

## 고성능 콘크리트의 정의 및 교량 바닥판의 실용화



정원기\*



이형준\*\*

### 1. 서론

고성능 콘크리트(High Performance Concrete, HPC)라는 단어가 소개된 이래 그 정의에 대한 수많은 시도가 이루어져 왔다. 즉, 누구나 고성능 콘크리트가 무엇인지는 알지만 막상 그 정의에 대하여 기술할 때는 난감함을 당하게 된다. 따라서 그 동안의 고성능 콘크리트 정의 현황을 "ACI Defines High-Performance Concrete" by Technical Activities Committee, 1999년 2월호, Concrete International 기사내용을 소개하며 이를 통하여 국내실정에 맞는 고성능 콘크리트의 정의도 한번 생각할 기회를 가져 보았으면 한다.

현재 미국 4개 주 도로국에서는 고성능 콘크리트를 이용한 교량의 연구개발, 설계 및 시공을 통

하여 실용화에 박차를 가하고 있다. 이에 대한 내용을 ACI에서 발간하는 Concrete International 에서는 "High-Performance Concrete for Bridge Decks" 제목의 특집으로 다루었으며 본 고에서는 이를 요약하여 소개하고자 한다.

### 2. 고성능 콘크리트의 정의

#### 2.1 기존의 고성능 콘크리트 정의

미국 Strategic Highway Research Program (SHRP)에서는 고성능 콘크리트를 다음 3가지로 정의하였다.

- 가. 최대 물-결합재비 0.35 이어야 하며,
- 나. ASTM C 666 Method A 측정방법에 의한 최소 내구계수는 80%이고,

\* 정회원, 동아건설산업(주) 기술연구원 수석연구원

\*\* 정회원, 한국도로공사 도로연구소 책임연구원

다. 최소 압축강도는 타설 후 4시간 이내 21 MPa, 24시간 이내 34 MPa, 재령 28일 이내 69 MPa이어야 한다.

또한 SHRP는 다음과 같이 4종류의 고성능 콘크리트를 개발한 바 있다.

다음 표에 각국의 고성능 콘크리트의 정의를 제시하였다. 이들에서 알 수 있듯이 각국마다 고성능 콘크리트를 약간씩 다르게 정의하고 있다.

## 2.2 ACI의 정의

1991년 ACI의 Technical Activities Committee(TAC)는 고성능 콘크리트에 관련된 부위원회(THPC)를 구성하였다. 이 위원회의 첫 작업은 현실적인 고성능 콘크리트 정의를 규정하는 것이었다. 수년간 이 정의는 개정되었고 1998년에 제출되어 TAC로 부터 공식 ACI 정의로 인정되었다.

이 정의를 개발하는데 있어서 위원회는 과도한 제한을 원치 않았으며 이것은 모든 콘크리트가 고성능 콘크리트라는 함정으로 가질 않길 기대하였다. 이 정의는 상대적으로 간결하며 폭넓은 적용을 허용한다. 정의 바로 다음에는 이 정의가 어

High-performance concrete as developed by SHRP			
HPC type	Minimum strength criteria	w/(c+m)	Min. durability factor
Very Early Strength(VES)	2000 psi(14 MPa) in 6 hrs	≤0.4	80 percent
High Early Strength(HES)	5000 psi(34 MPa) in 24 hrs	≤0.35	80 percent
Very High Strength(VHS)	10,000 psi(69 MPa) in 28 days	≤0.35	80 percent
Fiber Reinforced	HES + (Steel or Poly)	≤0.35	80 percent

제안자 및 단체	국 가	내 용
Goodspeed et al. by Federal Highway Administration	미 국	- 교량에 관련된 고성능 콘크리트로서 도로구조물의 고품질화를 지향하여 4종류의 강도, 4종류의 내구성 지수를 정의 - FHWA는 도로포장에 적합한 정의를 개발 중
Foster	미 국	- 고성능 콘크리트는 선택된 배합설계, 적절한 혼합, 운반, 타설, 다짐 그리고 양생을 겸비한 적당한 재료로 구성되며 고성능 콘크리트는 구조물의 설계 수명동안 노출된 환경 및 작용하중에 대하여 구조물에 탁월한 성능을 제공
FHWA	미 국	- 고성능 콘크리트는 내구성이 강한 콘크리트이며 필요시 일반 콘크리트보다 강도가 큰 콘크리트이다. 고성능 콘크리트 배합은 필수적으로 통상적인 배합과 같다. 그러나 공사의 구조적, 환경적 제한에 부합되는 강도와 내구성을 제공하도록 배합이 결정되어야 한다.
Mather	미 국	- 어떤 목적에 필요한 성질을 갖춘 콘크리트로서 일반 콘크리트로서는 해결할 수 없는 콘크리트. - U. S. Army Corps of Engineers는 현재 200년 수명의 고성능 콘크리트를 개발중
Neville	미 국	- 고성능 콘크리트의 필수적인 특징은 그것의 성분과 비율이 특별히 선택되어서 구조물의 기대된 용도를 위하여 특유의 적절한 성질을 보유하는 것이다. 이들의 성질은 고강도와 낮은 투수성을 말한다.
Ryan and Potter	호 주	- 일반 콘크리트에서 요구되는 것보다 엄격한 다기능의 규준을 보유한 콘크리트.
Rangan	호 주	- 고성능 콘크리트를 한마디로 정의할 수는 없다. 그것은 단지 콘크리트 사용의 목적에 부합되는 콘크리트를 말한다.
Swamy	영 국	- 경비, 수명, 내구성의 요구에 부합하며 주어진 하중, 사용성, 노출조건에 대하여 최적화된 수행 특성을 주도록 설계된 콘크리트. 물론, 주어진 상황이나 환경을 보장하지 않는 한 고가의 재료사용이나 복잡한 기술과정을 의미하는 것은 아니다.
Tomosawa	일 본	- 작업성이 양호하고 요구치를 만족하는 고유동성 콘크리트를 고성능 콘크리트라고 하며 다양하고 광범위한 구조물의 설계와 시공을 만족하게 한다.

떻게 적용되어야 하는지를 주석(commentary)을 첨가하였다. 의도적으로 이 주석은 어떻게 고성능 콘크리트를 성취하는 방법을 설명하지 않았다. 왜냐하면 그 목적을 달성하는 길은 여러 가지가 있기 때문이다.

