

점착성 하상에서의 교각형상에 따른 국부세굴 연구

A Study of the Local Scour Considering the Pier Shapes in the Cohesive Bed

최 계 운* / 김 기 형**

Choi, Gye-Woon / Kim, Gee-Hyoung

Abstract

When the pier is constructed in the cohesive bed, the accuracy may not be obtained because the equation for calculating the scour at piers is based upon the results which are analyzed through the experiments in the non-cohesive bed. In this paper, the variation of the depth of the pier scour occurred by constructing 5 types of pier in the channel having the cohesive material is examined. The experimental results are analyzed based upon Froude numbers and non-dimensional numbers which are indicated as the flow depths compared to the pier width. The results are also compared with the results obtained using the existing pier scour equations. In this paper, the shape factors, which can be used for calculating the scour depth of the pier in the cohesive channel bed, are suggested. The shape factors are indicated through the ratios between the scour depth at the circular pier and the scour depths at the different types of pier, and are suggested as two stages. In the first stage, in which the water depth compared to the pier width is less than 1.2, the shape factors are given as the equations. However, in the second stage the shape factors are given as the constant values. It is understood that the shape factors suggested in this paper can be properly used for calculating local scour at piers in the bridges which are constructed in the cohesive channel bed having the characteristics of the bed material which is used in these experiments.

Keywords: local scour, maximum scour depth, cohesive bed material, pier shape, pier, shape factor

요 지

점착성 하상에 교각을 설치하는 경우, 사용되는 국부세굴심도 산정공식은 대부분이 비점착성 하상을 가진 수로에서의 실험결과에 근거를 두고 있기 때문에, 정확성에 대한 논란이 있다. 본 논문에서는, 점착성 하상재료를 가진 실험수로 내에 5개 형태의 교각을 설치하여 발생하는 세굴심도의 변화에 대하여 연구하였다. 실험결과는 Froude 수와 교각폭에 대한 수심의 변화에 따라 분석되었으며 기존공식에 의한 결과와도 비교하였다. 본 논문에서는 실험결과를 바탕으로 점착성 하상에서 사용할 수 있는 교각형상계수를 제안하였다. 교각형상계수는 원형교각 주위에서 발생하는 세굴심도에 대한 타형태의 교각주위에서 발생하는 세굴심도의 비율로 나타내었으며, 수심에 따라 2단계로 구분하여 제안하였다. 1단계는 교각폭에 대한 수심이 1.2 이하인 경우로 방정식에 의하여 교각형상계수가 제안된 반면 2단계에서는 상수값으로 교각형상계수가 제안되었다. 본 논문에서 제안된 교각형상계수는 본 실험에서 사용된 하상재료와 유사한 점착성 하상에 설치된 교각의 교각 국부세굴심 산정에 효과적으로 이용될 것으로 판단된다.

핵심용어 : 국부세굴, 최대세굴심도, 점착성 하상재료, 교각형태, 교각형상계수

* 인천대학교 토목공학과 교수

Prof. Dept. of Civil Engrg., Univ. of Incheon, Incheon 402-749, Korea

** 인천대학교 토목공학과 박사과정

Doctoral Student, Dept. of Civil Engrg., Univ. of Incheon, Incheon 402-749, Korea

1. 서론

급속한 산업화로 인한 도시화로 인구의 집중은 교통량 증가를 유발하여 도시 주변 하천이나 강에 많은 교량 설치를 요구하게 되고, 이에 따른 교량에 대한 안전문제는 중요한 사회문제로 대두되고 있다. 특히, 하상에 설치된 교각 주변에서 발생하는 국부세굴은 신설 또는 기존 교량의 안전문제를 판단하는데 있어서 매우 중요한 인자이다. 국부세굴의 주요 원인은 교각 주위에서 발생하는 와류로 알려져 있으며, 이 와류의 변화는 흐름 자체의 특성뿐만 아니라 하상재료의 상호작용으로 인하여 매우 복잡한 양상을 띄게 되어 세굴현상을 이론적으로 규명하는 것이 매우 어렵기 때문에 그 동안의 세굴 연구는 주로 모형실험에 의하여 수행되어져 왔으며, 교각형상에 관한 연구는 안창진(1994)과 안상진 등(1996)에 의하여 수행된 바 있다. 이 때 실시되는 실험수로의 하상재료는 비점착성인 모래가 주로 사용되며 기존에 사용되고 있는 세굴공식들은 주로 이와같은 비점착성 하상에서 도출된 것으로, 하상재료가 점착성을 띄는 경우 점착성에 따른 세굴 양상의 차이 때문에 기존공식 사용에 무리가 있는 것으로 판단된다.

그 동안 점착성 하상에서의 세굴 연구는 하상의 특성에 따른 전반적인 하상 변화에 관한 연구와 구조물에 의한 국부세굴 연구 등 크게 두 가지 방향으로 진행되어 왔다. 전반적인 하상 변화에 관한 연구에 있어서 Dunn(1959)은 하상재료의 전단강도가 증가할수록 한계소류력도 증가한다고 하였으며, Smerdon과 Beasley(1961)는 소성지수의 증가에 따라 한계전단력도 증가한다고 하였다. ASCE의 Task Committee(1968)는 점착성 하상의 침식은 하상재료의 압축강도, 배인전단강도, 아터버그한계 등과 같은 하상재료 자체의 역학적 특성에 관계되는 것으로 밝히고 있으며, 그 밖에 Paaswell(1973), Arulanandan(1975), Arithurai 와 Arulanandan(1978), Kelly 와 Gularte(1981) 그리고 Raudkivi 와 Tan(1984), Parchure 와 Mehta(1985) 등이 점착성 하상에서의 전반적인 하상변화에 대한 연구를 수행하였다. 구조물에 의한 국부세굴의 연구는 최근에 와서 이루어지기 시작하였는데 Nagy(1995)는 점착성 하상의 초기합수비, 점토함유율, 다짐 등이 최대 세굴심과 세굴공의 형성에 영향을 미친다고 하였다. 국내의 점착성 하상에서의 세굴연구는 김재중(1989) 등이 급강하구의 점토를 하상재료로 사용하여 유사의 농

도를 측정함으로써 하상의 침식에 관한 연구를 수행하였고, 안수환과 이상화(1990) 등이 점착성 부유사 이동에 관한 수치모형의 연구를 수행하였으며, 최계운(1997) 등이 영종대교 교각설치에 따른 국부세굴에 관한 실험을 실시하는 등 몇몇 연구에 지나지 않는다.

이러한 시점에서 한강 등과 같이 큰 하천의 최하류 부나 전형적인 점토특성을 보이는 연안 등의 하상에 영종대교나 서해대교와 같이 대규모의 교량이 설치되는 경우가 늘어나면서 점착성 하상에서의 세굴현상에 관한 관심이 늘어나고, 이때 기존의 비점착성 하상을 가진 수로에서 실험을 통하여 도출된 세굴공식을 직접 적용하는 것에 대한 우려가 높아짐에 따라, 본 논문에서는 점착성이 있는 점토를 하상재료로 사용하고 다섯 개의 서로 다른 형태의 모형 교각을 사용하여 실험을 실시하여 교각 주위에서 발생하는 세굴양상을 검토하고 교각형태에 따른 세굴의 크기를 나타내는 교각 형상계수를 제안하였다.

