

## 굴착공법의 문제점과 개선방안

### Overview of Earth Retaining Structures on Underground Excavations

이종규, <sup>1)</sup>Chong-Kyu Lee

<sup>1)</sup>단국대학교 토목환경공학과 교수

**SYNOPSIS:** This paper presents a brief review of flexible retaining structure and the most significant methods developed to predict their behavior on underground excavations.

Some observations are made about the future directions that the design of retaining systems may take, as there are still some problems where uncertainty exists, in soil-structure interaction and evaluation of strength parameters etc. And also reviewed papers presented in 2002 Fall National Conference of KGS.

#### 1. 서론

과거 30년간 굴착공법은 괄목할만한 발전을 이룩하여 왔고 국내에서도 서울지하철 건설 및 고층건물의 지하주차장 공간 확보를 위한 굴착으로 이에 관한 연구가 크게 진전되어 왔다. 1970년 중반 이전에는 대부분의 연구가 흙막이 구조물에 대한 토압분포, 적절한 설계 방법 및 지지구조 선택을 위한 응용부분 등이 강조되어 왔으나 이후에는 soil nailing 등에 의한 보강공법과 보강 및 배수 조절을 위한 토목섬유의 사용 등으로 흙막이 구조시스템에 관한 종래의 기법이 크게 변화하기도 하였다.

다른 한편으로 고전적 굴착 공법에 관한 연구는 대부분의 토목구조물 설계기법에서 같이 연구의 초점이 붕괴에 대응되는 극한 조건(limit condition)의 평가에 의한 하중 추정에 맞추어져 왔을 뿐 정량화된 변위에 관한 연구는 매우 미흡한 실정이었다.

컴퓨터의 발달은 수치적 모델의 적용을 초래하였고 해석의 방향은 종래의 붕괴 극한 상태에 대한 관점보다는 흙막이 구조물의 거동 예측이 강조되었으며 굴착 후 비교적 연성인 흙막이벽 배면의 변위 추정이 보다 큰 관심사로 떠오르게 되었다.

그림.1은 지반굴착시 흙막이 구조 및 인접지반거동을 설명하는 널리 알려진 그림인데 흙막이벽은 비교적 연성벽이라는 점, 토압분포와 변위가 흙막이 구조물 시스템과 시공 진행 시점(construction sequence)에 따라 변화할 뿐만 아니라 흙-구조물 상호 작용 문제들을 포함하여 그 거동이 매우 복잡하다는 사실을 쉽게 알 수 있다.

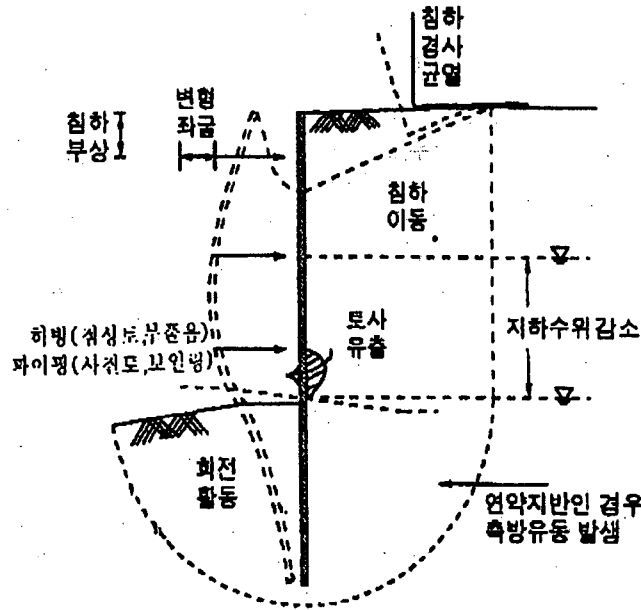


그림.1 지반굴착시 흙막이 벽체 및 인접지반 거동

또한, 적절한 지반조건을 추정하기 위하여는 지질학적 양상과 적절한 지반 정수를 정량화 하여야 하지만 이 역시 매우 어려운 일로서 흙막이 구조물 설계기법의 어려운 점을 짐작하게 한다.

