한국해안 · 해양공학회논문집/ISSN 1976-8192(Print), ISSN 2288-2227(Online)
Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers 34(5), pp. 169~175, Oct. 2022
https://doi.org/10.9765/KSCOE.2022.34.5.169

파랑에 의한 이중 파일 주변부 국부세굴 특성 분석
Characteristics of Local Scour Around the Double Pile in Waves

오현식* · 이호진**
Hyun Sik Oh* and Ho Jin Lee**

요 지 : 강 하구나 천해역 등 파랑에 의해 영향을 받는 흐름장에서의 세굴은 한 방향 흐름에서의 세굴에 비해 예측이 어렵다. 해저 교량과 같은 원형 파일 주변부에서의 세굴 예측에 있어서 주요 관심사는 최대 세굴의 깊이와 발생 지점이다. 인접한 원형 파일이 2개 이상인 경우 파일 간의 간격과 정렬 방식에 따라 최대 세굴이 발생하는 위치 및 깊이는 단일 파일일 경우와 많은 차이를 나타낸다. 본 논문은 흐름의 크기를 나타내는 무차원 변수로서 KC 수를 산정하고 파일 간격과 흐름의 크기에 따른 상관성을 분석하였다.

핵심용어 : 파랑, 세굴, 수직 원형 파일, KC 수, 파일 간격비.

Abstract : Scour in a flow field affected by waves, such as river estuaries or shallow waters, is more difficult to predict than scour in a currents. The main issue in predicting the scour around circular files, such as undersea bridges, is the maximum scour depth and the point of occurrence. In the case of two or more adjacent circular piles, the location and depth of maximum scour according to the spacing between piles and the arrangement method show a lot of difference compared to the case of a single pile. In this paper, the KC number are calculated as dimensionless variables representing the strength of the flow. And the correlation between pile gap size and relative scour depth was analyzed.

Keywords : waves, scour, vertical circular pile, KC number, piles gap ratio

1. 서 론

최근 교통의 중요성과 공학의 발달과 더불어 교량 시공 능력이 높아짐에 따라 육지와 섬 또는 섬과 섬을 잇는 연륙교와 연도교의 건설이 증가하고 있다. 일반적으로 소규모 교량의 경우, 하부구조를 여러 개의 말뚝에 의해 지지하는 1열 혹은 2열 형태의 교량을 선호하며, 웰빙 트렌드가 사회 전반에 확산됨에 따라 지역 주민의 건강이나 지역 관광 증진을 위해 해안을 따라 해상에 건설되는 '소규모' 보도교 및 해안 자전거 교량 또한 급격히 증가하는 추세이다(거제시 지세포항 및 명사항 보도교, 태안군 물닭섬 해안보도교 등). 경제성 및 미관상의 이유로 복잡한 구조 형식보다는 경제적 측면에서 유리한 종방향의 1열 형상의 단순한 파일 기초가 주로 사용된다.

안정화되어 있는 해상에서의 해저 저면은 계절적 영향으로 인해 침식과 퇴적이 반복되는 주기성을 가지며 오랜 시간에 걸쳐 평형 상태를 유지하게 된다. 하지만 구조물의 존재로 인해 흐름이 바뀌면 주변부 바닥재료의 이탈로 인해 바닥 침식 현상이 발생한다. 세굴(scour)은 이러한 침식 현상을 일컫는 말이며 특히, 구조물에 의한 침식 과정을 국부세굴(local scour)이라 한다. 국부세굴은 구조물의 안정성에 직접적인 영향을 미치는 요인이므로 구조물 시공시 반드시 고려해야 할 사항이며 국부세굴의 크기는 크게 흐름장의 세기와 구조물의 형상에 따라 달라진다.

먼저 세굴은 정상 흐름에서의 수직 파일 주변부 국부세굴, 특히 교각 주변의 세굴에 대한 연구가 그 시초이며 상당히 광범위하게 연구되어왔다. 이에 대한 많은 연구와 경험식들이 Raudkivi and Ettema(1977), Melville and Sutherland(1988), Melville and Chiew(1999), Melville et al.(2000) 등에 의해 수행되었다. 파에 의해 발생하는 세굴은 Sümer와 그의 동료들에 의해 집중적으로 연구되었으며(Sümer and Fredsøe, 1998, 2001; Sümer et al., 2005). 특히 파일군(Group Pile)에 대한 연구는 Chow and Herbich(1978)에 의해 선행 연구가 진행되었다 3~6개의 파일군을 대상으로 주로 경험적 방법이 사용되었고, 이후 Sümer and Fredsøe(2001)에 의해 파랑 하에서의 파일군 주변부 세굴에 대한 내용이 체계적으로 연구되었다. Sümer et al.(2005)은 2~4개의 파일 군과 파일

