

## UHPC-거더 사장보도교의 설계

Design of UHPC(Ultra High Performance Concrete) Girder Cable Stayed Footbridge



이치동\*  
Chi-Dong Lee



김우중\*\*  
Woo-Jong Kim



조경식\*\*\*  
Kyung-Sik Cho



김중화\*\*\*\*  
Jong-Hwa Kim

### 1. 머리말

UHPC-거더 사장보도교는 향후 예상되는 장대교량을 독창적이고 경제적으로 순수 국내 기술로 건설하기 위한 연구과정 중 실제교량에 적용한 사례이다. 초고성능 콘크리트를 사용하여 세계 최고 수준의 저비용 장수명 하이브리드 사장교 시스템을 개발하여 국제 경쟁력을 확보하고 이를 통해 해외 장대교량의 건설수주 확대에 활용할 수 있는 성과물 확보가 연구목표이다.

본 설계 및 시공은 이러한 목표를 달성하기 위한 일환으로 수행하였고, 기존에 주로 적용된 일반강도 콘크리트 교량에 대응하여 압축강도 180 MPa의 초고성능 콘크리트(이하 UHPC; Ultra High Performance Concrete)를 활용한 보도교 구조 형식을 제안하여 설계하였다. 이 성과는 신축이 예정되어 있던 한국건설기술연구원 신축 연구동 연결통로에 적용 및 시공하여 초고성능 콘크리트 교량의 설계와 시공에 있어서 필요한 기술을

파악하였다. 또한 기존 사용 중인 본관동과 신축연구동을 보도교로 연결함으로써 연구소 내의 보행자 이동을 단축하여 편의를 증대하는 기본기능도 달성하였다<사진 1>.

### 2. UHPC(초고성능 콘크리트)

#### 2.1 UHPC의 정의

UHPC는 설계기준 압축강도 값이 150 MPa 이상, 설계기준 쪼갬인장강도 값이 5 MPa 이상인 섬유보강 시멘트 복합체이다. UHPC는 보통 포틀랜드 시멘트, 실리카 폼 또는 고로슬래그 미분말로 구성되어 있는 포졸란계 혼화제, 입경 0.5 mm 이하의 골재, SiO<sub>2</sub> 성분이 90% 이상인 충전제 및 기타 혼화제로 물-결합재비가 0.24 이하이고, 또한 인장강도 2,000 MPa 이상으로 직경 0.2~0.25 mm, 길이 10~20 mm의 보강용 섬유를 2vol.% 이상 혼입한 것이다<그림 1>.

UHPC는 강도발현 촉진 및 경화체 조직의 밀실화를 위해 재령 초기 90°C에서 증기양생을 실시하는 것을 기본으로 한다.



사진 1. UHPC 거더 사장보도교의 가설전경

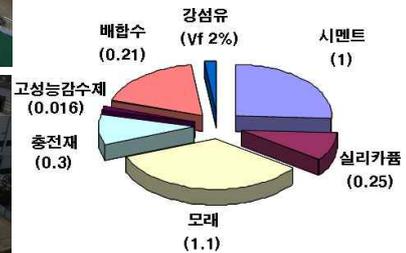


그림 1. UHPC 재료 질량 구성비

\* 정희원, 디엠엔지니어링 연구소 전무  
doinda@dm-eng.com  
\*\* 정희원, 디엠엔지니어링 대표이사

\*\*\* 정희원, 디엠엔지니어링 연구소 부사장  
\*\*\*\* 정희원, 디엠엔지니어링 연구소 상무

## 2.2 UHPC의 특징

UHPC는 기존의 콘크리트의 단점을 극복하기 위하여 강섬유 및 혼화재료를 사용하여 고강도화와 더불어 인장강도, 휨강도, 균열에 대한 저항성, 전단강도 및 내충격성을 대폭 개선시켜 구조부재의 연성 및 강도를 확보하기 위해 개발된 것으로 다음과 같은 재료적인 특성을 갖는다.

- 1) 굵은 골재 배제, 균일한 재료적 특성과 양호한 입자분포로 인한 초고강도 발현
- 2) 고온증기 양생에 의한 우수한 미세구조 형성
- 3) 강섬유 첨가로 인한 인성 증가

이와 같은 초고성능 콘크리트를 교량에 적용할 경우 다음과 같은 이점을 기대할 수 있다.

