

기초세굴의 영향을 고려한 교량시스템의 지진거동분석

Seismic Behavior Analysis of a Bridge Considering Bridge Scour

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

ABSTRACT

Bridge dynamic behaviors are examined under seismic excitations including the local scour effect. The corresponding simplified mechanical model, which can also consider the effect of other influence elements, is proposed to simulate the bridge motions. The scour depth around the pier is estimated by the CSU equation recommended by the HEC-18, and the local scour effect upon global bridge motions is then investigated by applying various foundation stiffness based upon the reduced embedded depths. From the results, it is found that seismic responses of a bridge with the same scour depth level for both piers increase as the scour depth increase due to the local scour effect. The scour effect is found to be significant under weak excitations and still to be quite notable even for moderate excitations.

1. 서 론

최근 발생되고 있는 교량구조물의 붕괴사태들로부터 알 수 있듯이 갑작스런 홍수로 인한 교각기초부의 세굴과 지반조건에 따른 지반진동(지진)은 교량구조물의 안전성을 위협하는 대표적인 위험인자들이라 할 수 있다. 각각의 인자들에 의한 교량구조물의 붕괴사태는 전 세계적으로 많이 보고되고 있으며, 이에 따라 설계기준 및 보수·보강대책 등에 관한 연구가 활발히 진행되고 추세이다^{1,2}. 최근 들어 국내에서도 세굴이나 지진하중에 의한 교량구조물의 안전성을 확보하기 위한 해석적, 실험적 연구가 꾸준히 진행되어 오고 있다. 그러나 두 인자들에 의해 발생할 수 있는 교량구조물의 가장 불리한 조건은 홍수에 의해 세굴이 진행중이거나 세굴이 완료된 상태에서 지진과 같이 세굴에 의해 손상된 기초지반에 직접적으로 큰 하중이 작용되는 경우라 볼 수 있다. 이와 같이 불리한 조건은 최근 들어 지진의 발생이 활발해지고 있는 국내의 여건에 비추어 볼 때 충분히 발생가능하며, 단순한 각 인자들에 의한 피해수준을 넘어선 교량구조물의 전체적인 붕괴를 촉발시킬 수 있는 중요한 요인이 될 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 홍수로 인한 세굴 및 교량구조물의 지진거동특성에 영향을 미치는 다양한 인자들을 고려할 수 있는 단순화된 교량해석모형을 바탕으로 세굴 및 지진하중의 조합에 의한 교량구조물의 동적거동특성을 평가하고자 한다. 또한 다양한 세굴조건이 전체적인 교량구조물의 지진거동특성에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

2. 교각기초부의 국부세굴특성

일반적으로 국부세굴은 하천을 횡단하는 교량의 교각 및 교대와 같은 수중구조물에 의해 기존의 흐름양상이 변화됨으로서 일어나는 현상이며, 이러한 국부세굴은 그림 1에서 보여지는 바와 같이 교각기초의 하단부에서 형성되는 와류로 인해서 발생하게 된다. 이러한 국부세굴에 영향을 미치는 대표적인 인자들로는 수

* 연세대학교 사회환경건축공학부 교수, 정회원
** 호서대학교 토목공학과 조교수, 정회원
*** 연세대학교 토목공학과 박사과정, 학생회원
**** 연세대학교 토목공학과 석사과정

심, 교각의 크기와 형태, 유속, 접근각, 유사의 크기 등이다^[1]. 그림 2는 흐름의 접근각에 따른 세굴양상을 보여주는 예이다.

