

사면의 배수압 소산을 위한 계비온 옹벽의 설계기법

배상수* · 이경옥** · 지홍기*** · 이순탁****

1. 서론

계비온(Gabion) 옹벽은 도로구조물, 제방보호, 토양보호장치, 교량의 교대 등 절·성토부 사면의 붕괴를 방지하는 방법으로 흔히 사용되는 구조물이다. 지금까지 이들 구조물에 대한 내부적인 파괴에 대한 내부안정 해석 및 활동, 전도, 지반지지력 등 외부안정에 관한 연구개발이 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 물에 대하여 배면배수가 공간 채움체인 돌 사이로 투과성이 있어 자연배수가 되어 배면에 수압이 축적되지 않으므로 붕괴를 방지하는데 타 구조물에 비하여 그 성능이 월등하여 여러 방면에서 사용되고 있는 이들 구조물에 대한 역학적 해석, 평가 및 설계 등의 구조적인 안정성 검토를 통하여 계비온 옹벽의 적용영역을 확장하고 그 설계프로그램 개발에 역점을 두었다.

2. 계비온 옹벽의 기본이론

2.1 Rankine 토압이론

벽체에 대해 깊이 z 에 위치한 토층에 작용하는 수직 및 수평응력은 식 (1)에서 구할 수 있다.

$$\sigma_v = \gamma \cdot z \quad \sigma_h = k_a \cdot \gamma \cdot z - 2 \cdot c \cdot \sqrt{k_a} \quad (1)$$

여기서, γ : 흙의 단위중량, c : 흙의 점착력, k_a : 주동토압계수이다.

따라서 토층의 전체 높이가 H 일 때 벽체에 작용하는 주동토압 P_a 은 식 (2)에서 구할 수 있다.

$$P_a = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot k_a - 2 \cdot c \cdot H \sqrt{k_a} \quad (2)$$

벽체가 수동토압 상태로 이동한다면 수평응력 σ_h 은 식 (3)에서 구할 수 있다.

$$\sigma_h = k_p \cdot \gamma \cdot z - 2 \cdot c \cdot \sqrt{k_p} \quad (3)$$

여기서, k_p 는 수동토압계수이다.

따라서 토층의 전체 높이가 H 일 때 수동토압 P_p 은 식 (4)에서 구할 수 있다.

$$P_p = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot k_p + 2 \cdot c \cdot H \cdot \sqrt{k_p} \quad (4)$$

* 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)

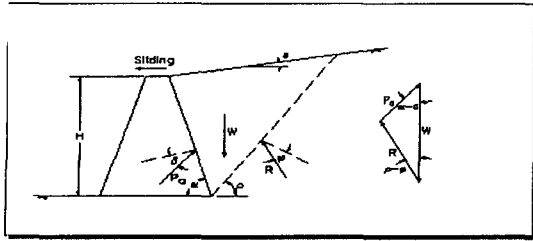


그림 1 주동토압 상태에서 썩기에 작용하는 힘

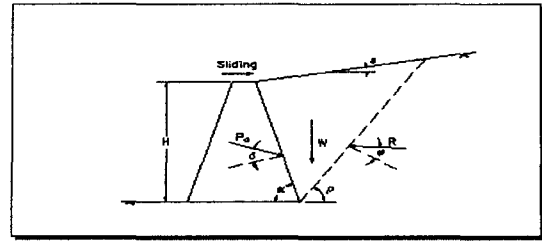


그림 2 수동토압 상태에서 썩기에 작용하는 힘

2.2 Coulomb의 토압이론

비점착성 흙의 경우 주동토압 상태에서 형성된 흩썩기에 작용하는 힘은 그림 1과 같으며, 이들 힘은 흙의 자중 W , 토체의 반력 R , 흩의 표면파괴를 일으키는 내부마찰각 ϕ 그리고 옹벽 구조물의 전면의 경사각 δ 이 주어질 때 주동토압 P_a 이다. 또한 옹벽 구조물의 경사각 δ 는 흩과 옹벽 구조물 사이의 썩기의 경사각이다. 따라서 주동토압 P_a 의 최대값은 식 (5)에서 구할 수 있다.

