

사질토에 시공된 앵커토류벽의 토압분포에 관한 연구

Earth Pressures of Tieback Walls in Sand

김 낙 경*

Kim, Nak - Kyung

Abstract

The design of a ground anchor wall consists of selecting an earth pressure diagram and calculating the design anchor force and the section modulus of the wall. The successful design of anchored walls depends primarily on the rational and proper selection of an earth pressure. Since the earth pressure acting on anchored walls depends on the geotechnical properties of the soil, the deflection of the wall, the wall stiffness, the soil arching, etc., no specific rational earth pressure distribution exists for anchored walls. In practice, Rankine triangular earth pressure diagram and the apparent earth pressure envelope developed by Terzaghi and Peck are commonly used for the design of anchored walls.

In this study, full scale anchored walls in sand were instrumented and constructed. Earth pressure distribution was obtained from the bending moment measurements by using cubic spline function. Earth pressures obtained from the measurement were compared with the Rankine earth pressure and with the apparent earth pressure envelope, and then were evaluated for the design of the anchored wall in sand. It is concluded that the apparent earth pressure by Terzaghi and Peck is appropriate for the anchored wall design in sand.

요 지

사질토 지반에 시공된 앵커토류벽의 설계는 각 시공 단계에 따른 토압 분포를 가정하고 앵커의 설계하중을 결정함으로써 토류벽의 설계 단면을 산정한다. 따라서 안전하고 경제적인 토류벽 설계에 있어 가장 기본적이고 필수적인 요소는 앵커 토류벽에 작용하는 토압분포의 올바른 이해와 선택에 있다.

앵커토류벽에 작용하는 토압분포는 배면토의 지반공학적 성질, 토류벽의 변위 양상, 토류벽의 강성, 흙의 아칭 효과 등에 따라 크게 변하므로 토압분포를 산정하는 것은 매우 어려운 일이다. 앵커 토류벽에 작용하는 토압분포의 가정은 크게 삼각형 분포의 Rankine 토압, Terzaghi와 Peck이 제안한 직사각형 분포의 겉보기토압이 적용되고 있다.

본 연구에서는 실험크기의 앵커토류벽으로부터 측정한 휨모멘트 결과로부터 Cubic Spline

* 정회원, 성균관대학교 공과대학 토목공학과 전임강사

Function을 이용하여 토류벽에 작용하는 토압분포를 시공단계별로 산정하여 설계에 이용되는 토압 분포와 비교하였다. 또한 앵커 토류벽의 설계에 적용되는 Rankine 토압분포를 이용하는 Canadian Geotechnical Society 방법과 Terzaghi와 Peck이 제안한 걸보기토압을 이용한 설계방법을 현장시험 결과와 비교하여 분석하였다.

본 연구의 결론으로는 앵커 설계하중, 최대 휨모멘트의 산정 방법에 있어 30% 정도의 안전율을 고려할 때 Terzaghi 와 Peck 토압을 이용한 단순보 힌지법이 Rankine의 주동토압보다 적합하다는 사실을 입증하였다.

Keywords : Earth pressure, Anchored wall, Tieback wall, Retaining wall, Apparent earth pressure

1. 서 론

도시지에서 대형 구조물의 건설이 늘어나면서 앵커토류벽의 적용사례가 늘어나고 있으며 그 안정성에 관한 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있다 (Clough와 Tsui, 1974; Nicholson et al., 1982; Otta et al., 1982; Pfister et al., 1982; Weatherby, 1982, Cheney, 1988, Briaud et al., 1994; Briaud와 김낙경, 1998; Briaud et al., 1998; 김낙경, 1998). 앵커토류벽의 설계는 각 시공 단계에 따른 토압분포를 산정하고, 앵커의 개수 및 간격을 결정하여 앵커의 설계하중과 토류벽의 설계단면을 결정함으로써 수행된다. 그러므로 안전하고 경제적인 토류벽 설계에 있어 가장 필수적인 요소는 앵커토류벽에 작용하는 토압 분포의 올바른 선택이다.

앵커토류벽에 작용하는 토압분포는 배면토의 지반공학적 성질, 토류벽의 변위 양상, 토류벽의 강성, 흙의 아칭 효과 등에 따라 크게 변하므로 토압 분포를 산정하기는 매우 어려운 일이다. 앵커토류벽에 작용하는 토압분포는 크게 삼각형 분포의 Rankine 토압, Terzaghi와 Peck이 제안한 직사각형 분포의 경험적인 걸보기토압이 설계에 적용되고 있다.

2. Rankine의 주동 토압

Rankine의 토압이론은 토류벽에 작용하는 토압을 삼각형 분포로 표시한다. 이 이론은 주

로 강성 토류벽의 설계에 널리 이용되어 왔으나 1950년대 중반부터 앵커로 지지된 연성 토류벽의 설계에도 사용되어 왔다. 지반과 벽체 사이의 마찰이 없는 것으로 가정하며 벽체 변위의 방향에 따라 다음과 같이 정의된다.

$$\text{주동토압} : P_a = K_a \sigma'_{av} - 2c\sqrt{K_a} + u \quad (1)$$

$$\text{정지토압} : P_o = K_o \sigma'_{av} + u \quad (2)$$

$$\text{수동토압} : P_p = K_p \sigma'_{av} + 2c\sqrt{K_p} + u \quad (3)$$

여기서, K_a = Rankine의 주동 토압 계수

K_o = Rankine의 정지 토압 계수

K_p = Rankine의 수동 토압 계수

σ'_{av} = 유효 상재응력

c = 지반의 점착력

u = 간극 수압

앵커토류벽의 설계에 적용된 Rankine 설계 토압의 사례를 연구하여 보면, 다음 표에서 나타난 바와 같이 주동토압에서 정지토압까지의 토압을 고려하여 설계에 이용하고 있다.

