

# 모의 지진하중에 의한 교량의 사각에 따른 축방향변위에 대한 확률론적 해석

## Probabilistic Analysis for Longitudinal Displacement due to Skew Angle of Bridges under Scenario Earthquakes

전 환 석\*

이 대 형\*\*

정 영 수\*\*\*

Cheon, Hwan Seok

Lee, Dae Hyung

Chung, Young Soo

---

### ABSTRACT

Since the mid of the 20th century in the world, it has been observed that the number of minor or moderate earthquake motions tend to be increased year by year. Owing to the topographical condition, moreover, large numbers of skew bridges have been constructed for the requirements of more than DB18 ton bridge in Korea. It has been also observed from foreign countries that lots of superstructures collapse in bridge were occurred in previous earthquakes, inclusive of 1995 Kobe earthquake. This is caused by a relative displacement between the upper and lower structure of bridge by the earthquake and the rotation with respect to the vertical axis of skew bridges, which were subjected to an earthquake motion.

In this study, the probabilistic analysis of unseating failure of skew bridges under scenario earthquake has been carried out by evaluating the longitudinal displacement of skew bridges.

---

### 1. 서론

#### 1.1 일반사항

20세기에 들어와서 세계적으로 지진활동이 다시 활발해지고 있고 우리나라도 최근 백령도지진(1995), 영월지진(1996), 경주지진(1997)등 중소규모 이상의 지진발생이 짧은 기간내에 계속되어 단위 시간당 지진발생이 다시 증가하는 경향을 비추어 볼 때 인명과 사회-경제 시스템에 막대한 피해를 초

---

\* 정회원, 중앙대학교 토목공학과 석사과정

\*\* 정회원, 경북도립 예천전문대학 전임강사

\*\*\* 정회원, 중앙대학교 건설대학 토목공학과 교수

래할 수 있는 대형 지진재해 발생에 대한 잠재적 가능성을 전혀 배제할 수 없다.

지진은 일반적으로 그 발생시기와 위치 및 규모를 예측하기 어렵기 때문에 Random 즉, 무작위적 현상으로 이해되고 있다. 따라서, 지진재해는 일반적으로 확률적인 함수로써 표현되고 있다. 내진설계를 위해서는 지진재해의 수준과 확률과의 관계가 규명되어야 하며, 이를 지진재해도 해석이라고 한다. 지진재해도의 해석에는 신뢰성이 높은 계측기록이 사용되어야 하나 자료가 빈곤하여 역사지진기록과 같이 불확실성이 높은 자료에 의존해야 할 경우에는 그 불확실성을 고려하여 해석하는 방법이 요구되고 있다. 지진재해도 평가는 구조물과 시설물의 중요도에 따라서 확률론적(Probabilistic)방법이 사용되기도 하고 결정론적(Deterministic)방법이 사용되기도 한다.

## 1.2 연구목적 및 범위

우리나라의 경우 지형적인 조건, 차량의 설계속도의 증가, 통행공간의 제한등으로 사각을 사용한 교량구조물이 많이 건설되고 있으며, 이에 대한 해석방법도 점점 변화되고 있다. 일반적인 구조해석 방법은 수학적 해석방법을 이용하는 수치적 해석이 있으며, 재료적 특성과 경계조건이 단순한 구조물인 경우는 수학적 해석을 이용하여 해석할 수 있으나, 복잡한 구조물은 computer를 이용한 근사해법을 이용하여 구조물을 해석한다. 사각을 가진 구조물의 경우에는 일반적으로 내진성능이 떨어진다. 내진성능이 우수한 교량을 설계하기 위해서는 전체적인 구조가 단순하고 대칭을 이루는 형상을 갖도록 하여 하부기초에서 전달되는 지진력에 대한 교량전체가 효과적으로 거동할 수 있도록 계획하는 것이 바람직하다. 그러나, 실제 교량은 곡률을 가질 수도 있고 사각이 크게 발생할 수 있으며 일부경간이나 전체연장이 긴 교량이 될 수 있으므로 지진에 대하여 효율적으로 거동할 수 있도록 계획하는 것이 바람직하다.

