

수치해석을 통한 지하철 구조물 인접 굴착에 따른 보강공법 적용사례연구

A Case Study on Reinforcement Method by Excavation Adjacent to the Subway Tunnel using Numerical Analysis

변 요 셉¹⁾ · 정 경 식¹⁾ · 천 병 식[†]

Byun, Yo-Seph · Jung, Kyoung-Sik · Chun, Byung-Sik

ABSTRACT : Recently, large and deep excavations are increasing. The damage of adjacent structures due to excavation has steadily increased with increasing construction demand. Especially in urban development and poor conditions, the excavation adjacent to the subway structures has caused a lot of problems. This paper was reviewed that the underground excavation and reinforcement of the status process through a case study on the field. And stability analysis through the case study evaluates applicability for reasonable reinforcement method by numerical analysis. As a result, the strata distribution condition of all 16 sites consisted of landfill from the top and distributed in the order of deposits, weathered soils, weak rock from the bottom. Also, when proceeding the excavation adjacent to structures, the location of site and layer conditions have highly effect on the results of the construction. Therefore, this study was applied reinforcement method to protect damage by excavation. Displacement and settlement were within allowable criterion and hence, stability of structure was analyzed as safe.

Keywords : Excavation, Adjacent structure, Stability analysis, Allowable criterion, Soil condition

요 지 : 최근 들어 대규모 및 대심도 지반굴착공사가 증가하고 있으며, 굴착으로 인한 인접구조물들의 붕괴사례는 건설수요와 더불어 꾸준히 증가하고 있고, 특히 도심지 개발 및 불량한 조건에서의 지하철 구조물과 인접하여 진행되는 굴착으로 인해 발생할 수 있는 문제점이 많아지고 있는 실정이다. 이에 본 논문에서는 서울시 내에서 수행된 16개 현장에 대한 사례연구를 통해 적용된 지하굴착공법과 보강공법의 현황을 고찰하였다. 또한 대표 현장을 선택하여 안정성 분석을 실시하였고, 적용된 굴착공법 및 보강방안에 대해 검토하고 이에 따른 공법의 적정성에 대해 검토하였다. 그 결과 16개 현장의 지층 분포상태는 모두 상부로부터 매립층, 그 하부는 퇴적층, 풍화토, 풍화암, 연암층의 순으로 분포하고 있었다. 또한 중요 구조물에 인접하여 굴착공사를 진행할 경우 구조물의 위치 및 지층조건에 매우 큰 영향이 있는 것으로 나타났다. 또한 도심지 특성상 일반 가시설 공법을 적용하여 지하철구조물과 인접하여 굴착이 진행될 경우는 별도의 보강공법의 적용이 필요할 것으로 판단된다.

주요어 : 굴착, 인접구조물, 안정성 분석, 허용기준, 지층조건

1. 서 론

산업발달과 도심지 확장으로 인하여 토지활용 극대화를 위해 기존 구조물과 인접한 대규모 및 대심도 굴착공사가 증가하고 있으며 동시에 불량한 지층조건, 도심지 내 깊은 굴착 등으로 인접 구조물의 문제도 꾸준히 증가하고 있는 실정이다. 이로 인해 굴착공사 중 흙막이 벽체의 안정성과 동시에 주변지반 거동과 인접 구조물에 미치는 영향 등에 대한 관심이 높아지고 있다.

일반적으로 지반굴착공사는 단계별로 굴착되며, 인접지반에 존재하는 다양한 구조물은 매 단계별 굴착과 더불어 발생하는 진행성 지반변위에 노출되게 된다. 이와 같은 진행성 지반변위에 노출되는 구조물에 발생하는 균열이나 변형은 지반변위가 진행되어감에 따라 서로 다른 거동 특성을

나타낸다. 뿐만 아니라 굴착이 완료된 후에 발생하는 최종 지반변위에 구조물이 일시에 노출되는 것과도 비교할 때 서로 다른 거동을 나타내게 된다. 그럼에도 불구하고 설계 등의 실무적 목적을 위하여 아직도 굴착지반 주변의 구조물에 대한 영향을 평가하기 위해서 진행성 지반변위의 영향을 고려하지 않은 굴착완료 후 발생된 최종지반변위를 이용하는 경우가 많아 실제구조물의 거동특성을 제대로 파악하지 못하는 경향이 있다(손무락, 2009).

