

일산대교 교각세굴 평가 사례 연구

Case Study on Local Scour Evaluation of Il-San Bridge

이주형¹⁾, Juhyung Lee, 광기석²⁾, Kiseok Kwak, 박재현³⁾, Jaehyeon Park,
정문경⁴⁾, Moonkyung Chung, 윤현석⁵⁾, Hyunsuk, Yoon

- 1), 3) 한국건설기술연구원 지반연구부 연구원, Researcher, Geotechnical Engineering Research Dept., Korea Institute of Construction Technology
- 2) 한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Research Dept., Korea Institute of Construction Technology
- 4) 한국건설기술연구원 대외협력실 수석연구원, Research Fellow, International Cooperation & Public Information Division, Korea Institute of Construction Technology
- 5) 한국건설기술연구원 지반연구부 Post-Doc., Post-Doc., Geotechnical Engineering Research Dept., Korea Institute of Construction Technology

SYNOPSIS : In this research, the reasonable local scour estimates considered conditions of the bed material and the flow was accomplished on two piers P14 and P17 of Il-san bridge. Especially, the Il-san bridge was located on the lower Han-river where is influenced by the tides of In-chon, and it has hydraulic condition that can cause the bridge piers local scour because of tides at ordinary times, as well as a flood. Therefore, the local scour depth has been presented influenced by the maximum velocity of the flow when a flood after construction and the tides on construction on the basis of the standards of river design and road design, furthermore, the results was made a comparative analysis.

According to the results, the local scour depth on the basis of the standards of river design was higher than it on the basis of the standards of road design(SRICOS), and the local scour depth influenced by the maximum velocity of the flow when a flood after construction was determined the final local scour depth of P14 and P17 at the Il-san bridge. It was ascertained that the local scour depth did not exceed the inserted depth of bridge foundation.

Key words : Il-san bridge, soil erodibility, local scour, SRICOS

1. 서 론

교량은 도로를 구성하는 대표적인 구조물로서 인간생활과 밀접한 연관성을 가지고 있는 사회기반시설이다. 급격히 증가하는 교통량으로 인해 그 중요성은 더욱 커지고 있는 실정이며, 이에 따라 교량구조의 안정성과 내구성의 확보가 강조되고 있다. 하지만 매년 구조적인 문제뿐만 아니라 여러 가지 요인으로 인해 피해를 입는 교량의 수가 점차 증가하여, 교량의 유지보수 및 교체에 많은 예산이 요구되고 있는 실정이다. 특히 홍수시 하천을 가로지르는 교량의 교각 및 교대 주변에서 발생하는 세굴로 인한 교량의 붕괴는 급속히 진행되어 인명의 안전에 심각한 영향을 미칠 뿐만 아니라, 교량의 교체나 보수, 우회도로

의 건설, 또한 그로 인해 발생하는 교통시간의 증가, 불편 및 경제활동의 피해 등으로 인해 장기간에 걸쳐 사회와 경제에 막대한 손실을 끼칠 수가 있다.

국내외 연구보고에 의하면 교량 파괴의 가장 큰 원인은 교량자체가 가지고 있는 구조적 결함이 아니라 홍수시 교대 및 교각 주위에서 발생하는 세굴로 인한 기초의 파괴이다. 세굴피해의 특징은 교량 상부구조물에서 흔히 발생하는 손상 정도가 국부적이거나 복구가능한 정도의 수준에 머물지 않고 교량기초의 파손 및 교량의 유실로 이어지는 교량의 완전 파괴로까지 연결된다는 점이다. 강 혹은 바다 위에 건설된 교량의 장수명화를 이루기 위해서는 세굴대책에 의한 교대 및 교각 기초의 장수명화가 선결되어야 한다. 따라서 교량의 안정성과 내구성의 확보를 위해서는 교량기초의 세굴 가능성을 평가, 해석하고 이에 따른 적절한 대책을 수립하여 극대홍수시에도 교량의 안전성을 확보할 수 있는 종합적인 대책 마련이 시급한 실정이다.

본 연구에서는 현재 건설 중인 일산대교 현장의 교각 P14와 P17에 대하여 지반특성 및 수리특성을 고려한 합리적인 교각세굴 평가를 수행하였다. 특히 본 연구의 대상교량인 일산대교는 인천 조위의 영향을 받는 한강 하류 감조구간에 위치하고 있어 홍수시 뿐만 아니라 평상시에도 조류의 영향에 의해 하천 유심부의 교각에 국부세굴을 유발할 수 있는 수리조건을 가지고 있다. 따라서 교량 완공 후 홍수시 최대유속 및 시공 중의 조류 영향에 대한 교각의 국부세굴을 국내 하천설계기준과 도로설계기준에서 제안하고 있는 방법들을 적용하여 예측하고 그 결과들을 비교분석 하였다.