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma \cdot H^2 \cdot k_a \quad (5)$$

수동토압 상태에서는 구조물의 활동방향의 변화로 반력 R 과 수동토압 P_b 의 경사각이 바뀌며, 가장 중요한 한계면은 그림 2에서 수동토압 P_b 이 최소값을 가진 면이다. 따라서 수동토압은 식 (6)에서 구할 수 있다.

$$P_b = \frac{1}{2} \gamma \cdot H^2 \cdot k_p \quad (6)$$

3. 계비온 옹벽의 안정성 해석

3.1 외부 안정성 해석

1) 활동에 대한 안정

계비온 옹벽 바닥에서의 마찰력과 구조물의 불안정성을 야기하는 힘을 비교하여 활동에 대한 안정성 해석을 하며, 그림 3에서와 같이 옹벽에 작용하는 힘의 평형을 고려하면서 결정한다. 옹벽에 작용하는 힘은 뒤채움재에 의한 주동토압 P_a , 벽체 전면에서 작용하는 수동토압 P_b , 벽체의 단위중량 W_g , 옹벽기초 바닥에 작용하는 수직력 N , 옹벽기초 바닥에 접선된 저항력 T 이다. 그림 3에서 옹벽 저면이 오른쪽의 토체쪽으로 팽창할 때 T_a 는 팽창되는 앵커효과에 의해 증가한다. 이러한 증가량을 계산하기 위해서 기초 저면의 팽창에 대해 작용하는 수직응력 σ_v 과 이것의 길이 L 은 식 (7)에서 결정할 수 있다.

$$T_a = (\sigma_v \cdot \tan \phi^* + c) \cdot L \quad (7)$$

이러한 경우 옹벽의 기초길이에 대응하는 값 B 는 L 값에 의해 감소한다. T_a 는 계비온 옹벽에서 철망의 인장응력에 의해 제한되며, 식 (8)에서 구할 수 있다.

$$T_a = 2 \cdot T_{\max} / 1.2 \quad (8)$$

여기서, T_{\max} : 철망의 최대허용인장응력이다.

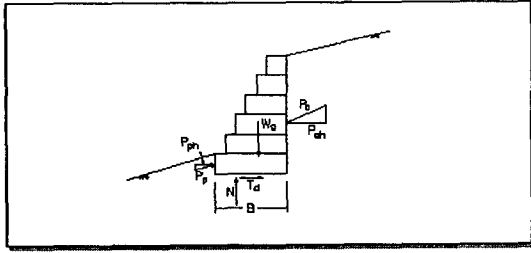


그림 3 옹벽 구조물에 작용하는 힘

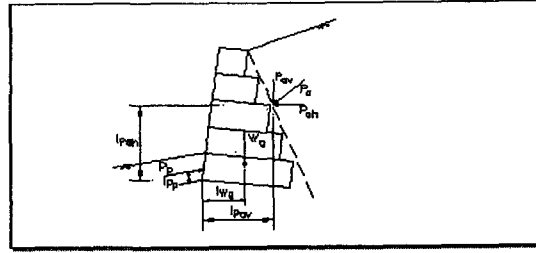


그림 4 복원모멘트와 활동모멘트

따라서 활동에 대한 안정계수는 식 (9)에서 구할 수 있다.

$$F_s = \frac{T_a + P_{ph}}{P_{ah}} \quad (9)$$

여기서, P_{ah} 와 P_{ph} 는 옹벽의 활동방향과 같은 방향으로 작용하는 주동 및 수동토압의 구성성분이며, 그림 3에서와 같다.

2) 전도에 대한 안정

전도에 대한 계비는 옹벽의 안정성 검토는 복원활동력 M_r 과 전도활동력 M_o 를 비교한다. 이들 모멘트는 그림 4에서 전도하려는 점을 나타내는 옹벽 하단아래 왼쪽 각의 관점에서 계산되어야 한다. 옹벽의 계산에서 지진의 영향과 옹벽이 부분적으로 침수되었을 때 양압력은 단위중량을 고려해야 하고 이것은 복원모멘트 감소에 영향을 미친다. 전도모멘트는 옹벽에 작용하는 수동토압에 의해 형성된다. 그러므로 전도에 대한 안정계수는 식 (10)과 같다.

$$F_o = \frac{M_r}{M_o} \quad (10)$$

주동토압은 옹벽의 전도에 반대방향으로 모멘트를 발생시킨다. 이런 경우 전도모멘트는 발생되지 않으므로 전도에 대한 안정계수는 필요가 없다.

