

연약지반 흙막이벽에 작용하는 토압 및 변위에 관한 연구

A Study of Earth Pressure and Deformation acting on the Flexible Wall in Soft Soil

박 영 목*

Park, Yeong-Mog

정 연 인**

Chung, Youn-In

Abstract

Recently the deep and large excavations are performed near the existing buildings in urban areas for the practical use of underground space. The earth pressure due to the excavation are varied according to the conditions of ground, the depth of excavation, the construction methods, and the method of supporting the earth pressure etc.. In this study, not only the behavior of axial load and distribution of earth pressure on the flexible wall according to stage excavation depth but also magnitude and distribution of lateral deformation, and the equivalent earth pressure from strut axial loads were analyzed by the results measured from instruments such as, load cells, strain gauges, and in-situ inclinometer, on the field of subway construction. According to the results of this study in the case of stage excavation the earth pressure of soft clayey soil is compounded with Terzaghi-Peck and Tschobotarioff.

요 지

최근 도심지 지하공간 활용을 위한 굴착공사가 기존의 건물주변에서 대형화, 대심도화 되고 있다. 굴착공사에서 발생하는 토압은 지반조건, 굴착깊이, 시공방법, 벽체 지지구조 등과 같은 여러 가지 요인에 의해 영향을 받으므로 정확히 산정하기가 매우 어렵다. 본 연구에서는 지하철건설현장에 설치된 하중계, 변형율계, 지중경사계와 같은 현장계측기로부터 측정된 계측자료를 선정하여 지반굴착시 흙막이벽체의 최대수평변위와 분포형태 그리고 실측된 Strut 축력으로부터 환산토압을 산정하여 단계별 굴착깊이에 따른 축력거동 양상과 토압분포 형태를 비교·검토하였다. 연구결과 점성토 지반에서의 실측토압은 Tschobotarioff의 경험토압과 Terzaghi-Peck의 경험토압의 합성 형태를 보이고 있다.

Keywords : Earth Pressure, Deformation, Flexible Wall, Soft Soil, Stage Excavation, Axial Load, Inclinometer

* 정희원, 영남대학교 토목도시환경공학부 토목공학전공 부교수

** 정희원, 계명대학교 공과대학 토목공학과 부교수

E-mail : cyi@kmu.ac.kr 016-501-5705

• 본 논문에 대한 토의를 2003년 9월 30일까지 학회로 보내 주시면 2004년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

굴착공사에서 발생하는 토압은 지반조건, 굴착깊이, 시공방법, 벽체 지지구조 등과 같은 여러 가지 요인에 의해 영향을 받으므로 정확히 산정하기가 매우 어렵다. 이와 같은 어려움을 해소하기 위하여 Terzaghi-Peck(1967), Tschebotarioff(1973) 및 NAVFAC(1982)은 버팀보로 지지되는 흙막이벽을 대상으로 현장계측을 통해 경험적으로 얻어진 토압분포를 제안하였다. 그러나 국내 연약지반 특성을 고려한 버팀보 지지방식에 의한 토압 분포와 제안된 경험 토압과의 관계는 현재까지도 규명되지 않고 있다. 따라서 본 연구는 대구지역 연약지반 조건에 적합한 합리적인 토압분포를 찾아내어 추후의 설계에 적용하기 위한 기준을 마련하는데 목적이 있다.

본 연구에서는 버팀보 지지방식으로 시공된 지하철 Main-Line 버팀보에 설치된 응력계와 흙막이 벽체 배면에 설치된 경사계로부터 계측된 실측자료를 근거로 하여 굴착에 따른 흙막이벽에 작용하는 토압 분포 및 수평변위에 대한 연구를 수행한다. 이를 위하여 대구지하철 ○○현장에 설치된 하중계, 변형율계, 지중 경사계와 같은 현장계측기로부터 측정된 계측자료를 선정하여 지반굴착시 흙막이벽체의 최대수평변위와 분포형태 그리고 실측된 Strut 축력으로부터 환산토압을 산정하여 단계별 굴착깊이에 따른 축력저동 양상과 토압분포 형태를 비교·검토 한다. 또한 현장실측치로부터 얻은 토압 분포 양상과 현재 국내에서 널리 사용되고 있는 경험토압과의 차이점을 비교·분석하여 대구지역 연약지반 특성에 적합한 토압분포 형태를 제시한다.

