

실드터널 라이닝 사다리꼴 세그먼트의 연결방법 개선에 관한 연구

A Study on the Improvement of Connection for Shield Tunnel Lining Using Trapezoidal Segments

정 형 식^{*1}
Chung, Hyung-Sik

김 도 열^{*2}
Kim, Do-Yeol

김 정 수^{*3}
Kim, Jung-Soo

Abstract

The assemblage of the trapezoidal segments, which is being used increasingly to shield tunnelling, with Guide rod and Dowel forms tunnel lining. In this case the larger the taper angle of trapezoidal segment is, the easier the assembly work becomes. The large angle can reduce the water proof material's phenomenon of being pushed back, but decreases the structural safety in connecting section of tunnel lining.

In this paper a 3-dimensional numerical analysis was performed to estimate the exact behavior of a model shield tunnel made by connecting 3-dimensionally various accessories with irregular sectioned segments. We obtained the operating force of connecting section according to the change of taper angle of trapezoidal segment and sought for improved scheme for connecting section by comparing and analyzing the test results on the friction resistance force of connecting parts.

요 지

실드터널에서 사용이 증가되고 있는 사다리꼴 세그먼트는 연결봉과 연결쇠기를 사용하여 세그먼트를 조립함으로써 터널라이닝을 형성하게 된다. 이 경우 사다리꼴 세그먼트의 테이퍼 각도를 크게 할수록 조립시 공이 용이하고, 또한 지수재의 밀립현상을 줄일 수 있지만 반면 연결부의 구조적 안정성은 감소하게 된다.

*1 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

*2 정회원, 경북대학 토목설계과 전임강사

*3 정회원, 대한주택공사 시험실 과장

본 논문에서는 단면형상이 불규칙한 세그먼트와 여러가지 부속재가 3차원적으로 연결되는 쉴드터널에 대해 현장의 시공과정을 모사하여 3차원 해석을 수행하였으며, 사다리꼴 세그먼트의 테이퍼 각도변화(0° , 10° , 20°)에 따른 연결부의 작용력을 구하여 연결부에 대한 마찰저항력 시험결과와 비교, 분석함으로써 연결부에 대한 개선방안을 모색하였다.

Keywords : Shield tunnelling, Trapezoidal segments, 3-dimensional analysis, Guide rod

1. 서론

쉴드공법은 토사지반, 파쇄대 및 지하수위의 영향이 예상되는 지반에서 효과적으로 적용될 수 있는 터널시공법으로 최근에는 쉴드기계의 성능향상으로 암반층에서도 적용이 가능하게 되었다. 국내에서는 그동안 일부 전력구 및 통신구에서 적용되어 왔으나 외국에 비해 폭넓게 적용되지 못하였으며, 근래에 와서 지하철 터널공사에 적용을 계획하고 있는 등 공공 서비스시설과 도시시설 정비 및 확충에 쉴드공법의 적용은 증가될 것으로 전망된다.

쉴드공법의 지보공으로 설치되는 1차 라이닝은 다양한 형태의 세그먼트(segment)와 연결방법이 이용되고 있다. 이는 터널 시공중 또는 완공 후 터널에 작용되는 하중에 대하여 역학적으로 안전이 확보되어야 하며, 또한 시공성 및 경제성이 있는 복공구조가 되어야 하므로 터널의 심층화와 단면의 다양화에 대응하여 합리적인 세그먼트 구조와 연결방법에 대해 지속적으로 연구개발되어 시공에 적용되고 있다.

본 연구는 최근 국내의 쉴드터널에서 적용되고 있는 플라스틱 연결봉(guide rod)과 연결쇠기(dowel)를 사용하는 사다리꼴 세그먼트 조립방법에 대해 연결부의 안정성을 분석하였고, 또한 시공상 발생하는 문제점에 대한 개선방안을 모색하였다.

연결부의 안정성 분석은 세그먼트 라이닝의 현

장 시공과정을 고려한 3차원 수치해석을 실시하여 연결부의 작용력을 구하고 이를 연결부에 대한 마찰저항력 시험결과와 비교하여 연결부의 구조적 안정성을 분석하였다.

2. 세그먼트의 연결부

2.1 세그먼트 라이닝의 구성 및 연결방법

쉴드터널의 복공은 그림 1과 같이 세그먼트를 결합하여 링(ring)을 형성하며, 이를 터널 굴진에 따라 연결함으로써 터널 라이닝을 형성하게 된다. 일반적으로 세그먼트는 서로 인접하는 링의 세그먼트와 터널 축방향으로 일치하지 않고 엇갈리는 교차구조가 되도록 설치한다.

세그먼트간 연결방법으로는 주로 볼트를 사용하는 강성연결(rigid joint)과 플라스틱 재질의 연결봉을 사용하는 힌지연결(hinge joint)로 구분할 수 있으며, 링간 연결방법으로는 편연결 및 나사체결 방식 등이 사용되고 있다.

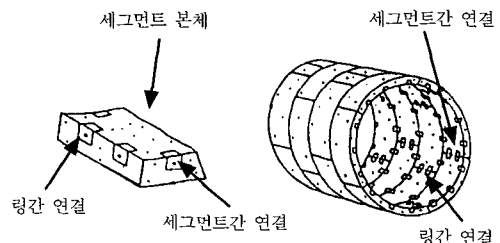


그림 1. 라이닝의 구성 및 연결부 명칭

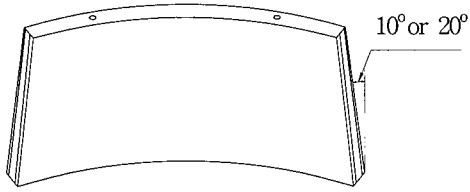


그림 2. 사다리꼴 세그먼트 형상

그림 2의 사다리꼴 세그먼트를 사용하여 터널 라이닝을 형성할 때, 터널의 원주방향연결(세그먼트간 연결)은 연결봉을 사용하고, 터널 축방향 연결(링간연결)은 연결쇠기(dowel)를 사용하여 세그먼트를 조립하게 된다.

