

# 철도교량 기초지반의 내진성능평가

## Performance Evaluation of Railroad Bridge Foundation under Design Earthquake

황선근\* 이진욱\*\* 조성호\*\*\* 오상덕\*\*\*\*  
Hwang, Seon-Keun Lee, Jin-Wook Joh, Sung-Ho Oh, Sang-Duk

### ABSTRACT

At the present time, civil structure based of aseismatic design in the Korea began about 1997. However, most of the railway bridge constructed with block and block in the past can easily deteriorate with time due to the increase of repeated traffic loading, increase of train speed, etc.

In this study, soil properties of the substructure of railway bridge with block and block was investigated through the SASW(Spectral Analysis of Surface Waves) and RCTC test in the field and laboratories. Also, stabilization of liquefaction after occurred earthquake was investigated through the Seed & Idress method use of N value and Andrus and Stoke method use of S-Wave velocity.

### 1. 서론

우리나라는 환태평양 지진대에서 벗어난 위치에 있지만 20세기에 들어와 한반도의 지진 발생 빈도의 증가와 중 규모 이상의 지진이 관측되고 있는 실정이다. 따라서 1997년 건설교통부에서는 국내 토목구조물에 대한 내진설계 기준 개발연구를 통하여 교량, 고속철도 및 철도, 건축물, 항만, 터널 등의 내진설계 상위개념을 정립하였으며 그 후 1998년 해양수산부의 [항만구조물에 대한 내진설계표준서], 1999년 항만 및 어항시설 기준서에 내진설계에 대한 내용을 포함하고 2000년 건설교통부는 도로설계기준에 내진설계편을 첨가하였다. 철도청에서도 1998년 철도구조물에 대한 내진성능 평가 및 보강연구를 시작하여 1999년 철도교 설계기준에 내진설계편을 신설하고 2000년 고속철도 시설물 내진설계기준에서 내진설계가 철도시설물 설계에 반영됨으로써 지진에 대한 철도구조물의 내진성능을 확보하고자 하였다.

따라서 본 연구의 목적은 내진설계가 고려되지 않은 기존 철도구조물 중 교량기초지반에 대한 내진성능평가기법을 제안하고 철도교량의 하부구조에 대한 내진성능평가를 수행하여 내진성능 확보를 위한 보강방법 등을 연구하고자 전국적으로 조적식 철도구조물 8곳을 선정하여 철도교량 기초지반에 대한 내진 성능평가를 실시하였다.

### 2. 철도교량 기초지반의 내진성능평가기법 제안

본 연구에서는 철도교의 내진성능평가기법을 예비평가, 간이평가, 상세평가 세 단계로 제안하였으며 예비평가의 경우는 간이평가 및 상세평가를 수행할 대상물을 선정하는 단계로 참고자료를 통해 이루어지며 간이평가의 경우는

\* 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원  
\*\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원  
\*\*\* 중앙대학교 토목공학과 조교수, 비회원  
\*\*\*\* 한국철도기술연구원 연구원, 비회원

상세평가를 수행하여야 하는 경우를 판단하는 단계로 반드시 수행하여 설계 요구상에 만족되지 않는 경우만 상세 내진성능평가를 수행한다. 마지막 단계인 상세평가는 적응성평가, 내진해석을 위한 지반조사, 그리고 지반응답해석의 순서로 진행한 후, 구조적 안정성 평가와 액상화 평가를 실시하여 최종 내진성능 보강 설계를 결정하기 전의 최종단계로 이루어 진다.

도표1. 내진성능평가

	예비평가	간이평가	상세평가
시추조사			2개 이상 해석단면에 대한 시추조사
현장실험	설계자료 및 구조물의 중요도 등으로 예비평가	기존의 N치가 없거나 추정이 불가능한 경우: 1공이상 시추, SPT 또는 CPT 수행	SPT점중, SASW 실험
실내실험	내진설계여부, 정적안정성 평가결과, 구조물의중요도 등을 참고	실내실험은 수행하지 않음 -전단과속도, 최대전단단선제수, 전단변형률에 따른 동적특성 등은 SPT(또는 CPT)의 결과를 이용하여 경험식(또는 곡선)으로 추정함	공진주실험 (지반응답해석용) 진동삼축실험(액상화 상세평가용)
해석방법	-	등가정적해석	등가정적해석 동적해석 3-D 해석중 택일
해석프로그램	-	지반응답해석프로그램	액상화 해석 지반응답해석 말뚝기초해석 지반-구조물 상호작용 해석 프로그램 등이 사용될 수 있음

