

## 지하철 굴착공사에 따른 인접지반의 침하 해석

### Analysis of Peripheral Surface Settlement during Subway Excavation

문준석<sup>1)</sup>, Jun-Seok Moon, 권강오<sup>1)</sup>, Kang-O Kwon, 김홍석<sup>2)</sup>, Hong-Seok Kim, 장연수<sup>3)</sup>, Yeon-Soo Jang

<sup>1)</sup>동국대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Dongguk University.

<sup>2)</sup>서울시 지하철건설본부 토목공사팀장, Civil Dept. of Office of Subway Construction, S.M.G.

<sup>3)</sup>동국대학교 토목환경공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Dongguk University.

**SYNOPSIS** : In this study, the influence of groundwater variation and surface settlement adjacent to the excavation site of subway station on ○○ Gas station and the ○○ building is analyzed. Measurement data of surface settlement, horizontal deformation and groundwater level are used to verify the results of Caspe analytical method and FLAC numerical analysis. Variation of groundwater level adjacent to the excavation site is modelled by the 3-D groundwater flow program, MODFLOW. The results of both the analytical method and the numerical method were quite close to the measurement data of surface settlement.

**Key words** : surface settlement, excavation site, horizontal deformation, groundwater level, analytical method, numerical method.

## 1. 서론

본 연구는 지하철 굴착공사로 인해 주변 구조물인 주유소와 빌딩의 피해 가능성을 분석한 사례이다. 굴착공사가 주변 구조물에 직접적인 피해를 가했는지 규명하기 위해 현장조사와 공사관련 자료를 분석하였다. 또한 침하량을 산정할 수 있는 계측자료를 분석하여 굴착단계와 지하수위 하강에 의한 침하량을 산정하였다.

굴착공사로 인한 침하량과 침하의 영향범위를 산정하기 위해 필요한 지반특성치를 구하고자 추가적인 시추조사와 물성시험이 실시되었다. 주유소와 빌딩이 위치한 지반의 침하량을 산정하기 위해 공사기간중 측정된 지표침하 계측자료를 검토하였으며, 이 수치가 정확한지를 확인하기 위해 분석해 (Analytical method)와 유한차분에 의한 수치해석(Numerical method)을 실시하였다. 분석해에 의한 침하량 산정은 수평변위 계측자료를 이용하여 수직 침하량을 계산하는 Caspe(1996)방법을 사용하였으며, 이 결과에 굴착공사로 인해 하강된 지하수의 영향을 고려하였다. 지하수위 하강의 영향은 지하수위 계측자료를 이용하였고, 굴착면에서 떨어진 거리별 지하수위 분포를 유추하고자 3차원 지하수위 해석 프로그램인 ModFlow를 사용하였다. 지하수위 해석 프로그램을 사용한 것은 굴착면으로부터 떨어진 거리에 따

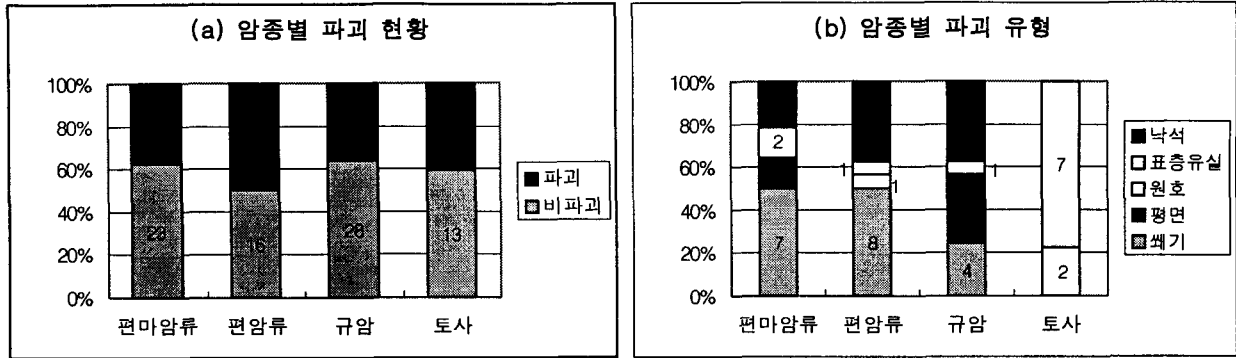


그림 6. 압중에 따른 절개면 파괴율(a)과 파괴 유형(b)