2. 현장조건

대상교량인 일산대교는 경기도 고양시 법곳동과 김포시 걸포동을 잇는 연장 1.84km, 폭 6차로(28.5m)의 교량으로 신곡수중보 하류 7km 지점에 위치하며, 인천 조위의 영향을 받는 한강 하류 감조구간에 해당된다. 총 29경간 28개의 교각으로 구성되어 있으며, 교각의 기초는 우물통기초로 설계되었다. 현재 기초공사가 진행 중이며, 대상 교각 및 우물통기초의 제원은 표 1에 자세히 나타내었다.

표 1. 교각의 제원

교각명	교각폭 (m)	케이슨폭 (m)	형상	케이슨 길이 (m)		하상고 (E.L., m)		근입심도 (m)		연압심도 (m)
				일산방향	김포방향	일산방향	김포방향	일산방향	김포방향	
P14	2.7	7.0	원형	30.4	30.4	1.400	1.460	29.020	29.080	27.90
P17	5.0	8.0	타원형	28.1	26.7	1.083	0.962	26.403	24.882	24.80

본 연구에서는 기존의 일산대교 현장에 대한 수리 검토 보고서(일산대교주식회사, 2003)와 조류를 고려한 수리 및 가시설 검토 종합보고서(대림산업주식회사, 2004)를 참조하여 대상현장의 수리영향을 분석하였다. 기존의 보고서에서는 홍수시의 계획홍수량과 평상시의 조류의 영향 등 두 가지 경우에 대하여 수리영향을 분석하였으며, 두 경우 모두 시공중과 완공후로 분리하여 시공중에는 축도 등 가시설의 영향을 검토하고 완공후에는 교각의 영향으로 인한 수위 및 유속 등 제반 수리영향의 분석을 실시하였다.

수리영향 검토를 수행함에 있어 홍수량은 ‘한강 수계하천 정비 기본계획(팔당댐~한강하구)’(건설교통부, 2002)에서 제시된 계획홍수량 37,000m³/sec에 대해 검토하였으며, 기점 수위는 부등류계산에 있어 초기단면에서의 계산을 위한 초기 경계조건을 정하는 것으로 계획홍수량 37,000m³/sec에 대한 곡륜천합류점의 홍수위 E.L. 7.0m를 사용하였다.

일산대교는 인천 조위의 영향으로 실제로 1일에 2회씩 조석으로 인한 수위 변동(최대조차 약 5.0m)이 발생되며, 이로 인해 현재 상태에서 최고조위시(조위 약 E.L. 5.0m)의 조류 유속이 걸포 유심부에서 3.47m/sec, 이산포 유심부에서 3.95m/sec에 달하여 가시설 구조물 설치시 하상의 세굴 및 하상고의 변동을 유발하여 가시설 구조물의 안정성을 저하시키는 등 현장작업에 큰 제약이 되는 실정이다. 따라서

조류에 의한 영향을 고려하지 않고는 공사 진행이 곤란한 상태이므로, 가시설에 대하여 조류에 의한 영향을 고려한 전반적인 검토가 필요하다. 따라서 조류에 대한 유속 및 수위 측정결과와 현장에서 계획된 축도범위에 따른 수치해석 결과를 종합하여 조류의 영향을 분석하였다(일산대교주식회사, 2003).

계획홍수량과 조류의 영향에 의한 수리영향을 시공 중과 완공 후의 단면에 대하여 각각 검토한 결과를 표 2에 나타내었다. 조류의 영향에 의한 유속이 홍수시의 계획홍수량에 의한 유속보다 다소 크게 나타났다.

표 2. 유속 분포

교각명	시공 중 (조류)			완공 후 (계획홍수량)	
	접근수심(m)	측정유속(m/s)	최대유속(m/s)	접근수심(m)	최대유속(m/s)
P14	3.55	2.30	2.50	8.65	2.29
P17	3.99	2.29	2.50	9.09	2.29

본 지역의 지질은 선캠브리아기의 흑운모편마암이 분포되어 있으며, 이를 부정합으로 덮은 제4기 충적층으로 대별된다. 본 노선 전 구간에 걸친 기반암은 흑운모편마암으로 구성되어 있으며, 부분적으로 운모편암이 혼재되어 나타나며, 걸포천을 중심으로 제4기의 충적층이 발달되어 평야를 이루고 있다(일산대교주식회사, 2003).

지층의 구성상태 및 기반암의 압중, 암질변화 등을 파악하고 현장 불교란시료를 채취하기 위하여 P14 및 P17 지점에 대하여 수중시추조사를 실시하였다. 시추조사와 병행하여 지층의 상대밀도, 연경도 및 구성성분을 파악하기 위하여 지층이 변화하는 경우 또는 동일 지층의 경우라도 1.5m 간격으로 표준관 입시험을 연속성 있게 실시하였다.

