

과지압 조건에서 해저터널의 연계해석 시 이완하중고 평가 연구

The estimation of the relaxed rock mass height of a subsea tunnel under the overstressed ground conditions in coupled analysis

유광호¹⁾, Kwang-Ho Yoo, 이동훈²⁾, Dong-Hoon Lee

¹⁾ 수원대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., University of Suwon

²⁾ 수원대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., University of Suwon

SYNOPSIS : In the case of subsea tunnels, hydro-mechanical coupled analysis is necessary for an exact design and construction. The consideration of the overstressed ground condition is also required because they are usually located at the great depth unlike the usual tunnels. Many researches have been performed on the estimation of relaxed rock mass height. However, there have been no researches on the estimation of relaxed rock mass height under overstressed ground conditions. In this study, therefore, hydro-mechanical coupled analyses were performed under the overstressed ground conditions and the relaxed rock mass heights were estimated based on the contour of the local safety factor around a tunnel.

Key Words : overstressed ground conditions, relaxed rock mass height, coupled analysis, local safety factor

1. 서 론

도심지의 발달로 인해 가까운 미래에는 지하공간의 개발이 활발히 이루어 질 것으로 판단된다. 이에 따라 해저시설물에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 해저터널의 경우 정확한 설계 및 시공을 위해서 수리-역학적 연계해석이 필요하며, 일반터널과 달리 해저 심부에 위치하고 있기 때문에 과지압에 대한 고려가 필요하다.

암반이완하중을 산정하는 방법으로는 Terzaghi의 암반하중 분류표, Terzaghi 및 Bierbäumer의 이론식, RMR 값 및 Q 값을 이용한 경험식, 그리고 터널 주변의 국부안전율 분포를 이용한 방법이 있다.

근래에 들어 천병식 등(2001)은 NATM 터널 콘크리트라이닝 설계 시 적용할 수 있는 적절한 암반이완하중 및 수압산정을 위하여 다양한 하중산정방법들을 고찰하는 연구가 진행되었다. 이 연구에 따르면 5가지 하중조합에 대한 구조해석을 실시하여 보통 암반조건에서는 Terzaghi와 Bierbäumer의 방법이 다소 큰 값을 나타내며, Terzaghi표, RMR 그리고 Q 방법 등 경험적인 방법에 의해 예측된 암반하중은 근사값을 나타낸다고 하였다. 그러나 기존에 제안된 식들은 다양한 측압을 고려할 수 없고 지반이나 암반의 상태에 따라 적용성의 문제가 있을 수 있다.

또한, 유광호 등(2000)에 연구된 바에 의하며 국부안전율을 이용하여 이완하중고를 산정한 방법은 해석영역의 각 요소가 얼마나 파괴에 가까운가를 설명하는데 효과적이며, 터널의 안정 해석 시 굴착으로 인해 발생한 터널 주변부의 파괴영역이나 양상, 보강이 필요한 부분을 찾아내는 데에 효과적으로 사용될 수 있다고 하였다. 따라서 터널 굴착 후의 이완 영역은 국부 안전율이 2.0 또는 3.0이 되는 등고선을 찾아 이완하중고를 찾을 수 있다고 제안된 바 있다(유광호 2005). 이에 최근에 유광호 등(2007)에

의하여 3등급 암반을 대상으로 유도배수 방법을 달리하고 국부안전율을 이용하여 이완하중고를 산정하여 그 적용성을 연구한 바 있다. 그러나 다양한 암반조건에 대해 수치해석이 수행되지 않았다는 문제가 있다. 이와 같이 기존의 연구들에 의하면 이완하중고에 관한 연구는 활발히 진행되고 있으나, 과지압이 이완하중고에 미치는 영향에 대해서는 연구된 바가 없는 실정이다.

이에 본 연구에서는 과지압 조건에서 해저터널의 수리-역학적 연계해석을 실시하고 국부안전율을 이용하여 이완하중고를 산정하였다. 과지압 조건에서 이완하중고에 미치는 영향을 분석하기 위해 1, 3, 5등급 암반을 대상으로 측압계수(1.0, 2.0, 3.0)에 따라 국부안전율을 이용하여 이완하중고를 산정한 결과 과지압에서 이완하중고가 더 크게 산정되는 것으로 나타났다.

