필터 없는 사석보호공의 유사이탈로 인한 침하 안정성 평가를 위한 실험 연구

An Experimental Study to Evaluate the Subsidence Stability of Riprap Protection without Filters

지 윤* / 여 윤 광** / 이 원 민***

Ji, Un / Yeo, Woon Kwang / Lee, Won Min

Abstract

Many countermeasures for local scour at bridge piers constructed on the river and sea have been developed and researched to protect piers against local scour. The most commonly employed method is riprap protection, which is sometimes required the filter installation between riprap and base layers. However, the construction of stone filters are really hard to perform in the field, require the high cost, or sometimes are impossible. The experimental modeling is conducted to analyze the riprap failure modes and the stability of riprap protection without filters based on the different approach velocity and riprap layer thickness conditions. Also, the stability index to evaluate the performance of riprap protection is developed using the experimental results. The cover and thickness of the riprap layer play a very important role in the stability and thicker riprap layers can prevent a total disintegration of the riprap layer effectively, especially due to winnowing failure.

keywords : pier scour, riprap protection, winnowing failure, riprap subsidence

요 지

하천이나 해상에 건설된 교량의 교각에서 발생하는 세굴은 구조물의 안전에 있어서 매우 중요하며 이러한 세굴을 막기 위해 여러 세굴보호공법들의 개발 및 연구가 수행되고 있으며, 현재 현장에서 가장 많이 적용되는 방법으로 사석보호공이 있다. 이러한 사석보호공의 경우 사석과 하상 입자 크기에 따라 그 비율이 기준 이상이 될 경우 사석 층과 하상 사이에 필터 층을 시공해야 하지만 현장여건에 따라 필터시공부분에 막대한 공사비용을 추가하거나 필터시공이 불가능한 경우도 있다. 본 연구는 수리모형실험을 통해 필터 없는 사석보호공의 붕괴 형태를 분석하고, 세굴을 방지하기 위해 설치하는 사석 세굴보호공이 필터 설치가 반드시 필요한 조건이지만 필터 층 없이 설치될 경우, 포설 두께 및 접근 유속에 따른 침하 안정성을 평가하기 위한 것이다. 실험 결과는 정량적인 분석과 정성적인 분석을 통해 최종적으로 필터 없는 사석 보호공의 안정성 평가 지표를 개발하는데 활용되었다. 접근유속이 증가하거나 사석보호공의 포설두께가 감소할수록 최종침하량은 증가하는 양상을 보였으며, 모든 실험조건에서 경미한 유사이탈은 최종침하량에 도달할 때까지 발생하였다.

핵심용어 : 교각세굴, 사석보호공, 유사이탈(winnowing), 사석침하

* 명지대학교 토목환경공학과 박사후 연구원

Post Doctoral Associate, Dept. of Civil and Environmental. Engrg., Myongji Univ., Yongin, Korea
(e-mail: jiuncivil@gmail.com)

** 명지대학교 토목환경공학과 교수

Professor, Dept. of Civil and Environmental. Engrg., Myongji Univ., Yongin, Korea

*** 명지대학교 토목환경공학과 석사과정

Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental. Engrg., Myongji Univ., Yongin, Korea

