

교량에서의 세굴깊이의 예측 및 실측치와의 비교분석

Prediction of Scour Depth at Bridges and Analysis between Predicted and Measured Scour Depth

이 재수* · 윤 용남** · 호 정석***

1. 서론

홍수 및 기타 여러 요인으로 인한 도로의 손실은 비교적 쉽게 보수되어 교통의 소통을 빠른 시간내에 정상화 할 수 있으나 홍수로 인한 교각 및 교대에서의 세굴에 의한 교량의 붕괴나 구조적인 피해는 시민의 안전뿐만 아니라 사회 경제에 막대한 손실을 끼치게 된다. 비록 홍수가 직접적인 원인이 아니지만 성수대교 붕괴 이후 교량에 대한 전반적인 안전점검을 실시하고 있으며 세굴에 의한 교량붕괴에 대한 연구도 활발해지기 시작했다.

미국의 경우 교량붕괴의 약 60%가 세굴로 인한 것으로 조사되었으며 따라서 세굴로 인한 교량의 붕괴 및 피해에 관심을 가지고 실험에 의한 세굴깊이 예측공식들을 유도하여 실제교량에 적용하고 또한 최대세굴깊이를 측정할 수 있는 실측장비를 개발하여 경험식을 보완하고 교량의 안전성을 점검할 수 있도록 노력하고 있다.

본 연구에서는 세굴이 많이 발생하고 있다고 판단되는 영동고속도로상의 남한강교를 선택하여 홍수로 인한 세굴깊이를 계산하고, 실측장비를 사용한 실측세굴깊이와 비교분석하여 보기로 한다. 본 연구에서 사용된 수리모형은 1차원 모형으로는 WSPRO, HEC-2 그리고 2차원 모형으로는 TABS이며, 이들 수리모형을 사용하여 남한강교 지점에서의 수리량을 구한 후 실험으로 부터 얻어진 경험식을 사용하여 세굴깊이를 구하게 된다. 이와 동시에 음향측심기인 Fathometer를 사용하여 홍수 전후에 교량 및 교각에서의 하상고 실측을 하여 홍수로 인한 세굴깊이를 구하고 경험식으로 부터 구해진 세굴깊이와 비교 해 보기로 한다.

이와 같은 방법을 통하여 세굴에 의한 교량의 안전성을 예측할 수 있는 시스템을 구축할 수가 있으며 붕괴가 예견되었을 때 적절한 보강조치를 할 수 있도록 하여 교량붕괴로 인한 인명 피해 및 경제적 손실을 미연에 방지할 수가 있게 될 것이다.

2. 적용 수리모형 및 실측장비

2.1 적용 수리모형

하천교량에 있어서의 세굴깊이에 대한 분석을 하기 위해서는 교량지점에서의 유량, 유속 및 수심을 먼저 구한 뒤 이 값들을 사용하여 세굴깊이를 예측하게 된다. 따라서 이러한 수리량을 결정하기 위해 여러가지 수리 모형들이 사용되어지는데, 본 연구에서는 2차원 모형으로 TABS를 1차원 모형으로 WSPRO와 HEC-2를 사용하여 수리량을 구하였다.

WSPRO모형은 하천교량의 통수단면과 교각의 설계를 주목적으로 하여 개발되어진 모형으로 개수로상

* 전주대학교 토목환경공학과 전임강사

** 고려대학교 토목환경공학과 교수

*** 고려대학교 토목환경공학과 대학원 석사과정

의 1차원 정상점변류(Steady gradually varied flow)흐름을 분석할 수 있다. 설계목적에 따라 다양한 형태의 통수단면과 교대부 제방 제원을 고려할 수 있다. 또한 세굴심 예측을 위한 수리특성분석의 적용 시 5% 유량통과 구간을 설정하여 단면을 통수능이 같은 20개의 구간으로 나누어 각 구간별 수리특성을 분석할 수가 있다. WSPRO모형에서 배수의 계산은 표준축차법(Standard step method)을 사용하는데 교량에 의한 흐름의 영향이 없는 구간에 적용할 때는 다른 1차원 수리모형과 거의 같은 결과를 얻으나 교량통과 흐름분석에서는 다른 모형에 비해 실제수면곡선과 비슷한 결과를 주고 있다.