*충북대학교 토목공학부 강사(Lecture, School of Civil Engineering, Chungbuk National University)
**충북대학교 토목공학부 교수(Corresponding author: Ho Jin Lee, Professor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University, 1 Chungdae-ro, Seowon-gu, Cheongju 28644, Korea, Tel.: +82-43-261-2403, Fax.: +82-43-275-2377, hojinlee@cbnu.ac.kr)

간격/파일직경(G/D)과 무차원화 된 주변 흐름의 크기(KC 수)를 주요 매개변수로 하여 세굴 깊이를 측정하였다. 이들은 또한 파일 군에서의 전역 세굴(Global scour)과 개개 파일의 국부세굴을 개별적인 주제로 다루었다. Mory et al.(2000)는 천해역에서의 해저 경사(1/40)를 고려하여 2열로 정렬된 파일군에 대해 세굴 실험을 수행하였고 정렬 각에 따른 지형 변화를 보고하였다. Ghaemi et al.(2013)은 한 방향 흐름장에서 2~24로 구성된 파일군이 종방향 및 횡방향으로 정렬된 조건을 가정하여 선행 연구자들의 자료를 취합해 이론적 분석을 시도하였다. 주요 세굴 영향인자들을 선정하고, 인공 신경망 프로그래밍 기법과 M5 알고리즘, 다중선형회귀(MLR) 등의 소프트웨어적인 방법을 이용하여 각 인자들의 가중치를 결정하는 방식으로 세굴심을 예측할 수 있는 공식을 제안하였다.

Yasser et al.(2011)는 2개의 파일을 횡방향, 종방향으로 정렬하고, 파랑과 한방향 흐름을 변화시키며 G/D에 따른 세굴 양상을 측정하였다. 측정 자료들은 세굴 범위와 깊이를 G/D에 따라 나타내었고, 기존 단일 파일에서의 자료 및 HEC-18를 이용하여 계산한 자료 등과 비교·검토하였다. 하지만 흐름 인자가 추가됨에 따라 파랑, 흐름 및 파랑 및 흐름이 혼합된 형태의 다양한 실험 요소가 존재함에도 실험의 데이터는 충분하지 않았다, G/D 값이 증가함에 따라 세굴심이 비례하여 증가하는 부분은 기존 연구와 상반되는 결과이기도 하다.

본 연구에서는 2개의 파일을 대상으로 흐름에 대해 종 방향(입사파에 대해 수평), 횡 방향(입사파에 대해 직각) 및 45° 의 엇각 방향에 대해 흐름의 크기와 G/D 값을 조절해가며 국부세굴의 규모와 최대 세굴심의 발생 위치를 알아보고자 한다.

2. 이 론

2.1 파일 주변의 세굴 메커니즘

파일과 같은 구조물 주변의 흐름 변화는 세굴을 일으키는 주요 인자이다. 수직 파일의 세굴은 하구와 같은 해안 환경에서 조석이나 풍파에 의해 발생하는 흐름장의 공간적 규모와 구조물의 크기에 따라가는 파일 영역(slender-pile regime)과 큰 파일 영역(large-pile regime)으로 나누어 생각할 수 있다. 전자는 파일 직경(D)이 흐름장의 규모에 비해 작아서 파일 주변부 흐름이 분리되는 와분리(separation vortices)를 형성하는 경우이고, 후자는 흐름이 분리되지 않고 회절효과를 일으키며 파일의 존재가 파형을 변화시켜 보다 복잡한 흐름을 유발한다. 회절효과는 파일 직경(D)이 파장(L)에 대해 비교적 큰 값을 갖는 D/L>0.1일 때 나타나며, D/L<0.1인 조건에서는 가는 파일 영역으로서 가장 일반적인 흐름 형태가 된다.

반 주기마다 파에 의해 흐름 방향이 바뀌는 해양 저면에서는 세굴을 일으키는 두 가지 와류가 형성된다. 먼저 말굽형 와(horseshoe vortex)는 흐름이 역전된 직후에 발생하며, 이후 반주기 동안 파일 주변 경계층에서 주로 구조물 측면에서

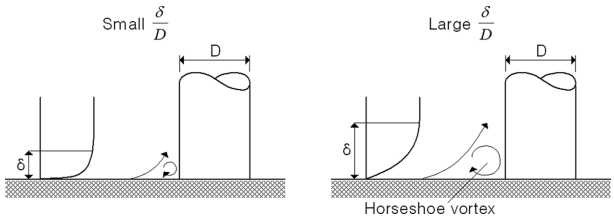


Fig. 1. Effect of boundary layer thickness on horseshoe vortex (Sümer et al. (1997)).