표. 1. Rankine토압을 이용한 앵커토류벽의 설계

참 고 문 헌	Rankine 토압
Mansur & Alizadeh(1970)	정지토압
Rizzo, et. al.(1968)	주동에서 정지토압
Hanna & Matallana(1970)	주동에서 정지토압
Oosterbaan & Gifford(1972)	주동토압
Larsen, et.al.(1972)	주동에서 정지토압

굴착 단계에 따른 토압에 관한 연구가 활발히 진행 됨에 따라 Rankine의 토압을 이용한 앵커 토류벽의 설계법이 제안되었으며 (Canadian Geotechnical Society, 1985) 간략하

게 그 과정을 설명하면 그림 1에 나타난 바와 같이 앵커의 설계하중과 근입깊이를 구한 후 전단력이 영이 되는 지점에서 최대 휨모멘트를 계산하여 설계 단면력을 산정한다.

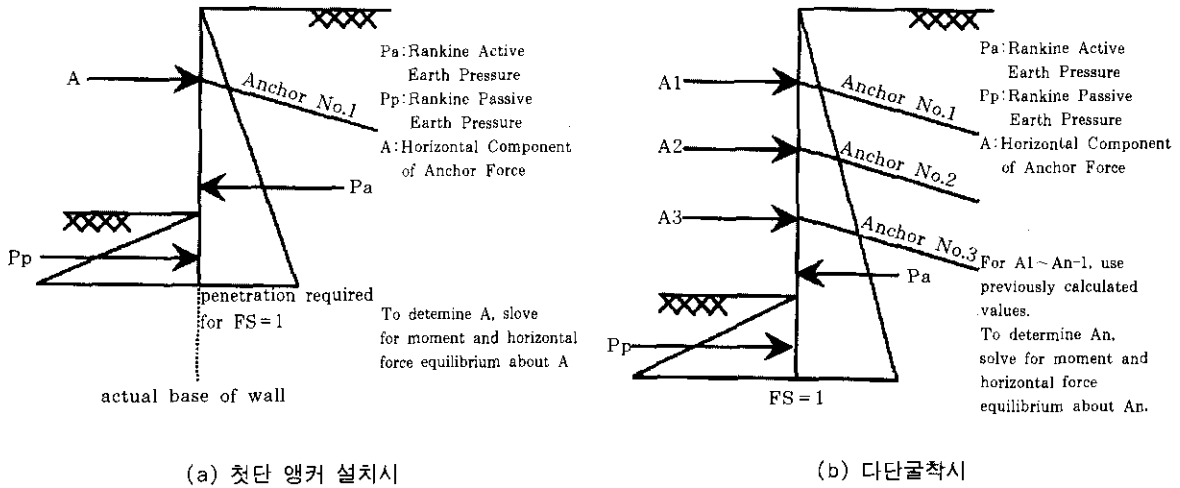


그림 1. Rankine 토압을 이용한 앵커 토류벽의 설계 방법

3. 경험적 겉보기 토압

버팀보 또는 앵커로 억지된 연성토류벽의 경우 강성토류벽과는 달리 억지된 토류벽 배

면의 지반에서는 주동토압을 유도할 만큼의 변위가 억제되므로 주동토압보다는 그 크기가 크게 된다. 따라서 실제 토압의 분포는 그림 2에서 보는 바와 같다.

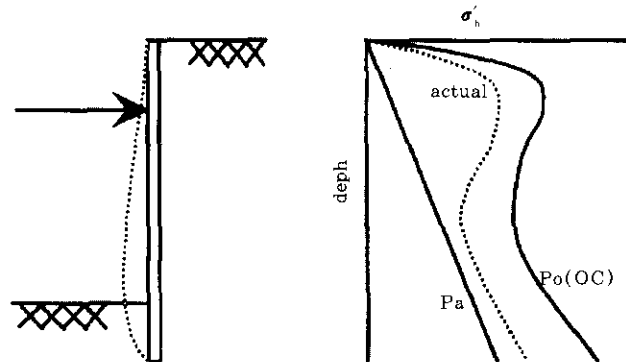


그림 2. 토류벽의 변형에 따른 토압 분포

버팀보로 지지된 연성토류벽의 시공이 활발해지면서 현장계측 결과를 토대로한 토압분포가 여러 학자들에 의해 제시되었다. 연성 토류벽에 작용하는 토압분포는 강성토류벽에 작용하는 삼각형 분포와는 달리 사다리꼴 또는 직사각형에 가까운 분포를 나타내고 있다 (Terzaghi & Peck, 1967, Tschebotarioff, 1973,

Scnabel, 1982). 사질토에 시공된 버팀보토류벽에 작용하는 토압분포는 그림 3에서 보는 바와 같이 단순한 분포형태를 가진 겹보기도압으로서 실제 작용예상 토압보다 약 30%가량 크게 산정된 설계토압으로 앵커토류벽의 설계에 주로 이용되어왔다.

