

구조 수명간 지진위험도를 고려한 연속 PSC교의 LCC 최적 내진설계

Optimum Life-Cycle Cost-Effective Seismic Design for Continuous PSC Bridges Considering Lifetime Expected Seismic Risks

조효남* 이광민** 박경훈*** 김평석****
Cho, Hyo Nam Lee, Kwang Min Park, Kyung Hoon Kim, Pyung Seok

ABSTRACT

This study is intended to propose a systematic approach for determining optimum Life-Cycle Cost (LCC)-effective seismic design for continuous PSC bridges considering lifetime expected seismic risks. In the paper, a set of cost function for LCC analysis of bridges is proposed. The total LCC functions consist of initial cost and direct/indirect damage costs considering repair/replacement costs, human losses and property damage costs, road user costs, and indirect socio-economic losses. The damage costs are expressed in terms of Park-Ang median global damage indices (Park and Ang, 1985) and lifetime damage probabilities. The proposed approach is applied to model bridges of both moderate seismicity regions like Korea and high seismicity regions like Japan. Since, in case of bridges, a number of parameters may have an influence on optimal target reliability, various sensitivity analyses are performed in this study. It may be expected that the proposed approach can be effectively utilized for the development of cost-effective performance criteria for design and upgrading of various types of bridges as well as continuous PC bridges.

1. 서론

최근에 Ang 등(1997)은 사회-경제적 효과를 고려한 건축구조물의 구조수명간 생애주기비용(이하 LCC) 내진최적설계 및 성능개선을 위한 방법론을 제안한 바 있다. 하지만 건축구조물과는 달리 교량구조물의 붕괴에 따르는 사회-경제적인 여파는 건축구조물과 다르며, 그 영향력은 실로 막대하다 할 수 있다. 따라서 교량구조물의 안전과 경제성이 균형화된 교량구조물의 내진설계 및 성능개선을 위한 실용적이고 합리적인 방법의 개발이 시급한 실정이다. 이를 위해서는 교량의 붕괴에 따른 직·간접손상비용의 정량화를 통한 구조수명간 최소기대비용의 평가가 필수적이다. 이에 본 연구에서는 장대 PC교량의 내진설계 및 성능개선을 위해 기대 LCC에 기초한 최적내진안전수준의 결정기법에 대한 체계적인 접근방법을 제시하였다.

2. 구조수명간비용(Life Cycle Cost) 모델의 정식화

본 연구에서는 기존의 건축구조물에 대해 Ang 등(1997)이 제안한 LCC함수를 확장하여 수정함으로써 교량구조물에 적합한 LCC함수를 정식화하였다. 이러한 최적내진안전수준의 결정을 위한 총 기대 LCC는 다음의 식 (1)과 같다.

$$\text{minimize } E[C_{\Sigma}^*] = C_1 + E[C_2^*] \quad (1)$$

여기서 $E[C_{\Sigma}^*]$ = 현재가치로 환산한 총기대 LCC; C_1 = 설계, 시공 및 공용전 재하시험에 대한 모든 제반비용을 포함한 초기비용; $E[C_2^*]$ = 현재가치로 환산한 구조수명간 총기대손상비용으로 다음의 식

* 정희원, 한양대학교 토목환경공학과 교수

** 정희원, UNICONS Co., Ltd. 기술개발부 팀장

*** 정희원, 한국건설기술연구원 구조안전그룹 연구원

**** 정희원, 한양대학교 토목환경공학과 대학원

(2)와 같이 구할 수 있다.

$$E[C_D^L] = \int_0^L E[C_D] \cdot z \cdot \nu dt = \lambda \cdot \nu L \cdot E[C_D] \quad (2)$$

여기서 ν = 주요지진(구조물에 구조손상을 야기할 수 있는 지진)의 연평균발생율; νL = 구조수명 L 동안 주요지진의 기대발생 수; λ = 할인계수로서 $(1 - \exp(-\ln(1+q)L))/\ln(1+q)L$ 과 같이 나타내어진다. 그리고 $E[C_D]$ = 심각한 지진 하에 기대손상비용을 나타내며 이는 다음의 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$E[C_D] = \sum_i \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \int C_{Di}(x) f_{X|Y}(x) f_Y(y) dx dy \quad (3)$$

