

일련연속교각, 다중연속교각, 말뚝군의 세굴특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Scour of Succession Row Piers, Multiple Row Piers and Pile Group

최한규* 김인호** 최용묵***
Choi, Han-Kyu Kim, In-Ho Choi, Yong-Mook

Abstract

As materials on the river bed have been changing through erosion, transportation and accumulation, so does the waterway's section. So many bridges have nowadays been constructed to the same direction as water flows.

However further researches are still needed on the scours of succession row piers and multiple row piers.

Analyzing them through hydraulic stimulation experiments, this study deals with the scour character with the change of diameters in row piers which have been built in the identical direction of water flow and also the part-scour character change in multiple row piers.

키워드 : 세굴, 교각세굴

Keyword : Scour, on scour of Piers

1. 서 론

본 연구는 유수의 흐름에 의해 교각주위에서의 하상재료가 침식, 운반, 퇴적작용을 하며 이에따라 수로의 단면이 변화하는 형상 즉, 교각 주위에서의 세굴 현상에 관한 실험 논문이다.

현재까지는 유수의 흐름방향에 직각으로 설치되어 있는 교량의 교각을 대상으로 국부세굴에 대한 많은 연구와 모형실험들이 수행되어 왔으며 특히, 균일 단면을 갖는 교각에 대한 세굴 연구가 주류를 이루고 있다.

그러나 최근 흐름방향과 동일한 방향의 종방향 교량이 많이 건설되고 있으나 교각배열이 균일 단

면이 아닌 일련연속교각과 다중연속교각에 대한 세굴 연구는 미비한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 흐름과 동일한 방향으로 설치된 연속교각에서 교각의 직경변화에 따른 세굴 특성과 다중연속교각 설치에 따른 국부세굴 특성의 변화를 수리모형 실험을 통하여 분석하였다.

2. 상사법칙 및 모형의 축척결정

2.1 상사법칙

모형과 원형의 상사성에는 세 가지가 있다.

- ① 기하학적 상사성 (Geometric Similarity)
- ② 운동학적 상사성 (Kinematic Similarity)
- ③ 역학적 상사성 (Dynamic Similarity)

이들 세 가지의 상사성이 성립하면 모형과 원형

* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사
** 동해대학교 토목공학과 조교수, 공학박사
*** 강원대학교 토목공학과 박사과정

은 수리학적으로 완전한 상사법칙이 성립한다. 자유표면을 갖는 수로는 중력의 영향이 가장 크고 관수로의 흐름에서는 점성력의 영향이 크다. 교각 주위에서의 흐름은 자유표면을 갖는 흐름으로 중력에 의하여 지배된다. 그러므로 이러한 흐름의 원형과 모형사이에서 역학적 상사가 이루어지기 위해서는 식 (1)과 같이 원형과 모형의 Froude의 상사성이 같아야 한다.

$$Fr = \frac{v}{c} = \frac{v}{\sqrt{gh}} \quad (1)$$

여기서, Fr : Froude수, v : 흐름의속도(m/sec), h : 수심(m), c : 파장의전파속도(m/sec), g : 중력가속도(m/sec^2)이다.

원형과 모형의 Froude의 수가 같아지기 위해서는 식 (2)가 성립되어야 한다.

$$Fr_p = Fr_m \text{ 또는 } \frac{V_p}{\sqrt{(g_p D_p)}} = \frac{V_m}{\sqrt{(g_m D_m)}} \quad (2)$$

여기서, p : 원형, m : 모형을 의미한다.