2.2 연결부의 문제점 및 개선

세그먼트의 연결부에는 방수를 위해 지수재가 사용되며, 이 지수재는 연결부에서 5mm정도 돌출되어 있으므로 세그먼트 조립시 지수재가 밀려 흠에서 이탈되는 경우가 많다.

따라서 세그먼트의 Taper 각이 큰 사다리꼴 형태가 될수록 조립이 용이하게 되며, 또한 지수재가 밀리는 것을 줄일 수 있으나 이 경우 세그먼트간 연결부에 작용되는 원주상 수직력과 전단력 관계에서 전단력이 커지게 되어 연결부 사이가 미끄러져 불안정한 구조가 될 수 있으므로 마찰저항력이 이를 뒷받침 할 수 있는 한도내에서 Taper 각도를 크게 하면 연결부에서의 문제점을 개선할 수 있다.

본 연구에서는 사다리꼴 세그먼트의 Taper 각도 변화(0°, 10°, 20°)에 따른 연결부의 안정성을 분석하고, 또한 연결부의 마찰저항력을 증대시킬 수 있는 개선방법으로 연결봉을 사용하는 대신에 그림 3과 같이 세그먼트의 측면에 콘크리트의 띠돌기(凸)와 띠홈(凹)을 설치하는 경우에 대해서도 분석하여 단점연결방식의 개선효과를 분석하였다.

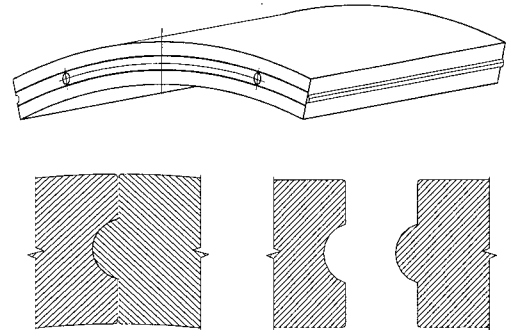


그림 3. 단점연결(띠돌기와 띠홈)

3. 세그먼트 연결부의 마찰저항력 시험

사다리꼴 세그먼트의 연결부에서의 구조적 안정성을 검토하고자 세그먼트간 연결부에 대해 직접전단시험을 실시하였다.

시험으로는 현재 사용되고 있는 방법과 개선된 방법(띠돌기와 띠홈 연결)의 마찰저항력을 비교 분석하기 위해 다음 두가지 경우에 대해 실시하였다.

- ① 연결봉과 세그먼트 접촉면 사이의 마찰 저항력 시험
- ② 세그먼트 띠돌기와 띠홈 사이의 마찰저항력 시험

3.1 공시체 제작

연결봉과 콘크리트 세그먼트 사이의 마찰저항력 시험에 사용된 공시체는 사진 1과 같이 공시체의凸부는 플라스틱 연결봉을 7cm 정도 절단하여 연결봉 직경의 반만 노출되도록 성형하였고, 凹부는凸부를 감싸도록 세그먼트의 설계기준강도(420kg/cm²)와 동일한 콘크리트로 제작하였다.

또한 콘크리트 세그먼트간 마찰저항력 시험에 사용된 공시체는凸부와 凹부가 맞물리도록 사진 2와 같이 성형하였다.

3.2 시험결과 및 분석

연결봉과 세그먼트 접촉면 사이의 마찰저항력 시험결과 수직응력과 전단응력의 관계는 그림 4와 같으며 연결봉과 콘크리트 사이의 마찰각은 22.5°로 측정되었다.

또한 콘크리트 세그먼트간 마찰저항력 시험결과는 그림 5와 같으며, 마찰각은 30.8°로 측정되었다.

4. 세그먼트 라이닝에 대한 3차원 수치해석

4.1 세그먼트 라이닝 구조해석

본 연구에서는 쉘드터널이 한지연결방법으로 조립되는 경우, 3차원 수치해석을 토대로 연결부

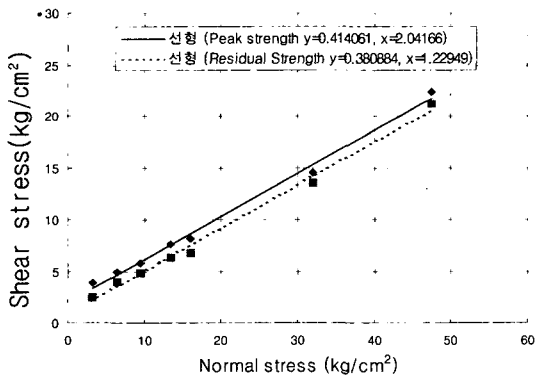


그림 4. 수직응력과 전단응력의 관계 (연결봉과 콘크리트 사이)

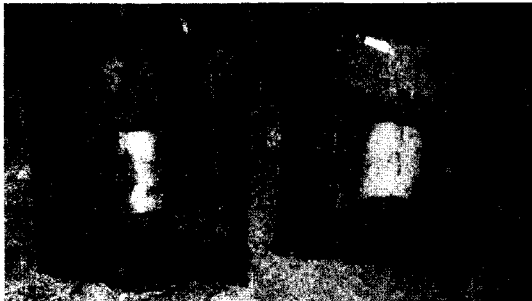


사진 1. 연결봉과 콘크리트 사이의 마찰저항력 시험 공시체

의 작용력을 구하여 현재 사용되고 있는 연결봉방식과 개선방법으로 단접연결방식(떠돌기와 띠흠이음)의 안정성을 비교분석하였다.