2. 점착성 관련 인자 변화에 따른 세굴양상

점착성 하상에서의 세굴연구는 점착성 재료가 갖는 복잡한 특성때문에 비점착성 하상에 비하여 연구가 활발하지 못한 상태이며, 그 동안의 연구는 주로 수로내 하상 변화 파악에 대한 연구가 주종을 이루고 있다. 이러한 수로내 하상의 변화에 대한 연구는 점착성 하상재료가 지니는 재료특성 자체를 이용하거나, 점착성 하상에서의 유사의 농도변화 규명 등을 통하여 이루어져 왔다. 점착성 하상재료의 특성에 관련된 인자로는 전단강도, 소성지수 및 합수비, 점토함유율, 염도 등이 있으며 점착성 하상을 가진 수로내 하상 변화는 하상재료가 갖는 역학적 특성이 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

2.1 전단강도의 변화

전단강도는 외부로부터 작용하는 힘에 대하여 변형을 일으키지 않고 견디는 힘을 나타내는데, 일반적으로 점토는 사질토와는 다른 점착력이 존재하며 이러한 점착력은 전단강도에 밀접한 영향을 미친다. Sunburg(1956)는 소류력을 하상재료의 전단강도에 비례하는 것으로 나타내었으며 Dunn(1959)은 한계소류력은 하상재료의 전단강도에 따라 변화하는 것으로 가정하여 한계소류력을 전단강도와 하상재료의 입도분포에 따른 관계로부터 계산하는 식 (1)을 제안하였다. 식 (1)을 살펴보면 배인전단강도 (S_v)가 증가하면 한계소

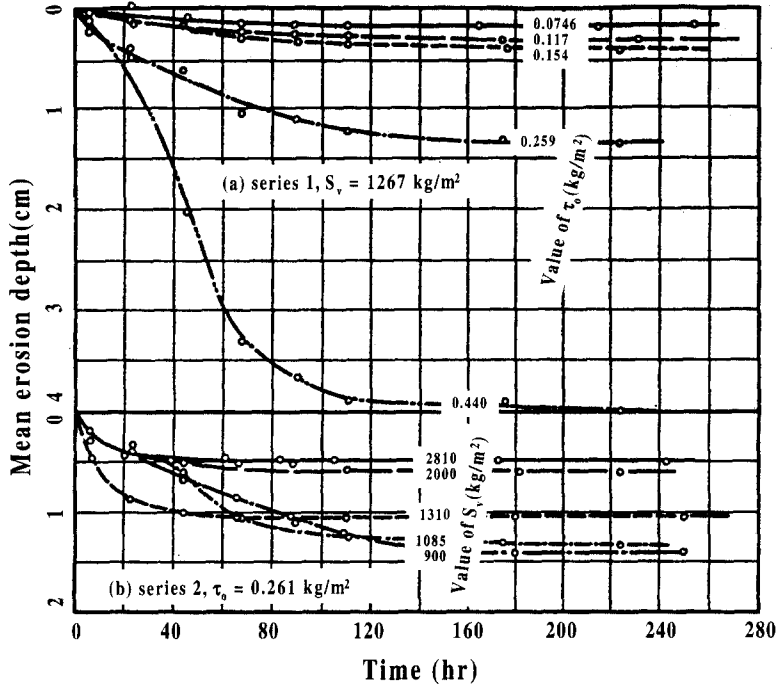


그림 1. 전단강도의 변화에 따른 평균침식 깊이의 시간적 변화 (Abdel-Rahmann, 1964 이후)

류력(τ_c)이 증가하고 있음을 알 수 있으며, 한계소류력의 증가는 결과적으로 하상에서의 세굴을 감소시키는 역할을 하고 있다.

$$\tau_c = 0.02 + \frac{S_v \tan \theta}{1000} + 0.18 \tan \theta (\text{lb/ft}^2) \quad (1)$$

식 (1)에서 S_v 는 하상재료의 배인전단강도를 나타내고 θ 는 0.06 mm보다 가는 입자의 비율(%)과 소성지수 (PI)와의 관계를 나타내는 선형의 기울기를 나타낸다. 한편 Abdel-Rahmann(1964)은 점착성 하상에서 일정한 전단강도에서 전단력이 변화하는 경우와 일정한 전단력에서 전단강도가 변화하는 경우의 하상 침식깊이의 변화에 대하여 연구하였다. 그림 1은 이러한 실험의 결과를 나타내고 있는데 S_v 는 하상의 전단강도를 나타내고 τ_0 는 하상에 작용하는 전단력을 나타내고 있다. 그림에서 보여주고 있듯이 하상에 작용하는 전단강도가 일정한 경우(series 1.)에는 하상에 전단력이 크게 작용할수록 침식깊이가 증가하고 있으며, 일정한 전단력이 작용하고 있는 경우(series 2.)에는 전단강도가 증가할수록

침식깊이는 감소하고 있는 것을 알 수 있다.

2.2 소성지수의 변화

점착성 하상재료의 특성은 소성지수로 나타낼 수 있는데 Smerdon과 Beasley(1961)는 수로특성과 에너지 경사로부터 계산된 한계소류력은 소성지수와 관계가 있다는 것을 밝히고 이를 표현하는 식 (2)를 제안하였다. 소성지수는 점토의 점착력을 나타내는 지수로 소성지수가 클수록 점토의 함유량과 점착력이 증가하는 것을 의미한다. 식 (2)에서 PI는 소성지수(%)를 의미하는데 소성지수가 증가할수록 한계소류력이 증가하고 있음을 알 수 있으며 결과적으로 소성지수의 증가는 하상의 침식 발생을 억제한다는 것을 의미한다.

$$\tau_c = 0.0022 (PI)^{0.82} (\text{lb/ft}^2) \quad (2)$$

2.3 함수비의 변화

함수비가 점착성 하상의 세굴에 미치는 영향을 수치화하기는 쉽지 않으나, 함수비는 흙 입자의 특성을 나타내는 가장 기본적인 인자의 하나로 Terzaghi 와