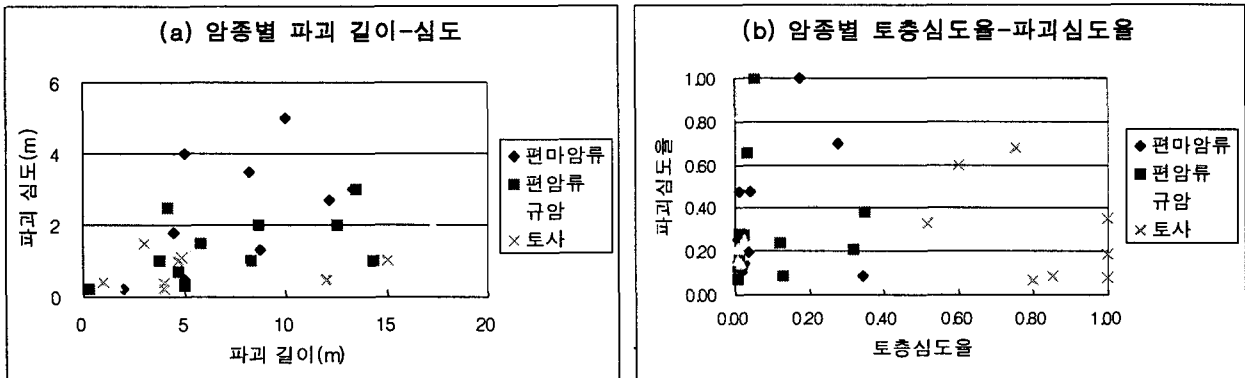


그림 7. 압중에 따른 파괴 길이-심도 변화(a) 및 토층심도율과 파괴심도율의 상관관계(b)

### 4.3. 풍화도에 따른 파괴유형

풍화 정도에 따른 파괴율 및 파괴 유형에 대한 분석은 그림 8와 같다. 풍화 등급에 따른 파괴율은 심한 풍화 등급에서 56.3%로 전체 파괴율(40.4%) 보다 월등히 높은 것으로 나타났으며, 표본수가 작은 완전 풍화를 제외하고는 거의 동일한 파괴율을 보여주고 있다(그림 8(a)). 이를 파괴 유형별로 알아보면 약간 풍화에서는 낙석이 46.2%(6 개소)로 가장 높은 파괴 유형을 차지하고 있으며, 보통 풍화와 심한 풍화에서는 썩기파괴가 가장 우세한 파괴 유형을 차지한다(그림 8(b)). 완전 풍화와 잔류 토층의 풍화 등급에서는 표층 유실과 원호파괴만이 관찰된다. 또한, 풍화도별 파괴 길이와 심도의 변화는 대체로 모든 풍화 등급에서 양의 상관관계가 있으며(그림 9(a)), 풍화 정도와 직접적으로 연관이 있는 토층심도에 따른 파괴심도의 변화는 심한 풍화(HW)에서 경향성을 갖는 것으로 나타났다(그림 9(b)).

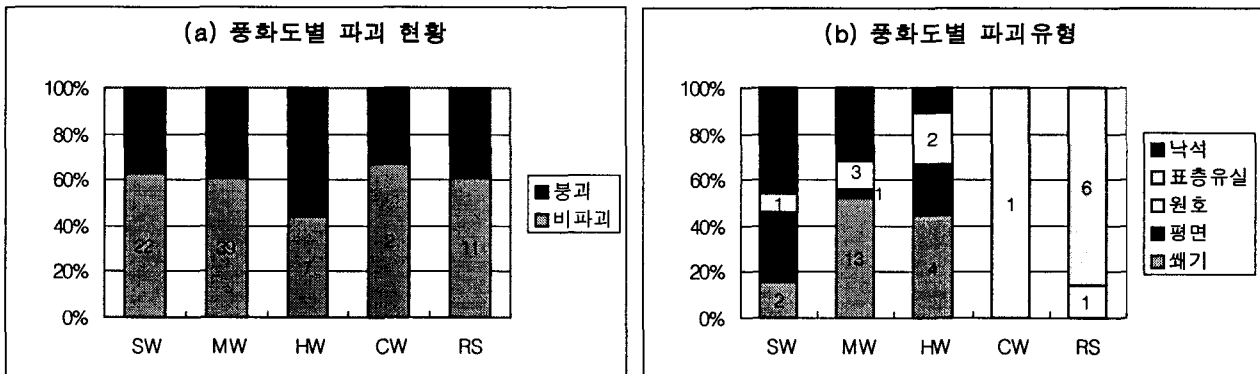


그림 8. 풍화도에 따른 절개면 파괴율(a)과 파괴 유형(b)