3) 지반지지력에 대한 안정

계비온 옹벽의 지반지지력을 구하기 위해서는 먼저 활동과 식 (11)에 의해 나타나는 모멘트평형을 검토하여 수직력 N 을 결정해야 한다.

$$d = \frac{M_r - M_o}{N} \quad (11)$$

여기서, M_r 와 M_o 는 전도에 대한 안정성 검토에서 언급되었고 d 는 그림 5에서 수직력 N 의 작용점과 기초의 아래 왼쪽사이의 거리이다. 수직력 N 은 옹벽 구조물 기초에 수직으로 작용하는 압력이다. 이러한 압력을 계산하기 위해서는 분포를 고려해야하며, 대개 선형분포를 가지고 있다. 따라서 분포의 최고값과 최소값은 그림 6에서 옹벽의 기초바닥 가장자리에서 얻을 수 있으며, 식 (12)에서 구할 수 있다.

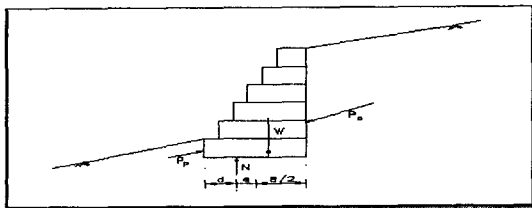


그림 5 N의 작용점

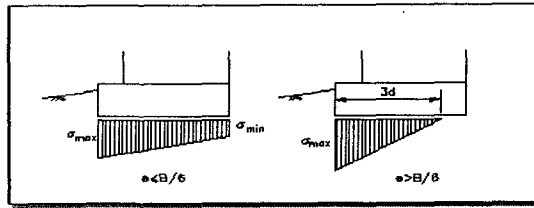


그림 6 기초 저면의 지반지지력 분포

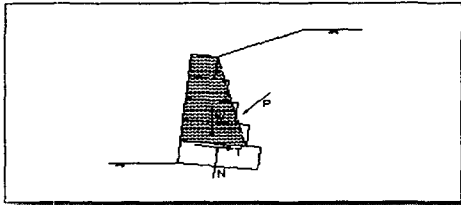
$$\sigma_{\max} = \frac{N}{B} \cdot \left(1 + 6 \cdot \frac{e}{B}\right) \quad \sigma_{\min} = \frac{N}{B} \cdot \left(1 - 6 \cdot \frac{e}{B}\right) \quad (12)$$

여기서, e : $e \leq B/6$ 의 범위에서 수직력 N 의 편심거리이다.

3.2 내부 안정성 해석

앞서 서술한 외부 안정성 해석 외에 계비온 옹벽 구조물은 내부 안정성 해석에 관한 해석을 해야 한다. 이것은 토압으로 인한 내부응력과 옹벽 구조물에 직접적으로 작용하는 재하하중의 영향을 받기 때문이다. 내부 파괴의 매카니즘은 옹벽 구조물의 종류에 따라 나누어진다. 계비온 옹벽 구조물의 경우에는 활동에 대한 옹벽 구조물의 위아래 각 층을 검토해야 한다. 이 해석으로 전 절에서 설명한 같은 과정을 이용하여 분석된 단면 위의 옹벽 구조물 벽체부분에 작용하는 주동토압을 그림 7에서 결정할 수 있다. 옹벽단면에 작용하는 전단응력과 수직응력을 모멘트평형법을 이용하여 계산하며, 전단응력은 식 (13)에서 구할 수 있다.

$$\tau = \frac{T}{B} \quad (13)$$



최대수직응력은 식 (14)에서 구할 수 있다.

$$\sigma_{\max} = \frac{N}{2d} \quad (14)$$

여기서, B 는 계비온 옹벽 층의 너비이고 T , N , d 는 힘과 모멘트평형법에 의해 구할 수 있으며, 전단응력과

그림 7 중간층에 대한 분석
할 수 있다.

수직으로 작용하는 허용응력은 식 (15) ~ 식 (16)에서 구

$$\tau_{adm} = N \cdot \tan \varphi^* + c_g \quad (15)$$

$$\sigma_{adm} = 50 \gamma_g - 30 \quad (16)$$

여기서, 단위는 t/m^2 이며, φ^* , c_g 는 식 (17) ~ 식 (18)에서 구할 수 있다.

$$\varphi^* = 25 \gamma_g - 10^\circ \quad (17)$$

$$c_g = 0.3 P_u - 0.5 \quad (18)$$

여기서, 단위는 t/m^2 이며, γ_g 는 $\gamma_g = \gamma_p \cdot (1-n)y P_u$ 에 의해 얻은 계비온 옹벽의 단위중량, P_u 는 단위가 kg/m^3 인 철망의 중량이다.

