

줄눈부의 거동을 고려한 시멘트콘크리트 포장체의 해석모델 개발

Development of Analytical Model for Cement Concrete Pavements
Considering Joint Behavior

변근주* 이상민** 임갑주***
Byun, Keun Joo Lee, Sang Min Yim, Garb Joo

국문 요약

시멘트콘크리트 포장의 세로줄눈 및 가로줄눈은 교통하중의 반복이동에 의한 포장슬래브의 단차 현상을 억제하고, 하중, 온도 및 습도변화 등에 의하여 발생하는 응력 및 변형을 효율적으로 조절하기 위하여 설치된다.

그러나, 노반공극수의 동결융해, 지하수위의 변화, 줄눈부의 팽팽 및 단차현상으로 지반지지력이 저하되면 줄눈부에 국부적 응력집중이 발생하여 하중분산능력이 저하됨은 물론 포장의 공용성 및 안정성을 크게 위협하게 된다.

따라서 시멘트콘크리트 포장을 효율적으로 유지관리하고 사용성을 확보하기 위해서는 줄눈부의 하중전달특성을 보다 엄밀히 반영할 수 있는 해석모델이 정립되어야 하며, 이를 토대로 체계적인 유지관리 시스템이 개발되어야 한다.

이러한 관점에서 본 연구에서는 줄눈부의 거동을 다우얼바의 연결작용, 골재 맞물림작용 및 타이 드키 작용으로 구분한 후, 포장체의 특성에 따라 이들의 영향을 포장슬래브의 구조해석에 선택적으로 반영시킬 수 있도록 해석프로그램을 개발하였다. 포장슬래브의 거동평가를 위하여 Winkler 기초 모델 및 탄성지반 위에 놓인 판이론을 적용하였으며, 4절점 사각형 유한요소를 사용하여 줄눈요소의 강성 매트릭스를 전 해석과정에 반영하였다.

한편, 본 연구의 해석결과는 Huang의 수치예에 비하여 Arlington 실험값에 더욱 근접된 경향을 보이므로 매우 효율적인 것으로 평가된다.

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

* 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수, 공학박사

** 정회원, 연세대학교 대학원 토목공학과, 박사과정

*** 연세대학교 산업기술연구소 연구원, 공학석사

● 1990.9.9 접수. 본 논문에 대한 토론을 1991.3.30 까지 본 학회에 보내주시면 1991.6월호에 그 결과를 게재해 드립니다.

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.

Using this numerical model as an analysis tool, the effects of joint parameters on the behavior of pavements are investigated.

1. 서론

최근, 대형차량의 급증 및 차량의 축중증가로 인한 기존 아스팔트포장의 과도한 소성변형이 문제점으로 대두됨에 따라 도로포장의 내구성, 사용성 및 유지관리의 경제성을 확보하기 위한 대체방안으로 시멘트콘크리트포장의 건설이 점차 증가되는 추세에 있다.

그러나, 시멘트콘크리트포장은 아스팔트포장과는 달리 국내에 도입된 역사가 짧을 뿐만 아니라 줄눈부의 하중전달기능, 골재 맞물림작용, 지반 지지력의 분포, 포장슬래브와 보조기층의 접촉조건, 하중의 작용위치등에 따라서 포장구조의 거동이 매우 상이하게 나타나므로 이들의 영향을 엄밀히 반영하여야 하지만 국내의 경우 아직까지 해석이론의 체계화 및 해석프로그램의 개발이 미흡한 실정에 있다.

따라서 본 연구에서는 실험자료와 문헌분석을 토대로 국내의 실정에 맞는 시멘트콘크리트포장의 해석모델을 개발하는데 연구의 목적이 있으며, 이를 위하여 줄눈부의 거동을 다우얼바의 연결작용(dowel action), 골재 맞물림작용(aggregate interlocking action) 및 타이드키 작용(tied key action)으로 모형화하여 해석 프로그램을 개발하였다.

