

시험성토 단면에서의 다짐에너지에 따른
LFWD 변형계수의 변화
**LFWD Deformation Modulus changes which follows in Compaction
Energy from Tentative Embankment Section**

최찬용* 김현기** 배재훈***
Choi, Chan-Young Kim, Hyun-Ki Bae, Jae-Hoon

Abstract

PLT where from site is used mainly with compaction maintenance of quality, CPLT and LFWD, in order to be a Young's modulus of using a direct arrival wave executed a site experiment. According to the roller compaction number of times measured the degree which changes and a promise management aptitude evaluation executed.

1. 서론

토공부의 다짐을 관리하고 평가하는 방법은 시방기준에 지지력 판정과 밀도 관리로 토공의 다짐상태를 객관적으로 평가하고 있다. 다짐이란 원리적으로 흙(soil matrix)에 존재하는 공기를 최대한 제거하여 흙을 촘촘한 상태로 만드는 것을 말하며 이를 위하여 에너지가 소요되게 한다. 이 때 잘 다져질수록 단위체적 당의 흙 입자 알갱이의 무게가 증가하게 된다. 즉, 흙의 건조단위중량이 증가하게 된다. 많이 다진다고 해서, 모든 흙이 다 잘 다져지는 것은 아니며 흙의 종류와 다짐에너지가 큰 영향이 있다. 입도분포가 좋은 모래섞인 실트(sand silt)가 큰 건조중량으로 가장 잘 다져지고, 다짐에너지가 클수록 최대건조중량이 증가하고 최적함수비는 감소한다.

토공의 다짐 품질평가 방법으로 가장 많이 사용하는 방법은 평판재하시험을 이용하는 방법이다. 평판재하시험은 건설 현장에 토공 다짐관리를 위해 1980년대부터 사용한 방법으로 다른 어떤 실험방법보다 사용자가 손쉽게 실험할 수 있으며 익숙하게 적용되는 실험방법이다. 가장 많이 사용하는 방법에도 불구하고 평판재하시험은 큰 하중 반력대가 필요하고 협소한 장소에서는 사용이 제한되고 한 개소에서 시험시간이 약 2시간 소요되는 등 실험상의 단점을 가지고 있다. 이러한 실험의 한계를 보완하여 독일 등 유럽에서는 시험시간을 줄이기 위해 반복평판재하시험을 통해 한 개소에서 소요시간을 약 30분까지 단축시키는 시험방법이 제안되었다. 또한 국외에서는 재하시험방법의 단점을 보완하고자 비파괴 다짐 품질관리 시험방법으로 중추낙하시험법의 일종인 FWD, 그리고 소형 FWD, 동평판재하시험 등 다양한 시험방법에 개발되고 있다. 따라서 본 논문에서는 LFWD시험장비로 구한 변형계수(E_{LFWD})

* 최찬용, 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부, 정회원

E-mail : cychoi@krri.re.kr TEL : (031)460-5317 FAX : (031)460-5319

** 김현기, 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부, 정회원

E-mail : hkkim@krri.re.kr TEL : (031)460-5770 FAX : (031)460-5319

*** 배재훈, 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부, 비회원

E-mail : jhbae@krri.re.kr TEL : (031)460-5380 FAX : (031)460-5319

가 소형다짐롤러와 실제 건설현장에서 사용되는 롤러를 이용하여 LFWD시험장비로 구한 변형계수가 롤러 다짐횟수에 따라 변화되는 정도를 평가하기 위해 시험성토단면에서 실험을 실시하였다. 또한 현장 들밀도 시험과 평판재하시험(반복평판재하시험, 평판재하시험)을 실시하여 LFWD 장비를 이용한 다짐관리 적정 여부를 평가하였다.