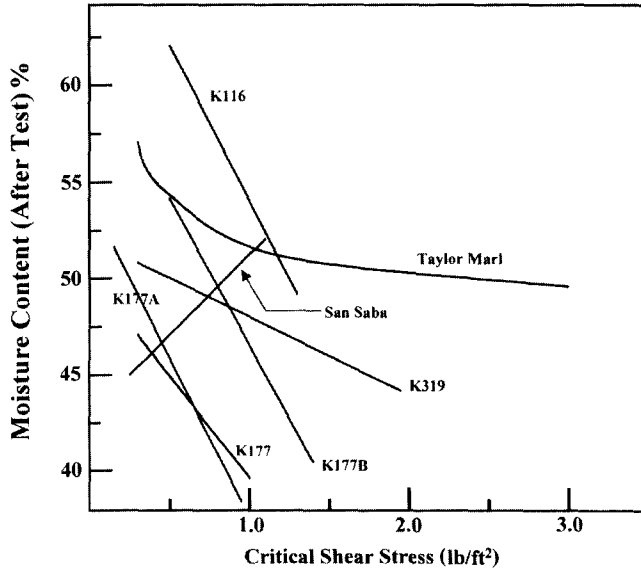


그림 2. 함수비 변화에 대한 한계전단력의 변화 (ASCE, Task Committee, 1968 이후)

Peck(1971)은 점토특성에 있어 물의 영향이 매우 중요하다고 하였다. 한편, Enger(1964)는 재료가 침식되기 시작할 때까지 전단력을 가하는 실험을 수행하였는데 이 실험에서 침식을 유발하기 위해 하상에 작용하는 전단력은 흙이 다짐된 상태에서 함수비의 영향을 크게 받는 것이라는 것을 밝혔으며, Rektorik 와 Smerdon(1964)은 한계전단력에 대하여 함수비의 영향을 알아보기 위하여 함수비 변화에 대한 실험을 실시하여 그림 2의 결과를 얻었다. 그림 2에서 K116, K177, K177A, K177B, K319, San Saba, Taylor Marl은 각각의 시료에 대한 표시를 나타내는데, 그림 2에서 보듯이 7개의 시료 가운데 San Saba 지역의 점토를 제외하고 함수비가 증가할수록 한계전단력은 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 함수비의 증가는 하상의 침식을 증가시키는 것으로 이해할 수 있다.

2.4 점토함유율의 변화

하상이 비점착성일 경우 점착성을 지닌 재료가 유입되면 하상의 특성이 변화하는데 일반적으로 총적토 하상에서 점토의 함유율이 10 % 정도만 변화하여도 하상의 특성이 많이 변화하기 때문에 점토의 함유율은 매우 중요한 인자이다. 점토 함유율이 변화하면 점착력과 관련된 소성지수와 전단강도가 변화하기 때문에 이

는 하상재료의 세굴에 관련이 있다. Nagy(1995)는 점토의 함유율에 따라 세굴심이 변화한다고 가정하여 점토의 함유율 변화에 따른 세굴실험을 통해 그림 3과 같은 결과를 도출하였다. 그림 3에서 보듯이 0~30 % 까지의 범위에서 점토함유율이 증가할수록 점토하상에서의 세굴심/모래하상에서의 세굴심 (d_{sc}/d_{ss})은 점차로 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 점토함유율이 증가함에 따라 세굴심은 감소하는데 이는 점토의 특성인 점착력의 증가로 소성지수와 전단강도가 증가하기 때문으로 판단된다.

2.5 염도의 변화

점착성 하상재료는 비점착성 하상재료에 비하여 많은 다른 특성을 지니고 있는데 그 중 하나가 입자 상호간에 작용하는 전기적 성질이다. 이러한 전기적 성질은 입자들간에 인력으로 나타나는데 점착성 하상재료에 염이 첨가되면 입자 상호간의 인력으로 알려진 Van der Waals 힘을 증가시킴으로써 전단강도의 증가를 유발한다. Parchure와 Mehta(1985)는 하상재료를 1.7일간 압밀시킨 후($T_{dc} = 1.7$ days) 염도가 없는 경우 ($BED=TK$), 염도를 3.5ppt로 고정한 경우($BED=KS$), 그리고 염도를 변화시키는 경우($BED=LM$)에 대하여 전단강도를 측정하고 염도(ppt)의 변화에 따른 편관하

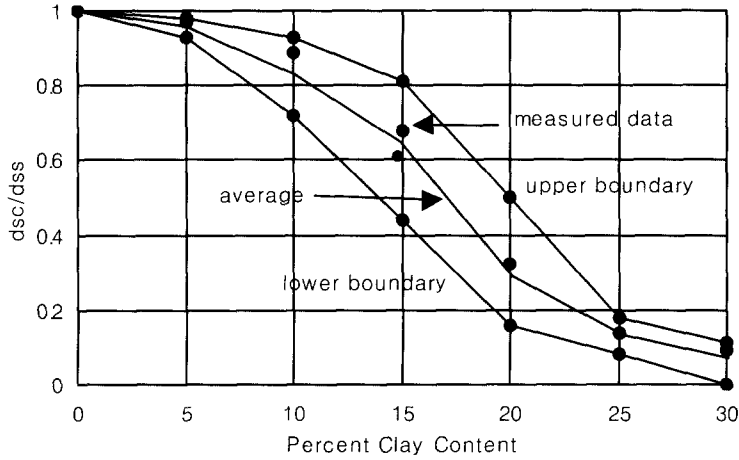


그림 3. 점토함유율에 따른 세굴심의 변화(Nagy, 1995)

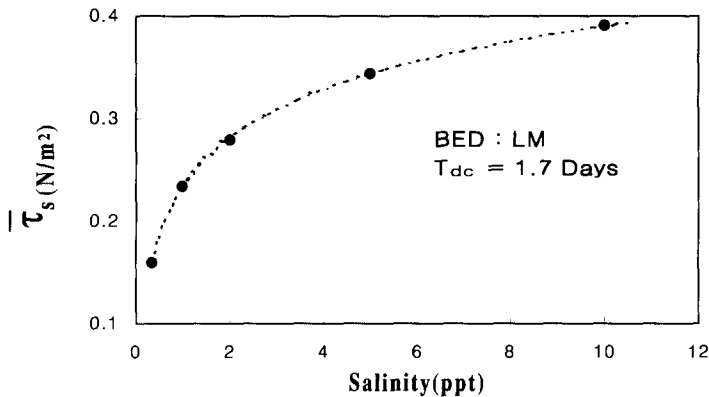


그림 4. 염도 변화에 따른 평균 하상 전단강도의 변화 (Parchure와 Mehta, 1985)

상전단강도 ($\bar{\tau}_s$)를 그림 4와 같이 나타내고 있는데 염도가 증가할수록 하상재료의 평균전단강도도 증가하여 결과적으로 하상의 침식을 감소시키게 됨을 의미한다. 그러나 염도가 전단강도에 미치는 영향은 다른 인자들에 비하여 상대적으로 작은 것으로 알려져 있다.

