

점착성 하상의 교각형상별 세굴양상에 관한 실험적 연구

최계운* 김기형**

1. 서론

하상에 설치된 교각주변에서 발생하는 국부세굴은 교량을 설치하거나 또는 이미 설치된 교량의 안전문제를 판단하는데 있어서 매우 중요한 문제이다. 국부세굴의 주요 원인은 교각주위에서 발생하는 와류로 알려져 있으며, 이 와류의 변화는 흐름자체의 특성뿐만 아니라 하상재료의 상호작용으로 인하여 매우 복잡한 양상을 띠게 되고 세굴현상을 이론적으로 규명하는 것은 매우 어렵기 때문에 세굴의 연구는 주로 모형실험에 의하여 수행되어져 왔다. 많은 하천의 경우 비점착성 하상으로 이루어져 있으며 이 경우 대부분이 비점착성인 모래가 하상재료로 사용되었다. 그러나, 최근들어 영종대교나 서해대교와 같이 전형적인 점착성 하상재료 위에 교량이 설치되는 경우가 늘어나면서 점착성 하상에서의 세굴현상에 관한 관심이 늘어나고 이때 비점착성 하상재료에서 도출된 세굴공식을 직접 적용하는 것에 대한 우려도 높아지고 있는 실정이다.

따라서 본 논문에서는 하상재료가 점착성이 있는 점토인 경우에 여러 형태의 모형 교각 주위에서 발생하는 세굴양상을 실험적으로 연구하였으며, 기존의 비점착 하상에서 사용되고 있는 세굴공식을 이용하여 계산한 세굴 결과와 비교하였다. 또한, 각각의 교각형태에 따른 세굴심도 변화 실험을 실시하여 원형교각 주위에서의 세굴심도에 대한 비율로 점착성 하상에서의 세굴심도 산출을 위한 교각형상계수를 제안하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

본 실험에 사용된 하상재료는 인천연안에서 채취한 점착성이 있는 점토가 사용되었다. 실험에 사용된 하상재료의 기본적인 특성으로는 비중이 2.74이며 함수비는 56%, 평균입경은 0.048mm로 200번체를 모두 통과하며, 전단강도는 $1200\text{kg/m}^2(250\text{lb/ft}^2)$, 액성한계 25%, 소성한계 21.46%, 소성지수 3.54의 유기성 실트질 점토로 나타났다. 그림 1은 본 실험에 사용된 하상재료의 입도분포를 보여주고 있다. 실험 수로로는 길이가 12m이며 폭과 높이가 각각 40cm이고 0~2%의 경사조절이 가능한 수로가 사용되었고, 교각모형은 원형, 반원형, 사각형, 그리고 2가지의 육각형 단면을 가진 5개의 교각모형을 아크릴로 제작하여 사용하였으며 교각의 표면에는 세굴심 측정이 용이하도록 눈금이 새겨진 스티커를 부착하여 사용하였다. 그림 2는 본 실험에 사용된 모형수로의 개략도이며 그림 3은 교각모형의 단면을 보여주고 있다.

