

## 철도 시설물 지진 피해 확산 모델 개발 및 적용 연구

### Research on Development and Application of Earthquake Risk Assessment Model for Railway Structures

김지현 · 김현기 · 유민택\* · 하익수

Ji Hyeon Kim · Hyunki Kim · Mintaek Yoo · Ik-Soo Ha

**Abstract** In this study, a risk assessment model for railway infrastructures was proposed and applied to the railway comprehensive test track in Korea to estimate the damage that can actually act on railway facilities when an earthquake scenario occurs. For the development of earthquake risk assessment models, previous studies on earthquake fragility curves for bridges, embankments, and tunnels were analyzed and, based on that research, earthquake fragility curves for individual damage states suitable for railway facilities were presented. In addition, a process of deriving expected damage rate and expected recovery time was organized using the concepts of replacement cost and replacement duration. As a result of applying the developed earthquake risk assessment model to the railway comprehensive test track, it was found that a high damage rate of 10% or more occurred in the embankment section and an expected recovery time of 9 days was required. It is expected that, using the presented approach, seismic reinforcement and earthquake response measures can be prepared for railway infrastructures.

**Keywords** : Railway infrastructure, Earthquake, Risk Assessment, Expected damage ratio, Expected required recovery day

**초 록** 본 연구에서는 철도 시설물에 대한 지진 피해 확산 예측 모형을 제안하고, 국내 철도종합시험선로에 적용하여 지진 시나리오가 발생하였을 때 실제로 철도 시설에 발생할 수 있는 피해를 추정하였다. 지진 피해 확산 예측 모형 개발을 위해 교량, 성토, 터널에 대한 지진 취약도 함수 선행연구를 분석하고, 이를 바탕으로 철도 시설에 적합한 손상 상태 별 지진 취약도 함수를 제시하였다. 또한, 대체 비용 및 복구시간 개념을 활용하여 예상 피해를 및 예상 복구시간 도출 프로세스를 정리하였다. 개발된 지진 피해 확산 모형을 철도종합시험선로에 적용한 결과, 성토구간에서 10% 이상의 높은 피해율이 발생하고 9일 수준의 예상 복구시간이 요구되는 것으로 평가되었으며 일련의 결과를 바탕으로 철도 시스템에 대한 효과적인 내진 보강 및 지진 대응 대책을 마련할 수 있을 것으로 기대된다.

**주요어** : 철도 시설물, 지진, 피해평가, 예상피해율, 예상복구시간

## 1. 서 론

국내에서는 2016년 및 2017년 연속적으로 큰 규모의 지진(2016 규모 5.8 경주지진, 2017 규모 5.4 포항지진)이 발생했다. 이로 인해 지진 대비의 필요성이 사회적으로 주목받고 있으며, 지진 위험도 평가 및 지진 시 구조물의 동적 거동과 관련된 다양한 연구가 수행되었다. Ji 등[1]은 포항 지진으로 발생할 수 있는 액상화 잠재 위험도 평가를 수행하였으며, Yun과 Han [2]은 말뚝으로 지지된 부두의 지진시 동적거동을 분석하였다. 또한, Nguyen 등[3]은 안벽 구조물에 대한 지진시 동적 거동 분석에 관한 연구를 수치해석을 통해 수행하였다. 지반 및 구조물의 동적거동에 대한 다양한 연구가 수행되었지만, 다수의 국민이 이용하는 공공 인프라 시설물에 대한 지진 위험도 평가 연구는 아직도 부족한 실정이다. 특히 철도 시설물은 지진으로 인한 파손이 전체 교통 시스템에 영향을 주고 막대한 사회, 경제적 피해를 유발할 수 있으며, 이에 국내 철도 시스템의 시설물 들에 대한 지진 위험도 및 지진 피해 확산 모형 연구가 필요하다. 국내 철도 시설물은 주로 토공, 터널, 교량 등으로 구성되어 있으며, 주요 구조물들에 대한 지진 피해 평가 모델은 지진성능 평가, 내진설계, 지진 시 피해 절감을 위한 노력 등의 필요 인자를 이

용한 정확한 평가가 필요하다[4-5].

지진취약도는 최대지반가속도(Peak ground acceleration, PGA) 등과 같은 지진의 정량적인 크기에 대한 주어진 한계상태의 초과확률을 의미한다[6]. 지진 취약도 함수는 확률론적 지진 재해 분석 기법과 결합하여 대상 구조물의 확률적인 위험도 평가, 즉 지진 재해로 발생할 수 있는 다양한 손상 상태(Damage state)의 발생초과확률을 계산하는데 사용된다.

국내 철도 시설물은 산지가 많은 국내 지형의 특성상 교량과 터널 구간이 상대적으로 많은 특징이 있다. 교량의 경우 주로 PSC 박스 거더교로 시공되며, 터널의 경우 암반을 통과하는 경우 굴착식 터널, 도심지 역사의 경우 개착식 터널로 시공된다. 토공 구간의 경우 열차의 선형 및 고저 차이의 최소화를 위해 성토구간으로 주로 시공되며, 성토의 높이도 도로에 비해 높은 편이다.

이에 본 연구에서는 교량, 성토, 개착식 터널에 대한 지진 피해 예측 모델에 대한 선행 연구자료를 조사하였다. 철도교량의 지진 취약도 함수에 대해 Jin and Song [7] 등 총 3개의 문헌을 조사 및 분석하였으며, 성토 구간의 경우 Argyroudis and Kaynia [2]의 문헌을 분석하였다. 철도 터널의 경우 Yang and Kwak [8]의 논문을 분석하고, 일련의 분석 결과를 바탕으로 국내에 적합한 지진 피해 예측 모형을 제안하였다. 또한, 제안한 모델을 철도종합시험선로 적용하여 붕괴방지 수준의 설계 지진이 발생하였을 때 실제로 철도 시설에 발생할 수 있는 피해를 추정하였다.