1. 서론

하천이나 해상에 건설된 교량의 교각 주위에 발생하는 세굴은 교량의 안전에 직접적인 영향을 미치기 때문에 여러 세굴 방지대책 및 공법들이 국내외에서 다양한 연구 및 실험을 통해 개발되어왔다. 1995년에 미국에서 조사된 결과(Parker *et al.*, 1998)에 따르면 220,000여개 이상의 교량들 중 세굴방지대책이 적용되거나 시공된 교량은 약 36,432개인 것으로 나타났다(Melville and Coleman, 2000). 흔히 세굴을 방지하기 위해 사용되는 공법으로는 교각에 보강 구조물을 추가하는 방법, 교각 바닥에 여러 종류의 매트를 설치하는 방법, 교각 둘레에 사석을 배치하는 방법 등이 있다. 이러한 다양한 세굴 방지공법 중 사석을 이용한 교각보호공법은 실제 시공 시 사석 확보의 용이성뿐만 아니라 교각 건설 중이나 저수위 상태에서 쉽게 교각 주변에 배치할 수 있는 장점이 있기 때문에 현재 개발된 세굴방지공법 중 가장 많이 활용되고 있다. 사석보호공은 한 번 설치되면 사석이 제자리에 남아있는 한 세굴 방지에 좋은 효과를 발휘한다는 장점을 가지지만 사석의 유실여부를 쉽게 확인할 수 없기 때문에 일반적으로 조사와 관리가 어려운 단점이 있으며, 사석 매트에서 사용되는 암석은 시간이 지남에 따라 혹은 홍수로 인해 이동되거나 소실되는 문제가 있다. 또한 세굴보호공의 사석크기와 하상재료 입자의 크기 차이 때문에 사석 층 공극사이로 하상재료가 이탈하는 현상이 발생하기도 하며, 이는 곧 사석보호공의 침하에 지배적인 영향을 미치기도 한다(박상길, 2006). Brice and Blodgett(1978)은 미국의 58개 교량에 설치된 사석보호공의 성능을 조사 및 평가하였으며, 그 결과 34곳에서의 사석보호공 성능이 매우 만족스러운 것으로 나타났다. 그러나 12 곳은 부분적으로 그 성능이 만족스러운 것으로 평가되었으며, 나머지 12 교량에서는 사석보호공의 성능이 불만족스러운 것으로 나타났다. 불만족스러운 12 교량에서의 사석보호공 붕괴 원인들 중 하나가 하상입자의 사석 층 공극사이로의 이탈 현상 때문이었으며, 이는 곧 하상과 사석 층 사이에 필터 층을 설치하지 않았기 때문인 것으로 나타났다.

하지만 이러한 사석보호공의 안정성에 큰 영향을 미치는 필터 층은 현장에서 시공하기가 매우 어렵다. Wörman(1989)은 비교적 깊은 수심의 흐름은 물에서 얇은 층의 사석을 포설하는 것은 매우 어려운 일일뿐만 아니라 이러한 사석보호공을 시공하는 과정에서 여러 문제점들이 발생할 수 있음을 지적하였다. 물이 흐르는 구조물 근처에서는 와류가 주기적으로 발생하고 충만한 유속이 발생했을 경우, 하상에서는 전단응력이 증가하

고 국부세굴이 발생한다. Wörman(1989)의 논문에 의하면 실제로 스웨덴에서 교각 기초의 국부세굴로 인한 심각한 피해가 발생하였으며, 사석보호공이 건설되는 동안에 피해가 발생된 경우도 있음을 지적하고 있다. 또한, 유속과 하상재료의 특성, 사석 층 두께, 사석의 입경 등이 사석 층의 침하와 직접적인 관련이 있으며, 교각직경은 사석의 침하에 영향을 주지 않음을 실험을 통해 증명하였다. Wörman(1989)은 사석 층을 통한 하상입자의 침식과 이송을 유속, 사석크기, 하상재료의 크기에 따른 침하량의 관계를 실험을 통해 유도하였으며, 최종적으로는 다층의 사석과 필터로 이루어진 사석보호공 층이 단층의 필터 없는 사석 층으로 대체될 수 있음을 제안하였다.

본 연구는 먼저 필터 없는 사석보호공의 붕괴 형태를 수리모형실험을 통해 분석한 후, 교량에 설치되는 사석보호공의 사석과 하상 재료의 입자 크기 차이로 인한 유사이탈 현상이 사석보호공의 침하에 미치는 영향을 평가하기 위해 각기 다른 유속조건 및 사석보호공의 포설두께 조건을 가지는 12가지 실험안의 수리모형실험을 실시하고 이에 따른 결과를 활용하여 교량에서의 사석보호공 침하에 대한 안정성 검토를 위한 기초자료 및 지표를 제공하는데 그 목적이 있다.

2. 이론적 배경

2.1 사석보호공의 붕괴 원인 및 양상

Chiew(1995) 그리고 Chiew and Lim(2000)은 정적하중 조건하에서 발생할 수 있는 사석붕괴의 형태를 전단붕괴(Shear Failure), 유사이탈붕괴(Winning Failure), 가장자리붕괴(Edge Failure)로 분류하여 정의하였고, 동적하중 조건하에서 발생할 수 있는 하상형태변화에 의한 사석붕괴(Destabilizing by the Progression of Bed Forms)를 사석붕괴 메커니즘에 포함하였다. 먼저, 전단붕괴(Shear Failure)는 사석이 흐름에 의해 본래 설치된 자리를 이탈하여 이동하는 현상으로 물의 흐름에 의한 사석의 작용력으로부터 발생한다고 정의하였다. 유사이탈 붕괴(Winning Failure)는 난류와 사석 사이의 공극으로 침투되는 물의 흐름에 의해 하상재료가 사석 사이로 이탈하여 발생하는 것이며, 가장자리 붕괴(Edge Failure)는 사석 층 주변부에서 발생하는 세굴에 의해 방호역할을 하는 사석 층의 지지가 약화되는 것이 주원인으로 사석이 인근에 발달된 세굴공으로 떨어지면서 발생한다고 정의하였다. 그리고 하상형태 변화에 의한 불안정성(Destabilizing by the Progression of Bed Forms)은 흐름이 발생하면서 바닥형상에 영향을 주어

