

호안용 매트리스내 채움재의 한계_허용 전단응력에 관한 연구

Study on Critical Allowable Shear Stress of Filling Rocks
With Mattress Revetment

배 상 수* / 이 승 윤** / 지 홍 기***

Bae, Sang Soo / Lee, Seung Yoon / Jee, Hong Kee

Abstract

Critical and allowable shear stress acting on the mattress revetment, is presented in this study. First of all, shear stress at each spot is computed when the hydraulic power act on the waterway. Secondly, median diameter of the filling rocks is computed using shear stress and Shields coefficient which are used to decide the critical motion of the particle. Finally, the range of critical and allowable shear stress is estimated which meet the particle stability and indicated that the mattress is a stable hydraulic structure in comparison with the riprap. Therefore the required median diameter of riprap is three times higher than that of mattress. Contrarily, this study also analyzed that resisting power of mattress to shear stress is three times higher than that of riprap on the same size.

keywords : mattress revetment, critical and allowable shear stress, Shields coefficient, filling-rocks median diameter, particle stability

요 지

본 논문은 호안용 매트리스내 채움재의 한계_허용 전단응력을 제시하였다. 먼저, 매트리스가 설치된 수로에서 유수력이 작용할 때 각 지점에 대한 유효전단응력을 산정하였다. 다음으로, 입자들의 한계운동을 결정하는데 주로 사용되는 Shields 계수와 전단응력을 이용한 채움재의 평균입경을 산정하였다. 마지막으로, 산정된 각 입자들을 근거로 철망내 개별 암석의 안정조건을 만족시키는 한계_허용 전단응력의 범위를 결정하였다. 또한 매트리스와 사석의 비교를 통해 매트리스의 거동에 관한 안정성을 규명하면서 안정적인 수리구조물임을 입증하였다. 따라서 동일 한계전단응력에 대한 소요 평균입경은 사석이 매트리스보다 대략 3배 정도 더 크다. 이와 반대로 동일 크기의 암석이 주어질 때 매트리스는 사석보다 3배 정도 더 큰 전단응력에도 저항할 수 있는 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 호안용 매트리스, 한계_허용 전단응력, Shields 계수, 채움재 평균입경, 입자안정

* 한국농촌공사 기술본부 기술지원팀 과장

Technical Assistance Team, Technical Engineering Office, KRC, Daejeon 302-859, Korea
(e-mail: ssbae@ekr.or.kr)

** 한국수자원공사 수자원연구원 수자원환경연구소 연구원

Water Resources & Environmental Research Center Korea Institute of Water & Environment, K water, Daejeon 305-730, Korea
(e-mail: behappy777kr@hotmail.com)

*** 영남대학교 건설환경공학부 교수

Professor Dept. of Civil & Environmental Eng., Yeungnam Univ., Gyeongsan 712-749, Korea
(e-mail: hkjee@yu.ac.kr)

1. 서론

매트리스(Mattress)는 하천과 같은 범면부위가 넓은 지역에서 매트리스 형식으로 깔아서 간단하게 설치하는 범면보호 구조물이며, 일반 돌망태와 같이 철망 내에 자갈이나 깬 돌로 채운다. 매트리스 공법은 하천이나 해안지역의 범면에 깔아 홍수나 태풍에 의한 유속의 증가 및 세굴, 토사유실을 방지하는데 탁월한 능력이 있으며, 자갈이나 깬 돌을 사용함으로써 미관이 수려하고 시공 후 돌과 돌사이에 풀이나 나무가 자라 세월이 지날수록 더욱 견고하고 내구성이 증가되는 환경친화적인 구조물이다.

지금까지 매트리스의 유수 중에서 유수력에 안정적으로 대응할 수 있는 적정규모 및 안정성에 관한 연구가 국내외적으로 미진하여 이를 실제에 적용하는데 있어서 경험적인 지식에 의존하고 있어 실무에서 호안공법의 채택에 있어서 많은 제약을 받고 있는 실정이다.

국내에서는 제방범면 및 하상의 보호공으로 사용되는 매트리스 수리구조물의 수리학적 특성 및 거동해석 연구(지흥기, 배상수 등, 2002)가 있었으며, 최근에는 호안용 매트리스의 수리학적 특성 및 설계기법에 관한 비교 연구(배상수, 2007)도 수행된 바 있다.

외국에서는 매트리스 하도의 수리학적 기본 이론과 안정성 검토 및 설계기법 연구(Agostini R. 등, 1978, 1988)가 있었으며, 매트리스 뿐만 아니라 사석(riprap) 설계에 관한 연구(Maynard S. T., 1989, 1995)도 있었다. 또한 매트리스의 수리학적 안정성을 규명하기 위하여 미국 콜로라도 주립대학교 공학연구소 수리실험실에서 1982~83년 동안 실험을 수행한 후, 매트리스의 설계기준(Simons, D. B. 등, 1984)을 제시한 바 있으며, 이 밖에 제방사면에서 사석과 같은 굵은 입자들의 안전율에 관한 연구(Stevens, M. A. 등, 1971, 1976)도 있었다.

본 연구에서는 매트리스가 설치된 수로에서 유수력이 작용할 때 수로 각 지점에 대한 유효전단응력과 입자들의 한계운동을 결정할 때 주로 사용되는 Shields 계수와 채움재의 평균입경을 근거로 매트리스 철망내 개별 암석의 안정조건으로 한계전단응력 및 허용전단응력을 제시하고자 한다. 또한 사석과 비교하면서 매트리스의 거동에 관한 안정성을 규명하여 안정적인 수리구조물임을 입증하고자 한다.

2. 매트리스의 구조 및 기본 이론

2.1 매트리스의 구조

표준 매트리스는 가로 6.0m, 세로 2.0m, 두께 0.15~0.30m 정도이며, 경우에 따라서 길이는 4m, 5m, 두께는 0.45~0.50m가 사용될 때도 있다. 상자내부는 1m 단위 이하 혹은 설계상 제시된 단위로 칸막이에 의해 나누어진다. 메쉬 규격은 60×80mm~80×100mm 정도의 육각 벌집모양으로 이루어진 상자이며, 이 규격은 필요에 따라 바뀔 수 있다. 또한 매트리스 채움재는 단단한 재질의 밀도가 크고 내구성이 있는 석재라야 하며, 크기는 매트리스 두께의 대략 1/2 정도가 좋다. Fig. 1은 가로 6.0m, 세로 2.0m, 두께 0.17~0.30m, 망눈 80×100mm에 대한 매트리스 구조와 철선의 소재 및 지름을 도시하고 있다.