원형과 모형에서 중력가속도는 같으므로 $g_p = g_m$ 이 된다. 기하학적 상사인 원형과 모형사이의 길이의 축척비를 $L_R = L_p/L_m$ 라고 하면 Froude의 상사성을 만족시키기 위해서는 아래의 식 (3), (4), (5)와 같이 되므로 유속의 축척비와 길이의 축척비는 식 (6)과 같다.

$$\frac{v_p}{\sqrt{(g_p h_p)}} = \frac{v_m}{\sqrt{(g_m h_m)}} \quad (3)$$

$$\frac{v_p}{v_m} = \sqrt{\frac{g_p h_p}{g_m h_m}} \quad (4)$$

$$\left(\frac{v_p}{v_m}\right)^2 = \frac{g_p h_p}{g_m h_m} = \frac{h_p}{h_m} \quad (5)$$

$$(V_p/V_m)^2 = (L_p/L_m) V_R^2 = L_R \quad (6)$$

이와 같은 관계에서 모형실험에 관한 여러 가지 축척비를 길이의 축척비로 다음과 같이 식 (7), (8), (9)로 나타낼 수 있다.

$$L_R = B_R = H_R = P_R \quad (7)$$

$$V_R = T_R = L_R^{1/2} \quad (8)$$

$$Q_R = V_R A_R = L_R^{1/2} L_R^2 = L_R^{5/2} \quad (9)$$

여기서, L_R : 길이 축척비, B_R : 폭 축척비, H_R : 높이축척비, P_R : 압력수두축척비, V_R : 유속축척비, T_R : 시간축척비, A_R : 면적 축척비, Q_R : 유량 축척비 이다.

2.2 모형의 축척 결정

위에서 설명한 상사법칙에 의해 계산된 원형과 모형의 제원은 다음과 같다.

표 1 모형의 축척

구분	항 목	원 형	축 척	모 형
구간1	교각의폭	3.00m	1/26.32	0.114m
	유 속	1.76m/s	1/5.13	0.343m/s
	수 심	3.30 m	1/26.32	0.125m
구간2	교각의폭	4.00m/7.50m	1/100	4cm/7.5cm
	유 속	3.68 m/s	1/10	0.368m/s
	수 심	8.43m	1/100	8.43cm
구간3	교각의폭	4.00m	1/100	4cm
	유 속	3.96m/s	1/10	0.396m/s
	수 심	8.36m	1/100	8.36cm
구간4	교각의폭	2.00m/2.50m	1/26.32	2cm/2.5cm
	유 속	4.01m/s	1/5.13	0.401m/s
	수 심	7.86m	1/26.32	7.86cm

3. 실험장치 및 방법

실험에 사용한 수로는 폭 0.75m, 깊이 0.60m, 길이 30m의 콘크리트 직선수로로서 물은 동력에 의하여 재 순환되며 수로 상류단에는 광정웨어가 설치되었고 하류단에는 수심 조절용 수문이 설치되어 있다. 모형실험에 사용한 물의 순환계통은 그림 1과 같다.

한편, 본 실험은 그림 2에 보인바와 같이 강원대학교 수리실험실에서 있는 수로폭 0.75m, 높이 0.60m, 길이 30m의 고정상 모형수로에서 수행하였다.

수로 중단면으로 폭 0.75m, 높이 0.15m, 길이 15m로 주문진표준사를 포설하고 수로의 하류 끝부분에는 모래받이를 설치하였다.

수로 하류부의 수문을 닫고 미소유량을 수로 내에 공급하면서 모형사층 위로 수면이 상승하기 시작하면 서서히 유량을 증가시켜 실험유량이 유효하도록 하였다.

