



노상 및 보조기층의 소형충격재하시험 활용방안 연구

A Study for Application of the Light Falling Weight Test on Subbase and Subgrade

최 준 성* 김 종 민** 한 진 석*** 김 부 일****
 Choi, Jun Seong Kim, Jong Min Han, Jin Seok Kim, Bu il

Abstract

The in-situ Compaction test using sand cone (RC) and Plate Bearing Capacity Test (PBT) has been widely used for evaluating the subgrade and subbase condition on the pavement system. However, because the in-situ RC and PBT test are expensive and take plenty of time for operation, these are very difficult to figure out the in-situ characteristics of subgrade and subbase strength in detail. Therefore, for faster and economical operation, this study is to compare the Light Falling Weight Tests and propose the LFWD test as the in-situ Compaction test. This study suggests the relationship between in-situ RC value, K_{30} , M_R and E_{LFWD} of the subgrade and subbase materials in Korea using the laboratory and in-situ testing.

Keywords : in-situ compaction, subgrade, subbase, LFWD

요 지

현재, 포장시스템의 노상과 보조기층의 다짐관리는 들밀도 시험을 이용한 상대 다짐도와 평판재하시험이 널리 쓰이고 있다. 하지만, 이 두 시험법은 노상과 보조기층의 다짐관리를 평가하기엔 시간과 비용이 많이 소요되며 실측 값을 얻기에도 매우 어렵다. 이에 본 연구에서는 노상과 보조기층 시공 현장에서 다짐관리를 보다 빠르고, 적은 비용으로 측정할 수 있는 소형충격재하시험들의 비교분석을 실시한 후, LFWD 시험을 다짐평가장비로 제안하였다. 또한, 노상과 보조기층의 실내시험 및 현장 시험을 통하여 국내 도로 하부구조 재료 특성에 따른 E_{LFWD} 와 상대 다짐도, K_{30} , 설계 M_R 값과의 상관관계를 제안하였다.

핵심용어: 다짐시험, 노상, 보조기층, LFWD 시험

* 정회원 · 인덕대학 토목환경설계과 부교수 · 공학박사(E-mail : soilpave@induck.ac.kr)
 ** 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 부교수 · 공학박사(E-mail : jongmin@sejong.ac.kr)
 *** 학생회원 · 세종대학교 토목환경공학과 · 박사과정(E-mail : for1000dayshan@nate.com)
 **** 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 선임연구원 · 공학박사(E-mail : bikim@kictre.kr)

1. 서론

현재 우리나라에서 시행되고 있는 노상 및 보조기층의 설계와 해석은 다짐 재료의 역학적 특성인 강성도(stiffness)개념의 회복탄성계수(Resilient Modulus 이하 M_R)를 이용하여 이루어지고 있으나, 다짐 시공과 유지관리는 오랜 경험을 이용한 강도(strength) 개념의 상대 다짐도를 이용하고 있다. 이와 같은, 개념적 괴리감은 설계 및 해석과 시공 및 유지관리 간의 일관적 기준을 유지할 수 없으며, 상대 다짐도 시험은 표층으로부터 10cm 이하 깊이만 검증 할 수 있고, 시험 시점을 시공 기술자의 경험에만 의존하는 단점이 있다. 또한, 상대 다짐도 시험은 현장 시험 지점의 시료를 이용하여 실내 다짐시험을 병행하여야 하는 단점이 있다. 이로 인해 시험 시점을 잘못 선택한 경우 재시공에 따른 추가 비용이 필요하며, 이를 방지하기 위해 과다짐 시공을 하는 경우 이 또한 시공비용의 과다 지출을 초래하게 된다.

이에 본 연구에서는 노상과 보조기층의 시공 및 유지관리 현장의 탄성계수를 측정할 수 있으며, 신속하고 간편한 시험법으로 소형 충격 재하시험들의 비교 분석 및 이를 이용한 노상과 보조기층의 다짐관리 가능 여부와 기존 다짐관리 시험들과의 상관관계를 비교분석하였다.

2. 소형 충격 재하시험기 소개 및 비교분석

2.1 소형 충격 재하시험기의 외형

소형충격재하시험은 LFWD(Light Falling Weight Deflectometer)와 동적평판재하시험이 있으며, 그림 1, 그림 2에서 보는바와 같이 한사람만으로도 실험이 가능한 소형, 경량의 시험 장비이다.

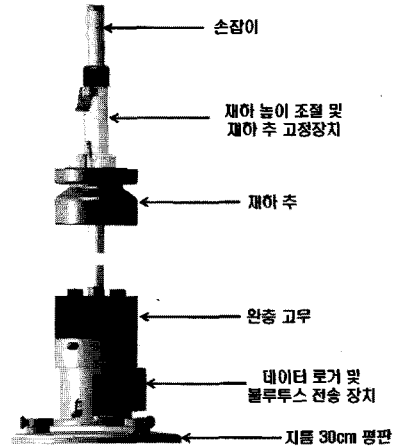


그림 1. LFWD 외형



그림 2. LFWD 외형 및 실험전경

2.2 LFWD 시험과 동적평판재하시험의 기본원리

2.2.1 LFWD 시험외형 및 시험 원리

소형 충격 재하시험기중 LFWD시험은 그림 3에서 보는 바와 같이 재하 추의 자유 낙하에 따른 지반의 탄성침하량을 그림 4에 보이는 geophone으로 측정하고, 이를 데이터로거를 이용하여 탄성계수(이하

E_{LFWD})로 환산한다(최준성의, 2000). LFWD 시험은 탄성침하량을 측정하여 E_{LFWD} 값을 산출하므로, 데이터로거와 노트북 혹은 PDA를 블루투스 장비로 연결하면 시험 현장에서 바로 설계 M_R 값과 비교 확인할 수 있으며, 데이터 수정 및 삭제, 저장이 용이하다.

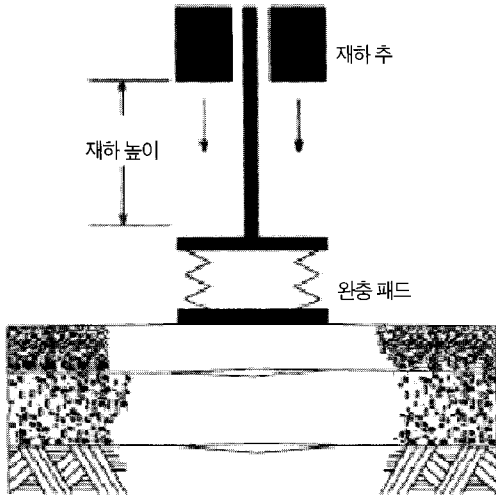


그림 3. LFWD 시험시 기본원리

측정된 탄성침하량은 Timoshenko의 탄성이론을 이용하여 탄성계수 값으로 계산하며, 이는 식 (1)과 같다(Timoshenko의, 1974).

$$E = \frac{q_d}{w_d} \gamma \frac{\pi}{2} (1 - \nu^2) \quad (1)$$

여기에서, E_{LFWD} = LFWD로 계산된 탄성계수,

q_d = 하중판에 작용한 응력,

w_d = 처짐,

ν = 포아송비,

γ = 하중판의 반지름이다.

