3차원 수치해석을 통한 개착터널내 단면변화구간의 손상미케니즘 연구

박재영^{1*}, 손정훈², 박광림³, 오영석⁴

A study on damage mechanism of transition section in cut and cover tunnel using 3 dimensional numerical analysis

Jae-Young Park, Jeong-Hun Son, Kwang-Lim Park, Young-Seok Oh

ABSTRACT This study made progress about Damage Mechanism of Transition Section in Cut and Cover Tunnel. For this study, Inspection and test was carried out about Transition Section. After this process, Numerical Analysis was accomplished by 2D, 3D. A result of inspection and test, It couldn't find the reason why the upper slab Damage was detected. So 2D Numerical Analysis was conducted. It was analyzed that the Safety Factor(1.0) was satisfied in 2D. But, the result of 3D Numerical Analysis, The reason was found that the Damage on upper slab was caused by moment change. The Moment was changed by column interval transition. For Retrofitting, Column was added under slab in tunnel. It was found that the addition column decreased upper slab deformation. After this study, It could be find that are important 3D Numerical Analysis as well as 2D Numerical Analysis in case of Transition Section. This Study can help developing construction and maintenance about Tunnel. Finally, It's going to study Retrofitting plans which have minimum influence of Transition Section in Cut and Cover Tunnel.

Keywords: Damage Mechanism, 3D FEM, Transition Section, Maintenance, Retrofitting plan

요약 본 연구는 터널의 단면변화구간에서 발생한 손상 미케니즘에 대하여 이루어졌다. 이를 위해 단면변화 구간을 대상으로 다양한 현장조사 및 시험을 실시하였으며, 이를 바탕으로 2차원 및 3차원 수치해석을 수행하였다. 현장조사 및 시험 결과, 슬래브 손상에 대한 직접적인 원인을 찾을 수 없었으며, 2차원 수치해석을 수행한 결과 기준 안전율(1.0)을 만족하는 것으로 분석되었다. 추가로 수행한 3차원 수치해석 결과, 기둥 간격의 변화에 따라 슬래브 휨응력 변화를 전달시키지 못해 손상이 발생한 것으로 분석되었다. 보강을 위해 터널내 기둥을 추가하는 방안을 적용하였으며 그 결과, 상부 슬래브 비틀림 형상이 완화된 보강 효과를 확인할 수 있었다. 단면 변화 구간의 경우 2차원 뿐만 아니라, 3차원으로 영향범위를 고려하여 설계에 반영한다면, 합리적이고 안정적으로 건설 및 유지관리가 가능할 것으로 판단된다. 추후에는 개착터널내 단면변화 구간에서 구조물에 영향을 최소화할 수 있는 보강방안에 대해 연구를 계속하고자 한다.

주요어: 손상 미케니즘, 3차원 수치해석, 단면변화, 유지관리, 보강방안

Received on November 6, 2012, Revised on November 18, 2012, Accepted on November 23, 2012.

¹정회원, 한국시설안전공단 대리

²비회원, 한국시설안전공단 사원

³비회원, 한국시설안전공단 과장

⁴정회원, 한국시설안전공단 팀장, 공학박사, 기술사

*Corresponding author: Jae Young Park, ids0130@kistec.or.kr

---

1. 서 론

우리나라 국토의 70%이상이 산악지형에 속하여 철도, 도로 등의 건설을 위해 터널은 필수적인 구조물이 되었다. 또한 대도시 등 밀집지역에서 환승 및 정비역사 등이 지하로 건설되는 추세에 있다. 이에 따라 터널이 점차 장대화, 대단면화 되고, 단면 변화 구간이 과거에 비해 점차 증가하고 있어 이는 구조적으로 취약한 부분이 될 수 있다. 본 연구에서는 터널 내 단면변화 구간에서 발생된 손상에 대하여 다각적으로 연구하고자 하였으며, 2차원 및 3차원 수치해석을 통해 구조적 결함에 대한 원인 및 대책에 대하여 분석하고자 한다.