4.1.1 해석단면

실제의 시공단면에 대해 제반조건을 적용하여 해석을 실시하였으며, 해석단면은 그림 6과 같다. 시공되는 쉘드터널의 외경은 5.0m이며, 두께 20cm, 폭 1.2m의 세그먼트 6개로 링을 형성하게 되어 있다.

4.1.2 해석조건

세그먼트의 단면형상 변화에 따른 연결부의 거동특성과 안정성을 분석하기 위해 다음의 3가지 경우에 대해 해석을 실시하였다.

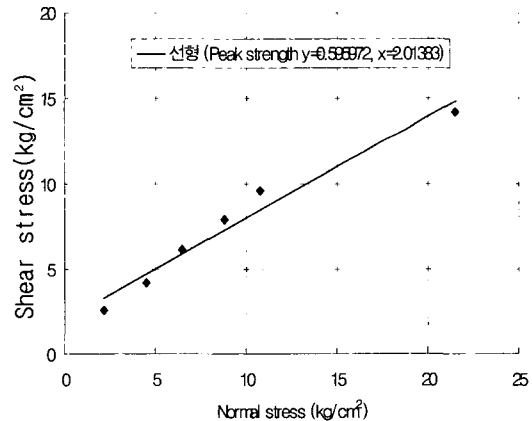


그림 5. 수직응력과 전단응력의 관계 (콘크리트와 콘크리트 사이)

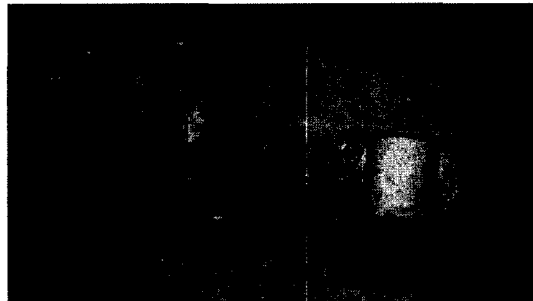


사진 2. 콘크리트와 콘크리트 사이의 마찰저항력 시험 공시체

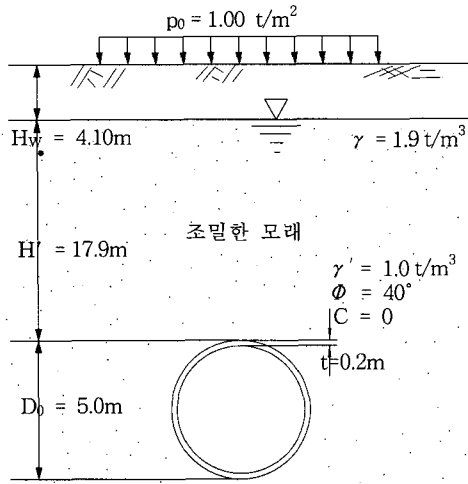


그림 6. 해석에 적용된 지층단면도

- 직사각형 세그먼트의 경우(Taper각이 0°)
 - 사다리꼴 세그먼트의 Taper각이 10° 인 경우
 - 사다리꼴 세그먼트의 Taper각이 20° 인 경우
- 우선 좌우대칭을 이루는 터널형상을 모사하기 위해 직사각형 세그먼트로 이루어진 쉴드터널에 대해서 해석한 후, 직사각형인 세그먼트의 Taper 각을 10° 와 20° 로 증가시켜 세그먼트의 단면형상 변화에 따른 연결부의 작용력 변화와 안정성을 분석하였다.

4.1.3 해석방법 및 모델링

일반적으로 터널해석에 보-스프링 모델이나 연속체 모델이 사용되고 있으나 이는 NATM 터널과 같이 터널을 형성하는 재료가 균질한 경우에는 만족할 만한 결과를 주지만, 쉴드터널에서는 단면형상이 불규칙하고 여러가지 재료가 3차원적으로 연결되므로 2차원 해석만으로는 정확한 거동을 예측하기가 곤란하다. 따라서, 이러한 거동을 효과적으로 나타내기 위해서 범용 구조해석 프로그램인 SAP90을 사용하여 3차원 해석을 수행하였다.

SAP90은 프로그램의 특성상 원형의 터널에 작용하는 하중 뿐만 아니라 지반과 터널 사이의

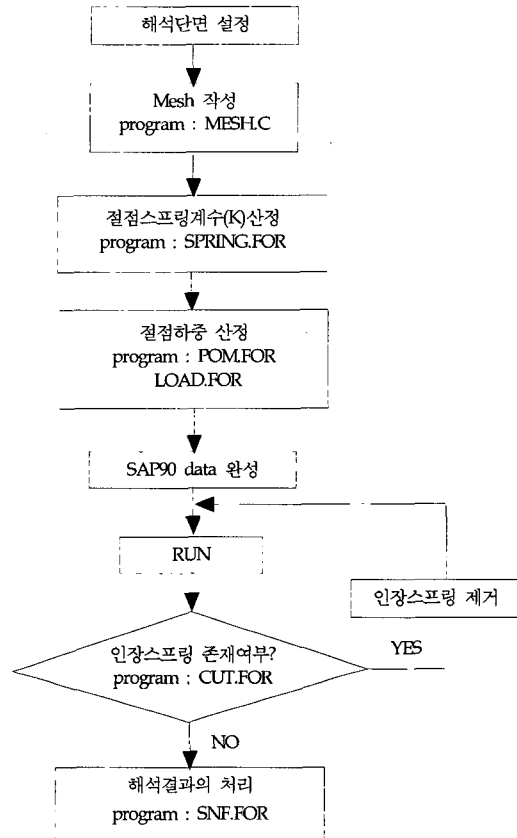


그림 7. 해석흐름도

지반스프링도 절점에만 부여하게 되어 있어 해석을 수행하기 이전에 이러한 일련의 선행작업을 프로그램으로 작성하여 처리하였다.