위에서 설명한 바와 같이 굴착공법 설계 추세는 종래의 극한하중에 기초하여 주로 지구조 등의 하중계산에 국한되어 오던 경향에서 다양한 방법의 수치해석 기법으로 바뀌어 가고 있으나 흙-구조물 상호작용의 중요성, 수치해석 결과를 검증하기 위한 현장 관측과 모델링을 정당화하기 위한 노력들은 아직까지도 계속되고 있을 뿐 아니라 앞으로 해결해야 할 과제로 남아 있다. 이러한 관점에서 본 논문은 굴착공법 기법상의 문제점들을 파악하여 정리하고 그 범위가 광범위할 뿐 아니라 서로 연관되어 있으므로 몇 가지 문제점에 대하여 사례별 개선방안을 제시하는데 그 목적을 두고 있다.

## 2. 굴착공법에서의 문제점

굴착공법에서의 고려해야 할 요소는 상당히 많지만 설계나 시공면에서 주된 문제점들을 요약한다면 다음과 같다.

- (1) 굴착공사와 일반공사의 차이점은 흙막이 구조물 자체의 안정성은 물론 인접 구조물에 끼치는 변형거동까지를 고려해야 하므로 흙막이 구조시스템의 정량적 변위거동을 추정하여야 한다는 점.
- (2) 외력인 토압 및 수압등이 일정하지 않고 굴착 진행에 따라 흙막이 구조시스템의 응력-변위 거동이 변화하여 다양한 기법의 개발에도 불구하고 정확한 거동을 추정하기가 용이하지 않다는 점.

- (3) 흙막이 구조물에 작용하는 토압이 Coulomb이나 Rankine 토압과 같이 깊이가 깊어짐에 따라 직선적 증가를 하지 않는다는 점.
- (4) 지반 조건 및 주변 현황에 따라 적절한 흙막이 구조를 선택하여야 하나 설계 단계에서 이를 추정하기 어렵다는 점.
- (5) 우리나라의 경우 비교적 깊은 굴착에 있어서는 다층토(multi-layer)로 구성되어 토사층과 암반층 거동이 다르므로 해석기법의 적용도 어렵다는 점.
- (6) 해석결과에 가장 큰 영향을 끼치는 요소는 입력치인 지반정수인데 굴착지반이 다층토인 경우 흙과 기반암 사이의 풍화대 내지 풍화암층은 풍화정도에 따른 지반정수 추정이 특히 어렵다는 점.
- (7) 불확정요소가 많아 변형해석에 대한 신뢰도가 떨어지므로 이를 배제하기 위하여 계측 결과를 feed back 시켜 역해석을 통한 현황을 파악하여야 하나 계측관리의 종류 및 위치 등 추정이 어렵고 역해석 기법의 연구도 미흡한 실정일 뿐만 아니라 설계 단계에서는 이를 적용할 수 없다는 점.
- (8) 고전적 굴착공법에 관한 연구의 대부분이 극한조건에서의 하중 평가에 치중되어 왔고 정량화 된 변위 해석에 관한 연구가 미흡하여 현재에도 진행되고 있다는 점.
- (9) 건물 지하 강성 벽체 사이의 좁은 공간에 작용하는 토압은 벽체 변위를 근거로 한 Coulomb 이나 Rankine 토압과는 일치되지 않을 것이라는 점

이밖에도 굴착공법기법 상의 문제는 일정한 기준이 없다는 점등 여러 문제들이 논의의 대상이 될 수 있으나 위에는 문제점 중 몇 가지 사항에 관한 개선 방향에 대하여 논의 하기로 한다.

### 3. 굴착공법 해석기법에서의 문제점과 개선 방향

앞 절에서는 굴착공법에서의 많은 문제점을 제시하였지만 이러한 문제들은 그 한 요소에 반드시 국한된 것이 아니고 대부분이 서로 연관된 문제점이다. 따라서, 본 절에서 현재 적용되고 있는 흙막이 구조물의 해석기법을 간단히 요약하고 문제점들을 분석하며 동시에 해석결과에 크게 영향을 끼치는 입력요소인 토질정수에 관한 사례연구를 통하여 그 개선 방안을 고찰하고자 한다.

