

모형실험을 통한 해상교각 주위에서의 세굴예측

최계운*, 서병하**, ○곽한범***

1. 서론

지금까지 세굴에 관한 논의는 주로 하천에 설치되어지는 교각에 대하여 이루어져 왔었다. 이와 같이 하천에 관하여 세굴을 검토하는 경우의 하상재료는 주로 사질토(모래)가 주종을 이루고 있다. 하상재료가 사질토인 경우 점성력이 없으며 입경도 비교적 큰 재료이나, 교량이 해상에 설치되는 경우에는 하천에 세워지는 경우와 전혀 다른 하상 특성을 가지고 있다. 해상에서의 하상재료는 주로 점성을 가진 점토나 실트질로써 점성력을 가지고 있으며 입경도 상당히 작아서 물의 흐름에 따라 움직이는 특성도 사질토와 상당히 다르다. 즉, 하천내에서는 소유사가 주종인 반면, 해상에서는 부유사가 주종을 이루고 있어서 최대세굴심도 및 세굴폭에도 큰 차이를 나타내고 있다. 국내의 경우 최근에 들어서 서해대교, 영종대교 등 해상에 설치되는 교각이 점차 증가하고 있어서 이에 대한 세굴의 예측과 예측된 세굴에 대한 세굴방지 대책이 신중히 검토되어야 할 것이다.

하천에 설치되어지는 교각의 안전에 큰 영향을 미치는 세굴은 크게 3종류로 구분할 수 있는데 첫째로는 하천내의 유속과 유량변화에 기인하여 하상재료가 이동하게 되는 자연발생적 하상상승이나 하상하강작용이 있으며, 둘째로는 수중에 축조된 수중구조물이나 축조된 제방등에 의하여 생기는 수축세굴과 국부세굴이 있다. 하상상승이나 하상하강작용으로 생기는 세굴은 장기적으로 발생되는 세굴이며, 수축세굴이나 국부세굴은 단기적으로 발생되는 세굴이다. 안정된 하천이나 해상에서 교량의 안전에 크게 영향을 미치는 것은 수축세굴과 국부세굴로 알려져 있다. 수축세굴은 통수단면적이 수중구조물등으로 인하여 줄어들어 발생하는 경우가 대부분이며 국부세굴은 교각이 설치됨에 따라 수류 흐름에 영향을 미치고 이로 인하여 교각주위에 발생되는 와류(Vortex)가 발생하고, 이에 따라 발생하는 세굴이 대부분이다. 교각 주위에서 발생하는 세굴은 흐름 및 하상의 여러 특성에 의하여 발생하는 양이 상이하기 때문에 세굴을 정확하기 예측하기란 매우 어렵다. 이러한 이유 때문에 지금까지 세굴예측을 하는 데 가장 많이 선호된 것이 모형실험을 이용한 방법이다.

본, 논문에서도 해상교각에서의 세굴예측에 단순히 사질토에 사용되는 기존의 세굴공식을 적용기 보다는 실제의 모형교각을 제작하여 모형실험을 실시하고 이를 기초로 세굴량을 예측하였다. 본 논문에서는 모형실험 대상 교각으로 서해 앞 바다에 설치되는 영종대교를 선정하고 이 교량의 주탑과 단부교각을 선택하여 세굴심도와 세굴폭의 변화에 대하여 연구하였다.

* 인천대학교 토목공학과 교수

** 인하대학교 토목공학과 교수

*** 인천대학교 토목공학과 석사과정

2. 모형실험 장치 및 실험방법

인천광역시 서구 경서동(장도)와 중구 운북동 경종도)간을 연결하는 4,420m 길이의 영종대교는 양쪽의 교대 및 47개의 교각을 지니고 인천국제 공항을 드나드는 수 많은 승객들이 이용하게 될 중요한 교량이다. 교각은 크게 현수교, 트러스교, 강상형교 부분으로 나누어지며, 이 중에서 현수교 부분은 교량의 중앙에 위치하여 300m의 공간을 지닌 가장 중요한 부분으로 이를 지지하는 교각을 주탑교각이라 하고, 트러스교를 지지하는 교각들을 단부교각이라 하며 이를 원형으로 하여 모형을 제작하였다.

모형교각은 아크릴을 가공하여 축척 1 : 532.5로 제작하여 사용하였으며 수로에 포설되어진 포설재료는 영종대교 현장에서 준설된 준설토를 사용하였다.

포설재료의 비중은 2.74이었으며 $d_{50} = 0.048\text{mm}$ 이고 입도곡선은 그림 1에서 보여지고 있다.