여기서 X = 구조손상도; Y = 지진발생조건에 따라 기대되는 최대지반가속도; $f_{X|Y}(x) = Y=y$ 일 경우에 X 의 조건부 확률밀도함수(PDF); $f_Y(y)$ = 지반에 대한 Y 의 PDF; 그리고 $C_{Di}(x)$ = 손상요소 i 에 대한 비용함수를 나타내며 다음 식(4)와 같이 구할 수 있다.

$$C_{Di}(d_m, P_{Fi}) = C_R + C_H + C_U + C_E \quad (4)$$

여기서 C_R = 보수 및 교체비용; C_H = 인적 및 물적손실비용; C_U = 교통지연 및 우회로 인한 도로이용자비용; C_E = 간접적 사회-경제손실으로서 정식화하였는데, 각각의 비용항목은 Park-Ang 손상지수 d_m 와 시스템 손상확률 P_{Fi} 의 함수로 표현하였다. 이러한 일련의 비용함수들은 지면관계상 다음절에 간략히 소개하였고, 구체적인 정식화는 여기에는 제시하지 않았지만 참고문헌(Cho et al., 2001)에서 찾아 볼 수 있다.

2.1. 비용함수 모델

보수 및 교체비용함수 C_R 는 과거 지진에 의해 실제로 손상되었거나 붕괴되었던 교량들에 대한 손상도 평가와 이용 가능한 보수비용 자료로부터 얻어진 Park-Ang 손상지수에 의한 회귀함수로서 나타낼 수 있다 [Ang 등, 1997]. 본 논문에서는 Park-Ang 손상지수에 의한 회귀함수 식의 기본형식은 그대로 따르되 Shoji 등(1997)에 의해 제안된 교량의 손상상태에 대한 통계자료 및 고베지진으로부터 얻어진 전형적인 보수비용 자료에 근거한 접근방법을 시도하였다. 인적 및 물적손실비용함수 C_H 는 교량구조물의 경우 사고발생 당시 교량 상의 차량 및 보행자의 수와 관계가 있으며, Ang 등(1997)에 의해 제안된 접근방법에 기초하여 물적손상비용을 포함하는 사망비용과 상해비용을 합하여 구하였다.

교량의 손상에 의한 교통망의 기능마비는 도로이용자 뿐 아니라 사회-경제에 엄청난 피해를 가져올 수 있으며, 이러한 비용은 인적 및 물적손실비용과 같은 직접손실보다 더 치명적일 수 있다. 따라서 지진에 의한 교량의 손상이나 붕괴는 물적 및 인적손실뿐만 아니라 소위 도로이용자비용이나 간접적 사회-경제손실에 대해서도 신중한 고려가 필요하다. 본 논문에서 도로이용자비용 C_U 는 주요항목으로 고려되어온 시간지연비용과 차량운행비용을 고려하였고(Wesemann 등, 1996), Park-Ang 손상지수와 ATC(1985)의 손상계수와의 관계를 유도하고 복구시간을 추정함으로써 비용산정이 되도록 정식화 하였다. 간접적 사회-경제손실비용 C_E 는 여가, 쇼핑, 지가하락 등에 의한 손실을 말한다. Ang 등(1997)에 의해 제안된 연구에서는 빌딩구조물의 최적 설계기준 개발을 위한 LCC 모델 중에서 이 비용을 2차 round 손실이라 정의하고 1차 손실(기능손실)과 대략적으로 비슷한 것으로 평가하였다. 이에 본 연구에서는 이러한 간접적 지역경제손실비용을 도로이용자비용과 같은 것으로 가정하였다.