## 2. 철도 시설물 지진 피해 확산 모델 개발

### 2.1 지진 취약도 곡선 개발 절차

시설물의 지진 피해 평가 모델 개발을 위해서는 지진 취약도 함수의 개발이 필요하다. 지진취약도는 지진 크기에 따른 구조물의 초과손상확률을 나타내며, 따라서 지진취약도 함수 개발을 위해서는 지진 크기에 따른 손상 상태별 초과 손상확률의 계산이 선행되어야 한다. 초과 손상확률을 구하는 방법에는 경험적 방법과 수치적 방법이 존재하며, 시설물별 지진 시 손상 상태의 초과손상확률 도출과 관련하여 다양한 연구자들이 선행연구를 진행한 바가 있다. 경험적 방법의 경우 실제 피해사례를 바탕으로 지진 시 피해상태의 초과확률을 도출하는 방법이며, 수치적 방법의 경우 다양한 해석 결과를 바탕으로 해당 결과를 도출하는 방법이다. 경험적 방법의 경우 실제 피해사례를 바탕으로 한 점에서 신뢰도가 높으나, 제한적인 조건 및 사례에 대해 통계적인 분석을 수행함에 따라 편중된 결과(Biased results)가 도출될 수 있는 위험이 있다. 수치적 방법의 경우 해석 모델의 신뢰성 확보가 선행되어야 하는 한계가 있으나, 검증된 해석 모델을 사용하면 데이터의 분포를 다양한 매개변수 별로 유사하게 배분하여 통계적으로 보다 유의미한 결론을 도출할 수 있는 장점이 있다. 이에 본 연구에서는 선행 연구자들의 수치적 연구 결과를 바탕으로 선행가중조합을 수행하여 철도 시설물에 적합한 지진 취약도 함수를 제시하였다.

### 2.2 철도 교량 구간의 지진 재해 피해 예측 모델 수립

#### 2.2.1 기존 지진 취약도 함수 분석

본 연구에서는 국내 철도 교량에 적합한 지진 취약도 함수를 제시하기 위해 기개발된 교량에 대한 세 개의 지진 취약도 함수 모델을 분석하였다. 먼저 Jin and Song [7]은 총 연장 200m인 4경간 PSC 박스 거더교를 대상으로 총 32개의 지진 가속도 기록을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 해당 수치해석 결과를 바탕으로 PSC 박스 거더교의 근거리 지진 발생에 대한 지진 취약도 함수를 Table 1과 같이 제안하였다.

Table 1. Fragility curve for PSC box girder bridge.

Damage state	Median (g)	Standard deviation ( $\beta$ )
Slight	0.246	0.690
Moderate	0.363	
Extensive	0.490	
Complete	0.853	

National Disaster Prevention Research Institute [9]는 철도 교량 지진 취약도함수의 국산화 연구를 수행하였으며, Table 2와 같이 국내 철도 교량의 지진취약도 함수를 제안하였다.

**Table 2.** Fragility curve for railway bridge.

Damage state	Median (g)	Standard deviation ( $\beta$ )
Slight	0.320	0.450
Moderate	0.620	0.550
Extensive	0.790	0.600

Mohseni [10]는 철도 교량에 대해 교량의 연장 및 교각 높이를 변화시켜가며 동적 수치해석을 수행하여 지진 취약도를 계산하였으며, 최종적으로 직선교량에 대한 지진 취약도 함수를 Table 3와 같이 제안하였다.

**Table 3.** Fragility curve for railway straight bridge, obtained by numerical analysis.

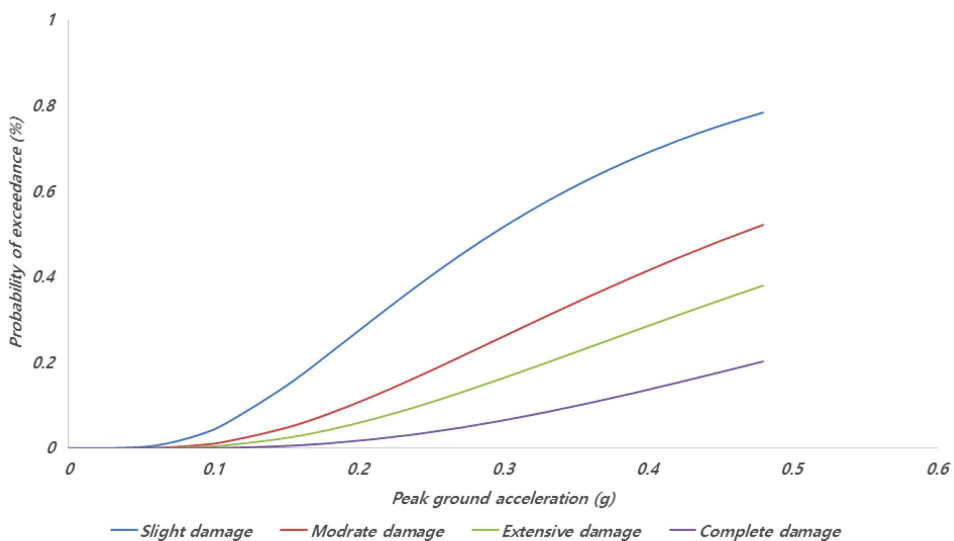
Damage state	Median (g)	Standard deviation ( $\beta$ )
Slight	0.312	0.756
Moderate	0.410	0.789
Extensive	0.508	0.805

### 2.2.2 철도 교량 지진 취약도 함수 제안

본 연구에서는 국내 철도 교량의 지진 취약도 함수 도출을 위해 기존에 도출된 세 가지 모델을 활용하였다. Jin and Song [7]의 연구의 경우 국내 철도 교량 중 많은 비중을 차지하는 PSC 박스 거더교를 적용한 국내 연구 결과로서 활용하였으며, National Disaster Prevention Research Institute [9]의 연구의 경우 국내에서 수행된 지진 취약도 함수의 국산화 연구 결과로서 적용하였다. Mohseni [10]의 연구는 다양한 교량의 연장 및 교각 높이에 대한 매개변수 연구를 수행한 결과로서 활용하였다. 최종적으로 적용하기 위한 지진 취약도 함수 도출을 위해서 선형 가중조합법을 적용하였다. 선형가중조합은 각 모델 별 중요성

**Table 4.** Fragility curve for railway bridge.

Damage state	Median (g)	Standard deviation ( $\beta$ )
Slight	0.293	0.632
Moderate	0.464	0.677
Extensive	0.596	0.699
Complete	0.853	0.691



**Fig. 1.** Fragility curve for railway bridge.

에 따라 가중치를 할당하여 합산하는 것을 의미한다. 선형 가중조합법에는 역분산 가중치, 최적 가중치 그리고 동일 가중치가 존재한다. 역분산 가중법은 일반적으로 각 모델에 대한 분산정보가 존재할 경우 사용하며, 최적 가중법은 다중 모델 간의 분산 정도와 상관관계가 존재할 경우 사용하는 것으로 조합된 모델의 분산을 최소화 할 수 있다. 하지만 이런 모델 간의 상관관계와 분산 정보를 사용한 방법은 데이터가 존재하지 않을 경우 사용하는데 한계가 있다. 각 모델이 서로 독립적이라면 상관관계 및 분산정보에 상관없이 등가 가중치를 할당하여 조합하여도 모델의 정확성이 높아진다[11]. 해당 연구에서 취합된 모델은 표준편차 및 모델간의 상관성이 존재하지 않으며, 이에 각 모델이 독립적으로 개발되고 모두 오차를 최소화하는 방향으로 개발되었다고 가정하여 동등한 가중치를 부여하였다. 최종적으로 지진 피해 확산 모형 적용을 위해 도출한 취약도 함수는 Table 4 및 Fig. 1과 같다.

