

도심지 지반굴착과 흙막이 벽체의 현재와 미래



김 학 문

단국대학교
토목환경공학과 명예교수
(khm1028@dankook.ac.kr)

서론

인구증가와 도시의 확대로 지하공간 개발의 필요성이 점차 증대됨에 따라 도심지 지반굴착은 더욱 관심이 고조되고 있는 분야이며, 특히, 최근에 연쇄적으로 발생되고 있는 싱크홀 공포로 인해 그 예방책 마련은 매우 시급하게 되었다. 우리나라의 경우 대부분이 도심지 지하공사(지하철, 터널, 지하매설물 등) 중 발생하는 문제는 흙막이 벽체의 강성, 근입심도, 지지구조 특성, 변형관리, 누수상태, 뒷채움 재료 및 공법과 주변 지하수위의 변화 등이 주 원인이며, 그 결과 주변지반 변형(침하)으로 인한 지하시설물 및 지상구조물(건물, 공장, 철도, 교량 등)의 손상 등을 예상할 수 있다.

이러한 도심지 굴착 흙막이 공사의 부실은, 지하공간 개발이 공포의 대상으로 인식되는 문제가 있으며,

지하공간 안전관리를 총괄하는 “지하공간 안전관리에 관한 특별법”을 제정하여 지하안전 관련 연구개발과 방지대책을 정부차원에서 마련할 계획으로 있다.

도심지 지반굴착시 선정되는 흙막이 공법은 지반의 붕괴나 주변지반침하로 인한 인접건물이나 지하 매설물(상하수도관, Gas관, 전력구, 통신구 등)의 안전에 영향을 미치기 때문에 이 분야에 대한 계획, 설계, 시공, 감리, 유지보수, 환경영향 등 각 단계별로 심도 있는 토론과 평가가 금번 특집을 통하여 소개되었으면 한다.

도심지 지반굴착과 흙막이 공법을 성공적으로 수행하기 위하여 지반조사의 적정성, 지반 입력자료의 적합성, 설계토압과 모델의 합리성, 흙막이 구조의 안정성, 인접구조물과 지하매설물의 거동을 시공단계별로 평가하고 보호할 수 있는 신뢰도 높은 정보화 시공의

적용 등이 종합적으로 연계되어야 할 것이다.

1. 도심지 지반굴착과 정보화 시공

도심지 지반굴착은 많은 불확실 요소와 함께 대형사고의 위험이 항상 잠재되어 있으므로, 도심지 근접시공에서는 흙막이 구조물뿐만 아니라 주변지반과 인접 구조물을 보호하고 안전을 중시하는 설계, 시공 및 감리가 적용되어야 한다.

설계 및 시공과정에서의 모든 예측 값은 수 많은 가정 하에서 산정되므로 실제거동과 상이하며, 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 계측과 역해석을 기본으로 하는 정보화시공을 (The Observational Method of Construction) 수행함으로써 인구 및 건물 밀집지역에서 발생할 수 있는 엄청난 인명과 재산피해를 예방할 수 있다.

1.1 흙막이 공법의 선정과 흐름도 (계측과 역해석 적용)

그림 1에서 흙막이 굴착공법의 선정은, 우선 지반조건에 맞는 굴착방법과 주변 구조물의 규모 및 상태에 따른 보호Level이 우선시 되고 소음, 진동, 분진 등 환경영향 평가를 만족시키는 흐름으로 가야 한다.

일반적으로 도심지 굴착의 흙막이 가시설에서는 가

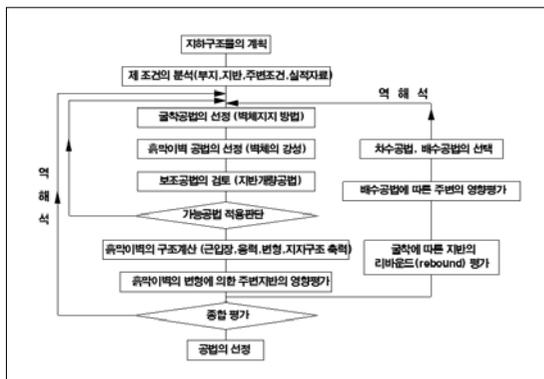


그림 1. 흙막이 공법의 흐름도(인접구조물 안정성)

시설 구조물의 역할과 안정성 및 경제성을 고려하여 아래의 3가지 선택이 있다고 본다.