2.2 전단응력 산정

2.2.1 유효전단응력 산정

매트리스가 설치된 수로 내에서 흐름이 정상등류일 때 전단응력은 흐름방향의 물의 무게성분과 방향은 반대이나 크기는 같다. 수로 각 지점에 대한 유효전단응력 τ_{ij} 는 동수반경 R , 수로바닥경사 i , 물의단위중량 w_w 와 관계되며, Eqs. (1a)와 (1b)에서 구할 수 있다.

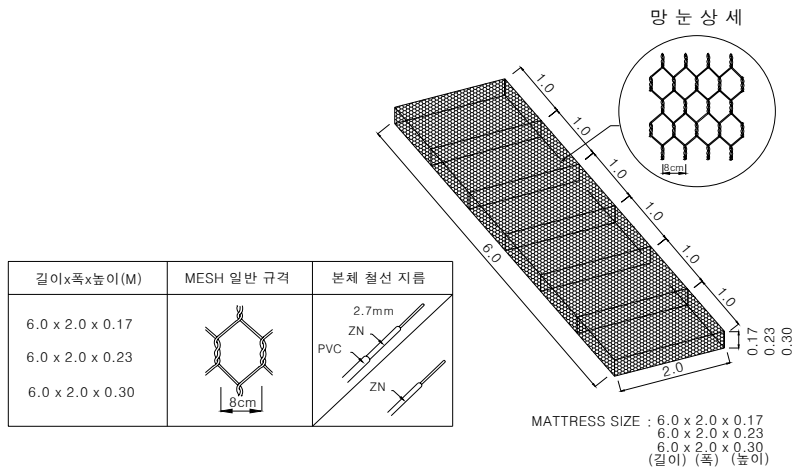
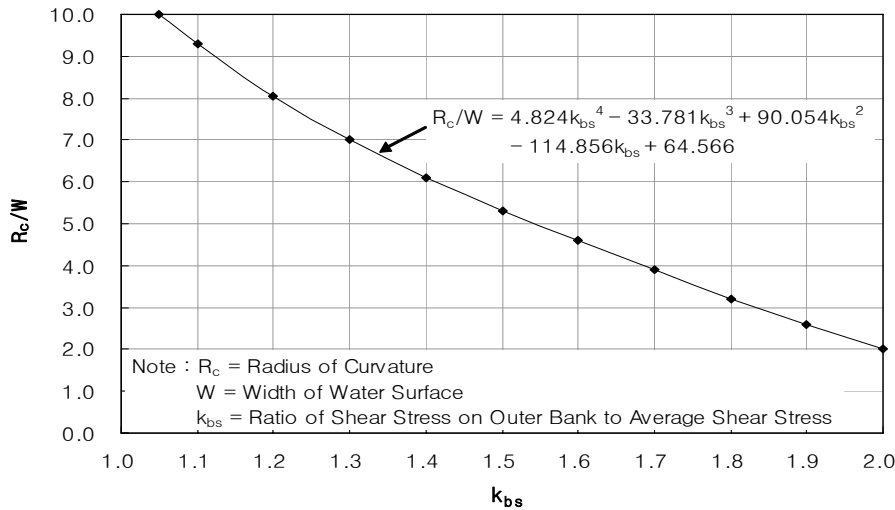


Fig. 1. Typical Assembled Unit 6m Long · 2m Wide · 6 Cells



note : Hydraulic Laboratory Engineering Research Center, Colorado State University

Fig. 2. Effect of Curve in Water Course upon Shear Stress Acting on Outer Bank

$$\begin{aligned} \tau_{sb} &= k_{sb} w_w R i & (\text{직선수로바닥}) \\ \tau_{ss} &= k_{ss} w_w R i & (\text{직선수로사면}) \end{aligned} \quad (1a)$$

$$\begin{aligned} \tau_{bb} &= k_{bb} w_w R i & (\text{만곡수로바닥}) \\ \tau_{bs} &= k_{bs} k_{ss} w_w R i & (\text{만곡수로사면}) \end{aligned} \quad (1b)$$

여기서, k_{ij} 는 수로 각 지점에 대한 계수이고 k_{ij} 의 첨자는 직선수로바닥은 k_{sb} , 직선수로사면은 k_{ss} , 만곡수로바닥은 k_{bb} , 만곡수로사면은 k_{bs} 를 의미하며, 이들 값은 각각 $k_{sb} \approx 1.0$, $k_{ss} \approx 0.75$, $k_{bb} \approx 1.0$ 을 권장한다. 또한 수로 만곡부에서 곡률계수 k_{bs} 는 Fig. 2에서 구할 수 있으며, 미국 콜로라도 주립대학 공학연구소 수리실험실(D.B. Simons, 1982-1983)의 자료를 근거하였다. 여기서, 평균전단응력에 대한 외제에 작용하는 전단응력 비인 k_{bs} 값은 수면폭 W 에 대한 곡률반경 R_c 의 함수가 되며, 외제를 따라 발생하는 원심력의 영향으로 유효전단응력도 증가함을 알 수 있다.

2.2.2 한계전단응력 산정

전단응력이 매트리스 채움재인 자갈이나 깬 돌을 막이동시키려는 초기거동 때의 응력인 한계전단응력을 무차원 Shields 계수 C^* 로 정의하면 Eq. (2)와 같다.

$$C^* = \frac{\tau_c}{(w_s - w_w)d_{50}} \quad (2)$$

여기서, w_s 는 채움재 단위중량, d_{50} 은 채움재 평균입

경, τ_c 는 초기거동의 한계조건에서 전단응력이며, 한계 전단응력이라고 한다.

Eq. (2)에서 분모인 $(w_s - w_w)d_{50}$ 은 채움재인 자갈이나 깬 돌의 수중단위중량 때문에 수로바닥 위의 수직응력에 비례하게 된다. 그 결과 Shields 계수는 마찰계수와 유사하다. 따라서 매트리스가 설치된 수로바닥에서 전단응력이 자갈이나 깬 돌의 움직임이 없이 도달될 수 있는 상태인 한계전단응력 τ_c 는 Eq. (3a)에서 구할 수 있다.

$$\tau_c = C^*(w_s - w_w)d_{50} \quad (3a)$$

또한 수로제방 사면경사면에서 한계전단응력 τ_c 는 Eq. (3b)에서 구할 수 있다.

$$\tau_c = K_s C^*(w_s - w_w)d_{50} \quad (3b)$$

여기서, K_s 는 수로제방 사면경사면에서 한계전단응력을 구할 때 사용되는 계수이며, 한계사면경사계수라고도 하고 Eq. (4)에서 구할 수 있다.

$$K_s = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_1}{\sin^2 \phi}} \quad (4)$$

여기서, ϕ 는 매트리스 채움재의 안식각(deg), θ_1 은 수로제방 사면경사각(deg)이다.