굴착공사로 인한 주변지반 거동과 인접 구조물에 미치는 영향에 대한 연구는 국내에서는 김학문 등(1993)이 지하 굴착에서 인접건물의 거동에 대해 수치해석적 검토를 실시하였다. 양구승(1996)은 도심지 깊은 굴착 시 인접지반의 거동에 대하여 분석하였는데, 굴착 깊이에 대한 토류벽의 최대수평변위는 Clough의 0.2H 보다 작게 나타났으며, 일부

1) 정희원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정

† 정희원, 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 교수(E-mail : hengdang@unitel.co.kr)

측정 지점은 최종 굴착 후에도 변위가 증가되었다고 한다. 이민근(2002)은 지반 굴착 시 인접구조물의 손상 정도와 영향을 규명하기 위해서 굴착지점으로부터의 이격거리에 따른 인접구조물의 손상 정도를 각 변위, 처짐비, 수평변형률을 이용하여 평가하였다. 김명호(2003)는 터널 상부 근접 굴착으로 인한 기존 지하철터널의 안정성 분석을 수치해석을 통해 검토하였다. 국외에서는 Cording과 Hansmire(1975)는 터널 굴착에 의한 인접구조물의 잠재적 손상에 대해 평가하였고, 지표침하 트라프의 평균경사가 터널 상부에 위치한 구조물의 손상 기준으로 사용될 것을 제안하였다. Pott와 Addenbrooke(1996, 1997)는 유한요소해석을 통해 건물의 강성에 의해 지표침하가 억제되는 경향성을 분석하였으며, Netzel과 Kalberg(2001)은 굴착단계에 따른 인접구조물의 거동에 대해 수치해석적 연구를 진행하였다.

본 연구에서는 지하철 인접구조물의 손상평가를 16개 현장에 대한 사례분석을 통해 적용된 지하굴착공법과 보강공법의 현황 및 적정성에 대해 고찰하였다. 그 중 대표 현장을 선택하여 수치해석을 통한 안정 검토를 수행하여 계획된 보강방안의 합리성을 판단하였다.

2. 이론적 배경

굴착이 진행됨에 따라 발생하는 인접 지표침하에 의해 구조물에 미치는 손상영향은 지반의 조건, 굴착깊이, 지보 조건과 구조물의 유형 및 형상, 작용하는 하중의 크기 및 분포, 기초의 특성 등 많은 복잡한 요인들로 인해 구조물에 대한 허용침하량을 이론적으로 추론하는 것은 쉽지 않다. 이러한 이유로 구조물의 허용침하량에 대한 연구는 구조물에 대한 침하량과 손상영향을 현장계측에 의해 수행한 경험적인 방법을 토대로 발전되어왔으며, 구조물 손상평가에 관한 연구는 이론적 방법, 실험적 방법, 현장 계측에 의한 방법 등 다양하게 수행되어 왔다.

2.1 구조물 손상평가 인자

Burland(1995)는 Boscardin과 Cording(1989)의 연구결과를 확장하여 처짐비와 수평변형률에 근거한 기준을 제시하였다. 흙막이 굴착이 진행되면서 발생하는 인접 지반거동에 따른 구조물 손상평가를 위하여 그림 1과 같이 구조물의 처짐 곡선에서 관심있는 두 지점을 연결한 직선과 그 구간에서 발생한 처짐 곡선간의 최대 수직 이격거리인 처짐(Δ)을 두 지점의 거리(L)의 비인 처짐비(Δ/L)로 나타내었다. 또한 처짐은 배사형 처짐과 등사형 처짐으로 분류하고 있다.

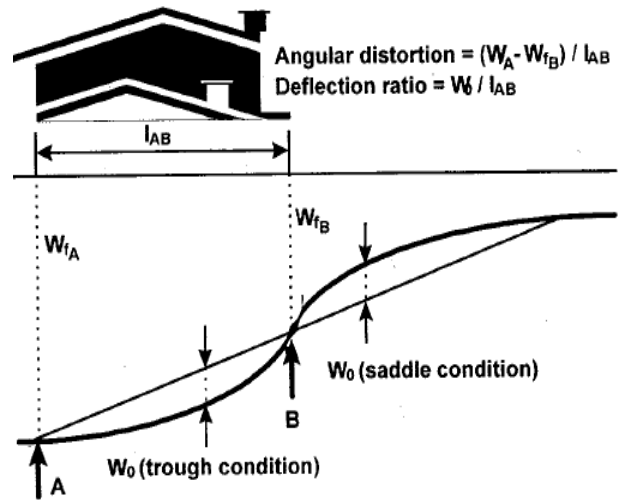


그림 1. 처짐비의 정의(Skempton 등, 1956)