덴마크 Dynatest사에서 제공하는 Dynatest 3031 소형 충격 재하시험기 매뉴얼에 따르면, 소형 충격 재하시험기로 측정되는 회복탄성계수 값은 다

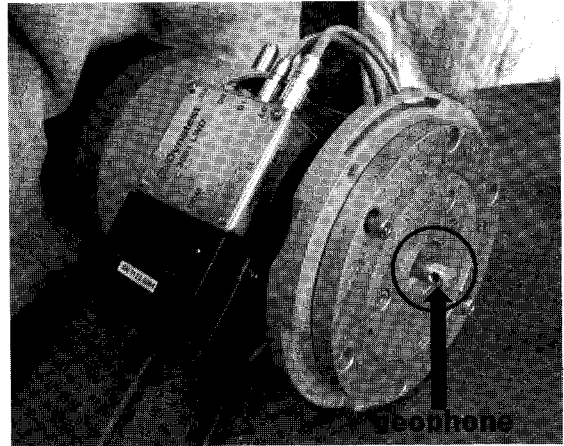


그림 4. 재하판 Geophone

표 1. LFWD 시험에 따른 재료별 탄성계수 범위 (Dynatest, 2006)

재 료	탄성계수 범위
부드러운 진흙	1 ~ 20 Mpa
단단한 진흙	20 ~ 50 Mpa
모 래	30 ~ 70 Mpa
자갈	60 ~ 200 Mpa

짐 재료에 따라 범위를 달리하며, 대체적인 범위는 표 1과 같다(Dynatest, 2006). 본 연구에서는 국내 노상 및 보조기층의 실내 토조시험 및 현장시험을 실시하여 LFWD시험특성 분석과 다짐 재료에 따른 회복탄성계수를 비교분석하고, 기존 다짐관리 시험법과의 상관관계를 분석하였다.

2.2.2 동적평판재하시험기 외형 및 시험 원리

그림 5에서 보는 바와 같이 동적평판재하시험기 (Dynamic Plate Bearing Test 이하 동평판)는 LFWD시험기와 비슷한 외형을 가지고 있으며, 원리 역시 충격 하중에 따른 지반 침하량을 계산하여 탄성계수를 계산하지만, 계산 방식에서는 식 (2)에서 보는 바와 같이 식 (1)과 차이점이 있다. 식 (2)는 최대 충격하중 응력값이 정해져 있으므로, 동평판 시험을 통한 탄성계수 값은 제한되어져 있으며, 실제로도

얇은 아스팔트 표층에서도 시험이 가능한 LFWD 시험기와는 달리, 동적평판 시험기는 노상과 보조기층에서만 시험 가능하며 계측 탄성계수 값도 120MPa 이하 값만 계산되어 지도록 정해져 있다.

$$\begin{aligned}
 E_{vd} &= 1.5 \times r \times \frac{\sigma_{\max}}{S_{\max}} \quad (2) \\
 &= 1.5 \times 0.15\text{m} \times \frac{0.1\text{MN/m}^2}{S_{\max}} \\
 &= \frac{22.5}{S_{\max}} \text{ (MN/m}^3\text{)}
 \end{aligned}$$

여기에서, E_{vd} = 동적탄성계수 (MN/m³)
 r = 재하판 반지름 (cm)
 σ_{\max} = 최대 충격하중 응력 (MN/m²)
 $= 0.1$ (MN/m²)
 S_{\max} = 최대 침하량 (m)이다.

2.3 LFWD 시험기와 동적 평판 재하시험기의 비교

노상 및 보조기층의 탄성계수를 이용한 소형 충격 재하시험기로서 LFWD 외에 동적 평판 재하시험기가 있다. 따라서 본 연구에서는 외형 및 원리가 비슷한 두 시험 장비를 비교분석하였다.

LFWD 시험기와 동적평판재하시험기를 비교하기 위해 연구 목적으로 명지대와 서울산업대에서 보유



그림 5. 동적평판재하시험기 외형

하고 있는 동적평판재하시험기와 인덕대에서 보유하고 있는 LFWD 시험기를 사질토지반인 운동장에서 비교 측정 시험하였으며, 시험 지점 2m 이내에서 시험한 결과는 표 2와 같다. 식 (1)과 식 (2)를 보면 침하량이 작을수록 계산되어지는 탄성계수는 커져야 하지만, 표 2의 시험 데이터를 보면 LFWD 시험과 비교하여 동적평판재하시험기는 침하량이 더 작음에도 불구하고 탄성계수가 더 작게 측정되어진다. 이는 동적평판재하시험기의 평판의 경우 LFWD 시험과 같

표 2. LFWD 시험기와 동적평판재하시험기 데이터 비교

시험장소	시험장비	재하판 지름 (mm)	재하 높이 (cm)	하중 추 무게 (kg)	침하량 (mm)	탄성계수 (MN/m ²)
명지대 운동장	동적평판시험기 (명지대)	300	75	15	0.377	59.7
	LFWD 시험기 (인덕대)	300	75	15	0.181	100
서울 산업대 운동장-1	동적평판시험기 (산업대)	300	75	15	0.267	84.3
	LFWD 시험기 (산업대)	300	75	15	0.383	101
서울 산업대 운동장-2	LFWD 시험기 (인덕대)	300	75	15	0.111	105
	동적평판시험기 (산업대)	300	75	15	0.269	83.64
	LFWD 시험기 (산업대)	300	75	15	0.388	99
	LFWD 시험기 (인덕대)	300	75	15	0.103	103

이 직접 측정센서가 지면에 닿지 않고 평판윗부분에 설치된 영향으로 보이며, 동적평판재하시험을 통한 노상 및 보조기층에 적용하기 위해서는 추정된 탄성계수를 설계 M_R 값과 비교하기 위한 상관관계식을 하나 더 거쳐야만 비교할 수 있음을 보여준다. 또한, 서울산업대에서 보유한 LFWD 시험기와 인덕대에서 보유한 LFWD 시험기 데이터를 보면, 운동장-1과 운동장-2 두 지점에서 모두 서울산업대 LFWD 시험기에서 측정된 침하량이 인덕대 LFWD 시험기 침하량 보다 3배 이상 크지만 탄성계수는 거의 비슷함을 알 수 있다. 이는 그림 6에서 보는 바와 같이 서울산업대 LFWD 시험 장비는 구 버전으로서 완충 고무가 흡수하는 하중 추 충격하중이 신 버전인 인덕대 LFWD 시험 장비의 완충 패드보다 적기 때문에 내부변환식의 차이로 판단된다. 하지만, 측정되는 침하량이 다르더라도 거의 비슷한 탄성계수 값을 산출하므로, 구 버전과 신 버전에 따른 시험 데이터 차이가 적음을 알 수 있다. 따라서 동적평판재하시험기보다 LFWD 시험이 탄성계수를 이용한 노상 및 보조기층 다짐관리에 더 적합함을 알 수 있었다.

