지반굴착 흙막이의 정보화 시공을 위한 계측데이터 활용방안

오정환[1], Jung-Hwan, 조철현[2], Chul-Hyun Cho, 김성재[3], Sung-Jae Kim

[1](주)한국지오컨설턴트 대표이사, 공학박사, 기술사, Principal of Korean Geo-Consultants, Ph.D, P.E(S&F)
[2](주)한국지오컨설턴트 기술연구소 책임연구원, Chief Researcher, Korean Geo-Consultants R&D Center
[3](주)한국지오컨설턴트 기술연구소 연구원, Researcher, Korean Geo-Consultants R&D Center

1. 서 론

최근 산업의 급속한 발전으로 인해 도심지 인구집중과 지하주차 공간의 부족현상이 발생되고, 건물의 초대형화 추세에 따른 토지이용의 효율성이 요구되고 있다. 이러한 현안의 해결방안으로 대규모 지하공간의 개발이 필수적이며, 지하공간에 대형구조물의 건설을 위해서 도심지 내에서는 기존건물에 근접하여 대심도 굴착공사가 수반하는 경우가 많다. 이 때 지반을 굴착하는 과정에 있어 지반의 평형상태가 흐트러지며, 이 평형상태를 유지하기 위해 흙막이가 필요하게 되고 동시에 굴착에 따른 흙막이구조물 자체 뿐만 아니라 인접구조물의 안정성 확보를 위한 설계를 수행한다. 그러나 실제 흙막이구조물은 흙-구조물의 상호작용, 배면지반의 초기 응력상태 및 그밖의 역학적으로 규명하지 못한 불확실한 요인들이 존재하기 때문에 실제 나타나는 지반거동은 설계예상치와 상당한 차이를 보이는 경우가 많다. 이러한 문제점의 대안으로 계측에 의한 현장관리가 필수적인 항목으로 자리잡고 있으나 절대치관리기법에 의한 현단계 안정성 판단에만 활용되고 있는 실정이다. 하지만 궁극적인 정보화시공을 위해서는 현상태의 안정성 판단뿐만 아니라 향후 굴착단계의 안정성 여부를 예측할 수 있는 계측데이터의 Feed back이 필요하다. 이와 같은 측면에서 본 고에서는 계측데이터의 Feed back을 위한 역해석 기법과 적용시 주의사항 등을 기술하고, 데이터베이스로 구축된 국내 흙막이 현장정보 및 계측자료를 분석하였다.

2. 지반굴착 흙막이의 역해석

2.1 역해석 문제의 정식화

1) 목적함수

지반공학분야에서 수행되는 역해석은 대부분 현장에서 계측된 변위를 응답변수로 하여 설계변수인 지반의 물성치에 대한 역해석을 수행한다. 일반적으로 변위량 또는 응력 등이 목적함수의 설계변수가 될 수 있지만 변위의 측정이 가장 용이하기 때문에 변위로 정의하는 경우가 많다. 이처럼 응답변수로 현장에서 계측된 측정데이타를 사용하였기 때문에 역해석에 의한 값은 실제 지반의 특성을 대변하는 값이라기 보다 현장조건을 포함한 포괄적인 의미의 응답변수이다. 이는 역해석을 통하여 설계변수에 해당하는 지반물성치를 얻었을 경우 지반자체의 물성치가 아닌 현장지반의 물성치가 된다. 즉, 현장에서 시공시 발생된 모든 상황이 고려된 값을 얻게 되는 것이다. 이와같이 현장지반의 물성치를 얻기 위해 목적함수를 구성하는데 있어 일반적으로 최소자승법을 이용하여 식 (2.1)과 같이 각각의 굴착단계와 전체 굴착영역에 대한 적분함수 전체 합으로 이루어진다.

$$F(X) = \sum_{k=1}^{n} \int_{\Omega} (\Delta D_k^* - \Delta D_k)^2 d\Omega \text{ minimize} \qquad (2.1)$$

여기서 k는 굴착단계이며, 목적함수는 n단계까지의 오차를 더하여 계산된다. 목적함수 값인 오차는 k-1단계에서 k단계로의 시공시 j지점의 계측 변위의 증분인 ΔD^*_{kj}와 계산에 의해 산정된 변위의 증분인 ΔD_{kj}의 차로 되어 있다.

2) 설계변수

무수한 인자중에서 어떤 인자가 흙막이벽의 거동에 영향을 크게 미치는 주요인자인가를 선택하여야 한다. 이는 역해석 대상변수 즉, 설계변수의 증가로 인해 역해석 수행능력의 저하와 많은 시간 및 노력이 소요되는 비효율성을 최소화하기 위해서이다. 흙막이벽의 거동에 영향을 미치는 인자는 여러 가지가 있을 수 있으나 대표적으로 지반물성치와 흙막이 부재의 강성을 인자로 할 수 있다.

3) 제약조건

역해석이 수행되면 목적함수를 만족시키면서 설계변수를 최적화 기법에 의하여 인위적으로 변화시키는데 이때 최적해를 찾기위해 목적함수를 최소화시키며, 설계변수를 올바른 방향으로 유도하고 수렴시키게 된다. 또한, 반복적인 과정중 각 설계변수 뿐만 아니라 설계변수에 의한 기타 응답의 내용들이 합리적인 범위에 해당하도록 제약을 주며, 이러한 제약조건으로 최종 결과가 유용하면서 설계변수의 최적값을 구할 수 있도록 하여야 한다.

2.2 최적화 일반

최적화는 수치적인 알고리즘을 통하여 목적함수, 설계변수 및 제약조건 등의 세가지의 주된 과정으로 요약된다. 최적화는 해석대상의 특성에 따라 다양한 문제가 존재하는데 가장 중요한 사항은 문제의 비선형성이 얼마나 존재하는가에 따라 최적화 결과가 국부적 최적값(local optimum)으로 수렴할 가능성이 있다. 이러한 경우는 2개의 설계변수 전구간에 대하여 목적함수 값을 3차원 그래프로 나타낸 그림 2.1을 예로 설명할 수 있다. 그림 2.1을 살펴보면 국부적 최적값과 전역적 최적값을 명확하게 확인할 수 있는데 여기서 국부적 최적값은 B점이며, 전역적 최적값은 D점이라 할 수 있다.

만약, 초기값을 A점에서 시작한다면 그림 2.1의 화살표 방향과 같이 국부적 최적값인 B점에 도달하게 되고, 초기값을 C점에서 출발할 경우는 일반적으로 전역적 최적값인 D점에 도달하게 될 것이나 이는 최적화기법에 따라서 결과값이 다르게 나타날 수 있다. 이처럼 최적화 문제는 최적화 기법의 선택도 중요하며, 이와 더블어 그림 2.1의 예와 같이 초기값의 선택도 최적화 결과에 크게 영향을 미칠 수 있는데 이러한 사항은 후술하는 2.3절의 분석결과와 상응된다.

