

## 장대 PC교량의 최적 내진설계 및 성능개선을 위한 최소 기대 Life Cycle Cost 모델

Minimum Expected Life Cycle Cost Model for Optimal  
Seismic Design and Upgrading of Long Span PC Bridges

조효남\*      임종권\*\*  
Cho, Hyo-Nam      Lim, Jong-Kwon

---

### Abstract

This study is intended to propose a systematic and practical life cycle cost(LCC) model for the development of the reliability-based seismic safety and cost-effective performance criteria for design and upgrading of long-span PC bridges. The LCC models consist of five cost functions such as initial cost, repair/replacement cost, human losses, road user cost, and indirect lossess of regional economy. The proposed model is sucesfully expressed in temrs of Park-Ang damage indices and life cycle damage probability obtained from SMART-DRAIN-2DX which is an existing algorithm for nonlinear time history analysis. The proposed LCC model is successfully applied to a viaduct constructed by PSM, in Seoul. Based on the observations, the proposed systematic procedure for the formulation of LCC model may be useful for the development of the reliability-based seismic safety and cost-effective performance criteria for design and upgrading of long-span PC bridges.

---

### 1. 서론

큰 지진 하에서의 구조물 성능 확보가 내진설계의 주된 목적이다. 발생가능한 모든 지진 하에서 손상이 없는 절대적인 안전을 보장하는 설계가 가능할지는 몰라도 비경제적이라는 것은 누구나 인식하고 있으며 설계시방서에도 이러한 개념이 내포되어 있다. 즉, 현재의 내진설계 규준은 어느 정도의 잠재적 위험은 수용하고 있다는 것을 의미한다. 지진하중과 이러한 하중을 받는 구조물의 거동자체가 갖는 다양한 불확실성으로 인하여 적절한 설계규준을 결정할 때는 구조물의 구조거동과 성능은 주어진 지진하중, 지진위험도 그리고 지진이 일어날 확률, 그리고 그에 따른 구조물의 손실비용에 따라 고려해야만 한다. 그리고 이를 통해서 얻어진 목표안전수준에 의해 적절한 설계규준을 정할 수 있다. 다시 말하면, 구조물의 초기비용과 손상비용의 합이 최소가 되는 설계규준의 개발이 필요함을 의미한다. 그러나 불행히도 빌딩구조물에 대한 기존의 연구결과(Ang and De Leon, 1997; Ang et al., 1998)를 제외하고서는, 현재 교량에 대한 최적 내진설계를 위한 목표안전수준의 결정을 위한 LCC 모델이 없기 때문에 이에 대한 개발이 시급하다. 따라서 본 연구에서는 최적의 비용-효율적 내진설계규준을 결정하기 위한 체계적이며 실용적인 LCC 모델이 개발되었고 이를 장대 세그멘탈 PC교량에 적용하였다. 이러한 LCC 모델은 Park-Ang 손상지수의 향으로 표현하였기 때문에 이 Park-Ang 손상지수와 Life Cycle 손상확률만 적절한 모델링에 근거하여 구하게 되면 바로 LCC를 분석할 수 있도록 개발되었다.

---

\* 한양대학교 토목환경공학과 교수

\*\* 한양대학교 토목공학과 박사수료

## 2. Life Cycle Cost 모델의 정식화

본 논문의 LCC모델 개발의 최종목표는 다음식과 같이 LCC를 최소로 하는 목표신뢰수준을 구하는 것이다[Ang et al., 1998].

$$\min[E(C_T)] = \min[C_I + E(C_D^0)] \quad (1)$$

subject to  $r_F \leq r_{FO}$

여기서,  $C_I$  = 구조물의 초기비용;  $C_D^0$  = 현재가치로 환산한 총손상비용(구조물의 공용수명기간 동안 발생 가능한 모든 지진에 대한 직·간접 손실비용을 포함);  $r_F$  = 사망률;  $r_{FO}$  = 최대사망 위험도이다. 지진의 발생이 Poisson 분포이고, 지진의 발생빈도와 강도가 통계적으로 독립이며, 구조물을 주요지진이 발생할 때마다 보수한다고 가정하면 유도된 현재가치로 환산된 기대 손상비용은 수명  $L$ 동안의 지진으로부터 발생하는 모든 기대손상비용의 합으로서 다음과 같이 표현할 수 있다[Ang. et al, 1998].