Kobe지진을 포함한 많은 국외지진의 피해사례중 교량상판이 낙교되는 붕괴현상이 다수 보고되고 있다. 이는 지진에 의한 교량의 상부구조와 하부구조 사이에 발생한 상대변위가 원인이며 따라서 설계에 있어서 설계변위량의 산정은 설계지진력의 산정만큼 중요하게 다루어져야 한다. 사각교량은 지진시에 수직축에 대하여 회전하는 경향이 있으며 교대부나 교각부에서 상부구조의 회전에 의해 모서리 부분에서의 축방향변위가 많이 발생되므로 연단거리가 부족하게 되어 낙교가 많이 발생하였다. 사교의 이러한 거동에 대한 이론적 증명은 있으나 아직까지는 구조적으로 명확히 규명하지는 못한 상황이므로 안전측의 설계를 위하여 받침거리등이 확보되어야 한다.

그러나, 현도로교표준시방서의 받침거리 규정은 미국의 AASHTO시방서에서 정하는 SPC(the Seismic Performance Category) B 및 A에 해당하므로 우리나라 교량구조물에 실제 적용하여 검증할 필요가 있다. 일반적으로 교량구조물의 낙교에 대해서 해석할 경우 교량의 종류, 교장, 교폭, 교량의 받침, 사각, 교각의 높이, 지점조건등 여러 변수들이 있다. 따라서, 본 연구에서는 사각을 갖는 교량구조물에 대해서 사각에 따라 예각부에서의 수평변위를 구하여 사각에 따른 지진하중에 의한 낙교의 확률적인 특성을 분석하고 도로교표준시방서의 받침거리 규정을 검토하고자 하였다.

## 2. 최소받침길이의 산정

### 2.1 교좌의 설계

교좌면의 치수는 교축방향과 교축직각방향에 대해서 위에서 나타낸 사항을 고려해서 정하여야 한다. 교축방향의 치수는 받침을 안전하게 설치할 수 있어야 되므로 들보 끝과 홍벽(교대의 경우) 또는 들보 끝끼리(교각의 경우)의 간격을 고려해서 정하지 않으면 안된다. 특히 사교나 곡선교의 경우는 형좌가 교좌면에서 벗어나지 않도록 해야 한다.

이 교좌면은 받침을 통해서 상부구조로부터 하중 등의 집중반력을 받는 곳이다. 따라서 받침 끝에서 정부 연단까지의 거리가 작으면 고정단에서는 전단면에 연해서 교좌가 파손되는 경우가 있고 또 가동단에서는 받침이 벗어나 들보가 낙하한 일도 있다. 이 받침 연단거리  $S$ 의 크기는 상부구조의 종류, 지반의 상황 등에 의해 결정하여야 한다. 일반적으로 단순지간에서 지진시 등에 구체 받침부의 이동량이 커지지 않을 것으로 보는 경우에, 콘크리트 교좌에 강제받침을 설치하는 경우의 받침연단거리  $S$ 에 대해 조문과 같이 정했다.

하부구조 정부에 있어서 교축방향의 받침연단과 하부구조 정부 연단 사이의 거리  $S(\text{cm})$ 는 다음의 식(2.1), 식(2.2)의 값 이상으로 한다.

- 1) 들보의 지간길이 100m 이하:

$$S = 20 + 0.5L \quad (2.1)$$

- 2) 들보의 지간길이 100m 이상:

$$S = 30 + 0.4L \quad (2.2)$$

다만,  $L$  : 지간길이(m)

### 2.2 내진설계

내진1등급교의 설계변위는 탄성해석으로부터 구한 최대 변위값과 식(2.3)에 규정한 최소 받침 지지길이 중 큰 값을 취하도록 하였다. 교량의 탄성해석에 의한 변위는 교량의 비탄성응답의 결과인 실제 변위에 대하여 적당한 예측이 될 수 있다. 그러나 변위는 기초의 유연도에 매우 민감하여, 탄성해석에 기초가 포함되지 않았고 연약지반에 가설된 교량이라면 규정된 변위를 증가시켜야 한다. 그 증가량은 50% 또는 그 이상이 될 수 있으나 어떠한 일반화 작업도 주의 깊은 판단이 필요하다. 이보다 좋은 방법은 탄성해석에 기초의 유연도를 함께 고려하여 변위의 상한치 및 하한치를 결정하는 것이다. 높은 교각을 갖는 교량에 대해서는 기초의 유연도에 대해 특별한 주의를 기울일 필요가 있다. 내진2등급교에 대해서는 탄성해석을 하지 않아도 좋으므로 식(2.3)에서 정한 값이 유일한 설계변위조건이 된다. 내진2등급교의 최소 받침 지지길이( $N$ )는 식(2.3)에 규정한 값보다 작아서는 안된다. 한편, AASHTO시방서의 경우는 식(2.4)와 같이 사각의 영향을 고려한 항이 추가되어 있다.

$$N = 203 + 1.67L + 6.66H \quad (\text{mm}) \quad (2.3)$$

$$N = 203 + 1.67L + 6.66H(1 + 0.000125S^2) \quad (2.4)$$

여기서, L : 인접 신축이음부까지 또는 교량단부까지의 거리(m).

