

## 지진과 세굴의 복합적인 영향을 받는 연속교의 동적거동분석

### Dynamic Analysis of Multi-Span Continuous Bridges under Combined Effects of Earthquake and Local Scour

김상호\*                      마호성\*\*                      이상우\*\*\*                      심정욱\*\*\*\*  
Kim, Sang-Hyo              Mha, Ho-Seong              Lee, Sang-Woo              Sim, Chung-Wook

#### ABSTRACT

Seismic bridge failure due to the combined effects of earthquake and local scour are examined in probabilistic perspectives. The seismic responses of multi-span continuous bridge with deep foundations are evaluated with a simplified mechanical model. The probabilistic local scour depths around the deep foundations are estimated by using the Monte Carlo simulation. From the simulation results, it is found that seismic responses of a bridge slightly increase due to the local scour effect. The effect of local scour on the global motion of the continuous bridge is found to be significant under weak seismic intensity. In addition, the duration to regain its original foundation stiffness is critical in estimating the probability of foundation failure under earthquake. Therefore, the duration in recovering the foundation stiffness should be determined reasonably and the safety of the whole bridge system should be evaluated by considering the scour effect.

#### 1. 서 론

교량구조물에 심각한 피해를 주는 대표적인 자연재해로는 갑작스런 홍수로 인한 교각기초의 국부세굴과 지진 등을 들 수 있다. 지진으로 인한 교량구조물의 붕괴사례는 최근 전 세계적으로 발생되고 있는 대지진으로부터 쉽게 찾아볼 수 있으며, 이에 따라 설계기준 및 보강대책 등을 마련하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있는 추세이다. 홍수에 의한 교량구조물의 피해는 국내는 물론 전 세계적으로 꾸준히 보고되고 있으며, 교량구조물의 붕괴원인 중 가장 많은 부분을 차지하고 있는 것으로 나타났다<sup>(1)</sup>. 국내에서도 홍수로 인한 교각기초부의 국부세굴에 관한 연구가 꾸준히 수행되어 오고 있으며, 최근 들어 국부세굴에 따른 전체적인 교량구조물의 안전성 평가 등에 관한 연구가 수행되고 있는 추세이다<sup>(2)</sup>. 그러나 지진과 세굴의 영향으로 인해 발생할 수 있는 교량구조물의 가장 불리한 조건은 홍수로 인해 세굴이 진행중이거나 세굴로 인해 기초지반의 강성이 저하된 상태에서 지진하중과 같이 큰 하중이 기초지반에 직접적으로 작용하는 경우라 할 수 있다. 이러한 불리한 조건은 매년 반복되는 홍수는 물론 최근 들어 지진발생이 빈발해지고 있는 국내여건에 비추어 볼 때 충분히 발생가능하며, 두 조건의 조합으로 인한 피해는 구조물의 국부적인 손상을 넘어선 전체적인 교량구조물의 붕괴를 가져올 수 있는 수준일 것으로 예상된다. 특히, 연속교의 경우는 단순교와는 달리 지진하중에 의한 상부구조의 관성력을 하나의 교각이 저항하도록 되어 있으며, 이외의 다른 교각은 상

\* 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수, 정회원  
\*\* 호서대학교 토목공학과 조교수, 정회원  
\*\*\* 연세대학교 토목공학과 박사과정, 학생회원  
\*\*\*\* 연세대학교 토목공학과 석사과정

부구조와 가동받침으로 연결되어 있으므로 받침부에서 발생하는 마찰력에 의해 관성력을 분산시키는 역할을 하게 된다. 그러므로 단순교에서 발생하는 국부세굴의 영향과는 달리 연속교에서 상부구조를 고정받침으로 지지하고 있는 교각기초부에서의 국부세굴은 교각기초는 물론 전체적인 교량구조물의 안전성을 위협하는 중요한 위험요인이 될 수 있다.

본 연구에서는 교량구조물의 지진거동특성에 영향을 미치는 다양한 인자들을 고려할 수 있는 단순화된 교량해석모형을 이용하여 국부세굴로 인한 기초지반의 강성저하특성을 반영한 교량시스템의 동적거동특성을 분석하고자 한다. 또한 각 교각기초별 세굴조건 및 세굴위치에 따른 전체적인 교량구조물의 응답특성 및 교량구조물의 사용기간동안에 대해 지진과 세굴의 영향으로 인해 발생할 수 있는 기초의 파괴확률을 평가하고자 한다.