3. 세굴을 실험

3.1 실험재료

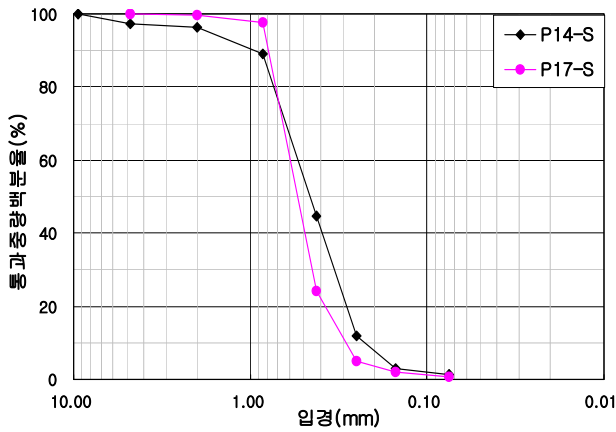
현장 불교란시료를 채취하기 위하여 하천중앙수로 중 P14와 P17 위치에서 외경이 76mm, 길이가 0.8m인 표준 박관튜브(thin-wall tube)를 이용하여 각각 2공의 수중보링을 실시하였다. 굴진심도는 연암층이 나오는 지하 약 30m까지 실시하였으며, 불교란시료는 지하 5m 내외의 충적층에서 채취하였다. 시추한 불교란시료에 대하여 비중시험, 입도분석시험, 액소성한계시험 등을 실시하여 각각의 토질특성을 분석하였다.

각 시료들의 물리적 특성은 표 3과 같다. 기본 물성치 실험을 실시한 결과 대부분의 흙은 모래 또는 실트질로 구성되어 있으며, 통일분류법에 의해 SM 또는 ML로 분류되었다. 특히 P14-S와 P17-S는 대부분 모래로 구성되어 있는 반면 P14-M과 P17-M은 대부분 실트로 구성되어 있어 비슷한 위치에서 채취하였음에도 불구하고 상이한 결과를 보였다. 실트질 지반의 경우 시추 위치는 상이한데도 불구하고 대부분의 토성치가 비슷한 결과를 보여주었다. 각 시료들의 입도분포곡선을 모래질과 실트질로 구분하여 그림 1에 도시하였다.

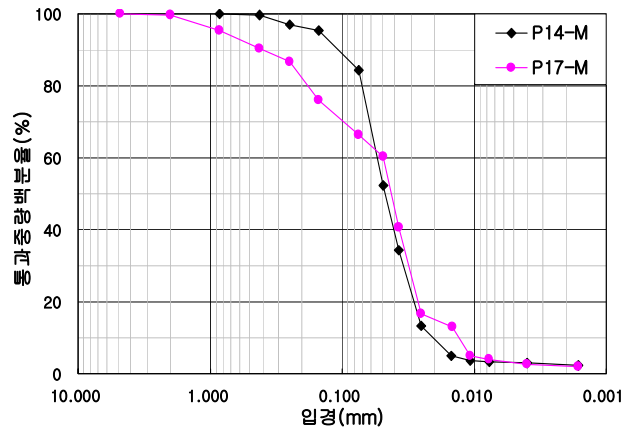
표 3. 시료의 물리적 특성

위 치	비중	액성한계 (%)	건조단위중량 (t/m ³)	비배수전단강도 (kg/cm ²)	#200 통과량(%)	D ₅₀ (mm)	D ₉₀ (mm)	한계전단응력* (N/m ²)	통일 분류
P14-S	2.598	N.P	1.48	-	1.4	0.450	0.98	-	SM
P14-M	2.482	29.79	1.36	5.1	84.3	0.045	0.11	0.61	ML
P17-S	2.644	N.P	1.54	-	0.5	0.520	0.80	-	SM
P17-M	2.608	24.98	1.29	3.5	66.3	0.042	0.40	0.42	ML

[주] * 세굴을 실험 결과임.



(a) 모래질



(b) 실트질

그림 1. 입도분포곡선

3.2 실험방법

세굴률 실험의 목적은 대상지반의 고유의 정량적인 침식함수를 결정하는 것이다. 이 침식함수는 한계 전단응력과 그 이후의 물에 의해 야기되는 전단응력과 지반의 침식률과의 관계로 구성된다. 한계전단응력(critical shear stress)은 세굴이 발생하기 시작할 때 지반에 적용되는 전단응력을 의미하며, 본 실험에서는 실험의 정도를 고려하여 침식률이 1mm/hr가 되기 바로 직전에 흐르는 물에 의해 지반에 작용하는 전단응력을 한계전단응력으로 정의하였다.

앞서 기술한 세굴률 시험기를 통한 세굴률 시험은 다음과 같은 세부절차에 따라 수행된다(Briaud et al., 2001; Briaud et al., 1999).

