

# 연약지반에 설치된 앵커지지 강널말뚝 흠막이벽의 거동

## The Behavior of Sheet Piling Walls supported by Anchors in Soft Ground

홍 원 표<sup>1</sup> Hong, Won-Pyo  
송 영 석<sup>2</sup> Song, Young-Suk  
김 동 옥<sup>3</sup> Kim, Dong-Uk

### Abstract

Based on the field measuring data obtained from seven excavation sections in Incheon International Airport project, the horizontal displacement of sheet piling walls supported by anchors and the lateral earth pressure acting on sheet piling walls was investigated in soft ground. The proposed diagram of lateral earth pressure is a rectangular form, and the maximum earth pressure corresponds to  $0.6 \gamma H$ . The maximum earth pressure is similar to the empirical earth pressure proposed by NAVFAC(1982). The quantitative safe criterion of sheet piling walls with struts is established from the relationships between increasing velocity of maximum horizontal displacement and stability number in excavated ground. If the velocity of maximum horizontal displacement shows lower than 1mm per day, the sheet piling walls exist under stable state. When the velocity of maximum horizontal displacement becomes more than 1mm and less than 2mm per day, excavation works should be observed with caution. Also, when the velocity of maximum horizontal displacement becomes more than 2mm per day, appropriate remediations and reinforcements are applied to sheet piling walls.

### 요 지

인천국제공항 공사현장의 7개 흠막이 굴착단면에서 계측된 자료를 토대로 연약지반에 설치된 앵커지지 강널말뚝 흠막이벽의 수평변위와 흠막이벽에 작용하는 측방토압을 조사하였다. 연약지반에서 앵커지지 흠막이벽에 작용하는 측방토압의 분포는 직사각형 모양이며, 측방토압의 크기는  $0.6 \gamma H$ 임을 알 수 있다. 제안된 측방토압의 크기는 NAVFAC(1982)의 경험토압과 동일함을 알 수 있다. 한편, 연약지반에 설치된 앵커지지 흠막이벽의 안정성에 대한 판단기준은 흠막이벽의 최대수평변위속도와 안정수를 이용하여 마련할 수 있다. 흠막이벽의 최대수평변위속도가 1mm/day 이하이면 흠막이벽의 안정성이 양호한 현장이고, 1~2mm/day이면 주의시공을 요하는 현장이며, 2mm/day 이상이면 흠막이벽의 안정성이 불량한 현장이라고 판단할 수 있다.

**Keywords :** Sheet piling walls, Anchor, Soft ground, Lateral earth pressure, Horizontal displacement, Stability number

1 정회원, 중앙대학교 건설환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Envir. Eng., Chung-Ang Univ.)

2 정회원, 중앙대학교 기술과학연구소 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Inst. of Tech. & Science, Chung-Ang Univ., yssong@ms.cau.ac.kr)

3 정회원, 중앙대학교 건설환경공학과 박사과정 (Member, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil & Envir. Eng., Chung-Ang Univ.)

## 1. 서론

최근 산업발전으로 인하여 새로운 토지의 수요가 날이 증가하고 있다. 이러한 수요에 부응하기 위하여 서남해안을 매립 및 개량하여 토지를 공급하는 경우가 급증하고 있다. 연약지반을 개량하여 조성한 해안매립지에 구조물을 건설하기 위해서는 기초공사 및 지하구조물공사를 위한 지하굴착작업을 반드시 실시하여야 한다. 지하굴착작업을 실시할 때 주변지반의 토사와 지하수의 유입을 방지하고 인접구조물을 보호하기 위하여 가설 흠막이구조물이 설치된다. 흠막이구조물의 설계시 가장 중요한 요소는 흠막이벽에 작용하는 측방토압과 흠막이벽의 변형에 따른 구조물의 안정성이다.

최근에는 굴착구간의 작업능률을 향상시키기 위하여 앵커를 사용하는 경우가 많이 늘어났다. 즉, 앵커로 흠막이벽을 지지시킴으로써 버팀보로 지지하는 경우보다 작업공간을 넓게 확보할 수 있게 되었다. 외국의 경우 연약지반상 앵커지지 흠막이벽에 대한 연구로는 Broms와 Stille(1975), Sills 등(1977), Ulrich(1989) 등이 있다.

현재 국내에서는 앵커지지 흠막이벽의 설계시 NAVFAC(1982) 및 홍원표와 윤중만(1995a)이 제안한 경험토압을 적용하거나, 버팀보지지 흠막이벽에 작용하는 경험토압(Terzaghi와 Peck, 1967; Tschebotarioff, 1973)을 그대로 적용하고 있다. 한편, 연약지반에서 앵커지지 흠막이벽의 안정성을 검토할 경우에도 Clough와 O'Rourke(1990) 및 홍원표와 윤중만(1995b)이 제안한 기준을 그대로 적용하고 있는 실정이다. 그러나, 이들 연구는 주로 사질토지반과 이를 포함한 다층지반을 대상으로 수행되었을 뿐 연약지반에서의 흠막이벽에 대한 연구는 아직 미흡한 편이다. 이는 해안지반이나 연약지반에서의 흠막이굴착공사에 대한 시공 및 계측사례가 부족하기 때문이다.

따라서, 본 연구에서는 인천국제공항 공사현장의 흠막이굴착공사에서 계측된 자료를 토대로 연약지반에 설치된 앵커지지 강널말뚝 흠막이벽에 작용하는 측방토압을 제안하고, 흠막이벽의 수평변위에 대한 안정기준을 마련하고자 한다. 이를 통하여 우리나라의 연약지반에 대한 흠막이굴착공사를 실시할 경우 적용 가능한 설계기준을 마련하여 앞으로 흠막이벽의 설계 및 시공시 경제적이고 안전한 공사를 실시할 수 있도록 하고자 한다.

## 2. 사례현장

### 2.1 현장개요

본 연구의 대상지역인 인천국제공항 현장은 행정구역상 인천직할시 중구에 해당하는 영종도, 용유도 및 신불도 일대로서 영종도와 용유도 사이에 총길이 17.3km의 방조제를 쌓고 1,700만평의 바다갯벌을 부지로 조성되어 있다.