이 정의가 고성능 콘크리트의 최종정의가 아니며 이미 위원회에서는 여러건의 개정안이 제안되고 있으며 고강도 콘크리트의 정의가 해를 거듭할수록 바뀌듯이 고성능 콘크리트의 정의도 바뀔 것이다.

이 정의가 고성능 콘크리트의 모든 것을 나타내었는가? THPC위원회는 모든 면을 표현하려 했으나 아마 못미친 것 같다. 여러분의 제안을 환영합니다.

### 3. 고성능 콘크리트 교량 바닥판

미 연방도로국(Federal Highway Administration, FHWA)에서는 교량수명 연장과 개선의 노력으로 1993년 교량에 고성능 콘크리트 적용 프로그램을 시작하였다. 1996년 Zia는 고성능 콘크리트는 일반콘크리트의 한계를 극복하기 위해 제안된 규준을 만족하는 콘크리트라 정의하였다. 이 향상된 콘크리트는 구조물 사용기간동안

개선된 내구성과 강도를 제공한다.

AASHTO(American Association of State Highway and Transportation Officials)산하의 기구인 SHRP(Strategic Highway Research Program),FHWA,그리고TRB(Transportation research Board)들은 고성능 콘크리트 실용화 노력의 일환으로 1996년 HPC Lead State Team을 구성하였다. 이들의 임무는 도로와 도로 구조물에 고성능 콘크리트의 사용을 촉진하며 다른 주들과 소비자에게 관련된 지식과 이익 그리고 도전을 공유하고자 하는 것이다.

이를 위하여 HPC Lead State Team의 4 구성원은(Nebraska, New Hampshire,Texas, Virginia) 고성능 콘크리트 교량의 경험들을 공유하고 있다. 이들 주의 교량들은 다양한 기후조건, 차량하중, 교통량에 노출되어 있다. 또한 지역적으로 다른 재료와 공법을 사용하고 있다. 이 요인들은 고성능 콘크리트 교량을 건설하기 위한 여러 방법들을 제공할 수 있다.

#### 3.1 Virginia주의 고성능 콘크리트 교량 바닥판

콘크리트의 내구성은 물과 화학물질의 침투에

#### 고성능 콘크리트에 대한 ACI 정의

##### 정의(definition)

고성능 콘크리트 - 일반적인 구성성분과 배합, 타설, 양생으로 이룰 수 없는 균등한 요구조건과 성능의 특별조합들을 만족하는 콘크리트

##### 주석(commentary)

고성능 콘크리트는 콘크리트내의 어떠한 성질이 특별한 사용성과 환경에 맞도록 개발된 콘크리트이다. 사용성에 고려되는 특성들은 다음과 같다.

- 타설의 용이성
- 재료분리 없는 다짐
- 조기강도 발현
- 장기적인 역학적 성질
- 투과성
- 조밀성
- 수화열
- 인성
- 체적 안정성
- 열악한 환경하의 장기수명

고성능 콘크리트의 많은 특성들이 상호 관련되어 있기 때문에 한가지의 특성의 변화는 한가지 이상의 다른 특성들의 변화를 초래한다. 결론적으로, 의도된 적용을 위하여 여러 가지 특성들이 고려되어야 한다면 이들 특성의 각각은 계약서 내에 분명히 명기하여야 한다.

저항할 수 있는 능력에 크게 의존한다. 철근 콘크리트 구조물 피해를 유발시키는 4개의 환경적 주요 요인은 철근부식, 알칼리 골재 반응, 동결융해 피해, 황산염 부식 등이 있다. 이중 철근 부식이 가장 폭넓게 발생한다.

각 경우 물이나 용액이 콘크리트에 침투하여 열화를 시작하고 촉진하며 결국 많은 보수비용을 수반하게 된다. 낮은 투과성을 보유하고 공기 연행된 콘크리트는 유해용액 침투를 저지하고 노출된 환경에 필요한 내구성을 제공한다. 낮은 침투성을 갖은 콘크리트는 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트보다 열악한 환경에 견딜 수 있으며 이러한 콘크리트를 고성능 콘크리트라고 구분하여 부른다.

(1) 투과성

Virginia 도로국(Virginia Department of Transportation, VDOT)에서는 콘크리트의 투과성(permeability)을 두 가지 시험법으로 판정한다. 첫번째 시험법은 ponding test로 "염소이온 투과 저항성 시험법(AASHTO T 259)"이다. 슬래브를 염화나트륨 용액에 90일 동안 침지하고 콘크리트내 깊이별로 염소함유량을 측정하는 방법이다. 그러나 뚜렷한 판정을 위해서는 일반적으로 1년 이상의 기간이 걸린다. 다른 판정법은 빠른 투과시험(rapid permeability test)으로 "염소이온 투과 저항성에 대한 전기적 신호법(AASHTO T 277, ASTM C 1202)"이다. 이 측정법은 60 V DC를 6시간동안 100 mm 직경의 50 mm두께의 포화된 공시체에 가할 때 공시체를 통과한 전하량(Coulombs 단위)

으로 결정한다. 낮은 수치는 용액 침투에 대한 높은 저항성을 나타낸다. 이런 직접법은 투과성의 좋은 지표로 나타낸다.

유해한 용액의 침투 저항성이 다른 콘크리트들을 이들 시험으로 구분하게 할 수 있다. 예를 들면 latex, 포졸란(Class F 플라이애쉬, 실리카흄), 슬래그를 사용한 콘크리트는 염소이온 침투에 대한 저항성을 증대시킨다. 이들 콘크리트는 재령 28일에 매우 낮은 수치부터 높은 수치까지의 coulomb 범위를 보이나 시간이 지남에 따라 낮거나 매우 낮은 수치를 보인다.

