

긴장력 횡분배를 이용한 강합성형교 외부 후 긴장 보강

External Post-tensioning Strengthening of Composite Girder Bridge Using Lateral Distribution of Post-tensioning Force

박영훈* · 박용걸**

Park, Young Hoon · Park, Yong Gul

Abstract

This study analyzes the lateral distribution behavior of external post-tensioning force and evaluates the possibility of strengthening the servicing composite girder bridge by adopting the external post-tensioning force to the parts of the bridge girder. From the results of experiments and analyses, it is founded that the composite girder bridge can be strengthened by applying the external post-tensioning force to the parts of the bridge girder. It is also proved that bracing improve the lateral distribution behavior of post-tensioning force. The lateral distribution behavior of post-tensioning force which influenced by stiffness ratio, girder spacing and span length is changed by the bridge type and the location of tensioned girder. From the results of analyses, set up an equation which can predict the lateral distribution behavior of external post-tensioning force and evaluate the rationality

Keywords : composite girder bridge, external post-tensioning, lateral distribution behavior

요 지

본 연구는 외부 후 긴장력 횡분배 거동을 연구하고 일부 거더 외부 후 긴장만으로 공용중인 강합성형교 보강 가능성을 평가하기 위한 연구이다. 실험 및 해석적 연구로부터 부분 거더 긴장만으로도 강합성형교 보강이 가능한 것으로 나타났으며, 브레이싱에 의하여 긴장력 횡분배 거동이 개선되는 것으로 평가되었다. 강성비, 거더 간격, 경간장의 영향을 받는 긴장력 횡분배 거동은 교량 형태 및 긴장되는 거더 위치에 의해 변화하는 것으로 분석되었으며, 외부 후 긴장력 횡분배 거동을 예측하는 제안식을 도출하여 합리성을 평가 하였다.

핵심용어 : 강합성형교, 외부 후 긴장, 횡분배 거동

1. 서 론

외부 후 긴장 공법은 철근 콘크리트교 보강뿐만 아니라 강합성형교 및 트러스교 보강에 적용 가능한 공법이다(Park, 2005; 정배근, 2000). 강합성형교 외부 후 긴장 보강에 있어서 공용중인 강합성형교의 강성을 합리적으로 파악한 후 필요 긴장력을 산정하게 되며 실제 긴장 과정에서 발생 할 수 있는 구조적 문제를 파악 하여야 한다(박영훈, 2004).

또한, 긴장재 및 긴장력 적용에 따른 강합성형교의 거동에 대한 충분한 연구가 필요하다. 기존 연구에서는 외부 후 긴장에 의해 장대화 된 강합성보의 구조적 안전도 평가와 사용성 문제에 대한 평가가 이루어 졌다(박영훈, 2007).

Miyamoto(2000) 등은 긴장된 강합성보의 고유진동수, 감쇠율의 변화에 대한 연구를 수행하였으며 긴장재의 위치 및 절곡 각도 정도에 따라 고유 진동수의 변화 양상이 변화하

고 감쇠율은 고유 진동수 증가에 비례하여 감소하는 것으로 분석되었다. Park(2005) 등은 실제 공용중인 강합성형교에 있어서 외부 후 긴장 전후의 정동적 거동 변화를 평가하였다.

한편, 도로교 활하중 횡분배와 동일하게 강합성형교 보강을 위한 외부 후 긴장력은 이웃하는 거더로 횡분배 하게 된다. 긴장력 횡분배 거동에 의한 기존 연구에서는 슬래브 강성, 브레이싱 강성, 거더 간격 등을 긴장력 횡분배 거동 영향인자로 평가하고 있으며, 이들 영향인자 중 브레이싱 강성을 긴장력 횡분배 거동의 중요 영향인자로 평가 하고 있다(박용걸, 2002).

한편, 공용중인 강합성형교 강성 평가 결과 낮은 긴장력 만으로도 목적하는 강성을 확보 할 수 있고 보강 시공 여건 상 모든 거더를 외부 후 긴장 하지 못 할 경우, 긴장력 횡분배를 이용한 일부 거더 외부 후 긴장만으로도 보강 대상 교량의 강성 확보를 유도 할 수 있을 것으로 판단되며, 이

*정호원 · 교신저자 · 부산대학 토목공학과 부교수 (E-mail : pyh@bc.ac.kr)

**정호원 · 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 교수 (E-mail : ygpark@snut.ac.kr)

를 위해서는 긴장 과정에서 외부 후 긴장력 횡분배 거동에 대한 정확한 분석과 여러 가지 형태로 긴장된 합성형교의 거동에 명확한 분석이 필요한 것으로 판단된다.

이 논문에서는 외부 긴장재 직선 및 절곡 배치에 있어 시험체의 외측 거더 및 내측 거더 긴장에 따른 긴장력 횡분배 거동을 실험 및 해석적으로 분석하여 일부 거더 외부 후 긴장 만으로의 보강 가능성을 실험적으로 분석하고 긴장력 횡분배 거동 영향인자인 강성비, 거더 간격, 경간장 변화에 따른 강합성형교의 긴장력 횡분배 거동 변화 양상을 해석적으로 분석하였으며, 분석 결과를 종합하여 긴장력 횡분배 거동

을 예측할 수 있는 제안식을 도출하였다.

2. 실험 개요

이 논문에서는 실제 외부 후 긴장에 의해 보강된 설계하중 DB-18, 지간 40 m의 판형교의 제원을 기준으로 기성강 제품을 이용하여 강합성보 높이에 대한 중립축 위치 비율, 중립축과 편심의 비율을 최대한 유사하게 시험체를 제작하였다. 시험체 주형은 기성 H 빔(250×125×6×9(mm), SS400)을 사용하여 제작하였고 슬래브 압축강도는 26.5 MPa으로

