

초고성능 콘크리트 하이브리드 사장교 바닥판 접합부 철근의 부착 성능에 대한 해석

Analysis on Bond Characteristics of Reinforcements for UHPC Hybrid Cable-Stayed Bridge Deck Joints

선우윤호* · 박성균** · 곽임종*** · 윤영수****

Seonwoo, Yoon Ho · Park, Sung kyun · Kwahk, Im Jong · Yoon, Young Soo

Abstract

Ultra High Performance Concrete (UHPC), which is characterized by its high strength and advanced ductile behavior that is much superior to those of convention concrete, is a useful material to make thinner and longer bridges. The precast segmental construction method utilizing UHPC has been mainly studied because cast-in-place UHPC is very difficult and complicate to be achieved. As a part of those research, the structural performance evaluation of different types of joint connection method for hybrid cable-stayed bridge utilizing UHPC by using nonlinear analyses is performed in this study. The bond stress at joint is obtained by section force analyses for a 600 m cable-stayed bridge deck, and compared with the required bond stress at joint. Analysis results show that the U Type connection and straight type connection resist the highest ultimate load and bond strength, respectively. In addition, all considered joint connection systems satisfy the bond performances at joint required in the final stage of cable-stayed bridge utilizing UHPC.

Keywords : UHPC, bond characteristic, joint connection, nonlinear analysis

요 지

높은 강도와 우수한 연성을 가지는 초고성능 콘크리트(Ultra High Performance Concrete, UHPC)는 교량 부재의 두께 및 자중을 감소시키는데 적합하여, 교량의 장대화, 장경간화에 유리한 재료로 각광 받고 있다. 그러나 초고성능 콘크리트는 타설 과정이 복잡하고 어렵기 때문에 현장 타설을 통한 적용이 어려운 재료이다. 따라서 이에 대한 대안으로 프리캐스트 공법을 활용하는 방안이 중점적으로 연구되고 있다. 본 연구에서는 이와 같은 연구의 일환으로 초고성능 콘크리트의 재료 특성을 고려하여 하이브리드 사장교 바닥판 접합부의 철근 이음방법에 따른 구조적 성능을 평가하였다. 바닥판의 접합부에 적용할 수 있는 철근 이음을 형상에 따라 RC 부재에 적용하고, 이에 대한 비선형 해석을 통해 구조적 성능을 예측하였다. 또한 600 m급 사장교를 선정하여 단면력 해석을 통해 접합부에서 발생하는 부착 응력의 크기를 파악하고, 이를 접합부 형상에 따른 부착 강도의 크기와 비교하여 구조적 성능을 평가하였다. 해석 결과, 접합부 철근의 형상에 따라 U형 루프 타입이 가장 큰 하중을 견딜 수 있고, 직선형 타입이 가장 큰 부착 강도를 발현하는 것으로 예측되었다. 또한, 세 가지 형상의 접합부 철근 모두 초고성능 콘크리트의 사장교의 완성계에서 요구되는 부착 성능을 만족시켰다.

핵심용어 : 초고성능 콘크리트, 부착 특성, 접합부, 비선형 해석

1. 서 론

사장교는 교량에 작용하는 하중의 일부를 케이블의 인장력으로 지탱하여 공간에 작용하는 사하중을 경감시킬 수 있도록 고안된 교량의 형식이다. 1784년 Loscher에 의해 처음으로 제안되었지만, 재료적·구조적 이론과 지식, 기술력의 부족으로 인하여 몇 차례의 붕괴사고를 겪으며 발달이 지체되었다. 그러나 이후 꾸준한 연구와 기술력의 발달을 통해

1956년 Strömsund교를 시작으로 근대적인 형태의 사장교가 본격적으로 등장하였으며, 현재까지 꾸준히 각광을 받아오고 있는 교량 형식이다(대한토목학회, 1987). 사장교는 주재료에 따라 강재 사장교, 콘크리트 사장교, 복합 사장교로 분류된다. 이 중 콘크리트 사장교는 콘크리트의 높은 압축 강도와 우수한 공사비 절감효과, 높은 내구성 등의 장점을 가지고 있어 적용성에 대한 기대가 크다.

교량의 효율성 극대화뿐만 아니라, 교량의 상징성과 미적

*고려대학교 건축사회환경공학부 · 공학석사 (E-mail : dolgoon@hanmail.net)

**COWI KOREA(주) 차장 · 공학석사 (E-mail : skpark@cowi.co.kr)

***정회원 · 한국건설기술연구원 기반시설연구본부 구조교량연구실 수석연구원 · 공학박사 (E-mail : kwakim@kict.re.kr)

****정회원 · 교신저자 · 고려대학교 건축사회환경공학부 교수 · 공학박사 (E-mail : ysyoon@korea.ac.kr)

인 측면도 함께 중요시되고 있는 건설시장에서의 패러다임 변화는 교량의 장대화, 장경간화 추세로 이어지고 있다. 콘크리트 사장교는 경간이 장대해지면 충분한 구조적 성능을 확보하기 위해 부재의 두께를 크게 증가시켜야 하며, 이로 인한 사하중의 증가로 인해 적용성에 한계를 가지고 있다.

최근 개발된 초고성능 콘크리트(Ultra High Performance Concrete, UHPC)는 이러한 콘크리트 사장교의 한계를 극복하기에 적합한 재료로서 부각되고 있다. 초고성능 콘크리트는 강섬유 및 혼화재료를 사용하여 구조부재의 연성 및 강도를 크게 증가시킨 콘크리트로, 150 MPa 이상으로 큰 압축력에 저항할 수 있을 뿐만 아니라, 인장 및 전단에 대한 저항 강도 역시 우수한 재료이다. 초고성능 콘크리트는 일반 강도 콘크리트(NSC)나 고강도 콘크리트(HSC)로 제작된 부재와 비교하였을 때, 주형의 단면 두께를 크게 줄이고도 동일한 강도를 확보하는 것이 가능하다. 이러한 특징으로 인해 부재에 가해지는 자중의 영향을 최소화시킬 수 있어, 교량의 장경간화 추세에 적합한 재료로서 주목받고 있다.

