

슬래브교 상판의 전문가 시스템 개발

Development of the Expert System for Management on Slab Bridge Decks

안 영 기* 이 증 빈** 임 정 순*** 이 진 완****
Ahn, Young-Ki Lee, Cheung-Bin Yim, Jung-Soon Lee, Jin-Wan

Abstract

The purpose of this study makes a retrofit and rehabilitation practice through the analysis and the improvement for the underlying problem of current retrofit and rehabilitation methods. Therefore, the deterioration process, the damage cause, the condition classification, the fatigue mechanism and the applied quantity of strengthening methods for slab bridge decks were analysed. Artificial neural networks are efficient computing techniques that are widely used to solve complex problems in many fields. In this study, a back-propagation neural network model for estimating a management on existing slab bridge decks from damage cause, damage type, and integrity assessment at the initial stage is needed. The training and testing of the network were based on a database of 36. Four different network models were used to study the ability of the neural network to predict the desirable output of increasing degree of accuracy. The neural networks is trained by modifying the weights of the neurons in response to the errors between the actual output values and the target output value. Training was done iteratively until the average sum squared errors over all the training patterns were minimized. This generally occurred after about 5,000 cycles of training.

Keywords : Retrofit, Rehabilitation, Damage Cause and Type, Deterioration.

* 쌍용엔지니어링주식회사, 대표이사

** 한국건설품질연구원 LCC연구소장, 공학박사

*** 경기대학교 토목·환경공학부 교수, 공학박사

**** 감사원 기술3국4과

E-mail : kmj1001@ssyeng.co.kr 011-724-4981

• 본 논문에 대한 토의를 2002년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2003년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

기존 슬래브교 상판에 격자상 균열이 발생하고, 콘 크리트의 부분적인 탈락 및 포장면의 함몰 등의 손상 사례가 고속도로상에서 수차레에 걸쳐서 보고되어 왔으며, 지금까지도 교량관리자에게 있어서는 철근 콘크리트 슬래브교 상판의 유지관리문제가 가장 큰 현안이 되고 있다. 그런데, 슬래브교 상판은 지간(주형 사이)에 비해서 두께가 얇은 판구조이고 휨모멘트가 거동에 대해서 지배적이므로 우리나라뿐만 아니라 선진 외국에서도 탄성박판 휨이론에 근거한 허용 응력설계법이 충분히 안전한 것으로 인식되어왔다. 그러나, 고도 경제 성장에 따른 교통량의 급속한 증대 및 시공환경의 열화 등을 고려하면 종래의 휨모멘트에 근거한 설계법은 반드시 충분하지는 않은 것으로 인식하기에 이르렀다.

특히, 슬래브교 상판은 윤하중을 직접지지하고, 시간적으로 그리고 공간적으로 변동이 심한 반복하중을 받지만, 과거의 설계기준에서는 피로의 영향을 충분히 고려하지 못하므로써 시공 전·후에 발생하는 내·외 적요인으로 인한 손상, 즉 균열, 박리, 누수 등이 발생하여 보수·보강해야 하는 사례가 늘고 있다. 이러한 결함은 두 가지 이상의 복합요인으로 인해 발생하므로 손상원인을 찾아내는 작업은 용이하지 않다. 또한 진단 및 보수·보강공법 판정은 진단의 주체자에 의해 그 방법이 각각 다르게 나타나고 있어 절차에 대한 체계화 연구가 시급한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 기존 슬래브교 상판의 손상원인 및 특성을 조사하고 손상 형태 및 손상 원인을 입력변수로하여 인공지능망의 학습형태를 구축하고, 외관조사에 의한 상태등급, 상태지수, 안전성지수 그리고 건전성지수에 따른 보수·보강공법의 판정 알고리

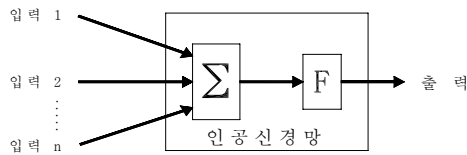


Fig. 1 인공지능망의 모델

즘을 정립하여 기존 슬래브교 상판의 유지관리를 위한 전문가 시스템을 구축하는 자료로 활용하고자 하였다.

2. 인공 신경망에 의한 전문가 시스템 구성

2.1 인공신경망 모델 구성

인공신경망은 고도로 복잡한 인간의 두뇌를 구성하고 있는 기본단위인 뉴런(Neuron)의 개념을 도입하여 인식과정과 신경생태를 수학적 모형으로 일반화시키기 위해서 개발된 병렬정보처리 시스템이다. 지금까지 알려진 바로는 인간의 두뇌는 많은 수의 뉴런으로 구성되어 있으며, 하나의 뉴런은 세포체(cell body)와 축색돌기(exon) 및 수상돌기(dendrite) 등으로 구성되어 있다. 이러한 뉴런의 구조로부터 유래된 인공신경망의 구조는 Fig. 1과 같다.

인공 신경망은 정보가 들어오는 입력층(input layer), 뉴런에 미치는 영향을 조절해주는 가중치(weight)와 이들 입력과 가중치로 들어온 정보를 결합하여 주는 결합함수(combining function), 이 결합함수로부터 나온 결과를 변환하여 출력값을 결정하는 전이함수(transfer function)등으로 구성되어 있다.

2.2 역전파기법의 학습 알고리즘

여러 가지 인공신경망 구조중 다층역전파기법(multi-layer back-propagation)을 이용한 인공신경망은 정확한 유형을 학습하고 유형 변화에 따라 조정이 가능하기 때문에 원하는 결과를 적절히 제시할 수 있다.

