

흙막이 구조물(IX)

이 종 규*

11. 近接 施工

11.1 개 요

지난 30여년간의 급격한 경제발전에 따라 도시지역에서는 기반시설(infra-structure)에 대한 개량작업이 가장 주된 과제로 떠오르게 되었다. 즉, 대도시로의 인구 집중과 용지 면적의 부족 현상은 대규모의 신속한 교통체계를 필요로 하게 되었고 고밀도화된 고층 빌딩의 신축은 주차면적 확보를 위한 지하공간의 이용을 필연적으로 요구하게 되었다.

새로운 기반시설의 건설은 그 나름대로의 필연성과 정당성을 가지고 있으나 기존 도시 지역에 소음, 진동, 분진 등의 악영향을 줄 뿐 아니라 지표수와 지하수의 오염, 지하수위의 저하, 수맥의 차단 및 지반변형으로 인한 인접 기존 구조물의 안정성에 나쁜 영향을 끼치는 등 보통 건설공해라 불리는 새로운 문제점을 대두시키게 되었다.

근접시공이란 위와 같이 공사과정에서 발생하는 건설공해를 최소화하면서 새로운 공사를 소기의 안전율로 시공하는 것을 뜻한다고 볼 수 있다. 따라서 지반공학적인 측면에서 볼 때 근접하여 새로운 굴착공사, 기초공사, 터널공사, 성토공사 및 지반개량공사에 있어 사람 및 인접구조물에 해로운 영향을 주지않고 더욱이

지중응력의 변화 또는 지반변형으로 안전성에 문제가 발생되지 않도록 세심한 배려속에 공사를 수행하는 것을 근접시공의 목적으로 생각할 수 있다.

그림 11.1은 근접시공으로 기존 인접 구조물의 안전성이 감소되는 여러 형태의 예를 나타낸다. 그림 11.1(a)는 토사구간에 쉘드공법으로 터널을 신설한 경우인데 지중응력 이완 및 지하수위의 감소로 지반변형이 발생되어 인접 기존 건물 기초의 안전성을 감소시킬 수 있다. 또, 그림 11.1(b)(c)(e)는 버팀 가설 토류벽을 사용하여 굴착하는 경우인데 토류벽 설치시의 진동 및 벽체의 변형에 따른 지반변형 또는 지하수위 감소로 인한 배면지반의 침하로 기존 얕은기초 및 말뚝기초의 안정성에 문제가 발생할 수 있는 경우를 보여준다.

또 그림 11.1(d)의 경우에는 굴착 공사로 기존 성토구간의 안전성이 감소되는 경우이고 그림 11.1(f)의 경우에는 절토로 인하여 기존 건물의 안정성이 감소되는 경우이다. 본 강좌에서는 근접시공의 여러 경우중에서도 가설토류벽을 사용하여 시행하는 굴착공사에 국한하여 설명한다.

11.2 지반 굴착에 따른 거동

보통의 건설공사에서는 축조되는 구조물의

* 정회원, 단국대학교 공과대학 토목공학과, 교수

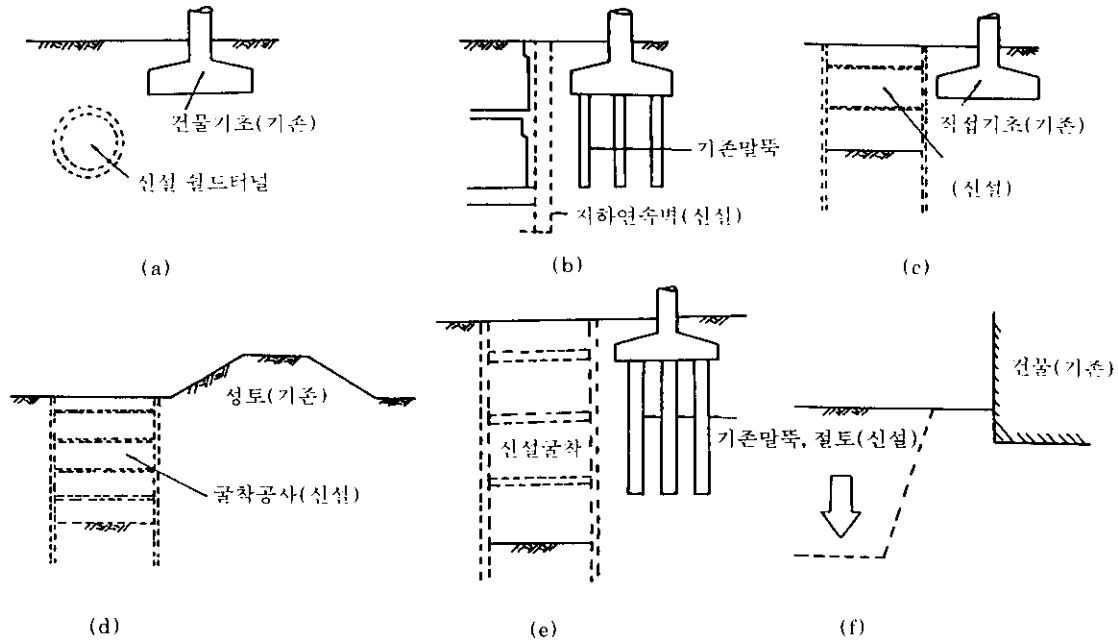


그림 11.1

안정성 확보가 주목적이 되지만 근접시공에서는 자체의 안정성은 물론 인접구조물에 끼치는 영향을 동시에 고려하여야 한다.

따라서 대상구조물만을 생각한다면 때때로 과대 설계처럼 보이기도 하지만 근본적으로 근접시공은 안정상태에 있는 인접구조물을 불안정한 상태로 변화 시킨다는데 그 문제점이 강조된다. 그림 11.2는 지반 굴착에 따른 여러 거동을 나타낸 것이다. 주된 지반거동은 토류벽체 변위에 따른 배면지반의 침하, 굴착저면의 heaving과 piping문제, 토류벽 사이로 배면지하수와 함께 유출되는 토사에 의한 지반손실(ground loss)문제 등이다.

또, 이들은 굴착을 위하여 가시설한 토류벽 및 지지구조 자체의 안정에 관계될 뿐만 아니라 그림 11.2에 보여주는 거동의 정도에 따라 기존구조물에는 침하, 경사, 균열 등의 피해가 직접적으로 가해지므로 토류벽 및 지지구조의 설계와 시공에 있어서는 이러한 영향이 충분히

연구, 검토되어야 하는 것이다. 결국, 굴착공사는 안정된 상태의 지반을 불안정시키는 굴착이라는 행위와 불안정화를 억제시키려는 흩막이

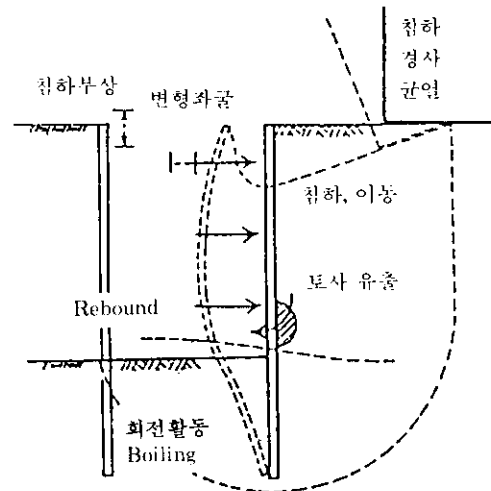


그림 11.2 굴착공사에 따른 지반거동

행위로 생각할 수 있다. 때문에 굴착공사를 위한 계획, 설계 및 시공에 당하여서는 주변지반에 전혀 영향을 끼치지 않는 상태에서의 공사는 거의 불가능하다는 기초개념아래 문제해결에 접근하는 자세를 가져야 할 것이다.

11.3 굴착에 따른 근접시공에서의 문제점과 고려사항

근접시공에서는 앞에서 언급한 바와 같이 계획, 설계 및 시공에 당하여 주변지반과 대상 인접구조물의 응력 및 변형상태를 정확히 예측하여야 하지만 이는 용이한 일도 아니고 그 정밀도에는 자연히 한계가 있다. 그 이유는 여러 가지가 있겠지만 가장 큰 요인은 근접시공의 문제가 근본적으로 지반조건과 가설구조물 및 대상인접구조물 상호작용에 관한 문제로서 그들 사이에 불확정요소가 많이 개재되어 있기 때문이다. 문제점 중 중요한 부분을 살펴보면 다음과 같다.

