



교량 복구 우선순위에 따른 도로망의 내진 복원력 비교 연구

Comparative Study of the Seismic Resilience of Transportation Networks according to Bridge Recovery Priority

윤성식*

Yoon, Sungsik*

Abstract

Recently, frequent earthquakes have damaged bridge structures, causing great inconvenience owing to the disruption of transportation networks and increasing travel time. In this study, the restoration priority of bridges under seismic conditions was proposed and the seismic resilience curves were compared based on an artificial neural network model. To determine the restoration priority of bridges, 1) performance-based and 2) benefit-cost-based restoration priorities were introduced. For demonstration purposes, the actual Pohang road network was reconstructed and the seismic resilience curves of the transportation network corresponding to the proposed restoration priorities were compared. Numerical analysis showed that the performance-based restoration priority had a more rapid seismic resilience curve than benefit-cost-based restoration priority.

Key words : Transportation Network, Seismic Resilience, Recovery Priority, TSTT, ANN

요 지

최근 빈번히 발생하는 지진은 교량 구조물의 손상을 발생시켰고, 그 결과 도로 네트워크의 통행시간 증가에 따른 큰 불편을 초래하였다. 본 연구에서는 도로 네트워크에 지진이 발생하였을 때 교량의 복구 우선순위를 결정하고, 인공신경망을 활용하여 내진 복원력을 비교하고자 한다. 이를 위하여, 교량의 복구순위를 결정하기 위하여 1) 성능기반, 2) 이익-비용에 기반한 복구순위를 도입하였다. 제안된 복구 우선순위에 따른 도로망의 내진 복원력을 비교하기 위하여 실제 포항 도로 네트워크를 재구성하였다. 수치해석 결과 이익-비용에 기반한 복구 우선순위보다 성능에 기반한 복구 우선순위가 더 신속한 복원력 곡선을 나타내었다.

핵심용어 : 도로 네트워크, 내진 복원력, 복구 우선순위, 총 시스템 이동시간, 인공신경망

1. 서 론

최근 대한민국에서 발생한 2016년 경주지진과 2017년 포항지진으로 인하여 지진으로부터 안전한 사회를 구축하기 위한 관심이 집중되고 있다. 대부분의 사회기반시설물은 도시에 밀집하여 건설되어있기 때문에 지진이 발생하면 구조물 자체에 직접적인 피해를 유발할 뿐만 아니라 다른 구조물에게 간접적인 피해를 발생시킬 수 있다. 그러므로 지진으로부터 구조물이 손상을 입게 되면, 다양한 사회기반 시설물에 연쇄적인 붕괴를 유발할 수 있다(Yoon et al., 2018; Park and Kwon, 2022).

도로 네트워크는 교량, 터널 등과 같은 다양한 구조물을 통하여 출발지-목적지 사이의 교통통행을 가능하게 한다. 그러므로 도로와 도로를 연결하는 교량 구조물이 파괴된다면 목적지에 도달하기 위하여 우회경로를 선택하여야 한다. 하지만 우회경로는 출발지와 목적지 사이 이동시간의 막대한 증가로 인하여 경제적으로 큰 피해를 유발할 수 있다. 특히 우회경로가 존재하지 않는 경우 해당 지역의 주민들은 사회적 및 경제적으로 고립될 수 있다. 과거에 발생하였던 Loma Prieta (1989), Northridge (1994), Tohoku (2011) 역사 지진은 교량의 붕괴 및 손상에 따른 교통량 감소가 지역사회의 경제에 미치는 직·간접적인 피해 정도를 잘 보여주었다.

*교신저자, 정회원, 한남대학교 AI융합학과 조교수(Tel: +82-42-629-8433, Fax: +82-42-629-8313, E-mail: sungsik@hnu.kr)
Corresponding Author, Member, Assistant Professor, Department of Artificial Intelligence, Hannam University

따라서 도로 네트워크에서 교량 구조물이 파괴되었을 때 지역기업과 주민들의 피해를 최소화하기 위한 효율적인 복구전략을 세우고 정책을 마련하는 것은 매우 중요하다.