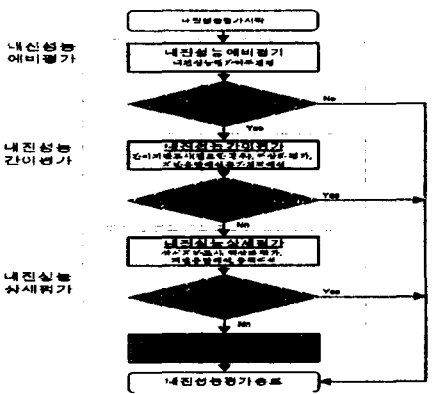


그림1. 철도교량 기초지반의 내진성능평가 흐름도

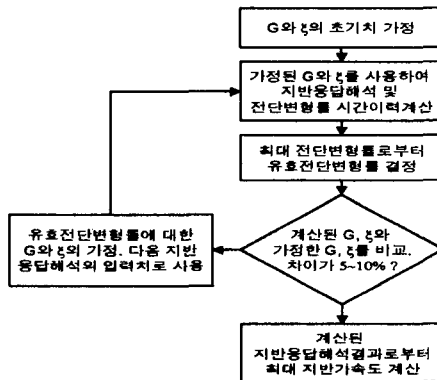


그림2. 등가선형해석의 흐름도

## 2. 지반응답 해석방법과 액상화 평가기법

### 2.1 지반응답해석방법

지반응답해석방법은 하나의 지층을 일차유도계시스템으로 단순화하고 그 시스템에 가해진 지진동 입력에 대한 출력을 구하는 1차원 지반응답해석방법과 1차원으로는 해석할 수 없는 경사와 불규칙한 지표면이 존재하고 매우 강성이 큰 구조물이 지표면 또는 지중에 존재하는 경우 해석하는 동적유한요소해석, 등가선형해석, 비선형 해석, 전단면해석등과 같은 2차원 지반응답해석방법이 있으나, 본 연구에서는 지반응답해석방법은 등가선형해석을 선택 하였고, 그 흐름도는 <그림 2>와 같다.

### 2.2 액상화평가기법

지반의 액상화를 평가하는 방법에는 Seed and Idriss 방법, Iwasaki and Tatsuoka 방법, Ishihara 이론, Eurocode 방법, Andrus and Stokoe방법 등 있으나 본 연구에서는 N치를 이용한 수정 Seed and Idriss방법과 전단 과속도를 이용하는 Andrus and Stoke방법을 제시하였다.

수정 Seed and Idriss 방법의 흐름도는 <그림 3>에 잘 나타나 있다. 이 방법의 특징은 지진으로 인하여 지반내에 유발되는 전단응력의 크기를 경험식에 의하여, 지진의 크기에 대한 최대 가속도를 깊이계수, 진도크기, 지반내의 유상상재하중 등을 이용하여 결정한다. 그러나 본 연구에서는 이 방법과는 다르게 응력감소계수, rd를 사용하지 않고 지반조건과 Shake와 같은 지진 응답해석 프로그램을 이용하여 대상지반의 깊이별 최대가속도를 구하고 이를 이용하여 깊이별 최대 전단응력을 직접 산정하여 좀더 정확한 해석을 수행하였다.

Andrus and Stokoe 방법은 간극비, 응력상태, 응력이력, 지질학적 연대 등 여러 측면에서 영향을 받는 전단파속도를 이용하여 지반의 액상화 저항능력을 평가하였고, 액상화평가방법 순서는 <그림 4>와 같이 요약 정리하였다.

