시멘트 콘크리트 포장 슬래브의 해석에 박판모델(thin plate model)을 이용하였고, 지반에 대해서는 임의의 한 점점에서의 지반반력이 그 점점의 연직면위에만 비례한다고 보는 Winkler 기초 모델을 사용하여 강성 매트릭스를 구하고, 이를 박판이론으로 부터 구한 포장 슬래브의 강성 매트릭스에 더하여 정식화 하였다.

지반의 반력을 고려해 넣은 시멘트 콘크리트 포장 슬래브의 강성 방정식은 식(2.1)과 같이 나타낼 수 있다.(1,2,3)

* 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수
** 정회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정
*** 준회원, 연세대학교 토목공학과 연구조교
****준회원, 연세대학교 토목공학과 석사과정

$$\{ f \} = [[K] + [H]] \{ d \} \quad (2.1)$$

여기서, $\{ f \}$: 외력 벡터
 $[K]$: 포장 슬래브의 강성 매트릭스
 $[H]$: 지반의 강성 매트릭스
 $\{ d \}$: 변위 벡터

3. 줄눈부의 거동해석 모형

시멘트 콘크리트 포장에는 가로줄눈과 세로줄눈이 시공된다. 이와같은 줄눈은 역학적 거동에 있어서 많은 문제점이 있으며, 차량이 포장위를 주행할 때 승차감에도 큰 영향을 미치고 있다.⁴⁾

가로줄눈부의 하중전달 기능은, 첫째 다우얼바의 휨 저항과 전단저항을 고려한 연결작용, 둘째 콘크리트 포장 슬래브 측면의 골재 맞물림작용, 그리고 셋째 연결작용과 골재 맞물림작용을 동시에 고려한 조합작용 등의 세가지로 구분하였으며, 이들 각각의 경우에 대하여 고려할 수 있도록 하였다.

또한 세로줄눈부에 타이바(tie bar)와 키(key)가 설치되어 있는 경우, 타이바는 휨에 대한 저항이 없고, 단지위치를 고정시키는 역할을 한다. 따라서 이들이 전단에만 저항한다고 가정하여 타이드 키 작용으로 고려하였다.

3.1 줄눈부의 유한요소 정식화

줄눈부의 하중전달을 나타낸 역학적 모델 중 가장 일반적인 것은 그림 3-1에 나타난 것과 같이 줄눈 줄눈 틈사이의 변형차에 비례한 하중이 양측 슬래브에 전달된다고 가정된 모델이다.^{5),6)}

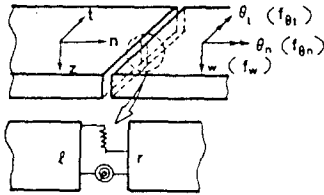


그림 3-1 줄눈부의 하중전달모델

줄눈요소의 임의점에 있어서 힘과 처짐과의 관계는 식(3.1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{ f_i \} = [J_0] \{ d_i \} \quad (3.1)$$

여기서 $[J_0] = \int_0^{2b} [B(t)]^T [T] [B(t)] dt$

$[J_0]$: 줄눈요소의 강성 매트릭스
 $[B]$: 절점 변위 - 변형률 매트릭스

줄눈요소의 강성 매트릭스 $[J_0]$ 를 줄눈부 전체에 대하여 고려하면 $[J]$ 를 구할 수 있고, 이를 식(2.1)에 더하여 시멘트 콘크리트 포장구조 전체에 대한 강성방정식으로 나타내면 식(3.2)와 같다.

$$\{ f \} = [[K] + [H] + [J]] \{ d \} \quad (3.2)$$

3.2 연결작용의 해석

다우얼바에 의한 줄눈부의 하중전달 모양을 도식적으로 표시한 그림 3-2에서 절점 1의 처짐 w_1 과 절점 2의 처짐 w_2 의 차이를 식(3.3)에 나타내었다.

