

# 지반과 관련된 지난 세기의 건설사고와 정보화 시공 A Review of the Last Century Construction Failures and the Observational Method in Geotechnical Engineering

김학문<sup>1)</sup>, Hak-Moon Kim

<sup>1)</sup> : 단국대학교 공학부 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Dankook University

**SYNOPSIS** : Construction incidents, mechanisms and causes in Geotechnical Engineering have been closely reviewed for the safety assurance during design and construction stages.

The safety assurance is clearly related to the observational method in which design is reviewed during construction and contingency actions are undertaken successfully to minimise any potential failures.

The observational method has been extensively applied for the construction of subways underground structures, dams and many important Civil Engineering projects in the past 20 years. But the number of serious construction incidents are growing for the past several decades.

Therefore present development of observational method and improvement techniques are introduced with some case histories.

## 1. 서론

지난 세기 몇 년간 국내·외적으로 지반과 관련된 많은 건설사고들을 접할 수 있었고, 특히 국내의 사고인 경우 많은 안전진단 보고서들이 발간되었으나 그와 유사한 사고를 예방하는 차원에서 조사, 설계, 시공 및 유지관리단계를 위한 정책적, 기술적 혹은 안전관리 확보 차원의 대책제시가 미비하였음을 부인할 수 없다.

특히 지반공학과 관련된 사고의 경우 안전성의 확보가 그 어느 분야보다 중요함을 알고 있음에도 이러한 사고방지를 위한 대책은 미비한 실정이다. 앞으로 21세기를 향하는 이 시점에서 이러한 문제들을 최소화하기 위하여 체계적인 정보화 시공의 활용방안을 제시하고자 한다.

정보화 시공에 대한 체계적인 적용과 시행지침 설정을 1969년 9회 Rankine Lecture에서 Peck이 저술한 "Advantages and Limitations of the Observational Method in Applied Soil Mechanics"에 발표하였으며, 그는 정보화시공법에 대하여 시공진행중 최대의 경제성을 허용하고 안전성을 확인하여, 설계를 합리적으로 보완해주는 방법으로 소개하였고, 제한 사항들은 있으나 안전을 희생시키지 않으며 시간과 공사비를 절약할 수 있는 훌륭한 방법이기 때문에 모든 지반공학 기술자들에게 널리 알려질 필요가 있다고 하였다. 제한사항 중의 하나로는 과업 특성상 시공 중에 설계변경을 허용하지 않는 경우이며, 이 방법에 대한 간략한 적용과정은 다음과 같다.

- ① 지반에 대한 성상과 특징을 상세하지는 않더라도 충분히 조사.
- ② 발생될 수 있는 가장 가능한 조건들과 가장 불리한 조건의 차이를 평가(주로 지질 및 지반조건 영향).
- ③ 발생가능 조건하에서 가정된 공식을 사용하여 설계방향 설정.
- ④ 가정된 공식으로 설계하고 시공중 측정해야 될 계측계획 설정.
- ⑤ 지반과 주변 조건을 고려하여 가장 불리한 경우의 설계를 상기 계측 계획과 일치시킴.
- ⑥ 현장 측정값과 가정된 공식하의 설계값 사이에 고려해야 될 만큼의 차이가 발생시에 설계 변

경방법과 조치해야 될 방안을 강구.

- ⑦ 적합한 양의 계측시행과 현장조건과의 비교 분석.
- ⑧ 현장조건에 부합하도록 설계의 수정.

Powderham(1996)은 영국토목학회가 발간한 ‘The Observational Method in Geotechnical Engineering’에서 Peck(1969)이 제시한 Observational Method의 활용을 현재까지 만족스럽게 발전시키지 못한 이유를 계약상의 복잡성과 위험에 대한 공정한 책임소재 관계와 정보화시공 사례의 자료부족과 지반조건에 대한 불신임 등으로부터 야기되는 기술적 자신감의 결핍등이 원인이라고 평가하였다.

국내에서는 부산, 서울지하철, 대형 원자력 발전소, Dam 및 대형구조물 등 주요 구조물의 거동과 안전성 평가를 위하여 1980년 중반부터 체계적인 계측을 수행한 바 있으며 최근 대부분 도심지 굴착시에는 정보화시공을 위한 많은 자료들의 수집 및 정리가 가능해졌다.

정보화 시공의 목적 및 그 필요성에 관하여 진행사항을 국내의 자료로 비교검토하고 건설사고 사례에 비추어 분석 평가하고자 한다. 참고로 정보화시공의 개념과 장점들은 한국지반공학회의 지반공학시리즈 3권 “굴착과 흙막이공법” 내의 제 7장 “계측과 정보화시공”을 참조하기 바란다.

## 2. 정보화시공의 발전과정

초기의 정보화 시공개념은 현장조사 및 시험의 한계성과 설계 및 시공시 야기되는 불확실성 등에 대하여 시공 중에 확인되는 계측결과 등의 실제자료들을 설계에 재반영하므로써 안전하고 경제적인 시공을 확보하는데 그 목적과 개념이 있다.

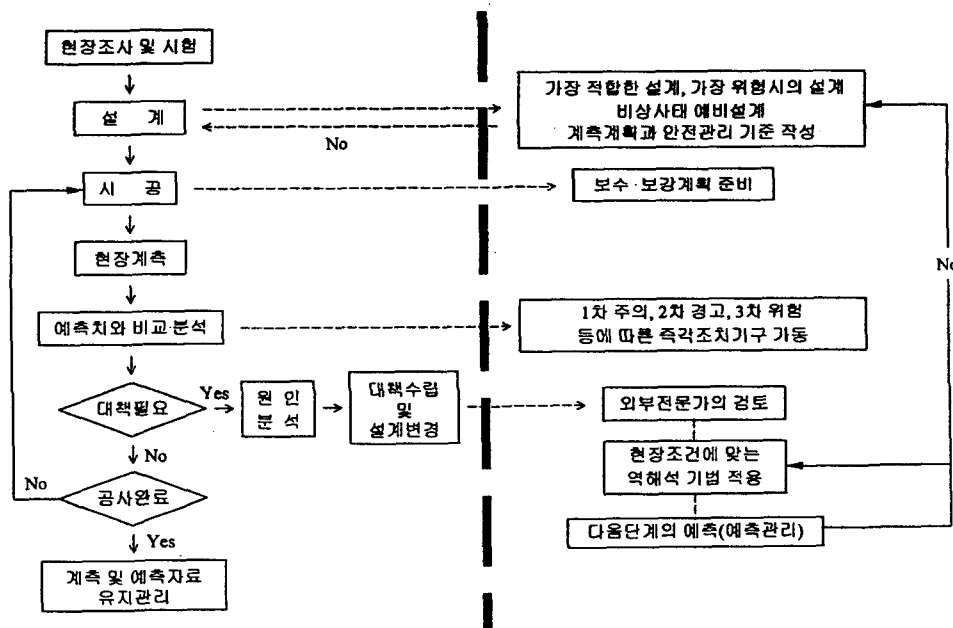


그림 1-(a)

그림 1-(b)

그림 1. 정보화시공 개념도

그러나 근간에 도심지 공사의 급증으로 인접구조물이나 인적피해가 빈번히 발생하고 있으며, 이로 인해 정보화시공이 급속하게 발전하고 안전에 관한 관리 기준치가 보다 현실적으로 제시되고 있으며 자동화 계측과 컴퓨터 및 유무선 통신 연결처리기술의 발달로 인하여 시공중 위험경고에 대한 즉각조치 체

계(System)를 확보하는 분야와 현장조건에 부합되는 다음 단계 예측을 할 수 있는 기술 등이 보강되어 있다(그림 1-(b) 참조).

### 3. 정보화 시공과 사고방지에 대한 영향

지반과 관련된 건설공사들은 그 준비과정에서부터 조사, 설계 및 시공에 이르기까지 많은 불확실한 요인을 가지고 있으며, 그중 몇 가지의 부정확한 요인으로도 크고 작은 문제로까지 확산될 수 있다.

그림 2 에서와 같이 정보화시공에 연관된 6가지 요소들에 대하여 그 특성 및 불확실성 즉, 문제점들을 점검해보고 이들의 영향을 사고예방 및 방지 차원으로 유도될 수 있는 방향으로 설정해 볼 필요가 있다고 생각된다.

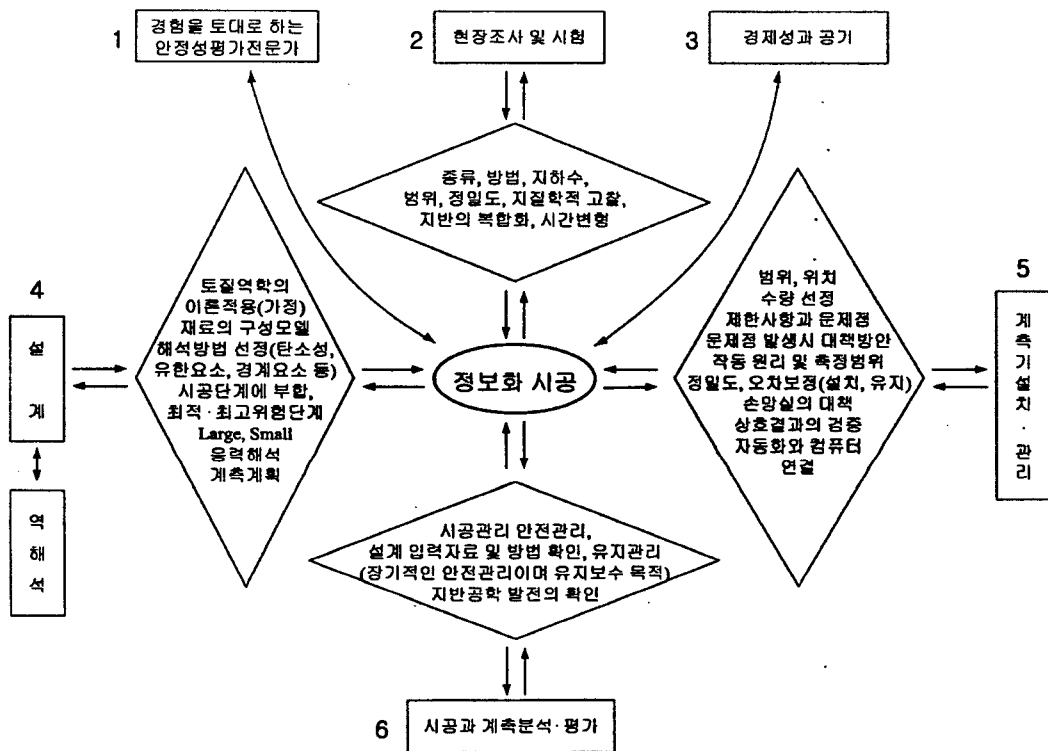


그림 2. 정보화시공에 연관된 요소

#### 3.1 경험을 토대로 하는 안정성 평가 전문가

정보화시공의 성공적 활용과 이에 따른 사고방지의 첫 번째 요소인 경험을 토대로 하는 안정성 평가 전문가의 양성은 필수적이라 하겠다.

지반공학 관련 설계 및 시공에서는 매 단계마다 어려운 선택과 결정이 요구되며, 그 결과의 향방에 따라 경제성은 물론 공사의 장, 단기 안정성에 상당한 영향을 미치게 된다.

주어진 조건하에서 가장 합리적인 선택과 결정을 내리기 위해서는 정보화 시공의 요건이 되는 설계, 시공, 계측 및 예비(위험)대책에 관한 복합적인 경험을 갖춘 전문가를 필요로 한다.

우선 지반공학에서의 경험은 어떻게 얻어지며 어떻게 정의되는 것일까?

Lambe 과 Whitman 교수의 저서 Soil Mechanics (1969)에서는 “경험이란 단순히 행하는 것이 아니고, 행하는 것에 대한 검증이 뒤따라야 된다. 토목공학자인 경우 지반에 관한 문제를 풀고, 설계를 시행한 후 현장의 실제상태를 측정하여 비교 평가하였을 때 비로소 경험을 얻을 수 있다.” 라고 언급하고 있다. 그러므로 설계경력 + 시공경력 + 계측경력 + 평가경력 모두가 복합적으로 갖추어져 있을 때 비로소 경험을 얻을 수 있는 것이다. 과연 우리는 이러한 복합적인 기능을 수행할 수 있는 정보화시공을 위한 전문가들을 양성하고 있는 것일까?

새로운 21세기에는 정보화 시공을 성공적으로 수행하고 사고를 방지할 수 있는 복합적인 경험을 갖춘 전문인의 확보가 시급하다고 사료된다.

(( What we have learned from the past can serve the future ))

### 3.2 현장조사 및 시험

정보화 시공과 연계되는 현장조사 및 시험은 초기조사나 상세조사의 개념 외에도 역해석이나 재설계 과정에서 추가조사나 공사안전 관련조사가 뒤따라야 될 것이다.

이러한 조사나 시험은 공사의 중요도나 시방조건에 부합되도록 그 범위, 한계, 위치, 종류 등을 예산에 맞추어 계획하는 것이 일반적이지만 당초의 설계조건이나 거동예측이 현장계측과 상이하거나 현장조건의 변동시는 정보화시공의 절차를 거쳐 별도의 조사 및 시험이 요구될 것이다.

그간의 사고사례의 발생요인을 분석해본 결과, 가장 많이 언급되는 사항으로 현장조사의 미비 및 부적합성을 지적하고 있다.

조사나 시험의 위치가 설계상의 위험예측지점과 일치하지 않거나, 조사심도와 수량이 공사의 중요도나 지반의 변화에 못 미치는 경우도 종종 볼 수 있다.

근간에 지반교란을 최소화하며 정밀도 높은 대형복합 조사장비들이 많이 개발되고 있으며, 시험의 수준도 지반의 현장상태를 최대한 대표할 수 있도록 고안한 장치들이 소개되므로 많이 향상되었다고 사료된다.

앞으로는 과거에 문제가 되었거나 사고사례에 연관된 실패경우들을 사전에 고려할 수 있는 지반조사와 시험의 분야를 체계적으로 수집 및 정리하여 적용시켜야 할 것이다.

### 3.3 경제성과 공기

앞에서 서술한 바와 같이 1969년 9회 Rankine Lecture에서 Peck 교수는 “정보화 시공법은 시공진행 중 최대의 경제성을 허용하고 안전을 희생시키지 않더라도 시간과 공사비를 절약할 수 있는 훌륭한 방법이기 때문에 모든 지반공학 기술자들에게 널리 알려질 필요가 있다.” 라고 제안하였다.

현장상태에 가장 적합하도록 안정성을 보장하며 실시되는 설계, 시공인 만큼 과대설계나 위험한 시공에서 벗어날 수 있으므로 가장 경제적이며 공기를 절약해주는 방법임에는 틀림없을 것이다.

그러나 현실적으로 상기의 상식적 평가를 현실화하기 위해서는 계약상의 정책적 배려가 요구되며, 기술적인 뒷받침이 준비되어야 할 것이다. 현재 시행중인 설계시공일괄(Turn-key) 계약의 경우 지반조건의 변화나 설계변경으로 절약되는 공사비는 반납하도록 되어있으며, 추가 공사비의 요인이 발생시는 지급이 거의 불가능한 상태이다.

