

평판재하시험, 흠강성측정기 및 동적콘관입시험기를 이용한 노상토의 탄성계수 비교

Comparison of Elastic Moduli of Subgrade Soils Using Plate Loading Test, Soil Stiffness Gauge and Dynamic Cone Penetrometer

김 규 선¹ Kim, Kyu-Sun

Abstract

This paper describes the correlation and relationship between elastic moduli measured by three stiffness measurement methods with different mechanical characteristics to evaluate the compaction characteristics of subgrade soils. The Soil Stiffness Gauge (SSG) with very small strain ($\approx 0.001\%$) ranges, static Plate Loading Test (PLT) with mid-level strain ($\approx 0.01 \sim 0.1\%$) ranges, and Dynamic Cone Penetrometer (DCP) using penetration resistance were implemented to measure the elastic modulus. To use the elastic modulus measured by different measurement methods with a wide range of strain in practice, it is required to identify the correlation and relationship of measured values in advance. The comparison results of the measured elastic moduli (E_{SSG} , E_{PLT} , E_{DCP}) using the three measurement methods for domestic and overseas subgrade soils under various conditions indicate that the evaluated elastic modulus relies on the types of soils and the level of stress condition. The correlation analysis of the measured elastic moduli except the data of cement treated soils indicates that the static elastic modulus (E_{PLT}) is evaluated as about 60 to 80% of the dynamic elastic modulus (E_{SSG}). Unusual soils such as cement treated soils are required to be corrected by the stress correction during the correlation analysis with typical soils, because these types of soils are sensitive to the stress condition when measuring the static elastic modulus (E_{PLT}) of soils. In addition, when considering the use of DCP data for the evaluation of the elastic modulus (E_{DCP}), the measured data of the elastic modulus less than 200 MPa show more reliable correlation.

요 지

본 연구는 노상토의 다짐특성 평가를 위해 특성이 다른 세 가지 강성측정 시험법으로 측정된 탄성계수의 상관관계 및 연관성에 대해 논의하였다. 미소변형률($\approx 0.001\%$) 범위의 흠강성측정기(SSG), 중변형률($\approx 0.01 \sim 0.1\%$) 범위의 정적 평판재하시험(PLT), 관입저항을 이용하는 동적콘관입시험기(DCP)가 탄성계수 측정에 이용되었다. 변형률 범위가 다른 시험방법에 의해 측정된 탄성계수를 실무에 적용하기 위해서는, 각각의 측정치에 대한 상관관계 및 연관성에 대해 사전에 파악되어야 한다. 국내·외 여러 조건의 노상토에 대해서 세 가지 방법을 이용하여 측정된 탄성계수(E_{SSG} , E_{PLT} , E_{DCP})를 비교 분석한 결과에 따르면, 흠의 종류 및 응력 조건에 따라 각 방법에 의해 측정된 탄성계수가 상이한 결과를 나타내었다. 전체 수집된 데이터 중 시멘트 처리토를 제외한 일반적인 노상토를 대상으로 한 상관성 분석결과, 정적 탄성계수(E_{PLT})는 동적 탄성계수(E_{SSG}) 대비 60~80%의 크기를 나타나는 것으로 평가되었다. 시멘트 처리토와

1 정희원, 삼성물산㈜ 건설부문 기술개발실 수석연구원 (Member, Principal Research Engineer, Construction Technology Division, Samsung C&T Corp., Tel: +82-2-2145-6993 Fax: +82-2-2145-6456, kysun@empas.com)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

같은 특이 토질은 정적 탄성계수(E_{PLT}) 측정 시 구속압의 영향을 크게 받기 때문에, 다른 일반 토질과 상관관계 비교 시 응력보정을 수행하여야 한다. 또한, 동적콘관입시험 결과를 이용하여 탄성계수(E_{DCP}) 예측 시, 200MPa 이내의 범위에서 탄성계수 데이터가 좀더 신뢰도 높은 상관관계를 나타내었다.

Keywords : Dynamic cone penetrometer, Elastic modulus, Plate loading test, Soil stiffness gauge

1. 서론

국내 토공현장에서의 다짐관리는 일반적으로 평판재하시험(Plate Loading Test, PLT)과 들밀도시험을 통해서 이루어지며, 필요한 경우 캘리포니아지지력비(California Bearing Ratio, CBR) 시험을 이용해 수행되어 왔다. 그러나 최근 설계, 시공 및 유지관리 과정에서 일관성 있는 역학적 개념을 적용하기 위한 대체시험으로 비파괴 시험 및 관입시험과 같은 역학적 특성에 기반한 시험법이 도입되면서 관련 연구가 지속적으로 진행되었다(Lenke et al., 2003; Kim et al., 2005; Choi, 2008; Kim et al., 2011). 국내 도로포장 분야에서도 지난 10여 년 동안 수행된 “한국형 포장설계법 연구”를 통하여 노반에 대한 탄성계수 개념의 변형특성과 관련한 광범위한 연구가 수행되었으며 “2011 도로포장 통합지침”을 통하여 역학적 개념기반의 새로운 다짐관리 기준이 제시되기도 하였다. 이 지침에 따르면 다짐 후 하부지반의 설계 탄성계수와 현장 탄성계수를 비교하기 위하여 평판재하시험이나 동적콘관입시험(Dynamic Cone Penetration Test, DCPT) 등과 같은 시험법을 이용하여 다짐관리를 수행하도록 제안하고 있다(MLTMA, 2011).

기존의 정적 PLT는 포장체 하부지반의 지지력 평가를 위하여 현장에서 일반적으로 사용되고 있는 시험법이며, 중변형률(0.01%~0.1%) 범위의 하중과 변위를 측

정하여 대상지반의 역학적인 특성을 평가한다. 측정된 하중과 변위의 관계로부터 탄성계수가 결정되는데, 변형률이 크게 발생하는 시험과정 중 지반은 탄소성 상태가 되기 때문에 하중 규모는 탄성계수 측정 결과에 큰 영향을 미칠 수 있다(Kim et al., 2005). Fig. 1에 나타낸 바와 같이, 탄성계수는 변형률에 따라 크게 영향을 받는다. 미소변형에 해당하는 0.001% 변형률에서의 탄성계수를 기준으로 변형률이 0.1%까지 발생하게 되면 측정되는 탄성계수는 기준치의 약 80% 수준으로 평가된다(Clayton, 2011). 측정방법에 따라 변형률 범위가 각각 다르기 때문에, 탄성계수 측정치는 측정방법 선택에 따라 큰 영향을 받을 수도 있다. 따라서, 해당 목적에 맞는 변형률 범위에 해당하는 탄성계수를 측정 및 이용할 필요가 있다.

