

호안용 매트리스의 설계기법

배상수* · 이경욱** · 지홍기*** · 이순탁****

1. 서론

매트리스는 철망 내에 자갈을 채운 구조물로서 수로사면의 침식을 억제하고 수로의 안정화에 사용되고 있다. 매트리스 철망은 세굴이 발생하는 수로에서 변형에 유연하게 적응하는 유연성을 가지고 있으며, 철망으로 조직된 구조물이기 때문에 변형 또는 유수력에 저항력을 발휘할 수 있는 특수성을 지니고 있다. 한편 매트리스는 다공체이기 때문에 침투성이 높아서 부력에 유효하게 대응할 수 있으며, 식물의 생장을 촉진시켜 식생수로로 쉽게 형성시키는 친생태성 구조물이다. 그러므로 수로사면의 안정을 위한 공법으로 매트리스가 가장 널리 적용되고 있으며, 수로사면의 자연 경관을 고려하고 수로를 안정화시키는 적절한 방법이라 할 수 있다. 그러나 아직까지 매트리스의 수리학적 거동해석이나 수리학적 특성에 관한 연구가 미흡하여 이를 실용화하는데는 많은 제약을 받고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 수로사면에서 유수 특성에 따른 호안용 매트리스의 적용지침 및 설계기법을 제시하기 위하여 각각의 수리학적 흐름조건에 따라 실험을 실시하였으며, 매트리스로 보호된 수로의 수리학적 특성, 초기거동조건 및 빠른 흐름 상태에서의 매트리스 변형 등을 규명하고 분석하였다.

2. 호안용 매트리스 수로의 수리학적 특성

2.1 조도계수 추정

수로사면에서 조도계수는 Meyer-Peter와 Muller에 의하면 모래-자갈 등의 혼합사로 구성된 수로사면의 표면조도는 90%를 차지하고 있는 입자와 관련되며, 호안용 매트리스에 대한 Manning 조도계수 n 은 식 (1)에서 구할 수 있다.

$$n = \frac{d_{90}^{1/6}}{26} \tag{1}$$

여기서, d_{90} 은 수로사면 재료의 90% 통과를 허용하는 체의 직경(단위 : m)이다.

2.2 전단응력과 유속과의 관계

수로사면에서 전단응력, 유속 및 동수반경 사이의 관계는 식 (2)와 같이 Manning 공식으로 나타낼 수 있다.

$$\tau_m = \gamma_w n^2 \frac{v^2}{R^{1/3}} \tag{2}$$

* 정회원 · 영남대학교 대학원 토목공학과 박사과정 053-810-3791(E-mail : m0056012@chunma.yu.ac.kr)
** 정회원 · 영남대학교 대학원 토목공학과 석사과정 053-810-3791(E-mail : m0046040@chunma.yu.ac.kr)
*** 정회원 · 영남대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 053-810-2414(E-mail : hkjee@yu.ac.kr)
**** 정회원 · 영남대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 · 이학박사 053-810-2416(E-mail : leest@yu.ac.kr)