3.3 배면수압에 의한 안정성 해석

옹벽이 붕괴되는 원인의 대부분은 옹벽 배면에 있는 뒤채움재 내의 물의 영향 때문이라는 것을 많은 경험을 통해 우리는 잘 알고 있다. 다시 말하면 배면수압을 무시하고 안정성을 검토하였거나 강우 등으로 인해 갑자기 수위가 증가하였을 때 옹벽은 불안정한 상태가 될 수 있다. 만일 옹벽 배면에 지하수위가 존재하고 옹벽을 통해 전혀 배수가 없다면 수압의 분포는 그림 8에 보인 것처럼 삼각형으로 분포하며, 이 합력이 옹벽의 활동과 전도를 일으키는 힘으로 작용한다. 또한 저판 바닥에도 수압이 작용하는데 그 크기는 뒷꿈치에서 앞부리쪽으로 직선적으로 감소한다고 가정할 수 있다. 앞부리 부근에서는 옹벽 전면의 지반으로 쉽게 배수될 수 있기 때문에 저판 선단에

서의 수압은 0이 되며, 이 저판 바닥의 수압도 옹벽의 안정에 불리한 힘으로 작용한다. 옹벽에 수압이 작용한다면 전 절에서 설명한 안정조건에다 이 영향을 합쳐야 하므로 이를 포함하여 안전율을 계산하여야 한다. 그림 8에서 이에 대한 공식은 식 (19)~식(20)과 같이 표시될 수 있다.

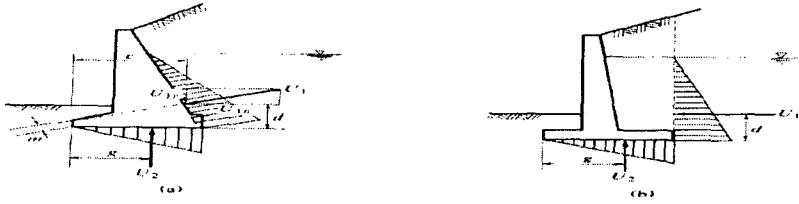


그림 8 뒤채움내에 배면수압이 적용할 때 수압의 분포 (a) 중력식 옹벽 (b) 캔틸레버식 옹벽

$$\text{활동에 대한 안전율} : F_s = \frac{R_v \tan \phi_w + 0.5 P_h}{R_h + U_{1h}} > 1.5 \quad (19)$$

$$\text{전도에 대한 안전율} : F_s = \frac{W_a}{(P_h y - P_v f) + (U_{1h} d - U_{1v} c) + U_2 g} > 1.5 \sim 2.0 \quad (20)$$

여기서, 벽체에 작용하는 수압의 합력 U_1 , 저판에 작용하는 수압의 합력 U_2 , 앞부리에서 U_2 까지의 거리 g , 저판 앞부리에서 U_{1v} 까지의 수평거리, 저판 바닥에서 U_{1h} 또는 U_1 까지의 연직거리 d 이다. 토압에 관계없이 어떤 흙을 뒤채움으로 사용할지라도 뒤채움의 배수에 대해서는 반드시 고려해야 한다. 왜냐하면 옹벽 배면에 본래 지하수위가 존재하지 않더라도 강우나 기타 침투수에 의해 일시적으로 수압이 작용할 수 있기 때문이다. 옹벽 배면에 지하수위가 있다면 안전율이 현저히 떨어지며, 이와 같이 일시적으로 발생된 수압은 옹벽의 붕괴사고의 원인이 될 수 있으므로 옹벽의 수면동안 뒤채움 내에서 수위가 상승되지 않도록 적절한 배수시설을 마련해 두어야 한다.

따라서 계획된 옹벽은 채움재인 자갈 또는 석재사이에 공극이 있어서 물이 자유로이 왕래할 수 있어서 옹벽 배면에서 수압이 발생되지 않으므로 상당히 안전하리라 판단된다.

