

# PSC보의 박스화 보강방법의 신뢰성해석

방 명 석

충주대학교 안전공학과

(2006. 2. 27. 접수 / 2006. 5. 16. 채택)

## A Reliability Analysis on the To-Box Reinforcement Method of PSC Beam Bridges

Myung-Seok Bang

Department of Safety Engineering, Chungju National University

(Received February 27, 2006 / Accepted May 16, 2006)

**Abstract** : The goal of this study is to show the way to increase the safety of deteriorated PSC beam bridges by the to-box reinforcing method. This method is to change the open girder section into the closed box section by connecting bottom flanges of neighboring PSC girders with the precast panels embedding PS tendons at the anchor block. The box section is composed of three concrete members with different casting ages, RC slab, PSC beam, precast panel. This different aging requires a time-dependent analysis considering construction sequences. Reliability index and failure probability are produced by the AFOSM reliability analysis. Transversely five schemes and longitudinally two schemes are considered. The full reinforcing scheme, transversely and longitudinally, shows the highest reliability index, but it requires more cost for retrofit. The partial reinforcing scheme 4, 4-1 are recommended in this study as the economically best scheme.

**Key Words** : PSC beam bridge, reinforcing method, to-box, reliability index, construction sequence, precast panel

### 1. 서 론

경제성장과 산업화 과정에서 국가 기간도로 건설 과정에 수많은 교량이 가설된 결과, 공용년수가 증가하면서 최근에는 교량의 노후화로 인한 사용성 및 안전성 저하문제가 발생하게 되고 이는 유지보수비용의 증대로 인한 커다란 사회적 관심사로 대두되고 있다. 교량현황조사서에 따르면 2002년까지 전국에 가설된 교량은 20,219개소이고, 그 중에서 설계하중 DB18 이하인 교량이 전체 교량의 40%에 이르러 있어 현재 공용중인 교량을 통행하는 차량의 중량과 교통량을 감안한다면 신속한 개축 및 보강이 절실히 요구되고 있다<sup>1)</sup>. 특히 1970~1980년대에 가설된 교량은 시공당시 품질관리 및 시공 후 유지관리 소홀로 인하여 교량의 내하력 저하가 발생된 교량이 많은 실정이다. 성능저하가 발생된 교량에 대하여 전면적인 개축은 경제적·사회적으로 막대한 비용이

소요되므로 합리적인 보강공법을 선택하고 유지관리를 위한 설비와 사용성 등을 반영한 보강설계를 수행함으로써 교량 구조물의 공용수명 연장은 물론 경제성을 제고시켜야 한다.

이러한 보강방안으로 많은 방법이 제안되고 있으나 대부분의 공법이 교량의 내하력을 초기수준까지 회복시킬 수 있으나 그 이상의 성능개선은 곤란한 것으로 알려져 있다<sup>2)</sup>. 이 중에서도 외부 프리스트레스 도입공법은 PS강재(Prestress Tendon)를 이용하여 휨부재의 인장응력을 감소시켜 균열을 방지하고 압축력에 의한 교량의 내하력 증가를 유도하는 공법으로 구조물에 대한 적용성과 보강효율이 크기 때문에 국내외에서 콘크리트교량의 보강에 많이 적용되고 있으며 구조적·경제적 측면에서 가장 효율적인 공법으로 인정받고 있다<sup>3,4)</sup>. 국내에서도 교량의 손실된 긴장력을 외부 프리스트레스 도입으로 재긴장하여 보강하고 있으며 실제 적용된 교량의 내하력에 상당히 기여함은 물론 처짐을 복원하는데 효과가 있

는 것으로 보고되고 있다. 그러나 이러한 외부 프리스트레스 도입공법 또한 시공상, 안전상 여러 가지 문제점을 가지고 있다. 외부긴장재의 노출로 유지관리상 손상의 위험성이 있고 PS긴장력의 손실로 보강효과의 상실이 보고되고 있다<sup>5,6)</sup>. 이에 대한 개선 방법으로 구조적인 보강이 필요한 PSC Beam 교량에서 인접한 두개 I형 PSC Beam을 폐단면 박스형태로 보강하여 2차합성 구조화함으로써 PSC Beam 교량의 내하력을 증가시킬 수 있는 보강공법이 제안되었다<sup>7)</sup>. 본 논문에서는 제안된 박스화 보강공법에 대한 구조적 안전성을 신뢰성해석을 통하여 검증하였다.

