

연약지반 굴착시 강널말뚝 흠막이벽의 안정성 평가 Stability Evaluation of Sheet-pile Walls during Excavation Works in Soft Ground

홍원표¹⁾, Won-Pyo Hong, 김동욱³⁾, Dong-Wook Kim, 송영석²⁾, Young-Suk Song, 이재호⁴⁾, Jae-Ho Lee

¹⁾ 중앙대학교 건설환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Envir. Eng., Chung-Ang University

²⁾ 금호산업(주)/건설 인천국제공항 2단계 현장소장, Project Manager, Incheon Int. Airport Phase 2, Kumho Industrial Co./Construction Business Unit

³⁾ 한국지질자원연구원 지질환경재해연구부 선임연구원, Senior Researcher, Geol. & Envir. Hazards Div., Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources

⁴⁾ 중앙대학교 대학원 토목공학과 박사과정수료, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Chung-Ang University

SYNOPSIS : 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 are largely occurred in 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 are rapidly increased.

Key words : Horizontal displacement, Velocity of horizontal displacement, Sheet-pile walls, Stability Number, Soft ground

1. 서론

연약지반에서 굴착을 실시할 경우 흠막이벽의 변형이 발생되고 이로 인하여 굴착 배면지반의 침하와 굴착저면의 융기 등이 발생하게 된다. 이러한 연약지반상 흠막이벽의 거동과 굴착주변지반의 변형에 영향을 미치는 요인으로는 흠막이벽의 종류, 지지형식, 시공조건, 지하수위 등이 있다. 이러한 영향요인에 따른 흠막이벽의 거동 및 굴착주변지반의 변형을 조사하고, 이를 규명하는 것은 매우 어려운 일이다. 연약지반에서 흠막이벽의 수평변위에 대한 형상과 크기는 흠막이벽의 지지형식에 따라 다르게 나타날 것이다. 연약지반에서 굴착공사를 안전하게 시행하기 위해서는 흠막이벽의 수평변위와 연계하여 연약지반 안정성을 반드시 검토해야 할 것이다. 따라서, 본 연구에서는 연약지반 굴착시 지지형식에 따른 흠막이벽의 거동을 조사하여 지지형식에 따른 흠막이벽의 변형특성을 비교 고찰하고자 한다. 그리고, Peck (1969)에 의해 제안된 안정수를 이용하여 흠막이벽의 안정성을 평가할 수 있는 기준을 마련하고자 한다.

2. 대상현장

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 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.