바닥형상의 변동이 발생하고 이로 인해 사석 층이 불안하게 되어 발생하는 현상으로 정의하였다. Lauchlan and Melville(2001)은 여러 조건하에서 사석보호공 실험을 실시하였으며 그 결과를 정성적인 방법으로 Fig. 1과 같이 표현하였다. 정적하상 조건하에서는 사석의 전단붕괴가 발생하지 않으며 제한적인 가장자리 붕괴와 유사이탈이 발생했을 때 사석 층이 안정하다고 평가하였으며 전단붕괴와 가장자리붕괴 및 유사이탈 현상이 모두 발생했을 때는 사석보호공이 더 이상 안전한 상태가 아님을 지적하였다. 또한, 동적하상 조건하에서는 하상형태변화에 의한 사석붕괴가 발생함과 동시에 사석전단붕괴가 가장자리붕괴와 유사이탈붕괴와 같이 발생할 수 있으며 또는 전단붕괴는 발생하지 않은 상태에서 가장자리붕괴와 유사이탈붕괴가 나타날 수 있음을 알 수 있다. Lauchlan and Melville(2001)은 하상의 변화로 인해 사석이 침하하다 결국 사석의 크기만큼 침하하여 하상바닥과 같은 높이가 되지만 층을 지어 침하되기 때문에 보호역할을 할 수 있는 능력은 여전히 남아 있으며 교각을 보호하는데 더욱 효과적일 수 있음을 제시하였다. 또한 유속이 증가할수록, 사석보호공의 포설 깊이가 얕을수록, 사석보호공의 세굴보호 능력이 감소함을 지적하였다.

Fig. 1. Summary of Riprap Failure Conditions for Both Clear-Water and Live-Bed Regimes (Lauchlan and Melville, 2001)

Chiew(1995)는 원형 교각의 주변에 설치되어 있으며, 적절하게 설계되지 않은 사석 층에서 발생하는 각기 다른 형태의 붕괴를 증명하기 위하여 실험을 실시하였으며, 그 결과 사석의 붕괴에 관한 각기 다른 전단붕괴, 유사이탈붕괴, 가장자리붕괴의 3가지 형태가 독립적으로 혹은 서로 연관되어 발생함을 확인하였다. Chiew

(1995)의 실험 결과, 사석 층의 두께와 사석포설 범위는 사석보호공의 안정성에 중요한 영향을 미치며 두꺼운 사석 층은 효과적으로 사석보호공의 붕괴를 방지하는 역할을 할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 유사이탈붕괴도 사석보호공에 매우 중요한 작용을 하며 비록 사석 층이 붕괴되지 않았더라도 유사이탈은 세굴을 발생시킬 수 있으며, 사석 층의 효과를 상쇄시킬 수도 있음을 지적하였으며, 사석보호공의 침하형태는 세굴의 양상과 비슷함을 확인할 수 있었다.

2.2 필터 설계 기준

필터는 사석보호공 밑에 위치하고 있는 하상토의 침식을 방지하며, 또한 사석보호공의 공극사이로 하상입자들이 유출되는 현상을 막기 위해서 설치된다 (Richardson *et al.*, 2001). 즉, 필터는 하상 입자들이 사석 층 밖으로 이탈하지 않으면서 바닥(base)층과 사석(riprap)층 사이로 물을 배수시키는데 효과적인 장치이다. 필터의 종류에는 사석필터(stone filter) 그리고 합성섬유필터(geosynthetic filter) 두 가지가 있으며, 이러한 필터 설계에 관한 지침서는 주로 미국 연방도로국의 HEC-23 (Lagasse *et al.*, 2001)와 Hec-11 (Brown and Clyde, 1989), 해안공학연구센터의 Shore Protection Manual (CERC, 1984) 그리고 미공병단에서 제시하고 있는 사석필터 설계기준(Julien, 2002)을 따른다. 주로 필터 층의 설치가 필요한지에 대해 가부를 판단하기 위한 식은 다음과 같다.

$$\frac{D_{50}(\text{riprap})}{d_{50}(\text{base})} < 40 \quad (1)$$

$$5 < \frac{D_{15}(\text{riprap})}{d_{15}(\text{base})} < 40 \quad (2)$$

$$\frac{D_{50}(\text{riprap})}{d_{85}(\text{base})} < 5 \quad (3)$$

여기서, D_{50} , D_{15} , D_{85} 는 각각 50%, 15%, 85%의 사석 입경을 나타내며 d_{50} , d_{15} , d_{85} 또한 0%, 15%, 85%의 하상 입경을 나타낸다.

