



Prediction of time dependent local scour around bridge piers in non-cohesive and cohesive beds using machine learning technique

Choi, Sung-Uk^{a*} · Choi, Seongwook^b · Choi, Byungwoong^c

^aProfessor, Department of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea

^bPh.D. student, Department of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea

^cResearcher, Yeongsan River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Ministry of Environment, Gwangju Korea

Paper number: 21-109

Received: 2 November 2021; Revised: 17 November 2021; Accepted: 17 November 2021

Abstract

This paper presents a machine learning technique applied to prediction of time-dependent local scour around bridge piers in both non-cohesive and cohesive beds. The support vector machines (SVM), which is known to be free from overfitting, is used. The time-dependent scour depths are expressed by 7 and 9 variables for the non-cohesive and cohesive beds, respectively. The SVM models are trained and validated with time series data from different sources of experiments. Resulting Mean Absolute Percentage Error (MAPE) indicates that the models are trained and validated properly. Comparisons are made with the results from Choi and Choi's formula and Scour Rate in Cohesive Soils (SRICOS) method by Briaud *et al.*, as well as measured data. This study reveals that the SVM is capable of predicting time-dependent local scour in both non-cohesive and cohesive beds under the condition that sufficient data of good quality are provided.

Keywords: Time-dependent local scour, Bridge pier, Support vector machines, Machine learning, Cohesive bed

기계학습을 이용한 비점성토 및 점성토 지반에서 시간의존 교각주위 국부세굴의 예측

최성욱^{a*} · 최성욱^b · 최병웅^c

^a연세대학교 건설환경공학과 교수, ^b연세대학교 건설환경공학과 석박사 통합과정, ^c환경부 국립환경과학원 영산강 물환경연구소 환경연구사

요 지

본 논문에서는 기계학습을 이용하여 비점성토 및 점성토 지반에서 시간에 따른 교각주위 국부세굴을 예측하였다. 기계학습 기법으로는 과적합 오차를 유발하지 않는다고 알려진 Support Vector Machines (SVM) 기법이 사용되었다. 비점성토 지반 및 점성토 지반에서 시간에 따라 발달하는 세굴심을 7개 및 9개의 변수를 각각 이용하여 표현하였다. 여러 실험을 통해 얻어진 시계열 자료를 이용하여 개발된 모형을 학습시키고 검증하였다. 계산된 평균절대비오차(MAPE)에 의하면 모형의 학습과 검증이 적절하게 수행된 것으로 나타났다. 실험 결과뿐 아니라 Choi and Cho 공식과 Briaud *et al.*이 제시한 SRICOS 방법에 의한 결과와 비교하였다. 본 연구를 통해 양질의 자료가 충분히 제공되는 경우 SVM 모형이 비점성토 및 점성토 지반 시간의존 국부세굴을 예측할 수 있음을 보여주었다.

핵심용어: 시간의존 국부세굴, 교각, Support vector machines, 기계학습, 점성토 지반

*Corresponding Author. Tel: +82-2-2123-2797
E-mail: schoi@yonsei.ac.kr (S.-U. Choi)

1. 서론

하천에서 유수가 교각과 같은 장애물을 만나면 교각 주위로 가속을 하게 되고 이로 인하여 하상에서 세굴이 진행된다 (Fig. 1). 교각 상류의 전면부에서는 하강류(downflow)가 발생하여 수면에서 바닥 방향으로 흐름이 형성된다. 바닥 근처 전면부에는 말굽형 와(horseshoe vortex)가 발생하여 하상의 토사를 이송하고 교각의 후면부에서는 후류(wake flow)가 만들어진다. 이와 같은 3차원의 복잡한 유동으로 세굴공이 형성된다(Melville and Coleman, 2000). 유동으로 인하여 세굴공 영역에서 밖으로 이송되는 유수량과 하상에서 세굴공 영역으로 이송되는 유수량의 수지에 따라 세굴이 계속 진행되던가 아니면 평형상태를 유지하게 된다.

모래와 같은 비점성토 지반에서 세굴심은 유사이송의 여부에 따라 정적세굴(clear water scour)과 동적세굴(live bed scour)로 구분된다. 홍수가 시작되면서 유속이 작은 상태에서는 상류 하도에 유사이송이 발생하지 않으며 이를 정적세굴이라 한다. 정적세굴 상태에서 세굴공에 퇴메움은 발생하지 않으며, 시간이 경과함에 따라 세굴심은 최대세굴심에 도달한다. 그러나 유속이 점차 증가하면서 상류 하도에 유사이송이 발생하여 세굴공에 유사를 공급하고 하상형상(bedform)이 유과하면서 세굴심은 진동하게 된다. 동적세굴에서 시간에 따른 세굴심의 평균값을 평형세굴심(equilibrium scour depth)이라고 한다. 일반적으로 평형세굴심은 최대세굴심의 약 90%인 것으로 보고되고 있다(Raudkivi and Ettema, 1983). 기존에 제시된 세굴심 공식은 홍수량이 장기간 지속된다는 가정 하에 제시되었으므로 실제 현장 적용에서는 세굴심을 과대 산정하는 것으로 알려져 있다(Briaud, 2004). 따라서 시

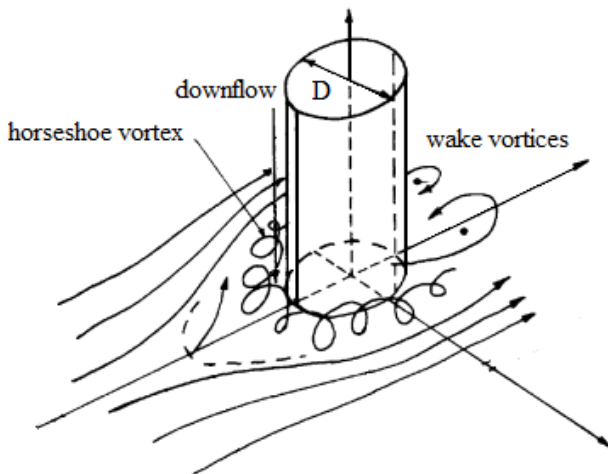


Fig. 1. Local scour around bridge pier

간의존 국부세굴의 예측을 통하여 세굴심 공식을 현장 조건에 적용했을 때 시간에 따른 오차를 파악할 수 있다.

