

현장계측과 수치해석을 이용한 가설 흙막이 구조물의 변형특성 연구

김종우¹⁾

Deformation Behaviors of Temporary Tieback Wall during Excavation Works

Jong-Woo Kim

ABSTRACT During excavation works for underground facilities, temporary tieback wall with earth anchor system was investigated for safety's sake. An excavation 9.7 meter deep was monitored by slope inclinometer in twelve measuring points. Instrumented lateral displacements of the wall during 177 days are represented. Especially, lateral displacements of the two positions under completely different condition are compared to investigate the effect of backfilling between soldier pile and the soil behind wall. The deformation behaviors of the wall according to both depth and elapsed time are discussed. Finally, a numerical analysis by the program FLAC was performed, and calculated displacements are compared to measured ones.

1. 서 론

최근 도심지 지하공간의 효율적인 이용을 위하여 지하개발공사가 빈번히 실시되고 있으나, 공사에 따른 각종 피해사례가 자주 발생하여 큰 사회문제로 되고 있다. 개착공법중에서 엄지말뚝과 어스앵커(earth anchor)를 이용한 가설 흙막이 구조물은 시공상의 편의와 저렴한 공사비 등으로 인해 흔히 사용되고 있으며, 이는 내부의 영구 구조물이 구축될 때까지의 단계적인 지지능력만을 요구한다.

그러나, 굴착공사중에 굴착진행에 따른 벽체배면의 수평변위가 크게 발생하면, 가설 구조물의 안정성 뿐만 아니라 인접건물이나 지중매설물에 피해를 줄 가능성이 크므로 이를 방지하기 위한 다각적인 노력이 경주되어야 하며, 이를 위해 현장계측이 시공과 필수적으로 병행되어야 한다. 즉, 굴착공사시에 흙막이 구조물 또는 주변지반의 거동을 현장계측함으로써 벽체의 이상 거동을 사전에 파악하여 안전대책을 강구할 수 있으며, 계측된 자료를 집적하고 이를 시공에 귀환 적용함으로써 안전 시공을 유도할 수 있다.

최근 국내에서도 현장계측이 일부 실시되어 보고되고 있으나, 계측전문가의 부족과 계측자료의 집적이 빈

약하며 또한, 다양한 지반조건에 따른 흙막이 구조물의 거동은 상이하기 때문에 신설 현장에서 다른 기설 현장의 계측자료를 이용하기에는 어려움이 있다.

한편, 배면토의 토압을 효과적으로 지지하기 위해서는 흙막이벽과 배면토 사이의 뒷채움이 매우 중요한 요소로 작용한다. 뒷채움토의 다짐이 부족한 경우, 벽체 배면의 잠재 파괴 토괴(potential failure wedge)는 낮은 응력 수준하에서도 전단파괴되기 쉬우므로 흙막이 벽과 인접건물의 안정성에 큰 영향을 미칠 수 있다.

본 연구에서는 엄지말뚝과 어스앵커를 사용한 가설 흙막이 구조물에 대한 벽체배면의 심도별 지중 수평변위를 경사계(inclinometer)를 사용하여 현장계측하고, 수치해석을 통해 계측결과를 검토하였다. 또한, 뒷채움이 양호한 지점과 불량한 지점을 각각 선정하여 흙막이 벽의 수평변위에 대하여 뒷채움토가 미치는 영향을 조사하였다.

2. 굴착현장과 계측개요

2.1 굴착현장

*1995년 6월 5일 접수

1) 정회원, 청주대학교 자원공학과 전임강사

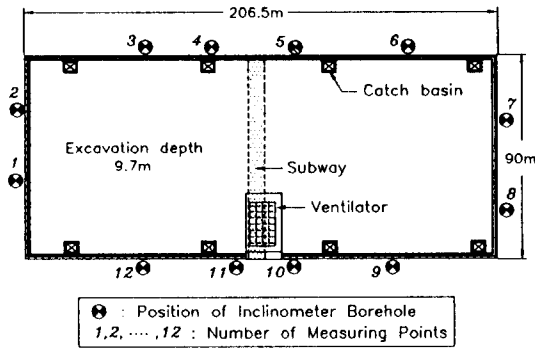


Fig. 1. Plan of excavation works.