2. 국부안전율을 이용한 방법

수치해석에 있어, 각 요소에서의 응력상태는 전응력 표현 시 그림 1과 같이 점선으로 표시된 Mohr 원(주응력 σ_1 과 σ_3)에 의해 표현될 수 있고, 공극수압(P_w)이 작용하면 유효응력에 의한 응력상태는 $\sigma - \tau$ 평면상에서 반지름 r 을 갖는 원 (**a**)로 그려진다. 이 원이 파괴면(failure envelope)에 접하게 될 때 파괴가 발생한다. 원 (**a**)에 의해 표현된 응력상태에서 파괴가 발생하려면 σ'_3 는 그대로 유지하면서 원 (**b**)와 같이 파괴면에 접할 때까지 σ'_1 이 증가하여야 한다(Itasca Consulting Group, 1999). 또한, 원 (**a**)에 의해 표현된 응력상태에서 원의 중심은 그대로 유지하면서 원 (**c**)와 같이 파괴면에 접할 때까지 응력원의 반지름을 증가시킴으로서 파괴에 도달할 수도 있다. 두 원의 반지름 비($F = \frac{R_2}{r}$ or $\frac{R_1}{r}$)는 주어진 응력 상태에서 일종의 강도/응력비 (strength/stress ratio)에 해당하며, 종종 국부 안전율 (Factor of Safety)이라고도 한다. 특히, 본 연구에서는 σ'_3 는 그대로 유지하면서 σ'_1 이 증가하여 파괴되는 경우로 가정하여 안전율을 구하였다. 파괴될 때의 최대주응력을 σ'_{1f} 라 하면, 식 (1)과 같이 표현된다.

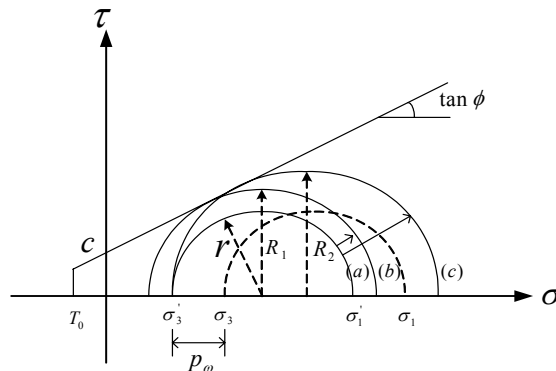


그림 1. 간극수압을 고려한 국부안전율

$$\sigma'_{1f} = \left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right) \sigma'_3 - 2c \sqrt{\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}} \quad (1)$$

여기서, c 는 점착력이고, ϕ 는 내부마찰각이다.

이 때, 국부 안전율(F.S.)은 식(2)와 같이 계산될 수 있다.

$$F.S. = \frac{R_2}{r} = \frac{\sigma'_3 - \sigma'_{1f}}{\sigma'_3 - \sigma'_1} \quad (2)$$

이와 같은 방법은 해석영역의 각 요소가 얼마나 파괴에 가까운가를 설명하는 데에는 효과적이며, 터널의 안정 해석 시 굴착으로 인해 발생한 터널 주변부의 파괴영역이나 양상, 보강이 필요한 부분을 찾아내는 데에 효과적으로 사용될 수 있다(유광호 등, 2000). 따라서 터널 굴착 후의 이완 영역은 그림 2와 같이 국부 안전율이 2.0 또는 3.0이 되는 등고선을 찾아 그 크기를 찾을 수 있다고 제안된 바 있다(유광호, 2005).