세굴실험은 수로의 유량을 변화시켜 가면서 Fr 수를 점차적으로 증가시켜 Fr 수의 변화에 따른 세굴심도 및 세굴폭을 측정하도록 하였다. 그림 2는 이때 사용된 실험장치를 나타내고 있다.

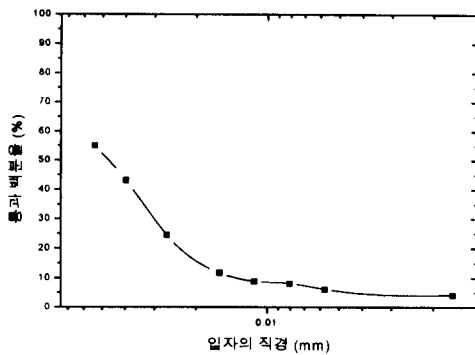


그림 1. 준설토의 입도분포 곡선

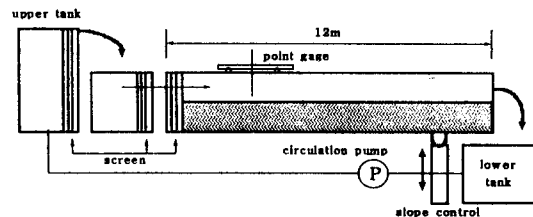


그림 2. 세굴실험을 위한 실험장치

3. 모형실험을 통한 세굴심 및 세굴폭 실험결과 분석

3.1 주탑교각에서의 세굴실험 결과

세굴실험은 최대세굴 깊이와 최대세굴 폭을 결정하도록 수행되었으며 Fr수의 증가에 따른 영향을 검토하였다. 그림 3에서 보는 바와 같이 실험수로에서 Fr 수가 0.4까지는 세굴현상이 발생하지 않았으며 Fr 수가 0.4이상에서는 점차 최대세굴 심도가 증가하고 있다. 모형제작을 위하여 Froude 상사법칙을 적용하고 원형과 모형에서의 ω/U^* 를 동일하게 유지한 가운데 실험을 진행하였으며 이때 원형에서의 세굴심도 추정은 모형에서의 Fr 수가 1.28인 경우에 대하여 결정하는 것으로 하였다.

실험결과에 의하면 교각폭에 대한 최대세굴심의 비 d_s/b 는 1.571로 나타났으며 그림 4에서 보는 바와 같이 교각폭에 대한 최대세굴폭에 비 d_H/b 는 1.716으로 나타났다. 그림 3과 4에서 보는 바와 같이 최대세굴심도는 Fr 수가 증가함에 따라 지속적으로 증가하고 있으나 Fr 수가 클수록 그 증가량이 둔화되고 있으며, 최대세굴폭의 경우는 Fr 수가 어느 정도 이상이 되면 오히려 감소하는 경향을 보이고 있다.

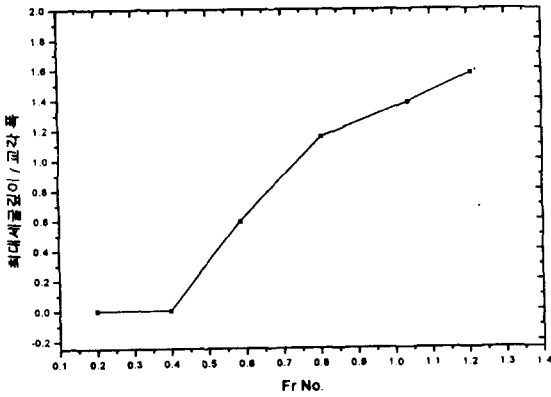


그림 3. Fr 수에 대한 최대세굴심의 변화

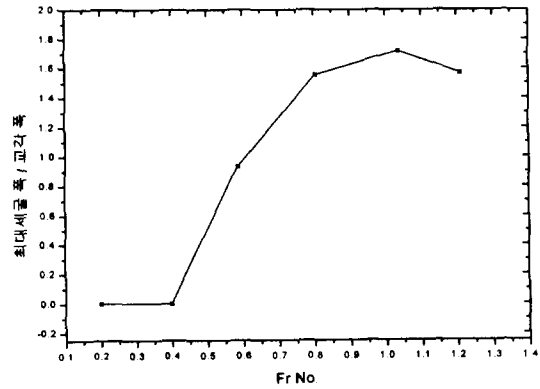


그림 4. Fr 수에 대한 최대세굴폭의 변화

3.2 단부교각에서의 세굴실험 결과

3.1절의 주탑교각에서와 동일한 조건으로 단부교각의 모형을 제작 설치하여 실험을 실시하였다. 그림 5에서 보는바와 같이 세굴실험 결과 Fr 수가 0.4까지는 주탑교각에서와 같이 국부세굴이 거의 일어나지 않았으며, Fr 수의 0.7정도 이상을 나타낼때는 최대세굴심도의 변화가 크지 않았다. 교각폭에 대한 최대세굴심도의 비 d_s/b 는 2.33정도를 보이고 있다. 세굴폭에 대한 실험결과는 그림 6에 나타내었으며 Fr 수가 0.4이하에서는 최대세굴심도와 같이 세굴폭의 변화가 없다가 Fr 수가 증가함에 따라 거의 직선적으로 증가하고 있으며 교각폭에 대한 최대세굴폭의 비 d_w/b 는 2.8을 나타내고 있다.

