

## 토압산정에서의 제문제

### Problematic Issues in the Estimation of the Earth Pressures

김명모, Kim Myoung-Mo

서울대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Seoul National University.

**개요(SYNOPSIS)** : Coulomb's 'Sliding Wedge Theory(1776)' is the earliest one dealing with the earth pressure problems, which is followed by Rankine's notes(1857) on the active and passive states in the retained earth. Since then, no more theories are added to these. However, during the field applications, practice engineers are sometimes confused and/or disagree each other on several points in the earth pressure estimations.

In this paper it is aimed to clarify these issues objectively as much as possible. Reinforced earth walls with attached reinforcements as well as unattached ones are introduced at the end.

**주요어(Key words)** : Earth Pressures, Coulomb, Rankine, Active State, Passive State, Seepage, Tension Crack, Capillary Tension, Reinforced Retaining Wall, Unattached Reinforced Retaining Wall

## 1. 머리말

횡토압의 줄임 말로서 일컫는 '토압'의 크기를 정확하게 산정 하는 일은 지반공학 내에서 압밀 문제와 더불어 상당히 큰 비중을 차지한다. 이 원고에서는 토압 산정 과정에서 논란의 여지가 있거나 특별한 이해를 필요로 하는 문제들을 다루었으며, 이에 앞서서 기본이 되는 사항들을 간략히 언급하였다.

## 2. 토압산정

### 2.1 토압의 정의

토압은 영국의 공학자 Rankine이 1857년 주동 상태와 수동상태를 그림 1과 같이 설정한 이래로 정지 상태에서의 토압인 정지토압, 그리고 주동토압과 수동토압 등 세 가지로 구분된다.

그림 1에 묘사된 바와 같이 주동상태는 횡방향 응력의 이완으로, 그리고 수동상태는 횡방향응력의 상당한 증가로 도달하며 각각의 경우에 지반 내에는 파괴면이 형성된다. 실험 결과에 의하면 토류벽체가 벽체 높이의 1/1000 정도 회전하므로써 주동상태에 도달하며, 따라서 대부분의 토류벽체 뒷채움 지반은 주동상태에 있다고 볼 수 있다. 그러나, 수동상태의 경우에는 이보다 훨씬 큰 변위가 필요한데, 특히 느슨한 모래나 정규압밀 점토 등의 경우에는 벽체 높이의 20~30% 정도의 변위가 발생하여야 수동저항력이 완전히 발휘된다.

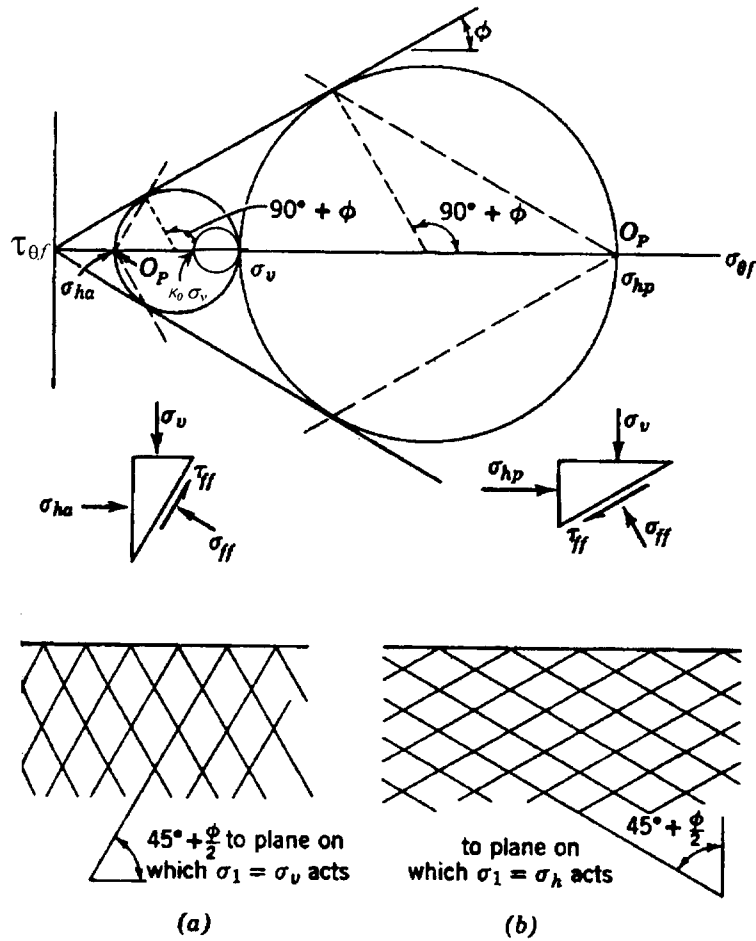


그림 1 Rankine 상태에서의 모아원과 파괴면  
(a) 주동상태 (b) 수동상태

## 2.2 토압 분포 및 작용점

토압의 분포 형태는 Rankine의 이론에 의하면 삼각형 모양이 되어야 하는데, Terzaghi, Duncan, 그리고 Coduto 등의 현장관찰에 의하면 벽체에 작용하는 실제 토압 분포는 포물선 형태(그림 2)에 가깝다. 그 이유로는 벽체 상단과 하단의 변위차, 아칭효과, 그리고 바닥 면의 마찰저항 등을 들 수 있다.

