

최적 보강공법 선정을 위한 의사결정모델에 관한 연구

Study on Decision-Making Model to Select Optimal Strengthening Method

선종원^{1)*}

Sun, Jong Wan

박경훈²⁾

Park, Kyong Hoon

오홍섭³⁾

Oh, Hong Sub

조효남⁴⁾

Cho, Hyo Nam

Abstract

Different to other social infrastructures, bridge elements or bridges can be damaged or collapsed and this may cause death toll and severe social and economical damage, bridges should be managed to maintain a safety level. Diverse strengthening methods is developed to improve a deteriorated bridge performance up to original design level. But rational decision-making process and methodologies to select a optimum strengthening method are absence yet in Korea. This paper therefore derived items and proposed methodologies for quantity estimate considering uncertainty to select a optimum strengthening method among conceptually designed alternatives. And also, to demonstrate the applicability and verification of the proposed approach, it was applied to select the optimum strengthening method for the deteriorated T-shape concrete girder bridge. The model and the procedure can greatly contribute to the uncertainty-oriented alternative selection.

Keywords : Decision-making, Cost-effectiveness, Strengthening, Bridge

1. 서론

공공시설물 중 교량은 하천, 계곡, 해상 등 가설되는 위치의 특성 상 열악한 환경에 놓이게 되는 경우가 많으며, 태풍, 홍수, 지진과 같은 자연재해뿐만 아니라 급격한 산업화로 인한 물동량의 증대와 운송수단의 대형화로 인해 교통량 및 통행하중의 지속적인 증가를 겪게 된다. 교량의 파손으로 인한 보수, 보강, 교체에 따른 교통통제나, 극단적인 경우 갑작스런 붕괴 등이 발생할 경우 사회경제적으로 커다란 손실과 인명사상의 피해를 유발하기 때문에 일정 수준 이상의 성능을 유지하여야 한다. 그러기 위해 구조물에 대한 주기적인 점검을 통하여 구조물의 성능이 설계상의 허용치 이하로 저하되기 전에 원상태와 동등 또는 그 이상으로 회복시키기 위한 노력 및 기술이 필요하다.

국내·외에서는 지금까지 성능이 저하된 교량의 안전성을 확보하고 교통조건을 개선하기 위해 프리스트레싱 보강공법, 강판접착공법, 복합섬유부착공법, 복합섬유 매립공법 등 다양한 공법들이 연구되고 있으나, 어떤 보강공법을 사용하는 것이 가장 합리적인지에 대한 판단기준 없

이 의사결정을 수행하고 있는 실정이다. 예를 들어 국토관리사무소의 시설물 관리 업무에 활용하기 위해 개발된 시설물유지관리시스템(한국건설기술연구원, 2005)의 세부 모듈 중 하나인 ‘보수보강관리’에서는 교량구조물의 보수·보강 공법 편람(건설교통부, 1995)에 따라 손상내용에 따른 보강방법을 제공하고 있으나, 변상을 복구하는데 적합한 복수의 방법들 중 어느 공법이 효율적인지에 대한 의사결정은 시설물 관리자가 판단해야 하는 몫으로 남겨져 있다.

또한 홍태훈 외(2005)는 적용 가능한 개·보수 활동 전략 중에 최고의 비용효과(유지관리전략 선택 전 후의 내용연수와 생애주기비용의 차 사이의 비율) 값을 가지는 전략을 최적의 개·보수 활동 전략으로 선택하는 의사결정모델을 제시하였다. 그러나 의사결정을 담당하는 일선 실무자가 쉽게 평가할 수 없는 생애주기비용과 내용연수의 증가량을 의사결정인자로 사용하였기 때문에 실용성 면에서 떨어진다고 할 수 있으며, 그 값을 추정하는 과정에 내포되어 있는 여러 불확실성을 고려하지 않아 합리적인 의사결정이 이루어지지 않을 수 있다.

기존 대부분의 의사결정방법에서는 보강공법 대안 사

1) 정회원, 한국건설기술연구원 구조교량연구실 연구원

2) 정회원, 한국건설기술연구원 구조교량연구실 선임연구원, 공학박사

3) 정회원, 진주산업대학교 토목공학과 조교수, 공학박사

4) 정회원, 한양대학교 건설환경시스템공학과, 명예교수, 공학박사

* Corresponding author : jwsun@kict.re.kr 031-910-0157

• 본 논문에 대한 토의를 2010년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2010년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

이의 우선순위를 결정하기위해, 한 대안이 기준안(원안)에 비해 상대적으로 우수한 정도를 쌍대비교를 통해 평가하는 방법을 사용하고 있다(정평기 등, 2005). 그러나 이 방법은 기준안이 없는 경우에 사용할 수 없으며, 모든 대안의 상대적인 점수를 비교할 수 없다는 문제점이 있다. 또한 기준안 없이 쌍대비교를 통해 평가하는 방법은 대안의 개수나 평가인자가 늘어나는 경우 쌍대비교를 수행해야 할 횟수가 기하급수적으로 많아진다는 문제점이 있다.