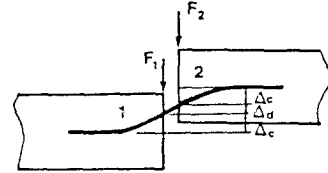


그림 3-2 연결작용

$$w_1 - w_2 = \Delta = \Delta_d + 2\Delta_0 \quad (3.3)$$

여기서 Δ_0 : 다우얼바에 의한 콘크리트의 변형

$$\Delta_0 = \frac{F_1 - F_2}{4\beta^3 EI} (2 + \beta d)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{Kb}{4EI}}$$

Δ_d : 다우얼바의 전단변형

$$\Delta_d = \frac{d}{GA} (F_1 - F_2)$$

d : 줄눈의 틈

G : 다우얼바의 전단 탄성계수

A : 다우얼바의 단면적

b : 다우얼바의 직경

K : 콘크리트의 지압계수

따라서 식(3.2)에서 연결작용의 강성 매트릭스 $[J_0]$ 를 구하기 위해 필요한 매트릭스 $[T_d]$ 는 식(3.4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$[T_d] = \begin{bmatrix} K_d & A_d & 0 & 0 & -K_d & A_d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & K_d & A_d & 0 & 0 \\ & & & & & & 0 & 0 \\ & & & & & & & 0 \\ & & & & & & & 0 \\ & & & & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

여기서

$$K_d = \left(\frac{d}{GA} + \frac{2 + \beta d}{2\beta^3 EI} \right)^{-1}$$

$$A_d = \frac{\text{요소의 영향연적}}{\text{다우얼바의 배치간격}}$$

3.3 골재 맞물림 작용의 해석

평창줄눈과 같이 줄눈의 틈이 큰 경우에는 다우얼바의 연결작용이 대부분의 하중전달을 담당하지만, 신축줄눈이나 또는 콘크리트 포장 슬래브가 온도에 의해서 팽창되어 줄눈의 틈이 매우 좁아졌을 경우에는 포장 슬래브 단면의 골재 맞물림작용이 하중전달에 큰 영향을 미친다. 그림 3-3은 골재 맞물림작용을 도시한 것이다.

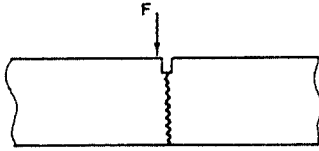


그림 3-3 골재 맞물림작용

본 연구에서는 골재 맞물림작용에 의해 전단력만이 전달된다고 가정하고, 식(3.2)의 $[T_a]$ 를 다음 식(3.5)에 나타내었다.

$$[T_a] = \begin{bmatrix} k_a A_a & 0 & 0 & -k_a A_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & k_a A_a & 0 & 0 & 0 \\ \text{sym.} & & & & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

여기서 k_a 는 골재맞물림계수(modulus of aggregate interlock)로서 맞물림면에서의 단위 면적당 전단 스프링상수이고, A 는 요소의 영향면적이다.

골재 맞물림계수 k_a 는 기하학적 모델로부터 해석적으로 구하는 것은 매우 어렵기 때문에, 수치계산의 결과를 이용하여 처짐 전달율(E_{ff})과 k_a 와의 관계를 그림 3-4와 같이 도출하였다.

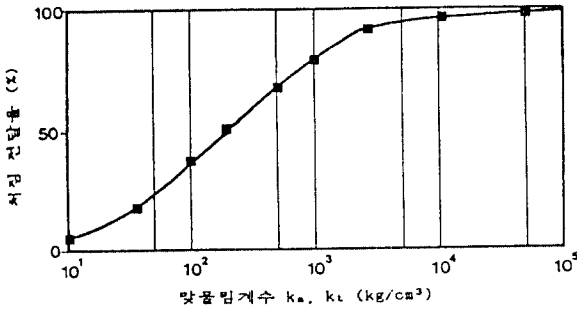


그림 3-4 k_a , k_t 와 E_{ff} 와의 관계

그림 3-4에서 k_a 를 구하기 위해 이용된 처짐 전달율(efficiency of shear transfer, E_{ff})은 식(3.6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{ff} = \frac{W_2}{W_1} \times 100 (\%) \quad (3.6)$$

여기서 W_1 은 포장 슬래브에서 재하측의 최대처짐, W_2 는 비재하측의 최대처짐이다. E_{ff} 를 구하기 위해 이용되는 장비로서는 Dynaflect, Benkelman Beam, Falling Weight Deflectometer, 그리고 Road Rater 등이 있다.