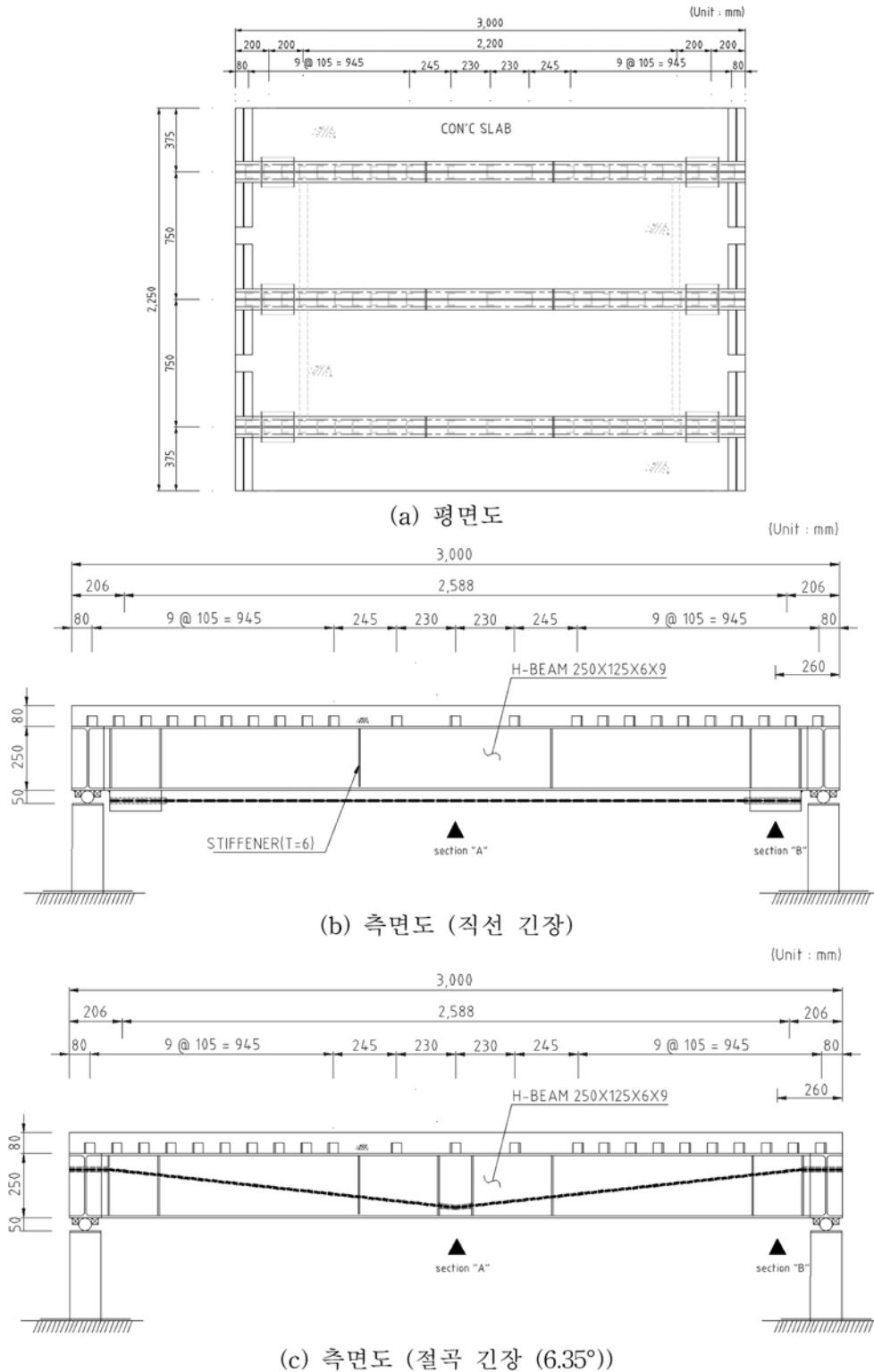


그림 1. 시험체 형상 및 제원

배합 설계하여 압축강도 시험으로 강도를 확인하였다.

한편, 시험체 제작에 있어서 교량폭과 거더 간격은 실험교량과 비율을 맞추어 축소하였으나 지간장에 있어서는 실제 시험체 지간장이 10,000 mm를 상회하게 되어 실험 여건 등에 의해 동일 축소율을 적용하지 못하였다.

시험체 상세, 하중재하 위치 및 측정센서 부착 상세는 그림 1~2와 같으며 하나의 거더에 2개의 긴장재를 이용한 외부 후 긴장 보강을 실시하였으며, 외부 후긴장 보강재로 사용된 긴장재 제원 및 물리적 성질은 표 1과 같다.

표 1에서 N은 보통 긴장재에 대한 값이고 L은 저 릴렉세이션 긴장재에 대한 값이다. 그림 1(c)에서 긴장 효과를 최대화하기 위하여 가능한 최대 각도로 긴장재를 절곡 배치하였다.

그림 2의 단면 A(section "A")에는 슬래브 거동을 분석하기 위하여 콘크리트용 변형률 게이지를 설치하였으며, 중립축 변화, 보강 효과 등을 측정하기 위하여 주형 상하단에 강재용 변형률 게이지를 부착하였다. 그림 2의 단면 B(section "B")에는 긴장 과정에서 전단 보강 정도 및 전단 거동을 측정하기 위하여 로켓 형태의 강재용 변형률 게이지를 설치하였다.

한편, 시험체 제작의 참고가 된 실제 공용중인 교량의 DB-18에 대한 기본 내하율이 식 (1)에서와 같이 1.28로 나타났으며, 대상 교량을 동일 내하율의 DB-24로 보강하기 위한 필요 압축응력은 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$\text{기본 내하율}(DB-18) = \frac{f_a - f_d}{f_{118}(1+i)} = \frac{140\text{MPa} - 83.7\text{MPa}}{36.9\text{MPa}(1+0.187)} = 1.28 \quad (1)$$

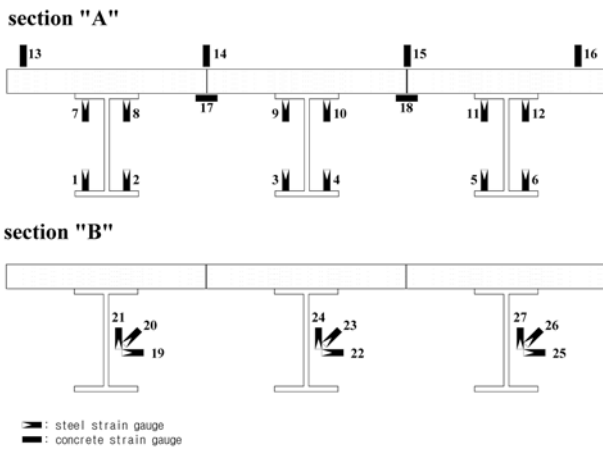


그림 2. 변형률 게이지 부착 위치도

$$\begin{aligned} \text{기본 내하율}(DB-24) &= \frac{(f_a + f_p) - f_d}{f_{124}(1+i)} = \frac{(140\text{MPa} + f_p) - 83.7\text{MPa}}{49.1\text{MPa}(1+0.187)} \\ &= 1.28, \quad f_p = 18.3 \text{ MPa} \quad (2) \end{aligned}$$

f_a = 강재 허용응력, f_p = 도입 압축응력, f_d = 사하중 응력, i = 충격계수(15/(40+경간장(40 m))), f_{118} = DB-18에 의한 활하중 응력, f_{124} = DB-24에 의한 활하중 응력

식 (1)~(2)의 기본 내하율 분석에 있어 허용응력(f_a)은 사용 강재 SS400의 허용응력이고 사하중 응력(f_d) 및 활하중 응력(f)은 그림 4의 유한요소 해석 모델을 이용하여 도출하였다. 사하중 응력은 교량 자체 중량과 포장 중량 그리고 부속물 중량을 포함하여 분석하였으며 활하중 응력은 2차선 재하 동시의 경우에 최대 응력이 발생하는 것으로 나타났다. 시험체 제작 대상인 DB-18 실험교량을 DB-24로 보강함에 있어서 DB-18의 기본 내하율을 유지하면서 DB-24로 보강하는 것으로 하였으며 이에 따른 필요 압축 응력은 18.3 MPa로서 외부 후 긴장에 의해 도입 되어야 하는 것으로 나타났다.

한편, 시험체에 있어서 긴장력 횡분배 거동이 발생하지 않고 외부 후 긴장력을 하나의 합성 거더가 모두 부담한다고 가정하면 긴장재 배치 형태에 따른 적용 가능 최대 긴장력은 표 2와 같다.

표 2에서 최대 긴장력은 슬래브의 파괴 계수를 고려한 것이며 필요 긴장력은 시험체를 DB-24급으로 상향시키기 위해서 지간 중앙부 하부 플랜지에 압축 응력 18.3 MPa를 도입시키기 위한 긴장력이다. 표 2를 살펴보면, 필요 긴장력이 최대 긴장력의 30% 초반 수준인 것으로 나타났다.

표 2의 최대 긴장력 109.9 kN 적용시 긴장재의 허용 인장응력을 고려한 필요 총 긴장재 단면적은 거더 당 91.7 mm²으로 나타났으며, 이 논문에서는 기성 제품의 규격, 긴



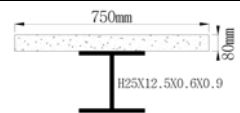
그림 3. 실험 전경

표 1. 긴장재 물성

표준지름 (mm)	공칭단면적 (mm ²)	인장하중 (kN)	0.2%영구 연신율에 대한 하중 (kN)	릴렉세이션 값 (%)	
				N	L
15.2	138.7	266이상	226이상	8.0이하	2.5이하

표 2. 합성보 최대 긴장력 비교

긴장재 배치 형태	최대 긴장력 ^(a) (kN)	필요 긴장력 ^(b) (kN)	(b)/(a) (%)
직선	81.2	26.1	31.6
절곡	109.9	37.8	33.8



장재의 허용 인장응력과 실험 과정의 안전성을 고려하여 각각의 거더에 표 1의 공칭 단면적 138.7 mm² 긴장재 2개씩 적용하여 총 긴장재 단면적을 277.4 mm²로 하였다. 외부 후 긴장력의 도입은 그림 3에서와 같이 긴장 장치 2대를 동시에 사용하여 각각의 긴장재에 대한 긴장력의 차이를 최소화 하였다.