탄성지반 위에 놓인 판이론을 토대로 4절점 사각형 유한요소를 이용한 유한요소기법을 적용하였으며, 해석조건에 따라서 이들 줄눈부의 거동을 선택적으로 포장슬래브의 강성 매트릭스에 반영할 수 있도록 하였다.

2. 시멘트콘크리트 포장슬래브와 지반의 해석

본 연구에서는 시멘트 콘크리트 포장 슬래브의 해석에 박판모델(thin plate model)을 이용

하였고, 탄성지반 위에 놓인 판이론을 적용하기 위하여 지반에 대해서는 임의의 한 절점에서의 지반반력이 그 절점의 연직변위에만 비례한다고 보는 Winkler 기초모델을 사용하여 강성 매트릭스를 산정한 후, 이를 박판이론으로부터 유도된 포장슬래브의 강성 매트릭스에 더하여 정식화하였다.

포장슬래브의 강성 매트릭스의 산정시 지반의 반력을 고려한 시멘트콘크리트 포장슬래브의 하중-변위관계는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다. 1),2),3)

$$\{f\} = \{[K] + [H]\} \{d\} \quad (1)$$

여기서, $\{f\}$: 외력 벡터

$[K]$: 포장슬래브의 강성 매트릭스

$[H]$: 지반의 강성 매트릭스

$\{d\}$: 변위 벡터

3. 줄눈부의 거동해석

시멘트 콘크리트 포장의 줄눈부는 가로줄눈과 세로줄눈으로 구분된다.

본 연구에서는 가로줄눈부의 하중전달 기능을 다우얼바의 휨저항과 전단저항을 고려한 연결작용, 콘크리트 포장슬래브 단면의 골재 맞물림작용, 그리고 연결작용과 골재 맞물림작용을 동시에 고려한 조합작용 등의 세가지로 구분하였으며, 이들을 포장상태에 따라서 선택적으로 고려할 수 있도록 하였다.

또한 세로줄눈부에 배치된 타이바(tie bar) 또는 키(key)는 휨에 대한 저항이 없고, 단지 위치를 고정시키는 역할을 하므로 이들이 전단에만 저항한다고 가정하여 타이드키 작용을 모형화하였다. 4)

3.1 줄눈부의 유한요소 정식화

줄눈부의 하중전달은 일반적으로 그림1에 도시된 바와 같이 좁은 줄눈 틈사이의 변형차에 비례한 하중이 양측 포장 슬래브에 전달된다고 가정한 모델이다. 5), 6)

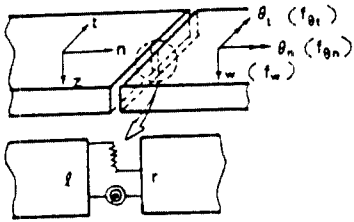


그림 1 줄눈부의 하중전달모델

그림 1의 하중 전달모델을 이용하여 임의의 줄눈요소에 대한 하중 $\{f_i\}$ -처짐 $\{d_i\}$ 관계를 유도하면 식(2)와 같이 나타난다.

$$\{f_i\} = [J_e] \{d_i\} \quad (2)$$

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

: 줄눈요소의 강성 매트릭스

$[B]$: 절점 변위-변형률 매트릭스

b : 줄눈요소길이의 1/2

줄눈요소의 강성 매트릭스 $[J_e]$ 는 다우얼바와 콘크리트 사이의 연결작용을 나타내는 강성 매트릭스 $[J_{ed}]$, 콘크리트 포장슬래브 단면의 풀재 맞물림작용을 나타내는 강성매트릭스 $[J_{ea}]$, 그리고 세로 줄눈부의 타이드키 작용을 나타내는 강성 매트릭스 $[J_{et}]$ 등의 3가지로 구분할 수 있고, 이들의 관계는 식 (3)에 나타난 바와 같다.

