

원심모형 실험을 통한 궤도지지말뚝구조의 동적 거동 평가

Dynamic Behavior Evaluation of Pile-Supported Slab Track System by Centrifuge Model Test

유 민 택 ¹	Yoo, Mintaek	이 명 재 ¹	Lee, Myungjae
백 민 철 ²	Baek, Mincheol	추 연 옥 ³	Choo, Yun-Wook
이 일 화 ⁴	Lee, Il-Wha		

Abstract

Dynamic centrifuge model test was conducted to evaluate the dynamic stability of the pile-supported slab track method during dynamic railway loading and earthquake loading. The centrifuge tests were carried out for various condition of embankment height and soft ground depth. Based on test results, we found that the bending moment was increased with embankment height and decreased with soft ground depth. In addition, it was confirmed that the pile-supported slab track system could have dynamic stability for short-period seismic loading. However, in case of long-period seismic loading, such as Hachinohe earthquake, the observed maximum bending moment reached to pile cracking moment at the return period of 2,400 year earthquake. The criterion of ratio between embankment height and soft ground depth was suggested for dynamic stability of pile-supported slab track system.

요 지

철도하중 및 지진하중 재하 시 궤도지지말뚝 구조의 동적 거동 평가를 위해 동적원심모형 실험을 수행하였다. 실험의 변수는 연약지반의 깊이와 성토체의 높이로 결정하였으며, 총 4가지 경우에 대해 실험을 수행하였다. 연약지반 깊이는 실제 연약지반층에 고속철도를 부설한 호남고속철도의 익산-정읍 구간의 시추주상도를 분석하여 결정하였으며, 성토체의 높이는 일반적인 고속철도의 성토체 높이 범위의 하한 값과 상한 값으로 결정하였다. 실험 결과, 연약지반 깊이 대비 성토체 높이 비율이 높을 수록 말뚝에 작용하는 최대 휨모멘트 값이 크게 평가되었다. 또한, 실험조건 내에서 부설되는 궤도지지말뚝 구조는 단주기 지진파에 대해서는 국내 내진설계 기준의 최대 지진하중인 0.22g에 대해서까지 안전한 것으로 확인되었다. 그러나, 장주기 지진파에 대해서는 재현주기 2400년 지진인 0.22g로 가진시 말뚝의 균열 모멘트가 초과되었다. 일련의 실험결과를 바탕으로, 본 논문에 기술된 연약지반 깊이와 성토체 높이 범위 내에서 궤도지지말뚝 일반 단면에 대한 연약지반 대비 성토체 높이 비율 기준을 제시하였다.

Keywords : Pile-supported track system, Centrifuge tests, Dynamic behavior, Seismic design code

1 정회원, 철도기술연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Railroad Structure Research Team, Korea Railroad Research Institute)

2 비회원, 철도기술연구원 기술원 (Engineer, Advanced Test Equipment Build-up Team, Korea Railroad Research Institute)

3 정회원, 공주대학교 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil and Env. Eng., Kongju National Univ.)

4 정회원, 철도기술연구원 책임연구원 (Member, Principal Researcher, Advanced Infrastructure Research Team, Korea Railroad Research Institute, Tel: +82-31-460-5326, iwlee@krii.re.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2019년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

연약지반 구간은 철도 건설 시 충분한 연약지반 보강이나 치환처리가 완료되지 않으면, 침하문제가 발생할 우려가 있다. 특히 콘크리트 궤도는 부설 후 침하가 발생하면 궤도 유지보수가 쉽지 않고 많은 처리비용이 발생하기 때문에 침하기준이 30mm로 매우 엄격하게 적용되고 있다. 이에, 열차의 주행 안정성과 궤도구조의 유지보수를 확보하기 위해서는 침하저감 및 억제가 필수적이다. 이러한 지반의 침하문제 해결방법으로 치환, 동다짐, CFG(Cement Fly ash Gravel) 말뚝, 토목섬유보강, 교량건설 등 다양한 방법이 있으나 효율성과 경제성 측면에서 비효율적이라는 단점이 있다. 최근 유럽을 비롯한 중국에서 연약지반 상 콘크리트 궤도 적용 시 침하문제 해결을 위한 방법으로 궤도지지말뚝 공법(Pile-Supported Slab Track)을 적용하고 있다(Bae et al., 2015). 이 공법은 설계 및 시공이 간단하며, 안정성이 우수하고 경제적인 시스템으로 보고되고 있어 우리나라 실정에 맞게 적용할 필요가 있다.

이러한 궤도지지말뚝의 경우 침하 억제를 위해 암반 근입말뚝 방식으로 시공하며, 이에 지진 등 횡방향 하중에 대한 안정성을 확보가 필수적이다. 또한, 최근 찾아진 국내의 지진(2016 경주, 2017 포항 등)으로 지진에 대한 국민적 불안감이 증대되어 신공법의 적용에 앞서 내진성능을 평가할 필요가 있다. 그러나, 궤도지지말뚝과 같은 신공법의 경우 우리나라에 실제 시공 사례가 없으며, 지진 실험은 지진 모사장치와 구조체 크기의 제약으로 인해 실제 케이스로 실험을 진행할 수 없다. 이에, Yoo 등(2017)은 궤도지지말뚝에 대한 횡방향 동적 안정성 평가에 대한 연구를 수행하였으나, 수치해석만을 수행하여 결과의 신뢰도 확보에 한계가 있다. 또한 Kwon 등(2016)은 말뚝 구조물의 동적 거동에 대한 수치해석 연구를 수행하였고, Yoo 등(2018)등은 말뚝 구조물의 정적 및 동적하중에 대한 연구를 수행하였으나, 궤도지지말뚝 구조와 차이점이 있어 해당 연구 결과를 그대로 적용하기에 한계가 있다.

이에, 본 연구에서는 국내 내진설계 기준의 지진하중 및 국내 연약지반특성을 고려한 궤도지지말뚝-지반 구조체에 대해 현장 구속압조건을 모사할 수 있는 원심모형실험을 수행하여 궤도지지말뚝의 동적 거동을 평가하고, 궤도지지말뚝의 국내 실정에 맞는 내진 설계를 제시하고자 한다.

2. 궤도지지말뚝 시스템

승객의 쾌적성, 철도의 안정성 확보, 그리고 궤도 유지보수 비용 절감을 위해서는 노반의 침하, 공사 후 부등침하에 대한 엄격한 관리가 필요하다. 이를 위해 현재 고속철도 노선의 노반, 특히 연약지반 구간에서는 교량을 건설하거나 연약지반을 개량하는 방식을 적용하고 있다. 이 중 교량은 건설비용이 많이 필요하며, 이에 제한된 비용으로도 침하억제가 가능하고 시공이 간단한 새로운 노반구조 개발이 시급하다.

궤도지지말뚝 구조는 지반 침하의 억제가 필수적인 연약지반 구간, 교량과 터널의 접속부 구간, 분기기 구간 등의 개선을 위해 개발된 새로운 노반구조 형식이다. 또한 암반 근입말뚝의 특성상 강도와 강성이 크며, 안정성이 우수하고 침하량이 작은 특징이 있다(Wangfeng, 2012).

국내 적용을 위한 종 및 횡단면 산정 시 기본 전제조건은 고속철도(최고속도 350km/h급) 선로이며, 노선배치는 양선식(double line)이다. 파일 가로보 플랫폼의 연결방식과 말뚝 지지방식은 선단지지 방식이며, 파일은 천공관입 방식으로 시공한다(Bae et al., 2018).

고속철도 운행에 따른 처짐제어, 온도변위 및 차량시제동 하중에 따른 종/횡방향 변위를 감안하여 한 개의 플랫폼은 3경간이 되도록 파일을 배치한다. 또한 플랫폼 간 연결은 신축이음으로 하였다. 말뚝의 횡방향 간격은 철도 건설기준에 관한 규정 제 14조를 적용하여 4.5m로 설정하였다(Bae et al., 2015). 단선 운행 시 횡방향 비틀림의 최소화를 위해 플랫폼 분리를 목적으로 좌우 플랫폼간 유격을 0.1m로 설정하였다. 궤도지지말뚝의 개념도는 Fig. 1과 같다.

