

기존 교각주변의 국부세굴 방지공법에 관한 연구

(The study of method local scour protection to the existing piers bridge)

박상길* , 장태래** , 박병열***

Sang Kil Park, Tae Rae Chang, Byung Yul Park

Abstract

Local scour is associate with particular local types of vortex around bridge piers. This paper is method of protection local scour for the existing Busan City subway 3 Line bridge piers and Gupo large bridge piers. In order to take design of protection of local scour this bridge piers, We calculate the local scour hole of depth , scour width, riprap construction , filter construction by formulas. We had experimental hydraulic model test for this bridge piers in order to take proof for the calculation of local scour. We knew that the vortex intensifies the local flow velocities and acts to erode sediment from the scour hole and transport it downstream. As the result of hydraulic model test, we could suggest three types method of protection local scour this bridges. We knew that FHWA HEC-18(Richardson et al. 2001: Modified CSU) Formula is useful to checking calculation as application of field. One is pier protection using the sheet piles and riprap, the others are pier protection using the riprap with filter and to make renew Wall-caisson. The best method of protection for the existing Busan City subway 3 Line bridge piers and Gupo large bridge piers is pier protection using the sheet piles and riprap.

Key words: local scour, checking calculation as application of field, protection of sheet piles, Renew Wall caisson, pier protection using the riprap and filter.

1. 서 론

기상이변으로 인한 집중호우가 발생하는 빈도가 많아지면서 기존에 설치된 교각의 주변에 심각한 세굴이 발생하는 피해가 매년 발생되고 있다. 선진국에서도 교량 붕괴 등이 발생하고 있으며, 아무리 잘 축조된 교량이라 할지라도 외적요소에 의해 유지관리가 제대로 되지 않을 경우는 교량이 붕괴될 수 있다는 것을 말해 주고 있다. 특히, 우리나라와 같이 한번 축조된 토목구조물은 유지관리가 없어도 영원히 안전해야 된다는 일반적인 개념은 교량구조물들을 유지관리를 하는 데 막대한 장애요소로 작용하고 있다. 따라서 교량의 중심부인 교각에 대한 유지관리는 교각의 생명을 연장시키는 주요한 검토사항이다. 교각을 유지관리 하는데 검토되어야 할 사항으로는 교각 주변의 국부세굴을 들 수 있다. 미국의 경우 미연방도로국에서 383개의 교량 파괴 사고를 분석한 결과 그 중 25%가 교각에 관련된 사고였고, 72%가 교대와 관련된 사고였으며, 1978년도에도 이와 유사한 조사를 통하여 상당한 수가 세굴에 의한 피해라는 것을 밝혀내었다.(F.H.W.A., 1993).

불규칙적인 흐름이 발생하는 하천의 하상에서 발생하는 세굴심도와 세굴범위를 정확히 예측한다는 것은 매우 어려운 과제로 남아 있다. 세굴에 미치는 영향에 대해서 연구자들에 의해서 계속적인 연구가 진행되고

* 정회원 · 부산대학교 토목공학과 교수 · E-mail : sakpark@pusan.ac.kr
** 정회원 · 부산광역시청 기획관리실 · E-mail : trchang@pusan.go.kr
*** 정회원 · 부산대학교 토목공학과 석사과정 · E-mail : byungyulp@hanmail.net

있지만, 정확하게 하상의 세굴을 예측하기는 해결해야 할 과제가 많이 남아 있는 실정이다. 하상세굴에 대한 일반적인 연구는 제한적으로 진행되었고, 지금도 이들을 해결하기 위해서 현장조사 및 수리모형실험 등이 연구자에 의해서 진행되고 있다. Wardhana와 Hadipriono (2003)가 미국에서 1989년부터 2000년 사이에 발생한 503개의 교량 붕괴 사례에 관하여 조사, 분석하였으며 그 결과 교량 붕괴의 주요 원인이 홍수에 의한 세굴로 밝혀졌다. 이러한 하상의 세굴은 대부분이 홍수가 지나간 후의 현장조사결과에 의해서 정량적으로 검증은 되지만, 홍수 시에 세굴이 발생하는 정확한 원인인 매카니즘을 조사 관측하여 이것을 방지하는 대책을 강구한 완벽한 세굴공식을 발견하기는 어렵다. 하상의 세굴에 대해서 미국이나 일본에서도 현장조사와 수리모형실험을 실시한 경험세굴공식을 적용하여 세굴심도와 세굴범위를 예측하는 연구가 진행 중에 있다. 기존의 세굴계산식 들은 대부분이 하천의 특성이나 수리현상을 포함시킨 계수를 적용하여 계산식이 제안되어 있기 때문에 일반적으로 어떤 곳이나 적용되는 식이라고 보기는 어렵다. 기존의 많은 계산식 중에서 몇 개의 계산식은 현장의 적용성에 타당성이 입증되어 있다. 특히, 미국에서 많이 이용되고 있는 식인 C.S.U의 수정계산식이 제안된 세굴계산식이다. 따라서 본 연구는 하상의 세굴을 예측하기 위한 일반적인 기법인 기존의 경험계산식을 적용하여 세굴심도와 범위를 계산한 후 동시에 수리모형실험을 실시하여 예측된 세굴의 심도와 범위에 대해 정량적으로 검증하는 방법을 채택하고 있다. 본 연구의 계산결과도 이러한 과정을 거쳐서 계산의 결과를 도출하고자 한다. 즉, 계산으로 산출된 정량화를 수리실험을 통해서 검증을 실시한 후 기존교각의 국부세굴방지공법을 제시하고자 하였다.

