

지진하중 및 교량구조물의 확률적 특성을 고려한 받침손상위험도 분석

Bearing Damage Analysis of Bridges Considering the Probabilistic Characteristics of Earthquake and Structural Properties

김 상 효* 마 호 성** 이 상 우*** 김 철 환****
Kim, Sang-Hyo Mha, Ho-Seong Lee, Sang-Woo Kim, Cheol-Hwan

ABSTRACT

The risk of bearing failure is evaluated through the seismic response analysis of a bridge considering the probabilistic characteristics of structural properties such as the mass of superstructure, the stiffness of pier, and the translational and rotational stiffness of the foundation as well as seismic loadings during the bridge service life. The effect of pounding between adjacent vibration units on the risk of bearing failure is also investigated. The probabilistic characteristics of structural properties are obtained by the Monte Carlo simulations based on the probabilistic characteristics of basic random variables included in the structural properties. From the simulation results, the failure probability of fixed bearings attached on the abutment is found to be much higher than those placed on the piers. It is also found that the pounding effect significantly increases the failure probability of bearings. In the simply supported bridges, the risk of bearing failure increases as the number of bridge spans increase. Therefore, the failure probability of fixed bearing due to the effects of pounding phenomena and the number of bridge spans should be considered in the seismic design of bearings.

1. 서 론

교량구조물의 내진성능 평가시 기본적으로 고려되어야 하는 것으로는 입력하중이 되는 지진이력은 물론 교량구조물의 지진거동특성을 결정짓는 구조요소들이다. 지진이력은 기저암에서 발생될 것으로 예측되는 지반진동의 불확실성뿐만 아니라 지진파가 전달되는 매체인 지반자체에 포함되어 있는 불확실성 등으로 인하여 확률론적인 접근방법에 의한 모형화가 필요하다. 또한 교량구조물의 동적거동에 영향을 미치는 구성요소들도 기하학적인 형상이나 재료적 물성치 등에 있어서의 변동성으로 인해 불확실성을 항상 내포하게 된다. 그러므로 교량구조물의 지진응답을 보다 실제적으로 평가하기 위해서는 확률론적인 접근방법에 의해 평가가 이루어져야 한다.

일반적으로 현재까지는 이런 불확실성을 반영할 수 있는 대안으로써 안전을 개념을 도입하여 구성요소들의 불확실성에 의한 위험성을 줄여 왔다. 그러나 이러한 안전을 개념은 실제 발생할 수 있는 위험성의 정도를 정량적으로 분석하기 어렵다는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해서는 불확실성을 갖는 요소들의 변동성을 확률적으로 모형화하여 분석할 필요가 있으며, 따라서 확률론에 근거한 신뢰성 분석기법의

* 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수, 정회원
** 호서대학교 기계건축토목공학부 조교수, 정회원
*** 연세대학교 토목공학과 박사과정, 학생회원
**** (주)유신코퍼레이션 사원

도입이 요구된다.

그러므로 교량구조물의 내진성능에 대한 안전성을 확률론적으로 평가하기 위해서는 교량구조물의 지진거동에 중요한 영향을 미치는 대표적인 물성치들의 확률적 특성이 분석되어야 하며, 이를 고려한 교량구조물의 지진응답에 대한 확률적 특성이 우선적으로 분석되어야 한다. 교량구조물의 응답특성을 확률적으로 분석하는 방법 중에서 보편적으로 널리 알려진 기법이 몬테칼로 모의분석기법이다. 이 모의분석기법은 복잡한 구조물의 확률적 응답특성을 구하는데 매우 유용한 분석기법이기는 하나 단순 모의분석기법으로 정확한 해를 얻으려면 많은 계산 시간이 소요되는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하고 보다 짧은 시간에 응답특성을 효과적으로 반영할 수 있는 기법으로 응답의 확률특성을 이용한 분석기법이 있다. 응답의 확률특성을 이용한 분석기법에서는 구조응답의 확률적 특성이 정규분포와 같이 일반적으로 널리 알려진 분포를 갖는다면 적절한 규모의 응답특성을 이용하여 전체적인 구조응답의 확률분포 및 확률특성값을 쉽게 구할 수 있는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 교량구조물의 동적거동에 영향을 미치는 물성치들 중에서 지진응답에 지배적인 영향을 미치는 대표물성치를 선정하고, 선정된 대표물성치들의 확률특성과 지진하중의 확률특성을 반영한 교량구조물의 지진응답특성을 확률적으로 분석하고자 한다. 또한 응답의 확률특성을 이용한 분석기법을 적용하여 받침의 손상위험도를 평가하고, 이러한 결과를 바탕으로 지진하중을 받는 받침의 내진성능을 확률론적인 접근방법을 통해 효과적으로 분석할 수 있는 내진신뢰성 평가기법을 제시하고자 한다.