교량의 유지관리 단계 의사결정을 위한 대표적인 의사결정시스템 중 하나인 미국의 PONTIS(Cambridge Systematics Inc., 2005)는 생애주기비용 분석, 비용효과 해석, 위험도분석 모듈과 비용최적화 분석을 위한 최적화 모듈로 구성되어있다. 그러나 이 시스템은 상위 수준의 교량 관리자가 네트워크 수준에서 개략적인 교량 열화모델, 개·보수활동의 효과 모델, 개·보수 활동의 단위 비용분석 모델 등을 이용하여 시설물의 장기 관리계획을 세우고 Top-Down 형식으로 예산을 분배하기 위해 개발된 것으로, 국토관리사무소 등과 같이 실제 유지관리담당자가 복수의 대안들 가운데 최적보강대안을 선정하는 등과 같은 실제적인 유지관리 의사결정문제에 적용하는 데는 한계가 있다.

따라서 본 논문에서는 교량유지관리 담당 실무자의 보강공법 선정 관련 의사결정을 지원하기 위해, 불확실성을 고려한 합리적인 의사결정방법을 제안하고 이를 간략한 예제에 적용하여 개발된 모델의 합리성 및 적용성을 검토하였다.

2. 의사결정방법

2.1 의사결정절차

시설물관리주체는 시설물의안전관리에관한특별법에서 정하는 바에 따라 소관시설물에 대한 안전점검을 실시하여 시설물의 이상 유무를 판단한다. 그 결과 이상이 발견되면 보수보강, 사용제한 등 필요한 조치를 취하고, 이상이 발견되지 않을 경우 일상유지관리 과정을 거치게 된다. 이러한 일련의 절차는 시설물이 건설되어 기능을 다할 때까지 정기적, 반복적으로 이루어진다.

관리주체가 수행하는, 청소 등과 같은 일상적인 유지관리나 콘크리트 균열보수 등 교량의 상태와 관련된 보수조치는 유지관리주체의 의사결정사항이라기보다는 반복적으로 수행되는 일련의 업무행위라 할 수 있다. 그러나 교량의 안전성이 관리주체의 평가 기준에 미치지 못했을 때 수행되는 보강공법의 선정과 같은 의사결정문제는 각각의 대안별로 직접비용, 시공 및 성능 측면에서 각기 다른 특징을 가지고 있기 때문에 최적의 유지관리전략을 선택하는 의사결정과정이 필요하다. 따라서 유지관리전략 수립

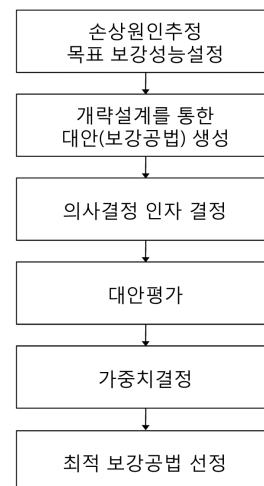


Fig. 1 최적 보강공법 선정 관련 의사결정절차

을 위한 의사결정은 교량의 구성 부재나 교량의 내하력이나 강성 등의 역학적인 성능을 회복 또는 향상시키는 것을 목적으로 최적의 보강공법을 결정하는 것이라 정의할 수 있다.

최적 보강공법 선정에 관한 의사결정을 위해 우선 발생된 손상에 적합한 복수의 적용을 선택하고 보강공법 별 설계방법, 시공 주의사항, 보강공법의 단가 등 제반사항을 검토해 보강공법을 개략설계 한다. 그 후 각각의 대안을 의사결정인자로 구분해 평가하고, 각 인자사이의 가중치를 고려해 각 대안별 가중평균값을 비교하는 방법으로 의사결정을 수행할 수 있으며, Fig. 1은 이와 같은 절차를 도식화하여 나타낸 것이다.

2.2 의사결정인자

일반적으로 사용할 수 있는 자원(財源)은 한정되어 있기 때문에 목표성능 이상을 발휘할 수 있는 보강공법 대안 중 가장 직접공사비가 적게 소요되는 대안이 가장 높은 가치를 갖고 있다고 할 수 있으므로, 직접공사비를 의사결정인자로 사용할 수 있다. 성수대교나 당산철교의 사례에서 알 수 있듯이 서울과 같은 대도시의 경우 직접공사비에 비해 간접비의 영향이 큰 것으로 알려져 있다(박구병, 2004). 같은 보강공법을 사용하더라도 주위 교통여건이나 공사 시간, 교통통제 방법 등에 따라 간접비는 크게 달라지기 때문에, 간접비 또한 의사결정인자로 사용될 수 있다. 일반적으로 유지관리주체는 부재나 교량의 노후화된 현재 성능(모멘트강도, 전단강도, 내하성능, 내구성능, 사용성 등 공학적 특성을 의미)을 설계 성능과 동등 또는 그 이상으로 개선하기 위한 목표를 가지고 발주하기 때문에 대부분의 보강공법 대안은 유사한 성능수준을 갖고 있다. 그러나 설계자가 제시한 대안의 성능개선 정도는 사용된 재료강도, 제작 또는 시공, 해석 모형 등 많

은 요인에 의해 불확실한 값으로 평가되므로, 각 보강공법 대안의 성능개선정도를 의사결정인자로 사용할 수 있다. 또한 성능개선정도와 직접공사비는 비례관계에 있으나 보강공법 대안별로 그 비율은 다르므로, 대안별 성능개선정도와 그 때 소요되는 직접공사비의 비율로 정의되는 비용효율성을 직접공사비와 성능개선량을 대체하는 의사결정인자로 사용할 수도 있다.

