



성능향상된 교량 바닥판의 확률론적 해석 및 수명연장 분석

심종성¹⁾ · 오홍섭¹⁾ · 최장환¹⁾ · 김언경^{1)*}

¹⁾ 한양대학교 토목·환경공학과

(2002년 8월 21일 원고접수, 2003년 6월 26일 심사완료)

Analysis of Probability and Extended Life Cycle of Strengthened Bridge Deck

Jongsung Sim¹⁾, Hong-Seob Oh¹⁾, Jang-Whan Ohoi¹⁾, and Eon-Kyoung Kim^{1)*}

¹⁾ Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Ansan, 425-791, Korea

(Received August 21, 2002, Accepted June 26, 2003)

ABSTRACT

Although the strengthening effect of deteriorated concrete bridge decks has been studied by various authors, most researches are focused on the experimental works on the pulsating loading in laboratory in spite of deterioration of deck caused by moving vehicle loads. In this research, a theoretical live load model that was proposed to reflect an effect of moving vehicle loads is formulated from a statistical approach on the measurement of real traffic loads for various time periods in Korea. Fatigue life and strengthening effect of strengthened bridge decks strengthened with either Carbon Fiber Sheet or Grid typed Carbon Fiber Polymer Plastic by the probabilistic and the reliability analyses are assessed. As a results, secondary bridge deck (DB18) strengthened with FRP ensures a sufficient fatigue resistance against the increased traffic loads as well as load carrying capacity in life cycle.

Keyword : live load model, concrete bridge deck, Fatigue, probability, reliability

1. 서 론

1970년을 전·후로 건설된 대다수의 국내 설계 2등급 교량들은 바닥판의 열화손상 등으로 인하여 단순보수공사만으로 내하력 회복이 곤란하고, 장기적으로 설계 2등급 교량으로서의 유지가 어려운 것으로 나타나고 있다. 또한 최근 들어 급속한 산업화에 따른 교통량 증가는 교량을 통과하는 차량하중형태의 변화와 차량하중의 증가를 가져왔다. 따라서 노후화된 설계 2등급 교량에 대해 안전성 확보와 장래의 교통수요에 대응하기 위하여 설계 1등급 교량으로의 성능향상 필요성이 대두되고 있다^{1,2)}. 이러한 필요성에 따라 현재 많은 교량들의 바닥판은 보수 및 보강을 하고 있는 상태이며, 제한적으로 노후화된 교량 바닥판의 보강효과에 대한 연구가 수행 중에 있다. 그러나 대부분의 보강효과에 대한 연구는 실험실 수준에 국한되어 있으며, 차량의 이동하중에 직접적인 영향을 받는 바닥판의 피로거동은 아직까지 고정반복하중에 대한 연구가 집중적으로 시행되고 있으므로 실제 바닥판과는 많은 차이를 나타내고 있다.

또한 피로손상된 바닥판을 보강하는 경우와 손상되지 않은 바닥판을 보강하는 경우의 피로거동은 수명효과 및 파괴 특성 등에서 많은 차이를 갖게 된다. 그러나 실제 교량 바닥판의 경우 바닥판의 위치에 따라 같은 교량의 경우에도 많은 편차를 나타내기 때문에 정확한 피로수명의 연장정도를 측정하기에는 무리가 있는 것이 사실이다³⁾. 임의의 피로손상이 도입된 바닥판 시험체에 대하여 CFS로 보강한 후의 피로성능을 평가한 결과 보강전의 손상 정도에 따라 수명연장 정도에는 차이는 있으나, 강성 또는 에너지 흡수 능력 등에서 충분한 성능향상 효과가 관찰되는 것으로 나타났으며, 특히 피로수명이 효과적으로 향상되는 것으로 나타났^{4,5)}.

김지상⁶⁾은 차량의 이동하중에 의한 교량 바닥판의 피로 파괴는 극한조건이 아닌 일반적인 사용조건 하에서 점진적으로 일어나며, 설계규정에 있는 차량하중은 정적해석을 수행하기 위해 교량에 작용하는 극한 조건의 하중이므로 피로해석을 위한 별도의 피로하중 모델을 이용하는 것이 타당하다고 제시하였다. 따라서 본 연구에서는 교량을 통과하는 차량하중의 효과를 모사하기 위하여 활하중 모델을 사용 제시하였으며, 제시된 활하중 모델을 적용하여 교량 바닥판의 피로해석을 수행하였다. 또한 교량 바닥판에 작용하는 외부하중과 콘크리트 피로시험 자료는 상당한

*Corresponding author

Tel : 031-400-4028 Fax : 031-408-5140

E-mail : keonk@hanmail.net

변화성과 불확실성을 보이므로 바닥판의 정확한 피로저항성을 확보하기 위하여 확률론적 개념과 신뢰성 해석을 적용하여 성능향상된 바닥판의 보강효과 검증 및 바닥판의 연장수명을 예측하였다.

2. 활하중 모델

2.1 트럭의 축하중

차선하중은 도심지 혹은 교통밀집 지역에 있는 장기간 교량에 발생하는 정체현상에 의한 피로하중을 모사하는 것으로 생각할 수도 있겠으나, 실제 이와 같은 상황의 빈도는 매우 낮고, 피로하중의 형태로 고려하지 않는 것이 일반적이므로 피로하중에는 고려하지 않는다⁷⁾.

