

소형 FWD와 반복평판재하시험에서의 변형계수(E_v)와의 상관관계 평가

Evaluation of correlation between Strain modulus (E_v) and Deformation modulus (E_{LFWD}) Using Cyclic Plate loading Test and LFWD

최 찬 용^{1*} Choi, Chan-yong 이 성 혁² Lee, Sung hyok
배 재 훈³ Bae, Jae hun 박 두 회⁴ Park, Doo hee

ABSTRACT

In this study, it conducted a compaction quality control test in 29 domestic construction sites and investigated the relationship between classical method (Cyclic Plate bearing test) and LFWD test with subgrade materials which consist in sandy soil and gravelly soil. According to the test results, the most of soil types were mostly satisfied with specification criterion and gravelly soils were easily satisfied with values over 3 times greater than specification criterion. In term of the correlation relation of soil modulus with the two compaction quality control test methods, it is shown that the sandy soil types were a good correlation, while gravelly soil types with a high stiffness materials were indicated less correlation. After the compensation for stress condition, a linear regression for elastic modulus were higher correlation.

요 지

본 논문에서는 국내 건설현장 29개 지점에서 국내 철도노반 다짐품질관리 방법인 반복평판재하시험과 LFWD(Light Falling Weight Deflection)에서 구한 변형률계수(E_v)와 변형계수(E_{LFWD})에 대하여 응력보정을 통해 자갈재료와 사질토에 대하여 상관성을 비교하였다. 실험결과 대부분 다짐품질관리 기준을 만족하고 있으며, 입상재료의 경우 관리기준치에 약 3배이상 값을 나타내었다. 두 시험방법에 따른 상관성은 토사의 경우에는 서로 상관성이 높은 것으로 나타났지만, 강성이 상대적으로 큰 입상재료의 경우 두 시험간의 상관성이 적은 것으로 나타났다. 또한, 시험방법 별로 탄성계수를 구하여 응력상태를 보정한 후 회귀 분석한 결과 응력 보정하지 않는 조건보다 상관성이 더 높게 나타났다.

Keywords : CPLT, LFWD, Compacted soil, Compaction quality control, Stress level

1. 서 론

현재 건설되고 있는 쌓기 구조물은 기계화 시공과 설계 기준의 정비, 지반 개량기술 발전 등으로 과거의 성능에 비해 상당히 향상되어 단순히 “토공”에서 교량 등과 거의 유사한 성능을 확보하는 것으로 개선되었다.

이러한 우수한 흙 구조물이 되기 위해서는 철저한 품질 관리를 통해서 이루어질 수 있다. 국내 철도 현장에서 사

용하고 있는 흙 구조물의 품질관리기준은 밀도관리와 지지력으로 관리하고 있으며, 주로 지지력 관리는 평판재하시험(PLT, Plate Loading Test)에서 얻은 지반반력계수(k_{30}) 또는 반복평판재하시험(CPLT, Cyclic Plate Loading Test)에서 구한 변형률계수(E_v)로 관리하고 있다. 최근에는 재하시험 방법보다 빠르게 지반의 강성을 평가할 수 있는 다양한 장비가 개발되고 현장에서 사용되고 있다. 재하시험을 대체하는 방법 중에 가장 많이 사용하고 있는 것은

1* 정회원, 한국철도기술연구원 고속철도연구본부 선임연구원 (Member, Senior researcher, Depart. of High speed Railway Research, KRRI, E-mail: cychoi@krri.re.kr)

2 정회원, 한국철도기술연구원 고속철도연구본부 책임연구원 (Member, Chief researcher, Depart. of High speed Railway Research, KRRI)

3 비회원, 태조엔지니어링 사원 (Non-member, Staff, TaeJo Eng.)

4 비회원, 한양대학교 토목환경공학과 조교수 (Non-member, Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University)

비파괴 실험의 일종인 FWD(Falling Weight Deflectometer)으로 이미 도로에서 품질관리 방법으로 수행되고 있다(박용부 등, 2003; 안진환 등, 2004). 김수일 등(1990)은 1990년대 초반에 FWD를 이용하여 층별 탄성계수를 추정할 수 있는 방법을 제안하여 국내에 본격적으로 연구개발이 시작되었다. FWD의 장비는 대형 차량을 이용한 장비이기 때문에 폭넓게 적용하기에 어려움이 있었기 때문에 이러한 한계를 보완하고자 개인이 손쉽게 사용할 수 있는 소형 FWD(LFWD, Light Falling Weight Deflectometer)가 개발되어 흙 구조물 다짐품질관리 시험방법으로 사용하고 있다.

국내에서도 경부고속철도공사에 “철도 공사를 위한 경량 낙하 시험기” 적용한 이후 여러 기관에서 노반 다짐품질관리 및 성토관리용으로 연구가 진행 중에 있다(건설교통부, 2004; 박용부 등, 2003). 김종렬 등(2002)과 日本舗装工學會(2000)에서는 평판재하에서 얻은 결과물과 동적변형계수와의 상관성에 대하여 연구를 수행하였으며, Adam et al.(2003)은 LFWD 장비에 의해 동적재하실험에 대하여 수학적 알고리즘을 통해 이론적으로 정립하였다. Khalid et al.(2005)은 모형토조 실험에서 다양한 품질관리 실험 방법에서 구한 계수들과의 상관성을 비교하였다. 일본에서는 HFWD를 이용하여 변형계수와 지반반력계수(K_{30})값과 상관성에 관한 연구 논문이 다수 발표되었다(Kim et al., 2006; Fleming et al., 2001; Livneh et al., 2001; Masaki and Etsuo, 2000; 假部長門 등, 2003). 이와 같이 소형 FWD 실험장비는 종래의 평판재하시험에 비해 신속 간편하고 장소에 제약을 받지 않는 장점 등으로 최소한의 공간만 있으면 시험이 가능한 실험방법으로 활용도가 매우 높은 실험장비로 활용되고 있다.