* 인천대학교 토목공학과 교수 ** 인천대학교 토목공학과 박사과정

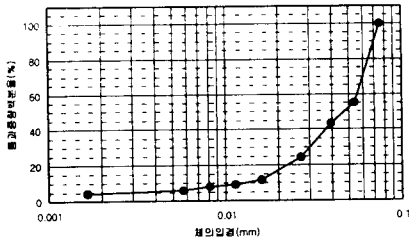


그림 1 하상재료의 입도분포 곡선

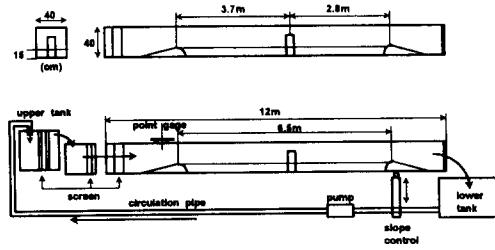


그림 2 모의 수로장치의 개략도

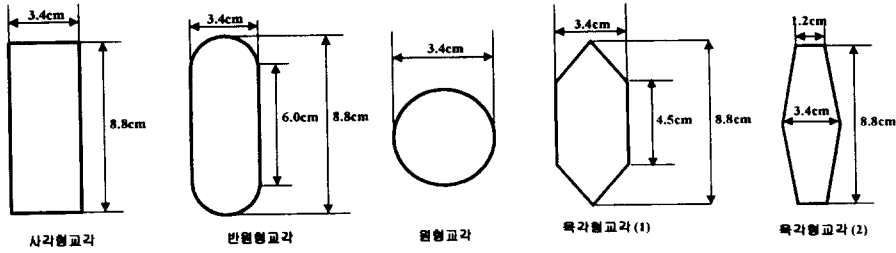


그림 3 실험에 사용된 교각모형

2.2. 실험방법

본 실험에 있어서 하상재료는 수로에 약간의 물을 채운 후 하상재료를 물에 풀어 덩어리가 생기지 않도록 포설하고 포설된 하상으로부터 20cm 높이로 물을 채워 물다짐하여 10일 후 베인전단강도의 약 75%에 해당하는 베인전단강도를 보이는 72시간이 경과한 후에 실험을 실시하였다. 그림 4는 시간에 따른 하상재료의 베인전단강도를 보여주고 있다. 또한 조도계수는 그림 5와 같이 수심에 따른 변화를 보이고 있는데 수심이 0.9cm 정도까지는 수심에 따라 조도계수가 급격히 감소하며 변화하고 있으나 0.9cm 이상의 수심에서는 수심의 변화에 따른 조도계수 값의 변화가 미미하였다. 따라서 본 실험에서의 Fr수는 그림 5의 조도계수를 이용하여 계산된 유속을 사용하여 구하도록 하였다.

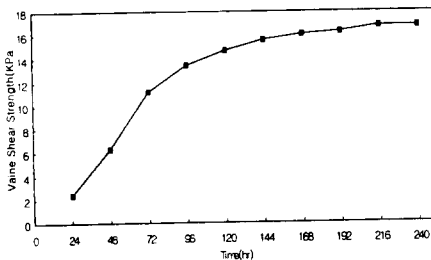


그림 4 하상재료의 베인전단강도의 변화

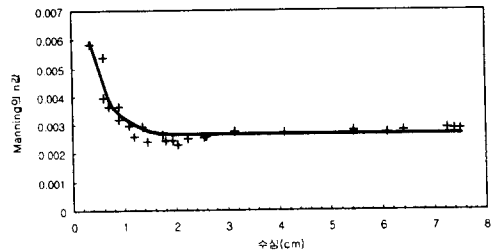


그림 5 수심에 따른 조도계수의 변화

또한 수로의 경사에 있어서는 수로의 경사가 없는 상태에서 유량조건상 0.6이상의 높은 Fr수를 발생시키기가 곤란하여 Fr수가 0.6이상이 되도록 하기 위하여 0.0028의 경사를 둔 상태에서 실험을

실시하여 원하는 수심에 도달하면 세굴심을 측정하였는데 실험의 지속시간은 충분한 세굴이 발생한 것으로 판단되는 3시간으로 하였다.

3. 실험결과와 정리

3.1. 시간에 따른 세굴심도의 변화

일반적으로 세굴심은 시간에 대하여 영향을 받으며 일정 시간이 경과하면 세굴심은 더 이상 증가하지 않고 평형세굴심에 도달하는 것으로 알려져 있는데, 점착성 하상에서의 시간에 따른 세굴심의 변화를 알아보기 위하여 점착성 하상과 비점착성 하상에서 실험시간에 따른 세굴심의 변화를 비교하였다. 그림 6과 그림 7은 이를 나타내고 있는데 그림에서 알 수 있듯이 비점착성 하상에서의 최대세굴심이 수심분 이내에 발생하는 것에 비하여 점착성 하상에서의 세굴은 비점착성 하상에서보다 최대세굴심이 장시간에 걸쳐 발생하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 점착성 하상에서는 단기간 동안에 세굴에 의한 문제가 발생하지 않았다고 할지라도 오랜 기간이 지난 후에는 세굴에 의한 문제가 발생할 수 있으므로 세굴에 의한 영향을 검토할 경우 시간에 의한 영향을 반드시 고려해야 할 것으로 판단된다.