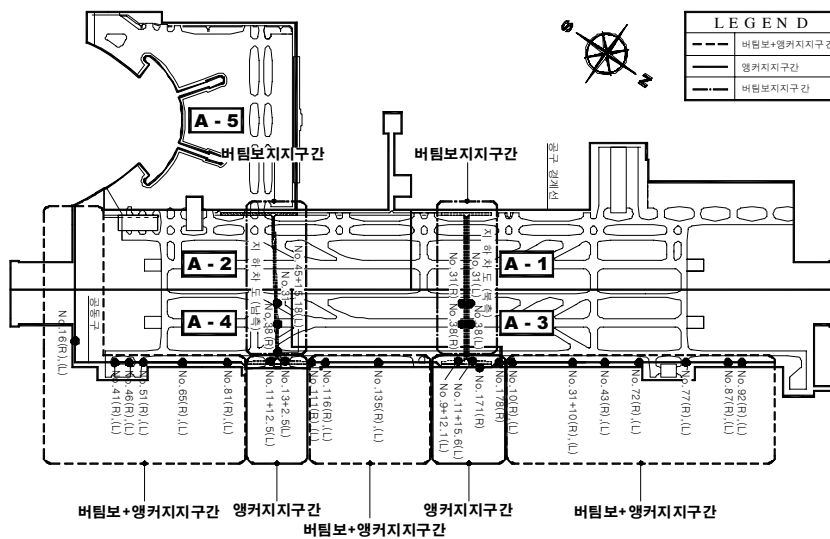


그림 1. 연구대상지역의 전체 개략도

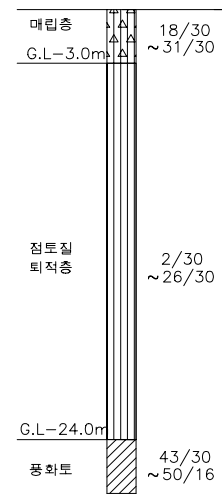


그림 2. 대표적인 지층주상도

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, 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 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 $1.76\text{g}/\text{cm}^3$ 이다. 그리고, 비배수전단강도는 삼축압축시험(UU-Test)결과 평균 $0.36\text{kg}/\text{cm}^2$ 이며, 일축압축시험결과 평균 $0.45\text{kg}/\text{cm}^2$ 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 암질은 매우 불량한 상태로

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 흠막이 구조물

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

먼저 A-1공구의 강널말뚝 흠막이벽은 일부 지하차도 구간에서 앵커지지 방식으로 시공되었으나 거의 대부분 버팀보지지 방식으로 시공되었다. 그리고, A-2공구의 강널말뚝 흠막이벽은 모두 버팀보지지 방식으로 시공되었다. 그러나, A-3공구의 강널말뚝 흠막이벽은 버팀보와 앵커의 복합지지 방식으로 시공되었다. 즉, 상부 1, 2단은 버팀보 지지방식이고 하부 3, 4, 5단은 앵커지지방식이다. 그리고, A-4공구에서의 강널말뚝 흠막이벽은 버팀보지지, 앵커지지 및 복합지지 방식으로 다양하게 시공되었다. 즉, 남측지하차도 Main Line의 강널말뚝 흠막이벽은 버팀보지지 방식으로 시공되었고, 일부 공동구와 지하차도 램프구간의 강널말뚝 흠막이벽은 앵커지지 방식으로 시공되었다. 한편, 공동구 구간에서는 굴착면 상부의 1, 2단은 버팀보지지이고, 하부 3, 4, 5단은 앵커지지인 복합지지 방식으로 시공되었다. 이와 같이 본 현장의 흠막이벽 지지방식은 세가지로 분류할 수 있으며, 지지방식에 따른 흠막이벽의 대표적 굴착 단면도는 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

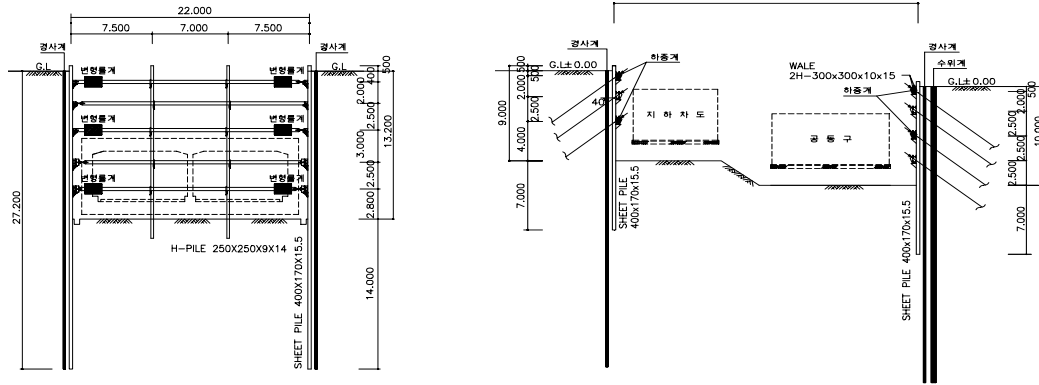
본 현장에서는 지하수위가 높은 연약점성토 지반으로 구성되어 있으므로 흠막이벽의 강성이 우수하고 별도의 차수공법을 고려하지 않아도 되는 강널말뚝을 채택하였고, 강널말뚝의 이음부를 물리개 하여 연속성을 확보할 수 있도록 하였다. 이외에 본 현장에 적용된 흠막이구조물의 제원을 요약 정리하면 표 1과 같이 나타낼 수 있다.