본 연구에서는 노상토의 역학적 특성 측정을 위한 시험방법으로 일반적으로 사용하는 평판재하시험(PLT)으로 측정된 정적 탄성계수(E_{PLT})와 미소진동을 이용하여 반사되는 진동측정을 이용한 미소변형률 대역에서 흙의 강성을 측정하는 흙강성측정기(Soil Stiffness Gauge, SSG)에서 측정된 동적 탄성계수(E_{SSG})를 비교하여 변형률에 따른(0.001%~0.1%) 측정치의 영향에 대하여 고찰하였다. 분석을 위한 데이터로는 국내·외에서 모형토조를 이용하여 수행된 실내시험 2개소와 도로현장 4개소에서 실측한 116개의 측정 데이터를 비교하였다. 추가적으로 역학적 특성이 다른 저항강도로부터 탄성계수를 예측하는 동적콘관입시험(DCPT)을 이용하여 경험적으로 예측한 탄성계수(E_{DCP})를 결과의 비교 분석 시 활용하였다.

2. 지반 탄성계수 측정

2.1 변형률 범위에 따른 정·동적 탄성계수

비파괴시험을 이용하여 평가한 역학적 특성치는 미소변형률의 동적인 하중을 이용하여 지반 특성을 산정

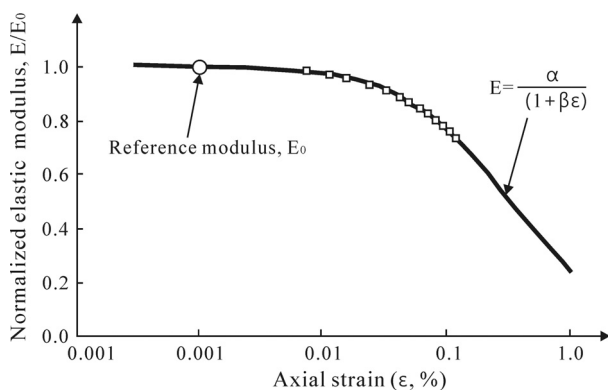


Fig. 1. Normalized stiffness data (modified after Clayton (2011))

하기 때문에 소성변형이 발생할 가능성이 낮지만, 중간 정도의 변형을 유발하는 정적 평판재하시험(PLT)의 경우에는 소성변형을 포함하는 탄소성 거동이기 때문에 두 측정치는 큰 차이가 발생할 수 있다. 일반적으로 사용되는 정적 PLT는 반복하중을 무시하고 초기 재하단계의 탄성계수(E_i)를 산정한다. 이와 같이 초기단계에서 시험을 수행한 측정치에는 상당량의 소성변형을 포함하기 때문에 노반설계에 사용되는 회복탄성계수(M_R)와 같은 강성을 평가하기 어렵다. 이러한 정적 PLT에서 발생하는 소성변형을 억제하기 위해서 2회 이상의 재하단계를 포함한 반복식 PLT를 통하여 탄성계수(E_R)를 산정할 것을 추천하기도 한다(Alshibli et al., 2005; Kim et al., 2005). 초기단계 탄성계수(E_i) 및 재하단계 탄성계수(E_R)의 개념은 Fig. 2에 나타낸 바와 같다. 본 연구에서는 이러한 측정 매커니즘 및 변형을 범위가 다른 각각의 탄성계수 측정 결과를 비교하기 위해 일반적으로 사용되는 정적 PLT를 기준으로 한 PLT 탄성계수(E_{PLT} , E_{static} , E_i)와 소성변위가 억제된 상태의 흙강성측정기(SSG)를 이용한 SSG 탄성계수(E_{SSG} , $E_{dynamic}$)를 비교 분석하여 실무에서 활용할 수 있는 상관관계를 제시하고자 하였다.

2.2 평판재하시험(KS F 2310, ASTM D 1196)

토공사에서 다짐평가를 위해 일반적으로 사용되는 정적 PLT는 기초지반 지지력을 평가하기 위해 사용된다. 두께 25mm 이상, 지름 300~750mm의 원형판에 가한 하중과 침하량을 측정하여 산정한 지지력계수(k , modulus of subgrade reaction)의 기준치 대비 만족 여부를 평가한다. 일반적으로 PLT 결과는 현장조건에 비해 보수적인 결과를 도출하는 경향이 있지만, 많은 실적을 가지고 있

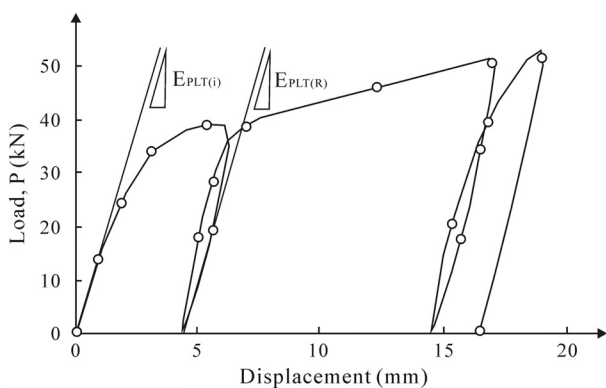


Fig. 2. Typical result of plate loading test (modified after Alshibli et al. (2005))

으며 측정 결과의 평가, 설계에서의 적용법 등이 거의 확립되어 신뢰할 만한 지지력 및 탄성계수를 결정할 수 있다. 노상토에 대한 PLT를 위해서는 덤프트럭 등의 하중이 큰 현장 장비를 활용한다. 유압잭 용량은 지반종류에 따라 달리 적용되며 연약한 지반의 경우 50kN, 단단한 지반의 경우 100~300kN 용량을 갖추어야 한다. 하중계는 하중을 $\pm 2\%$ 정밀도로 측정 가능한 것이어야 한다. PLT를 이용한 정적 탄성계수(E_{PLT})는 다음과 같은 식으로 계산될 수 있다.

$$E_{PLT} = \frac{P \cdot (1 - \nu^2)}{2 \cdot R \cdot \delta} \quad (1)$$

여기서, E_{PLT} 는 평판재하시험 탄성계수, ν 는 포아송비, P 는 작용하중, R 은 평판의 반지름, δ 는 평판의 변위이다.