지반이 모래가 아닌 점성토인 경우에 교각주위 국부세굴 문제는 한층 더 복잡해진다. 일반적으로 입자의 직경이 0.004 mm 이하인 경우 점토라고 하는데, 점토는 입자의 크기가 이보다 큰 실트 혹은 모래와는 달리 점성을 고려해야 한다. 점토는 대부분 납작한 형태를 보이며 입자 표면에 전하를 띤다. 점토와 같은 미세 입자의 초기 거동은 중력과 점성력에 의해 결정되는데, 점토는 분자 단위의 물리화학적 인력에 의한 응집력이 중력보다 중요하게 된다. 점토 지반의 교각주위 국부세굴을 고려하기 위해서는 지반의 전단응력을 고려해야 하는데 이에 관한 연구는 많이 수행되지 않은 것으로 파악되고 있다(Briaud *et al.*, 1999).

과거 교각주위 국부세굴에 관한 연구는 실내 실험을 통해 경험식을 제안하거나(Melville and Coleman, 2000) 3차원 계산유체동역학(computational fluid dynamics)을 이용하여 세굴현상을 규명하거나 모의하는 것이(Kirkil *et al.*, 2009; Baranya *et al.*, 2012) 주를 이루었다. 경험 공식의 경우, 개발에 사용되었던 자료에 적용될 때 예측 능력이 우수하지만 다른 자료에 대해서는 예측 능력이 저하된다. 그리고 경험공식은 세굴심을 상당히 과대 산정하는 것으로 알려져 있는데(Choi *et al.*, 2015) 이는 설계에 있어 안전상의 이유인 것으로 판단된다. 컴퓨터 수치모의는 세굴공의 발생기작 등을 규명하는데 기여하였으나 아직까지 실제 하천에서 발생하는 세굴 현상을 모의할 수 있는 범용적인 방법이 제시되지는 않은 상황이다. 따라서 기계학습과 같은 새로운 방법을 적용하여 교각주위에서 시간에 따라 발생하는 세굴심의 발달과정을 예측하고 실제 문제의 적용성을 검토해볼 필요가 있다.

과거 기계학습을 이용한 교각주위 국부세굴에 관한 연구는 다음과 같다. Bateni *et al.* (2007b)은 Bayesian neural network 모형이 기존의 경험식에 비하여 비점성토 지반에서 평형세굴심을 더 잘 예측하는 것을 보였다. Bateni *et al.* (2007a)은 ANN 모형과 ANFIS 모형을 이용하여 비점성토 지반의 평형세굴심을 예측하였는데 ANN 모형의 예측 성능이 더 우수함을 보였다. Firat (2009)도 ANFIS 모형이 기존의 경험식보다 비점성토 지반의 평형세굴심을 더 잘 예측하는 것을 보였다. 그 밖에 시간의존 국부세굴 예측에 관한 연구로는 Hong *et al.* (2012), Choi and Choi (2016), Pandey *et al.* (2017) 등이 있다.

교각주위 국부세굴에 대한 국내 연구 현황은 다음과 같다. Lee *et al.* (2009)은 인공신경망과 군집분석을 결합하여 비점성토 지반의 교각주위 국부세굴 예측모형을 제시하였다. Kim *et al.* (2014)은 GEP 기법을 이용하여 비점성토 지반의 교각

주위 국부세굴을 예측하는 모형을 개발하였다. Kim and Park (2014)은 LES를 이용하여 비점성토 기반 군말뚝 주변의 세굴 현상에 대하여 3차원 수치모의를 수행하였다. Lee and Oh (2018)는 하강류 제어를 통해 비점성토 기반의 교각주위 국부세굴을 감소시키기 위하여 실내실험을 실시하였다. 국내에서도 교각주위 국부세굴에 관한 연구는 실험, 인공지능 기법, 그리고 수치모의 등을 통해 활발하게 진행되어 왔으나, 시간의존 교각세굴 및 점성토 기반의 세굴 현상에 대해서는 연구 사례가 거의 없는 것으로 나타났다.

본 연구의 목적은 기계학습 기법을 이용하여 교각주위 국부세굴의 시간에 따른 발달과정을 예측하는 것이다. 이를 위하여 Support Vector Machines (SVM)을 사용하여 비점성토 및 점성토 기반의 교각세굴에 관한 기계학습 모형을 구축하였다. 기존 문헌에 있는 실험자료를 이용하여 모형을 학습시키고 검증하였다. Choi and Choi (2016) 공식과 비교하여 점성토 기반 교각세굴의 특성을 설명하였고, Briaud *et al.* (2004)이 제시한 SRICOS 방법에 의한 결과와 비교를 수행하였다.

2. 교각주위 국부세굴

일반적으로 비점성토 기반에서 교각주위 국부세굴에 의한 평형세굴심은 흐름, 하상토 입자, 그리고 교각형상의 함수이다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$d_{sc} = fn \text{ (flow, sediment, pier geometry)} \quad (1)$$

여기서 흐름에 관한 변수는 물의 밀도, 물의 점성계수, 유속, 수심, 중력가속도, 그리고 하상형상과 관련한 보정계수이다. 하상토와 관련된 변수는 입자의 중앙입경, 입도분포의 표준편차, 하상토 초기운동에 관한 한계유속을 포함한다. 그리고 교각과 관련된 변수는 교각의 폭, 교각형상 보정계수, 그리고 접근각이다. 적절한 가정을 통하여 위의 식을 간단하게 표현하면 다음과 같다(Choi *et al.*, 2015).

$$d_{sc} = f(V, y, d, V_c, D) \quad (2)$$

여기서 V = 평균유속, y = 수심, d = 하상토 입자의 직경, V_c = 하상토의 초기운동과 관련된 한계유속, 그리고 D = 교각의 폭 혹은 원형교각의 직경이다.

