

해석적 방법에 의한 강섬유 보강 초고성능 콘크리트(UHPFRC) 휨부재의 강도 평가

박우진 · 황훈희*

서일대학교 토목과 · *한국도로교통협회 기술국 구조교량팀
(2013. 1. 4. 접수 / 2013. 4. 10. 채택)

Strength Evaluation of UHPFRC Flexural Member by Analytical Method

Woo Jin Park · Hoon Hee Hwang*

Department of Civil Engineering, Seoil University

*Structure & Bridge Team, Technical Research Division, Korea Road & Transportation Association

(Received January 4, 2013 / Accepted April 10, 2013)

Abstract : The analytical model was constituted to evaluate the flexural strength of UHPFRC(ultra high performance fiber reinforced concrete) member. The analytical approach was attempted to study the effect of the joint and the result compared with the experimental study to verify the analytical model. The calculated value tends to underestimate about 23%~25% in comparison with the experimental result of the jointed test member because the bond stress between precast UHPFRC and cast-in-place UHPFRC surface is not considered in the analytical model. But in the case of the continuous test member, the analytical model provides reasonable results for the flexural strength of UHPFRC member.

Key Words : ultra high performance concrete, UHPFRC, analytical model, lap-spliced joint, flexural strength

1. 서론

강섬유 보강 초고성능 콘크리트(Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete, 이하 UHPFRC)의 적용은 기존 콘크리트 구조물이 가지는 한계를 극복하고 혁신적인 설계와 시공을 가능하게 할 수 있는 대안으로 많은 기대를 받고 있다. 최근에는 UHPFRC를 프리캐스트 공법에 적용하기 위하여 이음부와 관련된 연구가 활발하게 진행되고 있다.

전단압축, 압축, 인장이 작용하는 이음부에 대하여 UHPFRC의 특성을 활용할 수 있는 다양한 상세를 제시하고 실험을 통하여 거동과 성능을 규명한 연구가 보고되었다¹⁾. 실용화를 위한 연구사례로서 프리캐스트 교량 바닥판 세그먼트를 연결하기 위한 UHPFRC 이음부에 대하여 배근상세와 바닥판 두께 등을 변수로 반복재하실험이 실시되었으며, 검증된 상세의 시공 사례가 소개되었다²⁾. 국내에서는 2면 전단실험을 수행하여 스티드로 연결된 강재거더-UHPFRC 바닥판 합성부의 전단성능 평가를 실시하였으며, UHPFRC 바닥판 적용에 따른 전단성능 향상을 실험적으로 검증하였다³⁾. 또한 단면 중앙에 철근이 배근된 UHPFRC 프리캐스트 부재의 현장타설 철근접침이음부 성능을 실험적으로 평가하여 일반철근콘크리트의 경우보다 철근접침이음길이와 이음부의 폭을 상당부분 감소시킬 수 있음을 확인하였다⁴⁾.

실험적 연구와 함께 강도 평가 및 예측을 위한 해석모델과 해석방법에 대한 연구도 진행되고 있다. 비선형 유한요소해석을 통하여 Pi-Girder가 극한상태에 이르기까지의 거동이 예측되었으며⁵⁾, UHPFRC로 제작된 보의 휨거동을 예측하기 위하여 인장연화(tensile softening) 거동을 고려한 해석모델이 제안되었다⁶⁾.

그러나 UHPFRC의 본격적인 실용화를 위해서는 보다 많은 연구가 필요하며 특히 이음부에 대한 연구는 초기 단계로서 다양한 조건의 실험결과가 부재하므로 이를 보조할 수 있는 단순하고 효율적인 해석적 기법의 제안도 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 철근이 없는 얇은 UHPFRC 슬래브의 단면 강도를 예측하기 위해 제안된 해석모델⁷⁾을 보완한 단순한 해석모델을 제시하였으며, 이음부 유무에 따른 해석을 수행하여 실험결과와 비교하였다. 연구 대상으로 선정된 이음부는 UHPFRC의 높은 부착성능 등 장점을 최대화하여 얇은 부재에 적용이 가능할 것으로 판단되는 철근접침이음방식이다.