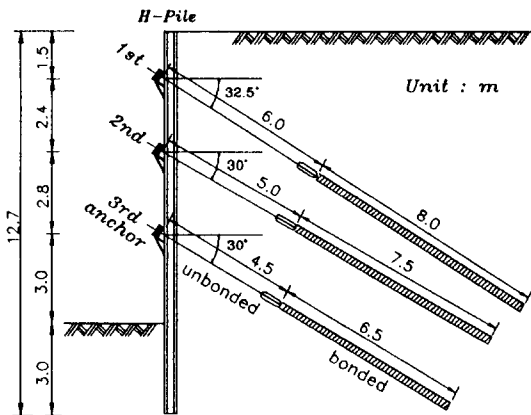


Fig. 2. Cross-section through tieback wall.

현장계측이 실시된 굴착공사는 206.5m×90.0m의 지표면적을 지표하 -9.70m 깊이로 굴착하는 것으로서, 벽체토압을 지지하는 가설 흠막이 구조물은 업지말뚝, 토류판, 띠장, 어스앵커 등으로 구성되었다. 이 중에서 업지말뚝의 규격은 mm단위로서 H-300×200×9×14이고, 토류판은 생송재 150×100×1750이며, 띠장은 H-300×300×10×15 이고, 어스앵커는 $\phi 12.7 \times 4$ 본인 연선이 사용되었다.

굴착작업은 3단계로 진행되었으며, 1단, 2단, 3단 어스앵커는 각각 지표하 -1.5m, -3.9m, -6.9m 지점에 설치되었다. Fig. 1은 굴착현장의 평면도를 나타낸 것이고, Fig. 2는 굴착완료 후의 단면도를 나타낸 것이다.

한편, 본 지역의 지질은 대체적으로 지표로부터 매립토, 풍화잔류토, 풍화암, 연암, 경암의 순으로 분포하였으며, 이 중에서 매립토는 지표로부터 평균 7m의 심도를 가지며 분포하는데 표준관입 저항치가 4/30~19/30 정도로서 매우 연약하였다.

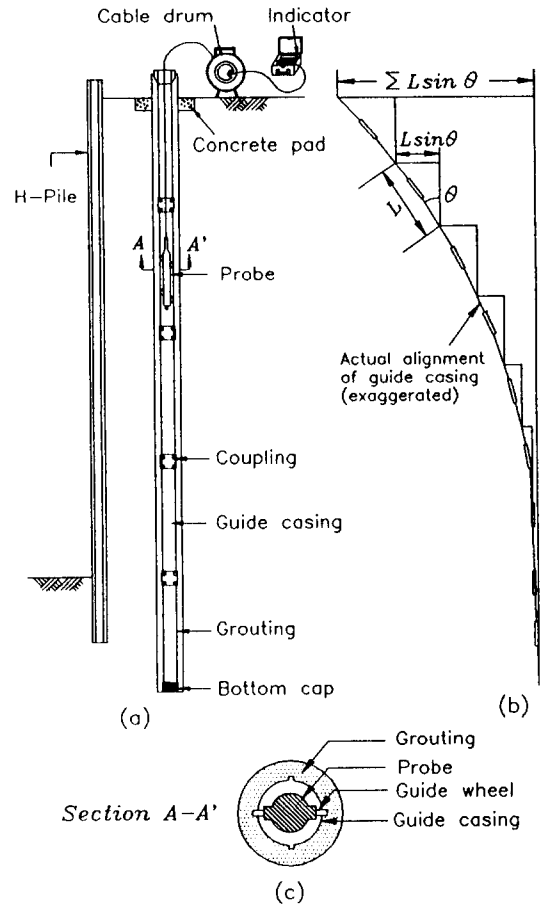


Fig. 3. Inclinometer system, (a) Installation and measurement, (b) Principle, (c) Section A-A'.

2.2 계측기

본 굴착현장의 흠막이벽 가장자리를 따라 심도 15.0m이고 직경 10cm인 공 12개가 천공되었으며(Fig.1 참고), 경사계(영국, Soil Instruments 社)를 사용하여 지하굴착에 따른 흠막이벽 배면의 심도별 지중 수평변위가 계측되었다. 대략적인 설치 및 계측작업 순서는 다음과 같다.

