

지반굴착과 지하수 - 주변영향 평가 측면에서의 고찰

Deep Excavation and Groundwater - Effects on Surrounding Environment

유충식¹⁾

¹⁾ 성균관대학교 공과대학 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Sungkyunkwan University

SYNOPSIS : This paper concerns the assessment of impact of deep excavation on surrounding environment with emphasis on the groundwater lowering. Fundamentals of ground excavation and groundwater interaction were reviewed and the stress-pore pressure coupled analysis approach as a tool for assessment was introduced. A case study concerning the use of coupled analysis for deep excavation design was presented. Implications of the finding from from this study were discussed.

Keywords : Deep excavation, Groundwater, Stress-pore pressure coupled analysis, Finite element analysis

1. 서 론

작금에 들어 건설공사는 과거와는 달리 "지속가능한 건설기술"의 접목을 요구하고 있다. 즉, 과거에는 건설공사의 설계/시공적 측면에서의 주안점을 "장·단기 안정성 확보"에 두었으나 일반인들의 "건설공사가 주변에 미치는 영향"에 대한 관심이 높아가고 환경적 측면에서의 중요성이 인식되면서 이제는 "안정성"뿐만이 아니라 "주변환경에 미치는 영향적 측면"이 설계/시공시 주요 검토사항으로 대두되고 있다.

가시설 혹은 터널 등의 지하굴착(underground excavation)은 응력해방으로 인해 평형상태(state of equilibrium)에 있던 지중응력의 변화를 가져오며 이러한 응력의 변화는 새로운 평형상태에 도달할 때까지 지반변형(ground deformation)을 야기 시키고, 평형상태에 도달하지 못할 경우 결국 지반 붕괴가 발생한다. 한편, 지반 붕괴로 까지 이어지지 않더라도 이러한 굴착으로 인한 지반 변형이 과도할 경우 인접 지장물이나 상부 구조물의 변형을 가져오게 되어 "주변영향의 최소화"라는 도심지 지반굴착의 대명제를 충족시키지 못하게 된다. 도심지 가시설 설계/시공시에는 가시설의 안정성 확보는 물론이고 지반 굴착으로 인한 주변 영향 평가를 위해서는 굴착으로 인한 지반변형 및 주변 지하수위 저하 등에 대한 정성·정량적인 예측을 통해 주변 건물 및 매설관에 대한 영향을 평가하여야 한다. 이러한 예측은 경험적, 반경험적, 해석적 또는 수치 해석적인 방법으로 이루어지나 형식적으로 수행되고 있는 것이 현실이다. 특히 지하철 9호선 건설공사 등 최근에 들어 지하수위가 높은 지반조건에서 가시설 굴착이 이루어지는 경우가 빈번해 지고 있으나 설계단계에서 단지 그라우팅을 계획하였다는 이유만으로 지하수에 의한 영향이 간과되고 있는 경우가 허다하다. 즉, 그라우팅의 차수 혹은 보강효과는 결국 대상지반과 시공 중 확보되는 품질에 좌우되거나 그라우팅 품질에 대한 과신으로 인해 실제 시공시 많은 어려움에 직면하는 경우가 발생하고 있다.

지반굴착시 지하수 유동이 발생하는 시공조건에 있어서 주변지반의 응력-변형을 거동은 간극수압의 변화에 좌우되며, 따라서, 지하수위가 높고 투수성이 큰 지반에서의 굴착시 가시설 벽체의 안정성 검토나 지반변형에 대한 평가는 "유효응력" 개념에 근거하여야 한다. 그러나 아직까지 대부분의 경우에 있어 응력해석만을 수행하는 경우가 대부분이며, 경우에 따라서는 침투해석을 병행하기도하나 결국 전응력

또는 부분적 유효응력해석이 수행되므로 시공 중 발생하는 지반변형 및 가시설 벽체의 안정성 검토가 부적절하게 이루어질 소지가 다분하다.

지반굴착에 대한 영향을 유효응력 개념에서 접근하기 위해서는 일종의 수단(tool)이 있어야 한다. 다양한 수단이 있을 수 있으나 연속체 개념의 유한차분법 혹은 유한요소법에 근거하여 응력과 간극수압이 연계된 “응력-간극수압 연계해석(이하 연계해석이라 칭함)”이 효과적인 수단이 될 수 있다. 연계해석은 응력해석과 침투해석을 분리(decouple)하여 수행한 후 침투력을 응력에 반영하는 개념이 아니라 해석과정에서 유효응력에 근거하여 지반의 응력-변형을 관계가 결정되는 개념이 적용되고 간극의 변화에 따른 투수성의 변화 및 체적변화 또한 모사되므로 지하수 저하시 유효응력 증가로 인한 지반의 체적변형이 발생하여 이것이 지반침하(변형)에 대한 보다 현실적인 결과를 얻을 수 있다.

본 고에서는 도심지 지반굴착 설계/시공시 주변 영향 평가를 위한 수단으로서의 연계해석 및 지하수 저하와 지반침하의 기본 이론, 연계해석의 적용에 있어서의 적용 사례를 다루었다.

2. 지하수저하와 지반거동

2.1 기본개념

그림 1에서와 같이 지하수위가 높고 매립·충적층 혹은 풍화토와 같은 토사지반에서 굴착이 이루어질 경우, 지하수위 저하는 불가피하게 된다. 지하수위 저하는 지반내 간극수압을 감소시키고 따라서 유효응력을 증가시키므로 토립자의 변형 및 느슨한 토체의 체적감소를 야기시켜 전체적으로 지반침하를 가중시킨다. 따라서 이러한 시공조건에서의 지반굴착시 지반변형은 굴착에 따른 응력해방으로 인한 영향과 지하수 저하로 인한 영향이 복합적으로 작용하여 발생하게 된다.

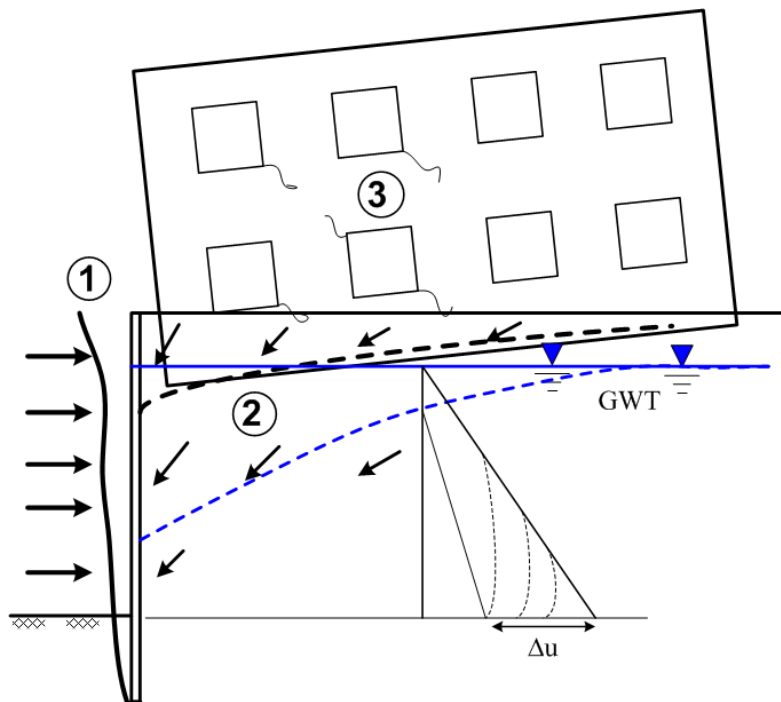


그림 1. 지하수 저하로 인한 주변 침하

우리 기술자들이 가지고 있는 지하수 저하에 의한 지반침하에 관한 잘못된 인식중의 하나는 예를 들어 토사지반이 풍화암이나 연암층 상부에 위치하는 경우 일반적으로 암반층의 투수계수는 작을 것이라