김동수 등(2005)은 크로스홀 시험과 공진주 시험을 수행하여 전체변형률 영역에서 현장의 변형특성을 평가하여

평판재하시험 결과와 비교하여 두 시험결과 사이의 응력 상태를 고려하면 비교적 일치한 결과를 보이며, 제한된 반복 평판재하시험을 통해 현장 변형계수의 평가가 가능하다고 하였다. 김대상 등(2008)은 지반반력계수와 반복평판재하시험의 실험적 차이와 변형계수의 상관성을 응력보정과 변형률 보정을 통해 상관성을 평가하였다.

본 논문에서는 국내 건설현장 총 29개소에서 측정한 반복평판재하시험(CPLT)에서 구한 변형률계수(E_{V2})와 소형 FWD시험에서 구한 변형계수(E_{LFWD})의 상관성을 응력보정 전·후와 비교하였다. 또한 성토재료별로 자갈재료와 토사재료를 구분하여 상관성을 분석하였다.

2. 토공노반의 다짐품질관리 실험법

2.1 지반의 변형계수 및 지반반력계수

일반적으로 지반의 탄성계수와 지반반력계수는 차이가 있으며 지반의 탄성계수는 응력-변형의 관계를 직선으로 가정하였을 때의 구배를 의미하고 지반 재료의 물성치의 하나이다. 이에 반해 지반반력계수는 기초의 지반반력(단위면적당의 지반의 저항력)과 변위와의 구배이기 때문에 물성값이기 보다는 경계치 문제의 해이기 때문에 해당하는 실험조건(재하판의 형상, 재하조건, 시간의존성 등)에 따라 달라질 수 있다(西岡 英俊 등, 2010).

그림 1은 지반의 탄성계수와 지반반력계수에 대한 차이로서 그림에서와 같이 흙은 일반적으로 탄성 거동으로서 취급되는 영역에 있어서도 정확한 의미에서는 비선형 거동을 보이게 된다. 이와 같은 지반의 비선형성(nonlinear)을 일으키는 주된 요인으로 첫 번째 「변형 레벨 의존성」으로 변형레벨이 커질수록 변형계수가 저하하는 현상을 말

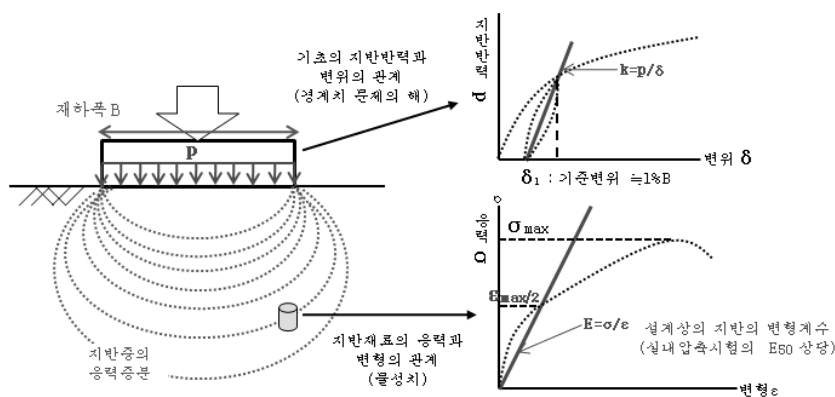


그림 1. 기초 구조물 설계에서의 지반의 변형계수와 지반반력계수의 개념(西岡 英俊 등, 2010)

한다. 지반반력계수의 경우는 「변위 레벨 의존성」에 해당하게 된다. 두 번째로는 「하중이 작용되는 지속 시간」에 대한 영향이다. 열차 하중과 같이 단기 작용에 대한 지반반력계수에 비해 사하중 등의 장기 작용에 대해서는 크리프 변위 등의 영향에 크기 때문에 겉보기 지반반력계수는 저하되게 된다. 세 번째 「재하폭 의존성」으로 동일 지반상이라도 재하 폭이 커질수록 지반반력계수가 저하하는 특징이다.

2.2 다짐품질시험방법

2.2.1 반복평판재하시험(Cyclic Plate Loading Test, CPLT)

경부고속철도 2단계와 호남고속철도의 토공노반의 품질관리기준은 반복평판재하시험으로 관리하고 있으며, 반복평판재하시험은 기존 평판재하시험과 달리 최대하중, 단계별 하중증가량, 그리고 하중재하단계 수, 단계별 하중재하시간 등이 다르다. 특히 재하하중은 재하(load)→제하(unload)→재재하(reload)로 하중을 반복적으로 재하하여 초기 소성침하량을 제거하고 단계별 하중재하 시간이 빠른 특징을 가지고 있다. 따라서 기존 평판재하시험보다 현장에서 빠르게 다짐 강성을 평가할 수 있으며, 큰 소성변형을 제거할 수 있기 때문에 보다 장점이 많은 시험방법으로 알려져 있다. 반복평판재하시험에서 재하하중은 최소 6단계 이상으로 규정하고 있으며, 각 하중단계별로 1~2분 동안 하중을 일정하게 유지하고 다음 하중단계로의 1분 이내에 완료하도록 되어 있다. 하중재하방법은 0, 0.08MPa, 0.16MPa, 0.25MPa, 0.33MPa, 0.42MPa, 0.50MPa으로 총 6단계 하중을 재하 시키고, 다시 단계별로 하중을 0.25MPa, 0.125MPa, 0으로 제거한다. 그리고 다시 초기 하중단계와 마찬가지로 최대수직응력 0.5MPa까지 재하시켜 지지력을 평가하는 것이다. 이때 평균수직응력 증가량은 약 80~90kPa으로 평판재하시험에 비해 크다는 것을 알 수 있다. 고속철도 및 일반철도의 상부노반에서 발생하는 수직응력이 0.196MPa의 범위에 있으므로 독일