점성토 기반의 경우 위에 제시된 세굴심 관련 관계식이 수정되어야 한다. 우선 점토와 같은 세립자는 일단 유동에 의해

연행되면 다시 바닥에 퇴적되기 어려우므로 동적세굴은 발생하지 않는다. 따라서 Eq. (2)에서 평형세굴심 d_{sc} 대신 최대세굴심 d_{max} 을 사용한다. 한편, 점성토의 경우, 바닥에서 초기운동을 위한 한계유속을 구하기 어렵기 때문에 하상의 전단응력 (τ_s)을 도입하면 편리하다. 그리고 점성토 기반의 공학적 특성에 점토함유량(clay content, C_p)과 함수량(water content, W_c)이 중요한 역할을 한다. 이와 같은 사항을 고려하여 Eq. (2)를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$d_{max} = f(V, y, d, D, C_p, W_c, \tau_s) \quad (3)$$

Debnath and Chaudhuri (2010)는 Eq. (3)의 무차원 형태로 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$\frac{d_{max}}{D} = f\left(\frac{V}{\sqrt{gD}}, \frac{y}{D}, \frac{d}{D}, C_p, W_c, \frac{\tau_s}{\rho V^2}\right) \quad (4)$$

위에서 V/\sqrt{gD} = 교각 Froude수(F_p), y/D = 무차원 접근수심, d/D = 무차원 입자 직경, 그리고 $\tau_s/(\rho V^2)$ = 무차원 바닥 전단응력이다. Ettema *et al.* (2006)은 교각 Froude수가 교각 뒷면 후류의 와(vorticity)와 밀접한 관계가 있음을 보였다.

적절한 가정을 통하여 위의 Eq. (4)를 더욱 간략화시킬 수 있다. 비점성토 기반의 국부세굴에 대하여 정적세굴에서 $D/d > 50$ 인 경우(Ettema, 1980) 그리고 동적세굴의 경우(Chiew, 1984) 하상토 입자의 크기가 세굴심에 영향을 주지 않음을 보인다. Debnath and Chaudhuri (2010)도 하상토 입자의 크기가 점성토 기반의 교각주위 국부세굴에 영향을 미치지 않는다고 가정하였다. 또한, $y/D > 2.6$ 인 비점성토 기반의 경우(Melville and Sutherland, 1988)와 $y/D > 2.0$ 인 점성토 기반의 경우(Briaud, 2004), 수심은 국부세굴에 영향을 주지 않는 것으로 확인되었다. 따라서 Eq. (4)에서 하상토 입자의 크기 및 접근 흐름의 수심을 무시하면 다음과 같다.

$$\frac{d_{max}}{D} = f\left(\frac{V}{\sqrt{gD}}, C_p, W_c, \frac{\tau_s}{\rho V^2}\right) \quad (5)$$

위의 식에 따르면 무차원 최대세굴심은 4개의 무차원수의 함수로 표현이 가능하다.

시간의존 국부세굴에 대해서는 위의 변수 외에도 시간(t) 및 평형세굴심 도달시간(t_c)을 고려해야 한다. 따라서 비점성토 및 점성토 기반의 시간의존 국부세굴에 관한 식은 각각 다음과 같다.

$$d_s(t) = f(V, y, d, V_c, D, t, t_e) \tag{6}$$

$$d_s(t) = f(V, y, d, D, C_p, W_c \tau_s, t, t_e) \tag{7}$$

점성토 기반 국부세굴의 경우 평형세굴심이 정의되지 않으므로 t_e 를 최대세굴심 도달시간으로 보아도 될 것이다.

3. SVM

Vapnik (1995)은 통계적 학습이론에 근거한 구조적 위험도 최소화 기법을 이용하여 SVM을 개발하였다. SVM은 기계학습 기법 중의 하나이며 주로 패턴인식과 회귀분석에 사용된다. 특정 자료가 두 범주 중 하나에 속할 때 SVM은 학습한 자료에 근거하여 특정 자료가 어느 범주에 속하는지 판단 가능한 모형을 만들 수 있다. 이 때 만들어진 모형은 자료 공간에서 경계로 표현되며 SVM은 가장 넓은 경계를 찾는 알고리즘을 제공한다. SVM 알고리즘에 대한 구체적인 내용은 Vapnik (1995)과 Smola (1996)를 참고하기 바란다.

SVM 모형에서 사용되는 매개변수는 서포트 벡터의 허용 오차의 비율에 관한 값인 C 와 커널 함수에서 사용하는 값인 k 가 있다. 여기서 커널 함수는 SVM이 비선형 관계의 자료를 분석하기 위하여 사용하는 매핑 함수로 다항식, Radial Basis Function (RBF), Gauss, 그리고 Gauss RBF 등이 있다. 매개변수와 커널 함수를 선정하기 위하여 0.1-10의 범위의 매개변수와 다양한 커널 함수에 대하여 각각 학습과 검증을 수행하고 최적의 결과를 적용하였다. 본 연구에서는 Choi *et al.* (2017)의 연구성과에 근거하여 Eqs. (6) and (7)에 제시된 차원량 변수를 사용하였으며, 각 변수들은 0과 1 사이가 되도록 크기를 조절하였다.

4. 예측 결과

4.1 비점성토 기반 국부세굴 예측

점성토 기반 국부세굴의 예측에 앞서 SVM 모형을 이용하여 시간에 따른 비점성토 기반 국부세굴을 예측하였다. 이를 위한 SVM 모형은 Eq. (6)을 사용하며 총 7개의 변수가 필요하게 된다. SVM 모형의 학습과 검증을 위하여 2개의 실험으로부터 전체 18개 시계열 자료를 사용하였다. 사용된 자료의 출처는 Yanmaz and Altinbilek (1991)과 Melville and Raudkivi (1996)이다. 모형의 검증을 위해서 Yanmaz and Altinbilek (1991)의 실험에서 2개의 시계열 자료를 선택하였다. 학습과 검증에 사용된 자료에서 변수의 범위는 각각 Tables 1 and 2에 제시하였다. 사용된 검증 자료에서 변수의 범위가 학습에 사용된 자료에서 변수의 범위에 포함되는 것을 알 수 있다.

Figs. 2(a) and 2(b)는 ANN과 SVM을 사용하여 각각의 모형을 학습한 결과이다. ANN 모형과 SVM 모형의 Mean Absolute Percentage Error (MAPE)가 각각 10.95%와 13.60%로 나타나 두 모형 모두 학습 결과가 우수한 것을 알 수 있다. 그러나 ANN 모형이 SVM 모형보다 학습에 의한 오차가 더 작은 것은 SVM이 최적화 문제 설정시 여유변수(slack variable)을 도입하기 때문으로 보인다.

Figs. 3(a) and 3(b)는 각각 ANN 모형과 SVM 모형의 검증 결과이다. ANN 모형과 SVM 모형의 MAPE가 각각 6.01%와 4.36%로 두 모형 모두 검증 결과가 우수한 것으로 나타났다. 그럼에서 SVM 모형의 검증 결과가 약간 더 우수한 것으로 보이나 이 차이는 유의미하지 않은 것으로 판단된다. ANN 모형의 검증 결과에서 과적합(overfitting)에 의한 오차는 나타나지 않은 것으로 보인다.

