

터널 그라우팅 보강에 의한 차수 및 강도 증가효과의 분석

유광호^{1*}

Analysis on the effect of strength improvement and water barrier by tunnel grouting reinforcement

Kwang-Ho You

ABSTRACT Recently concern for subsea tunnels is increasing. The effect of high water pressure can not be ignored in the case of a deep subsea tunnel. Reinforcement like grouting is necessary for the stability of such a subsea tunnel. In this study, therefore, it was investigated how the water barrier and shear strength increment resulted from grouting had an effect on the stability of a subsea tunnel. To this end, two-dimensional hydro-mechanical coupled analyses were performed for a sensitivity analysis in terms of different range, permeability coefficient, and cohesion of grouting reinforcement for the rock classes I, III, and V with respect to RMR system. The mutual relationship between strength increment and water pressure increased by barrier effect due to grouting was investigated by analyzing the numerical results.

Keywords: Subsea tunnel, shear strength, coupled analysis

요약 최근 국내에는 해저터널에 대한 관심이 높아지고 있다. 심부에 시공되는 해저터널의 경우에는 높은 수압의 영향을 무시할 수 없다. 이러한 해저터널의 안정성을 위하여 그라우팅보강 등이 필요하다. 따라서 본 연구는 해저터널의 시공 시 그라우팅으로 인해 발생하는 차수효과와 전단강도 증가효과가 터널의 안정성에 미치는 영향을 살펴보았다. 이를 위해 RMR 분류법을 기준으로 할 때 1, 3, 5 등급 암반을 대상으로 그라우팅 보강영역의 범위와 투수계수 및 점착력을 달리하여 민감도 분석을 위한 2차원 수리-역학적 연계해석을 수행하였다. 해석결과의 분석을 통해 해저터널의 그라우팅으로 인한 강도증가와 차수로 인해 증가되는 수압의 상호관계를 조사하였다.

주요어: 해저터널, 전단강도, 연계해석

접수일(2011.5.25), 수정일(2011.6.22), 게재확정일(2011.7.7)

¹수원대학교 토목공학과 교수

*교신저자: 유광호 (E-mail: khyou@suwon.ac.kr)

1. 서 론

최근 국내에서는 해저터널에 대한 관심이 높아지고 있으며, 시공 또는 계획되고 있다. 뿐만 아니라 경제대국 일본과 세계 거대 경제시장인 중국과의 연결을 위한 한·일 해저터널 및 한·중 해저터널에 대한 관심이 증가하고 있고, 이와 관련한 기초 연구가 활발히 이루어지고 있다. 해저터널과 같이 깊은 곳에 건설되는 시설물은 심도에 따른 초기 응력과 암반 내의 지하수 유동을 고려해야 한다. 따라서 해저 시설물은 그 특성상 보다 정확한 설계 및 시공을 위하여 수리-역학적 연계 해석이 필요하다(유광호, 2008; 유광호와 이동훈, 2008a, 2008b).

유광호와 김은혜(2010)는 해저터널을 대상으로 그라우팅 보강영역이 터널 안정성이 어떻게 달라지는가에 대한 연구를 수행한 바 있다. 이 연구에서 솗크리트 두께는 30 cm로 고정하여 솗크리트 두께의 영향은 살펴보지 않았으며, 암반등급 2 가지(1 등급, 3 등급), 측압계수 3 가지(1.0, 2.0, 3.0), 집수정 펌프를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우 2 가지, 그라우팅 보강영역 4 가지(무보강, 120°, 180°, 360°) 경우로 나누어 총 48 경우에 대해 간단한 민감도 분석을 실시하였다. 그 결과 1, 3, 5 등급 암반 모두에서 암반등급이 낮아질수록 안전율이 감소하고, 속크리트 두께가 두꺼워질수록 안전율이 증가하고 암반상태가 나쁠수록 속크리트의 보강효과가 커지며, 그라우팅 두께의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 종합적으로 판단할 때, 그라우팅 보강 설계를 수행할 경우에는 단순히 강도증가 효과만 고려하기보다는 그라우팅 차수로 인해 증가되는 수입의 효과를 같이 고려해야 한다고 주장하였다.

또한 유광호와 가필순(2011)은 심부에 있는 해저터널을 대상으로 그라우팅 투수계수와 점착력이 안전율에 어떠한 영향을 미치며, 안전율 변화비에 더 영향을 주는 것이 무엇인지를 알아보기 위해 수치해석을 수행한 바 있다. 그 결과 1, 5 등급 암반 모두 점착력이 증가할수록 안전율은 비례적으로 증가하는 것으로 나타났다. 또한 1 등급 암반은 투수계수가 감소함에 따라 안전율과 그 변화비가 모두 감소하는 결과가 나타났으나, 5 등급 암반에서는 두 가지 모두 오히려 증가하는 것을 알 수 있었다. 이 연구에서는 속크리트 두께는 30 cm, 그라우팅 보강영역은 360°, 측압계수는 1.0으로 고정하였고, 암반등급(1 등급, 5 등급), 그라우팅 투수계수와 점착력 4가지 경우로 총 32 가지에 대한 간단한 민감도 분석을 실시하였다. 하지만 정확한 결론을 도출하기 위해서는 보다 자세한 민감도 분석이 요구되었다.