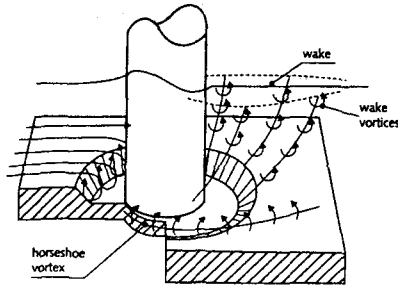


그림 1. 원형교각에서의 국부세굴

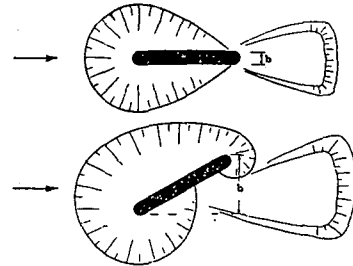


그림 2. 흐름의 접근각에 따른 세굴양상

교각기초의 국부세굴깊이를 산정하는 공식들은 주로 미국, 뉴질랜드, 일본, 러시아 등에서 실내실험 및 현장측정을 통하여 개발된 것으로 실험조건이나 현장의 측정조건 등에 따라 상당한 차이를 나타내고 있다. 본 연구에서는 국부세굴깊이의 산정공식으로 도로설계기준 (2001)에서 제시하고 있는 국부세굴깊이에 대한 예측공식 중 CSU공식을 이용하였다. 이 예측공식은 HEC-18에서 추천하고 있는 국부세굴깊이의 예측공식이기도 하며, 예측결과가 다소 안전측이기는 하나 상당히 신뢰성이 있는 것으로 알려져 있다^[2].

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

여기서, d_{max} 는 최대세굴깊이이며, y_0 는 교각기초 전면에서의 수심, K_1, K_2, K_3, K_4 는 각각 교각기초의 형상, 교각기초에 대한 흐름의 접근각, 하상조건 그리고 하상재료의 크기에 대한 보정계수이다. b 는 교각기초의 유효폭이며, $Fr (= V/\sqrt{g y_0})$ 은 Froude 수이고, V 는 평균유속, g 는 중력가속도이다.

3. 대상교량 및 교량해석모형

교각기초부의 국부세굴 및 지진하중의 조합에 따른 교량구조물의 동적거동특성을 분석하기 위하여 그림 3에서 보여지는 바와 같이 3경간 단순 PSC거더교 (3@30m=90m)를 대상으로 하였다. 교각형식은 원형교각($D=1.95m$)으로 이루어진 벤트형식이며, 교각높이는 12m이다. 교각기초는 풍화암층에 선단지지된 우물통기초로 기초의 직경은 3.75m, 높이는 10m이다. 교대형식은 앉힘형태로 교대높이는 6.5m 이고, 교대와 벽면 및 노면과의 경사각은 0°로 가정하였다.

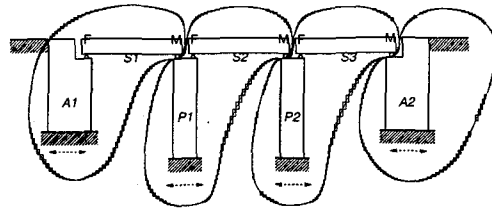


그림 3. 대상교량

그림 4는 대상교량에 대한 이상화된 해석모형으로 전체 교량시스템을 교축방향 지진거동특성에 영향을 미치는 다양한 인자들 및 교각기초의 국부세굴에 의한 영향을 고려할 수 있도록 모형화하였다. 그림 4에서 m, K, C 는 각각 구성요소들의 질량, 강성, 감쇠이다. 국부세굴의 영향은 국부세굴로 인한 교각기초의 근입깊이변화에 따라 교각기초의 강성을 변화시킴으로서 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 4에 나타난 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^[4]. 가동단에서의 마찰은 선형의 Coulomb 마찰요소로 모형화(마찰계수 0.05)하였으며^[4], 그림 4에서 $F_{1,2}, F_{5,6}, F_{9,A}$ 는 가동단에 작용되는 마찰력을 나타낸다. 교대-뒷채움재 시스템은 교대와 주변토체사이의 상호작용으로 인한 교대의 강성저하특성을 반영하기 위하여 비선형 스프링강성(K_{A1}, K_{A2})과 감쇠(C_{A1}, C_{A2})를 갖는 단자유도 시스템으로 모형화하였다. 교대의 비선형 강성은 Siddharthan 등 (1996)이 제안한 식을 이용하여 결정하였다^[5]. 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 적용하였으며, 히스테리시스모형의 변수들은 철근 콘크리트교각에 대해 수치적으로 구한 하중-변위관계로부터 결정하였다. 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 고려하였다^[4].

