

BMS 데이터를 활용한 콘크리트 교량의 결함-공법-비용 매핑 알고리즘 개발

이창준* · 박원영** · 차용운*** · 장영훈**** · 박태일*****

Lee, Changjun* · Park, Wonyoung** · Cha, Yongwoon*** · Jang, Young-Hoon**** · Park, Taeil*****

Development of Defect-Repair Method-Cost Mapping Algorithm of Concrete Bridge Using BMS Data

ABSTRACT

As aged infrastructures have been increased, the importance of accurate maintenance costs and proper budget allocation for infrastructure become prominent under limited resources. This study proposed a mapping algorithm between representative defects, repair methods, and the estimated maintenance costs for concrete bridges. In this regard, using BMS (Bridge Management System) data analysis, bridge repair methods were classified and matched with defects according to their locations, types, and sizes. In addition, the maintenance costs were estimated based on the amount of work-load and quantity per unit using CSPR (Cost Standard Production Rate). As a result, the level of accuracy was an average of 85.1 % compared with the actual bill of quantity for Seoul bridge maintenance. The accuracy of maintenance costs is expected to be enhanced by considering the various site conditions such as pier height, extra charge conditions, additional equipment, etc.

Key words : Infrastructure maintenance, Concrete bridge, Defect-repair method, Cost estimation, Bridge management system

초 록

최근 30년 이상 노후화된 국내 인프라의 증가로 한정된 예산 내에서 인프라 유지관리를 위한 정확한 유지관리 비용산출과 그에 따른 적절한 예산분배의 중요성이 증대되고 있다. 이에 본 연구에서는 콘크리트 교량의 대표적인 결함과 이에 대한 보수보강 공법들을 매칭하고 유지보수에 필요한 비용을 산정하였다. 표준품셈과 BMS (Bridge Management System) 데이터 분석을 통해 교량의 보수보강 공법을 분류하였으며, 결함의 위치와 종류, 크기에 따라 결함-공법을 매칭하였다. 그리고 표준품셈을 기준으로 단위당 작업량과 물량을 계산하여 노무비, 경비, 재료비를 구분하여 산출하였다. 서울시 교량 유지보수 내역서와 비교를 통해 평균 예측 정확도가 85.1%가 나왔으며, 결함의 간단한 조건을 통해 유지보수 비용을 파악할 수 있다. 향후 현장 조건을 고려한 장비 및 야간작업 여부를 추가하여 더 높은 유지보수 비용을 파악할 수 있을 것으로 기대된다.

검색어 : 인프라 유지관리, 콘크리트 교량, 결함-공법, 비용예측, 교량관리시스템

* 정회원 · 한국건설기술연구원 건설정책연구소 박사후연구원

(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · changjun@kict.re.kr)

** 종신회원 · 한국건설기술연구원 건설정책연구소 수석연구원

(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · wypark@kict.re.kr)

*** 한국건설기술연구원 건설정책연구소 수석연구원 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · ywcha@kict.re.kr)

**** 한국건설기술연구원 건설정책연구소 박사후연구원 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · yhj@kict.re.kr)

***** 종신회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 건설정책연구소 연구위원

(Corresponding Author · Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · teailpark@kict.re.kr)

Received December 21, 2022/ revised January 30, 2023/ accepted January 31, 2023

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

국내 경제 성장과 산업 발전에 많은 영향을 미친 인프라는 2020년 기준으로 30년 이상 된 시설물이 전체 시설물의 17.5%(2만 7,997개)에 달하며, 10년 뒤에는 26.8%(4만 2,908개)에 증가하게 된다. 특히 교량은 향후 10년 뒤 30년 이상 노후화율이 49.73%에 달하게 된다(Lim et al., 2021). 최근 기후변화에 따라 인프라 노후도 가속도는 더욱 빨라질 전망이다. 세계경제포럼(World Economic Forum)은 OECD 국가들의 기반시설에 대한 투자는 축소되는 반면에, 유지관리 및 성능개선 투자는 급증할 것으로 전망하였다(WEF, 2019). 인프라 유지관리의 중요성은 점차 커지고 있지만 국내의 유지관리를 위한 기술은 아직 부족한 실정이다.

주요 선진국들은 시설물별, 지역별 기반시설의 노후도와 유지관리 수준을 파악할 수 있는 성능카드를 발간하고 있다. 미국은 2005년 LTBP (Long-Term Bridge Performance) 프로그램을 통해 교량의 성능 데이터를 모니터링 할 수 있는 프로그램을 구축했다. 뉴질랜드는 교량과 도로망의 중요도와 위험도 산정 방법을 제안하여 다양한 시나리오 대비 유지관리 전략을 수립할 수 있도록 하였으며, 호주도 사회기반시설물 유지관리에 자산관리 개념을 도입하여 자산관리 프로그램을 운영하고 있다. 국내에서는 노후 인프라 관리를 위해 2018년 「지속가능한 기반시설 관리 기본법」을 제정하였으며, “지속가능한 기반시설 안전 강화 종합대책”을 발표하였다. 그러나 최근 코로나 대응으로 인한 관련 예산 증가로 인해 인프라 유지관리 예산배정에 어려움을 겪고 있다. 따라서 SOC (Social Overhead Capital) 분야의 한정된 예산을 유지관리 분야에서 효율적으로 활용하기 위한 유지관리 예산분배 체계의 마련이 시급하다. 또한 재난안전법 상의 특정관리대상시설이 제3종 시설물의 시설물 안전법 편입으로 안전 점검 의무 대상 시설이 확대됨에 따라 유지관리 비용 증가의 추세가 급격하게 커질 것으로 예상된다. 현재 인프라의 유지보수는 대부분 견적에 의존하고 있기 때문에 정부의 SOC에 대한 투자 추세를 고려하여 한정된 예산을 효율적으로 배분하기 위한 정부에서 제시하는 합리적인 유지관리 비용 산정 기준이 요구된다. 특히 교량은 구성하고 있는 부재의 종류가 다양하기 때문에 부재와 결함의 조건에 에 따른 합리적인 보수보강 공법결정과 그에 따른 정확한 비용 예측이 필수적이다. 이에 본 연구에서는 콘크리트 교량에 대한 대표적인 결함들을 도출하여 보수공법을 매칭하고, 공법별 비용을 산정하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 노후화된 콘크리트 교량의 유지관리를 위해 결함에 따른 보수보강 공법을 제시하고, 공법별 단위당 단가를 제시하여

