

일본 도시철도 개착식 터널의  
내진성능 평가 방법에 대한 고찰

**A Study on Evaluation Method of Seismic Performance on  
Cut and Cover Tunnel of Subway in Japan**

박범호\*                      이우철\*\*                      김진호\*\*\*                      임남형†  
Park, Beom-Ho              Lee, Woo-Chul              Kim, Jin-Ho              Lim, Nam-Hyoung

.....  
**ABSTRACT**

Due to the Japan's Kobe earthquake in 1995, a cut-and-cover tunnel, which is one of subway facilities, collapsed unexpectedly. As a result, also in Korea, seismic performance needs to be secured for the cut-and-cover tunnel and currently, the subway seismic design standard is based on the seismic performance. However, there is no standard for the damage level or stability level of a member for securing the seismic performance, and the definition of multi-level seismic performance is not sufficient. By contrast to this situation, in the Japan's evaluation method of seismic performance, design earthquake ground motion having reflected there into the subway driving stability is clearly defined and the seismic performance required for structures is classified in detail. This study analyzes the Japan's systematic evaluation method of seismic performance for cut-and-cover tunnels of subway.

Keywords : seismic performance, cut-and-cover tunnel, subway, damage level, stability level  
.....

**1. 서 론**

도시철도 시설물 중 지하구조물인 개착식 터널은 지진 시 교량, 건물 등의 지상구조물과 달리 증폭현상이 발생되지 않는 특성을 가지고 있다. 이는 지하 구조물의 겉보기 단위 체적 중량이 주변 지반에 비교하여 상대적으로 작기 때문에 지하 구조물에 작용하는 관성력이 작고, 주변이 지반에 의해 둘러 싸여 있어 구조물에서 주변 지반으로 빠져나가는 에너지가 상대적으로 크기 때문이다. 이와 같은 이유로 도시철도 개착식 터널의 경우, 타 시설물에 비하여 상대적으로 위험도를 낮게 평가하여 내진설계를 간과하는 경향이 있었다. 그러나 일본에서는 고베 대지진(1995)으로 개착식 터널(도시철도 지하철 역사가 붕괴되는 사례)이 붕괴되면서 해당 시설물의 내진성능 확보가 중요하게 인식되어, 그에 따른 연구 및 설계 기준 개정이 활발히 이루어졌다. 그 결과, 현재 일본의 도시철도 시설물은 내진설계 적용률이 100%를 나타내고 있다.

그러나 국내 도시철도 개착식 터널은 내진설계가 반영되지 않은 구간이 서울시 도시철도를 기준으로 0.8%에 불과해 내진설계 기준의 적용과 내진설계가 되지 않은 구간에 대해 정확한 내진성능을 평가할 수 있는 방안이 수립되어야 한다. 내진설계가 되지 않은 구간의 내진성능을 평가하기 위해 현재 일본에서 사용되고 있는 내진성능 평가 방법을 분석하여 국내 도시철도 개착식 터널에 적용성을 검토하였다.

† 책임저자 : 정회원, 충남대학교, 토목·환경공학부, 교수  
E-mail : nhrim@cnu.ac.kr

TEL : (042)821-7005 FAX : (042)821-8867

\* 비회원, 충남대학교, 토목공학과, 석사과정

\*\* 정회원, 충남대학교, 토목공학과, 박사과정

\*\*\* 정회원, 한국철도기술연구원, 선임연구원

## 2. 내진성능 설정

### 2.1 다중내진성능수준

구조물이 보유해야 할 내진성능은 구조물의 용도, 구조물의 손상이 사람의 목숨과 기능에 주는 영향, 2차 재해 방지, 복구에 필요한 시간과 비용 등을 감안해서 정해야 한다. 일반적으로 다음과 같은 세 가지 내진성능을 고려하고 있으며 내진성능은 구조물을 구성하는 부재의 손상과 기초안정으로 구분하고 각각에 대해 손상수준(Damage Level)과 안정수준(Stability Level)을 설정하는 것을 기본으로 하고 있다.

#### 1) 내진성능 I

- ① 지진이 발생한 후 보수하지 않아도 그 기능을 유지할 수 있으며 열차의 주행안전성에 악영향을 미치는 변위가 발생하지 않는다.
- ② 지진 시에 기능을 유지하며, 지진 후에도 구조물에 별다른 피해가 없어 보수를 하지 않고 사용이 가능한 성능이다. 지진 시에 부재에 발생하는 힘이 부재의 항복하중에 이르지 않고, 주변지반의 안정이 확보되어 있으면, 본 내진성능을 만족하고 있다고 본다.