Arlington 실험⁵⁾에 의하면, 골재 맞물림작용에 의한 처짐 전달율 E_{ff} 는 약 60% 이하라고 보고하고 있다. 따라서 본 연구에서는 그림 3-4의 k_a 와 E_{ff} 의 관계를 일반화하여, k_a 를 다음과 같이 계산하였다.

처짐 전달율 $E_{ff} = 10\%$ 이하일 때

$$k_a = 0 \quad (3.7)$$

처짐 전달율 $E_{ff} = 10 - 80\%$ 범위일 때

$$k_a = E_{ff} / (0.07307 - 0.0008386 * E_{ff}) \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad (3.8)$$

처짐 전달율 $E_{ff} = 80\%$ 이상일 때

$$k_a = E_{ff} / (0.04955 - 0.0004987 * E_{ff}) \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad (3.9)$$

3.4 타이드 키 작용의 해석

차선을 구분하거나 노면측 구조물을 보호하기 위해 설치하는 세로줄눈은 그림 3-5와 같이 타이드 키 작용으로 고려하여 강성 매트릭스를 유도하였다.

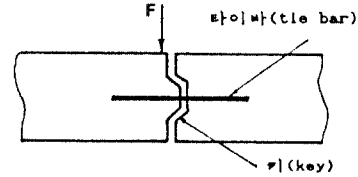


그림 3-5 타이드 키 작용

타이드 키 작용은 전단력만을 전달한다고 가정하여 식(3.2)의 $[T_t]$ 를 다음 식(3.10)와 같이 나타내었다.

$$[T_t] = \begin{bmatrix} k_t A & 0 & 0 & -k_t A & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & k_t A & 0 & 0 & 0 \\ \text{sym.} & & & & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

타이드 키의 맞물림계수 k_t 도 수치계산의 결과를 이용하여 E_{ff} 와 k_t 와의 관계를 그림 3-4로부터 구할 수 있다. Arlington 실험에 의하면, 타이드 키 작용에 의한 처짐 전달율 E_{ff} 는 약 80% 이상이라고 보고하고 있다.⁶⁾ 따라서 그림 3-4에서 k_t 와 E_{ff} 의 관계를 일반화하여 k_t 를 다음과 같이 나타내었다.

처짐 전담을 $E_{ff} = 79\%$ 이하일 때

$$k_t = E_{ff} / (0.07307 - 0.0008386 * E_{ff}) \text{ (kg/cm}^3\text{)} \quad (3.11)$$