지침서들은 위에서 제시하고 있는 범위에 결과 값이 포함되지 않을 때 필터에 대한 설계를 고려할 것을 제안하고 있다. 사석 층의 입자가 큰 것으로 구성되어 있고 충분히 작은 입자가 포함되어 있지 않아 공극 사이로 하상 입자가 유출될 가능성이 있다면 반드시 필터로 구성되는 필터 층을 정도에 따라 단층 또는 복층 이상으로 설치할 필요가 있다. 하지만 이러한 필터 층은 현

장에서 직접 시공하기가 매우 어렵고 설치 과정상 문제점이 발생하기 때문에 필터 층 없는 사석보호공의 설치가 불가피한 경우도 발생한다. 본 실험연구에서 채택된 사석과 하상 입자의 크기는 Eq. (1)부터 (3)까지의 범위를 훨씬 벗어난 상태로써 필터 층을 필요로 하는 경우를 대표하고 있다고 할 수 있다.

3. 수리모형실험

3.1 실험장치 및 재료

실험에 사용한 개수로 장치는 길이 25m(수조포함), 높이 0.8m, 폭 0.8m, 최대 하상경사는 7.7%까지 조절이 가능한 순환형 직선수로이다(Fig. 2). 개수로 상류단에는 유량을 조절할 수 있는 사각 위어가 설치되어 있으며, 수로의 끝에는 수위를 조절할 수 있는 수문이 설치되어 있다. 실험에 사용한 교각은 수로의 크기를 고려하여 10cm 폭의 원형 아크릴 모형교각을 제작하여 사용하였다. 교각 표면은 매끄러운 면을 가지고 있으며,

Fig. 2. Open-Channel in the Laboratory

Fig. 4. Particle Distribution of Quartz Sand

그 형상은 Fig. 3과 같다.

수리모형 실험에 사용된 하상토의 종류는 규사(SiO_2)이며, d_{50} 은 0.36mm 이고 입도분포는 Fig. 4와 같다. 또한 사석보호공의 사석은 각각의 입경을 등가지름 환산 공식을 이용하여 산정하여 입경 4cm가 되는 사석만을 Fig. 5와 같이 선별, 수집하여 실험에 사용하였다. 규사와 사석 모두 비중은 일반 모래의 경우인 2.65의 값을 가지며 규사의 비중은 모래의 비중보다 0.02에서 0.03 정도의 오차를 가지고 있다. 본 실험에서는 유사 공급 장치를 설치하지 않은 Clear-water condition이 적용되었으며 사석층의 침하량 즉, 세굴심은 시간에 따라 주기적으로 측정하여 최대 평형세굴심에 도달하는 시간을 관측하였다. 사석층 침하량은 대체적으로 실험 시작 후 200분 이후에 완전히 최대 평형상태에 도달하였으며 최대 침하량에 도달되는 시간보다는 최대 침하량 값을 획득하는 것이 사석층 설계 또는 계산 측면에서 좀 더 안전한 값들을 제시할 수 있다는 점을 고려하여 Clear-water condition을 적용하여 실험을 수행하였다.

Fig. 3. Round Shape Pier Used in Model

Fig. 5. Riprap with an Equivalent Diameter of 4 cm

Table 1. Experimental Cases

실험안	유량, Q [m ³ /s]	접근유속, V [m/s]	수심, h [m]	하상중앙입경, d ₅₀ [mm]	사석중앙입경, D ₅₀ [mm]	포설두께, T _R [mm]
C I-1	0.068	0.22	0.39	0.36	39	30
C I-2	0.068	0.22	0.39	0.36	39	56
C I-3	0.068	0.22	0.39	0.36	39	90
C II-1	0.068	0.264	0.33	0.36	39	30
C II-2	0.068	0.264	0.33	0.36	39	56
C II-3	0.068	0.264	0.33	0.36	39	90
C III-1	0.068	0.286	0.30	0.36	39	30
C III-2	0.068	0.286	0.30	0.36	39	56
C III-3	0.068	0.286	0.30	0.36	39	90
C IV-1	0.068	0.31	0.28	0.36	39	30
C IV-2	0.068	0.31	0.28	0.36	39	56
C IV-3	0.068	0.31	0.28	0.36	39	90

