

교량의 내진성능확보를 위한 유지보수계획의 최적화 Optimization of Maintenance and Retrofit Planning for Reliable Seismic Performance of the Bridges

고현무*1) 박관순**2) 김동석***3) 이선영****4)
Koh, Hyun Moo Park, Kwan Soon Kim, Dong Seok Lee, Sun Young

ABSTRACT

Using the life cycle cost concept, optimum maintenance and retrofit planning for reliable seismic performance is suggested the overall life cycle cost to be minimized including the initial cost, the costs of inspection, repair, and failure. Limit states of the bridges are defined. And failure probabilities are computed through crossing theory. The effect of maintenance and retrofit is represented using the probability of damage detection and event tree analysis. Optimization of maintenance and retrofit planning method proposed from this research was applied to numerical examples. The analysis incorporates the acceleration and site conditions prescribed in the code, and the quality of inspection methods.

1. 서론

토목구조물은 그 사용목적에 따라 침해적인 환경에 놓이게 되고, 이러한 침해적인 환경요인에 의해 시간의 흐름에 따라 구조물의 특성이 변화하고 구조물의 손상, 즉 성능이 저하되는 현상이 나타나게 된다. 구조물의 성능저하에 대하여 구조물의 안전성을 확보하고, 향후의 값비싼 파괴비용을 감소시키며, 사용기간의 증대를 위해 유지보수가 수행된다. 최근 유지보수에 대한 관심이 높아지면서 그에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데, 이러한 연구의 대부분은 사용하중상태에 있는 교량구조물의 사용선 개선을 위한 유지보수에 대한 것이다. 그러나 여러가지 환경요인에 의한 교량의 성능저하는 내진성능에도 영향을 미칠 수 있을 것이다.

따라서, 이 연구에서는 여러가지 환경요인에 의하여 시간에 따라 내진성능이 저하되고 있는 교량구조물에 지진하중이 작용할 경우, 내진성능에 대한 유지보수를 통하여 내진성능을 확보·유지

* 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수, 정회원
** 서울대학교 지구환경시스템공학부 계약교수
*** 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정
**** 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정

할 수 있도록 하였다. 이러한 유지보수비용을 도입하여 생애주기비용함수 재구성하고, 생애주기비용을 최소화하는 방법으로 최적의 유지보수계획을 제안 하고자 한다. 이를 위하여, 여러 가지 환경요인에 의하여 성능이 저하되고 있는 교량구조물의 내진성능 저하모델을 정의하였다. 교량의 각 구조요소가 파괴에 이르게 되는 한계상태를 정의하고, 이러한 한계상태를 넘어서는 빈도수를 초과 이론을 이용하여 구함으로써 교량의 파괴확률을 산출하였다. 시간의 흐름에 따라서 내진성능의 저하로 파괴확률이 증가하는 교량구조물에 대하여, 내진성능에 대한 유지보수의 효과를 손상감지확률과 Event Tree Analysis를 이용하여 표현하고 유지보수후의 파괴확률을 산출한다. 제시된 방법의 적용성을 검증하기 위하여, 시방서규정의 가속도계수와 지반계수를 달리하면서, 또한 검사의 질을 달리하면서, 생애주기비용이 최소가 되는 최적의 유지보수계획 즉, 검사와 수리회수를 제시하고자 하였다.

2. 교량의 내진성능 저하모델

교량구조물은 침해적인 환경요인에 의해 초기성능을 유지하지 못하고 시간의 흐름에 따라 구조적인 성능저하가 발생하게 되는데, 연구에서는 성능저하를 교각의 휨모멘트강도로 표현하였다. 즉, 시간이 지남에 따라 교각의 휨모멘트 강도가 감소한다고 가정하여, 임의시간 t 에서의 교각의 휨모멘트강도는 식(1)(by Ellingwood,1993)로 표현하였다.

$$M(t) = M_0 g(t) \quad (1)$$

여기서, $M(t)$ 는 임의시간 t 에서의 교각의 휨모멘트강도, M_0 는 교각의 초기 휨모멘트강도, $g(t)$ 는 손상함수로 이 연구에서는 식(2)와 같이 30년에 10%의 손상이 되는 2차곡선으로 구성하였다.

$$g(t) = 1 - at^2 \quad (2)$$

그러므로, 시간에 따른 교각의 휨모멘트강도 역시 손상함수와 같은 양상을 갖으며, 휨모멘트강도의 변화에 따라 항복변위가 감소하게 되고, 그러한 항복변위를 갖는 교량에 지진하중이 작용할 경우, 파괴확률이 증가하는 양상으로 내진성능의 저하를 표현하였다.

