

모형챔버시험을 이용한 사질토 지반의 경량포장체용 기초의 하중전달 특성

신광호¹, 황철비¹, 전상렬¹, 이관호^{*}

¹국립공주대학교 건설환경공학부

Load Transfer Characteristics of Pile Foundation for Lightweight Pavement in Sand Soil using Laboratory Chamber Test

Kwang-Ho Shin¹, Cheol-Bi Hwang¹, Sang-Ryeol Jeon¹, Kwan-Ho Lee^{1*}

¹Dept. of Civil Engineering, Kongju National University

요약 본 연구에서는 연약지반에서의 경량콘크리트포장을 적용할 때의 안전성 평가를 위해 실제 포장체 사이즈의 1/30으로 축소한 모형틀을 이용하여 모래지반에서 실험을 실시하였다. 모형토조를 이용하여 지반을 조성하였고, 표준 말뚝재하시험(완속재하시험방법)을 이용하였다. 수직하중이 적용되는 말뚝기초의 슬래브의 중심에서 가까운 순으로 Case A, Case B, Case C로 구분하였고, 각각의 말뚝의 간격은 8cm로 하였다. 말뚝기초 모형시험결과 사질토지반에서 수직하중을 1.5kg에서 12kg로 증가시킬 때 포장체가 전체적으로 침하하였고, 최대 침하량은 0.4mm로 측정되었다. Case A의 경우 압축력을 받는 것으로 나타났으며, Case B는 수직하중이 증가함에 따라 말뚝에 압축력과 함께 인장력도 같이 받는 것으로 보이며, Case C는 하중단계가 증가할수록 인장변형이 증가하는 경향을 나타내었다.

Abstract In this study, small scaled (1/30) laboratory chamber tests of the pile foundation for a lightweight concrete pavement system were carried out to evaluate the safety of a pile foundation on sandy soil. The testing ground was simulated in the field and a standard pile-loading test was conducted. The test piles were divided into 3 types, Cases A, B and C, which is the location from the center of the slab by applying a vertical load. The interval between the piles was set to 8 cm. As a result of the pile foundation model test, the pavement settled when the vertical load was increased to 12kg from 1.5kg in sandy soil ground, particularly the maximum settlement of 0.04mm. Judging from the model chamber test, Case A showed compressive deformation, whereas Case B represented the compression and tensile forces with increasing vertical load. Case C showed an increase in tensile strain.

Key Words : Laboratory chamber test, Lightweight pavement, Piles foundation, Vertical displacement

1. 서론

우리나라에서 연약지반은 주로 해안 지역과 내륙의 하천 연안 지역에 분포하고 있다. 고속도로의 경우 경부고속도로, 남해고속도로, 호남고속도로, 인천국제공항고속도로의 일부 구간이 연약지반상에 건설되었고, 최근에도 서해안고속도로, 천안-논산간 고속도로 등이 연약지반층 위에 건설되었다[1].

또한, 현재도 서해안고속도로, 신공항고속도로, 천안-논산간 고속도로 등이 연약지반 구간을 경유하여 건설 중에 있다. 서해안고속도로 건설 현장에서 나타나는 연약지반은 대부분 실트질 점성토층으로 이루어져 있다. 이에 비하여 남해고속도로와 경부고속도로가 건설된 남해안 일대와 낙동강 연안 지역은 점성토층의 두께가 최대 40m에 이르며, 함수비도 50~70%에 이른다. 강원도 일부 및 경북 지방을 경유하는 구간에서도 실트질의 연약

본 논문은 국토교통과학기술원 2013년 지역기술혁신사업 “환경친화적 연안역 개발” 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Kwan-Ho Lee (Kongju National Univ.)

Tel: +82-41-521-9313 email: kholee@kongju.ac.kr

Received February 19, 2014

Revised (1st April 8, 2014, 2nd May 8, 2014, 3rd June 17, 2014)

Accepted July 10, 2014

층이 발견되고 있다. 강원도 일부 및 경북 지방을 경유하는 구간에서도 실트질의 연약층이 발견되고 있다. 이 외에도 동해안에 인접하여 건설되고 있는 동해고속도로 일부 구간에서는 유기물질을 대량 함유한 유기질토층이 나타나고 있으며, 경우에 따라 유기질 함량이 50% 이상을 넘는 피트질 연약층도 확인되고 있다.