### 2.2.3 철도 교량 예상 피해율 및 복구시간 산출

시설물에 발생할 수 있는 지진으로 인한 예상 피해율(Expected damage ratio) 및 예상 복구시간(Expected required recovery time)은 각 손상 상태의 발생확률 및 손상 상태 발생 시의 대체 비용(Replacement cost) 및 복구시간(Recovery time)에 대한 기댓값으로 산출할 수 있다. 시설물 별 대체 비용은 해당 시설물의 기능을 기존 상태로 복구하는 데 필요한 비용의 비율을 뜻하며, 전체 건설 비용 혹은 구조물이 가지고 있는 잔존가치에 대한 비율로 나타낼 수 있다. 복구 시간의 경우, 대체 비용을 투자할 경우 시설물이 가용가능한 상태로 복구되기까지 필요한 평균 시간을 의미한다. 대체 비용 및 복구시간은 FEMA [12]에서 제안된 값이 널리 활용되고 있으며 본 연구에서도 FEMA에서 제안한 값을 채택한다. 철도 교량에 대한 대체 비용 및 시간은 Table 5와 같다.

Table 5. Replacement cost and recovery time for railway bridge.

Damage state	Replacement cost (%)	Recovery time (day)
Slight	0.05	0.6
Moderate	0.08	2.5
Extensive	0.25	75.0
Complete	1.00	230.0

## 2.3 철도 성토 구간의 지진 재해 피해 예측 모형 수립

### 2.3.1 철도 성토 구간 지진 취약도 함수

철도 시설의 경우 최대 한계 구배가 35% 수준으로 고저차에 대한 기준이 엄격한 시설물이다. 이에, 상대적으로 성토구간이 높게 건설되는 경우가 많으며, 이에 성토구간에 대한 추가적인 지진 피해 확산 모형 수립이 필요하다. 이를 위해서 성토 구간에 대한 지진 취약도 함수 모델을 분석하였다. Argyroudou and Kaynia [5]는 성토 노반의 높이 및 지반 조건에 따른 지진 취약도 함수를 제안하였으며, 본 연구에서는 상대적으로 취약한 성토 높이 6m에 대한 지진 취약도 함수를 적용하여 지진 피해 확

Table 6. Fragility curve for railway embankment.

(a) soft ground		
Damage state	Median (g)	Standard deviation ( $\beta$ )
Slight	0.120	0.800
Moderate	0.200	0.800
Extensive	0.340	0.800

(b) Stiff ground		
Damage state	Median (g)	Standard deviation ( $\beta$ )
Slight	0.300	0.700
Moderate	0.500	0.700
Extensive	0.840	0.700

산 모형을 개발하였다. 성토구간의 지진 취약도 함수의 특징은 완전한 손상(Complete damage)에 대한 함수가 없다는 점인데, 성토 구간의 건설 특징상 해당 구간이 심각한 손상(Extensive damage)을 경험하여도 교량 구조물처럼 붕괴에 이르지 않기 때문이다. 본 연구에서 적용한 연약지반(Soft ground) 및 단단한지반(Stiff ground)의 성토 구간의 지진 취약도 함수는 Table 6 및 Fig. 2와 같다.

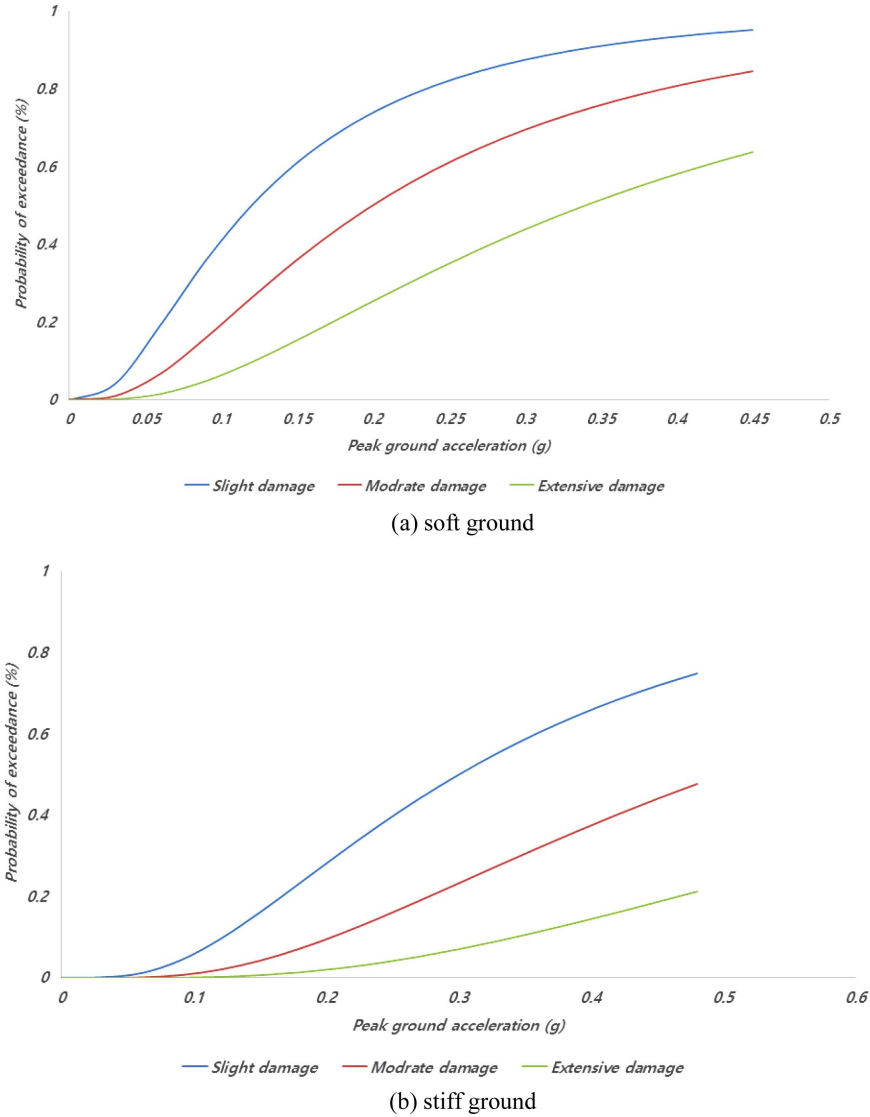


Fig. 2. Fragility curve for railway embankment.