고 예상하여 지하수에 관련된 대책마련에 매우 소극적이라는 점이다. 그림 2에서는 최근 턴키설계시 현장시험결과로부터 얻어진 다양한 지반/암반에 대한 투수계수 범위를 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 연암이하 암반이라도 투수계수가 1.0×10^{-5} cm/s 이상으로도 조사된 바 있으며 이는 일반적인 점토의 투수계수 1.0×10^{-6} cm/s 보다도 큰 값으로서 연암 정도의 암반이라도 절리 등의 불연속면의 발달 여부에 따라 상당한 크기의 투수성을 갖는다는 것을 알 수 있다. 특히, 풍화암 지층이라도 시공중 지하수 유동으로 인해 풍화토 정도로 연약화되는 경우가 대부분이어서 암반층이므로 굴착으로 인한 지반이완 및 침투에 대해 소극적으로 대처할 경우 시공 중 많은 어려움에 봉착하게 된다.

지반굴착으로 인해 지하수 저하가 예상되는 구간에서의 지반침하량은 (a) 초기 지하수위 위치; (b) 지하수위 하부 토사층 두께에 따라 좌우된다. 한편, 지중연속벽이나 차수 그라우팅을 적용하는 경우에도 균열발생시 누수는 불가피하기 때문에 이에 대한 굴착배면에 지하수계를 설치하여 시공중 철저한 관리를 수행하는 것이 매우 중요하다. 그림 3은 균열폭에 따른 콘크리트의 투수계수 변화 경향을 보여주고 있는데 균열폭이 0.4mm 정도만 되어도 투수계수가 10^{-5} cm/s 이상으로 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타나 지중연속벽체라도 완벽한 차수 효과를 얻을 수 없음을 단적으로 보여준다고 하겠다.

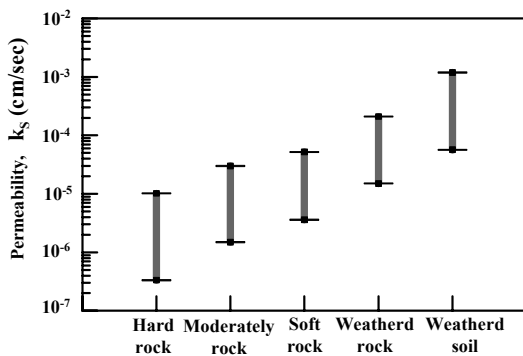


그림 2. 최근 턴키 설계구간 지층별 적용 투수계수

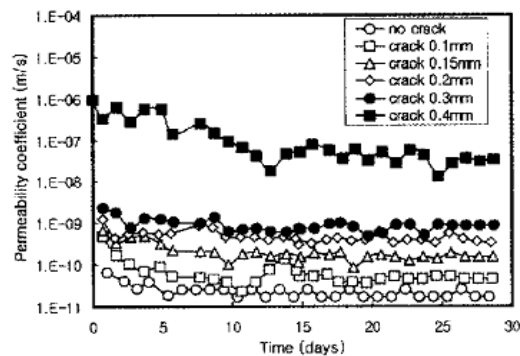


그림 3. 균열폭에 따른 콘크리트의 투수계수 변화량

앞서 언급한 바와 같이 지하수위가 저하될 경우 충적층, 매립층 등의 토사와 같이 간극이 큰 토사에서는 유효응력 증가와 더불어 간극의 감소를 통한 체적감소가 발생하며 이를 통해 지반침하가 발생하게 되며, 토사지반에서 지하수 저하로 인한 지반침하 영향 범위는 지하수 저하가 없는 경우에 비해 수배에 달하게 되므로 설계/시공시 지하수저하와 관련된 정성·정량적 검토가 매우 중요하다고 하겠다.

2.2 응력-간극수압 연계해석의 기본 개념

2.2.1 이론적 배경

응력-간극수압의 연계해석에서는 지반을 다상재료(multiphase material)로 간주하고 유효응력 개념을 적용하여 외력 및 수리적 조건의 변화에 대한 대상 지반의 역학적 거동을 표현한다. 응력-간극수압 연계해석에서 사용되는 지배방정식은 Biot (1941, 1955), Zienkiewicz와 Shiomi (1984)가 제안한 기본적인 완전 연계 유효응력 과정을 토대로 유도되며 선형 운동량의 평형 및 질량 보존의 법칙과 같은 물리적 법칙을 토대로 식 (1) 및 (2)와 같이 정식화 된다.

$$\sigma_{ij,j} - \rho b_j = -\rho \ddot{u}_i \quad (1)$$

$$n(v_{i,i} + \dot{\epsilon}_{vwc}) + \dot{u}_{i,i} = 0 \quad (2)$$

식 (1)에서 $\sigma_{ij,j}$ =전응력; ρ =흙의 밀도; b_j =물체력; u_i =흙입자의 변위이며 식 (2)에서 $v_{i,i}$ =침투속도; ϵ_{vwc} =압축에 의한 간극수의 체적 변형률; 그리고 n =간극률로 정의된다. 식 (1)은 정·동적 문제에서의 평형(지배)방정식이며 정적문제에서 관성력항($\rho\ddot{u}_i$)은 생략된다. 식 (2)는 질량 보존의 법칙을 의미하는 방정식으로서 정적문제에서 변위속도항($\dot{u}_{i,i}$)은 생략할 수 있으며 Cartesian 좌표계로 작성하면 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{1+e_0} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (3)$$

여기서 v_x, v_y, v_z 는 각각 x, y, z 방향의 유속이며 e_0 는 초기 간극비, e 는 간극비를 의미한다. 식(1)과 (2)로 정의되는 물리적 법칙이 흙입자, 간극수, 침투에 대한 구성법칙과 연계되는 과정을 토대로 유도되는 지배 방정식은 해석 대상 영역에 대한 경계조건 및 초기조건을 토대로 해를 찾게 된다.

