

북한 건설환경을 고려한 초고성능 콘크리트 프리캐스트 교량의 구조성능 및 경제성 평가

Evaluation on the Structural Performance and Economics of Ultra-high Performance Concrete Precast Bridges Considering the Construction Environment in North Korea

김경철¹ · 고경택^{2*} · 손민수³ · 류금성⁴ · 강재윤⁵

Kyoung-Chul Kim¹ · Kyung-Taek Koh^{2*} · Min-Su Son³ · Gum-Sung Ryu⁴ · Jae-Yoon Kang⁵

(Received May 13, 2021 / Revised May 24, 2021 / Accepted June 1, 2021)

In this study, a customized bridge system was developed for North Korea application. For the application of North Korea, the customized bridge system design, fabrication, and construction performance evaluation were performed using ultra-high performance concrete a compressive strength 120MPa or more and a direct tensile strength 7MPa or more. The comparison of the North Korean truck luggage load(30, 40, 55) and the Korean standard KL-510 load showed that cross-section increased as the load increased. Furthermore, a bridge with a span length of 30m was fabricated with ultra-high performance concrete for the construction performance evaluation. The evaluation of the load condition analysis was performed by a flexural test. The results showed that a bridge with a span length of 30m secured about 167% of sectional performance under initial cracking load conditions and about 134% of load bearing capacity under ultimate load conditions. As a result of economic analysis, the customized bridge system using ultra-high-performance concrete was less than about 11% of the upper construction cost compared to the steel composite girder bridge. Therefore, these results suggest that the price competitiveness can be secured when applying the ultra-high-performance concrete long-span bridge developed through this study.

키워드 : 초고성능 콘크리트, 프리캐스트 콘크리트, 휨 거동, 장지간 교량, 북한 맞춤형

Keywords : Ultra-high-performance concrete, Precast concret, Flexural performance, Long-span bridge, North Korea customization

1. 서론

최근 북한은 기존 철도 중심의 교통 인프라에서 도로 기능을 강화하는 인프라 건설 정책을 수립하고 주요 노선 및 북중 국경 지역에 교량 신축을 추진하고 있다. 그러나, 건설기술의 수준이 현대화된 건설장비나 공법을 적용하는 수준까지는 이르지 못한 것으로 파악되었다(KICT 2019). 현재 북한의 교량은 노후화로 인

해 구조적으로 안전성이 보장되지 않거나 수명이 다된 교량의 수가 증가하고 있다. 따라서 교량 인프라의 급속한 개선이 필요하며 교량 건설에 필요한 사용재료의 품질 개선 및 신 재료 개발을 통해 급속 시공이 가능한 기술이 필요할 것으로 판단된다.

기존 Han et al.(2013a)의 연구에서는 북한의 교량 설계기준 분석을 통해 표준트럭하중을 자동차짐-30, 22 및 15를 각각 적용하여 활하중 검토를 수행하였다. 또한, 남북한 도로교 설계기준 비교

* Corresponding author E-mail: ktgo@kict.re.kr

¹한국건설기술연구원 남북한인프라특별위원회 특화기술연구팀 박사후연구원 (Korea Institute of Construction Technology, Kyonggi-do, 10223, Korea)

²한국건설기술연구원 남북한인프라특별위원회 위원장 선임연구위원 (Korea Institute of Construction Technology, Kyonggi-do, 10223, Korea)

³한국건설기술연구원 남북한인프라특별위원회 특화기술연구팀 수석연구원 (Korea Institute of Construction Technology, Kyonggi-do, 10223, Korea)

⁴한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 복합신소재연구센터 연구위원 (Korea Institute of Construction Technology, Kyonggi-do, 10223, Korea)

⁵한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 차세대 인프라연구센터 (Korea Institute of Construction Technology, Kyonggi-do, 10223, Korea)

를 통해 철근콘크리트 슬래브교의 표준 단면 선정 및 구조검토를 수행하였다. 남북한의 8m이하 단 경간 철근콘크리트 슬래브 교의 휨 설계 수준을 검토한 결과, 전반적으로 남한의 교량 설계 수준에 도달하지 못하는 것으로 파악되었다(Han et al, 2013b). 또한, Mensah and Durham(2014) 연구에서는 프리캐스트 사다리꼴 형식의 2-거더 교량 시스템을 적용하여 활하중 검토를 수행하였고, AASHTO LRFD 규정을 적용하여 검토한 결과, 보수적으로 예측되었다.