HEC-2모형은 자연하천이나 인공하천에서의 흐름이 1차원 정상류 상태의 점변류인 흐름에 대해 적용할 수 있는 모형으로 기본방정식은 WSPRO모형과 같은 표준 축차법을 사용하고 있다. HEC-2에서는 교량을 통한 에너지 손실을 두가지 경우에 대하여 계산할 수가 있는데, 첫째는 흐름단면의 축소나 확대가 발생하는 교량의 상류와 하류에서 발생하는 에너지 손실부분이고, 두번째는 구조물 자체에 의해 생기는 손실이다. 구조물 자체에 의해 발생하는 손실은 normal bridge method와 special bridge method를 사용하여 결정하게 된다.

TABS모형은 전후처리기(Pre & post processor)인 FastTABS와 수리모형인 TABS-MD로 구성되며 TABS-MD내의 RMA-2를 사용하여 수리계산을 하게 된다. RMA-2는 2차원, 수심평균, 자유표면 유한 요소 프로그램으로 하천, 항구 또는 하구와 같은 수역을 대표하는 유한요소망의 각 격점에서의 수위 및 유속을 계산할 수 있으며 정상류 뿐만 아니라, 부정류 상태까지 모의 할 수 있고 지배방정식으로는 식 (1)의 연속방정식과 식 (2)~(3)의 x, y방향에 대한 운동량 방정식이 이용된다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial a_0}{\partial x} \right) - \frac{\epsilon_{xx}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\epsilon_{xy}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{gu}{C^2 h} \sqrt{u^2 + v^2} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial a_0}{\partial y} \right) - \frac{\epsilon_{yx}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{\epsilon_{yy}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{gv}{C^2 h} \sqrt{u^2 + v^2} = 0 \quad (3)$$

여기서

x, y = 흐름방향 및 흐름의 연직방향으로의 거리 [L]

u, v = x방향 및 y방향 수평유속성분 [LT⁻¹]

t = 시간 [T], g = 중력가속도 [LT⁻²], h = 수심 [L]

a₀ = 하상표고 [L], ρ = 유체의 밀도 [ML⁻³]

ε_{xx}, ε_{xy} = x방향으로의 법선 및 접선 난류교환계수 [MT⁻¹L⁻¹]

ε_{yy}, ε_{yx} = y방향으로의 법선 및 접선 난류교환계수 [MT⁻¹L⁻¹]

C = Chezy의 조도계수(Manning의 n으로 부터 변환된) [L^{2/3}T⁻¹]

2.2 실측장비

현장에서의 세굴 깊이의 실측은 교량의 지속적인 유지 및 관리와 실험으로 부터 도출한 세굴심 예측 공식들을 비교 검토하는데 도움을 줄 뿐만 아니라 실측자료와 경험공식으로 부터 구한 결과의 차이에 영향을 주는 인자를 규명하고 이를 보완하는데 도움을 준다.

본 연구에서는 음향측심기인 Fathometer(DE-719C)를 사용하여 남한강교 직상류부를 횡단 실측하였으며 세굴이 많이 발생하는 몇개의 교각을 택하여 교각주위를 실측하였다. Fathometer는 기록기, 송수신

기, 송수파기, 동진발전기로 구성되며 그원리는 다음과 같다. 수면에 가까운 음원으로부터 매우 짧은 시간동안 지속하는 음파를 수중에 방사하면 그 음파는 사방에 확산전파되며 그 중 수직방향으로 전파된 음파가 수중바닥면에서 반사되어 수면부근에 도달하여 중심봉에 전달된다. 이러한 송신음파가 수중바닥에 반사되어 도달하는 시간을 거리로 계산하여 수심을 측정한다