$$E[C_D^0] = \int_0^L E[C_D] \cdot \left(\frac{1}{1+q}\right)^t \cdot \nu dt = \lambda \cdot \nu L \cdot E[C_D] \quad (2)$$

여기서,  $\nu$  = 주요강도 지진의 연평균 발생률;  $\alpha = \ln(1+q)$ ;  $E[C_D]$  = 현재가치로 나타낸 지진 1회에 대한 기대손상비용;  $\lambda = \{1 - \exp(-\alpha L)\}/\alpha L$  (할인계수);  $q$  = 연합인율;  $\nu L$  = 수명기간  $L$  동안 발생할 것으로 기대되는 주요지진수이다. 기대손상비용  $E[C_D]$ 는 1년 안에 발생할 수 있는 모든 지진에 대한 발생확률과 각 손상비용과의 곱으로 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$E[C_D] = \sum_i \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \int_0^{\infty} C_{D_i}(x) f_{X|Y}(x) f_Y(y) dx dy \quad (3)$$

여기서,  $X$  = 구조손상도;  $Y$  = 지진이 발생한 경우에 기대되는 최대지반강도;  $f_{X|Y}(x)$  =  $X$ 에 대한 확률밀도함수 ( $Y = y$ 인 경우);  $f_Y(y)$  =  $Y$ 의 확률밀도함수를 나타낸다. 한편,  $C_{D_i}$ 는 손상요소  $i$ 에 대한 비용함수로서 본 연구에서는 지진이 발생한 조건하에서의 교량의 보수·대체비용  $C_R$ , 인적 및 차량손실비용  $C_H$ , 도로이용자비용  $C_T$ , 및 간접적 지역손실비용  $C_E$ 의 합으로서 다음과 같이 모델링되었다.

$$C_{D_i} = C_R + C_V + C_H + C_T + C_E \quad (4)$$

이들 각각의 비용들은 구조물의 Park-Ang 손상지수의 함수로 표현되었고 각각의 손상비용에 대한 비용함수의 형태는 아래에 제시되어 있다.

### 2.1 초기비용 함수

초기비용함수는 다양한 탄성지진응답계수를 변화하거나 다양한 단면으로 설계함으로써 달라지는 단면이나 시스템에 대한 초기건설비용 및 설계비용 등을 고려하면 얻어질 수 있다. 지진설계대상은 지배부재인 교각으로 국한하였고 이를 통해 각각의 설계에 대한 교각의 추가비용이 산출되며, 이렇게 산출된 비용을 토대로 설계비를 추정할 수 있고 이로부터 총프로젝트의 초기비용을 산출할 수 있다. 각각의 설계에 대해 손상도해석 및 Life Cycle 신뢰성해석을 수행하면 개념적으로 각 단면에 대한 손상도를 초과할 확률이 계산되고 초기비용은 손상확률( $P_f$ )의 함수로서 개념적으로 나타내어진다( $C_I = C_I(P_f)$ ).

### 2.2 보수·교체비용 함수

지진발생시 구조부재의 손상에 의한 보수·교체비용함수는 다음 식과 같이 Park-Ang median global damage index,  $d_m$ (이하 MGDI라 칭하기로 함)의 향으로 회귀방정식의 형태로 쉽게 표현 될 수 있다[Ang et al., 1998].

$$\begin{aligned} C_R &= \alpha_1 \cdot (d_m)^{\alpha_2}; & 0 \leq d_m \leq d_0 \\ C_R &= \alpha_3 C_I; & d_m > d_0 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,  $d_m$ = 구조물의 GDI;  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, d_0$ = 여러구조물의 실제 보수·교체비용과 손상지수 회귀분석에 의해 결정되는 계수를 나타낸다. 그러나 문제는 이러한 계수들을 결정하기 위해서는 해당 교량형식에 유사한 지진재해 보수비용과 교량의 손상지수분석 결과에 대한 광범위한 데이터가 있어야 보다 정확히 추정할 수 있지만 우리나라에는 최근 아직 구조물에 피해를 줄만한 큰 지진이 발생하지 않아 이에 대한 데이터는 전무하다. 따라서 본 연구에서는 우리나라와 여러면에서 유사한 지역적 특징을 가지고 있는 일본의 연구데이터를 활용하였다. 즉, 본 연구에서는  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 는 기존 Shoji et al.(1997)이 조사한 실제 일본의 지진손상데이터의 손상주순에 따른 보수비용 연구의 자료를 활용하여 유도하였다(식 (17)참조).

