

탄성계수에 근거한 포장 하부구조 다짐관리 정립

Compaction Control Criteria on the Pavement Substructure using the Elastic Modulus Concept

한진석* · 최준성** · 김종민*** · 김부일****

Han, Jin Seok · Choi, Jun Seong · Kim, Jong Min · Kim, Bu Il

1. 서론

“86 AASHTO 포장설계법”에서 포장 하부구조 다짐기준을 기존의 CBR(California Bearing Ratio) 대신 회복탄성계수(Resilient Modulus 이하 M_R)를 제시한 이후로 포장 하부구조 재료의 역학적 특성을 이용한 다짐관리 연구가 국내외적으로 활발하게 진행되었다. 국내 연구에서도 포장 하부구조 다짐관리를 강도(strength) 개념 대신 강성도(stiffness) 개념으로 전환하고자 노력하고 있으며, 그에 대한 일환으로 국토해양부 주관아래 한국형 도로포장설계법이 국내 연구진에 의해 연구되고 있다.

본 연구에서는 기존 연구결과(최준성 외 2007, 2008, 2009, 한진석 외 2010)인 동적 콘 관입시험기(Dynamic Cone Penetrometer 이하 DCPT)를 이용한 노상도 다짐관리와 소형 충격 재하시험기(Light Falling Weight Deflectometer 이하 LFWD)를 이용한 보조기층 다짐관리로부터 국내 포장 하부구조의 현장실험을 통해 탄성계수를 이용한 포장 하부구조 다짐관리를 제안하고자 한다.

노상 및 보조기층으로 대변되는 국내 포장 하부구조의 회복탄성계수 특성은 AASHTO 설계법에서 제시한 반복재하시험 M_R 시험을 통하여 국내 연구진에 의해 연구되었으나, 이를 이용한 포장 하부구조 현장 다짐기준은 제시되지 못하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 DCPT와 LFWD 장비를 이용하여 포장 하부구조 현장 탄성계수를 측정하고, 시험 지점 시료를 이용한 설계탄성계수를 추정하여 비교하였다. 또한 도로단면설계시 사용되는 다짐 재료의 역학적 특성을 반영한 설계탄성계수를 다짐기준으로 설계탄성계수와 현장 탄성계수를 비교한 상관관계식을 제시하여, 현장에서 기존 평판재하시험 및 새로운 시험장비로부터 다짐관리를 할 수 있도록 다짐기준 설계탄성계수에 상응하는 현장 탄성계수를 예측할 수 있도록 제시하였다. 본 연구에서는 한국형 도로포장설계법에서와 같이 반복재하시험 M_R 시험을 통해 얻은 탄성계수는 회복탄성계수, 회복탄성계수 값을 반복재하시험 M_R 시험 대신 재료 물성값으로 추정한 탄성계수를 설계탄성계수라 명하였다.

2. 현장시험 및 실내시험

시험은 포장하부 다짐현장 시험과 현장 시험 재료를 이용한 실내 시험으로 나누어 수행하였다. 현장 시험은 DCPT와 LFWD를 이용한 현장 탄성계수 측정 시험과 현재 국내 포장하부 다짐기준인 다짐도 시험, 평판재하시험을 실시하였다. 다짐도 시험과 평판재하시험은 현재 다짐기준을 만족한 상태에서 현장 탄성계수를 측정하기 위함과 다짐도 및 평판재하시험 K_{30} 값과 설계탄성계수와의 상관관계 수립 여부를 확인하기 위하여 실시하였다.

다짐도 시험은 노상 및 보조기층 모두에서 실시하였으며, 현장 탄성계수 측정을 위해 노상에서는 DCPT 및 LFWD 시험을 실시하고, 보조기층에서는 LFWD 시험 및 평판재하시험을 실시하였다. 현장 탄성계수 측정 후에는 동일 지점에서 실내 기본 물성시험에 필요한 시료를 채취하였다. 실내 기초물성 시험은 흙분류 및

* 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 · 박사과정 · 02-464-0716(Email:for1000dayshan@nate.com)