## 2. 보강공법

### 2.1. 공법의 개요

외부하중이 재하되는 철근콘크리트 슬래브와 PSC Beam으로 구성된 PSC Beam 교량에서, 임의의 2개 PSC Beam에 대하여 하부 플랜지 사이에 보강패널을 설치함으로써 PSC Beam 주형의 하부가 폐쇄된 박스형태의 단면구조가 되도록 보강하는 방법이다. 상부구조는 보와 바닥판의 1차합성구조에서 보, 바닥판, PSC판넬이 이루는 2차합성구조로 변하며, PSC 판넬에 프리스트레스 도입에 따라 콘크리트의 크립가 시간의존적으로 발생한다. 이러한 효과들이 교량의 내하력에 어떠한 영향을 미치는지 분석하기 위하여 시공단계별 시간의존적 신뢰성해석이 필요하다. Fig. 1은 박스형 보강이 내·외측 PSC Beam에 적용된 경우를 나타내고 있다.

위 보강은 필요에 따라서 횡방향으로 PSC Beam 전체를 보강하거나 부분적으로 보강하며, 종방향으로도 전 경간(full reinforcing)에 실시하거나 모멘트가 크게 발생하는 부위에 부분적(partial reinforcing)으로 적용될 수 있다.

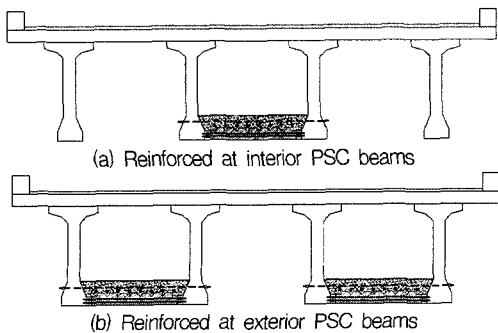


Fig. 1. Reinforcing method to closed box structure.

### 2.2. 공법의 특성 및 기대효과

가설초기에 I형 개방단면에서 박스형 폐합단면으로 변경됨에 따라 교량의 종방향·횡방향 휨강성이 증가되어 교량의 안전성을 증가시킨다. 최근에는 교량 설계 시 횡방향 가로보를 줄이는 추세로써 충분한 검토가 없을 시에는 비틀림에 취약한 구조가 될 수 있는 문제점까지도 충분히 보완할 수 있다.

박스형 보강공법에 따른 폐단면구조만으로 충분한 보강효과를 이루지 못할 경우 교축방향으로 프리스트레스를 도입한다. 기존의 외부프리스트레싱공법의 문제점을 개선하기 위하여 보강패널에 긴장재 방향 변환용 블록과 교량 양단의 상부 플랜지에 긴장재 정착블록을 설치한다. 또한 교축직각방향으로는 보강패널과 PSC Beam을 관통하는 PS강봉을 두어 횡방향 구속력을 향상시키는 방법을 사용한다. 외부 프리스트레스의 도입은 교량 구조물에 요구되는 보강정도에 따라 각각의 PSC Beam에 근접하게 정착블록과 방향변환용 블록을 설치하여 개별적으로 긴장력을 도입하거나 연결보강부의 중앙에서만 긴장력을 도입할 수 있도록 한다. Fig. 2와 Fig. 3은 판넬, 정착블록의 설치방법을 보여 준다.

## 3. 신뢰성 해석

### 3.1. 한계상태방정식

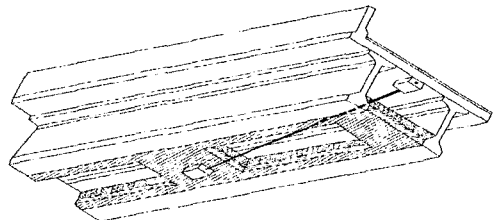


Fig. 2. Partial reinforcement along the span.

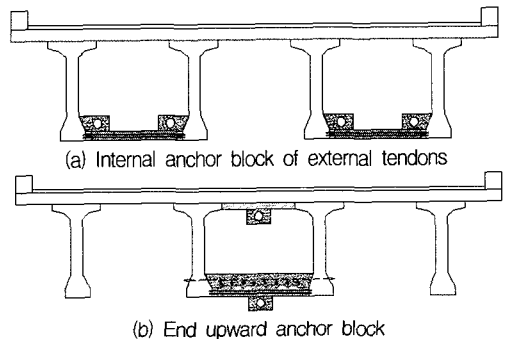


Fig. 3. Various scheme of anchor block.