한편, 일반적인 최적화 과정의 흐름은 다음 세가지의 단계로 간략하게 요약할 수 있으며, 그림 2.2와 같은 알고리즘으로 도식화된다.

(1) 제 1단계 : 탐색방향의 결정
(2) 제 2단계 : 현단계 중 1차원 탐색에 의한 최적점 도달
(3) 제 3단계 : 일련의 반복과정에 대해 수렴성과 종료여부 판정

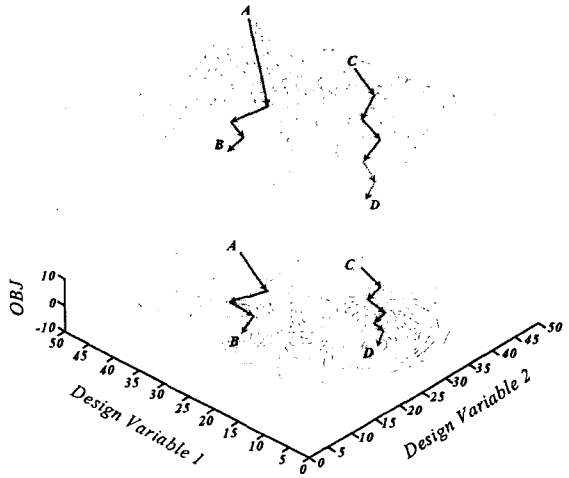


그림 2.1 초기값 선택에 따른 국부 및 전역적 최적값

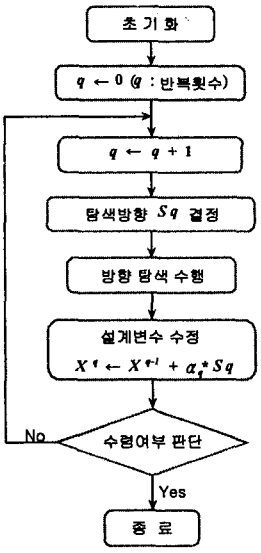


그림 2.2 최적화 알고리즘

또한, 최적화기법은 문제의 특성과 접근 방법에 따라 여러 가지가 제시되고 있으며, 최적화는 문제의 특성에 따라 가장 큰 분류로 그림 2.3과 같이 제약조건의 유무에 의해 구분된다.

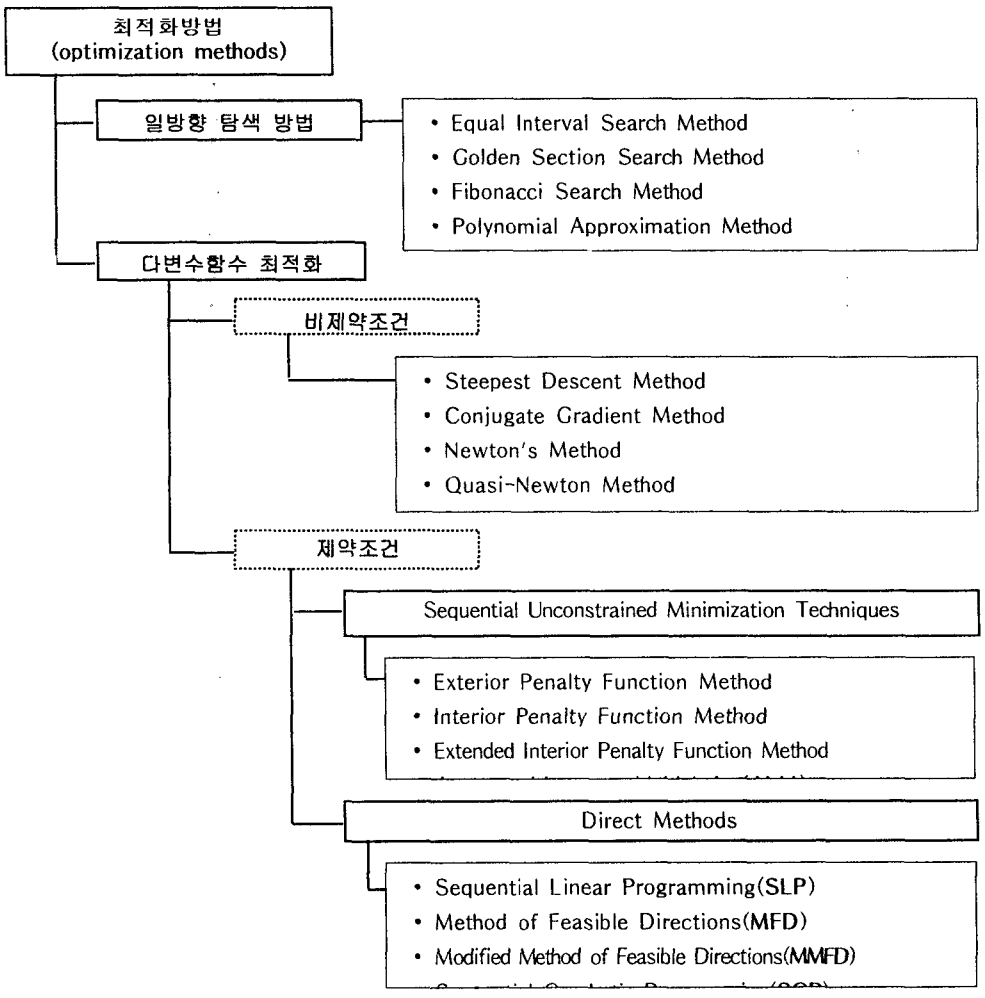
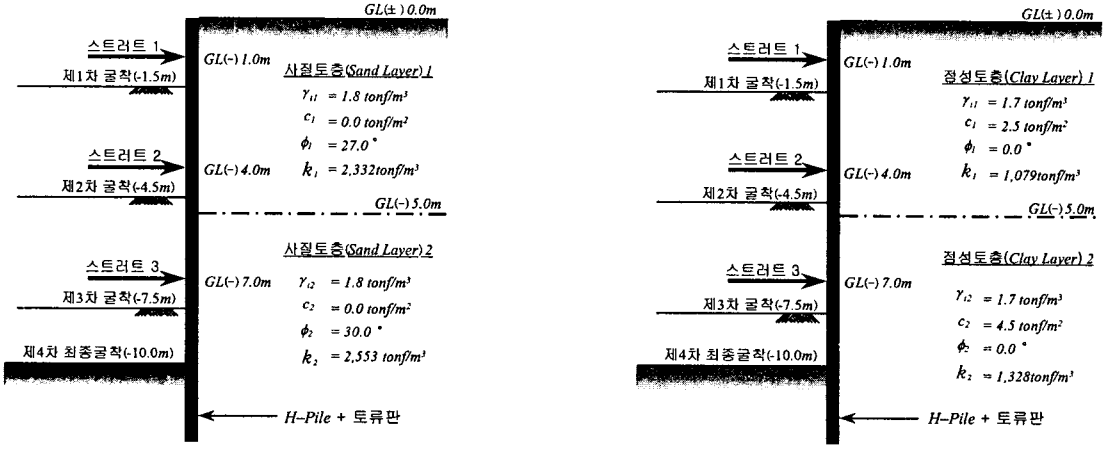