2.3.2 철도 성토 구간 예상 피해율 및 복구시간 산출

철도 성토 구간의 대체 비용 및 복구시간은 철도 교량과 동일하게 FEMA [12]에서 제안된 값을 활용하였으며, 이는 Table 7과 같다.

Table 7. Replacement cost and recovery time for railway embankment.

Damage state	Replacement cost (%)	Recovery time (day)
Slight	0.05	0.9
Moderate	0.20	3.3
Extensive	0.70	40.0

## 2.4 철도 터널의 지진 재해 피해 예측 모형 수립

### 2.4.1 철도 터널 구간 지진 취약도 함수

산간 비중이 높은 국내에서 터널은 철도 교통을 위해 널리 이용되고 있으며, 현재 철도 터널의 경우 약 800여개의 개소가 운용되고 있다[13]. 이중 개착식 터널은 지반 상부면 토층에 설치되어 지진동의 크기가 비개착식 터널보다 크고 지반이 상대적으로 연약하여 피해가 발생할 확률이 높다[14]. 이에 본 연구에서는 개착식 터널 구조물에 대한 지진 취약도 함수를 분석하고, 지진 피해 확산 모형에 적용할 수 지진 취약도 함수를 도출하였다. Yang and Kwak [8]은 본 연구에서 교량 지진 취약도 함수를 도출한 것과 유사한 방법으로 4개의 모델에 대한 선행연구를 수행하고, 이에 대한 선형 가중 조합을 통해 Table 8과 같이 지진 취약도 함수를 도출하였다. 본 연구에서는 철도 시설물 지진 피해 확산 모형 개발을 위해 해당 연구 결과를 적용하였으며, 해당 지진 취약도 함수는 Table 8 및 Fig. 3과 같다.

Table 8. Fragility curve for cut-and-cover tunnel.

Damage state	Median (g)	Standard deviation ( $\beta$ )
Slight	0.538	0.533
Moderate	0.793	
Extensive	1.075	

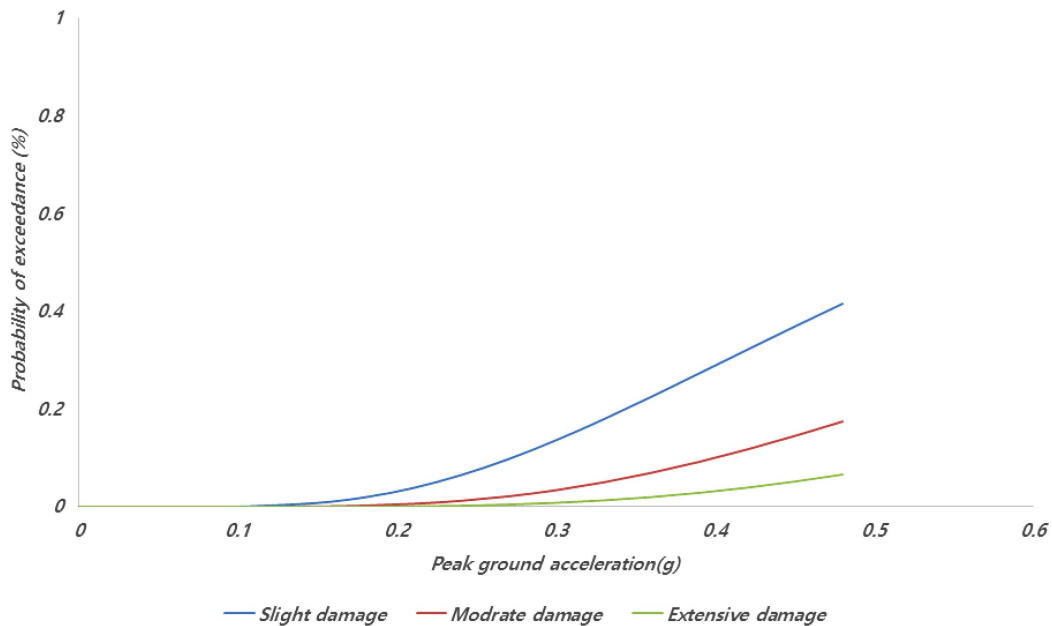


Fig. 3. Fragility curve for cut-and-cover tunnel.

### 2.4.2 철도 터널 구간 예상 피해율 및 복구시간 산출

철도 터널 구간의 대체 비용 및 복구시간은 철도 교량과 동일하게 FEMA [8]에서 제안된 값을 활용하였으며, 이는 Table 9과 같다.

Table 9. Replacement cost and recovery time for cut-and-cover tunnel.

Damage state	Replacement cost (%)	Recovery time (day)
Slight	0.10	0.9
Moderate	0.30	4.0
Extensive	0.70	93.0

### 2.5 철도 시설물 지진 피해 확산 모형

본 연구에서 제안하는 철도 시설물의 지진 피해 확산 모형은 다음과 같다. 먼저 각 철도 시설물이 위치한 곳의 최대 지반 가속도 값을 산출한다. 이 때 진앙지로부터의 거리에 따른 감쇠 및 지반 분류에 따른 증폭을 적용하여 실제 지표면에서 발생하는 최대 가속도 값을 계산한다. 계산된 최대 지반 가속도를 취약도 함수에 적용하여 각 손상 상태(Damage state)의 발생 확률을 산출한다. 각 손상 상태의 발생 확률 및 손상 상태가 발생했을 때의 대체 비용을 이용해서 손상에 대한 기댓값을 도출하고 이를 예상 피해율로 본다. 또한, 각 손상 상태의 발생 확률 및 해당 손상 상태가 발생했을 때의 복구시간을 이용해서 복구에 대한 기댓값을 도출하고 이를 예상 복구시간으로 정의한다. 다만, 복구 시간의 경우 피해확률이 가장 높은 손상 상태의 복구시간이 최대 복구시간이 될 수 있으며, 이에 대해서도 고려하여 평가하도록 한다. 마지막으로 구조물 별로 평가된 내용을 취합하여 전체 시스템에 미치는 영향에 대하여 분석을 수행한다.

## 3. 철도 시설물 지진 피해 확산 모형 적용

### 3.1 철도종합시험선로

본 연구에서는 철도 시설물의 지진 피해 확산 모형의 적용을 위해 국내에 있는 철도종합시험선로 노선을 활용하였다. 철도종합시험선로는 총연장 12.989km로 아래 Fig. 4와 같이 총 8개의 교량(총 연장 1.362km)과 6개의 터널(총 연장 3.565 km), 8.062 km의 성토구간으로 이루어져 있다.