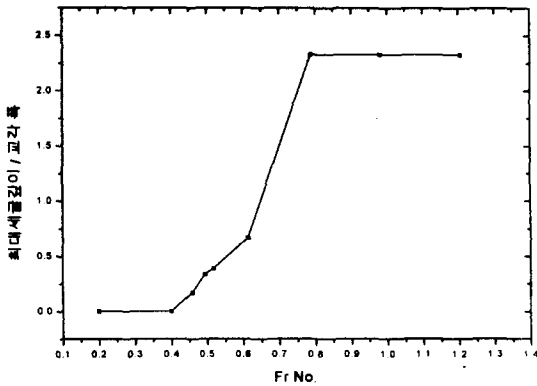


그림 5. Fr 수에 대한 최대세굴심의 변화

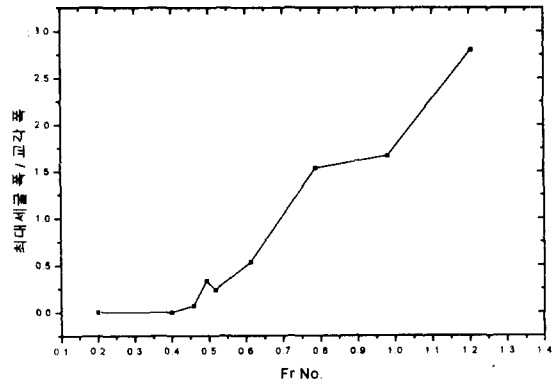


그림 6. Fr 수에 대한 최대세굴폭의 변화

4. 기존 세굴공식 및 사질토 하상과의 비교 및 검토

4.1 기존 세굴공식과의 비교

그동안 교각 설치에 의한 최대세굴심도 산정을 위하여 제안된 세굴공식은 수십개에 이르고 있

으며 이와같은 세굴공식을 세굴공식 개발 당시의 경제조건등을 검토함이 없이 단순히 세굴심도를 산정하는데 이용하는 것은 실제 하천의 상황과 다른 결과를 초래하게 될 우려가 크다. 따라서, 본 논문에서는 비교적 적용성이 큰 것으로 제안된 CSU 공식, Froehlich 공식, Laursen 공식, Melville 공식을 사용하여 최대세굴심도를 산정하였으며, 이 결과와 세굴실험 결과를 비교분석 하였다. 이때 수축세굴공식으로는 Laursen공식을 사용하였다.

그림 7과 그림 8은 주탑 및 단부교각에서의 최대세굴심도의 비교를 보여주고 있으며 그림 9와 그림 10은 주탑 및 단부교각에서의 최대세굴폭의 비교를 보여주고 있다.