2. 지진하중을 받는 교량구조물의 모형화

본 연구에서는 교량구조물 및 지진하중의 확률특성을 고려한 교량구조물의 지진응답특성을 분석하기 위하여 그림 1에서 보여지는 바와 같이 지간장 30m인 6경간 PSC 거더교를 대상으로하였으며, 상부구조 및 하부구조의 단면제원은 그림 2와 같다. 교각형식은 원형단면(D=1.95m)을 갖는 기둥으로 이루어진 π 형이며, 교각높이는 동일하게 12m를 적용하였다. 교각의 기초형식은 비교적 지반조건이 양호한 경우에 사용되는 직접기초를 이용하였으며, 기초의 교축방향 폭은 6m, 교축직각방향 폭은 14m, 그리고 높이는 2m로 하였다. 교대는 확대기초 위에 놓여 있는 앉힘형태의 교대로 높이는 6.5m이며, 확대기초의 교축직각방향과 교축방향 폭은 각각 17m와 4m를 적용하였다.

대상 교량구조물은 지진하중으로 인한 교축방향 거동특성을 고려하기 위하여 그림 1과 같이 7개의 단위진동계로 구분되었으며, 전체 대상 교량구조물의 해석모형은 그림 3에 나타난 바와 같이 교량구조물의 교축방향 지진거동특성에 영향을 미치는 다양한 인자들을 고려할 수 있도록 이상화되었다. 그림 3에서 m , K , C 는 각각 구성요소들의 질량, 강성, 감쇠이며, L 은 교각의 높이이다. 본 연구에서 고려된 영향인자로는 인접한 진동계간의 충돌, 가동단의 마찰, 교각의 비선형성, 그리고 교대와 기초의 운동이다.

인접 진동계간의 충돌현상은 그림 3에서와 같이 두 진동계사이에 탄성의 스프링강성(S_p)과 감쇠(C_p)를 갖는 충돌요소를 이용하여 모형화하였으며, 여유공간(d_p)은 온도변화나 건조수축 등으로 인해

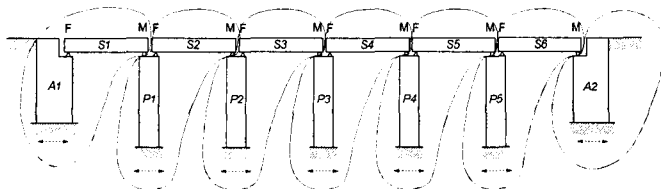


그림 1. 대상 교량구조물

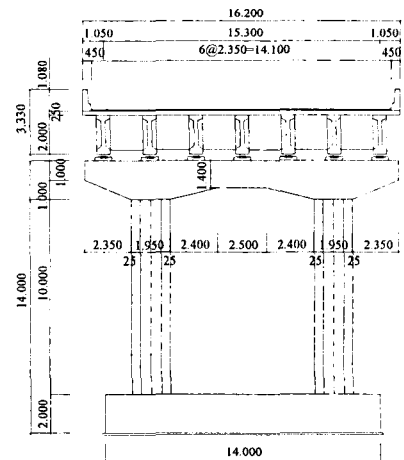


그림 2. 교량구조물의 단면제원 (단위:m)

