

국내 설계 기준을 반영한 철도 성토구조물의 동적 거동 분석

Dynamic Response Analysis of Railway Embankments Based on Korean Design Standards

송 현 민^{1†} Song, Hyunmin
김 지 현^{2†} Kim, Ji Hyeon
유 민 택³ Yoo, Mintaek

Abstract

In this study, a finite-element-based numerical model was developed to analyze the dynamic behavior of railway embankment structures under seismic loading. The embankment model was constructed based on the standard slope of high-speed railway embankments specified in Korean design codes, while the underlying soil was modeled under various conditions based on Korean ground classification standards. Dynamic analyses were conducted using OpenSees by varying the bedrock depth and the shear wave velocity of the soil layers. The dynamic behavior of the embankment structure was evaluated primarily based on settlement at the embankment crest. The analysis results indicate that embankment settlement increases with increasing thickness of the underlying soil layer and decreasing shear wave velocity. In addition, the frequency characteristics of the input ground motion were found to have a substantial impact on the dynamic response of the railway embankment.

요 지

본 연구에서는 지진 시 철도 성토구조물의 동적 거동을 분석하기 위해 유한요소 기반의 수치 해석 모델을 구축하였다. 해석 모델 성토부는 국내 설계 기준에 따른 고속철도 성토 비탈면의 표준 경사를 반영하였으며, 하부 토층 지반은 국내 지반 분류 기준을 반영하여 다양한 조건별 해석 모델을 구축하였다. OpenSees를 활용하여 기반암 깊이와 토층 전단파 속도를 달리한 다양한 조건에서 동적 해석을 수행하였으며, 성토 상부에서의 침하량을 도출하여 성토 구조물의 동적 거동을 분석하였다. 그 결과, 하부 토층의 두께가 증가하고 전단파 속도가 감소할수록 침하량이 증가하였으며 지진파의 주파수 특성 또한 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

Keywords : Dynamic analysis, Earthquake, Embankment, OpenSees, Settlement

1 정회원, 가천대학교 토목환경공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Gachon Univ.)

2 비회원, 한국철도기술연구원 선임연구원 (Senior Researcher, Track & Civil Infrastructure Division, Korea Railroad Research Institute)

3 정회원, 가천대학교 토목환경공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil and Environmental Engineering, Gachon Univ., Tel: +82-31-750-5339, mintaekyoo@gachon.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

† 송현민, 김지현은 공동 제1저자로서 본 연구에 동등하게 기여하였다.

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2026년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 국내에서는 2016년 규모 5.8의 경주지진과 2017년 규모 5.4의 포항지진이 연이어 발생하였다. 이로 인해 국내에서도 지진 대비의 중요성이 사회적으로 크게 부각되었으며, 특히 다수의 국민이 이용하는 공공 인프라 시설물에 대한 지진시 구조물의 동적 거동에 관한 다양한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 공공 인프라 시설물 중에서도 철도 인프라는 대규모 인명과 물류 수송을 담당하는 국가 핵심 시설로, 지진 발생 시 사회·경제 전반에 직·간접적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서 철도 인프라의 지진 피해를 최소화하기 위한 사전 대비와 내진성능 확보는 필수적이다.

철도 인프라를 구성하는 다양한 구조물 중 성토구조물은 철도 선로의 고도를 일정하게 유지하거나 주변 지형과의 높이 차이를 극복하기 위해 흙이나 자갈 등을 인공적으로 쌓아 올린 구조물이다. 이는 열차 운행의 안정성을 보장하는 핵심 기반시설이지만, 지진 발생 시 손상되거나 붕괴될 경우 막대한 경제적 손실을 초래할 수 있다. 대부분의 성토구조물은 흙으로 이루어져 있어 외부 동적 하중에 매우 민감하게 반응하며, 이로 인해 다른 구조물에 비해 지진에 대한 취약성이 높다. 따라서 성토구조물의 내진성능 향상을 위한 동적 해석 기반의 연구가 요구되고 있다.

해외에서는 성토구조물의 동적 거동을 분석하기 위한 다양한 수치해석 연구가 수행되어 왔다. Hübner and Mahler (2020)은 2차원 유한요소 해석을 통해 성토 높이에 따른 변위를 도출하여, 성토 높이가 증가할수록 응답 변위가 증가하는 것을 확인하였다. Argyroudou and Kaynia(2015)은 상대적으로 단단한 지반과 연약한 지반 조건에 대해 성토의 높이를 달리하여 2차원 유한요소 기반의 동적 수치해석을 수행하였다. 영구 수직 변위를 측정하였으며 연약한 지반에서의 응답이 크게 발생하고, 성토부의 높이가 증가할수록 응답이 크게 발생하는 것을 확인하였다. Mohammadi et al.(2023)은 PLAXIS를 활용하여 성토 형상, 하부 지반의 물성, 근거리 및 원거리 지진파 특성에 따른 성토의 영구 수직 변위를 도출하여 동적 거동을 평가하였다. Lin et al.(2016)은 FLAC을 활용하여 실제 규모의 성토구조물 해석 모델을 구축하고 동적 수치해석을 수행하였다. 성토부의 18개 위치에 대해 가속도 응답 및 동적 변위를 도출하였으며 성토부의 상부로 갈수록 응답 가속도가 증가하고 내면부일수록 응답 가속도

가 감소하는 것을 확인하였다. Namdar(2021)은 성토 높이와 지진 입력 방향을 변수로 하여 동적 해석을 수행하였으며 성토의 높이가 높을수록, 그리고 다방향의 지진 하중이 작용할수록 성토구조물의 변형률 및 변위 모두 증가하는 것을 확인하였다. 또한 다방향의 지진파를 적용하는 것은 성토구조물의 변위 거동 예측 정확도를 높임을 제시하였다.

