Project level에서의 철도 PC Beam교량의 경년열화모델구성 및 유지관리비용 추정

Time-Dependent Degradation Model and Maintenance Cost of Rail line PC Beam Bridge in Project Level

권세곤1) · 박미연2) · 도정윤3) · 김두기4)

Kwon, Se-Gon · Park, Mi-Yun · Do, Jeong-Yun · Kim, Do-kie

ABSTRACT

Construction project have extremely high risk in the process of construction owing to unexpected event, like as design amendment. As a result, owner have to endure enormous extra-cost to control the risk and continue to the project having more higher uncertainty. Also, if the structure is completed, it is needed that the structure is protected and maintained continuously during life cycle time to satisfying original aim of structure itself. LCC analysis to calculate cost of structure alternatives divides into two stage, one is design_LCC and the other is maintenace_LCC. But two stages all is needed in the transition deterioration model to calculate more reasonable LCC analysis. This paper developed the model using analysis of FMS contents and survey from professional about Prestressed concrete beam girder bridge(PC Beam bridge)in railway. The model is focused in project level of PC beam because any condition state information for element level analysis can not get up. This paper is intended to use the developed model in LCC analysis of PC Beam bridge in railway and constitute the foundation to perform more deep study in the near future.

1. 서 론

건설프로젝트는 사업의 특성상 시공 중 설계단계에서 예기치 못한 변수로 인하여 설계변경을 하는 경우 막대한 추가 비용이 발생하여 리스크 관리 차원에서 발주자는 매우 높은 불확실성을 가지고 프로젝트를 진행하게 된다. 또한 완공된 구조물을 설계수명기간동안 본래의 목적을 충족시키기면서 제수명을 다하기 위해서는 사용기간 동안 합리적인 유지관리계획이 필요하다. 따라서 건설 예산의 효율적인 집행을 위해서는 다양한 설계대안 및 유지관리전략 등에 대해 구조물의 생애주기비용(LCC)를 예측할 필요가 있다. LCC는 프로젝트의 전체 프로세스 중에서 기획/설계단계에서 시공 및 운영 등을 고려하여 수립되는 설계단계 LCC분석과 완공 후 운영단계에서 시설물의 운영수준 및 유지관리 전략 수립을 통해 예산 투입까지를 고려하는 유지관리단계 LCC분석으로 구분할 수 있다.

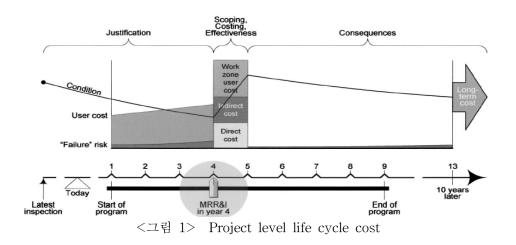
보다 합리적인 LCC해석을 위해서는 설계단계LCC에서든 유지관리단계LCC에서든 구조물의 경년열화모델이 요구된다. 구조물의 경년열화모델은 고려되는 영향인자의 수준에 따라 달라지는 다중 스케일 (multi-scale)적인 특성이 있으므로 본 연구에서는 철도 PC beam 교량에 대한 프로젝트 레벨에서의 경년열화모델을 실제유지관리자료 및 안전진단 자료, 그리고 설문조사자료를 통계 분석하여 개발하였으며 이를 통해 철도 PC빔 교량의 열화특성을 반영한 LCC분석모델을 제시하고자 하였다.

¹⁾ 정회원 · 군산대학교 토목공학과 · 박사과정 · 한국철도공사 · E-mail : tibobkr@korail.com - 발표자

²⁾ 정회원 · 아이엠기술단 기술연구소장 · 공학박사 · E-mail : <u>momo6238@hanmail.net</u>

³⁾ 정회원 · 군산대학교 Post Doc · 공학박사 E-mail: arkido@gmail.com

⁴⁾ 정회원 · 군산대학교 토목공학과 조교수 · 공학박사 E-mail: <u>kim2kie@chol.com</u>



2. 연구방법 및 내용

2.1 연구방법

본 연구에서는 시설물정보관리종합시스템(Facility Management System; 이하 FMS)에 입력되어 있는 데이터를 수집 및 분석이 가능한 상태로 정리한 자료와 철도 교량에 대한 유지관리 경험이 있는 전문가들의 설문자료를 분석하여 교량의 열화이력을 파악하였다. FMS을 통해 구조물의 보수보강 이력이 기록되어 관리된 지는 1990년대 중반이후로 10년의 관리 이력을 가지고 있고, 입력을 하는 관리자의 성실도와 숙련도의 문제로 인하여 저장되어 있는 자료는 오류/불확실성을 내포하고 있으므로, 본 연구에서는 상기의 설문조사를 실시하여 FMS의 자료와 비교 검토하여 상호 보완함으로써 국내 철도교의 상태이력과 열화 추이를 검토할 수 있는 자료를 준비하였다.

