

콘크리트 포장 설계법 개발에 관하여

류성우* · 조윤호**

1. 서론

국내 도로 포장은 중차량의 증가와 더불어 절대 교통량 증가에 따른 저속주행 등으로 파손이 심화되고 있다. 포장 상태가 악화됨에 따라 포장 보수비용이 증가하고 안전성, 쾌적성 등의 도로가 갖춰야 할 주요 기능이 저하됨에 따라 민원의 대상이 되고 있어 개선이 시급한 실정이다.

국내에서 사용중인 도로포장 설계는 외국의 설계법을 인용하여 사용해왔다. 그러나, 각 기관별로 포장 설계법 해석을 달리하고 있는 형편이며, 외국의 설계법 역시 개발국의 지역과 환경 조건들에 기초한 결과를 반영하였으므로 상이한 건설재료, 기후, 교통조건 등을 가진 국내에서 사용하기에는 근본적으로 문제가 있다.

이러한 한계를 극복하기 위하여 2000년 기본 계획을 시작으로 3단계 9년으로 계획된 「한국형 포장 설계법 개발 및 포장성능 개선에 관한 연구」가 진행되고 있으며, 그 세부 과업 중의 하나로 콘크리트 포장 설계법 개발 연구가 추진되고 있다.

2. 콘크리트 포장 설계법 기본 아키텍처

현재 개발중인 콘크리트 포장 설계법은 기본적으로

로 역학적-경험적 설계에 기초하고 있다. 개발될 설계법의 가장 큰 특징은 도로의 기능 및 특성을 고려하여 세 단계의 설계수준으로 구분하여 차등 적용한다는 것이다.

- 수준 1 - 고속국도 및 국도 등과 같이 중요한 도로의 포장설계에 적용하는 설계단계로서 모든 포장재료의 역학적 물성은 실내시험을 통하여 실측한 것을 사용한다. 또한 교통량 자료도 시공구간 혹은 인접한 구간에서 실측한 교통 데이터를 사용하며 포장의 구조해석은 유한요소 등을 이용한 주 모형을 이용한다.
- 수준 2 - 수준 1의 도로에 비해 상대적으로 교통량이 적고 중요도가 낮은 간선도로와 지방도의 포장설계가 수준 2에 해당한다. 포장재료의 입력 물성과 교통자료 등은 예측모형을 통해 추정되며, 포장의 구조해석은 개략식을 이용한다.
- 수준 3 - 교통량이 미미한 국지도로, 군도, 단지 내 도로 등의 포장설계는 수준 3에 해당되며 교통량과 기후조건 및 포장재료 등에 따라 연구진이 제시한 표준화된 설계단면을 사용한다.

기존의 설계법과 달리 도로 중요도에 따라 차등 설계하는 방법은 포장입력변수를 정량화함으로써 주요도로 설계의 정밀도를 높이는 한편 기타 도로의 설계비용 절감효과를 동시에 얻고자 하는 것이다.

* 정회원 · 중앙대학교 석사과정

** 정회원 · 중앙대학교 건설환경공학과 부교수 · 공학박사

개발될 설계법의 기본 아키텍처는 포장 해석 모형을 바탕으로 거동을 추정하고 경험적인 파손예측 모형을 이용하는 것으로 구성되었는데 상술하면 다음과 같다.

과거 경험이나 공학적 판단을 이용하여 설계하는 지역에 적합하리라 판단되는 시험 단면을 설정하고 대상지역의 교통량, 기후조건, 토질조건, 포장층의 조합, 콘크리트 및 다른 포장 재료물성 등을 입력한다. 설계종료시 유지되어야 할 공용성에 대한 의사 결정 기준을 정한다. 줄눈 콘크리트 포장에 대해서는 스폴링, 균열 및 IRI에 대한 허용기준 선정과 공용성 인자에 대한 설계수준을 결정한다. 향후 2단계에서는 단차(Faulting)를 추가적으로 고려할 수 있다.