2.3 흙강성측정기(ASTM D 6758)

흙강성측정기(SSG)는 간단하고 신속하게 지반 강성을 현장에서 측정하는 장치이다. SSG는 당초 군사용으로 개발되었다가 추후 지반강성을 비파괴적으로 측정하는 휴대용 장비로 상용화 되었다(Fiedler et al., 1998). SSG는 미소진동을 이용하여 발생시킨 응력으로 야기되는 지반변형을 측정하여 흙의 물리적 임피던스(impedance)를 평가한다. 지표면에서 장치에서 발생시킨 응력을 지반으로 전달시키면 시간의 함수로 표면 속도를 측정하는 동시에 변위를 측정하여 흙의 강성을 산정할 수 있다. 장치의 제원은 무게 100kN, 직경 280mm, 높이 254mm 크기로 1인 휴대가 가능하며, 한 지점에서 1회 측정시간은 약 75초 소요된다. SSG 내부의 진동기는 100~196Hz 범위의 25개 진동수로 $1.27 \times 10^{-6}m$ 이하의 수직방향의 변형을 발생시키고, 내부 지오폰으로 진동하중으로 발생한 변위량을 측정한다. 측정치는 링기초의 강성 계산을 위한 탄성해석식을 이용하여 산정되며 선형 탄성, 균질, 등방성 반무한체에서의 링기초에 대한 강성과 탄성계수의 관계는 식 (2)와 같다(Poulos and Davis, 1974; Fiedler et al., 1998; Lenke et al., 2003; Sawangsurinya et al., 2006). Sawangsurinya et al.(2003)의 연구에서는 SSG 탄성계수(E_{SSG})는 변형률을 고려할 때 탄성과 시험(seismic test)과 유사한 탄성계수를 나타낸다고 하였다.

$$K_{SSG} = \frac{E_{SSG} \cdot R}{(1-\nu^2) \cdot \omega(n)} = \frac{1.77 \cdot E_{SSG} \cdot R}{(1-\nu^2)} \quad (2)$$

여기서, ν 는 포아송비, R 은 링기초 외경(= 57.15mm), $\omega(n)$ 는 링기초 형상에 대한 상수(= 0.565), E_{SSG} 와 K_{SSG} 의 단위는 각각 MPa와 MN/m 이다.

2.4 동적콘관입시험(ASTM D 6951)

동적콘관입시험기(DCP)는 지지력 측정을 위해 1950 년대에 개발된 시험법으로 미국, 유럽, 호주 등에서 지반특성 평가를 위한 현장시험으로 많이 이용되고 있다. DCP는 49~78N의 추의 자유낙하로 발생시킨 타격에너지로 콘을 지중 관입시켜서 지반의 저항강도를 측정한다. 콘은 재사용식 및 교환식 두 종류로 사용할 수 있으며, 부식 방지를 위해 장치 및 룯드는 스테인레스로 제작되었다(KSEP, 2010). 시험결과는 타격당 관입깊이(DCP index, DPI, DCPI, DCP-PR)로 표시되는데, 주로 지반의 심도별 저항강도 단면을 취득하는데 활용된다. DCP는 흙의 저항강도를 직접 측정하는 장치이지만, DPI-CBR-E의 관계를 이용하여 탄성계수를 간접적으로 평가하는 연구도 진행되어 왔다(Powell et al., 1984; Webster et al., 1992; Chen et al., 2005). DCP 측정치인 관입저항

DPI 값은 표준관입시험의 N치와 유사하게 대상 지반의 밀도, 응력 수준, 입도분포와 입자의 성분 특성에 영향을 받는다. DCP는 단순 타격식 시험이므로, 간편하게 대부분의 흙에 대해 신뢰성 높은 시험을 수행할 수 있으며, 장비의 유지관리 및 보관이 용이하다는 장점이 있다 (Kim et al., 2013).

3. 데이터 수집 및 분석

3.1 데이터 수집

실험 데이터는 PLT와 SSG로 강성 측정이 동시에 수행된 경우를 대상으로 수집하였으며, 실내실험 47회, 현장시험 69회 등 총 116개의 데이터셋을 기준으로 분석하였다. 기존 발표된 연구결과에 국내 도로현장에서 측정된 실측치를 포함하여 비교 분석을 수행하였다. 대상 토질로는 도로 노반으로 사용되는 점토(CL, CL-ML), 사질토(SP, SM, SW, SW-SM), 자갈질토(GP, GC, GW, GW-GC), 시멘트 및 석회 처리토 등을 대상으로 하였으며, 다양한 강성에 대해 비교 분석이 가능하도록 하였다. 사용된 데이터 출처 및 관련 내용은 Table 1에 정리하였다.

