

MgO계 내화물이 함유된 팽창성 지반에서의 모형말뚝 거동 분석

Behavior of Model Pile Embedded in Expansive Soil with Magnesia Oxide-Based Refractories

윤 보 영¹ Yoon, Boyoung

김 민 태² Kim, Mintae

Abstract

This study explores the performance of pile foundations in highly expansive soil, incorporating magnesium oxide-based refractory materials. A controlled model chamber, housing a fixed pile, was utilized to induce ground expansion through fused magnesia (FM). The investigation focused on measuring the vertical displacement of FM-sand mixtures and the axial load on the pile in relation to depth and time. The study varied the amount of FM content (FM_c) at 30%, 50%, and 70%. The upward movement exhibited an augmentation with increasing FM_c , tapering off with depth as accumulation progressed toward the mixture surface. Compression and tensile forces were both evident along the pile for FM_c at 30% and 50%, while only a tensile force was observed at an FM_c of 70%. These results offer valuable insights for the analysis of pile behavior within FM-sand mixtures.

요 지

본 연구에서는 산화마그네슘계 내화물(Magnesium oxide-based refractory)을 함유한 팽창성 지반에서의 말뚝기초 거동을 분석하였다. 고정단 말뚝이 설치된 모형토조에 용융마그네시아(Fused magnesia, FM)를 활용하여 지반의 용기를 유도하였으며, FM함유량($FM_c = 30\%, 50\%, 70\%$)을 변화하여 시간에 따른 깊이별 용기량과 말뚝의 축력을 분석하였다. FM_c 가 증가할수록 더 큰 용기량이 측정되었으며, 시료의 표면으로 갈수록 용기량이 누적되어 깊이에 따라 용기량이 감소하였다. 그러나 깊이별 용기율의 차이와 그에 따른 팽창압의 차이로 인하여 $FM_c = 30\%$ 와 50% 일 때 말뚝에 뚜렷한 압축력과 인장력이 발현되었으며, $FM_c = 70\%$ 일 때에는 말뚝 전체에 인장력만이 발현되었다. 이러한 결과는 산화마그네슘계 내화물이 포함된 혼합토 내의 말뚝거동을 분석하는데 중요한 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

Keywords : Expansive soil, Magnesia oxide-based refractory, MgO-Sand mixture, Model pile test

1 정희원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사 후 연구원 (Member, Post-doctoral Researcher, Sch. of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)
2 정희원, 고려대학교 건축사회환경공학부 연구교수 (Member, Research Prof., Sch. of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ., Tel: +82-2-921-2086, mtkim@korea.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2024년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

말뚝기초의 시공 이후 주변 지반의 상태 변화는 말뚝-지반의 상대변위를 발생시켜 기초구조물뿐만 아니라 상부구조물에도 큰 영향을 미칠 수 있다. 상대변위는 말뚝의 압축(Compression)과 인장(Tension), 또는 지반의 침하(Settlement)와 융기(Heaving)로 인하여 발생하며 상대변위의 방향에 따라 주면마찰력은 상방향 또는 하방향으로 발생한다. 그 중 말뚝 시공 이후 지반의 융기가 발생하면 상향의 전단 변형이 발생하여 말뚝에는 상향의 주면마찰력이 말뚝을 인발시키는 방향으로 작용한다(Burland et al., 1977; Fellenius, 2017). 이러한 지반의 융기현상으로 인한 구조물의 피해는 세계 곳곳에서 보고되고 있으며(Charlie et al., 1984; Mokhtari and Dehghani, 2012; Li et al., 2014), 이에 팽창성 지반에서의 말뚝 거동에 관한 많은 연구가 진행되고 있다(Xiao et al., 2011; Dafalla et al., 2017; Shin and Lee, 2023).

지반의 융기현상은 구조물 시공 과정이나 지반의 동상현상(Rui et al., 2007; Jin et al., 2021) 등에 의해 발생할 수 있으나, 일반적으로 팽창성 지반(Expansive soil)의 팽윤현상(Swelling)이 주원인이다. 팽창성 지반은 자연 함수비의 변화에 따라 체적의 증가 또는 감소가 있는 지반을 의미하며(Chen, 2012; Liu and Vanapalli, 2017) 지반의 팽창성은 지반의 물리적, 화학적, 광물학적인 특성이 지배하는 것으로 알려져 있다(Holtz and Gibbs, 1956; Nelson and Miller, 1997; Sridharan and Prakash, 2000)(Table 1).

산화마그네슘(Magnesium oxide, MgO)을 주성분으로 하는 내화물은 강철산업 등에서 필수적으로 사용되며 주로 고온 환경에서의 내화 기능을 발휘하기 위해 사용된다. 그러나 반복적인 사용으로 인하여 내화물의 기능 저하가 발생하게 되어 교체가 필요한 경우 폐기되는 내화물들은 매립지나 바다로 폐기된다(Park et al., 2020). 이때 내화물에 함유된 MgO는 물과 접촉하여 수산화 마