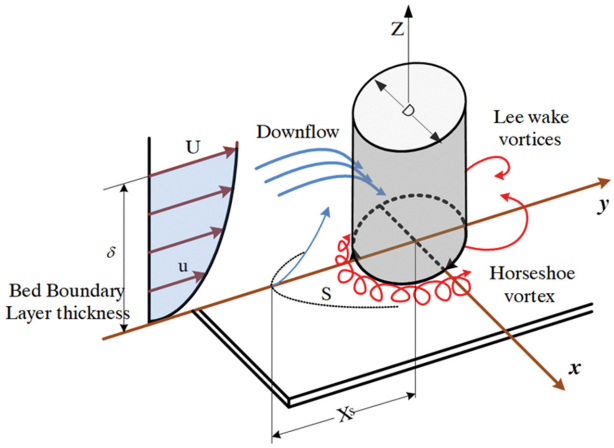


Fig. 2. Separation line associated with the bed boundary layer (Sümer et al. (1997)).

세굴을 일으킨다. 말굽형 와의 작용으로 인해 원추형 세굴공은 점진적으로 확장되고 단면적은 커지게 되지만 세굴공의 단면적이 증가할수록 말굽형 와는 감쇠되어 평형세굴 상태에 이르게 된다. 말굽형 와는 파일의 정면에서 수직 하강하는 흐름(downflow)의 크기와 비례하며, 발생 조건은 충분한 두께를 갖는 유입 경계층(δ) 두께와 6 이상의 KC 수이다. 만일 δ/D가 작다면 Fig. 1의 좌측 그림과 같이 유입 경계층은 더욱 균등한 속도 분포를 가지므로 바닥 경계층의 분리가 지연되고, 더 작은 말굽형 와가 형성될 것이다. 따라서 δ/D의 값이 작을수록, 말굽형 와의 크기는 작아지고, 특히 아주 작을 경우에는 경계층이 분리되지 않으며, 말굽형 와도 형성되지 않을 것이다(Sümer et al.(1997)).

두 번째로 배후 와류(Lee wake vortices)는 말굽형 와와 동시에 일어나며 파일의 표면에서의 경계층내의 회전에 의해서 발생하는데, 파일의 측단으로부터 퍼지는 전단 층은 파일의 후류에서 이러한 와들을 형성하면서 감아 올라간다(Fig. 2). 이러한 배후 와류는 더 이상 수동적인 흐름 특성을 갖는 것이 아니라 오히려 각운동의 반주기 동안 파일로부터 유사를 이송(침식)시키는 대류 메카니즘으로서 역할을 한다.

2.2 파일 군에서의 세굴특성

실제 현장의 파일 배열은 연직 하중 합력의 작용점에 대하여 가능한 한 대칭을 이루어 각 파일의 하중 분담률이 차이나지 않도록 한다. 그룹 파일의 배치의 종류 중, 여러 개의

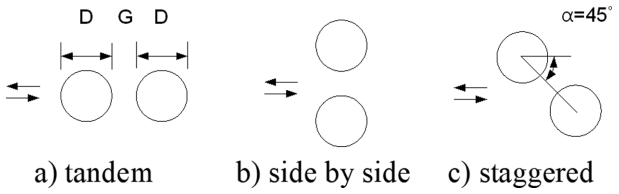


Fig. 3. Pile configurations tested.

파일을 1열로 배치한 기초를 파일 벤트식 기초라고 하며 소규모 교량에 사용된다. 또한 2열 이상으로 배치한 기초를 다주식 기초라 하며 국내에서 인천대교 같은 대규모 교량인 해상의 장대 교량에 많이 시공된다. 본 연구에서의 파일간 배열은 Fig. 3과 같이 흐름 방향에 따라 직각배열(side by side), 수평배열(tandem), 엇각배열(staggered)의 세 가지 형태에 대해 실험을 수행하였다.

2.3 무차원 세굴 영향인자

파랑에 의한 파일 주변의 세굴은 파의 특성과 파일의 형상과 크기 같은 여러 변수 군에 따라 달라진다. 세굴심(S)에 영향을 주는 인자를 함수 형태로 나타내면

$$S = f_1(T, d_{50}, U_m, U_{fm}, D, s, \nu) \tag{1}$$

여기서 T는 파의 주기, d_{50}은 유사의 중앙입경, U_m은 파일이 없을 때 최대 바닥유속, U_{fm}은 교란되기 전의 해저 바닥에서의 전단속도로서, 파랑에 의한 마찰계수 f를 이용하면 $U_{fm} = \sqrt{0.5f}\,U_m$으로 계산할 수 있다. s는 비중, ν는 해수의 동점성계수이다. 차원해석을 통해 위 식을 무차원 계수로 나타내면 다음과 같다.

$$S/D = f_2(Re, N_s, \theta, KC) \tag{2}$$

여기서, Re는 레이놀드 수(Reynolds number), N_s는 유사계수(Sediment number), θ는 Shield's 수, KC는 Keulegan-Capenter 수이며 다음과 같이 정의된다.