1) 지반특성을 파악하는 문제

지반구성이나 지반특성의 정량적 파악이 예측 정도에 직접적으로 연결되는 것은 명백하다. 그러나 통상적 지반조사나 시험은 주로 전단강도를 추정하기 위한 것이 대부분이고 변형해석을 위한 것이 아니기 때문에 이를 위하여 특별한 시험을 통하여 토질정수를 결정하여야 하지만 이는 쉬운 일이 아니다. 또, 대부분 토질정수의 추정을 원위치 시험결과에 의존하는 형편인데 시험 자체가 많은 문제점을 내포하고 있으므로 추정된 토질정수가 절대적인 값도 아니다. 특히, 우리 나라와 같이 대부분 지표로부터 매립토, 풍화토(잔류토), 풍화암, 연암 및 경암의 순으로 구성된 다층지반인 경우에는 지반정수의 추정이 매우 어려운 일일 뿐 아니라 하중으로서의 횡토압이 구조물과 지반 상호간의 관계로부터 변화하기 때문에 단순 적용이 반드시 합리적인 것도 아니다. 따라서 근접시공에 있어 지반정수를 추정할 때 단순한 어떤

제안에 무조건 따른다는 것은 올바른 설계자의 태도가 아니다. 근접시공에 접하는 지반공학자는 위에서든 여러 측면을 고려하여 합리적인 지반정수를 추정하여야 할 것이다.

2) 횡토압의 적용문제

가설토류벽에 대한 횡토압과 수압의 적용문제는 대단히 복잡하지만 여기서는 단지 버팀굴착에서 피할 수 없는 벽체와 지반변위를 억제하기 위하여 적용할 수 있는 횡토압계수에 대하여 캐나다의 기초공학 편람(Foundation Engineering Manual, 2nd.ed, 1985)에 제안된 바를 소개한다.

- 가) 어느 정도 벽체의 변위가 허용될 수 있는 경우 주동토압계수 K_a 를 적용한다.
- 나) 건물의 기초 또는 기타 매설물의 근접정도가 토류벽체 높이보다는 작고 $1/2$ 보다는 근접해 있지 않다면 횡토압계수로 $K=0.5(K_a+K_o)$ 를 추천한다.
- 다) 나)항의 근접정도가 벽체높이 $1/2$ 보다 작을 경우 토압계수로 정지토압계수 (K_o)를 추천한다.

3) 변형해석 방법의 문제

최근 변형해석 방법 자체는 상당히 발달되어 복잡한 계산도 가능하게 되었지만 문제점은 변형해석이 근본적으로 가설 구조물과 지반과의 상호작용에 의존하므로 이 분야의 해석이 불명확하다는 것이다.

4) 지하수위와 지반손실

가시설 구조에서 개수식으로 하여 배면수압을 경감시킨다면 가시설 구조단면 및 변위를 감소시키므로 안정성과 경제성에서 유리하다는 것은 명백하다. 그러나 배면 지하수의 감소는 토사유출을 동반한 지반 손실을 초래한다. 따라서 근접시공에서는 완전한 차수식으로 설계하여야하며 이때 횡토압 이외에 배면수압을 고려한다는 점에 특히 유의하여야 할 것이다. 또, 개수식인 경우 이로 인한 영향을 다음 항에

서 논하는 주변지반에 대한 거동에 합산하여 검토하여야 할 것이다.

5) 굴착에 의한 주변 지반의 영향

주된 지반거동은 토류벽의 변위에 따른 주변 지반의 침하, 토류벽사이로 부터 토사가 유실됨으로 인한 문제 등이 있으나 여기서는 주로 배면지반의 침하영향에 대하여 논한다. 그림 11.3은 벽체 변위에 따른 인접지반의 침하거동을 보여주고 있는데 이로 인하여 인접지반에 축조된 구조물이 그림 11.2에서 설명한 바와 같이 피해를 본다는 것은 명백함으로 벽체 변위에 따른 배면침하에 대한 영향검토는 근접시공에서 필수불가결한 요소이다. 배면지반 침하량을 예측하는 방법은 지반조건, 벽체 변위해석 방법 등에 따라 달라지므로 근접시공 설계자는 여러 방법으로 추정하여 합리적인 침하량을 예측하는 것이 필요하다.

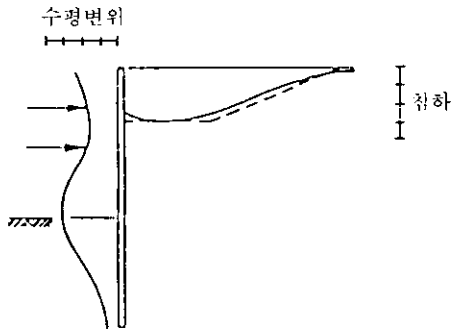


그림 11.3 벽체 변위에 따른 인접지반의 침하거동

6) 대상구조물의 특성을 파악하는 문제

지반과 구조물과의 상호작용이므로 대상구조물의 변위나 변형의 예측에는 그 위치, 형상, 치수, 재질 및 노후도 등을 파악할 필요가 있다. 이중에서도 노후도 등은 평가하기가 어려울 뿐 아니라 국부적으로 열화한 경우 구조물의 강성(rigidity)이나 강도를 정확하게 평가하는 것은 용이한 일이 아니다. 따라서 4)항

및 5)항에 의하여 배면 지반의 침하량을 추정하고 이로부터 design manual, building code 등에 규정되어 있는 허용 각변위 등에 의하여 인접구조물의 손상여부를 단순히 판단 한다는 것은 매우 무모한 일이 될 수도 있다. 이러한 규정은 인접구조물이 완벽할 경우에 대한 한계 허용치임을 명심하여야 할 것이다.

7) 근접시공 여부의 판정

그림 11.4는 근접시공의 검토순서를 흐름도로 나타낸 것이다. 여기서 문제가 되는 것은 근접시공 여부의 판정이다. 여러 나라의 예를 보면 영향범위 등을 나타내는 지침 등이 마련된 경우도 없지 않으나 우리 나라에서는 이를 뒷받침해줄 검증된 자료가 없으므로 앞에서 논한 여러 문제점을 고려하여 5)항, 6)항을 기준으로 근접 정도를 판단하는 것이 합리적인 것이다.

8) 계측관리의 중요성

근접시공에 있어서 변형해석에는 불확정 요소가 적용될 가능성이 높으므로 대상구조물의 허용변위와 허용 변형량이 아주 작은 경우 신뢰도가 떨어진다. 따라서 변형해석의 큰 역할은 정량적이라기 보다는 정성적으로 전체의 거동을 파악하는 것으로 보아야 하므로 해석결과를 크게 기대하는 것은 현명한 일이 아니다. 피해예측에 대하여 불확정 요소를 배제 시킬 수 있는 방법이 계측관리이다. 계측결과를 토대로 세심한 배려와 시공관리를 시행했을 때 예상피해를 방지할 수 있는 것이다. 계측관리에 있어 어느 곳에, 무엇을 계측하면 좋은가를 결정하기 위한 자료가 사전 실시한 변형해석 결과이다. 또, 계측결과는 변형해석에 feed back시켜 전체의 현황을 파악해 둔다. 따라서 변형해석과 계측관리는 근접시공의 2개 지주라 보아도 좋다.

이상에서 언급한 이외에도 근접시공의 문제점은 근접도의 판단기준, 3차원의 문제를 2차원으로 해석하는 등 많은 요소들에 관련되어 있다.

11.4 근접시공에 관한 조사, 계획

근접시공시 기존구조물에 미치는 영향은 토류벽체 변형에 의한 지반변위, 지반의 이완 및 교란, 지하수 변동 등에 의하여 발생하는 변위, 토압 및 수압 등의 하중 변동 등으로부터 일어나는 변위등이다. 따라서, 근접시공시에 공사로 인한 영향의 종류나 정도를 알기 위하여는 지형, 지질, 지하수에 관한 자료가 필요할 뿐 아니라 기설 구조물에 관한 조사가 필요하다.

1) 기존 구조물의 조사

(1) 구조물에 대한 현황조사

근접시공의 영향은 기초나 지하구조물이 설치된 지반에 의하여 기설 구조물에 미치게 된다. 따라서 그 영향의 종류와 정도를 알기 위하여는 그 위치, 형상과 치수, 단면의 성질 등을 조사할 필요가 있다. 또, 변위나 변형은 상부구조 사용상의 여러 기능이나 구조상의 강도, 내구성 등에 지장을 주는지 여부를 판단하여야 하므로 11.3절에서 언급한 바와 같이 구조물의 사용현황, 관리의 기준이나 형상치수, 부재단면의 성질 등을 고려하여 기존 구조물의 변형상태나 변위 등 현황을 조사하여야 한다. 이러한 조사에는 기존의 자료를 수집하는 자료조사와 현지에 가서 직접 확인하는 현지조사를 병행한다.