- 1) 단면 축소로 인한 중량(고정하중) 감소
- 2) 뛰어난 내구성으로 인한 교량의 장수명화

## 2.3 기술개발 현황

### 2.3.1 해외 기술개발 현황

초고강도 콘크리트는 프랑스, 일본, 호주, 캐나다, 미국 등 선진국에서 1980년대 말부터 연구가 시작되었고, 1990년 후반부터는 초고강도와 초내구성 및 고인성 개념이 복합적으로 융합된 기반 콘크리트 개발이 본격적으로 시작되었다.

프랑스에서는 1992년 Bouygues가 중심이 되고 Larfaz와 Choida가 합류한 컨소시엄을 구성하여 설계압축강도 180 MPa인 RPC(reactive powder concrete)로 명명된 초고강도 기반의 콘크리트 실용화 기술을 개발하였다.

호주에서는 뉴사우스웨일스주(New South Wales) 대학의 Gowripalan 교수팀을 중심으로 RPC를 연구하여 2004년 세계 최초의 RPC 도로교량인 Shepherd Gulley Creek Bridge를 준공하였다.

일본은 건설성이 1988년에 'New RC Project'를 실시하여 고강도 콘크리트 연구를 본격적으로 시작하였으며, 1991년 Kitamura는 구형 시멘트 콘크리트로서 140 MPa의 압축강도를 얻었다. 이후에도 지속적인 연구가 이루어졌으며, 최근에는 Tanaka 등은 PC교량에 200 MPa의 초고강도 섬유보강 콘크리트를 적용한 바 있다<그림 2>.

### 2.3.2 국내 기술개발현황

국내에는 1990년초부터 한국건설기술연구원, 한국과학기술원,

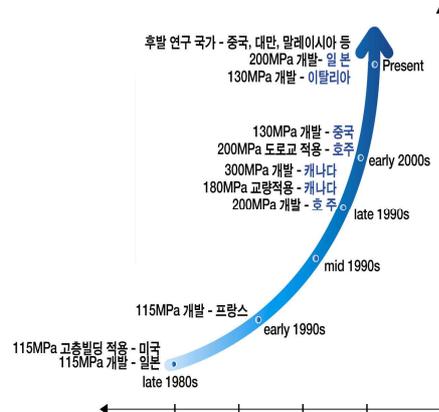


그림 2. 해외 UHPC 개발현황

서울대학교, 삼성건설기술연구소, 한양대학교, 충남대학교 등에서 50 ~ 80 MPa 범위의 고강도 콘크리트에 관한 연구를 시작하였다. 1990년 중반부터는 고강도 콘크리트 연구를 경험으로 초고강도 콘크리트 연구를 시작하였다.

초고강도 콘크리트 적용은 1994년 동아건설이 벽식 아파트 벽체에 100 MPa의 콘크리트를 시험 시공하였으며, 1997년 삼성물산(주) 건설부문은 80 ~ 140 MPa의 초고강도 콘크리트를 개발하여 타워팰리스(80 MPa)에 적용하였고, 최근 2006년도에는 서울 목동에 있는 주상복합건물 기둥 일부에 압축강도 150 MPa 정도의 초고강도 콘크리트를 적용하였다.

교량에 적용은 2002년 한강의 선유도 보도교로서 프랑스 Bouygues사에 의해 200 MPa의 강도를 가진 바닥판 두께 30 mm의 RPC로 시공하여 국내 최초의 초고강도 보도교를 건설하였으나 이것은 완전히 프랑스 기술로 이루어졌으며, 이에 대한 연구도 전무한 상황이었다.

