

PSC Beam의 박스형 보강 시 이차합성을 고려한 신뢰성해석

A Reliability Analysis considering the Second Composite Effect in the To-Box Reinforcement of Deteriorated PSC Beam Bridge

한 성 호* 조 창 주** 방 명 석*** 신 재 철****
Han, Sung Ho Cho, Chang Joo Bang, Myung Seok Shin, Jae Chul

ABSTRACT

The reinforcing effect of modified structure of PSC beams is analyzed in this study. The PSC beams are closed by precast half panels embedding PS tendons at the bottom flange of I-beam. The stiffness of box structure is larger and the PS force at half panels makes a time-dependent upward camber of superstructures. The superstructure becomes a second composite structure among 3 elements-PSC beam, RC slab, PSC panel. The time-dependent creep and shrinkage effect at PSC panels and structural behavior is verified considering construction sequences. The optimal range of to-box reinforcing method is surveyed through reliability analysis.

1. 서 론

경제성장과 산업화 과정에서 국가 기간도로 건설과정에 수많은 교량이 가설된 결과, 최근에는 공용년수가 증가하면서 교량 구조물의 노후화로 인한 사용성 및 안전성 저하문제가 발생하게 되고 이는 유지보수비용의 증대로 커다란 사회적 관심사로 대두되고 있다. 교량현황조사에 따르면 전국에 가설된 교량은 20,219개소이고 그 중에서 설계하중 DB18 이하인 교량이 전체 교량의 40%에 이르고 있어 현재 공용중인 교량을 통행하는 차량의 중량과 교통량을 감안한다면 신속한 개축 및 보강이 절실히 요구되고 있다[1]. 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

* 정회원 충남대학교 토목공학과 공학박사

** 정회원 충남대학교 토목공학과 공학박사

*** 정회원 충주대학교 교수

**** 정회원 충남대학교 토목공학과 교수

관한 것으로 알려져 있다[2-4]. 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 공으로 인정받고 있다[5-7]. 국내에서도 교량의 손실된 긴장력을 외부 프리스트레스 도입으로 재긴장하여 보강하고 있으며 실제 적용된 교량의 내하력에 상당히 기여함은 물론 처짐을 복원하는데 효과가 있는 것으로 보고되고 있다[8-9]. 그러나 이러한 외부 프리스트레스 도입 공법 또한 시공상, 안전상 여러 가지 문제점을 가지고 있다 외부긴장재의 노출로 유지관리상 손상의 위험성이 있고 PS력의 손실로 보강효과의 상실이 보고되고 있다. 따라서 본 연구에서는 구조적인 보강이 필요한 PSC Beam 교량을 대상으로 두 개의 I형 PSC Beam을 폐단면 박스형태로 보강하여 2차합성 구조화함으로써 PSC Beam 교량의 내하력을 증가시킬 수 있는 보강공법을 제안하고 이를 해석을 통하여 검증하였다. 제안된 보강공법 적용 시 이차합성효과를 정량적으로 규명하기 위해 시공단계별(construction sequence) 시간의존적(time dependent)해석을 실시하였으며, 경제적인 보강범위를 결정하기 위하여 박스화 범위를 조정하였다. 또한 신뢰성해석을 수행하여 박스형 보강에 따른 PSC Beam 교량의 안전성을 평가하였다.

2. 박스형 보강공법

2.1 공법의 개요

외부하중이 재하되는 철근콘크리트 슬래브와 PSC Beam으로 구성된 PSC Beam 교량에서, 임의의 2개 PSC Beam에 대하여 하부 플랜지 사이에 철근 슬래브로 이루어진 보강패널을 설치함으로써 PSC Beam 주형의 하부가 폐쇄된 박스형태의 단면구조로 변경하여 보강하는 방법이다. 상부구조는 보와 바닥판의 1차합성 구조에서 보, 바닥판, PSC판넬이 이루는 2차합성구조로 변하며, PSC판넬에 프리스트레스 도입에 따라 콘크리트의 크리프가 시간의존적으로 발생한다. 이러한 효과들이 교량의 내하력에 어떠한 영향을 미치는지 분석하기 위하여 시공단계별로 시간의존적 해석이 필요하다. 그림 1은 박스형 보강이 내·외측 PSC Beam에 적용된 경우를 나타내고 있다.