## 2. 교량시스템의 모형화

지진하중 및 교각기초부의 국부세굴에 따른 교량구조물의 동적거동특성을 분석하기 위하여 그림 1에서 보여지는 바와 같이 3경간 연속 강박스거더교(40m+50m+40m=130m)를 대상으로 하였으며, 상부구조의 단면제원은 그림 2와 같다. 교각형식은 원형단면(D=2.7m)을 가진 T형 교각으로 교각높이는 12m이다. 교각기초는 그림 3과 같이 풍화암층에 선단지진된 우물통기초로 직경이 5.8m이고, 높이가 10m이다. 교대형식은 얇힘형태의 교대로 교대높이는 9.5m이다.

그림 4는 대상교량의 교축방향 지진거동특성에 영향을 미치는 다양한 인자들 및 교각기초부의 국부세굴에 의한 영향을 고려할 수 있도록 이상화시킨 교량해석모형이다. 그림 4에서  $m$ ,  $K$ ,  $C$ 는 각각 구성요소들의 질량, 강성, 감쇠이다. 지진하중으로 인한 연속교의 거동특성에 영향을 미치는 인자들로는 인접한 상부구조와 교대진동계간의 충돌, 가동받침에서의 마찰효과, 교대의 강성저하특성, 교각의 비선형거동 그리고 기초의 운동 등이 있다.

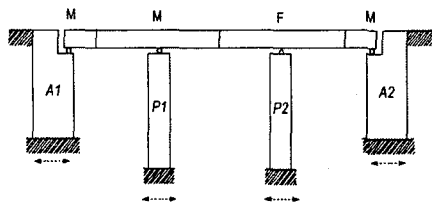


그림 1. 대상교량

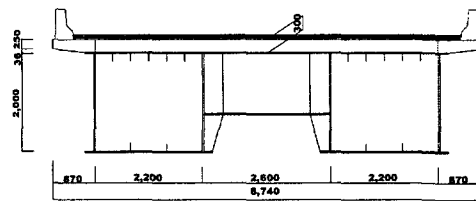


그림 2. 상부구조의 단면제원 (단위 : mm)