한계상태방정식의 확률변수는 축력, 휨모멘트, 단면적, 단면이차모멘트로 구성하고, 보의 부재응력을 확률변수의 함수로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$f_g = \frac{P(\cdot)}{A(\cdot)_g} + \frac{M(\cdot)}{I(\cdot)_g} y \quad (1)$$

여기서,  $f_g$  : 보의 응력,  $y$  : 중립축에서 거리  
 $P(\cdot)$ ,  $M(\cdot)$  : 보의 축력·휨모멘트  
 $A(\cdot)_g$  : 보의 단면적  
 $I(\cdot)_g$  : 보의 단면이차모멘트

따라서 한계상태방정식을 나타내는 한계공간함수  $g(\cdot)_g$ 는 다음 식과 같이 정의할 수 있다.

$$g(\cdot)_g = f_g - \frac{P(\cdot)}{A(\cdot)_g} - \frac{M(\cdot)}{I(\cdot)_g} y \quad (2)$$

여기서,  $f_g$ 는 보의 허용응력을 나타내고 있으며, 한계상태방정식에 대한 표준편차(0)는 식 (3)에 의해 계산할 수 있다.

$$\sigma_{g(\cdot)} = \left[ \sum_i \left( \frac{\partial g(\cdot)}{\partial X_i} \right)^2 f_{X_i}^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

여기서  $X_i$ 는 확률변수로서, 본 연구에서는 식 (2)을 이용하여 고정하중과 활하중에 의해 발생하는 최대 부재응력에 대하여 각각의 평균과 표준편차를 계산하여 신뢰성해석을 수행하였다.

### 3.2. AFOSM 방법

기본 확률변수들을 표준정규분포를 갖는 새로운 변수로 선형 변환하여 변환된 좌표공간의 원점으로부터 가장 가까운 거리에 있는 파괴면상의 한 점 (MPFP; Most Probable Failure Point or Design Point, Checking Point)에서 선형 근사함으로써 불변성이 결여되는 문제를 해결할 수 있는 방법이다. 신뢰성지수와 이에 상응하는 파괴확률은 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$P_f = \Phi(-\beta), \beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (4)$$

여기서,  $P_f$  : Failure Probability,  $\Phi$  : Failure Density Function,  $\beta$  : Reliability Index이다.

또한 AFOSM(Advanced First Order Second Moment) 방법은 연성(상관)확률변수들을 비연성(비상관)확률변수들로 바꾸어 연성을 해결하였으며, Rackwitz와 Fiessler는 등가정규변환 방법을 도입함으로써 연성 비정규분포를 갖는 기본변수들의 한계상태방정식이 비선형 함수인 경우에도 정확한 해석 결과를 구할 수 있는 신뢰성 해석 방법을 제시하였으며<sup>8)</sup>, 신뢰성지수를 구하기 위한 반복시행 알고리즘은 다음과 같다.

- <단계 1> 고려하고자 하는 한계상태방정식을 정한다.
- <단계 2> 신뢰성지수를 가정한다.
- <단계 3> 모든  $i$ 에 대하여 초기치  $X_i^* = X_i$ 를 설정한다.
- <단계 4> 비정규 변수들에 대하여 등가의 정규분포 평균( $\mu_{X_i}^N$ )과 표준편차( $\sigma_{X_i}^N$ )를 계산한다.
- <단계 5> 추정점  $X_i^*$ 에서 편미분  $\partial g/\partial X_i$ 를 계산한다.
- <단계 6> 단위 구배벡터  $\alpha_i$ 를 다음의 식을 이용하여 계산한다.  

$$\alpha_i = \frac{(\partial g/\partial X_i) \sigma_{X_i}^N}{[\sum [(\partial g/\partial X_i) \sigma_{X_i}^N]^2]^{1/2}}$$
- <단계 7>  $X_i^*$ 의 새로운 값을 다음 식으로부터 계산한다.  $X_i^* = \mu^N - \alpha_i \beta \sigma_{X_i}^N$  그리고  $\alpha_i$ 가 수렴될 때까지 단계 4~7을 반복한다.
- <단계 8> 고려하는  $g(X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*) = 0$ 에 대하여 신뢰성지수를 계산한다. 그리고 연속적인 반복시행에 의해 신뢰성지수의 오차가 허용한계 내에 들어 올 때까지 <단계 4~8>을 반복한다.