그림 2.3 최적화기법의 분류

2.3 역해석 대상변수 고찰

역해석 대상변수의 고찰은 역해석 수행시 발생될 수 있는 오류를 분석하여 얻고자 하는 해가 국부최소점이 아닌 전역최소점으로 수렴되도록 하기 위함이며, 역해석 대상변수는 내부마찰각, 수평지반반력계수 및 점착력으로 가정하여 그림 2.4와 같이 이상화된 사질토 지반 및 점성토 지반을 대상으로 실시하였다. 그림 2.4의 지반구성은 예상하지 못한 외력이나 시공상의 오차를 제거하여 정확한 설계변수의 고찰이 이루어지도록 모델링한 것이며, 각 토층에 명시된 지반물성치를 실제 지반물성치로 가정하고 이를 이용한 해석변위를 실측변위로 가정하였다. 이렇게 가정된 실제 지반물성치 및 실측변위를 토대로 역해석 대상변수로 선정된 각 토층의 내부마찰각, 점착력 및 지반반력계수를 실제값과 다르게 일정범위에서 변화시키면서 변위를 산정한 후 실측변위와 예측변위의 오차로 구성되는 목적함수의 수렴정도를 분석하였다. 여기서, 역해석 대상변수의 변화는 두 가지 방법으로 수행하였는데 첫 번째는 각 토층 지반물성치를 하나씩만 실제값과 다르게 변화시키고 나머지는 실제값으로 고정시켜 설계변수가 하나가 되게 하는 경우이며, 두 번째는 각 토층의 내부마찰각, 점착력 및 지반반력계수의 물성치 중 동일 지반물성치 모두는 변화시키되 나머지는 실제값으로 고정시켜 설계변수를 두 개로 하는 경우이다.

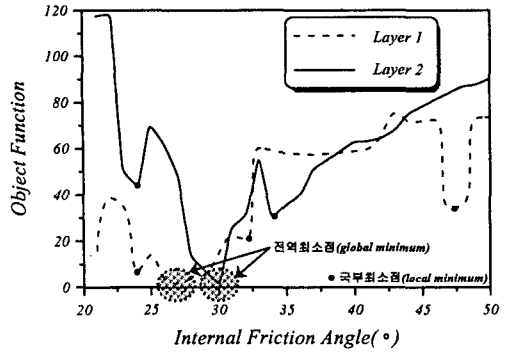


(a) 사질토 지반 (b) 점성토 지반

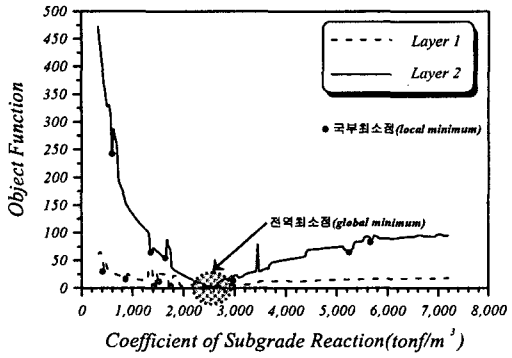
그림 2.4 토층구성 및 지반물성치

1) 설계변수가 하나인 경우

그림 2.5 및 2.6은 사질토 지반에서 내부마찰각을 21 ~ 50°, 지반반력계수를 330 ~ 7,200tf/m^{3}의 범위에서 변화시키고, 점성토 지반에서 점착력을 0.1 ~ 10.0tf/m^2, 지반반력계수를 사질토와 동일하게 330 ~ 7,200tf/m^{3}의 범위에서 변화시켰을 때 목적함수의 수렴경향을 도식화한 것이다. 이때, 각 토층의 내부마찰각, 점착력 및 지반반력계수를 변화시켰을 때 공통적으로 나타나는 현상이 최적의 해인 전역최소점(global minimum) 이외에 오목한 부분인 국부최소점(local minimum)이 다수 존재한다는 것이다. 이러한 결과는 역해석 수행 시 초기값 선택이 매우 중요하다는 사실을 나타내 주는 것으로 적용되는 초기값이 그림 2.5 및 2.6에서 보는 바와 같이 실제값(전역최소점)과 차이가 클 경우 국부최소점으로 수렴되어 상이한 결과가 도출되는 것을 볼 수 있다.

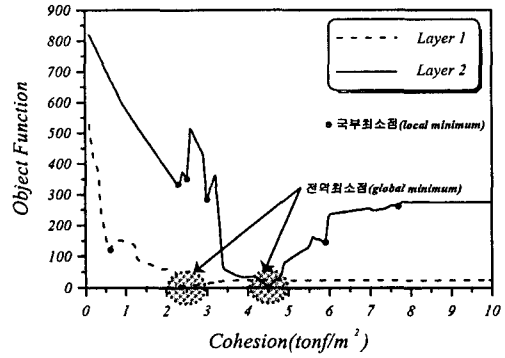


(a) 내부마찰각 변화

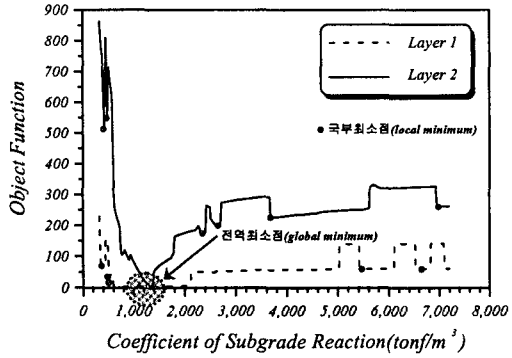


(b) 지반반력계수 변화

그림 2.5 목적함수의 수렴성(사질토 지반)