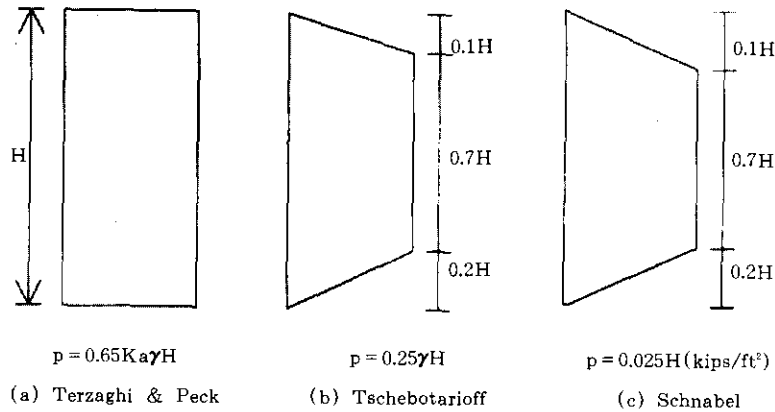


그림 3. 사질토에 시공된 버팀보 토류벽의 겹보기 토압 분포

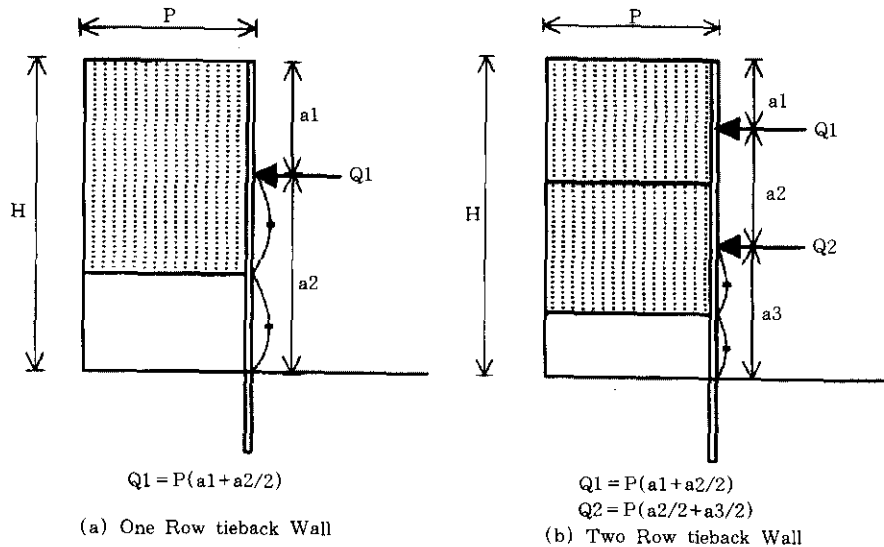
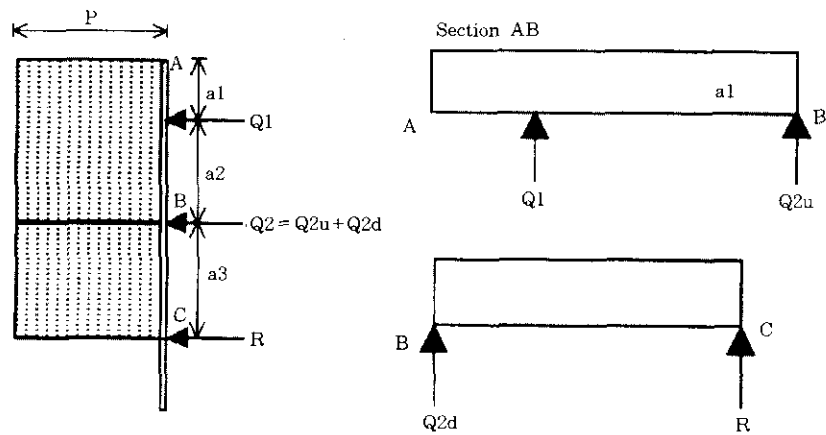


그림 4. 분할법에 의한 설계하중의 계산

경험적 겉보기토압을 이용한 앵커의 설계하중 산정방법은 크게 분할법 (Tributary Method)과 단순보 힌지법 (Hinge Method)으로 분류된다. 분할법은 그림 4에서와 같이 설계토압이 선정되면 앵커 숫자에 따라 토압을 분할하여 각 앵커에 할당하는 방법이며 Terzaghi와 Peck (1967)이 버팀보 토류벽의 겉보기토압을 계산할 때의 역순으로 되어있다.

단순보 힌지법(Lambe and Wolfskill, 1970) 토류벽을 내민보가 있는 단순보로 가정하여 지점 반력을 구하여 앵커의 설계하중을 계산하는 방법으로 그림 5에 나타나 있다. 앵커의 설계하중을 결정한 후 내민보에 의한 모멘트와 앵커 중간지점에서의 모멘트 중에서 큰 값으로 설계 최대 휨모멘트를 산정한다.



(a) Earth Pressure

(b) Simple Beam with Hinges at B and C

$$Q1 = \frac{P(a1+a2)^2}{2a2}$$

$$Q2 = Q2u + Q2d$$

$$R = Pa3 - Q2d$$

$$Q2u = P(a1+a2) - Q1$$

$$Q2d = P \frac{a3}{2}$$

그림 4. 단순보 힌지법에 의한 설계하중의 계산

4. 현장시험에 의한 시공단계별 토압

4.1 앵커토류벽의 현장시험

사질토 지반에서 앵커로 억지된 토류벽의 거동을 연구하기 위하여 텍사스에이엔엠 대학에 소재한 미국 국립토질시험장에 계측기가 장착된 실물 크기의 앵커토류벽을 시공하였다 (Briaud와 김낙경, 1994). 현장 지반 조건이

그림 6에 나타나 있으며 앵커 토류벽의 단면이 그림 7에 표시되어있다.