3. 점착성 하상에서의 세굴실험

3.1 실험장치

본 실험에 사용된 하상재료는 인천연안의 Y대교 건설현장에서 채취한 점착성이 있는 점토가 사용되었다. 점토의 채취는 굴삭기를 이용하여 교란된 상태에서 채

취하였으며, 실험에 사용된 하상재료의 기본적인 특성을 파악하기 위하여 실험이 끝난 후 모형수로의 시료를 채취하여 하상재료에 대한 기본 물성치 실험을 한 결과 비중이 2.74이며 함수비는 56%, 평균입경은 0.048 mm이고 전 시료가 모두 200번 체를 모두 통과하며, 전단강도는 1200 kg/m^2 (250 lb/ft^2), 액성한계 25%, 소성한계 21.46%, 소성지수 3.54의 유기성 실트질 점토로 나타났다. 그림 5는 본 실험에 사용된 하상재료의 입도분포를 보여주고 있다. 실험 수로는 길이가 12 m이며 폭과 높이가 각각 40 cm이고 0~2%의 경사조절이 가능한 수로가 사용되었고, 교각모형은 원형, 반원형, 사각형, 그리고 2가지의 육각형 단면을

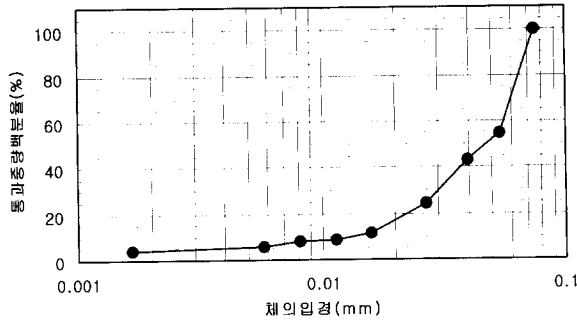


그림 5. 하상재료의 입도분포 곡선

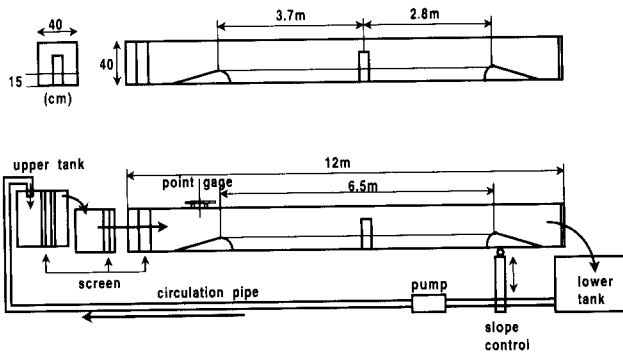


그림 6. 모의 수로장치의 개략도

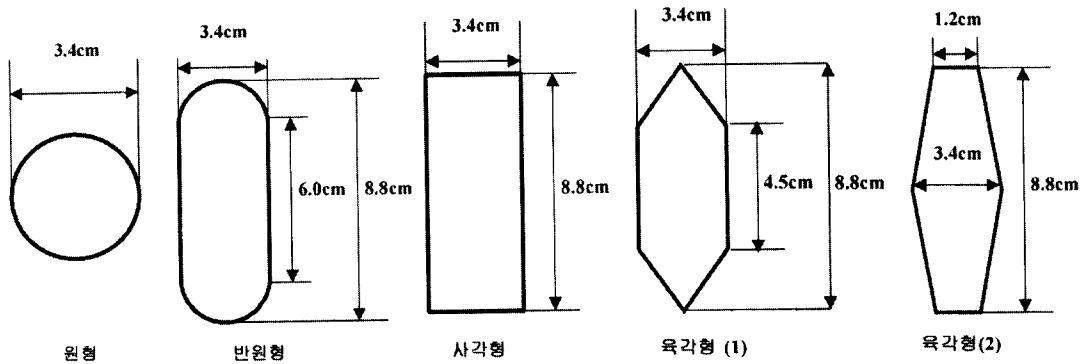


그림 7. 실험에 사용된 교각모형

포함하여 5개의 교각모형을 아크릴로 제작하여 사용하였으며 교각의 표면에는 세굴심 측정이 용이하도록 눈금이 새겨진 스티커를 부착하여 사용하였다. 그림 6은 본 실험에 사용된 모형수로의 개략도이며 그림 7은 교각모형의 단면을 보여주고 있다.

본 실험에서 사용된 개도비는 91.5 %를 나타내고

있으며 이는 교각과 교각사이에 8.5 %가 교각에 의하여 흐름이 방해받지 않음에 의해 나머지 91.5 %로 전체의 유량이 흐르는 것을 의미한다. 본 실험은 점착성 하상에서 교각형상에 따른 국부세굴의 크기를 비교하기 위한 실험이므로 원형과 모형과의 관계를 검토할 필요성은 없으나, 현장의 재료를 그대로 사용한 후 현장에서의 흐

를 통하여 최대의 세굴심도를 도출하기 때문에 현장에서 사용하는 데에도 무리가 없다. 통상적으로 동양에서는 원형과 모형의 축척비율에 맞추어 하상재료를 축소하여 사용하고 있으나, 미국 등지에서는 원형의 하상 재료를 축소하는 경우 모형의 하상재료가 원형특성을 잘 나타내지 못하기 때문에 원형의 하상재료를 그대로 사용한다. 다만, 원형의 축소된 조건하에서 부유된 하상재료가 이동하는 특성이 원형과 모형에서 동일하도록 하상의 경사를 조정하여 사용하며, 이는 본 실험에서 사용된 방법과 동일하다.

3.2 실험방법

본 실험에 있어서 하상재료를 비점착성 사질토와는 다른 점착성의 특성을 지니고 있어서 하상재료가 덩어리로 뭉쳐져 있었으므로 그대로 수로에 포설할 경우 하상재료가 덩어리째로 떨어져 나가 실제와 다른 양상을 나타냈다. 따라서, 실제 점착성 하상 상태에서의 세굴을 검토하기 위하여 수로에 약간의 물을 채운 후 하상재료를 물에 잘 풀어 덩어리가 생기지 않도록 포설하고 포설된 하상으로부터 20 cm 높이로 물을 채워 물다짐을 하여 시료가 채취되기전의 비교란 상태와 동일하도록 하였다. 물다짐 시간은 그림 8에 나타냈듯이 물다짐 후 10일 동안 배인전단강도 실험을 실시하고, 10일 동안의 배인전단강도의 약 75 %에 해당하는 72 시간 후에 배인전단강도의 변화가 크지 않은 것과 지속적인 실험 실시를 위하여 72시간 동안 물다짐 이후에 실험을 실시하도록 하였다. 실험 지속시간은 3시간으로 하여 충분한 세굴이 발생하도록 하였으며 세굴심의 측정은 교각의 전, 후, 좌, 우에서 5 mm 간격으로 측정하였다.