유한요소법을 이용하여 설계 기준차량이 놓였을 때 포장의 구조적 거동(한계응력과 변형률)을 계산하고 이를 실내시험 및 현장공용성 결과를 바탕으로 개발한 파손진행 모델(예:S-N 선도)에 적용하여 포장의 누적 파손을 예측한다. 연도별 누적 손상을 반복계산하여 주어진 포장 단면의 시간별 파손 진행을, 즉 공용성을 추정하여 설정된 설계 기준과의 적합성 여부를 판단하고 기준을 만족시키지 못할 경우, 두께 설계를 변경한 후 공용성 기준을 만족할 때까지 반복계산을 수행한다. 목표한 공용성 기준을 만족시키는 다양한 설계단면들 중에서 생애주기비용

분석을 수행하여 최적의 대안을 찾게 된다.

3. 콘크리트 포장 설계 세부 연구

현재 진행중인 콘크리트 포장 설계법은 크게 입력 변수 정량화, 구조해석 모형개발, 공용성 모형 개발로 나뉘며 경제성 분석은 2단계에서 고려할 계획이다.

3.1. 입력 변수

콘크리트 포장 설계법 분야에서 진행되는 입력 변수 관련 연구 항목은 교통하중, 재료물성, 불연속면 정량화로 지금까지의 결과를 정리하면 다음과 같다.

3.1.1. 교통하중 정량화

교통하중은 포장 설계에 가장 민감한 입력변수로서 포장 파손의 주요 원인이 된다. 따라서 적절한 교통량 정량화 및 교통량 예측은 포장의 설계법 완성을 위한 기초 토대가 된다.

1단계 1차년도에는 교통하중 정량화 방법 현황 조사를 통하여 한국형 포장 설계법에 적용할 하중 정량화 방안을 고찰하였다. 축하중 분포를 이용하여 실제 포장체에 재하되는 교통하중 정량화 방안을 수립하였다. 이를 위해 축하중 예비 조사를 고속국도에서 실시하였으며 그 결과를 토대로 차중 분류별, 축형태별 축하중 분포를 제시하였다. 또한, 축하중 조사 D/B 구축을 위하여 D/B필드 구성(안)을 제시하였다

2차년도에는 교통량 정량화를 위해 국내 차중분류 체계 및 FHWA 차중분류 체계를 조사하였으며 지역 추출법을 이용하여 조사대상 구간을 선정한 후 축하중 조사를 실시하였다. 또한, 조사된 교통하중 관련 자료의 D/B를 구축하기 위해 미국 LTPP 교통하중 관련 D/B를 조사하였다.

현장 축하중 조사는 고속국도와 일반국도에서만

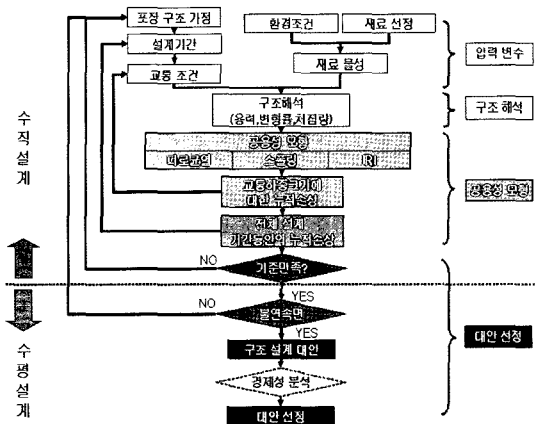


그림 1. 콘크리트 포장 설계법 기본 아키텍처

축하중 조사를 수행하였으며 계절별 포장 손상도를 정량화하기 위해 일부 조사대상 구간에서 매월 축하중 조사를 실시하였다. 그리고 고속국도와 일반국도 차종분류별, 축형태별 축하중 분포를 제시하였고 각 지역별 축하중 분포에 대해 분산분석 또는 Kruskal-Wallis Test를 실시하여 지역별 축하중 분포 차이를 검증하였다.

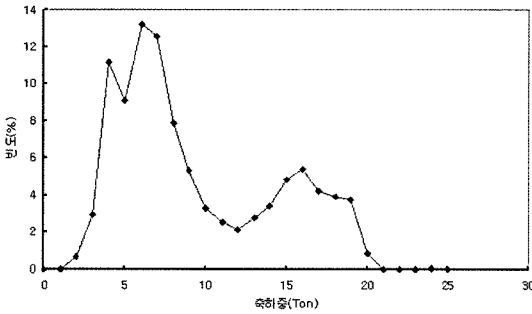


그림 2. Tandem 축 축하중 분포(고속국도)

3.1.2. 재료물성 정량화

재료물성 정량화 연구는 도로 포장에 적용되고 있는 콘크리트 재료의 기초적인 물성을 측정하여 구조 해석의 입력 변수로 제시하는데 있다. 또한 기존 시험 방법이 포장에 적용하기 어려운 경우 타당한 시험법을 개발하는데 있다.