### 2.3 인적 및 차량손실비용 함수

빌딩구조물의 기존의 연구결과는 사람과 물적피해를 분리하여 별도의 손상비용모델로서 고려된 바 있다(Ang et al. 1998, Ang and De Leon. 1997). 그러나 교량의 경우에는 물적피해는 차량에 국한되므로 이의 통계자료를 얻으면 된다. 그러나 전술한 바와 같이 지진에 의한 교량상의 차량 유실에 대한 통계적 데이터가 많지 않아 본 연구에서는 기존의 인적손상모델(Ang et al., 1998)에 이론적 모형은 두되 파라미터의 추정을 위한 다른 접근방법을 제시하였다.

교량 상의 인적손실에 대한 비용함수는 Ang(1998) 등이 제안한 대로 과거의 지진재해자료로부터 얻어진 결과로서 사망비용(인적자본법에 의한 사망시 잔여기간 노동력상실로 인한 비용, 의료비, 행정비용, 물적손실 포함)  $C_F$ , 부상비용(인적자본법에 의한 사망시 잔여기간 노동력상실로 인한 비용, 의료비, 행정비용, 물적손실 포함)  $C_J$ 를 더한 값으로 구할 수 있다. 단 주목해야할 부분은 사망비용과 부상비용에 물적피해 즉 차량유실비용이 포함시켜 분석하는 것이 옳다는 것이다. 즉 국내에서는 인적 사망이나 부상에 대한 비용은 주로 교통사고 비용 분석(교통개발연구원, 1997) 데이터로 주로 조사되어 있으며 이에 각각 물적피해까지 포함하고 있으므로 이를 이용할 경우 물적손실비용은 별도로 고려하지 않아도 되므로 간편하다.

사망 및 부상비용은 Ang(1998) 등이 제안한 다음과 같은 간단한 식으로부터 구할 수 있다.

$$C_F = r_F N_0 V_F \quad (6)$$

$$C_J = r_J N_0 (0.9 V_J + 0.1 V_F) \quad (7)$$

여기서,  $N_0$ = 교량상·하부에 있던 사람수;  $V_F$  = 한 명당 생명가치(물적피해 포함);  $V_J$  = 한 명당 부상비용(물적피해 포함)을 나타낸다.

여기서 생명가치( $V_F$ )에 대한 항목은 우리나라의 경우 사상자 1명당 생명가치에 대한 자료(교통개발연구원, 1997)를 근거로 하였다. 이는 앞에서도 언급하였듯이, 차량유실비용 등 물적손실비용이 포함되어 있으므로 별도로 물적손실비용함수의 개발은 필요치 않다. 제시된 교통개발연구원(1997)의 자료에서 생명가치는 사상자가 살아있을 경우의 기대생산가능비용, 의료비용 및 행정비용 등의 항목이 포함된 것 이외에도 위에서 언급했던 차량손실비용이 포함되어 있다. 따라서 위에 제시된  $C_F$ 항목으로부터 사망비용 및 사상자가 생겼을 경우의 차량손실비용까지 구할 수 있음을 알 수 있다.

한편, 사망률  $r_F$ 은 Shiono 등(1991)이 개발한 11개의 구조물형식에 대한 통계분석 연구자료로부터 붕괴확률  $P_c$ 의 함수로서 얻을 수 있다[Ang et al., 1998].

그러나 교량상의 사람수  $N_0$ 의 경우는 빌딩구조물 같은 경우는 단위면적당 각 층의 거주자수에 각 층의 면적을 곱하여 구할 수 있지만(ATC, 1985), 교량의 경우는 교통흐름이 시간에 따라 변화

하므로 구하기가 용이하지가 않다. 본 논문에서는 교량상의 사람수는 정확히 산정하는 것은 어렵지만 기본적인 교통량, 속도, 관련된 기본 데이터, 차량당 재차인원에 대한 통계자료를 확보하면 쉽게 구할 수 있도록 모델링하였다. 이에 본 논문에서는 교통밀도를 통해 교량 상에 사람수를 구하기 위한 식을 다음과 같이 정식화하였다.