- 흙막이 가시설

가시설 기능만을 만족하므로, 설치와 철거시 공기 및 공사비가 높고 사고위험이 가장 크다. 영구 구조물 시공시 장애요인이 될 수 있다.

- 흙막이 가시설 + 일부 영구지하구조물(Beam Girder사용)

일부 가시설과 일부 영구지하구조물을 활용한 도심지 근접시공으로 경제성, 안정성, 공기 및 작업장 공간 확보에 도움이 크다.

- 영구지하구조물을 흙막이 가시설로 활용

최근 해외에서 많이 활용되고 있는 Top-Down(역타공법) 또는 Hybrid공법으로 공기, 공사비, 시공공간 확보와 안정성에서 가장 뛰어난 공법으로 부각되고 있다.

1.2 도심지내 흙막이 구조물 설계시 고려사항

도심지내의 흙막이 구조물 설계시 고려사항으로는 그림 2의 6가지로 요약할 수 있다. 가장 중요한 공법선정은 1-1에서 방향을 제시하였지만, 공사의 규모, 주변구조물의 상태, 지반조건, 경제성, 안정성, 시공성 등의 복합적인 요인을 고려해야 된다. 특히, 주변구조물의 거동예측과 시공단계별 안정성 평가는 정보화시

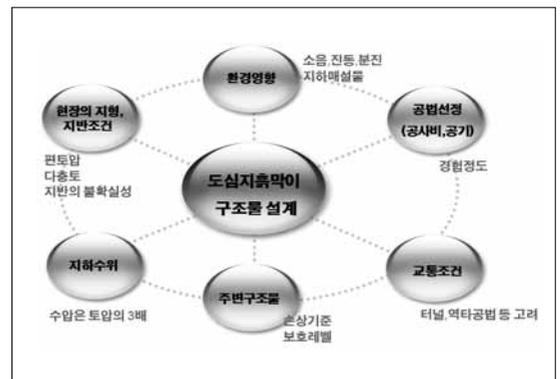


그림 2. 도심지내 흙막이 구조물 설계시 고려사항

공을 통하여 이루어져야한다.

지하수위의 변화에 민감해야 되는 이유는, 수위 1m 상승은 물속에서 3m 높이의 토압과 유사할 정도로 수압의 영향이 안정성에 악영향을 미침을 알 수 있다.

1.3 적용 토압

굴착시 적용되는 토압들은 Rankine이론토압, Coulomb토압, Peck 경험토압(Terzaghi & Peck 토압), 벽체변위에 따른 토압, FEM, FDM 등 일반적으로 6가지 토압이 사용되며, 세부내용은 아래와 같다.

- Rankine이론토압 : 최대토압(P_p)과 최소토압(P_a)으로 모든 토압의 경계조건(boundary condition)을 제시하는 소성토압(붕괴시)이다.
- Coulomb토압 : 불규칙한 배면지반 및 경사지반인 경우와, 벽체와 지반 간의 마찰력을 고려할 경우 사용한다.
- Peck경험토압 : 굴착과 지지구조 설치가 완료된 후의 토압분포로 굴착깊이가 6m 이상일때와 폭이 좁으며 버팀보로 지지한 버팀굴착공법에서 적용되는 계측 토압이다.
수압은 고려하지 않으므로 차수를 겸한 흠막이벽체인 경우에는 수압을 별도로 포함시킨다.