2. 선행연구에 대한 토의

지진으로부터 감소한 내진성능을 예측하기 위하여 Lee et al. (2011)은 개별 교량 구조물의 부식에 따른 내진성능을 반영하여, 최대통행량 기반의 네트워크 성능지수를 기반으로 미국 Sioux Fall 도로망의 통행성능평가를 예측하였다. Tak et al. (2019)은 최대통행량 기반의 도로망 네트워크 해석을 통하여 대한민국 포항시 도로망을 시스템 레벨로 구성하고 진원지의 위치와 지진의 규모의 크기에 따른 도로망의 내진성능을 평가하였다. 하지만 최대통행량 기반의 네트워크 성능지수는 전체 출발지-목적지 사이의 통행량 계산이 불가능하기 때문에 최근에는 총 시스템 이동시간(Total System Travel Time, TSTT) 지수를 도입하여 전체 네트워크의 통행성능을 예측하기 시작하였다. 특히 TSTT는 대상 네트워크의 형상과 도로별 통행량을 기반으로 노드별 이동시간을 계산하기 때문에 다른 네트워크 성능지수보다 더 현실적인 시뮬레이션을 가능하게 한다. 이러한 이유로 Sharma and Mathew (2011)는 TSTT를 네트워크 성능지수로 도입하여 다목적함수를 활용한 도로망의 설계에 관한 연구를 수행하였다. Chang (2010)은 TSTT를 도입하여 지진이 발생하였을 때 도시 도로 네트워크의 물리적 피해와 기능손실에 대한 성능을 정량적으로 평가하였다. 또한, Kim et al. (2008)은 미국 South Carolina의 Charleston County에 위치한 도로망의 내진 성능감소를 평가하기 위하여 TSTT를 도입하였다. 하지만 기존의 수행되었던 선행연구들은 도로망의 복원력에 대하여 평가하지 않았을 뿐만 아니라 비교적 간단한 네트워크에만 적용 및 검증되었다.

도로 네트워크의 복원력 평가를 위한 교량의 복구 우선순위를 결정하기 위하여 Rokneddin et al. (2013)은 Markov Chain Monte Carlo (MCMC) 시뮬레이션에 기반하여 고속도로 네트워크의 복구 우선순위를 평가하였다. Zhang et al. (2017)은 도로망의 신속한 복원을 위하여 다양한 복구전략 방법 및 복구 우선순위에 대하여 제시하였다. 하지만 기존에 수행되었던 연구들은 연결성 기반 또는 최대통행량을 기반으로 내진성능 및 복원력을 평가하였기 때문에 TSTT와 같은 정확한 성능지수에 기반한 복구전략이 제안되지 않았다. 또한, TSTT 성능지수를 채택하였을지라도 낮은 차원을 갖는 비교적 단순한 도로 네트워크에 대하여 연구가 집중되어 있어, 고차원의 복잡한 네트워크에 적용된 연구사례가 거의 없었다. 특히 복잡한 네트워크의 복구 우선순위에 따른 도로 네트워크의 복원력 비교평가에 관해서는 활발한 연구가 진행되지 않았다.

따라서, 본 연구에서는 먼저 TSTT에 기반한 네트워크

지수를 도입하여 도로 네트워크의 성능을 평가하고자 한다. 도로 네트워크의 성능은 교량 구조물의 손상상태와 TSTT의 관계를 수학적으로 풀어낸 인공지능망 모델을 활용하였다. 또한 복구 우선순위를 결정하기 위하여, 성능에 기반한 재난 복구 우선순위와 이익-비용에 기반한 재난복구 우선순위 방법을 비교하여 개별 복구전략의 차이점을 살펴보고자 한다. 특히 재난복구 우선순위에 따른 재난복원력, 직접피해 비용, 간접피해비용을 분석하여 상황에 따른 재난복구전략을 제시하고자 한다.

3. 복원력 평가 방법

3.1 인공지능망 기반 도로 네트워크 성능평가

지진이 발생한 직후 최적의 의사결정을 내리기 위해서는 도로 네트워크의 감소된 내진성능에 대한 신속한 예측이 중요하다. 본 연구에서는 이를 위해 인공지능망 기반의 대리 모델을 도입하였다. 일반적으로 인공지능망은 지도학습을 통해 입출력 데이터들의 패턴을 인식하고 그 데이터 간의 복잡한 관계를 단순화된 수학적 함수로 표현한다.

Fig. 1은 도로 네트워크의 복구 우선순위에 따른 내진성능 평가방법의 순서도를 나타낸다. 먼저 네트워크 해석을 위해서는 지리정보시스템에 기반하여 네트워크의 형상을 구축해야 한다. 이를 위해서는 노드의 위치, 링크, 노드의 인접 매트릭스를 통하여 네트워크 맵을 구성하게 된다.

네트워크 맵이 구축되면 과거 역사지진들에 근거하여 진원지의 위치와 지진의 규모를 결정하여 인공지능망기반 대리모델을 구축할 수 있다. 진원지의 위치와 지진의 규모가 결정되면 지반운동방정식과 공간상관식의 관계를 통해 진원지로부터 개별 교량 구조물의 위치까지의 지반운동세기를 예측 가능하며, 이에 따른 교량 구조물의 파괴확률을

