

부정류에서의 원형교각주위 국부세굴 특성

○ 박용수*, 심우배**, 이상도**, 송재우***

1. 서론

국내 및 국외의 많은 학자들은 교량붕괴의 주된 수리학적 원인으로 교각세굴을 지적하고 있으며 하도의 불안정, 장기간 하상 상승과 저하, 일반세굴, 국부세굴, 측방향세굴 등이 미국 교량붕괴의 60%를 야기한다고 한다. 이러한 원인 중 국부세굴의 누적된 영향이 교량붕괴의 가장 뚜렷한 수리학적 요소로 나타났다(Lagasse, 1995).

세굴은 하상 및 제방에서 유수에 의하여 발생하는 침식작용으로 하상재료가 씻겨 제거되거나 이동되는 현상이다. 홍수가 발생하여 수위가 상승할 때는 최대세굴심이 발생하였다가 유속이나 수위가 감소함에 따라 세굴공 안으로 유사가 복원되는 퇴채움 현상이 발생한다. 따라서 퇴채움 현상을 고려한 최대국부세굴심의 산정은 일정 지속기간동안 연속적으로 국부세굴심을 측정해야하나 현장에서는 홍수 시 위험 문제와 다량의 부유물질 및 오염물질 때문에 연속적인 퇴채움현상을 측정하기가 어렵다. 그러므로 실험실에서 수리모형과 흐름에 영향을 주지 않는 세굴심 측정기구를 통하여 연속적인 국부세굴심 및 퇴채움현상을 실시간 측정해야 한다.

또한, 홍수과의 진행에 따른 퇴채움 현상의 복원 정도는 국내·외로 아직 주목할 만한 이론이 정립되지 않았다. 그러므로 본 연구의 목적은 국부세굴의 수리모형실험을 통하여, 다양한 부정류 상태의 유입수문곡선에 따른 국부세굴 및 퇴채움 특성을 밝혀내어 교각의 안전진단 및 세굴보호공 설계에 기초적인 자료를 제시하는데 있다.

2. 부정류에서의 국부세굴 이론

하천에서의 홍수과의 이동과 같은 사상이 있는 경우에 부정류가 발생하며 서로 다른 파장을 갖는다. 파는 홍수처럼 이동되거나 또는 풍파처럼 진동을 하며 이러한 파의 이동은 국부세굴에 영향을 주는 변수의 수를 증가시킨다. 세굴은 궤도속도만의 함수에 기인하며 궤도속도는 흐름에 중첩된다. 또한 파는 하상에서 뚜렷한 중력파를 야기하며 그로 인하여 하상재료를 느슨하게 한다.

또한 원형교각에서는 진동파에 의해 상대세굴심이 적게 발생한다(Raudkivi 1976). Zanke(1981)는 A/b 의 매개변수를 도입하였으며, 이러한 매개변수로 인하여 수심, 파고, 파장 그리고 구조물의 크기가 결합된다. 여기서, A 는 하상에서 궤도운동을 하는 유수의 이중진폭이며 b 는 구조물의 직경 또는 폭이다. $A/b > 100$ 인 경우에는 정류조건에 접근하며 A/b 가 감소함에 따라 상대 국부세굴심 y_s/b 는 급격히 감소하면서 최대세굴심은 교각 전면에서 측면으로 이동한다. 이는 궤도운동의 주기가 매우 짧아서 다량의 유사를 이송할 수 없기 때문이다(Breusers, 1991).

3. 연구방법

본 연구에서는 부정류에서의 원형교각주위의 국부세굴 특성을 연구하기 위하여 모형수로의 직

* 다산건설컨트 수자원부 ** 홍익대학교 토목공학과 박사과정 *** 홍익대학교 토목공학과 교수

유로부에서 실시간에 따른 수리실험을 실시하였다.

첫째, 다음의 수리·수문학적 조건들을 달리하여 국부세굴의 정성적, 정량적 특성을 비교·분석하였다.