2. 연성벽체에 작용하는 토압

H말뚝과 흙막이 널을 이용한 흙막이 벽체 및 지지 시스템 등의 단면계산에 사용되는 토압 분포는 경험 및 현장에서 계측된 토압 분포를 토대로 제안된 값을 사용하고 있다. 흙막이벽의 설계에 사용하는 토압은 근입부분의 토압분포를 합리적으로 파악하는 방법이 확립되어 있지 않기 때문에 흙막이벽의 근입깊이를 구하는 경우와 흙막이 구조물 설계시 단면을 결정하

는 경우에 각각 다르게 가정한다. Terzaghi-Peck, Tschebotarioff, NAVFAC 등은 굴착현장의 실측 결과로부터 설계에 필요한 경험적인 토압 분포를 제시하였다. 다단식 버팀을 이용한 굴착에 있어서의 흙막이 벽에 작용하는 토압분포는 고전적인 Coulomb이나 Rankine의 소성평형이론에 의한 형태가 아니라는 것은 Terzaghi and Peck에 의해 밝혀졌다. 그 후 Tschebotarioff는 토압의 분포가 깊이에 따라 증가되지 않고 사다리꼴 모양이라고 제안하였고, Terzaghi-Peck은 많은 현장계측과 관찰을 토대로 토압의 크기가

$$\gamma H \left(1 - \frac{4Cu}{\gamma H}\right)$$

이며 사다리꼴분포라고 주장하였다.

이러한 반경험적(Semi-empirical) 겉보기토압(Apparent pressure)은 연성벽체의 버팀 굴착시 상부 버팀보가 설치된 후이므로 이 지점을 축으로 회전하게 되어 상부버팀보 부근 토압은 상대적으로 감소되어 사다리꼴이나 직사각형 토압분포를 나타낸다.

3. 현장상황 및 계측 결과

3.1 지반조건 및 계측기 설치 현황

본 현장은 ○○강 인근지역으로 두꺼운 모래, 자갈 및 실트쉬인 점토 퇴적층이 발달되어 있어 지반굴착시 과도한 지하수 유출로 주변지반의 변형 및 침하가 우려되어 “H-PILE + 토류CON'C + 차수보강토류공(SCR)” 공법을 적용하였다. 차수벽과 토류CON'C를 지지하기 위한 버팀보의 수직간격은 1.5~2.3m이고 수평간격은 2.5m이다. 차수벽의 근입깊이는 풍화암 -1.0m까지 근입시켰다. Table 1은 흙막이 구조물에 사용된 재료의 제원을 나타낸다.

Table 1 흙막이 구조물에 사용된 재료의 제원

항 목	채 택 공 법	주 요 용 도
흙막이벽	SCR 그라우팅 토류 CON'C H - 300×305×15×15	가시설 벽체
띠 장	H - 300×305×15×15	공사중 지지
버 팀 보	H - 298×299×9×14	공사중 지지
토공사 양수	강 제 배 수	토공사 진행

Table 2 지반조사 결과

토층	구분	두께 (m)	습윤단위중량 (t/m ³)	수중단위중량 (t/m ³)	내부 마찰각 (°)	점착력 (t/m ²)	주동토압계수 (Ka)
매립토		2.5	1.8	0.8	28	0	0.361
실트질 점토		8.5	1.8	0.8	20	1.5	0.490
실트질 점토		3.0	1.8	0.8	23	3	0.438
실트질 점토		5.0	1.8	0.8	23	4	0.438
실트질 점토		5.5	1.8	0.8	23	5	0.438
모래섞인 점토		5.5	1.8	0.8	30	7	0.333

지반조사 결과에 의하면 본 현장에 분포하고 있는 지질의 연직분포는 지표면으로부터 18.2m까지 매립토, 실트질 점토, 자갈, 암반으로 구성되어 있으며 하부로 갈수록 견고해지는 전형적인 하천유역의 퇴적층 지역이다.

본 구간에 설치된 계측기는 경사계, 응력계로서 경사계설치 심도는 G.L.-22.7m로 H-PILE 근입 심도까지 매설되어 있고 응력계는 2, 4, 6단에 설치되어 있다.