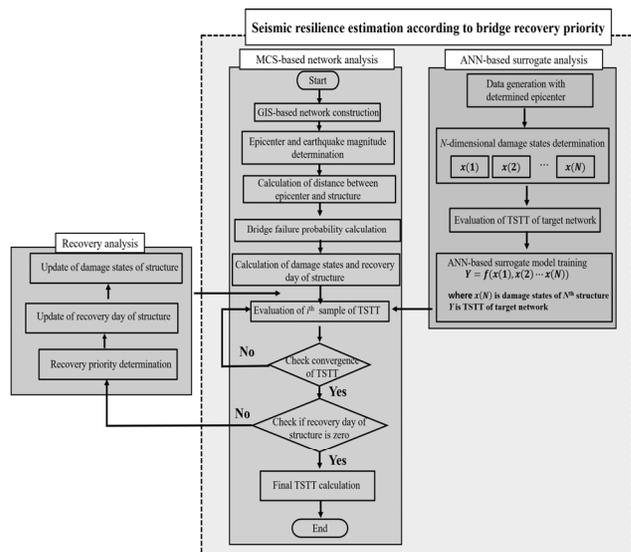


Fig. 1. Flowchart for Recovery Priority of Transportation Network

계산할 수 있다. 본 연구에서는 지반운동의 세기를 예측하기 위하여 Emolo et al. (2015)이 제시한 스펙트럼 가속도 기반의 지반운동방정식을 활용하였으며, 지반운동의 불확실성을 나타내기 위하여 Goda and Hong (2008)이 제시한 공간상관식을 채택하였다. 제안된 지반운동방정식은 대한민국 132개 측정소에서 계측된 222개의 역사지진을 기반으로 지반운동을 예측하였으며, Eqs. (1)과 (2)는 본 연구에서 채택한 지반운동방정식과 공간상관식을 나타낸다. 더 자세한 지반운동방정식과 공간상관식에 대한 설명은 다음의 참고문헌에서 나타내고 있다(Yoon et al., 2018; Sokolov et al., 2010).

$$\ln(SA_{ij}) = a + bM_i + c \ln(\sqrt{R_{ij}^2 + h^2}) + dR_{ij} + es \quad (1)$$

$$\rho(\Delta_{ij}) = e^{(-0.509\sqrt{\Delta})} \quad (2)$$

여기서 SA_{ij} 는 진원지 i 에 대한 j 장소에서의 스펙트럼 가속도, M_i 는 진원지 i 에서의 지진규모, R_{ij} 는 진원지 i 와 j 장소 사이의 거리, h 는 진원 깊이, $a \sim e$ 는 이전연구에서 제안한(Emolo et al., 2015) -5.15, 0.95, -0.92, -0.0003, 0.208 회귀계수, s 는 측정소의 특징에 따라 -1로 가정된 임의의 변수이며, Δ 는 두 지점 i 와 j 사이의 거리를 나타낸다.

다음은 계산된 지반운동 세기에 따른 교량 구조물의 파괴확률을 결정하는 단계이다. 본 연구에서는 미국 연방 재난관리청(FEMA)에서 제공하는 교량 구조물의 지진취약도 곡선을 채택하였다. 보고서에 따르면 교량의 파괴확률을 예측하는 데 있어 스펙트럼 가속도가 교량의 손상을 잘 예측하는 것으로 알려져 있으며, 과거 역사지진 데이터에 기반하여 5개의 손상상태에 대해 로그정규분포의 중간값과 로그표준편차를 활용한 지진취약도 곡선을 제시하였다(FEMA, 2003).

또한, 도로 네트워크내에서 손상된 교량들의 성능저하를 나타내기 위하여, 손상된 교량들은 손상수준에 따라 줄어든 교통통행량을 갖도록 모델링하였다. 본 연구에서는 Mackie and Stojadinovic (2006)이 제안한 5개의 손상수준에 따른 교통통행량을 활용하였다. Table 1은 교량의 손상상태에 따라 감소된 교통통행량을 나타내며, 교통통행량은 손상되지 않은 교량의 본래 용량 0%부터 100%까지 25% 간격으로 제안되었다.

Table 1. Reduced Traffic Capacity

Damage states	Reduced capacity
Complete damage	0%
Extensive damage	25%
Moderate damage	50%
Slight damage	75%
No damage	100%

입력지진에 따라 구조물의 손상상태가 결정되고, 전체 도로 네트워크의 감소된 내진성능이 계산되면 마지막으로 개별 교량 구조물의 복구우선순위 결정에 따른 복구전략을 수립하는 것이다. 미국 연방 재난관리청은 교량의 손상상태에 따라 평균적으로 필요한 복구 소요 일수를 제시하였으며, 본 연구에서는 Table 2에서 제시한 복구 소요일수를 채택하였다. 교량의 손상상태에 따라 복구 소요 일수가 계산되면, 복구모델 내에서 복구 소요 일수를 하루씩 감소시켜가며 교량의 손상상태를 업데이트하게 된다. 업데이트된 손상상태를 기반으로 전체 도로 네트워크의 성능을 예측하면 복구가 진행되면서 하루가 지난 다음 날의 통행성능을 예측할 수 있게 된다.

3.2 복구 우선순위

본 연구는 도로 네트워크의 재난복구 우선순위에 대한 분석을 수행하기 위하여 i) 성능 중심의 복구 우선순위지수와 ii) 이익·비용 비율 중심의 복구 우선순위지수를 제안하고자 한다.