3.2 실험 내용 및 조건

먼저 본 연구에서는 필터 없는 사석보호공의 붕괴형태를 알아보기 위해 단층의 균일한 사석층을 수로의 교각 주변에 설치하여 실험을 실시하였다. 또한 접근유속과 사석층 포설두께에 따른 안정성 평가를 위해 접근유속을 0.22m/s에서 20%부터 40%까지 증가시켜 실험을 실시하였으며 유속 증가와 함께 사석보호공 층의 두께 변화 효과를 고려하기 위하여 그 두께를 각각 3.0cm, 5.6cm, 9.0cm로 조절하여 실험을 수행하였다. 접근 유속은 교각의 영향을 받지 않는 상류지점에서 1차원 유속계를 이용하여 측정하였으며 유속계로 인한 흐름 변화가 교각에 미치지 않는 범위에서 실시하였다.

실험조건들은 다음의 Table 1과 같으며, C III-1, 2, 3을 제외한 모든 실험에서는 사석보호공의 평형 침하량을 산정하기 위해 매 30분마다 침하량을 측정하여 평형 침하량에 도달하는 시간과 최대 평형 침하량의 변화를 시간별로 관측하였다.

Table 1에서 C I은 접근유속을 0.22m/s로 하여 실험을 실시한 경우이며, C II, C III 및 C IV는 접근유속을 각각 20, 30, 40%씩 증가시킨 실험 안이다. 또한 C I, II, III 다음에 붙는 숫자 1, 2, 3은 해당 유속조건하에서 사석보호공의 포설두께를 각각 30mm, 56mm, 90mm로 실험을 실시한 경우이다.

4. 실험결과

4.1 사석보호공의 붕괴 형태

본 연구에서는 단층의 균일한 사석 층을 설치하여 필터 없는 사석보호공의 붕괴 형태를 분석하였으며 그

결과 Fig. 6에서부터 9까지 크게 4가지의 형태로 분류하였다. 흐름 방향은 왼쪽에서 오른쪽 방향이며, 이러한 붕괴 양상은 Chiew(1995) 그리고 Chiew and Lim (2000)이 분류한 것과 매우 유사한 형태이다. 특히, Fig. 7의 유사이탈로 인한 붕괴(winnowing failure)는 교각 후면에 이탈된 유사가 주로 퇴적되는 것으로 나타났으며, 이러한 현상은 사석 층이 두꺼워질수록 어느 정도 감소하는 것으로 나타났다. 하지만 두꺼운 사석 층은 Figs. 6, 8과 같은 전단 붕괴 및 가장자리 붕괴가 쉽게 발생하는 경향이 있는 것으로 나타났다.

4.2 접근유속을 고려한 실험 결과

수리모형실험 결과 교각 세굴이 가장 심하게 발생하는 지점, 즉 가장자리 붕괴가 발생하는 지점을 제외한 다른 지점들 중 침하량이 가장 큰 지점은 교각의 상류부 인근에 위치한 지점으로 관측되었으며, 특히 접근유속이 사석보호공에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위하여 사석보호공 층의 두께는 5.6cm로 일정하고 접근유속이 각기 다른 실험 조건인 C I-2, C II-2, C III-2 및 C IV-2의 결과를 비교하였다. Fig. 10은 C I-2, C II-2, C IV-2에 대한 시간에 따른 침하량의 변화를 측정한 결과이며, 실험안 C I-2와 C II-2에서는 시간에 따른 사석보호공 층의 침하량이 비교적 빠른 시간 내에 평형 상태에 도달하였음을 알 수 있었다. 그리고 C I-2의 실험에서 실험경과 시간이 180분과 210분이 되는 지점에서는 침하량이 0.1cm 감소하였으나, 최종적으로 0.2cm의 침하량이 발생한 것으로 측정되었고 C II-2에서는 최종 침하량이 0.4cm로 측정되었다. 최대 접근유속을 고려한 실험안인 C IV-2에서는 최대 평형침하량이 1.4cm 발생하였다.