그네슘(Magnesium hydroxide, Mg(OH)₂)으로 수화하는데 Mg(OH)₂의 부피는 MgO보다 약 2.2배 정도 큰 것으로 알려져 있다(Amaral et al., 2010; 2011). 결과적으로 MgO 매립지반이 지하수에 노출될 경우 지반의 융기를 발생시켜 주변 구조물은 물론, 매립지에 시공된 말뚝기초에도 영향을 미칠 수 있다. 이러한 문제점은 비교적 최근에 인지되었으며, 이에 MgO의 수화과정 및 MgO 함량에 따른 지반의 팽창 특성에 관한 연구 또한 최근에 이루어졌다(Park et al., 2020; Yoon et al., 2021). 하지만, MgO가 내포된 지반의 팽창에 따른 말뚝의 거동에 관한 연구는 수행되지 않아 이에 관한 연구가 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 내화물이 함유된 혼합토에서 내화물의 팽창에 따른 지반 융기 시 말뚝에 부착된 스트레인게이지를 통하여 말뚝과 지반 사이의 마찰력을 분석하였다. 또한 내화물의 함량을 변화시켜 실험을 수행하여 내화물이 매립된 지반에서 내화물의 함량에 따라 근입된 말뚝에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 실험장비 및 방법

2.1 시험재료

본 연구에서는 철강 부산물 중 하나인 용융마그네시아(Fused magnesia, FM)를 사용하였다. FM은 내화벽돌(Posco Chemical Co.)의 형태로 수령되었으며 함유량이 다른 혼합물을 조성하기 위하여 수령된 내화벽돌을 파쇄하여 사용하였다. 파쇄된 마그네시아(Crushed FM)의 비중(G_s)은 3.41, 평균입경(D_{50})은 0.22mm로 통일분류법(ASTM D2488)에 따라 SP-SM으로 분류되었다. 모형 실험을 수행할 시 혼합토의 거동에 대한 입경의 영향을 최소화하기 위하여 파쇄된 FM과 유사한 평균입경을 갖는 인공파쇄사(K7 모래, (주) 경인소재)를 사용하여 FM-모래 혼합토를 조성하였으며, K7의 비중은 2.64, 평균

Table 1. Degree of expansion according to soil properties

Soil properties	Degree of expansion			
	Low	Medium	High	Very high
Liquid limit, LL (%)	< 30	30 - 40	40 - 60	> 60
Plastic index, PI (%)	0 - 15	10 - 35	20 - 55	> 55
Fine content, f_c (%)	< 17	12 - 27	18 - 37	> 27
Activity, A_c (-)	< 0.75	0.75 - 1.25	> 1.25	

Table 2. Engineering properties of crushed FM and K-7 sand

Properties	Test materials	
	Fused magnesia, FM	K-7 sand
Mean particle size, D_{50} (mm)	0.21	0.163
Coefficient of uniformity, C_u (-)	5.7	2.1
Maximum void ratio, e_{max} (-)	N/A	0.6
Minimum void ratio, e_{min} (-)	N/A	1.041
Specific gravity, G_s (-)	3.41	2.64
USCS classification	SP-SM	SP

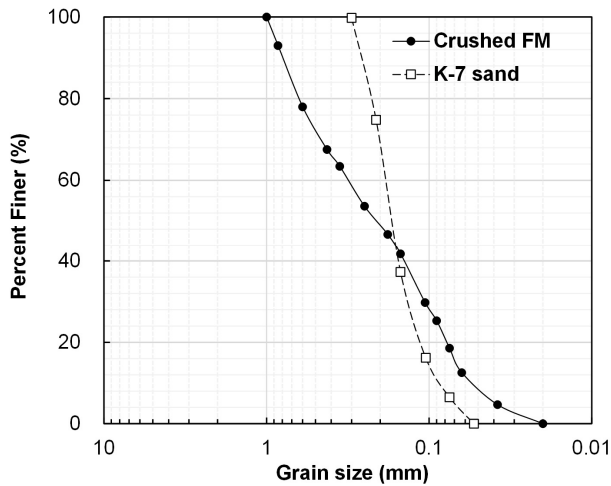


Fig. 1. Particle size distribution curves of crushed FM and K-7 sand

입경은 0.18mm로 SP로 분류된다. 파쇄된 FM과 K7 모래의 입도분포와 기본특성은 각각 Fig. 1과 Table 2에 정리하였다.

2.2 실험장치

파쇄된 FM 함량에 따른 혼합토 내에서의 고정단 말뚝기초의 거동을 평가하기 위하여 Fig. 2와 같이 원형의 토조를 제작하였다. 원형토조의 직경은 1200mm, 높이는 1000mm이며 FM-모래 혼합물의 자중 및 FM의 수화 과정에서 발생하는 팽창압을 고려하여 두께는 50mm의 강재로 제작하였다. 원형토조 중앙에는 모형 말뚝을 고정할 수 있도록 20mm 깊이의 나사선을 제작하였고, 혼합토의 포화를 위하여 토조 하단부에는 토조의 중앙부를 포함하여 총 5곳에 배수밸브를 부착하여 하부 배수로의 역할을 수행할 수 있게 하였다.

모형말뚝은 강재를 사용하여 외경 26.7mm, 두께 4mm, 그리고 길이 800mm의 규격으로 제작하였하였으며, 말뚝의 선단부 구속 효과를 확실시키기 위하여 모형 말뚝

