

선박충돌방지공이 설치된 해상교량의 교각 세굴 특성 분석 - 인천대교를 대상으로

Pier-Scour Characteristics of the Marine Bridge with Ship Impact Protection - Incheon Bridge Case

여운광* · 지 운* · 김창성* · 임종철*

Woon Kwang Yeo*, Un Ji*, Chang Sung Kim* and Jong Chul Lim*

요 지 : 최근 들어 선박의 항로에 위치하고 있는 대형 해상교량의 건설이 활발해짐에 따라 선박충돌의 위험성을 고려하여 교각 주변에 충돌방지공을 설치하는 경우가 많다. 이러한 충돌방지공 설치로 인해 교각의 세굴특성은 충돌방지공 설치 전의 교각 주변의 세굴양상과 매우 다르게 나타난다. 따라서 본 연구에서는 충돌방지공의 설치 유무에 따른 세굴의 형태를 분석하기 위해 인천대교를 대상으로 수리모형실험을 실시하였다. 충돌방지공 설치 전의 고정상, 이동상실험을 통해 유향과 세굴심 및 세굴공 범위를 파악하였으며 또한 충돌방지공 설치 후 실험을 통하여 최종적으로 충돌방지공으로 인한 교각 세굴 특성 변화를 분석하였다. 실험결과, 충돌방지공이 설치됨으로 인해 최대세굴심이 W1교각의 경우 약 0.24 m, W2+3+4교각의 경우 2.4 m 증가하는 것으로 나타났다. 또한 최대세굴심의 발생위치는 W1교각의 경우 충돌방지공 설치 전·후가 동일한 위치에서 발생하였으나 W2+3+4교각의 경우 설치 후 최대세굴심이 교각주변이 아닌 충돌방지공 주변에서 발생하였다.

핵심용어 : 세굴, 해상교량, 충돌방지공, 군말뚝 세굴

Abstract : More recently, the massive marine bridges in a ship passage have been constructed on the sea. Therefore, the ship impact protection for the bridge-piers are installed to consider the possibility of vessel collision danger. Due to the ship impact protection, the pier-scour characteristics are changed in comparison with the condition without the ship impact protection (SIP). In this study, the physical modeling for the Incheon Sea-Crossing Bridge was performed to analyze the pier-scour characteristics with respect to the vessel collision protection. The rigid and movable bed tests were conducted to evaluate the flow pattern, scour depth, and scour-hole with and without the ship impact protection. The experimental results for the maximum scour depth is increased 0.24 m in W1 pier at the same location and 2.4 m in W2+3+4 piers due to the SIP installation. Especially, the maximum scour depth in W2+3+4 piers was occurred around the SIP.

Keywords : scour, marine bridge, ship impact protection, group pile scour

1. 서 론

최근 국내에서는 도서지방과 내륙을 연결하는 연육교 건설이 계획 및 시공되고 있으며 이러한 대형 해상구조물 설치에 있어서 기초구조물의 안전은 상부구조물의 안전보다 우선적으로 고려해야 할 사항이다. 특히 교량의 기초 안전

성을 저해할 수 있는 세굴은 하천의 경우보다 해상에서의 세굴 발생 매커니즘이 상당히 복잡하므로 일반적인 세굴 평가방법만을 갖고 접근한다는 것은 매우 위험하다고 할 수 있다. 또한 현재까지 해상세굴 평가 및 대책에 대한 설계 기준 등이 완전히 수립되어 있지 않는 실정이므로 해상교량 교각세굴 평가에 대한 접근은 신중을 기해야 할 것이다.

*명지대학교 토목환경공학과(Corresponding author: Chang Sung Kim, Dept. of Civil & Environmental Eng., Myongji University, San 38-2, Namdong, Cheoin-gu, Yongin, Gyeonggi-do, Korea, cskim@mju.ac.kr)

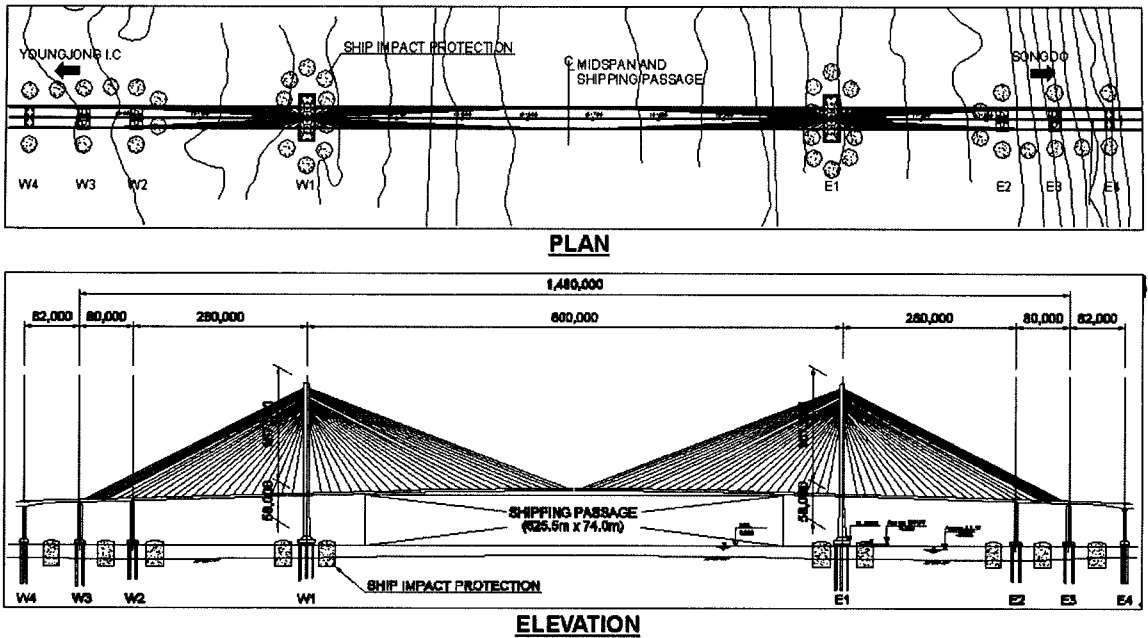


Fig. 1. Layout of cable stayed bridge and ship impact protection.

