

다양한 지반강성 평가장치를 이용한 현장 다짐도 예비 평가 Evaluation of Various Soil Stiffness Test Equipments as Construction Control Tools

김주형¹⁾, Ju Hyong Kim, 유완규²⁾, Wan-Kyu Yoo, 김병일³⁾, Byoung Il Kim, 채광석⁴⁾, Kwang Seok Chae

1) 한국건설기술연구원 선임연구원, Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology.

2) 명지대학교 박사과정, Ph.D. Candidate, Myongji University.

3) 명지대학교 교수, Professor, Myongji University.

4) GS건설(주) 선임연구원, GS Engineering & Construction

SYNOPSIS : The objective of this paper is to assess the potential use of the geogauge and the light falling weight deflectometer (LFWD) and the soil impact hammer as quality control/quality assurance Q_C/Q_A devices for compacted soil layers. A comprehensive field experimental program considering variation of number of compaction, water contents and thickness of compaction layer was conducted on compacted layers of gravel sand. The geogauge, LFWD, the soil impact hammer and static load test (PLT) as a reference test were performed for the compacted layers. The geogauge elastic modulus, E_G , the LFWD dynamic modulus, E_{LFWD} , empirical soil stiffness, K_{30} , obtained from soil impact hammer and soil stiffness directly obtained from PLT, K_{30} , were correlated with increasing number of compaction. The results of this study show that the geogauge, LFWD and the soil impact hammer, which are very simple to test, can be used as substituting devices for static PLT which is a conventional quality control/quality assurance Q_C/Q_A devices for compacted soil layers.

Key words : Geogauge, Light falling weight deflectometer, Soil impact hammer, Static plate load test

1. 서론

성토다짐은 흙을 쌓아 넓은 부지를 조성하거나 도로 등을 건설하는 데에 반드시 필요한 주요공정인데, 성토체가 어느정도 이상의 강도를 가지고 과도한 침하가 발생하지 않도록 하기 위해 성토재료를 일정한 사용 기준 이상의 값을 갖도록 하는 것이 성토다짐의 핵심 공정이라 할 수 있다. 이 핵심 공정은 전체 공사비, 공사시간 등에 막대한 영향을 미치나 대부분 체계적인 관리시스템의 부재로 번거로운 시험방법을 이용하거나 작업자 자신의 인위적인 판단에 근거해 평가하는 경우가 많다. 국내에서는 일반적으로 성토 다짐공정관리를 위해 평판 재하시험 (KS F 2310)이나 현장에서 모래 치환법에 의한 흙의 밀도 시험방법 (KS F 2311), 흙의 다짐 시험방법 (KS F 2312) 등의 일점시험 (spot test)을 사용하고 있는데, 이 같은 일점시험방법은 시험방법이 번거롭기 때문에 한정된 위치에서만 시험을 수행하고 있어, 현재의 시험관리 방법으로는 전체 성토 부지의 다짐도를 판단하는 것은 적절하지 못하다.

본 연구에서는 기존의 다짐도 평가시험방법을 대체하기 위해 비교적 시험이 간편한 몇가지 시험방법들을 실제 시험시공 현장에 적용하여 각 시험 방법의 유효성을 평가하고자 하였다.

2. 다짐평가 시험방법 개요

2.1 지오게이지

지오게이지의 기술은 원래 지뢰 발견을 위한 방위산업에 의해 발전된 것으로 Bolts, Beranek, Newman of Cambridge, MA; Minneapolis의 CNA 자문 엔지니어들 그리고 Humboldt사가 공동으로 연구하여 Humboldt 지오게이지를 만들었다 (그림 1). Geogauge는 1.3분당 1회 테스트의 속도로 다져진 흙의 강성을 측정하는 장비로 장비의 무게는 약 10kg이고 280mm(11 in.)의 직경에 높이 254mm(10 in.)이다. 114mm(4.50 in.) 외경, 89mm(3.50 in.) 그리고 13mm(0.5 in.) 두께의 흙에 접촉하는 나이테 모양의 링을 갖고 있다. 지오게이지에 달린 shaker라는 장치는 100~196Hz 범위내의 특정한 25개 진동수에서 매우 작은 동력을 발생시킨다. 이것은 Geogauge의 본체에 달린 geophone 센서로 측정된 매우 작은 변위량(δ)을 나타낸다. Geogauge 강성 측정값(H_{SG})은 25번의 다른 진동수에서 측정된 25개 강성지수 값을 평균한 값이다. H_{SG} 는 CNA 자문엔지니어들이 제안한 식 (1)에 의해 흙의 탄성계수(E_G)로 변환된다.