국내에서도 성토 지반을 대상으로 지진 시 거동을 평가한 연구가 일부 수행된 바 있다. Choi(2021)는 도로 성토지반을 대상으로 지진 시 안정성 및 액상화 거동을 평가하는 연구를 수행하였으며 성토 지반의 지진 응답 특성을 제시하고 진동대시험을 통해 비교 검증하였다.

이와 같이 성토구조물의 동적 거동을 분석하기 위한 연구가 수행되어 왔으나, 국내 내진설계 기준에서 정의된 지반 분류 조건을 해석 변수로 적용하여 성토구조물의 동적 거동을 비교 분석한 연구는 제한적인 편이다. 특히 국내 지반은 기반암 심도가 30m 이내에 위치하므로, 국외 지반 분류 기준을 그대로 적용하는 데에는 한계가 존재한다.

이에 본 연구에서는 국내 지반 분류 기준을 고려하여 다양한 조건별 해석 모델을 구축하고, OpenSees를 활용하여 동적 해석을 수행하였다. 성토부 상부에서의 침하량을 도출하여 지반 조건별 성토구조물의 거동 특성을 비교 분석하였으며, 대표 입력 지진파를 기준으로 성토 상부의 가속도 응답을 추가적으로 검토하였다.

2. 동적 수치 해석 모델 구축

2.1 OpenSees(Open System for Earthquake Engineering Simulation)

OpenSees(Open System for Earthquake Engineering Simulation)는 지진공학 및 구조·지반공학 수치해석 전용 프로그램으로, 비선형 동적 해석과 지반-구조물 상호작용 분석에 특화되어 있다. 비선형 거동을 모사할 수 있는 다양한 재료 모델을 비롯해, 복잡한 경계 조건, 단일 지점 및 다중 지점에 대한 지진파 입력 방식, 다양한 감쇠 모델 등을 포함한 고도화된 해석 기능을 제공한다. 이러한 특성은 지진 시 구조물과 지반의 비선형 응답을 정밀하게 모사해야 하는 해석에 특히 적합하다.

본 연구에서는 성토구조물의 동적 거동을 분석하기 위해 OpenSees 프로그램을 활용하였다. 성토구조물은 복

잡한 형상을 갖기 때문에, 이를 해석하기 위해서는 비선형성 재료 모델, 유연한 경계 조건 설정, 그리고 실제 지진파의 시간 이력 입력이 가능해야 한다. OpenSees는 이러한 요구사항을 충족할 뿐 아니라, Tcl 스크립트 기반의 유연한 모델링 환경을 통해 해석 과정과 모델 구성 절차를 온전히 사용자가 정의할 수 있다는 점에서 본 연구에 적합하다.

2.2 입력 지진파

동적 해석에는 총 3개의 실제 시간이력 지진파를 사용하였다. 선정된 지진파는 1995년 고베 지진(Kobe), 1999년 코케일리 지진(Kocaeli), 1994년 노스리지 지진(Northridge)이며 본 연구에서는 각각 NGA-WEST2 지진파 데이터베이스에서 추출한 RSN1108_KOBE_KBU000_EW, RSN1165_KOCAELI_IZT_NS_x1.5, RSN989_NORTHR_CHL070_NS_x1.5의 계측 기록을 사용하였다. 각 지진파의 지속시간과 최대 지반가속도(PGA)는 Table 1에 제시하였으며, Fig. 1에는 각 지진파의 가속도 시간이력을 나타내었다. 또한, Fig. 2는 각 지진파에 대해 수행한 FFT(Fast Fourier Transform) 분석 결과를 제시하였다. 분석 결과, 지진파의 지배 주파수는 Kobe 지진파의 경우 0.844Hz, Kocaeli 지진파의 경우 1.933Hz, Northridge 지진파의 경우 1.626Hz로 도출되었다. 이와 같이 본 연구에서는 서로 다른 주파수를 갖는 실제측 지진파를 통해 지반 분류 조건 별 성토구조물의 동적 거동을 평가하

Table 1. Input motions

Earthquake	During time (s)	Peak Ground Acceleration (g)
Kobe	22.5	0.276
Kocaeli	30	0.248
Northridge	22.75	0.275

였다. 또한 지진파의 고유 주파수 특성을 보존하기 위해 실제측 시간이력 지진파를 사용하였다.

추가적으로 입력 지진파의 주파수 특성을 대략적으로 비교하기 위해, 본 연구에서 사용한 실제측 지진파들의 응답스펙트럼과 KDS 17 10 00 기준 S₁ 지반에 대한 설계 응답스펙트럼을 Fig. 3에 함께 제시하였다. 본 응답스펙트럼은 입력 지진파의 주기 대역별 특성을 정성적으로 확인하기 위한 자료로 활용하였다.

