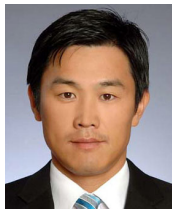
탄성계수를 이용한 보조기층 다짐관리 잠정지침 소개



최 준 성 | 정회원 · 인덕대학 토목환경설계과 교수
김 종 민 | 정회원 · 세종대학교 건설환경공학과 교수
한 진 석 | 정회원 · 세종대학교 건설환경공학과 박사과정
김 부 일 | 정회원 · 한국건설기술연구원 연구위원

1. 서 론

보조기층은 포장 상부구조 및 교통 하중을 최종적으로 지지하는 노상부에 위치한 층으로 상부에서 받은 하중을 노상에 고르게 분산시키는 역할을 한다. 이러한 중요기능을 수행하고 있음에도 불구하고, 현재 국내에서는 보조기층 다짐관리에 관한 세부적인 기준이 국가 규정이나 지침서 등을 통해 보급되지 못하여 시공 현장에서 최적의 품질 수준 및 내구성 확보에 어려움을 겪고 있다. 또한, 기존 다짐관리 방법으로 다짐도 측정 시험과 평판재하시험 같은 경험적인 방법이 이용되고 있어 보다 합리적이고 과학적인 다짐관리를 위한 탄성계수에 근거한 역학적인 다짐관리가 필요한 실정이다.

이에 한국형 포장 설계법 연구진들은 설계-시공-유지관리 전(全) 공정에 재료의 역학적 탄성계수(Resilient Modulus ; 회복 탄성계수 이하 M_R)를 이용한 다짐관리 방법을 연구하고 있으며, 이에 선진 외국에서 연구되었던 현장 M_R 측정 장비의 국내 적용 연구 및 다짐 기준 마련 연구를 수행하고 있다. 그 결과 탄성계수를 이용한 보조기층 다짐관리 잠정지침이 그림 1의 목차로 곧 발간될 예정이며, 본 기사에서는 탄성계수를 이용한 보조기층 다짐관리 잠정지침을 소개하고자 한다.

목 차

1. 총칙 ····1
1.1 적용범위 ····1
1.2 용어의 정의 ····2
1.3 참조 규격 ····4
2. 재료 및 시공 ····6
3. 다짐 관리 기준 ····8
3.1 일반 사항 ····8
3.2 노상 ····9
3.2.1 평판재하시험을 이용한 노상 다짐 평가 방법 및 기준 ····9
3.2.2 동적 콘 관입 시험을 이용한 노상 다짐 평가 방법 및 기준 ····11
3.2.3 소형 충격 재하 시험을 이용한 노상 다짐 평가 방법 및 기준 ····12
3.3 보조기층 ····14
3.3.1 평판재하시험을 이용한 보조기층 다짐 평가 방법 및 기준 ····14
3.3.2 소형 충격 재하 시험을 이용한 보조기층 다짐 평가 방법 및 기준 ····15
4. 다짐 검사 기준 ····20
4.1 일반 사항 ····20
4.2 다짐 검사 ····20
5. 포장 하부구조 시험시공 ····25
5.1 일반 사항 ····25
5.2 시험 시공 ····25
부 록 ····27