3.2 버팀보 축력

당 현장의 버팀보 지지 흙막이벽 굴착현장에 설치된 응력계, 경사계의 계측치를 활용하여 흙막이벽의 거동을 조사하였다.

Fig. 1 ~ Fig. 3는 단계별 굴착에 따른 버팀보 축력을 도시한 결과이다. 버팀보에 응력계를 부착하여 축력을 측정하였으며 축력의 변화를 중축으로 표기하고 일자로 계산된 측정시간은 횡축으로 도시하였다.

4K+150 지점의 경우 굴착시 계측결과를 살펴보면 버팀보에 응력계를 부착하고 1주일 이내 급격한 축력의 증가를 나타내다 일정한 상태를 유지하거나 감소를 나타내었으며, 특히 하위단 설치이후 버팀보에 작용하는 축력은 수렴양상을 나타내는 것을 알 수 있다. 계측자료가 수렴한 이후 버팀보에 작용하는 축력은 2단 28tonf, 4단 5tonf, 6단 6tonf 내외에서 수렴양상을 나타내고 있으며 굴착후 버팀보 거치 전까지 버팀보에 작용하는 축력값은 증가를 나타내고 있는데 이는 응력 분담폭이 커져서 발생하는 응력 집중현상으로 버팀보 거치시기가 지연될수록 버팀보에 작용하는 축력값은 계속적으로 증가됨을 알 수 있다.

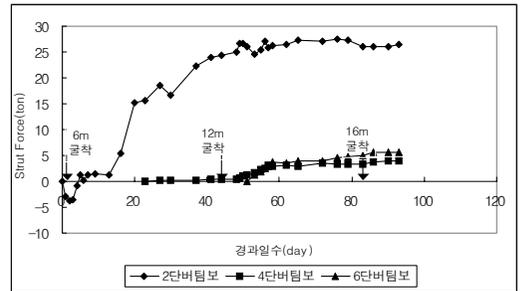


Fig. 1 굴착시 버팀보 축력 변화도(4K+150)

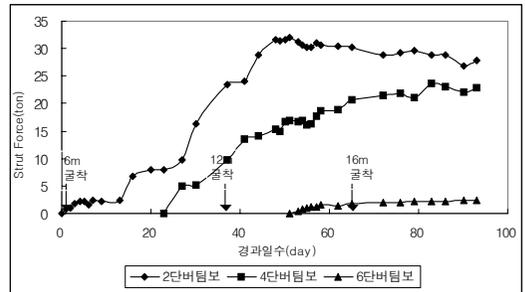


Fig. 2 굴착시 버팀보 축력 변화도(4K+210)

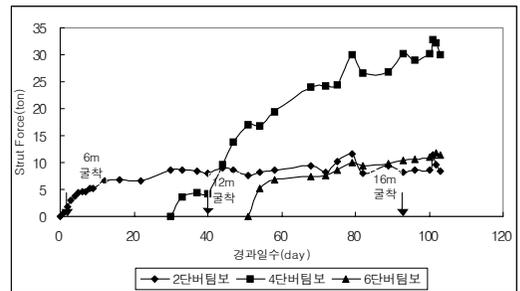


Fig. 3 굴착시 버팀보 축력 변화도(4K+270)

4K+210 지점의 경우 2, 4단 버팀보 모두 초기 축력 급증이 눈에 띄는데 이는 굴착에 따른 버팀보 설치 시기가 맞지 않아 버팀보의 토압 분담폭이 넓기 때문인 것으로 판단된다. 또한 4K+270 지점의 경우 2, 6단 버팀보의 축력값이 점진적 증가를 보이며 4단 버팀보의 축력값이 타 지점에 비하여 크게 발생하였는데 이는 5단 버팀보의 설치지연에 기인한 것이며 2, 6단은 버팀보 설치시기가 적절히 이루어져 축력이 일정한 증가를 나타낸다.

3.3 수평변위

굴착배면의 지반조건과 굴착에 따른 지보의 거치시기에 따른 지반 변위를 Table 3에 나타냈다.