SVM 모형에 의한 검증 결과를 Fig. 4에 시계열 자료로 제시하였다. Figs. 4(a) and 4(b)는 각각 Yanmaz and Altinbilek (1991)의 실험에서 YA24와 YA37이다. SVM 모형이 시간에 따라 발달하는 세굴심을 잘 예측하는 것을 알 수 있다. 그림에

Table 1. Range of variables for training SVM model for time dependent pier scour in the non-cohesive bed

	V (m/s)	V_c (m/s)	D (m)	y (m)	d (mm)	t_e (min)	d_{se} (m)
min	0.263	0.275	0.03	0.085	0.8	238	0.06
max	0.375	0.345	0.081	0.2	1.07	2,018	0.16

Table 2. Range of variables for validating SVM model for time dependent pier scour in the non-cohesive bed

	V (m/s)	V_c (m/s)	D (m)	y (m)	d (mm)	t_e (min)	d_{se} (m)
min	0.308	0.293	0.047	0.121	0.8	292	0.08
max	0.332	0.333		0.135	1.07	325	0.09

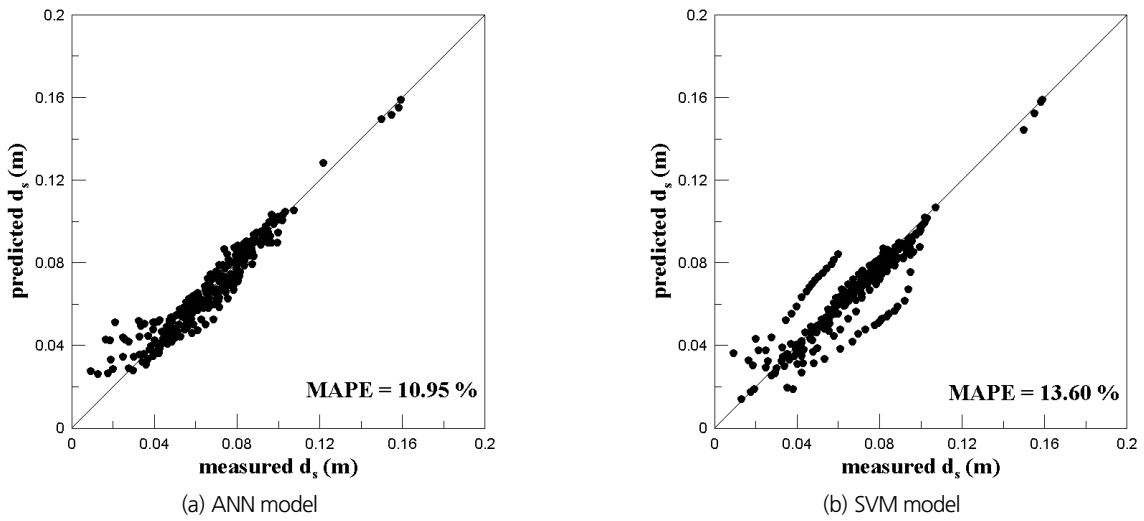


Fig. 2. Training of machine learning techniques for time-dependent pier scour in the non-cohesive bed

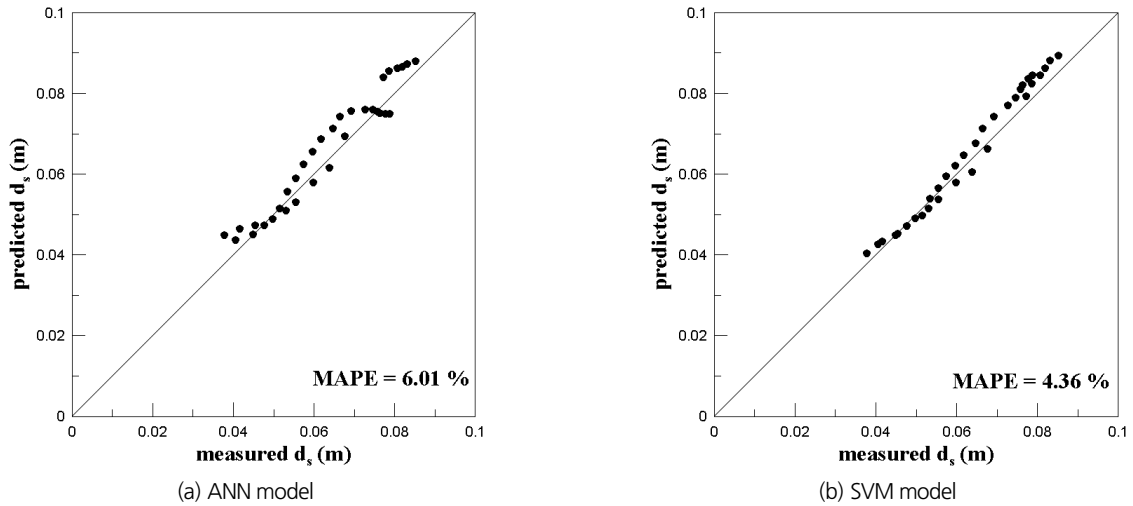


Fig. 3. Validation of machine learning techniques for time-dependent pier scour in the non-cohesive bed