이러한 해상교량에 대한 가이드라인으로는 Richardson and Davis(2001)가 제안하고 있는 세굴평가방법이 있으며 국내에서도 이를 그대로 적용하고 있다. 또한 선박의 항로에 위치하고 있는 장대교량의 경우 선박충돌의 위험성을 고려하여 충돌방지공을 설치하는 경우가 많으며 이러한 충돌방지공 설치로 인해 교각의 세굴특성은 충돌방지공이 설치되기 전의 교각 주변의 세굴양상과 매우 다르게 나타난다. 충돌방지공에 대한 세굴 연구는 최근 Jones and David(2007)가 Maryland의 Woodrow Wilson교에 대한 수리모형실험을 수행하였으며, 그는 축척에 따른 세굴의 영향을 검토하기 위해 두 개의 다른 수조에서 각각 1:28과 1:50의 축척으로 실험을 진행하였다. 각각 13.7 m와 9.1 m의 직경을 가진 두 가지 경우의 충돌방지공에 대한 실험을 진행하여 충돌방지공 직경에 따른 영향을 검토하였다. 실험결과는 동일 설계유속을 경제조건으로 적용할 경우 충돌방지공의 설치로 인해 약 2배가량 세굴심이 증가한다는 결과를 도출하였다.

이에 본 연구에서는 해상교량 세굴문제 중 특히 선박 항로에 위치한 해상교량에서의 충돌방지공으로 인한 세굴심의 변화 및 세굴발생 범위 등을 수리모형 실험을 통해 규명하고자 한다. 이를 통해 향후 교각 주변에 설치하는 하는 충돌방지공과 같은 안전 구조물로 인한 세굴 변화를 평가하는데 기초자료로 활용되어질 수 있다.

2. 대상교량의 현장조건 및 사전연구

2.1 인천대교 현황

인천대교는 인천 송도와 영종도 인천국제공항을 연결하는 해상고속도로이며 왕복 6차로, 총 연장 12.343 km(해상교량 11.658 km, 사장교 주경간장 800 m)로 구조형식에 따라 고가교, 접속교 및 사장교로 구성되어 있다. 인천대교는 인천항로에 위치하고 있어 빈번한 선박항행이 불가피한 지역이며 접속교와 사장교 구간인 E4~W4에 선박충돌방지공이 설치될 예정이다(Fig. 1).

인천대교가 위치한 해상구간의 해저지층은 상부로부터 해성퇴적층, 풍화토, 풍화암, 연안 및 경암으로 구성되어 있으며 세굴발생이 예상되는 상부 해성퇴적층은 점착성 토사가 10~30 m 두께로 넓게 발달되어 있다(중앙인경, d_{50} 은 약 0.07 mm). 또한 연구 대상지역에서 2004년 12월부터 2005년 1월에 관측된 표면층 최강유속은 창조류 0.85 m/s, 낙조류 1.07 m/s이며, 인천항 조위를 설계조위로 사용하여 최대 파고는 2.42 m, 평균조차는 5.665 m, 소조차는 3.347 m, 대조차는 9.27 m로서 세계에서 가장 큰 대조차 지역이다(삼성건설 JV, 2005b).

2.2 대상교각의 선정

해수유동 수치모형인 EFDC(Environmental Fluid Dynamics

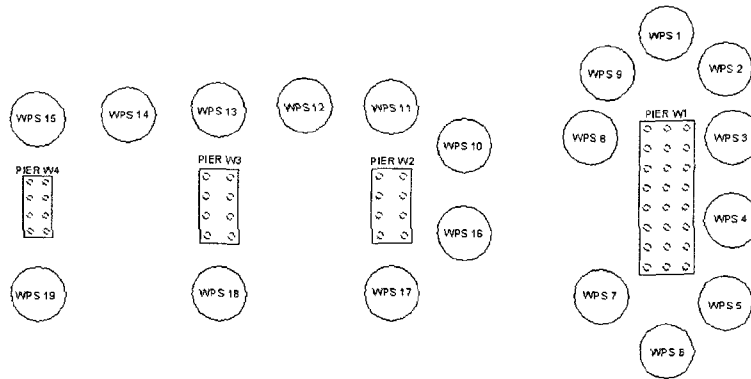


Fig. 2. W1, W2+3+4 and ship impact protection.

Code)를 통해 계산된 흐름과 파랑에 의한 합성전단응력이 가장 크게 나타나는 곳은 사장교 구간인 W4-E1 구간이지만 본 연구의 대상 교각은 W1과 대칭적인 구조를 이루고 있고 W1교각에 비해 수심과 유속조건이 작은 E1교각을 제외한 W1, W2, W3, W4교각을 선정하였다. 각각의 교각은 말뚝 기초 형식으로 Fig. 2와 같이 구성되어 있으며 말뚝 기초의 배열은 W1의 경우 3×8, W2+3+4는 2×4이고 말뚝기초의 직경은 W1, W2, W3교각은 3 m, W4 교각은 2.5 m이다.