$$[J_e] = [J_{ed}] + [J_{ea}] + [J_{et}] \quad (3)$$

여기서, $[J_{ed}] = \int_0^{2b} [B(t)]^T [T_d] [B(t)] dt$

$$[J_{ea}] = \int_0^{2b} [B(t)]^T [T_a] [B(t)] dt$$

$$[J_{et}] = \int_0^{2b} [B(t)]^T [T_t] [B(t)] dt$$

$[J_e]$ 를 줄눈부 전체에 대하여 고려하면 $[J]$ 를 구할 수 있고, 이를 식(2)에 더하여 시멘트 콘크리트 포장구조 전체에 대한 강성방정식으로 나타내면 식(4)와 같다.

$$\{f\} = [[K] + [H] + [J]] \{d\} \quad (4)$$

3.2 연결작용의 해석

다우얼바의 연결작용은 그림 2 및 식 5에 제시된 바와 같이 줄눈부의 거동특성 및 처짐차이로부터 모형화되며, 이는 줄눈부의 처짐산정에 적용된다.

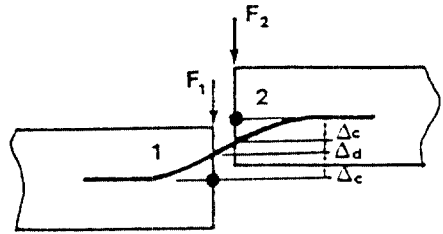


그림 2 다우얼바의 하중전달특성

$$\Delta = W_1 - W_2 = \Delta_d + 2\Delta_c \quad (5)$$

여기서, Δ_c : 다우얼바에 의한 콘크리트의 변형

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

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

Δ_d : 다우얼바의 전단변형

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

d : 줄눈의 틈

K : 다우얼바의 전단 탄성계수

A : 다우얼바의 단면적

b : 다우얼바의 직경

K : 콘크리트의 지압계수

W_1, W_2 : 포장슬래브 1점, 2점의 처짐

F_1, F_2 : 1점, 2점에 작용하는 하중

한편, 식 (3)에서 연결작용의 강성 매트릭스 $[J_{ed}]$ 를 산정하기 위한 강성매트릭스 $[T_d]$ 는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$[T_d] = \begin{bmatrix} k_d A_d & 0 & 0 & -k_d A_d & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & k_d A_d & 0 & 0 \\ & & & & 0 & 0 \\ \text{sym.} & & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서,

$$k_d = \left[\frac{d}{GA} + \frac{2 + \beta d}{2\beta^2 EI} \right]^{-1}$$

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

3.3 골재 맞물림작용의 해석

시멘트 콘크리트 포장을 타설한 후, 양생과정을 거치는동안 포장내부는 시멘트의 수화반응, 공기수의 증발 및 환경적인 변화로 인하여 체적변화를 수반하게 된다. 이때 줄눈부에 불연속적인 균열이 발생하게 되며 이로 인하여 공용기간동안 줄눈부의 골재맞물림 작용이 나타나게 된다. 그림 3은 줄눈부의 골재맞물림작용을 도시한 것이며, 포장슬래브의 온도 팽창 정도에 따라 상이하게 나타난다.

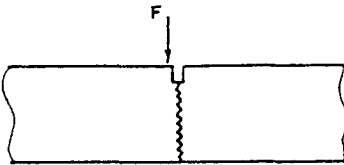


그림 3 골재 맞물림작용

골재 맞물림작용에 의해 전달력만이 전달된다고 가정할 경우 식(3)의 $[T_a]$ 는 식(7)과 같이 유도된다.

$$[T_a] = \begin{bmatrix} k_a A_a & 0 & 0 & -k_a A_a & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & k_a A_a & 0 & 0 \\ & & & & 0 & 0 \\ \text{sym.} & & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

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

그러나, 골재 맞물림계수 k_a 를 기하학적 모델로부터 해석적으로 구하는 것은 매우 어렵기 때문에 그림 4에 도시된 바와 같이 Nishizawa가 제안한 치짐전달율(E_{fr})과 k_a 와의 관계를 적용하기로 한다.

