

흙막이 가시설 설계시 고려하여야 할 주요사항



안민홍
(주)세움텍
대표이사/공학박사



박이근
(주)지오알앤디
대표이사/공학박사



윤민승
(주)세움텍
이사/공학박사



유상호
(주)지오알앤디
공학박사/토질및기초기술사

1. 서론

우리나라에서 발생한 흙막이 가시설의 사고사례의 사고원인이 [그림 1]과 같이 분석되고 있으며, 이러한 사고원인은 우리 지반공학 기술자들의 부단한 노력으로 줄이거나 방지할 수 있다고 판단됩니다.¹⁾

이번으로 세 번째를 맞이하는 흙막이 가시설 관련 강좌에서는 흙막이 가시설 설계 시 간단한 사항이지만 공학적으로 중요한 부분이 다소 간과됨에 따라 흙막이 가시설의 안정성에 영향을 미치고있는 사항들에 대해 고찰해 보고자 합니다. 이와같은 사항들이 실무기술자들자와 상호교류되어 향후 보다 안정성 높은 흙막이 가시설이 계획될 수 있기를 기대합니다

본 강좌에서 의견하는 사항들은 개인적인 기술적 경험과 소신에 따른 소견이 다소 있으므로 서로 다른 의견이 있는 경우 주저 없이 상호 질의 답변하는 과정과 충분한 논의를 거쳐 지반공학 기술자들이 발전하는 계기가 될 수 있기를 기대합니다.

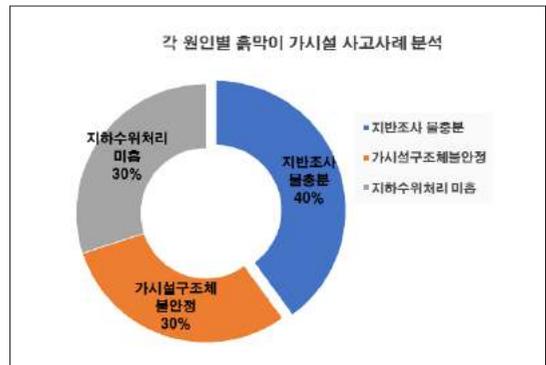


그림 1. 흙막이 가시설 사고사례의 원인별 분석
(참고 : 흙막이 가시설의 거동분석을 통한 안정성 확보방안에 관한 연구, 한국토목섬유학회논문집 제12권 2013. 12, 김광렬, 김우성, 김성수)

2. 지반조사

[그림 1]에 의하면 흠막이 가시설 공사에 대한 사고사례 24건 중 지반조사의 불충분으로 인한 사고가 12건, 가시설 구조체의 불안정에 의한 사고가 9건, 지하수위 처리의 미흡에 의한 불안정사고가 9건으로 나타난 바가 있을 정도로 지반조사의 부실로 인한 흠막이 가시설의 불안정성을 초래하고 있어 지반조사의 중요도가 매우 높다고 할 수 있다.

특히, 민간건축분야에서는 설계 또는 설계 및 시공의 일괄도급 후 도급자가 지반조사와 흠막이 가시설 설계를 별도 발주하는 방식으로 인해 저가에 의한 지반조사와 설계로 인해 부실공사가 되는 것이 일반적이다. 이로 인해 지반조사를 계획함에 있어 시추조사만을 계획하고 지층구성과 지층별 N치를 확인하는 수준의 조사가 이뤄져 locality가 강한 지반특성을 국외의 N치와 지반정수와의 관련식을 무분별하게 적용함으로써 지반정수의 결정에 큰 오류를 범하고 있다.

부실한 조사로 인한 개략적인 지반조사와 추정된 지반정수에 의해 작성된 설계로 인해 흠막이 가시설 공사의 사고가 발생할 경우 이를 수행한 기술자뿐만 아니라 지반공학 기술자 전체에 대한 사회적 불신이 커지게 되므로 설계자는 자신의 문제가 아니라 지반공학분야 기술에 대한 신뢰의 문제가 될 수 있으므로 설계 전 지반조사가야말로 대단히 중요한 사항으로 판단된다.

최근 지하안전법이 시행됨에 따라 지반조사가 시추 외에 공내재하시험, 공내전단시험 등을 포함한 현장시험, 실내시험 등이 비교적 충실히 수행되고 있어 향후 정도 높은 많은 자료가 축적되어 국내 지반에 대해서도 지반정수의 종합적 고찰이 이루어져 지반분야의 발전으로 이어질 수 있다고 생각된다. 그러기 위해서는 지반조사 계획부터 실시, 결과의 면밀한 분석 등 지반공학기술자들의 적극적인 노력이 요구된다.