2. 토공 다짐품질관리 시험

2.1 국내 토공 다짐품질기준

1) 철도 건설

국내 철도건설 기준은 일반철도의 경우 철도설계기준(2004)과 고속철도의 경우 고속철도공사 전문시방서(2003)에 명시되어 있으며, 일반철도의 경우 상부노반의 기준이 하부노반 기준보다 엄격히 관리되고 있다. 고속철도의 경우 일반철도기준보다는 약간 엄격하게 관리하고 있으며, 강화노반층을 입도에 따라 보조도상층과 입도조정층으로 구분하여 관리되고 있는 것을 알 수 있다. 표 1은 일반철도와 고속철도의 다짐시험 판정기준을 나타내었다. 일반철도, 고속철도 모두 다짐도를 상□하부 노반에 따라 관리하고 있으며, 다짐도를 최소 90%~100%이상으로 다지며, 노반 품질관리를 평판재하시험의 반복법($E_{1/2}$)과 비반복법(k_{30})에 의해서 관리를 하고 있다. 이러한 설계방법으로 설계를 수행할 시 노반을 보강하는 토목섬유 등 지지력 증가하는 영향이 매우 미소하게 작용하여 과대 설계가 되는 경우가 종종 발생할 수 있다.

표 1. 다짐시험에 대한 판정기준

적용	구 분	상부노반		하부노반	
		강화노반	흙노반		
일반 철도	1층 다짐 완료후의 두께(cm)	15 이하	30 이하	-	
	다짐도 (%)	95	95이상	90이상	
	다짐방법	D	D	A, D*	
	평판 재하	침하량 (cm)	0.125	0.125	0.125
		지지력계수 ($K_{30} : kg/cm^3$)	7이상 11이상	11 이상	7 이상
고속 철도	1층 다짐 완료후의 두께(cm)	보조도상	20이하	30이하	50이하
		입도조정층	30이하		
	다짐도 (%)	보조도상	100이상	95이상	90이상
		입도조정층	-		
	다 짐 방 법	보조도상	D	D	D
		입도조정층	-		
	평판 재하	보조도상	$Ev2 \geq 120MN/m^2$ $Ev2/Ev1 < 2.2$	$Ev2 \geq 80MN/m^2$ $Ev2/Ev1 < 2.3$	$Ev2 \geq 60MN/m^2$ $Ev2/Ev1 < 2.7$
입도조정층		$Ev2 \geq 80MN/m^2$ $Ev2/Ev1 < 2.3$			

2) 도로

평판재하시험이 널리 사용되고 있으며 측정방법이나 결과의 평가, 설계에서의 적용법 등이 거의 확립되어 있다. 포장설계를 위한 평판재하시험은 반복시험과 비반복 시험으로 구분하고 있는데, "비행장 및 도로 포장의 평가와 설계를 위한 흙과 가용성 포장의 반복 평판재하시험 방법(KS F 2338)"과 "비행장 및 도로 포장의 평가와 설계를 위한 흙과 가용성 포장의 비반복 평판재하시험 방법(KS F 2339)"에서 시험법이 규정되어 있다. 이밖에도 도로의 노상, 노반에서의 지지력계수를 구하기 위한 시험법이 "도로의 평판재하시험 방법(KS F 2310)"에 별도로 규정되어 있으나 앞에서 설명한 비반복 평판재하시험법과 별반 크게 차이

가 나지 않는다(한국지반공학회, 2003). 표 2는 도로설계편람(2000)에 기재되어 있는 노상 재료의 품질 기준을 나타낸 것이다. 표 2에서 상부노상과 하부노상으로 구분하였는데, 하부노상은 노체에 해당되고, 상부노상은 일반적인 노상에 해당된다.