2. 국부세굴의 적용

2.1 적용대상지역

본 연구의 대상인 지하철 3호선 횡단교량과 구포대교는 건설 당시는 완벽한 설계와 시공이 되었지만 다대항 배후도로를 건설로 인하여 축소되는 통수단면을 확보하고자 지하철 3호선 횡단교량과 구포대교를 중심으로 낙동강 우안의 홍수터(고수부지)일부를 준설을 실시하도록 되어 있다. 준설구간에 포함되어 있는 교각은 지하철 3호선 횡단교량의 교각 11번과 12번, 구포대교 교각 15번과 16번이다. 교각의 CAP 콘크리트 기초 상부로부터 약 7m 깊이만큼 준설될 예정이다. 지하철 3호선 횡단교량 교각 11번, 12번과 구포대교 교각 15번, 16번에 대한 일반적인 현황은 CAP 콘크리트 기초의 폭이 8m에서 10.2m이며, CAP 콘크리트 높이는 2.5m에서 3m이다. 준설로 인한 문제는 CAP 콘크리트 아래에 있는 기초파일들이 7m 정도 수중에 노출된다. 하상의 세굴이 진행되면 기초 pile들의 노출부능의 길이가 계속 증가되고, 홍수 시에 이물질에 의한 반복 충격으로 인한 진동이 기초 pile에 전달되어 교각의 안전에 위험을 줄뿐 아니라 교량전체의 안전에도 위험을 줄 수 있다. 둔치부와 교각의 세굴방지대책이 세워져야 할 이곳의 하상의 평균 입경분포는 그림 1에서 보여 지는 것과 같으며 구포대교 하상의 중간입경은 0.25mm이며 주로 가는 모래 (세사)이다.

2.2 기존식의 적용 성

교각에 의한 국부세굴은 실내 실험과 현장조사에서 오래 동안 광범위하게 연구되어 왔다. 교각 세굴심도 계산을 위한 수많은 식들이 정량적으로 제안되어 적재적소에 유효하게 사용되고 있다. 최근에는 Melville이 최근의 정량화된 식들을 검토하여 정리하였다. Melville이 지적한 이들 공식 중에서 수리학적으로 적용성이 뛰어나고 동시에 현장에서 잘 이용되고 있는 몇 개의 정량화된 식들을 정리하였다. 가장 최근에 제안된 F.H.W.A.의 H.E.C.-18과 같은 정량화된 식들이 대표적이라고 할 수 있다. 이들 정량화된 식들에 대한 좀 더 자세한 설명은 이 보고서에는 직접적으로 언급하지 않고, 각 저자들이 평가한 참고문헌을 참조하기 바란다. Laursen (1958, 1963) 계산식은 Melville (1997)의 기본 계산식과 일치하며 그 형태의 식은 $y_s \propto \sqrt{By}$ 이다. 여기서, B = 교각 기초 폭이며, y_s = 세굴심도이고, y = 수심이다. Neill (1973)은 세굴심도 계산을 위해 계산식에 교각 모형 계수(k_s)를 고려하였다. 둥근형태의 변화다면 이거나 원형 교각에 대해서 k_s 값은 1.5이