Cording 등(2001)은 지반거동으로 인한 건물손상평가 시 구조물의 거동으로부터 손상영향을 평가하기 위해 각 변위를 계산하여 적용하였다. 평면조건에서의 구조물 각 변위는 관심 있는 한 부분인 4개의 모서리부에서 측정된 수직변위와 수평변위를 이용하여 산정한다.

2.2 구조물 손상평가 기준

Skempton과 MacDonald(1956)는 내력벽, 강재 및 철근 콘크리트 구조물 등의 98개 현장 계측결과를 통해 각 변위와 구조물의 손상영향의 상호관계를 연구하였다. 표 1은 임계각변위를 1/300에 대한 부등침하 손상한계를 보여주고 있으며, 토질별 종류에 따라 최대 부등침하량, 총 침하량을 제안하였다.

Bjerrum(1963)은 Skempton과 MacDonald(1956)가 수행한 연구 결과를 토대로 이론적인 해석과 광범위한 대규모 시험을 통해 부등침하에 의해 나타나는 각 변위의 변화와 건물의 손상정도를 예측할 수 있는 허용기준치를 그림 2와 같이 나타내었다.

Sowers(1962)는 여러 구조물에 대한 최대허용침하량에 대하여 구조물의 종류에 따라 전체침하, 경사, 부등침하로 구분하여 최대허용침하량을 표 2와 같이 제안하였다.

표 1. Skempton과 MacDonald(1956)의 부등침하 손상한계

각 변위 (δ/L)		1/300
최 대 부등침하	점 토	45mm
	사 질 토	30mm
총 침하량	점 토	80mm
	사 질 토	40mm

화토, 풍화암, 연암층의 순으로 분포하고 있다. 상부 매립 및 토사층은 강북지역에 위치한 현장에서는 그 분포두께가 다소 두껍게 출현하고 있으며 강남지역에서는 상대적으로 얇게 분포하고 있는 것으로 나타나고 있다. 풍화대층은 전체적으로 불규칙하게 출현하거나 혹은 출현하더라도 매우 얇게 분포하는 것으로 나타났다. 또한, 연구지역의 기반암인 연암은 지표하 약(-)5.0~30.0m에서 출현하고 있으며, 전술한 바와 같이 전반적으로 강남지역에서 다소 일찍 출현하는 것으로 나타났다.

4. 수치해석

지하철 인접구조물의 손상평가를 16개 현장 중, 대표 현장을 선택하여 수치해석을 통한 안정 검토를 수행하여 계획된 보강방안의 합리성을 판단하였다.

4.1 적용프로그램

수치해석에서는 범용 유한요소해석 프로그램인 VisualFEA를 사용하여 수행하였다. VisualFEA는 토목, 건축, 기계, 물리 등의 많은 분야에서 적용되고 있는 프로그램으로 기계, 구조 및 지반해석용 프로그램이며 직관적이고 편리한 사용자 인터페이스 기능을 제공하고 있다.

4.2 해석모델링

해석영역의 모델링에 있어서 좌우측 절점에 측면경계면을 위치시켜 수평방향의 변위를 구속하였다. 하부경계면은 최하단에 위치시켜 수직 및 수평방향의 변위를 구속하였다. 재료 모델링에 있어서 지반은 Mohr-Coulomb의 파괴규준을 따르는 탄소성 재료로 모델링했으며, 지하철 구조물, C.I.P, J.S.P, M.S.G, H-Pile, SLAB, 현장타설말뚝 등에 있어서는 Linear Elastic 모델을 적용하였다. 적용 시 횡방향으로 일정한 간격을 두고 설치되는 H-Pile, 현장타설말뚝 등에 대한 수치해석 시, 적용은 간격을 고려하지 않을 경우 횡방향으로 길게 늘어서는 형태로 실제보다 단면력이 크게 적용되므로, 본 해석 시에는 탄성계수를 간격으로 나누어 입력함으로써 횡방향 간격에 대한 문제를 고려하였다.