그림 3의 실제 긴장 실험에서 긴장력을 도입하면서 실시간으로 긴장력을 체크 하여 시험체의 탄성 변형에 의한 긴장력 손실을 보완하였고, 긴장재를 노출시켜 마찰에 의한 긴장력 손실 요인을 제거 하였다.

3. 유한요소 해석 모델

시험체(그림 1)의 해석적 거동 연구를 위하여 상용프로그램인 LUSAS를 이용하여 그림 4와 같이 유한요소 해석을 실시하였다(FAE, 2002). 한편, 외부 후 긴장 공법 적용에 있어 보다 정확한 해석을 위하여서는 주형의 면의 변형이 고려되는 유한요소 해석 모델이 합리적이라는 기존의 연구 결과를 고려하여(박용걸, 2002; Park, 2005), 주형은 LUSAS에서 지원되는 쉘 요소(QTS4)를 사용하였으며 슬래브는 판구조의 강성을 합리적으로 반영 할 수 있는 솔리드 요소(HX8M)를 이용하여 주형과 슬래브를 tied mesh 기능을 이용하여 일체화 시켰다.

그림 4에서 긴장재는 압축에 강성을 가지지 않는 케이블 요소를 적용하였으며, 정착단 박스는 쉘 요소를 사용하여 주형 하단과 일체화 시켰으며 그림 1에서와 같이 정착단 전·

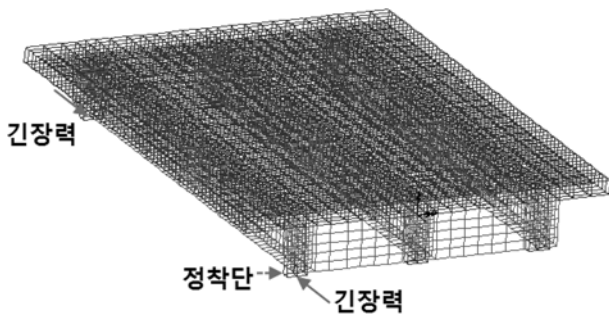


그림 4. 시험체 유한요소해석 모델

후면에 보강재가 설치 된 것을 고려하여 쉘요소를 이용하여 보강재를 모델링 하였다. 한편, 정착단 긴장재 위치에 집중 하중 형태로 긴장력을 주었다. 실 교량에 있어서 외부 후 긴장력 횡분배 영향 인자의 거동을 분석하기 위하여 그림 5에서와 같이 시험체 제작 대상 교량인 강합성형교에 대한 유한요소 해석을 실시하였다.

그림 5의 유한요소해석 모델은 기존 연구에서 실 교량의 긴장력 횡분배 거동을 합리적으로 반영하는 것으로 분석되었으며(박영훈, 2002), 그림 3의 유한요소 해석 모델과 동일하게 주형은 쉘 요소를 사용하였으며 브레이싱은 빔 요소(BSM3), 슬래브는 쉘 요소를 적용하였다.

4. 실험결과 분석

그림 1의 시험체 외·내측 거더에 외부 후 긴장력을 도입 하였으며, 긴장재 직선 및 절곡 배치에 따른 지간 중앙부 하부 플랜지에 도입되는 압축 변형을 그림 6에 정리하였다.

유한요소 해석에 의해 분석된 중립축을 고려할 경우 직선 긴장의 편심 거리가 절곡 긴장의 편심거리 보다 41% 정도 큰 것으로 나타났다. 이에, 동일 긴장력이 주어 질 경우 지간 중앙부 하부 플랜지에 도입되는 압축 변형 정도는 직선 긴장의 경우가 절곡 긴장의 경우 보다 높아진다.

또한, 절곡 긴장에 따른 긴장력의 수직 및 수평 분력화에 의하여 그 차이는 더욱 커지게 되어 그림 6(a)의 외측 거더

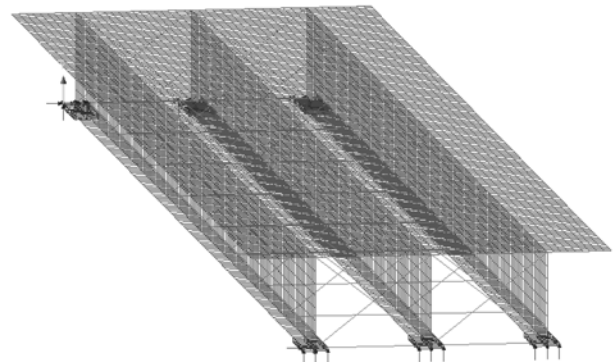
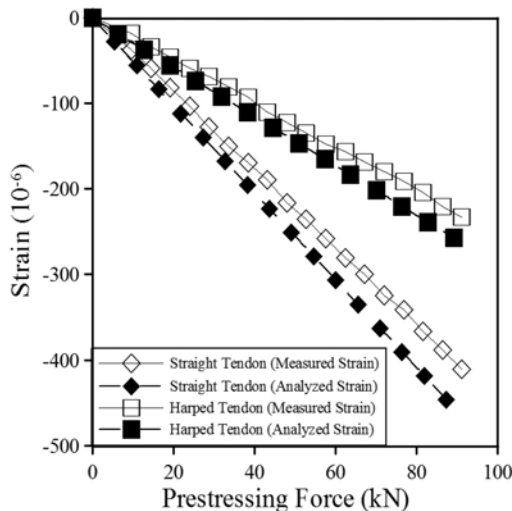
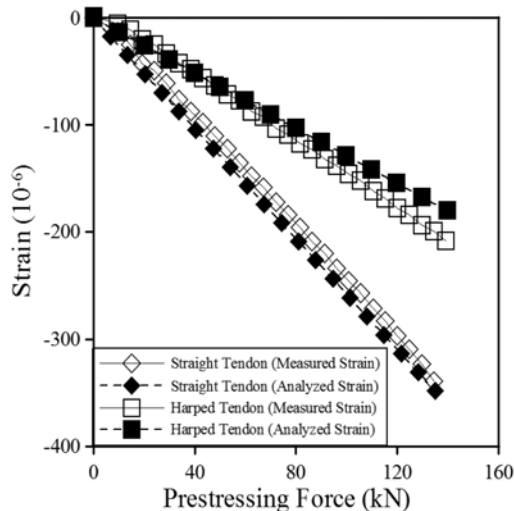


그림 5. 강합성형교 유한요소해석 모델



(a) 외측 거더 긴장시 긴장 거더



(b) 내측 거더 긴장시 긴장 거더

그림 6. 긴장시 지간 중앙부 도입 변형

표 3. 외·내측 거더 긴장시 횡분배율 비교

긴장 형태		구분	측정치 ^(a)			유한요소해석치 ^(b)			(a)/(b) (%)		
			G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3
외측 거더 G1 긴장	직선 긴장 ^(c)		0.8	0.2	0	0.81	0.19	0	98.7	105.2	-
	절곡 긴장 ^(d)		0.75	0.25	0	0.68	0.32	0	110.3	78.1	-
	(c)/(d) (%)		106.7	80.0	-	119.1	59.3	-	-	-	-
내측 거더 G2 긴장	직선 긴장 ^(e)		0.2	0.6	0.2	0.225	0.55	0.225	88.8	109.1	88.8
	절곡 긴장 ^(f)		0.175	0.65	0.175	0.15	0.70	0.15	116.7	92.8	116.7
	(e)/(f) (%)		114.2	92.3	114.2	150.0	78.5	150.0	-	-	-

긴장에 있어서 직선 긴장에 의해 지간 중앙부 하단에 도입되는 압축 변형이 절곡 긴장에 의해 도입되는 압축 변형보다 약 40% 정도 높은 것으로 실험적으로 나타났으며, 그림 6(b)의 내측 거더 긴장에서도 직선 긴장에 의해 도입되는 압축 변형이 절곡 긴장에 의해 도입되는 압축 변형보다 약 70% 정도 높은 것으로 평가 되었다.

