

철도 노반의 지지력 평가를 위한 현장시험법 적용성 연구

Application of in-site testing Methods for Bearing Capacity Estimates of Railroad Roadbed

최찬용*
Chan-Yong Choi,

박창우**
Chang-Woo Park,

박병은***
Byung-Eun Park

ABSTRACT

The field plate load test has a good potential for determining modulus since it measures both plate pressure and settlement. However, because the field plate load test is expensive and takes plenty of time for operation, it is very difficult to figure out the test characteristics of railroad roadbed in detail. For faster and economical operation, the Light Falling Weight Deflectometer(LFWD) have been utilized for estimating the bearing capacity of railroad roadbed.

The objective of this study is to determine the relationship between the test(PLT, LFWD) of the railroad roadbed in Korea. The LFWD test for evaluating the strength of railroad roadbed materials produced in Korea are presented in this paper.

keywords : LFWD, PBT, railroad roadbed

1. 서론

철도노반은 열차하중에 대하여 충분한 지지력을 가지고 있어야 하며, 압축침하가 발생되지 않도록 충분히 다져야 한다. 일반적으로 성토하부의 침하와 강성은 노반의 다짐 정도에 좌우된다고 알려져 있다. 국내 철도현장에서 널리 사용하고 있는 다짐상태를 측정하고 관리하기 위해서 많이 사용되고 있는 방법은 노상의 지지력을 이용하는 방법과 탄성계수를 이용하는 방법으로 구분할 수 있다. 국내 철도현장에서는 다짐품질관리로 평판재하시험(Plate Loading Test, PLT)을 사용하는데, 일반철도의 경우에는 일정 변위(1.25mm)를 유발한 하중강도에서의 지지력계수인 k_{30} 을 사용하고 있으며, 고속철도의 경우는 반복평판재하시험(Cycle Plate Loading Test, CPLT)을 통하여 구한 2번째 재하단계에서의 변형율계수 E_{v2} 및 첫 번째 하중재하시의 변형계수 E_{v1} 에 대한 비(比)인 E_{v2}/E_{v1} 을 사용하고 있다. 일반철도와 고속철도 모두 현장다짐 강성평가를 위해 평판재하시험방법을 적용하고 있으나 최대하중, 단계별 하중증가량, 단계별 하중재하시간, 하중재하 단계수 및 반복재하 횟수 등에 차이가 있다. 또한, 평판재하시험을 통한 시험방법은 다른 시험방법에 비하여 하중과 변위를 측정함으로써 역학적인 특성치 결정에 있어 가능성이 높은 시험방법으로 인식되어져 왔으나, 시험횟수 및 시험 소요시간, 반력하중, 개인적인 오차 등으로 인하여 보다 개선된 시험항목을 요구하고 있는 실정이다(김대상, 2005). 따라서 종래의 시험방법에 비해 신속하고 간편하며, 장소에 제약을 받지 않는 장점을 포함하며, 최소한의 공간만 있으면 시험이 가능한 LFWD(Light Falling Weight Deflectometer)와의 상관성을 검토함으로써 보다 신속하고 경제적인 노반 지지력을 평가할 수 있는 시험방법을 제시하고자 하였다.

*: 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 선임연구원, Senior Researcher, Civil Engineering Research Dept., KRRI.

** : 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 연구원, Researcher, Civil Engineering Research Dept., KRRI.

***: 한국철도시설공단 기술실 부장, General Manager, Engineering Div., Delegate from Korea Rail Network Authority

2. 현장강성시험방법의 비교

국내 철도, 도로, 공항 등 건설현장에서 하부구조의 지지력을 평가하기 위하여 다양한 시험방법들이 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)와 PBT의 변형인 독일의 E_{v2} 평가법이 있다. 표 1은 노반의 강성평가를 위한 각 시험법에 대하여 비교하였다.

