

절개지 사면의 배수압 소산을 위한 Gabion 옹벽

서 영 민 (정회원, 영남대학교 대학원 토목공학과 석사과정)

배 상 수 (정회원, 농업기반공사 수문조사처 근무)

지 흥 기 (정회원, 영남대학교 토목도시환경공학부 교수)

1. 서론

돌망태(Gabion) 옹벽은 흙의 깎기 또는 쌓기 등에서 경사면의 붕괴를 방지하는 방법으로 사용되고 있는 구조물이다. 이 때에 옹벽의 뒷면에 작용하는 토압의 방향, 크기 및 작용점을 구하여 이들 구조물에 대한 활동, 전도, 지반지지력 등 외적 안정이 필수적이다. 따라서 돌망태는 배면배수가 공간채움재인 돌사이로 투과되어 자연배수를 촉진시킴으로서 배면의 수압을 감소시켜 옹벽의 안정을 증대시키기 위한 구조물이며, 이 구조물은 친생태적이고 친환경적이므로 그 성능이 타 구조물에 비하여 우수성이 월등하여 여러 방면에서 사용되고 있다.

따라서 이들 구조물에 대한 배수압을 소산시키기 위해서 돌망태의 특성을 검토하고 구조물에 대한 안정성을 해석하고자 극한평형법, Rankin이론, Coulomb이론, Meyerhof이론(Simplex방법이라고도 알려짐), Bishop이론 등을 이용하여 돌망태 옹벽의 배수압 소산특성을 연구하는데 역점을 두었다.

2. 옹벽 돌망태의 기본이론

2.1 Rankine의 토압이론

그림 1에서 벽체에 대해 깊이 z에 위치한 토층에 작용하는 응력을 분석하면서 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 H일 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.

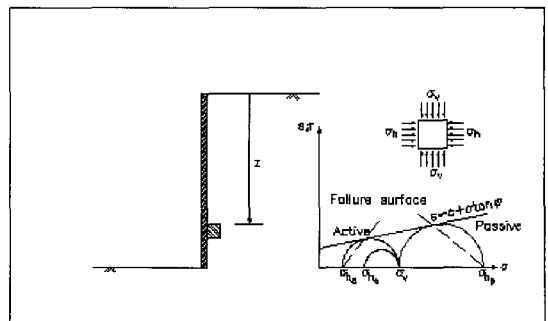


그림 1. 수평응력의 결정

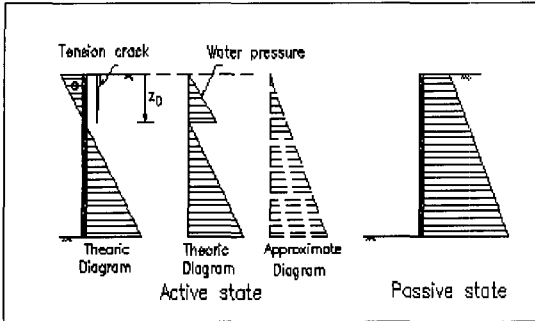


그림 2. 주동/수동상태에서 α_m 의 분포

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

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

주동토압 상태에서 점착성 흙의 상부는 인장응력의 영향을 받으며, 깊이 z_0 에서 응력증가는 식 (5)에서 구할 수 있다.

$$z_0 = \frac{2 \cdot c}{\gamma} \cdot \frac{1}{\sqrt{k_a}} \quad (5)$$

뒷채움 흙은 인장응력에 저항할 수 없기 때문에 깊이 z_0 에서 균열이 일어날 것이다. 그림 2는 점착성 흙의 주동 및 수동토압 상태에서 토체내에서의 응력분포를 보여준다.

