

# 도심지 굴착에서 지반의 거동예측과 계측관리

## Ground Behavior Analysis of Excavation near High Rising Building and Field Observation Control

\* 기홍석(전남대대학원) · 박근수(금강기업(주)) · 오재화(조선대) · 이문수(전남대)  
Ki, Hong Seok · Park, Keun Soo · Oh, Jae Hwa · Lee, Moon Soo

### Abstract

This study aimed at the technique for the construction control in braced excavation works. Selecting a case of Kwangju subway works, field observational values were compared with prediction using Plaxis's. Maximum observational values relevant to both horizontal and vertical proved satisfactory in that they were within the criteria. Numerical results by used Plaxis were overestimated greater than observational values, which meant the prediction were safe tendency. It must be emphasized that displacement measurement for neighboring important structures should be carried out in order to take countermeasure charge for construction methods, in case that the risk or failure was previewed.

### I. 서론

최근 경제 성장과 더불어 고도의 산업발전과 용지면적의 부족으로 도심지에서 교통 시설의 확충 및 대형 구조물의 건설이 활발하게 이루어져, 토지 활용의 극대화를 위해 기존의 구조물에 인접하여 대규모, 대심도의 굴착공사를 수행하고 있다. 그러나 이러한 도심지에서의 깊은 굴착시 굴착공사로 인하여 현장 주변 지반 및 토류 구조물에 변위가 발생하며, 이로 인해 인접 구조물과 토류구조물 자체의 안정성이 영향을 받을 수 있다. 특히, 토류벽 뒷편 지표의 침하 크기와 분포는 인접 구조물의 거동에 직접적으로 영향을 줄 수 있다. 따라서 가장 합리적이고 안전한 구조물의 설계, 시공을 위한 노력으로 지하구조물 및 인접구조물의 안전시공을 위한 현장계측관리가 국내 대부분의 현장에서 시행되고 있음은 당연한 추세라고 할 수 있다. 이와 같은 관점에서 현장계측에 대한 관심이 최근 들어 고조되고 있으나 실무진 또는 설계자의 계측 수행에 대한 경험 부족, 계측에 관련된 연구의 미흡, 관련기술자들의 이해 부족 등으로 인해 체계적이고 실용적인 계측이 수행되지 못하고 있는 것이 오늘의 현실이다. 특히, 현장 계측관리 수행시 시공상태에 따른 안전판단의 기준이 되는 측정자료에 대한 관리기준치에 관해서는 거의 연구가 이루어지지 않고 있다. 다만, 외국의 경험적인 자료를 관리기준치로 국내 현장의 계측관리에 도입하여 사용하고 있는 실정으로, 이러한 관리 기준치는 국내 건설현장의 시공방법 및 지반특성 등이 충분히 반영되지 않아 여러 가지 여건상 평가자료로써 적합성의 문제에 관한 이론이 제기되고 있다.

본 연구에서는 굴착으로 인한 주변 구조물과 지반거동을 파악할 목적으로 수행한 계측값과

유한요소 해석에 의한 해석값을 비교 분석하여 현장시공에 필요한 합리적인 지반정보를 제시 하는데 목적이 있다. 또한, 굴토 공사중 토류벽 및 인접지반의 거동을 측정하여 현재 상태의 안정성을 파악하고 토류벽의 장래 거동과 안정성을 예측하여 시공에 반영할 수 있는 정보를 제공하고자 하는데 그 목적이 있다.

## II. 지반 침하 예측방법

토류벽의 횡방향 변위는 굴착 토류벽 배면지반의 침하를 유발한다. 이것을 일반적으로 지반 손실(Ground Loss)이라 하는데, 지반손실은 인접구조물의 기초 또는 지하 매설물에 대하여 침하를 유발시켜 피해가 발생하므로 근접시공에서 매우 중요한 문제가 되고 있다.

토류벽의 변위에 따른 주변 지반의 침하는 토류벽 변위의 실측, 또는 계산에 의하여 구하고, 그 변위로부터 주변 지반 침하를 추정하는 방법과 버팀보 구조와 주변지역을 일체로 하여 해석하는 방법이 있다. 어느 경우에도 토류벽의 횡방향 변위를 해석하는 방법에 지배되는데, 현재까지 제안된 예측방법을 살펴보면 다음과 같다.

- ① Peck(1969)의 곡선 : 계측결과와 이용
- ② Caspe(1966)의 방법 : 이론적 방법
- ③ Clough et al.(1989) : 계측결과 및 FEM 해석
- ④ Fery et al.(1983)의 방법
- ⑤ 지하수 저하에 의한 방법
- ⑥ 유한요소 해석에 의한 방법(Plaxis, Bowles FADSPABW Program, etc)

## III. 사례연구

광주의 사례지역은 최대 굴착고가 16m 이내로 파악되었으며, 서울의 사례지역은 가시설 토류벽을 형성하고 스트러트 지보를 설치하면서 지표로부터 23.7m까지 굴착공사가 완료된 현장을 중심으로 이에 대하여 추정하고 검토하기로 한다. 필요한 토질정수는 설계치를 참고하고, 그외에는 경험치를 사용하여 해석을 실시하였다.