2.3 Shields 계수 산정

한계전단응력 개념을 이용한 사립자의 한계조건 관계(Shields, 1936)를 제시한 바 있으며, 지금까지 Shields 방법이 사립자의 한계운동을 결정할 때 가장 광범위하게 사용되고 있으므로 매트리스 채움재의 초기 운동에 이 개념을 적용시키고자 한다.

본 연구에서는 미국 콜로라도 주립대학 공학연구소 수리실험실에서 수로의 너비 2.1m, 높이 1.2m, 길이 23.0m, 경사 13%, 최대유량 2.8m³/s를 가진 원형 매트리스 실험장치에서 매트리스 두께 0.15~0.45m, 채움재 입경 80~200mm로 실험한 결과 및 1:3 모형실험장치에서 얻은 자료와 Shields의 기본 개념을 근거로 전단레이놀즈수 Re_* 와 한계이동 매개변수 C_* 사이의 관계식을 이용하여 Shields 계수를 산정하고자 한다.

전단레이놀즈수 Re_* 는 수로 바닥에서 점성력에 대한 관성력의 비로 나타낼 수 있으며, Eq. (5)에서 구할 수 있다.

$$Re_* = \frac{u_* d}{\nu} \quad (5)$$

여기서, d 는 대표입경이며, 본 연구에서는 평균입경 d_{50} 을 사용하였다.

Eq. (5)에서 전단유속 u_* 는 Eq. (6)에서 구할 수 있다.

$$u_* = \sqrt{ghi} \quad (6)$$

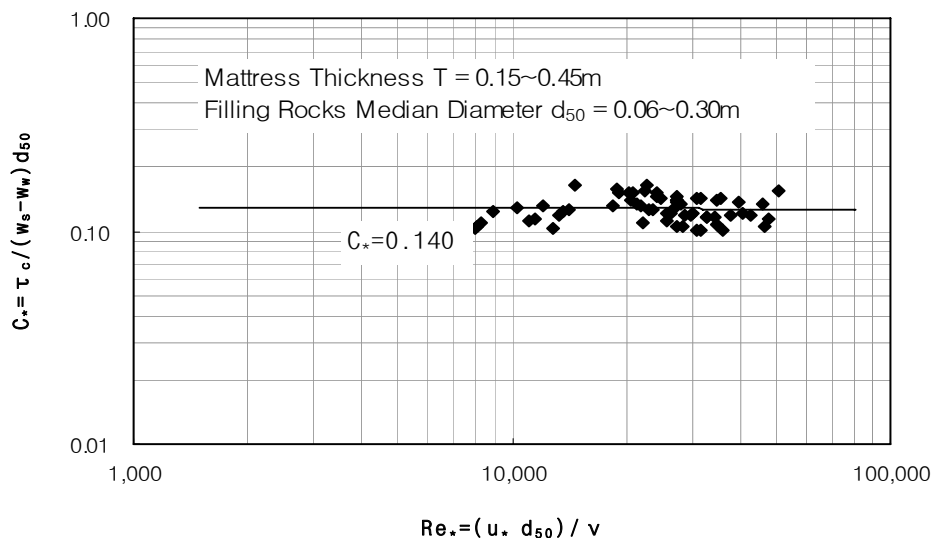
여기서, h 는 수심, g 는 중력가속도이다.

한편 한계이동 매개변수인 Shields 계수 C_* 는 무차원 전단응력이라고 하며, 이전의 Eq. (2)와 같이 주어진다. 그러므로 지금까지 설명한 기본 이론과 미국 콜로라도 주립대학 공학연구소 수리실험실 자료로 구한 전단레이놀즈수 Re_* 의 함수인 Shields 계수 C_* 값은 Fig. 3과 같다. 여기서, Shields 계수 C_* 값이 0.10 이하로는 떨어지지 않았고 최대값은 $C_*=0.160$ 정도가 되고 대략 $C_*=0.140$ 와 평평함을 알 수 있으며, 본 연구에서는 Shields 계수 $C_*=0.140$ 을 적용하여 분석하였다. 따라서 한계전단응력 τ_c 는 순전히 입자의 크기나 중량 같은 특성치의 함수가 됨을 알 수 있다.

2.4 전단응력 이용 매트리스 채움재의 평균입경 산정

전단응력을 이용한 매트리스 채움재의 평균입경 d_{50} 산정은 수로제방 사면경사 θ_1 에서 입자가 초기운동을 막 일으키려는 시점에서 계산되며, 다음 조건들을 만족시킬 때 가능하다: (1) 하류방향으로만 흐름이 있음(2차 흐름이 없음), 또는 하류방향에 대한 입자의 이탈각 $\lambda \cong 0$; (2) 하류방향으로 수로 바닥경사는 무시 ($\theta_0 \cong 0$); (3) 입자의 비중 G 은 2.65에 가까움; (4) 입자에 대한 항력은 양력과 비교해보면 더 작다.

적용된 수로 각 지점에서의 전단응력 τ_{ij} 하에서 수로 안정화에 요구되는 매트리스 채움재의 평균입경은 Lane's 관계식으로부터 추정될 수 있으며, Eq. (7)과 같다.



note : Hydraulic Laboratory Engineering Research Center, Colorado State University

Fig. 3. Shields Parameter as a Function of Shear Reynolds Number for Mattress

$$d_{50} = \frac{\tau_{ij}}{C_s w_w (G-1) \left[\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_1}{\sin^2 \phi}} \right]} \quad (7)$$

여기서, G 는 입자의 비중이다.

Eq. (7)은 전단응력과 수로기하 및 매트릭스와 채움재의 특성치를 알 수 있으면 쉽게 평균입경을 구할 수 있으며, 이 값을 이전의 Eqs. (3a)와 (3b)에 적용하여 한계전단응력을 산정할 수 있다.

2.5 입자 안정

운변을 따라 모든 입자들의 움직임이 없을 때 수로는 안정하다고 할 수 있다. 즉, 하상물질의 이송이 없고 시간이 지나도 단면기하가 변화하지 않는 것을 의미한다. 본 연구에서는 주어진 동수력 하에서 매트릭스 철망내 개별 암석의 안정조건들을 다루고자 한다.

Fig. 4는 수로제방 경사각 θ_1 과 하류방향 수로바닥 경사각 θ_0 를 가진 경사진 수로를 구성하는 입자에 작용하는 힘을 설명한다. 이들 힘에는 양력 F_L , 항력 F_D , 부력 F_B , 입자중량 F_W 가 있으며, 하류방향 수면경사가 작으면 입자의 수중중량 F_S 와 F_W 및 F_D 는 $F_S = F_W - F_B$ 의 관계가 있다. 양력은 수로제방 경사면에 수직으로 작용하는 유체력이며, 항력은 입자주위를 흐르는 유속과 동일한 방향으로 수로 바닥면을 따라 작용하는 힘이다. 양력과 항력은 수직방향이며, 유속이

0이면 두 힘은 각각 0이 된다.