2.2 Coulomb의 토압이론

비점착성 흙의 경우 주동토압 상태에서 형성된 흙 썩기에 작용하는 힘은 그림 3과 같으며, 이들 힘은 흙의 자중 W , 토체의 반력 R , 흙의 표면파괴를 일으키는 내부마찰각 ϕ 그리고 옹벽 구조물의 전면의 경사각 δ 이 주어질 때 주동토압 P_a 이다. 옹벽 구조물의 경사각 δ 는 흙과 옹벽 구조물 사이의 썩기의 경사각이며, 단위중량은 식 (6)과 같다.

$$W = \frac{\gamma \cdot H^2}{2 \cdot \sin^2 \alpha} \left[\sin(\alpha + \rho) \cdot \frac{\sin(\alpha + \varepsilon)}{\sin(\rho - \varepsilon)} \right] \quad (6)$$

주동토압은 식 (7)에서 힘의 평형으로부터 결정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{P_a}{\sin(\rho - \phi)} &= \frac{W}{\sin(\pi - \alpha - \rho + \phi + \delta)} P_a \\ &= \frac{W \cdot \sin(\rho - \delta - \phi)}{\sin(\pi - \alpha - \rho + \phi + \delta)} \quad (7) \end{aligned}$$

그러므로 주동토압 P_a 의 최대값은 식 (8)에서 구할 수 있다.

$$P_a = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot k_a \quad (8)$$

수동토압 상태에서는 구조물의 활동방향의 변화로 반력 R 과 수동토압 P_p 의 경사각이 바뀌며, 가장 중요한 한계면은 그림 4에서 수동토압 P_p 이 최소값을 가진 면이다. 따라서 수동토압은 식 (9)에서 구할 수 있다.

$$P_p = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot k_p \quad (9)$$

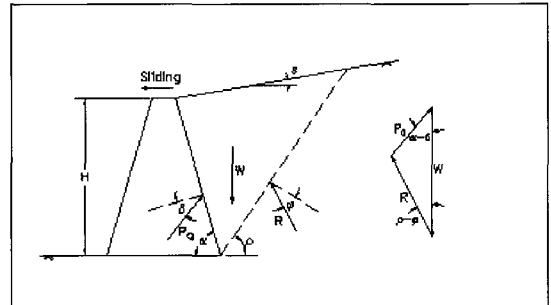


그림 3. 주동토압 상태에서 썩기에 작용 하는 힘

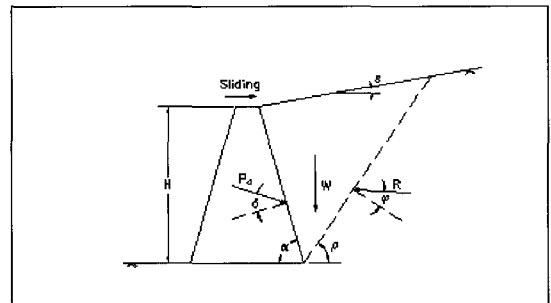


그림 4. 수동토압 상태에서 썩기에 작용 하는 힘

3. 안정성 해석

3.1 활동에 대한 안정

수동토압을 가진 돌망태 옹벽 구조물 바닥의 저항이 흙 표면 상부의 힘에 견디지 못할 때 구조물은 활동을 일으키게 된다. 옹벽 구조물 바닥에서의 마찰력과 구조물의 불안정성을 야기하는 힘을 비교하여 활동에 대한 해석을 한다. 두번째 힘은 그림 5에서와 같이 옹벽 구조물에 작용하는 힘의 평형을 고려하면서 결정한다. 옹벽 구조물 벽체에 작용하는 힘들은 구조물 뒤채움재에 의한 주동토압 P_a , 구조물 벽체 전면에 작용하는 수동토압 P_p , 구조물 벽체의 단위중량 W_g , 구조물 기초 바닥에 작용하는 수직력 N , 구조물 기초 바닥에 접선된 저항력 T 등이 있다.

