

선행하중 재하시 지반손실 감소효과에 관한 연구 A study on reduction effects of the ground loss in pre-loading

김봉유¹⁾, Bong-Yoo Kim, 조남준²⁾, Nam-Jun Cho

¹⁾국민대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng, Kookmin Univ.

²⁾국민대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Eng, Kookmin Univ.

SYNOPSIS : The ground excavation causes the deformation of the ground where the neighborhood structure is located. The ground deformation result in the vertical settlement of the neighborhood structure as well as the horizontal displacement of the temporary earth retaining structures. The decreased volume of the soil due to the ground settlement is defined as 'the ground loss quantity' or 'the ground loss'. When excavation is performed nearby existing structures, retaining walls should be designed and constructed to minimize the ground loss. Among various methods for reducing the ground loss, this study introduces the pre-loading method which has been recently developed. The reduction effect of the ground loss by pre-loading has been found to be larger as using a wall with relatively smaller rigidity.

Key words : ground loss quantity, pre-loading, settlement, soil movement

1. 서 론

굴착공사시 인접구조물의 안전성을 저해하는 요인은 지반의 변형(또는 침하)에 따른 지반의 이동이다. 인접구조물의 연직방향변위는 그 구조물이 위치한 지반의 연직방향의 침하 때문에 발생하며 침하하는 지반은 횡방향으로 이동하면서 흙막이벽의 횡방향변위를 발생시키게 된다. 이때 원지표면 대비 지반의 연직침하토량을 지반손실이라 한다. 굴착공사시 인접구조물의 안전성을 위협하는 중요한 요인은 지반의 이동이다. 본 연구에서는 굴착배면의 횡변위, 침하량 산정 등에 대한 기존의 계산방법을 통하여 선행하중 재하에 따른 차이를 보임으로써 선행하중의 지반손실감소효과를 알아보하고자 한다.

2. 근접시공시 지반거동

2.1 지반거동의 영향인자

2.1.1 지반의 강성

Peck(1969)은 지반의 강성에 따른 지반의 침하를 제시하였다. 연약~중간 점토와 같은

연약한 지반보다는 사질토나 단단한 점토와 같이 강성이 큰 지반에서 침하가 작게 일어남을 알 수 있다. Clough 등(1979)과 Mana와 Clough(1981)에 의하면 전반적인 지반의 거동은 흙의 강성(연약지반에서는 지반의 강도)에 따라 좌우되는데 용기현상의 위험이 증가하거나 굴착면 파괴의 안전율이 1에 가까우면 횡방향변위의 속도와 크기가 급격히 증가한다. 연약한 점토나 느슨한 실트 지반에서는 흙막이벽 주변의 수동저항과 큰 지반거동이 일어난다. 느슨한 사질토에서는 갑작스런 지반의 침하나 토류판, 널말뚝(sheet pile) 또는 지중연속벽의 연결부 사이를 통한 토사유출이 발생할 수 있다.

2.1.2 선행하중의 유무

버팀대에 선행하중을 작용시키면 지보재들간에 존재하는 틈새들을 폐합하고, 선행하중량에 대응하는 량만큼의 버팀대의 탄성압축변형을 미리 발생시킴으로써 그 만큼 흙막이벽의 휨변형량을 줄여 주변지반의 침하량을 작게 할 수 있다. 또한 버팀대에 선행하중을 작용시키면 버팀대의 유효강성 증대와 흙막이벽의 휨모멘트를 감소시킬 수 있다. 그리고 지반의 응력-변형을 곡선의 이력현상(Hysteresis)으로 인한 지반의 강성증대와 이로 인한 흙막이벽의 횡방향변위가 감소한다.

버팀대의 재료적인 강성(이상강성) K_I 는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_I = \frac{EA}{L} \quad (1)$$

여기서 E 는 버팀대의 탄성계수, A 는 버팀대의 단면적 그리고 L 은 버팀대의 길이이다. 그러나 현장에서 실측되는 버팀대의 강성(유효강성) K_E 는 이상강성과는 같지 않으며 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$K_E = \frac{P}{\Delta S} \quad (2)$$

여기서 P 는 작용된 선행하중이고 ΔS 는 선행하중에 의한 버팀대 자체의 변형량이다. Palmer와 Kenny(1972)는 버팀대에 선행하중을 작용하지 않은 상태에서 유효강성은 이상강성의 2~4% 정도라고 발표하였다.

