

콘크리트 포장의 구조해석

이승원* · 윤경구** · 김지원*** · 유태석****

1. 구조해석 기법

콘크리트 포장구조체의 역학적평가(mechanistic-evaluation) 혹은 구조적평가를 수행하는데 있어서 가장 기본이 되는 콘크리트 포장의 구조해석은 1926년 최초로 고전적인 Westergaard의 이론식에서부터 발전하기 시작하였는데, Westergaard는 콘크리트 포장 구조를 Winkler기초 위에 놓인 얇은 유한 탄성판 구조로 가정하여 임계하중위치에 따른 콘크리트 포장 슬래브의 응력 및 변위 계산식을 유도하였다. 그리고 1952년 Pickett & Ray는 콘크리트 포장 구조를 반무한 탄성체 위에 놓인 유한 탄성 판구조로 가정하여 각종 하중재하위치에 따른 휨 모멘트와 처짐을 계산할 수 있는 영향선도를 작성하였다. 이러한 이론식에 의한 구조해석 이후 현재는 컴퓨터의 발전과 더불어 안정적이고 다양한 구조해석을 수행할 수 있는 유한요소해석기법(finite element analysis)이 주로 사용되고 있다. 따라서 본 고에서는 콘크리트 포장의 구조해석기법으로 현재 가장 널리 활용되고 있는 유한요소해석 기법을 중심으로 설명하고자 한다.

현재까지 개발되어 활발히 사용되고 있는 유한요소해석기법들은 정적해석 및 선형해석이 주종을 이루고 있으며, 동적해석 및 비선형해석이 일부 수행 연구되고 있다. 따라서 현재까지 개발되어 사용되고 있는 콘크리트 포장의 유한요소해석 기법은 콘크리트 슬래브층 즉 콘크리트 포장판과 보조기층과 노상층등으로 구성되는 하부기초층을 모형화하는 방법에 따라 크게 분류되어 개발 발전되어 왔다. 먼저 콘크리트 판과 하부기초를 같은 요소이론으로 모형화하는 경우로 축대칭요소를 사용한 2차원 유한요소해석, 3차원요소(solid element)를 사용한 3차원 유한요소해석 등이 있다. 그리고 콘크리트 판과 하부기초를 각각 다른 요소이론으로 모형화하는 경우로서는 콘크리트 판은 유한 판요소(plate element)로 모형화하고 하부기초를 탄성기초로 모형화하는 Winkler 기초해석방법, 하부기초는 다층탄성이론으로 모형화하는 Burmister 기초해석방법, 또한 하부기초는 반무한대의 탄성체로 모형화하는 강성기초(Elastic solid foundation)해석방법등으로 크게 나뉘어 진다. 이러한 구조해석기법 및 이에 따른 구조모형화를 간략히 설명하면 다음과 같다.

* 정회원 · 경북대학 토목설계과 조교수(swlee@kyungbok.ac.kr)
 ** 정회원 · 강원대학교 토목공학과 조교수(kkyun@kangwon.ac.kr)
 *** 정회원 · 한국도로공사 도로연구소 책임연구원(aircraft1@hitel.net)
 **** 정회원 · 한국도로공사 도로연구소 연구원(Taeseok@freeway.co.kr)

1.1 유한 판요소

콘크리트 포장판을 유한요소해석하는 경우, 주로 유한 판요소로 모형화하는데 콘크리트 포장판이 하부기초층에 비하여 상대적으로 얇고 주로 차량하중에 의한 휨거동(bending behavior)에 의해 구조적거동이 지배되므로 휨거동이 주인 얇은 판이론(thin plate)으로 모형화한다. 따라서 모형화한 포장판내 한요소에서의 평형조건식은 기존의 유한요소 해석이론과 같이 다음과 같이 표현된다.

$$[K]\{\delta\} = \{F\}$$

여기서 $[K]$ 는 판구조의 강성도행렬, $\{\delta\}$ 는 절점 변위벡터, 그리고 $\{F\}$ 는 하중벡터이다. 위의 식에서 이론적으로 콘크리트 포장슬래브층을 나타내는 판구조의 강성도행렬 $[K]$ 의 구성이 유한요소해석의 핵심을 이룬다. 다음 그림은 콘크리트 포장판을 유한 판요소 즉 휨거동의 얇은 판이론으로 모형화한 것이다. 그림에서 M_x , M_y , M_{xy} 는 포장판 x , y 방향의 휨모멘트와 비틀림모멘트이고 w 는 포장판하부 즉 2방향의 처짐이고, θ_x , θ_y 는 x , y 방향의 회전 각인데 자세한 해석이론은 생략한다.

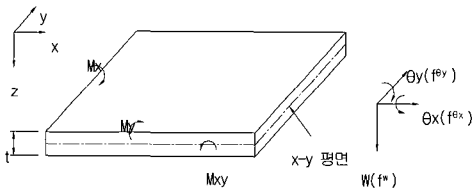


그림 1. 콘크리트 포장판의 판요소로의 모형화

국내의 콘크리트 포장구조의 주종을 이루는 콘크리트 포장판이 두개의 층(콘크리트 슬래브층(표층)과 빈배합 콘크리트층)으로 이루어진 경우, 두 개의 층이 부착된 경우와 비부착된 경우로 나뉘어 지는데, 이에따른 판구조의 강성도 행렬 $[K]$ 가 각각 다르게 구해진다. 따라서 이와같이 구해

진 콘크리트 판구조의 강성도는 다음에 기술되는 하부기초층의 강성도와 결합되어 일반적인 조합방법에 의하여 전체 포장구조계의 강성이 구해져 구조해석이 수행된다. 이외에 최근에는 휨거동 이외에 전단거동도 고려하는 중간두께의 판이론(medium thick plate)으로의 모형화도 시도되고 있다.

1.2 Winkler 기초해석

Winkler 기초해석방법은 Dense liquid해석으로도 불리우는데, 콘크리트 포장구조체를 콘크리트 판과 보조기층과 노상층등으로 구성되는 하부기초층을 Winkler 기초로 나누어 각각의 강성도행렬을 구하는 방법이다. 즉, 콘크리트 포장판 하부입의 지점에서 포장판에 대한 지반의 반력은 그 지점의 처짐에 비례한다고 보는 것이다. 그러므로 포장구조체 거동은 다음식과 같이 표현된다.

$$\{F\} = [K]\{\delta\} + [W]\{\delta'\}$$

여기서 $[W]$ 는 하부기초층의 강성도행렬로서 기초의 지반지지력계수 k 로 모형화 된다. 다음 그림 2는 국내의 일반적인 콘크리트 포장구조이다. 그리고 그림 3은 이러한 콘크리트 포장구조를 Winkler 기초해석으로 모형화한 구조해석 모형 및 유한요소해석의 예인데, 유한요소망은 FWD 비파괴시험치의 분석을 위한 요소망을 구성한 것이다.