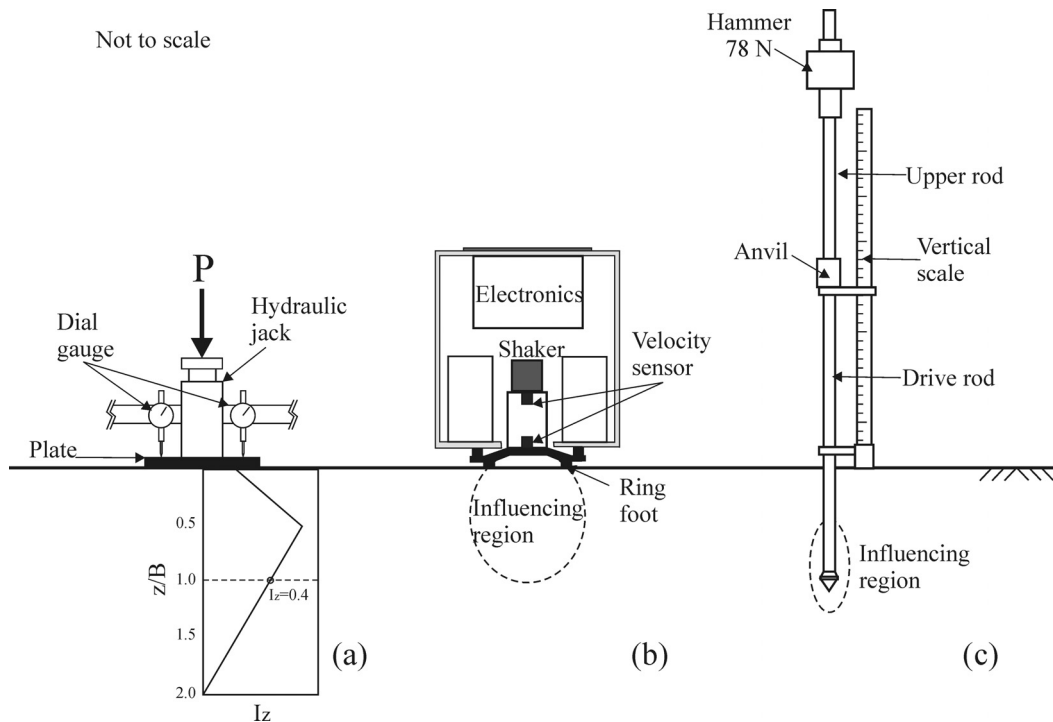


Fig. 3. Measuring device for elastic modulus: (a) PLT, (b) SSG, (c) DCP

Table 1. Data collection for comparison studies

Test type	Test method	Reference / Location	Testing no.	Soil description
Laboratory test	SSG, PLT, DCP	Alshibli et al. (2005)	26	Silty and clayey soil (CL, CL-ML), Sand (SP), Granular (GC, GW, GP), Cement treated soil,
	SSG, PLT, DCP	Kim et al. (2013)	21	Uniform soil (SP), Subgrade soil (SW-SM, SM), Clayey soil (CL)
Field test	SSG, PLT, DCP	Nazzal (2003)	36	Subgrade soil (GW-GC, CL, CL-ML), Granular (GP-GM, GP), Cement or lime treated soil
	SSG, PLT	MCT (2004)	6	Subgrade soil (SW, SW-SM)
	SSG, PLT, DCP	Geochang	9	Subgrade soil (SW-SM)
	SSG, PLT, DCP	Ansan	18	Subgrade soil (SM)

3.2 정·동적 탄성계수 측정치 비교

비파괴시험을 통하여 측정된 탄성계수(E_{SSG})와 PLT에서 측정된 탄성계수(E_{PLT})는 측정 변형률의 범위 차이로 인해 상이한 수치를 나타내므로, 실무에서 설계치로 활용하기 위해서는 두 시험법 사이의 차이점을 사전에 고려할 필요가 있다. Fig. 4는 국내·외에서 수행된 모형토조를 이용한 연구결과를 나타내고 있다. 국내에서 채취된 4가지 종류의 시료에 대한 SSG와 PLT의 측정치를 비교한 결과를 Fig. 4(a)에 나타냈으며, E_{SSG} 와 E_{PLT} 는 비례관계를 보인다. 분석에 사용된 데이터는 탄성계수 100MPa 미만의 측정치로 다소 작은 강성 범위의 값들에 한정되며 E_{PLT} 가 E_{SSG} 에 비해 선형적으로 58% 과소평가되는 것으로 나타났다(Kim et al., 2013). 이는 Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 중변형률 범위의 E_{PLT} 가 미소변형률 범위의 동적 시험결과에 비해 상대적으로 작은 값으로 평가하는 것과 동일한 경향이다. 반면에 미국 노상토로 사용되는 다양한 토질조건에 대해서 시험을 수행한 Alshibli et al.(2005)의 연구에서는 일반적인 노상토 외에 추가적으로 강성이 큰 시멘트 처리토에 대해서도 측정이 수행되었다. 이 연구에서는 실내 모형토조 시험을 이용한 측정 데이터로 E_{SSG} 와 E_{PLT} 의 비교 분석을 통하여 상관관계를 제시하였으나, 전체적인 경향성은 다소 상이하였다. Fig. 4(b)에 나타내었듯이, 측정 데이터는 $E_{SSG} < 150\text{MPa}$ 에서는 E_{PLT} 가 과소 평가되는 비슷한 경향성은 나타냈지만, $E_{SSG} > 200\text{MPa}$ 의 범위에서는 E_{PLT} 가 상당히 과대평가 됨을 나타내고 있다. 이로 인해서 E_{SSG} 와 E_{PLT} 의 전체 상관관계 또한 지수함수 관계의 비선형성을 가지는 것으로 제안되었다.

Chen et al.(2005)에 따르면 동적시험의 경우 간편하고 신속한 측정이 가능하지만, 사용하중이 미세하고 진동수가 높기 때문에 상대적으로 큰 값을 보인다고 하였

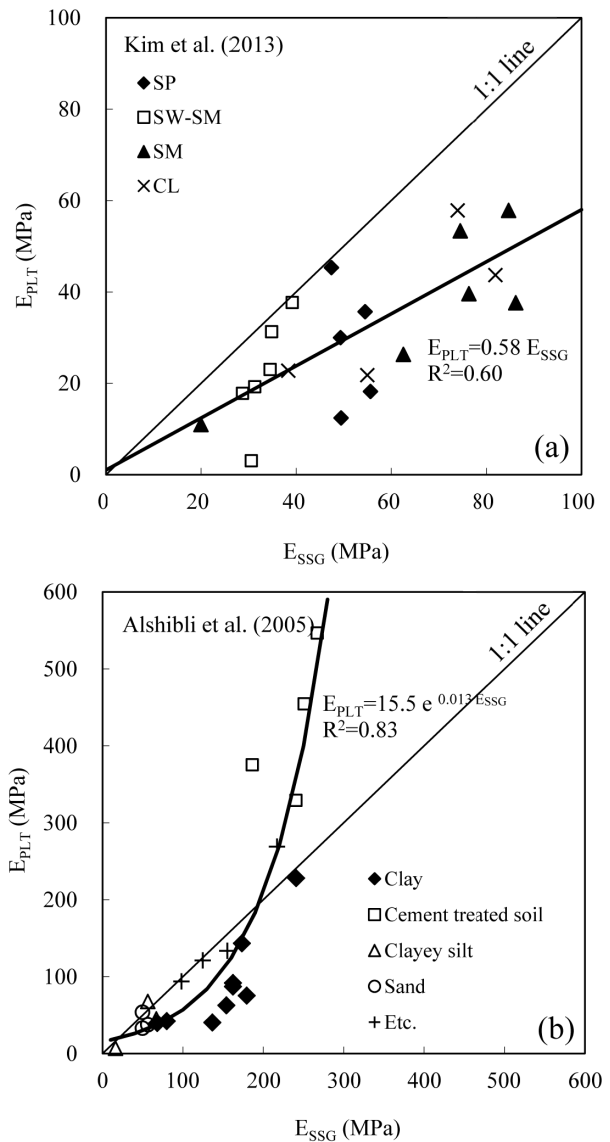


Fig. 4. Previous research of E_{SSG} vs. E_{PLT} (modified after (a) Kim et al. (2013) and (b) Alshibli et al. (2005))

다. 특히 SSG의 경우에는 측정대상 지반의 표면상태에 민감하고 측정 영향깊이에 대한 평균적인 강성을 나타낼 수도 있다고 지적하였다. Fig. 5는 현장에서 SSG 탄

성계수와 PLT 탄성계수를 비교한 데이터 및 Alshibli et al.(2005)과 Kim et al.(2013)의 실내실험 결과에서 제안한 상관관계를 함께 도시하였다. 본 연구에서 수집한 현장 데이터는 분산이 다소 크게 나타나지만, 전반적으로 1:1선 하단에 위치하고 있으며, 강성이 커질수록 분산이 커지는 선형의 형태를 나타내고 있다. 회귀분석 결과 E_{PLT} 는 E_{SSG} 의 약 69%의 값을 나타내었다.