설계와 시공에서의 불확실성을 수용하지 않는 이러한 제도하에서 합리적인 정보화시공의 발전이란 어느 한계 밖으로 벗어나기가 어려울 것이며, 국제적으로 일반화되어 있는 재난, 계획 또는 우발계획(Contingency Plan)에 의하여 예비비(긴급예산)를 확보하여 필요시나 문제발생시 즉시 재조사, 설계변경 및 시공을 합리화 할 수 있는 제도의 정착이 활성화되어야 할 것이다.

정보화 시공의 장점으로는 설계시에 모든 위험가능한 경우의 시나리오(Scenario)를 설정하여 해석한

후 계측 계획을 수행하기 때문에 시공 중 문제시 될 수 있는 상태를 미리 예측할 수 있으며, 그 지점에서의 계측으로 검증하므로써 위험을 사전에 예방할 수 있으므로 공기의 지연요소를 제거할 수 있을 것이다.

그러나 부적합한 계측기를 잘못된 위치에 설치하여 안전을 위태롭게 한다거나 잘못된 계측자료로 혼란을 발생시킬 경우 공기에 우려가 있기 때문에 계측계획은 경험이 풍부한 전문가에 의해 제시되도록 하여야 한다.

앞에서 언급한 바와 같이 설계시공일괄(Turn-key) 계약의 경우 지반 상태가 설계시 예측치보다 양호함에도 불구하고 설계변경과정에서 야기되는 문제점들을 감안하여 보강공사를 수행하므로써 경제적 낭비와 공기의 손실이 야기되는 현장들은 하루 속히 시정되도록 행정조정이 이루어져야 할 것이다.

현장에서 즉시 사용할 수 있는 역해석 방법 및 기법이 고려된 각종 프로그램의 공급으로 앞으로는 설계변경이 바로 현장에서 이루어져서 공기의 지연없이 공사로 연결되어야겠다.

### 3.4 설계 및 역해석

정보화시공과 연관된 건설공사는 대체적으로 정밀도가 높아야 하거나 대형공사들로 문제발생시에 인적, 물적피해 뿐만 아니라 사회적인 물의를 일으킬 소지가 있기 때문에 다양한 설계방법들이 요구될 수 있을 것이다.

물론 설계는 제공된 정보하에서 지반, 재료, 공사 및 영구적인 조건들을 고려하여 최적의 설계로부터 최고 위험상태의 경우까지를 모두 모사(Simulation)하므로써 각 시공단계에서의 안전성을 예측할 수 있도록 하는 과정이다.

만약 설계의 예측값들이 시공 중에 정확히 확인될 수 있거나 혹은 공사 중에 안정성이 확보되는 경제적인 설계를 할 수만 있다면 구태여 정보화 시공이란 과정은 필요치 않을 것이다.

그러나 현실적으로 조사, 시험, 설계시 및 공사 중에 설정된 가정사항, 단순화, 제한조건, 장비나 기술의 한계, 인적실수, 자연변화 등등의 불확실성으로 인하여 설계예측과 현장계측결과는 차이가 발생되며 다음 단계의 안전예측은 역해석에 의하여 결정되고 필요에 따라 보수, 보강 및 설계변경의 방향으로 공사가 진행되게 된다.

그간 계측결과의 분석, 평가는 난무하였으나 역해석에 의한 다음 단계의 예측이나 그에 따른 계측의 확인 작업에 대한 국내시공 자료의 수집이 상당히 어렵기 때문에, 앞으로 이 분야에 대한 간편한 역해석 프로그램의 공급과 그 결과를 확인하므로써 지반공학의 발전에 획기적인 전기가 되기를 기대해 볼 수 있겠다.

### 3.5 계측기 설치 및 관리

설계시 예측되는 모든 위험 가능요소나 불확실한 지점에 다양한 종류 및 수량의 계측기를 설치해야 되며 예측되는 상태를 계측결과와 비교 분석한 후 적절한 시기에 조치를 취할 수 있도록 하는 확고한 목적하에 설치되고 관리되어야 할 것이다.

그러나, 대부분의 사고현장사례를 보면 파괴나 함몰지점에는 거의 계측기가 설치되지 않았거나 계측기 선택의 문제나 기능상실 등으로 사전에 위험을 예측하는데 실패하곤 하였다.

공사의 종류별 계측의 목적은 표 1과 같다.

표 1. 공사의 종류에 따른 계측 목적 (단위 % 항목수)

| 공종<br>계측목적 | 시공관리 | 안전관리 | 설계법의<br>확인 | 사전조사 | 유지관리 | 기타   | 평균계측<br>목적수 |
|------------|------|------|------------|------|------|------|-------------|
| 굴착 1       | 34.8 | 91.1 | 58.9       | 0    | 12.5 | 25.9 | 2.2         |
| 굴착 2       | 34.0 | 74.0 | 64.0       | 2.0  | 28.0 | 22.0 | 2.2         |
| 성토         | 53.8 | 10.3 | 28.2       | 0    | 7.7  | 2.6  | 1.0         |
| 댐          | 62.5 | 0    | 0          | 0    | 12.5 | 37.5 | 1.1         |
| 매립         | 18.8 | 6.3  | 18.8       | 0    | 18.8 | 37.5 | 1.0         |
| 시설기초       | 15.2 | 21.7 | 37.0       | 0    | 6.5  | 19.6 | 1.0         |
| 터널         | 31.4 | 59.0 | 67.6       | 0    | 10.5 | 42.9 | 2.1         |
| 철도         | 28.2 | 31.8 | 14.5       | 2.7  | 11.8 | 10.9 | 1.0         |
| 교량         | 52.4 | 0    | 66.7       | 0    | 19.0 | 0.0  | 1.4         |
| 기타         | 35.6 | 17.8 | 40.0       | 6.7  | 4.4  | 22.2 | 1.3         |
| 전체         | 33.2 | 46.9 | 44.9       | 1.3  | 12.3 | 22.8 | 1.6         |

주) 이 답은 복수회답이기 때문에 합계가 100%를 넘는다.

전체는 전공사 수의 계측 목적의 분포이다.

굴착 1은 기초, 굴착 (Excavation) 등

굴착 2는 관로매설 등이다.

상호검토(Cross Check)를 위한 계측기의 복합설치나 시공중 손망실과 계측기의 기능상실을 대비한 추가 계측기의 설치의 장기계측에 필수적인 요건으로 시행되어야 한다.

상세한 계측관련 자료는 '97 정보화시공, 지반굴착위원회 공동학술 발표회 논문집 내 오정환, 남순성의 "지반굴착공에서의 계측계획 수립과 관리요령" 과 "지반굴착공에서 계측기기 설치 및 측정시 문제점과 대책방안" 그리고 "현장계측" 에서 참조할 수 있다.

### 3.6 시공과 계측 분석 및 평가

시공조건과 상태가 시방서의 요구조건에 부합되는지, 설계방법이나 설계입력자료의 확인이나 시공단계별 안정성을 평가하므로써 비로써 정보화 시공의 목적을 달성하였다고 할 수 있으나, 만약에 위험요소나 시방서 조건을 벗어난 계측결과가 발생시에 어떻게 경제성이 고려되고, 사고 또한 방지할 수 있는 조치를 취하는 가는 정보화시공의 마지막 단계라고 사료된다.

이는 물론 계측 결과를 신뢰할 수 있는 실제값으로 확신될 경우에 가장 중요한 것은 계측결과가 이미 위험단계에 접근하기 이전에 단계적으로 위험요소들을 예측하여, 다음 시공단계에서 안정성을 확보할 수 있도록 모든 자료들을 분석, 평가 할 수 있어야 한다.

근접시공인 경우 주변의 지하매설물들이나 인접건물의 안전관리기준에 부합되는 설계가 시행되고 시공중의 계측분석, 평가가 이루어져야 한다. 물론 비경제적인 설계가 계측에 의하여 확인되었을 때에는 설계변경에 의하여 경제적인 시공으로 방향을 제시하여 주는 것도 정보화시공이 말아야 할 중요한 임무인 것이다.

## 4. 도심지 지반굴착과 터널 사고유형

건물과 인구가 밀집된 도심지역에서의 지반굴착이나 터널공사 등은 사고시 엄청난 인적, 경제적 피해 외에도 주변환경에 미치는 영향이 크므로 정보화 시공의 계획 단계에서부터 설계 및 시공의 각 단계마다 철저한 점검이 이루어져야 한다.

지하매설물이나 인접건물들의 손상사례로부터 붕괴에 이르기까지 사고의 규모나 유형은 실로 다양할 뿐 아니라 그 원인 또한 복합적으로 작용하여 발생할 수 있으므로 정확한 기록이나 사고 원인 규명이 명확하지 않은 경우가 많다. 그러므로 주변에서 발생되었던 몇 가지 사고유형을 간략히 소개하고 정보

화 시공의 적용으로 대형사고를 방지한 현장과 그렇지 못한 현장으로 나누어 작은 경험이나마 정보화 시공의 중요도를 새삼 상기해 보고자 한다.

#### 4.1 지반굴착 관련 경험

'97 정보화 시공. 지반굴착위원회 공동학술 발표회 논문집 (May 9, 1997)의 초청강연에서 본인이 발표한 "정보화 시공을 적용한 도심지 지반굴착" 에서 다음의 사항들을 보고한 바 있다.

- 1) 도심지 굴착에서 정보화 시공의 검토순서
- 2) 도심지 굴착의 설계와 재설계
- 3) 굴착으로 인한 지반의 거동과 침하
- 4) 수치해석을 적용한 매개변수의 평가
- 5) 국내의 도심지굴착에 적용된 정보화 시공 사례
- 6) 국외 현장과 정보화 시공사례
- 7) 지반 침하에 대한 건물 피해 발생과정(Mechanism)
- 8) 굴착피해로부터 인접건물의 보호방법
- 9) 도심지 굴착에서 인접건물의 피해 사례

도심지 굴착의 설계와 재설계에서는 굴착심도가 깊어지면 강도가 큰 지하연속벽도 오히려 연성벽체(Flexible)에 가까운 거동을 보이며 이때의 토압과 구조물에 대한 해석기법은 흙-구조물 상호 거동모델(Soil-Structure Interaction Model)이 많이 사용되고 있음을 설명하였고, 고도의 정확도와 정밀설계가 요구되는 도심지 굴착에서 주변구조물의 하중이 복합적으로 적용시 설계상의 고려사항 등을 논의하였다.

또한 인접구조물의 위치에 따라  $K_a \rightarrow K_0$  까지 선택할 수 있는 캐나다의 설계 방법과 거동해석 모델의 개발사항이 설명되었다.

Xanthakos(1979)는 도심지 지하구조물 설계의 순서를 다음과 같이 제시하고 있다.

굴착으로 인한 지반거동예측 → 인접 구조물 예상 침하량 산정 → 인접구조물 허용범위에 따른 시공 방법과 설계의 제한조건설정 → 시공단계별 변위와 응력 (지반과 인접구조물 상태측정) → 구조물의 설계와 해석을 경험적인 방법으로 수행 → 수치해석(역해석) 으로 검토한다(다음 단계의 예측).

굴착으로 인한 지반거동과 침하 그림 3과 같으며, 이는 벽체강성과 벽체근입심도, 지반조건 및 시공 방법에 따라 벽체의 수평변위가 결정되며 이로 인한 인접지반의 거동과 침하 양상이 변하며, 일반적으로 잘 알려진 침하요인과 대책사항들을 아래 표 2에 나타내었다. 이 자료는 현장 사고사례로부터 조사된 사항들을 참조하여 만들어 졌다.

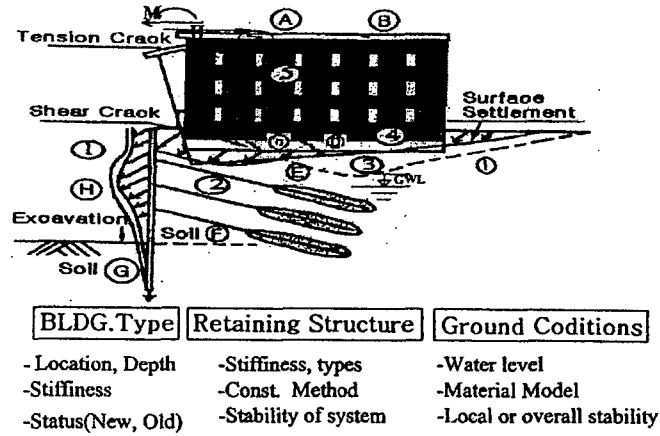


그림 3. 굴착으로인한 지반의 거동과 침하

표 2. 일반적으로 알려진 침하요인과 대책사항

| 침하요인   | 대책사항  |
|--|---|
| 1) 벽체 변형<br>- 지층상태의 조사미비, 지하수위의 상승, 지표면의 상재하중증가, 배면과 전면의 토사강도 변화, 과잉굴착으로 인한 토압증가   | - 버팀 간격 축소<br>- 적합한 개수의 토질조사 및 실험분석<br>- 설계시 지하수 변화에 대한 안전을 고려<br>- 극동화상태에서 강도의 재조사와 잔류강도 적용<br>- 소단(BERM)의 적용<br>- 벽체강성 증가 |
| 2) 버팀대의 강성부족<br>- 지형적 고저 등으로 양측하중의 불균형이나 버팀 길이가 길어 좌굴변형 발생   | - 정확한 시공과 Bracing 보강 및 응력의 집중현상을 최대한 방지<br>- 지반교란이 되지 않는 앵커 설치장비의 사용과 정착장부분의 토질조사   |
| 3) 지하수의 저하 및 증가<br>- 압밀 및 탄성침하 발생<br>- 벽체의 시공 Joint에서 토사유출<br>- 벽체시공으로 지형적 지하수위 상승 고려  | - 적절한 조사개수<br>- 별도의 현장 및 실내실험 조사<br>- 잔류응력 적용고려   |
| 4) 시공방법<br>- 굴착주변의 상재하중 증가<br>- 과잉굴착<br>- 현장지반상태에 의해 보완하지 않고 당초 설계도면을 사용<br>- 버팀설치 시간지연<br>- 벽체시공의 정확도 및 품질관리<br>- 시공장비와 공법채택 실패 | - 시공중의 하중과 설계상태 하중 비교검토<br>- 소단(BERM) 설치<br>- 시공중 변화되는 지반에 적합한 설계 변경 채택<br>- 시간변형 방지<br>- 품질관리 철저<br>- 지반조건에 적합한 공법 선정      |
| 5) 지반조사 및 강도정수<br>- 급작스런 단면 변화<br>- 지층상태와 강도정수 변화<br>- 시간에 따른 강도정수 감소<br>- $K_0$ 사용  | - 적절한 조사개수<br>- 별도의 현장 및 실내실험 실시<br>- 잔류응력 적용고려<br>- $(K_a + K_0)/2$ 나 $K_0$ 사용   |
| 6) 진동과 인접 상하수도관 파손<br>- 액상화 현상<br>- 부분침하로 인접 상하수도관 파열  | - 보강공법 적용<br>- 초기 변형을 최대 억지<br>- 암반사면의 활동(Sliding) 방지   |



최근 컴퓨터의 활용이 활발해지고 각종 재료모델의 개발에 의하여 토류구조 벽체의 시공방법과 시공 상태에 따른 벽체의 거동 및 안정성을 시공단계별로 비교 평가한 연구에 있어 수치해석을 적용한 매개 변수의 평가에서는 주어진 지반조건과 시공, 계층 결과를 이용하여 벽체의 종류와 버팀 System 선택에 따른 토류구조의 안정성 평가와 상호영향을 비교분석한 연구가 수행되었다. 동남아에서 많이 사용되고 있는 Duncan과 Chang 의 유한요소 해석기법의 제한사항이 평가되었고, 벽체 변위와 버팀하중에 가장 영향을 많이 미치는 입력자료(Input Parameter) 연구를 수행하여 비교한 결과 주로 벽체의 강성 (EI), 유효 버팀대 강성, 선행하중 (Prestressing)과 버팀대 간격 순으로 영향이 큰 것으로 나타났다.