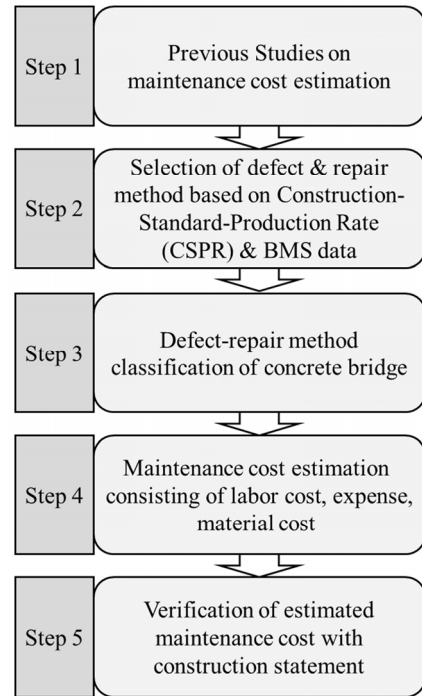


Fig. 1. Research Flow

물량에 따라 유지보수 비용을 산정할 수 있는 체계를 제시하고자 한다. 이를 위해 첫째, 인프라 유지관리 기법과 예산분배와 관련된 문헌을 조사하고 국내의 원가산정 기준 현황을 조사하였다. 둘째, 표준품셈에서 활용한 가능한 항목과 BMS 데이터를 활용하여 결함, 공법을 선정하였다. 셋째, 결함의 위치, 종류, 크기와 보수보강 공법의 분류체계를 개발하였다. 넷째, 표준품셈과 내역서를 기반으로 공법별로 노무비, 경비, 재료비를 산정하였다. 마지막으로, 교량 유지보수 공사 내역서와 비교 분석을 통해 예측된 유지보수 비용의 정확도를 평가하였다. 연구의 전체적인 흐름을 요약하면 Fig. 1과 같다.

2. 연구배경

2.1 문헌고찰

교량과 같은 인프라의 유지관리는 교량의 정보를 파악하고 부재별 성능 변화와 비용 예측을 위한 분석이 중요하다(Cha et al., 2015; Kim and Jang, 2017). 교량의 성능 예측을 위해서는 확률적 모델론을 활용하는 연구가 많이 진행되었으며, 이런 연구의 경우 주로 교량의 정밀점검 데이터와 정밀안전진단 데이터를 사용하여 보수보강 등급을 파악하고, 이를 기반으로 상태등급 데이터가 구축하였다. 기존 관련 연구를 살펴보면 Sun et al.(2016)은 교량의 대표 부재별 대표 보수보강 공법을 도출하여 적용 빈도를 고려한

평균 단가를 제시하였다. Lee et al.(2016)은 교량의 유지관리 의사결정을 위해 사용성, 기능성 등의 요소가 포함된 성능 예측 방법을 제시하고 성능 향상을 위한 시설물 예측 방법론을 개발하였다. Lee et al.(2018)은 점검 이력 데이터 기반 부재별 상태예측 모델과 실제 유지관리 교량에 적용 가능한 베이지안 업데이트 기법을 제안하였다. 그리고 운영단계 교량의 예방적 유지관리 시나리오를 제시하여 실제 공용 중인 교량에 대한 적용성을 검토하였다 (Lee et al., 2019).

사회기반시설의 유지관리는 국가와 지자체의 예산을 통해 유지 관리 비용이 지출되기 때문에 인프라의 종합적인 가치와 경제성을 파악하고 유지관리 전략을 수립해야 한다(Lee et al., 2010; Lee, 2012). 이를 위해서 생애주기 관점에서 교량의 안전점수에 따른 성능 예측모델과 연계하여 교량의 유지관리 비용을 예측하고 목표 성능 관리수준의 변화에 따른 예산 변화를 추정하기 위한 방법론도 제시되었다(Sun et al., 2018). Park et al.(2006)은 신뢰성을 기반으로 안전도와 상태등급 등을 평가하고 이를 통한 생애주기 성능