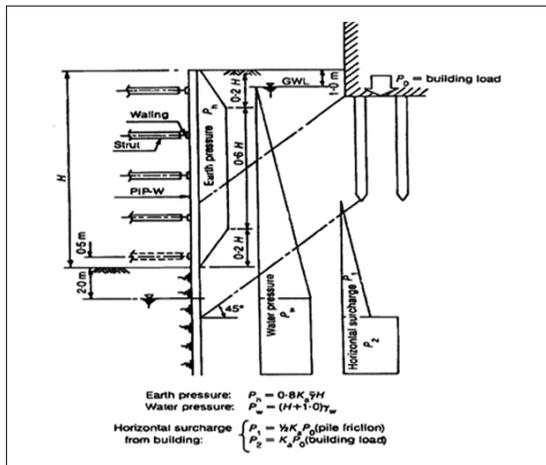


그림 3. 토류벽체 설계시 고려된 수압, 토압, 건물하중

■ 벽체변위에 따른 토압 : 탄소성보법 해석프로그램의 가장핵심토압으로 벽체변위량에 따른 토압을 산정할 수 있고, 인접구조물의 손상평가에 가장 중요한 역할을 하는 토압이다.

■ FEM과 FDM : 배면지반과 구조물을 연속체로 모델화 할 수 있는 유한요소 및 유한차분법프로그램으로, 인접건물이나 지하매설물의 거동을 시공 단계별로 예측하여 안정성 평가에 활용된다.

그림 3은 Peck의 경험토압을 활용한 도심지 근접시 공사레이다(Hong Kong).

1.4 선행하중과 벽체배면에 작용하는 각종 토압의 비교분석

배면지반의 건물과 매설물의 보호를 위해서 그림 4와 같이 일본에서는 설계하중의 50%, 홍콩에서는 50%~70%의 추가하중으로 배면지반 쪽으로 압축력을 작용시켜 벽체의 수평변위를 억제하는데 활용되고 있다. 그림에서와 같이 선행하중을 증가시키면 토압이 증가되지만, 벽체의 수평변위나 지표침하하는 감소되는 것을 알 수 있다.