DIN 18 134규정에서의 최대수직응력($\sigma_{0,max}$) 0.5MPa은 철도 재하시험에서 최대수직응력으로 충분한 수준이라고 볼 수 있다. 국내 고속철도 현장에서는 반복평판재하실험은 독일규정인 DIN 18 134에 의거하여 1차 하중 재하 후 결과 값 Ev_1 과 2차 하 재하 후의 결과 값 Ev_2 의 값과 Ev_1/Ev_2 비로 관리하고 있다.

2.2.2 소형 FWD(Light Falling Weight Deflectometer)

소형 FWD시험장비는 낙하하중에 의해 발생된 충격하중과 노반표면에 발생된 처짐량을 통해 탄성계수를 추정하는 방법으로 개발 모델과 장비의 사양에 따라서 표 1과 그림 2와 같이 구분된다. 충격 에너지를 이용한 시험장비에는 덴마크의 Carl Bro Pavement Consults사에서 제작한 LFWD(Light Falling Weight Deflectometer), 일본에서 개발한 HFWD(Handy Falling Weight Deflectometer), 그리고 독일에서 개발된 동평판재하시험기(Dynamic Plate Load Test with Lightweight Drop-Weight Tester)가 있다. LFWD는 간편식 충격하중에 의한 처짐을 측정하며 탄성계수를 추정하는 시험장비로서 콘크리트포장, 아스팔트포장, 쇄석기층, 노상 등의 광범위한 도로 및 지반에 대하여 탄성계수를 구할 수 있다. HFWD는 LFWD와 마찬가지로 낙하 추를 낙하시켜 발생하는 충격하중과 변형을 측정하여 그 하중과 변형과의 관계로부터 탄성계수를 추정하고 이 탄성계수를 지지력 계수 값으로 변환하여 다짐정도를 평가한다(假部長門 등, 2003). 동평판재하시험기는 CBR이나 평판재하시험장비를 대체할 목적으로 독일에서 개발된 시험장비로서 직경 30cm의 재하판 위에 10kg의 낙하 추를 자유 낙하시켜 지반의 최대 처짐을 계측하여 동적탄성계수 E_{vd} (MPa)를 측정하여 다짐정도를 평가한다.

소형 FWD 시험장비는 평판 중심에서 처짐을 측정하여 Boussinesq 탄성론을 이용하며 변형계수를 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$E_{LFWD} = \frac{2(1-\nu^2)\sigma R}{\delta_c} \quad (1)$$

표 1. 여러 종류의 소형 FWD 시험장비와 제원

모델	재하판의 직경(mm)	하중		파장(ms)	센서	응력범위(kPa)
		추 무게(kg)	재하판에서의 하중(kg)			
GDP	300	10	17	18±2	가속도	100
TFT	200, 300	10	20	15~25	속도	<120
Prima 100	200, 300	10, 20	16	15~20	속도	<200

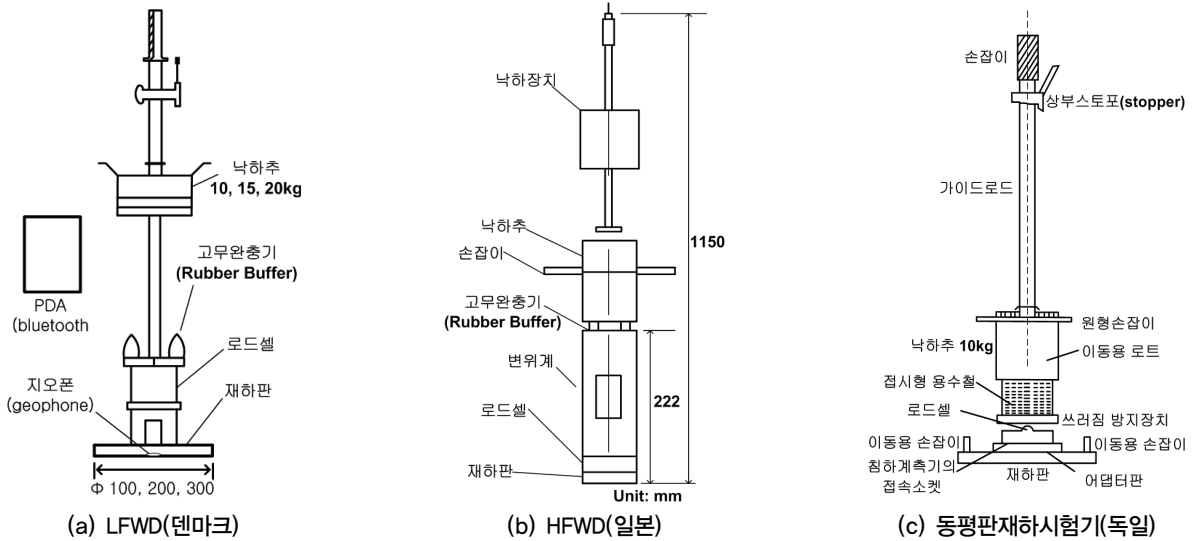


그림 2. LFWD, HFWD 및 동평판재하시험기의 개략도

표 2. 기존 연구자의 상관도

기존연구	상관 관계
건설교통부 (2004)	$k_{30} = 4.0321 \times E_{LFWD} - 53.425 \quad (R^2 = 0.906)$ $E_{PLT(1st)} = 22 + 0.7(E_{LFWD}) \quad (R^2 = 0.92)$ $E_{PLT(2st)} = 20.9 + 0.69(E_{LFWD}) \quad (R^2 = 0.94) \quad 12.5MPa < E_{LFWD} < 865MPa$
Nazzal 등 (2004)	$E_{PLT(1st)} = 0.97E_{LFWD} - 1.812 \quad (R^2 = 0.84)$
Khalid 등 (2005)	$E_{PLT(2st)} = 25.25e^{0.006E_{LFWD}} \quad (R^2 = 0.90)$

여기서, ν : 포아송비, δ_c : 탄성처짐량, σ : 작용응력, R: 평판의 반지름이다.