그림 1. 잠정지침 목차

2. 보조기층의 역학적 다짐관리

2.1 회복 탄성계수 M_R의 다짐관리 적용

회복 탄성계수는 다짐 재료의 역학적 특성을 나타내는 물성치로 인정받고 있으며 이를 이용한 다짐관리 적용 방법을 설명하기 위해 표준 M_R, 설계 M_R, 현장 탄성계수 그리고 설계 탄성계수란 용어를 설명하고자 한다. 표준 M_R은 AASHTO T307-99 시험으로 얻은 다짐재료의 실질적인 M_R 값을 말하며, 설계 M_R은 AASHTO T307-99 시험절차가 복잡하고 결과값이 실험자의 숙련도에 따라 오차가 큰 것을 보완하기 위하여 표준 M_R 값 산정식에 다짐 재료의 기초 물성 값만을 대입하여 얻은 M_R을 말한다. 현장 탄성계수 값은 다짐완료 후 현장시험 장비로 측정하여 얻은 탄성계수 값을 말한다. 이 설계 M_R 값과 현장 탄성계수 값을 이용하여 상관관계식을 도출하였으며, 이 상관관계식에 각 현장재료의 기초물성 값을 대입하여 계산 된 설계 M_R 값을 대입하여 얻은 추정 현장 탄성계수 값을 설계 탄성계수라 한다.

잠정지침에서 제시하는 역학적 다짐 기준은 다음과 같은 단계로 이루어진다. 첫째, 보조기층 다짐 시공 이전에 현장 다짐 재료의 기초 물성시험을 실시하여 설계 M_R 값을 산출한다. 둘째, 설계 M_R 값을 잠정지침에서 제시한 상관관계식에 대입하여 목표 현장 탄성계수 즉, 설계 탄성계수를 산출한다. 셋째, 다짐시공 완료 후에는 평판재하시험 및 그림 2의 소형 충격재하시험(Light Falling Weight Deflectometer ; 이하 LFWD)을 실시하여 현장 탄성계수 값을 산출한다. 이 설계 탄성계수 값과 현장 탄성계수 값을 비교하여 현장 M_R 값이 설계 탄성계수 값보다 크다면, 이는 설계에서 요구한 탄성계수를 만족하므로, 다짐 시공이 적절했음을 판단하게 된다.

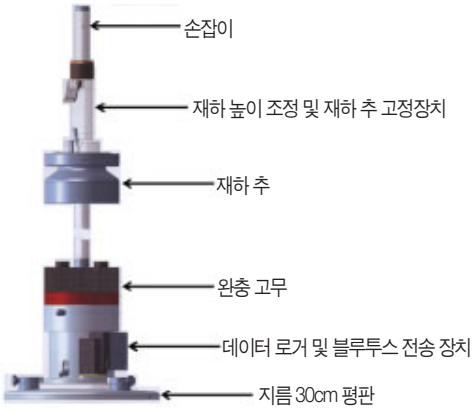


그림 2. LFWD 외형

2.2 잠정지침의 수정 및 보완 내용

탄성계수를 이용한 보조기층 다짐관리는 도로 요구 조건을 상향하는 강성도를 유지하는 것이 중요하며, 그에 따른 다짐 목표는 설계 시 계획된 설계 탄성계수 이상을 구현할 수 있도록 다짐 시공하는데 있다. 따라서, 잠정지침은 보조기층 재료 특성에 맞게 적용한 설계 탄성계수가 현장 다짐작업으로 발현되는지 여부를 판별하기 위하여 다짐관리 기준과 다짐검사 기준 이 두 부분으로 나누어 제시하여야 한다.

보조기층 성능은 강성도, 내구성 및 피로 저항성으로 판단하며, 성능을 발전시키고 측정하기 위한 방법으로 기존의 평판재하시험 외에 한국형 도로포장 설계법의 역학적-경험적 개념을 이용한 새로운 탄성계수 측정 시험법을 잠정지침에 제시하였다.

3. 잠정지침 내용

3.1 보조기층의 다짐 기준

잠정지침에서는 보조기층의 역학적 다짐관리를 위해 평판재하시험과 LFWD 시험을 현장 탄성계수 측정 시험법으로 제시하였다. 두 시험법은 보조기층의 탄성영역 안에서 재하 하중에 따른 침하량을 측정하여 탄성계수를 산출할 수 있어, 보조기층 탄성계수 측정에 적합한 시험법이다.

LFWD 장비의 경우 아직 국내 시공에서 널리 사

용되지 않은 장비이므로 잠정지침 부록에 장비 외형 및 시험 전 준비사항, 시험 방법, 시험 절차 그리고 시험 시 주의사항 등을 추가로 수록하여 감독관 및 실무자의 장비 운용에 도움이 되도록 하였다.

