

강널말뚝 흙막이벽으로 시공된 굴착연약지반의 안정성

The Stability of Excavated Soft Ground Supported by Sheet-pile Walls

홍 원 표¹ Hong, Won-Pyo

김 동 옥² Kim, Dong-Uk

송 영 석³ Song, Young-Suk

Abstract

Based on the field measuring data obtained from excavation sections in Incheon International Airport project, the relationships between the horizontal displacement of sheet-pile walls and the deformations of soft ground around the excavation were investigated. The horizontal displacements of walls according to supporting method occur, and the displacements were found to become larger in the order of anchors, anchors with struts, and struts. The depths of maximum horizontal displacement are varied with supporting systems. If the stability number shows lower than π , the maximum horizontal displacement and the velocity of maximum horizontal displacement are respectively developed less than 1% of excavation depth and 1mm/day. When the stability number shows lower than $\pi + 2$, the maximum horizontal displacement and the velocity are respectively developed less than 2.5% of excavation depth and 2mm/day. Also, when the stability number shows more than $\pi + 2$, the maximum horizontal displacement and the velocity rapidly increase. Also, the maximum horizontal displacement is found to increase rapidly when N value is less than 10. The maximum horizontal displacement increases with decreasing the factor of safety against basal heave (Terzaghi, 1943), and the maximum horizontal displacement is found to increase rapidly when the factor of safety against basal heave is greater than 2.0. This value can be proposed as the criterion for the factor of safety against basal heave in Korea.

요 지

인천국제공항 공사현장의 흙막이 굴착단면에서 계측된 자료를 검토하여 연약지반에 설치된 강널말뚝 흙막이벽의 수평변위와 굴착주변지반의 변형에 대한 상관관계를 조사하였다. 벽체의 지지방식에 따른 강널말뚝 흙막이벽의 수평 변위는 앵커지지, 복합지지, 버팀보지지 순으로 작게 나타났으며, 각각의 지지방식에 따른 최대수평변위 발생위치도 서로 다르게 발생하였다. 흙막이벽의 최대수평변위 및 최대수평변위속도는 굴착지반의 안정수가 π 이하일 경우 각각 굴착깊이의 1%, 1mm/day이하로 발생되고, 안정수가 $\pi + 2$ 이하일 경우 각각 굴착깊이의 2.5%, 2mm/day이하로 발생되며, 안정수가 $\pi + 2$ 이상일 경우 급격하게 증가한다. 또한, 굴착저면에서의 N치가 감소함에 따라 흙막이벽의 최대수평 변위는 증가하며, N치가 약 10이하일 경우 흙막이벽의 최대수평변위는 급격하게 증가함을 알 수 있다. 한편, Terzaghi(1943)에 의해 제안된 히빙에 대한 안전율이 감소함에 따라 흙막이벽의 최대수평변위는 증가하며, 히빙의 안전율이 2.0일 경우 흙막이벽의 최대수평변위는 급속하게 증가함을 알 수 있다. 따라서, 국내 연약지반 강널말뚝 흙막이벽의 경우 히빙에 대한 안전율은 2.0으로 제안할 수 있다.

Keywords : Heave, Horizontal displacement, Sheet-pile walls, Soft ground, Stability number, Supporting system

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

2 정회원, 중앙대학교 대학원 토목공학과 박사졸업 (Member, Ph.D., Dept. of Civil & Environmental Eng. Chung-Ang Univ.)

3 정회원, 한국지질자원연구원 지진환경재해연구부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Geological & Environmental Hazards Div., Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources, yssong@kigam.re.kr)

1. 서론

연약지반에서 흙막이벽을 설치하고 지하굴착을 실시하게 되면 흙막이벽 및 굴착주변지반에서 변형이 발생하게 된다. 연약지반에서 굴착으로 인한 주변지반의 변형으로는 배면지반의 침하와 굴착저면의 융기를 들 수 있다. 흙막이벽 배면지반의 침하는 연직방향의 상재하중이 변화되지 않은채 지반내의 수평방향 응력이 감소하여 발생하는 것이다. 굴착저면에서의 융기는 연직방향으로 상재하중이 순차적으로 굴착과 동시에 감소하고, 흙막이벽의 근입부가 굴착면측으로 변형되어 발생하는 것이다. 이러한 연약지반상 흙막이벽의 거동과 굴착주변지반의 변형에 영향을 미치는 요인으로는 흙막이벽의 종류, 흙막이벽의 지지형식, 시공조건, 지하수위 등이 있다. 이러한 영향요인에 따른 흙막이벽의 거동 및 굴착주변지반의 변형을 조사하고, 이를 명확히 규명하는 것은 매우 어려운 일이다.

연약지반상 흙막이벽의 거동 및 인접지반의 변형에 관한 연구로는 Clough and Hansen(1981), Finno et al. (1989), Finno and Nerby(1989), Wong and Broms(1989), 조기영 외 4인(1998) 등이 있다. 특히, 굴착배면지반의 침하에 관한 연구로는 Caspe(1966), Peck(1969), Clough and O'Rourke (1990) 등이 있으며, 굴착저면의 히빙에 관한 연구로는 Terzaghi(1943), Bjerrum and Eide(1956), Mana and Clough(1981) 등이 있다. 그러나, 국내의 경우 연약지반상 흙막이벽의 거동 및 인접지반의 변형에 관한 연구는 매우 미흡한 편이며, 국외의 연구결과를 검증

없이 그대로 사용하고 있는 실정이다.

연약지반에서 흙막이벽의 수평변위에 대한 형상과 크기는 흙막이벽의 지지형식에 따라 다르게 나타날 것이다. 그리고, 연약지반에서 굴착저면지반의 융기현상은 흙막이벽의 수평변위와 더불어 흙막이벽의 안정성에 영향을 미치는 중요한 요인이 된다. 연약지반에서 굴착공사를 안전하고 합리적으로 시행하기 위해서는 흙막이벽의 수평변위와 연계하여 굴착저면지반의 융기에 대한 안정성을 반드시 검토해야 할 것이다. 따라서, 본 연구에서는 연약지반 굴착시 지지형식에 따른 흙막이벽의 거동을 조사하여 보고자 한다. 이를 통하여 흙막이벽의 지지형식에 따른 흙막이벽의 변형특성을 서로 비교 고찰하고자 한다. 그리고, 흙막이벽의 변형거동과 굴착저면 지반에서의 융기에 대한 안정성의 상관관계를 이용하여 강널말뚝 흙막이벽의 설계 및 시공기준을 마련하고자 한다.