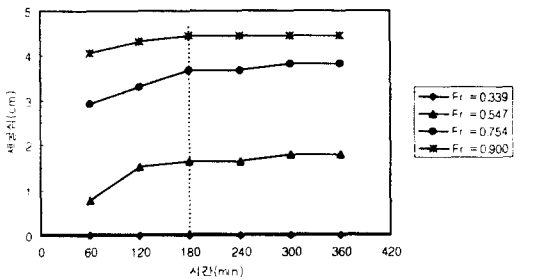


그림 6 점착성 하상에서의 시간별 세굴심

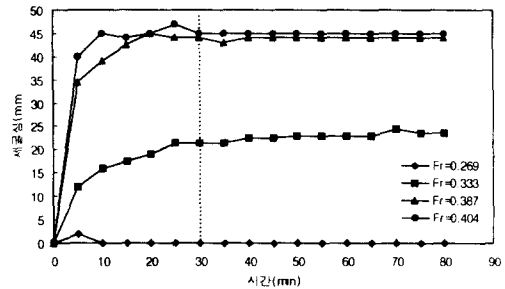


그림 7 비점착성 하상에서의 시간별 세굴심

3.2. Froude수 및 수심에 따른 세굴심도의 변화

비점착 하상에서 교각주위에 발생된 세굴심은 되메움 현상으로 세굴심이 증가와 감소를 반복하는 경향이 있는 반면에 점착성 하상에서는 Fr수와 수심이 증가함에 따라 세굴심이 증가와 감소의 반복이 없이 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 이는 점착성 하상재료의 점토입자가 매우 작기 때문에 세굴공 안으로 유입된 입자가 매우 작은 소류력에도 이동하여 다시 세굴공 밖으로 유출되기 때문으로 판단된다. 그림 8과 그림 9는 Fr수와 수심의 증가에 따른 세굴심의 변화를 보이고 있는데 그림에서 보듯이 원형교각의 세굴심이 가장 작게 나타났으며 육각형교각(1), 반원형교각, 육각형교각(2), 사각형교각의 순으로 세굴심이 크게 발생하고 있다.

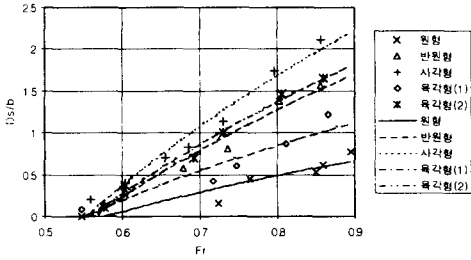


그림 8 Fr수에 따른 교각별 세굴심의 변화

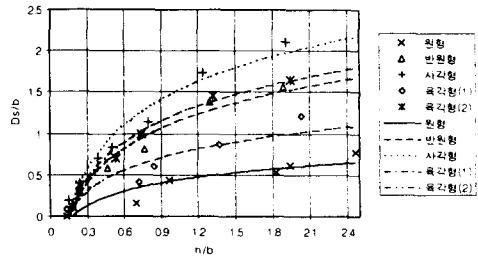


그림 9 수심에 따른 교각별 세굴심의 변화

3.3. 비점착성 하상과의 비교

기존에 제안된 비점착성 하상에서 사용되고 있는 세굴공식이 점착성 하상에서도 적절히 사용될 수 있는지를 알아보기 위하여 실험결과로 측정된 세굴심과 기존의 세굴공식에 의하여 계산된 세굴심을 비교하였다. 비교에 사용된 세굴공식은 비교적 많이 알려져 있는 CSU, Froehlich, Laursen, Melville공식을 사용하였다. 또한 기존에 연구된 비점착성 하상에서의 類似한 세굴실험의 결과를 이용하여 본 실험의 결과를 비교 분석하였다.