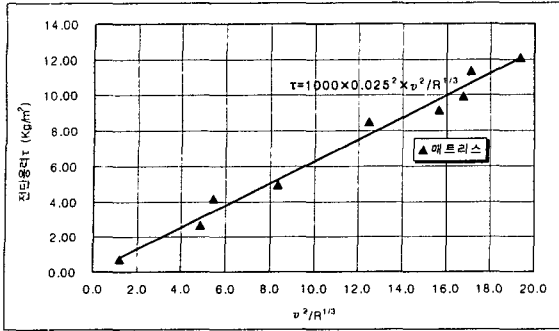


그림 1. 매트리스에 작용하는 전단응력 대 유속 및 동수반경과의 관계

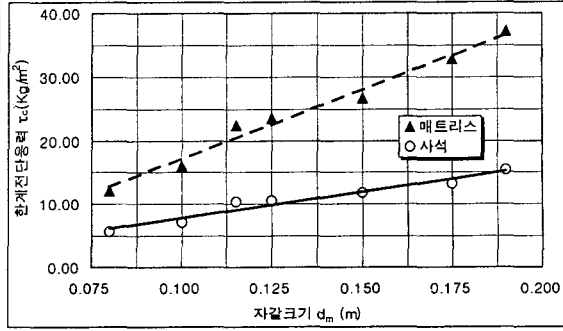


그림 2. 자갈크기별 사석과 매트리스 호안공의 한계전단응력

그림 1은 호안용 매트리스 실험으로부터 얻은 결과를 나타냈다. 그림 위의 직선은 Manning 조도 계수 $n=0.025$ 라는 가정하에 결정되었으며, 식 (2)와 매우 일치하고 있음을 보여주고 있다. 이 식은 유속과 전단응력은 동수반경과 반비례한다는 것을 알 수 있으며, 전단응력은 유속과 깊은 관계가 있고 수심에는 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

2.3 매트리스/필터, 필터/바닥흙 경계면에서의 유속

매트리스와 사석 호안공에서 피복공의 두께와 자갈크기는 2가지 요소(수로사면 재료의 침식성과 흐름에 의한 저항성)에 의해 결정된다. 매트리스와 사석의 자갈층을 지나는 유속이 자갈/바닥흙 경계면에서 0 또는 흙 입자가 움직이지 못하도록 충분히 느리게 되는 것을 요구한다. Manning 공식은 매트리스/필터 경계면에서 유속을 결정할 때 적용할 수 있다고 추정되었으며, 식 (3)과 같다.

$$v_b = \frac{1}{n_f} \left(\frac{d_m}{2} \right)^{2/3} i^{1/2} \quad (3)$$

여기서, v_b : 매트리스/필터 경계면에서 유속, d_m : 채움재의 평균크기, $d_m/2$: 매트리스 아래에서 흐르는 동수반경으로 가정, n_f : 평균 Manning 조도계수이다. 실험에 의하면 필터/바닥흙 경계면에서 필터 아래유속(v_f)은 대략 v_b 의 1/4~1/2 정도로 필터 위의 유속과 관계가 있다. 매트리스/필터 경계면에서 유속 v_b 로부터 필터/바닥흙 경계면에서 유속 v_f 까지 경계면의 유속을 감소시키기 위한 소요자갈의 두께 L 은 식(4)에서 결정될 수 있다.

$$L = \frac{d_v}{f} \left[1 - \left(\frac{v_f}{v_b} \right)^2 \right] \quad (4)$$

여기서, f : Darcy-Weisbach 마찰계수 ($f=0.05$ 로 가정), d_v : 대략 중간자갈크기의 1/5로 추정하는 공극의 직경이다. 또한 유속 v_f 는 바닥흙의 침식에 의해 발생하는 침식유속 v_e 와 비교되어야 한다. 비점착성 흙에 대해서는 식 (5)에서 구할 수 있다.

$$v_e = 16.1 d^{1/2} \quad (5)$$

여기서, v_e 의 단위는 m/sec, d 는 m이다. 점착성 흙에 대해서는 식 (6)에서 구할 수 있다.

$$v_e = \sqrt{\frac{8\tau}{f\rho}} \quad (6)$$

여기서, τ : 점착성 흙의 공극율에 대한 전단응력, ρ : 물의 밀도, f : Darcy-Weisbach 마찰계수이다. 만일 $v_f < v_e$ 이면 점유필터를 사용할 수 있으며, $v_f > v_e$ 이면 식 (7)을 이용하여 자갈필터를 설계한다.

$$\frac{d_{50}^{(filter)}}{d_{50}^{(soil)}} \leq 40 \quad 5 \leq \frac{d_{15}^{(filter)}}{d_{15}^{(soil)}} \leq 40 \quad \frac{d_{15}^{(filter)}}{d_{85}^{(soil)}} \leq 5 \quad (7)$$

두께 t 는 0.15m~0.23m보다 커야 하며, $v_f = v_e$ 라 가정하고 식 (4)에서 필터두께를 계산하고 t 와 L 을 비교하여 큰 값을 이용한다.