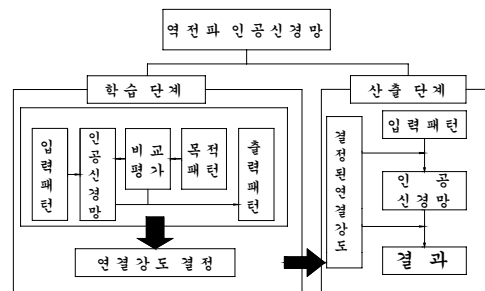


Fig. 2 역전파기법의 개념도

또한 연속된 값의 입력이 가능하며, 학습이 비교적 간단하게 이루어지므로 대부분 공학분야에 많이 적용된다. 인공신경망 모델중 역전파기법은 Fig 2와 같이 학습단계와 산출단계로 이루어진다. 학습단계에서는 입력패턴과 목적패턴이 다수의 입·출력조합으로 주어지고, 이 입·출력조합의 관계를 표현할 수 있는 가중치를 수정한다. 작업은 각 입력패턴에 대해 출력을 먼저 계산한 후, 원하는 출력과 실제 출력과의 차이를 줄이는 방향으로 연결강도를 조정함으로써 수행된다.

하나의 입력패턴에 대한 조정이 끝나면 새로운 입·출력조합이 주어지고 같은 과정으로 반복학습을 함으로써 입·출력간의 상호관계를 잘 묘사하는 가중치를 구한다. 따라서 산출단계에서는 필요로 하는 결과에 대한 입력만 주어지면 입력층과 은닉층의 상관관계에 의해서 적절한 축력이 계산된다.

2.3 손상과정과 손상원인 판정 알고리즘

2.3.1 슬래브고 상판의 손상과정

슬래브고 상판의 외관 손상과정은 손상장소 및 손상원인에 따라 여러 가지 형태로 나타난다. 그러나, 기존의 손상사례를 근거로 살펴보면 슬래브고 상판의 압축 콘크리트의 압축파괴 및 철근의 인장파괴에 의해서 상판이 파괴되는 것은 거의 보이지 않고, 콘크리트의 인장연에 발생한 균열이 시간과 함께 점차적으로 발달하여, 이른바 거북등 형상의 균열망이 형성되어 부분적으로 콘크리트가 함몰하여 떨어져 나가는 경우

가 거의 대부분이다.

따라서, 콘크리트에 발생하는 균열이 슬래브고 상판의 손상에 큰 역할을 하는 것이 분명하므로 균열상황을 관찰하는 것에 의해서 상판의 손상과정을 파악하는 것이 가능하다. 또한, 균열의 위치, 방향, 크기 등을 상세히 조사하는 것에 의해서 어느 정도의 손상원인을 추정할 수 있다.

따라서 인공신경망의 학습에 필요한 슬래브고 상판의 외관손상판정 알고리즘은 Table 1에서와 같이 여러 가지 복잡한 영향인자가 연관되며, 일반적으로 이러한 요인들 중에 몇 가지가 서로 합해져서 손상이 일어나며, 그것에 대응하는 균열의 형태도 변하는 것으로 생각된다.

Table 1에서와 같이 슬래브고 상판에 가장 일반적으로 사용되는 주철근이 차량진행방향에 직각인 1방향판인 경우의 손상은 (1) 일방향 균열, (2) 이방향 균열, (3) 박리, (4) 파손, (5) 백태의 순서로 발생한다.

2.3.2 보수·보강공법 판정을 위한 손상원인과 형태

슬래브고 상판의 보수·보강공법 판정에 필요한 손상원인 및 손상형태는 크게 균열, 박리 및 파손, 철근노출 및 부식, 누수 및 백태, 콘크리트의 품질저하 등으로 분리될 수 있으며, 손상원인은 Table 2에서와 같이 심중성 등(2002)이 사용한 14가지 항목으로 분류하였고, 정밀 외관조사에 의한 슬래브고 상판의 손상형태는 심중성 등(2002)이 사용한 18가지 항목으로 분류하였다.

Table 1 슬래브고 상판의 손상판정 기준

등급	균열		박리	파손	철근노출	백태	오염
	일방향 균열	이방향 균열					
A	없음, 0.1mm 이하 부분적	없음	없음	없음	없음	없음, 보수후 원상회복	없음
B	0.1-0.2mm 간헐적(30cm 이하)	없음	없음	없음	없음	국부적 발생, 초기 상태	없음
C	0.1-0.2mm 길이 (20cm 이상 간격)	0.1-0.2mm 부분적	없음	국부적	없음	표면전반에 얇은 상태	균열사이로 누수
D	0.1-0.2mm 길이 (20cm 이하 간격)	0.2-0.3mm 망상 균열	국부적	국부적	부분적, 부식 동반	균열주변에 심함 백태	균열주변으로 누수 악화, 콘크리트 표면부식
E	0.4mm 이상의 균열로 발전	0.2-0.3mm 망상 균열	전반적	전반적	다수 발생, 부식 심화	균열주변에 심함 백태	균열사이로 녹물이나 니트 발생, 부식 탈락

