

경부고속철도(대구-부산) 도심통과 노반신설 공사중
기존 지하철 터널구간의 구조적 안정성 검토
**Structure stability study for existing subway tunnel segment
of Seoul-Busan high-speed railroad (Daegu - Busan) construction**

공병승¹⁾
Kong, Byung-Seung

김민호²⁾
Kim, Min-Ho

ABSTRACT

In the new Seoul-Busan high speed railroad construction specially city center passage roadbed establishment is recommended the stability for the existing subway tunnel segments of Busan subway line No. 1 and No.2. regarding the appearance condition, a quality condition and the durability of the objective facility site exact inspection, and it evaluates the numerical analysis which uses MIDAS GTS it leads and there is the objective of the place where the stability of the objective facility and this tunnel it investigates. To immediacy of the on-the-spot inspection result whole facility it is a condition where the reinforcement which is simple not to be hindrance is necessary, 2nd Line case it is a condition which transfer is good but the general defect and the damage which occur from the tunnel of NATM type were confirmed part. While roadbed establishment constructing that the continuous maintenance is necessary, it is judged. The result of 1st, 2nd Line maximum sinkage, unequal sinkage and the lining stress of numerical analysis are within permission and the damage degree is appearing with the fact that the degree it will can disregard it is slight. But it enforces necessary Pre-grouting in order to minimize an actual tunnel face conduct and when the tunnel is excavated it is judged with the fact that necessary to minimize the outflow possibility.

1. 서 론

본 연구는 경부고속철도(대구-부산) 노반신설 공사구간의 기존 지하철 터널 구간인 부산지하철 1호선 좌천동역 ~ 범일동역 구간(16K300 ~ 16K400) 및 부산지하철 2호선 부암역 ~ 서면역 구간(21K140 ~ 21K240)에 대해 현장조사를 실시하여 대상시설물의 외관상태, 품질상태 및 내구성능 등을 평가하고 수치해석 프로그램인 MIDAS GTS를 통한 대상시설물 및 본선터널의 안정성을 검토하여 경부고속철도(대구-부산)구간의 노반신설 공사에 따른 안정성 검토에 그 목적이 있다.

2. 지하철 1, 2호선 현장조사

2.1 개요

본 연구에서는 경부고속철도 14-3공구 노반신설공사시 교차 예정 지점인 부산지하철 1호선 좌천동역~범일동역 구간내의 STA. 16K350과 부산지하철 2호선 부암역~서면역 구간내의 STA. 21K190을 중심으로 전·후 50m씩 각각 100m 구간을 대상으로 외관조사를 실시하였으며, 외관조사시 측정간격은 10m로 분할하고 별도의 조명시설과 트로리 및 사다리 등의 접근장비를 이용하여 조사부재에 최대한 근접한 후 육안

1) 동서대학교 토목공학과 부교수, 정회원

E-mail : kongbs@dongseo.ac.kr

TEL : (051)320-1821

2) 동서대학교 토목공학과 석사과정, 비회원

에 의한 외관조사를 실시하였다. 외관조사시 조사항목은 균열상태(길이, 방향, 폭 등)와 진행성 여부, 콘크리트의 박리, 박락, 재료분리, 중성화 진행상태, 보수·보강부위의 변상 등에 주안점을 두고 조사하였다.

2.2 지하철 1호선 현장조사

2.2.1 외관조사

가. 라이닝 제원

표 2.2 라이닝 제원

STA.	위 치	라이닝두께(cm)	STA.	위 치	라이닝두께(cm)
16K300	C	28	16K360	C	28
	W	31		W	26
16K320	C	30	16K380	C	29
	W	28		W	28
16K340	C	29	16K400	C	29
	W	28		W	30
비 고	설계 두께 : 30		비 고	설계 두께 : 30	

나. 균열

- ① 본 구간에 발생한 균열은 전체 13개소(34m)이며, 이 중 0.3mm이상의 균열은 4개소(11m), 0.3mm미만의 균열은 9개소(23m)로 조사되었다.
- ② 균열의 발생위치 및 형태는 대부분 천정부 및 측벽부의 횡방향균열로서 NATM형식의 터널에서 발생하는 일반적인 형태의 균열로 판단된다.
- ③ 16K310~16K317, 16K340~16K341 구간에서는 보수부균열이 일부 확인되었으므로 유지관리시 주의관찰 후 필요한 조치를 취해야 할 것으로 판단된다.