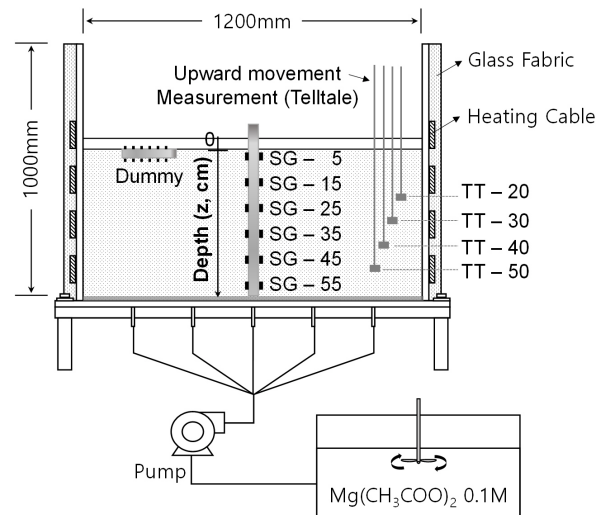


Fig. 2. Schematic drawing of experimental apparatus

하부에 토조 하부의 나사선에 고정될 수 있도록 제작하였다. 또한, FM의 수화반응이 진행됨에 따라 전달되는 하중을 측정하기 위하여 말뚝 주면에 180° 방향으로 양쪽 면에 스트레인게이지를 부착하였으며 100mm 간격으로 총 12개의 스트레인게이지(FLAB-5, ㈜주신산업)를 부착하였다. 각 위치에서의 변형률은 두 스트레인게이지의 평균 계측 값을 사용하였다. 스트레인게이지 부착 시 FM의 수화반응을 유도하기 위한 화학 촉매재와 고온(60-80°C)의 조건으로부터 보호하기 위하여 말뚝 주면에 흠을 내어 스트레인게이지 부착 후 내열실리콘과 내열 에폭시를 덧발라 사용하였다. 더미(Dummy) 스트레인게이지를 동일한 토조에 설치하여 온도의 영향을 고려하였다(Micro-Measurements, 2010). 스트레인게이지의 연결선은 말뚝 내부를 통해 토조 외부에 있는 계측기에 연결되어 발생하는 변형률을 계측하였다. 그리고 FM-모래 혼합토의 깊이별 팽창량을 측정하기 위하여 깊이 100mm 간격으로 4개의 Telltale 형식의 용기량 측정장치를 깊이 500mm에서부터 100mm 단위로 설치하여, 24시간 간격으로 측정하였다.

2.3 실험방법

파쇄된 FM의 함량에 따른 FM-모래 혼합토 내에서의 고정단 말뚝기초의 거동을 평가하기 위하여 중량비로 정의된 FM 함유량($FM_c = W_{FM} / (W_{FM} + W_{sand})$, 여기서, W_{FM} = 파쇄된 FM의 무게; W_{sand} = 모래 무게)을 30%, 50%, 70%로 조절하여 실험을 진행하였다. 균질한 상태의 시료를 조성하기 위하여 FM_c 에 맞추어 소분의 건조 시료를 충분히 섞은 뒤, 함수비 10%에 해당하는 물을 넣어 교반기를 이용하여 동일한 속도(60rpm)로 15분간 혼합한 후 원형토조에 투기하였다. 해당 과정을 통해 시료를 반복 투기하며, 한층 당 $60kN \cdot m/m^3$ 의 다짐에너지를 가하며 총 6개의 층으로 시료를 조성하였다. 시료 조성 이후 원형토조 하부의 배수로를 통하여 시료를 포화시켜 FM의 수화반응을 유도하였는데, FM의 팽창을 단기간에 유도하기 위하여 아세트산마그네슘($Mg(CH_3COO)_2$) 0.1M을 촉매로 사용하였으며 열선을 통하여 원형토조의 온도를 평균 $70^\circ C$ 로 유지하며 실험을 진행하였다(Aphane, 2007; Matabola et al., 2010). 본 연구에 적용된 실험 조건과 FM_c 에 따른 다짐밀도는 Yoon et al.(2022)과 동일하며, 시료의 팽창성을 고려하여 초기 시료의 높이는 600mm로 조성하였다. 해당 조건에서의 FM-모래 혼합물의 팽창량 및 팽창압은 FM_c 에 따라 증가하며 Yoon et al. (2022)의 결과를 참고하였다(Table 3). 시료의 팽창과정에 따라 말뚝의 주면으로 전달되는 말뚝의 축력(P) 및 마찰력(f)은 측정된 변형률(ϵ)로부터 각각 식 (1)과 (2)를 통하여 연산 되었다.

$$P = A_p \times E \times \epsilon \quad (1)$$

$$f_i = \frac{P_{i-1} - P_i}{\pi D \cdot L_i} \quad (2)$$

여기서, 말뚝의 탄성계수(E)는 $210GPa$ 이며, A_p = 말

Table 3. Properties of FM-Sand mixtures (compiled from Yoon et al., 2022)

Properties	FM contents, FM_c (%)		
	30	50	70
Unit weight (kN/m^3)	16.87	17.27	17.85
Swelling pressure (MPa)	0.07	1.19	4.51
Swelling strain ($\Delta V/V$, %)	28	55	78

Note: V = Volume of the mixture

뚝의 면적, P_{i-1} , P_i = 단위말뚝의 상부, 하부 축력, D = 말뚝의 직경, L_i = 단위말뚝의 길이이다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 혼합토의 용기량 측정 결과

깊이별 용기량 측정 장치로부터 측득된 시간당 FM-모래 혼합토의 함량에 따른 위치별 용기량(δ , mm)을 Fig. 3에 도시하였다. 위치별 용기량은 주어진 FM_c 의 FM-모래 혼합토에서 시간이 지남에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 특히 임의의 시간에서 급격한 증가량을 보인 후 수렴하는 양상을 보였다. 이로부터 시간에 따른 FM-모