3. 호안용 매트리스의 초기거동조건

3.1 소류력에 의한 안정성 검토

사석과는 달리 매트리스 호안공은 철망 내에 자갈로 채워지며, 이들 구조물에서 안정성의 한계는 전단응력이 채움재를 막 이동시키려는 초기이동 응력지점과 같다. 따라서 수로사면에서 호안공의 전단응력 τ_m 은 식 (8)에서 구할 수 있다.

$$\tau_m = 0.75 \gamma_w y i \quad (8)$$

여기서, γ_w : 물의 비중, y : 수심, i : 수로바닥의 경사이다.

곡선수로로 뻗어있는 수로사면에서 전단응력은 바깥제방을 따라 증가하며, 식 (9)에서 구할 수 있다.

$$\tau_m = K \gamma_w R i \quad (9)$$

여기서, R : 동수반경, K : 곡률반경에 따라 수표면 폭의 비율함수이다.

수로바닥에서 사석이나 매트리스 하상보호공의 한계전단응력 τ_c 은 식 (10)에서 구할 수 있다.

$$\tau_c = C^* (\gamma_s - \gamma_w) d_m \quad (10)$$

여기서, C^* : Shield 계수, γ_s : 자갈의 비중, d_m : 채움재의 평균입경이다.

제형단면 수로사면에서 매트리스 호안공의 한계전단응력 τ_s 는 식 (11)에서 구할 수 있다.

$$\tau_s = \tau_c \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \varphi}} \quad (11)$$

여기서, θ : 수로바닥과 사면이 이루는 각, φ : 채움재의 내부마찰각 $\varphi = 41^\circ$ 이다.

따라서 매트리스 호안공은 식 (8) 및 식 (9)와 식 (11)을 비교해서 얻은 부등식인 식 (12)를 증명할 수 있으면 안정하다고 할 수 있다.

$$\tau_m \leq \tau_s \quad (12)$$

위의 부등식 (12)는 식 (13)과 같이 매트리스 호안공의 변형을 제한할 수 있다.

$$\tau_m \leq 1.2 \tau_s \quad (13)$$

한편 Agostini, R. 등 (1988)에 의하면 철망에 채워지지 않는 느슨한 사석 호안공에 대한 Shield 계수는 $C^* = 0.047$ 이며, 철망에 채워진 자갈 매트리스에 대한 Shield 계수는 $C^* = 0.10$ 이다. 자갈의 크기에 따른 한계전단응력은 매트리스의 채움재인 자갈의 크기를 나타냈으며, 그 결과는 그림 2와 같았다. 여기서, 채움재의 크기가 달라짐에 따라 Shield 계수와 조도계수가 변화할 수 있으나 이를 감안하더라도 전단응력은 대체로 매트리스를 사용할 경우보다 사석을 사용할 경우에 거의 2배 이상이 됨을 알 수 있었다.

3.2 유속에 의한 안정성 검토

흐름에 의한 움직임에 저항하는 매트리스의 기능은 자갈의 부피가 아니라 이동에 저항하는 하나의 자갈으로서의 연속성에 의존한다. 매트리스 내의 자갈은 철망에 의해 구속되며, 유속과 전단응력이 한계점에 도달하였을 때 매트리스 내의 자갈은 흐름의 주요방향으로 움직이기 시작한다. 그림 3과 4는 한계유속 대 중간 자갈입자 크기와 매트리스 두께를 각각 나타냈다. 동일한 유속에 대해서 매트리스 두께는 얇은 수심조건에서 깊은 수심조건에서와 같은 안정성을 얻기 위해서는 매트리스가 더 두꺼워져야 한다. 그림 3은 Shield 계수 $C^* = 0.047$ 일 때 결정된 사석의 초기거동에