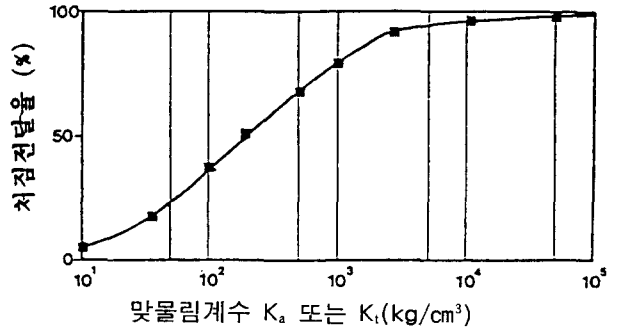


그림 4 골재맞물림계수와 치짐전달율의 상관관계

그림 4에서 k_a 를 구하기 위해 이용된 치짐전달율은 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{fr} = \frac{W_2}{W_1} \times 100(\%) \quad (8)$$

여기서, W_1 은 포장슬래브에서 재하층의 최대 치짐, W_2 는 비재하층의 최대치짐이며, Dynaflect, Benkelman Beam, Falling Weight Deflectometer 및 Road Rater등을 이용하여 측정할 수 있다.

Arlington 실험에 의하면, 골재 맞물림작용에 의한 치짐전달율 E_{fr} 는 약 60% 이하인 것으로 평가되고 있으므로 본 연구에서는 그림 4의 k_a 와 E_{fr} 의 관계를 일반화하여, k_a 를 식(9)과 같이 정식화하였다.

$$K_a = 0 \quad : E_{fr} < 10\%$$

$$K_a = E_{fr} / (0.07307 - 0.0008386 E_{fr}) \quad (\text{kg}/\text{cm}^3) \quad : 10\% \leq E_{fr} < 80\% \quad (9)$$

$$K_a = E_{fr} / (0.04955 - 0.0004987 E_{fr}) \quad (\text{kg}/\text{cm}^3) \quad : E_{fr} \geq 80\%$$

3.4 타이드키 작용의 해석

차선을 구분하거나 노건축 구조물을 보호하기 위해 설치하는 세로줄눈의 거동은 그림 5에 도시된 바와 같이 타이드 키 작용을 고려하여 강성매트릭스를 유도하였다.

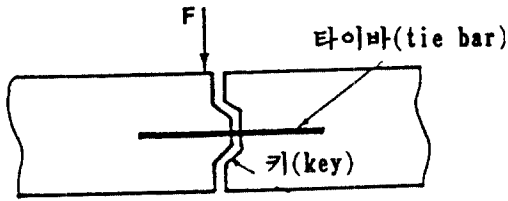


그림 5 타이드 키 작용

타이드키 작용은 전단력만을 전달한다고 가정하여 식(3)의 $[T_i]$ 를 다음 식(10)과 같이 유도하였다.

$$[T_i] = \begin{bmatrix} k_t A_t & 0 & 0 & -k_t A_t & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & k_t A_t & 0 & 0 \\ \cdot & & & & 0 & 0 \\ \text{sym.} & & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

타이드 키의 맞물림계수 k_t 도 수치계산의 결과를 이용하여 E_{it} 와 k_t 와의 관계를 그림 4로부터 구할 수 있다. Arlington 실험에 의하면, 타이드 키 작용에 의한 처짐전달율 E_{it} 는 약 80% 이상이라고 보고하고 있으므로 그림 4에 도시된 바와같이 k_t 를 식(11)과 같이 정식화하였다.

$$\begin{aligned} K_t &= E_{it} / (0.07307 - 0.0008386 E_{it}) \quad (\text{kg/cm}^3) \\ &\quad : E_{it} < 80\% \\ K_t &= E_{it} / (0.04955 - 0.0004987 E_{it}) \quad (\text{kg/cm}^3) \\ &\quad : 80\% \leq E_{it} < 97\% \quad (11) \\ K_t &= 200,000 \quad (\text{kg/cm}^3) \\ &\quad : E_{it} \geq 97\% \end{aligned}$$

4. 수치해석 알고리즘

본 연구에서 개발한 시멘트콘크리트 포장의 구조 해석과정을 체계적으로 도시하면 그림 6과 같다.