그림 4는 해석에 적용된 가장 최근에 수행된 ⑦ 현장의 유한요소망과 안정검토 평가를 위한 해석위치를 보여주고 있다. 표 5와 표 6은 해석에 사용된 지반 물성 및 지보재 물성을 보여주고 있다. 지반 물성의 경우는 점 조사인 지반조사의 대표성의 한계를 고려, 사례 현장들 모두 전반적으로 현장별 해당위치에 문헌자료 및 시험결과를 종합적으로 분

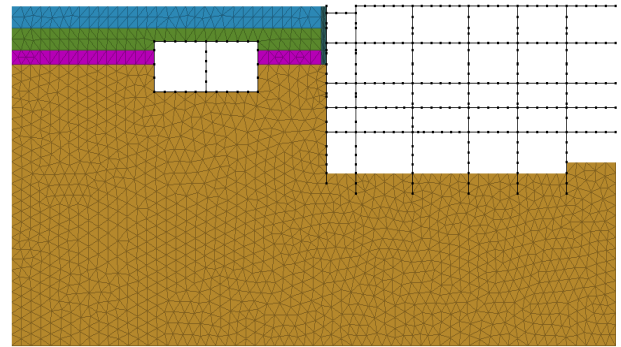


그림 4. 유한요소망

표 5. 해석에 사용된 지반 물성치

구분	단위중량 (kN/m ³)	점착력 (kN/m ²)	내부마찰각 (degree)	탄성계수 (kN/m ²)×10 ⁻³	포아송비
매립층	16.0~17.0	0.0	20~24	10~30	0.35~0.40
퇴적층	15.0~18.0	0.0~25	10~33	10~35	0.35~0.40
풍화토	19.0	10.0	32~33	25~55	0.32~0.35
풍화암	20.0~21.0	30.0	31~37	120~400	0.30~0.31
연암	21.0	12.0~50.0	33~40	360~800	0.25~0.30
보통암	22.0	70.0	42.0	550~1,100	0.25~0.28
경암	22.0~23.0	13.0~80.0	42.0~43.0	500~1,500	0.23~0.25

표 6. 해석에 사용된 지보재 물성치

구분	단위중량 (kN/m ³)	탄성계수 (kN/m ²)	포아송비
지하철 BOX	25	23,000,000	-
C.I.P	20	5,000,000	0.20
M.S.G, J.S.P	20	2,500,000	1.8~2.0
H-Pile, 철골	78	210,000,000	-
SLAB	25	23,000,000	-
현장타설말뚝	78	210,000,000	-

석, 평균 이하의 보수적인 값으로 적용한 것으로 나타났다.

시공과정의 모델링은 매 단계 지지체를 설치하기 위하여 굴착하는 심도까지가 가장 위험한 공정이므로 각 단 지보재 설치 전 굴착심도까지를 안정성 검토범위로 설정하였다.

모든 현장은 먼저 지반을 연직방향으로는 굴착 깊이의 2배 이상, 수평방향으로 굴착폭에 1배 이상 모델링하고, 초기 응력상태로 초기화 시킨 후 지하철구조물을 모델링하고, 흙막이 벽체 설치 및 초기굴착, 단계별 지지체 설치, 굴착을 반복 수행하였다. 영구 건축철골 및 slab를 이용하여 지지할 경우는 별도의 현장타설말뚝 설치를 고려하여 모델링한 후 동일하게 굴착단계해석을 수행하였다.

5. 안정해석 결과

5.1 지하철 구조물 손상평가 기준

조사된 16개 현장들은 모두 도심지이며 이용객이 많은 중요구조물인 지하철인 점을 고려, 손상평가 기준을 Sower (1962) 및 Bjerrum(1963)의 제안값 중 안전측의 결과를 주는 0.002S와 1/500로 선정하였다.

5.2 굴착계획을 고려한 지하철 안정성 검토

사례현장별 인접 지하철 구조물을 고려, 수치해석을 통한 안정성 검토 결과 나타난 각 단계 중 최대 침하량 및 부등침하량은 표 7과 같다.