연약지반상의 도로 파손은 주로 잔류침하로 인한 도로요철, 균열, 도로성토사면붕괴, 부등침하, 지반함몰 및 도로파손 등이 발생하고 있다. 현재 연약지반처리 후 잔류침하를 고려하여 단계별로 도로시공 (Stage Construction) 공법을 사용하고 있으나 연약지반처리에 2년 이상의 시공기간 및 연약지반의 처리와 유지관리에 많은 비용이 소요된다. 이에 말뚝기초를 이용 할 경우 기존의 프리로딩, 드레인, 치환 등 연약지반처리과정을 생략하여 연약지반에 도로시공이 가능하며 또한 기존의 노상, 보조기층, 기층, 표층으로 구성된 포장단면을 경량콘크리트기층, 표층으로 단순화하여 시공과정을 단순화 및 도로건설용 재료절감효과를 기대할 수 있을 것이다. 말뚝기초의 경우 충격하중, 지진하중 등에 의하여 상당한 크기의 횡하중을 받게 되며, 구조물이 토압, 풍압, 파력 등을 받게 되면 말뚝상부에는 연직하중뿐만 아니라 횡하중과 모멘트도 동시에 작용하게 된다. 이러한 횡하중과 모멘트 하중을 받는 말뚝의 과도한 변위나 파괴는 상부 구조물에 심각한 영향을 미칠 수 있으므로 이에 대한 검토가 수반되어야 한다[2,3].

본 연구에서는 말뚝기초의 실내모형시험을 통해 경량포장체용 기초로서의 적합성을 분석 및 평가를 목적으로 하고 있다. 이에 따라 연약지반에서의 경량콘크리트포장을 적용할 때의 안전성 평가를 위해 실내모형시험용 경량포장체용 말뚝기초모형을 실제 포장체 사이즈의 1/30으로 축소한 모형을 이용하여 시험을 실시하였다. 시험에 사용된 모형 토조는 직사각형로서 모형 토조의 크기는 가로 60 cm, 세로 80 cm, 높이 90 cm이며 지반조건은 연약지반을 모사하여 모델링하였다. 말뚝은 선단지지가 아닌 주변마찰말뚝으로 시험하였다. 모형시험용 토조에 생성된 토질은 사질토 지반을 모사한 후, 경량포장체용 포장용 말뚝기초에 대한 하중재하시험을 수행하였다.

본 연구에서는 전술한 연구목적에 효율적으로 수행하기 위하여 다음과 같은 제한 사항 내에서 연구를 수행하였다.

- (1) 실내시험용 모형은 상사비를 고려하여 1/30으로 축소하여 제작한 알루미늄으로 포장체 및 말뚝기초 모형을 사용하였다.
- (2) 모형토조에 사용된 지반은 모래를 이용한 사질토 지반으로 시험하였다.
- (3) 시험은 균말뚝모형을 대상으로 실시하였다.
- (4) 시험하중은 교통량이 많을 때의 교통하중을 기준으로 25%, 50%, 75%, 100%, 125%, 150%, 175%, 200%의 하중을 단계별로 주어 실시하였다[5-7].

2. 실내모형시험

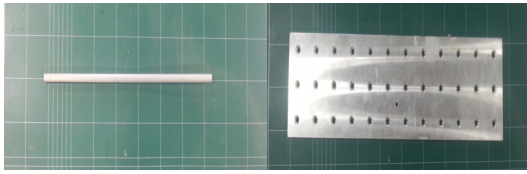
2.1 실내모형시험개요

본 연구에서는 느슨한 사질토지반에서의 적용성을 확인하고자 지층을 모래지반으로 조성하였다. 지반조성에 사용된 모래는 강모래를 사용하였으며 기본 물성치 시험을 모형토조시험 전에 실시하였다.