$$E_G = H_{SG} \frac{(1-\nu^2)}{1.77R} \quad (1)$$

여기서, E_G : 탄성계수(MPa), H_{SG} : Geogauge 강성 읽음 값(MN/m),
 ν : 포아송비, R : Geogauge 다리의 반경(57.15 mm)



그림 1. Humboldt 지오게이지

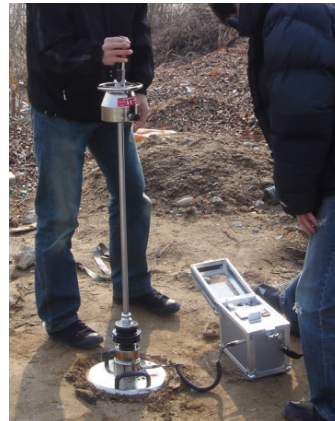


그림 2. 동평판재하시험

2.2 동평판재하시험기 (Light Falling Weight Deflectometer)

동평판재하시험기는 원위치 시험장치인 평판재하시험의 대안으로 FWD를 독일에서 휴대용으로 개발되었다. 동평판재하시험기는 재하장치, 재하판, 그리고 중앙부의 처짐을 측정하는 지오폰 센서 등으로 구성되어 있으며, 시험기 종류에 따라 디자인과 작동모드가 다양하다. German Dynamic Plate(GDP), Transport Research Laboratory(prototype) Foundation(TFT), the Prima 100-LFWD 등의 다양한 품명을 가지고 판매되고 있으나, 작동원리는 매우 비슷하다. 본 연구에서는 독일의 “흙과 암으로 건설하는 도로의 기술시방서 TP BF -StB Teil B 8.3”에 제시되어 있는 동평판재하시험에 적합하게 만들어진 독일제 “Light Drop Weight Tester ZFG2000” (그림 2)을 사용하였다. 이 시험기는 동적 재하를 위해 10kg 짜리 추를 사용하며 사용하는 펄스의 폭은 18ms이다. 하중진동을 발생시키기 위해 스프링을 타격하고, 안전하게 작동시키기 위해서는 추는 운반 고정핀과 가이드 룯드 그리고 안전 장치로 고정되어 있다. 재하판의 직경은 300mm이며 재하로 인한 처짐은 0.2~30mm까지 측정할 수 있다. 작동 중에

LFWD의 탄성강성계수(E_{LFWD}) 계산을 위하여 재하판의 중앙 변위량(δ_c)이 측정, 사용되는데 이를 위해 PC 소프트웨어를 이용하여 계산한다. LFWD를 이용한 지반의 탄성강성계수(E_{LFWD})는 식 (2)를 이용하여 산정한다.

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

여기서, σ 는 적용된 응력, R은 재하판의 반경

2.3 간이지지력 시험기

일본에서 개발된 간이지지력측정기는 래머를 일정한 높이에서 지반에 자유낙하 시킬 때 발생하는 충격가속도의 최대값을 측정하여 충격가속도와 CBR값, K_{30} 값, q_c 값 등과의 상관관계를 경험적으로 얻는 것을 기본원리로 한다. 간이지지력 시험기는 그림 3과 같이 본체와 표시부로 구성되며, 본체에서는 직경 50mm, 질량 4.5kg의 래머를 높이 45cm에서 자유 낙하시켜 래머에 내장된 가속도계에서 충격가속도를 측정하고 표시부는 본체에서 측정된 충격가속도를 내부의 관계식으로부터 상관식을 계산하여 표시하도록 구성되어 있다. 표시부에서는 가속도계에서 측정한 충격가속도의 최대값을 찾아 그 값을 CPU에 기록하고 충격가속도 값(Ia)을 환산하여 최대값 화면에 표시하도록 되어 있다. 최대 충격가속도(Ia) 값은 식 (3)과 같이 산정하고, 식 (4)를 사용하여 K_{30} 으로 변환한다.