4. 점착성 하상내 세굴실험 결과의 비교 및 분석

4.1 시간에 따른 세굴심도의 변화

일반적으로 비점착성 하상내 세굴심은 시간에 대하여 큰 영향을 받으며 일정 시간이 경과하면 세굴심은 더 이상 증가하지 않고 평형세굴심에 도달하는 것으로 알려져 있는데, 점착성 하상에서의 시간에 따른 세굴심의 변화를 알아보기 위한 실험을 실시하고 점착성 하상과 비점착성 하상에서 실험시간에 따른 세굴심의 변화를 비교·분석하였다. 그림 9는 점착성 하상에서의 시간에 따른 세굴심의 변화를 나타내고 있으며 그림 10은 비점착성 하상에서의 시간에 따른 세굴심의 변화를 나타내고 있는데 그림에서 알 수 있듯이 비점착성 하상에서의 최대세굴심이 상당히 짧은 시간내에 발생하는 것에 비하여 점착성 하상에서의 세굴은 비점착성 하상에서보다 최대세굴심에 이르는 시간이 상당히 긴 것을 알 수 있다. 따라서, 점착성 하상에서는 단기간 동안에 세굴에 의한 문제가 발생하지 않았다고 할지라도 오랜 기간이 지난 후에 세굴에 의한 문제가 발생할 수 있으므로 점착성 하상에서 세굴에 의한 영향을 검토할 경우 시간에 의한 영향을 반드시 고려해야 할 것으로 판단된다.

4.2 Froude수 및 수심에 따른 세굴심도의 변화

점착성 하상에서의 세굴심도를 무차원으로 비교하기 위하여 Froude수와 수심/교각폭 (h/b)으로 나타내는 무차원수의 변화에 대하여 세굴심도를 세굴심/교각폭 (ds/b)(이하 무차원 세굴심도라 함)으로 나타냈는데,

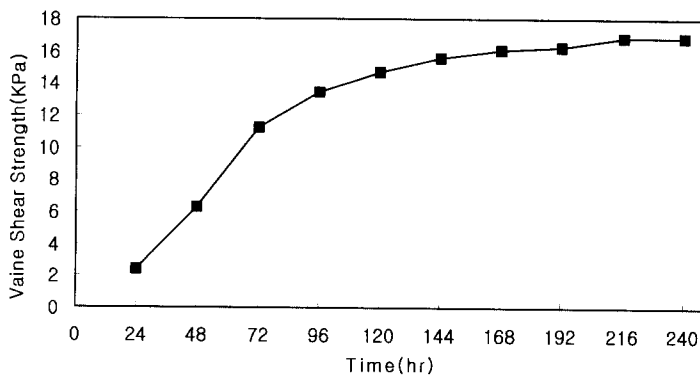


그림 8. 하상재료의 배인전단강도의 변화

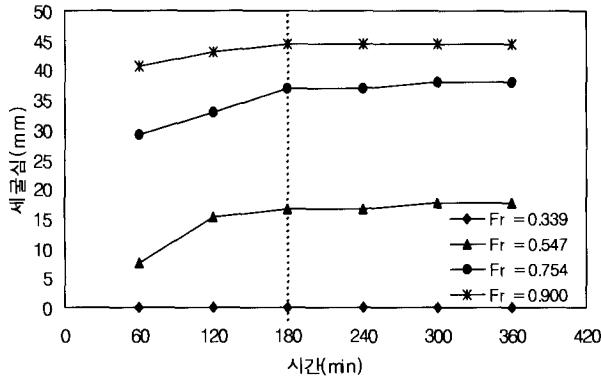


그림 9. 점착성 하상에서의 시간에 따른 세굴심의 변화

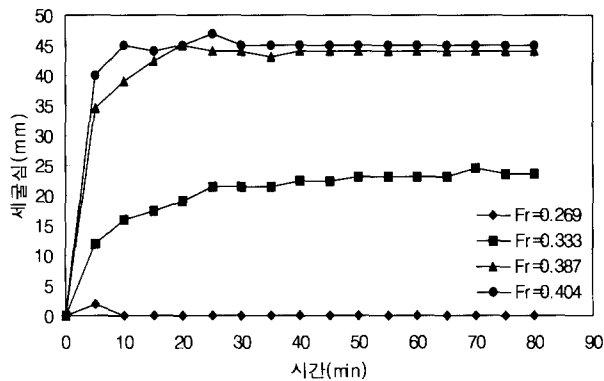


그림 10. 비점착성 하상에서의 시간에 따른 세굴심의 변화 (오정희, 1996)

비점착성 하상에서의 교각주위에 발생된 세굴심도는 세굴과 퇴매움 현상으로 세굴심도는 증가와 감소를 반복하는 경향이 있는 반면에 점착성 하상에서는 Froude 수와 수심이 증가함에 따라 세굴심도는 증가와 감소의 반복보다는 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 이는 점착성 하상재료의 점도입자가 매우 작기 때문에 세굴공 안으로 유입된 입자가 매우 작은 소류력에도 이동하여 다시 세굴공 밖으로 유출되므로 유입되는 유사는 없고 단지 유출되는 유사만 있기 때문이다. 그림 11은 Froude수의 증가에 따른 각 형상의 교각의 최대 세굴심도의 변화를 나타내고 있는데 그림에서 알 수 있듯이 Froude수의 증가에 따라 각각의 다른 형상의 교각에서의 최대 세굴심도의 증가는 서로 다르게 나타나고 있으며 교각의 형태에 따라 거의 직선변화를 보이고 있다. 또한 그림 12는 수심의 증가에 따른 세굴

심도의 변화를 보이고 있는데 수심이 증가함에 따라 각각의 교각에서의 최대 세굴심도는 비선형적으로 증가하고 있다. 또한, 그림에서 보듯이 원형교각의 세굴심도가 가장 작게 나타났으며 육각형교각(1), 반원형교각, 육각형교각(2), 사각형교각의 순서로 세굴심도가 크게 발생하고 있다.

4.3 실험결과와 기존공식과의 비교

기존에 제안된 비점착성 하상에서 사용되고 있는 세굴공식이 점착성 하상에서도 적절히 사용되어질 수 있는지를 알아보기 위하여 실험결과로 측정된 세굴심도와 기존의 세굴공식에 의하여 계산된 세굴심도를 비교하였다. 비교에 사용된 세굴공식은 비교적 많이 알려져 있는 식 (3)~(7)의 CSU, Froehlich, Laursen, Melville공식을 사용하였다.