2. 연구동향

터널 3차원 수치해석 연구는 굴착에 따른 응력-간극수압의 변화에 따라 기존 지하철터널을 3차원으로 안정을 수행한 경우가 있으며(공병승, 2009), 토피고 변화에 따라 Liner plate의 최대변위와 최대축응력을 분석하여 토피고에 따른 도심지 소구경 터널의 공학적 거동특성(정지수 등, 2012)을 연구, 2-Arch 터널의 거동 특성을 3차원 수치해석을 통해 시공 중 변위 및 슛크리트 라이닝 응력변화 경향을 연구(유충식 등, 2009)한 사례가 있다. 또한 터널 손상의 경우, 덕트슬래브의 종방향 균열에 대한 원인 분석(박성우 등, 2012), 주변지반 변형에 따른 터널 라이닝의 균열(Wang, 2010), 강섬유 혼입 여부에 따른 터널라이닝의 건조수축 균열(Mashimo, 2006), 터널이 아닌 구속된 슬래브에서의 건조수축 균열(Weiss, 1998) 등의 연구 사례는 있으나, 터널 단면변화 구간에 발생한 손상 미케니즘을 2, 3차원 수치해석을 통해 연구한 사례는 전무한 실정이다.

3. 변상현황 조사 및 분석

터널 내 발생한 손상이 구조적인 손상일 경우 유지관리상의 내구성 저하와 관련되어 많은 문제점이 나타나게 되므로 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(터널)(한국시설안전공단, 2009)에 따라, 상세 외관조사 및 각종 시험을 통하여 구조적인 손상인지 비구조적인지를 판단하고자 하였다.

3.1 구조물 및 주변환경

본 연구의 구조물은 박스형태이며, 3련 박스에서 유치선 구간으로 단면이 변화하는 형상이다 (Table 1). 토피고는 약 8.0 m정도이고 지상부에는 편도 2차로의 도로가 위치해 있다. 흑운모

화강암을 기반암으로 하여 지표로부터 표토(매립)층, 퇴적층, 잔류토층, 풍화암층, 연암층 등의 순으로 이루어져 있으며, 특히 터널통과 지층인 연암층의 경우 깊은 심도까지 매우 불규칙한 풍화도 및 암질상태가 나타나는 등 경연이 반복되고 균열 및 파쇄가 심한 것으로 조사되었다(Fig. 1).

Table 1. Actual Condition.

Structure Type	Box
Method of Construction	Excavation
Completion Year	1996
Upper Form	Farmland
Transition Section	3 way→car storage track
Superstructure	Soil backfill

Fig. 1. Topography and geology.

3.2 균열 조사

전체적으로 균열발생밀도가 높고 균열폭 0.2 mm 이하의 초기 경화 및 건조수축, 수화열 관리 미흡으로 인한 균열이 대부분이다. 반면 일부 균열폭이 큰 균열은 단면변화부에서 사방향으로 조사되었으며, 기둥의 배열이 바뀌는 부분, 단면의 형태가 크게 바뀌는 부분(3련박스에서 유치선구간으로 변동되는 구간)에서 발생했다(Photo 1). 육안조사 결과로는 사방향 균열에 대하여 특이사항을 인지하지 못하였다.

Photo 1. Slab Cracking.

Photo 2. Exposure of rebar.

3.3 누수 및 백태, 배수로

검토 구간에서 누수 및 백태 발생은 미미한 것으로 조사되었다. 배수로 상태 역시 전반적으로 양호하나 일부구간 구배가 완만한 경우 부분적으로 체수 및 이물질의 퇴적이 조사되었다.

3.4 철근노출 및 재료분리

철근노출은 어떤 일관된 특징없이 불규칙하게 조사되었으며, 일부 구간에서는 주철근이 노출된 구간도 조사되었다. 조사된 철근은 대부분 부식 및 콘크리트 박락을 동반하고 있으며, 피복두께가 대부분 설계기준을 만족하지 못하고 탄산화가 철근까지 진행되었다(Photo 2). 또한 재료분리는 국부적으로 존재하였으나, 전체적으로 볼 때 콘크리트의 표면에 기공이 존재하는 등 품질이 좋지 못하다.