잠정지침에서는 표 1과 같이 보조기층 다짐 판정 기준을 제시하였다. 다짐 판정 기준에서 1층 다짐 완료 후 두께와 다짐도, 다짐방법, 시공 시 함수비는 현장 M_R 값을 측정하기 위한 기본 현장 조건으로서 일종의 보조기층 기본 다짐품질 조건이라 말할 수 있다.

표 1. 보조기층 다짐 판정 기준

1층 다짐 후 두께(cm)	20 이하	설계두께 10% 이상 불가
다짐도 (%)	95 이상	KS F 2311
다짐방법	E	KS F 2312
시공 시 함수비(%)	최적함수비 ±2%	KS F 2306
평판재하시험	$K_{30} = 0.68M_R + 141.8$	설계 K_{30} <현장 K_{30}
LFWD	자갈질 $E_{LWFD} = 0.71M_R$	설계 E_{LFWD} < 현장 E_{LFWD}
	모래질 $E_{LFWD} = 1.09M_R - 82.96$	

특히, 다짐도의 경우 기존 표준시방서에서 평판재하시험과 함께 보조기층 다짐 판정기준으로 제시되었으나, 잠정지침에서는 정확한 현장 M_R 값 측정을 위한 다짐품질 조건으로 제시되었다. 다짐도의 경우 보조기층의 재료적 특성을 고려하지 않은 일률적인 기준으로 현장 다짐도를 측정하여 현장 M_R 값을 예측할 수 없으며, 표준 M_R 시험의 시료 성형 조건으로 다짐도 95%를 제시하고 있어 현장 조건 역시 다짐도 95% 이상을 만족하도록 하였다.

3.1.1 평판재하시험을 이용한 보조기층 다짐 기준

현장 시험을 통해 평판재하시험 K_{30} 값과 설계 M_R 값의 상관관계식은 식 (1)과 같다. 이 식 (1)을 시공 현장에서 사용하기 편하게 식 (2)로 변환하였으며, 식 (2)를 통해 설계 K_{30} 값과, 현장 K_{30} 값 간의 직접적인 비교가 쉬워졌다. (국토해양부, 2010)

식 (2)를 토대로 잠정지침은 평판재하시험을 이용한 보조기층 다짐 기준 메뉴얼을 그림 3과 같이 제시하였다.

$$M_R = 1.46K_{30} - 207.03 \quad (1)$$

여기서,

M_R = 설계 M_R (MPa)

K_{30} = 현장 측정 K_{30} (MN/m^3)

$$K_{30} = 0.68M_R + 141.8 \quad (2)$$

여기서,

M_R = 설계 M_R (MPa)

K_{30} = 설계 탄성계수 K_{30} (MN/m^3)

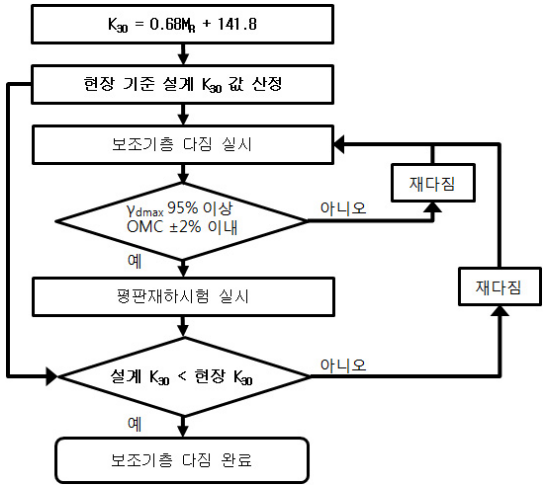


그림 3. 평판재하시험을 이용한 보조기층 다짐관리 매뉴얼

매뉴얼을 간략하게 설명하면 다음과 같다.

