2방향 지진하중을 받는 세굴된 교각기초의 파괴확률분석

Failure Probability of Scoured Pier Foundation under Bi-directional Ground Motions

김상효* 마호성** 이상우*** 김영훈****
Kim, Sang-Hyo Mha, Ho-Seong Lee, Sang-Woo Kim, Young-Hoon

ABSTRACT

Bridge foundation failure considering the effect of local scour around pier foundations under bi-directional seismic excitations is examined in probabilistic perspectives. The seismic responses of bridges with deep foundations are evaluated with a simplified mechanical model, which can consider the local scour effect around the deep foundation in addition to many other components. The probabilistic characteristics of local scour depths are estimated by using the Monte Carlo simulation. The probabilistic characteristics of basic random variables used in the Monte Carlo simulation are determined from the actual hydraulic data collected in middle size streams in Korea. The failure condition of deep foundation is assumed as bearing capacity failure of the ground below the foundation base. The probability of foundation failure of a simply supported bridge with various scour conditions and bi-directional seismic excitations are examined. It is found that the local scour and the recovery duration are critical factors in evaluating the probability of foundation failure. Moreover, the probability of foundation failure under bi-directional seismic excitations is much higher than under uni-directional seismic excitations. Therefore, it is reasonable to consider bi-directional seismic excitations in evaluating the seismic safety of bridge systems scoured by a flood.

1. 서 론

최근 보고되고 있는 교량피해사례들로부터 알 수 있듯이 예측 불가능한 지진의 발생이나 갑작스런 홍수로 인한 국부세굴 등은 교량구조물에 심각한 피해를 줄 수 있는 대표적인 자연재해라 할 수 있다. 지진으로 인한 교량구조물의 피해사례는 다행히도 국내에서 보고된 사례는 아직까지 없지만, 최근 발생되고 있는 일련의 대지진으로 인한 피해사례로부터 쉽게 찾아볼 수 있다. 또한 홍수로 인한 피해사례는 국내는 물론 전 세계적으로 꾸준히 보고되고 있으며, 교량구조물의 붕괴원인 중 가장 많은 부분을 차지하고 있는 것으로 조사되었다[1,2]. 특히, 2002년 태풍으로 인한 교량구조물의 피해는 홍수나 태풍 등으로 인한 갑작스런 하천의 통수량 증가 및 국부세굴 등이 교량구조물에 심각한 피해를 가져올 수 있다는 것을 보여주는 실례이다. 이에 따라 국내·외적으로 홍수로 인한 교량기초의 국부세굴이나 지진에 대한 교량구조물의 설계기준 및 보수·보강대책 등을 마련하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있는 추세이다.

교량구조물에 있어서 국부세굴에 관한 연구는 다양한 하상조건 및 흐름조건 등에 따른 최대세

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

굴심의 산정이나 산정된 최대세굴심에 기초한 근입된 기초의 수리학적 측면에서의 안전성 평가 등에 관한 연구가 주를 이루고 있으며, 국부세굴이 전체적인 교량구조물의 구조적 안전성에 미치는 영향이나 기초부가 세굴된 교량구조물의 내진성능평가 등에 관한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 그러나 지진이나 교각기초의 세굴로 인해 교량구조물에서 발생될 수 있는 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 있을 것으로 예상된다.

일반적으로 교각기초부의 국부세굴깊이는 교각기초의 모든 수평방향에 대해 동일하게 발생하는 것으로 알려져 있으며, 지진하중 또한 단순한 1방향의 지반진동이 아닌 임의의 방향성을 갖는 3차원 지반진동특성을 갖는다. 그러므로 교각기초부가 세굴된 교량구조물의 내진안전성을 보다 실제적으로 평가하기 위해서는 2방향 수평성분을 갖는 지진하중이 고려되어야 하며, 이를 위해서는 2방향 지진하중을 고려할 수 있는 3차원 교량해석모형이 적용되어야 한다.