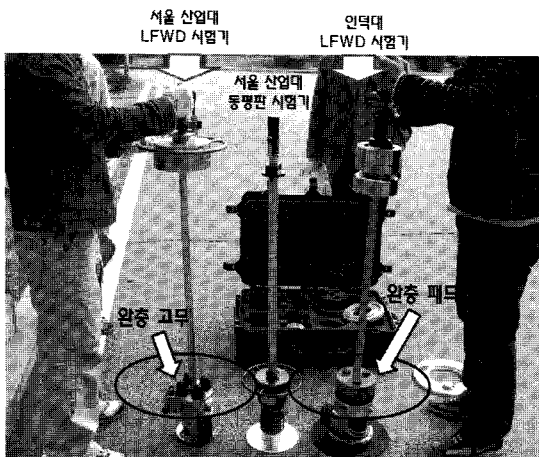


그림 6. 동적평판재하시험기 외형

3. LFWD 시험을 이용한 토조 실내 시험

토조 실내 시험은 LFWD 시험의 하중판 지름 및

하중판 높이에 따른 충격응력 변화와 다짐 재료 및 상대 다짐도에 따른 E_{LFWD} 에 미치는 영향을 확인하고자 실시하였다. 이를 위해 본 실내 시험에서는 SW 계열의 노상 및 GW 계열의 보조기층 재료를 이용하여 LFWD 시험기 10kg 하중에 하중판 지름을 30cm, 20cm 두 지름으로 시험하였으며, 높이는 각기 50cm, 75cm로 조절하여 시험하였으며 보조기층 시료를 상대 다짐도 85%, 90%, 95%로 토조 내에 다짐한 후 실내 토조 내 LFWD 시험을 실시하였다.

3.1 실내시험 방법과 적합성 분석

실내 토조 시험에 앞서 노상 및 보조기층 재료의 다짐시험으로 최대건조단위 중량과 최적함수비를 구하고, 최적함수비 $\pm 2\%$ 가 되도록 시료를 준비하여 밀폐된 통에 24시간 이상 보관한다. 토조는 LFWD 시험의 경계조건을 고려한 하중판 지름 30cm 2배 이상인 지름 90cm, 높이 65cm 인 철제 원형 토조를 제작하였으며 그림 7, 그림 8에서와 같이 보조기층 시험에서는 토조 내에 노상토를 다짐 두께 20cm로 깔고, 그 위에 보조기층 다짐규정에 맞게 다짐두께 15cm로 2층 다짐을 하였다. 노상 재료의 시험에서도 토조 내에 노상토를 다짐 두께 20cm로 깔 후, 노상토의 다짐두께 15cm로 2층 다짐 하였다. 보조기층 재료의 경우 다짐도를 85%, 90%, 95%로 맞추어 상대 다짐도에 따른 LFWD 시험 M_R 값을 시험하였다.

그림 8에서 보이는 노상토와 1층 보조기층(혹은 노상토) 사이 그리고, 1층 보조기층(혹은 노상토)과 2층 보조기층(혹은 노상토) 사이에 위치한 토압계는 LFWD 시험 충격하중의 깊이에 따른 영향을 파악하기 위하여 삽입하였으며, 이 토압계는 데이터로거를 이용하여 충격하중 측정 및 데이터를 저장하였다. 또한 LFWD 시험 본체의 Geophone 외에 중심에서 23cm, 35cm 떨어진 지점에 Geophone 2, 3을 추가 연결하여 충격하중에 따른 침하량 및 E_{LFWD} 를 측정하였다.

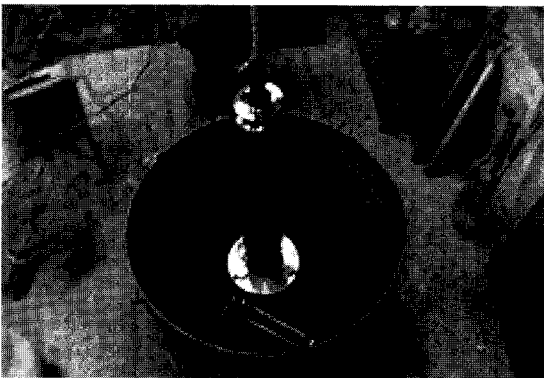
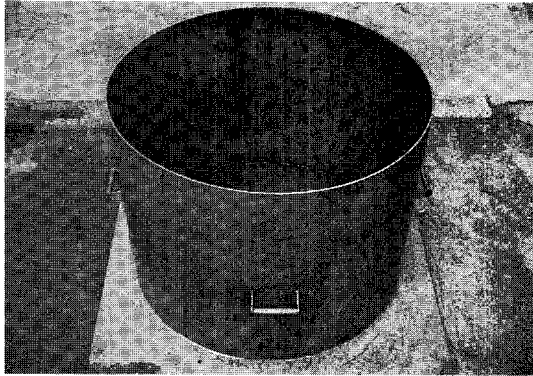


그림 7. 토조 외형

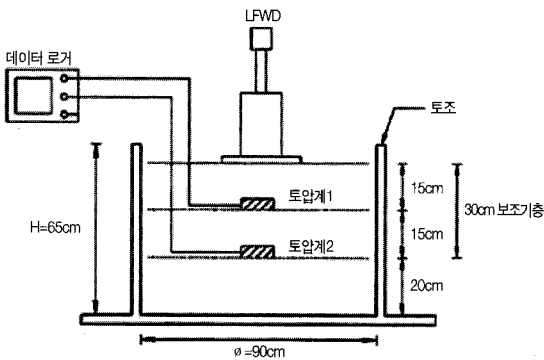


그림 8. 토조 시험 계획

LFWD 시험의 동적하중 영향 깊이를 실내 토조시험을 이용하여 연구하였던 Nazzal(2003)에 따르면, 그림 9와 같이 바닥에 세립층을 깔고 위에 조립층을 덮는 경우 동적하중이 280mm 이상에서는 영향을 주지 못한다. 본 연구에서는 토압계를 설치하여 하중전달 깊이를 분석하였다.

