

교각 세굴방지를 위한 섬유돌망태의 적용성

Application of Fiber Stone for Bridge Pier Scour Protection

김성원*

Abstract

In this study, qualitative and quantitative evaluations are performed using the hydraulic analysis of fiber stone for bridge pier scour protection. We can consider that the effective scour protection should be suggested from the side of hydraulic stability, structure stability, and permissible tractive force. The perfect verification, however, on the fiber stone for bridge pier scour protection is not sufficient because of short literatures and experiments on the field study. The continuous research, therefore, will be needed to establish reliable verification using literatures investigation and the various experiments on the fiber stone for bridge pier scour protection.

Key words : Fiber Stone, Hydraulic Evaluation, Pier Scour Protection, Permissible Tractive Force

1. 서론

세굴을 방지하기 위한 보호공은 크게 사석, 콘크리트 블록, 돌망태 (계비온), 섬유돌망태 보호공 등으로 분류할 수 있다. 사석보호공은 지난 수백년 동안 사용되어 온 공법으로 시공성과 경제성이 다른 공법에 비해 양호하므로 흔히 사용되어 왔으며, 몇 가지의 연구 결과에 의하여 대략적인 설계식을 사용하고 있는 실정이다 (Chiew, 2004; Chiew and Lim, 2000; Chiew and Melville, 1987). 콘크리트 블록보호공은 저면에 토목섬유를 설치하고 블록간에는 케이블로 연결하는 공법으로 전통적인 사석보호공의 대용으로 사용되고 있다. 뛰어난 안정성을 가지고 있으나 고가이고 시공 시 별도의 거치장비가 필요하다. 돌망태보호공은 작은 돌들의 집적적인 일체로 작용토록 하여 큰 암석과 같이 흐름에 대하여 높은 저항을 갖는 효과를 갖고 굴요성이 높아서 자체로서 자리매김을 하여 안정성을 높이고 돌망태를 채우는 돌의 크기에 제한을 받지 않고 시공성이 우수한 장점을 갖는 보호공이기 때문에 고가인 사석을 대체할 수 있는 보호공으로 인식되고 있다 (윤 등, 2000, 2003). 그리고 자연석 혹은 쇄석을 고강력 특수섬유 그물망에 담아 사용하는 섬유질 돌망태로 구성된 섬유돌망태 (Fiber Stone) 보호공은 호안 기초 수변부나 교각 주변 등에 원지반을 피복하여 유속에 의한 세굴을 방지하여 구조물의 붕괴나 유실을 막는 역할을 하며, 기존의 사석보호공보다 일반적으로 시공성, 경제성, 환경성 등이 우수한 것으로 알려지고 있다 (시내&들(주), 2010a, 2010b; 김, 2011). 본 연구에서는 섬유돌망태 (Fiber Stone) 보호공의 수리학적 분석에 대한 기존의 문헌조사를 실시하여 섬유돌망태 보호공의 정성적 및 정량적인 평가를 실시하였다.

2. 섬유돌망태 (Fiber Stone) 보호공

섬유돌망태 (Fiber Stone) 보호공은 고강력 특수섬유를 이용하여 망을 제작하고, 그 내부에 일정크기의 자연석, 쇄석, 폐콘크리트를 담아서 유속에 의한 유실이나 붕괴되는 지역에 설치하여 구조적인 안정성유지와 하천 생태계복원이 가능한 다공질 구조물로서 동·식물의 생육은 물론 자연스런 하천환경을 조성하여 생태계의 복원이 가능하다. 섬유돌망태 (Fiber Stone) 보호공의 특성을 비교하면 다음과 같다. 먼저, 사석 및 돌망태보호공에 비하여 굴요성과 접지성이 매우 우수한 섬유 소재의 세굴보호공이다. 또한 다공질의 구조체로서 어소기능 및 수질정화 기능이 원활하며, 친환경성으로 유해물질이 전혀없는 친 환경소재를 사용하고 있다. 마지막으로 일체형의 구조로서 시공이 간편하고, 수중시공이 용이하다 (시내&들, 2010a, 2010b). 그러나 섬유돌망태 (Fiber Stone) 보호공에 대한 학술적인 연구는 미비한 상황이다. 따라서 섬유돌망태 (Fiber Stone) 보호공에 대한 수리학적 특성분석에 대한 지속적이고 많은 문헌연구와 다양한 실험이 필요한 실정이다.