2.2 철도교의 상태평가

철도 교량에 대한 열화모델을 개발하기 위해서는 우선적으로 구조물의 상태를 정량적으로 표현할 수 있는 지표가 필요하다. 교량의 유지관리에 있어 구조물의 건전성 및 역학적 상태를 표현하기 위해 A등급으로부터 E등급까지의 상태등급 지표를 이용하고 있다. 그러나 현행 점검 및 진단 결과는 관리자 및점검자의 수준 및 경험 정도에 의해 주관적인 판단이 많이 작용하게 된다. 이와 같은 제반 문제점을 해결하기 위해 한국시설안전기술공단(2003)에서는 교량 구조물의 안전점검 및 안전진단 시 책임기술자의주관적인 견해를 최소화하고, 객관적인 입장에서 구조물의 상태평가를 수행할 수 있도록 결함지수(0~1)로 표현되는 새로운 평가기준을 제시하여 공용년수에 따른 상태등급의 전이를 정량적으로 판단할 수 있도록 하였다.

<표 1> 상태평가등급 기준

	,
상태평가 등급	상태 및 안전성
А	문제점이 없는 최상의 상태
В	보조부재에 경미한 결함이 발생하였으나 기능발휘에는 지장이 없으며 내구
	성 증진을 위하여 일부의 보수가 필요한 상태
С	주요부재에 경미한 결함 또는 보조부재에 광범위한 결함이 발생하였으나 전체적인 시설물의 안전에는 지장이 없으며, 주요부재에 내구성, 기능성 저
	하 방지를 위한 보수가 필요하거나 보조부재에 간단한 보강이 필요한 상태 주요부재에 결함이 발생하여 긴급한 보수·보강이 필요하며 사용제한 여부
D	를 결정하여야 하는 상태
Е	주요부재에 발생한 심각한 결함으로 인하여 시설물 안전에 위험이 있어 즉
	각 사용을 금지하고 보강 또는 개축을 하여야 하는 상태

2.3 자료분석방법

공사·공단의 시설물 유지관련 담당자의 설문자료와 시설물점검 담당자가 FMS에 입력한 자료를 바탕으로 PC Beam교량의 유지보수 현황을 수집한 자료는 3년 단위의 정밀안전진단자료 및 정밀자체정검를 토대로 하여 정리하였다. 3년 단위로 정리된 자료를 토대로 도수분포표를 작성하고, 범용 통계분석프로그램인 미니탭을 이용하여 히스토그램을 작성하고 적정한 확률밀도함수(PDF)를 추정하였다. 구조물의보수 및 보강이 발생하는 시점은 반드시 준공 후 이뤄지는 점을 고려하여 식(1)과 같은 형상모수와 척도모수로 구성되는 2모수 와이블 확률밀도함수를 철도 PC Beam교량의 유지보수발생시기를 나타내는함수로 사용하였다. 또한 FMS 데이터의 상태등급변화 추이를 조사하기 위해 5년마다의 상태등급의 변화양상을 분석하여 보았다. 5년이라는 기간의 설정은 준공 후 상태변화에 대한 결과를 좀 더 명확하게보고자 하여 설정하였다. 본 연구에서는 요소 부재단위의 상태등급(요소수준의 상태등급)의 변화를 알수 있는 구체적인 자료가 없어 교량단위의 상태등급(프로젝트 레벨 수준)의 변화에 대한 정보를 이용하여 상태등급의 전이과정을 분석하였다.