$$N_0 = \sum_i n_{PEP,i} r_i L_{BR} N_L k_T \quad (8)$$

여기서,  $i$  = 차량의 종류(예를 들면, 승용차, 택시, 승합차, 버스 등등.);  $n_{PEP,i}$  = 차량의 종류에 따른 평균재차인원(인/대);  $r_i$  = 전체교통량에 대한 특정차종  $i$ 의 비율;  $L_{BR}$  = 교량의 연장(km);  $N_L$  = 차선수(양방향);  $k_T$  = 평균교통밀도(대/km)를 나타낸다. 위 식 (8)에서 중요한 요소는  $n_{PEP,i}$ ,  $k_T$  그리고  $r_i$ 이다. 평균재차인원,  $n_{PEP,i}$ (예; 승용차 1.43명)의 경우는 1997년 서울시에서의 교통관련 통계자료를 통해 구할 수 있다. 평균교통밀도  $k_T$ 는 교량상의 인명수를 결정하게 되는 가장 중요한 인자이다. 이러한 교통밀도를 구하기 위한 다양한 모델들이 있지만 본 논문에서는 고전적이면서도 가장 단순한 Greenshields(1935)의 속도-밀도간 선형모델을 사용하였다. 이 모델에 대한 식은 다음과 같다.

$$k_T = k_j \left( 1 - \frac{V_{BR}}{V_{FREE}} \right) \quad (9)$$

여기서,  $k_j$  = 최대교통밀도;  $V_{BR}$  = 평균교통속도;  $V_{FREE}$  = 자유속도를 나타낸다. 여기서 최대교통밀도는 약 160대/km정도로 한다(도철용, 1998). 다음으로 평균교통속도  $V_{BR}$ 은 서울시 1997 교통통계자료에 의해 도시고속화도로인 경우 38km/h를 사용할 수 있다. 자유속도는 교통제한이 될 경우는 제한속도를 사용하면 된다. 마지막으로  $r_i$ 의 경우, 서울시 교통통계자료(1997)에 의해 각각의 지점별 차종에 따른 교통량의 분포를 사용하여 구할 수 있다.

상해를  $r_j$ 는 사망률과 관계가 있으며 사망1명당 부상자 명수로서 나타내어 진다(ATC, 1985). ATC(1985)에서는 손실비용/교체비용으로 정의된 소위 손상계수가 100%( $d_m \geq 0.4$  정도)이상이면 4, 손상계수가 100%미만이면( $d_m < 0.4$  정도) 34를 추천하고 있다.

## 2.4 도로이용자비용 함수

일반적으로 도로이용자비용은 차량운행비용(Vehicle Operating Costs, VOC), 시간지연비용(Time Delay Costs, TDC), 불편함의 비용, 환경영향 비용 등 다음의 5가지 항목으로 크게 평가되어 왔다. 이중 가장 중요한 것은 차량운행비용과 시간지연비용이다. 차량운행비용은 차량의 소유, 이용 그리고 유지보수와 관련 있는 비용으로서 교통개발연구원(1992) 연구결과에 따르면 감가상각비, 면허 및 보험료 그리고 운전기사의 임금 등의 고정비용과 연료비, 엔진오일, 타이어의 마모에 따른 교체비 등의 변동비 등으로 구성되어 있다. 이중에서 중요한 차량운행비용 항목으로는 운전기사의 인건비 그리고 연료비 등이 있다. 시간지연비용은 주로 공사구역을 통과하거나 우회함으로써 발생하는 시간지연, 또는 도로표면의 거칠음 등으로 인한 차량운행속도의 저하 등에 따른 추가 비용이다.

기존연구의 대부분은 도로이용자비용 중에서 차량운행비용, 시간지연비용 그리고 사고비용의 3가지 항목을 포함하고 있다. 그러나 본 연구대상 구조물은 도심지 고가교로 건설되는 장대 PC교이므로 사고비용의 경우 우회할 경우 어느 정도의 사고율이 늘어날 수 있다는 것은 예상되거나 교량 상에서는 일반도로보다 치사율이 높기 때문에 도로상의 사고위험도가 높다고 단언할 수 없고 또한 이에 대한 비용의 정량화가 어려운 문제로 인해 고려하지 않았다[A. A. Rahim and D. W. Johnston]. 따라서 차량운행비용과 시간지연비용의 두 항목만을 모델링에 포함시켰다.

