

현장탄성계수에 근거한 보조기층 다짐관리방안 연구

A Study on Establishing the Subbase Compaction Control Method based on the In-situ Elastic modulus

최준성 Choi, Jun Seong
김종민 Kim, Jong Min
한진석 Han, Jin Seok
김부일 Kim, Bu Il

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

ABSTRACT

The resilient modulus which is presented mechanical properties of compacted subbase material is the design parameter on the Mechanistic - Empirical pavement design guide. The compaction control method on the Mechanistic - Empirical pavement design guide will be the way to confirm whether the in-situ elastic modulus measured after the compaction meets the resilient modulus which is applied the design. The resilient modulus in this study is calculated by the neural network suggested by Korea Pavement Research Program, and degree of compaction as the existing compaction control test and plate bearing capacity test(PBT) was performed to confirm whether the in-situ elastic modulus is measured. The Light Falling Weight Deflectometer(LFWD) is additionally tested for correlation analysis between each in-situ elastic modulus and resilient modulus, and is proposed correlation equation and test interval which can reduced overall testing cost. Also, the subbase compaction control procedure based on the in-situ elastic modulus is proposed using the in-situ PBT and LFWD test result.

KEYWORDS

subbase, resilient modulus, PBT, LFWD, compaction control procedure

요지

국내에서 일반적으로 보조기층재료로 사용되고 있는 보조기층 다짐재료의 역학적 특성을 반영한 실내 회복탄성계수는 역학적-경험적 포장설계법에서 적용하는 설계 인자이다. 따라서, 역학적-경험적 포장설계법의 보조기층 현장에서 실시하여야 하는 다짐판리는 다짐 후 측정된 현장 탄성계수가 설계에 적용된 실내 회복탄성계수를 만족하는지 여부를 확인하여야 할 것이다. 이를 위하여 본 연구에서는 기존 다짐관리 시험인 들밀도 시험과 평판재하시험(PBT)의 시험결과와 현장탄성계수와와의 상관성을 분석하였고, 현장에서 탄성계수를 측정할 수 있는 소형 충격 재하시험(LFWD)을 통한 현장탄성계수와 실내 회복탄성계수와와의 상관관계식과 시험간격을 제안하였다. 또한 제안된 상관관계를 이용하여 현장시험을 통한 보조기층의 다짐관리방안을 제안하였다.

핵심용어

보조기층, 회복 탄성계수, 평판재하시험, 소형 충격 재하시험, 다짐관리방안

1. 서론

과거 국내에 적용되고 있는 도로포장 설계법은 미국의 AASHTO 설계법과 일본의 T_A 설계법을 혼용하여 사용하고 있으며, 포장 재료의 설계입력 물성치는 다짐도와 지지력계

수(K_{30}) 등의 강도특성 또는 경험적인 물성치를 기준으로 평가하고 있다. 그러나, 경험적인 특성치는 실제 포장체의 거동 특성을 구체적이며 실제적으로 평가하기 어려우며, 설계법이 개발되었던 조건과 상이한 조건에서 적용할 경우 신뢰성에

문제가 있다. 이에 경험적 특성치의 한계를 극복하기 위해 '86 AASHTO 설계법에서는 회복탄성계수(Resilient Modulus : 이하 M_R)를 하부구조 재료의 기본입력 물성치로 적용하였으며, 이후 국내에서도 M_R 값은 포장 설계 및 해석뿐 아니라 포장 평가 및 유지관리 등에도 보편적 개념으로 정착되어 가고 있다. 또한 최초 개발중인 한국형 도로포장설계법에서도 도로의 설계-시공-유지관리로 이어지는 전 공정 중, 설계 및 유지관리는 회복탄성계수를 이용한 역학적 설계법으로 이루어질 예정(국토해양부, 2006~2010)이나, 시공에서는 현재까지도 다짐도와 평판재하시험을 이용하여 관리되고 있다. 이는 설계-시공-유지관리의 불일치라는 역학적 맹점을 갖고 있으며, 이러한 문제를 해결하고자 도로하부 구조의 현장 다짐관리에 다짐 층 탄성계수를 측정할 수 있는 장비 및 다짐관리기법을 위한 연구가 필요한 실정이다.

탄성계수를 이용한 보조기층 다짐관리라 함은 설계 및 시공, 유지관리 전 공정에 탄성계수를 적용하는 방식이다. 이는 입상 보조기층 설계시 회복탄성계수를 사용하므로, 시공과 유지관리에서도 보조기층 현장탄성계수를 측정하여 설계탄성계수 값에 현장탄성계수 값이 부합하는지 여부를 파악하여 관리하는 방식이다. 그러나, 회복 탄성계수는 현장 다짐재료를 표준 M_R 시험으로 측정하고, 현장탄성계수는 선택된 시험장비를 시공현장 다짐 층에 직접적으로 운용하여 측정할 것이다. 따라서, 두 탄성계수 간에 측정방식 및 측정원리 차이가 있다. 이러한 차이로 인해 회복 탄성계수와 현장탄성계수의 직관적인 비교가 어려우며, 두 탄성계수의 비교를 위해서는 상관관계 분석이 이루어져야 한다.