먼저 제안하는 성능 중심의 복구 우선순위지수(TSTT incremental factor, TIF)는 i 번째 교량의 파괴에 따라 전체 도로 네트워크의 TSTT 성능감소로 정의하며, Eq. (3)을 통해 나타낼 수 있다.

$$TIF_i = 1 - \frac{TSTT_{\mu|s_i}}{TSTT_{\mu}} \quad (3)$$

여기서 TIF_i 는 i 번째 교량의 복구우선지수를 나타내며, $TSTT_{\mu|s_i}$ 는 지진이 발생하여 i 번째 교량이 파괴되었을 때 전체 도로 네트워크의 TSTT, $TSTT_{\mu}$ 는 지진이 발생하였을 때 전체 도로 네트워크의 TSTT를 나타낸다. 다음으로는 이익·비용 비율 중심의 복구 우선순위지수(Benefit-cost incremental factor, BCIM)를 제안하고자 한다. 제안된 BCIM 지수는 i 번째 교량이 파괴되었을 때 도로 네트워크의 통행시간 증가에 따른 간접피해비용과 i 번째 교량의 직접복구비용의 비율로 정의되며, Eq. (4)를 통해 나타낼 수 있다.

$$BCIM_i = \frac{IC_i}{DC_i} \quad (4)$$

Table 2. Required Recovery Period

Damage states	Recovery period (day)
No damage	0
Slight damage	0.6
Moderate damage	2.5
Extensive damage	75
Complete damage	230

여기서 BCM_i 는 i 번째 교량의 파괴에 따른 복구우선순위 지수를 나타내며, IC_i 와 DC_i 는 각각 i 번째 교량의 파괴에 따른 간접피해비용과 직접피해비용을 나타낸다. i 번째 교량의 파괴에 따른 직접피해비용은 교량의 건설비용을 통해 예측할 수 있으며, 간접피해비용은 Eq. (5)를 통해 계산할 수 있다.

$$IC_i = DT_i \times VOT \times ADT \quad (5)$$

여기서 DT_i 는 i 번째 교량의 파괴에 따른 도로망의 증가한 이동시간을 나타내며, ADT 는 하루 평균교통량, VOT 는 증가한 이동시간에 대하여 피해비용을 나타낸다. 본 연구에서는 Choi et al. (2007)이 제안한 대한민국 교통량에 따른 피해비용 데이터를 활용하여 시간당 평균 피해비용은 20.63\$로 가정하였다.

4. 적용예제

4.1 내진 복원력 비교를 위한 도로망 네트워크 구축

제안된 방법론을 적용하기 위하여 실제 포항시에 있는 도로 교통망을 활용하였다. 목표 지역은 대한민국 남동쪽에 자리 잡고 있으며, 2017년 규모 5.4의 지진이 발생해 내진성능 및 복원력 평가에 관한 관심을 지속해서 불러일으키고 있다. 포항시 교통망은 고속도로와 국도를 대상으로 모델링 되었으며, 1,440개의 노드와 3,940개의 링크로 구성되고 총 48개의 교량 구조물을 포함하고 있다. 교량 구조물은 상부 구조물의 형식에 따라 5가지 PSC-I (19%), Preflex (5%), RC slab (45%), Rahmen (17%), Steel box (14%)로 구성되어 있다. 또한 지진 발생에 따른 복구 우선순위를 결정하기 위하여 기상청에서 제공한 5개의 역사지진의 위치를 활용하

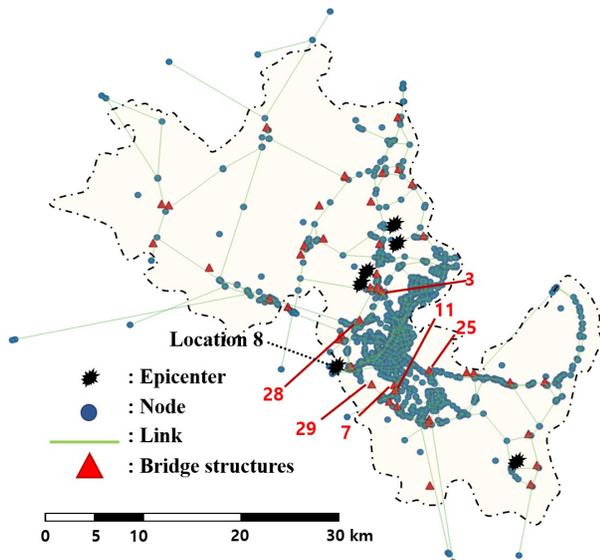


Fig. 2. Reconstructed Pohang Bridge Transportation Network

였다. Fig. 2는 본 연구에서 제안한 방법론을 적용하기 위한 포항시 도로 네트워크를 나타낸다.