- ① 외경이 76mm인 박관튜브를 이용해 불교란시료를 채취한다.
- ② 시료를 박관튜브와 함께 세굴률 시험기의 구형 관수로 바닥에 장착한 후 구형관을 물로 채워 시료가 완전포화상태가 되도록 한다.
- ③ 시료를 1mm 상승시킨 후 펌프를 구동하여 관수로 내에 일정유속의 흐름을 발생시킨다.
- ④ 상승된 1mm의 시료가 세굴되자마자 시료를 1mm씩 상승한다(반복).
- ⑤ 1시간동안 세굴된 양(1mm × 상승횟수)을 기록하거나, 1mm의 시료가 세굴되는데 걸리는 시간을 기록하여 시간당 침식률(mm/hr)로 환산한다.
- ⑥ 유속을 다양하게 변경하여 ① ~ ⑤의 과정을 반복한 후 유속별 침식률을 산정한다.
- ⑦ 각 유속별로 시료바닥에 적용되는 전단응력과 침식률과의 관계를 결정한다.

실험결과는 전단응력 τ 에 대한 침식률 변화곡선으로 구성되며, 관속을 흐르는 물로 인해 흙시료 상부에 야기되는 평균전단응력은 Moody 도표를 이용해서 구하며 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

$$\tau = \frac{1}{8} f \rho V^2 \quad (1)$$

여기서, f 는 Moody 도표로부터 얻어지는 마찰계수, ρ 는 물의 밀도 (1000 kg/m^3), V 는 관내의 평균유속 (m/s)이다. 마찰계수 f 는 관의 레이놀즈수 $Re (= VD/v)$ 와 관의 상대조도 ε/D 의 함수이며, 여기서 D 는 관의 직경(m), v 는 물의 동점성계수 ($10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 20°C), ε 은 조도(粗度)이다. 일반적으로 원형단

면인 경우 직경 D 는 동수반경의 4배이다. 관수로의 단면은 구형이므로 구형에 대한 동수반경을 구한 후 4배를 하여 그 직경으로 한다.

세굴률 실험에 앞서 박관튜브의 윗부분과 시료표면이 일치하도록 매끄럽게 다듬어야 하며, 세굴률 시험기에 시료를 장착할 때 시료가 교란되지 않도록 세심한 주의를 기울여야 한다. 세굴률 실험은 실트질로 구성된 P14-M과 P17-M에 대하여 실시하였으며, 그림 2는 세굴률 실험 및 비배수 전단강도 실험 모습이다.



(a) 세굴률 실험



(b) 비배수 전단강도 실험

그림 2. 일산대교 현장 불교란시료 실험모습

3.3 실험결과

세굴률 실험의 결과는 흐르는 물에 의해 시료표면에 야기되는 전단응력과 그에 상응해서 발생하는 세굴량의 관계곡선으로 정의되며, 그림 3은 P14-M과 P17-M에 대한 세굴률-전단응력 관계곡선이다. 그림 3에서 점선은 각각 홍수시 최대유속(완공후)(2.29m/s)과 조류시 최대측정유속에 해당하는 전단응력을 나타낸다. 각 시료들의 토성치와 세굴률 실험에 의한 한계전단응력은 전절의 표 3에서 이미 기술하였다.

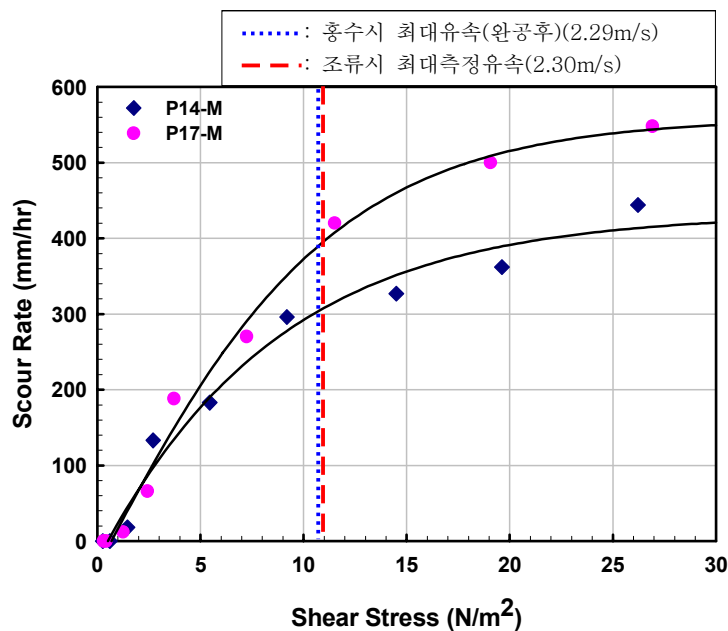


그림 3. 세굴률-전단응력 관계곡선

실험결과에서 흙의 물성치에 따른 한계전단응력의 변화는 크게 나타나지 않았으나 대부분의 경우 단위중량과 전단강도가 증가함에 따라 세굴률-전단응력 곡선의 기울기가 감소함을 알 수 있었다(표 3, 그림 3). 이는 단위중량과 전단강도가 큰 지반의 세굴심이 유속의 증가에 대해 완만하게 증가한다는 사실을 보여주는 것이다.