$$\text{충격가속도 값 (Ia)} = \frac{\text{가속도 (gal)}}{2.78 \times 980 \text{ (gal)}} \quad (3)$$

$$K_{30} = -37.58 + 8.554Ia \quad (4)$$

여기서, K_{30} =지반반력계수(MN/m³)

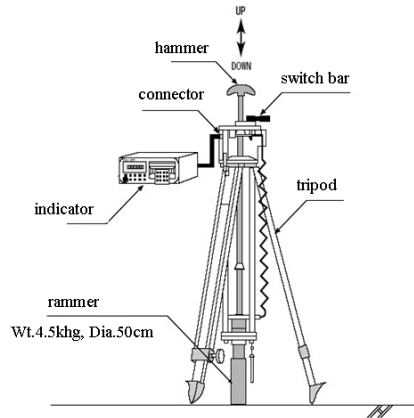


그림 3. 간이지지력 시험기

3. 현장시험

3.1 현장시험 준비

현장시험에 사용한 성토재료는 인근 토취장에서 구한 파쇄암으로써 그림 4에 나타난 것과 같이 통일 분류법 상 GW에 해당하는 것으로 나타났으며, 실내다짐시험 결과 최대건조밀도는 약 2.2g/cm³, 최적함수비는 약 7% 정도인 것으로 나타났다.

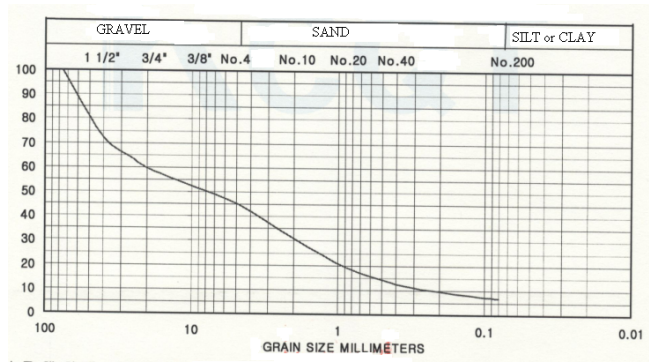


그림 4. 성토재의 입도분포 곡선

앞서 소개한 다양한 지반 강성 측정장치에 대한 현장 시험시공은 ○○ 지역 기반조성공사 현장의 노체 성토다짐구간에서 시험을 수행하였다. 본 시험시공 현장에서는 그림 5에 나타난 것과 같이 길이 30m, 폭 22.5m의 부지를 각각 10m×7.5m의 9개 셀로 분리하여 시험을 수행하였다. 이 중 3개의 셀을 갖는 A구간은 포설두께와 흙의 함수비를 일정하게 하고 진동로울러의 다짐횟수를 4회, 6회, 8회씩 각각 변화시켰다. 이 때 함수비는 앞서 수행한 실내다짐시험을 수행한 결과 최적함수비인 7%로 조절하였다. B구간은 다짐횟수와 흙의 함수비는 일정하게 하고 포설두께를 각각 20cm, 25cm 그리고 30cm로 변화시켜 3개의 셀로 구성하였다. 마지막으로 함수비의 영향을 관찰하기 위해 C구간은 다짐횟수와 함수비는 일정하게 하고 다짐층 두께를 변화시켜 역시 3개의 셀 지반을 조성하였다. 시험시공 위치별 상세한 시험 조건은 표 1에 나타내었다.