본 연구에서는 북한의 고속도로에 적용 가능한 교량 설계를 위하여 단 경간이 아닌 3경간 연속교를 대상으로 하였다. 거더 형식은 U-형상을 적용하였고, 남북한의 설계기준에서 제시하고 있는 1등급 교량의 차량 하중을 각각 적용하였다. 기존 북한의 자동차짐-30 하중과 KICT(2019)에서 최근에 입수한 북한의 자동차짐-40/55 하중을 적용하였고, 남한은 KL-510 하중을 적용하여 활하중효과를 검토하고자 하였다.

북한 건설환경을 고려한 맞춤형 교량 시스템을 개발하기 위하여 현장에서 작업 공정을 줄일 수 있는 프리캐스트 공법을 고려하였다(Choi et al, 2014). 주 사용재료는 일반 콘크리트의 단점을 보완하기 위해서 최근에 개발된 압축강도 120MPa 이상, 직접인장강도 7MPa 이상을 갖는 초고성능 콘크리트를 적용하였다(KICT 2020a). 이를 통해 현장 작업 공정을 대폭 감소시킴으로써 시공성을 향상시키고, 북한의 기후 조건에 맞는 뛰어난 내구성과 교량 성능 향상 및 유지 보수와 같은 비용 절감 측면에서 유리할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 북한에 적용하기 위한 맞춤형 교량 시스템을 개발하기 위하여 남북한의 교량 활하중 효과 분석과 교량 실험체 규모 실험체 제작 및 구조성능평가를 수행하였다. 또한, 장 기간에 주로 적용되고 있는 강합성 교량과 개발하고자 하는 북한 건설환경을 고려한 초고성능 프리캐스트 교량의 경제성 검토를 통해 적정성을 평가하고자 하였다.

2. 남북한 설계 활하중 효과 비교 분석

남북한의 설계기준에서 제시하고 있는 고정하중 및 활하중 조합을 고려하여 교량 단면 검토 및 최적 단면을 선정하였다. 남한은 도로교설계기준 한계상태설계법(MUIT 2016)을 공통적으로 적용하고 있는 반면에 북한은 운수건설총서(Kim 1999)에서 콘크리트교는 극한강도설계법, 강교는 허용응력설계법을 각각 적용하고 있는 것으로 파악되었다. 고정하중에서 교량의 주재료인 강재 및 철근콘크리트의 단위질량은 남북한이 유사한 것으로 파악되었다.

활하중의 경우 남한은 교량등급의 구분 없이 표준트럭하중과 표준차로하중을 적용하고 있으나, 북한은 교량등급에 따라 자동차짐-30/22/15로 각각 구분하여 자동차 대열하중과 선하중으로 적용하고 있다(Kim 1999). 다만, 최근에 북한에서 입수된 자료에 따르면 기존보다 하중을 증가시킨 자동차짐-40과 자동차짐-55 하중을 제안하여 사용하고 있는 것으로 파악되었다(KICT 2019). 본 연구에서 개발하고자 하는 초고성능 콘크리트를 적용한 U-형상 거더교 형식에 대해 3경간 연속교를 대상으로 활하중 효과를 분석하였다. Fig. 1과 같이 2차로 기준 단면을 바탕으로 30m와 60m를 갖는 교량의 기본 설계를 통해 1~2차로에 각각 활하중을 재하하여 하중 효과를 검토하였다.

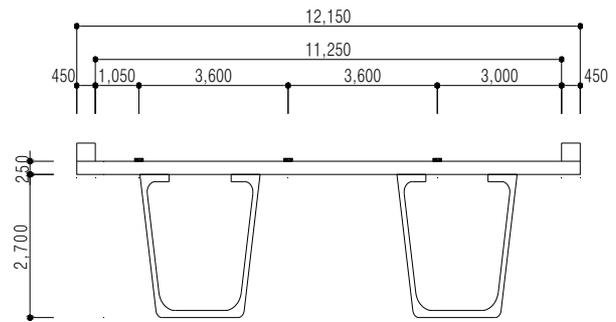


Fig. 1. Girder dimensions and cross section shape

남한의 KL-510 하중과 북한의 1등급 교량에 해당하는 자동차짐-30, 40 및 55 하중을 재하하여 단면에 발생하는 모멘트 효과를 Table 10에 나타내었다. Table 10에서 북한의 기존 설계하중인 자동차짐-30 하중은 남한의 KL-510 하중에 비해 정모멘트는 약 70%, 부모멘트는 약 90% 내외의 하중 효과를 나타낸다. 이는 교량의 시간장 변화에 상관없이 뚜렷한 영향을 미치지 않는다. 반면에, 자동차짐-40 및 55 하중은 시간장이 60m인 경우에 남한의 KL-510 하중과 약 10% 이내의 유사한 하중효과를 나타낸다. 그와 반대로 경간장이 30m인 경우에 부모멘트는 남한의 KL-510 하중 효과의 약 130% 내외로 분석되었다. 이는 북한의 기존 운수건설총서에 따라 자동차짐-30 하중은 남한의 KL-510 하중에 비해 낮은 하중효과로써 교량 단면 감소가 가능하다.