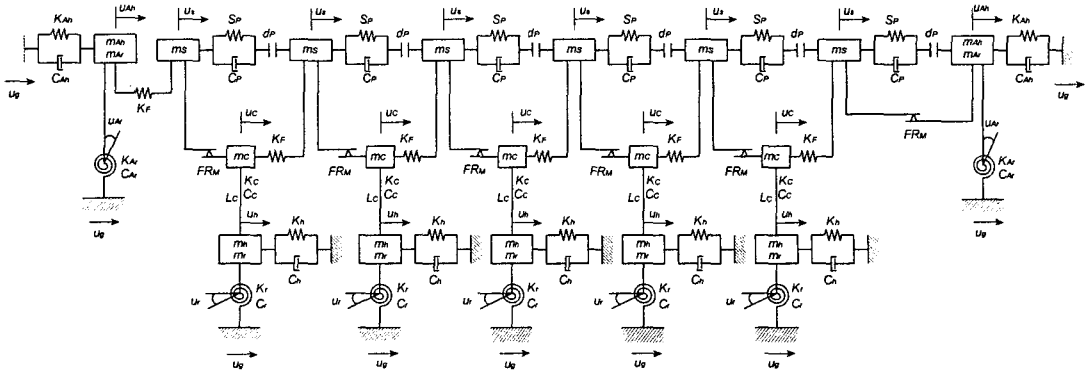


그림 3. 단순화된 교량해석모형

신축이음부에서 발생하는 상부구조의 변위량을 고려하여 5cm를 적용하였다⁽¹⁾. 가동단에서의 마찰은 상대속도와 마찰력의 관계로 표현되는 속도모형을 이용하였으며, 마찰계수는 $\mu=0.05$ 를 적용하였다⁽¹⁾. 그림 3에서 FR_M 는 가동단에 작용되는 마찰력을 나타낸다. 철근콘크리트 교각의 비선형성은 기하학적 비선형성을 나타내는 P- Δ 효과와 재료적 비선형성을 고려할 수 있는 히스테리시스모형을 이용하여 반영하였다⁽²⁾.

교대-뒷채움재 시스템과 교각기초는 병진변위와 회전변위를 갖는 2자유도 시스템으로 모형화하였다. 이때, 병진강성(K_{Ah} , K_h)과 회전강성(K_{Ar} , K_r)은 현행 도로교설계기준(2000)에서 제시하고 있는 방법을 이용하여 산정하였다⁽³⁾.

3. 대표물성치의 확률분포특성 및 지진응답의 확률분석기법

교량구조물의 지진응답특성을 지배하는 요소들 중 본 연구에 적용된 대표적인 물성치로 교량구조물의 상부구조 질량, 교각강성, 기초강성을 선정하였다. 그러나 현재 시공되어 있는 교량구조물에 있어서 이러한 대표물성치들의 분포특성에 관한 조사자료나 연구자료는 찾아보기 어려운 실정이다. 현재 이용가능한 조사자료로는 건축구조물이나 모형실험으로부터 얻어진 결과이며, 본 연구에서는 이러한 자료에 기초하여 교량구조물의 대표물성치에 대한 확률분포를 결정하였다. 그러나 교량구조물은 기하학적인 형상 및 작용하중의 특성상 사용되는 재료의 물성치 등에 있어서 건축구조물이나 축소실험모형과는 상당히 다르므로 기존의 조사자료를 그대로 적용할 수 없기 때문에 물성치를 구성하는 확률변수들에 대한 기존자료를 바탕으로 몬테칼로 모의분석기법을 이용하여 대표물성치들에 대한 확률분포특성을 재평가하였다. 모의분석규모는 모의분석규모에 따른 확률특성값의 민감도 분석을 통하여 응답의 확률특성값이 수렴하게 되는 모의분석횟수로 결정하였다.

대표물성치들의 확률특성을 분석하기 위해 적용된 확률변수들의 분포특성 및 이로부터 산정된 대표물성치의 분포특성은 표 1~3과 같다. 단, 교각강성의 확률특성은 탄성강성에 대해서만 평가되었다. 따라서 콘크리트 교각의 비선형성을 나타내는 히스테리시스 모델의 주요변수인 교각의 항복변위와 항복후 강성의 변동성은 교각의 탄성강성의 확률특성을 고려한 철근콘크리트 교각의 하중-변위관계곡선을 이용하여 산정하였다. 그림 4는 철근콘크리트 교각의 평균탄성강성을 포함한 임의의 5개의 탄성강성을 적용한 경우의 하중-변위관계를 도시한 결과이다. 그림 4로부터 알 수 있듯이 항복변위와 항복 후 강성은 탄성강성의 변동성에 관계없이 거의 일정한 값을 갖는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 탄성강성의 변동성에 관계없이 항복변위 D_y 와 항복후 강성 K_h 에 대해 일정한 값을 적용하였다.