평상시 교량을 통과하는 차량의 중량은 설계기준에 규정되어 있는 설계트럭의 중량과 차이가 있으므로, 본 연구에서는 국내에서 실측된 트럭의 축하중을 피로하중으로 설정하였다. 일반적으로 캔틸레버 교량과 같은 특수한 경우를 제외하고는 피로하중의 1회 재하는 중차량 한 대의 1회 통과와 같다고 간주된다. 이때 차량 통과 후 교량의 진동에 의해 발생하는 응력이나 차량 간격이 좁아서 생기는 상호작용 등에 의하여 발생하는 응력으로 인한 추가적인 반복횟수를 고려하지 않아도 그로 인한 오차는 무시할 정도로 작다고 알려져 있다⁸⁾.

윤석구⁹⁾는 국내의 기준에 따라 분류된 각 차종의 중량을 일반적인 경우와 과적의 경우로 나누어 측정하여 축무게의 비로써 축하중을 구하였다. 그중 설계트럭에 해당하는 차량의 통행량이 대부분을 차지하였으며, 축하중은 856.56 N과 1365.41 N로 설계에 사용되는 축하중과 많은 차이가 있는 것으로 나타났다. 이에 따라 본 연구에서는 이 두 축하중을 각각 설계 2등급 교량과 설계 1등급 교량을 통과하는 설계트럭의 축하중으로 가정하였다.

축하중에 이동반복하중의 효과를 고려하기 위한 충격계수는 철근콘크리트 바닥판의 피로설계에 사용할 수 있는 상세한 실측 데이터가 없으므로, 현행 도로교설계기준¹⁰⁾에 나타나 있는 $i = \frac{15}{(40 + L)}$ 의 식을 사용하였다. 본 연구에서 피로시험에 사용된 바닥판 시험체의 지간길이(L)가 1.8m이므로 이에 대한 충격계수는 0.3을 사용하였다¹¹⁻¹³⁾.

본 연구에서는 도시에 위치한 설계 2등급 교량의 교통량을 모사하기 위하여 건설교통부¹⁵⁾에서 조사한 반포에서 서초구간의 일일평균교통량중 화물의 통행량을 일일평균 트럭통행량(ADTT : average daily truck traffic)인 4,400대를 사용하였다. 또한 설계 2등급 교량을 통과하는 과적트럭의 비율은 보통 10~20%정도를 차지하는 것으로 나타나고 있으며, 본 연구에서 사용된 ADTT중 과적트럭의

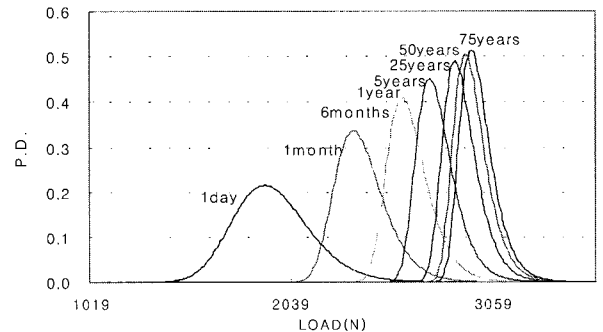
비율은 약 12%이다. 설계 2등급교량을 통과하는 과적트럭의 영향은 설계 1등급트럭의 축하중을 사용하였다.

2.2 활하중 모델

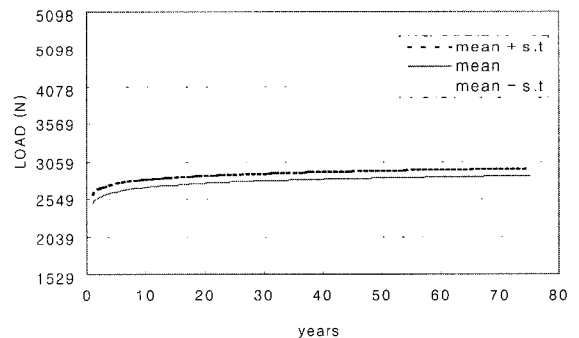
이동반복하중이 바닥판에 미치는 영향은 고정반복하중에 비해 그 영향은 4~7배이상 큰 것으로 연구되고 있으나, 콘크리트 바닥판의 피로해석은 대부분 고정반복하중을 적용하고 있다^{16,17)}. 따라서 본 연구에서는 바닥판의 피로해석을 수행함에 있어 차량 이동하중 효과를 갖도록 Type I 극치분포함수(extreme function)에 국내에서 실측된 차량의 축하중을 적용하여 활하중을 구하였다.

국내에서는 축하중을 극치분포함수(extreme function)에 적용하기 위한 평균공칭비와 변동계수의 연구결과가 아직 없으므로 Nowak¹⁸⁾이 제시한 평균공칭비 1.24와 변동계수 0.25를 사용하였다. 축하중을 Type I 극치분포함수에 적용하여 얻어진 활하중 모델의 결과는 Figs. 1과 2에서 보여주고 있으며, 교량의 공용수명은 도로교표준시방서¹¹⁾에 근거하여 75년으로 가정하였다.