1. 식 (2)를 사용하여 설계 M_R 값으로 설계 K_{30}

값을 산출한다.

2. 보조기층 다짐을 실시하여 다짐도 95% 이상 및 현장 함수비가 최적 함수비 ±2% 이내 만족 여부를 판별한다. 만약 이를 만족하지 못할 경우 추가 다짐을 실시한다.
3. 평판재하시험을 실시하여 현장 K_{30} 값을 산출한다.
4. 설계 K_{30} 값과 현장 K_{30} 값을 비교하여 현장 K_{30} 값이 설계 K_{30} 값보다 크면 보조기층 다짐이 완료되었다 판정하고, 그렇지 못할 경우 재다짐을 실시한다.

3.2.2 LFWD를 이용한 보조기층 다짐 기준

한국형 포장 설계법에서는 기존의 평판재하시험 외에 LFWD 장비를 도입 후 연구하여 이를 이용한 보조기층 다짐 기준 메뉴얼을 그림 3과 같이 제시하였다.

보조기층에서 LFWD를 이용하여 탄성계수 측정 시 평판재하시험보다 작은 충격량에 의해 재료 입도 크기 영향을 많이 받는다. 이러한 이유로 한국형 포장 설계법에서는 흙 분류 중 통일 분류법에 따른 자갈질과 모래질로 나누어 LFWD 다짐 기준을 달리 적용하였다(국토해양부, 2010).

현장 시험을 통해 설계 M_R과 E_{LFWD} 간의 상관관계식은 자갈질의 경우 식 (3)으로 모래질의 경우 식 (4)와 같이 나왔다. 이 두 상관관계식 역시 현장 실무자의 시공 현장 적용성 및 편의성을 높이기 위하여 식 (5)와 식 (6)으로 전환하였다. 식 (5)와 식 (6)을 이용하여 보조기층에서 LFWD를 이용한 다짐관리 방법을 설명한 것이 그림 4이다.

$$M_R = 1.4E_{LFWD} \quad (3)$$

$$M_R = 0.92E_{LFWD} + 76.32 \quad (4)$$

여기서,

M_R = 설계 M_R (MPa)

E_{LFWD} = 현장 측정 E_{LFWD} (MPa)

$$E_{LFWD} = 0.71M_R \quad (5)$$

$$E_{LFWD} = 1.09M_R - 82.96 \quad (6)$$

여기서,

M_R = 설계 M_R (MPa)

E_{LFWD} = 설계 탄성계수 E_{LFWD} (MPa)

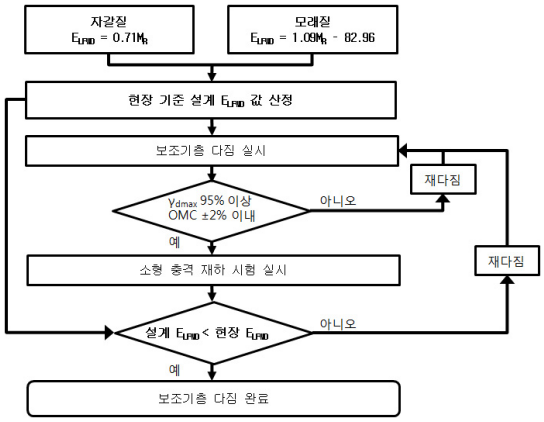


그림 4. LFWD를 이용한 보조기층 다짐관리 매뉴얼

그림 4의 매뉴얼을 간략하게 설명하면 다음과 같다.

1. 보조기층 다짐재료를 입도분석 실험을 통해 자갈질과 모래질로 구분한다.
2. 구분된 흙을 식 5와 식 6을 이용하여 설계 M_R 값으로 설계 탄성계수 E_{LFWD} 값을 산출한다.
3. 보조기층 다짐을 실시하여 다짐도 95% 이상 및 현장 함수비가 최적 함수비 ±2% 이내 만족 여부를 판별한다. 만약 이를 만족하지 못할 경우 추가 다짐을 실시한다.
4. 소형 충격재하시험을 실시하여 현장 E_{LFWD}값을 산출한다.
5. 설계 탄성계수 E_{LFWD} 값과 현장 E_{LFWD} 값을 비교하여 현장 E_{LFWD} 값이 설계 탄성계수 E_{LFWD}

값보다 크면 보조기층 다짐이 완료되었다 판정하고, 그렇지 못할 경우 재다짐을 실시한다.