유지보수밀도함수:
$$f(x) = \frac{a}{b} \cdot \left(\frac{x}{b}\right)^{a-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{b}\right)^a}$$
 : 2모수 식(1)

유지보수발생률 함수:
$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{b}\right)^a}$$
 식(2)

신뢰도함수:
$$1 - F(x) = e^{-\left(\frac{x}{b}\right)^a}$$
 식(3)

여기서, a는 형상모수, b는 척도모수

<표 2> 설문 데이터 분석을 위한 설문문항 및 분석방법

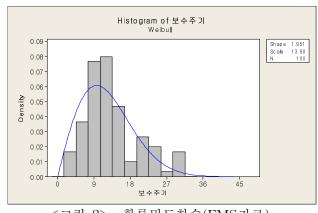
설문문항	1. PC Beam교 바닥판에서 유지보수가 필요한 균열의 발생 주기는? 2. PC Beam교 바닥판에서 유지보수가 필요한 열화 및 손상, 철근노출의 발생 주기는? 3. PC Beam교 신축이음의 유지보수가 필요한 손상의 발생 주기는? 4. PC Beam교 강제받침의 유지보수가 필요한 손상의 발생 주기는? 5. PC Beam교 거더 중앙부의 유지보수가 필요한 균열의 발생 주기는? 6. PC Beam교 고무받침의 유지보수가 필요한 손상의 발생 주기는? 7. PC Beam교 거더 받침부의 유지보수가 필요한 표면상태 및 철근노출의 발생 주기는? 8. PC Beam교 거더 받침부의 유지보수가 필요한 균열 발생 주기는? 9. PC Beam교 거더 중앙부의 유지보수가 필요한 표면상태 및 철근노출의 발생 주기는?
	10. 10 Dealine /19 80 89 19 1/12 1/1 200 0 0 1/12:
자료정리방법	1. PC빔 교량의 프로젝트 레벨에서의 유지관리빈도를 파악하기 위해 유지관리담당자가 파악하기 용이한 요소수준(element level)의 유지관리 빈도를 3년 단위로 설문을 하였음. 2. 요소수준의 유지관리빈도에 대한 설문결과를 프로젝트 레벨로 파악하기 위해서 공단과 공사의 각 항목의 설문결과를 종합하고, 3년의 유지관리구간별 각 빈도에 대한 평균을 내어 프로젝트 레벨에서의 유지관리빈도를 산출하였음.

<표 3> FMS 데이터 분석을 위한 데이터 분류 및 정리 예시

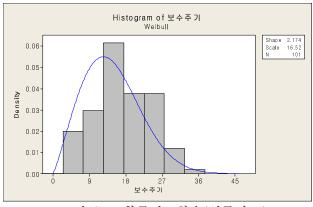
							교량성	け대등급		연왕								대상교량:	39개소			
교량명	준공년도	1-5년차 6-1			6-10년차	-10년차			11-15년차		16-20년차			21-25년차			26-30년차			31-35년차		
TESS.	ESET	절검반법	비용(천원)	상태등급	절검반법	비용(천원)	상태등급	점검반법	비용(천원)	상태등급	절검반법	비용(천원)	상태등급	절검반법	비용(천원)	상태등급	절검반법	비용(천원)	상태등급	절걸받벌	비용(천원)	상태통
A교량	96.10.03	정립(자체) 00.10.30		A→B																		
B교량	87.06.21							정립한정진단 99.08.09	118,983	A→0	정립한정진단 04.05.13	129,299	8→0	정립한정진단 06.11.11	2,788	8→8						
								정밀(자체) 02.10.01	3,010	0→8	정밀(자체) 05.12.18	444	0→8	정밀(자체) 07.12.10	1,848	8→8						
	96.10.03	정밀(자체) 00.10.16		A→B	정밀(자체) 02.09.04		B→B	정밀(자체) 07.09.27		B→B												
					정립(자체) 04.08.30		B→B															
C교량					정밀(자체) 05.09.05		8→8															
					정밀만전진단 06.06.07	80,930	B→B															
D교량	96.10.03	정립(자체) 00.10.18		A→B	정립(자체) 02.09.04		B→B	정립(자체) 07.09.20		B→B												
					정밀(자체) 04.08.30		8→8															
					정밀(자체) 05.09.05		8→8															
					정밀만전진단 06.06.07	98,759	B→B															
	74.08.00																정립한전진단 01.05.14		A-0	점립(자체) 05.09.05		0-
E교량																	정밀(자체) 02.09.04		0+0	정밀만점진단 06.06.26	104,038	0-
																	점립(자체) 04.08.30		00	점립(자체) 07.09.28		В-
- 7 21	00.12.00	정립(자체) 01.10.09		A→B	정립(자체) 05.09.01	230	B→0															
F교량		정밀(자체) 03.10.22		8→8	정밀(자체) 07.09.03	188	0→8															
G교략	00.08.10	정밀(자체) 03.03.03		A→A	정밀(자체) 07.08.15	874	A-A															
		정밀만전진단 03.05.20	48,595	A-0																		
		정밀(자체) 05.08.09		0 → A																		
	88.11.06							정밀만정진단 01.05.28	88,218	A→0	정밀(자체) 05.09.01	200	B→A									
н교량								정밀(자체) 01.09.22		00	정밀만전진단 06.07.03	91,088	A→B									