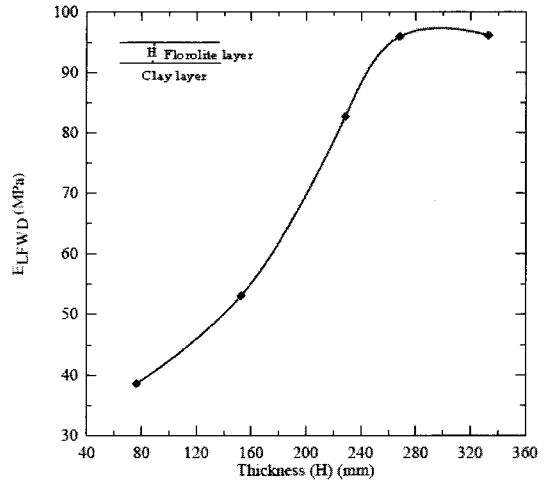


그림 9. LFWD 동적하중의 영향 깊이

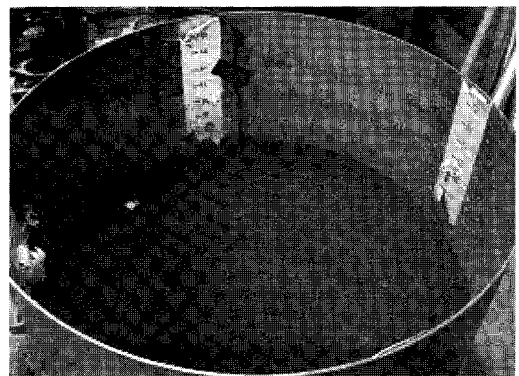


그림 10. LFWD 동적하중 충격 응력의 수평방향 범위 측정 시험

또한 실내 토조시험시 추가적으로 LFWD 동적하중이 주는 수평방향의 범위를 알아보려고 하였으며, 이를 위해 토조 내 LFWD 시험 시 그림 10과 같이 토조 옆면에 보조기층 다짐 표면과 동일 깊이로 토압

계를 하나 설치하고, 깊이 15cm 위치에 토압계를 추가적으로 설치하여 LFWD 시험을 수행하였다. 그 결과 LFWD 시험기의 최대 충격하중인 20kg으로 최대 높이 75cm에서 낙하하여도 수평방향 토압의 변화는 없었다. 이를 통해 본 과업에 사용되어진 토조는 LFWD시험을 수행하기에 충분한 크기임을 확인할 수 있었다.

3.2 실내시험 결과

토조 시험에 사용되는 노상토 및 보조기층의 기본 물성치를 파악하기 위하여 체분석 및 다짐 시험을 실시하였으며 그에 따른 흙분류와 최대건조단위중량 및 최적함수비는 표 3과 같다.

표 3. 노상토 및 보조기층의 기본 물성치

구 분	흙분류	$\gamma_{dmax}(t/m^3)$	최적함수비 (%)
노상토	SW	2.13	11.3
보조기층	GW	2.35	5.4

노상토 및 보조기층 재료를 이용하여 토조내에서 LFWD 시험을 실시하면, 그림 11과 같은 결과를 얻을 수 있다. 그림 11은 LFWD 시험에서 얻은 탄성침하량 및 표면 탄성계수를 LFWDmod라는 LFWD 시험 자체 해석 프로그램을 이용하여 도식화한 결과의 예이며, 좌측의 그림은 LFWD 시험 Geophone 3개에서 얻은 탄성침하량을 도시화한 것이고, 우측 그림은 각 Geophone의 데이터를 이용한 표면 탄성

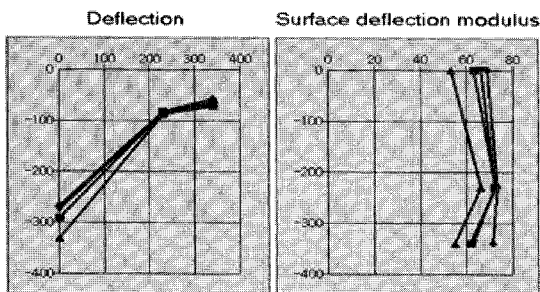


그림 11. LFWD 시험 결과 (예)

계수 계산 값이다.

각 격인 선들은 한 번의 타격횟수를 나타내며 좌측 그림의 세로축은 탄성침하량(μm)을 나타내고, 가로축은 LFWD 시험의 중앙에서부터 각 Geophone과의 거리(mm)를 나타낸다. 우측 그림의 세로축은 LFWD 시험 중앙에서부터 각 Geophone과의 거리(mm)를 나타내며, 가로축은 각 Geophone에서 얻은 회복탄성계수(MPa)를 나타낸다. 한 지점에서 각각의 타격횟수에 따라 얻은 탄성침하량과 회복탄성계수는 LFWD 시험 해석 프로그램을 이용하여 하나의 회복탄성계수로 산출되며, 노상토와 보조기층 LFWD 시험 결과값은 표 4~표 7과 같다.

표 4와 표 5에서는 노상토의 E_{LFWD} 값이 49~52MPa 범위로 측정되었으며, 표 6과 표 7에서는 보조기층의 E_{LFWD} 값이 60~82MPa 범위로 측정되어 표 1에서 보인 모래질 노상재료의 E_{LFWD} 범위인 30~70MPa에 부합되고, 자갈질 보조기층 재료의 E_{LFWD} 범위인 60~200MPa에 부합됨을 알 수 있다. 또한, 표 4~표 7를 보면, 동일한 10kg 하중으로 충격량을 가하

표 4. 지름 200mm 하중판을 이용한 노상토 LFWD 시험 결과

height	Drop	Radius mm	Load kN	Stress kPa	Dist.1 mm	Dist.2 mm	Dist.3 mm	Def.1 μm	Def.2 μm	Def.3 μm	Eo MPa	E_{LFWD} MPa
75 cm	1	100	4.9	69	0	230	340	374	92	81	49	50
	2	100	4.9	70	0	230	340	375	89	79	49	
	3	100	4.9	69	0	230	340	379	94	80	48	
50 cm	1	100	3.5	50	0	230	340	300	69	65	44	50
	2	100	3.6	51	0	230	340	272	66	59	49	
	3	100	3.6	51	0	230	340	275	68	59	49	

