

진동대 시험을 이용한 유기질토가 협재된 모래지반의 내진 안정성 평가

Seismic Stability Evaluation of Sand Ground with Organic Soil by Using Shaking Table Test

정용진¹⁾ · 백영철²⁾ · 이동혁[†]

Yongjin Chung · Youngchul Baek · Donghyuk Lee

Received: March 22nd, 2023; Revised: March 27th, 2023; Accepted: April 6th, 2023

ABSTRACT : The Gangneung region has an environment suitable for the formation of organic soil, and there is an alluvial layer in which sedimentary sand layers are distributed on the upper and lower parts of the organic soil. In order to evaluate the seismic safety of the railway roadbed passing through the Gangneung area, a railway roadbed and ground model considering the similarity ratio was fabricated, a shaking table test was conducted, and the seismic stability was evaluated by comparing the effective stress analysis results. The applied seismic waves were artificial seismic waves, Gyeongju seismic waves, Borah seismic waves, Nahanni seismic waves, and Tabas seismic waves. It became. Due to the ground reinforcement effect by jet grouting applied to the lower ground of the new roadbed, the displacement of the new roadbed was found to be reduced from a minimum of 33.7% to a maximum of 56.7% compared to the existing roadbed. The shaking table test results were verified by effective stress analysis using the Finn model of the Flac program, and showed a similar trend to the shaking table test values.

Keywords : Shaking table test, Liquefaction, Effective stress analysis, Organic soil, Finn model

요지 : 강릉지역은 유기질토가 생성되기 적합한 환경을 지닌 지역으로 유기질토 상부와 하부에 퇴적 모래층이 분포되어 있는 충적층 지반이 존재한다. 본 연구는 모래층 사이에 유기질토 및 점토가 협재된 지반 상부에 조성된 강릉지역을 통과하는 철도노반의 내진 안전성을 평가하기 위하여 상사율을 고려한 철도노반 및 지반 모형을 제작하여 진동대 시험을 실시하고 유효응력 해석 결과값을 비교하여 내진 안정성을 평가하였다. 적용된 지진파는 인공지진파, 경주지진파, Borah 지진파, Nahanni 지진파, Tabas 지진파를 적용하였으며 상부 모래층의 최대 응답가속도는 0.239g(인공지진파), 과잉간극수압비는 0.509(Borah파)가 발생하는 것으로 분석되었다. 신설노반의 하부지반에 적용된 jet grouting에 의한 지반보강 효과로 인해 신설 노반의 발생변위는 기존노반에 비해 최소 33.7%에서 최대 56.7% 감소한 것으로 나타났다. 진동대 시험결과와 Flac 프로그램의 Finn 모델을 적용한 유효응력해석으로 검증하였으며, 진동대 시험값과 유사한 경향을 나타내었다.

주요어 : 진동대 시험, 액상화, 유효응력해석, 유기질토, Finn 모델

1. 서론

우리나라 지진 특성은 천발지진으로 지구 조력에 의한 판 경계부가 아닌 판 내부의 축적된 탄성변형에너지에 의한 지각변형이 주된 원인으로 알려져 있다. 판 내부지역에서 지진발생이 많은 중국내륙지역의 지진활동과 같은 개념으로 볼 수 있다. 따라서 우리나라는 지진 발생 원인을 설명하는 판구조론 측면에서 판 경계에 위치하고 판의 지각운동으로부터 직접 영향을 받는 일본과는 달리 지진활동이 활발하지 않은 편이다.

그러나 최근 지진 관측 자료에 의하면 한반도에서 지진 발생 회수가 급증하고 있음을 알 수 있다. 2016년 경주 지진

과 2017년 포항지진으로 인한 피해가 관측됨에 따라 우리나라에서도 지진에 대한 관심이 높아졌다.

특히, 2017년 포항에서 발생한 규모 5.4의 지진으로 인해 도로나 공원 등에서 간극수가 배출되는 액상화 현상이 관측되었다. 이러한 액상화 현상은 지진발생으로 인한 과잉간극수압이 지반의 유효응력을 초과하게 되면 유체와 같은 거동을 보인다. 측방유동과 침하현상에 따라 기반 시설에 심각한 피해를 초래하게 된다.

이러한 액상화 현상은 포화된 모래지반에서 발생하며 지반의 퇴적력을 고려하면 일반적으로 모래지반 하부는 풍화토 등 단단한 지반위에 존재하는 경우가 대부분이다. 강릉지역은 겨울철에 기온이 높고 연평균 강우량이 많아서

1) Managing Director, Seoyoung Engineering Co., LTD

2) President, Yujin INC

† Lecturer, Department of Fire Safety, Sanji University (Corresponding Author : idonghyuk@hanmail.net)

유기질토 생성에 적합한 조건을 가지고 있다. 유기질토가 널리 분포하며 퇴적이력 고려 시 유기질토 상부와 하부에 모래층이 존재하는 경우가 다수이다.

따라서 본 연구는 강릉지역에 분포하는 유기질토 상부에 퇴적된 포화된 모래지반 상부에 조성된 철도노반에 대하여 상사율을 고려한 진동대 시험을 실시하였다. 지진발생 시 모래층에서 발생하는 과잉간극수압을 측정하고 동적변형특성을 측정하였다. 유효응력해석 결과 값과 비교하여 강릉지역 퇴적 모래의 동적거동 특성을 분석·검토하였다.