#### 4.1.1 도심지 굴착에서 적용된 정보화 시공사례

국내현장의 정보화시공 사례는 강남구 역삼동 소재 가로28m × 세로 68m × 굴착심도 30m의 편마암 지대의 굴착공사에서 강성이 큰 H -350×350×12×9 버팀대로 상부 5단을 지지하고 하부 연·경암층은 어스앵커로 지지하였다. 벽체배면의 인접구조물과 지하철에 영향을 최소화하기 위하여 2열의 주열식벽체(CIP)와 차수그라우팅(LW Grouting)을 설치하였다.

자동화 계층 시스템(System)으로 현장과 본사간에 구축된 통신망(Network System)을 이용하여 현장 지반거동을 1회 30분 간격으로 실시간(Real Time)으로 상시 계층관리를 하였다.

편마암 지역에서 호상 편마구조, 단층 경면, 흑연층들은 횡압력을 받아 소습곡 구조를 형성하였고, 이에 발달된 단층절리의 기하학적 구조가 소규모 활동암괴(Sliding Block)로 발달되어 1차 보강을 3-4단 사이, 2차보강을 4-5단 사이에 실시한 후 정보화 시공과정을 통하여 안전하게 공사를 마칠 수 있었다.

국외 현장의 정보화시공사례로는 일본의 역타공법 적용 현장에서 재설계하는 과정을 통하여 벽체의 변위와 휨모멘트를 계층하고 재설계하는 과정을 통하여 가설 버팀대를 미설치하므로써 안전하고 경제적인 시공관리 기록을 소개하였다.

지반침하에 대한 건물피해 발생과정(Mechanism)은 굴착공사시 단계별 지반침하로 인한 인접건물의 피해과정을 모사(Simulation) 해보고 이에 대한 대책을 사전에 마련하는데 목적이 있다. 또한 피해 발생 과정(Mechanism)이 잘못되었을 경우 계층장치의 위치 및 종류 선정에도 문제가 발생할 수 있어 초기의 위험을 예측못하는 경우가 있기 때문이다.

굴착시 다음의 3가지 주된 원인으로 인접구조물들은 영향을 받기 시작할 것이다.

- ① 토류벽체와 앵커 설치시 유실되는 토사량
- ② 굴착단계별 누적되는 벽체의 수평변위량
- ③ 지하수위 저하에 따른 체적감소 및 압밀침하

#### 4.1.2 굴착피해로부터 주변건물의 보호방법

토류구조물의 선정과 공사방법이 인접건물의 보호차원에서 계획되었을 때 주변여건과 지반조건등을 고려한 보호방법들로 지하수 저하방지, 보강(Underpinning) 공법 적용, 토압증가로 인한 강성벽체선정 등 사례들을 소개하였다. 홍콩의 사례 발표중 기초의 종류별 심도계수를 정하고 이에 따른 총계층침하량의 현황을 그림 4에 나타내었고 총침하량은 벽체시공중 + 지하수위저하 + 굴착공사중 침하량으로 나뉘어 표 3 에 나타내었다.

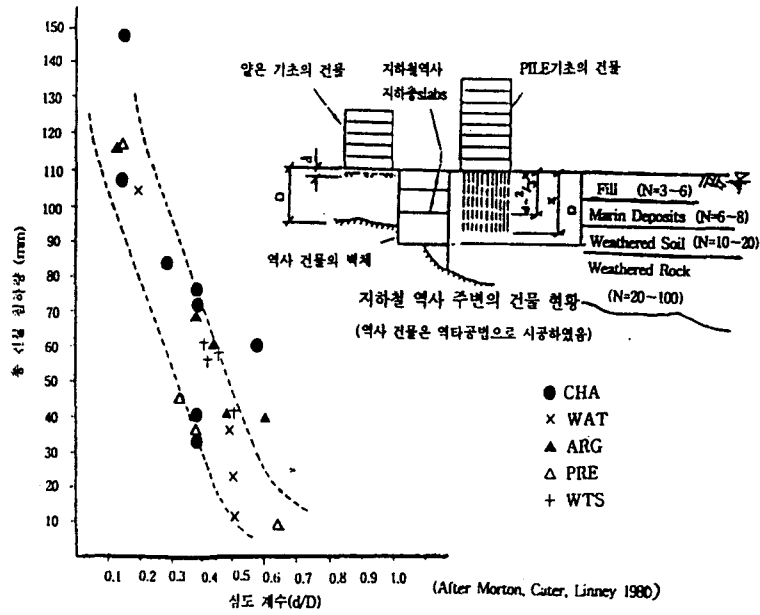


그림 4. 지하역사 굴착주변 건물의 기초 종류별 침하 현황

표 3. 굴착주변 건물들의 침하요소별 측정 침하량

| 측정위치                      | 건물 부호     | 유요기초<br>심도(d) | 심도계수<br>(d/D) | 벽체시공중<br>침하량<br>(mm) | 지하수저하<br>침하량<br>(mm) | 굴착공사중<br>침하량<br>(mm) | 총 침하량<br>(mm) |
|---------------------------|-----------|---------------|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------|
| Chater<br>(CHA)           | Prewar I  | 4             | 0.16          | 63                   | 46                   | 37                   | 146           |
|                           | Prewar II | 4             | 0.16          | 36                   | 32                   | 37                   | 105           |
|                           | 1960 I    | 8             | 0.31          | 46                   | 20                   | 16                   | 82            |
|                           | 1960 II   | 10            | 0.39          | 28                   | 6                    | 6                    | 40            |
|                           | 1960 III  | 10            | 0.39          | 35                   | 14                   | 20                   | 69            |
|                           | 1960 IV   | 10            | 0.39          | 15                   | 9                    | 9                    | 33            |
|                           | 1960 V    | 10            | 0.39          | 40                   | 22                   | 13                   | 75            |
| 1970 I                    | 15        | 0.59          | 29            | 15                   | 15                   | 59                   |               |
| Water<br>loo<br>(WAT)     | 1960 I    | 5             | 0.20          | 30                   | 40                   | 33                   | 103           |
|                           | 1960 II   | 13            | 0.52          | 0                    | 6                    | 5                    | 11            |
|                           | 1960 III  | 3             | 0.50          | 0                    | 15                   | 21                   | 36            |
|                           | 1970 I    | 12            | 0.48          | 6                    | 4                    | 13                   | 23            |
| Argyle<br>(ARG)           | 1950 I    | 4             | 0.15          | -                    | 100                  | 5                    | 113           |
|                           | 1950 II   | 12            | 0.46          | -                    | 56                   | 4                    | 60            |
|                           | 1950 III  | 13            | 0.50          | -                    | 36                   | 4                    | 40            |
|                           | 1950 IV   | 10            | 0.38          | -                    | 50                   | 181                  | 68            |
|                           | 1960 I    | 16            | 0.61          | -                    | 35                   | 4                    | 39            |
|                           | 1970 I    | 17            | 0.65          | -                    | 4                    | 4                    | 8             |
| Prince<br>Edward<br>(PRE) | Prewar I  | 4             | 0.17          | -                    | 115                  | -                    | 115           |
|                           | 1960 I    | 8             | 0.34          | -                    | 42                   | 38                   | 45            |
|                           | 1960 II   | 9             | 0.38          | -                    | 31                   | 36                   | 37            |
| Wong<br>Tai Sin<br>(WTS)  | 1950 I    | 9             | 0.42          | 14                   | 42                   | 2                    | 58            |
|                           | 1950 II   | 8             | 0.42          | 5                    | 39                   | 12                   | 56            |
|                           | 1950 III  | 8             | 0.42          | 10                   | 35                   | 15                   | 60            |
|                           | 1950 IV   | 10            | 0.52          | 1                    | 89                   | 0                    | 40            |

도심지 굴착에서 인접건물의 피해사례에서는 문화재건물, 벽돌조 2층 건물 그리고 병원건물로 나뉘어 피해 거동, 공법 검토, 간략한 해석방법 등을 소개하였다.

그림 5는 기초길이 및 침하량을 통한 안정성검토를 나타내며, 그림 6은 런던의 역사적 건물인 맨션 하우스 서쪽벽체에 대한 침하측정치와 설계예측치를 나타내고 있다. 터널중심부에서 침하영향거

리는 설계치와 계측치 사이에 2배이상 차이가 나는데 이는 건물의 하중이나 강성의 고려를 어떻게 하느냐에 따라 차이가 클 수가 있기 때문이다.

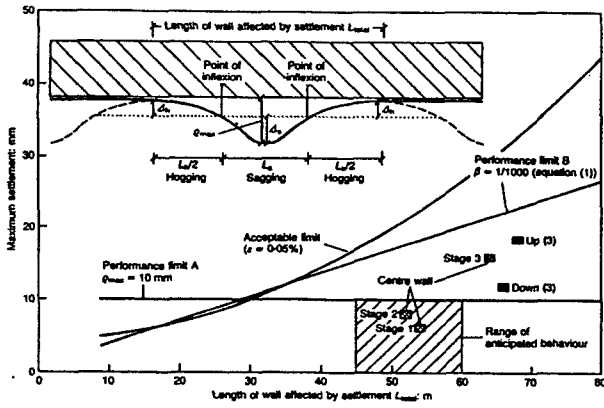


그림 5. 기초길이 및 침하량을 통한 안정성 검토

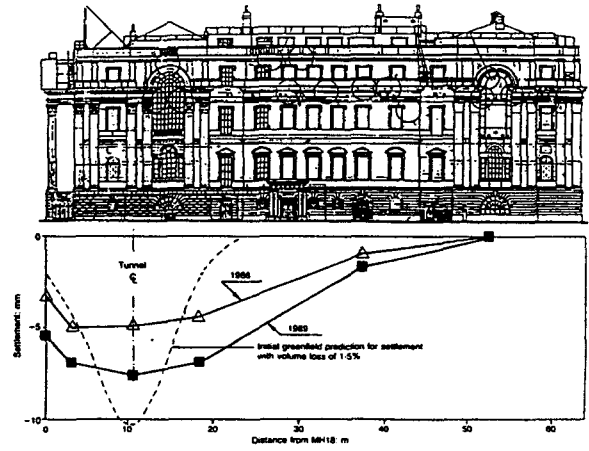


Fig. 11. Settlement of west wall of Mansion House on 16 July 1963 and 7 June 1969

그림 6. 침하측정치와 설계예측치

그림 7은 Boscardin과 Cording이 인접지반 굴착으로 인한 주변건물들의 손상상태를 관측하여 각변위와 수평변형으로 손상 판정기준을 나타내고 있다. 국외에서는 도심지 굴착의 경우 1차와 2차관리 기준치를 건물의 중요도와 용도에 따라 1/1,000 ~ 1/2,000 또는 최대인장변형율을 0.05%등으로 설정하여 정보화시공에 적용하고 있다.

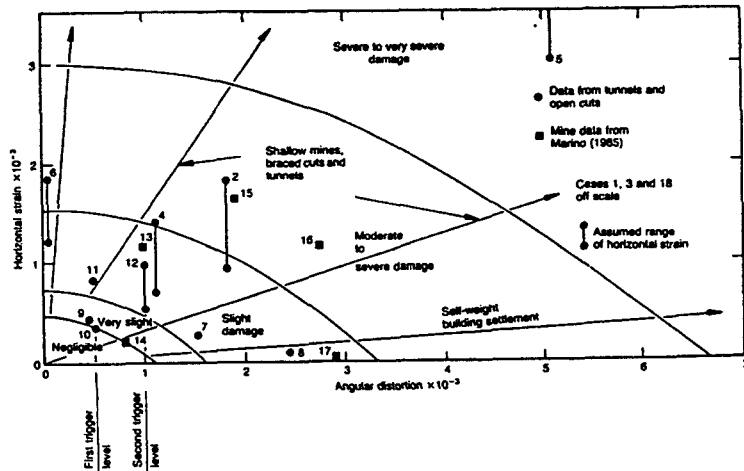


그림 7. 각변위와 수평변형에 따른 손상영향(after Boscardin & Cording, 1989)

## 4.2 지반굴착 관련 사고유형

### 4.2.1 강널말뚝+버팀대(Sheet Pile+Strut) 공법 (부산)

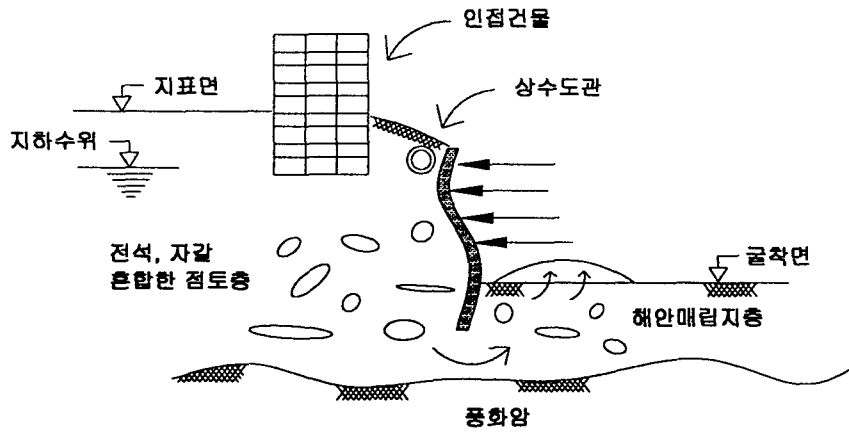


그림 8. 강널말뚝 + 버팀대공법에서의 사고사례

**피 해**

- 4층 건물이 토류벽 붕괴로 굴착공내로 전도되는 피해발생.

**검토 사항**

- 전석, 혼합된 점토층에 강널말뚝(Sheet Pile)의 시공이 불량하여 벽체의 불연속 부분을 통해 지하수와 토사유출.
- 벽체의 강성부족으로 벽체변위가 컸고 지하수와 토사 유출로 상수도관의 침하확대.
- 상수도관의 부등침하로 연결부(Joint) 파손과 상수도수압으로 벽체를 순식간에 붕괴시킴.
- 인접건물 보호를 고려한 설계 및 계측 미비.

**4.2.2 복합벽체와 복합지지방식 - (서울) <지하연속벽장비+ silo 등 설치>**

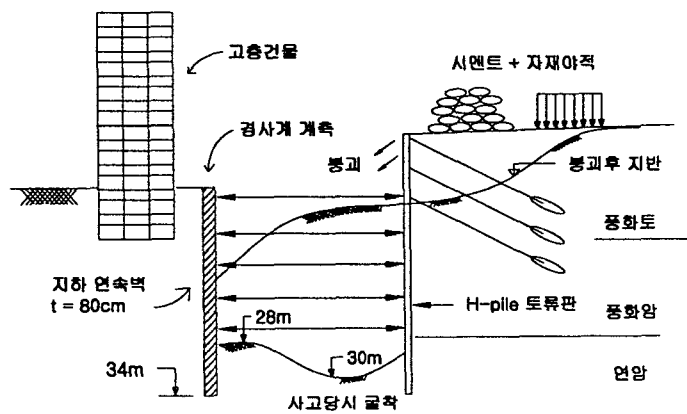


그림 9. 복합벽체와 복합지지방식에서의 사고사례

**피 해**

- 34m 굴착중 상당수의 굴착장비와 버팀대, 중간말뚝등 파손됨.