인천국제공항 현장공사는 4개의 평행활주로, 1동의 여객터미널, 2동의 탑승동 및 배수구조물, 중수 처리시설, 수하물 처리시설 그리고, 건축 및 부대시설 등으로 분류하여 시공되었다. 1992년 11월에 착공한 인천국제공항은 1단계 건설공사를 모두 마치고 2001년에 개항하였다.

그림 1은 본 연구의 대상지역인 인천국제공항 공사구간중 A-3공구와 A-4공구의 굴착공사 현황을 나타낸 것이다. 이 가운데 앵커지지 흠막이벽은 A-4공구의 공동구 구간과 북측 및 남측지하차도 구간에 시공되었다. A-4공구 공동구 구간의 굴착연장은 총 3,579m이며, 남

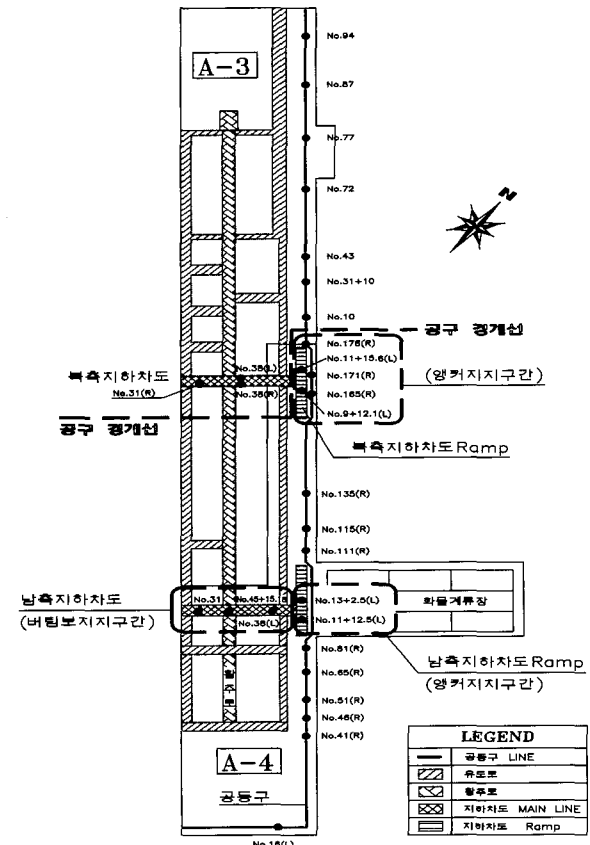


그림 1. 인천국제공항 A-3 및 A-4공구 굴착현황

측 및 북측지하차도 구간의 굴착연장은 각각 510m 및 104m이다.

## 2.2 지반특성

연구대상지역의 지반조건은 지표면으로부터 매립층, 해성퇴적층, 풍화잔류토층, 풍화암층, 및 연암층의 순으로 구성되어 있다. 매립층은 지표면으로부터 약 3m 정도까지 분포하고 있으며, N치가 18~31까지 나타나는 양호한 지반이다. 해성퇴적층은 10m~40m의 두께로 분포하고 있으며, 주로 실트, 점토, 가는모래이고 최하부에서는 중간 내지 굵은모래가 분포되어 있다. 깊이에 따른 지반의 연경도(consistency) 또는 상대밀도는 깊이에 따라 증가하는 것이 아니라 연경의 변화가 매우 심한 것으로 조사되었다. 전반적인 해성퇴적층의 분포는 북측에서 남측으로 퇴적층 두께가 두꺼워지는 분포를 보였으며, 북측과 남측의 지층분포도 다소의 차이를 보였다. 남측의 경우 주로 실트와 점토가 두껍게 분포하고 있지만 북측의 경우는 가는 모래의 분포가 우세하게 나타나고 있다. N치는 2~26으로 매우 다양한 것으로 나타났다. 해성퇴적층의 비중은 평균 2.68이고, 함수비는 평균 35.1%이며, 단위중량은 평균 172.6N/m이다. 그리고, 비배수전단강도는 삼축압축시험(UU-Test)결과 평균 35.3KPa이며, 일축압축시험결과 평균 44.1KPa으로 나타났다. 풍화잔류토층은 주로 3~4m의 두께로 분포하고 있으며, 실트섞인 모래로 구성되어 있다. N치는 43/30~50/16의 범위에 위치하므로 매우 조밀한 상대밀도를 보이는 것으로 나타났다. 풍화잔류토 아래의 풍화암은 심하게 풍화된 상태로 암의 조직과 형태는 보존되어 있는 것으로 나타났다. 풍화암의 두께는 10m 이상이며 깊이가 깊어짐에 따라 풍화의 정도가 약화되는 것으로 나타났다. 풍화암층의 하부는 기반암인 연암이 존재하며, 연암의 암질은 매우 불량한 상태로서 코아 회수율이 저조한 편이다.

## 3. 현장계측

### 3.1 흠막이구조물

본 연구는 인천국제공항의 A-1~A-5공구의 강널말뚝 흠막이벽을 이용한 굴착현장 가운데 A-4공구의 앵커로 지지된 강널말뚝 흠막이벽을 대상으로 하였다. 대상

표 1. 앵커지지 흠막이구조물의 제원

구분	단면 형상 및 단면 치수		주요 용도
흠막이벽	U-type (KWSP-IV) (400×170×15.5)		가설흠막이벽체
앵커	설치각도	40°	가설흠막이벽 지지
	강선수	7~8개	
	자유장	23~28m	
띠장	H-Pile (300×300×10×15, 350×350×12×19)		가설흠막이벽 지지

현장의 앵커지지 흠막이벽 설치구간은 A-4공구중 공동구 구간의 No.93~No.178 단면, 남측지하차도 구간의 No.3+3~No.8 단면, 그리고 북측지하차도 구간의 No.7~No.14 단면이다. 대상현장의 최종굴착깊이는 7~10m이며, 굴착폭은 위치에 따라 조금씩 차이가 있으나 30m이상으로 시공되었다.

대상구간의 흠막이구조물을 살펴보면 흠막이벽은 강널말뚝(sheet pile)이 사용되었으며, 흠막이벽의 지지방식은 앵커지지 방식이다. 대상현장은 지하수위가 높은 연약지반이므로 강성이 우수하고 별도의 차수공법이 필요하지 않은 강널말뚝 흠막이벽을 채택하였다. 강널말뚝의 형식은 U-type (KWSP-IV)이며, 띠장(wale) 및 중간말뚝은 H-Pile을 사용하였다. 본 현장에 적용된 흠막이구조물의 제원을 요약 정리하면 표 1과 같다.