토압의 분포 형태가 달라지면 토압 합력의 작용점도 달라지게 된다(표 1). 이 표에서 보면 Rankine 이외의 사람들은 모두 작용점의 위치를 벽체 하단으로부터 0.40H 또는 그 이상으로 보고 있다.

미국의 LRFD (Load and Resistance Factor Design, 1994) 도로교 설계 시방서는 토압은 삼각형 분포를 가정하여 산정하고 작용점은 0.40H 높이로 제안하고 있다.

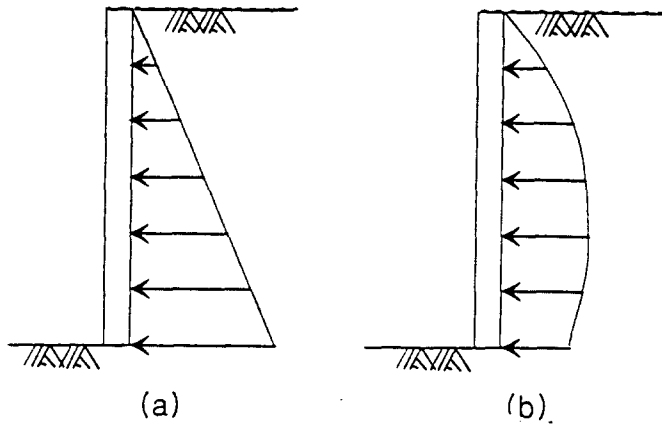


그림 2 토압분포의 비교 (a) 이론상의 가정 (b) 실제 관측 결과

표 1 토압 합력 작용점의 위치에 대한 제안값

제안자	토압합력의 작용위치	비고
Rankine	0.33H	
Terzaghi	0.40~0.45H	주동토압
Sherif	0.42H	정지토압
Duncan	0.40H	
미국 LRFD 도로교 시방서	0.40H	삼각분포

### 2.3 토압 작용방향

토압의 작용방향은 토류벽체와 뒷채움 흙사이에 발생하는 마찰력의 인정여부와 토류벽체의 형태에 따라 달라진다(그림3). 일반적으로 중력식 옹벽이나 뒷굽이 짧은 역 T형 옹벽의 경우에는 마찰력을 고려하는 Coulomb 방법을 이용하고, 뒷굽이 긴 역 T형 옹벽의 경우에는 뒷굽 끝단에서 지표면까지 연직으로 선을 그어서 생긴 면에 Rankine토압이 작용하는 것으로 본다. 짧고 긴 뒷굽길이의 구분은 그림 3(a)에 보인 것과 같이  $\alpha$ 각을 갖는 직선을 뒷굽 끝단에서 반시계 방향으로 그어 올렸을 때 벽체 몸통을 통과하느냐에 따라 결정된다.