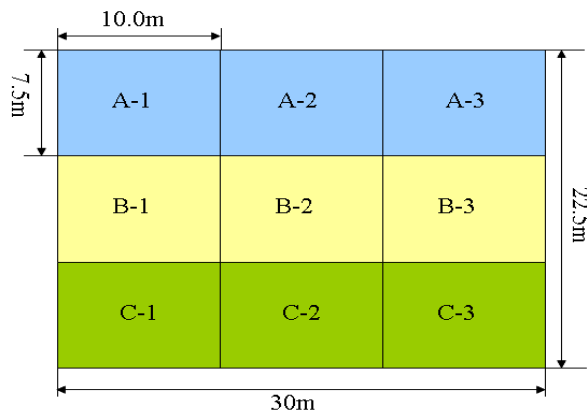


그림 5. 성토다짐 시험시공 평면도

표 1. 위치별 시험조건

위치	A			B			C		
	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3	C-1	C-2	C-3
다짐두께 (cm)	30	30	30	30	30	30	20	25	35
다짐횟수 (회)	4	8	12	8	8	8	8	8	8
함수비 (%)	7	7	7	13	10	4	7	7	7

그림 5와 표 1에 나타난 다양한 지반 조건 상태에서 지반 강성을 간단히 평가할 수 있는 지오게이지, 동평판재하시험기 그리고 간이지지력시험기를 이용한 시험을 수행하였다. 또한, 동일현장에서 다짐에 대한 기준값을 구하기 위해 평판재하시험을 기준 시험으로 함께 수행하였다.

3.2 현장시험 결과

1) 평판재하시험 결과

그림 6은 다짐시험시공 현장에서 수행한 각 위치에서의 평판재하시험 결과를 나타낸 것이다. 다짐 횟수를 변경시키면서 시험한 A구간에서는 4회 다짐보다는 8회 다짐, 8회 다짐보다는 12회 다짐을 수행한 경우에 평판재하시험으로 구한 K_{30} 값이 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 함수비를 변화시킨 B구간의 경우에는 함수비 변화에 따라 평판재하시험 결과 K_{30} 은 그다지 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 또한 C-1 구간에서 1회 수행한 평판재하시험 결과는 동일다짐횟수와 동일함수비를 갖지만 다짐 층 두께가 10cm 두꺼운 A-2 구역과 거의 일치하는 값을 얻어 층 두께에 따른 평판재하시험 결과의 큰 변화는 없는 것으로 나타났다.

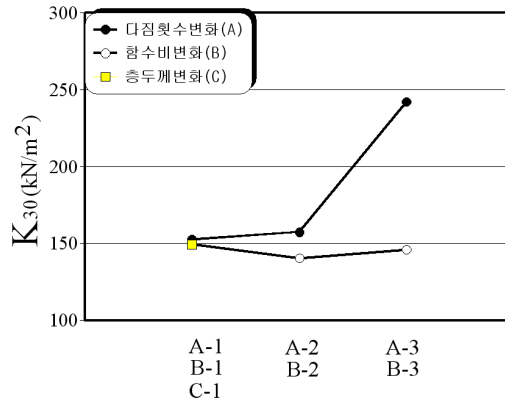


그림 6. 평판재하시험 결과

2) 지반강성 평가장치 시험결과

본 시험시공 현장에서 수행한 지오게이지, 동평판재하시험 그리고 간이지지력 시험 결과를 그림 7에 나타내었다. 우선 그림 7(a)과 그림 7(b)에 도시한 지오게이지 시험결과(E_G)와 동평판재하시험 결과(E_{LFWD})에서 보면 다짐횟수변화, 함수비 변화 그리고 층두께 변화에 대해 비교적 민감하게 반응하고 있는 것으로 나타났다. 그림 7(c)에 나타낸 간이지지력 시험기의 시험 결과(K_{30})도 다짐횟수변화와 함수비 변화에는 민감하게 반응하고 있는 것으로 나타났으나, 다짐층 두께의 변화에 대해서는 다른 시험 결과와는 달리 민감하게 반응하고 있지 않은 것으로 나타났다.