평가된 대표물성치의 확률분포특성을 반영하여 교량구조물에 대한 지진응답의 확률분포특성을 평가하기 위하여 본 연구에서는 응답의 확률특성을 이용한 분석기법을 적용하였다. 응답의 확률특성을 이용한 분석기법은 응답의 분포형태가 정규분포 등과 같이 일반적으로 널리 알려진 분포특성을 갖는다면 응답의 확률분포특성을 나타낼 수 있는 적절한 규모의 확률변수를 주어진 확률분포형태에 따라 모의 발생시키고, 그 분석결

표 1. 콘크리트 압축강도의 확률분포특성

확률변수	설계기준	분포특성
교각의 직경 ^{a)}	195cm	$N(\mu=195\text{cm}, \text{c.o.v}=0.015)$
콘크리트 덮개 ^{b)}	10cm	$N(\mu=10.84\text{cm}, \sigma=0.42\text{cm})$
철근콘크리트의 압축강도 ^{b)}	240kgf/cm ²	$LN^{b)}$ ($\mu=264\text{kgf/cm}^2, \text{c.o.v}=0.18$)
a)철근의 단면적 비율 ^{c)}	D29	$LN(\lambda^{c)}=1.03, \text{c.o.v}=0.06)$
교각의 탄성강성		$N(\mu=1.0^{d)}, \text{c.o.v}=0.061)$

a) (A_s/A_c)=실제 공급된 철근의 단면적/설계에 적용된 철근의 단면적
 b) $LN(\mu, \text{c.o.v})$ =평균이 $\ln \mu$ 이고, 변동계수가 c.o.v인 대수정규분포
 c) λ = Bias factor
 d) 설계단면의 탄성강성 대해 정규화된 탄성강성

표 2. 상부구조 질량의 확률분포특성

확률변수	분포특성
PSC거더 질량(연석포함) ^{b)}	$^a)N(\mu=M_s^{b)}, \text{c.o.v}=0.006)$
슬래브 두께 ^{d)}	$N(\mu=t_s^{c)}-4.7\text{mm}, \sigma=10.4\text{mm})$
아스팔트 포장두께	$N(\mu=t_a^{d)}+2\text{cm}, \sigma=1\text{cm})$
상부구조 질량	$N(\mu=1.017^{e)}, \text{c.o.v}=0.019)$

a) $N(\mu, \sigma)$ =평균 μ 이고, 표준편차 σ 인 정규분포
 b) M_s = PSC 거더와 연석의 설계단면에 대한 질량
 c) t_s = 설계 슬래브두께
 d) t_a = 설계 아스팔트두께
 e) 설계단면의 상부구조 질량에 대해 정규화된 질량

표 3. 기초의 병진강성 및 회전강성의 확률분포특성

확률변수	분포형태	최대값	최소값
전단탄성계수 (G) ³²⁾	일양분포	3,517kgf/cm ²	703kgf/cm ²
Poisson's ratio (ν) ³³⁾	일양분포	0.35	0.15
기초의 병진강성	일양분포	$1.49 \times 10^7 \text{kgf/cm}$	$2.70 \times 10^6 \text{kgf/cm}$
기초의 회전강성	일양분포	$2.07 \times 10^{12} \text{kgf} \cdot \text{cm}$	$3.17 \times 10^{11} \text{kgf} \cdot \text{cm}$

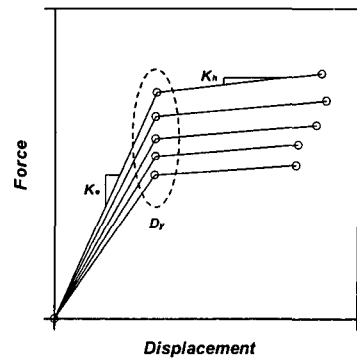


그림 4. 교각의 하중-변위곡선

과로부터 얻어진 응답의 확률분포특성을 적용하는 기법으로 상대적으로 적은 반복계산을 수행하여 응답의 확률특성을 결정하게 되므로 상당한 계산시간을 단축시킬 수 있으며, 신뢰성있는 결과를 얻을 수 있다.