2. 사례 현장

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 조성하였다. 인천국제공항 신축공사는 4개의 평행활주로, 한동의 여객터미널, 두동의 탑승동 및 배수구조물, 중수

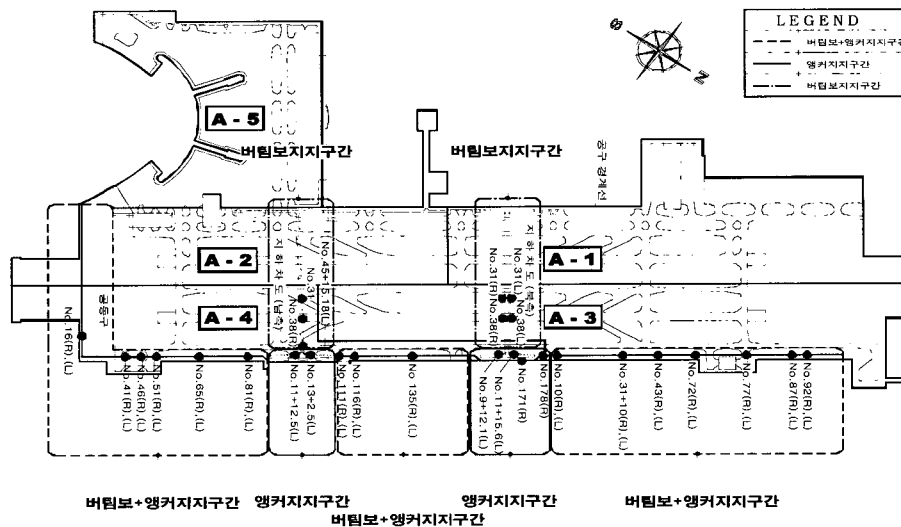


그림 1. 연구대상지역의 전체 개략도

처리시설, 수하물 처리시설 그리고, 건축 및 부대시설 등으로 분류하여 시공되었다. 1992년 11월에 착공한 인천국제공항은 1단계 건설공사를 모두 마치고 2001년에 개항하였다. 그림 1은 본 연구대상지역의 전체 개략도로써 4개의 활주로(A-1, A-2, A-3, A-4) 구간 및 여객계류장(A-5) 구간으로 구성되어 있다.

2.2 지반특성

연구대상지역의 지반조건은 그림 2에서 보는 바와 같이 지표면으로부터 매립층, 해성퇴적층, 풍화잔류토층, 풍화암층, 및 연암층의 순으로 구성되어 있다. 매립층은 지표면으로부터 약 3m 정도까지 분포하고 있으며, N치는 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 또는 상대밀도는 깊이에 따라 증가하는 것이 아니라 연경도의 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 두께계 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 1.76g/cm^3 이다. 그리고, 비배수전단강

도는 삼축압축시험(UU-Test)결과 평균 0.36kg/cm^2 이며, 일축압축시험결과 평균 0.45kg/cm^2 으로 나타났다. 풍화잔류토층은 주로 3~4m의 두께로 분포하고 있으며, 실트 섞인 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 10m이상이며 깊이가 깊어짐에 따라 풍화의 정도가 약화되는 것으로 나타났다. 풍화암층의 하부는 기반암인 연암이 존재하며, 연암의 압질은 매우 불량한 상태로서 코아 회수율이 저조한 편이다(홍원표 & 송영석, 2001). 한편, 지하수위는 GL(-)3~6m정도이며, 굴착이 진행됨에 따라 미소하게 감소하지만 굴착이 완료된 이후에는 거의 변화가 없는 것으로 나타났다.

3. 현장계측

3.1 흙막이 구조물

본 연구는 인천국제공항의 신설부지 가운데 A-1공구, A-2공구, A-3공구 그리고, A-4공구의 강널말뚝 흙막이 벽을 이용한 굴착현장을 대상으로 실시하였다. 대상현장의 강널말뚝 흙막이벽은 모두 공동구와 지하차도 건설을 위하여 수행된 것이다. 최종 굴착깊이는 10~17m이며, 대부분의 현장이 12m정도의 굴착깊이를 가지고 있다.

먼저 A-1공구의 강널말뚝 흙막이벽은 일부 지하차도 구간에서 앵커지지 방식으로 시공되었으나 거의 대부분 버팀보지지 방식으로 시공되었다. 그리고, A-2공구의 강널말뚝 흙막이벽은 모두 버팀보지지 방식으로 시공되었다. 그러나, A-3공구의 강널말뚝 흙막이벽은 버팀보와 앵커의 복합지지 방식으로 시공되었다. 즉, 상부 1, 2단은 버팀보 지지방식이고 하부 3, 4, 5단은 앵커지지방식이다. 그리고, A-4공구에서의 강널말뚝 흙막이벽은 버팀보지지, 앵커지지 및 복합지지 방식으로 다양하게 시공되었다. 즉, 남측지하차도 Main Line의 강널말뚝 흙막이벽은 버팀보지지 방식으로 시공되었고, 일부 공동구와 지하차도 램프구간의 강널말뚝 흙막이벽은 앵커지지 방식으로 시공되었다. 한편, 공동구 구간에서는 굴착면 상부의 1, 2단은 버팀보지지이고, 하부 3, 4, 5단은 앵커지지인 복합지지 방식으로 시

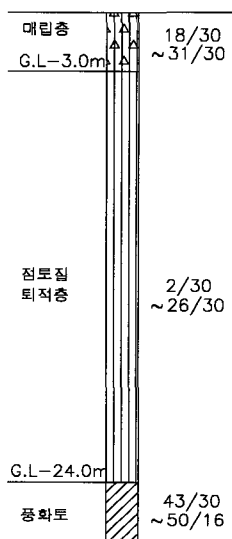


그림 2. 대표적인 지층주상도

공되었다.