초고성능 콘크리트에 대한 활발한 연구를 통해 이와 같은 우수한 재료적 특성이 검증되고 있음에도 불구하고, 초고성능 콘크리트의 현장 실용화 및 적용은 아직 충분히 이뤄지지 못하고 있다. 설계 및 현장 적용을 위해서는 제안된 설계기준에 따라야 하는데, 초고성능 콘크리트의 적용에 적합한 설계기준을 결정하는데 선행되어야 하는 분야의 연구가 아직 충분하지 않기 때문이다. 현재 국내의 각종 설계기준은 압축강도 40 MPa 이하인 일반강도의 콘크리트에 대한 실험을 바탕으로 제안된 규정으로, 초고성능 콘크리트의 거동 양상에 대한 예측 및 설계 과정의 적용성에 대해서 충분한 신뢰성을 확보하고 있지 못하다(한국도로교통협회, 2005; 한국콘크리트학회, 2007).

그러나 최근에 이르러 초고성능 콘크리트의 적용에 적합한 설계기준을 마련하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 실험적 연구에 대한 보완을 위해 해석적인 연구 역시 활발하게 진행되고 있다. 초고강도 콘크리트의 응력-변형률을 모사한 모델이 장일영 등(1998)에 의해 제안된 바 있으며, 단조증가 하중을 받는 초고강도 철근콘크리트 구조물의 비선형 해석모델에 대한 연구가곽효경 등(2009)에 의해 수행되었다. 또한 양인환 등(2010)은 휨을 받는 초고강도 콘크리트 보의 휨강도에 대한 예측기법의 제안을 위한 연구를 수행하였다.

초고성능 콘크리트는 타설 과정이 복잡하고 양생 과정에서의 관리에 따라 성능의 편차가 크게 발생할 가능성이 큰 재료이기 때문에 현장에서의 적용이 쉽지 않다. 이러한 점을 고려하여, 초고성능 콘크리트를 프리캐스트 세그먼트 공법으로 활용하는 방안을 주로 모색하고 있으며, 이에 대한 연구가 Reichel 등(2004)에 수행되었다. 초고성능 콘크리트와 철근의 부착 성능의 파악과 접합부에서의 구조적 성능 향상을 위한 연구 역시 Weiße와 Holschemacher(2003), Holschemacher 등(2004), 정재형 등(2008)에 의해 활발하게 수행되었다. 현재 콘크리트구조설계기준(2007)에 제시되어 있는 부착 및 이음에 대한 식들은 70 MPa 이하의 콘크리트를 대상으로 한다고 제안되어 있으며, 그 이상의 강도를 갖는 콘크리트에 대한 기준은 제시되어 있지 않다(한국콘크리트학회, 2007).

본 연구는 초고성능 콘크리트의 실용화를 위한 연구의 일환으로, 초고성능 콘크리트 사장교의 시공접합부에 적용할 수 있는 시스템의 제안을 목적으로 수행하였다. 이를 위해 사장교 바닥판의 접합부에 적용할 수 있는 이음 철근의 형상을 RC부재에 적용하고, 해석을 통해 이음 철근의 형상에 따라 나타나는 부착 성능을 평가하는 작업을 수행하였다.

초고성능 콘크리트를 적용한 사장교의 완성계 모델이 극한 하중 상태일 때 사장교의 접합부에서 발생하는 단면력을 해석을 통해 산정하고, 이로부터 접합부에서 요구되는 철근의 부착 강도의 크기를 결정하였다. 이를 상기 과정에서 도출한 이음 철근 형상에 따른 부착 강도와 비교하여 초고성능 콘크리트 사장교에 적용할 이음 철근의 적합성을 평가하였다. 이러한 해석 과정을 위하여 토목구조물의 비선형 상세 해석 소프트웨어인 MIDAS FEA를 사용하여 3차원 구조체를 모델링하고 초고성능 콘크리트의 특성을 재료 모델에 적용하여 해석을 수행하였다.

2. 재료 모델

2.1 초고성능 콘크리트

초고성능 콘크리트의 재료 특성은 한국건설기술연구원의 “초고성능 콘크리트의 표준시방 및 구조설계기준(안)”에 제시되어 있는 값들을 적용하였다. 시방서에서 제안하고 있는 초고성능 콘크리트의 표준 배합구성은 Table 1에 제시되어 있다. 물-결합재비(W/B)는 0.2이며, 시멘트, 실리카흄, 잔골재, 충전재, 강섬유가 사용되었다. 강섬유는 전체 체적에 대해 2%의 부피비로 첨가되었으며, 인장강도 2,500 MPa, 직경 0.2 mm, 길이 13 mm의 재료적 특성을 가진다. 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 반응성 분체로 사용된 실리카흄은 비표면적이 200,000, SiO₂ 함유율이 96% 이상인 것을 사용하였다. 감수제는 폴리칼본산계의 밀도 1.01 g/cm³, 고형성분 30%의 고성능 액상형 감수제를 사용하였다.

배합 설계표에 나타난 것과 같이 초고성능 콘크리트를 타설하고, 타설 직후 24시간 정도 상온에서 초기 습윤 양생을 수행한 후, 2~3일간 90°C에서 증기 양생을 가하여 초고성능 콘크리트 공시체를 제작하였다. 이 공시체의 강도 실험을 수행하여 도출된 결과가 시방서에 제시되어 있으며, 이를 본 해석과정에서 적용한 초고성능 콘크리트의 재료모델에 적용하였다. 초고성능 콘크리트의 재료적 특성은 Table 2에 제시되어 있다. 압축 강도는 180.0 MPa, 인장강도는 12.0 MPa, 탄성계수는 45,000 MPa이며, 포아송비는 일반적으로 0.2의 값을 사용할 것을 제안하고 있다. 제안된 탄성계수와 포아송

Table 1. Mix Proportion of UHPC (Weight Ratio)

W/B	Cement	Silica fume	Sand	Filler	Super plasticizer	Steel fiber
0.2	1.0	0.25	1.1	0.3	0.016	2%

Table 2. Material Properties of UHPC

Compressive strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (MPa)	Poisson's ratio	Shear modulus (MPa)
180.0	12.0	45,000	0.2	18,750

비로부터 전단계수를 산정하여 18,750 MPa의 값을 적용하였다.