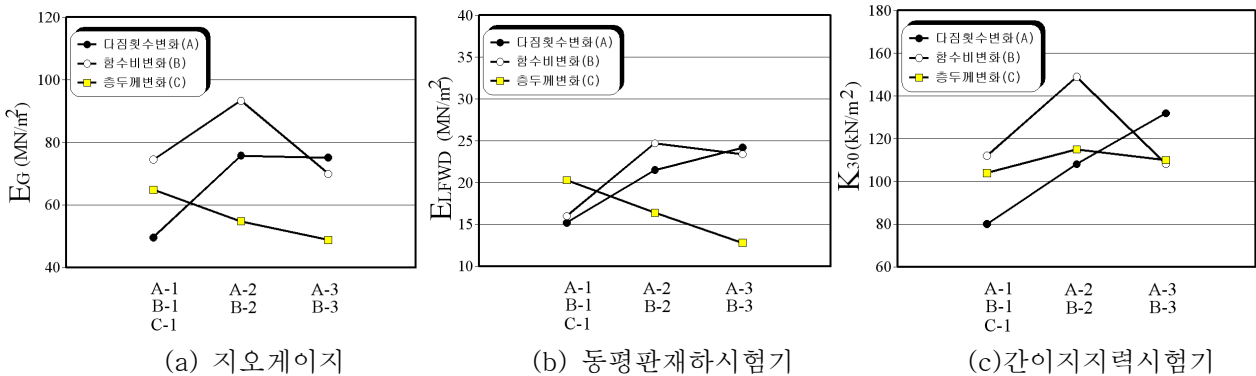
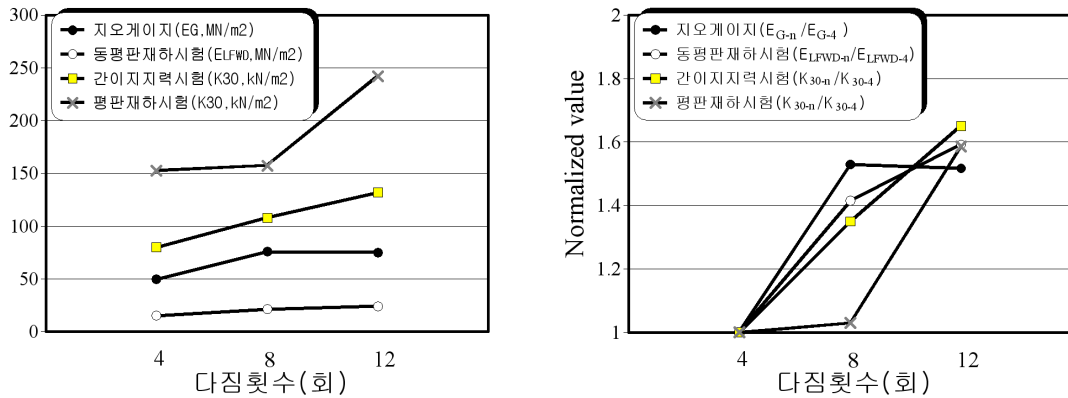


그림 7. 지반강성 평가장치 시험 결과

4. 시험 결과 분석

1) 다짐횟수 변화에 따른 다짐도 변화

그림 8은 앞서 제시한 그림 6과 그림 7에 나타난 시험 결과 중 다짐횟수 증가에 따른 평판재하시험 결과와 지반강성평가장치인 지오게이지, 동평판재하시험, 간이지지력시험 결과를 종합해서 나타낸 것이다. 그림 8(a)에서 보면 다짐횟수 증가에 따른 각 시험 결과의 증가가 시험기 종류에 따라 다소 차이는 있으나, 대체로 증가하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 그림 8(a)에서 나타난 다양한 시험 결과들은 시험방법의 근본적인 차이로 인해 지오게이지의 경우, E_G , 동평판재하시험의 경우, E_{LFWD} , 간이지지력시험과 평판재하시험의 경우, K_{30} , 으로 각각 다르게 산정되기 때문에 각 시험 값들을 서로 정량적으로 비교할 수 없다. 따라서 각 시험 결과들을 비교 분석하기 위해 그림 8(b)에서는 그래프 세로축에 다짐횟수 4회시에 산출된 각 시험결과를 기준값으로 하여 다짐횟수 8회, 12회에 시험한 각각의 시험 결과를 정규화하여 나타내었다.