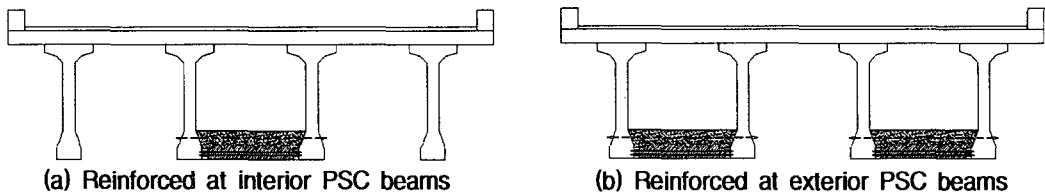


Fig. 1 Reinforcing method to closed box structure

윗 보강은 필요에 따라서 횡방향으로 PSC Beam 전체를 보강하거나 부분적으로 보강하며, 종방향으로도 전 경간에 실시하거나 모멘트가 크게 발생하는 부위에 부분적으로 적용될 수 있다.

2.2 박스형 보강공법의 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.

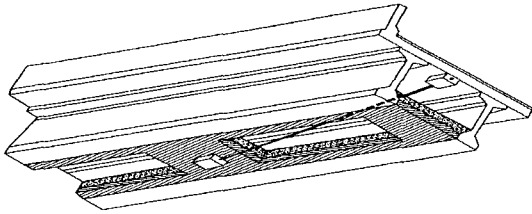
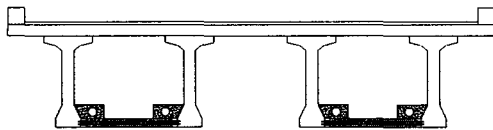


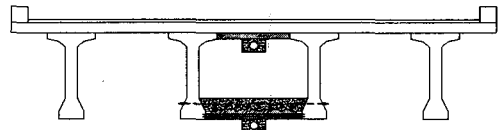
Fig. 2 Partial reinforcement along the span

박스형 보강공법에 따른 폐단면구조만으로 충분한 보강효과를 이루지 못할 경우 교축방향으로 프리스트레스를 도입한다. 기존의 외부프리스트레스

공법의 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. 그림 2와 3은 패널, 정착블럭의 설치방법을 보여 준다.



(a) Internal anchor block of external tendons



(b) End upward anchor block

Fig. 3 Various scheme of anchor block

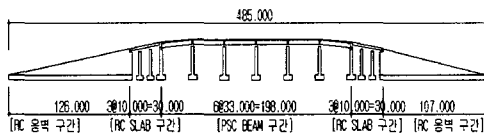
3. 보강에 따른 해석 및 평가

3.1 대상교량의 구조형식 및 제원

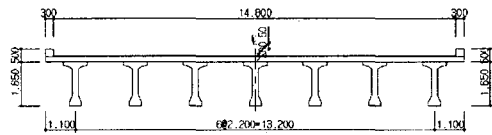
본 연구에서 도입한 박스형 보강공법은 도입초기단계로 실구조물에 적용한 사례가 없으므로 보강공법의 특성을 규명하기 위한 대상교량은 1979년 준공되어 25년이 경과한 도로시설물을 선정하였다. 대상교량의 상부구조는 PSC Beam(6경간)과 RC Slab(6경간)으로 구성된 고가차도로 구조물이며 그림 4에 종단면도, 횡단면도 및 평면도를 각각 도시하였으며 구성요소에 대한 제원은 표 1과 같다.

