홍수시 얕은기초의 세굴위험도 평가 사례연구

A Case Study of Scour Vulnerability Evaluation for Shallow Foundations during Floods

박재현* · 이주형** · 정문경*** · 곽기석****

Park, Jae Hyun · Lee, Juhyung · Chung, Moonkyung · Kwak, Kiseok

Abstract

Scour vulnerability evaluation for shallow foundations was performed to assure bridge safety against scour in the national capital region. The case studies for 26 shallow foundations consisted of site investigation including boring test, bridge scour analysis for the design flood, bearing capacity evaluation of the bridge foundation before and after scour, and comprehensive evaluation of bridge scour vulnerability. Bridge scour vulnerability was determined based on the interdisciplinary concept considering predicted scour depth for the design floods and bearing capacity of foundation as well as dimensions of foundation. Nine of 26 shallow foundations showed the potential future vulnerability to scour with significant decrease in the bearing capacity of foundations due to scour and the remaining 17 were expected to maintain their stability against scour.

key words: bridge scour, scour vulnerability, shallow foundation, bearing capacity, the national capital region

1. 서 론

한국은 산지 지형이 많고 하상 경사가 크며 강수량의 2/3이상이 하절기에 집중되고 잦은 골재 채취, 댐 건설 등으로 인해 하상 불안정성이 가중되어 홍수시 세굴 가능성이 매우 큰 것으로 인식되고 있다(여운광 등, 1999). 홍수시 교량의 안정성 확보를 위해서 정확한 세굴심 평가 및 조사뿐만 아니라 국내 실정과 여건에 맞는 합리적인 세굴 위험도 체계 및 유지관리 대책이 요구되고 있다.

본 연구에서는 수도권 지역 국도교량 중 얕은기초 교량 26개소를 선정하여 지반조사를 포함한 현장조사를 실시하고, 설계 홍수량에 대한 교량세굴 해석을 수행하였으며, 기초의 지지력 평가 및 위험도를 분석하였다.

2. 세굴해석

건설교통부 발행 교량현황조서(2004)에 기록된 서울지방국토관리청 관내 국도 교량은 총 420개소 이며, 다음과 같은 기준으로 조사대상 교량을 초기 분류하였다: ①하천정비기본계획이 실시된 구간의 하천을 가로지르는 교량, ②하도 내에 교각이 1기 이상 존재하는 교량, ③얕은기초 및 말뚝기초 교량. 전체 교량 중 위의 기준에 부합되는 교량은 69개소 이고, 이들 교량을 대상으로 지역 및 기초의 종류 분포를 조사한 결과 한강수계의 지류가 발달한 경기 동부 지역의 교량 수가 많았으며, 기초의 형식은 직접확대기초 교량이 56개소(81%), 말뚝기초 교량이 11개소(16%) 였다. 위험도 평가 대상은 얕은기초 교량 26개소를 선정하였다(곽기석 등, 2006).

**** 정회원 · 한국건설기술연구원 토질및기초연구실 · 선임연구원
**** 정회원 · 한국건설기술연구원 토질및기초연구실 · 연구원
*** 한국건설기술연구원 토질및기초연구실 · 책임연구원
**** 정회원 · 한국건설기술연구원 토질및기초연구실 · 책임연구원 · 교신저자 E-mail: kskwak@kict.re.kr

선정된 26개 교량의 세굴해석을 실시하기 위해 현장 조사를 실시하였다. 현장 조사를 통해 교량의 일반 현황, 교량제원 및 기초 형식, 교량이 위치한 하천 및 유역의 수리, 지형 특성 파악과 현재 교각의 세굴 피해 정도 및 세굴보호공 현황, 교량의 구조적 결함 정도를 조사하였다. 또한 시추작업을 통한 교량 기초 지반의 지층지질조사, 교량 및 하천의 종단면 측량, 하상재료의 입도분석과 교량이 위치한 하천의 수계, 산계, 지질망 등 교량세굴 및 하천안정성과 관련된 종합적인 분석을 실시하였다.