그림 2는 앵커지지 흠막이벽의 대표적인 단면을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 굴착 진행방향의 우측에는 공동구가 위치하고 좌측에는 지하차도가 위치한다. 이 구간은 지하차도와 공동구를 병행하여 시공하기 때문에 다른 구간에 비해 굴착폭이 매우 크다. 공동구 설치부분의 굴착깊이는 10m이며, 총 3~4단의 앵커를 이용하여 강널말뚝 흠막이벽을 지지하고 있다. 그리고, 지하차도 설치부분의 굴착깊이는 7~9m이며, 총 3단의 앵커를 이용하여 흠막이벽을 지지하고 있다. 앵커의 설치각도는 모두 40°이며, 자유장 및 정착장의 길이는 각각 23~28m 및 10m이다.

그리고, 앵커의 수직간격은 2.0~2.5m로 다양하며, 수평간격은 2.0m로 일정하다. 강널말뚝의 근입깊이는 최종굴착깊이로부터 7.0m 정도 더 근입시켰다.

### 3.2 계측기 설치

표 2는 대상현장의 각 구간별 앵커지지 흠막이벽에

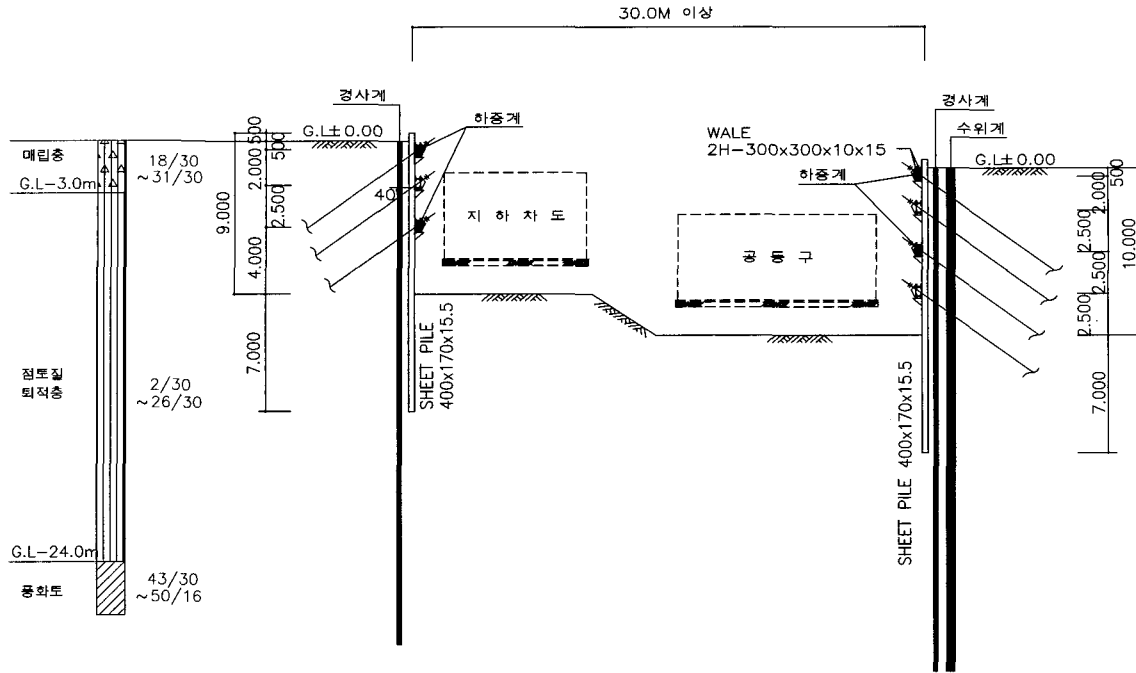


그림 2. 앵커지지 흙막이벽의 굴착단면도 및 토질주상도

표 2. 각 구간별 계측지점과 설치 계측기

공구	구간	계측지점	설치계측기
A-4	공동구	No.165(R)	지중경사계, 지하수위계, 하중계(1단, 3단)
		No.171(R)	지중경사계, 지하수위계, 하중계(1단, 3단)
		No.178(R)	지중경사계, 지하수위계, 하중계(1단, 3단)
	남측 지하차도	No.11+12.5(L)	지중경사계, 하중계(1단, 3단)
		No.13+2.5(L)	지중경사계, 하중계(1단, 3단)
	북측 지하차도	No.9+12.1(L)	지중경사계, 하중계(1단, 3단)
		No.11+15.6(L)	지중경사계, 하중계(1단, 3단)

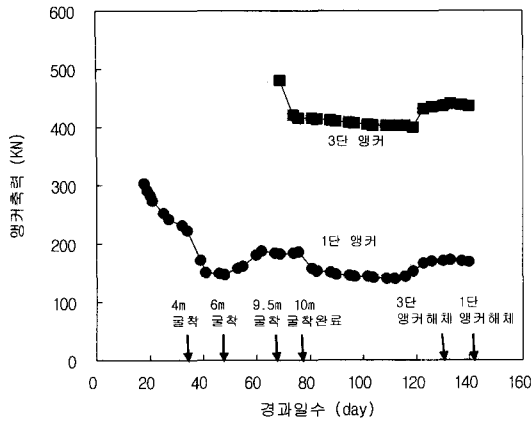
대한 계측지점과 설치계측기를 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 총 7개 단면의 앵커지지 흙막이벽을 대상으로 계측기를 설치하여 흙막이벽의 거동을 조사하였다. 이 구간에서는 하중계, 지중경사계 및 지하수위계를 이용하여 계측을 수행하였다. 첫째는 굴착에 따른 앵커의 축력을 측정하기 위하여 주로 1, 3단에 하중계를 설치하였다. 하중계는 진동현식을 사용하였으며, 유압 인장기를 이용하여 앵커에 인장력을 주었다. 둘째는 시공도중 흙막이벽체 및 배면지반의 변화를 관측하기 위하여 흙막이벽에 근접하여 지중경사계를 설치하였다. 지중경사계는 좌·우측 굴착배면에 설치하였으며, 지반내 수평변위의 발생방향, 크기, 속도 등을 측정하는데 사용되었다. 그리고, 측정된 변위를 허용기준치와 비교하여 구조물의 안정성을 검토하고 지반변형의 진행속도를 관측하여 갑작스런 지반의 변형에 대응할 수 있도록 하였다.

