



저작자표시-변경금지 2.0 대한민국

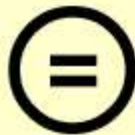
이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권으로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

설드터널 라이닝 세그먼트의
해석과 거동 특성



2007년 2월

부경대학교 대학원

토 목 공 학 과

김 관 수

공 학 석 사 학 위 논 문

셀드터널 라이닝 세그먼트의 해석과 거동 특성

지도교수 이 환 우

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2007년 2월

부경대학교 대학원

토 목 공 학 과

김 관 수

김관수의 공학석사 학위논문을 인준함.

2007년 2월 23일



주 심 공학박사 정 두 회 ㉠

위 원 공학박사 장 희 석 ㉠

위 원 공학박사 이 환 우 ㉠

목 차

1. 서 론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구범위	3
2. 쉘터널공법	4
2.1 쉘터널공법의 개요	4
2.2 쉘터널공법의 특징	5
2.2.1 장점	5
2.2.2 단점	5
3. 쉘터널 라이닝 세그먼트의 이론해	7
3.1 이음부의 강성과 강성비	7
3.2 하중계 모델	9
3.2.1 적용 하중계 모델	9
3.3 이론해	14
4. 구조해석 모델 분류	25
4.1 개요	25
4.2 하중 재하	27
4.3 구조해석 모델 분류	30
4.3.1 일정강성링 모델	30
4.3.2 다 힌지계링 모델	33
4.3.3 빔스프링 모델(1R)	36

4.3.4 빔스프링 모델(2R)	39
4.3.5 전주면스프링 모델(1R-S0)	45
4.3.6 전주면빔이음스프링 모델(1R-S0)	48
4.4 해석 모델 선정	52
5. 변수 해석	54
5.1 대상 터널	54
5.1.1 대상 터널의 제원 및 설계조건	54
5.2 변수 해석 방법	59
5.3 이음부 강성과 지반강성의 변화에 따른 영향	60
5.4 이음부 분할 분포의 변화에 따른 영향	62
5.5 이음부 분할 개수의 변화에 따른 영향	65
6. 결 론	68
참고문헌	70
감사의 글	72

Analysis and Structural Behavior of Shield Tunnel Lining Segment

Gwan-Soo Kim

*Department of Civil Engineering, Graduate School,
Pukyong National University*

Abstract

The shield tunneling method in downtown construction is increasingly used to minimize environmental damages and civil complaint at the residential overcrowding area. The lining segment which is the main structure of the shield tunnel consists of joints, not continua. Past international and domestic design data have been commonly used for design practices without specific verification about the structural analysis model, design load, and affection of the soil constant of the lining segment. In this study, the propriety is estimated through the comparison between analytical solution and numerical solution for segment analysis and design models of the shield tunnel which is being used internationally and domestically. As a result, the full-circumferential beam jointed spring model (1R-S0) is suggested by considering aspects of convenient use, application to field condition, and accuracy of analysis result. With suggested model, the parameter analysis was conducted for joint stiffness, ground rigidity, joint distribution, and joint number. From the result, this study shows that bending moments of jointed lining segments converge into at the certain rate of the value of bending moment which is generated at non-jointed continuous lining segments where ground rigidity is beyond certain value. Also, the bending moment in crown and invert than in springline and the vertical displacement than horizontal displacement in regard to joint distribution are the more largely affected by the smaller joint stiffness.

keyword : shield tunneling method, lining segment, structural analysis model, joint stiffness, ground rigidity, joint distribution and joint number

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

산업화에 따른 도시인구의 집중현상은 많은 도시문제를 야기시키고 있으며 그 중 대표적인 것이 교통문제이며 산업활동의 막대한 장애가 되고 있다. 최근의 극심한 도로 혼잡은 노면 교통 및 수송효율을 지속적으로 저하시키며 환경공해를 유발시키는 악순환의 반복으로 이어지고 있는 실정이다. 이러한 상황에서 대도시의 교통, 수송 수단의 특성으로 대량성, 안정성, 신속성을 고려할 때 수송 수단의 지하화, 즉 지하도로 및 지하철도의 요구가 불가피하게 되었으며 전 세계적으로 공통적인 경향이 되고 있다.

우리나라에서는 최근 들어 도심의 지하공간 활용과 원활한 교통소통을 위해 설비시설, 도로 및 지하철 건설에 따른 터널의 수요가 증가되고 있다(정경환 등, 2004). 도심은 일반적으로 하천을 중심으로 발달하거나 하천과 해안 주변에 형성된다. 지층구성은 암반층이 아닌 연약지반을 포함하고 있는 경우가 대부분이다. 따라서 도심지에서의 터널공법으로서는 연약지반에서부터 암반층까지 다양한 지반조건에 적용이 가능하고 환경훼손 및 주거과밀지역의 민원을 최소화할 수 있는 쉘드터널공법이 최적의 대안이라 할 수 있다(Koyama, 2003).

쉘드터널공법은 비교적 연약한 지반에 터널굴착을 할 때, 터널의 외경보다 조금 큰 단면의 쉘드라는 강재의 통을 지중에 추진시켜 내부에 있는 토사의 붕괴나 유동을 방지하면서, 안전하게 굴착·라이닝작업을 행하여 터널을 시공하는 공법이다. 국내에서는 부산 광복동 전력구 공사를 시초로 최근 부산지하철 230공구, 광주도시철도 1호선 TK-1공구, 서울지하철 9호선 909공구, 인천국제공항철도 등에 쉘드터널공법이 적용되었고, 소구경의

전력구 공사에서부터 대형·대단면 지하공간 건설에까지 그 적용범위가 점차 확대되고 있다.

쉴드터널공법에서 터널의 라이닝인 세그먼트는 공사비의 30%를 차지할 뿐만 아니라 터널에 작용하는 하중을 지지하는 주 구조체로서, 연속체가 아닌 이음부를 가지는 구조로 되어져 있다. 현재 국내에서 쉴드터널 라이닝 세그먼트의 해석 및 설계시는 2000년 국제터널협회(International Tunneling Association)에서 발표한 지침서(ITA, 2000)에서 제시된 구조해석 모델들을 주로 이용하고 있다. 이 지침서에서는 이론해부터 수치해석적인 방법까지 각종의 구조해석 모델들을 제시하고 있다. 그러나 각 모델의 현장별 적용성이나 장단점 등에 관해서는 언급하지 않고 있다.

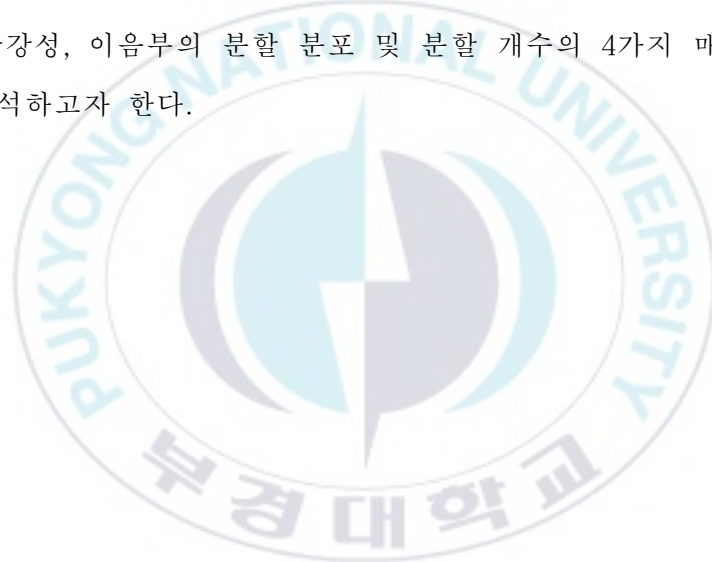
국내의 설계경향은 구조해석 모델이나 설계하중 및 지반정수의 영향 등에 별다른 검증평가 없이 과거의 국내·외 설계 자료에 관행적으로 의존하여 과다설계하고 있는 실정이다.

본 논문에서는 국내·외에서 현재 사용하고 있는 쉴드터널의 세그먼트 해석 및 설계모델들을 분석하여 현장 조건별 적용성을 평가하고자 한다. 그리고 라이닝 세그먼트의 거동에 직접적인 영향을 주는 라이닝 세그먼트의 이음부와 지반강성에 대한 매개변수 해석을 수행하여 실무 기술자들이 보다 간편하게 이용할 수 있는 기술자료를 제시하고자 한다.

1.2 연구범위

본 연구에서는 TBM공법에 의한 쉴드터널의 세그먼트 라이닝용 해석 기법에 관한 연구의 일환으로서 우선적으로, 국내·외에서 현재 사용하고 있는 쉴드터널의 세그먼트 해석 및 설계모델들에 대한 적정성을 평가·분석하고, 현장 조건별 적용성을 평가하여 이를 바탕으로 쉴드터널 라이닝 세그먼트의 해석시 간편하게 이용할 수 있는 구조해석 모델을 제안하고자 한다.

또한, 쉴드터널 라이닝 세그먼트의 설계에 중요한 설계변수인 이음부 강성, 지반강성, 이음부의 분할 분포 및 분할 개수의 4가지 매개변수들의 영향을 분석하고자 한다.



2. 쉴드터널공법

2.1 쉴드터널공법의 개요

쉴드터널공법은 단단한 강제의 쉴드기로 터널 주변 원지반의 붕락을 방지하고, 그 속에서 굴착과 복공작업(세그먼트 조립)을 하면서 쉴드기를 추진시켜 터널을 구축하는 공법으로 아래와 같은 순서를 반복해가며 터널을 조성해가는 것이다.

- 1) 잭으로 쉴드를 앞으로 추진하면서 쉴드막장부에서 세그먼트 1링 분의 굴착을 행한다.
- 2) 1링 분의 굴착이 완료되면, 쉴드 후방부에서 세그먼트 조립기계인 이렉터를 사용하여 세그먼트를 조립한다.
- 3) 쉴드의 전진으로 쉴드기 후방에서 발생한 세그먼트 외경과 쉴드굴착경 사이의 여굴 및 테일보이드에 뒷채움을 시행하여 충전한다.

일반적으로 쉴드터널공법이 적용되는 곳은 도시지역의 터널이고 그 예는 다음과 같다.

- 1) 도시가 밀집된 데 충적층 또는 홍적층의 지반위에 위치한 곳
- 2) 많은 시설이나 건물과 근접 시공되어 영향을 미칠 가능성이 있는 곳
- 3) 완성 후에 다른 근접 공사에 의한 영향을 받을 가능성이 큰 곳

2.2 쉘드터널공법의 특징

쉘드터널공법은 공사 중에 교통뿐만 아니라 인접구조물 등에 미치는 영향이 극히 적다. 즉, 말뚝타입에 의한 경음이나 진동의 발생이 없으며 기설 구조물을 피하여 터널을 구축하므로 기존 지중 매설물의 이설이 거의 필요 없으며, 깊은 심도까지 시공할 수 있는 특징이 있다. 하지만, 쉘드터널공법은 일반적으로 인력굴착일 경우는 약 500m 이상, 기계식인 경우에는 약 1,000m 이상일 때 적용하여야 타 공법에 비하여 경제성이 있다.

2.2.1 장점

- 1) 작업기지(발진작업구, 도달작업구 등)를 제외하고는 지상작업이 거의 없으므로, 노선을 따라 발생하는 교통장애나 소음 및 진동의 문제를 최소화할 수 있다.
- 2) 지장물의 이설 및 보호공을 최소화할 수 있다.
- 3) 비교적 단순하고 동일한 작업의 반복으로 자동화를 할 수 있고, 공정관리가 쉽다.
- 4) 토피의 두께에 따라 공사비의 변동이 적어 깊은 심도의 터널 축조에 유리하다.
- 5) 적당한 보호공의 시공으로 건축물이나 하천 등의 하부를 통과하는 터널 시공도 가능하다.
- 6) 쉘드 장비의 개발로 토사층에서 경암층에 이르는 폭넓은 범위의 지반까지 적용이 가능하다.

2.2.2 단점

- 1) 토피가 적은 경우, 막장의 안정을 피하기 어려워 시공이 곤란하다.

다만 보조공법을 사용하여 문제점을 해결할 수 있다.

- 2) 쉴드 장비의 굴진을 위해서 수직작업구(발진구, 도달구)가 필요하고, 지상 플랜트 설치를 위한 별도의 작업장이 필요하다.
- 3) 작업기지 주변에서 소음, 진동 등의 환경대책이 필요하다.
- 4) 극단적인 급곡선 시공은 어려움이 있고, 선형 변경에도 한계가 있다.
- 5) 지반에 따라서 터널 시공에 따른 융기, 침하 등의 지반변형에 대한 검토가 필요하다.
- 6) 압기, 약액주입공법 등의 보조공법 사용시 환경문제를 고려해야 한다.



3. 쉴드터널 라이닝 세그먼트의 이론해

3.1 이음부의 강성과 강성비

본 연구에서는 쉴드터널 라이닝 세그먼트용 구조해석 모델들의 적용성을 분석하기 위하여 세그먼트간 이음부와 지반반력을 고려할 수 있고 현장 계측과 모형실험을 통하여 그 결과가 검증된 이론해(Lee, 2001a)를 이용한다.



사진 3.1 쉴드터널 라이닝의 단면도(Kansai, 1997)

쉴드터널의 라이닝은 일반적으로 콘크리트 세그먼트를 조합·체결하여 시공하므로 사진 3.1과 같이 세그먼트와 링간 이음부를 가진다. 조립된 세그먼트의 이음부에서는 휨모멘트, 축력 및 전단력이 발생하고, 응력-변형률은 선형탄성 범위에 있다고 본 연구에서는 가정한다. 따라서, 이음부를 탄성연결요소로 이상화하여 이음부 강성(K_θ)을 정의한다. 또한, 식 (3.1)과 같이 세그먼트와 세그먼트간 연결이음부의 상대적인 강성비를 이음부 강

성비(λ)로 정의한다.

$$\lambda = \frac{K_{\theta} l}{EI} \quad (3.1)$$

여기서, λ : 라이닝 세그먼트와 이음부의 상대적인 강성비

K_{θ} : 이음부에 단위회전각을 발생시키는데 필요한 단위길이당 휨
모멘트

l : 세그먼트라이닝의 단위길이를 사용

EI : 라이닝 세그먼트의 휨강성

즉, 이음부 강성비는 무차원 계수로서, 라이닝의 이음부 강성을 세그먼트의 주 단면 강성과 비교한 값이다. 따라서 본 연구에서는 이음부 강성비를 이용하여 라이닝 세그먼트의 거동 특성을 분석하였다.

이음부의 휨강성 K_{θ} 을 결정하는 방법은 크게 다음의 2가지 방법을 따른다.

- 1) 두 개의 단일 세그먼트를 조립한 후 2절점 휨하중을 재하하는 방법
- 2) 완전히 체결된 라이닝 세그먼트에 터널 심도에 해당하는 하중을 재하하는 방법

3.2 하중계 모델

3.2.1 적용 하중계 모델

연약지반에 시공되는 대부분의 콘크리트 라이닝 세그먼트는 이음부에 방수용 러버가스켓을 사용하기 때문에 라이닝 구조물은 토압과 수압을 동시에 받게 된다. 그러므로 라이닝 세그먼트에는 그림 3.1과 같이 전토압이 작용한다고 가정한다. 이 하중계 모델은 라이닝 세그먼트에 연직토압, 연직반력, 상·하부 수평토압, 라이닝 세그먼트의 자중 및 수평지반반력을 받고 있는 양상이다.

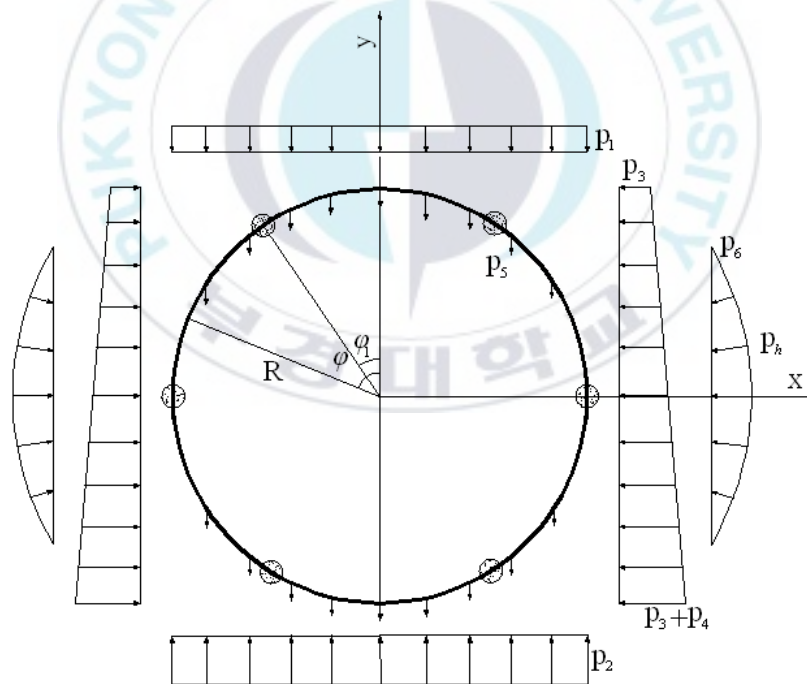


그림 3.1 라이닝 세그먼트의 하중모델 단면도(Lee, 2001a)

그림 3.1에서 터널 천단부에 작용하는 연직토압 p_1 은 식 (3.2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$p_1 = q_1 + q_2 \quad (3.2)$$

터널의 천단 상부의 전토압 q_1 은 식 (3.3)과 같다.

$$q_1 = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \quad (3.3)$$

여기서, γ_i : i 층 지반의 단위중량

h_i : i 층의 두께

n : 터널천정 상부의 토층의 개수

터널어깨부의 전토압 q_2 는 식 (3.4)와 같다.

$$q_2 = \frac{2 \left(1 - \frac{\pi}{4} R^2 \gamma_{as} \right)}{2R} = 0.215 R \gamma_{as} \quad (3.4)$$

여기서, R : 라이닝 세그먼트의 도심 반경

γ_{as} : 터널 어깨부의 평균단위중량

연직토압 p_1 과 라이닝 세그먼트의 자중으로 인한 연직반력 p_2 는 식 (3.5)와 같다.

$$p_2 = p_1 + \frac{2\pi R t \gamma_c}{2R} = p_1 + \pi t \gamma_c \quad (3.5)$$

여기서, t : 라이닝 세그먼트의 두께

γ_c : 라이닝 세그먼트의 평균 단위중량

터널 천정부의 수평토압 p_3 은 식 (3.6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_3 = K_o \gamma' h + \gamma_w h \quad (3.6)$$

여기서, K_o : 측방토압계수

γ' : 평균 유효단위중량

γ_w : 물의 단위중량

h : 터널 천정으로부터 지표면까지의 두께

터널 바닥부의 수평토압 p_4 는 식 (3.7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_4 = 2K_o \gamma' R + 2\gamma_w R \quad (3.7)$$

여기서, K_o : 측방토압계수

γ' : 평균 유효단위중량

R : 라이닝 세그먼트의 도심 반경

γ_w : 물의 단위중량

터널 라이닝의 자중 p_5 은 식 (3.8)과 같다.

$$p_5 = \gamma_c t \quad (3.8)$$

여기서, γ_c : 라이닝 세그먼트의 평균 단위중량

t : 라이닝 세그먼트의 두께

수평지반반력 p_6 은 식 (3.9)와 같이 나타낸다.

$$p_6 = p_h (1 - 2\cos^2 \varphi) \quad \left(\frac{\pi}{4} \leq \varphi \leq \frac{3\pi}{4} \right) \quad (3.9)$$

여기서, p_h : 터널 측벽부에서 발생한 지반반력

φ : 터널 천정으로부터 시계방향으로 읽은 각도

수평지반반력 p_6 은 터널의 변형이 상당히 커서 지반과 라이닝의 상호 작용이 발생할 때에만 고려한다. 압축성이 큰 극히 연약한 점토층에서는 수평지반반력을 고려하지 않으며, 장기적인 강도증진을 고려하여 설계할 때에는 이를 고려하여야 한다. 본 연구에서는 수평지반반력이 터널 천정으로부터 시계방향으로 켜 각도 $45^\circ \sim 135^\circ$ 영역에서 포물선분포로 작용하는 것으로 가정한다(Lee, 2001a).

$$p_h = K_s \Delta_h \quad (3.10)$$

여기서, K_s : 지반반력계수

Δ_h : 터널 측벽부에서 발생한 수평변위

또한, 하저터널과 해저터널의 경우처럼 지하수위가 지표면 위에 존재하면, p_1 , p_2 및 p_3 토압의 계산시 추가적으로 수압($\gamma_w \times$ 수심)을 고려해야 한다. 그리고 도시터널에 지반반력을 적용할 경우, Liu와 Hou(1999)는 표 3.1과 같이 제안하였다.