(1) 침투유량과 지속시간이 동일한 조건에서 유입수문곡선의 침투시간 위치를 각각 달리한 4종류의 유입수문곡선(이하 TESTa-1, TESTa-2, TESTa-3, TESTa-4 표기)을 사용하여 유입수문곡선의 침투시간의 위치에 따른 유입수문곡선의 하강부의 경사를 다르게 나타내었다. (그림 1)

(2) 침투유량은 동일하게 하고 지속시간을 각각 달리한 4종류의 유입수문곡선(이하 TESTb-1, TESTb-2, TESTb-3, TESTb-4로 표기)이 사용되었으며 다음 그림 2와 같다.

(3) 지속시간은 동일하지만 침투유량을 달리한 4종류의 유입수문곡선(이하 TESTc-1, TESTc-2, TESTc-3, TESTc-4로 표기)을 사용하였으며 다음 그림 3과 같다.

(4) 침투유량과 지속시간을 모두 달리한 4종류의 유입수문곡선(이하 TESTd-1, TESTd-2, TESTd-3, TESTd-4로 표기)을 사용하였으며 다음 그림 4와 같다.

둘째, 정류 및 부정류 상태에서 세굴공의 형상학적인 특성을 비교·분석하였다.

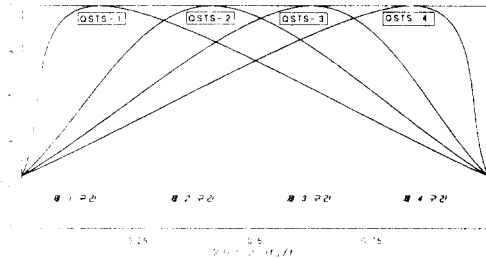


그림 1 TESTa-1의 경우

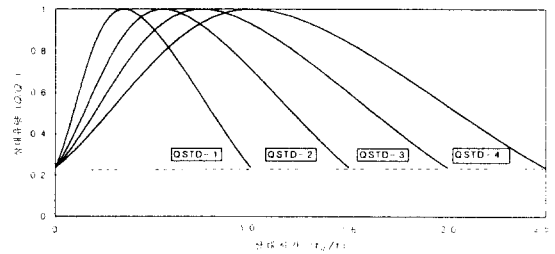


그림 2 TESTa-2의 경우

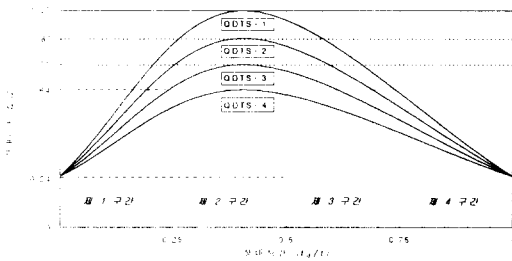


그림 3 TESTa-3의 경우

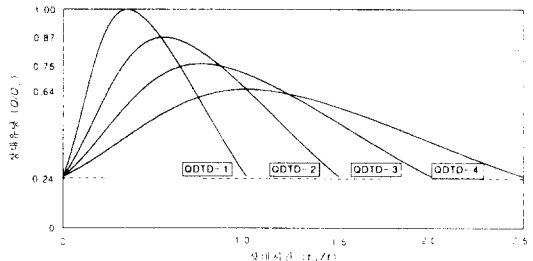


그림 4 TESTa-4의 경우

4. 수리실험

본 연구를 위한 개수로 실험장치는 수로 중심선을 따른 곡률반경(r_c) 2.5 m의 180° 만곡부 형태이며 조도계수가 0.012의 철재 모형수로이다. 직유로부의 길이는 8 m, 수로 폭 0.9 m, 수로높이 0.46 m의 제원을 가지고 있으며 유량은 고수조에 위치한 밸브에 의해 수동으로 조절하였다.