셋째는 굴착단계 및 강우에 따른 지하수위의 변화를 조사하기 위하여 지하수위계를 지중경사계와 인접하여 설치하였다.

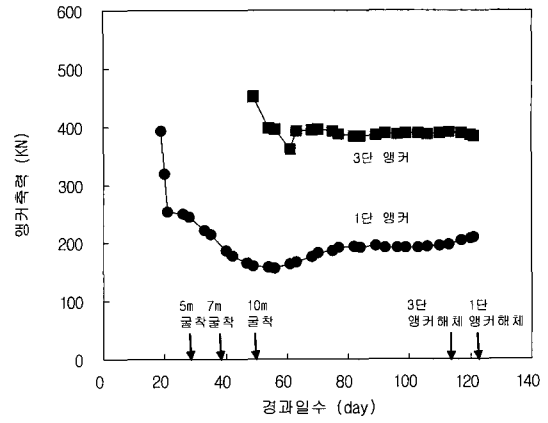
#### 4. 계측결과 및 고찰

##### 4.1 앵커의 축력

시공단계에 따른 앵커축력의 변화를 조사하기 위하여 앵커두부에 하중계를 부착시켜 축력을 측정하였다. 굴착단계별 앵커축력의 변화를 나타내기 위하여 횡축에 경과일수(day)와 종축에 앵커축력(ton)을 표시하였다. 그림 3은 A-4공구중 공동구 구간의 No.171(R)단면과 지하차도 구간의 No.11+12.5(L)단면의 굴착단계별 앵커축력의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 앵커축력

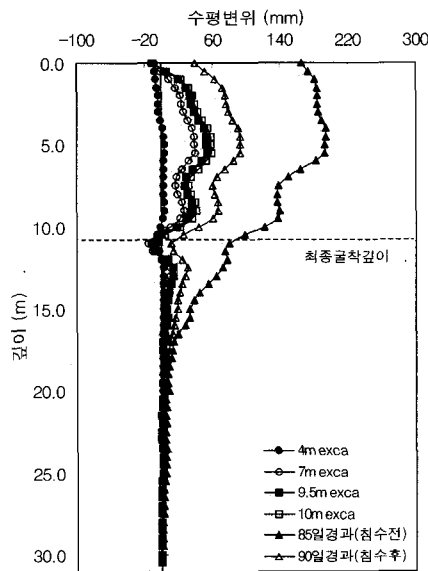


(a) No.171(R)단면

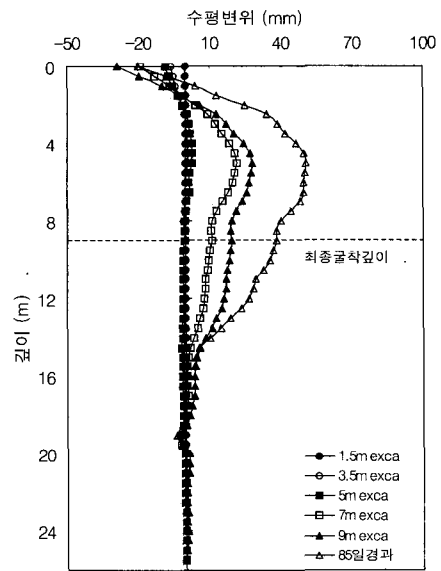


(b) No.11+12.5(L)단면

그림 3. 앵커의 축력변화도



(a) No.171(R)단면



(b) No.11+12.5(L)단면

그림 4. 앵커지지 흙막이벽의 수평변위

은 선행인장력을 가한 직후 1차적으로 인장력이 감소하며, 굴착이 진행됨에 따라 다시 앵커의 축력이 감소하는 경향을 보인다. 그러나 굴착이 완료된 이후에는 토압의 재분배가 일어나고 이로 인해서 앵커축력은 거의 수렴하는 경향을 보인다. 그림 3(a)는 No.171(R) 단면의 굴착단계별 앵커축력의 변화를 나타낸 것으로, 4m 굴착과 6m 굴착 사이에서는 앵커축력이 감소하는 경향을 보였으나, 그 이후로는 수렴하는 경향을 나타내었다. 그리고, 그림 3(b)는 No.11+12.5(L) 단면의 굴착단계별 앵커축력의 변화를 나타낸 것으로 굴착이 진행됨에 따라 앵커의 축력이 감소하는 경향을 보이다가 그 이후에는 수렴하는 경향을 보였다.

앵커로 지지된 강널말뚝 흙막이벽에서 굴착진행과

시간경과에 따른 앵커축력은 굴착이 진행되는 동안에는 주로 감소하는 것으로 나타났으며, 굴착이 종료후에는 앵커축력이 모두 수렴하는 것으로 나타났다. 또한, 앵커축력의 크기는 1단에서보다는 3단에서 더 크게 발생되어, 굴착하단부에서 토압이 크게 발생함을 확인할 수 있었다.

#### 4.2 흙막이벽의 수평변위

앵커지지 흙막이벽의 수평변위는 굴착배면의 지반조건, 굴착단계 그리고, 앵커의 설치시기 등에 따라 크게 영향을 받는다. 그림 4는 앵커지지 흙막이벽의 배면에 설치된 지중경사계로부터 측정된 흙막이벽의 수평변위

를 나타낸 것이다. 굴착단계별 흙막이벽의 수평변위를 도시하기 위하여 횡축에는 흙막이벽의 수평변위량을 누계변위량으로 나타내었고, 종축에는 지표면으로부터의 깊이를 나타내었다.