3. 지하수위 변화를 고려한 굴착배면의 지반거동

동일한 지반과 버팀대 조건하에서 선행하중의 유무와 흙막이벽의 강성에 따른 지반의 거동을 해석하기 위하여 지반조건을 그림 1과 같이 가정하였고 각 지층의 토질정수는 표 2.와 같이 가정하였다. 버팀대는 H-300×300×10×15의 H형 강말뚝(단면적 $A=0.01198m^2$, 길이 $L=20m$)을 사용한 것으로 가정하였다. 흙막이벽을 H형 강말뚝+ 토류판, C.I.P.(cast in placed pile) 그리고 지중연속벽(diaphragm wall)을 사용한 경우에 대하여 선행하중이 0인 경우의 버팀대의 축력을 설계축력으로 하여 설계축력의 0%, 25%, 50%, 75% 그리고 100%의 선행하중이 작용하는 경우에 대하여 각각의 경우를 해석하였다.

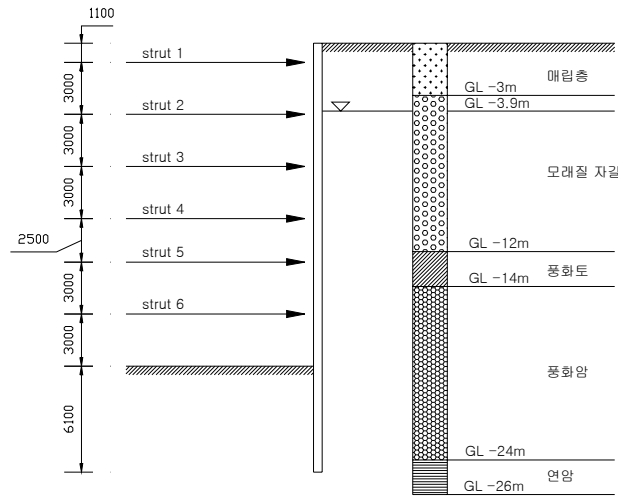


그림 1. 해석에 사용된 지반모델

표 2. 해석에 사용된 토질정수

지층	$\gamma_t (t/m^3)$	$\gamma_{sub} (t/m^3)$	$c (t/m^2)$	$\phi (^{\circ})$	$K_s (t/m^2)$	$E_s (t/m^2)$
매립층	1.7	0.8	0	25	1,600	1,500
모래질 자갈	1.8	0.9	0	27	2,660	4,545
풍화토	1.9	1.0	0	32	3,000	5,454
풍화암	2.0	1.1	2	35	4,500	10,000
연암	2.1	1.2	4	40	5,500	15,000

3.1 지반굴착에 따른 지하수위의 변화

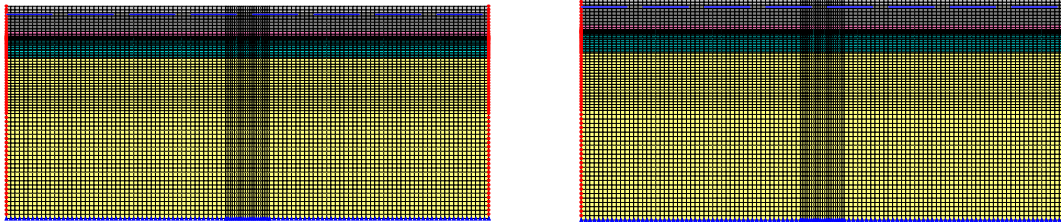
지하수위의 변화를 알아보기 위한 침투해석에 사용된 각 지층의 투수계수는 표 3.와 같다. 흙막이벽으로 H형 강말뚝+토류관을 사용한 경우 풍화암 하부 1m까지 L.W. Grouting(Water-Glass Grouting)을 실시하나 흙막이벽의 차수성이 불량하므로 C.I.P.인 경우나 지중연속벽을 사용한 경우와 구분하여 지하수위의 변화를 알아보았다. 지층은 그림 3과 동일하며 침투해석시 오차를 줄이기 위하여 연암층을 GL-100m까지 연장하였고 굴착폭 20m의 좌우 100m씩을 침투해석대상으로 하였다.