표 1 노반의 강성평가 시험방법의 비교

시험종류	측정치	추정치	장점	단점
평판재하시험 (KS F 2310)	하중, 변위	지지력계수 허용지지력 탄성계수	-현장지지력 평가방법으로 널리사용 -하중, 변위로부터 역학적 특성치 결정가능	-하중반력 필요 -재하판의 크기로 인한 실제 구조물보다 작은 응력범위 -지하수 및 시간효과 미고려 -시험시간 장시간소요
반복평판재하시험 (KS F 2338)	하중, 변위	Ev1, Ev2	초기재하단계에서의 소성변형 배제한 노반의 경험있는 사용하중단계에서의 변형 특성치 결정	-하중반력 -장래의 지반의 악화조건 평가 미흡
FWD	하중, 변위, 재하시간, 가속도	탄성계수	-층의 종류에 따라 재하판의 면적변경가능 -신속하고 간편하며 장소에 제약을 받지 않음	충격하중의 범위
현장CBR (KS F 2320)	관입저항치	CBR값	-노상, 노반 다짐도 관리 및 성토시 공중 증장비의 주행성판정 이용 -도로 등 포장설계법에서 주로 사용	-CBR포장설계 과대 설계 -기상변화 및 장래악화조건 미고려
DCP	관입저항치	DCP 지수 CBR값	-DCP지수를 통해 CBR 추정 -쉽고 빠르게 시험결과 도출	-자갈 및 암성토에서 적용불가능

2.1 기존 평판재하시험(PBT, CPBT)과 LFWD의 상관성 연구동향

국내 도로에서는 이미 LFWD의 적용성을 검토하기 위하여 “포장하부구조 다짐관리기준 정립(2004, 건설교통부)”에서는 휴대용 FWD인 LFWD를 이용한 다짐관리를 수행하는 것이 타당성을 가지며 적극적으로 검토할 필요성을 언급한바 있다¹⁾. Masaki 외 3인(2000)은 평판재하시험과 LFWD시험을 동시에 수행하여 평판재하시험의 k_{30} 과 LFWD의 k 값의 상관관계를 도출하였으며, 일본에서는 지반에 따라 점성토지반의 경우 k_{30} 과 k_{HFWD} 의 관계가 1:1의 상관관계가 있으며, 사질토 지반의 경우 1:1.5, 자갈지반과 같이 강성이 높은 지반의 경우 1:2의 관계가 있는 것을 정의하였다(가부장문 외 2명, 2003, 일본포장공학회, 2000). 국내의 경우에도 점성토, 사질토, 자갈지반 3곳에 대하여 실험을 실시한 결과 유사한 결과가 나타났다(김연복 외, 건설교통부 2004).

2.2 지지력계수(k_{30})와 탄성계수(E_s)의 관계

무한깊이의 탄성물체 위에 있는 기초의 즉시 침하량은 탄성론의 원리를 이용하며, 유도된 식은 식(1)과 같이 정리하였다.

$$w_d = q_d D \frac{(1-\nu^2)}{E} I_p \quad (\text{식 1})$$

여기서, w_d : 처짐, q_d : 하중판에 작용한 응력, D : 하중판의 직경, ν : 포아송비, E : 탄성계수, I_p : 무차원 영향계수

LFWD에 대한 기초의 영향계수 I_p 는 가요성 상태의 중앙에서 처짐을 측정하므로 $I_p=1$ 로 고려하면 식(2)로 유도된다.

$$E = \frac{q_d}{w_d} D (1-\nu^2) \quad (\text{식 2})$$

$$k_d = \frac{q_d}{w_d} \quad (\text{식 3})$$

$$k_d = \frac{E}{D} \times \frac{1}{(1-\nu^2)} \quad (\text{식 4})$$

재하판의 크기가 증가함에 따라 지지력계수가 감소함으로 일반적으로 재하판의 반경이 r인 지지력계수 k_d 를 다음 식 (5)와 같이 환산할 수 있다.

$$k_{30} = k_d \times \frac{r}{15} \quad (\text{식 5})$$

식 (6)은 식 (5)에 의해서 유도되며, 식 (7)은 식 (3), (4)에 대입함으로써 얻을 수 있다.

$$k_{30} = k_d \times \frac{D}{30} \quad (\text{식 6})$$

$$k_{30} = \frac{E}{D} \times \frac{1}{(1-\nu^2)} \times \frac{D}{30} \quad (\text{식 7})$$

최종적으로 포아송비를 0.35로 가정하면 다음 식 (8)과 같이 유도할 수 있다.