Winkler 기초해석에서 하부기초층을 모형화하는 지반지지력계수 k 는 Westergaard가 지반을 Winkler 기초로 모형화하여 콘크리트 포장판의 이론적인 응력을 계산하기 위하여 사용되기 시작하였다. Westergaard는 콘크리트 포장판이 무한대로 펼쳐있다고 가정하여 응력 산정식을 유도하였으며 지반지지력계수는 지반의 종류에 따라 경험적으로 추정하였다.

그 이후 Arlington 실험 등과 같은 여러 현장실험에서 실험에 의하여 측정된 응력과 지반지지력

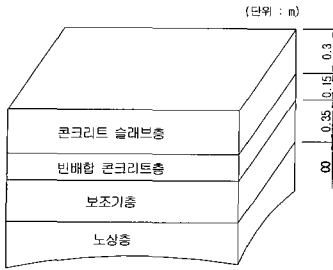


그림 2. 콘크리트 포장의 구조

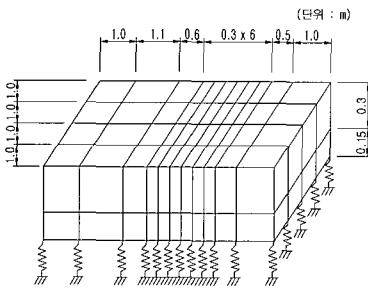


그림 3. Winkler 기초해석의 구조해석 모형

계수를 사용하여 Westergaard 이론식에 의해 산정된 콘크리트 포장판의 응력이 비교적 잘 일치함이 확인되어 널리 사용되기 시작하였다. 이렇게 지반의 종류에 따라 경험적으로 산정되는 지반지지력계수는 평판재하실험 등을 통하여 실험적으로 산정할 수도 있다. 1961년 Vesic은 지반 위에 놓인 임의의 폭을 가진 보의 휨 모멘트를 산정하기 위한 지반지지력계수의 산정식을 제안하였다. 그리고 이 이론을 임의의 두께를 가지고 무한대로 펼쳐 있는 콘크리트 포장판에 적용하여 포장판의 휨 모멘트와 응력계산을 위한 지반지지력계수의 산정식을 제안하였다. 지반지지력계수는 지반과 포장판의 상대적인 강성에 결정되는데 제안된 식은 다음식과 같다.

$$k = (E_f/E_c)^{1/3} E_f / [(1+\nu_f^2)h]$$

여기서 E_f 와 ν_f 는 각각 기초의 탄성계수와 포아송 비이며 E_c 는 콘크리트의 탄성계수, h 는 콘

크리트의 두께이다. 위 식에서 지반지지력계수는 지반의 종류에 따라 일정한 값을 가지지 않으며 포장판의 두께에 반비례함을 알 수 있다. Winkler 기초해석은 다른 해석방법보다 계산량이 적으므로 편리하고 경제적인 해석방법이나, 포장구조체의 지반을 스프링과 같은 가상의 일정한 지반지지력계수 k 로 추정하여 해석하여야 하므로 실제 여러 층으로 이루어진 하부기초층의 물성을 정확히 고려할 수 없는 단점이 있다. 그러나 콘크리트 포장판의 응력만을 산정하고자 할 때는 응력의 크기가 지반지지력계수에 의하여 크게 좌우되지 않으므로 효율적인 방법이 될 수 있다. 다만, 응력이 정확히 산정된다고 하여도 이에 대응되는 변위는 다른 해석기법의 결과와 경우에 따라 차이를 보일 수 있으나, 모형화와 수치해석이 용이하고 편리한 장점이 있다.

1.3 Burmister 기초해석

Burmister 기초해석방법은 다층기초(layered foundation)해석으로도 불리우는데, 콘크리트 포장구조체를 콘크리트 판과 보조기층과 노상층등으로 구성되는 하부기초층을 다층탄성기초로 나누고 각 이론에 따라 강성을 구한 다음 이를 겹침법에 의해 콘크리트 포장구조체 전구조의 강성도행렬을 구하는 방법이다. 그러므로 포장구조체 거동은 하나의 판 요소에 대하여 다음식과 같이 된다.

$$\{F\} = [K]\{\delta\} + [H]\{\delta'\}$$

여기서 $[H]$ 는 하부 기초층의 강성도행렬이고, $\{\delta'\}$ 은 기초에 의하여 강성이 추가되는 자유도이며, 하부 기초층의 강성도행렬 $[H]$ 는 Burmister의 다층탄성이론에 의해 보조기층 및 노상층의 물성에 따른 유연도행렬을 구하고 이의 역행렬로써 구해진다. 이때 하부기초층은 탄성해석을 위해 각 층은 균질, 등방인 이상적인 탄성체로서 수평

방향으로 무한하게 놓여 있으며 모든 층들은 완전 접합되어 있어 각 층의 경계면에서 변위 및 응력은 연속이라고 가정 모형화한다. 다음 그림 4는 앞의 그림 2의 콘크리트 포장층을 Burmister 기초해석으로 모형화한 구조해석 모형 및 유한요소해석의 예이다. 이와 같이 포장체기초층을 물성이 상이한 다층탄성구조체로 해석할 수 있는 다층탄성이론은 Burmister, D.M.에 의해 발표되었으며 Michelow, J.는 이를 확장하여 매트릭스를 사용한 다층탄성이론을 정립하였다. Burmister 기초해석의 경우는 하부기초가 반무한체의 층구조로 모형화되므로 하부기초층 각층의 물성을 고려할 수 있어 하부기초층으로의 응력집중과 하중분산을 고려할 수 있고, 모형화와 수치해석이 용이한 장점이 있다.