며 직사각형 교각에 대해서는 k_s 값을 2이로 결정했다. 제안된 계산식들은 Froude 수를 포함시켜 유속인자를 계산하고 있으므로 흐름의 상태를 국부세굴계산식에 이용하고 있다. 그러나 Laursen이나 Neille과 같은 몇몇 계산식들은 Froude 수를 포함시켜 유속인자를 포함 하고 있지 않는 상태에서 계산이 되고 있기 때문에 흐름의 상태는 계산식에 영향을 주지 않는 것으로 평가할 수 있다. Jain (1981)은 실험 결과를 가지고 최대 정적 세굴심도(clear-water scour)를 예측하는 모든 계산식들을 비교하여 이들 계산식의 한계를 고려한 (원형 교각) 최대 세굴심도를 예측할 수 있는 새로운 계산식을 제안하였다. Breusers와 Raudkivi는 교각 세굴 계산식에 유사 특성, 교각과 하도에서의 흐름 및 형태를 포함하고 있는 5가지의 특정 계수를 사용하였다. Breusers와 Raudkivi은 유사 입자의 분포(K_o), 유사 입자의 크기(K_d), 수심(K_y), 접근 각도(K_θ), 그리고 교각 형태(K_s)등을 고려하여 계산식을 제안하였다. Ansari와 Qadar (1994)도 교각에서의 최대 국부 세굴심도를 계산하기 위한 설계 계산식을 제안하였다. 이 계산식은 다양한 범위를 포함한 세굴 변수들을 포함하고 있고, 동시에 이미 발표된 현장의 실제 측정 자료들을 이용하여 만들어진 일정형태의 도시화된 그림(포락선)에 기초하고 있다. 아울러 이 계산식은 교각의 투영된 폭을 사용하고 있다. Melville의 국부세굴심도에 관한 설계개념은 다음과 같은 관계식에 기초를 두고 있다(Melville, 1997). $y_s = K_{yb}K_fK_dK_sK_\theta$ 여기서, K_{yb} = 수심과 기초 폭의 크기이며, K_f = 흐름 강도이다. 흐름의 강도는 정적 흐름과 동적 흐름사이의 차이를 나타내고 있으며 K_{yb} 는 교각 폭에 있어서 수심의 영향을 나타내는 흐름의 깊이(얕음) 정도를 나타내고 있다. F.H.W.A.의 H.E.C.-18 공식은 1975년부터 추가로 연구와 실제 현장에서의 측정 자료로부터 얻어진 새로운 인자를 추가하여 개발되어진 과거의 C.S.U.계산식을 수정한 형태이다. 이 계식은 정적세굴과 동적세굴 두 가지 경우 모두에 대해 최대 세굴심도를 결정하기 위한 공식으로 제시되어진 것이 특징이라고 할 수 있다. F.H.W.A.의 H.E.C.-18 계산식은 하상구성입자가 비교적 큰 입자로 구성되어 있을 경우 세굴심도를 감소시키게 하는 계수를 갖고 있다. F.H.W.A.의 H.E.C.-18 계산식은 최대 교각 세굴심도를 예측하는 계산식이며 그 형태는 $\frac{y_s}{y} = 2.0K_sK_\theta K_f K_a K_w \left[\frac{b}{y} \right]^{0.65} Fr^{0.43}$ 과 같다. 여기서, K_b = 하상 조건에 관한 보정 계수, K_a = 하상 입자 크기에 따른 피복층(armoring)에 관한 보정계수, K_w = 교각 폭에 관한 보정 계수이다. C.S.U. 공식은 Froude 수를 포함함으로써 교각 상류의 유속을 고려하고 있다. 그리고 C.S.U. 공식은 교각 모형뿐만 아니라 흐름의 접근 각도에 관한 교정 요소를 포함하고 있다. 따라서 C.S.U.의 수정된 계산식은 현장에서 세굴이 발생될 때의 수리학적으로 세굴원인을 잘 설명할 수 있는 적재적소의 인자를 계산식에 삽입하므로 인해서 정확한 계산을 할 수 가 있는 장점을 가지고 있기 때문에 세계적으로 널리 이용되고 있다.

3. 대책공법

3.1 세굴방지대책 개념의 적용한계 및 세굴방지대책공법

교각의 국부세굴에 대한 방지대책의 개념은 현장의 조건에 따라서 결정되어야 한다. 전술했듯이 세굴방지 대책은 보호공법의 두 종류 중에서 선택되어야 한다. 즉, 구포대교와 지하철 3호선 횡단교량과 같이 흐름의 상태를 변화시킬 수 없는 조건에서는 유체 외력에 대해 저항력이 매우 큰 보조 구조물을 축조한 후 이 구조물 주변을 입경이 큰 피복 석과 필터 층을 두어서 세굴을 방지하는 대책으로 정리되어야 한다.