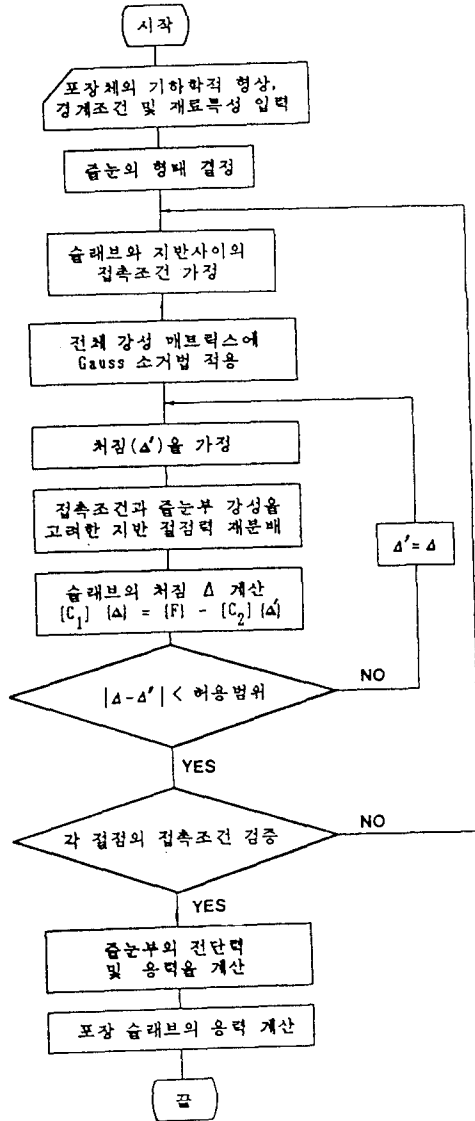
처짐 전담을 $E_{ff} = 80\% - 97\%$ 범위일 때

$$k_t = E_{ff} / (0.04955 - 0.0004987 * E_{ff}) \text{ (kg/cm}^3\text{)} \quad (3.12)$$

처짐 전담을 $E_{ff} = 98\%$ 이상일 때

$$k_t = 200000 \text{ (kg/cm}^3\text{)} \quad (3.13)$$

4. 수치해석 알고리즘



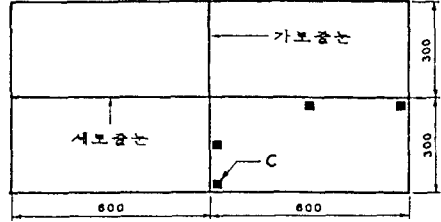
5. 수치에 및 결과분석

본 연구에서 개발한 수치계산 프로그램을 검증하기 위하여, 시멘트 콘크리트 포장의 구조적 거동을 측정된 Arlington 실험 및 Huang의 수치계산 결과와 비교하였다.

5.1 대상 구조의 선정

Arlington 실험은 그림 5-1에 나타난 것과 같이 4개의 슬래브를 가로줄눈으로 나누고, 하층의 재하 위치에 따라 응력과 처짐을 측정하였다.⁸⁾

단위 : cm



■ : 하층 재하 위치

그림 5-1 Arlington 실험 모형

표 5-1 공통적으로 이용된 수치

콘크리트 탄성계수 (kg/cm ²)	386700
콘크리트 포사스 비	0.15
계하판의 직경 (cm)	20

5.2 줄눈부의 거동해석

본 연구에서 개발한 프로그램을 이용하여 해석한 결과는 다음과 같다.

1) 연결작용 모델

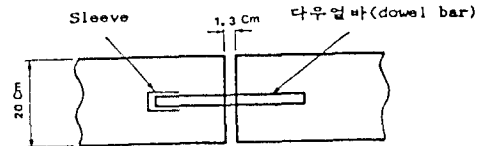


그림 5-2 연결작용의 모형

표 5-2 연결작용에 이용된 수치

지반 지지력계수 (kg/cm ³)	4.0, 8.3
포장 슬래브의 두께 (cm)	20
하중 (kg)	4536, 5443
다우얼바의 탄성계수 (kg/cm ²)	2.04x10 ⁶

다우얼바의 포와슨 비	0.15
다우얼바의 직경 (cm)	1.9
다우얼바의 배치간격 (cm)	45.7
줄눈의 폭 (cm)	1.3

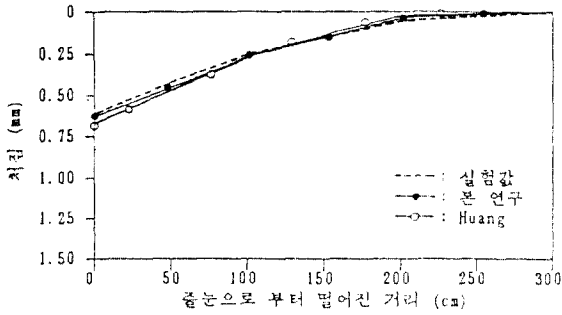


그림 5-3 결침 C에 해당하는 경우 ($P=14\text{kg/cm}^2, k=8.3\text{kg/cm}^3$)