3. 설계 시 주요사항에 대한 고찰

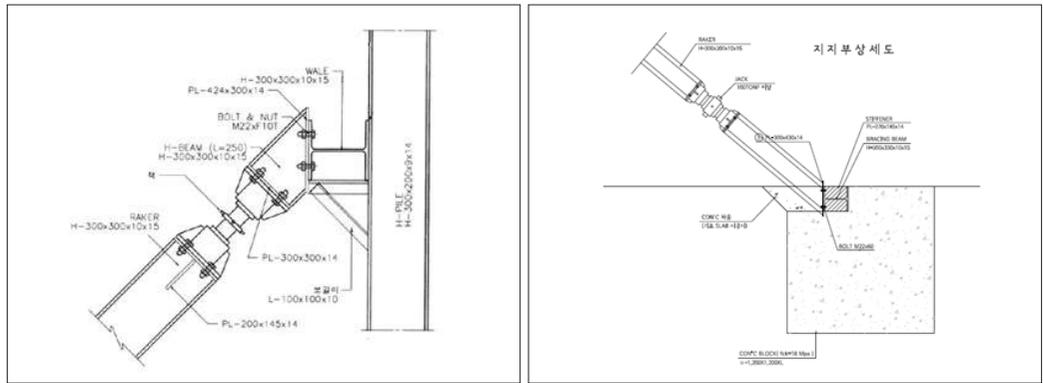
흠막이 가시설 설계에 있어서 검토하여야 할 사항은 [표 1]과 같이 단면설계, 주변영향성 검토, 평면배치설계, 주요시방 및 계측관리계획의 제시 등이다. 이들 사항 중 대부분 ①은 비교적 충실한 편이나 나머지 부분은 미흡하거나 다루지 않고 있는 경우가 많아 주의가 요구된다.

3.1 경사고임대(Raker)의 설계

경사고임대(Raker)는 사업부지 내에서 흠막이 버팀구조로 종종 사용되고 있으나, 내부 구조물 시공에 어려움이 크기 때문에 꺼리는 편이다. 그러나, 부지 외로 앵커를 할 수 없거나 버팀대로 하기 어려운 경우에는 어쩔 수 없이 계획할 수밖에 없는 구조이다. 경사고임대는 경사로 설치되는 구조부재이기 때문에 2방향의 힘이 작용하는 구조이나 수평력에 대해서만 고려하고 상향력에 대해서는 고려하지 않는 경

표 1. 흙막이 가시설의 설계 사항

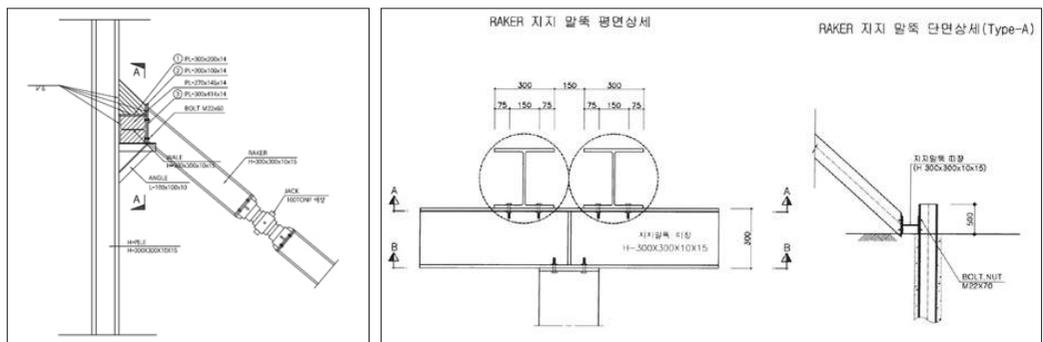
| 검토 사항 | 고려 사항 |
|---|--|
| ① 흙막이 벽체 및 버팀 구조 안정성 (탄소성해석, 단면 설계) | 토압, 수압, 인접 구조물 등이 흙막이 구조에 미치는 영향 분석 |
| ② 흙막이벽체 주변의 변위 영향성 (변형해석, 2, 3차원 단면설계) | 굴착에 따른 주변의 영향 분석 안정성 검토에 의한 부재력 등의 비교 분석 |
| ③ 흙막이 전체구조의 배치 안정성 (단면검토에 따른 평면 배치도면 작성) | 시공성, 우각부, 코너부, 편도압 등을 고려 버팀구조의 안정 확보 여부 |
| ④ 주요 시방 사항의 제시 (적용된 흙막이 및 차수 공법 등) | 적용된 흙막이공법(벽체, 버팀 등), 차수공법 등에 대해 현장여건에 맞도록 주요 시방사항의 제시 |
| ⑤ 계측관리계획의 적정성 (시공관리계획) | 설계 사실의 검증, 시공 안정성 확보 여부 판단 계측항목별 계측관리기준, 계측분석기법 등의 제시 |



(a) 레이커의 상단 지지점(구조부재 누락)

(b) 레이커의 하단 지지점

그림 2. 통상적인 경사고임대(레이커)의 도면(나쁜 예 : 설계오류)



(a) 레이커의 상단 지지점

(b) 레이커의 하단 지지점

그림 3. 개선된 경사고임대(레이커)의 도면(좋은 예)