표 2. 노상의 다짐 조건(건설교통부, 2000)

구분	상부노상	하부노상	비고	
시공 조건	시공층 두께	20cm 이하		
	함수비	다짐도 및 수정 CBR 10 이상을 얻을 수 있는 함수비, 최적함수비 $\pm 2\%$	다짐도 및 수정 CBR 5 이상을 얻을 수 있는 함수비	
다짐 후의 조건	다짐도	95% 이상	90% 이상	
	지지력계수 ($k_{30}, kg/cm^3$)	시멘트 콘크리트 포장	아스팔트 콘크리트 포장	각층마다 흙의 다짐시험 C, D 또는 E 방법에 의하여 정해진 최대건조밀도에 대한 다짐도
		15이상	20이상	
	허용 침하량	5mm 이하	-	타이어 롤러의 복륜하중 5톤 이상, 타이어 접지압 $5.6 kg/cm^2$ 에 의한 프루프 롤롤링(proof rolling)
마무리면의 규격	<input type="checkbox"/> 도로 중심선에 평행 또는 직각방향으로 3m 직선자를 이용하여 평탄성을 측정할 때 최요부의 깊이가 2.5cm 이하, 고속도로의 경우 1.0cm 이하 <input type="checkbox"/> 흙쌓기 또는 땅깁기 마무리면의 시공오차는 $\pm 3cm$ 이내			

2.2 토공 다짐품질관리 시험의 종류 및 특징

국내 건설현장에서 하부구조의 지지력을 평가하기 위하여 다양한 시험법들이 제시되고 있다. 하부구조의 지지력 평가 방법으로 가장 많이 사용하고 있는 PBT(Plate Bearing Test)와 1990년 이후 고속철도 시공시 국내에 도입된 미국의 LFWD(Light Falling Weight Deflectometer), PBT의 변형인 독일의 Ev_2 평가법(반복평판재하시험)이 있다. 표 3은 노반의 강성평가를 위한 각 시험법에 대하여 비교를 하였다.

표 3. 노반의 강성평가 시험방법의 비교

시험종류	측정치	추정치	장점	단점
평판재하시험 (KS F 2310)	하중, 변위	지지력계수 허용지지력 탄성계수	-현장지지력 평가방법으로 널리 사용 -하중, 변위로부터 역학적 특성치 결정가능	-하중반력 필요 -재하판의 크기로 인한 실제 구조물보다 작은 응력범위 -지하수 및 시간효과 미 고려 -시험시간 장시간소요
반복평판재하시험 (KS F 2338)	하중, 변위	Ev_1, Ev_2	초기재하단계에서의 소성변형 배제한 노반의 경험 있는 사용 하중단계에서의 변형 특성치 결정	-하중반력 -장래의 지반의 악화조건 평가 미흡
FWD 및 LFWD	하중, 변위, 재하시간, 가속도	탄성계수	-층의 종류에 따라 재하판의 면적변경가능 -신속하고 간편하며 장소에 제약받지 않음	충격하중의 범위
현장CBR (KS F 2320)	관입저항치	CBR값	-노상, 노반 다짐도 관리 및 성토시공중 증장비의 주행성판정 이용 -도로 등 포장설계법에서 주로 사용	-CBR포장설계 과대 설계 -기상변화 및 장래악화조건 미 고려
DCP	관입저항치	DCP 지수 CBR값	-DCP지수를 통해 CBR 추정 -쉽고 빠르게 시험결과 도출	-자갈 및 암성토에서 적용불가능

3. 시험성토

3.1 시험성토 단면

현장에서 다짐품질관리로 주로 사용되고 있는 반복 □ 비반복평판재하시험과 LFWD, 직 접도달과를 이용한 영계수를 산정하기 위하여 현장실험을 실시하였다. 현장시험구간은 본 연구원의 신축공사부지로 L=4m, H=8m로 구간을 선정하여 총 8개 site로 백호를 이용하여 총 3개층으로 성토하였으며, 성토시에는 롤러의 왕복횟수별로 다짐도를 다르게 하여 각 실험을 실시하였다. 1층은 원지반에서 50cm성토 후 롤러 10회로 다짐하였으며, 2층과 3층은 2, 6, 10, 22회로 롤러 왕복횟수를 달리하여 다짐을 실시하였다. 사진 1은 시험성토구간의 현장사진으로 성토단면을 실제 10톤 진동다짐롤러로 다짐을 실시하는 것과 LFWD 시험, 평판재하시험 등을 수행하는 장면이다. 또한 각 층별 높이를 정확하게 측정하기 위하여 레벨 측량을 통해 노반두께를 측정하는 사진을 나타내었다. 그림 1은 현장실험 구간과 구간 단면을 나타내었다.



