

하상재질의 특성을 고려한 국부세굴심 예측 Prediction of Local Scour Depth considering Bed Material Characteristics

○심우배^{*} · 강진구^{**} · 백경원^{***} · 송재우^{****}

1. 서론

최근 국내외에서 해마다 홍수로 인하여 많은 교량들이 붕괴되고 있으며, 미국 내 교량붕괴의 주요원인 중 하나가 홍수와 세굴로 인한 것이라고 발표된 이후로 교량구조물에 작용되는 수리학적 인자의 영향에 대한 연구가 1980년대 후반부터 활발하게 이루어지고 있다. 하지만 국내의 경우 교량이 도로의 일부이자 하천의 일부라는 개념이 확립되지 못했기 때문에 교량구조물에 대한 수리·수문학적인 인자들과 이들이 대상구조물에 미치는 영향에 대한 연구가 부족한 실정이다.

자연하천에서 장기적인 하상변동이나 국부세굴은 수리학적 인자들의 변화를 야기시켜 하천에 큰 영향을 미칠 수 있다. 국부세굴은 흐름에 장애를 주는 구조물 주위의 하상재질을 이동시킴으로써 발생하는데 구조물의 폭, 접근유속, 접근수심, 하상재질 등에 의해 영향을 받는다. 기존 연구에 의한 국부세굴 예측식은 대부분 균등유사에 대해서 유도되어 하상재질의 입도분포를 고려하지 못하였기 때문에 세굴심을 과대산정하는 경우가 많다.

따라서, 본 연구에서는 교각 폭, 접근수심, 접근유속, 한계유속, Fr수, 하상재질의 크기와 입도분포의 영향에 따른 원형 교각 주위의 국부세굴심을 분석하여 하상재질의 입도분포를 고려한 국부세굴심 예측식을 제시하였다.

2. 연구방법

본 연구에서는 수리모형실험을 통한 실험자료를 분석하여 입도분포를 고려한 원형 교각 주위의 국부세굴심 예측식을 제시하였으며, 수리모형 실험장치는 그림 1과 같다.

교각 직경(D)이 60mm, 30mm인 투명한 균등 원형교각을 실험수로 직유로부 중심에 유입부의 영향을 고려하여 유입부로부터 4m 떨어진 곳에 설치하였으며, 급격한 유량변화에 따른 하상형의 변화를 감소시키기 위해 유출부에 설치된 수문을 조절하여 교각 주위의 국부세굴 실험을 실시하였다. 유사공급은 하류부에서 1분당 유출되는 모래의 중량을 측정하여 유입구에 설치되어 있는 유사공급장치로부터 같은 양이 공급되도록 조절하였다.

* 홍익대학교 토목공학과 박사과정 수료
** 홍익대학교 부설 과학기술연구소 연구원
*** 한림정보대학 토목과 조교수
**** 홍익대학교 토목공학과 교수