Table. 1 Characteristics of the PSC Beam bridge

상부 구조	형식	PSC Beam (6경간) RC Slab (6경간)	콘크리트강도	Beam (350 kgf/cm ²) Slab (240 kgf/cm ²)
		교장	L=252m (옹벽부 : 223m)	교 폭
	차로	4차로	교량등급	DB18T, DL18T
하부 구조	교각	T형 : 6기 π형 : 6기	교 대	역 T형



(a) Arrangement



(b) Cross section

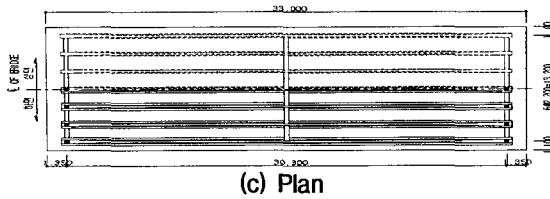


Fig. 4 Overview of selected PSC Beam bridge

3.2 시공단계별 해석

본 연구에서는 공용 후 10년이 경과한 시점에서 본 방법으로 보강하고, 보강 후 10년까지의 교량의 거동을 표 2에서와 같이 7단계로 나누어 해석한다.

Table. 2 Procedure of analysis is by construction stage

	적용 하중	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 적용	3650일(10년)

1단계는 PSC 보를 제작장에서 제작하는 동안 하부구조를 완성하고, 임시받침으로 보를 거치하는 단계이다. 2단계는 가로보와 바닥판을 타설하는 단계로 이 두 구조체는 굳기 전이라 하중으로만 PSC보에 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 교량등급이 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.

보강 후 2차합성구조가 완공되는 시점에서 박스단면의 강성증가, 2차프리스트레스력의 효과, 하부판넬의 크리프에 의한 상향캠버량, 보강 후 10년 경과 시점에서의 내하력을 평가한다. 시공이래로 보, 슬래브, 보강콘크리트의 물성은 타설시점에 따라서 모두 다르고, 초기 보의 긴장력과 시간에 따른 손실도 7단계까지 고려한다.[14-15]. 시공단계별 해석은 교량의 모든 부분에서 발생하는 응력이 설계기준에 규정된 허용응력 범위를 만족하는가를 검토하여 적절한 박스화 범위, 추가 프리스트레스력 보강범위를 조사한다.

3.2.1 대상교량의 보강방안 선정

대상교량의 성능개선을 위한 보강방안은 본 연구에서 제안한 박스형 보강방법을 적용하였으며 보강방법에 따라 5가지 Case로 구분하여 시공단계해석을 수행하였다. 보강패널이 형성되는 거더의 양측면에는 외부강선을 보강한다. 외부강선의 보강은 절곡배치 또는 직선배치로 적용할 수 있으나 본 연구에서는 시공성 측면에서 유리한 직선배치로 계획하였다.