Fig. 1(a)와 2(a)는 1일, 1개월, 6개월, 1년, 5년, 25년, 50년과 75년의 시간 변화에 따른 설계트럭과 과적트럭 축하중의 영향을 확률밀도함수(Probability density function : P.D.F)로 나타냈으며, Fig. 1(b)와 2(b)에서 보여주는 누적

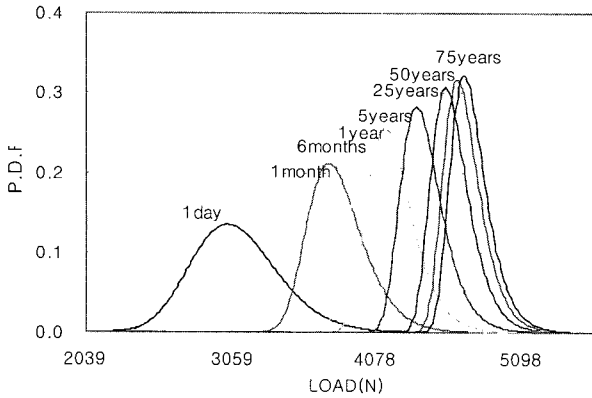


(a) Probability density function

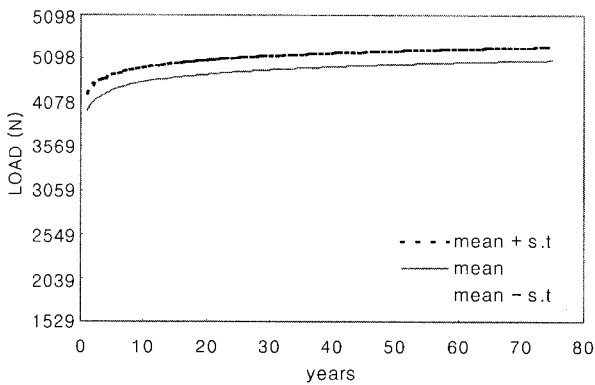


(b) Cumulative distribution function

Fig. 1 Live load model (DB-18 truck)



(a) Probability density function



(b) Cumulative distribution function

Fig. 2 Live load model (DB-24 truck)

분포함수(cumulative distribution function : C.D.F)의 분포 형태는 Nowak이 제시한 활하중 모델과 같은 양상을 나타내고 있다.

설계 2등급 교량 바닥판을 통과하는 실제 설계트럭의 축하중은 856.56N이나, 활하중으로서의 축하중은 공용 1일에 1733.52N과 공용 75년에 2870.51N으로 구조물이 받는 하중의 영향은 2.0~3.4배로 증가하였으며, 또한 과적트럭의 축하중 1365.41N의 경우에는 구조물에 미치는 하중의 영향은 구조수명동안 2.0~3.4배로 증가하였다. 이러한 하중영향의 증가는 일반적으로 피로거동예측에 적용되는 고정반복하중의 영향과 큰 차이를 나타내고 있으며, 이는 또한 구조수명예측에 있어서도 많은 차이를 가져오게 될 것으로 판단된다.

3. 바닥판의 확률론적 해석

3.1 바닥판의 피로시험

심중성¹²⁻¹⁴⁾은 설계 2등급 교량 바닥판과 유사한 제원의

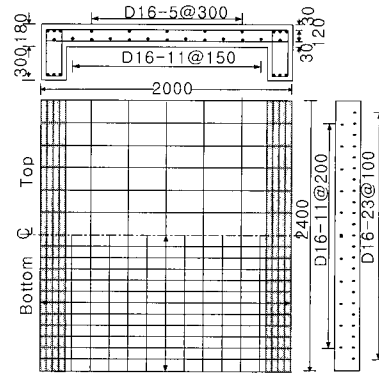
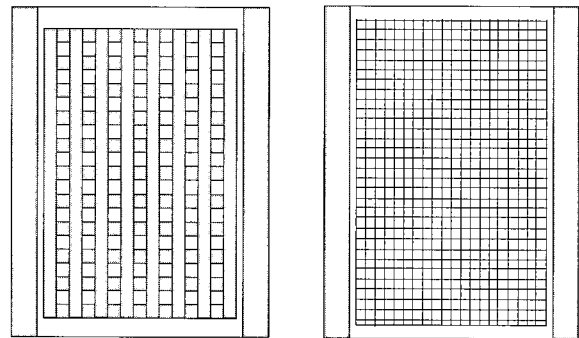


Fig. 3 Details of specimen (unit : mm)



(a) CFS

(b) CG

Fig. 4 Strengthening detail of specimens

모형 바닥판 시험체를 Fig. 3과 같이 제작하였으며, Fig. 4와 같이 탄소섬유시트(CFS : carbon fiber sheet)는 2방향 등방 strip으로, 격자형 탄소섬유플라스틱(CG : carbon grid)은 전면보강하여 정적 및 피로시험을 통하여 보강효과 검증 연구를 수행하였다.

성능향상을 검증하기 위한 하중은 무보강시험체(CON)체를 기준으로 하여 무보강시험체의 파괴하중에 대한 응력비 40%, 70%, 90%에 해당하는 피로하중을 재하하였으며, 두 보강시험체는 무보강시험체의 피로하중과 비슷한 피로하중을 갖도록 파괴하중에 대한 응력비 60%, 70%와 80%로 재하하였다. Table 1은 응력수준에 따른 시험체의 파괴횟수를 나타낸 것이다. 응력수준 40%의 무보강시험체와 응력수준 60%의 CFS 보강시험체는 1,000,000 회 가력후 피로파괴의 징후가 보이지 않아 정적파괴하였으며, 응력수준 60%의 CG시험체의 경우에는 피로하중에 대한 바닥판의 저항능력의 CFS 시험체에 비하여 상대적으로 우수하였으나, 거더의 철근이 500,000회에서 피로 파단되어 시험체가 급격히 파괴되었다. 따라서 본 연구에서는 CON시험체는 70%와 80% 응력수준에 대한 시험결과와 보강시험체의 경우에는 70%와 80%의 응력수준에 대한 시험결과를 기초로 해석을 실시하였다.