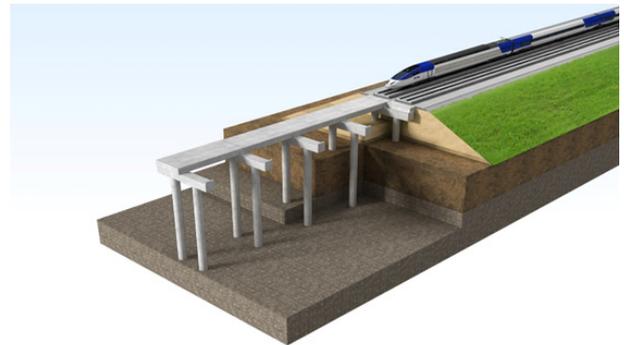


Fig. 1. Pile-supported slab track system

3. 원심모형 실험 개요 및 절차

본 연구에서는 궤도지지말뚝구조의 지진하중에 대한 동적거동 평가를 위해 원심 가속 중 궤도지지말뚝구조 모형체의 거동을 모니터링 하고 하부말뚝에 예상되는 부착력 등 궤도 안정성을 검토하였다. 궤도지지말뚝을 실제로 시공한 중국의 궤도지지말뚝구조 표준단면(Wangfeng, 2012)을 원형으로 선정하여 동적 원심모형실험의 제반 실험시스템을 설계하였고 원심가속 중 지진하중을 재하 하여 모형체의 거동을 분석하였다.

궤도지지말뚝 구조가 적용되는 일반적 지반조건은 연약점토층과 성토층으로 구성되며, 각 층의 두께가 궤도지지말뚝 구조의 동적 거동에 영향을 미칠 것이라 판단하고 Table 1과 같이 실험을 설계하였다. 연약지반의 두께와 연약지반의 연약도는 실제 연약지반층에 고속철도를 부설한 호남고속철도의 익산-정읍 구간의 시추주상도를 분석하여 결정하였다. 익산-정읍 구간의 30개 시추주상도를 분석한 결과, 연약지반의 두께의 평균 값과 중간 값은 13m 수준이었으며, 연약지반의 N치는 평균 3.5, 중간값 3.0 수준이었다. 이를 바탕으로 연약지반 두께는 평균 값인 13m 수준과 연약지반 층이 두꺼운 경우를 가정하여 23m 수준으로 결정하였으며, 연약지반의 N치는 3으로 결정하였다. 성토체의 높이는 일반적인 고속철도의 성토체 높이 범위의 하한 값과 상한 값으로 결정하였다.

본 연구에서는 팔 길이가 5m이고, 최대 2,400kg의 무게를 100g의 원심가속도까지 가속 할 수 있는 KAIST 동적 원심모형실험기를 이용하여 원심가속도 58g 조건에서 실험을 수행하였으며 4자유도 in-flight 로봇을 이용하여 말뚝을 압입하였다(Kim et al, 2013a, 2013b). 실험에 사용된 토조는 ESB(Equivalent Shear Beam) 상자로 토조의 크기는 길이 0.49m, 폭 0.49m, 높이 0.63m이며, 높이 방향으로 6cm 두께의 띠모양 요소들이 고무 버클로 연결되어 있어 지반 진동하에서 토조가 지반과 함께 변형을 일으켜 토조 가장자리에서의 반사파 발생을 줄여주도록 되어 있다(Zeng, 1996; Lee et al., 2013).

원심모형시험을 통해 실제 구조물의 거동을 분석하기 위해서는 합리적인 모형 제작이 필수적이며, 기존의 많은 연구자들에 의하여, 지반-구조물의 상호작용 모사를 위한 상사법칙이 제안되고 검증되어 왔다(Schofield 1980; Stone et al., 1991; Talyer, 1995). 모형 구조체는 이러한 기존 연구자들이 제안한 상사법칙을 적용하여 1/58사이즈로 제작하였으며, 실험에 사용된 모형 말뚝의 제원은 Table 2와 같다. 플랫폼은 가장 취약점으로 예상되는 플랫폼 신축경계부분을 중심으로 양쪽 대칭으로 2 x 3 균말뚝 형태가 되도록 제작하였다. 플랫폼과 가로보는 강체로 가정하여 말뚝에 관성력을 전달하고 말뚝 상단경계조건을 구속하는 역할을 하도록 일체로 설계하였으며, 표준 단면의 자중을 계산하여 상사비에 맞게 상부 플랫폼을 제작하였다. 말뚝의 선단은 지지층

Table 1. Conditions of test case

	Strength of soft ground	Soft ground (H1)		Embankment (H2)		Rock layer (H3)		Total length of pile L (m)
		Prototype (m)	Model (mm)	Prototype (m)	Model (mm)	Prototype (m)	Model (mm)	
T1	Soft ground, N=2~3	13	224	3	51	4.4	75	16
T2	Soft ground, N=2~3	13	224	6	103	4.4	75	19
T3	Soft ground, N=2~3	23	396	3	51	4.4	75	26
T4	Soft ground, N=2~3	23	396	6	103	4.4	75	29

Table 2. Dimensions of prototype pile and model pile

Specification	Prototype	Model
Outer diameter (m)	1.20	0.02069
Thickness (m)	0.15	0.00135
Geometrical moment of inertia, I (m ⁴)	0.073	3.853×10 ⁻⁹
Modulus of elasticity, E (MPa)	41691	70000
Bending rigidity, EI (kN-m ²)	3052881	0.269773

에 관입을 용이하게 하기 위하여 각도 60도의 콘슈(Cone shoe)를 부착하여 제작하였다. 최종적으로 제작된 모형체는 Fig. 2와 같다.

지반구성은 지지층, 연약점토층, 성토체로 구성하였다. 말뚝의 지지층과 성토체는 풍화토를 사용하여 조성하였으며, 점토층은 인도네시아산 카올린을 이용하여 조성하였다. 두 재료의 기본 물성은 Table 3과 같다.

지지층은 다짐함수비를 13%로 습윤측에서 상대다짐 90%를 목표로 다짐하여 조성하였고, 깊이별로 균질성을 확보하기 위하여 두 개의 층으로 나누어 목표건조단위중량으로 다져서 조성하였다. 풍화토 원재료는 말뚝 관입 저항력을 줄이고, 모형말뚝의 보호를 위하여 9.52mm제

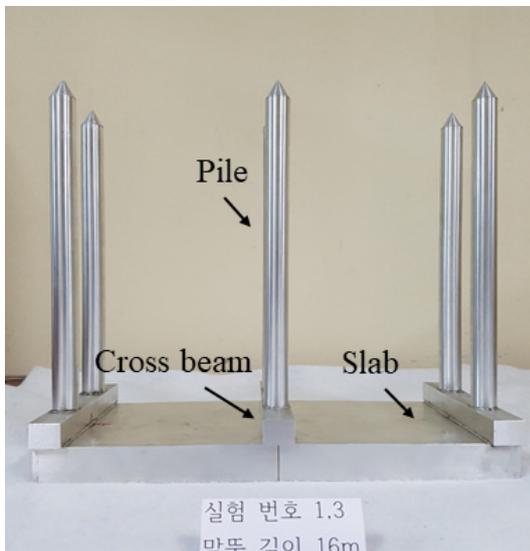


Fig. 2. Pile-supported slab track model (T1)

로 굵은 입자를 제거한 뒤 사용하였다. 다짐은 전동식 램머를 이용하여 목표한 건조단위중량으로 다졌다.