다. 누수 및 백태

- ① 본 구간의 누수는 대부분 균열부에서 발생하는 선상누수 2개소(8.0m)와 수밀성 부족부위 등에서 발생하는 면상누수 1개소(0.5m²)로 조사되었으며, 현재 누수량이 많아서 시공이음부 및 균열부로 유도배수를 하고 있는 부분이 25개소로 조사되었다.
- ② 본 구간의 백태는 시공이음부, 균열부 및 유도배수부 주변으로 누수와 외부 유입수에 의해 총 27개소(44.69m²)에서 조사되었다.



그림 2.1 횡방향 균열(cw 0.2, 16K311 : RS)



그림 2.2 횡방향 균열(cw 0.1-0.2, 16K323 : RS)



그림 2.3 유도배수



그림 2.4 백태(16K374 : RS)

라. 기타

- ① 기타 박리·박락, 재료분리 및 철근노출 부위는 확인되지 않았다.
- ② 라이닝 두께 및 강도 부족에 의해 측벽부 라이닝을 콘크리트 벽체로 보강(약 10~15cm)한 구간 총 4개 구간의 5개소로 대체로 양호한 시공상태를 보이는 것으로 조사되었다.
- ③ 터널의 바닥면은 철도의 레일부와 같이 울석이 깔려 있어 외관조사가 불가능하였다.
- ④ 상세 결함 및 손상내용과 수량은 외관조사망도에 기입하여 부록에 수록하였다.

2.2.2 비파괴 검사

본 연구에서는 대상구조물에 대한 콘크리트 라이닝의 품질상태, 시공상태, 내구성능 등을 평가하기 위하여 콘크리트 압축강도시험, 철근배근상태조사, 중성화시험 및 염화물함유량 분석 등을 실시하였다.

표 2.4 비파괴 검사 결과

구 분		내 용	비 고
콘크리트 압축강도시험	비파괴시험 강도	260kgf/cm ²	
	설계기준 강도	210kgf/cm ²	
중성화시험	중성화심도	3.4~5.0mm	
	피복두께	58.5mm	기존 설계도서 참조
	상태등급	b	
염화물함유량 분석	염화물함유량	0.61kgf/m ³ ~ 0.75kgf/m ³	
	상태등급	d	

2.2.3 상태평가 등급

현장조사결과에 따라 대상구조물 콘크리트 라이닝의 상태평가등급을 산정한 결과, 결함지수는 0.307로서 대상구조물 콘크리트 라이닝의 상태평가등급은 주요부재에 내구성, 기능성 저하방지를 위한 보수가 필요하거나 보조부재에 간단한 보강이 필요한 상태인 『C등급』으로 확인되었다.

표 2.5 상태평가 등급 결과

항목	균열	누수	손상	박리	박락	백태	철근 노출	중성화	염화물	배수 상태	지반 상태	갭문 상태	특수 조건	합계
결함점수	5.65	1.5	0	0	0	0.9	0	1	2	-	-	-	-	11.05
비고	※ 라이닝 결함지수(F) = ∑결함점수/36 = 11.05/36 = 0.307													

2.3 지하철 2호선 현장조사

2.3.1 외관조사

가. 라이닝 제원

구 분	라이닝두께	비 고
부산지하철 2호선 (부암-서면)	40cm	준공도면 및 기 정밀점검보고서 참조

나. 균열

- ① 본 구간에 발생된 균열은 전체 4개소(6.6m)이며 모두 0.3mm미만의 균열로 조사되었다.
- ② 균열의 발생위치 및 형태는 대부분 측벽부의 횡방향균열로서 NATM형식의 터널에서 발생하는 일반적인 형태의 균열로 판단된다.



그림 2.5 횡방향 균열(cw 0.1~0.2, 21K178 : LW) 그림 2.6 횡방향 균열(cw 0.1~0.2, 21K209 : RW)

다. 기타

- ① 본 구간은 박리 1개소(0.23㎡), 재료분리 1개소(0.06㎡) 및 철근노출 2개소(0.15㎡)가 조사되었다.



그림 2.7 박리(21K164 : RW) 그림 2.8 재료분리(21K172 : RW) 그림 2.9 철근노출(21K174 : LS)

2.3.2 비파괴 검사

본 연구에서는 대상구조물에 대한 콘크리트 라이닝의 품질상태, 시공상태, 내구성능 등을 평가하기 위하여 콘크리트 압축강도시험, 철근배근상태조사, 중성화시험 및 염화물함유량 분석 등의 비파괴시험을 실시하였다.