(2) 구조물의 허용 변위량

기존 구조물의 허용 변위량은 구조물로서의 사용목적에 달성할 수 있고 필요한 기능이 손상되지 않으며 구조체로서 소요의 강도나 안정성, 내구성을 확보할 수 있는 변위량이다. 따라서 허용 변위량을 결정하기 위하여는 위와 같은 여러 요인을 고려하여 기존 구조물에 지장을 주지 않는 한계 변위량을 구하고 여기에 한계 변위량 산정의 불확실성, 11.3절에서 언급한 구조물의 현황(변위, 노후도 등), 중요도, 보수방법의 난이도 등을 종합 판단하여 적절한 여유(안정율)를 고려하고 또, 과거의 조사결과도

참고로 하여 결정하는 것이 일반적이다.

구조물의 침하, 경사(또는 각변위) 등에 관한 허용값은 많은 토질공학자에 의하여 제안된 것이지만 추천할만한 자료로 다음과 같은 경우를 제시한다. 다만 이 허용값들은 한 표준임에 유의하여야 한다.

가) Skempton과 Macdonald(1955)의 허용 부등침하량

나) Sowers(1962)의 최대 허용침하량

다) Bjerrum(1963)의 허용 각변위

라) design manual 및 building code

표 11.1 허용 부등 침하량 (Skempton 등, 1955)

기 준	단독기초	진면기초
각변위	1/300	
최대부등침하		
점 토	1/3(1 ^{1/2})	
모 래	1/4(1)	
최대 침하		
점 토	3(2 ^{1/2})	3-5(2 ^{1/2} -4)
모 래	2(1 ^{1/2})	2-3(1 ^{1/2} -2 ^{1/2})

* 단위 inch, * () 안은 추천하는 최대값

표 11.2 구조물의 종류에 따른 허용침하량 (Sowers, 1962)

침하형태	구조물의 종류	최대허용 침하량
전체침하	배수시설	15.0~30.0 cm
	출입구	30.0~60.0 cm
	부등침하의 가능성	
	석적 및 조적구조	2.5~ 5.0 cm
	뺨대구조	5.0~10.0 cm
진 도	갈뚝, 사이로, 매트	7.5~30.0 cm
	탑, 말뚝	0.004 S
	물품적재	0.01 S
	크레인 레일	0.003 S
부등침하	빌딩의 조적벽체	0.0005 S~0.002 S
	철근콘크리트 뺨대구조	0.003 S
	강 뺨대구조(연속)	0.002 S
	강 뺨대구조(단순)	0.005 S