연구에서 사용된 모형 토조의 크기는 가로 80 cm, 세로 60 cm, 높이 90 cm의 강재로 제작하였다. 제작된 토조로 가로의 길이는 측면판의 위치를 이동하여 조절이 가능하게 제작하여 실제 시험에서 지반이 조성되는 가로 길이를 80 cm로 설정하였다. 또한 시험에서 조건을 단순화하기 위해 토조 내부벽에 비닐을 부착하여 벽면과 마찰을 최소화될 수 있도록 하였다.

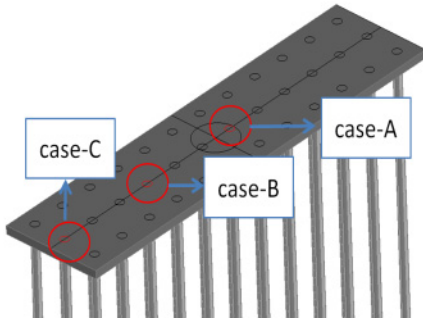
2.2 경량포장체용 말뚝기초 모델링

시험에서 적용된 모형은 Fig. 1과 같이 알루미늄 합금을 적용하여 제작하였다. 모형포장체는 장방향 길이 480 mm, 단방향 길이 120 mm 무게 1.2 kg의 슬래브형태에 말뚝모형을 연결할 수 있는 구멍을 만들어 제작하였다. 실제 도로폭 3.6 m, 도로길이 14.4 m, 포장두께 0.35 m (0.3 m 경량콘크리트 기층 및 0.05 m 아스팔트표층), 경량포장체 무게 25.7 톤의 기포콘크리트를 이용한 경량포장체 특성을 시험에 반영하여 1/30로 축소 제작하였다. 축소모형의 크기는 외경 10 mm, 내경 8 mm, 길이 370 mm의 증공관으로 제작하였고 시험조건에서 길이 11.1 m, 외경 300 mm의 PHC말뚝 특성을 시험에 반영되도록 하였다.



[Fig. 1] Model pile & pavement slab

제작이 완료된 두 모형을 결합하여 하나의 포장체 구조물로 제작하였고, 말뚝 간격은 40 mm로 제작하여 30 g 조건에서 말뚝기초 간격 1.2 m (4D; D=0.3m) 12×3 배열의 36개 균말뚝기초의 거동이 반영되도록 하였다. 말뚝기초의 경우 370 mm의 길이로 제작하여 실험 수행하였다. 측정용 3개의 말뚝기초에 변형율계 (Strain gauge) 를 부착하여 재하하중 단계에 따른 하중-전이 특성을 분석할 수 있도록 하였다. Fig. 2와 같이 균말뚝기초 중에서 측정위치는 가운데 줄의 하중센터, 포장체의 측면 등 3개의 말뚝을 이용하였다.



[Fig. 2] Measuring the displacement of the pile location

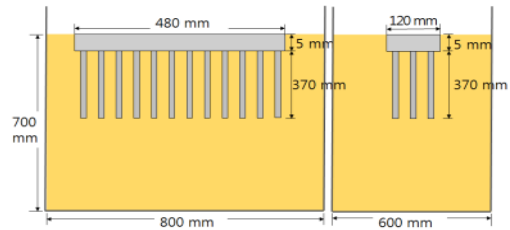
2.3 기본물성 시험 및 실험용 지반조성

실내모형실험에서의 지반조성은 강모래를 이용한 사질토지반에 실험을 실시하였다. 시료의 공학적 성질을 파악하기 위해서 골재의 기본물성은 KS 표준시험법을 이용하였다. 표준시험을 이용한 기본 물성 실험 결과는 Table 1과 같다.

[Table 1] Properties of Quartz Sand

USCS	D_{60} (mm)	Coefficient of curvature (C_c)	Coefficient of Uniformity (C_u)	specific gravity (Gs)	$\gamma_{d, max}$ (kN/m ³)	$\gamma_{d, min}$ (kN/m ³)
SP	0.55	1.05	1.57	2.67	15.68	13.45

800 mm × 600 mm × 900 mm 크기의 토조에 사질토 지반을 조성하였다. 말뚝지지 전면기초의 거동을 분석하기 위하여 상대밀도 80%의 상태의 지반을 대상으로 Fig. 3과 같이 세팅 후 실험을 수행하였다. 사질토 지반의 조성을 위하여 발다짐을 활용하였다. 지반조성시 깊이에 따라 10 cm 크기의 원통형 용기를 설치하고 실험이 끝난 후 이를 회수하여 깊이별 상대밀도를 측정함으로써 모형 지반의 균질성을 확인하였다.