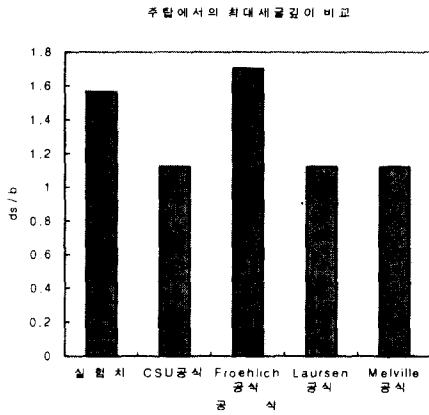


그림 7. 주탑교각에서의 최대세굴심도 비교

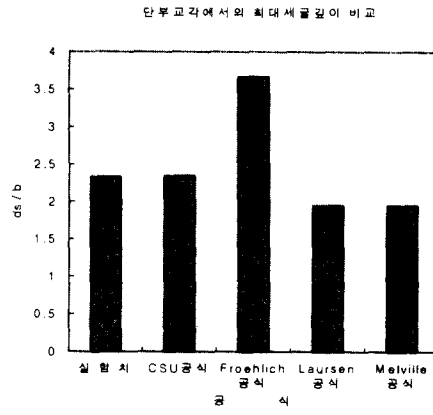


그림 8. 단부교각에서의 최대세굴심도 비교

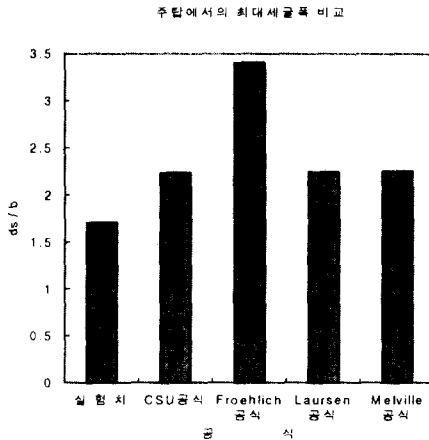


그림 9. 주탑교각에서의 최대세굴폭 비교

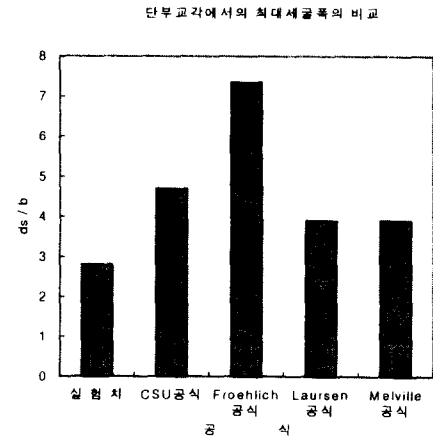


그림 10. 단부교각에서의 최대세굴폭 비교

최대세굴심도에 대하여는 그림 7에서 보는바와 같이 주탑에서의 실험결과치는 CSU, Laursen, Melville 공식에 의하여 추정된 세굴심도보다 크게 나타나나 Froehlich 공식에 의하여 추정된 세굴심도보다는 적게 나타나고 있다. 그러나, 단부교각에서는 그림 8에서 보는바와 같이 CSU 공식과 유

사하게 나타나고 있으나 Froeichlich 공식보다는 상당히 적게 나타나고 있다.

최대세굴폭에 대하여는 그림 9에서 보는바와 같이 주탑에서의 실험결과치는 각각의 공식에 의하여 추정된 세굴폭에 비하여 상당히 적게 나타나고 있으며, 단부교각에서는 그림 10에서 보는바와 같이 실험결과치가 상당히 적게 나타나고 있음을 보여준다. 따라서, 점성토 위에 세워진 해상교각의 경우 최대세굴폭은 사질토에 비하여 적게 나타나고 있음을 알수 있다.

4.2 사질토하상과의 비교

사질토하상에서의 최대세굴심도와 최대세굴폭을 점성토 하상에서의 최대세굴심도와 최대세굴폭을 비교하면 다음과 같다.

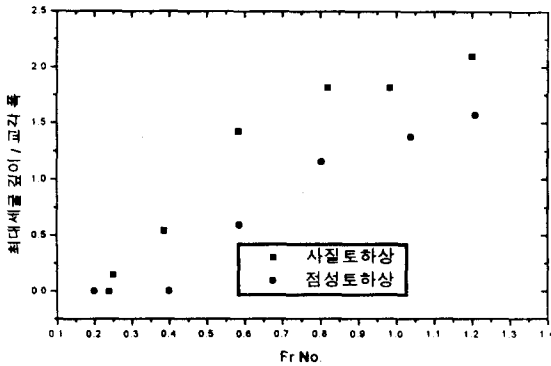


그림 11. Fr 수에 대한 최대세굴심의 변화(주탑교각)

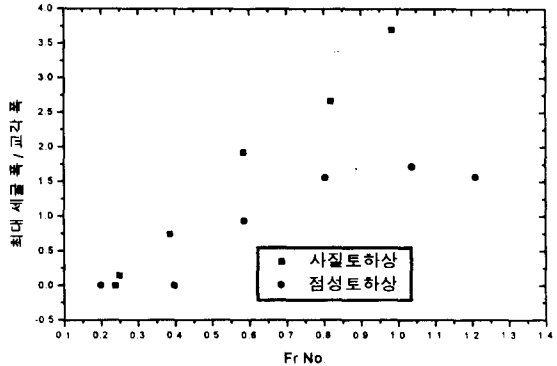


그림 12. Fr 수에 대한 최대세굴폭의 변화(주탑교각)