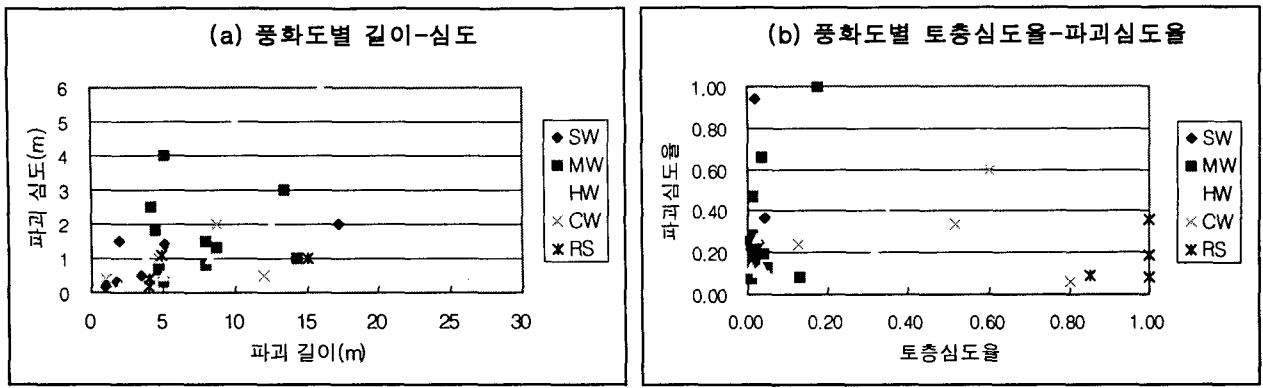


그림 9. 풍향도에 따른 파괴 길이-심도 변화(a) 및 토층심도율과 파괴심도율의 상관관계(b)

#### 4.4 파괴 유형별 현황 및 규모

파괴가 발생한 55 개소에 대해 보다 자세한 붕괴 특성을 규명하고자 규모에 대한 분석을 수행하였다 (표 3, 그림 10). 평균 파괴 길이와 높이는 원호파괴와 표층유실이 유사한 값을 보여주며, 썩기파괴와 평면파괴가 유사한 값을 보여준다. 파괴심도율은 썩기파괴와 원호파괴가 0.3~0.4로 비교적 높은 값을 갖고 있으며 평면파괴와 표층유실은 0.1~0.15의 낮은 값을 갖는다. 파괴 유형에 따른 길이-심도 변화와 길이-폭의 변화는 전체적으로 정의 상관관계를 보여주고 있다(그림 10(a)와(b)). 토층 심도에 따른 파괴 심도의 변화는 표층 유실의 경우 토층 심도와는 무관하게 일정한 파괴 심도를 갖는 것으로 나타났으며, 썩기파괴는 토층 심도가 증가하면서 파괴심도도 증가하는 경향을 보여주고 있다. 또한 원호파괴의 경우는 다른 유형의 파괴에 비해 일정한 토층심도/파괴심도 비를 갖는 것으로 나타났다.

표 3. 파괴 유형별 특성

파괴유형	썩기파괴	평면파괴	원호파괴	표층유실
평균 파괴폭(W)	10.3m	6.8m	7.2m	10.3m
평균 파괴길이(L)	9.1m	8.1m	6.1m	5.9m
평균 파괴심도(D)	2.4m	0.9m	1.5m	0.6m
평균 파괴높이(H)	7.7m	7.6m	4.8m	4.3m
평균 파괴심도율(A)	0.366	0.118	0.411	0.140
평균 토층심도	1.5m	0.8m	4.2m	4.8m
평균 토층심도율(B)	0.195	0.105	0.524	0.547