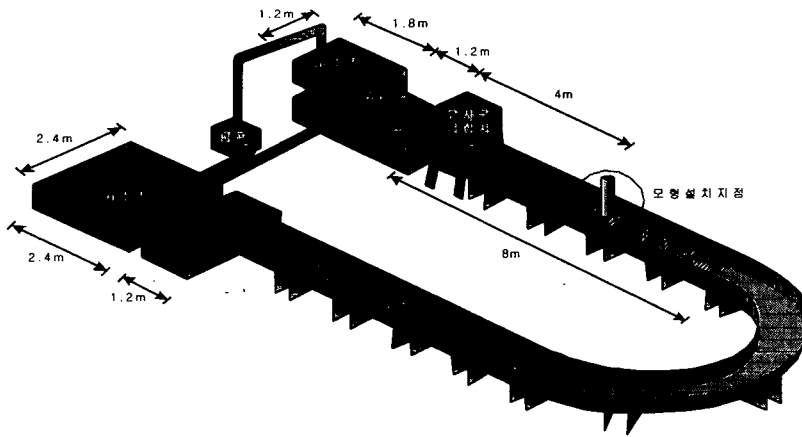


그림 1. 수리모형 실험장치

유속과 수심을 변화시켜 접근수심 및 Fr 수 변화에 따른 국부세굴심을 측정하였으며, 중앙입경 $d_{50}=0.2, 0.44, 0.47, 0.56, 0.59$, 기하학적 표준편차 $\sigma_g(=\sqrt{d_{84.1}/d_{15.9}})=1.00, 1.29, 1.40, 1.59, 1.63$ 인 유사를 두께 15cm, 길이 6m로 포설하여 하상재질의 입도분포에 따른 국부세굴심을 측정하였다.

접근유속은 3차원 유속계인 ADV(Acoustic Doppler Velocimeter)를 이용하여 교각 전면부에서 측정하였으며, 국부세굴심은 잠망경의 원리를 이용한 세굴심 측정장치를 이용하여 1mm의 하상변동이 없을 때까지 실시간으로 측정하였다.

3. 다중회귀분석에 의한 세굴심 예측 및 고찰

현재까지 국부세굴심 예측식에 사용되는 주요한 수리학적 및 기하학적 인자는 물의 밀도(ρ), 물의 동점성계수(ν), 평균유속(V), 교각 상류에서의 수심(y), 유사 수중밀도(ρ_s), 유사 중앙입경(d_{50}), 유사 기하학적 표준편차(σ_g), 중력가속도(g), 교각 폭(b), 교각의 형상인자(ϕ), 교각의 접근각도(α) 등이다.

$$d_s = f(\rho, \nu, V, y, \rho_s, d_{50}, \sigma_g, g, b, \phi, \alpha) \quad (1)$$

유사의 밀도는 일정하고 점성의 영향을 무시한다고 가정하면, 직경이 D 인 균등한 원형교각의 최대세굴심을 식(1)을 이용하여 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d_s}{D} = f\left(Fr, \frac{V}{V_c}, \frac{y}{D}, \frac{D}{d_{50}}, \sigma_g\right) \quad (2)$$

또한, 식(2)는 식(3)과 같이 나타낼 수 있으며, 선형 다중회귀분석을 하기 위하여 식(4)와 같이

양변에 log를 취하였다.

$$\frac{d_s}{D} = K Fr^b \left(\frac{V}{V_c}\right)^c \left(\frac{y}{D}\right)^d \left(\frac{D}{d_{50}}\right)^e \sigma_g^f \quad (3)$$

$$\log\left(\frac{d_s}{D}\right) = a + b\log(Fr) + c\log\left(\frac{V}{V_c}\right) + d\log\left(\frac{y}{D}\right) + e\log\left(\frac{D}{d_{50}}\right) + f\log(\sigma_g) \quad (4)$$

여기서, $a = \log K$ 이며, b, c, d, e, f 는 회귀계수이다

예측된 세굴심은 식(5)와 같은 평균절대백분비오차(Mean Absolute Percent Error, MAPE) 식을 이용하여 실측값과의 차이를 분석하였다.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum \frac{|K_m - K_p|}{K_m} \times 100\% \quad (5)$$

여기서, n 은 자료의 수이며, K_m 은 실측 세굴심, K_p 는 예측 세굴심이다.

통계프로그램인 SPSS를 이용하여 다중회귀분석을 실시하였으며 분석결과, Fr 와 $V/V_c, y/D$ 는 다중공선성이 존재하여 $V/V_c, y/D$ 를 제거하였다. 또한, 이전의 연구(Ettema ; 1980, 이정규 ; 1993, Melville ; 1999)와 Pearson 상관계수 계산결과, 중앙입경 d_{50} 은 세굴심에 큰 영향을 주지 못하였다. 따라서, $V/V_c, y/D, D/d_{50}$ 를 제거한 인자들을 고려한 회귀식은 식(6)과 같다.

$$\frac{d_s}{D} = 3.94 Fr^{1.082} \sigma_g^{-0.276} \quad (6)$$

그림 2는 식(6)에 의한 예측값과 실측값을 도시한 결과이다. 상관계수(R)는 0.889로 나타나 식(6)의 회귀식이 유효성이 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 오차는 8.1%로 예측식의 결과는 실측값과 잘 일치하였다.