#### 3.1 흙막이 구조물의 해석방법과 개선방향

편의상 흙막이 구조물의 해석기법을 고전적인 기법(classical approach)과 컴퓨터를 이용한 기법으로 나누어 논의하기로 한다.

고전적 해석방법(classical analysis)에서는 굴착 중 흙막이 구조물 자체의 안정성에 주

안점을 두고 붕괴시의 극한하중조건을 고려한 한계평형이론에 초점을 맞추었기 때문에 공사중이거나 굴착 후 배면지반의 정량적 변위거동 예측은 매우 어려운 실정이었다. 또한 해석적인 기법에 적용하는 토압분포 역시 Coulomb이 제시한 바와 같이 직선적으로 증가하지 않는다는 사실이 계측결과 밝혀졌으나, 굴착진행중의 토압분포는 추정하기가 어려운 실정이었다. Sokolovsky (1960)는  $C-\phi$ 흙에 대하여 소성을 고려한 경계이론(boundary theorem)으로 토압분포를 구하였지만 정확한 해는 단지 관련흐름법칙(associated plastic flow rule)에 맞는 재료에 한정되었다.

한편, 컴퓨터의 발달은 흙막이 구조해석 분야에도 큰 발전을 가져왔지만 초기에 적용된 상용프로그램들은 한계 평형 기법을 응용하여 개발되었고 이러한 모델들은 흙-구조물 상호작용문제를 해결하기 위하여 Winkler 모델이나 흙을 연속체 모델로 가정한다(그림.2 참조).

Winkler model에서 흙은 이산(discrete)되고 연결되지 않은 직선적 수평 스프링으로 모델화 하며 또한 이 해법을 적용하는 경우 흙막이 벽체에는 주동 또는 수동토압이 하중으로 작용하고 흙막이 벽은 보나 보-기둥요소로 표현된다. 그러나, Winkler 모델에서는 비선형 스프링으로 가정하여도 실제 스프링 거동을 구명하기도 어렵고 흙속에서 전달되는 전단거동을 정확히 나타낼 수 없다는 단점이 있다. 또한, 지반을 Winkler 모델로 해석하려고 할 때 집중하중이 작용하는 경우에는 흙-구조물 상호작용을 비교적 정확하게 추정할수 있지만 분포하중인 경우 구조적 거동 추정이 어려우므로 토압이 분포되어 있는 흙막이 시스템에 적용하는 경우 많은 주의가 필요하다.

Brooks 와 Spence (1992) , Yang(1997)등은 Winkler 해법을 적용한 경우와 흙을 연속체로 나타낸 해석기법으로 추정한 결과들을 비교하였는데 변위추정시 Winkler 모델에 있어서의 스프링 강성은 다른 연속체 모델에 비하여 일반적으로 작은 값을 적용하여야 한다고 주장하였다.