검토결과 전 현장 안정성 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 지하철 구조물의 이격거리와 지층조건, 지하철 구조물 위치(심도), 굴착 깊이를 통해 평가 결과와 비교할 때 안정성에 영향을 미치는 요소는 지하철 구조물이 설치된 위치와 지층조건이 큰 것으로 판단된다. 예로 ①, ②, ⑧, ⑨ 현장과 같이 매우 적은 부등침하량을 나타내는 지역은 이격거리 및 설치심도가 굴착깊이에 비해 깊거나 암반지역에 위치한 것으로 조사되었다. 반대로 ⑥ 현장은 토사층에 구조물이 위치하고 굴착면에서 이격거리 및 설치 위치가 5.0m, 10.0m이며 굴착깊이(=24.0m)로 인한 영향이 크게 나타나는 것으로 나타났다.

이를 토대로 볼 때 도심지에서 굴착심도 및 지층조건과

표 7. 인접 지하철 구조물 안정검토 결과

구분	굴착 깊이 (m)	이격 거리 (m)	구조물 심도 (m)	최대 침하량 (mm)	부등 침하량 (mm)	각변위 (부등침하량/L)	판정
①	14.0	6.5	28.0	0.047	0.040	1/361,000	O.K
②	20.0	20.0	14.0	0.822	0.545	1/15,596	O.K
③	28.0	33.0	24.0	6.800	2.400	1/11,111	O.K
④	20.0	30.0	지상	3.442	0.273	1/29,304	O.K
⑤	21.0	5.0	10.0	6.637	9.878	1/2,430	O.K
⑥	24.0	15.6	5.0	5.600	2.300	1/1,309	O.K
⑦	24.0	5.5	2.0	2.290	1.100	1/15,636	O.K
⑧	25.0	25.0	23.0	0.000	0.000	-	O.K
⑨	15.0	12.0	지상	0.197	0.007	1/285,764	O.K
⑩	20.0	5.0	10.0	3.283	3.230	1/5,969	O.K
⑪	33.0	6.0	1.4	0.686	1.422	1/9,001	O.K
⑫	13.0	15.0	4.2	0.078	0.102	1/211,765	O.K
⑬	25.0	21.5	5.5	0.670	0.392	1/24,000	O.K
⑭	35.0	19.3	10.5	1.986	0.596	1/10,811	O.K
⑮	23.0	6.3	8.0	0.331	0.356	1/2,077	O.K
⑯	11.0	17.0	5.0	4.078	0.163	1/58,282	O.K

지하철 구조물의 이격거리가 매우 근접한 경우에는 대부분 굴착공법(표 3) 적용에 있어 강성벽체인 지하연속벽을 적용하였다. 그러나 실제 현장 규모의 협소함으로 인한 작업성과 시공성의 저하로 일반 가설벽체를 적용한 현장의 경우 굴착심도에 비해 매우 멀리 구조물이 위치한 ⑫ 현장을 제외하고 전 현장이 별도의 보강공법을 적용하고 심지어는 2열 및 H-Pile의 크기 및 간격을 변경하여 계획된 것으로 나타났다.

⑦ 현장의 경우 굴착 깊이 24.0m, 지하철 이격거리 5.5m, 구조물 토피 2.0m로 계획 구조물과 매우 근접하여 굴착이 계획되었으며 당초 일반구간에 계획된 흙막이 공법은 H-Pile (H-300×200×9×14, C.T.C 1.600m)+C.I.P Ø400mm이다. 이를 표 6에 선정된 지반물성치 중 보수적인 값을 이용, 검토한 결과는 그림 5, 6에 도시한 바와 같이 굴착면으로부터의 거리에 지표 최대침하량은 2.29mm로 나타났다. 또한 지하철 구조물의 상부측 최대 변위는 23.25mm, 하부측 최대 변위는 22.52mm가 발생하였다.

한편, 기존 지하철 구조물의 최대 부등침하 검토결과를 표 8에서 보는 바와 같이 좌측부 및 우측부는 각각 변위가 23.24mm, 25.42mm, 부등침하 2.20mm로 다소 불안정한 것으로 나타났다.