- (1) 벽체 배면토에 수직 천공을 실시한다.
- (2) 천공된 공에 경사계관(guide casing)을 삽입하고 그라우팅을 실시한다.
- (3) 탐침(probe)을 경사계관에 투입하여 심도별 각변위(θ)를 연속적으로 계측한다.

Fig. 3(a)는 경사계의 설치도를 나타낸 것으로, 이 중에서 탐침은 한쌍의 바퀴가 부착되어 있어 경사계관의 십자형 Key 홈을 따라 움직이면서 심도별 각변위를 측

정하는 것이다. 본 계측에서는 지하 15 m 지점에서 지표면까지의 심도별 각변위를 50 cm 간격으로 측정하였으며, 이때 지하 15 m 지점은 不動點으로 가정하였다.

경사계를 사용하여 심도별 각변위를 연속적으로 측정하고 이를 계산 처리하면 지중 각 지점의 수평변위를 계측할 수 있다. Fig. 3(b)는 경사계의 작동원리를 도시한 것으로, 임의 구간의 수평변위는 (1)식으로 계산되고, 지표면에서의 수평변위는 (2)식과 같이 (1)식을 누산함으로써 구해지는데, 여기서 L은 50 cm 이다.

$$\text{Sectional displacement} = L \times \sin\theta \quad (1)$$

$$\text{Total displacement} = \sum(L \times \sin\theta) \quad (2)$$

where, L: Gage length

2.3 굴착 및 계측작업

굴착공사는 1단 굴착(지표하 -1.5 m), 2단 굴착(지표하 -3.9 m), 3단 굴착(지표하 -6.7 m) 및 최종 바닥굴착(지표하 -9.7 m)의 순서로 실시되었으며, 어스앵커 설치작업은 각 단 굴착완료후에 실시함을 원칙으로 시행되었다. 계측작업은 굴착공사중에는 주 2회 실시되었고, 굴착완료후에는 주 1회 간격으로 실시되어, 초기치 계측 이후 총 177일 동안 실시되었다. 계측 종료일에서는 기둥 및 벽체의 콘크리트 타설공사가 진행중이었으며, 모든 계측치는 일정치에 수렴되어 있었다.

3. 계측결과 및 검토

흙막이벽 가장자리를 따라 총 12개 지점에서 지중 수평변위가 계측되었으며, 본 절에서는 지질 조건 및 시공 상태가 대별되는 두 지점(No. 8, No. 11)의 변위 계측치를 제시하고 검토한다. 두 지점의 위치는 Fig. 1과 같다.

먼저, 두 지점의 지질 조건을 비교하면, No. 8 지점은 매립토의 두께가 7.8 m인데 비해, No. 11 지점은 매립토의 두께가 12.0 m로서, No. 11 지점의 지질 조건이 상대적으로 취약하였다. 다음으로, 두 지점의 주변 환경을 비교하면, No. 8 지점은 폭 20 m인 포장 도로에 인접해 있고, No. 11 지점은 토사 반입 차량의 주통행로로 이용되는 폭 10 m인 비포장 도로에 인접해 있어 이동 하중의 영향을 크게 받는 지점이다. 또한, No. 8 지점의 시공 상태는 대체로 양호한 반면에, No. 11 지

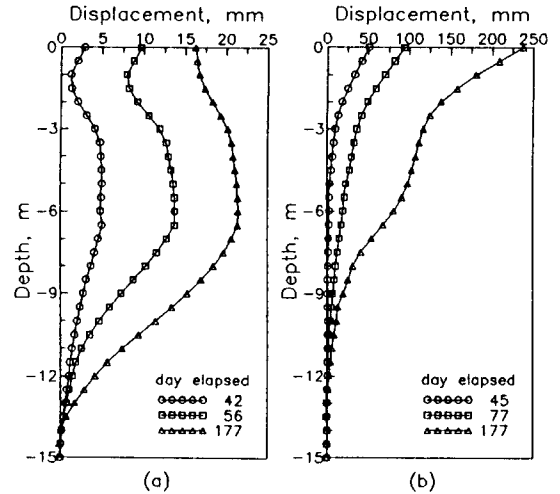


Fig. 4. Variation of horizontal displacement with depth during excavation, (a) No. 8, (b) No. 11.