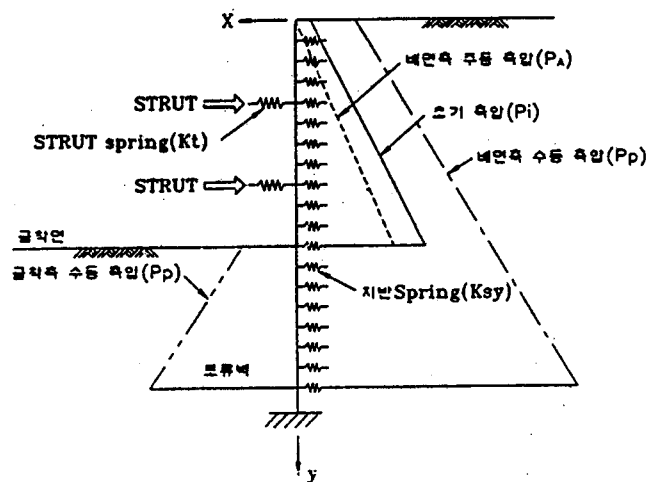


그림.2 Winkler 모델을 이용한 흙-구조물 상호작용의 표현

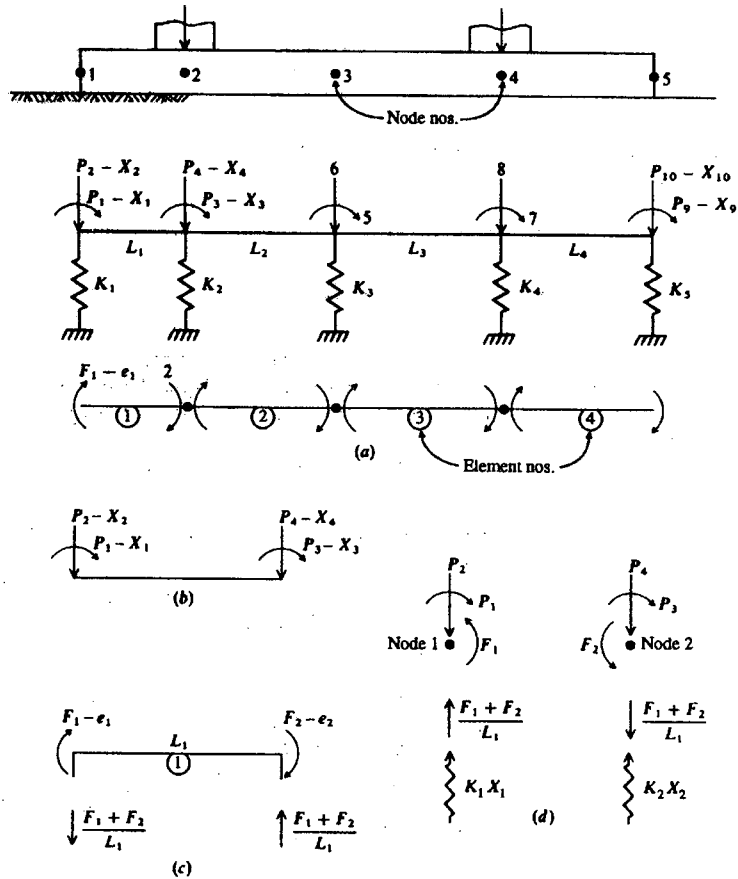


그림.3 (a) Structure and structure broken into finite element with global P-X;  
 (b) P-X of first element; (c) element force of any(including first)element;  
 (d) summing nodal force

흙-구조물 상호작용의 중요성을 추정하고 현장 계측을 통하여 이를 검증하며 정당화시키기 위한 해석모델의 개발노력은 현재에도 활발히 진행되고 있을 뿐 아니다. 이 새로운 모델들은 굴착 후 비교적 연성벽체 배면의 변위추정이 보다 강조되고 있다. 유한요소법이나 유한차분법등의 수치해석모델과 연속체모델에 근거한 해석기법은 굴착주변을 포함한 정량적 변위추정에 많은 발전을 가져왔다. Clayton등(1993)은 이러한 모델들을 작성함에 있어서의 문제점들을 발표한바 있는데, 이들은 이런 형태의 모델링에 있어 주된 문제점과 흙 거동을 나타내는 구성모델 및 지반정수 선택의 중요성에 관하여 논의하였다.

흙-구조물 상호작용 문제해결을 위하여는 굴착과 굴착시스템 설치 과정, 비선형거동과 결과적으로 흙-구조물 상호작용이 변화하는 양상에 부응하기 위하여 하중-경로기법(load-path techniques)을 응용한 수치해석의 모델들을 사용하는 것이 계속적으로 요구된다. 그러나 현재까지도 이러한 수치 모델들에 대한 정당성과 신뢰도에 관한 문제에는 비교적 등한시 해온 것이 사실이다.

Schweiger(1991, 1997, 1998, 2000)은 신뢰할 수 있는 수치해석방법에 관한 제한적 연구를 수행한바 있다. 여기서 신뢰할만한 수치해석기법을 이루기 위한 목적과 입력 데이터로써 정확한 원위치 지반정수를 추정하기 위한 절차와 가이드 라인 설정이 시급한 실정에 있다고 주장하였다. 그 이유는 비교적 간단하다. 수많은 개발연구자와 사용자들이 개인적 취향에 따라 수치해석기법을 광범위하게 개발하여 왔으나, 실제적 관점에서 볼 때 많은 계산된 결과값 들에 대한 정당성을 검증하기는 매우 어려운데 수치해석모델에는 많은 가정이 전제되어 있기 때문이다.