본 연구에 적용된 응답의 확률특성을 이용한 분석기법의 수행절차는 다음과 같다. 1) 대표물성치의 확률특성을 적용한 표본점 50개를 각각 발생시키고, 이에 대한 지진응답해석을 실시하여 해석대상에 대한 50개의 응답을 얻는다. 2) 해석대상에 대해 얻어진 50개의 응답을 확률지에 도시하여 응답분포를 결정한다. 3) 확률지에 도시된 50개의 응답에 대해 회귀분석을 실시하여 응답의 확률특성값을 평가한다. 4) 응답의 확률특성값과 파괴기준 R의 확률특성값을 이용하여 파괴확률(P)을 산정하고, 파괴확률과 신뢰성지수(β)의 관계식으로부터 신뢰성지수를 평가한다.

4. 교량구조물의 받침손상위험도 분석

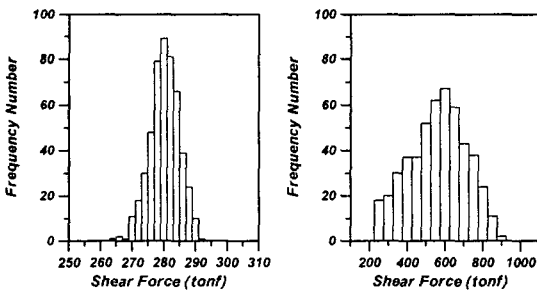
4.1 응답의 확률특성을 이용한 분석기법의 적용성 검증

지진하중을 받는 교량구조물에서 수평지진력에 의한 받침의 파괴확률을 산정하기 위해 적용한 응답의 확률특성을 이용한 분석기법의 적용성을 검증하기 위하여 몬테카를로 모의분석기법과 응답의 확률특성을 이용한 분석기법의 결과를 비교·분석하였다. 본 연구에서 적용한 받침의 파괴기준은 현행 도로교설계기준(2000) 내진설계편의 단경간교에 대한 받침의 설계규정에 따라 산정한 설계지진력과 받침부 앵커볼트에 적용된 안전율을 적용하여 결정하였다. 받침부 앵커볼트의 안전율은 앵커볼트로 고장력볼트(F10T)의 사용을 가정하여 고장력볼트의 허용전단저항력에 대한 극한전단저항력의 비로 3.04를 적용하였다. 입력지진하중은 널리 사용되고 있는 SIMQKE 프로그램¹²⁾을 이용하여 0.154g의 최대지반가속도를 갖는 인공지진이력을 발생시켜 적용하였으며¹⁰⁾, 대상교량은 단순지진된 6경간 PSC 거더교이다.

우선적으로 지진하중을 받는 교량구조물에 있어서 받침에 작용되는 전단력에 대한 파괴확률을 평가하기

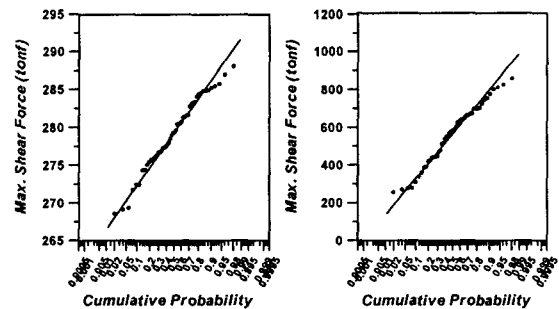
위하여 우선적으로 몬테칼로 모의분석기법을 이용하여 모의분석규모 500회에 대한 응답분석을 수행하였다. 받침부에 작용되는 전단력은 상부구조의 관성력은 물론 인접한 진동계간의 충돌에 의해 상당한 영향을 받게 된다. 그러나 이러한 충돌로 인해 각 진동계에 전달되는 수평력은 충돌현상에 대한 모형화 방법에 따라 많은 차이가 있을 수 있으며, 일반적으로 교량구조물의 내진설계시 별도의 고려사항으로 간주되지 않으므로 본 연구에서는 인접한 진동계사이의 충돌을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 있어서 받침에 작용되는 최대전단력에 대한 빈도분포를 도시한 것이다. 그림 5의 결과로부터 충돌의 고려여부에 따라 받침부에 작용하는 최대전단력의 크기 및 분포범위가 상당히 큰 것으로 나타났으나 충돌의 고려여부에 관계없이 전체적인 응답의 분포형태는 대체로 정규분포와 유사한 형태를 갖는 것으로 분석되었다.

