

평판재하시험과 다양한 다짐시험 장비를 활용한 지반계수 추정방안 Estimation of Ground Coefficient according to PBT and Various Compaction Test Devices

박병현¹⁾, Byung-Hyun Pak, 이준현²⁾, Heon-Jun Lee, 채창우²⁾, Chang-Woo Chae, 이주형²⁾, Ju-Hyeong Lee, 이명구²⁾, Myung-Gu Lee, 최영철³⁾, Young-Chul Choi, 송창섭⁴⁾, Chang-Seob Song

- 1) 팔당호수질정책협의회 정책국 지역개발팀 연구원, Researcher, The Council for PALDANG Water Quality Policy
- 2) 충북대학교 지역건설공학과 석사과정, The master course, Dept. of Agricultural & Rural Engineering, Chungbuk National Univ.
- 3) 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원, Senior Researcher, Expressway & Transportation Research Institute, Korea Expressway Corporation
- 4) 충북대학교 지역건설공학과 교수, Professor, Dept. of Agricultural & Rural Engineering, Chungbuk National Univ.

SYNOPSIS : The objective of this study is improve the technology by various testing devices for measuring degree of compaction. The methods for quality control for compaction are very various. But, normally the specifications have provided PBT(Plate Bearing Test) method when inspector tested quality control. In spite of the PBT has a few weak points to reduce process and cost. In order to improve quality control method, analyzed in-situ test results between PBT and other devices.(LWDT and Geogauge)

Keywords : quality control method, compaction test devices, pbt(plate bearing test)

1. 서론

건설공사의 각 공정은 안전한 시공과 동시에 공기를 단축함으로써 비용의 절감을 목적으로 하고 있으며, 기술의 발전에 따라 이외에도 편리성을 추구하고 있다. 토공과정의 성토는 넓은 부지를 조성하기 위하여 시공되거나, 도로의 경우 하부에 전달되는 하중을 적절하게 분산시키는 것을 목적으로 시공된다. 성토작업을 위한 현장에서의 다짐시공속도는 대형 토목장비의 개발, 기술의 진보로 인하여 점차 빨라지고 있는 추세이다. 성토는 크게 토량 확보를 위한 절토 및 토취공정, 토취장에서 성토지역까지의 운반 및 포설공정, 마지막으로 안전성 확보를 위한 다짐 공정으로 나눌 수 있다.

성토체 다짐관리 기법은 들밀도 시험 (KS F2312), 평판재하시험 (KS F2310), 노상토 지지력비(CBR) (KS F2302) 등을 이용할 수 있으며, 암성토부에서는 물치환법을 이용하여 다짐관리를 실시할 수 있다. 그러나, 노상토 및 보조기층의 품질관리에 관한 각 지방서의 다짐기준은 대부분 평판재하시험으로 한다.(한국도로공사 고속도로공사 전문 지방서(2005), 한국농어촌공사 농어촌정비공사 전문지방서(2000))

평판재하시험은 현장에서 10 ton 이상의 재하하중(만재덤프 및 백호 등의 대형장비)이 필요하며, 하중에 따른 시간별 침하량을 측정하기 위하여 한 지점에서 장시간이 소요되며, 시험자의 숙련도에 따라 결과 값이 상이하게 나타나는 단점이 있다.¹⁾ 현장에서 평판재하시험을 수행할 때 교대 및 터널구간은 시험차량의 접근이 어려워 적용에 제한을 받고 있다.

따라서, 평판재하시험에 따른 비용 및 간편성, 신속성, 접근성의 단점을 보완하고, 다짐부의 변형을 계수(E_v)를 측정할 수 있으며, 적은 비용으로 간편하고 신속하게 시험을 수행할 있고, 접근성이 용이한 새로운 시험법의 도입이 필요하다.

평판재하 시험이 가지고 있는 단점을 보완하기 위하여 국/내외적으로 다짐관리 장비의 개발이 진행되고 있다. 본 연구에서는 미국 및 독일에서 개발된 중추 낙하법을 이용한 Light Drop-Weight Tester, ZFG 2000(LWDT)와 지반 강성을 이용한 Geogauge를 사용하여 성토체의 지반계수를 추정하고, 이를 평판재하시험과 비교함을 목적으로 한다.