표 3. 침투해석에 사용된 투수계수

지층명	투수계수 (m/sec)
매립층	4.5×10^{-4}
모래질 자갈	3.3×10^{-5}
풍화토	1.3×10^{-6}
풍화암	2.5×10^{-6}
연암	1.7×10^{-7}

H형 강말뚝+토류관을 흙막이벽으로 사용한 경우 토류관 자체의 투수계수를 $1 \times 10^{-10} m/sec$ 그리고 틈새의 투수계수를 해당 지층의 투수계수로하여 환산투수계수를 계산한 결과 횡방

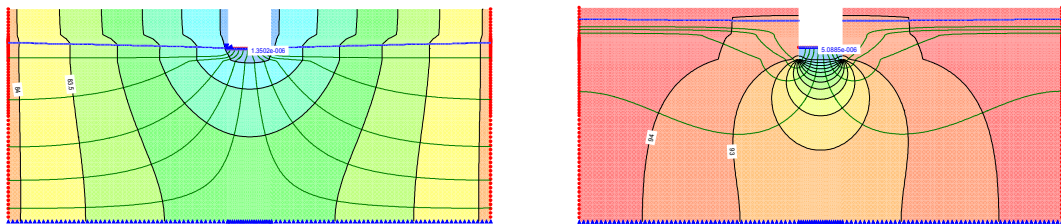
향 투수계수는 토류관 자체의 투수계수와 같았으며 연직방향 투수계수는 해당지층 투수계수의 0.67% 정도로 나타났다. 그래서 토류관의 환산투수계수를 0.01 m/sec 으로 결정하였다. 침투해석에 사용한 지반모델 mesh는 그림 3과 같다. 굴착단계별 해석결과를 표 4에 나타내었다. 그림 2는 최종 굴착단계의 해석결과이다.



(a) H형 강말뚝+ 토류관인 경우 (b) C.I.P. 또는 지중연속벽인 경우
그림 2. 침투해석에 사용된 지반모델 mesh

표 4. 침투해석 결과

굴착깊이 (m)	H형 강말뚝+ 토류관		C.I.P. 또는 지중연속벽	
	침투유량 ($10^{-6}\text{ m}^3/\text{sec}$)	배면지하수위 GL- (m)	침투유량 ($10^{-6}\text{ m}^3/\text{sec}$)	배면지하수위 GL- (m)
0	-	3.9	-	3.9
4.6	4.3731	4.6	0.2549	3.9
7.6	14.7880	7.4	1.3379	4.1
10.6	93.7530	10.4	2.3759	4.4
13.1	28.4230	12.8	3.2253	4.8
16.1	20.6580	15.9	4.2877	5.4
18.6	13.5020	18.4	5.0885	6.2



(a) H형 강말뚝+ 토류관인 경우 (b) C.I.P. 또는 지중연속벽인 경우
그림 3. 18.6m 굴착시 전수두분포와 유선망

3.2 선행하중에 따른 굴착배면의 지반거동

3.2.1 선행하중에 따른 굴착배면의 최대횡방향변위

굴착배면 지하수위의 변화를 고려한 선행하중비에 따른 굴착배면의 최대횡방향변위는 표 5와 같으며 이를 그래프로 나타내면 그림 4와 같다. 흙막이벽의 강성이 상대적으로 작은

H2의 최대횡방향변위가 C1나 C2보다 작은 이유는 흙막이벽의 차수성과 관련이 있다. C1나 C2보다 상대적으로 지하수위의 저하가 크게 발생하는 H2의 경우 굴착배면의 지하수위 저하로 인한 횡방향토압이 감소하므로 흙막이벽의 강성이 작음에도 C1이나 C2보다 작은 횡방향변위가 발생한다.