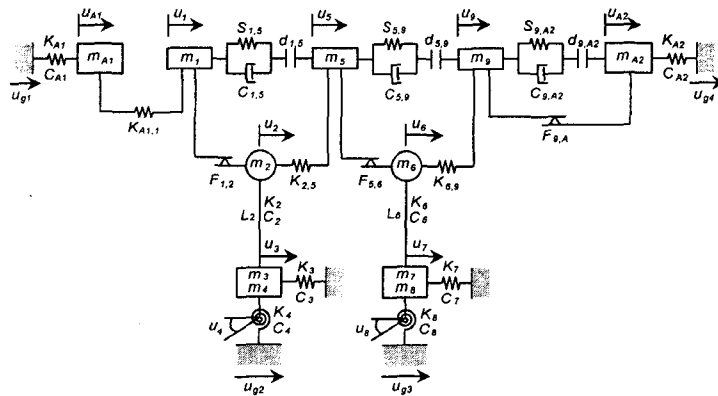


그림 4. 이상화된 교량해석모형

4. 교각기초의 세굴조건에 따른 기초의 강성결정

교각기초의 강성은 주변지반과의 상호작용에 의해 결정되므로 주변 지반의 구성조건 및 각 토층의 상태나 기초의 근입정도에 따라 상당히 달라지게 된다. 그러므로 교각기초주변의 국부세굴로 인한 근입깊이의 감소는 교각기초의 강성에 상당한 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 국부세굴에 대한 교각기초의 강성변화를 평가하기 위하여 우선적으로 교각기초부에 발생가능한 최대세굴깊이를 산정하고, 각 세굴깊이에 따른 교각기초의 강성을 평가하였다. 그림 5는 교각기초의 제원 및 토층조건을 나타낸 것이다.

본 대상교량의 교각기초부에서 발생가능한 최대세굴깊이는 앞서 언급한 바와 같이 CSU 공식을 이용하였으며, 최대세굴깊이 산정에 이용된 인자들과 이로부터 결정된 최대세굴깊이는 표 1과 같다. 단, 하상조건은 중간크기의 사구조건을 적용하였으며, 흐름의 입사각은 0°으로, 하상 재료는 $d_{50} < 2mm$ 으로 가정하였다.

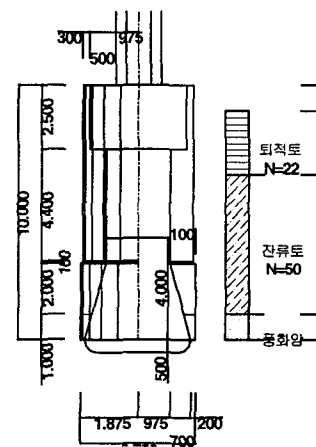


그림 5. 우물통기초

표 1에서 보여주고 있는 최대세굴깊이는 100년 빈도 계획홍수량에 근거하여 결정된 것으로 일반적으로 평시에는 세굴깊이가 6.6m보다는 작게 될 것이다. 따라서 본 연구에서는 0~7m사이의 다양한 세굴깊이에 대해 교각기초의 병진강성 및 회전강성을 평가하여 교량해석모형에 적용하였다.

표 1. 최대세굴깊이 산정에 이용된 인자

평균유속, $V(m/sec)$	보정계수, K_1	보정계수, K_2	보정계수, K_3	보정계수, K_4	수심, $y_0(m)$	Froude 수, Fr	기초유효폭, $b(m)$
2.53	1.0	1.0	1.2	1.0	6	0.33	3.75
최대세굴깊이, $d_{max} = 2 y_0 K_1 K_2 K_3 K_4 (b/y_0)^{0.65} Fr^{0.43} = 6.6 m$							

각 세굴깊이에 따른 교각기초의 병진강성 K_h 및 회전강성 K_r 은 아래의 식을 이용하여 결정하였다^[6].

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

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

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

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

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.

본 대상교량의 강성결정에 적용된 토체의 대표적인 물성치는 표 2와 같다. 표 2에서 퇴적토와 잔류토는 표준관입시험을 통해 얻어진 N 치에 기초하여 물성치를 결정하였다. 풍화암의 경우는 일반적인 토체에 적용되는 N 치로부터 물성치를 결정하는 것이 신뢰도측면에서 타당하지 않은 것으로 판단되어 건설표준품셈의 분류기준에서 제시하고 있는 자료를 이용하여 물성치를 결정하였다^[7]. 그림 6은 각 세굴깊이에 따른 교각기초의 강성변화를 나타낸 것으로 세굴깊이에 따라 강성이 상당히 감소하는 것을 볼 수 있으며, 특히 회전강성의 경우는 세굴깊이 7m인 경우에 거의 10%정도로 매우 작아짐을 알 수 있다. 그림 6에서 y 축의 값은 세굴이 되지 않은 기초의 강성에 대한 각 세굴깊이에 대한 기초의 강성비를 나타낸다.