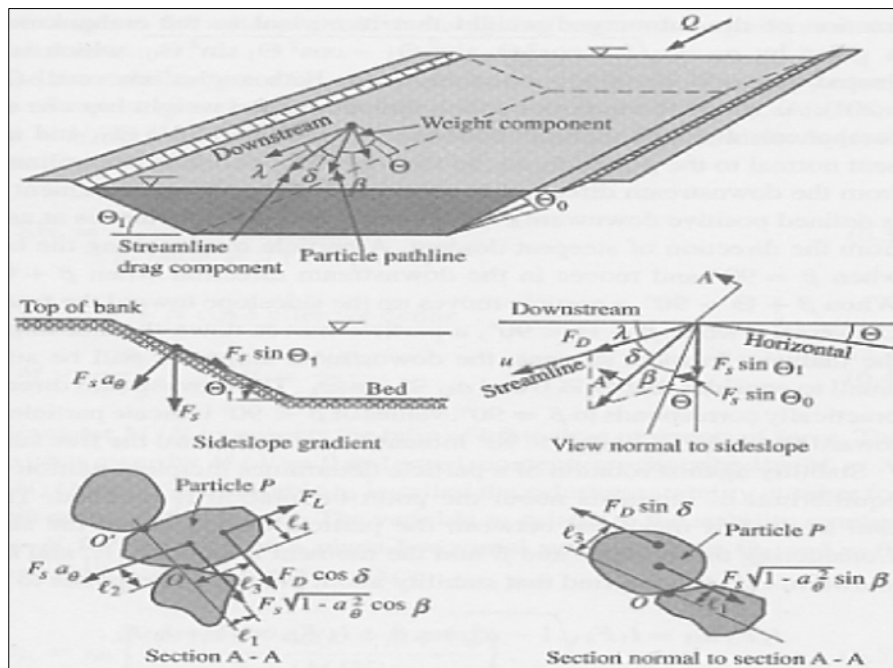
편의상 $\theta_1 = \alpha_\theta$, $\theta_0 = \tan \theta$ 와 같이 두 가지 기하학적 매개변수로 정의하면 이것은 수로제방 경사면을 따라 수중중량 벡터의 투영을 나타낸다. 여기서, θ 는 수로제방 경사면에서 F_S 의 두 가지 투영성분의 비로 구할 수 있으며, Eq. (8)과 같다.

$$\tan \theta = \frac{\cos \theta_1 \sin \theta_0}{\cos \theta_0 \sin \theta_1} \cong \frac{\sin \theta_0}{\sin \theta_1} \quad (\theta_0, \theta_1 \leq 20^\circ) \quad (8)$$

입자의 수중중량에 대한 마찰은 수로제방 경사면과 평행하며, α_θ 는 Eq. (9)에서 구할 수 있다.

$$\alpha_\theta = \sqrt{1 - \cos^2 \theta_0 \sin^2 \theta_1 - \cos^2 \theta_1 \sin^2 \theta_0} \cong \sqrt{\cos^2 \theta_1 - \sin^2 \theta_0} \quad (\theta_0, \theta_1 \leq 20^\circ) \quad (9)$$

Fig. 4에서 입자의 수중중량은 수로제방 경사방향의 성분 $F_s \sin \theta_1$, 하류방향 수로바닥 경사방향의 성분 $F_s \sin \theta_0$, 수로제방 경사면에 수직인 성분 $F_s \alpha_\theta$ 를 가진다. 유선은 수로제방 경사면을 따라 각 λ 만큼 하류방향으로부터 이탈한다(λ : 하류방향 “+” 정의). 입자가 불안정하면 가장 급경사 아래방향으로부터 각 β 만큼 이동한다.



note : River Mechanics(Dr. Pierre Julien, Cambridge University Press, 2002)

Fig. 4. Particle Stability Analysis

입자가 전도에 저항하려는 안정성은 초기운동이 막 전도하려는 지점에서 모멘트 평행이 만족될 때 결정된다. 이탈각 δ 는 입자방향과 유선사이에서 측정되고 Fig. 4에서 δ , β , 모멘트 팔길이 l_1 , l_2 , l_3 , l_4 를 고려하면 지점 O 에서 안정함을 알 수 있으며, Eq. (10)과 같다.

$$l_2 F_S \alpha_\theta = l_1 F_S \sqrt{1 - \alpha_\theta^2} \cos\beta + l_3 F_D \cos\delta + l_4 F_L \quad (10)$$

Eq. (10)에서 좌변은 입자중량에 의한 안정모멘트이며, 우변의 마지막 항은 양력모멘트이고 이것은 항상 입자를 불안정하게 한다. 이밖에 우변의 두 항은 입자 P 가 회전하려는 중심점에서 결정될 수 있다. 대부분의 경우 이들의 순함은 양수이고 모멘트 값은 대략 0이다. 그러나 이들의 순함이 음수, 즉 $\lambda < 0$ 이면 입자는 지점 O 대신 O' 에서 회전한다.

지점 O 에서 전도에 대한 안전을 SF_0 는 회전모멘트에 대한 저항모멘트의 비로써 정의할 수 있다. Fig. 4의 경우 $\cos\delta$ 와 $\cos\beta$ 는 양수이고 지점 O 에서 안전을 SF_0 는 시계방향 모멘트의 합에 대한 반시계방향 모멘트 합의 비이며, Eq. (11)과 같다. Eq. (11)에서 각 항은 양수가 되어야 한다.

$$SF_0 = \frac{l_2 F_S \alpha_\theta}{l_1 F_S \sqrt{1 - \alpha_\theta^2} \cos\beta + l_3 F_D \cos\delta + l_4 F_L} \quad (11)$$

정적흐름조건($F_D = F_L = 0$)하에서 입자의 안식각 ϕ 가 각 Θ_0 또는 Θ_1 과 같을 때 안전율은 $SF_0 = 1$ 이 되기 때문에 $\tan\phi = l_2/l_1$ 이 됨을 알 수 있다. Eq. (11)에서 분자와 분모를 각각 $l_1 F_S$ 로 나누면 Eqs. (12a)와 (12b)같이 변형시킬 수 있다.

$$SF_0 = \frac{\alpha_\theta \tan\phi}{\eta_1 \tan\phi + \sqrt{1 - \alpha_\theta^2} \cos\beta} \quad (12a)$$

$$\eta_1 = M + N \cos\delta, \quad M = \frac{l_4 F_L}{l_2 F_S}, \quad N = \frac{l_3 F_D}{l_2 F_S} \quad (12b)$$