본 연구에서는 심부에 있는 해저터널을 대상으로 그라우팅 투수계수와 점착력이 안정성에 미치는 영향을 보다 자세히 살펴보았다. 이를 위해 기존 연구의 민감도 분석 시 고정되었던 그라우팅

영역의 투수계수 및 접착력을 변화시켜가며 해석을 수행하고 상호간의 상관관계를 분석하였다. 그라우팅 후의 투수계수는 3가지로 세분하였고 접착력은 원 암반 등급에 따라 3 또는 4가지로 세분하여 민감도분석을 수행하였다. 한편 암반등급(1 등급, 3 등급, 5 등급), 그라우팅 보강영역(0° , 120° , 180° , 360°), 솟크리트 두께(30 cm, 45 cm, 60 cm)도 달리해가며 총 $3 \times 4 \times 3 \times 4 \times 4 = 576$ 가지의 민감도 분석을 실시하였다. 단, 측압계수와 그라우팅 두께는 각각 1.0, 5 m로 고정하였으며, 해석 시 접수정을 통한 펌핑을 고려하였다. 연계해석을 위해 지반 범용해석 프로그램인 FLAC-2D ver 5.0(Itasca Consulting Group Inc., 2005)을 사용하였다.

2. 전단강도 감소기법

터널의 안정성은 유광호 등(2000, 2001, 2005)에 의해 전단강도 감소기법에 기초하여 수치적으로 구할 수 있는 안전율(factor of safety)을 구함으로써 정량적으로 평가된 바 있다. 터널 안정해석에서 전단강도 감소기법을 적용하기 위해 실제 지반의 접착력(c)과 내부마찰각(ϕ)을 시험안전율(F^{trial})로 나누어 일련의 해석을 반복 수행한다.

이때 시험 안전율(trial factor of safety)과 이에 의해 감소된 지반의 물성을 그림 1에 나타낸 바와 같이 원래의 물성을 선형적으로 감소시켰으며 식 (1)과 식 (2)의 관계를 갖는다.

$$c^{trial} = \frac{c}{F^{trial}} \quad (1)$$

$$\phi^{trial} = \tan^{-1} \left(\frac{c}{F^{trial}} \tan \phi \right) \quad (2)$$

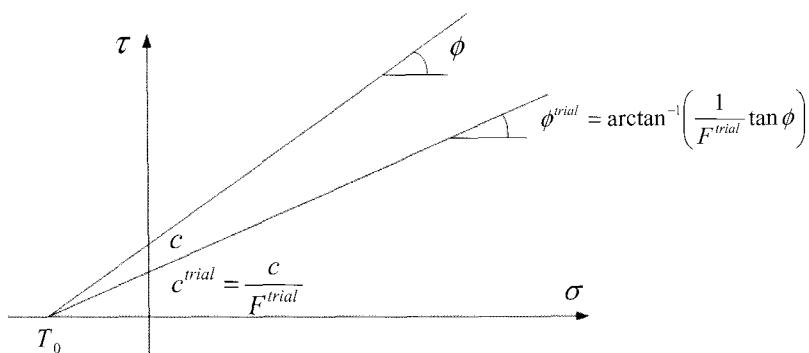


그림 1. 전단강도와 시험 전단강도(박연준과 유광호, 1998)

이 시험 안전율에 의해 감소된 지반의 물성을 가진 암반에 터널굴착 시 파괴가 발생한다면, 터널의 안전율은 방금 적용되었던 시험 안전율보다는 작으며, 파괴가 발생하지 않았다면 시험안전율보다는 크다는 것을 의미한다. 따라서 터널의 파괴가 발생되기 시작하는 시점의 시험안전율을 구하면, 이것이 곧 터널의 안전율이 된다고 할 수 있다. 이때 원래 파괴포락선과 시험안전율에 의해 감소된 파괴포락선은 그림 1에 도시된 바와 같이 동일한 인장강도 점에서 기울기만 감소시킨 직선으로 나타내게 된다. 한계평형해석에서는 인장파괴를 고려하지 않으므로 인장강도는 변화시키지 않는다. 그러나 터널 해석 시에는 필요에 따라 동일한 방법으로 인장강도도 감소시킬 수 있다.

3. 연계해석

3.1 연계해석 모델링 방법

해석 단면은 수심이 60 m, 토피가 100 m, 직경이 10 m인 원형터널을 대상으로 하였으며 터널 중심으로부터 수평 방향 해석경계까지의 거리는 터널 직경의 5배인 50 m로 하였다. 즉, 해수면(지하수위)은 터널 천단으로부터 160 m 상부에 있는 것으로 가정하였다.

그림 2와 같이 해석속도를 높이기 위해 터널 축을 중심으로 좌우 대칭경계 조건을 적용하여 반단면 해석을 수행하였고, 깊이 방향으로는 터널 천단으로부터 50 m까지의 구간을 해석영역으로 설정