2. 현장 품질관리 다짐시험 방법

2.1 평판재하시험 (Plate Bearing Test)

2.1.1 평판재하시험의 개요

평판재하시험의 현장에서 지반의 지지력을 측정하기 위해 실시하는 시험으로 다짐도 검사법으로 널리 활용되고 있다. 즉, 평판재하시험은 어느 지반에 실제 구조물을 축조하였을 때 지지력이나 침하조건을 만족하는지 여부를 판단하는 시험으로 침하에 대한 결과가 실제현장에 비해 작은 경향이 있지만 비교적 확실한 지지력 결과를 파악할 수 있는 장점이 있다. 또한, 평판재하시험을 통해 기초저면, 성토 기초저면 등에서 기초지반의 허용지지력 및 탄성계수를 결정 할 수 있다. 하지만, 시간효과를 일부만 고려한 지반 자료를 제공하며, 재하시험 시 작은 재하판으로 시험을 실시함으로써 실제 구조물의 응력 범위보다 작은 범위에서 결정된 결과가 산출되므로 다음의 사항을 고려하여야 한다.

- ① 현장지반의 토층, 전단강도 및 압축특성과 같은 토질특성의 고려하여야 한다.
- ② 지하수면과 그 변동을 고려하여야 한다.
- ③ Scale Effect를 고려하여야 한다.

2.1.2 시험장비

시험에 사용되는 재하대는 예상되는 소요 총 하중을 제공하는데 충분한 크기와 강도를 지닌 것으로 예상 총 하중 반력을 제공할 수 있어야 하며, 도로의 평판재하시험 시 덤프트럭과 백호등의 현장장비를 이용할 수 있다. 유압은 기초의 평판재하시험 시 용량이 50 ton 이상 또는 특정 토질조건에 대한 최대 예상하중을 가하는데 충분하고, 잭에 의하여 작용하는 힘을 측정하는 장치로써 압력계가 있어야 한다. 재하판은 두께 mm 이상, 지름 300 mm, 400 mm, 700 mm인 3개의 강재원판 또는 등치면적의 사각철판을 이용하며, 도로의 평판재하시험에서는 직경 300 mm이상의 원형으로 하여 상하면이 평활하고 두께 25 mm 이상의 동판을 사용하는 것이 바람직하다. 이때 재하판은 하중에 의해서 재하판의 변형이 생겨서는 안된다. 다이얼 게이지는 0.01~0.001 mm의 눈금을 갖는 축 길이 30 mm 이상의 것을 준비하되 주기적으로 검증 받은 것이어야 한다.

2.2 지반강성을 이용한 다짐 관리방법 (Geogauge)

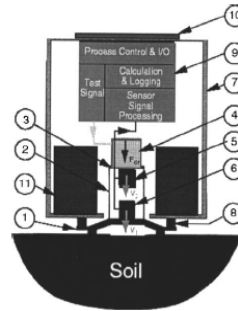
지오게이지(Geogauge)는 지반표면에서 직접적으로 변형에 대한 저항정도인 지반강성을 구하는 장비로, 최초의 기술은 원래 지뢰발견을 위한 방위산업에 의해 발전되었으며, Bolts, Beranek, Newman of Cambridge, MA(Minneapolis의 CNA 자문엔지니어들) 그리고 Humbolts사가 공동으로 연구하여 Humbolts Geogauge를 만들었다. 그림 1 Geogauge는 1.3분당 1회 테스트의 속도로 다져진 흙의 강성을 측정하며, 장비의 무게는 약 10 kg, 280 mm의 직경에 높이는 254 mm이다. 지반과의 접촉부는 외경 114 mm, 내경 101 mm의 나이테 모양의 링으로 되어있다. Geogauge에 달린 shaker라는 장치는 100~196 Hz 범위내의 특정한 25개 진동수에서 매우 작은 동력을 발생시키고 이때 Geogauge의 본체에 달린 Geophone 센서로 매우 작은 변위량(δ)을 측정한다. Geogauge 강성 측정값은 25번의 다른 진