구축된 포항 교통망을 사용하여 도로 네트워크의 TSIT를 예측하기 위하여 인공신경망 기반의 대리모델을 구축하였다. 대리모델 구축을 위하여 Fig. 2의 8번 진원지를 입력 지진파로 결정하였고, 이로부터 계산된 48개 교량의 5가지 손상상태를 입력데이터로, 48개 교량의 손상상태에 따른 도로 네트워크의 TSST 성능을 출력데이터로 결정하였다. 다음의 논문을 참고하면 인공신경망 모델을 구축하기 위한 자세한 정보는 알 수 있으며(Yoon et al., 2020), Fig. 3은 에폭에 따른 구축된 학습모델의 오차를 나타낸다. 또한, 트레이닝 데이터, 검증 데이터, 테스트 데이터의 상관계수는 0.98로 계산되었으며, 이는 본 연구에서 학습된 대리모델의 정확성이 높은 것을 확인할 수 있었다.

4.2 복구 우선순위 결정

Fig. 4는 TIF와 BCIM 성능지수에 의한 48개 교량 구조물의 복구 우선순위를 나타낸다. TIF기반의 복구 우선순위에서는 3번, 29번, 28번, 11번 교량의 순서대로 높은 중요성을 나타냈으며, BCIM기반의 복구 우선순위에서는 28번, 3번, 25번, 7번 교량의 순서대로 상대적 중요성을 나타내었다. TIF지수는 교량의 통행성능만을 고려하고, BCIM지수는 교량의 성능과 복구비용을 모두 고려하기 때문에 복구 우선순위의 차이가 발생하는 것을 알 수 있었다. 하지만 Fig. 2에서 알 수 있듯이 TIF 및 BCIM지수에 기반한 교량 복구 우선순위는 모두 포항시 도로망의 중심부에 자리 잡은 것을 확인할 수 있었다. 하지만 상대적으로 교통량이 적어 도시 전체의 통행량에 큰 영향을 미치지 않는 교량들은 대부분 대상 네트워크의 외곽지역에 자리 잡은 것을 확인할 수 있었다.

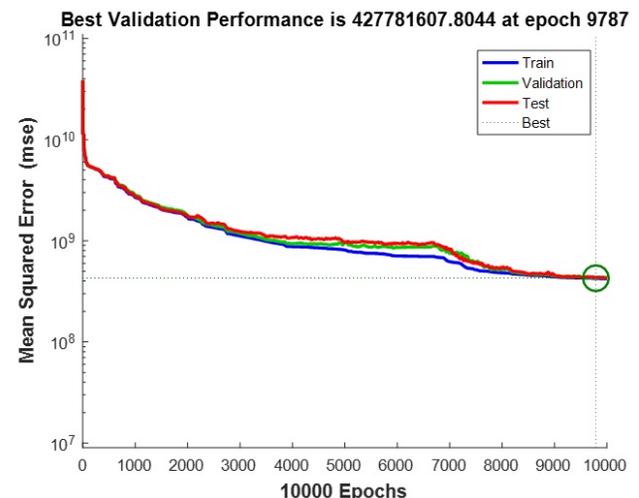
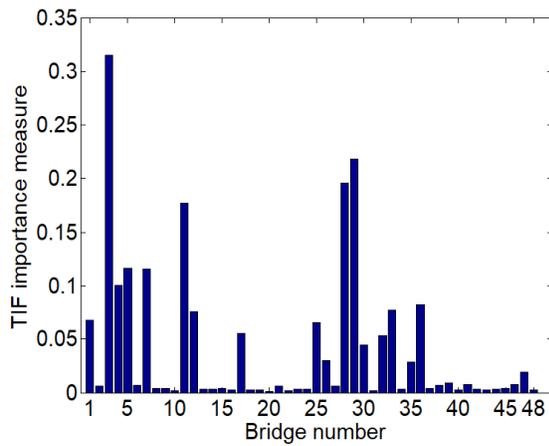
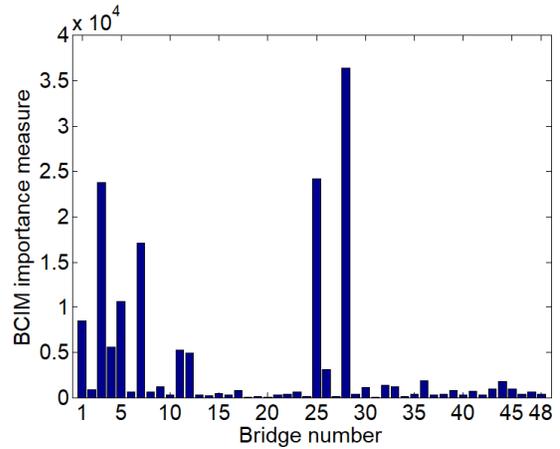