2. 수치 해석

2.1. 해석 모델

UHPFRC 부재 단면의 해석 모델은 UHPFRC의 응력-변형률 관계에 기초하여 간단한 형태로 이상화되었으며, 이음부

*Corresponding Author: Hoon Hee Hwang, Tel : +82-2-3490-1041, E-mail : poonhee@krta.co.kr

Structure & Bridge Team, Technical Research Division, Korea Road & Transportation Association, 5F, Hando Building, #515, Dogok-ro, Kangnam-Gu, Seoul 135-849, Korea

설치에 따르는 단면의 연속성은 UHPFRC의 인장 기여도에 대한 고려 여부로서 반영되었다.

이음부가 없는 연속된 부재의 단면해석 모델을 Fig. 1에 나타내었다. 여기서 UHPFRC 단면의 파괴는 인장변형률에 의하여 지배되며, 단면 하단의 인장변형률, ϵ_t 가 한계인장 변형률, ϵ_{lim} 에 도달하였을 때의 단면모멘트를 UHPFRC 부재의 공칭모멘트로 정의하였다. 이 모델은 철근이 배근되지 않은 얇은 UHPFRC 판부재의 항복선 해석을 위하여 제안된 모델⁷⁾에 철근의 인장거동을 고려할 수 있도록 수정한 것이며 한계인장변형률, ϵ_{lim} 는 다음의 식 (1)과 같다.

$$\epsilon_{lim} = \min(3L_f/8h, 3/200) \quad (1)$$

여기서 L_f : 강섬유 길이
 h : 단면 높이

제시된 단면해석 모델은 베르누이-오일러 가정(Bernoulli-Euler's hypothesis)에 따라 변형 후에도 단면이 평면으로 유지되므로 변형률 분포도로부터 비례식에 의하여 인장측 하단의 변형률 증가에 따르는 단면 각 위치에서의 변형률을 계산할 수 있다. 한편, UHPFRC는 극한강도 상태에 도달할 때까지 거의 선형적으로 거동하므로 후크의 법칙(Hooke's law)을 적용하여 압축응력 분포를 구할 수 있으며, 마찬가지로 인장강도에 도달할 때까지 선형 거동을 하며 이후에는 강섬유의 항복에 인장저항이 유지되는 것으로 가정하였다.

이음부가 있는 경우에는 프리캐스트 부분과 현장타설 부분으로 구분되는 경계면이 발생된다. 경계면에 의하여 유발되는 단면의 불연속성은 UHPFRC의 인장기여도를 고려하지 않음으로써 반영되었다.

이음부에서 겹침이음 방식에 의하여 연결되는 철근은 충분한 이음 성능을 확보하여 파괴시까지 미끄러짐(slip)이 발생되지 않는 것으로 가정하였다. UHPFRC의 인장기여도

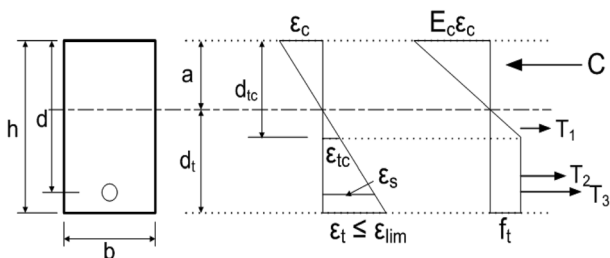


Fig. 1. Strain and stress distribution model(continued section).

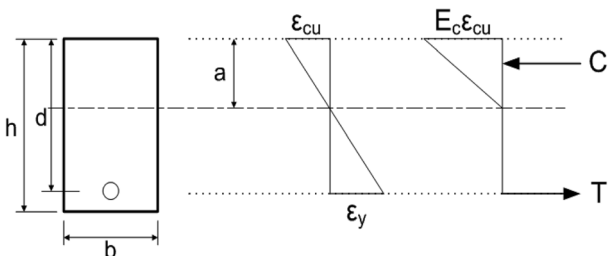


Fig. 2. Strain and stress distribution model(jointed section).