H : 다음 각 경우에 대한 평균 높이(m)

S : 상판의 수직선으로부터 측정한 받침의 기울어진 각도

### 3. 해석방법 및 모델링 기법

#### 3.1 시간이력 해석법 (Time History Analysis)

시간 이력 해석법은 지진에 의한 지반운동의 시간에 따른 변화를 알 때 구조물의 거동을 알아내는 정확한 해석방법이지만 예상되는 지진의 지반운동을 정확하게 예측하기 어려우므로 기존의 지진 기록을 사용하거나 합성된 지진을 사용해야 하며 막대한 계산량이 요구되는 단점이 있다. 그러므로 일반적인 교량의 설계를 위한 해석방법으로는 적절하지 못하고 극히 중요한 구조물의 해석이나 구조물의 비선형 해석 등 정밀 해석이 필요한 경우 혹은 이미 설계된 구조물에 대한 정확한 안전점검의 수단으로 주로 쓰는 방법이다.

따라서 일반적으로 직접 기초에 정형적인(Regular) 교량으로 고유주기가 1.0sec이하인 교량인 슬래브교 및 PSC교와 같은 교량은 단일 모드 스펙트럼 해석법을 사용하며, 고유주기가 1.0sec이상인 연약 지반상의 깊은 기초형식 교량과 같이 기초와 병행하여 해석되어야 할 연속교량에는 다중모드 스펙트럼 해석법을 적용하며 비정형화(Irregular) 교량 또는 지반과 구조물의 상호 작용 및 기초 분리 장치등의 면진장치를 사용한 교량에 대해 비선형 해석 및 피로해석등을 할 경우에 대한 해석방법은 시간이력해석법을 사용하는 것이 바람직하다.

#### 3.2 확률밀도 해석 방법

확률밀도함수(PDF)는 데이터를 개념적, 정량적으로 설명하는데 매우 유용하다. 이중 일반확률밀도함수(Normal PDF)는 가장 흔히 사용되고 수학적 정의를 이해하기 쉽다. 만약, 교량을 여러개의 지진에 대해 수평변위(x)를 구하여 확률밀도로 나타낼 경우 x가 normal분포를 나타내면 아래의 식(3.4)와 같이 쓸 수 있다.

$$p(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{x - \bar{X}}{\sigma_x} \right)^2 \right\} \quad (3.4)$$

여기서,  $\bar{X}$  : 수평변위 x의 평균값,  $\sigma_x$  : 수평변위 x의 표준편차

또한,  $X_i$ 를 지점에서의 수평변위,  $X_j$ 를 연단거리라 하면 지진에 의해 낙교할 확률은 식(3.5)와 같이 표시할 수 있다.

$$p(z) = Z_i = X_j - X_i < 0 \quad (3.5)$$

$$\beta = \frac{\bar{Z}}{\sigma_z} \quad (3.6)$$

여기서,  $\bar{Z}$ :  $Z_i$ 의 평균값,  $\sigma_z$ :  $Z_i$ 의 표준편차

### 3.3 모델링기법

동적해석모델의 예로는 집중질량모델(Lumped mass model)을 들 수 있으며, 이 모델은 구조물의 배치가 규칙적이고 균일한 정형적인 교량 구조물에 대하여 설계목적상 일반적으로 만족할 만한 결과를 준다는 사실이 알려져 있다.

특히 곡교나 사교의 경우, 비대칭성, 불규칙한 기하학적 형상 및 질량의 불균일한 분포 등에 의해 교차의 모우드가 발생하게 되지만, 효과는 구조물 전체의 응답에 영향을 주지는 못하므로 집중질량모델은 일반적으로 전체 구조물에 대한 만족할 만한 응답을 준다.

### 4. 해석결과 및 분석

본 연구에서는 지진하중에 의한 지점부에서의 수평변위를 산출하기 위해서 여러개의 지진하중에 의한 변위의 평균값을 구하고자 하였으며, 모의지진하중 100개를 산출하여 입력하였다. 해석대상모델은 RC슬래브교와 PSC교에 대하여 4가지 경우로 100개의 모의지진파에 의한 예각부의 평균수평변위값을 각각 그림으로 나타내면 아래의 그림 1과 2와 같으며, 사각이 커짐에 따라 변위값이 증가함을 알 수 있다. 변위값의 증가량은 표 1과 같으며, 변위값의 최대증가량은 약 11%정도로 나타났다. 이는 AASHTO시방서에 규정된 식  $1+0.000125S^2$ 의 계산값인 11.25%와 유사한 값을 보이며, 하부구조가 교대인 경우는 교각의 경우와 같이 하부구조의 거동을 고려하지 않고 해석하였기 때문에 수평변위값이 작게 나타났다.