#### 2) 내진성능 II

- ① 지진이 발생한 후 보수가 필요하나 그 기능이 조기에 회복(보수에 어려움이 예상되는 구조물의 잔류변형과 부재의 손상이 허용한도 내)될 수 있는 성능이다.
- ② 지진 후에 구조물의 사용에 필요한 내력이 유지되며 그 기능이 단시간에 회복되는 성능이다. 일반적으로는, 지진 시에 각 부재는 전단파괴하지 않으며 지진에 의한 변위가 종국변위에 도달하지 않아야 한다. 그리고 주변지반의 안정이 확보되어 있으면 내진성능 II를 만족하고 있다고 본다. 단, 보수·보강에 어려움이 따르는 부재에 대해서는 상기보다도 엄격한 제한치를 설정해 응답값이 허용한도 내에 있는지 판정한다.

#### 3) 내진성능 III

- ① 지진에 의해 구조물 전체계가 붕괴되지 않는다.
- ② 지진 후에 구조물의 복원이 불가능하더라도, 구조물 전체계가 붕괴하지 않는 상태의 성능이다.

### 2.2 성능수준별 지진지반운동수준

설계를 위한 지진동은, 지진의 규모, 진원 특성, 진원에서 건설지점에 이르기까지의 지층구조, 전파특성 및 거리, 건설지점의 지형, 지질, 지반조건 등을 고려해서 설정한다.

- 1) 구조물의 설계내용기간 내에 여러 번 발생하는 크기의 지진동 (L1 지진동)
- 2) 구조물의 설계내용기간 내에 발생할 확률이 극히 작은 강한 지진동 (L2 지진동)

위에 제시된 지진동에 대해, 구조물의 중요도에 따른 내진성능을 확보하는 것을 기본으로 한다. 개착식 터널은 지상구조물에 비해 보수·보강이 매우 어려워서 목표 성능을 정할 때에는, 이러한 점을 충분히 유의해야 한다. 앞에서 말한 지진동 수준과 내진성능의 결함을 일률적으로 강구하는 것은 어렵지만, 보편적으로는 다음과 같은 대응을 고려할 수 있다.

- 1) L1 지진동에 대해 내진성능 I 을 만족한다.
- 2) L2 지진동에 대해 내진성능 II 또는 내진성능 III을 만족한다.

### 3. 개착식 터널의 내진성능평가

내진성능 수준의 설정은 철도의 주행성을 고려하여 L2지진동, L1지진동에 대해 각각 내진성능Ⅱ, 내진성능Ⅰ로 설정하고 있다. 지진동 설정은 토질에 따라 분류하여 각 층에 대해 PS검층 결과나 N치를 사용하여 전단탄성파를 도출하고, 단층의 존재에 따른 지역별 계수를 사용하여 설계지진동을 설정한다. 그리고 설계 지진동에 따른 부재의 파괴형태 및 손상레벨을 검토하여 내진성능 확보를 판정한다. 다음의 표 1은 부재별 개착식 터널의 내진성능을 제시한 표이다.

표 1. 개착식 터널의 내진성능

구분		내진성능			
		I	Ⅱ	Ⅲ	
손상수준	상하부 슬래브	1	2	3	
	중간 슬래브	열차하중 지지	1	2	3
		기타	1	3	4
	측벽	1	2	3	
	중간 기둥	1	3	3	
안정수준		1	2	3	

#### 3.1 내진성능Ⅰ

구조물은 지진 후 무보수를 전제로 하기 때문에 개착식 터널을 구성하는 부재의 안정수준을 구조물의 기능을 유지하기 위해 큰 잔류변형이 발생되지 않는 안정수준1로 설정하였다. 손상수준 검토 시 손상수준1 이하 일 때, 내진성능Ⅰ을 만족하고 있는 것으로 판정한다.

#### 3.2 내진성능Ⅱ

지진 후에 기능이 단기간에 회복되는 것을 전제로 하기 때문에 보수의 난이성을 고려해서 손상수준이 각 부재별로 결정된다. 개착식 터널의 상하부 슬래브 및 측벽은 지반과 접하는 부재이므로 지진이 발생된 후 보수가 타 부재에 비해 어려우므로 손상수준2로 결정된다. 개착식 터널의 중간 슬래브가 열차하중을 직접 지지하는 경우에는 지진이 발생된 후 열차의 주행성을 고려하여 손상수준2로 결정된다. 그러나 사람이 통행하는 기타 중간 슬래브나 중간 기둥은 열차의 주행성이나 지반과의 관계를 고려하지 않아도 되어 손상수준3으로 결정하였다. 그리고 내진성능Ⅰ과 동일하게 각 부재의 손상수준이 설정한 손상수준을 초과하지 않으면 내진성능Ⅱ를 만족하고 있는 것으로 판정한다.

#### 3.3 손상수준 검토

부재 단면의 휨모멘트와 곡률과의 관계(그림 1)로부터 부재의 손상수준을 정의할 수 있다.