자동차짐-40 및 55 하중은 남한의 활하중에 비해 큰 하중효과로 인해 교량 단면 및 물량이 증가할 것으로 판단된다. 따라서, 경간장 30m 내외의 단 경간 교량에서는 부모멘트 효과가 단면 설계에 지배적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Table 1. Comparison of moments according to live loads

Span (m)	Positive moment(kN-m)				Negative moment(kN-m)				Ratio(%)					
	KL-510 (1)	A30 (2)	A40 (3)	A55 (4)	KL-510 (5)	A30 (6)	A40 (7)	A55 (8)	(2)/(1)	(3)/(1)	(4)/(1)	(6)/(5)	(7)/(5)	(8)/(5)
30	1,899	1,369	2,042	1,973	-1,720	-1,591	-2,177	-2,296	72	108	104	93	127	134
60	5,304	3,690	5,239	5,375	-4,946	-4,217	-4,522	-5,105	70	99	101	85	91	103

cf) A : Truck luggage load of North Korea

3. 교량실험체 구조성능 평가

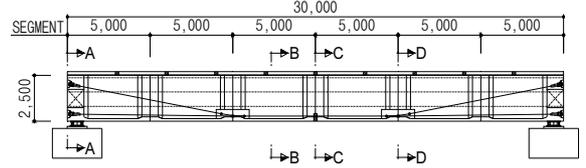
3.1 교량실험체 설계

본 연구에서 개발하고자 하는 초고성능 콘크리트를 적용한 U-형상 거더교를 초기 시간장 60m로 구조 검토 및 실시 설계를 수행 하였으나, 실험장비 규모 등을 고려하여 시간장 30m로 실험체를 재설계하였다. 실험체의 단면 제원은 시간장 60m의 설계 단면과 동일하지만, 시간장을 축소함에 따라 단면 내력을 보정하였다. 시간장 60m의 설계에 적용된 고강도 강연선($f_{pu} = 2,400\text{MPa}$) 8개소에서 일반 강연선($f_{pu} = 1,860\text{MPa}$) 4개소 배치로 긴장력 도입량을 조정하였다. 거더의 표준단면은 Fig. 2(b)와 같고, 거더 1기당 길이는 5m이며 운반 가능한 거더 중량은 28kN/m로 설계하였다. 또한, 초고성능 콘크리트를 적용한 바닥판 1기당 폭 3.4m, 길이 2.0m와 두께 170mm를 갖는 프리캐스트 바닥판을 총 15기로 설계하였다. 교량 실험체의 상세 제원을 Fig. 2에 나타내었다.

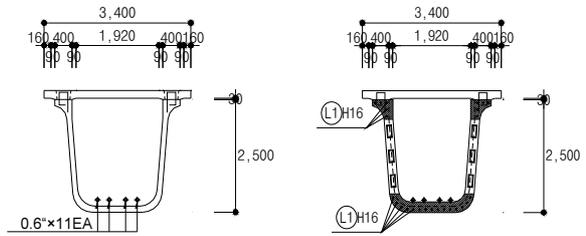
교량 실험체의 단면 거동을 예측하기 위하여 총 5개소의 연결부로 구성하였다. 초고성능 콘크리트의 능력이 완벽하게 발휘되는 4개소의 일반 연결부(Fig. 2(b))와 교량 실험체 중앙부 단면에 현장 타설 연결부 1개소(Fig. 2(c))로 설계하였다. 힘 모멘트가 최대로 발생하는 중앙 단면(C-C) 1개소에 철근으로 보강한 현장타설 연결부를 설치하여 힘 성능을 검증하고자 하였다.