고려되지 않으므로 압축변형률에 의해 단면의 파괴가 지배되며, UHPFRC의 극한압축변형률, ϵ_{cu} 는 선형 연구에서 제시된 값을 참고하여 0.0035를 적용하였다⁸⁾.

2.2. 해석 절차

앞 절에서 정의한 단면해석 모델을 사용하여 단면의 공칭모멘트를 구하는데 필요한 사항을 정리하였다. 해석절차는 일반적인 철근콘크리트 휨부재의 경우와 마찬가지로 힘의 평형 원리에 근거한다. 따라서 단면에 작용되는 압축력과 인장력의 크기는 동일하며, 이 힘의 관계에 의하여 유발되는 모멘트의 크기에 따라 단면모멘트가 계산된다. 단면이 저항할 수 있는 최대모멘트인 공칭모멘트는 앞 절에서 언급한 바와 같이 변형률 조건에 의하여 결정된다.

이음부가 없는 연속단면을 가정한 해석 모델인 Fig. 1의 응력분포도에서 압축측 상단의 응력은 변형률 분포도의 비례관계와 후크의 법칙을 적용하여 인장변형률의 함수로 나타낼 수 있다. 따라서 압축력, C 는 다음의 식 (2)와 같이 삼각형의 면적으로 계산된다.

$$C = \frac{1}{2} E_c \frac{a^2}{h-a} \epsilon_t b \quad (2)$$

여기서 E_c : UHPFRC 탄성계수(MPa)
 a : 중립축 깊이(mm)
 b : 부재의 폭(mm)
 h : 단면 높이(mm)

인장력은 크게 세 가지 성분으로 구성된다. 중립축으로부터 UHPFRC의 인장강도에 도달되는 위치까지 선형적으로 거동하는 부분을 T_1 , 강섬유의 항복거동으로 저항하며 인장강도가 유지되는 것으로 가정한 부분을 T_2 그리고 철근이 부담하는 인장력을 T_3 로 나타내었으며 다음의 식 (3)에서 식(5)까지로 정의하였다.

$$T_1 = \frac{1}{2} f_t (d_{tc} - a) b \quad (3)$$

$$T_2 = f_t (h - d_{tc}) b \quad (4)$$

$$T_3 = A_s f_s \quad (5)$$

이 때 f_t 는 UHPFRC의 인장강도(MPa)로서 강섬유의 혼입률 등에 따라 달라지나 비교연구에 사용된 실험체의 재료특성값인 Table 1의 값을 적용하였다. A_s 는 인장철근량(mm^2)이며 나머지 항은 식 (2)와 Fig. 1에서 정의한 것과 동일하다.

한편, 압축측 상단부터 UHPFRC가 인장강도에 도달할 때까지 선형적으로 증가하는 단면 위치까지의 거리를 나타낸 d_{tc} 는 변형률의 비례관계로부터 식 (6)으로 유도된다.

$$d_{tc} = \left(\frac{\epsilon_t - \epsilon_{tc}}{\epsilon_t} \right) a + \left(\frac{\epsilon_{tc}}{\epsilon_t} \right) h \quad (6)$$

여기서 $\epsilon_{tc} = f_t/E_c$

철근은 인장거동에 대하여 일반적으로 항복응력에 도달하기 이전까지 선형 거동을 하므로 식 (5)에서 철근의 인장응력, f_s 는 후크의 법칙(Hooke's law)을 적용하여 구할 수 있다. 또한 철근과 UHPFRC 사이에는 미끄럼(Slip)이 발생되지 않는 것으로 가정하였으므로 철근의 변형률, ϵ_s 를 비례관계로부터 유도하여 함께 나타내면 아래의 식(7)과 같이 표현할 수 있다.

$$f_s = E_s \left(\frac{d-a}{d_{tc}-a} \right) \epsilon_{tc} \leq f_y \quad (7)$$