2.3.3 외관상태 판정 알고리즘

슬래브고 상판에 대한 유지관리의 기본원칙은 기준 교량을 안전하게 이용할 수 있도록 그 기능을 만족시키며 정기점검, 정밀안전진단을 정기적으로 실시하여 슬래브고 상판의 손상을 정확히 분석하는 것이 중요하다 하겠다. 이러한 슬래브고 상판에 대한 유지관리의 흐름은 점검, 외관상태평가, 보수·보강의 3가지를 순차적으로 행하는 것이다. 즉, 점검은 슬래브고 상판의 손상을 발견하여 어느 정도까지 손상이 진행되고 있는가를 잘 조사하는 것이다. 따라서 슬래브고 상판의 외관상태 판정 알고리즘은 건설교통부(2000)에서 제정한 안전점검 및 정밀안전진단 세부 지침을 사용하였고, Table 2와 같이 균열, 박리 파손, 철근 노출, 누수 및 백태 등에 의해서 슬래브고 상판의 외관상태를 판정한 기준은 Table 3과 같다.

3. 슬래브고 상판의 보수·보강공법 판정 모델

3.1 유지관리대책의 노화에 측모델

슬래브고 상판을 효율적으로 유지관리하기 위해서는 점검, 진단 및 이를 토대로한 적절한 보수·보강 등이 실시되어야 한다. 특히 보수·보강공법 선정 및 판정 시에 손상정도에 따른 적합한 공법의 기술개발이 시급함에도 불구하고 현재까지는 슬래브고 상판의 유지관리대책에 필요한 보수·보강의 판정 및 공법선정 기준이 없는 것이 사실이다. 이를 위해서 본 연구에서는 Miyamoto(1998)가 사용한 공용년수에 따른 보수·보강전과 후의 노화예측모델 식을 이용하여 슬래브고 상판에 대한 유지관리대책의 노화예측모델을 다음과 같이 정량적으로 표현하였다.

Table 2 손상형태 및 손상원인

손상형태	손상원인
1. 시공초기에 발생한 불규칙한형태의 균열	1. 시공상의 결함
2. 동간격의 수직균열	2. 건조수축
3. 요각부의 경사균열	3. 누수
4. 백태	4. 알카리 골재 반응
5. 슬래브에서 방향없이 마구 갈라지는 균열	5. 동결융해의 반복
6. 거더에 평행한 긴 균열	6. 콘크리트의 중성화
7. 탈락	7. 염해
8. 표면 박리	8. 피복두께 부족
9. 모서리 부분을 중심으로 발생한 망상형 균열	9. 배력철근량 부족
10. 녹 흔적	10. 구조상 약점(단부)
11. 모서리 부분을 중심으로 발생한 박리	11. 바닥판 두께 부족
12. 배근을 따라 발생한 박리	12. 주형의 강성 부족
13. 배근을 따라 발생한 균열	13. 내하력 부족
14. 주철근 방향으로 거의 규칙적인 일방향 균열	14. 충격
15. 슬래브 중앙을 중심으로 발생한 망상형 균열	
16. 단부에 발생한 균열	
17. 단부에 발생한 박리	
18. 일부분에 집중한 균열	

Table 3 슬래브고 상판의 외관상태 판정기준

외관상태등급	외관상태구분	외관상태 판정기준	유지관리대책
A	매우 양호	$0.0 < x \leq 0.125$	보수 불필요
B	양호	$0.125 < x \leq 0.375$	일상적 유지관리
C	보통	$0.375 < x \leq 0.625$	예방보수 또는 적정보수
D	불량	$0.625 < x \leq 0.875$	보강 필요
E	매우 불량	$0.875 < x \leq 1.0$	교체

3.1.1 보수·보강전의 노화예측모델

보수·보강전의 노화예측 모델에 필요한 건전성평가 판정기준은 이증빈 등(2001)의 상술된 잔유저항계수, 내하율 및 손상계수를 이용하였다. 따라서 공용개시부터 정기점검 및 정밀안전진단을 행한 시점까지의 보수·보강전의 노화예측모델은 Miyamoto(1998)의 예측식을 사용하였고, 노화과정에 따른 슬래브고 상판의 노화예측은 기본적으로 슬래브고의 외관상태에 대응하는 상부구조 부재의 저항계수 저하로 인해 공칭저항모멘트가 감소하기 때문에 Miyamoto(1998)의 상태지수, 안전성지수 및 건전성지수의 개념을 도입하여, 외관조사 점검시점의 상태지수에 의한 손상변화율, 안전성지수에 의한 손상변화율, 건전성지수에 의한 손상 변화율 함수로 나타내면 공용년수에 따른 슬래브고 상판의 노화예측 모델 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{상태지수: } S_R = f(t) = b_R - a_R t^3 \quad (1a)$$

$$\text{안전성지수: } S_L = f(t) = b_L - a_L t^4 \quad (1b)$$

$$\text{건전성지수: } S_D = g(t) = b_D - a_D t^3 \quad (1c)$$

여기서,

S_R = 상태지수에 의한 노화예측 곡선식

S_L = 안전성지수에 의한 노화예측 곡선식

S_D = 건전성지수에 의한 노화예측 곡선식

$a_L, a_D, a_R, b_L, b_D, b_R$ = 정수

식 (1)은 공용개시 시점에서부터 외관조사 점검시점까지의 예상노화곡선 식이다. 이 때 건전성평가 모델의 손상변화율은 슬래브고 상판의 외관상태평가 등급에 따라 값이 변화하는데 상태지수와 건전성지수의 손상변화율은 잔여 상태지수(잔유저항계수)와 잔여 건전성지수(잔여 손상지수)에 비례하고 외관조사 점검시점에 대한 공용년수의 3승에 반비례한다고 가정하였고, 안전성지수의 손상 변화율은 잔여 안전성지수(잔여 내하율)에 비례하고 외관조사 점검시점에 대한 공용년수의 4승에 반비례한다고 가정하였다.