표 5. 지름 300mm 하중판을 이용한 노상토 LFWD 시험 결과

height	Drop	Radius mm	Load kN	Stress kPa	Dist.1 mm	Dist.2 mm	Dist.3 mm	Def.1 μm	Def.2 μm	Def.3 μm	Eo MPa	E_{LFWD} MPa
75 cm	1	150	4.9	65	0	230	340	336	123	81	51	49
	2	150	4.9	69	0	230	340	309	122	79	59	
	3	150	4.9	70	0	230	340	313	122	80	59	
50 cm	1	150	3.6	51	0	230	340	225	83	65	60	52
	2	150	3.6	51	0	230	340	223	84	59	60	
	3	150	3.6	51	0	230	340	218	82	59	62	

표 6. 지름 200mm 하중판을 이용한 보조기층 LFWD 시험 결과

height	Drop	Radius mm	Load kN	Stress kPa	Dist.1 mm	Dist.2 mm	Dist.3 mm	Def.1 μm	Def.2 μm	Def.3 μm	Eo MPa	E _{LFW} MPa
75 cm	1	100	4.9	69	0	230	340	342	88	64	81	71
	2	100	4.9	70	0	230	340	331	92	67	83	
	3	100	4.7	70	0	230	340	327	88	65	81	
50 cm	1	100	3.6	51	0	230	340	274	62	42	74	74
	2	100	3.6	51	0	230	340	271	59	41	74	
	3	100	3.8	50	0	230	340	273	61	42	72	

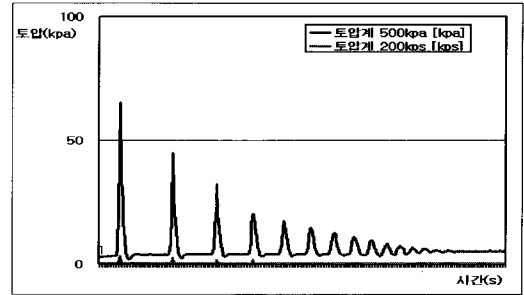
표 7. 지름 300mm 하중판을 이용한 보조기층 LFWD 시험 결과

height	Drop	Radius mm	Load kN	Stress kPa	Dist.1 mm	Dist.2 mm	Dist.3 mm	Def.1 μm	Def.2 μm	Def.3 μm	Eo MPa	E _{LFW} MPa
75 cm	1	150	4.9	70	0	230	340	292	83	66	63	68
	2	150	4.9	69	0	230	340	274	82	64	66	
	3	150	4.9	70	0	230	340	267	82	57	69	
50 cm	1	150	3.6	51	0	230	340	190	54	40	71	70
	2	150	3.6	50	0	230	340	189	53	38	70	
	3	150	3.6	51	0	230	340	191	53	39	70	

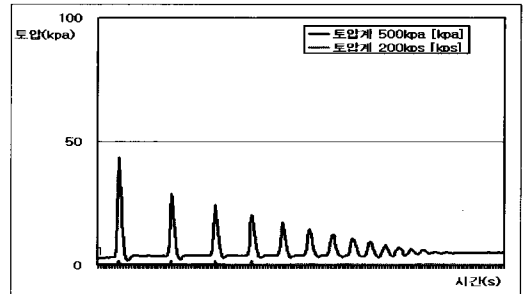
였을 때 하중판 지름이 작을수록, 하중 재하 높이가 클수록 응력 역시 크게 작용하여 침하량이 커졌음을 알 수 있다. 이와 더불어, 지름과 하중재하 높이가 변하여 응력이 변하였어도 측정된 회복탄성계수 값은 크게 변하지 않음을 알 수 있다. 이는 현장에서 보조기층 다짐 관리에 있어서 하중판 지름 및 하중재하 높이에 크게 고려하지 않고, 측정자의 임의에 따라 소형 충격 재하 시험을 실시하여도 동일한 탄성계수를 측정할 수 있음을 나타낸다.

그림 12와 그림 13은 하중판 지름 및 하중재하 높이 변화에 따른 충격량의 변화에 대한 노상토 및 보조기층 깊이별 토압의 영향을 분석한 그림이며, 깊이에 따른 토압의 영향을 초기 충격량을 측정하여 정리한 것은 표 8과 같다.

그림 12와 그림 13 및 표 8로부터, 노상토 및 보조기층에서 토압은 하중판 지름에 상관없이 하중 재하 높이에 따라 일정함을 알 수 있으며, 깊이 15cm에서는 충격하중의 영향을 크게 받고, 깊이 30cm에서는 영향이 거의 없음을 알 수 있다. 이를 통해

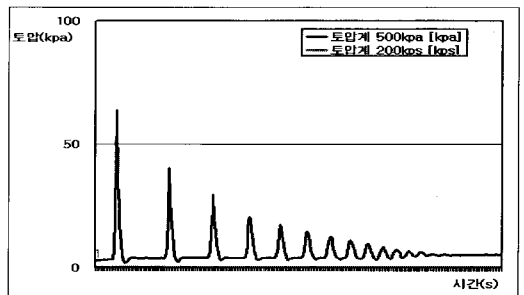


(a) 지름 200mm, 높이 75cm 낙하

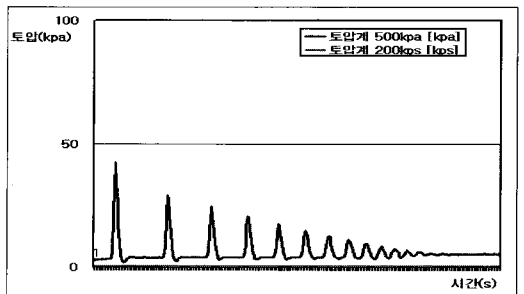


(b) 지름 300mm, 높이 50cm 낙하

그림 12. 10kg 하중추에 지름 및 높이에 따른 노상토 깊이별 충격량 영향 분석



(a) 지름 200mm, 높이 75cm 낙하



(b) 지름 300mm, 높이 50cm 낙하

그림 13. 10kg 하중추에 지름 및 높이에 따른 보조기층 깊이별 충격량 영향 분석



LFWD 시험은 노상토의 다짐기준 1층 두께 20cm와 보조기층의 다짐기준 1층 두께 15cm를 모두 검증 영역에 포함시켜 해석 할 수 있는 장비임을 확인하였다. 토조 내 다짐도를 달리한 보조기층의 E_{LFWD} 값은 표 9와 같다.