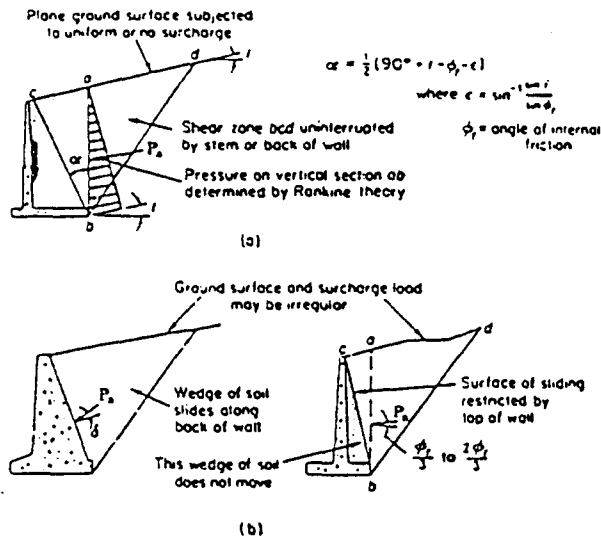


그림 3 토류벽체의 설계시 토압의 작용위치와 작용방향  
 (a) Rankine 이론 적용  
 (b) Coulomb의 썩기이론 적용

## 2.4 뒷채움 사면 형태의 영향

뒷채움 사면의 기울기는 비점성토의 경우에 원칙적으로 뒷채움 흙의 내부 마찰각 보다 클 수가 없다. 그러나 토압을 산정할 때 안전 측면을 강조하여 흙의 내부 마찰각  $\phi$ 를 지나치게 보수적으로 가정하는 경우 뒷채움 사면의 기울기가 더 크게 설계되는 수가 있다. 이때에는 두개의 값이 같다고 보고 주동 토압계수  $K_a$ 를 계산하는데, 결과적으로  $K_a$ 는  $\alpha$ 와  $\beta$  모두와 무관하게 된다.

뒷채움 지반이 경사진 토류벽체의 설계를 위한 흙의 분류와 분류된 흙에 의한 토압산정을 위한 도표를 각각 표 2와 그림 4에 나타내었다(Terzaghi & Peck, 1967).

표 2 옹벽설계를 위한 뒷채움 흙의 분류(Terzaghi & Peck, 1967)

흙의 종류 구분	설 명
1	깨끗하고 투수성이 좋은 모래나 자갈
2	비교적 불투수성인 실트질 모래나 자갈
3	잔적토, 실트, 모래, 자갈 그리고 점토 함유분이 높은 자갈
4 <sup>i)</sup>	매우연약한 점토, 유기질 실트 또는 실트질 점토
5 <sup>ii)</sup>	외부로부터 물이 스며들지 않도록 조치한 단단 내지 굳은점토

- i) 연약한 점토의 경우 옹벽 구조물 수명기간내내 자중 압밀이 진행될 것이며 정상적인 방법으로 뒷채움 시공을 할 수도 없을 것이다. 가능한 한 이런 종류의 흙은 피하여야 한다.
- ii) 외부로부터 스미는 물을 철저히 차단할 수 없는 경우 사용을 피하여야 한다. 점토가 단단할수록 침투 발생시 토압 증가도 커질 것이다. 실제로 외부 유입수를 차단하는 것은 거의 불가능하다.

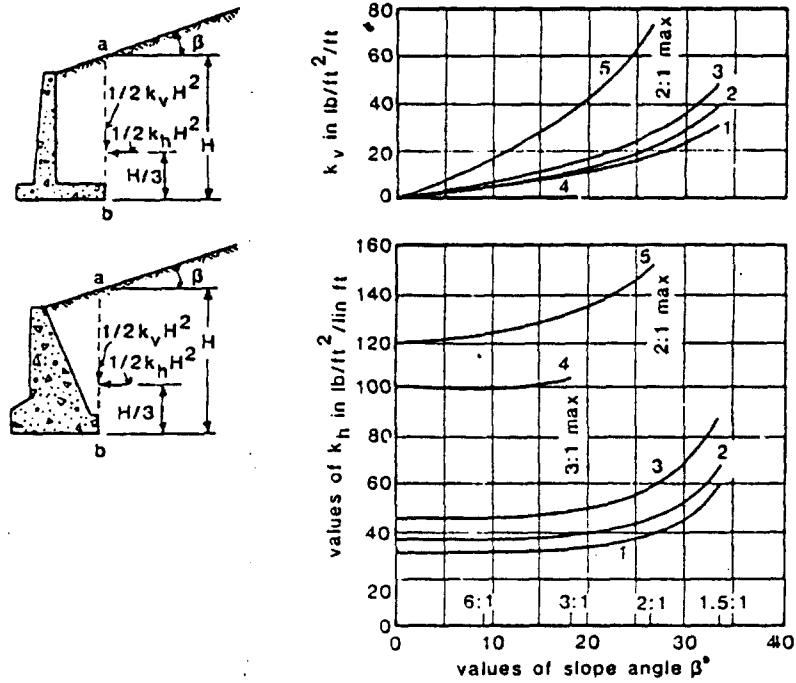


그림 4 뒷채움 토압의 평가를 위한 설계도표(Terzaghi & Peck, 1967)

그림 4에서 보면 뒷채움 경사각이 대략 25° 를 넘어서면서 수평·수직응력이 급격히 증가함을 알 수 있다.

## 2.5 점성토 뒷채움의 토압

뒷채움 지반이 점성토인 경우에 토류 벽체에 작용하는 주동 및 수동토압의 분포는 그림 5에 보인 것과 같다. 이 토압분포에 따르면 벽체에 작용하는 전체 주동 및 수동토압은 다음 식과 같다.