2.2.3 다짐품질시험간의 상관성에 관한 기존 연구동향

평판재하시험은 현장에서 가장 간편하게 지반의 지지력을 측정하는 실험으로 현장에서 가장 보편적으로 이용되는 실험방법이다. 실험결과가 현장에 비해 작은 경향이 있지만 비교적 확실한 지지력 결과를 파악하고 기초지반의 허용지지력 및 변형계수를 결정할 수 있다. 그러나 시간효과를 일부분 고려한 지반 자료를 제공하며 재하시험 시 작은 판으로 시험을 실시하기 때문에 실제 구조물의 응력 범위보다 작은 범위에서 결정된 결과가 산출되므로 주의하여 사용하여야 한다고 알려져 있다(건설교통부, 2004).

독일시방서(German Code)에 의하면 반복평판재하시험에서 구한 2번째 제하한 변형률계수(E_{v2})와 GDP(German Dynamic Plate)로 구한 동적변형률계수의 상관성은 식 (2)와 같다고 정의한바 있다.

$$E_{PLT(E_{v2})} = 600 - \frac{300}{300 - E_{GDP}} \quad (2)$$

여기서 $E_{PLT(E_{v2})}$ 은 반복평판재하시험에서 구한 $E_{v2}(MPa)$ 이다.

표 2는 다짐품질관리 시험방법간의 상관관계를 요약하였다. 표에서와 같이 건설교통부(2004)는 국내 12개의 현장에서 통일분류법에 의거하여 SM, SC 계열의 흙을 대상으로 LFWD로부터 구한 변형률계수와 지반반력계수와와의 상관관계를 제안하였다. 국외 연구는 실내시험에서 Nazzal et al.(2004)과 Khalid et al.(2005)이 노반재료를 점성토와 사질토를 대상으로 반복평판재하시험에서 구한 첫 번째 제하 기울기(E_{v1})와 두 번째 제하 기울기(E_{v2})로부터 회귀 분석하여 상관관계를 제안하였다.

2.3 변형률 레벨을 고려한 상관성 검토

지반의 응력상태는 지반의 탄성계수를 결정하는데 크게 영향을 미치는 요소로 알려져 있다(김대상 등, 2005).

각 시험방법에 따라 응력 조건이 다르기 때문에 각 시험간의 상관성을 분석하기 위해서는 지반의 응력 상태를 동일하게 한 후 이를 비교하여야 한다. 즉, 기준이 되는 응력상태에서의 탄성계수 또는 변형률계수 값으로 보정하여야 보다 정확한 상관성을 평가할 수 있다(김동수 등, 2005; 김대상 등, 2008). 평판재하시험의 경우 시 대표 변형률 깊이에서의 평균유효응력을 각 하중 단계마다 구하면 각 응력단계에 대하여 보정한 탄성계수 및 변형률 계수는 식 (3)을 이용하여 구할 수 있다. 여기서, 구속압 보정계수(n)는 지반의 종류에 따른 특성값으로 기준 평균유효응력에 대해 보정된 변형률계수를 구하는데 사용된다. 구속압을 달리한 실내시험에서 직접 구하거나, 실내시험의 제약이 있을 경우 흙의 종류에 따라 0.2~0.5의 값을 가정하여 사용할 수 있다고 알려져 있다(김동수 등, 2005). 본 논문에서는 구속압 보정계수를 0.5의 값을 사용하였다. 이는 보정된 탄성계수가 지반의 종류와 하중 등 구속압에 따라 많은 영향을 받는다는 가정으로 가장 큰 값을 사용하였으며, Kramer (1996)의 논문에서 상관성을 평가하기 위하여 사용된 구속압보정계수(n) 0.5값을 최종적으로 산정하였다.

$$E_{corrected} = E_{original} \left(\frac{\sigma'_{m,reference}}{\sigma'_{m,original}} \right)^n \quad (3)$$

여기서, $E_{corrected}$ 은 평균유효응력에 대해 보정된 탄성계수, $E_{original}$ 은 각 시험법 수행시 평균유효응력에서의 탄성계수, $\sigma'_{m,reference}$ 은 기준 평균유효응력, $\sigma'_{m,original}$ 은 각 시

험법 수행시의 평균 유효응력, n: 구속압 보정계수이다.

식 (3)을 적용하기 위해서 하중재하에 따른 평균유효응력을 구하며 지반 내의 응력증가분은 원형 등분포 하중 작용 시 Boussinesq의 해를 이용하여 구할 수 있으며, 임의의 깊이에서의 평균유효응력은 다음 식 (4)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\sigma'_m = \frac{1}{3}(\sigma'_{\nu} + \Delta\sigma'_{\nu} + 2\sigma'_h + 2\Delta\sigma'_h) \quad (4)$$

여기서, σ'_m 은 지반의 평균유효응력, σ'_{ν} 은 지반의 상재하중에 의한 수직응력, σ'_h 은 지반의 상재하중에 의한 수평응력, $\Delta\sigma'_{\nu}$ 은 평판에 작용하는 하중 강도 q에 의한 수직응력 증가분, $\Delta\sigma'_h$ 은 평판에 작용하는 하중강도 q에 의한 수평응력 증가분이다.