(a) 점착력 변화



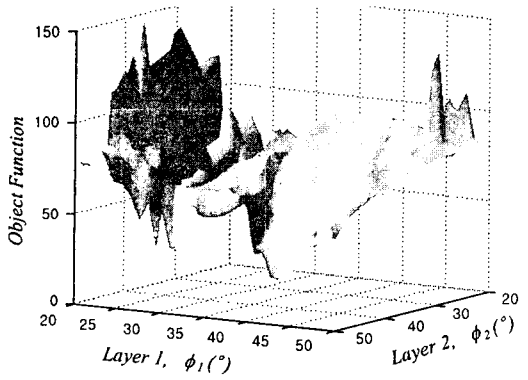
(b) 지반반력계수 변화

그림 2.6 목적함수의 수렴성(점성토 지반)

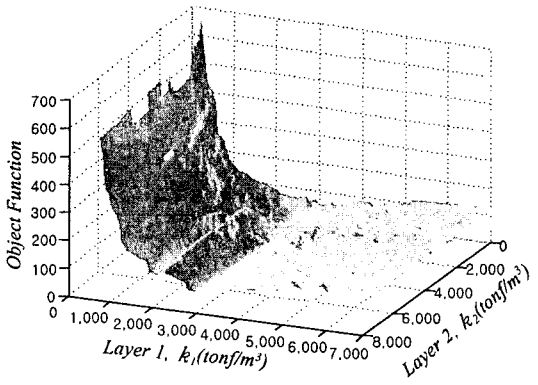
2) 설계변수가 두 개인 경우

설계변수 변화가 두 개인 경우는 3차원적인 분석이 필요하기 때문에 각 토층의 동일 지반물성치를 모두 변화시켜 설계변수 변화가 두 개가 되도록 하여 이들의 변화에 따른 목적함수의 변화형상을 그림 2.7 및 2.8에 도시하였다.

설계변수를 고찰한 결과 사질토 및 점성토 지반의 단순한 토층구성과 비교적 간단한 H-pile + 토류판, 스트러트 공법을 적용한 모델링에도 불구하고, 지반물성치인 설계변수에 대하여 다수의 국부적 최적값을 갖고 있음을 알 수 있다. 이는 흙막이구조물의 해석이 탄소성적 거동을 바탕으로 비선형적인 특성을 나타내며, 초기에 적용되는 설계변수에 따라서 불연속적인 값이 해석에 사용되기 때문에 발생되는 현상으로 판단된다. 이렇듯 흙막이구조물의 역해석 문제는 가장 적절한 최적화기법의 도입만으로 국부적 최소점에 수렴되는 문제점을 해결하는데 한계가 있으며, 적용 대상지반의 다층구성과 다양한 흙막이공법 등에 의해 복잡한 문제가 될 수 있다. 그러나, 본 분석에서 설계변수에 대한 전체적인 경향을 고찰한 결과 해당 지층에 대하여 설계변수의 초기값을 적절하게 선택함으로써 국부적최소점으로 수렴하는 문제를 극복할 수 있는 것을 알 수 있다. 다시 말해서 전 구간 토층에 대해 임의로 가정하여 적용되는 초기값에 대해서는 보장할 수 없는 값으로 최적화가 이루어지지만, 각 지층의 지반물성치를 공학적인 관점에서 예상할 수 있는 적절한 초기값을 선택할 경우 최적화 과정에서 더욱 신뢰성 있는 전역적 최소값으로 접근하는 결과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

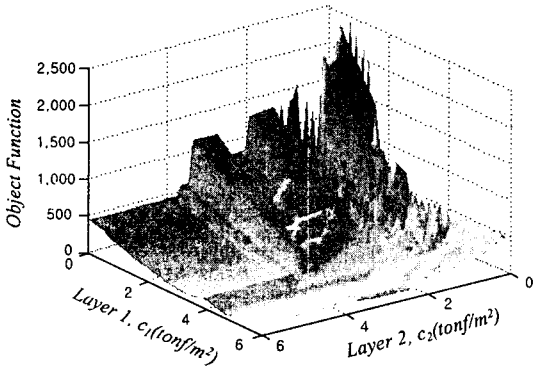


(a) 내부마찰각 변화

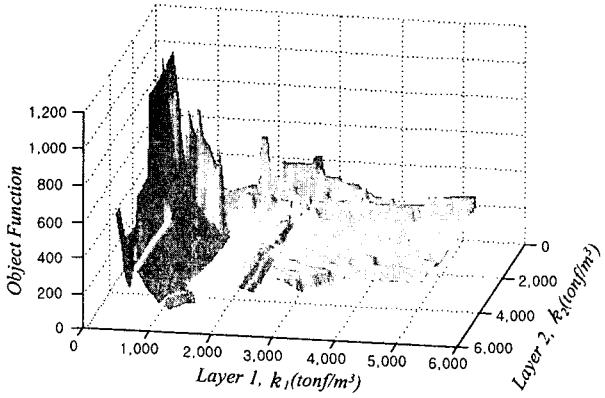


(b) 지반반력계수 변화

그림 2.7 목적함수의 수렴성(사질토 지반)



(a) 점착력 변화



(b) 지반반력계수 변화

그림 2.8 목적함수의 수렴성(점성토 지반)

3. 계측자료 D/B 구축 및 활용방안

지반굴착 흙막이분야 정보화시공의 기본사항 중의 하나는 데이터의 축적과 축적된 자료의 효과적인 활용이하고 해도 과언이 아니다. 이는 기 시공완료된 흙막이 현장자료의 축적으로 향후 설계 및 시공시 공법결정과 더불어 흙막이벽체 거동을 예측하는데 효율적인 활용이 가능하기 때문이다. 즉, 시공완료된 현장 및 계측자료의 데이터베이스는 흙막이 설계 시 선행되는 구조물개요와 지반조사 결과인 굴착심도, 지층구성, 및 지하수위 등의 조건으로 가장 유사한 조건에서 과거에 적용된 공법을 확인할 수 있어 효과적인 흙막이공법(흙막이벽체 및 지지구조) 선정이 가능하다. 또한, 선정된 흙막이공법에 대한 벽체거동을 정량적으로 파악할 수 있으므로 설계단계 뿐만아니라 시공과정에서도 유용한 자료가 될 수 있을 것으로 판단된다.

따라서, 본 고에서는 데이터베이스화된 70개소 도심지 흙막이현장 230개 단면의 수집자료를 다각적으로 분석하여 향후 정보화시공을 위한 기본자료로 활용될 수 있도록 정리하였다.