2. 연구 대상지반 특성

본 연구 대상지반인 강릉지역은 태백산맥의 지맥으로 이루어진 서쪽과 남쪽의 고지대와 동해와 접하는 해안 저지대로 거의 모든 하천들이 서쪽 산지에서 발원하여 동해로 유입된다. 연구대상 지반은 모래-유기질토-점토-모래의 순서로 층적된 지반으로 공학적 특성은 다음과 같다.

2.1 유기질토

유기질토는 주로 미분해 된 섬유질로 구성되어 있어 팽창성이 크나 반대로 탈수 시에는 수축성이 큰 특성을 가지고 있어 수치해석에 의한 변형해석이 어려운 지반이다.

연구대상 지반인 유기질토의 층후는 1.2~8.6m로 분포한다. 평균 함수비 315%, 평균 단위중량 12.9kN/m³, 평균 N값 1/30로 고함수비의 초연약 지반조건으로 OL, OH로 분류되며 평균 전단파속도는 180.2m/s로 조사되었다.

2.2 모래

모래층 층후는 1.0~13.0m로 분포하며 평균 N값 9/30의 느슨한 상태의 상대밀도를 보이고 통일분류는 SP, SM으로 분류된다. 하향식 탄성파탐사 결과 전단파속도는 123~272m/s로 조사되었으며 진동반복삼축시험 결과 Fig. 1과 같이 전단저항응력비(CSR, DA=10%)는 0.211~0.277로 산정되었다.

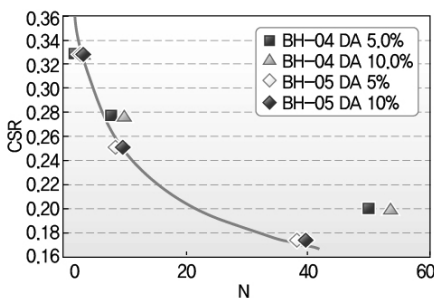


Fig. 1. The result of repeated-load triaxial test on sand

3. 진동대 실험

3.1 실험목적

본 실험은 진동대 실험결과의 정량적인 분석보다는 지진으로 인한 지반의 거동경향에 대한 분석을 수행하였다. 진동대 실험을 위하여 제작된 모형틀을 진동대 상에 거치하여 표면에 가속도계 및 변위계 등의 계측기를 부착한 후 인공지진파, 경주 지진파, Borah 지진파, Nahanni 지진파, Tabas 지진파를 모형틀에 가진하였다.

실험 시 측정된 가속도계, 변위계, 간극수압계 결과를 분석하여 안정성 평가 및 동적해석 결과와 상호 비교하는 자료로 활용하였다.

3.2 이론적 배경

3.2.1 모형시험에서의 정상상태 개념

모형지반은 원형지반의 응력상태와 다른 응력상태를 갖고 있기 때문에 원형지반의 거동을 모사하기에 어려움이 있다. 이 단점을 극복하기 위하여 한계상태 토질역학의 정상상태 개념이 사용된다. 정상상태 개념이란 유효구속압이 서로 다른 두 흙에 대해 상태변수가 같으면 같은 거동을 보인다는 개념으로 Fig. 2에서 알 수 있듯이 상태변수 Ψ 는 흙의 초기 간극비에서 유효구속압에 해당하는 정상상태선상에 있는 간극비를 뺀 값으로 Eq. (1)과 같이 정의된다.

$$\Psi = e - e_{ss} \quad (1)$$

여기서, Ψ : 상태변수, e : 초기간극비,

e_{ss} : 정상상태선 위의 간극비

Verdugo(1992)는 낮은 유효 구속압 하에서 매우 느슨한 모래의 거동이 높은 유효 구속압 하에서 조밀한 모래의 거동과 유사한 것을 증명하였다. 이러한 개념을 적용하여 Scott(1989)과 Gibson & Scott(1995)은 1g 진동대 모형시험을 수행하여 현장지반의 거동을 모사하였다.

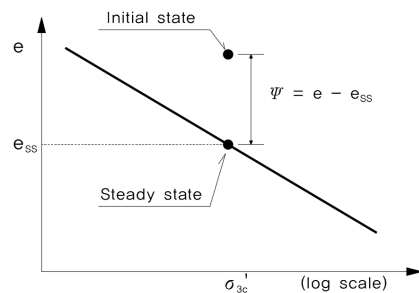


Fig. 2. Steady state and state variable

3.2.2 상사법칙

본 연구에서는 실제의 지반에 대한 축소모형을 제작하여 동적거동을 분석하므로 축소모형과 원형사이의 크기관계(상사법칙)를 합리적으로 정리하는 것이 필요하다.

모형과 원형사이의 관계에 대한 연구는 Iai(1989)가 지반-구조물-유체시스템을 지배하는 기본방정식(유체와 흡입자 사이의 평형방정식, 질량평형식 그리고 구성방정식 등)으로부터 이 시스템에 대한 상사법칙을 연구하였다. 이러한 상사법칙에 대한 연구에 의해 지반-구조물-유체 상호작용 연구에 있어서 진동대 모형실험이 많은 주목을 받게 되었다.