점은 뒷채움 작업이 불량하여 최대 50 cm 정도의 간극이 발견되었다.

이와 같은 두 지점에 대한 지중 수평변위의 계측결과를 심도와 시간에 따라 각각 분석하면 다음과 같다.

3.1 심도별 변위

초기치 계측 이후 42일, 56일, 177일 경과시에 No. 8 지점과 45일, 77일, 177일 경과시에 No. 11 지점의 심도별 지중 수평변위를 계측한 결과는 각각 Fig. 4(a), (b)와 같으며, 이 중에서 최종 계측치를 분석하면 다음과 같다.

먼저, 지질 및 시공 조건이 양호한 No. 8 지점의 최대변위는 약 21 mm로서 심도 6 m 지점에서 발생했고, 이때 지표면에서의 변위는 약 16 mm이다. 이와 같은 변위양상은 어스앵커의 지반 고정 효과가 잘 나타난 것이라 할 수 있다.

다음으로, 지질 및 시공 조건이 불량한 No. 11 지점의 최대변위는 약 237 mm로서 지표면에서 발생했는데, 이는 No. 8 지점의 약 10배에 해당하는 값이다. 또한, 어스앵커의 효과가 거의 발휘되지 못하여 지표면 부근의 변위가 크게 발생한 것으로 생각된다.

3.2 시간별 변위

상기 두 지점에서 계측된 지중 수평변위를 경과시간에 따라 도시하면 각각 Fig. 5(a), (b)와 같다.

먼저, No. 8 지점의 변위 발생양상을 경과시간에 따

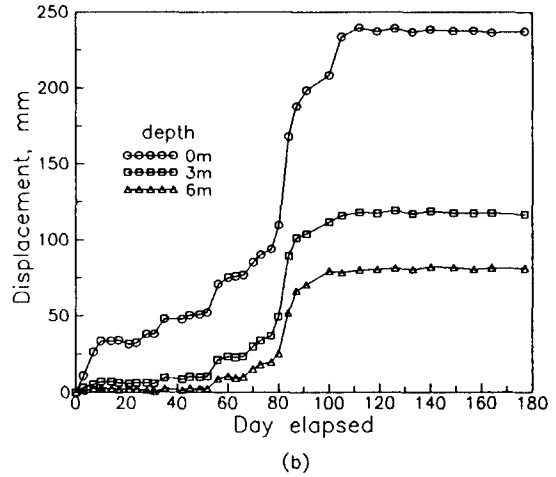
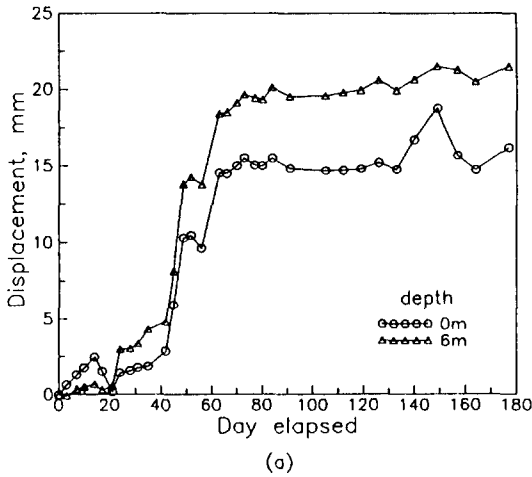


Fig. 5. Variation of horizontal displacement with time during excavation, (a) No. 8, (b) No. 11.

라 설명하면 다음과 같다.

(1) 0~14일

이 때는 어스앵커 설치 이전으로서 배면토는 엄지말뚝과 토류관에 의해 지지되므로, 잠재 파괴 토괴의 자중으로 인해 지표면의 변위가 경과시간에 따라 증가하여 약 3.5 mm의 변위가 발생하였다.

(2) 14~42일

1단 어스앵커 설치시에 부분적인 역변위 즉, 굴착현장에서 벽체배면을 향한 변위가 발생하였고, 이후 2단 굴착시점까지 약간씩의 변위 증가를 보였다.