전체 해석의 흐름도는 그림 7과 같다.

연결부의 구조해석에서 세그먼트는 4절점 쉘 요소(shell element), 링간 연결체는 2절점 보요소(beam element)로 모델링 하였으며, 한 개의 링을 형성하는 세그먼트와 세그먼트 사이의 연결부는 내부인지상대로 모델링하였다.

또한 터널과 지반 사이의 경계조건은 스프링(spring) 요소로 모델링하였으며, 지반 자체는 인장에 저항할 수 없으므로 해석결과에서 링의 변위가 터널 내측으로 발생하는 절점은 스프링을 제거하여 수렴될 때까지 반복적으로 해석을 수행하였다.

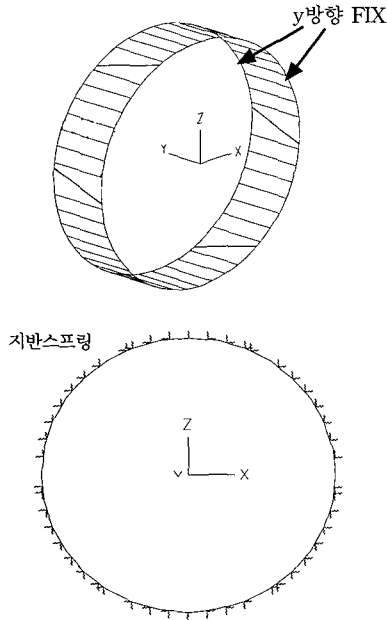


그림 8. 단일링 해석모델

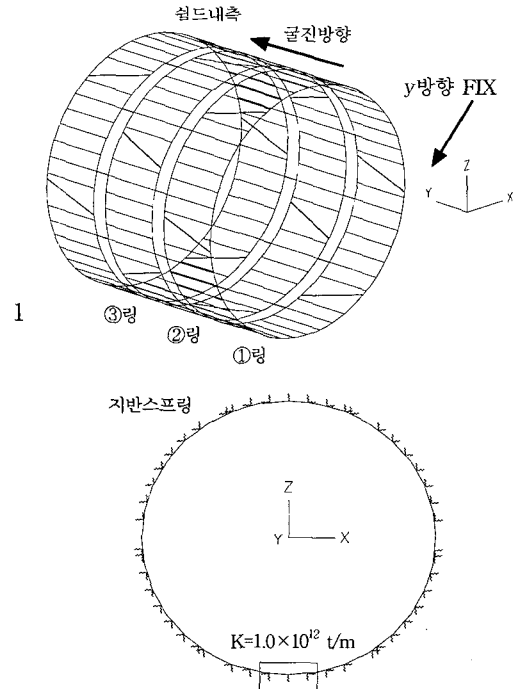


그림 9. 3링 해석모델

세그먼트 조립 완료후 장기적인 구조해석에서는 터널을 구성하는 링과 링 사이는 서로 터널축방향으로 구속되므로 이를 간단히 모사하기 위해 그림 8과 같이 단일링으로 모델링하였으며 모든 절점에서 터널축방향(Y방향) 변위를 구속하였다.

세그먼트 조립 시공중 셴드 내측 세그먼트 연결부에 대한 구조해석에서는 세그먼트 조립시 최악의 조건으로 조립책의 유압이 상실되어 책의 추력이 제거될 때 가장 위험한 상태가 되므로 이 경우에 대하여 현장의 시공상황을 모사하기 위해 그림 9와 같이 3개의 링으로 모델링하였다.

셴드 외측 ①링의 단부는 모든 절점에 대해 터널축방향(Y축방향) 변위를 구속하였으며, 셴드 내측 ③링의 단부는 책의 추력이 제거된 경우로 보아 구속조건은 두지 않았다

4.1.4 해석에 적용된 물성치

수치해석에 적용된 콘크리트 세그먼트 및 연결

표 1. 해석에 적용된 물성치

구분	탄성계수 (tf/m^2)	단면2차 모멘트 (m^4)	단위중량 (tf/m^3)	포아손비
세그먼트 (콘크리트)	3.3×10^6	0.8×10^3	2.6	0.167
연결책기	7.0×10^5	1.086×10^6	-	-

책기의 물성치는 다음 표 1과 같다.

4.1.5 지반의 스프링계수(K) 산정

터널과 지반 사이의 스프링계수(K)는 터널 주변 지반의 지반반력계수(K_s)를 $5,000 \text{ t/m}^3$ 인 지층으로 설정하여 요소(Element)의 단면적을 고려하여 각 절점에서의 스프링계수를 산정하였다.