정적성능 및 피로시험에서 시험체는 하중이 증가함에 따라 일방향 거동에서 이방향 거동으로 변화된 후 펀칭전단에 의해 파괴되었다. 보강시험체의 균열은 전반적으로 보강재의 계면을 따라 발생하였고, 보강재 격자 내의 콘크리트면에서 진전되다가 균열진전 방향으로 보강재를 가로질러 연속되지 않고 보강재의 끝단을 따라 섬유방향으로 진전되었다.

3.2 확률 및 신뢰성 해석

Weibull 분포함수가 피로거동에 대한 물리적 현상을 보다 잘 설명할 수 있으며, 실험적으로도 입증되어 금속의 피로해석에 널리 사용되고 있으며, 콘크리트 구조물의 경우에도 연구실적은 적으나 피로거동예측에 Weibull 분포가 적합한 것으로 연구되었다¹⁹⁻²¹⁾.

Weibull 분포의 확률분포함수 $f_N(n)$ 과 누적분포함수 $F_N(n)$ 은 다음과 같이 표시될 수 있다²¹⁾.

$$f_N(n) = \frac{k}{u-n_0} \left(\frac{n-n_0}{u-n_0} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{n-n_0}{u-n_0} \right)^k \right] ; n \geq n_0 \quad (1)$$

$$F_N(n) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{n-n_0}{u-n_0} \right)^k \right] ; n \geq n_0 \quad (2)$$

여기서, u = characteristic extreme value
 k = 형상매개변수
 n_0 = 위치매개변수

식 (1)의 Weibull 분포함수는 k, u, n_0 의 매개변수 3개를 사용하고 있는데, $n_0=0$ 인 두 개의 매개변수를 가진 Weibull 분포함수가 피로거동에 더 적합하다고 알려져 있다^{20,21)}. 일반적으로 매개변수 k 와 u 는 여러 가지 방법으로 추정될 수 있으나, S-N관계를 기준으로 하여 그 값을 추정할 수 있다^{23,24)}.

피로시험을 통한 S-N관계는 $NS^A = B$ 의 회귀분석식으로 나타낼 수 있으며, 피로수명 N 이 Weibull 분포를 따를 때 매개변수 k 와 u 는 다음과 같이 구할 수 있다²³⁾.

$$k^2 = \frac{\pi^2}{6s^2}, \quad \ln u = \frac{0.5772}{k} + \ln(B \times S^{-A}) \quad (3)$$

여기서, $s = \ln N$ 의 추정에 대한 표준편차
 A, B = 실험상수
 S = 응력수준 (stress level)

Table 1 Fatigue test result

Stress level	40 %	60 %	70 %	80 %	90 %
CON	1,000,000	-	68,834	-	10
CFS	-	1,000,000	90,079	19,836	-
CG	-	501,982	864,408	20,023	-

이제 주어진 응력수준에 대한 평균 피로수명이 식 (2)로부터 계산될 수 있으며, 피로수명 N_D 는 피로파괴가 일어날 확률을 최소화시킬 수 있도록 정해져야 한다. 일단 분포 함수가 결정되면 허용설계신뢰도에 대응하는 설계피로수명이 결정될 수 있다. 허용신뢰도는 $P[N > N_D] = 1 - p_f$ 로 표시되며, 여기서 p_f 는 파괴될 확률이다. 재하 횟수 n 에 따른 응력수준 S 에서의 파괴확률 $p_f = P[N < N_D]$ 는 $F_N(n)$ 과 같으므로 파괴확률 p_f 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_f = 1 - \exp \left(- \left(\frac{n-n_0}{u-n_0} \right)^k \right) \quad (4)$$

또한 확률적인 개념에 의한 구조안전성의 척도인 구조물의 신뢰성(reliability) p_r 은 파괴확률(failure probability) p_f 와 보확률의 관계($p_r = 1 - p_f$)를 갖는다.

구조물의 작용외력 Q 와 저항 R 이 무작위변량인 경우, 구조안전성은 역시 무작위변량인 안전여유(safety margin) $Z = R - Q$ 로 표현되며, $Z \leq 0$ 일 때 안전성을 상실한 파괴 또는 파괴상태가 된다. 즉, 구조부내는 저항 R 이 작용외력 Q 보다 작을 때 파괴된다고 할 수 있다. 따라서 구조부내의 파괴확률 p_f 는 식 (5)와 같이 표시할 수 있다.

$$p_f = P[R < Q] = P[Z = R - Q < 0] = \Phi_Z(-\beta) \quad (5)$$

여기서, β 는 신뢰성지수이며, 확률적 안전성의 표현에 전술한 파괴확률을 대신하여 보편적으로 사용되고 있는 개념이다.