그림 5에서 보는바와 같이 옹벽 구조물 저면이 오른쪽의 토체쪽으로 팽창할 때 T_a 는 이런 팽창의 앵커 효과에 의해 증가한다. 이런 증가량을 계산하기 위해 기초 저면의 팽창에 대해 작용하는 수직응력 σ_v 과 그것의 길이 L 을 식 (10)에서 결정할 수 있다.

$$T_a = (\sigma_v \cdot \tan\phi' + c) \cdot L \quad (10)$$

이런 경우 옹벽 구조물 기초길이에 대응하는 값 B 는 L 값에 의해 감소한다. T_a 는 돌망태에서 철망의 인장응력에 의해 제한되며, 식 (11)에서 구할 수 있다.

$$T_a = 2 \cdot T_{max} / 1.2 \quad (11)$$

여기서, T_{max} : 철망의 최대허용인장응력이다.

그러므로 활동에 대한 안정계수는 식 (12)에서 구할 수 있다.

$$F_s = \frac{T_a + P_{ph}}{P_{ah}} \quad (12)$$

여기서, P_{ah} 와 P_{ph} 는 옹벽 구조물의 활동방향과 같은 방향으로 작용하는 주동 및 수동토압의 구성성분이며, 위의 그림 5와 같다.

3.2 전도에 대한 안정

전도에 대한 돌망태 옹벽 구조물의 안정성 검토는 복원활동력 M_r 과 전도활동력 M_o 를 비교한다. 이들 모멘트는 다음의 그림 6에서와 같이 전도하려는 점을 나타내는 옹벽 구조물 하단 아래 왼쪽 각의 관점에서 계산되어야 한다. 옹벽 구조물의 안정을 지지하는 힘들은 옹벽 구조물의 단위중량, 수동토압, 옹벽 구조물에 작용하는 하중, 주동토압의 수직성분 등이 있다.

옹벽 구조물 계산에서 지진의 영향과 옹벽 구조물이 부분적으로 침수되었을 때 양압력은 단위중량을 고려해야 하고 이것은 복원모멘트 감소에 영향을 미친다. 전도모멘트는 옹벽 구조물에 작용하는 수동토압에 의해 형성된다. 그러므로 전도에 대한 안정계수는 다음 식 (13)과 같다.

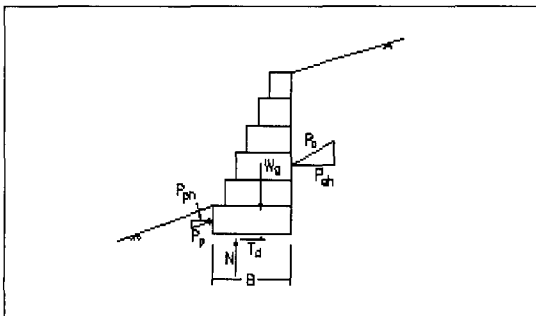


그림 5. 옹벽 구조물에 작용하는 힘

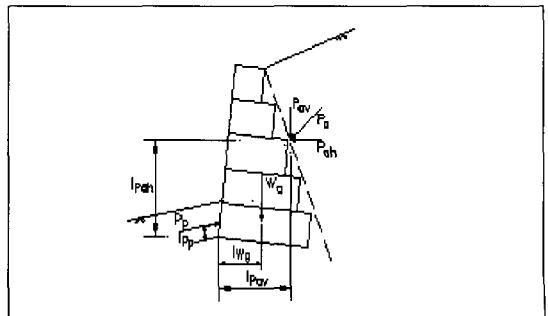


그림 6. 복원모멘트와 활동모멘트

$$F_o = \frac{M_r}{M_o} \quad (13)$$

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

3.3 지반지지력에 대한 안정

돌망태 옹벽 구조물의 지반지지력을 구하기 위해서는 먼저 활동과 식 (14)에 의해 나타나는 모멘트평형을 검토하여 수직력 N 을 결정하여야 한다.

$$d = \frac{M_r - M_o}{N} \quad (14)$$

여기서, M_r 와 M_o 는 전도에 대한 안정성 검토에서 언급되었고 d 는 그림 7에서 수직력 N 의 작용점과 기초의 아래 왼쪽사이의 거리이다. 수직력 N 은 옹벽 구조물 기초에 수직으로 작용하는 압력이다.

