

터널굴착시 지하수위저하에 의한 지표침하의 신뢰성 해석 Reliability analysis of surface settlement by groundwater drawdown from tunnel excavation

장연수¹⁾, Yeon-Soo Jang, 김홍석²⁾, Hong-Seong Kim, 박정용³⁾, Jeong-Yong Park,
박준모⁴⁾, Joon-Mo Park, 이성기⁵⁾, Seong-Ki Lee

1) 동국대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Dong-Guk University

2) SOC건설(주), SOC Construction & Engineering Co., Ltd

3) (주)삼보기술단, SAMBO Engineering Co., Ltd

4) 건일엔지니어링(주), Keon-IL Engineering Co., Ltd

5) (주)태조엔지니어링, TESO Engineering Co., Ltd

SYNOPSIS : In this paper, reliability analysis of surface settlement by ground water drawdown is performed using a reliability-groundwater flow numerical model. The result is compared with that of the deterministic model to evaluate the influence of the uncertainty from hydraulic conductivity in the soft ground as well as to determine the range of hydraulic conductivity of grouted ground. From the analyses, it was found that probability of failure to exceed the tolerable settlement was very high, if the hydraulic conductivity of grouted ground is decided from the deterministic flow model only. Reliability analysis which evaluates variance of hydraulic conductivity should be used together with the deterministic model for grouting design of tunnels to prevent ground water drawdown.

Key words : reliability analysis, groundwater drawdown, deterministic model, uncertainty, surface settlement, grouting design of tunnels

1. 서 론

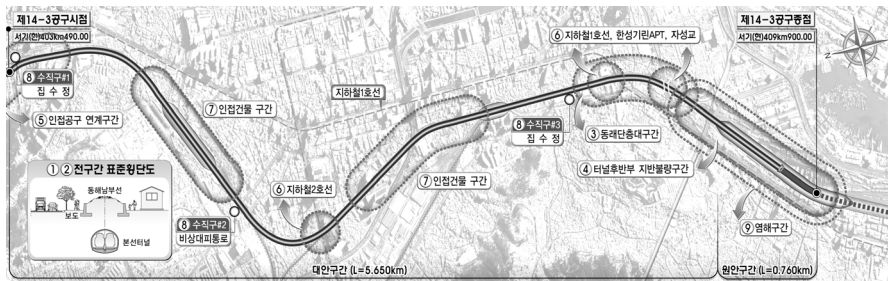
터널 굴착시 굴착으로 인한 지반내 응력 및 수리 평형조건의 변화에 의하여 굴착시 Volume Loss에 의한 침하와 지하수위 강하에 따른 침하가 발생하게 된다. 도심지 터널의 경우 상부에 구조물이 존재하고 터널이 천층에 시공되는 경우가 많아 지하수위가 높고 연약한 토사층에 시공되는 경우 시공중 인접 구조물에 주는 영향에 대한 평가시 지하수위 강하에 의해 증가된 상부 유효응력에 의해 발생하는 침하량을 Volume Loss에 의한 침하와 함께 고려하여야 한다.

최근까지 지반굴착 및 터널공사에서 지하수 영향을 고려한 안정성을 평가하는 데 있어서 해석시 지반정수들은 항상 일정한 불변의 값을 갖고 있다는 가정에 입각한 확정론적 방법을 많이 사용하고 있다. 그러나 지반정수는 지반의 형성당시 또는 현재의 외부환경적인 요인에 따라서 위치 및 시간에 따라 그 특성이 다르며 또한 시험방법과 표본개수에 의해서도 인위적인 오차를 내포하게 된다. 이러한 불확실성은 우리가 대상지반에 대한 지반조사 자료의 분산특성을 살펴보더라도 쉽게 확인할 수 있는데 고정된 평균값만을 이용하는 기존의 확정론적 이론에 의한 지하수 흐름해석은 지반정수들의 분산성을 고려할 수 없어 정확도에서 한계가 있다.