각 절점에서의 스프링계수는 별도의 프로그램을 작성하여 절점과 연계되어 있는 요소의 단면적을 고려하여 터널 방사선방향의 스프링계수를 계

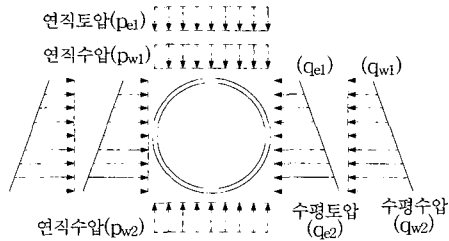


그림 10. 원공후 안정성 검토에 적용된 하중분포도

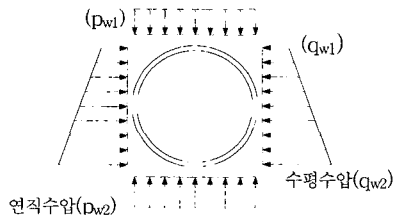


그림 11. 시공중 안정성 검토에 적용된 하중분포도

산하여 전체좌표계(X, Z축방향)로 환산하여 입력하였다. 또한 쉘드내측의 하단부는 쉘드기와 세그먼트가 접촉되어 침하가 발생하지 않으므로 하부의 3개 절점은 수직방향(Z방향)의 스프링계수를 $K=1.0 \times 10^{12} \text{ton/m}$ 의 값으로 입력하였다.

4.1.6 적용하중

쉘드 내측에서 조립된 링은 굴착이 진행됨에 따라 쉘드기 외부로 배출되며 쉘드기에서 방금 배출된 링에는 터널 축방향 및 직각방향으로 아칭효과(arching effect)가 발생되어 원지반의 토압이 작용되기 전에 먼저 수압이 작용하게 되며 계속적으로 터널공사 진행됨에 따라 점차 원지반의 토압이 링에 작용하게 된다.

연결부의 구조해석에 적용한 하중은 표 2와 같이 세그먼트 조립 완료후 장기적인 안정성 검토에는 세그먼트 단일링에 대해 원지반의 토압 및 수압을 고려하여 해석을 실시하였고(그림 8 & 그림 10 참조), 세그먼트 시공중 안정성 검토에는 현장의 시공상황을 고려하여 쉘드 외부로 배출된 ①&

표 2. 적용하중

구분	해석방법	적용하중	
완공후	단일링 해석	토압+수압+자중	
시공중	3링 해석	① & ②링	수압+자중
		③링 (쉘드내부의 링)	자중

표 3. 하중강도

구분		하중강도 (tf/m ²)	
연직 하중	상부	토압 (p _{e1})	10.000
		수압 (p _{w1})	17.900
	(p _{e1} +p _{w1})×1.2m		33.480
	하부	수압 (p _{w2})	22.900
수평 하중	상부	토압 (q _{e1})	3.535
		수압 (q _{w1})	18.000
		(q _{e1} +q _{w1})×1.2m	
	하부	토압 (q _{e2})	5.215
		수압 (q _{w2})	22.800
(q _{e2} +q _{w2})×1.2m		33.618	

②링에는 자중과 수압을, 쉘드 내부에 있는 ③링에는 단지 자중만 고려 하였다(그림 9 & 그림 11 참조).

터널상부의 수직토압은 Terzaghi의 이완토압을 산정하여 적용하였으며, 해석에 적용한 하중강도는 표 3과 같다.

해석에서 하중입력은 등분포하중인 토압 및 수압을 절점하중으로 환산하여 전체좌표계(X, Z축방향)로 입력하였다.

4.2 해석결과 분석

4.2.1 원공후에 대한 해석결과 및 안정성 분석

세그먼트 조립이 완료되고 장기적인 하중이 작용할 때 연결부에 작용하는 전단력, 수직력, 축력의 분포를 Taper 각이 10° 인 경우에 대해 대표적으로 나타내면 그림 12와 같고, 세그먼트의 단면형상별 연결부의 작용력을 정리하면 표 4와 같다.

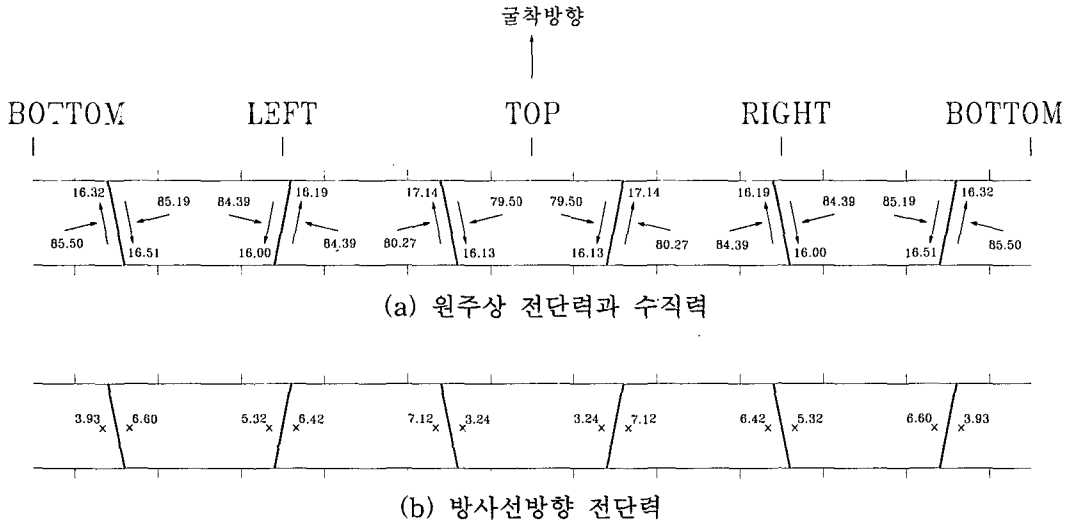


그림 12 세그먼트의 연결부에 작용하는 원주상 전단력과 수직력, 방사선방향 전단력(Taper 각도 10° 인 경우, 원공휘)

표 4. 원공휘 세그먼트간 연결부의 전단력 및 수직력 (단위:ton)

구 분	세그먼트 Taper 각도			
	0° 직사각형	10° 사다리꼴	20° 사다리꼴	
원주상	전단력(T_c)	0.00	17.14	26.66
	수직력(P_c)	81.15	80.27	77.53
	위치	상부	상부	상부
방사선 방향	전단력(T_r)	7.10	7.12	7.12
	수직력(P_r)	82.14	80.27	77.53
	위치	상부	상부	상부

해석결과 세그먼트의 Taper각이 커질수록 터널의 원주상으로 작용되는 전단력이 증가하였고 상대적으로 세그먼트의 수직력은 감소하는 것으로 나타났으며, 터널 방사선방향의 전단력은 세그먼트의 형상에 따라 큰 변화를 보이지는 않았다.