주) S : 기둥사이의 간격 또는 임의 두집단의 거리

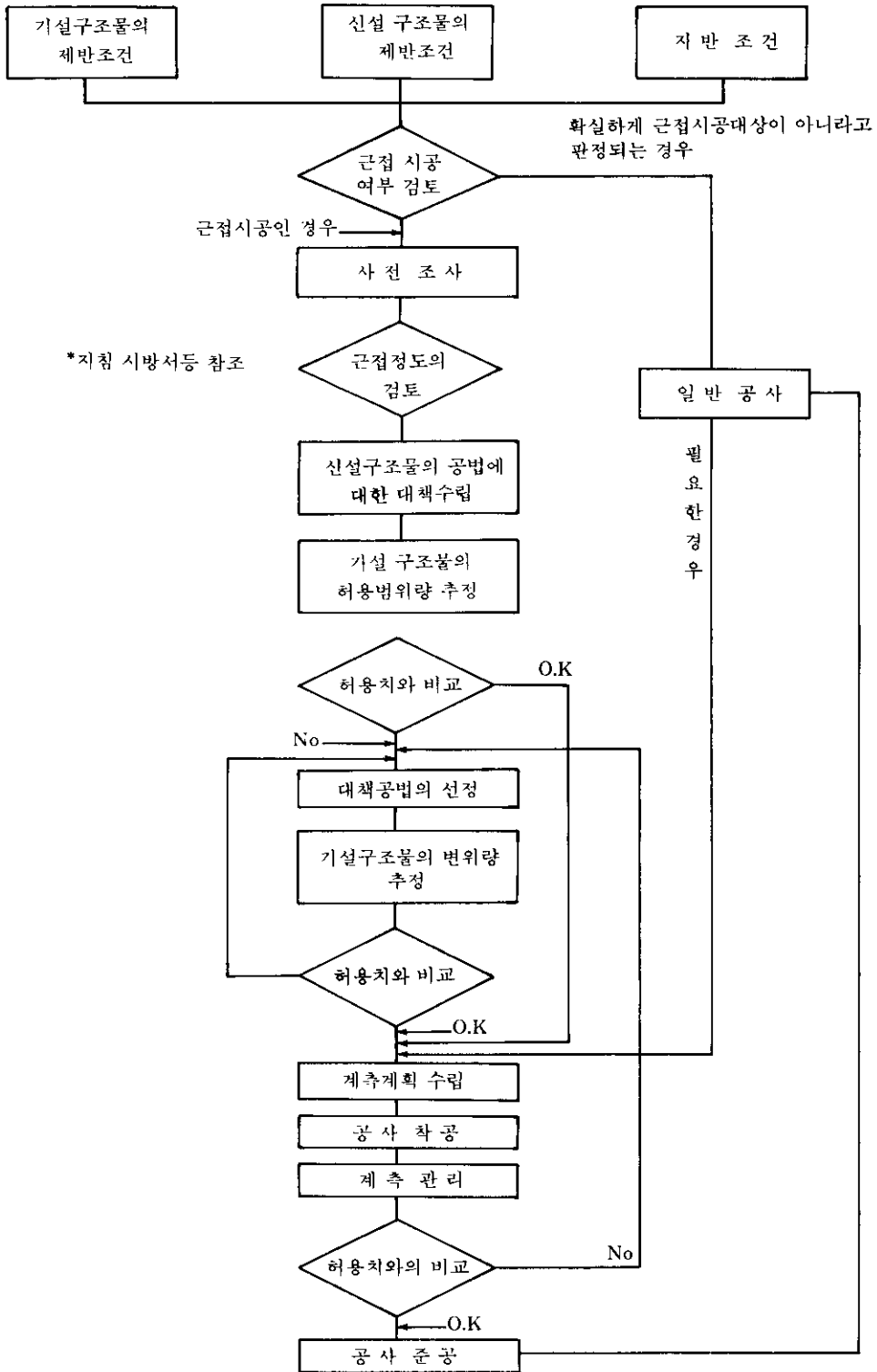


그림 11.4 근접시공의 검토순서

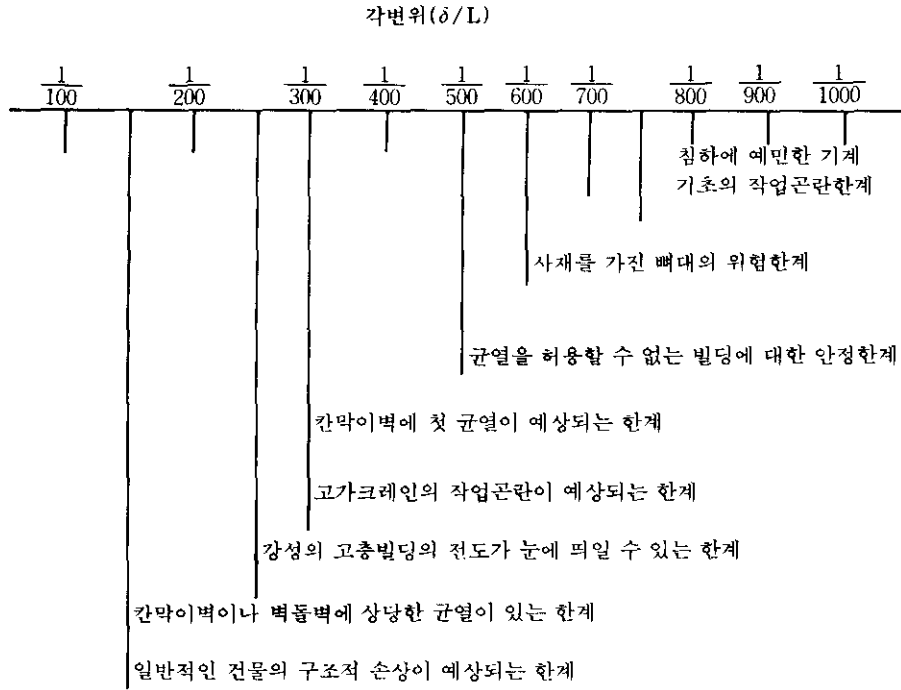


그림 11.5 각 변위에 따른 건물의 피해 상황

2) 지형, 지질, 지하수의 조사

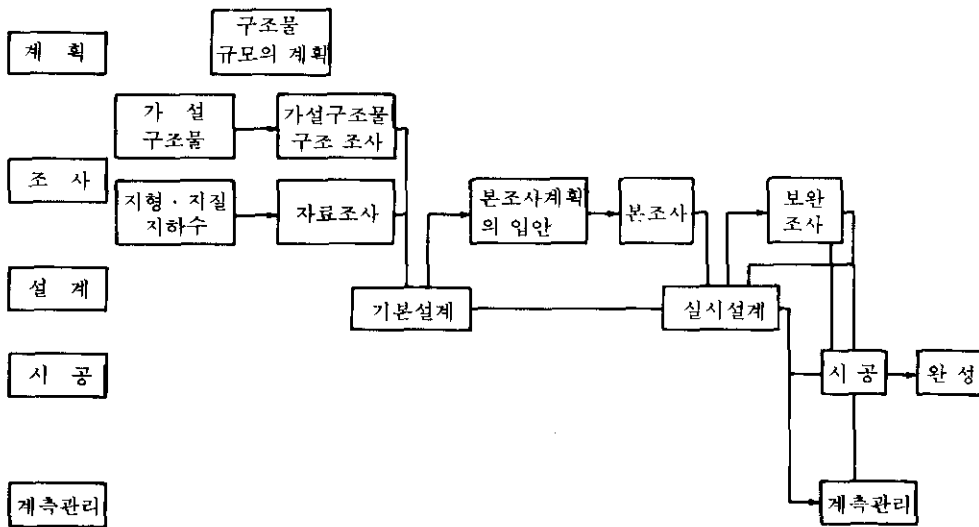


그림 11.6 근접 시공에서의 계획과 조사

근접 시공에서 시행하는 지형, 지질, 지하수에 관한 조사는 구조물의 계획에서부터 완성할 때까지 각 단계별로 실시한다.

계획 단계의 예비 조사에서는 기본 자료를 이용하고 이를 토대로 기본 설계를 실시하고 실시 설계 이전에 본 조사를 실시하며 실시 설계 단계에서 조건의 변화, 시공 단계에서 새로이 발생하는 경우에는 보완 조사가 필요하다.

근접 시공에서 지반의 변형 요인은 건설되는 구조물과 부지 주변의 지형, 지질, 지하수 상황에 따라 달라지므로 이를 고려하여 주변의 지형, 지질 구성, 흙의 조성, 전단강도, 압밀, 토압, 간극수압 등 토질특성을 조사하여야 하며 지하수위, 대수층의 분포 상황 및 투수성 등의 조사가 병행되어야 한다.

일반으로 근접시공시 굴착으로 일어나는 지반변형의 원인을 요약하면 다음과 같다.

- ① 토류 벽체의 변위에 의한 변형
 - ② 바닥면의 heaving에 의한 변형
 - ③ 바닥면의 piping에 의한 변형
 - ④ 지하수위 저하에 따른 침하
 - ⑤ 대수층의 차단에 따른 지하수위 저하로 인한 침하
 - ⑥ 토류 벽체 회수시 공동에 의한 변형
- 따라서 지형, 지질 및 지하수 조사는 위와 같은 변형의 원인을 규명하는 차원에서 실시되어야 한다.

11.5 근접 시공의 설계, 시공 계획

가설 토류벽을 사용하여 굴착할 때 근접시공에서의 설계, 시공 계획은 기존 구조물에 주는 영향을 최소로 억제한다는 조건하에 수립되어야 한다. 즉, 근접시공의 문제점(11.3절)과 조사 계획에서 언급한 사항을 기본으로 하여 신설 구조물의 설치 위치, 구조 형식 및 치수, 기초 형식 등을 선정, 검토하여 설계, 시공 계획을 수립하여야 한다. 이때 기존 구조물에 끼치는 영향을 예측하여 필요한 인접 지반 또는 기존 구조물에 대한 보강 또는 피해방지시설 등

의 대책을 강구하여야 하며 불확정 요소 등을 감안하여 계측 관리 계획을 수립한다.

근접시공의 설계, 시공 계획이 일반 공사와 다른 점은 일반 건설공사는 공비나 공기의 중요도에 따라 결정되는 경우가 많지만 근접시공은 기존, 신설 구조물의 사용 목적, 구조 조건, 지반 조건 및 주변 환경 조건에 지배될 뿐 아니라 기존 구조물과의 이격 거리, 작업 공간, 굴착용 기계의 형상, 치수에 따라서도 구조물의 형식이나 설치 위치가 좌우될 수 있다는 점이다. 근접시공에서의 설계 시공 계획은 앞에서 언급한 많은 요인에 관련되어 있으므로 구체적으로 기술하기는 어려우나, 이들 요인의 중요도에 따라 설계, 시공 계획을 수립하여 기존, 신설 구조물 모두가 안정성을 확보하도록 하여야 하며 시공 중의 면밀한 계측 관리로 피해를 방지하도록 계획, 시행되어야 한다.

11.6 배면 지반 침하와 인접 구조물에 대한 영향 예측 방법

1) 굴착이 인접지반에 끼치는 영향

굴착에 따른 지반의 거동은 그림 11.2에 나타난 바와 같은데 주된 거동은 벽체 주변 지반의 변형, 굴착 저면의 heaving과 piping 문제, 지반 손실 등이고 지반 주변이 점성토라면 압밀에 의한 주변 지반 침하도 발생한다. 여기서 굴착 저면의 heaving과 piping 문제는 다른 강좌에서 언급되었으므로 여기서는 토류 벽체 변위에 따른 배면 지반 변형 추정법과 지하수위 감소에 따른 침하 등에 관하여 설명한다. 다만, 인접하여 지반 구조물이 있는 경우 지하수위 감소는 배면 지반 침하를 유발시키므로 근접시공에서는 일반적으로 차수 공법을 시행하여 이를 감소시켜야 한다. 부득이한 경우 개수식을 채택한 경우에는 토류 벽체 변위로 인한 배면 침하와 지하수위 감소로 인한 배면 침하를 가산하여 인접 구조물에 대한 영향을 고려해야 한다.

2) 토류 벽체 변위에 따른 배면 지반 침하

예측 방법

토류벽의 횡방향 변위는 버팀굴착 주위의 지반침하를 유발한다. 이 배면침하는 인접 구조물 기초 또는 지하 매설물에도 침하를 유발시켜 피해가 발생하므로 근접시공에서 매우 중요한 문제가 된다.

토류벽의 변위에 따른 주변 지반의 침하는 토류벽 변위의 실측, 또는 계산에 의하여 구하고 이로부터 주변지반 침하를 추정하는 방법과 버팀 구조와 주변 지반을 일체로 하여 유한 요소법으로 해석하는 방법이 있다.

어느 경우거나 토류벽의 횡방향 변위를 해석하기 위하여 현재까지 제안된 예측 방법을 살펴보면 다음과 같다.

가) 유한 요소법에 의한 배면 지반 침하 예측 방법

나) 이론적 및 경험적 추정 방법

(가) Peck(1969)의 방법

(나) Caspe(1966)의 방법

(다) Clough 등(1990)의 방법

(라) Fry 등(1983)의 방법

(1) 유한 요소법에 의한 배면 지반 침하 예측 방법

굴착 공사에 있어 배면지반의 침하나 수평 변위를 정량적으로 파악하기 위하여는 유한 요소법을 사용할 수 있다.

유한 요소법은 지반 전체와 가시설 전체를 일체로 모델화하여 굴착 단계별에 따라 배면 지반 침하나 수평 변위 등을 구할 수 있는데 토류벽 및 지지 구조 등을 동시에 해석함으로써 지반-구조물 상호 거동을 고려한 해석이 된다. 그러나 이 방법을 이용하여 해석하기 위하여는 대상 지반 및 토류 구조물의 거동을 정확히 나타낼 수 있는 응력-변형률 관계가 필수적으로 요구되며 이에 필요한 제반 계수들의 정확한 추정이 해석 결과의 타당성에 큰 영향을 미치게 된다.

일반적으로 유한 요소법을 이용하여 토류 구조물의 거동을 해석하고자 할 때 그 결과에 영향을 미치는 주요한 요소들은 다음과 같다.