표 8. 노상토, 보조기층의 깊이별 토압 영향

노 상 토				보 조 기 층			
하중판 지름 (mm)	재하 높이 (cm)	깊이 (cm)	응력 (kPa)	하중판 지름 (mm)	재하 높이 (cm)	깊이 (cm)	응력 (kPa)
200	75	0	70	200	75	0	70
		15	65.4			15	63.8
		30	3.4			30	0
	50	0	50		50	0	51
		15	45.3			15	44.2
		30	2.8			30	0
300	75	0	69	300	75	0	70
		15	62.5			15	60.5
		30	2.9			30	0
	50	0	51		50	0	51
		15	43.8			15	42.5
		30	1.9			30	0

표 9. 보조기층 상대 다짐도와 E_{LFWD} 의 토조시험 결과

			E_{LFWD} (MN/m ²)	실제 상대 다짐도 (%)
실내 토조 시험	SB-1	A	28	73.2
		B	45	82.9
		C	56	85.4
	SB-2	A	20	72.7
		B	48	84.6
		C	66	86.7

토조 내에서 보조기층의 다짐도에 따른 E_{LFWD} 측정 시험 계획은 상대 다짐도 85%, 90%, 95%에서 LFWD 시험을 실시하고자 하였으나, 표 11과 같이 다짐후 측정결과, 상대 다짐도는 72.7~86.7%였다. 이는, 토조 크기가 LFWD 시험 충격하중에 따른 경계조건은 충족시키는 크기이지만, 보조기층을

토조 내에서 다짐 시 사용하는 자동 램마의 큰 충격 하중을 충족시키지 못해, 토조 내에서 자동 램마 충격하중에 따른 교란이 일어나는 것으로 판단된다. 하지만, 같은 재료의 보조기층이라 하더라도 상대 다짐도에 따라 E_{LFWD} 값은 차이가 있음을 알 수 있었으며, 다짐도는 강도(strength) 개념이고, E_{LFWD} 탄성계수는 강성도(stiffness) 개념이나, 다짐도가 커지면 E_{LFWD} 값이 커지는 정비례 관계임을 알 수 있다.

4. LFWD 시험을 이용한 현장 시험

토조 실내 시험을 통하여 하중판의 지름 및 높이에 상관없이 E_{LFWD} 값은 일정함을 알았으며, LFWD 시험은 노상 및 보조기층 다짐 두께 전체를 해석 영역에 두고 있음을 확인하였고, 현재 다짐 기준인 상대 다짐도와도 상관관계가 있음을 알 수 있었다. 이에, 노상과 보조기층 다짐 현장 시험을 통하여 현재 다짐 기준 시험법인 상대 다짐도 시험과 평판재하시험과의 상관관계를 알아보고자 하였다.

4.1 현장시험 방법

실내 토조 시험을 통하여 LFWD 시험은 노상과 보조기층 모두에서 사용 가능하다는 것을 확인하였다. 현재 국내 도로 하부구조 다짐관리 시험법인 상대 다짐도 시험과 평판재하시험 모두 노상 및 보조기층의 다짐관리에 사용하므로, 노상과 보조기층 다짐 시공 현장에서, 소형 충격 재하시험과 상대 다짐도 시험 및 평판재하시험을 동일 지점에서 수행하였다. 현장 시험 간격은 현재 도로 하부구조 다짐관리 기준(한국도로공사 2002)을 준수하여 500m²당 1회씩 실시하였으며, 평판재하시험 실시 후 반경 2m 이내에서 들밀도 시험과 LFWD 시험을 수행하였다.



4.2 현장시험 결과

현장 시험결과는 한국형 도로포장설계법 연구에서 실시된 LTPP 3개구간인 신북-양구, 개정-성간, 우정-장안 구간 자료를 분석하였고, 전주-광양, 당진-대전, 2개구간에서 현장 시험을 직접 실시한 총 5개 구간 데이터를 분석하였으며, 그 결과는 다음 표 10, 표 11과 같다. LTPP 구간은 일반 도로에서 사용되는 FWD(Falling Weight Deflectometer) 시험을 통해 구한 탄성계수를 비교하였으며, 추가 구간의 경우 LFWD 시험으로부터 탄성계수를 산정하였으며, 상대 다짐도는 현장에서 들밀도 시험을 수행한 후 실내 다짐 시험을 수행하여 다짐도(%)를 계산하였으며, 평판재하시험은 비반복 정적평판재하시험으로 수행하였다.

표 10. 노상 현장 시험 결과

		E_{LFWD} (MPa)	K_{30} (MN/m ³)	다짐도 (%)
전주-광양 고속도로 현장시험	교대40m지점	93	340.8	92
	교대60m지점	94		95.2
	교대80m지점	105.3		97.04
신북-양구 국도 LTPP 현장	0+180	72.1	283.22	
	0+230	76.1	272.44	
	0+280	45.4	143.08	
	6+020	109	189.14	
	6+070	191	596.82	

표 11. 보조기층 현장 시험 결과

		E_{LFWD} (MPa)	K_{30} (MN/m ³)	다짐도 (%)
당진-대전간 고속도로	2-A	111	184.8	
	2-B	109		
	2-C	114		
전주-광양 고속도로 현장시험	배수구에서 30m지점	111	316.8	98.00
	배수구에서 60m지점	110		97.39
	배수구에서 90m지점	108		98.51
	배수구에서 120m지점	104		96.00

신북-양구 국도 LTPP현장	0+180	352.09	695.8	
	0+230	301.65	669.34	
	0+280	375.65	853.58	
	6+020	372.45	677.18	
	6+070	313.29	496.86	
개정-성간 국도 LTPP현장	6+830	120.27	261.66	
	5+880	180.41	311.64	
	5+930	155.19	266.56	
	6+250	148.40	233.24	
우정-장안 국도 LTPP현장	6+300	159.07	279.30	
	2+330	75.65	154.84	
	2+270	99.90	164.64	
	2+170	109.60	194.04	
	2+130	120.27	299.88	
	2+030	127.06	235.20	

4.3 노상 현장시험 결과 분석

4.3.1 노상에서의 E_{LFWD} 와 K_{30} 간의 상관관계

표 10의 2곳의 현장 시험 데이터를 이용하여 LFWD 시험을 이용한 E_{LFWD} 값과 평판재하시험을 이용한 K_{30} 값으로 상관관계를 분석하여 그림 14와 같은 결과를 얻었다. 이에 따른 상관관계식은 식 (4)와 같이 도출되었으며, 결정계수 R^2 값은 0.6926이다.

$$E_{LFWD} = 0.2707 K_{30} + 11.146 \quad (4)$$

$$R^2 = 0.6926$$

여기서, E_{LFWD} = MPa,

K_{30} = MN/m³을 단위로 사용한다.

