

수치해석을 이용한 굴착지반의 안정성 검토와 예측 Prediction and validation of the stability for the excavated ground using numerical analysis

송준화¹⁾, Joon-Hwa Song, 장연수²⁾, Yeon-Soo Jang, 권오규³⁾, Oh-Kwoo Kwon

- 1) 동국대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Dong-Guk University
- 2) 정회원, 동국대학교 토목공학과 정교수, Member, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Dong-Guk University
- 3) 현대건설 서울지하철 908공구 현장소장, Director, 908 Division, Seoul Subway, Hyundai Construction Co.

SYNOPSIS : Horizontal displacement of slurry wall with strut is analyzed using 2-D numerical stress-displacement program, FLAC. Validation of the program results are performed using the pre- and ongoing excavation sections and further displacement is predicted in the stage of strut removal. The result show that the calculated displacement was very close to the measured displacement when 40% in-situ strut preloading is applied to the strut loading of the program considering the horizontal spacing of struts in the field. It was found that construction efficiency can be improved by partially removing the struts before putting slabs in the stage of subway structure construction.

Key words : horizontal displacement, slurry wall, strut, excavation, preloading, subway structure

1. 서 론

국내의 경우 인구의 수도권 밀집현상으로 인해 수도권 도심지에서의 공간 활용이 매우 중요하게 부각되고 있으며, 이런 측면에서 도심지에서 기존구조물에 인접한 지하굴착이 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 근접 시공시 흠막이 구조물과 인접지반에 발생하는 변위로 인하여 구조물자체와 인접구조물들의 안정성에 위험을 초래할 수 있는데 이런 문제를 개선하기 위하여 버팀대에 선행하중을 작용시키는 공법의 적용이 점차 증가하고 있으며, 흠막이 구조물의 변형에 대한 분석이 상당히 중요하게 대두되고 있다. 기존에 수행되어온 해석은 지하수위의 영향을 고려하지 않고 굴착에 의한 영향을 주로 평가하였지만, 실제 현장에서는 지하수위에 의한 수압이 지반변위에 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있어 지반굴착시 지하수위를 고려한 해석이 필요하다.

본 연구에서는 이와 같은 문제점을 보완하기 지하수위와 버팀대간의 수평간격을 고려하여 2차원 응력 변형해석 프로그램인 FLAC(fast lagrangian analysis of Continua)을 이용, 지하철 건설을 위한 지반굴착시 지하연속벽에 생기는 수평변위를 분석 하였다. 수치해석 결과의 신뢰성을 확보하기 위하여 굴착이 완료된 구간을 선정하여 계측자료와 해석결과를 비교하였고, 굴착이 진행중인 구간을 선정하여 굴착에

따른 지하연속벽의 수평변위를 예측하였다. 또한, 굴착 완료 후 구조물 시공단계에서 버팀대의 제거순서 변경이 흠막이 구조물의 수평변위 및 버팀대의 축응력에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 현장 및 지반조건

본 연구의 대상은 지하연속벽 공법이 적용된 지하철 9호선 908공구(영등포구 양평동 ~ 영등포구 당산동)로서 한강과 인접한 범람원에 퇴적된 하상퇴적층(충적층)을 매립하여 조성된 지형이다. 지층의 상부에는 모래자갈로 구성된 매립층이 1.5~4.3m로 존재하고, 하부로 사질토층과 모래자갈층이 각각 3.8~11.6m, 7.6~19.8m의 층후로 분포하고 모래자갈층 하부로 풍화토층, 풍화암층이 0~5.1m, 0.6~10.1m의 두께를 보이고, 풍화암층 하부로 기반암이 나타난다. 지하수위는 G.L.-9m정도에 분포하는 것으로 조사되었으며, 각 토층별 지반정수는 표 1과 같다.