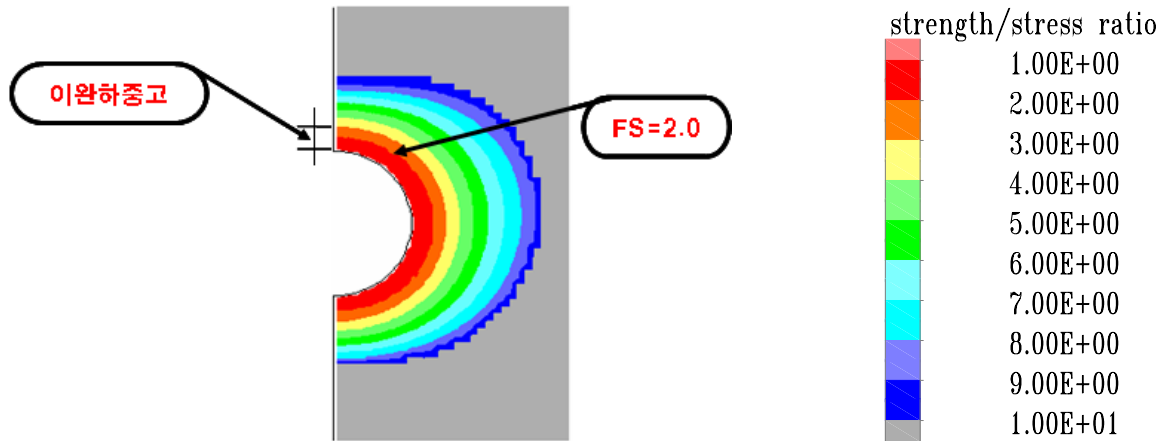


그림 2. 국부안전율 2.0영역에 의한 이완하중고

3. 연계해석 모델링

3.1 해석 영역 및 해석 조건

대상 터널은 그림 3과 같이 수심이 60m, 토피가 100m인 직경 10m의 원형터널이며, 균질한 암반에 굴착되는 것으로 가정하였다. 또한, 터널 굴착 시 미칠 수 있는 영향을 고려하여 해석영역을 높이 140m, 터널 중심으로부터 외부경계까지의 거리는 터널 직경의 5배인 50m로 하였다.

해석속도를 높이기 위하여 터널 축을 중심으로 좌·우 대칭경계 조건을 적용하여 반단면 해석을 수행하였으며, 깊이 방향으로는 지표면 이하 영역만을 고려하여 모델링하였다. 즉, 지하수면은 해석영역에 포함하지 않았으며, 단지 지하수면이 일정하게 유지된다는 가정 하에 지표면에 작용하는 수압만을 상재하중으로 처리하였다. 경계조건은 좌·우측면 경계는 수평방향 변위를 구속하고 하부경계는 수직방향을 구속하였으며, 우측면경계와 상부경계에서의 수압은 일정하게 유지되도록 하였으며, 굴착은 전단면굴착으로 가정하였다. 그림 3의 (a)와 같이 터널의 인버트부에 집수정을 설치하여 터널내로 유입되는 유입수를 처리하였다. 사용된 요소망은 격자형으로서 그림 3의 (b)와 같으며 터널 굴착면으로부터 외부로 멀어질수록 요소가 커지도록 구성하였다.