한편, 본 연구에서 사용된 긴장 장치는 실제 시공 현장에서 사용되고 있는 시공 장비로서 실험을 위하여 검정을 수행하고 실제 실험에서는 긴장재와 정착단의 마찰을 최소화시키기 위하여 정착단에서 긴장재가 통과하는 부분에 충분한 윤활제를 도포하였으나 그림 6에서 유한요소 해석 결과와 측정치의 미소한 차이가 발생하는 것으로 분석되었다. 외·내측 거더 긴장에 있어서 거더에 도입되는 긴장력 정도를 식 (3)의 횡분배율로 표 3에 나타내었다.

$$\text{횡분배율} = \frac{\text{해당 거더 발생 변형율}}{G1, G2, G3 \text{ 거더 도입 변형율 총합}} \quad (3)$$

표 3에서 외측 거더(G1) 긴장시 긴장되는 외측 거더의 직선 긴장 횡분배율이 절곡 긴장의 횡 분배율 보다 다소 높은 것으로 실험 및 해석적으로 나타나고 있으며, 내측 거더(G2) 긴장시 긴장되는 내측 거더의 절곡 긴장 횡분배율이 직선 긴장의 횡분배율 보다 다소 높은 것으로 분석되었다.

한편, 실제 공용중인 합성형교 긴장력 횡분배 거동을 분석한 기존 연구에서는 브레이싱 강성을 긴장력 횡분배 거동의 주된 영향 인자로 평가하고 있다(박용걸, 2002). 이에, 브레이싱이 긴장력 횡분배 거동에 미치는 정도를 해석적으로 평가하기 위하여 시험체 제원 결정 대상 교량과 시험체의 주형 축소 비율을 고려한 브레이싱 강성을 해석적 분석에 적용하였다.

기존 연구 결과에서 브레이싱을 고려하였을 경우 브레이싱을 고려하지 않은 경우 보다 긴장되는 외측 거더에 횡분배율이 감소하여 인접 내측 거더에 도입되는 긴장력이 증가하는 것으로 분석되어 긴장력 횡분배 거동이 개선되는 것으로 해석적으로 나타났다(박용걸, 2002).

이에, 표 3에서 분석된 긴장력 횡분배 거동과 브레이싱 고려에 의한 긴장력 횡분배 거동 변화 양상을 고려하여 양측 외측 거더 및 내측 거더 긴장시의 도입 긴장력 양상을 그림 7~8에 도식적으로 나타내었다.

그림 7에서 브레이싱 없이 외측 거더(G1, G3) 각각에 긴장력을 도입 하였을 때, 직선 긴장에서는 외측 거더 각각에 총 긴장력의 38%가 도입 되는 것으로 나타났으며 절곡 긴장의 경우에는 총 긴장력의 39%가 외측 거더 각각에 도입

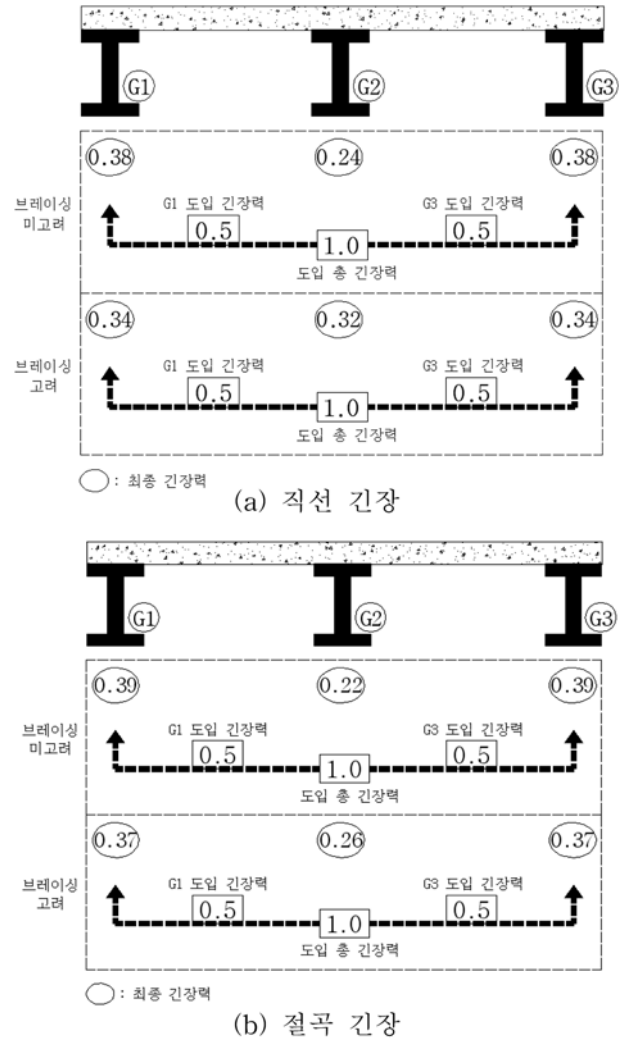


그림 7. 외측 거더 긴장시 도입 긴장력 양상

되는 것으로 분석되었다.

한편, 브레이싱 적용에 의해서는 횡분배 기능이 개선되어 직선 긴장의 경우 외측 거더 각각에 도입된 긴장력은 총 긴장력의 34%로서 브레이싱 미 적용시 보다 10.5% 정도 낮은 긴장력이 외측 거더 각각에 도입 되는 것으로 나타났으며, 절곡 긴장에서는 브레이싱 적용시 외측 거더 각각에 도입된 긴장력은 총 긴장력의 37%로서 브레이싱 미 적용시 보다 5.1% 정도 낮은 긴장력이 외측 거더 각각에 도입되는 것으로 분석되었다.

그림 8에서 브레이싱 미 적용시 내측 거더(G2)에 긴장력을 도입 하였을 경우 직선 긴장에서는 내측 거더에 총 긴장력의 55.0%가 도입되고 절곡 긴장에서는 내측 거더에 총 긴장력의 70.0%가 도입 되는 것으로 나타났다. 한편, 브레