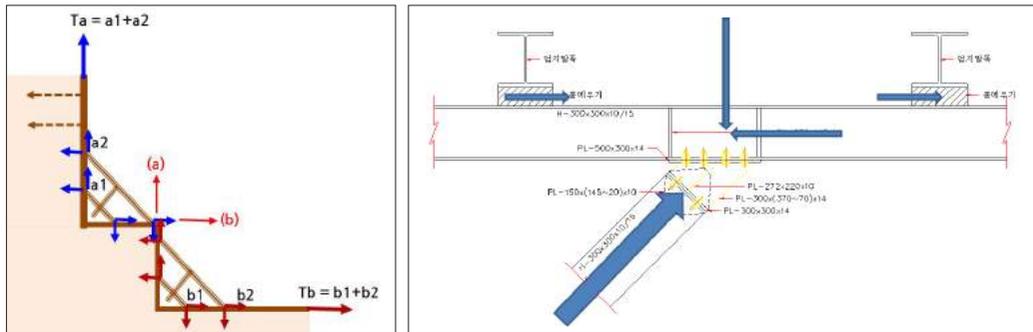
우가 많아 주의가 요구된다.

[그림 2(a)]와 [그림 3(a)]를 비교해보면, 경사고임대의 상향력에 대한 저항구조체를 설치하여야 한다는 사항이며, [그림 2(b)]에서는 지지체로서 콘크리트 블록을 현장타설토록 하는 것인데 이 경우는 현장 타설 콘크리트 블록이 완전 경화되기 전에는 지지구조가 되지 못하여 벽체의 변형은 불가피하므로 [그림 3(b)]에서와 같이 즉시 지지력이 발휘되는 지지말뚝으로 하는 것이 유리하다는 사항이므로 설계자는 이를 고려하여 현장여건에 맞게 검토할 것을 제안하는 것이다. 또한, 레이커 지지체의 변위 여부에 따라 지지능력에 큰 차이가 있으므로 계획계획에 지지체의 변위를 측정하도록 하여야 할 것으로 판단된다.

3.2 버팀대(Strut)의 설계

(1) 띠장의 폐합 여부

버팀대의 설계에 있어서 단면상 안정성 검토 후 그 결과에 따라 평면적인 배치를 계획함에 있어서 터파기 부지 형상에 따라 설계자의 고민이 크게 달라지게 된다. 그 주된 고민은 버팀대와 벽체 사이에 설치되는 띠장의 폐합 여부에 대한 고민이 매우 중요한 사항이라고 판단된다([그림 4], [그림 5] 참조).



(a) 코너부 2방향 힘, 띠장 폐합 여부의 중요성

(b) 압기말뚝, 띠장, 경사버팀대 분력도

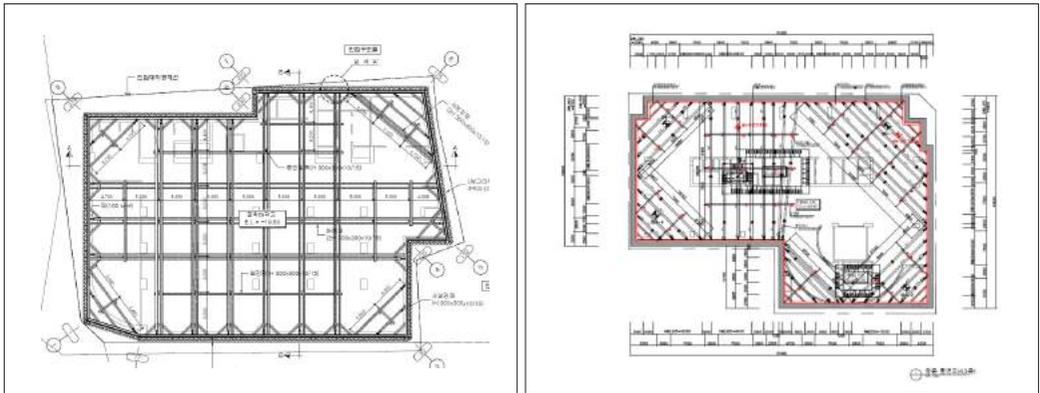
그림 4. 경사버팀대에서 2방향 힘의 전달에 대한 개념도

(2) 장기간의 버팀대

터파기 면적이 넓어 장기간의 버팀대를 계획할 경우에는 안정검토에서 버팀대의 강도 이내의 축력이 발생하더라도 실제 시공에서 모든 버팀대의 길이가 도면과 같이 동일하게 설치될 수 있을 것인지에 대한 사항과 배면지반의 특성이 버팀대 위치마다 동일할 수 있을 것인지에 대한 고민이 요구된다. 이들 사항이 달라지면 특정 버팀대에 힘이 집중될 수 있어 전체 구조의 불안정으로 이어질 수 있기 때문이다.

(3) 경사버팀대(코너부)

[그림 5(a)]에 비해 [그림 5(b)]에서는 경사버팀대(corner strut)의 길이가 매우 긴 편이다. 경사버팀대는 맞버팀대(축력만 작용하는 버팀대)에 비해 2방향의 힘이 발생하기 때문에 모멘트의 발생이 필연적이다. 그러나, 안정성 검토에서는 이러한 모멘트에 대한 검토가 행해지지 않고 있다.