따라서 여러 보강공법 대안의 상대적인 가치는 직접공사비, 성능개선정도, 간접비를 이용하거나, 비용효율성과 간접비를 통해 정량적으로 평가할 수 있으며, 각각의 의사결정인자의 가중치와 평가점수의 가중곱의 합을 통해 최적 보강대안을 결정할 수 있다.

2.3 정량적 대안평가방법

본 논문에서 다루고 있는 의사결정문제의 본질은 여러 불확실성을 고려하였을 때 의사결정인자 측면에서 보강공법 대안 사이의 상대적 우선순위를 결정할 수 있는냐에 있다. 각 대안의 직접공사비, 간접비, 성능은 여러 요인들에 의해 불확실한 값이므로, 한 대안이 다른 대안에 비해 상대적으로 우수한 정도 역시 불확실한 값으로 평가된다. 따라서 의사결정인자별로 모든 보강공법 대안의 평가값의 평균이 각 보강공법의 평가값을 초과(미만)할 확률을 계산하고, 이 값을 대안의 평가를 위한 지표로 이용하는 의사결정방법을 제안하였다. 여기서 실무자의 직관적 이해를 위해 0-100%의 확률을 10개 간격으로 분리하여 10점만점의 등급으로 변환한 Table 1을 이용하여 각 대안의 점수를 평가하였다.

일반적으로 관리주체가 입력한 의사결정지표의 확률모수를 가지고 전체 대안의 평균값이나 대안이 전체평균을 초과할 확률을 대수적으로 계산하는 것은 불가능하기 때문에, 본 논문에서는 시물레이션 기법을 이용하였다. 시물레이션 기법을 통해 대안의 상대적인 확률(등급)을 결정하기 위해 관리주체가 대안별 확률모수를 분포형식, 평

균, 표준편차, 최소, 최대 형태로 수집하고, 확률분포와 모멘트와의 관계를 이용하여 분포별 확률모수를 얻을 수 있다. 그 후 0에서 1사이의 랜덤변량의 발생시키고 이를 역변환법(Ang and Tang, 1984)을 통해 확률변수로 변환하며, 이 과정을 반복하여 확률변수군을 생성한다. 그 다음 각각 의사결정인자별, 대안별로 평가값의 평균값을 계산하고, 이 값을 대안의 평가값과 비교하여 평균초과/미만 여부를 판별한다. 이상을 도식적으로 나타내면 Fig. 2와 같다.

2.3.1 직접공사비 평가

직접공사비는 데이터베이스 내 시공여건에 따른 보강공법의 단위비용 정보나 복수의 엔지니어 견적 등을 통해 추정되므로, 불확실성은 피할 수 없다. 불확실성을 고려한 직접공사비 측면의 대안평가는 대안의 직접공사비와 전체 평균 직접공사비와의 쌍대비교를 통해 이루어진다. Fig. 2의 절차에 따라 각 대안의 직접공사비가 모든 대안의 평균공사비를 초과할 확률을 계산할 수 있다. 특수한 경우로, 각 대안 직접공사비가 식(1a)의 평균($=\mu_{alt_i}$), 표준편차($=\sigma_{alt_i}$)을 갖는 Gaussian 무작위변량인 경우, 각 대안 직접공사비(Alt_i)의 평균초과확률(P_{alt_i})과 등급(R_{alt_i})은 식(1b), (1c)와 같이 계산할 수 있다.

Table 1 초과확률과 점수와의 관계

평균 초과/미만 확률 (%)	등급(Rank)
$P < 10\%$	$9 < R \leq 10$
$10\% \leq P < 20\%$	$8 < R \leq 9$
$20\% \leq P < 30\%$	$7 < R \leq 8$
$30\% \leq P < 40\%$	$6 < R \leq 7$
$40\% \leq P < 50\%$	$5 < R \leq 6$
$50\% \leq P < 60\%$	$4 < R \leq 5$
$60\% \leq P < 70\%$	$3 < R \leq 4$
$70\% \leq P < 80\%$	$2 < R \leq 3$
$80\% \leq P < 90\%$	$1 < R \leq 2$
$90\% \leq P < 100\%$	$0 < R \leq 1$

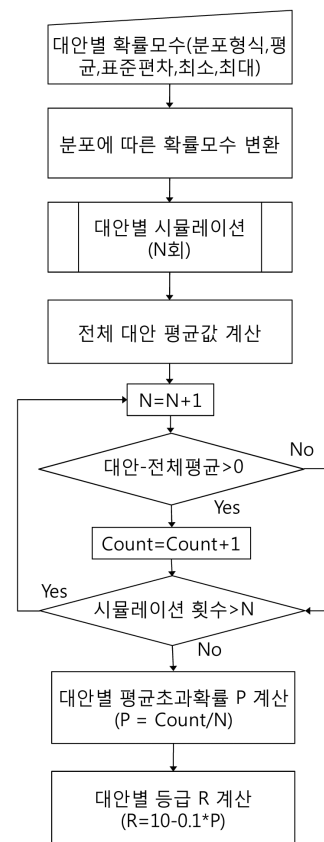


Fig. 2 시물레이션 기법을 이용한 대안별 등급 계산

$$\mu_{mean} = \sum_{i=1}^n \mu_{alt_i} / n, \sigma_{mean} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_{alt_i}^2} \quad (1a)$$

$$P_{alt_i} = \Phi\left(\frac{\mu_{alt_i} - \mu_{mean}}{\sqrt{(\sigma_{alt_i}^2 + \sigma_{mean}^2)}}\right) \quad (1b)$$

$$R_{alt_i} = 10 - 0.1P_{alt_i} \quad (1c)$$

여기서, μ_{mean} , σ_{mean} 는 각각 모든 대안의 평균, 표준편차, μ_{alt_i} , σ_{alt_i} 는 각각 개별 대안 i 의 평균, 표준편차, P_{alt_i} 는 각각 대안 i 가 모든 개별 대안의 평균을 초과할 확률, R_{alt_i} 는 대안 i 의 등급이다.