2.1 섬유돌망태 (Fiber Stone) 보호공 수리해석

하상면에 수평으로 설치하는 적층구조로서 원지반의 보호공의 설계로서 수리해석을 실시하였다. 수리해석은 대표 설계

*: 정희원, 공학박사, 수자원개발기술사, 동양대학교 철도토목학과 부교수 ; E-mail : swkim1968@dyu.ac.kr

유속 (4.0m/sec)과 설계수심 (5m)에 근거하여 유동안정성 및 세굴 안정성을 포함한 수리안정성의 조사는 섬유돌망태 (Fiber Stone) 2.0ton 및 4.0ton 수리안정성 검토서 (시내&들, 2010a, 2010b)를 참고하여 검토하였다.

2.1.1 섬유돌망태 (Fiber Stone) 수리안정성 검토

가상구간의 설계값으로 대표유속 $V_0 = 4.0\text{m/s}$, 설계수심 $H_d = 5.00\text{m}$ 이고, 설치형상은 하상면 수평 설치의 적층구조로 설치하였다. 다음 Table 1은 섬유돌망태 (Fiber Stone) 2.0ton 및 4.0ton에 대한 설계기준을 나타내고 있다. 섬유돌망태 (Fiber Stone)의 파손 및 유실요인은 유수력에 의한 것으로 2.0ton 및 4.0ton의 섬유돌망태 (Fiber Stone)가 설치된 장소에서 유동하지 않기 위한 수중중량을 안정중량으로 설정하고, 개별체와 집합체의 설치구조에 따른 유수력에 대한 섬유돌망태 (Fiber Stone)의 안정조건을 검토하였다. 섬유돌망태 (Fiber Stone) 2.0ton 및 4.0ton의 설치형상에 따른 설계치는 다음 Table 2와 같이 나타내었다. 여기서 B = 섬유돌망태의 지름 (m), L = 섬유돌망태의 내경 (m), R = 섬유돌망태의 높이 (m), A_D = 섬유돌망태의 투영단면적 (m^2), A_g = 섬유돌망태의 평면적 (m^2)이다.

Table 1. 섬유돌망태 (Fiber Stone)의 설계기준

	설계수치				속채움 골재의 입경(mm)
	높이(m)	직경(m)	체적(m^3)	면적(m^2)	최소경~최대경
2.0ton	0.40	2.00	1.30	3.00	75~150
4.0ton	0.55	2.40	2.50	4.52	75~200

Table 2. 섬유돌망태 (Fiber Stone)의 설계제원

	설 정 값				
	B(m)	L(m)	R(m)	$A_D(\text{m}^2)$	$A_g(\text{m}^2)$
2.0ton	2.00	1.60	0.40	0.73	3.00
4.0ton	2.40	1.80	0.60	1.36	4.52

섬유돌망태 (Fiber Stone)의 각종 계수는 체적보정계수 K, 투영단면적 계수 C_1 , 평면적 계수 C_2 로 구성되며 그 값의 산정은 섬유돌망태 (Fiber Stone)의 공기중에서의 무게 W 및 섬유돌망태 (Fiber Stone)의 속채움 골재의 밀도 ρ_b 를 이용하여 다음 식(1)-(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$K = \frac{W}{\rho_b g B} = \frac{W}{\gamma_b B^3} \quad \dots (1) \quad C_1 = \frac{A_D}{B^2} \quad \dots (2) \quad C_2 = \frac{A_g}{B^2} \quad \dots (3)$$

다음 Table 3은 식(1)-(3)을 이용하여 자연석 혹은 쇠석으로 속 채운 섬유돌망태 (Fiber Stone) 2.0ton 및 4.0ton의 각종 계수를 산정한 것을 나타내고 있다.

Table 3. 섬유돌망태 (Fiber Stone)의 각종 계수의 산정

구분	B (m)	$A_D (\text{m}^2)$	$A_g (\text{m}^2)$	$g (\text{m/s}^2)$	$\gamma_b (\text{t/m}^3)$	K	C_1	C_2	W(ton)
2.0ton	2.000	0.732	3.000	9.810	2.650	0.094	0.183	0.750	1.99
4.0ton	2.400	1.363	4.524	9.810	2.650	0.109	0.237	0.785	3.99

2.1.2 섬유돌망태 (Fiber Stone) 개별체구조의 안정성검토

섬유돌망태 (Fiber Stone) 개별체구조가 유동하지 않고 안정을 이루기 위한 조건은 다음 식(4)와 같다.

$$D < u \cdot (W_w - L) \quad \dots (4)$$

여기서 D = 섬유돌망태 (Fiber Stone)에 작용하는 항력 (ton), L = 섬유돌망태 (Fiber Stone)에 작용하는 양력 (ton), W_w = 섬유돌망태 (Fiber Stone)의 수중에서의 무게 (ton), 그리고 u = 섬유돌망태 (Fiber Stone)와 하상면의 정지마찰계수 (0.8)이다. 또한 D, L, 그리고 W_w 의 산정은 다음 식(5)-(7)과 같다.