- 건물 반대측 배면에 시멘트 와 자재야적 등으로 토압이 증가되고, 어스앵커(Earth Anchor) 의 정착장이 움직이며 순식간에 건물 측으로 붕괴.
- 고층건물 측은 80 cm 두께의 지하연속벽이 암반까지의 보강(Underpinning) 기능으로 지지하고 있어 기존 고층건물에 손상이 없었음.
- 철골 철제로 혼합된 붕괴지반의 보강과 재굴착으로 상당한 공기지연과 경제적 문제를 야기시킴.

**검토 사항**

- 도심지 굴착시 공간부족으로 자재 및 건설 장비 등 벽체 부근에 야적하게 되면 앵커의 하중이 크게 증가할 수 있음.
- 건물 측은 지하연속벽, 반대측은 H-pile + 토류판 공법으로 사용되고 상부 앵커(Anchor) 지지와 하부 버팀대(Strut) 복합지지로 변형해석이 용이치 않음.
- 고층건물측 계층과 반대측 계층의 중요도를 동일하게 보아 비교 검토할 필요가 있을 것이다. (전체 가설구조물의 안정성 관점).
- 기존 고층건물 지하굴착 공사중 유사붕괴사고 경험한 바 있다.
- 풍화토, 풍화암은 굴착후 지하수로 인하여 습윤, 건조 수축을 반복시에 극풍화토로 변질되어 강도가 상당히 저하될 가능성 있음.
- 45m 길이 버팀대(Strut) 의 좌굴길이 (  $l$  ) 과 모멘트 (  $\frac{wl^2}{12}$  ) (Strut 와 중간 말뚝 연결 강성 문제)

**4.2.3 Corner Strut 활동 사례 (용산전자상가, 안산)**

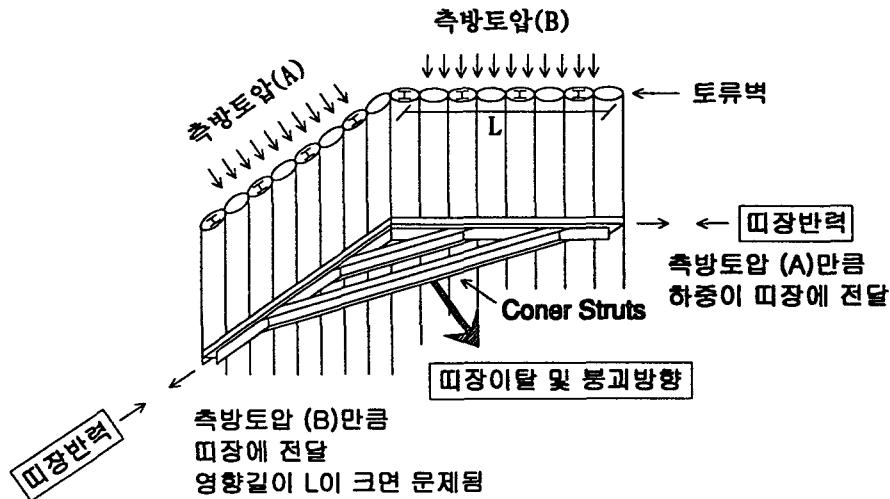


그림 10. Corner Strut 붕괴사례

**피 해**

- 측방토압 (A)와 (B)의 띠장이 견딜 수 없을 정도로 토압이 크거나 띠장반력이 부실한 상태에서 측방 토압 (A)와 (B)의 하중이 전달되어 코너 Strut가 이탈 붕괴됨.

- 굴착심도가 클수록 코너 배면 지반의 붕괴와 토류구조 전체의 연쇄파괴.

**검토 사항**

- 굴착전 띠장반력이 가능한지 점검.
- 측방토압 (A)나 (B)가 띠장 압축허용치를 초과하지 않도록 코너 Strut 길이 제한.

**4.2.4 CIP 벽체와 지하매설물 (인천)**

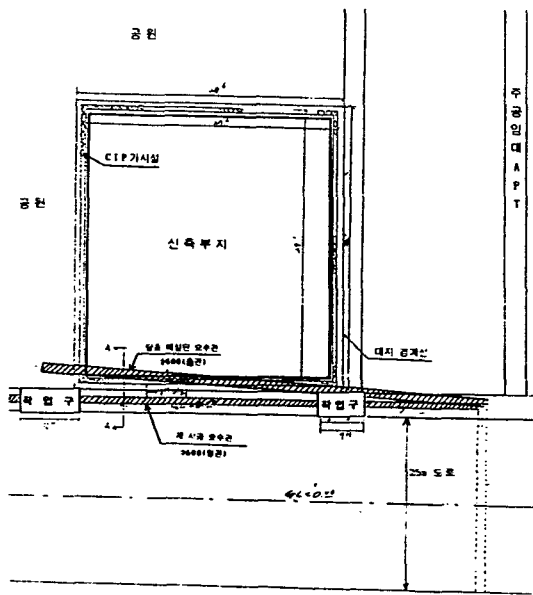


그림 11. 현장평면도

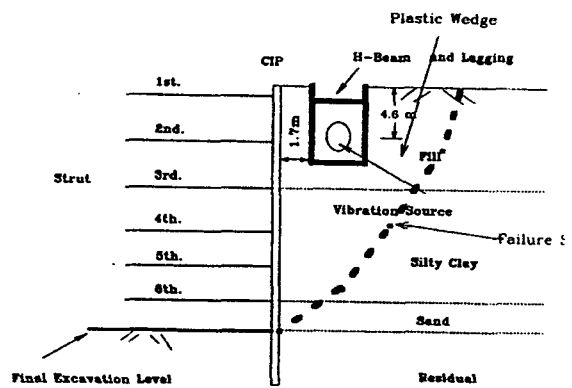


그림 12. 지반내 가상파괴면의 형태

그림 11에서와 같이  $\phi$  600 흙관의 우수관 위치가 현장내로 설치되어 있어, CIP 벽체의 품질관리에 문제가 있었다. 벽체 배면에서 1.7m 떨어진 곳에서 새로이  $\phi$  600 흙관을 신설하는 과정에서 흙관 설치용 Air Hammer 와 Air Compressor 사용건 등이 작용하였고 가상 파괴면 내의 Dynamic Stress 는 파잉 간극수압과 전단강도저하를 유발하였을 것이다.

주변 우수관 미관 공사의 영향으로 주변 상수도가 파열되고 이에 따른 수압의 작용이 벽체의 안정에 역시 영향을 미쳤다고 사료된다.

**피 해**

- 굴착심도 12 ~ 15m에서 토류구조물이 주변지반의 붕괴로 완전히 매몰되었음.
- 주변도로와 인접지반이 굴착현장에서 수평거리로 8 ~ 12m 까지 붕괴되었다.

**검토 사항**

- 지하 장애물 발견시 벽체시공의 품질관리에 특별히 유의할 것.
- 주변 상수도의 손상으로 주변지하수위 상승시에 수압고려가 설계시에 미비되었으나 계측이 실시되지 않았음.
- 파괴면내의 점토층에서 진동을 가하므로써 강도의 저하와 충격하중 작용 시킴.

#### 4.2.5 지하연속벽 + 버팀대지지의 경사면공사

해안매립지반과 연결된 경사면에 지하연속벽을 암반까지 근입시킨후 버팀대(strut)로 지지하여 24m 까지 굴착을 진행하였다.

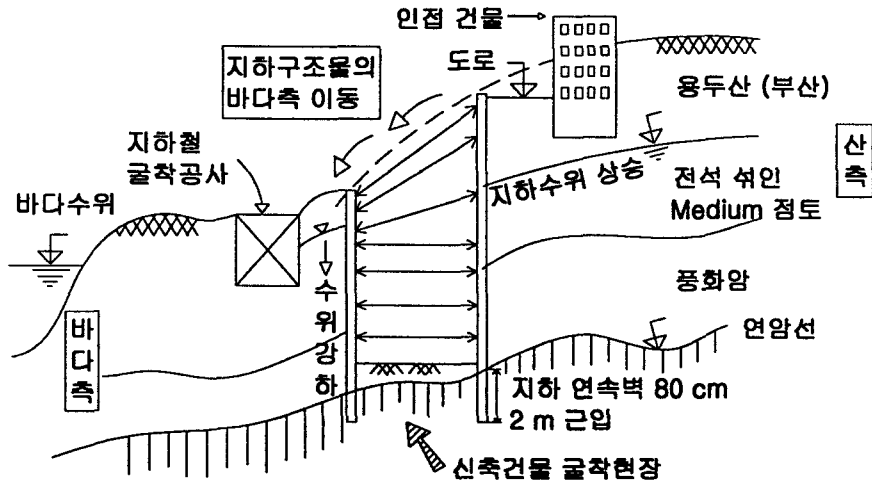


그림 13. 지하연속벽+버팀대의 경사면공사의 사고사례

#### 피 해


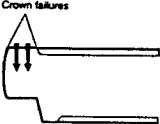
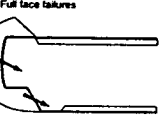
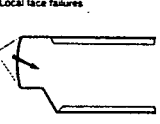
- 차수벽인 지하연속벽의 시공으로 산측에서 바다로 흐르는 지하수의 차단 → 산측 지하수위 상승.
- 인접지하철공사 현장굴착으로 바다측 지하수위 하강.
- 지하구조물의 바다측 이동으로 버팀대 구조의 버팀을 2배로 보강.
- 산측 도로와 인접건물의 심각한 손상.


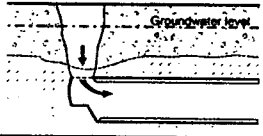

#### 검토 사항

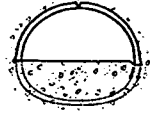

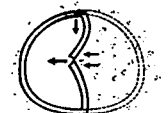
- 산측에 설치된 경사계와 지하수위측정공(well)의 측정결과 위험을 즉시 파악하고 즉각조치를 취하였음.
- 정보화시공의 적용으로(Load Cell, Strain Gauge등 사용)대형사고 방지.

#### 4.3 터널과 관련된 사고사례

대부분의 터널공사는 계측관리를 통하여 안정성을 판정하고 있으며 특히 NATM을 이용한 터널공사 시는 계측결과와 관리 및 평가의 의존도가 어느 공법보다 높다. 터널의 안정성 평가에 앞서 터널공사시 일반적인 파괴유형을 보면 그림 14와 같다.

| Number | Type of failure  | Illustration of failure  |
|--------|--|--|
| (i)    | Heading in ground too weak for method<br>May be due to discrete zones of weakness (discontinuities) including "greasy backs"<br>Bench failures may be transverse or longitudinal | (a) Bench failures<br>      |
|        |  | (b) Crown failures<br>      |
|        |  | (c) Full face failures<br>  |
|        |  | (d) Local face failures<br> |

| Number | Type of failure  | Illustration of failure   |
|--------|--|---|
| (ii)   | Weakness in crown<br>Due to vertical fissures, pipes and man made features (wells, etc.) |  |
| (iii)  | Insufficient cover to overlying permeable water bearing strata                           |  |
| (iv)   | Insufficient cover to surface  |  |

| Number | Type of failure   | Illustration of failure   |
|--------|---|---|
| (i)    | Bearing failure of arch footings<br>(Typically enlarged footings "Elephant's feet") |  |
| (ii)   | Failure due to horizontal movement of arch footing<br>Heaved ground                 |  |
| (iii)  | Failure of side gallery wall  |  |

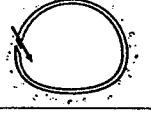
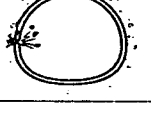
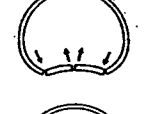
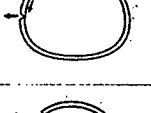
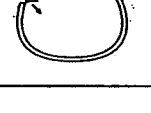
| Number | Type of failure             | Illustration of failure (after ring closure)  |
|--------|-----------------------------|---|
| (i)    | Shear failure               |  |
| (ii)   | Compression failure         |  |
| (iii)  | Combined bending and thrust |  |
|        |                             |  |
| (iv)   | Punching failure            |  |

그림 14. 터널의 파괴유형

1994년 10월21일 London Heathrow 공항 연결 지하철 터널 공사중 붕괴사고가 발생되었다. London Clay 지반에서 숏크리트(Shotcrete) 공사중 발생된 사고는 다른 지역에서 진행중인 NATM 터널현장에 까지 영향을 미치게 되었다.

영국정부내 보건안전당국에서 NATM 터널공법이 공사인력뿐만 아니라 공공안전과 관련하여 충분히



위험을 관리할 수 있을 정도의 안정성이 확보될때까지 모든 MATM 현장공사를 중지시킨후 전반적인 검토를 지시하였다.

다음 내용은 NATM 터널공사의 안전에 관한 조사검토 내용중 사고사례와 유형에 관련된 부분을 발췌하여 보고하고자 한다.

### 4.3.1 LONDON Heathrow 공항연결 지하터널붕괴사고 - NATM공법(London Clay)

비교적 단단한 London Clay 지반에서 시공되고 있는 NATM 공법의 문제점과 NATM 터널공사중 사고를 경험한 사례들을 수집, 정리하여 붕괴 발생과정(Mechanism) 별로 분석하였다.

1973년부터 1994년 사이 약 20년간 세계적으로 보고된 NATM 터널사고 사례를 표 4에 나타내었다.