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

$$P_p = \frac{1}{2} \gamma K_p H^2 - 2c\sqrt{K_p} H \quad (2)$$

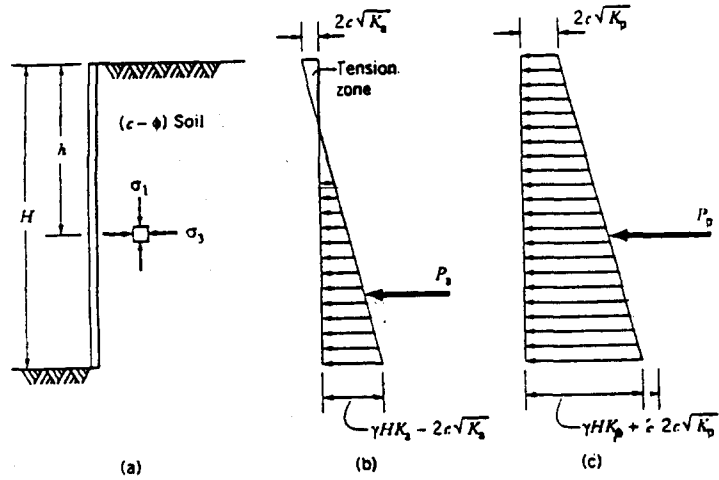


그림 5 점성토의 토압분포 (a)  $(c = 0)$  soil (b) 주동상태 (c) 수동상태

(1) 모관장력(Capillary Tension)

뒷채움 지반이 점성토이면서 지하수위가 지표면 보다 아래에 있는 경우는 모관작용에 의해 지표면까지 완전 포화될 가능성이 크기 때문에 포화된 상태로 가정하는 것이 타당하다. 이때 모관작용으로 포화된 지하수면 상부 지반의 간극수압은 마이너스(-) 값을 갖게 되고 유효응력은 마이너스(-) 간극수압과 같은 크기의 모관장력 만큼 증가하게 된다.

모관장력 효과를 겉보기 점착력 형태로 고려하면 그 크기가  $D \gamma_w \tan \bar{\phi}$  이며 전체 주동토압 산정식은 아래와 같이 달라진다.

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma_w H^2 + \frac{1}{2} \gamma_{sub} H^2 K_a - 2(\bar{c} + D \gamma_w \tan \bar{\phi}) H \sqrt{K_a} \quad (3)$$

(2) 인장균열

그림 5(b)의 주동토압 분포도를 보면 벽체 상부 지반은 수평 방향으로 인장응력 상태에 놓여 있다. 그러나, 점성이 있는 흙이라도 실제로는 오랜동안 인장력을 유지할 수 없으며 그 결과 주동상태에 놓인 점성토 지반의 상부층에 인장균열이 발생한다. 인장균열이 발생하면 인장균열 발생깊이내에서는 전단 저항력이 부분적으로만 발휘되는데 응력 평형을 고려하여 계산하면 인장균열내에서 평균 점착력은

$\bar{c} (1 - \frac{z_c}{2H})$  가 되고(그림 6), 토압산정식은

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma_w H^2 + \frac{1}{2} \gamma_{sub} H^2 K_a - 2\bar{c} (H - \frac{z_c}{2}) \sqrt{K_a} \quad (4)$$

이다.



표 3 모관장력이 주동토압에 미치는 영향

Assumption	Thrust (kN/m of wall)
1. No capillary tensions at wall or in soil (water table at ground surface)	66.1
2. Tension Cracks in soil ; no capillary tensions on wall	43.6
3. Tension cracks in soil ; capillary tensions on wall below tension cracks	32.3
4. Capillary tensions over whole height of wall	26.3