이에 따라 한국건설기술연구원은 교량에 적용을 목적으로 2002년부터 목표강도 200 MPa의 초고강도 콘크리트를 개발하

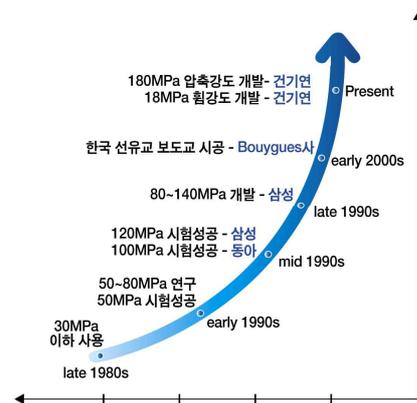


그림 3. 국내 UHPC 개발현황

표 1. UHPC의 물리적 특성비교

구분	AFGC/Setra	Ductal	일본토목학회	KICT
압축강도	150 MPa 이상	$f_c = 180$ MPa	150 MPa 이상 $f_{ck} = 180$ MPa	$f_{ck} = 180$ MPa
인장강도	$f_t = 8$ MPa(인장강도)	$f_t = 8$ MPa(인장강도) $f_{tu} = 5$ MPa(섬유)	$f_{crd} = 8$ MPa(균열강도) $f_{ck} = 8.8$ MPa(인장강도)	10 MPa
탄성계수	55,000 MPa	50,000 MPa	50,000 MPa	52,000 MPa
단위중량	-	-	25.5 kN/m <sup>3</sup>	25.5 kN/m <sup>3</sup>
포아송비	0.2	-	0.2	0.2
건조수축	0	0	$50 \times 10^{-6}$	$100 \times 10^{-6}$
크리프계수	0.2	0.3	0.4	0.2
열팽창계수	$11 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$13.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

기 시작하여 압축강도 180 MPa, 인장강도 25 MPa의 초고강도를 발휘하고, 연성거동 및 파괴에너지 흡수 능력이 탁월하며, 내구수명 200년이 확보되는 UHPC의 기반기술을 확보하였다 <표 1>. 또한 2005년에는 UHPC를 활용한 단경간(약 15m)의 프리캐스트 I형 거더 시작품을 제작하였다 <그림 3>.

2.4 UHPC 적용교량사례

2.4.1 교량종류별 사례조사

UHPC를 적용한 사장교의 사례를 조사결과 거더교 및 아치교의 사례는 발견되나 사장교에 적용은 조사되지 않아 본 보고가 세계최초의 설계 및 시공일 것으로 생각된다 <표 2, 3>.

2.4.2 교량사례

- ① 선유도 보도교 <그림 4>
- ② 도쿄국제공항 GSE교량 <그림 5>



그림 4. 선유도 보도교 야경



그림 5. 도쿄 국제공항 GSE교량 CG

표 2. 보도교 사례

구조물	시공	단면형상	경간(m)	국가
Sherbrook Footbridge	1997	트러스	60	캐나다
Sakata-Mirai Footbridge	2002	박스	50	일본
선유교	2002	II	120	한국
Akakura(Yamagata)	2004	박스	35	일본
TAhara Bridge(Aichi)	2004	박스	12	일본
FHWA Research Bridge	2004	-	30	미국
Keio Uni(Tokyo)	2006	-	11	일본
Yamagata Bridge	2006	-	20	일본
Gartnerplatz Footbridge	2007	트러스	36	독일
Sanken-ike(Fukuoka)	2007	박스	2@40	일본
Rifesaïdo Bridge	2007	-	26	일본
Toyota Gym(Aichi)	2007	박스	28	일본
건기연 보도사장교	2009	II	18	한국
Riverside Senshu Bridge	-	I	30.5	일본
Hikita(Tottori)	시공중	오른박스	63.3	일본

표 3. 도로교 사례

구조물	시공	단면형상	경간(m)	국가
Bourg-les-Valence	2001	II	2@20.75	프랑스
Road Bridge Virginia	2004	II	21	미국
Shepherds Gully Creek	2004	I	15	호주
Horikoshi Ramp(Fukuoka)	2005	I	16	일본
Saint-Pierre-la-Cour	2005	I	19	프랑스
PS34, bridge over A51	2006	Mono Cell	47.4	프랑스
The Mars Hill Bridge	2006	-	33	미국
Torisaki River(Hokkaido)	2006	-	45	일본
Wapello County Mars Hill	2006	II	-	미국
Cat Point Creek Bridge	2008	-	24.8	미국
Jakway Park	2008	-	26.5	미국
Tokyo Int. Airport GSE	2010	3실박스	47.6	일본
DNP Tokai Factory	-	-	2.9	일본
Wild Bridge(아치교)	2010	-	69	오스트리아

### 3. 교량계획

#### 3.1 현장조사 및 여건분석

본 과업의 교량은 본관동 후면에서 기사용 중인 본관동과 신축실험동을 연결하는 보도교량이다. 교량 가설 위치의 주요 지장물은 본관동의 지하층 및 휴게공간과 실험 1동과 인접하여 위치한 우수관로 및 오수관로로 교량의 기초 위치는 이러한 기존의 지장물과 간섭되지 않도록 위치를 선정하였다<그림 6>.