(a) 다짐횟수 증가에 따른 시험 결과

(b) 각 시험 결과를 정규화한 결과

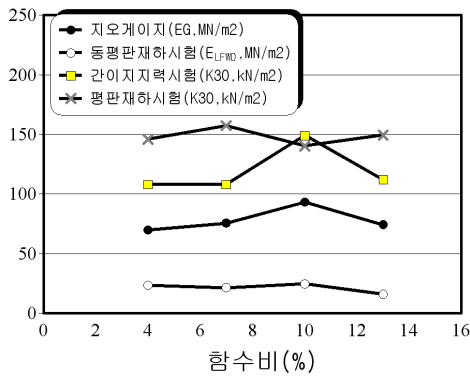
그림 8. 다짐횟수 증가에 따른 지반강성 평가 결과

우선 지오게이지 시험결과인 경우 4회 다짐시 보다는 8회 다짐시에 지오게이지 시험결과인 E_G 가 급격히 증가했다. 12회 다짐시에도 4회 다짐시보다 E_G 가 50%정도 증가했지만 8회보다는 약간 감소한 것으로 나타났다. 반면에, 동평판재하시험 결과인 E_{LFWD} 와 간이지지력 시험에서 측정된 K_{30} 은 4회 다짐에 비해 8회 다짐시에 약 40%정도 증가하였으며, 12회 다짐시에는 4회 다짐시에 비해 약 60%정도 더 큰 값이 산정되었다. 기준시험으로 수행한 평판재하시험의 경우에는 8회 다짐시 4회 다짐시에 비해 K_{30} 이 약간 증가하는 것으로 나타났으나, 12회 다짐시에는 다른 지반강성 평가시험결과와 비슷하게 4회 다짐시의 K_{30} 에 비해 약 60%의 증가하는 것으로 나타났다. 기준시험인 평판재하시험과 지오게이지 시험 결과의 경우 동평판재하시험이나 간이지지력 시험과 같이 다짐횟수 증가에 따른 일관된 시험결과 증가가 보이지 않았는데, 이는 지반의 불균질성 등의 여러가지 이유가 있겠지만, 본 시험시공에서 사용한 세 종류의 지반강성 평가 장치 모두와 평판재하시험 결과 모두 다짐횟수 증가에 대한 각 시험결과 반응이 양호한 것으로 나타났다.

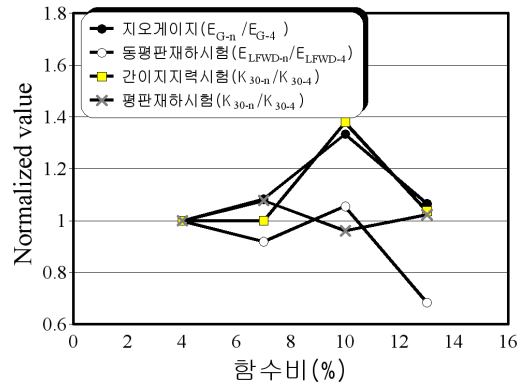
2) 함수비 변화에 따른 다짐도 변화

그림 9는 앞서 제시한 그림 6과 그림 7에 나타난 시험 결과 중 함수비 변화에 따른 평판재하시험 결과와 지오게이지, 동평판재하시험, 간이지지력시험 결과를 종합해서 나타낸 것이다. 그림 9(a)에서 B구간에서 수행된 함수비별 시험결과와 더불어 B구간의 다짐두께와 다짐횟수가 동일하지만 실내다짐시험 시 최적 함수비인 7%로 지반을 조성한 A-2 구간의 시험결과도 함께 도시하였다. 그림 9(a)에서 보면 지오게이지와 동평판재하시험 그리고 간이지지력시험 결과 모두 10% 함수비 일 때 가장 큰 값을 나타내고 있으며, 평판재하시험 결과만 7% 함수비 일 때 가장 큰 값을 나타내고 있다. 함수비 변화에 따른