엄지말뚝의 앞뒷면에 변형률 게이지를 장착하여 휨모멘트를 측정하였으며, 앵커상단에 하중계를 설치하여 앵커하중을 계측하고, 경사계로부터 토류벽의 변위를 측정하였다 (김낙경, 1998). 시공단계에 따른 토류벽체의 변위, 휨모멘트를 측정하여 그림 8과 그림 9에 표시하였다.

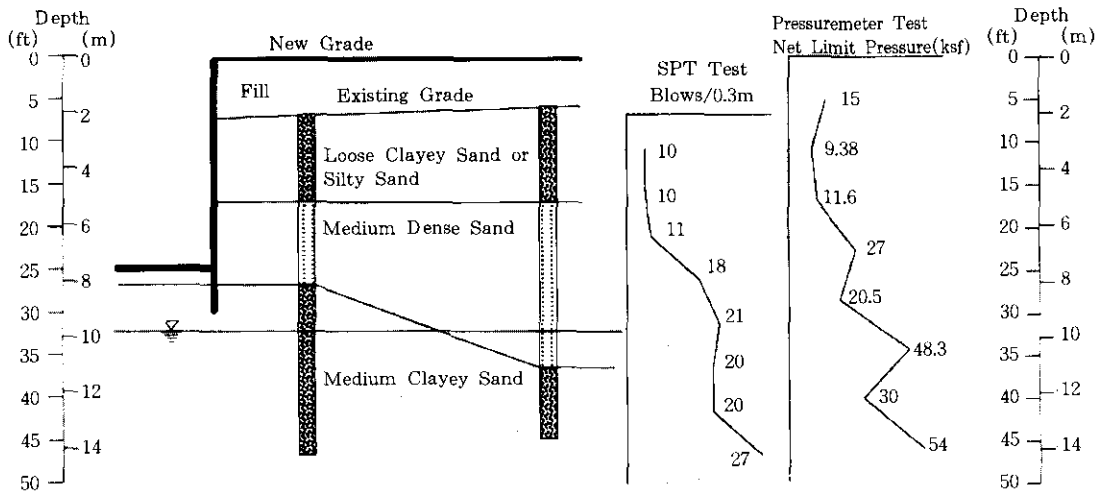
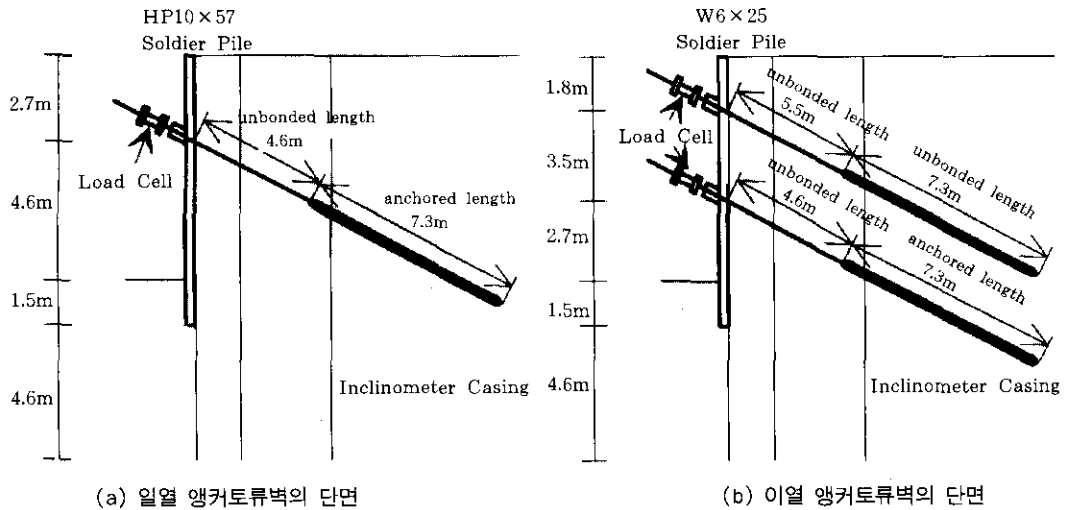