본 연구에서는 교량구조물의 2방향 지진거동에 영향을 미치는 다양한 인자들은 물론 교각기초의 국부세굴로 인해 저하된 강성을 고려할 수 있는 단순화된 교량해석모형을 바탕으로 2방향 지진하중에 의한 교량구조물의 지진응답을 구하고, 이를 바탕으로 교량구조물의 사용기간에 대해 지진과 세굴의 복합적인 영향으로 인한 기초의 파괴확률을 평가하고자 한다. 또한 평가된 기초의 파괴확률과 1방향 지진하중을 적용한 경우의 결과를 비교·분석함으로서 지진 및 세굴의 영향을 고려한 교량구조물의 안전성을 보다 실제적으로 분석하기 위한 지진하중의 적용방법을 검토하고자 한다.

2. 교량해석모형 및 입력지진하중

2.1 단순화된 교량해석모형

2방향 지진하중 및 교각기초부의 국부세굴을 고려한 교량구조물의 동적응답을 평가하기 위하여 그림 1에서 보여지는 바와 같이 3경간 단순 PSC 거더교 (*3@30m=90m*)를 대상으로 하였다. 그림 2는 대상 교량구조물의 단면제원을 나타낸 것이다. 교각은 π형의 원형 철근콘크리트교각(D=1.95m)이며, 교각높이는 동일하게 12m이다. 교각기초는 그림 2에서 보여지는 바와 같이 풍화암층에 선단지지된 우물통기초이며, 기초의 직경과 높이는 각각 4.8m와 10m이다. 교대는 확대기초를 갖는 역T형의 교대로 교대의 총 높이는 6.5m이다. 확대기초의 교축 및 교축직각방향의 폭은 4m와 17m이다.

전체적인 교량해석모형은 2방향 지진하중을 받는 교량시스템의 동적거동특성에 영향을 미치는 다양한 인자들, 즉 인접한 상부구조간의 평면적 충돌현상, 가동단에서의 마찰, 2축 휨을 받는 R/C 교각의 비선형성, 교대 - 뒷채움재 시스템의 비선형성, 기초의 운동 등을 고려할 수 있도록 그림 3과 같이 단순화하였다. 그림 2에서 u는 각 자유도에서의 지반에 대한 상대변위이며, u_g는 각 기초위치에서의 지반변위이다. m, K, C는 각 구조요소의 질량, 강성, 그리고 감쇠상수를 나타낸다. 또한 첨자 T와 R은 각각 교축직각방향과 회전을 나타낸다.

상부구조의 회전 및 교축방향으로의 상대변위차이에 의해서 상부구조 양 끝단의 모서리부분에서 발생하게 되는 평면적 충돌현상은 그림 3에서 보여지는 바와 같이 두 진동계사이에 선형 - 탄성의 스프링강성 ($S_{1,5}$, $S_{5,9}$, $S_{9,A2}$)과 감쇠 ($C_{1,5}$, $C_{5,9}$, $C_{9,A2}$)를 갖는 충돌요소를 이용하여 모형화하였으며, 여유공간 ($d_{1,5}$, $d_{5,9}$, $d_{9,A2}$)은 온도변화나 건조수축 등으로 인해 신축이음부에서 발생되는 상부

구조의 변위량을 고려하여 6.5cm를 적용하였다[3]. 가동단에서의 마찰은 상대속도와 마찰력의 관계로 표현되는 속도모형을 이용하였으며, 마찰계수는 μ=0.05를 적용하였다[4]. 그림 3에서 $F_{1,2}$, $F_{5,6}$, $F_{9,A}$는 가동단에 작용되는 마찰력을 나타낸다. 교대-뒷채움재 시스템은 교대와 주변토체사이의 상호작용으로 인한 교대의 강성저하특성을 반영하기 위하여 비선형 스프링강성 (K_{A1}, K_{A2}; K^T_{A1}, K^T_{A2})과 감쇠 (C_{A1}, C_{A2}; C^T_{A1}, C^T_{A2})를 갖는 2자유도 시스템으로 모형화하였으며, 비선형 스프링강성은 Siddharthan 등 (1996)이 제안한 식을 이용하여 결정하였다[5]. 또한 2방향 지진하중에 의한 2축 휨을 받는 R/C 교각의 비선형 거동특성은 비교적 단순한 해석과정을 포함하고 있으며, 해석모형이 시험결과에 기초하여 해석값의 정확도도 비교적 높은 것으로 알려져 있는 힘 - 변위모형을 이용하여 반영하였다[3]. 우물통기초는 병진강성 (K_3, K_7; K^T_3, K^T_7)과 회전강성 (K_4, K_8; K^T_4, K^T_8)을 갖는 선형-탄성스프링과 감쇠장치 (C_3, C_7; C^T_3, C^T_7; C_4, C_8; C^T_4, C^T_8)를 갖는 것으로 모형화하였다.