## 4. 해석 및 분석

### 4.1. 대상교량의 구조형식 및 제원

본 연구에서 도입한 박스형 보강공법은 도입초기 단계로 실구조물에 적용한 사례가 없으므로 보강공법의 특성을 규명하기 위한 대상교량은 준공된 후 10년이 경과한 교량을 선정하였다. 대상교량의 상부구조는 PSC Beam(6경간)과 RC Slab(6경간)으로 구성된 고가차도 구조물로 Fig. 4에 종단면도, 횡단면도 및 평면도를 각각 도시하였으며, 구성요소와 보강구조부재에 대한 제원은 Table 1, 2와 같다.

Table 1. Characteristics of the PSC beam bridge

상부 구조	형식	PSC Beam RC Slab	콘크리트강도	Beam(350kgf/cm <sup>2</sup> ) Slab(240kgf/cm <sup>2</sup> )
	교장	L=258m	교 폭	B : 15.4m
하부 구조	차로	4차로	교량등급	DB18, DL18
	교각	T형 : 6기 π형 : 6기	교 대	역 T형

Table 2. Characteristics of reinforcing members

보강 패널	형식	PSC Slab	콘크리트강도	350kgf/cm <sup>2</sup>
	두께	20.0cm		
긴장재	종류	강연선	수량	SWPC 7A(정착블럭당)
	도입 긴장력	0.7σ <sub>pu</sub>		

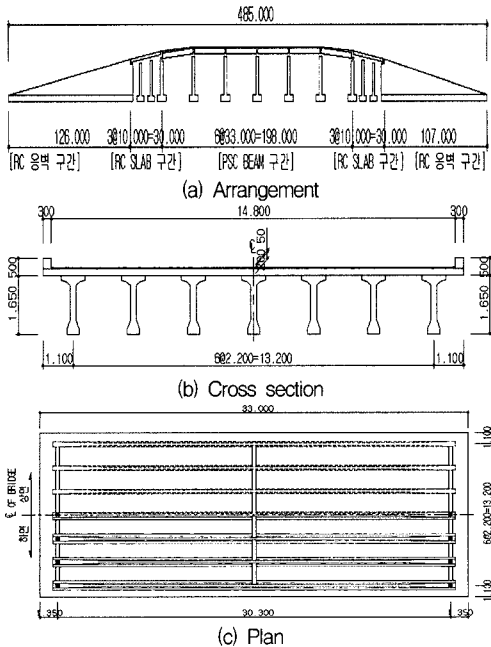


Fig. 4. Overview of selected PSC beam bridge.

1) 보강방안 선정

대상교량의 성능개선을 위한 보강방안은 보강방법에 따라 Fig. 5처럼 5가지로 구분하여 시공단계해석을 수행하였다. 보강패널이 형성되는 거더의 양측면에는 외부강선으로 보강한다. 외부강선 보강은 절곡배치 또는 직선배치로 적용할 수 있으나 본 연구에서는 시공성 측면에서 유리한 직선배치로 계획하였다.

2) 해석모델

보강구조물의 하부플랜지가 주형간에 보강패널로

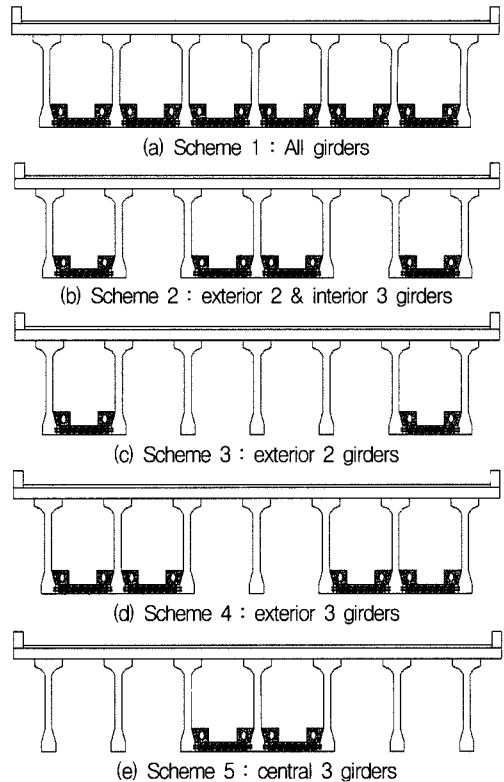


Fig. 5. Various reinforcing schemes in PSC bridge.