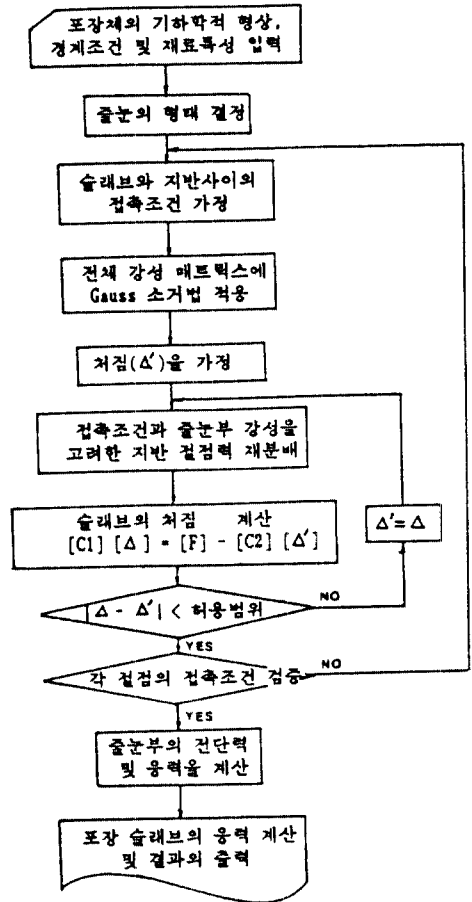


그림 6 해석과정의 흐름도

5. 수치예 및 결과분석

본 연구에서는 개발된 수치계산 프로그램을 검증하기 위하여, 다우얼바의 연결작용, 골재맞물림작용, 조합작용 및 타이키 작용 각각에 대하여 Arlington 실험치 및 Huang의 수치계산 결과와 비교하였다.

5.1 대상구조의 요소분할 예

Arlington 실험값과 비교하기 위하여 길이 6 m, 폭 3m의 포장모형을 대상구조로 선정하였다. 그림 7은 가로줄눈부 다우얼바의 연결작용, 골재맞물림 작용 및 조합작용을 평가하기 위하여 적용한 요소분할 예를 도시한 것이다.

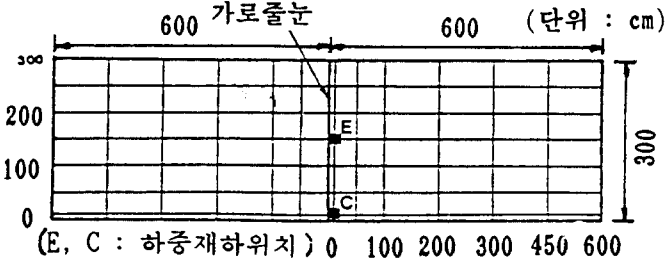


그림 7 가로줄눈부의 거동평가를 위한 요소분할 예

5.2 줄눈부의 거동평가

(1) 다우얼바 연결작용의 영향

연결작용의 영향을 평가하기 위하여 본 연구에서 선정할 줄눈부 모형은 그림 8과 같으며, 해석결과는 그림 9에 도시된 바와 같다. 해석결과에 의하면 다우얼바의 연결작용 만을 고려할 경우 Arlington의 실험값, Huang의 해석값 및 본 연구의 결과가 매우 잘 일치하는 것으로 평가된다.7), 8)