이러한 압력을 계산하기 위해 서는 이들의 분포를 고려해야하며, 대개 이 분포는 선형분포를 가지고 있다. 따라서 이것의 최고값과 최소값은 그림 8에서 옹벽 구조물의 기초바닥 가장자리에서 얻을 수 있으며, 식 (15)에서 구할 수 있다.

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

$$\sigma_{\min} = \frac{N}{B} \cdot \left(1 - 6 \cdot \frac{e}{B}\right) \quad (15)$$

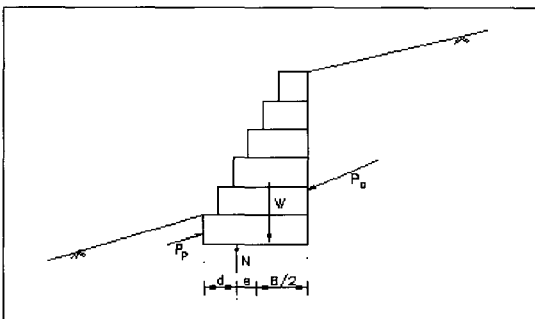


그림 7. N 의 작용점

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

3.4 지하수위가 옹벽에 미치는 영향

옹벽이 붕괴되는 원인의 대부분은 옹벽 배면에 있는 뒤채움재내의 물의 영향 때문이라는 것을 많은 경험을 통해 우리는 잘 알고 있다. 다시 말하면, 지하수위를 무시하고 안정을 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 바닥에 수압이 작용하는데 그 크기는 뒷꿈치에서 앞부리쪽으로 직선적으로 감소한다고 가정할 수 있다. 앞부리 부근에서는 옹벽 전면의 지반으로 쉽게 배수될 수 있기 때문에 저판 선단에서의 수압은 0이 되며, 이 저판바닥의 수압도 옹벽의 안정에 불리한 힘으로 작용한다.

옹벽에 수압이 작용한다면 앞절에서 설명한 안정 조건에다 이 영향을 합쳐야 하므로 이를 포함하여 안전율을 계산하여야 한다. 그림 8을 참조하면 이에 대한 공식은 다음과 같이 표시될 수 있다.