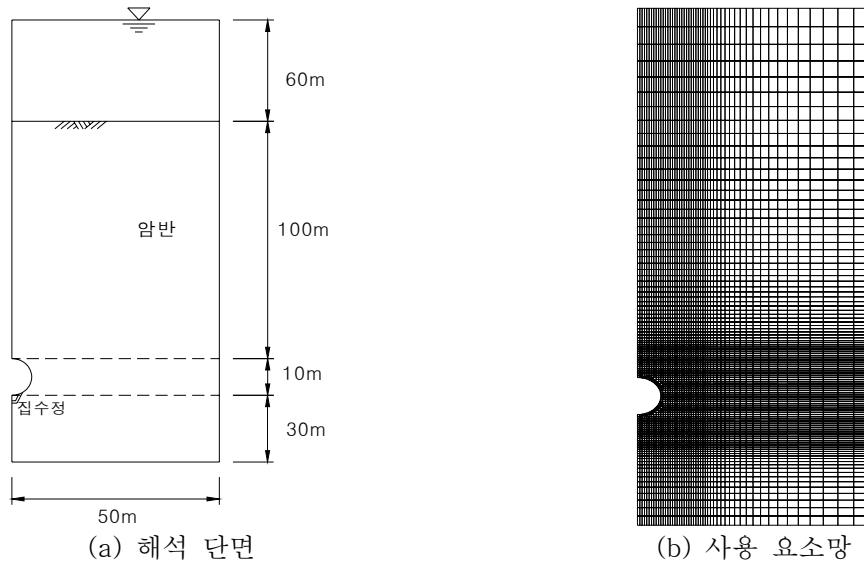


그림 3. 해석 단면 형상 및 요소망

일반적으로 2차원 해석에서는 3차원적 터널 시공과정을 현실적으로 모델링하기 위해 하중분배 개념을 도입하여 해석을 수행하는데 유충식(2006)에 의해 수행된 연구에 의하면, 시공과정을 모델링 할 때 각 굴착하중을 유사한 시공환경에서의 자료를 고려하여 굴착단계 2일, 연성 숏크리트 단계 8일, 경성 숏크리트 단계 20일 가량이 소요되는 것으로 가정하였다. 이에 본 연구에서는 그림 4와 같이 3가지 굴착단계(터널굴착-연성 숏크리트 타설 -경성 숏크리트 타설)별 하중 분담율을 60%-20%-20%로 가정하여 해석하였으며, 수리-역학적 연계해석을 위해 수리학적 해석을 실시함과 동시에 역학적 해석은 수행하지 않았으며, 반대로 역학적 해석에서는 수리학적 해석을 중지하여 연계해석을 모사하였다.

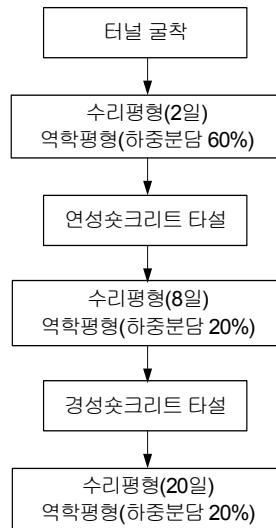


그림 4. 굴착 및 연계 해석 순서도

3.2 해석 물성치

1, 3, 5등급 암반을 대상으로 숏크리트 두께는 30cm, 45cm, 60cm(3가지), 숏크리트 수리특성은 $1.0 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$, 간극률은 0.08로 고정하였고, 집수정 펌핑량은 $3.6 \text{m}^3/\text{hr-m}$ (1가지)을 적용하였다. 측압 계수(K_0)는 1.0, 2.0, 3.0(3가지)을 사용하여, 총 $3 \times 3 \times 1 \times 3 = 27$ 가지 경우에 대해 연계해석을 실시하고 이완하중고를 산정하였다. 또한, 2차원 연계해석을 위해 탄소성 거동 모사가 가능한 라이너(liner)요소를 사용할 수 있는 FLAC-2D ver 5.0(Itasca Consulting Group Inc., 2005)을 사용하였다.

표 1은 한국도로공사 도로교통 기술원(2002), “암반등급에 따른 도로터널 지보체계 개선연구”에서 사용된 암반등급별 변형성 및 강도 정수 중 암반상태가 좋을수록 단위중량이 커지도록 수정하여 해석에 적용하였다. 표 2는 숏크리트를 모델링하기 위해 사용된 Liner 요소의 입력 물성치 및 숏크리트의 수리 물성치를 나타낸 것이다. 연계해석 시 숏크리트의 투수계수는 $1.0 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$, 간극률은 0.08로 일정하게 유지하고 숏크리트의 두께를 30cm, 45cm, 60cm로 변화시켰다.

표 1. 수정된 암반등급별 변형성 및 강도 정수

구 분	체적 탄성계수 (GPa)	전단 탄성계수 (GPa)	마찰각 (deg)	점착력 (MPa)	단위중량 (kN/m^3)	투수계수 (cm/sec)	간극률
1 등 급	22.75	13.65	45	1.0	26	1.22×10^{-5}	0.20
3 등 급	8.67	5.20	38.5	0.25	23	7.22×10^{-5}	0.25
5 등 급	1.87	1.12	31	0.05	21	4.22×10^{-4}	0.30