Fig. 3. Performance of Trained Model

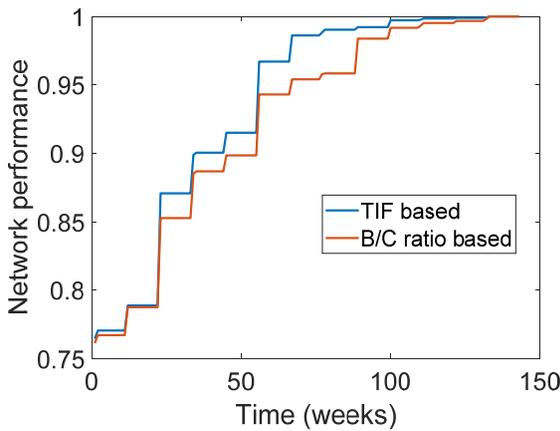


(a) TIF-based recovery priority

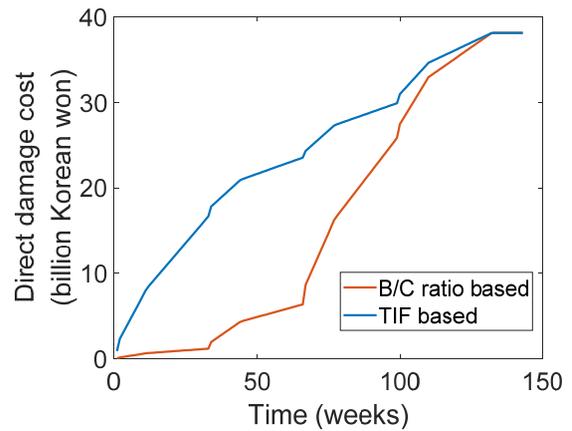


(b) BCIM-based recovery priority

Fig. 4. Recovery Priority of Bridge Structure



(a) Seismic resilience curve



(b) Direct damage

Fig. 5. Scenario A (6-10-14-18)

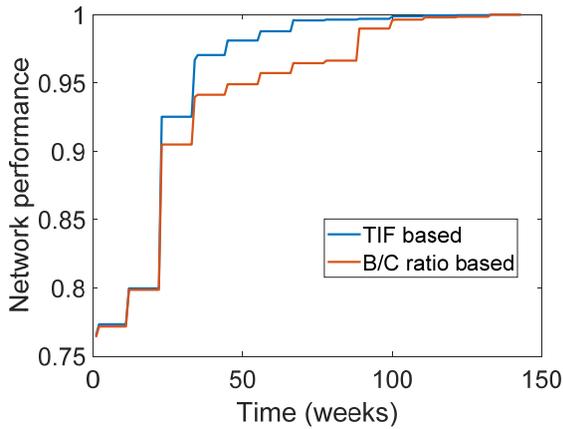
4.3 복구 우선순위에 따른 복원력 및 직접피해 비교

본 장에서는 제안된 복구 우선순위를 바탕으로 복구 우선순위에 따른 내진 복원력 곡선 및 직접 피해비용에 대한 비교 및 분석에 관하여 기술하고자 한다. 대상 도로 네트워크는 포항 도로 네트워크로 결정하였으며, 최근 발생한 지진을 포함한 역사지진의 위치를 활용하여 6개의 진원지를 결정하였다. 또한, 지진의 규모는 7.0으로 설정하여, 교량의 파손이 일어났을 때 실질적으로 포항 시내에서 얼마나 빠른 복원력이 가능하고 실제 피해가 어느 정도 발생하는지에 대하여 살펴보았다.

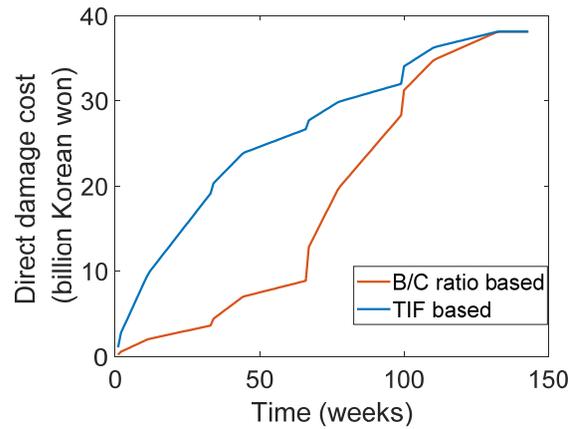
우선순위로 선정된 교량을 바탕으로 교량 네트워크 복구를 위한 다음의 같은 3가지 복구시나리오(시나리오 A, B, C)를 구성하였으며, 전체 48개 교량 중에서 교량 복구는 4단계에 나누어 일어난다고 가정하였다. 전체 48개 교량에 대하여, 첫 번째는 초기 공사복구비용의 부족으로 인하여

1~4단계까지 교량의 복구 숫자를 점차 늘려가는 1) 6개, 2) 10개, 3) 14개, 4) 18개 시나리오로 구성하였으며, 두 번째는 1~4단계까지 교량 복구 숫자를 모두 같게 수행하는 1) 12개, 2) 12개, 3) 12개, 4) 12개 시나리오를 구성하였다. 마지막으로 세 번째는 초기 교량 복구비용을 많이 투입하다가 점차 줄어드는 1) 18개, 2) 14개, 3) 10개, 4) 6개의 교량을 복구하는 시나리오를 구성하였다.