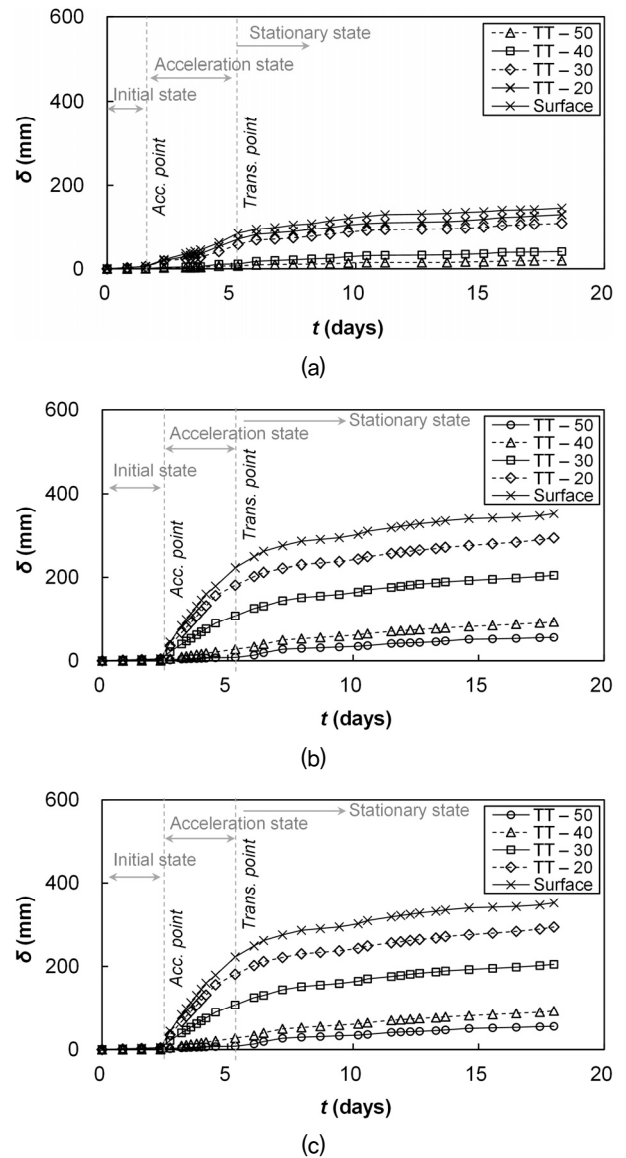


Fig. 3. Measurement of upward movement (δ) of FM-Sand mixtures with FM_c of: (a) 30%, (b) 50%, and (c) 70%

래 혼합물의 용기량 변화를 시료의 포화 및 수화반응이 유도되는 초기단계, 시료의 수화반응이 본격적으로 시작되어 시료의 용기량이 크게 발생하는 가속(Acceleration) 단계, 그리고 추가 수화반응이 시료의 용기량에 미비한 영향을 주는 안정화(Stationary) 단계로 나누었으며, 각 구간간의 경계점을 각각 가속시점(Acceleration point), 변이시점(Transition point)으로 명명하였다.

FM_c 가 증가할수록 시료의 포화 및 수화반응까지 필요한 시간이 증가함에 따라 초기단계에 소요되는 시간이 증가하였지만, 모든 시료에 대해서 약 6일 정도 이후 안정화 단계에 도달하였다. 또한 FM_c 가 증가할수록 용기량은 증가하였는데, 특히 FM_c 70%의 경우 시험 시작 약 14만에 표면 용기량이 500mm 이상 발생하여 시료가 토조 밖으로 넘침에 따라 시험을 조기 종료하였다. 가속 단계 소요시간(=변이시점과 가속시점의 시간차)은 FM_c 가 증가함에 따라 감소하였으며, 이는 가속단계에서 FM_c 가 증가할수록 시간당 용기율이 증가하는 것을 의미한다.

3.2 혼합토의 용기량 측정 결과

Fig. 4는 각 위치에서 측정된 스트레인게이지(Strain gauge)에서 측정된 변형률로부터 식 (1)을 통하여 계산된 축하중(P , kN)을 시간에 따라 도시한 그림이다(+ 압축, - 인장). 계측된 축하중의 최댓값은 FM_c 가 증가할수록 증가하는 경향을 보이며, $FM_c = 30\%$ 와 50% 의 SG - 45를 제외하고 모두 인장력이 측정되었다. FM_c 가 50%의 경우는 스트레인게이지의 망실로 인하여 SG - 25, 45의 경우 약 10일까지, SG - 35, 55의 경우 약 13일까지 변형률이 측정되었다.

주목할만한 점은 시간에 따른 축하중의 값이 시험 초기에는 매우 완만하게 변화하다가 큰 변화폭을 갖고 변화하여 최댓값이 계측된 이후 다시 완만하게 변화하는 양상을 보인다는 점이다. 이러한 축하중의 변화는 시료의 용기량이 말뚝과 주변 지반의 경계면에서의 상대변위를 발생시키기 때문에 시료의 용기량 변화와 밀접한 관련이 있다.

Fig. 5는 FM_c 70%에서 시간에 따른 축하중의 변화와 표면의 용기량 변화를 보여준다. FM-모래 혼합물에서 축하중의 변화는 시료의 용기량 변화와 유사하게 가속화 단계에서 큰 변화율을 가지며 안정화 단계에서 변화율이 감소한다. 특히, 축하중의 최댓값은 가속화 단계 중 발견된다. 이는 초기단계에서 일체거동을 하던 말뚝

과 말뚝 주변부 시료 사이에 지속적인 용기로 상대변위가 증가하여 말뚝의 경계면에서 최대 마찰력이 발생하며 이후 말뚝 경계면에서 미끄러짐(slip)이 발생하기 때문이다. 일반적으로 최대마찰력을 발생시키는 상대변위는 2mm - 10mm(Lee et al., 2017)인 것과 비교하여 본 실험에서는 발생 용기량이 100mm이상인 것으로부터 훨씬 큰 값의 상대변위가 발생하였을 것으로 추정된다.