연약지반 점토층은 카올린분말을 이용하여 물과 섞어 조성 후, Fig. 3과 같이 선행압밀하중 재하기를 이용해 압밀하여 조성하였다. 슬러리는 카올린점토 액성한계 2배인 120%로 조성하였다. 선행압밀하중은 공압실린더를 이용하여 반력프레임에 지지하는 방식으로 재하하였으며, 선행압밀하중의 크기는 연약지반에 가해지는 원심력의 크기와 재하 장비의 용량을 고려하여 130kPa

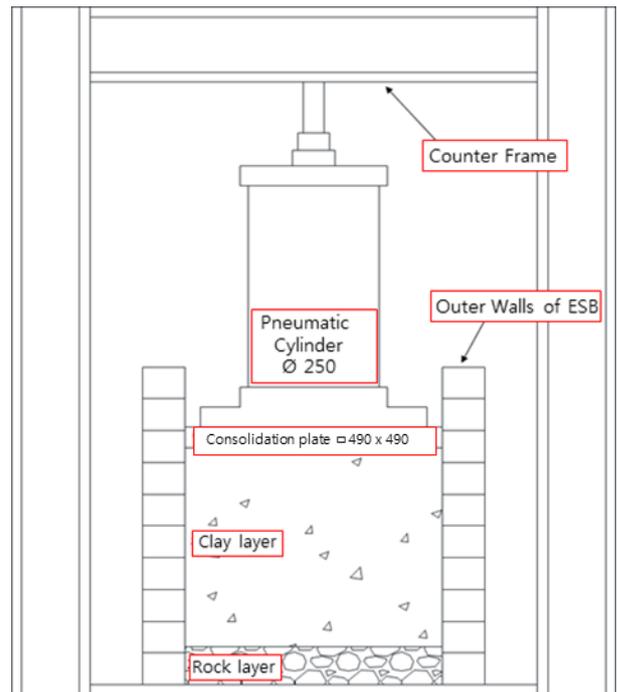


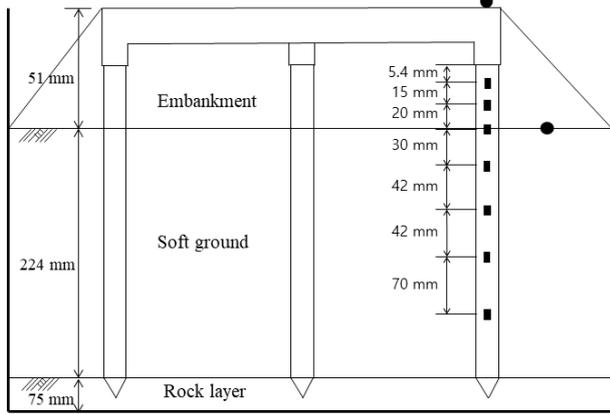
Fig. 3. Consolidation load by pneumatic cylinder

Table 3. Basic properties of soil materials

	Embankment/Support layer	Clay
USCS	SW	MH
Cu	6.29	-
Cc	1.11	-
Plasticity Index (PI)	-	25
Liquid Limit (LL)	-	76
Plastic Limit (PL)	-	51
Optimum water content (%)	11	-
Maximum dry unit weight, $\gamma_{d,max}$ (t/m ³)	2.06	-

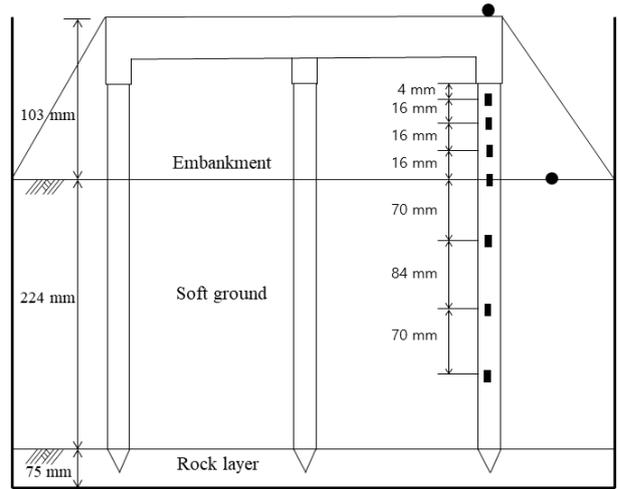
Table 4. Water content and unit weight measurement results of soft ground

	T1	T2	T3	T4
Water content of clay w (%)	123.6	122.8	123.1	123.1
Water content of after consolidation, w (%)	61	59	63	63
Specific weight of after consolidation, γ_t (t/m ³)	-	1.64	1.71	1.71



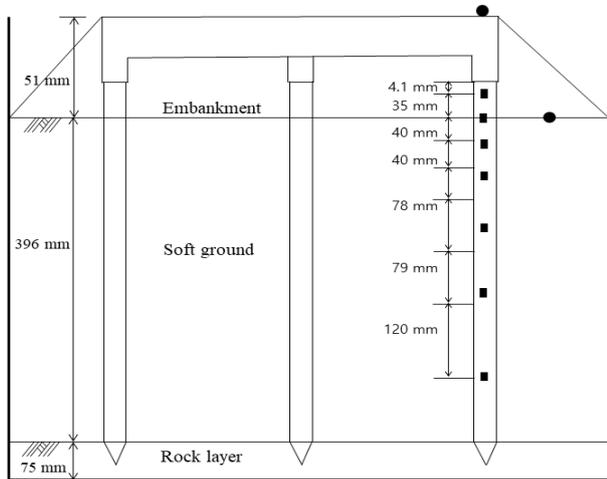
■ Strain gauge ● Accelerometer

(a) Sectional view of T1



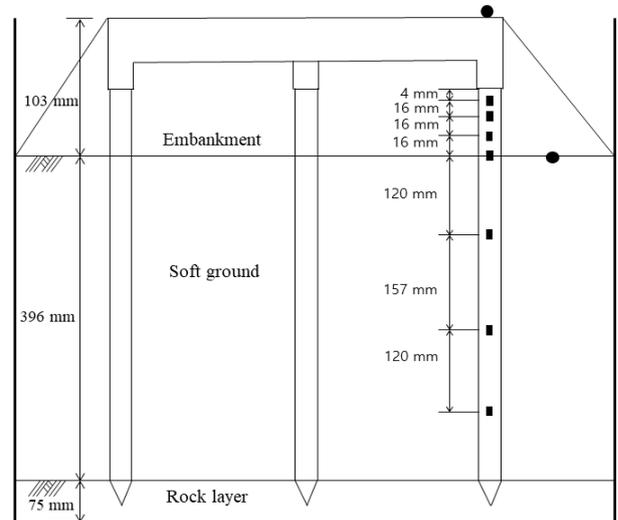
■ Strain gauge ● Accelerometer

(b) Sectional view of T2



■ Strain gauge ● Accelerometer

(c) Sectional view of T3

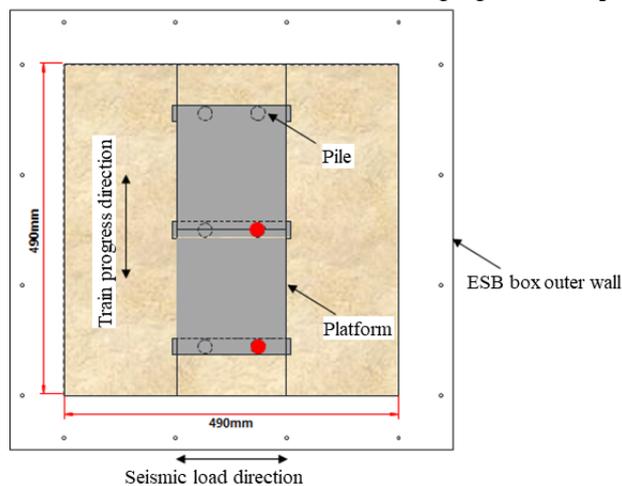


■ Strain gauge ● Accelerometer

(d) Sectional view of T4

○ Pile

● Strain gauge attached pile



(e) Plane view of test section

Fig. 4. Schematic drawing of test section (Model scale)

로 결정하였다. 실험 별 연약지반층 함수비 및 단위중량 측정 결과는 Table 4와 같다.