표 3.1 터널 반경이 3~11m인 도시터널에서의 지반반력(Liu and Hou, 1999)

	점토질 또는 실트질 흙				사질토			
	Mucky	Soft	Medium	Stiff	Very Loose	Loose	Medium	Dense
K_s ($\times 10^4 \text{ kN/m}^3$)	0.3~1.5	1.5~3.0	3.0~15.0	>15.0	0.3~1.5	1.5~3.0	3.0~10.0	>10.0



3.3 이론해

이론해는 그림 3.2와 같이 구조물에 작용하는 토압을 좌우대칭으로 가정한 반단면으로부터 유도한다. 천정부와 바닥부의 경계조건에서 전단력은 0이기 때문에 터널은 2차 부정정 구조물이 되며 응력범이 주 지배방정식으로 사용된다. 터널 반단면에 n 개의 이음부가 존재한다면, n_1 은 $0^\circ \leq \varphi < 45^\circ$ 범위에서, n_2 는 $45^\circ \leq \varphi < 90^\circ$ 범위에서, n_3 은 $90^\circ \leq \varphi < 135^\circ$ 범위에서, n_4 는 $135^\circ \leq \varphi < 180^\circ$ 범위에서의 이음부의 개수로 정의하며, $n = n_1 + n_2 + n_3 + n_4$ 이다. 이론해의 부호체계는 터널내공이 인장이면 모멘트는 (+)로, 라이닝 단면이 압축이면 축력은 (+)로, 라이닝 단면이 시계방향으로 회전하면 전단력은 (+)로 가정한다. 터널 천정과 바닥부의 경계조건으로부터 회전과 수평방향 변위를 각각 0으로 고려함으로써 응력범에 의해 식 (3.11)을 구할 수 있다.

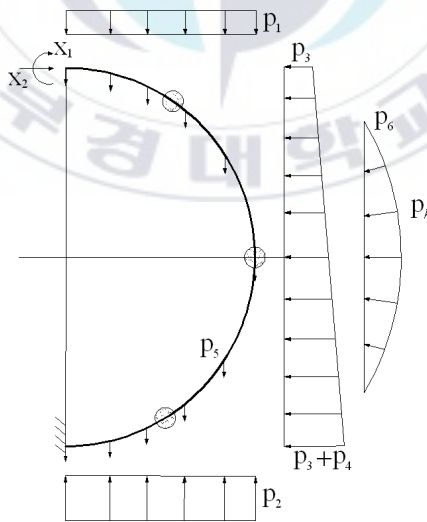


그림 3.2 터널의 반단면을 고려한 모델

$$\begin{aligned}\delta_{11}x_1 + \delta_{12}x_2 + \Delta_{1p} &= 0 \\ \delta_{21}x_1 + \delta_{22}x_2 + \Delta_{2p} &= 0\end{aligned}\tag{3.11}$$

그림 3.2에서 x_1 과 x_2 는 각각 여용력(redundant forces)으로서, 터널 천정부에 단위길이 당 작용하는 모멘트와 축력이다.

여기서, δ_{ii} : 여용력 x_i 의 위치에서 발생한 변위이고, 단위하중 $x_i=1$ 을 작

용시킬 때 x_i 와 같은 방향으로 작용하는 변위

δ_{ij} : 여용력 x_i 의 위치에서 발생한 변위이고, 단위하중 $x_j=1$ 을 작

용시킬 때 x_i 방향으로 작용하는 변위

Δ_{ip} : 여용력 x_i 의 위치에서 발생한 변위이고, 토압에 의해 발생하

며 x_i 의 방향으로 작용하는 변위 (여기서, $i=1\sim 2$, $j=1\sim 2$)

x_1 과 x_2 는 식 (3.12)와 식 (3.13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_1 = \frac{\delta_{12}\Delta_{2p} - \delta_{22}\Delta_{1p}}{\delta_{11}\delta_{22} - \delta_{12}\delta_{21}}\tag{3.12}$$

$$x_2 = \frac{\delta_{21}\Delta_{1p} - \delta_{11}\Delta_{2p}}{\delta_{11}\delta_{22} - \delta_{12}\delta_{21}}\tag{3.13}$$

단위하중 $x_1=1$ 과 $x_2=1$ 로 발생한 단위길이 당 내부 휨모멘트 $\overline{M}$, 축력 $\overline{N}$ 및 전단력 $\overline{Q}$ 은 식 (3.14)와 식 (3.15)와 같이 유도된다.

$$\begin{aligned}
\overline{M_1} &= 1 \\
\overline{N_1} &= 0 \\
\overline{Q_1} &= 0 \\
\overline{M_2} &= R(1 - \cos \varphi) \\
\overline{N_2} &= \cos \varphi \\
\overline{Q_2} &= -\sin \varphi
\end{aligned} \tag{3.14}$$

변위를 발생시키는데 있어서, 축력과 전단력의 영향은 상대적으로 미소하므로, 휨모멘트의 영향만을 고려하여 가상일의 원리를 적용하면, δ_{11} , δ_{12} (δ_{21}), 및 δ_{22} 는 식 (3.16), 식 (3.17) 및 식 (3.18)과 같이 유도된다.

$$\delta_{11} = \int \frac{\overline{M_1}^2}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \overline{M_1}^{(i)} \overline{M_1}^{(i)} = \frac{R\pi}{EI} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \tag{3.16}$$

$$\delta_{12} = \int \frac{\overline{M_1} \overline{M_2}}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \overline{M_1}^{(i)} \overline{M_2}^{(i)} = \frac{R^2 \pi}{EI} + R \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} (1 - \cos \varphi_i) \tag{3.17}$$

$$\delta_{22} = \int \frac{\overline{M_2}^2}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \overline{M_2}^{(i)} \overline{M_2}^{(i)} = \frac{3R^3 \pi}{2EI} + R^2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} (1 - \cos \varphi_i)^2 \tag{3.18}$$

여기서, i : i 번째 이음부

s : 라이닝 세그먼트의 곡면길이

n : 라이닝 반단면의 전체 이음부개수

φ_i : i 번째 이음부의 터널 천정부로부터 시계방향으로 켄 각도

토압에 의해 발생하는 내력은 그림 3.2에서 알 수 있듯이 6개의 작용토

압을 중첩함으로서 식 (3.19), 식 (3.20) 및 식 (3.21)과 같이 유도할 수 있다. (여기서, $j=1,2,...,6$)

$$M_p = \sum_{j=1}^6 M_{pj} \quad (3.19)$$

$$N_p = \sum_{j=1}^6 N_{pj} \quad (3.20)$$

$$Q_p = \sum_{j=1}^6 Q_{pj} \quad (3.21)$$

여기서, M_{pj} , N_{pj} 및 Q_{pj} 는 각각 j 번째의 하중이 작용할 때 발생하는 단위 길이 당 휨모멘트, 축력 및 전단력이다. 연직토압 p_1 이 작용할 때, 휨모멘트, 축력 및 전단력은 식 (3.22)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} M_{p1} &= -\frac{1}{2}p_1 R^2 \sin^2 \varphi \\ N_{p1} &= p_1 R \sin^2 \varphi \quad (0 \leq \varphi \leq \pi) \\ Q_{p1} &= p_1 R \sin \varphi \cos \varphi \end{aligned} \quad (3.22)$$

연직반력 p_2 가 작용할 때, 휨모멘트, 축력 및 전단력은 식 (3.23)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} M_{p2} &= -\frac{1}{2}(p_2 - p_1)R^2(1 - \sin \varphi)^2 \\ N_{p2} &= -(p_2 - p_1)R(1 - \sin \varphi)\sin \varphi \quad \left(\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \pi\right) \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$Q_{p2} = -(p_2 - p_1)R(1 - \sin\varphi)\cos\varphi$$

천정부의 수평토압 p_3 이 작용할 때, 휨모멘트, 축력 및 전단력은 식 (3.24)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} M_{p3} &= -\frac{1}{2}p_3R^2(1 - \cos\varphi)^2 \\ N_{p3} &= -p_3R(1 - \cos\varphi)\cos\varphi \quad (0 \leq \varphi \leq \pi) \\ Q_{p3} &= p_3R(1 - \cos\varphi)\sin\varphi \end{aligned} \quad (3.24)$$

바닥부의 수평토압 p_4 가 작용할 때, 휨모멘트, 축력 및 전단력은 식 (3.25)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} M_{p4} &= -\frac{1}{12}p_4R^2(1 - \cos\varphi)^2 \\ N_{p4} &= -\frac{1}{4}p_4R(1 - \cos\varphi)^2\cos\varphi \quad (0 \leq \varphi \leq \pi) \\ N_{p4} &= \frac{1}{4}p_4R(1 - \cos\varphi)^2\sin\varphi \end{aligned} \quad (3.25)$$

라이닝 세그먼트의 자중 p_5 가 작용할 때, 휨모멘트, 축력 및 전단력은 식 (3.26)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} M_{p5} &= -p_5R^2(\cos\varphi + \varphi\sin\varphi - 1) \\ N_{p5} &= p_5R\varphi\sin\varphi \quad (0 \leq \varphi \leq \pi) \\ Q_{p5} &= p_5R\varphi\cos\varphi \end{aligned} \quad (3.26)$$

수평지반반력 p_6 가 작용할 때, 휨모멘트, 축력 및 전단력은 식 (3.27)과 식 (3.28)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} M_{p6} &= -\frac{p_h R^2}{3} \left[\cos 2\varphi - 2\cos\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right) \right] \\ N_{p6} &= -\frac{p_h R}{3} \left[\cos 2\varphi - 2\cos\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right) \right] \quad \left(\frac{\pi}{4} \leq \varphi \leq \frac{3\pi}{4} \right) \\ Q_{p6} &= -\frac{2p_h R}{3} \left[\sin 2\varphi - 2\sin\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right) \right] \end{aligned} \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned} M_{p6} &= \frac{2\sqrt{2}p_h R^2}{3} \cos \varphi \\ N_{p6} &= -\frac{2\sqrt{2}p_h R}{3} \cos \varphi \quad \left(\frac{3\pi}{4} \leq \varphi \leq \pi \right) \\ Q_{p6} &= \frac{2\sqrt{2}p_h R}{3} \sin \varphi \end{aligned} \quad (3.28)$$

Δ_{1p} 와 Δ_{2p} 는 가상일의 원리를 적용하여 구한 식 (3.29)와 식 (3.30)에 식 (3.14), 식 (3.15) 및 식 (3.22)~(3.28)을 대입하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta_{1p} &= \int \frac{\overline{M}_1 M_p}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \overline{M}_1^{(i)} \overline{M}_p^{(i)} \\ &= \sum_{j=1}^6 \left(\int \frac{\overline{M}_1 M_{pj}}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \overline{M}_1^{(i)} \overline{M}_{pj}^{(i)} \right) = \sum_{j=1}^6 \Delta_{1pj} \end{aligned} \quad (3.29)$$

$$\begin{aligned} \Delta_{2p} &= \int \frac{\overline{M}_2 M_p}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \overline{M}_2^{(i)} \overline{M}_p^{(i)} \\ &= \sum_{j=1}^6 \left(\int \frac{\overline{M}_2 M_{pj}}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \overline{M}_2^{(i)} \overline{M}_{pj}^{(i)} \right) = \sum_{j=1}^6 \Delta_{2pj} \end{aligned} \quad (3.30)$$

여기서, 6개의 하중경우($j=1,2,\dots,6$)에 관한 Δ_{1pj} 와 Δ_{2pj} 는 식 (3.31) ~ 식 (3.42)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta_{1p1} = -\frac{\pi p_1 R^3}{4EI} - \frac{1}{2} p_1 R^2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \sin^2 \varphi_i \quad (3.31)$$

$$\Delta_{1p2} = -\frac{(p_2 - p_1) R^3}{2EI} \left(\frac{3\pi}{4} - 2 \right) - \frac{(p_2 - p_1) R^2}{2} \sum_{i=n_1+n_2+1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} (1 - \sin \varphi_i)^2 \quad (3.32)$$

$$\Delta_{1p3} = -\frac{3\pi p_3 R^3}{4EI} - \frac{p_3 R^2}{2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} (1 - \cos \varphi_i)^2 \quad (3.33)$$

$$\Delta_{1p4} = -\frac{5\pi p_4 R^3}{24EI} - \frac{p_4 R^2}{12} \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} (1 - \cos \varphi_i)^3 \quad (3.34)$$

$$\Delta_{1p5} = -p_5 R^2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} (\cos \varphi_i + \varphi_i \sin \varphi_i - 1) \quad (3.35)$$

$$\begin{aligned} \Delta_{1p6} = & -\frac{p_h R^3}{EI} - \frac{p_h R^2}{3} \sum_{i=n_1+1}^{n-n_4} \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \left[\cos 2\varphi_i - 2\cos \left(\varphi_i + \frac{\pi}{4} \right) \right] \\ & + \frac{2\sqrt{2} p_h R^2}{3} \sum_{i=n-n_4+1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \cos \varphi_i \end{aligned} \quad (3.36)$$

그리고,

$$\Delta_{2p1} = -\frac{\pi p_1 R^4}{4EI} - \frac{p_1 R^3}{2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} (1 - \cos \varphi_i) \sin^2 \varphi_i \quad (3.37)$$

$$\begin{aligned} \Delta_{2p2} = & -\frac{(p_2 - p_1) R^4}{2EI} \left(\frac{3\pi}{4} - \frac{5}{3} \right) - \frac{(p_2 - p_1) R^3}{2} \\ & \sum_{i=n_1+n_2+1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} (1 - \cos \varphi_i) (1 - \sin \varphi_i)^2 \end{aligned} \quad (3.38)$$

$$\Delta_{2p3} = -\frac{5\pi p_3 R^4}{4EI} - \frac{p_3 R^3}{2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} (1 - \cos \varphi_i)^3 \quad (3.39)$$

$$\Delta_{2p4} = -\frac{35\pi p_4 R^4}{96EI} - \frac{p_4 R^3}{12} \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} (1 - \cos \varphi_i)^4 \quad (3.40)$$

$$\Delta_{2p5} = \frac{\pi p_5 R^4}{4EI} - p_5 R^3 \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} (1 - \cos \varphi_i) (\cos \varphi_i + \varphi_i \sin \varphi_i - 1) \quad (3.41)$$

$$\begin{aligned} \Delta_{2p6} = & -\frac{p_h R^4}{3EI} \left(3 + \frac{\pi \sqrt{2}}{2} \right) - \frac{p_h R^3}{3} \sum_{i=n_1+1}^{n-n_4} \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \left[\cos 2\varphi_i - 2\cos \left(\varphi_i + \frac{\pi}{4} \right) \right] \\ & (1 - \cos \varphi_i) + \frac{2\sqrt{2} p_h R^3}{3} \sum_{i=n-n_4+1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \cos \varphi_i (1 - \cos \varphi_i) \end{aligned} \quad (3.42)$$

위 식에서 구한 δ_{11} , δ_{12} , δ_{22} , Δ_{1p} 및 Δ_{2p} 를 식 (3.12)와 식 (3.13)에 대입하여, 여용력 x_1 과 x_2 를 구할 수 있으며, 최종적으로 라이닝 세그먼트에 작용하는 휨모멘트, 축력 및 전단력을 식 (3.43), 식 (3.44) 및 식 (3.45)로부터 구할 수 있다.

$$M = \overline{M}_1 x_1 + \overline{M}_2 x_2 + M_p \quad (3.43)$$

$$N = \overline{N}_1 x_1 + \overline{N}_2 x_2 + N_p \quad (3.44)$$

$$Q = \overline{Q}_1 x_1 + \overline{Q}_2 x_2 + Q_p \quad (3.45)$$

천정부의 수직변위 Δ_v 와 측벽부의 수평변위 Δ_h 는 가상일의 원리(그림 3.3)를 이용해 구할 수 있다. 라이닝 세그먼트 천정부에 가상의 단위하중 $T_1=1$ 을 작용시킬 때의 휨모멘트 $\overline{M}_{T1}$ 는 식 (3.46), 라이닝 측벽부에 가상의 단위하중 $T_2=1$ 을 작용시킬 때의 휨모멘트 $\overline{M}_{T2}$ 는 식 (3.47)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{M_{T1}} = -R \sin \varphi \quad (0 \leq \varphi \leq \pi) \quad (3.46)$$

$$\overline{M_{T2}} = -R \cos \varphi \quad \left(\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \pi \right) \quad (3.47)$$

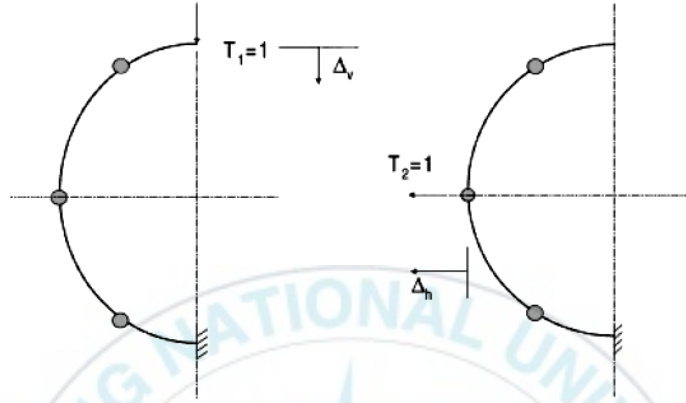


그림 3.3 라이닝 세그먼트에 적용된 가상하중 T_1 과 T_2 의 개념도

따라서, 라이닝의 천정부에 발생한 수직변위 Δ_v 는 식 (3.48)과 같다.

$$\Delta_v = \int \frac{\overline{M_{T1}} M}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \overline{M_{T1}} M^{(i)} = \Delta_{v1} + \Delta_{v2} + \Delta_{v3} \quad (3.48)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \Delta_{v1} &= \int \frac{\overline{M_{T1}} \overline{M_1} x_1}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \overline{M_{T1}}^{(i)} \overline{M_1}^{(i)} x_1 \\ &= -\frac{2R^2 x_1}{EI} - R x_1 \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \sin \varphi_i \\ \Delta_{v2} &= \int \frac{\overline{M_{T1}} \overline{M_2} x_2}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \overline{M_{T1}}^{(i)} \overline{M_2}^{(i)} x_2 \\ &= -\frac{2R^3 x_2}{EI} - R^2 x_2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \sin \varphi_i (1 - \cos \varphi_i) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta_{v3} &= \int \frac{\overline{M_{T1}M_p}}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \overline{M_{T1}^{(i)} M_p^{(i)}} \\ &= \sum_{j=1}^6 \left(\int \frac{\overline{M_{T1}M_{pj}}}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \overline{M_{T1}^{(i)} M_{pj}^{(i)}} \right)\end{aligned}$$