(a) 상하좌우 버팀대간 간섭(띠장 레벨 일치 안됨)

(b) 상하좌우 버팀대간 미간섭(띠장 동레벨 설치)

그림 5. 버팀대의 평면배치 사항에 따른 띠장 폐합 여부 예시도

(4) 편굴착에 대한 문제

지하 터파기 과정에서 임의 위치에서 우선 굴착할 수밖에 없기 때문에 흙막이벽체 및 버팀대에는 편굴착에 의한 영향을 받을 수밖에 없다. 굴착과정에서 발생하는 편굴착 영향에 의해 구조안정성의 불안정측이 우려되는 정도의 약한지반, 깊은 굴착일 경우에는 단면 안정성 검토에서 버팀대에 발생하는 축력은 설계한 도보다 충분한 여유를 두는 노력이 요구된다.

예시로 평면배치계획에 대해 구조안정성 검토를 수행하고 발생모멘트를 확인한 결과 [그림 6]과 같이 경사버팀대의 휘어지는 현상과 모멘트 값이 크게 발생하게 되는 것으로 나타나므로 경사버팀대는 큰 힘이 발생하는 곳, 길이가 길어지는 곳에서는 지양하는 것이 바람직하다 판단되며, 부득이 필요할 경우에는 평면적 배치에 대해 구조안정성검토를 별도로 수행하여 추가 보강대책을 고민하는 것이 바람직하다 사료된다.

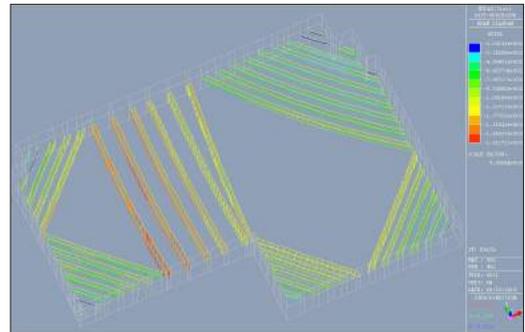


그림 6. 버팀대의 평면배치

3.3 소일네일과 지반앵커의 설계

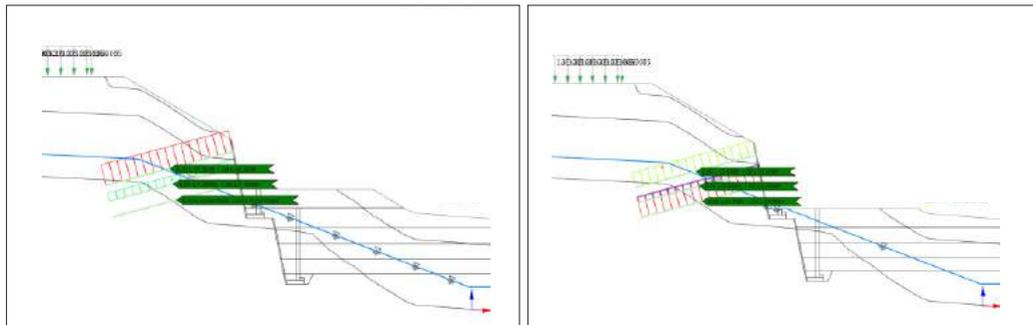
흙막이벽체의 지지방법으로 소일네일과 지반앵커를 사용하는 경우가 있는데, 이들 두 부재의 지지특성에 의한 차이를 명확히 알고 설계할 필요가 있다.



그림 7. 지지형식에 따른 변위 관련도

(1) 소일네일의 거동 특성

소일네일과 같이 천공 후 그라우트 충전 후 다음 단계 굴착을 반복하는 보강의 경우, 다음 굴착과정에서 변위가 발생하는 정도에 따라 기 설치한 소일네일은 저항능력이 발휘되기 시작한다. 즉, 소일네일은 변위를 허용하는 지지 부재이다. 이러한 사항은 [그림 8] 및 [그림 9]의 굴착단계를 고려한 해석에서



| | 발생축력(kN) | |
|--------------|-----------|--------|
| | 3단 네일 시공시 | 4단 굴착시 |
| 1단 Soil Nail | 18.32 | 23.98 |
| 2단 Soil Nail | 7.12 | 9.39 |
| 3단 Soil Nail | 0.00 | 31.71 |