3.2 계측기 설치

본 연구에서는 총 44개 단면의 강널말뚝 흠막이벽을 대상으로 계측기를 설치하여 흠막이벽의 거동을 조사하였다. 이 가운데 버팀보지지 강널말뚝 흠막이벽은 19개 단면이고, 앵커지지 강널말뚝 흠막이벽은 7개 단면이며, 버팀보와 앵커의 복합지지 강널말뚝 흠막이벽은 18개 단면이다. 그림 3은 굴착단면도에 계측기설치위치를 함께 도시한 것이다. 그림을 살펴보면 각각의 지지방식별 흠막이벽에 대하여 변형률계, 하중계, 지중경사계 및 지하수위계를 설치하여 계측을 수행하였다. 즉, 버팀보의 축력을 측정하기 위하여 변형률계를 설치하였고, 앵커의 축력을 측정하기 위하여 하중계를 설치하였다. 그리고, 시공도중 흠막이벽의 변형을 살펴보기 위하여 흠막이벽에 근접하여 지중경사계를 설치하였다. 또한, 굴착단계 및 강우에 따른 지하수위의 변화를 조사하기 위하여 지하수위계를 지중경사계와 인접하여 설치하였다.

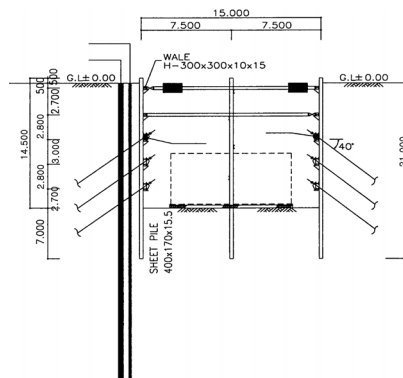
표 1. 흠막이구조물의 제원

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



(a) 버팀보지지

(b) 앵커지지



(c) 복합지지

그림 3. 지지방식에 따른 흙막이벽의 굴착단면도 및 계측기 설치도

4. 계측결과 및 고찰

4.1 흙막이벽의 변형거동

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

그림 4는 A-2공구 공동구 구간 No.12(L)단면의 굴착단계별 수평변위를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 최대수평변위는 굴착저면에 인접한 흙막이벽 저부에서 발생하는 것으로 나타났으며, 그 크기는 약 60~400mm인 것으로 나타났다(홍원표 외 2인, 2004a).

그림 5는 A-4공구 지하차도 구간 No.11+ 12.5(L)단면의 굴착단계별 수평변위를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 최대수평변위는 버팀보지지 흙막이벽과는 달리 굴착저면으로부터 3~5m상부에 발생하고 있는 것으로 나타났으며, 그 크기는 약 30~150mm인 것으로 나타났다(홍원표 외 2인, 2004b).

그림 6은 A-3공구 지하차도 구간 No.38(R)단면의 굴착단계별 수평변위를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 최대수평변위는 버팀보로 지지된 부분과 앵커로 지지된 부분의 경계면에서 발생되며, 그 크기는 약 30mm~180mm인 것으로 나타났다. 이러한 원인은 지표면으로부터 약 6m 깊이를 경계로 상부는 버팀보지지 구조이고, 하부는 앵커지지 구조로 설치되어 있기 때문이다(홍원표 외 2인, 2004c).