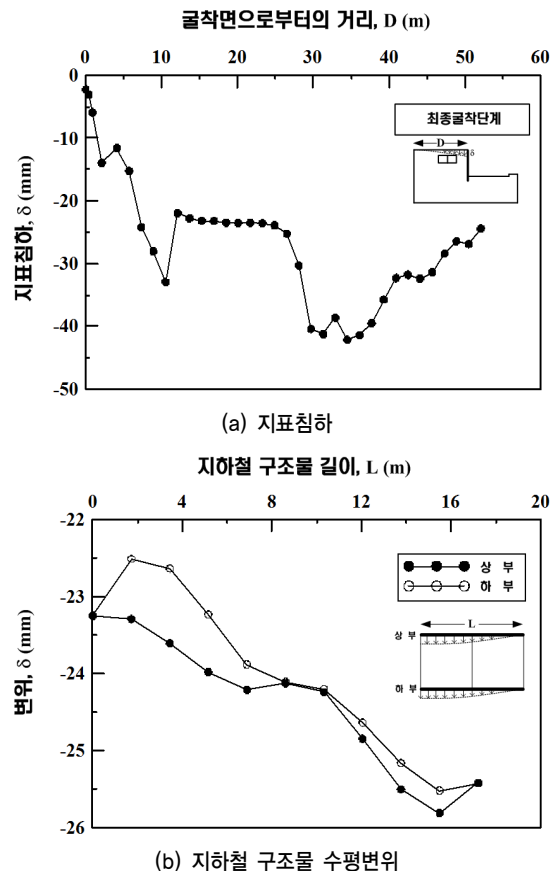


그림 5. 지하철 본선 BOX 인접구간 해석결과 그래프(보강 전)

표 8. 굴착에 따른 기존구조물의 최대 부등 침하량 검토 결과(보강 전)

인접 지하철하부기초(좌) (mm)	인접 지하철하부기초(우) (mm)	하부기초 부등침하량 (mm)	길이 (m)	각변위 (부등침하량/길이)
23.24	25.42	2.20	17.20	1/7,818

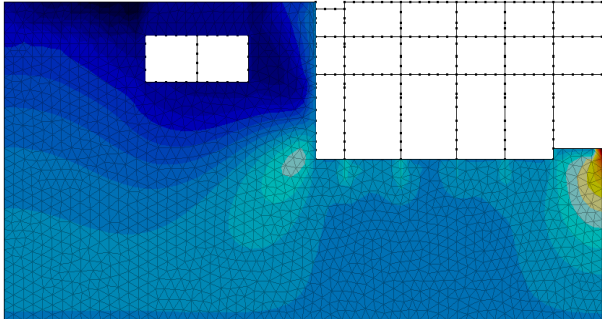
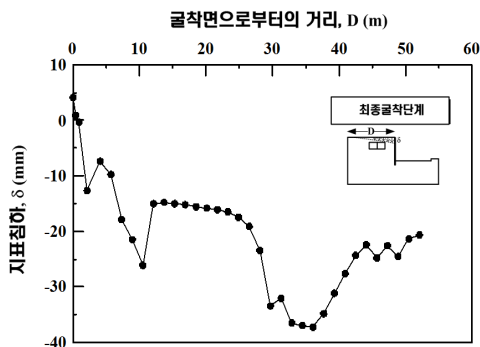


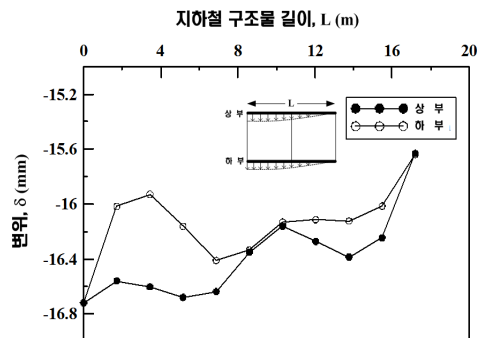
그림 6. 침하 contour(보강 전)

따라서 굴착으로 인한 피해를 방지하기 위해 적용된 흙막이 벽체공법 H-Pile(300 × 300 × 10 × 15, C.T.C 1,500mm) + C.I.P-2열(∅500, C.T.C 500mm), 중심간격 1.6m에서 1.5m로 적용, C.I.P 근입 심도 증가 조건을 적용하여 검토하였다.