응답의 분포특성이 기존에 널리 알려져 있는 일반적인 형태를 나타낼 경우 응답의 확률특성을 이용한 분석기법을 이용하는 것이 효과적이므로 본 연구에서는 물성치의 확률특성을 고려한 50개의 표본점을 선정하고, 선정된 표본점에 대하여 받침의 최대전단력에 대한 응답분포를 구하였다. 그림 6은 50개의 표본점에 대해 구해진 받침의 최대전단력을 정규분포확률지에 도시한 결과이다. 그림 6으로부터 적은 수의 표본점을 적용하여도 대체로 정규분포의 확률특성을 잘 나타냄을 알 수 있다. 표 4는 앞서 제시한 받침파괴기준인 극한 전단저항력을 적용하여 지진하중을 받는 6경간 교량구조물에 있어서 인접 진동계간의 충돌을 고려한 경우의 받침파괴확률을 분석한 결과를 나타낸 것이다. 표 4의 결과로부터 분석의 효율성 및 응답의 정확도 측면에서 비교해 볼 때, 응답의 확률특성을 이용한 분석기법이 신뢰할만한 결과를 주면서 계산시간을 효율적으로 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 그러므로 본 연구에서와 같이 응답의 확률특성이 널리 알려진 일반적인 분포형태를 보일 경우, 응답의 확률특성을 이용한 분석기법을 적용하여 더 효과적인 분석을 할 수 있을 것으로 판단된다.



(a) 충돌을 고려하지 않은 경우 (b) 충돌을 고려한 경우

그림 5. 몬테칼로 모의분석기법에 의한 결과



(a) 충돌을 고려하지 않은 경우 (b) 충돌을 고려한 경우

그림 6. 응답의 확률특성을 이용한 분석기법에 의한 결과

표 4 6경간 교량구조물의 받침파괴확률 (충돌을 고려한 경우)

해 석 방 법	몬테칼로 모의분석기법	응답의 확률특성을 이용한 분석기법
받침의 파괴확률 (분석횟수)	0.626 (500회)	0.605 (50회)

4.2 교량구조물의 사용기간동안의 받침파괴확률

본 절에서는 응답의 확률특성을 이용한 분석기법을 바탕으로 지진하중 및 대표물성치의 확률특성을 고려한 6경간 교량구조물의 기대수명동안의 지진위험도⁽¹¹⁾를 고려한 받침파괴확률을 평가하였다. 지진하중에 의한 받침의 파괴확률은 전체적인 교량구조물의 지진거동 및 받침에 전달되는 전단력에 중요한 영향을 미치는

교대의 거동 및 인접 진동계간 충돌의 고려여부에 따라 평가하였으며, 이에 기초하여 교량구조물에서 서로 다른 진동특성을 갖는 교대부와 교각부에 놓이는 고정받침의 파괴확률을 비교·분석하였다. 단, 고정받침의 파괴는 앵커볼트의 전단에 의해서만 발생하는 것으로 가정하였으며, 받침의 파괴기준은 받침의 앵커볼트 설계시 적용되는 안전율을 감안하여 구한 극한전단저항력으로 하였다. 지진이력은 지진위험도에 따른 최대지반가속도의 발생가능구간을 7개구간으로 나누어 각 최대지반가속도 구간의 중간값에 해당되는 인공지진이력으로 널리 사용되고 있는 SIMQKE 프로그램⁽¹²⁾을 이용하여 각 10개씩 발생시켜 적용하였다.