동수에서 측정된 25개의 강성지수 값을 평균한 것이다. 강성 측정값은 CNA 자문 엔지니어들이 제안한 다음 식에 의해 흙의 탄성계수(Young`s modulus)로 변환된다.

$$E = stiffness \times \frac{(1 - \nu^2)}{1.77 R} \quad (1)$$



그림 1. Geogauge 시험모습



- 1 Rigid foot with annular ring
- 2 Rigid cylindrical sleeve
- 3 Clamped flexible plate
- 4 Electro-mechanical shaker
- 5 Upper velocity sensor
- 6 Lower velocity sensor
- 7 External case
- 8 Vibration isolation mounts
- 9 Electronics
- 10 Control & display
- 11 Power supply

그림 2. Geogauge 장비의 작동 원리

2.3 중추 낙하법을 이용한 다짐관리방법 (LWDT)

LWDT는 원위치 시험장치인 평판재하시험의 대안으로 독일에서 휴대용으로 개발한 장비로 중추를 이용하여 중추가 지반에 충돌할 때 발생한 중추의 진동특성으로부터 지반의 다짐도를 평가하는 방법이다. 본 장비는 독일의 '흙과 암으로 건설하는 도로의 기술시방서 TP BF-StB Teil b 8.3'에 제시되어 있는 동평판 재하시험에 적합하게 만들어져 있으며, 동적 재하를 위한 추는 10 kg이며 펄스의 폭은 18 ms이다. 재하판의 직경은 300 mm이며 재하로 인한 처짐은 0.2~30 mm까지 측정할 수 있다.³⁰⁾

본 장비를 이용하여 다짐관리를 실시할 경우 종래의 방법에 비해 신속하고 간편하며, 개발비용이 비교적 저렴하며, 도로공사 중 노반, 노상, 입상기층의 재하시험을 동적변형계수(E_{od} , MN/m²)를 구함으로써 신속한 조사를 수행할 수 있는 장점이 있다. 재하시험으로 구한 변형계수를 이용하여 골재, 재활용 재료, 뒷채움 재료, 생석회 다짐 재료로 이루어진 노상, 노반 입상기층의 지지력 계수로 이용할 수 있다. 본 시험기는 기존의 다짐관리기법인 평판재하시험의 대안이며 기존의 시험법에 비하여 다음과 같은 장점이 있다.

- ① 평판 재하시 필요할 덤프트럭과 같은 큰 재하하중이 필요 없음.
- ② 교량, 뒷채움지역, 시추공과 같이 접근이 힘든 지역에서도 시험이 가능.
- ③ 시험을 위해 최소의 공간만 주어지면 되고, 재하를 위한 하중의 크기도 작음.
- ④ 개소당 약 3분정도면 시험을 실시.

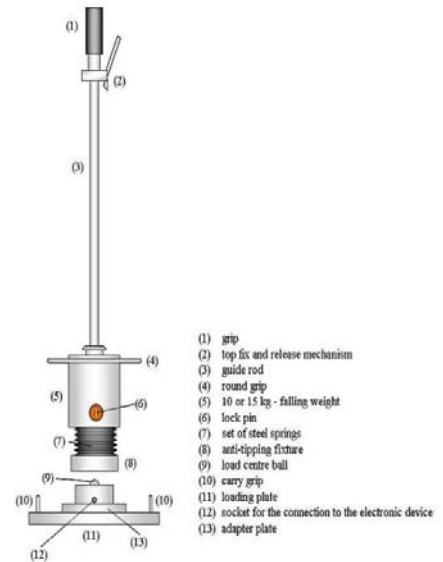


그림 3. LWDT장비의 구성

시험결과는 통계해석을 실시하며, 통계해석은 독일의 '흙과 암으로 건설하는 도로의 기술시방서'에 기초를 둔다.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2)$$