### 1. 경험식에 의한 침하량 추정

굴착공사시 인접 배면지반의 침하 발생을 야기시키는 요인으로는 토류벽체 및 지지구조체의 강성, 지반조건, 상재하중 등에 의하여 다양하게 발생되므로 정확하게 산출하는 것은 쉬운 일은 아니다. 특히 암반층에서 암반의 절리, 균열 등 불연속면의 형태에 따라 거동양상이 크게 달라지겠지만 Peck의 경험적인 곡선 이용법, Caspe의 벽체 수평변위에 의한 추정방법, Clough 등의 방법 및 Fry 등의 방법에 의한 경험 및 반 경험적인 방법을 사용하여 굴착지반의 주변의 예상 침하량 계산결과를 표. 1 이 계산결과를 살펴보면, 예상 침하량의 크기는 Fry 방법, Peck 방법이 크게 발생하는 경향을 보이고 있다.

### 2. 지하수위의 영향과 최대수평변위 및 지표침하량, 영향거리 분석

전술한 경험식을 이용하여 광주 현장과 서울 현장에 대해 굴착에 따른 지하수위의 영향을 해석하고 표. 2에 나타낸다. 최대수평변위와 최대지표침하량은 각각 표. 3~4에 나타낸다.

표. 1 경험식에 의한 거리별 예상 침하량 (단위 : cm)

토류벽으로부터 거리 (m)		0	10	20	30	40	50
Peck 방법	광주	10.71	4.81	3.51	1.66	0.00	0.00
	서울	13.03	8.29	4.74	1.89	0.24	0.00
Caspé 방법	광주	10.56	2.69	0.001	0.00	0.00	0.00
	서울	20.07	9.87	3.14	0.31	0.07	0.00
Clough 방법	광주	4.65	3.41	2.33	1.21	0.00	0.00
	서울	18.40	16.12	10.54	8.34	3.71	1.89
Fry 방법	광주	13.41	7.51	4.90	2.48	1.43	0.00
	서울	14.17	8.91	4.50	2.37	0.00	0.00

표. 2 경험식에 의한 지하수위 영향 범위

구 분	영향 범위 추정 (R) (m)	
	광 주	서 울
U S C R법	$1500 \times (16-2) \times \sqrt{10^{-4}} = 210 \text{ m}$	$1500 \times (23.7-2) \times \sqrt{10^{-4}} = 325 \text{ m}$
Sichardt법	$3000 \times (16-2) \times \sqrt{10^{-4}} = 420 \text{ m}$	$3000 \times (23.7-2) \times \sqrt{10^{-4}} = 650 \text{ m}$

위 표에서 알수 있는 바와 같이, USCR법과 Sichardt법은 경험식으로 차원이 일치하지 않는 경향이 있으며, 투수계수는 설계치를 인용하였다. 광주 현장의 경우  $H-h_w (=16-2)$ 는 당초 터파기 전 지하수위와 현재 굴착고(당시 터파기고)를 기준으로 계산한 값이며, 서울 현장의 경우도 계산은 동일하다. 따라서, 영향범위 R은 현장의 지질 조건, 투수계수 추정, 기초 조건, 지하수위 저하량 등에 따라 다소 가변적일 수 있음을 나타낸다.

표. 3 굴착시 최대 허용수평변위의 검토 결과

구 분	제 안 자	제 안 값	계산값(mm)		계측값(mm)		FEM(mm)	
			광주	서울	광주	서울	광주	서울
최대 수평 변위	Peck(1969)	1.0%H	185	235	34.58	32.07	63.8	27.84
	NAVFAC DM-7.2(1982)	0.2%H	37	47				
	Clough & O'Rourke(1990)	0.2%H	37	47				
	Chang Yu-Ou(1990)	(0.2~0.5)%H	37~92.5	47~117.5				
	이종규 등(1993)	0.2%H	37	47				

위 표에 나타낸 바와 같이 외국의 경우에는 지반의 조건에 따라 다소 차이를 보이지만 NAVFAC DM-7.2의 최대 허용수평변위는 굴착고(H)의 0.2%이고 Peck은 1.0%로 규정되는 반면에 국내의 경우(이종규 박사, 1993)는 굴착고(H)의 0.20%로 제안하고 있는데, 검토 결과는 광주지역의 경우, 최소 37mm에서 최대 185 mm를 허용하고 있으며, 서울지역의 경우, 최소 47mm에서 최대 23.5mm를 허용하고 있다. 본 현장의 계측결과도 오차를 감안한다면 최대 수평변위가 34.58mm(광주지역), 32.07mm(서울지역)로 나타나 잠정적으로 다른 추정변위량과 비교할 때 허용범위에 드는 것으로 나타났다.