** 정회원 · 인덕대학교 토목환경설계과 교수 · 공학박사 · 02-950-7565(Email:soilpave@induk.ac.kr)

*** 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 교수 · 공학박사 · 02-3408-3293(Email:jongmin@sejong.ac.kr)

**** 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 선임연구원 · 공학박사 · 031-910-0240(Email:bikim@kict.re.kr)

재료기준 충족 여부를 확인하고, 기초물성 값을 통한 설계탄성계수를 산출하기위해 실시하였다. 탄성계수를 이용한 포장 하부재료의 설계기준은 하부재료 특성에 따른 회복탄성계수로 결정된다. 이 회복탄성계수를 산출하기 위해서는 반복재하식 M_R 시험이 필요하지만, 시험장치가 매우 복잡하고 고가일뿐만 아니라, 까다로운 시험절차로 인하여 고도로 숙련된 전문적 기술을 요구한다. 고가의 시험장비 비용과 고도의 숙련된 기술을 요하는 반복재하식 M_R 시험을 대체하기 위한 간편하고 일상적인 시험법 연구가 국내에서 진행되고 있으며, 그 결과 국내 하부구조 재료의 물성특성, 구성모델, 모델계수의 범위, 경험모형 등에 대한 핵심적인 일련의 연구들이 한국형 포장설계법에서 완료되어 가고 있다. 본 연구에서는 실내 기초물성 시험을 통하여, 한국형 포장설계법에서 제시한 “인공신경망 방법”(국토해양부, 2010)에 의해 노상 및 보조기층 설계탄성계수를 산출하였다.

3. 시험 결과 분석

노상과 보조기층의 현장시험을 통하여 DCPT의 PR 값, LFWD의 E_{LFWD} 값, 평판재하시험 K_{30} 값 및 다짐도를 측정된 구간의 시료의 토질특성을 이용하여 한국형 도로포장설계법에서 제안하고 있는 “인공신경망 공식”으로 설계 M_R 과 추정하여 각각의 상관관계를 분석하였다.

3.1 설계탄성계수와 다짐도 상관관계 분석

노상과 보조기층의 현장 시험을 통한 설계탄성계수와 다짐도 간의 상관관계는 그림 1과 같이 분석하였다.

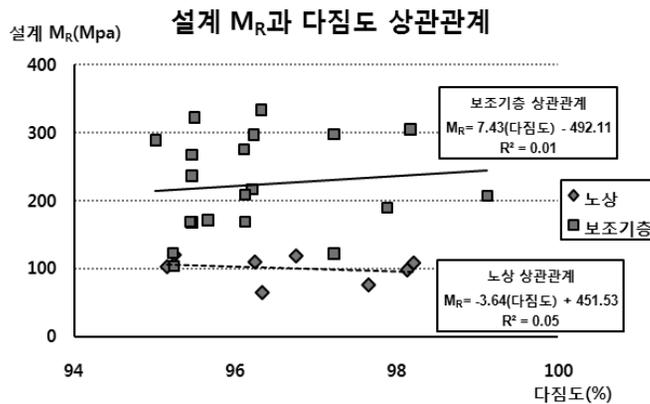


그림 1. 설계 M_R 과 다짐도 상관관계

설계탄성계수와 다짐도 상관관계는 노상과 보조기층 모두 결정계수 R^2 값이 0.05 이하로 매우 낮은 상관관계를 보인다. 이는 설계탄성계수는 재료적 특성을 이용한 물성치지만, 다짐도는 재료적 특성이 아닌 확일적 기준이기 때문이며, 현장 다짐관리에서 탄성계수 구현을 위한 현장 다짐기준으로는 부적합함을 알 수 있다. 그러나, 기존 논문의 LFWD의 E_{LFWD} 값과 다짐도와와의 상관관계(한진석 외, 2010)와 같이 다짐도 95% 이하에서는 다짐할수록 탄성계수가 증가하여 95%에 도달하면 일정한 최대값을 보이고, 반복재하식 M_R 시험에도 시료 성형조건이기에, 현장에서 시료가 가지는 최대 탄성계수를 발휘하기 위해서 다짐 품질 기준으로 제안하고자 한다.