$$k_{30} = \frac{E}{0.3(1-\nu^2)} \quad (\text{식 8})$$

$$k_{30}(\text{kgf/cm}^3) = 38 \times E$$

3. 현장개요도

현장에서 많이 사용되고 있는 평판재하시험과 휴대용으로 다짐관리를 수행할 수 있는 방법인 LFWD 현장적용성 검토를 위해 현장시험구간을 선정하여 실험을 실시하였다. 현장시험구간은 장항선 개량구간으로 천안-온양온천 OO구간과 경부고속철도 2단계 공사구간인 OO구간에서 각각 5개소와 4개소에 시험을 실시하였다. 현장시험구간은 각 구간별로 상부노반, 하부노반구간, 절토구간 등 여러 가지 지반조건을 대표할 수 있는 구간이다. 현장시험은 평판재하시험, 반복평판재하시험, LFWD시험을 실시하여 각각의 측정별 지지력 계수를 평가하였다. 표 2는 측정별 시험항목과 현장조건 등을 정리하였다.

표 2. 각 측정별 시험항목 및 현장조건

측점	현장시험	현장조건
장항선	JH-1	PLT, CPLT, LFWD 절토부
	JH-2	PLT, CPLT, LFWD 상부노반(중앙지점)
	JH-3	PLT, CPLT, LFWD 상부노반(측선지점)
	JH-4	PLT, CPLT, LFWD 하부노반(측선지점)
	JH-5	PLT, CPLT, LFWD 하부노반(측선지점)
경부고속철도	KS-1	PLT, LFWD 상부노반(중앙지점)
	KS-2	PLT, LFWD 절토부(중앙지점)
	KS-3	PLT, LFWD 상부노반(중앙지점)
	KS-5	PLT, LFWD 접속부(중앙지점)
일산*	IS-1	PLT, LFWD
	IS-2	PLT, LFWD
	IS-3	PLT, LFWD
안산*	AS-1	PLT, LFWD
	AS-2	PLT, LFWD

* : 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구에 의해 실시되어진 기존 실험DATA를 참조

3.1 현장토의 기본물성값

현장에서 사용된 흙쌓기 재료는 현장구간 내에서 발생된 토사로서 흙쌓기 재료의 기본물성값은 표 3과 같다. 표 3에서와 같이 최대입경이 10mm, 최대건조밀도(γ_{dmax}) 1.987gf/cm³, 최적함수비 9.5%로서 철도설계기준에서 제시한 최대입경 25mm이내의 재료이며, 소성한계 9이하의 재료로 흙쌓기 재료로 적합한 재료인 것을 알 수 있다.

표 3. 현장토의 기본물성값(장항선00구간)

구 분	측정치	구 분	측정치
함수비	9.9%	건조밀도(γ_{dmax})	1.99gf/cm ³
비중(G_s)	2.60	최적함수비(OMC)	9.5%
최대입경	10mm	습윤밀도(γ_{sat})	2.18gf/cm ³
0.084mm체 통과율	15.4%	소성한계	N · P

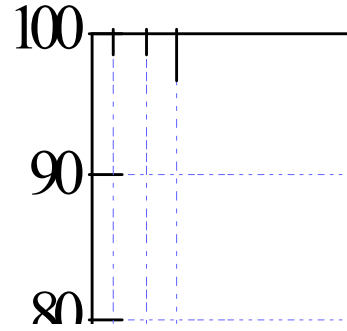


그림 1. 흙쌓기 재료의 입도분포곡선

4. 현장시험 결과

4.1 각 시험방법에 따른 하부구조 지지력 결과

하부구조의 지반 지지력을 평가하기 위하여 평판재하시험, 반복평판재하시험, LFWD 시험을 실시하였다. 평판재하시험에서 구한 지반반력계수(k_{30})는 1.25mm 변위가 발생하였을 때의 하중강도 비이며, E_{v1} 과 E_{v2} 는 반복평판재하시험으로 첫 번째와 두 번째 재하했을 때 각각의 기울기로서 구하였다. 각각의 시험방법에 따라서 최종적으로 LFWD에서 제시한 변형계수(E_s)값과 비교하였다. 또한, 비반복 평판재하시험 방법에서 도출된 k_{30} 값을 사용하여 변형계수를 산정하였다. 표 4는 각 시험방법으로 구한 측정값을 나타내었다.

