

적용사례 분석을 통한 개착식 구조물의 내진성능 예비평가

박범호*, 진민녀*, 이태형**, 김기동***, 임남형*

*충남대학교 토목공학과

**건국대학교 토목공학과

***공주대학교 건설환경공학부

e-mail:uheung@cnu.ac.kr

The Preliminary Seismic Performance Evaluation of Cut-and-Cover Tunnels through the Case Studies

Beom-Ho Park*, Tian-minnu*, Tae-Hyung Lee**, Kee-Dong Kim***, Nam-Hyoung Lim*

*Dept of Civil Engineering, Chungnam National University

**Dept of Civil Engineering, Konkuk University

***Dept of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University

요 약

개착식 구조물의 내진성능 예비평가는 설계자로나 현장조사를 토대로 지진도 그룹, 취약도 지수, 영향도 지수를 산정하여 내진성능 상세평가의 시행여부를 판단하는 근거가 되어왔다. 내진성능 예비평가를 적용했던 사례를 분석한 결과 평가항목 산정 시 근거가 미약하고, 내진성능 상세평가 대상으로 분류되지 않은 그룹에 대해 구조적 내진성능 확보가 불확실하여 내진성능 예비평가를 개정하였다. 개정된 내진성능 예비평가는 지진도 그룹, 취약도 지수, 영향도 지수를 적용하는 기존의 틀은 유지하면서 평가항목을 산정하는 근거를 명확하게 하였으며, 내진성능 상세평가를 실시하지 않는 그룹에 대해서도 간략하게 구조적 내진성능 확보여부를 검토할 수 있는 진단변형각을 도입하였다. 본 연구에서는 개정된 내진성능 예비평가를 기존 사례에 적용하여 결과를 도출하였으며, 기존의 적용 사례와 비교·분석하였다.

1. 서론

최근 발생한 아이티지진과 칠레지진은 우리에게 지진에 대한 대비가 얼마나 중요한지 시사해준다. 아이티는 규모 7.0의 강진으로 23만여 명의 사망자가 발생하였지만 칠레에서는 아이티 지진보다 약 800배 강한 규모 8.8 지진이 발생함에도 불구하고 700여 명의 사망자가 발생한 것으로 집계되었다. 아이티에 비해 칠레의 피해가 현저히 작았던 것은 무감(無感) 지진을 포함해 연간 200만번의 지진이 발생하고, 규모 8.0 이상의 강진도 연 1회 이상 발생함에 따라 기반 시설물에 대해 내진설계를 엄격하게 적용하고 있는 것이 전문가들의 견해이다. 즉, 기반 시설물에 대한 내진설계 반영 여부가 지진의 피해를 감소시키는 가장 최선의 대안이다.

우리나라의 경우는 일반적으로 지진 안전지대라는 인식으로 인해 10여년 전부터 기반 시설물에 내진설계가 반영되어 그 이전에 건설된 기반 시설물은 내

진설계가 반영되지 않은 실정이다. 그러나 2007년 오대산 지진, 2008년 공주지진, 2010년 시흥지진 등 피해는 작지만, 우리나라에도 지진은 빈번하게 발생하고 있는 실정이어서 이와 관련한 대책이 시급하다. 특히, 대도시에 건설된 도시철도의 경우, 일 평균 약 860만 명을 수송하고 있는 대단위 수송체계이다. 이러한 도시철도의 대부분은 「도시철도 내진설계기준」이 공포된 2005년 이전에 설계 및 건설되었다. 이와 같은 이유로 인해 내진설계가 반영된 도시철도 시설물은 전무한 상황이며, 이에 따라 내진성능을 확보하고 있는지 여부를 반드시 검토해야 하는 상황에 처해있다.

이에 따라, 최근에 각 지자체 도시철도 운영기관에서는 「기존 터널의 내진성능 평가요령, 2004」를 근거로 하여 도시철도 개착식 구조물에 대한 내진성능을 평가하고 있으며, 내진성능 상세평가의 시행여부를 판단하는 내진성능 예비평가는 완료된 상황이다. 그러나 「기존 터널의 내진성능 평가요령, 200

4」를 적용하여 내진성능 예비평가를 수행한 사례를 분석한 결과 평가항목 산정의 중복, 도시철도 특성의 미반영 등의 문제점이 있다고 판단되어 이를 개정하였다. 본 연구에서는 개정한 내진성능 예비평가를 「기존 터널의 내진성능 평가요령, 2004」에 의해 예비평가가 수행된 개착식 구조물에 적용하여 결과를 도출하였으며, 기존의 적용 사례와 비교·분석하였다.