- 1) 손상수준1 : 지진 후 손상이 발생되지 않는 수준으로 축방향 인장철근이 항복에 도달할 때의 항복모멘트 및 변위
- 2) 손상수준2 : 지진 후 부분적으로 보수가 필요한 수준으로 압축단의 콘크리트가 극한변형률에 도달할 때의 극한모멘트 및 변위
- 3) 손상수준3 : 지진 후 보수가 필요한 수준으로 항복모멘트를 유지하는 최대변위
- 4) 손상수준4 : 지진 후 보수가 필요하고 경우에 따라서는 부재의 교체 필요

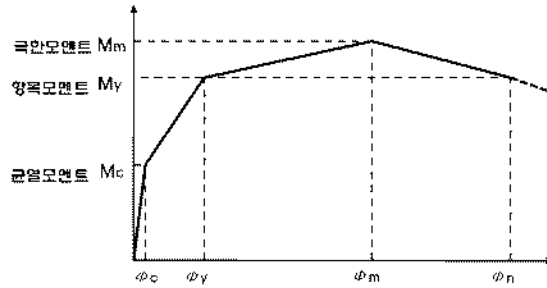


그림 1. 휨모멘트와 곡률과의 관계

### 3.4 파괴형태 검토

부재의 파괴형태는 각 손상수준에서 전단력이나 휨모멘트를 검토하여 전단파괴모드인 경우 휨파괴모드가 발생하도록 단면을 보강하고 휨파괴모드인 경우 내진성능을 만족하는 것으로 판정한다.

- 1) 손상수준1 : 부재가 항복모멘트 이내인 것은 명백하기 때문에 부재의 전단력이 최대전단력 이내이면 결과적으로 휨파괴나 전단파괴가 발생하지 않으므로 휨파괴모드로 판정한다.
- 2) 손상수준2 : 최대전단력을 발생한 휨모멘트( $M_d$ )와 극한모멘트( $M_m$ )의 비(최대전단력 추정계수)를 발생한 전단력에 곱하여 예측한다. 모멘트와 최대전단력 추정계수를 이용해 산정한 최대전단력이 전단내력 이내이면, 휨파괴모드라고 판단한다.
- 3) 손상수준3, 4 : 부재에 극한모멘트가 발생하고 있기 때문에, 최대전단력을 부재가 휨내력에 도달한 경우의 전단력으로 고려한다. 개착식 터널의 외측 부재는 지반과의 상호 작용력의 영향으로 인해, 극한모멘트가 발생한 시점과 전단력의 최대값이 발생하는 시점이 동일하지 않은 경우가 있다. 이러한 경우는, 최대휨모멘트가 발생한 경우가 아니라 최대전단력을 발생한 시점의 단면력 상태에 대해서 파괴형태를 검토한다.

## 4. 결론

각 성능수준에 해당하는 개착식 터널의 요구성능을 일본의 경우처럼 구조물별로 구체적인 성능을 제시하는 것이 타당하며, 그에 따른 요구 성능을 다음과 같이 정리하였다.

- 1) 기능수행수준은 구조물의 설계사용연한(Design Working Life) 동안 최소한 1번 이상 발생할 수 있는 지진에 대하여 엄격히 제한된 손상이 발생되어 본래의 기능을 유지할 수 있어야 한다. 즉, 지진 발생 후에도 구조물의 기능이 온전하여 보수를 하지 않고 사용이 가능한 성능이다. 또한 열차의 주행안정성에 악영향을 미치는 과도한 변위는 발생되지 않아야 한다.
- 2) 붕괴방지수준은 구조물의 설계사용연한(Design Working Life) 동안 발생할 확률이 극히 작은 강한 지진동에 대하여 구조물의 일부분이 손상될 수 있으나 구조물 전체계의 붕괴가 방지되어야 하며, 가능하면 지진에 의한 피해 예측이 가능하고 피해조사와 복구를 위해 현장접근이 가능하도록 설계하여야 한다. 구조물의 구체적인 요구성능은 구조물의 용도 및 중요도, 2차 재해, 그리고 복구에 필요한 시간과 비용 등을 고려하여 결정한다.
- 3) 내진성능을 평가하기 위해 구조물의 부재별 성능수준을 제시하고, 그에 따른 파괴형태 및 손상수준을 검토하여 내진성능의 확보여부를 판정한다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 도시철도표준화2단계연구개발사업의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 일본토목학회 (1998), “개착 구조물의 내진설계”
2. 철도종합기술연구소 (2004) “철도구조물등 설계표준 동해설 내진설계(설계계산 예 개착터널)”
3. 건설교통부 (2005), “도시철도 내진설계 기준”
4. 한국철도기술연구원(2008), “도시철도 표준화 2단계 연구개발사업 1단계 보고서”
5. RTRI (1999), “철도구조물등 설계표준 동해설-내진설계”