결과적으로 명백한 가이드라인이 없기 때문에 특별한 문제에 대하여 비록 합리적으로 충분히 정의된 사용하중 조건하의 결과라 하더라도 사용자에게 따라 상당히 큰 차이를 나타내고 있는 실정이며 이러한 문제들을 해결하기 위하여 ISSMGE TC-12를 비롯한 많은 기관에서 현재도 연구가 진행중이다.

### 3.2 지반정수의 추정방법과 개선방향

지반굴착시 흙막이벽 및 인접지반의 거동 분석을 위한 수치해석적 방법이 급속하게 발전되고 널리 활용되는 추세이나, 수치해석 결과의 신뢰성을 대변하는 입력 데이터로서의 지반정수 평가방법은 아직도 많은 난제를 해결하지 못하고 있는 실정이다. 특히, 대다수 지역이 다층토로 구성된 국내의 경우 지반굴착시 비교적 얇은 심도에서 풍화암을 빈번하게 접하게 되는데, 풍화암의 경우 불교란 시료 채취의 난이성, 암반이 아닌 비교적 성형이 가능한 암석편에 대한 실내시험 결과의 신뢰성 결여 및 현장시험의 어려움 등의 여러 가지 이유로 다른 지반과 달리 현재까지도 그 공학적 특성이 명확하게 규명되지 않은 상태이다. 한편, 풍화암의 경우 토사지반과는 달리 암반의 불연속면 상태에 따라 강도특성이 달라지므로 소규모 공시체에 대한 실내역학시험 보다는 실물 크기(proto type) 현장에서의 원위치(in-situ) 시험을 통한 강도정수 평가가 필수적인데, 설계 단계에서는 대규모 원위치시험을 소정의 심도에서 실시하기 어려우므로 비교적 수행이 용이한 공내재시험등과 같은 원위치시험결과로부터 강도정수를 평가할 수 있는 방법의 개발이 요구되는 상황이다.

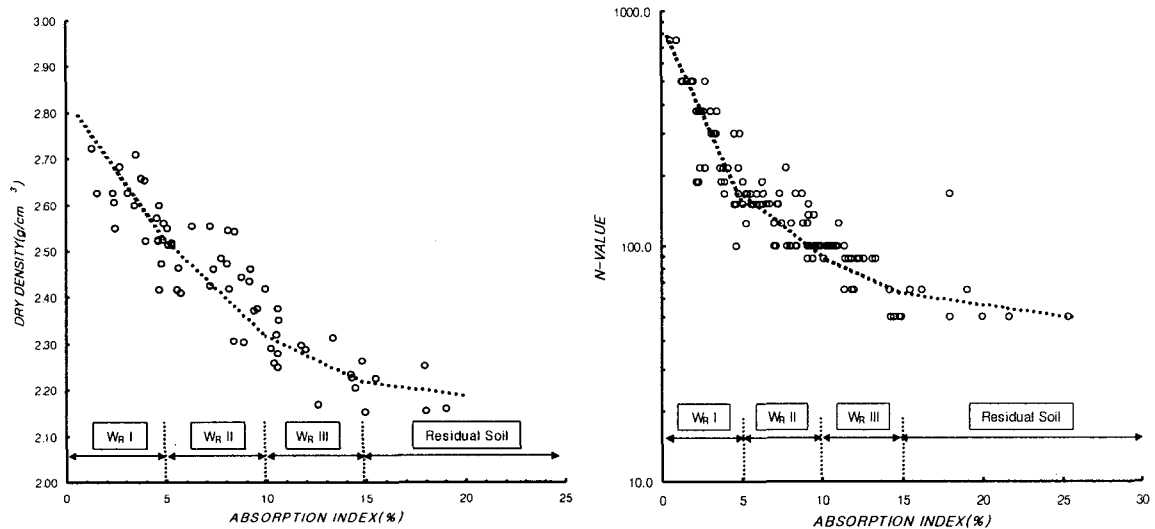
#### (1) 풍화도 평가

풍화암반의 강도정수를 합리적으로 추정하기 위해서는 대상 암반의 풍화도를 정량적으로 평가하는 과정이 필요한데 국내 현실은 N치를 이용하여 토사와 풍화암층의 경계를 구분하는 정도만이 설계단계에서 고려되는 실정이다. 따라서, 실용적인 풍화암반의 풍화도 평가법 개발의 중요성 또한 대두되게 되는데 근래 국내 연구진에 의하여 암석의 흡수율, 건조밀도 및 내구성 지수를 이용한 풍화도 평가방법에 관한 연구가 추진되고 있다.