표 2. 숏크리트 (Liner 요소) 역학 및 수리 물성치

두께 (m)	포아송비	탄성계수 (GPa)	허용 인장응력 (MPa)	잔류 인장응력 (MPa)	허용 압축응력 (MPa)	투수계수 (cm/sec)	간극률
0.30	0.25	3.0	0.89	0.45	12.36	1.0×10^{-5}	0.08
0.45							
0.60							

4. 수치해석 결과

과지압이 이완하중고에 미치는 영향을 알기위해 수치해석을 실시한 결과를 표 3과 같이 정리하였다. 이완하중고는 국부안전율 분포가 2.0인 영역에서 산정 하였으며 천단부를 기준으로 하였다. 표에서 알 수 있듯이 측압계수에 의한 안전율의 차이는 거의 없었으며, 측압이 증가할수록 이완하중고가 증가하는 것으로 나타났다. 또한 암반상태가 불량할수록 이완하중고가 증가하였으며, 숏크리트 두께가 증가할수록 이완하중고는 감소하는 것으로 나타났다. 각각의 측압에서 5등급 암반, 숏크리트 두께 30cm의 경우 지보재가 파괴되어 안전율이 1.0이하로 나타나 이완하중고를 산정하지 못하였다.

표 3. 측압계수 별 해석 결과

구 분	암반등급	숏크리트 두께 (cm)	측압계수		
			$K_0=1.0$	$K_0=2.0$	$K_0=3.0$
안전율 (F.S)	1등급	30	4.53	4.53	4.53
		45	5.59	5.61	5.61
		60	6.99	7.03	7.03
	3등급	30	2.45	2.41	2.19
		45	3.33	3.35	3.35
		60	4.45	4.41	4.47
	5등급	30	0.61	0.61	0.45
		45	1.47	1.43	1.41
		60	2.29	2.41	2.09
F.S=2.0 이완하중고(m)	1등급	30	1.23	1.86	2.39
		45	1.21	1.82	2.35
		60	1.18	1.80	2.32
	3등급	30	5.17	6.62	22.83
		45	4.51	6.01	22.51
		60	4.18	5.65	22.30
	5등급	30	-	-	-
		45	13.30	32.75	51.51
		60	11.67	31.78	51.53

그림 5는 터널주변의 국부안전율 등고선도로서 3등급 암반에서 숏크리트 두께 30cm일 때 측압계수 별로 나타내었다. 그림에서와 같이 국부안전율이 2.0인 영역이 측압이 증가함에 따라 그 크기가 증가하고 측압계수 3.0인 경우에서 급격히 커지는 것을 알 수 있다.