3.5 콘크리트 추정 비파괴 강도

본 구간의 비파괴 강도는 KS F 2730에 따른 콘크리트 압축강도 추정을 위한 반발경도시험을 실시하였으며, 아래 Table 2과 같이 설계기준강도의 128%로 설계기준강도 이상을 확보하고 있는 것으로 조사되었다.

Table 2. Strength of Concrete (MPa).

Division	Estimation of strength (A)	Standard (B)	(A) / (B) *100%
Box	30.7	24.0	128%

Table 3. Quality of Concrete thru Ultrasound.

Division	Velocity of Ultrasound(km/sec)		Estimation of strength (MPa)	Grade of judgment
	Surface Vi	Direct Vd (Vi*1.05)		
Box	3.184	3.344	21.9	c

KS F 2731에 따른 콘크리트 압축강도 추정을 위한 초음파 펄스 속도 시험 방법을 이용하여 콘크리트 품질평가를 실시한 결과, 위의 Table 3과 같이 콘크리트의 품질상태는 대부분 c등급으로 품질이 다소 양호하지 못한 「검사를 요함」 것으로 평가되었다.

3.6 철근탐사 시험

KS F 2734에 따라 전자기유도법에 의한 철근 탐사 시험을 실시한 결과는 Table 4와 같으며 국부적으로 철근이 노출되거나 피복두께가 설계도면을 만족하지 못하는 개소가 일부 조사되었으며, 배근간격은 설계도면과 비교하여 볼 때 일부 간격이 좁거나 넓은 곳이 조사되었다. 이는 시공당시

철근의 배근과 거푸집 설치시 정밀시공 미흡으로 인해 철근배근 위치의 국부적 이동에 기인한 것으로, 최소한 설계상의 단위 m당 철근량은 확보하고 있다.

Table 4. Radar Detection in R.C.

(Unit: mm)

Interval of main reinforcement		Interval of distribution bar		Thickness of cover concrete	
Design	Detection	Design	Detection	Design	Detection
125	90~110	150	130~160	39	55

3.7 철근부식도 시험

KS F 2712에 따라 부식의 진행이 의심되는 부위 1개소를 선정하여 콘크리트 내부 철근의 반전지 전위 시험을 실시한 결과는 Table 5와 같다. 부식등급이 I(90% 이상 확률로 부식 없음)등급으로 판정되었으며, 박락이 발생하여 철근표면에 부식이 진행된 상태이나 표면적으로 나타난 철근노출로 주변의 철근부식은 없는 것으로 조사되었다.

Table 5. Corrosion degree.

Division	Distribution (%)		
	-200 < E	-350 < E ≤ -200	E ≤ -350
Corrosion	100	0	0

Table 6. Result of chloride test.

Depth(mm)		Conversion of chloride(kg/m ³)
Surface	0~15	0.715
Cover	15~30	0.290

3.8 염화물 함유량 시험

코어를 채취하여 깊이별로 염화물 함유량에 대한 실내시험을 실시한 결과, 위 Table 6과 같으며 허용 기준을 만족하는 것으로 평가되었다.

3.9 탄산화 시험

KS F 2596에 따라 콘크리트 탄산화 깊이를 측정하였으며, Table 7과 같이 본 시설 및 부대시설에 대한 탄산화 진행은 일부개소를 제외하고는 대부분 공용년수에 비해 탄산화 진행속도가 늦은 것으로 분석되었으며, 잔여깊이에 대한 평가 결과 대부분 b등급이상으로 탄산화에 의한 내구성 저하는 미미할 것으로 판단된다.

Table 7. Carbonation test.

Thickness of cover concrete (mm)	Progress of carbonation	Remaining depth	Grade
36	9.8	26.2	b
66	9.8	56.2	a

4. 수치해석을 통한 손상원인 분석

현장조사 및 시험 결과, 단면변화 구간에서 발생한 손상에 대하여 명확한 원인을 파악할 수 없었다. 외관조사망도는 Fig. 2와 같으며 콘크리트 및 철근의 상태 역시 균열을 일으킬 정도는 아닌 것으로 조사되었다.

따라서 본 연구에서는 Photo 3에서와 같이 단면면화구간 손상에 대한 원인분석을 위하여 구조물 설계 및 해석에 널리 이용되는 상용프로그램을 이용하여 2차원 및 3차원 수치해석을 수행하였다.