3.1 계측자료 수집현장의 D/B 내용

그림 3.1은 수집된 현장자료에 대해 흙막이벽체 종류별 분포도를 도시한 것으로 수집된 현장의 흙막이벽체 종류별 분포수는 전체 흙막이벽체 중 H-pile + 토류판 벽체(56%), S.C.W 벽체(20%), C.I.P 벽체(17%) 및 Slurry Wall 벽체(7%) 등의 순서로 나타났다. 따라서, 현장자료를 대표하는 흙막이벽체의 종류는 H-pile + 토류판 벽체임을 알 수 있으며, 이러한 분포결과는 현장 및 지반조건, 굴착심도 등 복합적인 요인으로 분석되지만 H-pile + 토류판 공법이 경제성 및 시공성에서 기타 공법보다 우수하기 때문으로 판단된다.

또한, 그림 3.2는 수집된 현장자료를 지지구조의 종류에 따라 분포경향을 나타낸 것이다. 수집현장 중 흙막이벽체의 지지구조로 스트러트 공법(64%)이 상대적으로 많이 차지하고 있는데 이는 앵커공법이 배면측에 설치되어 타 소유부지를 침범할 경우가 많아 소유주의 동의를 얻어야 하는 번거로움이 따르는 반면, 스트러트 공법은 부지내에 용이하게 설치할 수 있어 적용현장이 많은 것으로 판단된다. 한편, 슬래브 지지구조는 Top down 공법에 주로 적용되는 방식으로 수집자료 중 3%가 시공되었는데 이러한 요인은 부지이용의 효율성 및 구조적인 안정성 등의 장점보다 공사비 증가가 지배적인 요인으로 작용되어 소수현장에 적용된 것으로 예상된다.

그림 3.3은 수집 현장자료의 굴착심도별 분포도를 나타낸 것이며, 굴착심도는 소규모 굴착인 0 ~ 10m, 중굴착인 10 ~ 20m, 대심도 굴착인 20m이상으로 분류하였다. 이 중 주종을 이룬 굴착심도는 소규모 굴착인 5 ~ 10m(56%)로 나타났으며, 20m이상의 대심도 굴착도 23%를 차지하고 있어 용지 부족으로 인한 대규모 지하공간의 개발이 증가추세에 있는 것을 알 수 있다.

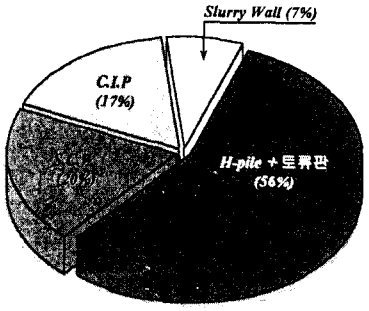


그림 3.1 흙막이벽체 종류별 분포

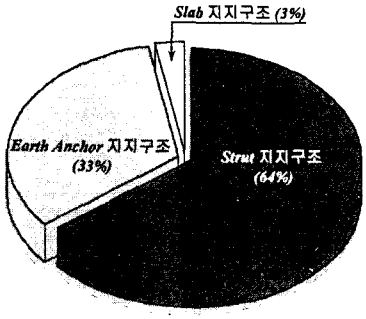


그림 3.2 지지구조 종류별 분포

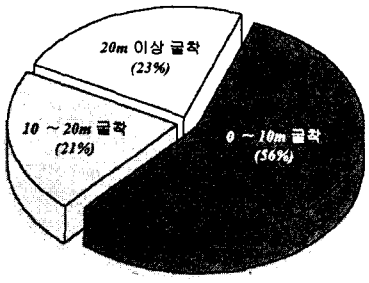


그림 3.3 굴착심도별 분포

3.2 수평변위에 대한 관리기준치

흙막이공사 시 정기적인 계측수행과 체계화된 관리가 이루어지지 않는다면 안정성 유무에 대한 정확한 판단을 할 수 없는 상태에서 굴착공사가 진행되므로 흙막이벽체의 과다한 변위와 인접지반의 침하를 유발시켜 공사 전반에 큰 영향을 주게된다.

따라서, 굴착공사 시 수행한 계측결과에 따른 거동상태를 합리적으로 정량화된 관리기준을 설정하여 신뢰성 있는 안정성 분석을 수행하며, 이를 토대로 공사의 완급조절 및 보강조치를 신속하게 취할 수 있도록 하여 원할한 공사의 진행을 유도하는 것이 필요하다. 이러한 관점에서 본 고에서는 국내 흙막이공사 시 수행되어 축적된 70개 현장 230개소 단면의 계측된 결과를 토대로 관리기준치를 설정하기 위해 경우의 수가 무수히 많은 각 현장의 조건들을 잘 추적할 수 있는 확률론적인 방법 중의 하나인 정규분포(normal distribution)를 적용하였다.

정규분포의 모집단에 대해 t분포를 이용하여 10% 및 1% 유의수준으로 단측검정을 실시하였으며, 신뢰구간의 10% 상한선을 1차 관리기준치, 신뢰구간의 1% 상한선을 2차 관리기준치로 설정하였다. 여기

서, 1차 관리기준치란 안전에 이상이 없으나 주의시공이 요구되는 기준이고, 2차 관리기준치는 주의시공의 정도를 초과하여 위험상태를 뜻하는 기준을 의미한다.

그림 3.4 ~그림 3.8은 각 시공단계에서 안정성 판단의 기준이 되는 관리기준치를 전술한 10% 및 1% 유의수준으로 단측검정한 결과에 대해 최대수평변위량($\delta_{h\,max}$)을 굴착심도(H)로 나누어 정규화하여 나타낸 것이다.