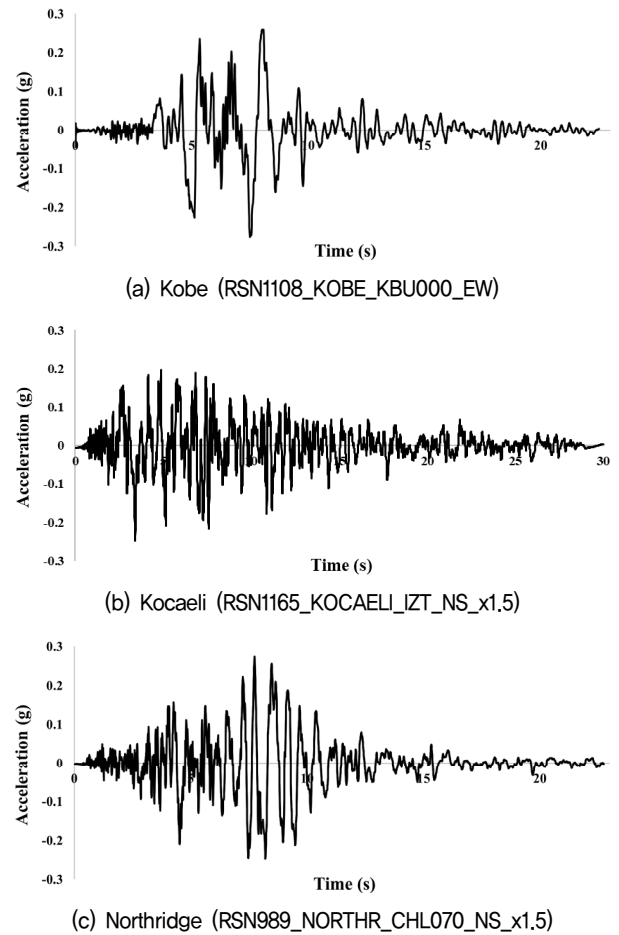


Fig. 1. Input acceleration time histories

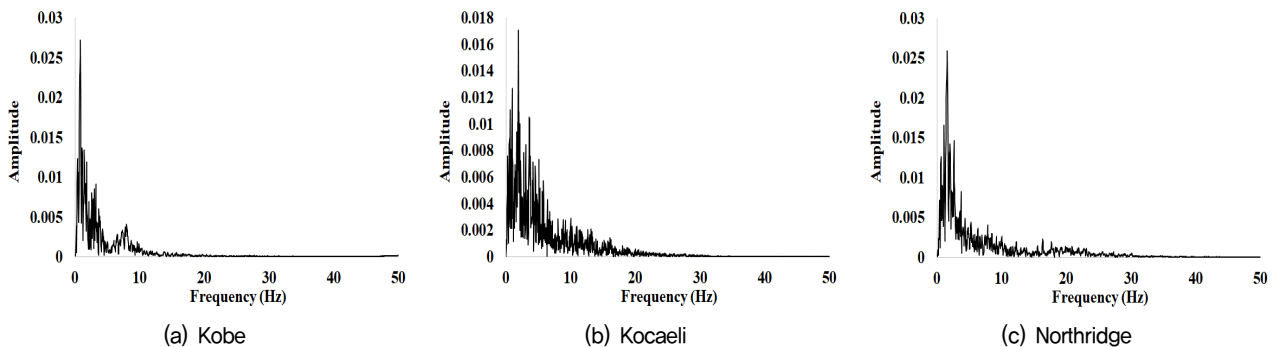


Fig. 2. FFT analysis results of the input ground motions

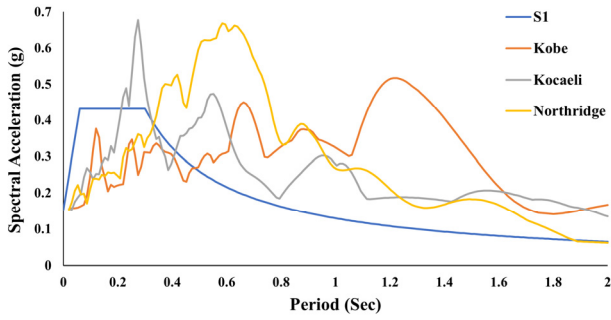


Fig. 3. Response spectra of selected recorded ground motions and KDS design response spectrum for reference ground condition (S1)

2.3 철도 성토구조물의 동적 수치해석 모델링

본 연구에서는 OpenSees를 활용하여 성토구조물의 동적 거동을 해석하기 위해 평면 변형률(plane strain) 조건의 2차원 유한요소 모델을 구축하였다. 유한요소해석

은 대상을 유한 개수의 요소로 분할한 후 각 요소의 거동을 수치적으로 계산하고, 이를 종합하여 전체 구조물의 거동을 분석하는 기법이다. 평면 변형률 조건은 구조물이 길이 방향으로 연속적이고 변형이 없다고 가정하는 기법으로, 길이 방향 변형률을 0으로 설정하여 3차원 구조물을 2차원 단면으로 단순화한다. 이를 통해 계산 효율성을 높이는 동시에, 단면 내 지반 및 성토의 거동을 효과적으로 반영할 수 있다.

해석 단면 Case는 국내 내진설계기준 내진설계 일반(KDS 17 10 00)에 따른 지반의 분류 조건($S_1 \sim S_5$)에 근거하여 총 5개로 구성하였다. 국내 지반의 분류 조건은 Table 2와 같으며, 각 조건별 기반암 깊이와 토층 전단파 속도의 차이를 반영하여 해석 단면을 정의하였다.

정의한 해석 단면 Case는 Table 3에 제시하였으며, 해석 단면의 형상은 아래 Fig. 4와 같다. 높이는 총 40m까지 모델링하였으며, 각 해석 Case의 기반암 심도에 따라

Table 2. Ground classification criteria (KDS 17 10 00)

Soil Type	Description of Soil	Classification Criteria	
		Depth to Bedrock, H (m)	Shear Wave Velocity, $V_{s,soil}$ (m/s)
S_1	Rock	$H < 1$	—
S_2	Shallow, stiff soil	$1 \leq H \leq 20$	≥ 260
S_3	Shallow, soft soil		≤ 260
S_4	Deep, stiff soil	$H > 20$	≥ 180
S_5	Deep, soft soil		≤ 180

Table 3. Analysis case

Case No.	Embankment height (m)	Depth to Bedrock, H (m)	Shear Wave Velocity, $V_{s,soil}$ (m/s)	Soil Type
1	8	1	330	S_1
2	8	13	330	S_2
3	8	13	200	S_3
4	8	28	280	S_4
5	8	28	160	S_5