표 5는 6경간 교량구조물에서 충돌의 고려여부에 따른 교대부 및 교각부 고정받침의 파괴확률을 나타낸 것이다. 여기서 교대는 선형거동을 하는 것으로 가정하였다. 표 6의 결과로부터 전체적으로 충돌을 고려하지 않은 경우의 받침파괴확률은 교대부와 교각부에서 각각 2.8%와 0%로 매우 낮은 것으로 나타났으나, 충돌을 고려한 경우의 받침파괴확률이 15.3%와 8%로 상당히 증가하는 것으로 분석되었다. 또한 동일조건 하에서 교대부의 받침의 파괴확률이 교각부에 비해 상당히 큰 것으로 평가되었다. 표 6은 교대부의 받침파괴확률을 교각부의 받침파괴확률($P_f=0.06$)과 유사한 수준으로 낮추기 위해 요구되는 교대부 받침의 극한전단저항력을 산정한 것이다. 극한전단저항력을 파괴기준으로 적용할 경우 교대부와 교각부의 교량사용기간동안의 받침파괴확률을 유사한 수준으로 유지하기 위해서는 교대부의 극한전단저항력을 현행 기준의 2.5배 수준의 파괴기준으로 향상시켜야 하는 것으로 분석되었다. 이상에서 보여지는 바와 같이 6경간 교량구조물에서 받침의 파괴확률이 가장 큰 경우는 인접한 진동계사이에서 충돌이 일어날 경우의 교대부 고정받침인 것으로 나타났다. 그러므로 지진하중을 받는 교량구조물의 받침설계기준 적용시 교각부보다는 교대부의 받침파괴가능성에 대해 우선적으로 검토되어야 할 것으로 판단된다. 또한 현재의 설계기준을 그대로 적용할 경우, 교각부의 받침보다 교대부 받침의 설계수준을 높이거나 받침파괴에 따른 영향을 줄일 수 있는 보강대책이 마련되어야 할 것으로 판단된다.

표 5. 충돌에 따른 받침의 파괴확률

고려조건	충돌을 고려한 경우		충돌을 고려하지 않은 경우	
	교대부 고정받침	교각부 고정받침	교대부 고정받침	교각부 고정받침
파괴확률	0.153 ($\beta=1.03$)	0.060 ($\beta=1.56$)	0.028 ($\beta=1.91$)	No failure

표 6. 극한전단저항력의 증가에 따른 교대부의 받침파괴확률 (교각부 받침파괴확률 $P_f=0.060$)

극한저항력의 증가율	1.0배	1.5배	2.0배	2.5배	3.0배
교대부 받침의 손상위험도	0.153	0.1165	0.087	0.057	0.035

표 7은 3경간 및 6경간 교량구조물의 사용기간동안의 받침파괴확률을 나타낸 것이다. 표 7의 결과로부터 충돌을 고려한 경우에는 3경간 단순교량보다 6경간 단순교량의 받침파괴확률이 더 큰 것으로 분석되었다. 특히, 충돌을 고려한 경우에 있어서 교대부 받침의 파괴확률은 3경간 교량구조물에 비해 6경간 교량구조물의 받침파괴확률이 약 34%정도로 상당히 증가하는 것으로 분석되었다. 그러나 충돌을 고려하지 않은 경우의 받침파괴확률은 교대부 및 교각부 모두에서 경간수의 증가에 따라 영향을 받지 않는 것으로 평가되었다. 그러므로 지진하중을 받는 단순지지된 다경간 교량구조물의 받침설계기준 적용시 교각부보다는 교대부의 받침파괴가능성에 대해 우선적으로 검토되어야 할 것으로 판단된다. 또한 현재의 설계기준을 그대로 적용할 경우, 교각부의 받침보다 교대부 받침의 설계수준을 높이거나 받침파괴에 따른 영향을 줄일 수 있는 보강대책이 마련되어야 할 것으로 판단된다.

표 7. 경간수에 따른 단순형 교량구조물의 받침파괴확률 (교대가 선형거동을 하는 경우)

	충돌을 고려한 경우		충돌을 고려하지 않은 경우	
	3경간	6경간	3경간	6경간
교대부	0.114 ($\beta=1.21$)	0.153 ($\beta=1.03$)	0.028 ($\beta=1.91$)	0.028 ($\beta=1.91$)
교각부	0.049 ($\beta=1.65$)	0.060 ($\beta=1.56$)	No failure	No failure

5. 결 론

본 연구에서는 교량구조물의 지진응답에 영향을 미치는 대표물성치로 교각의 강성, 상부구조의 질량, 그리고 기초의 강성을 가정하였으며, 지진하중과 선정된 대표물성치들의 확률특성을 반영한 교량구조물에 대한 지진응답의 확률적 분포특성을 평가하였고, 이를 바탕으로 응답의 확률특성을 이용한 분석기법을 적용하여 대상교량의 기대수명간 받침파괴확률을 분석하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 본 연구에서 적용한 응답의 확률특성을 이용한 분석기법은 몬테칼로 모의분석기법에 의한 결과와 비교하여 볼 때, 교량구조물의 사용기간동안의 받침파괴확률을 산정함에 있어 상대적으로 짧은 계산시간으로도 신뢰성있는 결과를 주는 것으로 나타났다. 따라서 교량구조물의 내진신뢰성 평가시 분석의 효율성 및 응답의 정확도 측면에서 응답의 확률특성을 이용한 분석기법은 효율적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