본 현장에서는 지하수위가 높은 연약점성토 지반으로 구성되어 있으므로 흙막이벽의 강성이 우수하고 별도의 차수공법을 고려하지 않아도 되는 강널말뚝을 채택하였고, 강널말뚝의 이음부를 물리게 하여 연속성을 확보할 수 있도록 하였다. 그리고, 강널말뚝 흙막이벽의 형식은 U-Type(KWSP-IV)을 적용하였다. 한편, 흙막이벽의 지지방식으로는 버팀보와 앵커가 사용되었다. 버팀보, 띠장 및 중간말뚝은 모두 H-말뚝을 사용하였다. 버팀보는 H-300×300×10×15를 사용하였고, 띠장은 H-300×300×10×15 또는 H-350×350×15×19을 사용하였으며, 중간말뚝은 H-250×250×9×14을 사용하였다. 특이한 사항으로는 띠장의 단면이 두가지 형태이며 2열 띠장을 사용한 구간도 있다. 앵커는 주변마찰형 형태이며 PC 스트랜드 강연선을 사용하였고, 강선수는 7~8개를 사용하였다. 앵커의 설치각도는 40°고, 자유장의 길이는 23~28m이며 정착장의 길이는 8~10m이다. 본 현장에 적용된 흙막이구조물의 제원을 요약 정리하면 표 1과 같이 나타낼 수 있다.

전술한 바와 같이 본 현장의 흙막이벽 지지방식은 세 가지로 분류할 수 있으며, 지지방식에 따른 흙막이벽의 대표적 굴착단면도는 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 그림 3(a)는 버팀보지지 강널말뚝 흙막이벽의 굴착단면도를 나타낸 것으로 굴착깊이는 13m정도이며, 총 4~5단의 버팀보에 의하여 강널말뚝 흙막이벽이 지지되어 있다. 굴착폭은 22m이며, 굴착단면의 중앙에 버팀보의 처짐을 방지하기 위하여 2~3개의 중간말뚝을 설치하였다. 버팀보의 수평간격은 2.5m, 수직간격은 2.0~3.0m로 시공되었다. 강널말뚝의 근입깊이는 최종굴착깊이로부터 약 14m정도를 더 근입시켜 지지층에 도달하도록 하였다.

그림 3(b)는 앵커지지 강널말뚝 흙막이벽의 굴착단면

도를 나타낸 것으로 굴착깊이는 7~10m이며, 총 3~4단의 앵커에 의해 강널말뚝 흙막이벽이 지지되고 있다. 앵커의 수직간격은 2.0~2.5m로 다양하며, 수평간격은 2.0m로 일정하다. 강널말뚝의 근입깊이는 최종굴착깊이로부터 약 7m정도를 더 근입시켰다.

그림 3(c)는 버팀보와 앵커의 복합지지 강널말뚝 흙막이벽의 굴착단면도를 나타낸 것으로 굴착깊이는 12.5m정도이며, 상부 2단의 버팀보와 하부 3단의 앵커에 의하여 강널말뚝 흙막이벽이 지지되어 있다. 굴착폭은 15m이며, 굴착단면의 중앙에 중간말뚝을 설치하여 상부 버팀보의 처짐을 방지하였다. 강널말뚝의 근입깊이는 앵커지지 흙막이벽과 마찬가지로 최종굴착깊이로부터 약 7m정도를 더 근입시켰다.

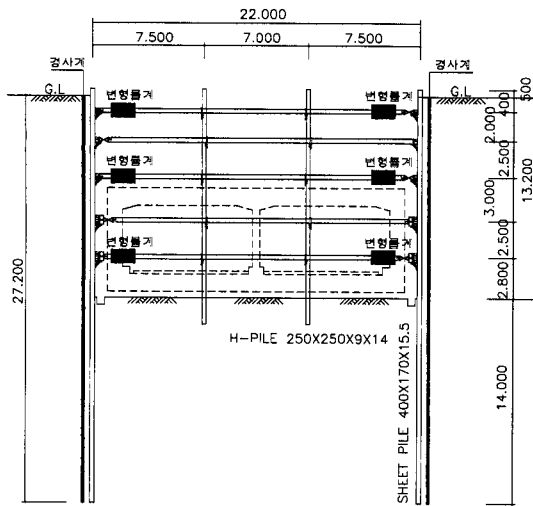
3.2 계측기 설치

본 연구에서는 총 44개 단면의 강널말뚝 흙막이벽을 대상으로 계측기를 설치하여 흙막이벽의 거동을 조사하였다. 이 가운데 버팀보지지 강널말뚝 흙막이벽은 19개 단면이고, 앵커지지 강널말뚝 흙막이벽은 7개 단면이며, 버팀보와 앵커의 복합지지 강널말뚝 흙막이벽은 18개 단면이다.

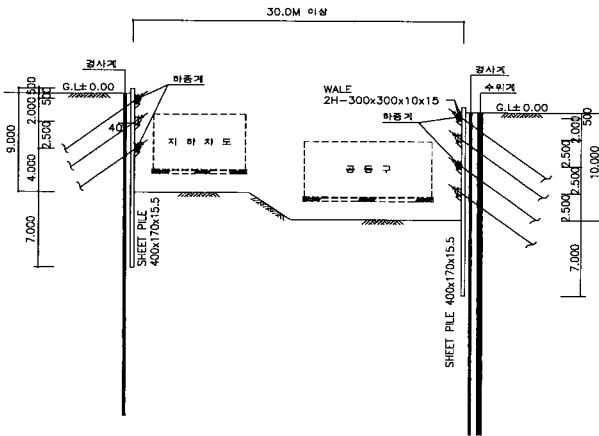
그림 3은 굴착단면도에 계측기설치위치를 함께 도시한 것이다. 그림을 살펴보면 각각의 지지방식별 흙막이벽에 대하여 변형률계, 하중계, 지중경사계 및 지하수위계를 설치하여 계측을 수행하였다. 즉, 버팀보의 축력을 측정하기 위하여 변형률계를 설치하였고, 앵커의 축력을 측정하기 위하여 하중계를 설치하였다. 그리고, 시공도중 흙막이벽의 변형을 살펴보기 위하여 흙막이벽에 근접하여 지중경사계를 설치하였다. 또한, 굴착단계 및 강우에 따른 지하수위의 변화를 조사하기 위하여 지하수위계를 지중경사계와 인접하여 설치하였다.