표 1. 각 토층별 지반정수(지반조사 보고서, 2002. 5)

지 층	단위중량(tf/m ³)	점착력(kg/cm ²)	내부마찰각(°)	탄성계수(tf/m ²)	푸아송비
사질토층	1.86	0	30	850	0.35
모래자갈층	1.9	0	40	8000	0.3
풍화토층	1.9	2	30	5000	0.3
풍화암층	2	2.5	33	30000	0.3
기반암층	2.2	10	35	170000	0.25

3. 해석조건

지반내 지하수위에 의한 수압을 고려하기 위하여 토층의 측압계수(K_{Os})는 0.5 지하수의 측압계수(K_{Ow})는 1.0인 점을 이용, 지하수위 하부에 작용하는 측압계수(K_{Ot})를 식 (1)에 의하여 0.73으로 적용하였다.

$$K_{Ot} = \frac{\text{습윤단위중량} \times 0.5 + \text{물의 단위중량} \times 1.0}{\text{포화단위중량}} \quad (1)$$

프로그램 해석을 위한 입력조건으로 상부에 작용하는 상재하중은 1tf/m², 건물하중은 1층당 1.5tf/m²으로 적용하였다.

4. 해석 변위와 계측치의 비교

2차원 응력변형해석 프로그램의 해석결과에 대한 신뢰성을 확보하기 위하여 굴착이 완료된 구간내 한 단면을 선정하여 계측자료와 프로그램 결과를 비교하였다.

4.1 비교단면 및 입력조건

비교에 사용된 단면과 수치해석에 사용된 mesh는 각각 그림 (1), (2)와 같으며, 초기에 지하연속벽을 G.L.-23.35m까지 타설한 후 굴착이 진행된다. 굴착단계는 1차 굴착(G.L.-2.0m)후 주형보가 G.L.-0.9m

에 놓이며, 굴착이 진행되면서 총 7단의 버팀대가 주형보 하부에 단계적으로 설치되고 최종굴착깊이는 G.L.-19.15m이다. 선형하중은 1단과 2단버팀대는 10tf/EA, 3단과 4단버팀대에는 20tf/EA, 5단과 6단 버팀대에 30tf/EA, 마지막으로 7단 버팀대에는 35tf/EA가 작용한다. 건물하중은 그림 (2)와 같이 G.L.-3.0m에 적용하였고, 지하수위는 G.L.-9.4m에 존재한다.

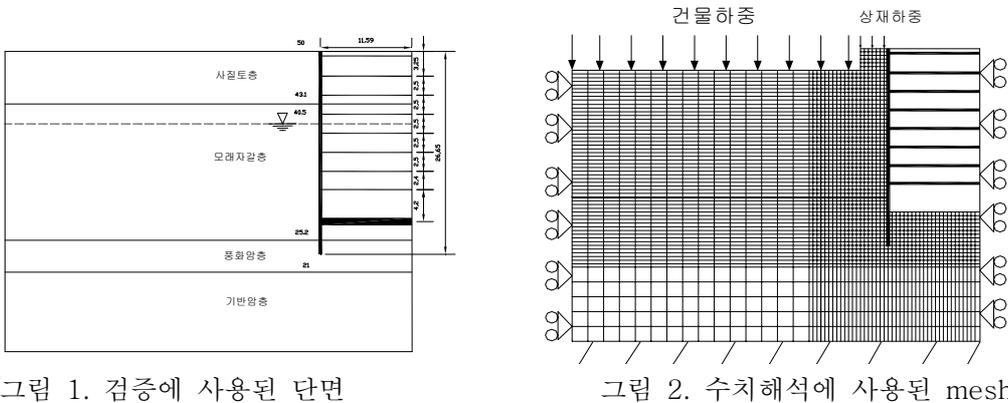


그림 1. 검증에 사용된 단면

그림 2. 수치해석에 사용된 mesh

선형하중 적용시 버팀대간의 수평간격(2.5m)을 고려하여 선형하중의 40%만 적용한 경우와 100% 적용한 경우에 대한 해석을 수행하여 계측자료와 비교, 분석하였다. 해석에 사용된 강재의 제원은 표 (2)에 정리하였다.