그림.3은 국내의 대표적인 화강암 분포지역의 풍화암을 대상으로 흡수율 및 풍화내구성지수로부터 풍화도를 평가한 결과를 보여준다. 연구결과를 참조하면 흡수율, 건조밀도

및 풍화내구성지수시험 결과간 상관성 분석을 통하여 흡수율이 풍화도를 평가하는 유용한 지표가 될 수 있음을 알 수 있으며 흡수율을 이용하여 보통 내지 높은 풍화정도(highly weathered)에 해당되는 풍화암을 3등급으로 세분하여 분류할 수도 있을 것이다 .

한편, 대상 암반에 대하여 수행된 흡수율 및 암석내구성지수 시험 결과와 표준관입시험치(N치)와의 상관성 분석을 실시한 결과 특정 N치를 기준으로 흡수율 및 내구성 지수의 분포 특성이 변화하는 것을 확인할 수 있었으나 풍화도를 구분하는 정량적인 자료로 활용하기에는 무리가 따르는 것으로 평가된다.



(a) 흡수율 대 건조밀도의 관계

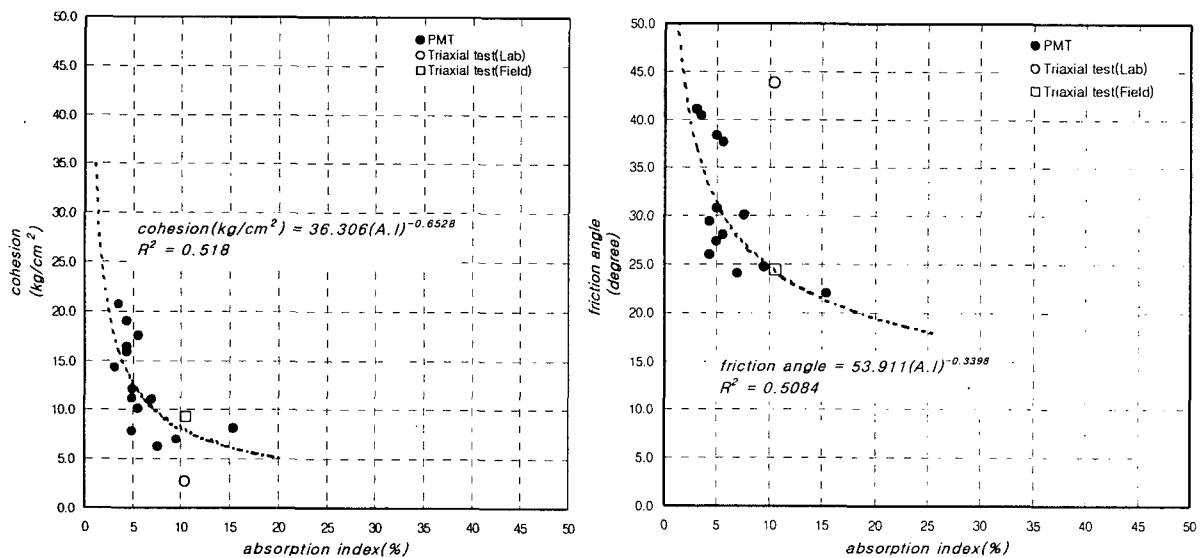
(b) 흡수율 대 N치의 관계

그림.4 대상지반 암반의 풍화도 평가

## (2) 공내재하시험 결과를 이용한 풍화암의 강도정수 평가

Haberfield와 Johnson(1990)은 공내재하시험결과로부터 암반 강도정수를 추정할 수 있는 해석적 방법에 관한 연구를 수행하였는데, 이들은 암반이 선형 Mohr-Coulomb 파괴 기준을 만족하고 비관련 유동법칙에 따라 팽창한다는 가정을 적용하여 공내재하시험 결과로부터 점착력, 내부마찰각 및 팽창각을 추정할 수 있는 해석적인 방법을 제안하였다. 또한, 공내재하시험시 풍화암의 반경방향 균열 효과를 고려한 수치해석을 실시한 결과와 균열효과를 고려하지 않은 해석적 방법에 의한 결과를 비교하여 균열효과가 강도정수에 미치는 영향이 크지 않음을 제안하였다. 그러나, 연구결과를 실제 지반의 풍화암에 대하여 적용하지 못하고 가상의 공내재하시험 자료에만 적용하여 실제 문제에 대한 적용성 검증은 미흡한 상태이다. 따라서, 이러한 원위치 시험결과로부터 풍화암반의 강도정수를 합리적으로 추정할 수 있는 기법 개발에 관한 연구가 국내에서도 중요한 문제로 대두될 것으로 판단되는데 국내 연구진에 의하여 수행된 연구사례를 간략히 소개해 보기로 한다.

그림.5는 화강 풍화암층에 대하여 수행된 24개의 공내재하시험 결과로부터 암반의 강도정수를 앞에서 소개한 Haberfield 및 Johnson(1990)이 제시한 해석적 방법을 토대로 풍화도에 따라 추정된 결과를 나타낸 것이다. 