그림 4(a)는 공동구 구간의 No.171(R)단면의 굴착단계별 수평변위를 나타낸 것으로 굴착이 진행되는 동안 흙막이벽의 수평변위는 비교적 작게 발생하였으나, 굴착이 완료된 이후에 큰 수평변위가 발생되었다. 이는 점성토지반의 크리프특성과 앵커의 릴렉세이션(relaxation)에 기인한 것으로 판단된다. 그리고, 굴착완료후 여름철 장마기간도중 집중강우로 인하여 굴착면 내부가 침수되기도 하였다. 이때 굴착전면에서는 흙막이벽 내부의 침수로 인한 수압이 작용하게 되고, 이러한 수압은 흙막이벽에 작용하고 있는 토압에 저항하게 된다. 이로 인하여 흙막이벽 내부의 침수로 인한 수압은 흙막이벽의 수평변위에 저항하는 역할을 하게 되므로, 흙막이벽의 수평변위가 일부 회복되는 현상을 볼 수 있다. 그림 4(b)는 지하차도 구간의 No.11+12.5(L) 단면의 굴착단계별 수평변위의 변화를 나타낸 것으로, 굴착이 진행되는 동안 흙막이벽의 수평변위는 작게 발생되었으나 굴착이 완료된 이후 점성토지반의 크리프변형과 앵커의 릴렉세이션으로 인하여 수평변위가 계속적으로 증가하였다. 그리고, 최대수평변위는 굴착바닥면 4~5m 상부에서 발생하는 것으로 나타났다.

### 4.3 지하수위

굴착공사시 지하수위의 변화는 흙막이벽의 안정에 큰 영향을 미치므로 굴착에 따른 지하수위의 변화를 최소화하기 위하여 차수성이 뛰어난 강널말뚝 흙막이벽

을 사용하였다. 지하수위의 변화를 측정하기 위하여 흙막이벽의 배면에 지하수위계를 설치하여 굴착에 따른 지하수위의 변화를 조사하였다.

그림 5는 No.171(R) 단면에서의 굴착에 따른 지하수위 변화를 나타낸 것이다. 굴착단계별 지하수위의 변화를 나타내기 위하여 그림의 종축에는 지하수위를, 횡축에는 경과일수를 나타내었으며 굴착깊이와 지하수위의 상관성을 조사하기 위하여 굴착고도 함께 표시하였다.

그림에서 굴착이 진행됨에 따라 미소한 지하수위의 감소는 발생하지만 굴착이 완료된 이후에는 지하수위의 감소가 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서, 본 현장에 설치된 강널말뚝 흙막이벽은 차수효과가 상당히 크며, 차수벽의 역할을 충분히 할 수 있는 것을 확인하였다. 그리고, 지하수위의 변화가 적은 이유로는 본 현장의 지반조건을 들 수 있다. 본 현장의 굴착지반은 투수계수가 상당히 낮은 점성토로 구성되어있기 때문에 지하수위의 변화가 적은 것으로 나타났다.

## 5. 흙막이벽에 작용하는 측방토압

앵커지지 흙막이벽에 작용하는 측방토압을 산정하기 위하여 앵커에 하중계를 설치하고, 굴착단계별 앵커에 작용하는 축력을 측정하였다. 이와 같이 측정된 축력을 이용하여 굴착단계별 흙막이벽에 작용하는 측방토압을 산정하였다.

### 5.1 측방토압의 산정방법

굴착단계별 측정된 앵커축력을 토대로 증점분할법을 이용하여 흙막이벽체에 작용하는 측방토압을 산정하였

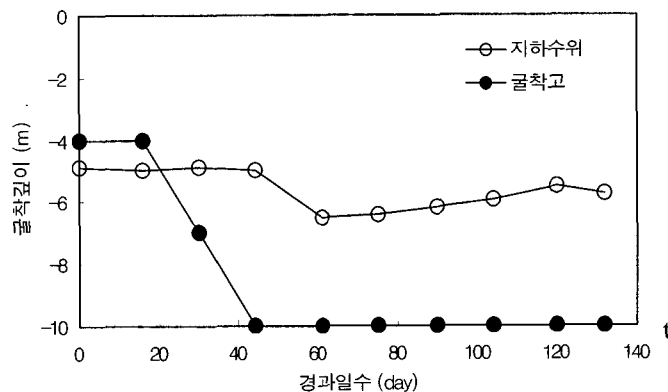


그림 5. 지하수위 변화

다. 일반적으로 흙막이벽에 작용하는 토압을 계산하는 방법으로는 그림 6에 나타낸 바와 같이 중점분할법을 적용한다(Flaate, 1966). 그리고, 중점분할법에 의하여 각 단의 앵커가 분담하는 토압은 식 (1)을 적용하여 계산하였다.

$$p = \frac{P \times \cos \theta}{c.t.c \times L} \quad (1)$$

여기서,  $p$  : 측방토압 (KPa)

$P$  : 하중계에 의해 실측된 앵커축력 (KN)

$\theta$  : 앵커설치각도 ( $^{\circ}$ )

$c.t.c$  : 앵커 수평설치 간격 (m)

$L$  : 중점분할법에 의한 분담길이 (m)

### 5.2 굴착단계별 측방토압분포

그림 7은 앵커지지 흙막이벽 구간에서 측정된 앵커축력을 중점분할법에 의하여 환산측방토압으로 계산한 결과이다. 굴착단계별 흙막이벽의 환산측방토압을 나타내기 위하여, 그림의 종축에는 굴착깊이를 표시하였고, 횡축에는 측정된 앵커축력으로부터 산정된 실측토압을 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이 흙막이벽에 작용하는 측방토압은 지표면으로 부터 하부로 갈수록 증가하는 양상