본 연구에서는 Iai & Sugano(1999)가 제안한 상사법칙을 적용한 진동대 실험을 실시하여 지반-구조물-유체 상호작용을 파악하였다. 지반(건조한 흙)에 대한 기본 방정식을 정리하면 다음과 같다.

$$\text{평형 방정식} : L^T \sigma + \rho g = \rho \ddot{u} \quad (2)$$

$$\text{변위와 변형률 관계} : d\epsilon = L du \quad (3)$$

$$\text{구성방정식} : d\sigma = D d\epsilon \quad (4)$$

여기서, $\sigma = (\sigma_{11} \sigma_{22} \sigma_{33} \tau_{12} \tau_{23} \tau_{31})$: 응력

$\epsilon = (\epsilon_{11} \epsilon_{22} \epsilon_{33} \gamma_{12} \gamma_{23} \gamma_{31})$: 변형률

$u = (u_1 u_2 u_3)$: 변위

D : 접선 계수

g : 중력가속도

ρ : 질량

$$L = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x_2} & 0 & \frac{\partial}{\partial x_3} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x_2} & 0 & \frac{\partial}{\partial x_1} & \frac{\partial}{\partial x_3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x_3} & 0 & \frac{\partial}{\partial x_2} & \frac{\partial}{\partial x_1} \end{bmatrix} : \text{미분연산자}$$

위 기본방정식으로부터 유도한 지반-구조물-유체 시스템의 원형과 모형과의 크기관계는 Table 1과 같다. 상사법칙을 실제 진동대 모형실험에 적용할 때에는 Type I, II 또는 III을 사용한다.

지반의 변형이 진동하는 동안에는 계속 증가하다가 진동이 멈춘 순간 변형이 멈추는 변형형태를 cyclic mobility type 이라고 하고 진동이 멈춘 후에 계속해서 변형이 발생하는 변형형태를 strain softening type 이라고 한다. 지반의 거동이 cyclic mobility type인 경우 지반-구조물 시스템의 거동을 파악하기 위해서는 변형률에 대한 크기관계(λ_ϵ)를 고려하는 것이 중요하다. 변형률에 대한 크기관계(λ_ϵ)는 모형지반의 전단파 속도를 알고 있을 때 Eq. (5)를 이용한다(Type I). 이 때

Table 1. Similitude law for shaking table model testing

Parameter	Scaling factor proposed by Iai et al. (2005)	TYPE-I	TYPE-II	TYPE-III
		$\lambda_\rho=1$	$\lambda_\epsilon=\lambda 0.5$ $\lambda_\rho=1$	$\lambda_\epsilon=1$ $\lambda_\rho=1$
Length	λ	λ	λ	λ
Density	λ_ρ	1	1	1
Time	$(\lambda\lambda_\epsilon)0.5$	$(\lambda\lambda_\epsilon)0.5$	$\lambda 0.75$	$\lambda 0.5$
Acceleration	1	1	1	1
Velocity	$(\lambda\lambda_\epsilon)0.5$	$(\lambda\lambda_\epsilon)0.5$	$\lambda 0.75$	$\lambda 0.5$
Displacement	$\lambda\lambda_\epsilon$	$\lambda\lambda_\epsilon$	$\lambda 1.5$	λ
Stress	$\lambda\lambda_\rho$	λ	λ	λ
Strain	λ_ϵ	λ_ϵ	$\lambda 0.5$	1
Stiffness	$\lambda\lambda_\rho/\lambda_\epsilon$	λ/λ_ϵ	$\lambda 0.5$	λ
Permeability	$(\lambda\lambda_\epsilon)0.5/\lambda_\rho$	$(\lambda\lambda_\epsilon)0.5$	$\lambda 0.75$	$\lambda 0.5$
Pore pressure	$\lambda\lambda_\rho$	λ	λ	λ
Flexural rigidity	$\lambda 5\lambda_\rho/\lambda_\epsilon$	$\lambda 5/\lambda_\epsilon$	$\lambda 4.5$	$\lambda 5$
Axial rigidity	$\lambda 4\lambda_\rho$	$\lambda 3/\lambda_\epsilon$	$\lambda 2.5$	$\lambda 3$
Moment	$\lambda 3\lambda_\rho$	$\lambda 4$	$\lambda 4$	$\lambda 4$
Shear force	$\lambda 3\lambda_\rho$	$\lambda 3$	$\lambda 3$	$\lambda 3$
Axial force	$\lambda 3\lambda_\rho$	$\lambda 3$	$\lambda 3$	$\lambda 3$

원형과 모형의 거동이 cyclic mobility type이면 원형과 모형의 질량이 서로 같을 필요는 없으며 모형지반의 전단파 속도를 모를 때에는 원형의 질량과 모형의 질량이 거의 비슷하다. 전단탄성계수는 구속압의 제곱근에 비례한다고 가정하여 Eq. (6)을 이용하여 계산한다(Type II).

$$\lambda_\epsilon = \lambda \left[\frac{(V_s)_m}{(V_s)_p} \right]^2 \quad (5)$$

$$\lambda_\epsilon = \lambda^{0.5} \quad (6)$$

진동대 모형실험에서 진동대의 제원 및 제반 실험조건을 고려하여 상사법칙을 고려하여 지반을 원형의 1/50 크기로 모델링한 경우 실험대상 지반의 동적 거동특성상 Cyclic Mobility의 특성을 띄고 모형의 전단파 속도를 판단할 수 없기 때문에 본 연구에서의 상사법칙은 Type II를 사용하였다.