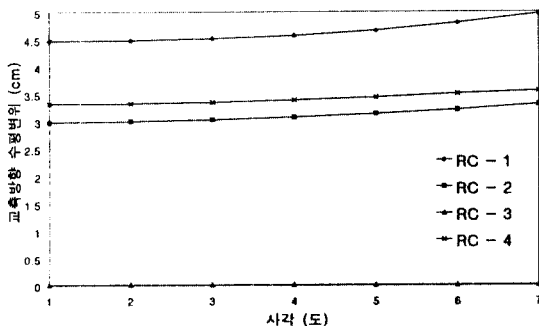


그림 1 사각에 따른 RC슬래브교의 예각부에서의 평균 종방향 변위값

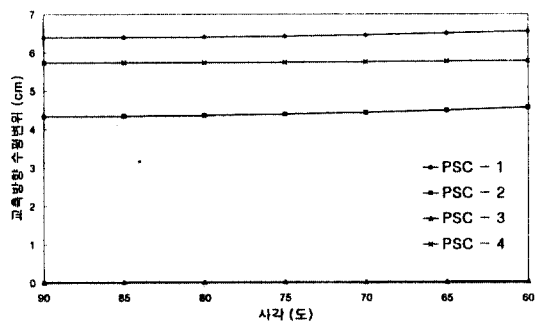


그림 2 사각에 따른 PSC교의 예각부에서의 평균 종방향 변위값

**RC - 1**  
교량종류      형태

- CASE 1 : 3경간 연속교인 경우  
 CASE 2 : 단경간, 하부구조가 교각인 경우  
 CASE 3 : 단경간, 하부구조가 교대인 경우  
 CASE 4 : 단경간, 탄성받침 사용한 경우

표 1 사각에 따른 예각부 증방향 변위의 평균값(cm) 및 직교에 대한 변위값의 증가율(%)

|     | RC - 단경간 |       | PSC - 단경간 |      | RC - 3경간 |       | PSC - 3경간 |      |
|-----|----------|-------|-----------|------|----------|-------|-----------|------|
|     | 평균변위     | 증가율   | 평균변위      | 증가율  | 평균변위     | 증가율   | 평균변위      | 증가율  |
| 90° | 2.975    | -     | 4.329     | -    | 4.468    | -     | 6.394     | -    |
| 75° | 3.070    | 3.19  | 4.386     | 1.32 | 4.570    | 2.28  | 6.424     | 0.47 |
| 60° | 3.300    | 10.92 | 4.563     | 5.41 | 4.969    | 11.21 | 6.556     | 2.53 |

5. 결론 및 추후연구과제

위의 결과로부터 사각을 갖는 교량의 경우 직교에 비해 수평변위가 더 많이 발생하므로 내진설계 시 사각의 경우는 직교의 경우보다 연단거리를 더 두어야 할 것으로 판단되며, 현 도로교시방서 내진설계편의 최소받침거리 규정에 사각의 영향을 고려한 항이 추가되어야 할 것으로 사료된다. 또한, 수치적인 해석결과의 변위값이 시방서의 규정보다 상당히 작은 값을 보이므로 현 도로교시방서의 규정이 과다하게 산정된 것으로 판단되나, 보다 확실한 검증을 위해 추후에 다양한 교량형식에 대해 보다 정밀한 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금(과제번호 : 97K3-1301-04-02-3)에 의한 것으로 한국과학재단에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Chopra, "Dynamics of Structures", PrenticeHall, 1997
2. Priestley, M. J. N., Seible, F., Calvi, G. M., "Seismic Design and Retrofit of Bridges", Willey Interscience, 1996
3. Y.S.Chung, M Shinozuka, C Meyer, "SARCF User's guide seismic Analysis of reinforced concrete frames", NCEER, NewYork, 1988
4. Gary C. Hart, "Uncertainty Analysis, Loads, and Safety in Structural Engineering", Prenticehall, 1982
5. "고속도로 교량의 내진설계 지침", 한국도로공사, 1996
6. "도로교 표준시방서", 대한토목학회, 1996