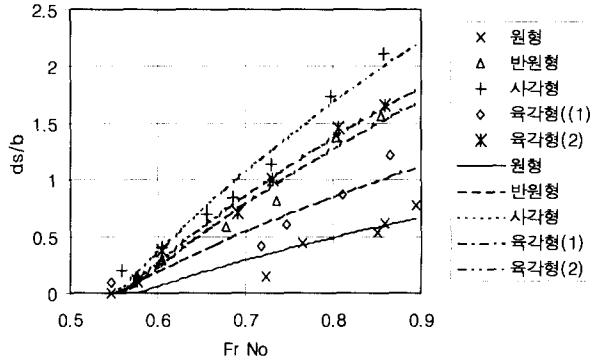


그림 11. Fr수에 따른 교각별 세굴심의 변화

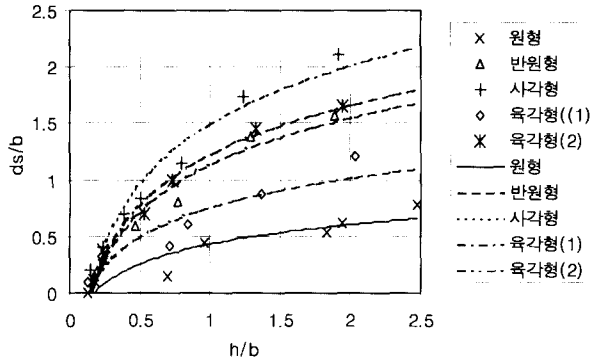


그림 12. 수심에 따른 교각별 세굴심의 변화

$$\text{CSU: } \frac{ds}{y} = 2.0k_1k_2k_3k_4 \left(\frac{b'}{y}\right)^{0.65} Fr^{0.43} \quad (3)$$

Froehlich:

$$\frac{ds}{b} = 0.32 \phi \left(\frac{b'}{b}\right)^{0.62} \left(\frac{y}{b}\right)^{0.46} Fr^{0.2} \left(\frac{b}{D_{50}}\right)^{0.08} + 1 \quad (4)$$

Melville:

$$ds = 3.4b Fr^{0.67} \quad (Fr < 0.5) \quad (5)$$

$$11.5y = \frac{ds}{\left(1 + \frac{0.182}{ds/b}\right)^{0.589} - 1} \quad (Fr > 0.5) \quad (6)$$

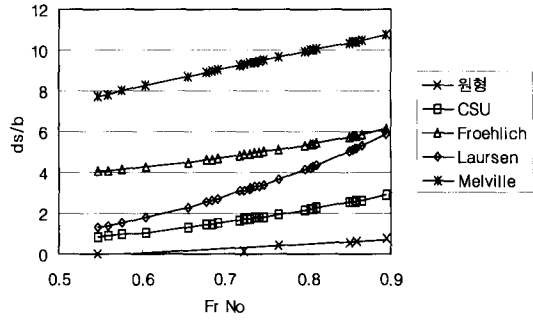
$$\text{Laursen: } \frac{b}{y} = 5.5 \frac{ds}{y} \left[\left(\frac{ds}{11.5y} + 1\right)^{1.7} - 1 \right] \quad (7)$$

여기서 ds 는 세굴심, b 는 교각폭, y 는 수심, k_1 은 교형상계수, k_2 는 흐름접근각계수, k_3 는 하상조건계수, k_4 는 하상재료의 크기계수, ϕ 는 교각형상계수,

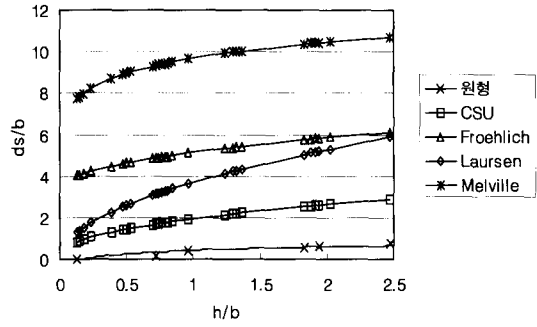
b' 은 투영교각폭, D_{50} 는 평균입경이다.

그림 13~그림 17은 각각의 교각에 대하여 기존의 비점착성 하상에서 사용하고 있는 세굴공식에 의해 계산된 세굴심도와 본 실험에 있어서 세굴심도를 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 각각의 교각에서 발생한 세굴심도는 기존의 세굴공식에 의한 세굴심도보다 항상 작게 나타나며 그 차이에 있어서는 교각의 형상에 따라 차이를 보이고 있다. 따라서 점착성 하상에서의 세굴심도는 기존의 세굴공식을 사용하는 경우 교각의 형상에 따라 많은 차이가 발생하고 있음을 알 수 있다.

그림 18은 교각폭, 하상경사, 개도비 등이 같고 하상의 재료만 점착성 점토를 사용한 경우와 비점착성 모래를 사용했을 경우의 최대세굴심도의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 점착성 하상에서의 세굴심도는 비점착성 하상에서의 세굴심도 보다 작게 발생