검토 결과 그림 7에서 보는 바와 같이 굴착에 따른 지하철 구조물은 상부측에서 최대변위 15.63mm, 하부측에서는 최대변위 15.63mm가 발생하였다. 좌측부 및 우측부는 각각



(a) 지표침하



(b) 지하철 구조물 수평변위

그림 7. 지하철 본선 BOX 인접구간 해석결과 그래프(보강 후)

표 9. 굴착에 따른 기존구조물의 최대 부등 침하량 검토 결과(보강 후)

인접 지하철하부기초(좌) (mm)	인접 지하철하부기초(우) (mm)	하부기초 부등침하량 (mm)	길이 (m)	각변위 (부등침하량/길이)
16.72	15.63	1.10	17.20	1/15,636

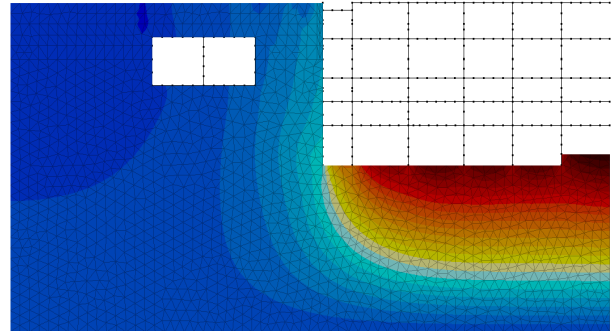


그림 8. 침하 contour(보강 후)

변위가 16.72mm, 15.63mm로 부등변위가 발생하여 구조물의 최대 발생부등침하량은 1.10mm로 나타났으며, 총침하량 15.63mm로 나타나 결정된 허용기준이내로 나타나 안정한 것으로 판단된다(표 9, 그림 7, 그림 8).

본 현장의 경우 적용 설계정수의 대표성, 시공과 설계의 정확한 일치의 어려움 등을 고려할 때 당초 계획된 지하철 구조물 구간을 일반구간 대비 안전하게 보강하여 계획한 것은 합리적인 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 증가되고 있는 도심지 개발 및 불량한 조건에서의 지하철 구조물과 인접하여 진행되는 굴착으로 인해 발생할 수 있는 문제점을 서울 시내에서 진행된 16개 현장의 사례 분석을 통해 적용굴착공법 및 보강공법 현황에 대해 고찰하였다. 그 중 대표 현장으로 일반구간과 지하철 구간을 구분하여 보강공법을 적용한 현장에 대해 수치해석을 통해 안정 검토를 수행하여 계획된 보강방안의 적용성을 판단하였다. 그것을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 조사된 16개 현장은 서울 도심지에 위치하고 있으며 지층 분포상태는 모두 상부로부터 매립층, 그 하부는 퇴적층, 풍화토, 풍화암, 연암층의 순으로 분포하고 있다. 상부 매립 및 토사층은 한강을 기준으로 북측은 그 분포두께가 다소 두껍게 출현하고 있으며 남측은 상대적으로 얇게 분포하고 있는 것으로 나타나고 있다. 조사된 현장을 기준으로 풍화대층은 전체적으