사진 1. 시험성토구간 현장사진

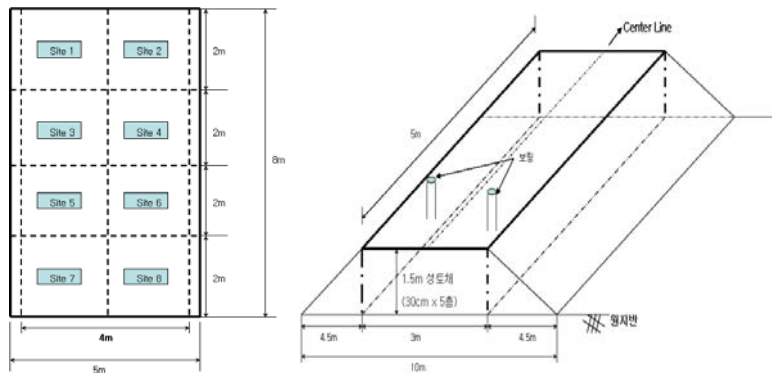


그림 1. 연구원 부지 구간단면

3.2 시험성토 단면에서 실시한 실험항목

표 4는 시험성토 단면에서 실시한 실험항목을 정리하였다. 본 논문에서는 재하시험결과와 LFWD의 변형계수의 결과를 중심으로 분석하였다.

표 4. 위치별 실험 실시여부

층 구분	다짐횟수 (롤러)	Site (1~8)	실험별 실시여부				
			LFWD	K_{30}	Ev	단위중량 실험	탄성과 실험
원지반	-	Site 1~8	-	-	-	-	-
1 층	10회다짐	Site 1~8	○	○	○	○	○
	2회다짐	Site 1~8	○	○	○	○	○
2 층	6회다짐	Site 1~8	○	○	○	○	○
	10회다짐	Site 1~8	○	○	○	○	○
3 층	2회다짐	Site 1~8	○	○	-	○	○
	6회다짐	Site 1~8	○	○	○	○	○
	10회다짐	Site 1~4	○	○	○	○	○
	22회다짐	Site 1~4	○	○	○	○	○

3.3 성토재료 물성값

현장에서 사용된 성토재료에 대한 기본물성 시험결과와 입도분포곡선은 그림 2와 같다. 성토재료의 흙의 종류는 통일분류법에 의거하여 SP계열이며, 비중 2.27, 최적함수비 15%, 평균 건조밀도(γ_{dmax})는 1.8~1.9gf/cm³이다.