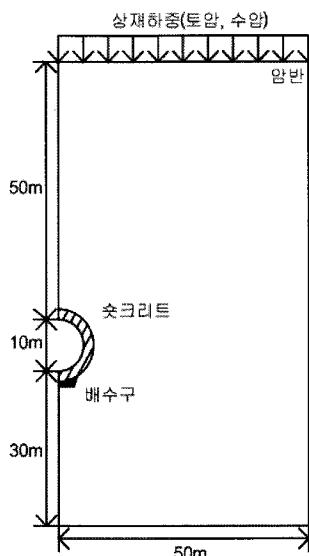


그림 2. 해석단면 개요도

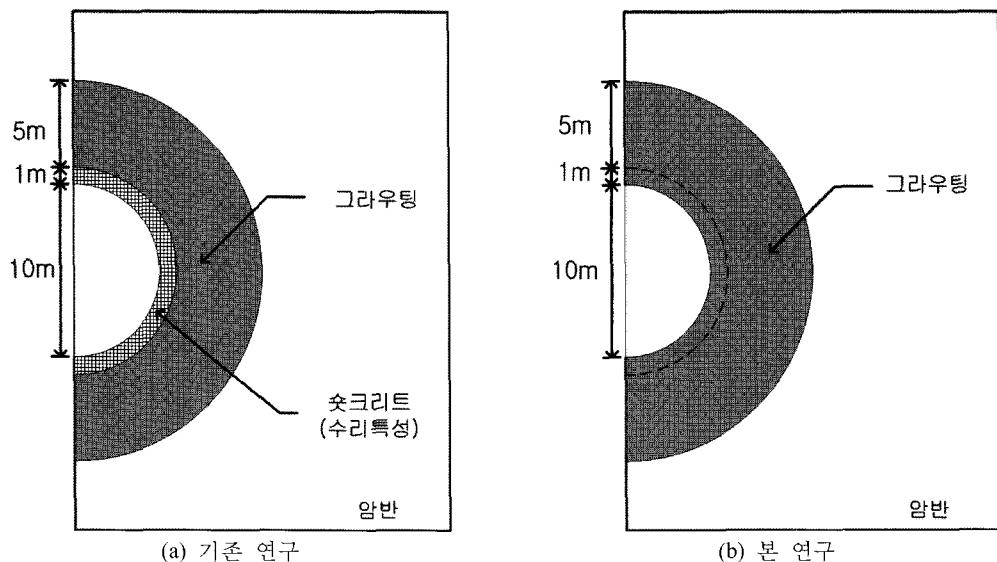


그림 3. 그라우팅 360° 보강 시 모델링 비교

하였다. 단, 지하수면이 일정하게 유지된다는 가정 하에 해석 상부경계면에 작용하는 수압과 토압을 상재하중으로 처리하였다(유광호와 김은혜, 2010). 대상암반은 탄소성 거동을 만족하는 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였다.

그라우팅 보강영역은 무보강, 120°, 180°, 360°로 4 경우가 고려되었으며, 반단면 해석을 수행하였으므로 본 연구에서는 0°, 60°, 90°, 180°로 적용하였다. 단, 그라우팅 보강영역 중 대표로 360°를 그림 3에 나타내었다. 유광호와 김은혜(2010)는 해저터널에 작용하는 그라우팅 두께를 5 m와 7 m로 가정하였는데, 터널의 안정성에 미치는 그라우팅 두께의 영향은 없는 것으로 나타났다. 따라서 본 논문에서는 그라우팅 두께를 6 m로 고정하여 적용하였다. 또한 배수구 펌핑에 대한 효과를 알아보기 위해 터널의 인버트 하단에 배수구를 설치하였고, 수치해석 시 펌핑을 고려하였다.

한편 그림 3은 그라우팅 360° 보강 시 굴착면 주변의 암반, 솗크리트, 그라우팅을 어떻게 모델링하였는지에 대해 기존 연구와 본 연구를 비교한 것이다. 기존 연구에서는 그림 3(a)에서 보는 바와 같이 솗크리트 영역이 그라우팅 보강되지 않아 접수정과 솗크리트 영역을 통해 지하수가 유입되어 결과의 신뢰도가 떨어지는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 이를 해결하기 위해 그림 3(b)와 같이 솗크리트 영역도 그라우팅 보강되는 것으로 하였다.

3.2 연계해석을 위한 입력정수

해석에 사용된 지반 물성치는 표 1에 정리하였다. 표 1의 값들은 한국도로공사 도로교통기술원

표 1. 해석에 사용된 입력 물성치

구 분	탄성계수 (GPa)	단위중량 (kg/m ³)	마찰각 (°)	점착력 (MPa)	인장강도 (MPa)	간극률	포아송비	투수계수 (cm/sec)
1등급	암반	34.12	2,600	45	1.0	0.5	0.20	1.0×10^{-5}
	그라우팅 영역	50.00	2,600	45	1.2배	0.88	0.17	1/10배 1.0×10^{-6}
					1.6배			1/100배 1.0×10^{-7}
					2.0배			1/200배 5.0×10^{-8}
3등급	암반	13.01	2,300	38.5	0.25	0.125	0.25	7.0×10^{-5}
	그라우팅 영역	28.02	2,450	38.5	1.6배	0.25	0.22	1/10배 7.0×10^{-6}
					2.0배			1/100배 7.0×10^{-7}
					5.0배			1/200배 3.5×10^{-7}
5등급	암반	1.26	2,000	31	0.05	0.05	0.30	4.0×10^{-4}
	그라우팅 영역	6.04	2,150	31	2.0배	0.1	0.27	1/10배 4.0×10^{-5}
					5.0배			1/100배 4.0×10^{-6}
					10.0배			1/200배 2.0×10^{-6}

표 2. 해석에 사용된 솗크리트 물성치

구 분	두께 (cm)	탄성계수 (GPa)	포아송비	인장강도(MPa)	항복압축강도 (MPa)	간극률	투수계수 (cm/sec)
연성	30	3.0	0.25	0.89	0.45	12.36	1.0×10^{-5}
		30.0					

(2002)o] “암반등급에 따른 도로터널 지보체계 개선연구”를 위해 수치해석을 수행할 때 사용한 입력 물성치를 참고하여 선정된 값들이다. 한편 그라우팅 보강영역의 투수계수 및 점착력의 변화가 터널의 거동에 어떤 영향을 미치는지를 알아보기 위하여 값을 변화시켜가며 적용하였다. 즉 그라우팅 보강영역의 투수계수는 암반등급에 상관없이 원 암반 투수계수의 1/10배, 1/100배, 1/200배로 변화시켜가며 적용하였고, 그라우팅 보강영역의 점착력은 1 등급의 경우는 원 암반 점착력의 1.2배, 1.6배, 2.0배로, 3 등급의 경우는 1.0배, 1.6배, 2.0배, 5.0배로, 5 등급의 경우는 2.0배, 5.0배, 10.0배로 달리해가며 적용하였다. 내부마찰각의 경우는 그라우팅 후에도 변하지 않는 것으로 가정하였다. 또한 단위중량은 암반상태가 좋을수록 커지도록 하였으며 1 등급은 그라우팅 보강을 하여도 단위중량이 더 증가하지 않을 것이라고 판단하여 암반과 그라우팅 영역의 단위중량을 같은 적용하였다.

