

지진 및 기초의 세굴을 고려한 교량시스템의 동적거동분석

Dynamic Behavior Analysis of Bridges under the Combined Effect of Earthquake and Scour

김상효* 최성욱** 이상우*** 김호상****
Kim, Sang-Hyo Choi, Sung-Uk Lee, Sang-Woo Kim, Ho-Sang

ABSTRACT

Bridge dynamic behaviors and the failure of the foundation are examined in this study under seismic excitations including the local scour effect. The simplified mechanical model, which can consider the effect of various influence elements, is proposed to simulate the bridge motions. The scour depths around the foundations are estimated by the CSU equation recommended by the HEC-18 and the local scour effect upon global bridge motions is then considered by applying various foundation stiffness based upon the reduced embedded depths. From the simulation results, it is found that seismic responses of a bridge with the same scour depth for both foundations increase due to the local scour effect. The bridge scour is found to be significant under weak and moderate seismic intensity. The recovery durations of the foundation stiffness after local scour are found to be critical in the estimation of the probability of foundation failure under earthquakes. Therefore, the safety of the whole bridge system should be conducted with the consideration of the scour effect upon the foundations and the recovery duration of stiffness should be determined rationally

1. 서 론

최근 발생되고 있는 일련의 교량붕괴사례들로부터 알 수 있듯이 예측 불가능한 지진의 발생이나 갑작스런 홍수로 인한 교각기초부의 세굴 등은 교량구조물의 안전성을 위협하는 대표적인 위험인자들이라 할 수 있다. 지진이나 홍수로 인한 교량구조물의 붕괴사례는 전 세계적으로 꾸준히 보고되고 있으며, 이에 따라 설계기준 및 보수·보강대책 등을 마련하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있는 추세이다^[1,2]. 국내에서도 홍수에 의한 교량피해의 급증으로 인해 교량구조물의 기초부에서 발생하는 국부세굴에 관한 연구나 지진하중에 의한 교량구조물의 거동에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 교량구조물에 있어서 국부세굴에 관한 연구는 주로 수리학적 측면에서의 안전성 평가에 관한 연구이며, 국부세굴에 의한 교량구조물의 전체적인 성능평가나 기초부가 세굴된 교량구조물의 지진시 안전성 평가 등에 관한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 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

* 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수, 정회원
** 연세대학교 사회환경시스템공학부 부교수
*** 연세대학교 토목공학과 박사과정, 학생회원
**** 연세대학교 산업기술연구소 연구원

조합으로 인한 피해는 구조물의 국부적인 손상을 넘어선 전체적인 교량구조물의 붕괴를 가져올 수 있는 수준일 것으로 예상된다.

본 연구에서는 교량구조물의 지진거동특성에 영향을 미치는 다양한 인자들을 고려할 수 있는 단순화된 교량해석모형을 이용하여 기초지반의 국부세굴로 인한 강성저하특성을 반영한 교량시스템의 동적거동특성을 분석할 수 있는 기법을 개발한다. 또한 개발된 기법을 이용하여 교량구조물의 사용기간에 대해 지진과 세굴의 복합적인 영향으로 인한 기초의 파괴확률을 평가하고자 한다.

2. 교량해석모형

지진하중 및 교각기초부의 국부세굴에 따른 교량구조물의 동적거동특성을 분석하기 위하여 그림 1에서 보여지는 바와 같이 3경간 단순 PSC 거더교 (3@30m=90m)를 대상으로 하였다. 교각형식은 원형교각 ($D=1.95m$)으로 이루어진 벤트형식이며, 교각높이는 12m이다. 교각기초는 그림 2와 같이 풍화암층에 선단지지된 우물통기초이며, 기초의 직경은 3.75m, 높이는 10m이다. 교대형식은 앉힘형태의 교대로 교대높이는 6.5m이다.