따라서 현재 보조기층 다짐기준인 들밀도 시험과 평판재하시험 값과 설계탄성계수와의 비교를 위하여 현장결과와 현장탄성계수와의 상관성에 대한 분석이 필요하며, 보조기층 다짐시공 현장에서 현장탄성계수를 직접 추출할 수 있는 소형 충격 재하시험(Light Falling Weight Deflectometer ; 이하 LFWD)의 경우에도 실내 회복탄성계수에 근거한 설계탄성계수와의 상관관계분석도 필요한 실정이다.

2. 설계탄성계수 인공신경망 공식 검증

한국형 도로포장설계법에서는 도로 중요도에 따라 보조기층의 설계탄성계수를 결정하고 있으며, 표준 M_R 시험을 실시하거나 국내 보조기층 재료의 표준 M_R 시험 데이터베이스를 통해 설계탄성계수가 결정된다. 이에 본 연구에서는 제안된 국내 입상 보조기층 재료의 표준 M_R 시험 데이터베이스를 이용하여 제시된 인공신경망 공식으로부터 설계탄성계수 값을 산출하였다. 이에 앞서, 인공신경망 공식을 입상 보조기층 재

료의 표준 M_R 시험 데이터베이스에서 재료별로 임의 추출을 통해 사용성을 검증하였다. 검증 방법은 표준 M_R 시험을 실시한 시료의 기초물성 값으로 설계탄성계수를 계산하고, 이 회복탄성계수 값과 설계탄성계수를 실제 차량에 유발되는 응력 범위를 구조해석으로 결장한 후 응력상태에 따라 시험값과 산정값을 비교 분석하였다. 한국형 도로포장설계법에서 국내재료에 대해 제시하고 있는 회복탄성계수 값은 표 1과 같고, 기초물성 값은 표 2(권기철, 2004)이며, 본 연구에서 기초물성 값으로부터 구한 설계탄성계수 값은 표 3과 같다. 표 1의 입상 보조기층 회복탄성계수 값과 표 2의 설계탄성계수 값 중에서 실제 차량이 유발하는 축차응력과 구속응력하에서 발생하는 탄성계수를 찾아야 한다.

이를 위하여, 표 4의 아스팔트 포장 단면을 고려한 모델을 통해 표 5의 설계차량 주행속도에 따른 응력범위를 표 5와 같이 범용 유한요소해석을 실시하여 산정하였다(김지환 외, 2008). 주행 속도에 따른 국내 도로의 설계속도 0~100km/h를 고려하여 설계 차량으로부터 응력 발생범위가 구속응력 8.56~88.44kPa, 축차응력 16.49~228.84kPa임을 알 수 있었다.

표 1. 보조기층 표준 M_R 시험 값

단계	응력상태(kPa)			탄성계수(MPa)						
	구속응력	축차응력	체적응력	SB-1	SB-2	SB-3	SB-4	SB-5	SB-6	SB-7
1	21	21	84	108	124	112	94	98	85	60
2	21	41	104	117	135	119	99	107	93	65
3	21	61	124	115	145	124	103	112	99	71
4	35	35	140	119	140	119	125	136	113	63
5	35	69	174	134	156	128	130	140	119	64
6	35	104	209	145	165	134	135	143	124	77
7	69	69	176	156	187	161	179	191	165	93
8	69	138	345	169	203	165	187	200	175	100
9	69	207	414	180	212	171	187	200	175	104
10	104	69	381	187	221	187	203	221	191	109
11	104	104	416	190	226	189	208	226	195	110
12	104	207	519	206	246	203	221	240	211	123
13	138	104	518	221	258	221	235	256	228	136
14	138	138	552	225	263	227	241	263	232	139
15	138	276	690	244	287	245	258	281	253	155

표 2. 보조기층 표준 M_R 시험 시료의 기초 물성

기초물성	SB-1	SB-2	SB-3	SB-4	SB-5	SB-6	SB-7
γ_{dmax} (t/m ³)	2.36	2.36	2.26	2.04	2.13	2.22	2.21
균등계수	37.5	50	17	33.3	27.3	25	15.9
#4 통과량 (%)	54.4	48.2	51	30.6	46.2	26.2	48.9

표 3. 인공신경망 공식의 설계 M_R 값

응력상태(kPa)				탄성계수(MPa)						
단계	구속 응력	축차 응력	체적 응력	SB-1	SB-2	SB-3	SB-4	SB-5	SB-6	SB-7
1	21	21	84	109.79	136.67	104.58	106.80	120.48	102.44	59.57
2	21	41	104	112.44	139.43	106.80	108.11	121.02	105.31	61.01
3	21	61	124	115.64	142.13	109.08	109.43	121.58	108.23	62.49
4	35	35	140	125.05	152.92	116.90	122.09	134.36	113.99	67.56
5	35	69	174	130.45	157.47	120.86	124.45	135.37	119.18	70.17
6	35	104	209	135.90	162.00	125.09	126.92	136.51	124.69	72.98
7	69	69	176	160.98	190.71	150.15	162.09	172.72	146.57	89.63
8	69	138	345	171.38	199.33	159.05	167.40	175.37	158.72	95.72
9	69	207	414	181.19	207.35	168.57	172.92	178.48	171.56	102.39
10	104	69	381	189.29	223.65	185.05	202.60	218.42	180.75	113.59
11	104	104	416	194.51	228.05	189.67	205.34	219.92	187.44	116.53
12	104	207	519	208.98	240.11	204.21	213.72	225.08	208.15	127.28
13	138	104	518	219.49	256.00	228.76	213.88	272.38	227.17	144.84
14	138	138	552	224.28	264.11	233.57	246.55	274.24	234.39	148.37
15	138	276	690	242.19	279.43	254.57	257.91	283.13	265.33	164.30