표 1. 흙막이구조물의 제원

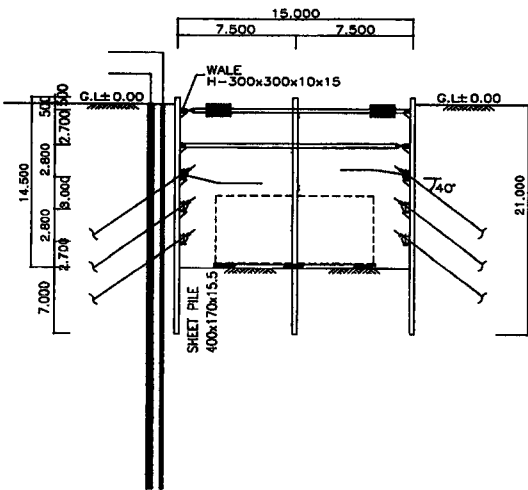
구분	단면 형태 및 단면 치수		주요 용도
흙막이벽	U-Type (KWSP-IV) (400×170×15.5)		가설흙막이벽체
버팀보	H-Pile (300×300×10×15)		가설흙막이벽 지지
앵커	설치각도	40°	가설흙막이벽 지지
	강선수	7~8개	
	자유장 길이	23~28m	
띠장	H-Pile (300×300×10×15, 350×350×12×19)		가설흙막이벽 지지
중간말뚝	H-Pile (250×250×9×14)		버팀보 변형방지



(a) 버팀보지지 강널말뚝 흠막이벽



(b) 앵커지지 강널말뚝 흠막이벽



(c) 복합지지 강널말뚝 흠막이벽

그림 3. 지지방식에 따른 흠막이벽의 굴착단면도 및 계층기 설치도

4. 흠막이벽의 변형거동 비교

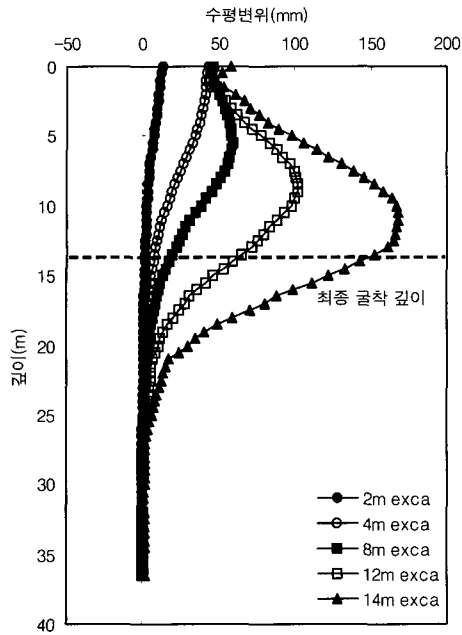
흠막이벽의 수평변위는 굴착배면의 지반조건, 굴착

단계, 지지방식 등에 따라 크게 영향을 받는다. 그림 4~그림 6은 각각의 지지방식에 따른 굴착단계별 강널말뚝 흠막이벽의 수평변위를 나타낸 것이다. 굴착단계별 흠막이벽의 수평변위를 나타내기 위하여 횡축에는 흠막이벽의 수평변위량을 누계변위량으로 나타내었고, 종축에는 지표면으로부터의 깊이를 나타내었다.

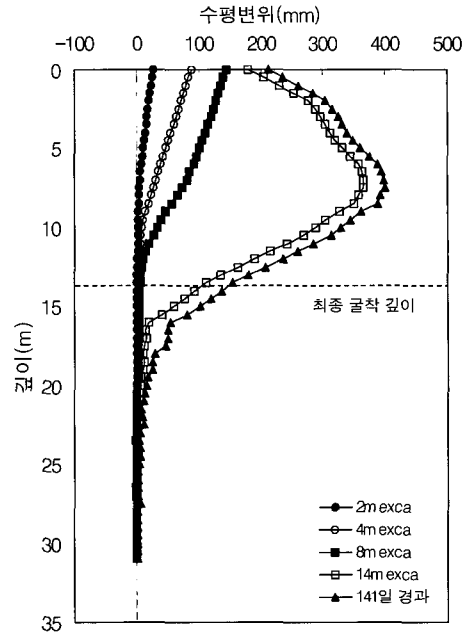
그림 4는 버팀보지지 강널말뚝 흠막이벽의 수평변위를 나타낸 것으로 최대수평변위는 굴착저면에 인접한 흠막이벽 저부에서 발생하는 것으로 나타났으며, 그 크기는 약 60~400mm인 것으로 나타났다. 그림 4(a)는 A-2공구 공동구 구간 No.12(L)단면의 굴착단계별 수평변위를 나타낸 것이며, 그림 4(b)도 A-2공구 공동구 구간 No.24+9.8(R)단면의 굴착단계별 수평변위를 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면 굴착을 실시한 초기의 수평변위는 캔틸레버보 형상으로 지표면부근에서 최대수평변위가 발생되며, 굴착깊이가 증가함에 따라 최대수평변위는 굴착저면 부근에서 발생하는 것으로 나타났다(홍원표 외 2인, 2004a).

그림 5는 앵커지지 강널말뚝 흠막이벽의 수평변위를 나타낸 것으로, 최대수평변위는 버팀보지지 흠막이벽과는 달리 굴착저면으로부터 3~5m상부에 발생하고 있는 것으로 나타났으며, 그 크기는 약 30~150mm인 것으로 나타났다. 그림 5(a)는 A-4공구 공동구 구간 No.171(R)단면의 굴착단계별 수평변위를 나타낸 것이다. 굴착이 진행되는 동안 흠막이벽의 수평변위는 비교적 작게 발생하였으나, 굴착이 완료된 이후에 큰 크리프성 수평변위가 발생되었다. 그러나, 이 구간에서는 여름철 장마기간도중 집중강우로 인하여 굴착전면이 모두 물에 잠기는 경우가 발생되었다. 이로 인하여 굴착전면에 수압이 작용하게 되어 흠막이벽의 수평변위가 회복되는 현상을 볼 수 있었다. 그림 5(b)는 A-4공구 지하차도 구간 No.11+12.5(L)단면의 굴착단계별 수평변위를 나타낸 것이다. 굴착이 진행되는 동안 흠막이벽의 수평변위는 작게 발생되었으나 굴착이 완료된 이후 점성토 지반의 크리프특성으로 인하여 수평변위가 계속적으로 증가하였다(홍원표 외 2인, 2004b).