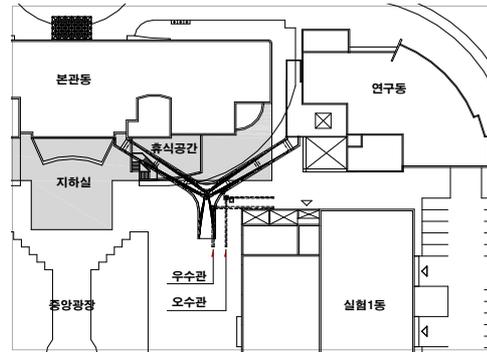


그림 6. 현장 여건

#### 3.2 교량형식선정 기본 방향

1) 기존 건물인 본관동 3층에서 신축 연구동 3층을 보도교로

연결하여 보행자의 동선을 단순화한다.

표 4. 교량형식비교

(a) 기능성 특화안	(b) 곡선형 특화안	(c) C.I. 특화안(Ⅰ)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 주탑: 1주식 주탑</li> <li>• 케이블 배치: 3면 Fan Type</li> <li>• 특징                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 거더 고정하중에 의한 균형 유지</li> <li>- 주탑 강성으로 활하중에 저항</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 주탑: 1주식 주탑</li> <li>• 케이블 배치: 2면 Semi-Fan Type</li> <li>• 특징                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 조형성 우수</li> <li>- 곡선거더 적용으로 동선 우수</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 주탑: 건기연 C.I.를 형상화</li> <li>• 케이블 배치: 2면 Fan Type</li> <li>• 특징                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 연구소의 상징성 제고</li> <li>- 강한 주탑으로 안정성 증대</li> </ul> </li> </ul>
(d) C.I. 특화안(Ⅱ)	(e) 케이블 특화안	(f) 건물 근접안
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 주탑: 건기연 C.I.를 형상화</li> <li>• 케이블 배치: 2면 Semi-Fan Type</li> <li>• 특징                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 연구소의 상징성 제고</li> <li>- 강한 주탑으로 안정성 증대</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 주탑: A형 주탑</li> <li>• 케이블 배치: 2면 하프형</li> <li>• 특징                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 비대칭 고정하중을 사재 케이블로 저항</li> <li>- H 형강을 사용한 주탑으로 경계성 제고</li> <li>- Simple한 단면계획으로 시공성 우수</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 주탑: 1주식 하이브리드 주탑</li> <li>• 케이블 배치: 2면 하프형</li> <li>• 특징                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 건물 근접하여 중앙광장 점유 면적 최소</li> <li>- 하부구조의 일체화로 안정성 증대</li> <li>- 비대칭 고정하중을 사재로 분담</li> </ul> </li> </ul>



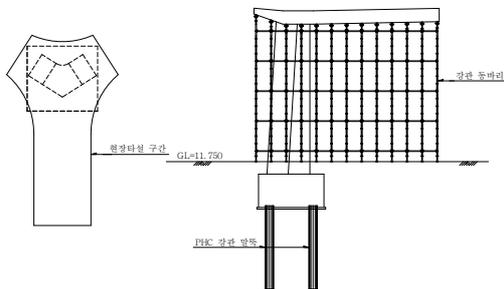
하였다. 현장에서 에폭시를 도포하고 가설용 강봉으로 압축력을 도입 후 강선을 긴장하는 통상적인 프리캐스트 세그멘탈 공법의 시공법을 적용하였다. 이때 철근은 시공 이음면에서 서로 연속되지 않는 것으로 계획하였다. 시공이음부의 단면 형태는 가설 강봉을 배치할 공간 확보를 위해서 가로보를 배치하고 가로보에 강봉을 배치해서 초기 긴장력을 도입하였다.

셋째, 프리캐스트 부재와 건물의 연결은 기사용 중인 건물로써 교량의 추가하중이 재하되면 건물에 유해한 영향을 줄 수 있기 때문에 FRP 발판만 설치하고 구조적으로 독립으로 계획하였다.