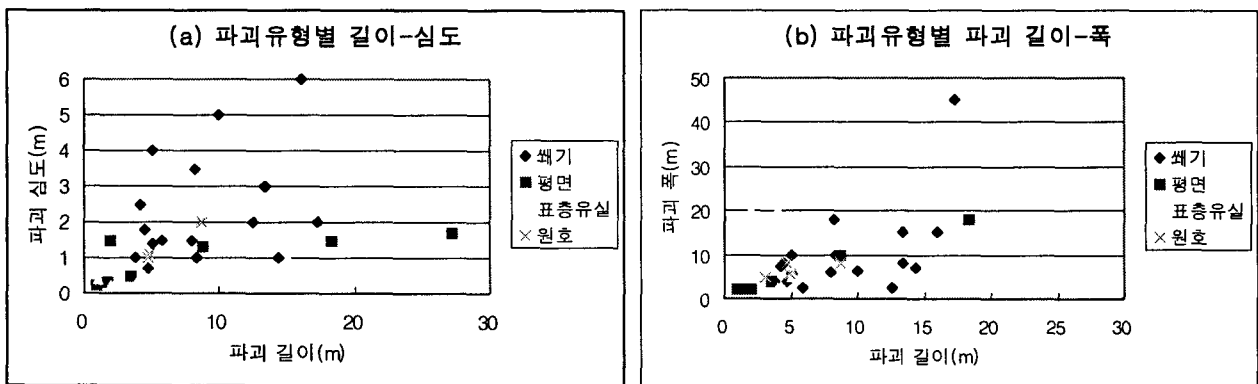


그림 10. 파괴 유형에 따른 규모

구간 인접부의 지하수위는 -24.0m로 나타났다. 그리고 개착구간에서 2.3m 떨어져 있는 빌딩시점의 지하수위는 -20.7m를 유지하고 있었고, 빌딩이 끝나는 부분의 지하수위는 -10.3m로 개착구간보다 13.7m 높으며, 빌딩이 시작되는 지점의 지하수위 감소가 큰 폭으로 발생하였다.

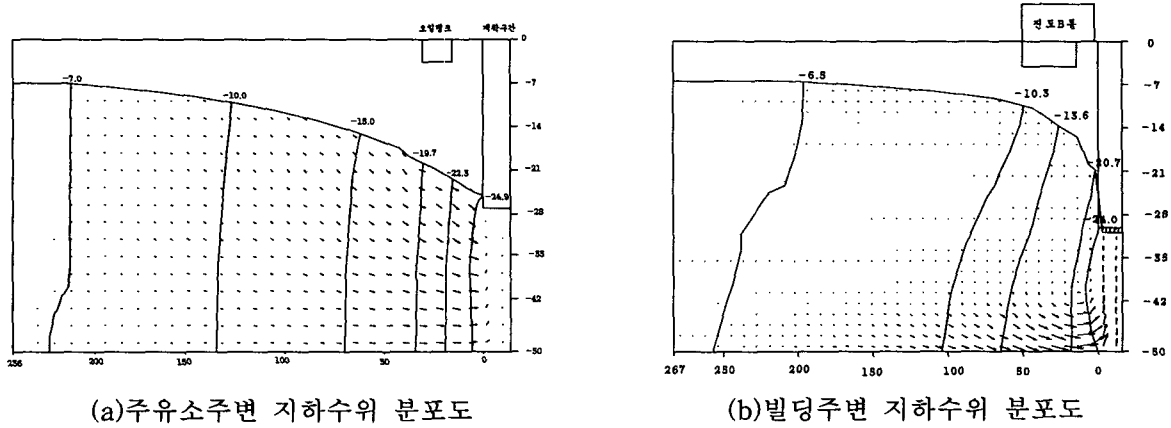


그림 3. 굴착에 의한 지하수위 분포도

#### 4. 지표침하 계측자료에 의한 침하량

주유소와 빌딩 주변에 매설된 지표 침하계에 의한 지표침하 결과는 표 1과 같으며, 지하철 개착구간 굴착깊이에 따른 침하량의 변화는 그림 4와 같다.