1단계 1차년도에는 실내실험을 통하여 기본 물성을 측정된 결과, 콘크리트 압축강도와 탄성계수는 양생온도와 재령에 따라 큰 차이가 있었다. 비파괴

에 의한 동탄성계수를 측정된 후 정탄성계수를 추정할 수 있는 정탄성계수와 동탄성계수와와의 관계식을 제안하였으며, 공기중 양생의 강도는 습윤 양생에서의 강도와 큰 차이를 보이지 않았다. 휨강도와 할렬 인장강도를 비교하여 보았을 때, 휨강도는 할렬인장강도의 1.6배 더 크게 측정되었다. 또한 골재 종류에 따른 시험 결과, W/C 45%와 50%의 범위 내에서는 초기 1개월까지 건조수축 양이 차이가 미비하였으며 현장 실험을 통해 양생제의 사용은 건조수축과 그로 인한 콘크리트의 건조수축 균열에 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 린 콘크리트 실험 결과, 압축강도에 영향을 주는 인자는 굵은 골재 최대치수와 골재 자체의 강성, 다짐으로 나타났다.

2차년도에는 안산암 및 사암 골재에 대한 골재 입도 분석 및 비중, 흡수율에 대한 시험을 수행하였고 시험도로 골재를 포함하여 화강암, 편마암, 안산암, 사암 등 골재에 따른 열팽창계수 시험 및 재령별 압축강도 시험을 수행하였다. 골재들은 입도시험, 절대 건조 비중, 흡수율 시험결과 모두 기준치를 만족시켰으며 콘크리트의 열팽창계수는 부순돌을 사용한 경우 9.2~10.7 $\mu\text{E}/\text{C}$ 정도 수치를 보였다. 10~60 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도범위에서 상승 및 하강 사이클에 따른 열팽창계수 변화는 편마암의 경우 큰 변화가 없으나 재생골재는 0.2~0.4 $\mu\text{E}/\text{C}$ 의 변화를 나타내었다. 시편의 형상을 달리하여 시험한 결과, 박편시험체를 사용한 콘크리트의 열팽창이 원주형공시체보다 높은 값을 나타내었다. 한편 골재 종류에 따른 린콘크리

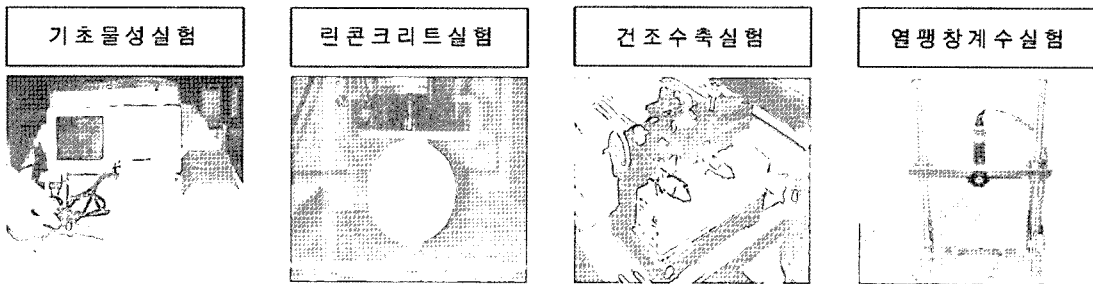


그림 3. 재료 물성 정량화 실험

트 물성 시험 결과, 석회암, 사암, 화강암 크기 순으로 압축강도가 나타났다.

3.1.3. 불연속면 정량화

불연속면은 콘크리트 포장의 거동 및 공용성에 중요한 영향을 미치는 인자로서 구조적으로 매우 취약한 부분이다. 콘크리트 포장의 합리적인 불연속면 설계는 포장의 기능향상과 수명 연장을 위해 수행되는 연구이다.