3.2 재료특성

본 연구에서 사용된 설계 기준압축강도 120MPa급 초고성능 콘크리트(SC-120f)의 배합조건을 Table 2에 나타내었다(KICT



(a) Cross section of the entire bridge specimen



(b) Cross section of the general girder (c) Cross section of the connection girder

Fig. 2. Specimen details

2020b). 프리믹싱 결합재에는 밀도 3.15g/cm³을 갖는 일반 포틀랜드 시멘트와 밀도 2.10g/cm³과 비표면적 240,000cm²/g의 실리카 피움을 적용하였다. 또한, 밀도 2.91g/cm³의 고로슬래그 미분말, 석회석 미분말의 충전재와 밀도 2.62g/cm³, SiO₂ 90% 이상, 평균 입경 0.5mm 이하를 갖는 잔골재로 각각 구성하였다. 폴리카르본산계 고성능 감수제(밀도 1.04g/cm³, 고형성분 30%)와 액상형 수축저감제(글리콜계, 밀도 1.036g/cm³)를 각각 사용하였다. 강섬유는 직경 0.2mm, 길이 19.5mm 및 인장강도 2,000MPa를 갖는 직선형상의 단일 섬유를 사용하였고, 강섬유 혼입률은 초고성능 콘크리트 체적에 대해 1.0%를 적용하였다.

Table 2. Mix proportion of UHPC

f_{ck} (MPa)	Target slump flow (mm)	W/B	Unit weight(kg/m ³)					
			Mixing water	Pre-mixing binder*	Sand	Steel fiber	Super plasticizer	Shrinkage reducing agent
120	700±100	0.23	210	1,180	847	78	17	7

* Pre-mixing binder: OPC+Silica Fume+Blast Furnace Slag+Filler(materials containing CaCO₃)

매회 거더 및 바닥판 타설 시 각 배치(batch)별로 압축강도 측정용 원주형 공시체 3개와 직접인장강도 시편 3개를 각각 제작하였다. 콘크리트 압축강도 실험을 통해 측정된 하중-변위 관계 곡선을 이용하여 압축응력-변형을 관계 곡선을 획득하였다. 측정된 콘크리트 압축응력-변형을 관계를 활용하여 배치별 평균탄성계수를 산정하였다. 또한, 초고성능 콘크리트의 직접인장강도를 측정하기 위하여 시편 중앙 단면에 폭 2mm, 깊이 12.5mm의 노치(notch)를 제작하여 중앙단면에 균열이 발생하도록 하였다. 노치 부분에 설치된 클립게이지를 통해 측정된 균열개구변위를 활용하여 인장응력-변형을 관계를 산정하였다. Table 3에 초고성능 콘크리트의 각 배치별 평균 압축강도(f_{ck}), 탄성계수(E_c) 및 인장강도(f_{ctk})를 각각 나타내었다. 철근의 항복강도 500MPa($E_s = 200$ GPa)를 적용하였고, 강연선은 KS D 7002 기준에 따라 항복강도 1,860 MPa를 사용하였다(KS D 7002 2011).

3.3 실험체 제작

실험체 제작을 위해 크게 제작단계와 조립단계로 구분된다. 제작단계의 경우, 분할 제작한 강재 거푸집을 현장에 설치한 후 철근 조립 및 쉬스관을 삽입한다. 이후, 초고성능 콘크리트를 제조한 후 타설을 수행하며 24시간 동안 습윤양생을 실시한다. 거푸집 제거 후 강도 발현 촉진을 위해 $80 \pm 5^\circ\text{C}$ 로 고온증기양생을 3일 실시하였다. 이후, 거더의 매치캐스트를 위해 양생이 완료된 거더 측면에 거푸집을 이동시켜 조립한 후 동일한 방법으로 거더 6기를 제작하였다. 또한, 바닥판은 실내 제작장에서 콘크리트를 타설하여 거더와 동일한 양생조건을 적용하여 제작하였다.

조립단계에서는 제작된 거더 및 바닥판을 현장으로 운반시킨 후, 거더 연결부에 에폭시 도포 및 강연선을 설치하여 가 조립을 완료하였다. 이후, 거더 일체화를 위해 긴장력을 도입하였고, 긴장

Table 3. Material properties of concrete

Mixture	Section	Specimen No.	f_{ck} (MPa)	E_c (MPa)	f_{ctk} (MPa)
SC-120f	Girder	1	131.2	43,418	10.8
		2	132.5	43,621	11.1
		3	128.1	42,936	9.8
		4	132.1	43,618	11.0
		5	131.2	43,416	10.5
		6	131.6	43,428	10.9
		Mean	131.6	43,406	10.7
		S.D.	1.56	250.1	0.48
	Slab	1	130.6	43,268	9.1
		2			
		3			
		4			
		5	132.1	43,618	10.8
		6			
		7			
8		133.1	43,714	11.4	
9					
10		134.2	43,786	12.1	
11					
12		131.1	43,409	10.9	
13					
14					
15		131.5	43,421	10.1	
Mean	131.8				43,488
S.D.	1.24	194.8	1.03		

재의 부식 방지를 위해 그라우트를 사용하였다. 거더 조립을 완료한 후에 바닥판을 거치하였고 바닥판 연결부 부분에 현장에서 콘크리트를 타설하여 실험체 제작을 완료하였다.