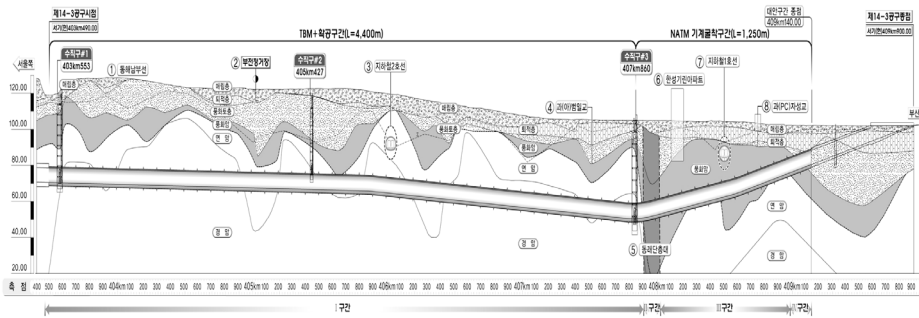
본 논문에서는 제작된 지하수-신뢰성 연계 해석 프로그램을 이용하여 연약토사구간에서 지하수위 저하로 발생하는 지표침하의 발생여부에 대해 확정론적 해석과 신뢰성 해석을 실시하였다. 신뢰성 해석시 지반의 투수계수를 확률변수로 취급하여 터널주변 그라우팅된 지반의 투수계수 변화에 따라 형성되는 수위 분포에 따른 지반침하량이 상부구조물에 영향을 미칠 수 있는 한계침하량을 초과할 파괴확률을 일계 및 이계 신뢰성 해석을 이용하여 검토하고 민감도를 분석하였다.

2. 대상현장 조건

본 연구의 대상지역은 경부고속철도 공사구간으로 그림 1과 같으며 대구~부산 구간 중 부산시 부산진구 양정동~동구 초량동을 연결하는 6.41km (403km490~409km900)의 터널구간이다. 노선 주변에는 지상 및 지중 인접구조물들이 산재해 있으며, 지하철 1·2호선, 자성교가 위치하며 종점부에서는 지반상태가 불량한 구간을 통과한다. 그 중 본 과업에 해당하는 구간은 구간내 다른 지역과 달리 동래단층대의 영향으로 풍화대가 깊이 발달하고 연약점성토층이 두껍게 분포하고 있는 지반불량구간 407km910~409km140 으로 선정하였다.



(a) 전체 현황도



(b) 지층분포도

그림 1. 연구대상지역 현황

대상 구간에 대한 지반조사 결과, 최상부에 매립층이 존재하고 그 하부로는 N치가 1~5로 연약하고 투수계수가 작은 퇴적 점성토층이 3~6m로 분포하며 지반 내 지하수위는 점성 퇴적층의 영향으로 다른 지역에 비해 높으며 G.L(-) 2.1~5.0m에 분포하고 있다. 토사층이 터널상단에 도달하고 있어 터널막장의 자립성이 불량하고, 터널굴착에 의한 지하수 흐름영향이 클 것으로 판단된다. 따라서 점토질 퇴적토 및 조밀한 풍화토층에 대해서는 마이크로 시멘트와 같은 미세분말형 그라우팅을 사용하고 풍화토 및 토사층을 대상으로 지상보강 그라우팅이 계획되었다.