본 연구는 2차년도부터 시작된 연구로서 초기거동에서의 HIPERPAV, 파괴역학이론을 이용한 최대, 최소 줄눈간격 산정 방안을 제시하였고, 장기거동에서 파손종류에 따른 줄눈간격의 영향에 대하여 조사하였다. 또한 국내의 줄눈간격 현황, 줄눈채움재 적용현황 및 하중전달장치 적용 현황 등을 검토하였다. 그리고 국내 시험포장구간에서의 줄눈채움재의 파손양상 조사구간을 선정하였고 콘크리트 포장에서의 다웰바의 필요성 검토를 위해 국외 단면을 선정하였다. 하중전달장치의 효율 평가를 위한 설계인자를 고찰하였으며 타이바와 콘크리트의 부착특성을 연구하였다.

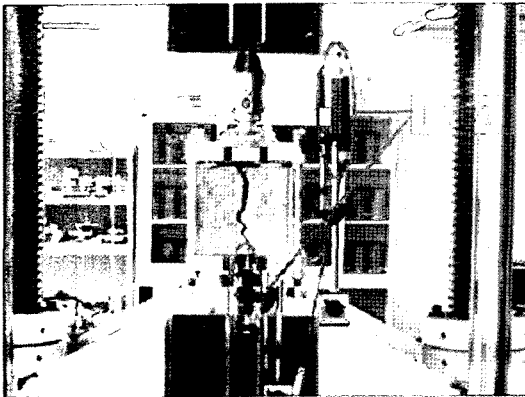


그림 4. Tie-Bar의 부착특성 전경

3.2. 구조해석 모형

구조해석은 포장 거동의 역학적 해석 기능을 담당

하며, 한국형 도로 포장 설계법 개발에 있어서 물성 정량화 부분과 피로 파손 모형을 통합하는 역할을 담당하고 있다.

1차년도에는 문헌 고찰을 통해 최적의 모형 개발 계획을 수립하였고, 2차년도는 FEM 응용 코드는 물론이고 사용자들이 편리하게 이용할 수 있는 GUI(Graphic User Interface)를 구축하였다.

입력변수 중 슬래브 정보장은 크게 콘크리트 슬래브 요소, 슬래브 크기, 슬래브 요소수, 노상층으로 나뉜다. 슬래브 요소는 Plate와 Shell을 선택하여 사용할 수 있으며, 슬래브 수는 최대 한 방향으로 5개 까지 해석할 수 있다. 그리고, 다웰바/타이바의 개수와 위치를 입력하고 노상의 종류를 선택할 수 있다.

물성 정보장은 콘크리트 슬래브, 노상, 다웰바/타이바의 형상 및 각각의 물성을 입력하는 창으로서, 탄성계수, 포아송비, 열팽창계수, 노상 지지력 등의 포장 구조의 물성값을 입력하는 창이다. 하중 입력 창은 집중하중, 등분포하중, 온도하중을 고려할 수 있으며 쉐어링을 모사하기 위해 슬래브 상하부 온도차를 입력할 수 있다.

이상의 변수 값들을 입력하고 해석버튼을 누르면 일정 시간 계산 과정을 거쳐 횡방향/종방향 인장응력, 처짐량 등을 그림 5의 우측과 같이 보여 준다.

3.3. 공용성 모형

공용성 모형은 피로 파손 모형, 스프링 모형, IRI 모형으로 구분된다.

3.1.1. 피로파손 모형 개발

차량의 왕복하중으로 인해 콘크리트 슬래브 하부에 피로 균열이 발생하므로 인해 포장의 공용성이 저하된다. 다양한 요인들을 고려하여 피로실험을 수행하고 그 결과를 바탕으로 설계에 사용할 수 있는 피로모형을 개발하는 것이 본 연구의 목표이다.