김대상 등(2008)은 지반반력계수(k_{30})와 변형률계수(E_{v2})의 상관성을 검토하기 위하여 응력보정을 위한 지반의 평균유효응력(σ'_m)을 정지토압계수(K_0) 0.5, 구속압 보정계수(n) 0.5으로 가정하였다. 본 논문에서는 반복평판재하시험에서의 재하응력과 소형 LFWD의 응력이 다르기 때문에 각각 다르게 적용하였다. 일반적으로 반복평판재하시험의 하중범위는 통상 직경의 2배정도이기 때문에 중간 깊이에 해당하는 평균유효응력의 평균값을 사용하여 기준 평균유효응력($\sigma'_{m,reference}$) 40kPa을 적용하였다. 소형 LFWD에서는 반복평판재하시험에서 구한 응력보다 작기 때문에 평균유효응력을 20kPa으로 가정하였다.

표 3. 강화노반재료의 입도기준

구분		강화노반			
		보조도상층		입도조정층	
최대입경(mm)		31.5 이하		125 이하	
입 도	D	40mm	100	125mm	100
		31.5mm	99~85	106mm	95~76
	D/2	16mm	82~56	63.5mm	84~56
				25.4mm	61~32
				9.52mm	46~21
	D/5	5mm	53~27	5mm	37~15
	D/10	2.5mm	43~21	2.5mm	28~10
	D/20	1.2mm	35~16	1.2mm	21~7
	D/50	0.6mm	25~10	0.6mm	15~5
	D/100	0.3mm	18~8	0.3mm	10~3
	D/200	0.15mm	12~5	0.15mm	7~2
	D/500	-	-		
D/1000	-	-			
<0.080mm	0.08mm	8~4			

표 4. 현장 성토재료별 기본물성실험결과

성토 재료	실험명	측정 개소	다짐실험		입도분포시험		U.S.C.S
			$\gamma_{d\max}$, gf/cm ³	$\omega_{opt}\omega_{opt}$, %	200번째 통과량	소성지수	
자갈 재료	경산 A	1	1.91	10	7.6	-	GP
	경산 B	4	1.98	8	6.5	-	GP
	울산	5	1.98	7	7.0	-	GP
	안성	2	2.2	5.6	4.2	-	GW
토사	울산	1	1.87	12	23.3	7.9	SC
	경산 A	3	2.12	14	21.4	10.3	SP
	동탄	6	1.94	10.8	23.7	6.3	SM
	안성	3	1.96	10.2	48.2	-	SM
	온양	5	1.99	9.5	15.4	-	SP

2.4 현장시험 개요

현장 시험구간은 경부고속철도 2단계 공사구간, 장항선 개량구간, 도로 시공현장 2개소 등 총 29개소에서 실험한 결과를 분석하였다. 성토재료는 자갈재료와 토사로 구분하여 분석하였으며, 강화노반 또는 상하부노반 층에서 측정하였다. 표 3은 강화노반재료로 사용하고 있는 보조도상층과 입도조정층의 입도기준이다. 보조도상의 최대입경은 31.5mm, 입도조정층은 125mm로 200번째 통과율이 8%이하 기준을 만족하는 것을 사용하고 있다.

표 4는 대상현장의 기본물성실험결과를 정리한 표이다. 쇄석재료는 세립분함유량이 8%이하로 대부분 GW, GP로 분류되며, 토사의 경우에는 세립분의 함유량이 SP, SC, SM로 분류되었다.

3. 시험결과 및 고찰

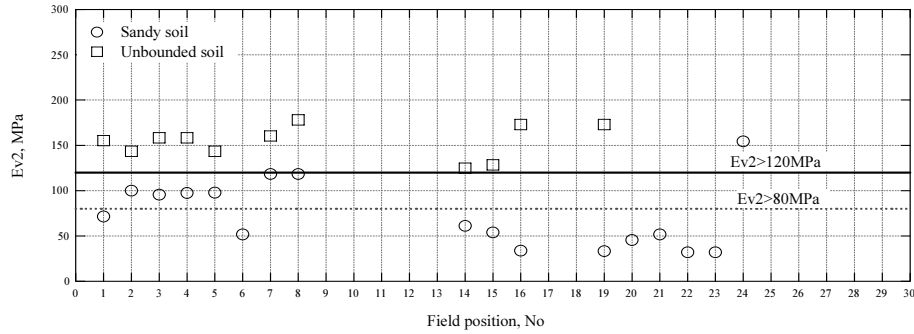
3.1 성토재료별 품질시험결과

표 5는 현장에서 측정된 응력보정하기 전의 토사와 자갈재료의 변형률계수(Ev1, Ev2)와 변형계수(ELFWD)를 정리한 표이다.