표 2. 검증단면에 사용된 강재제원

구분	규격	단면적(m ²)	중량(kgf/m)	단면2차모멘트(m ⁴)
버팀대	H-300*350*12*19	0.01739	137	2.15e ⁻⁴
주형보	I-700*300*13*24	0.02350	185	2.01e ⁻³
SLURRY WALL	-	0.65	-	0.0833

4.2 비교결과

프로그램 해석결과 버팀대간의 수평간격인 2.5m를 고려하여 실제 적용된 선형하중의 40%만 적용한 경우 계측자료와 대부분 일치하는 결과를 보였다(그림 (3)). 즉, 2차원 응력변형해석 프로그램을 이용하여 해석할 경우 구조물의 수평간격을 고려하는 것이 실제 현장을 정확히 묘사하는 것으로 나타났다.

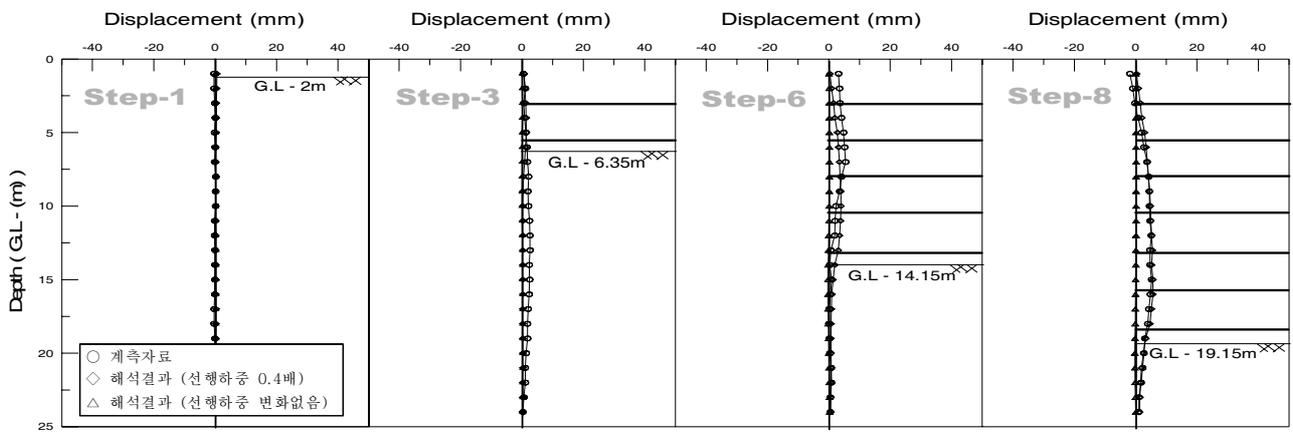


그림 3. 수치해석 프로그램 검증결과

5. 굴착이 진행중인 단면에 대한 안정성 해석

앞의 결과를 바탕으로 굴착이 진행중인 단면에 대하여 굴착단계와 굴착완료 후 구조물 시공단계에서 지하연속벽의 수평변위에 대한 안정성 해석을 수행하였다. 또한, 구조물 시공단계에서 버팀대 해체시 시공순서변경(원안설계, 대안-1, 대안-2)이 지하연속벽의 변위에 미치는 영향 및 안정성을 검토하였다.

원안설계는 안정성을 확보하기 위하여 슬래브 설치 후 하부 버팀대를 제거하는 시공순서이고, 대안-1은 슬래브 설치시 하부 버팀대에 의하여 시공성이 저하되는 것을 개선하기 위하여 슬래브 하부 버팀대를 일부(1단) 제거한 후 슬래브를 설치하는 방안이다. 그리고, 대안-2는 시공성을 더욱 개선하기 위하여 슬래브 하부 버팀대를 모두(2단) 제거한 후 슬래브를 설치하는 방안이다.