Table 3 굴착심도와 지반변위의 관계

STA.	7m 굴착시 (8m)		13m 굴착시 (11m)		최종 굴착시		비고	
	지점 (G.L, -m)	최대변위 (mm)	지점 (- G.L)	최대변위 (mm)	지점 (- G.L)	최대변위 (mm)		
4K+150	L	0.0	(2.5)	8.5	82.25	10.0	95.25	
	R	0.0	(4.05)	8.5	47.25	8.5	50.85	
4K+210	L	0.0	4.8	8.0	(33.7)	8.0	63.15	
	R	1.5	0.65	12.5	(11.74)	12.5	21.15	
4K+270	L	8.0	21.2	9.5	33.74	10.0	42.75	
	R	7.5	24.60	11.0	34.57	11.0	45.70	

상기에서 나타난 바와 같이 좌측지반의 최대변위가 우측지반의 최대변위보다 2~3배 이상 크게 나타나고 있는데 이는 좌측부에는 200,000m²이상의 굴착토가 적치되어있는 상황으로 재하하중의 영향을 받는 것으로 사료된다.

4. 흙막이벽에 작용하는 토압

4.1 환산 측방 토압분포

당 현장에 설치되어 있는 응력계로부터 측정된 각 단의 최대버팀보 축력을 활용하여 환산된 굴착단계별 토압 분포형태는 Fig. 4 ~ Fig. 6과 같은 사다리꼴 모양을 하고 있다.

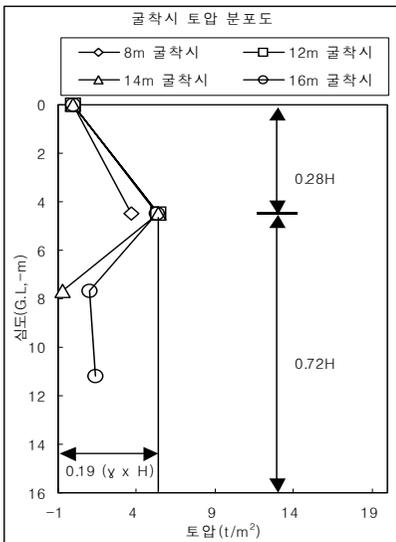


Fig. 4 굴착시 토압분포 (4K+150)

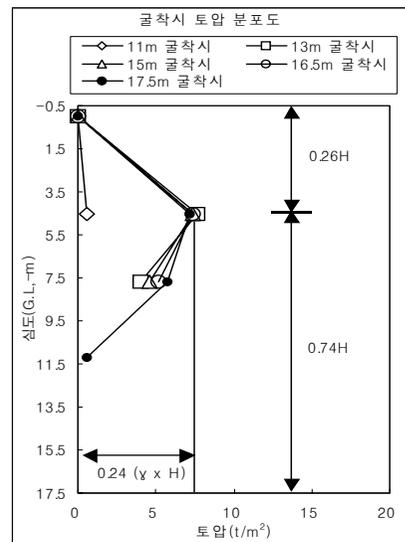


Fig. 5 굴착시 토압분포 (4K+210)

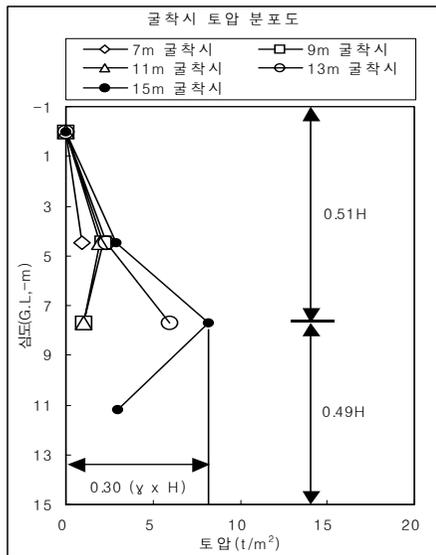


Fig. 6 굴착시 토압분포 (4K+270)