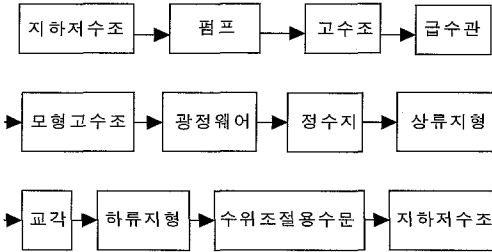


그림 1 모형실험에 사용한 물의 순환과정

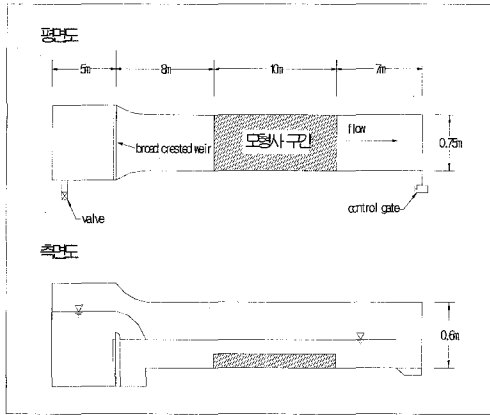


그림 2. 수리모형 실험장치

설치된 실험수로는 측벽일부가 유리로 되어 있어 흐름을 관찰할 수 있도록 되어 있고, 유량을 순환시키는 펌프와 송,배수관 장치를 통해 수위를 조절하였다. 프로펠라 유속계로 유속을 실측하였고, 세굴심 및 세굴폭은 수면측정기(point gauge)로 측정하였다.

실험은 일련연속 비균일교각, 다중연속 균일교각, 말뚝군의 세가지 형태이며 일련연속교각의 경우 1th~5th의 교각 직경은 4m, 6th~8th의 교각 직경은 7m, 9th~11th의 교각 직경은 4m이다. 다중연속교각의 직경은 4m, 말뚝군의 교각직경은 2m×2m이다.

수리모형실험에 사용된 교각의 배열은 그림 3, 4, 5와 같으며 이들을 1/100의 축척으로 모형화하여 실험을 수행하였다.

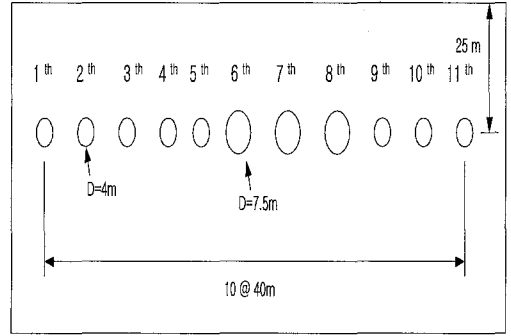


그림 3. 일련연속 비균일교각 평면도

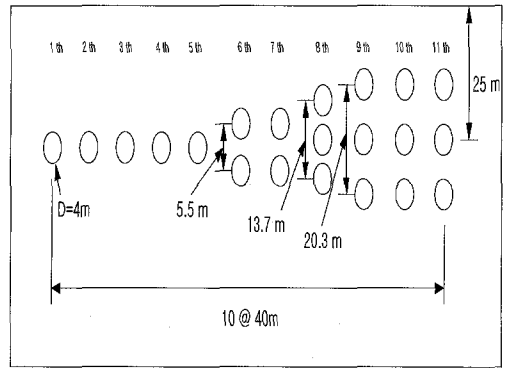


그림 4. 다중연속 균일교각 평면도

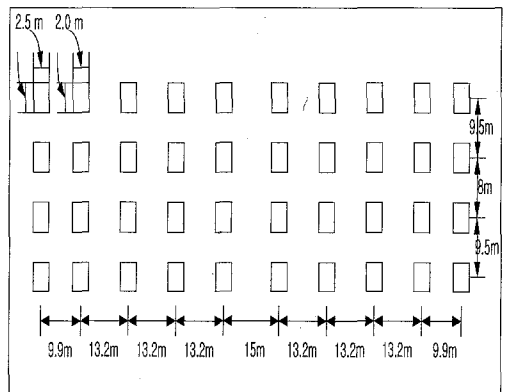


그림 5. 균말뚝 평면도

4. 세굴현상에 관한 이론

4.1 세굴 형태의 분류

경제적이고 안전하게 교량의 교각을 설계하기 위하여 최대세굴심도를 예측하는 것이 필요하다. 교량의 교각과 흐름, 퇴적층의 상호관계는 매우 복잡하기에 현재까지는 해석이나 수치해를 구할 수 없고 모형실험 또는 실험식을 이용하여 예측하고 있다.

일반적으로 세굴현상은 하상의 변화, 통수단면의 확대 또는 축소, 하천에서의 구조물의 설치 그리고 상류로부터의 유사유입의 정도에 따라 하상상승(aggradation) 및 하강(degradation), 수축세굴, 국부세굴 세 가지로 구분할 수 있다.