표. 4는 최대지표변위량을 추정된 결과인데, 이 침하량은  $(0.67 \sim 1.33) \times \delta_{hm}$ 의 관계를 이용하여 해석하였다. 여기서 Goldberg, Mana & Clough, Chang Yu-Ou의 침하량은 표. 3의 Tezaghi & Peck의 결과를 이용하였다.

표. 4 굴착시 최대 지표 변위량의 검토 결과

구 분	제 안 자	제안값	계산값(mm)		계측값(mm)		FEM(mm)	
			광주	서울	광주	서울	광주	서울
최대수평변위를 이용한 최대 지표 침하량	Goldberg(1976) <sup>1)</sup>	(0.67~1.33) × δ <sub>hm</sub>	123.9~ 246	157.4~ 312.5	6.51~ 12.87	8.0~ 14.5	88.8	56.79
	Mana & Clough (1981) <sup>1)</sup>	(0.5~1.0) × δ <sub>hm</sub>	92.5~ 185	117.5~ 235				
	Chang Yu-Ou (1990) <sup>2)</sup>	(0.5~0.7) × δ <sub>hm</sub>	46.2~ 64.71	58.7~ 82.3				

표. 5 굴착심도에 따른 최대수평변위의 추정과 계측치의 비교(광주지역)

굴착깊이 H (m)	최대 수평변위 (mm)	Clough & O'Rourke (1990)	양 (1996)	계측치 (mm)
		0.2% H	0.28% H	
0		0	0	0
4		8	11.2	3.478
8		16	22.4	8.963
12		24	33.6	34.588
16		32	44.8	21.954
18.5		37	51.8	5.318

표. 6 굴착심도에 따른 최대 지표침하량의 추정과 계측치의 비교(광주지역)

굴착깊이 H (m)	최대 침하량 (mm)	Terzaghi & Peck (1967)	Clough & O'Rourke (1990)	국내 적용사례	계측치 (11K 605) (mm)
		0.5% H	0.3% H	0.28% H	
0		0	0	0	
5		25	15	14	
10		50	30	28	
13		65	39	36.4	10.815
15		75	45	42	12.872
17		85	51	47.6	6.514
18.5		92.5	55.5	51.8	
20		100	60	56	

### 3. 지하수 영향범위와 Boiling과의 상관성

굴착시 인근 주변의 지하수의 저하로 인한 반경(R)은 전술한 표. 2에 그 결과를 수록하였다. 계산에 필요한 투수계수는 앞의 3절에서 인용한 값과 동일하다. 그 결과, 광주지역의 경우, USCR법은 그 반경이 210m이고, Sichardt법은 420m로 추정되었으며, 서울지역의 경우, USCR법은 그 반경이 325m이고, Sichardt법은 650m로 추정되었다. 그러나 USCR법과 Sichardt법은 경험식으로서 차원이 일치하지 않는 경향이 나타나고 있으므로 주의하여야 하며, 당초 터파기 전 지하수위와 현재 굴착고를 기준으로 계산한 값이고, 영향범위 R은 현장의 지질 조건, 투수계수 추정, 기초 조건, 지하수위 저하량 등에 따라 다소 가변적일 수 있다. 굴착시 지반저면의

Boiling 현상과 소요근입장의 상관성을 알아보기 위해서 Terzaghi 경험식을 이용하여 계산하였다.

소요근입장은  $D_2 \geq \frac{F_s \times \gamma_w \times h_w}{\gamma}$  이므로 수중단위중량은 1.0 t/m<sup>2</sup>, 안전율은 1.5, 물의 단위중량은 1 t/m<sup>3</sup>, 굴착면과 배면의 수위차가 최소 1 m를 유지한다면, 근입장이 1.5m가 유지되어야만 Boiling이 발생하지 않을 것이며, 그 이하는 안정상에 의문이 있다고 판단된다.

#### 4. 유한요소해석(FEM)에 의한 지반거동

유한요소법은 임의의 크기를 가지는 요소로서 해석에 요구되는 굴착지반을 분할하고 여기에 흙막이 벽체를 설치한 후 단계별로 굴착하고 지보공을 설치하면서 각 분할점의 X, Y 방향 변위(수평 또는 연직)와 각 요소의 응력을 계산하는 방법이다.

해석결과, 최대 연직침하량과 최대 수평변위량은 각각 88.8mm, 63.8mm이며 계측값은 각각 12.87mm, 34.58mm로 관측되어 추정치가 계측치보다 다소 큰 값을 보였다. 서울지역은 각각 88.8mm, 63.8mm이며 계측값은 각각 12.87mm, 34.58mm로 관측되어 추정치가 계측치보다 다소 큰 값을 보였다. 표. 7에 광주지역과 서울지역에 대한 유한요소법을 사용하여 해석한 축력, 변형 및 전단력, 모멘트의 계산결과를 나타낸다.