Figs. 5~7은 각 시나리오에서 TIF와 BCIM의 복구 우선순위에 따른 내진 복원력 곡선과 산출된 직접 피해비용을 나타낸다. 내진 복원력 곡선은 도로 네트워크에 지진이 발생하고 개별 교량 구조물을 수리함에 따라 전체 네트워크의 성능이 얼마나 빨리 정상상태로 돌아오는지를 나타내는 곡선이다. 또한, 직접 피해비용은 전체 네트워크의 성능이 정상상태로 돌아오게 하도록 개별 교량 구조물의 수리비용을 시간에 따라 나타낸 것을 의미한다. Fig. 5(a)에서 알

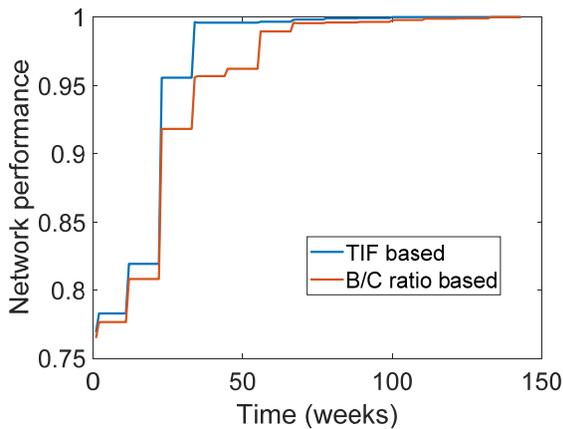


(a) Seismic resilience curve

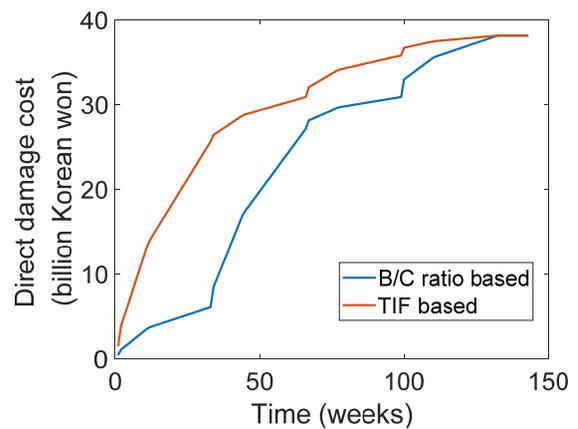


(b) Direct damage

Fig. 6. Scenario B (12-12-12-12)



(a) Seismic resilience curve



(b) Direct damage

Fig. 7. Scenario C (18-14-10-16)

수 있듯이 TIF에 기반한 복구 우선순위지수는 교량의 성능을 중심으로 복구순위를 결정하였기 때문에, BCIM지수와 비교하여 더 빠른 복원력을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. Figs. 6(a)와 7(a)에서도 TIF에 기반한 복구순위 지수는 BCIM 지수와 비교하여 신속한 복원력 곡선을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 시나리오 A에서 C로 갈수록 초기단계에 복구가 일어나는 교량의 비율이 상대적으로 높으므로 시나리오 C에서 신속한 복구가 일어나는 것을 확인할 수 있었다.

하지만 TIF지수는 교량의 직접피해비용에 따른 우선순위가 반영되어있지 않기 때문에, Fig. 5(b)에서 볼 수 있듯이 BCIM지수와 비교하여 초반에 더 큰 비용의 교량 수리비용이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 초반에 복구가 필요한 교량의 숫자가 많을수록 더 가파른 직접 피해비용이 발생하는 것을 Figs. 6(b)와 7(b)에서 확인할 수 있다. 그러나 전체 교량의 복구비용은 동일하기 때문에 최종적으로 누적

된 직접 피해비용은 모두 동일한 결과를 나타내었다. 따라서 교량 복구를 위하여 복구 초기에 충분한 복구비용을 확보할 수 있다면 TIF에 기반한 성능지수를 채택하여 BCIM에 기반한 성능지수보다 신속한 회복에 따른 피해를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 도시 도로 네트워크에 지진이 발생하였을 때 신속한 재난복구를 위한 복구 우선순위 분석에 관한 연구를 수행하였다. 이를 위해 도로 네트워크의 복구 우선순위에 따른 내진 복원력 평가 모델을 제시하였으며 이는 인공지능망기반 대리모델, 몬테카를로 시뮬레이션 기반의 성능평가, 교량 네트워크 복구모델로 구성된다. 도로 네트워크의 성능을 예측하기 위하여 정확한 성능지수 TSTT를

도입하였으며, 도로망의 TSTT를 신속하게 예측하기 위하여 인공신경망을 활용하였다. 전체 도로망에서 복구 우선순위를 결정하기 위하여 성능 중심의 복구 우선순위지수와 이익-비용 비율 중심의 복구 우선순위지수를 제안하여 내진 복원력 곡선을 비교하였다.