3.4 실험 방법

초고성능 콘크리트를 적용한 U-형상 거더교의 실험체는 용량 3,500kN의 가력장비를 이용하여 Fig. 4와 같이 3점 재하방식으로 하중을 재하하였다. 교량 실험체의 지점과 지점 사이의 간격은 29,000mm이고, 실험체 중앙부에 강재 가력보를 설치하여 균일한 하중이 전달되도록 하였다. 하중은 일정한 속도의 변위제어 방식으로 0.02mm/sec로 재하하였다.

하중에 따른 처짐을 측정하기 위하여 거더 연결부에 1,000mm 용량의 와이어 게이지를 거더 연결부 하단에 설치하여 처짐을 측정하였다. 긴장재의 거동을 평가하기 위하여 실험체 중앙부의 강

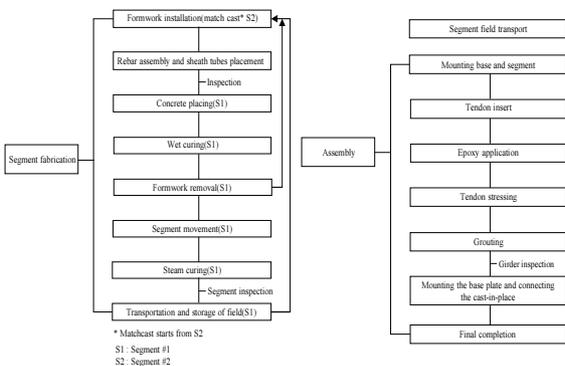


Fig. 3. Fabrication process for test specimen



Fig. 4. Test setup

연선에 총 9개의 변형률 게이지를 부착하였다. 또한, 거더 연결부의 균열 측정을 위해 π -게이지를 총 6개, 하중 가력지점 연결부의 하부플랜지에 4개의 철근 변형률 게이지를 설치하였다. Fig. 5와 같이 실험체 거더 연결부의 단면 중앙을 기준으로 상하단부에 용량 60mm의 콘크리트 변형률 게이지를 부착하여 하중 가력 시 발생하는 변형률을 측정하였다.

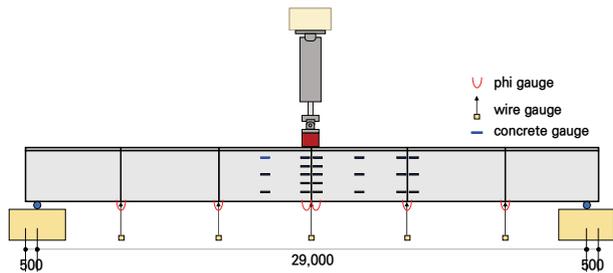


Fig. 5. Location of strain gauges

3.5 교량 실험체 목표 성능

실험을 수행하기에 앞서 교량 실험체의 목표 성능을 검토하기 위해 60m 교량의 설계 단면력을 바탕으로 30m 교량 실험체의 구조 검토를 수행하였다. 기존 60m 교량의 설계 단면력에서 강연선 조정에 따른 긴장력 도입 감소계수와 콘크리트의 재료계수 및 부재계수를 각각 적용하여 초기 균열하중상태와 극한한계상태에서의 하중을 산정하였다.

긴장력 도입 감소계수는 기존 60m 교량에 적용한 강연선 $f_{pu} = 2,400\text{MPa}$ 의 8개소에서 30m 교량 실험체로 수정함에 따라 $f_{pu} = 1,860\text{MPa}$ 의 4개소로 감소한 영향을 고려하였다. 또한, 슈퍼 콘크리트 구조설계지침(KCI 2019)에서 제시하고 있는 콘크리트의 재료계수 0.80과 휨 부재계수 0.90을 각각 적용하였다. Table 4와 같이 60m 교량 설계 단면력은 초기균열하중상태에서 2,687kN, 극한한계상태에서 7,117kN으로 나타났다. 긴장력 도입 감소계수와 재

료 및 부재계수를 도입한 30m 교량 설계 단면력은 초기균열하중 상태에서 1,028kN이고, 극한한계상태에서는 1,985kN으로 예측되었다.