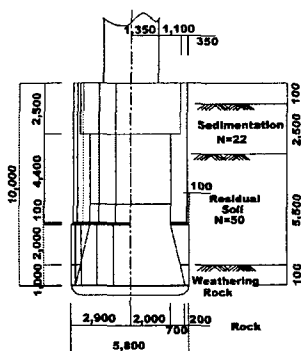


그림 3. 우물통기초

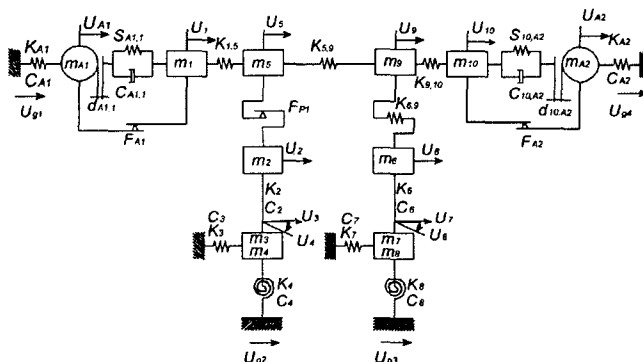


그림 4. 이상화된 교량해석모형

인접 진동계간의 충돌현상은 그림 4에서 보여지는 것과 같이 두 진동계사이에 탄성의 스프링강성( $S_{A1,1}$ ,  $S_{10,A2}$ )과 감쇠( $C_{A1,1}$ ,  $C_{10,A2}$ )를 갖는 충돌요소를 이용하여 모형화하였으며, 인접 진동계간 여유공간 ( $d_{A1,1}$ ,  $d_{10,A2}$ )은 온도변화, 건조수축 및 크리프 그리고 보의 처짐 등에 의한 신축이음부에서의 이동량을 고려하여 10cm를 적용하였다. 가동받침의 마찰은 선형의 Coulomb 마찰요소로 모형화 (마찰계수  $\mu=0.05$ )하였으며<sup>(3)</sup>, 그림 4에서  $F_{A1}$ ,  $F_{P1}$ ,  $F_{A2}$ 는 가동받침에 작용되는 마찰력을 나타낸다. 교대-뒷채움재 시스템은 교대와 주변토체사이의 상호작용으로 인한 교대의 강성저하특성을 반영하기 위하여 비선형 스프링강성 ( $K_{A1}$ ,  $K_{A2}$ )과 감쇠 ( $C_{A1}$ ,  $C_{A2}$ )를 갖는 단자유도 시스템으로 모형화하였으며, 비선형 스프링강성은 Siddharthan 등 (1996)이 제안한 식을 이용하여 결정하였다<sup>(4)</sup>. 또한 지진하중의 작용과 그로 인해 발생하는 변위의 증가에 따라 나타나는 철근 콘크리트 교각의 비선형거동을 반영하기 위해서 기하학적 비선형성을 나타내는 P- $\Delta$ 효과와 재료적 비선형성을 고려할 수 있는 히스테리시스모형을 적용하였다. 우물통기초는 병진강성 ( $K_3$ ,  $K_7$ )과 회전강성 ( $K_4$ ,  $K_8$ )을 갖는 선형-탄성스프링과 감쇠장치 ( $C_3$ ,  $C_7$ ;  $C_4$ ,  $C_8$ )를 갖는 것으로 모형화하였으며, 교각기초부의 국부세굴로 인한 영향은 세굴로 인해 감소된 근입깊이에 따른 교각기초의 수평 및 회전강성을 반영시킴으로서 해석모형에 반영하였다<sup>(3)</sup>.

### 3. 국부세굴깊이의 확률특성 및 세굴깊이에 따른 교각기초의 강성

교각기초의 국부세굴깊이를 산정하는 공식은 주로 실내실험 및 현장측정을 통해서 개발된 것으로 실험모형이나 측정된 수리자료 그리고 공식에 적용되는 변수 등에 따른 많은 불확실성을 포함하고 있다. 그러므로 보다 실제적인 세굴깊이를 추정하기 위해서는 불확실한 요인들에 대해 가능한 분포특성을 가정하고, 이로부터 확률론적 접근방법에 의한 평가가 수행되어야 한다.

일반적으로 널리 적용되고 있는 국부세굴깊이 산정공식은 국내 도로설계기준<sup>(5)</sup>과 HEC-18<sup>(6)</sup>에서 추천하고 있는 CSU (Colorado State University)공식으로 다음 식 (1)과 같이 정의된다.

$$d_s = 2 \lambda_s y_0 K_1 K_2 K_3 K_4 \left( \frac{b_{eff}}{y_0} \right)^{0.65} Fr^{0.43} \quad (1)$$

여기서,  $d_s$ 는 최대세굴깊이 (m)이며,  $y_0$ 는 교각기초 전면에서의 수심,  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$ 는 교각기초의 형상, 교각기초에 대한 흐름의 접근각, 하상조건 그리고 하상재료의 크기에 대한 보정계수,  $\lambda_s$ 는 모형보정계수이다.  $b_{eff}$ 는 교각기초의 유효폭 (m)이며,  $Fr (= V/\sqrt{g y_0})$ 은 Froude 수이고,  $V$ 는 평균유속 (m/sec),  $g$ 는 중력가속도 (m/sec<sup>2</sup>)이다. 본 연구에서 식 (1)에 포함된 영향인자들에 대한 확률적 분포특성은 다음 표 1과 같이 가정되었으며, 이 중 평균유속과 교각기초 전면에서의 수심은 우리나라의 중소하천에서 실측된 수리자료에 기초하여 대수정규분포로 가정하였다.

교각기초에 대한 세굴깊이의 분포특성은 각 세굴영향인자들의 분포특성에 적합한 난수를 발생시킨 후 몬테칼로 모의분석법 (Monte Carlo Simulation)을 이용하여 구하였다<sup>(6)</sup>. 이 때, 모의분석규모는 평균 세굴깊이와 변동계수가 일정한 값으로 수렴하는 10000회를 사용하였다. 모의분석결과로부터 교량구조물의 사용기간동안에 우물통기초에서 발생가능한 세굴깊이는 3.0m~5.6m의 범위이며, 산정된 교각기초의 세굴깊이에 대한 분포특성은  $\lambda = 1.460$  와  $\zeta = 0.085$  인 대수정규분포를 갖는 것으로 나타났다. 각 세굴깊이에 대한 발생확률은 그림 5와 같다.