표 4. NATM 사고(붕괴포함)의 사례(1973 ~ 1994)

| NO | 날짜      | 위치                    | 특징<br>보고자                                 | 사고위치           | 당시상황  | 비고  |
|----|---------|-----------------------|---|----------------|---|-----|
| 1  | '73. 10 | Paris<br>France       | 붕괴<br>Muller '78                          | A6<br>A8       | 수치해석과계측의 문제점  |     |
| 2  | '81. 10 | São Paulo<br>Brazil   | 급작스런불안정<br>소음과 Lining<br>균열<br>Kochen '87 | A1             | 붕괴발생되지 않았으나 6m 직<br>경의 12.0cm의 건물침하. 8m<br>Overburden. 지반조건변경과<br>배수 비배수 강도 변화.                     | 도심지 |
| 3  | '83     | Santana<br>Brazil     | Cave-in                                   |                | NATM의 첫 번째 시도(Brazil)<br>도로까지 점진적 붕괴진행.   | 도심지 |
| 4  | '84. 11 | Landruchèn<br>Germany | 붕괴<br>john:wogin<br>Heissel '87           | A8<br>A10      | Cave-in 시작으로 11km중 47<br>개소 천단과 측벽의 전단(그림<br>10 참조).  |     |
| 5  | '84     | Bochum<br>Germany     | 붕괴<br>Laue & Sager<br>'87                 | A7<br>A9<br>B1 | 도심지반 300m <sup>3</sup> 이 내려앉으며<br>30분내에 붕괴가 일어남. 토피<br>고 7.5m, 터널직경 6.5m, 라이<br>닝 두께 150mm(굴진거리 줄임) | 도심지 |
| 6  | '85. 1  | Richthof<br>Germany   | 붕괴<br>Engels and<br>Aubel '91             | A1             | 20m 토피고, 붕괴 11m의 지표<br>면이 6m 깊이로 내려앉음. 3개<br>월간 재굴착.  |     |
| 7  | '85     | Bochum<br>Germany     | 붕괴 Laue &<br>sager '87                    | A1             | 물과 균열이 문제, 도로 30m <sup>3</sup><br>내려앉음.   | 도심지 |
| 8  | '85. 8  | Kaiserau<br>Germany   | 붕괴<br>Wallis '90                          | A4<br>A5       | 막장 100m 전방까지 붕괴영향.<br>Bench 굴착중 붕괴 4개월 공기<br>지연.  |     |
| 9  | '86. 2  | Krieberg<br>Germany   | 붕괴<br>Leichnitz<br>Schlitt '87            | A8<br>A10      | 사암으로 3km 터널굴진중 천단<br>좌우측의 물과 모래층이 붕괴,<br>지표면의 큰 침하유발(그림 11<br>참조).                                  |     |

| NO     | 날짜      | 위치                             | 특징<br>보고자  | 사고위치                 | 당시상황   | 비고  |
|--------|---------|--------------------------------|--|----------------------|--|-----|
| 10     | '87     | Munich<br>지하철<br>Germany       | 붕괴<br>Weber '87  | C2                   | 수직갱에서 터널연결부 굴진중<br>얇은 이회토(Marl) 층의 붕괴로<br>상부 지하수와 모래자갈 450m <sup>3</sup><br>지표면부근에서 쏟아져 내림(그<br>림 12 참조).          | 도심지 |
| 11~ 15 | '87     | Munich<br>지하철<br>Germany       | 붕괴<br>Weber '87<br>Rovan &<br>Weber '91                      | A1<br>A12<br>(그림 13) | 막장전면의 불안정한 지반조건<br>으로 붕괴. 지표면 부근 300m <sup>3</sup><br>의 지반침하와 지하수가 쏟아져<br>내림. 얇은 불투수층(Marl)붕괴<br>포함.               | 도심지 |
| 16     | '87     | Weltkugel<br>Germany           | Cave-in<br>Schrewe '87                                       | A3                   | 극중화된 사암에서 수압과<br>24cm의 내공변위가 5개월간 누<br>적됨.   |     |
| 17     | '87     | Karawanken<br>Austria          | 많은 유수와 큰<br>변형<br>Martin '91<br><High<br>Tectonic<br>stress> | 미붕괴                  | 알프스의 큰 지각응력으로 파쇄<br>대의 암반이 120cm까지 움직<br>임. 상당의 squeezing 문제로<br>터널직경을 늘리고 segments에<br>간격을 주고 Rock Bolt로 교정<br>함. |     |
| 18     | '88     | Michaels<br>Germany            | 붕괴<br>Pilot<br>터널확장중   | A10                  | 급작스런 지반변화(11m 붕괴)<br>감독과 예측문제가 제기됨.  |     |
| 19     | '88     | Kehrenberg<br>Germany          | 상당한 침하<br>wallis '88   | A3                   | 단층지역을 예견하였으나 조치<br>의 불충분 30m 가량 침하. 배<br>수로서 붕괴방지  |     |
| 20     | '89. 1  | Karawanken<br>Austria          | 붕괴<br>Maidl '93  | A1<br>A11            | 4000m <sup>3</sup> 암반포함한 대형붕괴사<br>고 36bar의 높은수압과 암반파<br>쇄대 문제(전단강도의 감소)  |     |
| 21     | '91. 9  | Kwachon<br>Korea               | 붕괴   |                      | 15m 토피고, 연약지반의 붕괴<br>(점토)지표면이 내려앉고 4명이<br>고립되어 26시간만에 구출됨  |     |
| 22     | '91. 11 | Seoul<br>지하철<br>1-2공구<br>Korea | 붕괴<br>Park & Lee<br>'93                                      | A1                   | 풍화암과 점토 관련됨. 가스관<br>파열 인접제방 붕괴로 지하철<br>붕괴현장유입. 지표면 최하<br>20m×15m×4m 침도.  | 도심지 |
| 23     | '91. 11 | Seoul<br>지하철<br>2호선<br>Korea   | 붕괴<br>건물3채와<br>지하매설물<br>손상                                   | A1                   | 22번 붕괴 10일후 막장의 암반<br>sliding 지층변화 Borehole<br>100m 간격조사됨. 건물3채 붕<br>괴와 지하매설물 손상.                                  | 도심지 |
| 24     | '92     | Funagata<br>Japan              | 붕괴   | C1                   | 막장상부붕괴-물과느슨한 지반<br>(Sand-Gravel)-15m 토피고 지<br>표면침하 6m 깊이로 4m 주변.   |     |

| NO      | 날짜                                   | 위치  | 특징<br>보고자                           | 사고위치           | 당시상황   | 비 고 |
|---------|--------------------------------------|---|-------------------------------------|----------------|--|-----|
| 25      | '92. 2                               | Seoul<br>지하철<br>2-3공구<br>Korea                  | 붕괴<br>Park & Lee<br>'93             | A2             | 오래된 굴착공 주변 굴진중 물과 토사가 쏟아져 들어옴. 모든 유틸리티 Line 끊어지고 교통 혼란 야기함.                  | 도심지 |
| 26      | '92. 6                               | Lambach<br>Austria                              | 붕괴<br>Vavrovsky<br>Schvbert '95     | A5             | 막장 Bench 부근의 부분적 취약지반에서 발생. 굴착공 구조됨.   |     |
| 27 ~ 30 | '93. 1<br>'93. 2<br>'93. 3<br>'93. 3 | Seoul<br>지하철<br>#4-2 phase<br>5-2<br>6-2<br>7-2 | 붕괴<br>Park & Lee<br>'93             | A1<br>A3       | 막장 뒷편의 연약지반(물을 포함하는 느슨한 모래, 자갈지반)이 굴진과 더불어 쏟아져 내림. 천부의 풍화암이 강도저하로 붕괴됨.       | 도심지 |
| 31      | '93. 3                               | Chungho<br>Taipei,<br>Taiwan                    | 붕괴                                  | A1             | 15m 직경터널이 연약지반대를 만나 붕괴됨. 100m의 붕괴 영향으로 2년의 공사지연과 보수요함. 다른 NATM 붕괴사고로 보고하고있음. |     |
| 32      | '93. 11                              | Sao Paulo<br>Brazil                             | 붕괴                                  | A1<br>A7<br>A3 | 균열난 단단한 점토층에 얽은 토피로 굴착중 굴진속도가 빨라 붕괴유발. 물이 터널내에 가득 차고 도심지 교통문제등 유발.           | 도심지 |
| 33      | '93                                  | Tuscany<br>Italy                                | 상당한침하<br>붕괴?<br>Pelizza '94         | A3             | 연약암반대의 붕괴.<br>14m 막장전반 Grouting 보강하고 토피고 25m 내로 조정.                          |     |
| 34      | '94. 4                               | C.Pinto<br>Brazil                               | Portal 붕괴                           | C1             | 1차와 2차 Lining에 Gap 발견하고 보수중 터널입구(Portal) 붕괴.                                 |     |
| 35      | '94. 7                               | Montemor<br>Portugal<br>#1                      | 붕괴<br>Wallis '95                    | A3             | 높이 6m 폭 19.5m 인 터널이 토피고 20m, 길이 45m 가량 붕괴됨. 유수의 세굴이 원인중 하나.                  |     |
| 36      | '94. 8                               | Montemor<br>Portugal<br>#2                      | 붕괴<br>Wallis ' 95                   | A1             | 5m 직경의 침하구를 형성   | 도심지 |
| 37      | '94. 8                               | Galgenberg<br>Austria                           | 붕괴<br>Schuber<br>Riedmuller<br>'95  | A1             | 천단의 대 단층지역 붕괴. 순식간의 암반강도파괴로 700m <sup>3</sup> 붕괴토사 이동.                       |     |
| 38      | '94. 9                               | Munich<br>지하철<br>Germany                        | 붕괴<br>4명사망,<br>27명사상<br>Tiefbau '95 | A1             | 이회토(Marl) 지층에서 상부지하수와 자갈층에서 수압이 얽은 이회토(Marl) 지층을 파괴시킴. 자동차가 터널로 떨어져 묻힘.      | 도심지 |
| 39      | '94. 10                              | Heathrow<br>공항<br>London                        | 3개터널 붕괴<br>조사중                      |                |  |     |

그림 15, 16, 17, 18은 NATM 터널사고중 몇몇 사고사례를 나타낸다.

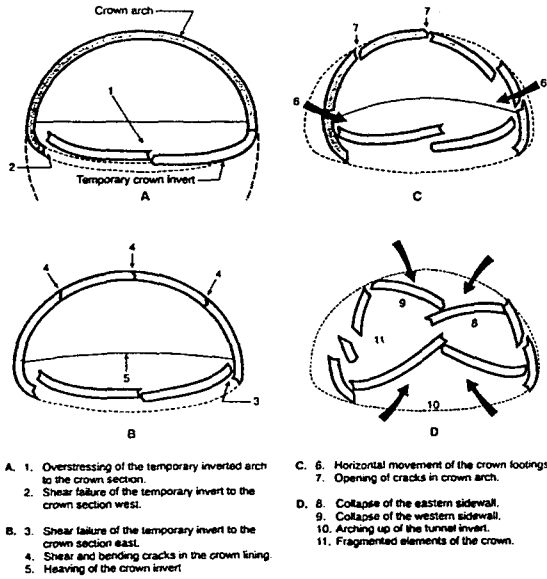


그림 15. Landruken 터널의 사고  
(after John, Wogan & Heissel, 1997, Germany)

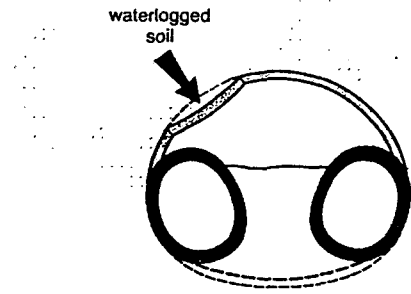


그림 16. Keriburg 터널의 사고  
(after Lechnitz & Schlitt, 1987, Germany)

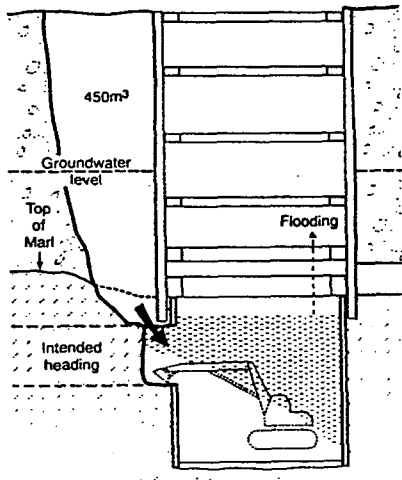


그림 17. Munich에서의 사고(Germany)

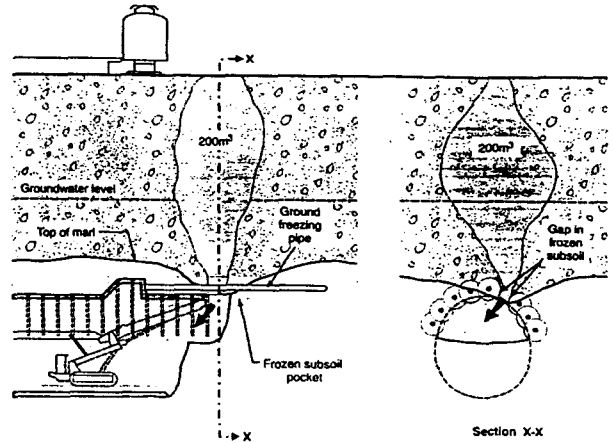


그림 18. Munich에서의 사고  
(after Weber, 1987, Germany)

도심지 붕괴사고가 도심지가 아닌 지역보다 2배이상 큰  
몇몇 Project는 연쇄적인 붕괴사고를 경험함  
사고는 NATM 경험이 많은 적든 관계없이 일어남  
도심지사고의 경우 피해가 엄청나게 클 수 있음

위의 사고목록이외에도 1978년에서 1991년 사이에 암반터널공사의 사고가 61개의 터널공사에서 71건으로 집계되었다(Inokuma et al 1994).

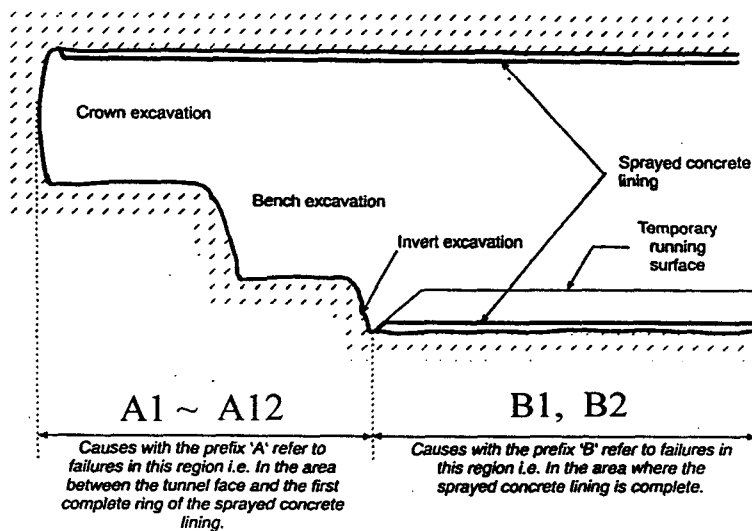
최근들어 사고가 많이 발생한 것처럼 보이는 것은 ;

- NATM 공법이 다양한 환경조건에서 시공되고 있다.
- NATM 공법은 경험이 비교적 작은 전문인에 의해 시공되고 있다.
- NATM 공법은 자체의 잠재적인 위험이 내포되고 있다.
- 공법자체에 너무 자신감을 가지고있지 않는지?
- 사고사례가 보다 적극적으로 보고되고 있다.

상기 표 4의 사고사례들에 대한 붕괴위치를 3개의 영역으로 나누어 구분하면 다음과 같다.

- "A" - 막장부근사고 (A1 ~ A12)
- "B" - Shotcrete 타설 완료단면의 사고 (B1, B2)
- "C" - 터널입구(Portal) 붕괴등 다른 부분의 사고 (C1, C2)

19개의 붕괴현장을 기준으로 구분해 보면, 대부분이 A1~A12에 해당되는 막장부근 사고이고, 약간의 Shotcrete 타설 완료단면 사고, 그리고 오직 2건만이 C급 사고로 분류되며 그림 19에 나타내었다.



C1, C2 : Portal 이나 그 외의 위치

그림 19. 사고발생원인의 위치

#### 4.3.2 사고의 원인

상기 터널사고의 사례에 대한 원인을 분석 정리해본 결과 다음의 5가지 항목으로 함축시켜보았다.

- (1) 예상하지 못한 지질학적 원인들
- (2) 계획과 시방단계에서의 실수
- (3) 계산과 수치해석의 실수

(4) 시공의 실수

(5) 경영과 관리의 실수

1) 예상하지 못한 지질학적 원인(Unpredicted geological causes)

- 수압을 가진 모래·자갈층의 급작스런 출현
- 시공중 연속적으로 지층상태를 파악할 수 있는 수평시추 미실시
- 전문가에 의한 막장관찰기록 분석 및 조치미비
- Unpredicted 지반조건은 Unpredictable 지반조건과는 아주 다름

2) 계획과 시방조건 미비

- 터널위치가 높아 안전한 토피고 유지 불가
- 굴착과 지지조건이 지질학적 조건을 고려하지 못했을 때
- 지반조건 분류기준의 잘못으로 지지구조의 부적합한 선택
- 부적합한 시공자재와 허용오차 선정
- 문제발생시 긴급조치계획의 부적합

3) 계산과 수치해석의 실수

- 설계입력자료의 실수
- 지하수 영향을 충분히 고려하지 못한 경우
- 부적합한 재료모델과 컴퓨터 프로그램 사용
- 계측 자료에 대한 정확한 분석과 빠른 해석 미비

4) 시공의 실수

시공에 관한 미비점이 너무나 많기 때문에 전부 집계하지는 못하지만 그 일부만 정의해 보면 다음과 같다.