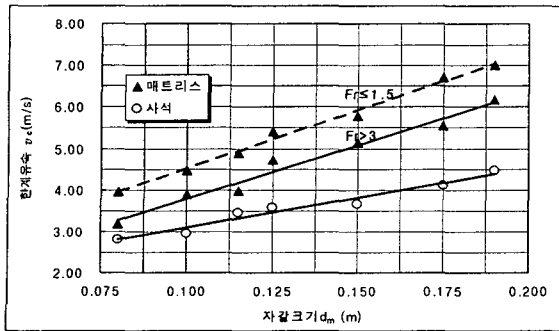


그림 3. 채움재의 크기에 대한 사석과 매트리스 호안공의 한계유속

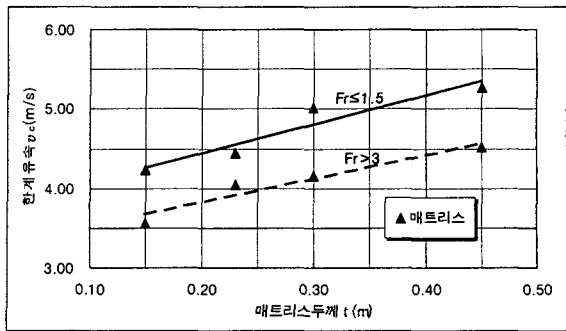


그림 4. 매트리스 호안공 두께에 대한 한계유속

대한 한계유속을 나타냈다. 이 그림에서 매트리스 철망이 자갈을 묶어줌으로써 채움재의 안정성을 증가시킨다는 것을 알 수 있다. 그림 4는 0.45m 매트리스 두께는 한계류 또는 상류($Fr \leq 1.5$)에 대한 0.23m 매트리스 두께와 같은 안정성을 얻기 위해서는 아주 큰 사류($Fr > 3.0$)에 이용되어야 함을 보여준다.

4. 호안용 매트리스의 변형

전단응력이 초기거동조건인 한계치에 도달할 때 철망 내의 자갈은 그림 5와 같이 매트리스 내의 채움재 일부가 하류측으로 이동한다. 만약 전단응력이 더욱더 증가하면 다음 두 가지 중의 한 가지 현상이 발생할 것이다. 먼저, 매트리스 아래의 바닥 흩이 드러나게 되면 호안공이 그 효력을 상실하게 된다. 다음으로, 철망이 구속력을 발휘할 수 있는 강도의 범위 내에서 새로운 평형상태에 도달하게 될 것이다. 변형의 정도를 추정하기 위해서 매개변수 $\Delta z / d_m$ 가 사용되었다. 여기서, Δz 는 그림 5에서 매트리스 구간 내에 가장 높은 채움 자갈표면과 가장 낮은 채움 자갈표면과의 차이이다. 따라서 C_s^* 는 유효 Shield 계수로서 정의될 수 있으며, 식 (14)와 같다.

$$C_s^* = \frac{\tau_m - \tau_s}{(\gamma_s - \gamma_w) d_m} \quad (14)$$

매트리스 구간의 상류측 채움 자갈두께의 감소는 $\Delta z / 2$ 이다. 그러므로 바닥 흩이 흐름에 직접적으로 드러나지 않고 보호되기 위한 기본적인 조건은 식 (15)를 만족해야 한다.

$$\frac{\Delta z}{d_m} \leq 2 \left(\frac{t}{d_m} - 1 \right) \quad (15)$$

여기서, t 는 매트리스 두께이다. $\Delta z / d_m$ 와 C_s^* 의 관계는 그림 6에서 곡선으로 나타냈으며, C_s^* 값이 어떤 일정한 값을 넘어서면 매개변수 $\Delta z / d_m$ 는 더 이상 증가하지 않음을 알 수 있다.

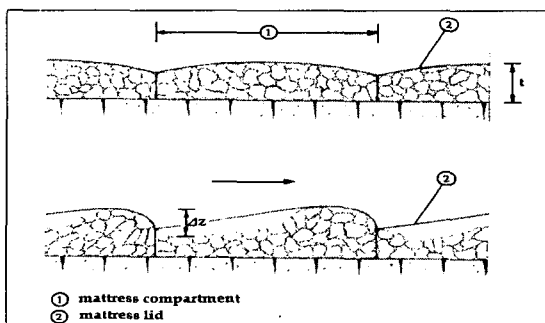


그림 5. 매트리스 구조내부에서 자갈이동과 변형

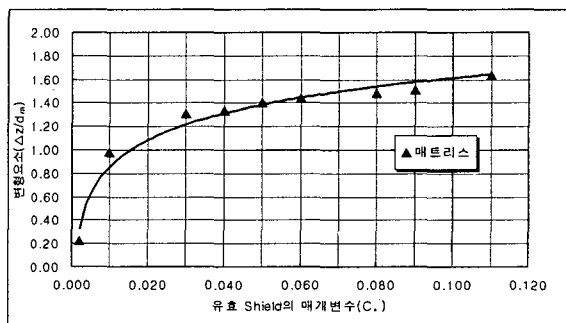


그림 6. 유효 Shield 계수에 대한 변형요소

5. 호안용 매트리스의 설계기법

호안용 매트리스의 설계기법을 그림 7의 흐름도와 같이 다음 단계별로 요약할 수 있다.