Fig. 2. Inspection map.

Photo 3. Part in Section Change.

4.1 2차원 수치해석

4.1.1 단면 선정

안전성 평가를 위해 선정된 해석단면은 3련박스형으로, 외관조사 결과, 기둥간의 간격변화가 크며, 사방향 균열이 폭 0.2~0.5 mm, 길이 0.6~4.0 m, 10개소가 발생한 단면으로 선정하였다.

4.1.2 해석단면 및 모델링

2차원 해석 모델링은 Fig. 3와 같은 박스구조물로 2개의 기둥으로 지지하고 있는 형상이다.

Fig. 3. Modeling (2D).

4.1.3 2차원 해석결과

부재의 시공당시 철근배근을 고려하여, 상부슬래브 휨응력, 전단응력, 축력, 변위 등에 대하여 해석을 수행하였으며 휨응력을 검토한 결과는 아래 Fig. 4와 같다.

Fig. 4. Result of Moment.

외관망도상 균열이 발생한 상부슬래브 기둥부에 대한 응력검토 결과, Table 8에서와 같이 안전율은 허용안전율(1.0)을 만족하는 1.10으로 분석되었다. 2차원해석 결과 상부 슬래브 균열에 대한 원인 파악이 어려웠으며, 이에 3차원 해석을 추가적으로 수행하였다.

Table 8. Output of 2D analyzing.

Division	b (cm)	d (cm)	Tension bar	fck (MPa)	Mu (kN-m)	Safety Factor
			Compressive bar	fy (MPa)	ϕM_n (kN-m)	
End	100	98.3	D29@100	24	441.46	3.47
			D32@100	300	1533.44	
Middle	100	85.0	D32@100	24	1265.34	1.27
			D32@100	300	1603.16	
Column	100	95.0	D32@100	24	1697.88	1.10
			D32@100	300	1805.68	

4.2 3차원 수치해석

4.2.1 단면변화부를 고려한 3차원해석 모델링

기둥 배열 변화에 따른 슬래브 응력거동을 파악하기 위해, Fig. 5와 같이 시공이음 및 현장조건과 동일하게 3차원 Plate로 모델링 하였다. 사용재료, 하중조합 및 검토 조건 등은 2차원 해석과 동일한 조건으로 검토하였다.

Fig. 5. Modeling (3D).

4.2.2 3차원해석 결과

구조해석 결과 균열이 발생한 상부 슬래브 기둥부는 Fig. 6과 같이 힘응력에 대하여 안전율을 확보하지 못하는 것으로 분석되었다.

(1) 힘응력 검토

Fig. 6. Result of Moment (3D).

Table 9. Output about Moment (3D).

Division	b (cm)	d (cm)	Tension bar	fck (MPa)	Mu (kN·m)	Safety Factor
			Compressive bar	fy (MPa)	ϕM_n (kN·m)	
Column	100	95.0	D32@100	24	1937.47	0.93
			D32@100	300	1805.68	

(2) 전단응력 검토

Fig. 7. Result of Shear force (3D).

Table 10. Output about S hare force (3D).

Division	b (cm)	d (cm)	Shearing bar	Shear force (kN)	Shear strength (kN)	Safety Factor
End	100	85.0	D13@150 (5.0ea)	994.96	1328.23	1.33
Column	100	85.0	D13@150 (5.0ea)	1563.51	1786.60	1.14

(3) 축력도

Fig. 8. Result of Axial force (3D).

구조해석 결과, 전단응력(Fig. 7.), 축력(Fig. 8.)의 결과를 얻었으며, Table 10에서와 같이 모든 부재가 전반적으로 안전율을 확보하나, 균열이 발생한 상부슬래브 기둥부는 휨응력에 대하여 안전율이 부족(기둥부: 0.93)한 것으로 분석되었다(Table 9).

4.2.3 결과 분석

본 구간에 외관상 조사된 상부슬래브의 사균열이 구조적인 원인인지를 판단하기 위해 구조해석을 실시한 결과, 단면 변화부 상부슬래브 기둥부 영역이 전반적으로 휨응력 및 전단력이 집중되는 경향을 보였다.