$$Re = \frac{U_m D}{\nu} \tag{3}$$

$$N_s = \frac{U_m}{\sqrt{g(s-1)d_{50}}} \tag{4}$$

$$\theta = \frac{U_{fm}^2 D}{(s-1)gd_{50}} \tag{5}$$

$$KC = \frac{U_m T}{D} \tag{6}$$

파일 경계층에서의 흐름의 세기는 KC 수로 나타낼 수 있다. 유속을 산정함에 있어서 현장에서 직접 U_m을 측정하거나 미소진폭 파 또는 흐름 함수 파 이론을 적용하여 U_m을 계산할 수도 있다. 파일 간의 간격을 새로운 인자로 추가 고려하면 식(2)는 최종적으로 다음과 같이 된다.

$$S/D = F(Re, N_s, \theta, KC, G/D) \tag{9}$$

Melvil et al.(1988)의 실험에서 유사 크기의 영향이 $D/d_{50} \geq 50$일 때 사라지는 것으로 나타났고 이에 따라 입자의 크기를 포함하는 무차원 수(Re 수, N_s, θ수 등)들은 상관성은 비교적 낮게 나타났다. 다만 이러한 조건에서의 유사크기 영향은 평형 세굴에 도달하기까지의 시간 축척(time scale)에 영향을 줄 수 있다. 앞선 세굴 연구들에서 S/D와 가장 강한 상관성을 보이는 무차원 매개변수는 KC 수이며, S/D와 연관된 모든 무차원 변수들을 고려하기 보다 대표적 영향인자만으로 나타내는 간략한 형태의 경험식이 오히려 유용하게 적용될 수 있다.

3. 실 험

3.1 실험기기

본 연구의 대상 해역은 상대수심이 $h/L = 0.003$~0.04인 천해역이다. 실험은 조파기를 제외한 길이 20 m, 높이 1 m, 폭 0.8 m인 수조에서 진행하였고 경사식 소파제를 설치하였다. 그 주변을 스테인레스 코일로 반사파를 최소로 억제하였다. 수조 선단에 구성된 피스톤형 조파장치와 함께 구성된 제어부에서는 파형의 구성과 용량식 파고계로부터 획득한 데이터를 처리 및 저장할 수 있는 입출력 제어용 컴퓨터와 연결되어 있다.

실험 시작부터 종료 시점까지 일정 시간 동안 진행된 세굴 단면의 형태를 계측하기 위해 초음파식 사면계를 사용하였다. 총 4개의 센서로 구성되어 있으며 스프레드 시트 형태로 입력된 평면격자 구조에 따라 능동적으로 움직이는 궤도형 대차기로 평형 세굴단계의 지형을 측정하였다. 센서의 측정오차는 ±1 mm, 감도한계는 0.1 mm이고 대차기의 위치오차는 ±1.1 mm이다. 모래의 중앙입경은 0.52 mm이고 균등계수는 $C_u = 3.61$이다. 실험장치의 구성은 Fig. 4와 같다.

3.2 실험방법

파일의 직경은 38 mm로 고정하였으며 파일의 정렬 방식(3가지)에 따라 파고를 7.5 cm, 11 cm, 파일 간의 간격을 $G/D = 0.1, 0.5, 1.0, 2.0$의 4단계의 24회 실험과 흐름과 직각방

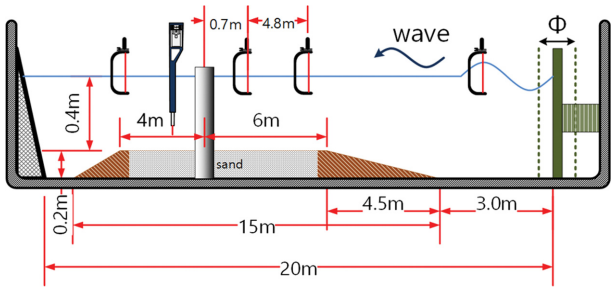
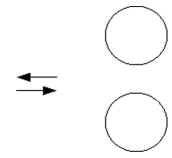
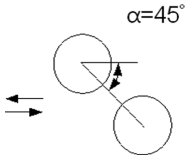


Fig. 4. Schematic description of experimental setup.