표 2. 토체의 물성치

토체의 종류	퇴적토	잔류토	풍화암
전단탄성계수, G (kg/cm^2)	280	498	28125
밀도, ρ (ton/m^3)	1.84	1.84	2.0
전단파속도, V_s (m/sec)	39	52	375
탄성계수, E (kg/cm^2)	756	1400	72800

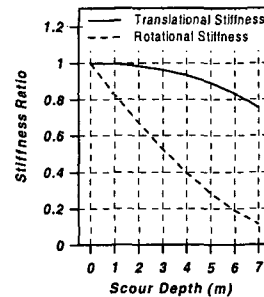
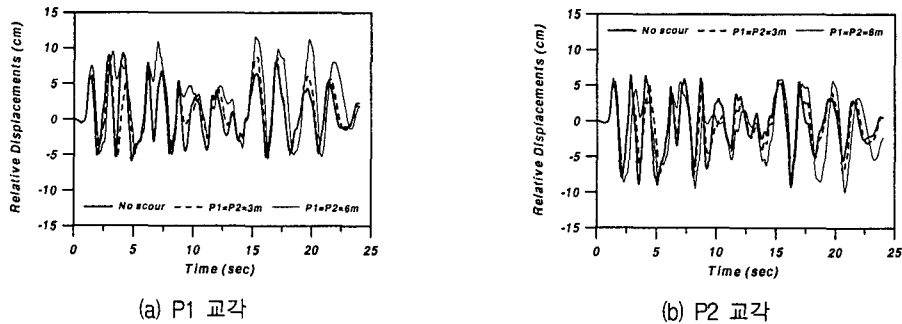


그림 6. 세굴깊이에 따른 교각기초의 강성변화

5. 세굴깊이에 따른 교량구조물의 지진응답특성

본 연구에서는 대상교량에서 나타날 수 있는 모든 가능한 세굴조건 및 이에 따른 교각기초부의 강성변화를 고려하여 교각기초부의 국부세굴이 전체적인 교량구조물의 지진거동특성에 미치는 영향을 분석하였다. 교각기초부의 세굴조건은 2개의 우물통기초에 대해 세굴을 고려하지 않은 경우로부터 최대세굴깊이 6.6m(안전축으로 7m를 적용)까지 세굴깊이를 1m씩 증가시켜가면서 발생가능한 총 64개의 조합으로 가정하였다. 입력지진하중은 널리 사용되고 있는 SIMQKE 프로그램¹⁸⁾을 이용하여 현행 도로교표준시방서(1996)에서 제시하고 있는 설계응답스펙트럼에 일치하도록 모의 발생된 인공지진이력을 적용하였다.

그림 7은 P1교각기초와 P2교각기초에 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 크기도 증가하는 것으로 나타났다.

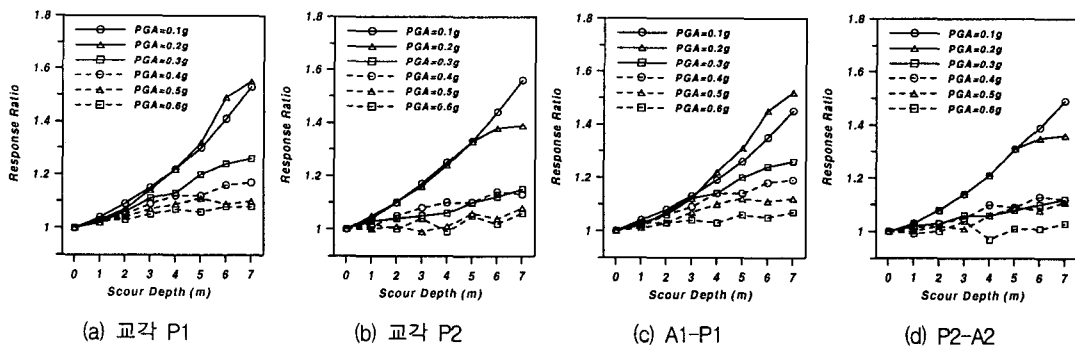


(a) P1 교각

(b) P2 교각

그림 7. 지반에 대한 상대변위이력 (PGA=0.3g)