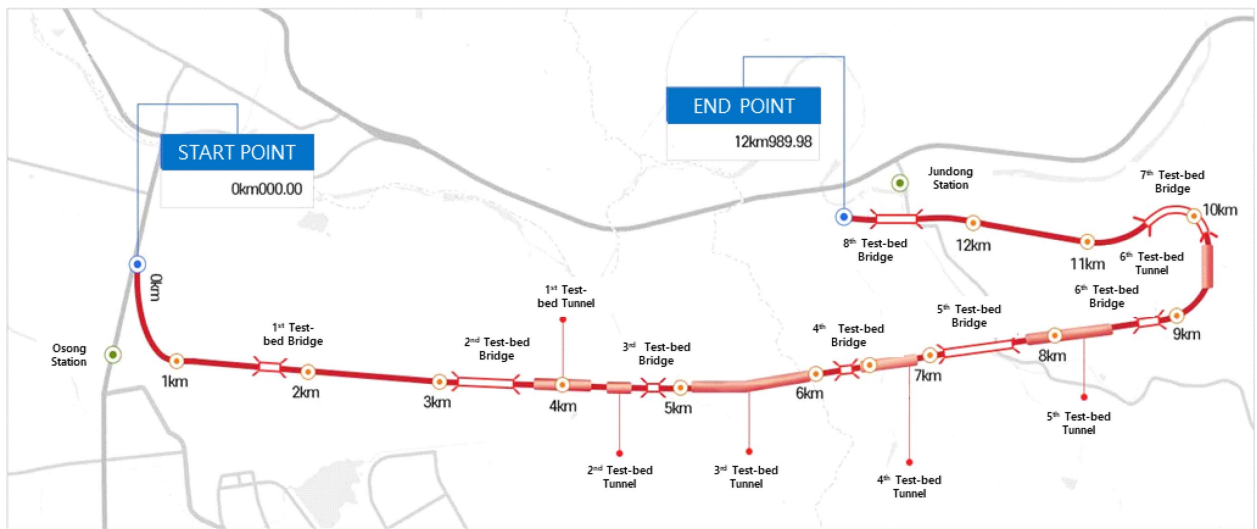


Fig. 4. Railway comprehensive test track in Korea.

### 3.2 철도종합시험선로 도식화

철도종합시험선로를 활용하여 지진 피해 평가 모델의 적용성을 평가하기 위해 Fig. 5와 같이 적용이 용이하게 도식화를 하였

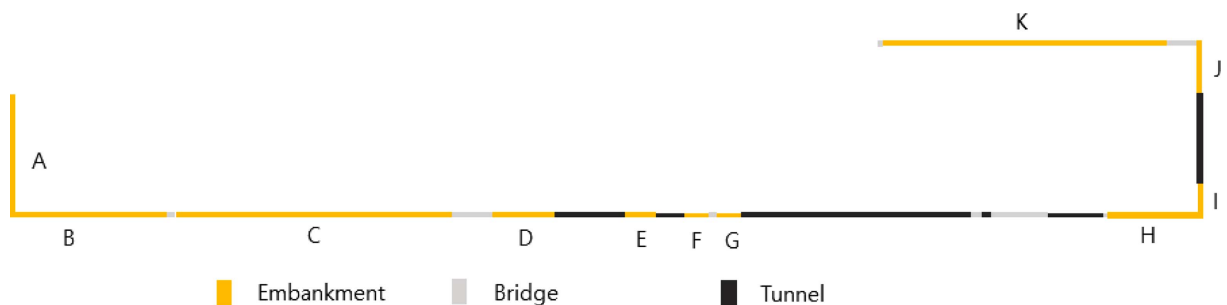


Fig. 5. Schematic drawing of railway comprehensive test track in Korea.

다. 전체 교량 구간은 PSC 박스 거더교로 가정하였으며 회색으로 표시되어 있다. 터널 구간의 경우 보수적인 추정을 위해 개착식 터널로 가정하였으며, 검은색으로 나타내었다. 토공구간의 경우 지반 조사 결과를 획득하기 어려운 한계가 있어 A ~ F구간은 연약한 지반으로, G ~ K 구간은 단단한 지반으로 가정하였으며, 노란색으로 표시되어 있다.

### 3.3 지진 발생 시나리오에 따른 지진 피해 예측 모델 적용

#### 3.3.1 지진 발생 시나리오

철도 시설물의 내진설계는 1등급 구조물의 붕괴방지 수준인 0.154g 지진[15]으로 수행된다. 이에, 본 연구에서 수행하는 지진 발생 시나리오는 1000년 재현주기 지진인 0.154g 지진의 발생을 가정하였다. 지표면 가속도 0.154g 지진이 오송시험선 북서방향에서 발행하는 지진 시나리오를 가정하였으며, 실제적인 피해가 발생하는 시나리오를 도출하기 위해 모든 시설물이 진앙거리 5km 이하에 위치하도록 진앙을 설정하였다. 지진 발생 깊이는 포항 지진과 유사한 천층 지진인 10km 수준으로 가정하였다.

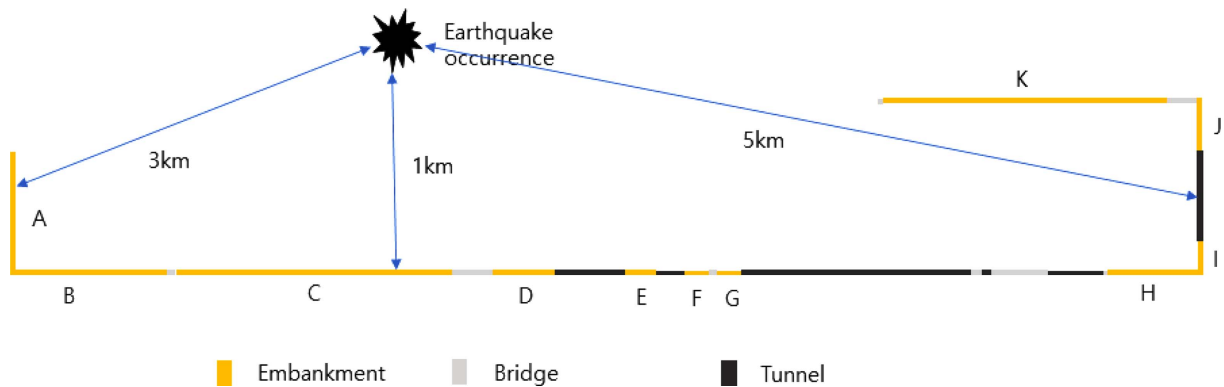


Fig. 6. Earthquake scenario.