Table 1의 피로시험결과에 따른 회귀분석으로부터 각 시험체의 S-N관계는 다음과 같다. 시험결과로부터 충분한 신뢰성을 갖춘 S-N관계를 도출하기 위해서는 최소 3개의 응력수준에 대하여 두 개 이상의 데이터를 확보하는 것이 이상적이다. 그러나 본 연구에서는 보강 시험체의 경우 응력수준 60%에서 피로한계를 넘어서는 것으로 나타났기 때문에 두 개의 응력수준에 대한 실험결과만을 해석에 사용하였으며, 이로 인하여 신뢰성이 다소 저하되었을 것으로 판단된다.

$$\text{CON 시험체 : } N_r S^{30.279} = 1.795 \quad (6)$$

$$\text{CFS 시험체 : } N_r S^{33.254} = 1.962 \quad (7)$$

$$\text{CG 시험체 : } N_r S^{38.948} = 1.392 \quad (8)$$

Table 2 A probabilistic coefficient of specimens

	CON	CFS	CG	Parameter
k	2.827	1.325	2.702	Shape parameter
A	30.279	33.254	38.948	Experiment variable
B	1.795	1.962	1.392	Experiment variable
s	0.454	0.968	0.475	Standard error

Table 3 A random variables

Variables	Mean	COV	Distribution
Traffic	4,400	0.20	Normal
Axle load	1.24×axle load	0.25	Lognormal

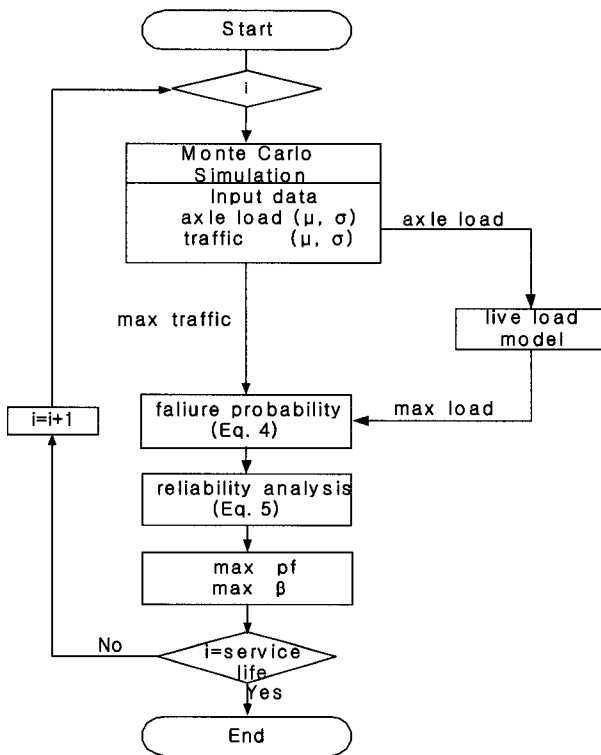
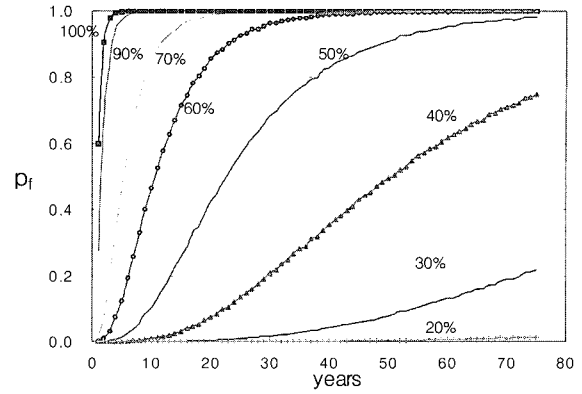


Fig. 5 Flow chart of reliability analysis

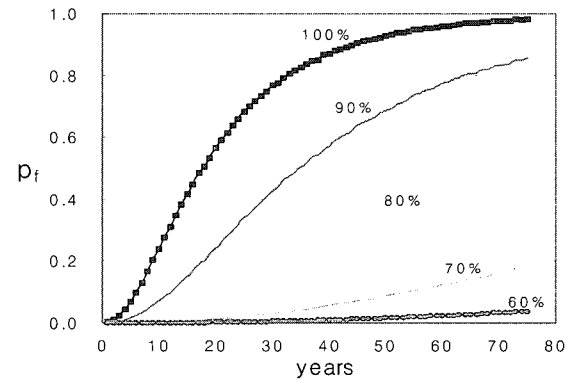
이로부터 Weibull 분포의 계수인 표준편차(s), 형상함수(k), 그리고 시험상수(A, B)의 값은 Table 2와 같다.

설계 2등급 교량을 통과하는 차량하중의 증가에 대한 성능향상된 교량 바닥판의 보강효과를 검증하기 위하여 설계 1등급에 해당하는 트럭의 혼입률을 10%씩 증가시킴에 따른 축하중은 856.56N에서 1365.41N으로 증가하였으며, 그에 따른 바닥판의 파괴확률을 식 (4)에 적용하여 계산하였다.