표 1. 세굴영향인자들에 대한 분포특성값<sup>(7)</sup>

영향인자	최소값	평균값	최대값	분포특성
$b_{eff}$	—	3.75	—	상수
$V^*$	$\lambda=-0.117, \zeta=0.094$			대수정규분포
$y_0^*$	$\lambda=1.103, \zeta=0.140$			대수정규분포
$\lambda_s$	0.8	0.93	1.0	비대칭삼각형분포
$K_1$	—	1.0	—	상수
$K_2$	—	1.0	—	상수
$K_3$	1.1	1.15	1.2	일양분포
$K_4$	—	1.0	—	상수

\* 중소하천의 실측자료이용

국부세굴깊이에 따른 교각기초의 병진 및 회전방향으로의 강성은 세굴로 인해 감소된 근입깊이를 고려하여 산정하였으며<sup>9)</sup>, 그림 6은 각 세굴깊이에 따른 교각기초의 강성변화를 나타낸 것이다. 세굴깊이가 증가함에 따라 강성이 상당히 감소하는 것을 볼 수 있으며, 특히 상부구조의 응답변위에 큰 영향을 미치는 회전강성은 세굴깊이 5m이상에서 세굴되지 않은 기초강성의 30%이하의 수준으로 상당히 저하되는 것으로 나타났다. 그림 6에서 y축의 값은 세굴이 되지 않은 기초의 강성에 대한 세굴된 기초의 강성비를 나타낸다.

#### 4. 기초의 파괴확률분석

교량구조물의 기초는 연직방향 및 수평방향으로의 변위, 지지력, 전단저항력 등과 같은 다양한 검토조건에 대하여 만족하여야 한다. 그러나 우물통기초의 파괴기준으로 다양한 검토조건을 적용하여 기초의 파괴를 확률론적으로 분석하는 것은 많은 시간을 요구하게 된다. 본 연구에서는 기초의 파괴기준을 선정하기 위하여 현행 도로교설계기준 (2000)에서 제시하고 있는 다양한 검토조건에 대한 타당성을 분석하였으며, 이로부터 우물통기초의 파괴기준을 극한연직지지력에 대한 안전성 여부로 결정하였다. 따라서 교각기초의 세굴깊이가  $d$ 인 교량구조물에 최대지반가속도  $a_g$ 인 지진이 발생하였을 때, 기초가 파괴될 확률은 식 (2)와 같은 조건부 확률로서 표현할 수 있다.

$$P [failure/(d_s \cdot a_g)] = P \left( \frac{Q_d}{q} < 1 \right) \quad (2)$$

여기서,  $Q_d$ 는 기초지반의 극한 연직지지력이며,  $q$ 는 지진하중 작용에 의한 세굴된 기초의 지반반력이다.

그러므로 교량의 사용기간동안에 교각기초가 파괴될 확률은 전확률의 정리에 의해 교량사용기간 동안의 각 세굴 및 지진의 발생확률과 지진하중에 의한 세굴된 교각기초의 파괴확률의 곱을 모두 누적한 확률로 다음의 식 (3)을 이용하여 구할 수 있다.

$$P_f = \sum P[failure/(d_s \cdot a_g)] \cdot P(d_s) \cdot P(a_g) \quad (3)$$

여기서,  $P(d)$ 는 각 세굴깊이의 발생확률이며,  $P(a_g)$ 는 각 최대지반가속도의 발생확률이다.

각 세굴깊이의 발생확률은 앞서 언급한 바와 같이 그림 4로부터 구할 수 있다. 단, 본 연구에서 고려한 세굴현상의 발생주기는 1년이며, 대상교량의 사용기간 동안에 매년 상호 독립적으로 발생하는 것으로 가정하였다. 또한 세굴발생 후 되메움에 의해 기초지반이 원래의 강도를 회복하는 기간을 3개월, 6개월 그리고 12개월로 가정하여 기초의 파괴확률을 산정하였다.

대상지역의 지진위험도는 한반도에서 관측된 지진자료에 기초하여 지진구역별 지진위험도를 구한 기존의 연구결과<sup>(11)</sup>를 이용하여 구하였으며, 그림 7은 대상지역에 대한 사용기간 50년과 75년 기간의 지진위험도곡선이다.