그림 8. 단계굴착에 따른 네일 발생 축력의 변화

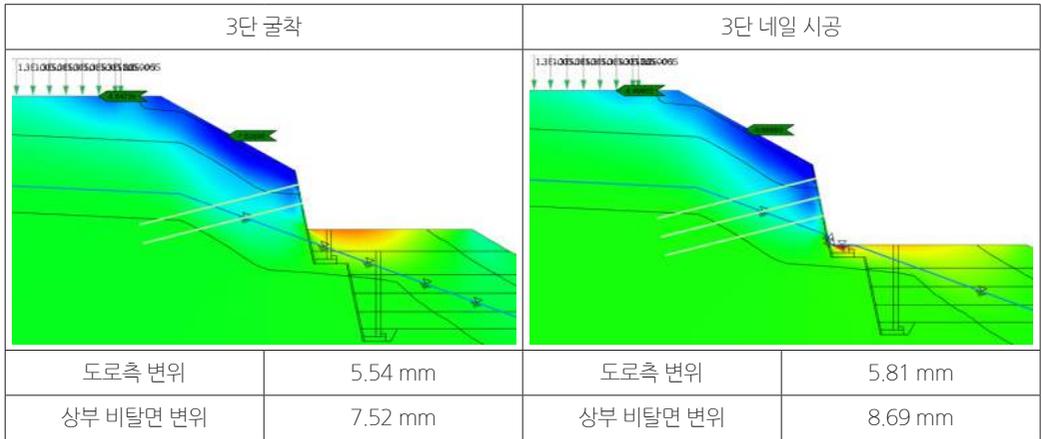


그림 9. 단계굴착에 따른 지반변위의 변화

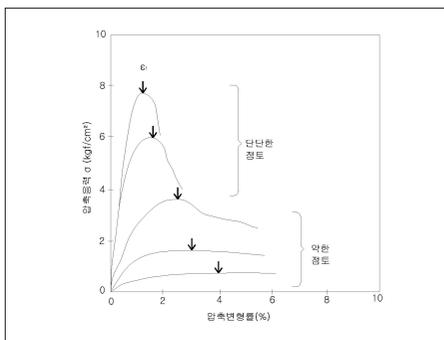
알 수 있다. 따라서, 소일네일을 사용할 경우에는 굴착단계에 따라 주변 변위 영향에 대한 사항과 실제 발휘되는 저항력과 부재의 지지능력을 고려하여 안정성 검토를 수행하여야 한다.

또한, 굴착 완료된 상태에 대해서만 모든 소일네일이 부재능력 전부가 저항력으로 발휘되는 것으로 안정성을 검토하는 경우가 대부분인데 이러한 경우에는 안전율을 과대 평가하여 불안정측의 검토가 되기 때문에 주의가 요구된다.

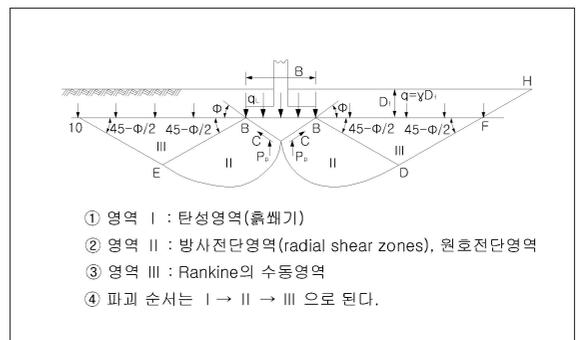
그리고 소일네일(또는 강관)의 인발저항력과 전단저항력을 동시 도입하여 안정성을 검토하는 경우도 있어 안전율을 턱없이 과대평가하는 경우도 있는데, 통상적으로 그 저항력으로 보강재의 전단저항력과 인발저항력 중 작은 값을 저항력으로 반영하여 안전율을 계산토록 하는 것이 바람직하다.

(2) 지반앵커의 거동 특성

소일네일의 변위 허용으로 인한 문제점을 보완하기 위해 계획되는 것이 지반앵커이다. 지반앵커는 변



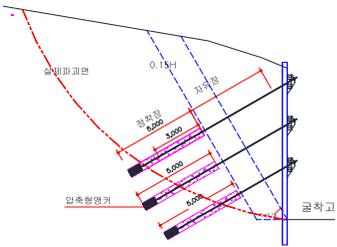
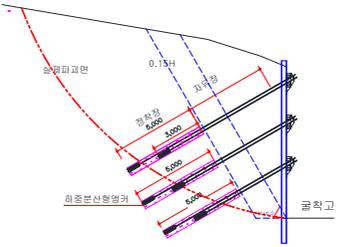
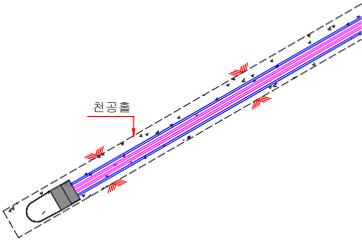
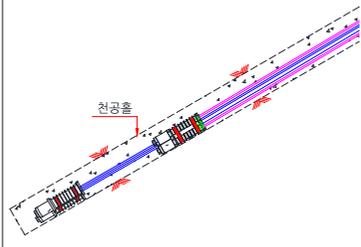
(a) 지반의 응력-변형을 관계도