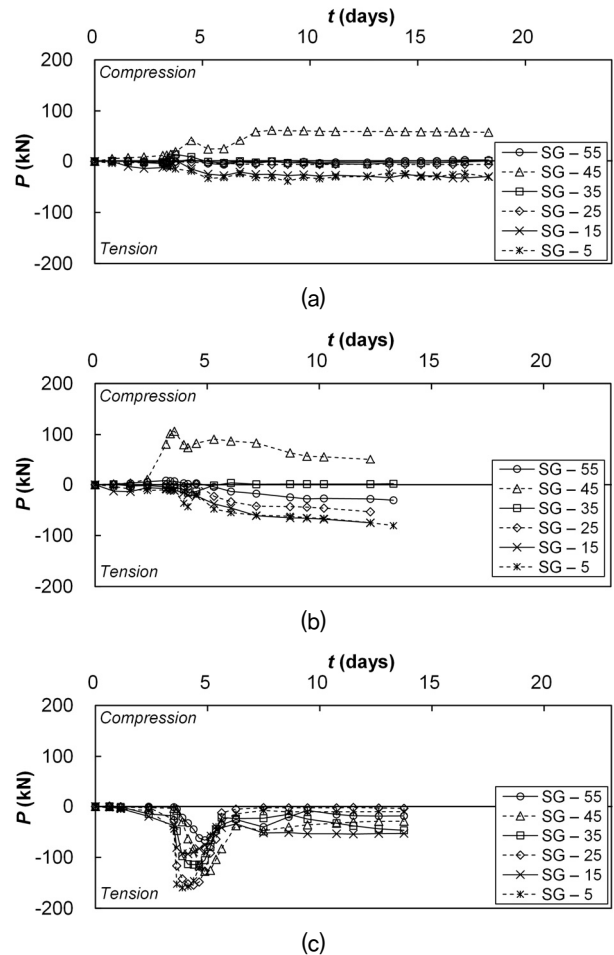


Fig. 4. Pile axial load (P) as a function of time with FM_c of: (a) 30%, (b) 50%, and (c) 70%

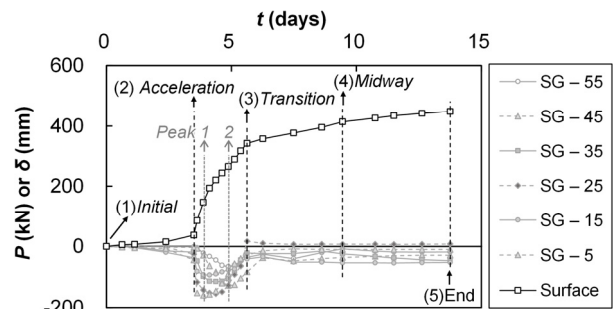


Fig. 5. Comparison between the upward movement of mixtures and the axial load distribution of pile of FM - Sand mixtures (selected case of $FM_c = 70\%$ is only shown)

따라서 상대변위 뿐 아니라 시료의 용기과정에서 발생하는 팽창압으로 인해 토조 내부에서의 구속효과도 축하중의 분포에 영향을 미치는 것으로 보인다. 또한 이러한 복합적인 영향은 뚜렷한 최댓값을 보이지 않으며 가속단계에서 출렁이는(Fluctuation) 축하중의 분포도 초래한다.

3.3 시료의 팽창에 의한 말뚝의 축력 분석

시료의 용기에 의한 말뚝의 거동을 Fig. 5에서 정리된 5개의 시점: (1) 시험 시작점(Initial time, Int.), (2) 가속시점(Acceleration point, Acc), (3) 변이시점(Transition point, Trans), (4) 변이 - 시험 종료 중간시점(Midway point, Mid), 그리고 (5) 시험 종료 시점(End point, End)에 대해 분석하였다. 뚜렷한 최대 축하중이 관측된 $FM_c > 30\%$ 의 FM-모래 혼합물에서는 최대 축하중이 가장 먼저 관측되는 시점(Peak point 1, Pk-1)과 가장 늦게 관측되는 지점(Peak point 2, Pk-2)도 포함하였으며, 망실로 인해 End에서 하나의 계측값만 있는 $FM_c = 50\%$ 의 경우 모든 스트레인게이지 값이 유효한 시점을 Mid로 결정하였다.

Fig. 6은 각 해석 단계에서 축하중의 분포를 임의의 심도 z 를 말뚝의 길이(L)로 정규화하여 정리한 그래프이다. 일반적으로 말뚝의 거동은 인접지반과의 상대 변위로부터 결정되며, 상향의 전단응력(Positive skin friction)을 발현시키는 상향의 상대변위는 말뚝에 인장력을 발현시키며 하향의 전단응력(Negative skin friction)을 발현시키는 하향의 상대 변위는 말뚝에 압축력을 발생시킨다. 이에 지반의 용기는 말뚝 내 인장력을 작용시키는 것으로 알려져 있다(Chen, 2012; Fellenius, 2017). 그러나 앞서 서술한 바와 같이, 상대 변위와 팽창압의 영향으로 인하여 FM-모래 혼합물 내 말뚝에서는 일부 구간 압축력도 발생한다. FM-모래 혼합물에서 용기량과 팽창압은 서로 밀접한 관련이 있으므로(Yoon et al., 2020) 본 연구에서 측정된 누적 용기량으로부터 말뚝의 길이에 대한 용기량 변화율($d\delta/dL$)을 Fig. 6에 같이 도시하였다.