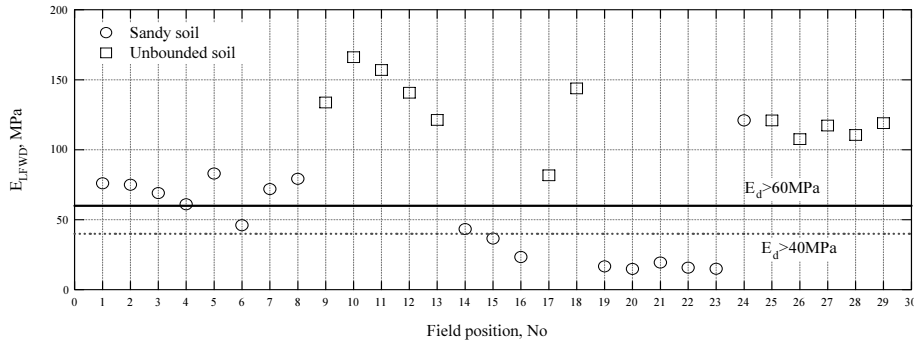
그림 3은 현장에서 측정된 모든 개소에서의 변형률계수(Ev2)와 변형계수(ELFWD)를 그림으로 표현한 것이다. 그림 3(a)의 변형률계수에 관한 설계기준은 상부노반, 하부노반, 강화노반이 다른 기준으로 관리되고 있다. 하부노반의 경우 60MPa, 상부노반 80MPa이며, 강화노반 기준은 120

표 5. 현장 다짐품질시험 결과 정리(응력보정 전)

실험명	개소	CPLT, MPa		LFWD, MPa	흙의 종류
		Ev1	Ev2		
동탄	1	34.1	71.4	76	토사
	2	52.9	100	75	
	3	54.9	95.7	69	
	4	51.1	97.4	61	
	5	51.1	97.8	83	
	6	25.6	51.7	46	
경산 A	7	72.6	118.4	71.9	자갈 재료
	8	67.2	118.4	79.2	
	9	65.2	155.2	133.8	
경산 B	10	77.6	143.4	166.2	자갈 재료
	11	73.8	158.3	157	
	12	76.3	158.3	140.7	
	13	79.0	143.5	121.3	
안성	14	26.8	61.1	43.3	토사
	15	23.6	54.0	36.5	
	16	16.0	33.8	23.4	
	17	-	-	81.8	
	18	60	160.4	148.3	
온양	19	21.3	33.3	16.7	토사
	20	21.7	45.5	14.8	
	21	17.9	51.7	19.4	
	22	10.9	32.1	15.7	
	23	13.4	31.9	14.9	
울산	24	66.2	154.4	121	자갈 재료
	25	109.9	154.4	121	
	26	104.6	224.9	107.5	
	27	58.4	128.5	117.3	
	28	91.8	173	110.6	
	29	88.2	173	119	

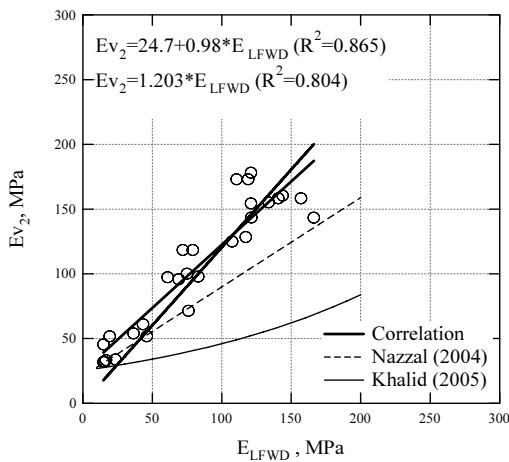


(a) 변형률계수(E_{v2})

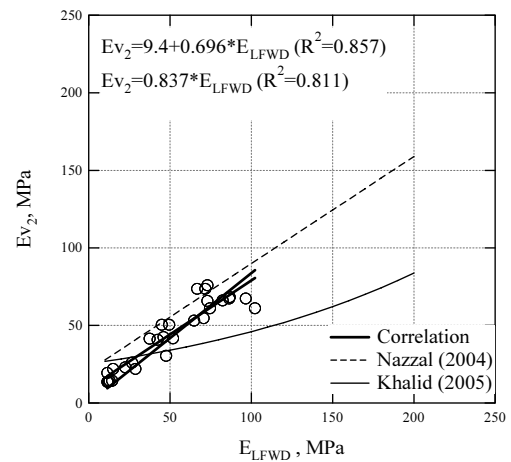


(b) 변형률계수(E_{LFWd})

그림 3. 전체 측정개소에서의 변형계수



(a) 보정 전

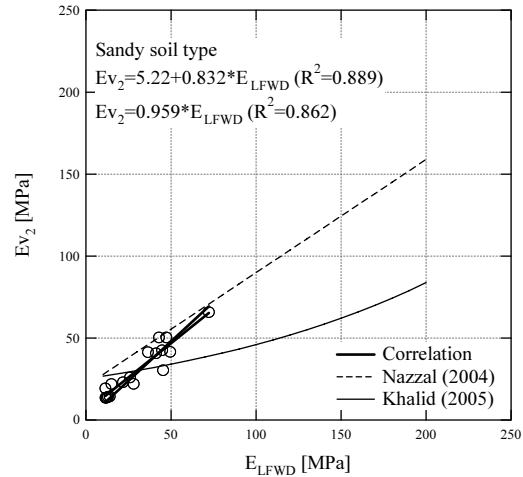
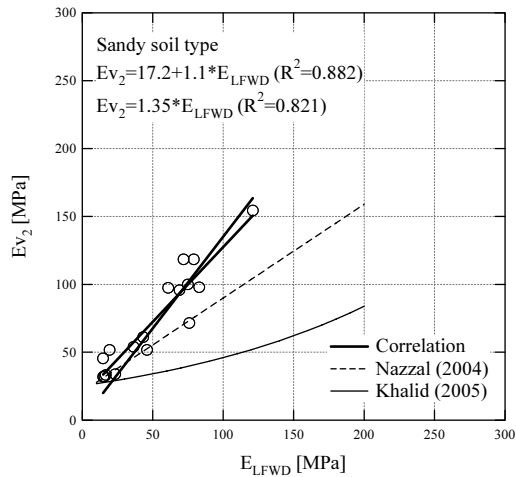