제안된 방법론을 적용하기 위하여 실제 포항시 도로 네트워크를 채택하였으며, 지리정보시스템(GIS)을 기반으로 하여 포항시 도로 네트워크를 재구성하였다. 또한, 기상청으로부터 받은 포항지역의 역사지진 데이터를 진원지로 설정하여 성능 중심의 복구 우선순위지수와 이익-비용비율 중심의 복구 우선순위지수에 대한 복원력 곡선을 비교하였다. 수치 해석 결과 성능 중심의 복구 우선순위지수가 이익-비용비율 중심의 복구 우선순위지수보다 더 신속한 복원력 곡선을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 성능 중심의 복구 우선순위지수는 이익-비용비율 중심의 복구 우선순위지수보다 상대적으로 더 높은 초기 복구비용이 있어야 하는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 제시한 교량 구조물의 복구 우선순위를 활용하면 다양한 재난이 왔을 때 신속한 의사결정을 통해 사회적 및 경제적 혼란을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에서 제안된 기법이 상수도, 전력, 가스 네트워크와 같은 다양한 라이프라인 시설물에 대한 검증이 이루어질 경우, 통합된 사회 인프라 시설물의 유지관리가 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2022학년도 한남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- Chang, L. (2010). *Transportation system modeling and applications in earthquake engineering*. Mid-America Earthquake (MAE) Center: Urbana, IL, USA.
- Choi, C.-H., Park, D., Najafi, F.T., and Kim, J.-L. (2007). Time value of goods movement for project appraisal in South Korea. *Transp Res Rec.*, Vol. 1996, No. 1, pp. 92-99.
- Emolo, A., Sharma, N., Festa, G., Zollo, A., Convertito, V., Park, J.H., et al. (2015). Ground-motion prediction equations for South Korea Peninsula. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 105, pp. 2625-2640.
- FEMA. (2003). *Multi-hazard loss estimation methodology earthquake model, HAZUS-MH MR3 technical manual*. Department of Homeland Security, Emergency Preparedness and Response.
- Goda, K., and Hong, H.P. (2008). Spatial correlation of peak ground motions and response spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 98, No. 1, pp. 354-365.
- Kim, Y.-S., Spencer, B.F., and Elnashai, A.S. (2008). *Seismic loss assessment and mitigation for critical urban infrastructure systems*. Newmark Structural Engineering Laboratory, University of Illinois at Urbana: Urbana, IL, USA. ISSN 1940-9826.
- Lee, Y.-J., Song, J., Gardoni, P., and Lim, H.-W. (2011). Post-hazard flow capacity of bridge transportation network considering structural deterioration of bridges. *Struct Infrastruct Eng.*, Vol 7, No. 7-8, pp. 509-521.
- Mackie, K., and Stojadinovic, B. (2006). Post-earthquake functionality of highway overpass bridges. *Earthq Eng Struct Dyn.*, Vol. 35, No. 1, pp. 77-93.
- Park, H.S., and Kwon, S.A. (2022). A study on the spatial distribution and accessibility of disaster evacuation facilities: Focusing on Cheongju City. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 22, No. 5, pp. 161-170.
- Rokneddin, K., Ghosh, J., Duenas-Osorio, L., and Padgett, J.E. (2013). Bridge retrofit prioritisation for ageing transportation networks subject to seismic hazards. *Struct Infrastruct Eng.*, Vol. 9, No. 10, pp. 1050-1066.
- Sharma, S., and Mathew, T.V. (2011). Multi-objective network design for emission and travel-time trade-off for a sustainable large urban transportation network. *Environ. Plan. B Plan. Des.*, Vol. 38, No. 3, pp. 520-538.
- Sokolov, V., Wenzel, F., and Kuo-Liang, W. (2010). Uncertainty and spatial correlation of earthquake ground motion in Taiwan. *TAO: Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, Vol. 21, No. 6, pp. 905-921.
- Tak, H.-Y., Suh, W., and Lee, Y.-J. (2019). System-level seismic risk assessment of bridge transportation networks employing probabilistic seismic hazard analysis. *Math Prob Eng.*, Vol. 2019, pp. 1-17.
- Yoon, S., Kim, J., Kim, M., Tak, H.-Y., and Lee, Y.-J. (2020). Accelerated system-level seismic risk assessment of bridge transportation networks through artificial neural network-based surrogate model. *Appl Sci.*, Vol. 10, No. 18, 6476.
- Yoon, S., Lee, Y.-J., and Jung, H.-J. (2018). A comprehensive framework for seismic risk assessment of urban water transmission networks. *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, Vol. 31, pp. 983-994.

Zhang, W., Wang, N., and Nicholson, C. (2017). Resilience-based post-disaster recovery strategies for road-bridge networks. *Struct Infrastruct Eng.*, Vol. 13, No. 11, pp. 1404-1413.

<i>Received</i>	January 2, 2023
<i>Revised</i>	January 3, 2023
<i>Accepted</i>	January 25, 2023