실험에 사용된 모형교각의 형상은 와류 생성이 쉽고 유하 방향에 상관없이 설치할 수 있는 원형 단면을 선택하였다. 접근수심 및 세굴심의 변화를 실시간 측정하기 위하여 눈금이 부착된 투명

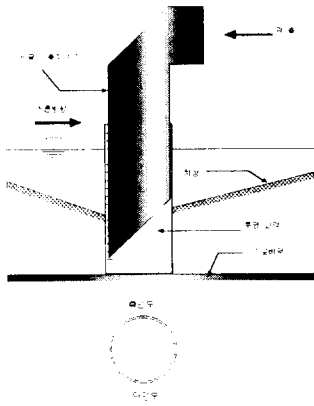


그림 5 모형교각의 개념도

아크릴 모형교각에 세굴심 측정 기구를 설치하였으며 그림 5와 같다. 모형교각의 설치 지점은 직유로부이며 상류단의 영향과 만곡 유입에 의한 영향을 최소화하기 위하여 직유로부 중앙 지점에 위치하였으며 모형교각의 직경은 6 cm 이다. 유속계는 ADV 3차원 유속계를 사용하였으며 수리 실험에 사용된 하상재료 체분석 실험결과를 바탕으로 실험에 사용된 하상재료의 특성을 표 1에 나타내었다.

표 1 하상재료의 재료 역학적 특성

중앙입경 d_{50}	비중	기하학적 표준편차 σ_g	유효침강 속도 w_e	수중 안식각
0.35(mm)	2.65	1.27	16.81(cm/s)	33°

5. 실험결과 및 비교·분석

5.1 정류 상태에서 국부세굴의 실시간 특성

정류 상태에서 국부세굴심의 실시간 측정 결과, 전체 지속시간의 18%($t_d/t = 0.18$)까지는 세굴심이 급격히 증가하는 추세를 보이다가 그 이후에는 완만한 증가와 감소의 경향을 보였으며, 또한 전체 지속시간의 10%이내에서 최대세굴심의 81%가 생성되었다. $t_d/t = 0.18$ 이후에는 시간이 증가함에 따라 세굴심의 증가가 뚜렷하지 않았으며 실시간 50분($t_d/t = 1.0$) 이후에는 세굴심의 변화가 거의 없었다.

5.2 부정류 상태에서의 국부세굴 및 퇴체움

각 유입수문곡선의 경우에서 상대시간에 따른 국부세굴심 특성을 알아보기 위하여 다음 그림 6~9에 나타낸 바와 같이 x 축을 상대시간, y 축의 좌측을 상대유량, 상대수심, 교각 Froude수로 나타내고 우측을 상대세굴심으로 나타내었다.