$\Delta_{v3} = \sum_{j=1}^6 \Delta_{v3j}$ 라고 가정 하면,

$$\begin{aligned}\Delta_{v31} &= \frac{2p_1 R^4}{3EI} + \frac{p_1 R^3}{2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \sin^3 \varphi_i \\ \Delta_{v32} &= \frac{(p_2 - p_1) R^4}{2EI} \left(\frac{5}{3} - \frac{\pi}{2} \right) + \frac{(p_2 - p_1) R^3}{2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \sin \varphi_i (1 - \sin \varphi_i)^2 \\ \Delta_{v33} &= \frac{4p_3 R^4}{3EI} + \frac{p_3 R^3}{2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} (1 - \cos \varphi_i)^2 \sin \varphi_i \\ \Delta_{v34} &= \frac{p_4 R^4}{3EI} + \frac{p_4 R^3}{12} \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} (1 - \cos \varphi_i)^3 \sin \varphi_i \\ \Delta_{v35} &= \frac{p_5 R^4}{EI} \left(\frac{\pi^2}{4} - 2 \right) + p_5 R^3 \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} (\cos \varphi_i + \varphi_i \sin \varphi_i - 1) \sin \varphi_i \\ \Delta_{v36} &= \frac{\sqrt{2} p_h R^4}{3EI} \left(\frac{1}{3} - \frac{\pi}{4} \right) + \frac{p_h R^3}{3} \sum_{i=n_1+1}^{n-n_1} \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \left[\cos 2\varphi_i - 2\cos \left(\varphi_i + \frac{\pi}{4} \right) \right] \sin \varphi_i \\ &\quad - \frac{2\sqrt{2} p_h R^3}{3} \sum_{i=n-n_1+1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \cos \varphi_i \sin \varphi_i\end{aligned}$$

이와 유사하게 라이닝 세그먼트의 측벽부에 발생한 수평변위 Δ_h 는 식 (3.49)와 같다.

$$\Delta_h = \int \frac{\overline{M_{T2}M}}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \overline{M_{T2} M^{(i)}} = \Delta_{h1} + \Delta_{h2} + \Delta_{h3} \quad (3.49)$$

여기서,

$$\begin{aligned}
\Delta_{h1} &= \int \frac{\overline{M}_{T2} \overline{M}_1 x_1}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \overline{M}_{T2}^{(i)} \overline{M}_1^{(i)} x_1 \\
&= \frac{R^2 x_1}{EI} - R x_1 \sum_{i=n_1+n_2+1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \cos \varphi_i \\
\Delta_{h2} &= \int \frac{\overline{M}_{T2} \overline{M}_2 x_2}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \overline{M}_{T2}^{(i)} \overline{M}_2^{(i)} x_2 \\
&= \frac{R^3 x_2}{EI} \left(1 + \frac{\pi}{4}\right) - R^2 x_2 \sum_{i=n_1+n_2+1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} (1 - \cos \varphi_i) \cos \varphi_i \\
\Delta_{h3} &= \int \frac{\overline{M}_{T2} M_p}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \overline{M}_{T2}^{(i)} M_p^{(i)} \\
&= \sum_{j=1}^6 \left(\int \frac{\overline{M}_{T2} M_{pj}}{EI} ds + \sum_{i=n_1+n_2+1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \overline{M}_{T2}^{(i)} M_{pj}^{(i)} \right)
\end{aligned}$$

$\Delta_{h3} = \sum_{j=1}^6 \Delta_{h3j}$ 라고 가정하면,

$$\begin{aligned}
\Delta_{h31} &= -\frac{p_1 R^4}{6EI} + \frac{p_1 R^3}{2} \sum_{i=n_1+n_2+1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \sin^2 \varphi_i \cos \varphi_i \\
\Delta_{h32} &= \frac{(p_2 - p_1) R^4}{6EI} + \frac{(p_2 - p_1) R^3}{2} \sum_{i=n_1+n_2+1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \cos \varphi_i (1 - \sin \varphi_i)^2 \\
\Delta_{h33} &= -\frac{p_3 R^4}{2EI} \left(\frac{5}{3} + \frac{\pi}{2} \right) + \frac{p_3 R^3}{2} \sum_{i=n_1+n_2+1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} (1 - \cos \varphi_i)^2 \cos \varphi_i \\
\Delta_{h34} &= \frac{p_4 R^4}{4EI} \left(1 + \frac{5\pi}{16} \right) + \frac{p_4 R^3}{12} \sum_{i=n_1+n_2+1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} (1 - \cos \varphi_i)^3 \cos \varphi_i \\
\Delta_{h35} &= \frac{p_5 R^4}{EI} \left(\frac{\pi}{8} - 1 \right) + p_5 R^3 \sum_{i=n_1+n_2+1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} (\cos \varphi_i + \varphi_i \sin \varphi_i - 1) \cos \varphi_i \\
\Delta_{h36} &= -\frac{p_h R^4}{3EI} \left(\frac{\sqrt{2}}{6} + \frac{3\sqrt{2}\pi}{8} - \frac{1}{3} \right) + \frac{p_h R^3}{3} \sum_{i=n_1+n_2+1}^{n-n_4} \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \left[\cos 2\varphi_i - 2\cos \left(\varphi_i + \frac{\pi}{4} \right) \right] \cos \varphi_i \\
&\quad - \frac{2\sqrt{2} p_h R^3}{3} \sum_{i=n-n_4+1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \cos^2 \varphi_i
\end{aligned}$$

4. 구조해석 모델 분류

4.1 개요

쉴드터널의 구조해석 모델은 실제 세그먼트 라이닝의 역학적 거동특성을 유사하게 표현하기 위해서 “‘세그먼트·링간 이음부’와 ‘세그먼트-지반의 상호작용을 고려한 지반반력’을 어떻게 모델화할 것인가?”라는 두 가지 측면으로 변천하였다.

초창기 구조모델에서는 실제 세그먼트·링간 이음이 존재하더라도 이음이 라이닝의 역학적 거동에 그리 큰 영향을 주지 않는다고 가정하여 이음을 무시한 채 단면력을 계산하였다. 그 후 이음부를 고려하지 않은 구조모델은 쉴드터널의 실제 역학적 거동과 상이하다는 것을 알았으며 이음부를 힌지 또는 회전스프링 등의 연결요소로 고려하여 실제와 유사하게 모델화하려는 경향이 나타났다. 또한, 쉴드터널의 굴착은 지반 속에서 이루어지기 때문에 라이닝 세그먼트와 지반의 상호작용을 고려해야 하며, 지반반력이 라이닝 세그먼트의 변형에 비례하는지의 여부에 따라 관용모델(변형에 독립)과 전주면 스프링모델(변형에 비례)로 변천하였다.

현재 라이닝 세그먼트의 설계에서 실용목적으로 사용되고 있는 구조해석 모델은 일정강성링 모델, 다한지계링 모델, 빔스프링 모델(1R, 2R), 전주면스프링 모델(1R-S0, 1R-SS) 등이 있다. 여기서, 1R은 터널 진행방향으로 1개의 링만을 고려함을 의미하고, 2R은 서로 엇갈려 조립·체결되는 라이닝 세그먼트를 2개의 링으로 모델링하여 해석하는 것을 의미한다. S0는 지반반력을 고려하기 위해 압축스프링을 법선방향으로만 연결한 것이고, SS는 법선방향과 접선방향으로 동시에 연결시킨 것을 의미한다.

이번 장에서는 이들 6개 모델들에 대하여 수치해와 이론해의 비교를

실시한 후 설계 실무에서의 적정성을 평가하였으며, 실제 이음을 갖는 쉘드터널의 역학적 거동을 가장 잘 표현하는 모델을 선정하는데 목적을 두었다. 수치해는 MIDAS/CIVIL((주)마이다스아이티, 2005)의 빔과 스프링요소를 이용하여 수행하여 얻고, 표 4.1의 해석조건에 대하여 이론해(Lee, 2001a)와 비교한다.

현재 국내에서 건설되는 쉘드터널의 이음부 강성비는 보통 0.126~1.37(삼보, 2003; 서울지하철, 2003; 에스코, 2003)의 분포를 가지고 있다. 해석 예들에서는 이음부 강성비를 이음부 강성이 아주 작은 경우에 해당되는 0.01과 일반적으로 국내에 적용되고 있는 범위를 감안하여 0.1과 1.0을 적용한다.



4.2 하중 재하

표 4.1은 각 구조해석 모델들에 적용할 해석조건과 식 (3.2) ~ 식 (3.8)로 부터 구한 토압을 나타낸 것이다.

표 4.1 적정성 평가를 위한 해석조건

적용 물성치	경우 1
터널반경, R_{out} (m)	2.5
세그먼트 두께, t (m)	0.3
도심선 반경, R_{cal} (m)	2.35
세그먼트 탄성계수, E (kN/m ²)	3.5e+7
단면 2차모멘트, I (m ⁴)	2.25e-3
터널심도 (m)	8.7
지하수위면 (m)	1.0
흙의 종류	Mucky clay
점착력, C_u (kPa)	$C_u = 30$
흙의 단위중량 (kN/m ³)	$\gamma = 17.2$
지반반력계수, K_s (kN/m ³)	5000
이음부 개수	6
이음부 위치	$\phi = 30^\circ, 90^\circ, 150^\circ$
적용 토압 (kN/m ²)	$p_1 = 165.8$
	$p_2 = 187.9$
	$p_3 = 116.1$
	$p_4 = 60.2$
	$p_5 = 7.5$

쉴드터널에 작용하는 지반반력은 이음부의 강성비에 따라 변한다. 표 4.2는 이론해와 반복계산법으로부터 구한 이음부 강성비별 라이닝 세그먼트에서 작용하는 지반반력을 터널의 천정으로부터 켄 각도에 따라 나타내었다.

표 4.2 표 4.1의 경우 1에서 이음부 강성비에 따른 지반반력 p_6 계산값

각도(°)	$p_h(\text{KN/m}^2)$	$\lambda = 0.01$	$\lambda = 0.1$	$\lambda = 1.0$
		38.123	19.039	6.784
45	p_6	0.000	0.000	0.000
50		-6.620	-3.306	-1.178
55		-13.039	-6.512	-2.321
60		-19.062	-9.520	-3.392
65		-24.505	-12.239	-4.361
70		-29.204	-14.585	-5.197
75		-33.016	-16.489	-5.876
80		-35.824	-17.892	-6.376
85		-37.544	-18.751	-6.682
90		-38.123	-19.040	-6.785
95		-37.544	-18.751	-6.682
100		-35.824	-17.892	-6.376
105		-33.016	-16.489	-5.876
110		-29.204	-14.585	-5.197
115		-24.505	-12.239	-4.361
120		-19.062	-9.520	-3.392
125		-13.039	-6.512	-2.321
130		-6.620	-3.306	-1.178
135		0.000	0.000	0.000

그림 4.1은 각 구조해석 모델들에 적용할 하중 재하 모식도를 나타내고 있다.

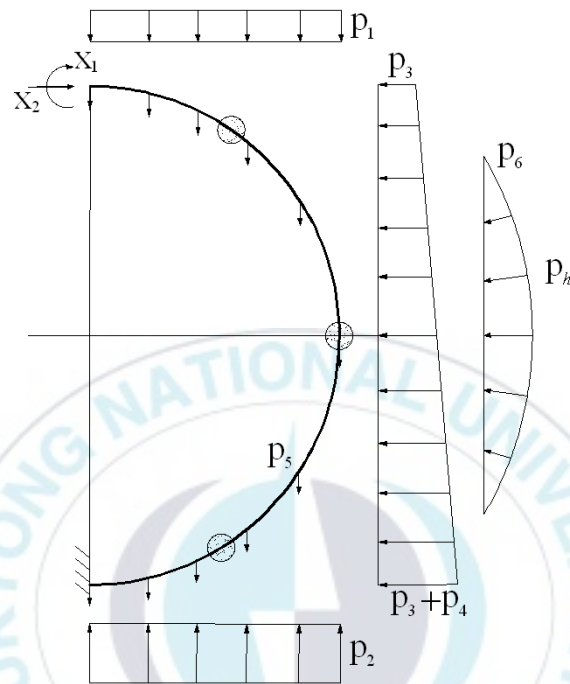


그림 4.1 하중 재하 모식도

4.3 구조해석 모델 분류

4.3.1 일정강성링 모델

일정강성링 모델은 세그먼트 이음에 의한 휨강성의 저하를 무시하고 이음부를 세그먼트 본체의 휨강성과 동일한 일체의 링으로 평가하는 모델이며, 계산이 간편하므로 일본 등에서 가장 실적이 많은 계산법이다. 일정강성링 모델의 구조모델 형상은 **그림 4.2**와 같다.



그림 4.2 일정강성링 모델의 구조도

그림 4.3 ~ 그림 4.5는 일정강성링 모델을 적용한 경우의 라이닝에 발생한 휨모멘트, 축력 및 변위를 보여주고 있다. **그림 4.3**의 휨모멘트도와 **그림 4.4**의 축력도는 터널 천정부로부터 반단면을 돌아 바닥부까지만의 결과를 보여주고 있다. **그림 4.5**의 변위는 터널 천정부에서의 최대 수직변위 Δ_v 와 측벽부에서의 최대 수평변위 Δ_h 를 나타내고 있다. **그림 4.3**과 **그림 4.4**에서 보는 바와 같이 휨모멘트와 축력은 이음부 강성비의 크기에 관계없이 라이닝의 전체에서 수치해와 이론해가 1% 미만의 아주 근소한 차이

를 나타내고 있다. 그러나, 일정강성링 모델에서는 세그먼트간 이음부의 강성을 고려할 수 없고 지반반력을 직접적으로 계산할 수 없다.

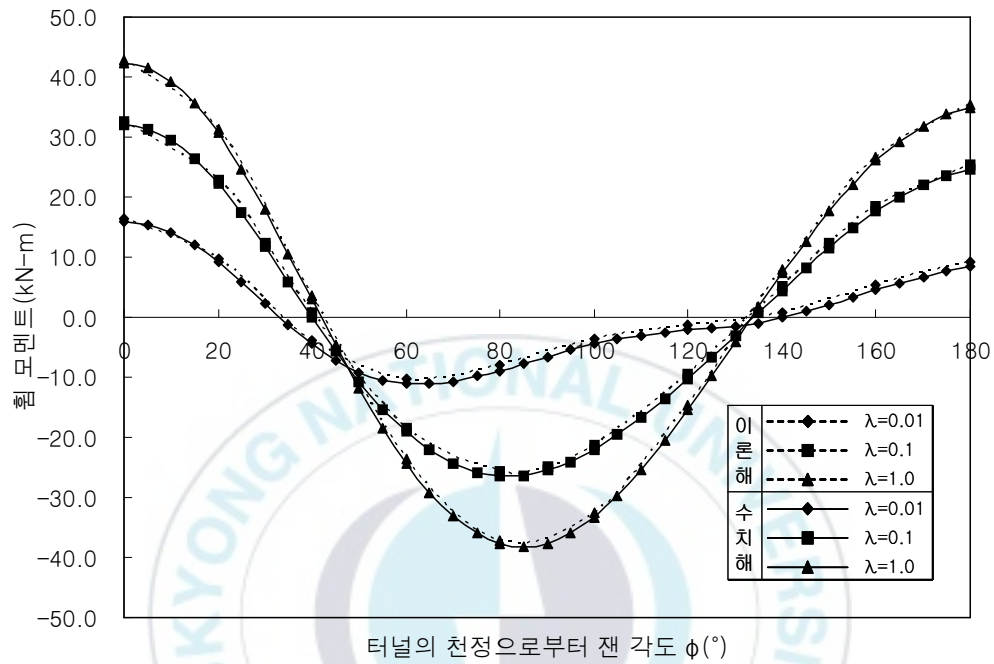


그림 4.3 일정강성링 모델의 휨모멘트

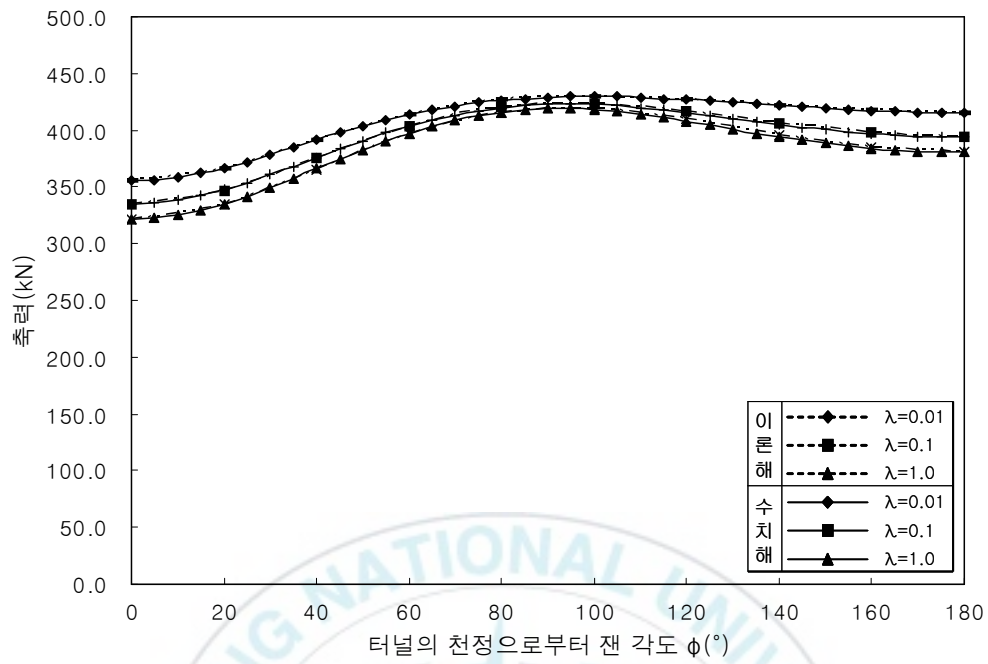


그림 4.4 일정강성링 모델의 축력

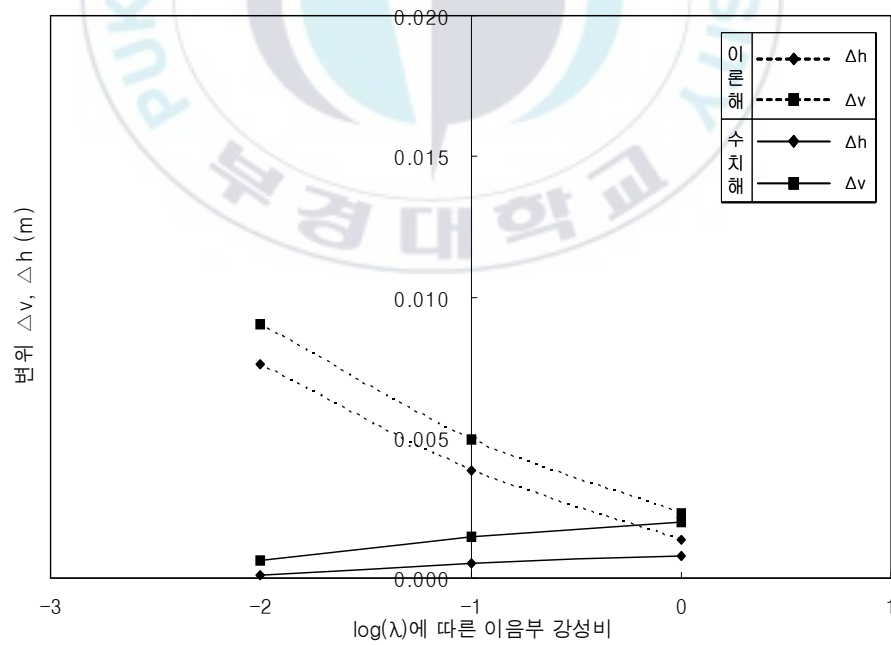


그림 4.5 일정강성링 모델의 수평·수직변위

그림 4.3에서 보인 부재력의 근소한 차이는 이론해를 얻는데 사용된 식 (3.9)로부터 이음부 강성비에 따른 지반반력을 계산하여 일정강성링 모델에 적용하였기 때문이다. 따라서 일정강성링 모델의 경우에 정확한 부재력의 산정을 위해서는 하중으로 작용시키는 지반반력을 정확히 산정해야 하고, 이를 위한 추가적인 하중계산 과정이 필요하다.