여기서, 매개변수 M/N 은 항력모멘트에 대한 양력모멘트의 비로 나타낼 수 있다. 양력모멘트가 발생되지 않는 경우 $M/N = 0$ 이 되고 항력과 양력모멘트가 동

일하면 $M = N$ 또는 $(M + N)/N = 2$ 로 나타낼 수 있다. 변수 η_1 은 수로제방 경사면 위의 입자에 대한 사면경사 안정수라고 부르며, 또한 η_1 은 수평면 ($\Theta_0 = \Theta_1 = \delta = 0$)상의 입자에 대한 안정수 $\eta_0 = M + N$ 와 관계가 있다. 이들 관계는 Eqs. (13a)와 (13b)같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_1 = \eta_0 \left\{ \frac{(M/N) + \sin(\lambda + \beta + \Theta)}{1 + (M/N)} \right\} \quad (13a)$$

$$\eta_0 = \frac{\tau_{ij}}{\tau_c} = \frac{\tau_{ij}}{(G-1)\rho g d_{50} C_*} \quad (13b)$$

여기서, ρ 는 유체의 질량밀도이다.

Eqs. (13a)와 (13b)는 Shields 계수가 적용된 표준 형태이며, $\eta_0 = 1$ 은 수평 수로바닥 위에서 입자의 초기운동을 의미한다. 본 절에서 제시한 이론을 근거로 본 연구에서는 매트리스 채움재의 초기운동 기준을 $C_* = 0.10 \sim 0.14$ 와 $SF_0 = \eta_0 = 1$ 로 정하였다.

두 번째 평형조건은 Fig. 4에서 단면 A-A의 연직단면을 따라 움직이는 입자의 방향을 가르키며, 지점 O 를 기준으로 모멘트 평형방정식을 적용하면 Eq. (14)와 같다.

$$l_3 F_D \sin\delta = l_1 F_S \sqrt{1 - \alpha_\theta^2} \sin\beta \quad (14)$$

Eq. (14)의 δ 는 이후 λ , Θ , β 의 함수로 사용되며, 입자의 방위각 β 에 대해 풀면 Eq. (15)와 같다.

$$\beta = \tan^{-1} \left[\frac{\cos(\lambda + \Theta)}{\frac{(M + N)\sqrt{1 - \alpha_\theta^2}}{N\eta_0 \tan\phi} + \sin(\lambda + \Theta)} \right] \quad (15)$$

여기서, β 는 수로제방 경사면에 접촉하여 설치한 매트리스 채움재 입자의 이동방향을 결정할 수 있으며, 또한 수로의 기하매개변수 Θ 와 α_θ , 하천 유수방향과 유선의 이탈각 λ 그리고 안식각 ϕ 와 초과전단 $\eta_0 = \tau_{ij}/\tau_c$ 와 같은 입자특성에 관계된다. 지금까지 매트리스 채움재 입자의 안정성을 설명하는 식들은 수로의 제방 경사면 또는 바닥위에서 고정된 흐름조건하에서 사용될 수 있다.

3. 매트리스 호안공의 한계 허용 전단응력 산정

매트리스는 특수 아연도금철선, 아연도금 후 PVC 코팅처리 또는 알루미늄합금 처리된 철선을 소재로 서로 인접하는 철선을 중복되게 꼬아서 만든 육각형 철망(Mesh)의 망을 다양한 규격의 육면체 박스 형태로 만든 후 그 내부공간에 자갈 또는 깬 돌을 채워 조립하는 구조물이다. 매트리스 채움재에 대한 한계전단응력 τ_c 는 입자가 어떠한 움직임도 없이 안정한 상태로 남아 있을 때의 전단응력이며, 허용전단응력 τ_a 는 매트리스 철망 내에서 입자들의 움직임으로 인해 매트리스 구조체가 약간의 변형이 있을지라도 여전히 안정한 상태로 남아 있을 때의 전단응력이다.

본 연구에서는 매트리스 채움재인 자갈 또는 깬 돌을 막 이동시키려는 초기거동 때의 응력인 한계전단응력을 전 절의 기본이론을 근거로 구하고자 하며, 특히 Eqs. (12a)와 (12b) 및 Eqs. (13a)와 (13b) 그리고 Eq. (15)에서 구하였다. 한계조건에서는 매트리스 채움재 입자들의 안전율은 1이다. 만약 안전율이 1보다 더 크면 입자들은 파괴로부터 안전하다고 할 수 있으며, 안전율이 1보다 더 작으면 입자들은 매트리스 층으로부터 썩겨 내려가서 나중에는 매트리스가 파괴에 이른다.

또한 흐름에 의한 매트리스 채움재의 이동을 막는 매트리스의 기능은 입자들의 크기가 아니라 이동에 저항하려는 결속력에 달려있다. 매트리스 채움재 입자들은 철망에 의해 구속되어 있으며, 전단응력이 한계에 도달했을 때 매트리스 철망내 채움재는 주 흐름방향으로 이동하기 시작한다. 만약 한계치를 넘은 더 큰 전단응력에서는 매트리스 채움재가 상류부에서 하류부로 움직일 것이다.

한편 미국 콜로라도 주립대학 공학연구소 수리실험실의 실험자료에 따르면 매트리스가 설치된 수로 각 지점에서 작용하는 전단응력 τ_{ij} 가 한계전단응력 τ_c 보다 더 크면 약간의 변형이 발생하더라도 20% 이내이면 매트리스는 그 기능을 다할 수 있으며, 이를 허용전단응력 τ_a 라 하고 식으로 나타내면 Eq. (16)과 같다.

$$\tau_a \leq 1.2\tau_c \quad (16)$$

지금까지의 기본 이론과 관계식들을 근거로 수로 사면경사와 바닥에 대한 매트리스 채움재의 평균입경 d_{50} 별 한계전단응력 및 허용전단응력을 산정하였다. 여기서, 암석의 비중 G 는 2.65, 안식각 ϕ 는 40° , 조도계수

n 은 0.0277, Shields 계수 C_* 는 0.140을 적용하였으며, 자연 및 제형수로의 선형은 $R/W \geq 26$ 일 만큼 충분한 직선형 수로를 매트리스에 적용시켰다.

수심에 비해 폭이 매우 넓은 자연수로와 수로 저폭을 10m, 20m로 가정한 후 저폭(B)와 수심(H)의 비율 $B/H=3.3, 6.7, 10$ 이상으로 한 제형수로로 구분하여 사면경사 $Z=2.0, 3.0$ 및 수로바닥으로 간주할 수 있는 $Z=12.0$ 에서 평균입경에 대한 한계 및 허용전단응력을 산정한 결과는 Table 1과 같다. 또한 Fig. 5a와 5b는 대표 사면경사 $Z=3.0$ 일 때를 도시한 것이다.