3.1.2 보수·보강후의 노화예측모델

슬래브고 상판에 대한 보수·보강후의 노화예측모델

은 보수·보강공법 또는 이를 조합한 공법에 따라 차이가 있는데, 본 연구에서는 외관상태등급, 잔유저항계수, 내하율, 손상계수인 4가지입력변수와 14가지 항목의 손상원인, 18가지 항목의 손상형태의 입력변수를 고려하여 인공신경망 모델에 의해 보수·보강을 판정하였고, 이에 따른 상태지수, 안전성지수, 건전성지수에 의한 보수·보강 횟수 i 번째 보수·보강후의 노화예측 모델은 다음과 같이 된다.

가) 보수인 경우

$$\text{상태지수: } S_{R(i)} = b_{R(i)} - aa_{R(i)} t_o^3 \quad (2a)$$

$$\text{건전성지수: } S_{D(i)} = b_{D(i)} - aa_{D(i)} t_o^3 \quad (2b)$$

$$\text{안전성지수: } S_{L(i)} = b_{L(i)} - aa_{L(i)} t_o^4 \quad (2c)$$

여기서,

$$b_{R(i)} = 1.0 + aa_{R(i)} t_o^3$$

$$b_{D(i)} = 1.0 + aa_{D(i)} t_o^3$$

$$b_{L(i)} = b_L - aa_{L(i)} t_o^4$$

단, aa = 보수효과계수,

t_o = 현시점(점검시점)의 공용년수

b_L = 보수·보강전의 내하성 변화율,
 $i = 1, 2, \dots, n$

슬래브고 상판의 열화 또는 손상을 회복시키기 위해 부재의 저항능력 회복을 목표로 하지 않고 자연환경에 대한 내구성 확보가 목적인 경우에는 보수공법이 사용되어 지는데, 이에 대한 보수·보강후의 노화예측 모델 식(2)에 필요한 각종 보수공법에 따른 보수효과 계수의 값을 Miyamoto(1998)와 전문가의견을 수렴하여 나타내면 Table 4와 같이 된다.

Table 4 슬래브 상판에 대한 보수효과계수

부재	보수 공법	보수효과계수(aa)
슬래브고 상판	교면방수	1.0
	합성수지+몰탈주입	0.8
	합성수지주입	0.6
	철근방청	0.5
	단면수복	0.3

나) 보강인 경우

$$\text{상태지수: } S_{R(i)} = b_{R(i)} - aa_{R(i)}t^3 \quad (3a)$$

$$\text{건전성지수: } S_{D(i)} = b_{D(i)} - aa_{D(i)}t^3 \quad (3b)$$

$$\text{안전성지수: } S_{L(i)} = b_{L(i)} - \gamma_1\gamma_2(bf/rf)a_{L(i)}t^4$$

여기서, (3c)

$$b_{R(i)} = \beta_1 + aa_{R(i)}t_o^3$$

$$b_{D(i)} = \beta_2 + aa_{D(i)}t_o^3$$

$$b_{L(i)} = rf + \gamma_1\gamma_2(bf/rf)a_{L(i)}t_o^4$$

단, $\alpha, \beta_1, \beta_2, \gamma_1, \gamma_2 =$ 보강효과계수

$bf =$ 내하성회복도,

$rf =$ 보수·보강후의 내하력

보수공법과 보강공법으로 분류하는 기준은 내하력의 부족을 회복시킬 수 있는 공법인가에 따라서 분류되지만 명확한 경계가 있는 것은 아니다. 일반적으로 슬래브교 상판의 각 부재가 현재의 통행하중이나 자중 등에 대한 저항성이 부족할 경우에는 이를 증가시키기 위한 공법으로 보강공법이 사용된다. 이러한 보강공법을 보수·보강후의 노화예측 모델 식으로 선정할 수 있는데, 이 때 슬래브교 상판에 대한 보강효과 계수를 Miyamoto(1998)와 전문가의견을 수렴하여 나타내면 Table 5와 같이 된다. 그리고 Table 5에서 $fsc =$ 잔유저항계수와 $dampf =$ 손상계수는 이증빈 등(2001)이 사용한 공식을 적용하였다.

다) 교체인 경우

$$\text{상태지수: } S_{R(i)} = b_{R(i)} - a_{R(i)}(t - t_o)^3 \quad (4a)$$

$$\text{건전성지수: } S_{D(i)} = b_{D(i)} - a_{D(i)}(t - t_o)^3 \quad (4b)$$

$$\text{안전성지수: } S_{L(i)} = rf - (bf/rf)a_{L(i)}(t - t_o)^4 \quad (4c)$$

Table 5 슬래브교 상판에 대한 보강효과계수

부재	보강공법	보강효과계수				
		α	β_1	β_2	γ_1	γ_2
슬래브교 상판	NEFMAC공법	1.0	1.0	1.0	0.5	0.67
	상판중후	1.0	1.0	1.0	1.0	0.67
	새로보증설	1.0	fsc	dampf	1.0	0.67
	강관접촉	1.0	1.0	1.0	0.5	0.67
	상판중후+보수포함	1.0	fsc	dampf	0.5	0.67

여기서,

$$b_{R(i)} = 1.0 + a_{R(i)}t_o^3$$

$$b_{D(i)} = 1.0 + a_{D(i)}t_o^3$$

$$b_{L(i)} = 1.0 + a_{L(i)}t_o^4$$

단, $bf =$ 내하성회복도,

$rf =$ 보수·보강후의 내하력

$t_o =$ 현시점(점검시점)의 공용년수

슬래브교 상판의 교체인 경우는 외관상태 평가 등급이 E에 해당되고, 손상원인 및 손상형태가 거의 연관되어 있으며, 이증빈 등(2001)이 사용한 건전성 평가 기준인 상태지수, 안전성지수, 건전성지수를 이용하면 Table 6에서와 같이 외관상태평가 등급이 E 등급에 해당된다.