비교 분석을 위해 수집된 모든 실내 및 현장실험 데이터를 함께 도시한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 시멘트 처리토와 같이 이상치로 판정되는 데이터를 제거한 결과, 강성이 커질수록 다소 분산이 커지지만 전체적으로 선형관계를 나타내는 것을 알 수 있다. 강성은 다른

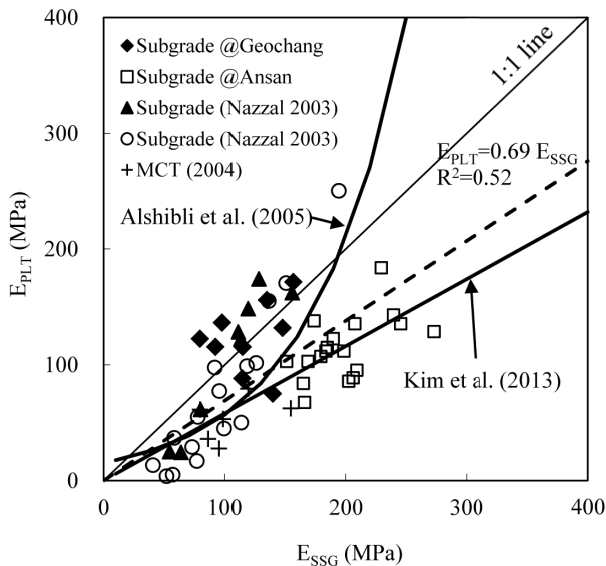


Fig. 5. E_{SSG} vs. E_{PLT} relationship using field test data

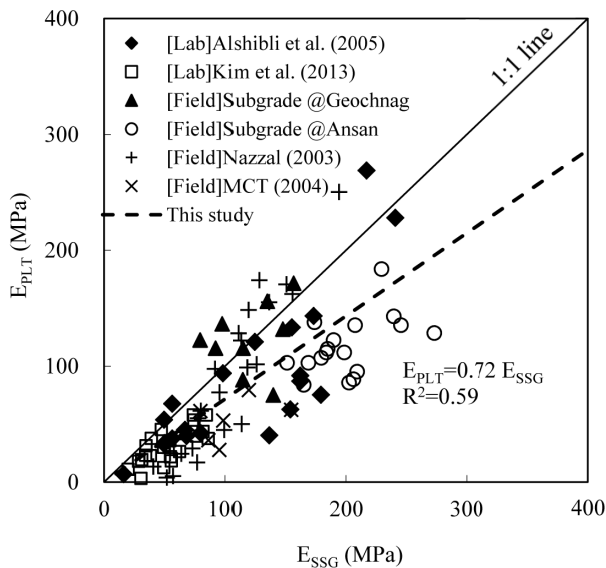


Fig. 6. E_{SSG} vs. E_{PLT} relationship using combined test data

물리적 특성치나 강도 특성치에 비해서 흙의 변동성 (soil variability)이 높기 때문에 강성에 대한 높은 상관관계를 얻어내기 어렵다(Table 2). 본 연구에서는 시험방법에 따른 측정치 사이의 상관성 평가를 위해 결정계수(R^2)를 이용하였다. 통계학적으로 결정계수를 통한 상관성 평가에 있어서 $R^2 = 0.16 \sim 0.36$ 은 중간 상관성 (moderate correlation), $R^2 = 0.36 \sim 0.64$ 는 뚜렷한 상관성 (marked correlation), $R^2 = 0.64 \sim 1.0$ 사이의 값은 높은 상관성 (high correlation)을 나타낸다(Moore and McCabe, 2005). 탄성계수 비교 분석 결과는 다양한 조건과 탄성계수 자체의 높은 COV(Coefficient Of Variance)로 인하여 높은 상관성을 얻기는 어려웠으나, 과도하게 높은 E_{PLT} 결과를 나타내는 시멘트 처리토 등을 제외하는 등의 이상치 제거과정을 통하여 $R^2 = 0.59$ 의 비교적 뚜렷한 상관성을 얻을 수 있었다.

3.3 동적콘관입시험을 이용한 탄성계수 산정

동적콘관입시험(DCPT)은 관입저항치인 DPI와 CBR 사이의 관계가 오랜 기간 축적되어 상당히 신뢰성 높은 결과를 나타내는 것으로 알려져 있다. 경험적 상관관계를 이용하여 DPI 값으로 CBR을 산정하고 이어서 탄성계수(E_{DCP})를 경험적 관계를 통하여 추정할 수 있다. DPI를 이용한 탄성계수(E_{PLT} , E_{SSG})를 추정하기 위한 이전의 연구 결과를 Table 3에 정리하였다. 제안식에서 사용된 토질의 종류 및 시험 위치에 따라 각각의 제안식은 차이를 나타내지만, 대체적으로 유사한 경향을 나타내고 있다. Fig. 7에 나타나 있듯이 탄성계수를 과대평가하는 것으로 언급되었던 Alshibli et al.(2005)의 PLT 탄성계수 제안식을 제외하면 대체로 유사한 경향을 나타낸다. DCP 시험결과를 기준으로 하여 E_{SSG} 및 E_{PLT} 를 산정하여 도시한 결과는 Fig. 8에 나타내었으며, 이 결과에 따르면 E_{PLT} 는 E_{SSG} 에 비해서 약 77%의 값을 나타내었다.