5.1 해석단면 및 입력조건

굴착이 진행중인 단면과 수치해석에 사용된 mesh는 각각 그림 4, 5에 나타난 바와 같으며, 초기에 타설되는 지하연속벽의 깊이는 23.35m이다. 초기 굴착 후 주형보가 G.L.-0.9m에 놓이며, 굴착이 진행됨에 따라 주형보 하부로 총 5단의 버팀대가 단계적으로 설치된다. 버팀대에 작용하는 선형하중은 1단 버팀대에 10tf/EA, 2단과 3단은 15tf/EA, 4단과 5단은 20tf/EA를 적용하였다. 최종굴착(G.L.-18.35m) 후 하부 슬래브가 타설되고, 중간 및 상부 슬래브와 각 슬래브 하부 버팀대의 제거가 병행으로 진행된다. 굴착면에 관입되는 H-Pile의 간격이 좌우대칭이 아니므로 그림 (5)와 같이 전단면을 모델링하였다. 상재하중과 건물하중은 그림 (5)와 같이 적용하였으며, 상재하중의 경우 1t/m²이고 건물하중은 G.L.-3m 심도에 층당 1.5t/m²를 적용하였다.

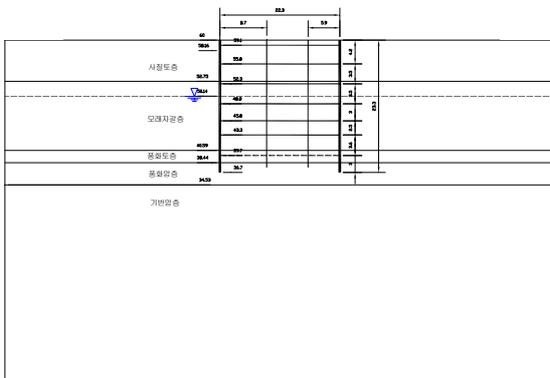


그림 4. 해석단면

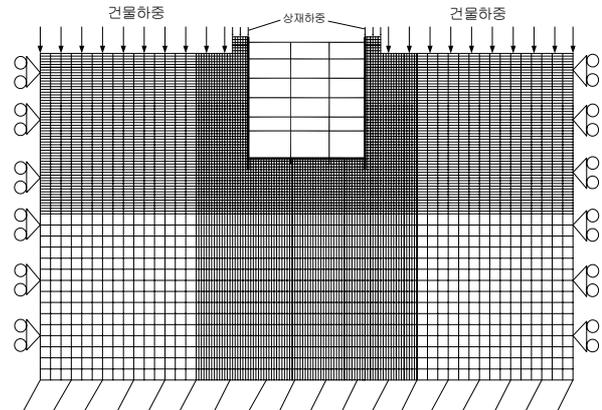


그림 5. 수치해석에 사용된 mesh

해석에 사용된 강재의 제원은 표 (3)과 같다. H-Pile, 주형보 그리고 버팀대는 강재로 입력하였으며, 흙막이벽인 slurry-wall과 3단 슬래브 그리고 슬래브 하부에 타설되는 내외측기둥은 철근콘크리트로 적용하였다.