콘크리트의 재료 모델은 Total Strain Crack 모델을 적용하였다. Total Strain Crack 모델은 콘크리트의 압축응력-변형을 곡선과 인장응력-변형을 곡선으로 재료 특성이 정의되는 모델로서, 표준시방서에 제안되어 있는 물리적 특성을 적용하기에 적합한 모델이다. 또한 사용한계상태(SLS)와 극한한계상태(ULS)모델에 적합하며 균열과 파괴양상을 확인하는데 적합한 모델로서, 본 해석 과정에서는 극한 하중의 도출과 이음철근 형상에 따른 균열 양상을 표현하는데 적합한 것으로 판단하여 콘크리트 재료 모델로서 선택하였다.

표준시방서에서는 Fig. 1과 Fig. 3에 따라서 변형을 곡선을 제시하고 있으며, 이에 따라 비선형 재료 모델을 해석에 적용하였다. Fig. 1은 탄성 완전소성 곡선으로 나타난 초고성능 콘크리트의 압축응력-변형을 곡선의 기본 모델이다. 부재의 내력으로부터 역산된 강도와 시험체 강도의 차이를 고려

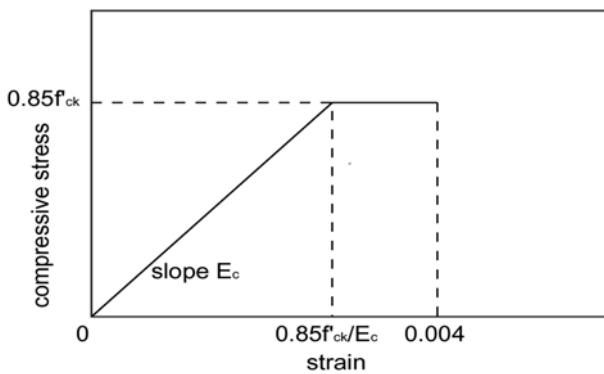


Fig. 1 Compressive Stress-Strain Relationship of UHPC (Basic Model)

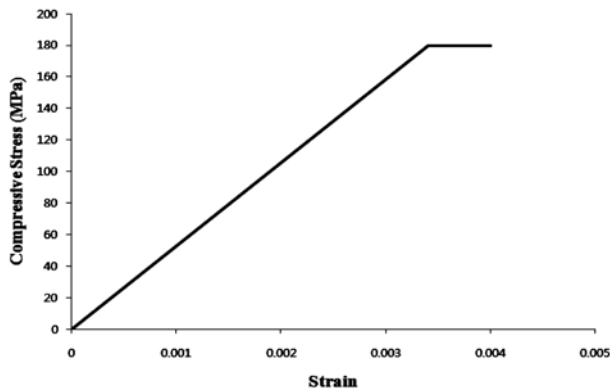


Fig. 2 Compressive Stress-Strain Relationship of UHPC (Application Model)

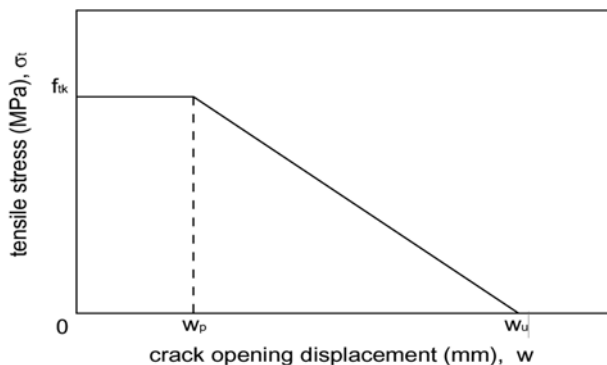


Fig. 3 Tension Softening Curve of UHPC (Basic Model)

하여 압축강도의 0.85배의 값을 이용하도록 제안하고 있으며, 이 지점에 도달하기까지 선형탄성관계를 유지하다가 이후 변형률이 0.004에 도달하기까지 일정한 응력을 유지하는 완전소성 거동을 한다. 초고성능 콘크리트의 압축강도와 탄성계수를 고려하여 적용한 압축응력-변형을 곡선이 Fig. 2에 나타나 있다(조창빈 등, 2009).

초고성능 콘크리트의 인장응력-변형을 곡선은 현재 JSCE에서 제안되어 있으며, 실험을 통해 파악된 초고성능 콘크리트의 설계인장강도와 인장연화 특성을 고려하여 결정된다. 인장연화 특성은 균열 발생 이후 균열이 완전히 개구가 될 때까지의 균열 폭의 변화에 따른 인장응력의 변화 관계를 나타낸 인장연화곡선으로 표현할 수 있으며, Fig. 3에 인장연화곡선의 선형 모델이 제시되어 있다. 이를 Fig. 4에 제시되어 있는 인장응력-변형을 곡선 모델에 적용하여 인장응력-변형을 곡선을 결정할 수 있다. 초고성능 콘크리트의 설계 기준 인장강도는 12.0 MPa, $w_p=0.5$ mm, $w_u=4.3$ mm, 특성 길이 $l_c=110$ mm를 적용하였다(조창빈 등, 2009). 이를 통해 결정된 초고성능 콘크리트의 인장응력-변형을 곡선은 Fig. 5에 나타나 있다.

2.2 보강재

본 연구에서 사용된 보강재는 철근으로 Von Mises Model을 재료모델로 사용하였으며, 철근의 응력-변형을 관계 곡선은 이선형으로 나타나는 완전 탄소성 곡선으로 가정하였다. 철근의 재료적 특성은 항복강도 400 MPa, 탄성계수 200,000 MPa, 포아송비 0.3의 값을 적용하였다.