상류부분에 있는 하상재료가 운반되어 퇴적된 경우에는 하상상승이 발생하고 반대로 하상재료의 침식으로 인하여 하상이 낮아지는 현상이 하상하강이다.[4][10]

일반적으로 댐의 상류에서는 하상상승이 발생하고 하류에서는 하상하강이 일어난다. 자연하천 및 인공수로에서 통수면적이 감소하게 되면 유속이 증가하게 되고 이로 인한 하상의 세굴이 발생하는 데, 이것을 수축세굴이라고 한다.

국부세굴은 하천에 교량과 같은 구조물 등을 설치함으로써 물의 흐름을 방해하게 되고 이들 구조물 주위에서의 유속의 증가로 인한 부분적인 세굴현상이다. 대부분 국부세굴의 세굴심도가 하상상승 및 하강 또는 수축세굴의 세굴심도에 비하여 크다.

4.2 교각주위의 세굴에 영향을 미치는 인자

하천의 흐름이 동류인 경우 여러 개의 변수가 교각의 세굴심도에 영향을 주며, 세굴심도 d_s 는 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.[2]

$$d_s = f(\rho, \nu, g, d, \rho_s, y_0, U, k) \quad (10)$$

여기서, ρ : 물의 밀도, ν : 물의 동점성계수, g : 중력가속도, d : 하상재료의 크기, ρ_s : 유사의 수중밀도, y_0 : 교각 전면수심, U : 평균유속, b : 교각의 폭이다.

4.3 교각세굴의 구조(mechanism)

(1) 교각주위의 국부세굴

교각 주위에서 발생하는 국부세굴에는 마제형 와류시스템(horseshoe vortex system), 반류형 와류시스템, Trailing형 와류시스템이 있다.

마제형 와류는 여러 학자들에 의하여 관찰되었으며 단일의 수평 와류가 아닌 몇 가지의 와류들로 이루어진다. 교각전면에서의 마제형 와류는 다

음과 같이 형성된다.[1]

- ① 교각 전면에서의 압력경사와 수직 속도분포로 인하여 흐름의 하향성분을 유발시킨다.
- ② 하향흐름은 교각 전면에서 하상을 따라 상류방향의 흐름이 된다.
- ③ 따라서 경계층을 유발시키고 수평와류를 유발시켜 3차원 마제형 와류가 된다.
- ④ 이와 같은 과정이 반복됨으로써 교각 주위에서는 와류의 집중분포, 소산, 이동이 연속적으로 발생한다.

(2) 정적세굴(clear-water scour)과 동적세굴(live-bed scour)

정적세굴은 상류에서 유사의 이동이 없거나 운송되어 온 유사가 세굴공을 통하여 운송될 때 발생하며, 일시적인 평균 전단응력, 중량성분, 그리고 난류의 인자들이 평형을 이룰 때 평형세굴심(equilibrium scour depth)에 도달한다. 즉, 흐름에 의한 소류력(tractive force)이 세굴 진행에 따라 약해져서 이동한계속도에 도달할 때까지 세굴이 진행된다.

동적세굴은 상류에서 유사의 이동이 있는 경우를 의미하며, 유입 유사량과 유출 유사량의 차에 의해서 진행되고 유입 유사량과 유출 유사량이 평형을 이룰 때 평형 세굴심에 도달한다.

5. 실험결과 및 검토

실험방법은 수로에 물을 천천히 유입시켜 초기의 수면을 저수위로 유지하고 난 후에 상류측의 공급밸브와 하류의 수문을 조절하여 실험유속과 수위를 맞추었다. 이와 같은 상태 즉, 정상상태를 유지하면서 일정 시간 동안 물을 유하시킨 후, 하상상태의 변동이 발생되지 않도록 천천히 배수를 시켰다.