3. 해석이론 및 조건

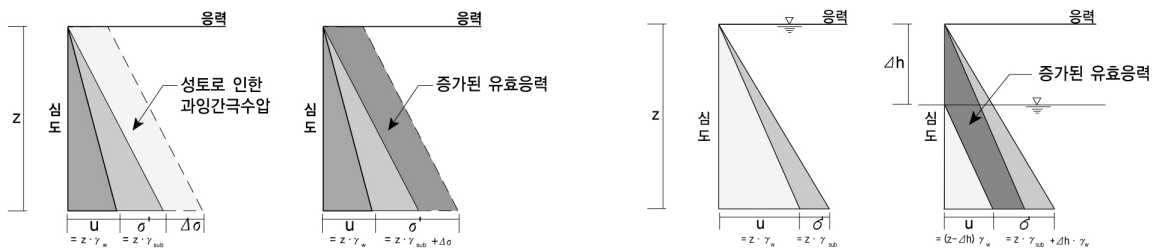
3.1 지하수 강하에 의한 지반침하량 산정이론

터널굴착에 의한 지하수 유출은 지반내의 간극수압을 변화시키며, 간극수압의 감소는 유효응력의 증가분이 된다. 유효응력 증가는 일반적인 성토재하하중에 의한 것과 지하수위 저하에 의한 것으로 구별할 수 있으며 이들은 유효응력 증가라는 것은 유사하나 그 응력이력에 차이가 있다. 성토에 의한 유효응력증가는 그림 2(a)에서 볼 수 있듯이 성토로 인해 발생한 과잉간극수압이 지반내의 유효응력으로 전환되어 그 폭만큼 증가가 발생하게 되며 변화된 유효응력은 다음과 같이 표현할 수 있다(김상규, 2000).

$$\sigma' = (\sigma_t - u) + \Delta\sigma_{\text{성토}} \quad (1)$$

지하수위 강하에 의한 유효응력은 전응력의 변화없이 지반내 간극수압의 감소로 인하여 간극수압감소량만큼의 유효 응력의 증가가 식 2와 같이 발생하게 된다.

$$\sigma' = z\gamma_{\text{sub}} + \Delta h\gamma_w \quad (2)$$



(a) 성토재하하중에 의한 유효응력변화

(b) 지하수저하에 의한 유효응력변화

그림 2. 조건에 따른 유효응력 변화

터널굴착에 의한 지하수 유출은 지반내의 간극수압을 변화시키며, 간극수압의 감소는 유효응력의 증가분이 된다. 지반의 변형률(ϵ)값은 유효응력 증가분에 대한 탄성계수의 비로써 나타낼 수 있으며, 지표면에서의 침하량은 지표면 아래 모든 깊이의 변형률을 적분하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_i = \int_0^z \epsilon_v dz = \int_0^z \frac{1}{E_s} (\Delta\sigma_v - 2\mu \Delta\sigma_h) dz \quad (3)$$

여기서, z 는 변형률을 더해야 할 깊이로서, 만일 탄성체가 무한 깊이에 있다면, $z = \infty$ 가 될 것이며, 사질토 지반의 지표침하는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$S_i = q_0 \frac{B}{E_s} (1 - \mu^2) \alpha \quad (4)$$

여기서, S_i : 즉시침하량, q_0 : 기초에 놓이는 순하중, μ : 포아송비, B : 기초의 폭, α : 형상계수 이다.

본 대상지역과 같이 기초하중에 의한 침하가 아닌 지하수위 저하에 의한 유효응력의 증가에 의하여 침하가 되는 경우는 기초폭 B를 고려하지 않으므로 단위폭에 대한 해석이 된다. 공식에 사용되는 탄성계수와 포아송비는 대상지역의 토질조사 보고서를 이용하였으며, 수위저하로 인한 유효응력의 증가분을 순하중 q_0 로 사용하였다. 점성토층은 간극수압 감소에 의한 압밀침하가 발생하며, 터널굴착에 의한 대수층의 수압저하량 ΔH 가 발생하면 이로 인해 유효응력의 증가가 발생하게 되고 압밀침하량 S는 식 (5)와 같이 산정할 수 있다.

$$S = \frac{C_c}{1+e_o} H_o \log_{10} \left(\frac{\sigma'_{vo} + \Delta\sigma_v}{\sigma'_{vo}} \right) \quad (5)$$

여기서, C_c : 압축지수, H_o : 초기지층높이, e_o : 초기간극비, σ'_{vo} : 유효토피응력, $\Delta\sigma_v$: 상부 유효응력 증가량 이다.