표 1. 지표침하 계측자료에 의한 침하량

대상 지반	주유소 주변					빌딩 주변				
이격거리 (m)	2.5	4.5	10.5	14.5	19.5	1.5	4.0	7.5	11.5	16.5
최종침하량(cm)	4.9	3.5	2.5	1.7	0.2	1.6	2.0	1.0	0.5	0.7

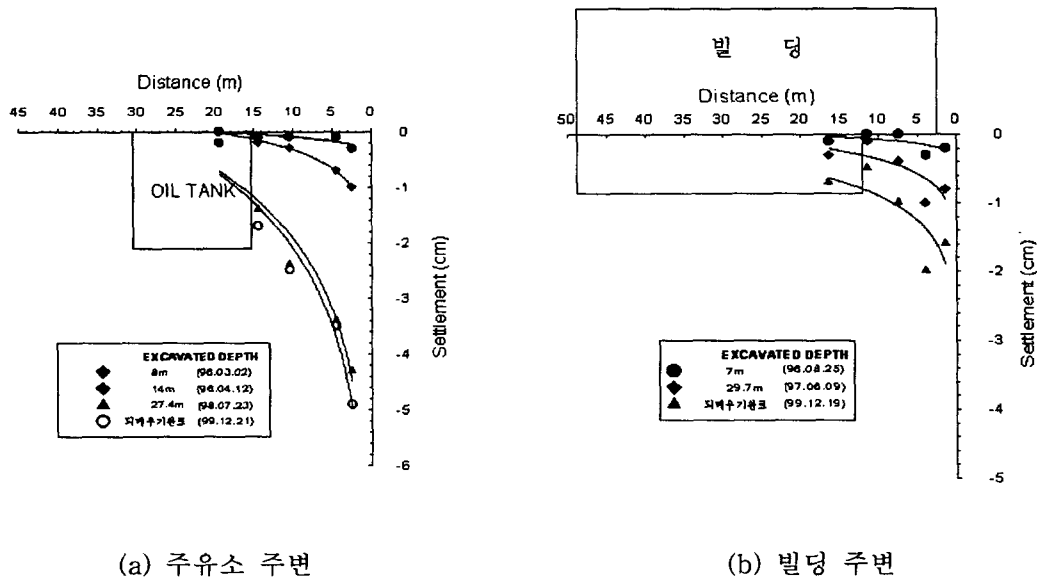


그림 4. 굴착깊이에 따른 지표침하의 변화

## 5. 분석해에 의한 침하량 산정

### 5.1. 수평변위 계측자료에 의한 침하량 산정

흙막이 벽체에 수평방향으로 변위가 발생하게 되면 지표면에는 수평방향 변위의 체적만큼 침하가 발생한다는 Caspe(1966)의 제안식을 이용하여 침하량을 산정하였다. Caspe의 제안식은 식 (2)와 같다.

$$S_w = 4 \cdot \Delta V / D \quad (2)$$

여기서,  $\Delta V$  : 수평변위에 의한 체적변화량,  $D$  : 영향 거리 =  $H_t \cdot \tan(45^\circ - \frac{\phi}{2})$

$$H_t = H_w + H_p, \quad H_p = 0.5 \cdot B \cdot \tan(45^\circ + \frac{\phi}{2}),$$

$B$  : 굴착 폭,  $\phi$  : 내부 마찰각,  $H_w$  : 굴착 깊이

벽체에서 떨어진 임의의 거리 ( $x$ )에 대한 침하량 ( $S_x$ )은 식 (3)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$S_x = \frac{S_w}{D^2} \times (D-x)^2 \quad (3)$$

### 5.2 지하수위 하강을 고려한 침하량 산정

지하수위의 하강은 토체에 유효응력을 증가시키고, 증가된 유효응력은 지반의 침하를 유발시킨다. 따라서, 사질토나 암반지반에 탄성이론을 적용하여 지하수위 하강으로 인한 침하량을 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$S_i = \int_0^H \varepsilon \, dh = \int_0^H \frac{\Delta \sigma}{E_s} \, dh = \frac{\Delta \sigma}{E_s} H \quad (4)$$

여기서,  $S_i$ 는 각 토층의 즉시침하량을 나타내고,  $H$ 는 각 토층의 두께이다.  $E_s$ 는 흙의 탄성계수이며  $\Delta \sigma$ 는 지하수위 하강에 의한 유효응력 증가분을 나타낸다.

표 2는 주유소주변과 빌딩주변의 수평방향 변위에 의한 침하와 지하수위 하강에 의한 침하를 나타낸 것이다. 또한, 총침하는 수평방향 변위 및 지하수위 하강에 의한 침하를 합산하여 구한다.