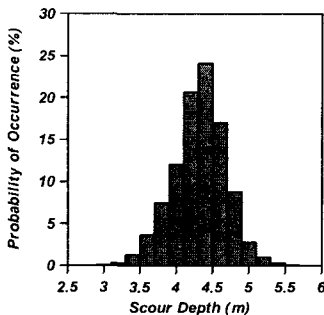


그림 5. 세굴깊이의 발생확률

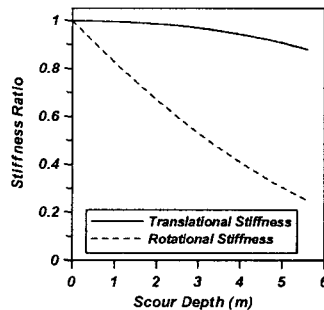


그림 6. 세굴깊이별 기초의 강성

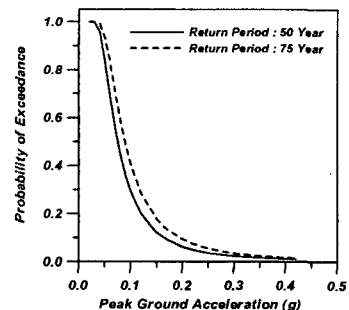


그림 7. 대상지역의 지진위험도

## 5. 기초가 국부세굴된 교량구조물의 지진거동특성

본 연구에서는 교각기초부에 발생가능한 세굴조건 및 각 교각기초의 세굴여부에 따른 전체적인 교량구조물의 지진응답특성을 분석하였으며, 교량사용기간 동안의 지진과 세굴로 인한 우물통기초의 파괴확률을 산정하였다. 입력지진하중은 널리 사용되고 있는 SIMQKE 프로그램<sup>(12)</sup>을 이용하여 현행 도로교설계기준에서 제시하고 있는 설계응답스펙트럼에 일치하도록 모의 발생된 인공지진이력을 적용하였다.

### 5.1 세굴깊이에 따른 연속교의 지진응답특성

교각기초의 국부세굴이 전체적인 교량구조물의 지진응답특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 상대적으로 취약할 것으로 예상되는 P2교각기초(상부구조와 고정단으로 연결된 교각기초)만 국부세굴된 것으로 가정하였으며, 세굴깊이는 모의분석의 결과로부터 3.0m~5.6m의 범위를 적용하였다.

그림 8은 P2교각기초가 세굴된 경우에 있어서의 각 교각진동계의 지반에 대한 상대변위이력과 상부구조와 교대진동계간의 상대거리이력을 나타낸 것이다. 그림 8로부터 알 수 있듯이 P1 진동계는 P2교각기초의 세굴여부와 관계없이 동일한 응답을 보이는 것으로 나타났는데, 이는 상부구조와 P1교각사이의 가동단에서 마찰의 영향이 상대적으로 작기 때문에 P2교각기초의 세굴로 인한 응답증가가 P1 진동계에는 영향을 미치지 않기 때문인 것으로 판단된다. P2 진동계 및 상부구조와 교대진동계간의 상대거리이력은 세굴여부에 따라 응답의 형태가 상당히 달라지는 것으로 나타났으나 응답크기는 거의 유사한 수준인 것으로 나타났다. 이는 교각기초의 국부세굴로 인해 상대응답이 다소 증가되어도 전체적인 교량구조물의 양끝단에 놓이는 교대진동계로 인해 상부구조와 교대진동계사이의 상대거리는 상당히 억제되기 때문인 것으로 판단된다.