3. 지진손상도 및 신뢰성 평가

구조물의 총 기대 LCC를 산정하기 위해서는 구조수명간 발생 가능한 지진하중에 의한 구조적 손상 뿐 아니라 손상발생확률(혹은 신뢰성)에 대한 광범위한 접근이 반드시 필요하다. 구조수명간 임의의 지진하중 하에 구성요소에 대한 손상도의 올바른 평가를 위해서 교량은 적절하게 모델링되고 분석되어야 한다. 또한 지진하중 하에서 구조물의 응답은 비선형이고 히스테리틱하므로 적절한 임의의 구조모델과 저항능력을 이용한 임의의 지진하중 하에 응답을 구하는 것은 매우 복잡한 일이다. 이에 본 논문에서는 불확실성을 반영한 손상해석을 구하기 위해서 단순화된 Monte Carlo Simulation(MCS) 기법을 사용하는 개선된 SMART DRAIN-2DX 프로그램을 사용하였다(Lee, 1996). 해석시 가장 지배적인 구조 부재인 교각의 경우 DRAIN-2DX의 탄·소성 변형(tri-linear elasto-plastic hysteresis)거동을 모사할수 있는 보-기둥요소(beam-column element)를 이용하여 모델링하였다. 시뮬레이션을 위한 입력치로 이용되는 입력지진동은 실제의 지진기록이나 Yeh & Wen 모델(Lee, 1996)에 근거한 진동수와 진폭을 가지는 비정체성 Gaussian과정의 표본을 사용하였다. 본 연구에서는 계산시간의 절감하기 위해서 시뮬레이션 회수를 200번으로 규정하였는데, 이는 선행 연구(Lee, 1996)에서 안정적인 연구결과를 주고 있다.

RC교각의 한계상태에 대한 초과확률을 구하기 위한 손상상태에 대한 Park-Ang 손상지수의 최소경계값을

보수 가능한 수준에 대해서는 0.4, 붕괴수준에 대해서는 0.8로 정하였다.

생애주기 동안 시스템 붕괴확률 P_{fs}^L 는 다음 식에서 구할 수 있다.

$$P_{fs}^L = \int_Y P_{sys}(D) d| Y_L = y) f_{Y_L}(y) dy \quad (5)$$

여기서 $f_{Y_L}(y)$ = 생애주기동안 특정 지점에서 지진강도의 PDF; $P_{sys}(D) d| Y_L = y)$ 는 구조 손상이 손상수준 d 를 초과할 조건부 시스템 손상확률이다.

4. 적용 예 및 고찰

4.1 대상교량의 제원 및 적용데이터

본 연구에 적용된 대상교량은 서울 내부순환도시고속화도로에 속하는 교량으로서 각 경간의 길이가 50m인 프리캐스트 세그멘탈 10경간 연속 PC교이며, 전체 교량시스템은 동일한 10경간 연속교 10개가 연결되어 있다. 본 교량의 제원은 그림 1과 같다. 이러한 대상교량에 대해 본 연구에서는 약진지역인 한국과 강진지역인 일본에 건설된다고 가정하여 제안한 방법론을 적용하였다. 또한 본 연구에서는 내진 최적설계에 교량 길이가 미치는 민감도를 고찰해 보기 위해 길이가 다른 3가지 경우에 대해 분석을 수행하였다. 첫 번째 교량A는 10경간 하나(0.5km)의 교량, 두 번째 교량B는 50경간 5개(2.5km) 교량, 세 번째 교량C는 100경간 10개(5km) 교량으로 구성된 것으로 가정하였다. 한편 우회도로의 길이가 미치는 영향을 고찰해 보기 위해 각각의 교량은 우회도로가 5.5km(Case I), 11km(Case II), 16.5km(Case III)인 경우를 고려하였다.

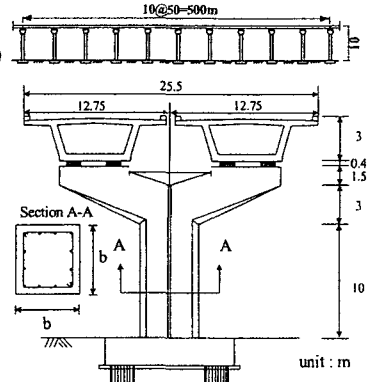


그림 1 대상교량의 제원

수치해석을 수행함에 있어 구조 저항관련 불확실성, 지진동 변수의 불확실성을 고려하였다. 이에 대한 구체적인 수치는 참고문헌 (Cho et al., 2001)에서 찾아볼 수 있다. 서울과 동경지역의 지진위험도 곡선이 사용되었고 자세한 사항은 참고문헌 (Ang et al., 1997)에서 찾을 수 있다.