(1) 자연 및 제형수로에서 한계전단응력 비교

매트리스 채움재의 평균입경별 한계전단응력을 살펴보면 자연수로에서 $d_{50}=0.06m \sim 0.30m$, 수심 $h \leq 5.0m$ 일 때 $Z=2.0, Z=3.0, Z=12.0$ 에 대한 최소 및 최대 한계전단응력의 범위는 각각 $8.2 \sim 38.4kg/m^2, 11.2 \sim 53.1kg/m^2, 13.8 \sim 65.4kg/m^2$ 이고 제형수로에서 $d_{50}=0.06m \sim 0.30m$, 수심 $h \leq 6.0m$ 일 때는 각각 $8.1 \sim 37.7kg/m^2, 11.2 \sim 52.4kg/m^2, 13.8 \sim 65.1kg/m^2$ 정도로 나타났다. 전체적으로 5배 정도 차이가 있으며, 제형수로의 한계전단응력은 자연수로와 매우 유사하거나 약간 작은 편이다.

(2) 한계 및 허용전단응력 비교

전반적으로 한계전단응력보다 허용전단응력이 20% 정도 크게 나타났으며, 이것은 철망으로 구성된 매트리스 구조체가 가질 수 있는 장점으로 판단된다. 수로의 바닥과 대표 사면경사에 대해 한계전단응력을 비교해보면 수로 바닥에서의 한계전단응력이 1.2~1.7배 정도 더 크다.

4. 매트리스와 사석의 한계전단응력 비교 고찰

지금까지의 설명과 이론을 근거로 매트리스와 사석의 개별 특성치를 적용시켜 한계전단응력별 암석의 평균입경을 비교하고자 한다. 철망에 채워지지 않는 느슨한 사석에 대한 Shields 계수는 $C_* = 0.047$ (Fiuzat, et al., 1982), 철망 내에 자갈 또는 깬 돌로 채워진 매트리스에 대한 Shields 계수는 $C_* = 0.140$ 을 적용하였으며, 이밖의 인자들은 전 절과 동일하게 적용시켰으며, 자연수로와 제형수로의 사면경사 $Z=2.0, 3.0, 12.0$ 에서 한계전단응력별 암석의 평균입경을 비교한 결과는 Table 2와 같다. 또한 Fig. 6a와 6b는 대표 사면경사 $Z=3.0$ 일 때를 비교한 것이다.

Table 1. Critical and Allowable Shear Stress for Rock Sizes in Natural and Trapezoidal Channel

Type	Rock Fill d_{50} (m)	Shear Stress(Z=2.0)		Shear Stress(Z=3.0)		Shear Stress(Z=12.0)	
		Critical τ_c (kg/m ²)	Allowable τ_a (kg/m ²)	Critical τ_c (kg/m ²)	Allowable τ_a (kg/m ²)	Critical τ_c (kg/m ²)	Allowable τ_a (kg/m ²)
Natural Channel	0.060	8.2	9.9	11.2	13.5	13.8	16.5
	0.085	11.5	13.8	15.7	18.9	19.3	23.2
	0.100	13.5	16.2	18.4	22.1	22.6	27.1
	0.110	14.8	17.8	20.2	24.2	24.8	29.8
	0.120	16.1	19.3	21.9	26.3	27.0	32.4
	0.125	16.8	20.1	22.8	27.4	28.1	33.7
	0.150	20.0	24.0	27.2	32.7	33.5	40.2
	0.190	25.0	30.0	34.2	41.0	42.1	50.5
	0.200	26.3	31.5	35.9	43.1	44.2	53.1
	0.225	29.4	35.2	40.2	48.3	49.6	59.5
	0.250	32.4	38.9	44.5	53.4	54.9	65.8
	0.275	35.4	42.5	48.8	58.6	60.2	72.2
	0.300	38.4	46.1	53.1	63.7	65.4	78.5
Trapezoidal Channel	0.060	8.1	9.7	11.2	13.4	13.8	16.6
	0.085	11.3	13.6	15.6	18.7	19.3	23.2
	0.100	13.3	15.9	18.2	21.9	22.6	27.1
	0.110	14.5	17.4	20.0	24.0	24.8	29.8
	0.120	15.8	19.0	21.7	26.1	27.0	32.4
	0.125	16.4	19.7	22.6	27.1	28.0	33.7
	0.150	19.6	23.5	26.9	32.3	33.4	40.1
	0.190	24.5	29.4	33.8	40.6	42.0	50.4
	0.200	25.8	30.9	35.5	42.6	44.1	52.9
	0.225	28.8	34.6	39.8	47.7	49.4	59.3
	0.250	31.8	38.2	44.0	52.8	54.7	65.6
	0.275	34.8	41.7	48.2	57.9	59.9	71.9
	0.300	37.7	45.3	52.4	62.9	65.1	78.2

note : Side Slope(1V:ZH)

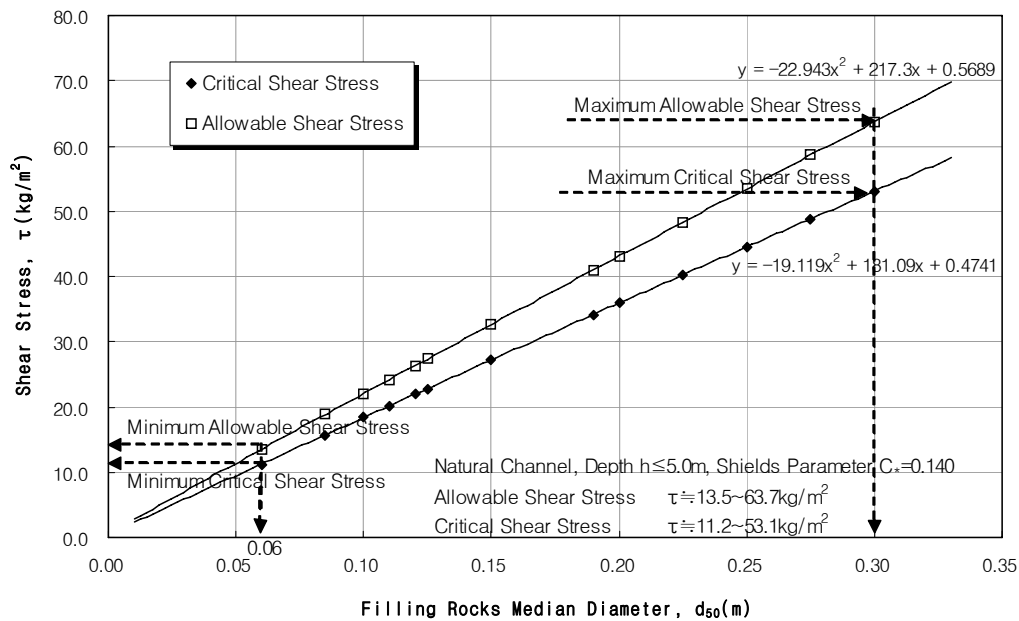


Fig. 5a. Critical and Allowable Shear Stress for Rock Sizes in Natural Channel(Z=3.0)