응력-간극수압 연계 해석에서는 식(1)과 (2)를 연계시키는 과정을 통해 응력뿐만이 아니라 대상 매체의 간극비의 시간에 따른 변화(체적변화)도 고려하여 해(solution)을 찾게 된다. 즉, 연계해석에서 대상 매체의 역학적 거동은 간극에 존재하는 액체와 입자의 외력에 대한 응답특성 및 대상 매체의 유효응력에 대한 응답특성의 조합으로 결정된다. 따라서 흔히 적용되고 있는 응력해석과 침투해석을 분리하여 수행한 후 유효응력을 찾아 해를 구하는 접근방법은 응력-간극수압 연계해석의 결과와는 상당한 거리가 있다. 특히, 연계해석에서는 대상 매체의 간극비의 변화, 즉 체적의 변화가 고려되나 응력해석 혹은 분리된 응력해석+침투해석의 결과는 이에 대한 고려가 되지 않으므로 지반침하 등이 과소평가될 수 있다.

2.2.2 모델링

1) 정상류(steady state flow) 및 부정류(transient flow) 해석

응력-간극수압 연계해석은 시간개념의 적용여부에 따라 정상류(steady state) 해석과 부정류(transient) 해석으로 구분된다. 정상류해석은 외부환경 변화에 의해 침투가 발생하여 평형상태에 도달한 후에 대한 해석으로서 평형상태에 도달하는 과정에 대한 결과는 얻을 수 없다. 따라서 단계별 굴착으로 시공되는 지반굴착 문제의 시공과정 중 발생하는 지반변형 및 가시설 벽체의 안정성에 대한 평가를 위해서는 이러한 정상류 해석은 적당하지 않다. 반면, 부정류 해석은 시간개념이 도입된 것으로서 지반굴착으로 침투가 발생하는 시점에서 평형상태에 도달하는 시점까지 임의의 시간에서의 해를 얻을 수 있으므로 지반 굴착 후 시간에 따른 지하수위 저하 경향과 이에 따른 가시설 벽체 및 주변지반의 거동을 파악할 수 있다.

2) 수리경계조건

수치해석에 있어서 지배방정식은 해석대상 조건에 대해 초기조건과 경계조건을 부여하여 해를 얻게 된다. 유한요소법에 근거한 응력-간극수압 연계해석에서도 응력해석에서 변위에 대한 경계조건과 아울러 수리경계조건을 부여하여야 한다. 응력해석에서의 변위경계조건과 마찬가지로 연계해석에서의 수리경계조건은 해석결과에 지대한 영향을 미치는 모델링 측면에서 매우 중요한 경계조건이라고 할 수 있다. 수리경계조건을 설정하는데 있어 먼저 굴착이전의 초기 수리경계조건이 설정되어야 한다. 그림 4에 서와 같이 초기 지하수위는 일반적으로 간극수압의 분포를 지정하는 방법으로 설정하며, 수리경계조건이 부여 되지 않은 경계면은 일반적으로 no-flow 경계로 간주된다.

한편, 굴착이 진행되면서 굴착면을 통해 지하수 유입이 발생한다. 굴착면을 통한 유입량은 대상매체의 투수계수에 좌우되며, 지반굴착 문제와 같이 굴착면을 통한 유입으로 지하수위가 저하되는 경우에는 시간경과에 따른 자유수면을 찾아야 하는 "unconfined-flow" 성격의 문제를 가지고 있다. 이는 흙댐의 경우 담수 후 발생하는 정상류 침투해석시 자유수면을 찾는 것과 유사하다. 즉, 흙댐의 경우와 마찬가지로 굴착문제에 있어서도 지하수가 유입되는 경계면은 침투가 발생하면서 시간에 따라 변하기 때문에 일괄

적으로 이것을 찾는 과정 또한 침투해석이나 연계해석에서 “해”를 찾는 과정에 포함된다. 지하수 유입면은 Pagano (1997)이 제안한 ‘배수경계(drainag-only flow boundary)’ 개념을 적용하여 찾을 수 있다. 즉, 배수경계는 포화된 매체를 통해서만 지하수가 유입되고 유입면의 간극수압은 '0'이 되어야 하는 조건을 만족하는 면을 찾는 간단한 개념(그림 5)을 적용하는 것으로서 침투해석을 수행하는 과정에서 불포화면을 배제하고 포화된면에 대한 검토를 통해 유입면 결정하게 된다. 따라서 굴착면의 간극수압을 '0'으로 부여하여 침투가 강제적으로 발생하게 하는 방법으로 얻은 ‘해’는 적절치 않다고 보고된바 있다(Pagano 1997).

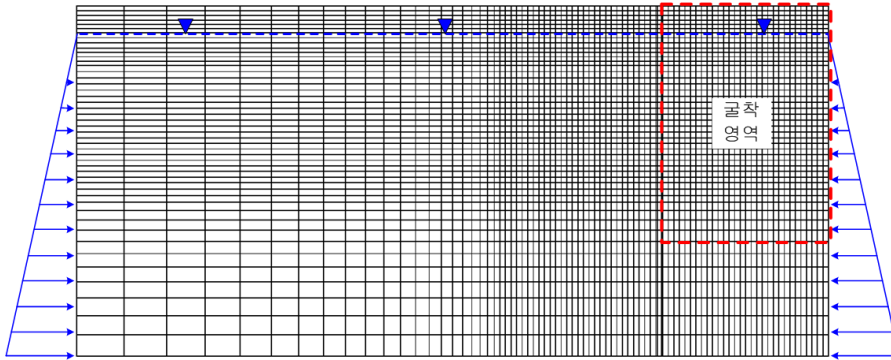


그림 4. 수리경계조건의 설정

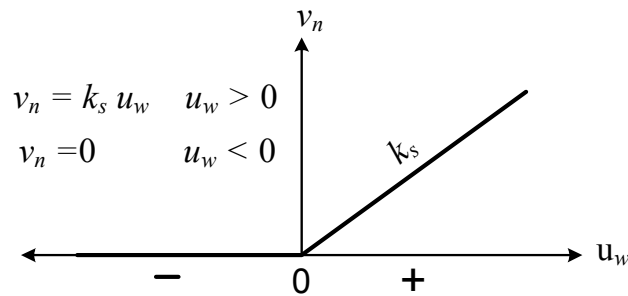


그림 5. Drainage-only 수리 경계조건

3. 연계해석의 설계적용 사례

본 장에서는 지하수위가 높고 토사층이 두텁게 위치하는 지반조건에서 지반굴착이 이루어지는 시공조건에 대한 가시설 설계에 있어서 앞서 언급한 응력-간극수압 연계해석의 적용사례를 다루었다.

3.1 현장개요

당 구간은 도심지 내에 지하차도 건설을 위한 가시설 구간으로서 지하수위가 GL-2m 내외에 위치하고 매립층, 충적층, 풍화토로 구성된 토사층이 두텁게 위치하여 가시설 시공 중 지하수위 저하가 예상되는 구간이다. 당 현장은 다양한 가시설 단면을 가지고 있으나 그림 6에 제시되어 있는 단면 AA'과 BB'에 대한 검토 결과를 제시하였다.

