

터널공사에서의 안전영향평가의 적용

The Application of Safety Impact Assessment to Tunnel Construction

김병식* · 최봉준** · 서종원***

Kim, Byung Sik · Choi, Bong Joon · Seo, Jong Won

Abstract

In this study, the concept of safety impact assessment to achieve 'Design-for-Safety' in design phase is introduced. For this purpose, safety impact assessment model was devised and a methodology using the risk-based safety impact assessment approach for NATM of tunnel projects is suggested. The suggested methodology includes safety information survey, classification of safety impact factors caused by design and construction, and quantitative estimation of magnitude and frequency of safety impact factors. A real-world case study on the safety impact assessment of a tunnel construction project is also provided in the paper.

key words : Safety impact assessment, Tunnel construction

1. 서론

건설산업의 안전관리는 여러 가지 복잡한 제반 요소에 영향을 받는 특성을 지니고 있지만 현재 계획 및 설계단계에서는 안전에 관하여 고려하지 않고 설계업무가 수행되고 있어, 건설사업의 안전사고 예방차원에서 유해위험을 설계단계에서 사전 안전도 차원의 설계를 수행하여 안전시공을 유도하고, 위해요소를 조기에 발견하며 재해발생가능성과 강도를 최소화함으로써 물적·인적 손실을 방지하기 위한 방안 마련에 대한 필요성이 대두되었다. 본 연구에서는 건설공사의 위해요소를 설계단계에서 조기에 발견하고 이를 미연에 예방하기 위해 우선적으로 건설사업 안전관리현황 및 건설안전사고 사례 등을 분석하고, 건설안전영향평가의 기본개념을 분석하여 합리적인 안전영향평가모형을 제시하고, 제시된 안전영향평가모형에 따라 터널공사를 중심으로 위험요소를 규명하기 위하여 안전영향요소 수집 및 시나리오를 작성하며, 이를 바탕으로 안전영향요소를 단계별로 분류, 중요도를 산정하여 안전영향요소의 공중별 최종 가중치를 산정하여 체크리스트를 제시한다. 이어서 위험요인평가에 활용하기 위한 설계제한사항을 규명하여 실제 터널공사에서의 안전영향요소들을 분석하고 적절한 대응방안을 모색하여 사전단계 안전관리를 유도하도록 하여 적용성을 검증한다.

2. 안전영향평가의 모형

일반적으로 안전영향평가의 의의는 설계 및 계획 단계, 즉 사전단계에서 건설사업의 안전영향요소가 건설 사업에 미치는 안전피해의 정도 및 규모 등에 미치는 영향을 예측하고 평가하여 이를 다시 설계 및 계획 단계에 반영, 피해의 영향을 줄일 수 있는 사전 안전성 확보에 그 의미가 있다고 할 수 있으므로 이에 본 연구에서는 안전영향요소를 합리적으로 반영할 수 있는 모형을 제시하였다.

2.1 위험요소 규명단계

위험요소 규명단계는 안전영향요소의 수집 및 시나리오 작성을 통하여 건설프로젝트에 내재되어 있는 안전영향요소에 대한 존재여부를 인식하고 그 안전영향요소들이 원인이 되어 발생할 수 있는 안전사고들을 정의하는 과정이

* 한양대학교 토목공학과 석사과정 · briankim1103@gmail.com

** 롯데건설 SOC 사업부 사원 · 공학석사

*** 정회원 · 한양대학교 토목공학과 조교수 · 공학박사 · P.E · 교신저자

다. 이는 안전영향평가를 위한 첫 번째 단계이며 안전영향요소 규명 및 체크리스트 작성을 위한 기초 자료로써 안전영향요소 체크목록에서 고려되어야 할 사항들이 누락이 되지 않도록 대상 건설프로젝트와 관련된 기존 안전설계 매뉴얼 및 체크리스트, 설계도서, 기존 연구 자료와 전문가 인터뷰 등의 다양한 접근방법을 활용하여 가급적 철저한 조사를 실시하여, 대상 건설프로젝트에 내재되어 있는 안전영향요소들에 대해 보다 구체적으로 인식한다. 또한 도출된 안전영향요소들을 터널사업의 공정별로 분류하여, 공정별에 영향을 미치는 안전영향요소로 구분하여야 한다.