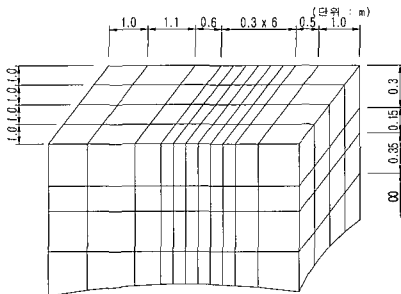


그림 4. Burmister 기초해석의 구조해석 모형

1.4 2차원 및 3차원 유한요소해석

콘크리트 포장판과 하부기초를 축대칭(axi-symmetric)요소를 사용하는 2차원 유한요소해석은 이론식에 의한 구조해석을 지나 컴퓨터에 의한 수치해석 초창기에는 사용되었으나 최근에는 콘크리트 포장의 구조해석에는 거의 사용되지 않고 있다. 최근에 시도되고 있는 3차원 유한요소해석은 제한적으로 일부 수행 연구되고 있으며, 콘크리트 포장판에서부터 하부기초 각층 및 다우웰바등 콘크리트 포장구조체 전부를 3차원요소로 모델링 함으로써 비선형해석, 동적해석, 전단변형

등을 해석할 수 있는 장점이 있으나, 콘크리트 포장층 밑의 하부기초층에 인위적인 경계조건(지점 조건)을 주어 해석해야 하는 단점이 있어 유한요소망을 하중영향권 이상의 충분한 요소망을 구성하여 해석하거나 특수한 요소(infinite element등)를 사용하여야 한다. 그리고 모형화 및 수치해석이 복잡한 단점이 있다. 이러한 3차원 유한요소해석에는 범용 프로그램(SAP, ABAQUS, ANSYS 등)이 많이 사용되고 있다. 다음 그림 5는 이러한 3차원 해석의 구조해석 모형 및 유한요소해석의 예이다.

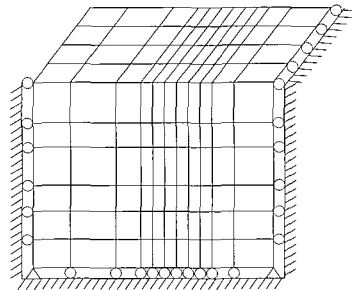


그림 5. 3차원 해석의 구조해석 모형

1.5 하중전달장치의 해석

국내의 콘크리트 포장의 주종을 이루고 있는 무근 콘크리트 포장의 콘크리트 포장판은 하나의 포장판에 가해진 차량하중을 인접 포장판에 전달시키는 하중전달장치(dowel bar, tie bar등)를 갖추고 있다. 따라서 이러한 하중전달장치의 구조해석을 위하여 많은 구조적 모형화가 수행되고 있다. 앞에서 언급한 바와같이 포장판과 포장판 사이에 다우웰바의 강성을 더하는 방법이 주로 사용되는데, 다우웰바의 모형화는 보요소(beam element)를 사용하는 방법이 있고, 포장판과 포장판 사이에서 발생 전달되는 수직변형과 회전변형을 스프링요소(spring element)를 사용하여 하중전달을 해석하는 방법이 사용되고 있다.

2. 콘크리트 포장 해석 프로그램

앞에서 언급한 바와 같이 현재 콘크리트 포장 구조해석 프로그램으로 개인용컴퓨터(PC)의 발전과 더불어 안정적이고 다양한 구조해석을 수행할 수 있는 유한요소해석기법이 주로 사용되고 있는데, 현재까지 개발되어 활발히 사용되고 있는 유한요소해석기법들은 정적해석 및 선형해석 프로그램(KENSLAB, ILLISLAB, JSLAB, CRCP-10등)이 주종을 이루고 있으며, 동적해석 및 비선형해석을 위한 프로그램(DYNA-SLAB, EverFE등)이 일부 수행 연구되고 있다. 이러한 콘크리트 포장 전용의 유한요소해석 프로그램의 구조적 해석기능을 중심으로 간략하게 언급하면 다음과 같다.

2.1 KENSLAB

KENSLAB는 1970년대에 Y. H. HUANG에 의해 개발된 유한요소해석 프로그램으로 계속 추가적인 보완개발을 통하여 Winkler 기초해석, 강성(Elastic solid) 기초해석, Burmister 기초해석 기능과 콘크리트 슬래브층과 빈배합 콘크리트층의 부착(bond) 및 비부착(unbond) 해석기능, 등분포하중과 집중하중 해석기능, 다우웰바의 하중전달 해석기능, 온도에 의한 warping 해석기능, 콘크리트 포장판 9개까지의 해석기능등 각종 구조해석의 수행이 가능

하다. 그리고 최대 24개의 계절로 나누어 포장의 수명동안에 발생하는 손상에 대한 예측이 가능하며, 포장에 발생하는 손상은 피로 균열로 표현되는데 1977년 Darter가 개발한 모델이나 PCA에서 개발한 모델을 사용한 해석이 가능하다.

2.2 ILLISLAB

ILLISLAB은 1977년 미국의 일리노이 대학에서 개발되었으며, 연결부와 균열등에 대한 응력의 해석과 불연속적인 강성포장의 처짐을 여러해 동안 연구하여 Barenberg와 Tabatabale에 의해 개발된 콘크리트 포장 구조해석 프로그램이다. 이 프로그램은 유한요소법을 이용하며 개발된 이후 꾸준히 정확도와 사용성에 대한 개선이 이루어지고 있다. ILLISLAB 프로그램은 하부 지지층을 elastic solid, Winkler, spring으로 가정할 수 있으며, 덧석우기를 고려하여 포장층을 두 층으로 가정하여 해석할 수 있다. 그리고 다우웰바, 골재 맞물림, keyway 등 다양한 하중전달장치에 대한 고려가 가능하며, 포장층 내의 온도 변화에 따른 응력 분포에 대한 예측도 가능하다. 이 프로그램의 중요한 특징은 일반적인 콘크리트 포장의 연결부와 균열 등 불연속면의 고려, 아래로 방출하는 슬래브의 거동을 분석할 수 있다. 이러한 ILLISLAB은 지속적인 추가보완을 통하여 현재 ISLAB 2000라는 이름으로 통용되고 있으

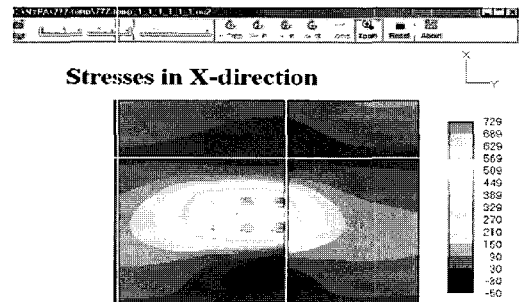
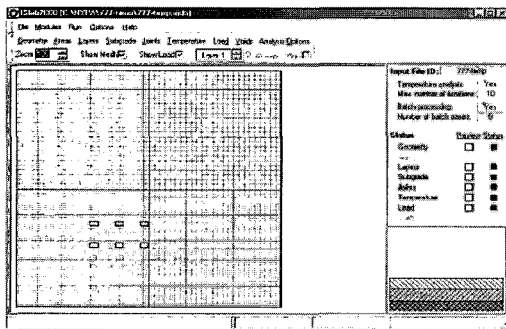