그림 8은 P1교각기초와 P2교각기초에 대해 동일한 세굴깊이를 적용한 경우에 있어서의 세굴이 발생되지 않은 경우의 응답에 대한 세굴깊이를 반영한 경우의 응답비를 나타낸 것이다. 그림 8에 나타난 바와 같이 전체적으로 교각기초부에 발생하는 세굴의 영향으로 인해 교량구조물의 전체적인 응답크기가 증가하는 것으로 평가되었다. 특히, 약진의 경우에는 세굴에 따른 영향이 상당히 큰 것으로 나타났으며, 0.5g 이상의 강진에서는 다소 증가하기는 하나 10%이하로 매우 낮은 수준인 것으로 나타났다. 이는 강진으로 갈수록 세굴에 의한 영향이 인접한 진동계간의 충돌, 특히 본 대상교량과 같이 경간수가 작은 경우에는 교대진동계와의 충돌로 인해 변위가 제한되기 때문에 상대적으로 작게 나타나는 것으로 판단된다.



(a) 교각 P1

(b) 교각 P2

(c) A1-P1

(d) P2-A2

그림 8. 동일한 세굴깊이를 적용한 경우의 응답비

그림 8의 결과에서 나타난 바와 같이 동일한 세굴깊이를 갖는 경우의 교량시스템의 지진거동특성에 미치는 세굴의 영향은 중·약진에서 대체로 큰 것으로 평가되었다. 따라서 본 연구에서는 최대지반가속도 0.1g와 0.3g의 지진하중하에서 다양한 세굴깊이에 따른 교량시스템의 응답변화를 분석하였다. 그림 9와 그림 10은 세굴이 발생되지 않은 경우의 응답에 대한 세굴깊이를 반영한 경우의 응답비를 나타낸 것으로 다양한 세굴조건에 대해 전체적인 교량구조물의 응답크기가 증가하는 것으로 나타났다. 최대지반가속도 0.1g의 경우는 지진하중에 의한 영향이 크지 않으므로 모든 응답이 P1교각과 P2교각의 세굴효과가 동일하게 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 최대지반가속도 0.3g의 경우에는 P2교각의 지반에 대한 상대변위와 P2-A2진동계사이의 상대거리는 최대지반가속도 0.1g의 경우와 응답의 형태나 경향은 다르지만 세굴효과에 따른 영향은 유사한 것으로 나타났다. 반면에 P1교각의 지반에 대한 상대변위는 P2교각의 세굴깊이에 관계없이 P1교각의 세굴깊이에 지배적인 영향을 받으며, P1교각과 인접한 A1-P1진동계간의 상대거리 또한 P1교각의 응답특성과 동일한 경향을 보이는 것으로 평가되었다. 이는 최대지반가속도가 낮은 경우에는 상대적으로 인접 진동계간의 충돌에 의한 영향이 크지 않기 때문에 세굴에 의해 저하된 기초의 강성에 따라 변화된 각 진동계간의 상대적 진동특성이 세굴이 발생되지 않은 경우의 진동특성과 유사한 경향을 보이기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 최대지반가속도가 증가함에 따라 P1진동계의 경우는 P2교각의 세굴효과보다는 P1교각의 세굴로 인한 교각기초의 강성변화와 이로 인한 인접한 A1진동계와의 충돌빈도의 증가에 따른 영향이 상대적으로 크기 때문에 P1교각의 지반에 대한 상대변위는 물론 인접한 A1교대와의 상대거리도 P1교각 자체의 세굴효과에 따라 민감하게 변화되는 것으로 판단된다.

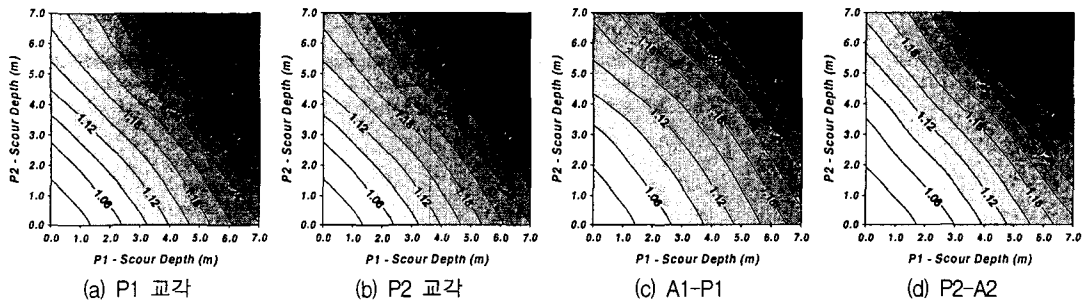


그림 9. 다양한 세굴깊이에 따른 응답비 (PGA=0.1g)