상류와 하류의 수위, 세굴심도는 포인트게이지와 버니어캘리퍼스(point gauge & vernier caliper)를 이용하여 측정하였고 유속은 유속계를 이용하여 측정하였다.

그림 6~7는 하천 흐름방향으로 설치된 일련연속교각에 대한 실험으로 $Fr=0.4$ 의 조건에서 교각의 직경변화에 따른 세굴심과 세굴폭의 변화를 보여 주고 있다.

그림 6에서 최대세굴심은 두 번째 교각에서 일어났으며, 1th~5th 교각의 직경 4m에서 6th, 7th, 8th 교각의 직경이 7.5m로 변환에 따라 세굴심이 증가하는 것을 볼 수 있다.

그러나 교각직경에 대하여 무차원화된 세굴심(hs/D)에서는 변화된 교각직경 크기에 비해 오히려 무차원 세굴심은 감소하고 있다. 이는 교각직경

이 커짐에 비해 세굴심의 정도는 점점 줄어든다는 것을 의미한다.[3][9]

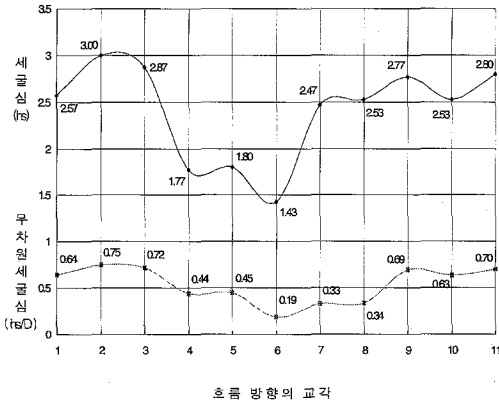


그림 6. 일련연속 비균일교각의 직경 변화에 따른 세굴심의 변화

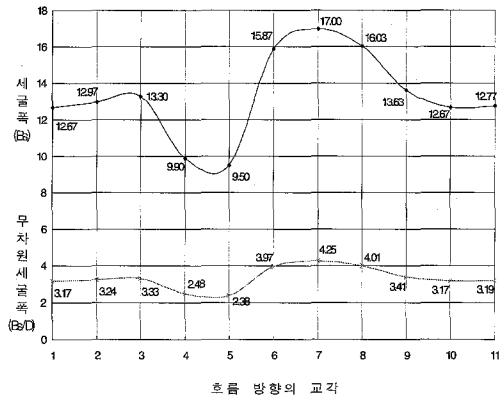


그림 7. 일련연속 비균일교각의 직경변화에 따른 세굴폭의 변화

그림 7의 세굴폭의 변화는 교각직경에 의해 무차원화된 세굴폭(Bs/D)에서 보듯이 교각의 직경이 변화에 따라 7th 교각에서 최대세굴폭을 나타내고 있다. 그리고 6th, 7th, 8th 교각에서 전반적으로 세굴폭의 증가를 보이고 있는데, 교각직경의 크기가 증가함에 따라 세굴폭은 비례적으로 증가하고 있다는 것을 알 수 있다.

다중연속교각의 세굴심과 세굴폭을 보여주는 그림 8~9에서는 유수의 흐름이 2연교각을 지나 3연

교각으로 흐르면서 중앙교각을 기준으로 좌,우 교각의 세굴심은 큰 폭으로 증가하였는데 이는 유속과 흐름의 형상이 양쪽교각에서는 독립적인 교각으로서 작용을 하여 국부세굴이 발생되었다고 판단된다.