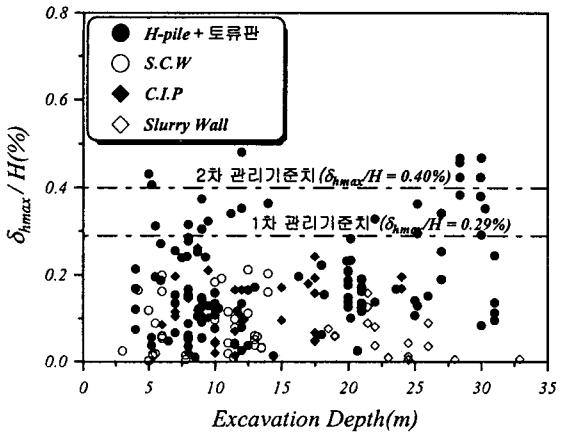


그림 3.4 전체 흙막이벽체

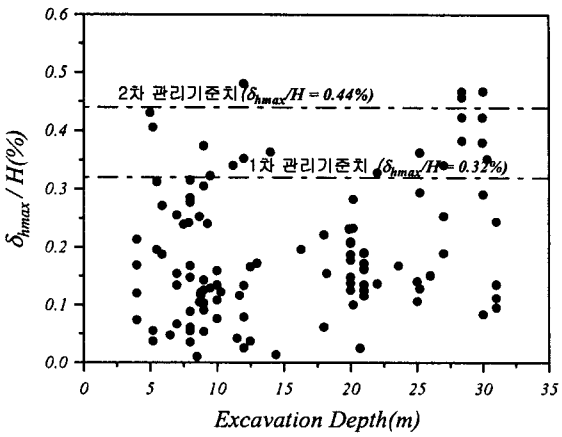


그림 3.5 H-pile + 토류판 벽체

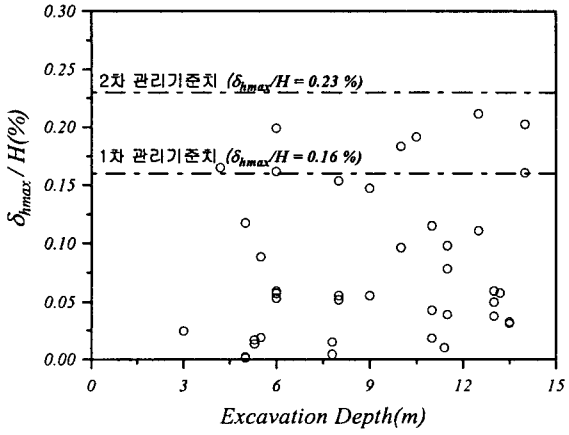


그림 3.6 S.C.W 벽체

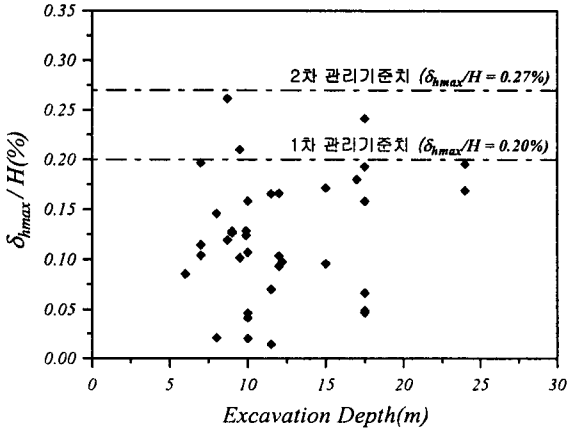


그림 3.7 C.I.P 벽체

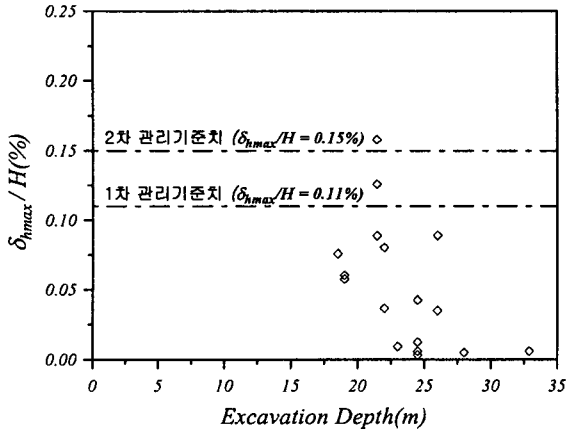


그림 3.8 Slurry Wall 벽체

관리기준치 설정을 위한 현장계측 결과 중 흙막이벽의 최대수평변위를 굴착심도로 나누어 정규화시키고 그림 3.4 ~그림 3.8과 같이 분석한 결과 H-pile + 토류판 벽체의 경우 제 1, 2차 관리기준치가 되는 $\delta_{h\,max}/H$값은 0.32 ~ 0.44%의 범위를 나타내고 있으며, S.C.W 흙막이벽체에서는 0.16 ~ 0.23%를 보이고 있다. 또한, C.I.P 벽체의 경우 제 1, 2차 관리기준치가 되는 $\delta_{h\,max}/H$값은 0.20 ~ 0.27%이고 Slurry Wall은 0.11 ~ 0.15% 정도가 발생되고 있으나 전반적으로 0.29 ~ 0.40%의 범위 내에서 변화하는 경향을 보이고 있다.

일반적으로 최대수평변위의 정규화값 $\delta_{h\,max}/H$이 1차 관리기준치인 0.11 ~ 0.39%를 초과하여 변위가 발생한 경우 흙막이구조체 및 인접지반에 영향을 줄 수 있으며, 2차 관리기준치인 0.15 ~ 0.44%를 초과할 경우에는 지반침하, 인접도로 및 건물의 균열 등 문제점이 나타나므로 중점적인 관리가 요구된다. 여기서, H-pile + 토류판 벽체보다 S.C.W, C.I.P 및 Slurry Wall 벽체의 변위가 작게 나타난 주요원인은 벽체강성의 증가에 따른 변위억제 효과와 강성의 차이가 큰 재료에 기인하는 불연속적인 H-pile + 토류판 벽체에 비해 전술한 3가지 종류의 벽체는 연속성을 갖기 때문으로 판단된다. 이와같은 흙막이벽체의 특성 때문에 본 연구에서 설정된 수평변위의 관리기준치는 강성이 큰 Slurry Wall보다 H-Pile + 토류판 벽체가 크게 나타나 발생변위의 허용값이 다소 커지는 현상을 볼 수 있다. 이는 수집된 현장계측 자료가 파괴 시의 변위가 아닌 안전하게 시공이 완료된 현장에서 발생한 변위의 분석결과이기 때문에 나타난 결과로 판단된다. 그러나, 강성이 큰 벽체는 굴착심도가 깊거나 토압이 큰 현장에 일반적으로 적용하므로 현장관리 시 표 3.1의 수평변위에 대한 관리기준치를 참고할 수 있을 것으로 사료된다.

표 3.1 흙막이벽체 종류에 따른 수평변위에 대한 관리기준치($\delta_{h\,max}/H$)

흙막이벽체의 종류	1차 관리기준치(%)	2차 관리기준치(%)
H-pile + 토류판 벽체	0.32	0.44
S.C.W 벽체	0.16	0.23
C.I.P 벽체	0.20	0.27
Slurry Wall	0.11	0.15
종합분석	0.29	0.40

3.3 주요 수평변위 영향인자와 수평변위의 상관관계 분석

본 절에서는 데이터베이스로 구축된 현장 및 계측자료 중 흙막이벽체의 수평변위에 대해 예측 가능한 경향을 파악하는 것이 필요할 것으로 판단되어 흙막이벽의 수평변위와 수평변위에 영향을 미치는 주요 인자와의 상관관계를 분석하였다. 흙막이벽체의 수평변위에 대한 주요인자로는 토사 및 암반층의 구성비, 지지구조의 형식 및 흙막이벽체의 종류 등으로 선정하였다.