성토체는 지지층 조성에 사용된 동일한 풍화토 재료를 이용하였고, 지지층과 마찬가지로 다짐함수비를 13%로 습윤층에서 상대다짐 90%를 목표로 다짐하여 조성하였다. 가진방향에 대해 모형말뚝 사이의 간격 및 말뚝과 ESB 내측벽 사이 간격은 말뚝 직경의 10D 이상으로 하여 말뚝간에 영향을 주지 않도록 하였다(Remaud, 1999).

최종적으로 완성된 실험 단면도 및 평면도는 Fig. 4에 도시하였다. Fig. 4(a)부터 Fig. 4(d)는 각 실험 케이스의 실험 단면도이며, Fig. 4(e)는 실험 평면도를 설명한 그림이다. 가진 방향은 구조물에 불리하게 하중이 작용되도록 열차 직각방향으로 작용시켰다. 말뚝 단면의 양쪽에는 7쌍의 변형률계를 부착하여 진동 중에 발생하는 말뚝 깊이별 모멘트를 측정하였으며, 가속도계를 말뚝 상부질량과 지반내에 설치하여 말뚝과 지반 가속도 응답을 측정하였다. 모형말뚝에 부착한 변형률계는 모형말뚝을 압입시킬 때 말뚝 표면에 발생하는 강한 마찰력을 견디어낼 수 있도록 에폭시로 코팅하여 단단하게 부착하였다.

모형 제작이 완료된 후, 원심가속도가 가해진 상태에서 진동하중을 입력하여 구조체의 동적 거동을 분석하였다. 입력 지진파의 경우, 주파수 특성에 따른 구조물의 거동 차이를 확인하기 위하여 단주기 지진파인 Ofunato

지진파와 장주기 지진파인 Hachinohe 지진파를 사용하였다(Fig. 5). Hachinohe 지진파의 경우 1hz 이하의 장주기 대역이 지배주파수로 작용하게 되며, Ofunato 지진파의 경우 3hz~5hz 수준의 단주기 대역이 지배주파수로 작용하게 된다. 국내에서 발생한 지진의 경우 경주지진과 포항지진 모두 Ofunato 지진파보다 단주기 지진파 특성을 가지고 있다. 입력지진파의 입력 지진 가속도의 크기에 따른 거동 변화를 살펴보기 위하여 입력지진파의 크기는 약진인 0.03g 수준부터 국내 내진설계 기준의 2400년 재현주기 지진인 0.22g 및 4800년 재현주기 지진인 0.29g 이상 까지 재하 하였으며, 순차적 하중재하 방법을 적용하였다.

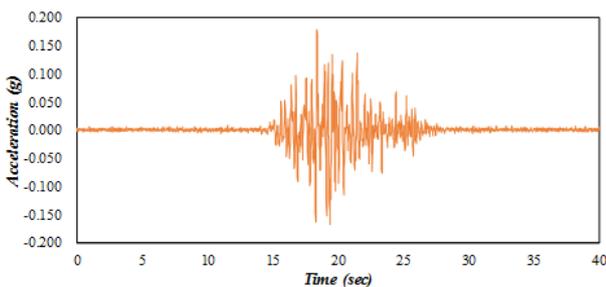
4. 원심모형 실험결과

4.1 가속도 계측 결과

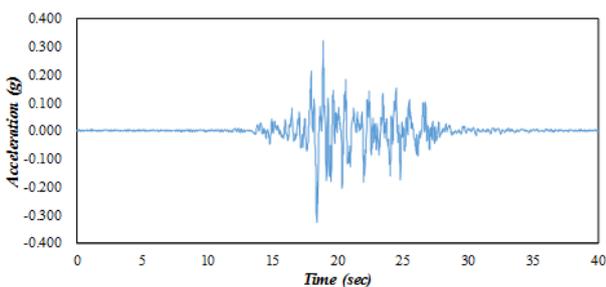
지중에 매설된 가속도계와 모형 구조물의 상부 슬래브에 설치된 가속도계를 이용하여 지중 가속도와 성토체의 가속도를 계측하였다. Fig. 6은 입력 지진파 가진 시 구조물에서 계측된 대표적 시간이력 그래프로서 입력가속도 기준 Ofunato 지진파 0.3g 조건에서 계측된 T1 실험 결과를 도시하였다. Ofunato 지진파와 Hachinohe 지진파의 최대가속도를 원형스케일 0.03g~0.35g까지 증가하며 입력하여 비교하였다.

4.1.1 Ofunato 지진파 재하 시 가속도 계측결과

Fig. 7은 Ofunato 지진파 가진 시 궤도지지말뚝 모형 구조체 상부에서 계측된 실험 케이스별 가속도 그래프이다. 유민택 등(2014)의 연구에 따르면 지반-구조물 상호작용 시스템에 진동하중이 가해질 경우, 구조물에서 계측되는 가속도 값의 입력대비 증폭비는 입력가속도



(a) Ofunato seismic wave



(b) Hachinohe seismic wave

Fig. 5. Input seismic wave

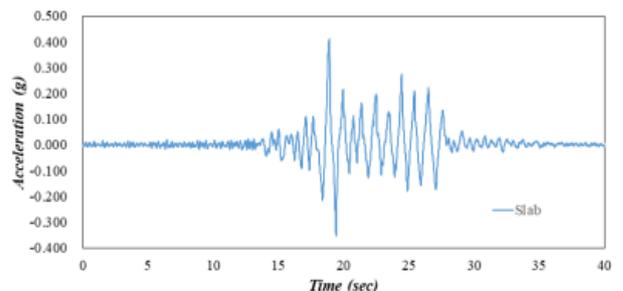


Fig. 6. Acceleration time history

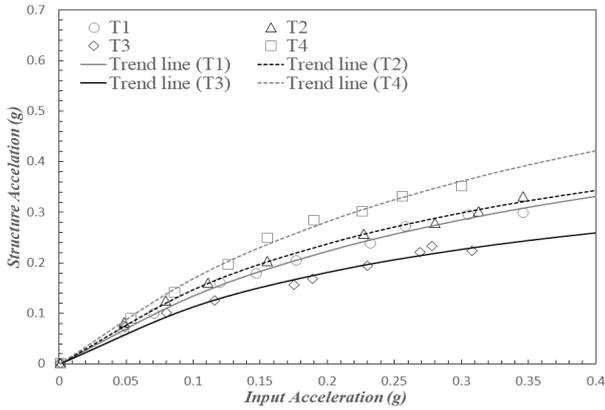


Fig. 7. Acceleration at slab structure (Ofunato earthquake)

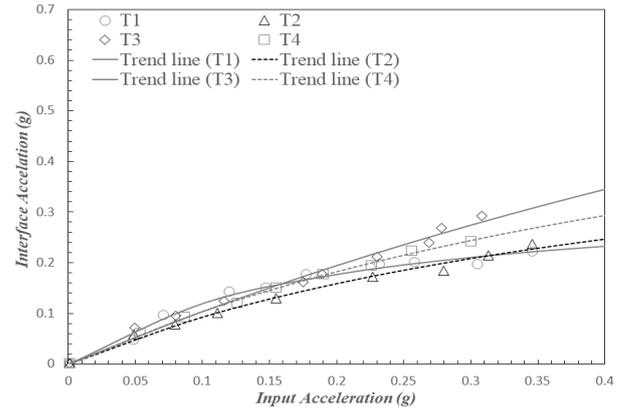


Fig. 8. Acceleration at interface between embankment and soft ground (Ofunato earthquake)

가 증가할수록 작아지게 되는데, 이는 입력 지진하중의 크기가 클수록 지반을 통과하며 소산되는 지진 에너지 양이 커지기 때문으로 판단된다. 이러한 선행 연구의 경향은 본 실험 결과에서도 동일하게 나타났으며, 각 실험 단면 별 경향을 보다 정량적으로 파악하기 위하여 실험 결과를 쌍곡선식으로 연결하여 실험 결과를 분석하였다. 분석결과, 연약지반이 깊고, 성토체가 높은 T4의 경우에 가장 가속도 증폭이 크게 발생하였으며, 그 다음으로 연약지반이 얇고 성토체가 높은 T2에서 두 번째로 큰 증폭이 발생하였다. 이는 성토체의 높이가 가속도 증폭에 큰 영향을 주며, 성토체가 높을수록 가속도 증폭이 크게 발생하는 것을 의미한다. 그러나, 성토체의 높이가 동일할 경우에는 성토체의 높이가 3m에서는 연약지반의 두께가 얇은 경우(T1)가, 성토체의 높이가 6m에서는 연약지반의 두께가 깊은 경우(T4)가 더 높은 가속도 값을 나타냈다. 이는 성토체의 높이가 낮고 연약지반의 깊이가 깊은 경우(T2)에서는 연약지반 내에서 지진파 증폭 및 말뚝의 횡방향 거동이 발생하고 상부구조물에서는 오히려 낮은 수준의 지진 하중이 가해졌기 때문으로 판단된다. 일련의 결과를 바탕으로 단순히 성토체의 높이와 연약지반의 깊이의 변수에 대해 상부 구조물의 지진 하중이 결정되는 것이 아닌, 연약지반 깊이 대비 성토체 높이가 구조물의 지진 하중 결정에 영향을 끼친 것으로 판단된다.