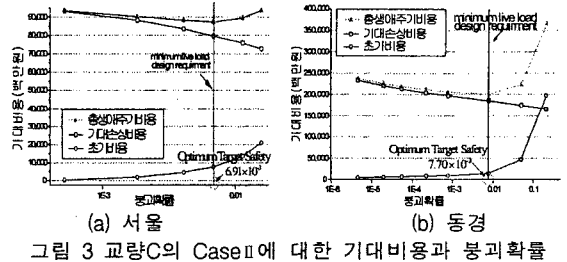
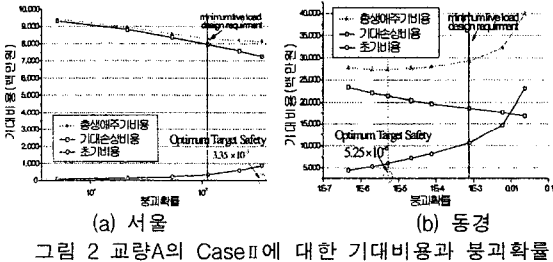
4.2 최적내진안전수준의 결정

표 1은 LCC최적설계에 관한 주요결과만을 나타내고 있다. 표 1에 제시된 바와 같이 서울의 경우, 교량의 길이가 짧은 경우인 교량A의 3가지 Case I, II, III에 대한 최적단면은 S1(2.0x2.0m)~S3(3.0x3.0m)로 나타났다. 이는 도로이용자비용과 간접적 사회-경제손실비용이 총기대비용에서 차지하는 비율은 46.5%에서 86.4%로 큰비중을 차지하면서 민감하게 변화되고 있기 때문에 우회도로길이 변화에 따라 최적단면이 민감하게 변화됨을 의미하는 것이다. 교량C의 Case I, II, III에 대한 최적목표내진 안전수준은 S3으로 나타났다. 이 경우는 교량의 길이가 증가함에 따라 도로상의 사람의 수가 증가하여 교량 A의 경우보다 인적 및 물적 손상비용의 효과가 더 크므로, 도로이용자비용과 사회-경제손실 비용이 총기대비용에 차지하는 비율이 상대적으로 적기 때문에 우회도로의 변화가 최적단면의 형성에 별다른 효과를 보이고 있지 않은 것으로 판단된다. 한편 표 1에는 동경에 대한 결과도 나타나고 있는데, 표에 나타난 바와 같이 최적단면은 T3(4.5~4.5m)~T8(6.5x6.5m)로 나타났다. 즉 동경에서 교량 A에 대한 Case I, II, III는 서울의 경우보다 우회도로 길이의 효과가 더욱 민감하게 나타나는 것을 알 수 있는데, 이는 동경의 경우가 서울의 경우보다 높은 손상확률이 존재하기 때문으로 판단된다.

최적안전수준의 형성에 교량의 길이 (혹은 초기비용)가 미치는 영향에 대한 고찰을 하기 위해 그림 2와 3에는 각각 교량 A와 C에 대한 최적안전수준에 따른 초기비용, 손상비용, 총기대비용을 나타내었다. 그림 2는 교량의 길이가 짧아 초기비용이 비교적 적은 경우인 교량A의 Case II에 대한 기대비용과 붕괴확률을 나타내고 있는데, 이 경우에는 서울과 동경의 붕괴수준에 대한 초과확률이 각각 3.35×10^{-3} 과 5.25×10^{-6} 로 큰차이를 나타내고 있다. 이는 총기대비용에 대한 초기비용의 영향보다는 기대손상비용이 최적안전수준을 결정하는데 지배적인 역할을 하는 것으로 판단된다. 반면 교량의 길이가 길어져 초기비용이 총기대비용에 차지하는 비율이 큰 경우를 나타내는 그림 3의 교량C는 서울과 동경에 대해 각각 6.91×10^{-3} 와 7.70×10^{-3} 로 비슷한 수준을 보이고 있다. 이는 교량의 길이가 긴 경우 총기대비용에 대한 초기비용이 차지하는 비율이 커짐에 따라 최적안전수준의 결정에 지배적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.