토압 산정은 총 3개단에 설치되어 있는 응력계의 축력을 버팀보 축력으로 이용하였으며 4K+150지점의 경우 굴착 단계별 환산 토압 분포는 Terzaghi-Peck의 연약한 점토지반의 토압 분포인 $0.25H$ 보다 약간 깊은 $0.28H$ 까지 선형적으로 증가하고 중간부위는 감소하는 경향을 보이며, Tschebotarioff의 경험토압인 $0.375H$ 보다 다소 작게 나타나고, 4K+210지점의 경우 굴착 단계별 환산 토압 분포는 Terzaghi-Peck의 경험토압 분포와 비슷한 $0.26H$ 까지 선형적으로 증가하고 토압크기 역시 Terzaghi-Peck의 경험토압과 거의 유사하게 나타났으며, 4K+270지점의 경우 굴착 단계별 환산 토압 분포는 Terzaghi-Peck의 경험토압 분포보다 다소 깊은 $0.51H$ 까지 선형적으로 증가하고 토압크기는 Terzaghi-Peck의 경험토압과 거의 유사하게 나타났다.

4.2 환산토압과 기존토압의 비교

4.2.1 토압 분포 형태 및 크기 비교

현장계측에 의해 산정된 환산토압과 Terzaghi-Peck의 경험토압과 Tschebotarioff 토압과의 관계를

Fig. 7~ Fig. 10과 같이 횡축을 토압(P)으로, 종축을 굴착고(G.L-m)로 나타내어 도시화 하였다. 실측 토압의 분포형태와 크기는 Terzaghi-Peck의 경험토압과 Tschebotarioff의 경험 토압을 합성한 형태를 보인다.

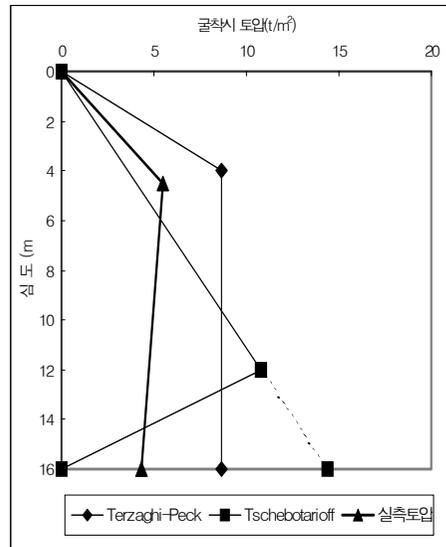


Fig. 7 굴착시 토압분포(4K+150)

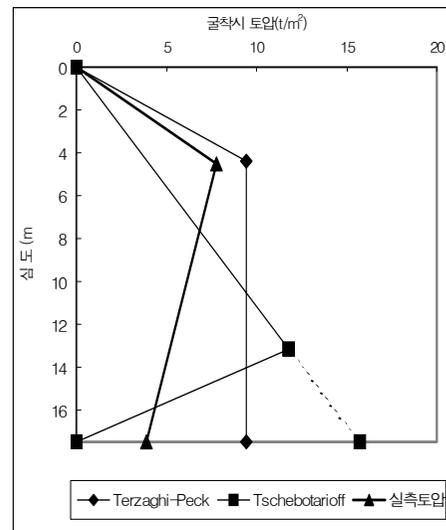


Fig. 8 굴착시 토압분포(4K+210)

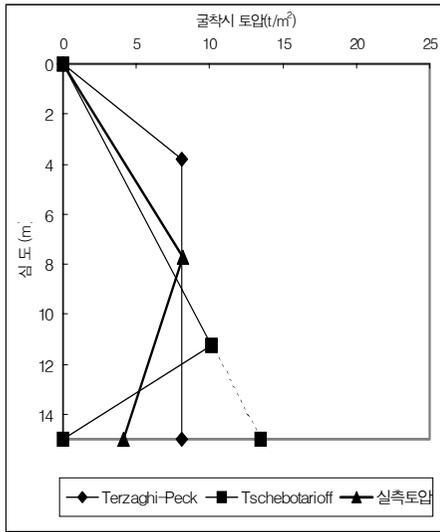


Fig. 9 굴착시 토압분포(4K+270)