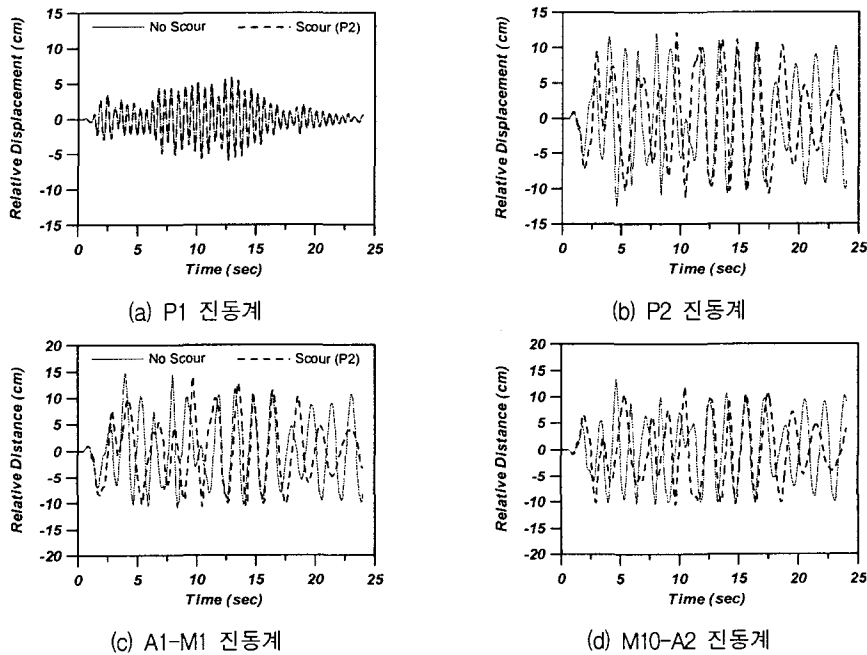


그림 8. P2교각기초가 세굴된 경우의 응답이력 (PGA=0.3g)

표 2와 표 3은 P2교각기초가 국부세굴된 경우에 있어서 각 진동계의 지반에 대한 최대상대변위와 상부구조와 교대진동계간의 최대상대거리의 평균값과 Gumbel Type-I의 90% 최대값을 나타낸 것이다. P1 진동계의 최대상대변위는 세굴로 인해 응답이 상당히 증가하는 것으로 나타났으나 세굴깊이의 증가에 따른 영향은

전혀 없는 것으로 나타났다. P2 진동계의 경우도 기초부의 국부세굴로 인해 응답이 다소 증가하는 것으로 분석되었으며 세굴깊이가 증가함에 따라 다소 응답도 증가하는 것으로 분석되었다. 세굴로 인한 응답증가율은 P1 진동계가 P2 진동계에 비해 상당히 큰 것으로 나타났으며, 최대지반가속도가 큰 경우에는 응답의 크기도 오히려 P1 진동계가 커지는 것으로 나타났다. 그러므로 P2교각기초가 국부세굴된 경우에 있어서 교각의 손상가능성 평가시 강진에서는 오히려 P1 교각에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다. 상부구조와 교대진동계간의 최대상대거리는 A1-M1 진동계와 M10-A2 진동계에서 거의 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 국부세굴의 영향으로 인해 응답이 증가하며, 세굴깊이가 증가할수록 응답도 다소 증가하는 것으로 분석되었다. 그러나 세굴로 인한 응답의 증가율은 낮은 지반가속도에서 가장 큰 것으로 분석되었다. 그러므로 우리나라와 같은 중·약진 지역에서 교량구조물의 내진안전성 평가시 국부세굴에 따른 영향이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

표 2. 각 진동계의 지반에 대한 최대상대변위 (P2교각기초가 국부세굴된 경우)

(a) P1 진동계 (단위:cm)					(b) P2 진동계 (단위:cm)				
PGA	No Scour	3m	4.2m	5.6m	PGA	No Scour	3m	4.2m	5.6m
0.1g	2.0 (2.3)	3.4 (3.8)	3.4 (3.8)	3.4 (3.8)	0.1g	9.0 (10.4)	10.1 (11.2)	10.6 (11.1)	10.8 (11.2)
0.2g	3.9 (4.5)	6.8 (7.6)	6.8 (7.6)	6.8 (7.6)	0.2g	11.2 (11.8)	11.4 (12.0)	11.4 (12.1)	11.5 (12.2)
0.3g	5.9 (6.8)	10.3 (11.4)	10.3 (11.4)	10.3 (11.4)	0.3g	12.1 (13.2)	12.3 (13.3)	12.4 (13.3)	12.4 (13.3)
0.4g	7.9 (9.1)	13.7 (15.2)	13.7 (15.2)	13.7 (15.2)	0.4g	13.0 (14.3)	13.3 (14.9)	13.4 (14.7)	13.5 (14.6)

표 3. 상부구조와 교대진동계간 최대상대거리 (P2교각기초가 국부세굴된 경우)