표 3. 해석단면의 강재제원

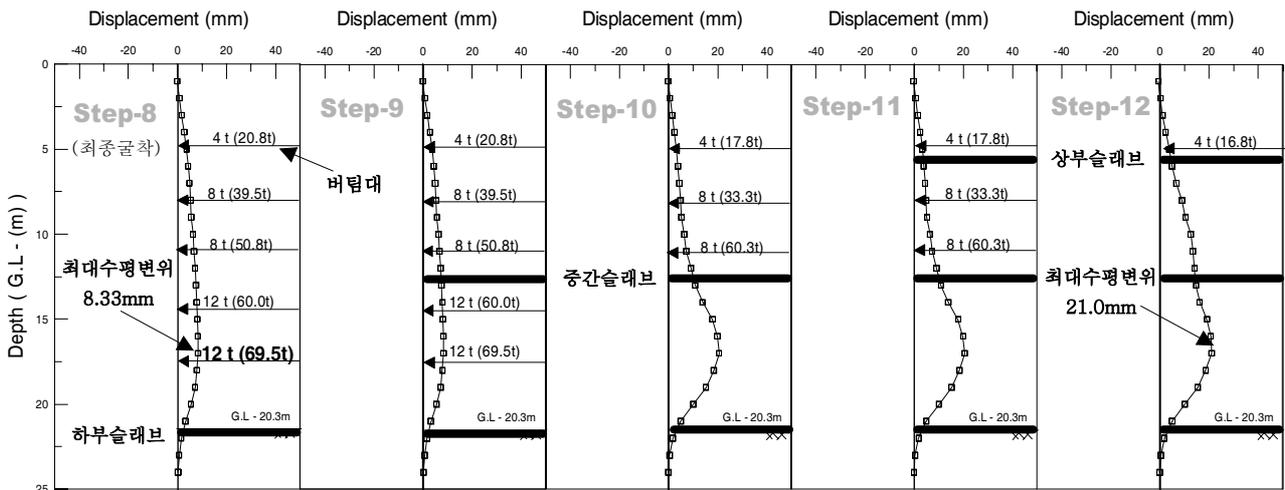
구분	규격	단면적(m ²)	중량(kgf/m)	단면2차모멘트(m ⁴)
H-PILE (측벽)	H-300*305*15*15	0.01198	106	2.04e ⁻⁴
H-PILE (중양)	H-300*305*15*15	0.01348	106	2.15e ⁻⁴
버팀보	1단	H-300*305*15*15	106	2.15e ⁻⁴
	2~5단	H-300*350*12*19	137	4.03e ⁻⁴
주형보	I-700*300*13*24	0.02350	185	2.01e ⁻³
SLURRY WALL	—	1	—	0.0833
외측기둥	—	0.16	—	0.00213
내측기둥	—	0.177	—	0.01869
상부 슬래브	—	0.9	—	0.0608
중간 슬래브	—	0.5	—	0.0104
하부 슬래브	—	1.3	—	0.1831

5.2 시공순서에 따른 해석결과

굴착완료 후 버팀대 제거시 안정성을 고려한 원안설계와 시공성을 고려한 대안-1, 대안-2에 대하여 지하연속벽에 생기는 수평변위와 버팀대에 작용하는 축력을 계산하였고, 허용기준인 0.2%H (이종규 등, 1993)와 143.93t(서울특별시, 2003a & b)에 대하여 안정성을 평가하였다.

5.2.1 원안설계에 대한 안정성 분석

원안설계는 안정성을 고려하여 슬래브 타설 후 하부 버팀대를 모두 제거하는 것으로써, 슬래브 타설 시 하부 버팀대로 인해 작업능률이 떨어지는 단점을 지니고 있다. 해석결과는 그림 6에 나타난 바와 같으며, 지하 연속벽의 최대수평변위와 버팀대에 작용하는 최대 축력은 각각 21.0mm와 69.5t으로 허용기준인 40.6mm(0.2%H)의 수평변위와 143.93t의 허용축력을 만족하는 것으로 나타났다.