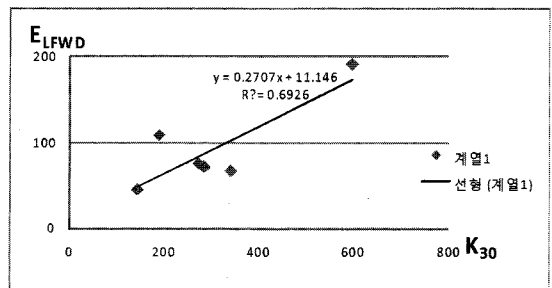


그림 14. 노상에서의 E_{LFWD} 와 K_{30} 관계

4.3.2 노상에서의 E_{LFWD} 와 상대 다짐도 간의 상관관계
 표 10의 2곳의 현장 시험 데이터를 이용하여 LFWD 시험을 이용한 E_{LFWD} 값과 들밀도 시험을 이용한 상대 다짐도와의 상관관계를 분석하여 그림 15와 같은 결과를 얻었다. 이에 따른 상관관계식은 식 (5)와 같이 도출되었으며, 결정계수 R^2 값은 0.7593이다.

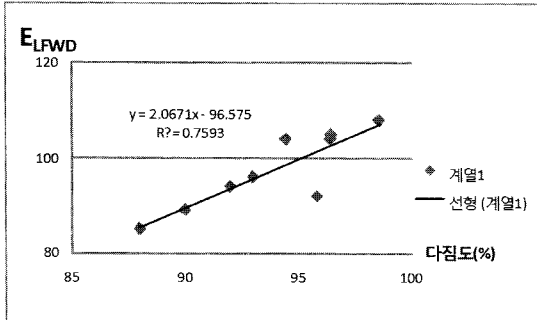


그림 15. 노상의 E_{LFWD} 와 상대 다짐도 상관관계

$$E_{LFWD} = 2.0671 RC - 96.575 \quad (5)$$

$$R^2 = 0.7593$$

여기서, E_{LFWD} = MPa,

K_{RC} = %를 단위로 사용하여 상대다짐도를 뜻한다.

4.3.3 노상에서의 E_{LFWD} 와 설계 M_R 간의 상관관계

노상 다짐 현장 2곳에서의 LFWD 시험을 이용한 E_{LFWD} 값과 현장 시료의 기초 물성을 이용한 설계 M_R 값을 인공신경망 공식(박현일 2003)으로 도출하여 이 두 값의 상관관계를 그림 16과 같이 구하였다. 그에 따른 상관관계식은 식 (6)과 같으며, 결정계수는 0.7784로 나왔다.

$$E_{LFWD} = 1.0125 M_R - 74.829 \quad (6)$$

$$R^2 = 0.7784$$

여기서, E_{LFWD} = Mpa,

M_R = MPa를 단위로 사용한다.

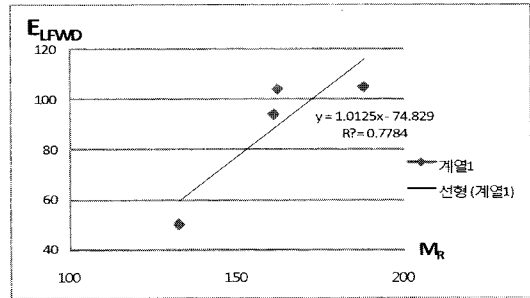


그림 16. 노상의 E_{LFWD} 와 설계 M_R 상관관계

4.4 보조기층 현장시험 결과 분석

4.4.1 보조기층에서의 E_{LFWD} 와 K_{30} 간의 상관관계
 표 11의 5곳의 현장 시험 결과를 이용하여 보조기층에서의 E_{LFWD} 와 K_{30} 간의 상관관계를 분석하여 그림 17과 같은 결과를 얻었다. 그에 따른 상관관계식은 식 (7)과 같으며, 결정계수는 0.8905이다.

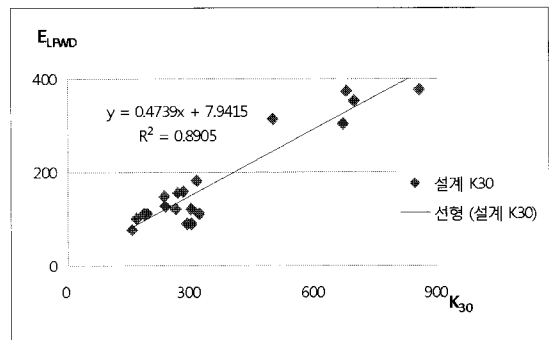


그림 17. 보조기층의 E_{LFWD} 와 설계 K_{30} 상관관계

$$E_{LFWD} = 0.4739 K_{30} + 7.9415 \quad (7)$$

$$R^2 = 0.8905$$

여기서, E_{LFWD} = MPa,

K_{30} = MN/m³을 단위로 사용한다.



4.4.2 보조기층에서의 E_{LFWD} 와 상대 다짐도 간의 상관관계

표 11의 5곳의 현장 시험 결과를 이용하여 보조기층에서의 E_{LFWD} 와 상대 다짐도 간의 상관관계를 분석하여 그림 18과 같은 결과를 얻었다. 그에 따른 상관관계식은 식 (8)과 같으며, 결정계수는 0.9666이다.

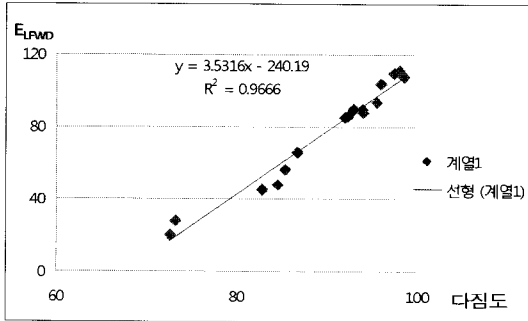


그림 18. 보조기층의 E_{LFWD} 와 상대 다짐도 상관관계

$$E_{LFWD} = 3.5316 RC - 240.19 \quad (8)$$

$$R^2 = 0.9666$$

여기서, E_{LFWD} = MPa,

실제다짐도 = %를 단위로 사용한다.

4.4.3 보조기층에서의 E_{LFWD} 와 설계 M_R 간의 상관관계

표 11의 5곳의 현장 시험 결과를 이용하여 보조기층에서의 E_{LFWD} 와 현장 시료의 기초 물성에서 인공 신경망 공식(박현일의 2003)으로 계산된 설계 M_R 간의 상관관계를 분석하여 그림 19와 같은 결과를 얻었다. 그에 따른 상관관계식은 식 (9)와 같으며, 결정계수는 0.9722이다.

$$E_{LFWD} = 2.2733 M_R - 459.77 \quad (9)$$

$$R^2 = 0.9722$$

여기서, E_{LFWD} = MPa,

M_R = MPa를 단위로 사용한다.