2.3.2 간접비 평가

간접비는 보강공사를 수행하는 도중 차선차단 등 교통여건의 변화에 의해 발생하며, 일반적으로 통행시간비용과 차량운행비용으로 구성된다. 여기서 통행시간비용은 공사구간 통행속도 감소로 인해 차량에 타고 있는 이용자의 추가적인 시간지연을 화폐가치화한 금액을 의미하며, 차량운행비용은 차량속도 감소, 우회 등으로 인한 유류소비 증가금액을 의미한다(박경훈 등, 2007).

작업구간 통행속도는 일부차선통제, 차선축소, 우회도로 이용 등 작업구간 교통 통제방법 및 시간대별 교통량에 밀접하게 연관된다. 또한 보강공사의 기간은 공법의 특징 및 인력, 기계 및 장비 등 자원 투자 계획에 따라 다르므로, 간접비는 개별 보강공법의 ①작업구간 통행조건, ②작업시간대, ③ 작업기간에 영향을 받는다 할 수 있다.

간접비는 차선수, 차선폭 등 기하학적 조건, 일평균교통량, 주유비, 사용자(운전자, 동승자, 승객 등)의 시간가치, 승용차, 트럭, 버스 통행 비율, 차종별 평균 재차인원, 시간대별 평균 교통량 비율 등 모든 대안에 같은 값으로 적용되는 공통인자와 작업구간 통행조건, 작업시간대, 작업기간 등 각 보강공사 대안별로 정의되는 인자를 고려하여 계산된다. 본 논문에서는 일평균교통량의 불확실성을 고려하여 Fig. 3의 절차에 따라, 한국시설안전기술공단(2004)의 정식화 모델을 응용해 개발된 사용자비용 산정 프로그램을 이용하여 각 대안의 간접비가 모든 대안의 평균 간접비를 초과할 확률 및 그 때의 등급을 평가하였다.

2.3.3 성능평가

관리자는 설계기술자에게 보강설계성능개선목표(내하력, 모멘트성능, 전단성능, 내진성능, 공용수명연장 등)를 제시하고, 설계자는 설계성능개선목표를 만족하도록 설계할 것이다. 그런데 설계자가 제시한 대안의 성능개선평균은 사용된 재료강도, 제작 또는 시공, 해석 모형 등 많은 요인에 의해 불확실한 값으로 평가되며, 성능개선평균의 불

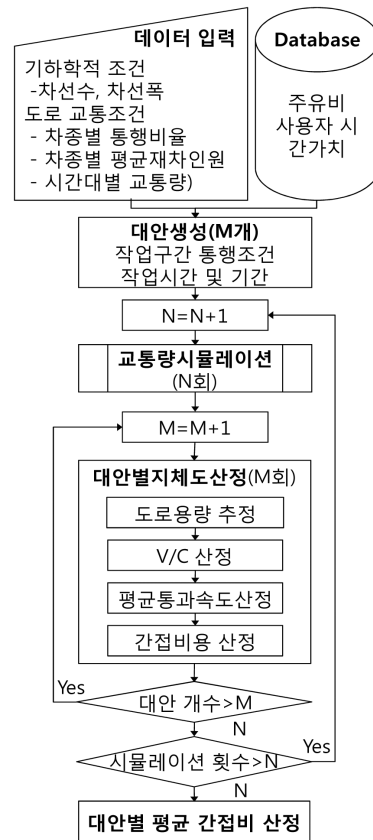


Fig. 3 대안별 간접비 평가 절차

확실성은 실제 성능과 설계 성능의 비율의 평균과 불확실성 정도로 모델링 할 수 있다. 즉, 실제 보강공법 설계 목표치와 보강공사 후 성능 평가 결과의 비율을 통계 분석하여 평균값과 표준편차를 구하는 방법을 통해 대안별 성능 불확실성을 구할 수 있다.

각 보강공법 대안의 성능은 식(2)와 같이 정식화 된다.

$$X = N_X \cdot \bar{X} \quad (2a)$$

$$N_X = P \cdot M \cdot F \quad (2b)$$

여기서 X 는 보강공법 대안의 성능, \bar{X} 는 설계 성능개선 목표, N_X 는 설계성능개선을 추정하는데 발생할 수 있는 불확실량, P 는 해석모형에 관련된 불확실량 확률변수, M 은 재료강도에 관련된 불확실량 확률변수, F 는 제작 또는 시공에 관련된 불확실량 확률변수를 의미한다.

2.4 가중치 및 최적보강대안결정

Saaty(1980)가 제안한 AHP(Analytic Hierarchy Process)기법은 한 번에 두 개의 대상(objects) 또는 기준(criteria)을 비교하는 방법으로 수학적 일관성이 검증된 종합적인 우선순위를 결정할 수 있기 때문에, 본 논문

Table 2 의사결정인자의 비교 매트릭스

	직접공사비	간접비	성능개선량
직접공사비	1	2	4
간접비	0.5	1	2
성능개선량	0.25	0.5	1

에서는 AHP기법을 의사결정인자의 가중치 결정에 이용하였다.