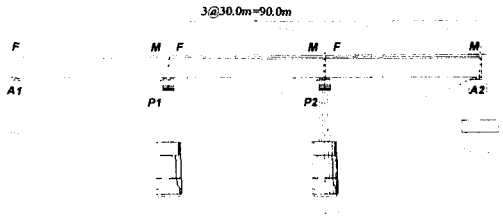
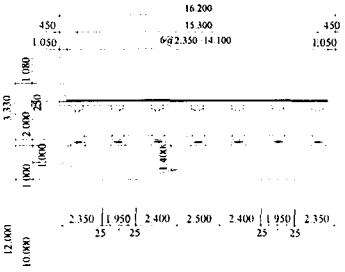


그림 1. 대상 교량구조물



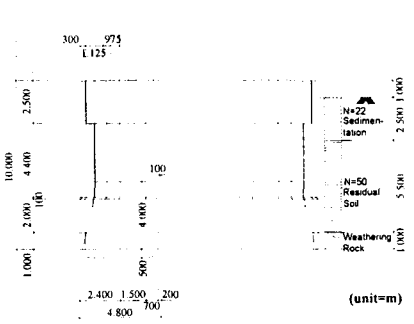


그림 2. 대상 교량구조물의 단면도

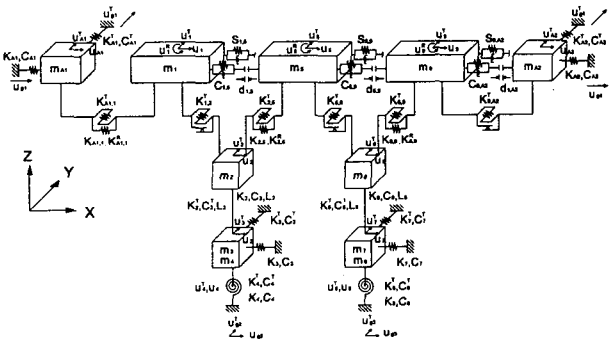
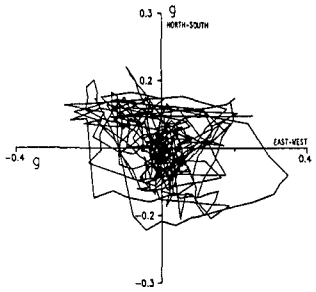


그림 3. 교량해석모형

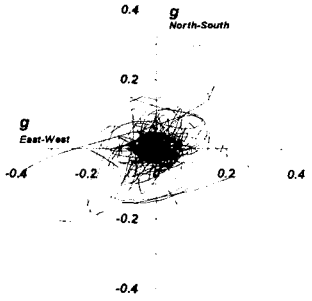
2.2 2방향 입력지진하중

실제 지진에 의한 지반진동은 방향성 및 크기에 있어서 상당히 불규칙한 특성을 보이게 된다. 그림 4는 El Centro 지진과 Hyogoken - Nanbu 지진시 두 직교축방향(남북방향, 동서방향)에 대해 실측된 계기지진기록을 도시한 것으로 지진파의 불규칙한 특성을 잘 보여주는 대표적인 예이다[6,7]. 단, 2방향 지진이력 중에서 최대지반가속도를 가지는 좌표축방향을 주축성분으로, 그에 대한 직교좌표축 방향을 직교축성분으로 정의하였다. 본 연구에서는 그림 4와 같은 실제 지진기록과 유사한 인공지진이력을 발생시키기 위해서 SIMQKE 프로그램[8]을 이용하여 현행 도로교표준시방서의 설계응답 스펙트럼에 일치하는 두 개의 독립된 인공지진이력을 생성하였으며, 생성된 두 개의 인공지진이력의 조합에 의한 지진파의 평면분포도는 그림 5와 같다. 또한 본 연구에서는 보다 실제적인 2방향 지진이력을 발생시키기 위해 기존의 실측된 계기지진기록에 대한 자료조사를 통

하여 최대지반가속도를 가지는 주축 성분과 직교축성분의 상관관계를 분석하였다(그림 6)[6,7,9].