$FM_c = 30\%$, 50% 의 경우 말뚝의 하단부($z/L > \sim 0.7$)에서 공통적으로 압축력이 발현되며, 상단부($z/L < \sim 0.7$)에서는 인장력이 측정되었으며 각각 Trans와 Pk-1시점까지 $z/L \sim 0.7$ 의 평균구간에서 큰 $d\delta/dL$ 을 갖는다. 그러므로 $z/L = 0.7$ 의 평균구간에서 발생한 팽창압으로 인하여 상단부에는 상방향의 상대변위를 유도하여 인장

력이 발생하며, 동시에 하단부에는 하방향의 상대변위를 유도하여 압축력이 발생한다. Trans와 Pk-1 시점 이후 최대 $d\delta/dL$ 이 발생하는 구간은 말뚝의 상단부로 변화하였지만 축력의 분포에는 영향을 미치지 않았다. 이와 다르게 $FM_c = 70\%$ 의 경우에는 심도별 용기량의 차이가 존

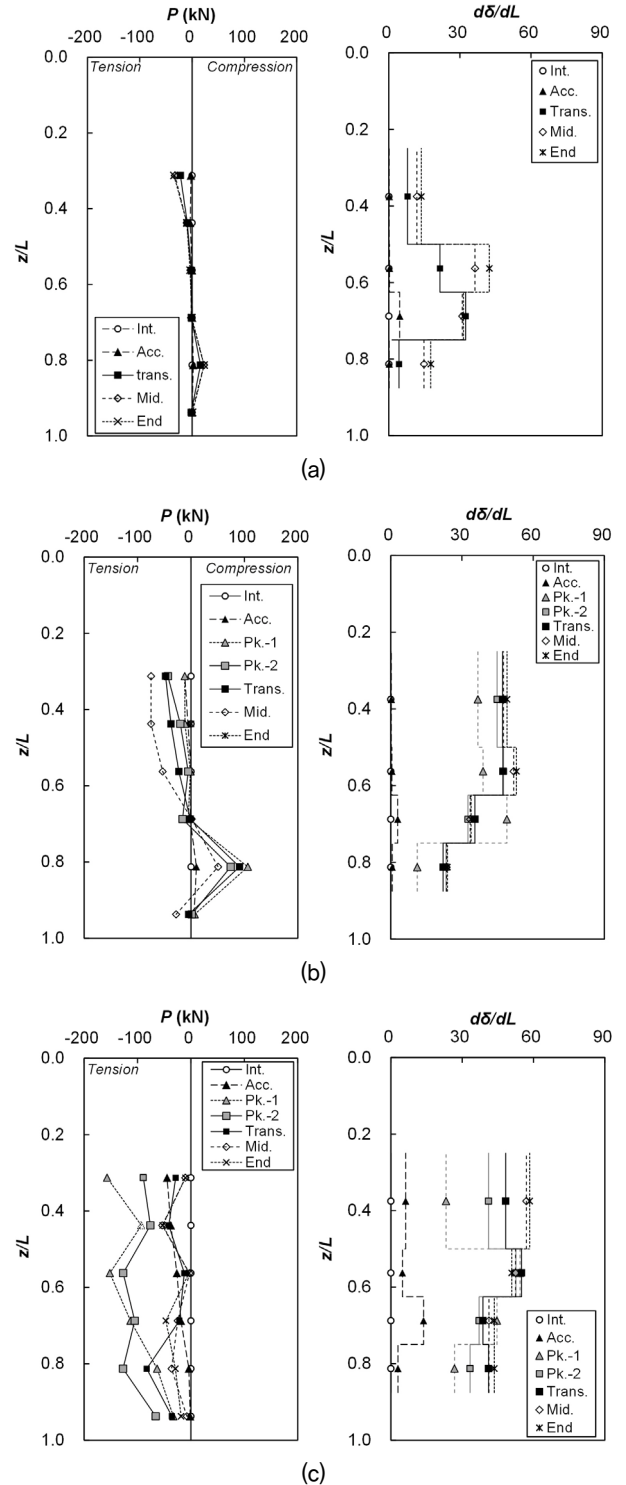


Fig. 6. Distribution of rate of change in upward movement with depth ($d\delta/dL$) and axial load (P) according to normalized depth (z/L) with FM_c of: (a) 30%, (b) 50%, and (c) 70%

재함에도 말뚝 전체에 인장력이 작용하는 이유는 용기량이 매우 커 임의의 구간에서 발생한 팽창압이 다른 구간에 미치는 영향이 감소하기 때문으로 보인다. 다만 누적용기량 및 $d\delta/dL$ 이 시간에 따라 증가함에도 Pk-1 이후 감소하는 축하중의 분포를 보이므로 Pk-1 이후의 스트레인게이지 값에 대한 분석은 추가실험을 통해 확인되어야 한다. Acc에서는 말뚝 상부로 갈수록 인장력의 크기가 증가하는 반면 Pk-1에서는 $z/L = 0.45$ 에서 인장력이 감소하는 양상을 보였는데, 이러한 축하중의 분포가 $z/L \sim 0.55$ 의 평균 구간에서 관찰된 최대 $d\delta/dL$ 의 영향에 의한 것인지 혹은 계측 오류로 인한 것인지 확인을 위한 추가실험도 필요하다. 그러나 본 연구에서는 다른 FM-모래 혼합물의 경우 말뚝 상부로 갈수록 인장력이 증가하고, 시료의 용기가 진행됨에 따라 축하중도 증가하므로 $z/L = 0.45$ 에서 측정된 축하중의 값은 측정 오류로 판단되며, 최대 축하중이 계측된 이후(즉, Pk-1 이후)에는 스트레인게이지의 기능이 손실되었다고 판단하였다.