대상 교량이 위치한 하천의 하천정비기본계획 보고서와 교량관리시스템(건설교통부, 2000)의 자료를 이용하여 해석에 요구되는 수리 매개변수와 교량기초의 제원을 확보하였다. 본 연구 대상교량의 100년 빈도 홍수량은 대부분 200m^3/sec 이상 2,000m^3/sec 이하의 범위에 있어 100년 빈도의 홍수량을 기준으로 세굴 해석을 위한 수리매개 변수를 산정하였으며, 그 결과를 지반 매개변수, 교각 매개변수와 함께 표 1에 나타내었다.

수리 매개변수, 지반 매개변수, 교각 매개변수를 이용하여 대상 교량의 세굴심을 산정하였다(표 1). 교각의 국부세굴은 하천설계기준(건설교통부, 2005)에서 제시하고 있는 CSU 공식(Richardson 과 Davis, 2001), Froehlich 공식(1988), Laursen 공식(1960), Neill 공식(1973)을 이용하여 산정한 뒤 이들의 평균값을 예상 세굴심으로 하였다. 또한 예상 세굴심 내에 연암층이 존재할 경우 연암 심도를 고려하여 예상 세굴심을 결정하였다.

표 1. 수리, 지반, 교각 매개변수 (100년 빈도 홍수 기준)

번호	수리 매개변수			지반 매개변수			교각 매개변수				세굴심 산정결과				
	홍수량 (m^3/s)	설계수심 (m)	설계유속 (m/s)	입경 (mm) D_{50}	입경 (mm) D_{95}	연암심도 (m)	교각형상	교각폭 (m)	교각길이 (m/s)	근입심도 (m)	CSU	Froehlich	Laursen	Neill	예상 세굴심
1	3680	8.05	3.30	0.90	3.22	2.0	원형	2.5	2.5	4.00	8.46	8.22	6.91	8.62	**2.00**
2	1930	5.11	5.87	1.89	26.30	2.6	원형	2.0	2.0	2.88	9.59	7.28	5.24	7.04	**2.60**
3	930	4.11	4.22	2.00	21.33	0.2	원형	1.0	1.0	2.00	4.14	2.87	2.82	3.21	**0.20**
4	220	2.41	3.81	2.03	10.26	2.0	사각형	0.7	9.5	2.17	3.18	2.16	1.79	2.11	**2.00**
5	345	3.64	3.74	2.28	14.39	N/A	타원	1.0	1.5	3.56	4.26	3.15	2.86	3.44	**3.43**
6	775	4.93	3.91	1.24	18.16	2.9	타원	0.5	16.8	3.63	1.05	0.57	1.08	0.78	**0.87**
7	240	3.47	3.23	3.24	17.74	7.0	타원	0.5	17.8	2.05	0.93	0.49	0.91	0.71	**0.76**
8	1900	11.78	3.79	0.94	9.42	2.3	원형	2.0	2.0	3.00	9.48	8.82	8.38	9.69	**2.30**
9	1900	8.88	2.00	3.27	14.06	1.8	원형	2.0	2.0	3.68	5.00	5.04	5.67	6.27	**1.80**
10	1810	5.60	3.37	2.14	15.67	1.3	원형	2.0	2.0	3.18	7.40	6.75	5.36	6.99	**1.30**
11	1810	7.50	2.92	5.28	14.29	3.4	원형	2.0	2.0	3.40	6.87	6.30	5.96	7.21	**3.40**
12	390	4.43	3.71	4.92	19.01	2.1	원형	0.8	0.8	2.13	3.42	2.31	2.62	2.81	**2.10**
13	390	3.85	3.04	1.49	6.46	2.6	원형	0.8	0.8	2.60	3.31	2.53	2.58	2.90	**2.60**
14	1480	5.38	2.84	1.89	12.53	N/A	원형	1.0	1.0	2.47	3.36	2.64	3.05	3.21	**3.07**
15	390	3.71	3.07	3.48	14.96	12.1	원형	2.0	2.0	5.10	4.33	3.40	3.01	3.64	**3.59**
16	465	3.61	2.10	4.42	14.29	7.3	원형	1.0	1.0	3.90	5.99	5.39	3.99	5.46	**5.21**
17	205	3.21	1.66	1.50	24.89	7.5	원형	0.8	0.8	2.12	2.20	1.72	2.08	2.20	**2.05**
18	205	2.80	2.84	0.85	16.41	3.0	원형	0.8	0.8	1.91	2.51	2.38	2.37	2.78	**2.51**
19	305	4.44	2.94	5.97	27.10	3.0	원형	1.2	1.2	2.88	3.13	2.50	2.23	2.69	**2.64**
20	305	3.57	3.00	0.63	9.93	3.2	원형	1.2	1.2	2.91	3.09	3.45	2.30	3.75	**3.15**
21	370	4.28	2.67	2.21	17.62	2.5	타원	1.3	3.5	3.47	2.20	2.98	2.90	3.55	**2.90**
22	370	3.80	3.14	3.10	11.25	5.0	타원	1.3	3.5	4.93	3.99	3.35	2.71	3.54	**3.20**
23	2277	5.73	3.45	0.70	2.31	N/A	원형	2.0	2.0	4.00	4.08	3.49	3.10	3.93	**2.50**
24	270	2.51	3.50	0.93	16.56	N/A	사각형	0.7	17.5	1.84	3.13	2.27	2.43	2.69	**2.63**
25	170	2.16	2.32	0.93	17.86	8.2	원형	1.5	1.5	2.47	5.90	5.13	4.51	5.44	**5.24**
26	290	2.62	2.12	4.00	17.74	N/A	사각형	0.7	9.0	2.06	3.40	2.51	1.97	2.37	**2.56**