표. 7 유한요소 해석결과

Strut Step		Depth (m)	Strut Force (kN)		Comp. Disp. (mm)		Shear Force (kN)		Moment (kN-m)	
광주	서울		광주	서울	광주	서울	광주	서울	광주	서울
0	0	0	0	0	11.255	0	0	0	0	0
1		1.5	230.748		3.967		59.25		88.88	
	1	2.5		134.336		4.362		5.5		20.58
2		3.5	127.792		2.197		6.25		22.38	
	2	4.5		141.255		4.587		6.43		20.95
3		5.5	153.288		2.635		36.46		16.30	
	3	7.0		139.655		4.535		4.05		20.97
4		7.5	159.756		2.747		41.17		19.64	
5	4	9.5	159.211	135.433	2.737	4.398	39.17	5.06	19.47	17.71
6		11.5	151.778		2.609		38.20		16.88	
	5	12.0		120.674		3.919		31.41		31.43
7		13.5	136.305		2.343		44.43		26.73	
	6	14.5		248.434		8.068		62.05		93.43
8		15.5	264.628		4.546		66.12		79.97	
	7	17.0		21.667		18.499		66.30		-97.94
		18.5	21.667		12.427		18.74		-41.55	
	8	19.5		67.156		15.591		130.79		-43.17
	9	21.5		12.01		10.283		12.00		0
비 고			1 ton = 9.8kN, 1kN ≒ 0.1 ton							

#### IV. 결론

근접시공에서 가장 문제가 되는 것은 지하구조물 자체의 안전한 축조도 중요하지만, 인접구

조물에 유해한 영향을 주지 않아야 할 것이다. 이를 위해서는, 관리기준치를 엄격하게 준수해야 할 것이며, 사전에 합리적인 지반조사를 수행하고, 관련된 프로그램에 의하여 모사(simulation)를 하고, 정도 높은 계측을 수행하여 유의할만한 차이가 발견되면, 이 원인을 분석하고, 다시 토류벽 시설의 보강이 이루어지는 현장 안정관리를 해야 할 것이다.

주요 결론을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 본 문에서 검토한 사례연구와 PLAXIS를 이용한 프로그램에 의한 변위가 관측치보다 크게 나타나며, 관측치가 관리기준치 이내이므로, PLAXIS에 의한 설계당시의 예측은 유용하며, 안전측이라고 판단된다.

둘째, 계측치가 관리기준치를 초과한 경우에는 공사를 일시 중지하고, 이에 대한 대책(설계보강 등)을 취한 다음, 계속공사를 해야 할 것이다.

셋째로 굴착공사의 착공과 동시에 인근 구조물에 경사계나 침하 계측장치, 균열의 진전유무 등을 알 수 있는 현장 계측장치를 부착하여 구조물에 유해한 변위 발생유무 등을 면밀히 분석하여 역해석에 의한 인근주변의 물성치를 결정하고, 다시 최종변위를 예측하는 한편, 피해보상 등의 문제도 해소해야 할 것이다.

## 참고 문헌

1. 과학기술 편집부 역, 1994, "최신 사면·토류공법 총기술", 과학기술처 pp. 1297~1298
2. 김명모, 정충기, 양구승, 1996, "도심지 굴착시 발생하는 인접 지반 지표 침하분석", '96 봄 학술 발표회 논문집, 한국 지반공학회, pp. 65~86
3. 한국지반공학회, 1992, "굴착 및 흩막이공법", 지반공학 시리즈 3권, pp. 433~446.
4. Caspe, M. S., 1996, "Surface settlement adjacent to braced open cuts", JSMFD, ASCE, Vol. 92, SM4, pp. 51~59
5. John Dunicliff, 1988, "Geotechnical instrumentation for monitoring field performance", John Wiley & Sons, Inc., pp. 207~209
6. NAVFAC, 1981, DM-7.2, pp. 13~20
7. O'Rourke, T. D., 1981, "Ground movements caused by braced excavations", ASCE, Vol. 107, No. GT9, September, pp. 1159~1177
8. Peck, R. B., 1969, "Deep excavations and tunnelling in soft ground", Proc. of 7th Inter. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Mexico, Vol.4, pp. 259~290
9. Terzaghi, K. and Peck, R. B., 1967, "Soil Mechanics in Engineering Practice", 2nd Ed., John Wiley and Sons, Inc., New York, pp. 572
10. Tschebotariff, G. P., 1973, "Foundations, Retaining and Earth Structures", 2nd Ed., McGraw-Hill Book Co. Inc., New York, N. Y.