3. LWDT와 Geogauge 다짐시험을 통한 지반계수 추정

3.1 현장시험

본 연구에서는 도로 건설현장을 선택하여 시험을 실시하였으며, 해당 현장의 지반조건은 노체다짐 완료 구역으로 잡석혼합을 성토재로 사용하였으며, 시험은 그림 4와 같이 57개소를 선정하여 시험실시 전 만재덤프로 사전정지작을 위하여 왕복 5회 주행을 실시한 후 시험을 실시하였으며, 각 시험 공간과 공간사이 2m의 간격을 두어 각 시험데이터의 독립성을 유지하였다. 반복평판재하 시험이 완료 된 후 LWDT와 Geogauge를 각 반복 평판재하시험을 실시한 지점에서 500 mm 이격된 곳에서 각각 실시하였으며, 3개의 시험장비를 1 set로 기준하였다.

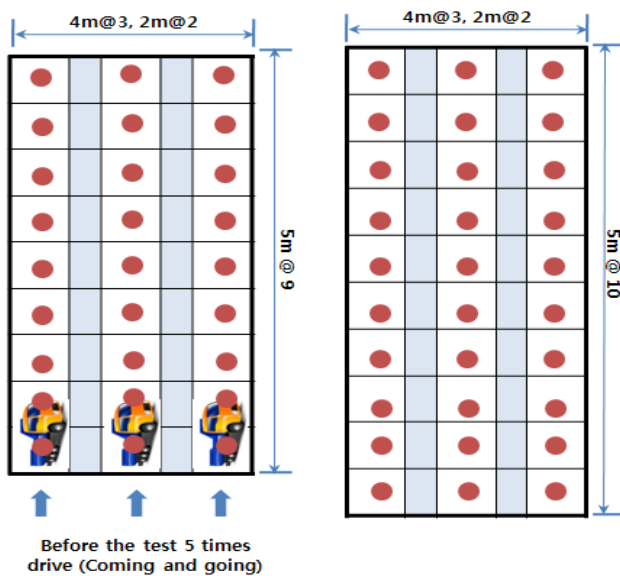


그림 4. 시험계획 (57개 포인트)

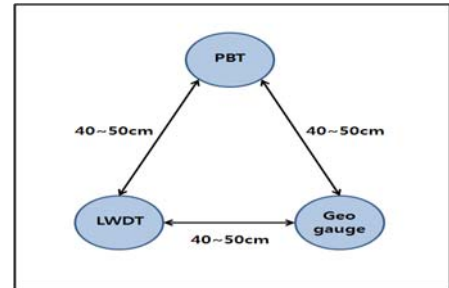


그림 5. 시험 모식도 및 실제 현장시험

평판재하시험은 독일을 중심으로 유럽에서 많이 사용되고 있는 DIN 18134 방법을 선택하여 실시하였다. 이는 평판재하시험에서 제하와 재제하 단계를 시험에 포함하는 것은, 초기 재하(Initial loading)단계에서는 하중 재하판과 노상면과의 접촉의 불안정으로 측정결과의 신뢰성이 떨어지고, 초기 재하단계에서는 탄성변형뿐만 아니라 상당한 소성변형을 포함할 가능성이 커서, 노상을 탄성체로 가정하기 어렵기 때문이다. 반복식 평판재하시험은 1회 재하의 평판재하시험과 다르게 2회의 재하 1회의 제하 단계로 시험을 수행한다. 재하단계는 최소 6단계 이상이어야 하고, 각 단계별로 1~2분 동안 하중을 일정하게 유지하고 다음 단계로의 하중증가는 1분 이내에 완료한다. 또한 1회 재하시의 평균 수직응력의 증가량은 80~90 kPa로 규정을 준수하여 시험을 실시하였다.