Table 4. Comparison of loading state

Span length(m)	State	
	Initial cracking	Ultimate load
30	1,028kN	1,985kN
60	2,687kN	7,117kN

3.6 실험 결과

실험 수행 시 각 하중 단계별로 측정된 하중-처짐 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 초기균열 하중은 항복하중 이전 선형구간에서 육안으로 관찰된 초기균열을 토대로 산정하였다. 초기균열은 현장타설 연결부의 인장철근의 외측 부근 하단부에서 발생하였다. 초기균열 하중은 1,727kN이고, 처짐은 17.4mm로 측정되었다. 하중이 지속적으로 증가함에 따라 실험체 중앙 하단부에서 초기에 발생된 균열을 따라 추가 균열이 발생하였다. 초기에 발생된 균열의 균열폭이 점차 확대됨에 따라 강섬유의 가교역할로 인해 균열폭의 확대를 억제시키는 거동 특성을 나타내었다.

하중이 지속적으로 증가함에 따라 거더 하단부에서 현장타설 연결부의 종점까지 횡방향으로 균열이 진전되었다. 현장타설 연결부의 철근으로 보강된 구간과 보강되지 않은 구간에서 강성이 크게 변화하는 경계면으로 판단된다. 이후, 하중이 증가한 후 비선형 거동을 나타내는 시점에서의 항복하중은 2,531kN이고, 처짐은 29.5mm로 측정되었다. 초기균열상태의 설계하중은 1,028kN이고, 측정하중은 1,727kN으로써 약 167%의 단면능력을 확보하였다. 또한, 극한한계상태에서의 설계하중은 1,985kN이고, 측정 하중은

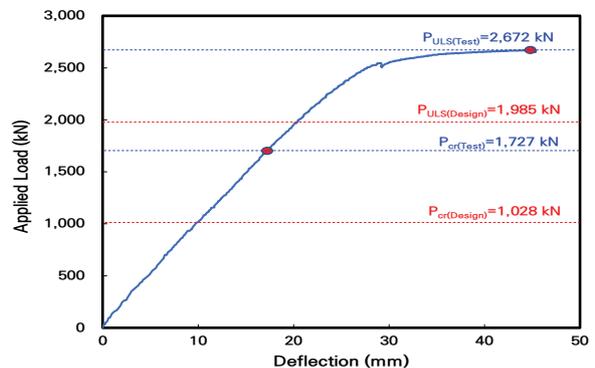


Fig. 6. Load-deflection curve

2,672kN으로써 실제 구조물의 내하력은 설계값에 비하여 대략 134% 이상의 내하력을 확보하는 것으로 나타났다.

교량 실험체의 중앙 연결부에 부착된 콘크리트 변형률 게이지에서 측정된 변형률을 바탕으로 하중 증가에 따른 변형률 변화를 Fig. 7에 나타내었다.

초기균열하중(1,727kN), 항복하중(2,531kN), 중립축 깊이 변화가 발생하는 시점에서의 하중(2,536kN), 중앙 연결부가 파괴되는 시점에서의 하중(2,610kN)과 극한하중(2,672kN)에서 각 단계별로 측정된 변형률을 분석하였다. S1과 S2는 각각 바닥판의 중앙부와 거더 최하단부의 콘크리트 변형률 게이지를 나타낸다. C는 콘크리트 변형률 게이지로서 거더의 높이에 따라 총 5개의 게이지를 부착하였다. 측정된 압축변형률은 음수, 인장변형률은 양수로 표기하였다.

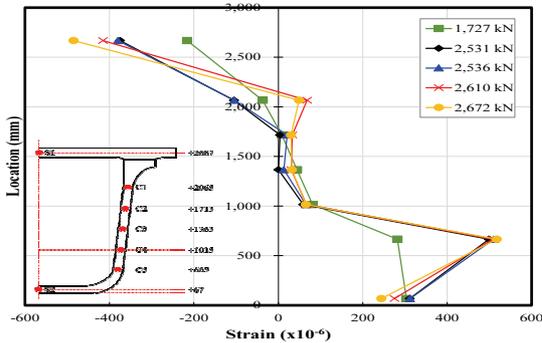


Fig. 7. Load-strain curves

대표적으로 중립축 깊이가 변화하는 단계에서 압축영역인 S1, C1 및 C2의 변형률은 -380, -104 및 21×10^{-6} mm/mm 이고, 중립축인 C3의 변형률은 13×10^{-6} mm/mm로 측정되었다. 인장영역인 C4, C5 및 S2의 변형률은 각각 65, 510 및 312×10^{-6} mm/mm로 측정되었다. 거더 최하단부에 부착된 S2 변형률은 초기 균열의 영향으로 뚜렷한 변형률 변화는 관찰되지 않았다. 최대하중 단계에서 압축영역인 S1, C1 및 C2의 변형률은 -485, 49 및 30×10^{-6} mm/mm이고, 중립축인 C3의 변형률은 32×10^{-6} mm/mm로써 중립축 깊이가 상단으로 이동하는 경향을 나타낸다. 인장영역인 C4, C5 및 S2의 변형률은 65, 517 및 244×10^{-6} mm/mm로 측정되었다.