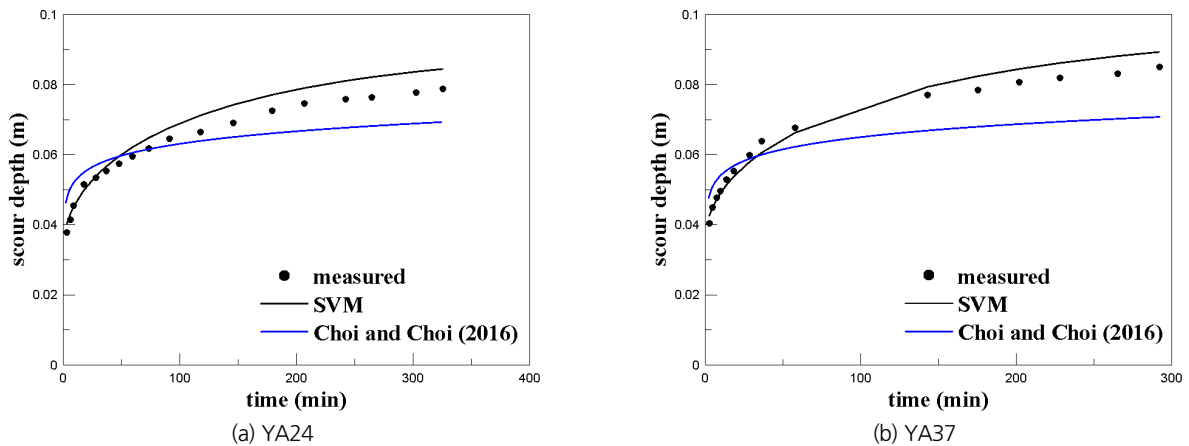


Fig. 4. SVM prediction of time-dependent pier scour in the non-cohesive bed

Choi and Choi (2016)에 제시된 공식을 이용하여 예측된 결과를 함께 도시하였다. Choi and Choi (2016)는 비점성토 지반의 시간의존 국부세굴 공식인 Sumer *et al.* (1992) 공식, Melville and Chiew (1999) 공식, 그리고 Lanca *et al.* (2013) 공식을 비교하였다. Choi and Choi (2016)는 기존에 제시된 세 공식이 공식 개발에 사용되었던 자료를 예측하는데 성공적이거나 다른 자료에 적용하면 예측 능력이 떨어지는 것을 지적하였다. Choi and Choi (2016)는 기존 공식의 단점을 보완하여 다음과 같은 비점성토 지반의 시간의존 국부세굴 공식을 제시하였다.

$$\frac{d_s}{d_{se}} = \exp\left\{0.065\left(\frac{V}{V_c}\right)^{0.35}\left(\frac{y}{D}\right)^{0.19}\ln\left(\frac{t}{t_e}\right)\right\} \quad (8)$$

여기서 t_e 는 평형세굴심 도달시간으로 단위는 min.이며 다음 식으로 구한다.

$$t_e = 18.94\left(\frac{V^2}{V_c D}\right)^{-1}\left(\frac{y}{D}\right)\left(\frac{D}{d}\right)^{2.6} \text{ for } y/D > 6 \quad (9a)$$

$$t_e = 0.36\left(\frac{V^2}{V_c D}\right)^{-1}\left(\frac{y}{D}\right)^{0.52}\left(\frac{D}{d}\right)^{2.6} \text{ for } y/D \leq 6 \quad (9b)$$

Choi and Choi (2016) 공식에 의한 결과와 비교하면 Yanmaz and Altinbilek (1991)의 두 실험 모두 세굴이 서서히 진행되는 것으로 예측하고 있다. Choi and Choi (2016)에 따르면 Yanmaz and Altinbilek (1991)의 실험에서 평형세굴심에 도달하는 시간이 다른 실험 자료와 비교해 볼 때 매우 작아 실험이 평형상태에 도달하기 전에 종료되었다고 추론하였다. Yanmaz and Altinbilek (1991)에 따르면 YA24와 YA37의 평형세굴심 도달시간(t_e)은 각각 325분과 292분이며 Eq. (9)에 의하면 각각 1,650분과 2,990분이다.

4.2 점성토 지반 국부세굴 예측

다음으로 점성토 지반의 국부세굴을 예측하기 위하여 SVM 모형을 구축하였다. Eq. (7)을 사용하여 SVM 모형을 구축하였는데 총 9개의 변수를 사용하였다. SVM 모형의 학습을 위하여 Table 3의 자료를 이용하였다. 모형의 학습을 위하여 5개의 실험으로부터 총 39개의 시간의존 국부세굴 시계열자료를 사용하였다. 5개 실험의 출처는 Debnath and Chaudhuri (2010), Ting *et al.* (2001), Rambabu *et al.* (2003), Hosny (1995), 그리고 Najafzadeh and Barani (2014) 이다. 모형의 검증에 위하여 이들 5개 실험의 시계열 자료에서 1개씩을 선택하였다. Table 4에 모형의 검증에 사용된 자료에서 변수의 범위를 제시하였다. Debnath and Chaudhuri (2010)와 Ting *et al.* (2001)의 경우, 최대세굴심 도달시간이 각각 36-62 시간과 95-227.3 시간인데 비하여 나머지 실험의 경우는 4-5 시간으로 보고되어 평형상태 도달 이전에 실험이 종료된 것으로 추측할 수 있다. 본 연구에서 이와 같은 자료를 포함시킨 것은 점성토 지반의 교각세굴에 대한 자료가 충분하지 않기 때문이다.

Figs. 5(a) and 5(b)에 SVM 모형에 의한 학습 및 검증 결과를 각각 도시하였다. 모형의 학습 및 검증에 의한 MAPE는 각각 8.99%와 10.31%이다. 그림을 통하여 모형의 학습과 검증이 성공적으로 수행되었음을 알 수 있다. 모형의 검증 결과에 따르면 ANN 등 기계학습에서 종종 보이는 과적합에 의한 오차는 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

Fig. 6(a)는 Debnath and Chaudhuri (2010)의 실험자료에 대한 검증 결과를 시계열로 도시한 것이다. Debnath and Chaudhuri (2010)의 실험에서 중앙입경은 $d_{50} = 0.182$ mm인 모래와 점토가 혼합된 점성토를 사용하였으며 최대세굴심은 0.12 m이고 평형상태 도달시간은 $t_e = 36$ hr 이다. 그림에 의하면 SVM 모형이 점성토 지반의 시간에 따른 세굴심의 변화를 잘 모의하는 것을 알 수 있다. 한편, 그림에 Eq. (8)의 결과를 함께 도시하였다. 여기에서 평형상태 도달시간은 실험에 의한 값을 사용하였다. Eq. (8)은 비점성토 지반에서 시간에 따

Table 3. Range of variables for training SVM model for time dependent pier scour in the cohesive bed

	V (m/s)	D (m)	y (m)	d (mm)	τ_s (KPa)	C_p (%)	W_c (%)	t_e (hr)	d_{se} (m)
min	0.141	0.025	0.25	0.0055	1.9	2	12.3	4	0.014
max	0.608	0.21	0.6	0.182	35.6	52	32.94	227.3	0.244

Table 4. Range of variables for validating SVM model for time dependent pier scour in the cohesive bed

	V (m/s)	D (m)	y (m)	d (mm)	τ_s (KPa)	C_p (%)	W_c (%)	t_e (hr)	d_{se} (m)
min	0.183	0.075	0.25	0.0055	1.1	2	20	4	0.056
max	0.585	0.15	0.4	0.182	21.1	52	32.94	131.1	0.161