2.2 위험요소 분석단계

위험요소 분석단계의 첫 번째 단계인 안전영향요소의 분류는 건설프로젝트에 내재되어 있는 안전영향요소가 사전단계와 연관성이 있는지 여부를 판단하는 단계로, 건설프로젝트의 수행과정에서 발생 가능한 잠재적인 안전사고의 시나리오가 구성되면 이를 바탕으로 안전영향요소의 적용단계를 설계, 시공으로 단계별 구분하여 설계항목과의 연관성 여부를 판단, 설계항목과 연관성이 있는 안전영향요소를 재분류하여야 한다. 설계항목과의 연관성 여부의 판단은 기존의 다양한 연구자료, 안전 매뉴얼 및 사고사례 분석 및 전문가들의 인터뷰 자문을 통해 산정하여야 한다. 두 번째 단계인 안전영향요소의 사건중요도 산정(Category)은 설계항목과 연관된 안전영향요소에 의해 발생가능한 안전사고의 발생 빈도(Frequency) 및 피해 규모(Magnitude)를 산정하는 과정이다.

표 1. 사건중요도 산정 방법

구 분		Magnitude		
		Low	Medium	High
Frequency	High	Medium	High	High
	Medium	Low	Medium	High
	Low	Low	Low	Medium

다음 단계인 연관된 설계항목의 도출은 내재되어 있는 안전영향요소에 대한 특성을 파악하여 안전영향요소와 관련된 주요 설계항목을 도출하는 단계로서 기존의 다양한 연구자료, 다양한 사고사례, 설계도서, 안전 매뉴얼에 대한 검토 및 전문가들의 경험이나 직관에 의한 인터뷰 자문을 통한 연구자의 노력에 의해 산정될 수 있다.

2.3 대응방안 수립단계

앞에서 도출된 안전영향요소와 관련된 설계항목을 작업공종별에 대한 안전영향평가관련 설계항목으로 제작성 및 제시하여, 향후 안전영향평가를 실시하는 설계자, 건설관리자, 혹은 입찰심사자가 분석대상 건설사업 프로젝트에 대한 안전영향평가 수행 시 참고자료로 활용할 수 있도록 하여야 한다. 다음의 표2는 최종적으로 조사된 터널공사 최종 안전영향평가 체크리스트를 제시하였다.

표 2. 터널공사 안전영향평가 최종 체크리스트

작업공종	세부공종	안전영향요소	관련설계항목	사건중요도	평가등급	위험등급
사면 토공 및 배수공	법면 절취	· 법면 절취 시 구배 부적정으로 일부 슬라이딩	· 갱구 사면 안정 검토 · 적정한 사면구배 계획	Category 2 (중)		
	사면 락볼트 보강	· 사면보강 부적정 사면 슬라이딩	· 갱구부 지보 구조 설계	Category 2 (중)		
굴착 및 발파 작업	갱구부	· 갱구부 보강방법 부적정으로 갱구부 발파 시 붕락	· 갱구부 지보 구조 설계	Category 2 (중)		
	버럭 처리	· 막장 상단 파쇄대 층에서 부석 낙하	· 막장지반관찰 및 설계보완	Category 2 (중)		
	막장 관리	· 환기장치 환기효율이 저조하여 작업자 호흡기 장애 발생	· 공사 중 환기량 산정	Category 3 (하)		
		· 막장 파쇄대 출현 시 과도한 굴진	· 굴진 길이	Category 2 (중)		
		· 부정확한 지질조사로 과도한 굴진	· 굴진 길이	Category 2 (중)		
· 지하수 대비 미흡으로 막장 슬라이딩	· 지질 및 지하수 사전조사 · 지하수 고려항목	Category 2 (중)				
터널 지보공 작업	강지보 설치	· 부정확한 암 판정으로 부적정한 지보설치로 막장 붕락	· 실질적인 암 판정 기준 선정 · 강지보재의 설치 간격 및 보강 공법	Category 2 (중)		

다음으로 설계항목의 위험요인 저감을 위한 설계제안은 어떤 건설프로젝트에 내재되어 있는 위험요인인 안전영향요소에 부합되는 설계항목의 위험등급이 High 또는 Medium 인 경우 위험요인을 저감시킬 수 있도록 기 설계단계에서 재검토 되어야 할 사항을 제시하는 단계로서, 설계자들에게 잠재적인 위험을 내재하고 있는 설계항목을 인지시켜주는 단계이다. 따라서 설계자들이 설계를 수행할 때 안전에 대한 고려를 원활히 하기 위해 주요 설계공법과 안전영향요소를 연계할 필요가 있다. 이를 위해 주요 설계항목별 부합되는 공종을 수록하여 설계자가 공법에 의거한 설계를 수행할 때 안전을 고려한 설계에 유념하도록 유도할 수 있을 것으로 보인다.