표 2. 수평변위와 지하수위 하강에 의한 이격거리별 침하량

대 상 지 반	주유소 주변						빌딩 주변						
	0.0	5.0	12.6	15.5	18.5	30.5	0	5.0	10.0	15.0	20.0	24.6	50.3
수평변위에 의한 침하(cm)	2.84	1.52	0.30	0.08	0.00	0.00	1.37	0.93	0.58	0.31	0.13	0.03	0.00
지하수하강에 의한침하(cm)	1.73	1.68	1.56	1.52	1.46	1.35	0.81	0.61	0.51	0.41	0.39	0.36	0.30
총침하(cm)	4.57	3.20	1.86	1.60	1.46	1.35	2.18	1.54	1.09	0.72	0.52	0.39	0.30
부등침하량비	0.0030	0.0017	0.0017	0.0005	0.0001	-	0.0013	0.0009	0.0008	0.0004	0.0001	0.0002	-

## 6. 수치해석에 의한 침하량 산정

지반을 굴착하게 되면 굴착면에 토압과 주변건물의 하중이 작용하여 굴착면 주변지반이 변위를 발생시키고, 이 거동의 특성은 굴착깊이와 지반 특성에 따라 달라진다. 본 연구에서는 주유소와 빌딩 주변지반의 굴착에 따른 지반의 침하량을 산정하기 위해 기초하부의 굴착깊이, 가시설구조물 및 지반의 비균질성 등을 고려하는 FLAC(fast lagrangian analysis of continua)을 이용하여 유한차분 수치해석을 실시하였다. 주유소지반과 빌딩주변지반의 경계조건은 그림 5에 나타난 바와 같다. 대상지반의 하부는 고정지점으로 되어있고, 양측면은 롤러지점으로 되어있다. 해석을 위한 격자망은 그림 6과 같이 개착구간 굴착면까지는 촘촘하게 굴착면 하부지반은 격자의 간격을 크게 하였다. 해석에 사용된 지층과 물성치는 Das(1984)와 Karol(1990)이 제안한 값을 사용하여 표 3과 같이 결정하였다.