그림 10은 기존의 비점착성 하상에서 사용하고 있는 세굴공식에 의해 계산된 세굴심과 본 실험의 원형교각의 세굴심을 비교한 것이고 그림 11은 사각형 교각의 세굴심을 비교한 것이다. 세굴심이 가장 작게 나타나는 원형교각과 세굴심이 가장 큰 사각형교각에서의 세굴심은 공식에 의해 계산된 세굴심보다 항상 크게 작게 나타나고 있으며, 원형교각에서 그 차이는 더욱 크게 발생하고 있다. 따라서 점착성 하상에서의 세굴심은 교각의 형상에 따라 많은 차이가 발생하고 있음을 알 수 있다.

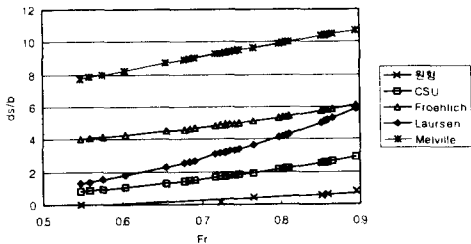


그림 10(a) 원형교각의 Fr수에 따른 세굴공식과의 세굴심 비교

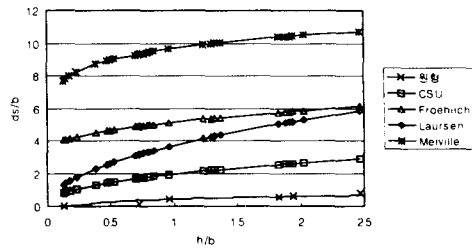


그림 10(b) 원형교각의 수심에 따른 세굴공식과의 세굴심 비교

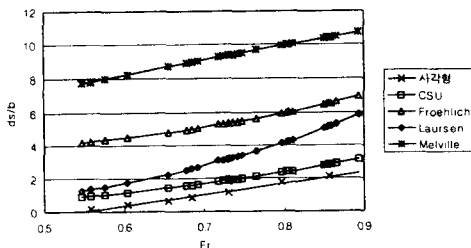


그림 11(a) 사각형교각의 Fr수에 따른 세굴공식과의 세굴심 비교

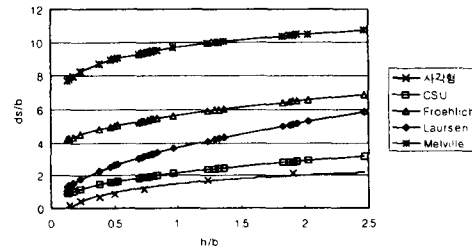


그림 11(b) 사각형교각의 수심에 따른 세굴공식과의 세굴심 비교

또한 그림 12와 그림 13은 기존에 연구된 비점착성 하상에서의 類似실험과 본 실험의 결과를 비교한 것으로 비점착성 하상에서 발생된 세굴심은 점착성 하상에서의 세굴심보다 크게 발생하고 있는 것을 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.