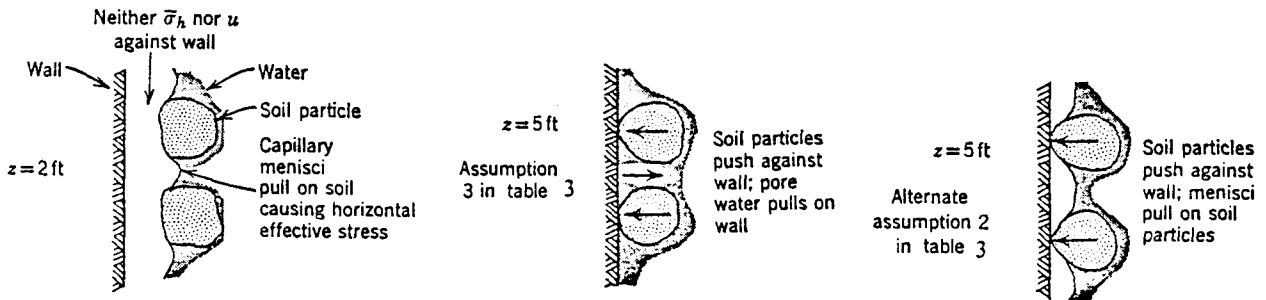


그림 8 각 가정에 따른 벽체, 토립자, 간극수 간의 응력 상관관계

(4) 토의

진흙지반 고유의 점성과 모관작용에 의해 생성되는 모관장력은 이론적 측면에서 볼 때 두 가지 경로로 토압의 크기를 변화시킨다. 첫째는 직접 벽면을 당기는 것이고 둘째는 흙 내부의 유효응력에 영향을 주는 것이다. 많은 학자들은 첫번째 효과에 대해서 대체로 부정적인 반면에 두 번째 효과는 인정한다. 다만, 모관장력의 경우 그 크기를 확실하게 알기 어렵고 기후 변화로 지하수위에 변동이 생기면 소멸될 가능성이 있다. 결국 많은 학자들은 설계시에 보수적인 쪽을 택하도록 권장한다.

2.6 뒷채움 지반에서의 침투(Seepage) 영향

토류구조물에 대한 토압 부담을 감소시키기 위하여 토류구조물에는 대부분의 경우 배수시설을 설치한다. 따라서, 포화상태에서 빗물 등이 계속하여 유입되면 뒷채움 지반내에 침투가 발생하게된다. 이럴 경우 물이 흙 입자에 가하는 침투압에 의해 토압이 증가하게 되는데 이 토압의 증가는 배수시설의 위치에 따라 그 크기가 달라진다.

경사배수시설과 연직배수시설의 예를 그림 9와 그림 10에 나타내었으며 각 경우의 주동토압의 수평 수직성분을 표 4에 수록하였다.



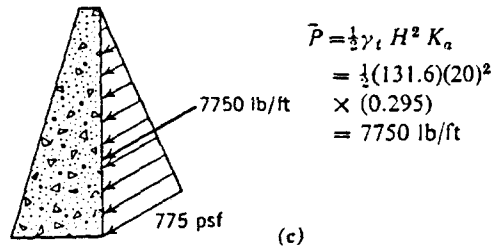
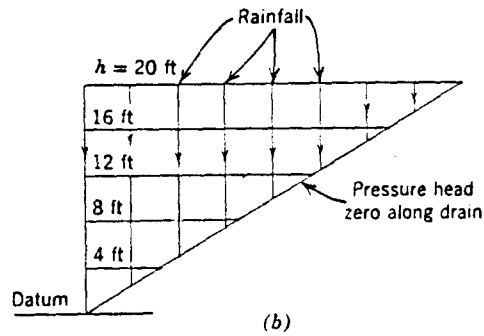
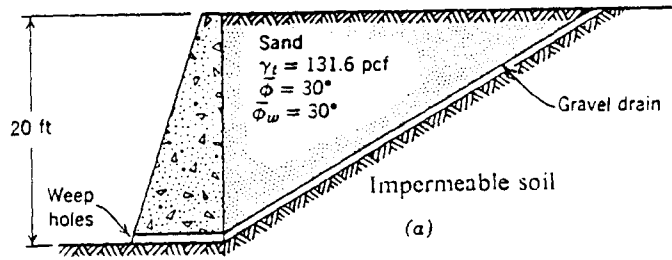


그림 9 경사배수시설이 있는 뒷채움 지반의 해석

- (a) 배수시설의 형태
- (b) 뒷채움지반 표면의 강우에 대한 유선망
- (c) 벽체에 작용하는 토립자의 응력

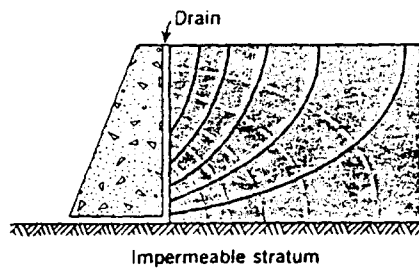


그림 10 연직배수시설이 있는 뒷채움 지반

표 4 여러 가지 조건에 따른 주동토압의 수평, 수직성분

Condition	Horizontal Component(KN/m)	Vertical Component (KN/m)
Saturated with sloping drain	98.5	56.9
Saturated with vertical drain	128.9	74.4
Saturated without drain	234.3	29.9

이 표에서 보면 경사배수재를 설치하는 경우에 수평토압이 가장 작게 발생하고 배수를 하지 않은 경우에 토압의 수평 방향 성분은 경사배수재가 있을 경우의 2.3배에 이른다.

## 2.7 뒷채움 지반 다짐 영향

뒷채움 지반을 롤러 등으로 다지는 경우에는 토류구조물 상부 층의 토압이 증가한다. 증가되는 토압의 분포와 계산식을 그림 11에 나타내었다.