연계해석 시 솗크리트의 역학적 거동은 소성거동을 고려할 수 있는 라이너(liner)요소로, 수리학적 거동은 굴착면 주변 1 m 두께의 연속체요소로 모델링하였다(유광호와 김은혜, 2009). 단 기존 구와 달리 그라우팅 전에는 솗크리트의 수리학적 거동이 고려되었으나, 그라우팅 후에는 그라우팅 영역으로 포함되어 무시되는 것으로 하였다. 연계해석에 사용된 솗크리트의 물성치는 표 2에 정리하였다. 이 때 솗크리트의 두께는 30 cm이며, 연성 솗크리트는 크리트를 췌을 때 굳기 전의 상태이

고, 경성 솗크리트는 솗크리트를 치고 난 다음 완전히 굳은 후의 상태이다.

4. 연계해석 민감도 분석 결과

그라우팅 투수계수 및 점착력의 변화에 따라 터널의 거동이 어떻게 달라지는가를 알아보기 위하여 각각 값을 달리하여 수치해석을 실시하고 결과를 분석하였다. 단, 안전율은 유광호와 김은혜(2010)가 수행한 바와 같이 전단강도감소기법에 근거하여 일련의 수치해석을 실시하여 솗크리트가 경화된 최종상태를 기준으로 산정하였다. 그림 4는 그라우팅 보강영역 120°의 1 등급 암반에서 그라우팅 투수계수에 따른 안전율을 점착력별로 솗크리트 두께를 달리하여 나타낸 것이다. 그림 4로부터 솗크리트 두께가 증가할수록 안전율이 증가하며, 속크리트 두께가 같은 경우 점착력이 증가할수록 안전율이 증가하는 것으로 나타났다. 그림 4(a)는 속크리트 두께 30 cm를 나타낸 것으로 속크리트 두께가 45, 60 cm인 경우보다 얇아 그라우팅 투수계수가 감소함에 따라 그라우팅 배면에 작용하는 수압이 증가하여 안전율이 작아지는 것을 알 수 있다. 하지만 그라우팅 투수계수가 1/100배 이하에서는 안전율의 변화가 거의 없는 것을 알 수 있다.

그림 4(b)는 속크리트 두께 45 cm를 나타낸 것으로 속크리트 두께가 30 cm와 마찬가지로 그라우팅 투수계수가 감소하면 안전율이 감소한다. 하지만 점착력이 원 암반 점착력의 1.6배 이상에서는 그라우팅 투수계수가 작아져도 전단강도가 커서 속크리트 두께 증가(지보효과)로 인한 안전율의 변화는 없는 것을 알 수 있다.

그림 4(c)는 속크리트 두께 60 cm를 나타낸 것이다. 속크리트 두께 30, 45 cm 보다 전단강도가 커서 그라우팅 투수계수가 감소해도 속크리트 두께 증가로 인해 안전율이 감소하지는 않는 것으로 나타났다. 따라서 수리학적 조건(터널 내부로의 유입량 및 굴착면 주변 수압분포)이 비슷할 경우에는 속크리트 두께가 두꺼울수록 그라우팅 투수계수가 안전율에 미치는 영향이 감소하는 것으로 나타났다.

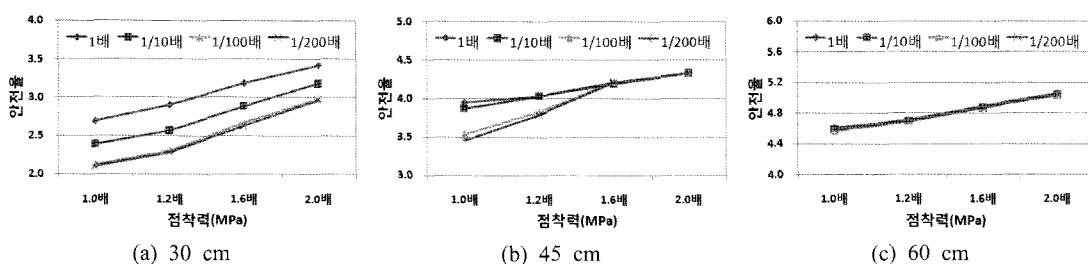


그림 4. 그라우팅 투수계수별 점착력과 안전율 관계(1 등급, 그라우팅 보강영역 120°)

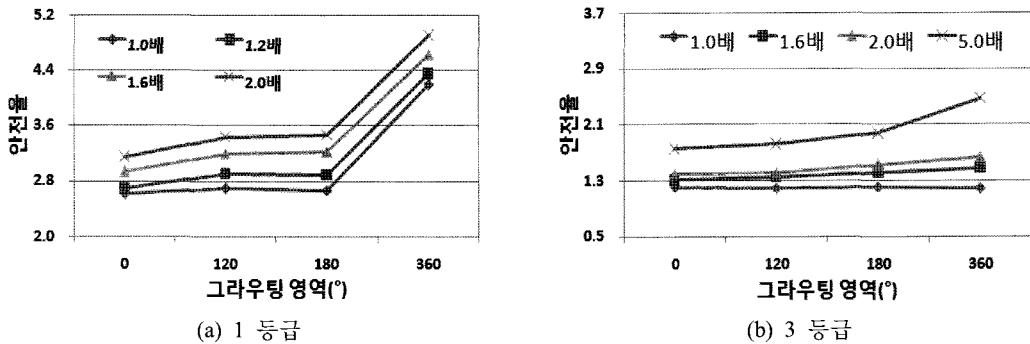


그림 5. 점착력별 그라우팅 보강영역과 안전율 관계(숏크리트 두께 30 cm, 그라우팅 투수계수 1배)