표 2.6 비파괴 검사 결과

구분	내용	비고	
콘크리트 압축강도시험	비파괴시험 강도	258kgf/cm ²	
	설계기준 강도	240kgf/cm ²	
철근배근상태조사	주철근량	설계치의 99%	
	배력철근량	설계치의 112%	
	피복두께	설계치의 170%	
중성화시험	중성화심도	2.5 ~ 3.3mm	
	피복두께	92 ~ 105mm	
	상태등급	b	

2.4.3 상태평가 등급

현장조사결과에 따라 대상구조물 콘크리트 라이닝의 상태평가등급을 산정한 결과, 결합지수는 0.128로서 대상구조물 콘크리트 라이닝의 상태평가등급은 문제점이 없는 최상의 상태인 『A등급』으로 확인되었다.

표 2.7 상태평가 등급 결과

항목	균열	누수	손상	박리	박락	백태	철근 노출	중성화	염화물	배수 상태	지반 상태	갯문 상태	특수 조건	합계
결합점수	2.5	1	0	0	0	0	0.1	1	-	-	-	-	-	4.6
비고	※ 터널결합지수(F) = $\sum \text{결합점수} / 36 = 4.6 / 36 = 0.128$													

3. 안정성 평가에 대한 수치해석

3.1 개요

지하수 침투현상은 침투영역 주변 경계의 수두차 또는 유량 경계에 의해 발생하게 된다. 지하수의 유동이 발생하면 물과 흙의 골격사이의 마찰력에 의한 침투력 (Seepage force)이 발생하며, 이에 의해 변위와 응력이 발생한다.

MIDAS/GTS는 침투해석에서 구한 간극수압(pore water pressure)을 이용하여 침투력의 효과를 적용하여 이때 간극수압은 침투해석에서 얻는 전수두(total head)에서 위치수두(elevation head)를 빼서 얻은 압력수두(pressure head)에 물의 단위중량을 곱하여 산출한다. 보통 침투력은 전수두의 크기가 급격히 감소하는 유출측 경계에 인접한 영역에 집중되며, 이 영역은 보통 구속압력이 작아서 전단강도가 작고, 인장강도도 상대적으로 작기 때문에 주변지반이 불량한 지층 및 파쇄대인 경우 침투압을 고려한 유효응력 (effective stress)해석시 지반이 쉽게 파괴될 것이라 판단된다.

3.2 지하철 1호선 하부 통과 구간

3.2.1 개요

- ① 본선터널 상부에 지하철 1호선과 133° 교차하여 통과하는 구간(서기(현)408km 490)으로 근접 시공에 대한 영향평가를 수행함
- ②대상지역의 적용지보패턴은 상·하반 분할굴착을 적용한 P-5-3-1을 적용함
- ③해석단면의 범위는 근접시공의 영향을 정확히 반영할 수 있도록 터널 좌·우측 5D이상, 하부 3H, 상부는 지표면까지 모델링하여 침투-응력을 연계한 Coupled Analysis와 Non-Coupled Analysis 해석을 수행 비교분석함

3.2.2 수치해석 결과

가. 안정성 평가

표 3.1 지하철 1호선 안정성 평가

항 목	본선천단침하	본선 숏크리트응력	1호선 바닥침하	1호선 부등침하량	1호선 라이닝 응력
Coupled Analysis	2.908mm	7.24MPa	2.930mm	1.08×10^{-4} rad	6.51MPa
Non-Coupled Analysis	1.923mm	3.23MPa	1.982mm	2.87×10^{-5} rad	4.01MPa
관리기준치	*20 ~ 50mm	8.4MPa	25mm	1.33×10^{-3} rad	9.6MPa
안정성 평가	안 정	안 정	안 정	안 정	안정