도로이용자비용: 도로이용자 비용은 다음과 같이 시간지연비용  $C_{TDC}$ 과 차량운행비용  $C_{VOC}$ 의 합으로 모델링하였다. 일단 손상이 발생하면 외관조사나 보수, 복구기간 동안 모든 차량이 우회되는

것으로 가정하였다.

$$C_T = C_{TDC} + C_{VOC} \quad (10)$$

이때, 시간지연비용  $C_{TDC}$ 과 차량운행비용  $C_{VOC}$ 은 각각 다음과 같이 모델링 되었다.

$$C_{TDC} = \left( \sum_{i_1} (n_{PEO_{i_1}} - k) T_{i_1} u_{VOT_{i_1}} \right) \times \Delta t_{DET} t_{RES} \quad (11)$$

$$C_{VOC} = C_{VOC\_F} + C_{VOC\_C} \quad (12)$$

여기서,  $i_1$  = 승용차, 택시 그리고 버스에 대한 업무/비업무 통행;  $n_{PEO_{i_1}}$  = 차량  $i$ 에 대한 평균 재차인원;  $k = 0$ (승용차의 경우) 또는  $1$ (버스나 택시의 경우);  $T_{i_1}$  = 차종별 업무 또는 비업무 교통용량;  $u_{VOT_{i_1}}$  = 차종별 업무 또는 비업무 차량을 이용하는 사람의 시간가치;  $\Delta t_{DET}$  = 우회함으로서 늘어난 운행시간을 나타낸다. 또한  $C_{VOC\_F}$ 와  $C_{VOC\_C}$ 는 각각 고정비와 변동비의 추가 손실이며 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_{VOC\_C} = \sum_{i_2} T_{i_2} (u_{fuel\_DET_{i_2}} L_{DET} - u_{fuel\_BR_{i_2}} L_{BR}) t_{RES} \quad (13)$$

$$C_{VOC\_F} = \left( \sum_{i_3} T_{i_3} \times u_{FIXED_{i_3}} \right) \Delta t_{DET} t_{RES} \quad (14)$$

여기서,  $i_2$  = 승용차, 승합차, 택시 화물차 그리고 버스;  $i_3$  = 택시, 버스 그리고 화물차;  $T_{i_2}$  = 차종  $i_2$ 별 총일일교통량;  $T_{i_3}$  = 차종  $i_3$ 별 총일일교통량;  $u_{FUEL\_DET_{i_2}}$  = 우회도로에서의 차량평균속도에 따른 차종별 단위거리(km)에 대한 연료소모비용;  $u_{FUEL\_BR_{i_2}}$  = 지진전 교량상 차량평균속도에 대한 차종별 단위거리(km)에 대한 연료소모비용;  $L_{DET}$  = 우회도로의 길이(km);  $L_{BR}$  = 교량을 포함한 노선 총연장(km);  $u_{FIXED_{i_3}}$  = 차종에 따른 시간당 고정비용을 나타낸다. 그리고 이러한 비용들을 산출하기 위해서 필요한 요소들은 서울시에서 조사된 교통통계자료(1997)를 이용할 수 있다.

여기서 시간지연비용은 승용차, 택시 그리고 버스에 대한 각각의 업무교통량 및 비업무교통량에 대해 구하였는데, 운전자의 시간가치는 차량운행비용의 인건비에서 고려되었으므로 운전자에 대한 비용의 중복계산을 피하기 위해 비용산출 시 각각의 재차인원에서 1명씩을 감하여 구해야 한다. 다음으로 차량운행비용은 고정비와 변동비의 항목으로 분류하였는데 고정비의 경우는 택시, 버스 그리고 화물차의 각각에 대한 차량 1대 당 고정비용과 각각의 차종별 교통량을 곱하여 구할 수 있고, 변동비의 경우는 정상도로와 우회도로에서의 각각에 대한 차량의 운행속도에 따른 단위길이(km) 당 연료소모량에 각각에 대한 도로연장을 곱하여 각각의 늘어난 연료소비량을 구함으로써 산출할 수 있다(교통개발연구원, 1992).