3.2 보수·보강비 및 잔여수명 예측모델

현재 매우 많은 종류의 보수·보강공법이 시행되고 있으나 보수 또는 보강공사 후에 얻어지는 효과에 관한 연구는 대부분 부재시험이나 재하시험에 의해 슬래브교 상판의 역학적 거동이나 내하력의 증가에만 초점이 맞추어져 있으며, 이 또한 부재시험을 통하여 보수·보강전과 후의 역학적인 거동의 파악이나 성능회복 정도를 파악하고 있는 수준이다.

따라서 본 연구에서는 기존의 연구에서 제시하고 있는 보수·보강공법의 효과를 토대로 각 공법의 보수효과 즉 손상회복 효과를 정량화하여 보수·보강비 예측평가를 개발한다. 보수효과의 정량화는 Frangopol (1997)이 사용한 보수전과 후의 공칭저항모멘트와 본래의 공칭저항모멘트의 합수로 나타내면 다음과 같이 된다.

Table 6 외관상태등급에 따른 건전성평가 기준

외관상태등급	노화기간	건전성평가		
		상태지수	안전성지수	건전성지수
A	잠복기	1.0	1.0	1.1
B	진전기	0.95	0.9	0.9
C	가속기(전기)	0.85	0.8	0.7
D	가속기(후기)	0.75	0.7	0.55
E	노화기	0.6	0.55	0.3

$$e_{rep} = \frac{M_{ra} - M_{rb}}{M_{ro}} \quad (5)$$

여기서,

M_{ro} = 본래의 공칭저항모멘트,

M_{ra} = 보수·보강후의 공칭저항모멘트,

M_{rb} = 보수·보강전의 공칭저항모멘트

식(12)에서 M_{ra} , M_{rb} 의 값은 전철의 철근부식 평가와 콘크리트의 노후화 평가에 따라 달라지는데, 보수·보강비 예측모델 평가에 필요한 M_{ra} , M_{rb} 의 값과 보수비용을 보수효과로 표현하면 식 (6) 및 식 (7)과 같이 된다.

$$M_{ra} = M_{rtb} \quad (M_{agep} \geq M_{rtb}),$$

$$M_{ra} = (M_{agep} + M_{rtb})/2 \quad (M_{agep} < M_{rtb}) \quad (6a)$$

$$M_{rb} = M_{rt} \quad (M_{age} \geq M_{rt}),$$

$$M_{rb} = (M_{age} + M_{rt})/2 \quad (M_{age} < M_{rt}) \quad (6b)$$

여기서,

M_{rtb} = 보수·보강후 철근부식에 의한 공칭 저항강도

M_{agep} = 보수·보강후 콘크리트 노후화에 의한 공칭 저항강도

M_{rt} = 보수·보강전 철근부식에 의한 공칭 저항강도

M_{age} = 보수·보강전 콘크리트 노후화에 의한 공칭 저항강도

$$C_{rep} = \alpha_{rep} \left(\frac{M_{ra} - M_{rb}}{M_{ro}} \right)^\gamma = \alpha_{rep} e_{rep}^\gamma \quad (7)$$

여기서,

γ = 모델파라미터(매개변수),

α_{rep} = 교량구조물의 교체(개축) 비용

이 때, 실제로 예산이 배정된 개축비용을 근거로 하여 산정한 값을 사용하면 슬래브교 상판의 교체(개축) 비용 α_{rep} (원단위)는 다음과 같이 된다.

$$\alpha_{rep} = 3477, 219 \times L^{0.65895} \times W^{0.80350} \times H^{0.25905} \quad (8)$$

여기서

L, W 및 H=m 단위의 교량지간, 교량 폭 및 교량 높이

한편, 전철 3.1의 공용년수에 따른 안전성지수, 상태지수 및 건전성지수를 이용하면 슬래브교 상판에 대한 보수·보강전과 후의 각각의 잔여수명 예측을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\text{안전성지수: } t_L = \sqrt[4]{b_L/a_L} - t,$$

$$\text{건전성지수: } t_D = \sqrt[3]{b_D/a_D} - t,$$

$$\text{상태지수: } t_R = \sqrt[3]{b_R/a_R} - t \quad (9)$$

4. 적용 예 및 고찰

4.1 대상교량의 개요

본 연구에서 적용한 대상교량의 개요는 Table 7에 제시된 바와 같이 3경간 슬래브교로 이루어져 있으며, 설계하중은 DB-18인 2등급교이다.