[Fig. 3] Setup of Small scaled model testing

2.4 실내실험용 측정장비

모형토조실험을 이용하여 수평방향의 정적하중 재하시 균말뚝의 깊이에 따른 각 지점에서의 변형량 및 변위를 측정하였다. 또한, 수직방향의 정하중재하시 말뚝두부에서의 수직변위와 말뚝의 각 지점에서 발생하는 변형량을 측정하였다. 실험에 사용된 계측장비는 Table 2와 같이 구성하였다.

실험에 사용된 하중 재하값은 교통량의 정도에 따라 50mm 원형하중판에 재하되는 하중의 크기를 결정하였다. 실험에 쓰인 하중 재하값은 중간 교통량 도로의 689 kPa를 모사하였고, 단계별 하중값은 Table 3과 같이 적용하였다.

[Table 2] Measuring instruments

Measuring instruments		Range
Strain gauge		±10000 μ
LVDT		Rated Capacity : ±50.00 mm
Data Logger		Static and dynamic measurements

[Table 3] Loading Stages

Loading stage (%)	50	100	150	200
Applied Load (kPa)	294	588	882	1176

2.5 실내모형실험 방법

실내모형실험을 위해서 모형챔버토조에 조성된 사질토지반에 축소 제작된 모형기초를 실험토조 중심부에 설치하였다. 유압잭을 이용하여 모형기초를 관입하였다. 모형기초의 관입이 끝나면 약 30분 정도의 안정화를 시킨 후 지름 50 mm의 하중판을 모형의 중심부에 위치시킨다. 중심부에 위치한 하중판위에 추를 설치하여 단계별하중의 크기를 조절하였다. 수직하중을 받는 말뚝기초 모형에 수평하중을 적용시켜 말뚝의 하중-변위특성, 심도별 변형률 등을 평가하였다. 말뚝의 길이는 37 cm로 하였으며, Fig. 4와 같이 말뚝의 수평하중 재하를 위해 모형 슬래브의 중앙부분에 와이어를 연결시켰고 연결된 와이어에 추를 달아 수평하중을 적용 하였다.



[Fig. 4] Installation of pile foundation

사질토 지반의 경량포장체용 기초의 수직하중에 따른 하중전달 특성평가를 위한 실내 모형실험은 총 시험 하중을 8단계 즉, 설계하중의 25%, 50%, 75%, 100%, 125%, 150%, 175% 및 200%로 나누어 재하 하였다. 각 하중단계에서 말뚝 머리의 침하율 (rate of settlement)이 시간당 0.25 mm 이하가 될 때까지 단 최대 2시간을 넘지 않도록 하여 재하하중을 유지하였다. 설계 하중의 200% 즉 총 시험하중 재하단계에서 하중을 유지하되 시간당 침하량이 0.25 mm 이하일 경우 12시간, 그렇지 않을 경우 24시간동안 유지시켜 시험하였다[8]. 수평하중에 따른 하중전달 특성평가를 위한 실내 모형실험은 수직하중재하와 동일한 방법으로 진행하였으며 적용된 수평하중값을 0.5 kgf, 1.5 kgf, 3.5 kgf, 및 5.5 kgf 등 총 4단계로 나누어 재하하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 슬래브 침하 실험 결과