(a) El Centro 지진



(b) Hyogoken-Nanbu 지진

그림 4. 실측된 지진파의 평면분포도

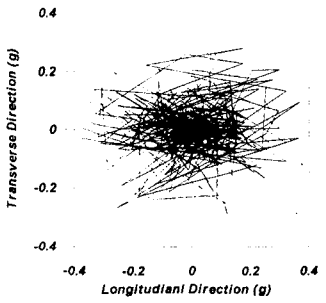


그림 5. 인공지진이력의 평면분포도

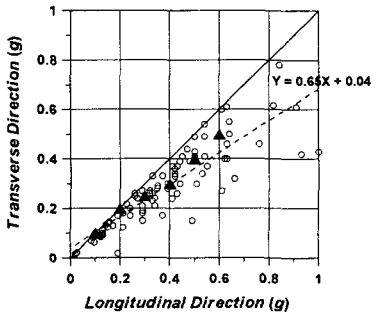


그림 6. 방향별 최대지반가속도의 발생분포도

3. 국부세굴깊이에 따른 교각기초의 강성결정

교각기초의 국부세굴깊이를 산정하는 공식들은 주로 실내실험 및 현장측정을 통하여 개발된 것으로 실험조건이나 현장의 측정조건 등에 따라 상당한 차이를 나타내고 있다. 본 연구에서는 국부세굴깊이의 산정공식으로 널리 적용되고 있으며, 국내 도로설계기준[10]과 HEC-18[11]에서 추천하고 있는 CSU공식을 사용하였다.

$$d_{\max} = 2\lambda_S y_0 K_1 K_2 K_3 K_4 \left(\frac{b}{y_0}\right)^{0.65} Fr^{0.43} \qquad (1)$$

여기서, d_{max}는 최대세굴깊이 (m)이며, y_0는 교각기초 전면에서의 수심, K_1, K_2, K_3, K_4는 교각기초의 형상, 교각기초에 대한 흐름의 접근각, 하상조건 그리고 하상재료의 크기에 대한 보정계수, λ_S는 모형보정계수이다. b는 교각기초의 유효폭 (m)이며, Fr ($= V/\sqrt{g y_0}$)은 Froude 수이고, V는 평균유속 (m/sec), g는 중력가속도 (m/sec^2)이다.

일반적으로 국부세굴깊이의 산정공식은 실험모형, 수리자료, 그리고 변수들에 따른 불확실성을 내포하고 있으므로 보다 실제적으로 세굴깊이를 산정하기 위해서는 확률론적 접근방법을 통한 평가가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 국부세굴깊이를 확률론적으로 산정하기 위하여 우선적으로 우리나라의 중소하천에서 실측된 수리자료를 바탕으로 식 (1)에 포함된 영향인자들의 확률적 분포

특성을 결정하였다 (표 1).

교량기초부의 각 세굴깊이별 발생확률은 각 세굴영향인자들의 분포특성에 적합한 난수를 발생시킨 후 몬테칼로 모의분석법 (Monte Carlo Simulation)을 이용하여 구하였다[13]. 이 때, 모의분석규모는 평균 세굴깊이와 변동계수가 일정한 값으로 수렴하는 10000회를 사용하였다. 교량구조물의 사용기간동안에 기초에서 발생가능한 세굴깊이는 모의분석결과로부터 $2.8m \sim 5.0m$의 범위를 갖는 것으로 나타났으며, 각 세굴깊이에 대한 발생확률은 그림 7과 같다.