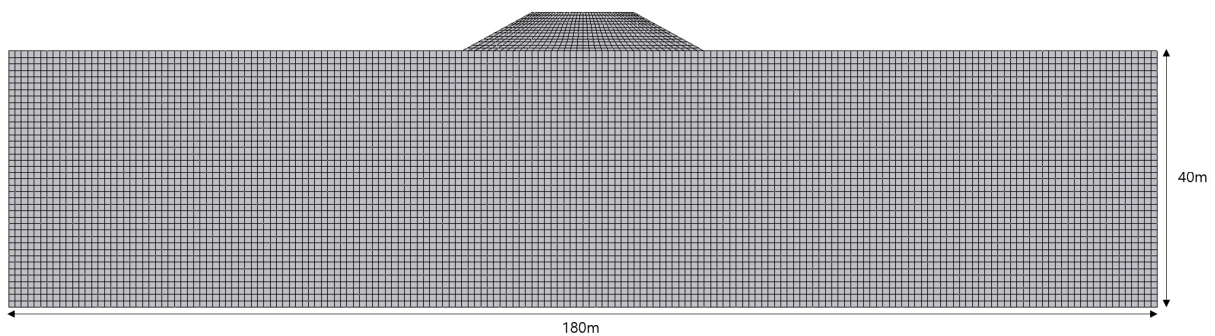


Fig. 4. Model cross-section of the embankment structure

상부는 토층, 하부는 암반층으로 구분하여 구성하였다. 또한 모든 해석 단면에서 성토부의 높이는 8m, 상부 길이는 16m로 고정하였으며 기울기는 국내 지반설계 기준 쌓기 깔기(KDS 11 70 05)에 따른 쌓기비탈면(철도)의 표준경사에 근거하여 고속철도 기준인 1:1.8로 설정하였다. 성토부의 전단파 속도는 모든 해석 Case에 대해 290m/s로 설정하였다.

모든 해석 단면은 성토부와 하부 지반 모두 4절점 평면변형을 조건의 quad 요소로 구성하였다. 요소의 크기(h)는 해석에서 재현하고자 하는 목표 최대 주파수 $f_{\max}$ 를 기준으로 결정하였다. 전단파 속도(V_s)에 해당하는 파장은 아래 식 (1)과 같이 산정하였으며, Kuhlemeyer와 Lysmer(1973)의 권고에 따라 $h \leq \lambda/8$ 을 만족시키도록 구성하였다.

$$\lambda = V_s / f_{\max} \quad (1)$$

보수적으로 최소 V_s 층인 Case5를 기준으로 검토하였으며, 이 기준을 충족하기 위해 모든 해석 단면 케이스에서 요소 크기를 1.0×1.0m로 구성하였다.

해석 단면의 폭은 민감도 테스트(Sensitivity test)를 수행하여 결정하였다. 가장 보수적인 조건을 대표하기 위해, 하부 토층의 전단파 속도가 가장 낮은 Case 5를 대상으로 민감도 테스트를 수행하였다. 이는 연약 지반 특성상 응답이 최대가 되어, 측면 경계에서의 반사 영향이 가장 크게 나타날 가능성이 높기 때문이다. 측면 경계 조건의 영향을 최소화하기 위해 하부 폭을 60m, 100m, 140m, 180m, 220m로 단계적으로 증가시키며 동적 해석을 수행하였고, 각 폭 조건에 대해 성토 상부의 수직 침하량을 도출하였다. 입력 지진파로는 Kobe 지진파를 사용하였으며, 이에 따른 해석 결과는 Table 4에 제시하였다.

민감도 테스트 결과 하부 지반의 폭이 140m 이상이 될 경우 침하량이 일정한 값으로 수렴하는 것을 확인되

었으나, 보수적인 설계를 위해 하부 지반의 폭을 180m로 설정하여 모델링하였다.

민감도 테스트를 통해 하부 지반의 폭을 결정한 후, 모든 해석 Case에 대해 동일한 경계 조건을 적용하였다. 최하단 경계 노드들의 경우 수평 방향으로 지진파를 입력하기 때문에 수평 방향 자유조건, 수직 방향 고정 조건을 부여하였으며, 좌·우측 경계는 동일한 높이의 노드들을 equalDOF(equal Degree of Freedom) 조건으로 연결하여 무한 지반 조건을 구현하였다. 그 외의 노드들은 수평 및 수직 방향 모두 자유 조건을 부여하여 동적 하중 작용 시 변위 및 응답이 충분히 발생할 수 있도록 설정하였다.

또한, 지반 재료의 감쇠 특성을 고려하기 위해 Rayleigh 감쇠를 적용하였다. 하부 토층 및 성토부의 감쇠비는 5%, 하부 암반층의 감쇠비는 0.5%를 목표로 설정하였다. 하부 토층, 성토부 및 암반층을 각각 별도의 영역으로 정의하고 각 영역의 전단파 속도(V_s)와 높이로부터 산정한 1차 고유 주파수($f_1 = V_s/4H$)와 이에 5배에 해당하는 주파수($f_2 = 5f_1$)를 기준으로 Rayleigh 계수를 도출하여 적용하였다.