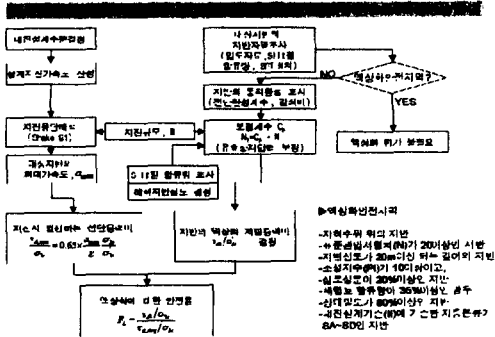


그림3. 수정 Seed and Idriss 방법

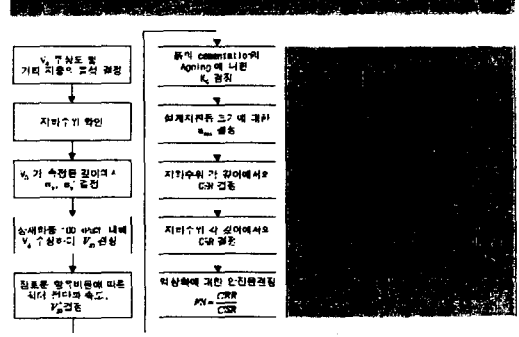


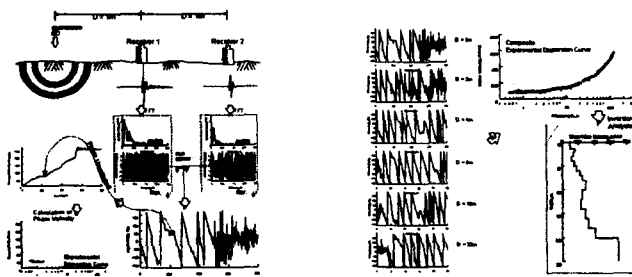
그림4. Andrus and Stokoe 방법

### 3. 철도교 기초지반의 동적물성결정 (SASW 시험, RC/TS 시험)

철도교 기초지반의 내진성능평가를 수행하기 위하여 결정해야할 변수는 지층별 전단파속도와 전단탄성계수 및 재료 감쇠비의 전단변형률이고 이를 결정하기 위하여 비파괴표면파탐사기법인 SASW 실험을 통해 지반의 층별 전단파속도를 구하고, 공진주/비틀전단시험을 통해 전단탄성계수와 재료감쇠비의 전단변형률을 산정하였다.

#### 3.1 비파괴표면파 탐사시험(SASW 시험)

SASW (Spectral-Analysis-of-Surface-Waves) 기법은 지반이나 구조물에 대하여 전단 강성의 깊이별 변화를 추정하기 위하여 비파괴적으로 수행하는 현장 실험법이다. SASW 실험은 기본적으로 지표면이나 구조물의 표면에서 물리적인 충격이나 진동을 가하여 응력파를 발생시키는 것으로 시작이 된다. 충격이나 진동에 의해서 발생한 응력파는 지반이나 구조물의 매체를 통하여 사방으로 전파되어 나가는데, 진동원에서 일정 거리만큼 떨어진 지표면에 설치한 진동 감진기에 의해 지반이나 구조물의 진동을 측정하게 된다. 이렇게 지표면에서 응력파를 발생시키고 일정 위치만큼 떨어진 곳에서 진동에 의한 지반의 진동을 측정하여 하부지반의 지층구조와 깊이에 따른 S-파 속도분포를 구하는 것이 SASW 실험이다. <그림 5>는 시험측정 및 자료분석과정을 나타내고 있다.



(a) 실험분산곡선의 결정 (b) 역산해석에 의한 S-파 속도 추상도의 결정  
그림 5. SASW 실험의 자료분석 및 해석방법

### 3.2 공진주/비틀전단 실험(RCTS 실험)

공진주/비틀전단 실험은 지반의 동적 물성치를 구하기 위하여 가장 널리 사용되는 실내실험 방법으로서 흙의 전

단단성계수와 재료감쇠비를 측정하는 실험법이다. RCTS 실험을 위한 실험방식은 다수 있지만, 여기에서는 1970년 대 후반 Stokoe에 의해서 개발된 Stokoe 식 RCTS 실험을 위주로 설명하였다. Stokoe식 RCTS 시스템의 개념도는 <그림 6>에 도시한 바와 같다. <그림 7><그림 8>은 Site3에 대한 공진주 실험결과로 Ramberg-Osgood모델과 Hyperbolic 모델로 최적곡선을 구하여 이를 지반응답해석에 직접 활용하였다.