(b) 보정 후

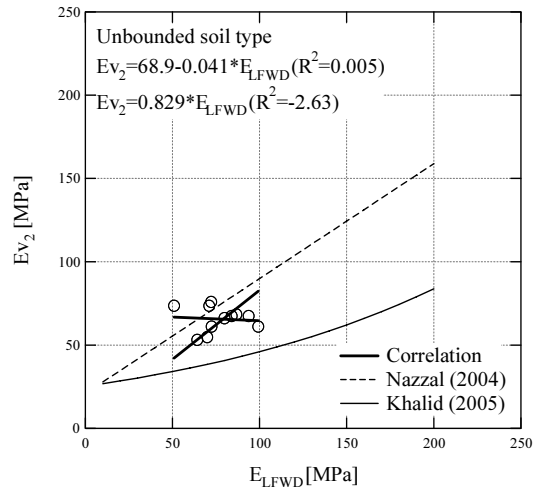
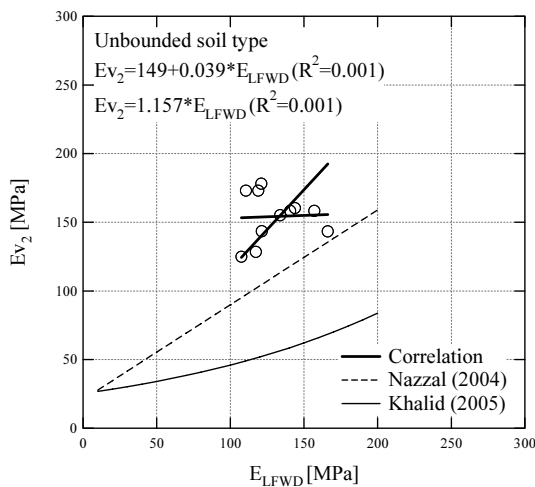
그림 4. 변형률계수(E_{v2})와 변형계수(E_{LFWd})의 응력보정 전후의 상관관계(모든재료)

MPa이다. 그림에서와 보면 자갈재료의 경우 품질관리 기준값을 대부분 만족하고 있는 것을 볼 수 있다. 최근 일본에서는 현장 기계 다짐으로 대부분 강성기준을 만족하기 때문에 층별 강성 기준을 없애고 최 상위층만 측정하도록 하고, 층별 관리는 밀도관리만을 실시하는 것으로 개정된 바 있다. 그림 3(b)은 LFWd로 구한 변형계수(E_{LFWd})로 토사의 경우는 변형률계수(E_{v2})의 실험결과와 같이 결과 값에 큰 편차를 보이지 않고 있으나, 자갈과 같이 강성이

큰 재료의 경우 변형계수(E_{LFWd})의 편차가 크게 발생하고 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 경향은 자갈의 경우 재료 자체의 강성이 크기 때문에 하중이 작게 재하되는 소형장비의 특성상 편차가 크게 나타난 것으로 판단된다. 따라서 소형장비로 강화노반과 같이 강성이 큰 재료의 다짐을 평가할 때에는 이러한 실험적 한계성을 고려하여야 할 것으로 판단된다.



(a) 응력보정 전과 후(토사)



(b) 응력보정 전과 후(자갈재료)

그림 5. 성토재료별 응력보정 전·후의 상관관계

3.2 변형률계수(E_{v2})와 변형계수(E_{LFWD})와의 상관관계

그림 4는 전체 측정에서의 LFWD 실험에서 구한 변형계수(E_{LFWD})와 반복평판재하실험에서 구한 변형률계수(E_{v2})와의 상관성을 응력보정 전·후 비교하였다. 그림에서와 같이 LFWD 실험에서 구한 변형계수(E_{LFWD})와 변형률계수(E_{v2})의 상관성(R^2)은 0.804~0.865로 상관성이 매우 높은 것으로 나타났으며, 응력 보정 후에 다소 상관성이 높아졌다. 기존연구자 Nazzal et al.(2004)과 Khalid et al.(2005)이 제안한 회귀식과 비교해 볼 때 응력보정 전의 경우에는 선형기울기가 다소 크게 나타났으며, 응력보정 후에는 제안 식과 거의 유사한 결과를 보이는 것을 알 수 있다. 그림 4(b) 응력보정 후 각 변형계수의 값이 거의 1:1의 기울기를 보이고 있어 응력보정에 의해 변형계수가 거

의 같아지는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과를 볼 때 기존 연구자들이 각 실험방법에서 산출되는 값에 대하여 응력을 보정하게 되면 같은 결과를 얻을 수 있다는 것과 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

그림 5는 성토재료별로 구분하여 상관성을 분석하였다. 그림 5(a)의 토사인 경우에는 상관성이 $R^2=0.821\sim0.889$ 로 매우 높은 상관성을 보이고 있으며, 응력보정 전보다 보정한 후가 다소 높은 상관성을 가지는 것을 볼 수 있다. 그림 5(b)는 자갈재료에 대한 상관성을 나타내었다. 그림에서와 같이 자갈재료의 경우 토사 재료와 달리 각 품질시험간의 상관관계가 매우 적은 것으로 나타났다. 이는 앞서 언급하였듯이 자갈재료의 경우 강성이 크기 때문에 소형 재하시험의 경우 충격하중의 크기가 작기 때문에 상관성이 낮게 평가된 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 현장에서 많이 사용하고 있는 반복평판 재하시험에서의 변형률계수(E_{v2})와 소형 FWD 실험에서 구한 변형계수(E_{LFWD})간의 상관성을 검토하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