그림 6은 버팀보와 앵커의 복합지지 강널말뚝 흠막이벽의 수평변위를 나타낸 것으로, 최대수평변위는 버팀보로 지지된 부분과 앵커로 지지된 부분의 경계면에서 발생되며, 그 크기는 약 30mm~180mm인 것으로 나타났다. 그림 6(a) 및 그림 6(b)는 A-3공구 지하차도 구간 No.38(L)단면 및 No.38(R)단면의 굴착단계별 수평변위

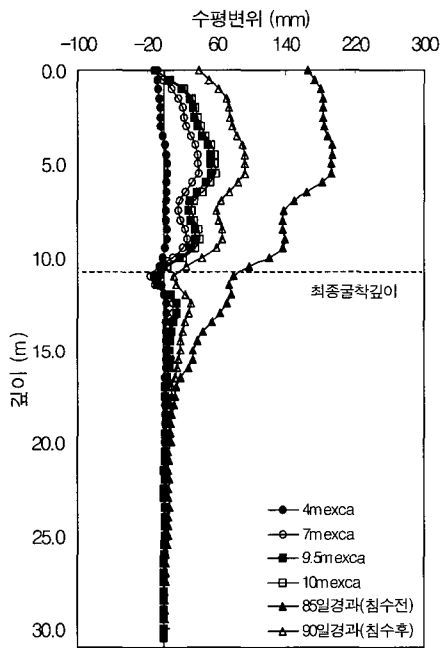


(a) No.12(L) 단면

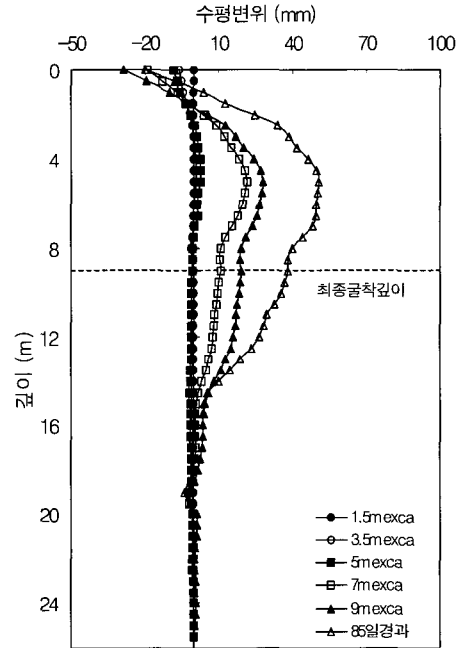


(b) No.24+9.8(R) 단면

그림 4. 버팀보지지 강널말뚝 흠막이벽의 수평변위



(a) No.171(R) 단면



(b) No.11+12.5(L) 단면

그림 5. 앵커지지 강널말뚝 흠막이벽의 수평변위

를 나타낸 것이다. 지표면으로부터 약 6m를 경계로 하여 상부의 수평변위와 하부의 수평변위가 서로 다른 형태로 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 원인은 지표면으로부터 약 6m 깊이를 경계로 상부는 버팀보지지 구조이고, 하부는 앵커지지 구조로 설치되어 있기 때문이다. 따라서, 지표면으로부터 약 6m를 경계로 상부에는 버팀

보지지 흠막이벽에서 발생하는 수평변위형태가 나타나고, 하부에는 앵커지지 흠막이벽에서 발생하는 수평변위형태가 나타나는 것을 알 수 있다(홍원표 외 2인, 2004c).