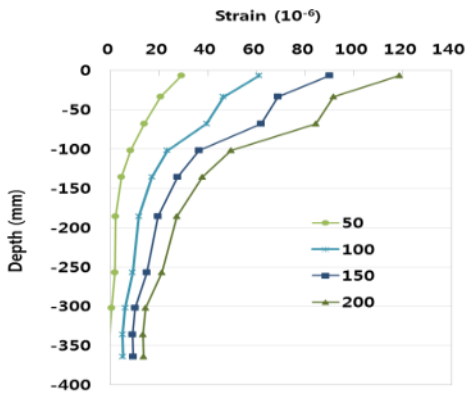
사질토지반에서의 말뚝기초모형의 수직 하중과 변위를 측정하였다. 말뚝기초모형의 최대침하량은 Case A 부분이 0.04 mm의 침하를 나타냈고, Case B 부분과 Case C 부분은 침하량이 없는 것으로 측정되었다. 하지만 말뚝의 변위 경향을 보아 대칭 부등 침하가 발생하는 것으로 판단된다. 이러한 부등침하의 원인으로는 모형기초의 중심부에 집중된 수직하중에 의하여 Case A 부분에 최대 침하가 발생하고, 상대적으로 수직하중에 영향을 적게 받는 Case B와 Case C부분은 LVDT 측정범위 이하의 침하가 발생했다고 판단된다. 말뚝기초 모형의 실험값을 실제 크기로 환산하였을 때의 최대침하량 및 부등침하량이 각각 1.2 mm 정도로 측정되었다. 이는 최대침하량 50 mm와 부등침하량은 20 mm로 정의한 도로교 설계기준(하부구조편, 2001)을 만족하는 것을 의미한다.

3.2 수직하중 적용 시 말뚝의 변형

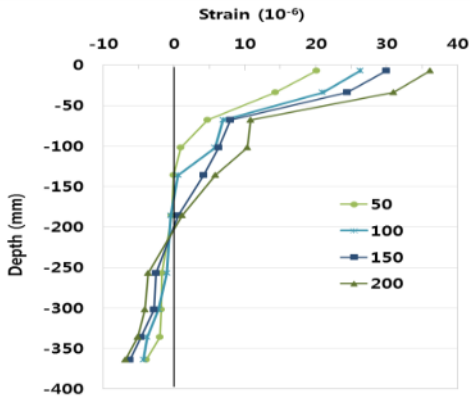
Fig. 5의 Case A는 하중단계가 증가할수록 말뚝의 변형이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 말뚝이 압축력을 받고 있는 것으로 판단되며 말뚝의 관입깊이 7 mm 부분부터 말뚝의 1/3지점인 136 mm 지점에서 가장 많은 변형을 보이고 있다. 말뚝의 상부에서는 최대 변형 94.29×10^{-6} 이 나타났고, 말뚝하부에서는 최대 변형률은 8.88×10^{-6} 로 측정되었다.

Fig. 6의 Case B은 수직하중이 증가함에 따라 말뚝에 압축력과 함께 인장력도 같이 받는 것으로 나타났다. 말뚝의 상부에서는 최대 변형률 36.2×10^{-6} 이고, 말뚝하부에서는 최대 변형률 -6.8×10^{-6} 으로 측정되었다.

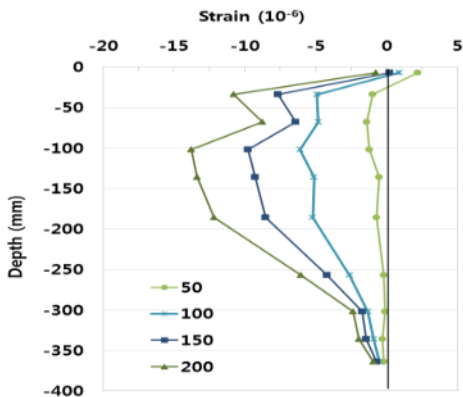
Fig. 7의 Case C는 하중단계가 증가할수록 말뚝의 전체적인 변형이 인장방향으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 말뚝의 상부보다는 말뚝의 중앙부(102 mm)에서 많은 변형을 보였다. 말뚝의 중앙부(102 mm)에서의 최대 변형률 -1×10^{-6} 을 보인 반면, 말뚝하부에서는 최대 변형률 -12.27×10^{-6} 을 나타내었다. 이와 같은 경향을 보이는 원인으로는 말뚝모형기초의 슬래브중앙부에 집중된 하중으로 인해 발생한 부등침하에 그 원인이 있다고 판단된다.