2.4 안전영향평가의 수행

다음으로는 안전영향평가 모형에서 제시된 체크리스트를 바탕으로 대상 사업에 적용하여 안전영향평가를 수행한다. 위험등급은 설계항목이 안전영향평가 체크리스트에 파악된 안전사고 유형에 대비하여 얼마나 충실하게 설계되었는지에 의거하여 산정하며, 여기에 각 등급별 점수를 부여하여 위험지수를 정량적으로 표현함으로써 최종 설계위험등급을 산정하게 된다.

3. 사례연구

본 연구에서 제시된 안전영향평가 절차를 기반으로 안전영향요소 체크리스트의 적용성에 대한 검증은 위해 실제 터널 건설사업인 “○○산업단지 진입도로 개설공사” 구간 중 터널구간을 대상으로 안전영향평가를 수행하였으며, 본 연구의 터널관련 안전영향평가 체크리스트는 NATM 공법을 대상으로 하기 때문에 본 터널공사 구간 중 NATM 공법으로 시공된 7.5km의 구간을 대상으로 하였다.

3.1 체크리스트의 검토

앞서 제시된 안전영향평가 체크리스트의 항목과 우선순위를 검토하고 사용자 편의성을 고려하여 실질적인 안전영향평가를 수행하기 위한 체크리스트로 재분류를 하며, 이는 설계상에 내포된 작업자/공사목적물 위해요소를 찾는 데 현실적인 판단 기준이 될 것이다.

3.2 설계도서 분석을 통한 안전영향평가 수행

안전영향평가터널공사의 설계도서를 검토한 후 이를 기초로 실질적으로 안전영향평가를 수행하며 수행 시에는 실제 대상시설물의 설계도서를 기준으로 사고원인과 관련 있는 점검항목의 적절성에 대해 평가를 하여 등급을 한정하였다. 등급 산정은 안전영향평가 모형에서 제시한 평가등급 판단 기준을 통해 항목별로 설계사항에 대해 평가를 수행하며 평가를 통해 각 항목별 평가 등급이 산정된 이후에는 안전영향요소별 위험등급 산정표를 통해 (사건중요도 및 평가등급을 고려하여) 최종 위험등급을 산정하게 된다.

표 3. 터널공사 적용사례의 위험등급 산정결과

작업 공종	세부 공종	안전영향요소	관련설계항목	사건 중요도	평가 등급	위험 등급
사면 토공 및 배수공	법면 절취	· 법면 절취 시 구매 부적정으로 일 부 슬라이딩	· 갱구 사면 안정 검토 · 적정한 사면구배 계획	Category 2 (Medium)	Poor	High
	사면 락볼트보강	· 사면보강 부적정 사면 슬라이딩	· 갱구부 지보 구조 설계	Category 2 (Medium)	Marginal	Medium
굴착 및 발파 작업	갱구부	· 갱구부 보강방법 부적정으로 갱구 부 발파 시 붕락	· 갱구부 지보 구조 설계	Category 2 (Medium)	Good	Medium
	머럭처리	· 막장 상단 파쇄대 층에서 부석 낙하	· 막장지반관찰 및 설계보완	Category 2 (Medium)	Excellent	Low
	막장 관리	· 환기장치 환기효율이 저조하여 작 업자 호흡기 장애 발생	· 공사 중 환기량 산정	Category 3 (Low)	Good	Low
		· 막장 파쇄대 출현 시 과도한 굴진	· 굴진 길이	Category 2 (Medium)	Good	Medium
		· 부정확한 지질조사로 과도한 굴진	· 굴진 길이	Category 2 (Medium)	Poor	High
· 지하수 대비 미흡으로 막장 슬라 이딩	· 지질 및 지하수 사전조사 · 지하수 고려항목	Category 2 (Medium)	Good	Medium		
터널 지보공 작업	강지보 설치	· 부정확한 암 관정으로 부적정한 지보설치로 막장 붕락	· 실질적인 암 관정 기준 선정 · 강지보제의 설치 간격 및 보 강 공법	Category 2 (Medium)	Marginal	Medium