1) 토사 및 암반층의 구성비에 대한 변위와의 상관관계

그림 3.9와 그림 3.10은 수집된 현장 및 계측자료에 대해 토사 및 암반층의 구성비가 흙막이벽체 변위특성에 미치는 영향을 분석하기 위해 도시한 것으로 토사 및 암반층의 구성비는 토사층 두께(H_S) 및 암반층 두께(H_R)를 굴착심도(H)로 나누어 백분율로 표현하였다. 여기서, 토사층은 도심지에서 일반적으로 분포하는 매립토, 사질토 및 실트 등 풍화토 이하의 강성을 가진 지층이며, 암반층은 풍화암 이상의 강성을 가진 연암 및 경암 등으로 분류하였다.

분석결과 토사층의 구성비가 증가할 수록 흙막이벽체의 최대수평변위량($\delta_{h\,max}$) 또한 전반적으로

증가하는 경향을 보이고 있으나 토사층 구성비가 80% 이상인 일부구간에서는 최대수평변위량이 $0.1\%H$ 이하로 크게 감소된 결과를 나타내고 있다. 이는 굴착심도가 6.0m 이하의 소규모 현장과 강성이 큰 흙막이벽체로 시공된 현장에서 나타난 계측결과로 굴착심도의 규모와 벽체강성 또한 지층구성과 더불어 흙막이벽체의 변위에 영향을 미치는 인자임을 알 수 있다. 한편, 토사층의 구성비와는 달리 암반층 구성비의 증가는 흙막이벽체 수평변위를 억제하는 경향을 보이고 있는데 이러한 토사 및 암반층의 구성비에 따른 변위특성은 지반의 강도특성에 크게 영향을 받기 때문에 나타난 결과로 판단된다.

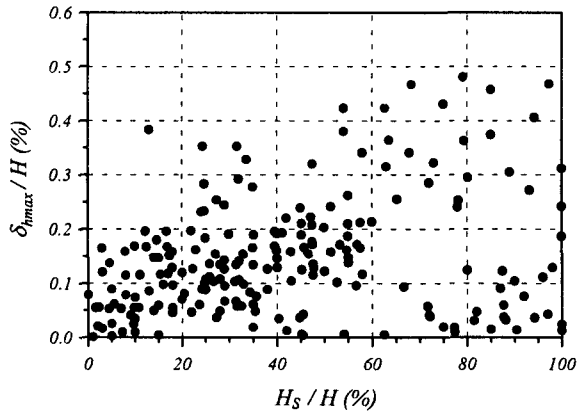


그림 3.9 토사층의 구성비에 따른 변위특성

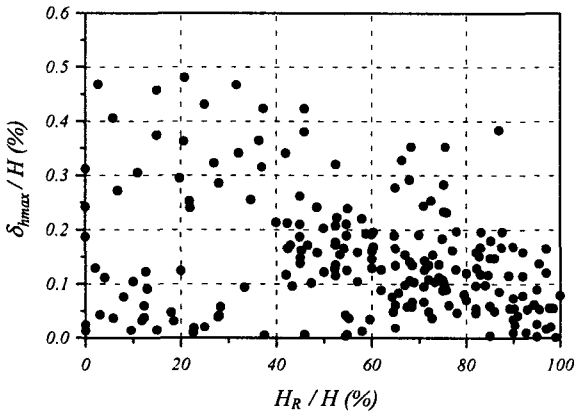


그림 3.10 암반층의 구성비에 따른 변위특성

2) 지지구조 형식에 대한 변위와의 상관관계

수집된 70개 현장의 230개 단면을 대상으로 지지구조 형식에 대한 변위특성을 알아보기 위해 스트러트와 앵커 지지구조가 적용된 계측결과를 그림 3.11 및 3.12와 같이 굴착심도(H)에 대한 흙막이벽체 최대수평변위비($\delta_{h\max}/H$)의 관계로 나타내었다. 여기서, 수집된 자료의 지지구조 형식은 스트러트 및 앵커이외에 슬래브 형식의 지지구조도 있으나 슬래브 형식의 지지구조는 그림 3.2에서 보는 바와같이 3%의 한정된 자료로 인해 분석항목에서 제외하였다.

지지구조 형식에 대한 변위와의 상관관계 분석결과 최대수평변위가 $0.3\%H$를 초과하는 단면이 스트러트 지지벽체에서는 14%이며, 앵커지지 벽체는 8%로 나타나 앵커형식의 지지구조가 변위억제에 효과적인 것으로 나타났다. 또한, 각 지지구조 형식에 대한 최대수평변위량의 평균치에서도 스트러트 지지벽체의 경우에는 $0.19\%H$가 나타난 반면 앵커 지지벽체의 경우에는 스트러트 지지벽체보다 작은 $0.13\%H$로 나타났다. 이러한 경향은 압축부재인 스트러트의 구조적 특성상 부재의 이음부 및 부재 상호간의 공간 등으로 어느 정도 벽체변위가 발생하기 이전에는 이상적인 강성을 충분히 발휘하지 못하기 때문에 초기 발생된 변위가 회복되지 않고 누적되는 경우가 자주 발생한다. 그러나, 인장부재인 앵커는 지지구조와 벽체사이에 공간을 제거하고 굴착 시 초기변위를 회복하거나 추가변위를 억제시키기 위해 선행하중(prestress)을 도입하므로 이상적인 강성과 유사한 강성을 발휘하여 스트러트 지지구조보다 구속효과가 크게 나타난 것으로 사료된다.

또한, 지지구조의 강성이외에도 스트러트는 굴착면 내측에 설치되는 시공상의 특성으로 장비의 원활한 통행 및 작업공간의 확보를 위해 과굴착이 이루어지는 경우가 많지만 앵커의 경우는 배면측에 설치되므로 작업공간의 확보 등에 따른 과굴착 요인이 상대적으로 미소한 것도 주요원인으로 판단된다.