3.2 보조기층의 다짐검사 시험빈도

보조기층의 다짐검사는 다짐 시공 후 하루가 지나지 않은 시간 내에 실시하며, 다짐도 측정시험 및 평판재하시험 빈도는 표 2에서 보는 바와 같이 2009년 도로공사 표준시방서와 동일하다. 현장 탄성계수 측정을 위한 LFWD 시험의 경우 입하되는 보조기층 재료가 동일한 흙 종류의 경우 2차선 기준으로 층별 100m 당 한 지점에서 3회 실시하여 평균값을 취한다. 만일, 입하 시 다른 흙 종류일 경우 변경 시마다 다짐구간에 대해 실시한다. 또한, 터널이나 교량과 같은 구조물을 이용한 도로 연결부에서는 구조물 사이에 두고 다짐재료의 성질이 다를 수 있으므로, 구조물의 양쪽 연결부에서 재차 시험하도록 하였다.

표 2. 보조기층 다짐검사 시험간격

시험 종류	최소 시험 간격	
다짐도 시험	2차선 기준	층별 200m 당 1회
	광활지	500m^{3}당 1회
평판 재하시험	2차선 기준	층별 100m 당 1회
	광활지	500m^{3}당 1회
LFWD 시험	2차선 기준	100m 당 3회
	광활지	200m^{3}당 1회

4. 결 론

역학적 탄성계수를 이용한 보조기층 다짐관리 잠정지침은 2009년 도로공사 표준시방서를 바탕으로 보조기층 설계탄성계수 구현을 위하여 적정 다짐도 및 다짐도 측정법을 제시하였다. 또한, 현장의 적정 다짐평가를 위하여 평판재하시험 방법 외에 보다 신속한 다짐 현장 탄성계수 측정을 위해 LFWD 시험법을 제시하였다.

보조기층 시공은 설계에서 사용된 공학적 입력 물성치 범위 이상의 품질을 각 층의 모든 깊이에서, 그리고 모든 시공 구간내에서 만족하도록 관리되어야 하며, 시공 후 공학적 특성치 차이가 적도록 균일하게 시공되어야 한다.

본 지침을 통하여 보조기층 재료적 특성인 기본 물성치를 이용한 역학적 다짐기준을 마련하게 되어 보다 과학적이고 체계적인 다짐 체계를 이룩하게 되었다. 또한, 보조기층 외에 노상, 기층, 포장층까지 도로 포장구조물의 역학적 설계의 개념적 일관성을 완성하게 될 것이며, 보조기층의 설계-시공-유지관리 전 공정의 역학적 개념 일관성도 완성하게 될 것이다.

참고 문헌

1. 국토해양부, 도로공사 표준시방서 (2009)
2. 국토해양부, 포장 하부구조 다짐관리 잠정지침(안) (2010)
3. 건설교통부, 건설공사 품질시험기준 (2011)
4. 최준성; 김종민; 한진석; 김부일, “현장 실험을 통한 LFWD의 보조기층 다짐관리 기초 연구”, 한국도로학회 2009년도 추계학술대회 논문집, pp.653-658, 2009. 11.
5. 최준성; 김종민; 한진석, “설계탄성계수를 구현할 수 있는 도로하부구조 다짐관리기법 소개” 도로, v.11, no.3, pp.28-35, 2009. 9
6. 한국형 도로 포장설계법 개발과 도로 포장 성능 개선 방안 연구, C 도로 포장 하부구조 다짐관리 지침개발 연구 (2010)