그림 6. ISLAB 2000의 실행화면

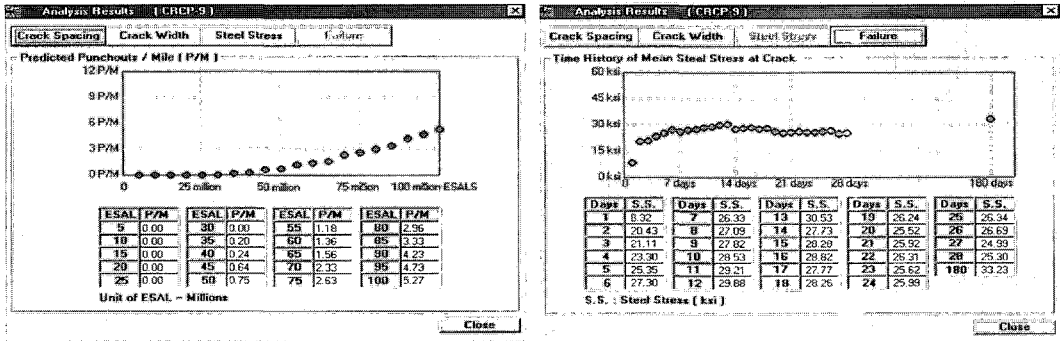


그림 7. CRCP-9의 결과 값 출력 화면

며 2002년도 AASHTO의 콘크리트 포장의 설계법 개발에도 이용되고 있는 것으로 알려져 있다. 주요한 프로그램의 기능의 발전사항은 다음과 같다. 1983년에 A. Ioannides에 의해 여러 가지의 하부조건 모델이 추가되었고, 1989년 G. Korovesis에 의해 curling해석 기능이 추가 되었으며, 1994년에는 L. Khazanovich에 의해 비선형 온도분포와 Totsky모델을 이용한 슬래브와 기층의 분리거동 해석 기능이 추가되었으며, 현재 ISLAB 2000에서는 위의 기능에 콘크리트 덧씌우기가 수행된 경우 줄눈이 일치하지 않는 줄눈이나 균열의 해석(mismatched joints or cracks), 슬래브 하부에 위치하는 기층이 슬래브 보다 넓은 경우(widened base)에 대한 해석 기능 추가, 그림 6과 같이 그래픽 기능을 추가하여 사용자가 편리하게 이용할 수 있도록 개선되었다.

2.3 JSLAB

JSLAB은 1986년 CTL(Construction Technology Laboratories)에서 미연방도로국을 위해 개발되었다. 이 프로그램은 줄눈 콘크리트 포장이 포장의 구조적 성능과 교통량에 대한 최소 비용이 사용 되도록 설계되었다. 줄눈은 구속된 수축과 Curling, Warping과 교통하중에 의한 종방향, 횡방향의 균열을 제어한다. 이 설계방법은 지난 수십년간 연구되었고 그 동안 여러 종류의 하중전

달 장치와 하중전달을 위한 줄눈규격이 제안되었다. 이러한 JSLAB은 최대 2개 층, 9개의 슬래브까지 해석이 가능하며, 다우웰바, 골재 맞물림, keyway 등 다양한 하중전달장치에 대한 고려가 가능하다. 또한 이 프로그램은 포장체 내의 온도 변화에 따른 포장의 거동 분석이 가능하며, 다양한 지지조건(부분적인 지지력 손실 등), 재료 물성에 대한 고려가 가능하다. 포장체에 가해지는 운하중은 절점에 작용하는 집중하중과 요소에 작용하는 분포하중으로 고려가 가능하다. 절점에서의 휨응력과 전단응력, 처짐값에 대한 해석이 가능하며 다우웰바의 전단력과 휨모멘트 해석이 가능하다. 에러의 발생 및 신뢰도를 증가시킨 JSLAB의 최근 버전은 JSLAB-92이다.

2.4 CRCP-10

CRCP-10은 연속철근 콘크리트포장을 해석하기 위해 만들어진 것으로 1975년에 CRCP-1이란 이름으로 최초로 만들어졌다. 최초의 CRCP-1은 텍사스대학교와 NCHRP에 의해 CRCP의 복잡한 매개변수들의 상호작용에 대한 고려를 위해 개발되었는데, 콘크리트 포장 슬래브에 작용하는 습도와 온도변화 그리고 외부의 차분하중으로 인해 CRCP에 발생하는 콘크리트 응력, 철근 응력, 균열폭 계산기능을 갖추었다. 그리고 이러한 기능은

기후조건, 재료의 성질, 하중조건, 철근, 포장두께 등의 범위에 대한 CRCP 분석프로그램의 많은 해법에 대한 결과이다. 또한 끝단에서 거동을 예측하는 것과 같은 가로와 세로방향에 요구되는 철근 계산기능을 갖추고 있다. 그 이후 추가보완이 이루어져 1991년 재료의 변동성을 고려할 수 있고 피로파괴 모델을 포함하도록 만들어진 CRCP-5, 골재의 종류에 따른 양생곡선과 파괴 예측모델의 보정을 하도록 만들어진 CRCP-7, 이전의 버전을 통합하여 1차원 해석이 가능한 CRCP-8로 발전되었다. 이후에 깊이방향의 온도 및 습도 변화를 해석할 수 있는 CRCP-FEM, CRCP의 초기거동(시공 후의 균열간격, 균열폭, 종방향 철근응력) 등을 예측할 수 있는 CRCP-9으로 발전하고 최근에는 이동 텐텀축의 영향을 고려할 수 있는 CRCP-10이 개발되고 있다. CRCP-9을 통해 얻어지는 결과는 아래 그림 7과 같은 형태로 나타난다.

2.5 DYNA-SLAB

DYNA-SLAB은 1992년 K. Chatti에 의해 개발된 프로그램으로 ILLISLAB을 동적해석이 가능하도록 만든 것이다. 즉 기존의 프로그램에 이동 하중 기능을 추가하여 시간에 따른 하중변화의 효과를 볼 수 있도록 했고 포장체 및 하부모델을

개선하여 동적해석이 가능하도록 하였다. 포장체의 하부는 Winkler foundation을 사용하거나 layer solid foundation을 사용하는 것이 가능하고 포장해석의 원리는 다음 그림과 같이 설명된다.