Fig. 6. Shear Failure

Fig. 7. Winnowing Failure

Fig. 8. Edge Failure

Fig. 9. Destabilizing by the Progression of Bed Forms

4.3 사석보호공의 포설두께 및 접근유속을 고려한 실험 결과

Table 1의 실험 조건하에 수행된 실험 결과들 중 C III-1,2,3을 제외한 실험 조건에서 시간(t)에 따른 침하량의 변화를 관측하였으며, 그 결과는 Fig. 11과 같았다. Fig. 11에 나타난 9 가지의 실험결과를 살펴보면 동일한 사석보호공의 포설두께(T_R)를 가지는 실험의 경우, 접근유속(V)이 증가할수록 사석보호공의 최종 평형 침하량(S_R)이 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 접근유속을 동일하게 하고 사석보호공의 포설두께를 달리 한 실험결과를 비교한 경우, 포설두께가 클수록 최종침하량이 작아짐을 알 수 있었다.

Fig. 12는 포설두께를 변화시켰을 때 접근유속이 증가함에 따라 사석보호공의 침하량 증가 정도를 나타내는 그래프이다. Fig. 12에서 알 수 있듯이 사석보호공 포설두께가 높아질수록 침하량은 현저히 줄어들었다. 특히 사석 포설두께가 3.0cm인 실험안의 결과는 다른 실험 결과보다 사석보호공의 침하량이 두 배 이상 증가됨을 알 수 있었으며, 이러한 현상은 유속이 증가할수록 더욱 뚜렷한 양상을 보였다. 유속이 증가함에 따라

침하량이 증가하는 정도는 포설 두께에 따라 각각 다양한 형태의 선형성을 보였다.

Fig. 13은 유속을 변화시켰을 때 각각의 포설두께에서 침하량 증가 정도를 나타내고 있다. 유속이 증가할수록 사석보호공의 침하량은 더욱 커졌으며, 특히 사석보호공의 포설두께가 커질수록 유속의 증가에 따른 사석보호공 침하량의 편차가 감소하는 양상을 보였다. 포설두께가 어느 정도 커진 상태에서는 유속의 증가가 침하량을 증가시키는데 지배적인 역할을 하지 않음을 알 수 있었으며 본 실험 결과에서는 포설두께가 7cm 이상이 되면 최대 평형침하량이 1cm를 초과하지 않았다.

4.4 사석보호공의 유사이탈에 대한 안정성 평가 지표 개발

Table 2는 12 가지의 실험 안에 대한 각각의 붕괴 양상 및 실험 결과를 사진과 함께 분석한 내용으로 Fig. 14의 사석보호공 침하 안정성 평가지표를 작성하는데 활용하였다. Fig. 14는 실험 조건 변수들 중 일정한 값으로 고정시킨 사석 크기 및 입자 크기 값을 제외한 유속(V), 수심(y_0), 사석층 두께(T_R), 그리고 실험을 통해 얻어진 침하량(S_R)을 무차원 변수화하여 그래프로 나

Fig. 10. Subsidence Depth Changes by Time

Fig. 11. Riprap Subsidence Measurements through the Time

Fig. 12. Relationship between Velocity and Subsidence

Fig. 13. Relationship between Riprap Thickness and Subsidence

타낸 것이다. 무차원화 그래프에서 무차원 상수 결정은 Wörman(1989)의 실험 결과에 기초하여 결정하였다. Wörman(1989)의 경우는 X축의 수심 대신 교각 직경을 이용하여 그래프를 작성하였으며 Wörman(1989)의 실험 결과에서도 알 수 있듯이 유속과 하상재료의 특성, 사석 층 두께, 사석의 입경 등이 사석 층의 침하와 직접적인 관련이 있으며, 교각직경은 사석의 침하에 영향을 주지 않음을 실험을 통해 증명하였다. 이에 본 연구에서는 같은 유량 조건하에 실시된 실험이며 유속이 커짐에 따라 수심이 알아지듯이 사석층의 경우도 사석층이 높아질수록 침하량이 작아지기 때문에 교각의 직경 대신 수심을 적용하여 무차원 상수를 결정하였다. Y축의 무차원 상수 $V^2/g T_R$ 의 한계값은 $S_R/y_o = 0$ 일 때 외삽을 이용하여 추정할 수 있으며 이 값은 침하가 시작되는 시점을 나타내는 매우 중요한 변수이다.