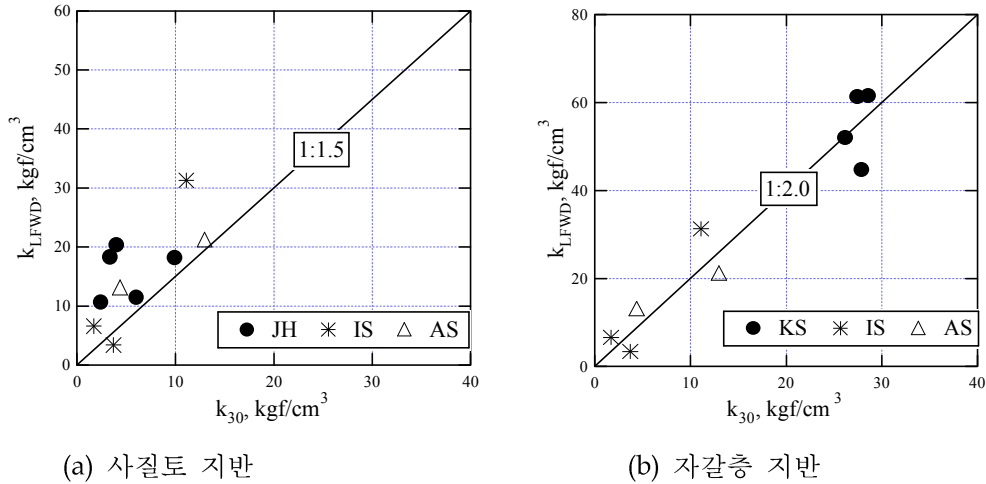
표 4. 각 시험별 측정값

구 분		PBT		CPBT				LFWD,	
		k_{30} ¹⁾ (kgf/cm ²)	E_k ²⁾ (kgf/cm ²)	E_{v1} ³⁾ (kgf/cm ²)	k_{Ev1} ⁴⁾ (kgf/cm ²)	E_{v2} ⁵⁾ (kgf/cm ²)	k_{Ev2} ⁶⁾ (kgf/cm ²)	E_s ⁷⁾ (kgf/cm ²)	k_{LFWD} ⁸⁾ (kgf/cm ²)
장항선	JH-1	4.00	180.0	229.5	4.48	382.5	4.64	185.7	20.4
	JH-2	9.92	446.4	229.5	8.96	459.0	9.04	165.6	18.2
	JH-3	6.00	270.0	183.6	8.40	510.0	8.4	105.0	11.5
	JH-4	2.40	108.0	114.7	3.28	353.0	3.12	97.2	10.7
	JH-5	3.35	150.7	139.0	4.56	327.8	4.64	166.3	18.3
경부 고속철도	KS-1	-	-	866.0	27.42	1,434.4	29.1	1,661.7	61.3
	KS-2	-	-	850.0	28.57	1,582.8	30.0	1,564.8	61.6
	KS-3	-	-	740.3	26.15	1,582.8	28.3	1,402.2	52.0
	KS-5	-	-	778.0	27.87	1,434.4	29.2	1,212.7	44.7

주)
¹⁾ k_{30} , 평판재하시험(PBT)에서 구한 지반반력계수(k_{30})
²⁾ E_k , 지반반력계수로 추정된 변형계수(E_s)
³⁾ E_{v1} , 반복평판재하시험(CPBT) 첫번째 하중재하시 변형계수(E_{v1})
⁴⁾ k_{Ev1} , 반복평판재하시험(CPBT) 첫번째 하중 vs 침하곡선으로 추정된 지반반력계수(k_{30})
⁵⁾ E_{v2} , 반복평판재하시험 두 번째 하중재하시 변형계수(E_{v2})
⁶⁾ k_{Ev2} , 반복평판재하시험 두 번째 하중 vs 침하곡선으로 추정된 지반반력계수(k_{30})
⁷⁾ E_s , LFWD 시험으로 측정된 변형계수(E_s)
⁸⁾ k_{LFWD} , LFWD로 추정된 지반반력계수(E_s)