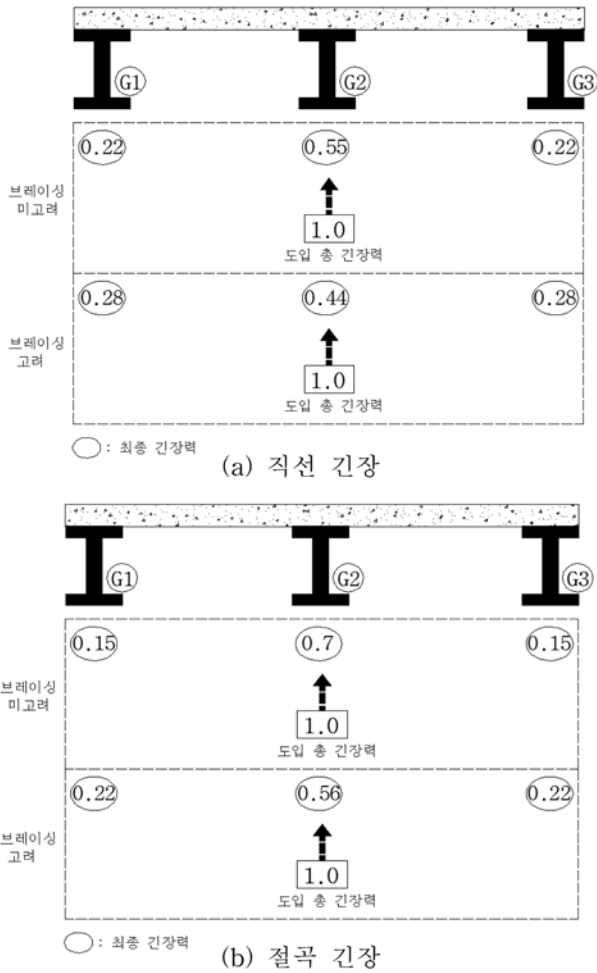


그림 8. 내측 거더 긴장시 도입 긴장력 양상

이상을 적용하였을 경우 횡분배 거동의 개선에 의해 직선 긴장에서는 내측 거더에 도입되는 긴장력이 20.0% 감소하고 절곡 긴장에서도 내측 거더에 도입되는 긴장력이 20.0% 정도 감소하는 것으로 분석되었다.

이에, 실제 공용중인 강합성형교 보강에 있어서 긴장력 횡분배를 이용한 외부 후 긴장 보강을 실시 할 경우 기존 브레이싱 강성을 증대시키거나 브레이싱 신설이 병행 된다면 본 시험체에서 해석적으로 나타난 긴장력 횡분배 거동 개선 효과 보다 높은 개선 효과를 기대 할 수 있을 것으로 판단 된다. 한편, 표 2에서 분석된 필요 긴장력을 도입시키기 긴장력을 브레이싱 유무로 구분하여 표 4에 정리 하였다.

표 4에서 외측 거더 직선 긴장에 있어 브레이싱이 고려되지 않을 경우 외측 거더에 각각 54.3 kN을 도입 하면 내측 거더에 필요 긴장력 26.1 kN이 도입 되어 목적하는 보강이 이루어지는 것으로 나타났으며, 브레이싱 고려시는 외측 거더 각각에 긴장력 40.7 kN의 도입이 필요한 것으로 분석되었다. 내측 거더 긴장에 있어서도 브레이싱 유무에 따라 해당 거더에 각각 긴장력 118.6 kN, 93.2 kN을 도입하면 되는 것으로 나타났다.

외측 거더 절곡 긴장에 있어서는 브레이싱 유무에 따라 각각 긴장력 85.8 kN, 72.6 kN을 도입하면 보강을 위한 필요 긴장력이 내측 거더에 도입 되는 것으로 분석되었으며, 내측 거더 긴장에 있어서는 브레이싱 유무에 따라 각각 긴장력 251.9 kN, 171.7 kN을 내측 거더에 도입하면 보강이 이루어지는 것으로 평가되었다.

표 4의 최종 도입된 긴장력을 살펴보면, 브레이싱 미 고려시의 내측 거더 절곡 긴장을 제외하고는 모든 긴장력이 단일 합성 거더 가능 최대 긴장력(109.9 kN) 이하인 것으로 나타나 실현 가능한 긴장이 것으로 평가 되었다. 한편, 실 교량에 있어 외측 거더 및 내측 거더 직선 긴장에 따른 해석적 긴장력 횡분배 거동을 그림 5의 유한요소 해석 모델을 적용하여 도출하였으며 그 결과를 표 5에 정리하였다.

표 5에서 시험체 결과는 그림 6~7의 직선 긴장에서 브레이싱이 고려된 경우로 실제 실 교량의 유한요소 해석에서 브레이싱을 고려하였다. 표 5를 살펴보면, 외측 거더 긴장에

표 4. 필요 긴장력 도입을 위한 도입 총 긴장력

긴장 형태			구분	도입 총 긴장력(kN)			최종 도입된 긴장력(kN)			단일 합성 거더 가능 최대 긴장력 (kN)
				G1	G2	G3	G1	G2	G3	
직선 긴장	외측 거더 G1·G3 긴장	브레이싱 미고려	54.3	-	54.3	41.2	26.1	41.2	81.2	
		브레이싱 고려	40.7	-	40.7	27.6	26.1	27.6		
	내측 거더 G2 긴장	브레이싱 미고려	-	118.6	-	26.1	65.2	26.1		
		브레이싱 고려		93.2		26.1	41.0	26.1		
절곡 긴장	외측 거더 G1·G3 긴장	브레이싱 미고려	85.8	-	85.8	66.9	37.8	66.9	109.9	
		브레이싱 고려	72.6	-	72.6	53.7	37.8	53.7		
	내측 거더 G2 긴장	브레이싱 미고려	-	251.9	-	37.8	176.3	37.8		
		브레이싱 고려	-	171.7	-	37.8	96.1	37.8		

표 5. 실교량 및 시험체 횡분배를 비교

긴장 형태	구분	실 교량 ^(a)			시험체 ^(b)						(a)-(b) / (a) (%)					
		G1	G2	G3	G1		G2		G3		G1		G2		G3	
					case1	case2	case1	case2	case1	case2	case1	case2	case1	case2	case1	case2
외측 거더 G1, G3 긴장		0.33	0.34	0.33	0.34	0.34	0.32	0.32	0.34	0.34	3.0	3.0	5.9	5.0	3.0	3.0
내측 거더 G2 긴장		0.34	0.32	0.34	0.28	0.33	0.44	0.34	0.28	0.33	17.6	2.9	37.5	6.25	17.6	2.9

case 1 : 시험체 실제 종횡비 고려, case 2 : 실교량 종횡비 고려된 시험체

있어서는 실 교량과 시험체의 결과(case 1)가 거의 동일하나 내측 거더 긴장에서는 최대 37.5% 정도 차이가 발생하는 것으로 나타났으며, 이와 같은 거동은 시험체와 실 교량의 중횡비의 차이에 따른 거동으로 분석된다.

전술한 바와 같이 시험체 제작에 있어서 동일 축소율을 적용할 경우 시험체 지간장이 10,000 mm를 상회하게 되어 시험 여건 등에 의하여 지간장에 있어서는 동일 축소율을 적용하지 못하였다. 이에, 그림 3의 시험체 거동을 반영하는 그림 4의 유한요소해석 모델에 있어서 시험체 제작에 고려된 동일 축소율을 지간장에 적용하여 횡분배율을 분석하였으며 그 결과를 표 5에 'case 2'로 정리하였다. 표 5의 case 2 결과를 살펴보면, 실제 시험체의 결과와는 달리 실 교량과 동일 중횡비를 가질 경우 시험체의 내측 거더 긴장에 따른 횡분배율이 실교량과 거의 동일 한 것으로 나타났다.

5. 긴장력 횡분배 영향인자 분석

전 절에서는 부분 거더 긴장에 의한 보강 타당성을 실험적으로 도출하였다. 기존 공용중인 강합성형교 외부 후 긴장 보강에 있어 특정 거더 긴장에 따른 전체 거더에 도입 되는 긴장력 정도를 예측 할 수 있으면 본 연구에서 목적하는 부분 거더 긴장에 의한 강합성형교 보강 실현에 매우 유용할 것으로 판단된다. 이에, 이 논문에서는 제한된 범위 내에서 영향인자에 따른 긴장력 횡분배 거동을 분석하여 긴장력 횡분배 거동 예측식 도출 가능성을 분석하였다.