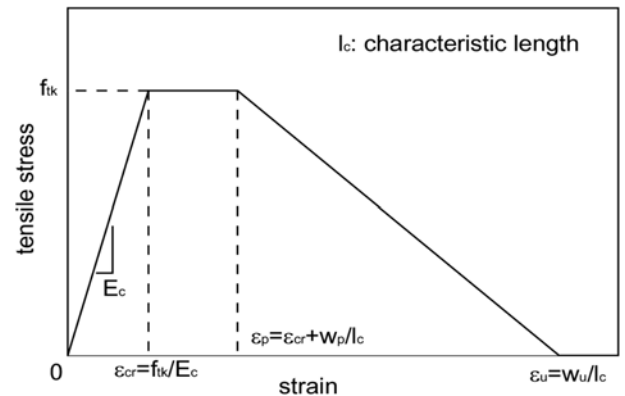


Fig. 4 Tensile Stress-Strain Relationship of UHPC (Basic Model)

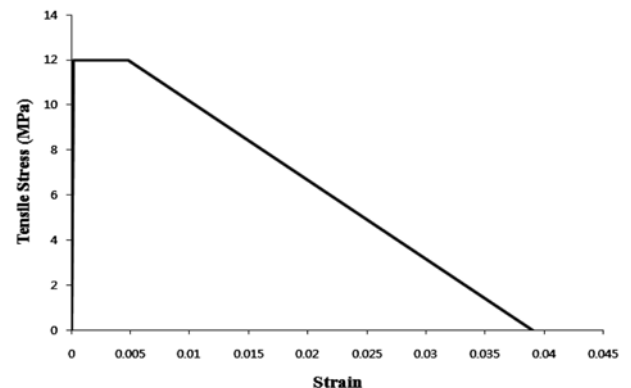


Fig. 5 Tensile Stress-Strain Relationship of UHPC (Application Model)

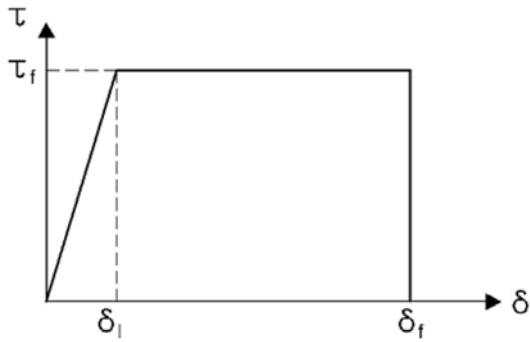


Fig. 6 Bond - Slip Relationship

2.3 부착 특성 모델

초고성능 콘크리트와 철근의 부착면에는 Bond-Slip Model을 적용하였으며, 극한 하중에 도달했을 때 발생하는 부착강도의 크기를 고려하여 구조적 성능을 평가하였다. 따라서 본 해석에 적용한 Bond-Slip 관계 곡선은 부착강도에 도달하기까지는 선형으로 증가하고, 이후에는 부착강도의 크기가 유지되어도 Slip이 증가하는 완전 탄소성 곡선을 적용하였다 (Fig. 6).

3. 구조 해석

3.1 RC 부재 적용 및 구조적 성능 검토

본 연구는 접합부의 이음철근을 RC 부재에 적용하여 해석을 수행하였다. 이음철근의 형상은 프리캐스트 바닥판을 위해 수행된 기존의 접합부 형식에 대한 연구 사례 (Shim 등, 2001; 류형근 등, 2003; 정철현 등, 2008)를 검토하고, 현장에서 주로 적용되고 있는 철근의 형상과 직경을 고려하여 결정하였다. 본 연구에서는 커플러를 이용하는 직선형 배치, 절곡된 L형 배치, 루프 형태의 U형 배치의 세 가지 형태의 접합부 이음철근을 제안하였고, 철근의 직경은 현장에서 사용빈도가 높은 D16, D19, D22의 세 가지를 선택하여 적용하였다. 기존의 연구(정재형 등, 2008)에 의하면 피복두께 역시 부착 성능에 영향을 미치는 것으로 나타났으나, 피복 두께가 40 mm 이상이면 부착강도에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 평가되었다. 본 연구는 부재의 단면 축소를 목표로 하는 초고성능 콘크리트의 목적을 고려하여 UHPC 부재의 두께를 150 mm로 동일하게 적용하였으며, 이 경우 피복 두께가 64~67 mm가 되어 피복 두께의 영향을 고려하기 어려운 것으로 판단하여 본 해석 변수에서 제외하였다. 다만 U형 루프 이음철근의 경우 동일한 피복 두께의 확보를 위해서 D19 철근을 적용한 UHPC 부재의 두께는 200 mm로 결정하였으며, D22 철근은 본 해석에서 제외하였다. 해석 시험체 제원은 Table 3에 나타나 있으며, Figs. 7(a)~7(c)에 철근 형상에 따른 해석 시험체의 구조 모델이 제시되어 있다.

하중의 크기와 철근의 직경, 부착 길이를 부착응력 산정식 (Eq. (1))에 적용하게 되면 하중의 크기에 따른 발생 부착 응력의 크기를 파악할 수 있다(한국콘크리트학회, 2007). 이 식에서 하중의 크기에 부재가 견딜 수 있는 최대 하중을 적용하면, 이로부터 산정되는 부착응력의 크기는 접합부 형상에 따라 부재가 견딜 수 있는 최대부착응력(Eq. (2))을 의미한다.