그림 3은 대상교량의 교축방향 지진거동특성에 영향을 미치는 다양한 인자들 및 교각기초부의 국부세굴에 의한 영향을 고려할 수 있도록 단순화된 교량해석모형이다. 그림 3에서 m , K , C 는 각각 구성요소들의 질량, 강성, 감쇠이다. 교각기초부의 국부세굴로 인한 영향은 세굴로 인해 감소된 근입깊이에 따른 교각기초의 수평 및 회전강성을 반영시킴으로서 해석모형에 반영하였다. 지진하중으로 인한 교량의 거동특성에 영향을 미치는 인자들로는 인접 진동계간의 충돌, 가동단의 마찰효과, 교대의 강성저하특성, 교각의 비선형거동 그리고 기초의 운동 등을 고려하였다. 인접 진동계간의 충돌현상은 그림 3에서 보여지는 것과 같이 두 진동계사이에 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 5cm를 적용하였다^[3]. 가동단에서의 마찰은 선형의 Coulomb 마찰요소로 모형화 (마찰계수 $\mu=0.05$)하였으며^[3], 그림 3에서 $F_{1,2}$, $F_{5,6}$, $F_{9,A}$ 는 가동단에 작용되는 마찰력을 나타낸다. 교대-뒷체 운재 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^[4]. 또한 지진하중의 작용과 그로 인해 발생하는 변위의 증가에 따라 나타나는 철근콘크리트 교각의 비선형거동을 반영하기 위해서 기하학적 비선형성을 나타내는 P- Δ 효과와 재료적 비선형성을 고려할 수 있는 히스테리시스모형을 적용하였다. 교각의 기초는 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 모형화하였다^[3].

3. 국부세굴에 따른 교각기초의 강성결정

3.1 교각기초부의 국부세굴깊이 산정

교각기초의 국부세굴깊이를 산정하는 공식들은 주로 실내실험 및 현장측정을 통하여 개발된 것으로 실험조건이나 현장의 측정조건 등에 따라 상당한 차이를 나타내고 있다. 본 연구에서는 국부세굴깊이의 산정공식으로 도로교설계기준^[5]과 HEC-18^[6]에서 추천하고 있는 CSU (Colorado State University)공식을 사용하였다.

$$d_{max} = 2 \lambda_s y_0 K_1 K_2 K_3 K_4 \left(\frac{b}{y_0} \right)^{0.65} F_r^{0.43} \quad (1)$$

여기서, d_{max} 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, λ_s 는

모형보정계수이다. b 는 교각기초의 유효폭 (m)이며, $Fr (= V/\sqrt{gy_0})$ 은 Froude 수이고, V 는 평균유속 (m/sec), g 는 중력가속도 (m/sec^2)이다.

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

교량기초부에 대한 세굴깊이의 분포특성은 각 세굴영향인자들의 분포특성에 적합한 난수를 발생시킨 후 몬테칼로 모의분석법 (Monte Carlo Simulation)을 이용하여 구하였다^[7]. 이 때, 모의분석규모는 평균 세굴깊이와 변동계수가 일정한 값으로 수렴하는 10000회를 사용하였다. 모의분석 결과로부터 산정된 교각기초의 세굴깊이에 대한 분포특성은 $\lambda = 1.200$ 와 $\zeta = 0.085$ 인 대수정규분포를 갖는 것으로 나타났다. 교량구조물의 사용기간동안에 기초에서 발생가능한 세굴깊이는 2.2 $m \sim 4.4m$ 의 범위이며, 각 세굴깊이에 대한 발생확률은 그림 4와 같다.