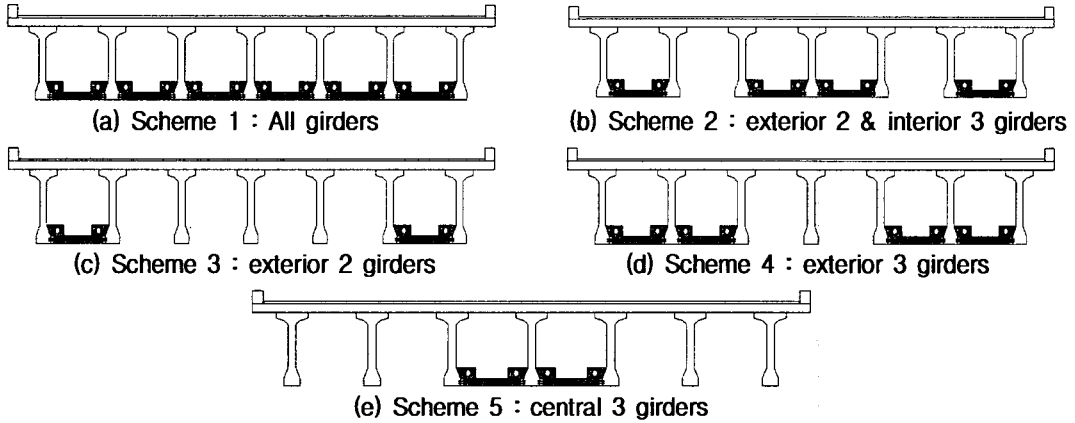


Fig. 5 Various reinforcing schemes in PSC bridge

3.2.2 해석모델의 적합성

보강구조물의 하부플랜지가 주형 상호간에 연결됨에 따라 PSC Beam 주형이 박스주형으로 변경되고 구조물의 강성이 증대되는 특성을 충분히 모사할 수 있는 해석모델이 요구된다. 본 연구에서는 제안된 보강공법의 구조적 효율성을 평가하기 위해 층 요소에 의한 3차원 입체구조를 설정하였다. 층 요소 모델은 이질재료로 구성된 구조부재의 특성과 실제 거동양상을 반영할 수 있는 개선된 해석모델이며 정해에 가장 근접한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단되는 방법인 보강교량 전체를 Solid요소로 모델링 한 후 자중에 의해 발생하는 치짐과 층 요소에 의한 해석 결과를 비교 검토함으로써 해석모델의 적합성을 평가하였다. 층 요소에 의한 해석모델은 바닥판 슬래브, PSC Beam, 보강패널을 각각 가설위치에 모델링 한 후 Rigid link에 의해 강체연결 시킴으로써 상호간의 위치특성을 부여하고 층 요소 간의 합성효과를 유도하였다. 표 3은 해석모델링 방법에 따른 결과 값을 나타낸 것이다.

Table. 3 Result of modeling(solid, layer) [cm]

구분		G1	G2	G3	G4
중앙부	Solid	2.068	2.041	2.027	2.022
	Layer	2.020	1.992	1.975	1.970
Ratio (%)		2.321	2.401	2.565	2.572

3.2.3 전단면 보강에 따른 시공단계해석

보강방안별 구조적 효율성을 평가하기 위한 시공단계해석은 전절에서 제시한 7단계로 구분하여 수행하였다. 전절에서 기술한 바와 같이 보강방안별로 4단계까지는 동일한 시공단계해석을 거치며 하부 플랜지를 타설하는 5단계부터 차이를 나타낸다. 시공단계해석을 통한 보강방안별 최종응력을 표5에 나타냈었다.

Table. 4 Rehabilitation scheme

구 분	하부플랜지 보강	외부강선보강	
		편측 보강	양측 보강
Scheme 1	G1~G7 (전체 거더 보강)	G1, G7	G2~G6
Scheme 2	G1~G2, G3~G5, G6~G7 (외측2개, 내측3개 보강)	G1~G3, G5~G7	G4
Scheme 3	G1~G2, G6~G7 (외측2개 보강)	G1~G2, G6~G7	
Scheme 4	G1~G3, G5~G7 (외측3개 보강)	G1, G3, G5, G7	G2, G6
Scheme 5	G3~G5 (내측3개 보강)	G3, G5	G4

Table. 5 Result of Final Stresses [kgf/cm²]

구 분		G1	G2	G3	G4
무 보 강	상연	-109.957	-105.278	-101.015	-100.691
	하연	54.362	43.502	36.304	35.263
E / T 보 강	상연	-108.006	-103.354	-99.101	-98.769
	하연	45.201	34.450	27.204	26.170
Scheme 1	상연	-107.855	-110.639	-111.561	-112.304
	하연	4.994	5.329	5.076	5.612
Scheme 2	상연	-108.449	-106.434	-107.268	-108.758
	하연	12.945	12.528	11.375	7.734
Scheme 3	상연	-104.063	-103.850	-102.293	-101.665
	하연	14.841	19.694	22.801	23.410
Scheme 4	상연	-105.179	-107.827	-106.187	-104.622
	하연	9.007	8.006	13.773	15.396
Scheme 5	상연	-98.607	-102.381	-105.246	-106.835
	하연	23.542	22.617	17.281	11.187

※ 허용압축응력 $f_c = 0.40 f_{ck} = -140.0 \text{ kgf/cm}^2$ 허용인장응력 $f_t = 1.6 \sqrt{f_{ck}} = 29.9 \text{ kgf/cm}^2$
(모든 손실이 일어난 후)

3.2.4 휨 보강에 따른 시공단계해석

본 연구에서 제안된 박스형 보강공법은 구조물의 휨 성능 향상에 주목적이 있으므로 전 연장을 대상으로 보강할 수 있는 반면 실질적으로 휨에 저항하는 경간 중앙부에 대해서만 부분적으로 적용하여 수행하였다. 따라서 휨 보강에 대한 시공단계해석은 경간 중앙부 L/2 구간에 박스형 보강공법을 적용하여 부분보강에 따른 거동 특성을 분석하였다. 이때 외부강선에 의한 긴장력 도입은 휨모멘트가 크게 작용하는 중앙부를 보강하는 휨 보강이므로 직선배치를 적용하였다. 시공단계해석을 통한 보강방법별 최종응력은 표 7에 나타냈었다.