교량 바닥판에 적용된 낮은 투과성 콘크리트는 낮은 물-결합재비(0.45 이하)와 포졸란(플라이애쉬, 실리카흄)이나 슬래그 사용으로 달성될 수 있다. 1992년 이래로 VDOT는 시멘트의 알칼리 함유량을 0.4%(최근 0.45%)이하를 요구하고 있다. 이는 포졸란이나 슬래그의 혼입이 없이는 알칼리 골재 반응이 일어날 가능성 때문이다. 포졸란이나 슬래그의 사용으로 알칼리 함유량은 1.0%로 높일 수 있다. Virginia 내에서 사용되는 방대한 시멘트들이 알칼리 함유량 0.45%를 초과하므로 VDOT는 포졸란 재료를 통상적으로 사용하고 있다.

낮은 투과성 규준은 운송 시설물 등의 사용수명을 확장한다는 경험을 VDOT는 갖고 있다. 이 규준은 강도와 굳지 않은 콘크리트의 물성에 대한 기존의 요구조건에 더하여 빠른 투과성시험을 사용한 투과성의 요구를 포함시켰다.

(2) VDOT의 낮은 투과성 규준

VDOT가 제안한 낮은 투과성 규준은 38°C로

Table 1 High-performance concrete bridges in Virginia

Bridge	Length (m)	Span (m)	Specified beam strength (MPa)	Specified deck strength (MPa)	Low permeability specified?*
Rte. 40	97.5	24.4	55	28	Yes
Rte. 629	365.8	30.5	55	28	No
Telegraph Rd.	55.5	27.7	Steel	28	Yes
Rte. 10	654.4	29.6	55	28	No
Rte. 250	16.2	16.2	48	28	Yes
Second St.	27.1	27.1	48	28	Yes
Virginia Ave.	44.5	22.3	69	41	Yes

\*Maximum of 2500 coulombs for bridge deck and 3500 for substructure

3주간 양생하고 실내온도에서 일주일간 습윤양생 후 시험실시를 요구한다. 고온양생은 23℃로 6개월간 양생한 결과와 유사한 coulomb를 재령 28일에 얻도록 한다. 이 특별 규준은 프리스트레스트 콘크리트는 1,500 coulomb 이하, 교량바닥판은 2,500 coulomb 이하, 교량하부구조는 3,500 coulomb를 요구한다.

시방규정에 달성되도록 시험 batch실시가 요구된다. 각 압축강도 시험용 공시체(cylinder)에 2개의 투과시험용 공시체를 추가한다. 투과성이 기준 미달 시 벌과금 부과 및 수정방법을 계약서에 포함시켰다.

콘크리트 품질을 위해서 시험시공이 필수적이라고 새로운 규준에 언급하였다. 교량 바닥판과 덧씌우기에 대해서 습윤양생이 최소 7일이 요구되며 설계압축강도의 70%가 재령 28일에 달성되어야 한다. 젖은 양생포나 plastic sheeting 설치 전에 급격한 표면건조를 막기 위해 분무양생을 실시한다. latex를 사용하는 경우를 제외하고 습윤양생 실시후 curing compound를 사용한다.

적절한 다짐이 중요하다. 바닥판 타설 시 내부 진동기의 사용법이 규정되었다. 내부 진동기(internal vibrator)의 최소 진동수는 8,000회/분이며 막대형 진동기(screed)의 진동은 3,000회/분이다.

### (3) 현장적용

1995-97년 건설기간동안 VDOT는 7개의 고성능 콘크리트 교량구조물을 건설하였다(Table 1 참조). 그중 5개 구조물에 신규로 낮은 투과성 규준이 적용되었다. 7개 교량이 준공되었으며 그중 6개 교량은 사용 중에 있다. 2개의 교량이 포

졸란 재료로서 슬래그를 사용하였다.

Rte. 40 교의 하부구조는 물-결합재비 0.44이고 슬래그 40%를 사용하였고 교량 바닥판은 물-결합재비 0.40, 슬래그 50%를 사용하였다. 배합비는 Table 2에 기술하였다.

물-결합재비가 낮아졌다는 사실을 제외하고는 1992년 이후의 일반적인 교량시공에 사용하는 배합비이다. 특히 교량바닥판은 0.45, 하부구조는 0.49의 최대 물-결합재비를 사용하였지만 낮은 물-결합재비 규정인 경우에 하부구조와 상부구조 모두 0.45이다. 교량 바닥판 시공 시 생산자의 보다 낮은 물-결합재비 선택은 coulomb 규정들이 규정내에 경미한 가격 수정조항에 일치한다는 확신이다. 하부구조물의 평균 압축강도(재령 28일)는 40.9 MPa이고 상부구조물은 60.1 MPa이다. 이 수치들은 규정치(하부구조 21 MPa, 상부구조 28 MPa) 보다 매우 큰 강도이다. 38℃로 3주간 양생한 재령 28일의 평균 coulomb값은 하부구조에서 1,109이고 상부구조는 898이다. 물-결합재비 0.44의 하부구조물은 교량 바닥판의 강도와 투과성 요구치를 만족한다.

Telegraph Road교에서 하부구조의 물-결합재비는 0.45이고 상부구조는 0.38이며 양쪽 다 50%의 슬래그를 사용하였다. 배합비는 Table 2에 주어졌다. 하부구조와 교량 바닥판의 평균 압축강도는 각각 44.4 MPa, 46.1 MPa이며 평균 coulomb는 각각 2,147과 983이다. 물-결합재비 0.45의 하부구조물은 교량 바닥판의 요구치를 만족한다.

### (4) 결론

실험실과 현장을 통한 연구결과들로 부터 통상적인 물-결합재비 0.45 이하는 포졸란이나 슬래

Table 2 Mix proportions

Material	Rte. 40 Bridge		Telegraph Road Bridge	
	Substructure (kg/m <sup>3</sup> )	Deck (kg/m <sup>3</sup> )	Substructure (kg/m <sup>3</sup> )	Deck (kg/m <sup>3</sup> )
Portland cement	209	195	174	195
Slag	139	195	174	195
Coarse aggregate	1052	1052	1060	1060
Fine aggregate	747	696	716	687
w/cm	0.44	0.40	0.45	0.38

그가 사용되는 한 VDOT에서 정한 coulomb 값을 만족하는 것을 나타내었다. 적절한 시공 연습이 품질관리 측면에서 필요성을 느낀다. Rapid permeability test는 만족스런 결과를 주고 있으며 콘크리트 관리를 위한 규정으로 사용되고 있다.