[Fig. 5] Vertical Strain of Case A



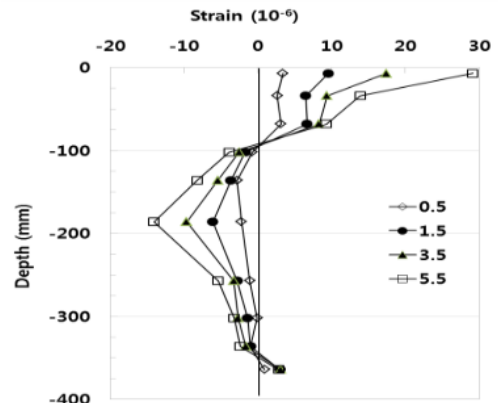
[Fig. 6] Vertical Strain of Case B



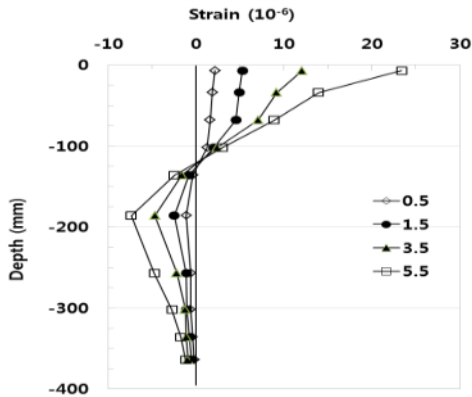
[Fig. 7] Vertical Strain of Case C

3.3 수평하중 적용 시 말뚝의 변위

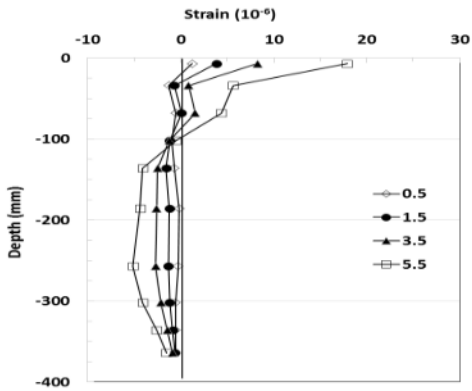
사질토지반에 관입된 말뚝은 102 mm 전후로 회전점이 발생하였고, 회전점을 기준으로 말뚝의 변형 방향이 압축방향(+부호)에서 인장방향(-부호)으로 변화하는 것으로 나타났다. 말뚝모형기초 상부에 적용하는 하중이 모형기초의 슬래브에 적용된 수평하중의 영향으로 말뚝의 상부의 변위폭이 가장 많이 나타났고 수평지지력이 강한 말뚝하단부에서는 가장 작은 변형률을 보였고, 관입깊이 108 mm를 전후로 회전점이 발생함을 알 수 있다. Fig. 8에 나타난 것과 같이 수평하중 5.5 kgf에서 말뚝의 수평 변형은 Case A의 경우 압축방향으로 관입깊이 7 mm에서 29.13×10^{-6} 으로 측정되었고, 인장방향으로는 관입깊이 186 mm에서 -8.23×10^{-6} 가 측정되었다. Fig. 9의 Case B는 압축방향으로 관입깊이 7 mm에서 23.42×10^{-6} 측정되었고, 인장방향으로는 관입깊이 186 mm에서 -7.36×10^{-6} 으로 측정되었다. Fig. 10의 Case C의 경우 압축방향으로 관입깊이 7 mm에서 17.92×10^{-6} 측정되었고, 인장방향으로는 관입깊이 -257 mm에서 -5.12×10^{-6} 측정되었다. 즉, 수평력의 적용하기위해 설치한 수평 작용점과 가까운 Case A, Case B, Case C 순서로 수평 변형이 크다는 것을 알 수 있다.



[Fig. 8] Horizontal Strain of Case A



[Fig. 9] Horizontal Strain of Case B



[Fig. 10] Horizontal Strain of Case C

4. 결론

본 논문은 말뚝기초의 실내모형시험을 통해 말뚝기초 모형의 지반조건에 따른 침하량과 말뚝위치별 수직하중에 의한 변위와 수평하중에 의한 변위를 측정하였다. 제한된 실험조건에서 실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 실내모형실험에서 말뚝기초모형의 침하량을 실제 크기로 환산하였을 때의 최대침하량과 부등침하량은 각각 1.2 mm로 측정되었고, 이는 도로교 설계기준(하부구조편, 2001) 최대침하량 50 mm와 부등침하량 20 mm를 넘지 않는 것으로 측정되었다.