표 4. 국내 아스팔트 포장단면을 고려한 단면모델

	표층	표층	기층	보조기층	노상	참고사항
두께(cm)	하	5	15	30	-	* 임반층 : 8m(가정)
	중	10	25	40	-	
	상	20	35	60	-	
탄성계수 (kg/cm ²)	하	하중주파수 및 온도에 따른 탄성계수		K-θ 모델을 이용한 비선형 탄성계수		
	중					
	상					
포아송비	0.3	0.3	0.35	0.4		
단위중량(kg/cm ³)	0.00235	0.00235	0.0023	0.00191		
온도(°C)	시험도로 표면온도 : 52.5°C(2004.7.22), -4.5°C(2004.1.3)					
Speed(Km/h)	10, 30, 60, 100					

표 5. 속도에 따른 비구속층의 응력범위 산정(KPa)

응력종류	층	차량주행속도			
		10km/h	30km/h	60km/h	100km/h
수직응력 범위	보조기층	43.96~228.84	26.64~90.09	19.54~48.89	16.49~37.59
	노상	43.50~51.05	35.52~40.31	32.84~37.56	32.09~36.81
구속압 범위	보조기층	21.01~88.44	14.06~31.52	10.12~19.92	8.56~16.40
	노상	28.04~31.74	25.21~28.87	24.26~27.92	27.65~23.99

따라서, 응력상태에 따른 여러 탄성계수 값 중에서 주행 속도에 따른 구속응력과 축차응력중간 값인 9단계 범위에서 표준 M_R 시험의 9단계 탄성계수와 9단계 설계 탄성계수 값을

표 6과 같이 비교함으로써 인공신경망 공식의 사용성을 분석하였다.

표 6. 보조기층 표준 M_R 시험과 설계탄성계수 값의 오차율

	SB-1	SB-2	SB-3	SB-4	SB-5	SB-6	SB-7
표준 M_R 시험값	180	212	171	187	200	175	104
인공신경망 설계 M_R 값	181.2	207.4	168.6	172.9	178.5	171.6	102.4
오차율(%)	-0.66	2.19	1.42	7.53	10.76	1.97	1.55

표 6에서 보는 바와 같이 본 연구에서 이용하고자 하는 인공신경망 공식의 설계탄성계수 값은 표준 M_R 시험값과 SB-4, SB-5를 제외하고는 오차율 $\pm 2\%$ 이내의 정확한 값을 계산하고 있음을 확인하였다. 이는 표준 M_R 시험을 대신하여 인공신경망 공식이 설계탄성계수를 추정할 수 있음을 알 수 있었다.

3. 보조기층 현장시험 결과 분석

LFWD를 이용한 보조기층 탄성계수 측정 및 다짐관리 연구를 위하여 그림 1과 같이 전국지역을 고려하여 5 구간에서 현장 시험을 실시하였다. 각 구간 당 12개 지점의 LFWD 시험과 들밀도 시험을 수행하였으며, 각 구간의 대표 1 지점에서 평판재하시험을 수행하였다.

총 60개 지점의 데이터를 표 7과 같이 정리하였으며 LFWD 탄성계수 E_{LFWD} 와 평판 재하시험의 K_{30} , 다짐도 외에도 현장 시료의 기본 물성값을 이용하여 인공신경망 공식에 의해 설계 탄성계수 값도 추출하였다.