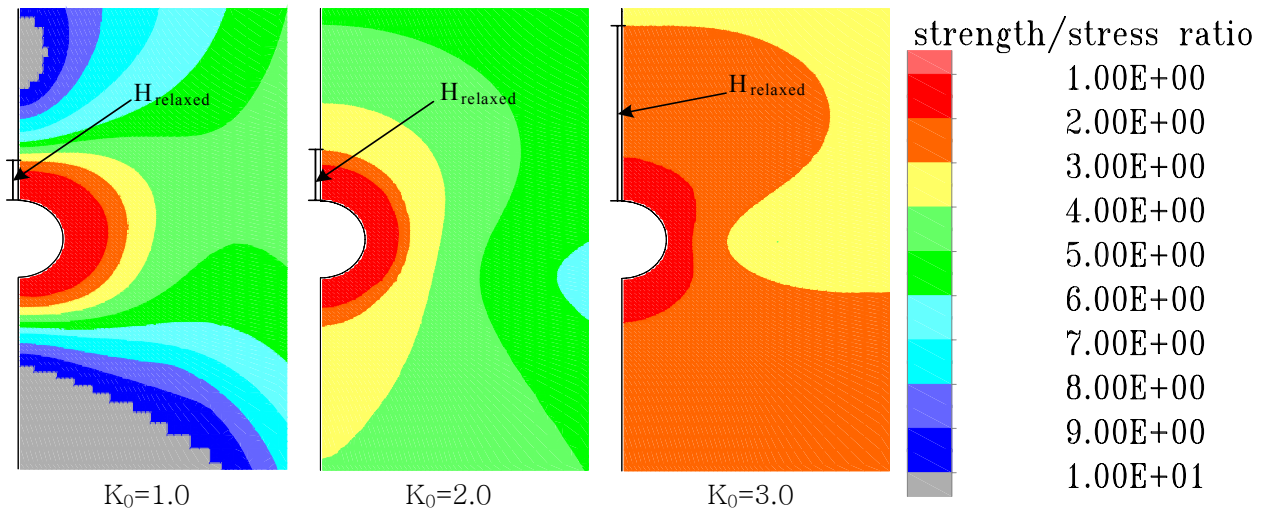


그림 5. 터널 주변의 국부안전율 등고선도(3등급 30cm)

안전율과 숏크리트 두께의 관계를 그림 6과 같이 측압계수에 따라 구분하여 나타내었다. 그림 6의 (a)는 1등급 암반상태의 안전율로서 숏크리트가 증가함에 따라 안전율 또한 증가하는 것으로 나타났으며, 측압에 따른 안전율의 변화는 없는 것으로 나타났다. 그림 6의 (b)는 암반상태가 가장 불량한 5등급 암반으로서 1등급에 비해 안전율이 감소하였으며 숏크리트 두께가 30cm일 경우 지보재가 파괴되어 안전율이 1.0이하로 나타났다. 5등급 암반에서도 측압에 의한 안전율의 차이는 거의 없으나 측압이 3.0인

경우에 다소 낮게 나타났다.

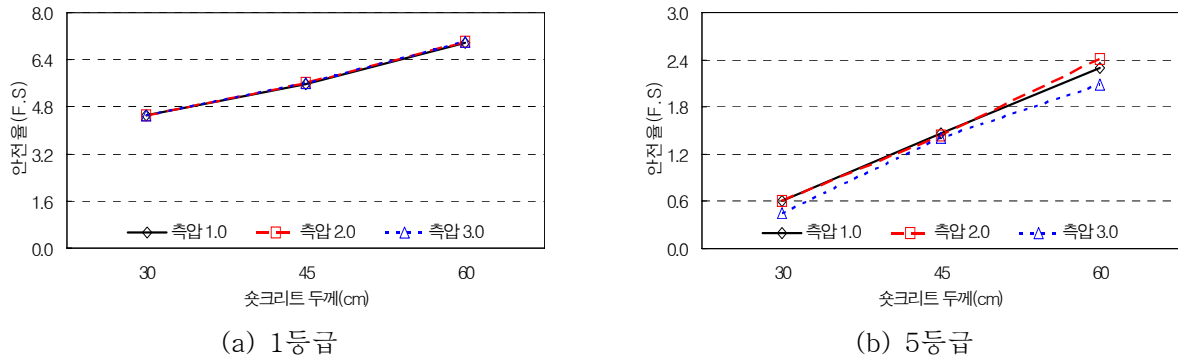


그림 6. 측압계수에 따른 안전율 vs 쏏크리트 두께

안전율과 암반등급의 관계를 측압계수로 구분하여 그림 7과 같이 나타내었다. 그림 7의 (a)는 쏏크리트 두께가 30cm 인 경우로서 암반등급이 불량해질수록 안전율이 감소하였으며 5등급 암반상태에서 지보재가 파괴되어 안전율이 1.0이하로 나타남을 알 수 있다. 그리고 측압이 안전율에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 그림 7의 (b)는 쏏크리트 두께가 60cm 인 경우로서 지보재의 두께가 30cm 보다 두꺼워져 안전율이 다소 증가하였으며, 그림 7의 (a)와 마찬가지로 측압에 의한 안전율의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다.