3.2 설계탄성계수와 DCPT PR 상관관계 분석 및 노상 다짐관리 흐름도 제안

DCPT 현장시험은 노상과 보조기층 모두에서 실시되었으나, 보조기층에서는 DCPT 관입력이 부족하여 콘의 손상, 로드의 휨이 발생하였다. 노상에서 DCPT PR 값과 설계탄성계수간의 상관관계 그래프는 그림 2와 같다. 노상 현장 시험은 한 구간 8지점에서 실시되었으며 모두 SW-SM 계열의 흙으로 입도분포특성과 다짐도가 다른 경우이다. DCPT 시험은 지반 재료의 소성변형 저항력에 의해 동일한 충격하중에 의한 콘 관입량 변화

도를 파악하는 시험이기 때문에 탄성범위 내에서 토질의 특성을 파악하는 설계탄성계수와는 달리, 재료의 소성파괴에 의한 DCPT 와의 역학적 괴리감에서도 결정계수 R^2 값이 낮게 나오는 이유로 판단된다. 그러나 소성변형 저항력 영향인자에는 재료의 입도분포, 최대 골재 크기, 200번체 통과량 백분율, 소성지수 등이 있으며 이는 설계탄성계수 영향인자이기도 하다(안지환 외, 2004). 추후 노상에서 더 많은 시험 데이터가 축적된다면 상관관계가 좋아지리라 사료된다. 본 연구에서는 추후 발전 한계성을 가지고 그림 3과 같이 노상에서의 다짐관리 흐름도를 제안하였다.

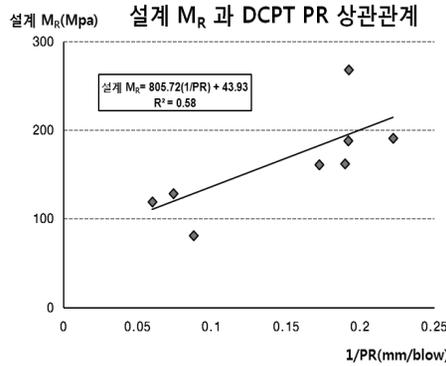


그림 2. 노상에서의 설계 M_R 과 DCPTPR 상관관계

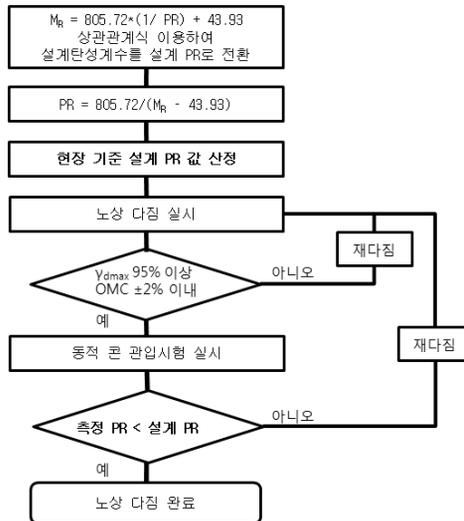


그림 3. 동적 콘 관입시험을 이용한 노상 다짐평가

3.3 평판재하시험을 이용한 다짐관리 흐름도 제안

기존의 평판재하시험을 이용한 다짐관리를 설계시의 탄성계수 개념으로 관리하고자 설계탄성계수와 K_{30} 간의 상관관계는 기존 연구에서 제시된 식을 사용하여 다음과 같은 평판재하시험을 이용한 노상 및 보조기층 다짐관리 흐름도를 제안하였다(한진석 외, 2010).