표 1. 세굴영향인자들에 대한 확률특성값[12]

영향인자	최소값	평균값	최대값	분포특성
b	—	4.80	—	상수
V	λ=-0.117, ζ=0.094			대수정규분포
y	λ=1.103, ζ=0.140			대수정규분포
λ_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

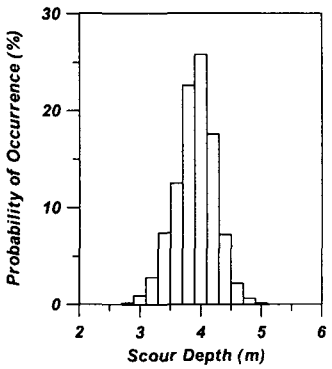


그림 7. 세굴깊이의 발생확률

교각기초의 강성은 주변지반과의 상호작용에 의해 결정되므로 주변지반 토층의 구성조건 및 각 토층의 상태나 기초의 근입정도에 따라 상당히 달라지게 된다. 그러므로 교각기초주변의 국부세굴로 인한 근입깊이의 감소는 교각기초의 강성을 저하시키게 된다. 본 연구에서는 그림 2에서 보여지는 바와 같이 각 국부세굴깊이에 따른 교각기초의 수평 및 회전방향의 강성을 구하기 위하여 Gazetas가 제안한 공식을 이용하였다[14].

4. 지진 및 세굴의 영향을 반영한 기초의 파괴위험도

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)[15]에서 제시하고 있는 다양한 검토조건에 대한 타당성을 분석하였으며, 이로부터 우물통기초의 파괴기준을 극한연직지지력에 대한 안전성 여부로 결정하였다.

따라서 교각기초의 세굴깊이가 d인 교량구조물에 최대지반가속도 a_g인 지진이 발생하였을 때, 기초가 파괴될 확률은 식 (2)와 같은 조건부 확률로서 표현할 수 있다.

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

여기서, Q_d는 기초지반의 극한 연직지지력이며, q는 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, $P(d_s)$는 각 세굴깊이의 발생확률이며, $P(a_g)$는 각 최대지반가속도의 발생확률이다.

각 세굴깊이의 발생확률은 앞서 언급한 바와 같이 그림 7로부터 구할 수 있다. 단, 본 연구에서 고려한 세굴의 발생주기는 1년이며, 대상교량의 사용기간 동안 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[16]를 이용하여 구하였으며, 그림 8은 대상지역에 대한 사용기간 50년과 75년 기간의 지진위험도곡선이다.

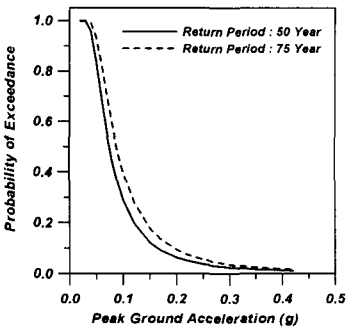


그림 8. 대상지역의 지진위험도

5. 지진 및 세굴깊이에 따른 기초의 파괴확률

본 연구에서는 대상교량의 사용기간동안에 지진 및 세굴로 인한 기초의 파괴위험도를 분석하기 위하여 우선적으로 각 최대지반가속도에 대해 발생가능한 세굴깊이별 (=2.8m~5.0m) 기초의 파괴확률을 산정하였으며, 산정된 기초의 파괴확률에 교량의 사용기간동안 각 최대지반가속도의 발생확률을 적용하여 누적시킴으로서 대상교량의 사용기간에 대한 기초의 파괴확률을 산정하였다. 대상교량의 사용기간은 50년과 75년의 두 가지 경우로 가정하였으며, 입력지진하중으로는 지진위험도 분석결과에 기초하여 최대지반가속도 0.03g~0.42g의 범위를 갖는 인공지진이력을 적용하였다. 교각기초부의 세굴조건은 2개의 우물통기초에 대해 동일한 것으로 가정하였다. 기초지반의 저항력은 정역학적 공식으로부터 구한 극한 연직지지력으로 세굴조건에 따라 일정한 상수값을 갖는 것으로 가정하였다. 지진하중의 작용으로 인해 발생되는 기초의 지반반력의 확률적 분포특성은 모의 발생된 50개의 인공지진이력을 적용하여 구해진 지진응답해석결과로부터 대수정규분포를 갖는 것으로 모형화하였다. 그림 9는 50개의 인공지진이력에 대한 시간이력해석으로부터 구한 지반반력을 대수정규분포 확률지에 나타낸 것이다.