전문가 인터뷰나 설문조사 등을 통해 의사결정인자의 상대적 중요도는 비교매트릭스 형태로 획득하고, 고유벡터 문제를 풀어 각 의사결정인자의 가중치를 결정한다. AHP 분석결과와 일관성은 일관성비율(Consistency ratio)로 검증할 수 있는데, Saaty 등(2001)은 일관성비율의 값이 0.1이내인 경우 일관성에 무리가 없는 결과로 정의하고 있다. 예를 들어 Table 2과 같이 비교매트릭스를 가정한 경우, 고유벡터문제를 풀어 직접공사비는 57%, 간접비는 29%, 성능개선량은 14%와 같이 의사결정인자별 가중치를 얻을 수 있으며, 일관성비율(= 0.0)을 계산할 수 있다. 그리고 비용효율성은 직접공사비와 성능개선정도를 이용해 계산되므로 비용효율성의 가중치는 두 의사결정인자 가중치의 합으로 계산될 수 있다.

마지막으로 대안별로 의사결정인자별 가중치와 대안평가 결과를 가중곱의 합을 계산하여 가중곱의 합이 가장 높은 대안이 최적대안이 되는 방식으로 의사결정을 수행할 수 있으며, 이를 식(3)과 같이 정식화 할 수 있다. 식(3a)는 비용효율성과 간접비를 의사결정의 인자로 사용한 것으로 직접비 및 성능을 대신해 비용효율성만을 시물레이션 하면 되므로 식(3b)에 비해 계산시간은 적게 걸리나 각 대안별 직접비, 성능의 등급을 확인할 수 없으며, 식(3b)는 직접비, 간접비, 성능을 의사결정의 인자로 사용한 것으로 식(3a)와 반대되는 특징을 가지고 있다.

$$WR_i = w_e \cdot R_{alt_i}^e + w_{id} \cdot R_{alt_i}^{id} \quad (3a)$$

$$WR_i = w_d \cdot R_{alt_i}^d + w_p \cdot R_{alt_i}^p + w_{id} \cdot R_{alt_i}^{id} \quad (3b)$$

여기서, w_d , w_{id} , w_p , w_e 는 각각 직접비, 간접비, 성능, 비용효율성의 가중치, $R_{alt_i}^d$, $R_{alt_i}^{id}$, $R_{alt_i}^p$, $R_{alt_i}^e$ 는 각각 대안 i의 직접비, 간접비, 성능, 비용효율성 측면에서 등급, WR_i 는 대안 i의 가중곱의 합을 의미한다.

3. 분석예

3.1 분석대상 선정

제안된 방법의 적용성을 보이기 위하여 선정된 구조물은 설계하중이 DB-18(대한토목학회, 2008)인 철근콘크

Table 3 대상교량의 제원 및 일반사항

교량명	교장	교폭	상부구조형식	경간	준공년도	설계하중
OO교	30m	6m	RC T-Beam	2	1969	DB-18

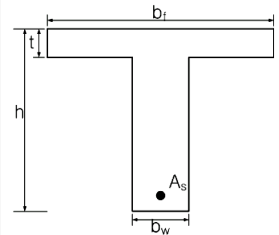
	플랜지폭 (b _f)	183cm
	웹폭 (b _w)	50cm
	단면높이 (h)	97cm
	슬래브 두께 (t)	17cm
	인장철근량 (A _s)	74.24cm ²
	콘크리트설계 기준강도	21MPa
	철근항복강도	280MPa

Fig. 4 대상교량의 단면형상

Table 4 대상구조물의 설계목표 결정

	가설당시 (DB-18)	현 시점	보강 후 (DB-24)
내력모멘트 (KNm)	1,539.05	1,385.15	2,000.00
계수하중모멘트 (KNm)	1,480.80	1,614.70	1,915.30
검토결과	OK	NG	OK

리트 T형 교량으로 주요 제원 및 일반사항은 Table 3과 같으며, 대상 교량에 대한 단면 형상은 Fig. 4와 같다. 또한 대상교량은 일 교통량 50,000대(불확실성 10%), 4차선 도로와 교차하는 교통특성을 가지고 있다. 정밀안전진단 결과 노후화로 인해 단면의 모멘트 성능이 설계성능 대비 10% 감소한 것으로 조사되었으며, 설계하중 개선에 대한 요구가 증대하였기 때문에, 설계하중 DB-18 교량을 DB-24로 개량하는 것을 의사결정의 목표로 선정하였다. 실제 설계하중 개선을 위해서는 검토해야할 사항이 많지만, 본 논문의 적용 예제에서는 부재의 모멘트 성능만을 고려하였다.

보강공법 선정에 관한 의사결정을 위해 첫 번째 단계로 구조해석을 통해 설계대안의 목표성능을 설정하였으며, 그 결과는 Table 4와 같다. 가설 당시에는 설계기준을 만족하도록 설계되었으나, 구조물의 열화 및 설계기준의 강화 등으로 인해 현재 개정된 설계기준은 만족하지 못하는 것으로 분석되었다. 교량의 설계하중을 DB-24로 개선할 경우 계수하중모멘트는 1,915.3KN·m로 평가되었으며, 이를 만족시키기 위한 보강공법 대안의 성능개선목표는 2,000KN·m로 정하였다.