또한, 추정된 강도정수의 타당성 검증을 위하여 1개 풍화도에 대하여 실시된 현장삼축시험결과와 비교 분석하였는데 연구결과를 참조하면 공내재하시험 결과로부터 추정된 점착력 및 내부마찰각을 1종의 풍화도에서 실시된 현장삼축시험결과와 비교한 결과 두 결과가 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 이 검증결과는 제한된 1종 풍화도에서 수행된 것이므로 향후 다른 풍화도에서 보다 많은 현장삼축시험을 수행하여 추가적인 연구가 진행된다면 비교적 간편한 공내재하시험 결과로부터 깊은 심도에서의 강도정수를 추정할 수 있을 것으로 기대된다.



(a) 흡수율에 따른 점착력의 변화      (b) 흡수율에 따른 내부마찰각의 변화

그림.5 풍화도에 따른 화강 풍화암의 강도정수 추정

#### 4. 금번 발표되는 연구결과가 지니는 의미

금번 발표되는 유충식(2002, 10)교수의 “도심지 깊은 굴착시 주변 건물 및 매설관 손상평가”는 현재 우리나라 굴착설계에 적용되고 있는 굴착에 따른 인접구조물 손상평가 방법을 고찰하고 이에 대한 문제점 및 선진 외국에서 적용하는 기법을 소개함과 아울러 향후 이 분야에서의 연구개발필요성을 제시하였다는 점에서 큰 의의가 있다고 하겠다. 다음으로 장찬수박사(2002, 10)의 “지하굴착시스템의 역해석에 대한 유전알고리즘의 적용”은 토류벽과 주변거동을 공사중 응답변수인 변위와 축력등을 초기에 측정하여 계산치(추정치)와 비교하여 차이가 있을 경우 그 차이를 최소화 하는 설계 변수를 (토압계수, 지반반력계수등)을 구하는 역해석 방법으로 앞서 언급한 수치해석모델들에 대한 정당성과 신뢰도를 높인다는 점에서 크게 진전된 연구 결과로 평가된다.



주재건 사장 등의 “지하철 흠막이 구조물 대안설계 사례분석”은 서울지하철 9호선 건설공사의 대안설계에서 제시된 흠막이 공법, 차수 및 지반보강공법 등의 각종 관련공법을 중심으로 사례분석을 실시한 것으로 실무엔지니어들에게 설계시 자료로 활용되고 향후 연구개발의 방향설정에 크게 도움을 주리라 기대된다.

마지막으로 이인근 박사의 “지하철 흠막이 구조물 시공시 유의사항”은 발표자의 긴 기간에 걸친 계획, 설계 및 시공 경험을 토대로 제시된 내용으로 지하철공사 뿐 아니라 흠막이 구조물 시공시에 살아 있는 사례연구로 많은 활용이 기대된다. 한가지 아쉬운 점은 본고를 작성할 때까지도 금번 발표되는 논문 원본을 입수하지 못하여 제목과 요지를 중심으로 고찰하였기 때문에 심도 있는 평가를 할 수 없었다는 점인데 제한된 자료를 중심으로 대별한다면 흠-구조물 상호작용에 따른 인접지반 변위거동분석(유충식), 수치해석 모델의 기법 개발(정찬수박사) 및 사례분석을 통한 굴착공법의 문제점과 개선방안에 관한 연구(주재건사장, 이인근박사)로 분류할 수 있다.