표 2는 다양한 2방향 지진하중을 받는 교량구조물에 있어서 사용기간 및 세굴 발생 후 기초의 강성회복기간에 따른 기초의 파괴확률을 나타낸 것이다. 세굴을 고려하지 않은 경우의 기초파괴확률은 세굴을 고려한 경우에 비해 상대적으로 무시할 정도로 작은 것으로 나타났으나 세굴을 고려한 경우의 기초파괴확률은 강성회복기간 3개월에 대해서도 상당히 증가하는 경향을 보이는 것으로 분석되었다. 또한 교량의 사용기간을 50년으로 적용한 경우에 기초의 파괴확률은 강성회복기간이 6개월, 12개월로 증가할수록 3개월을 적용한 경우보다 2배 또는 4배 이상 증가하는 것으로 나타났다. 교량의 사용기간이 75년인 경우에도 강성회복기간이 증가함에 따라 50년인 경우와 동일한 경향을 보이는 것으로 나타났으나 기초파괴확률의 증가율은 다소 작은 것으로 분석되었다. 그러므로 지진 및 세굴의 영향에 따른 교량구조물의 안전성을 보다 효과적으로 평가하기 위해서는 교각기초의 국부세굴에 의한 영향은 물론 세굴 후 교각기초의 강성회복기간이 적절히 반영되어야 할 것으로 판단된다.

그림 10은 1방향 지진하중을 적용한 경우와 2방향 지진하중을 적용한 경우에 있어서 강성회복

기간에 따른 기초의 파괴확률에 대한 신뢰성지수를 도시한 것이다. 그림 5로부터 알 수 있듯이 2방향 지진하중을 적용한 경우의 파괴확률이 1방향 지진하중을 적용한 경우보다 상당히 증가하는 것으로 나타났다. 또한 1방향 지진하중을 받는 교량구조물에서는 세굴의 고려여부에 관계없이 P1 교각기초의 파괴확률이 P2교각기초에 비해 상대적으로 크게 나타났다. 그러나 2방향 지진하중하에서는 세굴을 고려한 경우의 기초파괴확률은 강성회복기간에 관계없이 P1, P2교각기초 모두 거의 동일한 것으로 평가되었으며, 이로부터 교축직각방향의 지진하중이 세굴된 교각기초의 파괴확률에 상당한 영향을 미침을 알 수 있다. 그러므로 교각기초가 세굴된 교량구조물의 내진안전성을 실제적으로 평가하기 위해서는 2방향 지진하중이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

표 2. 2방향 지진하중하에서의 기초의 파괴확률

강성회복기간	50 years		75 years	
	P1 pier	P2 pier	P1 pier	P2 pier
세굴을 고려하지 않은 경우	1.01×10^{-5} (β=4.27)	2.81×10^{-5} (β=4.55)	1.55×10^{-5} (β=4.16)	4.21×10^{-6} (β=4.45)
3개월	6.27×10^{-3} (β=2.50)	5.90×10^{-3} (β=2.52)	9.96×10^{-3} (β=2.33)	9.44×10^{-3} (β=2.35)
6개월	1.26×10^{-2} (β=2.24)	1.20×10^{-2} (β=2.26)	1.97×10^{-2} (β=2.06)	1.87×10^{-2} (β=2.08)
12개월	2.52×10^{-2} (β=1.96)	2.38×10^{-2} (β=1.98)	3.81×10^{-2} (β=1.77)	3.61×10^{-2} (β=1.80)

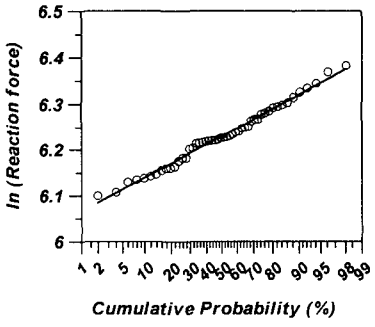


그림 9. 지반반력의 확률분포특성 (PGA=0.3g)