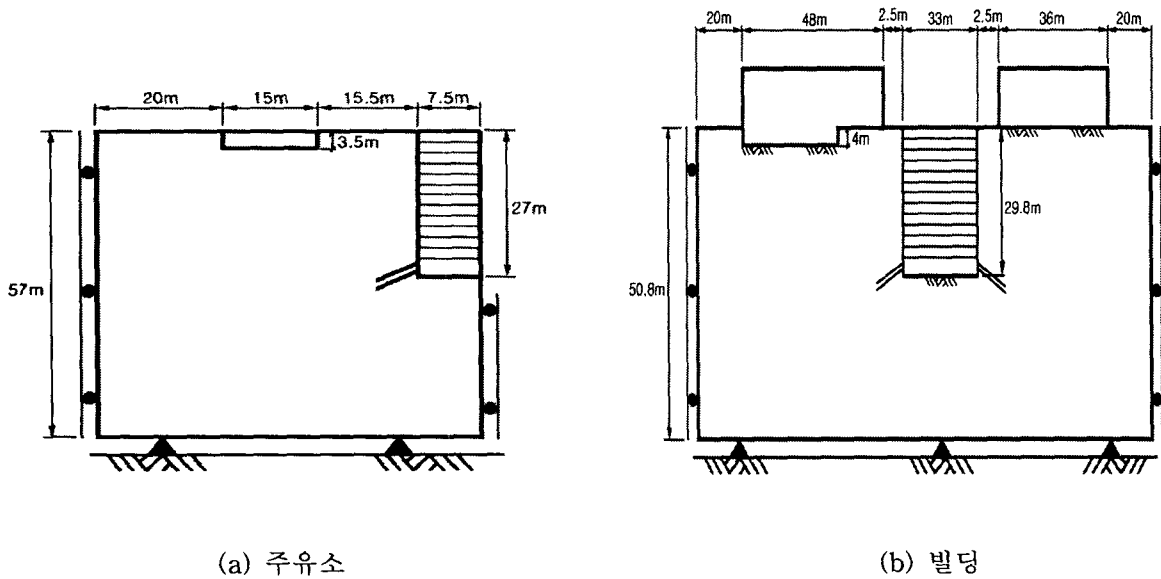


그림 5. 해석을 위한 모델의 경계조건

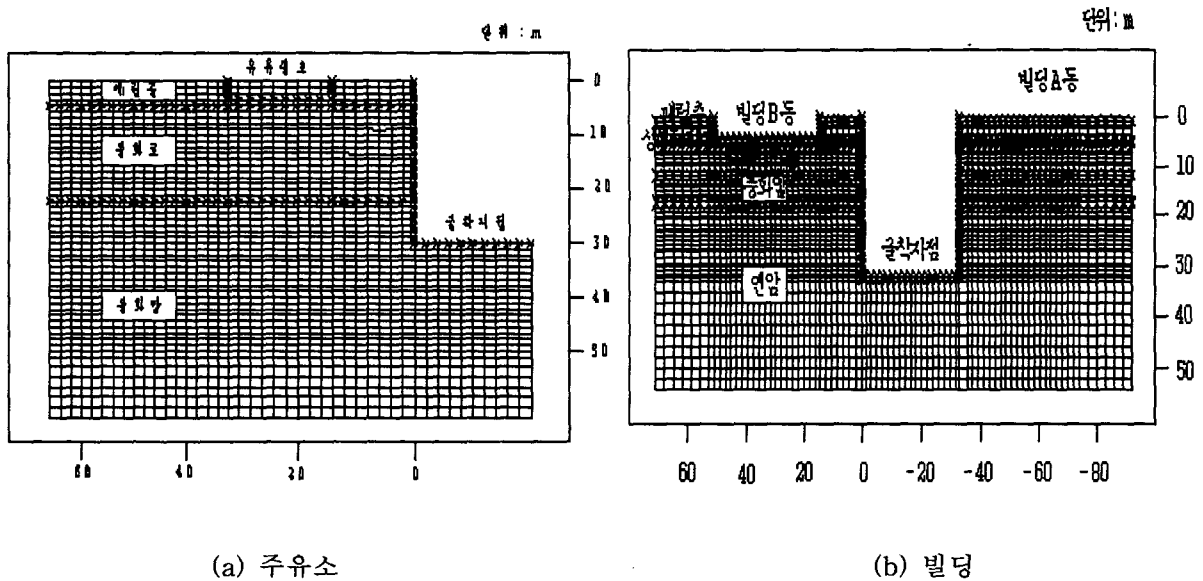


그림 6. 해석을 위한 격자 요소망

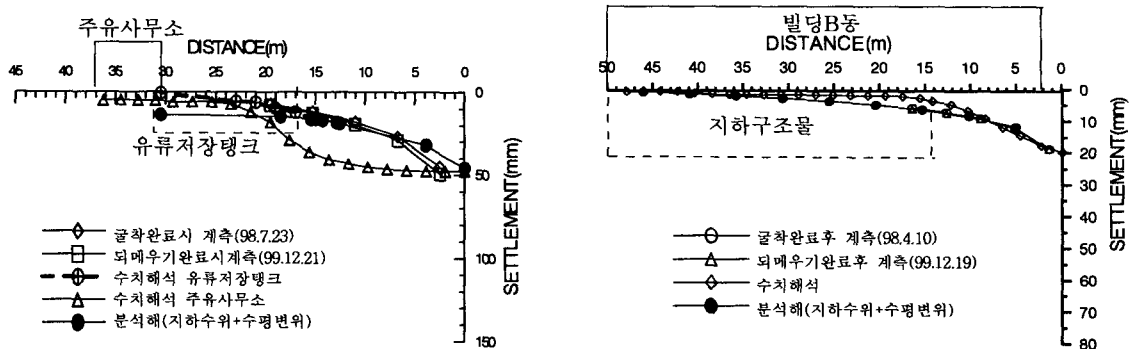
표 3 해석을 위한 지반 입력자료

위치	구분	탄성계수 (t/m <sup>2</sup> )	포아송비	단위중량 (t/m <sup>3</sup> )	체적탄성계수 (t/m <sup>2</sup> )	전단탄성계수 (t/m <sup>2</sup> )
빌딩	매립토	2,000	0.3	1.7	1,666	769
	상부퇴적층	1,000	0.3	1.8	833	388
	하부퇴적층	7,000	0.3	2.1	5,833	2,692
	풍화암	30,000	0.22	2.4	17,859	12,295
	연암	50,000	0.25	2.6	26,666	16,000
주유소	매립토	2,000	0.3	1.8	1,666	769
	풍화토	7,000	0.3	2.1	5,833	2,692
	풍화암	30,000	0.22	2.4	17,853	12,295