### 3.2 New Hampshire 교량의 고성능 콘크리트 적용

New Hampshire의 Bristol시의 Newfound River를 통과하는 State Route 104번 도로 상에 고성능 콘크리트 교량이 위치한다. 이 교량은 경간 20m 단순교이며 교폭은 17.5m이고 보도와 3차선으로 되어 있다. 5개의 precast/prestressed AASHTO Type III girder와 합성된 콘크리트 바닥판은 현장타설이 실시되었다. 거더 중심간의 간격은 3.8m이다. 접속슬래브는 마지막에 시공하였다. 바닥판과 접속슬래브는 최종 표면처리로서 bare concrete를 사용하였다.

AASHTO MS22(HS25) truck 하중으로 설계하였다. 거더의 28일 압축강도는 55 MPa이며 강선 release시 강도는 45 MPa로 설계하였다. 51 mm 간격으로 13 mm low relaxation 강선을 사용하고 에폭시 코팅이 된 철근을 사용하였다. 접속 슬래브의 강도는 41 MPa이며 비교를 위하여 에폭시 처리가 안된 철근을 배근하였다.

AASHTO의 사용하중 설계법에 따라 철근콘크리트 바닥판은 230 mm로 설계하였다. 이는 거더의 간격이 넓어지고 피복두께를 증가에 따른 고려이다. 상부 철근의 피복두께는 75 mm(N.H. 표준은 65 mm)로 변경하였으며 마모 층의 부재와 톱날 홈의 깊이 때문에 증가하였다.

#### (1) 콘크리트 배합설계

University of New Hampshire(UNH)가 교량 바닥판에 사용될 고성능 콘크리트 배합설계에 참여하였다. 이 배합은 3종류의 배합을 실내 실험과 현장실험으로부터 선정되었다. 3종류 배합의 조건은 설계강도 41 MPa, 28일 공시체 강도 50 MPa, 재령 50일의 최대 염소이온 투과성

은 1,000 coulomb 이었다. 각각의 배합을 사용한 시험 슬래브들이 Rochester, N.H.의 UNH 교량바닥판 시험소에 설치하였다. 각 슬래브들은 65ton의 heavy truck traffic을 6개월 동안 겨울기간 중에 가하였다. 이들 조건하에 최적의 수행능력을 보인 배합이 선택되었다.

#### (2) 바닥판 시공

콘크리트 생산업자는 바닥판 설계배합을 위해 수회의 시험배치를 수행하였다. NHDOT에 배합 설계를 인정한 후에 본 타설에 앞서 실제의 마감 처리와 양생을 포함한 3.8 m<sup>3</sup>의 시험타설을 수행하였다. 작업성의 향상을 위하여 고유동화제량이 추가되었으며 믹스에 투여되는 물의 양을 계산하는 컴퓨터의 사소한 고장이 고쳐지는 등 약간의 조정이 이루어졌다.

고성능 콘크리트 배합에 대한 규준이 Table 3(N.H. standard AA 바닥판 콘크리트 배합 첨가)에 나타내었다. 그리고 최종 인정된 배합은 Table 4에 나타내었다. 이 고성능 콘크리트 배합은 시멘트 결합재량의 7.5% 실리카흄을 사용하여 N.H. standard AA 배합과는 차이가 있다. 재령 28일 공시체 강도는 50 MPa 이고 1,000 coulomb 이하의 염소이온 투과성을 규정하였다. 방청제의 사용으로 아스팔트 덧씌움과 barrier membrane를 적용하는 N.H. 표준과 차이를 두었다.

바닥판의 시공은 표준 바닥판 시공기술을 적용하였고 타설을 용이하게 하기 위하여 펌프를 사용하였다. 공기량의 손실과 콘크리트의 자유낙

Table 3 Concrete specifications

	HPC mix	Standard mix
Cement	Type II	Type II or IP
Silica fume	7.5 percent	-
w/c	0.38 (max)	0.38 (max)
Air content	6 to 9 percent	5 to 8 percent
28-day cylinder strength, $f'_{cr}$	50 MPa	30 MPa
Chloride ion permeability	1,000 coulombs (max)	-
Corrosion inhibitor	20 L/m <sup>3</sup>	-
Curing procedure	4 day wet cure 2/cotton mats	3 day wet burlap cure

하를 방지하기 위하여 호스의 끝은 수평을 유지하였다. 표준 self-propelled finishing machine으로 표면을 두드렸다. finishing pan과 burlap drag가 막대진동기(screed machine)뒤에 부착되어 다짐과 동시에 표면마감을 한다.

15분 이내에 마른 양생포로 표면을 덮고 물로 적신다. 양생은 4일 동안 젖은 목화매트가 콘크리트 표면에 접촉된 상태로 지속한다. 표면수분의 빠른 증발로 인한 소성건조 수축을 방지하기 위하여 마무리 직후 콘크리트 표면을 덮는 것이 중요하다.

Table 4 Deck mix proportions

Cement	Ciment Quebec-SF (approx. 8 percent silica fume)	300 kg
Fine aggregate	Sand	540 kg
Coarse aggregate	No. 67 Stone (19mm)	823 kg
water	114 L	115 kg
Air entrainment	Daravair-1000	150 mL
Water reducer	WRDA w/hycol	600 mL
*Superplasticizer	Daracem-100	-
Corrosion inhibitor	DCI-S	15L
w/c		0.384

\* added at the site

콘크리트 타설 시 수분 증발율에 대한 규준은 엄격하게 강조된다. 증발율이 0.5 kg/m<sup>2</sup>/hr이거나 주변온도가 29°C 이상이면 타설할 수 없다.

적당한 콘크리트 강도가 이루어지면 saw cut을 사용하여 횡방향으로 40 mm 간격마다 3 mm 폭, 6 mm 깊이의 홈을 낸다. 소음의 감소를 위하여 불규칙한 간격의 홈은 저속차량에 필요하나 고려치 않았다.

바닥판 타설 시 설계 공기량과 균일한 슬럼프를 이루기는 약간의 어려움이 있었다. 기대하는 작업성을 달성하기 위해 시험타설시보다 많은 양의 고유동화제가 사용되었다.