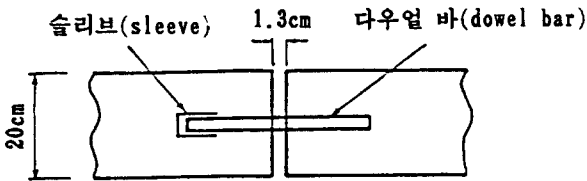


그림 8 연결작용의 평가를 위한 줄눈부의 모형

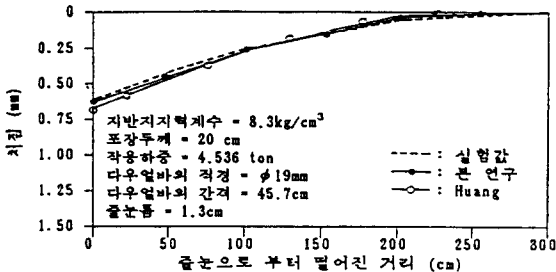


그림 9 연결작용을 고려한 포장의 처짐특성

(2) 골재맞물림 작용의 영향

가로줄눈부에 다우얼바가 설치되지 않은 경우, 골재맞물림에 의한 하중전달효과 및 처짐특성을 분석하기 위하여 그림 10과 같은 모형을 설정하여 구조해석을 실시하였다. 그림 11에 의하면 Arlington의 실험값과 본 연구의 결과가 매우 유사함을 알 수 있다.

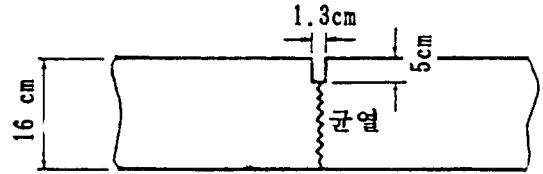


그림 10 골재맞물림작용의 평가를 위한 줄눈부 모형

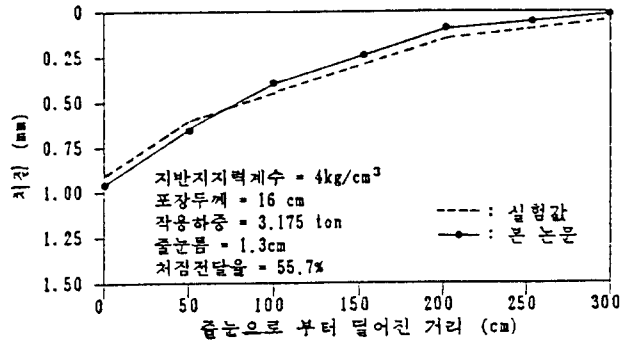


그림 11 골재맞물림 작용을 고려한 포장의 처짐특성

(3) 조합작용의 영향

본 연구에서 적용한 조합작용의 모형 및 해석결과는 그림 12 및 13과 같으며, 골재맞물림 작용이 고려되지 않은 Huang의 해석값에 비하여 본 연구의 해석결과는 Arlington의 실험치와 매우 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다.7), 8)

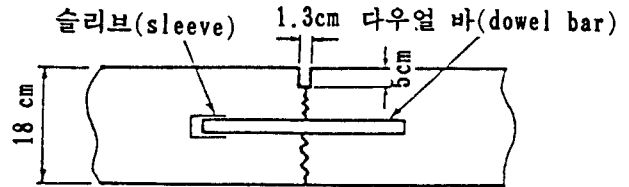


그림 12 조합작용의 평가를 위한 줄눈부 모형

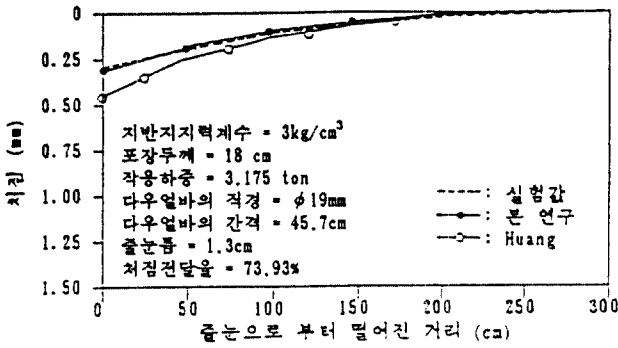


그림 13 조합작용을 고려한 포장의 처짐특성

(4) 타이드키 작용의 영향

타이드키작용을 평가하기 위하여 선정된 줄눈부모형 및 해석결과는 그림 14 및 15에 도시된 바와 같으며, 최대처짐이 실험값과 잘 일치함을 알 수 있다.