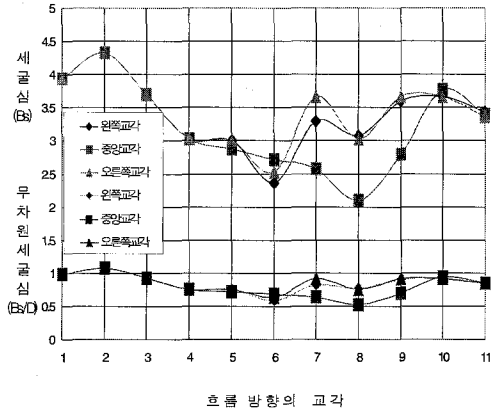


그림 8. 다중연속교각의 직경변화에 따른 세굴심의 변화

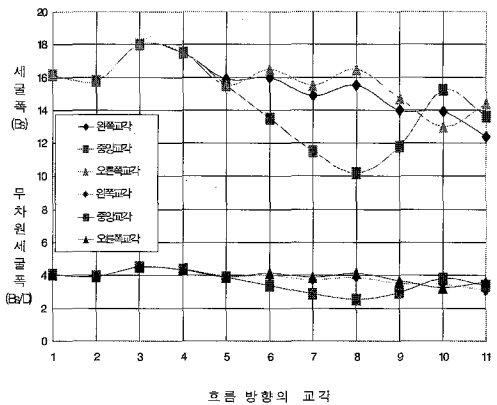


그림 9. 다중연속교각의 직경변화에 따른 세굴폭의 변화

중앙에 위치한 교각에서의 세굴심의 변화는 그리 크지 않았으나 오히려 양쪽교각에 비해 세굴심이 감소하는 경향을 보여주고 있는데 이것은 양쪽 교각 세굴범위와의 간섭으로 인한 것으로 판단된다.

그러나 세굴폭의 경우에는 양쪽교각에 비해 중앙교각에서 큰폭으로 감소하고 있음을 볼 수 있는데 이것은 각각의 교각에서 발생하는 원형형태의 세굴범위가 중앙교각의 세굴범위와 겹쳐지게 되어 세굴폭이 감소하게 되는 것으로 판단된다.

하류 끝부분에 위치한 교각들에서 다시 세굴심과 세굴폭이 증가하는 것은 유수가 교각사이를 통과하면서 다소 유속이 감소하였다가 교각의 끝부분을 지나면서 유속이 다시 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

교각군에서의 세굴심은 그림 10에서 보여주고 있다. 각각의 사각단면을 갖는 교각군에서 상류쪽 1~3행에서 최대 세굴이 발생하였으며 각각의 말뚝주위의 세굴형상은 원형형태를 보이고 있다.[5][7]

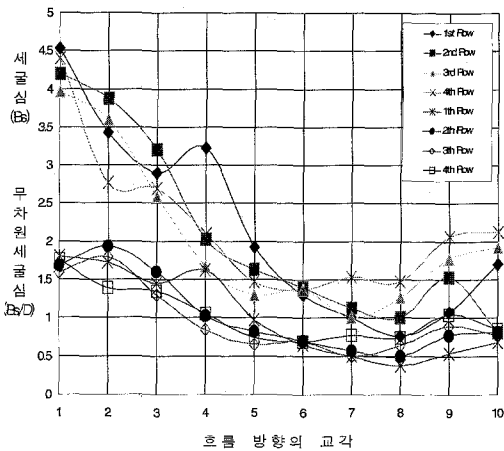


그림 10. 군말뚝 세굴심의 변화

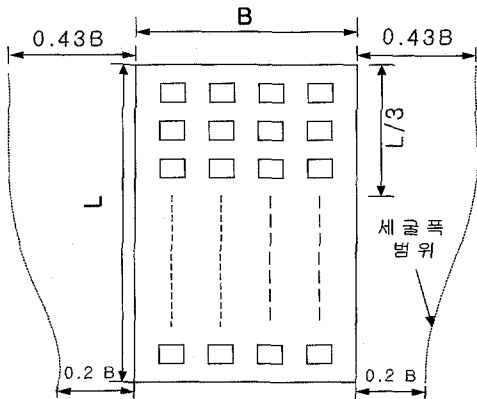


그림 11. 말뚝군 세굴심 변화

그림 11에서는 상류쪽 1~4행까지의 말뚝군의 전체 세굴폭은 50.2m로 말뚝군 전체폭 27m의 2배에 가까운 결과를 나타내고 있고, 5~10행까지의 말뚝군 하류구간 전체 세굴폭은 37.3m로 말뚝군 전체폭에 비해 1.38배로 나타났다. 이는 흐름조건과 단면형상은 다르지만 기존에 제시된 연구결과와도 유사한 것으로써 중단방향으로는 하류부로 갈수록 상류부에 비해 세굴심이 급격히 감소함을 알 수 있다.[8]