Fig. 8은 단주기 지진파 Ofunato 지진 재하 시 연약지반과 성토체 경계면의 가속도 측정 결과이다. 대체적으로 모든 케이스에서 상부구조물의 가속도에 비해 작게 계측되었으며, 토사지반에 근입된 구조물의 경우 지표면 가속도와 구조물 가속도의 시간이력이 유사하게 나타나는 선행 연구 결과(Yoo et al., 2014)로 미루어 보면

성토체에서 지진 증폭 현상이 발생한다는 것을 추론할 수 있다. 전체적인 경향성을 살펴보면 연약지반의 두께가 깊은 경우(T3, T4)에서 지진파 증폭이 크게 발생하고, 연약지반의 두께가 얇은 경우(T1, T2)에서 그 증폭이 작게 발생하는 것을 알 수 있다. 또한, 동일한 연약지반 두께인 경우, 성토체의 높이가 상대적으로 높은 T2와 T4에서 T1과 T3 보다 증폭이 작게 발생하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 성토체로 발생하는 연직하중이 증가하여 지진파 증폭이 적게 발생한 것으로 판단된다. 단, T1의 경우, 낮은 입력가속도 수준에서 다른 실험 조건에서보다 지진파의 증폭이 크게 발생하였는데, 이는 연약지반 내에서 과도한 증폭이 발생하였기 때문으로 여겨진다. 그 원인으로서는 인터페이스에서의 계측 조건, 낮은 입력가속도 수준에서의 연약지반 층의 공진주파수와 입력 진동 주파수 수준의 일치 등이 이유가 될 수 있다. 일련의 결과에도 불구하고, 0.15g 이상의 수준에서는 다른 실험 경향들과 마찬가지로 낮은 수준의 증폭이 일어나는 것으로 보아 복잡한 지반 동적 상호작용내에서 0.15g 이하의 입력 가속도 수준에서만 발생한 현상으로 판단된다. 성토체의 높이가 높은 경우(T2, T4)가 성토체의 높이가 작은 경우(T1, T3)보다 증폭이 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 경계층의 가속도까지는 연약지반의 깊이에 의해 지배적으로 거동하게 되며, 성토체의 연직하중이 연약지반 층의 가속도 증폭에 영향을 주는 것을 확인할 수 있다.

일련의 결과를 바탕으로, 연약지반층과 성토체의 경계면까지의 증폭은 연약지반 층의 두께가 깊을수록 크게 발생하며, 성토체의 연직하중이 클수록 줄어드는 효과가 있는 것으로 판단된다. 또한, 지반-구조물 상호작용

용 시스템에서 상부구조물의 가속도 증폭 값은 연약지반의 증폭특성 뿐 아니라 성토체의 두께에도 영향을 받으며, 성토체의 두께가 두꺼울수록 상부구조물의 응답이 크게 나타나는 것을 확인하였다. 이는 성토체가 높은 다짐도를 가지고 있어 상부구조물과 일체거동을 하게 되고, 상부 구조물의 관성 효과를 증가시키기 때문이며, (성토체의 다짐도가 높을 경우 말뚝과 일체거동을 하나?) 단주기 지진파의 경우 성토체의 높이가 구조물의 응답에 지배적인 역할을 하는 것으로 판단된다.

4.1.2 Hachinohe 지진파 재하 시 가속도 계측결과

Hachinohe 실험 결과의 경우 경계층에서의 가속도 응답 계측 값이 이상치로 판단되어 상부 구조물에서의 응답만을 표기하였다. Fig. 9는 장주기 지진파인 Hachinohe 지진 가진 시 측정된 실험 단면 별 가속도의 그래프이다. Hachinohe 지진에 대한 결과 역시 쌍곡선식을 이용하여 실험 결과를 도시하였다. 일련의 실험 결과를 분석한 결과 Ofunato 지진파에 비하면 뚜렷하지 않지만, 성토체 높이가 6m인 경우(T2, T4)에서 성토체의 높이가 3m인 경우(T1, T3)의 경우보다 가속도가 높게 나타났다. 또한 성토체의 높이가 같은 경우 연약지반의 깊이가 얇은 케이스(T1, T2)가 깊은 케이스(T3, T4)에 비해 구조물 가속도가 높게 나타났다. 이는 Ofunato 지진파의 결과와는 상반되는 결과인데, 이는 13m의 연약지반의 고유주기가 23m 연약지반의 고유주기에 비해 Hachinohe 지진파의 입력 주파수 특성과 가까워 나타나는 현상으로 판단되며, 고유주기의 영향이 성토체의 연직하중의 영향보다 크게 작용한 것을 의미한다.

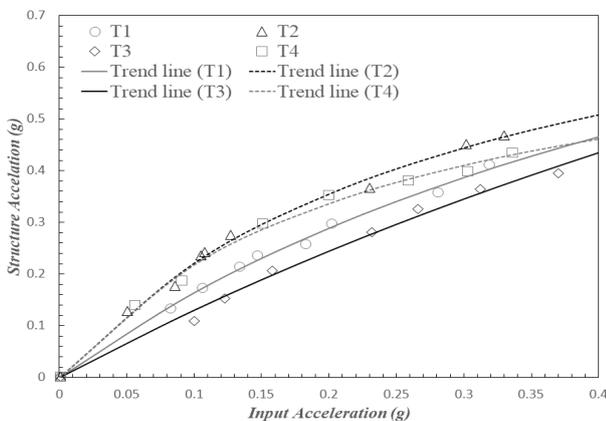


Fig. 9. Acceleration at slab structure (Hachinohe earthquake)

4.2 모멘트 계측 결과

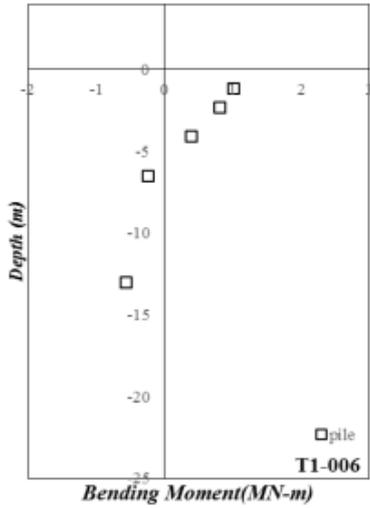
플랫폼-플랫폼 연결부의 모형말뚝과 플랫폼 내부를 지지하는 말뚝 1본의 모형말뚝에 부착한 변형률계를 이용하여 성토체와 연약지반의 깊이에 따른 변형률을 계측하였다. Ofunato 지진파와 Hachinohe 지진파의 최대 가속도를 원형스케일 0.03g~0.35g까지 증가하며 케이스별 모멘트를 비교하였으며, 말뚝의 균열 모멘트 및 파괴 모멘트 발생 양상을 분석하였다. 여기서 말뚝의 균열 모멘트 및 파괴모멘트는 Bae 등(2015)에서 결정한 표준단면인 PHC 1,200 말뚝의 설계 균열 휨모멘트인 1.825 MN-m와 3.335MN-m로 결정하였으며, 해당 모멘트 값은 PHC 말뚝 제작 업체의 PHC PILE 성능표로부터 확인하였다.