세그먼트간 연결부의 안정성은 그림 13(a)에서 보는 바와 같이 터널의 원주방향 전단력과 수직력의 크기에 관계되는데, 현재 사용되고 있는 Taper 각이 10° 인 사다리꼴 세그먼트는 전단력(T_c)이 17.14ton, 수직력(P_c)이 80.27 ton이 작용하며, 연결봉과 세그먼트 사이의 접촉면 마찰각(ϕ) 20° 를 적용하여 안정성을 검토해 보면 마찰저항력 ($S=P_c \tan \phi = 80.27 \times \tan 20$)은 29.22 ton이므로 안전율($FS=S/T_c=29.22/17.14$)이 1.70으로 서 안정한 것을 알 수 있다.

그러나 세그먼트의 Taper 각도를 20° 로 확장했을 경우 전단력은 26.66 ton, 수직력은 77.53 ton이 작용되며, 마찰저항력 ($S=P_c \tan \phi = 77.53 \times \tan 20$)은 28.22 ton이므로 안전율($FS=S/T_c=28.22/26.66$)이 1.06으로 테이퍼 각이 커짐에 따라 안

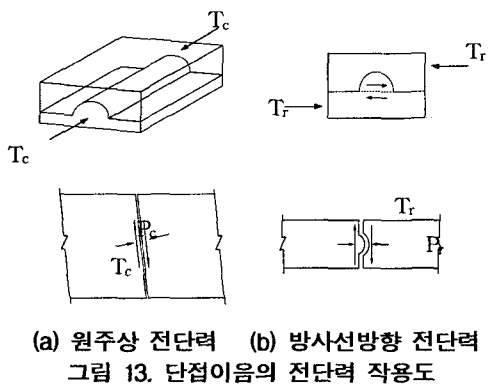


표 5. 연결방식별 원주상 전단에 대한 안전율 (원공후)

구 분	세그먼트 Taper 각도	
	10°	20°
연결봉 방식	FS = 1.70	FS = 1.06
단접연결 방식	FS = 2.61	FS = 1.68

표 6. 세그먼트간 연결부의 전단력과 수직력 및 링간 연결부의 전단력과 축력 (시공중, 쉴드내측)

구 분			세그먼트 Taper 각도		
			0° 직사각형	10° 사다리꼴	20° 사다리꼴
세그 먼트간 연결부	원주상	전단력(T_c)	0.00	0.30	0.39
		수직력(P_c)	3.03	1.34	1.06
		위치	—	좌측벽부	좌측벽부
	방사선 방향	전단력(T_r)	0.33	0.32	0.34
		수직력(P_r)	0.22	0.24	0.26
		위치	상부	상부	상부
링간 연결부	전단력(T_l)	4.20	2.18	1.75	
	인장력(P_l)	1.68	1.29	1.71	
	압축력(P_a)	1.68	1.29	1.71	

표 7. 세그먼트간 연결부의 전단력과 수직력 및 링간 연결부의 전단력과 축력 (시공 중, 쉴드외측)

구 분			세그먼트 Taper 각도		
			0° 직사각형	10° 사다리꼴	20° 사다리꼴
세그 먼트간 연결부	원주상	전단력(T_c)	2.76	13.49	21.62
		수직력(P_c)	62.46	60.72	58.45
		위치	하부	우측벽부	우측벽부
	방사선 방향	전단력(T_r)	6.29	6.82	6.85
		수직력(P_r)	62.46	61.63	59.67
		위치	하부	하부	하부
링간 연결부	전단력(T_l)	3.72	4.75	5.10	
	인장력(P_l)	1.06	2.41	2.20	
	압축력(P_a)	1.22	2.46	2.34	

정성이 감소하였으며, 본 연구에서 제안한 단접연결 방식(띠돌기와 띠흠 이음)의 접촉면 마찰각 30°를 적용하여 안정성을 검토하면 마찰저항력이 44.76 ton($S=P\tan\phi=77.53\times\tan30$)이므로 안전율($FS=S/T_c=44.76/26.66$)은 1.68로 계산되며, 시공성을 위해 세그먼트의 Taper 각도를 20°로 확장하여도 안정성을 확보할 수 있는 것으로 분석되었다.

세그먼트의 연결방법과 Taper각도 변화에 따른 연결부의 안전율을 정리하면 표 5와 같다.

터널 방사선방향의 전단력은 그림 13(b)에서 보는 바와 같이 세그먼트 즉, 콘크리트의 허용전단응력 ($0.25\sqrt{\sigma_{ck}}=0.25\sqrt{420}=5.123\text{kg/cm}^2$)인데, Taper각이 10°와 20°인 경우 방사선방향의 상대 전단력(T_r)은 각각 3.88 ton, 3.89 ton이므로 전단응력(전단력/단면적=3880kg/(120cm×8cm))은 4.04kg/cm², 4.05kg/cm²이 발생되어 콘크리트의 전단강도는 충분한 것으로 검토되었다.