(b) 직접기초의 극한지지력 개념도

그림 10. 지반의 응력-변형을 및 극한지지력 개념도

표 2. 강선의 길이에 따른 앵커구조의 차이 및 고려사항

| 앵커 한 개의 강선길이 동일 | 앵커 한 개의 강선길이 다름 | 비고 |
|--|--|--|
|  |  | <p>◎ 앵커는 지반상태가 가장 약한 상부 첫 단의 앵커력 확보가 어려운 것이 통상이고, 앵커력이 잘 발휘되지 않는다는 것은 설계시 추정 지반보다 약한 지반으로 보아야 하고, 가상활동영역의 범위는 증가한다는 것이 될 수 있으므로 앵커설치길이의 적정성도 동시에 검토해 보아야 할 부분임에 유의하여야 한다.</p> |
|  |  | <p>◎ 앵커력 확보 여부도 중요하지만 굴착진행과정에서 앵커력이 지속유지될 수 있는지에 대한 지반상태(크리프 여부)에 대한 판단도 매우 중요함.</p> |
|  |  | <p>◎ 앵커는 앵커를 구성하는 강선의 길이가 다르다면 그에 맞는 인장기, 정착구, 하중계를 사용하여야 하며, 그러지 못할 경우 굴착단계 진행에서 강선의 이완 현상이 발생하게 될 가능성 높음.</p> |
|  |  | <p>◎ 현재의 구조계산은 앵커 한 개의 강선길이가 모두 동일한 것에 대한 이론이고, 강선 길이가 다른 것에 대한 이론적 근거는 마련되지 않은 상태임.</p> |
|  <p>진동현식</p> |  <p>전기식</p> |  <p>유압식</p> |
|  <p>개별하중계</p> | | <p>◎ 또한, 현재의 정착(정착구)방식, 하중측정방식은 앵커 한 개의 강선길이가 모두 동일한 것에 대한 것이고, 강선 길이가 다른 것에 대한 것에 대해 시공관리하는 방식은 마련되지 않은 상태임.</p> <p>◎ 따라서, 앵커 한 개가 강선의 길이가 다른 경우는 구조계산서와 다르게 되어 설계오류, 시방 기준 불일치가 될 수 있으므로 유의할 필요가 있음.</p> |

위를 허용할 수 없는 주변여건인 경우 굴착단계에서 앵커력을 도입하여 변위를 사전에 억제하는 역할을 갖도록 하는 것이다.

현재 국내에 사용되고 있는 지반앵커에 있어서, 하나의 앵커에서도 강선의 길이를 달리하는 구조를

채택하는 경우가 대부분인데 이러한 방식은 지지구조에 있어서 설계기법이나 관리기법이 마련되어 있지 않기 때문에 그 사용에 주의가 요구된다(표 2 참조).

[표 2]에서 알 수 있듯이 하나의 앵커는 강선의 길이가 모두 동일한 것을 전제로 하여 앵커의 구조계산이 수행되고 있으며, 하나의 앵커에서 강선의 길이가 다르게 되면 정착장도 최소정착장 기준(4.0m)을 만족하지 못하는 점, 강선길이별 하중-늘음량 관계도의 작성이 어려운 점, 개별인장기를 사용하더라도 개별정착구를 사용하지 않고 일체형 정착구를 사용하고 있어 개별인장이 무의미해지는 점 등 설계 및 시공관리기법에서 해소하여야 할 문제점이 많은 편이다.

(3) 기타 참고사항

지반의 강도를 설계에 적용함에 있어서 적용하는 지반강도는 변위를 전제로 하고 있음에 유의할 필요가 있다. 변위가 발생하지 않으면 지반강도는 발현(mobilized)되지 않는다. 즉, [그림 10(a)]의 응력-변형률 그래프에서 알 수 있듯이 설계에 사용하는 지반강도가 실제 현장에서 발휘되기 위해서는 변위가 발생되어야 한다는 것이다.

다른 예로, [그림 10(b)]의 직접기초의 지지력 문제에 있어서도 마찬가지이다. 지지력이 충족된다고 해서 그 지지력이 발휘되기 위해 요구되는 침하가 검토되지 않아도 되는 것은 아니다. 그래서, 지지력과 침하를 동시에 고려하는 지내력(지지력, 침하)을 평가하여야 하는 것이다.

3.4 지중연속벽의 설계

지중연속벽(Diaphragm wall, Slurry wall)은 지반이 약하고 토압이 크게 작용하는 경우 H-pile 흠막이 판, CIP, SCW, Sheet pile 공법 등으로는 저항할 수 없는 경우에 주로 사용한다. 벽체의 강성이 크고 벽체