3.2 국부세굴된 교각기초의 강성결정

교각기초의 강성은 주변지반과의 상호작용에 의해 결정되므로 주변지반 토층의 구성조건 및 각 토층의 상태나 기초의 근입 정도에 따라 상당히 달라지게 된다. 그러므로 교각기초 주변의 국부세굴로 인한 근입깊이의 감소는 교각기초의 강성을 저하시키게 된다. 본 연구에서는 국부세굴에 따른 교각기초의 강성변화를 평가하기 위하여 각 세굴깊이에 따른 교각기초의 병진강성 K_h 및 회전강성 K_r 을 아래의 식을 이용하여 결정하였다^[8].

$$K_h = k_h \cdot K_{h, surface} \cdot \left(1 + 0.15\sqrt{\frac{D}{B}}\right) \left[1 + 0.52\left(\frac{h}{B} \cdot \frac{A_w}{L^2}\right)^{0.4}\right] \quad (2)$$

$$K_{h, surface} = \left(\frac{2GL}{2-\nu}\right) \left[2 + 2.5\left(\frac{A_b}{4L^2}\right)^{0.85}\right] - \left[\frac{0.2}{(0.75-\nu)}\right] \cdot GL \cdot [1 - (B/L)]$$

$$K_r = K_{r, surface} \cdot \left[1 + 0.92\left(\frac{d}{L}\right)^{0.6}\right] \left[1.5 + \left(\frac{d}{L}\right)^{1.9} \left(\frac{D}{d}\right)^{0.6}\right] \quad (3)$$

$$K_{r, surface} = \frac{3G}{1-\nu} I_{br}^{0.75} \left(\frac{L}{B}\right)^{0.15} (1 - 0.26a_0)$$

여기서, G 는 전단탄성계수, $2L$ 은 기초의 길이, $2B$ 는 기초의 폭, A_b 는 기초의 면적, k_h 는 동적강성계수(=0.2), ν 는 포아손비, D 는 지표면으로부터 기초저면까지의 깊이, h 는 지표면에서부터 근입깊이의 1/2까지 깊이, A_w 는 토체와 접촉하고 있는 기초의 접촉면적, d 는 기초의 근입깊이, I_{br} 은 기초의 관성모멘트 그리고 $a_0 (= \omega B/V_s)$ 는 토체의 주파수와 관련된 계수이다.

그림 5는 각 세굴깊이에 따른 교각기초의 강성변화를 나타낸 것으로 세굴깊이가 증가함에 따라 강성이 상당히 감소하는 것을 볼 수 있다. 그림에서 y 축의 값은 세굴이 되지 않은 기초의 강성에 대한 세굴된 기초의 강성비를 나타낸다. 특히 상부구조의 응답변위에 큰 영향을 미치는 회전강성은 세굴깊이 5m인 경우 세굴되지 않은 기초강성의 30%정도로 매우 작아짐을 알 수 있다.

4. 지진 및 세굴의 영향을 반영한 기초의 파괴위험도

교량구조물에 하중작용시 기초는 가해지는 작용력과 이로 인해 발생하는 변위가 연직방향 및 수평방향의 허용변위와 연직지지력 및 전단저항력을 초과하지 않아야 한다^[5]. 본 연구에서는 기

초의 파괴기준을 설정하기 위하여 현행 도로교설계기준에서 제시하고 있는 다양한 검토조건들에 대한 타당성을 분석하였으며, 분석결과로부터 기초의 파괴기준을 연직지지력에 대한 안전성 여부로 결정하였다. 따라서 교각기초의 세굴깊이가 d 인 교량구조물에 최대지반가속도 a_g 인 지진이 발생하였을 때, 기초가 파괴될 확률은 식 (4)와 같은 조건부 확률로서 표현할 수 있다.

$$P[\text{failure}](d, a_g) = P\left(\frac{Q_d}{q} < 1\right) \quad (4)$$

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 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$P_f = \sum P[\text{failure}](d, a_g) \cdot P(d) \cdot P(a_g) \quad (5)$$

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 최대진도 초과확률을 나타내는 다음 식을 이용하여 구할 수 있다^[9].

$$P_t = 1 - \prod_{i=1}^n \exp[-pt \cdot \exp\{-\beta(I_e - i_0)\}] \quad (6)$$

여기서, P_t 는 기간 t 년 동안 최대진양진도 I_e 를 초과하는 지진이 최소한 한번 발생할 확률이다. p 는 지진구역의 지진발생비율, β 는 축적매개변수, 그리고 i_0 는 위치매개변수이다. 그림 6은 식 (6)을 이용하여 얻은 대상지역에서의 50년과 75년 기간의 지진위험도곡선이다.