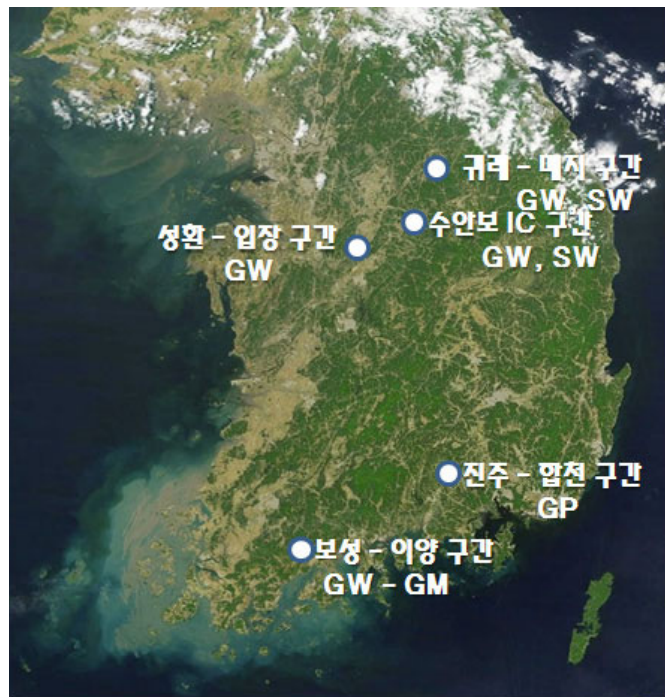


그림 1. 현장시험 구간

표 7. 현장시험 데이터 정리

구간	지점	흙분류	다짐도 (%)	K ₃₀ (MN/m ³)	E _{LFWD} (MPa)	설계탄성 계수(MPa)	
귀래 - 매지 국도	A-1	GW-GM	89.12	300.80	215	84.98	
	A-2	SW	96.11		259	274.50	
	A-3	GW	88.00		205	296.37	
	A-4	GW	97.22		210	297.11	
	B-1	GP	89.88		158	119.55	
	B-2	GW	91.33		303	313.85	
	B-3	SP	104.00		148	330.80	
	B-4	SW	97.22		119	121.65	
	C-1	GW	89.23		151	169.74	
	C-2	GP	92.23		130	294.59	
	C-3	GW	99.12		157	206.37	
	C-4	GW-GM	90.00		132	498.64	
	2+960	GW	95.01		315.94	218	288.59
	2+900	GW	96.23		297.35	189	296.44
	2+840	GW	98.17		328.79	197	304.38
	2+780	GW	97.88		288.74	177	188.65
보성 - 이양 국도	A-1	GW	88.65	276.51	66	552.54	
	A-2	GW	90.44		98	208.97	
	A-3	GW	82.21		77	240.96	
	A-4	GW	87.82		100	271.14	
	B-1	GW	92.22		100	446.26	
	B-2	GW	93.06		83	468.46	
	B-3	GW	103.55		98	301.92	
	B-4	GW	95.24		116	103.25	
	C-1	GW	78.11		105	108.26	
	C-2	GW	91.28		145	40.03	
	C-3	GW	91.04		93	86.63	
	C-4	GW	92.43		102	55.93	
수안보 IC	A-1	SW	95.49	342.26	270	321.54	
	A-2	SW	93.23		154	329.63	
	A-3	GW	94.23		81	293.11	
	A-4	SP	91.25		48	294.12	
	B-1	SW	95.46		170	267.26	
	B-2	SW	73.61		185	185.11	
	B-3	SW	94.20		90	374.56	
	B-4	GW	94.54		58	309.18	
	C-1	GW	93.44		136	329.50	
	C-2	GW	96.32		218	332.99	
	C-3	GW	95.46		98	167.76	
	C-4	GW	92.55		110	328.07	
진주 - 합천 국도	A-1-A	GP	93.62	312.44	155	233.88	
	A-1-B	SW	95.46		144	235.91	
	A-2-A	GW-GM	93.71		89	227.92	
	A-2-B	GW-GM	94.91		97	210.58	

<표 계속>

진주 - 합천 국도	B-1-A	GW	93.16	343.28	74	210.93
	B-1-B	GW	94.88		81	216.70
	B-2-A	GW	96.21		102	216.65
	B-2-B	GW	94.12		109	275.50
성환 - 입장 국도	A-1	GW	-	343.28	110	-
	A-2	GW	95.23		119	122.23
	A-3	GW	-		115	-
	A-4	GW	88.98		113	266.76
	B-1	SW	91.44		72	183.86
	B-2	GW	94.00		75	342.52
	B-3	GW	92.56		81	245.11
	B-4	GW	92.23		125	176.35
	C-1	SW	95.66		77	170.91
	C-2	SW	95.44		60	168.80
	C-3	SW	96.12		59	168.06
	C-4	GW	96.12		74	207.87

3.1. 설계탄성계수 분포 특성 분석

표 7의 현장시험 데이터들은 각 구간의 지점끼리 약 6m 간격으로 떨어져 있다. 각 구간을 구분하기 위하여 10m 간격을 두고, 총 60개 모든 데이터를 일직선으로 연결하여 420m로 나열한 분포도는 그림 2와 같다.

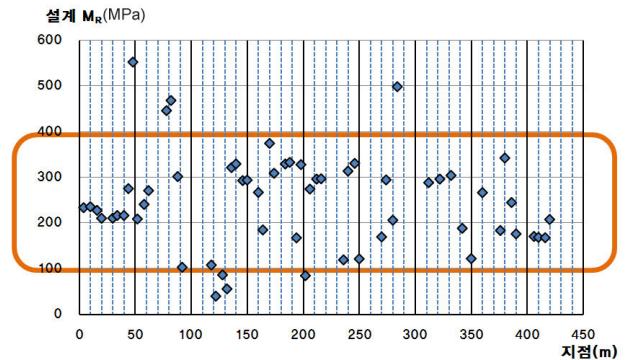


그림 2. 설계탄성계수의 분포

현장 데이터 60개 지점을 나열한 결과 5개 지점을 제외한 55개 지점이 표 6의 표준 MR 시험 최소값 104MPa 이상을 만족하였다.