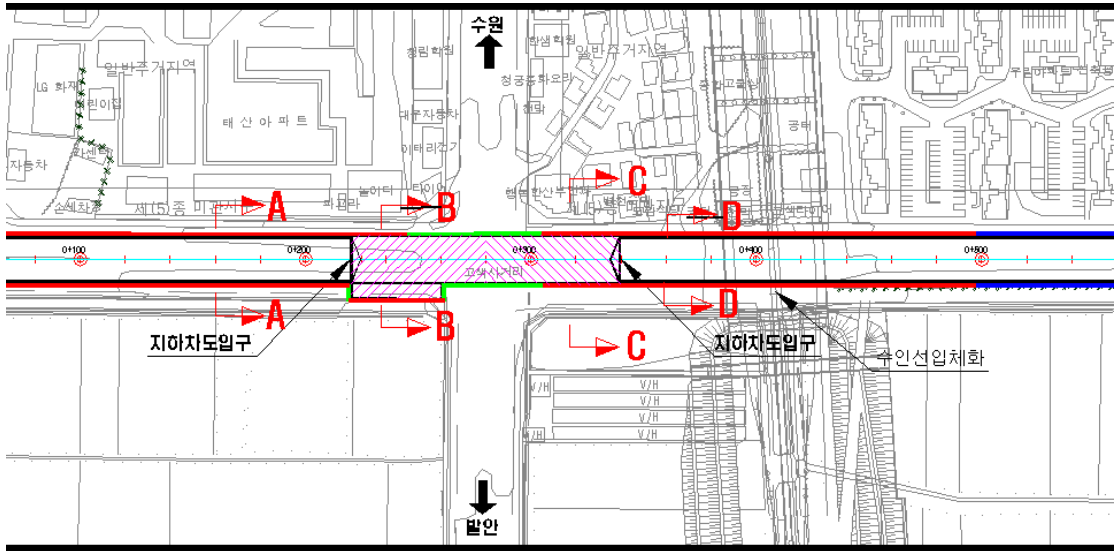


그림 6. 현장 평면도

본 현장의 지반조건은 상부 4m는 매립층과 충적층으로 이루어져 있고 그 하부에 10m 가량의 풍화토 층이 위치하고 있으며 지하수위는 매립층과 충적층의 경계에 위치하는 것으로 조사되었다. 한편, 각종 건물이 가시설 주변에 들어서 있어 굴착으로 인한 응력해방과 지하수위 저하로 인한 지반침하를 최소화 하여야 한다는 제한적인 조건을 갖고 있다.

가시설 벽체로 단면AA' 경우에는 SCW($\phi=550mm$)가 적용되었으며, 단면BB'의 경우 좌측벽체(BB'-L)로는 H-pile+토류판이 적용되었으며 차수벽체로 NDS가 시공되는 것으로 계획되었다. 한편, 단면BB'의 우측벽체(BB'-R)는 SCW($\phi=550mm$)가 풍화암에 근입되는 것으로 계획되었다. 지지구조는 버팀보와 앵커를 사용하는 것으로 되어 있으며 자세한 제원은 표 1에 정리되어 있다.

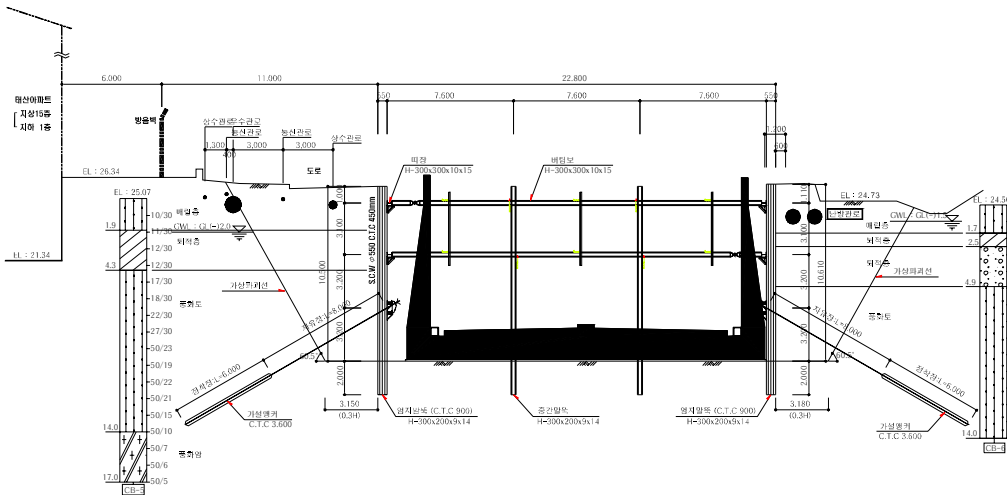


그림 7. 해석대상구간(단면 AA')

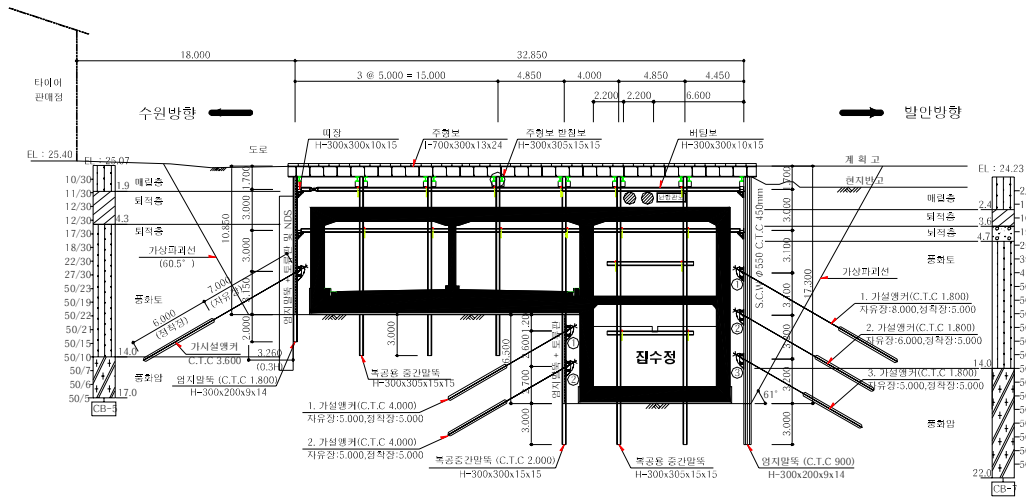


그림 8. 해석대상구간(단면 BB')