이때 Winkler foundation을 사용하는 경우 적절한 지지력 계수 및 감쇄 계수를 사용해야 하는데 이를 위하여 2001년도 TRB Annual Meeting에서 FWD시험결과를 이용한 정밀 역해석 방법을 제시하였다. 이 방법은 FWD의 처짐을 통해 다음 식과 같은 공식을 사용하여 지지력 및 감쇄를 추정하는 원리를 가지고 있고 적절한 결과를 제시하는 것으로 알려져 있다. 다음 식에서 U는 FWD를 통해 얻는 포장의 처짐을, P_0 는 작용하중을 나타내고 k 및 c 는 이를 통해 역산되는 지지력계수 및 감쇄계수를 나타낸다.

$$k = \frac{Re(P_0) \int_A ReUdA + Im(P_0) \int_A ImUdA}{\left(\int_A ReUdA \right)^2 + \left(\int_A ImUdA \right)^2} + \omega^2 P$$

$$c = -\frac{1}{\omega} \frac{Re(P_0) \int_A ImUdA + Im(P_0) \int_A ReUdA}{\left(\int_A ReUdA \right)^2 + \left(\int_A ImUdA \right)^2}$$

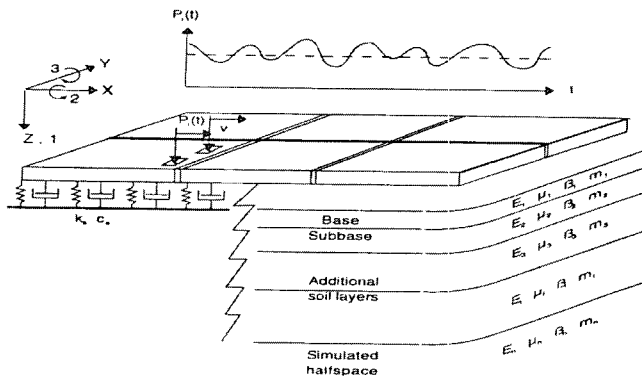


그림 8. DYNA-SLAB 모델의 개념도

2.6 EverFE

EverFE는 1998년도에 W. Davis가 발표한 것으로 3차원 해석을 수행할 수 있도록 만들어진 것이다. 이것은 기존의 2D 프로그램이 가지고 있는 제약(줄눈에서의 응력분포)을 극복하기 위한 것으로 줄눈에서 골재 맞물림, 다우웰 바의 처리 기능을 갖추고 있으며, 슬래브와 기층사이에 부분 접촉 개념을 도입하였다. 이 프로그램은 기존의 2D 프로그램이 다우웰 바에서 발생하는 looseness를 다우웰-콘크리트 상관계수를 사용하여 모사한 데 비해 콘크리트와 다우웰 바 사이에 발생하는 틈을 정의하여 모사할 수 있도록 하였다.

EverFE는 그림 9와 같이 사용자가 입력하기 편리

하도록 되어있는데 8개의 패널(Geometry, Dowel, Materials, Loadings, Meshing, Aggregate Interlocking, Deflection, Stresses)로 구성되어 있다.

이 가운데 다우웰 패널은 다음 그림 10과 같이 다우웰 각각의 위치, 매입 길이, 슬래브와의 틈을 정의할 수 있도록 되어있고 골재 맞물림 패널은 그림 11과 같이 선형해석 및 모델식을 이용한 비선형 해석을 수행할 수 있도록 되어있다.

이외에도 현재까지 개발되어 사용되고 있는 콘크리트 포장 전용의 각종 해석 프로그램들은 표 1과 같다.

또한 현재까지 개발되어 주로 많이 사용되고 있는 유한요소해석 프로그램인 KENSLAB, ILLISLAB, JSLAB, CRCP등의 주요기능 및 특징을 정리하면 다음 표와 같다

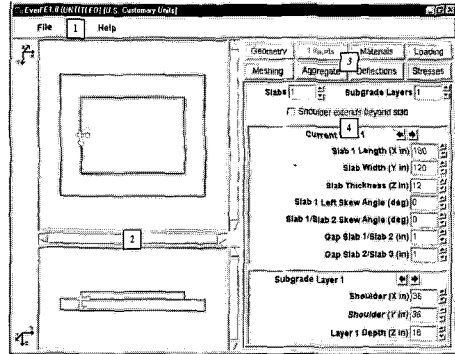
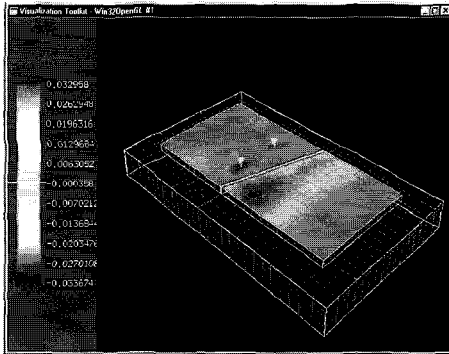


그림 9. EverFE의 실행화면

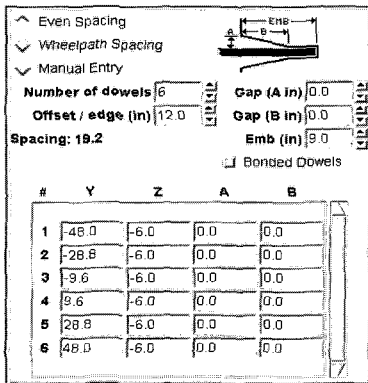


그림 10. Dowels Panel

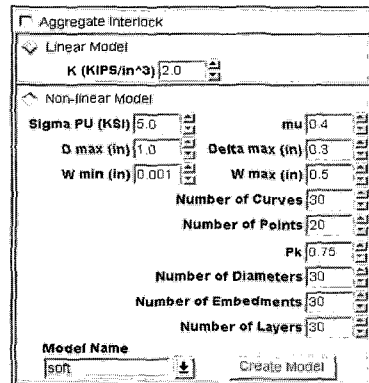


그림 11. Aggregate Interlocking Panel

3. 콘크리트 포장 해석 프로그램의 활용

3.1 역학적-경험적(mechanical-empirical)

포장설계법 개발에의 활용

콘크리트 포장의 설계법은 경험적 설계법(empirical design method)과 역학적 설계법(mechanical design method) 그리고 역학적-경험적 설계법(mechanical-empirical design method)으로 나뉘어 진다.