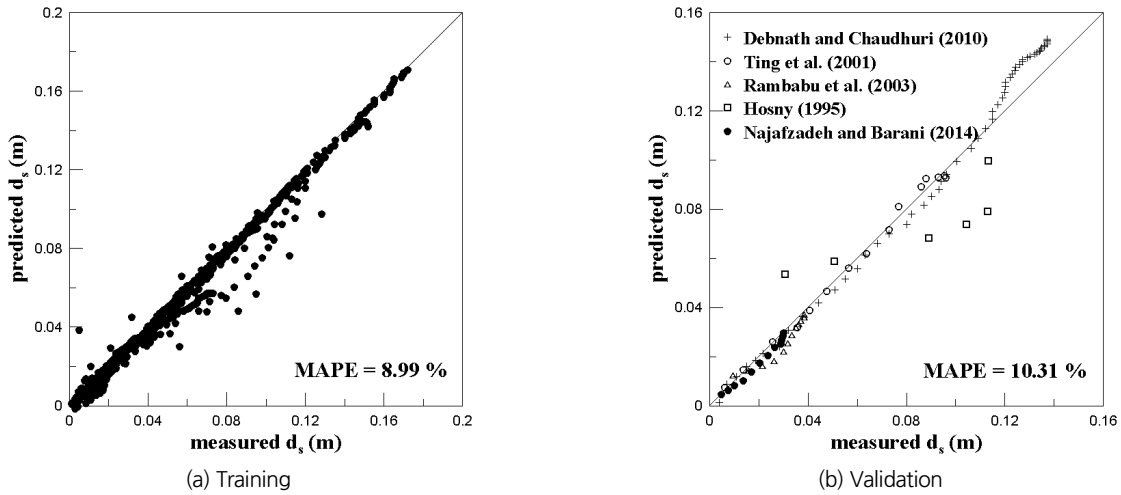


Fig. 5. Training and validation of the SVM model for time-dependent pier scour in the cohesive bed

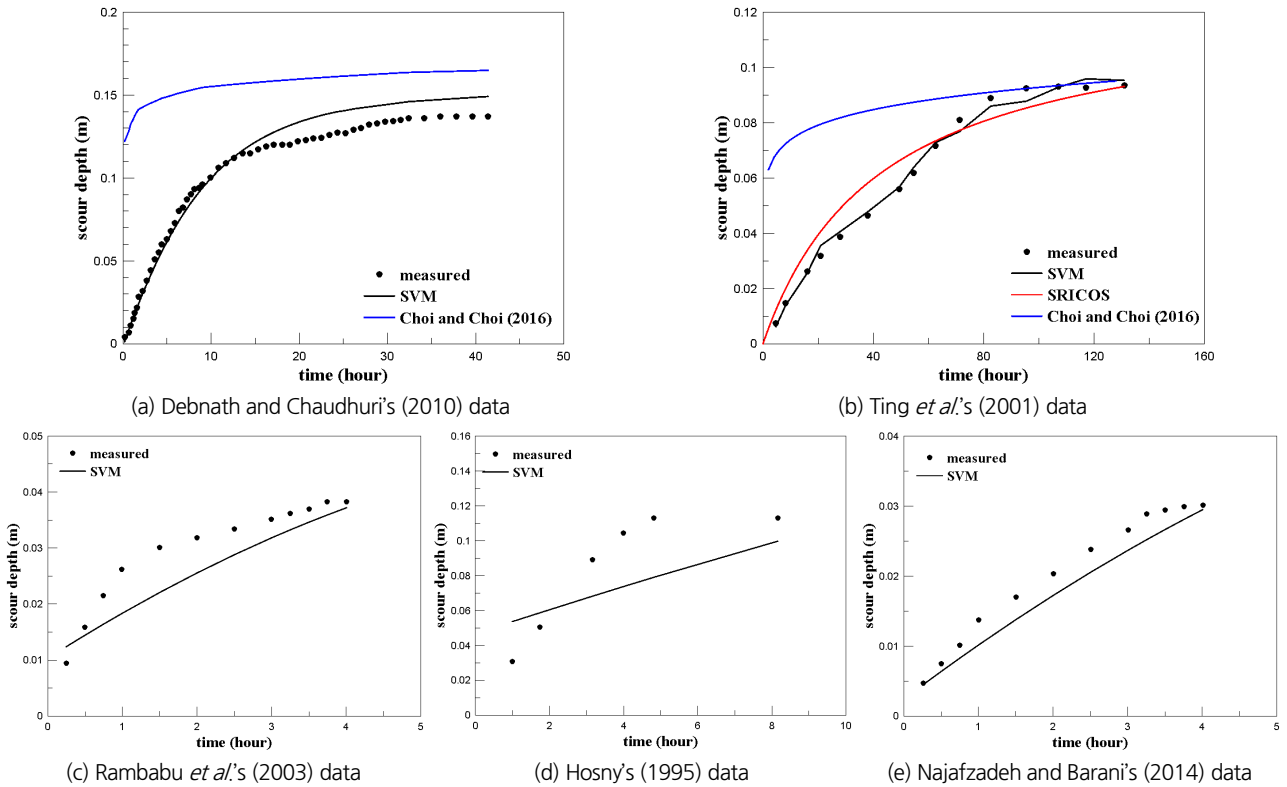


Fig. 6. SVM prediction of time-dependent pier scour in the cohesive bed

큰 세굴심의 변화를 나타내는데 점성토 지반의 국부세굴과 구별되는 큰 차이를 보여준다. 즉, 비점성토 지반에서 국부세굴은 점성토 지반에서 보다 빨리 진행되어 평형상태에 도달하는데 점성토 지반에서는 토질입자의 점성력 때문에 세굴이 훨씬 더디게 진행되는 것을 알 수 있다. 이는 Briaud (2004)가 지적한 내용과 일치한다.

Ting *et al.* (2001)의 실험 자료에 대한 SVM 모형의 검증 결과를 시계열로 도시한 것이 Fig. 6(b)이다. Ting *et al.* (2001)은 실험에서 중앙입경이 $d_{50} = 0.0062$ mm인 점토를 사용하였으며 최대세굴심은 0.161 m이고 평형상태 도달시간은 $t_e = 131.1$ hr이다. 그림에 따르면 SVM 모형이 Ting *et al.* (2001)의 실험을 잘 재현하는 것을 알 수 있다. 그림에는 Choi and

Choi (2016)가 제시한 비점성토 지반에서의 시간의존 국부세굴 결과를 도시하였는데, 전술한 바와 같이 비점성토와 점성토 지반에서의 국부세굴의 특성을 잘 보여주고 있다.