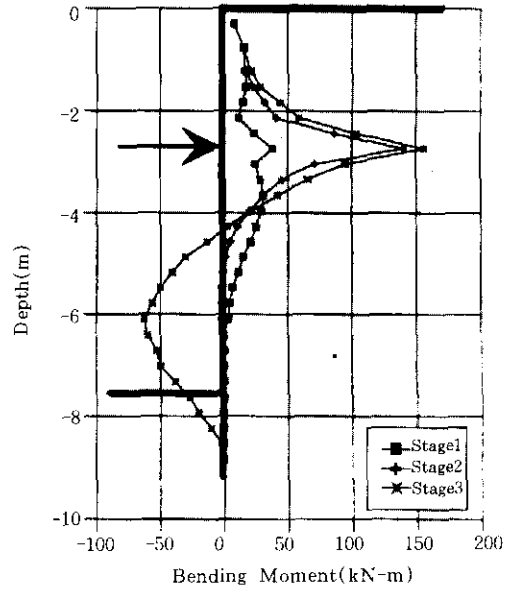
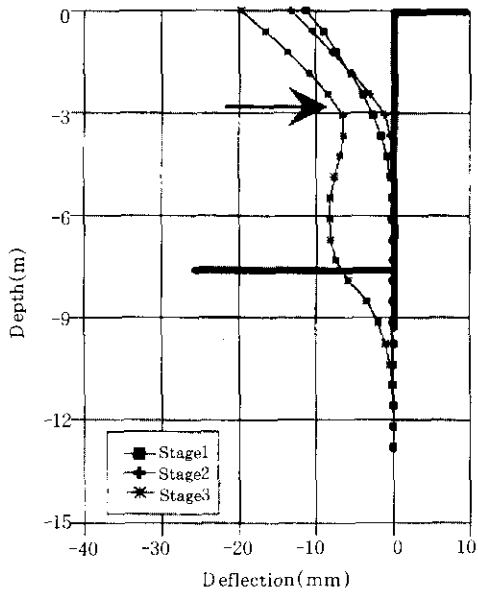
그림 6. 현장 지반조건



(a) 일열 앵커토류벽의 단면

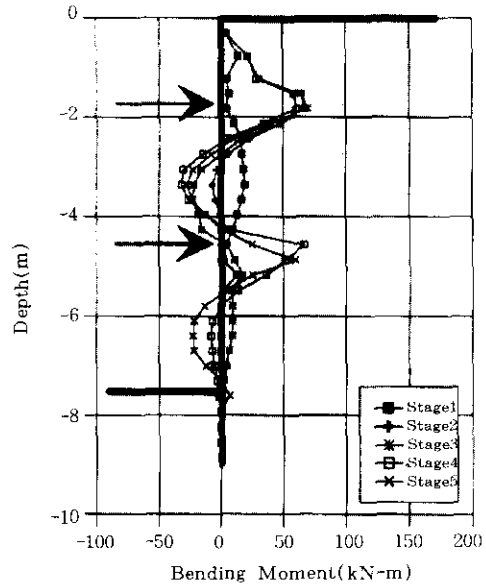
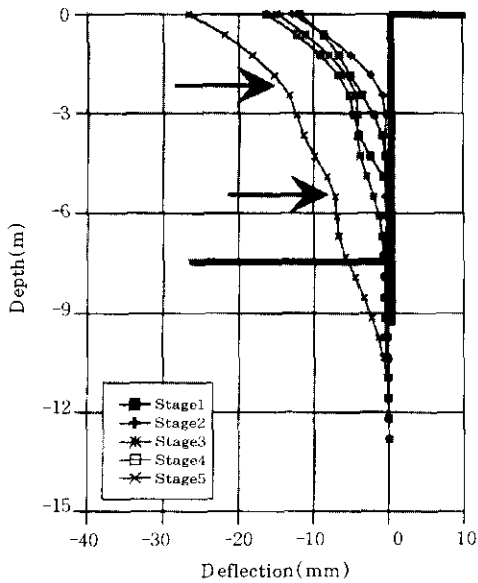
(b) 이열 앵커토류벽의 단면

그림 7. 앵커 토류벽의 단면



Note : Stage 1 - 3.1m 굴착
 Stage 2 - 2.7m에 앵커설치
 Stage 3 - 7.6m 최종굴착

그림 8. 일열 앵커토류벽의 변위 및 모멘트



Note : Stage 1 - 2.4m 굴착
 Stage 2 - 1.8m에 상단 앵커설치
 Stage 3 - 5.2m에 하단 앵커설치

Stage 4 - 4.9m에 하단 앵커설치
 Stage 5 - 7.6m 최종굴착

그림 9. 이열 앵커토류벽의 변위 및 모멘트

4.2 Cubic Spline 함수를 이용한 토압 산정 방법

토류벽 배면에 작용하는 토압분포를 산정하기 위한 방법은 토압계를 설치하여 직접 구하거나 토류벽체의 휨모멘트를 측정하여 토압을 계산해내는 방법이 있다. 보 이론에서 휨모멘트와 토압 p 와의 관계는 다음에서와 같이 표시할 수 있다.

$$p = \frac{d^2M}{dz^2} \quad (4)$$

여기서, M 은 휨모멘트

p 는 토압

z 는 토류벽 상단으로부터의 깊이

한편, 실측된 휨모멘트 자료는 계측기의 파손, 온도의 영향, 국부적인 변형 기타 등의 이유로 연속적인 2계 미분 값을 구하기는 사실상 불가능하다. Cubic Spline 함수는 연속적인 1계, 2계 미분 값을 갖는 함수로서 실측된 휨모멘트 값에 적용하고 함수의 내삽값(Interpolant)을 구함으로써 실측 자료의 연속성을 확보하여 2계 미분값, 즉 토압을 계산해 낼 수 있다. Cubic Spline 함수는 다음과 같이 정의되며 다음조건을 만족하여야 한다.