Table 7 대상교량의 제원과 일반사항

교량위치	전라남도 여수시 낙포동		
설계하중	DB - 18	교량등급	2 등급
상부구조	교폭 도로교(17m) + 관교(10m) = 총폭(27m) 연장 3@13.3m = 40.0m, SKEW 35°		
하부구조	교대 : 본체 Box벽체 기초 : Box 하부슬래브 교각 : 본체 Box벽체 기초 : Box 하부슬래브		
시공년도	1969년	시행청	한국수자원공사

4.2 외관상태 평가 및 보수·보강 판정

슬래브교 상판의 정밀외관조사시에는 구조적인 손상뿐만 아니라 둔각부 균열, 받침부의 부스러짐, 지점부의 사인장균열, 중앙부의 휨균열에 대하여 주의 깊게 관측되어야 한다. 이 슬래브교의 제 1, 2경간의 경우 상판에 발생된 균열의 개수도 많고, 일부는 슬래브교 상판 하단까지 균열로 인한 철근노출까지 진행되어 위험한 것으로 관측되었다. 외관조사에 따른 상부의 상판의 손상현황을 Table 8에 제시하였다.

본 연구에서 구축한 인공신경망을 이용한 슬래브교 상판의 외관상태평가의 타당성을 검토하기 위하여 Table 8의 입력변수값을 실제 사례로 적용하였고, 총

외관조사항목 10개의 입력변수를 입력층에 10개의 노드(Node)로 구성시켜 0~1사이의 값을 갖도록 변화시켰다. 은닉층의 수는 10개로 고정하였고, 학습의 반복횟수는 5000번으로 신경망을 학습시켰다. 이 때 학습률(lr)은 0.1, 오차제곱평균(RMS)의 오차허용한계는 0.05로 은닉층과 출력층이 모두 로지스틱(logistic) 전달함수를 갖는 2개층의 신경망과 역전파 알고리즘을 사용하였다. 오차한계를 0.05로 했을 때 학습의 반복횟수가 600번째 이내의 학습에서 목표에 도달될 수 있었다.

따라서 Table 8의 제3경간 외관상태의 입력변수를 사용하고, 14가지 항목의 손상원인과 18가지항목의 손상형태 그리고 잔여저항계수, 내하율 및 손상계수 등 36가지의 입력변수를 사용하여 본 연구에서 제안한 인공신경망을 학습시키면, 보수·보강에 대한 판정 등급의 출력은 $output=0.5024$ 로 목표출력 $t=0.50$

에 대응되므로 보수 및 보강판정에서 보수판정에 해당되고 보수공법은 합성수지 주입공법에 해당된다. 한편 제1경간과 제2경간의 보수·보강판정과 공법은 인공신경망을 학습시킨 결과, 유지관리대책이 보강으로 판정되었기 때문에 네프맥(NEFMAC)공법에 해당된다. 이 때 목표출력값과 학습출력값의 오차는 0.048%이다.

4.3 보수·보강공법 및 교체 판정의 결과 비교

본 연구에서는 슬래브교 상판에 대한 각종 보수·보강공법 판정의 해석 결과를 검증하기 위하여 Table 9, 10, 11에서와 같이 기존의 외관 육안검사와 현장 재시험의 측정결과로 각종 보수·보강공법에 대한 건전성 및 잔여수명예측 결과를 분석하였다.

Table 8 대상교량 상판의 외관손상현황 및 등급

손상원인	손상부위	손상형태	기존 건설교통부안			본 연구의 인공신경망		
			손상 등급			입력 변수 값		
			제1경간	제2경간	제3경간	제1경간	제2경간	제3경간
휨균열	중앙부	균열,파손	C	C	C	0.2	0.2	0.2
	중앙부	박리	C	C	C	0.5	0.5	0.5
받침부 손상	지점부	균열,파손	C	C	C	0.2	0.2	0.2
	지점부	박리	D	D	C	0.75	0.75	0.5
	지점부	철근노출	D	D	C	-0.8	-0.8	-0.6
지점부 손상	지점부	균열,파손	C	C	C	0.2	0.2	0.2
	지점부	박리	D	D	C	0.75	0.75	0.5
둔각부 균열	지점부	균열,파손	C	C	C	0.2	0.2	0.2
	지점부	박리	D	D	C	0.75	0.75	0.5
	지점부	철근노출	D	D	C	-0.8	-0.8	-0.6
종합 판정			D	D	C	0.733(D)	0.733(D)	0.5024(C)

Table 9 보수공법에 대한 건전성 및 잔여수명 예측 결과

구분	보수전	보수후						
		예방유지관리	사후유지관리					
		네프맥(NEFMAC)	교면방수	합성수지	합성수지	철근방청	단면수복	
건전성	상태지수	0.8736	1.2901	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	안전성지수	0.8442	1.5998	0.8442	0.8442	0.8442	0.8442	0.8442
	건전성지수	0.7073	1.6610	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
내하력		11.3962	21.5841	21.5841	21.5841	21.5841	21.5841	21.5841
잔여수명	상태지수	7.4293	25.0031	22.7027	22.3281	21.9477	21.7552	21.3657
	안전성지수	7.6373	22.4872	18.7283	18.0274	17.3039	16.9331	16.1721
	건전성지수	9.2317	22.7138	15.1102	15.1102	15.1102	15.1102	15.1102

Table 9, 10, 11에서와 같이 건전성평가 즉 상태지수, 안전성지수 및 건전성지수를 보강전과 보강후로 분석한 결과, 슬래브교 상판에 대한 건전성평가는 슬래브교 상판의 개축과 성능개선을 판정할 수 있는 주요 결정요소라 할 수 있다. 슬래브교 상판의 외관상태를 통해서 판단할 수 있는 슬래브교 상판의 상태지수는 슬래브교 상판의 노후화의 정도를 판단할 수 있는 주요한 단서가 되기는 하지만 슬래브교 상판의 수명과 내하력을 통한 종합적인 평가 측면에서는 미흡한 점이 있다.