구 분	측정치
계열	SP
조립률	2.94
비중	2.27
평균함수비	15%
평균건조밀도(γ_{dmax})	1.8~1.9

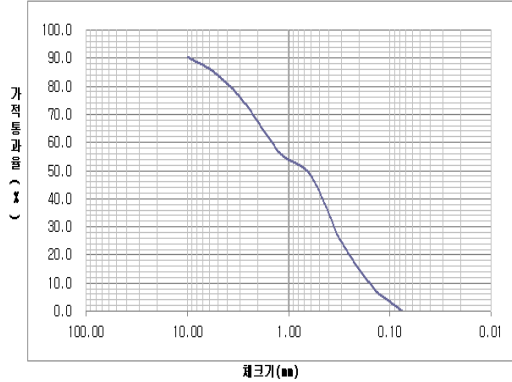


그림 2. 성토재료의 기본물성 및 입도분포 곡선

4. 실험결과 및 분석

4.1 들밀도 및 재하시험결과

본 연구에서 수행한 다양한 품질시험간의 상관성 및 LFWD 장비의 실제 다짐롤러 회수에 따른 지지력 변화 등을 검토하기 위하여 실험을 실시하였다. 표 5는 각 층별 구간 단면에서의 들밀도 실험결과를 나타내었다. 동일한 다짐을 받는 층에서도 구간 단면(Site 1~8)의 들밀도 결과가 상이하게 나오는 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 결과를 볼 때 현장에서 들밀도 실험의 오차는 상당히 포함되어 있는 것으로 판단되며 이를 정량적으로 평가할 수 있는 실험방법이 개발되어야 할 것으로 판단된다. 특히, 입상재료와 같이 입경크기가 큰 지반의 경우에는 더 큰 오차를 포함할 수 있을 것으로 사료된다. 국내 시방기준에서 제시하고 있는 밀도관리는 공용 중 압축침하에 많은 영향을 미치기 때문에 고속철도와 같이 공용중의 허용 침하량을 엄격하게 적용하는 경우에는 특히 더 주의하여야 할 것으로 판단된다. 현장에서 구한 들밀도 시험결과 다짐횟수가 증가함에 따라 점진적으로 증가하는 경향을 보이고 있으며 다짐횟수 10회에 다소 감소하다가 재 증가하는 경향을 보이고 있다.

표 5. 현장 들밀도 실험결과

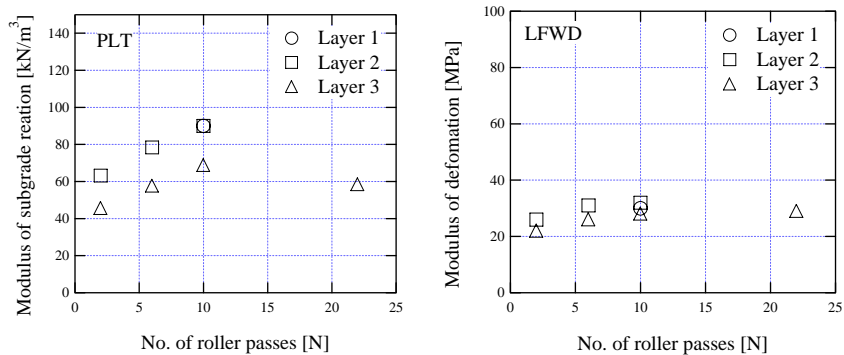
Layer	No. of Roller Passes	site								평균
		Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7	Site 8	
1층	10회	1.816	1.84	1.632	2.05	1.887	1.81	1.814	1.751	1.825
2층	2회	1.911	1.74	1.786	1.98	1.804	1.94	1.766	-	1.847
	6회	1.832	1.937	1.858	2.13	2.028	2.21	-	-	1.99
	10회	1.912	1.88	1.855	2.14	1.981	2.07	-	-	1.973
3층	2회	1.696	1.753	1.843	1.77	1.723	2.07	-	-	1.809
	6회	1.919	1.891	1.882	1.97	1.748	2	-	-	1.902
	10회	1.856	-	1.843	-	-	-	-	-	1.849
	22회	1.941	-	1.799	2.09	-	-	-	-	1.943

표 6은 평판재하시험에서 구한 지지력계수와 변형계수, 그리고 LFWD장비로 구한 변형계수에 대하여 각 층별 다짐롤러횟수에 따른 실험결과를 정리하였다. 3층 반복평판재하실험의 경우 2층에서 충분한 다짐도를 확보하지 못하는 관계로 하중을 재하시 급격한 침하가 발생하여 결과에는 생략하였다. 평판재하시험의 지지력계수의 노반의 최소 품질관리 기준값은 70kN/m^3 으로 2층에서는 약 6회 이상 다짐을 하였을 때 만족하였으며, 3층의 경우에는 10회 이상으로 하여도 만족하지 못하는 결과를 얻었다. 이러한 결과는 성토고의 높이가 높아짐에 따라 실험단면이 작아짐에 따라 구속압력(σ_h)은 상대적으로 작게 되기 때문에 재하실험시 침하가 상대적으로 크게 발생한 것으로 판단된다. 또한 3층 부에서 하중이 재하됨에 따라 1층과 2층 에서 압축침하가 발생되기 때문에 10회 이상 다짐을 실시하여도 작게 측정된 것으로 판단된다. 이러한 결과는 재하실험과 LFWD의 변형계수도 모두 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 재하하중에 따른 응력상태와 변형율의 크기에 대하여 보정하여 실험을 실시하여야 보다 정확한 해석결과가 도출 될 것으로 판단된다.