기존의 연구에서 긴장력 횡분배 거동에 영향을 미치는 영

표 6. 고려된 조건

구분	거더간격(S, mm)	경간장(L, mm)	강성비(H)*
3주형 강합성형교	1,500~3,500	30,000~45,000	46.7~56.0
5주형 강합성형교	1,500~3,500	30,000~45,000	46.7~56.0

*: 교축방향 강성(Dx)/교축직각 방향 강성(Dy)

향인자로서는 슬래브 강성, 거더 간격, 브레이싱으로 평가되고 있다. 이 논문에서는 슬래브 강성 영향을 고려함에 있어서 교축방향 강성(이하 Dx)과 교축 직각 방향 강성(이하 Dy)의 상호 변화에 따른 횡분배 거동을 고려하였으며, 거더 간격, 경간장의 영향을 해석적으로 평가하였다.

한편, 기존 공용중인 강합성형교 보강에 있어서 브레이싱의 강성을 증가시키기 위해서는 기존 브레이싱 강성을 증가시키거나 기존 브레이싱 사이에 신설 브레이싱을 추가하는 방안이 있으나 시공의 어려움 등의 현실을 고려하여 이 논문에서는 브레이싱 강성 변화에 따른 영향을 고려하지 않았다. 최종적으로 고려된 조건은 표 6과 같다.

표 6의 조건 설정에 있어서 실험적 분석에서 시험체 축소 대상 교량의 제원을 기준으로 하였다. 즉, DB-18, 지간장 40 m, 거더 간격 2.85 m의 강합성형교의 강성비는 46.7로서 강성비 20.0% 변화를 고려하였으며, 거더 간격은 52.6~122.8%, 경간장은 75.0~112.5% 변화를 고려하였으며 그림 5의 해석 모델을 사용하였다.