연결됨에 따라 PSC Beam 주형이 박스주형으로 변경되므로 구조물의 강성이 증대되는 특성을 충분히 모사할 수 있는 해석모델이 요구된다. 본 연구에서는 제안된 보강공법의 구조적 효율성을 평가하기 위해 적합한 유한요소체에 의한 3차원 해석모델을 설정하였다. 유한요소 모델은 재령기간이 다른 이질재료로 구성된 구조부재의 특성과 실제 거동양상을 반영할 수 있도록 Fig. 6과 같이 구성하였다. 상부슬래브와 보강패널은 평판요소(thick plate element)로 모델링하고 PSC보는 보요소(beam element)로 모델링하였다. PSC보와 상부슬래브는 강체요소(rigid element)로 연결하되 실제 보의 깊이를 고려한 중심위치에

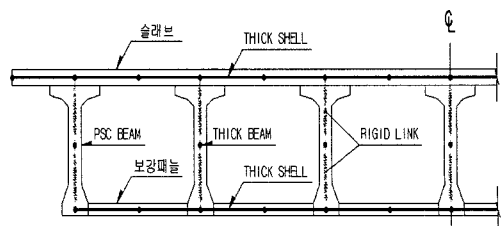


Fig. 6. Numerical modelling of box section.

Table 3. Procedure of analysis by construction stage

	적용하중	구조거동	해석시점
Stage 1	① PSC Beam 자중 ② 내부 긴장력 도입 ③ 크리프 및 건조수축	PSC 보 설치(임시교좌장치)	5일 양생 + 60일
Stage 2	① Slab 및 가로보 타설하중 ② 크리프 및 건조수축	Slab, 가로보는 하중으로만 작용하고 구조체가 아님.	7일
Stage 3	① Slab 및 가로보 자중 ② 크리프 및 건조수축	Slab, 가로보는 합성구조로 작용 (영구교좌장치)	30일
Stage 4	① 2차고정하중(포장 및 난간) ② DB18재하 ③ 크리프 및 건조수축	Slab, 가로보는 합성구조로 작용 (영구교좌장치)	3650일(10년)
Stage 5	① 보강콘크리트 타설하중 ② 크리프 및 건조수축	보강콘크리트는 하중으로만 작용	5일 양생 + 30일
Stage 6	① 보강콘크리트 자중 ② 외부 긴장력 ③ 크리프 및 건조수축	보강콘크리트가 2차합성구조물로 작용	7일
Stage 7	① DB24 ② 크리프 및 건조수축	보강콘크리트가 2차합성구조물로 작용	3650일(10년)

보요소의 절점을 모델링한다. 또한 PSC보와 하부 보강판넬도 강체요소로 연결(rigid link)하되 보의 중심과 보강판넬의 좌표를 고려한 위치에 모델링한다. 보강긴장재의 긴장력은 하부 보강판넬의 절점에 등가 절점력으로 작용한다.

3) 시공단계별 해석

해석방법은 공용개시 후 10년이 경과한 시점에서 본 공법으로 보강하고, 보강 후 10년까지의 교량의 거동을 Table 3에서와 같이 7단계로 나누어 해석한다. 1단계는 PSC 보를 제작장에서 제작하는 동안 하부구조를 완성하고 임시받침으로 보를 거치하는 단계이다. 2단계는 가로보와 바닥판을 타설하는 단계로 이 두 구조체는 굳기 전이라 하중으로만 PSC 보에 재하된다. 3단계는 가로보와 슬래브가 강도를 발휘하여 바닥틀, 바닥판 구조체가 1차합성구조로 완성되고 영구받침을 설치하여 자중을 지지한다. 4단계는 포장 및 난간을 설치하고 DB18하중으로 10년간 공용하는 단계이다. 5단계는 10년 공용 중 교량 등급이 DB18에서 DB24로 승격되어 내하력을 1/3

상향시키기 위해서 보강을 실시하는 단계이다. 이때 보강콘크리트는 기존 교량과 일체가 되지 않아서 하중으로만 작용하는 단계이다. 6단계는 보강콘크리트가 기존 교량과 일체가 되어 2차합성구조로 작용하는 단계이다. 이 단계에서 추가 프리스트레스를 도입할 수도 있고 보강콘크리트는 크리프효과가 발생한다. 7단계는 보강 완료 후 DB24하중이 공용되는 단계로 활하중, 크리프, 프리스트레스의 시간별 해석을 수행한다.