3. 교량의 한계상태와 파괴확률

3.1 한계상태의 정의

교량의 파괴확률을 구하기 위해서는, 교량의 각 구조요소가 파괴에 이르게 되는 상태, 즉 한계상태를 정의해야 한다. 연구에서는 교량의 파손을 크게 상부구조와 교각의 두가지로 단순화하여 정의하고 한계상태를 결정한다. 지진발생시 상부구조의 파괴는 상부구조의 변위가 설계당시 상부구조에 주어진 여유변위를 넘어설 때 발생한다. 따라서, 상부구조에 대한 한계상태는 상부구조의 수평변위가 최소지지길이를 넘는 것, 즉 낙교상태로 정의하였다. 교각의 파손에 대한 한계상태에 있어서는 전단파괴보다 휨파괴가 먼저 일어나도록 설계되어 있음을 가정하고, 휨모멘트강도에 대한 교각의 최대변위를 교각의 한계상태로 정의하였다.

3.2 입력지반운동 모델링

입력지반운동은 시방서규정의 가속도계수와 지반계수를 토대로 만들어진 설계응답스펙트럼을 만족하도록, 스펙트럼밀도함수의 형태로 모델링한다. 그림 1은 응답스펙트럼으로부터 스펙트럼 밀도함수형태의 입력지반운동 모델을 얻는 과정을 나타낸 것이다.

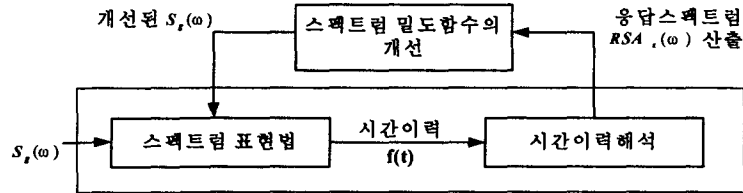


그림 1. 등가 응답스펙트럼을 갖는 스펙트럼 밀도함수를 구하는 과정

3.3 초과이론을 이용한 파괴확률의 산출

입력지반운동이 정규분포를 따르는 것으로 가정하였을 때, 선형시스템의 응답 역시 정규분포를 따른다. 정규분포를 따르는 응답의 랜덤변수가 정의된 한계값을 넘어서는 빈도는 초과이론(Crossing Theory)을 이용하여 다음과 같이 추정할 수 있다. (Newland, 1993)

$$\nu_{ak} = 2\nu_{ak}^+ = \frac{1}{\pi} \frac{\sigma_{y_k}}{\sigma_{y_k}} \exp(-a_k^2 / 2\sigma_{y_k}^2) \quad (3)$$

여기서, ν_{ak} 는 k 자유도의 응답이 설정된 한계상태 a_k 를 단위시간동안 넘어서는 횟수다.

구조물의 응답이 지진 지속시간 동안 한계상태를 넘어서는 사건의 회수가 Poisson 분포를 따른다고 가정하였을 때, 지진발생시 k 한계상태의 파괴확률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{f_k|eq} = 1 - \exp(-\nu_{ak} \cdot t_d) \quad (4)$$

여기서, t_d 는 평균적인 지진 지속시간이다.

따라서, 생애주기 동안 k 한계상태의 파손이 일어날 확률은 다음과 같다.

$$P_f = P_{f_k|eq} \cdot P_{eq} = P_{eq} \{1 - \exp(-\nu_{ak} \cdot t_d)\} \quad (5)$$

여기서, P_{eq} 는 생애주기 동안 지진이 발생할 확률이다.

4. 유지보수후의 파괴확률

내진성능이 저하되고 교량구조물에 대하여 유지보수를 행함으로써 파괴확률이 감소되어 내진성능의 회복을 꾀할 수 있게 된다. 따라서, 이장에서는 손상감지확률과 Event Tree Analysis를 통하여 유지보수후의 파괴확률을 구하는 방법에 대하여 설명하고자 한다.