표 6. 평판재하시험과 LFWD 시험결과

Layer	No. of roller Passes	K_{30} (kN/m ³)	Ev_1 (MPa)	Ev_2 (MPa)	Ev_2/Ev_1	E_{LFWD} (MPa)	평균들밀도
원지반	-	192	66.7	248.1	3.72	439	
1층	10회	90	21.7	47.8	2.2	30	1.825
2층	2회	63.2	11.7	30.6	2.62	26	1.847
	6회	78.4	17.9	39.8	2.22	31	1.99
	10회	90	20.8	57.5	2.76	32	1.973
3층	2회	45.6	과다 침하로 실험 중단			22	1.809
	6회	57.6	11.9	32.5	2.74	26	1.902
	10회	68.8	14.1	33.3	2.36	28	1.849
	22회	58.4	16.1	38.9	2.41	29	1.943

그림 3은 각 품질시험방법(PLT, CPLT, LFWD)에서 구한 계수들에 대하여 다짐롤러횟수에 따른 변화를 나타내었다. 그림에서와 같이 모든 실험에서 다짐횟수가 증가함에 따라 지지력 또는 변형계수도 증가하고 있으며 1층, 2층, 3층에서 10회 다짐횟수를 기준으로 볼 때 LFWD장비로 구한 변형계수의 값이 가장 작은 범위는 보이며 반복평판재하시험에서 구한 Ev_2 의 값이 가장 큰 범위를 보이고 있다. 이러한 결과를 볼 때 성토재료로 사용한 토사재료의 경우 압축성이 큰 재료인 것으로 판단된다.



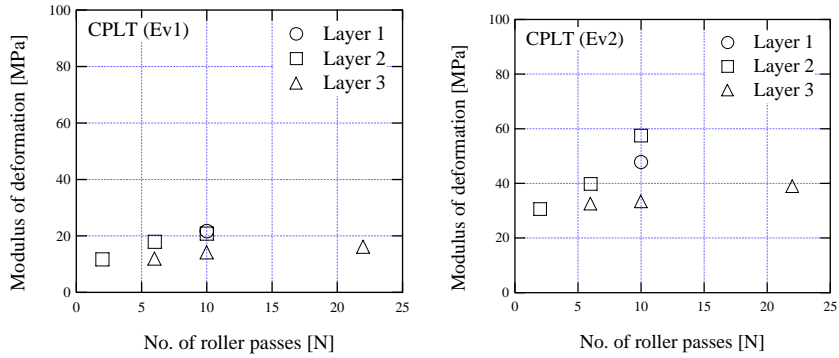


그림 3. 각 품질관리 시험방법에서의 다짐롤러 횟수에 따른 변화

4.2 품질시험방법에 따른 변형계수

표 7은 각 품질관리 시험방법에 따른 다짐횟수에 따른 탄성계수의 변화를 정리하였다. 표에서와 같이 P파로 구한 탄성계수(E_{WAVE})와 E_{LFWD} , 지지력계수로 환산한 탄성계수(E_{PLT}), 그리고 반복평판재하시험에서 1차 재하시 기울기(E_{v1})와 2차 재하시 기울기(E_{v2})을 구하였다. 그림 4에서와 같이 다짐횟수가 증가함에 따라 탄성계수가 증가하는 경향과 다짐횟수가 약 10회 이상 다짐하게 되면 수렴되는 경향을 충분히 볼 수 있었다.