4.2. 해석결과 및 분석

1) 해석 결과

본 절에서는 PSC Beam 교량의 박스형 보강에 따른 효과를 정량적으로 평가하기 위해 시공단계별 해석을 통하여 신뢰성해석을 수행하였다. 변위는 사용성에 대한 신뢰성해석이므로 생략하였으며, 보강된 PSC Beam 교량에 작용하는 축력 및 휨모멘트에 의한 응력에 관해서 신뢰성해석을 수행하였다. 신뢰성해석은 전 절에서 언급한 AFOSM 방법으로 수행하였으며 신뢰성지수와 파괴확률을 산출하였다. 대

Table 4. Reliability index and failure probability by full reinforcement

구분	E/T보강		Scheme 1		Scheme 2		Scheme 3		Scheme 4		Scheme 5	
	$P_f$	$\beta$	$P_f$	$\beta$	$P_f$	$\beta$	$\beta$	$P_f$	$\beta$	$P_f$	$\beta$	$P_f$
Girder 1	4.233	1.154E-5	5.428	2.844E-8	4.687	1.384E-6	4.609	2.019E-6	4.780	8.777E-7	3.866	5.525E-5
Girder 2	4.515	3.173E-6	5.362	4.126E-8	4.673	1.487E-6	4.456	4.170E-6	5.296	5.905E-8	3.905	4.712E-5
Girder 3	4.701	1.293E-6	5.381	3.695E-8	4.702	1.291E-6	3.903	4.747E-5	4.634	1.790E-6	4.524	3.035E-6
Girder 4	4.728	1.134E-6	5.372	3.887E-8	5.312	5.422E-8	3.890	5.006E-5	4.142	1.720E-5	5.202	9.835E-8

Table 5. Reliability index and failure probability by half partial reinforcement

구분	E/T보강		Scheme 1-1		Scheme 2-1		Scheme 3-1		Scheme 4-1		Scheme 5-1	
	$P_f$	$\beta$	$P_f$	$\beta$	$P_f$	$\beta$	$\beta$	$P_f$	$\beta$	$P_f$	$\beta$	$P_f$
Girder 1	4.233	1.154E-5	5.385	3.625E-8	4.685	1.397E-6	4.586	2.263E-6	4.760	9.667E-7	3.230	6.185E-4
Girder 2	4.515	3.173E-6	5.390	3.527E-8	4.626	1.865E-6	4.409	5.189E-6	5.302	5.742E-8	3.758	8.580E-5
Girder 3	4.701	1.293E-6	5.472	2.225E-8	4.782	8.678E-7	3.864	5.586E-6	4.696	1.326E-6	4.644	1.707E-6
Girder 4	4.728	1.134E-6	5.474	2.196E-8	5.382	3.675E-8	3.778	7.918E-5	4.162	1.574E-5	5.281	6.437E-8

상교량의 최대응력은 기본내하력 산정 시 적용한 허용응력을 대상교량이 지지할 수 있는 최대치로 설정하면서 변동계수(C·O·V)는 10%로, 사하중과 활하중에 의한 변동계수는 각각 10%와 25%로 가정하였으며, 사하중과 활하중에 의한 확률분포는 각각 정규(normal)분포, 대수정규(lognormal)분포를 갖는 것으로 가정하였다. 해석위치는 시공단계 중 인장응력이 가장 크게 발생하는 경우에 경간중앙부이며, Table 4는 전경간(full reinforcement)을 Table 5는 중앙1/2 경간만(half reinforcement)을 박스보강한 경우의 결과로 파괴확률 및 신뢰성지수를 나타내고 있다. 단, Table 4, 5에서 E/T보강은 폐단면으로 하지 않고 기존의 외부긴장재보강만을 한 경우이다.