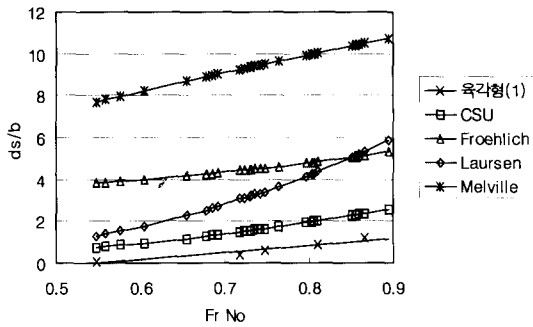


(a) Froude수에 비교

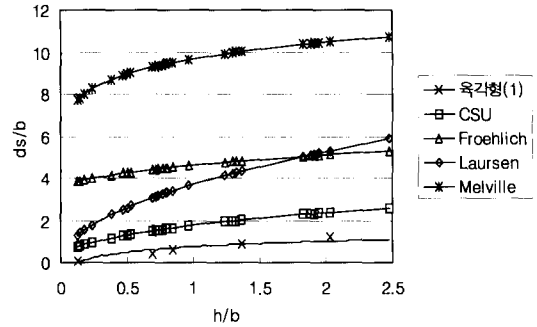


(b) 수심에 따른 비교

그림 13. 원형교각의 세굴공식과의 세굴심도 비교

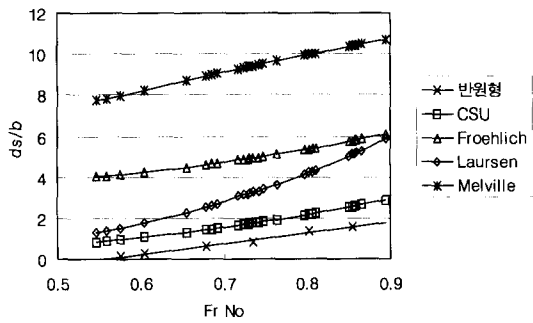


(a) Froude수에 따른 비교

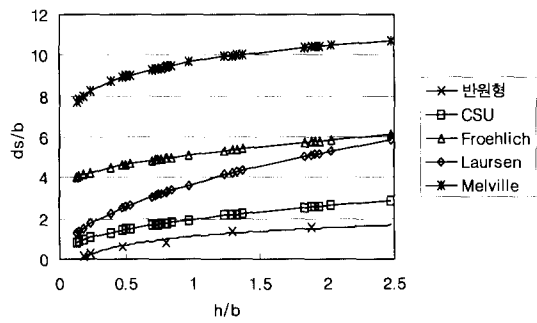


(b) 수심에 따른 비교

그림 14. 육각형교각(1)의 세굴공식과의 세굴심도 비교



(a) Froude수에 따른 비교

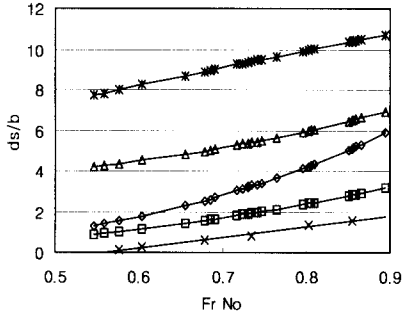


(b) 수심에 따른 비교

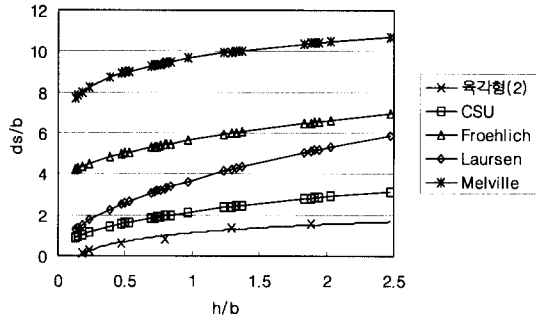
그림 15. 반원형교각의 세굴공식과의 세굴심도 비교

하고 있으며 교각의 형상에 따라 그 차이는 서로 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서, 점착성 하상에서보다 세굴심이 크게 발생하는 비점착성 하상에서

사용되는 기존의 세굴공식을 점착성 하상에 그대로 사용하는 것은 무리가 있을 것으로 판단되며 계수등의 조정이 필요할 것으로 판단된다.

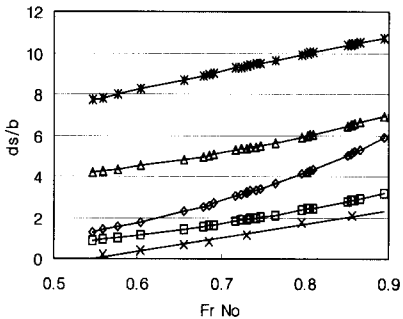


(a) Froude수에 따른 비교

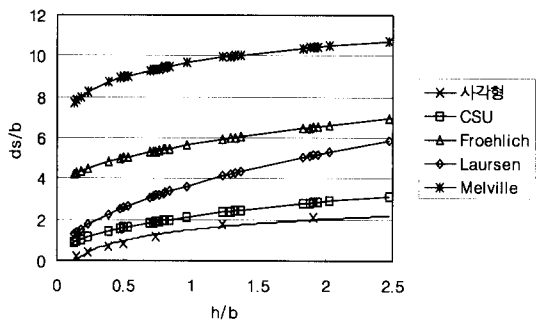


(b) 수심에 따른 비교

그림 16. 육각형교각(2)의 세굴공식과의 세굴심도 비교



(a) Froude수에 따른 비교



(b) 수심에 따른 비교

그림 17. 사각형교각의 세굴공식과의 세굴심도 비교

4.4 교각형상계수

그림 12에 근거하여 수심변화에 따라 원형교각의 세굴심도를 1.0으로 하였을 때 원형교각에 대한 각각의 교각 형상별 세굴심도의 비교를 그림 19에 나타냈는데, 세로축은 원형교각의 세굴심도에 대한 각각의 교각 형상별 세굴심도의 비를 의미한다. 또한 그림 20에는 CSU공식에서 사용하고 있는 교각형상계수를 나타냈는데 그림 19와 그림 20에서 알 수 있듯이 기존의 비점착성 하상에서 사용하고 있는 교각의 형상계수는 원형을 1.0으로 할 때 수심의 변화에 상관없이 교각의 형상에 따라 0.9~1.1의 값을 사용하고 있는데 비하여 본 실험에서 사용한 점착성 하상에서의 교각형상계수는 수심/교각폭의 비가 1.2이하에서는 수심에 따라 원형교각에 대한 교각 형상별 세굴심도의 비가 많은 변화를 보이고 있으며 1.2이상에서는 거의 비슷한 양상을 보이고 있다. 따라서 점착성 하상에서는 수심에 따라 교각 형

상별 세굴심도의 비에 많은 변화가 발생하고 있으므로 국부세굴심을 고려할 경우는 교각의 형상에 대한 영향을 반드시 고려해야하며 수심의 변화에 대한 교각의 형상계수를 표 1과 같이 제안하였다. 표 1에서 보던 제안된 형상계수는 수심이 낮은 경우와 높은 경우에 두 가지의 형태로 표현되는데 수심이 낮은 경우에 육

표 1. 점착성 하상에서 수심에 따른 교각별 형상계수

교각형상 \ h/b	0.3 ≤ h/b < 1.2	1.2 ≤ h/b ≤ 2.1
원형	1.0	1.0
육각형(1)	1.7(h/b) ^{-0.15}	1.7
반원형	2.6(h/b) ^{-0.06}	2.6
육각형(2)	2.8(h/b) ^{-0.11}	2.8
사각형	3.4(h/b) ^{-0.16}	3.4