3.2. LFWD 탄성계수 분포 특성 분석

표 7의 E_{LFWD} 데이터를 그림 3과 같이 나열한 결과, 현장 E_{LFWD} 데이터는 50~200MPa 범위에 집중되어 있음을 알 수 있다. 또한, 선으로 묶은 바와 같이 약 100m 간격으로 서로 뭉쳐 있으며, 데이터 분포형태도 약 100m 간격으로 변하는 것을 알 수 있다.

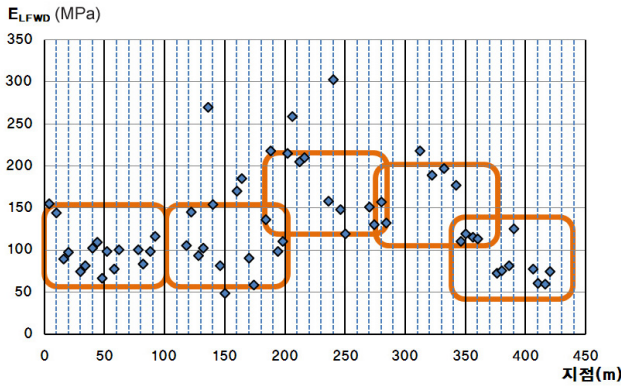


그림 3. E_{LFWD} 분포

현재, 도로공사 표준 지침서(국토해양부, 2009)에 따르면 평판재하시험기준은 2차로 기준 200m 당 1회이며, 현장에서 평판재하시험 소요시간은 대략 1시간 정도 된다. 그러나, LFWD 시험은 한 지점 당 15분 정도 소요되므로, 이를 2차로 기준 100m 당 1회씩 실시한다면 평판재하시험보다 약 2배 이상의 현장 효율성을 높일 수 있을 것이다.

4. 현장시험을 통한 상관관계식 제안

입상 보조기층의 탄성계수를 이용한 역학적 다짐관리 일원화를 위해서는 설계탄성계수와 현장에서 측정되는 탄성계수를 비교할 수 있어야 한다. 따라서 기존의 다짐관리장비를 통해 산정되는 다짐도와 평판재하시험결과인 K_{30} 으로부터 탄성계수와와의 관계를 정립하거나 현장탄성계수를 바로 측정하는 다짐관리장비가 필요하다. 본 연구에서는 기존 다짐관리장비를 통한 다짐도 및 평판재하시험 결과 K_{30} 과 설계탄성계수와의 상관관계를 비교 분석하였다. 또한 현장에서 현장탄성계수를 직접 추출하는 LFWD시험의 경우, 설계탄성계수는 현장시료의 기초물성을 이용한 인공신경망 공식으로 산정하고, 현장탄성계수는 시공현장 다짐 층에서 측정하는 것으로, 측정 방식 및 원리에 차이가 있다. 이러한 차이로 인해 설계탄성계수와 현장탄성계수의 직접적인 비교가 불가하므로 본 연구에서는 설계탄성계수와 회복탄성계수 값간의 상관관계를 비교 분석하였다.

4.1. 설계탄성계수와 다짐도 상관관계 분석

기존 다짐관리 시험법인 다짐도와 평판재하시험으로도 보조기층의 현장 탄성계수 측정 가능여부를 알아보고자 설계탄성계수와 두 시험법 간의 상관관계를 분석하였다. 먼저, 채취 시료의 기초물성 값으로 구한 설계탄성계수와 시료 채취 지점의 다짐도 간의 상관관계를 분석한 결과 설계탄성계수와 다짐도 상관관계는 그림 4와 같이 보조기층 모두 결정계수 R^2 값 0.05 이하로 매우 낮은 상관관계를 보임을 알 수 있다.

이는 설계 탄성계수가 재료적 특성을 이용한 물성치지만, 다짐도는 재료적 특성이 아닌 모든 보조기층의 획일적 기준이기 때문이다. 따라서, 다짐도는 현장 탄성계수 측정을 위한 개별적 현장 시험법으로 부적합함을 알 수 있다.

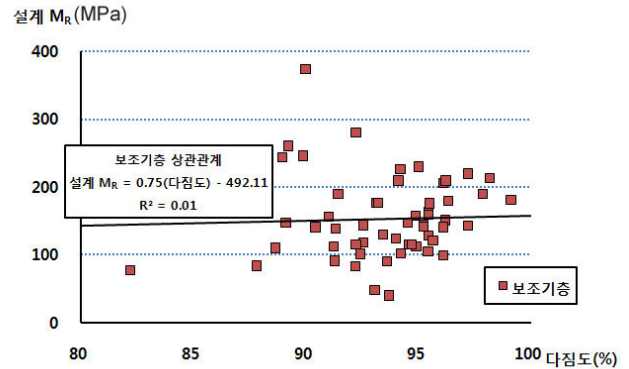


그림 4. 설계 M_R 과 다짐도 상관관계

그러나, 반복재하시험 표준 M_R 시험에도 다짐도 95% 이상은 시료 성형조건이며, 현장에서 시료가 가지는 최대 탄성계수를 발휘하기 위해 다짐도 95% 이상 기준은 필요하므로 탄성계수를 이용한 다짐관리에서 다짐도는 다짐관리 기준이 아닌 다짐 품질 기준으로 제안하고자 한다.