1) 활동에 대한 안전율

$$F_s = \frac{R_v \tan \Phi_w + 0.5 P_p}{R_h + U_{ik}} > 1.5 \quad (16)$$

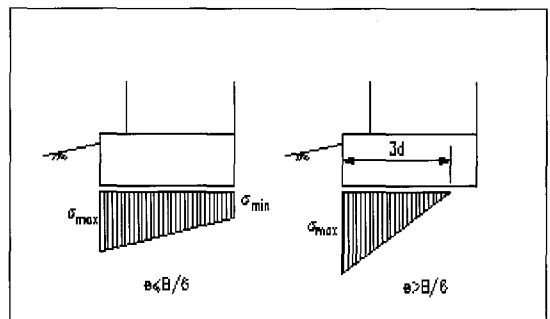


그림 8. 기초저면의 지반지지력 분포

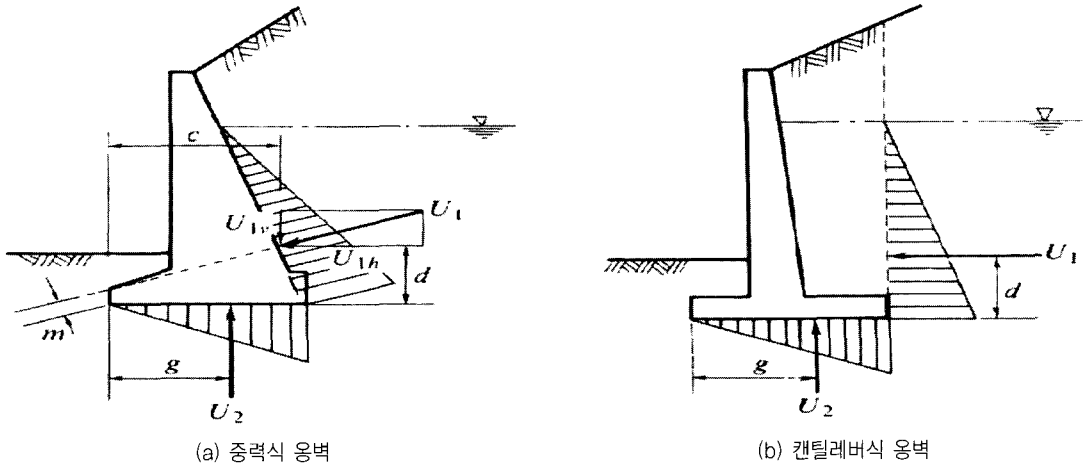


그림 9. 뒤채움내에 지하수위가 있을 때 수압의 분포

표 1. 돌망태 옹벽 각층의 크기

돌망태 층	폭(Width)m	높이(Height)m	벽면의 단(Offset)m
1	2.00	1.00	-
2	1.50	1.00	0.00
3	1.00	1.00	0.00

2) 전도에 대한 안전율

$$F_s = \frac{W_a}{(P_h y - P_v f) + (U_{1k} d - U_{1v} c) + U_{2g}} > 1.5 \sim 2.0 \quad (17)$$

벽체에 작용하는 수압의 합력 U_1 , 저판에 작용하는 수압의 합력 U_2 , 앞부리에서 U_2 까지의 거리 g , 저판 앞부리에서 U_1 까지의 수평거리, 저판 바닥에서 U_{1h} 또는 U_1 까지의 연직거리 d 라 할 때 다음 그림 9와 같다.

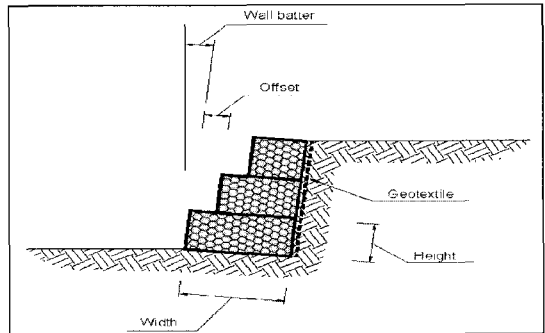


그림 10. 옹벽에 관한 일반적인 자료

4. 실제적용 및 분석

4.1 입력자료

1) 옹벽에 관한 자료

- 옹벽 경사도(Wall batter) : 6°
- 옹벽 채움재의 단위중량 : 2.47t/m³
- 돌망태의 공극률 : 30%

- 뒤채움재와 옹벽사이 토목섬유 유무 : 유
- 마찰손실 : 5%
- 기초지반과 저판사이 토목섬유 유무 : 무
- 마찰손실 : 5.00%
- 철망의 직경 : 8×10, Ø2.7mm

2) 뒤채움 흙의 자료

- 첫 번째 경사(1st Slope) : 30.00°

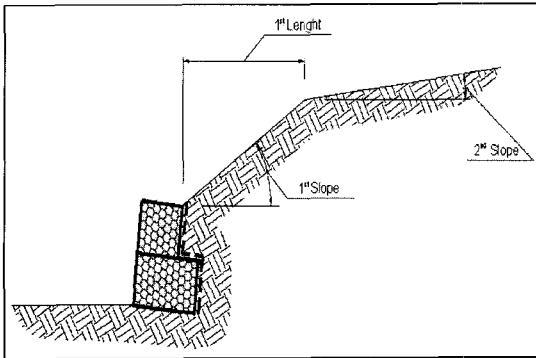


그림 11. 뒤채움 흙의 자료8

- 첫 번째 길이(1st Length) : 6.50m
- 두 번째 경사(2nd Slope) : 0.00°
- 흙의 단위중량 : 1.84t/m³
- 흙의 내부마찰각 : 30.00°