Fig. 6(b)에 Briaud *et al.* (2004)이 제시한 SRICOS 방법에 의한 점성토 지반의 시간의존 국부세굴 결과를 함께 도시하였다. Briaud *et al.* (2004)은 점성토 지반에서 시간에 따른 교각 주위 국부세굴을 예측하기 위해 SRICOS 방법을 제시하였다. SRICOS 방법에 의한 점성토 지반에서 시간에 따른 세굴심은 다음과 같다.

$$d_s(t) = \frac{t}{\dot{d}_s + \frac{t}{d_{\max}}} \quad (10)$$

여기서 d_{\max} 는 최대세굴심이며 다음 식으로 주어진다.

$$d_{\max} = 0.18R_p^{0.635} \quad (11)$$

위의 식에 의하면 점토지반 교각주위 최대세굴심은 교각 레이놀즈수만의 함수이다. Eq. (10)에서 \dot{d}_s 는 초기 세굴률(initial scour rate)을 의미한다. 초기 세굴률은 일반적으로 최대 전단응력의 함수로서 실제 현장에서 채취한 시편(76.2 mm Shelby tube sample)을 가지고 실내 실험을 통하여 구할 수 있다(Briaud *et al.*, 2004). Briaud *et al.* (2004)은 Porcelain 점토(PI = 14.1%, Su = 12.5 kN/m²)에 대하여 다음과 같은 관계식을 제시하였다.

$$\dot{d}_s = \frac{(5.54\tau_{\max} - 2.77)}{(\tau_{\max} + 0.875)} + 0.178\tau_{\max} - 0.0809 \quad (12)$$

여기서

$$\tau_{\max} = 0.094\rho V^2 \left(\frac{1}{\log R_p} - \frac{1}{10} \right) \quad (13)$$

여기서 $R_p = VD/\nu$ 로서 교각 레이놀즈수이다. Ting *et al.* (2001) 실험에서 위에 제시된 Porcelain 점토를 사용하였으므로 Eq. (12)의 최대전단응력과 초기 세굴률을 사용하여 시간에 따른 세굴심의 발달을 구할 수 있다. Fig. 6(b)에 의하면 SRICOS 방법에 의한 예측 결과가 실측치 및 SVM 모형에 의한 결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 SRICOS 방법을 이용하여 시간에 따른 점성토 지반 세굴심을 예측하기 위해서는 실험을 통해 Eq. (12)와 같은 관계식이 필요하게 된다.

Figs. 6(c), 6(d), and 6(e)에 Rambabu *et al.* (2003), Hosny (1995), 그리고 Najafzadeh and Barani (2014)의 실험 자료를

이용한 모형의 검증 결과를 각각 제시하였다. 전술한 바와 같이 이들 실험은 세굴심이 평형상태에 도달하기 전에 종료된 것으로 추측된다. 그림에서 실험 자료와 SVM 모형에 의해 예측된 결과가 대체적으로 맞는 것을 알 수 있다. 그러나 SVM 모형에 의한 예측 결과가 세굴심의 발달되는 과정을 정확히 예측하지 못하는 것은 학습 자료에서 평형상태 도달시간에 대한 규모가 크기 때문으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 기계학습 기법을 이용하여 비점성토 및 점성토 지반에서 시간에 따라 발달하는 교각주위 국부세굴을 예측하였다. 기계학습 방법으로는 ANN 모형과 같이 과적합 오차를 유발하지 않는 SVM 모형을 사용하였다.

먼저, SVM 모형을 이용하여 비점성토 지반에서 시간에 따른 세굴심의 발달을 예측하였다. 비점성토 지반의 세굴심을 유속, 하상토의 초기거동을 위한 한계유속, 교각의 폭, 수심, 하상토 직경, 시간, 그리고 평형상태 도달시간의 함수로 표현하였으며, 차원량의 변수를 그대로 사용하였다. SVM 모형의 학습과 검증을 위하여 2개의 실험으로부터 전체 18개 시계열 자료를 사용하였다. 계산된 MAPE 결과를 통해 SVM 모형의 학습과 검증이 성공적으로 진행되었음을 확인하였다. ANN 모형과 비교하여 동일한 수준의 정확도의 학습이 이루어졌고, 검증 결과의 정확도는 SVM 모형이 약간 더 우수한 것으로 나타났다. 또한, Choi and Choi (2016)의 공식과의 비교를 통하여 SVM 모형이 비점성토 지반에서 세굴심의 발달을 더 잘 예측하는 것으로 나타났다.

다음으로 SVM 모형을 이용하여 점성토 지반에서 시간에 따른 세굴심의 발달을 예측하였다. 점성토 지반의 세굴심을 유속, 교각의 폭, 수심, 하상토 직경, 점토함유량, 함수비, 시간, 그리고 평형상태 도달시간의 함수로 나타내었고 차원량의 변수를 사용하였다. 5개의 실험으로부터 전체 44개 시계열 자료를 이용하여 SVM 모형의 학습과 검증을 수행하였다. 계산된 MAPE로부터 SVM 모형의 학습과 검증이 성공적으로 수행되었음을 확인하였다. Choi and Choi (2016) 공식과의 비교를 통하여 점성토 지반의 교각세굴이 비점성토 지반에 비해 훨씬 서서히 진행되는 것을 알 수 있었다. 또한, Ting *et al.* (2001)의 실험 자료에 대한 검증 결과가 Briaud *et al.* (1999)이 제시한 SRICOS 방법에 의한 결과와 잘 일치하는 것을 확인하였다.

이상에서 SVM 모형이 비점성토 및 점성토 지반에서 시간에 따른 국부세굴을 성공적으로 예측할 수 있음을 보였다. 그

러나 기계학습을 이용하여 교각주위 국부세굴을 예측하기 위해서는 양질의 실험 자료가 많이 필요하므로 보다 강력한 기계학습 기법의 개발을 위해서는 향후 다양한 환경에서 정밀하게 측정된 자료의 확보가 중요하다 할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2021년도 정부의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF2020R1A2B5B01098937)을 받아 수행된 연구입니다. 이에 감사드립니다.