3.4 지반의 침식특성

세굴현상은 흐르는 물에 의한 침식유발능력과 지반의 침식저항능력과 상호작용에 의하여 발생하는 자연현상이며, 하상물질의 종류에 따라 다르게 나타나는 침식저항능력으로 인해 상이한 양상을 띠게 된다. 일반적으로 조립토의 침식저항능력은 중력과 마찰력이 지배하여 비교적 단순한 반면, 세립토의 침식저항능력은 중력과 마찰력뿐만 아니라 흙입자의 물리·화적 성질 및 전기적 성질에도 의존하여 매우 복잡한 양상을 보인다. 따라서 조립토에서는 하상에 작용하는 유체의 침식유발능력이 급격히 상승하는 경우, 단시간 내에 세굴이 발생하여 최대세굴심에 도달하는 반면, 세립토는 침식저항능력이 조립토에 비해 크고 저항메커니즘이 달라 상대적으로 느리게 침식이 진행된다.

일산대교 현장에서는 P14 지점과 P17 지점의 시추조사 결과를 종합해볼 때 부분적으로 조립토(모래질)와 세립토(실트질)가 혼재되어 있는 양상을 보이고 있다. 따라서 지반이 모래로 구성되어 있는 일반적인 하구의 하상과는 달리 세립토의 침식률로 대표되는 침식저항능력의 영향으로 인해 홍수시 세굴심이 급격히 증가하지는 않을 것으로 판단된다. 하지만 시공중 조류의 영향으로 인해 오랫동안 빠른 유속이 반복되어 발생하기 때문에 하상의 세립토가 거의 침식되어 모래질 하상의 침식특성을 보일 것으로 판단되며, 세굴대책 수립시에는 각별한 주의가 요망된다. 각 시료에 대한 홍수 및 조류 유속에 대한 침식률을 표 4에 나타내었다. 일반적인 조립토의 홍수시 유속(3.0~4.0m/s)에 대한 침식률은 수천 내지 수만 mm/hr에 이른다(Briaud et al., 1999).

표 4. 홍수 및 조류 유속에 대한 흙의 침식률

시 료 명	침식률 (mm/hr)	
	홍수시 최고유속(완공후) (2.29 m/s)	조류시 최대측정유속 (2.30 m/s)
P14-M	306	310
P17-M	393	398

4. 교각세굴 해석

하천에서 발생할 수 있는 세굴의 형태는 주로 장기하상변동(long term streambed elevation change), 단면축소세굴(contraction scour) 그리고 국부세굴(local scour)이다. 장기하상변동이란 교량의 유무에 상관없이 장기간에 걸쳐 발생하는 하상의 변동을 말하며, 단면축소세굴은 교량 등의 인공구조물 또는 자연적인 요인에 의해 하천내의 통수단면적이 축소되어 발생하는 세굴이다. 국부세굴은 구조물에 의한 흐름의 방해와 가속된 흐름에 의해 야기된 와류의 발달에 의해 발생하며, 국부적으로 상당한 깊이까지 이르기도 하며 때로는 구조물자체의 안정까지 위협하기도 한다. 해안지역과 같이 조석이나 해일 등의 영향을 받는 지역의 교량세굴 또한 장기 하상저하, 단면 축소 세굴, 국부 세굴과 수로의 불안정성의 조합으로 이루어진다. 이러한 요소들은 하천흐름에 의한 세굴 메커니즘과 근본적으로 동일하다. 그러므로 해안지역과 하천의 흐름조건이 많이 다름에도 불구하고, 수리상 조건(수심, 유량, 유속 등)이 신중히 평가되었다면 하천의 세굴결정식을 적용하는 것이 가능하다(Richardson and Richardson, 1993; Richardson et. al, 1995).

기존의 수리영향 평가보고서(일산대교주식회사, 2003)에서는 일산대교 현장의 수리평가를 위하여 먼저 구조물 설치 지점에 대한 조석 영향의 규모, 횡단부의 장기 안정성 및 변화에 대한 수로의 반응을 정성적으로 평가하였으며, 이를 바탕으로 수면형과 유량, 유속 등의 수리학적 특성을 산정하여 세굴량 예측 및 평가를 실시하였다. 장기적으로 안정되어 있는 하천의 교량 횡단부에서는 일반적으로 단면축소 세굴과 국부세굴의 합으로 최종세굴심을 평가하게 된다. 하지만 일산대교 현장과 같이 상대적으로 규모가 큰 대형 하천에서는 교각으로 인한 통수단면적의 감소가 그리 크지 않으므로 단면축소세굴의 영향은 작은 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 교각 주위의 세굴심을 평가하여 기초 및 교각의 안정성을 평가하였으며, 이를 위해 기존의 교각세굴 해석모델 중에서 국내 하천설계기준에서 권장하고 있는 CSU공식과 Froehlich공식, Laursen공식, Neill 공식 등을 적용하였다. 이러한 모델들은 조립토 지반에 대해서는 이미 그 적용성이 검증된 바 있다(하천설계기준, 2002). 또한 현장의 지반이 세립토로 구성되어 있어 지반의 침식특성을 고려하여 세굴심을 예측할 수 있는 SRICOS 방법을 적용하여 그 결과를 비교하였다. SRICOS 방법은 계측수문곡선이 없는 경우에 사용할 수 있는 S-SRICOS 방법을 적용하였다(도로설계기준, 2003).