3. 교량에서의 최대세굴깊이 계산

하천에서의 세굴은 시간에 따라 장기적인 변화와 단기적인 변화로 구분 할 수가 있는데, 장기변화는 하상의 상승(Aggradation)이나 저하(Degradation)로 하천과 유역에 있어서의 수리특성과 하천 단면변화와 관련이 있고, 여러 학자들에 의해 장기간의 하상변화를 예측하는 공식이 제안되고 있으나 아직 비교적 정확한 예측을 하지 못하고 있는 실정이다. 단기변화로는 단면축소로 인한 세굴 및 국부세굴로 나눌 수가 있다. 따라서 총 세굴 깊이는 하상의 상승 및 저하, 통수 단면 축소에 의한 세굴 그리고 국부 세굴의 세가지 요소의 합으로 구하게 된다.

3.1 통수단면 축소세굴

통수단면 축소에 의한 세굴은 교량 등 인공구조물에 의해 하천내의 홍수 단면적이 축소되어 발생하는 세굴이다. 통수 단면 축소에 의한 세굴은 다음과 같은 두가지 상태에 대하여 고려를 하는데, 첫째는 혼탁수세굴(Live-bed scour)로 교량 상류부로부터 토사의 이송이 있는 경우이며, 두번째는 청정수세굴(Clear-water scour)로 상류부로부터 토사의 이송이 없는 경우이다.

혼탁수세굴인 경우 다음과 같은 Laursen의 경험식을 사용한다.

$$\frac{y_2}{y_1} = \left(\frac{Q_{mc2}}{Q_{mc1}} \right)^{\frac{6}{7}} \left(\frac{W_{c1}}{W_{c2}} \right)^{K_1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^{K_2} \quad (4)$$

$$y_s = y_2 - y_1 \text{ (평균 세굴 깊이, ft)}$$

- 여기서 y_1, y_2 = 주 하도 및 축소단면에서의 평균 수심, ft
- W_{c1}, W_{c2} = 주 하도 및 교량단면에서의 하상 폭, ft
- Q_{mc1}, Q_{mc2} = 퇴사를 포함하는 주하도의 접근 유량 및 축소단면에서의 유량, cfs
- n_1, n_2 = 주 하도 및 축소단면에서의 Manning의 조도계수
- K_1, K_2 = 전단속도와 침강속도에 따른 계수

3.2 교각에서의 국부세굴

국부세굴은 교대와 교각에서의 국부세굴로 나눌 수가 있는데, 흐름속에 설치된 구조물에 의한 흐름의 간섭때문에 발생한다. 교각에서의 국부세굴은 Colorado State University 공식이 주로 추천되고 있는데 다음과 같다.

$$\frac{y_s}{a} = 2.0 K_1 K_2 K_3 \left(\frac{a}{y_1} \right)^{0.35} Fr_1^{0.43} \quad (5)$$

- 여기서 y_s = 세굴 깊이, ft
- y_1 = 교각 직상류의 수심, ft
- K_1, K_2, K_3 = 교각 형상, 흐름의 접근각, 하상조건에 대한 보정계수
- a = 교각의 폭, ft Fr_1 = Froude 수

4. 실측 및 계산된 세굴깊이

4.1 Fathometer에 의한 세굴깊이 실측

남한강교에 대해 95. 6. 17 - 18 양일간 횡단 및 교각 주위를 실측하였다. 실측당시 남한강교에서의 수위는 36.91(EL.m)이며 유출량은 같은 기간의 여주수위표에서 측정된 수위를 유량으로 환산한 결과 약 $120\text{m}^3/\text{sec}$ 였다. 그림 1은 교각전면부로부터 1m상류지점에 대한 횡단 하상고 실측결과를 보여주고 있다. 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 교각이 위치한 부분이 교각사이 부분보다 상당히 세굴되었으며 1m전방에서 실측한 것을 고려하면 교각전면부에서의 세굴은 그림보다는 더 심하다고 판단할 수가 있다. 교량건설(1971년) 당시의 교각에서의 하상고와 비교해 볼때 주하도에 있는 교각부분이 약 3-4m 정도 낮아진 것으로 나타나 있다