이상의 결과를 살펴보면 강널말뚝 흠막이벽의 최대 수평변위는 버팀보지지의 경우 가장 크고, 그 다음은 복

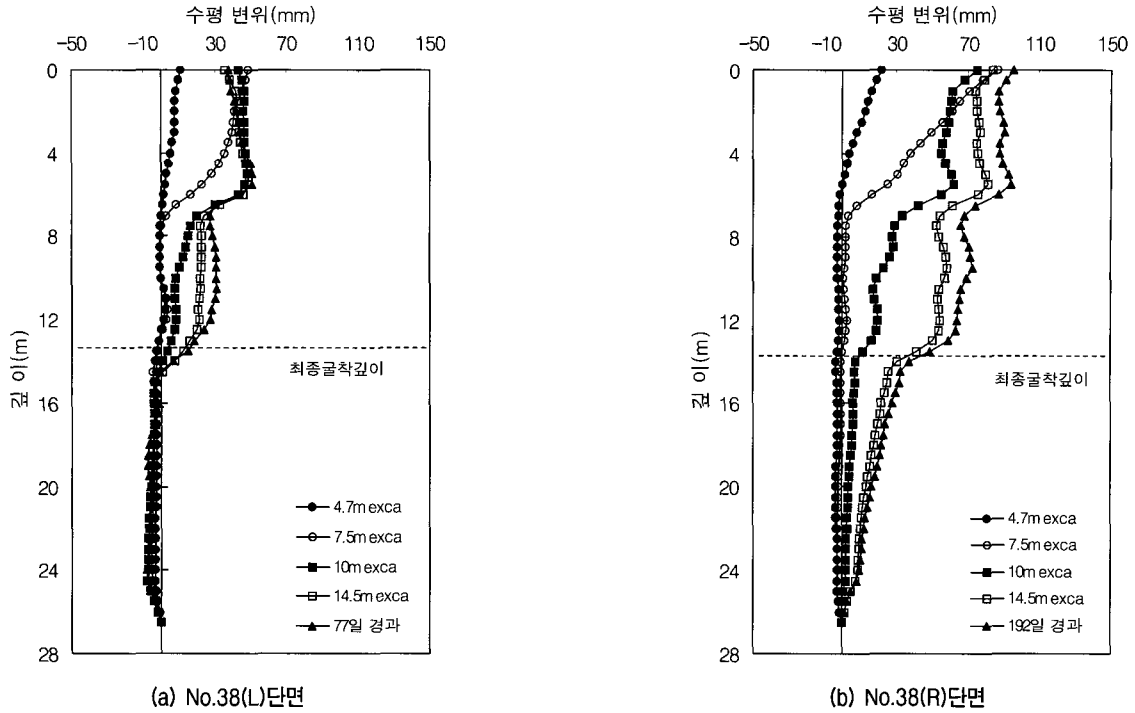


그림 6. 복합지지 강널말뚝 흙막이벽의 수평변위

합지지의 경우가 크며, 앵커지지 흙막이벽의 경우가 가장 작은 것으로 나타났다. 이러한 원인은 지지방식에 따른 시공과정 및 시공조건, 굴착완료후 점성토지반의 크리프성 변형 등에 의한 것으로 판단된다. 그리고, 흙막이벽의 변형형상은 버팀보지지 흙막이벽의 경우 굴착저면에서 최대수평변위가 발생되고, 앵커지지 흙막이벽의 경우 최대수평변위는 최대굴착깊이의 1/2지점에서 발생되며, 복합지지 흙막이벽의 경우 최대수평변위는 최대굴착깊이의 2/3지점에서 발생됨을 알 수 있다. 한편, 최종 굴착저면 부근에서 강널말뚝 흙막이벽의 수평변위가 크게 발생되고 있는데 이는 굴착저면에서의 히빙현상이 발생되고 있음을 보여주고 있다고 할 수 있다.

계속적인 히빙이 발생하게 된다. 따라서, 굴착지반의 안정수를 이용하여 연약지반상 흙막이벽의 안정성을 검토하여 보고자 한다. 이를 위하여 흙막이벽의 단계별 최대수평변위 및 단계별 굴착완료후 최대수평변위 증가속도와 굴착지반의 안정수와의 상관관계를 조사하였다.

그림 7은 무차원화시킨 흙막이벽의 최대수평변위와 안정수와의 상관관계를 도식한 것이다. 그림을 살펴보면 안정수가 3.14이하인 경우 최대수평변위는 굴착깊이의 1.0%이하로 발생되고, 안정수가 3.14~5.14사이인 경우 최대수평변위는 굴착깊이의 2.5%이하로 발생하는 것으로 나타났다. 그리고, 한계안정수인 5.14이상에서

5. 분석 및 고찰

5.1 굴착저면의 안정수

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

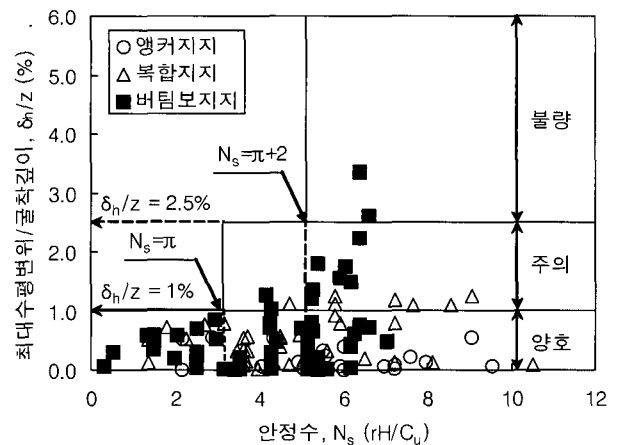


그림 7. 최대 수평변위와 안정수의 관계

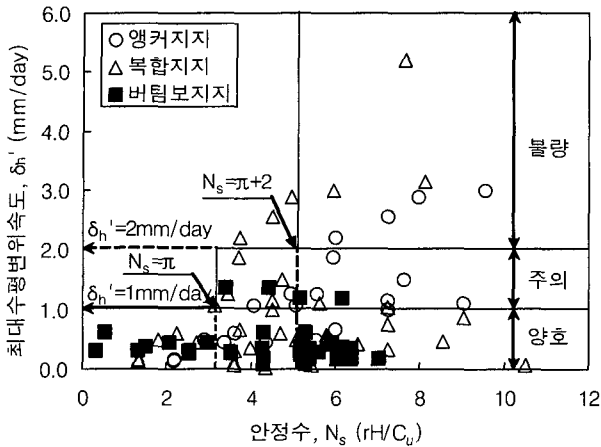


그림 8. 최대 수평변위 속도와 안정수의 관계

최대수평변위는 급격하게 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 한편, 그림 8은 최대수평변위속도와 안정수와의 상관관계를 도시한 것이다. 최대수평변위속도는 단계별 굴착이 완료되고 일주일 경과후 발생된 최대수평변위를 경과일수로 나누어 선정하였다. 그림을 살펴보면 안정수가 3.14이하인 경우 최대수평변위속도는 1mm/day이하로 발생되고, 안정수가 3.14~5.14사이인 경우 최대수평변위속도는 대부분 2mm/day이하에서 발생되며, 한계안정수인 5.14이상인 경우 최대수평변위속도는 급격하게 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이는 Peck(1969)에 의해 제안된 굴착저면지반의 안정수에 대한 기준과 잘 일치하며, 홍원표 외 2인(2004a; 2004b)에 의해 제안된 안정성 판단기준을 동일하게 적용할 수 있음을 알 수 있다.

5.2 굴착저면의 강도

그림 9는 복합지지 강널말뚝 흠막이벽으로 시공된 A-4공구 공동구 구간간의 시추조사시 표준관입시험결과를 토대로 굴착저면에서의 N치와 최대수평변위와의 관계를 나타낸 것이다. 종축에는 최대수평변위를 최종굴착깊이로 나누어서 백분율로 나타내었으며, 횡축에는 굴착저면지반에서의 N치를 표시하였다.