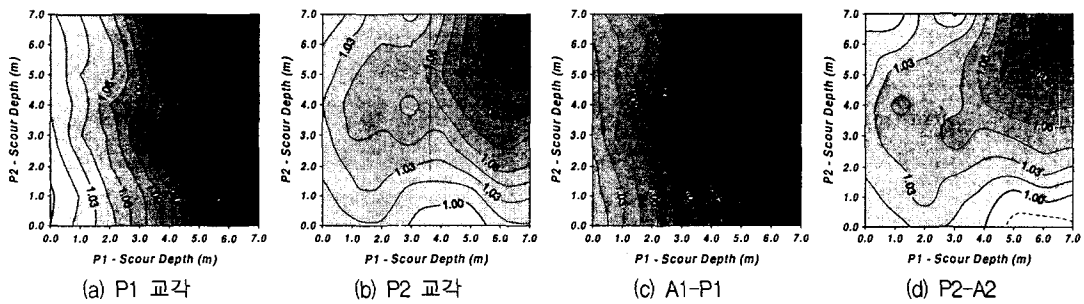


그림 10. 다양한 세굴깊이에 따른 응답비 (PGA=0.3g)

표 3과 표 4는 P1교각과 P2교각의 다양한 세굴깊이 및 지진하중의 작용에 따른 각 교각기초의 안전성을 검토한 결과이다. 교각기초부의 안전성검토는 극한하중조건에 기초하여 연직방향 및 수평방향으로의 변위와 지지력 그리고 수평방향 전단저항력에 대하여 수행하였으며, 교각기초의 안전성 판정기준은 각각의 항목에

대해 작용력의 총합이 극한저항력의 총합을 초과하지 않는 경우로 선정하였다. 분석결과로부터 최대지반가속도가 증가함에 따라 낮은 세굴깊이에서도 교각기초부가 상당히 손상될 수 있는 것으로 분석되었으며, P1 교각이 P2교각에 비해 동일한 세굴조건 및 지진하중하에서 손상의 발생가능성이 다소 높은 것으로 평가되었다. 이는 P1교각과 인접한 A1교대진동계와의 충돌로 인한 영향인 것으로 분석된다.

표 3. P1 교각기초의 안전성 검토

구 분	P1 교각의 세굴깊이 (m)							
	0	1	2	3	4	5	6	7
P2 교각의 세굴깊이 (m)	0	PGA ≥ 0.4g (불안전)						
	1							
	2							
	3	PGA ≥ 0.3g (불안전)		PGA ≥ 0.2g (불안전)				
	4	PGA ≥ 0.3g (불안전)						
	5	PGA ≥ 0.3g (불안전)						
	6	PGA ≥ 0.3g (불안전)						
	7	PGA ≥ 0.3g (불안전)						

표 4. P2 교각기초의 안전성 검토

구 분	P1 교각의 세굴깊이 (m)							
	0	1	2	3	4	5	6	7
P2 교각의 세굴깊이 (m)	0	PGA ≥ 0.5g (불안전)						
	1	PGA ≥ 0.5g (불안전)						
	2	PGA ≥ 0.5g (불안전)						
	3	PGA ≥ 0.5g (불안전)						
	4	PGA ≥ 0.4g (불안전)		PGA ≥ 0.3g (불안전)		PGA ≥ 0.2g (불안전)		
	5	PGA ≥ 0.4g (불안전)		PGA ≥ 0.3g (불안전)		PGA ≥ 0.2g (불안전)		
	6	PGA ≥ 0.4g (불안전)		PGA ≥ 0.3g (불안전)		PGA ≥ 0.2g (불안전)		
	7	PGA ≥ 0.4g (불안전)		PGA ≥ 0.3g (불안전)		PGA ≥ 0.2g (불안전)		

이상의 결과로부터 알 수 있듯이 교각기초부의 세굴이 진행중이거나 세굴이 완료된 상태에서 지진하중과 같은 큰 하중이 약화된 교각기초부에 작용될 경우 전체적인 교각구조물은 세굴정도에 따라 상대적으로 큰 영향을 받는 것으로 평가되었다. 또한 강진보다는 중·약진의 지진하중하에서는 세굴의 영향이 상당한 것으로 분석되었다.