표 5. 선행하중비에 따른 굴착배면의 최대횡방향변위

		P0	P25	P50	P75	P100	비고 (EI)
δ_{\max} (mm)	H1	34.30	17.53	6.78	3.80	3.58	2,793
	H2	21.03	12.62	6.28	2.74	2.63	4,284
	C1	25.82	17.30	10.49	6.66	5.68	9,135
	C2	23.35	16.23	10.35	6.56	5.52	10,857
	D1	13.19	10.34	7.87	5.92	4.56	104,961
	D2	9.93	8.33	6.95	5.72	4.64	216,666
δ_{\max}/H_w (%)	H1	0.184	0.094	0.036	0.020	0.019	2,793
	H2	0.113	0.068	0.034	0.015	0.014	4,284
	C1	0.139	0.093	0.056	0.036	0.031	9,135
	C2	0.126	0.087	0.056	0.035	0.030	10,857
	D1	0.071	0.056	0.042	0.032	0.025	104,961
	D2	0.053	0.045	0.037	0.031	0.025	216,666

그림 4에서 선행하중을 적용한 모든 경우에서 최대횡방향변위가 감소됨을 알 수 있다. 이는 선행하중을 작용시키면 지보재들간의 연결부 틈새가 제거되며, 버팀대 및 굴착배면지반의 강성이 증가하기 때문이다. 그리고 버팀대의 유효강성이 증가하며 흙막이벽의 휨모멘트가 감소하기 때문이다.

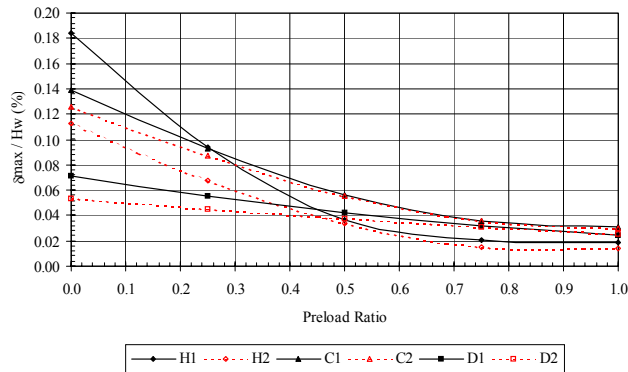


그림 4. 선행하중비에 따른 굴착배면의 최대횡방향변위

3.3.2 선행하중에 따른 굴착배면의 최대침하량

굴착배면 지하수위의 변화를 고려한 선행하중비에 따른 굴착배면의 침하량은 표 6과 같으며 이를 그래프로 나타내면 그림 5와 같다. 선행하중을 적용한 경우 모든 경우에서 굴착배면의 최대침하량이 감소함을 알 수 있다. 특히 흙막이벽을 H형 강말뚝+토류판을 사용한 경우 설계하중의 50%에 해당하는 선행하중을 적용시키면 효과적인 굴착배면의 침하량 감소효과가 있다.

표 6. 선행하중비에 따른 굴착배면의 최대침하량

		$P0$	$P25$	$P50$	$P75$	$P100$	비고 (EI)
s_w (mm)	H1	70.39	32.47	12.02	5.02	3.18	2,793
	H2	42.81	23.81	11.13	5.34	3.21	4,284
	C1	56.67	37.13	14.48	7.45	5.08	9,135
	C2	51.32	34.89	21.56	11.89	5.01	10,857
	D1	29.86	22.44	15.73	9.98	5.58	104,961
	D2	22.89	18.46	14.33	10.58	7.26	216,666
s_w/H_w (%)	H1	0.378	0.175	0.065	0.027	0.017	2,793
	H2	0.230	0.128	0.060	0.029	0.017	4,284
	C1	0.305	0.200	0.078	0.040	0.027	9,135
	C2	0.276	0.188	0.116	0.064	0.027	10,857
	D1	0.161	0.121	0.085	0.054	0.030	104,961
	D2	0.123	0.099	0.077	0.057	0.039	216,666

흙막이벽을 H형 강말뚝+ 토류관을 사용한 경우 설계하중의 50%에 해당하는 선행하중을 작용시키면 선행하중을 작용시키지 않았을 때보다 82.93%와 74.01% 굴착배면의 최대횡방향변위 감소효과가 있었다. 선행하중을 작용시키지 않은 최대횡방향변위에 대한 각 선행하중별 최대침하량 감소효과를 표 7에 나타내었다.