4.2.2 시공중에 대한 해석결과 및 안정성

쉴드터널 시공중 연결부에 작용하는 전단력, 수직력, 축력의 분포를 Taper 각이 10°인 경우에 대해 대표적으로 나타내면 그림 14(a),(b)와 같으며, 세그먼트의 단면형상별 연결부의 작용력을 쉴드 내측과 외측의 연결부에 대해 구분하여 정리하면 표 6, 표 7과 같다.

쉴드기 외측의 연결부는 내측의 세그먼트 링에 의해 구속되어 이탈이 억제되므로 쉴드기 내측의 연결부에 대해 안정성을 검토하였다.

현재 사용되고 있는 Taper 각이 10°인 사다리꼴 세그먼트의 연결부에 작용하는 터널 원주방향 최대 전단력(T_c)은 0.3 ton, 수직력(P_c)은 1.34 ton 작용하며 연결봉 사용시 마찰저항력 0.49 ton($S=P\tan\phi=1.34\times\tan20$)과 비교해 볼 때 안전율($FS=S/T_c=0.49/0.3$)이 1.63으로 안정한 것으

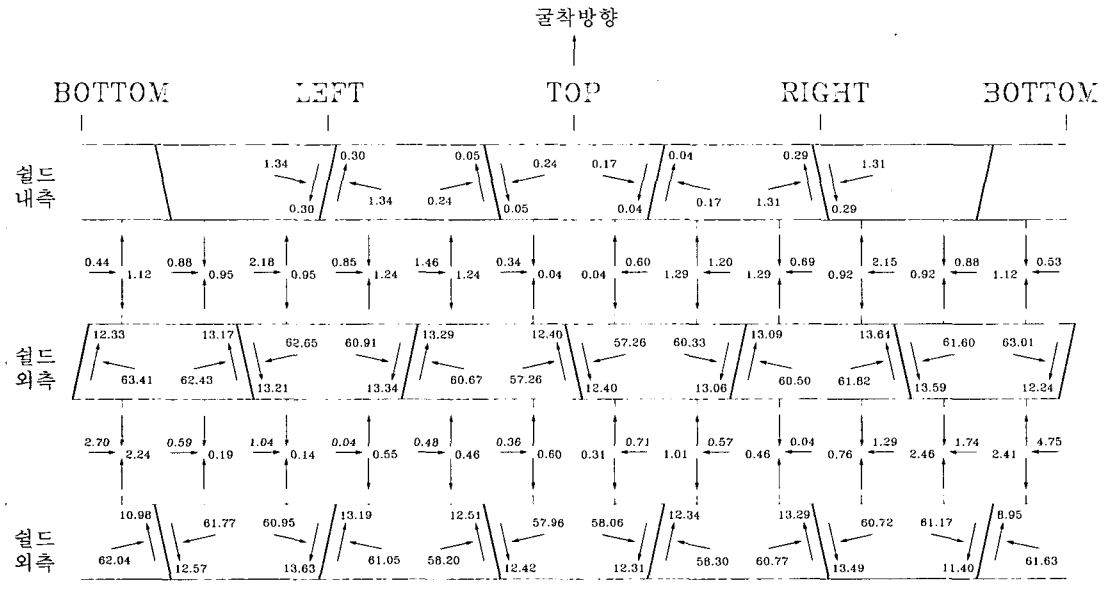


그림 14(a) 세그먼트의 연결부에 작용하는 원주상 전단력과 수직력, 링간 연결쇄기에 작용하는 전단력과 축력 (Taper 각도 10° 인 경우, 시공중)

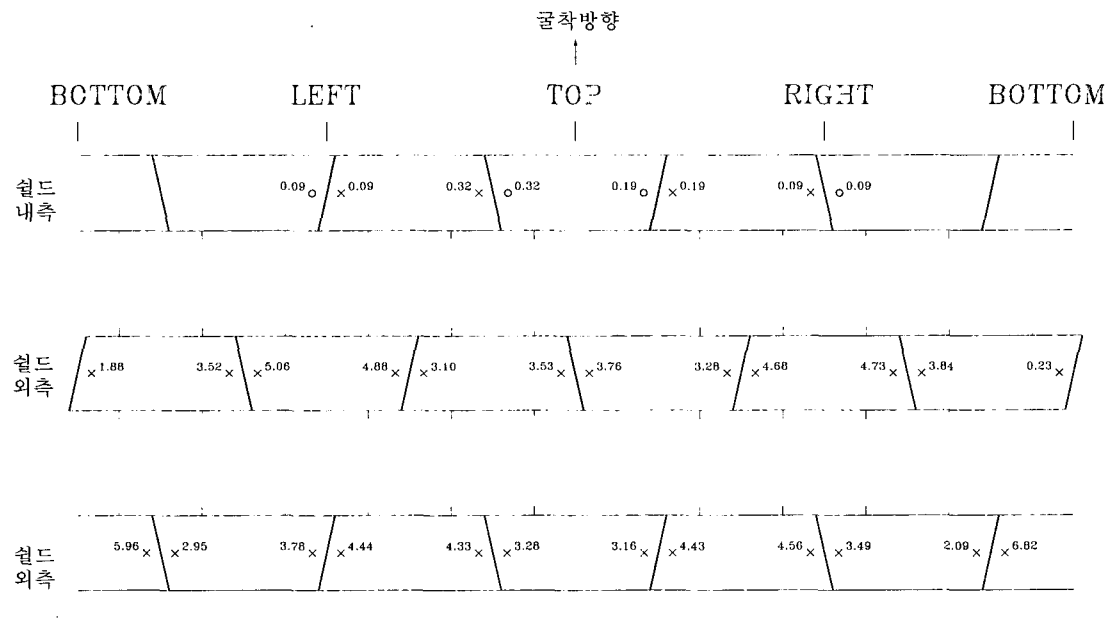


그림 14(b) 세그먼트의 연결부에 작용하는 방사선방향 전단력 (Taper 각도 10° 인 경우, 시공중)

표 8. 연결방식별 원주방향 전단에 대한 안전율 (시공중)

구 분	세그먼트 Taper 각도	
	10°	20°
연결봉 방식	FS = 1.63	FS = 1.0
단접연결 방식	FS = 2.58	FS = 1.56

로 검토되었다.