그림 4의 내용을 종합하면, 숏크리트 두께가 증가할수록 안전율이 증가하며, 숏크리트 두께가 같은 경우 점착력이 증가할수록 안전율이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 숏크리트 두께가 두꺼울수록 그라우팅 투수계수가 안전율에 미치는 영향이 감소하는 것으로 나타났다.

그림 5는 그라우팅 투수계수 1배의 숏크리트 두께 30 cm에서 점착력에 따른 안전율을 그라우팅 보강영역별로 암반등급을 달리하여 나타낸 것이다. 그림 5(a)는 1 등급 암반에서 그라우팅 보강영역과 안전율의 관계를 나타낸 것이다. 점착력이 증가하면 안전율이 증가하는 것으로 나타났다. 그라우팅 보강영역 0°, 120°, 180°는 부분보강으로 보강영역이 넓어져도 안전율이 그렇게 크게 증가하지 않으나 전체보강인 360°의 경우는 안전율이 크게 증가함을 알 수 있다. 따라서 1 등급 암반은 점착력이 증가하면 안전율이 증가하고, 그라우팅 보강영역이 증가함에 따라 안전율이 증가한다.

그림 5(b)는 3 등급 암반에서 그라우팅 보강영역이 안전율에 미치는 영향을 분석한 것이다. 3 등급 암반에서는 그라우팅의 점착력이 원 암반의 2.0배로 증가하더라도 전단강도가 충분히 커지지 못해 그라우팅 보강영역이 확대되더라도 안전율 증가가 미미한 것을 알 수 있다. 하지만 그라우팅의 점착력이 원 암반의 5.0배가 되면 전단강도가 어느 정도 커져서 그라우팅 보강영역이 넓어짐에 따라 안전율이 증가하는 것으로 나타났다. 이상을 종합하면 암반상태가 좋을수록 점착력이 증가하고 그라우팅 보강영역이 확대되면 안전율도 따라서 증가하나 암반상태가 나쁠수록 그라우팅 보강영역의 점착력이 충분히 크지 않으면 그라우팅 보강영역이 확대되더라도 안전율이 증가하지는 않는 것으로 나타났다.

그림 6(a), (b), 및 (c)는 각각 암반이 1, 3, 및 5 등급인 경우, 그라우팅 보강영역이 360°이고, 숏크리트 두께가 60 cm인 경우의 그라우팅 투수계수와 점착력 및 안전율의 관계를 나타낸 것이다. 모든 등급의 암반에서 투수계수와 상관없이 점착력이 증가할수록 안전율이 증가하는 것을 알 수

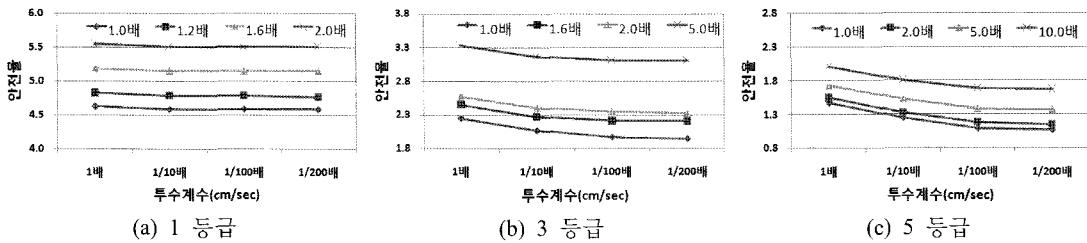


그림 6. 그라우팅 투수계수에 따른 점착력과 안전율의 관계(그라우팅 보강영역 360°, 솗크리트 두께 60 cm)

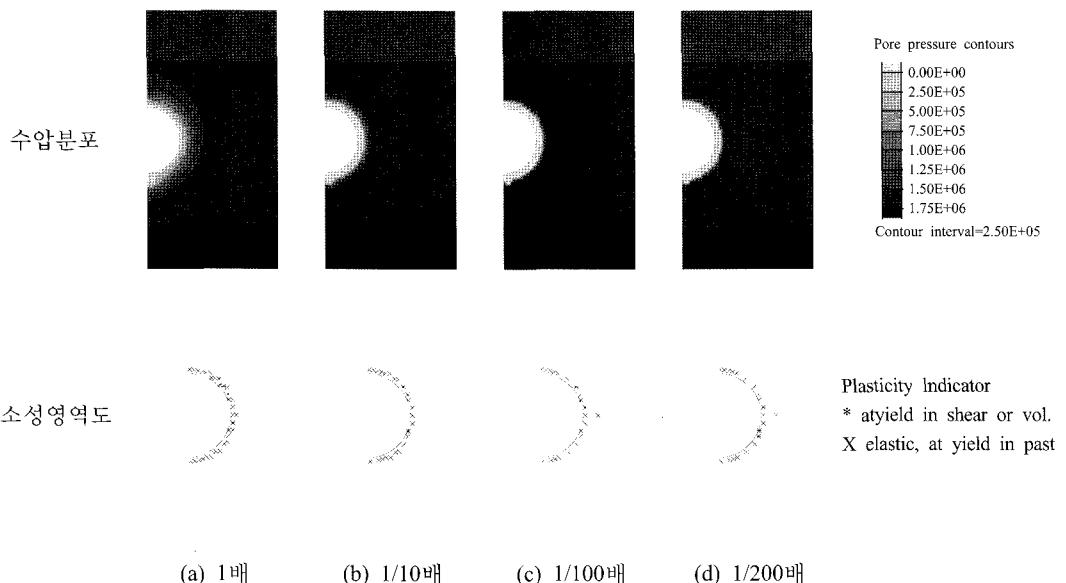


그림 7. 1 등급 암반의 경우 그라우팅 투수계수별 수압분포 및 소성영역도(그라우팅 보강영역 360°, 솗크리트 두께 60 cm, 점착력 1.0배)