5. 지진 및 세굴깊이에 따른 교량구조물의 동적거동분석

본 연구에서는 대상교량에서 발생가능한 세굴조건 및 이에 따른 교각기초부의 강성변화를 고려하여 교각기초부의 국부세굴이 전체적인 교량구조물의 지진응답특성에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 교량사용기간 동안의 지진과 세굴로 인한 기초의 파괴확률을 산정하였다. 입력지진하중은 널리 사용되고 있는 SIMQKE 프로그램^[10]을 이용하여 현행 도로교설계기준에서 제시하고 있는 설계응답스펙트럼에 일치하도록 모의 발생된 인공지진이력을 적용하였다.

5.1 세굴깊이에 따른 교량구조물의 지진응답특성

교각기초의 국부세굴이 전체적인 교량구조물의 지진응답특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 교각기초부의 세굴조건은 2개의 우물통기초에 대해 동일하며, 세굴깊이는 모의분석결과(세굴깊이=2.2m~4.4m)로부터 확장하여 0m~5m의 범위를 가정하였다.

그림 7은 두 개의 우물통기초 (P1 교각과 P2 교각)에 대해 동일한 세굴깊이를 적용한 경우에 있어서의 각 교각진동계의 지반에 대한 상대변위이력을 나타낸 것이다. 그림 7로부터 알 수 있듯이 세굴깊이에 따라 전체적인 응답의 형태 및 크기가 다르며, 세굴깊이가 증가함에 따라 응답의 크기가 증가하는 것으로 나타났다. 그림 8은 두 개의 우물통기초 (P1 교각과 P2 교각)에 대해 동일한 세굴깊이를 적용한 경우에 있어서 세굴이 발생되지 않은 경우의 응답에 대한 세굴깊이를 반

영한 경우의 응답비를 나타낸 것이다. 그림 8에 나타난 바와 같이 전체적으로 교각기초부에 발생되는 세굴의 영향으로 인해 교량구조물의 전체적인 응답크기가 증가하는 것으로 평가되었다. 특히, 약진의 경우에는 세굴에 따른 영향이 상당히 큰 것으로 나타났으며, 0.5g이상의 강진에서는 다소 증가하기는 하나 매우 낮은 수준인 것으로 나타났다. 이는 강진으로 갈수록 세굴의 영향으로 인해 증가된 응답이 인접한 진동계간의 충돌로 인해 제한되기 때문에 상대적으로 작게 나타나는 것으로 판단된다.

5.2 지진 및 세굴에 의한 기초파괴확률

대상교량의 사용기간동안에 지진 및 세굴로 인한 기초의 파괴위험도를 분석하기 위하여 우선적으로 각 최대지반가속도에 대해 발생가능한 세굴깊이별 (=2.2m~4.4m) 기초의 파괴확률을 산정하였으며, 산정된 기초의 파괴확률에 교량의 사용기간 동안 각 최대지반가속도의 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. 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.