- 1차와 2차 Lining 두께가 시방서와 다름
- 잘못 시공된 Rock Anchor 와 Steel Ribs
- 잘못 시공된 Lining 보수
- 설계시방과 다른 굴착단계와 시공 시점

5) 경영과 관리의 실수

- 경험이 충분하지 않은 설계자와 현장관리인 선정
- 지난 공사의 사고사례들의 장·단점을 충분히 인식하지 못한 현장 관리인 선정
- 실력있고 경험이 풍부하지 않은 시공업체 선정
- 불충분한 감리제도 도입
- 현장 계측결과에 따른 시공의 적용이 즉시 이루어지지 못함

### 4.3.3 사고방지를 위한 제안사항

1) 설계 개선사항

- 모든 가능한 상황하에서 안전율이 고려된 설계
- 인접 매설물이나 건물들의 영향이 고려된 설계
- 지반조건의 충분한 변화에 대한 이해와 설계에 반영

- 터널 구조의 불충분한 파괴 발생과정(Mechanism) 예측
- 시공단계나 구조 Joint 의 안정성 고려 미비

2) 시공의 개선사항

- Steel Rib 등 기초를 넓고 안전하게
- Forepoling 등 천단 보강재의 최대활용
- 막장 전면의 수압저하를 위한 배수구 설치
- 두꺼운 Lining 과 화학적 지반 보강 , Steel Rib 활용
- Curved 인버트
- 계측 자료의 최대한 활용

3) 관리측면의 개선사항

- 지질학적 피해를 줄이기 위한 전문가의 막장관찰 분석
- 계측자료의 즉각적인 분석과 활용을 위한 시스템 제공
- 철저한 계획과 시공감리제 도입
- 정신적, 기술적 교육 철저
- 위험구간의 계측기 보완 및 수평보링의 활용

4.3.4 위기관리와 NATM

그림 20은 위기( Risk )의 수준과 시간이 NATM 공법의 안정성을 증대시키는 방안을 제시하고 있다.

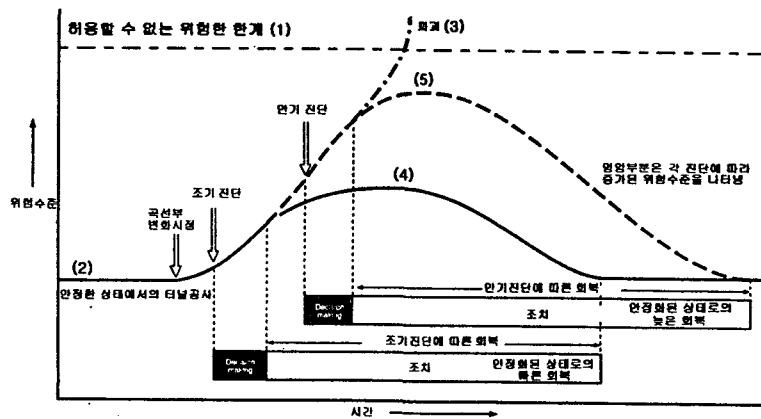


그림 20. 위기수준과 NATM공법의 안정성증대 방안

그림에서 (1)은 허용할 수 없는 위험한계를 점선으로 표시하였고 (2)는 일반적으로 안정된 상태에서 터널을 공사하는 과정에서 (3)은 위험이 예측되지 못한 상태에서 급격히 진행되어, 준비된 대체 방안을 활용하지 못할 때, (4)는 초기의 위험요소발견과 적절한 대체방안 활용으로 안전하게 원래의 안정상태 (2)로 돌아오며(발견과 회복 Mechanism) (5)는 문제발견이 늦어져 대체방안을 겨우 적용시킬 수 있었던 경우로, 잘못되면 (1)의 위험단계를 넘을 수 있다. 그러므로 적절한 시점에서 문제의 발견과 적합한 대체방안 (contingency) 계획이 NATM공법에서는 상당히 중요하다.

바람직한 NATM터널공사의 설계와 시공과정은 그림 21에 시공중 시행되는 정보화시공의 상세한 절차는 그림 22에 소개하였다.

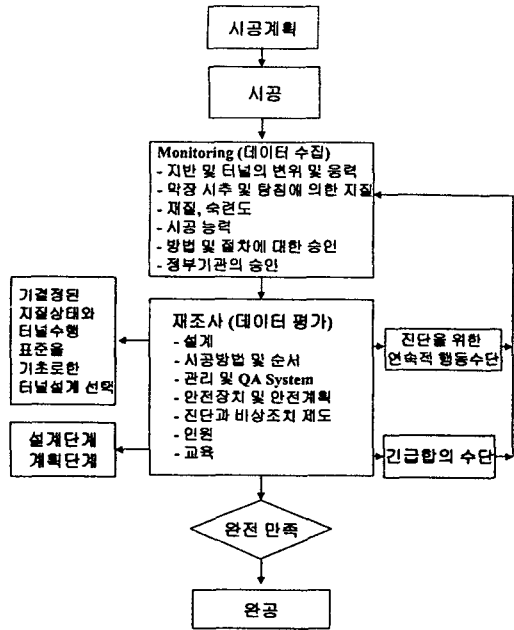


그림 21. 바람직한 NATM터널공사의 설계와 시공과정

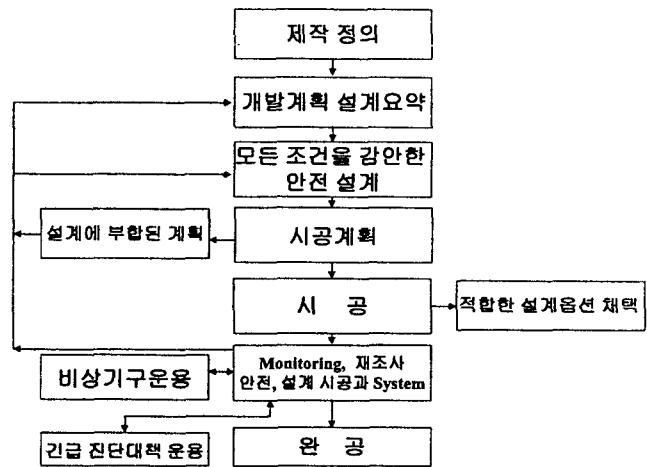


그림 22. 정보화시공의 시공절차

### 4.3.5 국내의 터널붕괴 사례

1993년 3월 구포열차사건은 터널공사중 철도지반에 내려앉아 무궁화호 승객 100명의 사상자를 낸 최악의 터널붕괴사고였다. NATM공법으로 직경 4.2m의 전력구 터널을 철도밀 34m 위치에 시공중이었으며 터널에 물이 차서 물을 퍼내자 선로 아랫부분의 흙이 터널로 빨려들어 가면서 선로지반이 무너져 발생하였다고 신문은 보고하고 있다.

이러한 사고의 발생시 우리는 어떻게 대처하고 있는가? 서로에게 책임전가하기 급급하고 사고수습대책에만 혼신을 기울이고 있으나, 앞으로 유사한 사고재발 방지를 위한 체계적인 조사와 원인규명 및 방재대책은 뒷전으로 밀리고 마는 관습에 빠지고 만다. 이런 엄청난 사고의 대가로부터 우리는 보다 다량의 산지식과 경험을 얻어내어야만 지반공학을 포함한 토목공학 전반의 기술이 향상되리라 생각되어 몇 가지 궁금증을 피력하고자 한다.

- 사고지점은 91년 6월 폭우로 철도일부가 유실된 곳에서 가까운 지점으로 지반이 약한 곳으로 알려져 있다.
- 터널공사로 인한 영향권에 있는 철도 및 주변지반의 계측결과는 어떠했으며, 그간의 계측 분석이 이 구간 시공의 문제점 예측에 도움이 되지는 않았는지?
- 철로 통과 구간에서는 수평시추등을 동원하여 막장전면의 지층과 수압을 파악할 수 없었는지?
- 설계시 지하수 유출과 굴착영향으로 철도의 예상침하량은 얼마였으며, 주변 계측결과가 부합되지 않았을 경우 철도사고 방지를위한 재난대책, 우발사고대책(Contingency Plan)은 무엇이었는지?

만약 상기의 모든 사항이 지켜졌다면 사고의 책임이 어디에 있으며, 안 지켜졌다면 어떤 요소에서 실수를 한 것인지?

- 일부 신문에서는 "발파의 언급이 있는가 하면, 철로근처의 막장은 암반층의 두께가 얇고 균열이 있는 연암층이 주성분으로 이루어져 있어 각별한 안전대책이 요구되는데도 시공업체측이 무리한 발파작업의 강행때문에 균열이 확대되면서 용출수가 증가되었다." 라고 보고하고 있다.
- 또 하나의 의문점은 이러한 경우 설계와 공사의 시방서는 현장조건과 부합되었으며 이때의 시공에 대



한 안전율은 어떻게 예상하였는지?

- 사고발생에 대한 시나리오는 없었으며 사고발생시의 예상 피해액은 생각해보지 않았는지?
- 이 부분의 터널설계, 감리, 시공에 참여한 전문가들의 NATM터널시공 경험을 분석하고 이러한 위험 지역의 공사에서는 설계와 시공의 경험을 동시에 겸비하고 계측결과를 적용할 수 있는 정보화 전문가가 필요하지는 않았는지?

언젠가 이러한 궁금증에 대한 자료를 손쉽게 접하게 되고 앞으로 21세기에는 이와 유사한 사고는 발생되지 않기를 바랄 뿐이다.

#### 4.4 댐(Dam)과 관련된 사고사례

1991년 11월에 지반공학에서의 컴퓨터 활용이란 주제의 추계학술발표에서 영국 Carsington 댐의 파괴 사례에 대한 해석 결과 및 평가가 있었다.

토사댐인 Carsington 댐은 길이 1200m, 최고높이 37m로 계획되어 주말에 내린 폭우가 끝난 1984년 6월4일(월)에 계획고 1m 모자라는 시공을 한 상태에서 상류측 사면 190m정도가 활동을 일으키기 시작했으며 6월7일(목)에는 파괴연장이 500m 정도, 최대수평변위는 15m로 측정되었다. 표 5는 일반적인 사면의 안전율을 나타내며, 댐의 일반사항과 파괴이유는 표 6에 나타내었고, 사면안정해석 단면은 그림 23에 STABL에 의한 사면안정해석결과는 표7과 같이 대우엔지니어링 (송정락, 김성인, 박광준, 유태성) Team에 의해 보고되었다.

이러한 사면붕괴사고의 원인분석과 추후예방을 위하여 정보화시공차원에서 몇 가지 검토사항들을 나열해 보았다.

- 1) 시추조사시와 시공중에 황색점토층을 발견 못한 점
- 2) 댐 건설시 하부점토의 진행성 파괴 (Progressive Failure)로 인한 전단변위를 계측하지 못한 점.
- 3) 설계시 수행한 원호파괴 예측(Bishop)의 안전율은 1.387 (약 1.4)였으나 풍화된 Mud stone 경계로 지나가는 비원호파괴의 경우 안전율이 1.304로 파괴면 예측에서 실패하였음.
- 4) 일반적으로 토사댐의 안전율이 1.3-1.4정도이면 불안으로 판정하며 안전을 확보하기 위해서는 1.5보다는 커야되는데 왜 1.4정도로 만족되었는지. (사고시의 Cost?)
- 5) 설계시 비원호의 안전율이 원호보다 낮은 것을 예측하였다면 채움재와 풍화된 Mud Stone 경계에 계측기 설치하는 해야되는 지점인데 결과가 어떻게 되었는지.
- 6) 댐의 계측은 상당한 비용으로 시공단계에서 영구단계까지 모든 계측을 하게 되면 Instrumentation House로 연결되어 정교하게 측정하게 되어 있는데 점진적 전단파괴 발생과정(Mechanism)을 예측할 수 없었는지.
- 7) 풍화된 점판암 (Mud stone) 은 자체의 강도보다는 굴착 후 응력이완과 물의 작용으로 연화 (Softening)될 수도 있으며, 이 연화된 점판암상부와 채움재의 경계가 경사면인데 이때의 두 물체만의 전단강도가 사전에 검토되었어야 할 것이다.
- 8) 정보화 시공관점에서 상기 일곱가지 사항들 중 한가지만 제대로 관리(Control)되었어도 파괴사고를 미리 방지할 수 있었는지 Risk Analysis를 해 볼 필요가 있을 것이다.

표 5. 사면안정의 안전율

| 안 전 율     | 안 전 성                                |
|-----------|--------------------------------------|
| < 1.0     | 불 안정                                 |
| 1 ~ 1.2   | 안정하나 다소불안                            |
| 1.3 ~ 1.4 | 굴착이나 성토에 대해서는 안전. Earth Dam에 대해서는 불안 |
| > 1.5     | Earth Dam에도 안전. 지진을 고려할 때 필요         |

표 6. Carsington 댐의 일반사항

| 항 목                         | 내 용  |                       |             |                           |            |  |
|-----------------------------|--|-----------------------|-------------|---------------------------|------------|--|
| 제체의 계획고                     | 37M  |                       |             |                           |            |  |
| 파괴 발생년월일                    | 1984년 6월 7일  |                       |             |                           |            |  |
| 설계시 사면 안정해석을 위한 지반조건        | Material   | Unit Weight<br>(kn/m) | C'<br>(kPa) | $\phi'$<br>( $^{\circ}$ ) | $\gamma_u$ |  |
|                             | Core   | 18.5                  | 0           | 22                        | 0.4        |  |
|                             | Shell  | 21.0                  | 0           | 25                        | 0.0        |  |
|                             | Boot   | 18.5                  | 0           | 22                        | 0.5        |  |
|                             | Riprap   | 18.5                  | 0           | 35                        | 0.0        |  |
|                             | Mudstone   | 18.0                  | 100         | 30                        | 0.0        |  |
| * 제체 하부의 연약한 황색점토는 발견되지 않음  |  |                       |             |                           |            |  |
| * $\gamma_u$ = 수압/상재하중(전응력) |  |                       |             |                           |            |  |
| 파괴후 조사에 의하여 밝혀진 지반조건        | Condition  | Core                  |             | Yellow Clay               |            |  |
|                             |  | C'(kPa)               | $\phi'$     | C'(kPa)                   | $\phi'$    |  |
|                             | Peak, intact   | 15                    | 21          | 10                        | 20         |  |
|                             | Peak, with pre-shears  | 6                     | 20          | 5                         | 17         |  |
|                             | "Critical State"   | 0                     | 20          | 0                         | 18         |  |
|                             | Residual   | 0                     | 13          | 0                         | 12         |  |
|                             | Material   | $\gamma_u$            |             |                           |            |  |
|                             | Core   | 0.42                  |             |                           |            |  |
|                             | Boot   | 0.53                  |             |                           |            |  |
|                             | Yellow Clay  | 0.00                  |             |                           |            |  |
| 파괴이유                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 설계시 댐 제체 상부사면 하부의 연약한 황색점토(Yellow Clay)를 발견하지 못함</li> <li>· 댐 건설로 인하여 하부 점토에 발생한 전단변위를 고려치 않음</li> <li>· 위의 2가지 주요 이유로 인하여 설계시 수행된 원호 파괴 양상의 파괴면이 실제 파괴면(Wedge Failure Surface)과 차이가 있음.</li> </ul> |                       |             |                           |            |  |

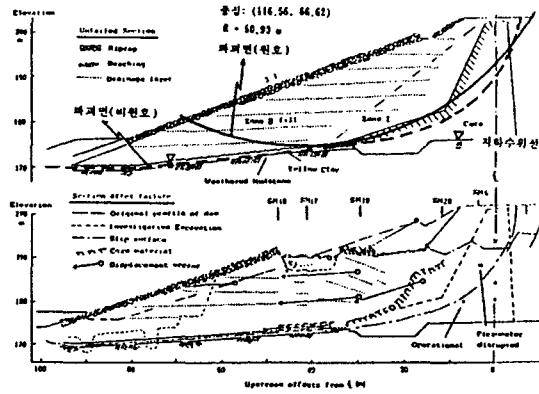


그림 23. STABL에 의한 Carsington 댐의 사면안정해석(Bishop 의 간편법)

표 7. STABL 에 의한 사면 안정해석 결과

| Condition*                    | Safety Factor | Remarks              |
|-------------------------------|---------------|----------------------|
| Design Condition              | 1.387         | Circular (Bishop)    |
| Peak, intact                  | 1.304         | Non-Circular (Janbu) |
| Peak with pre-existing shears | 1.211         | Non-Circular (Janbu) |
| "Critical State"              | 1.066         | Non-Circular (Janbu) |
| Residual                      | 0.798         | Non-Circular (Janbu) |

#### 4.5 정보를 이용한 설계 및 시공

과업의 계획 설계단계에서 인근유사한 공사완료현장에 대한 자료수집과 분석은 과업의 방향 설정에 상당히 중요한 역할을 하게 된다.