2) 골재 맞물림작용 모델

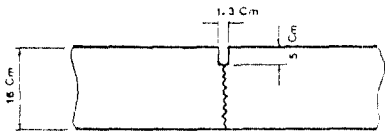


그림 5-4 골재 맞물림작용의 모형

표 5-3 골재 맞물림작용에 이용된 수치

지반 지지력계수 (kg/cm^3)	2.5, 4.0
포장 슬래브의 두께 (cm)	16
하중 (kg)	3175, 4032
처짐 전담습 (%)	55, 70
줄눈의 폭 (cm)	0.3

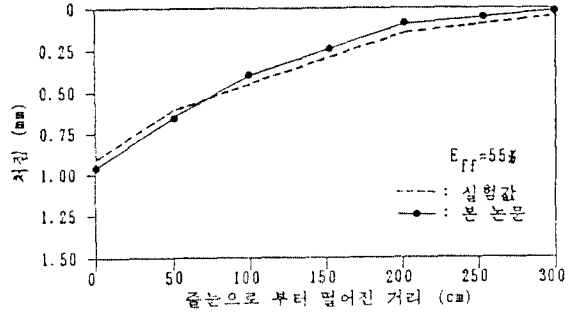


그림 5-5 결침 C에 해당하는 경우 ($P=12.6\text{kg/cm}^2, k=4.0\text{kg/cm}^3$)
3) 조합작용 모델

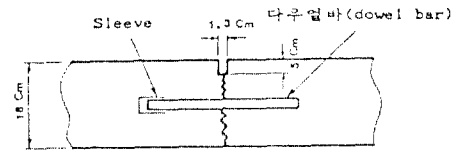


그림 5-6 조합작용의 모형

표 5-4 조합작용에 이용된 수치

지반 지지력계수 (kg/cm^3)	3.0
포장 슬래브의 두께 (cm)	18
하중 (kg)	3175, 4990
다우얼바의 탄성계수 (kg/cm^2)	2.04×10^6
다우얼바의 포와슨 비	0.15
다우얼바의 직경 (cm)	1.9
다우얼바의 배치간격 (cm)	45.7
처짐 전담습 (%)	73, 93

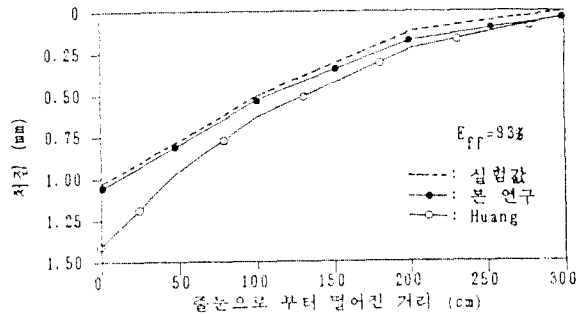


그림 5-7 결침 C에 해당하는 경우 ($P=15.4\text{kg/cm}^2, k=3.0\text{kg/cm}^3$)

4) 타이드 키 작용 모델

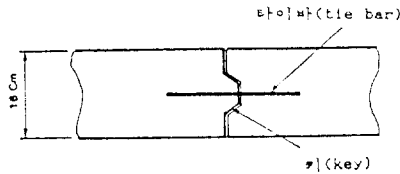


그림 5-8 타이드 키 작용의 모형

표 5-5 타이드 키 작용에 이용된 수치

지반 지지력계수 (kg/cm^3)	2.8
포장 슬래브의 두께 (cm)	16
하중 (kg)	4082
처짐 전달율 (%)	93, 98

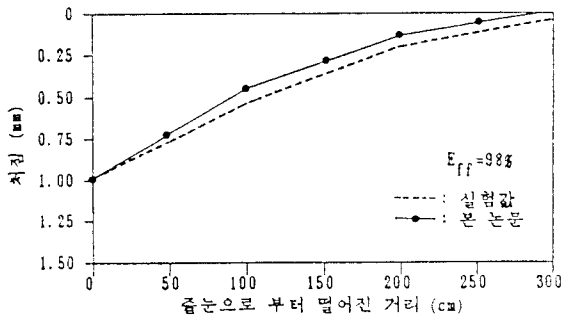


그림 5-9 결점 C에 재하한 경우 ($P=12.6\text{kg}/\text{cm}^2, k=2.8\text{kg}/\text{cm}^3$)