한편, 그림 4.5의 변위는 $\lambda=0.01$ 의 경우 수치해가 이론해보다 최대 1/8배로 작게 나타났다. 이것은 이음부의 강성이 작은 라이닝 세그먼트의 경우에 이음부의 강성이 과대평가될 수 밖에 없는 일정강성링 모델의 한계 때문이다. 그러나 그림 4.5의 $\lambda=0.1$ 과 $\lambda=1.0$ 의 경우에서 알 수 있듯이 이음부의 강성이 클수록 변위의 정확도가 향상된다.

4.3.2 다 힌지계링 모델

다 힌지계링 모델은 일정강성링 모델의 단점을 보완하고 실제 쉘터널 라이닝의 거동을 유사하게 표현하기 위해 세그먼트간 이음부를 힌지로 고려한 모델이다. 이 모델은 이음부는 고려할 수 있지만 이음부의 휨강성은 고려할 수 없다. 다 힌지계링 모델의 구조 형상은 그림 4.6과 같다.

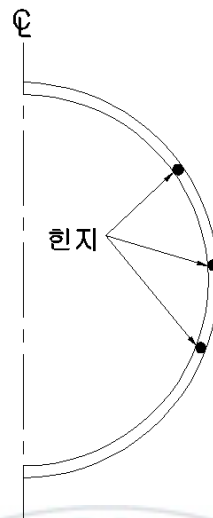


그림 4.6 다 힌지계링 모델의 구조도

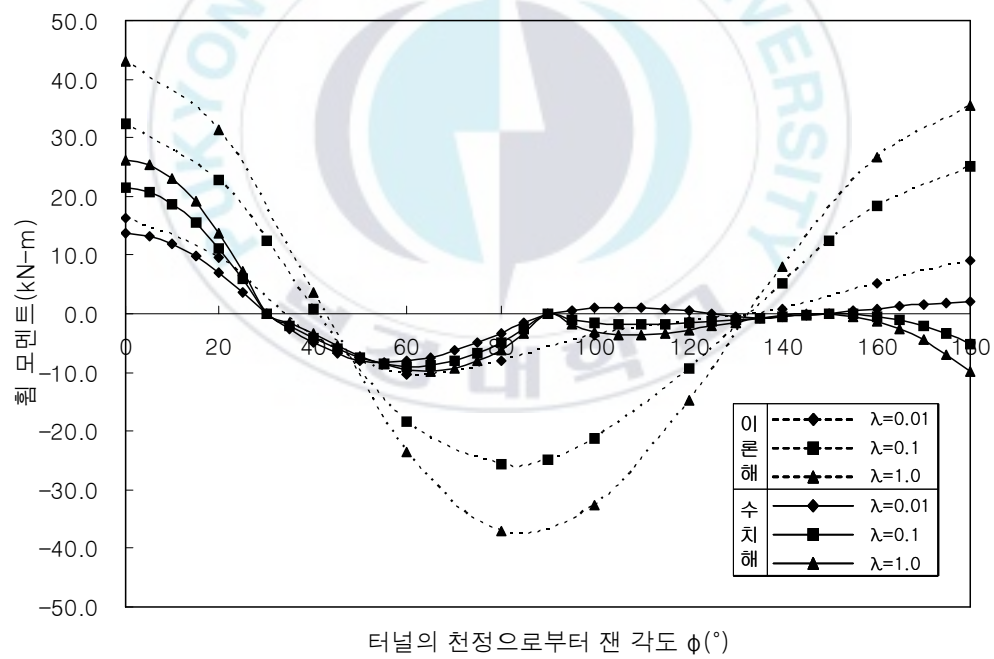


그림 4.7 다힌지계링 모델의 휨모멘트

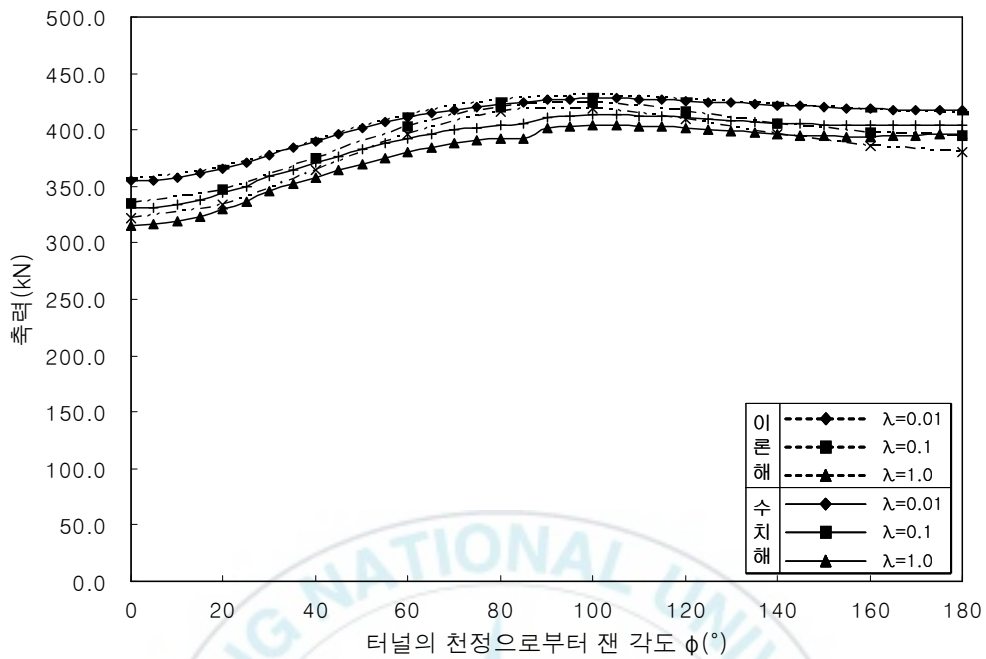


그림 4.8 다힌지계링 모델의 축력

표 4.3 다힌계링 모델의 수평 · 수직 변위

이음부강성비 (λ)	이론해		수치해	
	Δ_h (m)	Δ_v (m)	Δ_h (m)	Δ_v (m)
0.01	0.00762	0.00903	6336.2	7316.4
0.1	0.00380	0.00494	26785.5	30929.2
1.0	0.00135	0.00232	39917.4	46092.7

그림 4.7과 그림 4.8은 다 힌지계링 모델을 적용한 경우의 라이닝 세그먼트에 발생한 휨모멘트와 축력을 나타냈고 표 4.3은 변위를 보여주고 있다. 다힌지계링 모델은 이음부가 고려되기는 하나 이음부의 강성 크기를 직접적으로 고려할 수 없다. 즉, 이음부를 힌지로 처리하기 때문에 그림 4.7에서 보는 바와 같이 이음부 위치인 $30^\circ, 90^\circ, 150^\circ$ 에서는 실제 쉘드터

널 라이닝 세그먼트의 거동과 다르게 휨모멘트가 0으로 얻어진다. 변위 역시 표 4.3에서 보는 바와 같이 실제적이지 못한 크기의 값으로 나타난다. 따라서 이 모델은 라이닝 세그먼트의 변위가 발생하지 않을 정도로 지반 구속력이 아주 큰 지반조건의 경우에 한하여 적용이 가능할 것으로 본다.

4.3.3 빔스프링 모델(1R)

빔스프링 모델(1R)은 1개의 라이닝만을 고려한 것으로, 세그먼트간 이음부를 회전스프링으로 모델화해서 단면력을 계산하는 모델이다. 빔스프링 모델(1R)은 이음부의 강성을 임의로 변화시키면서 단면력을 계산할 수 있는 장점이 있으므로 실제 쉘터널 라이닝의 역학적 거동을 비교적 유사하게 표현할 수 있다. 빔스프링 모델(1R)의 구조 형상은 그림 4.9와 같다.

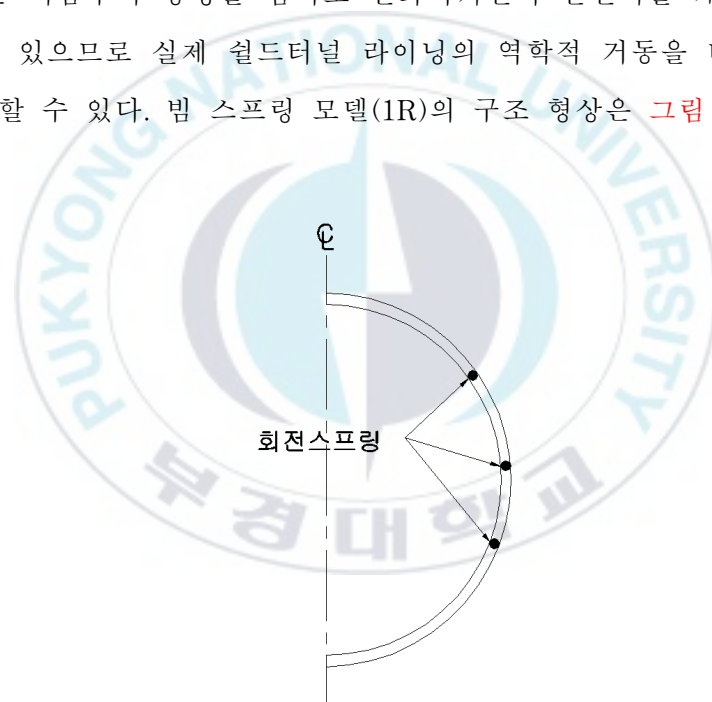


그림 4.9 빔스프링 모델(1R)의 구조도

라이닝 세그먼트에 발생하는 부재력은 이음부의 휨강성 크기에 의해 결정된다. 이것을 구조해석 모델에서는 회전스프링으로 다룬다. 회전스프링의 휨강성 크기는 실링재(부착 위치, 경도, 실 홈과 실링재의 단면 형상)

나 세그먼트의 이음 각도의 영향을 받기 때문에 이것을 충분히 고려해서 결정할 필요가 있다.

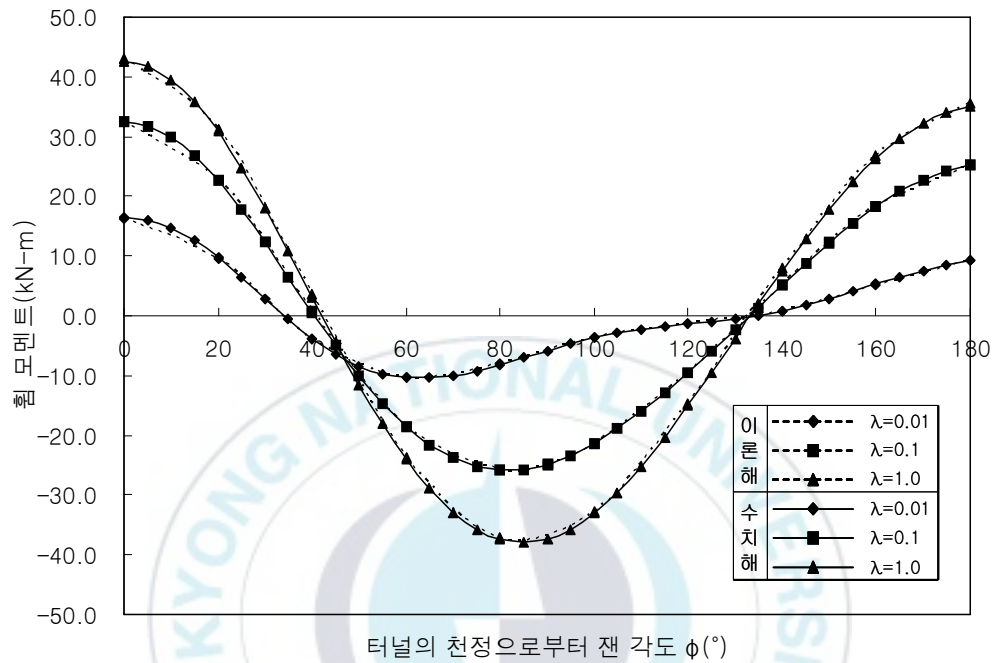


그림 4.10 빔스프링 모델(1R)의 휨모멘트

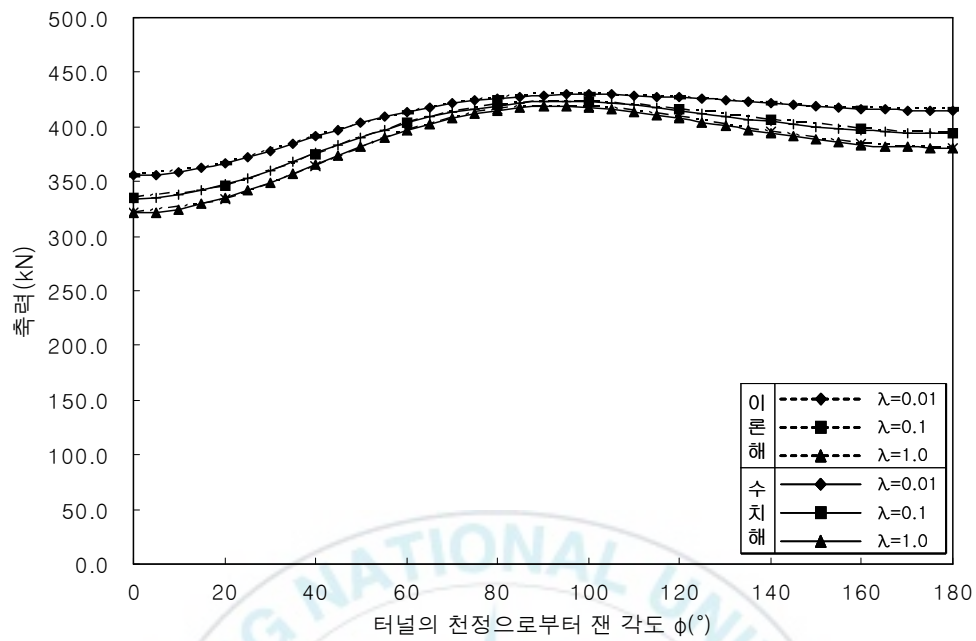


그림 4.11 빔스프링 모델(1R)의 축력

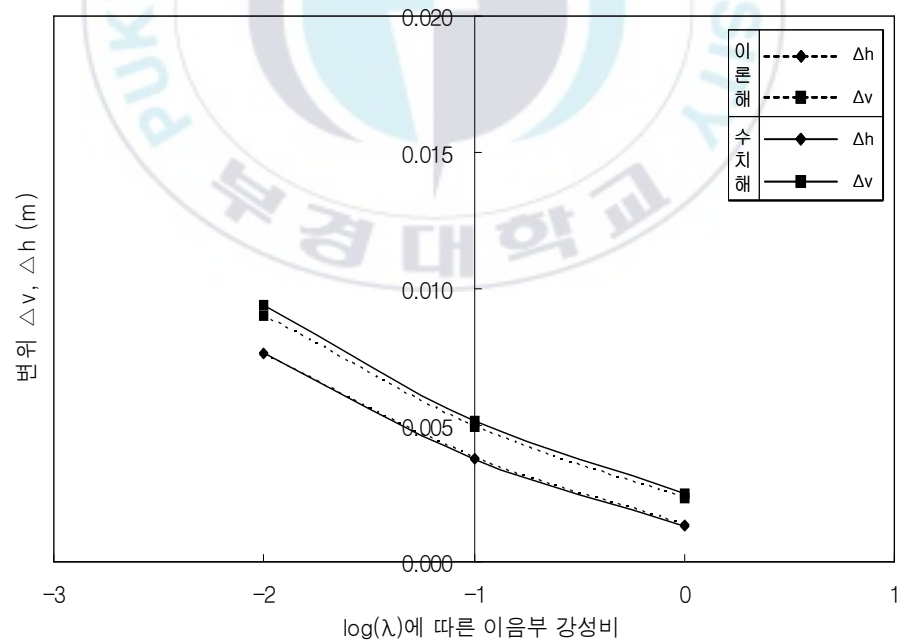


그림 4.12 빔스프링 모델(1R)의 수평 · 수직변위

그림 4.10 ~ 그림 4.12는 빔스프링 모델(1R)을 적용한 경우의 해석결과이다. 적용하중은 앞선 해석모델들과 마찬가지로 식 (3.9)를 이용하여 산정하였다. 그림 4.10 ~ 그림 4.12에서 보는 바와 같이 휨모멘트, 축력 및 변위가 이음부 강성비의 크기에 관계없이 이론해와 근사한 값으로 얻어졌다. 빔스프링 모델(1R)은 터널의 측벽부에서 수평변위를 추정한 후 간접적으로 계산된 지반반력을 적용시킨다는 점에서는 앞선 해석모델들과 유사하다.

즉, 빔스프링 모델(1R)은 이음부 강성, 지반반력의 크기 및 적용범위가 부재력의 정확도에 직접적인 영향을 준다. 따라서 이 값들이 정확히 평가되었을 경우에 한하여 설계 실무에서 신뢰성 있는 구조해석 모델로 사용될 수 있을 것이다. 그러나 해석시에 이음부 강성을 고려할 수 있다는 점에서 앞의 경우들보다는 개선된 모델이다.

4.3.4 빔스프링 모델(2R)

라이닝 세그먼트는 터널 진행방향으로도 볼트 등으로 결합된다. 일반적으로 라이닝 세그먼트간 원주방향 이음부는 강성 저하를 작게 하기 위해서 각 링간에 엇갈린 위치에서 조립된다. 따라서, 터널 진행방향으로 서로 다른 라이닝 세그먼트 링의 강성과 인접 링간의 상호작용을 고려한 실용적인 모델로서 빔스프링 모델(2R)이 제안되어 있다. 이 모델에서는 인접한 링간을 연결하기 위한 요소로서 강체요소나 전단스프링을 사용한다 (Koyama, 2003). 빔스프링 모델(2R)의 구조 형상은 그림 4.13과 같다.