여기서 d : 철근의 유효깊이(mm)
 f_y : 철근의 항복응력(MPa)

위에서 유도한 각 항에서 궁극적인 변수는 중립축의 깊이 a이며, 이는 힘의 평형원리에 의하여 단면에 작용하는 압축력과 인장력의 크기는 동일하다는 가정으로부터 구해진다. 즉, 압축력 식 (2)와 인장력 식 (3), 식 (4) 및 식 (5)의 합계를 같게 놓고 정리하면 중립축 깊이, a를 변수로 하는 2차 방정식을 구성할 수 있으며, 방정식의 해에서 얻어진 중립축의 깊이 a를 다시 식 (2)에 대입하여 압축력의 크기를 구할 수 있다. 마찬가지로 식 (3), 식 (4)와 식 (5)에 대입하여 인장력의 각 성분을 결정할 수 있다. 마지막 단계로 압축력과 인장력이 이루는 우력 모멘트로부터 단면모멘트의 값이 결정되며, 인장축 하단의 변형률이 식 (1)에서 정의한 한계변형률일 때의 단면모멘트값을 공칭모멘트로 정의하였다.

이음부가 있는 경우를 모사한 Fig. 2에 대해서도 유사한 절차에 의하여 단면모멘트를 계산할 수 있다. 일반적으로 휨부재는 과소철근단면으로 설계되므로 단면이 파괴에 이르기 전에 인장철근이 항복하며, 파괴는 UHPFRC의 압축변형률이 극한변형률에 도달함과 동시에 발생하는 것으로 가정한다. 따라서 단면에 작용하는 압축력과 인장력은 각각 다음의 식 (8)과 식 (9)와 같다.

$$C = \frac{1}{2} E_c \epsilon_{cu} ab \quad (8)$$

$$T = A_s f_y \quad (9)$$

여기서 각 항은 앞의 식들에서 정의한 바와 동일하다. 이음부가 없는 경우에서와 마찬가지로 압축력 식 (8)과 인장력 식 (9)의 크기는 동일하다는 힘의 평형원리에 의하여 중립축의 깊이 a가 구해지며, 두 힘이 이루는 우력모멘트로부터 단면모멘트의 크기를 계산할 수 있다. 이 때 파괴시의 가정에 의하여 UHPFRC단면의 압축변형률은 극한값을 적용하였으므로 계산된 단면모멘트는 공칭모멘트값이 된다.

3. 비교 연구

3.1. 실험 개요

각 해석모델로부터 계산된 단면의 공칭모멘트값과 비교하기 위한 선행연구⁹⁾의 실험내용을 정리하였다. 실험부재는 연속된 단면을 가지는 것(NC 실험체)과 이음부를 모사한 것(C 실험체)으로 구분하여 각각 2개씩 총 4개이다. 전자는 UHPFRC를 일체로 타설하여 연속된 단면을 구현하였고, 후자는 프리캐스트 부의 양생이 끝난 이후에 이음부를 타설하여 경계면이 형성될 수 있도록 제작하였다. 실제 구조물의 이음부에서 철근은 겹침이음으로 연결되나 실험부재에서는 연속된 철근을 사용하였으므로 이 결과값은 추후 철근 겹침이음길이 등의 결정 시 목표성능값으로 활용될 수 있다. 이음부 설치유무에 상관없이 모든 실험체의 제원은 길이(L) 2 m, 폭(b) 0.5 m, 높이(h) 150 mm 그리고 철근의 유효깊이(d) 110.5 mm로 동일하므로 Fig. 3에 C 실험체의 형상과 제원을 나타내었다. 여기서 이음부의 폭은 250 mm이다.