2) 지진하중을 받는 교량구조물에서 받침의 파괴확률은 충돌을 고려한 경우가 충돌을 고려하지 않은 경우에 비해 상당히 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 교대부 고정받침의 파괴확률이 교각부 고정받침보다 상당히 높은 것으로 분석되었다. 또한 교대부 받침의 파괴확률을 교각부 받침의 파괴확률과 유사한 수준으로 낮추기 위해서는 교대부 받침의 설계기준을 교각부 받침의 설계기준의 2.5배정도 수준으로 높여야 하는 것으로 평가되었다. 그러므로 지진하중을 받는 다경간 단순형 교량구조물의 받침설계에서는 교각부보다 교대부의 받침파괴 가능성에 대해 우선적으로 검토하여야 할 것으로 판단된다.

3) 단순지지된 다경간 교량구조물에서 경간수에 따른 교대부 및 교각부의 받침파괴확률은 충돌을 고려한 경우에 경간수가 증가할수록 전반적으로 증가하는 경향을 보이는 것으로 분석되었다. 특히 충돌을 고려한 6경간 교량구조물의 교대부 받침의 파괴확률은 3경간 교량구조물에 비해 약 34%정도 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 교각부의 경우는 경간수의 증가에 따른 영향이 없는 것으로 분석되었다.

이상의 결과로부터 전체적인 교량구조물의 받침파괴 가능성이 가장 큰 부분은 교대부의 고정받침이며, 인접 진동계간 충돌이나 경간수의 증가로 인해 받침파괴확률은 상당히 증가하는 것으로 분석되었다. 그러므로 지진하중을 받는 교량구조물에 있어서 인접 진동계간 충돌이나 경간수에 따른 영향을 고려하여 볼 때, 교대부 받침의 설계기준을 상향조정하거나 또는 현행 설계기준을 적용할 경우에는 받침의 파괴 후 교량구조물의 낙교 등을 방지할 수 있는 대책이 강화되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원 및 1999년도 두뇌한국 21 핵심사업분야 지원으로 수행되었음을 밝히며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Kim, S-H, Lee, S-W, and Mha, H-S, "Dynamic Behaviors of Bridges Considering Pounding and Friction Effects under Seismic Excitations", *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 10, No. 6, 2000, pp. 621-633.
2. 김상호, 마호성, 이상우, "교각 비선형거동 및 기초운동을 고려한 지진시 낙교위험분석", 대한토목학회 논문집, 제19권, 제4호, 1999, pp. 571-580.
3. 한국도로교통협회, 도로교설계기준, 2000.
4. Mirza, S. A. and MacGregor, J. G., "Variations in dimensions of reinforced concrete members", *Journal of Structural Division*, 1979, pp. 751-766.
5. 김상호, 배규웅, 박홍석, "철근콘크리트 부재강도의 확률적 특성 분석", 콘크리트학회 논문집, 제3권, 제4호, 1991, pp. 117-123.
6. Mirza, S. A. and MacGregor, J. G., "Variability of mechanical properties of reinforcing bars", *Journal of Structural Division*, 1979, pp. 921-937.
7. Mirza, S. A., "Monte Carlo Simulation of Dispersions in Composite Steel-Concrete Column Strength Interacton", *Engineering Structures*, Vol. 20, 1997, pp. 97-104.
8. Federal Highway Administration, "Seismic Design of Highway Bridge Foundation Vol. II : Design Procedures and Guidelines", Report No. FHWA/RD-86/102, 1986.
9. Das, B. M., *Principles of Foundation Engineering*, 1994.
10. Gasparini, D. A. and Vanmarcke, E. H., "Evaluation of Seismic Safety of Buildings Simulated Earthquake Motions Compatible with Prescribed Response Spectra", Massachusetts Ins. of Technology, Report 2, 1976.
11. 오병환, 강영진, "지진위험도해석기법과 실제지진결정 연구", 대한토목학회 논문집, 제12권, 제1호, 1992, pp. 29-42.