4.1 손상감지확률

손상감지확률이라는 것은 검사방법의 질에 따라 변화할 수 있는 값이다. 즉, 검사방법의 질이 좋을수록 검사시에 손상을 감지할 확률이 늘어나고 그에 따라서 검사비용이 증가하게 된다. 따라서, 검사방법의 질을 정의하기 위한 손상감지함수가 필요하게 된다. 연구에서는 손상정도(damage intensity : η_{str}), 즉 임의 시간 t 에서 존재하게 되는 손상의 정도를 손상감지함수로 택하였으며, 시간에 따른 교각의 휨모멘트강도의 감소를 손상정도로 표현하였다. 이러한 손상정도는 식 (6)으로 표현된다.

$$\eta_{str} = \frac{M_{init} - M(t)}{M_{init}} \quad (6)$$

여기서, η_{str} 은 손상정도, M_{init} 은 교각의 초기 휨모멘트강도, $M(t)$ 는 임의시간 t 에서의 교각의 휨모멘트강도이다.

그리고, 검사방법의 손상감지확률 P_{det} 는 식 (7)로 표현된다.

$$P_{det} = \Phi((\eta_{str} - \eta_{0.5})/\sigma_{insp}) \quad (7)$$

여기서, $\eta_{0.5}$ 는 검사방법의 감지가능한 평균 손상정도, σ_{insp} 는 검사방법의 감지가능한 손상정도의 표준편차이다.

4.2 Event Tree Analysis

Event Tree는 검사와 관련된 모든 수리경로를 나타내는 데 사용된다. 아래의 그림 2는 생애주기가 20년인 어떠한 구조물에 대하여 t_1 과 t_2 에서 2번의 검사를 하였다고 가정하였을 때 발생할 수 있는 수리경로를 나타내는 것이다. 검사회수(m)가 2번이 되면 수리경로는 2^m , 즉 4가 된다.

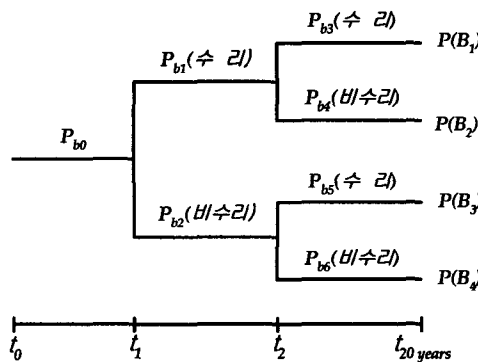


그림 2. 사용기간 20년동안 2번의 수리를 할 경우의 수리경로

우선, 시간 t_1 에서 검사를 하면 P_{b1} 과 P_{b2} 의 두가지 경우가 나타날 수 있다. 첫번째는 수리를 행하는 경우로, 수리는 손상이 감지되어야 가능한 것이므로 수리경로의 확률은 시간 t_1 에서의 손상감지확률로 식 (8)로 표현할 수 있다. 두번째는 수리를 하지 않는 경우로서 수리를 하는 경우의 여사건으로 그러한 수리경로의 확률을 생각할 수 있다. (식 9)

$$P_{b1} = P_{det}(t_1) \quad (8)$$

$$P_{b2} = 1 - P_{b1} \quad (9)$$

결국, 생애주기 동안 2번의 모든 검사를 다 했을 경우, 그림 2와 같이 4가지 수리경로를 생각해 볼 수 있는데, 그중 첫 번째 경로의 확률은 시간 t_1 에서의 손상감지확률과 시간 t_2 에서의 손상감지확률의 곱으로 식 (10)으로 나타낼 수 있다.

$$P(B_1) = P_{b1} \times P_{b2} = P_{det(t_1)} \times P_{det(t_2)} \quad (10)$$

따라서, 임의경로의 확률 $P(B_i)$ 는 식(11)로 나타낼 수 있다. 여기서 m 은 검사회수이다.

$$P(B_i) = \prod_{i=1}^m P_{bi} \quad (11)$$

결국, 내진성능에 대한 유지보수를 행한 이후, 파괴확률은 식 (12)와 같이 유지보수후의 모든 가능경로에 대한 파괴확률에 그 경로가 차지하는 비율 (Branch 확률)을 곱함으로써 구할 수 있게 된다.