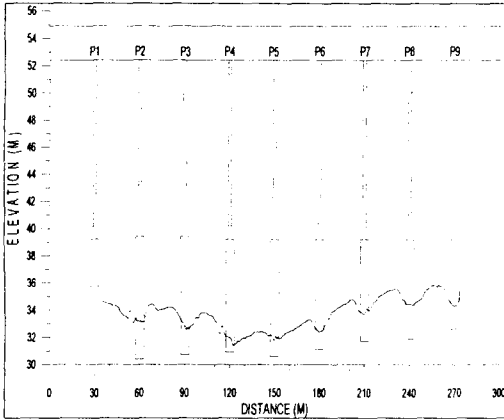


그림 1. 남한강교 횡단 실측 하상고 (1차)

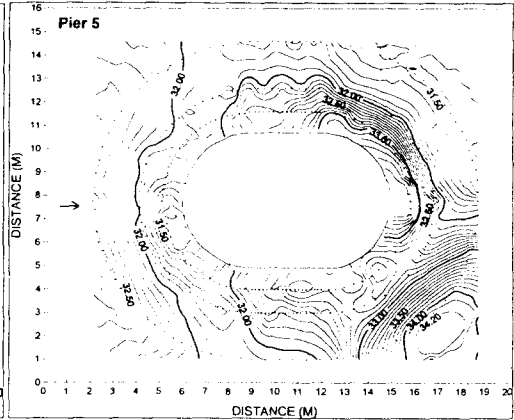


그림 2. 5번교각 주위의 실측 하상고 (1차)

그림 2는 세굴이 가장 심하다고 판단되는 5번 교각에 대해 교각 주위를 각각 1m, 2m, 4m 떨어져서 실측한 결과를 보간하여 등고선 형태로 나타낸 실측 하상고 도면을 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 교각 상류측에서 유수에 의해 세굴이 상당히 심함을 알 수가 있고, 교각하류부에서는 상류측에서 세굴된 유사들이 퇴적되어 상류부 보다는 세굴이 비교적 덜 심함을 알 수가 있다. 또한 교각에서의 국부세굴이 교각과 접촉된 부분에서 심하게 발생함을 감안하면 그림에서 교각과 접촉하고 있는 부분은 하상고가 더 낮다고 보아야 한다. 그림에서 점들은 각 교각주위 1 m, 2 m, 4 m로 실측한 지점을 나타내고 있다. 실제적으로는 물의 흐름과 배의 조작, 위치표시 등에 어려움이 있으므로 그림처럼 정확하게 일정한 거리로 실측은 할 수 없었지만 가급적 그림에 표시된 것처럼 실측하려고 노력하였다. 이와 같은 이유로 약간의 오차발생은 감수할 수 밖에 없다.

홍수로 인한 세굴깊이를 계산하기 위해 95년 9월 18일에 2차 실측을 실시하였다. 1차 실측과 1차 실측기간 사이에 큰호우 사상이 발생하였는데 8월 25일경 수위가 43.6(EL.m)로 가장 높게 나왔으며 이에 해당하는 유출량은 여주수위표 지점의 수위-유량관계곡선으로 부터 약 $17145\text{m}^3/\text{sec}$ 로 계산되었으며, 이는 여주수위표 지점에서의 100년 빈도의 계획홍수량 $15600\text{m}^3/\text{sec}$ 보다 상당히 큰 값이다. 2차 세굴 실측도 1차와 동일한 방법으로 수행하였으며 그림 3은 2차 횡단실측 하상고를 보여주고 있다. 전반적으로 교각이 하단부까지 거의 노출되어 있는 것을 볼 수 있으며 1차 실측결과와 비교해 볼때 홍수로 인해 전반적으로 세굴이 발생하였음을 관찰할 수가 있다. 특히 4, 5, 6번 교각이 많이 세굴되었으며 5번 교각은 1차측정결과와 비교해 볼 때 상당히 세굴되었음을 알 수가 있다. 이는 4번과 6번 교각에 대해 94년도에 보수를 실시하였지만 5번 교각에 대해서는 보수를 실시하지 않아 4, 6번 교각에 비해