3.2 변형률 계수의 추정

3.2.1 하중-변위와의 관계 정식화

평판재하시험은 두께 20 mm 이상 지름 30, 40, 70 mm의 강판에 작용하는 하중과 변위를 동시에 측정하는 방법으로 하부구조의 지지력을 평가한다. 평판재하시험의 결과는 그림 6과 같이 나타나며, 최초 Loading시 1.25 mm의 침하시에 하중강도를 지지력 계수 k_{30} 이라고 하며, Unloading을 하여 하중을 0까지 제거한다. 이때, 최초의 시작단계의 변형까지 도달하지 않고 어느 수준의 변형을 나타내는 것은 지반의 소성변형을 포함하고 있기 때문이다. 마지막으로 Reloading을 실시하여 변형률 계수(E_v)를 구하도록 한다.

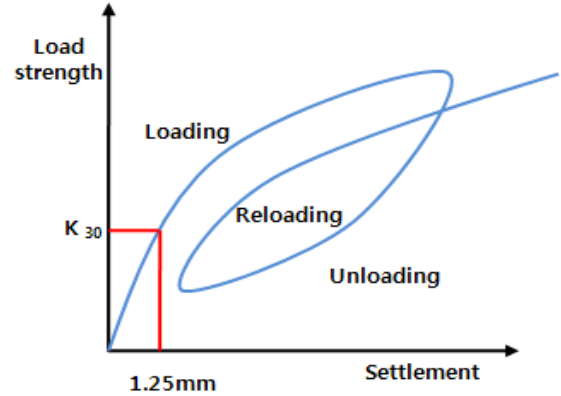


그림 6. 하중과 침하 관계 그래프

3.2.2 변형률 계수(E_v) 산정

본 연구에서는 평판재하시험으로 얻어지는 변형률 계수(E_v)를 다양한 다짐관리장비의 결과와 상관관계에 목적을 두고 있으며, 변형률 계수(E_v)는 다음의 2가지 방법을 이용하여 산정하였다.

- 1) 변형률 계수는 침하량을 아래의 식과 같이 평균수직응력의 2차원 함수로 표현하고 계수는 최소 제곱근법(Least square method)을 이용하여 구한다.

$$s = a_0 + a_1 \cdot \sigma_o + a_2 \cdot \sigma_o^2 \quad (3)$$

$$E_v = \frac{1.5r}{a_1 + a_2 \cdot \sigma_{0max}} \quad (4)$$

- 2) 반복재하 시험 중 재재하 하중 곡선의 기울기를 변형률 계수(E_v)로 계산한다. 독일의 DIN 규정에서 제시하는 최대수직응력의 0.3배와 0.7배의 사이의 할선구배(gradient of secant)를 이용하여 변형률 계수를 산정하였다.

4. 결 과

4.1 평판재하시험 결과

하부구조 재료의 변형특성과 관련하여 현장 노상토의 변형특성, 즉 변형률에 따른 비선형 탄성계수인 변형률 계수는 회복탄성계수 개념을 가지고 있다. 본 연구에서는 국내 지반 실정에 좀 더 정확한 기준을 마련하기 위하여 변형률 계수(E_v)를 구함에 있어서 최소자승법(Least Square Method/LSM)과 할선구배법(Gradient of Secant/GoS) 2가지 방법을 모두 고려하여 산정하였다. 그림 7과 8은 시험결과에 따른 결과값을 보여준다.

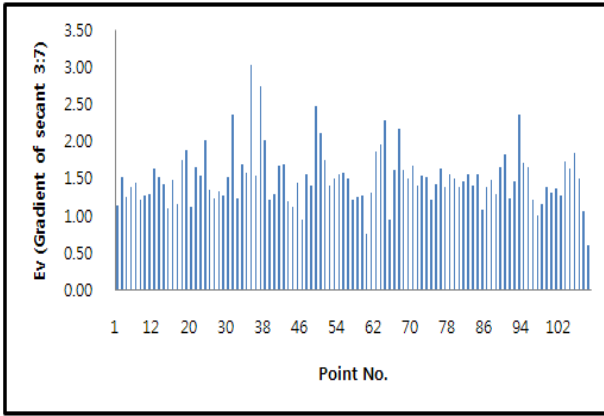


그림 7. 할선구배법을 통한 변형율 계수(E_v)