Fig. 9는 DCP를 이용하여 간접적으로 평가한 탄성계

Table 2. Coefficient of variation (COV) for soil tests (modified after Lee et al. (1983))

Type	Soil Properties	COV (%)
Physical property	Density	3%
	Moisture content	15%
Strength	CBR	25%
Stiffness	Elastic modulus	30%

Table 3. DPI correlations for estimating E_{PLT} and E_{SSG}

Type	Correlation	Reference	Test type
E_{PLT} vs. DPI	$E_{PLT} = 664.67 \cdot DPI^{-0.716}$	Chen et al. (2005) (Webster et al. (1992) & Powell et al. (1984))	Field
	$E_{PLT} = 10^{-0.88405 \cdot \log(DPI) + 2.90625}$	Konrad and Lachance (2001)	Field
	$E_{PLT} = \frac{7000}{6.1 + DPI^{1.5}}$	Alshibli et al. (2005)	Lab.
	$E_{PLT} = \frac{9770}{DPI^{1.6} + 36.9} - 0.75$	Abu-Farsakh et al. (2005)	Field & Lab.
E_{SSG} vs. DPI	$E_{SSG} = 755.2 \cdot DPI^{-0.671}$	Alshibli et al. (2005)	Lab.

Note: E_{PLT} in MPa, DPI in mm/blow

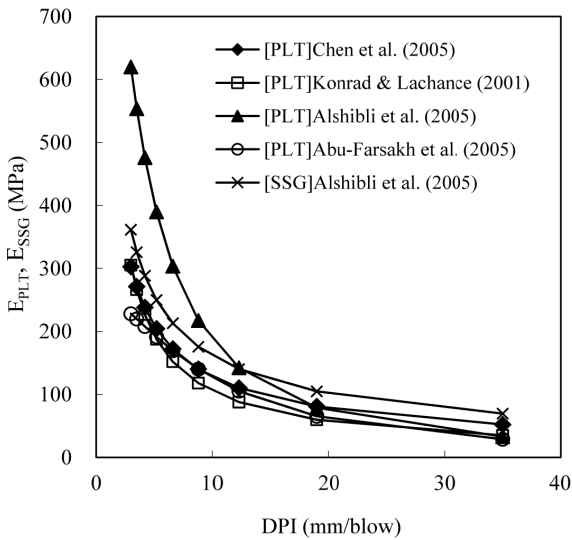


Fig. 7. DPI correlations for estimating E_{PLT} and E_{SSG}

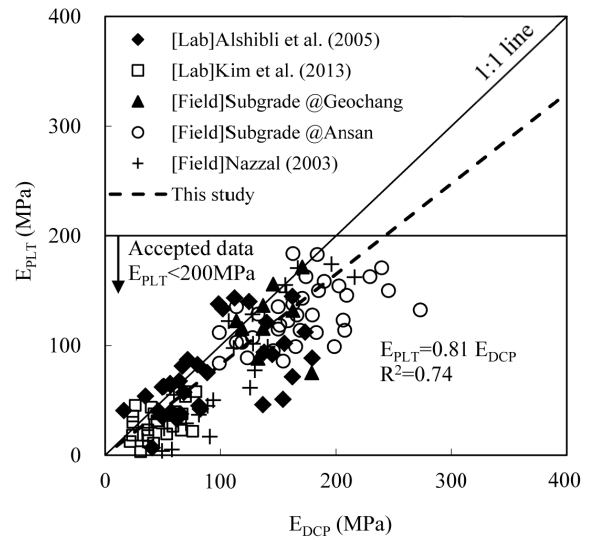


Fig. 9. E_{DCP} vs. E_{PLT} relationship using combined test data

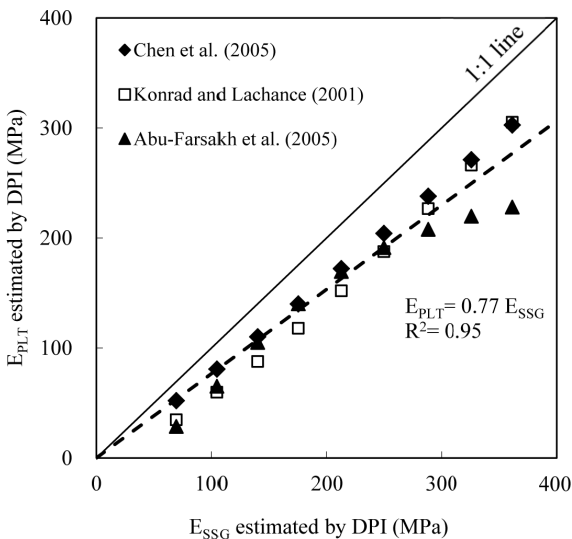


Fig. 8. E_{SSG} vs. E_{PLT} relationship estimated by DPI data

수(E_{DCP})와 PLT로 측정된 탄성계수(E_{PLT})를 비교하였다. 실내시험 결과와 현장시험 결과를 혼합하여 분석을 수행하였으며, 이상치 제거를 위해서 측정 E_{PLT} 의 상한치

를 200MPa로 제한하고 나머지 데이터들로부터 분석한 결과 E_{PLT} 는 E_{DCP} 예측치의 약 81%로 나타났다. 두 파라미터 사이의 상관성 또한 결정계수 0.74 이상의 높은 상관성을 나타내었는데, 이는 기존 연구에서 제한되었던 E_{DCP} 를 산정하는 경험식이 E_{PLT} 를 기준으로 개발되었기 때문인 것으로 판단된다.

3.4 변형률 수준을 고려한 탄성계수 보정

평판재하시험(PLT)에서 응력상태를 고려하지 않으면 정적 PLT에서 측정된 탄성계수(E_{PLT})가 비파괴시험에 의해 측정된 동적 탄성계수(E_{SSG})에 비해 변형률이 증가할수록 작용하는 평균유효응력이 커지기 때문에 과도한 탄성계수(E_{PLT})로 평가할 가능성이 있다. 탄성계수는 지반의 강성계수, 간극비, 과압밀비, 평균유효응력, 구속압 영향계수 등의 영향을 받으므로(Hardin and Drenevich, 1972; Clayton, 2011), 현장의 하중 규모에 따

른 변형특성에 맞는 합리적인 탄성계수를 산정하기 위해서는 동일한 기준 응력상태에 대해 비교해야 신뢰성 있는 관계를 도출할 수 있다(Kim et al., 2005).

탄성계수 산정 시 변형률 수준을 고려한 응력보정을 위해서는 Kim et al.(2005)에서 제안한 방법을 사용하였다. 각 응력단계에 대하여 보정한 탄성계수는 식 (3)을 이용하여 산정할 수 있다. 여기서 구속압 보정계수(n)는 지반의 종류에 따른 특성 값으로 흙의 종류에 따라 n=0.2~0.5의 값의 범위를 나타낸다.