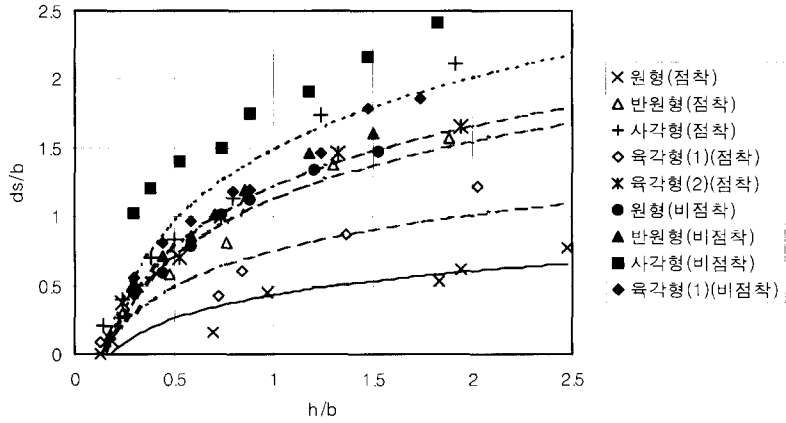


그림 18. 점착성 하상과 비점착성 하상에서의 수심에 따른 세굴심도의 비교

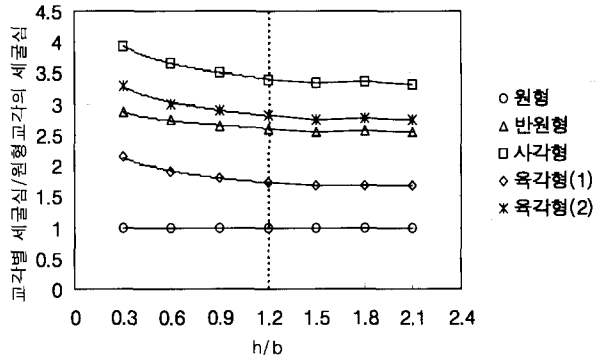


그림 19. 본 실험에서 구해진 수심에 따른 교각의 형상별 세굴심도의 비

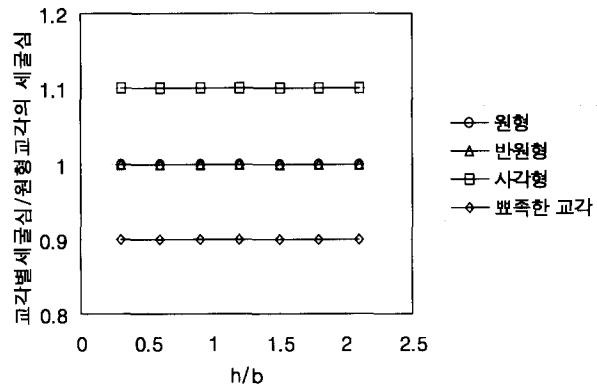


그림 20. CSU공식에서 사용되는 수심에 따른 교각의 형상별 세굴심도의 비

각형교각(1)의 경우는 $1.7(h/b)^{-0.15}$, 반원형교각에서는 $2.6(h/b)^{-0.06}$ 그리고 육각형교각(2)와 사각형교각에서는 각각 $2.8(h/b)^{-0.11}$, $3.4(h/b)^{-0.16}$ 로써 수심비에 대한 방정식으로 표현하였고, 수심이 높은 경우에는 육각형교각(1)에서 1.7, 반원형교각에서 2.6, 육각형교각(2)에서 2.8 그리고 사각형교각에서 3.4로써 교각형태에 따라 상수로 제안하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 점착성 하상에 설치된 여러 형태의 교각 형상에 따른 국부세굴에 관한 실험연구를 수행하였으며, 연구결과는 아래와 같다.

(1) 본 실험에서 사용된 점착성 하상에 설치된 서로 다른 형태의 교각주위의 세굴심을 계산하는데 이용될 수 있는 교각형상계수를 교각폭에 대한 수심의 비에 따라 제안하였다. 수심이 낮은 경우는 교각폭과 수심비에 대한 방정식으로 제안하였고, 수심이 높은 경우는 교각형태에 따라 상수로 제안하였다.

(2) 본 실험에서와 같이 점착성 하상에 있어서의 최대세굴심은 장시간 동안 발생하여 세굴심에 대한 시간의 영향은 비점착성 하상에 비하여 훨씬 분명하게 나타났다.

(3) 본 실험에 사용된 점착성 하상에서의 여러 가지 교각형상에 대한 세굴심도의 변화에 있어서 발생한 최대세굴심도는 원형교각, 육각형교각(1), 반원형교각, 육각형교각(2), 사각형교각의 순서로 증가하는 것으로 나타났다.

(4) 점착성 하상에서의 세굴은 전단강도, 소성지수, 점토함유율 등 하상재료 자체의 특성에 따라 변화하므로 점착성 하상에서 세굴심도 예측을 위하여는 하상재료의 특성이 고려되어야 한다.

(5) 기존의 세굴공식에 의해 계산된 세굴심도는 점착성 하상에서의 세굴심도와 다르게 나타나고 있으므로 기존의 세굴공식을 점착성 하상에 그대로 적용하기 위하여는 신중한 검토가 필요하며 향후 계수등의 조정이 이루어져야 할 것으로 판단된다. 아울러, 점착성 하상재료의 특성이 고려된 세굴공식을 개발하기 위하여는 하상재료의 여러 가지 특성과 세굴심도의 관계에 대한 세부적인 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

김재중 (1989). 점성토의 침식 및 퇴적에 관한 연구. 박사학위논문, 서울대학교.

안상진, 김응용, 이재경 (1996). "교각형상에 따른 국부세굴의 실험적 연구." 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, pp. 155~161.

안수환, 이상화 (1990). "점착성 부유사 이동에 관한 수치모형." 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제 23권, 1호, pp. 119-127.

안창진 (1994). 반원형 교각에서 국부세굴에 대한 접근각도의 영향. 석사학위논문, 충북대학교.

오정희 (1996). Y형 교각에서의 세굴심도 및 배후하상변화에 관한 실험적 연구. 석사학위논문, 인천대학교.

최계운 (1997). 영종도 신공항 고속도로 연육교구간 세굴방지공법 검토 및 실시설계 보고서. 삼성물산(주) 건설부문, (주)다산건설턴트, pp. 16-92.

Abdel-Rahmann, N.M. (1964). *The effect of flowing water on cohesive beds*. Contribution No. 56, Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau an der Eidgenössischen Technischen Hochschule, Zurich, Switzerland, pp. 1-114.

Ariathurai, R. and Arulanandan, K. (1978). "Erosion rates of cohesive soils." *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 104, No. HY5, pp. 279-283.

Arulanandan, K. (1975). "Fundamental aspects of erosion of cohesive soils." *Journal of The Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 101, No. HY5, pp. 635-639.

Dunn, I.S. (1959). "Tractive resistance of cohesive channels." *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 85, No. SM3, Proc. Paper 2062, pp. 1-24.

Enger, P.F. (1964). *Canal erosion and tractive forces study-Analysis of data taken on a boundary shear flume*. Hydraulic Branch Report No. Hyd-532, Bureau of Reclamation, Denver, Colo.

Kelly, W.E. and Gularte, R.C. (1981). "Erosion resistance of cohesive soils." *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 107, No. HY10, pp. 1211-1224.

Nagy, G.R.Y. (1995). *Effect of cohesion on bridge abutment scour*. Ph. D. Dissertation,

- Colorado State Univ., Fort Collins, Co.
- Parchure, T.M. and Mehta, A.J. (1985). "Erosion of soft cohesive sediment deposits." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 10, pp. 1308-1326.
- Paaswell, R.E. (1973). *Causes and mechanisms of cohesive soil erosion*. The State of the Art. Special Report 135, Highway Research Board, National Research Council, pp. 52-74.
- Raudkivi, A.J. and Tan, S.K. (1984). "Erosion of cohesive soils." *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 22, No. 4, pp. 217-233.
- Rectorik, R.J. and Smerdon, E.T. (1964). "Critical shear stress in cohesive soils from a rotating shear apparatus." Paper No. 64-216, ASCE .
- Smerdon, E.T. and Beasley, R.P. (1961). "Critical tractive force in cohesive soils." *Agricultural Engineering*, Vol. 42, pp. 26-29.
- Sunberg, A. (1956). "The river Klaralven, A study of fluvial processes." *Geografiska Annaler*, Arg. XXXVIII, Hafte 2-3, pp. 127-316.
- Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1971). *Soil mechanics in engineering practice*. 2nd Edition, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- The Task Committee on Erosion of Cohesive Materials Committee on Sedimentation (1968). "Erosion of cohesive sediment." *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 94, No. HY4, pp. 1017-1046.

(논문번호:98-029/접수:1998.05.23/심사완료:1998.08.13)