한편 UHPFRC의 설계기준강도는 압축에 대하여 180 MPa, 인장의 경우는 12 MPa이며, 철근은 항복강도 400 MPa 등급의 직경 19 mm를 사용하였다. 강섬유는 길이가 다른 두 종류를 혼합하여 사용하였다. 체적비를 기준으로 길이 19.5 mm는 1%, 길이 16.3 mm는 0.5%를 혼합하였으며, 직경과

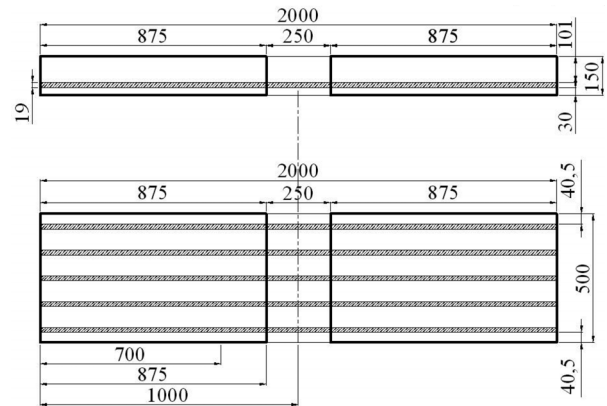
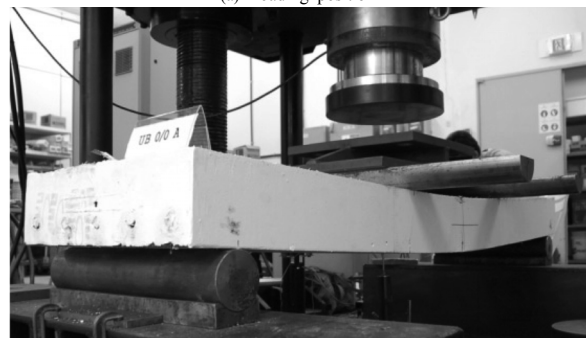
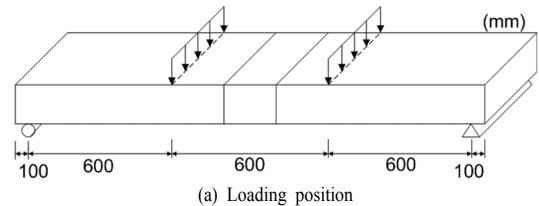


Fig. 3. Dimension of test specimens⁹⁾.



(b) Setting for testing
 Fig. 4. Static loading test⁹⁾.

인장강도는 각각 0.2 mm와 2,500 MPa로 동일하다.

정적재하실험은 Fig. 4와 같은 4점 재하방법에 의하여 수행되었다. 지지점 및 하중 사이의 간격은 600 mm로서 이음부가 최대모멘트 구간에 충분히 포함되도록 하여 전단거동의 간섭이 발생되지 않도록 하였다.

한편 하중재하는 변위제어방법(displacement control method)에 의하여 0.02 mm/sec 속도로 재하하며, 한 개의 액츄에이터(actuator)를 사용하되 프레임을 통하여 실험체에 하중이 전달되도록 함으로써 두 지점에서 가력될 수 있도록 하였다.

3.2. 결과 비교

이음부가 없는 연속된 경우에 대하여 2.2절 해석 절차에 따라 계산된 UHPFRC단면의 인장변형률 ϵ_t 와 단면모멘트 M_n 의 상관관계를 Fig. 5에 나타내었다. 기울기의 급격한 변화를 나타내는 약 103 kN·m의 모멘트값은 인장철근의 항복이 발생하는 경계로서 이보다 낮은 영역에서는 선형적으로 증가되는 경향을 나타내었다. 이는 주된 인장저항이 철근의 탄성거동으로 지배되는 것으로 볼 수 있으며, 이후의 구간에서는 강섬유가 주인장 거동을 지배하여 완만한 증가세를 나타낸다.

식 (1)에 따른 한계변형률 ϵ_{lim} 은 0.015이므로 이 때의 단면모멘트값인 115.9 kN·m는 이음부가 없는 연속단면의 공칭모멘트이다. 이음부를 모사한 해석모델로부터 계산된 값인 60.9 kN·m도 함께 표시하여 이음부 설치에 따른 단면의 공칭모멘트 감소에 대한 해석모델의 예측 경향도 살펴보았다.