$$S_j = a_j + b_j(z - z_j) + c_j(z - z_j)^2 + d_j(z - z_j)^3 \quad (5)$$

1) S_j is a Cubic Function on

$$[z_j, z_{j+1}] \quad j=0, 1, \dots, n-1 \quad (5.1)$$

2) $S_j(z_j) = f(z_j), \quad j=0, 1, \dots, n \quad (5.2)$

3) $S_{j+1}(z_{j+1}) = S_j(z_{j+1}), \quad j=0, 1, \dots, n-2 \quad (5.3)$

4) $S'_{j+1}(z_{j+1}) = S'_j(z_{j+1}), \quad j=0, 1, \dots, n-2 \quad (5.4)$

5) $S''_{j+1}(z_{j+1}) = S''_j(z_{j+1}), \quad j=0, 1, \dots, n-2 \quad (5.5)$

6) 경계조건

$$S''(z_0) = S''(z_n) = 0 \quad (5.6)$$

$$S''(z_0) = f''(z_0) \text{ and } S''(z_n) = f''(z_n) \quad (5.7)$$

앵커토류벽에 작용하는 토압분포를 구하기 위해서는 연속적으로 분포하는 휨모멘트 결과가 있어야 하므로 일열 앵커토류벽의 휨모멘트 결과를 이용하였다. 이열 앵커가 설치된 단면에서는 앵커부위의 게이지의 파손으로 휨모멘트

트 결과로부터 토압분포를 구할 수가 없었다. 토류벽의 상단에서부터 앵커까지와 앵커 하단부터 토류벽 근입부 선단까지 두 부분으로 분할하여 해석하였으며 IMSL 패키지의 Cubic Spline 함수 서브루틴을 이용하였다. 휨모멘트 실측치와 Cubic Spline 함수를 적용하여 구한 내삽값의 차이는 그림 10에서와 같이 거의 없으며 시공단계별로 토류벽 배면의 토압분포가 그림 11에 나타나있다.

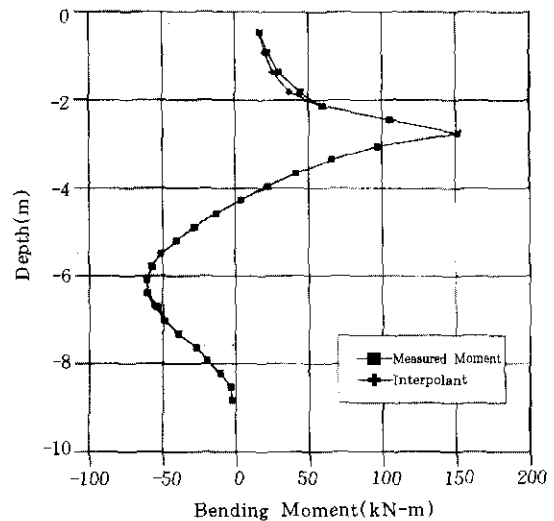


그림 10. 앵커토류벽의 휨모멘트 실측치와 Cubic Spline 함수의 내삽값의 비교

4.3 앵커토류벽에 작용하는 토압분포의 비교

Cubic Spline 함수를 이용하여 실험실 크기의 현장시험으로부터 구한 토압분포를 Rankine의 삼각형 분포 토압, 절보기 토압 중에서 가장 일반적으로 사용되는 Terzaghi와 Peck의 직사각형 절보기 토압과 비교하면 그림 12에서 나타나있는 바와 같이 서로 다르다는 것을 알 수 있다. 각 토압분포의 합력의 크기를 Terzaghi와 Peck 토압에 대한 백분율로 표시하고 ($K_a = 0.3$, 흙의 단위중량 = 18.1 kN/m^3) 굴착면으로부터 그 작용점을 구하여 비교하면 표 2에 나타난 바와 같다.