Table 1. Experimental condition for the local scour

Scour condition / Case No.	Arrange	Pile diameter *D*	Wave period *T*	Wave height *H*	Gap of the piles *G*
10 times		38 mm	2 sec	7.5 cm	3.8 mm
					19 mm
					38 mm
				11 cm	57 mm
					76 mm
8 times		38 mm	2 sec	7.5 cm	3.8 mm
					19 mm
				11 cm	38 mm
					76 mm
8 times		38 mm	2 sec	7.5 cm	3.8 mm
					7.6 mm
				11 cm	19 mm
					76 mm

향인 경우의 추가실험($G/D = 1.5$)을 포함하여 총 26회 실험을 진행하였다. 예외적으로 엇각 방향의 경우 최대 세굴심이 상대적으로 작은 G/D에서 발생하기 때문에 파일 간격을 재조정하였다. 측정에 사용된 4개의 파고계 중 3개는 조파기로부터 생성된 파의 검증을 위해 주요 지점에 설치하였다. 설계파와 생성된 파의 비교를 위해 조파판 앞에 파고계를 설치하였고, 수로 끝단과 경사면 선단에도 파고계를 설치하여 반사파와 경사각에 따른 파의 변형 유무를 판단하였다. 대표 파고는 파일 중심으로부터 상류측 0.7 m 거리에서 기록하였다. 500회 정도의 파가 작용하면 세굴이 평형 상태에 도달하는 것으로 알려져 있으며 본 실험에서는 각각 1000회의 파를 작용시켰다. 지형의 변화를 측정하기 위한 사면계는 최종 평형 세굴단계에서 사용되며 입력된 스프레드 시트 좌표 값에 따라 자동적으로 읽어 들인다. 총 4개의 사면 센서가 y축 방향에 대해 5 mm 간격으로 구성되어 있다. 따라서 스프레드 시트의 절점 간격은 본 실험 조건상 최소 간격인 5 mm이다. Fig. 4와 같이 파일을 설치할 위치를 정하여 그 지점으로부터 x축 방향으로 2 m, y축 방향으로 0.7 m를 측정한다. 실험조건은 Table 1과 같다.

4. 결 과

실험 결과를 바탕으로 획득한 사면 자료와 무차원 변수들 간의 계산결과를 도표로 정리하였고 수치분석 도구를 활용하여 사면의 등위도를 그린 뒤 최대 세굴심이 나타나는 위치를 각각 표시하였다. 그림에서의 길이 단위는 mm이다. Table 1의 모든 실험 조건은 최대 세굴심을 나타내는 등위도로 나타내었으며 Fig. 5는 3가지 정렬 방식에 따른 등위도의 대표적인 예시이다.

4.1 G/D에 따른 평형 세굴심

4.1.1 흐름과 수직한 배열(side by side)

Fig. 6은 두 파일이 파의 방향과 수직하게 정렬되었을 때, 무차원 파일 간격(G/D)을 횡축으로 하고 상대 세굴심(S/D)을 종축으로 하여 *KC* 수의 크기에 따라 도시한 것이다. a)는 Sümer and Fredsøe(1998)의 결과 값과 비교하여 도시했으며 이들의 실험에서 $G/D \rightarrow \infty$일 경우 즉, 단일파일에서의 상대 세굴심이 $S/D = 0.2$임을 표시하였다. 직각 배열의 평형 세굴심은 $G/D = 0$~0.5에서 최대 세굴심을 나타내며 이후 파일 간의 간격이 벌어짐에 따라 단일 파일에서의 세굴심에 점근해 간다. 흐름이 좀 더 강한 a)의 경우 $G/D = 2.0$에서도 단일 파일에서의 세굴심 보다 큰 값을 갖는 것으로 보아 파일간의 간섭이 남아 있음을 알 수 있다. 직각 배열에서의 가장 큰 특징은 $G/D < 1.0$일 경우 파일 사이를 이동하는 흐름은 분류효과를 일으켜 짧은 시간 동안 매우 큰 흐름을 유발할 수 있다는 점이다.

최대 세굴심은 $G/D \leq 1$에서는 두 파일 사이에서 발생하며, $G/D \rightarrow 2.0$일수록 두 파일 중 어느 한 곳 후방에서 발생했다. $G/D = 0.1$과 0.5에서는 뒷채움 현상(backfilling processes)이 확연하게 발생하였다. G/D가 큰 경우 최대 세굴심은 상류쪽 파일의 선단에서 주로 발생하였다. Sümer 등의 자료에서 $G/D = 0.4$ 부근에서 세굴심이 급격히 작아지는데 실험상 유의미한 이유는 없어 보인다.