이곳은 현장의 조건을 감안하여 볼 때 이 방법을 제외한 다른 대책방법은 적용성에 대해 제한을 받고 있기 때문에 적용이 불가능하다. 교각의 기초 주변에 sheet pile을 타설할 때 타설 시의 수직오차를 고려하여 sheet pile을 cap concrete 끝단에서 2.5m씩 이격하여 타설하고, 지하철 3호선 횡단교량 11번과 12번은 직사각형으로 그리고 구포대교의 15번과 16번은 직사각형으로 타설한다. sheet pile 타설에 관한 자세한 설명과 그림을 제시하기에 앞서, sheet pile에 의해 둘러싸인 상태의 교각에 대한 세굴심도 산정과 세굴 공 범위 계산이 이루어져야 하며 그 결과는 표1로 정리하였다.

위에서 설명한 개념을 가지고 세굴방지대책을 기존의 문헌조사를 통해서 구상한 결과 구포대교와 지하철 3호선 횡단교량의 국부세굴에 대한 세굴방지대책은 3가지로 압축시킬 수 있다. 대책공법1안은 교각 보호를

위해 sheet pile을 현장에서 타설하여 교각기초의 보호 구조물로 만들고, sheet pile의 주변을 사석과 필트 층을 적당한 규모로 만들어 세굴을 방지하는 대책공법이다. 대책공법2안은 기존의 수중 교각처럼 우물 통(wall caisson) 기초를 교각기초주변으로 만들어 몰타르를 일정깊이 까지 채우는 방법이다. 마지막으로 제안된 대책공법3안은 교각주변을 일정하게 완만한 경사를 두어 사석과 필트를 이용하여 사면을 피복시켜 교각의 국부세굴을 방지하는 대책공법이다.

표1. 지하철 3호선 횡단대교와 구포대교의 세굴심도

구 분	지하철 3호선 횡단 교량		구포 대교	
	P11 정사각형	P12 정사각형	P15 직사각형	P16 직사각형
교각 폭, b (m)	15.2	13.2	13	13
F.H.W.A. HEC-18	10.4	9.7	9.6	9.6
Melville (1997)	22.1	20.6	20.4	20.4
Ansari and Qadar (1994)	19.9	18.8	18.6	18.6
Breusers and Raudkivi (1991)	8.7	8.1	7.9	7.9
C.S.U. (Richardson et al. 1975)	14.5	13.2	13.1	13.1
Neill (1973)	22.8	19.8	19.5	19.5
적용 값	10.4	9.7	9.6	9.6

3.3 사석의 규모산정

사석 크기와 입도 분포 계산을 위해 미공병단의 CHANLPRO 프로그램을 이용하였다. 이 PC 프로그램은 미공병단의 사석 설계 지침을 포함하고 있어 현장에 적용되고 있다.(U.S.A.C.E., 1994). CHANLPRO 프로그램에서 사용되는 기본 방정식을 이용하였다. 이 연구에서는 국부유속을 4m/s로 하였다. CHANLPRO 프로그램을 이용하고 Julien, (2002)의 사석 크기 계산을 위한 유속과 사석의 크기를 이용하면 사석의 계산 결과는 직경 52cm, 무게 193kg으로 산정되었다. (Julien, 2002)의 그래프에서의 제시된 사석 크기와 무게에 의하면 사석 입자의 중간 입경이 1.35ft(0.41m) 보다 커야하며 180lb(82kg)보다 무거워야 한다. 유속 방법의 결과를 고려하면 CHANLPRO 프로그램에서 결과가 여러 가지 가능성이 있는 결과들 중 가장 적절한 결과 중의 하나로 평가할 수 있다.