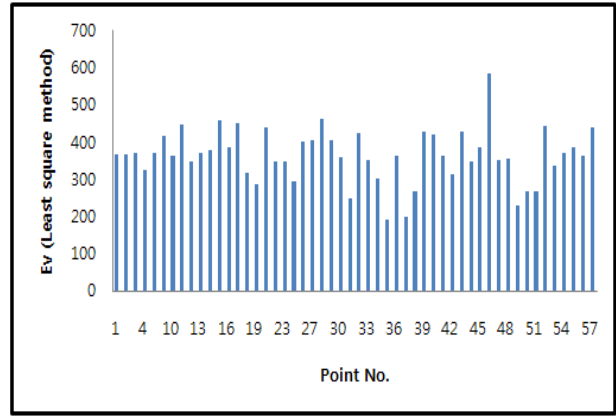


그림 8. 최소자승법을 통한 변형율계수 값(E_v)

4.2 LWDT 및 Geogauge 시험 결과

4.2.1 LWDT

중추 낙하법을 이용하여 다짐관리를 실시하는 LWDT는 평판재하시험을 대체하여 사용할 수 있는 장비로 본 연구에서는 반복 평판재하시험이 완료되면 즉시 시험을 실시하였다. LWDT에 의한 동적탄성계수 측정결과는 평균 약 77.36 MN/m²으로 나타났으며 침하(s)는 평균 약 0.3 mm로 나타났으며 표 1과 그림 9는 현장시험 따른 침하와 탄성계수 간의 그래프를 보여주고 있다.

표 1. LWDT 시험결과

LWDT	
Dynamic modulus (MN/m ²)	77.36
Settlement (mm)	0.3

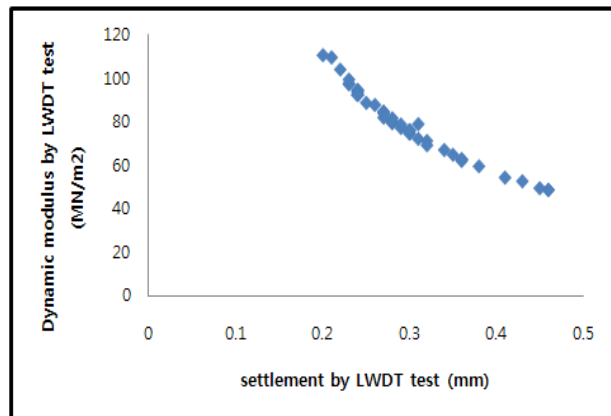


그림 9. LWDT 시험결과에 따른 Graph

4.2.1 Geogauge

Geogauge는 진동을 통하여 지반표면에서 직접적으로 변형에 대한 저항정도인 지반강성을 구하는 장치로 본 연구에서는 반복 평판재하시험이 완료되면 즉시 시험을 실시하였다. 표 2와 그림 10은 Geogauge로 측정된 결과로써 강성도(Stiffness)를 탄성계수(Young's modulus)로 변형한 결과를 나타낸 것이다.