Table 3. Variables for Structural Performance Evaluation of Joint

Connection method	Diameter of rebar (mm)	Thickness of deck (mm)	Development length (mm)
Straight type	16	150	150
	19	150	150
	22	150	150
L-type	16	150	380
	19	150	380
	22	150	380
U-type	16	150	424
	19	200	424

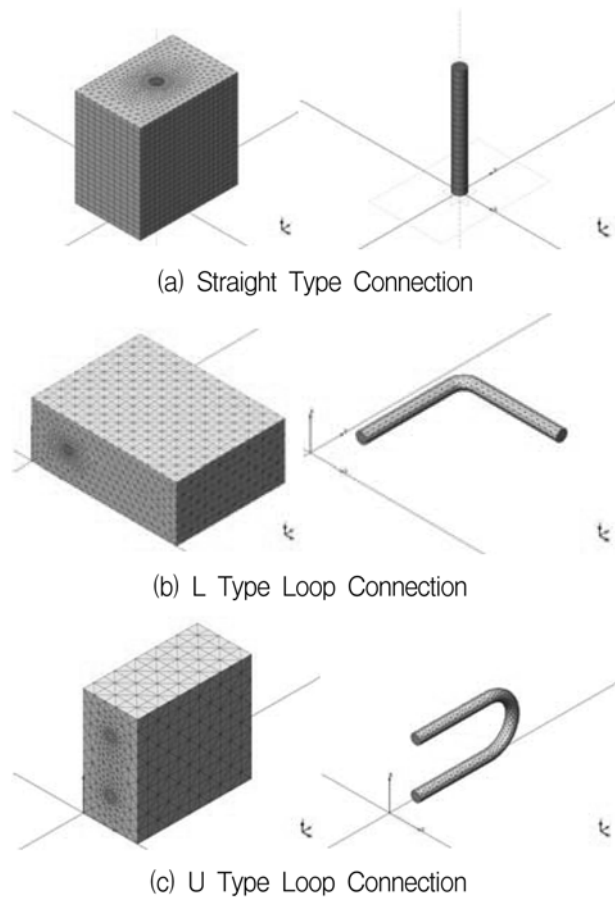


Fig. 7 Analysis Models for Joint Connection Type

$$\tau(\pi d_s)l_b = A_s f_s = \frac{\pi d_s^2}{4} f_s = P \quad (1)$$

$$\therefore \tau = \frac{d_s f_s}{4 l_b} = \frac{P}{\pi d_s l_b}$$

if, $P = P_u$, $\tau = \tau_{max}$ (2)

본 연구의 해석 과정에서, 모든 해석 대상 부재에서 콘크리트에 발생한 인장응력의 크기가 인장강도에 도달하였을 때 부재의 접합부에서 파괴가 발생하면서 해석이 종료되었다. 또한 철근에 발생한 응력을 검토한 결과, 모두 항복강도에 도달하기 이전에 파괴가 발생한 것을 확인할 수 있었다. 이를 고려하여 본 해석과정이 탄성 범위내에서 진행되었다고 판단하였으며, 따라서 해석을 통해 도출된 최대 하중을 식

Table 4. Bond Characteristics by Joint Method

Connection method	Diameter of rebar (mm)	Development length (mm)	Ultimate load (kN)	Bond strength (MPa)
Straight type	16	150	139.3	18.5
	19	150	226.8	25.3
	22	150	291.4	28.1
L-type	16	380	139.3	7.3
	19	380	196.5	8.7
	22	380	263.4	10.0
U-type	16	424	142.7	3.3
	19	424	263.4	5.2

(1)과 식 (2)에 적용하여, 이음철근의 형상에 따른 부착강도를 결정하였다.

해석 결과는 Table 4와 Figs. 8~9에 나타나있다. 철근의 직경에 따라 나타나는 결과를 비교하였을 때, 철근의 직경이 증가할수록 UHPC 부재에 파괴를 발생시키는 하중의 크기가 점차 증가하는 것을 Fig. 8에서 확인할 수 있다. 또한 이를 식 (1)에 적용하여 부착강도를 산정한 결과, 마찬가지로 철근 직경이 증가함에 따라서 부착강도 역시 증가하는 것을 Fig. 9에서 확인할 수 있다.

해석결과를 접합부 이음철근의 형상에 따라 비교하면, 동일한 직경의 이음철근 중에서 U형 루프타입의 이음철근을 적용하였을 때 가장 큰 하중을 견디는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 식 (1)에 적용하여 산정한 부착강도를 비교하면, 직선형 연결에서 가장 높은 부착강도를 보이고 있는 반면, U형 루프 철근이 가장 낮은 부착강도를 보였다. 직선형 연결의 경우 갈고리 효과를 받을 수 없기 때문에, 가해지는 하중에 대한 저항을 하중 방향을 따라 발생하는 부착 응력으로만 저항해야 하고, 접촉면의 면적이 다른 두 형상의 이음부 철근에 비해서 작기 때문에 부착강도가 가장 크게 나타난 것으로 판단된다.

3.2 사장교 해석을 통한 연결부 구조 성능 평가

상기 과정을 통해 접합부 이음철근의 부착강도를 고려하여

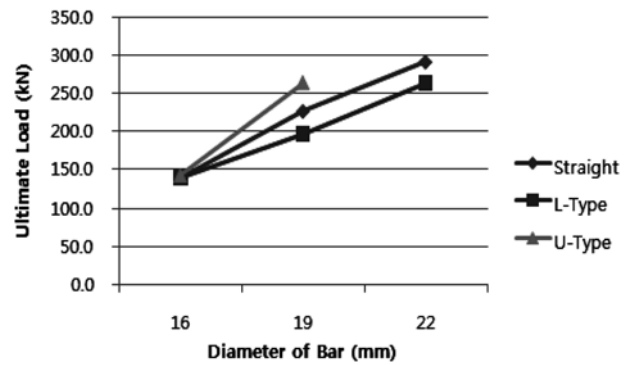


Fig. 8 Ultimate Load versus Reinforcement Diameter Relationship

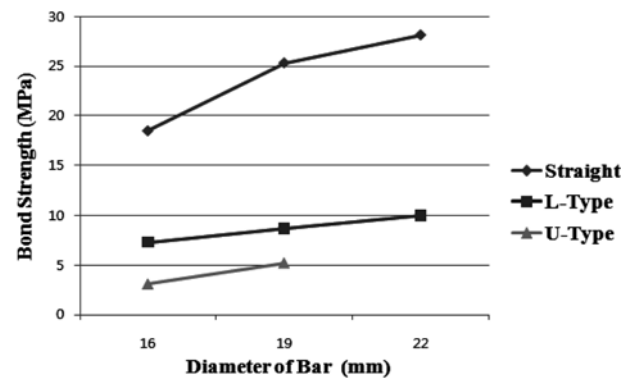


Fig. 9 Bond Strength versus Reinforcement Diameter Relationship

접합부에 적용하기에 적합한지 평가하기 위해, 본 연구 과정에서는 사장교를 선정하여 완성계에 대한 단면력 해석을 통해 접합부의 철근 부착면에서 필요로 하는 부착강도를 도출하였다.