#### 3.3.2 지진 가속도 크기 산출

진원지부터 각 철도 시설물까지의 거리를 활용하여 철도 시설물에 작용할 수 있는 지진 가속도를 산출하였다. 진앙지에서의 최대 지반 가속도 값을 0.154g로 설정하고 각 시설물의 위치에서의 최대 지반 가속도 값은 거리에 비례하여 감소하는 방식으로 계산하였다. 실제상황을 정확하게 구현하기 위해서는 국지적 지반 조건에 따른 증폭을 고려해야하나, 자료의 한계로 인하여 본 연구에서는 모든 지반 조건을 S1 지반으로 가정하고 증폭계수를 1로 적용하였다. 산출된 최대 지반 가속도 값은 각 철도 시설물별로 Table 10에 정리하였다.

Table 10. Calculated PGA value at each structure.

Label	Length (m)	Distance from epicenter (km)	PGA level (g)
Bridge No. 1	70	2.5	0.149
Bridge No. 2	380	1.2	0.153
Bridge No. 3	60	2.5	0.149
Bridge No. 4	80	4.0	0.143
Bridge No. 5	440	4.0	0.143
Bridge No. 6	25	4.5	0.140
Bridge No. 7	272	4.7	0.139
Bridge No. 8	35	5.0	0.138
Embankment A	600	3.0	0.148
Embankment B	1000	2.5	0.149
Embankment C	2000	1.0	0.153
Embankment D	300	1.5	0.152
Embankment E	300	2.0	0.151



Table 10. Continued.

Embankment F	300	2.3	0.150
Embankment G	300	2.5	0.149
Embankment H	500	4.8	0.139
Embankment I	200	5.0	0.138
Embankment J	500	5.0	0.138
Embankment K	2000	3.0	0.148
Tunnel No. 1	551	2.0	0.151
Tunnel No. 2	229	2.5	0.149
Tunnel No. 3	1,245	3.0	0.148
Tunnel No. 4	80	3.5	0.145
Tunnel No. 5	440	4.0	0.143
Tunnel No. 6	1,020	5.0	0.138

3.3.3 시설물 별 지진 피해 확산 예측 결과

앞 절에서 철도 시설물의 붕괴방지 수준의 설계 지진이 발생하였을 때 각 시설물에 발생하는 최대 지반 가속도를 산출하였다. 해당 지진 발생 시나리오에 따라 각 시설물에서 발생할 수 있는 예상 피해율 및 예상 복구시간을 산출하였다.

3.3.3.1 교량 시설물

개별 교량구조물에서 발생할 수 있는 피해상태 별 초과 발생 확률, 예상 피해율 그리고 예상 복구시간은 Table 11과 같다. 교량의 경우 대부분의 교량에서 경미한 손상(Slight damage) 이상의 피해가 발생할 확률이 12%를 초과하며, 중간 정도의 손상(Moderate damage) 이상의 피해가 발생할 확률도 3% 이상으로 평가된다. 예상 피해율은 2% 내외로 예상되며, 예상 복구시간은 3 ~ 4일 수준으로 평가된다.

Table 11. Earthquake risk assessment results for bridges.

Label	Slight damage expectancy (%)	Moderate damage expectancy (%)	Extensive damage expectancy (%)	Complete damage expectancy (%)	Expected damage ratio (%)	Expected required recovery time (day)
Bridge No. 1	9.62%	2.32%	1.80%	0.58%	2.27%	3.34
Bridge No. 2	10.12%	2.47%	1.94%	0.64%	2.45%	3.63
Bridge No. 3	9.62%	2.32%	1.80%	0.58%	2.27%	3.34
Bridge No. 4	8.71%	2.05%	1.57%	0.49%	1.97%	2.84
Bridge No. 5	8.71%	2.05%	1.57%	0.49%	1.97%	2.84
Bridge No. 6	8.35%	1.94%	1.48%	0.45%	1.86%	2.66
Bridge No. 7	8.20%	1.90%	1.44%	0.44%	1.81%	2.58
Bridge No. 8	7.98%	1.84%	1.39%	0.42%	1.74%	2.47

3.3.3.2 성토 시설물

성토 시설물에 대해서도 교량과 동일한 방식으로 평가를 진행하였으며 결과는 Table 12와 같다. 연약한 지반 구간인 A ~ F 구간의 경우 경미한 손상 이상의 피해가 발생할 확률이 60% 수준이며, 중간 정도의 손상 이상이 발생할 확률은 약 35% 수준, 심각한 손상 이상이 발생할 확률은 15% 내외로 평가되었다. 단단한 지반 구간의 경우 경미한 손상 이상의 피해가 발생할 확률이 15% 수준이며, 중간 정도의 손상 이상이 발생할 확률은 약 2% 내외로 평가되었다. 예상 피해율은 연약한 지반 구간의 경우 약 20% 내외, 단단한 지반 구간의 경우 약 2% 수준으로 평가되었으며, 예상 복구 시간은 8 ~ 9일 수준으로 평가되었다. 전체적으로 교량에 비해 높은 피해율이 발생하는 것으로 평가되었으며, 연약한 지반의 경우 복구시간도 길게 필요한 것으로 나타났다.

**Table 12.** Earthquake risk assessment results for embankments.

Label	Slight damage expectancy (%)	Moderate damage expectancy (%)	Extensive damage expectancy (%)	Expected damage ratio (%)	Expected required recovery time (day)
Embankment A	25.00%	20.35%	14.83%	20.42%	7.63
Embankment B	25.02%	20.57%	15.20%	20.83%	7.81
Embankment C	25.05%	21.00%	15.96%	21.66%	8.16
Embankment D	25.04%	20.90%	15.77%	21.46%	8.07
Embankment E	25.04%	20.75%	15.52%	21.18%	7.96
Embankment F	25.03%	20.65%	15.33%	20.98%	7.87
Embankment G	11.74%	3.54%	0.68%	2.12%	0.56
Embankment H	10.19%	2.85%	0.51%	1.70%	0.44
Embankment I	10.03%	2.79%	0.49%	1.66%	0.42
Embankment J	10.03%	2.79%	0.49%	1.66%	0.42
Embankment K	11.47%	3.41%	0.65%	2.04%	0.53