표 1 서울과 동경의 총 기대 LCC와 시스템 손상확률 (할인율 q=4%, 구조수명 L=50년) (단위:백만원)

	설계 수준 기호	탄성 지진 응답 계수	설계 단면 (m×m)	초기 비용 C_i	기대상비용 항목									총 LCC $E[C_T]$			시스템 손상확률			
					$E[C_H^L]$		$E[C_E^L]$			$E[C_D^L]$			case I	case II	case III	case I	case II	case III	보수가능수준 $P(D > 0.4)$	붕괴수준 $P(D > 0.8)$
					case I	case II	case III	case I	case II	case III	case I	case II								
서울	교량 A	S1	0.10	2.0×2.0	7,266	8.8	263	118	299	481	507	871	1,234	7,773	8,137	8,500	1.98×10^{-2}	3.35×10^{-3}		
		S3	0.20	3.0×3.0	7,965	4.4	61	51	225	362	323	597	870	7,918	8,192	8,464	1.49×10^{-2}	2.13×10^{-3}		
	교량 B	S2	0.15	2.5×2.5	37,980	33	3,979	89	225	362	4,189	4,462	4,735	42,164	42,437	42,710	3.29×10^{-2}	7.57×10^{-3}		
		S3	0.20	3.0×3.0	39,820	22	2,313	51	130	210	2,438	2,597	2,756	42,261	42,420	42,579	2.03×10^{-2}	4.61×10^{-3}		
	교량 C	S3	0.20	3.0×3.0	79,650	44	7,486	51	131	210	7,633	77,920	7,951	87,279	87,438	87,597	2.71×10^{-2}	6.91×10^{-3}		
동경	교량 A	T3	0.20	4.5×4.5	18640	170.9	5.27	2,050	5,213	8,376	4,276	10,600	16,930	22,911	29,237	35,563	2.24×10^{-2}	7.74×10^{-4}		
		T6	0.35	5.7×5.7	21340	58.84	0.00	1,166	2,964	4,763	2,390	5,987	9,584	23,728	27,325	30,922	6.41×10^{-4}	5.25×10^{-6}		
		T8	0.50	6.5×6.5	23380	29.91	0.00	844	2,146	3,448	1,718	4,322	6,927	25,101	27,706	30,310	7.12×10^{-5}	4.68×10^{-7}		
	교량 B	T3	0.20	4.5×4.5	93180	854.3	344.9	2,050	5,213	8,376	5,299	11,630	17,950	98,475	104,800	111,130	1.07×10^{-1}	3.86×10^{-3}		
		T3	0.20	4.5×4.5	186400	1709	2090	2,050	5,213	8,376	7,899	14,220	20,550	194,250	200,580	206,900	1.84×10^{-1}	7.70×10^{-3}		



5. 결론

본 연구는 장대 PC교량의 최적내진설계 및 성능개선을 위해서 LCC를 고려한 방법론을 제시하였다. 교량에 대한 합리적인 LCC모델이 Park-Ang 손상지수와 손상확률의 함수로 표현되었다. 제안된 방법은 각각 서울과 동경의 교량에 대해서 적용되었으며, 수치예제의 결과에서 알 수 있듯이 교량의 길이가 짧은 경우, 즉 초기비용이 작은 경우에는 최적단면과 목표안전수준의 결정에 있어서 우회도로의 길이가 미치는 영향은 매우 민감함을 알 수 있다. 한편 교량의 길이가 길어서 초기비용이 큰 경우에는 우회도로에 따라 도로이용자비용이나 사회-경제손실비용이 총기대비용에 미치는 영향이 적어서 최적단면과 목표안전수준에 미치는 영향은 적은 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Ang, A. H-S., Lee, J. C. & Pires, J. A. 1997. Cost-Effectiveness Evaluation of Design Criteria *Proceedings of the International Workshop on Optimal Performance of Civil Infrastructure Systems*: 1-16, April 12, 1997. Organ, Portland. ASCE and SEL.
2. Cho, H. N., Ang, A. H-S., Lim, J.K., Lee, K.M., 2001. Reliability-Based Optimal seismic design and upgrading of continuous PC bridges Based on Minimum Expected Life-Cycle Costs. ICOSAR
3. Lee, J. C. 1996. Reliability-based cost-effective aseismic design of reinforced concrete frame-wall building. Ph.D. dissertation, Univ. of California Irvine.
4. Shoji, G., Fuzino, Y & Abe, M. 1997. Optimal Allocation of Earthquake-Induced Damage for Elevated Highway Bridges. *JSCE Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering* 563(I-39): 79-94.
5. Wesemann, L., Hamilton, T., Tabaie, S., & Bare, G. 1996. Cost of Delay Studies for Freeway Closures Caused by Northridge Earthquake. *Transportation Research Record* 1559: 67-75.