3.2 개략설계 및 대안평가

두 번째로 설계목표에 따라 시설물유지관리시스템이나 교량구조물의 보수·보강편람 등을 통해 적절한 공법 대안을 생성한다. 본 예제에서는 소규모 콘크리트 교량의 보강을 위해 Table 5와 같이 3가지 대안을 선정하였으며

Table 5 대상구조물의 보강대안 개략설계

		대안1	대안2	대안3
공법 명		탄소판부착 보강공법	무수지형 일방향 탄소섬유시트보강공법	유리섬유 복합재 보강공법
보강방법		10cm×1.4mm 3장 부착	50cm×0.11mm 4장 부착	50cm×0.13mm 3장 부착
재료강도		176.4MPa	347.9MPa	49MPa
교통통제방법 및 시공기간		하부 1차선 종일 통제 2일간	하부 2차선 종일 통제 5일간	하부 2차선 종일 통제 4일간
직접 공사비	평균(원)	63,016,655	57,383,935	40,250,000
	불확실성	LN(1.0,0.1,0,∞)	LN(1.0,0.2,0,∞)	LN(1.2,0.3,0,∞)
간접비(원)	평균=13,784,492 COV=0.12	평균=84,754,437 COV=0.12	평균=67,859,922 COV=0.12	
	성능 (KN·m)	2,015.4	2,030.9	2,151.0
성능	불확실성	LN(1.0,0.1,0,∞)	LN(1.0,0.2,0,∞)	LN(0.9,0.2,0,∞)

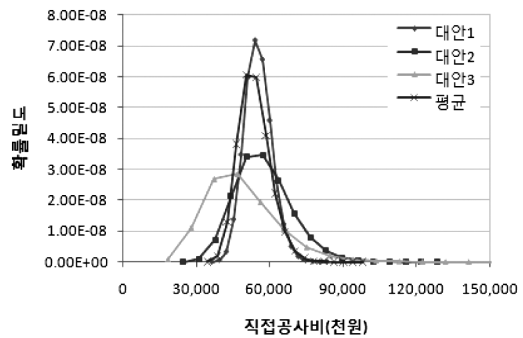
개략설계를 통해 보강공법 비용 및 성능을 추정하였다.

본 논문에서 적용한 보강공법은 모두 복합재료 부착공법의 일종으로, 각 대안별로 거더복부하부에 탄소판, 무수지형 일방향탄소섬유시트, 유리섬유복합재를 부착하여 단면의 모멘트 성능의 향상을 도모한다. Table 6에 나와 있는 보강방법 및 재료강도와 일육시스템 등(2001)의 내력모멘트 산정식을 이용해 보강 후 대상 구조물의 내력모멘트를 계산할 수 있으며, 모든 대안이 정도의 차이가 있지만 목표성능개선량인 DB-24의 내력모멘트를 초과하는 것을 확인할 수 있다.

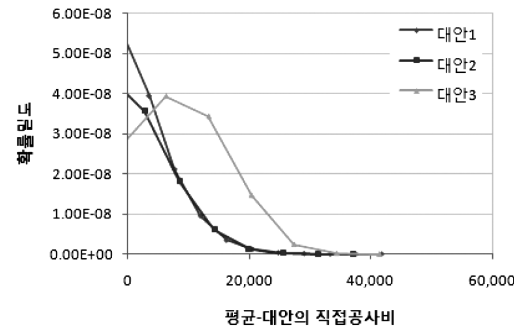
그리고 유지보수공중별단가집(한국도로공사, 2007) 및 일육시스템 등(2001)의 신기술보고서 등을 참조하여 직접공사비를 산정하였다. 그 중 비계 및 기타 제잡비는 일 평균 500만원으로 가정하였다. 직접공사비와 성능의 불확실성은 데이터베이스나 전문가 판단으로부터 획득된 값으로 LN(a, b, c, d)에서 LN은 대수정규분포를 의미하고, a는 평균, b는 변동계수, c는 최솟값, d는 최댓값을 의미한다.

모든 대안은 보강 대상교량 하부 도로의 차선을 차단한 후 조립식 비계를 설치하고 치핑, 고압수 세척, 바탕면 수평작업 후 보강재를 부착하는 순으로 보강공사를 수행한다. 그런데 보강재 부착 장수와 방법이 대안별로 다르기 때문에 교통통제방법 및 시공기간이 달라질 수밖에 없으므로, 각 대안별 간접비는 다르게 평가된다. 간접비는 대상교량의 보강공사로 인해 하부도로 통행이 지장을 받아 발생한다. 하부도로는 왕복 4차선이며, 차단구간의 길이는 100m, 시간대별 교통량 및 차량의 업무/비업무 통행 시간가치, 연료소모량 산정모델 등은 한국시설안전기술공단(2004)의 일반도시부 추정치를 사용하였다.

3.3 등급평가 및 의사결정



(a) 각 대안별 직접공사비 분포곡선(천원)



(b) 전체평균과 대안 직접공사비 차의 분포곡선

Fig. 5 대안별 직접공사비 평가

첫 번째로 Table 5의 대안별 직접공사비를 살펴보면, 평균값은 대안 3이 가장 작고 대안 1이 가장 큰데 비해 불확실성은 반대로 대안 3이 가장 큰 것을 확인할 수 있다. 만약 불확실성이 없다고 가정하는 경우 대안간 순위는 쉽게 결정할 수 있으나, 각 대안별 상대평가점수를 정량적으로 구하는 것은 쉽지 않은 일이다.