### 3.5 시공방법

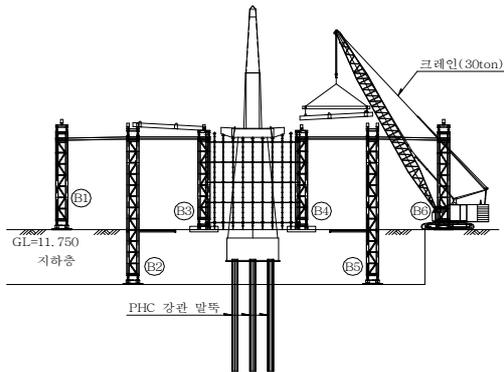
Step 1: 기초 및 주탑 하부 시공

Step 2: 현장타설 상부거더 시공

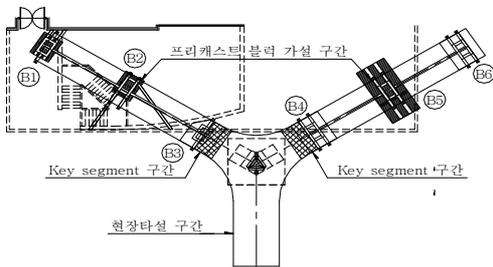


Step 3: UHPC 프리캐스트 블록 제작

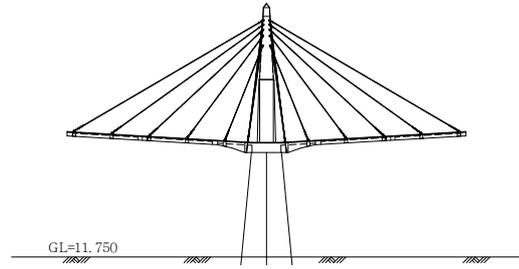
Step 4: 강제 벤트, 주탑 및 UHPC 프리캐스트 블럭가설



Step 5: 긴장후 Key Segment 시공



Step 6: 케이블 가설 및 긴장



## 4. 구조검토

### 4.1 UHPC 설계기준

항목	내용	
설계기준 강도	$f_{ck} = 180 \text{ MPa}$	
탄성 계수	$E_c = 50,000 \text{ MPa}$	
선팽창 계수	$\alpha = 1.35 \times 10^{-5}$	
포아송비	0.2	
단위 하중	$25.5 \text{ kN/m}^2$	
크리프 계수	$\phi = 0.2$	
건조수축율	$10 \times 10^{-5}$	
PS 도입시 콘크리트 응력	$f_{ct} = 180 \text{ MPa}$	
허용응력	인장응력	$f_t = 8 \text{ MPa}$
	압축응력	$f_c = 72 \text{ MPa}$

### 4.2 바닥판

바닥판은 UHPC(180 MPa)를 사용하여 제작장에서 엇지 거더(edge girder)와 일체로 프리캐스트로 제작되며, 보강 철근 없이 단면에 혼입된 강섬유 만으로 바닥판에 발생하는 부재력에 저항하도록 단면두께를 70 mm로 계획하였다. 바닥판의 안전성은 허용응력 조합에 대하여 균열이 발생하지 않도록 하였으며, 강도조합에 대하여 인장연단에서의 변형률은 1%를 초과하지 않도록 하였다.

구조검토 결과, 바닥판 두께 70 mm에는 보강 섬유만으로도 허용응력 및 휨강도를 모두 만족하는 것으로 검토되었으나 국내 최초 초고성능 콘크리트 사장교임을 고려하여 단면 중앙에 직경 5.8mm의 이형 와이어메쉬를 250 mm 간격으로 배치하였다.

1) 허용응력 검토

$$f_t = 4.87 \text{ MPa} < f_{ta} = 8 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

$$f_c = 4.87 \text{ MPa} < f_{ca} = 72 \text{ MPa} \quad \therefore \text{OK}$$

2) 휨강도 검토

최대 압축응력

$$f_c = 24.2 \text{ MPa} \leq f_{\text{max}_u} = 118 \text{ MPa} \quad \therefore \text{O.K}$$

최대 인장 변형률

$$\epsilon = 0.15\% \leq \epsilon_{max} = 1\% \quad \therefore \text{O.K}$$

3) 전단검토(일본토목학회)

$$V_{yd} = V_{rpd} + V_{fd} = 313 \text{ kN} \geq V_u = 15.59 \text{ kN} \\ \therefore \text{O.K}$$