현장까지 운반할 동안 방청제와 다른 혼화제들과 상호작용으로 불규칙한 공기량과 슬럼프로 초래하였다. 그럼에도 불구하고 28일 공시체 강도는 50 MPa를 초과하였고 재령 56일의 바닥판 core로부터 rapid permeability test는 탁월한 결과를 보였다. 공기량은 규준치 이하이지만 300 cycle의 동결융해시험 시 우수한 결과를 보여주었다.

NHDOT 바닥판 콘크리트 시험결과와 시험방법은 Table 5에 기술하였다.

### (3) 결론

University of New Hampshire는 연구역의 일환으로 3종류의 배합에 대한 실내시험과 현장시험을 실시하였다. 최상의 성능을 보여준 배

Table 5 Deck concrete test results

Test	Target	Results	Test Method
Slump	125 to 180 mm	75 to 125 mm	AASHTO T119
Unit weight	-	65.3 to 66.7 kg	AASHTO T121
Air content	6 to 9 percent	4.0 to 5.8 percent	AASHTO T152
w/c	0.38	0.39	†
28-day cylinder strength, f <sub>cr</sub>	50 MPa	56.3 to 66.3 MPa	AASHTO T22
*Modulus of elasticity, E	30.6 GPa	29.0 to 30.0 GPa	AASHTO C 469
Chloride ion permeability	1,000 coulombs	609 to 896 coulombs	AASHTO T277
Freeze-thaw durability	80 percent	96 to 99 percent	AASHTO T161
*Sealing	-	0 to 1	ASTM C 672

\*Results determined by UNH graduate student Cheryl Wilson

† Results determined by NHDOT microwave oven drying test

합이 고성능 콘크리트 교량바닥판의 규준의 기초로서 선택되었다.

최종 시제품은 기대치를 초과하였다. 시공 후 설계자, 연구원, 시공자에 의해 조사한 결과 바닥판 표면에 균열은 발견하지 못하였다. 재령 28일의 압축강도는 설계압축강도를 초과하였다.

그러나 탄성계수는 기대값보다 작았다. 동결융해 내구성시험, 염소이온 투과성시험, scaling 시험 등은 탁월한 결과를 나타내었다. 예비 평가에 기초한다면 고성능 콘크리트 바닥판은 염소의 침투와 동결융해에 대한 저항성이 크며 수명연장이 극대화될 것으로 기대된다.

### 3.3 Texas HPC 교량 바닥판

텍사스주에서는 미연방도로국(FHWA)와 주도도로국(TxDOT)의 지원으로 텍사스 오스틴대학(UT) 교통연구센터와 협동으로 2개의 HPC 교량을 건설하였다. 2개의 프로젝트에서 얻은 결과로 UT와 TxDOT의 연구진들은 교량 바닥판과 하부구조에 대한 내구성 규정을 마련하였다. 여러 개의 교량이 보통강도의 HPC를 이용하여 새로운 내구성 규정에 따라 바닥판을 건설하도록 계약되었고 더 많은 교량건설이 계획되고 있다. 내구성 규정은 연구를 계속하면서 수정될 것이다.

#### (1) 교량상세

Houston의 서쪽 249번 고속도로상에 있는 Louetta 교량은 상·하행선이 분리된 2개의 3경

간 연속교로 구성되어 있으며, 고성능 콘크리트(HPC)는 이 교량의 바닥판, 프리캐스트 U beam, 프리캐스트 포스트텐션 하부구조에 사용되었다. San Angelo시의 Concho 강, 87번 도로 및 철로를 횡단하는 67번 교량(San Angelo)은 상·하행선이 분리된 다경간의 인접한 2개 교량으로 구성되어 있으며, HPC는 하행선 교량의 8개 지간에 걸쳐 바닥판, AASHTO IV type 거더 및 하부구조와 상행선의 5개 지간 바닥판에 시공되었다.

두 교량의 상부 구조는 단순지간으로 설계되었으며, 바닥판은 2경간 또는 3경간 연속으로 시공되었다. 바닥판은 프리캐스트 프리스트레스트로 만든 하부 패널과 현장타설로 만든 상부 패널로 구성되어 있다. 두 교량의 제원 및 콘크리트 설계강도는 Table 6과 같다.

#### (2) 현장타설 HPC 바닥판에 대한 최적 배합

본 절에서는 주로 현장타설 바닥판의 HPC를 주로 다루고 프리캐스트 프리스트레스트 하부 패널에 대해서 조금 다룬다. 왜냐하면, 1) 현장타설 콘크리트가 도로표면을 형성하고, 2) 프리캐스트 플랜트 조건보다는 현장에서 타설되고, 3) 패널이 프리스트레스트를 받는 곳에서 철근이 보강되기 때문이다. HPC 교량의 비용 효과에 대해서는 가능한 한 그 지역의 재료를 사용하고 일반적인 시공방법을 사용하는 것에 중점을 두었다. 각 교량의 근처에 있는 레미콘 플랜트에서 이용 가능한 그 지역의 골재를 UT의 재료실험실에 운

Table 6 Dimensions and design compressive strengths

제 원	Louetta Bridge		San Angelo Bridge	
	북측 교량 (상행선)	남측 교량 (하행선)	동측 교량 (상행선)	서측 교량 (하행선)
지간, m	37.0- 41.3		19.4-47.9	14.2-42.8
바닥판의 순지간, m	1.0-1.6	0.8-2.7	1.5-2.83)	1.1-2.0
바닥판의 캔틸레버부 순지간, m	1.1		0.81	0.66
바닥판 두께, mm			90	
현장타설 부	95		90	
프리캐스트 패널	90		1001)	
총 두께	1852)		1902)	
콘크리트 압축강도 MPa				
현장타설부(28일)	27.61)	55.2	41.4	27.61)
패널(PS 도입시)	41.4	41.4	27.61)	27.61)
패널(28일)	55.2	55.2	41.4	34.51)

1) Texas 표준 2) Texas 표준은 최소 200 mm

3) Beam 간격 최대 3.35 m. 표준 프리캐스트 패널을 사용할 때 대표적인 최대 Beam 간격은 3.0 m



반하여 실험을 수행하였다.