상부슬래브 모멘트도(Fig. 9)에서 기둥 ①과 ②의 위치에 부모멘트가 발생하였으며, 기둥사이의 슬래브에서는 정모멘트가 발생하였다.

Fig. 9. Moment on Upper Slab.

Fig. 10. M-vector on Upper Slab.

판요소 중심점에서 모멘트 방향에 대한 M-vector도(Fig. 10)에서 기둥 사이 슬래브에서 발생하는 모멘트의 방향성이 수평방향이 아니라 사방향으로 발생하였으며, 구조해석 결과 슬래브와 기둥단부 변위량에 차이와 기둥변화 전과 후의 상부슬래브의 변위량의 차이에 의해 비틀림의 변위형상이 나타났다.

5. 보강방안 검토

본 구조물의 상부가 도로부이고 토피고가 높아 공용 중 예상치 못한 상부활하중이 구조물에 직접적인 영향이 미칠 경우는 적을 것으로 분석되었으나, 부족한 휨응력에 따른 균열진행을 억제할 필요가 있어 보강방안을 검토하였다.

5.1 보강방안 선정

구조해석 결과 단면이 변화하는 상부슬래브 기둥부영역에 전반적으로 휨응력 및 전단력이 집중되는 경향을 보였으며, 해당 구간 기둥부가 휨응력에 대해서 안전성이 확보되지 않은 상태이다.

보강방안을 적용함에 있어, 일반적으로 상부슬래브 부모멘트가 발생하는 기둥부 영역은 구조체 배면 또는 도로부 하부에서의 보강이 어려운 현실이다. 따라서 보강은 유치선 구간 본선 내에서 보강을 실시할 수 있는 기둥부를 추가로 설치하는 방안(Fig. 11)을 선정하였다.

Fig. 11. Modeling (3D, After Retrofitting).

5.2 보강공법 검증

기둥 추가 설치 후 3차원 수치해석을 실시하여 슬래브의 응력거동을 파악하였다.

Fig. 12. Result of Moment (3D, After Retrofitting).

기둥을 추가로 설치해서 수치해석을 실시한 결과(Fig. 12), 휨응력에 대한 안전율을 확보하였으며, Table 11에서와 같이 보강 전 휨응력 및 전단력이 집중되는 경향을 보였던 단면 변화부 구간이 기둥 추가 후 분산되는 결과가 나타났다.

Table 11. Comparison before and after Retrofitting.

Before	Mu (kN-m)	Safety factor	After	Mu (kN-m)	Safety factor
	1937.47	0.93		1380.11	1.31

아래 Fig. 13에서와 같이 보강 후 상부슬래브의 발생모멘트가 전체적으로 감소하였으며, 슬래브에 발생했던 비틀림의 형상이 완화되어 구조적으로 안정적인 결과가 나타났다.

Fig. 13. A Decrease in displacement after Retrofitting.

또한, 기둥 사이 모멘트에 의한 주축방향성 및 크기가 보강 전에 비해 완화되었다(Fig. 14).

Fig. 14. M-vector on Upper Slab after Retrofitting.

6. 결 론

본 연구는 터널의 단면변화 구간에서 발생한 손상 미케니즘에 대하여 이루어졌다. 이를 위해 3련박스에서 유치선 구간으로 단면이 변화하는 구간을 대상으로 다양한 현장조사 및 시험을 수행하였으며, 그 결과를 바탕으로 2차원 및 3차원 수치해석을 수행하여 거동 특성을 분석하였다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 단면 변화 구간에서 상부 슬래브에 발생한 사방향 균열에 대하여 상세 외관 조사 및 시험을 실시한 결과, 슬래브 손상에 대한 직접적인 원인을 찾을 수 없었다.
2. 2차원 수치해석 결과, 휨, 전단, 축력에 대하여 기준 안전율(1.0 이상)을 만족하는 것으로 분석되었다. 따라서, 동일 구간을 3차원으로 모델링하여 수치해석을 수행하였다.

