

모형챔버시험을 이용한 점성토 지반에 설치된 경량포장체용 기초의 하중전달 특성

이관호* · 신광호**

Lee, Kwan-Ho*, Shin, Kwang-Ho**

An Analysis of Pile Foundation Load Transfer for Lightweight Pavement System in Clay Soil using Lab Chamber Test

ABSTRACT

The main purpose of this study is to analyze and evaluate the feasibility of lightweight pavement system with pile foundation on soft soil by laboratory small chamber test. In order to verify the stability of lightweight pavement system, the 1/30 scaled downed model system was tested at lab. The soft soil condition was simulated and group piles for skin friction resistance were used. Within the limited lab test, the settlements of pavement system were 0.86 mm for Case A, 0.70 mm for Case B, and 0.50 mm for Case C. The converted maximum settlement differential settlement were 25.8 mm and 10.8 mm. These values meet the inside of specification of Bridge Design Guide in Korea. The use of lightweight pavement systems on soft soils could be an alternative construction method on soft soils to reduce the challenges of conventional design and constructions.

Key words : Lightweight pavement, Pile foundation, Laboratory Chamber test, Soft soil

초 록

본 연구에서는 말뚝기초의 실내모형시험을 통해 연약지반상의 경량포장체용 기초로서의 적합성을 분석 및 평가를 목적으로 하고 있다. 안전성 평가를 위해 실내모형시험용 경량포장체용 말뚝기초모형을 실제 포장체 사이즈의 1/30으로 축소한 모형을 이용하여 시험을 실시하였다. 지반 조건은 연약지반을 모사하여 모델링하였고, 말뚝은 마찰군말뚝으로 시험하였다. 제한된 실험으로부터 측정된 모형포장체의 침하량은 Case A는 0.86 mm, Case B는 0.70 mm, Case C는 0.50 mm로 측정되었다. 측정된 말뚝기초 모형의 실험값을 실제 크기로 환산하였을 때의 최대침하량과 부등침하량은 각각 25.8 mm와 10.8 mm로 도로교 설계기준에 의거하여 최대부등변위량인 50 mm와 부등변위량 20 mm를 넘지 않는 것으로 보이며 침하량을 기준으로 안전성을 평가 할 경우 안전한 것으로 판정되었다.

검색어 : 경량포장체, 말뚝기초, 실내모형시험, 연약지반

1. 서론

우리나라의 경우 연약지반은 주로 남해안과 서해안지역에 넓게 분포한다. 이런 연약지반에 구조물을 축조할 경우 기초지지력이 부족하거나, 지반의 전단저항력이 충분하지 못해서 안정과 관련된 문제가 발생할 수 있으며 연약지반의 압밀침하, 연약지반에 시공된 말뚝에 작용하는 부마찰력 등 흙의 압축성으로 인한 침하의 문제가 발생할 수 있다. 또한 지진, 진동 등 여러 가지 원인으로 발생하는

* 중신회원 · 교신저자 · 공주대학교 토목공학과 정교수 (Corresponding Author · Kongju National University · kholee@kongju.ac.kr)

** 한국콘크리트시험원 연구원 (KCTL · innocent0919@naver.com)

Received January 6, 2016/ revised March 17, 2016/ accepted April 15, 2016

동적하중으로 인해 액상화와 관련된 문제가 발생할 수 있고 연약지반 굴착공사에 있어 분사현상, 파이프와 관련된 투수성의 문제가 발생할 수 있다. 현재 연약지반처리 후 잔류침하를 고려하여 단계별로 도로시공을 하는 점진공법(Stage Construction)을 사용하고 있으나 연약지반처리에 2년 이상의 시공기간 및 연약지반의 처리와 유지관리에 많은 비용이 소요된다(Jang et al., 1999; Jeong et al., 2005).