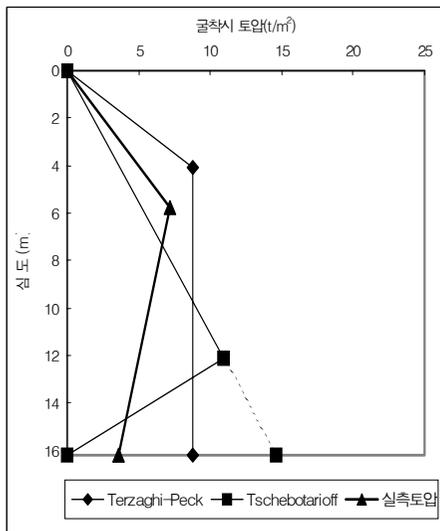


Fig. 10 굴착시 토압분포의 전체 평균

4.2.2 Terzaghi-Peck 토압과의 비교

본 연구지점 버팀보에 설치한 응력계에 의해 계측되어진 환산토압과 Terzaghi-Peck의 경험토압과의 상관관계를 Fig. 11과 같이 종축을 환산토압(P)으로 횡축을 경험토압(P')으로 나타내어 도시 하였다. Fig. 11에서 나타난 바와 같이 버팀보 축력에 의해 산정된

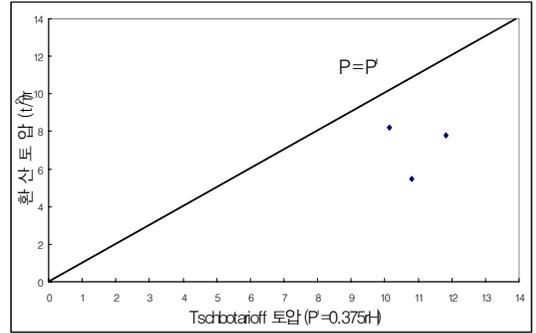


Fig. 11 환산토압과 Terzaghi-Peck 경험토압과의 비교

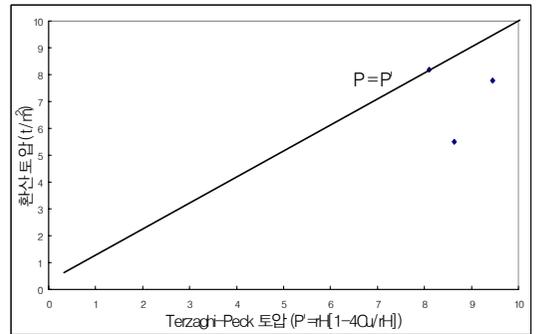


Fig. 12 환산토압과 Tschebotarioff 경험토압과의 비교

환산토압과 Terzaghi-Peck의 경험토압과의 상관관계는 굴착시 $P=0.820P'$ 로 Terzaghi-Peck의 경험토압보다 다소 작게 나타났다.

4.2.3 Tschebotarioff 토압과의 비교

본 연구지점 버팀보에 설치한 응력계에 의해 계측되어진 환산토압과 Tschebotarioff의 경험토압과의 상관관계를 Fig. 12와 같이 종축을 환산토압(P)으로 횡축을 경험토압(P')으로 나타내어 도시하였다. Fig. 12에서 나타난 바와 같이 버팀보 축력에 의해 산정된 환산토압과 Tschebotarioff의 경험토압과의 상관관계는 굴착시 $P=0.660P'$ 로 Tschebotarioff의 경험토압보다 다소 작게 나타났다.

4.3 토압과 흙막이 벽체의 수평변위와의 관계

4.3.1 버팀보축력과 수평변위와의 관계

응력계로부터 측정된 버팀보의 축력과 흙막이 벽체 배면에 설치된 경사계로부터 측정된 수평변위와의 관계를 나타내면 Fig. 13 ~ Fig. 15와 같다. 그림들에서 나타난 바와 같이 버팀보 축력과 흙막이 벽체의 수평변위가 양호한 4K+210 지점은 버팀보의 최대 축력에 비해 수평변위가 비교적 적게 발생하고 있다. 이는 버팀보 축력이 30ton~35ton으로 증가하나 수평변위는 20~60mm 내외로 수평변위를 억제하는 효과가 양호하기 때문이다.