그림 10은 각 최대지반가속도별 세굴깊이의 증가에 따른 기초의 파괴확률을 나타낸 것이고, 표 6은 각 최대지반가속도별 발생가능한 세굴깊이를 고려한 경우의 기초파괴확률을 나타낸 것이다. 표에서 신뢰성지수가 6이상일 경우에는 기초파괴확률이 1.0E-10미만이어서 결과에 영향을 미치지 않으므로 (-)기호로 표시하였다. 그림 10과 표 2에서 알 수 있듯이 최대지반가속도가 0.03g에서 0.12g구간의 낮은 지진하중에서는 최대세굴깊이에 도달하여도 기초의 파괴확률은 상당히 낮은 것으로 분석되었으나 세굴깊이나 최대지반가속도가 증가함에 따라 기초의 파괴확률은 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 표 3은 교량의 사용기간 50년과 75년에 대해 기초지반의 강성회복기간에 따른 기초의 파괴확률을 나타낸 것이다. 세굴을 고려하지 않은 경우에는 교량의 사용기간에 관계없이 기초가 파괴되지 않는 것으로 나타났으나, 되메움에 의한 강성회복기간을 3개월로 가정하여 세굴을 고려한 경우의 기초파괴확률은 각각 $4.41E-3(\beta=2.62)$, $7.16E-3(\beta=2.45)$ 으로 나타났다. 또한 강성회복기간이 6개월, 12개월로 증가함에 따라 기초의 파괴확률은 강성회복기간을 3개월로 가정한 경우에 비해 최대 4.1배까지 증가하는 것으로 평가되었다. 이상의 결과로부터 교량구조물의 내진 안전성을 평가하는데 있어 교각기초부의 국부세굴에 의한 영향이 반영되어야 하며, 되메움에 의한 강성회복기간의 적용에 따른 영향도 고려되어야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 세굴에 의한 기초의 강성저하가 교량시스템의 지진거동특성에 미치는 영향에 대해서 분석하였다. 대상교량에 대해 발생가능한 세굴깊이는 우리나라 중소하천에서 실측된 수리자료에 기초하여 확률론적인 접근방법에 의해 산정하였으며, 대상지역의 지진위험도 및 산정된 세굴깊이의 발생확률을 반영한 교량구조물의 동적응답분석을 통하여 교량의 사용기간동안의 기초파괴확률을 평가하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 본 연구에서는 지진과 세굴의 복합적인 영향을 받는 교량구조물의 지진응답특성을 분석하였으며, 대상교량의 사용기간동안의 지진위험도 및 세굴의 발생확률을 고려한 교량기초의 파괴확률을 평가할 수 있는 방법론을 제시하였다. 본 연구를 통하여 제시된 방법론은 지진 및 세굴에 의

한 교량구조물의 기초에 대한 안전성을 평가하는데 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

2) 교각기초부에 발생하는 세굴은 지진하중을 받는 교량구조물의 전체적인 응답을 증가시키는 것으로 평가되었다. 특히, 강진보다는 인접한 진동계간의 충돌빈도가 적은 약진하에서 세굴에 따른 영향이 상당히 큰 것으로 평가되었다. 따라서 우리나라와 같은 중·약진 지역에서의 지진응답 평가시 교각기초의 국부세굴에 따른 영향이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

3) 세굴을 고려하지 않을 경우 기초의 파괴가능성은 교량의 사용기간에 관계없이 거의 없는 것으로 나타났으나 되메움에 의한 강성회복기간을 3개월로 가정하여 세굴을 고려한 경우에는 기초의 파괴확률이 각각 $4.41E-3(\beta=2.62)$, $7.16E-3(\beta=2.45)$ 으로 나타났다. 또한 강성회복기간이 6개월, 12개월로 증가함에 따라 강성회복기간이 3개월인 경우에 비해 기초의 파괴확률이 최대 4.1배까지 증가하는 것으로 분석되었다. 따라서 교량구조물의 내진 안전성을 평가하는데 있어 교각기초부의 국부세굴에 의한 영향이 반영되어야 하며, 되메움에 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. 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, 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, *도로교설계기준*, 2000.
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. Ang, A. H-S. and Tang, W. H., *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*, John Wiley & Sons, Inc., 1975.
8. Gazetas, G., "Formulas and Charts for Impedances of Surface and Embedded Foundations", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 117, No. 9, 1991, pp. 1363-1381.
9. 오병환, 강영진, "지진위험도해석기법과 설계지진결정 연구", *대한토목학회논문집*, 제12권, 제1호, 1992, pp. 29-42.
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. Johnson, P. A. and Dock, D. A., "Probabilistic Bridge Scour Estimates", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 124, No. 7, 1998, pp. 750-754.