그림 5는 평판재하시험에서 구한 k_{30} 값과 LFWD를 통해 구한 k 값과의 상관성을 검토하기 위하여 사질

토와 자갈층으로 구분하여 상관성 여부를 관찰하였다. k_{30} 값과 LFWD의 상관성은 앞서 언급한바와 같이 사질토 지반의 경우 1:1.5, 자갈층의 경우 1:2로서 자갈층의 경우 유사한 경향을 보이고 있으며, 사질토 지반의 경우에는 국내 다른 시험(일산, 안산)과 마찬가지로 1:1.5보다 약간 높게 나타나는 경향을 보이고 있다. 사질토 지반의 경우에는 좀 더 많은 시험을 통해서 상관성을 분석하여야 할 것으로 판단되나, 자갈층의 경우에는 이론적인 경향인 1:2와 거의 유사한 경향을 보이고 있으며, 향후 자갈층에 대한 시험을 보완하여 LFWD시험에 의한 품질관리가 가능할 것으로 사료된다.



주) 그림 4와 5에 나와 있는 IS, AS는 본 논고의 결과를 비교하기 위하여 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구의 일환으로 수행된 “포장하부구조 다집 관리 기준 정립(건설교통부)”의 DATA를 인용한 것임.

그림 2. 평판재하시험(k_{30})과 LFWD 시험에서 추정된 k 값의 상관관계

4.2 각 시험방법에 따른 추정 탄성계수의 비교

현장에서 가장 많이 사용되고 있는 노반품질관리 시험방법인 평판재하시험은 하중반력 및 시험시간 등 많은 제약을 받고 있으며, 이러한 시험방법을 대체하기 위한 연구개발이 꾸준히 연구되어오고 있다.

이 논문에서는 앞서 언급한 바와 같이 일반철도에서 품질관리기준으로 활용하고 있는 평판재하시험(PBT)과 고속철도에서 품질관리로 사용되어지고 있는 반복평판재하시험(CPBT), 도로 현장에서 사용하고 있는 LFWD 시험 등을 실시하여 각 시험방법에서 추정 탄성계수 값과 비교하여 상관성을 검토하였다. 그림 3은 사질토와 자갈층에 대하여 각 시험방법에 따른 추정탄성계수를 나타내었다. 그림 3에서와 같이 사질토의 경우 CPBT에서 구한 E_{v2} 가 가장 큰 값을 보이고 있으며, 전반적으로 LFWD와 PBT시험에서 구한 탄성계수가 가장 작게 나타나는 것으로 나타났다. 노반재료가 자갈인 경우 LFWD와 E_{v2} 값이 거의 유사한 탄성계수를 보이고 있으며, E_{v1} 값이 가장 적게 나타났다. 좀 더 많은 시험을 실시하여 각 시험방법에 대한 상관성에 대하여 연구가 필요할 것으로 판단된다.