이에 말뚝기초를 이용할 경우 기존의 드레인, 프리로딩, 치환 등과 같은 연약지반처리과정을 생략하여 연약지반에 도로시공이 가능하며 또한 기존의 노상, 보조기층, 기층, 표층으로 구성된 포장 단면을 경량콘크리트기층, 표층으로 단순화하여 시공과정을 단순화 및 도로건설용 재료절감효과를 기대할 수 있을 것이다. 말뚝기초의 경우 충격하중, 지진하중 측방유동등에 의하여 상당한 크기의 횡하중을 견딜 수 있으며, 따라서 이러한 연직하중을 받는 말뚝에 대하여서는 일찍부터 연구되어 설계에 유효하게 활용되고 있다. 그러나 말뚝에 의하여 지지되고 있는 구조물이 토압, 풍압, 파력 등을 받게 되면 말뚝상부에는 연직하중뿐만 아니라 횡하중과 모멘트도 동시에 작용하게 된다. 이러한 횡하중과 모멘트 하중을 받는 말뚝의 과도한 변위나 파괴는 상부구조물에 심각한 영향을 미칠 수 있으므로 이에 대한 검토가 수반되어야 한다(Kim and Kim, 2013; Sanctis and Mandolini, 2006; Shin, 2014; Shin et al., 2013; Shin et al., 2014).

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 축소된 모형을 이용하여 시험을 실시하였다. 실험에 사용된 모형 토조는 직사각형이고, 크기는 가로 60 cm, 세로 80 cm, 높이 90 cm이며 지반조건은 연약지반을 모사하여 모델링하였다. 말뚝은 선단지지가 아닌 주변마찰말뚝으로 실험하였다. 모형실험용 토조에 생성된 토질은 연약지반을 모사한 후, 경량포장체용 말뚝기초에 대한 하중재하시험을 수행하였다.

2. 실내모형시험

2.1 모형토조

연구에 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 실험에서 지반이 조성되는 가로 길이를 80 cm로 설정하였다. 또한 실험에서 조건을 단순화하기 위해 토조 내부벽에 비닐을 부착하여 벽면과 마찰을 최소화될 수 있도록 하였다.

2.2 경량포장체용 말뚝기초 모델링

모형토조를 이용한 실내시험에 사용한 포장체 모형은 알루미늄 합금을 이용하여, 슬래브 및 말뚝기초로 각각 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 25.7톤의 기포콘크리트를 이용한 경량포장체 특성을 실험에 반영하여 1/30로 축소 제작하였다. 축소모형의 크기는 외경 10 mm, 내경 8 mm, 길이 370 mm의 중공관으로 제작하였고 실험조건에서 길이 11.1 m, 외경 300 mm의 PHC말뚝 특성을 실험에 반영되도록 하였다(Horikoshi and Randolph, 1996; Park et al., 2012).

제작이 완료된 두 모형을 결합하여 하나의 포장체 구조물로 제작하였고, 말뚝 간격은 40 mm로 제작하여 30 g 조건에서 말뚝기초 간격 1.2 m (4D; D=0.3 m) 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. 1과 같이 균말뚝기초 중에서 측정 위치는 가운데 줄의 하중센터(Case A), 포장체의 측면(Case C) 등 3개의 말뚝을 이용하였다.

2.3 기본물성 시험 및 지반조성

실내모형실험에서의 지반조성은 10 cm의 모래를 바닥에 타설하여 배수층을 형성하였고, 모래층 위에 카울리나이트를 이용하여

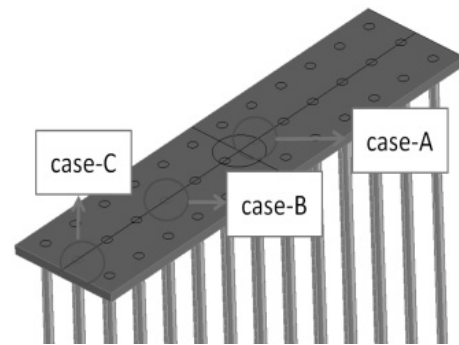


Fig. 1. Measuring the Displacement of the Pile Location

Table 1. Properties of Quartz Sand

Test	Liquid Limit	Plastic Limit	Plastic Index	Specific Gravity	Particle Size	Undrained Shear Strength
KS	F2303, 2304			F2308	F2306	F2343
Result	36.5%	21.0%	15.5%	2.75	0.004 mm	8.2 kPa