$$P_{f,Life} = \sum_{i=1}^m P_{f,Life,i} P(B_i) \quad (12)$$

5. 생애주기비용함수의 구성

시설물을 건설하여 이용하기 위해서는 기획·설계·건설·운용관리 및 폐기에 이르는 각각의 단계에서 비용이 발생한다. 생애주기비용(Life Cycle Cost)라는 것은 구조물의 건설에서 사용기간 종료까지 기대되는 모든 비용에 대한 현재가치의 합으로 정의된다. 연구에서는 검사·보수비용을 고려하여 식 (13)과 같이 생애주기비용함수를 구성하였다.

$$C_T = C_{INT} + C_{INSP} + C_{REP} + C_{FAIL} \quad (13)$$

여기서, C_T 는 총생애주기비용, C_{INT} 은 초기비용, C_{INSP} 는 검사비용, C_{REP} 는 수리비용, C_{FAIL} 은 파괴비용을 나타낸다.

초기비용은 한국건설기술연구원에서 수행된 "교량관리체계(B.M.S) 개선에 관한 연구"에서 제안한 초기비용함수 모델을 이용하였다. 연구에서 사용하게 될 교량구조물형식은 RC 슬래브교로, 초기비용은 식 (14)와 같다.

$$C_{INT} = 3477219 \times L^{0.65895} \times W^{0.80350} \times H^{0.25905} \text{ (원)} \quad (14)$$

여기서, L 은 교장, H 는 교고이며, W 는 교폭이다.

검사비용은 검사방법의 질에 따라 그 값이 변화하게 되므로, 검사방법의 질, 즉 η_{\min} 에 따라서 검사비용이 변화하도록 하였다. 결국, 검사비용은 식 (15)와 같이 나타낸다. (Mori and Ellingwood, 1994)

$$C_{insp} = \alpha_{insp} (1 - \eta_{\min})^{20} \quad (15)$$

여기서, C_{insp} 는 실제검사비용, α_{insp} 는 이상적 상태에서의 검사비용(검사로 손상을 100%감지할 때의 검사비용), η_{\min} 는 감지 가능한 최소의 손상정도를 나타낸다. 총생애주기 동안 m 번의 검사를 하였을 경우, 생애주기동안의 총검사비용 C_{INSP} 는 한번의 검사에 사용되는 비용에, 검사를 행하는 그 시점에 대해 현재 가치화를 해주는 식(16)으로 표현된다.

$$C_{INSP} = \sum_{i=1}^m C_{insp} \frac{1}{(1+r)^{T_i}} \quad (16)$$

여기서, m 은 수리회수, C_{insp} 는 한번의 검사에 사용되는 비용, T_i 는 검사간격, r 은 할인율이다.

수리비용은 식 (17)과 같이 교체비용과 수리효과의 곱으로 정의하였다 (Mori and Ellingwood, 1994).

$$C_{rep} = \alpha_{rep} e_{rep} \quad (17)$$

여기서, α_{rep} 는 교체비용, e_{rep} 는 수리효과로 교각의 휨모멘트강도비로 식(18)로 정의하여, 수리로 인해 개선된 양만을 수리비용에 포함되도록 하였다.

$$e_{rep} = \frac{M_{before} - M_{rep}}{M_{init}} \quad (18)$$

여기서, M_{init} 는 교각의 초기 휨모멘트강도, M_{before} 는 수리전 교각의 휨모멘트강도, M_{rep} 는 수리 후 교각의 휨모멘트강도를 나타낸다. 총생애주기 동안 m 번의 검사를 하였을 경우, 생애주기동안의 총수리비용 C_{REP} 는 모든 가능한 수리경로의 수리비용에 그 경로가 차지하는 확률(branch 확률)을 곱하여 얻게 된다. 수리비용은 식 (19)로 표현된다.

$$C_{REP} = \sum_{i=1}^m C_{rep,i} P(B_i) \quad (19)$$

여기서, m 은 검사회수, $C_{rep,i}$ 는 i 번째의 수리비용, $P(B_i)$ 는 전체 수리경로 중 i 번째의 수리경로가 차지하는 확률이다.