Fig. 5는 본 논문에서 제안한 불확실성을 고려한 평가를 도식적으로 설명한 것이다. Fig. 5(a)는 각 대안의 분포곡선을 도시한 그림이며, Fig. 5(b)는 평균과 대안의 차를 도시한 그림이다. 어떤 대안이 다른 대안보다 평균과 대안의 차이가 0이상 되는 부분의 면적이 많다는 것은, 모든 대안의 직접공사비의 평균이 대안 직접공사비에 비해 클 확률이 많다는 것을 의미하므로 면적이 넓을수록 더 경제적인 대안이다.

두 번째로 Table 5의 대안별 간접비를 살펴보면, 다른 대안에 비해 대안 1이 교통통제기간이 짧고 통제 차선수도 작아 타 대안에 비해 간접비가 절대적으로 작은 것을 확인할 수 있다. 한국시설안전기술공단(2004)의 정식화 모델을 보면 간접비는 공사 전·후 차선용량과 통행량의 비율로 통과속도를 산정하기 때문에 두 인자에 영향을 받으며, 1일 동안의 총 간접비와 시공기간을 곱해 간접비가 산정되므로 시공기간과는 선형관계에 있다. 따라서 대안 2와 3을 비교해보면 2차선을 하루 통제하였을 때 약 1,690만 원 정도 간접비가 발생하는 것으로 분석되며, 이 값은 대안 1과 같이 1차선을 하루 통제한 간접비의 약 2.45 배

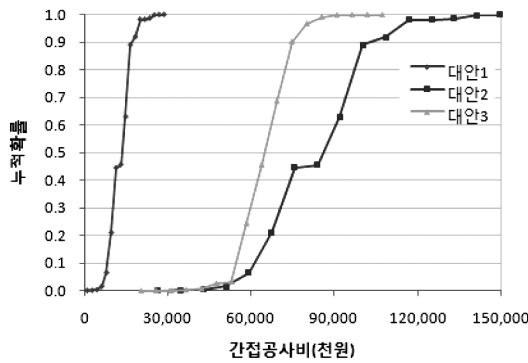


Fig. 6 대안별 간접비 평가

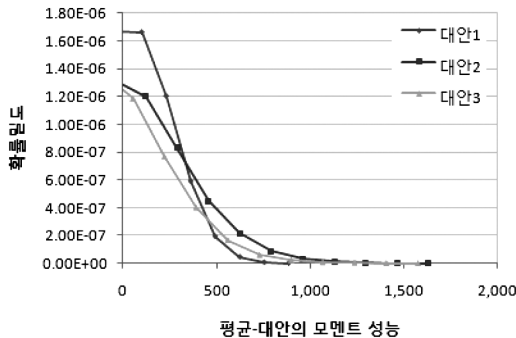


Fig. 7 평균-대안 모멘트 성능 분포곡선

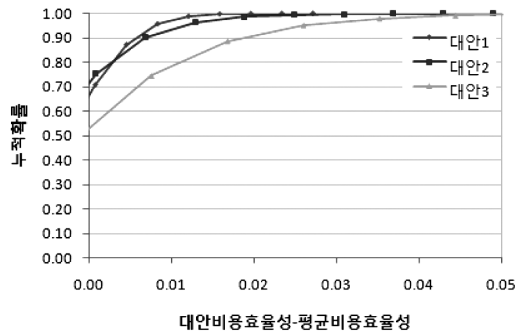


Fig. 8 대안 비용효율성-평균비용효율성의 누적분포곡선

로 차선차단 개수가 시공기간에 비해 민감한 것으로 분석되었다. 교통량의 불확실성을 고려한 각 대안별 간접비 산정결과를 도시하면 Fig. 6과 같다.

세 번째로 성능에 대해서도 Fig. 5와 6과 유사한 결과를 확인할 수 있다. 대안 1은 대안 2와 비교했을 때 평균 값은 거의 같으나, 불확실성이 작기 때문에 대안 1의 평균을 초과할 면적이 대안 2에 비해 큰 것을 확인할 수 있다. 보강공법 3의 평균성능개선량은 타 대안에 비해 가장 컸었지만, 실제 시공했을 때 통상 기대했던 것보다 약 10% 적게 성능이 발현된 것으로 평가(가정)되었기 때문에 타 대안에 비해 모든 대안의 평균을 초과할 확률이 가장 낮은 것으로 평가되었다.

마지막으로 비용효율성에 대한 결과를 확인하기 위해 대안비용효율성과 평균비용효율성의 차에 따른 누적분포

Table 6 의사결정인자별 평가대상구조물의 보강대안 평가결과

구분	의사결정인자	가중치	대안1	대안2	대안3
정식화1	직접공사비	57%	3.90	3.48	7.27
	성능개선량	14%	5.49	5.26	4.01
	간접비	29%	10.00	0.01	0.30
	가중급 합		5.89	2.72	4.79
정식화2	비용효율성	71%	4.49	4.03	6.33
	간접비	29%	10.00	0.01	0.30
	가중급 합		6.09	2.86	4.58