**복구시간함수:** 기대 도로이용자비용의 근사적 추정을 위해서는 복구시간이 필요하지만 본 대상교량에 대한 지진시 손상정도에 따른 복구시간에 대한 통계데이터가 없어 복구시간함수는 ATC(1985)의 자료에 근거하였는데, 이 자료에서 복구함수는 손상도계수(damage factor, DF)에 의해서 각각 기능회복 30%, 60%, 100%에 대한 복구시간에 대한 데이터가 다양한 구조물의 실제 손상데이터를 기초로 DB화 되어있다. 따라서 이 자료를 이용하기 위해서는 손상도계수를  $d_m$ 의 항목으로 나타내어줄 필요가 있는데 다행히 대체비용( $C_R$ )은 초기비용( $C_I$ )의 항목으로 나타내어 줄 수 있으므로 손상도계수 DF(손실비용/교체비용)와  $d_m$ 과의 관계를 쉽게 구할 수 있다[Ang et al, 1998].

### 2.5 간접적 지역경제 손실비용

간접 지역경제 손실비용이라 함은 여가, 쇼핑, 지가하락 등 간접적인 지역 경제손실을 말한다. Ang(1998) 등은 빌딩구조물의 최적 설계기준 개발을 위한 LCC 모델 중 이를 2차 round 손실로 정의하였다. 2차 round 손실은 1차 round 손실(기능손실)과 거의 비슷한 수준에서 평가된 바 있

다. 또한 Seskin(1990)은 이러한 간접적 지역경제 손실비용을 도로이용자비용( $C_T$ )의 50~150%정도로 적용할 수 있다고 하였다. 따라서 본 연구는 교량에 대한 LCC 모델 개발의 기초 연구단계로서 이러한 간접적 지역경제 손실비용의 모델링을 구체적으로 산출하지 않고 도로이용자 비용과 같다고 가정하였다.

### 3. Park-Ang 손상도 지수

본 연구는 RC교각이 구조손상도 평가의 주요대상이므로 이에 대한 손상도평가는 기존에 제안된 다양한 구조손상지수(williams & sexsmith, 1995)로 평가가 가능하다. 본 연구에서는 이러한 제안된 모델 중 가장 보편적으로 사용되어지는 Park-Ang 손상지수 모델을 이용하였고, 이러한 모델을 통한 손상지수를 구하기 위해서 최근에 DRAIN-2DX라는 프로그램에 MCS(Monte Carlo Simulation)기법과 신뢰성해석 알고리즘을 추가하여 RC 발딩구조물과 전단벽 구조물의 손상도를 평가할 수 있는 소위 SMART DRAIN-2DX라는 프로그램을 사용하였다. Park-Ang 모델에 대한 내용을 나타낸 식은 다음과 같다.

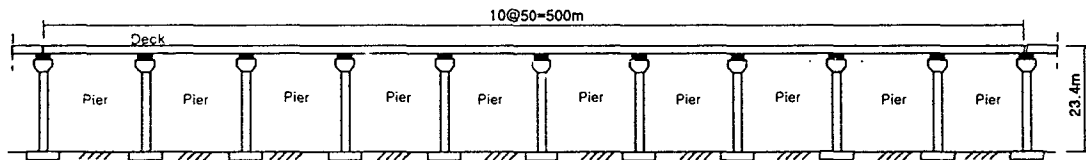
$$D = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \frac{\beta_0 E}{Q_y \delta_u} \quad (15)$$

여기서,  $D$ = 부재의 손상지수;  $\delta_m$ = 지진시 최대변형;  $Q_y$ = 정적항복강도;  $E$ = 방출되는 hysteretic 에너지;  $\delta_u$ = 최대극한변형;  $\beta_0$ = 상수를 나타낸다.

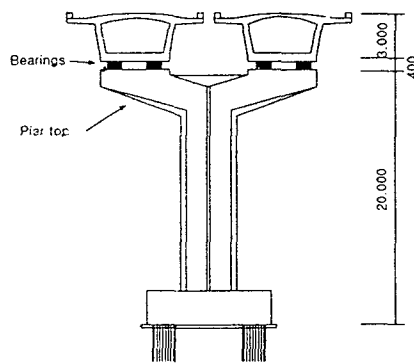
### 4. 적용사례

#### 4.1 적용대상 교량

적용대상교량은 서울 내부순환도시고속화도로 중 제 1공구에 해당하는 교량으로서 형식은 10경간 연속형 세그멘탈 PC교량이다. 제원은 다음과 같다.