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

여기서, $E_{corrected}$ = 응력보정 탄성계수, $E_{original}$ = 하중 재하 시 평균유효응력에서의 탄성계수, $\sigma'_{m,reference}$ = 기준 평균유효응력, $\sigma'_{m,original}$ = 하중 재하 시 평균유효응력, n = 구속압 보정계수.

본 연구에서는 구속압의 영향을 관찰하기 위해, 응력의 영향을 크게 받을 수 있도록 n = 0.5로 가정하였다. 현장 평균유효응력은 PLT 평판직경 깊이인 약 300mm 하부의 응력을 기준 평균유효응력으로 계산하였으며, 하중 재하로 발생하는 응력증가량은 0.02%의 변형률이 발생할 때 작용하는 응력증가량을 기준으로 하였다. 노상의 대표적 변형특성을 PLT 영향깊이(2B)의 중간 위치인 평판직경에 해당하는 심도에서 결정하고자 변형률 영향계수(I_z)는 0.4로 정하였다.

시멘트 고결화된 흙은 일반 흙에 비해서 동일한 미소 변형률 영역의 시험에서는 구속압 변화에 따른 강성변화가 크지 않은 것으로 알려져 있다(Santamarina et al., 2001). 하지만, 변형률 범위가 다른 시험에서 각각 측정된 정·동적 탄성계수는 차이가 크게 발생할 수 있다. Fig. 4(b)에 나타내었듯이, Alshibli et al.(2005)의 실험결과에서 시멘트 처리토는 E_{PLT} 가 E_{SSG} 에 비해 과도하게 크게 측정되었다. 구속압 변화에 민감하지 않은 시멘트 처리토에 대한 정·동적 탄성계수의 차이가 다른 흙에 비해 크게 발생하는 이유는, 재료의 강성 차이에 따른 변형수준이 다르기 때문에 PLT 수행 중 일정 변형이 발생하는 동안 흙에 작용하는 평균유효응력 상태의 차이가 크게 발생하기 때문인 것으로 판단된다. PLT 하중 재하 시 발생하는 응력증가를 고려하여 동일한 기준 평균유효응력에 대해서 보정한 결과, Fig. 10에 나타낸 바

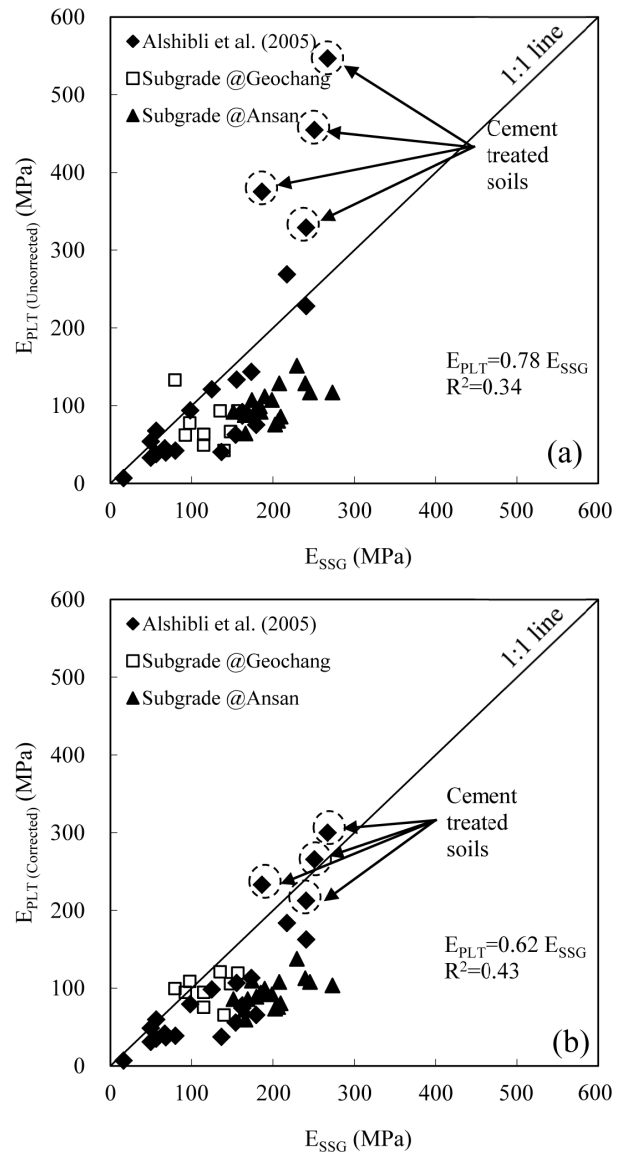


Fig. 10. Stress correction: (a) Before correction, (b) After correction

와 같이 PLT에서 과도하게 높게 평가되었던 탄성계수는 보정 후 1:1선에 가깝게 수정되는 것을 확인할 수 있었으며, 전반적인 데이터가 1:1선 쪽으로 이동되었다. 이를 통해서, 다양한 강성의 데이터를 혼합하여 PLT 탄성계수 결과를 비교 분석할 경우에는 변형률 수준을 고려한 응력보정을 고려해야 한다는 것을 확인할 수 있었다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 노상토 다짐평가에 일반적으로 사용되는 평판재하시험(PLT)에서 측정된 정적 탄성계수(E_{PLT})와 미소진동을 이용한 비파괴시험 장비인 흙강성측정기(SSG)에서 측정된 동적 탄성계수(E_{SSG})를 비교하였으

며 분석결과 도출한 결론은 다음과 같다.