Table. 6 Rehabilitation scheme(L/2)

구 분	하부플랜지 보강	외부강선보강	
		편측 보강	양측 보강
Scheme 1-1	G1~G7 (전체 거더 보강)	G1, G7	G2~G6
Scheme 2-1	G1~G2, G3~G5, G6~G7 (외측2개, 내측3개 보강)	G1~G3, G5~G7	G4
Scheme 3-1	G1~G2, G6~G7 (외측2개 보강)	G1~G2, G6~G7	
Scheme 4-1	G1~G3, G5~G7 (외측3개 보강)	G1, G3, G5, G7	G2, G6
Scheme 5-1	G3~G5 (내측3개 보강)	G3, G5	G4

Table. 7 Result of Final Stresses [kgf/cm²]

구 분		G1	G2	G3	G4
무 보 강	상연	-109.957	-105.278	-101.015	-100.691
	하연	54.362	43.502	36.304	35.263
E / T 보 강	상연	-108.006	-103.354	-99.101	-98.769
	하연	45.201	34.450	27.204	26.170
Scheme 1-1	상연	-107.561	-110.602	-109.668	-110.210
	하연	9.513	6.932	4.173	4.363
Scheme 2-1	상연	-106.514	-105.739	-105.254	-107.650
	하연	14.262	15.925	10.570	7.561
Scheme 3-1	상연	-107.163	-107.622	-100.656	-100.526
	하연	17.501	23.097	23.844	26.411
Scheme 4-1	상연	-106.099	-109.011	-104.815	-101.079
	하연	11.700	10.406	13.367	14.918
Scheme 5-1	상연	-106.541	-102.889	-105.977	-107.222
	하연	44.489	27.493	14.921	10.849

※ 허용압축응력 $f_c = 0.40 f_{ck} = -140.0 \text{ kgf/cm}^2$ 허용인장응력 $f_t = 1.6 \sqrt{f_{ck}} = 29.9 \text{ kgf/cm}^2$
(모든 손실이 일어난 후)

4. PSC Beam 교량의 박스형 보강에 따른 신뢰성해석

4.1 신뢰성해석

본 절에서는 PSC Beam 교량의 박스형 보강에 따른 효과를 정량적으로 평가하기 위해 시공단계해석 결과를 이용하여 신뢰성해석을 수행하였다. 변위의 불확실량은 사용성에 대한 신뢰성해석이므로 생략하였으며, 보강된 PSC Beam 교량에 작용하는 축력 및 휨모멘트에 의한 응력에 의해서 신뢰성해석을 수행하였다. 신뢰성해석 방법은 AFOSM 방법을 이용하여 본 연구에서 작성한 프로그램에 의해 수행하였으며 신뢰성지수와 파괴확률을 검토하였다.

4.2 신뢰성해석 결과 분석

대상교량의 극한응력은 기본내하력 산정 시 적용한 설계모멘트 강도를 대상교량이 지지할 수 있는 극한강도로 설정하였으며 이를 극한응력으로 치환하여 사용하였다. 신뢰성해석 시 극한응력에 대한 변동계수($C \cdot O \cdot V$)는 10%로 가정하였다. 고정하중과 활하중에 의한 응력은 각각 10%와 25%로 가정하여 적용하였으며 고정하중과 활하중에 의한 불확실량은 각각 정규(Normal)분포, 대수정규(Lognormal)분포를 갖는 것으로 가정하였다.

4.2.1 보강방안에 따른 신뢰성해석 결과

한계상태방정식을 이용하여 인장응력이 가장 크게 발생하는 경간 중앙부의 부재에 대하여 보강방안별로 신뢰성해석을 수행하였다. 고정하중과 활하중에 의한 부재응력(축응력+휨응력)의 평균, 가정한 표준편차, 극한응력을 Scheme에 따라 신뢰성해석 결과인 신뢰성지수 및 파괴확률은 표8~9에 나타내었다.