파괴비용의 기대값은 파괴비용과 유지보수후의 파괴확률의 곱으로 다음과 같이 정의하였다. 여기서 파괴비용은 초기비용에 damage scale(DS)을 곱한 값이며, damage scale(DS)은 교량중요도에 따라서 변화하는 값이다.

$$E[C_{FAIL}] = C_f P_{f, life} \quad (20)$$

여기서, C_f 는 파괴비용(= $C_f = C_{INT} \times DS$), $P_{f, life}$ 는 유지보수후의 파괴확률이다.

6. 최적유지보수 계획

이 연구에서 제시한 내진성능의 확보를 위한 유지보수계획 최적화에 대한 적용성을 검증하기 위해, 다음과 같은 교량에 지진하중이 작용할 경우, 최적의 유지보수 회수의 결정을 시방서규정의 가속도계수와 지반계수조합별로, 또한 검사의 질별로 수행한다. 검사의 간격은 일정하다고 가정한다.

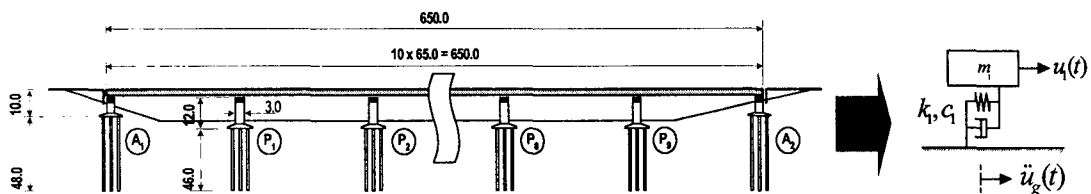


그림 3. 해석대상교량

표 1. 교량 특성치 및 지진특성치

교장	10@65m	교각높이	12m
교각형식	원형 RC교각	상부질량	1.695tonf
콘크리트극한강도	2.05×10^7 N/m ²	철근항복강도	4.0×10^7 N/m ²
RC탄성계수	2.16×10^7 N/m ²	교각감쇠비	5%
지진발생확률 (50년)	0.1	지진지속시간	16.6 sec
교량생애주기	50년	할인율	2%

6.1 가속도 · 지반계수별 최적유지보수계획

시방서에 규정되어 있는 가속도계수와 지반계수 조합별로 만들어진 입력지반운동을 이용하여, 생애주기비용이 최소가 되는 내진성능의 보장을 위한 최적의 검사 및 수리회수의 결정에 대해 알아보도록 한다. 그림 4는 가속도계수가 $A=0.154$ 이며, 지반계수 $S=1.0$ 인 경우에 대한 생애주기비용과 검사회수와의 관계를 나타낸 것이다. 이때 사용한 검사방법은 3.5%이상의 손상을 감지하는 방법이다. 총생애주기비용이 최소가 되는 검사회수는 2회, 즉 16.7년에 한번씩의 검사를 행하는 것이 최적이 된다. 이때의 최적의 수리회수는 그림 5와 같이 1회가 된다.