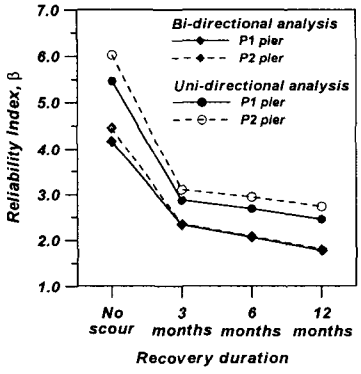


그림 10. 지진하중조건에 따른 기초의 파괴확률

5. 결 론

본 연구에서는 2방향 지진하중을 받는 교각기초가 세굴된 교량구조물의 지진거동을 분석하였다. 대상교량에 대해 발생가능한 세굴깊이는 우리나라 중소하천에서 실측된 수리자료에 기초하여 확률론적인 접근방법을 통해 산정하였다. 산정된 세굴깊이의 발생확률 및 대상지역의 지진위험도를 반영하여 교량구조물의 사용기간에 대한 기초의 파괴확률을 평가하였다. 모의분석결과로부터 2방향 지진하중을 받는 교량구조물에 있어서 세굴을 고려하지 않은 경우 기초의 파괴확률은 무시할 정도로 매우 낮은 것으로 나타났으나 세굴을 고려한 경우는 상당히 증가하는 것으로 분석되었다. 또한 기초의 파괴확률은 세굴된 기초의 강성회복기간에 따라 상당한 영향을 받는 것으로 평가되었으며, 지진하중의 조건에 따른 기초의 파괴확률은 2방향 지진하중을 받는 경우가 1방향 지진하중을 받는 경우에 비해 상당히 증가하는 것으로 나타났다. 그러므로 지진 및 세굴의 영향을

받는 교량구조물의 안전성을 보다 실제적으로 평가하기 위해서는 국부세굴의 영향 및 세굴된 기초의 강성회복기간은 물론 2방향 지진하중의 영향이 고려되어야 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. Hamill, L., *Bridge Hydraulics*, E & FN SPON, 1995.
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., Mha, H. S., Lee, S. W., and Kang, J. W., "Dynamic Behavior Analysis of Bridge under Bi-directional Seismic Excitations", *KEERC-MAE Joint Seminar on Risk Mitigation for Regions of Moderate Seismicity*, 2001, pp. 180-188.
4. 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.
5. 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.
6. Ministry of Construction (Public Works Research Institute), *Strong-Motion Acceleration Records from Public Works in Japan (No. 21)*, Technical Note of Public Works Research Institute, Vol. 64., 1995.
7. Solnes, J., *Engineering Seismology and Earthquake Engineering*, Noordhoff International Publishing, 1974.
8. Gasparini, D. A. and Vanmarcke, E. H., *Evaluation of Seismic Safety of Buildings Simulated Earthquake Motions Compatible with Prescribed Response Spectra*, Massachusetts Institute of Technology, Report 2., 1976.
9. Goltz, J. D., *The Northridge, California Earthquake of January 17, 1994, General Reconnaissance Report I & II*, NCEER-94-0005, 1994.
10. 한국도로교통협회, **도로설계기준**, 2001.
11. Richardson, E. V. and Davis, S. R., *Evaluating Scour at Bridges*, Report FHWA-IP-90-017, Hydraulic Engineering Circular No. 18, FHWA, 1991.
12. Johnson, P. A. and Dock, D. A., "Probabilistic Bridge Scour Estimates", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 124, No. 7, 1998, pp. 750-754.
13. Ang, A. H-S. and Tang, W. H., *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*, John Wiley & Sons, Inc., 1975.
14. Gazetas, G., "Formulas and Charts for Impedances of Surface and Embedded Foundations", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 117, No. 9, 1991, pp. 1363-1381.
15. 건설교통부, **도로교설계기준**, 2000.
16. 오병환, 강영진, "지진위험도해석기법과 설계지진결정 연구", **대한토목학회논문집**, 제12권, 제1호, 1992, pp. 29-42.