(3) 42~56일

이 때는 3단 굴착 작업이 진행되던 시기로서 다른 기간에 비해 변위가 집중적으로 발생하였다. 이는 양호한 지반조건을 고려하여 2단 어스앵커 작업을 소홀히 하면서 3단 굴착작업을 서둘렀기 때문이라고 생각된다.

(4) 56~64일

이 때는 3단 어스앵커를 인장한 시점으로서 인장 작업을 철저히 실시한 바, 배면토 방향의 역변위가 다시 발생하였다. 이후 최종 바닥굴착시까지 약간씩의 변위 증가가 발생하였다.

(5) 64~177일

굴착공사가 완료된 이후 계측 변위는 수렴되고 있다. 단, 144일 경과시에 지표면 부근에서 약간의 변위가 발생하였는데, 이는 흙막이벽 직상부에서 콘크리트 차량이 주차하여 작업하였기 때문이다.

한편, No. 11 지점의 변위 발생양상을 경과시간에 따라 설명하면 다음과 같다.

(1) 0~11일

잠재 파괴 토괴의 자중으로 인해 지표면의 변위가 증가하여 약 34 mm의 변위가 발생하였다. 이는 No. 8 지점과 비교하여 매우 큰 값으로서 이 지점이 토사 반입 차량의 주통행로 연변에 위치하였기 때문이라고 생각된다.

(2) 11~45일

1단 어스앵커의 설치로 인해 변위의 증가폭은 다소 작아졌다.

(3) 45~74일

44일 경과시에 2단 어스앵커가 설치되어 흙막이벽은 다소 안정되는 듯 하였으나, 56일 경과시에 1일 발생 변위량이 약 18 mm로서 급작스런 변위가 발생하였다. 이는 흙막이벽과 배면토 사이의 간극에 기인한 것으로서 잠재 파괴 토괴가 이때 파괴된 것으로 생각되며, 실제로 흙막이벽 후방 4 m 지점에서 지표면 균열이 발견되었다. 이때 발생 변위를 억제하기 위하여 사보강재를 추가 설치하였고 이것의 영향으로 변위 증가폭은 다소 감소하였다.

(4) 74~108일

74일 경과시에 3단 어스앵커를 설치하였다. 이후 84일 경과시에는 바닥공사를 본격적으로 수행하기 위해 사보강재를 철거하였는데, 이에 따라 누적된 잠재 변위가 일시에 방출되어 큰 변위가 발생하였으며, 흙막이벽의 안정성이 문제로 되었다.

(5) 108~177일

108일 경과시에 엄지말뚝의 후방 7m 지점에서 근입

장 5 m인 말뚝을 4개 타입하고 Tie-Rod를 설치하였는데, 이때 이후에는 변위 수렴현상을 나타내었다.

No. 11 지점의 변위양상을 고찰하면, 뒷채움이 부실한 가설 흙막이 구조물에 있어서 어스앵커는 그 지지력이 상실되며, 기설치된 보강재를 철거할 경우 누적된 잠재 변위가 일시에 발생하게 되어 매우 위험한 상황을 만들 소지가 있으므로 각별한 주의를 필요로 한다는 것을 알 수 있다.

4. 수치해석

4.1 해석 개요

계측된 변위의 타당성을 검토하기 위해 수치해석을 실시하였다. 해석에 사용된 프로그램은 패키지 프로그램으로서 FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua)을 사용하였는데, 이는 유한차분법을 사용한 지반해석 전용 프로그램이다.

해석대상은 No. 8 지점으로서 Fig. 6은 굴착완료후

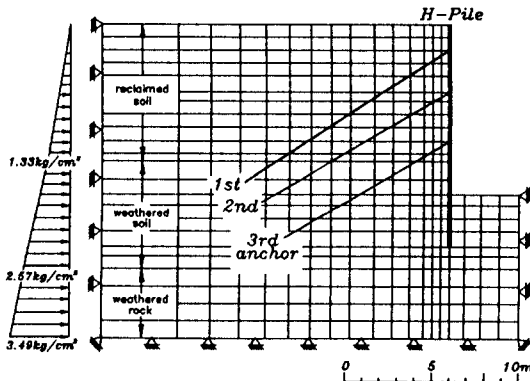


Fig. 6. Plot of grid after final excavation.