표 2 Geogauge 시험결과

Geogauge	
Stiffness (MN/m)	16.91
Young's Modulus (MPa)	146.67

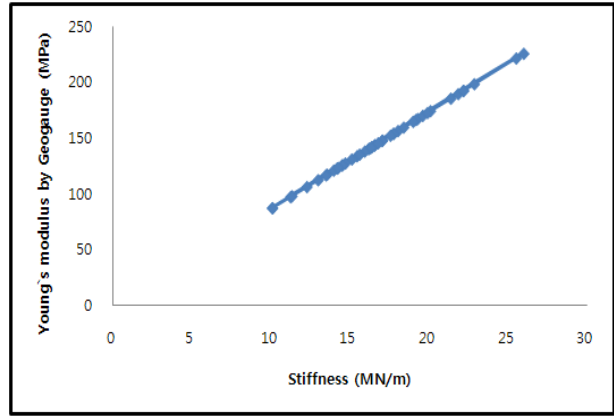


그림 10. Geogauge 시험결과에 따른 Graph

5. 결론

본 연구에서는 기존의 성토재의 품질관리 기법인 평판재하시험의 단점을 보완하고자 휴대가 가능하며, 시험이 용이한 다짐관리 장비(LWDT, Geogauge)를 노체 다짐이 완료된 현장시험을 통하여 품질관리의 새로운 기법을 제시하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 평판재하시험의 변형율 계수(E_v)와 Geogauge의 강성(Stiffness)간 상관관계 : 시험장비간 상관관계를 알아보기 위하여 회귀분석을 실시한 결과 결정계수 값이 0.012 ~ 0.025 으로 양 시험법간 상관성이 부족한 것으로 나타났다. 이는 하부지반 다짐재료인 잡석혼합으로 성토구간 내 공극 발생이 진동(주파수)으로 강성을 측정하는 Geogauge data에 영향을 미친것으로 판단된다.
- 2) 평판재하시험의 변형율 계수(E_v)와 LWDT의 동탄성 계수(E_v)의 상관관계 : 상관관계를 알아보기 위하여 회귀분석을 실시한 결과 결정계수 값이 0.289와 0.716으로 두 장비간 상관성은 최소자승법을 통하여 변형율 계수(E_v)를 구하는 것이 상관성이 유의한 것으로 나타났다.
- 3) 동탄성 계수와 탄성계수의 상관관계 : LWDT와 Geogauge는 평판재하시험을 대체할 수 있는 장비로 두 장비간 상관관계를 알아보기 위하여 회귀분석을 실시한 결과 결정계수 값이 0.024로 상관성이 부족한 것으로 나타났다. 이는 하부지반 다짐재료인 잡석혼합으로 성토구간 내 공극 발생이 진동(주파수)으로 강성을 측정하는 Geogauge data에 영향을 미친것으로 판단된다.

본 연구는 잡석혼합재료를 성토재분 연구는 잡석혼합재료를 성토재로 사용한 노체다짐이 완료된 지반 조건에 대한 결과로 향후 추가연구를 통하여 국내 실정에 맞는 다양한 지반조건에의 시험이 이루어질 경우 평판재하시험을 대체할 수 있는 장비로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부(2007), 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구, 1단계 3차년 보고서.
2. 건설교통부(2007), 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구, 2단계 3차년 보고서.
3. 건설교통부, 한국건설교통기술평가원(2007), 불포화 사면 및 다짐지반 최적화 표준설계를 위한 지반정수 산정기술 연구보고서.
4. 김동수, 서원석, 권기철(2005), 반복식 평판재하시험을 이용한 노상토의 현장 변형계수 평가, 한국지반공학회지, 21(6), 67~79.
5. 김대상, 박성용, 김수일, (2008), 평판재하시험을 이용한 지반관력 계수와 변형률 계수의 상관관계 평가, 한국지반공학회지 24(6) 57~67.
6. 김종민, 최준성, 한진석, 문성호 노상 및 보조기층의 평판재하시험 대체를 위한 소형충격재하시험 활용방안 연구, 한국도로학회 학술대회 논문집, 599~605.
7. 한국농어촌공사(2000), 농어촌정비사업 전문시방서 토목편.
8. 한국도로공사(2005), 고속도로공사 전문시방서 토목편.
9. Federal Highway Administration FHWA(2000), Geogauge workshop, Background & theory, Turner-Fairbank Highway Research Center, McLean, Va.
10. Flemming. P. R, Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli Third Volume(STP1375), ASTM(2000), 41~58.
11. Khalid Alshibl A, Murad Abu-Farsakh and Ekrem Seyman(2005), Laboratory Evaluation of the Geogauge and Light Falling Weight Deflectometer as Construction Control Tools, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE 0899-1561(2005), 560~569.
11. Langer, J. and Ruta, P(1995), Dynamic identification of model parameter of road and airfield pavements, Archives of Civil Engineering, 41(2), 115~136.
13. LWDT 홈페이지 <http://www.ticservicegroup.com.au>
14. Geogauge 홈페이지 <http://hanmicorp.net>
15. 국토해양 전자정보관, 시방서 / 설계기준, <http://www.codil.or.kr>