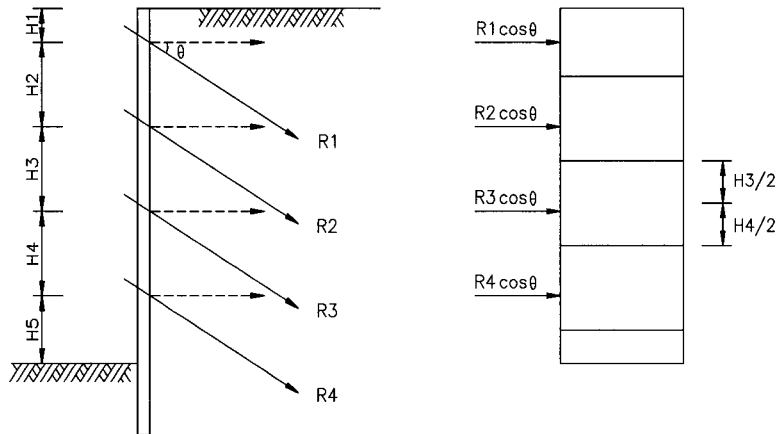
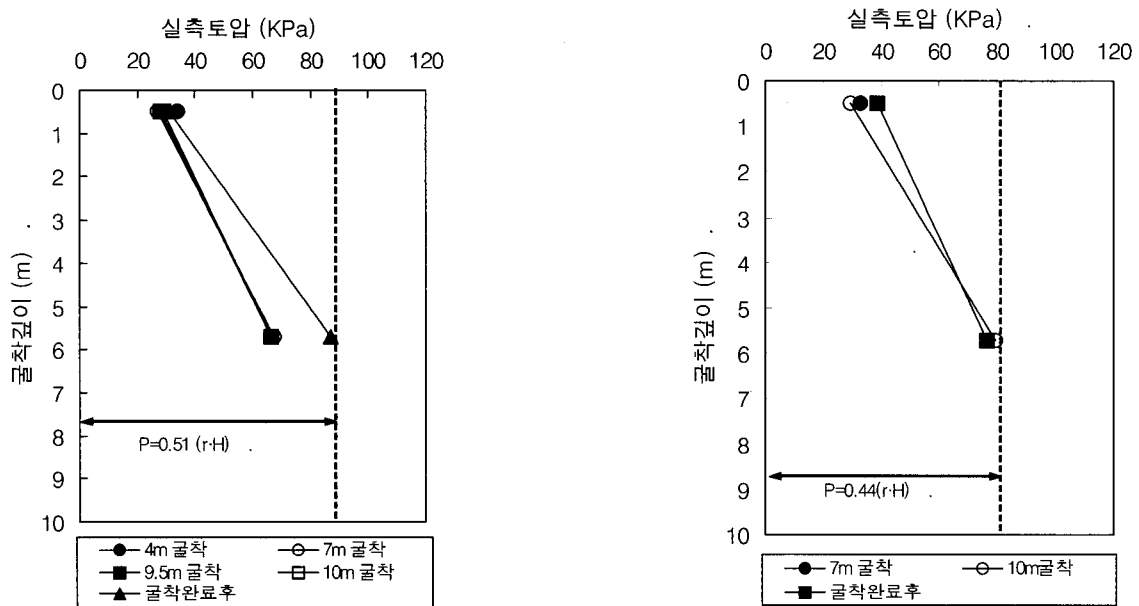


그림 6. 앵커축력의 분담토압



(a) No.171(R)단면

(b) No.11+12.5(L)단면

그림 7. 앵커지지 흙막이벽에 작용하는 측방토압

을 나타내고 있으며, 굴착면 상부에서도 측방토압이 크게 작용하고 있음을 알 수 있다.

그림 7(a)는 공동구 구간의 No.171(R)단면에 대한 측방토압 분포를 나타낸 것으로, 굴착이 진행됨에 따라 측방토압은 미소하게 증가하며, 굴착완료후 측방토압이 계속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 그리고, 그림 7(b)는 지하차도 구간의 No.11+12.5(L)단면에 대한 측방토압 분포를 나타낸 것으로 굴착이 진행되는 동안 측방토압은 미소하게 증가하며, 굴착완료후에는 측방토압이 변화하는 것으로 나타났다.

### 5.3 측방토압분포의 제안

현장에서 측정된 앵커의 축력을 토대로 흙막이벽에 작용하는 측방토압분포를 제안하고자 한다. 그림 8은 흙막이벽에 작용하는 측방토압의 분포와 최대측방토압의 크기를 구하기 위하여 각 단계별 최대측방토압을 모두 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 흙막이벽에 작용하는 측방토압 분포는 직사각형 형태로 제안할 수 있으며, 최대측방토압의 크기는  $0.60 \gamma H$ 로 선정할 수 있다. 대상현장의 경우 굴착면 하부에는 계측기가 설치되지 않아 이 부분에 대한 측방토압을 추정하여 측방토압분포를 산정하였다. 그러나 실제 굴착현장에서 지하수의 영향에 따라 흙막이벽에 작용하는 측방토압분포

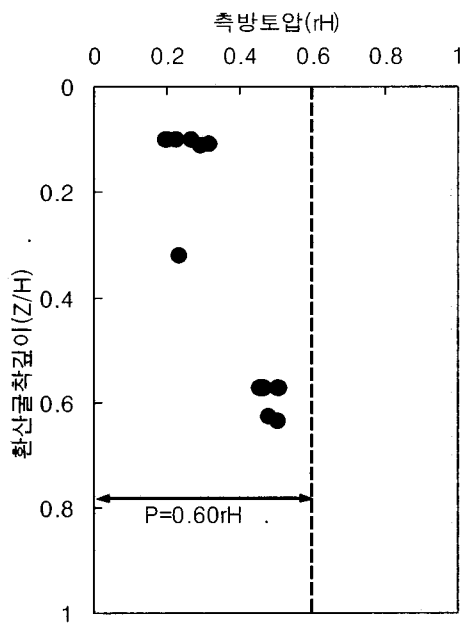


그림 8. 측방토압분포의 제안

는 본 연구에서 제안된 토압분포와는 약간 다르게 작용할 수 있을 것이다. 따라서 실무에서 본 연구에서 제안한 측방토압분포를 적용하고자 할 때는 이러한 요인들을 고려하여 흙막이구조물을 설계하는 것이 바람직하다.

### 5.4 경험토압과의 비교

본 연구에 의해 제안된 연약지반에서의 앵커지지 흙막이벽에 작용하는 측방토압분포와 기존에 제안된 경험토압분포를 비교하였다. 즉, 앵커지지 흙막이벽을 대상으로 제안된 NAVFAC(1982) 및 홍원표와 윤중만(1995b)의 경험토압분포를 제안된 측방토압분포와 서로 비교하였다. NAVFAC(1982)의 경험토압은 연약지반에서의 앵커지지 흙막이벽을 대상으로 제안된 것이며, 홍원표와 윤중만(1995b)의 경험토압은 국내 사질토지반에서의 앵커지지 흙막이벽을 대상으로 제안된 것이다.

그림 9는 대상현장의 앵커지지 흙막이벽에 작용하는 측방토압분포와 기존 경험토압분포를 함께 도시한 것이다. 제안된 측방토압의 경우 직사각형 분포를 가지며, 최대측방토압은  $0.60 \gamma H$ 의 크기를 갖는다. 그림에서 보는 바와 같이 제안된 측방토압의 분포는 NAVFAC(1982)의 경험토압과 서로 다르나, 최대측방토압의 크기는 유사함을 알 수 있다.