본 실험의 세굴양상은 촘촘한 군말뚝의 일체형 세굴이 발생할 거라는 예상과는 달리 종방향의 세굴에서 뒷채움 현상을 뚜렷이 볼 수 있었다. 이는 뒷채움으로 인하여 하상의 높이가 오히려 약간씩 증가하였고, 단일 교각에서의 세굴폭 또한 뒷채움 현상으로 인해 세굴심에 비하여 상당히 줄어들었음을 보여주었다.

6. 결론

유수의 흐름방향과 동일한 방향으로 설치된 일련연속교각, 다중연속교각, 말뚝군에 대한 수리모형 실험결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 비균일 단면을 갖는 일련연속교각에 대한 실험결과 무차원 세굴심은 교각의 직경이 커질수록 감소하는 경향을 보이는 반면에 무차원 세굴폭은 교각의 직경이 커질수록 증가함을 알 수 있었다.
2. 다중연속교각의 실험결과 3연교각의 중심에 위치한 교각에서의 세굴폭과 세굴심이 양쪽에 위치한 교각에 비해 큰폭으로 감소하는 경향이 있음을 알 수 있었다. 이는 양쪽교각의 세굴범위와의 상호간섭효과에 기인하는 것으로 판단된다.
3. 말뚝군에 대한 수리모형실험 결과 무차원 최대세굴심은 상류부 두번째 말뚝군에서 발생하였다. 상류부 4번째 교각까지의 전체세굴폭은 말뚝군 전체폭 27m에 비해 2배에 가까운 결과로서 세굴폭이 매우 큼을 나타내고 있으며 나머지 하류부 전체세굴폭은 37.3m로 말뚝군 전체폭 27m에 비해 1.38배에 해당함을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] FHWA. (1995), Evaluating Scour at Bridges, Publication No. FHWA-IP-90-011, U.S.

Department of Transportation

- [2] Jones, J. S. Bertoldi, D A., Umbrell, E R.(1993), Preliminary Studies of Pressure Flow Scour, Hydraulic Eng. '93, Vol.1, Proceedings of the 1993 Conference, ASCE, pp.916~912.
- [3] 안상진, 최계운, 김종섭, 안창진, “보청천내 교각설치에 따른 국부세굴심도의 산정”, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제13권, 제3호, pp.81~88. 1993
- [4] 안상진, 최계운, 김종섭, 안창진, “압력변화를 고려한 교각주위에서의 세굴현상연구”, 한국수문학회지, 한국수문학회, 제27권, 제1호. 1994
- [5] 최계운, 김기형, 서병하, “하천내 연속교량설치에 따른 세굴심도의 변화”, 1996년도 학술발표회 논문집(Ⅱ), 대한토목학회, pp107~110. 1996
- [6] 최계운, “도시하천 복개에 따른 수리학적 영향”, 한국수자원학회지, 제29권 제1호, pp.17~26. 1996
- [7] 박성식, 송재우, “만곡수로에서의 연속교각 세굴특성에 관한 연구”, 1998년 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, pp.431~436. 1998
- [8] 서정필, 윤병만, 여운광, “군말뚝 기초의 말뚝 간격에 따른 세굴 특성”, 1998년 학술발표회 논문집(Ⅲ), 대한토목학회, pp.309~312. 1998
- [9] 안상진, 김용용, 황보연, 김진극, “교대형상에 따른 국부세굴의 실험적 연구”, 97년 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, pp.116~121. 1997
- [10] 윤용남, 호정석, 이재수, “교량에서의 홍수로 인한 세굴과 퇴채움의 실측치와 계산치의 실시간 비교분석”, 97년 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, pp.141~147, 1997