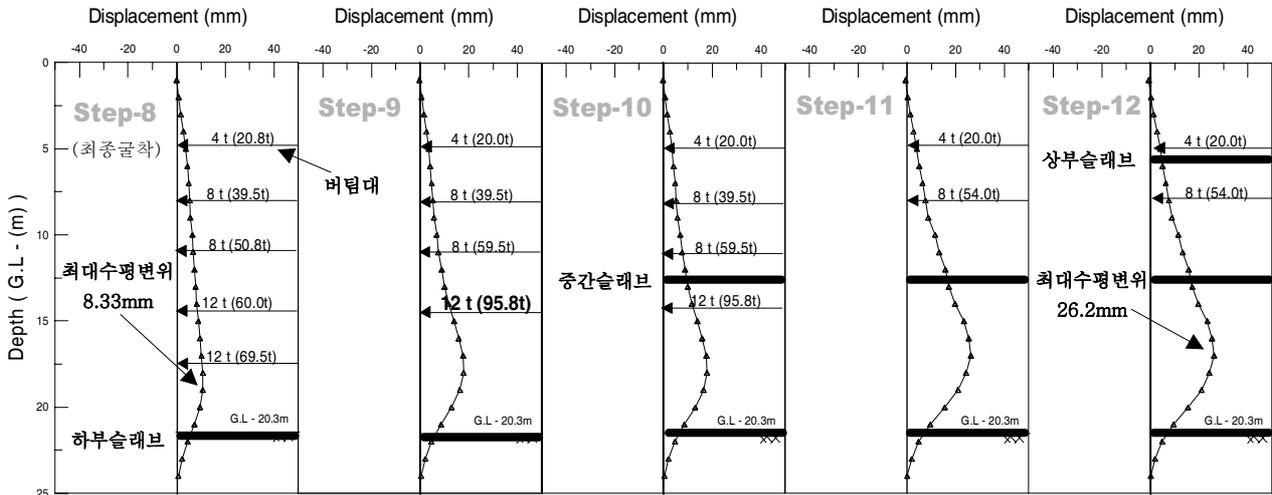


※ 버팀대 위 숫자는 선행하중(축력) 임.

그림 6. 원안설계 적용시 공사단계에 따른 흙막이벽체의 수평변위 및 버팀보 축력

5.2.2 대안-1에 대한 안정성 분석

원안설계가 시공성을 고려하지 못하는 점을 개선하기 위하여 슬래브 타설 전 하부버팀대 일부(1단)를 제거하여 안정성과 시공성을 모두 고려하는 방안에 대해 안정성 검토를 실시하였다. 그 결과 원안설계에 비해 큰 수평변위(262.mm)와 최대축력(95.8t)이 발생하였지만, 허용기준에는 모두 만족하는 것으로 나타났다(그림 (7)).

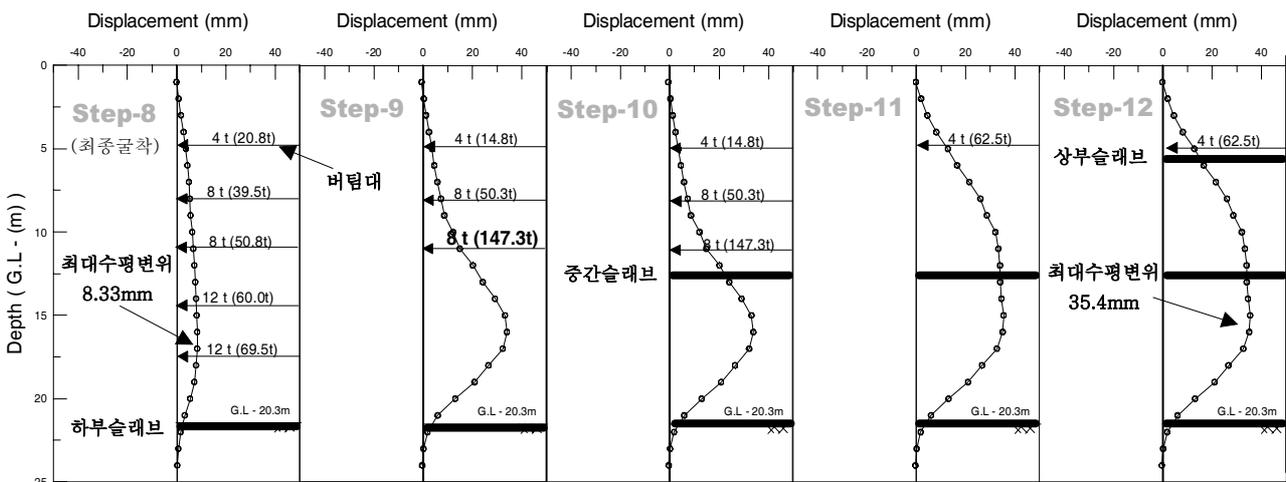


※ 버팀대 위 숫자는 선행하중(축력) 임.

그림 7. 대안-1 적용시 공사단계에 따른 흙막이벽체의 수평변위 및 버팀보 축력

5.2.3 대안-2에 대한 안정성 분석

대안-1에 비해 시공성을 더욱 개선하기 위하여 슬래브 하부 버팀대를 모두(2단) 제거한 후 슬래브를 설치하는 대안-2에 대하여 안정성을 검토하여 그림 (8)에 정리하였다.