2.3 해상특성을 반영한 세굴심 산정을 위한 사전 연구

해상교량의 세굴은 일반 하천의 세굴과는 다른 세굴양상을 보인다. 조석에 의한 왕복류, 파 흐름의 상호작용, 점착성 지반 등 세굴에 영향을 미칠 수 있는 여러 요인들이 복합적으로 작용한다. 이러한 요인들을 분석하기 위하여 수리모형실험을 실시하기 이전에 세굴을 실험과 현장모니터링을 통해 인천대교 현장에서의 세굴특성을 파악하였다. 대상교각으로는 세굴실험은 W7, W9교각이며, 현장모니터링은 W6, W8번 교각이다. 4개의 교각 모두 서측구간의 접속교이며 말뚝기초의 형식으로 배열은 2×4이고 직경은 2.5 m이다.

세굴은 주로 흐르는 물에 의해 하상과 물의 경계면에 발생하는 전단응력에 주로 의존한다는 개념이 포함된 SRICOS (Scour Rate in Cohesive Soils)방법에서는 세굴을 야기시키는 수리학적 매개변수뿐만 아니라 세굴저항능력에 관계되는 대상지반의 침식특성을 세굴 해석에 적용할 수 있다 (Richardson and Davis, 2001). 세굴을 실험의 목적은 대상 지반의 정량적인 고유 침식함수를 결정하는 것으로 이 침식함수는 대상 지반의 한계전단응력과 흐름으로 인한 전단응력, 지반의 세굴률과의 관계이다. 이 관계를 규명하기 위

해 W7과 W9 교각지점에서 불교란 시료를 채취하여 세굴 실험기에서 실험을 실시하여 세굴 실험결과를 세굴 전단응력 곡선으로 나타내었다. 이 곡선을 이용하여 Briaud et al.(2001)과 광(2002)이 제안한 SRICOS방법에 의해 100년 빈도 홍수에 의한 세굴심을 해석한 결과 W7 교각의 세굴심은 2.59 m, W9 교각에서는 2.9 m로 산정되었다(삼성건설 JV, 2005a).

기존의 이론이나 수치 및 수리모형실험에만 의존하였던 세굴심 평가의 한계를 극복하고자 실시간 현장 모니터링을 실시하였다. 현장 모니터링을 실시하기 위하여 현장재하시험말뚝을 2개소(W6, W8)에 설치하여 대상지점의 세굴경향과 향후 발생가능성을 파악하고자 하였다. 관측기간 동안의 관측된 유속은 1 m내외로 실제 설계유속보다 느린 현장조건을 보였으며, 관측된 세굴범위는 약 7 m, 세굴심은 약 3 m로 측정되었다(삼성건설 JV, 2005a).

해상교량의 세굴 특성을 파악하기 위해 세굴 실험과 현장모니터링의 결과 유사한 세굴심을 예측한 것을 확인할 수 있었다. 하지만 세굴 실험의 경우 대상교각이 본 연구와 상이하며 지반조건이 유사하다는 가정을 전제해야하는 위험을 내재하고 있다. 또한 모니터링의 경우 실제 설계유속보다 느린 유속조건에서의 세굴이므로 실제 설계빈도의 유속일 경우 이보다 많은 세굴심이 예상될 수 있다. 이에 앞선 두 가지 연구방법은 본 연구를 위한 선행 연구로 실제 세굴에 대한 침식저항능력을 검토하고 세굴실험의 검증자료로 활용하는데 의미가 있다고 할 수 있다.

3. 수리모형실험

3.1 실험장치 및 조건

수리모형실험은 명지대학교 수공학연구실 야외실험장에

만들어진 수조를 사용하였으며, 수조는 길이 25 m, 폭 6 m, 깊이 1.2 m로 충돌방지공의 실험이 가능하도록 공간을 충분히 고려하였다. 최대 공급유량이 약 330 l/s 까지 가능하며, 수로바닥에는 각 지점에서의 수심을 확인할 수 있도록 액주계가 설치되어 접근 수심의 확인이 가능하다. 또한 3차원 전자 유속측정기(VP3000)를 이용하여 접근유속과, 교각 및 충돌방지공 주변의 유속을 측정하였다. 또한 지형변동의 정확한 측정을 위하여 자동계측장비인 레이저 레벨측정기를 제작하여 1×1 cm의 격자점을 설정하고 각 지점에서의 바닥깊이의 변화량을 측정하였다.

이동상 실험모형실험에서는 Froude 상사법칙을 적용했을 경우 실제 인천대교 현장의 하상재료에 상사를 만족할 할 수 있는 입자를 구할 수 없으므로 “교각 주변에서 발생하는 국부세굴의 최대세굴심은 바닥입자의 크기에 따라 도달 시간이 다를 뿐, 그 깊이는 입자크기와 상관없이 동일하다”라는 이론(Briaud et al, 2001)을 바탕으로 본 실험에 사용된 모형사는 취득이 용이한 입자 중 가장 작은 규사를 선정하였다. 규사의 중앙입경크기는 0.37 mm 이며 세굴실험에 있어서 하상재료의 다짐에 의한 영향을 최소화 하기 위해 교각설치 후 약 12시간 동안의 물다짐을 시행한 후 실험을 진행하였다.

인천대교 현장에서 나타나는 조석류는 우리나라의 경우 평균 6시간 주기이며 이 왕복 조석류는 세굴의 되매움 현상을 발생시켜 세굴심이 작게 나타날 것이다(Escaramela, 1998). 이에 본 연구에서는 실제 현장에서의 양방향 흐름보다 일방향 흐름이 좀 더 깊은 세굴심을 보일 것으로 판단하여 일방향 흐름으로 최대세굴심이 발생할 때까지 실험을

수행하였다.