### 3.3.3.3 터널 시설물

터널 구간에 대한 지진 피해 확산 예측 결과는 Table 13과 같다. 터널 구간의 경우 경미한 손상 이상의 피해가 발생할 확률이 1% 미만이며, 예상 피해율 및 예상 복구시간 역시 매우 작게 평가된다. 터널 구조물의 경우 교량 및 성토구간보다 지진에 대해 상대적으로 매우 안전한 편이며, 추가적인 내진 보강 등에 대한 요구가 타 시설물에 비해 낮은 것으로 볼 수 있다. 이는 터널 구조물이 가지는 특징에서 기인한다. 터널 구조물의 경우 암반을 굴착 혹은 개착하여 건설하는 경우가 많으며, 관성력의 영향을 크게 받는 지상의 구조물과 달라서 관성력의 영향이 적고 주변 지반의 변형에 따라 그 거동이 지배적이다[16]. 이로 인해 전형적인 터널 단면에 대해 수행한 기존 연구의 취약도 함수는 성토 및 교량 구조물보다 상대적으로 낮은 수준의 피해를 예측하고 있다. 그러나 최근 활성 단층을 통과하거나 연약지반 층에 건설되는 터널 구조물이 증가하고 있어, 취약도 함수에 대한 개선 및 지진 피해 예측 모델에 관한 추가적인 연구가 필요하다.

**Table 13.** Earthquake risk assessment results for tunnels.

Label	Slight damage expectancy (%)	Moderate damage expectancy (%)	Extensive damage expectancy (%)	Expected damage ratio (%)	Expected required recovery time (day)
Tunnel No. 1	0.49%	0.04%	0.01%	0.06%	0.01
Tunnel No. 2	0.46%	0.04%	0.00%	0.06%	0.01
Tunnel No. 3	0.42%	0.03%	0.00%	0.06%	0.01
Tunnel No. 4	0.39%	0.03%	0.00%	0.05%	0.01
Tunnel No. 5	0.35%	0.03%	0.00%	0.06%	0.01
Tunnel No. 6	0.28%	0.02%	0.00%	0.04%	0.01

### 3.3.4 철도 시스템의 지진 피해 확산 예측 결과

각 철도 시설물의 예상 피해율에 대한 도식도는 Fig. 7과 같다. 예상 피해율 1% 미만의 경우, 1% 이상의 경우, 2% 이상의 경우, 10% 이상의 경우에 대하여 각각 초록색, 노란색, 주황색, 붉은색 선으로 나타내어 피해율을 도식화 하였다. 전체적으로 연약한 지반에 놓여있는 성토 구간에서 10% 이상의 높은 예상 피해율이 나타났으며, 터널 구간에서는 1% 미만의 낮은 예상 피해율이 나타났다. 예상 복구시간의 경우 교량은 3 ~ 4일, 철도 성토 노반은 8 ~ 9일, 터널 구간의 경우 피해가 거의 없어 복구시간이 필요 없는 것으로 평가된다. 전체 철도 시스템이 본래의 기능으로 회복되기까지 걸리는 복구시간의 기댓값은 최대 값인 8.16일로 9일 정도가 소요될 것으로 판단된다. 단 해당 값은 복구시간의 기댓값이므로, 성토노반 구간에서 심각한 손상이 발생하는 40일까지 복구시간이 요구될 수 있으며, 이에 시스템의 최대 복구 시간은 40일로 보는 것이 타당하다. 철도 시설물은

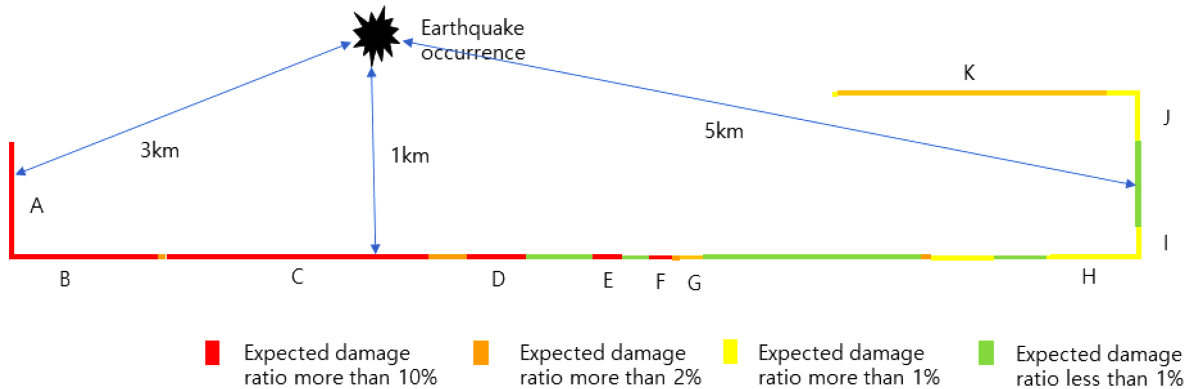


Fig. 7. Earthquake risk assessment results.

하나의 교통시스템이며, 도로에 비해 우회노선 등을 만들기 어려운 한계가 있어 피해를 받는 구간이 발생할 경우 전체 철도 시스템으로 피해가 확산된다. 이에, 철도 시스템에 대한 내진 보강 및 지진 재해 대응 시스템을 구축할 경우 높은 피해가 예상되는 시설물에 대해 선제적인 보강 및 대응 체계를 구축할 필요가 있다. 본 해석 결과에 따르면 연약한 지반에 놓인 성토구간의 경우 설계지진 수준에서도 10% 이상의 높은 피해가 발생하며 9일 정도의 상대적으로 긴 복구시간이 요구된다. 따라서 연약지반에 놓인 성토구간에 대한 선제적인 지진 재해 대응 체계 구축이 필요하다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 철도 시설물의 지진 취약도 함수에 대한 선행 연구자료를 조사하고 이를 바탕으로 국내에 적합한 지진 피해 예측 모형을 제안하였다. 또한, 제안한 모형을 국내 철도종합시험선로에 적용하여 설계 지진 등이 발생하였을 때 실제로 철도 시설물에 작용할 수 있는 피해를 추정하였다.

1. 교량, 토공 성토구간, 개착식 터널의 지진 취약도 함수에 대한 다양한 선행연구를 분석하고, 선행가중조합 기법을 활용하여 철도 시설물에 적용할 수 있는 지진 취약도 함수를 각 시설물 별로 제안하였다. 선행가중조합 기법 적용에 있어, 취합된 모델은 표준편차 및 모델간의 상관성이 존재하지 않으며, 이에 각 모델이 독립적으로 개발되고 모두 오차를 최소화하는 방향으로 개발되었다고 가정하여 동등한 가중치를 부여하였다. 예상 피해를 및 예상 복구시간 산정을 위해 대체 비용 및 복구시간 개념을 활용하였다. 예상 피해를 및 예상 복구시간은 각 손상 상태의 발생 확률과 대체 비용 및 복구시간에 대한 기댓값으로 산출하였다.