4.2. 설계탄성계수와 K_{30} 상관관계 분석

기존 다짐관리 시험법 중 평판재하시험을 통한 현장 탄성계수 측정 가능성을 분석하기 위하여, 현장시험에서는 현장 시험 한 site 당 1~2 지점에서 평판재하시험을 실시하였으며, 5site에서 총 8개의 K_{30} 값을 얻었다. 설계 M_R 값은 평판재하시험을 실시한 지점의 시료를 채취하여 기초물성을 측정하고, 이를 인공신경망 공식에 대입하여 산출하였다. 두 시험값간의 데이터 분석 결과는 그림 5와 같다.

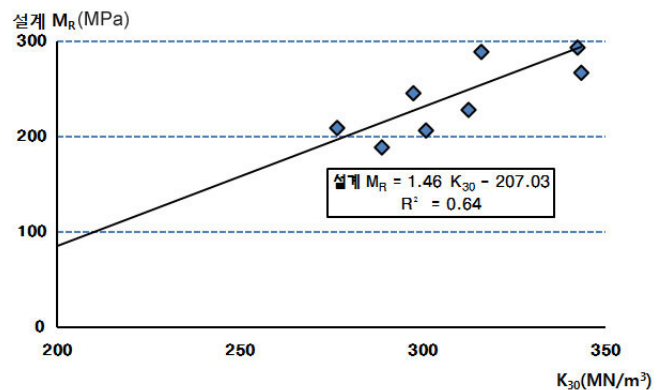


그림 5. 설계 M_R 과 K_{30} 상관관계

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

$$R^2 = 0.64$$

여기서, $M_R = \text{MPa}$
 $K_{30} = \text{MN/m}^3$

현재 보조기층 K_{30} 값 기준은 아스팔트 콘크리트의 경우 294.2MN/m^3 이며, 시멘트 콘크리트의 경우 196.1MN/m^3 이다. 이를 그림 5의 상관관계식 식 (1)에 대입하면 아스팔트 콘크리트의 경우 설계 M_R 값은 222.5MPa 이상 나와야 하며, 시멘트 콘크리트의 경우 설계 M_R 값은 79.28MPa 이상 나와야 한다. 그러나, 보조기층 재료에 따라서는 222.5MPa 이 안되는 경우가 발생하므로 이 기준을 적용 시 사용할 수 없는 재료들이 발생한다. 따라서, 현재 일률적인 기준값 적용보다는 설계탄성계수에 근거하여 현장에서 사용하는 재료에 대한 다짐관리가 필요하다. 보조기층에서 평판재하시험을 이용한 현장탄성계수와 설계탄성계수를 다짐관리에 적용한다면 이는 그림 6과 같은 단계로 적용할 수 있다.

먼저, 보조기층 재료의 기본물성 값을 이용하여 설계탄성계수 값을 산정하거나 도로설계시의 보조기층 설계탄성계수를 통해 현장기준 설계 K_{30} 을 결정한다. 둘째, 다짐품질관리 기준인 다짐도 95% 이상 지점에서 평판재하시험을 실시하여 현장 K_{30} 을 측정한다. 셋째, 설계 K_{30} 과 현장 K_{30} 을 비교하여 현장 K_{30} 이 더 큰 경우 설계탄성계수가 요구하는 탄성계수를 현장에서 만족하였음을 확인한다.

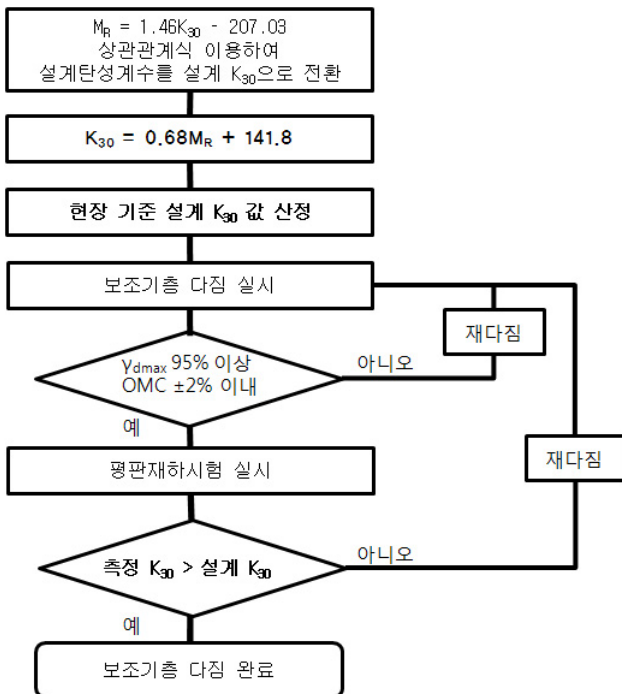


그림 6. 평판재하시험을 이용한 보조기층 다짐관리방안 제안

4.3. 설계탄성계수와 E_{LFWD} 상관관계

보조기층 현장 시험을 통한 표 7의 설계탄성계수와 E_{LFWD}

상관관계는 그림 7과 같다.