있다. 한편, 그라우팅 투수계수가 감소함에 따라 안전율의 변화는 1 등급 암반의 경우는 거의 없는 것을 알 수 있다. 하지만, 암반 상태가 나빠질수록 그라우팅 투수계수가 감소할수록 안전율의 감소 폭이 증가함을 알 수 있다. 이는 암반등급이 좋을수록 모든 그라우팅 투수계수에 대해 그라우팅 배면에 작용하는 수압분포가 비슷해 안전율에 영향을 못 미치나, 암반등급이 나빠질수록 그라우팅 투수계수가 작을수록 그라우팅 배면에 작용하는 수압이 증가하여 안전율이 감소하기 때문으로 판단된다. 하지만, 보다 자세한 원인 분석을 위해 암반등급별로 굴착면 주변의 수압분포와 소성영역도를 살펴보았다.

그림 7은 암반이 1 등급이며, 그라우팅 보강영역이 360°이고, 솗크리트 두께가 60 cm이며, 점착력이 원 암반의 1.0배인 경우의 그라우팅 투수계수 변화에 따른 굴착면 주변의 수압분포와 소성영

역도를 나타낸 것이다. 그림 7에서 보는 바와 같이 굴착 후 터널 배면의 수압이 균등한(uniform) 분포를 보이며, 평균 수압이 그라우팅 투수계수별로 $1.545 - 1.617 - 1.617 - 1.617$ MPa이 작용하여 큰 차이가 나지 않고, 소성영역도도 거의 차이가 없음을 보여준다. 따라서 그라우팅의 투수계수가 감소하여도 터널의 전체 안전율이 거의 동일하게 나타난 것으로 판단된다.

그림 8은 암반이 3 등급이며, 그라우팅 보강영역이 360° 이고, 콘크리트 두께가 60 cm이며, 점착력이 원 암반의 1.0배인 경우의 그라우팅 투수계수 변화에 따른 굴착면 주변의 수압분포 및 소성영역도를 나타낸 것이다. 그림 8에서 보는 바와 같이 굴착 후 터널 배면의 수압이 그라우팅 투수계수가 1배인 경우는 나머지 경우에 비해 상대적으로 작고, 수압분포도 천단부와 인버트 부분의 수압 차이가 발생하여 균등하지 않으며, 그라우팅 투수계수가 감소할수록 평균 수압도 $1.295 - 1.579 - 1.617 - 1.617$ MPa로 증가하기 때문에 안전율이 낮아지는 것으로 판단된다. 참고로 소성영역도는 거의 같은 양상을 보이는 것으로 나타났다. 한편 그라우팅 보강영역의 점착력이 원 암반의 점착력과 같을 경우 그라우팅 투수계수별 간극수압 분포를 그림 9에 도시하였다.

그림 9(a)는 그라우팅 보강영역의 배면 경계에서 수압을 측정 한 7 군데의 위치를 도시한 것이다. 참고로 1은 천단부, 4는 측벽부, 7은 바닥부에 해당된다. 그림 9(b)에서 볼 수 있듯이 그라우팅 투수계수가 감소할수록 그라우팅 영역 배면에 작용하는 수압이 증가함을 알 수 있었다. 단 그라우팅 투수계수가 1/100배 이하에서는 간극수압의 변화가 없었다. 특히 원 암반의 물성치에 해당하는 그

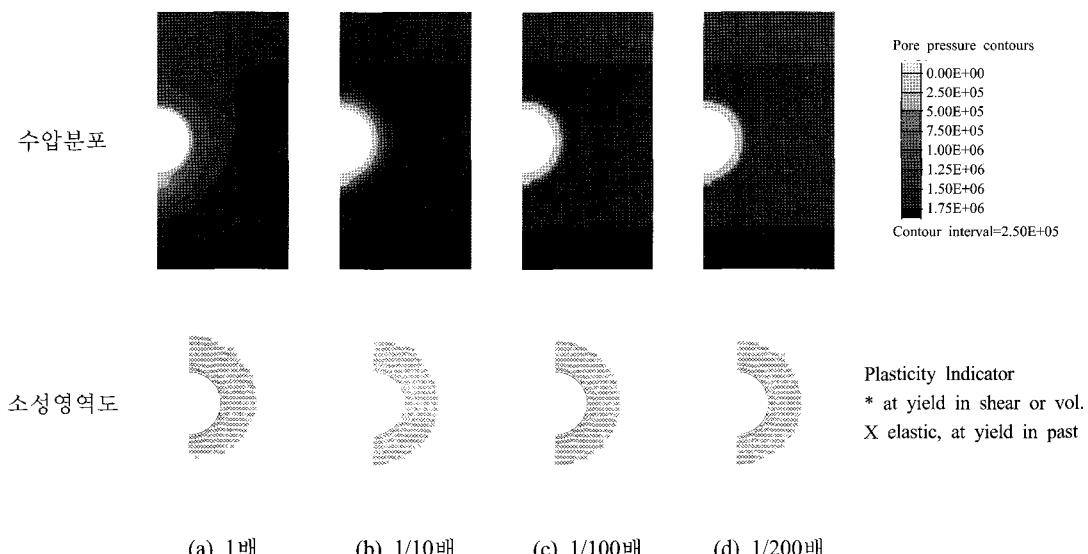
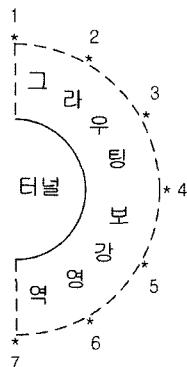
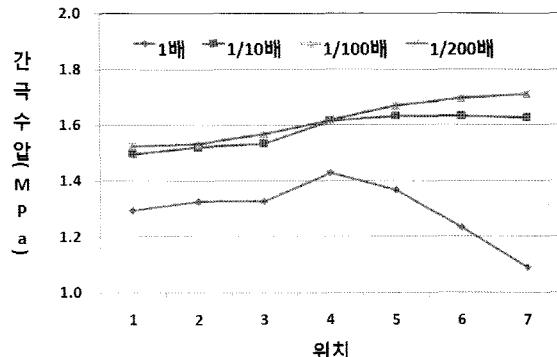