곡선을 살펴보면 x축이 0일 때 대안 3의 누적확률값이 타 대안에 비해 낮은 것을 알 수 있다. 이는 대안 3의 비용효율성이 모든 대안의 평균비용효율성에 비해 작은 부분이 타 대안에 비해 적다는 것을 의미한다. 즉, 대안 3이 타 대안에 비해 비용효율성 측면에서 우수하다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 열화 되었거나 기능개선이 필요한 교량의 최적보강공법을 선정하는데 필요한 의사결정인자를 도출하였으며 불확실성을 고려한 정량적 평가 방법 및 의사결정 절차를 제안하였다. 그리고 제안된 절차 및 방법의 합리성 및 적용성을 검토하기 위해 개략 설계된 여러 보강대안 중 최적 보강공법을 선정하는 문제에 적용하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 최적 보강공법 선정에 관련된 의사결정을 수행하기 위해 필요한 의사결정인자에는 직접공사비, 간접비, 성능개선량이 있으며, 이들 의사결정인자는 서로 상충되므로 합리적인 의사결정을 위해서는 이들 인자의 가중급의 합을 의사결정의 척도로 사용하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

2) 직접공사비, 간접비 및 성능을 추정하는데 포함되어 있는 불확실성은 최적 보강공법을 선정하는데 영향을 미치므로 이들을 고려할 수 있도록, 의사결정인자별 모든 대안의 평균값이 개별 대안 평가 값을 초과(미만)할 확률을 구하고 이를 대안간 우선순위를 평가하는 정량적인 인자로 사용하는 접근방법은 합리적인 것으로 판단된다.

3) 본 연구에서 제안된 방법론은 불확실성이 존재하는 대안들 가운데 상대적인 우선순위를 결정하는 분야 및 최적의 대안을 선택하는 분야에 활용가능 할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 “보수보강된 콘크리트 교량의 성능평가/개선 기술개발 및 원격관리시스템 구축사업” 및

한국건설기술연구원 “교량의 성능 및 사용 효율 증대를 위한 자산관리 기법 개발” 과제의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부, 교량구조물의 보수 보강공법편람, 건설교통부, 1995.
2. 대한토목학회, 도로교설계기준 해설, 기문당, 2008.
3. 박경훈, 선종완, 이상윤, 이종순, 조효남, “교량 유지관리전략 수립을 위한 실용적 도로이용자비용 추정 모델”, 한국구조물진단학회 논문집, 제11권 제6호, 2007, pp. 131-142.
4. 박구병, 시설물 안전관리체계 구축 서둘러야, 한국건설신문, 2004.
5. 선종완, 오홍섭, 박경훈, 박선규, 조효남, “비용 효율적인 보강공법 선정을 위한 의사결정 모델에 관한 연구”, 대한토목학회 정기 학술대회 논문집, 2008, pp. 3343-3346.
6. 일육시스템, 한상훈, 탄소판을 이용한 구조물 내하력 보강을 위한 홈 삽입공법 및 보강량 설계기법, 신기술보고서, 2001.
7. 정평기, 지승구, 서종원, “교량구조물의 확률적 생애주기비용 및 가치분석 방법론”, 대한토목학회논문집, 제25권 제1D호, 2005, pp. 117-126.
8. 한국건설기술연구원, 시설물 유지관리 시스템 사용자 지침서, 2005.
9. 한국도로공사, 유지보수 공종별 단가집, 2007.
10. 한국시설안전기술공단, 교량 생애주기비용 분석을 위한 사용자비용 산정 프로그램 개발, 2004.
11. 홍태훈, 이상엽, 한승우, 김정욱, “콘크리트 교량상판의 효과적인 유지관리를 위한 의사결정시스템 모델링”, 대한토목학회 논문집, 제25권 제 6D호, 2005, pp. 837-845.
12. Ang, Alfredo H-S. and Tang, Wilson H., Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Vol. II, 1984, pp. 274-332.
13. Cambridge Systematics Inc., Pontis 5.0 Bridge Management System, 2005.
14. Saaty, T.L., The Analytic Hierarchy Process, RWS Publications, Pittsburgh, PA., 1980.
15. Saaty, T.L. and Vargas, Luis G. Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process, Kluwer Academic Publishers, 2001, pp. 8-9.

(접수일자 : 2009년 7월 28일)

(1차수정일자 : 2009년 12월 11일)

(심사완료일자 : 2009년 12월 17일)

요 지

교량은 도로나 철도 네트워크를 구성하는 중요한 사회기반시설로 부재의 파손으로 인한 보수, 보강, 교체에 따른 교통통제나 갑작스런 붕괴 등이 발생할 경우 사회경제적으로 커다란 손실과 인명사상을 유발하기 때문에 일정한 안전수준 이상으로 관리되어야 한다. 사용연수의 증가에 따라 열화 손상되거나, 사고, 천재지변 등으로 인해 문제가 발생한 교량의 성능을 회복시키기 위하여 다양한 보강 공법들이 연구되고 있다. 그러나 어떤 공법을 사용하는 것이 합리적인가에 대한 판단기준 없이 의사결정을 수행하고 있는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 개략 설계된 여러 보강대안 중 최적 보강공법을 선정하는 문제를 해결하기 위해, 의사결정인자를 도출하고 불확실성을 고려한 정량적 평가 및 의사결정방법을 제안하였으며, 이를 간략한 예제에 적용하여 개발된 모델의 합리성 및 적용성을 검토하였다. 본 연구에서 제안된 방법론은 불확실성이 존재하는 대안들 가운데 최적의 대안을 선택하는 분야에 응용하여 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심 용어 : 의사결정, 비용-효율성, 보강공법, 교량