Fig. 3은 각 교각 노선상의 해수유동 수치모형인 EFDC를 이용하여 계산된 100년 빈도 유속 및 파랑에 의한 저면 전단응력이다. 본 연구의 대상 교각인 W1~W4교각은 다른 위치의 교각에 비해 깊은 수심조건으로 인해 파랑으로 인한 저면 전단응력이 0.1 N/m² 이하로 계산되었다. 따라서 파랑보다는 흐름의 영향이 매우 클 것으로 판단하여 본 실험에서는 파랑에 대한 고려를 제외하고 흐름에 의해 발생하는 세굴실험만을 실시하였다.

교각 건설 구간에서의 100년 빈도 경계조건을 Table 1에 제시하였으며 이 값은 관측 자료(조석 및 조류)를 통한 보정된 수치모델을 이용하여 계산되었다(삼성건설 JV, 2007c). 이 흐름조건은 낙조 조건에서의 100년 빈도 풍속과 한강, 임진강, 예성강의 100년 빈도 홍수량을 모두 고려한 것이다. 모형에서의 유속과 수심은 Froude 상사법칙에 의해 계산된 값이며 접근각의 경우 각 교각별 최대 설계유속에 따른 유입 각을 나타낸 것이다.

3.2 군말뚝만을 고려한 실험

충돌방지공이 세굴에 미치는 영향을 검토하기 위해서 충돌방지공 설치 전의 실험을 통해 유속과 유황 분석을 위한 고정상실험과 세굴심, 세굴양상 검토를 위한 이동상 실험을 실시하였다.

3.2.1 고정상실험

고정상실험은 유속과 유황을 검토하여 교각 주변 외류역의 범위를 파악하며 이동상 실험 수행시 교각 주변에서 발

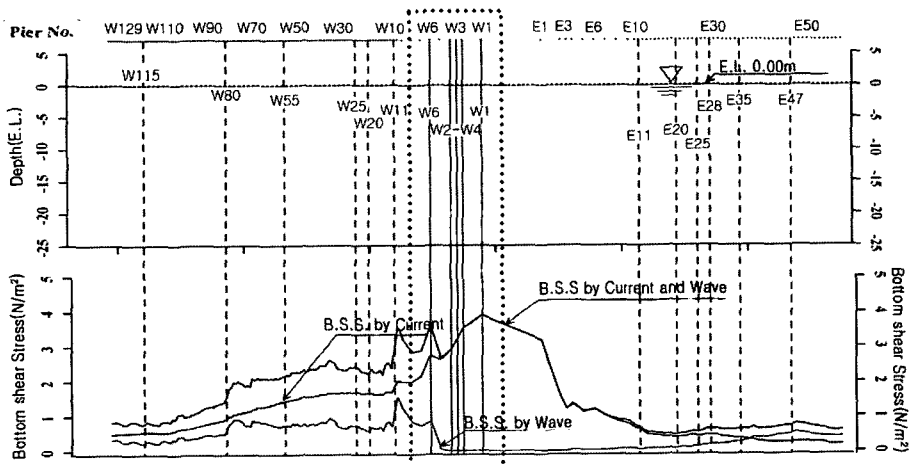


Fig. 3. Bottom shear stress (100-year return period event).

Table 1. Hydraulic physical model condition

Piers	Scale	Flow Depth (m)		Velocity (m/s)		Angle of Attack (°)
		Proto	Model	Proto	Model	
W1	1:80	17.7	0.221	1.49	0.166	-4.448
W2	1:60	19.3	0.322	1.428	0.184	-4.248
W3	1:60	19.3	0.322	1.364	0.176	-1.547
W4	1:60	17.4	0.290	1.288	0.166	-0.248

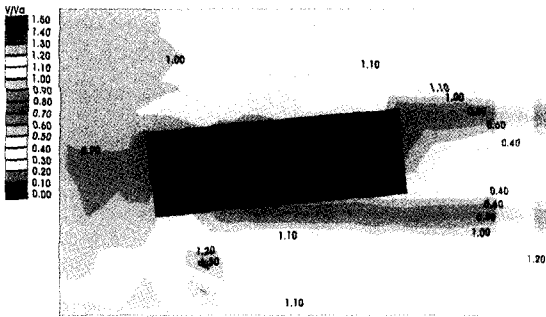


Fig. 4. Non-dimensional velocity distribution of W1 (flow →).

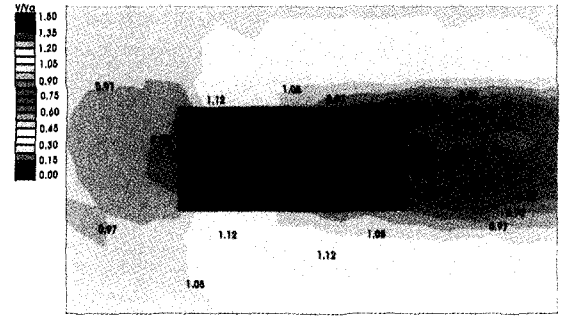


Fig. 6. Non-dimensional velocity distribution of W3 (flow →).

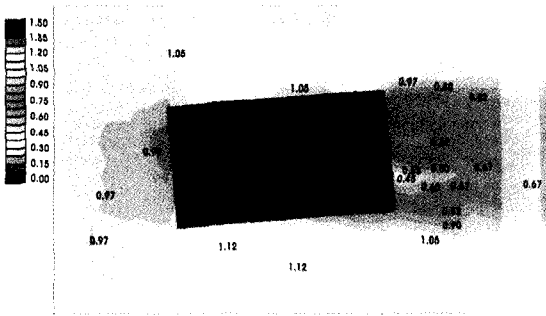


Fig. 5. Non-dimensional velocity distribution of W2 (flow →).