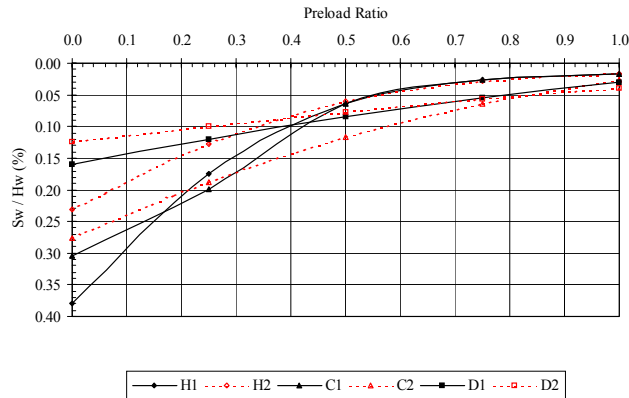


그림 5. 선행하중비에 따른 굴착배면의 최대침하량

표 7. 선행하중의 최대침하량 감소효과

	$P0$	$P25$	$P50$	$P75$	$P100$
H1	0.00	53.87	82.93	92.87	95.48
H2	0.00	44.38	74.01	87.52	92.49
C1	0.00	34.47	78.79	91.14	94.39
C2	0.00	32.01	57.98	76.83	90.23
D1	0.00	24.86	47.31	66.58	81.32
D2	0.00	19.35	37.41	53.78	68.30

위에서 계산된 지반의 거동이외에 지하수위가 저하되면 굴착배면의 유효응력이 증가하므로 이로 인한 굴착지반의 침하가 추가적으로 발생한다. 본 연구에서는 지반모델을 단순화하여 간단히 추가적인 지반침하량을 산정하였다. 추가적으로 발생하는 굴착배면의 지반침하를 간단히 산정하기 위하여 그림1과 표 3에 주어진 토질정수를 사용하여 굴착고 GL-18.6m까지

의 굴착배면을 동일한 지층으로 환산하여 토질정수를 결정하였다(표 8 참조).

표 8. 동일한 지층으로 환산한 토질정수

지층	두께 (m)	γ_t (t/m^2)	γ_{sat} (t/m^2)	ϕ (°)	E_s (t/m^2)
매립층	3.0	1.7	1.8	25	1,500
모래질 자갈	9.0	1.8	1.9	27	4,545
풍화토	2.0	1.9	2.0	32	5,454
풍화암	4.6	2.0	2.1	35	10,000
평균		1.9	2.0	32	7,641

굴착배면의 지하수위 저하로 인한 유효응력의 변화를 계산하여 깊이에 따른 유효응력의 증가량을 그림 6에 나타내었다. 깊이에 따른 유효응력의 증가량이 다르므로 모든 깊이에 공통으로 적용할 수 있는 평균유효응력의 증가량을 계산한 결과 $5.226 t/m^2$ 이었다. 굴착배면의 지반을 완전 탄성체로 보고 Hook의 법칙을 이용하여 탄성침하량을 계산한 결과 굴착배면의 침하량은 14.543mm였다.