본 해석을 위해서 선정한 교량은 600 m급 하이브리드 사장교로, Fig. 10에 해석 단면 형상이 나타나있다. 해당 사장교에 대해서 바닥판과 거더의 연결부에 대해서 종방향, 횡방향, 가로보에 대한 해석을 실시하여 접합부에 작용하는 축력과 모멘트의 크기를 구하고, 이를 식 (2)에 적용하여 접합부의 철근 부착면에 발생하는 응력을 산정하였다. 이는 곧 접합부의 부착면에서 요구되는 필요부착강도를 의미한다. Table 5에 설계 단면력 해석 조건이 제시되어 있다.

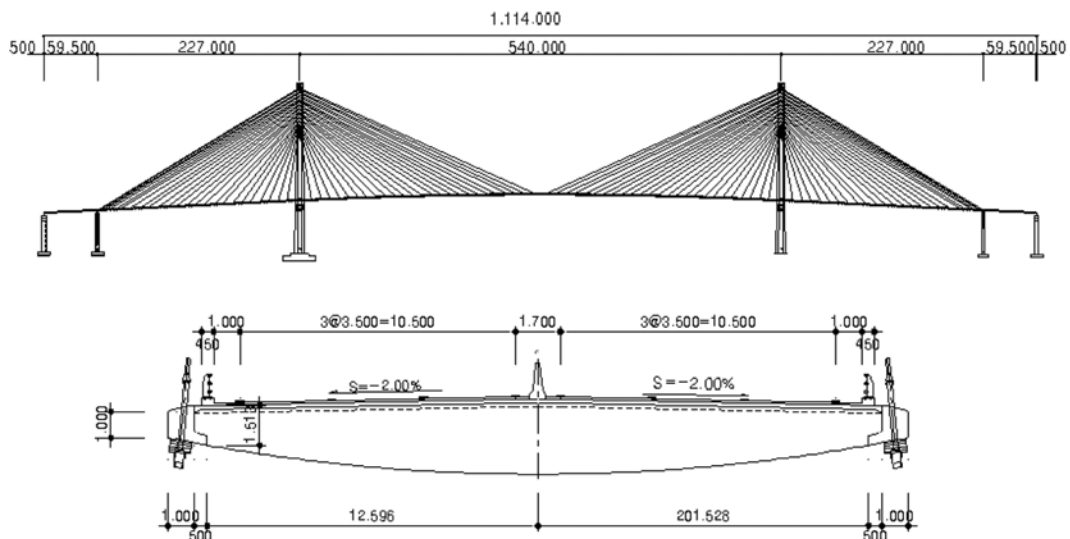


Fig. 10 Analysis Model: Cable-Stayed Bridge

Table 5. Analysis Condition

Analysis method	Sectional force	Location
Longitudinal analysis	Moment, Axial force	Deck & deck connection
Transverse analysis	Moment	Deck & girder connection

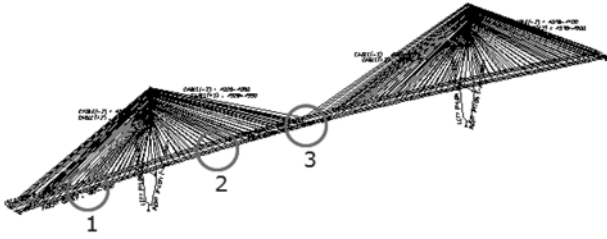


Fig. 11 Sections for Longitudinal Analysis

종방향 해석은 바닥판과 바닥판의 연결부에서 발생하는 종방향 모멘트와 축력을 산정하였으며, Fig. 11에 나타나 있는 세 구간의 접합부에 대한 해석을 수행하였다. 거더와 주탑은 빔 요소, 케이블은 응력과 변형률의 일방향성을 고려하여 트러스 요소로 모델링하였다. 가설단계를 고려하지 않은 초기치 해석 결과를 바탕으로 공용 중인 하중을 재하하였고, 초기치의 해석은 구조물의 지중으로부터 케이블의 장력과 단면적이 결정되었으며, 활하중 등의 추가하중으로부터 허용응력을 만족시키기 위해 종방향 강연선을 배치하였다. 해석 과정을 통해 도출된 결과를 식 (3)과 식 (4)를 통해 모멘트와 축력에 의해 발생하는 철근의 응력을 산정하였다.

- 모멘트에 의한 철근의 응력 산정식

$$f_s = M/[A_s \times (d-x/3)]$$

$$x = -nA_s/b + nA_s/b \times \sqrt{1+bd/nA_s} \quad (3)$$

- 축력에 의한 철근의 응력 산정식

$$f_s = nP/A_c1 + nA_s/A_c \quad (4)$$

해당 구간에서는 철근이 상연에 배치되므로, 이를 고려하여 해당 부분에 발생하는 부모멘트에 대해서 응력을 산정하였다. 해석 결과는 Table 6에 나타나 있다. 축력에 의해 발생하는 응력과 모멘트에 의해 발생하는 응력은 서로 반대방향으로 작용하며, 이를 고려하여 발생하는 총 응력의 크기를 축력에 의한 응력과 모멘트에 의한 응력의 합으로부터 산정하였으며 1 구간에서 364 MPa로 가장 큰 응력이 발생하였다.