4. 수리실험결과

4.1 보강전의 세굴심도

세굴의 깊이는 기초의 형상에 따라서 달라진다. 본 실험은 200년 확률 빈도의 홍수량 본 실험은 50년 확률 빈도의 홍수량 $Q_p = 15,290m^3/s$, 100년 확률 빈도의 홍수량 $Q_p = 17,330m^3/s$, $Q_p = 19,370m^3/s$ 으로 설계 유량을 적용하여 지하철 3호선 횡단교각 11번과 12번 구포대교 15번과 16번에 대하여 정상류상태에서 시간에 따라서 수행한 결과를 일례를 정리한 것이 표2와 같다. 세굴심도의 값은 교각별로 다르지만, 구포대교 교각 16번에서 최대세굴심도가 발생하고 있다. 따라서 Cap concrete 높이를 더하면 세굴심도는 9.1m가 된다. 실험결과에 의한 최대세굴심도를 정리한 것이다. 이 값은 계산을 실시하여 C.S.U.가 제안한 값보다는 적지만, 거의 동일한 값을 갖는다. 세굴범위는 지하철 3호선 11번 교각은 실험값은 16.75m이고, 계산 값은 20.8m이다. 12번 교각의 경우 실험값은 상하좌우를 평균하면 17.2m 이며, 계산 값은 18.6m 이다. 구포대교 15번도 마찬가지로 실험값은 15.85m이고, 계산 값은 18.4m이다. 16번 교각은 실험값이 20.7m이고, 계산 값은 18.4m로서 실험값과 계산 값의 차이는 최대 값이 4.05m이며, 최소 1.4m 이다. 이들 값으로 볼 때 실험값과 계산 값은 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

표 2. 실험에 의한 최대세굴 심도

구분	지하철3호선횡단교량		구포대교	
	11번 교각	12번 교각	15번 교각	16번 교각
최대실험값	4.1m	5.1m	4.1m	6.1m
Cap concrete 높이	3.0m	2.5m	3.0m	3.0m
최대 세굴심도	7.1m	7.6m	7.1m	9.1m

4.2 보강후의 세굴심도와 세굴 공 범위

매트를 부설한 경우의 세굴대책공법을 실험한 경우, 지하철 횡단교량 교각구간 중 교각11번과 교각12번 그리고 구포대교 교각 15번과 교각 16번 사이에 포설된 제원을 가지고 실험한 결과 마운더의 침하나 필터층에서의 입자의 유출은 없었다. 즉, 설계된 제원을 축척시킨 실험에서 원형의 피복사석직경 50cm 깊이 2.5m 피복사석을 부설한 상태에서는 어떠한 세굴도 발생하지 않았다. 더욱이 Synthetic Filter를 깔고 필터 층을 이중으로 포설하여 실험을 실시한 경우는 유체력에 대해 충분히 저항하여 침하및 세굴 등은 발생하지 않았다. 따라서 낙동강 본류인 구포대교를 따라 평행하게 건설된 이들 교량들에 대한 세굴방지공법으로는 Sheet pile 공법이 가장 적합한 공법으로 판단되었다.

5. 결 언

Sheet pile을 타설하여 교각에 대한 외력을 차단하고, 몰타르를 50cm 주입하여 기초말뚝 사이의 토사가 어떠한 수리조건에서도 흘러 나가지 않는 견고한 외곽 구조물을 설치 한 후 주변에 Synthetic Filter를 깔고 상부에 2층의 사석 필터 층을 두고 사석 보호 공인 피복 석으로 보호하는 방식을 채택하고 있는 대안은 다른 두 가지 대안들 보다 가장 안전한 공법이고, 시공도 복잡하지 않고, 실현 가능성이 크며 경제적이고, 가장 적절정한 공법으로 판단된다.

참고문헌

- 311공구 건설공사 부산지하철 3호선 조사보고서 1997.7 부산교통공단
- 부산지하철 3호선 건설공사(311공구) 실시설계보고서 삼성물산.
- 다대항 배후도로 건설2단계실시설계 종합보고서 1999.부산광역시 건설본부.
- 다대항 배후도로 낙동대로 건설2단계 실시설계용역 수치 및 수리모형실험보고서 1997.8 (주) 삼단건설기술공사.
- Ansari, S.A. and Qadar, A., 1994. Ultimate depth of scour around bridge piers, Proc., ASCE National Hydraulic Conference, Buffalo, New York, U.S.A., 51-55.
- Breusers, H.N.C. and Raudkivi, A.J., 1991. Scouring. Hydraulic Structures Design Manual, No. 2, IAHR, Balkema, 143p.
- Busan city, 2005. Analysis report of hydraulic influence by highway construction for the Daedae Harbor. Construction department of Busan city.
- Jain, S.C., 1979. Maximum clear-water scour around cylindrical piers. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 107(5): 611-625.
- Ji, U. and Julien, P.Y., 2005. The Impact of Typhoon Maemi on the Nakdong River, South Korea. Hydrology Days, Colorado State University, March 7, 2005, pp. 103-110.
- Julien, P.Y., 2002. River Mechanics. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- 한강교량기초 수리모형실험 보고서 1998.7 서울특별시 건설안전관본부