

수로 압력터널의 콘크리트 Lining 해석

Analysis of the Concrete Lining for Water Pressure Tunnel

김승권* 임정열** 공천석*** 안주옥****
Kim, Seung-Kwon Lim, Jeong-Yeul Kong, Chun-Suk An, Zu-Og

ABSTRACT

Objective of this study is to investigate the structural behavior of the concrete lining in water pressure tunnel. In many cases, the concrete lining of water pressure tunnel has not considered as a major structure comparing to the other structures, resulting in use of conservative analysis and design. For the detailed analysis of concrete lining of water pressure tunnel, factors such as rock pressure and water pressure have to be considered.

In this study, analysis of concrete lining was performed by using beam element method, shell element method and solid element method.

Analysis results showed that the tensile stress at crown of concrete lining is greatly affected by the stability of concrete lining and the tensile stress for the concrete lining has to be evaluated for the section where maximum moment is occurred.

1. 서 론

터널 라이닝(lining)은 터널에 작용하는 하중을 지지하고 또는 지반의 변형을 구속하여 터널의 내공단면을 보호하는 역할을 가진다. 또한 라이닝은 터널에 있어서 주요한 구조물이고 라이닝의 합리적인 시공은 터널을 보다 경제적이며 신뢰성 있는 구조물을 만드는 데 있어 중요한 요소라 할 수 있다. 더욱이 용수공급 및 수로 발전용의 수로압력 터널에서 콘크리트 라이닝의 기능 및 중요성을 올바르게 인식하여 터널 주변의 지반상태, 수압 등 환경조건 및 주지보재의 지보능력을 고려하여 사용목적에 적합한 설계를 하여야 하며, 터널 라이닝에 대한 보다 정확한 구조적인 검토가 요구된다. 그러나 국내에서는 아직도 수로 압력터널 라이닝은 다른 콘크리트 구조물에 비하여 중요 구조물로 인식되지 않아 보수적인 해석 및 설계가 이루어지고 있는 실정이다.⁽¹⁾

따라서, 본 연구는 기존의 시공된 수로 압력터널을 연구대상 터널로 선정하여 터널 라이닝에 대한 연구를 수행하고자 하였으며, 터널 라이닝에 작용하는 하중과 하중의 적용하는 방법을 파악하고,

* 청석엔지니어링 구조부
** 한국수자원공사 수자원연구소 연구원
*** 경희대학교 토목공학과 박사과정
**** 경희대학교 토목공학과 교수

2 차원 또는 3 차원 해석을 통하여 터널에 작용하는 단면력, 처짐, 응력 등을 분석하며, 수로 압력 터널 라이닝의 보다 합리적인 해석을 통한 터널의 정확한 구조거동을 해석하고자 한다.

본 연구에서는 수로압력터널 라이닝을 해석하기 위해 다음과 같이 제한하였다.

- (1) 암반은 Terzaghi 암반 하중 분류법에서 분류군 4인 '보통정도 블록상, 균열상'을 적용하였다.
- (2) 외수압을 효과적으로 감소시키는 압밀그라우팅에 의한 그라우트압 및 내수압의 하중적용은 종점 부의 불리한 하중을 적용하였다.
- (3) 수로터널은 자중을 고려한 무근콘크리트 라이닝을 해석하며, 전단변형은 고려하지 않았다.

2. 수로 압력터널의 해석

2.1 지반반력계수 산정⁽²⁾

지반반력계수는 각종의 조사, 시험결과에 의해 얻어진 변형계수를 써서, 기초의 재하폭 등의 영향을 고려하여 정하는 것을 원칙으로 한다.