가) 지하 굴착 진행 과정을 시뮬레이션하는 방법

나) 지반 자체의 거동 모델화

다) 지반 거동 모델에서 사용된 모델 계수 값들

라) 그 외 실제 시공 당시에 발생한 예상치 못했던 변화들

유한 요소법을 이용하여 토류 구조물을 해석하고자 할 때의 방법으로는 등가하중을 고려한 해석 방법이 주로 이용되나 등가하중은 보간벽이나 경계면에서의 평형상태 등을 고려하여 구하므로 전체 평형 관계와 일치하지 않을 수 있다.

이를 위해 전체 평형 방정식에 입각한 굴착 해석 방법이 여러 학자에 의하여 제안되어 있으나 이 방법은 매우 복잡하므로 여기서는 등가하중을 고려한 해석법만 간략하게 설명한다.

가) 해석 모델

(가) 지반은 삼각형 또는 사각형의 탄소성 요소로 보는데 보통 isoparametric 평면 변형 탄소성 요소로 시뮬레이션한다.

(나) 토류벽은 보요소로 시뮬레이션 하는데 보요소는 압축과 인장을 전달하는 외에 모멘트도 전달하므로 축력과 모멘트 모두를 계산할 수 있다.

(다) 스트러트와 앵커 등 주로 축력에 저항하는 부재는 봉(rod) 또는 트러스 요소로 시뮬레이션 하는데 트러스는 양단 힌지로 취급하므로 봉 또는 트러스 요소는 축 방향의 압축과 인장만 전달한다.

(라) 암반의 절리, 단층 등의 불연속성을 표현하기 위하여는 절점 요소로 시뮬레이션하는데 연속체 요소에서 표현할 수 없는 활동 등의 거동을 해석하기 위해서 사용된다.

(마) 그림 11.7의 점선은 anchor로 지지하는 굴착에 대한 유한 요소 해석 모델을 나타낸다.

나) 하중

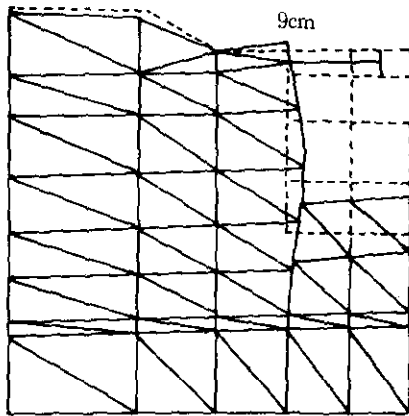


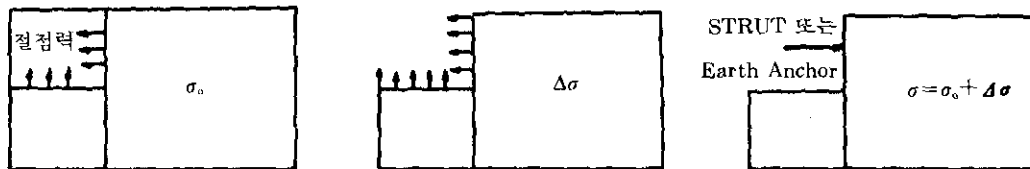
그림 11.7

(가) 작용하는 하중으로는 과재 하중, 자중에 의한 초기 하중, 굴착에 의한 굴착 증가 하중이 있다. 과재 하중으로는 지표면에 1-2 t/m²의 등분포 하중을 가하는 경우가 많다. 초기 응력은 자중에 의한 응력을 계산하여 입력한다.

(나) 임의의 요소 중앙에서의 수직 및 수평 방향 초기 응력은

$$\begin{aligned} \sigma_y &= \sum \gamma \cdot h \text{ (수직)} \\ \sigma_x &= K_0 \cdot \sigma_y \text{ (수평)} \\ \sigma_z &= v \cdot (\sigma_x + \sigma_y) \end{aligned} \quad (11.1)$$

여기서 γ : 각 층 지반의 유효단위 중량
 h : 계산하는 점까지의 각 층의 두께



(a) 초기상태

(b) 굴착

(c) 굴착후

그림 11.8 굴착 증가 하중의 작용

K_0 : 정지 토압 계수 (0.5 정도)

v : 지반의 포아송비

(다) 굴착이 진행됨에 따라 각 굴착 단계마다 굴착으로 인한 굴착 증가 하중을 입력한다.

$$\text{굴착 증가 하중은 } \{F\} = -\{N\} \cdot \{\sigma\} d_n \text{이다.} \quad (11.2)$$

여기서 $\{F\}$: 굴착 증가 하중

$\{N\}$: 형상 함수

$\{\sigma\}$: 굴착되는 부재의 굴착 직전 단계에서의 응력

d_n : 경계면

다) 해석 과정

이상의 유한요소 모델과 하중에 따라 그림 11.9와 같은 과정으로 단계별 계산을 수행한다. 지반 중의 어떤 요소가 탄성한계 이내일 때는 탄성해석을 수행하며 탄성한계를 벗어나면 소성체로 취급한다.

라) 해석 결과

단계별 굴착에 따른 해석 결과는 그림 11.7의 실선과 같은데 이 결과는 어느 굴착 단계에서 버팀대 설치 후의 변위 형상을 나타낸 것이다. 유한요소 해석의 출력 사항으로서는 지반의 최대 및 최소 주응력 분포 상태, 지구구조의 응력 및 토류벽 각 절점에서의 변형 및 전단력, 휨 모멘트 등이다.

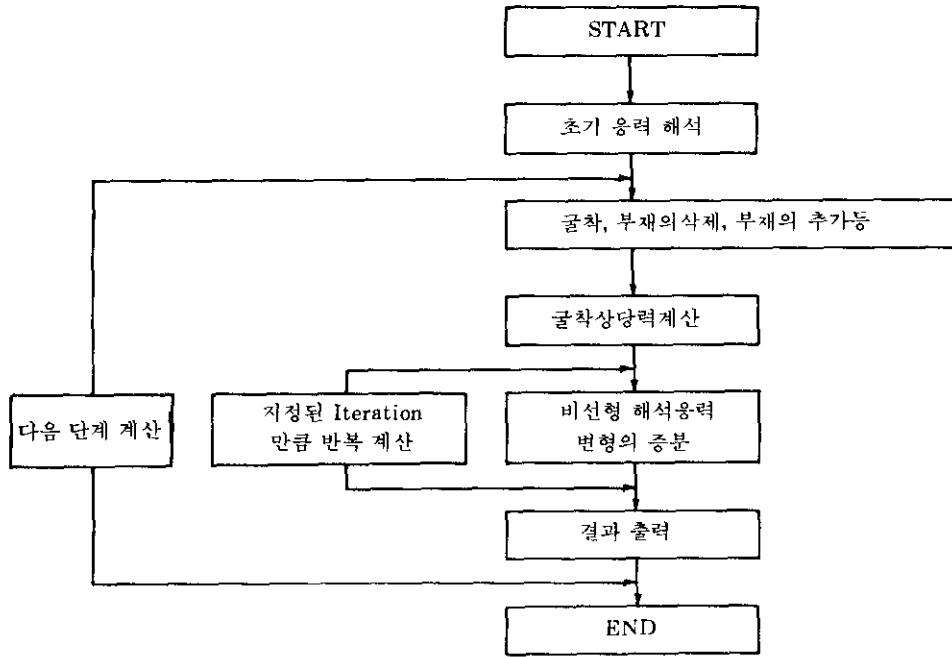


그림 11.9 탄소성 유한 요소 해석 과정

(2) 기존 구조물에 미치는 영향을 해석하는 방법

그림 11.10(a)와 같이 기존의 쉘터널 바로 위에 공사를 시행하는 경우를 예로하여 기존 터널에 미치는 영향을 해석하는 방법을 간략히 설명한다.

- (가) 지반변형에 의하여 기존 구조물이 변형되었다고 보아 해석하는 방법
- (나) 지반과 기존 구조물을 일체로 보아 해석하는 방법
- (다) 기존 구조물에 굴착으로 변화된 하중 조건을 주어 해석하는 방법

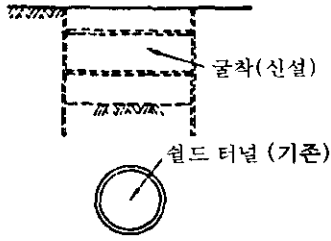
가) 지반 변형에 의하여 기존 구조물이 변형되었다고 보아 해석하는 방법

이 방법은 그림 11.10(b)와 같이 기존 구조물의 규모 및 휨강성이 작고 지반 변형을 해석할 때 기존 터널을 무시해도 큰 차가 없다고 판단되는 경우 적용할 수 있다. 이때 굴착에 따

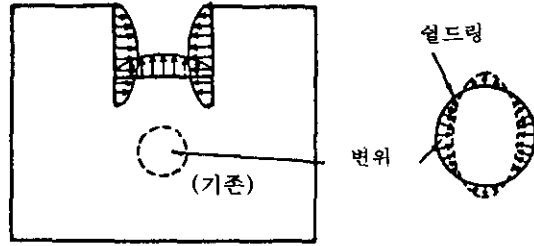
른 지반 변형은 기존 터널을 무시하고 지반을 2차원으로 모델화하여 유한 요소법으로 구하고 이 변형을 터널에 발생한 변형으로 본다. 다만, 기존 터널의 규모나 강성이 비교적 작지 않은 경우에도 약간의 오차를 허용하여 이용할 수 있다.