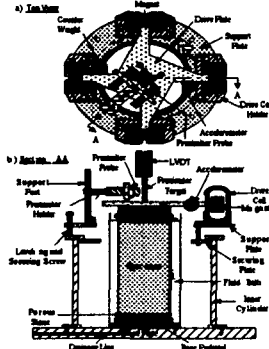


그림 6. 공진주 실험과 비틀 전단 실험을 위한 장비

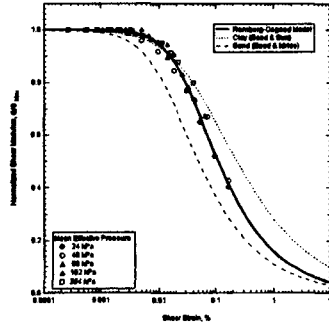


그림 7. 전단변형률에 따른 정규화된 전단탄성계수의 변화

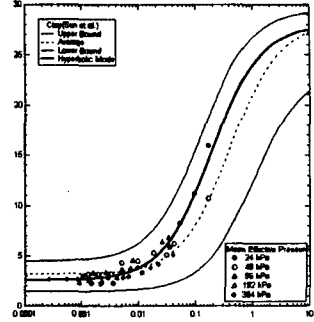


그림 8. 전단변형률에 따른재료의 감쇠비의 변화

#### 4. 철도교 기초지반에 대한 내진성능평가

내진설계가 고려되지 않은 기존 철도교량하부기초지반을 평가하기 위해 선정된 조적식 철도교량은 총8개소이다. 평가 방법은 앞서 설명한 지반조사와 실내실험을 통해 예비평가, 내진성능 간이평가, 내진성능 상세평가 등의 단계를 모두 포함하였고 액상화평가 방법은 앞서 설명한 N치를 이용하는 수정 Seed and Idriss방법과 전단파속도를 이용하는 Andrus and Stokoe방법을 별도로 적용하였다.

액상화 평가를 수행하는데 있어서 입력지진은 <그림 9>와 같이 설계응답스펙트럼을 기초로 하여 작성된 인공지진, 장주기 Hachinohe 지진, 단주기 ofunato 지진을 사용하여 평가하였다. 액상화의 판단은 실제 액상화로 인한 구조물의 손상정도를 평가하는 액상화 가능지수(LPI)형태로 정리하였으며 LPI값이 5미만 일때는 액상화 영향에 거의 없고,  $5 \leq LPI \leq 15$  일때는 지표면에 미소한 영향이 예상되며,  $LPI > 15$  일때는 액상화 영향이 우려된다.

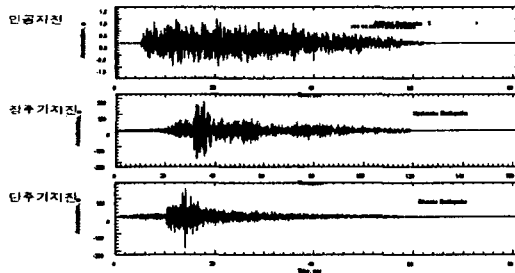


그림 9. 지반응답해석을 위한 입력 지진: 인공지진, 장주기 지진, 단주기 지진

다음은 Site 4에 대해서 두가지 방법을 통해 액상화평가를 수행한 결과이다. 우선적으로 수정 Seed and Idriss 방법은 입력지진에 대해 지반 내에 발생하는 전단응력을 평가하는 지반응답해석을 위해 지반의 등가선형 거동을 구현한 Shake91프로그램을 이용하여 깊이별 최대전단응력과 최대가속도를 구현하였고(그림 10(a),그림 10(b)), 입력지진으로 유발된 지반내 전단응력과, N치를 이용하여 지반의 액상화 저항강도를 비교분석하였으며(그림 10(c)) 수정 Seed and Idriss방법에 의한 액상화 안전율을 깊이별로 계산하였다. (그림 10(d))

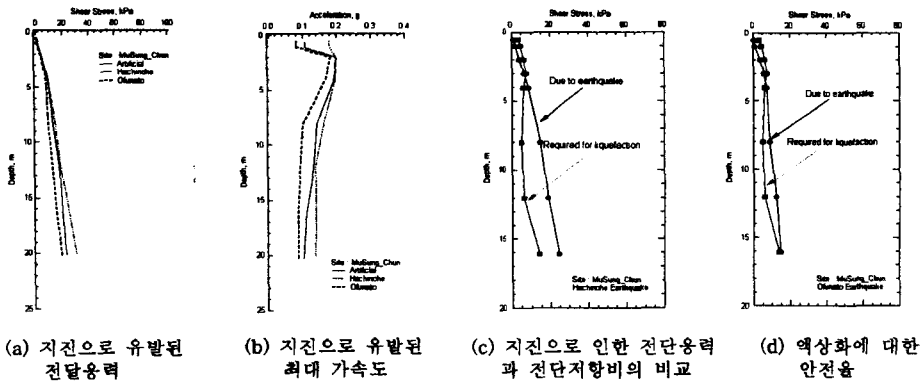


그림 18 Site4의 교량기초지반에 대한 액상화 평가: 전단파 속도에 의한 평가

두 번째 방법인 Andrus and Stokoe 방법에 의한 평가는 <그림 11>과 같이 깊이에 따른 전단파 속도와 유효상재하중에 대해 수정한 전단파 속도의 분포, 지진으로 인하여 유발되는 지반내 전단응력비 CSR과 지진에 저항하는 저항강도비 CRR을 도시하고 있으며, 궁극적으로 액상화에 대한 안전율, 즉 CSR과 CRR의 비율 최종적으로 제시하였다.