## 2) 결과 분석

박스형 보강공법을 도입한 PSC Beam 교량의 시공단계별해석 결과를 이용하여 신뢰성해석을 수행한 결과 신뢰성지수는 3.230~5.428의 높은 신뢰성을 보이는 것으로 평가되었다. 보강패널이 적용되지 않은 E/T보강의 경우도 허용응력을 초과하는 최종응력상태와는 달리 4.233의 신뢰성지수를 갖는 것으로 분석되었다. 방법(scheme) 1과 방법 1-1의 경우 전단면 폐합에 따른 보강효과가 뛰어나 파괴확률이 가장 낮은 것으로 나타났는데 이는 개방형 단면이 폐합형 박스단면으로 변환되면서 구조물의 강성에 의한 인접 거더간의 횡분배 기능이 증대된 것에 기인한 것으로 분석된다. 구조물의 강성에 의한 인접 거더간의 횡분배는 주형에 작용하는 활하중 휨모멘트를 균등하게 분포시키는 역할을 하며 사하중보다 불확실성이 큰 활하중의 영향을 감소시킬 수 있어 파괴확률이 낮아지는 요인으로 작용하는 것으로 판단된다. 대상교량에 대한 보강방안으로는 방법 1과 방법 1-1을 적용할 경우 가장 확실한 보강효과를 기대할 수 있으나 과도한 사하중 증대와 전단면 보강에 따른 경제성 측면에서 불리하므로 부분적인 폐합으로 동일한 효과를 기대할 수 있는 방법 4와 방법 4-1

을 선정하는 것이 합리적이라 판단된다. 방법 4의 신뢰성지수는 4.142~5.296, 방법 4-1의 신뢰성지수는 4.162~5.302의 분포를 보이고 있어서 대상교량의 보강방안 중 가장 적합한 방안으로 평가되었다.

## 5. 결론

본 연구에서 제안된 박스형 보강공법의 신뢰성 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다. 신뢰성해석 수행에 의해 검토된 신뢰성지수 및 파괴확률은 보강공법의 보강효과를 정량적으로 평가할 수 있어 본 연구에서 제안된 박스형 보강공법의 실질적 판단기준을 제공할 수 있는 것으로 판단된다. PSC Beam 교량과 같은 형교는 주형의 지지간격에 따라 다소 차이는 있으나 내측거더에 비해 외측거더가 취약하므로 방법 4와 4-1과 같은 외측거더 보강계획을 채택하는 것이 효율적이라 판단된다. 방법 4와 4-1의 보강방안을 적용할 경우 내·외측거더가 보유한 기본내하력 및 신뢰성지수의 분포가 유사하여 보강효율 측면이나 시공성·경제성 측면에서 가장 우수한 것으로 판단된다. 그러나 본 공법이 비특력이 큰 곡선교나 등급상향이 필요한 교량에는 경제성이 있을 것으로 사료되나, 보강패널의 연결부 등 구조적 일체성이 필요한 부분에서는 시공성과 안전성을 확보할 수 있도록 지속적인 연구가 필요하다.

## 참고문헌

- 1) 건설교통부, “교량현황조사”, 2003.
- 2) 건설교통부, “교량구조물의 보수·보강 공법편람”, 1995.
- 3) Ariyawarena, N. Don, G., “Design of Precast Prestressed Concrete Members Using External Prestressing”, PCI Journal, Vol. 47, No. 2, pp. 84~94, 2002.
- 4) 한국건설기술연구원, “외부 프리스트레스를 도입

- 하는 구조물의 설계 및 시공에 관한 연구”, 1995.
- 5) 한만엽, 정문연, “외부강선 보강용 압축형 단부 브래킷의 거동 연구”, 대한토목학회 논문집, 제21권, 제6-A호, 2001.
  - 6) 홍석주, “외부 프리스트레스 도입에 의한 노후 콘크리트교량의 성능향상에 관한 연구”, 충남대학교, 2000.
  - 7) 방명석, “주형의 박스화에 의한 피씨빔교량의 보강방법,” 특허청, 2001.
  - 8) Rackwitz, R. and Fiesseler B., “Structural Reliability Under Combined Random Load Sequences”, Computers and Structures, Vol 9, No. 5, pp. 489~494, 1978.