의 해석 요소망을 나타낸 것이다. 해석단면은 폭 24 m, 심도 18 m인 영역으로서, 이 지반은 지표로부터 매립토(두께 7.8 m), 풍화잔류토(두께 6.2 m), 풍화암(두께 4 m)로 구성되어 있다.

각 요소의 초기응력은 (3), (4)식을 이용하여 각 지층의 단위중량과 심도로부터 계산하여 Fig. 6의 왼쪽 그림과 같이 입력하였고, 축압계수(K)는 0.5로 가정하여 해석하였다. 한편, 지반 및 지보요소의 입력자료는 Table 1 과 같다.

$$\sigma_v = \gamma h \tag{3}$$

$$\sigma_h = K \gamma h \tag{4}$$

여기서, σ_v : 초기 수직응력

σ_h : 초기 수평응력

γ : 단위중량

h : 심도

K : 축압계수

4.2 해석단계

본 굴착현장의 시공순서를 고려하여 4단계의 해석을 실시하였으며, 각 해석단계를 순서대로 나열하면 다음과 같다.

- (1) 업지말뚝 설치.
- (2) 1단계 굴착 및 1단 어스앵커 설치.
- (3) 2단계 굴착 및 2단 어스앵커 설치.
- (4) 3단계 굴착 및 3단 어스앵커 설치.

한편, Fig. 7은 각 해석단계에 해당하는 요소망을 나타낸 것이다.

4.3 해석결과

각 단계별로 심도에 따른 지중 수평변위를 해석한 결

Table 1. Input values of numerical analysis

Items	Properties	Unit	Reclaimed Soil	Weathered soil	Weathered rock
Ground	Specific gravity	g/cm^3	1.7	2.0	2.3
	Elastic modulus	kg/cm^2	150	350	1000
	Cohesion	kg/cm^2	0	0.5	4
	Internal friction angle	degree	28.5	30	35
	Poisson's ratio		0.35	0.3	0.25
H-pile	Elastic modulus	kg/cm^2		2.1×10^6	
	Moment of inertia	cm^4		12970	
	Sectional area	cm^2		80.48	
Earth anchor	Elastic modulus	kg/cm^2		4.57×10^5	
	Sectional area	cm^2		3.95	

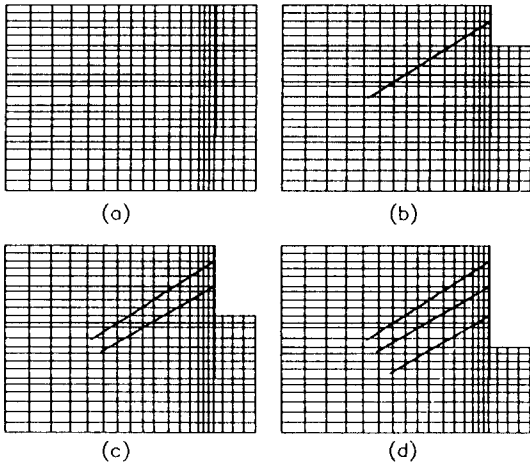


Fig. 7. Plot of grid illustrating four continuous steps.

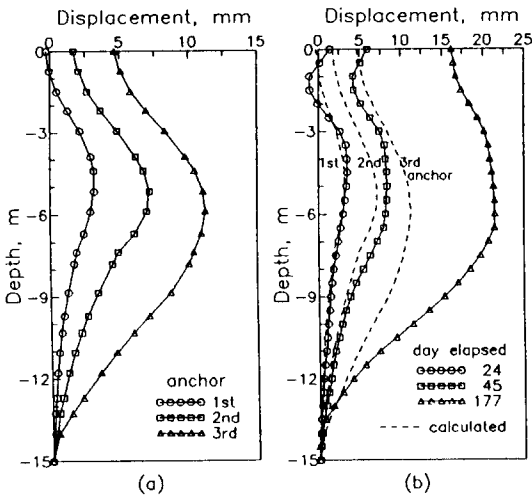


Fig. 8. Results of numerical analysis, (a) Numerical results only, (b) Comparison of measured displacements and calculated ones.