Table. 8 Reliability index and failure probability by full reinforcement

구 분	E/T보강		Scheme 1		Scheme 2		Scheme 3		Scheme 4		Scheme 5	
	P_f	β	P_f	β	P_f	β	P_f	β	P_f	β	P_f	β
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. 9 Reliability index and failure probability by flexure reinforcement

구 분	E/T보강		Scheme 1-1		Scheme 2-1		Scheme 3-1		Scheme 4-1		Scheme 5-1	
	P_f	β	P_f	β	P_f	β	P_f	β	P_f	β	P_f	β
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

5. 결 론

1. 보강패널 신설에 의한 고정하중 증대에 따른부정적 효과는 박스형태에 의한 강성증대와 크리프/건조수축 효과로 상쇄되며 장기적 상향캠버는 지속적인 교량의 내하력 손실을 보완하는데 효과가 있는 것으로 판단된다.
2. 박스형 보강공법과 외부프리스트레스 도입공법의 결합은 기존의 보강방법보다 사용성, 안전

성, 내구성에서 우수한 결과를 제공할 수 있으며 작은 긴장력 도입으로도 폐합형 단면에 따른 강성증대와 크리프/건조수축 효과로 인해 안정적인 내하력을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 특히 보강패널과 주형간의 2차합성효과는 장기적인 교량의 내하력 확보에 특별한 효과를 발휘할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 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.
4. PSC Beam 교량과 같은 형교는 주형의 지지간격에 따라 다소 차이는 있으나 내측거더에 비해 외측거더가 취약하므로 Scheme 4와 4-1과 같은 외측거더 보강계획을 수립하는 것이 효율적이라 판단된다. Scheme 4와 4-1의 보강방안을 적용할 경우 내·외측거더가 보유한 기본 내하력 및 신뢰성지수의 분포가 유사하여 보강효율 측면이나 시공성·경제성 측면에서 우수한 것으로 판단된다.
5. 휨 보강방안에 대한 분석결과 보강위치에 따라 현격한 결과 차이를 나타내고 있으므로 보강 대상교량에 대한 상세한 구조해석이 선행되어야 하며 해석 결과에 따라 보강범위를 결정해서 구조물의 안정성을 확보해야 할 것이다. 그러나 시공성·경제성 측면에서 휨 보강방안 적용은 교량연장방향 전단면 보강방안에 비해 우수하므로 활용도가 높을 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 건설교통부(2003) 교량현황조사서.
2. 건설교통부(1995) 교량구조물의 보수·보강 공법편람.
3. Hassan, Tarek, Rizkalla, Sami. (2002) Flexural Strengthen of Prestressed Bridge Slabs with FRP Systems, *PCI Journal*, Vol. 47, No. 1, pp. 76-93.
4. Burke, Chrd R., Dolan, Charles W. (2001) Flexural Design of Prestressed Concrete Beams Using FRP Tendons, *PCI Journal*, Vol. 46, No. 2, pp. 76-87.
5. Kiang-Hwee T. and Tjandra, Robert A. (2003) Strengthening of Precast Concrete Bridges by Post-Tensioning for Continuity, *PCI Journal*, Vol. 48, No. 3, pp. 56-71.
6. Ariyawarena, Nihal Don, Ghali, Amin. (2002) Design of Precast Prestressed Concrete Members Using External Prestressing, *PCI Journal*, Vol. 47, No. 2, pp. 84-94.
7. Kiang-Hwee T. and Chee-Khooon Ng (1997) Effects of Deviator and Tendon Configuration in Behavior of Externally Prestressed Beams, *ACI Structural Journal*, Vol 94, Issue 1.
8. 홍석주(2000) 외부 프리스트레스 도입에 의한 노후 콘크리트교량의 성능향상에 관한 연구, 충남대학교 대학원 공학박사학위논문.
9. 방명석(2001) 주형의 박스화에 의한 피시빔교량의 보강방법 및 그에 의한 보강구조를 구비한 피시빔교량, 특허청.