몇 년전 홍콩의 Geotechnical Control Office (GCO)를 방문하였다. 지반정보부서 내의 정보보관장소에서 홍콩의 전역에 걸쳐 시추공의 기록과 지반조사보고서, 크고 작은 건물의 지반조사, 토질실험 결과, 설계도서가 지역별로 잘 정리되어 있었다. 더욱 놀란 것은 굴착공사중 일어났던 문제점들과 해결을 위한 별도의 조사결과, 역해석 및 시공변경 등이 계측결과와 아울러 잘 분석되어 있어, 부근 지반의 유사공사시 기존조사 결과를 통해 사전에 예측하여 공사를 실시하는 것을 알 수 있었다.

이들의 자료정리 분석 결과는 당연히 다음 사용자의 정보로 입력되어 엄청난 비경제적요소를 제거하고 안정성을 확보할 수 있는 정보화 시공의 중요한 시작지점임을 알 수 있었다.

지반공학의 모든 정보를 제공할 수 있는 다른 자료들로는, 방콕의 Asian Information Center for Geotechnical Engineering (AGE), 정부관공서, 전기·가스·통신공사, 각 대학 도서관, 학회자료실, 국제자료기구들 (NGI, SGI)등등 정보화의 활용이 일반화되어 있음을 느꼈다.

이렇듯 국내에서도 지난 경험의 실패 및 성공에 관계없이 모두가 정보화 자료로 사용하므로써 유사한 실패사례, 사고사례를 최소화하는 제도적 장치를 마련하여야 할 것이다. 또한 자료를 수집하고 연구분석하는 방향의 정보화시공도 우선적으로 수행되어야겠으며, 이에 대한 외국의 사례를 조사해 보았다.

분야별 변화와 개선방향은 별도로 설명하기로 한다.

## 4.6 정보화 시공의 변화와 개선방향

이미 언급한 바와 같이 정보화시공의 목적이 그림 24에서와 같이 현장계측자료를 토대로 설계사의 불확실한 요소들과 시공중 발생하는 모든 위험요소들은 비교분석하고 경제성을 고려한 최적의 설계, 시공이 되도록 방향을 제시하며 다음 단계의 안전성을 보다 정확히 예측할 수 있기 때문에 바람직한 정보화시공을 수행하기 위하여서는 설계사의 불확실한 요소와 시공중에 예측되는 모든 위험요소에 대한 이해와 응용이 필수적이라 하겠다.

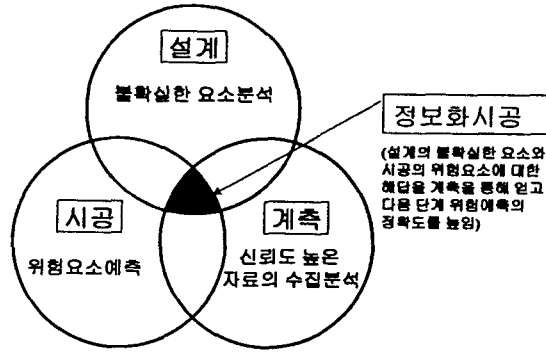


그림 24. 정보화시공의 연관성

정보화시공의 개선은 그림 24에서와 같이 설계와 시공 및 계측을 유기적으로 연계시켜 시공 중 적절한 시점에서 빠르게 정확도 높은 안정성 분석을 시행한 후 보다 합리적이고 경제적인 시공에 도움을 줄 수 있도록 활용되는 방향으로 발전되고 있는 것 같다.

설계의 불확실한 요소나 시공 중에 위험요소들은 과거의 경험이나 사고 사례들로부터 확인되고 검증되기 때문에 공사의 계획에서부터 설계 시공 단계에서 유사한 구조물의 특성이나 지반의 거동 피해에 관한 많은 자료를 분석하여 이를 근거로한 설계와 시공중 계측방향의 설정이 활성화되어야겠다.

그간 많은 계측경험과 자료수집 및 분석과정을 거쳐서 시공의 안정성평가에 도움이 되기는 하였으나, 현장조건에 부합되는 재해석 내지 역해석을 수행하여 공사안전예측으로 연결되는 기술분야에서는 만족할 만한 경험을 하지 못하였다.

특히 도심지 굴착의 경우 인접건물이나 지하매설물의 손상 기준결정과 손상정도에 대한 신뢰도 높은 예측을 위하여 수치해석, 대형모형실험 및 과거 손상자료 분석이 현재 진행중에 있다.

현장계측자료, 역해석 프로그램 그리고 안전관리 기준을 연결하여 시공중 보다 현실적인 안정성 평가를 예측할 수 있는 통합안전관리 시스템개발과 현장에서 직접 활용할 수 있는 프로그램이 상용화진행중이다.

터널의 경우 현장계측과 막장의 암반평가(Face mapping) 자료를 근거로 다음 시공단계의 안정성을 예측하면서 성공적으로 공사완료한 한강의 하저터널 시공사례를 소개하였다.

### 4.6.1 도심지 지반굴착분야

현장에서 역해석과 안전관리분석이 가능한 통합안전관리 시스템이 개발되어 상품화 준비를 하고 있다. 현장계측자료를 실시간으로 분석하여 현장에서 즉시 안정성을 평가할 수 있으며 재해석과 다음 단계의 시공안정성을 예측할 수 있는 중요한 기능을 갖춘 프로그램이다.

간략한 통합 안전관리 System 운영도는 그림 25와 같다.

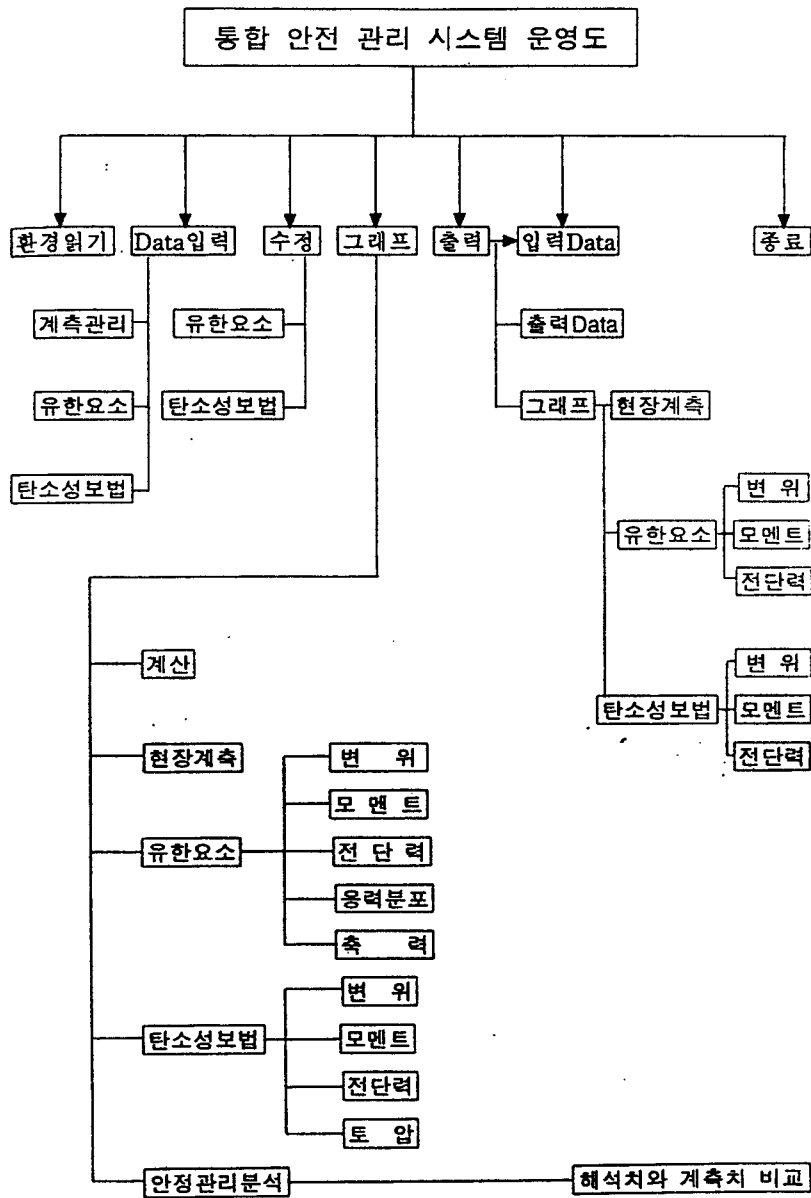


그림 25. 통합 안전관리 System 운영도

도심지 지반굴착시 인접구조물의 보호와 손상기준 방법의 제시는 현실적인 문제점의 해결책으로 정보 화시공의 다음 연구분야일 것이다.

철골 또는 철근 Concrete Frame 건물과 벽돌 건물 종류로 나누어 현장자료를 분석하여 건물의 강성 (길이/높이)비율에 따른 건물의 손상정도를 그림 26에 나타내었다.

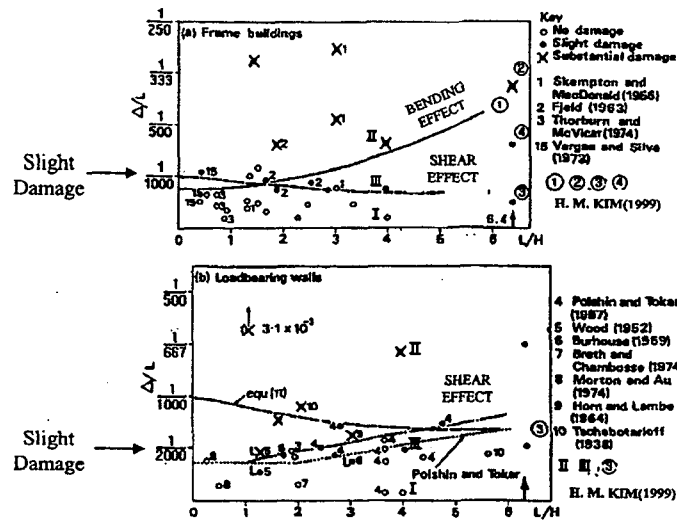


그림 26. 건물의 강성(길이/높이)비율에 따른 건물의 손상정도

위 그림 26에서 Frame 건물은 강성의 감소에 따라 약간의 손상은 각변위 1/1000로 일정한 반면 (Shear 효과), 상당한 손상의 현상은 곡선을 나타내며 Bending 효과의 중요성을 보이고 있다. 또한 벽돌 건물은 강성이 (L/H)감소됨에 따라 약간의 손상경우는 수평선을 나타내므로써 전단 발생과정에 중요한 요인임을 알 수 있다. 이러한 자료는 건물의 종류와 상태에 따라 건물손상 발생과정을 예측하고 이러한 부위에 예측장치를 집중시켜서 보다 정확한 손상 영향을 평가하고자 하였다.

그림 27은 지반침하로 인한 벽돌건물의 손상 발생과정을 수치해석과 대형모형실험으로 검증하고자 하는 국제공동연구의 일부이다.

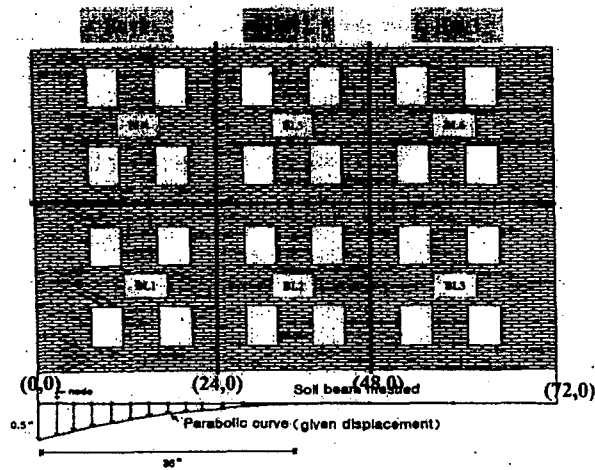


그림 27. 지반침하로 인한 벽돌건물의 손상 Mechanism

건물의 부위별 각변위와 인장균열크기의 변화는 그림 28의 도표에 나타내므로써 손상정도와 그 변화를 판정하고자 하였다.

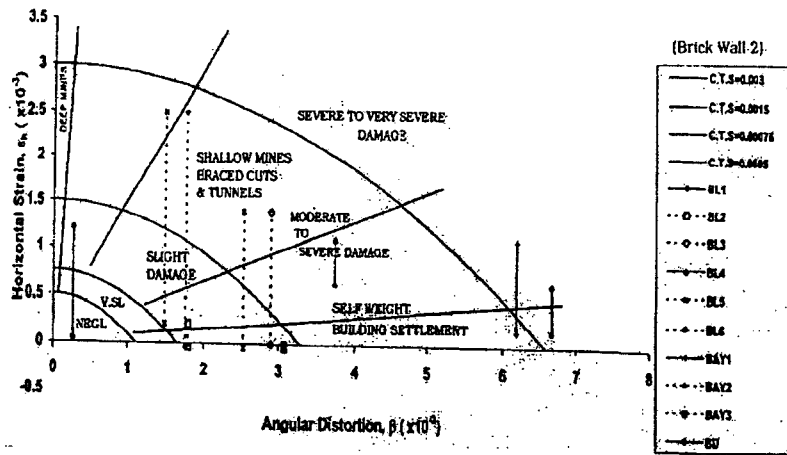


그림 28. 구조물의 손상정도 및 변화 판정

이러한 건물손상 발생과정을 수치해석과 모형실험으로 관리기준을 작성하고 그 결과를 현장관측자료로 검증하였을 때 이러한 건물의 손상판정기준에 대한 보다 현실적이고 신뢰성 있는 자료는 건물보호와 정보화시공이란 분야에 훌륭한 지침이 될 것이다.