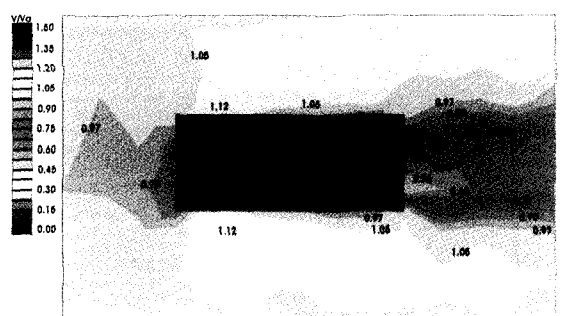


Fig. 7. Non-dimensional velocity distribution of W4 (flow →).

할 수 있는 세굴범위를 예측하는데 그 목적이 있다. 먼저 수심조건과 유속조건을 일치시킨 후 유황실험, 유속측정, 수표면 흐름장 분석 실험을 수행하였다. 유속측정실험은 10 × 10 cm의 격자로 측정점을 구성하여 3차원 전자유속계로 유속을 측정하였으며 경계조건은 Table 1과 같다.

Fig. 4~7은 대상교각별 유속 측정 결과로서 접근유속으로 무차원화 시킨 유속분포도이다. 네 교각 모두 전면부에서는 유속비가 0.9~0.97로 구조물로 인하여 유속이 감소된 영역이 나타남을 알 수 있고, 입사각에 의해 교각의 좌우측에서는 유속분포가 대칭을 이루지 못하고 교각에 의하여 흐름이 좌우로 분리되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 후류부의 발달은 W1교각의 경우가 상대적으로 잘 나타나 보이는데 이는 군말뚝 배열로 인해 와류가 충분히 발달하여 후류부에 그 영향이 미치는 것으로 나타났다.

3.2.2 이동상실험

이동상실험은 교량의 세굴심을 산정하기 위한 실험으로서 인천대교에 건설될 충돌방지공을 고려하지 않은 실험이다. 충돌방지공이 없는 경우에 대한 이동상실험을 실시하여 교각 주변에서 발생하는 국부 세굴심 및 세굴 범위를 산정하였다. 이동상실험에 사용된 경계조건은 고정상실험과 동일하게 적용하였다.

Fig. 8~11에서 나타나듯이 대부분 각 말뚝 주변에서 국부세굴만 발생하였으며 군말뚝의 영향은 나타나지 않았다. 군말뚝의 영향은 일반적으로 각각의 말뚝의 세굴공이 점점 발달하여 인근 말뚝의 세굴공과 합쳐지는 현상으로 본 연구의 군말뚝은 이러한 현상이 일어날 수 있는 충분한 유속 조건과 군말뚝의 형태가 아닌 것으로 분석되었다(윤 등, 2001). W1, W2, W3, W4교각의 최대 세굴심은 각각 5.1 cm

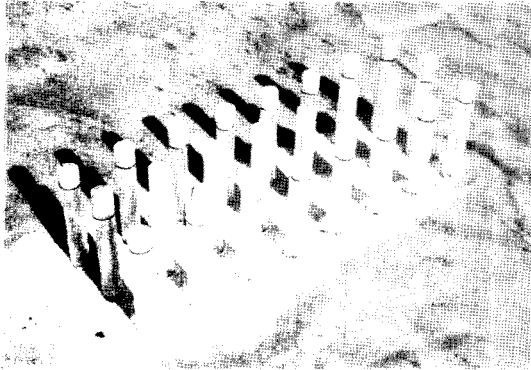


Fig. 8. W1 movable test result (flow ↗).

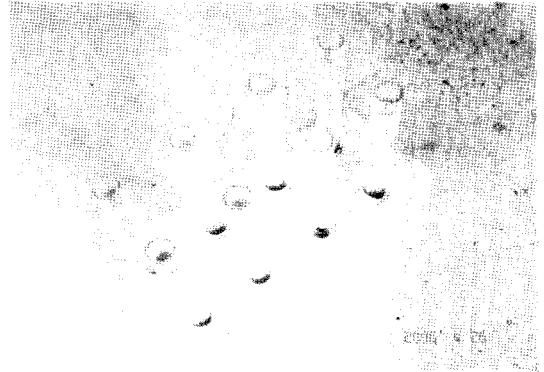


Fig. 11. W4 movable test result (flow ↗).

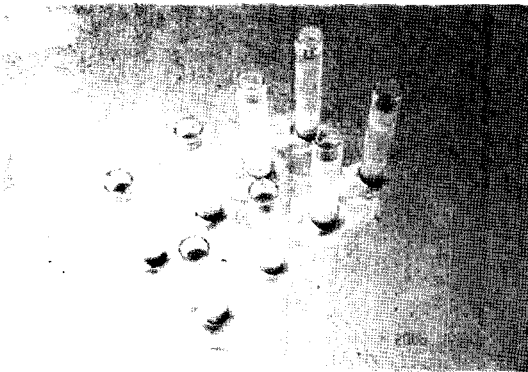


Fig. 9. W2 movable test result (flow ↗).

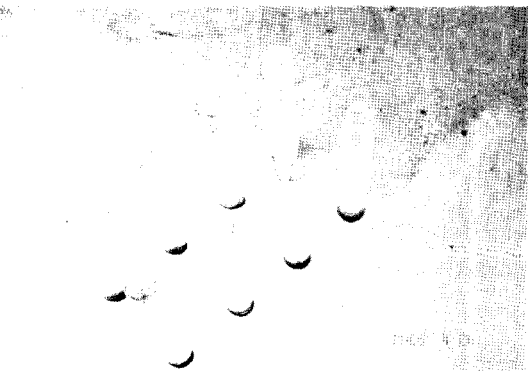


Fig. 10. W3 movable test result (flow ↗).