표 7. 각 품질관리 시험방법에 따른 추정 변형계수

층	다짐 횟수	Vs (m/sec)	Vp (m/sec)	poisson's ratio	E_{WAVE} (Mpa)	E_{LFWD} (Mpa)	E_{PLT} (Mpa)	E_{v1} (Mpa)	E_{v2} (Mpa)
1층	10회	145	280	0.32	125	30	24.24	66.7	248.1
	2회	119	223	0.30	81	26	17.25	21.7	47.8
2층	6회	131	247	0.31	108	31	21.26	11.7	30.6
	10회	142	293	0.35	128	32	23.7	17.9	39.8
3층	2회	128	244	0.31	92	22	12.37	20.8	57.5
	6회	145	277	0.31	124	26	15.62	11.9	32.5
	10회	148	300	0.34	134	28	18.25	14.1	33.3
	22회	152	311	0.34	152	29	19.37	16.1	38.9

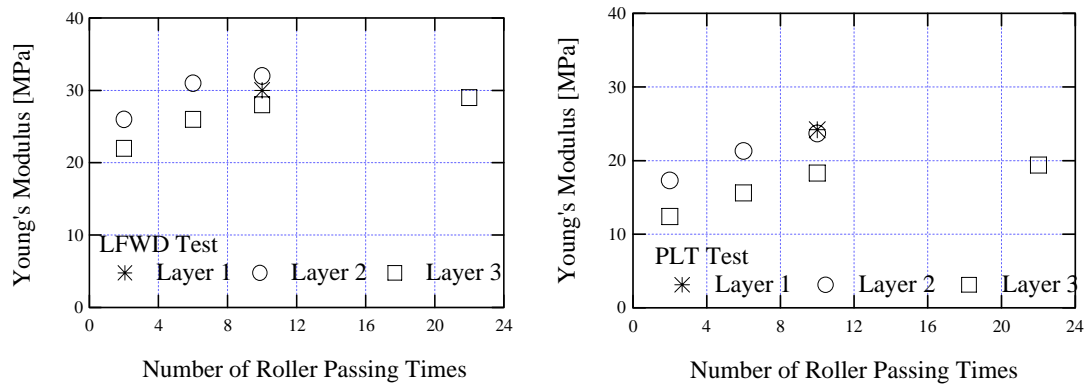


그림 4. 층별 다짐 횟수별에 따른 LFWD 측정값

4. 결론

현장품질관리 방법으로 많이 사용하고 있는 재하실험 방법의 단점을 보완하고 보다 빠르고 쉽게 수행할 수 있는 LFWD 장비로 구한 변형계수로 토공 품질관리 방법의 적용 가능성을 검토하였다. 실제 건설현장에서 사용하고 있는 다짐에너지를 가하여 토공부의 밀도 변화와 지지력 변화를 측정하였다. 현재 밀도관리로 사용하고 있는 들밀도 시험의 경우 실험오차가 상당히 많이 발생하고 있어 이를 보완할 수 있는 대체 시험방법이 필요할 것으로 판단된다. LFWD 장비로 구한 변형계수의 경우 다짐에너지에 따른 변화를 관찰할 수 있었으며 다짐 품질관리 시험방법으로 적용가능할 것으로 판단된다. 또한 각 실험방법의 변형계수는 각 실험에서 재하시키는 조건이 다르기 때문에 변형률 범위를 고려하여 상관성을 분석하여야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부(2000), "도로설계편람(III)", 한국건설기술연구원
2. 건설교통부(2004), 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구"포장하부구조 다짐 관리 기준 정립"
3. 고속철도공사 전문시방서(노반편, 2003), 한국고속철도 건설공단
4. 이인모(1999), 토질역학의 원리
5. 철도설계편람(2004), 대한토목학회
6. 한국철도기술연구원(2007), 토공노반 최적두께 산정을 위한 설계표준기술연구(2차년도), 연구보고서