3.2 해석 단면 및 물성치

지표지반 침하에 관한 신뢰성 해석은 유한요소모델(그림 3)을 이용하여 지하수 유동해석을 수행하고, 3.1절에서 전술된 침하량 산정식을 이용하여 터널주변의 간극수압 변화에 대한 지표침하량을 계산하였다. 신뢰성 해석에 이용된 확률변수들의 각 층별 투수계수는 평균값 및 표준편차는 표 1에 요약하여 정리하였으며 투수계수의 분포형태는 로그정규분포를 따른다(Lumb(1966), Meyerhof(1970), Turnbull et al.(1966))고 가정하였다.

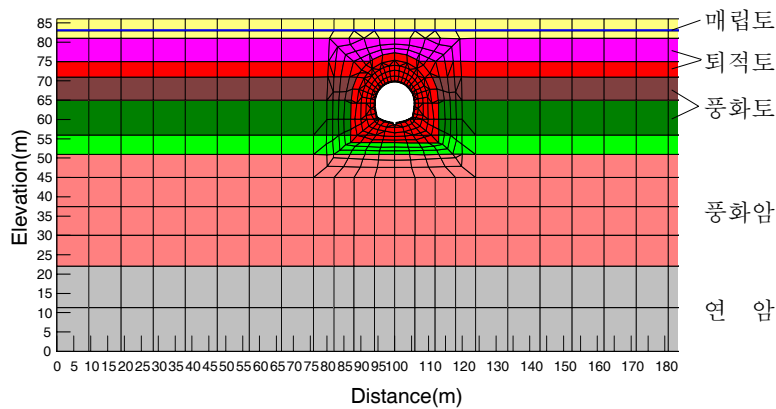


그림 3. 해석을 위한 유한요소망

표 1. 해석구간의 원지반물성치(동국대학교, 2004)

구 분	지층깊이 (m)	단위 중량 (tonf/m ³)	탄성 계수 (tonf/m ²)	투수계수(m/sec)		분포 형태	
				평균	표준편차		
원 지 반	매립층	4.5~ 5.0	1.8	2,000	2.00×10^{-4}	1.00×10^{-4}	로그정규
	퇴적층	4.7~12.7	1.7	300	9.00×10^{-7}	4.50×10^{-7}	
	풍화토	1.2~28.2	1.9	3,000	9.58×10^{-7}	4.79×10^{-7}	
	풍화암	13.0~18.0	2.0	10,000	2.38×10^{-7}	1.19×10^{-7}	
	연 암	20.0~30.0	2.3	100,000	7.55×10^{-8}	2.78×10^{-8}	
그라우팅된 지반	풍화토	-	1.9	30,000	5.0×10^{-6}	2.5×10^{-6}	로그정규
	풍화암	-	2.0	50,000	$\sim 1.0 \times 10^{-7}$	$\sim 5.0 \times 10^{-8}$	

4. 확정론적 해석을 이용한 침하평가

터널굴착으로 인한 터널주변의 간극수압 저하량을 확정론적 해석에 의해 산정하였다. 터널이 설치된 흐름영역의 전수두는 그림 4와 같이 굴착면을 중심으로 원형으로 분포하며, 굴착면에서 멀어질수록 수두저하량이 작게 나타나고 있다. 흐름영역의 간극수압은 터널굴착면 부근에서 가장 크게 감소하였으며, 터널굴착면 주위 지표면 지하수위는 터널상단에서 가장 크게 나타났다(그림 5).