경험적 설계법은 AASHTO 설계법과 같이 과거의 경험 예를들어 AASHO Road Test와 같이 오랜기간 관측 및 시험등으로 축적된 경험에 의하여 포장 단면을 결정하는 설계법이고, 역학적 설계법은 차량의 반복하중 재하에 의한 포장구조체의 피로파괴가 되지 않도록 주로 콘크리트 포장슬래브층의 휨응력을 제어하고 이를 위한 포장구조해석에 유한요소해석기법들을 사용하는 설계법이다. 역학적-경험적 설계법은 역학적 즉 구조해석에 의해 유도된 포장설계에 기존의 경험자료를 결합 즉 추가보완하여 설계하여 설계법이다.

역학적-경험적 포장설계법은 특정 국가의 차량하중, 포장구조, 각종 포장재료, 기후등의 환경요인등을 고려할 수 있는 장점이 있는 설계법이다. 따라서 이러한 설계법은 차량의 반복하중 재하에 의한 콘크리트 포장의 구조해석결과가 핵심이 된다. 즉 해석 프로그램결과는 포장설계 즉 포장의 피로파괴 산정의 기본이 되는 것이다. 그러므로 이 설계법에는 차량하중과 환경변화에 따른 포장체 내부의 구조적 거동변화를 분석 평가하는데 정도높은 구조해석 프로그램의 활용이 필수적이라 하겠다. 콘크리트 포장구조체 각층의 물성을 추정하는 방법으로 포장구조체를 파괴하는 시험을 실시하여 구하는 방법과 각종 비파괴시험에 의한 포장의 표면처짐을 분석하여 구하는 방법 그리고 각종 비파괴시험에 의한 표면 처짐곡선과 이론적인 처짐곡선과의 비교에 의한 역산기법(back analysis) 등으로 크게 나뉜다.

표 1. 콘크리트 포장 전용의 각종 해석 프로그램

설계 및 설계프로그램	구조해석프로그램	예상 프로그램	배수 및 기후 프로그램
ASSHTO (DNPS 86)	ILLI-SLAB,ILSL2	PEARLARP	CMS
CALTRANS	KENSLAB	PREDICT	Liu/Lytton
JCS-1	JSLAB		
BEAM	H51,H51-ES		
RPS-3	RISC		
PCA	WESLAYER		
JCP-1	WESLIQID		
PMARP	BISAR-29		
	CHEVRON		
	AIRPORT		
	ABAQUS		
	ANSYS		
	FINTE		
	ILLI-LAYER		
	FEACONS-IV		
	JRCP-4		
	KOLA		
	ROOF		
	DIPLOMAT		
	WESTER		
	KENSLAYER		
	CRCP-8,9		

3.2 콘크리트포장 각층의 물성추정에의 활용

포장구조체를 파괴하는 시험을 실시하여 구하는 방법은 공용중인 포장구조체에는 거의 적용되지 않고 있다. 비파괴시험치를 이용하는 방법으로 AASHTO에서 사용되고 있는 기존의 콘크리트 포장의 물성추정 방법은 Westergaard의 이론적인 공식에서 유도된 방법으로 스프링의 지지를 받는 무한한 크기의 콘크리트 포장슬래브에 정적하중이 가해지는 경우의 처짐을 근본으로 한다.

실제 물성추정을 위해 널리 사용되는 FWD 비파괴시험에 의한 포장구조체의 처짐은 기존의 이론적인 방법과는 차이가 발생하고 현장시험결과를 통해 지지력 계산결과와의 1/2 값을 사

표 2. 주요 유한요소해석 프로그램의 구조적기능 및 특징

해석프로그램	해석기본모델	기능 및 특징	비고
KENSLAB	역학적모델	<ul style="list-style-type: none"> - 유한요소해석 - 사용자가 차원을 정의 - 같은 또는 다른 재료의 2층해석 (부착/비부착) - Liquid/Soild/Layer subgrade - 슬래브 간의 하중전달 고려 - 교통하중과 환경하중 고려 - 임의의 하중 상태 고려 - 임의의 길어깨 상태 선정 - 임의의 슬래브나 길어깨 두께 선정 	<ul style="list-style-type: none"> - 컴퓨터 저장용량이 큼
ILLI-SLAB	역학적 모델	<ul style="list-style-type: none"> - 유한요소해석 - 사용자가 차원을 정의 - 같은 또는 다른 재료의 2층 해석(부착/비부착) - Liquid/Solid subgrade - 슬래브 간의 하중전달 고려 - 교통하중과 환경하중 고려 - 임의의 하중상태 고려 : 축하중 - 임의 길어깨 상태선정 - 임의의 슬래브나 길어깨 두께 선정 	<ul style="list-style-type: none"> - 컴퓨터 저장용량이 큼 - 소스 코드가 빈약함
ISLAB 2000	역학적 모델	<ul style="list-style-type: none"> - ILLI-SLAB의 발전된 형태 	
JSLAB	역학적 모델	<ul style="list-style-type: none"> - 임계응력과 처짐계산을 위해 유한요소 이용 - 슬래브내 온도변화, 지지력 조건 재료물성고려 - 하중은 절점에 작용하는 집중 - 하중과 요소에 작용하는 분포하중으로 구분 - 하중전달 영향 고려 - Liquid subgrade 	<ul style="list-style-type: none"> - 소스코드가 유용하지 않음 - 2002 AASHTO GUIDE에 사용예정
CRCP ver 8.0	역학적-경험적 모델	<ul style="list-style-type: none"> - CRCP 초기 거동해석 - 균열 폭, 철근 응력 온도에 의한 기층 처짐 등을 예측 - 노상종류에 따른 마찰력 고려 - 피로모형 적용에 따른 손상해석 	<ul style="list-style-type: none"> - 강성도 행렬의 부정확성 - ILLI-SLAB의 초기 버전을 기본으로 만들어짐

용므로 AASHTO의 물성추정은 반경험적인 방법이라고 할 수 있다.

콘크리트 포장 각층의 물성을 추정하는 역산 기법은 FWD 비파괴시험을 통해 발생하는 처짐곡선을 포장 구조해석 프로그램을 통해 구해진 이론적인 처짐곡선

과 허용범위내에서 일치할 때까지 반복보정하면서 포장 각층의 물성을 추정하는 기법이다. 현재까지 개발된 이러한 역산기법에는 포장 구조해석 기법인 유한요소해석 프로그램으로 앞에서 언급된 정적해석 및 선형해석 프로그램들이 주로 활용되었다. 국내의 경우 1989년과

1990년에 연세대학교(이승원 등)에서 국내의 콘크리트 포장 단면, 제원 및 물성등을 고려하여 FWD 비파괴시험을 통해 발생하는 처짐곡선으로부터 콘크리트 포장 각층의 탄성계수를 추정할 수 있는 역해석 프로그램인 MRPD 개발에 KENSLAB 프로그램이 기본 해석기법으로 사용되었으며, 국내의 콘크리트 포장을 대상으로 FWD 비파괴시험치에 의한 물성추정의 검증시험도 수차례 실시되었다.