(a) 횡단면도



(b) 종단면도

<그림 1> 적용대상 교량의 제원

#### 4.2 개발된 Life Cycle Cost Model

여기서는 지면제약상 Life Cycle Cost Model 유도를 위한 모든 과정을 제시할 수 없으며 보다

자세한 사항은 조효남(1999)를 참조하기 바란다. 본 논문에서는 손상수준에 따른 Life Cycle Cost Model의 주요 결과만을 제시하였다.

**초기비용:** 초기비용에는 설계비용, 시공비용 그리고 주행성능시험비용이 있는데 이 중에서 시공비용은 초기비용의 90%를 차지하고, 설계 및 교량시험비용은 초기비용의 10%를 차지한다고 가정하였다(de Brito & Branco, 1994). 이에 대한 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 따라서 초기비용은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_I = C_{IC} + C_{ID} + C_{IT} = C_{IC} + \frac{0.1}{0.9} C_{IC} = 1.11C_{IC} \quad (16)$$

**보수/재시공비용:** 본 논문에서는 이러한 교량에 대한 손상수준의 언어학적 변량에 따른 초기비용과 보수비용의 비율을 연구한 Shoji(1997)의 연구결과에 근거하여 Park-Ang 손상지수(Sexsmith & Williams, 1996)와 초기비용에 대한 보수비용의 비율의 관계를 위의 구해진 표로부터 손상지수와  $C_R/C_I$ 값의 두 점인 (0.175, 0.05)와 (0.325, 0.20)이 얻어지므로 본 연구에서는 (0.0)을 지나는 포물선 방정식을 구함으로서 식 (5)의 상수  $\alpha_1, \alpha_2$ 의 구체적인 값을 구하였다. 그리고 구조물이 보수 불가능한 수준인 경우( $d_m = 0.4$ 로 가정, Park et al., 1995)에는 재시공시 기존 교량의 철거에 따른 추가비용을 초기비용의 약 30%정도로 가정하였다. 따라서 각각의 손상수준에 따른 보수/재시공비용에 관한 식은 다음과 같다.

$$0 \leq d_m < 0.4 \text{인 경우,} \quad C_R = 2.457 d_m^{2.23} C_I \quad (17)$$

$$d_m > 0.4 \text{인 경우,} \quad C_R = 1.30 C_I \quad (18)$$

**인적손실:** 인적손실의  $d_m$ 의 범위에 따른 비용을  $d_m$ 이 0.8을 넘을 확률의 향으로 나타낸 결과식은 다음과 같다.

$d_m < 0.8$ 인 경우,

$$C_H = 6.236 r_F \sum_i n_{PEP_i} r_i L_{BR} N_L k_T V_F = 2.631 \times 10^{11} [P(d_m > 0.8)]^{1.6} (\text{원}) \quad (19)$$

$d_m \geq 0.8$ 인 경우,

$$C_H = 1.616 r_F \sum_i n_{PEP_i} r_i L_{BR} N_L k_T V_F = 6.817 \times 10^{10} [P(d_m > 0.8)]^{1.6} (\text{원}) \quad (20)$$

**도로이용자비용:** 앞에서 언급했던 시간지연비용, 차량운행비용의 고정비와 변동비에 대한 구체적인 결과 식은 다음과 같다.

$$C_{TDL} = 1.064 \times 10^8 t_{RES} (\text{원}); \quad C_{VOC\_C} = 1.406 \times 10^7 t_{RES} (\text{원}); \quad C_{VOC\_F} = 3.04 \times 10^7 t_{RES} (\text{원}) \quad (21)$$

따라서, 도로이용자비용( $C_T$ )은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_T = C_{TDL} + C_{VOC\_C} + C_{VOC\_F} = 15.086 \times 10^7 t_{RES} (\text{원}) \quad (22)$$

식 (21), (22)에서 복구기간( $t_{RES}$ )은  $d_m$ 의 범위에 따라  $d_m$ 의 함수로 나타내면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} d_m \leq 0.07 \text{인 경우,} & \quad t_{RES} = 10 d_m & (\text{일}) \\ 0.07 \leq d_m \leq 0.20 \text{인 경우,} & \quad t_{RES} = 16.92 d_m - 0.48 & (\text{일}) \\ 0.20 \leq d_m \leq 0.40 \text{인 경우,} & \quad t_{RES} = 412.94 d_m - 79.69 & (\text{일}) \\ d_m > 0.4 \text{인 경우,} & \quad t_{RES} = 946.8 & (\text{일}) \end{aligned} \quad (23)$$