(원형 4.08 m), 2.7 cm(원형 1.62 m), 1.7 cm(원형 1.02 m), 1.7 cm(원형 1.02 m)가 측정되었으며 위치는 네 교각 모두 교각 전면부에 위치하고 있는 말뚝에서 발생하였다. 최대 세굴심은 유속조건이 빠를수록 더욱 크게 나온 것을 확인할 수 있었지만 W1의 경우 상사법칙을 적용했을 때의 유속이 W2, W3, W4에 비해 작지만 말뚝의 수가 W2, W3, W4에 비해 많기 때문에 고정상 실험을 통해 확인된 와류

영역의 발달과 무관하지 않고 그에 따라 세굴심이 상대적으로 크게 나타난 것으로 판단된다.

3.3 충돌방지공(Ship Impact Protection, SIP)의 영향을 고려한 이동상실험

충돌방지공은 인천대교 교각 주변에 발생 가능한 선박의 충돌로부터 교각을 보호하기 위하여 설치하는 원형 기둥의 구조물로서 지름은 25 m이고 W1의 주변에 9개, W2+3+4 주변에 10개가 설치된다. 충돌방지공은 구조물의 크기와 배치를 볼 때 기존의 설치 전 유속조건을 크게 변화시킬 수 있어 세굴에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 이러한 충돌방지공의 설치로 인한 세굴심 및 세굴범위의 영향을 확인하기 위해서 군말뚝만을 고려한 실험과 같은 경계조건에서 실험을 실시하였다. 또한 대상교각이 위치한 현장이 해상이므로 낙조 외에 창조, 양방향흐름에 대해서도 검토하였으나 본 논문에는 낙조조건에서의 세굴이 그 외의 조건에 비해 세굴심이 크게 나타나 낙조조건에서의 세굴실험 결과만을 분석하였다.

실험결과, W1낙조에 대한 충돌방지공(Fig. 12)은 최대세굴심이 5.4 cm(원형 4.32 m)발생하였으며 발생위치는 W1 교각 전면부 말뚝주변에서 발생하였다. 또한 설치 전 실험에 비해 말뚝의 세굴공이 커져 인근의 세굴공과 합쳐지는 군말뚝 현상이 나타났다. 충돌방지공 주변에서 발생한 국부 세굴심은 말뚝주변에서 발생한 값보다 작았지만 충돌방지공 사이를 지나는 흐름은 흐름단면의 축소로 인하여 유속이 경계유속의 1.4~1.7배 측정되었으며 이는 색소를 이용한 유황실험을 통하여 육안으로 확인할 수 있었다.

W2+3+4에 대한 충돌방지공 실험결과는 Fig. 13~16에 나타내었으며 Fig. 13에서 오른쪽에서부터 W2, W3, W4 교각이다. 최대 세굴심은 흐름 전면부에 위치한 충돌방지공

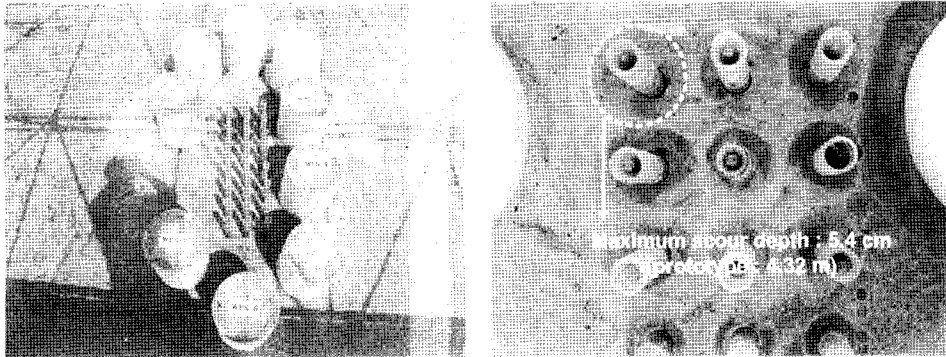


Fig. 12. Test results of W1 with SIP (flow ↓).



Fig. 13. Test result of W2+3+4 with SIP.

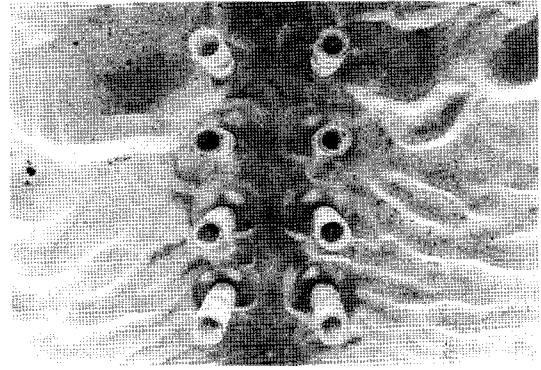


Fig. 15. Scour pattern of W3 pier (flow ↓).

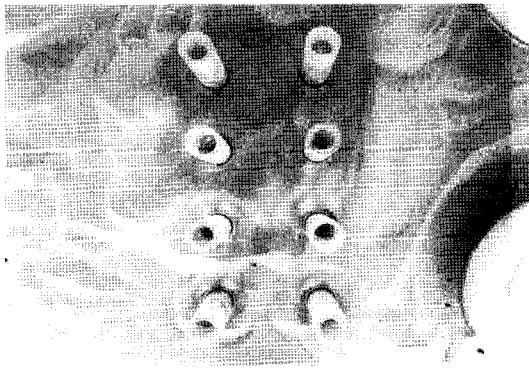


Fig. 14. Scour pattern of W2 pier (flow ↓).