참 고 문 헌

- 로 불규칙하게 출현하거나 혹은 출현하더라도 매우 얇게 분포하는 것으로 나타났다. 또한 기반암인 연암은 지표 하 약 (-)5.0~30.0m에서 불규칙하게 출현하는 것으로 나타났다.
- (2) 사례현장은 평균 20.0m 이상 굴착현장으로 도심지 내 지하철과 5.0~33.0m 인접해서 굴착이 진행되는 점을 고려하여 전반적으로 강성벽체인 지하연속벽을 이용하여 계획되었으며 일반 가설공법을 적용한 경우에는 별도의 C.I.P 및 M.S.G, J.S.P 등의 보강공법을 사용하여 안정성 확보를 꾀한 것으로 조사되었다.
 - (3) 현장별 지하철 구조물을 고려한 안정검토는 범용 수치해석 프로그램인 Visual FEA를 이용하여 수행되었으며, 안정검토 결과 인접 구조물의 안정성은 지층조건 및 구조물 이격거리 및 위치에 영향이 큰 것으로 판단된다. 암반지역에 위치하거나 인접 구조물이 굴착깊이에 비해 이격 거리 및 설치 심도가 깊거나 멀 경우 총 침하 및 부등침하는 매우 적게 나타난 것으로 조사되었다. 또한 토사층에 구조물이 위치하고 굴착면에서 이격거리 및 설치 위치가 굴착깊이에 비해 얇거나 가까운 경우 반대로 매우 크게 나타났다.
 - (4) 향후 시공이 예정된 현장에 대해 지하철 구조물 구간에 보강 전과 보강 후에 대한 안정검토 수행결과, 도심지 특성상 시공성과 작업성으로 지하연속벽 등의 대규모 장비를 운용한 공법의 적용이 어려운 경우는 인접 구조물 위치와 지층조건을 고려하여 확실한 안정 확보를 위해 반드시 별도 지반보강이 필요할 것으로 판단된다.
 - (5) 이처럼 도심지 내에서 중요 구조물인 지하철과 인접하여 굴착공사가 이루어질 경우에는 반드시 지반 조사결과와 구조물의 위치 조건을 종합적으로 고려하여 확실한 안정성이 확보될 수 있도록 설계 시 굴착공법 및 보강방법이 결정되어야 할 것으로 판단된다.
 - (6) 조사된 사례현장 중 4개 현장은 향후 시공될 예정이며 12개 현장은 건물이 준공되거나 굴착공사가 완료된 현장이다. 따라서 향후 추가적으로 4개 현장이 완료될 경우 실제 현장에서 수행된 인접 지하철 구조물의 예측결과와 사전 예측결과를 비교하여 확실한 영향요소와 적용공법의 효과를 평가한다면 더욱 의미 있는 결과를 도출할 수 있을 것으로 사료된다.
1. 김명호(2003), *근접굴착에 의한 기존 지하철 구조물의 거동연구*, 석사학위 논문, 고려대학교, pp. 1~59.
 2. 김학문, 이봉렬(1993), *지하굴착에서 인접건물의 거동에 대한 수치해석적 검토, 1993년도 학술발표회 개요집(I)*, 대한토목학회, pp. 587~590.
 3. 손무락(2009), *지반굴착 유발 진행성 지반변위에 의한 인접구조물의 거동분석, 대한토목학회논문집*, Vol. 29, No. 4C, pp. 153~162.
 4. 양구승(1996), *도심지 깊은 굴착시 인접지반 거동에 대한 분석*, 박사학위 논문, 서울대학교, pp. 3~53.
 5. 이민근(2002), *지반굴착시 인접구조물의 손상 영향 평가에 대한 수치해석*, 석사학위 논문, 단국대학교, pp. 19~50.
 6. Potts, D. M. and Addenbrooke, T. I.(1996), *The Influence of an Existing Surface Structures on the Ground Movements due to Tunnelling*, *Proc. Int. Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft ground*, London,(eds. Mair, R. J. and Taylor, R. N.), Balkema, pp. 593~598.
 7. Potts, D. M. and Addenbrooke, T. I.(1997), *A Structures's Influence on Tunnelling-Induced Ground Movements*, *Proc. Int. Civil Engrs. Geotech. Engng.*, Vol. 125, pp. 109~125.
 8. Bjerrum, L.(1963), *Allowable Settlement of Structures*. *Proc. 3rd Europ. Conf. Soil Mechn. & Found. Eng.*, Wiesbaden, Vol. 2, pp. 135~137.
 9. Boscardin, M. D. and Cording, E. J.(1989), *Building Response to Excavations-Induced Settlement*, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, Vol. 115, No.1, pp. 1~21.
 10. Burland(1995), *Assessment of Risk of Damage to Buildings due to Tunneling and Excavation*, *International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, IS-Tokyo, pp. 324~329.
 11. Cording, E. J. and Hansmire, W. H.(1975), *Displacements around Soft Ground Tunnels-General Report*, *5th Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Buenos Aires, Session IV, pp. 571~632.
 12. Cording, E. J. and Long, J. H., Son, M., Laefer, D. F.(2001), *Modelling and Analysis of Excavation-Induced Building Distortion and Damage using a Strain-Based Damage Criterion*, *Conference for Response of Building to Excavations-Induced Ground Movement*, London, pp. 118~130.
 13. Netzel, H. and Kalberg, F. J.(2001), *Numerical Damage Risk Assessment Studies on Adjacent Building in Amsterdam*, *Conference for Response of Building to Excavations-Induced Ground Movement*, London, pp. 245~268.
 14. Skempton, A. W. and MacDonald, D. H.(1956), *Allowable Settlement of Buildings*, *Proc. Inst. Civil Engineers, London*, Vol. 5(part 3), pp. 727~784.
 15. Sowers, G. F.(1962), *Shallow Foundations, Foundation Engineering*, G. A. Leonarda, ed., Chapter 6, McGraw-Hill, Inc., New York, pp. 324~358.

(접수일: 2011. 1. 28 심사일: 2011. 3. 15 심사완료일: 2011. 8. 12)