그림 5에서는 흠막이 배면에 작용되는 토압이 벽체 강성과 시공단계, 시공방법, 지반의 종류별로 변화하는

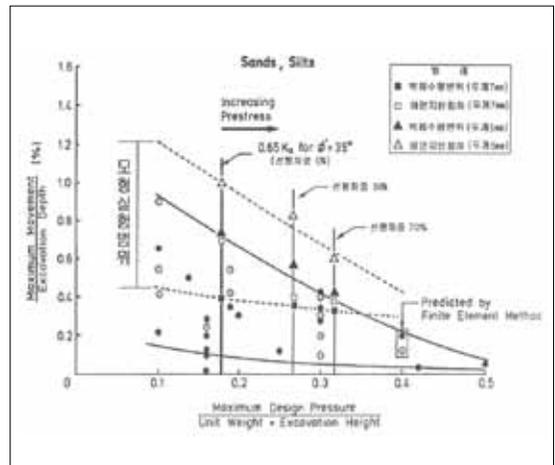


그림 4. 선행하중에 따른 벽체변위와 지표침하의 감소효과

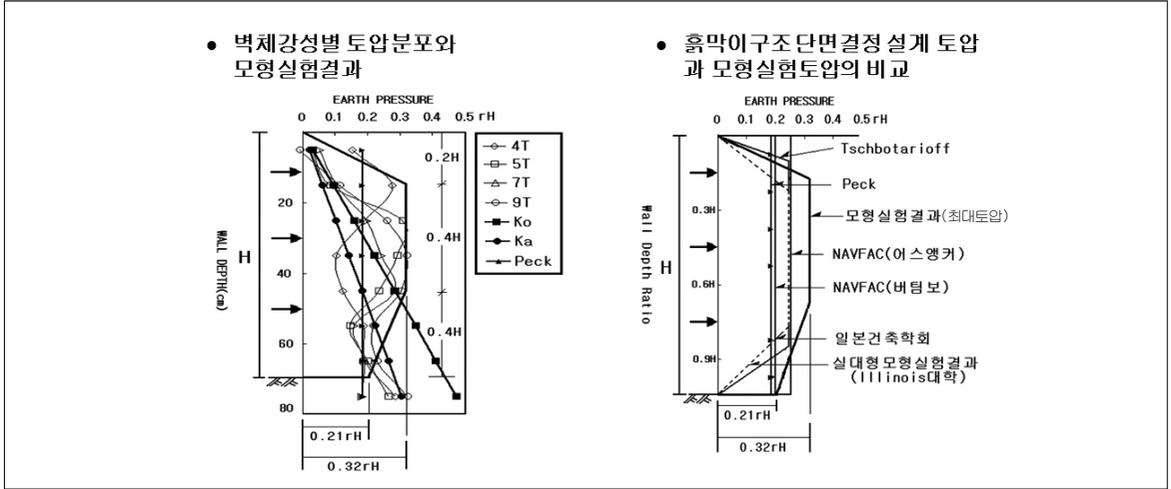


그림 5. 벽체 배면에 작용되는 토압분포의 비교분석

것을 모형실험과 기존토압으로 비교평가 하였다.

토압의 크기순서는 아래와 같다.

Peck 경험토압 < NAVFAC(버팀보) < NAVFA(어스 앵커) < 모형실험 최대토압 < 선형하중 적용시 토압
 그러므로 선형 하중시 토압이 도심지 흙막이 벽체설 계에 가장 안전한 조건을 제시한다.

2. 인접구조물 보호대책과 안정성검토

인접구조물 보호에는 그림 6에서와 같이 벽체의 강

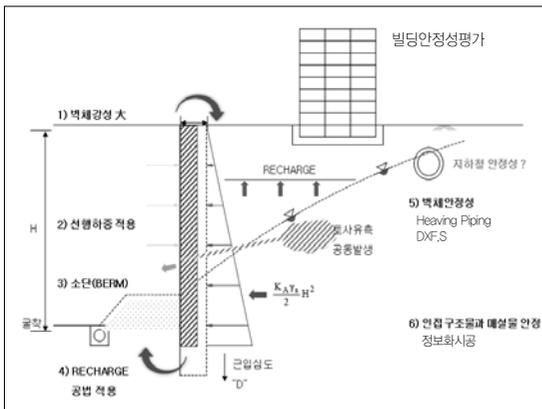


그림 6. 인접구조물과 지하매설물 보호방법

성이 크면 클수록 안전하게 되는 것을 알 수 있고, 선형 하중을 반드시 적용하며, 소단설치의 효과로 토압을 반감시킴으로써 안전율을 2배 정도 올릴 수 있으며, 또한, Recharge공법을 적용함으로써 배면구조물의 뒤틀림이나 또는 각변위 손상을 예방할 수 있다.

벽체안정성은 연약점도의 경우 Heaving, 사질토의 경우 Piping의 안전성을 시공단계별로 평가하고, 근입심도(D)의 경우에는 사고 후의 뗏가(VE, Value Engineering)에 따라 별도의 안전율(F.S)을 증가시킬 필요가 있다.

인접구조물과 매설물 안정에서는 시공단계별 계측과 역해석을 진행하여 관리기준치와 비교하고 안정성을 확보하는 정보화시공을 수행하여야 한다. 문제시에 즉각 조치할 수 있는 24시간 계측 분석 및 안전망시스템가동이 요구된다.

3. 지반굴착과 지하수 영향(싱크홀의 주원인)

지하수 변화에 따라 설계와 정보화 시공에 그림 7과 같이 아래의 7가지 요소를 고려해야 한다.