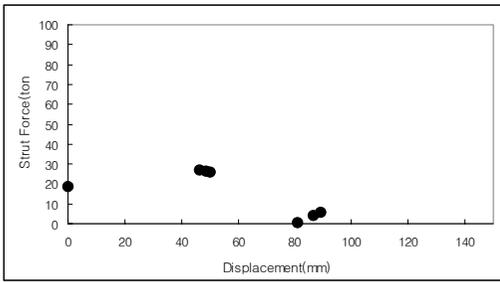


Fig. 13 버팀보 축력과 수평변위와의 관계 (4K+150)

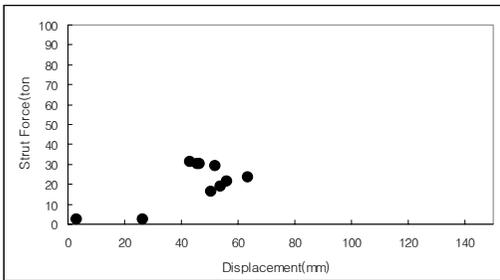


Fig. 14 버팀보 축력과 수평변위와의 관계 (4K+210)

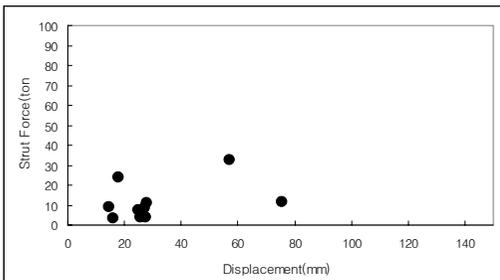


Fig. 15 버팀보 축력과 수평변위와의 관계 (4K+270)

즉, 지중수평변위 60mm에 버팀보 축력이 35t정도 까지 증가한 것은 버팀보가 어느정도 수평변위를 억제하고 있는 것으로 분석된다. 반면 4K+150 지점은 변위량이 60~100mm로 나타났으며 4단 버팀보의 경우 지반변위량이 100mm 이상인데 반해 버팀보에 작용하는 축력은 5ton 이내로 버팀보의 설치시기 지연으로 인한 상부 버팀보의 응력 부담으로 최대 변위량이 발생하는 5단 부위의 수평변위 억제 효과는 상당히 미진한 것으로 나타났다. 따라서 벽체의 수평변위는 버팀보 시공상태에 큰 영향을 받고 있으므로 지하 굴착시 안전시공을 위하여 버팀보 축력 및 지중 수평변위에 대한 철저한 계측관리가 이루어져야 한다.

4.3.2 환산토압과 수평변위와의 관계

각 지점에 설치된 계측기의 실측결과를 토대로 버팀보 축력을 활용하여 환산한 토압과 흙막이벽체의 변위와의 상관관계를 Fig. 16 ~ Fig. 18에 도시 하였다.

시공상태에 따라 실측결과를 살펴보면 시공이 양호한 4K+210 지점은 흙막이 벽체의 수평변위량이 증가함에 따라 거의 직선적으로 토압이 증가하여 어느

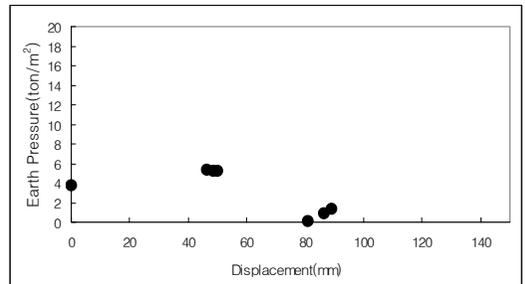


Fig. 16 환산토압과 수평변위와의 관계 (4K+150)

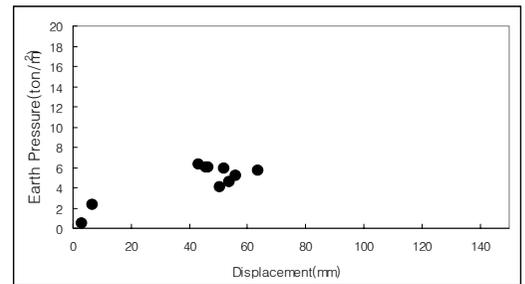


Fig. 17 환산토압과 수평변위와의 관계 (4K+210)