(1) 연직방향

연직방향의 지반반력계수는 다음 식에 의해 구해진다.

$$k_v = k_{vo} \left(\frac{B_v}{30} \right)^{-3/4}$$

여기서 k_v : 연직방향 지반반력계수 (kgf/cm^3)

k_{vo} : 지름 30 cm의 강채원판에 의한 평판재하시험의 값에 상당하는 연직 방향 지반반력 계수 (kgf/cm^3)로서 각종 토질시험, 조사에 의해 구한 변형계수로부터 추정하는 경우는 다음과 같다.

$$k_{vo} = \frac{1}{30} \alpha E_o$$

B_v : 기초의 환산 재하폭 (cm)으로 다음 식에서 구한다. 다만, 저면형상이 원형인 경

우에는 지름으로 한다.

$$B_v = \sqrt{A_v}$$

E_o : 추정된 설계의 대상이 되는 위치에서의 지반변형계수 (kgf/cm^2)

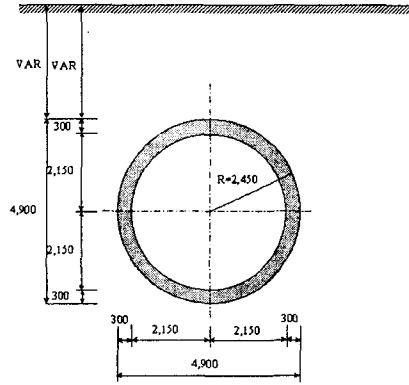
α : 지반반력계수의 추정계수

(2) 수평방향

수직방향의 지반반력계수와 같은 방법으로 구한다.

2.2 콘크리트 Lining 의 제원

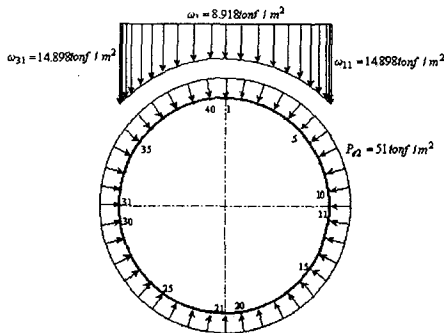
해석 대상터널의 단면제원은 [그림.1]과 같다



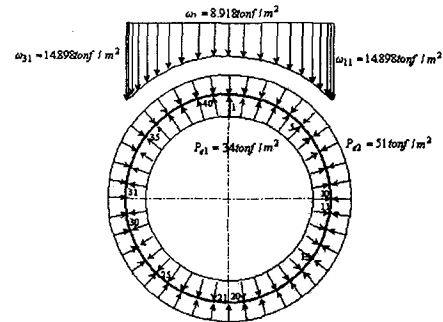
[그림.1] 대상터널 단면도

2.3 하중조합(Load combination)

본 연구에서 하중의 적용은 터널의 자중과 굴착 시 발생하는 암반의 이완하중이 기본적으로 작용하며 그라우트압과 내수압이 작용하였을 때 터널의 거동을 분석하기 위하여 다음과 같은 하중조합을 하였다. 하중적용은 종점부의 불리한 하중을 적용하였으며 그라우트압력(P_{e2})은 내수압의 150%를 적용하고, 암반하중과 라이닝의 자중을 고려하였다.



[그림.2] Load Case1 의 하중재하 상태



[그림.3] Load Case2 의 하중재하 상태

(1) Load Case 1 (자중+이완하중+그라우트압)

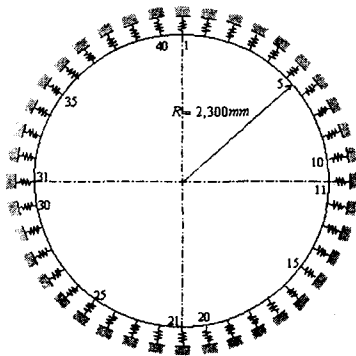
Load Case1 은 터널 시공 시 암반이 이완되면서 작용하게 되는 Terzaghi 의 암반 이완 하중과 그라우트압, 그리고 터널 라이닝의 자중의 조합으로 하중 재하 형태는 [그림 2]와 같다.