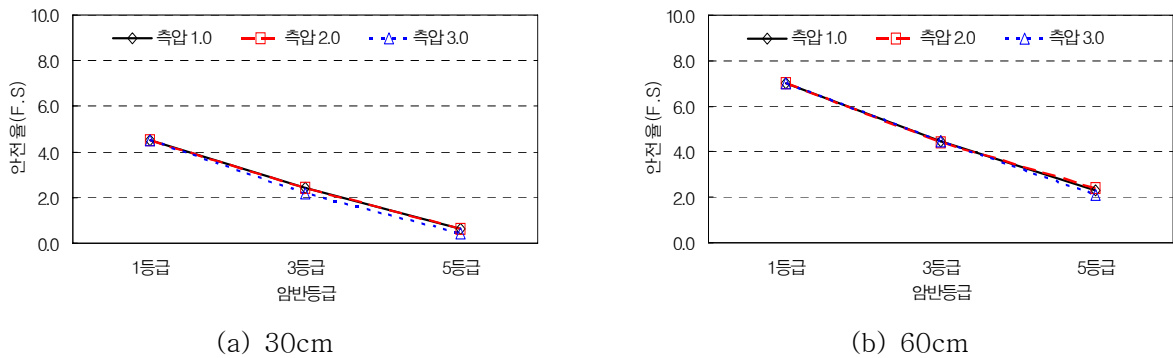
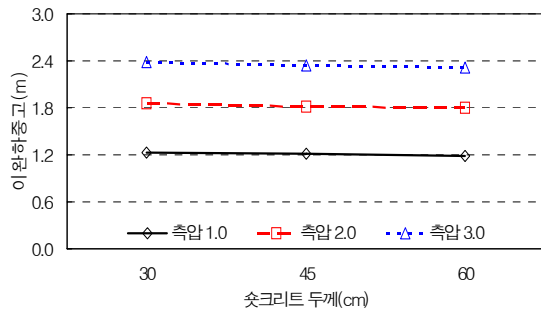
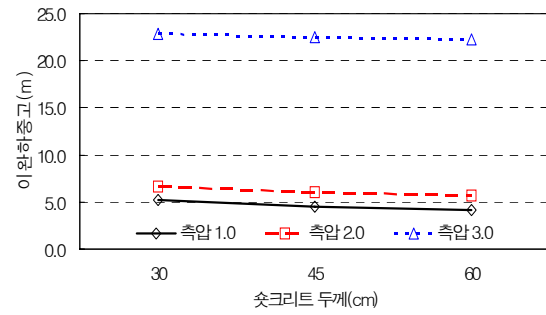


그림 7. 측압계수에 따른 안전율 vs 암반등급

이완하중고와 쏏크리트와의 관계를 알아보기 위해 그림 8과 같이 1, 3등급의 경우에서 측압에 따라 구분하여 도시하였다. 그림 8의 (a)는 1등급 암반으로서 쏏크리트 두께가 증가하여도 이완하중고의 차이는 거의 없으며, 측압계수가 증가할수록 이완하중고의 차이는 약 60cm 간격으로 증가하는 것으로 나타났다. 그림 8의 (b)는 3등급 암반으로서 1등급과 달리 암반상태가 불량해지면서 쏏크리트 두께에 따라 이완하중고의 차이가 약 1m 정도의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 또한, 측압이 증가하면서 이완하중고가 증가하는 것으로 나타났으며, 측압이 3.0인 경우에서 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 이는 암반상태가 불량해짐에 따른 결과로 분석된다.