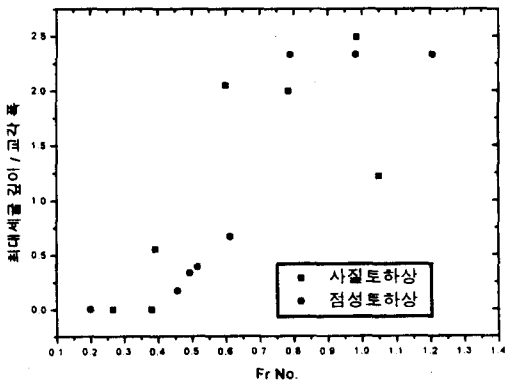


그림 13. Fr 수에 대한 최대세굴심의 변화(단부교각)

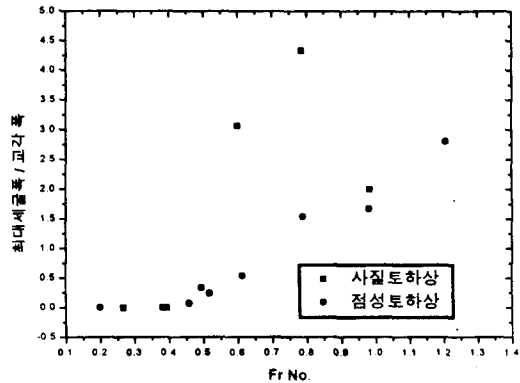


그림 14. Fr 수에 대한 최대세굴폭의 변화(단부교각)

그림 11에서 14까지에 의하여 하상재료에 따라 최대세굴깊이 및 최대세굴폭이 차이가 있다는 것을 알 수가 있다. 하상재료가 사질토인 경우와 점성토인 경우를 비교해 보았을 때 점성을 가진 하상이 중력의 영향을 더 많이 받는 사질토하상보다 세굴량이 약간 적게 나타나는 것을 볼 수 있으며 세굴의 양상은 Fr 수가 작은 경우에는 점착성의 하상재료와 사질토하상의 세굴량이 약간의 차이가 생겼지만 Fr 수가 증가할수록 그 차이가 증가하는 현상을 보이고 있다.

5. 결론

본 논문에서 해상교각 주위에서의 세굴 측을 위하여, 영종대교의 주탑 및 단부교각을 제작설치 세굴실험을 수행하였다. 세굴실험은 최대세굴심과 최대세굴폭으로 나누어 Fr 수를 증대시켜 가면서 수행되었으며, 세굴실험 결과 Fr 수가 증가할수록 최대세굴심 및 최대세굴폭이 증가하는 양상을 보였다. 이와같은 실험결과를 기존의 국부세굴 추정공식인 CSU 공식, Froehlich 공식, Laursen 공식 및 Melville 공식에 의하여 산정된 최대세굴심과 최대세굴폭을 비교하였다. 이 비교에 의하여 최대세굴심 실험결과는 Froehlich 공식에 의한 추정 결과보다는 작지만 나머지 공식에 의한 추정결과를 상회하는 것으로 나타났으며, 최대세굴폭에 관하여는 세굴실험 결과가 공식에 의하여 추정된 세굴폭보다 상당히 적게 나타났다. 따라서, 세굴방지공 설계시 이와같은 점을 반영할 필요가 있는 것으로 판단된다. 또한, 해상 점성토 위에 설치된 교각에서의 세굴과 사질토 위에 설치된 경우의 세굴을 비교한 결과 점성토를 가진 하상에서의 최대세굴심과 최대세굴폭이 적게 나타나는 경향이 있다.

참고문헌

1. Ettema, R., (1980), "Scour at Bridge Piers", Report No. 216, Dept of Civil Engineering, Univ. of Auckland, New Zealand.
2. Melville, B. W., (1975), "Local Scour at Bridge Sites", Report No. 117, School of Engineering, Univ. of Auckland, New Zealand.
3. Raudkivi, A. J. and R. Ettema, (1977), "Effect of Sediment Gradation on Clear-Water Scour", J. of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 103.
4. Richardson, E. V., Simons, D. B. and Julien, P.Y., (1987), "Highways in the River Environment", U. S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration.
5. 안상진, 최계운, 김종섭, 안창진, (1993), "보청천내 교각설치에 따른 국부세굴심도의 산정", 대한토목학회 논문집, 제13권 제3호 pp. 93~105.
6. 이재수, 윤용남, 호정석, (1996), "교량에서의 세굴깊이의 예측 및 실측치와의 비교분석", 1996년 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, pp167~172.
7. 최계운, (1995), "하천 구조물 설치에 따른 세굴발생과 최근 연구동향", 한국수자원학회지 제28권, 제6호 pp. 22~27.
8. 최계운, 김기형, 서병하, (1996), "하천내 연속교량 설치에 따른 세굴심도의 변화", 1996년도 학술발표회 논문집(Ⅱ), 대한토목학회, pp107~110.