각 시험결과들의 증감 여부를 상대적으로 비교 분석하기 위해 그림 9(b)의 세로축에 4% 함수비인 경우에 측정된 각 시험결과를 각각 기준 값으로 하여 각 시험 결과를 정규화하여 나타내었다.



(a) 함수비 증가에 따른 시험 결과



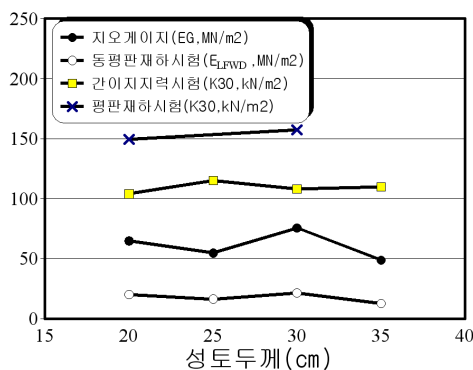
(b) 각 시험 결과를 정규화한 결과

그림 9. 함수비 증가에 따른 지반강성 평가 결과

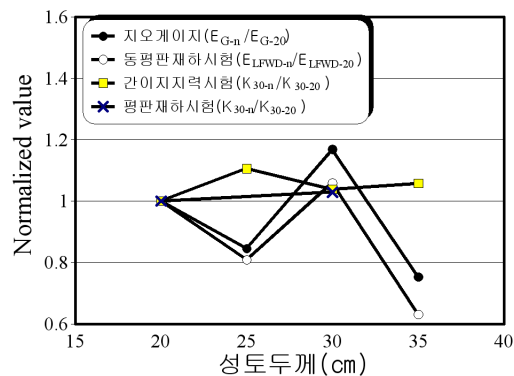
그림 9(b)에서 보면 지오게이지와 간이지지력 시험결과와 경우 10% 함수비 지반이 4% 함수비 지반 보다 약 33~37% 정도 큰 값이 산정되었다. 동평판재하시험도 10% 함수비 지반에서 가장 큰 값을 보였지만 그 크기는 4% 함수비 지반에 비해 불과 5% 정도로 큰 값으로 미미한 것으로 나타났다. 평판재하시험의 경우에는 실내다짐시험에서 도출된 최적함수비 7%에서 가장 큰 값을 나타내었지만, 역시 이 값도 4% 함수비 지반에 비해 불과 8% 정도 밖에 크지 않은 것으로 나타났다. 이를 종합해 보면, 현장 시험 결과는 실내 다짐시험 결과에서 도출된 최적함수비 7% 보다는 약간 더 큰 10% 함수비에서 더 큰 강성이 측정되었으며, 지오게이지와 간이지지력시험의 경우에는 함수비 변화에 어느정도 반응을 하는 것으로 나타났다. 동평판재하시험이나 평판재하시험의 경우에는 함수비 변화에 따른 지반강성 평가 결과는 그리 크게 변화하지 않는 것으로 나타났다.

3) 다짐층 두께 변화에 따른 다짐도 변화

그림 10은 앞서 제시한 그림 6과 그림 7에 나타난 시험 결과 중 다짐층 두께 변화에 따른 평판재하시험 결과와 지오게이지, 동평판재하시험, 간이지지력시험 결과를 종합해서 나타난 것이다. C 구간에서는 현장 사정상 다짐층 두께가 20cm인 C-1 구간에서만 평판재하시험을 수행하였기 때문에 다짐횟수와 현장함수비가 동일하고 다짐층 두께가 30cm인 A-2 지역의 결과를 함께 도시하였다.