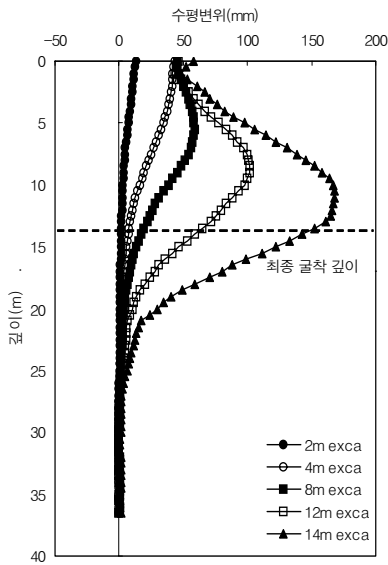


그림 4. 버팀보지지 흙막이벽의 굴착단계별 수평변위

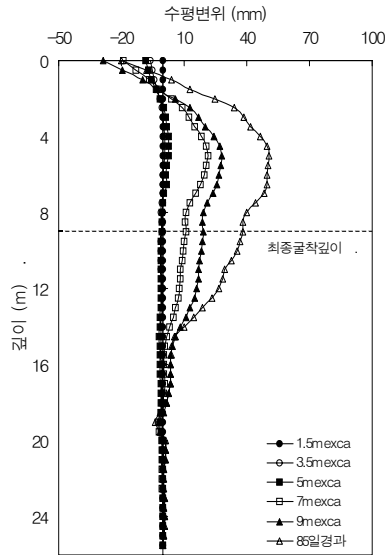


그림 5. 앵커지지 흙막이벽의 굴착단계별 수평변위

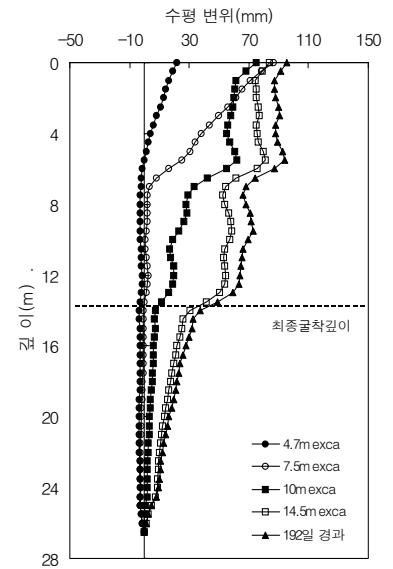


그림 6. 복합지지 흙막이벽의 굴착단계별 수평변위

이상의 결과를 살펴보면 강널말뚝 흙막이벽의 최대수평변위는 버팀보지지의 경우 가장 크고, 그 다음은 복합지지의 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.

4.2 안정수를 이용한 흙막이벽의 안정성 평가

Peck(1969)은 안정수 (N_s)를 이용하여 굴착저면지반의 안정을 검토한 바 있다. 즉, 안정수가 $3.14(\pi)$ 이하이면 굴착저면에서는 탄성적인 변형을 보이고, 안정수가 $3.14(\pi) \sim 5.14(\pi+2)$ 이면 굴착저면에서 소성역이 확대되기 시작하여 지반용기가 현저하게 된다. 그리고, 안정수가 $5.14(\pi+2)$ 이상이면 굴착저면에서는 저면과괴로 지속적인 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 도시한 것이다. 그림을 살펴보면 안정수가 3.14 이하인 경우 최대수평변위는 굴착깊이의 1.0% 이하로 발생되고, 안정수가 $3.14 \sim 5.14$ 사이인 경우 최대수평변위는 굴착깊이의 2.5% 이하로 발생하는 것으로 나타났다. 그리고, 한계안정수인 5.14 이상에서 최대수평변위는 급격하게 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 한편, 그림 8은 최대수평변위속도와 안정수와의 상관관계를 도시한 것이다. 최대수평변위속도는 단계별 굴착이 완료되고 일주일 경과후 발생한 최대수평변위를 경과일수로 나누어 선정하였다. 그림을 살펴보면 안정수가 3.14 이하인 경우 최대수평변위속도는 1mm/day 이하로 발생되고, 안정수가 $3.14 \sim 5.14$ 사이인 경우 최대수평변위속도는 대부분 2mm/day 이하에서 발생되며, 한계안정수인 5.14 이상인 경우 최대수평변위속도는 급격하게 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이는 Peck(1969)에 의해 제안된 굴착저면지반의 안정수에 대한 기준과 잘 일치함을 알 수 있다.