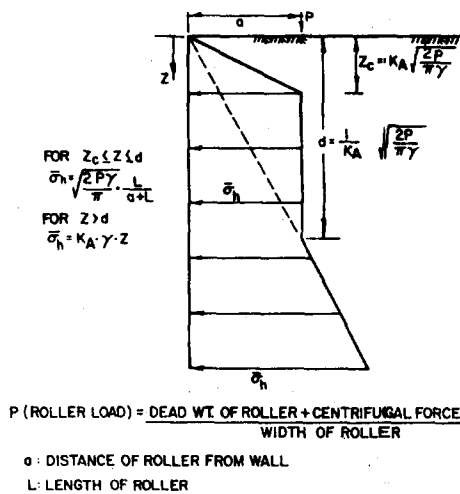


그림 11 다짐효과에 의한 벽체 작용 토압

## 3. 보강토 옹벽

### 3.1 정착식 보강토 옹벽

정착식 보강토는 현장에서 거푸집을 제작하여 콘크리트를 타설하는 기존의 옹벽과는 달리 그림 12에서 보는 바와 같이 전면판과 보강재의 순차적 조립에 의해 건설되기 때문에 옹벽 구조물의 높이가 높고 공사물량이 클수록 공기의 단축과 공사비의 절감 효과가 상승한다.

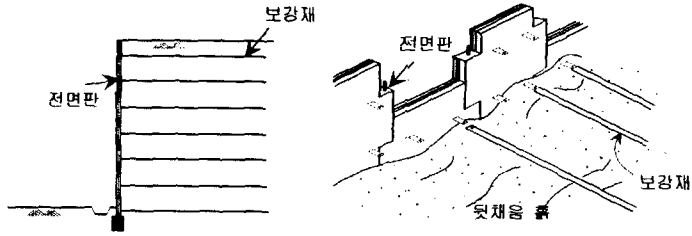
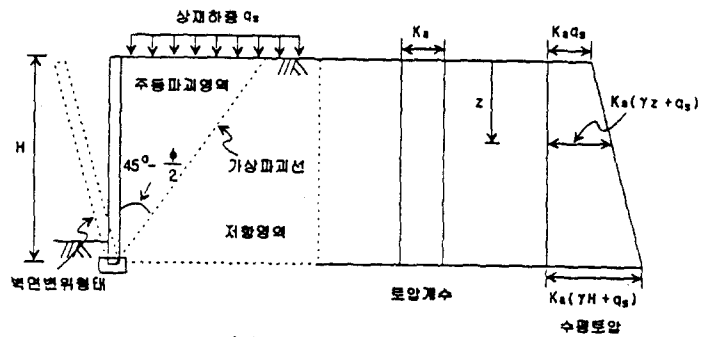
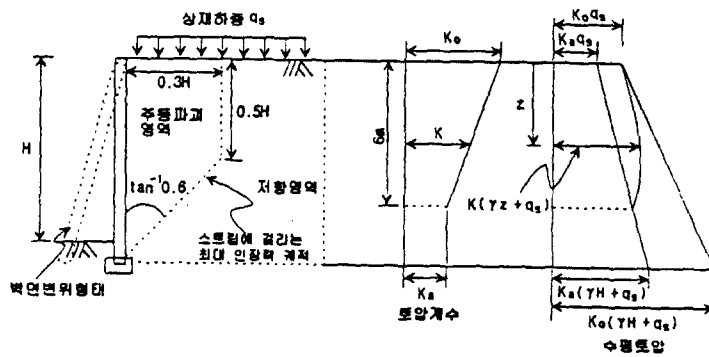


그림 12 보강토 옹벽의 구조

이러한 보강토 구조에 대한 해석방법으로는 그림 13과 같이 Tie Back-Wedge법과 Coherent Gravity 법등의 두 가지가 있다. 이 두 가지 방법은 보강재의 특성과 주동파괴 영역 및 토압계수의 분포, 그리고 토압분포를 어떻게 보는가에 따라서 달라진다. 지금까지 보강토 공법에 사용되는 보강재로는 알루미늄 스트립과 같은 금속재료가 주류를 이루었으나, 최근에는 합성섬유등을 이용한 신장성 보강재도 등장하고 있다. LRFD에서는 신장성 합성섬유재질의 보강재로 시공한 구조물의 내적안정성은 Tie Back-Wedge법을 적용하여 해석하며, 스트립이나 그리드같이 금속재료로 된 비신장성 보강재에서는 Coherent Gravity법등을 적용하여 해석할 것을 제안하고 있다.