(2) Load Case 2 (자중+이완하중+그라우트압+내수압)

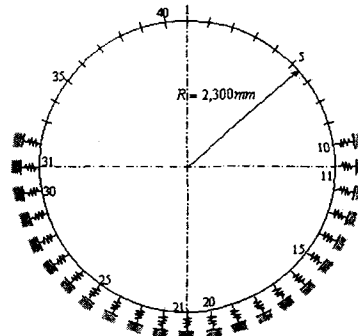
Load Case2 는 터널시공이 끝난 후 터널 내부로 압력에 의하여 물이 흐를 경우 내수압을 고려한 하중조건으로 터널의 자중과 암반의 이완하중, 그라우트압, 그리고 내수압을 고려한 것이다. Load Case2 의 하중 재하 형태는 [그림 3]과 같다.

2.4 Lining 의 Modeling

라이닝 단면의 수치해석 시 주변암반은 스프링요소로 modeling 되고 스프링은 압축력에만 저항하고 인장력에는 저항하지 않으므로 인장스프링을 확인하고자 [그림.4]와 같이 라이닝 주변에 전체스프링을 초기 modeling 한 후 하중을 작용시켜 해석을 하고, 이 해석결과를 참조하여 인장력을 받는 스프링을 판별하고 순차적으로 제거한 후 재해석을 통하여 최종적으로 인장력을 받는 스프링이 없을 때까지 수행하여 최종 해석에 필요한 해석터널의 Modeling 을 [그림.5]와 같이 결정한다.⁽³⁾



[그림.4]초기 2 차원 해석터널 modeling 예



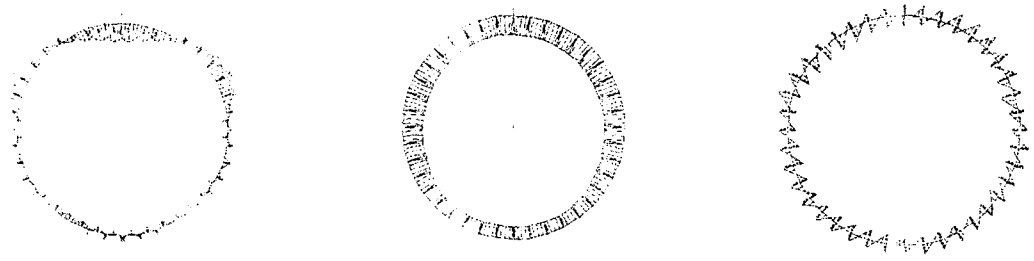
[그림.5]최종 2 차원 해석터널 modeling 예

정확한 구조거동 해석을 위해 2 차원 Beam Element Modeling 과 3 차원 Shell Element modeling, Solid Element Modeling 에 의한 해석을 수행하였다.

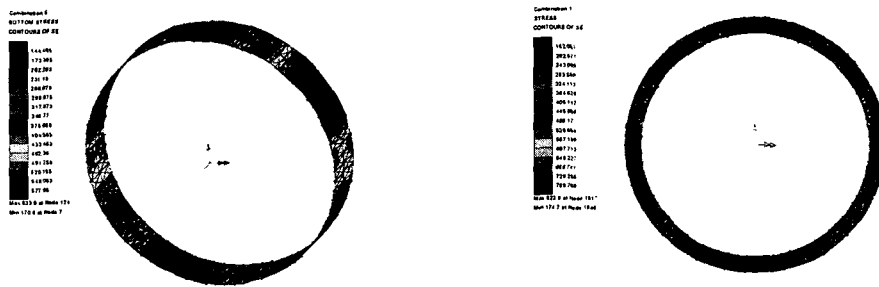
3. 결과고찰

3.1 단면력

수치해석 한 결과 Load Case1, 2 주변 암반을 스프링요소로 modeling 하고 암반은 압축력에만 저항하고 인장력에는 저항하지 않아 인장력을 받는 스프링을 제거하였기 때문에 터널 천단부에서 최대(+)의 모멘트가 발생하고 터널 천단부로부터 7 번째 Element 에서 최대(-)의 모멘트가 발생하였다. 그리고 천단부로부터 인장스프링을 제거한 9 번 Element 까지 압축력이 점점 증가하는 특성을 보인다.