$$W_w = \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_b}\right) \cdot W = \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_b}\right) \cdot W \quad \dots (5)$$

$$D \frac{1}{2} \rho_w A_D C_D V_d^2 = \frac{\gamma}{2g} A_D C_D V_d^2 \quad \dots (6)$$

$$L = \frac{1}{2} \rho_w A_g C_L V_d^2 = \frac{\gamma}{2g} A_g C_L V_d^2 \quad \dots (7)$$

여기서 ρ_w = 물의 밀도 ($t\text{-sec}^2/\text{cm}^4$), γ = 물의 단위중량 (t/m^3), C_D = 항력계수, C_L = 양력계수, V_d = 설계유속 (m/sec)이다. 보편적으로 항력계수와 양력계수는 레이놀드 수에 따른 실험결과로 산정한다. 유속의 실험범위는 0.8-2.0m/sec 사이에 있지만 레이놀드 수가 커지더라도 항력계수와 양력계수의 값은 거의 변화가 없으므로 설계유속의 값은 2.0m/sec 이상으로 설정한다. 항력계수와 양력계수는 각각 0.5와 0.15로 설정된다. 따라서 섬유돌망태 (Fiber Stone) 개별체구조 2.0ton 및 4.0ton에 대한 유동안정성을 검토한 결과는 다음 Table 4와 같다. Table 4의 결과로부터 섬유돌망태 (Fiber Stone) 개별체구조 2.0ton 및 4.0ton의 유속에 대한 유동안정성을 확보한 것으로 분석된다.

Table 4. 섬유돌망태 (Fiber Stone) 개별체구조의 유동안정성

구분	V_d (m/s)	C_D	C_L	D(ton)	L(ton)	W_w (ton)	$u \cdot (W_w - L)$	판정
2.0ton	4.00	0.5	0.15	0.298	0.367	1.239	0.698	안정
4.0ton	4.00	0.5	0.15	0.555	0.553	2.484	1.545	안정

또한 섬유돌망태 (Fiber Stone) 개별체구조 2.0ton 및 4.0ton의 수중에서의 무게와 설계유속과의 관계로부터 유도된 유동에 대한 안정조건식은 안전율을 1.2로 설정하였으며, 다음 식(8) 및 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$W_w = 1.235 \times 10^{-4} V_d^2 : 2.0\text{ton} \quad \dots (8) \quad W_w = 1.480 \times 10^{-4} V_d^2 : 4.0\text{ton} \quad \dots (9)$$

식(8) 및 (9)를 이용하여 섬유돌망태 (Fiber Stone) 개별체구조 2.0ton 및 4.0ton의 유동에 대한 안정적인 설계유속의 범위는 다음 Table 5와 6과 같이 나타낼 수 있다. Table 5과 6에 의하면 섬유돌망태 (Fiber Stone) 개별체구조 2.0ton 및 4.0ton의 유동 안정성에 대한 설계유속의 설정은 2.0ton에서 최대 4.6m/sec 및 4.0ton에서 최대 5.0m/sec로 산정되었다.

Table 5. 섬유돌망태 (Fiber Stone) 개별체구조의 설계유속에 따른 안정성검토 (2.0t)

구분	W_w (ton)	V_d (m/s)	$1.235 \times 10^{-4} V_d^6$	판정
2.0ton	1.239	4.0	0.506	안정
	1.239	4.6	1.170	안정
	1.239	5.0	1.930	불안정
	1.239	5.5	3.419	불안정

Table 6. 섬유돌망태 (Fiber Stone) 개별체구조의 설계유속에 따른 안정성검토 (4.0t)

구분	W_w (ton)	V_d (m/s)	$1.480 \times 10^{-4} V_d^6$	판정
4.0ton	2.484	4.0	0.606	안정
	2.484	4.5	1.229	안정
	2.484	5.0	2.313	안정
	2.484	5.5	4.097	불안정

본 연구의 대표 설계유속 $V_0 = 4.0\text{m/s}$ 에 대하여 안정적인 설치조건은 개별체의 섬유돌망태 (Fiber Stone) 2.0ton 및 4.0ton의 경우 안정성 검토결과 필요조건을 모두 충족하는 것으로 분석되었다.