나. 변위량 발생

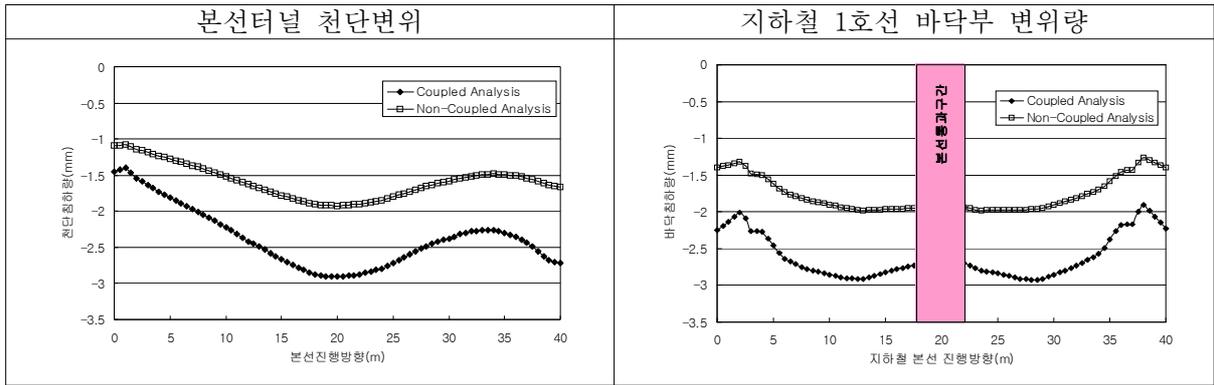


표 3.2 최종단계 변위발생량 비교

다. 지보재 응력발생량

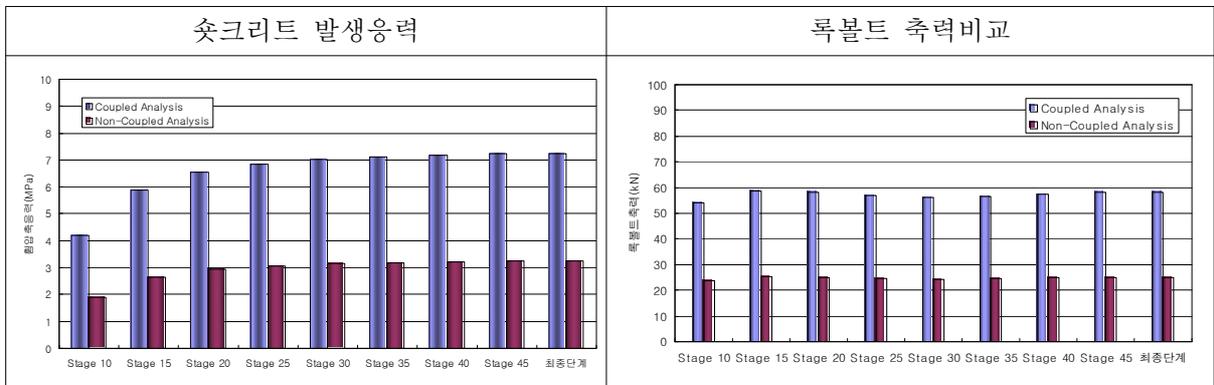


표 3.3 시공단계별 지보재 응력발생량 비교

3.3 지하철 2호선 하부 통과 구간

3.3.1 개요

- ① 본선터널 상부에 지하철 2호선과 하부 이격거리 13.99m를 통과하는 구간 서기 (현)406km 032으로 근접 시공에 대한 영향평가가 필요한 구간임
- ② 대상지역의 적용지보패턴은 TBM 선 굴착 및 상·하반 분할굴착을 적용한 P-2에 해당함
- ③ 해석단면의 범위는 근접시공의 영향을 정확히 반영할 수 있도록 터널 좌·우측 5D이 상, 하부 3H, 상부는 지표면까지 모델링하여 침투-응력을 연계한 Coupled Analysis와 침투영향을 무시한 Non-Coupled Analysis 해석을 수행함

3.3.2 수치해석 결과

가. 안정성 평가

표 3.4 지하철 1호선 안정성 평가

항 목	본선천단침하	본선 샷크리트응력	2호선 바닥침하	2호선 부등침하량	2호선 라이닝응력
Coupled Analysis	0.652mm	0.88MPa	0.522mm	6.41×10^{-6} rad	7.72MPa
Non-Coupled Analysis	0.572mm	0.69MPa	0.518mm	5.79×10^{-6} rad	7.81MPa
관리기준치	*10 ~ 20mm	8.4MPa	25mm	1.33×10^{-3} rad	9.6MPa
안정성 평가	안 정	안 정	안 정	안 정	안 정