3.3 진동대 실험준비

3.3.1 시험순서

본 연구는 지진 발생 시 철도노반 하부에 존재하는 모래지반의 동적거동 경향에 대한 분석을 주목적으로 한다. 따라서 진동대 시험 순서는 선정된 단면에 대하여 상사율을 고려하여 진동대 모형 토조에 원지반 및 노반을 조성하고 계측기를 부착한다. 지진파를 모형에 가진하고 가속도계와 변위계의 계측결과를 분석하여 안정성 분석 및 동적해석 결과와 상호 비교하는 자료로 사용하였다.

3.3.2 진동대 장비제원

본 연구에서 사용된 진동대 장비의 최대 시험하중은 200kN, 최대가속도는 1.0g의 시험 장치를 이용하였으며, 상세제원은 Table 2와 같다.

Table 2. Specifications of shaking table

Parameter	Item	Specifications
Sample box	Dimension	2,000×600×700 (mm)
	Material	Steel, acrylic
	Weight	3.0 kN
Main frame	Dimension	3,500×800×1,120 (mm)
	Material	Steel frame
	Weight	10.0 kN
Hydraulic cylinder	Maximum test load	200.0 kN
	Stroke	±150 mm (total 300 mm)
	Maximum acceleration	1.0 g
	Frequency	0.1~100 Hz

3.3.3 상사율을 고려한 진동대 시험단면 설정

진동대 시험의 모형단면은 연약지반 상부에 조성된 고속철도 노반을 상사율을 고려하여 1/50의 크기로 Fig. 3과 같이 조성하고 계측기를 설치하였다. 가속도계 3개, 변위계 4개, 간극수압계 2개의 계측기가 사용되었다.

상사법칙에 따른 실제지반과 모형사이의 크기와의 관계에 따른 물리량은 Table 3과 같다.

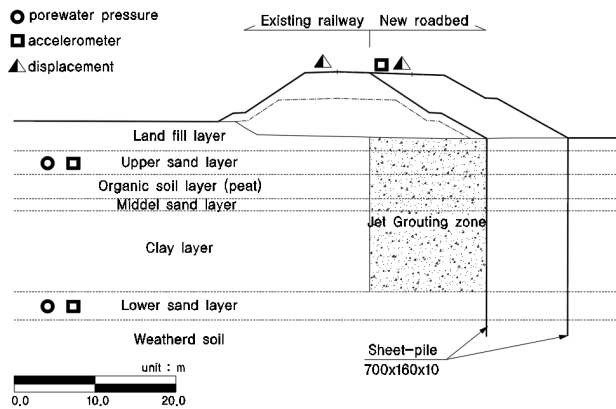


Fig. 3. Model section and measurement

Table 3. Similitude law for this study

Parameter	Scaling factor	Scale (1/50)
Length	λ	50
Time	$\lambda^{0.75}$	18.8
Acceleration	1	1
Displacement	$\lambda^{1.5}$	353.33
Stress/pore pressure	λ	50

3.3.4 모형토조 제작

시험모형은 상사율 1/50로 축소된 모형을 Fig. 4와 같이 제작하였다. 모형단면은 매립층, 퇴적모래, 유기질토, 퇴적모래층, 퇴적 점토층, 퇴적 모래층, 풍화토층 순서로 원지반을 조성하였다. 여기에 신설노반 시공 시 기존노반 압밀침하를 방지하기 위한 고압분사 그라우팅 개량체와 신설노반 성토하중으로 인한 연동침하를 방지하기 위한 시트파일을 설치하였다.

지진하중 발생 시 과잉간극수압 발생으로 인한 영향을 검토하기 위해 상부 유기질토 상부의 모래층 및 하부 퇴적점토층 하부의 모래층에 간극수압계를 설치하였다. 철도노반의 안정성을 파악하기 위해 노반 상부에 변위계와 가속도계를 설치하였다.



(a) Lower sand layer

(b) Clay layer



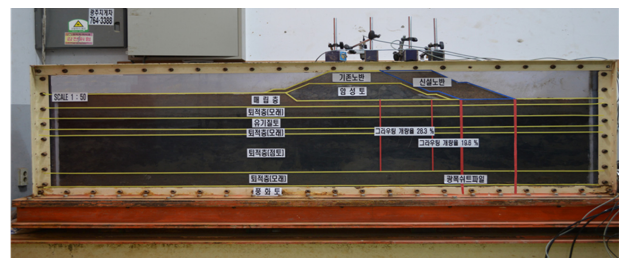
(c) Middle sand layer

(d) Organic soil layer



(e) Upper sand layer

(f) Grouting



(g) Finished model

Fig. 4. Shaking table test model production process

3.3.5 지진파 입력

국내의 내진해석을 위한 설계 지진파는 주로 최대가속도에 대해 보정한 1968년 일본 Hachinohe항에서 계측된 장주기 지진파(M 7.9)와 1978년 일본 Ofunato시에서 계측된 단주기 지진파(M 7.4)를 실지진파로 적용하고 인공지진파를 적용하여 실지진파가 재현하지 못하는 주파수 대역을 보완하였다. 그러나 일본의 실지진기록은 국내의 내진설계 목표 규모 보다 큰 규모의 지표면 자유장에서 측정된 판 경계 지진으로 판내부에 위치한 우리나라 지진특성을 반영하기 어려운 지진기록이라 할 수 있다. 이러한 문제점으로 인해 2017년 내진설계기준 공통적용사항(MOIS, 2017)과 내진설계일반(MOLIT, 2018)이 개정되었다.