그러나 Taper각이 20°인 사다리꼴 세그먼트에서는 터널 원주방향의 최대전단력(T_c)은 0.39 ton, 수직력(P_c)은 1.06ton이 작용하며 연결봉 사용시 마찰저항력($S=P_c \tan \phi = 1.06 \times \tan 20$) 0.39 ton과 비교해 볼 때 안전율($FS=S/T_c=0.39/0.39$)은 1.0으로 안정성 확보가 어려운 것으로 검토되었으며, 본 연구에서 제안한 단접연결 방식(띠돌기와 띠홈)의 마찰각 30°를 적용하면 마찰저항력이 0.61 ton($S=P_c \tan \phi = 1.06 \times \tan 30$)이므로 안전율($FS=S/T_c = 0.61/0.39$)은 1.56 이므로 안정성을 확보할 수 있는 것으로 분석되었다.

세그먼트의 연결방법과 Taper각도 변화에 따른 연결부의 안전율을 정리하면 표 8과 같다.

터널 방사선방향의 전단력은 단지 세그먼트의 자중에 의해 발생되므로 전단력의 크기는 작았으며 Taper각이 10° 와 20° 인 경우 각각 0.32 ton, 0.34 ton 이 작용하여 전단응력은 0.133kg/cm², 0.142kg/cm²으로 콘크리트의 허용전단응력과 비교해 볼 때 안전한 것으로 검토되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 쉘드공법에서 사다리꼴 세그먼트를 연결부속재를 사용하여 조립하는 경우 연결부에서의 안정성을 분석하였으며, 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 연결부에 대한 시험결과 연결봉과 세그먼트 사이의 마찰각은 약 20°로 측정되었으며, 연결봉 대신에 반원형의 띠돌기(凸)와 띠홈(凹)을

세그먼트 전 폭에 걸쳐 설치할 경우 마찰각은 약 30°로 측정되었다. 따라서 세그먼트 연결부를 단접연결(띠돌기와 띠홈 이음)로 하면 세그먼트간 연결부의 마찰력을 증가시킬 수 있다.

- 2) 세그먼트의 Taper 각도 변화에 따른 연결부의 작용력을 분석해 본 결과, 세그먼트의 이음각(Taper각)을 크게 할수록 원주방향의 전단력은 커지고, 반면 수직력은 작아져서 연결부의 안정성이 감소하는 것으로 분석되었다.
- 3) 시공성 및 지수재의 밀림을 줄이기 위해 사다리꼴 세그먼트의 테이퍼 각을 20°로 확대 할 경우 플라스틱 연결봉의 마찰저항력이 적어 안정성 확보가 어려운 것으로 분석되었으며, 단접연결(띠돌기와 띠홈연결)에서는 Taper 각을 20°로 증가시켜도 안정성을 확보할 수 있는 것으로 분석되었다.

참 고 문 헌

1. 한양대학교 건설연구소(1997), 쉘드터널 라이닝 세그먼트의 연결방법 개선에 관한 연구, (주)한국실업, pp.1-121.
2. 한양대학교 건설연구소(1997), 한국전력 신당-한남간 및 영서-영등포간 전력구 터널 세그먼트 부속재 평가에 관한 연구, (주)엘지이엔씨, pp.59-91.
3. 한국건설기술연구원(1997), 쉘드터널용 사다리꼴 세그먼트의 효율성 평가, (주)한국실업, pp.51-127.
4. 선경건설(주)(1996), 154 KV 신당-한남간 지중 T/L 전력구 건설공사 세그먼트 라이닝 설계 검토서.
5. 쉘드공법의 실제(1992), 창우출판, pp. 117
6. 터널/토지조성(1998), 도서출판 과학기술 pp.99-100
7. 한국전력공사(1993), 마산-수출 지중 송전 전력구 건설공사 실시설계 보고서, pp. 217-254.
8. 건설교통부(1996), 터널공사 표준시방서(안), pp.156-173.
9. 한국산업규격 KS F 2403(1995), 콘크리트의 강도시험용 공시체 제작방법.
10. 한국산업규격 KS F 2405(1992), 콘크리트의 압축강도 시험방법.
11. 대한건설협회(1991), 한·일 건설협력 협의회, 건설기술 세미나, pp.21-64.
12. 한국지반공학회(1996), 지반공학시리즈7. 터널, pp.

- 358-365.
13. 建設産業調査會(1988), 最新 トンネル工法・機材便覽, pp241-374
 14. 土木學會(1989), トンネル 標準示方書(シルト編)・同解説, pp25-76.
 15. Maidl B., Herrenknecht M., Anheuser L. (1996),

- Mechanised Shield Tunnelling, Ernst & Sohn, pp.116-173.
16. Edward L. Wilson & Ashraf Habibullah (1991), SAP90 Structural Analysis Users Manual, COMPUTERS & STRUCTURES INC.

(접수일자 1999. 9. 10)