- 계절적 변화
- 1~2m 안전율 높이 적용

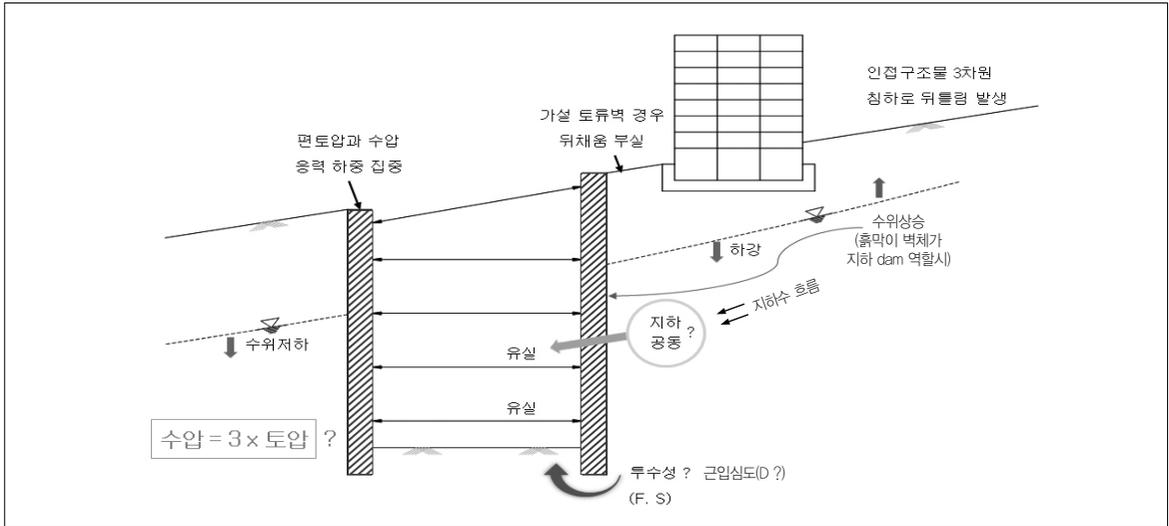


그림 7. 지반굴착과 지하수 거동

- 지반의 불확실성(F,S 추가검토), 피압수 검토
- 벽체차수성 문제
- 근입심도 문제(벽체 하부 지하수 유출)
- 지하수 및 토사의 이동 방지대책
- 뒷채움 재료의 체적변화 또는 유실문제

4. 가시설과 영구구조물의 병행 (Hybrid 공법, 역타+순타 공법사용)

지하층 슬라브나 빔을 활용하여 시공 중에는 가시설 역할을 하게하고 시공 후에는 그림 8과 같이 영구적으로 사용하는 방식(그림 8)으로 역타공법 또는 Top-down 공법이라고도 한다. 시공중에 영구지하 구조물을 가시설 역할과 작업장 기능을 하는 융복합 공법으로 공사비나 공기 및 안정성 측면에서 가장 뛰어난 공법이며, 미래의 도심지 굴착공사시 가장 경쟁력이 뛰어나므로 주목해야 될 공법이다.

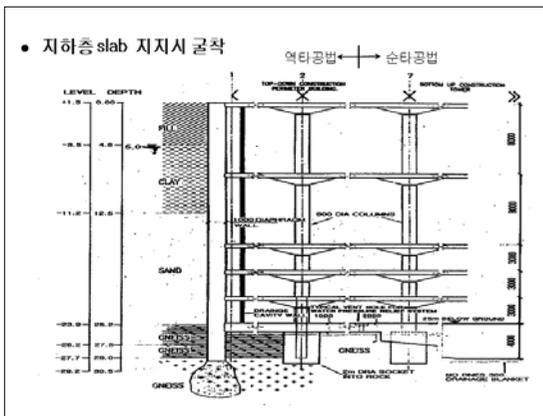


그림 8. 가시설과 영구적인 지하구조물 공법

5. 인접구조물 안정성 평가 및 문제시의 복원공법

5.1 D-ROG (Digitalized Restoring Of Grouting) 공법

일반적인 토목공사에서 그라우팅에 의한 지반 용기는 지표면이나 주변 지반에 악영향을 주기 때문에 지양되고 있으나, D-ROG 공법은 그라우팅에 의한 지반 용기를 정밀하게 제어할 수 있어, 기울어진 건물이나 부등침하한 구조물의 복원이 가능하다.