나) 지반과 기존 구조물을 일체로 보아 해석하는 방법

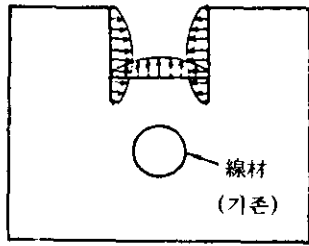
이 방법은 그림 11.10(c)와 같이 기존 구조물의 규모나 휨강성이 중간정도로서 구조물과 지반과의 상호 작용을 무시할 수 없는 경우 이용된다. 이 경우 굴착공사와 기존 구조물을 동일한 2차원 모델로 표현하고 지반과 기존 구조물을 일체로 취급하는데 이때 지반은 연속체로 하고 구조물은 보로 모델화한 후 면요소와 선요소를 이용한 유한요소법으로 해석하는 경우가 많다. 그림 11.10(a)와 같이 쉘터널 바로 위에 굴착을 실시하는 경우 기존 터널의 규모나 휨강성이 중간정도이고 지반과의 상호작용을



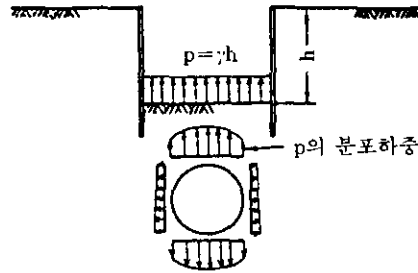
(a) 기존 구조물에 인접하여 굴착을 하는 경우



(b) 지반 변형에 의하여 기존 구조물이 변형되었다고 보아 해석하는 방법



(c) 지반과 기존 구조물을 일체로 보아 예측하는 방법



(d) (기존) 구조물에 굴착으로 변화된 하중 조건을 주어 해석하는 방법

그림 11.10 기존 구조물에 미치는 영향을 해석하는 방법

무시할 수 없기 때문에 이 방법으로 해석하는 것이 타당하다고 생각된다.

다) 기존 구조물에 굴착으로 변화된 하중 조건을 주어 해석하는 방법

기존 구조물의 규모 및 휨강성이 크고 근접 시공을 실시하더라도 기존 구조물의 변위나 휨 변형이 대단히 작으며 지반과 구조물의 상호작용을 무시할 수 있는 경우 해석하는 방법이다. 그림 11.10(c)의 경우 굴착의 영향을 저면에 작용해온 지중응력의 이완으로 생각하고 저면에 굴착에 상응하는 외력을 작용시켜 그 하중에 의한 터널의 압력변화를 구하여 이를 터널 링에 작용시켜 응력-변형을 구한다. 이때 압력변화는 Boussinesq식 등에 의하여 추정한다. 계산에 적용하는 구조모델은 기존 구조물의 해석모델에 준하는 경우가 많다.

(3) 이론적 및 경험적 추정방법

가) Peck(1969)의 곡선

그림 11.11과 같이 과거의 계측결과를 이용하여 지반의 종류별로 개략의 침하량 분포를 보여주고 있는데 토류벽은 강널말뚝과 같은 강성이 낮은 것을 대상으로 하고 있다.

나) Caspe(1966)의 방법

Caspe는 강널말뚝의 변위와 포아송비를 사용하여 벽체배면의 지반 침하량을 다음과 같은 단계로 추정하였다. (그림 11.12 참조)

(가) 횡방향 벽체 변위를 계산(예측치 또는 계측치)

(나) 횡방향 벽체 변위를 합하여 변위 체적 V_v 구함.

(다) 침하 영향권의 횡방향 거리 추정

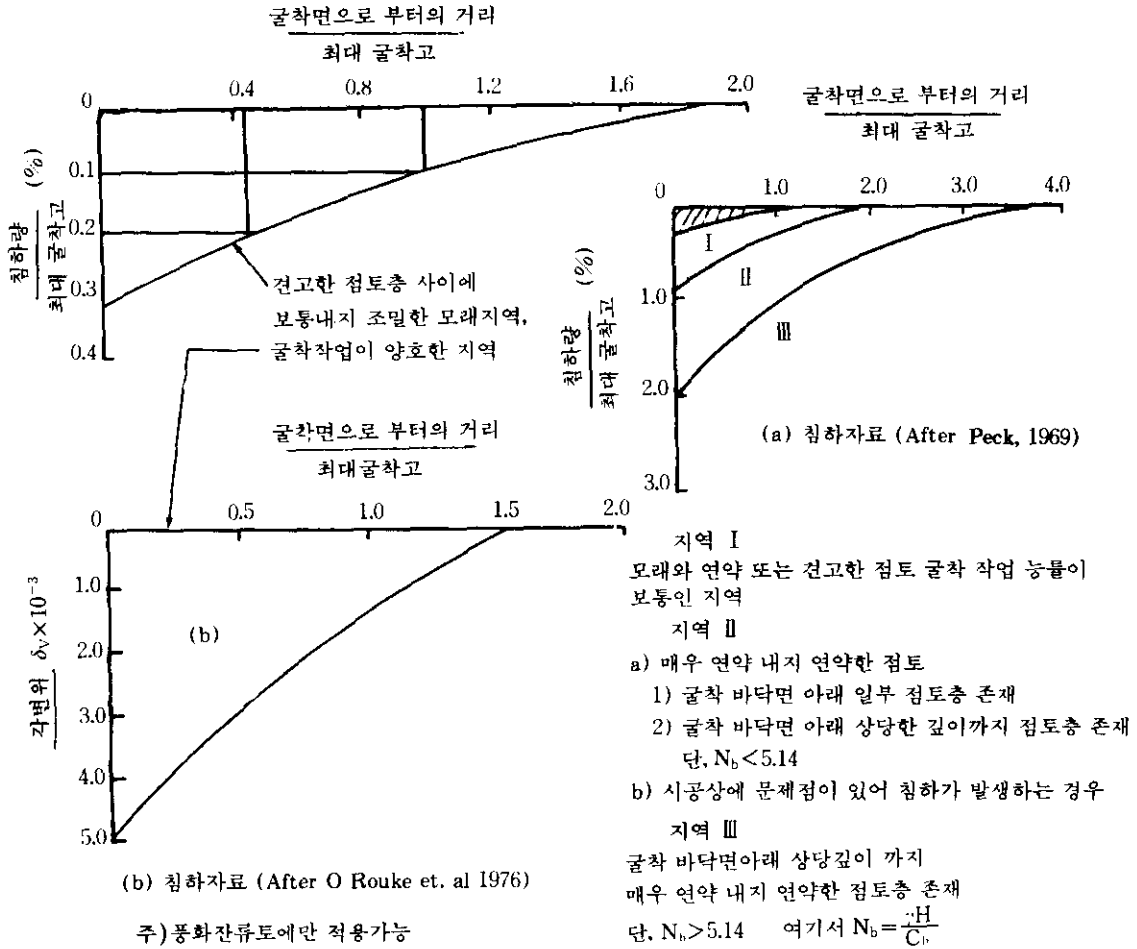


그림 11.11

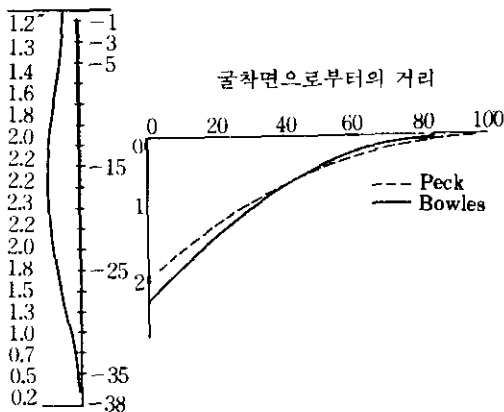


그림 11.12 벽체배면에서의 거리별 침하량

- (i) 굴착 심도 H_w 계산
- (ii) 굴착영향 거리 $H_t = H_p + H_w$ 계산
단, $H_p = B(\phi = 0$ 인 경우)
 $H_p = 0.5 \cdot B \cdot \tan(45^\circ + \phi / 2)$ (11.3)
- (iii) 침하영향 거리 D 계산
 $D = H_t \cdot \tan(45^\circ - \phi / 2)$ (11.4)
- (iv) 벽체에서의 표면 침하량 S_w 계산
 $S_w = \frac{4V_s}{D}$ (11.5)
- (v) 벽체에서 x 되는 거리별 침하량 S_x 계