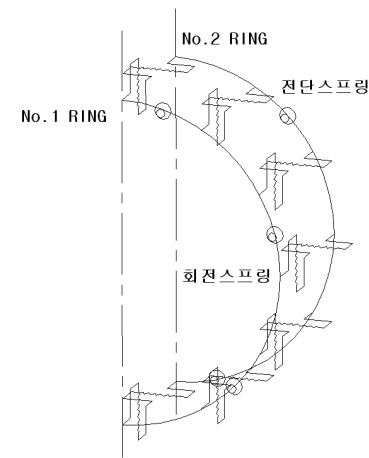


그림 4.13 빔스프링 모델(2R)의 구조도

빔스프링 모델(2R)에 의해 중첩효과를 고려하는 경우에는 인접하는 세그먼트의 축 방향 이음부에서 힘의 상호작용을 고려할 필요가 있기 때문에 2링 이상을 모델로 취급할 필요가 있다. 계산모델에서 고려해야 할 링 숫자는 예를 들면 2종류의 조립 패턴(K 세그먼트의 위치)을 번갈아 반복하는 경우에는 2링을, 또 3종류의 조립 패턴을 순차적으로 반복하는 경우에는 3링이 되기 때문에 시공시에 생기는 세그먼트의 조립 패턴을 미리 상정할 필요가 있다.

본 해석 예에서는 2번째 링의 이음부가 1번째 링의 이음부의 중간 위치(60° , 120°)에 있다고 가정하여 해석하였다. 그림 4.14 ~ 그림 4.21은 라이닝에 발생하는 휨모멘트, 축력 및 라이닝의 천정부와 측벽부의 수직·수평변위를 나타낸다.

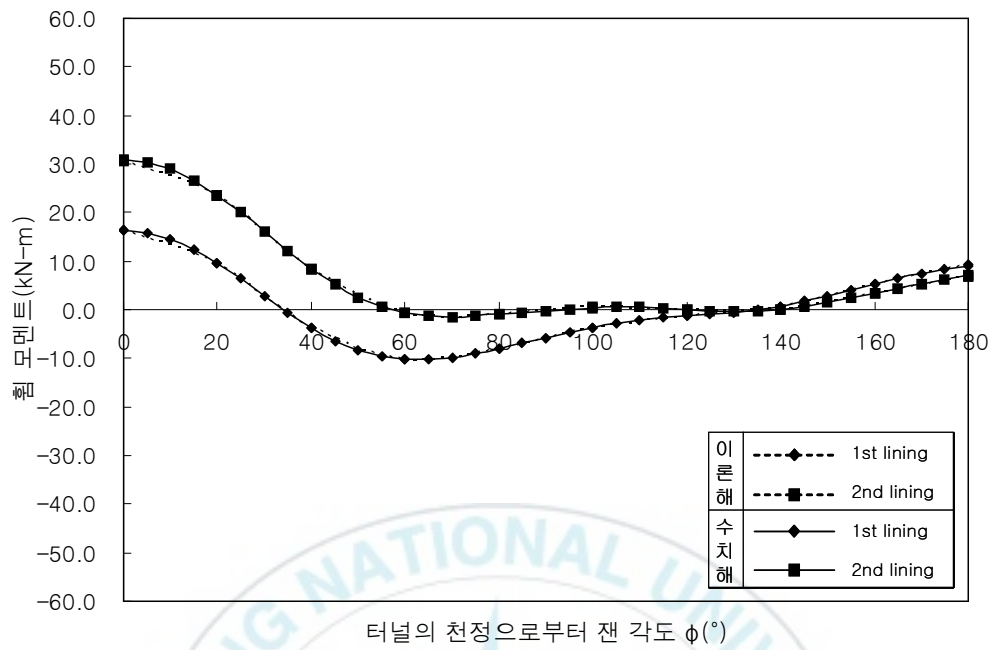


그림 4.14 $\lambda=0.01$ 일 때의 빔스프링 모델($2R$)의 휨모멘트

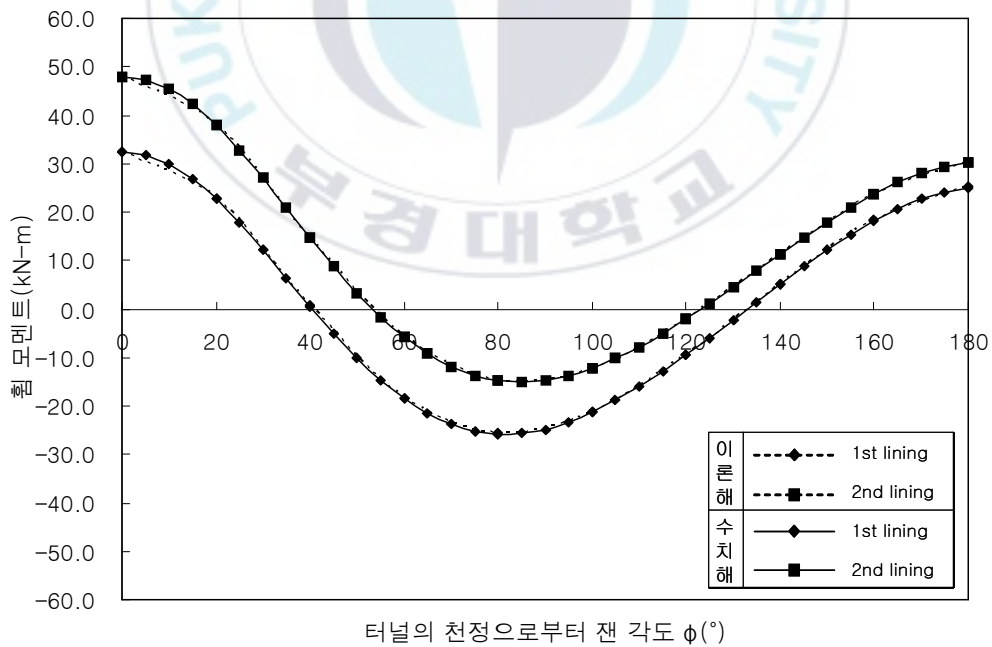


그림 4.15 $\lambda=0.1$ 일 때의 빔스프링 모델($2R$)의 휨모멘트

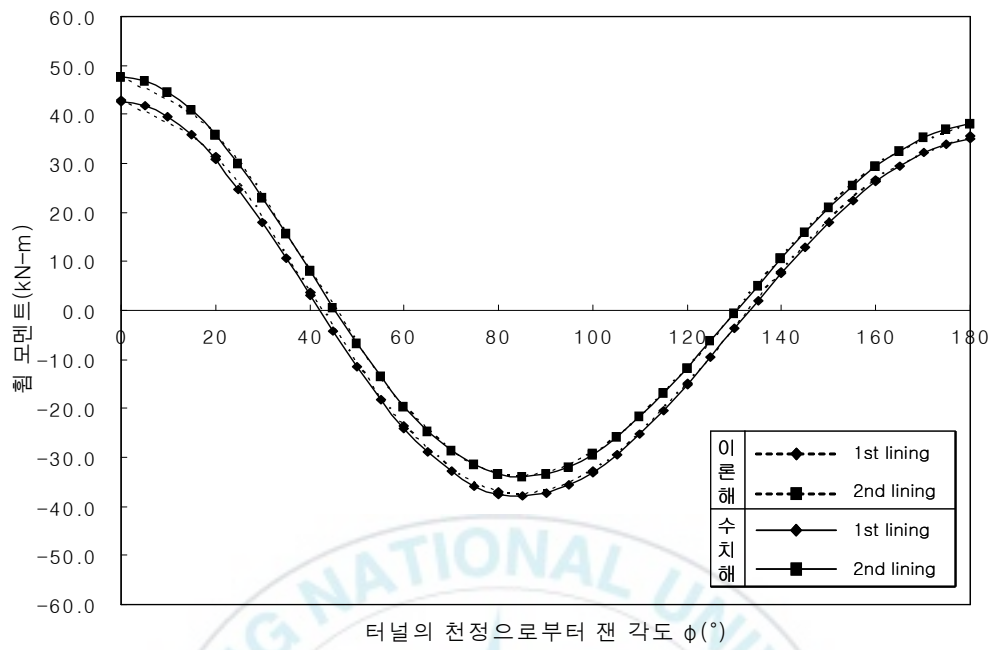


그림 4.16 $\lambda=1.0$ 일 때의 빔스프링 모델($2R$)의 휨모멘트

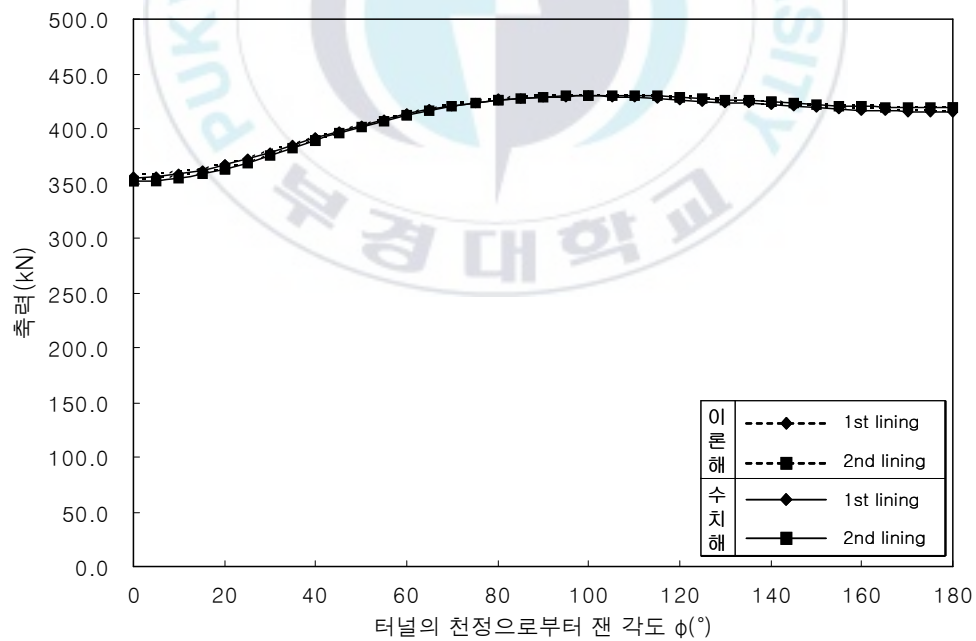


그림 4.17 $\lambda=0.01$ 일 때의 빔스프링 모델($2R$)의 축력

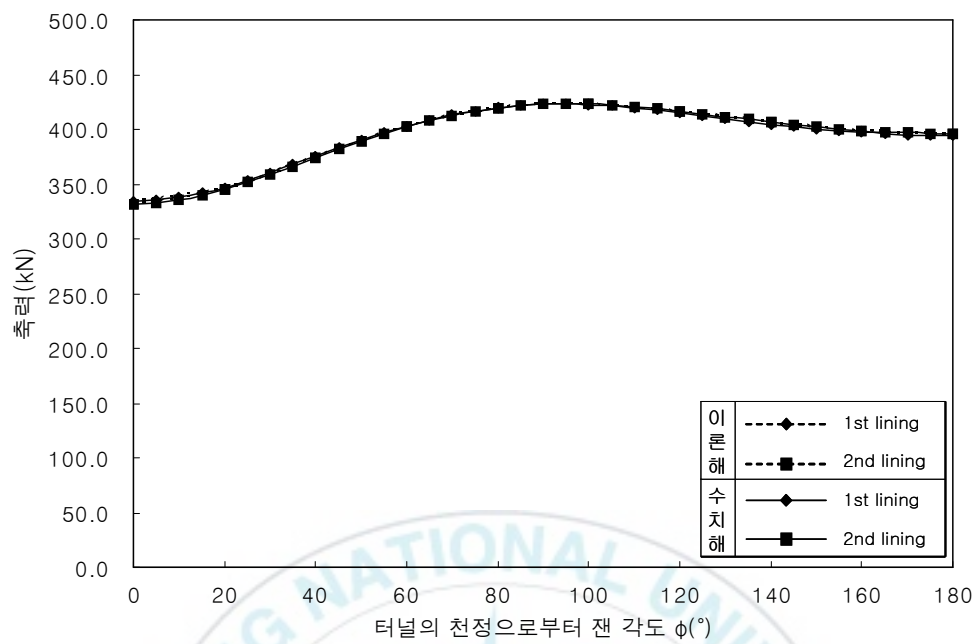


그림 4.18 $\lambda=0.1$ 일 때의 빔스프링 모델(2R)의 축력

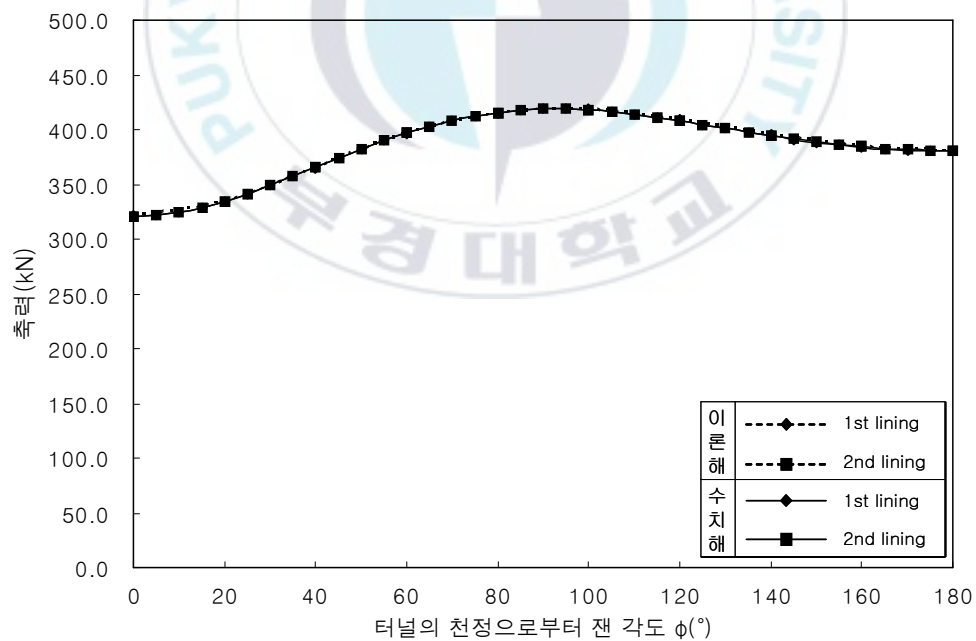


그림 4.19 $\lambda=1.0$ 일 때의 빔스프링 모델(2R)의 축력

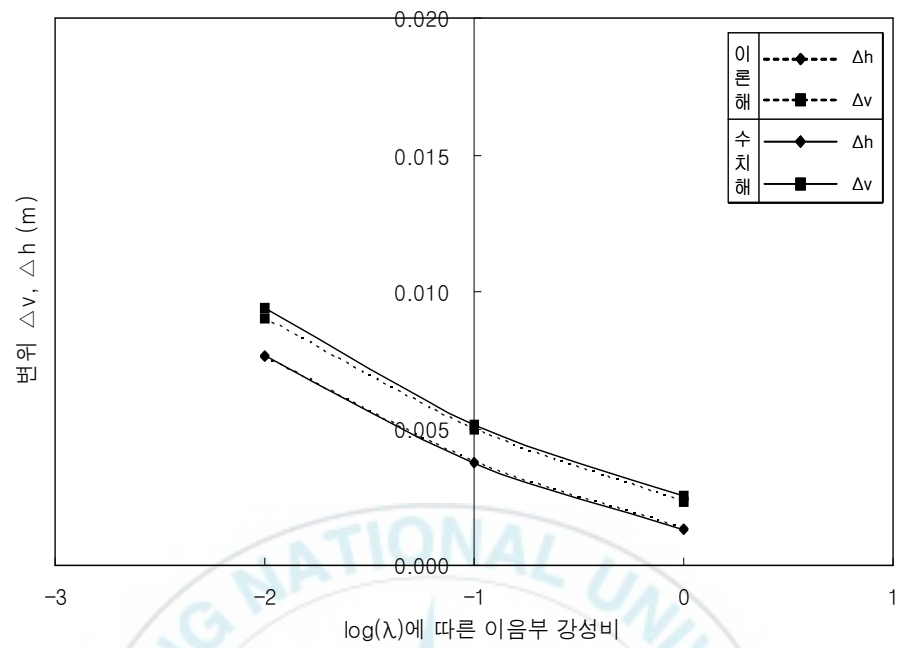


그림 4.20 빔스프링 모델(2R)의 1st lining 수평·수직변위

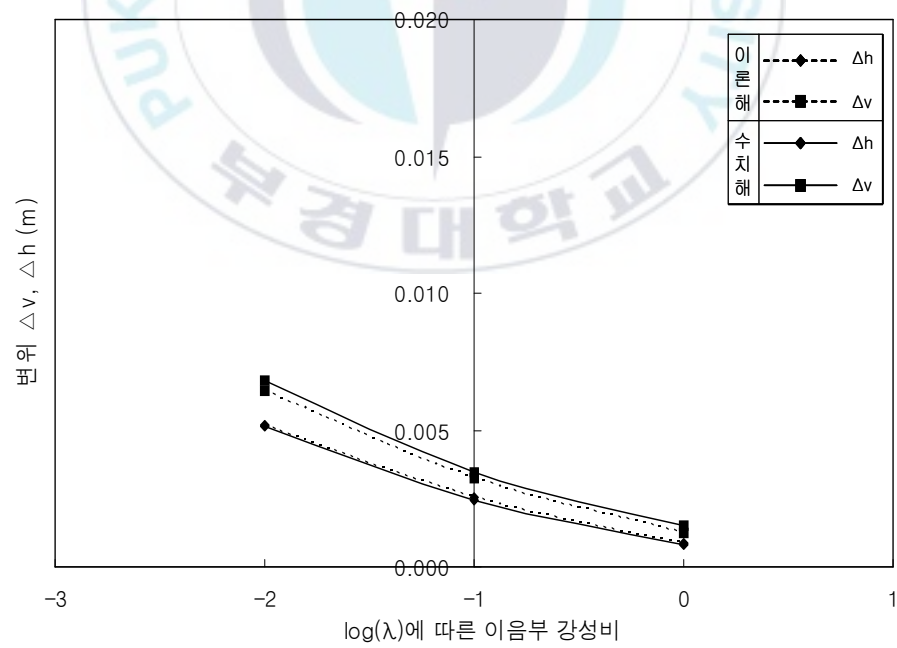


그림 4.21 빔스프링 모델(2R)의 2nd lining 수평·수직변위

해석결과, 그림 4.14 ~ 그림 4.21에서 알수 있듯이 1번째 링과 2번째 링의 휨모멘트, 축력 및 변위가 이론해와 동일한 결과를 나타냈다. 휨모멘트에서 이음부 강성비가 0.01일 때 1번째 링과 2번째 링은 천정부에서 큰 차이를 보이나 점차 이음부 강성비가 커질수록 2번째 링과 1번째 링의 부재력의 크기가 비슷해져 갔다. 이러한 결과로부터 휨모멘트는 이음부 강성비가 작은 경우 인접하는 링 간 서로 영향이 큰 것을 알 수 있다. 따라서 세그먼트와 라이닝간의 지그재그 조립에 의한 중첩효과를 고려한 시공단계 해석 시 적절한 이음부 강성 크기의 선택이 중요할 것으로 판단되며, 이 또한 빔스프링 모델(1R)과 마찬가지로 지반반력의 크기 작용범위 및 전단스프링 정수가 정수가 정확하게 평가되었을 경우에 한하여 설계 실무에서 신뢰도를 갖는 구조해석 모델로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

4.3.5 전주면스프링 모델(1R-S0)

전주면스프링 모델(1R-S0)은 지반과 라이닝 세그먼트의 상호작용에 의해 발생하는 지반반력을 지반반력계수 K_s 를 반영한 법선방향의 압축스프링을 이용하여 직접적으로 계산할 수 있는 이점이 있으나, 세그먼트간 이음부는 고려할 수 없는 모델이다. 또한, 지반거동을 선형탄성거동으로 가정하기 때문에 라이닝 세그먼트를 설치하기 직전에 발생하는 지반응력의 이완현상은 고려할 수 없다. 이 모델은 지반을 평면변형률 조건의 스프링으로, 라이닝 세그먼트는 빔요소로 표현한다. 지반반력을 고려할 때 조건에 따라 접선방향과 법선방향 탄성스프링을 사용한다. 보통은 라이닝의 압축에만 유효하고 인장력에는 유효하지 않는 법선방향 스프링만 설치하고 접선방향 스프링은 설치하지 않는데, 이는 지반강성을 약하게 평가한 것이 되어 결과적으로 안전측 설계가 된다.