D-ROG 공법은 구조물 기초 하부 지반에 2종의 주입재를 차례로 주입하여 기울어진 구조물을 복원하는

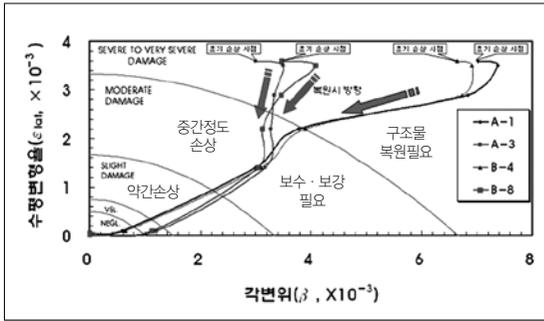


그림 9. 인접구조물 안정성 평가도표(복원 메커니즘 적용)

기술이다(지반보강 S그라우팅 후 복원용 R그라우팅).

5.2 Jacking up 공법

D-ROG공법보다 2~3배정도 시공비가 높고, 주로 대규모 구조물의 복원에 사용되며 Pile이나 지하 Beam을 보강하여 구조물을 들어 올리는 공법이다.

5.3. 인접구조물 안정성 평가도표

그림 9의 도표에 의해 각변위와 수평변형을 측정이 가능하며 안정성 평가를 5단계로 분류하고 건물의 안정성을 평가할 수 있다.

- A등급(NEGL), 손상없음
- B등급(VSL), 매우약간손상
- C등급(SLIGHT DAMAGE), 약간손상
- D등급(MODERATE DAMAGE), 중간정도 손상
- E등급(SEVERE TOV, SEVERE DAMAGE), 매우손상-구조물 복원필요

6. 정보화시공

6.1 정보화시공 개념도

정보화시공(그림 10)의 현재(좌측)와 미래(우측)에 관한 도표와 흐름도를 나타내었다. 해외의 경우 시공 단계별 인접건물의 안정성 평가와 검증은 실무에 일반적으로 사용되고 있다.