3) 기초에 관한 자료

- 상단표면높이 : 0.50m
- 상단표면초기길이 : 10.00m
- 상단표면경사각 : 0.00°
- 흙의 단위중량 : 1.84t/m³
- 흙의 내부마찰각 : 30.00°
- 흙의 점착력 : 0.51t/m²
- 기초의 허용압축응력 : t/m²
- 지하수위 : m

4.2 안정해석 결과

1) 주동 및 수동토압

- 주동토압 : 5.23t/m
- X축에 대한 작용점 : 1.75m
- Y축에 대한 작용점 : 0.87m
- X축에 대한 토압의 방향 : 40.93°
- 수동토압 : 1.57t/m
- X축에 대한 작용점 : 0.02m
- Y축에 대한 작용점 : 0.21m
- X축에 대한 토압의 방향 : 0.00°

2) 활동에 대한 안정

- 기초 위에 수직력 : 11.39t/m
- X축에 대한 작용점 : 0.85m
- Y축에 대한 작용점 : -0.09m
- 기초 위에 전단력 : 1.20t/m
- 기초 위에 저항력 : 8.84t/m
- 활동에 대한 안정계수 : 3.20

3) 전도에 대한 안정

- 전도모멘트 : 3.42t/m×m
- 저항모멘트 : 13.44t/m×m
- 전도에 대한 안정계수 : 3.93

4) 기초에 작용하는 응력

- 편심거리 : 0.14m
- 기초 바깥쪽 가장자리
- 위에 수직응력 : 8.42t/m²

6. 결론

본 연구결과, 토압에 관계없이 어떤 흙을 뒤채움으로 쓰든간에 뒤채움의 배수에 대해서는 심각히 고려하여야 한다. 왜냐하면 옹벽 배면에 본래 지하수위가 존재하지 않더라도 강우나 기타 침투수에 의해 일시적으로 수압이 작용할 수 있기 때문이다. 앞절에서 설명한 바와 같이 옹벽 배면에 지하수위가 있다면 안전율이 현저히 떨어진다. 이와 같이 일시적으로 발생된 수압은 옹벽의 붕괴사고의 원인이 될 수 있으므로 옹벽의 수면동안 뒤채움내에서 수위가 상승되지 않도록 적절한 배수시설을 마련해 두어야 한다. 이에 돌망태 옹벽은 채움재인 돌사이 공극이 있어서 물이 자유로이 왕래할 수 있어서 옹벽 배면에서 수압이 발생되지 않으므로 상당히 안전하리라 판단된다.

또한 돌망태 옹벽의 안정해석을 신속하고 효과적으로 할 수 있으며, 기술자들에게 설계과정에서 발생될지도 모르는 기하학, 과다하중 등 여러 가지 상황

에서 빠르고 능률적인 설계방법을 제시할 수 있다고 판단된다. 또한 기존의 콘크리트 옹벽 등은 환경친화적인 면에서는 전혀 고려되지 않는 구조물인데 반하

여 돌망태 옹벽 구조물은 유연성, 강도와 내구성, 투수성, 환경친화성뿐만 아니라 경제성 등의 차원에서 본 구조물이 장래에는 많이 이용될 것이다.

참고문헌

1. Bishop, A. W., The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes, *Geotechnique*, 5 (1) 7-17, 1955
2. Nguyen, V. U., Determination of Critical Slope Failure Surfaces, *Journal of Geotechnical Engineering - ASCE*, 111 (2) 238-50., 1985
3. 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 Structures*, pp 103-47, 1970.
4. Bowles, J. E., *Foundation Analysis and Design*, Third Edition, McGraw-Hill, 1982.