3. 공용년수에 따른 유지보수 발생빈도 분석

3.1 각 자료의 유지보수빈도를 나타내는 확률밀도함수



<그림 2> 확률밀도함수(FMS자료)

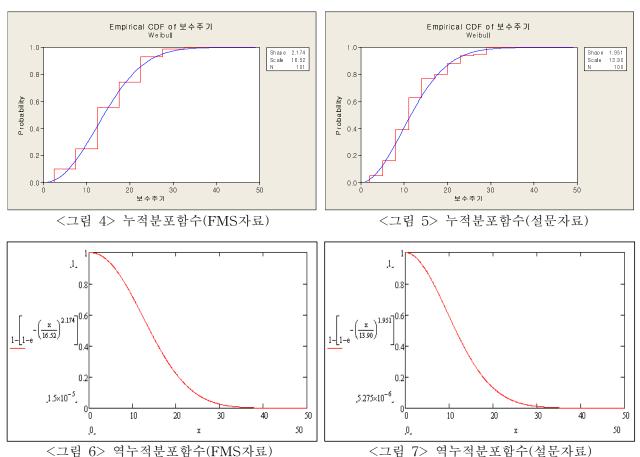


<그림 3> 확률밀도함수(설문자료)

<그림 2>의 FMS자료의 경우 전체 공용기간 중 실시된 유지보수 중 25%가 9.3년에 75%가 19.2년에 발생하였으며, 평균적인 유지보수시기는 15.5년으로 분석되었다. <그림 3>의 설문자료의 경우 전체 공용 기간 중 실시된 유지보수 중 25%가 7.3년에 75%가 16.4년에 발생하는 것으로 분석되었으며 평균적으로 유지보수는 15.4년에 보수가 시행되는 것으로 조사되었다. 본 연구의 결과인 <그림 2>과 <그림 3>의 분석 자료를 토대로 유지관리빈도를 파악하여 보면 평균적으로 15년의 유지보수주기가 발생하는 것으로 파악되고 있으며, fib의 Model code for service life design에 규정하고 있는 사용성한계상태(SLS)의 파 괴확률이 0.1인 점을 감안하여, 설계단계에서 예방적 유지관리를 수립하기 위해서는 발생빈도가 10%정 도인 수준을 유지하도록 유지관리계획을 수립하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

3.2 Weibull 누적분포함수 · 역누적분포함수

<그림 4>과 <그림 5>는 각각 FMS자료와 설문자료에 의해 파악된 유지보수발생주기의 누적확률분포 를 나타내고 있는 것이며, <그림 6>와 <그림 7>은 각각의 자료에 대한 시간경과에 대한 신뢰성의 변화 를 나타내는 그림이다. <그림 4>와 <그림 5>는 시간의 경과에 따른 PC빔 교량의 프로젝트 레벨에서의 열화과정을 나타내는 그래프로 해석을 할 수 있으며, fib의 사용한계상태를 규정하는 파괴확률=0.1을 기준으로 볼 때 FMS자료와 설문조사자료에 의한 최초 유지보수시점은 각각 5.9년과 4.3년으로 예측되고 있다. 이는 유지보수시기가 비교적 이른 것으로 판단할 수 있는데, 이렇게 이른 유지보수시기가 예측되는 이유로는 현재 FMS가 구축된 지 이제 겨우 10년이어서 구축된 자료가 대부분 20년 이내로 교량 전체 수명으로 볼 때 초기자료가 대부분을 차지하고 있기 때문으로 판단된다. 따라서 보다 신뢰성 있고합리적인 유지관리주기를 파악하고, 이를 토대로 성능저하모델을 제시하기 위해서는 보다 장기간의 유지관리 이력을 토대로 분석할 필요가 있다.