(a) A1-M1 진동계 (단위:cm)					(b) M10-A2 진동계 (단위:cm)				
PGA	No Scour	3m	4.2m	5.6m	PGA	No Scour	3m	4.2m	5.6m
0.1g	9.6 (10.7)	10.6 (11.9)	11.1 (12.0)	11.4 (12.2)	0.1g	9.0 (10.5)	10.1 (11.2)	10.6 (11.1)	10.7 (11.3)
0.2g	12.5 (13.8)	12.8 (14.0)	12.8 (14.2)	13.0 (14.4)	0.2g	11.3 (12.3)	11.4 (12.4)	11.5 (12.4)	11.6 (12.8)
0.3g	14.3 (16.8)	14.6 (16.4)	14.7 (16.4)	14.8 (16.8)	0.3g	12.4 (14.2)	12.6 (14.2)	12.7 (14.2)	12.6 (14.1)
0.4g	16.2 (19.1)	16.6 (20.1)	16.6 (19.6)	17.1 (20.1)	0.4g	13.5 (15.8)	13.8 (16.2)	13.9 (16.2)	14.0 (15.9)

## 5.2 지진 및 세굴로 인한 기초의 파괴확률

대상교량의 사용기간동안에 지진 및 세굴로 인한 우물통기초의 안전성을 분석하기 위하여 우선적으로 발생가능한 각 최대지반가속도 및 세굴깊이별(=3.0m~5.6m) 기초의 파괴확률을 산정하였으며, 산정된 기초의 파괴확률에 교량의 사용기간동안 각 최대지반가속도 및 세굴깊이의 발생확률을 적용하여 누적시킴으로서 대상교량의 사용기간에 대한 기초의 파괴확률을 산정하였다. 대상교량의 사용기간은 50년과 75년의 두 가지 경우로 가정하였으며, 입력하중으로는 최대지반가속도 0.03g~0.42g의 범위를 적용하였다. 기초지반의 저항력은 정역학적 공식으로부터 구한 극한 연직지지력으로 세굴조건에 따라 일정한 상수값을 갖는 것으로 가정하였다. 그림 9는 50개의 인공지진이력에 대한 시간이력해석으로부터 구한 지반반력을 대수정규분포 확률지에 도기한 것으로 기초의 지반반력의 확률적 분포특성은 대수정규분포에 적합한 것으로 나타났다.

표 4는 교량의 사용기간 및 세굴후 기초의 강성회복기간에 따른 기초의 파괴확률을 나타낸 것이다. 세굴을 고려하지 않은 경우 상부구조와 고정단 및 가동단으로 연결된 교각기초의 파괴가능성은 교량의 사용기간에 관계없이 거의 유사한 수준으로 나타났으며, P2교각기초가 세굴된 경우 두 교각기초의 파괴확률은 세굴을 고려하지 않은 경우에 비해 상당히 증가하는 것으로 분석되었다. 또한 되메움에 의한 기초의 강성회복기간이 증가할수록 기초의 파괴확률이 상당히 증가하는 것으로 나타났으며, 강성회복기간이 6개월, 12개월로 증가함에 따라 기초의 파괴확률은 강성회복기간을 3개월로 가정한 경우에 비해 대체로 2배이상 증가하는 것으로 분석되었다. 이상의 결과로부터 교량구조물의 내진 안전성을 평가하는데 있어 교각기초부의 국부세굴에 의한 영향이 반영되어야 하며, 되메움에 의한 강성회복기간의 적용에 따른 영향도 고려되어야 할 것으로 판단된다.

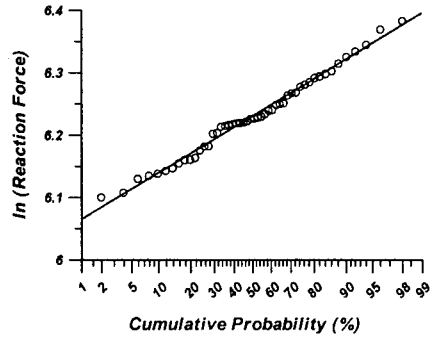


그림 9. 지반반력의 확률적 특성 (PGA=0.3g)