(a) 다짐층 두께 증가에 따른 시험 결과



(b) 각 시험 결과를 정규화한 결과

그림 10. 다짐층 두께 증가에 따른 지반강성 평가 결과

그림 10(a)에서 보면 그림 7에 나타난 결과와는 달리 다짐층 두께 증가에 따라 평판재하시험 결과나 지반강성 평가 시험 결과 모두 다짐층 두께 증감과는 일정한 경향성이 보이지 않았다. 이를 좀 더 자세히 분석하기 위해 다짐층 20cm 두께를 기준 값으로 각각 시험 결과 값으로 나누어 정규화하여 그림 10(b)에 나타내었다. 그림 10(b)에서 나타나 있듯이 다짐 두께 증감에 대해 모든 종류의 시험 결과에서 일정한 경향을 찾을 수 없었다. 그림 7에서는 지오게이지와 동평판재하시험 결과가 다짐층 두께 증가에 따른 지반강성의 감소 경향을 나타내고 있으나, C구간과 A-2구간의 결과를 함께 도시한 그림 10의 결과에서는 지반강성 평가 시험 결과가 다짐층 두께 증감과 일정한 경향성을 보이지 않는 것으로 나타나 지반조성시 A구간과 C구간이 다소 불균질한 것으로 추측된다. 따라서 다짐층 두께와 지반강성도의 관계는 추가적인 연구를 통해 판단해야 할 것으로 생각된다.

5. 요약

본 연구에서는 지오게이지, 동평판재하시험기 그리고 간이지지력시험기 등과 같은 지반강성도를 평가할 수 있는 시험장치와 현장 다짐도 측정에 가장 많이 사용되는 평판재하시험을 다짐횟수, 함수비 그리고 다짐층 두께 등을 변화해 가면서 현장시험을 수행한 결과, 다음과 같은 잠정 결론을 내릴 수 있었다.

- 1) 지오게이지와 동평판재하시험기 그리고 간이지지력 시험기에서 측정된 결과는 모두 다짐도 증가에 따른 지반 강성 증가 현상을 잘 반영하는 것으로 나타났다.
- 2) 함수비에 따른 지반강성 증감 현상은 지오게이지와 간이지지력시험 결과에서만 일부 뚜렷하게 나타났으며, 동평판재하시험이나 기준 시험인 평판재하시험은 함수비 증감에 따라 지반강성 증감 현상이 뚜렷하게 나타나지 않았다.
- 3) 다짐층 두께 변화에 따른 지반강성도 평가시험 결과 본 시험에서 수행한 지오게이지, 동평판재하시험, 간이지지력 시험은 물론 기준시험인 평판재하시험의 경우에도 일정한 경향이 뚜렷하게 나타나지 않아 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 간편하고 신속한 시험이 가능한 다양한 지반강성평가 시험장치를 이용해 현장에서 다양한 조건의 지반에 대해 다짐도 평가 시험을 수행한 결과, 함수비 및 다짐두께가 일정한 경우 다짐횟수 증가에 따라 모든 시험 결과가 지반강성도가 증가하는 것으로 나타났다. 따라서, 추후 다양한 지반조건에 대해 다양한 시험을 수행하여 다짐도 및 지반강성도의 연관성에 대한 자료가 축적된다면, 본 시험에서 수행한 시험방법으로도 현장 다짐도 측정이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설핵심기술연구개발사업 “텔레메틱스를 활용한 지능형 성토다짐/운송시스템 개발” (06건설핵심D02)의 지원으로 수행되었음을 밝힙니다.

참고문헌

1. 백인철, 유완규, 김병일, 김주형 (2007), “여러가지 다짐평가 장비의 적용성에 대한 모형시험”, 한국산학기술학회논문지, Vol. 8, No. 5, pp. 1152-1158
2. Murad Y. Abu-Farsakh, Ph.D., P.E., Khalid Alshibli, Ph.D., P.E., Munir Nazzal, and Ekrem Seyman (2004), "Assessment of In-situ Test Technology for Construction Control of Base Courses and Embankments "Louisiana Transportation Research Center , pp. 126