2. 개발된 지진 피해 확산 예측모형을 국내에 있는 철도종합시험선로 노선에 적용하여 그 적용성을 평가하였다. 지진 시나리오 오는 국내 철도 시설물의 붕괴방지 수준인 1000년 재현주기 지진(0.154g)를 활용하였으며, 진앙거리는 5km 이내로, 진원 깊이는 포항지진을 참고해서 10km 수준으로 설정하였다.

3. 시나리오 지진이 발생할 경우, 교량 구조물의 경우 2%, 성토 구조물의 경우 10% ~ 25%, 터널 구조물의 경우 1% 미만의 예상 피해율이 나타났다. 예상 복구시간의 경우 교량 구조물은 최대 4일, 성토구간은 최대 9일, 터널 구간은 복구기간이 필요하지 않을 것으로 예상된다. 단, 전체 철도 시스템이 본래의 기능으로 회복되기까지 걸리는 복구시간의 기댓값은 최대 값인 8.16일로 9일 정도가 소요될 것으로 판단되나, 해당 값은 복구시간의 기댓값이므로 성토노반 구간에서 심각한 손상이 발생하는 40일까지 복구시간이 요구될 수 있다. 따라서 시스템의 최대 복구 시간은 40일로 보는 것이 타당하다.

4. 철도 시스템에 대한 내진 보강 및 지진 재해 대응 시스템을 구축할 경우 높은 피해가 예상되는 시설물에 대해 선제적인 보강 및 대응 체계를 구축할 필요가 있다. 본 해석 결과에 따르면 연약한 지반에 놓인 성토구간의 경우 설계지진 수준에서도 10% 이상의 높은 피해가 발생하며 및 9일 정도의 상대적으로 긴 복구시간이 요구된다. 이에 연약지반에 놓인 성토구간에 대한 선제적인 지진 재해 대응 체계 구축이 필요하다.

5. 본 연구에서 수행한 지진 피해 확산 예측 모형의 적용성 평가는 국지적 지반 조건 및 구조물 형식의 통일 등 다양한 가정 조건을 포함하고 있다. 이에 실제적인 철도 시설물의 지진 피해 확산 예측을 위해서는 보다 상세한 정보를 바탕으로 한 피해 확산 예측 모형의 적용이 필요하다.

## 후 기

본 연구는 한국철도기술연구원(지진 대응 고도화를 위한 디지털 전환(DX) 기술 기반 시뮬레이터 및 운영 서비스 개발-PK2302A3)의 지원을 받아 수행되었습니다. 또한, 본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다 (과제번호 RS-2023-00238458).

## References

- [1] Y. Ji, B. Kim, K. Kim (2021) Evaluation of liquefaction potentials based on shear wave velocities in Pohang City, South Korea, *International Journal of Geo-Engineering*, 21(1), pp. 1-10.
- [2] J.-W. Yun, J.-T. Han (2021) Dynamic behavior of pile-supported wharves by slope failure during earthquake via centrifuge tests, *International Journal of Geo-Engineering*, 21(1), pp. 1-11.
- [3] A.-D. Nguyen, V.-T. Nguyen, Y.-S. Kim (2023) Finite element analysis on dynamic behavior of sheet pile quay wall dredged and improved seaside subsoil using cement deep mixing, *International Journal of Geo-Engineering*, 23(1), pp. 1-18.
- [4] S.A. Argyroudis, K.D. Pitilakis (2012) Seismic fragility curves of shallow tunnels in alluvial deposits”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 35, pp. 1-12.
- [5] S. Argyroudis, A.M. Kaynia (2015) Analytical seismic fragility functions for highway and railway embankments and cuts. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44(11), pp. 1863-1879.
- [6] J.B. Kyung, M.J. Kim, S.J. Lee, J.K. Kim (2016) An analysis of probabilistic seismic hazard in the Korean Peninsula - probabilistic peak ground acceleration (PGA), *Journal of the Korean Earth Science Society*, 37(1), pp. 52-61.
- [7] H.S. Jin, J.K. Song (2010) Effect of near-and far-fault earthquakes for seismic fragility curves of PSC box girder bridges, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 14(5), pp. 53-64.
- [8] S. Yang, D.Y. Kwak (2022) Evaluation of seismic fragility models for cut-and-cover railway tunnels, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, 24(1), pp. 1-13.
- [9] National Disaster Prevention Research Institute (2008) A study on the localization of the seismic fragility function of railway facilities.
- [10] M. Mohseni (2012) Dynamic vulnerability assessment of highway and railway bridges, The University of Nebraska-Lincoln.
- [11] D.Y. Kwak, E. Seyhan, T. Kishida (2018) A method of linear combination of multiple models for epistemic uncertainty minimization, *Proceedings of the Eleventh US National Conference on Earthquake Engineering*, Los Angeles, California, pp. 1-10.
- [12] Federal Emergency Management Agency (2020) HAZUS-MH technical manual, pp. 7-1-24.
- [13] MOLIT (2022) Yearbook of road bridge and tunnel statistics, No. 11-1613000-000108-10, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- [14] S.Y. Park, H.J. Yoon, Y.S. Oh, Y.S. Sin (2006) A case study of damages on tunnel structure due to chuetsu earthquake, *Proceedings of the KSR (Korean Society for Railway) Conference*, Daejeon, pp. 478-492.
- [15] MOLIT (2018) Korean Design Standard 17 00 00:2018.
- [16] MOLIT (2021) Korean Design Standard 29 17 00:2021.

(Received 28 August 2023; Revised 1 September 2023; Accepted 8 September 2023)

---

**Ji Hyeon Kim** : jhkim06@krri.re.kr

Senior Researcher, Advanced Railroad Civil Engineering Division, Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 16105, Republic of Korea

**Hyunki Kim** : hkkim@krri.re.kr

Principal Researcher, Advanced Railroad Civil Engineering Division, Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 16105, Republic of Korea

**Mintaek Yoo** : mintakyoo@gachon.ac.kr

Assistant professor, Department of Civil & Environmental Eng., Gachon University, 1342, Seongnam-daero, Sujeong-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea

**Ik-Soo Ha** : geotech@kyungnam.ac.kr

Professor, Department of Civil Engineering, Kyungnam University, 7 Gyeongnamdaehak-ro, Masanhappo-gu, Changwon-si, Gyeong-sangnam-do, 51767, Republic of Korea