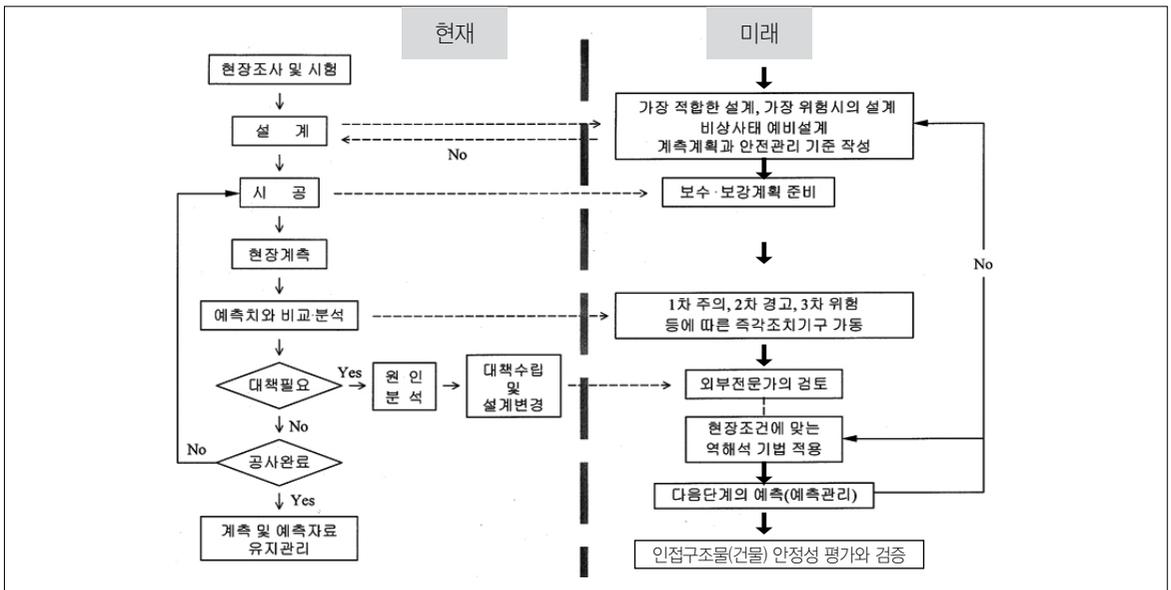


그림 10. 정보화시공 개념도

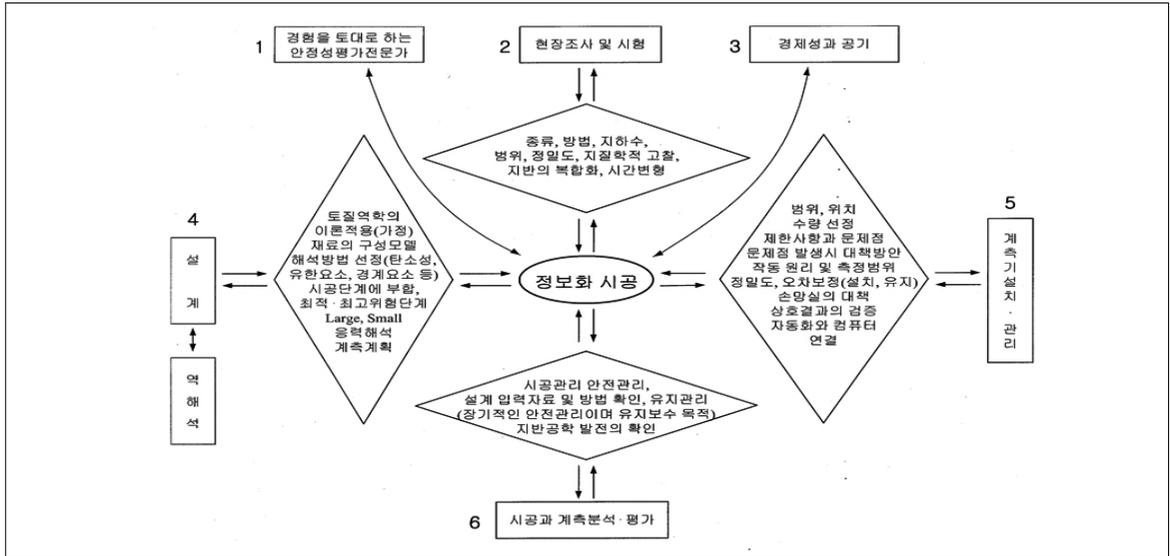


그림 11. 정보화 시공에 연관된 요소

6.2 정보화시공의 연관요소

정보화시공의 연관요소는 그림 11과 같이 지반조사, 설계, 경제성과 공기, 시공과 계측, 역해석과 안정성 평가와 검증 등 6가지 요소로 연계하여 나타내었다.

7. 계측계획의 개선방안

계측위치는 구조해석 결과와 시공상의 중요부위 등 큰 변형이 예측되는 단면을 선정하여야 하며, 다음과 같은 사항들에 대하여 유의할 필요가 있다.

- 1) 설계의 불확실성에 의해 결정되는 계측항목에 대해서는 그 요인에 따라 배치한다.
- 2) 조기에 시공되는 위치에 우선적으로 배치하며 계측결과는 Feed back 할 수 있는 장소로 한다.
- 3) 계측결과의 해석상 상호 관련된 계측항목에 대응하는 계기는 가능한 한 근접시켜 배치한다.
- 4) 계기의 설치 및 배선이 확실히 행해질 수 있는 위치로 한다(시공 중 손상실 가능성 검토).

- 5) 보링 등으로 지반조건이 충분히 파악되고 있는 장소로 한다(설계와 계측단면 반드시 일치).
- 6) 일반적으로 토류벽 지지구조가 전환되는 구간은 구조물의 응력체계가 상이한 상태가 되므로 주의 깊은 관찰과 집중적인 계측관리가 요구된다.
(예 : 버팀부구간 - Earth Anchor 구간)
- 7) 우각부에서 토류벽체는 모서리 부분이 현장 내부로 이탈하려는 힘이 발생하게 되므로 구조적으로 취약부가 되며, 시공상 연결부가 되므로 철저한 체크가 이루어져야 한다.
- 8) 굴착심도가 깊은 곳과 지층 조건이 매우 불량한 구간에는 계측기기를 우선적으로 배치하여 관리한다.
- 9) 인접건물이 공사영향권 내에 있는 경우 건물의 안전관리 및 민원에 대한 공학적인 자료를 제공하기 위한 계측기기를 추가적으로 배치한다(흙막이 벽체-지반거동-인접건물의 거동을 시공 단계별로 연계하여 분석하여 안정성 검증).