[그림.6] 2 차원 Beam Element Modeling 에 의한 해석결과 B.M.D , A.F.D , S.F.D



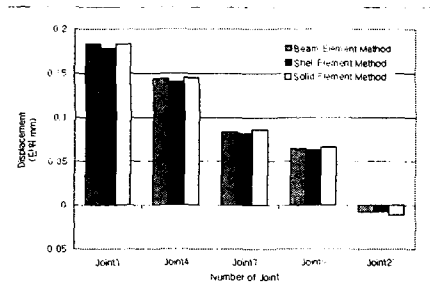
[그림.7] 3 차원 Shell, Solid Element Modeling 에 의한 해석결과

3.2 Load Case1 의 해석결과 비교

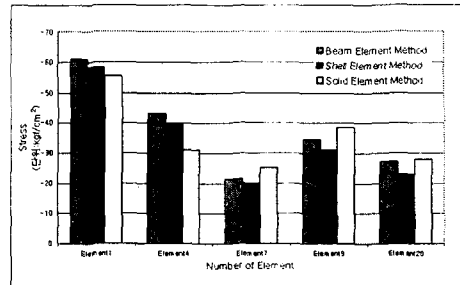
Load Case1 에 대하여 각각의 방법으로 해석한 처짐의 결과는 [그림.8]과 같다. 최대 처짐이 발생하는 천단부(Joint1)에서 Beam Element Method 에 의해 해석한 처짐은 Shell Element Method 에 의해 해석한 처짐보다 다소 크게 발생하였으며 Solid Element Method 에 의해 해석한 처짐과는 비슷하였다. 나머지 Joint 에에서도 비슷한 결과가 나왔다.

Load Case1 에 대하여 각각의 방법으로 해석한 응력의 결과는 [그림.9]와 같다. [그림.9]에서 응력값을 비교해 보면 천단부(Element1)의 응력이 다른 Element 보다 크게 나왔다. 이는 터널 천단부에서 최대 정 (+)모멘트에 의한 응력과 압축력에 의한 응력에 의해 큰 압축응력을 받기 때문이다. 따라서 압력 수로 터널의 라이닝에서 천단의 응력상태는 라이닝 전체의 구조적 안정에 절대적인 영향을 주는 것으로 판단된다.

각 방법을 비교하여 보면 터널 천단부에서 Beam Element Method 에 의해 해석한 응력은 Shell Element Method, Solid Element Method 에 의해 해석한 응력보다 다소 차이를 보였다. 이는 Beam Element Method 에 의해 해석이 다른 방법보다 다소 크게 해석됨을 알 수 있었다.



[그림.8] Load Case1의 처짐 비교



[그림.9] Load Case1의 응력 비교

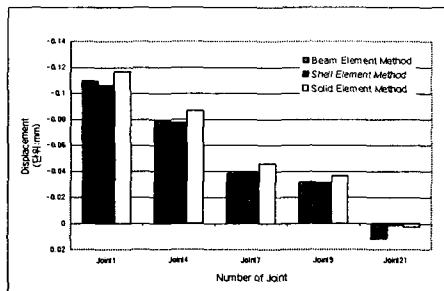
3.3 Load Case2의 해석결과 비교

Load Case2에 대하여 각각의 방법으로 해석한 처짐의 결과는 [그림.10]과 같다.

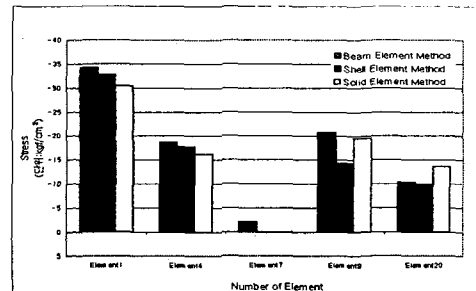
최대 처짐이 발생하는 천단부(Joint1)에서 Beam Element Method에 의해 해석한 처짐은 Shell Element Method에 의해 해석한 처짐보다 다소 크게 차이가 났으며 Solid Element Method에 의해 해석한 처짐과는 다소 작게 차이가 났다. Load Case2에 대하여 각각의 방법으로 해석한 응력의 결과는 [그림.11]과 같다.