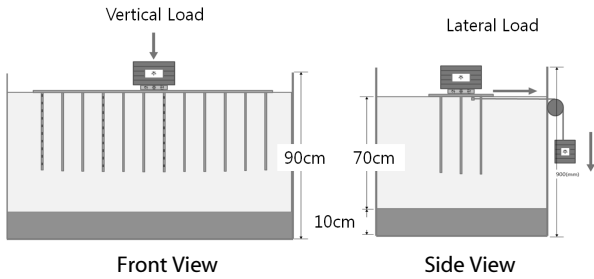


Fig. 2. Setup of Small Scaled Model Testing

약 70 cm 두께의 연약지반을 조성하였다. 30 kPa의 선형압밀하중을 약 1주일 동안 재하하여 연약지반을 인공적으로 조성하였다. 인공으로 조성된 연약지반 시료의 기본물성은 KS 표준시험법을 이용하였고, 실험 결과는 Table 1과 같다.

800 mm × 600 mm × 900 mm 크기의 토조에 Fig. 2와 같이 모형말뚝기초와 모형경량포장을 조립한 모형세트를 관입한 후 실험을 수행하였다. 연직하중은 중량추를 이용하였고, 수평하중은 중량추와 도르레를 이용하여 간접적으로 하중을 재하하였다. 모형토조실험을 이용하여 수평방향의 정적하중 재하시 균말뚝의 깊이 에 따른 각 지점에서의 변형량 및 변위를 측정하였다. 또한, 수직방향의 정하중 재하시 말뚝두부에서의 수직변위와 말뚝의 각 지점에서 발생하는 변형량을 측정하였다. 실험에 사용된 하중 재하값은 교통량의 정도에 따라 50 mm 원형 하중판에 재하되는 하중의 크기를 결정하였다. 실험에 쓰인 하중 재하값은 Kaloush (2001)가 사용한 중간 교통량 도로의 689 kPa (100%)를 모사하였다. 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(Conte et al., 2003). 수평하중에 따른 하중전달 특성평가를 위한 실내 모형실험은 수직하중재하와 동일한 방법으로 진행하였다. 수평하중은 연직하중의 약 45% 수준을 최대값으로 결정하였고 이를 0.5 kgf, 1.5 kgf, 3.5 kgf, 및 5.5 kgf 등 총 4단계로 나누어 재하하였다.

2.4 침하량 기준

도로교 설계기준(하부구조 편, 2001)에서는 직접기초 및 말뚝기초에 대한 침하량은 기초의 안정성 검토 항목에 포함되어 있지 않아 설계시 일반적으로 검토되지 않고 있다. 그러나 공사시방서에서 기초의 침하량이 허용침하량을 만족하도록 하는 규정으로 인해

Table 2. Specification of Allowable Settlement

Suggest	Allowable Settlement (mm)	Comment
Bozozuk (1978)	0-51	not harmful
Walkinshaw (1978)	0-63	effect on riderbility
Walkinshaw (1978)	over 63	structural problem
Grover (1978)	0-102	riderbility and structural problem
Bozozuk (1978)	0-102	harmful but allowable
Wahls (1990)	over 102	over the general limitation

시공시 허용침하량 규정은 기초심도 결정시 매우 중요한 변수가 되고 있다. 설계하중에 대한 기초의 침하량을 계산하면 대부분의 경우, 예측침하량이 1 cm를 넘어 설계단계에서 적용할 수 없는 기준을 시공단계에서는 적용하고 있다. FHWA (1985)에서는 수치 해석 및 기존교량의침하량조사를 통하여교량의 허용침하량기준에 대한 연구를 수행한바 있으며, Bozozuk (1978), Grover (1978) 및 Wahls (1990) 등은 Table 2와 같이 각 교각의 침하량 기준을 제시하였다. 상부구조물의 형식 및 경간장에 따라 침하량이 교량에 미치는 영향이 다르나, 1990년대 이전의 교량에 대한 실측결과를 근거로 허용치를 제시하고 있다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 모형포장체 침하 특성 평가

Fig. 3은 점토지반에서의 말뚝기초모형의 연직침하량을 측정 비교한 그래프이다. 모형시험으로부터 측정된 모형포장체의 침하량은 Case A는 0.86 mm, Case B는 0.70 mm, Case C는 0.50 mm로 측정되었다. 측정된 말뚝기초 모형의 실험값을 실제 크기로 환산하였을 때의 최대침하량과 부등침하량은 각각 25.8 mm와 10.8 mm로 도로교 설계기준(하부구조편, 2001)에 의거하여 최대부등변위량인 50 mm와 부등변위량 20 mm를 넘지 않는 것으로 보이며 침하량을 기준으로 안전성을 평가 할 경우 안전하다고 판단된다.