본 연구에서 제안된 예측식 식(6)의 정확성 검증을 위해 예측식 유도에 사용되지 않은 이전 연구의 자료를 추가하여 상관성과 오차를 계산하였다.

그림 3은 이전 연구의 자료를 추가한 후의 예측값과 실측값을 도시한 결과이다.

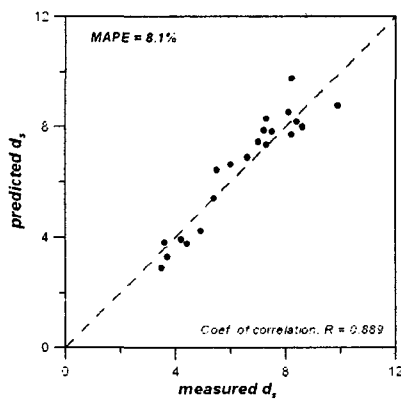


그림 2. 예측값과 실측값 비교

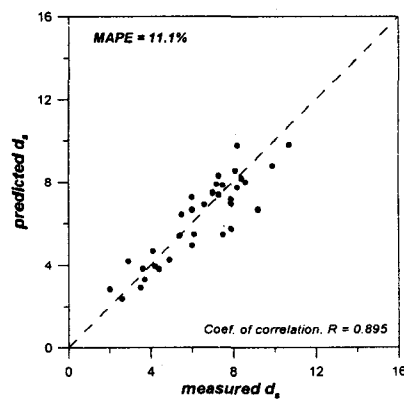
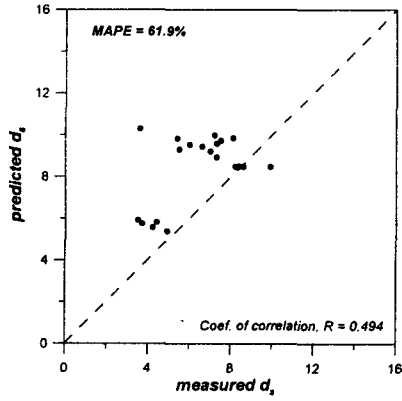


그림 3. 자료추가후 예측식 적용결과

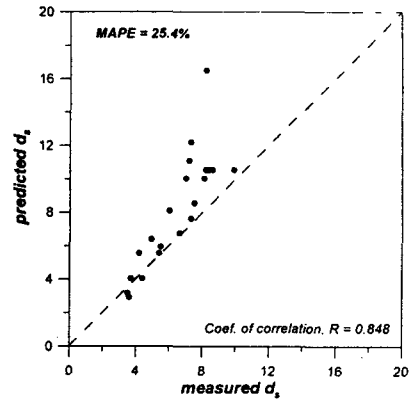
그림 3에서 보는 바와 같이, 상관계수는 0.895, 오차는 11.1%로 나타났으며, 이러한 결과를 보인 예측식의 적용성을 확인하기 위하여 기존의 국부세굴 예측식을 본 연구의 자료에 적용하여 보

왔다.

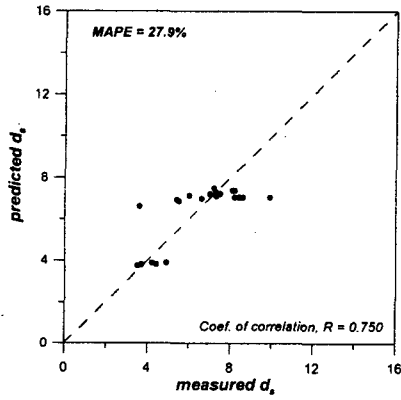
그림 4는 기존의 국부세율 예측식을 본 연구의 실측값에 적용한 결과이다.