References

- Baranya, S., Olsen, N.R.B., Stoesser, T., and Sturm, T. (2012). "Three-dimensional RANS modeling of flow around circular piers using nested grids." *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, Vol. 6, No. 4, pp. 648-662.
- Batani, S.M., Borghei, S.M., and Jeng, D.S. (2007a). "Neural network and neuro-fuzzy assessments for scour depth around bridge piers." *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 20, No. 3, pp. 401-414.
- Batani, S.M., Jeng, D.S., and Melville, B.W. (2007b). "Bayesian neural networks for prediction of equilibrium and time-dependent scour depth around bridge piers." *Advances in Engineering Software*, Vol. 38, No. 2, pp. 102-111.
- Briaud, J.L. (2004). *Pier and contraction scour in cohesive soils*. NCHRP report No. 516, Transportation Research Board, Washington D.C., U.S.
- Briaud, J.L., Chen, H.C., Li, Y., and Nurtjahyo, P. (2004). "SRICOS-EFA method for complex piers in fine-grained soils." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 130, No. 11, pp. 1180-1191.
- Briaud, J.L., Ting, F.C., Chen, H.C., Gudavalli, 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, pp. 237-246.
- Chiew, Y.M. (1984). *Local Scour at Bridge Piers*. Auckland University, New Zealand.
- Choi, S.U., and Choi, B. (2016). "Prediction of time dependent local scour around bridge piers." *Water and Environment Journal*, Vol. 30, No. 1-2, pp. 14-21.
- Choi, S.U., Choi, B., and Choi, S. (2015). "Improving predictions made by ANN model using data quality assessment: An application to local scour around bridge piers." *Journal of Hydroinformatics*, Vol. 17, No. 6, pp. 977-989.
- Choi, S.U., Choi, B., and Lee, S. (2017). "Prediction of local scour around bridge piers using the ANFIS method." *Neural Computing and Applications*, Vol. 28, No. 2, pp. 335-344.
- Debnath, K., and Chaudhuri, S. (2010). "Bridge pier scour in clay-sand mixed sediments at near-threshold velocity for sand." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 136, No. 9, pp. 597-609.
- Ettema, R. (1980). *Scour at bridge piers*. Report No. 216, School of Engineering, University of Auckland, Auckland, New Zealand.
- Ettema, R., Kirkil, G., and Muste, M. (2006). "Similitude of large-scale turbulence in experiments on local scour at cylinders." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 132, No. 1, pp. 33-40.
- Firat, M. (2009). "Scour depth prediction at bridge piers by Anfis approach." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, Vol. 162, No. 4, pp. 279-288.
- Hong, J.H., Goyal, M.K., Chiew, Y.M., and Chua, L.H. (2012). "Predicting time-dependent pier scour depth with support vector regression." *Journal of Hydrology*, Vol. 468, pp. 241-248.
- Hosny, M.M. (1995). *Experimental study of local scour around circular bridge piers in cohesive soils*. Ph. D. dissertation, Colorado State University, CO, U.S.
- Kim, H.S., and Park, M. (2014). "Three-dimensional computational modeling of scour around pile groups." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 11, pp. 907-919.
- Kim, T., Choi, B., and Choi, S.U. (2014). "Prediction of local scour around bridge piers using GEP model." *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 34, No. 6, pp. 1779-1786.
- Kirkil, G., Constantinescu, G., and Ettema, R. (2009). "Detached eddy simulation investigation of turbulence at a circular pier with scour hole." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 135, No. 11, pp. 888-901.
- Lanca, R.M., Fael, C.S., Maia, R.J., Pego, J.P., and Cardoso, A.H. (2013). "Clear-water scour at comparatively large cylindrical piers." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 139, No. 11, pp. 1117-1125.
- Lee, C.H., Ahn, J.H., Lee, J.H., and Kim, T.W. (2009). "Prediction of scour depth using incorporation of cluster analysis into artificial neural networks." *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 29, No. 2B, pp. 111-120.
- Lee, H.J., and Oh, H.S. (2018). "Analysis on the scour reduction effect by controlling downflow." *Journal of Korean Society of Disaster and Security*, Vol. 11, No. 2, pp. 61-67.
- Melville, B.W., and Chiew, Y.M. (1999). "Time scale for local scour at bridge piers." *Journal of Hydraulic Engineering*, No. 125, No. 1, pp. 59-65.
- Melville, B.W., and Coleman, S.E. (2000). *Bridge scour*. Water Resources Publication, LLC, U.S.
- Melville, B.W., and Raudkivi, A.J. (1996). "Effects of foundation geometry on bridge pier scour." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 122, No. 4, pp. 203-209.
- Melville, B.W., and Sutherland, A.J. (1988). "Design method for local scour at bridge piers." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 114, No. 10, pp. 1210-1226.
- Najafzadeh, M., and Barani, G.A. (2014). "Experimental study of local scour around a vertical pier in cohesive soils." *Scientia Iranica*, Vol. 21, No. 2, pp. 241-250.

- Pandey, M., Sharma, P.K., Ahmad, Z., and Singh, U.K. (2017). "Evaluation of existing equations for temporal scour depth around circular bridge piers." *Environmental Fluid Mechanics*, Vol. 17, No. 5, pp. 981-995.
- Rambabu, M., Rao, S.N., and Sundar, V. (2003). "Current-induced scour around a vertical pile in cohesive soil." *Ocean Engineering*, Vol. 30, No. 7, pp. 893-920.
- Raudkivi, A.J., and Ettema, R. (1983). "Clear-water scour at cylindrical piers." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 109, No. 3, pp. 338-350.
- Smola, A.J. (1996). *Regression estimation with support vector learning machines*. Ph. D. dissertation, Technische Universität München, Germany.
- Sumer, B.M., Christiansen, N., and Fredsøe, J. (1992). "Time scale of scour around a vertical pile." *Proceedings of the 2nd International Offshore & Polar Engineering Conference (Vol. 3)*, ISOPE, San Francisco, CA, U.S.
- Ting, F.C.K., Briaud, J.L., Chen, H.C., Gudavalli, R., Perugu, S., and Wei, G. (2001). "Flume tests for scour in clay at circular piers." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 127, No. 11, pp. 969-978.
- Vapnik, V.N. (1995). *The nature of statistical learning theory*. Springer, New York, NY, U.S.
- Yanmaz, A.M., and Altinbilek, H.D. (1991). "Study of time dependent local scour around bridge piers." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 117, pp. 1247-1268.