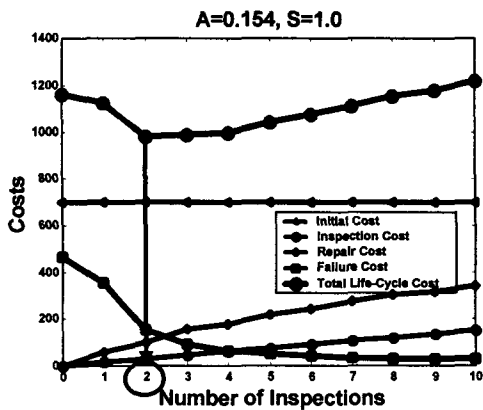


그림 4. $A=0.154, S=1.0$ 일 때 최적검사회수

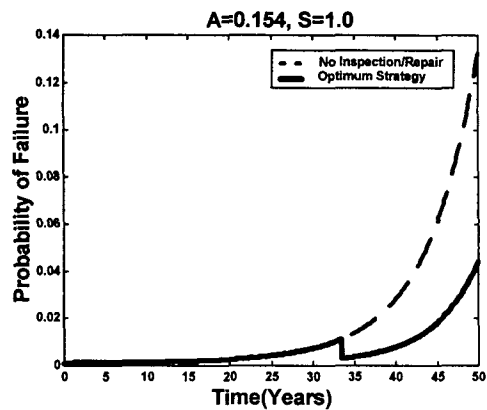


그림 5. $A=0.154, S=1.0$ 일 때 최적수리회수

6.2 지반계수와 가속도계수 변화에 따른 최적유지보수 경향

가속도계수 $A=0.154$ 로 일정할 때, 지반계수를 변화시키면서 최적유지보수 경향 즉, 최소생애주기비용과 검사회수의 변화 양상을 살펴보았다. 그림 6의 가로축은 지반계수를 나타내는데, 지반계수가 증가할수록 검사회수와 최소생애주기비용이 증가하는 모습을 볼 수 있다. 다음으로 지반계수 $S=1.5$ 로 일정할 때, 가속도계수를 변화시키면서 생애주기비용과 검사회수의 변화를 알아보았다. 그림 7의 가로축은 가속도계수를 나타내는데, 가속도계수가 커질수록 최소생애주기비용과 검사회수가 증가하는 모습을 볼 수 있다.

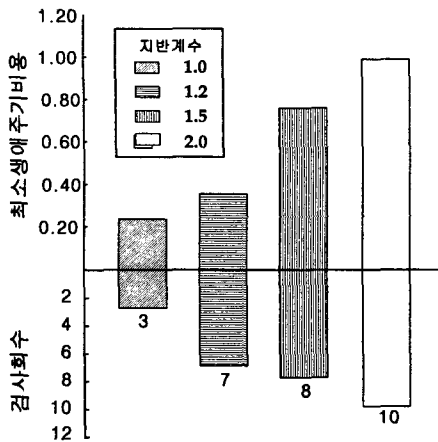


그림 6. 가속도계수 A=0.154일 때, 지반계수별 최적유지보수

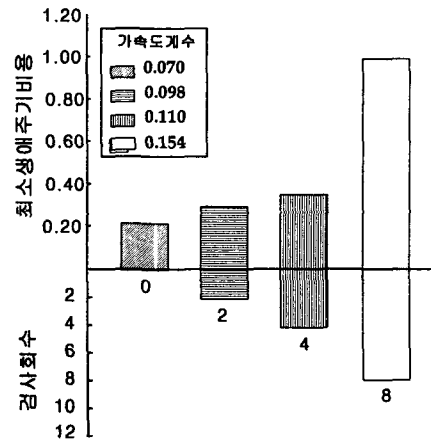


그림 7. 지반계수 S=1.5일 때, 가속도계수별 최적유지보수

6.3 검사의 질(Quality)별 최적유지보수경향

검사의 질을 변화시키면서, 검사의 질과 생애주기비용 및 검사회수와의 관계를 알아보려고 한다. 검사를 하지 않을 경우와 3.5%, 7%, 10.5%이상의 손상을 감지하는 검사방법의 네가지 경우로 나누어 최적의 검사회수의 결정에 대해 알아보았다. 세가지 검사방법 중 3.5%이상의 손상을 감지하는 검사방법이 작은 손상도 감지할 수 있고, 수리 할 수 있으므로 가장 좋은 질의 검사방법이 된다.

다음의 그림은 가속도계수 A=0.154이고 지반계수 S=1.5일 경우, 검사의 질별 최소생애주기비용과 검사회수를 나타낸 그림이다. 검사의 질이 low quality에서 high quality로 증가할수록 생애주기비용과 검사회수가 감소하는 것을 볼 수 있다.

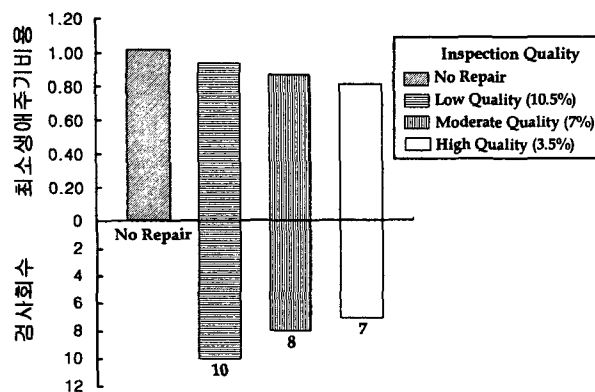


그림 8. A=0.154, S=1.5일 때, 검사의 질별 최적유지보수

7. 결 론

검사·수리비용을 고려하여 생애주기비용함수를 구성하고, 이러한 생애주기비용을 최소화하여, 내진성능의 확보를 위한 유지보수계획의 최적화기법을 제시하였다.