표 4. 교량 사용기간에 대한 기초파괴확률

사용기간 \ 강성회복기간	50 년		75 년	
	P1 교각기초	P2 교각기초	P1 교각기초	P2 교각기초
세굴을 고려하지 않은 경우	1.42E-3 ( $\beta=2.99$ )	1.45E-3 ( $\beta=2.98$ )	2.13E-3 ( $\beta=2.86$ )	2.17E-3 ( $\beta=2.85$ )
3개월	2.33E-3 ( $\beta=2.83$ )	3.02E-3 ( $\beta=2.75$ )	4.29E-3 ( $\beta=2.63$ )	5.32E-3 ( $\beta=2.56$ )
6개월	2.43E-3 ( $\beta=2.82$ )	4.38E-3 ( $\beta=2.62$ )	5.39E-3 ( $\beta=2.55$ )	7.83E-3 ( $\beta=2.42$ )
12개월	5.58E-3 ( $\beta=2.54$ )	8.49E-3 ( $\beta=2.39$ )	8.37E-3 ( $\beta=2.39$ )	1.29E-2 ( $\beta=2.23$ )

## 6. 결 론

본 연구에서는 연속교에 있어서 상부구조와 고정단으로 연결된 교각기초에서의 국부세굴이 전체적인 교량구조물의 지진응답특성에 미치는 영향을 분석하였으며, 이를 바탕으로 최대지반가속도 및 세굴깊이의 발생확률을 고려한 교량구조물의 기초파괴확률을 평가하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 본 연구에서는 다경간 연속교의 지진거동에 영향을 미치는 다양한 요소들을 고려할 수 있는 교량해석모형을 개발하였으며, 이를 바탕으로 지진과 세굴의 복합적인 영향을 받는 연속교의 지진응답특성을 분석하였다. 모의분석결과로부터 본 연구에서 적용된 교량해석모형 및 방법론은 지진 및 세굴에 의한 교량기초의 안전성을 평가하는데 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

2) 상부구조와 고정단으로 연결된 교각기초부의 국부세굴은 지진하중을 받는 교량구조물의 전체적인 응답을 증가시키는 것으로 평가되었다. 특히, 강진보다는 상부구조와 교대진동계간의 충돌빈도가 적은 약진에서 세굴에 따른 영향이 상대적으로 큰 것으로 평가되었다. 따라서 우리나라와 같은 중·약진 지역에서의 지진응답 평가시 교각기초의 국부세굴에 따른 영향이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

3) 연속교에서 세굴을 고려하지 않은 경우 상부구조와 고정단 및 가동단으로 연결된 교각기초의 파괴가능성은 교량의 사용기간에 관계없이 거의 유사한 수준으로 나타났으며, 세굴에 따른 두 교각기초의 파괴확률은 세굴을 고려하지 않은 경우에 비해 상당히 증가하는 것으로 분석되었다. 또한 되메움에 의한 기초의 강

성회복기간이 증가할수록 기초의 파괴확률이 상당히 증가하는 것으로 평가되었다. 따라서 교량구조물의 내진 안전성을 평가하는데 있어 교각기초부의 국부세굴에 의한 영향이 반영되어야 하며, 퇴매움에 의한 강성회복기간의 적용에 따른 영향도 고려되어야 할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

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

#### 참고문헌

1. Smith, D. W., "Bridge Failures", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part 1, pp. 367-382.
2. Yoon, T. H., Kim, S. S., Choi, G. W., and Jeong, S., "Bridge Scour Problems in Korea", *International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Technical Committee-33 on Scour of Foundations*, 2000, pp. 219-229.
3. 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.
4. Siddharthan, R. V., El-Gamal, M., and Maragakis, E. A., "Stiffness of Abutments on Spread Footings with Cohesionless Backfill", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 34, 1997, pp. 686-697.
5. 한국도로교통협회, *도로설계기준*, 2001.
6. Richardson, E. V. and Davis, S. R., "Evaluating Scour at Bridges", *Report FHWA-IP-90-017*, Hydraulic Engineering Circular No. 18, FHWA, 1991.
7. Johnson, P. A. and Dock, D. A., "Probabilistic Bridge Scour Estimates", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 124, No. 7, 1998, pp. 750-754.
8. Ang, A. H-S. and Tang, W. H., *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*, John Wiley & Sons, Inc., 1975.
9. Gazetas, G., "Formulas and Charts for Impedances of Surface and Embedded Foundations", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 117, No. 9, 1991, pp. 1363-1381.
10. 한국도로교통협회, *도로교설계기준*, 2000.
11. 오병환, 강영진, "지진위험도해석기법과 설계지진결정 연구", *대한토목학회논문집*, 제12권, 제1호, 1992, pp. 29-42.
12. 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.