2.4 토층 및 암반 물성치

본 연구에서는 정의한 해석 단면 Case들에 대해 사질 토 지반의 비선형 동적 거동을 모사하기 위하여 Pressure DependMultiYield(PDMY)(Yang et al., 2003) 모델을 사용하였다. 주요 입력 변수로는 밀도, 전단탄성계수, 체적탄성계수, 내부마찰각 등이 포함되며 계산이 필요한 변수들의 경우 각 해석 조건에 따른 토층 전단파 속도와 포아송비를 이용하여 계산하였다. 그 외의 변수들은 지반 조건에 따라 분류하여 입력하였으며, Case1과 Case2의 하부지반은 Dense Sand, 성토부와 Case4의 하부지반은 Medium-dense Sand, Case3의 하부지반은 Medium Sand, Case5의 하부지반은 Loose Sand로 설정하고 OpenSees 메뉴얼에 따라 적용하였다. 전체적인 입력 변수는 Table 5에 제시하였다.

하부 암반층의 경우 모든 해석 Case에서 동일하게 적용하였으며, ElasticIsotropic(Mazzoni et al., 2007) 모델을 사용하였다. 입력 변수로는 탄성계수, 포아송비, 밀도가 포함되며 전단파 속도(V_s) 800m/s에 따라 계산하였다. 계산된 입력 변수는 Table 6에 제시하였다.

Table 4. Sensitivity test result

Model width (m)	Settlement (m)
60m	0.1324
100m	0.1533
140m	0.1591
180m	0.1591
220m	0.1594

Table 5. Physical properties of soil and its consolidation characteristics

Parameters	$V_s = 160m/s$	$V_s = 200m/s$	$V_s = 280m/s$	$V_s = 290m/s$	$V_s = 330m/s$
Density (ton/m ³)	1.7	1.75	1.9	1.91	1.95
Poisson's ratio	0.38	0.35	0.3	0.29	0.27
ShearModulus (kPa)	43,520	70,000	148,960	160,631	212,355
BulkModulus (kPa)	166,826.7	210,000	322,746.7	328,911.1	390,856.3
FrictionAng (°)	30	31	33	33	35
PeakShearStrain	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
PressDependCoe	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
PTAng (°)	29	27	27	27	27
Contrac	0.21	0.07	0.05	0.05	0.03
Dilat1	0	0.4	0.6	0.6	0.8
Dilat2	0	2	3	3	5

Table 6. Rock material properties

Parameters	Value
Elastic modulus (kPa)	3,600,000
Poisson's ratio	0.2
Density (ton/m ³)	2.34

Table 7. Analysis results of settlement under all input ground motions

(Unit : m)			
Case No.	Kobe	Kocaeli	Northridge
1	0.005	0.004	0.004
2	0.018	0.016	0.017
3	0.035	0.034	0.045
4	0.038	0.035	0.047
5	0.160	0.093	0.109

3. 해석 결과

3.1 동적 침하량 결과

철도 성토구조물에 대한 지진 위험도 분석에서 동적 침하량은 가장 중요한 평가 지표로 활용된다. 이는 지진 발생 후 나타나는 잔류 침하가 궤도의 안정성을 직접적으로 저해하는 대표적인 손상 특성이다. 침하량은 지진에 의해 성토구조물에서 발생하는 비선형 거동과 강성 저하가 시간에 따라 누적되는 결과로서, 구조물의 성능 저하를 직접적으로 반영한다.

모델링한 철도 성토구조물의 침하량을 도출하기 위해 중력해석 및 동적해석을 수행하였다. 먼저, 초기 응력을 분포시키기 위해 각 요소에 수직 방향 단위 중량을 적용하여 탄성 중력해석을 수행하였다. 이후, 탄성 단계에서 형성된 초기 응력을 비선형 재료 거동으로 이행시키기 위한 소성 중력해석을 수행하였다. 마지막으로, 중력해석을 통해 형성한 초기 응력을 기반으로 실제 시간이력 지진파를 입력하여 동적해석을 수행하였다.

이러한 해석 과정을 통해 성토 상부 중앙 지점에서의 동적 침하량을 도출하였다. 해석에서의 수직 변위(침하)는 방향을 음의 방향으로 정의하였으며, 중력해석 단계 직후 침하량과 동적해석 종료 시점의 침하량의 차이를 계산하여 동적 침하량을 계산하였다. 대표적으로 Kobe 지진파

에 대한 해석결과 그래프는 Fig. 5에 제시하였으며, 제시된 침하량 그래프는 중력해석에 의한 침하를 제외한 동적 하중에 의한 침하 거동을 의미한다. 또한, 모든 입력 지진파에 따른 침하량 도출 결과는 Table 7에 제시하였다.

3.2 대표 가속도 응답 결과

동적 해석에서 사용한 입력 지진파 중 Kobe 지진파를 대표 입력 지진파로 선정하여, 성토 상부의 가속도 응답을 분석하였다. Fig. 6은 Kobe 지진파 입력 시 Case 5에 대한 성토 상부의 가속도 시간이력 응답을 나타낸다. 성토 상부에서는 입력 지진파에 비해 가속도 응답이 증폭되어 나타나는 경향을 확인할 수 있으며, Case 5의 경우 성토 상부 최대가속도는 입력 지진파 대비 약 61% 증가한 것으로 나타났다. 또한 Table 8은 Kobe 지진파 입력 시 모든 해석 Case에 대한 성토 상부에서의 최대가속도를 비교한 결과를 나타낸다. 하부 토층의 전단파 속도가 감소하고 기반암의 심도가 증가할수록 성토 상부에서의 최대가속도가 증가하는 경향이 나타났으며, 가장 연약하고 기반암의 깊이가 깊은 Case 5에서의 최대가속도가 발생하였다. 이러한 결과는 연약하고 기반암의 깊이가 깊