4) 바닥판 처짐 검토

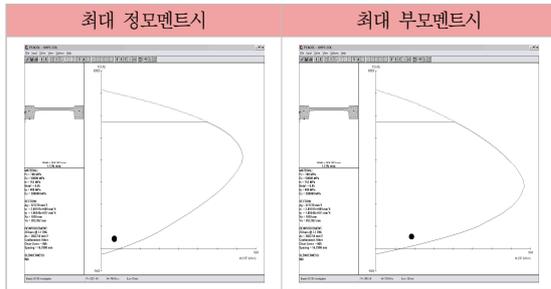
$$\text{활하중 처짐: } v = 1.1 \text{ mm} \leq \frac{L}{600} = 3.5 \text{ mm} \quad \therefore \text{O.K}$$

### 4.3 거더

1) 허용응력 검토

구분	상연응력(MPa)		하연응력(MPa)	
	인장	압축	인장	압축
공용중	5.78	-8.54	0.50	-20.44
케이블 교체	6.01	-6.28	2.22	-9.94
케이블 파단	5.04	-8.29	4.75	-11.46
허용응력	8.00	-72.00	8.00	-72.00
비교	O.K	O.K	O.K	O.K

2) 휨강도 검토



3) 전단검토

$$V_u = 136.2 \text{ kN} < \phi V_c = 1693.6 \text{ kN} \quad \therefore \text{O.K}$$

4) 비틀림검토

$$T_u = 23.6 \text{ kN} < \phi T_n = 31.0 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \therefore \text{O.K}$$

### 4.4 케이블 정착부

케이블 정착부는 콘크리트 타설시 강재를 매입하여 시공하는 것으로 하고 콘크리트와 강재의 접합은 스티드를 매입하고 철근으로 보강하는 것으로 하였다<그림 8, 9>.

### 4.5 보행자 진동검토

본 교량은 건물에 하중을 전달하지 않기 위해 주탑만 지지되고 거더가 일체 지지되지 않은 형식으로서 진동발생이 우려되어

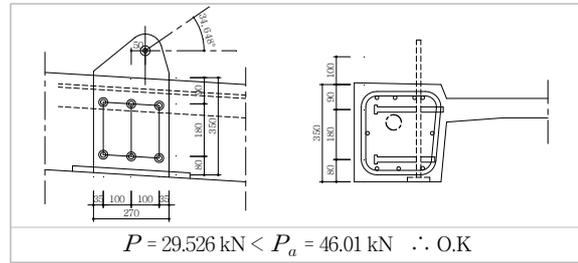


그림 8. 정착부 보강상세

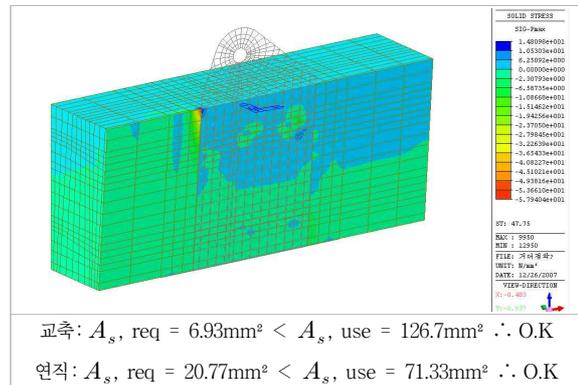


그림 9. 정착부 해석결과

교량 상부에 70 kg/m<sup>2</sup>의 하중에 2 Hz의 강제 주기력에 대하여 시간이력 해석을 수행한 결과 교량 단부에서 최대 가속도는 1.494 m/sec<sup>2</sup>으로 가속도 응답 상한치인 0.981 m/sec<sup>2</sup>을 상회하여 보행자에게 불쾌감을 유발하는 것으로 검토되었다. 하지만 시간에 따른 변위응답은 발산하지 않아 구조 안전에는 이상이 없는 것으로 판단되었다. 완공 후 불쾌감 저감을 위해 최종적으로 교량 단부에 TMD를 설치하여 진동의 응답을 제어하였다.

### 5. 맺음말

본 교량은 UHPC를 사용한 세계최초의 사장보도교로서 실교량의 준공으로 기술적 완성도가 제고되었다고 생각한다. 향후 고강도 재료특성을 활용한 경량화로 초장대교의 도전과 국내 토목기술의 국제 경쟁력강화를 기대한다. □

담당 편집위원 :

김진국(포항산업과학연구원 강구조연구소) jkkim@rist.re.kr