3.4 시료의 팽창에 의한 말뚝의 마찰력 분석

Fig. 7은 FM_c 에 따라 식 (2)로부터 계산된 깊이 별 평균 마찰력을 보여주며, $FM_c = 70\%$ 인 경우는 Pk-2 이후부터는 포함하지 않았다. Fig. 7에서 보여진 것처럼 $FM_c = 30\%$ 와 50% 일 때 상방향으로 작용하는 팽창압에 영향을 받는 상부 지층에서($z/L < 0.8$) 상향의 마찰력이 작용하였으며, 반대로 하방향의 팽창압에 영향을 받는 말뚝의 하단($z/L > 0.8$) 구간에서는 하방향의 마찰력이 발

생하였다. 따라서, 말뚝 내 축력은 상향과 하향의 마찰력의 조합으로부터 발생되며, 특히 말뚝 내 최대 압축력이 발생하는 지점과 마찰력이 0이 되는 지점(즉, 중립면(Neutral plane))이 일치하는 것을 확인하였다.

$FM_c = 70\%$ 의 경우 축하중의 감소가 측정된 $0.45 < z/L < 0.55$ 구간을 제외하고, 전체 구간에서 상향의 마찰력이 작용하는 것으로 나타났다. 이때, Pk-2에서 $z/L \sim 0.75$ 의 평균 구간에 나타난 하향의 마찰력은 해당 영역에서의 축하중이 Pk-1 이후 감소하였기 때문에 얻어지는 값으로, 실제로는 시료의 용기가 말뚝 전체에 상향의 마찰력을 발생시킬 것으로 보인다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 산화마그네슘계 내화재를 함유한 팽창성 지반에서, 내화물의 팽창에 따른 말뚝의 거동을 평가하였다. 원형의 모형 토조에 용융마그네시아(Fused magnesia, FM) 함유량을 다르게 조성한($FM_c = 30\%, 50\%, 70\%$) FM-모래 혼합토를 다짐을 통하여 시료를 조성한 뒤, FM의 팽창을 유도하였다. 모형말뚝에 부착된 스트레인게이지와 모형토조에 설치된 용기량 계측장치로부터 말뚝에 작용하는 축하중과 FM-모래 혼합토의 용기량을 시간에 따라 측정하였다. 이로부터 FM-모래 혼합물의 용기에 따른 말뚝의 거동을 축하중 및 마찰력을 통하여 분석하였으며, 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 깊이별 용기량은 시간에 따라 증가하였으며, FM_c 가

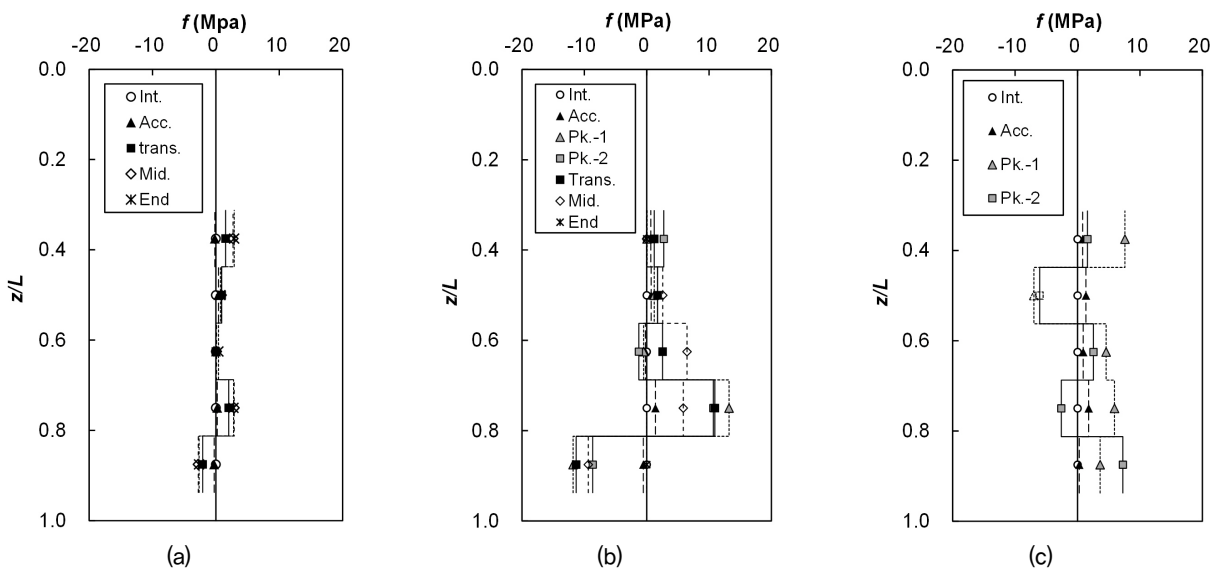


Fig. 7. Distribution of friction at selective time steps with FM_c of: (a) 30%, (b) 50%, and (c) 70%

증가할수록 더 많은 시료의 포화 및 수화반응이 필요함에 따라 시료의 용기가 발생하기까지의 시간이 증가하였다. 그러나 용기가 발생한 이후 시간당 용기량은 FM_c 가 증가할수록 커졌다.