해석모델에 의한 예측값 계산을 위하여 사용된 단면 및 재료특성값은 Table 1에 요약하였다. 각각의 기호는 앞에서 언급된 식 (1)에서 식 (9)까지의 정의에서 사용한 특성치의 기호 및 의미와 일치한다.

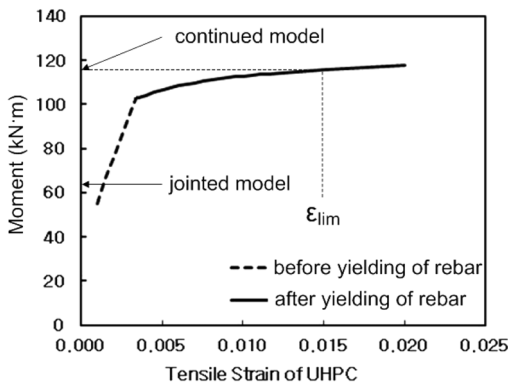


Fig. 5. Tensile strain and moment relationship.

Table 1. Material and sectional property for analysis.

	Material Property		Sectional Property	
	UHPFRC	f_{ck} (MPa)	180	b(mm)
E_c (GPa)		51.4	h(mm)	150
f_t (MPa)		12	d(mm)	110.5
L_f (mm)		16.3		
ϵ_{cu}		0.0035		
Rebar	f_y (MPa)	400	As(mm ²)	1433
	E_s (GPa)	200		

Table 2. Test results and predicted values.

Specimens	Ultimate Load(kN)	Moment (kN·m)		(B)/(A)
		test(A)	analysis(B)	
NC-1	376.4	112.9	115.9	1.03
NC-2	411.5	123.5		0.94
C-1	263.1	78.9	60.9	0.77
C-2	269.1	80.7		0.75

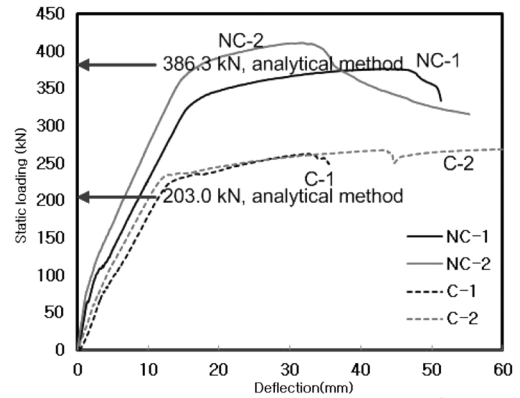


Fig. 6. Load-deflection relationship of test specimens⁹⁾.

해석적 방법에 의한 예측값과 정적재하실험 결과를 Fig. 6와 Table 2에 정리하였다. 실험결과에서 얻은 최대 하중은 식 (10)을 이용하여 최대 휨모멘트로 환산한 후 예측값과 비교하였다.

$$M=PL/6 \quad (10)$$

여기서 M은 최대모멘트(kN·m), P는 가력 하중(kN)이고 L은 지지점 간의 거리(m)이다.

실험값에 대한 단면해석모델 예측값의 비는 모델의 단 순성에도 불구하고 이음부가 없는 연속단면에 대하여 0.94와 1.03으로서 매우 근접한 결과를 나타내었다. 다만, 이음부가 있는 경우에는 0.77과 0.75로 나타나 해석모델에서 프리캐스트 부재와 현장타설부의 경계면에서 부착성능에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다. 이음부의 설치에 따르는 단면의 최대모멘트는 실험값에서 연속된 단면의 67.5% 수준이었으나, 예측값에서는 52.5%로 감소폭이 다소 크게 예측되는 경향을 보였으며 이음부가 있는 경우에 대해 예측값이 작게 계산되는 것이 주요 원인인 것으로 판단된다.

4. 결론

연속된 UHPFRC 단면의 공칭모멘트를 계산하기 위하여 UHPFRC의 인장기여도와 인장철근의 보강효과를 고려할 수 있는 단면해석모델을 구성하였다. UHPFRC의 인장변형률이 한계변형률에 도달하였을 때를 단면의 파괴시점으로 가정하였을 때 이 해석모델에 의한 예측값은 실험값에 매우 근접하였다.