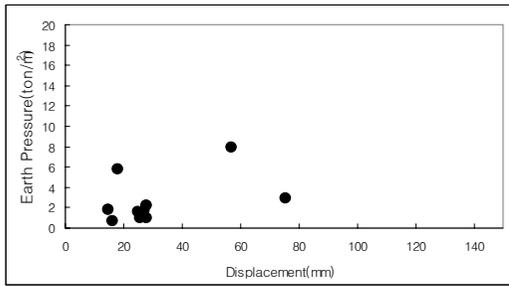


Fig. 18 환산토압과 수평변위와의 관계 (4K+270)

정도 변위가 발생하면 그 이상의 수평변위는 발생하지 않고 버팀보로 인하여 유지되어 주는 것으로 판단되며, 시공 여건이 불리한 4K+150 지점의 경우 버팀보가 지지효과를 제대로 발휘하지 못하는 이유로 수평변위의 증가가 상당히 크게 나타나며 버팀보 축력에 의한 토압의 크기는 작은 수치를 나타낸다.

5. 결론

본 연구에 사용된 지하차도 Main-Line의 실측치를 토대로 버팀보지지 흙막이벽에 작용하는 토압의 분포 및 크기를 기존 경험토압과 비교·검토를 실시하고, 토압과 수평변위와의 상관관계를 중심으로 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 환산토압의 분포형태는 단계별 굴착의 경우 지표면으로 0.35H까지 선형적으로 증가하다가 그 이후로는 일정한 반면, Terzaghi-Peck의 경우는 0.25H까지 선형적으로 증가하다가 일정한 상태를 유지하고, Tschebotarioff의 경우는 0.75H까지 선형적으로 증가하다가 감소하여 삼각형 분포를 이룬다.
- 2) 연약한 점성토 지반으로 구성된 흙막이벽에 작용하는 단계별 굴착시 환산 최대 토압은 Terzaghi-Peck 경험토압의 82.0% 정도, Tschebotarioff 경험토압의 66.0% 정도로 나타났다.
- 3) 점성토 지반에서의 실측토압은 Tschebotarioff의 경험토압과 Terzaghi-Peck의 경험토압의 합성 형태를 보이고 있다.

참고 문헌

1. 대구광역시 지하철건설본부, "지하철 2호선 계측관리 보고서", 2000. 4.
2. 대구광역시 지하철건설본부, "지하철 2호선 지반조사 보고서", 1998. 5.
3. 유충식, 김연정, "깊은굴착시 버팀보식 흙막이벽체의 거동", 대한토목학회 논문집, 20권, 3-C호, 2000. 5., pp. 195~204.
4. 홍원표, 윤중만, "지하굴착시 앵커지지 흙막이벽에 작용하는 측방토압", 한국지반공학회지, Vol. 11, No. 1, 1995. 3., pp. 63~77.
5. Bowles J. E., "Foundation Analysis and Design", 5th Ed., McGraw-Hill, 1996. pp. 644~681.
6. Clough G. W., Hansen L. A. & Mana A. I., "Prediction of Supported Excavation Movements under Marginal Stability Conditions in Clay", Proc. 3rd int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, Vol. 4, 1979, pp. 1485~1502.
7. NAVFAC DESIGN MANUAL, 1982, pp. 7.2-85~7.2-116.
8. Peck R. B., "Deep Excavations and Tunnelling in Soft Ground", 7th ICSMFE, State-of-Art Volume, 1969, pp. 225~290
9. Sowers G. F., "Shallow Foundation Engineering", McGraw-Hill, 1962, pp. 525.
10. Terzaghi K., "Distribution of the Lateral Pressure of Sand on Timbering of Cuts", Proc. of 1st ICSMFE, Vol. 1, 1936, pp. 211~215.
11. Terzaghi K. & Peck R. B., "Soil Mechanics in Engineering practice", 1st Ed., John Wiley and Sons, New York, 1948, pp. 345~352.
12. Terzaghi K. and Peck R. B., "Soil Mechanics in Engineering practice", 2nd Ed., John Wiley and Sons, New York, 1967, pp. 394~413.
13. Tschebotarioff G. P., Klein G. K., Malyshev M. V., et al., "Lateral Pressures of Clayey Soils on Structures", Specialty Session, No 5, 8th ICSMFE, Vol 4, 1973, pp. 227~266.

(접수일자 : 2003년 3월 10일)