4.1.2 흐름과 나란한 배열(tandem)

흐름과 나란한 방향에 대해 같은 방식으로 Fig. 7에 도시하였다. 흐름과 수직으로 배열했을 때와는 다르게 G/D가 증가함에 따라 세굴심 역시 커지며, 최대 세굴심은 $G/D = 1.0$에서 발생하였다. 그러나 그 증가폭은 상대적으로 미미하며

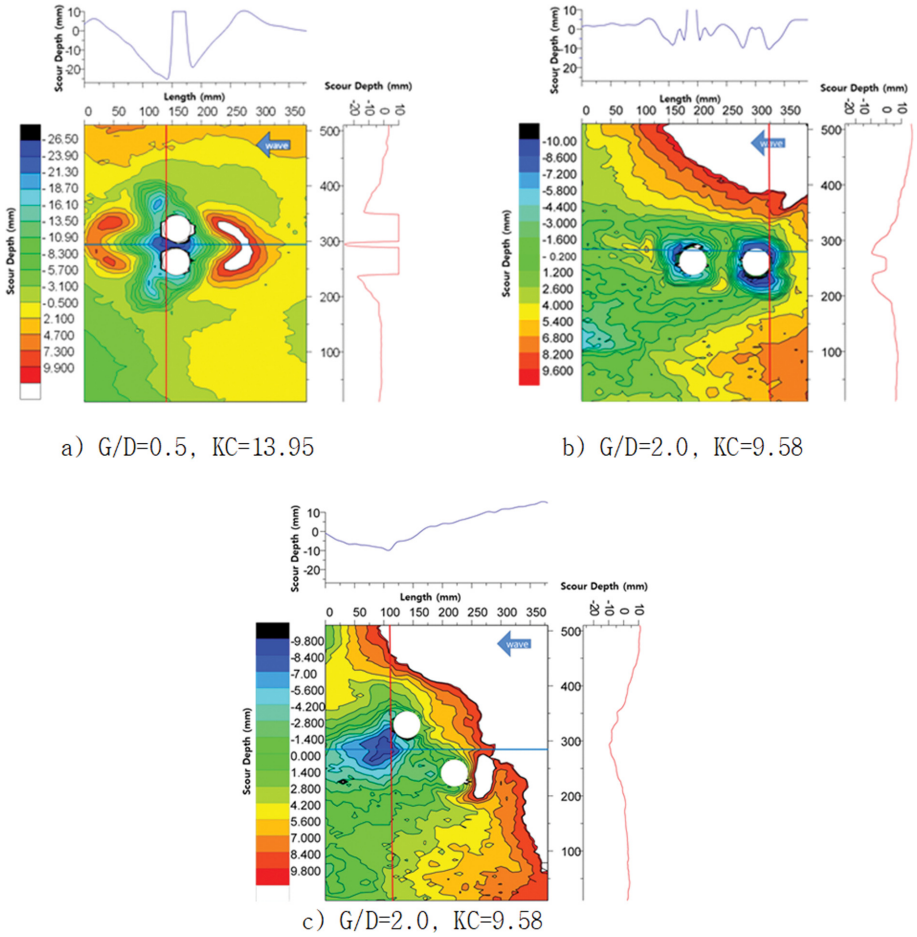


Fig. 5. Variation of equilibrium scour dept.

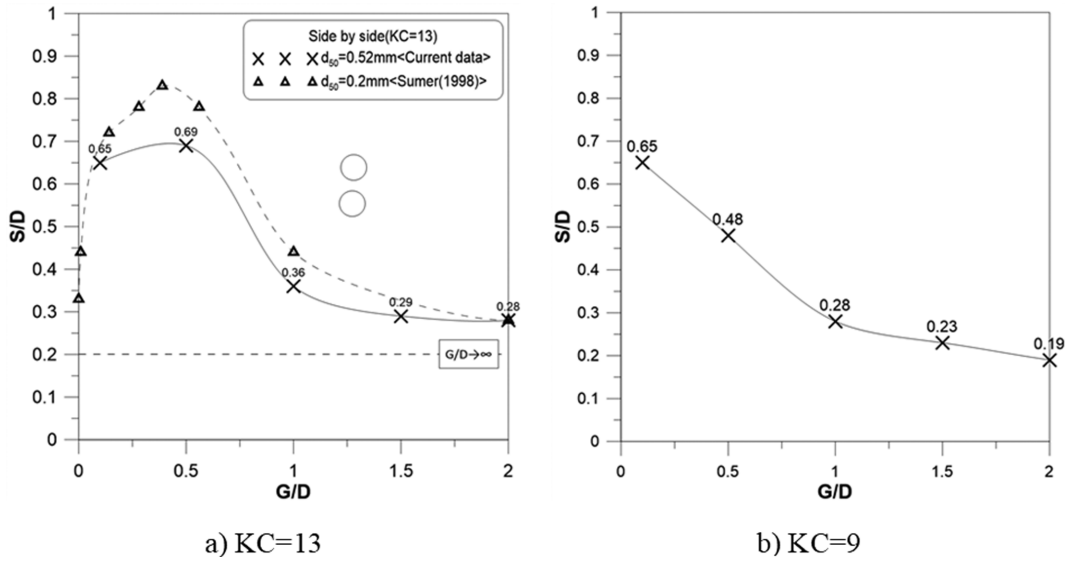


Fig. 6. Equilibrium scour depth (S/D) versus normalized gap between piles (G/D) for case of side by side arrangement.