텍사스 주립대학의 Ramon Carrasquillo의 방침에 따라 연구원들은 ACI 지침을 기초로 하여 배합비를 처음으로 개발하였다. 다양한 구성 재료간의 상호작용을 평가하고 성능을 최적으로 하기 위해 실험실에서 많은 시험배합을 개발하였다. 현장타설 바닥판의 배합설계는 낮은 염소이온 침투성, 동결융해-저항성, 마모저항성과 같은 장기 내구특성에 초점을 맞추었다.

실험실에서 얻은 최적의 배합을 기초로 하여 이를 현장에서 얻기 위해 UT의 연구진들은 레미콘공장의 작업원들과 밀접하게 일을 같이 하였다. 실험실에서 얻은 배합을 현장에서 생산하였을 때 강도의 저하를 규명하기 위하여 현장에서의 시험배합을 실시하였다. 또한, 초결시간, 압송능력, 작업성 및 마감성을 평가하였다. 레미콘공장의 작업원들은 시멘트 부분 대체재료로서의 플라이애쉬 사용이나 바닥판용 고강도콘크리트 배합

을 위해 고성능감수제(HRWRA)를 사용한 경험을 갖고 있다. Table 7은 Louetta 교량과 San Angelo 교량에 사용한 현장타설 콘크리트의 배합표를 보여주고 있다. San Angelo교 하행선의 바닥판에서 보면 같은 물-결합재비를 유지하기 때문에 플라이애쉬를 대체함으로써 시멘트량이 감소하였다.

콘크리트 구성재료의 선정시 교량 현장의 조건을 고려하여야 한다. 예를 들면, 적정한 양 이상의 황산염을 포함하고 있는 토양이나 지하수는 10% 이상의 생석회(산화칼슘)를 함유한 플라이애쉬를 사용한 콘크리트에 유해한 영향을 미칠 수 있다. 이와 같은 경우에 대해서는 추가의 실험이 수행되어야 한다.

Table 8은 현장타설 바닥판용 굳지 않은 콘크리트의 성질을 나타내고 있다. Louetta교 하행선과 San Angelo교 하행선 교량의 바닥판은 고강도 콘크리트로 설계되었기 때문에 낮은 물-시

Table 7 Mix proportions for cast-in-place decks

Component	Louetta		San Angelo			
	Northbound (상행선)	Southbound (하행선)	Eastbound (상행선)	Westbound (하행선) Spans 1-5	Westbound (하행선) Spans 6-91)	
Coarse agg.:Type	Crushed limestone 38mm max	Crushed limestone 25mm max	Crushed river gravel 32mm max	Crushed river gravel 32mm max	Crushed river gravel 32mm max	Crushed river gravel 32mm max
Quantity	1102 kg/m <sup>3</sup>	1074 kg/m <sup>3</sup>	1127 kg/m <sup>3</sup>	1101 kg/m <sup>3</sup>	1101 kg/m <sup>3</sup>	1101 kg/m <sup>3</sup>
Fine agg. : Type	natural sand FM=2.54	natural sand FM=2.54	natural sand FM=2.70	natural sand FM=2.70	natural sand FM=2.70	natural sand FM=2.70
Quantity	737 kg/m <sup>3</sup>	773 kg/m <sup>3</sup>	721 kg/m <sup>3</sup>	735 kg/m <sup>3</sup>	735 kg/m <sup>3</sup>	737 kg/m <sup>3</sup>
Water	136 kg/m <sup>3</sup>	145 kg/m <sup>3</sup>	128 kg/m <sup>3</sup>	153 kg/m <sup>3</sup>	153 kg/m <sup>3</sup>	153 kg/m <sup>3</sup>
Cement : Type	Type I	Type I	Type II	Type II	Type II	Type II
Quantity	227 kg/m <sup>3</sup>	281 kg/m <sup>3</sup>	292 kg/m <sup>3</sup>	253 kg/m <sup>3</sup>	253 kg/m <sup>3</sup>	362kg/m <sup>3</sup>
Fly Ash <sup>2)</sup> , Repl. of cement by wt	88 kg/m <sup>3</sup> 28%	131 kg/m <sup>3</sup> 32%	125kg/m <sup>3</sup> 30%	109kg/m <sup>3</sup> 30%	109kg/m <sup>3</sup> 30%	None 0
Retarder, ASTM Type D3)	1744 mL/m <sup>3</sup>	853 mL/m <sup>3</sup>	1085 mL/m <sup>3</sup>	1008 mL/m <sup>3</sup>	1008 mL/m <sup>3</sup>	1008 mL/m <sup>3</sup>
HRWRA, ASTM Type P4)	None	4729 mL/m <sup>3</sup>	6047 mL/m <sup>3</sup>	None	None	None
Air Entr., ASTM C260	78 mL/m <sup>3</sup>	None	116 mL/m <sup>3</sup>	116 mL/m <sup>3</sup>	116 mL/m <sup>3</sup>	116 mL/m <sup>3</sup>

주 : 1) Non-HPC

2) ASTM C 등급 및 TxDOT의 Material Spec. D-9-8900을 만족하는 플라이애쉬

3) 지연제의 사용량은 타설시 기상상태에 따라 달라짐. 표에 나타난 사용량은 무더운 날씨조건에서 사용하는 최대 사용량 임. 동절기에는 지연제를 사용하지 않음

4) 고성능감수제(High Range Water Reducer)

Table 8 Fresh concrete properties of cast-in-place decks

Component	Louetta		San Angelo		
	Northbound (상행선)	Southbound (하행선)	Eastbound (상행선)	Westbound (하행선) Spans 1-5	Westbound (하행선) Spans 6-91)
w/cm. bt wt	0.43	0.35	0.31	0.42	0.42
Total Air	5.0%	1.4% <sup>2)</sup>	6%	6%	6%
Slump	75~100mm	200~240mm	190~230mm	75~100mm	75~100mm
Unit weight	2294kg/m <sup>3</sup>	2406kg/m <sup>3</sup>	2395kg/m <sup>3</sup>	2327kg/m <sup>3</sup>	2332kg/m <sup>3</sup>

주: 1) 보통 콘크리트(Non-HPC)

2) 공기연행제를 사용하지 않음(No air entrainment)

멘트비를 요구하고, 고성능감수제가 필요하다.