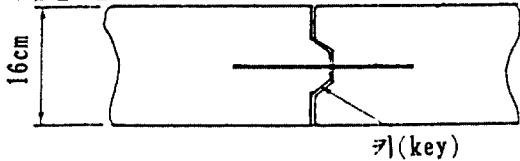


그림 14 타이드키 작용의 평가를 위한 줄눈부 모형

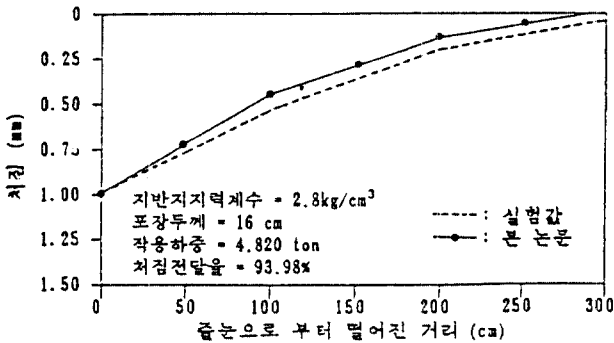


그림 15 타이드키 작용을 고려한 포장의 처짐특성

5.3 결과분석

연결작용의 해석결과인 그림 9는 Arlington 실험값, Huang의 수치해 및 본 연구의 해석결과가 매우 유사함을 보여주고 있다. 또한 골재 맞물림작용의 그림 11과 타이드키 작용의 그림 15는 실험치와 이론해가 잘 일치함을 나타

내고 있으며, 조합작용을 해석한 그림 13은 본 연구에서 개발한 수치해와 실험치가 약 3% 정도의 차이가 있는 반면, Huang의 수치해는 실험치보다 약 36% 정도 과대 평가하고 있음을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서는 포장체 가로줄눈부의 연결작용과 골재맞물림작용을 동시에 고려하여 해석모델을 개발하였고, 이 모델은 시멘트콘크리트 포장체의 거동을 평가하는데 사용될 수 있는 것으로 사료된다.
- 2) 다우얼바의 연결작용만을 고려할 경우, 본 연구의 해석결과는 Huang의 수치해와 큰 차이가 없으며, 모두 실험결과와 잘 일치한다고 판단된다. 또한, 골재맞물림작용만을 고려할 경우, Arlington의 실험치와 거의 일치함을 보이고 있으며, 조합작용을 고려할 경우에도 본 연구의 수치해는 실험치와 약 3% 정도로 거의 일치함을 보인 반면, 골재맞물림작용을 고려치 않은 Huang의 수치해는 실험치와 큰 차이를 보이고 있으므로 본 연구의 결과는 신뢰도가 높은 것으로 판단된다.
- 3) 세로줄눈부의 타이드키 작용만을 고려한 경우, 최대처짐 부분에서 본 연구의 수치해는 실험치와 거의 일치하기 때문에 향후 포장체의 세로줄눈 거동 해석에 효율적으로 적용 가능한 것으로 평가된다.

참고 문헌

- 1) Wang, S.K., Sargious, M., and Cheung, Y.K., "Advanced Analysis of Rigid Pavements", *Transportation Engineering Journal*, Vol.98, NO. TE1, ASCE, 1972, pp.37-44.
- 2) Tabatabaie, A.M. and Barenberg, E.J., "Finite Element Analysis of Jointed or Cracked

- Concrete Pavements”, *TRR,NO.671, TRB* 1978,pp.11-17.
- 3) Bazant,Z.P. and Tsubaki,T., “Slip-Dilatancy Model for Cracked Reinforced Concrete”, *Journal of the Structural Division,Vol.106, NO. ST9*, 1980, ASCE,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 논문 보고집(일본) 제338호, 일본토목학회, 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, 일본토목학회, 1987, pp.185-193.
 - 7) Nishizawa,T. and Tai,S.,“A Preliminary Study on Mechanical Properties of Concrete Block Pavements”, 토목학회 논문집(일본) 제354호, V-2, 일본토목학회, 1985,pp.137-145.
 - 8) Teller,L.W. and Sutherland,E.C., “The Structural Design of Concrete Pavements, *Public Roads, Vol. 17*, 1986.,143-192.”