실험체의 중립축 깊이는 거더 하면으로부터 약 1,715mm 위치에 있으며 중립축 깊이가 변화하는 시점은 하중 2,536kN에서 관찰되었다. 이후, 하중 2,610kN에 도달하였을 때 중앙 단면의 거더 연결부가 완전히 파괴되어 강연선이 집중적으로 하중에 저항하는 형태를 나타낸다. 하중은 점진적으로 증가하여 최대하중 2,672kN이고,

이때의 처짐은 45.0mm이다. 실험체가 파괴 상태에 도달하기 이전에 안전을 고려하여 가력하중을 중지하였지만 실제 극한하중은 이보다 더 클 것으로 판단된다. 최종 균열 패턴은 Fig. 8과 같이 현장타설 연결부가 종료되는 부근의 하단에서 상단부로 균열이 진전되는 전형적인 휨 균열 패턴을 나타내었다.



Fig. 8. Crack patterns

4. 개발 교량형식의 경제성 분석

본 연구에서 개발한 초고성능 콘크리트를 적용한 U-형상 거더 교의 경제성을 평가하기 위하여 60m 3경간 연속교를 대상으로 강합성 거더교와 상부구조의 물량에 따른 공사비를 분석하였다. Table 5는 주요 물량을 비교한 결과로써, 바닥판의 경우 초고성능 콘크리트를 적용함에 따라 콘크리트 물량은 33%, 철근량은 34% 감소하는 것으로 분석되었다.

Table 5. Economics review according to superstructure

Section	SCGB*		UHPCB**	
	Steel	Concrete	Concrete	Rebar
Girder	1,095ton	905m ³	Rebar	38ton
		Strand	55ton	
Slab	Concrete	1,122m ³	Concrete	751m ³
	Rebar	226ton	Rebar	149ton

Note) * SCGB : Steel-Concrete Composite Girder Bridge

** UHPCB : Ultra-High Performance Concrete Bridge

왕복 4차로를 기준으로 3경간 연속교에 대한 상부공사비를 분석한 결과, 바닥판 공사비는 약 2% 증가하지만 거더를 포함한 상부구조 전체 공사비는 약 11% 감소한다(Fig. 9).

따라서 초고성능 콘크리트를 사용한 북한 맞춤형 모듈러 교량은 60m이상 장기간 교량 시장에서 충분한 가격 경쟁력을 확보할 것으로 판단된다.