지반반력계수는 표 3.1과 같이 주변지반의 탄성계수와 터널 구조물의 기하학적 치수에 의하여 결정된다. 전주면스프링 모델(1R-S0)의 구조 형

상은 그림 4.22와 같다. 해석결과와 비교를 위한 이론해를 얻는 과정에서
본 예제는 일정강성링에 해당되며 식 (3.1)의 이음부 회전강성은
 $K_\theta = 4EI/l$ 로 가정하였다.

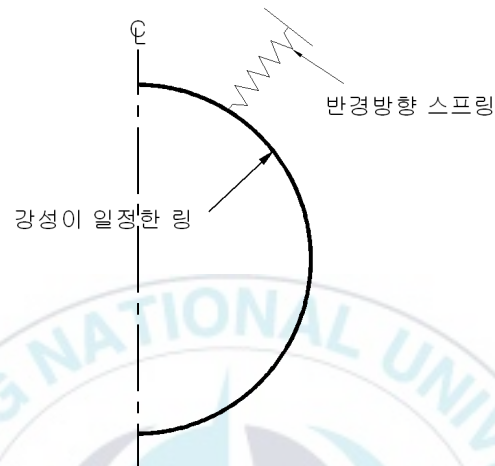


그림 4.22 전주면스프링 모델(1R-S0)의
구조도

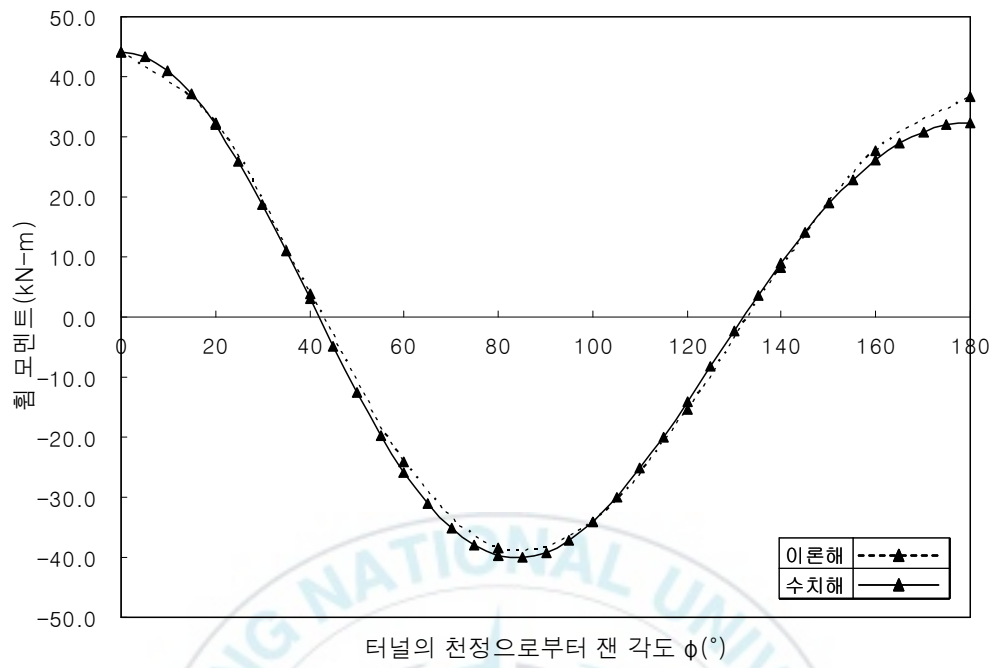


그림 4.23 전주면스프링 모델(1R-S0)의 휨모멘트

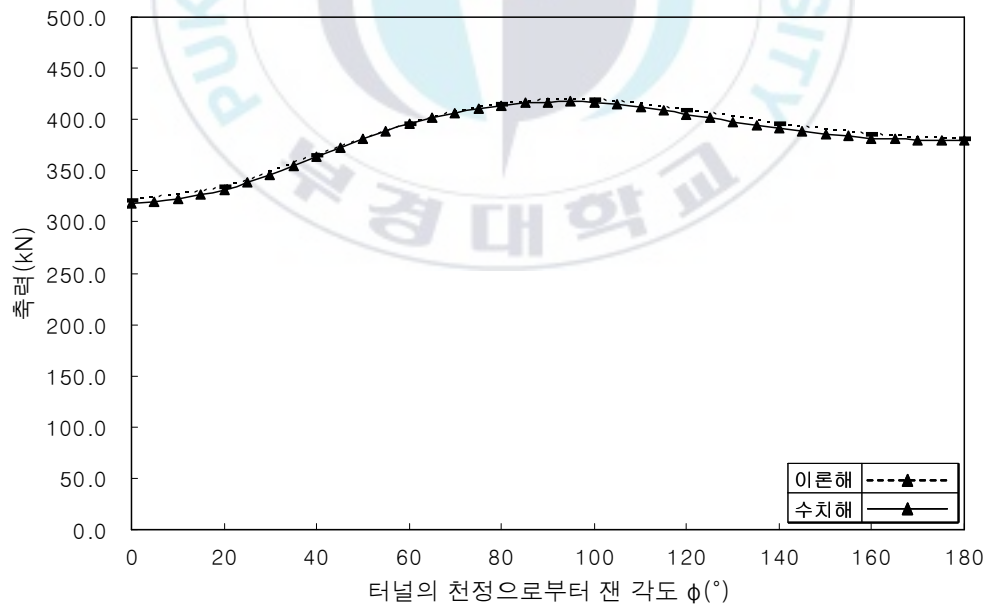


그림 4.24 전주면스프링 모델(1R-S0)의 축력

그림 4.23과 그림 4.24는 이론해와 수치해에 의한 라이닝 세그먼트의 휨모멘트와 축력을 보여주고 있다. 터널의 바닥부 주변($160^{\circ} \sim 180^{\circ}$)을 제외하고는 전주면스프링 모델(1R-S0)에 의한 수치해가 이론해와 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 터널 바닥부 주변에서 보인 차이는 지반반력의 작용범위에서 기인하였다. 이론해의 경우는 $45^{\circ} \leq \phi \leq 135^{\circ}$ 로 고정된 범위로 가정하는 반면에 수치해의 경우는 지반조건에 따라 변할 수 있다. 본 예제의 경우는 수치해가 $50^{\circ} \leq \phi \leq 140^{\circ}$ 로 이론해보다 터널 바닥부 쪽의 범위에 약간 치우쳐 작용한 것으로 해석되었다. 따라서, 전주면스프링 모델(1R-S0)의 경우는 일정강성링 모델과 같이 이음부의 강성이 큰 라이닝 세그먼트의 해석에서는 매우 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 본다.

4.3.6 전주면빔이음스프링 모델(1R-S0)

현재 라이닝 세그먼트의 해석 및 설계에 가장 많이 사용되고 있는 구조해석 모델들의 분석을 통하여, 사용의 편이와 해석결과의 신뢰가 동시에 요구되는 설계 실무에 적절한 해석모델로서 본 연구에서는 그림 4.25와 같은 전주면빔이음스프링 모델(1R-S0)을 제안하고자 한다.

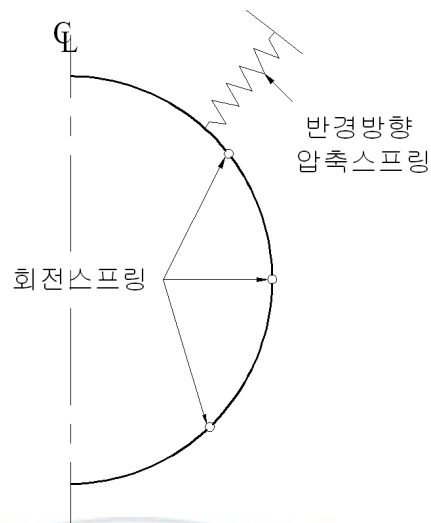


그림 4.25 전주면빔이음스프링 모델(1R-S0)의 구조도

전주면빔이음스프링 모델(1R-S0)은 기존의 해석모델들의 장점들을 조합한 모델로서 장점은 다음과 같다.

- 1) 라이닝 세그먼트의 이음부와 이음부 강성크기를 고려할 수 있다.
- 2) 라이닝 세그먼트와 지반과의 상호작용에 의한 지반반력을 압축스프링을 이용한 연결요소로서 자동적으로 산정할 수 있다.

그림 4.26 ~ 그림 4.28은 전주면빔이음스프링 모델(1R-S0)을 적용한 경우의 라이닝 세그먼트에 발생한 휨모멘트, 축력 및 변위를 보여주고 있다.

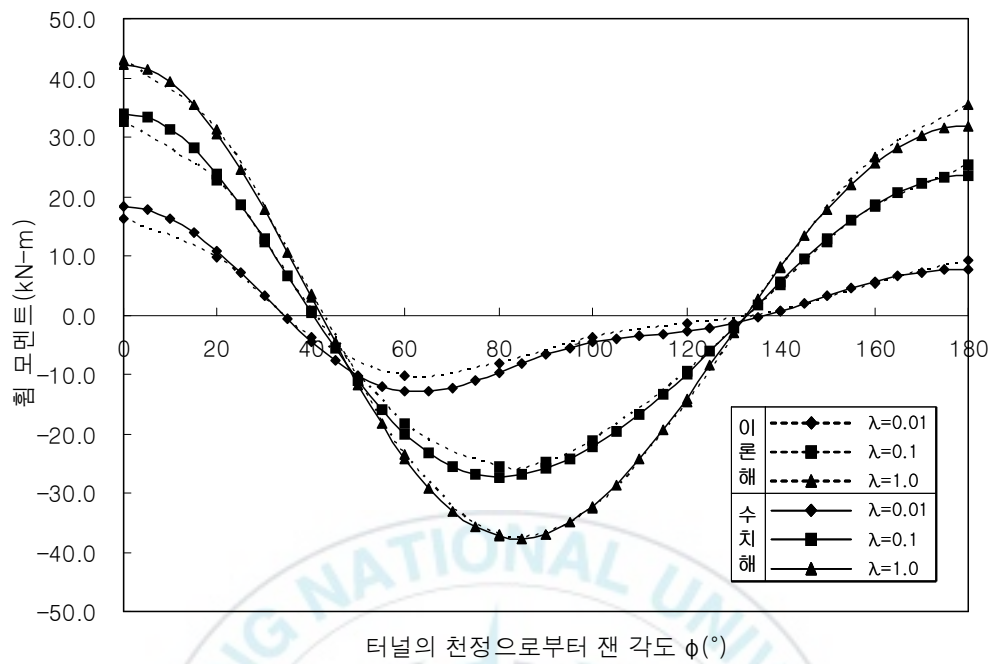


그림 4.26 전주면빔이음스프링 모델(1R-S0)의 휨모멘트

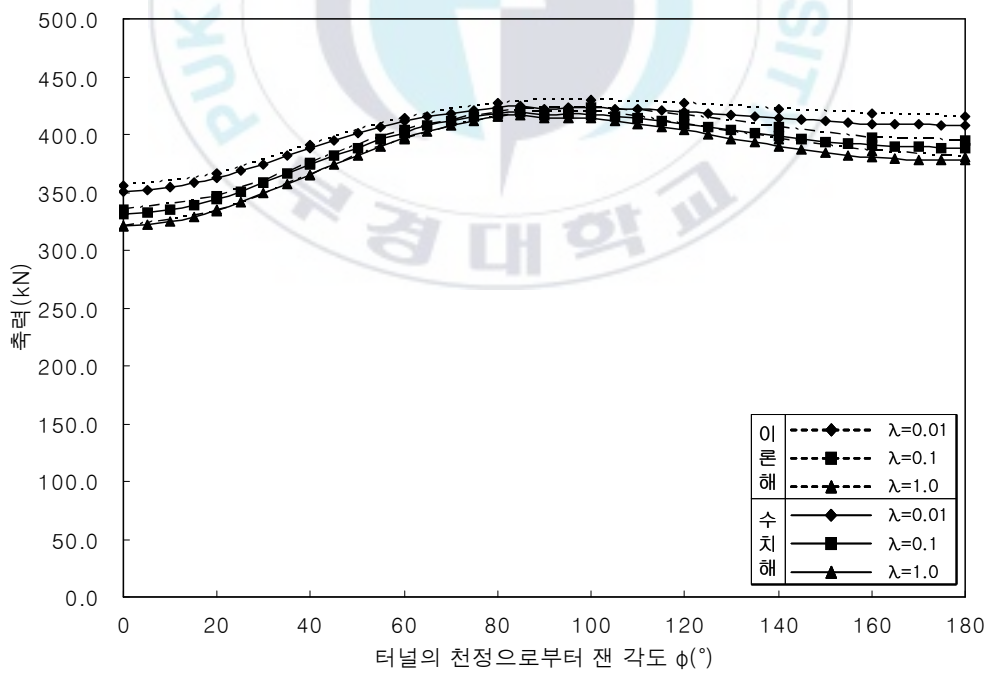


그림 4.27 전주면빔이음스프링 모델(1R-S0)의 축력

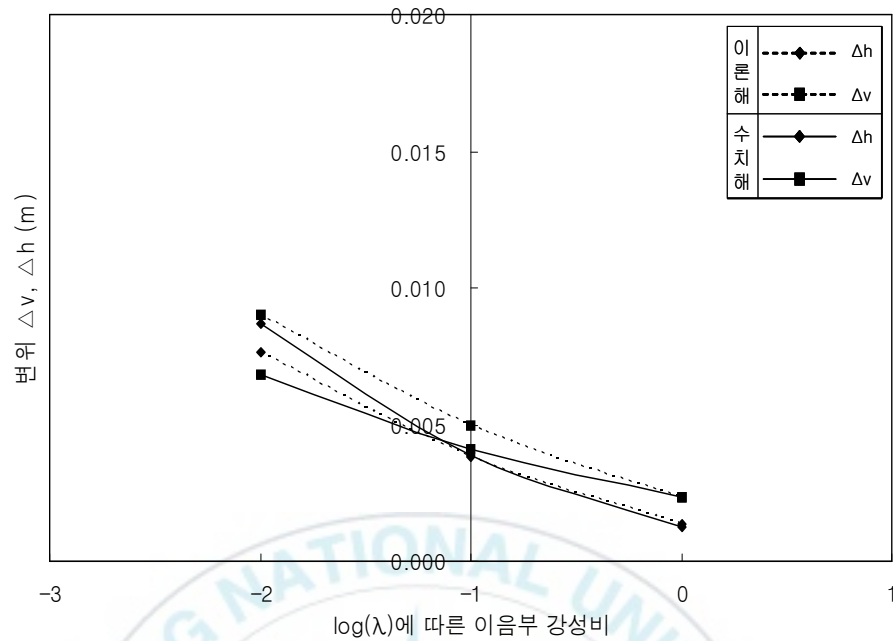


그림 4.28 전주면빔이음스프링 모델(1R-S0)의 수평·수직변위

휨모멘트는 그림 4.26에서 보는 바와 같이 이음부 강성비가 0.1이하일 때 라이닝 세그먼트의 천정부에서 아래방향으로 볼 때 $40^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 범위에서 약간의 차이를 보이나 대부분의 범위에서 이론해와 거의 유사한 결과를 나타내고 있다. $40^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 범위에서의 차이는 전주면스프링 모델(1R-S0)에서와 같이 이론해가 지반반력의 적용범위를 고정된 범위로 가정하고 있기 때문이다. 그림 4.28에서 보는 바와 같이 변위 역시 이음부 강성비가 0.1이하인 경우에는 수치해와 이론해가 다소 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 그러나, 차이 값의 절대적인 크기는 공학적인 의미를 부여하기는 어렵다고 판단한다. 한편, 현재 우리나라에서 건설중에 있거나 건설이 완료된 쉘터널 라이닝 세그먼트의 이음부 강성크기는 대부분 0.1이상에서 1.0 내외의 값으로 설계되어져 있다. 따라서, 이러한 크기의 강성을 갖는 라이닝 세그먼트의 해석 및 설계에서는 전주면빔이음스프링 모델(1R-S0)이 설계실무에 매우 적합할 것으로 판단된다.

4.4 해석 모델 선정

표 4.1의 해석조건에 대하여 현재 실무에서 적용되고 있는 구조해석 모델과 본 연구에서 제시한 구조해석 모델로 이론해와 수치해석 결과를 비교하였으며, 각 모델들의 사용한계에 대하여 검토하였다. 평가대상 모델들은 일정강성링 모델, 다힌지계링 모델, 빔스프링 모델(1R, 2R), 전주면스프링 모델(1R-S0), 전주면빔이음스프링 모델(1R-S0)들이었다.

해석결과, 지반반력을 하중으로 입력시켜야 하는 일정강성링 모델, 다힌지계링 모델 및 빔스프링 모델(1R, 2R)중에서 다힌지계링 모델을 제외하고 휨모멘트와 축력에서 이론해와 유사한 결과를 나타내었다. 그러나, 일정강성링 모델과 다힌지계링 모델은 이음부의 강성비, 분할분포 및 분할개수에 따른 지반반력을 직접적으로 구할 수 없는 모델로서 측벽부의 수평변위를 추정하여 간접적으로 적용하는 관용계산식을 따른다. 따라서 이음부를 갖는 쉘터널 세그먼트의 설계에 적용하기에는 적정하지 못한 모델들로 평가된다. 빔스프링 모델(1R, 2R)은 이음부의 강성비, 분할분포 및 분할개수에 따른 영향을 고려할 수 있다는 장점은 있으나 지반반력의 크기와 적용범위의 정확도에 따라 해석결과가 달라지므로 실무 설계시 이에 대한 주의가 필요하다.

지반반력을 하중이 아닌 압축스프링을 사용한 전주면스프링 모델(1R-S0)과 전주면빔이음스프링 모델(1R-S0)의 해석결과도 이론해와 유사한 결과를 나타내었다. 하지만 전주면스프링 모델(1R-S0)은 지반반력을 지반반력계수로 이용하여 쉽게 해석할 수 있다는 장점은 가지고 있으나 이음부를 고려하지 못하는 단점을 가지고 있다. 전주면빔이음스프링 모델(1R-S0)은 이음부를 고려할 수 있을 뿐만 아니라 지반반력도 압축스프링으로 쉽게 적용할 수 있다. 한편, 전주면스프링 모델(1R-S0)과 전주면빔이

음스프링 모델(1R-S0) 모두 지반을 정확히 모사하는 스프링 상수의 적용이 해석결과의 정확성에 영향을 준다.

본 연구에서는 해석결과의 종합적인 분석을 통하여 이용자의 용이성, 현장조건의 적용성, 해석결과의 정확성 측면에서 현재 실무기술 수준에서는 전주면빔이음스프링 모델(1R-S0)이 적절한 모델일 것으로 판단한다. 따라서 세그먼트 라이닝의 이음부와 지반조건의 변화가 쉘터널 세그먼트 라이닝의 역학적 거동에 끼치는 영향에 대하여 알아보기 구조해석 모델은 해석의 용이성과 해석결과의 정확성을 고려하여 전주면빔이음스프링 모델(1R-S0)을 적용하고자 한다.