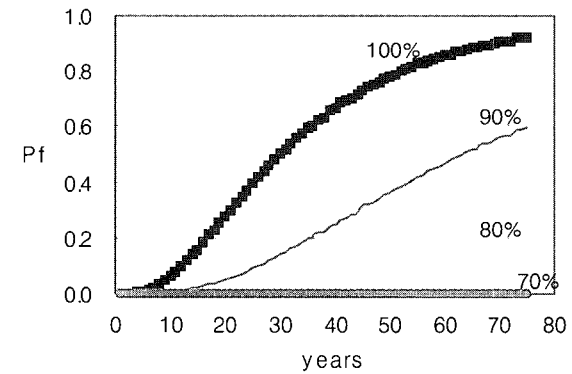
Fig. 5는 바닥판의 파괴확률과 신뢰성지수를 구하기 위한 흐름도를 나타낸 것으로 바닥판에 작용하는 외부하중에 의해 매년 발생할 수 있는 불확실성을 고려하기 위하



(a) CON



(b) CFS



(c) CG

Fig. 6 Failure probability of specimens

여 MCS기법을 적용하였다. 본 연구에서 사용한 지역 ADTT의 교통량과 축하중의 두 랜덤변수에 대한 변동계수와 분포형태는 Table 3과 같다.

Fig. 6은 과적트럭 혼입률 20%단계까지는 구조수명 75년에 1%이하의 매우 작은 파괴확률을 가졌으나, 혼입률 30%이후 파괴확률은 단계적으로 큰 증가를 보인 후 70%이상에서는 10년 이내에 파괴가 일어날 확률을 나타냈다. Fig. 6(b)의 CFS로 보강된 시험체는 혼입률 60%까지 구조수명 75년에 나타난 파괴확률은 4% 이하였으며, 혼

입를 70%이후 파괴확률의 증가가 눈에 띄게 나타났다. Fig. 6(c)의 CG로 보강된 시험체의 파괴확률은 혼입물 80%에서 구조수명 75년의 파괴확률은 20%였으며, CG로 보강된 시험체의 파괴확률 간격은 무보강시험체나 CFS로 보강된 시험체의 파괴확률의 그래프 간격에 비하여 넓어져 하중증가에 의한 구조물에 미치는 영향이 큰 것으로 판단된다. 바닥판을 통과하는 하중이 과적트릭 축하중만 고려된 조건에서 CFS와 CG로 보강된 시험체의 파괴확률은 각각 98%와 92%로 파괴확률 100%에 도달하지 않았다.

Fig. 7은 각각의 혼입률에서 세 시험체의 파괴확률을 신뢰성 지수분포를 나타낸 것이다. Fig. 7(a)에서 설계트릭 축하중에서 CFS로 보강된 시험체의 신뢰성 지수는 공용 초기에 무보강시험체보다 작은 신뢰성 지수를 나타냈으나, 공용 60년 이후부터 무보강시험체보다 큰 신뢰성 지수를 보였다. 이와 같이 구조수명 초기 CFS로 보강된 시험체의 신뢰성 지수가 공용 초기 무보강시험체의 신뢰성 지수보다 작게 시작하여, 공용시간이 지남에 따라 CFS의 신뢰성지수가 커지는 경향은 혼입물 40%까지 나타났다. Fig. 7(c)는 혼입물 50%에서 무보강시험체와 CFS로 보강된 시험체의 신뢰성 지수는 공용 1년과 같으며, 혼입물 60%이후 CFS의 신뢰성 지수는 전체적으로 큰 값을 보여준다. CG로 보강된 시험체의 신뢰성 지수는 CFS로 보강된 시험체 보다 큰 신뢰성 지수를 보였으며, 하중이 증가함에 따라 두 보강 시험체의 신뢰성 지수의 차이는 감소하였다.

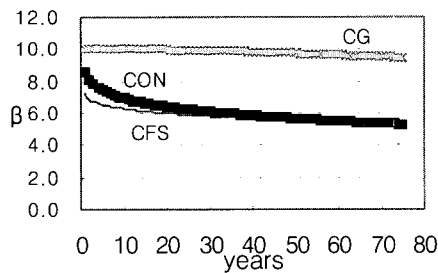
이것으로 볼 때 CFS로 보강된 시험체 보다 CG로보강된 시험체의 보강효과가 보다 우수한 것을 알 수 있다.

CFS와 CG로 보강된 시험체의 하중증가에 따른 파괴확률과 신뢰성을 고려해 볼 때 보강된 설계 2등급 교량 바닥판은 완전한 설계 1등급 교량 바닥판으로의 성능향상은 미치지 못하였으나, 일반적인 설계 2등급 교량을 통과하는 차량하중의 증가에 대한 보강효과는 충분한 것으로 판단 된다.

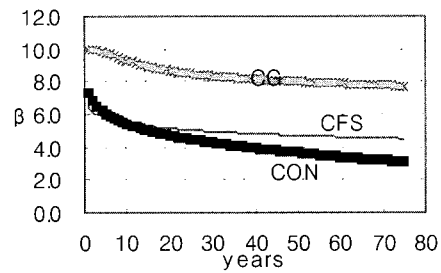
3.3 연장수명 분석

이 절에서는 설계 2등급 교량에 일반적으로 발생하는 과적차량의 혼입률에 의한 바닥판의 보강시기를 추정하기 위하여 본 논문에서 사용된 지역의 ADTT자료에서 과적트릭이 차지하는 비율인 12%를 일반적으로 발생하는 과적차량 혼입률로 가정하여 사용하였다. 과적차량의 혼입률에 의한 축하중은 917.75N이었으며, 이에 대한 무보강시험체와 보강시험체의 확률해석결과는 Fig. 8에서 신뢰성 지수분포로 보여주고 있다.