나. 변위량 발생

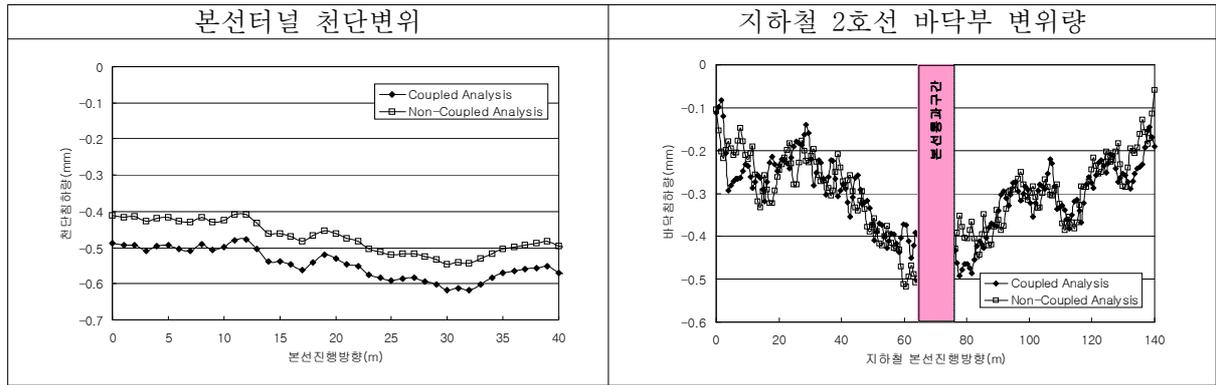


표 3.5 최종단계 변위발생량 비교

다. 지보재 응력발생량

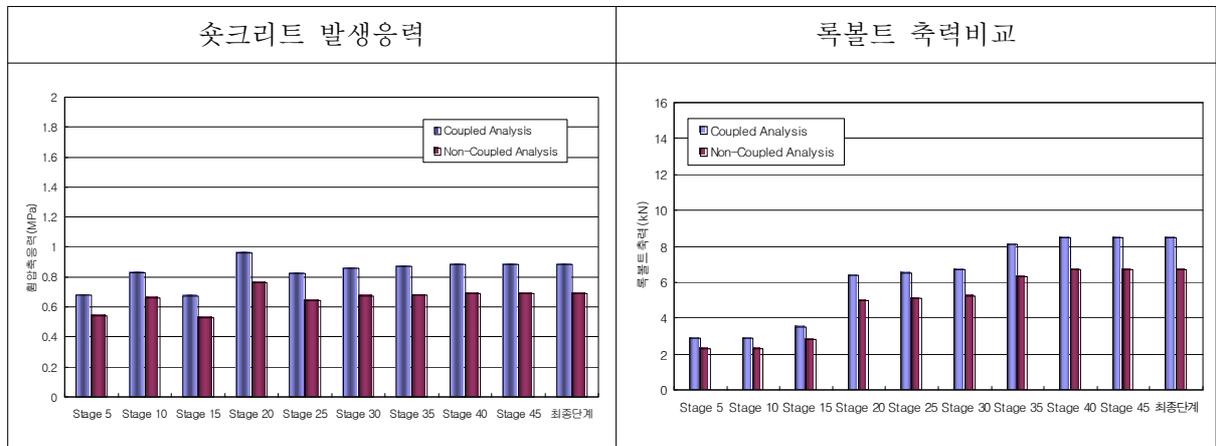


표 3.6 시공단계별 지보재 응력발생량 비교

4. 결론

4.1 지하철 1, 2호선 정밀안전진단 결과

4.1.1 지하철 1호선 종합평가

본 연구 대상구간 중 지하철 1호선에 대한 상태평가등급은 주요부재에 경미한 결함 또는 보조부재에 광범위한 결함이 발생하였으나 전체적인 시설물의 안전에는 지장이 없으며, 주요부재에 내구성, 기능성 저하방지를 위한 보수가 필요하거나 보조부재에 간단한 보강이 필요한 상태인 『C등급』으로 평가되며 손상에 대한 적절한 대책을 수립하고 공사중 계측관리, 중점점검 등을 통한 지속적이고 효율적인 유지관리가 실시되어야 할 것으로 판단된다.

4.1.2 지하철 2호선 종합평가

지하철 2호선 구간의 현장조사결과를 종합 분석한 결과 문제점이 없는 최상의 상태인 『A등급』으로 평가되며 지하철 2호선 구간에 대한 경부고속철도 14-3공구 노반신설공사 중에는 지속적인 계측관리 등이 필요하다고 판단되어진다.