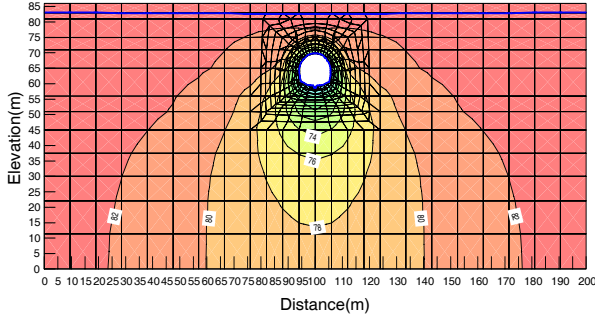


그림 4. 터널주변의 전수두분포

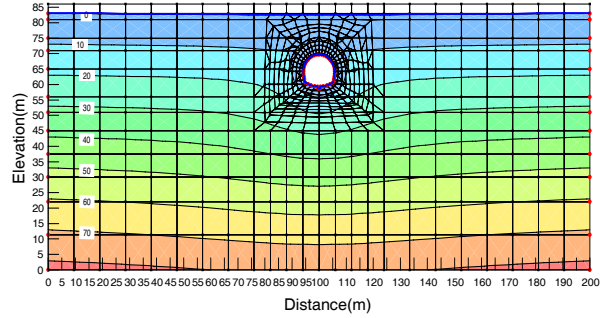


그림 5. 터널주변의 압력수두 분포

터널 막장면에 주입된 그라우팅된 지반의 투수계수에 따른 흐름영역의 지하수위 저하량과 지표지반 침하량을 확정론적 해석으로 산정하여 그림 6에 나타내었다. 허용 침하량을 만족하는 그라우팅된 지반의 투수계수는 $8.0 \times 10^{-7} \text{m/sec}$ 이하로 시공되어야 하며, 이에 대한 지하수위 강하량은 1.63m 이하로 평가되었다.

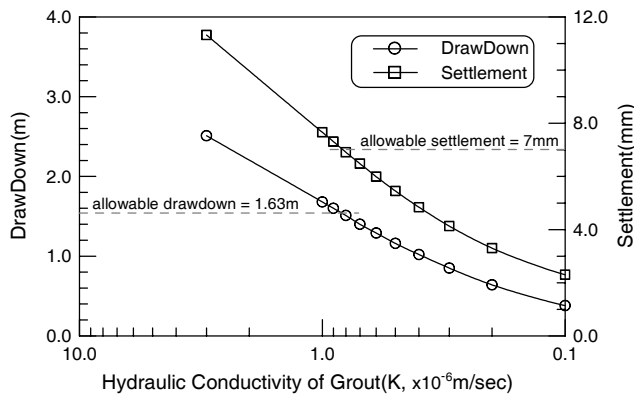


그림 6. 그라우팅된 지반의 투수계수에 따른 수위 강하량 및 지표지반 침하량

5. 신뢰성 해석을 이용한 침하평가

본 연구에서 적용된 한계상태함수는 허용침하량(S_a)과 지하수 저하시 생기는 유효응력 증분에 의해 발생하는 지표 침하량($S_{\text{numerical}}$)으로 정의되며 다음과 같이 정의된다.

$$g(x) = S_a - S_{\text{numerical}} \quad (6)$$

여기서, S_a : 허용침하량(7mm), $S_{\text{numerical}}$: 지하수위저하에 의한 침하량 이다. 상부 지표 허용침하량은 터널 상부에 여러 구조물이 위치하고 있어 표 2와 같이 일본 및 국내 철도기준 및 근접시공시 인접구조물의 허용침하 기준을 참고하여 7mm로 결정하였다.

식 6에서 $g(x)=0$ 일 때는 한계상태면을 나타내며, 이 면을 기준으로 $g(x)>0$ 일 때는 허용침하량을 초과하지 않는 안전한 상태가 되고 $g(x)<0$ 일 때는 발생침하량이 허용침하량을 초과하는 상태를 나타낸다.

표 2. 허용 침하량 기준

구 분	제안기관 및 적용현장	관리기준치
철 도	국철 선로보수 기준	수직 : 면맞춤 10m당 7mm 수평 : 줄맞춤 10m당 7mm
	일본 가야선 건설공사	10m당 7mm(부등침하량)
	일본 도큐-토쿄선 지하화공사	10m당 7mm(부등침하량)
건 물	근접시공	최대침하량 : 25mm 부등침하량 : 1/500~1/750