본 논문에서 적용한 실지진파는 국내에서 측정된 지진파 외에 우리나라와 같이 판 내부에서 측정된 해외 3개소의 실지진기록을 Table 4와 같이 선정하여 설계응답 스펙트럼과 부합되도록 보정 후 사용하였다. 인공지진파는 본 논문의 대상지역인 강릉지역의 설계지반운동수준(구역계수 0.11g, 내진 1등급 붕괴방지수준 위험도 계수 1.4, 최대가속도 0.154g)의 최대 가속도와 부합되는 인공지진파를 적용하였다.

Table 4. Strong ground motions used in this study

Year	Event / Country	Magnitude	Epicentral dist.
2016	Gyeongju / Korea	5.8	6.0 km
1983	Borah / America	6.88	6.8 km
1985	Nahanni / Canada	6.76	6.5 km
1978	Tabas / Iran	7.35	6.7 km

3.4 진동대 실험결과

3.4.1 가속도 측정결과

진동대 시험 시 가속도계는 상부 퇴적모래와 하부퇴적모래 그리고 노반상부에 설치하였다. 측정결과 상부 및 하부 모래층의 최대 응답가속도는 인공지진파 가진시로 각각 0.239g (Fig. 5), 0.177g로 나타났다. 상부노반은 Borah 지진파 가진시로 0.271g로 측정되었다. 상부 모래층의 최소 응답가속도는 경주지진파 가진시로 Fig. 6과 같이 0.181g로 나타났다.

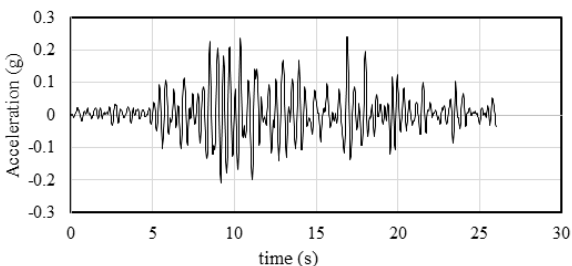


Fig. 5. Acceleration of upper sand layer (artificial seismic waves)

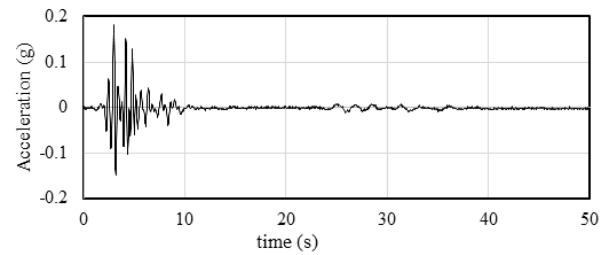


Fig. 6. Acceleration of upper sand layer (Gyeongju seismic waves)

3.4.2 과잉간극수압 측정결과

지진발생 시 해당 모래지반의 액상화 발생의 판단여부는 지진발생 시 유효 구속압에 대한 과잉간극수압의 비($r_u = \text{과잉간극수압/유효응력}$)로 표현할 수 있다. 상부 퇴적모래층의 최대 과잉 간극수압비는 Fig. 7과 같이 Borah 지진파 가진시 0.509로 나타났다. 하부 퇴적모래층은 Fig. 8과 같이 인공지진파 가진시 0.382로 나타났다. 실지진파 및 인공지진파 가진시 발생한 과잉 간극수압비는 '1' 이하로 지진 발생 시 액상화 현상에 대해 안정한 것으로 나타났다.

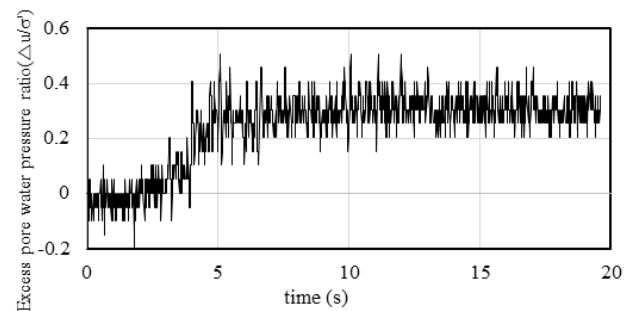


Fig. 7. Excess pore water pressure ratio (Borah seismic wave)

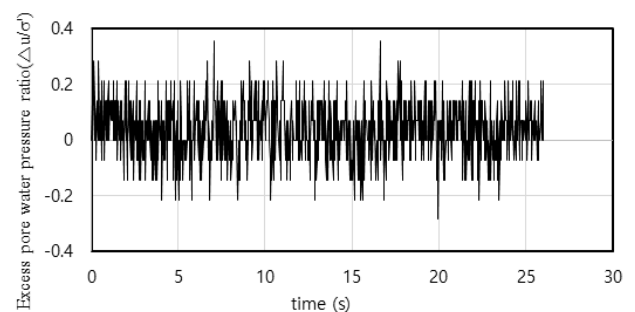


Fig. 8. Excess pore water pressure ratio (artificial seismic waves)

3.4.3 변위계 측정결과

기존노반에 설치한 변위계 측정결과 최대 수평 및 연직변위는 모두 Borah 지진파 적용시로 수평 6.5cm, 연직 3.0cm가 발생하였으며, 시간이력에 따른 변위양상은 Fig. 9와 Fig. 10과 같다.