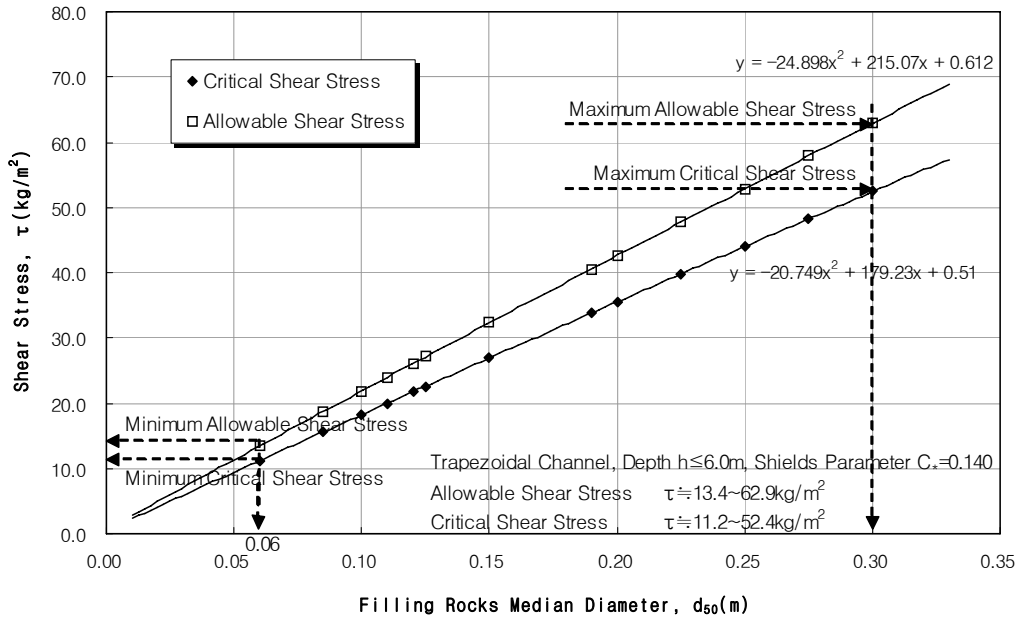


Fig. 5b. Critical and Allowable Shear Stress for Rock Sizes in Trapezoidal Channel(Z=3.0)

(1) 한계전단응력에 대한 평균입경 비교

동일한 한계전단응력에 대하여 소요 평균입경을 비교해 본 결과 사석이 매트리스보다 대략 3배 정도 더 크게 나타났으며, 한계전단응력별 매트리스 대비 사석의 평균입경 비율도 소요 평균입경과 같이 전체 한계전단응력 구간에서 3배 정도의 일정한 값으로 수렴함을 알 수 있다.

(2) 한계전단응력에 대한 매트리스와 사석의 비교

동일한 크기의 자갈이나 깬 돌이 주어질 때 매트리스

스 채움재는 사석보다 대략 3배 정도 더 큰 전단응력에도 저항할 수 있다. 이것은 Shields 계수가 사석은 $C_* = 0.047$ 이고 철망에 의해 구속된 매트리스는 $C_* = 0.140$ 이기 때문에 매트리스의 채움재가 초기거동을 일으키는 전단응력은 사석보다 3배 정도 더 소요된다. 따라서 동일한 안정성을 얻기 위해서는 사석의 크기는 매트리스 채움재의 크기보다 3배 정도 커야하며, 매트리스 구조체 두께 ($T \approx 2d_{50}$)보다는 대략 1.5배 더 두꺼워야 한다.

Table 2. Critical Shear Stress vs Rock Sizes for Riprap & Mattress in Natural and Trapezoidal Channel

Type	Critical Shear Stress τ_c (kg/m ²)	Revetment Rock Sizes d_{50} (m)					
		Side slope $Z=2.0$		Side slope $Z=3.0$		Side slope $Z=12.0$	
		Riprap	Mattress	Riprap	Mattress	Riprap	Mattress
Natural Channel	5	0.107	0.036	0.077	0.026	0.062	0.021
	10	0.216	0.073	0.156	0.052	0.126	0.042
	20	0.447	0.150	0.322	0.108	0.260	0.087
	30	0.687	0.231	0.493	0.166	0.398	0.134
	40	0.931	0.313	0.667	0.224	0.538	0.181
Trapezoidal Channel	5	0.109	0.037	0.078	0.026	0.063	0.021
	10	0.220	0.074	0.157	0.053	0.129	0.042
	20	0.456	0.153	0.325	0.109	0.266	0.087
	30	0.701	0.236	0.499	0.167	0.407	0.134
	40	0.951	0.319	0.675	0.227	0.549	0.181

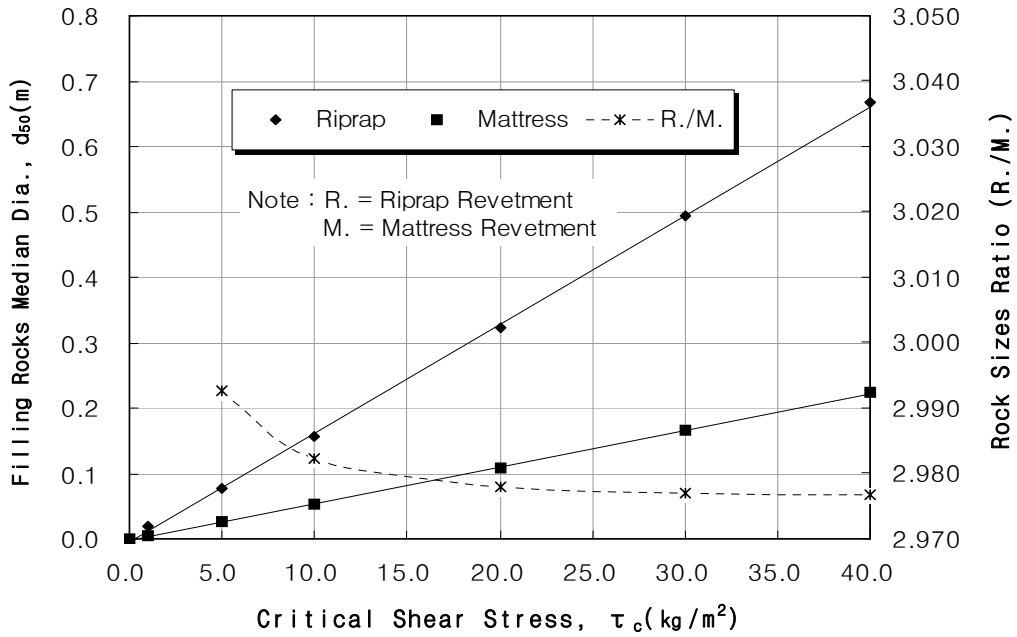


Fig. 6a. Critical Shear Stress vs Rock Sizes for Riprap & Mattress in Natural Channel(Z=3.0)