4.2.1 깊이별 모멘트 분석

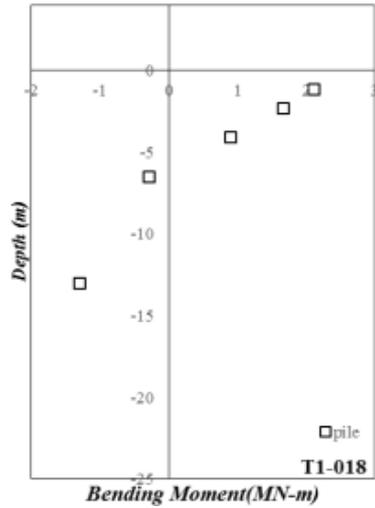
Fig. 10은 0.15g 수준의 입력지진파 가진 시 깊이 별 말뚝의 모멘트 그래프이다. 연약지반의 깊이가 13m 인 경우(T1, T2), 기반암 부근에서 상부층과 반대방향 모멘트가 발생하며, 깊이가 얇아질수록 반대방향으로 모멘트가 계속 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이에 반해, 연약지반의 깊이가 23m 인 경우(T3, T4)에는 연약지반 중앙에서 성토체 부분의 모멘트와 반대방향으로 큰 모멘트가 나타났다. 이는, 상대적으로 연약지반의 깊이가 얇고 성토체의 두께가 큰 경우에는 성토체 및 상부구조물의 관성력이 궤도지말뚝 구조의 전체 거동을 지배하게 되며 이로 인해 고정단인 기반암 부근에서 상층부와 반대방향 모멘트가 크게 발생한 것으로 판단된다. 반대로, 연약지반의 깊이가 깊고 성토체의 두께가 작은 경우에는 연약지반의 운동학적 힘(kinematic load effect)의 영향이 지배적이기 때문에 연약지반의 횡방향 운동에 의해 말뚝 중앙부에서 큰 모멘트가 발생한 것으로 판단된다.

4.2.2 Ofunato 지진파 재하 시 모멘트 계측 결과

Fig. 11은 단주기 지진파 Ofunato 지진 재하 시 케이스별 최대 휨 모멘트 결과이다. 이 때, 최대 휨 모멘트 값은 Fig. 10의 깊이별 모멘트 발생 값 중 연약지반 및 성토체 층에서 발생한 모멘트 중 최대 모멘트 값으로 결정하였다. 최대가속도 원형스케일 0.019g~0.35g로 증가시키며 케이스별 최대 휨 모멘트를 나타내었다. 가속도계 측정 결과와 유사하게 성토체가 높은 경우(T2, T4)

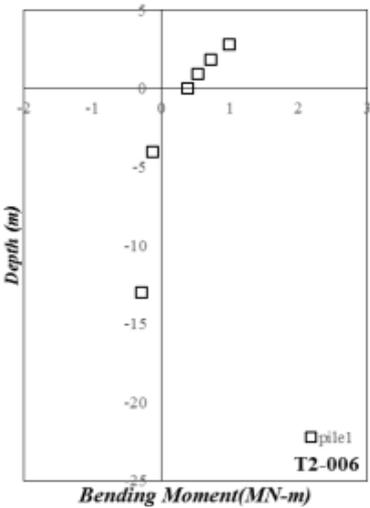


Ofunato earthquake

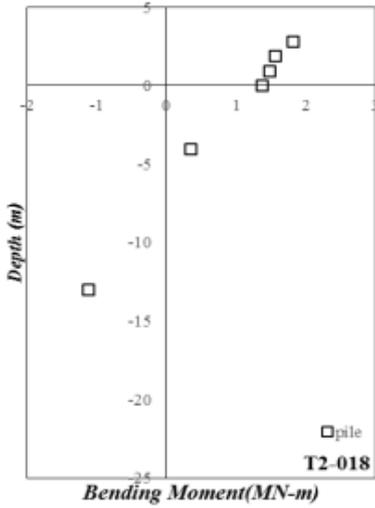


Hachinohe earthquake

(a) T1 Moment by depth (Soft ground=13m, embankment=3m)

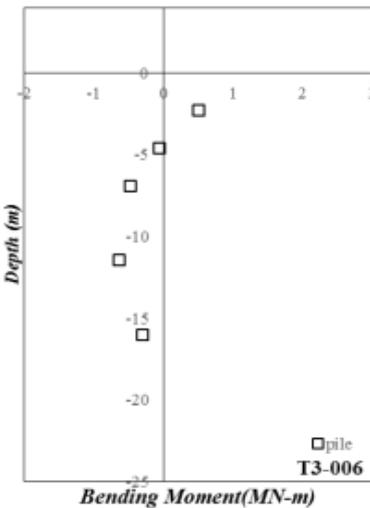


Ofunato earthquake

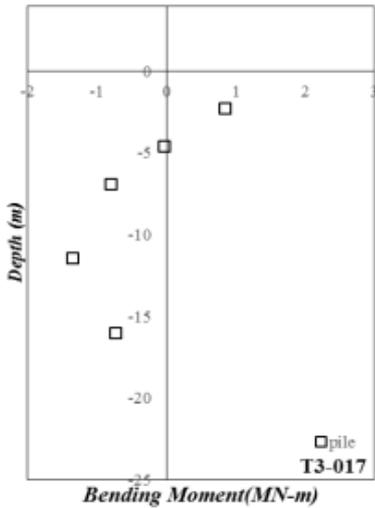


Hachinohe earthquake

(b) T2 Moment by depth (Soft ground=13m, embankment=6m)



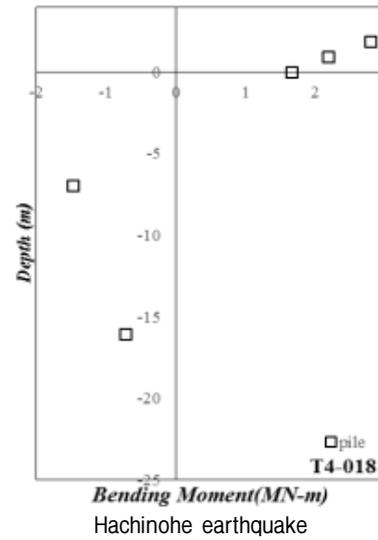
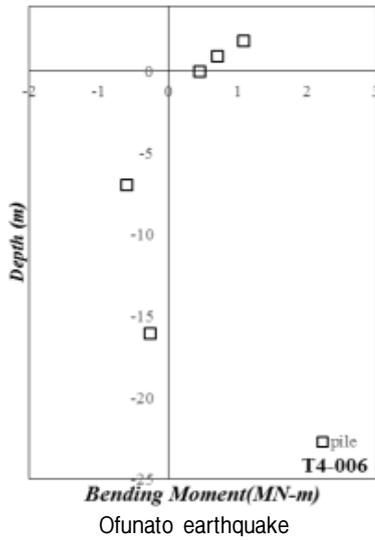
Ofunato earthquake



Hachinohe earthquake

(c) T3 Moment by depth (Soft ground=23m, embankment=3m)

Fig. 10. Measured bending moment along the pile depth



(d) T4 Moment by depth (Soft ground=23m, embankment=6m)

Fig. 10. Measured bending moment along the pile depth (Continued)

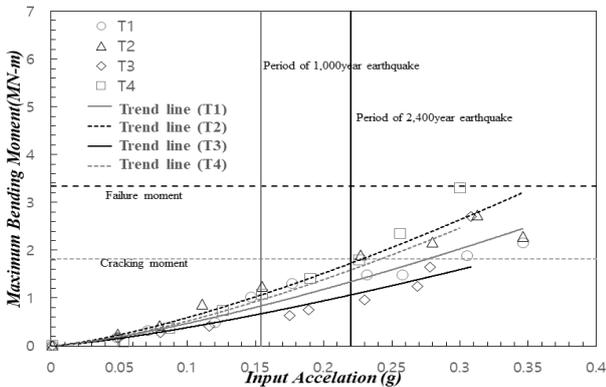


Fig. 11. Maximum bending moment (Ofunato earthquake)