표 1 세굴영향인자들에 대한 분포특성값⁽¹¹⁾

영향인자	최소값	평균값	최대값	분포특성
b	—	3.75	—	상수
V	$\lambda = -0.117, \xi = 0.094$			대수정규분포
y	$\lambda = 1.103, \xi = 0.140$			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

표 2. 최대지반가속도별 기초의 파괴확률

PGA	P_f
0.03g~0.05g	—
0.05g~0.08g	—
0.08g~0.12g	—
0.12g~0.17g	$2.70E-7 (\beta=5.00)$
0.17g~0.22g	$1.04E-2 (\beta=2.31)$
0.22g~0.27g	0.153 ($\beta=1.02$)
0.27g~0.32g	0.578 ($\beta=-0.20$)
0.32g~0.37g	0.832 ($\beta=-0.96$)
0.37g~0.42g	0.968 ($\beta=-1.85$)

표 3. 교량 사용기간에 대한 기초파괴확률

사용기간	50년	75년
강성회복기간	—	—
세굴을 고려하지 않은 경우	—	—
3개월	$4.41E-3 (\beta=2.62)$	$7.16E-3 (\beta=2.45)$
6개월	$8.93E-3 (\beta=2.37)$	$1.42E-2 (\beta=2.19)$
12개월	$1.81E-2 (\beta=2.09)$	$2.75E-2 (\beta=1.92)$