3. 3차원 수치해석 결과, 기둥부 상부슬래브가 휨응력에 대하여 기준 안전율을 확보하지 못하는 것(안전율: 0.93)으로 분석되었다. 기둥간의 간격변화가 궤도위치에 따라 심하며, 기둥간격이 변하는 구간의 상부 거더가 서로 연결되지 않고 전·후로 단절되어 있어 슬래브 휨응력 변화를 자연스럽게 전달시키지 못해 손상이 발생한 것으로 확인되었다.
4. 보강은 주변 여건상 터널 외부 보강이 아닌 내부 보강을 적용하였으며, 보강 전 휨응력 및 전단력이 집중되는 경향을 보였던 단면 변화부 구간이 기둥 추가 후 분산되는 결과가 나타나, 상부슬래브에서 발생한 모멘트가 전체적으로 감소하였으며, 슬래브에 발생했던 비틀림의 형상이 완화되어 구조적으로 안정적인 결과가 나타났다.

터널 단면변화 구간의 경우 설계 시 해당 구간에 대하여 2차원 뿐만 아니라, 3차원 수치해석을 수행한다면 보다 합리적이고 안정적으로 건설 및 유지관리를 수행할 수 있으리라 판단된다.

추후 단면 변화에 따라 발생할 수 있는 손상 원인을 다각적으로 분석하고자 하며, 또한 운용중인 시설물의 경우 기존 구조물에 영향을 최소화할 수 있는 효율적인 보강방법에 대하여 연구를 계속하고자 한다.

REFERENCES

1. Jeong, J.S., Ji, Y.H., Cho, H., Hur, I.Y., Lee, S.H. (2012), "A study on behavior characteristics of liner plate with depth", Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 14, No. 2, pp. 131-139.
2. Kong, B.S. (2009), "Structural stability analysis study for existing subway tunnels using a 3D stress-pore pressure coupled finite element modelling of NATM tunneling", Korea institute for Structural Maintenance Inspection, Vol. 13, No. 6, pp. 192-203.
3. Korea Standards Association. (2012), "KS F 2712 : Testing method for half-cell potentials of reinforcing steel in concrete", The ministry of Knowledge Economy, Agency for Technology and Standards, pp. 1-10.
4. Korea Standards Association. (2008), "KS F 2730 : Testing method for rebound number to conclude compressive strength of concrete", The ministry of Knowledge Economy, Agency for Technology and Standards, pp. 1-16.
5. Korea Standards Association. (2008), "KS F 2731 : Testing method for velocity of ultrasonic pulses to conclude compressive strength of concrete", The ministry of Knowledge Economy, Agency for Technology and Standards, pp. 1-13.

-
6. Korea Standards Association. (2009), “KS F 2734 : Testing method of detecting reinforcement by electromagnetic induction method”, The ministry of Knowledge Economy, Agency for Technology and Standards, pp. 1-7.
  7. Korea Standards Association. (2009), “KS F 2596 : Method for measuring carbonation depth of concrete”, The ministry of Knowledge Economy, Agency for Technology and Standards, pp. 1-10.
  8. Korea Infrastructure Safety & Technology Co. (2009), “Guideline(tunnel) about Safety check and inspection”, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, pp. 83-198.
  9. Mashimo, H., Isago, N., Kitani, T., Endou, T. (2006), “Effect of fiber reinforced concrete on shrinkage crack of tunnel lining”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 21, pp. 382-383.
  10. Park, S.W., Park, S.S., Hwang, I.B., Cha, C.J. (2012), “A case study on cause analysis for longitudinal crack of duct slab in tunnel”, Korea institute for Structural Maintenance Inspection, Vol. 16, No. 5, pp. 19-28.
  11. Wang, T.T. (2010), “Characterizing crack patterns on tunnel linings associated with shear deformation induced by instability of neighboring slopes”, Engineering Geology, Vol. 115, pp. 80-95.
  12. Weiss, W.J., Yang, W., Shah, S.P. (1998), “Shrinkage cracking of restrained concrete slabs”, ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 124, No. 7, pp. 765-774.
  13. Yoo, C.S., Kim, J.M., Kim, H.C. (2009), “Numerical investigation on 3D behavior of 2-Arch tunnel”, Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 11, No. 3, pp. 255-264.