이음부가 있는 경우는 연속된 단면의 단면해석모델에서 UHPFRC의 인장기여도를 배제하여 모사하였으며, 단면의

파괴시점은 압축측 UHPFRC가 극한변형률에 도달하였을 때로 가정하였다. 예측값은 실험값의 약 76% 수준으로서 이음부가 없는 경우에 비하여 상대적으로 큰 오차를 나타내었다. 이에 따라 이음부 설치에 따른 휨강도의 감소폭은 실험값의 경우에 67.5% 수준으로 감소하는 것으로 측정되었으나, 단면해석모델을 이용한 계산에서는 52.5%로서 감소폭이 다소 크게 예측되는 경향을 보였다. 이런 현상은 강섬유 보강 초고성능 콘크리트가 우수한 부착성능을 가지고 있음에도 해석모델에서 경계면의 부착저항을 무시하였고, 실제 철근의 항복강도가 설계기준값을 초과하기 때문일 것으로 판단된다. 따라서 프리캐스트 부재와 현장타설부의 경계면에서 인장강도를 완전히 배제하지 않고 일정한 인장강도를 고려할 수 있는 보완이 수행된다면 보다 정확한 예측이 가능할 것이다.

본 연구에서 제시한 단면해석모델은 UHPFRC 철근접침 이음부와 관련한 이론적 및 실험적 연구성과가 부족한 국내 실정에서 단면상세에 따라 이음부에 요구되는 성능을 예측하기 위한 기초적 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대되며, 향후 다양한 실험결과와의 비교를 통하여 추가적인 검증과 보완이 이루어져야 할 것이다.

감사의 글: 이 논문은 2012년도 서일대학교 교내연구비의 지원으로 작성되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- 1) J. Hegger, N. V. Tue, J. Schoening and M. Winkler, "Connections of Precast UHPFRC Elements", 3rd International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, #1121, 2012.
- 2) B. A. Graybeal, "UHPFRC in the U.S. Highway Transportation System", 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, pp. 11~17, 2008.
- 3) Dong-Min Yoo, Hoon-Hee Hwang, Sung-Tae Kim and Sung-Yong Park, "An Experimental Study on the Shear Connection for UHPFRC Deck Bridge", Journal of the Korean Society for Composite Materials, Vol. 24, No. 5, pp. 29~33, 2011.
- 4) Hoon-Hee Hwang, In-Soo Yeo, Keun-Hee Cho and Sung-Yong Park, "Evaluation of Flexural Strength for UHPFRC Deck Joints with Lap-Spliced Reinforced Steel Bar", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, Vol. 15, No. 6, pp. 92~99, 2011.
- 5) L. Chen and B. A. Graybeal, "Finite Element Analysis of Ultra-High Performance Concrete: Modeling Structural Performance of an AASHTO Type II Girder and 2nd Generation Pi-Girder", Technical Report, FHWA-HRT-11-020, Federal Highway Administration, 2010.
- 6) In-Hwan Yang, Changbin Joh and Byung-Suk Kim, "Flexural Response Predictions for Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concrete Beams", Magazine of Concrete Research, Vol. 64, Issue. 2, pp. 113~127, 2011.
- 7) D. K. Harris and C. L. Roberts, "Characterization of the Punching Shear Capacity of Thin Ultra-High Performance Concrete Slabs", VTRC 05-CR26, Virginia Transportation Research Council, Virginia, 2005.
- 8) A. Spasojevic, "Structural Implications of Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete in Bridge Design", PhD Thesis, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Suisse, pp. 22~29, 2008.
- 9) Hoon-Hee Hwang, Sung-Gyu Noh and Dong-Min Yoo, "Details and Performance Evaluation of the UHPFRC Deck Panel Joint in the Positive Moment Range", Technical Report, Korea Institute of Construction Technology, 2011.