(a) Tie Back-Wedge Method



(b) Coherent Gravity Method

그림 13 보강토 옹벽의 해석방법

### 3.2 비정착식 보강토 옹벽

근래에 들어 기존의 옹벽이나 보강토 옹벽등 전형적인 공법외에 EPS 경량성토 공법, Geotextile 공법, 그리고 비정착 보강토 공법 등이 시도되고 있다. 이 중 EPS와 Geotextile 공법은 이제 거의 실용화 단

계에 접어들었으나 비정착 보강토 공법은 아직 연구단계에 머물고 있다. 비정착 보강토 공법이란 벽체와 분리된 보강재를 사용한 강성옹벽 시공방법이다. 이에 대한 연구는 국내외적으로 많지 않다. 비정착 보강토 공법에 대한 이해를 돕고자 현재까지 국내외에서 수행된 몇몇 연구결과들을 간단히 소개한다.

**L형 벽체와 비정착 섬유보강재**

보강재-벽체 분리형 보강토 옹벽에 관한 최초의 연구는 Broms에 의해 시작되었다. Broms는 뒷채움 흙으로 인해 옹벽에 작용하는 토압을 감소시킬 수 있는 방법을 연구하기 위해 그림 14와 같은 L형의 단위 구조를 가진 옹벽의 배면에 섬유보강재를 벽체와 연결하지 않은 채 수평으로 늘어놓은 보강토 옹벽의 내적·외적 안정해석을 하였다.

Broms의 연구에 의하면 L형 조각판으로 이루어진 벽체요소의 각 층에 놓인 섬유보강재로 인하여 벽체에 작용하는 토압은 일반옹벽 구조물과 비교하여 감소하며, 감소 정도는 섬유보강재의 간격 및 Creep 강도 등의 영향을 받는다. 또한 가장 효율적인 보강재 길이는 벽체높이의 40%이고, 보강재가 파괴면과 만나는 지점에서 보강재는 최대 인장력에 도달한다.

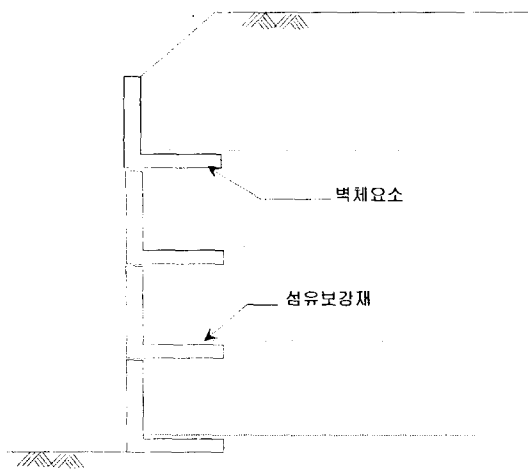


그림 14 L형 벽체와 비정착 섬유보강재

**중력식옹벽에 대한 비정착 보강재의 효과**

Saran and Garg는 공법에 대한 이해 부족 및 기술적인 어려움, 그리고 경제적 이유 등으로 인하여 인도에서 잘 받아들여지지 않고 있는 일반 보강토공법의 대체 공법으로서 그림 15와 같은 중력식 옹벽의 뒷채움 흙속에 벽체와 보강재를 연결시키지 않은 채 시공하는 공법을 제안하였다.

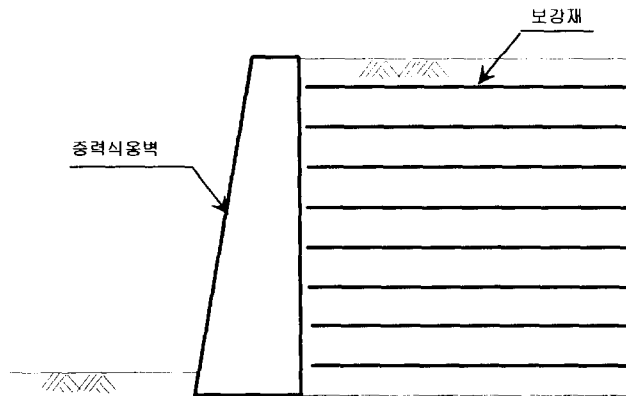


그림 15 중력식 옹벽뒤에 설치한 비정착 보강재

이러한 공법은 시공이 간편하고 보강재에 작용하는 인장력의 크기가 작기 때문에 값비싼 보강재 대신 대나무 등과 같이 주변에서 구하기 쉬운 재료로 손쉽게 보강효과를 낼 수 있다.

이들은 모형시험결과를 통해 벽체와 연결시키지 않은 보강재로 인한 토압의 감소정도는 약 50%이며, 보강재의 최적길이는 벽체높이의 0.6배 정도임을 밝혔다.