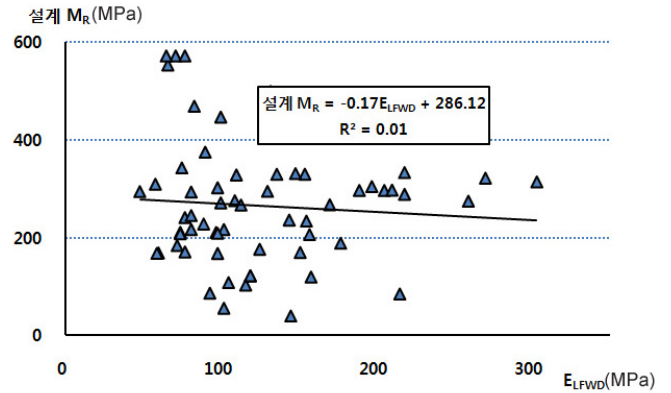


그림 7. 설계 M_R 과 E_{LFWD} 상관관계

그림 7에서 결정계수 R^2 값이 0.01로 매우 낮게 나타나는 것은 보조기층 재료의 특성이 반영되지 않았기 때문으로 사료된다.

따라서, 설계 기준인 설계탄성계수와 현장 시험으로 얻은 E_{LFWD} 와의 상관관계를 보다 효과적으로 분석하기 위하여 전체 데이터를 재료 특성별로 분류하여야 하며 이를 위해, 다음과 같은 분석을 실시하였다.

첫째, 표준 실내 M_R 시험은 다짐도 95% 이상의 시료를 이용하여 수행하므로, 현장 데이터 중 상대 다짐도 95% 이상 지점의 데이터를 그림 8과 같이 재정리하였다.

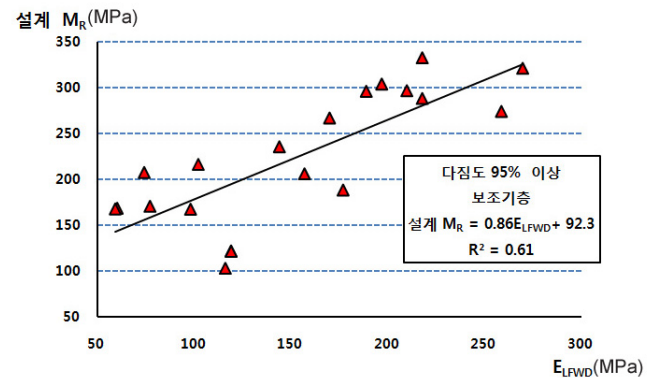


그림 8. 다짐도 95% 이상의 설계 M_R 과 E_{LFWD} 상관관계

$$\text{설계 } M_R = 0.86E_{LFWD} + 92.3 \quad (2)$$

$$R^2 = 0.61$$

여기서, $M_R = \text{MPa}$

$E_{LFWD} = \text{MPa}$

둘째, 설계탄성계수는 다짐 재료 고유의 역학적 특성을 반영하므로 표 7의 보조기층 전체 5종류의 흙을 통일 분류법 기

준에 따라 자갈질과 모래질로 나누어 상관관계를 분석한 결과, 다짐 재료에 따라 E_{LFWD} 와 설계탄성계수와와의 상관관계 경향이 서로 다를 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 보조기층 재료별로 상관관계식을 식 (3)과 식 (4)로 제안하였다.

자갈질 보조기층

$$\begin{aligned} \text{설계 } M_R &= 1.40E_{LFWD} & (3) \\ R^2 &= 0.71 \end{aligned}$$

모래질 보조기층

$$\begin{aligned} \text{설계 } M_R &= 0.92E_{LFWD} + 79.32 & (4) \\ R^2 &= 0.78 \end{aligned}$$

여기서, $M_R = \text{MPa}$

$E_{LFWD} = \text{MPa}$

식 (3), 식 (4)를 이용하여 보조기층 다짐관리에 LFWD 시험을 적용한다면, 이는 그림 9와 같은 단계로 적용할 수 있을 것이다. 먼저, 보조기층 재료의 입도분석 시험을 통해, 자갈질과 모래질로 판별하여, 적용되는 상관관계식을 확인한다. 둘째, 보조기층 재료의 기초물성값을 상관관계식에 대입하여 설계기준 E_{LFWD} 값, 또는 도로설계시의 보조기층 설계탄성계수를 통해 현장기준 설계 LFWD 탄성계수를 결정한다. 셋째, 다짐품질관리 기준인 다짐도 95% 지점에서 LFWD 시험을 실시하여, 현장 탄성계수를 얻는다. 넷째, 설계기준 E_{LFWD} 와 현장탄성계수 E_{LFWD} 를 비교하여 현장탄성계수 E_{LFWD} 가 더 크면, 보조기층 설계 탄성계수를 현장 탄성계수가 만족한다고 판별할 수 있다.