모형기초에 수평하중을 작용시켰을 때 수평하중이 증가함에 따라 모형기초 상부에서 발생하는 누적 수평변위는 Fig. 4와 같이 증가하는 경향을 보였다. 포장체 모형의 수평방향하중은 최대 5.5 kg 작용하였다. 수평변위의 최대값은 슬래브 중앙부(Case A)의 경우는 1.06 mm가 나타났으며, 슬래브 좌측(Case C)의 최대수평변위는 1.05 mm로 측정되었다. 모형실험의 결과를 실제크기로 환산하여 적용 하였을 때 최대 수평변위는 31.8 mm로 나타낼 수 있다.

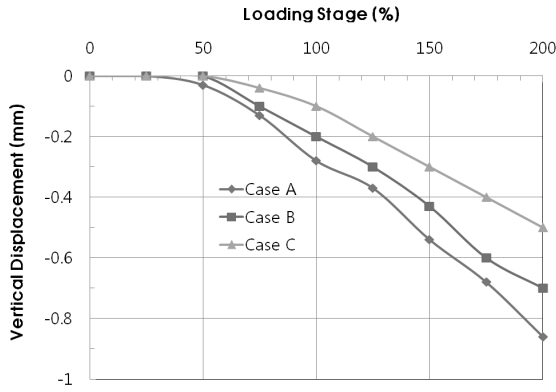


Fig. 3. Measured Vertical Settlement (mm)

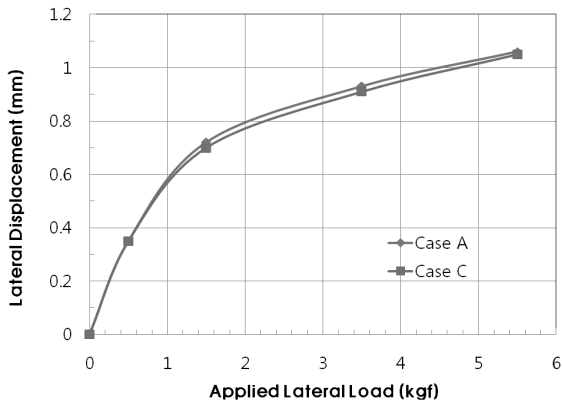


Fig. 4. Measured Lateral Displacement (mm)

이는 국내 도로교설계기준이 15~50 mm, NCHRP (1991)의 보고서에서 Moulton의 기준인 38 mm를 기준을 한 것과 비교했을 때 포장체에 직접적인 영향을 줄만한 거동이 일어나지 않을 것으로 예상된다(Ghosn et al., 1991).

3.2 연직하중 작용시 개별 말뚝기초의 변형 특성

Fig. 5는 하중단계별 연직하중 재하시 Case A 모형말뚝에 설치된 깊이별 변형률계이지 측정값을 보여주고 있다. 슬래브중양부에 집중된 하중에서 멀리 떨어진 말뚝일수록 말뚝의 변형이 압축력보다는 인장력을 더 받는 것으로 나타났다. Case A의 경우 전체적으로 하중이 증가함에 따라 변형률은 선형으로 증가하는 경향을 보였다. Case B는 하중이 증가함에 따라 말뚝의 관입깊이 7 mm에서 68 mm까지 변형률이 선형으로 증가하는 것으로 나타났다. 말뚝의 하단부(깊이 257~364 mm)의 경우 모형기초에 적용된 수직하중이 교통하중의 100% 일 때부터는 변형률이 감소하는 것으로 나타났다. Case C의 경우는 하중이 증가함에 따라 변형률이 인장으로 변하는 경향을 나타냈다.