C I-1, C II-1, C III-1, 그리고 C IV-1 실험의 붕괴

형태에서도 알 수 있듯이 유속의 크기에 상관없이 비교적 포설두께가 낮거나 혹은 단층으로 이루어진 사석층은 유사이탈 현상이 모두 발생하는 것으로 나타났으며, 특히 유속이 가장 빠른 C IV-1 실험의 경우 사석 크기 높이만큼 침하가 일어나는 것을 알 수 있다. 즉, 유사이탈 현상으로 사석이 모래 하상에 완전히 침하되는 현상이 발생하였다.

실험결과 가장자리 붕괴는 사석보호공의 침하에 큰 영향을 미치지 않으며 유사이탈 현상이 사석보호공 층의 침하량을 증가시키는데 더 큰 영향을 주는 것으로 분석되었다. 사석보호공의 포설두께가 작은 조건들은 유사이탈현상 때문에 대체적으로 천이구간 및 불안정한 상태로 분류되었으며, 포설두께가 큰 조건에서는 높은 사석보호공 층으로 인한 가장자리 붕괴를 제외하고는 유사이탈에 의한 침하량의 관점에서 분석해 보았을 때 상당히 안정적인 성향을 보였다.

Table 2. Summary of Riprap Failure for 12 Cases

실험안	실험 후 사진	붕괴 형태	실험 결과
C I-1		유사이탈과 제한적인 가장자리 붕괴	교각의 상류단 부근에서 유사이탈이 다소 발생함 이탈된 유사는 교각의 하류단 부근에서 퇴적되는 양상을 보임 (침하량 : 0.5cm)
C I-2		제한적인 유사이탈 붕괴	미세한 유사이탈이 실험시작 후 잠시 발생하다 평형상태에 도달후 더 이상 발생하지 않음 (침하량 : 0.2cm)
C I-3		제한적인 가장자리 붕괴	두꺼운 사석층으로 인해 사석보호공 부근에 사륜이 발달하여 제한적인 가장자리 붕괴가 발생 유사이탈은 거의 발생하지 않음 (침하량 : 0.1cm)
C II-1		유사이탈 붕괴와 제한적인 가장자리 붕괴	교각의 상류단 부근에서 유사이탈이 발생하고 교각의 가장자리 부근에서 경미한 붕괴 발생 (침하량 : 2.5cm)
C II-2		제한적인 유사이탈 붕괴	교각의 상류단 부근에서 유사이탈이 다소 발생하였으나 평형상태에 도달한 후 유사이탈이 발생하지 않음 (침하량 : 0.4cm)
C II-3		가장자리 붕괴	인근에 발달한 사륜으로 인해 가장자리의 사석이 붕괴됨 (침하량 : 0.3cm)
C III-1		유사이탈붕괴, 가장자리 붕괴, 하상형상변화에 의한 불안정 붕괴	흐름에 의해 하상형상이 변화하여 사석보호공이 영향을 받았으며 이로 인해 사석간 공극이 커져 유사이탈을 심화시킴 (침하량 : 3.5cm)
C III-2		제한적인 유사이탈붕괴	교각의 상류단 부근에서 유사이탈이 다소 발생함 (침하량 : 0.8cm)
C III-3		제한적인 유사이탈붕괴와 가장자리 붕괴	교각의 상류단 부근에서 유사이탈이 다소 발생함 인근에 발달한 사륜으로 인해 가장자리의 사석이 붕괴됨 (침하량 : 0.5cm)

Table 2. Summary of Riprap Failure for 12 Cases(Continued)

실험안	실험 후 사진	붕괴 형태	실험 결과
C IV-1		유사이탈붕괴 가장자리 붕괴 하상형상변화에 의한 불안정성	사석보호공 전체에 걸쳐서 유사 이탈 발생하고 가장자리 사석이 붕괴됨 하상형상이 변화하여 사석보호공이 영향을 받았음 (침하량 : 4.2cm)
C IV-2		유사이탈붕괴와 가장자리 붕괴	교각의 상류단 부근에서 유사이탈이 다소 발생함 사석보호공의 하류단 가장자리 부근에 발달한 사륜으로 인해 가장자리 붕괴가 발생함 (침하량 : 1.4cm)
C IV-3		제한적인 유사이탈붕괴와 제한적인 가장자리 붕괴	사석보호공 전체에 걸쳐서 유사 이탈이 발생함 인근에 발달한 사륜으로 인해 가장자리의 사석이 붕괴됨 (침하량 : 0.6cm)