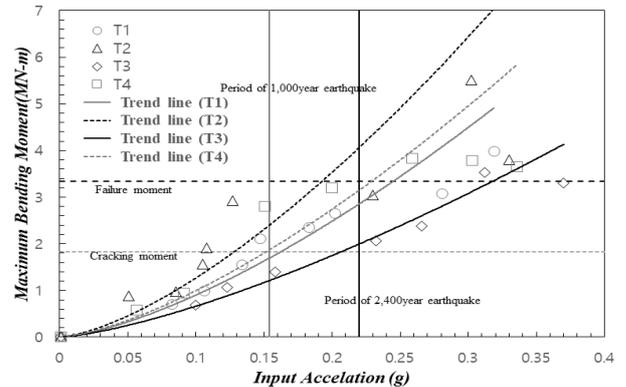


Fig. 12. Maximum bending moment (Hachinohe earthquake)

케이스의 최대 휨 모멘트가 높게 나타났으며 성토체가 낮은 경우(T1, T3)의 최대 휨 모멘트 값이 작게 나타났다. 또한 성토체의 높이가 같은 경우(T1과 T3, T2와 T4)를 비교하여 보았을 때, 연약지반의 깊이가 얇은 케이스가 깊은 케이스에 비해 말뚝 균열모멘트에 먼저 도달하는 것을 확인할 수 있다. 연약지반의 깊이가 깊을수록 단주기 지진파에 대한 말뚝의 휨모멘트가 크게 나타났다. 또한 1997년 건설교통부에서 제정한 내진설계 상위 개념인 내진설계기준연구 II에 따르면 국내 특등급 내진설계기준 재현주기 2,400년 0.22g에 대해 단주기 지진 발생 시, 모든 실험 케이스에서 궤도지지말뚝 구조물의 말뚝 균열모멘트 1.825MN-m를 초과하지 않는 것을 확인 할 수 있었다.

4.2.3 Hachinohe 지진파 재하 시 모멘트 계측 결과

Fig. 12는 장주기 지진파 Hachinohe 지진 재하 시 케이스별 변형률계 측정 결과이다. 성토체의 높이 및 연약지반의 두께에 따른 최대 모멘트 발생 경향은 Ofunato 지진파와 동일하게 나타났다. 그러나, 장주기 지진파 입력 시, T2와 T4의 경우 국내 내진설계 기준 재현주기 1,000년의 입력지진인 0.154g 수준에서 궤도지지말뚝 구조물의 균열 모멘트 1.825MN-m를 초과하는 것으로 나타났다. 또한, 재현주기 2,400년의 입력지진인 0.22g 수준의 지진이 발생할 경우, 모든 경우에서 궤도지지말뚝 구조물의 균열모멘트를 초과하는 것으로 확인되었다. 이는 궤도지지말뚝 구조체가 단주기 지진파에 비해 장주기 지진파에 취약한 것을 의미하며, 이는 궤도지지말뚝 구조체가 장주기 지반인 연약지반에 근입되어 있

으며, 지반-구조물 상호작용 시스템의 고유진동수가 장주기 특성을 보이고 있기 때문으로 판단된다.

5. 결과 분석 및 제언

Fig. 13과 Fig. 14는 각각 Ofunato 지진과 와 Hachinohe 지진과 입력 시 성토체 높이와 연약지반 깊이의 비에 따른 말뚝의 균열모멘트 및 파괴모멘트가 발생하기 시작하는 기반암 가속도 크기를 나타낸 그래프이다. 연약지반 깊이 대비 성토체의 높이로 데이터를 분석한 결과 장주기 지진파, 단주기 지진파에서 모두 일관된 경향성을 나타냈으며 이를 바탕으로 대표적인 연약지반과 성토체로 특징지를 경우 내진 안정성 확보를 위한 성토체 높이의 가이드라인을 설정할 수 있다. 단주기 지진파 가진 시 모든 케이스에서 국내 내진설계기준 재현주기 2,400년의 입력지진 0.22g 이후 궤도지지말뚝 구조물의 균열모멘트 1.825MN-m를 초과하여 국내 내진설계 기준에 만족하는 것을 확인하였다. 또한 연약지반 깊이에 대한

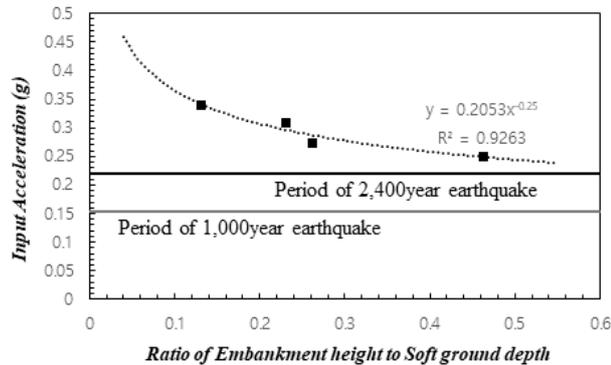


Fig. 13. Point of crack moment according to ratio of embankment height to soft ground depth when loading Ofunato seismic waves

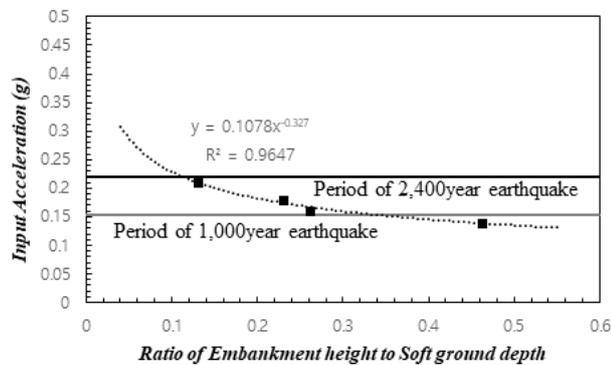


Fig. 14. Point of crack moment according to ratio of embankment height to soft ground depth when loading Hachinohe seismic waves

성토체 높이의 비율이 0.46 정도로 높을 경우 입력지진 0.25g 수준에서 말뚝 균열모멘트에 도달하였으나, 성토체의 비율이 0.13 정도로 낮은 경우 입력지진 0.34g 수준에서 말뚝 균열모멘트에 도달하였다. 연약지반 대비 성토체의 높이의 비율이 낮아질수록 말뚝 균열모멘트에 늦게 도달하는 것을 확인하였다. 단, 본 연구 결과는 철도 시설물에 적용하는 궤도지지말뚝 구조에 대한 내용이므로, 최소 성토고 높이는 1m 이상인 경우 적용해야 한다.

Fig. 14는 장주기 지진파인 Hachinohe 지진과 입력 시 성토체 높이와 연약지반 깊이의 비에 따른 말뚝의 균열모멘트 발생시점을 나타낸 그래프이다. 장주기 지진파 가진 시 그래프 양상과 단주기 지진파 가진 시의 그래프와 유사한 경향을 띄고 있다. 하지만 위의 단주기 지진파 입력 시 균열 모멘트 발생 시기에 비해 장주기 지진파 입력 시 말뚝의 균열모멘트가 전체적으로 약 1.5배 가량 빠르게 발생 한 것을 확인할 수 있다.