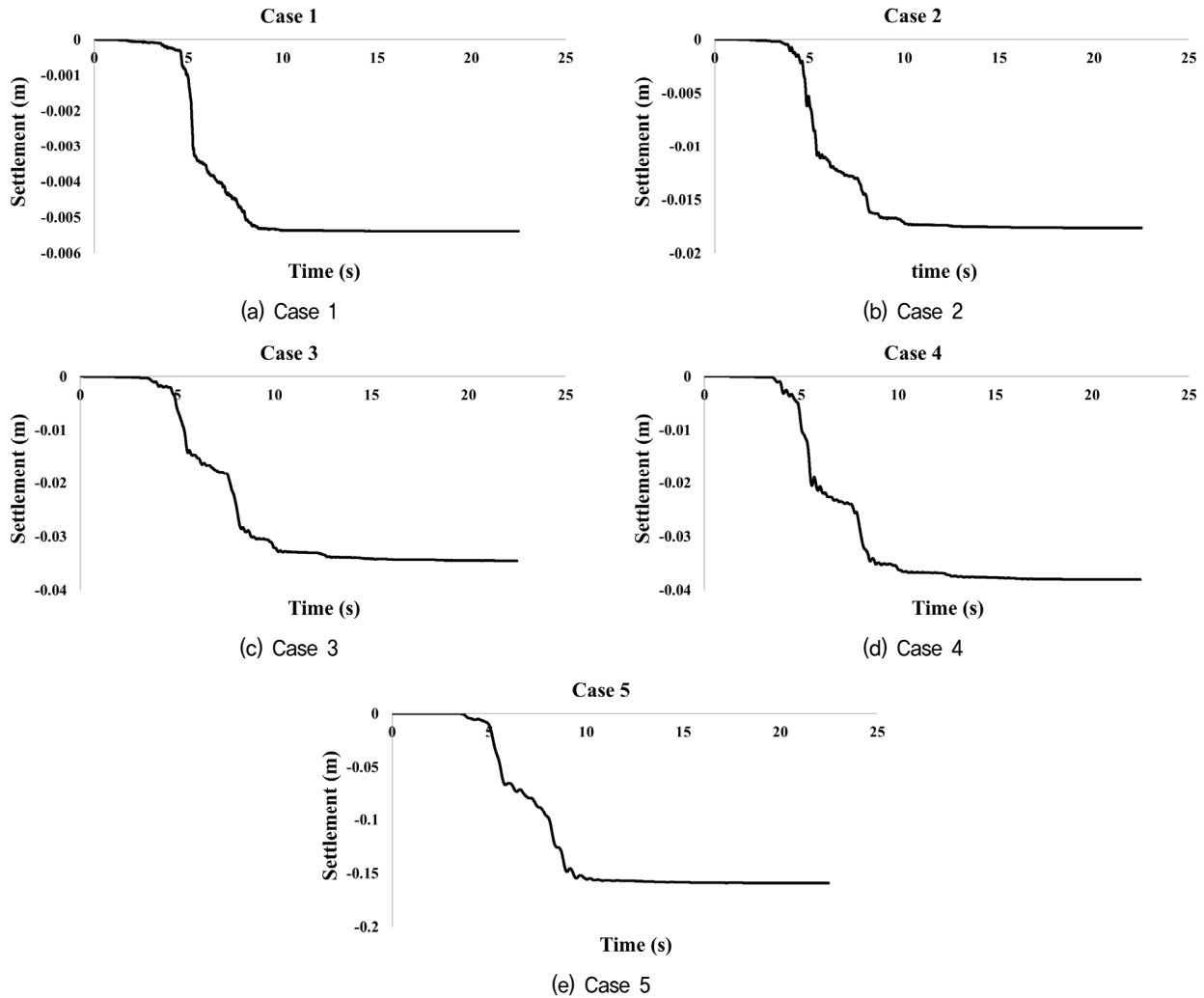


Fig. 5. Analysis results under the Kobe ground motion

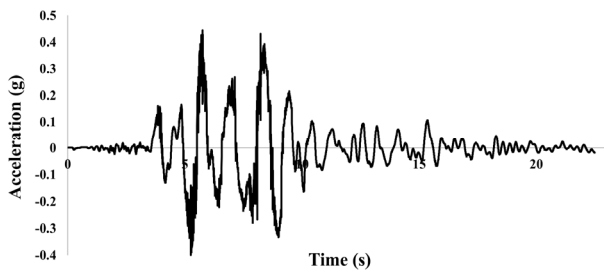


Fig. 6. Representative acceleration response of Case 5 under the Kobe ground motion

Table 8. Peak ground acceleration at the embankment crest under the Kobe ground motion

Case No.	Peak acceleration (g)
1	0.344
2	0.378
3	0.398
4	0.440
5	0.445

은 지반 조건에서 성토구조물의 가속도 응답이 크게 나타남을 보여준다.

3.3 동적 침하량 결과 고찰

본 연구에서는 국내 내진설계 기준에 따라 정의된 지반 분류 조건을 각각 적용한 해석 단면을 대상으로 성토구조물의 침하 응답 변화를 정량적으로 평가하였다. 그 결과, S_1 지반에 해당하는 Case 1에서의 침하가 가장 작게 발생하였으며, S_2 지반에 해당하는 Case 2부터 S_5 에 해당하는 Case 5로 갈수록 침하 응답이 지속적으로 증가하는 경향이 나타났다.

동일한 토층의 두께 조건에서 연약도에 따른 침하량 비교 결과, 토층이 연약해질수록 침하량이 유의미하게 증가하는 경향을 보였다. Case 2 대비 Case 3에서의 침하량은 입력 지진파에 따라 약 94%에서 165%까지 증가

하였으며, Case 4 대비 Case 5에서는 침하량이 약 132%에서 321%까지 대폭 증가하였다. 또한 토층 두께 증가의 영향을 분석한 결과, Case 2 대비 Case 4의 침하량은 약 111%에서 177% 증가하였고, Case 3 대비 Case 5에서의 침하량은 약 142%에서 357%의 큰 증가율을 보이며 토층의 두께 증가가 침하량을 증가시키는 주요 요인임을 확인하였다. 이러한 침하 증가 현상은 토층이 연약하여 전단파 속도가 낮거나 토층의 두께가 증가할수록 토층의 고유주파수가 감소하여 입력 지진파와의 저주파 성분과 공진 발생 가능성이 높아지기 때문이다.