시추조사결과 동일한 교각주위에서 모래질과 실트질이 혼재하는 것으로 나타났기 때문에 세굴해석은 조립질 하상과 세립질 하상에 대하여 모두 실시하였다. 세립질 하상에 대한 세굴해석시 P14-M과 P17-M에서 채취한 시료에 대한 세굴률 실험결과를 바탕으로 SRICOS 방법에 의한 세굴해석을 수행하였다.

4.1 교각세굴 해석모델

(1) 미국(HEC-18)

HEC-18(Richardson and Davis, 2001)에서 제안하는 교각세굴심 예측 공식(CSU 공식)은 이동상세굴, 정지상세굴 모두 적용가능하며 다음과 같다.

$$\frac{y_s}{y_1} = 2.0 K_1 K_2 K_3 K_4 \left(\frac{a}{y_1} \right)^{0.65} Fr_1^{0.43} \quad (2)$$

여기서, y_s = 세굴심(m), y_1 = 교각 상류부 흐름 깊이(m), K_1 = 교각 형상에 따른 보정계수, K_2 = 흐름 유입각에 대한 보정계수, K_3 = 하상 상태에 대한 보정계수, K_4 = 하상 재료 크기에 대한 보정계수, a = 교각 폭(m), Fr_1 = 교각 상류부의 Froude 수($V_1/(gy_1)^{1/2}$), V_1 = 교각 상류부의 평균 유속(m/s), g = 중력 가속도($9.81m/s^2$)이다.

(2) Froehlich 공식

Froehlich(1988)가 제안한 교각 국부세굴 공식은 다음과 같다.

$$\frac{y_s}{b} = 0.32\Phi \left(\frac{b'}{b} \right)^{0.62} \left(\frac{y}{b} \right)^{0.46} Fr^{0.2} \left(\frac{b}{d_{50}} \right)^{0.08} + 1 \quad (3)$$

여기서 y_s = 세굴심(m), b = 교각폭(m), Φ = 교각의 형상계수(사각형: 1.3, 원형: 1.0, 날카로운 교각: 0.7), b' = 흐름 유입각에 대한 직각방향의 투영교각 폭(m), $b' = b\cos\alpha + L\sin\alpha$, L = 교각의 길이(m), α = 흐름 유입각, y = 교각 직상류부 수심(m), Fr = 교각 직상류부 Froude 수, d_{50} = 하상입자의 평균 입경(m)이다.

(3) Laursen 공식

$$\frac{b}{y} = 5.5 \frac{y_s}{y} \left[\left(\frac{y_s}{11.5y} + 1 \right)^{1.7} - 1 \right] \quad (4)$$

여기서 y_s = 세굴심(m), b = 교각폭(m), y = 교각 직상류부 수심(m)이다.

(4) Neil 공식

$$\frac{y_s}{b} = K_s \left(\frac{y}{b} \right)^{0.3} \quad (5)$$

여기서 y_s = 세굴심(m), b = 교각폭(m), K_s = 교각의 형상계수(직사각형: 1.5, 원형: 1.35), y = 교각 직상류부 수심(m)이다.

(5) SRICOS 방법

세립토 지반의 국부세굴은 SRICOS 방법을 이용하여 평가하며, 이는 흐르는 물에 의해 하상에 작용하는 전단응력의 개념에 기초하고 있다. SRICOS 방법은 적용방법에 따라 실제로 교각주위에 발생한 불규칙한 수문곡선을 반영하여 시간에 따른 세굴심의 변화를 계산하는 E-SRICOS 방법과 수문곡선기록이 없는 대부분의 경우 간단한 매개변수와 수계산만으로 세굴심을 산정하는 S-SRICOS 방법으로 나누어진 다. 일반적으로 해석에는 E-SRICOS 방법이, 그리고 재현기간을 고려하여 교량을 설계하는 경우에는 S-SRICOS 방법이 적합하다. S-SRICOS 방법은 다음과 같은 단계를 따른다.