2. 내진성능 예비평가(개정안)

내진성능 예비평가 개정안은 「기존 터널의 내진성능 평가요령, 2004」에 대해 평가체계, 취약도 지수를 수정하였으며, 예비평가에서 간단하게 구조성능을 평가할 수 있는 진단변형각을 추가하였다.

2.1. 예비평가체계

「기존 터널의 내진성능 평가요령, 2004」의 예비평가는 자료조사, 지진도 그룹 결정, 그리고 취약도 지수 및 영향도 지수에 의한 내진상세 평가 대상 터널의 결정단계로 구성되어 있다. 그러나 각 단계에서 고려하는 평가 항목의 산정에 있어 중복 고려되어지거나 근거가 미흡하고, 도시철도 교량과의 연계성 및 특성을 고려하기 위하여 예비평가 체계를 다음 그림 1과 같이 수정·보완하였다. 내진그룹화 단계에서는 기존 평가체계와 동일하게 4개의 그룹으로 분류하고, 개정안에서 신설된 상세평가 우선순위 결정단계에 대해서는 진단변형각을 적용하여 상세평가 대상에서 제외된 개착식 구조물에 대해 구조성능을 평가하여 상세평가를 미실시하는 개착식 구조물에 대해서도 내진성능을 확보하는 방안을 제안하였다.

2.2. 취약도 지수

「기존 터널의 내진성능 평가요령, 2004」에 의한 실제 취약도지수 산정 시, $CONNECT_{지수}$ (이음부 상태), $DETIOR_{지수}$ (노후화 등급), $DAMAGE_{지수}$ (손상도) 항목은 개착식 구조물의 손상도에 의해 동일하게 평가하고 있으므로 세 가지 평가 항목을 동일화한다. 그리고 「시설물의 안전관리에 관한 특별법」의 「시설물의 안전점검 및 정밀안전진단 지침」에 의한 시설물의 안전진단 평가등급(A~E)을 활용하여 평가한다.

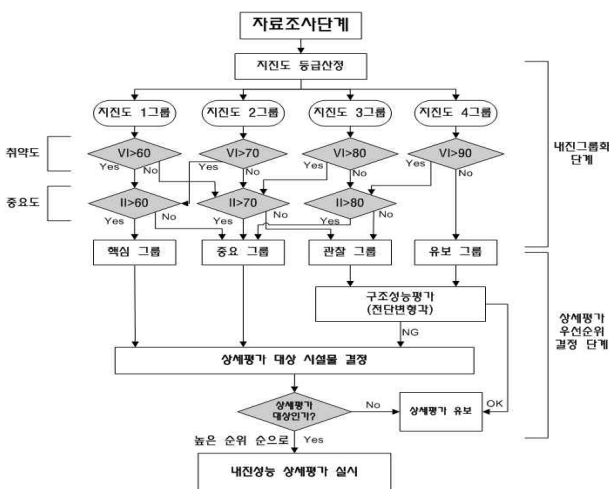
개착식 구조물의 $EARTH_{지수}$ (지반상태 정도)는 지반종류($S_A \sim S_E$)에 따라 평가하고 있다. 지반종류에 따른 평가는 이미 지진도 등급에서 고려하고 있어 중복적인 평가가 되고 있으므로 삭제하였다. 이에 따라 $LIQ_{지수}$ 에 2배의 가중치를 적용하여 산정하고 이에 대한 평가방법으로 「도시철도 설계기준, 2005」의 “4.6 지반의 액상화 평가”에 제시되어 있는 액상화 간편예측법을 활용함으로써 신뢰성을 제공한다. 이와 같은 점을 고려하여 도시철도 개착식 구조물의 취약도 지수를 다음 식 1과 같이 제안하였다.

$$VI = FLEX_{지수} + (CONST_{지수} + SIZE_{지수} + FAULT_{지수} + SYM_{지수} + 2 \cdot LIQ_{지수} + 3 \cdot DETIOR_{지수} + NC_{지수}) \leq 100 \quad (\text{식 1})$$

2.3. 구조성능평가

개착식 구조물의 구조성능 평가는 진단변형각을 활용하여 평가한다. 진단변형각 평가는 「기존 터널의 내진성능 평가요령, 2004」와 비교했을 때 가장 차별화되는 부분으로 “관찰/유보 그룹”에 해당하는 개착식 구조물에 대해서만 실시한다. 즉, 예비평가만을 이용하여 내진성능 상세평가 대상 개착식 구조물을 판단하는 기준으로 사용하기에는 구조적 내진성능 평가 항목이 미비하므로 “관찰/유보 그룹”에 대해 진단변형각을 평가함으로써 예비평가의 신뢰성을 보장하는 것이 목적이다.