Table 1. Maintenance Cost Standard of Domestic Major Authorities

		Organization			
		Korea Expressway Corporation	Land&Housing Corporation	Korea Railroad	City of Seoul
Operation	Title	Maintenance & rehabilitation (M&R) cost book	M&R cost book	Cost book for railway track	Design principle for M&R work
	Period	Annually	Regularly	Annually	Annually renewed and -annual unit cost based
	Basis	Construction-standard-product ion-rate (CSPR)	CSPR	CSPR	CSPR
	Difference	Develop a its own extra charge standards according to site condition.	Develop a extra charge standards for labor cost	Develop various types of extra charge standards including night time, types (single track/double track), etc.	Develop a Unit Cost Standard (including a new excellent technology such as pick up manhole) as well as extra charge standard for various conditions (including Night time, topography, etc.)
Items included	Coverage	14 types of work, 89 activities, and 1,186 unit costs included	5 sectors (Building/Civil work/Landscaping/Equipment /Electrical communication) and 2504 unit costs included	349 unit costs for railway track included	7 Sector (Pavement, manhole, road marking, landscaping, machine & electricity facility, etc.) and 695 unit costs included
	Major works	<ul style="list-style-type: none"> Earth work and face of slope repair Structures repair (Bridge/Tunnel) Pavement repair Subsidiary facilities repair Patrol/Cleaning/Snow removing Painting/Plant management 	<ul style="list-style-type: none"> Building: Most major works Civil work: focused on water & sewer and road facilities Equipment/Electrical communication): Focused on piping equipments 	<ul style="list-style-type: none"> track construction and assembly Turnout construction/ Expansion joint/ welding Items only for M&R such as removal and replacement included 	<ul style="list-style-type: none"> Pavement: M&R Manhole: 8 new excellent tehcnology applied Road marking: mainly about lane painting Specials: safety equipment
Features	<ul style="list-style-type: none"> * CSPR is mainly applied except details about extra charge * Clearly divided in specific types of work and material ex) expansion joint - material types, subdivisions in pipe replacement, concrete repair, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> * Extra charge standards for labor cost Rental ousing: 10 % Multi-family/multiple x housing: 20 % * Extra charge for Small scale construction (Only for building sector) For small scale construction, 1 day labor cost is applied when the job is finished in less than 8 hour * Equipment operating hours: divided in 4 hour and 8 hour 	<ul style="list-style-type: none"> * CSPR is applied for building and civil work as it is * Characteristic of railway track is reflected Extra charge for nighttime and electricity shutdown (3, 4 hour) Different extra charge for single track and double track M&R cost book is only used for railway track 	<ul style="list-style-type: none"> * CSPR is mainly applied * Extra charge for various conditions (including Night time, topography, etc.) * For each, type of work, installation standard for safety equipment is prepared separately * Item is not exist in CSPR, similar standards ard used 	

및 비용을 평가하는 방법들을 제시하였다. 또한 교량의 선제적 유지관리를 통해 생애주기 비용을 절감하고, 성능개선과 유지관리 비용의 조합 기반의 최적 유지관리 전략 수립을 위한 연구도 수행되었다(Jeong et al., 2016; Park et al., 2007a).

합리적인 예산분배를 위해서는 단순히 인프라의 유지관리 비용 뿐만 아니라 투자한 유지관리 비용에 따른 비용효과에 대해서도 파악해야 한다. Park et al.(2007b)은 우회도로의 효과를 고려한 이용자 지연비용과 차량운행비용의 정식화를 통해 실용적 도로이용자 비용 추정 모델을 개발하였으며, 이를 통해 도로의 생애주기 분석에 미치는 영향을 고찰하였다. Kim and Lee(2017)은 교량의 파손인자를 도출하고 위험도 기반의 우선순위 선정 모델을 제시하였다. 최근에는 인공지능을 활용하여 보수보강 공법을 선정하는 기술도 개발되었다(Kim et al., 2021).

국외에서는 유전자 알고리즘과 같이 최적 의사결정을 위한 방법을 활용한 연구가 수행되고 있다. Xie et al.(2018)은 유전자 알고리즘을 기반으로 안전성, 수명주기, 유지관리 비용, 환경영향에 대한 최적화 방안을 제시하였으며, 선제적 유지관리 시점, 주기와 교량 수명의 영향관계를 파악하였다. Ghodoosi et al.(2018)은 유전자 알고리즘을 통해 최소한의 수명주기 비용으로 교량의 구조적 안전성을 유지하기 위한 최적 비용을 예측 방법론을 제시하였다. Gui et al.(2021)은 probabilistic neural networks, radial basis fuction, principal component analysis와 같이 의사결정 알고리즘을 조사하고, 이에 대한 종합적인 평가 모델을 제시하였다. Jaafaru and Agbelie(2022)는 교량 성능영향 평가, 기계학습 모델, 다속성 효용 이론 및 유전자 알고리즘을 통해 교량의 위험도에 따른 우선순위를 산정하였다.

2.2 국내외 원가산정 기준 현황

국내에서 유지관리 원가산정은 대부분 표준품셈을 기반으로 하고 있으나 현재 신축과 유지보수 품이 혼재되어 있으며, 할증의 경우 ‘1장 적용기준’에서 부분적으로 제시하고 있다. 표준품셈의 유지보수 품은 “1편 공통, 2편 토목” 부분의 경우, 해당 공종(토공사, 조경공사, 철근콘크리트, 도로포장공사, 궤도공사, 강구조공사, 관부설 및 접합공사 內 유지보수)내에서 제시하고 있으며, “3편 건축, 4편 기계설비”부분의 경우, 별도의 장(유지보수공사)에서 제시하고 있다.

유지보수 공사 할증의 경우 대부분 표준품셈 기반으로 각 발주청 별로 해당 공사 특성을 고려한 할증 기준을 적용한다. 발주기관별 표준품셈 준용비율은 도로공사(70~80%), LH공사(10%), 철도공사(70%), 서울시(80~90%) 정도이며, LH공사의 경우 자체 품셈이 있어 표준품셈 준용비율이 낮은 것으로 추정된다. LH공사는 유지보수 공사 할증은 일괄 10%를 적용하고 있고, 서울시는

지세별, 야간할증 등 부분적으로 적용하고 있다. 한국철도공사는 휴전할증 3시간작업, 4시간작업 등을 적용한다(Table 1).