#### 역T형 옹벽에서의 비정착 보강토

한경제등은 비정착 보강공법에 대한 정량적인 분석을 위해 모형실험 및 이론적 해석을 실시하였다. 모형실험은 역T형 옹벽에 보강재로 뒷채움을 보강한 경우에 대한 것이다.

역T형 벽체의 뒷굽길기와 보강재의 배치를 달리하여 모형실험 및 이론적 분석을 실시한 결과에 의하면 토압이 무보강 상태에 비해 약 48% 정도 감소하며, 보강재의 길이가 옹벽 높이의 0.6배 이상이 되어야 보강재의 보강효과가 발휘되는 것으로 나타났다.

그림 16의 예는 암사면을 포함한 급경사지에 역T형 옹벽을 설치하는 경우이다. 이 경우 역T형 옹벽의 뒷굽이 암사면에 의해 제약을 받으므로 옹벽의 안정에 필요한 뒷굽길이의 확보에 어려움이 있으며, 옹벽의 단면증가에도 한계가 있다. 이러한 경우 역T형 옹벽의 배면 뒷채움 흙속에 비정착 보강재를 설치한다면 보강재로 인한 토압의 감소를 기대할 수 있으며 벽체의 안정성을 높일 수 있을 것이다.

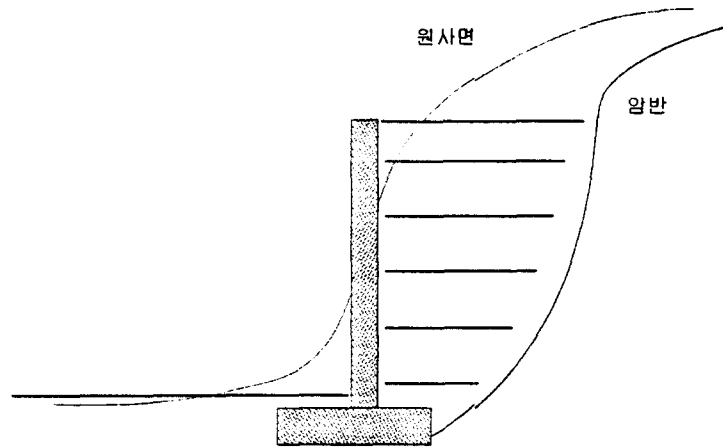


그림 16 급사면 지역에 대한 비정착식 보강토 역T형 옹벽

## 참 고 문 헌

1. 건설부 국립건설연구소(1981), " '81 보강토 공법연구 ", 건설연구소 자료, pp.73-121
2. 김운영, 김명모(1990), "도로교 표준시방서의 교대의 토압문제에 대하여", 한국지반공학회지 제6권 제3호, pp.77~87
3. 김홍택, 백영식(1992), "옹벽의 설계 및 발생토압에 관한 고찰", 한국지반공학회지, 제 8권, 제 4호, pp.99~117.
4. 한국건설기술연구원 (1985), "Geotextile 및 보강토 공법에 관한 연구", 한국건설기술연구원 연구보고서.
5. 한국도로공사 (1989), "보강토 공법", 한국도로공사 기술교재
6. 한경제, 최진오, 김운영, 김명모(1996), "벽체와 분리된 띠보강재를 사용한 역T형 옹벽의 모형실험", 한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp.47~64
7. LRFD Bridge Design Specification and Commentation
8. Bowles, J. E.(1988), *Foundation Analysis and Design*, McGraw-Hill Book Co., 4th Ed., pp.530~577.
9. Broms, B. B.(1978), *Design of Fabric Reinforced Retaining Structures, Proc. Sympo. on Earth Reinforcement*, ASCE, pp. 282~303.
10. Coduto, Donald P.(1994). *Foundation Design: principles and practices*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey.pp.699~704.
11. Das, B. M.(1990), *Principles of Foundation Engineering*, 2nd Ed., PWS-KENT Pub. Comp., Boston, pp.289~290.
12. Ingold, T. S.(1982), *Reinforced Earth*, Thomas Telford Ltd., London.
13. Jones, C. J. F. P.(1985), *Earth Reinforcement and Soil Structures*, Butterworths Co.
14. Saran, S., Garg, K. G. and Bhandary, R. K.(1992), *Retaining Wall with Reinforced Cohesionless Backfill*, ASCE, Vol. 118, No. 12, pp.1869~1888.
15. Teng, W. C.(1962), *Foundation Design*, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, pp.316~317.
16. Vidal, H.(1966), *La Terre Aremee*, Annales de L' Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics, pp.888~938.