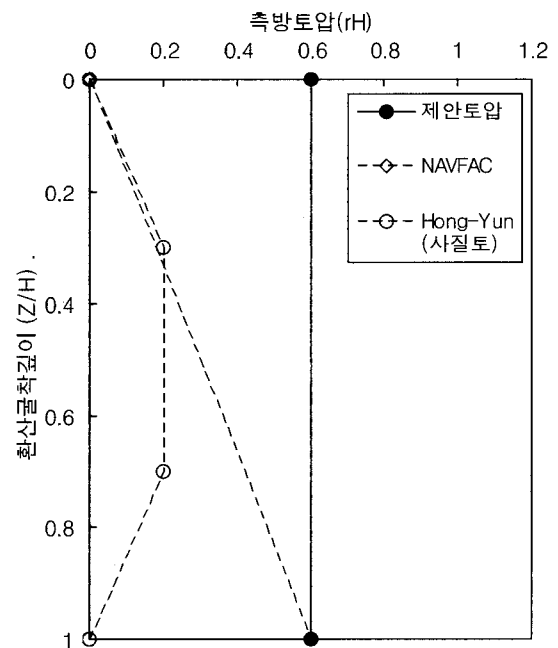


그림 9. 경험토압과의 비교



그리고, 제안된 측방토압의 크기는 사질토지반을 대상으로 한 홍원표와 윤중만(1995b)의 경험토압보다는 매우 큰 것으로 나타났다. 따라서, 연약지반 흠막이벽에서 측방토압은 사질토지반 흠막이벽에 작용하는 측방토압보다 더 크게 작용하고 있음을 알 수 있다.

### 5.5 이론토압과의 비교

그림 10은 제안된 측방토압과 Rankine(1857)의 주동토압 및 연직상재압을 비교한 것이다. 그림 10(a)에서는 최종굴착깊이에서 제안된 측방토압과 Rankine의 주동토압( $\gamma H \tan^2(45^\circ - \phi/2) - 2c \cdot \tan(45^\circ - \phi/2)$ )을 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 실측된 최대측방토압은 계산된 Rankine 주동토압의 0.22~1.0배 범위에 있으며 평균적으로 0.63배인 것으로 나타났다. 따라서, 연약지반에서 앵커지지 흠막이벽에 작용하는 최대측방토압은 Rankine의 주동토압보다 작게 나타나고 있음을 알 수 있다.

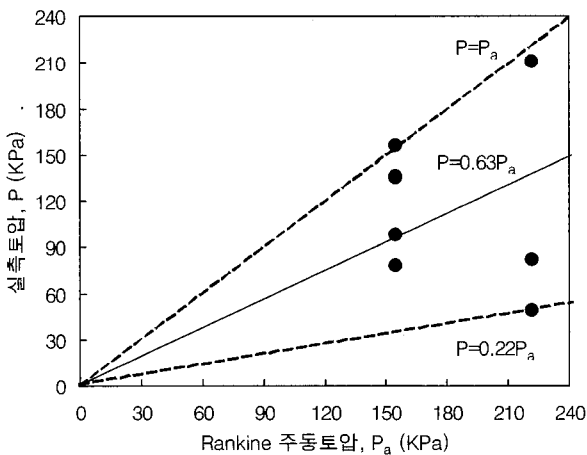
한편, 그림 10(b)는 제안된 측방토압과 최종굴착깊이에서의 연직상재압( $\sigma_v = \gamma_{avg}H$ )과 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 최대측방토압은 연직상재압의 0.16~0.70배 범위에 있으며 평균적으로 연직상재압의 0.45배인 것으로 나타났다. Tschbotarioff(1973)는 모래지반의 흠막이벽에 작용하는 측방토압으로 연직상재압의 0.25배를 제시한바 있다. 그러나, 연약지반에서 앵커지지 흠막이벽에 작용하는 최대측방토압은 Tschbotarioff가 제시한 토압보다 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

## 6. 흠막이벽의 안정성

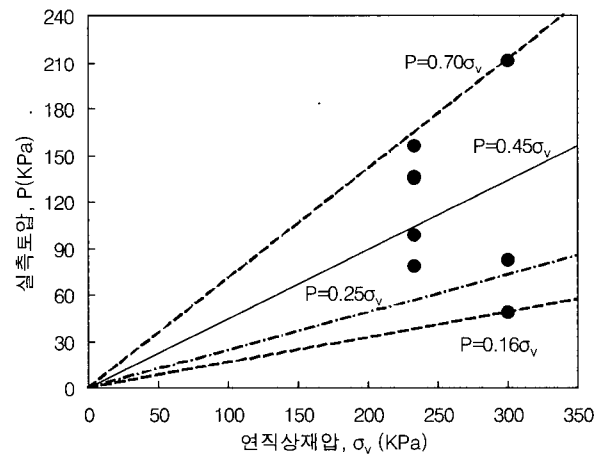
연약지반에서 굴착시 흠막이벽의 수평변위는 굴착깊이가 증가함에 따라 증가한다. 그러나, 대상현장의 앵커지지 흠막이벽의 수평변위는 굴착이 진행되지 않을 경우에도 계속적으로 증가하는 경향을 나타낸다. 이는 굴착으로 인한 연약지반의 크리프변형, 앵커의 릴렉세이션 등에 의한 것으로 예상할 수 있다. 그러므로, 수평변위속도를 적용하여 흠막이벽의 안정성을 판단함이 바람직하다.

한편, Peck(1969)은 안정수( $N_s$ )를 이용하여 굴착저면지반의 안정을 검토한 바 있다. 즉, 안정수가 3.14( $\pi$ )이하이면 굴착저면에서는 탄성적인 변형을 보이고, 안정수가 3.14( $\pi$ )~5.14( $\pi+2$ )이면 굴착저면에서 소성역이 확대되기 시작하여 지반용기가 현저하게 된다. 그리고, 안정수가 5.14( $\pi+2$ )이상이면 굴착저면에서는 저면파괴로 지속적인 히빙이 발생하게 된다.