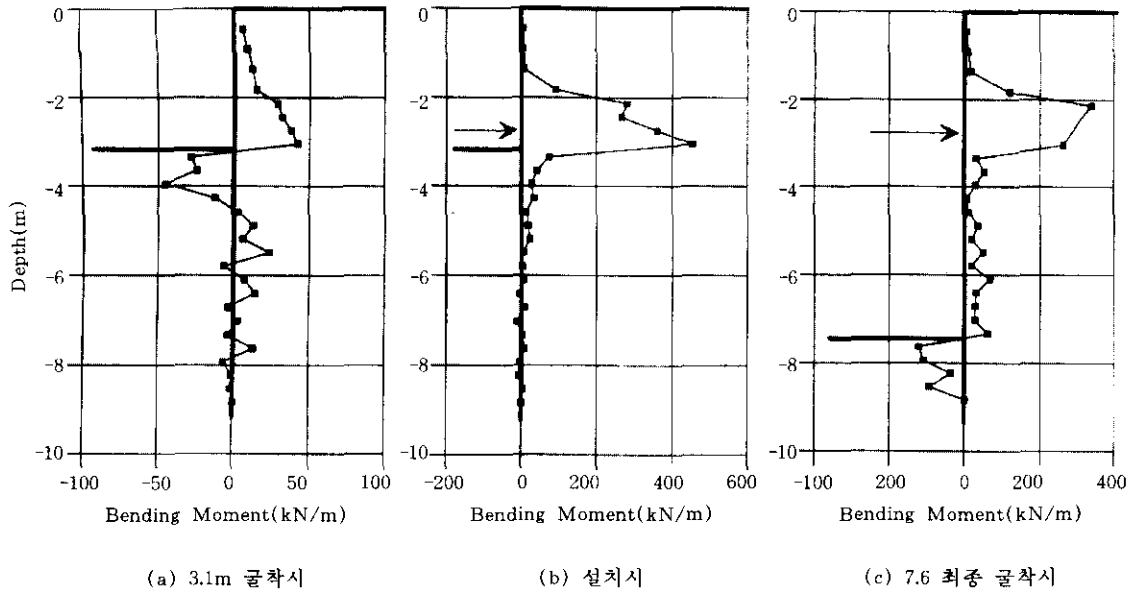


그림 11. 시공 단계별 토압 분포

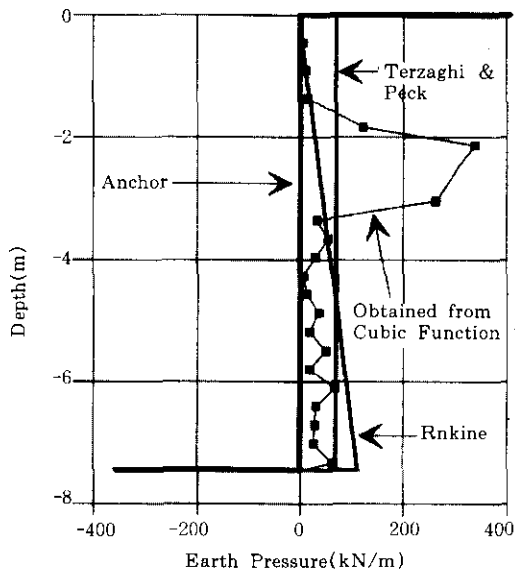


그림 12. 토압 분포의 비교

표 2. 토압의 합력과 작용점

토 압	합력크기	작용점
Rankine 주동토압	77%	0.33
Rankine 정지토압	128%	0.33
Terzaghi & Peck	100%	0.5
Tschebotarioff	109%	0.53
Schnabel	89%	0.5

5. 앵커토류벽의 설계토압

앵커토류벽의 설계는 설계토압을 산정하여 앵커의 설계하중과 최대 휨모멘트를 구하여 토류벽 단면산정을 하므로 올바른 설계토압을 선정해야한다. 앞서 기술한대로 앵커토류벽에 실제로 분포하는 토압은 Rankine의 토압 또는 Terzaghi와 Peck의 토압과 다르다. 그러므로 가장 널리 사용되는 Rankine의 토압분포를 이

표 3. 일열 앵커토류벽의 앵커하중과 최대 휨모멘트

	앵커하중(kN)	최대 휨모멘트(kN-m)
Rankine 주동토압	294	354
Terzaghi & Peck	403	246
실측치	328	158

표 4. 이열 앵커토류벽의 앵커하중과 최대 휨모멘트

	상단 앵커하중(kN)	하단 앵커하중(kN)	최대 휨모멘트(kN-m)
Rankine 주동토압	208	118	400
Terzaghi & Peck	295	178	109
실측치	190	148	90

용하는 Canadian Geotechnical Society 방법과 Terzaghi-Peck 토압을 이용한 단순보 힌지방법으로 구한 앵커의 설계하중과 최대 휨모멘트를 실측치와 비교하여 보면 일열 앵커토류벽의 경우는 표3에, 이열 앵커토류벽은 표4에서와 같다.

표3과 표4에서 보듯이 앵커의 설계하중은 Terzaghi와 Peck 토압분포를 사용한 단순보 힌지법이 20~55% (평균 약 33%) 크게 산정되었으며 Rankine의 주동토압을 이용한 Canadian Geotechnical Society 방법은 이열 앵커토류벽의 상단앵커는 9% 크게 산정되었고 나머지는 10~20% 정도 작게 산정되었다. 한편, 설계 최대 휨모멘트는 Terzaghi와 Peck

토압분포를 사용하여 단순보힌지법으로 구한 것이 실측치보다 21~55% (평균 약 38%) 크게 산정되었고 Rankine의 주동토압을 이용한 Canadian Geotechnical Society 방법은 123~340% 크게 산정되었다.

한편, 계측된 앵커하중을 이용하여 그림 13에서와 같이 직사각형의 걸보기토압을 구하여 보면 일열 앵커토류벽에서는 Terzaghi와 Peck 토압의 82%, 이열 앵커토류벽에서는 77%가 산정되었다. 이는 앵커의 설계하중과 최대 휨모멘트 산정시 30% 정도의 안전율을 고려할 때 Terzaghi와 Peck 토압을 이용한 단순보 힌지법이 가장 적합하다는 것을 보여주고 있다.