산정된 결과를 살펴보면 사면토공 및 배수공 공중에서 법면 절취 시 구배 부적정으로 입부 슬라이딩이 발생할 가능성이 매우 높은 것으로 판단되고 있다. 또한 굴착 및 발파작업에서 부정확한 지질조사로 과도한 굴진이 예상된다. 따라서 이를 보강하기 위해서는 표 4 에서 제시한 설계제안사항과 같이 갱구부 사면 사전 지질 조사 철저 및 적절한 보강 공법 설계를 하고 법면의 적정한 사면 구배 및 장비 투입 계획 수립, 또한 무리한 절취 작업을 지양하도록 하여야 하며 보다 정확한 지질조사를 통해 적절한 보강공법을 고려해야 하는 것으로 사료된다.

표 4. 설계제안사항 도출(터널)

작업공종	세부공종	안전영향요소	관련설계항목	설계제안사항
사면토공 및 배수공	법면 절취	· 법면 절취 시 구배 부적정으로 일부 슬라이딩	· 갱구 사면 안정 검토 · 적절한 사면구배 계획	· 갱구부 사면 사전 지질 조사 철저 및 적절한 보강 공법 설계(설계) · 법면의 적절한 사면 구배 및 장비 투입 계획 수립(계획) · 무리한 절취 작업 지양(시공단계 관리)
	사면 락볼트 보강	· 사면보강 부적정 사면 슬라이딩	· 갱구부 지보 구조 설계	· 시공성 및 경제성을 고려한 적절한 사면 보강 공법 설계 · 사면 지질 상태를 고려한 보강 공법 설계 · 사면보호공 시공 관리 철저(시공 시)
굴착 및 발파작업	갱구부	· 갱구부 보강방법 부적정으로 갱구부 발파 시 붕락	· 갱구부 지보 구조 설계	· 시공성 및 경제성을 고려한 적절한 갱구부 보강 공법 설계 · 갱구부 지질 상태를 고려한 보강 공법 설계
	버럭 처리	· 막장 상단 파쇄대 층에서 부석 낙하	· 막장지반관찰 및 설계보완	· 정확한 지질 조사 후 보강 공법 설계 · 파쇄대 예상 구간 시공 대책안 수립
	막장 관리	· 환기장치 환기효율이 저조하여 작업자 호흡기 장애 발생	· 공사 중 환기량 산정	· 터널 종류에 따른 적절한 환기시설 설계 · 정확한 환기 용량 파악
		· 막장 파쇄대 출현 시 과도한 굴진	· 굴진 길이	· 파쇄대 구간 적절한 보강 대책 수립 · 적절한 보강 공법 설계 · 적절한 굴진장 및 보강대책 수립
		· 부정확한 지질조사로 과도한 굴진	· 굴진 길이	· 정확한 지질 조사로 적정 굴진장 설계 · 불안정한 지반일 경우 적절한 보강공법 설계
· 지하수 대비 미흡으로 막장 슬라이딩	· 지질 및 지하수 사전조사 · 지하수 고려항목	· 유입수의 특성을 고려한 보강공법 설계 · 차수 및 지하수 유도 배수 계획		
터널 지보공 작업	강지보 설치	· 부정확한 암 판정으로 부적정한 지보설지로 막장 붕락	· 실질적인 암 판정 기준 선정 · 강지보제의 설치 간격 및 보강 공법	· 정확한 지반 계수 및 암질 판단 기준 선정 및 적용 · 지반상태에 따른 적절한 암질 Type 결정 및 지보간격 및 보강공법 설계

4. 결론

본 연구를 통하여 터널사업에 체계적이고 합리적인 안전영향평가를 도입하고 적용성을 검토하여 향후 유사 프로젝트 수행 시 적용할 수 있는 방안도 모색하였다. 건설안전영향평가가 제대로 도입된다면 유해위험수준의 식별을 통한 사전 안전도 차원의 설계가 가능지고 이를 통한 안전시공을 유도하여 재해발생 가능성과 강도를 최소화하고, 건설사업의 안전사고 예방차원에서 막대한 국고의 낭비를 방지할 수 있을 뿐만 아니라 인명손실 등의 인재를 방지할 수 있을 것이라 사료된다.

참고문헌

1. 한국시설안전기술공단(2005). *건설사업 안전영향평가제도 도입방안에 대한 연구*.
2. 건설교통부 (1997). *건설공사의 확률적 위험도 분석평가 기법 개발*.
3. 한국산업안전공단 (2002). *건설중대재해 사례와 대책*.