횡방향 해석은 바닥판과 거더 간의 연결부에 대해서 4개의 해석 구간을 결정하여, 계수하중에 의해서 발생하는 횡방향 단면 모멘트를 최대 정모멘트와 최대 부모멘트를 각각 산정하여 이로부터 발생하는 철근의 응력을 계산하였다. 해석 모델은 판 요소를 사용하여 종방향으로 24 m를 모델링하였고, 경계 조건은 케이블 정착부를 고정으로 하여, 단면의 양단은 종방향으로 구속하였다. 하중은 DB-24의 후륜 하중을 집지압을 고려하여 4대를 재하 하였다. 해석을 수행한 단면과 이를 모델링한 형상은 Figs. 12(a)~(b)에 제시되어 있다.

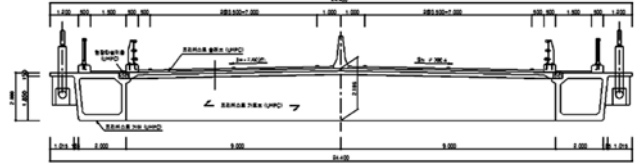
횡방향 해석에 의한 결과는 Table 7에 나타나 있다. 횡방향 모멘트에 의해서 나타나는 응력은 정모멘트에 의해서 3

Table 6. Stress by Longitudinal Analysis

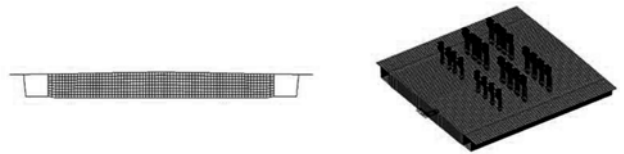
Section	Axial force (kN)	Stress* (MPa)	Moment (kNm)	Stress** (MPa)	Total stress (MPa)
1	-76,600	-96	-10,800	460	364
2	-94,400	-118	-8,700	434	316
3	-61,150	-77	-9,900	422	345

*Stress caused by axial force (calculated by equation (5))

**Stress caused by moment (calculated by equation (4))



(a) Section for Transverse Analysis



(b) Model for Transverse Analysis

Fig. 12 Section and Model for Transverse Analysis

Table 7. Stress by Transverse Analysis

Section	Maximum positive moment (kNm)	Stress* (MPa)	Maximum Negative Moment (kNm)	Stress** (MPa)
1	1.6	8	-46.8	237
2	38.4	195	-39.9	202
3	49.5	251	-18.2	92
4	17.4	88	-4.9	25

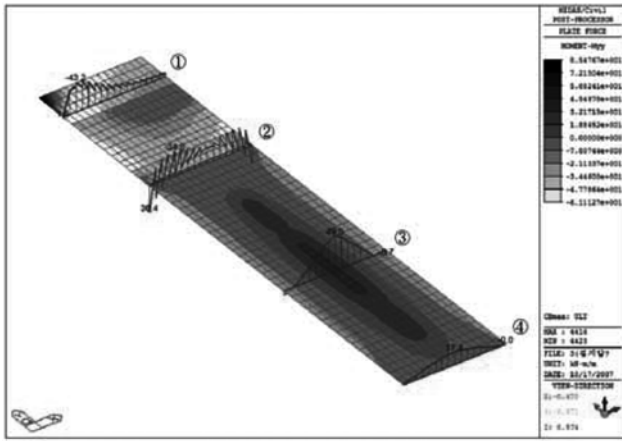
*Stress caused by maximum positive moment

**Stress caused by maximum negative moment

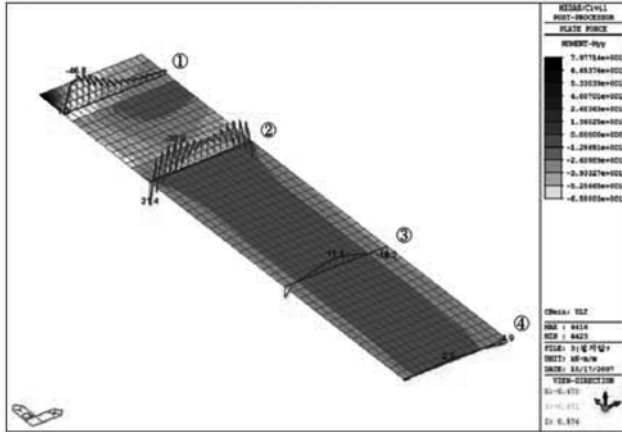
구간에 발생하는 응력이 가장 크게 나타났습니다. Figs. 13(a)~(b)는 횡방향 해석에 의한 정모멘트와 부모멘트 선도를 나타낸 결과입니다.

단면력 해석을 통해 도출된 철근의 응력으로부터 식 (1)을 통해 접합부에 위치하는 철근의 부착면에 발생하는 응력의 크기를 산정할 수 있으며, 이를 접합부에서 요구하는 철근 부착면의 필요응력(t_a)으로 볼 수 있다. 이를 철근 직경과 부착 길이에 따라서 산정한 결과가 Table 8에 제시되어 있다. 바닥판과 바닥판의 접합부에서 필요한 부착응력보다 바닥판과 거더 간의 접합부에서 필요한 부착응력이 더욱 크게 나타나고 있으며, 동일한 철근의 발생 응력 하에서 부착 길이의 증가에 따라서 필요한 부착응력의 크기가 작게 나타나고 있다.