4. 실제적용 및 분석

4.1 입력자료

1) 옹벽에 관한 자료

옹벽 경사도 : 6° , 옹벽 채움재의 단위중량 : 2.47t/m^3 , 계비온의 공극률 : 30%, 뒤채움재와 옹벽사이 토목섬유 유무 : 유, 마찰손실 : 5%, 기초지반과 저판사이 토목섬유 유무 : 무, 마찰손실 : 5.00%, 철망의 직경 : 8×10 , $\phi 2.7\text{mm}$

2) 뒤채움 흙의 자료

첫 번째 경사 : 30.00° , 첫 번째 길이 : 6.50m, 두 번째 경사 : 0.00° , 흙의 단위중량 : 1.84t/m^3 , 흙의 내부마찰각 : 30.00°

3) 기초에 관한 자료

상단표면높이 : 0.50m, 상단표면초기길이 : 10.00m, 상단표면경사각 : 0.00° , 흙의 단위중량 : 1.84t/m^3 , 흙의 내부마찰각 : 30.00° , 흙의 점착력 : 0.51t/m^2 , 기초의 허용압축응력 : t/m^3 , 지하수위 : m

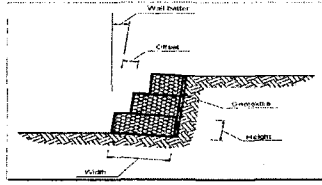


그림 9 옹벽에 관한 일반적인 자료

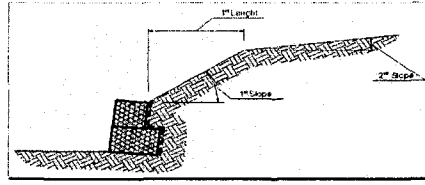


그림 10 뒤채움 흙의 자료

4.2 안정해석 결과

주동 및 수동토압		활동에 대한 안정		전도에 대한 안정	
주동토압	: 5.23t/m	기초 위에 수직력	: 11.39t/m	전도모멘트	: 3.42t/m×m
X축에 대한 작용점	: 1.75m	X축에 대한 작용점	: 0.85m	저항모멘트	: 13.44t/m×m
Y축에 대한 작용점	: 0.87m	Y축에 대한 작용점	: -0.09m	전도의 안정계수	: 3.93
X축에 대한 토압의 방향	: 40.93°	기초 위에 전단력	: 1.20t/m	기초에 작용하는 옹력	
수동토압	: 1.57t/m	기초 위에 저항력	: 8.84t/m	편심거리	: 0.14m
X축에 대한 작용점	: 0.02m	활동에 대한 안정계수	: 3.20	기초 가장자리 위에 수직응력	: 8.42t/m ²
Y축에 대한 작용점	: 0.21m				

6. 결론

지금까지의 연구결과, 토압에 관계없이 어떤 흙을 뒤채움으로 쓰든간에 뒤채움의 배수에 대해서는 심각히 고려하여야 한다.

(1) 옹벽 구조물에 배면수압이 작용한다면 안전율이 현저히 떨어진다. 이와 같이 일시적으로 발생한 수압은 옹벽의 붕괴사고의 원인이 될 수 있으므로 옹벽의 뒤채움내에서 수위가 상승되지 않도록 적절한 배수시설을 마련해 두어야 한다. 이에 대비한 옹벽은 채움재인 자갈사이 공극이 있어서 물이 자유로이 왕래할 수 있어서 옹벽 배면에서 수압이 발생되지 않으므로 상당히 안전하리라 판단된다.

(2) 게비온 옹벽의 안정해석을 신속하고 효과적으로 할 수 있으며, 기술자들에게 설계과정에서 발생할지도 모르는 기하학, 과다하중 등 여러 가지 상황에서 빠르고 능률적인 설계방법을 제시할 수 있다고 판단된다.

(3) 기존의 콘크리트 옹벽 등은 환경친화적인 면에서는 전혀 고려되지 않는 구조물인데 반하여 게비온 옹벽 구조물은 유연성, 강도와 내구성, 투수성, 환경친화성뿐만 아니라 경제성 등의 차원에서 본 구조물이 장래에는 많이 이용될 것이다.

참고문헌

1. 배상수, 송시훈, 허영수, 지홍기(2001), 사면의 배수압 소산을 위한 Gabion특성 연구, 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, p775~780.
2. Bishop, A. W., The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes, Géotechnique, 5 (1) 7-17, 1955
3. Nguyen, V. U., Determination of Critical Slope Failure Surfaces, Journal of Geotechnical Engineering - ASCE, 111 (2) 238-50., 1985
4. Seed, H. B. & Whitman, R. V., Design of Earth Retaining Structures for Dynamic Loads, ASCE Spec. Conf. Lateral Stresses in the Ground and Design of Earth Retaining Structurea, pp 103-47, 1970.