4.2 지하철 1, 2호선 수치해석 검토 결과

경부고속철도 14-3공구 노반신설 기타공사와 관련하여 지하철 구조물(1,2호선) 하부통과 시공구간에 대해 침투-응력 연계한 Coupled Analysis와 터널 굴착면 침투를 무시한 Non-Coupled Analysis를 수행하

여 고속철도 본선터널의 변위량 및 지보재응력 검토를 통해 안정성 평가를 수행하였으며, 상부 지하철 구조물의 바닥부 침하, 부등침하, 라이닝응력 발생량을 비교 분석하였다.

구 분	Coupled Analysis 해석 결과		관련 기준치	Non-Coupled Analysis 해석 결과		관련 기준치
	지하철 1호선	지하철 2호선		지하철 1호선	지하철 2호선	
본선천단침하	2.908mm	0.652mm	20 ~ 50mm	1.923mm	0.572mm	10 ~ 20mm
본선 숏크리트응력	7.24MPa	0.88MPa	8.4MPa	3.23MPa	0.69MPa	8.4MPa
바닥침하	2.930mm	0.522mm	25mm	1.982mm	0.518mm	25mm
부등침하량	1.08×10^{-4} rad	6.41×10^{-6} rad	1.33×10^{-3} rad	2.87×10^{-5} rad	5.79×10^{-6} rad	1.33×10^{-3} rad
라이닝응력	6.51MPa	7.72MPa	9.6MPa	4.01MPa	7.81MPa	9.6MPa

<표 4.1 수치해석 결과 비교>

상부구조물인 지하철 1호선, 2호선의 최대침하, 부등침하, 라이닝응력 등은 허용치 이내이며 손상정도는 무시할 수 있는 정도의 경미한 것으로 나타나고 있다.

고속철도 본선 터널의 변위량, 지보재 응력 또한 허용치 이내로 안정성을 확보한 것으로 판단된다. 그러나 실제 터널 시공시 막장거동을 최소화하기 위하여 필요시 Pre-grouting을 시행하여 터널 굴착시 터널내 유출수를 최소화하는 것이 필요할 것으로 판단되며, 특히 지하철 1호선 구간의 경우 동래 단층대 통과로 인한 지층변화가 심할 것으로 판단되므로 막장면 관찰 및 계측자료 분석을 통해 철저한 시공관리를 수행하여야 할 것이다.

참고문헌

1. 건설교통부 (2003. 7), “시설물의 안전점검 및 정밀안전진단 지침 및 세부지침”
2. 하우엔지니어링 (1998. 3), “부산지하철 1호선 정기점검보고서”
3. 태조엔지니어링 (2004. 8), “경부고속철도 14-3공구 부산지하철 1호선 좌천동역~범일동역 구간 정밀 안전진단 보고서”
4. 태조엔지니어링 (2004. 7), “경부고속철도 14-3공구 부산지하철 2호선 부암역~서면역 구간 정밀 안전진단 보고서”
5. 한국시설안전기술공단 (2003), “안전점검 및 정밀안전진단 세부지침 터널편”
6. MIDAS/GTS 매뉴얼 3권, “Analysis Reference”
7. 한국터널공학회 “터널의 이론과 실무”
8. 유충식 (2003), “터널시공과 지하수의 상호작용”, 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp.46664-6449
9. 유충식 (2004), “응력-간극수압 3차원연계해석을 통한 터널굴착과 지하수의 상호작용 고찰”, 한국지반공학회 논문집, 제 20권 3호 pp.33-46
10. 유충식, 김선빈 (2006), “NATM 터널의 응력-간극수압 연계 유한요소모델링”, 한국터널공학회 논문집, pp.97-108
12. Tsuchiyama, S., Hayakawa, M. Shinokawa, T. and Konno, H.(1988), "Deformation behavior of the tunnel under the excavation of crossing tunnel", Numerical Methods in Geomechanics, Balkema, Rotterdam, ISBN, pp.1591-1596
13. Lee, I.M and Nam, S.W.(2001), "The Study of seepage forces acting on the tunnel lining and tunnel face in shallow tunnels", Tunnelling and Underground Sapce Technology, Vol.16, pp.31-40.
14. Atawa, M., and Leca, E.(1984), "Analysis of groundwater seepage into tunnels", Proc., Int Congress on Tunneling and Ground Conditions, Cairo, Egypt, 303-310.