- (1) 서로 다른 응력상태에서의 구한 변형계수에 대하여 지반의 응력을 동일하게 보정하게 되면 서로 상관도가 높아지고 각각의 변형계수의 값이 서로 같아질 수 있다는 것을 확인하였다.
- (2) 자갈재료의 경우 강성이 큰 재료이기 때문에 현장다짐 품질기준 값을 쉽게 만족하는 것을 볼 수 있으며, 자갈재료의 경우 다짐이 불충분하여도 강성기준을 쉽게 만족할 수 있기 때문에 주의하여야 할 것으로 판단된다. 또한 침하에 대해서는 강성기준뿐만 아니라 밀도관리를 충분히 하여야 한다.
- (3) 성토재료가 토사인 경우에는 변형률계수(E_{v2})와 변형계수(E_{LFWD})와의 상관성이 $R^2=0.821\sim 0.889$ 로 매우 높은 상관성을 보이고 있으며, 응력보정 전보다 후가 다소 높은 상관성을 가지는 것으로 나타났다. 이와 반대로 자갈재료의 경우 각 품질시험간의 상관관계가 매우 적은 것으로 나타났다. 이는 앞서 언급하였듯이 자갈재료의 경우 강성이 크기 때문에 소형 재하시험의 경우 충격하중의 크기가 작기 때문에 상관성이 낮게 평가된 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부 (2004), *포장하부구조 다짐관리 기준 정립*, 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구 1단계 3차년도 최종보고서, pp.E2-47-65.
2. 김대상, 이수형, 최찬용 (2005), “철도노반공사 다짐관리 기준에 관하여”, *철도시설기술지*, No.98, pp.38-44.
3. 김대상, 박성용, 김수일 (2008), “평판재하시험을 이용한 지반반력계수와 변형률계수의 상관관계 평가”, *한국지반공학회논문집*, 제24권, 제6호, pp.57-67.
4. 김동수, 서원석, 권기철 (2005), “반복식 평판재하시험을 이용한 노상토의 현장 변형계수 평가”, *한국지반공학회논문집*, 제21권, 제6호, pp.67-79.
5. 김수일, 유지형 (1990), “FWD에 의한 4층 아스팔트 포장 구조체의 층별 탄성계수 추정”, *대한토목학회논문집*, Vol. 10, No.2, pp.67-78.
6. 김종렬, 강권수, 박달수, 강승구 (2002), “소형 FWD의 개

량을 통한 아스팔트 포장체의 물성치 추정에 관한 연구”, *대한토목학회 2002년 학술발표회집*, pp.134-137.

7. 박용부, 정형식 (2003), “동평판 재하시험을 이용한 정적 및 동적변형계수 비교”, *한국지반공학회논문집*, 제19권, 제5호, pp.335-342.
8. 안지환, 양성린, 박희문, 권수안 (2004), “현장에서의 동적 관입시험을 이용한 노상토의 지지력 평가연구”, *한국도로학회 논문집*, Vol.6, No.3, pp.17-26.
9. 假部長門, 上浦正樹, 關根稅夫 (2003), “小型FWDによる支持力値とその適用事例(1)”, *舗装工學學會誌*, 38-1, pp.13-17.
10. 日本舗装工學會 (2000), “路上·路盤の支持力評価方法”, *日本舗装工學學會誌*, 35-12, pp.15-18.
11. 西岡 英俊, 安西 綾子, 神田 政幸, 館山 勝 (2010), *地盤調査法に応じた地盤変形係数および地盤反力係数の算定法*, 鉄道総研報告 特集 基礎構造物の設計技術, RTRI REPORT, Vol.24, No.7, pp.11-16.
12. Adam, C. and Adam, D. (2003), “Modelling of the dynamic load plate test with the light falling weight device”, *Asian Journal of civil Engineering (Building and Housing)*, Vol.4, No.2-4, pp.73-89.
13. Fleming, P. R. (2001), *Field Measurement Of Stiffness Modulus For Pavement Foundations*, Transportation Research Record 1755, Annual Meeting of the Transportation Research Board for Presentation and Publication Submitted to the 2001, pp.69-77.
14. Kim, j. R., Kang, H. B., Kim, D. H. and Park, D. S. (2006), “Evaluation of in-situ Modulus of Compacted Subgrades using Portable Falling Weight Deflectometer as an alternative to Plate Bearing load Test”, *2006 Annual Meeting of the Transportation Research Board for Presentation and Publication*.
15. Khalid A. A., Murad A. F. and Ekrem, S. (2005), “Laboratory Evaluation of the Geogauge and Light Falling Weight Deflectometer as Construction Control Tools”, *Journal of materials in civil engineering*, ASCE, ISSN 0899-1561/2005/5-560-569, pp.560-569.
16. Kramer, S. L. (1996), *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, New Jersey, pp.653.
17. Livneh, M. and Goldberg, Y. (2001), *Quality Assessment During Road Formation and Foundation Construction: Use of Falling-Weight Deflectometer And Light Drop Weight*, Transportation Research Record 1755, Annual Meeting of the Transportation Research Board for Presentation and Publication, Submitted to the 2001, pp.69-77.
18. Masaki. K. and Etsuo, A. (2000), “Stiffness evaluation of the subgrade and granular aggregates using the portable FWD”, *Unbound Aggregates in Road Construction*, Dawson, pp.217-223.
19. Nazzal, M., Abu-Farsakh, M. and Alshibli, K. (2004), “Evaluating the potential use of a Portable LFWD for Characterizing pavement layers and subgrades”, *Geotrans 2004 of American Society of Civil Engineers*, pp.915-924.

(논문접수일 2011. 7. 15, 심사완료일 2011. 9. 16)