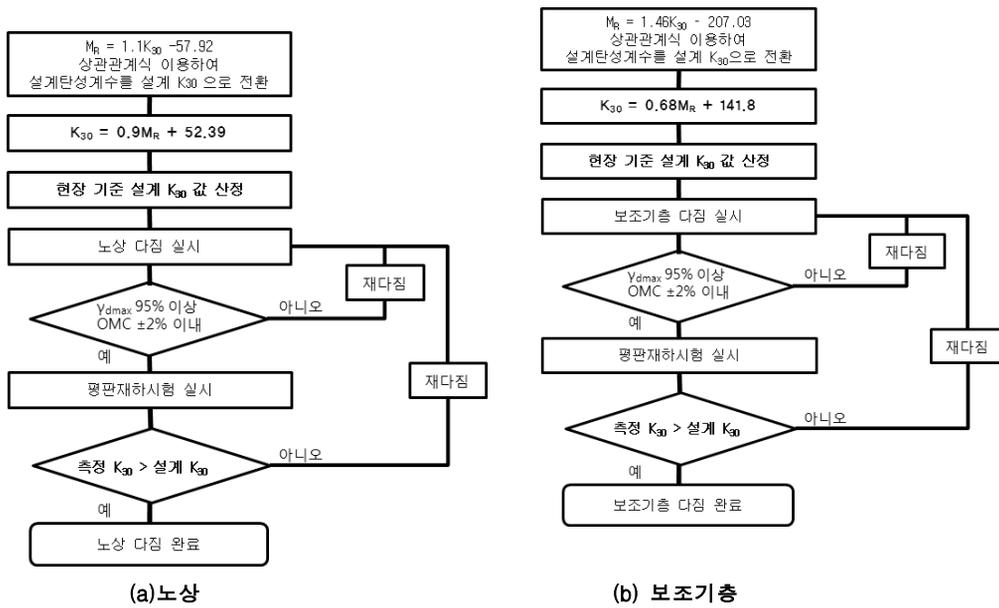


그림 4. 평판재하시험을 이용한 다짐관리 평가

3.4 노상 설계탄성계수와 E_{LFWD} 상관관계 분석 및 LFWD를 이용한 다짐관리 흐름도 제안

LFWD 시험은 DCPT 시험과 달리 파괴에 따른 소성변형을 측정하는 게 아닌, 탄성영역에서 충격하중에 따른 침하량을 측정하기에 노상 및 보조기층 모두에서 측정 가능하였다. 우선 노상에서의 설계탄성계수와 E_{LFWD} 상관관계 분석 결과는 그림 5와 같으며 현장 시험은 DCPT 시험구간과 동일하다. 따라서 추후 국내 노상토로 알려져 있는 SP-SM, SW, SP 등의 재료에 대한 시험결과들의 보완이 필요한 것으로 사료된다.

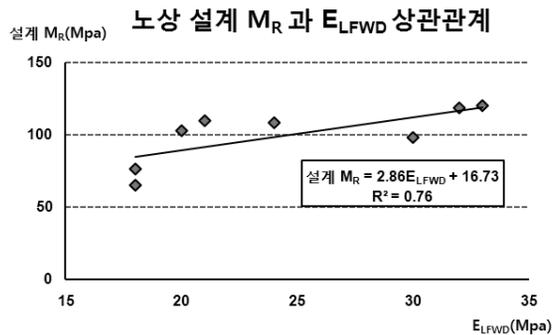
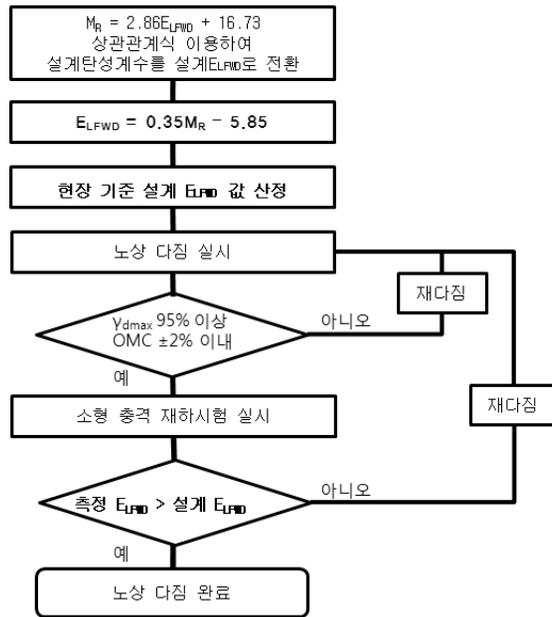
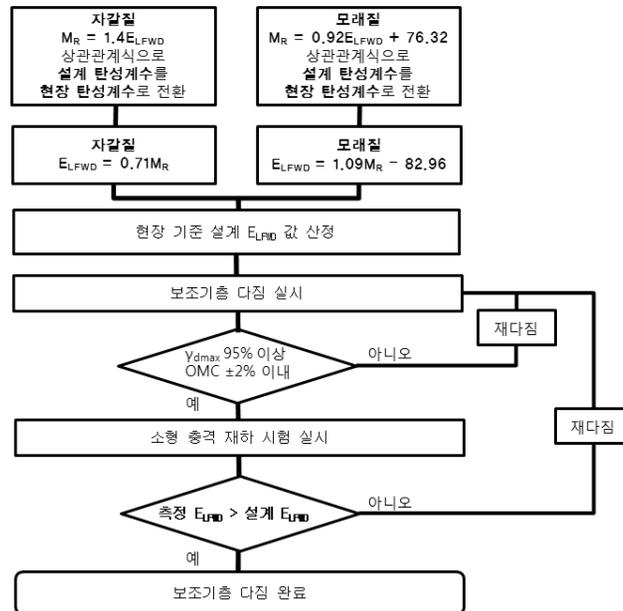


그림 5. 노상 설계 M_R 과 E_{LFWD} 상관관계

보조기층은 기존 연구에서 자갈질과 모래질로 나누어 제시된 식을 보조기층 재료에서 나타날 수 있는 실내시험 M_R 시험결과의 최소값을 고려하여 하한계식으로 수정하였고, 수정된 식을 이용하여 다음과 같은 다짐관리 흐름도를 제안하였다(한진식 외, 2010).