과는 Fig. 8(a)와 같다. 그림에서 엄지말뚝 설치에 따른 변위는 극히 미미하게 나타나 표시하지 않았으며, 1단, 2단, 3단 어스앵커 설치 이후의 변위 발생량을 심도별로 나타내었다. 예를 들어, 1단 어스앵커 설치 이후에 흙막이벽의 최대변위는 심도 5 m 지점에서 약 3.2 mm가 발생하였다.

4.4 해석치와 계측치의 비교

해석치와 계측치를 비교하면 Fig. 8(b)와 같다. 점선은 Fig. 8(a)에 표시된 해석치이며, 실선은 각 해석단계

에 해당하는 계측치이다.

1단 및 2단 굴착해석에서 해석치는 계측치와 전반적으로 부합하지만, 3단 굴착해석에서 계측치는 해석치보다 크게 나타났다. 이는 전술한 바와 같이 실제 시공시에 양호한 지반조건을 고려하여 2단 보강작업을 소홀히 하며 3단 굴착을 서둘렀기 때문이라고 생각된다.

5. 결 언

어스앵커로 지지되는 가설 흙막이 구조물에 대하여 경사계를 이용하여 지중 수평변위를 현장계측하고, 수치해석을 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

지질조건 및 시공상태가 양호한 No.8 지점의 변위양상을 검토하면, 전반적으로 어스앵커의 지반 고정 효과가 충분히 발휘되고 있었으나, 3단 굴착시에 변위가 집중적으로 발생되었음을 감안하면 3단 굴착시에 보다 주의를 하였음이 바람직하였다고 생각된다.

이에 비해 여러 조건이 불량한 No.11 지점의 변위양상을 검토하면, 뒷채움이 부실한 흙막이 구조물에 있어 어스앵커는 그 지지력이 상실되며, 기설치된 보강재를 철거할 경우 누적된 잠재변위가 일시에 발생하게 되어 매우 위험한 상황을 만들 소지가 있으므로 각별한 주의를 필요로 한다는 것을 알 수 있다.

한편, No. 8 지점의 현장계측 결과를 수치해석으로 검토한 결과, 1단 및 2단 굴착해석에서 해석치는 계측치와 전반적으로 부합하지만, 3단 굴착해석에서 계측치는 해석치보다 크게 나타났으며, 이는 실제 시공과정을 잘 묘사한다.

참 고 문 헌

1. Dale F. Munger *et al.*, 1990, "Temporary tie-back wall, Bonneville Navigation Lock", Design and performance of earth retaining structures, pp.778-793.
2. "FLAC user's manual", 1992, Itasca Consulting Group, Inc.
3. T.H. Hanna, 1985, "Field instrumentation in geotechnical engineering", Trans Tech Publication, pp. 322-325.
4. Joseph A. Caliendo *et al.*, 1990, "A field study of a tieback excavation with a finite element analysis", Design and performance of earth re-

- taining structures, pp.747-763.
5. Roy E. Hunt, 1984, "Geotechnical engineering investigation manual", McGraw Hill, pp.245-300.
 6. R.F. Craig, 1979, "Soil mechanics", Van Nostrand Reinhold, pp.118-160.
 7. Cheng Liu and Jack B. Evett, 1992, "Soils and foundations", Prentice Hall, pp.412-424.
 8. H.H. Vaziri & V.M. Troughton, 1992, "An efficient three-dimensional soil-structure interaction model for analysis of earth retaining structures", Canadian geotechnical journal, Vol. 29, pp.529-538.
 9. Marco Favaretti & Alberto Mazzucato, 1992, "Experimental investigation on an instrumented reinforced earth wall", Proceedings of the 3rd int. symp. on field measurement in geomechanics, Vol.2, pp.673-682.
 10. Richard T. Reynolds, 1991, "Geotechnical field techniques used in monitoring slope stability at a landfill", Proceedings of the 3rd int. symp. on field measurement in geomechanics, Vol.2, pp.883-892.
 11. 윤지선 역, 1992, "그라운드 앵커공법", 구미서관.
 12. 박광준, 1993, "지반거동 파악을 위한 체계적인 계측", 지반계측 93년도 학술발표집, pp.55-69.
 13. 김응태, 안대영, 김득기, 한창현, 1994, "지하철 개착구 주변지반과 구조물에 대한 거동예측과 실측의 비교평가", 한국암반역학회지, Vol.4, No.1, pp.63-76.