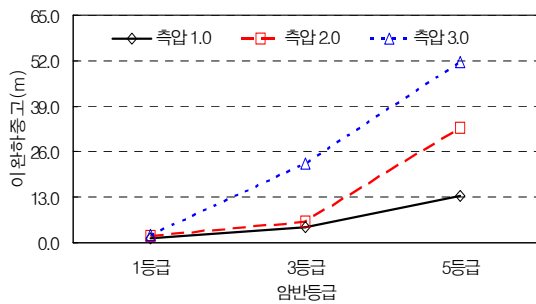
(a) 1등급



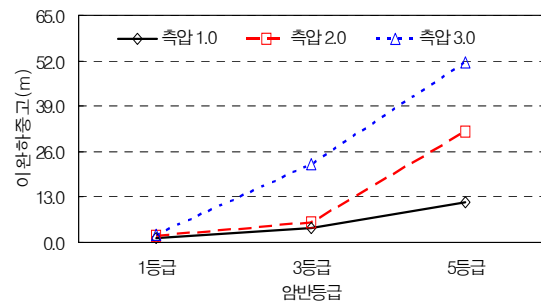
(b) 3등급

그림 8. 측압계수에 따른 이완하중고 vs 숏크리트 두께

이완하중고와 암반등급과의 관계를 그림 9와 같이 숏크리트 두께 45cm와 60cm의 경우를 나타낸 그래프로서 측압에 따라 구분하여 나타냈다. 그림 9의 (a)는 숏크리트 두께가 45cm 인 경우로서 암반상태가 불량할수록 이완하중고가 증가하며 측압이 클수록 이완하중고의 크기도 증가함을 알 수 있다. 측압이 1.0과 2.0일 때 3등급 암반까지는 측압에 의한 영향이 미미 하였으나 암반상태가 가장 불량한 5등급 암반에서 약 20m 정도의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이와 같은 경향은 지보재의 두께가 이완하중고에 미치는 영향이 거의 없으므로 그림 9의 (b)와 같이 숏크리트 두께가 60cm 인 경우에서도 같은 경향을 보이는 것으로 나타났다.



(a) 45cm



(b) 60cm

그림 9. 측압계수에 따른 이완하중고 vs 암반등급

5. 결론

해저터널 연계해석 시 과지압 조건이 이완하중고에 미치는 영향을 알아보기 위해 1, 3, 5등급의 암반을 대상으로 측압이 1.0, 2.0, 3.0으로 증가시켜 국부안전율을 이용하여 이완하중고를 산정한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

각각의 암반상태에서 숏크리트 두께가 증가할수록 안전율이 증가하였으며, 암반상태가 불량할수록 안전율의 차이는 있지만 측압이 안전율에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 또한, 숏크리트 두께가 증가할수록 이완하중고가 감소하지만 그 차이는 미미한 것으로 나타났으며 측압이 클수록 이완하중고는 증가하였다.

암반상태가 좋은 1등급 암반에서는 각각의 측압에 따라 이완하중고가 일정한 차이로 증가하였으나, 3등급 암반의 경우에서 측압이 3.0일 때 이완하중고의 차이가 큰 폭으로 커지는 것으로 나타났다. 이는 측압이 크고 암반상태가 불량하기 때문에 이완하중고의 크기가 증가한 것으로 판단된다. 따라서, 측압이 암반이나 지반의 이완하중고에 영향을 미치므로 해저터널의 정확한 설계를 위해 측압에 대한 고려가 필

요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2007년도 첨단도시개발사업(과제번호: 05-건설핵심 D10-01, 과제명: 해저시설물 차폐기술연구)에 의하여 연구비가 지원되었기에 관계자분들에게 감사드립니다.

참고문헌

1. 유광호, 박연준, 배규진(2000), “연약암반층에 굴착된 터널의 안전을 평가”, 터널기술논문집, 제 2권, 제 3호, pp.47~57.
2. 유광호(2005), “2-ARCH 터널의 라이닝 설계를 위한 터널굴착주변 응력이완 영역산정에 관한 연구”, 터널기술논문집, 제 7권, 제 4호, pp.343~352.
3. 유광호, 이동훈(2007), “연계해석 시 해저터널의 이완하중고 산정을 위한 수치 모델링 비교 연구”, 2007년 한국암반공학회 특별심포지엄 논문집, 제주 그랜드 호텔, pp.137~146.
4. 유충식, 김선빈(2006), "NATM 터널의 응력-간극수압 연계 유한요소모델링", 한국지반공학회 봄학술발표회 논문집, pp.189~198.
5. 천병식, 신영완(2001), “NATM 터널의 콘크리트 라이닝 설계하중에 관한 연구”, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, 제 11권, 제 2호, pp. 96~108.
6. 한국도로공사 도로교통기술원, 2002, 암반등급에 따른 도로터널 지보체계 개선연구, 268p.
7. Itasca Consulting Group, Inc. 1999, Fast Lagrangian Analysis of Continua, Ver. 3.4, Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota, USA.
8. Itasca Consulting Group, Inc., 2005, Fast Lagrangian Analysis of Continua, Ver. 5.0, Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota, USA.