5.1 강성비 영향 평가

강합성형의 최대 가능 긴장력은 합성보의 강성에 의해 결

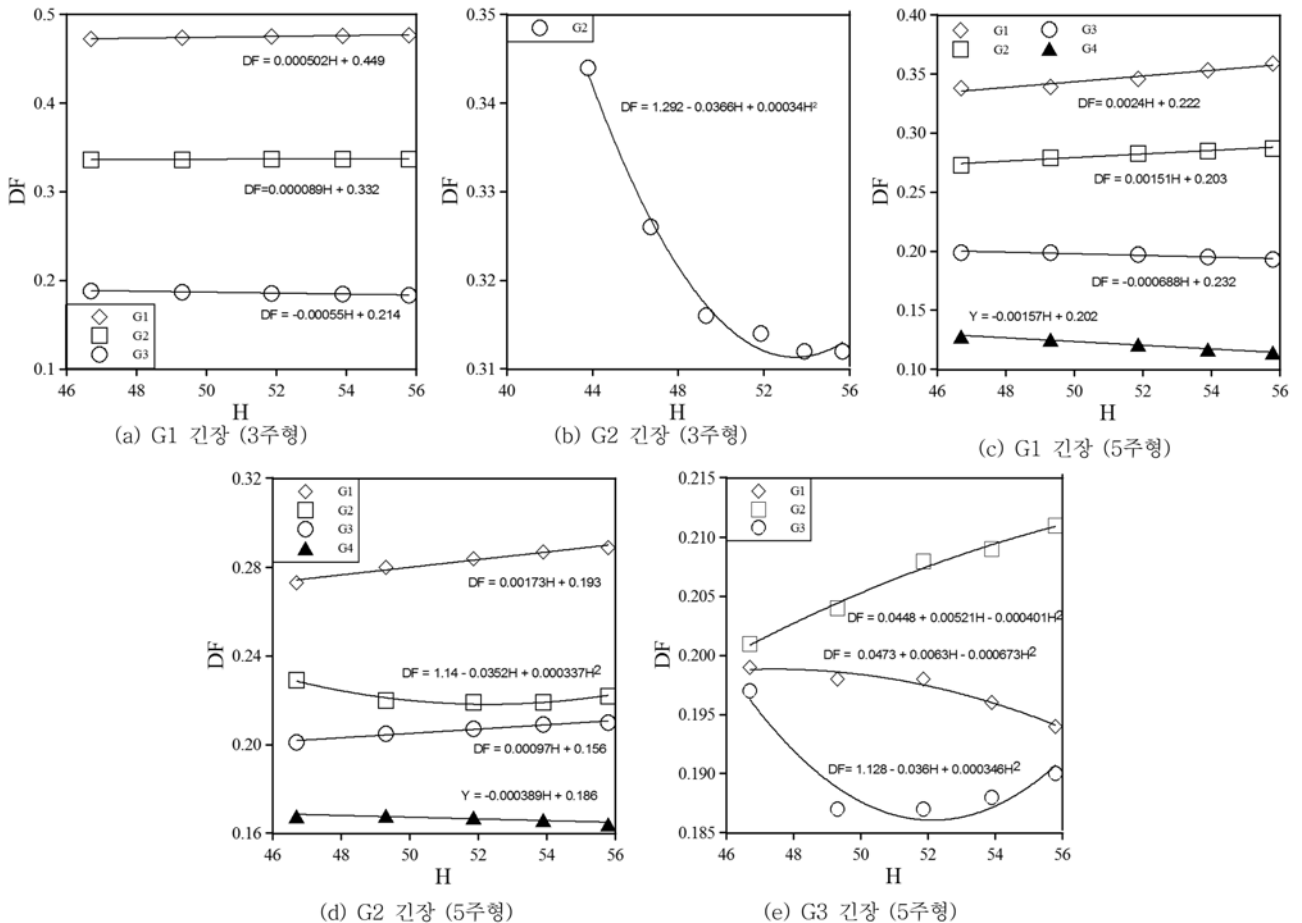


그림 9. 강성비에 따른 긴장력 횡분배율

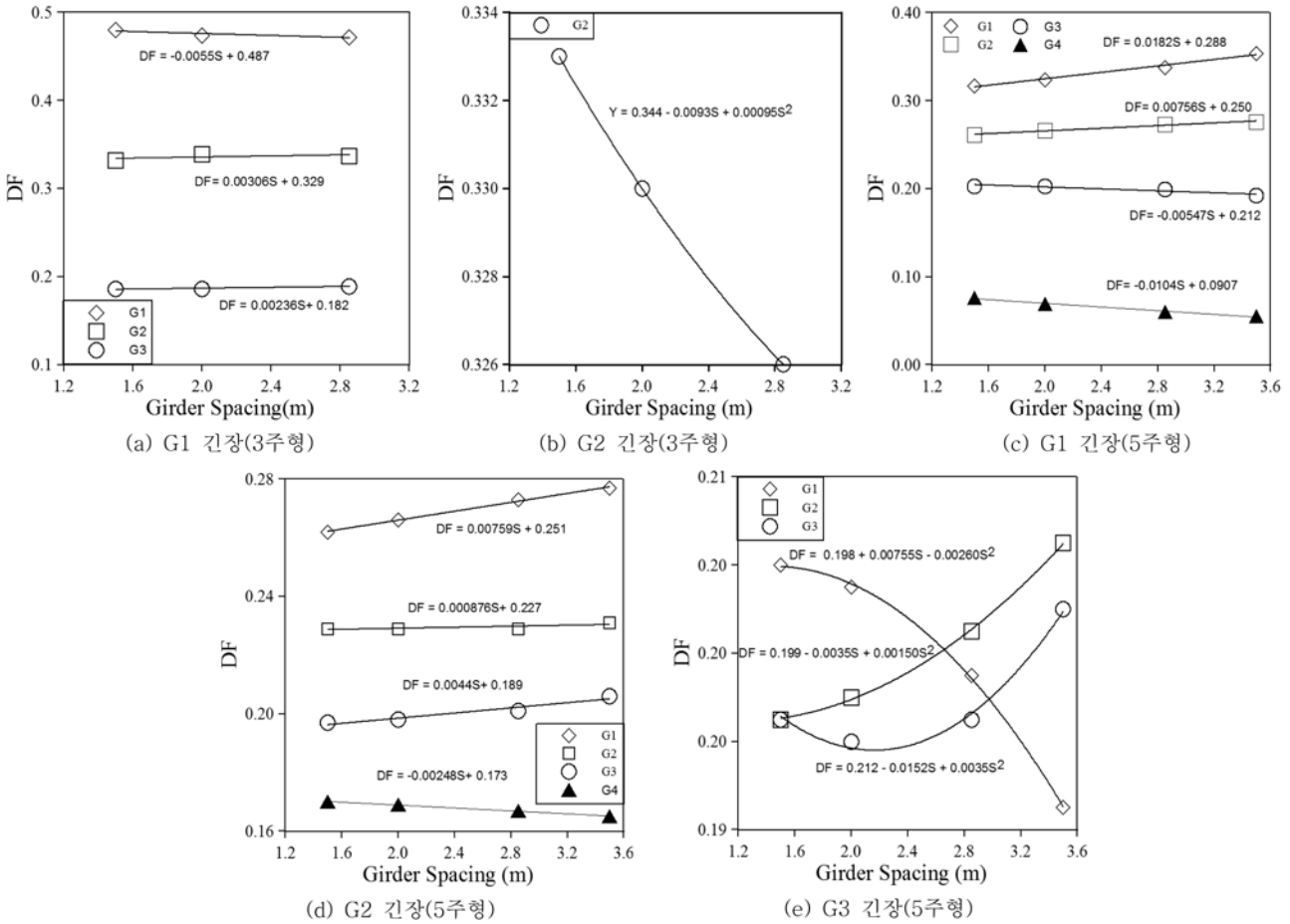


그림 10. 거더 간격에 따른 긴장력 횡분배율

정이 된다. 한편, 부분 긴장에 의한 강합성형교 보강에 있어서 적용 긴장력을 횡분배 시키는 것은 슬래브 강성으로서 가능 최대 긴장력 횡분배 거동을 고려하기 위해서는 합성보의 강성에 대한 슬래브의 강성이 중요한 영향인자가 된다고 볼 수 있다. 이에, 이 논문에서는 식 (4)에 의한 강성비 변화에 따른 긴장력 횡분배 거동을 그림 9에 정리하였다.

$$H = \frac{E_s I_{girder}}{E_c I_{slab}} \quad (4)$$

식 (4)에서 E_s 는 강재의 탄성계수, I_{girder} 는 합성보 이차 모멘트, E_c 는 콘크리트 탄성계수, I_{slab} 는 슬래브의 이차 모멘트이다.

그림 9(a)에서 Dx 강성에 비해 상대적 Dy 강성 감소(강성비(H) 증가)에 의해 긴장력 횡분배 효율이 떨어져 긴장된 외측 거더 (G1)에 상대적으로 높은 긴장력이 도입 되는 것으로 나타났으며, 그림 9(b)의 중앙 거더(G2) 긴장의 경우에는 반대의 경향이 분석되었다.

한편, 그림 9(c)의 5주형 강합성형교 외측 거더(G1) 긴장에 있어서도 강성비 증가에 따라 긴장력 횡분배율이 증가하는 것으로 나타났으며, 내측 거더(G2), 중앙 거더(G3) 긴장 시에는 긴장력 횡분배율이 감소하여 상대적으로 긴장 되는 거더에 낮은 긴장력이 도입 되는 것으로 분석되었다.

5.2 거더 간격 영향 평가

거더 간격이 긴장력 횡분배 거동에 미치는 영향을 해석적으로 평가 하였으며 그 결과를 그림 10에 정리하였다.

그림 10(a)~(e)의 3주형 강합성형교의 경우에는 거더 간격 증가에 따라 긴장 되는 거더의 긴장력이 상대적으로 증가하는 것으로 나타났으나, 5주형 강합성형교는 반대의 경향을 보여 주고 있다.

5.3 경간장 영향 평가

경간장 변화에 따른 긴장력 횡분배 거동을 분석하여 그림 11에 정리 하였으며, 분석 결과 경간장 증가에 의해 긴장력 횡분배 거동이 개선되어 경간장 증가에 따라 긴장되는 거더의 긴장력 횡분배율이 감소하는 것으로 나타났다.

5.4 예측식 개발 및 평가

5.1~5.3절의 분석 결과를 바탕으로 강성비(H), 경간장(S), 거더 간격(L)에 따른 긴장력 횡분배율 예측식을 도출하였으며 그 결과를 표 7에 정리하였다.

표 7의 분석 결과 합리성을 검토하기 위하여 그림 5의 유한요소 해석 모델을 이용하여 특정 거더 긴장에 따른 횡분배율을 분석하고 표 7 적용에 따른 결과와 상호 비교하여 표 8에 정리 하였다.

표 8에서 실제 횡분배 거동을 합리적으로 반영하는 것으로 기존 연구에서 검토된 유한 요소 해석 모델에 의해 분석된 긴장력 횡분배율과 표 7의 예측식에 의한 긴장력 횡분배율이 최대 4% 정도의 차이만을 보여 주고 있어 표 7의 예측식이 실제 긴장력 횡분배 거동을 합리적으로 예측 할 수 있을 것으로 판단된다. 이에, 표 6의 제한된 조건의 강합성형교에 있어서 일부 거더 긴장에 의해 보강을 실시할 경우