3.2 응력-간극수압 연계해석을 통한 지반거동 평가

3.2.1 사용프로그램

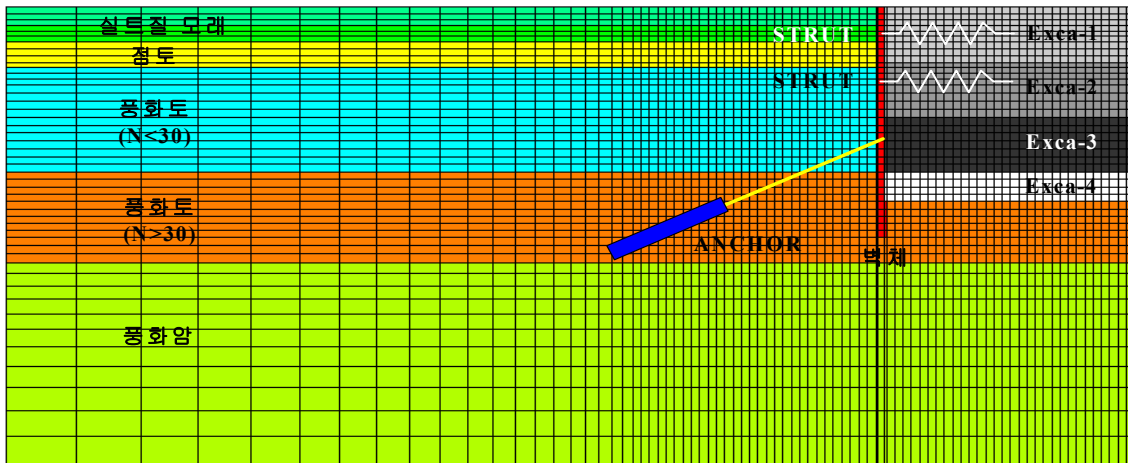
응력-간극수압 해석은 세계적으로 그 효용성이 검증된 범용 유한요소해석 프로그램 ABAQUS 6.4을 사용하여 수행하였다. ABAQUS 6.4는 다양한 지반 구성모델을 제공하고 굴착 시공과정의 모델링에 필수적인 요소의 제거 및 추가 기능이 탁월할 뿐만 아니라 매우 효율적인 재료 모델링 알고리즘을 적용하고 있다. 아울러 당 구간과 같이 굴착으로 인한 지하수 유동이 예상되는 구간에 적용하여야 하는 응력-간극수압 연계 해석에 있어서 탁월한 안정성을 제공한다.

3.2.2 해석 모델링

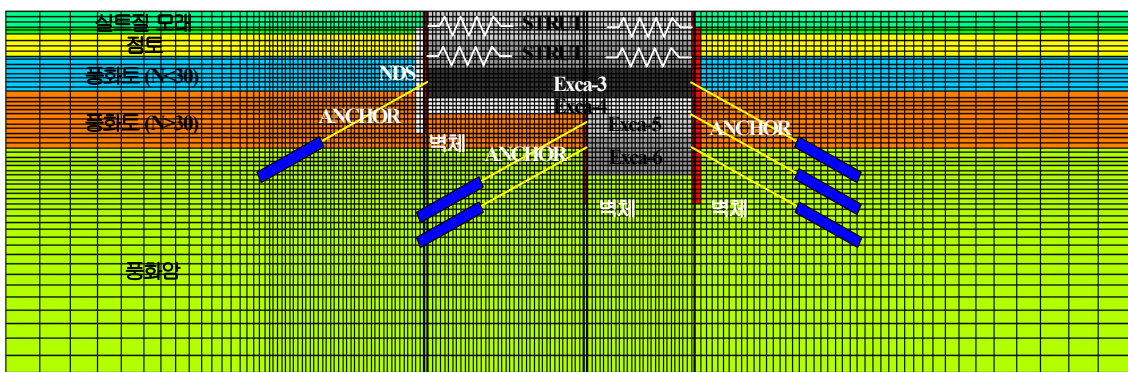
단면 AA'의 경우 해석대상 단면이 좌우 대칭인 점을 감안하여 반단면 해석을 수행하였으며[그림 7(a)], 단면 BB'의 경우 대칭조건이 형성되지 않으므로 전단면 해석을 수행하였다(그림 8). 변위 경계조건인 경우 응력-간극수압 연계해석을 수행함으로써 인해 발생하는 지표침하를 고려하여 경계면 설치로 인한 오차를 최소화하기 위해 가시설 벽체에서 약 4H (H=굴착깊이)되는 위치에 수평방향 변위가 구속된 측면 경계면을 설치하였으며 굴착저면 바닥으로부터 약 1.5H 하부에 연직 및 수평변위가 구속된 하부 경계면설치하였다. 초기 수리경계는 초기지하수위(GL-2m)를 고려하여 측면경계에 간극수압 분포를 지정해주는 방법으로 설정하였다.

해석 영역의 이산화에 있어 지반 및 가시설 벽체는 8절점 가감 적분 응력-간극수압 연계 평면변형요소(CPE8RP)를 이용하여 모델링하였으며 버팀보는 1절점 스프링요소(SPRING1)로 앵커는 2절점 스프링요소(SPRING2)를 이용하여 모델링하였다. 한편, 지반과 가시설 벽체사이의 인터페이스 특성을 고려하여 지반과 벽체 사이에 인터페이스 요소를 적용하여 굴착시 발생하는 인터페이스 거동을 모델링하였다.

재료 모델링에 있어 해석 대상 지반은 Mohr-Coulomb 항복규준을 따르는 비연계 탄소성 (non-associated elasto-plastic) 재료로 가정하였으며 가시설 벽체는 탄성재료로 가정하였다. 한편 굴착으로 인해 지하수위가 저하되어 부의 간극수압이 발생할 가능성이 있으므로 SWCC(Soil Water Characteristic Curve)를 이용한 모관흡수력(suction)을 고려하도록 하였다. 표 1은 해석에 적용된 지반 및 가시설 벽체, 그리고 구조부재의 역학적·수리학적 특성을 보여주고 있다.



(a) 단면 AA'



(b) 단면 BB'

그림 7. 해석 대상 단면의 유한요소모델

표 1. 해석에 적용된 지반 및 지보재의 역학적·수리학적 특성

구 분	단위중량 (kN/m ³)	점착력 (kPa)	내부마찰각 (°)	변형계수 (kPa)	프아송비	투수계수 (cm/sec)	초기 축압계수
실트질 모래	25	5	27	15,000	0.37	6.26×10^{-3}	0.43
점토	18	50	0	10,000	0.49	7.30×10^{-6}	0.10
풍화토(N<30)	20	17	30	35,000	0.35	3.12×10^{-4}	0.5
풍화토(N>30)	20	30	31	75,000	0.32	3.12×10^{-4}	0.5
풍화암	22	50	35	200,000	0.30	1.99×10^{-4}	0.6
벽체(SCW)	25	-	-	210,000,000	0.30	1.00×10^{-7}	0.5
벽체(NDS)	25	50	35	200,000	0.30	1.77×10^{-6}	0.5
스트럿	H-300×300×10×15						
앵커 (단면BB')	자유장 길이 : 8m , 정착장 길이 : 6m, 여유장 길이 : 1.5m 설치각도 : 30°, 본수 : $\phi 12.7\text{mm} - 4\text{EA}$						
앵커 (단면AA')	토류관 설치구간	자유장 길이 : 7m , 정착장 길이 : 6m, 여유장 길이 : 1.5m					
	굴착부지 구간	자유장 길이 : 5m , 정착장 길이 : 5m, 여유장 길이 : 1.5m					
	집수정구간1	자유장 길이 : 8m , 정착장 길이 : 5m, 여유장 길이 : 1.5m					
	집수정구간2	자유장 길이 : 6m , 정착장 길이 : 5m, 여유장 길이 : 1.5m					
	집수정구간3	자유장 길이 : 5m , 정착장 길이 : 5m, 여유장 길이 : 1.5m					
설치각도 : 30°, 본수 : $\phi 12.7\text{mm} - 4\text{EA}$							