그림 8. 3 등급 암반의 경우 그라우팅 투수계수별 수압분포 및 소성영역도(그라우팅 보강영역 360° , 콘크리트 두께 60 cm, 점착력 1.0배)



(a) 수압 측정위치도



(b) 간극수압 비교

그림 9. 3 등급 암반에서의 그라우팅 투수계수별 간극수압 분포(그라우팅 보강영역 360°, 솗크리트 두께 60 cm, 점착력 1.0배)

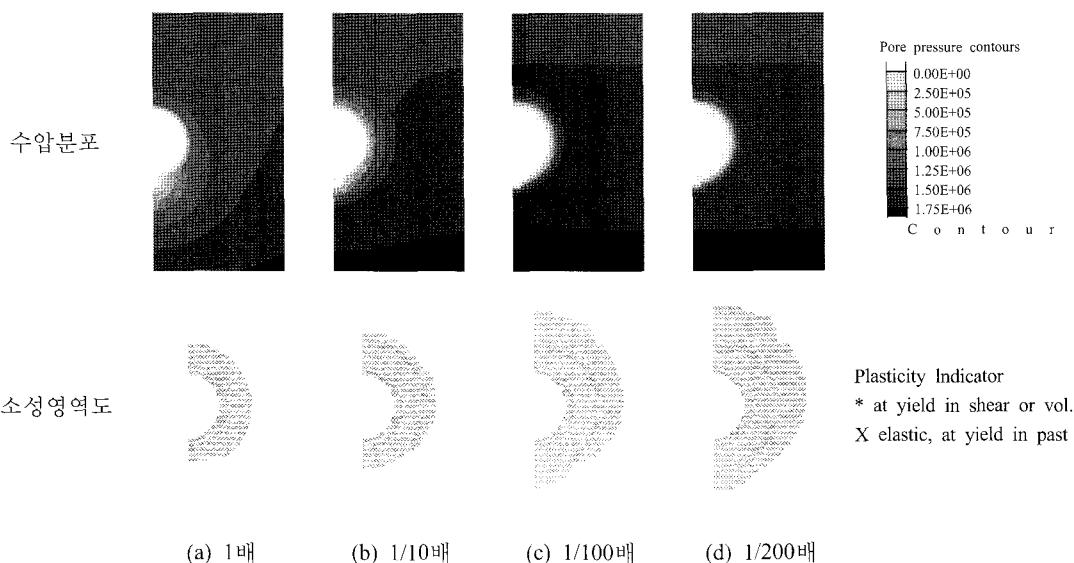


그림 10. 5 등급 암반의 경우 그라우팅 투수계수별 수압분포 및 소성영역도(그라우팅 보강영역 360°, 솗크리트 두께 60 cm, 점착력 1.0배)

라우팅 투수계수가 1배인 경우가 나머지 경우보다 터널 내부로 지하수가 많이 유입되어 평균적으로 간극수압이 0.3 MPa 정도 작게 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 이유로 3등급 암반의 경우 그라우팅 투수계수가 감소할수록 터널의 안전율이 감소하는 것으로 나타났을 것으로 판단된다. 참고로, 그라우팅 투수계수가 1배인 경우에는 천단부에 작용하는 수압이 바닥부에 작용한 수압보다 큰 것으로 나타났지만 그라우팅 투수계수 1/10배를 포함한 나머지의 경우에는 천단부가 바닥부에 비해 작용하는 수압이 적고, 그 차이가 줄어든 것을 알 수 있다.

그림 10은 5 등급 암반의 경우, 그라우팅 보강영역이 360° 이고, 콘크리트 두께가 60 cm이며, 점착력이 원 암반의 1.0배인 경우의 그라우팅 투수계수 변화에 따른 굴착면 주변의 수압분포 및 소성영역도를 나타낸 것이다. 3등급 암반의 경우와 마찬가지로 그라우팅 투수계수가 감소할수록 터널 내부로 유입되는 물의 양이 줄어 평균 수압이 $1.177 - 1.444 - 1.607 - 1.616 \text{ MPa}$ 로 증가하기 때문에 안전율이 낮아지는 것으로 판단된다. 안전율의 감소폭은 1, 3 등급 암반의 경우보다는 큰 것을 알 수 있다. 이는 그라우팅 투수계수가 감소함에 따라 소성영역이 확대되는 것으로도 확인할 수 있다.