1) TESTa의 경우 실험결과

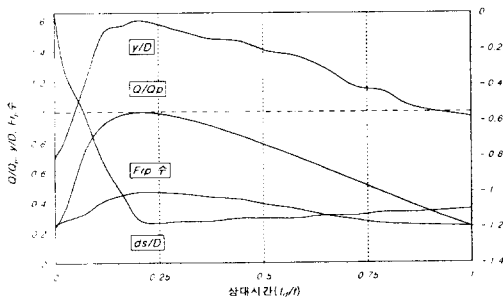


그림 6 TESTa-1의 경우 실험결과

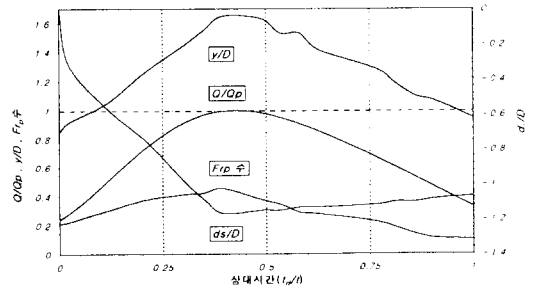


그림 7 TESTa-2의 경우 실험결과

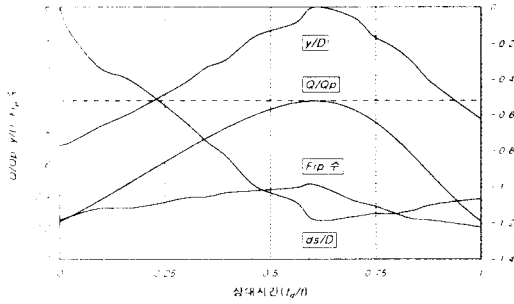


그림 8 TESTa-3의 경우 실험결과

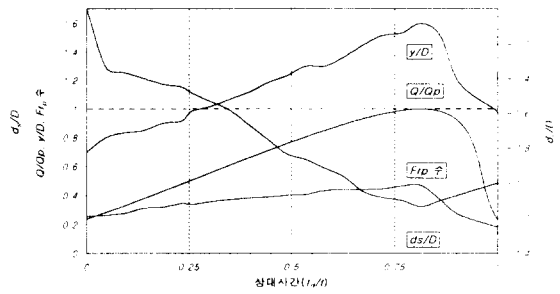


그림 9 TESTa-4의 경우 실험결과

그림 6~9에서 보여지는 바와 같이 침투시간 이전까지는 세굴심이 증가하다가 침투시간이 지나고 난 후 수심과 유속이 감소하면서 상대세굴심이 감소하는 퇴채움현상이 발생하였다. 즉, 최대 세굴심은 침투유량이 발생한 후 거의 동일한 시점에서 발생하였으며, 따라서 최대세굴심의 발생시간은 침투시간이 어느 구간에 위치하였느냐에 따라 영향을 받는다고 할 수 있다.

4.3 각 수문곡선 종류에 따른 실험결과 비교·분석

각 부정류 상태에 따른 최대상대세굴심, 최종상대세굴심, 유입수문곡선의 하강부 경사, 퇴채움률, 상대세굴공반경, 최대교각Froude수의 실험 결과와 CSU공식을 이용한 최대국부세굴심 계산 결과를 다음 표 2에 나타내었다.

표 2에 나타낸 바와같이 침투시간이 유입수문곡선의 제1구간에 위치한 경우보다 제2구간, 제3구간, 제4구간에 위치함에 따라 최종세굴공 반경은 1.3%, 3.2%, 11.6%로 증가하였으나 최대세굴심은 침투유량의 위치에 큰 영향을 받지 않았다. 또한 TESTb 부정류 상태에서의 실험결과, 지속시간이 1.5배, 2배, 2.5배씩 증가함에 따라 최대세굴심은 1.7%, 2.5%, 4.2%, 최종세굴심은 3.7%, 6.5%, 9.3%, 세굴공 반경은 3.0%, 6.0%, 9.0% 증가하였다. 따라서 총수량의 증가에도 불구하고 지속시간의 증가는 최대세굴심에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

TESTc 상태에서의 실험 결과, 침투유량이 0.87배, 0.75배, 0.64감소함에 따라 최대세굴심도 7%, 16%, 24% 감소하였으며 최종세굴심은 4%, 12.5%, 20%의 차이를 보였다. 따라서 세굴심은 유량의 증감에 따라 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. TESTd 상태에서의 실험 결과, 침투유량이 0.87배, 0.75배, 0.64배 일 때 최대세굴심 감소율은 4.2%, 14.2%, 6.7%로 나타났으며 최종세굴심 감소율은 각각 0%, 9.3%, 0%로 변화 양상이 거의 없었다.

4.4 세굴공의 형태학적 특성 비교

원형교각 주위에 생성된 세굴공의 경사각은 평균적으로 33.39° 를 이루고 있어 수중안식각(33°)과 밀접한 관계가 있다고 볼 수 있다. 따라서 실험을 통하여 얻어진 안식각과 세굴심 예측식으로 추정된 국부세굴심으로써 세굴공 반경의 예측이 가능하다고 사료된다.