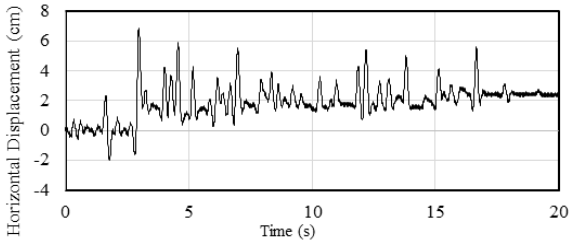


Fig. 9. Horizontal displacement on existing railway (Borah seismic wave)

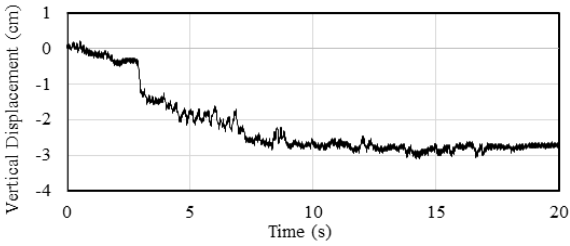


Fig. 10. Vertical displacement on existing railway (Borah seismic wave)

3.4.4 진동대 시험결과 정리

진폭과 주기가 각기 다른 실지진파 4개와 인공지진파를 가진하여 철도노반 하부의 모래층의 응답가속도와 과잉간극수압비의 발생경향과 철도노반 상부의 변위를 측정하였다.

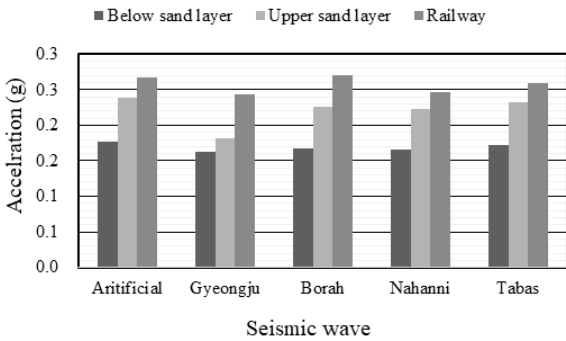


Fig. 11. Maximum acceleration of the sand layers and railway roadbed

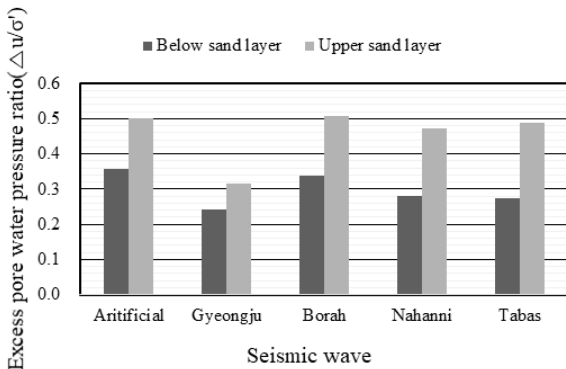


Fig. 12. Maximum excess pore water pressure of the sand layers

유기질토 상부의 모래지반에 대한 응답가속도를 측정된 결과 Fig. 11과 같이 단주기 지진파인 경주 지진파에서 최소값을 나타내었다. 점토 하부의 모래지반은 유사한 응답가속도 값이 측정되었다. 액상화 발생여부를 판단할 수 있는 과잉간극수압비 결과는 Fig. 12와 같으며 증폭이 작은 경주지진파에서 최소값을 나타냈다. 상부 퇴적모래의 과잉간극수압비는 0.317(경주지진파), 0.502(인공지진파), 0.473~0.509(기타 실지진파)로 액상화에 대해 안전한 것으로 측정되었다.

상기 시험 결과값을 분석한 결과, 연구대상 부지인 강릉 지역 충적층 지반은 장주기 진동의 지진파에서는 증폭되기 쉬운 지반 조건임을 알 수 있다.

기존 노반과 신설 노반에 설치한 수평 및 연직 변위계 측정결과를 Fig. 13과 Fig. 14에 나타내었다. 최대 수평변위는 각각 6.61cm(인공지진파)와 4.69cm(Borah파)가 발생하였다. 최대 수직변위는 각각 3.36cm(인공지진파)와 2.01cm(Borah파) 발생하는 것으로 나타났다.