습윤 동결융해(moist freeze-thaw cycles)가 일어나지 않으면 동결융해 저항성을 위한 공기연행제를 사용할 필요가 없으나 텍사스주를 가로지르는 교량의 현장타설 바닥판에 대해서는 공기연행제를 사용하도록 규정하고 있다. 예를 들면, Louetta교 상행선 바닥판은 휴스턴에 건설된 바닥판의 대표적인 것으로 5% 공기를 연행하였다. 그러나 휴스턴에는 전형적인 습윤 동결융해가 발생하지 않기 때문에 고강도 콘크리트로 설계된 Louetta교 하행선 바닥판에는 공기를 연행하지 않았다. 두 개의 바닥판에 대한 장기적인 내구성능에 대한 비교를 수행할 것이다.

Table 9은 AASHTO T 277 규정 "Standard Method of Test for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration"에 따라 재령 56일에 실시한 현장 투수성 실험결과를 나타내고 있다. Louetta교와 San Angelo교 프로젝트에 참여한 UT의 연구진들은 시공사와 TxDOT 직원의 협조하에 바닥판에서 채취한 실린더 시편

(100 mm×200 mm)으로 투수성 실험을 수행하였다. 현장타설한 모든 고성능콘크리트의 염소이온투수성은 2,000 coulomb 미만이었다. AASHTO T 277에서는 2,000 coulomb 이하인 경우를 염소이온 침투가 "낮음" 또는 "매우 낮음"으로 분류하고 있다.

Westbound(하행선) 바닥판 공시체 양생시 사용된 양생조의 높은 온도와 낮은 물 높이로 인하여 비정상적인 투수시험결과가 나타났다. 그러므로 하행선 바닥판에 대해서는 실제 바닥판 시료에 대한 실험 결과보다는 현장 시험배합의 시편에 대한 결과를 Table 9에 나타냈다. 현장 시험배합에서의 시편은 동일한 조건에서 배합하고 타설하여 제작하였다.

시멘트의 30%를 플라이애쉬로 대체한 경우(하행선 지간 1~5)와 플라이애쉬를 사용하지 않은 보통콘크리트의 경우(하행선 지간 6~9)의 투수성을 비교하면, Table 9에서 보는바와 같이 지간 1~5에 사용한 콘크리트의 시험배합의 평균 투수성은 지간 6~9에 사용한 콘크리트의 시험배합의 평균 투수성보다 현저하게 작다. 또한, 압축

Table 9 Field permeability test results @ 56 days, coulombs passed

Member	Louetta		San Angelo		
	Northbound (상행선)	Southbound (하행선)	Eastbound (상행선)	Westbound (하행선) Spans 1-5	Westbound (하행선) Spans 6-91)
현장타설 바닥판 (상부 층)	1730	900	690	13802	24902)
패널(하부 층)	1430		980	32301	

주 : 1) 보통콘크리트(Non-HPC)

2) 현장 시험 배합

강도가 증가하면 투수성이 낮아지는 것은 Louetta교 하행선과 San Angelo교 상행선 바닥판 콘크리트의 투수성이 낮은 것으로부터 알 수 있다.

다른 내구성능 특성을 평가하기 위하여 San Angelo 교량의 시공 중에 추가로 몇 개의 시편을 제작하였다. ASTM C 666 규정 A에 따른 동결융해시험을 실시하였으며, 300회 반복 후 내구성 지수는 90으로서 모든 바닥판 콘크리트는 양호한 동결융해 내구성을 보였다. ASTM C 672에 따른 50회 후의 마모저항(scaling resistance) 실험결과는 다양하게 나타났는데, ASTM C 944규정에 따라 6분 후의 마모깊이는 모든 바닥판 콘크리트에 대해 평균적으로 1~2 mm 이었다. 바닥판용 보통 강도의 고성능콘크리트에 대한 내구성 실험과 분석은 계속과제로 수행하고 있다.

그 지역의 이용가능한 재료를 사용함으로써 두 교량의 바닥판에 대한 설계강도 요구조건은 초과하였다. UT의 연구진들은 실내배합과 현장배합에서의 강도감소를 고려하기 위해 배합강도를 설계강도보다 최소 15% 할증할 것을 권고하고 있다. 이 값은 Louetta교와 San Angelo교량의 시공에 사용된 레미콘 공장의 표준편차를 근거로 한 값이다.

### (3) 바닥판 시공

두 교량의 바닥판 콘크리트는 압송에 의해 타설되고 다짐되었다. 다음으로 횡방향으로의 막대기, 흠손, 빗자루(Louetta교 만)로 쓸고, 철재로 줄눈을 만들었다. 콘크리트는 표면양생제를 살포할 때까지 표면의 습윤상태를 유지하기 위해 살수를 하였다. 콘크리트가 보행할 정도로 굳으면 젖은 목화양생포를 덮는다. 플라이애쉬가 없는 바닥판은 습윤양생이 8일인데 비하여 플라이애쉬를 혼합한 바닥판에 대해서는 10일 동안 습윤양생이 요구된다.

물-결합제비가 약 0.4보다 작으면 고성능감수제(HRWRA)의 사용이 일반적으로 필요하다. 바닥판의 넓은 면적에 타설하고 마감할 때 이와 같은 혼화제의 사용은 급격한 슬럼프 손실의 가능성을 내포하고 있다. 추가로 이와 같은 혼화

제는 낮은 블리딩 수(bleed water)를 갖는 경향이 있으며, 이것은 부서짐(crushing)과 같은 마감시의 문제점을 유발한다.

Louetta교와 San Angelo교의 HPC 바닥판은 고성능감수제를 사용한 고강도콘크리트 배합으로 인해 보통강도 콘크리트(28 MPa)에 비해 타설하고 마감하는데 있어 더 많은 노력을 요하였다. San Angelo교 하행선의 1~5번 지간에 시공한 압축강도가 28 MPa인 고성능콘크리트는 시멘트를 플라이애쉬로 대체하였기 때문에 6~9번 지간에 시공한 압축강도가 28 MPa인 보통콘크리트에 비해 압송, 타설 및 마감이 용이했다. 또한, 플라이애쉬의 가격이 시멘트에 비해 상대적으로 싸기 때문에 플라이애쉬의 사용으로 인해 콘크리트의 생산비가 감소하였다.