- (1) 국내·외 노상토에서 일반적으로 사용되는 세립토, 조립토 등에 대해 각각의 시험방법으로 측정된 E_{PLT} 와 E_{SSG} 는 선형의 관계가 있으며, E_{PLT} 는 E_{SSG} 의 72%의 값을 나타낸다. 하지만 시멘트 처리토의 경우에는 상관관계에서 데이터 분산 범위를 벗어나는 이상치로 평가되었다.
- (2) 변형률 범위가 다른 정·동적 탄성계수의 경향성 차이를 검증하기 위해, 관입저항을 측정하여 간접적으로 강성을 추정하는 DCP에 의한 방법으로 비교하였다. E_{PLT} 는 E_{SSG} 에 비해 과소평가되는 동일한 경향을 나타내었고, E_{DCP} 와 E_{SSG} 는 선형관계를 가지고 있음을 확인할 수 있었다. DCP 데이터 분석을 통한 탄성계수 산정 시 $E_{PLT} < 200\text{MPa}$ 인 데이터에 대해 좀더 정확한 결과를 도출가능 하였다.
- (3) 일반적으로 미소변형률($\approx 0.001\%$)의 동적 탄성계수(E_{SSG})는 중변형률($\approx 0.01\% \sim 0.1\%$)의 정적 탄성계수(E_{PLT})에 비해서 큰 측정값을 나타낸다고 알려져 있다. 두 가지 파라미터를 비교하는 이전 연구에서는 100MPa 이하의 탄성계수 범위에서는 $E_{SSG} > E_{PLT}$ 인 유사한 경향성을 나타내었으나, 100MPa 이상 구간에서는 오히려 E_{PLT} 가 E_{SSG} 에 비해 과대평가되는 경우도 발생하였다. 이와 같은 현상이 발생한 이유는 강성이 큰 지반에서 PLT 수행 시 가해진 응력의 차이에 기인하는 것으로 추론된다. 따라서 시멘트 처리토와 같은 특수 지반에서 변형률 범위가 다른 시험법을 이용하여 탄성계수를 측정할 경우에 응력수준의 차이로 인한 측정치의 오차가 발생할 가능성이 있으며, 이런 경우에는 변형률 수준을 고려한 응력보정을 수행한 후 비교하여야 한다.

감사의 글

본 연구는 삼성물산(주) 건설부문의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. Abu-Farsakh, M. Y., Nazzal, M. D., Alshibli, K., and Seyman, E. (2005), "Application of Dynamic Cone Penetrometer in Pavement Construction Control", *Journal of Transportation Research Board*, No.1913, pp.53-61.

2. Alshibli, K., Abu-Farsakh, M., and Seyman, E. (2005), "Laboratory Evaluation of the Geogauge and Light Falling Weight Deflectometer as Construction Control Tools", *Journal of Material Civil Engineering*, Vol.17, No.5, pp.560-569.
3. Chen, D.-H., Lin, D.-F., Liao, P.-H., and Bilyeu, J. (2005), "A Correlation Between Dynamic Cone Penetrometer Values and Pavement Layer Moduli", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.28, No.1, pp.42-49.
4. Choi, J. S. (2008), "Fundamental Study on Establishing the Subgrade Compaction Control Criteria of DCPT with Laboratory Test and In-situ Tests", *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol.10, No.4, pp.103-116 (in Korean).
5. Clayton, C. R. I. (2011), "Stiffness at Small Strain: Research and Practice", *Géotechnique*, Vol.61, No.1, pp.5-37.
6. Hardin, B. O. and Drenevich, V. P. (1972), "Shear Modulus and Damping in Soils: Measurement and Parameter Effects", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol.98, No.6, pp.603-624.
7. Fiedler, S., Nelson, C., Berkman, E. F., and DiMillio, A. (1998), "Soil Stiffness Gauge for Soil Compaction Control", *Public Road*, Vol.61, No.5, pp.5-10.
8. Kessler Soils Engineering Products, Inc. (2010), *KSE DCP K-100 Models User's Manual*.
9. Kim, K.-S., Woo, W., Lee, C., and Lee, W. (2013), "Laboratory Soil Box Tests for Compaction Characteristics of Foundation Soils using Nondestructive and Penetration Tests", *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.13, No.5, pp.93-101 (in Korean).
10. Kim, D.-S., Seo, W.-S., and Kweon, G.-C. (2005), "Evaluation of Field Nonlinear Modulus of Subgrade Soils Using Repetitive Static Plate Bearing Load Test", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.21, No.6, pp.67-79 (in Korean).
11. Kim, K.-S., Kim, D., Fratta, D., and Lee, W. (2011), "Physical and Mechanical Characteristics of Subgrade Soil using Nondestructive and Penetration Tests", *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol.31, No.1C, pp.19-27 (in Korean).
12. Konrad, J. M. and Lachance, D. (2001), "Mechanical Use of In Situ Penetration Tests in Pavement Evaluation", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.38, No.5, pp.924-935.
13. Lee, I. K., White, W., and Ingles, O. G. (1983), *Geotechnical Engineering*, Boston, Pitman.
14. Lenke, L. R., McKeen, R. G., and Grush, M. P. (2003), "Laboratory Evaluation of GeoGauge for Compaction Control", *Transportation Research Record*, No.1849, pp.20-30.
15. Ministry of Construction and Transportation (MCT) (2004), *Korean Pavement Research Program*, No. KPRP-E-04, Phase 1-3, Final Report (in Korean).
16. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA) (2011), *Integrated Guidelines for Pavement for Highway Pavement* (in Korean).
17. Moore, D. and McCabe, G. (2005), *Introduction to the Practice of Statistics*, 5th ed., W.H. Freeman.
18. Nazzal, M. D. (2003), *Field Evaluation of In-situ Test Technology for QC/QA During Construction of Pavement Layers and Embankments*, Master's Thesis, Louisiana State University, Baton Rouge, LA, USA.
19. Poulos, H. G. and Davis, E. H. (1974), *Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics*, John Wiley & Sons.

20. Powell, W. D., Potter, J. F., Mayhew, H. C., and Nunn, M. E. (1984), *The Structural Design of Bituminous Roads*, TRRL Report LR 1132, 62 p.
21. Santamarina, J. C., Klein, K., and Fam, M. (2001), *Soils and Waves*, John Wiley & Sons, Chichester, UK.
22. Sawangsuriya, A., Edil, T. B., and Bosscher, P. J. (2003), "Relationship Between Soil Stiffness Gauge Modulus and Other Test Moduli for Granular Soils", *Journal of the Transportation Research Board*, No.1849, 3-10.
23. Sawangsuriya, A., Bosscher, P. J., and Edil, T. B. (2006), "Application of Soil Stiffness Gauge in Assessing Small-strain Stiffness of Sand with Different Fabrics and Densities", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.29, No.3, pp.207-216.
24. Webster, S. L., Grau, R. H., and Williams, R. P. (1992), *Description and Application of Dual Mass Dynamic Cone Penetrometer*, U.S. Army EngineerWaterways Experiment Station, Instruction Report, No. GL-92-3.

Received : January 25th, 2015

Revised : February 10th, 2015

Accepted : February 16th, 2015