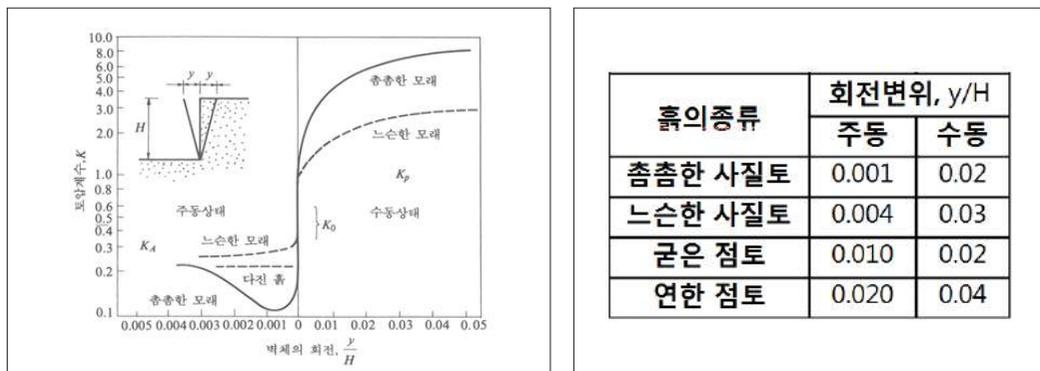


그림 11. 지반의 주동 및 수동 토압과 변위 관계

3.5 부상방지앵커의 설계

구조물의 부상(浮上)을 방지하기 위해 부상방지앵커를 시공하는 경우가 종종 있다. 앵커의 경우 두부는 정착구에 내에 강선과 썸지가 고정되는 구조인데, 이 부분에 누수현상이 발생하면 강선의 부식으로 인해 앵커의 기능은 상실되게 된다. 강선의 부식을 방지할 수 있는 대책은 없다고 보아도 될 정도로 어려운 사항이다.

이러한 현상을 고려해 볼 때 [그림 13]과 같이 철근다발(마이크로파일 개념)을 기초매트 철근과 결속하여 기초매트콘크리트에 매몰하는 방법도 고려해 볼 필요가 있을 것으로 판단된다.



사진 1. 부상방지앵커 두부에서의 누수현상

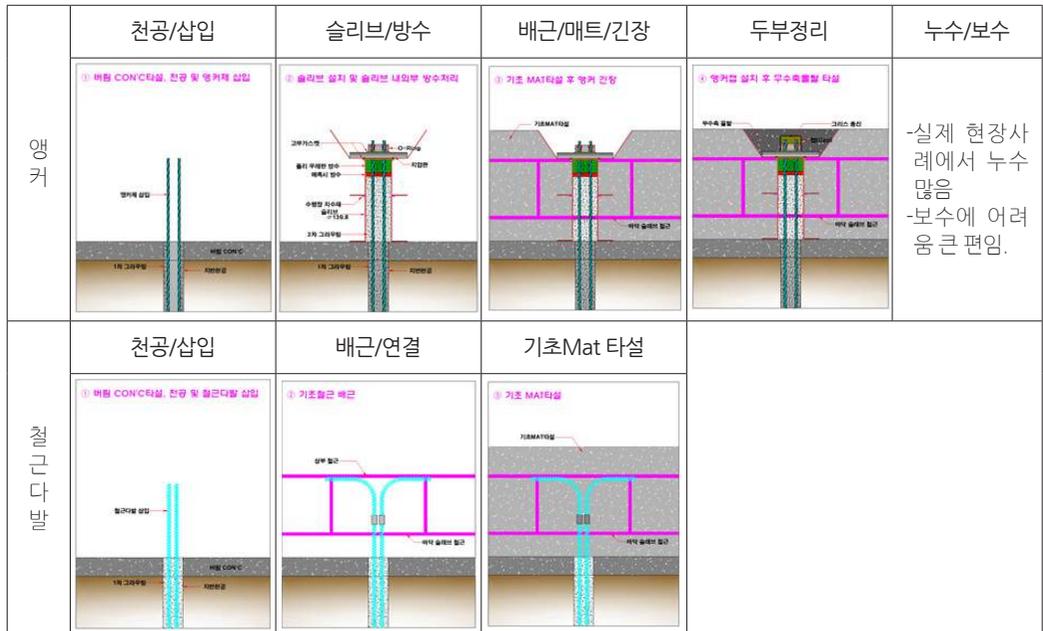


그림 13. 부상방지를 위한 지지구조의 비교

3.6 기타 사항

(1) 최소지반반력계수

탄소성이론을 기반으로 하는 흙막이 해석 프로그램을 이용하여 흙막이 안정성을 검토할 경우, 프로그램에서는 최소지반반력계수를 디폴트(default)값으로 하여 100을 적용하도록 추천하고 있다. 이 값은 시험이나 이론식에 의해 구해지는 지반정수가 아니기 때문에 기술자가 임의로 정할 수 없는 값이다. 모든 지반정수를 동일하게 하고 이 값을 어떻게 설정하느냐에 따라 흙막이벽체에 발생하는 토압의 변화를

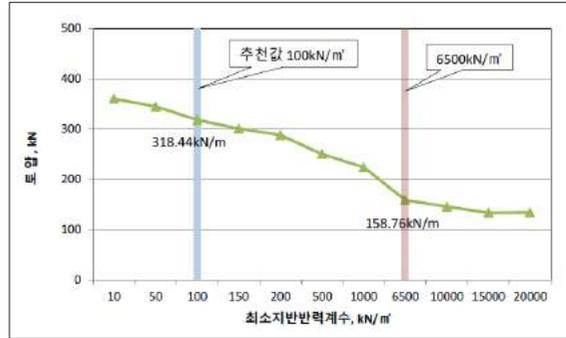


그림 14. 최소지반반력계수의 차이에 따른 벽체에 발생하는 토압의 변화

[그림 14]에 나타내었다. 프로그램에서 추천하는 값과 임의의 값의 비교에서 거의 2배의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다.