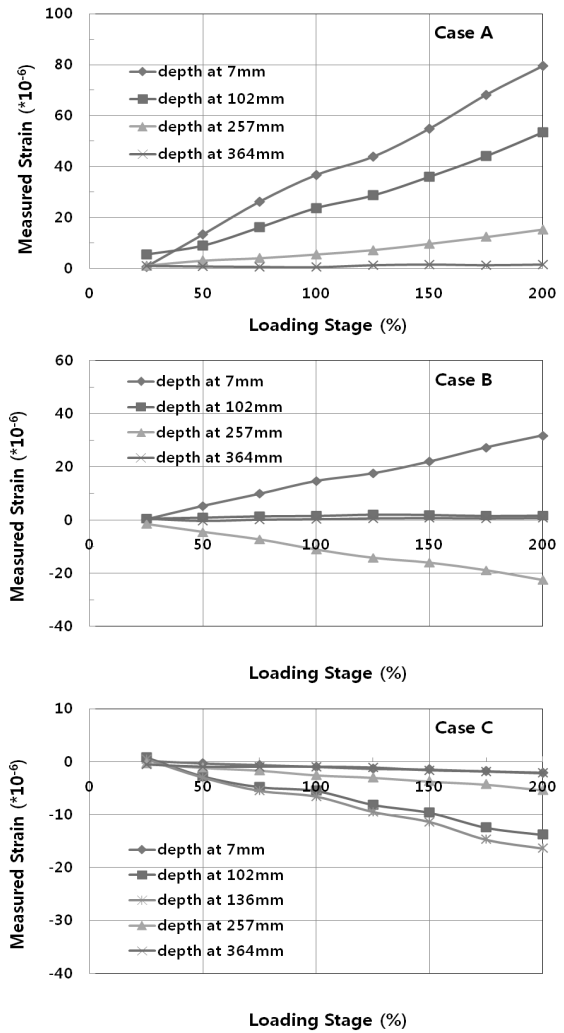


Fig. 5. Measured Strain at Loading Stage for Case A, B and C

Fig. 6은 점성토지반에서 적용된 수직하중단계별 말뚝의 변형률을 나타낸 것이다. Case A는 하중단계가 증가할수록 말뚝의 변형률이 증가하는 것으로 나타났으며 이는 말뚝이 압축력을 받고 있는 것으로 판단된다. 말뚝의 변형률은 상부부분인 관입깊이 7 mm 지점부터 말뚝의 1/3 지점인 102 mm 지점에서 가장 많은 변형률을 보이고 있다. 말뚝의 최대 변형률은 관입깊이 7 mm에서 압축방향으로 79.43의 변형률(10^{-6})을 보인 반면 최소 변형률은 관입깊이 364 mm에서 압축방향으로 1.47의 변형률(10^{-6})을 보인다. Case B는 수직하중이 증가함에 따라 말뚝에 압축력과 함께 인장력도 같이 받는 것으로 측정되었다. 말뚝의 최대 변형률은 말뚝의 관입깊이 7 mm에서는 압축방향으로 최대 31.77의 변형률(10^{-6})이 측정되었고, 말뚝의 관입깊이 257 mm에서는 인장 방향으로 최대 -22.59의 변형률(10^{-6})이 측정되었다. Case C는 하중단계가 증가할수록 말뚝의 전체적인 변형률이 인장방향으로 증가하는 경향을 보이고