최근에는 실제의 현장시험 조건 즉 FWD 비파괴시험의 동적영향을 반영하는 노력이 시도되고 있는데 위에서 소개한 DYNA-SLAB에서 동적인 시험조건을 고려하여 지지력, 감쇄계수 및 탄성계수의 추정방법이 사용될 수 있다. 이 방법은 슬래브의 크기, 두께 및 하중·처짐의 이력곡선을 입력하면 위에서 제시한 정밀해를 통해 물성을 구하게 되는데 AASHTO의 역산공식과 이전의 역산기법에 사용된 프로그램에 비해서 개선된 방법으로 판단된다. 또한 동적인 영향을 고려한 정밀해의 경우에도 줄눈에서의 영향이 역산결과에 미치는 경우와 시험조건이 제한되어 온도구배를 고려하여야 하는 경우에는 구조해석을 통해 처짐 결과를 비교하는 방법을 이용할 수밖에 없으므로 적절한 포장 구조해석기법의 활용은 필수적이라고 할 수 있다.

3.3 역학적기법에 의한 덧씌우기 설계에 활용

콘크리트 포장의 덧씌우기 설계 즉 보강두께 산정기법은 크게 경험적기법(empirical procedure)과 역학적기법(mechanistic procedure)으로 나뉘어지는데, 주로 경험적기법이 사용되어왔으나 최근 외국에서는 역학적기법을 연구 발전시키고 있다. 역학적기법에 의한 콘크리트 포장의 덧씌우기 두께 산정기법은 다음과 같다. 콘크리트 포장의 강성 즉 수명이 저하된 기존의 콘크리트 포장슬래브의

구조적상태를 분석하기 위하여 비파괴시험에 의해 포장체 여러지점의 처짐치 및 실험등에 의해 포장체 각층의 물성을 해석적인 방법으로 추정한 뒤, 추정된 물성과 포장슬래브의 단면제원등으로 앞에서 언급한 해석 프로그램들로 구조해석을 수행하여 콘크리트 포장슬래브의 최대 인장응력을 산정하고, 산정된 최대인장응력을 인장응력의 함수형태로 개발된 파괴기준식에 대입하여 현 포장슬래브의 잔존수명을 추정하고, 덧씌우기 보강후의 기대되는 예상 교통량과 앞에서 추정된 잔존수명의 차이를 대상으로 덧씌우기 보강두께를 산정하는 기법이다. 따라서 정도 높은 구조해석 기법 및 파괴기준식 그리고 물성추정을 위한 역산 기법의 활용이 요구된다 하겠다. 이러한 역학적기법에 의한 덧씌우기 설계기법에도 구조해석 프로그램의 사용이 필수적이라 하겠다.

3.4 하중전달계수 유도에의 활용

국내 콘크리트 포장구조의 주종을 이루고 있는 무근 콘크리트 포장은 하나의 포장판 에 가해진 차량하중을 인접 포장판에 전달시키는 하중전달장치를 갖추고 있는데, 포장의 설계시 이러한 하중전달 능력을 나타내는 하중전달계수의 산정은 중요하다 하겠다. 즉 하중전달계수(load transfer coefficient, J-factor)는 줄눈, 균열과 같은 콘크리트 포장의 불연속 지점에서 하중전달 능력을 나타내는 계수로 다우웰바와 같은 하중전달 기구, 골재 맞물림, 콘크리트 길어깨 결속 여부등에 영향을 받는다. 현재의 콘크리트 포장의 두께 설계공식에 하중전달계수가 사용된 이유는 AASHTO 도로시험을 통해 얻은 공식을 Spangler 공식을 통해 다른 조건으로 확장하였기 때문으로 Spangler 공식은 아래와 같은 형태를 가지고 있다.

$$\sigma_s = J \left[\frac{P}{D^2} \left(1 - \frac{a_1}{l} \right) \right]$$

여기에서, σ_s : Spangler 공식을 이용하여 예측

된 콘크리트 응력, J : 하중전달계수, P : 축 하중 (lbs), D : 슬래브의 두께(in), a_1 : 슬래브 모서리에서 하중 중심까지의 거리, l : 상대강성반경(in, $[ED_c^3/12k(1-\mu^2)]^{0.25}$)이다.

콘크리트 포장 구조해석 프로그램은 AASHO 도로시험에서 다루지 못한 포장의 하중전달계수를 구하는데 활용되었으며 현재의 값은 SLAB-49를 통해 얻어진 값이다. Spangler 공식은 물성의 변화는 고려할 수 있으나 다우웰의 존재, 길어깨의 존재와 같은 기하학적 영향은 고려할 수 없기 때문에 Spangler 공식을 통해서는 물성에 의해 정해지는 다음식의 C_2 항만을 구하고 J 는 SLAB-49를 실행시켜서 얻은 결과와 연관시켜 구하려는 아래공식을 이용한 접근방법을 택하였다. 따라서 이러한 원리로 얻어진 하중전달계수가 합리적인 값을 가지기 위해서는 해석프로그램인 SLAB-49의 해석결과가 얼마만큼 적절한 값을 제시할 수 있는가가 중요한데 앞에서 언급한 각종 해석 프로그램을 활용하면 더욱 정확성이 향상될수 있다 하겠다.

$$J = \frac{\sigma_s \sigma_m'}{\sigma_m [C_2]}$$

여기에서, σ_s : AASHO 도로시험 조건에서 Spangler 공식에 의한 응력, σ_m : AASHO 도로시험 조건에서 SLAB-49를 사용해서 얻어진 응력, σ_m' : AASHO 도로시험과 다른 조건에서 SLAB-49를 사용해서 얻어진 응력, C_2 : Spangler 공식에서 하중전달계수를 제외하고 계산된 값이다.