3.2.3 해석결과

(1) 단면 AA'

그림 9는 굴착단계별 벽체 수평변위와 벽체 배면지반의 연직·수평변위 발생 경향을 그래프로 도시하고 있다. 특이할 만한 사항은 최종 굴착단계에서 벽체 저부의 변위가 최대 20mm 정도가 발생하는 것으로 나타나 근입깊이가 부족한 것으로 나타났다. 이러한 경향은 침투수압에 의해 벽체 좌측에서 외력이 증가하고 우측에서의 상향침투로 인해 유효응력이 감소하여 전단강도가 감소하여 저항력이 감소하였기 때문으로서 그림 10(b)에 제시되어 있는 유속벡터에서 확연히 관찰할 수 있다. 이러한 경향은 응력해석만을 수행할 경우 반영되기 어려운 경향으로서 연계해석의 중요성을 나타낸다고 하겠다.

한편, 벽체 배면의 최대 수평변위와 침하량은 각각 6mm, 8mm 정도로 그다지 크지 않게 발생하는 것으로 나타났다. 한편, 이 그림에는 전응력해석(total stress analysis, TSA)에 의한 최종굴착단계의 결과도 함께 도시되어 있는데 보이는 바와 같이 최종단계에서 연계해석에 의한 벽체 변위 및 배면 변위의 50%정도만을 나타내고 있으며 그 유형 또한 현저히 상이하게 나타나고 있어 본 구간과 같이 지하수 유동이 발생하는 시공조건에 응력해석만을 수행할 경우 과소평가의 가능성이 있음은 물론 부적절한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 한편, 굴착단계별 간극수압 분포를 나타내는 그림 10(a)에서는 약 1m 정도의 지하수위 저하가 발생하는 것으로 나타나 본 구간의 차수공법 설계는 적정한 것으로 검토되었다.

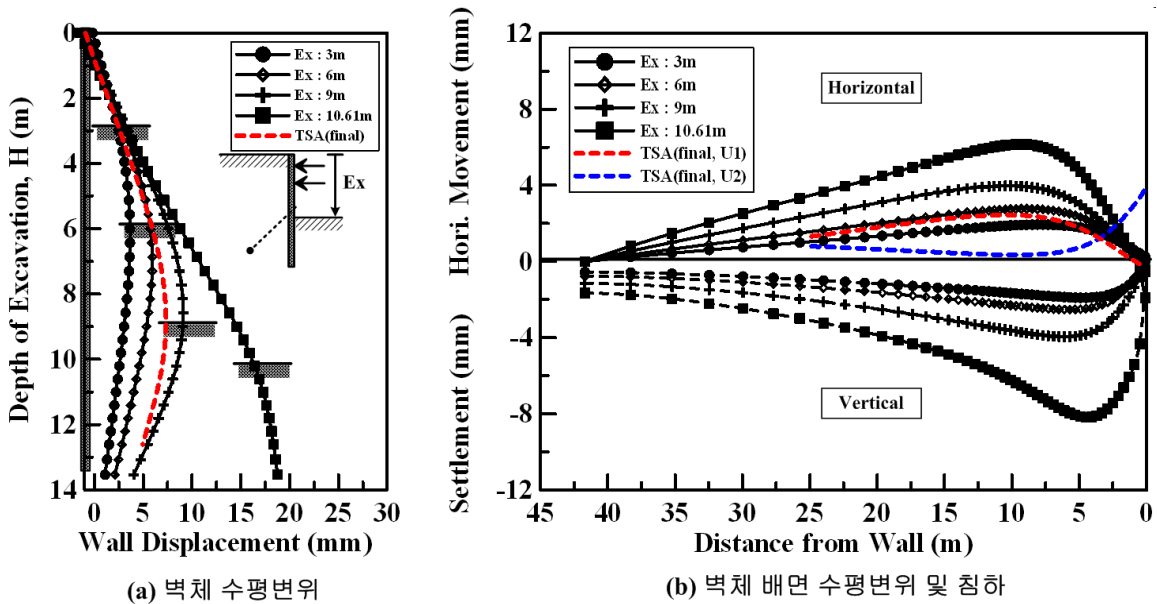


그림 9. 굴착단계별 벽체 및 지표변위(단면 AA')

굴착깊이: GL-6m

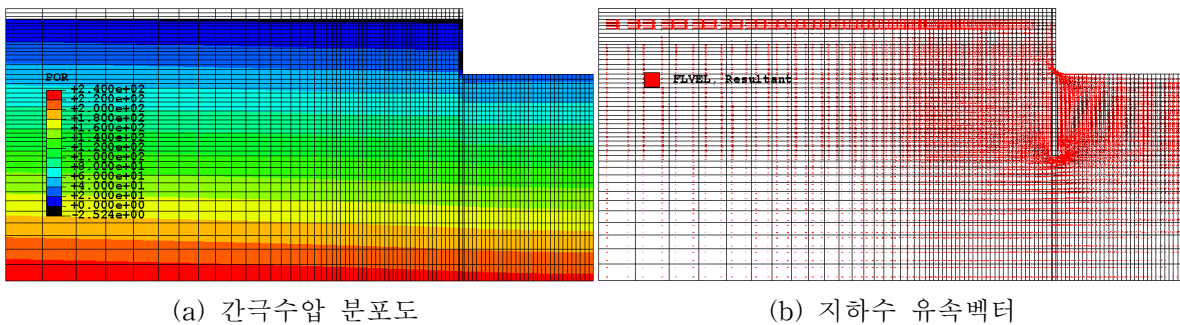
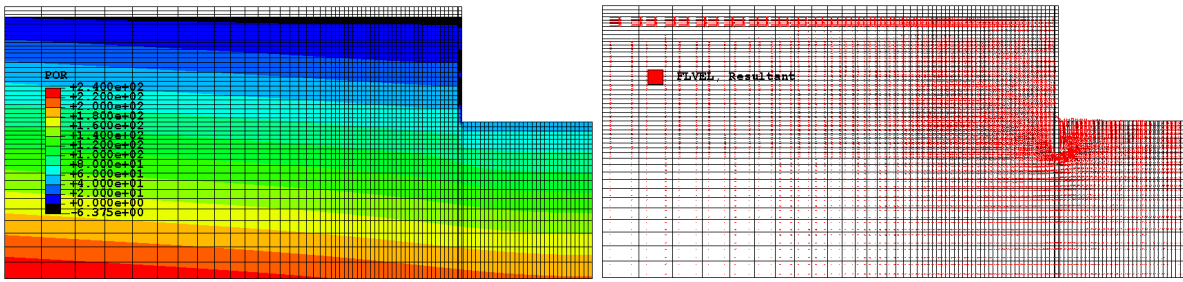