터널굴착면 주변의 그라우팅된 지반의 투수계수를 변화시키면서 흐름영역의 지하수 저하에 따른 지표 지반 침하의 파괴확률을 계산하였다. 그림 7에서 볼 수 있듯이 그라우팅된 지반의 투수계수가 5.0×10^{-6} m/sec 일 때, 지표지반의 침하량이 7mm를 초과할 확률은 1에 가까우며, 2.0×10^{-7} m/sec 이하일 경우 파괴확률이 1% 이하인 것으로 평가되었다. 확정론적 해석에서 허용 침하량을 만족하는 그라우팅된 지반의 투수계수는 8.0×10^{-7} m/sec 이하로 평가되었으나, 신뢰성 해석으로부터 33.13%의 불안정한 결과를 얻었다. 따라서 지반정수 중에서 비교적 불확실성이 큰 투수계수를 수치모델의 파라미터나 확률변수로 이용할 경우에는 분산특성이 반드시 반영되어야 하며, 확정론적 해석과 더불어 신뢰성 해석이 수반되어야 할 것으로 판단된다.

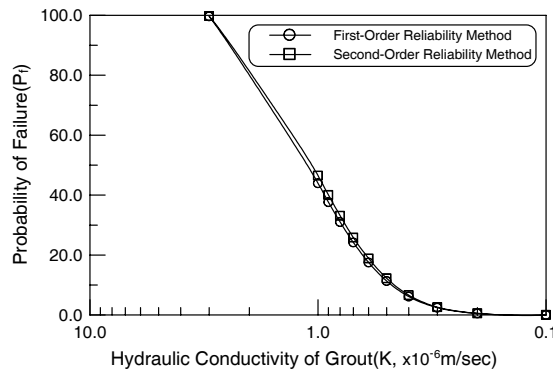


그림 7. 그라우팅된 지반의 투수계수에 따른 파괴확률

파괴확률의 평균과 표준편차에 대한 민감도분석을 실시하여, 지표지반 침하량에 영향을 미치는 확률변수의 상대적인 크기를 검토하였다. 민감도분석은 확정론적 해석에서 허용침하량이 발생할 경우의 파괴확률(33.13%)과 파괴확률이 매우 작은 0.02%일 경우에 대하여 각각 검토하였으며, 그 결과를 표 3에 나타내었다.

투수계수의 평균과 분산에 대한 파괴확률의 민감도 분석결과, 매립토층과 토사층, 그리고 연암층 투수계수의 평균값이 감소하거나 표준편차가 증가할수록 파괴확률은 증가하며, 풍화토층과 풍화암층 투수계수의 평균값과 표준편차가 증가할수록 파괴확률은 증가하는 것으로 분석되었다. 민감도의 크기는 터널이 굴착되어 있는 상부의 매립토층과 퇴적층의 투수계수 변화에 크게 반응하는 것으로 나타났다.

표 3. 파괴확률의 민감도 분석

1) $P_f = 33.13\%$ 일 경우

확률변수	$\frac{dP_f}{d\mu}$	$\frac{dP_f}{d\sigma}$	$\frac{dP_f}{d\lambda}$	$\frac{dP_f}{d\zeta}$
매립토층	$-3.31 \times 10^{+3}$	$1.68 \times 10^{+3}$	-4.95×10^{-1}	1.63×10^{-1}
퇴적층	$-1.86 \times 10^{+5}$	$7.13 \times 10^{+4}$	-1.35×10^{-1}	1.21×10^{-2}
풍화토층	$3.42 \times 10^{+4}$	$-1.10 \times 10^{+4}$	2.75×10^{-2}	5.02×10^{-4}
풍화암층	$3.86 \times 10^{+4}$	$-1.27 \times 10^{+4}$	7.66×10^{-3}	3.89×10^{-5}
연암층	$-1.97 \times 10^{+4}$	$6.59 \times 10^{+3}$	-1.24×10^{-3}	1.02×10^{-6}

2) $P_f = 0.02\%$ 일 경우($F_s=1.5$)