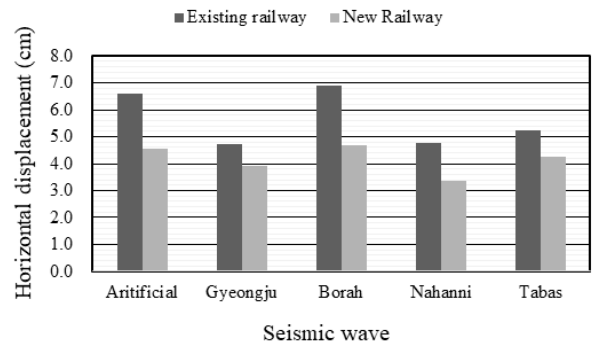


Fig. 13. Horizontal displacement at railway

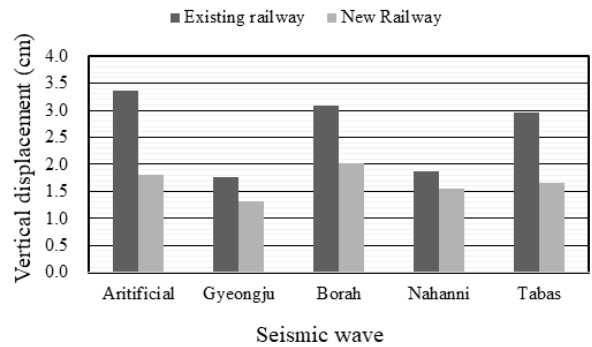


Fig. 14. Vertical displacement at railway

신설노반의 변위값이 기존노반에 비해 최소 33.7%에서 최대 56.7% 감소한 것으로 나타났다. 이는 신설노반 성토시 기존노반의 침하방지를 위하여 신설노반 하부에 단계별로 시공되는 jet grouting에 지반 보강효과에 기인한 것으로 판단된다.

4. 액상화 유효응력 해석

4.1 액상화 해석모델

본 연구에서는 진동대 시험결과값을 검증하기 위하여 2차원 유한차분 해석프로그램인 FLAC 2D 프로그램을 사용하였다. 본 해석프로그램은 지진과 같이 시간이력에 따른 하중이 달라지는 비정상(transient)하중에 대하여 안정된 해석결과를 도출할 수 있다는 장점이 있다.

지반 진동시 간극수압의 증가를 모사하기 위하여 FLAC 프로그램에 내장된 구성모델인 Finn 모델을 적용하였다.

본 모델은 지하수위 아래의 지반을 완전히 포화된 것으로 가정하여 동적하중 재하시 간극수압의 증가현상은 부차적인 것으로 간주한다. 동적하중 재하시 일차적인 결과는 지반의 영구적인 체적변형률이며, 이때 간극이 유체로 채워져 있다면 유체압력은 증가하게 되고 유효응력은 감소하게 된다. 이러한 영구적인 체적변형률과 전단변형률 크기 사이의 관계를 다음과 같이 적용한다(Martin et al., 1975).

$$\Delta\epsilon_{vd} = C_1 (\gamma - C_2 \epsilon_{vd}) + \frac{C_3 \epsilon_{vd}^2}{\gamma + C_4 \epsilon_{vd}} \quad (7)$$

여기서, ϵ_{vd} : 영구적인 체적변형률
 γ : 전단변형률
 C_1, C_2, C_3, C_4 : Finn Model 입력상수

Eq. (7)의 입력상수 C_1, C_2, C_3, C_4 는 실내시험 결과를 이용하여 하나 실무적으로는 Eq. (8)과 같이 Byrne(1991)이 제안한 간편식이 널리 쓰인다.

$$\frac{\Delta\epsilon_{vd}}{\gamma} = C_1 \exp\left(-C_2 \left(\frac{\epsilon_{vd}}{\gamma}\right)\right) \quad (8)$$

여기서, C_1 은 대상 지반의 상대밀도(D_r)에 의해 결정되는 상수이며, 다음 Eq. (9)에 의해 계산할 수 있다(Byrne, 1991).

$$C_1 = 7600 (D_r)^{-2.5} \quad (9)$$

또한, 다수의 실험을 수행한 결과로부터 C_1 및 C_2 의 관계는 Eq. (10)과 같이 도출되었다.

$$C_2 = \frac{0.4}{C_1} \quad (10)$$

4.2 액상화 유효응력 해석

4.2.1 해석흐름

원지반의 응력특성을 반영하기 위하여 원지반의 변위를 초기화하고 흐름계조조건을 적용하여 정상침투(Steady-State Flow)해석을 수행하였다. Phreatic Line 및 간극수압의 분포를 모사한 후 지진하중을 재하하여 간극수압-지진하중 완전 상호 연계해석(Fully Coupled Analysis)을 수행하였으며 해석 Mesh는 Fig. 15와 같다.

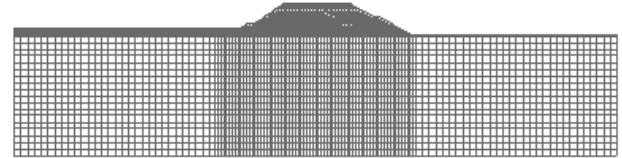


Fig. 15. Finite difference mesh

4.2.2 모래층의 동적 물성치

액상화 대상지반인 모래층의 동적물성치는 하향식 탄성파 탐사, S-PS검층, 다채널 표면파탐사(MASW)를 통한 전단파 속도를 측정하여 Table 5와 같이 동적물성치를 산정하였다.