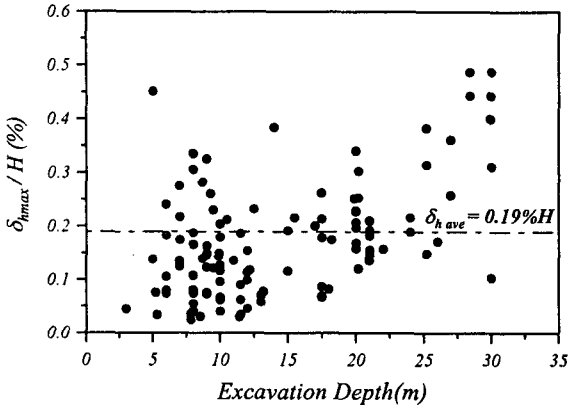


그림 3.11 스트러트 지지구조에 따른 변위특성

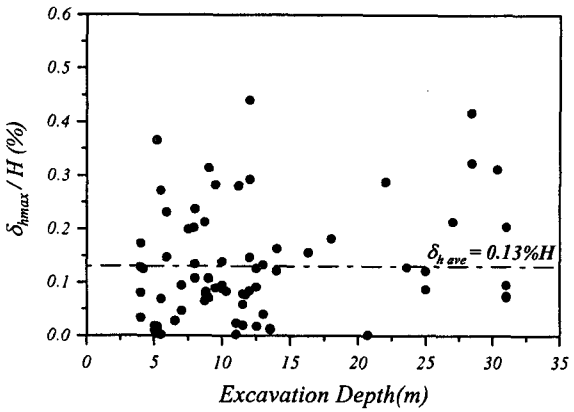


그림 3.12 앵커 지지구조에 따른 변위특성

3) 흙막이벽체 종류에 대한 변위와의 상관관계

그림 3.13은 흙막이벽체의 종류에 따른 변위특성을 분석하기 위해 H-pile + 토류판, S.C.W, C.I.P 및 Slurry wall에 대한 최소 및 최대수평변위비를 명시한 것이다.

그림 3.13에서 알 수 있듯이 최소수평변위량은 굴착심도 및 지층구성 조건 등으로 큰 차이를 보이지 않아 상대비교가 어렵지만 최대수평변위량의 경우는 벽체의 종류에 따라 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 즉, 벽체강성이 가장 큰 Slurry wall은 기타 흙막이벽체보다 상대적으로 작은 $0.16\%H$의 최대수평변위량이 나타난 반면, 벽체강성이 작은 H-pile + 토류판은 Slurry Wall보다 약 3배정도 큰 $0.48\%H$의 최대수평변위량이 발생된 것으로 분석되었다. 이러한 경향은 강성이 큰 흙막이벽체는 작용토압에 대한 저항효과와 굴착에 따른 배면지반의 유동 및 여굴발생이 감소되기 때문에 나타난 결과로 사료된다.

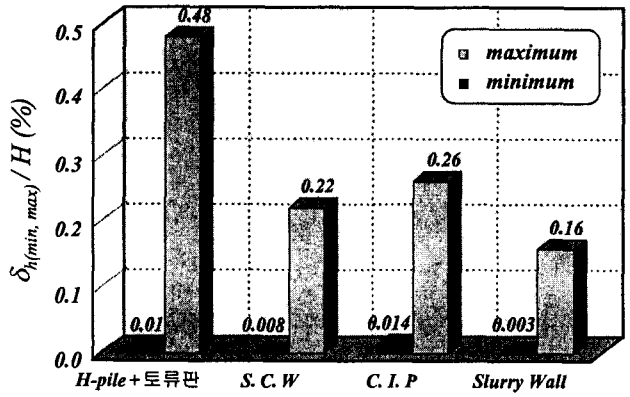


그림 3.13 흙막이벽체 종류에 따른 변위특성

4. 결 언

기술한 바와 같이 지반굴착 분야의 정보화시공을 위해서는 무엇보다도 흙막이현장의 자료가 사장되지 않고 데이터베이스로 구축되어 설계 및 시공시 효과적으로 활용되어야 한다. 또한, 현 굴착단계의 안정성 판단만 수행되는 절대치관리 체계를 탈피하고 역해석 기법이 도입되어 다음 굴착단계의 안정성 판단까지 가능한 예측관리가 정착되어야 한다. 이를 위해서는 계측자료의 적절한 활용과 아울러 안전관리를 위한 통합시스템 개발이 시급하다. 여기서, 안전관리를 위한 통합관리시스템은 흙막이벽체의 변위, 지보공의 응력등에 대한 현단계의 안정성을 판단하며, 나아가 역해석에 의한 다음단계 안정성을 판단하여 위험시 보강대책을 신속하고 합리적으로 처리할 수 있는 시스템을 의미한다. 이러한 시스템의 도입은 국내 흙막이현장의 체계적인 정보화시공을 이룰 수 있으며, 설계 및 시공과정뿐만 아니라 시공 후에도 여러 가지 효과가 나타날 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 오정환, 조철현, 김기웅, 백영식(2002), "지반굴착 흙막이공의 정보화시공 종합관리 시스템", 한국지반공학회 논문집, 제 18권, 2호 pp51 ~ 64.
2. 오정환, 조철현, 김성재, 백영식(2001), "지반굴착 흙막이공의 정보화시공 종합관리를 위한 역해석 프로그램 개발", 정보화시공 학술발표회, 한국지반공학회.
3. 유충식, 김연정, "암반을 포함한 다층토 지반에서의 깊은굴착시 흙막이벽체의 수평변위 및 겉보기토압", 한국지반공학회 논문집, 한국지반공학회, Vol. 16, NO. 4, 2000.
4. Cividini, A., Gioda, G., Barla, G.(1985), "Calibration of a Rheological Material Model on the Basis of Field Measurements", 15th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Nagoya
5. Gioda G. and Marier, G.(1980), "Direct Search Solution of an Inverse Problem in Elastoplasticity : Identification of Cohesion, Friction Angle and In-situ Stress by Pressure Tunnel Tests", Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 15
6. Gioda, G. & Sakurai, S.(1987), "Back Analysis Procedures for the Inter- pretation of Field Measurements in Geomechanics", Internation Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 11
7. Goldberg-Zoino and Associates(1976), "Lateral Support Systems and Underpinning", FHA, PB-257 210, Vol. 1
8. Murakami, A. and Hasegawa, T.(1985), "Observational Prediction of Settlement Using Kalman Filter Theory", Proceedings of 5th International Conference Numerical Methods in Geomechanics, Nagoya
9. Sakurai, S. & Takeuchi, K.(1983), "Back Analysis of Measured Displacements of Tunnels", Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 16, No. 3
10. Vanderpaats, G. N.(1984), ADS - a Fortan Program for Automated Design Synthesis, Ver 1.10, NASA CR 172460
11. Vanderpaats, G. N.(1984), Numerical Optimization Techniques for Engineering Design, McGraw-Hill, Inc.