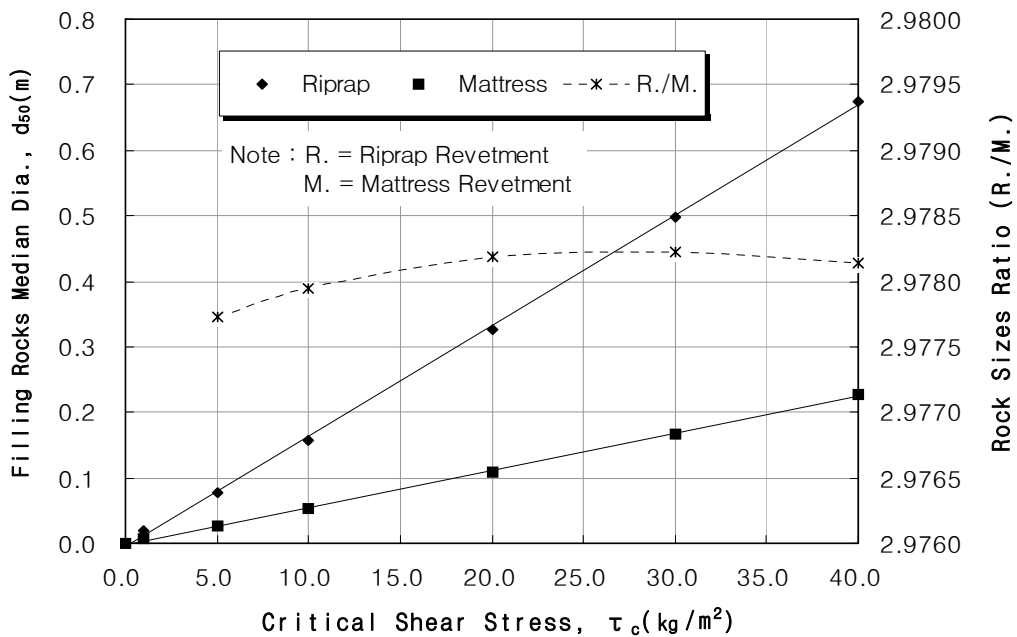


Fig. 6b. Critical Shear Stress vs Rock Sizes for Riprap & Mattress in Trapezoidal Channel(Z=3.0)

5. 결론

지금까지 본 연구에서 호안용 매트리스와 채움재의 한계_허용 전단응력에 관한 연구를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 실험자료와 Shields의 기본 개념을 근거로 구한 매트리스의 Shields 계수는 $C_* = 0.140$ 이며, 기존에 연구 발표된 사석의 Shields 계수 $C_* = 0.047$ 과 비

교해 보면 철망으로 만든 매트리스가 대략 3배 정도 더 크다.

- 2) 매트리스 채움재 평균입경 $d_{50} = 0.06\text{m} \sim 0.30\text{m}$ 와 수로의 사면경사 $Z=2.0$, $Z=3.0$ 및 바닥 $Z=12.0$ 에서 구한 한계전단응력의 범위는 대략 $8.0 \sim 38.0\text{kg/m}^2$, $11.0 \sim 53.0\text{kg/m}^2$, $14.0 \sim 65.0\text{kg/m}^2$ 이다. 또한 허용전단응력은 한계전단응력보다 약 20% 더 크며, 이것은 철망으로 구성된 매트리스

구조체이기 때문이다. 수로의 바닥과 대표 사면경사에 대해 한계전단응력을 비교해 보면 수로 바닥에서의 한계전단응력이 약 1.2~1.7배 더 크다.

- 3) 동일한 크기의 자갈이나 깬 돌이 주어질 때 매트리스 채움재는 사석보다 대략 3배 정도 더 큰 전단응력에도 저항할 수 있다. 즉, 매트리스의 채움재가 초기거동을 일으키는 전단응력은 사석보다 3배 정도 더 소요된다. 따라서 동일한 안정성을 얻기 위해서는 사석의 크기는 매트리스 채움재의 크기보다 3배 정도 커야하며, 매트리스 구조체 두께($T \approx 2d_{50}$)보다는 대략 1.5배 더 두꺼워야 한다.

참 고 문 헌

- 배상수, 이경옥, 허창환, 지흥기 (2002). “호안용 돌망태 매트리스의 수리학적 특성 연구.” **한국농공학회지**, 한국농공학회, 제44권, 제2호, pp. 81-98.
- 배상수, 허창환, 지흥기, 이순탁 (2002). “하상보호용 매트리스의 수리학적 특성 연구.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, Vol. 35, No. 1, 통권 제126호, pp. 77-90.
- 배상수 (2007). 호안용 Mattress의 수리학적 특성 및 설계기법에 관한 비교 연구. **박사학위논문**, 영남대학교, pp. 54-60, 88-96, 111-115, 213- 225.
- Agostini R., A. Papetti (1978). “Flexible Linings in Reno Mattress and Gabions for Canals and Canalized Water Courses.” *Tabulated Dimensions for Trapezoidal Channel Sections*. Bologna, S.P.A. Officina Maccaferri.
- 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.
- Michael A. Stevens, Daryl B. Simons, and Gary L. Lewis (1976). “Safety Factors for Riprap Protection.” *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 102, No. HY5, pp. 637-655.
- Maynard Stephan T. (1989). “Riprap Design.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 7, pp. 937-949.
- Maynard Stephan T. (1995). “Gabion-mattress Channel-protection Design.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 7, pp. 519-522.
- Shields, A. (1936), “Anwendung der Aenlichkeit-smechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung.” *Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin, Germany*, Translated to English by W. P. Ott and J. C. van Uchelen, California Institute of Technology, Pasadena, Calif.
- Simons, D. B., and Stevens, M. A. (1971). “Stability Analysis for Coarse Granular Material on Slopes.” *River Mechanics*, Vol. 1, Published by Hsieh Wen Shen, ed., Fort Collins, Colorado, pp. 17~1-27.
- Simons, D. B., Chen, Y. H., and Swenson, L. J. (1984). “Hydraulic Test to Develop Design Criteria for the Use of Reno Mattresses.” *Rep. Prepared for Maccaferri Steel Wire Products, Ltd., Ontario, Canada*, Civil Engineering Department, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.

(논문번호:07-86/접수:2007.09.01/심사완료:2008.01.04)