2.2 낙농장 살리기 사업 20공구 구간의 섬유돌망태 (Fiber Stone)에 의한 교량세굴 검토

교량세굴은 교각, 교대 등 교량구조물 주변의 하상이나 제방의 토사가 흐르는 유체의 물리, 화학적 작용에 의해 발생하는 현상이다. 이 현상은 교량안전에 직접적으로 영향을 주기 때문에 교량계획, 설계, 시공 및 유지관리와 같은 단계에서 가장 중요하게 검토되어야 할 사항 중 하나이다. 다음 Table 7은 섬유돌망태 (Fiber Stone) 보호공 포설심도의 설정 및 판정결과를 나타낸 것이다. 다음 Table 7에 의하면 낙농장 살리기 사업 20공구 구간의 울지교, 공도교 및 적포교에서 사석 보호공의 포설심도에 해당하는 섬유돌망태 (Fiber Stone)를 각각 1단 포설 (T=40cm) 할 경우에도 허용소류력의 측면에서 안전한 것으로 판단되나, 지구온난화에 의한 이상기후의 영향에 따른 극한강우나 슈퍼태풍 등을 고려하면 2단 포설 (T=80cm) 하는 것이 최적인 것으로 판단된다.

Table 7. 섬유돌망태 (Fiber Stone) 보호공 포설심도

분류	울지교	공도교	적포교	비 고	판 정
사석보호공 포설심도 (m)	1.20	0.75	1.38	-	안정
섬유돌망태 2.0ton	0.40	0.40	0.40	1단 포설	안정
포설심도 (m)	0.80	0.80	0.80	2단 포설	안정

3. 결론 및 추후 연구과제

본 연구에서는 섬유돌망태 (Fiber Stone) 보호공의 수리학적 분석에 대한 기존의 문헌조사를 통하여 섬유돌망태 (Fiber Stone) 보호공의 정성적 및 정량적인 평가를 시도하여 다음과 같은 결론을 유도하였다. 섬유돌망태 보호공 (Fiber Stone)은 기존의 다른 보호공에 비하여 굴요성과 접지성이 매우 우수한 섬유 소재의 교각보호공이다. 또한 다공질의 구조체로서 어소기능 및 수질정화 기능이 원활하며, 친환경성으로 유해물질이 전혀 없는 친 환경소재를 사용하고 있다. 그리고 섬유돌망태 보호공의 수리안정성, 구조안정성 검토 및 허용소류력 검토를 통하여 판단하면 기존의 사석보호공의 약 1/2 정도 두께로 섬유돌망태를 포설하는 경우 사석보호공보다 우수한 결과를 나타낼 수 있다고 판단된다. 낙동강 살리기 사업 20공구 구간의 울지교, 공도교 및 적포교에서의 사석보호공 설치부분에 섬유돌망태 (Fiber Stone)를 각각 1단 포설 (T=40cm) 할 경우에도 허용소류력의 측면에서 안전한 것으로 판단되나, 여러 불확실한 변수들을 고려하여 2단 포설 (T=80cm) 하는 것이 최적인 것으로 판단된다. 그러나 시공성, 경제성을 포함한 현장경험 등을 고려하여 섬유돌망태 (Fiber Stone)의 포설 두께를 결정하는 것이 바람직 할 것이다. 또한 본 연구에서의 문헌조사를 통한 정량적인 결과치는 추후에 다양한 실험 특히 대규모의 현장실험을 통하여 검증하는 과정 및 새로운 자료의 수집이 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구를 위하여 많은 기초자료를 제공하여 주신 시내&들(주) 전보술 대표이사님과 이강일 이사님께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 김성원(2011), 교각보호공을 위한 섬유돌망태의 수리학적 평가, 2011년 낙동강연구원 국제 심포지움 및 한국습지학회 정기학술발표대회 논문집, 한국습지학회, pp. 165-170.
2. 시내&들(주)(2010a), Fiber Stone 2.0톤 수리안정성 검토서, 보고서.
3. 시내&들(주)(2010b), Fiber Stone 4.0톤 수리안정성 검토서, 보고서.
4. 윤태훈, 김대홍, 이지승(2000), 돌망태에 의한 교각세굴 방지, 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제 33권, 제 6호, pp. 725-731.
5. 윤태훈, 이재진, 이봉희(2003), 원형교각 주위의 돌망태 세굴 보호공, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제 23권, 제 1B호, pp. 1-9.
6. Chiew, Y.M.(2004), Local Scour and Riprap Stability at Bridge Piers in a Degrading Channel, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 130, No. 3, pp. 218-226.
7. 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.
8. Chiew, Y.M. and Melville, B.W.(1987), Local Scour around Bridge Piers, Journal of Hydraulic Research, Vol. 25, No. 1, pp. 15-26.