현재까지의 연구는 지진하중을 받는 전체적인 교각구조물의 거동특성에 미치는 세굴의 영향을 파악하기 위하여 우선적으로 교각기초부에 발생가능한 모든 세굴조건에 대해 전체적인 교각구조물의 응답변화를 광범위하게 살펴보았다. 향후 보다 실제적인 조건에 대해 대상교량의 세굴깊이를 결정하는 것이 필요하며, 이를 바탕으로 보다 세부적인 세굴조건에 따른 교각구조물의 거동특성변화에 관한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다. 또한 본 대상교량과 같이 경간수가 작은 경우에는 교대진동계와의 충돌로 인해 전체적인 교각구조물의 변위증가가 제한되기 때문에 상대적으로 교대진동계에 의한 변위억제효과가 크지 않은 교각구조물, 즉 다경간 단순형 교각구조물에서의 세굴에 따른 응답특성의 변화는 상당히 다를 것으로 판단되므로 다양한 경간수를 갖는 교각구조물에서의 세굴의 영향에 관한 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 홍수로 인한 세굴 및 교각구조물의 지진거동특성에 영향을 미치는 다양한 인자들을 고려할 수 있는 교량해석모형을 바탕으로 세굴 및 지진하중의 조합에 의한 교각구조물의 동적거동특성을 분석하였다. 또한 대상교량에서 발생가능한 다양한 세굴조건 및 이로 인한 교각기초부의 강성변화를 고려하여 교각기초부의 국부세굴이 교각구조물의 전체적인 거동특성에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 교각구조물의 전체적인 응답은 교각기초부에 발생하는 세굴의 영향으로 인해 증가하는 것으로 평가되

었다. 특히, 0.2g이하의 약진에서는 세굴에 따른 영향이 상당히 큰 것으로 나타났으며, 0.5g이상의 강진에서는 응답이 다소 증가하기는 하나 10%이하로 상대적으로 낮은 수준인 것으로 나타났다. 이는 강진으로 갈수록 세굴에 의한 영향이 인접한 진동계간의 충돌, 특히 본 대상교량과 같이 경간수가 작은 경우에는 교대진동계와의 충돌로 인해 변위증가가 제한되기 때문인 것으로 판단된다.

2. 최대지반가속도 0.1g인 경우에 있어서 P1 교각과 P2 교각의 다양한 세굴조건에 따른 교량구조물의 응답특성은 모든 응답이 두 교각에서의 세굴효과가 동일하게 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 이는 지진하중의 크기가 작기 때문에 상대적으로 인접 진동계간 충돌의 영향이 작기 때문인 것으로 분석된다.
3. 최대지반가속도 0.3g인 경우에 있어서 P1 교각과 P2 교각의 다양한 세굴조건에 따른 교량구조물의 응답특성은 최대지반가속도 0.1g의 경우와 비교하여 응답의 형태나 경향은 상당히 다른 것으로 분석되었다. 특히, P1 교각의 지반에 대한 상대변위와 P1 교각과 인접한 A1 교대간의 상대거리의 세굴깊이에 관계없이 P1 교각의 세굴깊이에 지배적인 영향을 받는 것으로 평가되었다. 이는 지진하중의 증가로 P1 교각과 인접한 A1 교대간의 충돌로 인한 영향이 상대적으로 증가되기 때문인 것으로 분석된다.
4. 다양한 세굴깊이 및 지진하중의 작용에 따른 각 교각기초는 최대지반가속도가 증가함에 따라 낮은 세굴깊이에서도 불안정한 것으로 평가되었으며, P1 교각이 P2 교각에 비해 동일한 세굴조건 및 지진하중 하에서 손상의 발생가능성이 다소 높은 것으로 평가되었다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원 및 1999년도 두뇌한국 21 핵심분야사업 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. Richardson, E. V. and Davis, S. R., "Evaluating Scour at Bridges", HEC-18, FHWA-IP-90-017, U.S. Department of Transportation, 1995.
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. Gazetas, G., "Formulas and Charts for Impedances of Surface and Embedded Foundations", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 117, No. 9, 1991, pp. 1363-1381.
7. 한국지반공학회, 구조물 기초 설계기준, 1997.
8. 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.
9. 건설교통부, 도로교표준시방서, 1996.
10. 한국도로교통협회, 도로설계기준(건설교통부 제정), 2001.