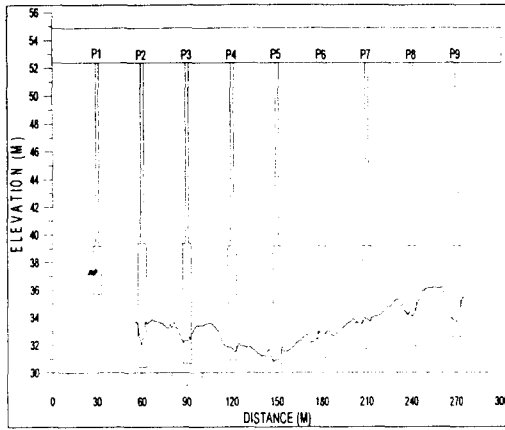


그림 3. 남한강교 횡단 실측 하상고(2차)

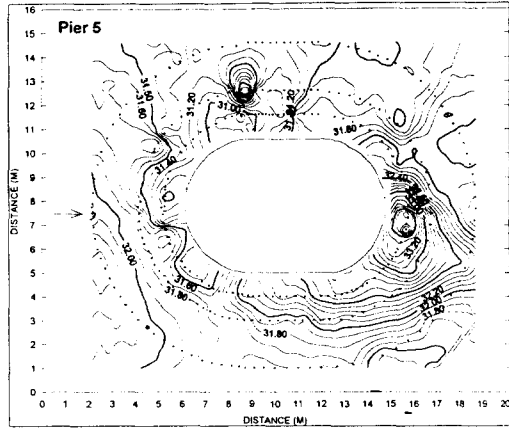


그림 4. 5번교각 주위의 실측 하상고(2차)

더욱 많이 세굴된 것으로 보인다. 그림 4는 1차와 같은 방법으로 5번 교각주위로 실측한 결과를 보여주고 있다.

4.2 경험식으로 부터 계산된 세굴깊이

1차 실측과 2차 실측사이에 발생한 홍수로 인한 세굴깊이를 계산하기 위해 홍수에 상당하는 수위와 유량을 사용하여 TABS, WSPRO, HEC-2 모형에 의한 수리량을 계산하였다. 먼저 통수단면축소에 의한 세굴깊이를 계산하여 보자. 혼탁수세굴과 청정수세굴의 구분은 유사이송에 대한 Neil의 한계유속식을 이용하여 구한 한계유속과 접근단면 평균유속을 비교하여 한계유속보다 접근단면의 평균유속이 크면 혼탁수세굴이 발생하는 것으로 본다. 세가지 모형으로 부터 계산된 수리량을 사용하여 한계유속을 구한결과 세가지 모두 혼탁수세굴이 발생하는 것으로 나타났다.

표 1은 세가지 모델에 의한 계산된 단면축소깊이를 보여주고 있다. 교각 폭을 2m(6.56ft)로 적용했을 경우 2~2.5m, 그리고 교각 폭을 5.6m(18.37ft)로 했을 경우 3~4m의 단면축소 세굴이 발생함을 알 수가 있다.

표 1. 세가지 모형에 의한 통수단면축소세굴 깊이

모형	Q (cfs)	W ₁ (ft)	W ₂ (ft)		y ₁ (ft)	K ₁	y _s (ft)/(m)	
			폭 6.56ft	폭 18.37ft			폭 6.56ft	폭 18.37ft
WSPRO	605403	2036	1501.6	1324.5	33.38	0.64	7.34/2.24	10.68/3.26
HEC-2	605403	2034	1378.7	1201.6	33.10	0.64	9.60/2.53	13.24/4.04
TABS	605403	1870	1377	1200.5	30.6	0.64	6.73/2.05	10.1/3.08