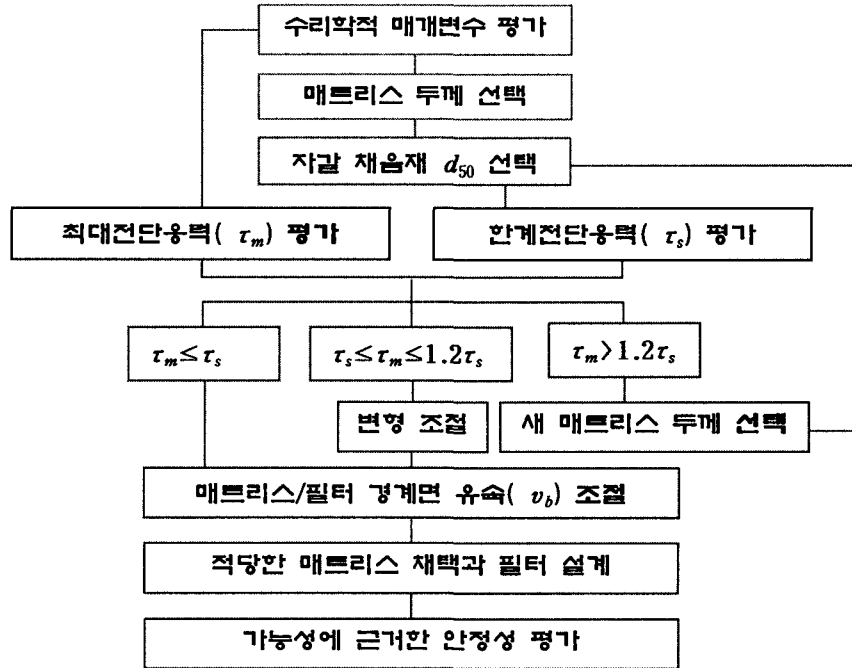


그림 7. 호안용 매트리스 설계 흐름도

단계 1 : 매트리스의 형태·두께를 선택한다. 이어서 철망의 형태·직경 및 채움재의 형태·크기(d_{90} , d_{50})을 결정한다. 또한 매트리스로 보호된 수로에서 수리학적 매개변수를 평가하며, 식 (1)에서 Manning 조도계수 n 을 구하고 단면적 A , 운반 C , 경심 R 을 Manning 공식인 식 (16)을 이용하여 수심 y 와 유속 v 의 함수로 나타내고 y 에 대해서 푼다.

$$Q = Av = A R^{2/3} i^{1/2} \frac{1}{n} \quad (16)$$

위의 식에서 구한 y 값을 사용하여 A , C , R , y 및 수로폭 B 를 계산한다.

단계 2 : 수로사면에서 호안용 매트리스의 전단응력 τ_m 는 식 (8) 및 식 (9)에서 구하고 한계전단응력 τ_s 는 식 (11)에서 구한다. 그리고 식 (8) 및 식 (9)와 식 (11)을 비교해서 식 (12)를 검토하면서 안정여부를 판단한다. 식 (13)에서 매트리스 호안공의 계산에서 변형의 한계는 $\tau_b \leq 1.2 \tau_c$ 까지 허용한다. 유속에 대한 설계를 검토하기 위해서 식 (17)에서 Froude수 F 를 계산한다.

$$F = \frac{v}{\sqrt{gA/B}} \quad (17)$$

여기서, g : 중력가속도이며, F 와 d_m 의 함수인 한계유속 v_c 를 구한 후 식 (18)의 조건에 대해서 검토한다.

$$v \leq v_c \quad (18)$$

단계 3 : 바닥 흙에 대한 침식유속 v_c 를 식 (5) 및 식 (6)에서 구하고 매트리스/필터 경계면에서 유속 v_b 는 $n_f = 0.020 \sim 0.025$ 값을 사용하여 식 (3)에서 계산한다. 위의 식 (3)과 식 (5) 및 식

(6)에서 구한 값이 만일 $v_f < v_e$ 이면 섬유필터를 사용할 수 있으며, $v_f > v_e$ 이면 식 (7)을 이용하여 자갈필터를 설계한다.