확률변수	$\frac{dP_f}{d\mu}$	$\frac{dP_f}{d\sigma}$	$\frac{dP_f}{d\lambda}$	$\frac{dP_f}{d\zeta}$
매립토층	$-1.27 \times 10^{+1}$	$1.44 \times 10^{+1}$	-1.10×10^{-3}	2.87×10^{-3}
퇴적층	$-1.02 \times 10^{+2}$	$4.34 \times 10^{+1}$	-7.19×10^{-5}	1.22×10^{-5}
풍화토층	$3.38 \times 10^{+1}$	$-9.94 \times 10^{+0}$	2.76×10^{-5}	1.81×10^{-6}
풍화암층	$1.32 \times 10^{+2}$	$-3.89 \times 10^{+1}$	2.67×10^{-5}	1.69×10^{-6}
연암층	$-1.00 \times 10^{+2}$	$3.43 \times 10^{+1}$	-6.27×10^{-6}	9.31×10^{-8}

6. 결론

도심지 연약한 지반에 터널시공시 발생할 수 있는 수위 변화에 의한 인근 구조물 영향 평가를 위하여 지하수 흐름해석을 실시하고, 터널의 지하수 유출로 인한 지반침하량이 상부구조물에 영향을 미치는 영향에 대한 신뢰성 해석을 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 확정론적 해석결과, 흐름영역의 간극수압은 터널굴착면 부근에서 가장 크게 감소하였고 지하수위 저하량은 터널 상부에서 가장 크게 나타났다.
2. 그라우팅된 지반 투수계수에 따른 지하수위 저하량과 침하량에 대한 확정론적 해석결과, 허용침하량을 만족하는 그라우팅된 지반 투수계수는 8.0×10^{-7} m/sec으로 평가되었고 이에 대한 관리 지하수위 강하량은 1.63m이하로 나타났다.
3. 그라우팅된 지반의 투수계수 변화에 따른 지표침하에 대한 신뢰성 해석결과, 그라우팅된 지반의 투수계수가 5.0×10^{-6} m/sec일 때, 파괴확률은 1에 가까우며 2.0×10^{-7} m/sec이하일 경우 파괴확률이 1% 이하로 평가되었다.
4. 확정론적 해석에서 허용침하량을 만족하였던 그라우팅된 지반의 투수계수 8.0×10^{-7} m/sec인 경우에 대한 신뢰성 해석결과, 허용지표침하 7mm를 초과할 확률은 33.13%로 허용파괴확률 1%이상으로 상당히 불안한 결과가 도출되었다.
5. 투수계수의 평균과 분산에 대한 파괴확률의 민감도 분석결과, 매립토층과 토사층, 그리고 연암층 투수계수의 평균값이 감소하거나 표준편차가 증가할수록 파괴확률은 증가하며, 풍화토층과 풍화암층 투수계수의 평균값과 표준편차가 증가할수록 파괴확률은 증가하는 것으로 분석되었다. 민감도의 크기는 터널이 굴착되어 있는 상부의 매립토층과 퇴적층의 투수계수 변화에 크게 반응하는 것으로 나타났다.

6. 여러 가지 요인에 의해 불확실성을 내재하고 있는 지반정수를 수치모델의 파라미터로 이용할 경우에는 정수들의 분산특성이 고려되어야 하고 확정론적 해석과 더불어 신뢰성 해석이 수반되어야 하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 논문은 경부고속철도 건설공사 관련 연구과제에 의해 이루어진 결과로써 연구의 수행에 도움을 주신 SK건설(주)과 (주)태조엔지니어링에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 김상규(2000), 토질역학, 청문각, 434p.
2. 정교철(1998), 굴착공사와 지하수, 엔지니어즈, 434p.
3. 동국대학교 산업기술연구원(2004), 지하수위 저하로 인한 지표침하 영향 검토, 69p.
4. Lumb, P.(1966), "The Variability of Natural Soils," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 3, No. 2, pp. 74~97
5. Meyerhof, G. G.(1970), "Safety Factors in Soil Mechanics," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 5, No. 2, pp. 140~148.
6. Turnbull, W. J., Compton, J. R., and Ahlvin, R. G.(1966), "Quality Control of Compacted Earthwork," *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 92, No. SM5, pp. 142~145.