지층 특성을 고려한 대상 교량의 예상 세굴심은 몇몇 교량을 제외하고는 대체로 1m~5m 의 값을 나타내었다. 각 세굴 공식에서 고려하는 매개변수의 종류와 그 영향정도가 상이하기 때문에 전체 교량에 대한 각 세굴공식의 세굴심 산정 결과는 일정한 경향성을 나타내지 않았다.

3. 위험도 평가

3.1 세굴 전, 후 지지력

대상 교량 26개소에 대하여 예상 세굴심을 이용하여 세굴 전, 후 기초 지지력을 산정하였다. 지지력 공식은 구조물기초설계기준(건설교통부,2003)에서 제안하고 있는 Terzaghi 공식(1943)을 적용하였다(식 (1)).

$$q_{ult} = \alpha c N_c + \beta \gamma_2 B N_\gamma + \gamma_1 D_f N_q \quad (1)$$

여기서, q_{ult}= 극한지지력, c= 흙의 점착력, γ_1= 기초저면 상부 지반의 단위중량, γ_2= 기초저면 하부 지반의 단위중량, α, β= 형상계수. N_c, N_γ, N_q는 전반전단파괴에 대한 지지력계수이다. 표 2는 얕은기초 교량의 세굴 전, 후 극한지지력 산정 결과이다. 암반에 근입된 교량은 그렇지 않은 교량에 비해 기초의 지지력이 전반적으로 큰 것을 알 수 있었다. 26개 교량 중 9개 교량이 세굴 발생으로 인해 기초 주변의 지반이 모두 유실되어 기초의 지지력을 100% 상실하는 것으로 분석되었다. 이들 교량은 기초가 모래질 자갈 및 풍화토 등 세굴 저항성이 낮은 지반에 근입되어 있고 예상 세굴심이 기초의 근입심도보다 컸기 때문이다. 나머지 교량들은 연암층이 지표 근처에 존재하고 기초가 연암층에 근입되어 홍수 시 세굴이 발생하더라도 기초의 지지력 변화는 작으며 교량 기초는 안정한 수준을 유지할 것으로 예상되었다.