단일 파일에서의 세굴심에 근접해 갔다. 최대 평형 세굴심은 파일의 중심선에서 발생하지 않고 약간 측면으로 이동한 파일의 측면 모서리에서 발생하였다. G/D가 작은 경우 직경이 큰 하나의 타원형 파일에서와 같은 세굴 양상을 띈다.

4.1.3 엇각 배열(staggered)

Fig. 8은 엇각 배열에 대한 G/D의 영향을 도시한 것이다. 직각 방향에서 만큼은 아니지만 틈새 흐름에 의한 분류 효과가 부분적으로 작용하는 것으로 판단된다.

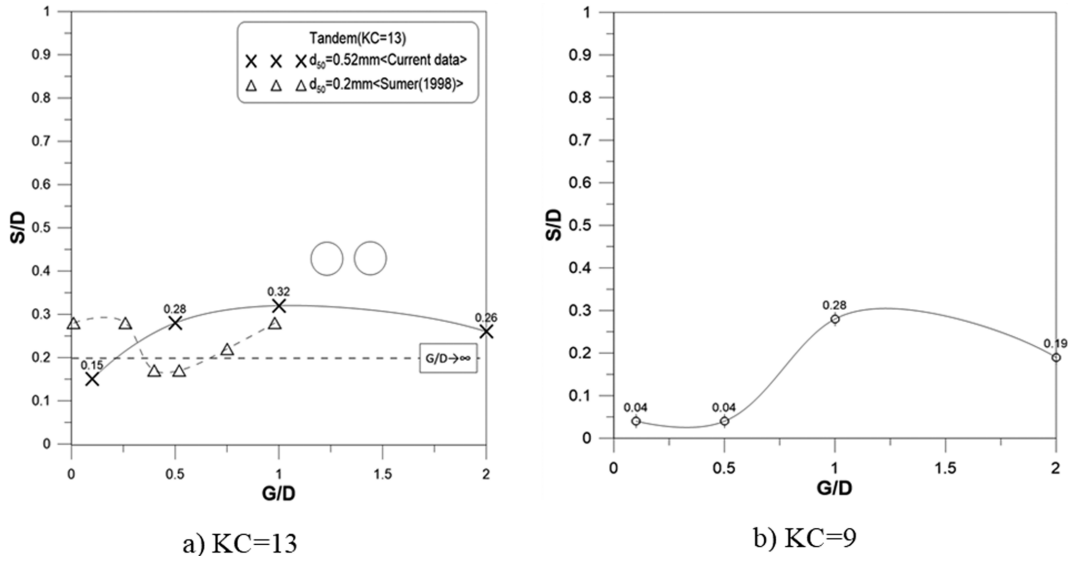


Fig. 7. Equilibrium scour depth (S/D) versus normalized gap between piles (G/D) for case of Tandem arrangement.

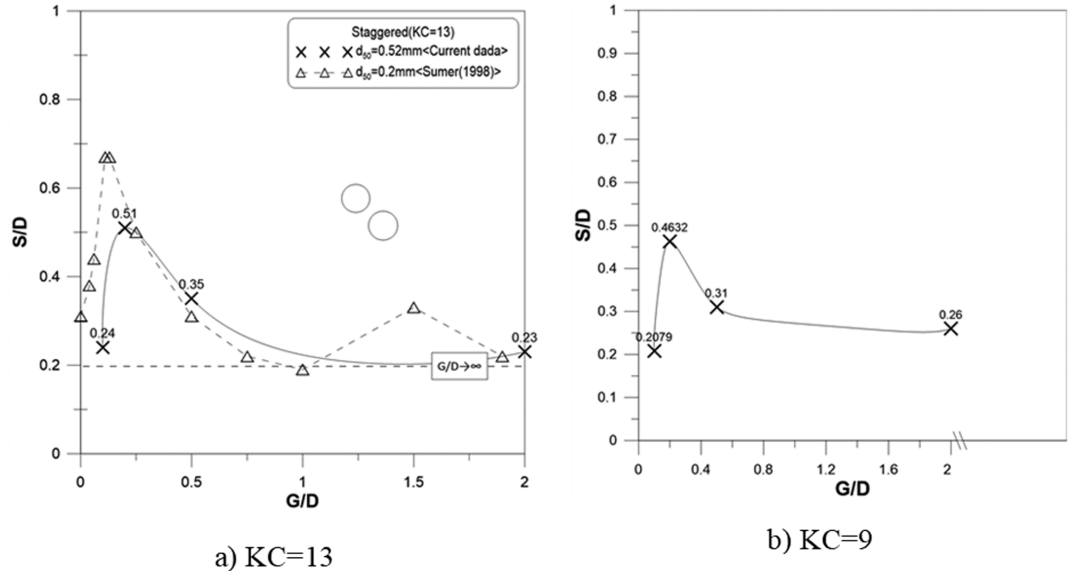


Fig. 8. Equilibrium scour depth (S/D) versus normalized gap between piles (G/D) for case of staggered arrangemen.