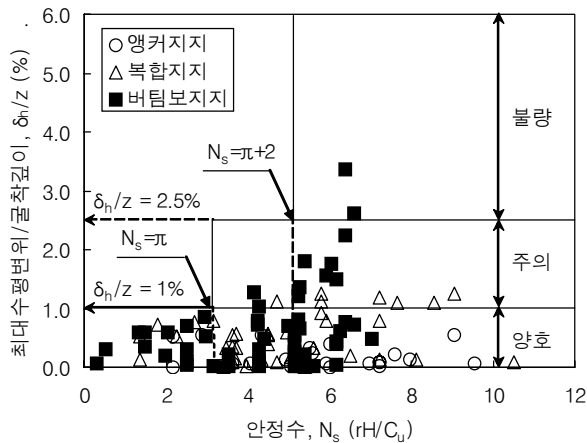


그림 7. 최대수평변위와 안정수의 관계

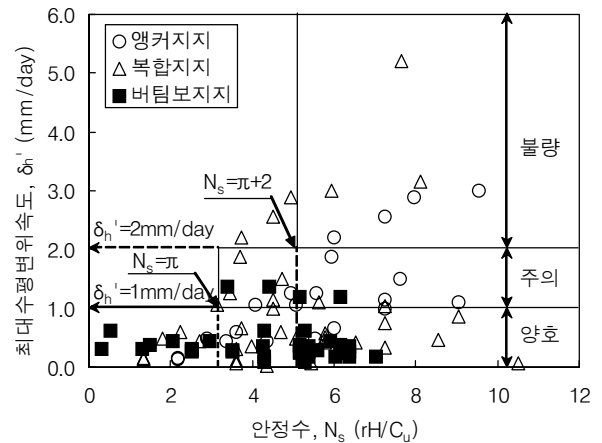


그림 8. 최대수평변위속도와 안정수의 관계

5. 결론

인천국제공항현장의 연약지반에 설치된 강널말뚝 흙막이벽의 수평변위에 대한 현장계측결과를 토대로 지지형식에 따른 수평변위 특성 및 지반의 안정수와 상관계수를 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 지지방식에 따른 강널말뚝 흙막이벽의 수평변위는 앵커지지, 복합지지, 버팀보지지 순으로 작게 나타났으며, 각각의 지지형식에 따른 최대수평변위 발생위치도 서로 다르게 발생함을 알 수 있다.

2) 연약지반 강널말뚝 흙막이벽을 이용한 굴착시 굴착지반의 안정수가 π 이하이면 최대수평변위는 굴착깊이의 1% 이하로 발생되고, 안정수가 $\pi + 2$ 이하이면 최대수평변위는 굴착깊이의 2.5% 이하로 발생되며, 안정수가 $\pi + 2$ 이상이면 최대수평변위는 급격하게 발생된다.

3) 연약지반 강널말뚝 흙막이벽을 이용한 굴착시 굴착지반의 안정수가 π 이하이면 최대수평변위속도는 1mm/day 이하로 발생되고, 안정수가 $\pi + 2$ 이하이면 최대수평변위속도는 2mm/day 이하로 발생되며, 안정수가 $\pi + 2$ 이상이면 최대수평변위속도는 급격하게 증가된다.

참고문헌

1. 홍원표, 송영석 (2001) 영종도지역 해성점토의 공학적 특성, 중앙대학교 기술과학연구소 논문집, 제 31집, pp.1-13.
2. 홍원표, 송영석, 김동욱 (2004a) “연약지반에 설치된 버팀보지지 강널말뚝 흙막이벽의 거동”, 대한토목학회 논문집, 제24권 제3-C호, pp.183-191.
3. 홍원표, 송영석, 김동욱 (2004b) “연약지반에 설치된 앵커지지 강널말뚝 흙막이벽의 거동”, 한국지반공학회 논문집, 제20권 제4호, pp.65-74.
4. 홍원표, 김동욱, 송영석 (2003c) “연약지반에 설치된 복합지지 강널말뚝 흙막이벽의 거동”, 대한토목학회 논문집, 제24권 제6-C호, pp.317-325.
5. Peck, R. B. (1969) “Deep excavations and tunnelling in soft ground” 7th ICSMFE, State-of-Art Volume, pp.225-290.