5. 변수 해석

5.1 대상 터널

앞 장들의 결과로부터 이음부는 쉘드터널 라이닝 세그먼트의 거동에 큰 영향을 주는 변수임을 알 수 있었다. 이번 장에서는 이음부 강성과 지반강성, 이음부 분할 분포 및 분할 개수의 영향에 관하여 분석하고자 한다.

해석에 적용한 대상 터널의 제원은 표 5.1에 나타내었다. 경우 1 ~ 경우 3은 중국의 상하이에 쉘드터널공법으로 건설된 지하철과 고속도로상의 터널이다. 경우 4와 경우 5는 이음부의 분할 분포와 분할 개수의 영향을 알아보기 위해 가정한 조건이다.

5.1.1 대상 터널의 제원 및 설계조건

본 연구에 적용한 5개의 터널 제원과 형상을 표 5.1과 그림 5.1 ~ 그림 5.5에 상세히 나타내었다.

표 5.1 변수 해석에 적용한 해석조건

적용 물성치	경우 1	경우 2	경우 3	경우 4	경우 5
터널반경, R_{out} (m)	2.5	3.1	5.50	3.1	5.50
세그먼트 두께, t (m)	0.3	0.35	0.55	0.35	0.55
도심선 반경, R_{cal} (m)	2.35	2.925	5.225	2.925	5.225
세그먼트 탄성계수, E (kN/m ²)	3.5e+7	3.5e+7	3.43e+7	3.5e+7	3.43e+7
단면 2차모멘트, I (m ⁴)	2.25e-3	3.57e-3	1.386e-2	3.57e-3	1.386e-2
터널심도 (m)	8.7	14.0	18.7	14.0	18.7
지하수위면 (m)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
흙의 종류	Mucky clay	Mucky clay	Mucky clay	Mucky clay	Mucky clay
점착력, C_u (kPa)	$C_u = 30$	$C_u = 56$	$C_u = 56$	$C_u = 56$	$C_u = 56$
흙의 단위중량, (kN/m ³)	$\gamma = 17.2$	$\gamma = 18.3$	$\gamma = 18.3$	$\gamma = 18.3$	$\gamma = 18.3$
지반반력계수, K_s (kN/m ³)	5000	10000	15000	10000	15000
이음부 개수	6	6	8	6	6
이음부 위치(ϕ)	30°, 90°, 150°	8°, 73°, 138°	22.5°, 67.5°, 112.5°, 157.5°	30°, 90°, 150°	30°, 90°, 150°
적용 토압 (kN/m ²)	$p_1 = 165.8$	$p_1 = 274.0$	$p_1 = 373.0$	$p_1 = 274.0$	$p_1 = 373.0$
	$p_2 = 187.9$	$p_2 = 301.0$	$p_2 = 415.1$	$p_2 = 301.0$	$p_2 = 415.1$
	$p_3 = 116.1$	$p_3 = 191.0$	$p_3 = 257.1$	$p_3 = 191.0$	$p_3 = 257.1$
	$p_4 = 60.2$	$p_4 = 86.8$	$p_4 = 137.2$	$p_4 = 86.8$	$p_4 = 137.2$
	$p_5 = 7.5$	$p_5 = 8.6$	$p_5 = 13.48$	$p_5 = 8.6$	$p_5 = 13.48$

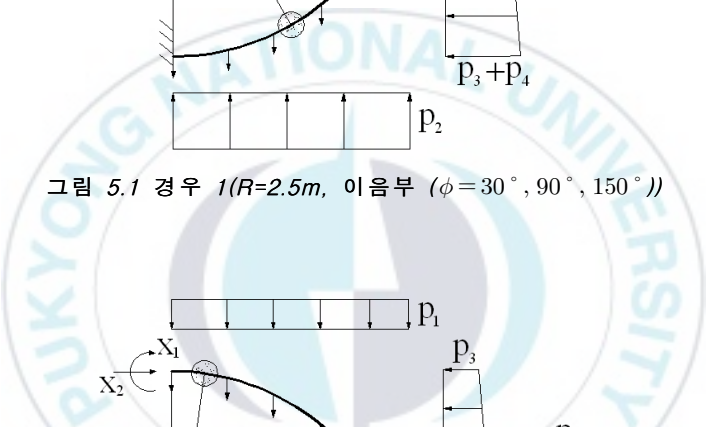
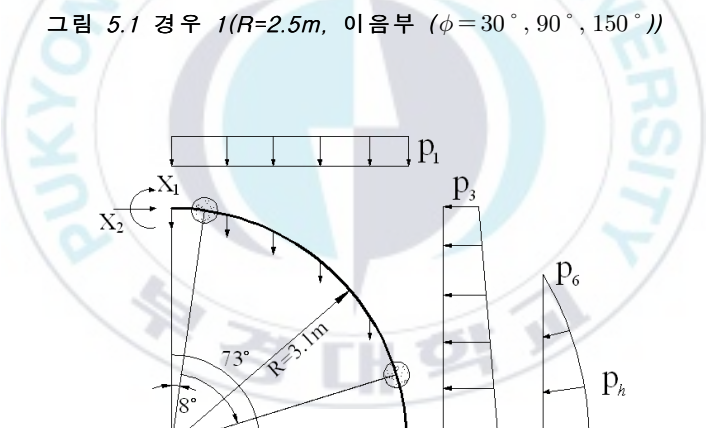
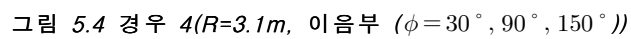


그림 5.2 경우 2($R=3.1m$, 이음부 ($\phi=8^\circ, 73^\circ, 138^\circ$))



– 56 –



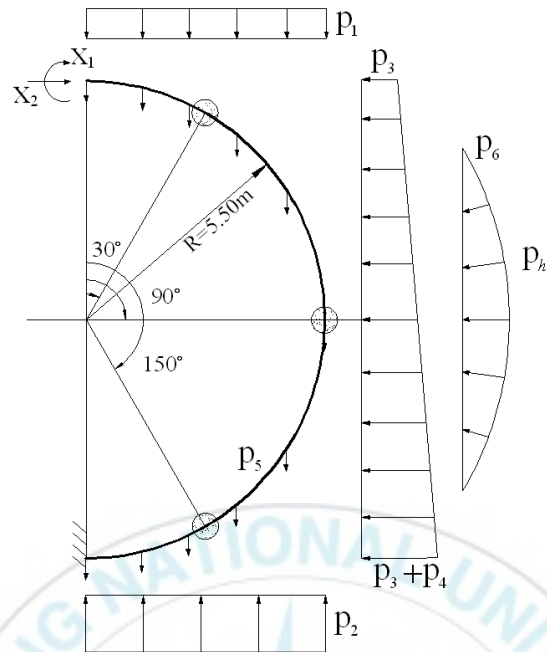
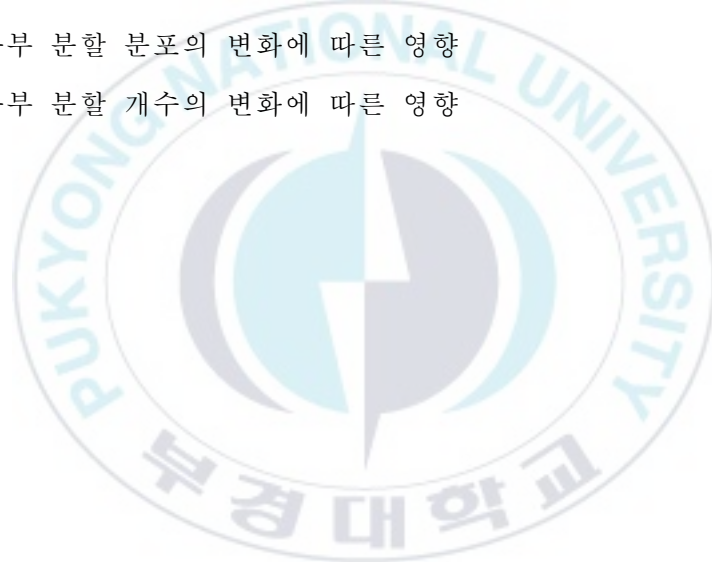


그림 5.5 경우 5($R=5.5\text{m}$, 이음부 ($\phi = 30^\circ, 90^\circ, 150^\circ$))

5.2 변수 해석 방법

이번 장에서는 4장에서 제안한 전주면빔이음스프링 모델(1R-S0)을 바탕으로 이음부를 갖는 라이닝 세그먼트에 대하여 변수 해석을 실시하고자 한다. 변수 해석은 라이닝 세그먼트의 이음부와 지반조건의 변화가 쉘터널의 구조 거동에 끼치는 영향에 대하여 평가하기 위함이다. 다음과 같은 주요 설계변수에 대하여 변수 해석을 실시하고자 한다.

- 1) 이음부 강성과 지반강성의 변화에 따른 영향
- 2) 이음부 분할 분포의 변화에 따른 영향
- 3) 이음부 분할 개수의 변화에 따른 영향



5.3 이음부 강성과 지반강성의 변화에 따른 영향

이음부 강성과 지반강성의 변화에 따른 영향은 표 5.1의 경우 1에 대하여 구조해석을 실시하였다. 해석 예에선 지반강성을 나타내는 지반반력계수의 해석범위를 지반반력을 기대할 수 없을 정도로 아주 연약한 지반($K_s = 0$)에서부터 지반이 아주 견고한 상태($K_s = 30,000 \text{ kN/m}^3$)까지 고려하였다. 이음부의 강성을 비롯한 나머지 해석조건들은 표 5.1의 경우 1과 같다.

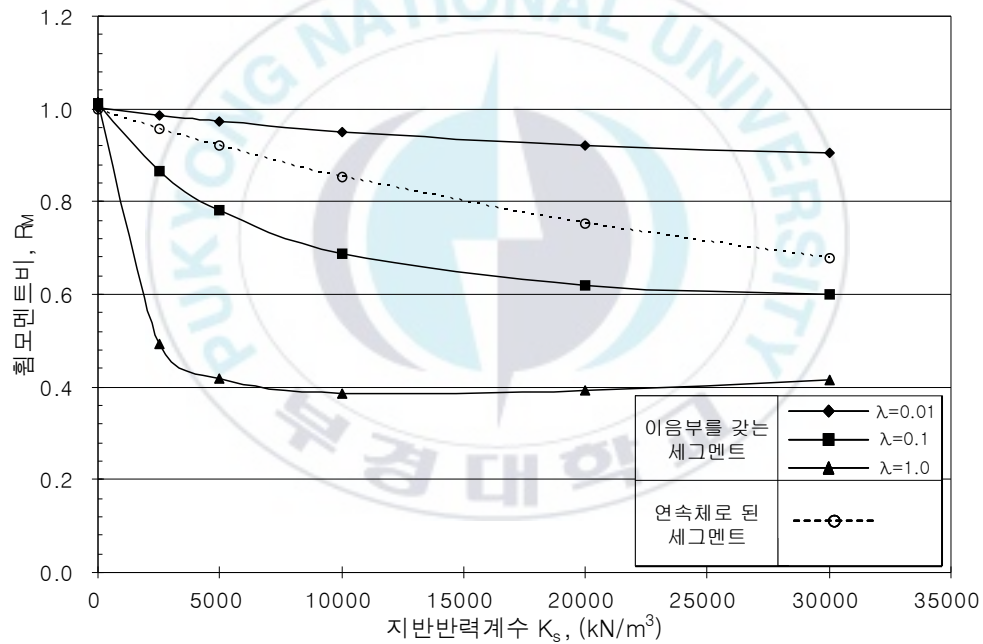


그림 5.6 지반조건의 변화에 따른 이음부 강성비 별 정 휨모멘트비

그림 5.6에서 실선은 지반강성에 따라 이음부 강성비별 라이닝 세그먼트의 천정부에 발생된 최대 정 휨모멘트비 R_M 를 보여주고 있다. 실선의 휨모멘트비는 식 (5.1)과 같이 두께 30cm로 이음부없이 연속된 라이닝 세

그먼트와 이음부($\lambda = 0.01, 0.1, 1.0$)를 갖는 경우에서의 값을 비교한 것이다.

$$R_M = \frac{|\text{이음부를 갖는 세그먼트의 최대 정 휨 모멘트}|}{|\text{연속체로 된 세그먼트의 최대 정 휨 모멘트}|} \quad (5.1)$$

그림 5.6의 점선은 식(5.2)와 같이 지반반력계수가 $K_s = 0$ 인 경우에 연속체로 가정된 라이닝 세그먼트의 천정부에 발생된 최대 정 휨모멘트에 대한 지반강성의 변화에 따른 휨모멘트비를 나타내고 있다.

$$R_M = \frac{|\text{지반강성별 연속체 세그먼트의 최대 정 휨 모멘트}|}{|K_s = 0 \text{에서의 연속체 세그먼트의 최대 정 휨 모멘트}|} \quad (5.2)$$

그림 5.6의 점선에서 지반강성이 커짐에 따라 라이닝 세그먼트의 발생하는 휨모멘트 크기가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그림 5.6의 실선에 서는 이음부 강성의 크기가 큰 $\lambda = 1.0$ 의 경우에는 지반강성이 커짐에 따라 완만한 기울기로 약 0.9정도의 휨모멘트비로, 이음부 강성의 크기가 상대적으로 작은 $\lambda = 0.01$ 에서는 약간의 지반강성 증가에서도 급격히 약 0.4 정도로 빠르게 수렴하고 있는 것을 알 수 있다. 즉, 이음부를 갖는 라이닝 세그먼트에 발생하는 휨모멘트의 크기는 일정한 크기 이상의 지반강성에서 지반강성의 크기에 관계없이 이음부가 없는 연속체의 라이닝 세그먼트에 발생하는 휨모멘트의 크기에 일정한 비율로 수렴하였다.

5.4 이음부 분할 분포의 변화에 따른 영향

표 5.1의 경우 2와 경우 4의 조건을 가지고 이음부 분할 분포가 라이닝 세그먼트에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 경우 2는 라이닝의 반단면에서 $\phi=8^\circ, 73^\circ, 138^\circ$ 의 위치에 이음부가 있고, 경우 4의 이음부는 $\phi=30^\circ, 90^\circ, 150^\circ$ 에 위치한다고 가정한 것이다. 그 이외의 해석조건은 경우 2와 4가 동일하다.

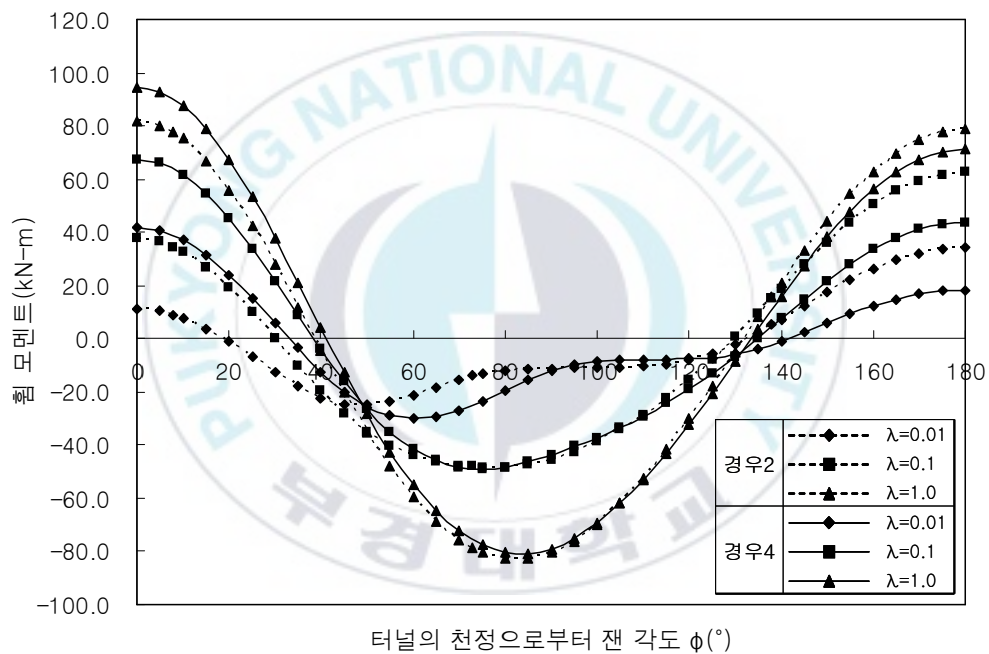


그림 5.7 이음부 분할 분포의 변화에 따른 휨모멘트

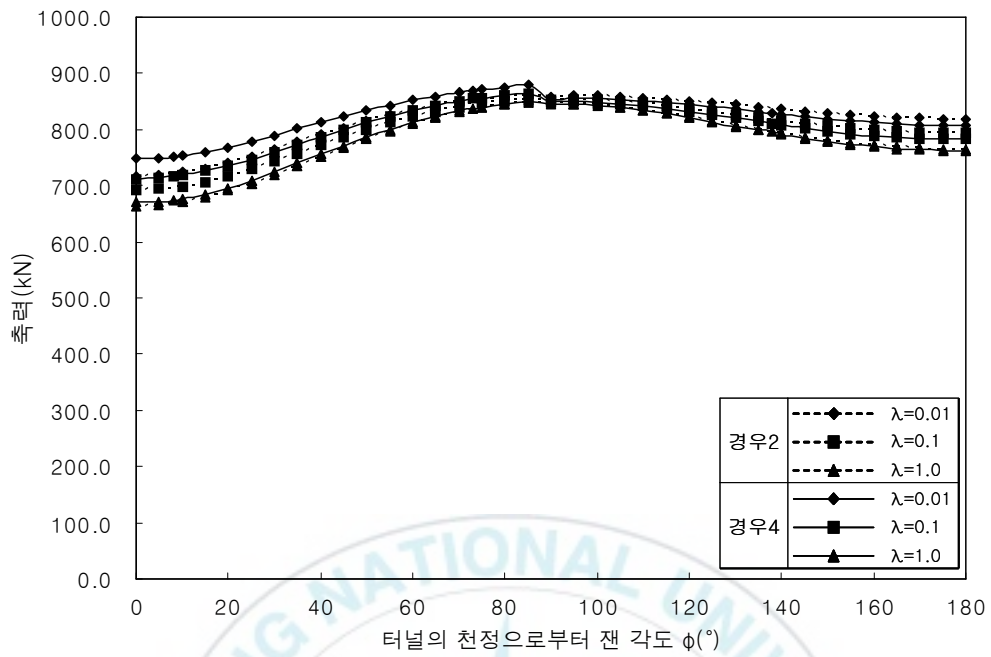


그림 5.8 이음부 분할 분포의 변화에 따른 축력

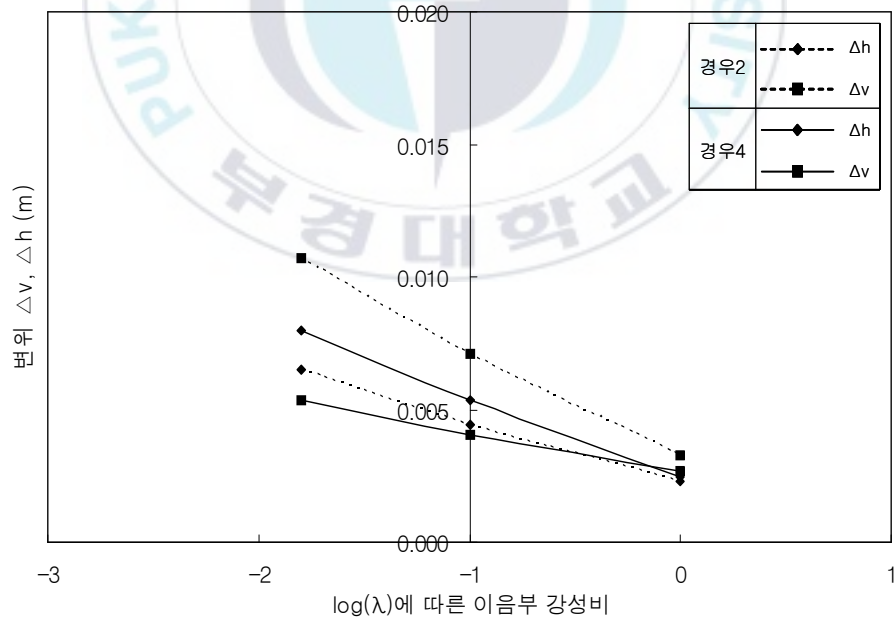
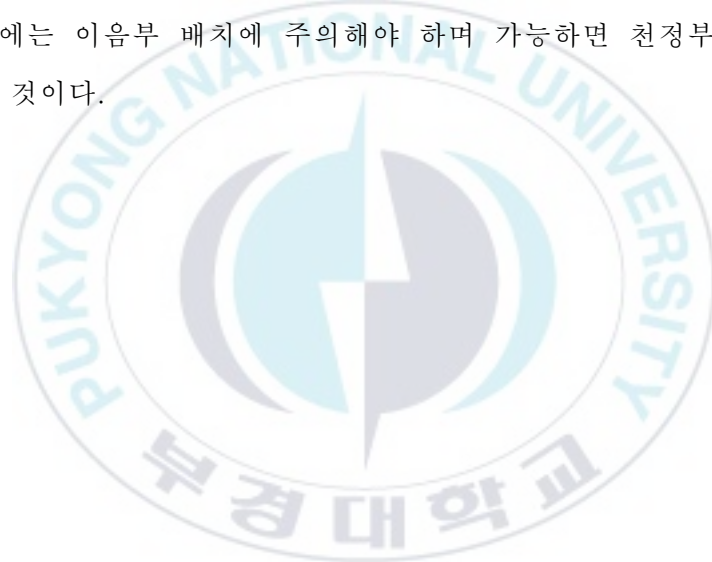