미국의 경우 RSMMeans의 Cost Data Book을 활용하여 유지관리 공사 예산 산정의 근거로 활용하고 있다. 특히 RSMMeans는 상업시설 신축공사, 주거시설 신축공사, 보수 및 리모델링공사 등 개별 Cost Data Book으로 분권 제시하고 있다. 특히 Facilities Maintenance & Repair Costs Book은 시설물 유지 및 수리 비용에 대한 내용으로 시설물 유지 및 보수(maintenance and repair)와 예방적(preventive) 유지관리 등, 유지관리 공사를 위한 상세한 내용(수선 교체주기, 작업조, 장비 운용시간 등)을 제공한다.

일본의 경우 유지보수 품셈을 별도로 발간하지는 않고 토목 부문은 해당 공종(하천, 도로공사)에서 건축 부문은 별도의 장(개수공사)에서 유지보수 제시하고 있다. 편제형식은 국내품셈과 유사하나, 내용 면에서 유지보수공사를 위한 적용범위, 시공개요 및 프로세스, 적용 자재 등 상세한 기준 제시하고 있다. 별도의 유지관리 품셈은 없으나 우리보다 앞서 유지관리 관련 공종을 확대시켜 나가고 있다.

3. 교량 보수보강 비용산정

3.1 교량 결함 보수보강 분류체계 매핑

「기반시설관리 기본법」에 따르면, 시설물 관리 주체는 유지관리 및 성능개선을 위하여, 중장기적으로 시설물의 상태를 평가하고 소요되는 예산을 추정하여 마련해야 한다. 그러나 시설물의 유지관리 공사비용은, 신설 공사와는 다르게 다양한 현장요건에 따라 공사비용이 다르게 나타난다. 또한 건적의 경우, 물량산출에 있어, 기본적으로 도면에 대한 해석과 이해도에 따라 산출하는 사람마다 다르게 나타날 여지가 있다. 따라서, 적절한 유지관리 비용 산정기준 마련을 위해서는, 유지관리 공사 비용산정 메커니즘에 대한 이해가 요구된다. 본 연구는 다양한 인프라 중 교량을 대상으로 하였으며, 교량 구조물인 기초, 교대/교각, 거더(주형), 슬래브(바닥판)에 한정하여 비용을 산정하였다.

현재 국내에 유지관리 공사 원가산정 기준인 표준품셈에서 활용 가능한 항목들을 공법별로 분류하였다. 주요 결함은 균열, 파손, 누수, 백태, 박리/박락 등 안전점검 및 정밀안전 진단 보고서에 주로 기록결함을 기반으로, 일부 결함 명칭이 중복되는 항목들은 통합하고 기타로 분류된 항목들은 별도의 매핑이 용이하지 않아 제외하였다. 공법은 국내 유지관리 공사 원가산정 기준인 표준품셈에서 활용 가능한 항목들로 적용하였다. 표준품셈에서 제공하지 않는 유지보수 항목에 대해서는 BMS (Bridge Management System) 데이터 약 20,000건에 대한 정보를 분석하여 결함과 공법을 매핑하였다.

결함에 대한 보수보강 공법 선정은 결함의 위치, 종류, 그리고 크기 순으로 분류한 후 매칭하였다. 우선 기초, 교대나 교각, 슬래브 등 결함의 위치에 따라 공법을 적용할 대상을 분류하고, 결함의 종류에 따라 유지보수 항목을 결정하였다. 그리고 결함의 크기나 깊이에 따라 표준품셈 항목에 준하는 공법 선정을 통해 최종적으로 결함과 보수보강 공법 분류체계를 작성하였다(Fig. 2). 본 연구는 콘크리트 교량을 대상으로 하였으며, 이에 대한 결함-보수보강 분류체계는 Table 2와 같다. 공법별 현장 여건에 따라 다양한 규격이 있는데 본 연구에서는 전문가 자문을 통해 일반적으로 가장 많이 활용되는 규격을 기준으로 적용하였다. 국내 표준품셈 개정 관련 전문가 3인을 대상으로 자문을 수행하였으며, 본 연구에서 선정한 유지보수 항목에 대해 특수한 상황이 아닌 일반적인 조건에 따른 대표규격을 선정하였다. 예를 들어 절삭 후 아스팔트 덧씌우기의 경우, 평면교차로 등으로 시공구간은 단절되어 장비는 이동하되, 장비 운반이 발생되지 않는 B-Type으로 대표 규격을 설정하였다. 교량받침 교체의 경우 교대 및 교각의 높이는 도로와

철도교의 일반적인 높이인 20 m, 교량받침 1기당 중량은 도로교의 탄성받침 기준을 고려할 때, 0.3~0.5 ton의 교량받침이므로 0.5 ton 이하로 대표 규격을 선정하였다.

균열, 파손의 경우 콘크리트 균열보수 공법을 사용하는데 일반적으로 표면처리 공법(표준품셈 6-8-1), 주입공법(표준품셈 6-8-2), 패커주입공법(표준품셈 6-8-3) 충전공법(표준품셈 6-8-4) 등이 있으며, 구조물의 특성과 균열현상을 고려하여 적절한 공법을 선정해야 한다. 한국시설안전공단에서는 안전점검 및 정밀안전진단에 관한 지침을 시설물별로 제시하고 있으며, 본 연구는 교량의 세부지침해설서 기반으로 공법을 선정하였다. 표면처리공법은 균열이 미세하게 발생했을 경우 보수재료를 입혀 방수성 및 내구성을 향상시키는 방법으로 균열의 내부를 처리하기 어려우므로 진행 중인 균열을 보수하기는 어렵다는 단점이 있다. 주입공법은 균열 부분에 에폭시 수지 또는 시멘트 등의 재료를 주입하여 콘크리트의 수밀성을 증가시켜 콘크리트 및 철근의 부식을 방지하는 공법이다. 패커주입공법은 콘크리트 구조물을 찬공하여 패커를 설치하고 지