또한, Case 3과 Case 4의 침하량 비교 결과 모든 입력 지진파에 대해 유사하게 발생하였다. Case 4는 Case 3에 비해 전단파 속도가 상대적으로 크지만, 기반암 심도가 깊어져 토층 두께가 증가한 조건에 해당한다. 해석 결과, 전단파 속도 증가에 따른 침하 감소 효과에도 불구하고 토층 두께 증가의 영향이 함께 작용하여 Case 3과 Case 4에서의 침하 응답이 유사하게 나타난 것으로 판단된다. 이는 성토구조물의 동적 거동이 전단파 속도와 토층 두께의 복합 작용에 의해 지배됨을 의미한다. 이러한 결과는 전단파 속도 변화뿐만 아니라 하부 토층 조건이 함께 고려될 때 성토구조물의 침하 응답을 보다 현실적으로 해석할 수 있음을 보여준다.

지진파의 특성 또한 성토구조물의 동적 응답에 영향을 미치는 것으로 나타났다. Case 1번부터 Case 4까지의 모든 입력 지진파에 대해 유사한 침하량이 발생하였지만, 전단파 속도가 가장 낮고 기반암의 깊이가 가장 깊은 Case 5에서는 입력 지진파의 특성에 따라 침하량의 차이가 뚜렷하게 발생하였다. Kobe 지진파, Northridge 지진파, Kocaeli 지진파 순으로 침하량이 크게 발생하였으며, 각각 0.160m, 0.109m, 0.093m의 침하가 발생하였다. 입력 지진파들의 최대지반가속도(PGA) 값은 유사하였으나, Kobe 지진파의 경우 입력 지진파들 중 지배 주파수가 0.844Hz로 가장 낮은 장주기 성분의 지진파이기 때문에 성토구조물에 가장 큰 침하가 발생한 것으로 판단된다. 하부 토층의 두께와 전단파 속도, 지진파의 특성은 성토구조물의 동적 거동에 영향을 미치는 주요 요인이며 특히 토층의 두께가 증가하거나 전단파 속도가 낮아지고, 장주기 지진파가 입력될 경우 성토구조물의 침하량이 크게 증가할 수 있음을 확인하였다. 이러한 침하량의 증가는 지진 발생 이후 성토구조물의 성능 저하뿐만 아니라 유지관리 측면에서도 중요한 의미를 갖는다.

유지관리 측면에서, 본 연구에서 도출된 동적 침하량

을 선로유지관리지침(국가철도공단, 2023)에서 제시하는 고저틀립 관리 단계 및 임계값과 정성적으로 비교하였다. 선로유지관리지침에 따르면 고속철도 궤도의 고저틀립은 주의 기준(10mm 이상), 보수 기준(18mm 이상), 속도제한 기준(30mm 이상)으로 관리된다. 비교 결과, Case 1은 주의 기준 미만 수준으로 나타났으며, Case 2는 주의 기준에 해당하는 침하가 발생하였다. 반면 Case 3 및 Case 4에서는 속도제한 기준을 초과할 수 있는 수준의 침하가 발생하였으며, 가장 연약한 지반 조건에 해당하는 Case 5는 속도제한 기준을 크게 초과할 가능성이 확인되었다. 이러한 결과는 지반 조건에 따라, 특히 하부 토층이 연약하고 두께가 두꺼운 지반 조건에서 지진 발생 이후 성토구조물의 침하가 궤도 유지관리 및 운영에 중요한 영향을 미칠 수 있음을 시사한다.

결론적으로 본 연구에서는 지진 발생 시 철도 성토구조물에서 발생하는 고저틀립 등의 피해를 침하량을 통해 평가하였다. 동적 침하량은 지진 발생 이후 구조물에 잔류하는 침하가 궤도와 주행 안전성을 직접적으로 저해하는 대표적 손상이므로, 철도 성토구조물의 지진 위험도 분석에서 핵심적인 평가 지표로 사용한다. 기존 선행연구에서도 성토구조물의 지진 시 피해는 침하량으로 평가하였다(Argyroudis and Kaynia, 2015). 이에 본 연구에서 국내 내진설계 기준의 지반 분류에 따른 성토 침하량을 평가하였으며, 향후 성토구조물 내진 안전성 및 지진 위험도를 평가하기 위한 동적 해석 모델을 구축하였다.

본 연구에서 적용한 해석 모델은 단일 지반 구성, 제한적 성토 높이, 세 종류의 지진파만을 사용하였기에 한계가 존재한다. 이에 따라, 향후 추가적인 연구에서는 다층 지반 구성, 성토 높이 범위 확장 및 다양한 지진파를 추가적으로 활용하여 보다 현실적인 성토구조물에 활용 가능한 지진 취약도 함수를 도출하고 적용 가능한 지진 피해 평가 모델을 구축할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 지진 시 철도 성토구조물의 동적 거동을 평가하기 위해 평면변형률 조건의 2차원 유한요소 해석 모델을 구축하였다. 성토부는 국내 설계 기준에 따른 고속철도 성토 비탈면의 표준 경사를 반영하였으며, 하부 지반은 기반암 깊이와 토층 전단파 속도를 달리하여 국내 지반분류 조건을 반영한 총 5가지 해석 Case를 구성하였다. 실제 시간이력 지진파를 사용하여 동적해석을

수행하였으며, 성토부 상부 중앙 지점의 침하량을 도출하였다. 성토구조물의 침하량은 중력해석에 의한 침하량과 동적해석 종료 시점 침하량의 차이를 통해 동적 침하량을 계산하여 동적 거동을 평가하였다.