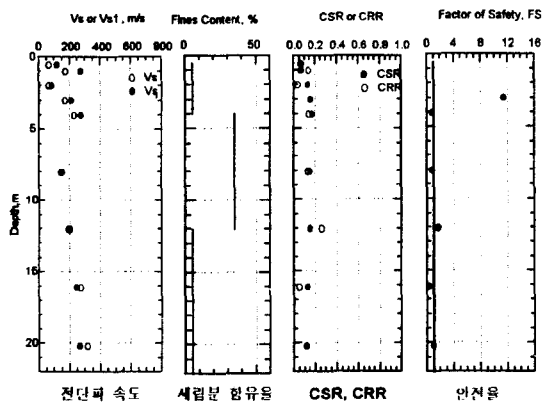


그림 11. Site4의 교량기초지반에 대한 액상화 평가: 전단파 속도에 의한 평가

총 8개 개소의 철도교량 기초지반의 액상화 평가를 요약하면 <도표 2>와 같으며, N치를 이용한 수정 Seed and Idriss방법과 전단파속도를 이용한 Andrus and Stokoe방법 모두 총 8개소중 7개소가 액상화가능지수(LPI)값이 5미만으로 지진발생시 액상화에 대해 안전한 것으로 판단된다. 한 개소에 대해서는 지반에 대한 정확한 자료가 없는 관계로 평가를 수행하지 못하였다.

도표 2 철도교량 기초지반에 대한 액상화 가능지수(LPI)

철도교량 위치	N 치를 이용하는 수정 Seed and Idriss 방법			전단파 속도를 이용하는 Andrus and Stokoe 방법		
	인공지진	강주기 지진	단주기 지진	인공지진	강주기 지진	단주기 지진
Site 1	0	0	0	0	0	0
Site 2	0	2.09	1.25	0	0	0
Site 3	1.00	0.91	1.74	0.43	0.43	0.39
Site 4	0.53	0.83	0.12	0	0	0
Site 5	0	0	0	0.8	0.86	1.30
Site 6	0	0	0	0	0	0
Site 7	0	0	0	0	0	0
Site 8	-	-	-	-	-	-

## 5 결론

우리나라 철도교량중 조적식구조물의 지진발생시 안정성을 판단하고자 기초지반의 내진성능평가를 수행한결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 철도교량 기초지반에 대한 내진성능평가를 예비평가, 간이평가, 상세평가와 같이 세단계로 제안하였으며 지반조사, 동적물성치를 위한 실내실험, 내진해석 등과 같은 고비용의 과정은 위험이 판단되는 경우에만 적용하여 경제성 및 효율성을 높인다.
- 2) 철도교량중 조적식 구조물의 기초지반에 대한 액상화 평가는 보편적으로 N치를 이용하는 Seed and Idriss방법과 지반의 물성과 관련이 깊은 전단파속도를 이용하는 Andrus and Stokoe방법을 적용한 결과 철도교량의 기초지반 8개소 중 7개소가 모두 지진발생시 액상화에 안전한 것으로 판단되었다.
- 3) 철도교량 기초지반에 대한 내진평가는 지진 발생시 가장 큰 피해를 예상할 수 있는 액상화 발생가능성을 평가하는 것이 바람직 하며 전국 8개소를 통한 조적식 구조물의 안전평가를 바탕으로 전국 철도교량 기초지반의 단계적인 액상화평가 수행이 이루어 져야 할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 철도청 지원에 의하여 한국철도기술연구원(KRRI)와 중앙대학교 지반동역학연구실(SDLAB)주관으로 수행되었으며 이에 감사드리는 바입니다.

## 참고문헌

1. A. De Stefano, D. Sabia, L. Sabia (1999). "Probabilistic Neural Networks for Seismic Damage Mechanisms Prediction", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* Vol 28 No. 8, p 807 - 821.
2. Bay, J. A. (1997). *Development of a Rolling Dynamic Deflectometer for Pavement Testing*. Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin.
3. Ganji, Vahid (1997). *An automated inversion procedure for surface wave testing*, Ph. D. Dissertation, The University of New Jersey at New Brunswick.
4. Giovanni, Cascante. (1996). *Propagation of mechanical waves in particulate materials*, ph. D. Dissertation, The University of Waterloo.
5. Giovanni, Cascante., Carlos, Santamarina., najwa Yassir. (1998). *Flexural excitation in a standard torsional-resonant column device*. Canadian Geotechnical journal. J. Vol.35