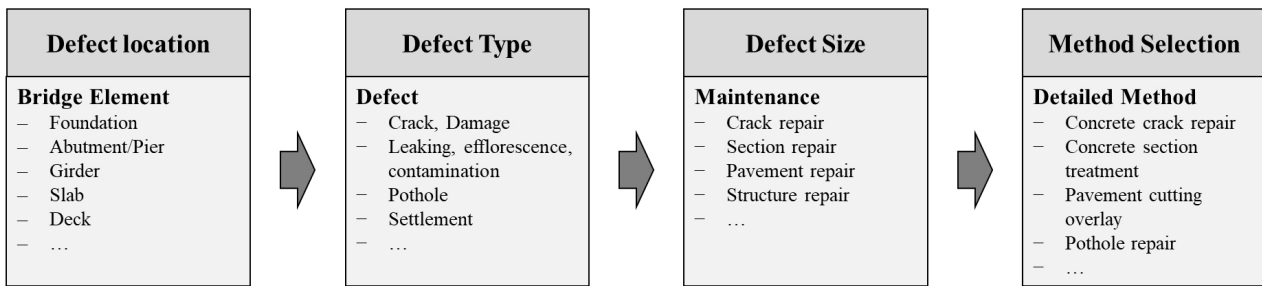


Fig. 2. Defect-Repair Method Classification Process

Table 2. Defect-Repair Method Classification

Location	Defect Type	Repair & Reinforcement Item	Repair & Reinforcement Method
Foundation Abutment/Pier Girder Deck	- Crack - Damage	- Crack repair	- Concrete crack repair
	- Leaking, efflorescence, contamination - Split/Delamination - Map crack - Material separation	- Section repair	- Concrete section treatment - Concrete section rehabilitation
Pavement	- Abrasion/Wear - Settlement - Plastic deformation - Pothole	- Pavement repair - Pavement cutting overlay	- Asphalt cutting overlay - Pothole repair
Bearing	- Damage - Corrosion, Split/Tearing, Loss of bearing area - Deterioration	- Bearing repair - Bearing replacement	- Bearing replacement
Expansion Joint	- Damage - Corrosion, Split/Tearing, Loss of bearing area - Deterioration - Seal adhesion, Seal damage	- Joint repair - Joint replacement	- Joint replacement

수발포재를 사용하여 보수하는 공법이다. 충전공법은 일반적으로 균열폭이 0.5 mm 이상으로 크게 발생했을 경우 균열 부분을 U형 또는 V형으로 절취 후 보수재를 충전하는 공법이다.

콘크리트 단면이 누수, 오염되거나 박리, 박락 등의 파손이 발생했을 경우 단면보수를 하는데 콘크리트 단면처리(표준품셈 6-8-5) 또는 콘크리트 단면복구(표준품셈 6-8-6)를 수행한다. 콘크리트 단면처리는 보수 두께가 10 mm 이하인 경우 콘크리트면을 그라인더로 연마하고, 표면을 모르타르로 미장하여 마감한다. 콘크리트 단면복구는 보수 두께가 50 mm 이하인 경우 콘크리트면을 치핑, 물세척하고 표면의 모르타르 미장 처리 및 코팅재 바름까지 수행하는 공법이다.

교량의 슬래브에서는 일반적으로 아스팔트에 대한 유지보수 공사가 가장 많다. 절삭 후 아스팔트 덧씌우기는 아스팔트 포장면을 파쇄기 등을 통해 적삭 후 아스팔트로 재포장하는 공법으로 아스팔트 포장 절삭, 유제살포, 포장 및 다짐의 순으로 수행된다. 소파보수는 대형장비의 투입이 어려운 상황에서 아스팔트 포장면을 소형장비로 절삭 후 아스팔트로 재포장 하는 공법이며, 공사 방법은 절삭 후 아스팔트 덧씌우기와 같다. 두 공법 모두 현장 여건에 따라 3개의 타입이 있지만 본 연구에서는 대표적으로 일반적으로 가장 많이 적용되는 B-type을 기준으로 한다.

교량받침 교체는 교대 및 교각의 기존 포트받침, 탄성받침 등을 철거하고 신규 자재를 재설치 하는 작업으로 표준품셈에서는 콘크리트 깨기, 기존 교량받침 및 sole plate 철거와 신규 교량받침의 설치 작업, 모르타르 타설 및 양생작업까지 포함하는 공사를 말한다. 교대 및 교각의 높이와 교량받침 1기당 중량에 따라 투입되는 인력과 장비의 규격이 차이가 난다. 본 연구에서는 대표 규격을 교대 및 교각 높이 20 m 이하, 교량받침 1기당 중량 0.5 ton 이하로 한다.

교량신축이음 교체는 기존의 신축이음장치(모노셀형, 핑거형, 레일형 등)를 철거하고 포장 및 콘크리트 파쇄 후 신규 자재를 설치하는 공사이며, 차단 차로 수와 절단폭에 따라 인력과 장비의 규격 차이가 발생한다. 본 연구에서는 대표 규격을 2차로 차단, 절단폭 1,200 m 이하를 기준으로 한다.