표 2. 세굴 전, 후 극한지지력 및 위험도 평가

번호	근입심도 (m)	연암심도 (m)	예상세굴심 (m)	극한지지력(tf/m^2)			세굴 후 안전율(S.F.)	세굴 후 위험도(μ)
				세굴전	세굴후	감소(%)		
1	4.00	2.00	2.00	4549.2	4419.3	2.86	2.91	1.03
2	2.88	2.60	2.60	4099.8	3930.9	4.12	2.88	1.04
3	2.00	0.20	0.20	3837.4	3789.4	1.25	2.96	1.01
4	2.17	2.00	2.00	3076.1	2930.0	4.75	2.86	1.05
5	3.56	N/A	3.43	1281.1	1036.6	19.09	2.43	1.24
6	3.63	2.90	0.87	3054.2	2997.7	1.85	2.94	1.02
7	2.05	7.00	0.76	213.8	164.4	23.11	2.31	1.30
8	3.00	2.30	2.30	4508.8	4286.3	4.93	2.85	1.05
9	3.68	1.80	1.80	4065.7	3948.7	2.88	2.91	1.03
10	3.18	1.30	1.30	3968.4	3883.9	2.13	2.94	1.02
11	3.40	3.40	3.40	3980.3	3759.4	5.55	2.83	1.06
12	2.13	2.10	2.10	442.4	306.0	30.83	2.08	1.45
13	2.60	2.60	2.60	3051.3	2882.4	5.54	2.83	1.06
14	2.47	N/A	3.07	301.3	N/A	100.00	0.00	N/A
15	5.10	12.10	5.21	584.4	N/A	100.00	0.00	N/A
16	3.90	7.30	2.05	1266.5	1133.3	10.52	2.68	1.12
17	2.12	7.50	2.51	270.2	N/A	100.00	0.00	N/A
18	1.91	3.00	2.64	1090.5	N/A	100.00	0.00	N/A
19	2.88	3.00	2.90	3302.4	3107.5	5.90	2.82	1.06
20	2.91	3.20	3.20	1239.9	N/A	100.00	0.00	N/A
21	3.47	2.50	2.50	3418.6	3250.4	4.92	2.85	1.05
22	4.93	5.00	2.63	3508.0	3379.5	3.66	2.89	1.04
23	4.00	N/A	5.24	471.6	N/A	100.00	0.00	N/A
24	1.84	N/A	2.56	231.3	N/A	100.00	0.00	N/A
25	2.47	8.20	3.78	483.4	N/A	100.00	0.00	N/A
26	2.05	N/A	2.45	261.8	N/A	100.00	0.00	N/A

3.2 얕은기초 세굴 위험도 평가

대상 교량에 대한 세굴 위험도 평가는 예상 세굴심과 현장 지반 특성 및 교량기초의 제원 등을 고려한 세굴 전, 후 기초의 지지력 분석을 통해 가능하다. 곽기석 등(2006)은 수리학적 영향 인자와 세굴 안정성 해석에 필수적인 기초-지반 시스템의 지지력 개념 및 지반공학적 영향 인자를 모두 고려할 수 있는 다학제적 개념의 교량 세굴 위험도 평가기법을 개발, 제안하였다. 기초의 위험도는 예상 세굴심과 기초의 근입심도의 대소비교를 통해 크게 두 부분으로 나눌 수 있다: ①세굴심(Y_s)이 기초 근입심도(Y_p)와 같거나 큰 경우($Y_s \geq Y_P$), ②세굴심(Y_s)이 기초 근입심도(Y_p)보다 작은 경우($0 \leq Y_s < Y_P$). 첫 번째 경우는 기초저면에서 발생한 세굴로 인해 기초-지반 시스템의 지지력이 완전히 소실되는 경우로서 설계 사상의 홍수에 대해서 교량이 심각한 위험성을 내포함을 의미한다. 두 번째 경우는 기초-지반 시스템의 지지력이 세굴로 인해 일부 감소되어 교량이 부분적으로 피해를 입는 경우로서, 다음 식 (2)와 같이 세굴 전, 후 의 지지력 비를 이용하여 위험도를 정량적으로 표현할 수 있다.

$$\mu = \frac{q_{ult}^{(normal)}}{q_{ult}^{(scour)}} = \frac{q_a S.F._{normal}}{q_a S.F._{scour}} = \frac{S.F._{normal}}{S.F._{scour}} \quad (2)$$

여기서, μ=교량세굴 위험도, q_{ult}^{normal}=세굴 전 극한지지력, q_{ult}^{scour}=세굴 후 극한지지력, q_a=허용지지력, $S.F._{normal}$=세굴 전 안전율(safety factor), $S.F._{scour}$=세굴 후 안전율이다. 대상 교량 26개소에 대한 세굴 전, 후 기초의 지지력 평가 결과에 따른 교량세굴 위험도 평가 결과는 표 2와 같다.