해석 결과, 국내 지반 분류 조건 중 하부 토층의 두께, 전단파 속도, 입력 지진파의 주파수 특성이 성토구조물의 동적 거동에 지배적인 영향을 미치는 것을 확인하였다. 동일한 전단파 속도 조건에서 하부 토층 두께가 증가할수록 성토구조물의 침하량이 증가하였으며, 동일한 하부 토층 두께 조건에서 전단파 속도가 감소할수록 성토구조물의 침하량이 증가하였다. 이는 하부 토층의 두께가 증가하거나 전단파 속도가 감소할 경우 토층의 고유주파수가 감소하고, 입력 지진파의 저주파 성분과 공진이 발생하기 때문에 성토구조물의 동적 응답이 증가하기 때문으로 판단된다. 또한 입력 지진파의 특성 또한 성토구조물의 동적 거동에 중요한 영향을 미쳤으며, 특히 지배 주파수가 낮은 장주기 지진파의 경우 단주기 성분이 우세한 지진파보다 큰 침하가 발생하였다. 추가적으로, 대표 입력 지진파를 기준으로 한 가속도 응답 분석 결과 연약하고 기반암의 깊이가 깊은 지반 조건에서 성토 상부의 가속도 응답이 크게 나타나는 경향을 확인하였다.

따라서 철도 성토구조물의 설계 및 내진 성능 평가시에는 국내 내진 설계 기준에 따른 지반 분류 조건을 반영한 동적 해석이 필요하다. 성토구조물의 동적 거동이 하부 토층의 두께와 전단파 속도에 크게 영향을 받는 것으로 확인되었으며, 국내 지반 분류 조건이 국외 기준과 상이하기 때문이다. 이러한 차이를 고려하지 않을 경우 실제 국내 지반에 대한 동적 응답이 왜곡될 가능성이 높다. 또한 해석 수행 시 입력 지진파의 주파수 특성도 성토구조물의 동적 거동에 영향을 미치므로, 다양한 주파수영역에 대한 해석도 필요하다.

본 연구는 이러한 국내 지반 분류 조건과 실제 시간이력 지진파를 반영한 해석을 통해 철도 성토구조물의 동적 거동을 종합적으로 평가하였다는 점에서 의의가 있다. 그러나 본 연구의 해석 과정에서는 하부 토층 및 성토부를 단일 지반으로 구성하였으나, 실제 지반의 경우 여러 층으로 구성된 다층 지반 조건을 가지고 있다. 향후 연구에서는 지반의 특성이 상이한 다층 지반 조건을 고려하여 동적 응답을 정밀하게 분석할 필요가 있으며, 성토부의 높이가 동적 거동에 미치는 영향 또한 분석할 필요가 있다. 이를 통해 현실적인 철도 성토구조물의 동적 거동 평가가 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 기본사업(지능형 정보 기반 이상기후 복합재난 대응 기술 개발, PK26414A0)의 연구비 지원으로 수행 되었습니다.

참고문헌 (References)

- Argyroudis, S. and Kaynia, A.M. (2015), "Analytical Seismic Fragility Functions for Highway and Railway Embankments and Cuts", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.44, No.11, pp.1863-1879, <https://doi.org/10.1002/eqe.2563>.
- Choi, J.S. (2021), "A Case Study on the Seismic Stability Evaluation of Reclaimed Land for Road", *Journal of the Korean Asphalt Institute*, Vol.11, No.1, pp.100-110, <https://doi.org/10.22702/jkai.2021.11.1.10>.
- Hübner, B. and Mahler, A. (2020), "Analysis of Seismic Fragility Functions of Highway Embankments", *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, Vol.64, No.4, pp.1162-1169, <https://doi.org/10.3311/PPci.16483>.
- Korea National Railway Authority (2023), Track Maintenance Guidelines, Korea National Railway Authority, Daejeon, Korea (in Korean).
- Kuhlemeyer, R.L. and Lysmer, J. (1973), "Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol.99, No.5, pp.421-427, <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001885>.
- Lin, Y.L., Shi, F., Yang, X., Yang, G.L., and Li, L.M. (2016), "Numerical Analysis on Seismic behavior of Railway Earth Embankment: A Case Study", *Journal of Central South University*, Vol.23, No.4, pp.906-918, <https://doi.org/10.1007/s11771-016-3138-5>.
- Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M.H., and Fenves, G.L. (2007), OpenSees Command Language Manual, Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, University of California, Berkeley.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2016), Embankment and cut (KDS 11 70 05), Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Sejong, Korea (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2018), General seismic design (KDS 17 10 00), Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Sejong, Korea (in Korean).
- Mohammadi, M., Mosleh, A., Razzaghi, M.S., Alves Costa, P., and Calçada, R. (2023), "Probabilistic Seismic Safety Assessment of Railway Embankments", *Applied Sciences*, Vol.13, No.1, Article ID 598, <https://doi.org/10.3390/app13010598>.
- Namdar, A. (2021), "The Boundary Condition Simulation Quality for Embankment Seismic Response", *Engineering Failure Analysis*, Vol.126, Article ID 105491, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105491>.
- Yang, Z., Elgamal, A., and Parra, E. (2003), "A Computational Model for Cyclic Mobility and Associated Shear Deformation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.129, No.12, pp.1119-1127, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2003\)129:12\(1119\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:12(1119)).

Received : November 27th, 2025

Revised : January 6th, 2026

Accepted : January 6th, 2026