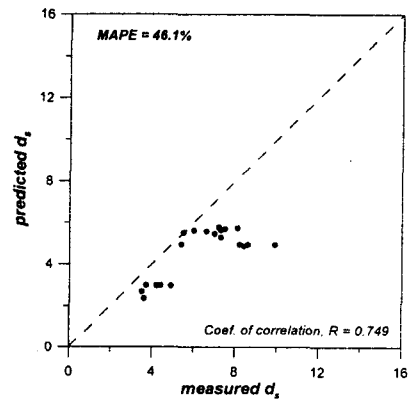
(a) L-T



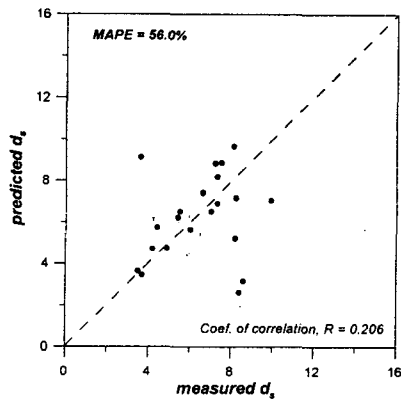
(b) SHE



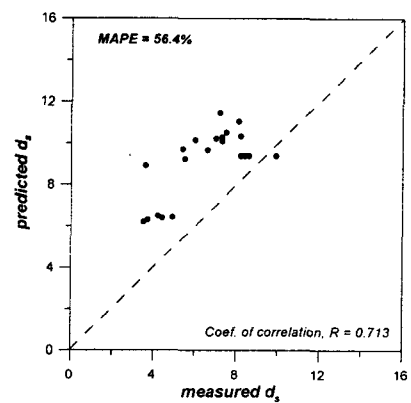
(c) COL



(d) BRE

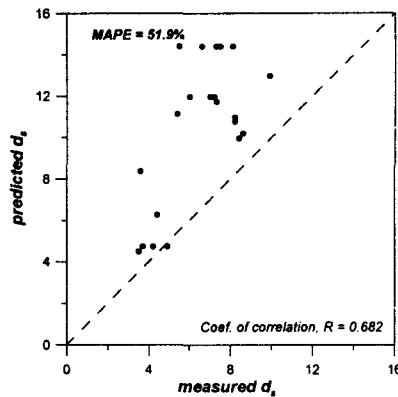


(e) JAF



(f) CSU

그림 4. 기존의 국부세율 예측식 적용결과



(g) MEL

그림 4. 기존의 국부세굴 예측식 적용결과(계속)

그림 4에서 보는 바와 같이, BRE식을 제외하고 대부분의 국부세굴 예측식은 세굴심을 약 25~30%정도 과대산정 하였는데, 이것은 등급화된 하상재질의 자기장압화(self-amoring)의 특성을 고려하지 않았기 때문이다.

BRE식은 한계유속(V_c)을 산정하는데 하상재질의 크기를 고려했기 때문에 다른 식들에 비해 작은 값을 나타낸 것이라고 판단된다.

SHE식, COL식, BRE식, CSU식이 비교적 상관성이 좋게 나타났으며, SHE식, COL식이 오차가 각각 약 25%, 28%로 다른 식에 비해 실측치에 근접한 값을 나타내었다. 이 식들은 간단하나 Fr 수의 함수로 되어 있기 때문에 세굴심은 Fr 의 영향을 크게 받음을 알 수 있다.

따라서, 본 연구에서 제안한 식(6)이 기존의 다른 예측식에 비해 상관성이 높고 오차가 작아 적용성이 좋음을 확인할 수 있었다.