1차년도에는 시험도로에 적용되는 재료와 배합을 적용하여 콘크리트의 쪼갬인장 피로시험을 수행하였

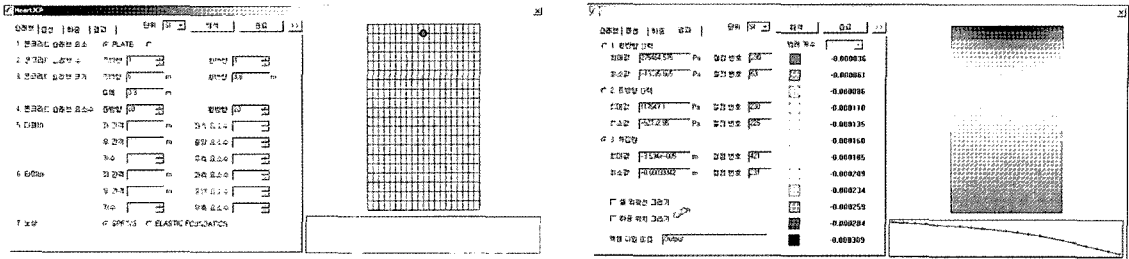


그림 5. Heart-JCP 프로그램 화면 및 해석 결과

다. 하중재하 속도, 하중재하 형상, 시험체의 습윤조건 및 양생기간에 따라 각각의 요인별 평균 피로수명과 상대수명 비를 산정하였으며 신뢰성 해석을 바탕으로 적합한 피로모델을 제안하였다. 또한 확률모형을 이용하여 파괴확률에 피로수명을 산정하였으며, 이로부터 피로모델의 계수와 상관계수를 산정하여 나타내고 S-N-P_f 선도를 나타내었다.

2차년도에는 문헌 고찰을 통하여 국내 콘크리트 포장의 주요 파손을 균열과 스폴링으로 나누고 Data Pave 프로그램 및 중부고속도로의 LTPP 자료를 이용하여 공용성 모형을 제시하였다. 또한 힘인장 피로실험을 통하여 쪼갬인장 피로 실험과 비교하여 신뢰성 해석에 바탕을 둔 파괴확률 모형을 개발하였으며, 쪼갬인장 피로 실험 방법을 콘크리트 포장의 피로 실험 방법으로 정립하였다. 골재 종류

에 따른 피로실험을 수행하여 D/B를 구축하였고 실내실험을 통해 개발된 피로모형과 현장조건의 차이를 보정하기 위하여 국외 LTPP 자료를 수집 및 검토하였다.

3.1.2. 스폴링 모형 개발

본 연구는 2차년도부터 시작된 연구로서, 스폴링은 줄눈부나 균열부위에서 상부 콘크리트 재료가 떨어져 나가는 주요 파손이다. 피로파손 모형과 같이 다양한 요인들을 고려하여 1단계에서는 경험적인 모형을 개발하는 것이 연구 목표이다.

당해에는 주로 문헌조사 및 국내 자료 조사를 실시하였다. 기후자료는 현재 장기공용성 조사구간에 특별한 기후 측정장치가 없고 지금까지 데이터가 전무한 점을 고려하여 기상청의 83개 관측소 및 460개의 자동관측소를 활용하는 것이 합리적이라고 판단하였다. 고속도로 콘크리트포장 LTPP구간에 인접한 관측소에서 공용연수에 해당하는 강수량, 일평균 및 일최고 온도를 구하였으며 외국의 기후지역 구분기준에 따르면 우리나라는 습윤-동결 혹은 습윤-비동결 지역에 포함되는 것으로 나타났다. 그리고 LTPP 구간의 파손상태를 분석한 결과, 재령 및 교통량에 따른 추세는 주로 중·상급 스폴링과 관련된 것으로 외국에서 제시한 모델은 적절한 것으로 판단되었다. 또한 국내 고속도로 단면의 성질상 피로균열의 숫자는 매우 적고 산발적이어서 상관성을 이끌어 내기에는 부족하였고 향후 절·성토 경계구간, 통로박스, 수로통과 구간과 같은 취약부에 대한 체계적인 조사를 통해 국내 환경을 반영한 모델개발

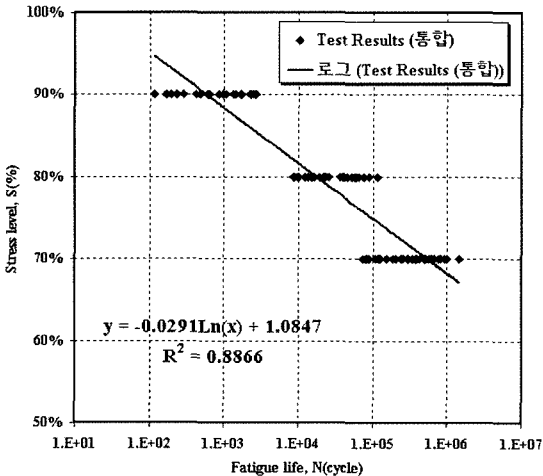


그림 6. 종합 S-N 선도