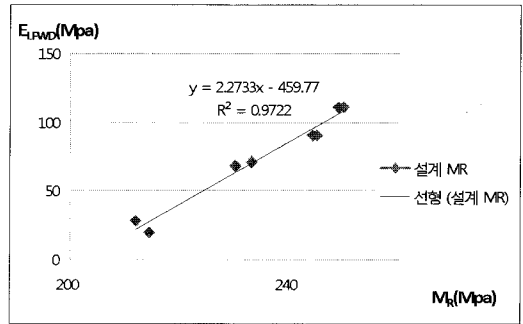


그림 19. 보조기층에서의 E_{LFWD} 와 설계 M_R 상관관계

4.5 현장 시험 상관관계식과 기존 상관관계식 비교

본 연구 초기 단계로서 LFWD시험기에 대한 해외 문헌 연구를 통해 (Gudishala, 2004), (Nazzal, 2003)이 제시한 기존 다짐 관리 시험법과의 상관관계식을 분석하였다. 하지만, 기존 상관관계식은 해외 다짐기준에서의 현장 시험을 통한 상관관계식으로서 국내 노상과 보조기층 현장 시험 데이터와는 상당한 차이를 보였다. 그에 따라 현장 시험을 통해 얻은 상관관계식과 비교를 하면 표 12와 같다.

표 12. 기존 상관관계식과 산출된 상관관계식 비교

비교 데이터	기존 상관관계식	산출된 상관관계식
E_{LFWD} 와 K_{30}	$E_{PLT(i)} = 0.907 E_{LFWD} - 1,812 (R^2 = 0.84)$ $E_{PLT(i)} = 0.71 E_{LFWD} + 18,63 (R^2 = 0.87)$	$E_{LFWD} = 0.4739 K_{30} + 7,9415$ $R^2 = 0.8905$
E_{LFWD} 와 설계 M_R	$M_R = 73.3 (E_{LFWD})^{0.25}$	$E_{LFWD} = 2.2733 M_R - 459.77$ $R^2 = 0.9722$
E_{LFWD} 와 다짐도	다짐도 = $-0.004 \times E_{LFWD}^2 + 0.733 \times E_{LFWD} + 67,968$	$E_{LFWD} = 3.5316 RC - 240.19$ $R^2 = 0.9666$

5. 결과

노상 및 보조기층의 현장 시험 및 실내 토조 시험



을 이용한 소형 충격 재하시험 결과를 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

가. 소형 충격 재하시험기 시험은 노상 및 보조기층의 탄성계수를 측정하는 장비로서 시험법이 간편하여 1인으로도 시험이 가능하고, 시험 데이터를 바로 확인할 수 있어 설계 M_R 값과 현장에서 직접 비교가 가능함을 알 수 있었다

나. 소형 충격 재하시험기인 LFWD 시험기와 동적 평판재하시험기를 비교하여 LFWD 시험기가 노상 및 보조기층의 탄성계수 측정에 보다 적합함을 알 수 있었다.

다. LFWD 시험은 다짐 재료와 다짐도에 따라 E_{LFWD} 값이 변하지만, 하중판 지름 및 하중재하 높이에 따른 E_{LFWD} 값 변화는 없음을 알 수 있었다.

라. LFWD 시험기를 이용한 기존 상관관계식들은 해외 다짐기준에 따른 현장 시험 데이터를 이용한 것으로 본 연구를 통한 현장 시험 데이터 값과 상당한 차이를 보임을 알 수 있었다.

마. 국내 보조기층 다짐 현장에서 LFWD의 탄성계수 E_{LFWD} 와 평판재하시험 K_{30} , 상대 다짐도(RC), 설계 M_R 과의 상관관계식은 다음과 같다.

$$E_{LFWD} = 0.4739 K_{30} + 7.9415 \quad R^2 = 0.8905$$

$$E_{LFWD} = 3.5316 RC - 240.19 \quad R^2 = 0.9666$$

$$E_{LFWD} = 2.2733 M_R - 459.77 \quad R^2 = 0.9722$$

바. 국내 노상 다짐 현장에서 LFWD의 탄성계수 E_{LFWD} 와 평판재하시험 K_{30} , 상대 다짐도(RC), 설계 M_R 과의 상관관계식은 다음과 같다.

$$E_{LFWD} = 0.2707 K_{30} + 11.146 \quad R^2 = 0.6926$$

$$E_{LFWD} = 2.0671 RC - 96.575 \quad R^2 = 0.7593$$

$$E_{LFWD} = 1.0125 M_R - 74.829 \quad R^2 = 0.7784$$

사. 토압계를 이용한 토조시험 결과 LFWD 시험장비는 노상의 1층 다짐두께 20cm와 보조기층의 다짐두께 15cm를 모두 해석 영역에 포함하고 있음을 확인하였으며, LFWD를 이용한 노상토 다짐관리는 재하하중 높이 50cm 이하에서 시행하여야 하고, 보조기층의 다짐관리는 하중판 지름 300mm, 하중재하 높이 50cm에서 시행하여야

함을 토압계의 토압측정을 통해 확인하였다.

본 연구의 노상과 보조기층의 실내 토조시험 및 현장 시험을 통한 소형충격재하시험인 LFWD 시험 결과를 바탕으로 노상 및 보조기층 다짐관리에 활용가능성을 확인하였다. 추후 보다 많은 현장 시험과 데이터 분석을 통하여, 탄성계수를 이용한 국내 노상 및 보조기층에 적합한 다짐 관리 지침과 현장적용을 위한 적용식을 제시하고자 한다.

감사의 글

본 논문은 국토해양부에서 지원한 “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구”의 일부 연구 결과로 이에 감사드립니다.

참고문헌

박현일, 권기철, 오세봉, “인공 신경망 모델에 근거한 노상토 및 보조기층 재료의 탄성계수 추정”, 대한 토목학회 논문집, 2005.3

최준성, 김인수, 김수일, (2000) “도로포장구조체의 물성추정을 위한 비파괴시험장비의 국산화 연구”, 대한 토목학회 2002년도 학술발표회 논문집, pp. 209~212

Dynatest (2006.7), “LFWD Manual 1.0”, Dynatest

Nazzal, M. D. (2003). “Field Evaluation of In-Situ Test Technology for QC/QA During Construction of Pavement Layers and Embankments”. *MS Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Louisiana State University*

Ravindra Gudishala (2004). “Development of Resilient Modulus Prediction Models for Base and Subgrade Pavement Layers from in situ Devices Test Results.” *Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Louisiana State University*



Timoshenko, S. P. Young, D. H. and Wsaver, Jr
W.(1974) *Vibration Problems in Engineering*,
4th Edition, John Wiley & Sons,

접 수 일: 2009. 1. 15
심 사 일: 2009. 1. 29
심사완료일: 2009. 4. 27