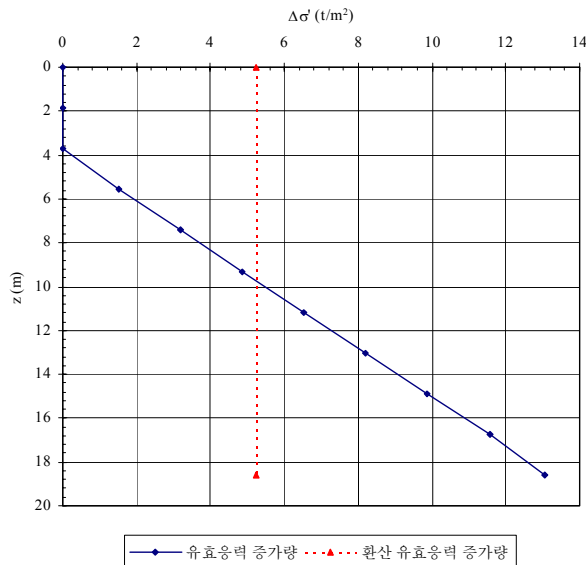


그림 6. 깊이에 따른 유효응력의 증가량

4. 결 론

1. 선형하중에 의한 지반손실 감소효과는 H형 강말뚝에 목재토류판을 끼워 시공한 흙막이 벽과 같이 흙막이벽의 강성이 상대적으로 작은 경우에 크게 나타났다. 즉, 흙막이벽의 강성이 작은 경우에는 선형하중을 가하는 것이 바람직하지만 지중연속벽(diaphragm wall)과 같이 흙막이벽의 강성이 매우 큰 경우에는 효과적인 선형하중에 의한 지반손실 감소효과를 기대하기 어렵다.
2. 지하수위 저하에 따른 유효응력의 증가로 인하여 추가적인 지반의 침하가 발생할 수 있으므로 흙막이벽의 설계 및 시공시 지하수위의 변화를 정확하게 예측하기 위한 현장투수 시험을 행하는 것이 바람직하다고 사료된다.

3. 지하수위의 변화에 의하여 발생하는 추가적인 침하는 과압밀상태의 지반에서는 크지 않으나 신규매립지와 같은 정규압밀 지반에서는 클 것으로 예상되므로 향후 추가의 연구가 요구된다.
4. 선행하중 재하시 버팀대 축력이 증가하는데 본 연구에서 토류판과 지중연속벽에서는 그 영향이 그리 크지 않았으나 C.I.P.를 흙막이벽으로 사용한 경우에는 그 영향이 크게 나타났다. 따라서 버팀대의 안정성에 대한 검토가 보완되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 오성남, 조현태, 박기태, 양구승, 1999 “버팀굴착시 버팀대 선행하중과 흙막이 구조물과의 상호 관계”, 한국지반공학회 봄학술발표회 논문집, pp.129~136.
2. 백규호, 오성남, 조현태, 양구승, 1998 “버팀대 선행하중 공법을 이용한 깊은 굴착 사례 연구”, 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, pp.225~232.
3. Clough G. W. et al., 1979 “Prediction of support excavation movements under marginal stability conditions in clay”, Proc. 3rd Int. Conf. Numerical Methods, Vol.4, Aachen, pp.1485~1502.
4. Goldberg D.T. et al., 1975 “Vol.1, Lateral support systems and underpinning; Vol.2, Design fundamentals; Vol.3, Construction methods”, Federal Highway Administration, FHWA-RD-75-128, FHWA-RD-75-129, FHWA-RD-75-130.
(National Technical Information, 1976 PB 257210, PB 257211, PB 257212.)
5. Lambe T. W., 1970 “Braced excavations”, Proc. ASCE speciality Conf., Ithaca, New York, pp.149~218.
6. Mana A. I. and Clough G. W., 1981 “Prediction of movements for braced cuts in clay”, ASCE J. Geotech. Engng., 107, June, pp.759-777.
7. O'Rourke, T. D., 1981 “Ground movements caused by braced excavation”, ASCE, Vol.107, No.GT9,, pp.1159~1178.
8. Palmer & Kenny, 1972 “Analytical Study of a Braced Excavation in Weak Clay”, Canadian Geotechnical Society, Vol.9, pp.145~164.
9. Peck R. B. 1969, “Deep excavations and tunnelling in soft ground”, Prof. 7th Int. Conf. S.M.F.E., State-of-the-art volume, Mexico, pp.225~290.