유류탱크 콘크리트기초 및 굴착면 벽체의 수치해석 결과는 분석해 및 계측자료의 수직변위와 근접한 것으로 나타났으며, 수직변위 형상도 그림 7과 같이 유사한 것으로 나타났다. 유류탱크 우측벽체의 수치해석과 분석해에 의한 최대변위는 각각 16mm, 14mm로 매우 근접한 값을 보였다. 주유소 대상단면에 대해서 주유사무소를 포함시키고, 유류탱크 기초부분을 제외한 단면의 수치해석은 굴착면과 20m이격된 지점에서 계측치와 분석해에 의한 결과가 비슷한 수직변위를 나타냈으나, 15m지점에서는 다소 차이를 보였다. 이는 지표침하 계측기가 설치된 곳이 주유탱크부분과 인접한 곳으로 주유탱크 콘크리트기초의 강성이 영향을 미쳤기 때문에 수직변위가 적게 발생된 것으로 사료된다.

빌딩 B동 주변지역은 최종굴착시 수치해석에 의한 최대변위는 19mm, 계측치 17mm, 분석해 21mm가 발생하여 3가지 분석이 상호 근접한 값을 보였다. 계측치, 분석해, 수치해석치 모두 토류벽체로부터 14.5m 떨어져 있는 지하실 구조물의 하부지반 강성이 지표면의 강성보다 큰 관계로 수직변위가 작게 발생하였으며, 굴착면쪽에 인접한 캔틸레버 구조물 부분에서는 굴착면 방향으로 갈수록 수직변위가 증가하였다. 변위의 형상도 분석해와 수치해석이 계측치와 매우 유사함을 나타내었다.

주유소 및 빌딩 B동 주변지반 모두 최종굴착 후 되메우기 작업시 발생하는 수직 변위량의 차이가 거의 나타나지 않아기 때문에 추가적인 수직 침하는 발생하지 않을 것으로 사료된다.



(a) 주유소

(b) 빌딩 B동

그림 7. 계측자료와 해석방법에 따른 수직변위해석결과 비교

## 7. 결 론

- 1) 주유소 주변 개착구간 굴착이 완료된 시점에서, Caspe 제안식에 의한 침하량과 지하수위 하강에 의한 침하량을 합산한 결과, 토류벽체로부터 15.5m 떨어진 유류저장탱크 하부의 침하량은 1.6cm정도 발생하였으며, 수치해석에 의한 침하량도 1.6cm로 동일한 값을 나타냈다. 이 지점에 대한 지표침하계에 의한 실측치는 1.2cm로 앞서 구한 두 해석치와 큰 차이를 보이지 않았다.
- 2) 빌딩주변의 해석에서도 개착구간 굴착이 29.7m 진행되었을 때, 수평변위에 의한 침하와 지하수위 하강을 고려한 구조물 하부의 최대 침하량은 구조물 단부(흙막이 벽체로부터 2.5m)에서 1.84cm 발생하였으며, 이 지점의 수치해석치는 1.90cm로서 지표침하계로 측정된 침하량 1.76cm와 비슷한 수치를 나타내었다.
- 3) 지하수위 비균질층과 굴착단계 공정을 고려할 수 있는 수치해석방법은 수평변위, 수직침하등 여러 계측자료와 매우 유사한 값을 갖고 있는 것으로 나타나 실제 지반의 거동을 해석하는데 유용한 수단으로 평가되었다.
- 4) 굴착깊이에 따른 수평변위 계측자료를 바탕으로 수직침하를 예측하는 Caspe방법은 지하수위 하강에 따른 침하를 고려하여야 현장 수직침하를 정확히 모사할 수 있는 것으로 나타났다.

## 참고문헌

1. 한정상(1998), 지하수 환경과 오염, 박영사.
2. Caspe, M. S.(1966), "Surface Settlement Adjacent to Braced Open Cut," *JSMFD*, ASCE, Vol, 92, SM4.
3. Das, B. M.(1984), *Principles of Foundation Engineering*, PWS Publishing Co..
4. Karol, R. H(1990)., *Chemical Grouting*, Second Edition, Revised and Expanded, Marcel Dekker, New York and Basel.