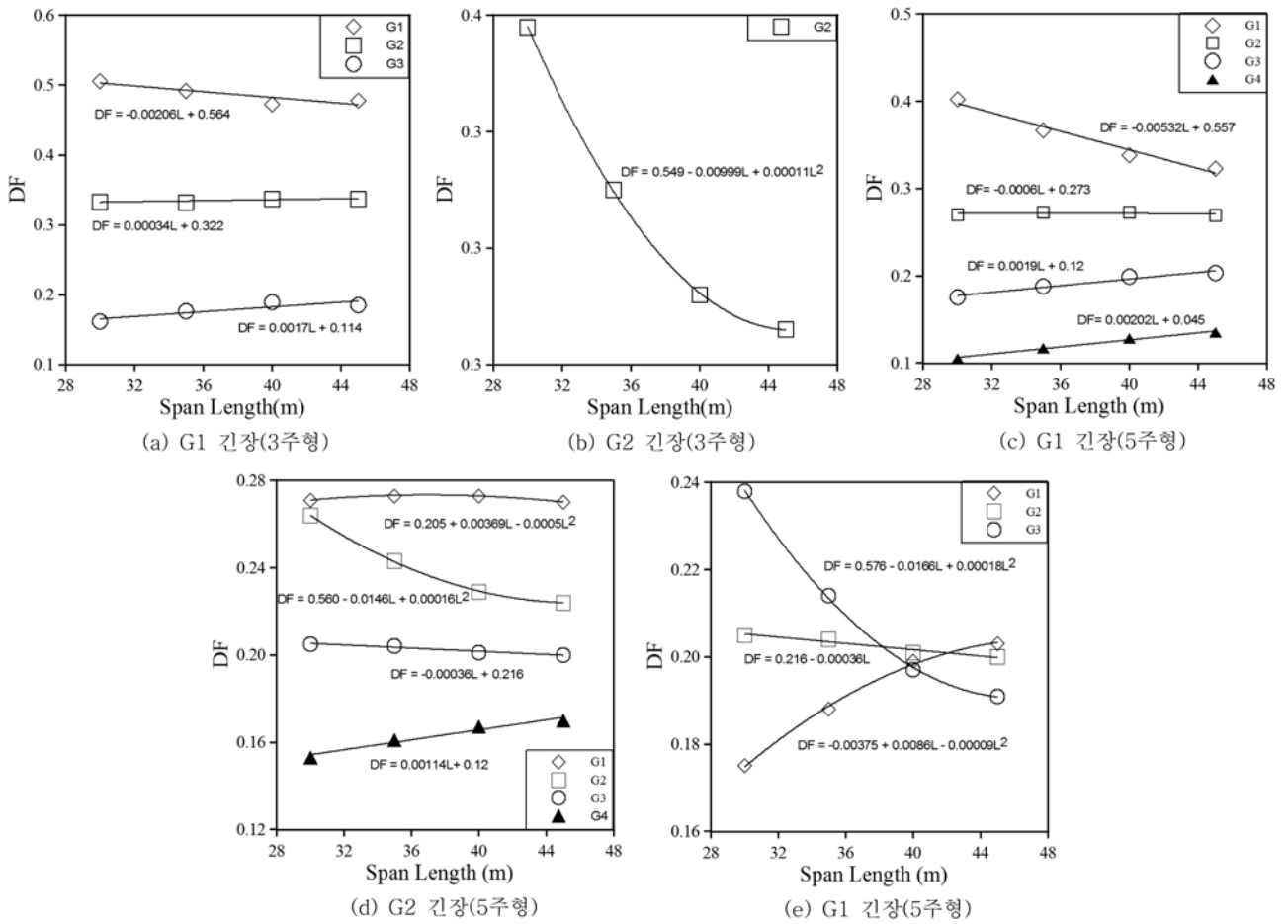


그림 11. 경간장에 따른 긴장력 횡분배율

표 7. 긴장력 횡분배율 예측식

구분	긴장 거더	거더	예측식
3주형 합성형교	G1	G1	$0.00050H - 0.00554S - 0.00206L + 0.5480$
		G2	$0.00009H + 0.00306S + 0.00034L + 0.31040$
		G3	$1 - G1 - G2$
	G2	G1	$(1 - G2)/2$
		G2	$-0.03660H + 0.00034H^2 - 0.00999L + 0.00011L^2 - 0.00513S + 1.53110$
		G3	$(1 - G2)/2$
5주형 합성형교	G1	G1	$0.00242H + 0.01820S - 0.00532L + 0.3850$
		G2	$0.00151H + 0.00750S - 0.00006L + 0.18560$
		G3	$-0.00068H - 0.00540S + 0.00190L + 0.1720$
		G4	$-0.00157H - 0.01040S + 0.00202L + 0.1510$
		G5	$1 - G1 - G2 - G3 - G4$
	G2	G1	$0.00173H + 0.00760S - 0.00050L^2 + 0.00370L + 0.620$
		G2	$0.00033H^2 - 0.03520H + 0.00087S + 0.00016L^2 - 0.01460L + 1.4660$
		G3	$0.00097H + 0.00440S - 0.00036L + 0.1590$
		G4	$-0.00039H - 0.00248S + 0.00114L + 0.1470$
		G5	$1 - G1 - G2 - G3 - G4$
	G3	G1	$(1 - 2G2 - G3)/2$
		G2	$-0.00004H^2 + 0.00521H + 0.00150S^2 - 0.00350S - 0.00036L + 0.0580$
		G3	$0.00034H^2 - 0.0360H + 0.00350S^2 - 0.01520S - 0.00009L^2 + 0.00860L + 0.9430$
		G4	$-0.00004H^2 + 0.00521H + 0.00150S^2 - 0.00350S - 0.00036L + 0.0580$
		G5	$(1 - 2G2 - G3)/2$

H: 강성비, S: 거더 간격(m), L: 경간장(m)

표 8. 긴장력 횡분배율 예측식 평가

구분	긴장 거더	거더	횡분배율		(a)/(b) (%)	
			유한요소 해석	예측식		
3주형 합성형교	G1	G1	0.492	0.485	101.4	△1.4
		G2	0.332	0.333	99.6	▽0.4
		G3	0.175	0.182	96.1	▽3.9
	G2	G1	0.332	0.329	100.9	△0.9
		G2	0.335	0.341	98.2	▽1.8
		G3	0.332	0.329	100.9	△0.9
5주형 합성형교	G1	G1	0.354	0.357	99.2	▽0.8
		G2	0.270	0.270	100.0	-
		G3	0.194	0.192	101.0	△1.0
		G4	0.124	0.122	101.6	△1.6
		G5	0.058	0.057	101.7	△0.9
	G2	G1	0.271	0.271	100.0	-
		G2	0.249	0.242	102.9	△2.9
		G3	0.201	0.201	100.0	-
		G4	0.163	0.163	100.0	-
		G5	0.116	0.121	96.0	▽4.0
	G3	G1	0.197	0.192	102.6	△2.6
		G2	0.201	0.201	97.1	▽2.9
		G3	0.205	0.211	102.0	△2.0
		G4	0.201	0.201	100.0	-
		G5	0.197	0.192	102.6	△2.6

고려 조건; 강성비(H=45.5), 거더 간격(S=2.5m), 경간장 (L=35 m)

표 7의 예측식을 이용하여 긴장력의 횡분배 정도를 파악 할 수 있을 것으로 사료된다.

6. 결 론

본 연구는 강합성형교에 있어서 일부 거더 외부 후 긴장만으로의 보강 가능성을 분석하기 위하여 긴장력 횡분배 거동을 실험 및 해석적으로 평가 하였으며, 제한된 조건에서 강합성형교의 긴장력 횡분배 거동을 예측 할 수 있는 제안식을 도출 하였다. 본 연구에서 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 실제 공용중인 강합성형교를 대상으로 제작된 시험체를 구성하는 거더 중 일부 거더만의 보강에 의해서도 긴장력의 횡분배에 의하여 목적하는 보강이 충분히 가능 한 것으로 실험적으로 분석되었다. 또한, 브레이싱 강성 보강 및 증설 등을 병행하면서 일부 거더 외부 후 긴장 보강을 실시할 경우 소정의 보강 목적을 충분히 달성 할 수 있을 것으로 확인 되었다.
2. 긴장력 횡분배 거동에 영향을 미치는 강성비, 거더 간격, 경간장의 영향을 제한된 범위에서 평가하였으며, 분석 결과 각각의 영향 인자의 변화에 따른 긴장력 횡분배 정도는 교량 형태, 긴장 되는 거더 등에 의해 변화하는 것으로 해석적으로 나타났다.
3. 강성비, 거더 간격, 경간장을 고려하여 제한된 범위에서 긴장력 횡분배 거동 예측식 도출 가능성을 파악하였으며, 긴장력 횡분배 거동 예측식이 추가적인 연구에 의해 개발 될 경우 일부 거더 외부 후 긴장에 의한 강합성형교 보강에 매우 유용할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 박영훈, 박용걸(2004) 공용중인 관형교의 강성을 고려한 외부 후 긴장 보강 설계에 관한 연구. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제24권 제3A호, pp. 445-453.
- 박용걸, 박영훈(2007) 외부 후 긴장에 의해 지간이 증가된 합성보의 안전도 평가. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제27권 제4A호, pp. 461-470.
- 박용걸, 박영훈, 강덕만(2002) 합성형교의 외부 후 긴장력 횡분배 거동에 대한 실험 및 해석적 연구. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제22권 제6A호, pp. 1469-1479.
- 정배근, 한경봉, 박선규(2000) 후긴장을 이용한 트러스교의 보강 방법에 관한 연구. **2000년도 학술발표 논문집**, 대한토목학회, pp. 91-94.
- Park, Y.H., Park, C.W., and Park, Y.G. (2005) Behavior of in-service plate girder bridge strengthened with prestressed external tendons. *Engineering Structures*, Vol. 27, pp 379-386.
- Ayaho Miyamoto, Katsuji Tei, Hideaki Nakamura, John W. Bull. (2000) Behavior of prestressed beam strengthened with external tendon, *ASCE*, Vol. 115, No. 9, pp. 2348-2363.
- LUSAS (2002) *Powerful FE technology for specialist applications Ver. 13.7*. FEA Ltd.

(접수일: 2008.6.12/심사일: 2008.9.19/심사완료일: 2009.10.10)