본 연구의 세굴해석에 적용된 세굴심 공식들은 대체로 세굴심을 과대평가 하는 것으로 알려져 있으며, 단단한 사질토층이나 세립토가 함유된 지층의 경우 시간효과로 인해 실제로 예상 세굴심 보다 작은 크기의 세굴이 발생할 수 있다. 그러나 기초의 안전성을 지속적으로 확보하려는 유지관리의 목적을 위해서 본 연구에서 세굴공식에 의해 산정된 예상 세굴심을 적용하였고 연암층 상부의 지층은 세굴이 발생할 것으로 가정하였다. 해석적 연구에 의해 분석, 평가된 교량세굴 위험도 등급의 실무 적용 시 현장 상세조사를 통해 세굴 진행 상태를 파악하고 유역의 잠재적 세굴 가능성 분석 등 전문가의 공학적 판단을 종합하여 유지관리 대책을 수립해야 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 서울지방국토관리청 관내 수도권 국도 교량의 홍수 시 세굴에 대한 안정성 확보 및 효율적인 방재대책 수립을 위해서 전체 대상 교량 중 26개소 실제 얕은기초 교량을 선정하여 교량의 세굴 위험성을 평가하였다. 얕은기초 교량 26개소 중 연암에 근입되지 않은 9개소의 교량이 재현기간 100년 빈도의 홍수 발생 시 세굴로 인해 지지력을 완전히 상실할 가능성이 있는 것으로 분석되어 위험도가 높에 산정되었다. 지지력 분석시 Terzaghi 공식을 적용하였으며 현장 지반조사 결과를 바탕으로 하천설계기준에서 제안하고 있는 조립토에 대한 네 가지 세굴공식(CSU공식, Froehlich 공식, Laursen 공식, Neill 공식)을 적용하여 사례연구 대상 교량에 대한 교량세굴 해석을 실시하였다. 네 가지 공식에 의해 산정된 세굴심의 평균값을 산정하여 예상 세굴심으로 선정하였으며 세굴 저항능력이 큰 연암층 이상의 단단한 지층을 고려하여 예상 세굴심을 결정하였다. 대상 교량의 예상 세굴심은 대체로 1m~5m로 나타났으며, 각 세굴공식에 의한 전체 교량의 세굴심은 일정한 경향성을 나타내지 않았다. 본 연구 결과 분석, 평가된 교량의 세굴 위험도 등급은 현장 상세조사 및 주기적인 모니터링을 통해 전문가의 공학적 판단을 종합하여, 체계적이고 효율적인 교량세굴 유지관리 대책수립을 수립하는 데 논리적이고 객관적인 기준이 될 것이다.

참고문헌

1. 곽기석, 박재현, 정문경, 우효섭 (2006) 교량세굴 위험도 결정 및 유지관리 시스템 개발(I) - 시스템 개발 - , **대한토목학회 논문집**, 제 26권, 제 2B호, pp. 187-195.
2. 곽기석, 이주형, 박재현, 정문경, 조삼덕, 우효섭 (2006) **교량기초 장수명화 기술 개발(최종보고서)**. 연구보고서, 건기연 2006-085, 한국건설기술연구원
3. 건설교통부 (2003) **구조물기초설계기준 해설**
4. 건설교통부 (2004) **교량현황조서**
5. 건설교통부 (2005) **하천설계기준**
6. 여운광, 강준구 (1999) 우리나라 중.소 하천의 세굴특성 조사연구(1). **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제 32권, 제 1호, pp. 41-47.
7. Froehlich, D.C. (1988) Analysis of Onsite Measurement of Scour at Piers. *Proc., National Hydraulic Engineering Conference*, ASCE, Colorado Springs, CO., U.S.A.
8. Laursen, E.M. (1960) Scour at Bridge Crossings. *Journal of Hydraulic Division*, ASCE, Vol. 86, No. HY2.
9. Neill, C.R. (1973) *Guide to Bridge Hydraulics, Roads and Transportation Association of Canada*, University of Toronto Press, Toronto, Canada.
10. Richardson, E.V. and Davis, S.R. (2001) *Evaluating Scour at Bridges*. Hydraulic Engineering Circular No.18, Fourth Edition, FHWA NHI 01-001, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
11. Terzaghi, K. (1943) *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley and Sons, New York.