결 론

도심지 지반 굴착에 따른 인접구조물의 안정성 검토 및 지하수 변화예측에서는 흙막이 구조물, 인접구조물 그리고 지하수 영향의 각각에 대하여 계획단계, 설계와 시공단계에서 안정성, 경제성, 공법의 합리성을 철저히 비교·검토 후 공법이 선정되고, 정보화 시공을 통해 검증 되어야 한다.

1) 흙막이구조물

- 가시설 흙막이 공법의 전반적인 안정성 검토
- 지반조사 적정성과 입력자료의 안전성 점검
- 지반거동과 인접구조물 안정성을 시공단계별로 연계검토
- 지하수거동과 인접구조물 안정성 연계검토
- 지반조건별 유사 사고사례의 분석활용
- 사고 예측기법 적용으로 대책공법 준비

2) 인접구조물

- 가장 민감한 민원의 대상으로 사고 후 대가는 막대함
- 공사전 구조물 상태에 대한 현황 조사 철저
- 흙막이 구조물 시공단계별 인접구조물의 손상 예측(휨손상, 전단파괴, Tilt 문제 발생 가능성)
- 설계시 예측되는 손상시나리오에 따른 계측기 종류 및 계측위치 선정(시공중 안정성 확인)

3) 지하수

- 수압은 토압의 3배 정도의 크기로, 지반굴착에서 사고의 주원(수압 1m up ⇨ 물속 토압 3m)이다.
- 공사 전, 중, 후의 지하수 변화를 정확히 예측하여 예상되는 사고의 대책 제시
- 지하수 저하로 인한 인접구조물 손상은 광범위하고 사고시 인명 재산피해 상당함
- 지하수 유출과 토사 유출시 배면지반 공동(싱크홀) 발생으로 도심지 기능 악영향
- Recharge 공법 적용으로 손상예방

4) 융복합 미래의 흙막이구조물

- 가시설 토류구조물을 영구 지하구조물로 대체함으로써 (Top-Down, 역타공법 적용) 가시설 토류구조물의 설치와 제거시 사고가능성, 공기감소, 경제성과 안정성 증가, 시공 중 작업 platform 제공 등 미래의 깊은 굴착과 도심지 굴착공법으로 적극 추천함.
- Full Top-Down, Partial Top-Down, Beam-Girder Top-Down, Slab on grade(ground) Top-Down, Partial Excavation Top-Down, Hybrid Beam Top-Down (P.C Beam, Pannel 사용) etc 공법 등을 적극 활용

5) 정보화 시공

- 지반굴착과 흙막이구조물에 대한 시공단계별 설계의 정확성, 시공의 안정성, 공법의 경제성을 계측과 역해석을 통하여 검증하는 과정
- 인접구조물의 안정성을 평가 관리하는 계측기술과 안전관리기술 적용
- 시공단계별 흙막이구조물, 지반거동과 인접구조물 안정성을 예측하고 평가할 수 있는 융복합 설계와 역해석 Computer Program을 활용하여 현장에서 안전관리, 공사관리, 공정관리, 경제성 검증이 가능하도록 개선, 보완할 수 있는 미래의 정보화 시공 Program 개발이 바람직하다.

참 고 문 헌

1. 김학문, 지반굴착흙막이공, 건설기술교육원, 2013.08
2. 김학문, 도심지 지반굴착 설계시 유의사항과 지하수 변화를 고려한 해석방법의 이해와 활용, MIDAS, 2015.05