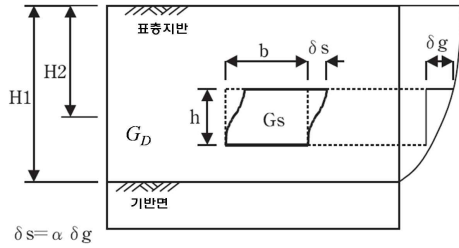
진단변형각(θ_s)은 일본에서 개착식 구조물에 적용하는 간이응답변위법에 활용되는 지진응답치로 지진에 의한 지반변위로부터 발생하는 개착식 구조물의 진단변형의 정도를 나타낸다. 일반적으로 진단변형각이 1/100 이상인 경우, 개착식 구조물에 비탄성 거동이 유발되는 것으로 평가하고 중요 그룹으로 평가할 수 있으며 다음과 같은 식 2를 이용하여 산



[그림 1] 개착식 구조물의 내진성능 예비평가(개정안) 체계

정한다.

$$\theta_s = \frac{\delta_s}{h} \quad (\text{식 2})$$



[그림 2] 지반, 개착식 구조물의 단면

$$\delta_s = \sum_{i=1}^{\text{지반층수}} \delta_{si} \quad (\text{식 3})$$

여기서,

δ_s : 지진에 의한 터널 구조물 상층부와 하층부의 상대 변형량

δ_{si} : 터널 구조물 측면의 지반 각층에 해당하는 터널구조물의 상대 변형량

h : 터널 구조물 높이

지진에 의한 터널 구조물 측면의 지반 각층에 해당하는 터널구조물의 상대 변형량, 는 다음 식 4와 같이 자연지반의 지반 층간 상대 변형량과 응답계수를 활용하여 구할 수 있다.

$$\delta_{si} = \alpha_i \cdot \delta_{gi} \quad (\text{식 4})$$

여기서,

δ_{gi} : 자연지반의 지진에 의한 지반 층간 상대 변형량으로 「도시철도 내진설계기준, 2005」의 “6.1.5 지반변위 산정”편을 적용하여 구할 수 있다. 단, 지반변위를 산정하기 위해 사용되는 기반면에서의 속도 응답스펙트럼은 붕괴방지수준에 적합한 스펙트럼을 사용한다.

α_i : 각 지반층에서의 응답계수로 다음 식 5을 활용하여 산출한다.

$$\alpha_i = 1.1 \cdot \left\{ \beta \times \ln \left(\frac{G_D}{G_S} \right) + \gamma \right\}$$

$$\beta = 0.091 \cdot \left(\frac{b}{h} \right) + 0.053 \cdot \left(\frac{H_1}{H_2} \right) - 0.07 \quad (\text{식 5})$$

$$\gamma = -0.036 \cdot \left(\frac{b}{h} \right) + 0.040 \cdot \left(\frac{H_1}{H_2} \right) + 0.92$$

b : 터널 구조물의 폭

H_1 : 지표면부터 기반면까지의 깊이

H_2 : 지표면부터 터널 구조물 중간까지의 깊이

G_D : 터널 구조물 측면 지반의 각 층에 대한 지반 전단탄성계수로 「도시철도 내진설계기준, 2005」의 식(6.1.1)로 산출한다.

G_S : 터널 구조물의 등가전단탄성계수로 터널 구조물의 경계조건을 단순지지로 가정한 골조(frame) 해석을 통해 다음 식 6과 같이 산출한다.

$$G_S = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{\tau}{\delta} \cdot \frac{\delta}{h} \quad (\text{식 6})$$

τ 는 전단응력, δ 는 전단응력에 의한 골조의 변형량을 나타낸다.

3. 내진성능 예비평가 결과 및 분석

「기존 터널의 내진성능 평가요령, 2004」에 의해 내진성능 예비평가가 완료된 서울 도시철도 1-4호선에 대하여 개정안을 적용하여 내진성능을 평가하였다. 그 결과는 다음 표 1과 같으며, 기존의 평가사례와 동일한 결과가 산출됨을 알 수 있다.