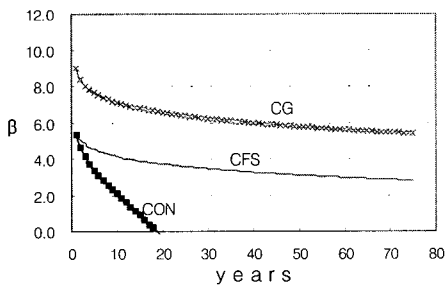
CFS와 CG로 보강된 시험체의 보강효과를 수명연장으로 평가하기 위하여 바닥판의 보강시기와 교체시기를 추정할 수 있는 목표신뢰성 지수가 필요하나, 현재 콘크리트 구조물의 보수시기를 추정하기 위한 목표신뢰성 지수는 국내외적으로 정해진 바 없다. 따라서 보수시기와 교체시기를 의미하는 목표신뢰성 지수는 Fig. 8에서 문헌에 의



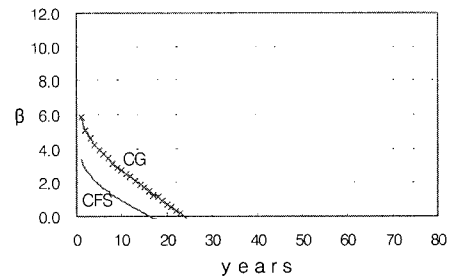
(a) The rate of increase 0%



(b) The rate of increase 20%



(c) The rate of increase 50%



(d) The rate of increase 100%

Fig. 7 Reliability index of increasing vehicle loads

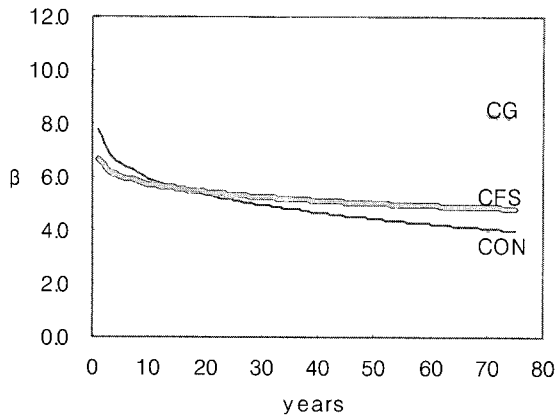


Fig. 8 Reliability index(when axle load has the rate of increase 12%)

한 교체시기와 보강시기에 해당하는 무보강시험체의 신뢰성지수로 가정하였다. 일반적으로 콘크리트 바닥판의 교체시기는 공용 후 40년²⁵⁾, 보강시기는 공용 후 30년²⁶⁾인 것으로 보고 있으며, 이에 해당하는 시기의 무보강시험체 신뢰성 지수는 각각 4.7과 5.0이었다.

Fig. 8에서 CFS로 보강된 시험체는 보수필요시기의 목표신뢰성 지수 5.0은 공용 52년에 해당하며, 75년에는 신뢰성 지수는 4.8을 가졌다. CG로 보강된 시험체의 신뢰성 지수는 구조수명 75년에 8.2로 구조수명동안 보수·보강 없이 사용 가능한 것으로 나타났다.

무보강시험체에 대하여 공용수명 30년에 CFS와 CG로 보강할 경우 구조수명동안의 보강횟수는 각각 1회를 요구하게 되며, CFS로 보강된 바닥판은 공용 후 82년에 보수가 필요하게 되나, CG로 보강이 이뤄진 바닥판은 공용 후 100년 이상 보수 필요 없이 사용이 가능한 것으로 판단된다. 또한 70년에 보수를 필요로 하고 공용 후 80년엔 다시 교체해야 하는 무보강바닥판의 교체의 경우에 비하여 보강된 바닥판은 약 1.2~1.5배 이상의 수명연장 효과가 있는 것을 예측 할 수 있다. 이것으로 일반적으로 발생하는 설계 2등급 교량 바닥판의 하중증가에서 CG로 보강할 경우의 보강효과가 우수한 것을 알 수 있으며, 또한 수명연장의 효과도 탁월한 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 교량을 통과하는 차량하중의 증가에 대한 바닥판의 보강효과를 검증하기 위하여 파괴확률과 신뢰성 지수를 구하였으며, 이로부터 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 1) 하중증가 단계에 따른 CFS와 CG로 보강된 시험체의 파괴확률과 신뢰성 지수는 보강후 성능향상된 설계 2

등급 교량 바닥판이 설계 1등급 교량 바닥판으로의 향상은 미치지 못하였으나, 일반적으로 설계 2등급 교량에 발생하는 차량하중의 증가에 대하여 바닥판의 성능향상은 충분히 이뤄진 것으로 판단된다.