본 적용사례를 보면 알 수 있듯이 지진발생 시 손상비용은 Park-Ang 손상지수와 파손확률의 향으로 나타낼 수 있으므로 Life Cycle 동안 최소기대비용, 최적내진설계 및 내진성능개선을 위한 목표신뢰도 결정을 위한 유용한 모델로서 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에 대한 결론은 교량의 신뢰성에 기초한 지진안전도 및 비용효율 내진설계 및 성능개선을 위한 성능기준 개발을 위한 Life Cycle Cost(LCC)해석을 위한 체계적인 모델을 초기비용, 보수·교체비용, 인적손실비용, 이용자비용, 및 간접적 지역경제 손실 등 5가지로 모델링 하여 제안하였고 이들 손실비용은 모두 Park-Ang 손상지수의 향으로 성공적으로 표현되었다. 따라서 본 연구에서 개발한 LCC 모델은 신뢰성에 기초한 지진안전도 및 비용효율 최적내진설계 및 성능개선을 위한 기본 LCC 모델로서 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 논문의 연구내용은 한국과학재단 국제공동연구[과제번호: 975-1200-004-2]의 연구지원에 의해 수행되었으며, 연구비를 지원하여준 한국과학재단에 진심으로 감사드립니다.

## 참고문헌

- Ang, A. H-S. and De Leon, D. (1997), "Determination of Optimal Target Reliabilities for Design and Upgrading of Structures", *Structural Safety*, 19(1), pp.91-103
- Ang, A. H-S., Lee, J. C. and Pires, J. A. (1998), "Cost-Effectiveness Evaluation of Design Criteria", *Proceedings of SEWC*, T132-1.
- ATC (1985), *Earthquake damage evaluation data for California*. Report ATC-13, Redwood City, California.
- De Brito, J. and F. A. Branco (1994), "Bridge management policy using cost analysis", *Proc. Instn Civ. Engineering Structures and Bridges*, 1994, 104, Nov., 431-439.
- Greenshields, B. D. (1935), "A Study of Traffic Capacity", *Proc. HRR.*, 14.
- Park, Y. J., Ang, A. H-S., and Wen, Y. K.(1985), "Seismic Damage Analysis of Reinforced Concrete Buildings", *J. of Structural Engineering*, ASCE, 111(4), pp.740~757.
- Rahim, A. A. and Johnston, D. W., "Estimating Bridge-Related Traffic Accident Rates and Costs", *Transportation Research Record*, 1392, TRB.
- Seskin, S. N. (1990), "Comprehensive Framework for Highway Economic Impact Assessment: Methods and Results", *Transportation Research Record* 1274, TRB.
- Shiono, K., Krimgold, F. and Ohta, Y. (1991), "A method for the estimation of earthquake fatalities and its applicability to the global macro-zonation of human casualty risk", *Proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. Seismic zonation*, Stanford, California, 3, pp. 277-284.
- Shoji, G., Fuzino, Y and Abe, M., "Optimal Allocation of Earthquake-Induced Damage for Elevated Highway Bridges", *J. of Structural Mechanics and Earthquake Engineering*, JSCE, Vol. 563(I-39), pp. 79-94.
- Viscusi, W.K. (1993), "The value of risk to life and health", *J. Economic Literature*, 31, pp. 1912-1946.
- Williams, M. S. and Sexsmith, R. G. (1995), "Seismic Damage Indices for Concrete Structures: A State-of-the-Art Review", *Earthquake Spectra*, Vol. 11, No. 2, May 1995.
- 교통개발연구원 (1992), *교통혼잡비용 예측 연구*.
- 교통개발연구원 (1997), *교통사고비용의 추이와 결정요인*.
- 도철웅 (1998), *교통공학원론*, 청문각.
- 조효남 (1999), *장대 PC교량의 설계 및 성능개선을 위한 신뢰성에 기초한 지진 안전도 및 최적 성능 기준 개발*, 한국과학재단 국제공동연구[975-1200-004-2] 최종보고서(출판예정).