3.2 공용년수에 따른 상태등급 전이확률 및 유지보수비 분석

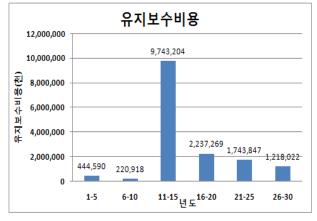
<표 5>와 <그림 8>은 상태등급 향상을 위해 수행하는 유지보수 조치에 따른 유지보수비의 정도를 추정하기위해 교량별 경년에 따른 유지보수비용 조사한 자료를 분석한 것이다. 여기서 상태등급의 향상이란 현 상태등급을 유지하거나 유지보수 행위로 인해 상태등급이 상승된 것으로 정의할 수 있으며, 분석결과 교량의 상태등급을 향상시키는데 소요되는 유지보수비용은 11-15년 사이(62.4%), 16-20년 사이(14.3%), 21-25년 사이(11.2%)에 가장 많은 비용이 소요된 것을 알 수 있으며 이들 세 구간의 유지보수비용의 합은 전체빈도의 87.9%에 달하고 있다. <표 4>는 시간의 경과에 따른 상태등급의 변화를 나타내는 것으로 각 철도교량의 정기점검 및 정밀점검 자료를 토대로 작성된 것으로 유지관리 구간 연도별각 교량의 상태등급의 변화를 조사하여 경년 별 상태등급의 변화를 파악할 수 있도록 전이확률과 비슷한 형태로 나타낸 것이다. <표 4>를 통해 볼 때, 전체 교량 중 약 32%가 5년 이내에 B등급으로 성능이저하되는 것으로 조사되고 있으며, 철도교량의 상태등급 최저 관리선인 C등급으로는 보통 16년 이후에도달하는 것으로 파악된다. 이는 정밀안전진단이 수행되고 있는 1종 교량에 대한 상태등급의 변화를 조사한 것으로 실제 비유지관리상태를 기준으로 할 경우 상태변화관련 전이확률은 상당히 높아질 것으로 판단된다.

〈표 4〉 상태등급의 전이확률 추정

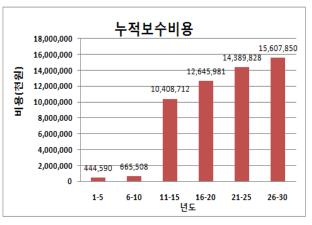
년도 등 급	1-5	6-10	11-15	16-20	21-25	26-30
A->A	0.68	0.56				
A->B	0.32	0.06	0.46			
B->B		0.38	0.54	0.82	0.44	0.25
B->C				0.09	0.56	
C->C				0.09		0.75

<표 5> 등급상승에 따른 유지보수비용 (신축후 5년 간격, 천원)

경 년	유지보수비용	평 균	표준편차
1-5	444,590	74,098	93,242
6-10	220,918	44,184	25,419
11-15	9,743,204	374,739	1,086,886
16-20	2,237,269	139,829	104,359
21-25	1,743,847	124,561	131,796
26-30	1,218,022	203,004	97,787



<그림 8> 경년별 유지보수비용 발생추이



<그림 9> 경년별 누적 유지보수비용

4. 결 론

본 연구는 철도 PC Beam교량의 Project level에서의 유지관리 현황을 파악하고 교량상태이력과 설문조사자료를 통한 열화곡선과 열화된 교량을 복구하는데 필요한 유지보수비용을 분석·추정하였으며, 대상교량의 공용년수에 따른 성능개선, 성능유지를 위한 유지보수 발생시기 및 유지보수 비용을 분석한 결과 PC Beam교의 열화는 준공 후 평균 15년 사이에 진행되는 것으로 조사되었으며, fib의 사용한계상대를 기준으로 판단할 때 최초유지보수시점은 4년 내지 5년인 것으로 조사되었다.

PC Beam교의 기능상 지장이 없는 상태로 유지하기 위한 상태등급 유지비용은 준공 후 11년에서 15년 사이에 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 PC Beam교의 유지관리비용을 저감시키고 전체라이프사이클 코스트를 저감시키기 위해서는 평균 유지보수시기인 15년 이전에 유지관리시점을 정하여예방적 유지관리계획을 세우는 것이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2008년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2008-355-D00020)

참고문헌

- 1. fib Bulletin 34: Model Code for Service Life Design, 2006.
- 2. 한국시설안전공단, 시설물유지관리시스템(FMS).
- 3. Paul D.Thompson, John O. Sobanjo, Richard kerr(2003) Florida DOT Project-Level Bridge Management Models, ASCE. Vol. 8. 2003