※ 버팀대 위 숫자는 선행하중(축력) 임.

그림 8. 대안-2 적용시 공사단계에 따른 흙막이벽체의 수평변위 및 버팀보 축력

대안-2의 경우 지하연속벽의 최대 수평변위는 35.4mm가 발생하여 허용기준인 40.6mm를 만족하였지만, 버팀대에 작용하는 최대축력이 중간슬래브 설치 전 하부 버팀대를 모두 제거하는 단계에서 허용기준인 143.93t을 초과하는 147.3t이 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 대안-2의 경우 안정성확보가 안 되는 이유로 현장적용이 어려운 것으로 나타났다. 그러나 대안-2의 경우 2차원 응력-변형해석 만에 의한 것으로 실제 현장의 3차원 조건을 보면 제거되는 상부 버팀대를 실제로는 2개당 1개씩을 교호하여 제거하는 방법도 있어 이에 대한 3차원 응력-변형 해석에 의한 점검이 필요하다.

6. 결론

지하철 현장 계측자료와 지반굴착시 지하수위를 고려한 응력변형해석을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 버팀보의 수평간격인 2.5m를 고려하여 버팀보의 선행하중을 실제하중의 40%를 적용한 경우의 변위가 계측자료와 잘 일치하는 것으로 나타났다.
2. 굴착에 따라 발생하는 지하연속벽의 수평변위를 분석한 결과, 최대 8.3mm의 수평변위가 발생하여 허용수평변위인 40.6mm(0.2%H)에 비하여 안전한 것으로 나타났다. 또한 공사시 안정성 확보를 위하여 슬래브 설치 후 하부 버팀보를 제거하면, G.L-17m 지점에서 최대 21.0mm의 수평변위가 발생하는 것으로 나타났다.
4. 안정성과 시공성을 모두 고려하여 하부버팀보를 일부(1단)만 제거한 후 슬래브를 설치하는 대안 1의 경우 지하연속벽의 최대 수평변위와 버팀대의 최대축력이 26.2mm와 95.8t이 발생하는 것으로 나타나 허용기준인 수평변위 40.6mm와 최대축력 143.93t이하인 것으로 나타났다.
5. 시공성을 더욱 개선하기 위하여 하부버팀보를 모두(2단) 제거한 후 슬래브를 설치하는 대안 2는 지하연속벽의 최대 수평변위는 35.4mm가 발생하여 허용기준인 40.6mm를 만족하지만, 버팀대에 작용하는 최대축력이 중간슬래브 설치전 하부 버팀대를 모두 제거하는 단계에서 허용기준인 143.93t을 초과하는 147.3t이 발생하였다. 그러나 대안-2의 경우 2차원 응력-변형해석 만에 의한 것으로 실제 현장의 3차원 조건을 보면 제거되는 상부 버팀대를 실제로는 2개당 1개씩을 교호하여 제거하는 방법도 있어 이에 대한 3차원 응력-변형 해석에 의한 점검이 필요하다.

감사의 글

본 논문은 서울시 지하철 건설 본부의 지하철 9호선 건설관련 산·학 협동 연구과제에 의해 이루어진 결과로써 연구의 수행에 도움을 주신 서울시 지하철 건설 본부와 현대건설에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 이종규, 전성근, "다층지반 굴착시 토류벽에 작용하는 토압분포", 한국지반공학회지 제 9권 1호, 1993. pp59-68
2. 서울특별시(2003a), 지하철 9호선 908공구 건설공사(토목) 정거장 규모축소 및 설계기준 조정(가시 설분야)에 따른 구조계산서(3), 지하철 건설본부
3. 서울특별시(2003b), 지하철 9호선 908공구 건설공사(토목) 정거장 규모축소 및 설계기준 조정(가시 설분야)에 따른 구조계산서(5), 지하철 건설본부
4. 서울특별시(2002), 지하철 9호선 908공구 건설공사 지반조사보고서, 지하철 건설본부