4. 결론

교각 폭, 접근수심, 유속, Fr 수 및 하상재질의 중앙입경, 기하학적 표준편차를 달리한 수리모형실험을 통하여 원형교각 주위에서의 국부세굴심을 예측한 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 세굴심에 영향을 미치는 인자들을 분석한 결과, Fr 와 V/V_c , y/D 는 다중공선성이 존재하였으며, 중앙입경 d_{50} 은 세굴심에 큰 영향을 주지 못하여 V/V_c , y/D , D/d_{50} 를 제거한 후, 다중회귀 분석을 통하여 원형교각에서 입도분포를 고려한 국부세굴심 예측식인 식(6)을 제시하였다. 식(6)에 의한 예측값과 실측값을 비교한 결과, 상관계수(R)는 0.889, 오차는 8.1%로 예측식의 결과는 실측값과 잘 일치하였다.
2. 본 연구에서 제안된 국부세굴심 예측식의 정확성 검증을 위해 예측식 유도에 사용되지 않은 이전 연구의 자료를 추가하여 상관성과 오차를 계산한 결과, 상관계수는 0.895, 오차는

11.1%로 나타났다. 또한, 기존의 국부세굴 예측식을 본 연구의 자료에 적용한 결과, Breusers식을 제외하고 대부분의 국부세굴 예측식은 세굴심을 과대산정하였는데, 이것은 등급화된 하상재질의 자기장갑화(self-armoring)의 특성을 고려하지 않았기 때문이다. Shen-Karaki식, Coleman식, Breusers식, Colorado State Univ.식이 비교적 상관성이 좋게 나타났으며, Shen-Karaki식, Coleman식이 오차가 각각 약 25%, 28%로 다른 식에 비해 실측치에 근접한 값을 나타내었다. 따라서, 본 연구의 입도분포를 고려한 세굴심 예측식이 기존의 다른 예측식에 비해 상관성이 높고 오차가 작아 적용성이 좋음을 확인할 수 있었다.

5. 참고문헌

- 심우배, 임장혁, 조형준, 송재우(2000), “하상재료에 따른 원환보호공법 적용”, 한국수자원학회 학술 발표회 논문집, pp. 604~609.
- 심우배, 강진구, 송재우(2001), “교량상판의 곡면화 및 모따기를 통한 압력흐름하에서의 국부 세굴 심 감소 효과”, 대한토목학회 논문집, 제 21 권, 제 4-B 호, pp. 403~408.
- 이정규(1993), “교각의 세굴에 미치는 Armoring 효과”, 한국수문학회지, 제 26 권, 제 4 호, pp. 107~115.
- Breusers, H. N. C., Nicollet, G., and Shen, H. W.(1997), “Local Scour around Cylindrical Piers”, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 15, pp. 211~252.
- Dey, S., Bose, S. K., and Sastry, G. L. N.(1995), “Clear Water Scour at Circular Piers: A MODEL”, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 12, pp. 869~876.
- Ettema, R.(1976), “*Influence of bed gradation on local scour*”, Report No. 124, University of Auckland School of Engineering.
- Ettema, R.(1980), “*Scour at bridge piers*”, Report No. 216, University of Auckland School of Engineering.
- Melville, B. W. and Chiew, Y.(1999), “Time Scale for Local Scour at Bridge Piers”, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 1, pp. 59~65.
- Melville, B. W. and Coleman, S. E.(1999), “*Bridge Scour*”, Water Resources Publications, LLC.
- Raudkivi, A. J. and Ettema, R.(1985), “Scour at Cylindrical Bridge Piers in Armored Beds”, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 4, pp. 713~731.
- Raudkivi, A. J. and Ettma, R.(1983), “Clear-Water Scour at Cylindrical Pier”, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 109, No. 3, pp. 338~350.
- Richardson, E. V., et al.(1993), “*Evaluating Scour at Bidges*”, Hydraulic Engineering Circular No. 18, FHWA-IP-90-017, February.