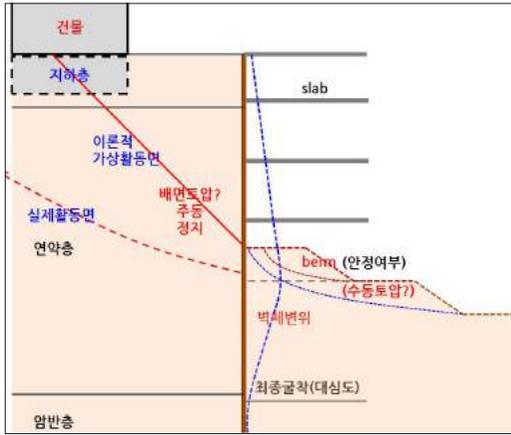
이 값을 설계자가 임의 조정할 수 있게 되면 동일한 지반조건에서 벽체에 발생하는 토압은 설계자마다 다른 안정성 평가를 하게 되어 시험을 통해 구한 지반정수나 경험에 의한 다양한 지반정수들은 무의미하게 된다.

따라서, 탄소성 이론적으로 해법을 구하는 과정에서 프로그램 내의 탄소성해석 수행 기법상 제시되어 있는 최소지반반력계수는 해석을 수행하기 위한 프로그램 자체의 기능수행값으로 보아야 하고, 이 값이 토압의 크기에 미치는 민감도가 상당히 큰 편이므로 이 값을 임의 조정하는 등의 행위로 흙막이벽체의 안정성을 추구해서는 안 된다고 판단되므로 주의를 요한다.

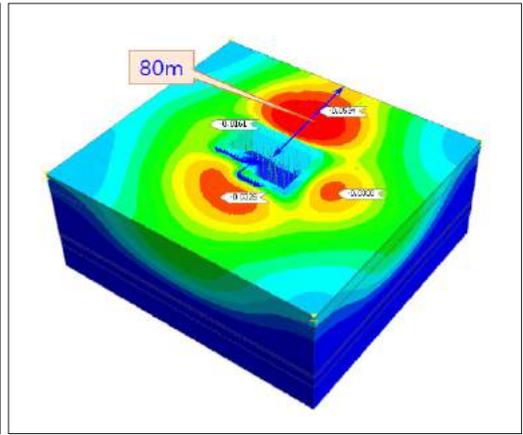
(2) 안정해석의 검토한계에 대한 극복

연약지반에서 굴착을 계획함에 있어서 설계시 탄소성이론에 의한 안정성 검토만을 수행할 경우, [그림 15(a)]와 같이 굴착바닥면보다 더 깊은 곳에서 큰 변위가 발생하고 그 영향범위가 매우 넓어지는 등 이론과는 크게 다른 양상의 이상변위가 나타나는 사례가 많은 편이다.

상기에서 기술한 바와 같이 탄소성이론을 기반으로 하는 안정해석에서 굴착측에서의 수동토압을 전부 지반지능력으로 보는 이론적 한계의 문제와 버팀방법을 구분하여 굴착과정에서 벽체에 작용하는 토압으로 정지토압을 적용한 결과와 주동토압을 적용한 결과에는 큰 차이가 없는 것으로 나타나 버팀방법의 차이에 따른 해석 수행이 불가한 문제점 등이 공존하고 있음에 기인하는 것으로 판단된다. 이러한 문제점을 안정성 검토만으로는 극복하기에는 현실적으로 어렵다고 판단되므로 이러한 변위양상이 우려되는 연약지반에서의 굴착에 있어서는 [그림 15(b)]와 같이 유한요소법 등과 같은 수치해석을 수행하



(a) 연약지반에서 나타나는 벽체의 변위 양상



(b) 수치해석 수행의 예

그림 15. 벽체의 이상 변위 및 수치해석의 예

여 변위영역과 부재력을 검토하여 설계에 반영토록 하는 것이 바람직하다 판단되므로 설계시 주의할 필요가 있다.

(4) 경사지 시공중 물관리 문제

경사지에서 굴착을 계획할 경우 배면의 경사지에서 발생하는 지표수 및 지하수 처리계획에 대해 매우 신중히 대처할 필요가 있다. 최근 강우패턴은 일일 몇 백 mm의 강우도 발생하는 양상이므로 설계자는 시공 후 유지관리 측면에서 뿐만 아니라 시공중 배수관리에도 각별히 유의하여야 할 것으로 판단된다([사진 2] 참조).



사진 2. 시공 중 지표수 처리 실패 사례