3.2 교량 보수보강 비용산정

교량의 콘크리트 보수를 위한 대표적인 공법의 비용은 '22 건설공사 표준품셈(MOLIT and KICT, 2021)을 기반으로 산정하였으며, 노무비, 경비, 재료비로 구분하였다. 효율적인 보수보강 비용 산정을 위해 물량 산출 시 비용이 자동으로 산정될 수 있도록 단위당 (m, m², m³) 비용으로 결과를 나타내기로 하였다. 이를 위해 표준품셈에 따른 일일 시공량과 인력 및 장비 수량을 바탕으로 단위 시공량과 단위 시공량에 필요한 인력, 자재의 수량을 도출하였다.

$$\begin{aligned} & \text{단위당 투입 물량(인/}m) \\ & = \frac{1}{\text{일일 시공량}(m/\text{일})} \times \text{일일 투입물량(인/일)} \end{aligned} \quad (1)$$

우선 노무비는 '22 상반기 시중노임단가를 활용하였으며, 시중 노임단가는 일당 단가로 제시하고 있기 때문에 단가를 일당 시공량으로 나누어 단위당 단가를 계산하였다. 경비는 공구손료와 경장비, 기계경비 등으로 분류되는데 보수보강 공법에 따라 사용하는 경장비, 기계 등의 손료, 주연료, 잡재료 및 조종원의 단위물량과 단가를 곱하여 계산하였다. 재료비는 보수보강 공법에 따라 사용하는 재료와 물량의 편차가 크기 때문에 서울시 및 공단에서 사용한 공사비 내역서를 통해 대표적으로 사용되는 재료를 선정하였으며, 보수 물량은 단위당 단가로 나누어 계산하였다.

$$\begin{aligned} & \text{단위당 단가(원/}m) \\ & = \text{단위당 투입 물량(인/}m) \times \text{일당 단가(원/인)} \end{aligned} \quad (2)$$

콘크리트 균열보수는 일반적으로 특별인부와 보통인부가 작업한다. 예를 들어 콘크리트 균열보수(주입공법)는 특별인부 2인과 보통인부 1인이 작업에 투입되며, 일일 시공량은 28 m이다. Eq. (1)에 따라 특별인부는 m당 투입물량이 0.0714인, 보통인부는 0.0357인이며, 이에 단가를 곱하여 구한 단위당 특별인부의 노무비는 13,388원(0.0714 × 187,435), 보통인부의 노무비는 5,304원(0.0357 × 148,510)이다(Eq. (2)).

절삭 후 아스팔트 덧씌우기는 노면의 파쇄와 아스팔트 재포장을 위해 많은 장비가 투입된다. B-type의 현장에서는 노면파쇄기(2 m) 2대를 사용하며, 일일 시공량은 3,400 m²이다. 따라서 m²당 투입되는 노면파쇄기 물량은 0.0006이며, 일당 단가를 곱한 단위당 경비는 2,565원(0.0006 × 4,359,904)이다.

공사에 사용되는 모든 인력과 장비의 단가를 다음과 같이 구하고, 재료비는 앞서 서술하였듯이 내역서를 통해 대표 재료를 선정하여 최종적으로 교량의 대표적인 유지보수 공법에 대한 비용을 산정하였다(Table 3). 교량받침 교체와 교량신축이음 교체의 재료비는 대표 재료를 산정하기에 재료비의 범위가 너무 넓어 제외하였다.

3.3 비용 예측의 정확도

본 연구에서 개발된 유지보수 비용 예측을 통해 비용 산정 예측의 정확도 측정을 위하여 기수행한 유지관리공사 계약내역을 확보하여 시스템에서 산정한 비용과 비교 분석하였다. 실제 서울시에서 발주된 교량 유지보수 공사 내역서 6건을 활용하였으며, 확보된 유지관리공사 데이터가 콘크리트 보수공사에 국한되어 제한된 콘크리트 균열보수와 단면보수에 대해서만 비교하기로 한다.

예측 정확도는 1-(예측금액-내역서 금액)/내역서 금액으로 계

Table 3. Cost Estimation by Defect and Repair Method

Defect	CSPR	Amount	Unit	Labor cost	Expense	Material cost	Total
Crack repair	Concrete crack repair (surface treatment) [Dry B=0.3 mm, t=100 mm] Epoxy injection	110	m	2,157	43	6,804	9,004
	Concrete crack repair (injection method) [Wet B=0.3 mm, t=100 mm] Epoxy injection	28	m	18,692	374	907	19,973
	Concrete crack repair (packer method) [SKI method / dry B=0.3 mm below, t=100 mm] KPG epoxy, surface treatment agent	24	m	29,617	889	36,549	67,055
	Concrete crack repair (charging method) [Wet B=0.5 mm, t=100 mm] Epoxy and V-cut filling agent	23	m	14,606	438	11,151	26,195
Section repair	Concrete section treatment [B=10 mm] Polymer mortar	81	m ²	8,775	263	400	9,438
	Concrete section restoration [B=30 mm] Polymer mortar	9	m ³	78,979	3,159	10,800	92,938
Pavement cutting overlay	Asphalt cutting overlay (B-type)	3,400	m ²	1,234	4,455	918	6,607
Pavement repair	Pothole repair (B-type)	140	m ²	15,532	25,463	1,872	42,867
Bearing repair	Bearing replacement (Abutment/Pier height ≤ 20 m, Weight per unit ≤ 0.5 ton)	0.40	EA	5,174,973	3,710,829	-	8,885,802 +
Expansion joint repair	Joint replacement (2 lane blocked, Cutting width ≤ 1,200 mm)	7	m	589,755	1,280,947	-	1,870,702 +

산하였으며, 콘크리트 보수 공법에 따른 평균 예측도는 85.1 %이다 (Table 4). 예측 정확도는 콘크리트 균열보수(표면처리) 공법도가 가장 높았으며, 콘크리트 균열보수(패커주입공법) 공법이 가장 낮았다. 콘크리트 균열보수(표면처리) 공법은 인력도 미장공만 포함되며, 경비에 포함되는 항목도 믹서 등으로 비교적 적은 종류가 사용되기 때문에 오차가 적은 것으로 나타났다. 콘크리트 균열보수(패커주입공법)은 재료로 사용되는 에폭시 쉐어링제와 주입제, 패커 등 사용되는 재료와 경장비의 종류가 많기 때문에 예측 정확도가 낮게 나타났다.