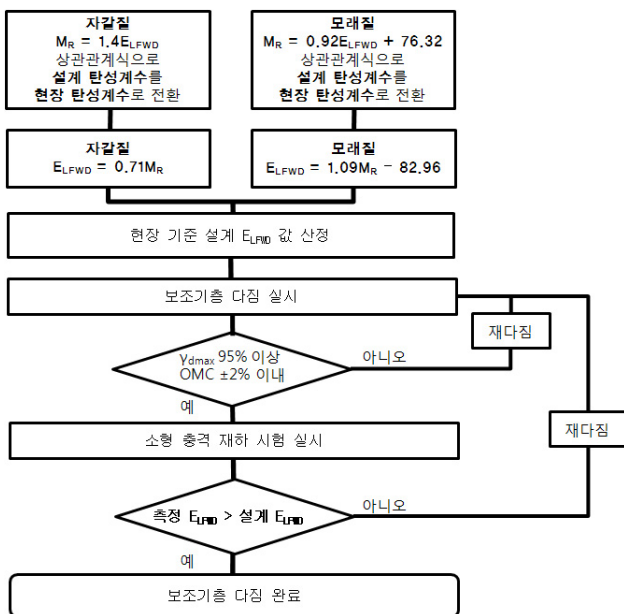


그림 9. LFWD를 이용한 보조기층 다짐관리방안 제안

5. 결론

본 연구는 밀도 개념의 들밀도 시험의 다짐도 측정과 강도 개념의 평판재하시험으로 평가하고 있는 보조기층 다짐관리 방법을 설계 입력 변수인 회복탄성계수를 이용한 다짐관리 방법으로 활용할 수 있도록 제안하였다. 이를 위하여 기존 다짐관리 시험인 들밀도 시험과 평판재하시험(PBT)의 시험결과와 현장탄성계수와와의 상관성 분석 및 현장에서 탄성계수를 바로 측정할 수 있는 소형충격재하시험(LFWD)을 현장다짐관리에 활용할 수 있는 방법을 제시하는 연구로서, 연구 결과는 다음과 같다.

1. 현재 다짐관리 기준인 다짐도는 보조기층 재료 구분없이 다짐도 95% 이상을 확일적으로 적용하나 보조기층 다짐시공 현장시험결과 다짐도와 회복탄성계수의 상관관계는 매우 낮음을 알 수 있었다. 그러나 다짐도 95% 이상은 실내시험인 반복재하식 표준 M_R 시험 시료 성형조건이다. 따라서 도로포장설계시 사용재료의 탄성계수를 결정하기 위해 실시하는 실내시험조건을 고려하여 최적의 현장탄성계수 구현을 위한 기본조건으로서 다짐도는 보조기층 품질기준으로 제안하였다.
2. 현재 다짐관리 시험법인 평판재하시험은 현장 탄성계수를 측정할 수 있는 시험법으로, 설계 탄성계수와와의 상관관계식을 식(1)과 같이 제안하였다.
3. 국내 5개 구간의 보조기층 다짐시공 현장시험을 통해 설계탄성계수와 E_{LFWD} 값간의 상관관계식을 통일분류법 기준에 따라 자갈질과 모래질에 따라 제안하였고, LFWD 시험간격을 탄성계수 변화구간을 고려하여 식(3), 식(4)와 같이 제안하였다.
4. 연구에서는 현장 다짐관리 시 기존 다짐관리시험방법인 평판재하시험과 현장탄성계수 측정시험인 LFWD시험을 통한 도로설계 시 적용된 설계탄성계수 구현을 위한 다짐관리 방안을 제시하였다.

감사의 글

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

참고 문헌

- 국토해양부(2009) “도로공사 표준 시방서”
 권기철(2004) “국내 보조기층 재료의 변형특성을 고려한 전체 변형률 영역의 구성모델 개발”, 한국도로학회 논문집, pp. 65~77
 김지환, 강병준, 이준환, 최준성(2008) “응력의존성을 고려한 보조기층 해석모델 개발”, 대한토목학회 2008년도 학술발표회 논문집

김종민, 최준성, 한진석, 김부일(2008) “노상 및 보조기층의 평판 재하시험 대체를 위한 소형 충격재하시험 활용방안 연구”, *한국도로학회 2008 학술발표회 논문집*

박현일, 권기철, 오세봉(2005) “인공신경망 모델에 근거한 노상도 및 보조기층 재료의 탄성계수 추정”, *대한토목학회 논문집*, pp. 61~71

최준성, 김인수, 김수일(2002) “도로포장 구조체의 물성추정을 위한 비파괴 시험장비와 국산화 연구”, *대한토목학회 2002년도 학술발표회 논문집*, pp. 209~212

최준성, 김종민, 김부일, 한진석(2006) “탄성계수에 근거한 포장하부구조 다짐기준 정립을 위한 기초 연구”, *한국도로학회 2006 학술발표회 논문집*

최준성, 김종민, 김부일, 한진석(2009) “노상 및 보조기층의 소형 충격 재하시험 활용방안 연구”, *한국도로학회 논문집*, pp. 85~98

한국형 도로포장설계법 개발과 포장성능 개선 방안 연구(2006, 2007, 2008, 2009) “C 도로포장 하부구조 다짐관리 지침개발 연구”

접 수 일 : 2010. 1. 19
 심사 일 : 2010. 1. 20
 심사완료일 : 2010. 12. 3