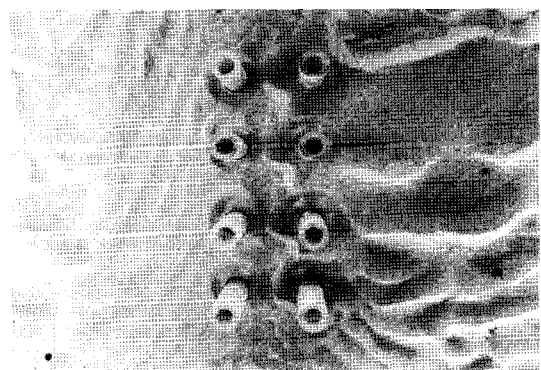


Fig. 16. Scour pattern of W4 pier (flow ↓).

주변에서 6.7 cm(원형 4.02 m)가 발생하였다. W2, W3, W4교각에서의 최대 세굴심은 각각 6.3 cm, 3.2 cm, 3.2 cm의 세굴이 발생하였으며 그 위치는 흐름방향의 교각 전면부에서 발생하였다. W2의 경우 충돌방지공의 흐름방향에 대하여 우측에 있는 두 개의 충돌방지공으로 인하여 흐름의 양상이 더욱 복잡해져서 세굴심이 다른 교각에 비해 크게 차이가 나는 것을 볼 수 있으며 군말뚝의 영향이 확연

히 발생한 것을 Fig. 14에서 확인할 수 있다. 하지만 Fig. 15와 Fig. 16에서 보듯이 W3와 W4는 W2에 비해 세굴심과 군말뚝의 영향은 적게 나타났지만 흐름방향의 전면부에 위치하고 있는 충돌방지공으로 인해 교각주위에 하상변동이 발생한 것을 확인할 수 있다. 한편 세굴심은 교각뿐만 아니라 주로 흐름의 전면부에 위치하고 있는 충돌방지공 주변에서 많이 발생하였다.

4. 실험결과 및 비교분석

수리모형 실험결과, 충돌방지공 설치는 설치 전에 비해 유황이 더욱 복잡해짐을 확인할 수 있었으며 교각과 충돌방지공 주변의 복잡한 유속장의 영향으로 인해 세굴에 큰 영향을 주는 것으로 확인하였다.

충돌방지공 설치 전 군말뚝단의 효과를 검토하기 위한 실험 중 고정상 실험결과 유속분포가 전반적으로 교각 전면부에서 교각에 의해 접근유속이 감소되는 경향을 보였으며, 교각 후면에서의 와류영역이 군말뚝의 배치 및 개수에 따라 다르게 측정됨을 확인할 수 있었다. 이동상 실험결과 4 개의 교각 모두가 군말뚝에 의한 세굴형태는 나타나지 않았고 말뚝주변에서 국부세굴만 발생하였다. 최대 세굴심은 W1에서 5.1 cm(원형 4.08 m), W2에서는 2.7 cm(원형 1.62 m), W3와 W4는 1.7 cm(원형 1.02 m)의 세굴심이 측정되었다.

충돌방지공 설치 후 결과는 설치 전에 비해 세굴양상이 확연히 다르게 발생하였다. W1 실험결과 최대 세굴심은 흐름방향의 교각 전면부에서 5.4 cm(원형 4.32 m)가 발생하였으며, W2+3+4 실험결과 최대 세굴심은 흐름방향의 전면부에 위치하고 있는 충돌방지공 주위에서 6.7 cm(원형 4.02 m)가 발생하였다. Table 2와 Fig. 17은 충돌방지공 설치 유무에 따른 각 교각의 군말뚝에서 최대 세굴심을 원형으로

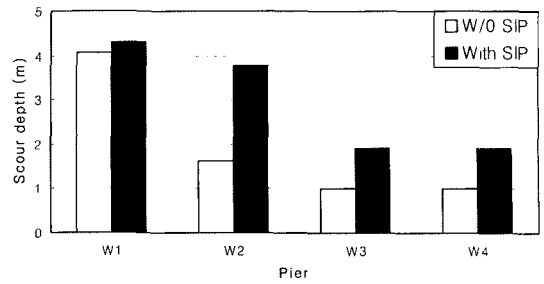


Fig. 17. Comparison of scour depth with and without SIP.

환산한 것으로써 W1의 경우 충돌방지공 설치 전과 같은 위치에서 최대세굴심이 발생하였지만 충돌방지공에 의한 유속의 증가로 인하여 세굴심은 약 0.3 cm(원형 0.24 m) 증가하였다. 하지만 W2에서의 최대 세굴심은 설치 전에 비하여 2.3배나 커진 것을 볼 수 있는데 이는 W2가 다른 교각에 비해 더 많은 충돌방지공에 의해 둘러싸여 있어서 유수단면적의 축소로 인한 통과되는 유속의 증가가 원인인 것으로 확인되었다.

한편 W1과 W2+3+4의 국부세굴 및 흐름으로 인한 하상 변동이 일어난 쪽은 충돌방지공의 외측 면으로부터 충돌방지공의 지름(1D, 25 m)의 1.5배(0.5 cm 이상 세굴기준)의 영향범위를 보였다. 또한 교각의 전면부와 좌우측면부에 위치한 충돌방지공이 후면부에 위치한 충돌방지공에 비해 상대적으로 큰 세굴심을 보였다. 이처럼 대규모 교량 부속시설물의 설치시 설치 전의 흐름보다 더욱 복잡한 흐름이 발생하여 세굴심 및 세굴범위에 큰 영향을 주게 된다.