- 2) 말뚝모형기초에 수직하중 적용시 말뚝의 변형은 Case A의 경우 압축력을 받는 것으로 나타났으며, Case B는 수직하중이 증가함에 따라 말뚝에 압축력과 함께 인장력도 같이 받는 것으로 보이며, Case C는 하중단계가 증가할수록 말뚝의 전체적인 변형이 인장방향으로 증가하는 경향을 보이고 있다.
- 3) 말뚝의 변형은 수평하중 재하시 Case A의 경우 압축방향으로 관입깊이 7 mm에서 29.13×10^{-6} 으로 측정되었고, 인장방향으로는 관입깊이 186 mm에서 -8.23×10^{-6} 가 측정되었다. Case B는 압축방향으로 관입깊이 7 mm에서 23.42×10^{-6} 측정되었고, 인장방향으로는 관입깊이 186 mm에서 -7.36×10^{-6} 으로 측정되었다. Case C의 경우 압축방향으로 관입깊이 7 mm에서 17.92×10^{-6} 측정되었고, 인장방향으로는 관입깊이 -257 mm에서 -5.12×10^{-6} 측정되었다.

References

- [1] Jeong, J.H., Jeong, K.J., King, H.J., Cho, S.M., Park, J.K., and Kim, D.S. (2005), "The Evaluation and management of long-term settlement for the Highway on the Soft Grounds", Korean Expressway Corporation, Research Report, pp. 5-8.
- [2] Shin, K.H, Hwang, C.B., Kim, S.K. and Lee, K.H (2013), "Laboratory Test of Pile Foundation for Lightweight Pavement", Korean Society of Road Engineers, 2013 Annual Conference, pp.105
- [3] Jang, S.Y., Won, J.O., and Jeong, S.S. (1999), "Analysis of Passive Pile Groups Subjected to Lateral Soil Movements - A Study on the Model Test", Korean Geotechnical Society, pp. 239-248
- [4] Highway Bridge Design Guide, Chapter of Substructure (2001)
- [5] Sanctis L., Mandolini A., (2006) "earing Capacity of Piled Rafts on Soft Clay Soils" Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.132, No.12, pp. 1600-1610
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:12\(1600\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:12(1600))
- [6] D. G. Park, K. J. Choi, J. H. Lee, (2012) "Analysis of Piled Raft Interaction on Sand with Centrifuge Test", Korea Geotechnical Society, Vol. 28, No.10, pp. 27-40
DOI: <http://dx.doi.org/10.7843/kgs.2012.28.10.27>

- [7] Horikoshi, K. and Randolph, M. F. (1996), "Centrifuge modelling of piled raft foundation on clay" *Getechnique*, Vol.46, No.4, pp. 741-752.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1996.46.4.741>
- [8] Conte, G., Mandolini, A., and Randolph, M. F.,(2003) "Centrifuge modeling to investigate the performance of piled rafts." *Proc., Geotech. Int. Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles*, Van Impe and Haegeman, eds., pp. 379-386

신 광 호(Kwang-Ho Shin)

[정회원]



- 2012년 2월 : 국립공주대학교 건설환경공학부 (공학사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 국립공주대학교 건설환경공학부 (석사과정)

<관심분야>
도로공학 및 지반공학

황 철 비(Cheol-Bi Hwang)

[정회원]



- 2004년 2월 : 고려대학교 토목공학전공 (공학석사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 국립공주대학교 건설환경공학부 (박사과정)

<관심분야>
도로공학 및 지반공학

전 상 열(Sang-Ryeol Jeon)

[정회원]



- 2006년 2월 : 연세대학교 토목공학전공 (공학석사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 국립공주대학교 건설환경공학부 (박사과정)

<관심분야>
도로공학 및 지반공학

이 관 호(Kwan-Ho Lee)

[정회원]



- 1991년 2월 : 고려대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1996년 12월 : 미국 Purdue Univ. Civil Eng., (공학박사)
- 2006년 9월 ~ 현재 : 국립공주대학교 건설환경공학부 교수

<관심분야>
도로공학 및 지반공학