그림에서 보는 바와 같이 굴착저면에서의 N치가 감소함에 따라 복합지지 강널말뚝 흠막이벽의 최대수평변위는 증가함을 알 수 있다. 특히, N치가 약 10이하일 경우 흠막이벽의 최대수평변위는 급격하게 증가하는 경향을 보이고 있다. 이들 결과를 토대로 굴착저면에서의 N치와 굴착깊이에 따른 최대수평변위의 상관관계를

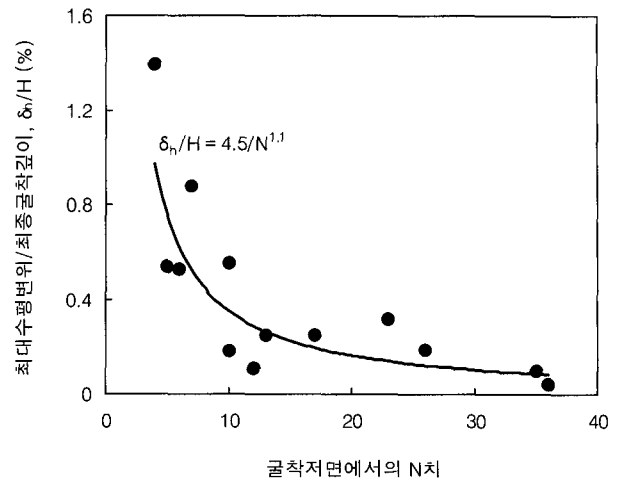


그림 9. 굴착저면에서의 N치와 복합지지 흠막이벽의 최대 수평변위와의 관계

회귀분석을 통하여 식 (1)과 같이 제안할 수 있다. 따라서, 연약지반상 복합지지 강널말뚝 흠막이벽의 굴착저면에 대한 N치를 이용하여 흠막이벽의 최대수평변위를 예측할 수 있을 것이다.

$$\frac{\delta_{\max}}{H} (\%) = \frac{4.5}{N^{1.1}} \quad (1)$$

5.3 히빙에 대한 안정성

Terzaghi(1943)는 연약지반 흠막이 굴착시 굴착저면에서의 히빙에 대한 안정성을 얕은기초의 지지력 이론을 적용하여 제안한 바 있다. Terzaghi(1943)에 의해 제안된 굴착저면에서의 히빙에 대한 안전율(F_s)은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_s = \frac{1}{H} \frac{5.7c}{\gamma - \frac{c}{B_1\sqrt{2}}} \quad (2)$$

여기서, H : 굴착깊이(m), c : 흙의 점착력(kg/m²), γ : 흙의 습윤단위중량(kg/m³), B_1 : 굴착폭(m)

그림 10은 대상현장의 강널말뚝 흠막이벽을 대상으로 굴착저면에서의 히빙에 대한 안전율과 흠막이벽의 최대수평변위와의 관계를 나타낸 것이다. 그림의 종축에는 최대수평변위를 굴착깊이로 나눈 백분율로 무차원화시켜 도시하였으며, 횡축에는 히빙에 대한 안전율을 도시하였다. 그림중 굵은 실선은 본 연구결과 얻어진 흠막이벽의 최대수평변위와 히빙 안전율과의 관계중

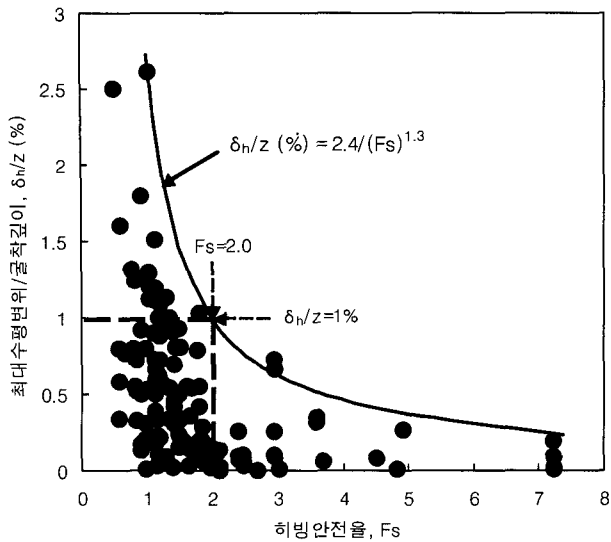


그림 10. 히빙안전율과 흙막이벽의 최대 수평변위와의 관계

상한선을 도시한 결과이다.

앞서 설명한 바와 같이 Peck(1969)은 굴착지반의 안정수가 3.14이상이면 굴착저면에서 소성역이 확대되기 시작하여 지반응력이 현저하게 된다고 하였다. 그리고, 대상현장의 경우 굴착지반의 안정수가 3.14이상이면 흙막이벽의 최대수평변위는 굴착깊이의 1.0%가 되는 것으로 나타났다. 따라서, 대상현장에서는 최대수평변위가 굴착깊이의 1.0%에 해당하는 히빙의 안전율을 그림중 굵은 실선에서 산정하여 이를 히빙의 안정기준으로 제안하는 것이 바람직하다. 그림에서 보는 바와 같이 최대수평변위가 굴착깊이의 1.0%일때 히빙의 안전율은 2.0이 되며, 히빙의 안전율이 2.0이하일 경우 흙막이벽의 수평변위는 크게 증가하고 있는 것으로 나타났다. 따라서, 국내 연약지반 강널말뚝 흙막이벽의 경우 히빙에 대한 안전율은 2.0으로 제안할 수 있으며, 히빙에 대한 안전율이 2.0이상 되어야 흙막이벽의 최대수평변위에 대한 안정성이 확보된다고 할 수 있겠다. 또한, 히빙안전율과 흙막이벽의 최대수평변위와의 상관관계를 나타내면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\delta_h}{z} = \frac{2.4}{(F_s)^{1.3}} \quad (3)$$

여기서, δ_h : 최대수평변위, z : 굴착깊이, F_s : 히빙안전율

한편, 그림 11은 본 연구결과를 토대로 제안된 실험식과 Mana and Clough(1981)에 의해 제안된 실측결과 및 유한요소해석결과를 함께 도시한 것이다. 그림에서 점