산

$$S_x = S_w = \left(\frac{x}{D}\right)^2 \quad (11.5)$$

다) Clough 등(1990)의 방법

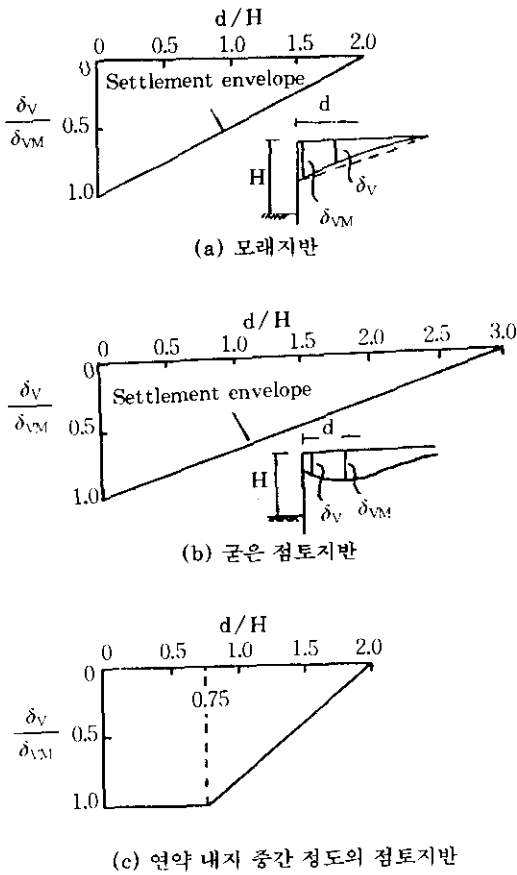


그림 11.13 토질 조건에 따른 거리별 침하량

Clough 등은 모래 지반, 굳은 점토 지반 및 연약 내지 중간 정도의 점토 지반에 굴착을 시행했을 경우 토류벽체 배면에서의 거리별 침하량을 현장 측정 결과 및 유한 요소법으로 구하여 그림 11.13과 같이 제안하였다. 그림 11.13에서 H는 굴착 깊이, d는 토류벽체로부터의 거리이며 δ_{VM} 은 최대 침하량이고 δ_v 는 거리별 침하량이다. 또, 이 방법은 토류벽체로서 얽지말뚝, 널말뚝 및 Diaphragm 벽체에 버팀대나 앵커 지지에 관계없이 적용할 수 있다고 하였다. 다만, 굳은 점토 지반일 때는 어떤 조건에서

Heaving이 일어날 수 있으나 토류벽체가 안정하고 정밀 시공을 한다면 안전 측이라 한다. 한편, 연약 및 중간 정도의 점토층에서 거리별 침하량(그림 11.13(c))은 사다리꼴로서 $0 \leq d/H \leq 0.75$ 인 경우 최대 침하가 일어나며 $0.75 \leq d/H \leq 2.0$ 인 경우 직선적으로 감소한다고 한다. 그림 11.13을 사용하는 경우, 문제는 최대 침하량 δ_{vm} 을 추정하는 것인데 지반조건에 따라 다음과 같다고 한다.

(가) 굳은 점토, 잔류토 및 모래 지반인 경우 최대 침하량(δ_{vm})에 대하여는 종래 굴착깊이(H)의 (0.5-1)%H라고 추정하여 왔으나 Clough 등은 그림 11.14와 같이 최대 침하량은 대부분 0.3%H 이내라고 하였으며 평균적으로 0.15%H가 된다고 제안하였다. 이 경우 벽체의 종류에 관계 없을 뿐 아니라 Soil Nail 및 흙시멘트벽(Soil Cement Wall)까지 포함된다고 한다. 또 최대 침하량이 0.5%H 보다 큰 경우도 있는데 수평판 또는 기타 가설 지지구조가 잘못 설치되었거나 지하수 등이 굴착 내측으로 유입되는 경우등이라고 하였다.

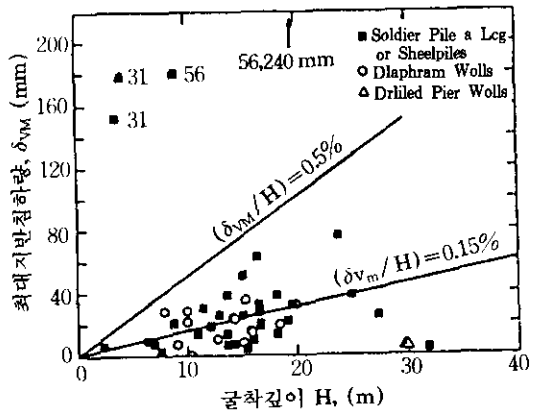


그림 11.14 굳은 점토, 잔류토 및 모래 지반에서의 최대 침하량

(나) 연약 내지 중간 정도의 점토 지반 점토층에서의 벽체 최대변위(δ_{Lm})와 최대 침

하량(δ_{vm})추정은 저면에서의 heaving에 대한 안전율, 가설 구조체의 강성(system stiffness)에 관련되는 것이지만 실용적인 면에서 배면 지반의 최대 침하량(δ_{vm})은 압밀 효과를 고려하지 않는 경우 벽체의 최대 변위와 같다고 보고 그림 11.13(c)에서 배면 침하량을 계산할 수 있다고 하였다.

(다) Fry 등(1983)의 방법

Fry 등(1983)은 지반을 완전탄성 및 포화된 것으로 가정하여 실시한 유한요소해석 결과치를 지반조건에 따라 확장시켜 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$\text{수직변위 } \delta_v = \frac{\gamma H^2}{E} (C_3 K_0 + C_4) \quad (11.7)$$

여기서 E : 지반의 탄성계수

H : 굴착깊이

γ : 지반의 단위중량

K_0 : 지반의 정지토압계수

$$(K_0 = 1 - \sin\phi)$$

$C_1 - C_4$: 상수(그림 11.15 참조)

(4) 지하수위 감소에 따른 침하해석

근접 굴착시공에서는 토류구조가 개수식이면 유수에 따른 토사 유출로 지반 손실이 발생하여 토류벽체 배면지반이 침하되고 이로 인하여 인접 구조물에 손상이 생기므로 차수식을 택하는 것이 일반적이다. 그러나 굴착저면의 piping 및 heaving 대책으로서 또는 공사 편의상 굴착저면 이하의 지하수를 강제 배수하는 경우가 있는데 이로 인하여 지하수위가 감소되면 사질토층에 있어서는 유효응력의 증가로 수축이 유발되고 사질토층 사이에 점성토가 존재하면 압밀 침하를 유발한다.

사질토층의 지하수위 및 수압은 비교적 단기간에 정상상태가 될 수 있으므로 일반 우물이론 등에 의하여 침하량을 추정할 수 있는데 Lohman(1961)은 다음과 같이 제안하였다.

$$\Delta\delta_{vs} = S_v \cdot (\gamma_w - n\beta) \cdot H \cdot \Delta P \quad (11.8)$$

여기서 $\Delta\delta_{vs}$: 각사질토층의 수축량

n : 간극률

γ_w : 물의 단위중량

β : 물의 압축률

트렌치 벽면으로부터의 거리(d)/트렌치 깊이(H)

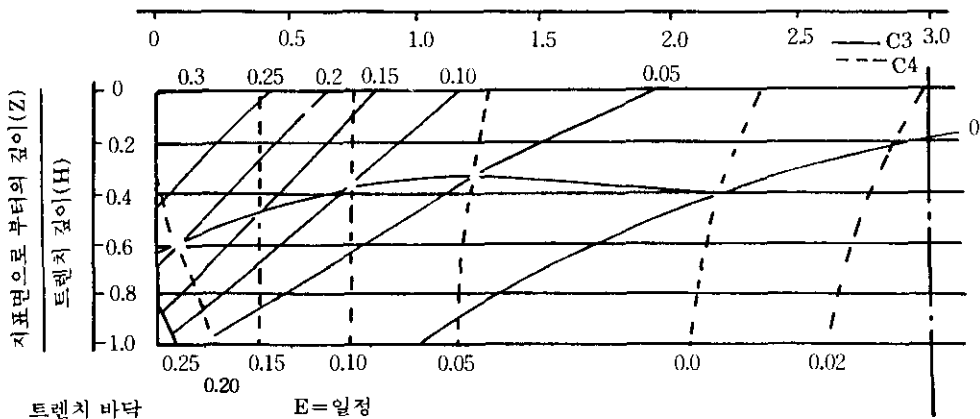


그림 11.15 지반 변위 예측 계수

H : 사질토층의 두께
 ΔP : 지하수위 저하에 따른 유효응력의 증분
 S_v : 비 저류량 (표 11.3)

일반적으로 $n < 1$ 이고 β 는 지층 압축률의 $1/10 \sim 1/100$ 정도로 작기 때문에 $n\beta \approx 0$ 로 한다. $\gamma_w = 1$ 이므로 식(11.8)은 다음과 같이 된다.

$$\Delta \delta_{vs} = \frac{S_v H \Delta P}{\gamma_w} \quad (11.9)$$

비 저류량 S_v 는 토질에 따라 다른데 표 11.3에 나타나 있다.