제시된 방법으로 첫번째로 시방서규정의 가속도계수와 지반계수에 대하여 해석을 수행하였다. 그 결과 가속도계수와 지반계수가 증가할수록 검사회수가 증가하며, 이때의 최소생애주기비용 역시 증가하는 경향을 볼 수 있었다. 이는 같은 물성치를 가지는 구조물에 대하여, 가속도계수와 지반계수의 증가에 따라 파괴확률이 증가하여, 이로 인한 파괴비용이 증가됨으로써 생애주기비용 및 검사회수가 증가하는 것으로 판단된다. 즉, 제시된 방법이 파괴확률에 민감하다는 것을 나타낸다.

두번째로 검사의 질을 변화시키면서 최적의 유지보수회수 결정을 위한 해석을 수행하였다. 그 결과 검사의 질이 low quality에서 high quality로 변화함에 따라 검사회수와 이에 따른 최소생애주기비용이 감소하였다. High quality의 검사방법은 그 검사방법 자체는 고가이지만, 작은 손상을 감지하고 이를 수리함으로써 전체 생애주기비용에 미치는 효과가 검사방법 자체의 비용에 비해 보다 탁월한 것을 알 수 있다. 즉, 검사의 질이 좋은 방법이 손상의 조기발견으로 인한 내진성능의 확보정도가 크기 때문에 보다 효과적임을 나타낸다.

제시된 방법은 교량구조물의 성능저하가 30년에 10%가 되도록 내진성능저하모형을 정의하였다. 그러나, 실제 교량구조물에 대한 내진성능저하에 대한 모델의 연구가 진행된다면 현존하는 교량구조물에 대하여도 제시된 방법을 이용하여 최적의 유지보수계획을 수립할 수 있을 것으로 판단된다.

8. 감사의 글

이 연구는 서울대학교 지진공학연구센터(KEERC)를 통한 한국과학재단의 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

참고문헌

1. Koh, H.M., Ha, D.H., Song, J., Hahm, D. and Kwon, K.J., "Optimal Design and Cost Effectiveness of Seismic-Isolated Bridges Based on Minimum Life Cycle Cost Concept," Proc. of International Post-SmiRT Conference Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibration of Structure, Aug. 23-25, Korea, 1999
2. 송준호, 최소 사용기간비용 내진설계에 의한 지진격리교량의 경제성 평가, 석사학위논문, 서울대학교, 1999
3. Koh, H.M., Song, J. and Ha, D.H. "Cost Effectiveness of Base Isolation for Bridges in Low and Moderate Seismic Region," Proc. of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, WCEE, 2000
4. Ellingwood, B.R. and Yasuhiro Mori, "Reliability-Based Service Life Assessment of Aging Concrete Structures", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.119, No. 5, 1600-1621, 1993
5. Newland, D.E., An Introduction to Random Vibrations, Spectral and Wavelet Analysis, John

Wiley and Sons Inc., N.Y., 1993

6. Frangopol, D.M., Lin, K.-Y. and Estes, A.C., "Life-Cycle Cost Design of Deteriorating Structures," *Journal of Structural Engineering*, Vol.123, No.10, 1390-1401, 1997
7. Mori, Y., and Ellingwood, B.R., "Maintaining Reliability of concrete structures. II: Optimum inspection/repair," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 120(3), 846-862, 1994
8. Ang, A.H-S. and Leon, D.D., "Target Reliability for Structural Design Based on Minimum Expected Life-Cycle Cost", *Proc. of 7th IFIP WG7.5 Working Conference on Reliability and Optimization of Structural System*, 71-84, 1996
9. Estes, A.C., A system reliability approach to the lifetime optimization of inspection and repair of highway bridges, Ph.D.Thesis, University of Colorado, boulder, CO, 1997
10. Frangopol, D.M, *Bridge Safety and Reliability*, ASCE
11. 함대기, 교각의 비선형 거동을 고려한 중약진 지역 지진격리 교량의 비용효율성 평가, 석사학위논문, 서울대학교, 2000