## 5. 결론

굴착공법에 관한 문제점을 종합하여 그 개선 방안을 모색하고 금번 발표되는 연구결과를 종합한 결과를 요약한다면 다음과 같다.

1. 굴착공법에서는 흠막이 구조물 자체는 물론 인접지반까지 정량적 변위거동추정기법 개발에 초점이 집중되어야 한다.
2. 굴착진행(construction sequence)에 따른 흠막이 구조물에 가해지는 토압분포는 지금까지의 많은 연구에도 불구하고 앞으로 더 많은 연구가 필요하다.
3. 흠-구조물 상호작용에 관한 연구는 고전적 해석기법에서는 물론 수치해석모델에 있어서도 개선방안이 강구되어야 한다.
4. 수치해석모델에 의한 해석 결과에 대한 정당성과 신뢰도에 관한 검증은 현재까지도 미흡한 상태에 있다.
5. 비교적 검증된 해석기법이라 하더라도 입력 데이터인 지반정수가 해석결과에 결정적 영향을 끼치므로 정밀한 추정방법개발이 필요하고 특히 국내의 경우 각종 풍화암에 관한 강도정수 개발연구가 시급한 실정이다.
6. 신뢰성 있는 수치해석방법을 수립하기 위한 절차와 가이드라인이 설정되어 해석결과의 정당성이 검증되어야 한다.
7. 2002년도 한국지반공학회 가을학술발표회에 발표된 논문은 흠·구조물 상호작용을 고려한 인접지반거동분석, 수치해석모델기법 및 사례분석을 통한 굴착공법의 문제점과 개선방안에 관한 연구결과로 분류된다.

## 참고문헌

1. 한국지반공학회(1992,1997), 굴착 및 흙막이 공법, 구미서관, pp. 301~343.
2. 이종규, 박찬호, 전성곤(2002), “풍화도에 따른 화강풍화암의 지반정수 평가법 개발”  
건설교통부, 한국건설기술연구원(1차년도 보고서).
3. 일본토질공학회(1989), 토질공학라이브러리-34, “근접시공” pp.82.
4. Brooks, N. J. & Spence, J. F. (1992), Design and recorded performance of a secant retaining wall in Croydon. Proc. Int. Conf. Retaining Structures, Cambridge.
5. Clayton, C. R. I., Milititsky, J. & Woods, R. I. (1993), Earth pressure and earth - retaining structures. 2<sup>nd</sup> ed. Blackie Academic & Professional, London.
6. Poulous, H. G. et al (2001), Foundations and Retaining Structure - Reserch and Praticice proc, 15th, ICSGME, pp.2527~2595.
7. Schweiger, H. F. (1991), Benchmark Problem No. 1: Results, Computers and Geotechnics, 11: 331-341.
8. Schweiger, H. F. (1997), Berechnungsbeispiele des AK 1.6 der DGGT-Vergleich der Ergebnisse für Beispiel 1 (Tunnel und 2 (Baugrube. Tagungsband Workshop “Numerik in der Geotechnik”, DGGT/AK 1.6:1-29, (in German).
9. Schweiger, H. F. (1998), Results from two geotechnical benchmark problems. Proc. 4<sup>th</sup> European Conf. Numerical Methods in Geotechnical Engineering. Cividini, A. (ed.), 645~654.
10. Schweiger, H. F. (2000), Ergebnisse des Berechnungsbeispielles Nr. 3 “3fach verankerte Baugrube”. Tagungsband Workshop “Verformungsprognose für tiefe Baugruben”, DGGT/AK 1.6: 7-67, (in German).
11. Yang, Q. J. (1997), Numerical analysis and design of strutted deep excavation. Computer Methods and Advances in Geomechanics, Proc. 9th IACMAG Conference, Wuhan. 3: 1909-1914.