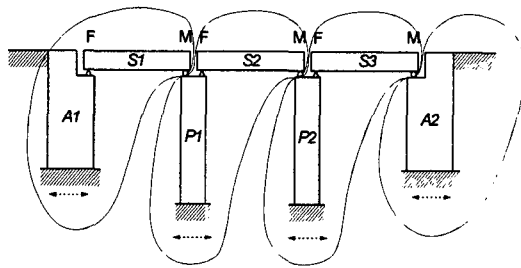


그림 1. 대상교량

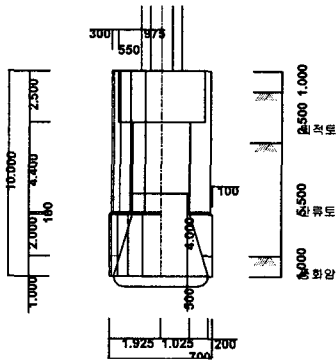


그림 2. 우물뿔기초

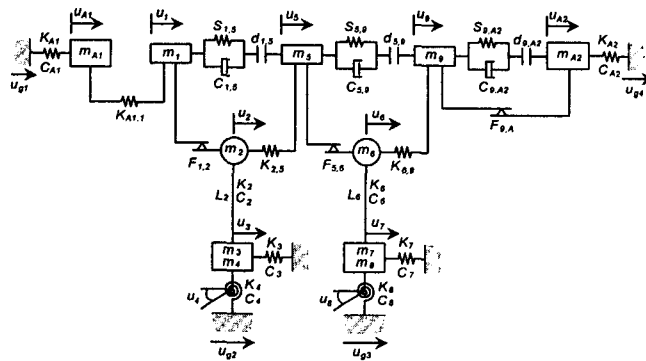


그림 3. 이상화된 교량해석모형

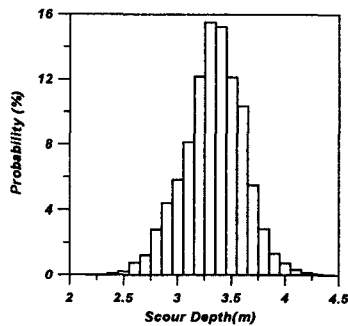


그림 4. 세굴깊이의 발생확률

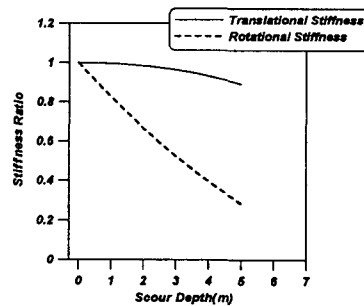


그림 5. 세굴깊이에 따른 기초의 강성변화

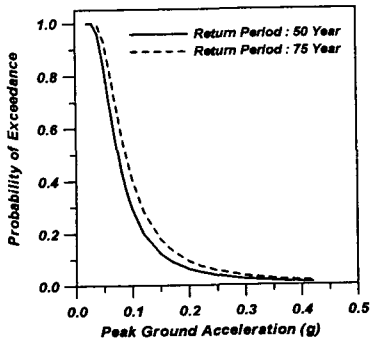
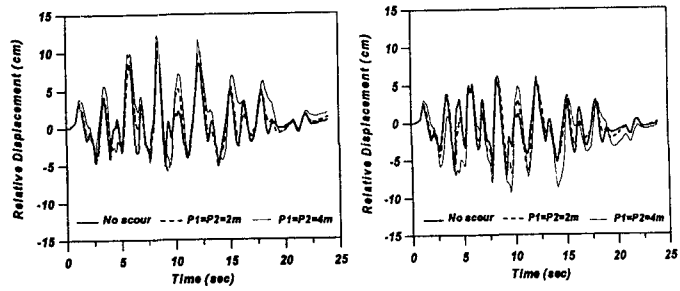


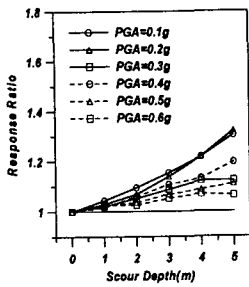
그림 6. 대상지역의 지진위험도



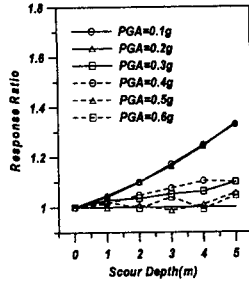
(a) P1교각

(b) P2교각

그림 7. 지반에 대한 상대변위이력 (PGA=0.3g)



(a) P1 교각



(b) P2 교각

그림 8. 동일한 세굴깊이를 적용한 경우의 응답비

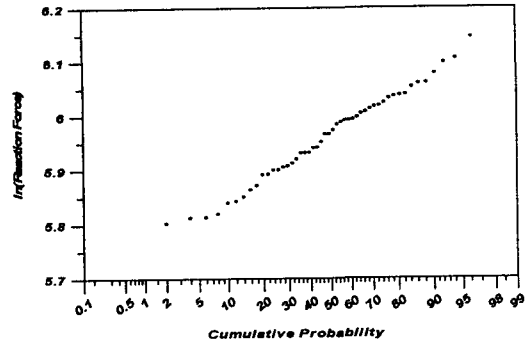


그림 9. 지반반력의 확률적 특성 (PGA=0.2g)

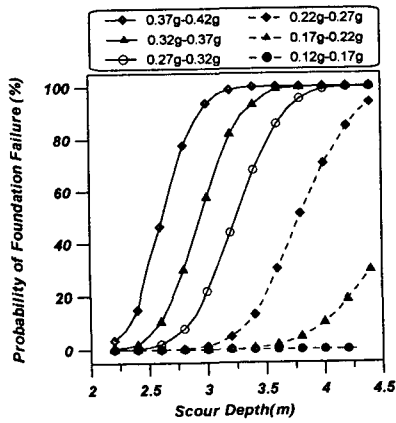


그림 10. 세굴깊이에 따른 기초의 파괴확률