그림 10. 굴착단계별 간극수압 분포도 및 지하수 유속벡터(단면AA') - 계속

굴착깊이: GL-10m



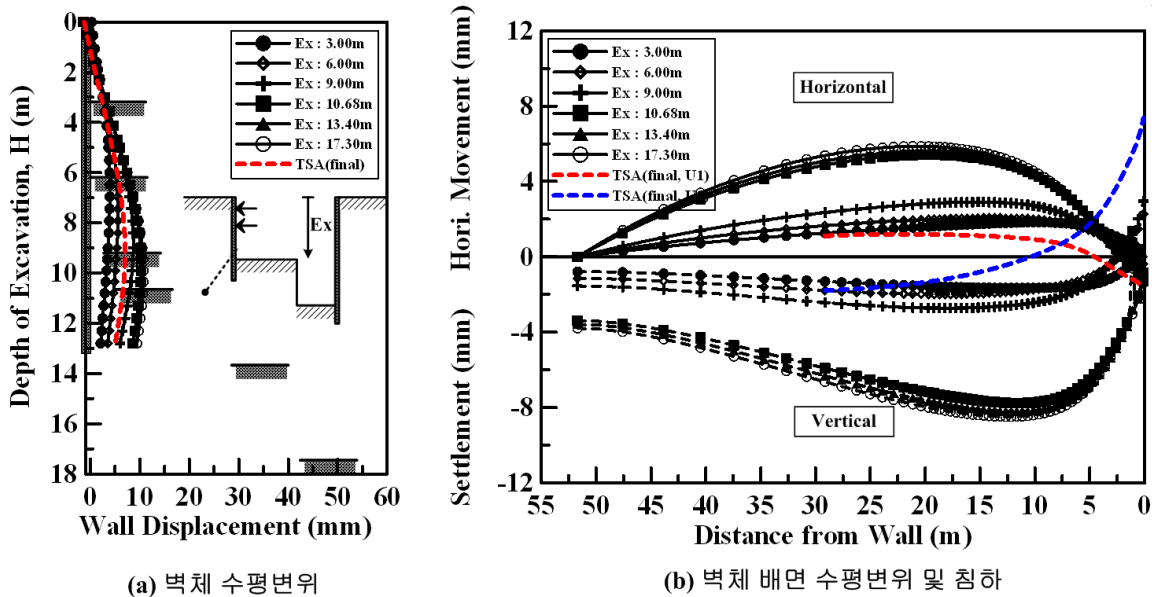
(a) 간극수압 분포도 (b) 지하수 유속벡터

그림 10. 굴착단계별 간극수압 분포도 및 지하수 유속벡터(단면AA')

(1) 단면 BB'

그림 11과 12는 단면 BB' 결과를 보여주고 있다. 본 구간의 경우 그림 11에서 보이는 바와 같이 좌·우측 설계단면이 다르기 때문에 좌측단면(BB'-L) 및 우측단면(BB'-R)으로 구분하여 분석하였다.

먼저 그림 11에 제시되어 있는 BB'-L의 경우 굴착깊이가 10m 내외로 그다지 깊지 않아 10mm 정도의 최대 벽체수평변위가 발생한 것으로 나타났으며 배면 침하는 약 8mm 정도로 나타났다. 한편, 그림 12에 제시되어 있는 BB'-R의 경우 GL-13에서 -17m까지 굴착되는 최종단계에서 벽체 수평변위와 지표 침하량이 약 50mm 및 30mm 정도까지 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 최종단계에서의 무지보 굴착깊이가 과도하기 때문으로서 최종 앵커설치 시기를 최대한 앞당겨 무지보 굴착깊이를 줄이는 것이 바람직한 것으로 나타났다. 한편, 본 그림에는 최종단계에서 TSA 결과도 제시하고 있는데 보이는 바와 같이 벽체변위는 50%이상 과소평가하는 경향을 보이고 있으며 지표변위의 경우 정량적인 크기는 물론 변위 유형이 벽체주변에서 히빙을 보이는 실제현상과는 동떨어진 결과를 주는 경향을 관찰할 수 있다.



(a) 벽체 수평변위 (b) 벽체 배면 수평변위 및 침하

그림 11. 굴착단계별 벽체 및 지표변위(단면 BB'-L)

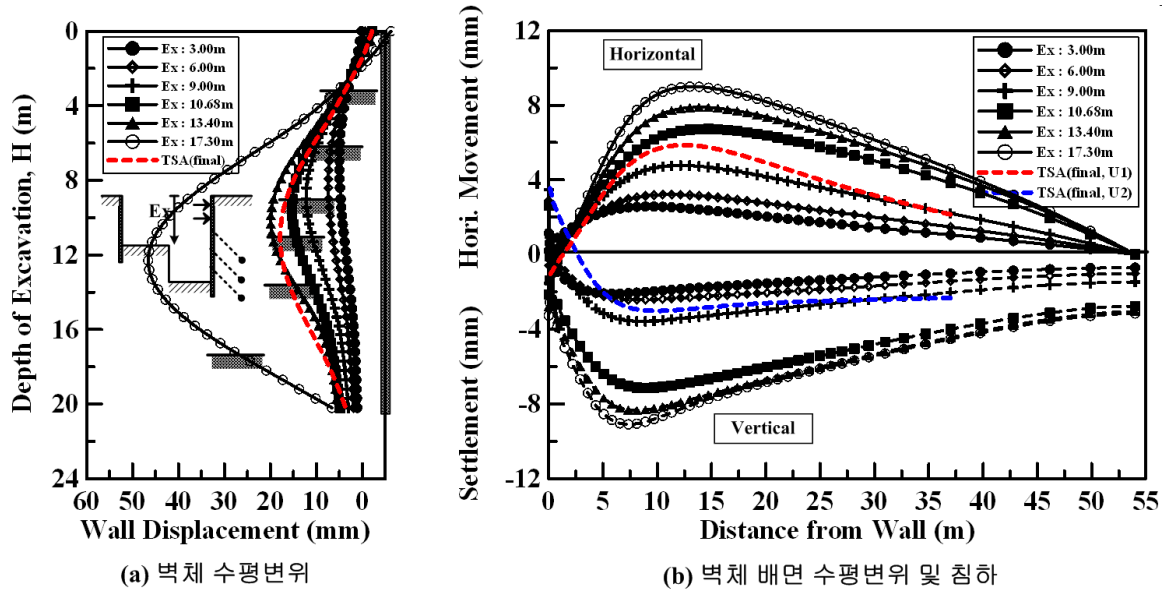
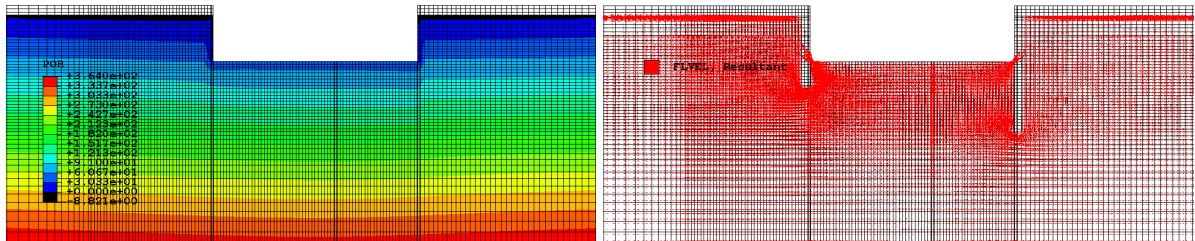