따라서, 본 연구에서는 최대수평변위의 증가속도와 안정수의 관계를 이용하여 흠막이벽의 안정기준을 마련하고자 한다. 그림 11은 최대수평변위속도와 안정수와의 상관관계를 도시한 것이다. 그림의 종축은 단계별 굴착이 완료되고 일정기간 경과후 발생한 최대수평변위를 경과일수로 나누어 최대수평변위속도로 나타내고, 횡축은 굴착저면지반의 안정수로 나타내었다. 그림을 살펴보면 안정수가 3.14이하인 경우 최대수평변위속도는 1mm/day이하로 발생되고, 안정수가 3.14이상인 경우 최대수평변위속도는 계속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 특히 안정수가 5.14인 한계안정수의 경우 최



(a) 실측토압과 Rankine 주동토압과의 관계



(b) 실측토압과 연직상재압과의 관계

그림 10. 이론토압과의 비교

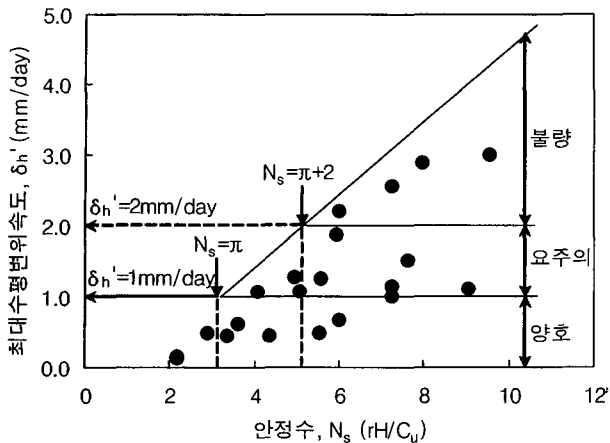


그림 11. 최대수평변위속도와 안정수의 관계

대수평변위속도는 굴착깊이의 2mm/day로 발생됨을 알 수 있다. 이러한 결과를 토대로 최대수평변위속도와 안정수에 의한 흙막이구조물의 안정성을 판단할 수 있는 기준을 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \delta_h' \leq 1\text{mm/day} & \quad \text{양호한 현장} \\
 1\text{mm/day} < \delta_h' \leq 2\text{mm/day} & \quad \text{요주의 현장} \\
 \delta_h' > 2\text{mm/day} & \quad \text{불량한 현장}
 \end{aligned} \quad (2)$$

즉, 각 굴착단계별 흙막이벽의 최대수평변위속도( $\delta_h'$ )가 1mm/day이하이면 흙막이벽의 안정성이 양호한 현장이고, 1~2mm/day사이이면 주의시공을 요하는 현장이며, 2mm/day이상이면 흙막이벽의 안정성이 불량한 현장으로 판단할 수 있다.

## 7. 결론

연약지반에서 앵커지지 흙막이벽을 이용한 굴착현장에서 얻은 현장계측결과를 토대로 흙막이벽에 작용하는 측방토압과 흙막이벽의 최대수평변위속도에 대한 안정기준을 제안하고자 한다. 따라서, 국내의 연약지반에서 앵커지지 흙막이벽에 대한 설계 및 시공시 다음과 같이 제안된 기준을 적용함이 바람직할 것으로 판단된다.

- (1) 연약지반에서 앵커지지 흙막이벽에 작용하는 측방토압의 분포는 직사각형 형태로 제안할 수 있으며, 최대측방토압의 크기는  $0.60 \gamma H$ 로 선정할 수 있다.
- (2) 연약지반에서 앵커지지 흙막이벽에 작용하는 최대측방토압의 크기는 NAVFAC(1982)에서 제안된 측

방토압과 매우 유사함을 알 수 있다. 그리고, 제안된 측방토압은 Rankine의 주동토압의 0.63배에 해당하며, 연직상재압의 0.45배에 해당한다.

- (3) 앵커지지 흙막이벽을 설치한 연약지반 굴착시 굴착지반의 안정수가  $\pi$  이하이면 최대수평변위속도는 1mm/day이하로 발생되고, 안정수가  $\pi$  이상이면 최대수평변위속도는 계속적으로 증가하여 흙막이벽의 안정성에 이상이 발생된다.
- (4) 연약지반에서 앵커지지 흙막이벽의 안정성에 대한 기준은 최대수평변위속도가 1mm/day이하이면 흙막이벽의 안정성이 양호한 현장이고, 1~2mm/day 사이이면 주의시공이 필요한 현장이며, 2mm/day 이상이면 흙막이벽의 안정성이 불량한 현장이라고 판단할 수 있다.

## 참고 문헌

1. 홍원표, 윤중만 (1995a) "지하굴착시 앵커지지 흙막이벽에 작용하는 측방토압", 한국지반공학회지, 제11권, 제1호, pp.63-77.
2. 홍원표, 윤중만 (1995b) "지하굴착시 앵커지지 흙막이벽 안정성에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 제15권, 제4호, pp.991-1002.
3. Broms, B. B. and Stille, H. (1975) "Failure of anchored sheet pile walls", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.102, No.3, pp.235-251.
4. Clough, G. W. and O'Rourke, T. D. (1990) "Construction induced Movements of insitu Walls" *Design and Performance of Earth Retaining Structures*, Geotechnical Special Publication, No. 25, ASCE, pp.439-470.
5. Flaate, K. S. (1966) *Stresses and movements in connection with braced cuts in sand and clay*, Ph.D. Thesis, University of Illinois, USA.
6. NAVFAC (1982) *Design Manual for Soil Mechanics*, Dept. of the Navy, Naval Facilities Engineering Command, pp.DM7.2-85-116.
7. Peck, R. B. (1969) "Deep Excavations and Tunnelling in Soft Ground.", *Proc. 7th ICSMFE, State-of-Art Volume*, pp.225-290.
8. Rankine, W. M. J. (1857) "On Stability on Loose Earth." *Philosophic Transactions of Royal Society, London, Part I*, pp.9-27.
9. Sills, G. C., Burland, J. B. and Czechowski, M. K.(1977) "Behaviour of an anchored diaphragm wall in stiff clay", *Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engrg.*, Vol.2, pp.147-155.
10. Terzaghi, K. and Peck, R. B. (1967) *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd Ed., John Wiley and Sons, New York, pp.394-413.
11. Tschebotarioff, G. P. (1973) *Foundations, Retaining and Earth Structure*, McGraw-Hill, New York, pp.415-457.
12. Ulrich, E. J., Jr. (1989) "Tieback supported cuts in overconsolidated soils", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.115, No.4, pp.521-545.

(접수일자 2004. 3. 2, 심사완료일 2004. 5. 18)