5. 결 론

본 연구에서는 인천대교현장에서 충돌방지공으로 인한 해상교량의 세굴심을 평가하기 위해 수리모형실험을 수행하였다. 수리모형실험 수행 전에 해상교량의 세굴경향을 파악하기 위해 세굴률 실험과 현장모니터링의 결과 값을 비교해보았고, 두 실험을 통해 해상교량의 세굴특성을 파악할 수 있었다.

현장 관측 자료를 기초로 한 수치모델링을 통하여 산출된 100년 빈도 경계조건을 이용하여 충돌방지공 설치 전 고정상, 이동상 실험을 실시하여 군말뚝에서의 유속과 유황, 세굴심을 측정하였으며 충돌방지공 설치 후에는 충돌방지공으로 인한 세굴변화에 대해 분석하였다.

충돌방지공 설치 전 실험의 경우 군말뚝효과라는 나타나지 않았으며 각 말뚝의 세굴공은 말뚝 주변에서 말뚝직경의 이

Table 2. Comparison of test results with and without SIP

Piers	W/O SIP		With SIP	
	Max. Scour Depth (m)	Max. Scour Depth (m)	SIP	Max. Scour Depth (m)
W1	4.08	4.32	WPS-1	4.16
			WPS-2	3.92
			WPS-3	3.60
			WPS-4	2.00
			WPS-5	0.56
			WPS-6	0.32
			WPS-7	0.88
			WPS-8	3.76
			WPS-9	3.60
W2	1.62	3.78	WPS-10	2.82
			WPS-11	3.12
			WPS-12	3.54
			WPS-13	3.48
W3	1.02	1.92	WPS-14	4.02
			WPS-15	3.84
			WPS-16	2.64
			WPS-17	0.90
W4	1.02	1.92	WPS-18	1.50
			WPS-19	1.38

내의 세굴심을 확인할 수 있었다. 하지만 충돌방지공이 설치 후 세굴경향은 W1의 경우 최대세굴심의 위치는 설치 전과 같은 흐름의 전면부에 위치하고 있는 첫 번째 말뚝에서 발생하였으며 설치 전에 비해 세굴심은 0.3 cm(원형0.24 m) 더 크게 발생하였다. 또한 각 교각의 세굴공이 커지게 되어 인근의 세굴공이 합쳐지게 되는 군말뚝효과가 발생하였다. W2+3+4의 경우 최대세굴심은 충돌방지공 주위에서 발생하였으며 각 교각에서의 최대 세굴심은 설치 전 보다 2.3 배까지 커지는 결과를 보였다.

이에 대규모 해상구조물 설계시 세굴에 대한 영향검토를 수행할 경우 교각뿐만 아니라 교각 주변 시설물의 규모에 따라 막대한 영향이 있을 수 있음을 수리모형실험을 통하여 확인할 수 있었다. 앞으로 충돌방지공의 위치 및 크기(직경)에 따른 수리 검토 실험이 실시된다면 충돌방지공의 설치로 인한 영향에 대한 연구가 더욱 발전할 수 있을 것으로 보인다.

참고문헌

- 곽기석 (2002). S-SRICOS 방법: 점성토지반의 교각세굴깊이 예측, 한국지반공학회 논문집, 18(2), 1-9.
- 김창성, 곽문수, 여운광, 김정환 (2006). 조석환경에서의 교각 국부세굴에 대한 실험적 연구, 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 논문집, 2290-2293.
- 대한토목학회 (2004). 교량세굴의 예측과 대책: 수리/지반/구조공학의 공동접근.
- 삼성건설JV (2005a). 인천대교프로젝트 세굴조사보고서 (Package A), 18-88.
- 삼성건설JV (2005b). 인천대교프로젝트 해양조사보고서, 29-130.
- 삼성건설JV (2007c). 인천대교프로젝트 세굴조사보고서 (Package B), 71-123.
- 서석구, 이석용, 양병홍, 홍석주 (2007). 섬식 충돌보호공의 계획과 설계, 대한토목학회지, 55(8), 39-49.
- 여운광, 이종국 (1998). 실시간 해상 교량세굴 모니터링 시스템의 운용, 한국해양해양공학회 논문 초록집, 51-55.
- 여운광, 이훈, 김정환, 곽문수 (2006). 인천대교의 세굴심 산정을 위한 다학제적 연구, 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 562-566.
- 우효섭 (2004). 하천수리학, 청문각.
- 윤병만, 서정필, 노영신 (2001). 군말뚝 주변의 국부세굴에 관한 연구, 한국수자원학회 논문집, 34(6), 641-649.
- Briaud, J.L., Ting, F.C.K., Chen, H.C., Cao, Y., Han, S.W. and Kwak, K.W. (2001). Erosion Function Apparatus for Scour Rate Prediction, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 127(2), 105-113.
- Escarameia, M. (1998). Laboratory investigation of scour around large structures in tidal waters. 3rd International Conference on Advances in Hydro-Science and - Engineering, Cottbus, Germany, Vol III.
- Jones, J.S. and Davis, S.R. (2007). Evaluating Scour for the Piers on the New Woodrow Wilson Bridge, Proceeding of the World Environmental and Water Resources Congress 2007, Tampa, Florida, U.S.A.
- Richardson, E.V. and Davis, S.R. (2001). Evaluating scour at bridges. Report No. FHWA-IP-901-017, Hydraulic Engineering Circular No. 18(HEC-18), Third Edition, Office of Technology Applications, HTA-22, Federal Highway Administration, U.S. Dept. of Transportation, Washington, D.C., U.S.A., November.
- Yeo, W.K., Lee, H., Kim, C.S., Ji, U. and Lim, J.C. (2007). Hydraulic Physical Modeling for Marine Bridge Pier-Scour, Fifth International Symposium on Environmental Hydraulics, 197.

Received March 5, 2008

Accepted April 7, 2008