또한 교각전면과 측면에서 세굴심의 실시간 측정결과, 정류 상태에서는 상대시간 초기에서부터 측면세굴심과 전면세굴심이 거의 유사하였으며 일반적으로 전면세굴심이 측면세굴심보다 크게 발생되었다. 하지만 부정류 상태에서는 상대시간 초기에 교각측면의 세굴심이 전면의 세굴심보다 크

게 발생하다가 침투유량인 시점에서는 전면세굴심이 측면세굴심보다 크게 발생되었다. 이러한 양상과 정량적인 차이를 알아보기 위하여 그림 10에 도시하였다. 그림 10은 원형교각을 중심으로 횡단면의 전면과 측면의 세굴심 차이를 보여주고 있다.

표 2 각 부정류 상태의 실험 결과

수문 곡선 종류	최대상대 세굴심	최종상대 세굴심	수문곡선 하강부 경사	되채 율(%)	상대 세굴공반경	최대교각 F_r 수	CSU 공식
TESTa-1	1.17	1.10	0.96	5.71	1.55	0.47	1.86
TESTa-2	1.17	1.07	1.26	8.57	1.57	0.47	1.87
TESTa-3	1.18	1.07	1.93	9.86	1.60	0.47	1.86
TESTa-4	1.13	1.00	4.10	11.76	1.73	0.47	1.86
TESTb-1	1.20	1.08	1.20	9.72	1.67	0.47	1.86
TESTb-2	1.22	1.12	0.84	8.22	1.72	0.47	1.87
TESTb-3	1.23	1.15	0.62	6.76	1.77	0.46	1.85
TESTb-4	1.25	1.18	0.51	5.33	1.82	0.46	1.86
TESTc-1	1.23	1.12	1.37	9.46	1.70	0.48	1.88
TESTc-2	1.15	1.08	1.03	5.80	1.65	0.44	1.80
TESTc-3	1.03	0.98	0.85	4.84	1.48	0.39	1.71
TESTc-4	0.93	0.90	0.67	3.57	1.57	0.35	1.61
TESTd-1	1.20	1.08	1.09	9.72	1.67	0.46	1.85
TESTd-2	1.15	1.08	0.70	5.80	1.68	0.43	1.78
TESTd-3	1.03	0.98	0.42	4.84	1.48	0.39	1.71
TESTd-4	1.12	1.08	0.27	2.99	1.67	0.34	1.58

주) CSU 예측식에 적용한 보정계수 K_1, K_2, K_3, K_4 는 각각 1.0, 1.0, 1.1, 1.0을 사용.

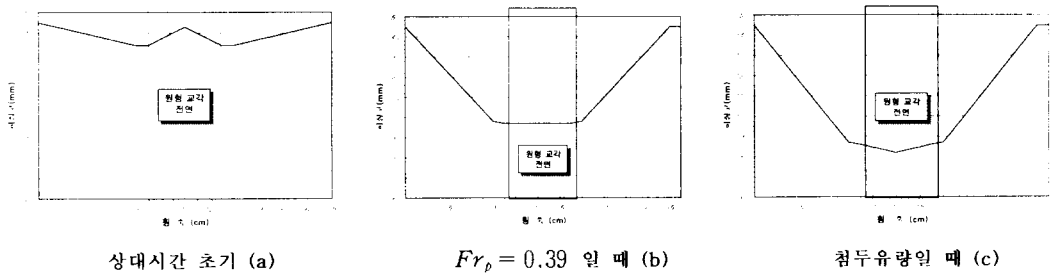


그림 10 유량변화에 따른 교각전면과 측면의 세굴심 횡단면도

최종적으로 생성된 세굴공의 형상을 원형교각을 중심으로 축점별로 하상고를 측정한 후, 3차원으로 도시한 결과를 그림 11, 그림 12에 나타내었다.