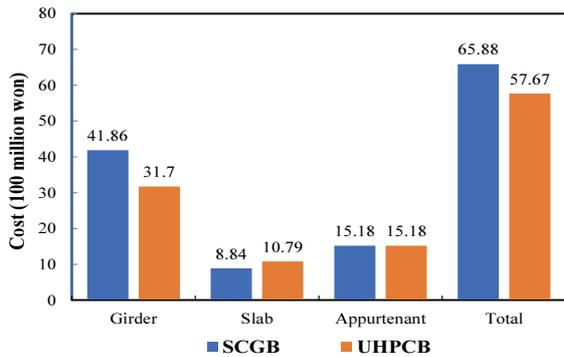


Fig. 9. Comparison result of economics according to bridge type

5. 결론

본 연구에서는 초고성능 콘크리트를 적용한 북한 맞춤형 교량 시스템을 개발하기 위한 활하중 효과 분석과 구조성능을 통한 검증 및 경쟁 교량과의 경제성 검토를 수행하였으며, 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 남북한의 활하중 효과를 분석한 결과, 북한의 기존 자동차차침-30에서는 남한보다 교량 단면이 감소할 것으로 판단된다. 그러나 최근 개정된 자동차차침-40/55를 적용할 경우 남한보다 단면이 증가하여 설계 물량이 늘어나는 것으로 파악되었다.
- 2) 초고성능 콘크리트를 적용한 U-형상 거더교는 북한 기후조건 및 도로 여건을 반영하여 프리캐스트로 선정하였고, 운반 가능한 거더 중량은 28kN/m와 길이 5m로 설계하였다. 또한, 바닥판은 폭 3.4m, 길이 1.8m와 두께 170mm로써 남한에서 북한으로 운반 가능한 최적 단면을 도출하였다.
- 3) 하중단계별 구조 성능을 검증한 결과 초기균열하중 상태에서 서의 설계 하중 대비 167%의 단면 성능과 극한한계상태에서의 설계 하중에 비해 약 134% 이상의 내하력을 확보함으로써 요구 성능을 만족하는 것으로 나타났다.
- 4) 거더 중앙부 하단면의 현장타설 연결부에서 철근 보강 구간과 철근 미보강 구간의 강성 차이가 발생하는 경계면이 주요한 균열 발생 위치로써 연결부 보강 철근을 고려한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.
- 5) 강합성 거더교와 초고성능 콘크리트를 적용한 U-형상 거더교의 60m급 3경간 연속교의 4차로를 기준으로 상부공사비를 분석한 결과, 약 11% 정도 감소하며 장경간 교량 구축에서 충분한 가격 경쟁을 갖추고 있는 것으로 나타났다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(북한 인프라 현대화 시나리오에 기반한 맞춤형 특화기술 개발 및 건설기준 연계방안 수립) 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Choi, J.W., Lee, S.S., Park, S.K., Hong, S.N. (2014). Evaluation of structural behavior and serviceability on transverse connection for modular slab bridge system, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, **18(6)**, 139–146 [in Korean].
- Han, E.S., Lee, I.K., Park, S.K. (2013a). Study on design vehicle loads of South and North Korean highway bridges, *International Journal of Highway Engineering*, **15(1)**, 37–45 [in Korean].
- Han, E.S., Lee, I.K., Park, S.K. (2013b). Study on the reinforced concrete slab bridges of North Korea, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, **33(2)**, 455–464 [in Korean].
- KICT (2019). Development of Specialized Construction Technologies and the Strategy of Combining Design Codes on the Modernization Scenario for Infra-Structures in North Korea, 43–47 [in Korean].
- KICT (2020a). Development of Manufacturing Technologies, Material Models and Guidelines for SUPER Concrete with 80MPa ~180MPa of Compressive Strength, Final Report, KAIA & MOLIT [in Korean].
- KICT (2020b). The Fabrication and Quality Control Guidelines for Fiber Reinforced SUPER Concrete [in Korean].
- Kim, H.W. (1999). A Series of Transportation Construction (Road Construction), Design Specification, Industrial Publishing Company, North Korea.
- Korea Concrete Institute(KCI) (2019). The Structural Design Guidelines of Fiber Reinforced SUPER Concrete, Korea Concrete Institute, 44–49 [in Korean].
- KS D 7002 (2011). Uncoated Stress-Relieved Steel Wires and Strands for Prestressed Concrete, Korean Agency for Technology and Standards, Ministry of Knowledge Economy [in Korean].

Korean].
Mensah, S.A., Durham, S.A. (2014). Live load distribution factors in two-girder bridge system using precast trapezoidal U-girders, Journal of Bridge Engineering, **19(2)**, 281-288.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport(MLIT) (2016). Highway Bridge Design Standard(Limit State Design), Korea [in Korean].

북한 건설환경을 고려한 초고성능 콘크리트 프리캐스트 교량의 구조성능 및 경제성 평가

본 연구에서는 북한 건설환경을 고려한 초고성능 콘크리트 프리캐스트 교량 시스템을 개발하고자 한다. 맞춤형 교량 시스템은 최근에 개발된 압축강도 120MPa 이상, 직접인장강도 7MPa 이상을 갖는 초고성능 콘크리트를 적용하여 설계, 제작 및 구조성능평가를 통하여 북한의 적용 가능성을 분석하였다. 설계를 위해 북한의 자동차집(30, 40, 55)을 남한의 KL-510 하중과 비교한 결과, 하중이 증가함에 따라 단면이 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 구조성능평가를 위하여 지간장 30m 교량 실험체를 초고성능 콘크리트를 이용하여 제작하였다. 휨 실험을 통하여 하중 분석을 수행한 결과, 설계하중 대비 측정하중은 초기균열하중상태에서 약 167%의 단면성능과 극한한계상태에서 약 134% 이상의 내하력을 확보하여 본 실험에서 요구하는 성능을 만족하였다. 이러한 결과는 기존의 강합성 거더교로 제작하는 장지간 교량 대비 약 11%의 상부공사비가 감소하는 것으로 분석되었다. 그러므로, 본 연구를 통하여 개발된 60m 이상 장지간 맞춤형 교량 시스템을 활용한다면 충분한 가격 경쟁력을 확보 할 수 있을 것으로 기대된다.