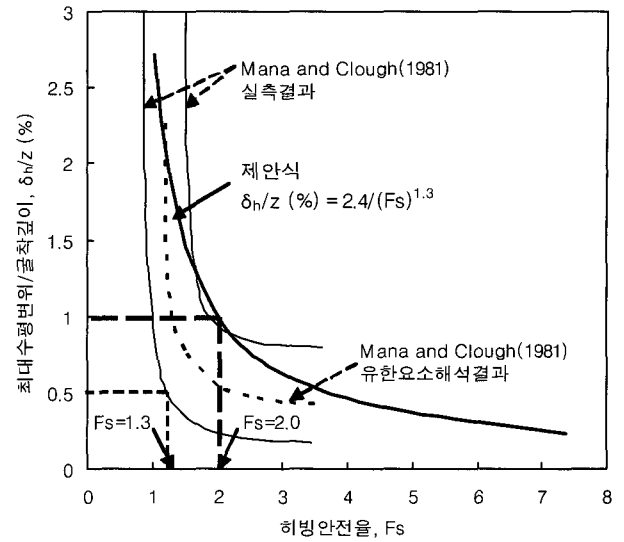


그림 11. Mana and Clough(1981)의 히빙안전율과 비교

선은 Mana and Clough(1981)의 유한요소해석의 결과를 표시한 것이며, 얇은 실선은 실측결과의 상한선과 하한선을 표시한 것이다. 그리고, 굵은 실선은 본 연구결과에서의 제안식을 표시한 것이다. Mana and Clough(1981)는 예민비가 2~8정도의 연약~중간 점토지반에서 최대수평변위가 굴착깊이의 0.5%일때 히빙에 대한 안전율이 약 1.3이며, 히빙안전율이 1.3이하일 경우에 흙막이벽의 최대수평변위가 급속하게 증가한다고 제안한 바 있다. 그러나, 본 연구결과에서는 앞서 제안한 바와 같이 최대수평변위가 굴착깊이의 1.0%일때 히빙의 안전율은 2.0이 되며, 히빙의 안전율이 2.0이하일 경우 흙막이벽의 수평변위는 크게 증가함을 알 수 있다. 따라서, Mana and Clough(1981)의 연구결과인 히빙안전율 1.3을 국내에 적용하는 것은 적합하지 않은 것으로 나타나므로 우리나라 연약지반의 경우는 히빙 안전율을 2.0으로 정함이 바람직하다고 생각된다.

6. 결론

인천국제공항현장의 연약지반에 설치된 강널말뚝 흙막이벽의 수평변위에 대한 현장계측결과를 토대로 지지형식에 따른 수평변위 특성 및 지반의 안정수, 굴착저면지반의 강도 및 히빙에 대한 안전율과의 상관관계를 조사한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 지지방식에 따른 강널말뚝 흙막이벽의 수평변위 억제효과는 앵커지지, 복합지지, 버팀보지지 순으로 크게 나타났으며, 각각의 지지형식에 따른 최대수평변

위 발생위치도 서로 다르게 발생함을 알 수 있다.

- (2) 연약지반 강널말뚝 흠막이벽을 이용한 굴착시 굴착 지반의 안정수가 π 이하이면 최대수평변위는 굴착 깊이의 1%이하로 발생되고, 안정수가 $\pi+2$ 이하이면 최대수평변위는 굴착깊이의 2.5%이하로 발생되며, 안정수가 $\pi+2$ 이상이면 최대수평변위는 급격하게 발생된다.
- (3) 연약지반 강널말뚝 흠막이벽을 이용한 굴착시 굴착 지반의 안정수가 π 이하이면 최대수평변위속도는 1mm/day이하로 발생되고, 안정수가 $\pi+2$ 이하이면 최대수평변위속도는 2mm/day이하로 발생되며, 안정수가 $\pi+2$ 이상이면 최대수평변위속도는 급격하게 증가된다.
- (4) 연약지반에서 굴착시 굴착저면지반에서의 히빙에 대한 안전율이 2.0이하이거나, 굴착저면에서의 N치가 10이하일 경우 흠막이벽의 최대수평변위는 급격하게 증가하여 흠막이벽의 안정성에 문제를 발생하게 된다.

참 고 문 헌

1. 조기영, 정성교, 고광진, 배종건, 정진교 (1998), "연약점토지반의 깊은 굴착에 의한 지반거동의 예측 및 현장계측", 98년도 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp.245-248.
2. 홍원표 (2000), 연약점성토지반 굴착시 흠막이벽의 거동에 관한 연구보고서, 중앙대학교.
3. 홍원표, 송영석, 김동욱 (2004a), "연약지반에 설치된 버팀보지 강널말뚝 흠막이벽의 거동", 대한토목학회 논문집, 제24권

- 제3C호, pp.183-191.
4. 홍원표, 송영석, 김동욱 (2004b), "연약지반에 설치된 앵커지지 강널말뚝 흠막이벽의 거동", 한국지반공학회 논문집, 제20권 제4호, pp.65-74.
5. 홍원표, 김동욱, 송영석 (2004c), "연약지반에 설치된 복합지지 강널말뚝 흠막이벽의 거동", 대한토목학회 논문집, 제24권 제6C호, pp.317-325.
6. Bjerrum, L. and Eide, O. (1956), "Stability of strutted excavations in clay", *Geotechnique*, Vol.6, No.1, pp.32-47.
7. Caspe, M. S. (1966), "Surface settlement adjacent to braced open cut" *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Div., ASCE*, Vol.92, No.SM4, pp.51-59.
8. Clough, G. W. and Hansen, L. A. (1981), "Clay anisotropy and braced wall behavior", *Journal of Geotechnical Division, ASCE*, Vol.107, No.GT7, pp.893-913.
9. Clough, G. W. and O'Rourke, T. D. (1990), "Construction induced Movements of in-situ Walls", *Design and Performance of Earth Retaining Structures*, Geotechnical Special Publication, No. 25, ASCE, pp.439-470.
10. Finno, R. J. and Nerby, S. M. (1989), "Saturated clay response during braced cut construction", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.115, No.8, pp.1065-1084.
11. Finno, R. J. Atmatzidis, D. K. and Perkins, S. B. (1989), "Observed performance of a deep excavation in clay", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.115, No.8, pp.1045-1064.
12. Mana, A. I. and Clough, G. W. (1981), "Prediction of movements for braced cuts in clay", *Journal of Geotechnical Division, ASCE*, Vol.107, No.GT6, pp.759-777.
13. Peck, R. B. (1969), "Deep excavations and tunnelling in soft ground", 7th ICSMFE, State-of-Art Volume, pp.225-290.
14. Terzaghi, K. (1943), *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley and Sons, Inc., New York, pp.189-194.
15. Wong, K. S. and Broms, B. B. (1989), "Lateral wall deflections of braced excavation in clay", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.115, No.6, pp.853-870.

(접수일자 2004. 3. 29, 심사완료일 2005. 1. 22)