[표 1] 내진성능 예비평가 결과

노선	내진성능 예비평가 방법	평가대상 개착식 구조물 개소	핵심 그룹	중요 그룹	관찰 그룹	유보 그룹
1호선	기존	63	0	63	0	0
	개정		0	63	0	0
2호선	기존	230	0	230	0	0
	개정		0	230	0	0
3호선	기존	112	0	112	0	0
	개정		0	112	0	0
4호선	기존	141	0	141	0	0
	개정		0	141	0	0

기존의 평가사례와 동일한 결과가 도출되는 이유는 중요도지수에 있다. 중요도지수는 도시철도가 존재하는 지역적 특성상 평가대상 전 개소에서 90점 이상의 높은 평가점수가 산정된다. 그럼에도 불구하고, 중요도지수에 의한 분류체계는 60, 70, 80의 세 가지 그룹에 의해 결정된다. 따라서 중요도지수에

의한 분류체계의 수정 및 개선된 평가항목의 도입이 필요하다고 판단된다. 그리고 구조성능평가 대상시설물인 관찰/유보 그룹이 존재하지 않았지만 평가대상 전 개소에 대해서 진단변형각 평가를 실시한 결과, 모든 개착식 구조물의 진단변형각이 비탄성거동 기준인 1/100 이하에 크게 못미치는 것으로 산출됨에 따라 구조성능이 확보된 것으로 평가할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 서울 도시철도 1-4호선의 개착식 구조물에 대해서 개정안을 적용하여 내진성능 예비평가를 수행하였으며, 기존사례와 비교·분석하였다. 이에 따른 결과는 다음과 같다.

- (1) 내진성능평가 개정안은 「기존 터널의 내진성능 평가요령, 2004」의 비합리적인 평가항목의 삭제 및 구조성능 평가방법의 추가 등으로 수정·보완된 평가체계이다.
- (2) 개정안을 적용한 내진성능 예비평가 결과는 기존 사례와 동일한 결과가 도출된다.
- (3) 내진성능 예비평가의 내진그룹화 판정은 개착식 구조물의 구조적인 취약성보다 사회 및 경제적 영향(중요도지수)이 크게 반영된 결과로 분석된다.
- (4) 구조성능평가 결과, 평가대상 전 개소의 개착식 구조물은 비탄성거동을 하지 않는 것으로 평가되었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 도시철도표준화2단계연구개발사업의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 서울메트로, “서울메트로 1-4호선 내진성능 예비평가 용역 보고서”, pp. 129-165, 1월, 2007.
- [2] 건설교통부, “기존 터널의 내진성능 평가요령”, pp. 1-32, 2004.
- [3] 이성민, 유제남, 조인범, 윤종구, “기존지하철 구조물 내진성능 예비평가의 고찰”, 한국지진공학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 171-178, 2008.
- [4] 건설교통부, “도시철도 내진설계 기준”, 2005
- [5] RTRI, “철도구조물등설계표준·동해설, 내진설계”,

pp. 331-344, 1999

- [6] 박범호, 임남형, 이태형, 김기동, 김진호, “도시철도 시설물의 내진성능 예비평가체계에 대한 소고”, 한국산학기술학회논문지, 제11권, 제2호, pp.666-674, 2010

기 호

- FLEX*_{지수} : 단면에 대한 유연도 지수
*CONST*_{지수} : 시공방법에 따른 지수
*EARTH*_{지수} : 지반상태 정도 지수
*SIZE*_{지수} : 단면 크기 정도 지수
*CONNECT*_{지수} : 터널 구조물 이음부의 상태 지수
*DAMAGE*_{지수} : 터널 구조물의 손상 지수
*FAULT*_{지수} : 터널 구조물과 단층대와의 거리 지수
*SYM*_{지수} : 단면의 비정형성 정도
*LIQ*_{지수} : 액상화 가능여부 지수
*DETIOR*_{지수} : 터널 구조물의 노후화 등급지수
*NC*_{지수} : 단면에 위치한 기둥부의 수
*NPPD*_{지수} : 일평균 도시철도 탑승인원
*IMPS*_{지수} : 인접한 곳에 주요시설물의 존재 여부
*IMPL*_{지수} : 인접한 곳의 라이프라인의 존재 여부
*IMPA*_{지수} : 노선의 중요도 지수
*IMPC*_{지수} : 구조물의 성능 회복을 위한 비용지수