건물의 강성과 지반의 조건이 고려되고 건물의 무게와 흙-구조물 상관관계를 3차원으로 모델화 할 수 있는 수치해석 프로그램이 개발되고 있다. 이러한 프로그램들은 벽체-지반-건물의 거동을 함께 예측하고, 계측결과와 비교하여 필요시에 적절한 조치를 취할 수 있는 정보화 시공 분야에 크게 기여하게 될 것이다.

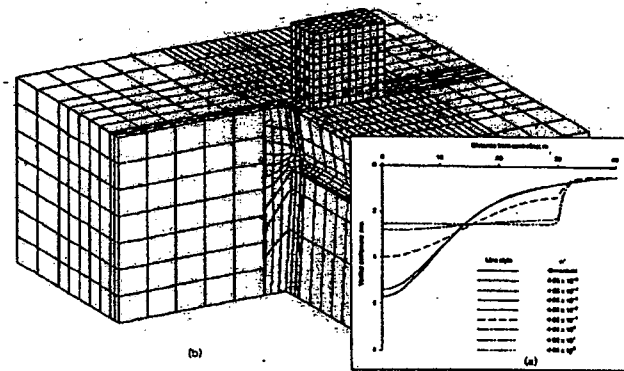


그림 29. 건물손상평가를 위한 3차원 해석프로그램

#### 4.6.2 터널 분야

국내 최초로 건설된 장대하저 터널인 여의도와 마포를 잇는 약 1.3 km의 한강하저터널은 그간 안전성 문제로 국내의 모든 토목인들의 관심이 집중되었던 어려운 공사였다.

92년 10월 10일 터널 굴착을 시작하여 96년 7월에 완료된 이 터널은 단선병렬로 굴착시 직경 7.7m Concrete Lining 완료 후 직경 6.3m로 NATM 공법을 적용하였으며, 터널의 종단면도 및 평면도는 그림 30과 같다

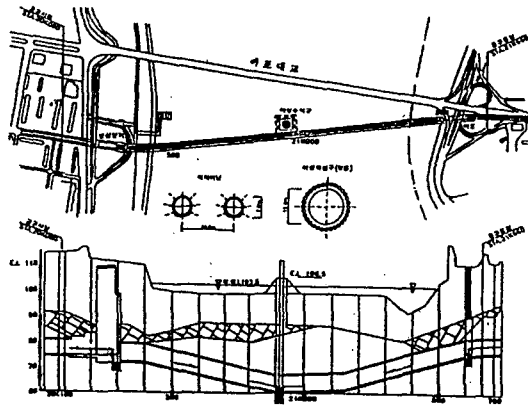


그림 30. 여의도 하저터널의 종단면도 및 평면도

한강 바닥에서 불과 16~30m의 얇은 심도로 건설예정이었던 하저터널은 당초 예상과는 달리 풍화대가 깊고, 단층 및 파쇄대, Gauge를 협재하는 절리면의 발달 등 지질구조가 복잡하고 심하게 교란되어 있어 공학적으로 거동의 예측이 용이하지 않았다.

93년 현장을 방문하였다가 담당자의 역해석 요청을 받았다. 일본의 전문회사에서 위험(Risk)이 많기 때문에 자문하기가 어렵다고 하는데 국내 설계 계산서(FEM)로는 충분히 안전하다는 예측이 제시되고 있어 어떻게 하면 좋으냐는 질문이었다. 본인 역시 하저터널 설계나 역해석 경험이 없는데다 만약의 사고에 의한 한강물의 유입을 어떻게 처리할 것인가? 사고시 피해는 경제적, 사회적, 국가적으로 어디까지 파급될 것인가? 사고 확률과 공사 안전율이 과연 어느 시공 시점에서 얼마가 될 것인가? 이러한 질문이 머리를 가득 메운채 아무 생각을 할 수 없었다. 그러나 어떻게 하든 매 시공단계마다 터널 주변 어느 부위에서 위험한 안전율이 발생되는지는 예측해 주기로 약속하고 돌아왔다.

현장계측자료와 시공중 노출되는 막장의 조사를 토대로 터널의 안전성을 평가하기로 하고, 이를 효과적으로 모델링 할 수 있는 Hoek-Brown 암반 모델을 이용한 비선형 유한요소 터널해석으로 들어갔다. 그 당시 완벽한 역해석과 정보화 시공은 아닐지라도 "Learn as you go"로 시공하면서, 정확도를 높여가는 현장암반 조건을 최대한 고려하면서 경험치가 포함된 공사 안전기법을 사용하였다. 시도된 몇 개의 단면 설계에서 이 방법은 기존 Mohr-Coulomb 모델을 사용한 FEM 보다 월등히 현장계측치에 잘 접근하고 있었으며 그 해석과 분석자료는 지반공학회 창립 10주년 기념 및 '94 가을 학술발표회 논문집의 "Hoek-Brown 암반 모델을 이용한 비선형 유한요소 터널해석 및 평가"에 수록하였다.

이러한 현장암반 모델을 성공적으로 적용할 수 있었던 배경에는 굴착전 지반상태를 정확히 판단하기 위한 수평탐사 및 막장조사등을 세밀하게 분석평가 할 수 있는 전문가 체계를 완벽하게 갖추고 있었기 때문이다.

송근백, 우종태의 한강 하저터널 구조물 설계 및 시공(II)에 의하면 하저터널 NATM공법에 대하여 일본전문가들의 견해를 다음과 같이 실고있다.

"공사여건이 어려운 한강하저에서 보조터널을 삭제한 것은 매우 과감한 결정인 것 같으며 보조터널없이 무난하게 공사를 완료했다는 것은 상당한 기술수준을 갖추고 있으며, 또한 정확한 지반예측과 계측자료, 현장암반모델 해석을 통한 안전을 분포를 토대로 적절한 굴착방법의 변경과 보강공법의 적용으로 정보화시공의 원칙을 가장 잘 준수하였다고 사료되는 현장이었다."

또한 하저터널 공사시행시에는 학계와 업계, 연구원등으로 구성된 전문가 기술자문회의를 통하여 문제점 제시 및 정확한 판단으로 안전이 전제된 경제적인 공법을 결정하였다. 물론 소규모 붕락(낙반)사고는 몇차례 발생되어 공사 참여자들을 극도로 긴장시켰으며 그때마다 모두가 혼연일체가 되어 적극적인



응급조치와 복구공사로 위기상황을 모면하였으며, 순간순간 대자연의 엄숙함 앞에 인간한계의 나약함을 느낄때도 있었다고 회고하고 있다(송근백, 우종태).

하저터널의 현장사무실의 대자보에는 "지신이시여 부디 잠을 깨지마소서" 라는 문구가 등골을 오싹하게 만들었으며, 특히 시공사의 책임자인 김제원 상무(삼부토건)와 이용재 소장은 터널안전의 책임자로서 1년 365일 단 한시도 현장을 못 떠났던 모습들이 본인의 기억에서 영원히 기억될 것이다.

#### 4.6.3 행정적, 제도적 부실공사의 개선방향

국내의 설계, 시공 일괄도급 (Turn Key) 발주방식의 문제점들은 이미 몇가지 언급하였으나 한국 건설감리협회에서 발간한 내용중 "부실공사의 원인과 대책" 이란 주제에서 건설안전의 구성 및 관리업무내용을 그림 31 및 그림 32에 설명하고 있다(김학수).

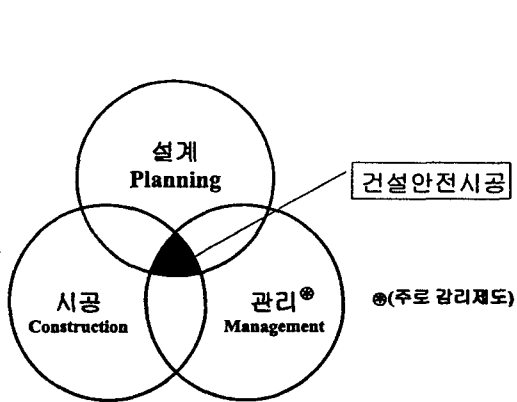


그림 31. 건설안전의 구성

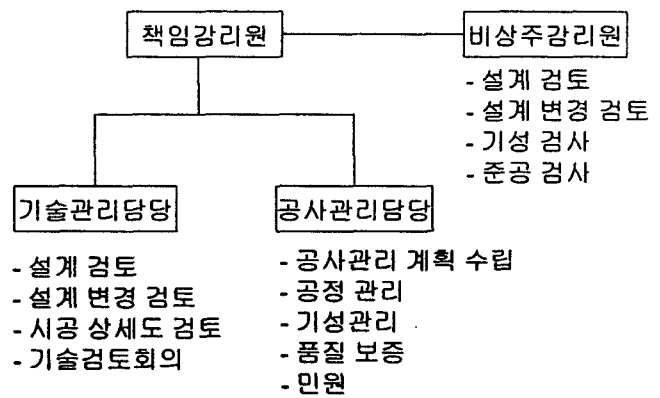


그림 32. 감리자 기구조직의 업무분담

건설안전의 실현은 "기술이 우선시 되고 기술에 바탕을 둔 설계 시공, 관리가 조화를 이루면서 각각의 과정이 유기적으로 발전되어야 한다" 라고 강조하고 있다.

또한 부실공사의 요인으로는

- 1) 설계 단계 부실
- 2) 시공단계 부실 --- 공사감리 과정의 부실\*
- 3) 시설물 유지관리 단계의 부실

공사현장의 세부적 부실 요인으로는

- 1) 공사비 부족 투입
- 2) 부적당한 자재와 가설재 사용
- 3) 시공기술부 - 관리자의 기술 부족  
기능공의 기술 부족
- 4) 관리, 감독자의 경험부족과 기술부족
- 5) 기후, 온도 등 자연환경에 대한 부적절한 대응
- 6) 기타 사후 관리 부적합

관리 (Management)를 주로 감리제도를 통해 고려해 볼때에 이러한 제도 운영상 또는 관행면에서 여러 문제점들을 아래와 같이 요약하고 있다.

- 감리업무수행상 중복서류 등 문서처리와 일반행정업무가 32%차지
- 설계 변경 업무가 21%
  - 사전 조사 및 타당성 분석 등 절차미진
  - 현장여건과 설계도서의 부합되지 않음
  - 시공과정에서 설계변경 및 역해석 검토
- 책임과 권한 문제에서
  - 중요한 결정사항은 담당공무원에 의해 결정
  - 감리사가 시공업체보다 열세에 놓여 본연의 기능수행이 불가
- 공사기간 단축 등의 압박감으로 감리업무의 불충분
- 감리원 자질 미흡과 인력부족
  - 감리 경력5년 미만 45%
  - 공중에 맞는 전문가 배치 미흡
  - 인사이동 등 업무 연속성 상실

상기의 관리영역 외에 철저한 계측을 통한 정보화시공의 적용으로 안전성을 검토하고 이 결과에 대하여 여러명의 전문가로 구성된 결정기관을 통해 기술적 보안을 강화하는 제도도입이 바람직하다. 또한 유사공사현장의 설계, 시공기록 및 문헌을 충분히 연구하여 위험의 가능성을 사전에 준비하여 대처하는 방안이 일반화 되길 바란다.

## 5. 결 론

지난 세기에 발생되었던 지반굴착, 터널 및 댐과 관련된 사고들을 고찰해 보며 이러한 건설사고들과 정보화시공의 연계성을 분석하였다. 이러한 건설사고의 경험들을 토대로 앞으로의 정보화시공의 개선방향모색에 도움이 되고자 다음과 같은 몇 가지 결론을 제시하고자 한다.

- 1) 정보화시공에 대한 체계적인 방향설정은 이미 1969년 9회 Rankine Lecture에서 Peck 교수에 의하여 명확하게 제시된 바 있다. 그러나 계측기술의 향상과 개선된 해석 프로그램 기법의 활용에도 불구하고 만족할 만한 수준의 정보화시공이 이루어질 수 없었던 문제점들을 집중 검토하였다.
- 2) 지난 세기의 국내외의 건설사고들에 대한 정책적, 기술적 혹은 안전관리 차원에서 사고의 원인을 명확하게 규명하고, 차후에 합리적이고 안전한 공사를 할 수 있는 대책방안들과 개선사항들을 각 분야 별로 제시하였다.
- 3) 머지않아 정보화 시공분야는 현장의 지반조건, 시공여건, 설계보완점이 계측을 통하여 확인되고, 즉시 재해석, 역해석 과정을 거쳐 현장에서 적절한 조치를 취할 수 있어야 될 것이며, 보다 현실적인 다음 공사 단계의 안전예측을 할 수 있는 안전관리 통합 프로그램이 각 현장마다 설치, 운영될것이다.
- 4) 지난 세기의 값진 사고경험과 수준 높은 사고 예측의 설계 기술을 적용하여 계측자료의 활용화를 극대화해야 될 것이다. 그리고 계측결과를 이용한 역해석 수행과 정확한 안전성 예측을 근거로 하는 정보화시공을 선도할 수 있는 전문가들을 양성할 수 있도록 건설업계가 특단의 조치를 취할 필요가 있다.

## 참고문헌

1. 김학문(1994) "도심지 지하굴착의 문제점과 개선방향" 한국지반공학회 추계학술발표회 논문집, pp. 139-148.
2. 김학문(1997) "정보화 시공을 적용한 도심지 지반굴착" '97 정보화시공. 지반굴착위원회 학술발표회, pp.5-56.
3. 서울지하철건설본부(1996) "한강하저터널 건설현황", "한강하저터널 구조물설계 및 시공"
4. 손준익(1992) "계측과 정보화시공" 굴착 및 흙막이 공법, 지반공학 시리즈3, 한국지반공학회, pp. 389-446.
5. 송정락, 김성인, 박광준, 유태성(1991) "사면안정해석과 댐거동 분석을 통한 Carsington Dam 파괴의 고찰", 한국지반공학회, 추계학술발표회 논문집, pp.87-102.
6. 이봉열, 김광진, 김학문(1994) "Hoek-Brown 암반모델을 이용한 비선형 유한요소 터널해석 및 평가", 한국지반공학회, 창립10주년기념 및 '94가을학술발표회 논문집 pp.235-244.
7. 이은수, 남준성, 이승호 공역(1994) "토목,건축 현장계측계획", 탐구문화사 pp.2-10.
8. 중동대성교회 신축공사 토류가시설 사고에 대한 안전진단보고서.
9. 한국건설감리협회(1999) "감리현장관리기법실무 감리원과정(토목)"
10. Canadian Geotechnical Society(1985) "Foundation Engineering Manual " 2nd Ed.
11. Dunichiff & Green (1988) Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance, John Willy & Son.
12. Health and Safety Executive(1994) "Safety of New Austrian Tunnelling Method"
13. Lambe.T.W & Whitman. R.V(1969) "Soil Mechanics" John Willy & Son, pp.16-17.
14. Terzaghi, K. & Peck, R.(1967) "Soil Mechanics in Engineering Practice, John Willey & Sons, 2nd Ed. pp.627-681.
15. The Institution of Civil Engineers(1996) "The observational method in geotechnical engineering"