따라서 종합적인 평가에 대한 적절한 의사결정을 위해서는 교통량에 대한 정보, 현재까지의 수명, 구성부재별 건전성 등이 종합적으로 평가되어야 하는데, 본 연구에서 개발한 상태지수와 안전성지수를 병행한 건전성지수에 의한 건전성평 모델로 수행되어야 한다.

Table 9, 10, 11에서와 같이 본 연구에서 수행한 건전성평가에 의해 산정한 값은 1999년 건설교통부에서 수행한 「'98 교량관리체계(BMS)개선에 관한 연구」의 전문가집단 조사에 의한 손상모델 식으로 산정한 값과 거의 일치하고, 본 연구에서 산정한 슬래브교 상판에 대한 보수·보강의 잔여수명도 13.482년(보수), 10.144년(보강)으로 건설교통부의 잔존수명 산정 모델에 의해 산정한 14년(보수), 10(보강) 값과 일치하고 있다. 그리고 Table 11에서와 같이 본 연구

에서 산정한 교체의 잔여수명 31.2451값 또한 건설교통부의 상태등급에 따른 사용수명 31년과 일치하고 있다. 따라서 슬래브교 상판의 수명연장은 Fig 3, 4와 같이 적절한 보수·보강공법 판정을 수행함에 따라 성능이 뚜렷하게 개선될 뿐만 아니라 슬래브교 상판의 공용수명을 연장시킬 수 있는 시점을 찾을 수 있다.

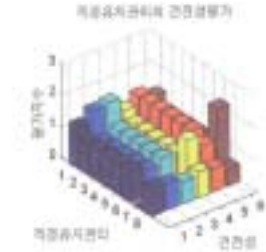


Fig. 3 보수·보강공법의 건전성평가

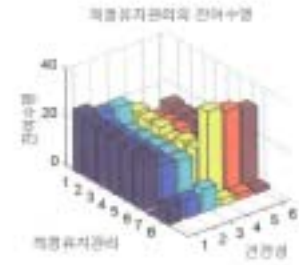


Fig. 4 보수·보강공법의 잔여수명

Table 10 보강공법에 대한 건전성 및 잔여수명 예측 결과

구 분		보강전	보강후					
			예방유지관리		사후유지관리			
			네프맥	합성섬유	상판중후	새로보증설	강판접촉	상판중후+보수
건전성	상태지수	0.8154	1.2329	1.0	1.0	0.8153	1.0	1.0
	안전성지수	0.7386	1.4951	1.4951	1.4951	1.4951	1.4951	1.4951
	건전성지수	0.5418	1.3123	1.0	1.0	0.5418	1.0	1.0
내하력		9.9717	20.1835	20.1835	20.1835	20.1835	20.1835	20.1835
잔여수명	상태지수	2.6538	18.1436	17.5469	17.5469	15.1007	17.5469	17.5469
	안전성지수	2.4379	12.5820	13.9975	13.9975	9.15391	13.9975	13.9975
	건전성지수	1.5527	15.7632	15.0396	15.3174	15.3174	15.0396	15.0396

Table 11 교체에 대한 건전성 및 잔여수명 예측 결과

구분	건전성			잔여수명		
	상태지수	안전성지수	건전성지수	상태지수	안전성지수	건전성지수
교체	1.6022	1.2478	2.4196	35.7671	33.6666	31.2451

또한 네프맥(NEFMAC)공법으로 예방적인 보수·보강을 시행할 경우에는 과도한 결함이 노출된 후에 보수·보강을 실시하는 경우보다 공용수명을 보다 연장시킬 수 있고 공사수행도 훨씬 수월하게 됨을 알 수 있다.

이와 같이 손상된 슬래브교 상판을 적절하게 유지관리하기 위해서는 결함과 성능에 대한 본 연구의 분석을 통해서 언제 어느 시점에서 어떻게 보수·보강을 시행해야 하느냐를 정확히 결정하는 것이 중요하게 되고 이에 대한 연구가 계속 진행되어야 할 것으로 사료된다.

따라서 본 연구에서 개발한 보수·보강공법 판정에 대한 노화예측모델(Fig. 6참조)은 지금까지 개발된 교량 유지관리시스템의 잔여수명예측과 노후화모델에 적용하지 못한 단점을 보완할수 있는 것으로 판단된다.

4.4 유지관리대책의 보수·보강비용평가 비교

Table 12 및 Fig. 5은 현행 건설공사 품셈에서 사용하고 있는 보수·보강공법에 따른 표준공사비를 공법종류별로 나타낸 것이다. 본 연구에서는 예방유지

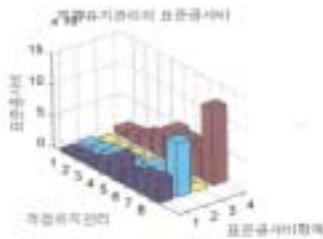


Fig. 5 보수·보강공법의 표준공사비

관리의 보수·보강공법에 네프맥(NEFMAC)공법을 사용하였는바 손상회복을 위한 보수효과 (e_{rep})는 0.4312(43.12%)이고, 예측보강비용은 531,580원으로 Table 12에서와 같은 보강공법의 보강비용과 거의 같다.