이는 모멘트 계측결과에서 기술한 궤도지지말뚝 구조체가 장주기 주파수를 가진 구조체이기 때문으로 판단된다. 장주기 지진파 가진 시 역시 연약지반 깊이 대비 성토체 높이의 비율이 0.46 정도로 높을 경우 0.14g 가진 시 말뚝 균열모멘트에 도달하였고, 성토체의 비율이 0.13 정도로 낮을 경우 0.22g 가진 시 말뚝 균열모멘트에 도달하는 것을 확인하였다. 위의 분석을 토대로 현재 철도 내진설계 기준인 재현주기 1000년 지진에 대해서는 연약지반 대비 성토체 높이의 비율이 0.31 이하일 때 장주기 지진에도 안전한 것으로 판단된다. 또한 특등급 기준 입력지진 0.22g로 설계할 경우 연약지반 대비 성토체의 높이를 0.13 미만으로 설계하여야 안전한 것으로 판단된다. 단, 본 연구는 궤도지지말뚝 구조의 국내 도입을 위한 기초적인 연구로서, 궤도 지지말뚝의 기본 단면이 철도 시설물이 주로 건설된 연약지반 깊이 (13m~23m)와 성토체 높이(3m~6m)에 적용된다는 가정하에 연구를 진행하였다. 해당 조건에 만족할 경우, 장주기 지진파에 대해서도 안전성을 확보하기 위한 연약지반 대비 성토체 높이 비율을 제안한 것이며, 포항 및 경주에서 밝혀진 국내 지진특성인 극단적인 단주기 지진파에 대해서는 보다 높은 성토체 높이에 대해서도 안전할 것으로 예상된다. 이에 일반화된 설계 기준 제시를 위해서는 본 연구를 바탕으로 한 추가적인 연구가 필수적이다.

6. 결 론

궤도지지말뚝의 동적 거동을 평가 및 분석하기 위하여 연약지반 깊이와 성토층의 높이를 매개변수로 동적 원심모형실험을 수행하였다. 각 위치별 측정된 계측값을 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 지진하중 작용 시 가속도계 계측 결과 입력지진의 크기에 비해 상부구조물로 갈수록 모든 실험조건에서 가속도 증폭이 발생하였다. 또한 성토체의 높이가 높을수록 가속도 증폭이 크게 발생하였으며, 성토체 높이가 같을 경우 연약지반의 깊이가 얕을수록 상부 구조물 가속도가 높게 발생하였다. 이는 성토체의 자중이 상부구조물 가속도 증폭에 지배적인 영향을 주었을 것으로 판단된다. 또한 연약지반의 깊이가 깊을수록 연약지반에 의한 횡방향 거동억제 효과가 크게 발생하여 상부 구조물가속도 증폭이 작게 관측된 것으로 판단된다.
- (2) 단주기 지진파 재하 시, 모든 실험 케이스에서 국내 내진설계기준 재현주기 2,400년 0.22g 기준에 대하여 궤도지지말뚝 구조물의 말뚝 균열모멘트 1.825 MN-m에 도달하지 않아 안전하게 확인되었다. 모멘트 계측값 비교를 통해 상대적으로 연약지반 깊이의 조건보다 성토체 높이의 조건이 말뚝의 휨모멘트에 큰 영향을 주는 것이 확인되었다. 또한 성토체의 높이가 같은 조건의 경우 연약지반의 깊이가 얕은 경우 연약지반 깊이가 깊은 경우에 비해 말뚝의 휨 모멘트가 크게 발생하는 것을 확인하였다. 장주기 지진파 재하 시, 단주기 지진파 재하 시와 유사하게 성토체가 높을수록, 연약지반의 깊이가 얕을수록 말뚝의 최대 휨모멘트가 크게 관측되었다. 하지만 장주기 지진파 입력 시, 모든 케이스에서 국내 내진설계기준 재현주기 2,400년의 입력지진 0.22g 이전에서 궤도지지말뚝 구조물의 균열모멘트 1.825 MN-m를 초과하여 국내 내진설계 기준을 만족하지 못하는 것을 확인하였다. 궤도지지말뚝 구조체가 장주기의 고유주파수를 가지고 있기 때문에 장주기 지진에 대하여 확연히 큰 휨모멘트가 발생되었다 판단된다.
- (3) 깊이별 모멘트 분석을 통해 지진파의 주기와 관계 없이 성토체와 연약지반의 깊이의 비율에 따라 모멘트 발현 성향이 다른 것을 확인하였다. 이는 연약

지반 깊이 대비 성토체의 높이 비가 높아질수록 성토체의 관성력 영향이 지배적이고, 성토체의 비율이 낮아질수록 연약지반의 운동학적 힘(kinematic effect)이 지배적이기 때문에 연약지반 중앙부의 모멘트 값이 높게 측정된 것으로 판단된다.

- (4) 위의 결과를 바탕으로 내진설계 특등급 기준 연약지반 상 궤도지지말뚝 설계 시, 연약지반 대비 성토체의 높이의 비율 0.13 이하로 설계 하여야 안전함으로 판단된다. 또한 내진설계 1등급 기준으로 설계 시, 연약지반 대비 성토체 높이의 비율을 0.31 이하로 설계하여야 안전함으로 판단된다. 이번 연구를 통해 연약지반 상 궤도지지말뚝 구조 설계 시, 연약지반 깊이에 따른 성토체 높이한계에 대한 한계 기준을 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

1. Bae, Y.H. and Lee, I.W. (2015), "Optimal Section of Concrete Deck on Piles System for Settlement Restraint of Soft Soil", *Journal of the Korean Society for Railway*, pp.1463-1467 (in Korean).
2. Bae, Y.H., Yoo, M.T., Choi, G.M., and Lee, I.W. (2018), "Application of Pile Supported Slab Track System for Restraining Residual Settlement in Soft Soil Zone", *Korean Society of Civil Engineers Magazine*, Vol.66, No.4, pp.38-41 (in Korean).
3. Yoo, M.T., Baek, M.C., Lee, I.W., and Lee, J.S. (2017), "Evaluation of Dynamic Behavior for Pile-Supported Slab Track System by 3D Numerical Analysis", *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.21, No.5, pp.225-264 (in Korean).
4. Yoo, M.T., Ha, J.G., Jo, S.B., and Kim, D.S. (2014), "Evaluation of Seismic Loading of Pile Foundation Structure Considering Soil-foundation-structure Interaction", *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.18, No.3, pp.125-132 (in Korean).
5. Yoo, M.T. and Kwon, S.Y. (2018), "Comparison of Lateral Pile behavior under Static and Dynamic Loading by Centrifuge Tests", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.34, No.7, pp. 51-58.
6. Kim DS, Kim NR, Choo YW, and Cho GC (2013a), "A Newly Developed State-of-the-art Geotechnical Centrifuge in Korea", *KSCE J Civ Eng*, 17(1):77-84.
7. Kim DS, Lee SH, Choo YW, and Perdrat J (2013b), "Self-balanced Earthquake Simulator on Centrifuge and Dynamic Performance Verification", *KSCE J Civ Eng*, 17(4):651-661.
8. Kwon, S.Y., Kim, S.J., and Yoo, M.T. (2016), "Numerical Simulation of Dynamic Soil-pile Interaction for Dry Condition Observed in

- Centrifuge Test”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.32, No.4, pp.5-14 (in Korean).
9. Lee SH, Choo YW, and Kim DS (2013), “Performance of an Equivalent Shear Beam (ESB) Model Container for Dynamic Geotechnical Centrifuge Tests”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 44:102-114.
 10. Schofield, A.N. (1980), “Cambridge University Geotechnical Centrifuge Operation, Rankine Lecture”, *Geotechnique*, Vol.30, No.3, pp.227-268.
 11. Stone, K.J.L., Hensley, P.J., R.N.Taylor (1991), “A Centrifuge Study of Rectangular Box Culverts”, *Centrifuge '91*, Balkema, Rotterdam, pp.107-112
 12. Taylor, R. N. (1995), “Centrifuge in Modeling: Principles and Scale Effects”, *Geotechnical centrifuge technology*, Blackie Academic and Professional, Glasgow, U.K., pp.19-33.
 13. Wangfeng (2012), The theory and practice of concrete deck on pile system in a high speed ballastless track, *China Railway Publishing House*, Beijing, China, pp.1-200.
 14. Zeng, X. and Schofield, A. N. (1996), “Design and Performance of an Equivalent-shear-beam Container for Earthquake Centrifuge Modeling”, *Geotechnique*, Vol.46, No.1, pp.83-102.

Received : June 5th, 2018

Revised : February 25th, 2019

Accepted : February 26th, 2019