- ① 세굴률 실험을 통해 각 지층별 세굴률-전단응력 변화곡선을 얻는다.
- ② 식 (6)과 (7)을 이용하여 교각주위에서 발생하는 최대전단응력 τ_{\max} 와 최대세굴깊이 z_{\max} 를 계산한다.

$$\tau_{\max} = 0.094 \rho \cdot v^2 \left(\frac{1}{\log Re} - \frac{1}{10} \right) \quad (6)$$

$$z_{\max} (mm) = 0.18 Re^{0.635} \quad (7)$$

여기서, τ_{\max} = 평탄하상에 위치한 교각주위의 최대전단응력(N/m²), z_{\max} = 최대세굴깊이(mm), ρ = 물의 밀도(kg/m³), v = 평균유속(m/s), $Re = \frac{vD}{\nu}$ = 교각 Reynolds 수, D = 교각폭(m), ν = 물의 동점성계수(10⁻⁶m²/s, 20℃일때)이다.

- ③ 세굴률-전단응력 변화곡선으로부터 계산된 τ_{\max} 에 상응하는 초기세굴률 \dot{z}_i 를 구한다. 다층지반구조인 경우에는 각 지층의 초기세굴률을 두께비에 따라 평균한 값을 사용한다.
- ④ 식 (8)을 이용하여 등가시간 t_e 를 계산한다.

$$t_e = 73 t_{lje}^{0.126} V^{1.706} \dot{z}_i^{-0.20} \quad (8)$$

여기서 t_e = 해석기간동안의 수문곡선에 의해 발생한 세굴깊이와 같은 깊이를 생성하기 위해 최대 유속이 지속되어야 하는 시간(hrs), t_{lje} = 세굴해석기간(years)

- ⑤ 교각세굴깊이를 다음의 식을 이용해서 구한다.

$$y_s = \frac{t_e}{\frac{1}{\dot{z}_i} + \frac{t_e}{z_{\max}}} \quad (9)$$

4.2 세굴심 예측

전절에서 나타낸 바와 같이 수리영향 분석 결과 시공 중에는 조류의 영향이 홍수의 영향보다 큰 것으로 나타났으며, 교량 완공 후에는 홍수의 영향이 큰 것으로 나타났다. 따라서 시공 중의 세굴심 예측에는 조류속을 적용하였으며, 실제 측정유속과 축도 및 가시설 등의 영향으로 인해 증가할 수 있는 최대 가능유속 두 가지 모두에 대해 세굴심을 계산하였다. 그리고 교량 완공 후의 세굴심 예측에는 홍수시의 계획홍수량에 의한 유속을 적용하였다.

세굴심 계산에 사용된 설계변수 및 계산결과를 표 5와 표 6에 각각 나타내었다. 표 5는 하천설계기준에서 제안하는 모델들에 의한 최대 세굴심 계산결과이며, 표 6은 도로교설계기준의 SRICOS 방법의 해석과정 및 결과이다. 표 7에서는 하천설계기준 모델들의 평균치와 도로설계기준의 SRICOS 방법의 해석결과를 연암심도 및 교각의 근입깊이 등과 비교하여 최종세굴심을 결정하였다. 결과에서 나타낸 바와 같이 지반의 침식특성을 고려하지 않는 하천설계기준의 모델들은 SRICOS 방법에 비해 세굴심을 크게 산정하는 것으로 나타났다.

표 5. 최대 세굴심 산정결과(하천설계기준)

구 분	교각명	케이슨 폭(m)	형상	시추 No.	하상재료, D ₅₀ (mm)	하상고 EL.(m)	접근수심 (m)	최대접근 유속(m/s)	세굴심 산정 (m)				
									CSU	Froehlich	Laursen	Neill	
시공 중 (조류영향)	측정유속	P14	7.0	원형	P14-S	0.450	1.400	3.55	2.30	8.10	9.94	5.41	8.57
		P17	8.0	타원형	P17-S	0.520	0.962	3.99	2.29	8.95	11.29	6.12	9.74
	최대 가능유속	P14	7.0	원형	P14-S	0.450	1.400	3.55	2.50	8.39	9.99	5.41	8.57
		P17	8.0	타원형	P17-S	0.520	0.962	3.99	2.50	9.30	11.35	6.12	9.74
완공 후 (홍수영향)	홍수시 최대유속	P14	7.0	원형	P14-S	0.450	1.400	8.65	2.29	9.11	11.05	8.50	11.19
		P17	8.0	타원형	P17-S	0.520	0.962	9.09	2.29	10.01	12.42	9.31	12.47

표 6. 최대 세굴심 산정결과(도로설계기준)

구 분	교각명	케이슨폭 (m)	최대접근유속 (m/s)	Sampling 위치	z_{max} (m)	τ_{max} (N/m ²)	\bar{z}_i (mm/hr)	t_e (hr)	최대 세굴심 z (m)	
시공 중 (조류영향)	측정유속	P14	7.0	2.30	P14-M	6.77	19.27	387.4	163.98	6.12
		P17	8.0	2.29	P17-M	7.37	18.58	504.9	154.37	6.73
	최대 가능유속	P14	7.0	2.50	P14-M	7.15	22.36	401.8	187.68	6.53
		P17	8.0	2.50	P17-M	7.79	21.72	525.3	177.88	7.19
완공 후 (홍수영향)	홍수시 최대유속	P14	7.0	2.29	P14-M	6.79	19.12	386.7	162.83	6.13
		P17	8.0	2.29	P17-M	7.37	18.58	504.9	154.37	6.73