- (2) 시간에 따른 축하중은 시료의 용기로 인해 발생하는 상대변위뿐 아니라 용기와 동반되는 팽창압에 의해 복합적인 영향으로 인하여 최대 축하중이 계속되거나, 뚜렷한 최댓값 없이 출렁이는(Fluctuation) 분포를 보인다.
- (3) $FM_c = 30\%$ 와 50% 일 때, $z/L = 0.7$ 의 평균 구간에서 (이때 $z =$ 심도, $L =$ 말뚝의 길이) 상대적으로 큰 용기변화율을 보이며, 그에 따라 상단부에는 상향의 팽창압으로 인해 인장력이 발생하며 하단부에는 하향의 팽창압으로 인해 압축력이 발생하였다. 최대 압축력이 발현되는 지점은 마찰력이 0이 되는 지점과 일치하였다.
- (4) $FM_c = 70\%$ 의 경우 말뚝 전체에 시료의 용기로 인하여 인장력이 발생하였으며, 말뚝의 상단으로 갈수록 인장력이 커지며 상방향의 마찰력이 발생하는 경향을 보였다. 시료의 용기가 계속해서 발생하고 있으므로 최대 축하중이 계속 이후 감소되는 축력의 분포 경향은 재검토가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No2021R1A2C1010281).

참고문헌 (References)

1. Amaral, L., Oliveira, I., Bonadia, P., Salomão, R., and Pandolfelli, V.C. (2011), "Chelants to Inhibit Magnesia (MgO) Hydration", *Ceramics International*, Vol.37, No.5, pp.1537-1542.
2. Amaral, L., Oliveira, I., Salomão, R., Frollini, E., and Pandolfelli, V. (2010), "Temperature and Common-ion Effect on Magnesium Oxide (MgO) Hydration", *Ceramics International*, Vol.36, No.3, pp.1047-1054.
3. Aphane, M.E. (2007), "The Hydration of Magnesium Oxide with Different Reactivities by Water and Magnesium Acetate", Master Dissertation, University of South Africa.
4. Burland, J.B., Hancock, R., and Burland, J. (1977), *Underground car park at the House of Commons*, London: geotechnical aspects. Building Research Establishment.
5. Charlie, W.A., Osman, M.A., and Ali, E.M. (1984), "Construction on Expansive Soils in Sudan", *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol.110, No.3, pp. 359-374.
6. Chen, F.H. (2012), *Foundations on expansive soils*, Elsevier.
7. Dafalla, M., Al-Shamrani, M., and Al-Mahbashi, A. (2017), "Expansive Soil Foundation Practice in a Semiarid Region", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol.31, No.5, 04017084.
8. Fellenius, B. (2017), *Basics of foundation design*. Lulu. com.
9. Holtz, W.G. and Gibbs, H. (1956), "Engineering Properties of Expansive Clays", *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, Vol.121, No.1, pp.641-663.
10. Jin, H., Kim, I., Eun, J., Ryu, B.H., and Lee, J. (2021), "Assessment of the Correlation between Segregation Potential and Hydraulic Conductivity with Fines Fraction", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.37, No.12, pp.47-56.
11. Lee, C., Al-Tabbaa, A., and Bolton, M. (2017), "Development of Tensile Force in Piles in Swelling Ground", *Soft soil engineering*, Routledge, pp.345-350.
12. Li, J., Cameron, D.A., and Ren, G. (2014), "Case Study and Back Analysis of a Residential Building Damaged by Expansive Soils", *Computers and Geotechnics*, Vol.56, pp.89-99.
13. Liu, Y. and Vanapalli, S.K. (2017), "Influence of Lateral Swelling Pressure on the Geotechnical Infrastructure in Expansive Soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.143, No.6, 04017006.
14. Matabola, K.P., van der Merwe, E.M., Strydom, C.A., and Labuschagne, F.J. (2010), "The Influence of Hydrating Agents on the Hydration of Industrial Magnesium Oxide", *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, Vol.85, No.12, pp.1569-1574.
15. Mokhtari, M. and Dehghani, M. (2012), "Swell-shrink Behavior of Expansive Soils, Damage and Control", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.17, pp.2673-2682.
16. Nelson, J. and Miller, D.J. (1997), *Expansive soils: problems and practice in foundation and pavement engineering*. John Wiley & Sons.
17. Park, S., Ma, J., Yun, T.S., Jeon, S., Byeun, Y., Kang, D., and Jang, J. (2020), "Pore-scale Swelling Mechanism of Magnesium Oxide Granules during Hydration", *Construction and Building Materials*, Vol.251, 119101.
18. Rui, D.-H., Suzuki, T., and Kim, Y.-S. (2007), "Frost Heave Force of Ground and Countermeasure for Damage of Structures", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.23, No.5, pp.43-51.
19. Shin, S. and Lee, K. (2023), "Analysis of the Shaft Resistance of a Pile Embedded in Sand Responding to Ground Deformation by Model Tests of Simulated Ground Heaving", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.39, No.1, pp.5-14.
20. Sridharan, A. and Prakash, K. (2000), "Classification Procedures for Expansive Soils", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, Vol.143, No.4, pp.235-240.
21. Xiao, H.-b., Zhang, C.-s., Wang, Y.-h., and Fan, Z.-h. (2011), "Pile-soil Interaction in Expansive Soil Foundation: Analytical Solution and Numerical Simulation", *International Journal of Geomechanics*, Vol.11, No.3, pp.159-166.
22. Yoon, B., Lee, J., Choo, H., Lee, C., and Lee, W. (2021), "Swelling and Behavioral Transformation of Magnesia-sand Mixtures: Experimental Characterization of Physical Properties and Undrained Shear Strength", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol.81, No.1, pp.46.

Received : October 4th, 2023

Revised : October 17th, 2023

Accepted : October 18th, 2023