3.5 줄눈 평가에의 활용

앞에서 언급한 바와 같이 콘크리트 포장구조체의 중요한 구조중의 하나인 줄눈은 그 특성상 줄눈에서 가장 많은 결함이 발생하는데 줄눈 아래의 지지력이 상실되거나 다우웰 바를 감싸는 콘크리트가 손상되어 제대로 하중전달을 하지 못하는 원인이 대부분이다. 지지력이 상실되는 경우와 다우웰 바가 손상된 경우

에 적용해야할 보수공법은 차이가 있으며 1985년에 Ozbeki는 이것을 구별하기 위한 수단으로 포장해석 프로그램을 활용한 줄눈평가 방법을 제시하였다. 이것은 JSLAB으로 줄눈을 평가하는 방법으로 여러 가지 물성의 포장에 대하여 18kips 단축하중을 줄눈에 위치시킬 때 발생하는 표면처짐과 상대처짐을 통한 하중전달율을 이용하는 것이다. 이러한 구조해석 프로그램을 활용한 줄눈평가 절차는 다음과 같다.

- 1) 대상하중(형태, 크기)과 해석모델(슬래브의 형태, 다우웰 배치 등)을 선택
- 2) 지지력계수와 다우웰 콘크리트 상관계수를 바꾸어 가면서 처짐과 하중전달을 계산
- 3) 각각의 결과를 도표화(처짐-하중전달율 관계 도표에 표시하면 그림과 같은 양상)
- 4) 실제 현장에서 처짐과 하중전달율을 구하여 도표에 표시
- 5) 표시된 지점의 지지력과 다우웰-콘크리트 상관계수를 구하고 이를 통해 줄눈 평가

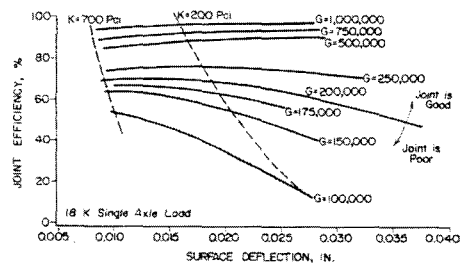
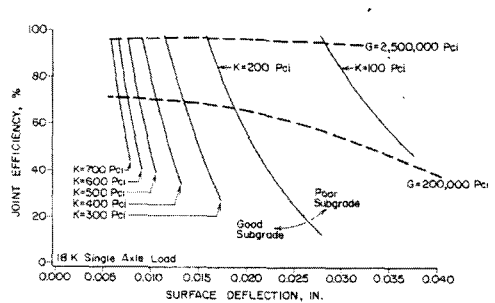


그림 12. 처짐과 하중전달율에 따른 지지력 및 다우웰-콘크리트 상관계수

위의 절차에서 제시된 그림 12와 같은 도표는 표면 처짐은 지지력의 영향이 많고 하중전달은 다우웰-콘크리트 상관계수의 영향을 많이 받는다는 민감도 분석결과를 이용한 것이다. 제시된 방법은 여러 가지의 변수에 대하여 민감도 분석을 실시하고 이를 근거로 줄눈의 거동에 가장 많은 영향을 미치는 변수는 지지력과 다우웰 콘크리트 상관계수임을 가정하여 접근한 방식이다. 이것은 평가방법의 도출 당시 컴퓨터의 능력에 한계를 고려하여 중요한 변수만을 택한 것으로 하중의 재하조건, 해석모델의 변화가 생길 때마다 새로운 도표를 생성해야하는 번거로움을 가지고 있고 재료물성의 변화, 환경의 영향과 같은 복잡한 상황에서는 더 많은 검토가 필요하다. 제시된 이러한 발전 방향은 실제상황을 더욱 잘 모사 할 수 있는 포장해석 프로그램과 향상된 연산속도 등이 필요하며, 현재에는 콘크리트 포장 구조해석 프로그램 및 컴퓨터의 성능이 크게 발전되었기 때문에 더욱 정확한 평가가 이루어질 수 있다 하겠다.

이외에도 콘크리트 포장의 구조해석 프로그램에 의한 구조해석은 새로운 포장 구조 및 재료등에 의한 포장 거동 분석과 포장단면 각 부분의 응력분포 분석에도 활용되고 있다. 그리고 포장구조체 각 부분에서의 계측센서 설치에 따른 계측치의 분석평가 및 각종 비파괴시험결과의 분석평가에도 활용되고 있으며, 아울러 새로운 콘크리트 포장 설계법 개발에도 크게 활용될 것으로 기대된다 하겠다.

참고문헌

1. 이승원, 김문겸, 황학주, “시멘트 콘크리트 포장 구조계의 구조거동의 해석 방법에 관한 비교연구,” 대한토목학회논문집, 제 9 권, 제 4 호, 1989. 12, pp. 73-82.
2. 이승원, 김문겸, 김수일, 황학주, “시멘트 콘크리트 포장구조계의 층별 물성 및 응력추정에 관한 연구,” 대한토목학회논문집, 제 10 권, 제 1 호, 1990. 3, pp. 47-56.
3. 이승원, 김문겸, 김수일, “콘크리트 포장슬래브

의 파괴기준에 관한 연구,” 대한토목학회논문집, 제 15 권, 제 6 호, 1995. 11. pp. 1545-1555.

4. 이승원, “역학적기법에 의한 콘크리트 포장슬래브의 덧씌우기 보강두께 산정,” 1999 년도 한국도로포장공학회 학술발표회 논문집, 한국도로포장공학회, 1999. 11. pp. 45-50.
5. 한국도로공사, “시멘트 콘크리트 포장체의 응력분포에 관한 연구,” 1992.
6. Kim, J. "Three-dimensional finite element analysis of multi-layered systems, Ph. D. Thesis, University of Illinois at Urbana-champaign, 2000.
7. AASHTO, "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures," 1993.
8. "EverFE v1.01 User's Manual," Univ. of Washington and Washington DOT
9. K. Chatti, J. Lysmer and C. L. Monismith, "Dynamic Finite-Element Analysis of Jointed Concrete Pavement," *Transportation Research Record* 1449, pp.79-90, 1994.
10. L.Khazanovich et al, "ISLAB2000 USER'S GUIDE," ERES, 2000
11. M. A. Ozbeki, W. P. Kilareski and D. A. Anderson, "Evaluation Methodology for Jointed Concrete Pavements," *Transportation Research Record* 1043, pp1-8, 1984.
12. S.M. Kim, M.C. Won and B.F. McCullough, "Development of CRCP-9 Computer Program for Analysis of CRC Pavements," *Proceedings of the 80th Annual Meeting of the TRB*, 2001.
13. W. G. Davids, G. M. Turkiyyah and J. P. Mahoney, "EverFE : Rigid Pavement Three-Dimensional Finite Element Analysis Tool," *Transportation Research Record* 1629, pp41-49, 1998.