표 7. 일산대교 교각 P14와 P17의 최종 예측세굴심

교각명	세굴심 산정 (m)						최종 세굴심 (m)	연암심도 (m)	근입심도 (m)
	시공 중				완공 후				
	측정조류속		최대조류속		홍수시 최대유속				
	도로 설계기준	하천 설계기준	도로 설계기준	하천 설계기준	도로 설계기준	하천 설계기준			
P14	6.12	8.01	6.53	8.09	6.13	9.96	9.96	27.90	29.08
P17	6.73	9.03	7.19	9.13	6.73	11.05	11.05	24.80	24.88

5. 결 론

본 연구에서는 시공 중의 세굴심 예측을 위하여 실제 측정유속과 축도 및 가시설 건설 등의 영향으로 증가할 수 있는 최대가능유속의 두 가지 경우에 대해, 그리고 교량 완공 후의 세굴심 예측을 위하여 홍수시의 수리영향에 대해 각각 세굴심을 계산하였다. 세굴심 산정모델로는 하천설계기준에서 권장하고 있는 기존의 모델들과 최근 도로설계기준에 포함된 SRICOS 방법을 적용하였다.

결과에서 나타낸 바와 같이, 세 가지 수리영향 모두에 대해 지반의 침식특성을 고려하지 않는 하천설계기준의 모델들은 SRICOS 방법에 비해 세굴심을 크게 산정하는 것으로 나타났다. 하지만 지반조사 결과에서 나타낸 바와 같이 대상교량 현장의 지반이 조립토와 세립토가 혼재되어 있기 때문에 하천설계기준의 모델들에 의한 결과를 사용하는 것이 상대적으로 안전할 것으로 판단된다.

세굴심 예측결과 가장 큰 값을 보이는 교량 완공 후 홍수에 의한 세굴심을 최종 예측세굴심으로 결정하였다. 하지만 교각기초의 근입깊이와 비교한 결과 세굴심이 기초의 근입깊이를 초과하지는 않는 것으로 판명되었으며, 교각기초가 세굴에 상대적으로 안정된 구조를 가지고 있는 우물통 기초로 설계 및 시공되고 있어 본 연구의 대상교각인 P14와 P17은 세굴보호공이 필요하지 않는 것으로 판단된다.

또한 일산대교 현장에서는 지반이 모래로 구성되어 있는 일반적인 하구의 하상과는 달리 혼재되어 있는 세립토의 영향으로 인해 홍수시 세굴심이 급격히 발생하지는 않을 것으로 판단된다. 하지만 시공중 조류의 영향으로 인해 오랫동안 빠른 유속이 반복되어 발생하기 때문에 하상의 세립토가 거의 침식되어 모래질 하상의 침식특성을 보일 것으로 판단되며, 세굴대책 수립시에는 각별한 주의가 요망된다.

참고문헌

1. 건설교통부 (2003), 도로설계기준
2. 건설교통부 (2000), 하천설계기준
3. 건설교통부 (2002), 한강 수계하천 정비 기본계획(팔당댐~한강하구)
4. 대림산업주식회사 (2004), 일산대교 현장, 조류를 고려한 수리 및 가시설 검토 종합보고서
5. 일산대교주식회사 (2003), 일산대교 건설 민간투자사업 실시설계 수리검토보고서
6. 일산대교주식회사 (2003), 일산대교 건설 민간투자사업 실시설계 토질조사보고서
7. Briaud, J.L., Ting, F.C.K., Chen, H.C., Cao, Y., Han, S.W. and Kwak, K. (2001) "Erosion function apparatus for scour rate predictions," ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, No. 2, pp. 105-113
8. Briaud, J.L., Ting, F.C.K., Chen, H.C., Gudavalli, S.R., Perugu, S. and Wei, G. (1999) "SRICOS: Prediction of Scour Rate in Cohesive Soils at Bridge Piers," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.125, No.4, ASCE, Reston, Virginia, U.S.A., pp. 237-246
9. Froehlich, D.C. (1988) "Analysis of Onsite Measurement of Scour at Piers," Proc., National Hydraulic Engineering Conference, ASCE, Colorado Springs, CO.
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. Richardson, E.V. and Richardson, J.R. (1993) "Scour at highway structures in tidal waters," ASCE Hydraulic Engineering, Proc. 1993 National Conf., San Francisco, CA August
12. Richardson, J.R., Richardson, E.V. and Edge, B.L. (1995) "Bridge scour in the coastal region," Proc. Fourth International Bridge Conference, Transportation Research Board, Washington, D.C.