그러나 현행 교량유지관리는 정기점검 및 정밀안전진단 등 예방유지관리를 하지 않고 외관상태등급이 E등급이 될때까지 방치하였다가 교체를 행하는 사후유지관리체계의 잘못된 관행으로 인해 외관상태 C등급인 예방유지관리체계의 네프맥(NEFMAC)공법에 대한 보강비용보다 2.27~11.7배 정도 소요됨으로서 막대한 국가의 재정적 손실을 가져옴을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 기존 슬래브교 상판의 유지관리를 위한 전문가 시스템을 개발하기 위해 인공지능망이론을 이용한 보수·보강공법을 판정하는 알고리즘을 제시하였고, 슬래브교 상판에 대한 보수·보강의 유지관리대책의 노화예측모델을 개발하였으며, 본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같이 된다.

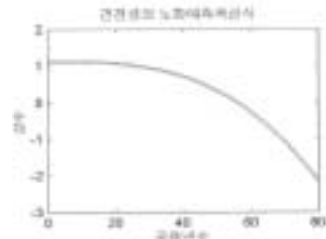


Fig. 6 공용연수에 따른 건전성평가

Table 12 보수·보강공법 및 교체의 표준공사비

구분	공법종류	단위	재료비	노무비	경비	합계
보수공법	표면처리공법	m ²	45,383	57,881	1,361	104,625
	충전공법	m ²	52,470	86,823	2,014	141,307
	주입공법	m ²	95,340	143,967	3,319	242,626
	방청공법	m ²	201,187	160,401	2,176	363,764
보강공법	단면증대공법	m ²	378,163	160,035	3,483	541,681
	강관압착공법	m ²	227,445	265,489	719	493,681
	섬유절착공법	m ²	327,810	121,280	2,664	451,754
교체	바닥판교체	m ²	365,877	865,554	1,362	1,232,793

- 1) 기존 슬래브교 상판교량에 대한 유지관리 대책의 의사결정이나 슬래브교 상판의 성능개선 및 보수·보강공법을 위한 예산을 배분함에 있어서 최적의 우선순위를 결정하는 척도로는 충분도지수, 상태평가, 내하력 등을 들 수 있는데, 본 연구에서는 인공지능망에 의한 외관상태 판정과 건전성 판정의 척도를 개발하였고, 이에 따른 적정유지관리에 필요한 건전성 및 잔여수명 예측모델에 적용하였다.
- 2) 현행 기술수준으로는 슬래브교 상판에 대한 효과적인 보수·보강공법의 선정하기 어려운 실정임으로 본 연구의 적정유지관리 전문가 시스템 모델을 이용함으로써 보다 효율적인 슬래브교 상판의 보수·보강 판정뿐 만 아니라 생애주기비용에 대한 보수비용 예측을 수행할 수 있다.
- 3) 인공 신경망 기술을 이용한 상태지수, 안전성지수, 그리고 건전성지수에 의한 노화예측모델 식을 이용함으로써 현장계측 등을 통하지 않고서도 개략적인 공용년수에 따른 건전성 및 잔여수명을 추정할 수 있어 정기점검 등에 활용될 수 있고, 보수·보강비용 예측평가모델은 실제 개축비용자료를 바탕으로 회귀분석방법에 의해 개발되었기 때문에 슬래브교 상판의 유지관리 대책에 필요한 보수·보강을 위한 우선순위 결정에 실용적으로 활용될 수 있다고 사료된다.
- 4) 보수·보강 공법의 선정문제는 보다 높은 신뢰성을 얻기 위하여 많은 자료와 전문지식과 경험을 수집하여 지속적인 보완이 필요하고, 나아가 교량 구조물 전체에 대한 도로통합관리 전문가 시스템 구축이 필요하다.

참고문헌

1. 이증빈·손용우, "교량구조물의 건전도 감시시스템 모델 개발," 대한토목학회 학술발표회, 2001.10.
2. 여수시, "시도1호선 낙포교 정밀안전진단 보고서," 순천제일대학 산학테크노센터, 1999. 6.
3. 건설교통부., "97 교량관리체계(B.M.S)개선에 관한 연구," 1998.10.
4. 건설교통부., "98 교량관리체계(BMS)개선에 관한 연구," 1999.11.
5. 심종성, 김민수, 김성엽, "철근콘크리트 교량 바닥판의 보수·보강을 위한 전문가시스템 알고리즘 구성", 한국전산구조공학회 봄 학술발표회 논문집, 제6권 제1호, 2002, pp 201-206.
6. 안영기, 김성철, "퍼지 의사결정을 이용한 교량구조물의 건전성평가모델", 한국콘크리트학회논문집, 제14권 제6호, 2002. 12.
7. Hines, J., "Fuzzy and Neural Approaches in Engineering," WILEY INTER·SCIENCE, 1997.
8. 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, October, 1997, pp. 1390~1401.
9. Miyamoto, A., Kushida, M., Adachi, Y., and Matsumoto, M., "Development of Bridge Management System(BMS)," Journal of Structural Engineering (in Japanese), VI-34, No. 560, 1997.3, pp.91-106.
10. Miyamoto, A., K. Kawamura, K., nakamura, H., "Multiobjective Optimization of Maintenance Planning for Existing Bridges by using Bridge Management System(BMS)," Journal of Structural Engineering (in Japanese), VI-38, No.588, 1998.3, pp.191-208

(접수일자 : 2002년 11월 29일)