5.5 결과 분석

연결작용의 해석결과인 그림 5-3은 Arlington 실험치, Huang의 수치해 및 본 연구의 이론해가 매우 유사함을 보여주고 있다. 또한 골재 맞물림작용의 그림 5-5와 타이드 키 작용의 그림 5-9는 실험치와 이론해가 잘 일치함을 나타내고 있으며, 조합작용을 해석한 그림 5-7은 본 연구에서 개발한 수치해와 실험치가 약 3% 정도의 차이가 있는 반면, Huang의 수치해는 실험치보다 약 36% 정도 과대평가하고 있다.

6. 결론

- 1) 본 연구에서는 포장체 가로중선부의 연결작용과 골재 맞물림작용을 동시에 고려하여 해석모형을 개발하였고, 이 모형을 시멘트 콘크리트 포장체의 거동을 엄밀히 평가할 수 있는 것으로 사료된다.
- 2) 가로중선부에서 연결작용만을 고려할 경우, 본 연구의 수치해적은 Huang의 수치해와 큰 차이가 없으며, 모두 실험결과와 잘 일치한다고 판단되고, 골재 맞물림작용만을 고려할 경우, Arlington 실험치와 거의 일치함을 보이고 있다. 또한 조합작용을 고려할 경우, 본 연구의 수치해는 실험치와 약 3% 정도 거의 일치함을 보인 반면, 골재 맞물림작용을 고려치 않은 Huang의 수치해는 실험치와 큰 차이를 보이고 있다.
- 3) 세로중선부의 타이드 키 작용만을 고려한 경우, 최대처짐 부분에서 본 연구의 수치해는 실험치와 거의 일치하기 때문에 앞으로 포장체의 세로중선 거동 해석에 본 연구 결과를 활용할 수 있다고 판단된다.

참고 문헌

1. Wang, S.K., Sargious, M., and Cheung, Y.K., "Advanced Analysis of Rigid Pavements", Transportation Engineering Journal, ASCE, Vol.98, NO.1E1, 1972, pp.37-44.
2. Tabatabaie, A.M. and Barenberg, E.J., "Finite Element Analysis of Jointed or Cracked Concrete Pavements", IBR, No.671, 1978, pp.11-17.
3. Bazant, Z.P. and Tsubaki, T., "Slip-Dilatancy Model for Cracked Reinforced Concrete", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.106, No. ST9, 1980, pp.1947-1966.
4. 건설부, 도로 포장 설계 시공지침, 건설부, 1985, pp.403-419.
5. Nishizawa, T. and Matsuno, S., "Adaptability of the Finite Element Method for Structural Analysis of Concrete Pavements", 토목학회 논문보고집(일본), 제338호, 1983, pp.207-215.
6. Nishizawa, T., Fukuda, T., and Matsuno, S., "Analysis of Mechanical Behavior of Concrete Pavements at Transverse Joints", 토목학회 논문집(일본), 제354호, V-6, 1987, pp.185-193.
7. Nishizawa, T., Tai, S., "A Preliminary Study on Mechanical Properties of Concrete Block Pavements", 토목학회 논문집(일본), 제354호, V-2, 1985, pp.137-145.
8. Teller, L.W. and Sutherland, E.C., "The Structural Design of Concrete Pavements : Part 4 - A Study of the Structural Action of Several Types of Transverse and Longitudinal Joint Designs", Public Roads, Vol.17, 1936, pp.143-192.