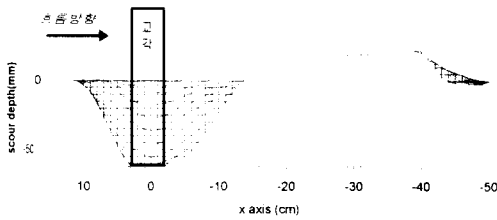


그림 11 최종세굴공의 종단면도

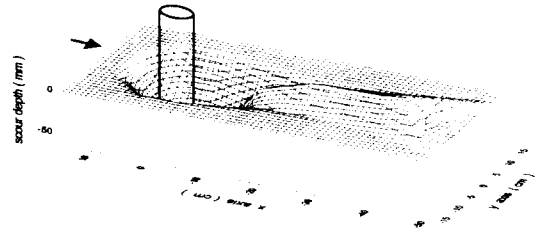


그림 12 측면에서 30° 경사로 바라본 입체도

제 5 장 결론

1. 실제 자연하천의 흐름인 부정류 상태에서 국부세굴심의 실시간 실험결과, 최대국부세굴심은 침두유량이 발생한 후, 거의 동일한 시간에서 관측되었다. 또한 최대세굴심은 침두유량 발생 시까지 계속 증가되었으며 침두유량이 클수록 최대세굴심도 크게 관측되었다.

2. 교각전면과 측면에서 세굴심의 실시간 측정결과, 정류 상태에서 수행된 실험에서는 시간의 경과에 따라 측면세굴심과 전면세굴심의 차이가 거의 없었으나, 부정류 상태에서는 상대시간 초기에 교각측면의 세굴심이 전면의 세굴심보다 크게 발생하다가 침두유량 시점에서는 전면세굴심이 측면세굴심보다 크게 발생되었다.

3. 시간에 따른 세굴심의 생성비율과 최대세굴심의 발생시간을 정류상태에서 수행된 실험 결과와 비교하였을 때, 정류상태에서는 세굴심이 초기에 급격히 증가하면서 전체지속시간의 1/5 이내에서 최대세굴심의 약 90%가 생성되었다. 하지만 부정류상태에서 수행된 실험 결과, 침두시간의 위치에 따라 세굴심이 생성되는 비율이 달라지며 또한 침두시간으로써 최대세굴심 발생 시간의 예측이 가능할 것으로 사료된다.

4. 정류와 부정류 상태에서의 최대세굴심 측정값을 CSU 공식을 이용한 계산값과 비교한 결과, CSU 공식을 이용한 계산치가 모든 경우의 측정값보다 과대하게 산정되었으며 부정류인 경우가 정류인 경우보다 다소 CSU 공식의 계산값과 차이가 크게 나타났다.

6. 참고문헌

- 1) 윤태훈, 윤성범, 제갈선동, 이백, “홍수시 교각주위에서의 최대세굴심 측정 기술 개발”, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 1996, pp. 87~90.
- 2) 최인호, “유로만곡부의 원형교각 주위 국부세굴 보호공에 관한 연구”, 박사학위논문, 홍익대학교 대학원, 1997.
- 3) 호정석, “교량에서의 홍수로 인한 세굴과 퇴채움의 실측치와 계산치의 실시간 비교분석”, 석사학위논문, 고려대학교 대학원, 1997.
- 4) Baker, C. J., “Theoretical Approach to Prediction of Local Scour around Bridge Piers”, Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol. 18, No. 1, 1980, pp. 1~12.
- 5) Breusers, H. N. C., and Raudkivi, A. J., “Scouring”, A. A. Balkema, 1991.
- 6) Chiew, Y. M., and Melville, B. W., “Local Scour around Bridge Pier”, Journal of Hydraulic Research, Vol. 25, No. 1, 1987, pp. 15~26.