제시한 유지보수 비용의 예측 정확도가 낮게 나타나는 이유는 크게 세가지가 있다. 첫째, 최근 건설 기능인력의 급격한 임금 상승이다. 본 연구에서는 노무비를 시중노임단가를 기준으로 계산하였다. 그러나 최근 건설현장의 숙련인력 및 기능인력 부족과 고령화로 인해 실제 유지공사 현장에서는 시중노임보다 훨씬 높은 비용이 노무비로 지출되는 것으로 나타났다.

둘째, 대표 재료비 산정을 통한 계산 오차가 발생하였다. 같은 공법을 적용하여 유지보수 공사를 수행하더라도 사용하는 재료의 종류에 따라 물량과 비용 차이가 많이 발생할 수 밖에 없다. 본 연구는 일반적으로 가장 많이 사용되는 재료 선정을 통해 재료비를 산정하였지만 그럼에도 불구하고 현장마다 사용되는 재료의 규격과 단가 그리고 물량의 차이가 크게 나타났다. 그 결과, 콘크리트 균열보수(패커주입공법)와 같이 재료비의 비중이 높은 공법이나 콘크리트 단면처리와 같이 재료 사용량이 높은 공법에서는 예측 정확도가 낮았다.

마지막으로, 현장 조건에 따른 할증 요건이다. 표준품셈에는 현장 여건에 따라 고소작업 등의 인력인상에 장비가 필요할 경우 기계경비를 별도로 계상해야한다. 또한 야간작업을 할 경우에는 품을 25 %까지 가산이 가능하며 첫 번째로 제시한 바와 같이 실제 야간작업 시에는 50 % 이상 노무비가 증가하는 경우도 발생한다. 본 연구에서 비교분석한 유지관리공사 계약내역서에서는 할증

Table 4. Accuracy of Estimated Maintenance Cost

	Unit cost (won)	Amount	Estimated cost (won)	Actual cost (won)	Accuracy (%)
Concrete crack repair (surface treatment)	9,004	180	1,620,720	1,501,020	92.0
Concrete crack repair (injection method)	19,973	116	2,316,868	2,062,356	87.7
Concrete crack repair (packer method)	67,055	150	10,058,250	7,698,300	69.3
Concrete crack repair (packer method)	26,195	125	3,274,375	2,751,625	81.0
Concrete section treatment	9,439	95	896,705	856,615	95.3
Concrete section restoration	92,939	60	5,576,340	4,869,120	85.5
Average					85.1

조건의 적용여부를 판단할 수 없기 때문에 예측금액과의 차이가 발생한 것으로 판단된다. 각 교량의 현장 조건에 따라 고소작업차, 예션 및 대신 등과 같은 장비를 사용 해야할지, 야간작업의 필요 여부를 판단함에 따라 유지보수 비용에 할증 요건을 추가하면 더 높은 정확도의 비용을 예측할 수 있을 것이다.

4. 결론

국내 인프라의 노후화로 인해 유지관리 및 성능개선에 대한 필요성과 수요는 급속도로 커지고 있다. 특히 교량은 10년 뒤 30년 이상 노후화율이 50 %에 달하는 수준으로 유지관리에 대한 투자가 급박한 실정이다. 유지관리 시장 규모의 증가로 인해 관련 법률과 제도가 구축되고 있으나, 사후대응적 관리체계와 한정된 예산으로 인해 합리적인 유지관리 예산분배에 어려움을 겪고 있다. 이에 본 연구에서는 효율적이고 예방적인 인프라 유지관리를 위해 콘크리트 교량의 대표적인 결함을 도출하고 결함에 따른 보수보강 공법의 매칭과 공법에 따른 유지보수 비용을 산정하였다.

제안된 분류체계는 교량의 구조물에 따라 결함의 위치, 결함의 종류로 분류하였다. 그리고 균열 크기에 따라 보수보강 공법을 매칭하였으며, 공법을 표준품셈에 준하는 항목들로 적용하였다. 표준품셈에서 제공하지 않는 유지보수 항목은 BMS 데이터를 분석하여 적용하였다. 비용은 공법에 따라 단위당 물량을 산출하고, 표준품셈과 시중노임단가를 활용하여 노무비, 경비, 재료비로 구분하여 산정하였다. 산정된 비용을 서울시의 교량 유지보수 살내역서 금액과 비교하였으며, 평균 예측 정확도는 85.1 %로 나타났다.

본 연구에서 제시한 교량의 결합-공법-비용 산정체계는 단위당 비용으로 산출하였기 때문에 결함의 위치, 크기와 종류를 파악하게 되면 유지보수 공사를 발주시 필요한 비용을 확인하는데 활용할 수 있다. 또한 업체의 다양한 유지보수 견적을 비교 분석 가능하며,

일관성 있는 공법 선정 및 비용 산정 측면에서 의의가 있다. 향후, 본 연구에서 제시하는 유지관리 비용 산정 기준의 정확도를 향상시키기 위하여 실제 현장에서 지출되는 노무비와 재료비에 대한 자료 확충과 현장 조건 및 야간 할증에 따른 비용 변화에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비 지원 (주요사업) 사업으로 수행되었습니다 (과제번호 20230079-001, 건설정책 및 건설관리 발전전략).