(a) 노상



(b) 보조기층

그림 6. 소형 충격 재하 시험을 이용한 다짐관리 평가

4. 결 론

본 연구는 노상과 보조기층 다짐 현장 시험을 통하여 설계탄성계수를 추정할 수 있는 상관관계식을 마련하였다. 또한 기존 발표한 다짐도와 평판재하시험과 DCPT PR 과 LFWD의 E_{LFWD} 상관관계를 현장에서 설계시 탄성계수에 의한 다짐관리를 수행코자 한국형 도로포장설계법에서의 설계탄성계수와 상관관계로 전환하였다. 설계탄성계수는 다짐 재료의 기본 물성치를 이용한 “인공신경망 방법”으로 계산하였으며, 노상과 보조기층 현장에서 다짐도, 평판재하시험 및 DCPT 시험과 LFWD 시험을 추가로 실시하였다.

1. 다짐도는 다짐 재료의 특성을 나타내는 물성치가 아닌 밀도 개념의 획일적인 기준으로 설계탄성계수와 상관관계를 맺을 수 없었으나, 정확한 현장탄성계수 측정 시험을 위해 기본 다짐 품질기준으로 유지되어야 함을 확인하였다.
2. SW-SM 계열의 노상에서의 설계탄성계수와 DCPT와의 상관관계를 제시하였으며, 이를 통하여 동적 콘관입시험을 이용한 노상다짐평가방법을 제안하였다.
3. 기존의 평판재하시험을 이용한 노상과 보조기층의 다짐관리를 설계시의 탄성계수 개념으로 관리하고자 설계탄성계수와 K_{90} 간의 상관관계는 기존 연구에서 제시된 식을 사용하여 평판재하시험을 이용한 노상 및 보조기층 다짐관리 흐름도를 제안하였다.
4. SW-SM 계열의 노상에서의 설계탄성계수와 E_{LFWD} 상관관계식을 제안하였고, 보조기층은 기존 연구에서 자갈질과 모래질로 나누어 제시된 식을 보조기층 재료에서 나타날 수 있는 실내시험 M_R 시험결과의 최소값을 고려하여 하한계식으로 수정하였다. 수정된 식을 이용하여 소형충격재하시험을 이용한 노상 및 보조기층 다짐관리 흐름도를 제안하였다.
5. LFWD 시험은 노상과 보조기층 모두에서 실시되었으며, 탄성영역에서 충격하중에 의한 침하량으로 E_{LFWD} 산출한다. 이는 다른 세 시험법들보다 역학적 관점에서 회복탄성계수 원리와 가장 유사하며 결정계수 R^2 값도 가장 높게 나왔다. 또한, LFWD 시험을 통하여 다짐도 95% 이상이 다짐 품질기준으로 유지되어야 함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부의 국책연구과제인 “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구”의 일부 결과로 이에 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 안지환 외 3명, 현장에서의 동적관입시험을 이용한 노상토의 지지력 평가연구, **한국도로학회 논문집**, 제6권3호, pp. 17-26, 2004
2. 최준성 외 3명, 현장시험을 통한 DCPT의 노상토 다짐관리 적용성 연구, 한국도로학회 학술발표회, pp. 179-184, 2007
3. 최준성 외 3명, 노상 및 보조기층의 평판재하시험 대체를 위한 소형충격재하시험 활용방안 연구, 한국도로학회 학술발표회, pp. 599-606, 2008
4. 최준성 외 3명, 노상 및 보조기층의 소형충격재하시험 활용방안 연구, 한국도로학회 논문집, pp. 85-98, 2009
5. 한진석 외 3명, 소형충격재하시험을 이용한 보조기층 다짐관리 연구, 한국도로학회 봄 학술발표회, pp. 247-254, 2010
6. 국토해양부, **한국형 도로포장설계법 개발과 포장성능 개선 방안 연구**, C 도로포장 하부구조 다짐관리 지침개발 연구, 2010