G/D ≤ 0.5에서는 역시 단일 파일처럼 거동하며 대부분의 최대 세굴심이 발생하는 위치는 파일간의 중앙점이다. G/D = 0.1에서는 단일파일에서의 세굴양상을 보이지만 G/D = 0.2에서 최대 세굴이 발생하였고, 이후 급격히 감소하여 S/D = 0.2에 근접해 간다. 마지막으로 엇각 배열은 세굴 모서리 바깥쪽으로부터 환류(대류) 되어서 세굴이 파일 주위로 세굴이 일어나며, 또한 가로방향의 틈새 흐름보다는 약하지만 틈새흐름의 영향을 받는다. 그러므로 간격이 작은 경우에는 파일 사이 중앙에 위치하며 *G/D* = 2인 경우에는 하류쪽 파일 뒤쪽에서 일어나는 경향을 보이는데 상류파일의 와류 유출의 영향을 받는 것으로 파악 된다. Sümer et al.(1998)의 실험은 보다 작은 중앙입경 값을 갖기 때문에 이러한 현상이 더욱 두드러지게 나타났다.

5. 결 론

1. 파일의 정렬 방식에 따라 최대 세굴심은 G/D 값은, side by side; G/D ≃ 0.5, tandem; G/D ≃ 1.0, staggered; G/D ≃ 0.2이다.
2. 세 가지 정렬 방식 모두 G/D ≥ 1.5에서 단일 파일의 세굴 거동을 보이며 단일 파일일 경우의 S/D = 0.2에 점근한다.
3. 파일의 정렬 방식에 따라 최대 세굴심이 발생하는 위치는,
   - side by side; G/D ≤ 1.0인 경우 두 파일 사이, G/D > 1.0인 경우 임의 파일 후면 측방에서 발생하며 정렬 방식 중 가장 큰 세굴심을 보였다.
   - tandem; 항상 파일의 측면 모서리에서 발생하며, G/D ≤ 1.0은 하류부 파일에서, G/D > 1.0은 상류부 파일에서 최대 세굴심이 발생하였다.

- staggered; G/D ≤ 0.5일 경우 파일 사이 또는 바로 그 아래에서 발생, G/D = 2.0의 경우 하류부 파일 측부에서 발생하였다.

4. 최대 세굴을 일으키는 주요 원인은 side by side는 파일 틈새에서의 분류효과, tandem의 경우 중첩된 와류효과, staggered는 차폐효과와 더불어 일부의 분류효과에 기인한 것으로 보인다.

References

Chow, W.Y. and Herbich, J.B. (1978). Scour around a group of piles. Offshore Technology Conference. OTC-3308-MS, Houston, Texas.

Melville, B.W. and Chiew, Y.M. (1999). Time scale for local scour at bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 125(1), 59-65.

Melville, B.W. and Sutherland, A.J. (1988). Design method for local scour at bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 114(10), 1210-1226.

Melville, B.W. and Coleman, S.E. (2000). Bridge scour. Water Resources Publications, LLC, CO, USA, 112, 550.

Mory, M., Larroudé, P., Carreiras, J. and Seabra Santos, F.J. (2000): Scour around pile groups. Proceedings of Coastal Structures 99, vol. 2, 773-781, Balkema.

Ghaemi, N., Etemad-Shahidi, A. and Ataie-Ashtiani (2013). Estimation of current -induced pile groups scour using a rule-based method. Journal of Hydro Infomatics, 15(2), 516-528.

Raudkivi, A.J. and Ettema, R. (1977). Effect of sediment gradation on clear water scour. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 103(10), 1209-1213.

Sümer, B.M., Bundgaard, K. and Fredsoe, J. (2005). Global and local scour at pile groups. Proceedings of the 15th International Offshore and Polar Engineering Conference. Seoul, 577-583.

Sümer, B.M. and Fredsøe, J. (1997). Hydrodynamics around cylindrical structures. World Scientific, vol. 18, 530.

Sümer, B.M. and Fredsøe, J. (1998). Wave scour around group of vertical piles. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 124 (5), 248-255.

Sümer, B.M. and Fredsøe, J. (2001). Scour around pile in combined waves and currents. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 127(5), 403-411.

Yasser, E. Mostafa and Ahmed F. Agamy (2011). Scour around single pile and pile groups subjected to waves and currents. International Journal of Engineering Science and Technology, 3(11), 8160-8178.

Received 11 October, 2022
1st Revised 25 October, 2022
2nd Revised 27 October, 2022
Accepted 28 October, 2022