References

- Cha, K. H., Kim, J. H. and Kong, J. S. (2015). "Development of the deterioration models for the port structures by the multiple regression analysis and markov chain." *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 28, No. 3, pp. 229-239. DOI: <https://doi.org/10.7734/COSEIK.2015.28.3.229> (in Korean).
- Ghodoosi, F., Abu-Samra, S., Zeynalian, M. and Zayed, T. (2018). "Maintenance cost optimization for bridge structures using system reliability analysis and genetic algorithms." *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 144, No. 2, 04017116. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001435.
- Gui, C., Zhang, J., Lei, J., Hou, Y., Zhang, Y. and Qian, Z. (2021). "A comprehensive evaluation algorithm for project-level bridge maintenance decision-making." *Journal of Cleaner Production*, Vol. 289, 125713. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125713>.
- Jaafaru, H. and Agbelie, B. (2022). "Bridge maintenance planning framework using machine learning, multi-attribute utility theory and evolutionary optimization models." *Automation in Construction*, Vol. 141, 104460. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104460>.

- Jeong, Y. S., Kim, W. S., Lee, I. K. and Lee, J. H. (2016). "Bridge life cycle cost analysis of preventive maintenance." *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 20, No. 6, pp. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.11112/jksmi.2016.20.6.001> (in Korean).
- Kim, D. J. and Lee, M. J. (2017). "Basic study for development of risk based bridge maintenance priority decision model." *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 18, No. 2, pp. 108-116. DOI: <https://doi.org/10.6106/KJCEM.2017.18.2.108> (in Korean).
- Kim, J. H., Jung, I. S., Yun, W. G., Kim, J. Y. and Park, I. S. (2021). "Preliminary analysis on artificial intelligence-based methodology for selecting repair and rehabilitation methods of bridges." *Journal of Korean Society of Industry Convergence*, Vol. 24, No. 6, pp. 861-872. DOI: <https://doi.org/10.21289/KSIC.2021.24.6.861> (in Korean).
- Kim, J. K. and Jang, I. Y. (2017). "Proposal of domestic road bridge deck deterioration models and forecast of replacement demand." *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 21, No. 4, pp. 61-68. DOI: <https://doi.org/10.11112/jksmi.2017.21.4.061> (in Korean).
- Lee, D. H., Kim, J. W., Jun, T. H., Jeong, W. S. and Park, K. T. (2016). "Development of performance prediction method for bridge and tunnel management decision-making." *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 20, No. 1, pp. 33-40. DOI: <https://doi.org/10.11112/jksmi.2016.20.1.033> (in Korean).
- Lee, J. H., Choi, Y. R., Ann, H. J. and Kong, J. S. (2019). "The preventive maintenance strategy in operation stage of bridge using bayesian inference." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 39, No. 1, pp. 135-146. DOI: <https://doi.org/10.12652/Ksce.2019.39.1.0135> (in Korean).
- Lee, J. H., Lee, K. Y., Ahn, S. M. and Kong, J. S. (2018). "Proposal of maintenance scenario and feasibility analysis of bridge inspection using bayesian approach." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 38, No. 4, pp. 505-516. DOI: <https://doi.org/10.12652/Ksce.2018.38.4.0505> (in Korean).
- Lee, M. J., Park, K. H., Park, C. W., Sun, J. W. and Lee, D. Y. (2010). "A study on asset valuation method for bridge asset management." *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 11, No. 6, pp. 35-44. DOI: <https://doi.org/10.6106/KJCEM.2010.11.6.35> (in Korean).
- Lee, Y. S. (2012). "The research on economic valuation of maintenance alternatives for bridge." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 32, No. 4D, pp. 387-396. DOI: <https://doi.org/10.12652/Ksce.2012.32.4D.387> (in Korean).
- Lim, C. S., Kim, D. J., Hwang, K. R., Shin, B. K., Park, K. S., Oh, H. S., Lee, S. O., Kim, D. H., Yu, H. J., Lee, S. Y. and Bang, Y. J. (2021). *A study on the improvement of facility safety management system in accordance with climate change*, Korea Authority of Land & Infrastructure Safety (KALIS), and Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Republic of Korea, pp. 112 (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT) (2021). *2021 Construction standard production rate*, Ministry of Land Infrastructure and Transport, Korea (in Korean).
- Park, K. H., Kong, J. S., Hwang, Y. K. and Cho, H. N. (2006). "Development of bridge maintenance method based on life-cycle performance and cost." *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 26, No. 6A, pp. 1023-1032 (in Korean).
- Park, K. H., Lee, S. Y., Hwang, Y. K., Kong, J. S. and Lim, J. K. (2007a). "Development of the performance-based bridge maintenance system to generate optimum maintenance strategy considering life-cycle cost." *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 11, No. 4, pp. 109-121 (in Korean).
- Park, K. H., Sun, J. W., Lee, S. Y., Lee, J. S. and Cho, H. N. (2007b). "Practical model to estimate road user cost for bridge maintenance strategy." *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 11, No. 7, pp. 131-144 (in Korean).
- Sun, J. W., Lee, D. Y. and Park, K. H. (2016). "Development on repair and reinforcement cost model for bridge life-cycle maintenance cost analysis." *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 17, No. 11, pp. 128-134. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.11.128> (in Korean).
- Sun, J. W., Lee, H. S. and Park, K. H. (2018). "Development of maintenance cost estimation method considering bridge performance changes." *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 19, No. 12, pp. 717-724. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.12.717> (in Korean).
- World Economic Forum (WEF) (2019). *The global competitiveness report 2019*, Switzerland.
- Xie, H. B., Wu, W. J. and Wang, Y. F. (2018). "Life-time reliability based optimization of bridge maintenance strategy considering LCA and LCC." *Journal of Cleaner Production*, Vol. 176, pp. 36-45. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.123>.