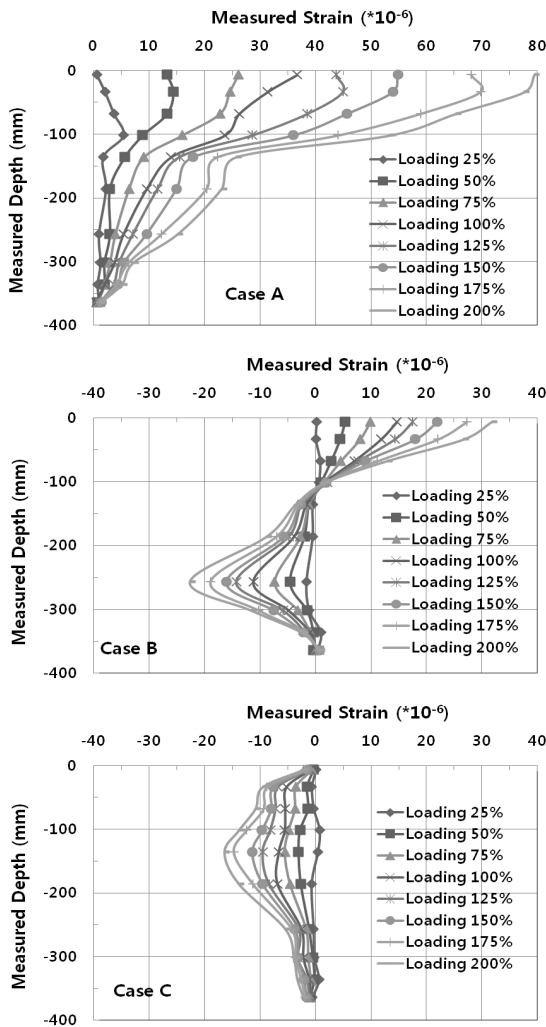


Fig. 6. Measured Strain at Pile Depth for Case A, B and C

있다. 말뚝의 상부보다는 말뚝의 중앙부인 관입깊이 136 mm에서 많은 변형률을 보였다. 말뚝의 변위는 중앙부 136 mm에서 인장방향으로 최대 -16.40 의 변형률(10^{-6})이 측정되었다. 이와 같은 경향을 보이는 원인으로는 말뚝모형기초의 슬래브중앙부에 집중된 하중으로 인해 중앙부를 중심으로 발생한 부등침하에 그 원인이 있다고 판단된다.

4. 결론

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

- (1) 실내모형시험으로부터 측정된 모형포장체의 침하량은 Case A는 0.86 mm, Case B는 0.70 mm, Case C는 0.50 mm로 측정되었다. 측정된 말뚝기초 모형의 실험값을 실제 크기로 환산하였을 때의 최대침하량과 부등침하량은 각각 25.8 mm와 10.8 mm로 도로교 설계기준(하부구조편, 2001)에 의거하여 최대부등변위량인 50 mm와 부등변위량 20 mm를 넘지 않는 것으로 보이며 침하량을 기준으로 안전성을 평가 할 경우 안전하다고 판단된다.
- (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 20.28×10^{-6} 으로 측정되었고, 인장방향으로는 관입깊이 186 mm에서 -8.37×10^{-6} 가 측정되었다. Case B는 압축방향으로 관입깊이 7 mm에서 15.55×10^{-6} 측정되었고, 인장방향으로는 관입깊이 186 mm에서 -3.79×10^{-6} 으로 측정되었다. Case C의 경우 압축방향으로 관입깊이 7 mm에서 17.92×10^{-6} 측정되었고, 인장방향으로는 관입깊이 -257 mm에서 -5.12×10^{-6} 측정되었다.

감사의 글

본 논문은 2013년 국토교통과학기술진흥원 지역기술혁신사업 “기포콘크리트 및 우드칩을 이용한 연안역 경량포장기술” 연구과제 지원으로 수행되었습니다.

References

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.

Ghosn, M., MOdes, F. and Wang, J. (1991). “Design of highway bridges for extreme events.” NCHRP Report 489, *Transportation Research Board*, p. 183.

Horikoshi, K. and Randolph, M. F. (1996). “Centrifuge modelling of piled raft foundation on clay.” *Getechnique*, Vol. 46, No. 4, pp. 741-752.

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.

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.
- Kaloush, K. E. (2001). “Simple performance test for permanent deformation of asphalt mixtures.” Ph.D. Thesis, Arizona State University, p. 413.
- Kim, D. S. and Kim, N. (2013). “A newly developed state-of-the-art geotechnical centrifuge in Korea.” *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 77-84.
- Park, D. G., Choi, K. J. and Lee, J. H. (2012). “Analysis of piled raft interaction on sand with centrifuge test.” *Korea Geotechnical Society*, Vol. 28, No. 10, pp. 27-40.
- Sanctis, L. and Mandolini, A. (2006). “Bearing capacity of piled rafts on soft clay soils.” *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 132, No. 12, pp. 1600-1610.
- 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, p. 105.
- Shin, K. H. (2014). “Indoor model experience for subsidence characterization of lightweight packing body with pile foundation.” Master Thesis, Dept. of Civil Engineering, Kongju National University, p. 69.
- Shin, K. H., Hwang, C. B., Jeon, S. R. and Lee, K. H. (2014). “Load transfer characteristics of pile foundation for lightweight pavement in sand soil using laboratory chamber test.” *Journal of the Korea Academic-Industrial Cooperation Society*, Vol. 15, No. 7, pp. 4588-4594.