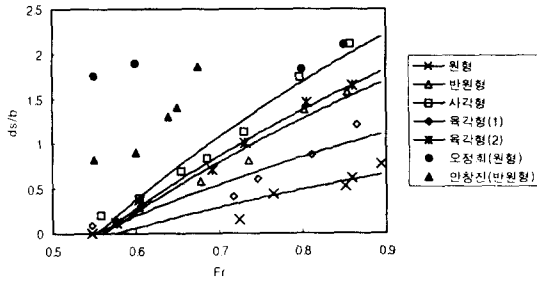


그림 12 Fr수에 따른 비점착하상에서의 類似실험과의 비교

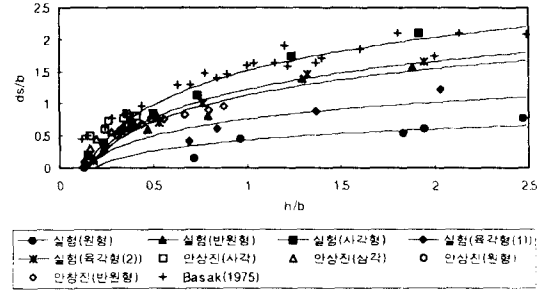


그림 13 수심에 따른 비점착하상에서의 類似실험과의 비교

3.4. 교각형상계수

그림 9에 근거하여 수심변화에 따른 교각 형상별 세굴심도의 비교를 그림 14에 나타냈는데, 세로 축은 원형교각의 세굴심도에 대한 각 형상별 세굴심도의 비를 의미한다. 그림에서 알 수 있듯이 수심/교각폭의 비가 1.2이하에서는 원형교각에 대한 교각 형상별 세굴심도의 비가 많은 변화를 보이고 있으며 1.2이상에서는 거의 비슷한 양상을 보이고 있다. 따라서 점착성 하상에서는 수심에 따라 교각 형상별 세굴심도의 비에 많은 변화가 발생하고 있으므로 국부세굴심을 고려할 경우는 교각의 형상에 대한 영향을 반드시 고려해야하며 수심의 변화에 대한 교각의 형상계수를 표 1과 같이 제안하였다.

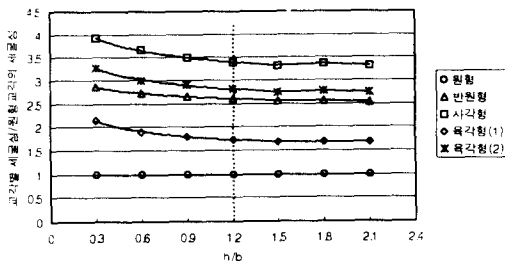


그림 14 수심에 따른 교각의 형상별 세굴심도의 비

표 1 점착성 하상에서 수심에 따른 교각별 형상계수

교각형상 \ h/b	h/b	
	$0.3 \leq h/b < 1.2$	$1.2 \leq h/b \leq 2.1$
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

4. 결론

본 연구는 점착성 하상에 설치된 여러 가지 형태의 교각에서 발생하는 세굴양상을 파악하기 위하여 수행되었으며 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

첫째로, 점착성 하상재료에 있어서는 교각의 형상비를 비점착성 하상에서 사용하고 있는 교각의 형상비와는 다르게 적용하여야 하며 이때 적용되는 교각형상계수는 아래와 같다.

교각형상 \ h/b	$0.3 \leq h/b < 1.2$	$1.2 \leq h/b \leq 2.1$
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	$3.4(h/b)^{0.17}$	3.4

둘째로, 점착성 하상에 있어서는 세굴심은 퇴메임 현상이 발생하지 않았으며 최대세굴심이 장시간에 걸쳐 발생하므로 시간에 대한 영향을 반드시 고려하여야 한다.

셋째로, 본 실험에 사용된 여러 가지의 교각형상에 대한 세굴심의 변화는 있어서 발생한 최대세굴심은 원형교각, 육각형교각(1), 반원형교각, 육각형교각(2), 사각형교각의 순서로 증가하는 것으로 나타났다.

넷째로, 기존의 세굴공식에 의해 계산된 세굴심은 점착성 하상에서의 세굴심과 다르게 나타나고 있으므로 기존의 세굴공식을 점착성 하상에 그대로 적용하기에는 무리가 있으며 향후 계수등의 조정이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

- Breusers, H. N. C., G. Nicollet, H. W. Shen, Local Scour around Cylindrical Piers, J. of Hydraulic Research, Vol. 114, No. 10, pp. 221-252, 1977.
- FHWA; Evaluating Scour at Bridges, Publication No. FHWA-IP-90-017, 1995.
- Yanmaz, A. M. and Altinbilek, H. D., Study of Time-Dependent Local Scour Around Bridge Piers, J. of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 117, 1991.
- 건설교통부, 하천횡단 구조물의 세굴안전진단 시스템의 개발, R&D/95-0078, 1997.
- 안상진, 김용용, 이재경, 교각형상에 따른 국부세굴의 실험적 연구, 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp. 155~161, 1996.
- 안창진, 반원형 교각에서 국부세굴에 대한 접근각도의 영향, 충북대학교 토목공학과, 1994.
- 오정희, Y형 교각에서의 세굴심도 및 배후 하상변화에 관한 실험적 연구, 인천대학교 토목공학과, 1996.