교각에서의 국부세굴깊이 계산은 세굴이 가장 심하게 일어나고 있다고 판단되는 5번교각에 대해 수행하였다. 그 결과가 표 2에 나타나 있는데 세가지 모형에 의한 결과가 비슷하게 나왔으나 전반적으로 세굴깊이가 큼을 볼 수 있다. 교각의 폭을 5.6m(18.37ft)로 하였을 때가 2m(6.56ft)로 하였을 때보다 세굴깊이가 두 배정도 크게 계산되고 있다. 5번 교각에 대해 실측한 세굴깊이를 보면 홍수로 인해 약 1m가량 세굴이 되었는데 계산치와 비교하여 볼때 작게 실측되었음을 알 수 있다. 그 원인은 경험식은 실험실에서 균등한 하상재료를 사용하여 평형하상이 발생할 때까지 계속 물을 흘려보냈을 경우에

표 2. 세가지 모형에 의한 국부세굴 깊이

모형	V_1 (ft/s)	y_1 (ft)	Fr_1	y_s (ft)/(m)	
				폭 6.56ft	폭 18.37ft
WSPRO	14.93	39.67	0.42	18.72/5.71	36.44/11.11
HEC-2	12.53	42.87	0.34	17.51/5.34	34.17/10.42
TABS	11.84	41.66	0.32	16.89/5.15	23.99/10.06

대한 식인 반면 실제의 교량지점에서는 깊이에 따라 암반층이 존재하는 경우가 많고 또한 홍수가 지나고 난 후 퇴채움 현상 등이 발생하기 때문이라고 볼 수가 있다.

5. 결론

본 연구에서는 교량지점에서의 홍수로 인한 세굴깊이를 예측하기 위하여 2차원 수리모형인 TABS와 1차원 모형인 WSPRO, HEC-2를 사용하여 수리량을 구한 후 경험식으로 부터 세굴 깊이를 계산하였다. 또한 실측장비를 사용하여 교량에서의 횡단 하상고 및 교각주위의 하상고를 실측하여 계산치와 비교하여 보았다. 본 연구를 통한 결론을 요약하면 다음과 같다.

- ① 세가지 모형에 의한 세굴계산 결과가 많은 차이를 보이고 있지 않다.
- ② 2차원 모형은 교각에서의 국부세굴 계산시 원하는 지점에서의 수리량을 구할 수가 있고 흐름의 방향도 모의를 할 수가 있으므로 1차원 모형보다는 비교적 정확한 결과를 얻을 수가 있다.
- ③ WSPRO모형은 HEC-2모형에 비해 20개의 동일유량통과구간으로 분배를 할 수 있으므로 HEC-2보다는 적용하는데 이점이 있다.
- ④ 실험실에서 도출한 경험식으로 부터 계산한 세굴깊이와 실측세굴깊이 사이에는 하상의 지질구조, 퇴채움 등에 여러 원인에 의해 상당한 차이가 발생함을 알 수 있다.
- ④ 일반적으로 교각과 교각사이보다 교각전면부에서 세굴이 심하게 발생하고 교각후면부에서는 퇴적이 발생하게 된다.
- ⑤ 실측은 최고 홍수위가 지난지 수일 후에 실시되므로 이때는 이미 퇴채움이 발생하여 최대 홍수위일때의 세굴깊이를 정확히 실측할 수가 없다. 따라서 최대홍수위일때 세굴깊이를 실측할 수 있는 실측장비 개발의 필요성이 절실하다

참 고 문 헌

1. Engineering Computer Graphics Laboratory, 1994. FastTABS, Hydrodynamic Modeling Reference Manual, Brigham Young University, Provo, Utha.
2. Hydraulics Laboratory, 1990. Generalized Computer Program System for Open-Channel Flow and Sedimentation, "TABS System, Volumes 1-2", U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
3. Proceedings of the 1993 Conference, 1993. Hydraulic Engineering '93, Vol. 2, ASCE, New York, NY.
4. Richardson, E.V., Harrison, L.J., and Davis, S.R., 1993. Evaluating Scour at Bridges (2nd Edition), Hydraulic Engineering Circular No. 18, Federal Highway Administration.
5. Shearman, J.O., 1990. User's Manual for WSPRO - A Computer Model for Water Surface Profile Computation, Federal Highway Administration, FHWA-IP-89-027.
6. U.S. Army Corps of Engineers, 1990. Waterway Surface Profile, User's Manual: HEC-2, Hydraulic Engineering Center.