표 11.3 비 저류량

흙의 종류	비 저류량
강성 점토	$2.0 \times 10^{-4} \sim 2.6 \times 10^{-5}$
약간 연성 점토	$2.6 \times 10^{-5} \sim 1.3 \times 10^{-5}$
약간 경성 점토	$1.3 \times 10^{-5} \sim 6.9 \times 10^{-6}$
느슨한 모래	$1.0 \times 10^{-5} \sim 5.1 \times 10^{-6}$
조밀한 모래	$2.0 \times 10^{-6} \sim 1.3 \times 10^{-6}$
조밀한 모래와 자갈	$1.0 \times 10^{-6} \sim 5.1 \times 10^{-7}$
균열이 있는 암	$6.9 \times 10^{-7} \sim 3.3 \times 10^{-8}$
고결된 암	3.3×10^{-8} 이하

한편, 사질토 지반에 대하여도 점성토의 압밀과 같이 생각하는 방법도 제안되어 있는데 다음과 같다.

$$\Delta \delta_{vs} = \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1} H \quad (11.10)$$

여기서 e_1, e_2 : 지하수위 저하 전 후 유효응력에 대한 간극비

또 식(11.10)을 적용하는 경우 $e - \log P$ 곡선은 원지반에서 채취한 시료로서 압밀시험을 시행하여 그 결과를 이용하는 것이 이상적인 것이지만 Haugh에 의하여 제안된 그림 11.16

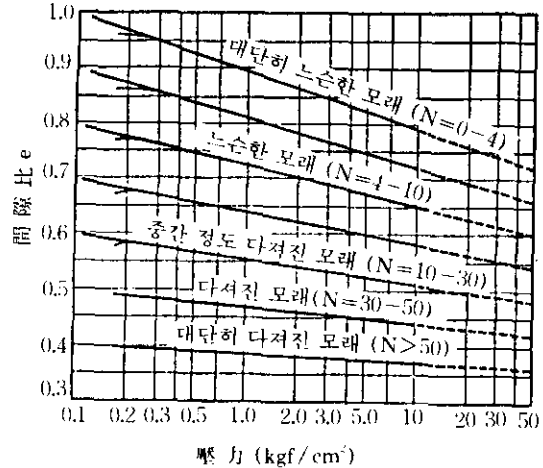


그림 11.16 사질토의 $e - \log P$ 곡선

을 이용하는 경우도 많다.

지하수위 저하에 따른 점성토의 압밀에 대하여는 일반적으로 1차원 압밀로 취급하고 근접시공에서는 시공기간이 짧아 압밀이 완료되지 않는 경우가 많으므로 다음과 같이 구한다.

$$\Delta \delta_{vc} = \Delta \delta_{vco} \cdot U = \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1} H \cdot U \quad (11.11)$$

여기서, $\Delta \delta_{vc}$: 임의 압밀시간에 대한 압밀량
 $\Delta \delta_{vco}$: 압밀 완료시의 압밀량
 U : 평균 압밀도

11.7 굴착공사시의 계측관리

계측관리에 대한 사항은 흙막이 구조 전체에 관한 문제이므로 다른 강좌에서 다루기로 하고 본 강좌에서는 특히 근접시공에 요하는 계측대상 및 종류 그리고 측정위치에 따른 측정 항목만을 표 11.4와 같이 제시한다.

도심지 근접굴착 시공에 도입되고 있는 계측대상 및 종류를 보면 다음과 같다.

배면의 지반의 거동 및 수평변위 inclinometer	strut 또는 anchor의 거동 load cell, strain gauge
엄지말뚝 및 띠장의 응력 strain gauge	인접 구조물의 피해사항 tiltmeter, crack gauge
벽체에 작용하는 토압 load cell total pressure cell	진동 및 소음 발파, 진동 측정기
지하수위 및 간극수압 standpipe type pizometer water pressuremeter	지반의 수직 변위 ROD extensometer MCS extensometer

표 11.4 측정위치에 따른 측정항목

측정위치	측정 항목		사용 계기	육안 관찰	측정 목적
토류벽	측압	토압, 수압	토압계, 수압계	· 벽체의 휨, 크랙 · 연속성 확인 · 누수 · 주변지반의 크랙	① 측압의 실측치와 설계치의 비교검토 ② 주변수위, 간극수압, 벽면수압의 관련성 파악
	변형	두부변위, 수평변위	트랜싯드, 전자식 변위계, 삼입식경사계, 정식경사계		① 변형이 허용치이내에 있는가의 검토 ② 수압, 토압과 벽체변형과의 단계 파악
		벽체응력	변형계, 철근계		① 벽체 응력분포를 구해 설계측압에서 계산된 벽체응력과의 비교 ② 실측치를 기초로 계산한 응력과 허용 응력과의 비교에 의한 벽의 안전성 검토
Strut 또는 Earth anchor	축력, 변위량, 온도		하중계, 압축계, 상대변위계, 스케일, 온도계	· Strut연결의 평탄성 · 볼트가 죄어진 상태	① Strut 또는 Earth anchor의 토압 분담 비율을 명확히 한다. ② 허용축력과 비교하여 안전성 검토
굴착지반	기저면의 변위 및 어떤 깊이의 변위, 간극수압, 지중수평범위		지중고정로드, 간극 수압계, 삼입식경사계, 고시막대	· 내부 지반의 용수 · 분사	① 응력이완에 의한 굴착지반의 변형이나 주변지반의 거동을 안다. ② 배면지반의 변위, 토류벽의 변위, 굴착저면의 변위관계 파악
주변지반	지표연직범위, 지중연직범위, 간극수압, 지중수평범위		지중고정로드, 간극 수압계, 삼입식경사계, 고시막대	· 배면지반의 용수 · 도로연석 블록의 벌어짐 확인	③ 허용변위량과 실측 변위량과의 비교에 의한 안전성 검토 ④ 굴착 및 배수에 따른 주변지반의 침하량 및 침하범위 파악
인접 구조물	연직 및 수평변위, 경사량		연통관식침하계, 고정식경사계	· 구조물의 크랙	굴착 및 배수에 수반되는 가설구조물의 변위, 변형의 파악
유독 Gas. 수질 오염	탄산가스, 메탄가스 수질오염		가스감지기, 우물의 수질시험		① 굴착내 유독가스 발생의 검토 ② 지반개량등에 의한 주변지역의 수질 오염 검토

참 고 문 헌

1. Candaian Geotechnical Society(1985), Foundation Engineering Manual, 2nd ed. PP. 387-393.
2. Clough G.W and O'Rurke. T.D(1990), Construction Induced Movements of Insitu Walls, Geotechnical special publication. No.25, ASCE, PP. 439-470.
3. Sowers G.F(1962), Shallow Foundations, Foundation Engineering, G.A, Leonards. MGH, P525.
4. Bjerrum(1963), Discussion to European Conference on Soil Mechanics and Foundation Eng. Wiesbaden, Vol. II. P135.
5. Peck R.B(1969), Deep Excavation and Tunneling in Soft Ground, 7th ICSMFE, Mexico, State-of-the Art Report. PP. 225-281.
6. Caspe. M.S(1966), Surface Settlement Adjacent to Braced open cut. JSMFD. ASCE, Vol. 92. SM4 July, PP. 51-59.
7. Clough. W. et al. (1989), Movement Control of Excavation Support Systems by Iteration Design. Foundation Eng. current principles and practices Vol. 2, PP. 869-884.
8. 일본토질공학회(1989), 근접시공, PP. 1-95.
9. 이종규(1992), 굴착 및 흙막이공법. 제6장 근접시공 사단법인 한국지반공학회. PP. 341-388.