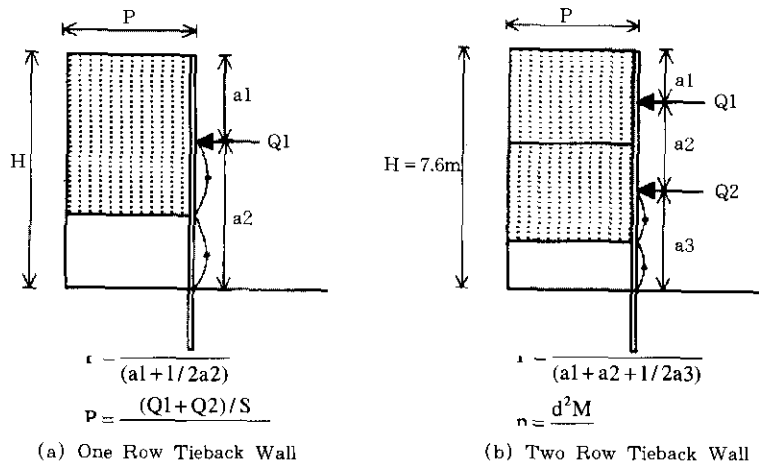


그림 13. 앵커의 하중으로부터 구한 걸보기토압

6. 결 론

본 연구에서는 앵커토류벽의 실험크기 현장 시험 계측결과를 이용하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 계측기가 설치된 실험크기의 앵커토류벽을 시공하여 시공단계 별로 변위, 앵커하중, 휨모멘트를 측정하였으며 휨모멘트 분포로부터 Cubic Spline 함수를 이용하여 시공단계별 토압분포를 산정하였다.
- (2) 실측치로부터 구한 토압분포와 기존의 토류벽 설계에 적용하고 있는 Rankine 토압과 Terzaghi와 Peck 토압을 비교하였으며 사질토에 시공된 엄지말뚝-토류판공법에서 앵커의 설계하중과 최대 휨모멘트는 30 % 정도의 안전율을 고려할 때 Terzaghi와 Peck 토압을 이용한 단순보 힌지법을 사용하여 구하는 것이 가장 적합하다는 사실을 입증하였다.

감사의 글

본 연구는 미 연방 도로국(FHWA)과 Schnabel Foundation Company의 연구비 지원으로 University of Illinois, Prototype Engineering, Texas A&M University와 공동 수행되었으며 Dr. Briaud, Dr. Cording, Dr. Long 그리고 David Weatherby에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김낙경 (1998), "Measured Performance of Tieback Walls in Sand", 한국지반공학회지, 제 14권 제3호.
2. Briaud, J.L. and Kim, Nak-Kyung (1998), "Beam-column Method for Tieback Walls", *Proc. ASCE, J. of Geotechnical & Geoenvironmental Eng.*, Vol.124, No.1, pp69-79.
3. Briaud, J.L., Kim, Nak-Kyung, Chung, M.K. and Powers, W. (1994), *Permanent Ground Anchor Wall*, Report to Schnabel Foundation Co., Sterling.
4. Briaud, J.L., Powers, W. and Weatherby, D. (1998), "Should Grouted Anchors Have Short Tendon Bond Length?," *Proc. ASCE, J. of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, Vol.124, No.2, pp110-119.
5. Canadian Geotechnical Society, (1985), *Canadian Foundation Engineering Manual*, 2nd Ed., Vancouver, B.C.
6. Cheney, R.S. (1988), *Permanent Ground Anchors*, Report to Federal Highway Administration, FHWA-DP-68-1R, Washington, D.C.
7. Clough, W.G. and Tsui, Y. (1974), "Performance of Tieback Walls in Clay", *Proc. ASCE, J. of Geotechnical Eng.*, Vol.100, pp1259-1273.
8. Hanna, T.H. and Matallana, G.A. (1970), "The behavior of Tieback Retaining Walls", *Proc. Canadian Geotechnical Journal*, Vol.7, No.4, pp372-396.
9. Lambe, T.W. and Wolfskill, A.L. (1970), "Measured Performance of Braced Excavation", *Proc. ASCE, SM6*, Vol.95, pp817-836.
10. Mansur, C.I. and Alizadeh, M. (1970), "Tiebacks in Clay to Support Sheeted Excavation", *Proc. ASCE, SM2*, Vol.96, pp495-529.
11. Nicholson, P.J., Uranowski, D., and Wycliffe-Jones, P.T. (1982), *Permanent Ground Anchors : Nicholson Design Criteria*, Rep. FHWA/RD-81/151, U.S. Dept. of Transportation, Fed. Hwy. Admin., Washington, D.C.
12. Larson, M.L., Willette, W.R., Hall, H.C., Gnaedinger, J.P. (1972), "A Case Study of a Soil Anchor Tieback System", *Proc. Specialty Conf. on Performance of Earth and Earth-*

- supported Structures*, Purdue Univ., Vol.1, pp1323-1343.
13. Otta, L., Pantueck, M. and Goughnour, R. (1982), *Permanent Ground Anchors : Stump Design Criteria*, Rep. FHWA/RD-81/152, U.S. Dept. of Transportation, Fed. Hwy. Admin., Washington, D.C.
 14. Pfister, P., G. Evers, M. Guillaud, and R. Davidson. (1982), *Permanent Ground Anchors, Soletanche Design Criteria*, FHWA/RD-81/150, U.S. Dept. of Transportation, Fed. Hwy. Admin., Washington, D.C.
 15. Oosterbaan, M.D. and Grifford, D.G. (1972), "A Case Study of the Bauer Anchor" *Proc. Specialty Conf. on Performance of Earth and Earth-supported Structures*, Purdue Univ., Vol.1, pp1391-1402.
 16. Rizzo, P.C., Ellison, R.O., Shafer, R.J. (1968), *Prestressed Tieback Walls for Two Deep Excavation in Buffalo, New York*, ASCE Meeting, Pittsburgh, September.
 17. Schnabel, H.J. (1982) *Tiebacks in Foundation Engineering and Construction*, McGraw-Hill Book Co., New York.
 18. Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1967), *Soil Mechanics in Engineering Practice*, Wiley, New York.
 19. Tschebotarioff, G.P. (1973), *Foundations, Retaining and Earth Structures*, McGraw-Hill Book Co., New York.
 20. Weatherby, D.E. (1982), *Tiebacks*, Report to FHWA/RD-82/047, U.S. Dept. of Transportation, FHWA, Washington, D.C.

(접수일자 1998. 2. 18)