단계 4 : 설계유량에 의한 변형도를 단계 2의 결과를 식 (19)에 적용하여 허용도를 검토한다.

$$\tau_s \leq \tau_m \leq 1.2 \tau_s \quad (19)$$

초기거동 보다 큰 구조물의 여유강도를 평가하기 위하여 유량을 증가시켜 위와 같은 과정을 반복한다. 또한 수로사면을 계산하기 위해서는 식 (14)를 이용한다. C_s 의 함수인 $\Delta z / d_m$ 을 구하여 식 (15)로 검토한다.

6. 결론

수로사면의 안정성을 확보하기 위해 다양한 호안보호 공법이 지금까지 개발되어 왔다. 매트리스 호안공은 이러한 요구에 알맞은 호안보호 공법이며, 수로사면의 침식을 억제하고 수로의 안정화에 사용되고 있다. 매트리스 호안공의 철망은 세굴이 발생하는 수로에서도 변형에 유연하게 적응하는 유연성을 가지고 있으며, 철망으로 조직된 구조물이기 때문에 변형 또는 유수력에도 강도를 발휘할 수 있는 특수성을 지니고 있다. 따라서 매트리스로 보호된 수로사면에서 각각의 수리학적 흐름조건에 따라 실험한 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 매트리스의 Shield 계수는 사석의 2배에 달하며, 이것은 동일한 수리학적 조건에서 매트리스에 사용된 자갈의 평균크기가 사석의 1/2을 의미한다. 또한 동일한 크기의 자갈이 채움재로 사용될 때, 허용유속에 대해서 매트리스의 경우 사석보다 2배 이상 심지어 3~4배까지 견딜 수 있다.

2) 사석은 초기거동조건을 범위를 지나 한계조건에 도달하면 흐름에 의해 각각의 자갈이 분리되면서 점진적으로 파괴된다. 매트리스의 경우는 비록 초기거동조건을 범위를 지나 한계조건에 도달할지라도 철망에 의해 각각의 자갈의 분리가 억제됨을 알 수 있었다. 비록 변형된 매트리스일지라도 새로운 형태의 평형을 얻을 수 있으며, 더 이상의 변형과 약조건에도 저항하고 있음을 확인할 수 있었다.

따라서 수로사면의 안정은 매트리스 호안공이 가장 보편적인 공법이라 할 수 있으며, 더욱이 이것은 다공의 구조로서 하천생태계를 배려하고 수로를 안정화시키는 적절한 방법이라 할 수 있다.

참고문헌

1. 지홍기, 배상수, 임기석, 이순탁 (2000). 돌망태를 이용한 제방법면의 보호공법, **학술발표회 논문집**, 대한토목학회.
2. 지홍기, 배상수, 임기석, 허수영 (2001). 돌망태를 이용한 호안구조물의 수리학적 특성, **학술발표회 논문집**, 한국수자원학회.
3. Simons, D. B., Chen, Y. H. and Swenson, L. J. (1983). Hydraulic Test to Develop Design Criteria for the Use of Reno Mattresses, *Officine Maccaferri Technical Report*, Fort Collins, Colorado.
4. Simons, D. B., Hi, R.H. and Liang, W. S. (1981). Design Guidelines & Criteria. Channels & Hydraulic Structures on Sandy Soils, *Officine Maccaferri Technical Report*, Fort Collins, Colorado.
5. Fiuzat, A. A., Chen, Y. H. and Simons, D. B. (1982). Stability Tests of Rip-Rap in Flood Control Channels, *Officine Maccaferri Technical Report*, Fort Collins Colorado.
6. Agostini, R., Cesario, L., Ferraiolo, F. and Papetti, A. (1988). Flexible Gabion and Reno Mattress Structures in River and Stream Training Works, *Officine Maccaferri Technical Report*, Italy.