이를 접합부 형상에 따라 부착강도의 크기와 비교한 결과는 Table 9에 제시되어 있다. 바닥판과 바닥판의 연결에는 직선형과 L형 루프 연결을 적용하였고, 바닥판과 거더의 연결에는 U형 연결을 적용하였으며, 부착 길이에 따라서 필요 부착응력을 재산정하여 RC부재에서 검토된 접합부 철근 형



(a) Positive Moment



(b) Negative Moment

Fig. 13 Results of Transverse Analysis

Table 8. Required Stress at Connection

Location	Diameter of rebar (mm)	Stress at reinforcement (MPa)	t_a (MPa)		
			100 mm bonding	150 mm bonding	200 mm bonding
Deck - Deck	16	364	14.5	9.6	7.2
	19		17.4	11.6	8.7
	22		20.1	13.4	10.1
Deck - Girder	16	251	10.0	6.6	5.0
	19		12.0	8.0	6.0
	22		13.9	9.3	6.9

Table 9. Stress at Connection by Connection Method

Connection method	Diameter of rebar (mm)	Development length (mm)	t_a (MPa)	t_b (MPa)
Straight type	16	150	9.6	18.5
	19	150	11.6	25.3
	22	150	13.4	28.1
L-type	16	380	3.8	7.3
	19	380	4.6	8.7
	22	380	5.3	10.0
U-type	16	424	2.4	3.3
	19	424	2.8	5.2

t_a : Required bond stress for bonding face of reinforcement at connection

t_b : Bond strength by connection method

상에 따른 부착강도(t_b)와 비교하여 구조적 성능을 만족시키는데 대해 평가하였다. 해석 결과, 접합부 형상에 따른 부착강도(t_b)의 크기가 접합부의 철근 부착면에서 필요로 하는 부착응력(t_a)보다 큰 것으로 판단된다.

4. 결 론

1. UHPC를 프리캐스트 세그먼트 공법에 적용하기 위해서 접합부의 철근 배치안을 제시하고 비선형 해석을 통해 부착 성능을 평가하였다. 해석 결과 동일한 직경의 철근을 적용하였을 때, 가장 큰 하중을 견딜 수 있는 접합부 철근은 U형 배치이고, L형 배치의 경우 견딜 수 있는 하중의 크기가 가장 작게 나타났다.
2. 접합부의 철근 배치 형상에 따라 발생하는 부착강도의 크기를 비교 검토한 결과, 직선형 철근 배치의 경우 부착강도가 가장 높게 나타났고, U형 배치를 하였을 때 가장 작은 부착강도가 나타났다.
3. 철근의 직경이 증가함에 따라서 견딜 수 있는 하중의 크기와 부착강도의 크기가 모두 증가하는 경향을 보이고 있다. U형 배치의 경우는 철근 직경에 따라 견딜 수 있는 하중의 크기 증가 효과가 더욱 크게 나타났으나, 충분한 피복두께의 확보가 어려운 단점이 있어서 적용할 수 있는 철근의 직경이 제한된다.
4. 단면력 해석을 통해 600 m급 사장교의 세그먼트 접합부 철근 부착면에서 발생하는 극한 응력의 크기를 도출하였다. 이로부터 접합부의 부착면에서 필요로 하는 응력의 크기를 산정하여, 접합부 철근의 형상에 따른 부착강도와 비교 검토하였으며, 그 결과 제안된 접합부 철근은 사장교의 접합부에서 필요로 하는 구조적 성능을 충분히 만족시키는 것으로 판단되었다.

감사의 글

이 논문은 한국건설기술연구원 주요사업인 “하이브리드 사장교 설계 및 시공시스템 기술 개발”과제의 연구비 지원으로 이루어졌음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 곽효경, 나채국, 김성욱, 강수태(2009) 초고강도 강섬유보강 철근 콘크리트의 인장강화 모델 및 적용. *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 제29권 제4A호, pp. 267-279.
- 류형근, 장승필, 정철현, 김영진(2003) 루프 이음 프리캐스트 합성형 교량 바닥판의 적용. *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 제23권 제3A호, pp. 479-486.
- 양인환, 조창빈(2010) 강섬유 보강 초고강도 콘크리트 보의 휨강도 예측기법의 제안. *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 제30권 제3A호, pp. 317-328.
- 장일영, 박훈규, 이상화, 윤영수(1998) 초고강도 콘크리트의 응력-변형률 모델 제안. *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 제18권 제1-1호, pp. 41-47.
- 정재형, 강훈, 안중문, 신성우(2008) 150 MPa 초고성능 콘크리트와 철근의 부착 응력 평가. *대한건축학회논문집 구조계*, 대한건축학회, 제24권 12호, pp. 43-50.
- 정재형, 강훈, 안중문, 신성우(2008) 피복두께에 따른 초고강도

- 콘크리트에 매립된 철근의 부착특성. **대한건축학회논문집 구조계**, 대한건축학회, 제24권 10호, pp. 45-52.
- 정철현, 성열은, 현병하, 박세진(2008) 루프이음을 갖는 반단면 프리캐스트 바닥판 이음부 성능에 대한 실험적 연구. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권 제4A호, pp. 581-590.
- 황학주(1987) [특집:사장교] 1. 사장교의 연혁과 변천, **대한토목학회지**, 대한토목학회, Vol. 35, No. 3. pp. 7-18.
- 한국도로교통협회(2005) **도로교설계기준**.
- 한국콘크리트학회(2007) **콘크리트구조설계기준**.
- 조창빈 등(2009), **초고성능 콘크리트 활용 원천기술 개발: Super bridge 200 2차년도 보고서(부록 2: 초고성능 콘크리트 표준 시방 및 구조설계기준(안))**. 연구보고서, 한국건설기술연구원.
- (주)MIDAS IT (2010), **MIDAS Manual**.
- ACI Committee 318 (2008) *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, ACI 318-08 and ACI 318R-08, Farmington Hill, Mich.
- Holschemacher, K., Weiße, and Klotz, S. (2004) Bond of reinforcement in ultra high strength concrete. *Proceedings of International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, pp. 375-388.
- Reichel, M., Sparowitz, L., and Freytag, B. (2004) UHPC-segmental bridges material-based design principles and adapted construction methods. *Proceedings of International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, pp. 779-786.
- Shim, C.-S., Choi, K.-Y., and Chang, S.-P. (2001) Design of transverse joints in composite bridges with precast decks. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 17-27.
- Weiße, D. and Holschemacher, K. (2003) Some aspects about the bond of reinforcement in ultra high strength concrete. *Leipzig Annual Civil Engineering Report (LACER)*, No.8, University of Leipzig, Germany, pp. 251-263.

(접수일: 2010.7.9/심사일: 2010.11.21/심사완료일: 2011.1.20)