- 2) 교량의 공용수명동안 노후화된 바닥판에 CFS와 CG로 보강이 이뤄질 경우 필요 보강횟수 및 교체회수는 1회였다. 또한 시험 및 해석 결과로부터 CG로 보강된 시험체가 CFS로 보강된 시험체에 비하여 피로저항성과 수명연장 효과가 보다 우수한 것으로 해석되었다. 그러나 본 연구에서 적용된 보강된 바닥판의 시험결과는 무손상상태에서 보강된 것으로서 본 연구의 결과를 손상정도를 정확하게 판정하기 어려운 실제 피로손상된 바닥판에 곧바로 적용하기에는 다소 무리가 있는 것이 사실이다. 따라서 바닥판의 손상도 추정 기법의 개발 및 손상상태의 따른 보강성능에 대한 추가적인 실험, 해석적 연구를 통하여 보다 신뢰성 있는 연구 결과의 도출이 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부, 노후교량조사 및 보수공법개발(최종보고서), 1988.
2. 건설교통부, 한국건설기술연구원, 97교량관리체계개선(BMS)에 관한 연구, 1998.
3. 김철우, 김기봉, 정영수, "TYFO 유리섬유로 보강된 노후교량 상판에 대한 피로실험", 1997년도 가을 학술 발표회 논문집, 한국콘크리트학회, 1997, pp.615~620.
4. Sim, J., Oh, H. S., and Sim, J. W., "Fatigue Loading Effect on the Strengthening Concrete Bridge Deck Specimen with Carbon Fiber Sheet," EASEC-8, 2001.Paper No. 1529
5. Oh, H.-S., Sim, J., and Meyer, C., "Fatigue damage to bridge deck specimens strengthened with carbon fiber sheets," *ACI Structural Journal*, 2003. (submitted).
6. 김지상, "프리스트레스트 콘크리트 교량거동의 등가피로하중모델", 콘크리트학회논문집, Vol.4, No.2, 1994, pp.148~158.
7. Schiling, G. C., and Klippstein, K. H., "Fatigue of Steel Beams by Simulated Bridge Traffic," *Journal of the Structural Division, Proceedings of ASCE*, Vol. 103, No.8, 1977, pp.1561~1575.
8. Schiling, G. C., "Impact Factors for Fatigue Design," *Journal of the Structural Division*, Vol. 108, No. 9, September 1982, pp.2034~2044
9. 윤석구, "A Study on the Fatigue Behavior and the Fatigue Design of the Reinforced Concrete Deck Slabs of the Composite Bridges," 서울대학교 박사학위논문, 1996.

10. 한국도로교통협회, 도로교설계기준, 2000.
11. 대한토목학회, 도로교표준시방서, 1996.
12. 심중성 외, "콘크리트 교량 바닥판에 대한 보수·보강 공법의 효과분석 연구," 한국도로공사, 한양대학교, 2000.
13. 심중성 외, "탄소섬유쉬트 보강공법을 적용한 콘크리트 구조물의 정적 및 피로거동연구," 한양대학교, 2001.
14. 심중성 외, "NEFMAC 보강공법을 적용한 콘크리트 교량 바닥판의 동적시험에 의한 성능향상 효과분석," 한양대학교, 2001.
15. 건설교통부, "도로 교통량 통계연보," 2000.
16. Perdikaris, P. C., Beim, S. R., "RC Bridge Decks under Pulsating and Moving Load," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 114, No. 3, 1988, pp.591~607.
17. Perdikaris, P. C., Beim, S. R. and Bousias, S. N., "Slab Continuity Effect On Ultimate and Fatigue Strength of Reinforced Concrete Bridge Deck Models," *Structural Journal, ACI*, Vol.86, No.4, 1989, pp.483~491.
18. Nowak, A. S., Yamani, A. S., and Tabsh, "Probabilistic models for resistance of concrete bridge girders," *Structural Journal, ACI*, Vol.91, No.3, 1994. pp.269~276.
19. Collins, J. A., "*Fatigue of Materials in Mechanical Design*," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1981.
20. 오병환, "교량구조물의 합리적인 설계하중 결정 및 설계기준," 대한토목학회논문집, 제11권, 제4호, 1991, pp.55~66.
21. 장상훈, "탄소섬유쉬트로 보강한 R/C보의 피로거동에 관한 실험 및 해석적 연구," 한양대학교 석사학위논문, 1998.
22. Benjamin J. R. and Cornell C.A., "Probability, Statics, and Decision for Civil Engineers," McGraw Hill Book Co., Inc., New York, N.Y., 1970.
23. Kapur, K. C. and Lamberson, L. R., "*Reliability in Engineering Design*," John Wiley & Sons, New York, 1997.
24. Yao, J. P. T., "Fatigue Reliability and Design", *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 100, ST9, Sept., 1974, pp.1827~1836
25. Nishikawa, K., "A Concept of Minimized Maintenance Bridges", *橋梁と基礎*, 1997, pp.94~72.
26. 건설교통부, "LCC 개념을 도입한 시설안전관리체계 선진화 방안 연구," 시설안전기술공단, 2001.

요 약

최근들어 노후화된 교량의 증가에 따라 바닥판의 보강효과에 대한 많은 연구가 이루어지고 있으나 대부분의 연구는 실험실 수준에 국한되어 있으며, 구조물의 피로거동은 이동하중이 아닌 고정반복하중에 의한 연구가 집중적으로 시행되고 있다. 본 연구에서는 이동하중의 영향을 반영하기 위하여 국내에서 실측된 축하중으로 활하중 모델을 제시하였다. 확률론적 해석과 신뢰성 해석을 적용하여 탄소섬유쉬트와 격자형 탄소섬유로 성능향상된 바닥판의 보강효과 및 연장수명을 예측한 결과 성능향상된 설계 2등급의 교량바닥판은 일반적인 증가 차량하중에 대하여 사용기간동안 충분한 내하력뿐만 아니라 충분한 피로거항성을 갖는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 활하중 모델, 콘크리트 교량 바닥판, 피로, 확률해석, 신뢰성해석