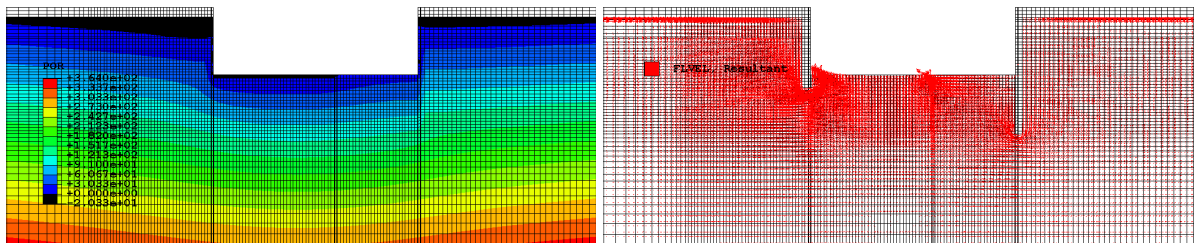
그림 12. 굴착단계별 벽체 및 지표변위(단면 BB'-R)

그림 13은 굴착단계별 간극수압 분포와 지하수 유속 벡터를 나타내고 있다. 간극수압 분포 경향을 보여주고 있는 그림 13(a)로부터 관찰할 수 있는 바와 같이 단면 BB'-L에서의 지하량이 약 4m 정도로서 BB'-R 보다 현저히 큰 것으로 나타났는데 이는 BB'-L 단면의 경우 차수벽체가 풍화암까지 근입되지 않고 풍화토에서 끝나는 것으로 설계되었기 때문으로서 유속벡터를 보여주고 있는 그림 13(b)에서와 같이 BB'-L 단면에서 차수벽체에서 지하수 유입이 크게 발생하는 경향에서 잘 관찰할 수 있다. 이러한 경향으로부터 차수벽체의 근입장 결정이 벽체의 안정성 뿐만 아니라 주변침하와도 밀접한 관계가 있음을 알 수 있으며 연계해석이 이러한 평가에 있어 수단으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

굴착깊이: GL-9m



굴착깊이: GL-11m



(a) 간극수압 분포도

(b) 지하수 유속벡터

그림 13. 굴착단계별 간극수압 분포도 및 지하수 유속벡터(단면BB') - 계속

굴착깊이: GL-17m

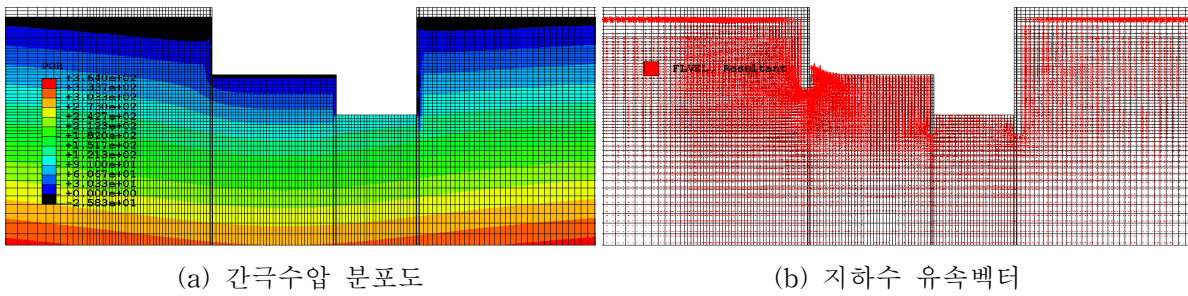


그림 13. 굴착단계별 간극수압 분포도 및 지하수 유속벡터(단면BB')

4. 결론

본 논문에서는 지하수위가 높고 투수성이 큰 지반을 포함하는 지반굴착 시공조건의 가시설 설계/시공 시 수행하여야 할 굴착에 따른 주변 영향평가 검토시 응력-간극수압 연계해석의 적용의 필요성 및 기본 개념을 알아보았다. 또한 적용사례에 대한 소개를 통해 연계해석과 응력해석의 결과 및 차이점에 대한 비교를 통해 응력해석만을 적용하였을 경우의 문제점 등을 짚어 보았다.

제시된 바와 같이 응력-간극수압 연계해석은 응력해석과 침투해석을 분리해서 수행한 후 그 결과를 조합하여 “해”를 얻는 개념이 아니라 유효응력과 흙의 체적변화에 대한 지배방정식을 해석과정에서 시간의 함수에 대한 “해”를 구하는 개념을 적용하므로 지하수저하에 따른 지반변위에 대한 평가를 현실적으로 수행할 수 있다는 장점이 있다. 특히, 적용사례에 대한 해석 결과에서 관찰할 수 있는 바와 같이 연계해석에서는 침투력 지반변형, 유효응력 감소를 통한 전단강도 감소 등을 반영할 수 있으므로 보다 현실적인 안정성 검토 및 영향 평가가 가능하다. 그러나, 이러한 응력-간극수압 연계해석을 대상 문제에 적용할 경우 지반공학적 측면의 이론적 배경에 대한 이해가 절대적이다.

일반인들의 도심지 건설공사시 주변 영향에 대한 관심이 증대하고 지속가능한 건설기술의 적용을 맥락에서 굴착으로 지하수 저하가 예상되는 시공조건에 대한 설계시에는 본 고에서 소개한 응력-간극수압 연계해석의 적용으로 보다 현실적인 주변 영향평가가 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. ABAQUS Users manual-version 6.3. (2002). Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, Pawtucket, Providence, R.I.
2. Biot, M.A., (1941), "General theory of three dimensional consolidation", *J. Appl. Phys.*, Vol. 12, pp. 155~164.
3. Biot, M.A., (1955), "Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid", *J. Appl. Phys.*, Vol. 26, No. 2, pp. 182~185.
4. Zienkiewicz, O.C. and Shiomi, T., (1984), "Dynamic behavior of saturated porous media: The generalized Biot formulation and its numerical solution", *Int. J. Numer. Analyt. Meth. Geomech.*, Vol. 8, pp. 71~96.
5. Pagano, L. (1997). "Steady State and Transient Unconfined Seepage Analyses for Earthfill Dams", ABAQUS Users' Conference, Milan, 557~585.