최대 응력 작용지점을 비교해보면, Beam Element Method에 의해 해석한 응력은 압축응력을 나타낸 반면에 Shell Element Method, Solid Element Method에 의해 해석한 응력은 인장응력을 나타냈다.

이는 Shell Element Method, Solid Element Method에 의해 해석한 휨응력이 압축응력보다 크게 발생하기 때문이다. 따라서 터널 가동시 내부에서 작용하는 내수압에 의해 절대 최대 모멘트가 발생하는 단면에서 콘크리트에 인장응력이 발생할 수 있기 때문에 터널 가동시 절대 최대 모멘트가 발생하는 단면에서 인장응력에 대한 검토가 요구된다.



[그림.10] Load Case2의 처짐 비교



[그림.11] Load Case2의 응력 비교

4. 결론

본 연구에서 하중은 터널 라이닝 자중과 터널 시공시 발생하는 암반이완하중, 콘크리트 라이닝에 작용하는 외수압을 효과적으로 감소시키는 압밀그라우팅에 의한 그라우트압, 그리고 수압터널 가동시 터

널 내공에 작용하는 내수압이 작용한다고 가정하였고, 하중조합을 통하여 터널 라이닝의 구조적인 검토를 수행하였다. 수로터널 라이닝의 2 차원, 3 차원 해석을 통하여 응력을 비교 검토하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 본 수치해석 모델에 대한 해석결과에 의하면 수로터널 천단부에서 최대 정(+)의 모멘트가 발생하고, 터널 천단부로부터 54 ~ 63° 사이에서 최대 부(-)의 모멘트가 발생하며, 인장스프링을 제거한 천단부로부터 72 ~ 81° 지점 까지에서 압축력이 점점 증가하는 특성을 보인다.
2. 수로터널 시공시 작용하는 하중에 의한 응력값을 비교해 보면 천단부(Element1)의 응력이 다른 부위보다 크게 나왔다. 이는 터널 천단부에서 발생하는 최대 정(+)모멘트와 이완하중과 그라우트압에 의해 발생하는 압축응력에 의해 큰 응력을 받기 때문이다. 따라서 압력 수로터널의 라이닝에서 천단부의 응력상태는 라이닝 전체의 구조적 안정에 절대적인 영향을 주는 것으로 판단된다
3. 최대 부(-)모멘트가 발생하는 지점의 응력을 비교해보면, Beam Element Method 에 의해 해석한 응력은 압축응력을 나타낸 반면에 Shell Element Method, Solid Element Method 에 의해 해석한 응력은 인장응력을 나타냈다. 이는 Shell Element Method, Solid Element Method 에 의해 해석된 응력은 휨응력이 압축응력보다 크게 발생하기 때문이다. 따라서 터널 가동시 내부에서 작용하는 내수압에 의해 절대 최대 모멘트가 발생하는 단면에서 콘크리트에 인장응력이 발생할 수 있으며, 터널 가동시 절대 최대 모멘트가 발생하는 단면에서 인장응력에 대한 검토가 요구된다.

참 고 문 헌

1. 홍현표 “수로압력터널 콘크리트 라이닝의 균열발생 원인에 관한 연구” 연세대학교 산업대학원 석사학위논문 1999
2. 건설교통부, 도로교 표준시방서, 1996, pp.404, pp.610-613
3. 신경진 “외부수압을 받는 압력터널에서의 콘크리트 라이닝 설계” 대림기술 정보, 1998 상반기 pp.102-107
4. 지왕률, 임태정 “말레이시아 바쿰 가배수로 터널의 철근콘크리트 라이닝 설계” 한국암반공학회 터널과 지하공간, 1999 Vol.9 pp.20-26
5. 한국수자원공사 수로터널의 설계 및 시공지침(안), 1997 pp.4-5, 128-139, 165-166
6. 한국전산구조공학회 기술강습회, 지하구조물의 해석 및 설계, 1994 pp.120-128
7. 사단법인 한국지반공학회, 지반공학시리즈 7 터널, 1997 pp.140-156, 179-188
8. 건설교통부, 도로설계편람(I), 2000 pp.607-17~607-20
9. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준·해설 2000, pp392-393