Table 5. Dynamic properties applied to numerical analysis

Material	G_d (MPa)	E_d (MPa)	K_d (MPa)	vd
Sand	80	240	570	0.43

4.2.3 해석결과

지진하중에 대한 최대 응답가속도는 상부 모래지반 0.21g(인공지진파, Tabas 지진파), 철도노반 상부에서 0.23g(인공지진파)로 나타났다. 인공지진파 적용시 간극수압 분포는 Fig. 16과 같으며 각 지진하중에 대한 시간에 따른 과잉 간극수압비 이력곡선을 Fig. 17에 도시하였다. 상부모래층의 최대 과잉간극수압비는 Nahanni 지진파 적용시 0.23으로

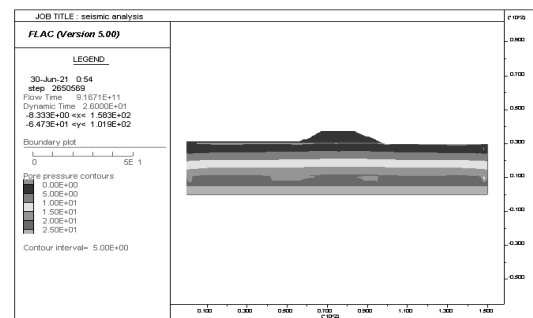


Fig. 16. Pore water pressure (t=26.0s, artificial seismic wave)

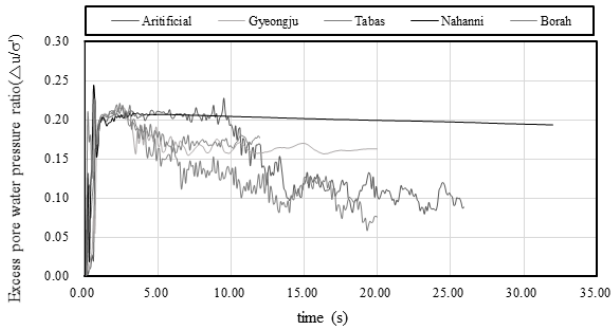


Fig. 17. Excess pore water pressure ratio for each seismic wave

나타났다. Nahanni 지진파는 지진발생 초기에 과잉간극수압비가 급격히 증가하며 그 이후로 일정한 값($r_u=2.0$)에 수렴되며 인공지진파를 포함한 다른 실지진파는 시간이 지날수록 과잉간극수압비가 감소하는 추세를 보였다.

5. 결 론

강릉지역의 충적층 지반을 통과하는 철도노반 하부지반에 대한 동적거동 특성을 진동대 시험과 유효응력해석을 실시하여 분석하였다.

모형토조를 제작하고 간극수압계, 가속도계 및 변위계를 설치한 후 인공지진파 및 4개의 실측 지진파를 가진시켜 계측값을 분석하였다. 유효응력 해석을 실시하여 시험결과값과 비교한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 과잉간극수압비는 단주기파인 경주지진파에서 최소값을 나타냈으며 상부 퇴적모래층의 과잉간극수압비는 0.317~0.509로 액상화에 대해 안전한 것으로 측정되었다.
- (2) 연구대상 부지인 강릉지역 충적층 지반은 변형율이 큰 유기질토의 영향으로 단주기의 지진파형 보다는 장주기 지진동의 지진파에서 증폭되기 쉬운 지반 조건임을 파악하였다.
- (3) 신설 노반의 발생변위는 기존노반에 비해 최소 33.7%에서 최대 56.7% 감소한 것으로 나타났다. 이는 신설노

반 하부 지반에 적용한 jet grouting에 의한 지반보강과 시트파일에 의한 구속효과의 영향인 것으로 판단되며, 상기의 보강대책이 상시 및 지진 시에도 유효한 대책으로 판단된다.

- (4) FLAC 프로그램의 finn 모델을 이용한 유효응력 해석결과 상부 모래층의 최대 과잉간극수압비는 0.23으로 나타났다. Nahanni 지진파는 일정한 값($r_u=2.0$)에 수렴되는 반면 인공지진파를 포함한 다른 실지진파는 시간이 지날수록 과잉간극수압비가 감소하는 추세를 보였다.

References

1. Byrne, P. M. (1991), A Cyclic Shear-Volume Coupling and Pore Pressure Model for Sand, Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri, Paper No. 1.24, pp. 47~55.
2. Gibson, A. D. and Scott, R. F. (1995), Comparison of a 1g and centrifuge liquefaction test : preliminary results, First International conference on Earthquake Geotechnical Engineering, A.A. Balkema, Rotterdam, Vol. 2, pp. 773~778.
3. Iai, S. (1989), Similitude for shaking table tests on oil-structure-fluid model in 1g gravitational field, Soils and foundations, JGS, Vol. 29, No. 1, pp. 105~118.
4. Iai, S. and Sugano, T. (1999), Soil-structure interaction studies through shaking table tests, Proc. of the Second International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Lisbon, Portugal, Vol. 1, pp. 365~370.
5. Iai, S., Tobita, T. and Nakahara, T. (2005), Generalized scaling relations for dynamic centrifuge tests, Geotechnique, 55(5), pp. 355~362.
6. Martin, G. R. (1975), Fundamentals of liquefaction under cyclic loading, J. Geotechnical., Div. ASCE, 101(GT5), pp. 423~438.
7. Ministry of the Interior and Safety (MOIS) (2017), Common Applications of Seismic Design Standards (in Korean).
8. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2018), General Seismic Design KDS 17 10 00: 2018 (in Korean).
9. Scott, R. F. (1989), Centrifuge and modelling technology : a survey, Rev. Franc, Geotechnical., No. 48, July, pp. 15~34.
10. Verdugo, R. L. (1992), Characterization of sandy soil behavior under large deformation, Ph. D. Thesis presented to University of Tokyo, Japan, pp. 419~420.