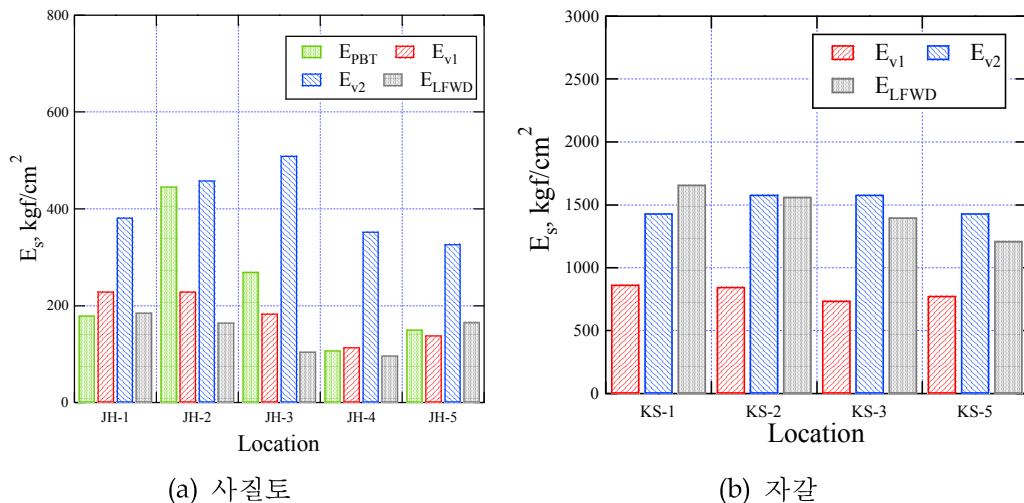


그림 3. 각 시험방법에 따른 변형계수

5. 결론

본 논문에서는 현장 지지력을 평가할 수 있는 평판재하시험, 반복평판재하시험, LFWD 시험을 장항선 개량 OO구간 5개소와 경부고속철도 OO구간(기존 도로현장 5개소 추가)에 대하여 현장시험을 수행한 결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 평판재하시험을 통해 구한 k_{30} 값과 LFWD의 상관성은 앞서 언급한바와 같이 사질토 지반의 경우 1:1.5, 자갈층의 경우 1:2로서 자갈층의 경우 유사한 경향을 보이고 있으며, 사질토 지반의 경우에는 국내 다른 시험(일산, 안산)과 마찬가지로 1:1.5보다 약간 높게 나타나는 경향을 보이고 있다.
2. 사질토와 자갈층에 대하여 각 시험방법에 따른 추정탄성계수는 사질토의 경우 CPBT에서 구한 E_{v2} 가 가장 큰 값을 보이고 있으며, 전반적으로 LFWD와 PBT시험에서 구한 탄성계수가 가장 작게 나타나는 것으로 나타났다. 따라서 LFWD시험방법의 신뢰성을 검토하기 위하여 현장시험을 추가할 예정이며 크로스홀 시험과 공진주 시험을 통해 탄성계수값과 비교할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 건교부 건설기반기술구축사업의 일환으로 “토공노반 최적두께 산정을 위한 설계표준 기술 연구”의 일부 성과물로 이에 감사를 포함합니다. 또한 현장 제공을 해준 (주) SK건설과 두산산업개발(주)의 관계자 분께도 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부(2004), “포장하부구조 다짐관리 기준 정립”, 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구 1단계 3차년도 최종보고서, pp.E2-47~65
2. 김동수, 서원석, 권기철(2005), “반복식 평판재하시험을 이용한 노상토의 현장 변형계수 평가”, 한국지반공학회논문집, 제21권, 6호, pp.67~79
3. 박창우, 최찬용, 이일화, 김대상(2006), “철도노상의 지지력평가를 위한 현장시험법 적용성연구”, 한국지반공학회 2006춘계 학술발표회, pp.87
4. 박태순, 최준성, 박재균(2001), “회복탄성계수 측정을 위한 Portable LFWD의 활용”, 대한토목학회 2001학술발표회 논문집[창립50주년], Vol.0, No.0
5. 안지환, 양성린, 박희문, 권수안(2004), “현장에서의 동적관입시험을 이용한 노상토의 지지력 평가연구”, 한국도로학회 논문집, 제6권, 3호, pp.17~26
6. 오재화, 이광찬(2005), “콘 지수(CI)를 이용한 노상토의 CBR 및 다짐도 측정에 대한 기초 연구”, 대한토목학회논문집, 제25권, 2C호, pp.73~78
7. 윤길림, 이규환, 채광석(2006), “지반조사기술의 현재와 미래”, 한국지반공학회지, Vol 22, No.1, pp.11~21
8. Amini, F.(2003), "Potential Applications of Dynamic and Static cone penetrometers in MDOT pavement design and construction", Final Report, Mississippi Department of Transportation
9. Kremer, C., Dai, S.(2004), "Improvement Validation of Mn/DOT DCP Specifications for Aggregate Base Materials and Select Granular", Minnesota Department of Transportation
10. Oman, M.(2004), "Advancement of Grading and Base Material Testing", Final Report, Minnesota Department of Transportation
11. Peshkin, D.(1994), "Pavement Analysis and Design Checks", National Highway Institute, U.S. Department of Transportation
12. Seyman, E.(2003), "Laboratory evaluation of in-situ tests as potential quality control/quality assurance tools", Bogazici University, Istanbul, Turkey