그라우팅 투수계수와 간극수압 분포 및 소성영역과의 관계를 정리하면, 암반상태가 나빠질수록 전단강도가 작아지고 터널 내부로 유입되는 지하수의 양이 증가하여 굴착면 주변의 간극수압이 작아지기 때문에 소성영역이 확대됨을 알 수 있었다. 특히, 5 등급 암반의 경우 그라우팅 보강영역의 투수계수가 작아질수록 소성영역이 확대됨을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 심부에 있는 해저터널을 대상으로 그라우팅 투수계수와 점착력이 안정성에 미치는 영향을 보다 자세히 살펴보기 위해 1, 3, 5 등급 암반을 대상으로 민감도 분석을 실시하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 콘크리트 두께가 증가할수록 안전율이 증가하며, 콘크리트 두께가 같은 경우 점착력이 증가할수록 안전율이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 콘크리트 두께가 두꺼울수록 그라우팅 투수계수가 안전율에 미치는 영향이 감소하는 것으로 나타났다.
2. 암반상태가 좋을수록 점착력이 커지고 그라우팅 보강영역이 확대되면 안전율도 따라서 증가하나 암반상태가 나쁠수록 그라우팅 보강영역의 점착력이 충분히 크지 않으면 그라우팅 보강영역이 확대되더라도 안전율이 증가하지 않아 그라우팅 보강영역의 크기가 안전율에 영향을 주지 못함을 알았다.
3. 암반상태가 좋을수록 그라우팅 영역의 전단강도가 충분히 커져서, 그라우팅 투수계수가 안전율에 미치는 영향이 줄어들며, 암반상태가 나쁠수록 그라우팅 영역의 전단강도가 작아져서, 그라우팅 투수계수가 작을수록 그라우팅 배면에 작용하는 수압이 증가하여 안전율이 감소하고 감소폭은 암반상태가 나빠질수록 증가함을 알았다.
4. 한편, 암반상태가 나빠질수록 전단강도가 작아지고 터널 내부로 유입되는 지하수의 양이 증가하여

굴착면 주변의 간극수압이 작아지기 때문에 소성영역이 확대됨을 알 수 있었다. 특히, 5 등급 암반의 경우 그라우팅 보강영역의 투수계수가 작아질수록 소성영역이 확대됨을 확인할 수 있었다.

5. 종합적으로 판단할 때, 해저터널의 그라우팅 보강 시, 보강영역의 투수계수가 감소하여 그라우팅 영역 배면의 수압이 높아지는 차수효과보다 그라우팅 영역의 점착력이 증가하여 전단강도가 높아지는 보강효과를 더 크게 하는 것이 안정성 측면에서 필요할 것으로 판단된다.

본 연구의 결과가 해저터널 그라우팅 보강의 설계 및 시공에 도움이 되길 기대해 본다. 단 연구결과가 가정된 입력 물성치에 근거하여 도출된 것으로 사용 시 주의하기 바란다.

감사의 글

본 논문의 작성是为了 수치해석을 수행하고 데이터를 정리하는 등의 수고를 해준 가필순 석사과정 학생에게 진심으로 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 유광호(2008), “이차원 수리-역학적 연계해석 시 유도배수 모델링 방법에 따른 수치해석적 비교 연구”, 한국터널공학회 논문집, 제10권, 제1호, pp. 91-104.
2. 유광호, 가필순, 김경식(2011), “터널 천단부의 그라우팅 보강에 대한 연계해석 연구”, 2011년 한국암반공학회 봄학술발표회 논문집, pp. 105-110.
3. 유광호, 김은혜(2009), “그라우팅 보강영역이 해저터널 안정성에 미치는 영향에 대한 연구”, 한국암반공학회 학술발표회 논문집, 서울대학교 호암컨벤션센터, pp. 113-119.
4. 유광호, 김은혜(2010), “해저터널에서의 그라우팅 보강을 위한 안정성 연구”, 한국터널공학회 논문집, 제12권, 제2호, pp. 145-155.
5. 유광호, 이동훈(2008a), “해저터널의 이완하중과 산정을 위한 제안식들과의 수치해석적 비교 연구”, 한국터널공학회 논문집, 제10권, 제1호, pp. 25-36.
6. 유광호, 이동훈(2008b), “민감도 분석을 통한 불연속암반 내의 해저터널의 안정성 평가를 위한 연계해석”, 한국터널공학회 논문집, 제10권, 제4호, pp. 421-430.
7. 유광호, 박연준, 강용(2001), “절리암반 터널의 안전율 평가를 위한 수치해석적 연구”, 한국암반공학회 논문집, 제11권, 제3호, pp. 279-288.
8. 유광호, 박연준, 배규진(2000), “연약 암반층에 굴착된 터널의 안전율 평가”, 대한터널협회 논문집, 제2권, 제3호, pp. 47-57.

-
9. 유광호, 박연준, 홍근영, 이현구, 김재권(2005), “지보재 파괴를 고려한 터널 안전율의 수치해석적 산정 연구”, 한국터널공학회 논문집, 제7권, 제1호, pp. 37-49.
 10. 박연준, 유광호(1998), “편재절리 모델을 이용한 절리암반 사면의 안정성 해석”, 한국암반공학회 논문집, 제8권, 제4호, pp. 287-295.
 11. 한국도로공사 도로교통기술원(2002), “암반등급에 따른 도로터널 지보체계 개선 연구”, p. 268.
 12. Itasca Consulting Group, Inc. (2005), Fast Lagrangian Analysis of Continua, Ver. 5.0, Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota, USA.