Fig. 14. Subsidence Stability Graph of Riprap Protection

5. 결 론

본 연구는 사석보호공을 구성하는 사석의 크기와 하상 재료의 입자 크기 차이로 인한 유사 이탈 현상이 사석보호공 층의 침하에 어떠한 영향을 주는지를 평가하기 위해서 각기 다른 유속조건 및 사석보호공의 포설두께 조건을 가지는 12가지 형태의 수리모형실험을 실시하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 접근유속이 0.22m/s에 해당하는 실험안 C I과 충돌방지공 사이의 단면 축소로 인한 유속 증가를

고려하기 위해 접근유속을 C I보다 20% 증가시킨 실험 C II에서 모두 빠른 시간 내에 최대 평형침하량에 도달하였다.

- 2) 접근유속과 사석보호공 포설두께를 변화시킨 12가지 실험조건에서의 결과를 이용하여 사석보호공 안정성 평가지표를 개발하였다. 그 결과 가장자리 붕괴는 사석보호공의 침하에는 큰 영향을 미치지 않았으며, 유사이탈 현상이 사석보호공의 침하량을 증가시키는데 더 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 사석보호공의 포설두께가 작은 조건들은

대체적으로 천이구간 및 불안정한 상태로 분류되었으며, 사석보호공의 포설두께가 큰 조건들에서는 높은 사석 층으로 인해 가장자리 붕괴만이 발생하였고 유사이탈에 의한 침하량은 유속의 크게 증가하는 조건에서도 현저히 감소하는 것을 알 수 있었다.

- 3) 모든 실험조건에서의 결과를 살펴보면 경미한 유사이탈은 최대 평형침하량에 도달할 때까지 발생하였다. 그러나 최대 평형침하량에 도달한 후에는 유사이탈 현상은 더 이상 발생하지 않음을 알 수 있었다.

본 실험 결과는 필터 층이 존재하지 않는 사석보호공에서 유사이탈로 인한 안정성을 평가하는데 활용될 수 있을 것으로 사료되며, 향후에는 보다 다양한 접근 유속과 사석보호공의 포설두께 및 사석의 입경 조건을 가지는 추가적인 실험을 실시함으로써 보다 일반화된 사석보호공의 안정성 평가 지표를 개발할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

박상길 (2006). **기존구조물 보강을 위한 수리모형실험 연구보고서**, 대한토목학회 부산·울산·경남지회

Brice, J.C., and Blodgett, J.D. (1978). *Countermeasures for hydraulic problems at bridge*. Vol. 1&2, FHWA Report No. FHWA-RD-78-162 & FHWA Report No. FHWA-RD-78-163, Federal Highway Administration, Washington, D.C.

Brown, S.A., and Clyde, E.S. (1989). *Design of riprap revetment*. Hydraulic Engineering Circular No.11, FHWA Report No. FHWA-IP-016, McLean, VA.

Chiew, Y.M. (1995). "Mechanics of riprap failure at bridge piers." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 9, pp. 635-643.

Chiew, Y.M., and Lim, F.H. (2000). "Failure behavior

of riprap layer at bridge piers under live-bed conditions." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 126, No. 1, pp. 43-55.

Coastal Engineering Research Center (1984). *Shore protection manual*, Vol. 1&2.

Julien, P.Y. (2002). *River mechanics*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

Lagasse, P.F., Zevenbergen, L.W., Schall, J.D., and Clopper, P.E. (2001). *Bridge scour and stream instability countermeasures*. Hydraulic Engineering Circular NO.23, Second Edition, FHWA NHI 01-003, Federal Highway Administration, Washington, D.C.

Lauchlan, C.S., and Melville, B.W. (2001). "Riprap protection at bridge piers." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 127, No. 5, pp. 412-418.

Melville, B.W., and Coleman, S.E. (2000). *Bridge scour*. Water resources publications, LLC, Highlands Ranch, Colorado, U.S.A.

Parker, G., Toro-Escobar, C., and Voigt, R.L.Jr. (1998). *Countermeasures to protect bridge pier from scour*. Draft Final Report (project NCHRP 24-7) prepared for National Co-operative Highway Research Program, University of Minnesota, Minnesota, U.S.A. pp. 402.

Richardson, E.V., Simons, D.B., and Lagasse, P.F. (2001). *River Engineering for Highway Encroachments - Highway in the River Environment*. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington D.C.

Wörman, A. (1989). "Riprap protection without filter layers." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 12, pp. 1615-1630.

(논문번호:08-08/접수:2008.01.14/심사완료:2008.03.07)