그림 5.9 이음부 분할 분포 변화에 따른 수평·수직 변위

그림 5.7 ~ 그림 5.9는 이음부 분할 분포의 변화에 따라 이음부 강성 비별 라이닝 세그먼트에 발생된 휨모멘트, 축력 및 변위를 보여주고 있다. 그림 5.7에서 보는 바와 같이 측벽부의 휨모멘트는 이음부의 강성이 작은 $\lambda=0.01$ 인 경우를 제외하고는 이음부 분할 분포에 관계없이 서로 근사한 크기로 나타났다. 그림 5.9에서 보는 바와 같이 수평변위도 수직변위에 비하여 이음부의 분할 분포에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 그러나, 천정부와 바닥부의 휨모멘트 및 천정부 수직변위는 이음부의 분할 분포에 따라 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 특히, 이음부의 강성이 작을 수록 그 영향은 더욱 커지는 것을 알 수 있다. 따라서, 이음부의 강성이 작은 경우에는 이음부 배치에 주의해야 하며 가능하면 천정부 쪽 배치를 피해야 할 것이다.



5.5 이음부 분할 개수의 변화에 따른 영향

이번 절에서는 이음부 분할 개수가 라이닝 세그먼트의 휨모멘트와 변위에 미치는 영향을 표 5.1의 경우 3과 경우 5의 해석조건에서 알아본다. 경우 3은 라이닝의 반단면을 기준으로 $\phi = 22.5^\circ, 67.5^\circ, 112.5^\circ, 157.5^\circ$ 에 4개의 이음부를 배치한 경우이고, 경우 5는 3개의 이음부를 $\phi = 30^\circ, 90^\circ, 150^\circ$ 에 배치한 경우이다.

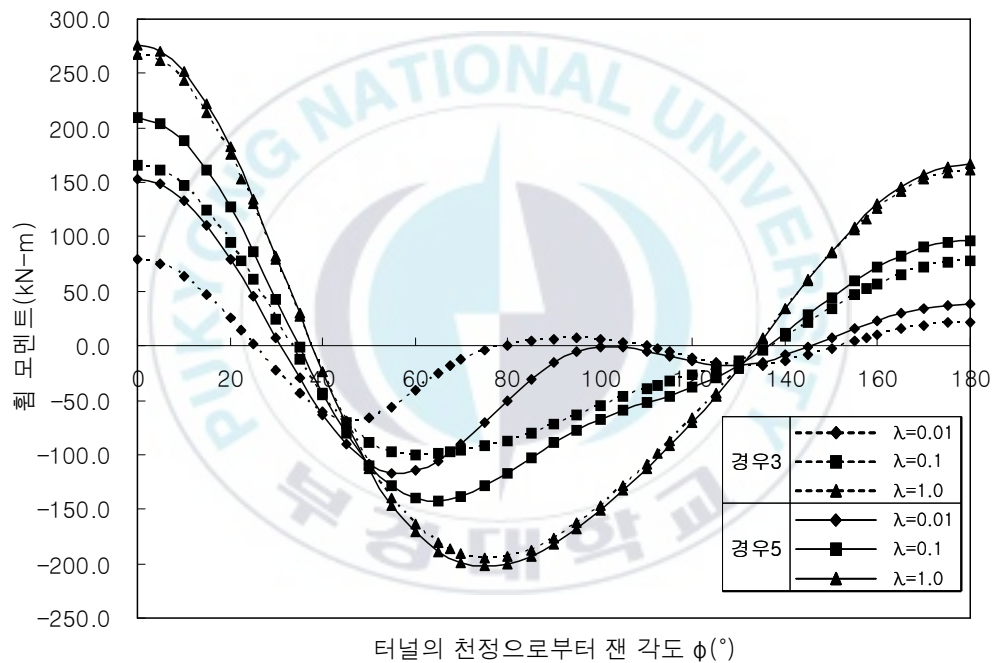


그림 5.10 이음부 분할 개수의 변화에 따른 휨모멘트

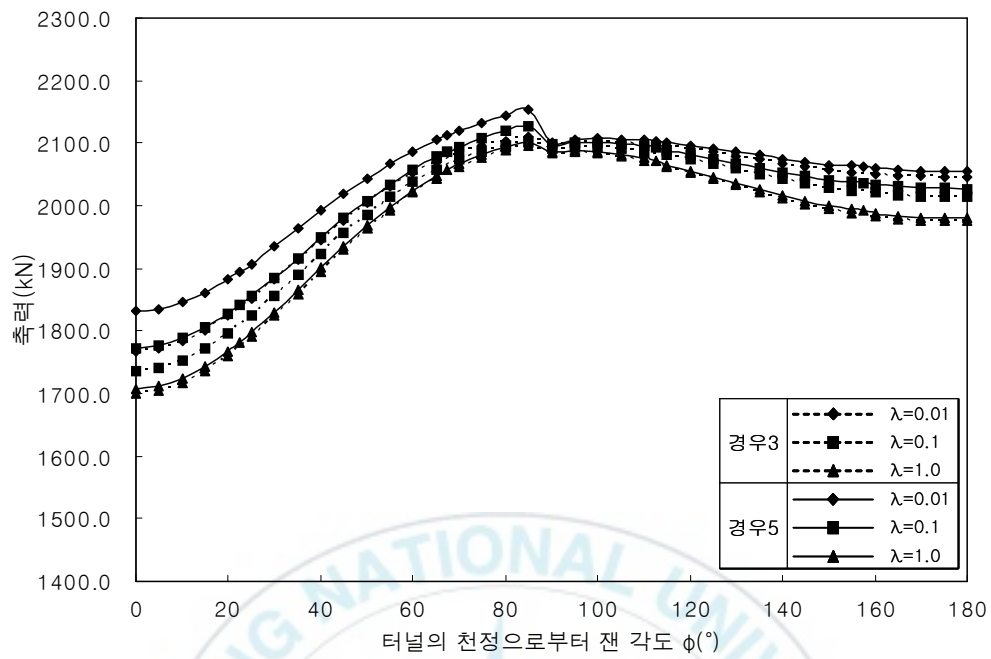


그림 5.11 이음부 분할 개수의 변화에 따른 축력

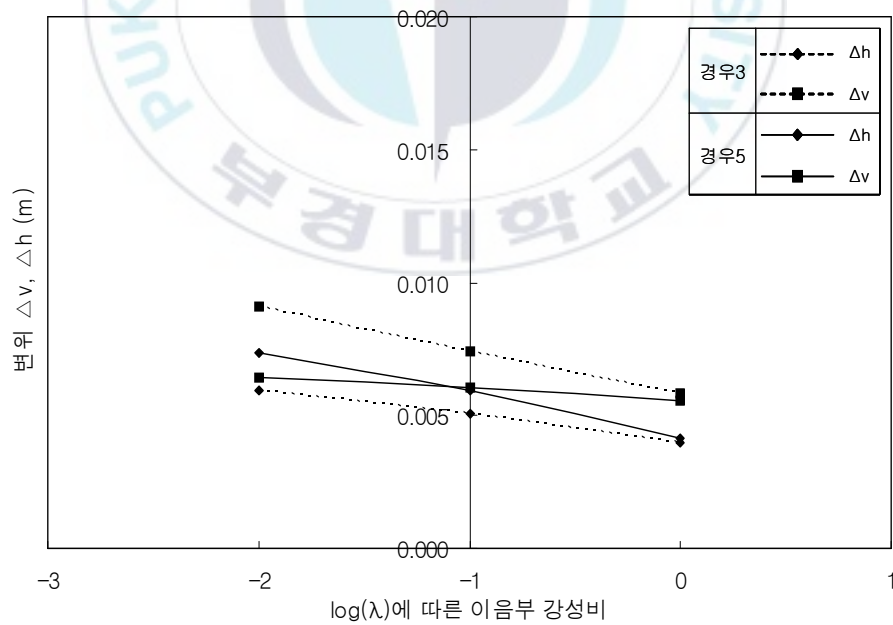


그림 5.12 이음부 분할 개수의 변화에 따른 수평 · 수직변위

그림 5.10 ~ 그림 5.12는 이음부 강성별로 이음부 분할 개수에 따른 라이닝 세그먼트에 발생된 휨모멘트, 축력 및 변위를 보여주고 있다. 그림 5.10에서 보는 바와 같이 휨모멘트는 전체 단면에서 이음부의 강성이 큰 $\lambda=1.0$ 의 경우를 제외하고는 이음부 분할 개수에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 이음부의 개수가 많을수록 휨모멘트의 크기는 라이닝 세그먼트 강성의 저하로 작게 나타났다. 변위의 경우는 그림 5.12에서 보는 바와 같이 이음부의 개수가 많을수록 커졌다. 그러나, 이음부 강성이 큰 $\lambda=1.0$ 의 경우는 이음부의 개수에 관계없이 휨모멘트와 변위의 크기가 전체 단면에서 서로 근사한 값을 보이고 있다.



6. 결론

샐드터널 라이닝 세그먼트는 기본적으로 연속체가 아닌 이음부를 갖는 구조물이다. 이에 따라 샐드터널 라이닝 세그먼트의 부재력은 이음부의 강성, 분할 분포 및 분할 개수에 따라 크게 달라진다. 따라서, 샐드터널 라이닝 세그먼트 설계시 이음부를 반드시 고려해야 한다.

본 연구에서는 샐드터널 라이닝 세그먼트에 대해 이음부 강성, 지반강성, 이음부의 분할 분포 및 분할 개수의 변화에 따른 변수 해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 이음부를 가지는 샐드터널 라이닝 세그먼트에 대하여 현재 실무 설계에 적용되고 있는 구조해석 모델들의 적정성을 평가한 결과, 다양한 설계조건을 만족시키며 해석결과의 정확성을 갖는 모델은 빔스프링 모델(1R)과 전주면빔이음스프링 모델(1R-S0)이었다. 빔스프링 모델(1R)은 해석결과가 이론해와 가장 일치하는 구조해석 모델이나 지반반력의 크기와 적용범위의 정확도에 따라 해석결과가 달라지는 한계성을 가지고 있다. 전주면빔이음스프링 모델(1R-S0)은 해석결과가 이론해와 아주 미소한 차이를 나타낸 구조해석 모델이나 이음부를 고려할 수 있을 뿐만 아니라 지반반력도 압축스프링으로 쉽게 적용할 수 있다. 기 시공된 샐드터널 라이닝에 작용하는 지반반력의 작용범위 및 크기의 산정방법이 명쾌하게 정립되어 있지 않은 실정에서 이용자의 용이성, 현장조건의 적용성, 해석결과의 정확성 측면에서 현재 실무기술 수준에서는 전주면빔이음스프링 모델(1R-S0)이 적절한 모델일 것으로 판단한다.

- 2) 샐드터널 라이닝 세그먼트의 이음부 강성이 클수록 라이닝 세그먼트에

발생되는 휨모멘트의 크기가 증가한다. 그러나 발생하는 축력과 변위는 감소한다. 특히 이음부 강성이 라이닝 세그먼트의 휨강성보다 상대적으로 작을때 변위는 크게 증가한다. 따라서, 최적의 라이닝 세그먼트 단면을 설계하기 위해서는 변위에 대한 제한조건을 만족하면서 가능한 부재력 발생을 최소화할 수 있도록 이음부가 적절한 휨강성을 가지도록 하는 것이 매우 중요하다.

- 3) 본 연구를 통해 이음부를 갖는 라이닝 세그먼트에 발생하는 휨모멘트의 크기는 일정한 크기 이상의 지반강성에서 지반강성의 크기에 관계없이 이음부가 없는 연속체의 라이닝 세그먼트에 발생하는 휨모멘트의 크기에 일정한 비율로 수렴함을 알 수 있었다. 따라서 설계자는 라이닝 세그먼트의 정밀해석을 하지 않고도 최소 이음부 강성을 민감도 해석을 통해 추정할 수 있을 것이다.
- 4) 이음부의 강성이 라이닝 세그먼트의 휨강성보다 작은 경우 측벽부에 비하여 천정부와 바닥부의 휨모멘트 및 천정부 수직변위는 이음부의 분할분포에 따라 큰 영향을 받는다. 특히, 이음부의 강성이 작을수록 그 영향은 더욱 커진다. 따라서, 지표면 침하가 크게 나타나는 연약한 지반에서는 이음부 강성이 작은 라이닝 세그먼트를 사용하였을 경우 수직변위에 큰 영향을 주는 천정부 주위의 이음부 위치 선정에 대하여 주의가 필요하다.
- 5) 이음부 강성이 클수록 전체 단면의 휨모멘트와 변위에 미치는 이음부 개수에 영향은 크지 않다. 따라서 현장 여건상 이음부 개수를 늘려야 할 경우 이음부 강성을 라이닝 세그먼트의 휨 강성보다 크게 하는 것이 합리적인 설계방향일 것으로 판단된다.

참고 문헌

- 삼보 (2003) 분당선 연장선 구조계산서, p.248.
- 서울지하철 (2003) 서울지하철 7호선 연장(운수~부평구청) 703공구 구조계산서, p.193.
- 에스코 (2003) 분당선 연장선 구조계산서, p.250.
- (주)마이다스아이티 (2005) *MIDAS/CIVIL*, (주)마이다스아이티.
- 정경환, 유창도, 조성호, 황부성, 한경태, 김태효, 정두희 (2004) 일본과 국내의 실드세그먼트 경향비교, *한국터널공학회, 정기 학술대회 논문집*, pp.175~196.
- Bull, A. (1944) "Stress in The Linings of Shield-Driven Tunnels", *ASCE TRANSACTION*, No. 2275, pp.443~530.
- Duddeck, H. (1980) "Empfehlungen zur berechnung von tenneln im lockergestein", *DIE BAUTECHNIK*, pp.349~356.
- Einstein, H.H., Schwartz, W. (1979) "Simplified Analysis for Tunnel Supports", *ASCE*, GT4., pp.499~518.
- International Tunnelling Association Working Group No. 2. (2000) "Guidelines for the Design of Shield Tunnel Lining", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 15, No. 3, pp.303~331.
- Japan Society of Civil Engineers (1977) "The design and construction of underground structures", *JSCE*.
- Kansai International Public Relations Promotion Office. (1997) <http://www.kippo.or.jp/culture/gendai/evolving/pho03.htm>.
- Koyama, Y. (2003) "Present status and technology of shield tunneling method in Japan", *Tunnelling and Underground Space Technology*,

Vol. 18, pp.145~159.

Lee, K.M., X.Y., Hou, X.W., Ge., Y., Tang. (2001a) "An analytical solution for a jointed shield-driven tunnel lining", *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, Vol. 25, No. 4, pp.365~390.

Lee, K.M., X.W., Ge. (2001b) "The equivalence of a jointed shield-driven tunnel lining to a continuous ring structure", *Can. Geotech. J.*, Vol. 38, No. 3, pp.461~483.



감사의 글

구조설계연구실에 들어온 지도 벌써 3년이라는 시간이 흘렀습니다. 인생에 있어 또 하나의 시작을 하려는 지금 지난 연구실 생활을 돌이켜 보며 곁에서 지켜 보고, 도움을 주신 분들께 감사의 마음을 글로서 전하려 합니다.

지난 3년여 동안 지도교수로서 다양한 경험과 기회를 제공해 주시고 학문의 길을 가르쳐 주신 이환우 교수님께 먼저 깊은 감사의 인사를 올립니다. 학업연구에 바쁘신 와중에서도 세밀하게 논문을 심사해 주시고, 조언과 충고를 아끼지 않으신 정두희 교수님, 장희석 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

그 동안의 학교 생활을 통하여 인성과 지성을 일깨워 주신 김종수 교수님, 손인식 교수님, 이종섭 교수님, 이동욱 교수님, 이종출 교수님, 이영대 교수님, 김명식 교수님, 정진호 교수님, 김수용 교수님, 국승규 교수님, 이상호 교수님께 진심으로 감사드립니다.

항상 웃음으로 격려해주시며 논문이 완성되기까지 항상 옆에서 많은 도움을 주시고 여려해동안 동고동락한 김광양 형님과 구조설계연구실의 선배님들에게도 감사드립니다. 그리고, 끝까지 학업을 마치지 못해서 아쉽지만 항상 곁에서 지켜봐주신 박유철 부장님에게도 감사드립니다. 항상 곁에서 대학원 생활에 힘이 되어준 친구 고동원, 김희준, 조중식에게도 감사의 마음을 전합니다.

지난 3년동안 저조한 출석에도 불구하고 모임이 있을 때마다 연락해주고 관심 가져주는 'D-1515' 친구들과 힘들 때마다 웃음과 따뜻한 관심으로 힘을 실어준 우리 친구 김성훈, 최원종, 박지은, 양준호에게도 고마움을 전합니다.

항상 못난 동생을 옆에서 챙겨주고 도와준 우리 큰누나 현주, 작은누나 현정에게 감사드리고, 당신보다도 더 아끼시는 못난 아들 때문에 평생을 바치시느라 이제는 흰머리 하얗하신 우리 아버지, 어머니께 깊은 감사를 드리며 이 논문을 바칩니다.