저속트럭, 다짐막대기의 기능불량(screed malfunction), 크레인의 고장 그리고 작업연결의 붕괴(재가 bridge collapse)와 같이 부득이한 지체가 발생하였다. 또한, 강풍, 고온 그리고 낮은 습도와 같은 자연 현상에 의해서도 지체가 발생한다. 이와 같은 조건들은 바닥판을 건조수축 균열이 없이 균일하게 시공하는 것을 매우 어렵게 한다. 적당한 습도(fogging)와 양생(curing)을 갖는 양호한 시공은 소성 건조수축 균열의 가능성을 크게 감소시킨다. Louetta교와 San Angelo 교의 바닥판에서 약간의 건조수축 균열이 관찰되었으며, 기존의 바닥판에서 볼 수 있는 전형적인 균열이었다. 건조수축에 대한 실험자료는 계속 분석하고 있으며, 더 많은 연구를 계획하고 있다.

명확하게 기술된 규정과 참여 연구진간의 원활한 의사소통은 현장에서 요구된 성능특성을 얻는 것을 용이하게 한다. Louetta교와 San Angelo교에 대한 프로젝트의 성공은 연구진, 기업, FHWA 및 TxDOT 간의 뛰어난 협력에 의한 결과이다.

### (4) HPC 바닥판의 현재 규정

텍사스주에서 HPC 바닥판의 중요성은 설계강도가 34 MPa인 프리캐스트 하부 패널과 보통의 설계강도 28 MPa인 상부 현장타설 바닥판의 내구성을 향상시키고 있다.

내구성 규정은 최초의 두 개 교량에 대한 프로젝트에서 얻은 결과를 기초로 하여 개발하고 있다. HPC 교량 바닥판에 대한 텍사스주에서의 현재 내구성 규정은 AASHTO T 277에 따른 28일에서의 최대 염소이온 침투량 2,000 coulomb과 현장에서의 공기량을 5~8%로 요구하고 있다. 투수성에 대한 요구조건은 강도요구조건과 같이 28일이다. 이 규정은 지금까지 여러 교량의 프로젝트에 포함되어 왔으며, 다른 규정들은 계획 단계이다. 28일의 조기재령에 투과된 2,000 coulomb보다 작은 투수성을 얻는데 있어서의 어려움 때문에 Virginia에서는 유사 현장 투수성에 사용하였던 투수시험체(permeability cylinders)를 촉진양생으로 평가하는 방법을 제안하였다.

HPC에 대한 연구 및 보완은 계속 수행하고 있으며, 추가의 결과를 얻을 때마다 규정을 개정할 것이다. HPC 바닥판의 초기 및 장기 내구성을 평가하는 것, 균열 가능성의 감소시키는 것 및 장기 성능을 잘 예측할 수 있는 최적의 시험방법을 선정하는데 중점을 두고 있다. 적절한 온·습도와 양생으로 잘 시공하는 것은 현장에서 향상된 내구성을 얻는데 있어 중요한 요인이다.

### 3.4 Nebraska HPC 교량 바닥판

Nebraska주에서의 고성능콘크리트를 이용한 구조물의 설계 및 시공에 대한 연구는 Sarpy시, Nebraska대학의 연구소(CIR), 미 연방도로청(FHWA) 및 주 도로국(NDOR) 사이의 협동으로 이루어지고 있다. 이 프로젝트의 성공은 각 기관들간에 큰 관심이었다.

기업, 학계, 시, 주 및 연방정부의 각 개인은 자문단으로 구성되었다. 그들의 의견은 프로젝트의 연구수행방법을 결정하는데 중요하게 작용하였으며, 실제적이고, 성공 가능하고 경제적인 계획을 수립하는 것을 가능케 하였다.

#### (1) 프로젝트 수행방법

프로젝트 범위를 확정하는 설계변수를 결정하기 위해 연구진들은 지침으로 HPC에 대한 연방도로국(FHWA)의 정의를 이용하였다. 다른 여러 주에서와 마찬가지로 Nebraska주는 염화물 제

설제를 사용하고 많은 동결융해 작용을 받는 지역이다. 그러므로 우리의 초점은 내구성을 갖는 바닥판 콘크리트에 있었다. HPC의 정의는 동결융해 저항성, 염소이온 침투, Scaling 및 마모저항성 등 4가지 내구 특성으로 구분하고 있다. Scaling 및 마모 저항성은 언급은 되었으나 본 프로젝트의 범위에는 포함시키지 않았다. 지금까지의 자료들은 이들 성능에 대한 현재의 기준은 받아들일 수 있다고 제시하고 있다. 나머지 동결융해 저항성 및 염소이온 침투의 내구성 특성은 본 프로젝트 범위에서 다루어 졌다.

AASHTO 및 ASTM 방법에 따른 동결융해 시험에 대한 논쟁은 장애물이 되고 있다. HPC의 정의에 따르면 동결융해 시험을 300회까지 하도록 되어 있는데 이것은 시험이 완료될 때까지 약 3개월을 요한다. 콘크리트 공급자와 계약자를 대표하여 연구진들은 이 시험방법이 계약 기간에 있어 장애가 되고 입찰가격을 증가시킨다고 주장하였다. 연구진들은 소정의 동결융해 저항 특성을 얻기 위해 공기연행제를 사용하는 것을 제안하였다. 연구결과들은 동결융해 규정 대신에 공기량을 5~7.5% 연행시키도록 규정한 연구진들의 결정을 뒷받침하고 있다.

자문단은 염소이온침투에 대한 계약규정을 결정하기 위해 네브래스카대학에서 수행한 연구결과와 자료를 신뢰하였다. 단위 시멘트량이 많은 배합은 낮은 투수성을 갖는다는 문헌에 따라 연구진들은 바닥판 콘크리트의 강도를 일반적으로 쓰이고 있는 28 MPa 대신에 55 MPa로 결정했다. 연구단계에서 실시한 55 MPa 배합에 대한 투수시험 결과는 염소이온 침투량이 1,800 coulomb보다 작게 나타났으며 이 배합을 최종적으로 결정하였다.

#### (2) 연구

Nebraska주의 HPC 프로젝트에는 Nebraska대학 연구소(CIR)에서 수행된 연구를 포함하고 있다. CIR에서의 연구는 배합특성 규명 실험, 교량의 건설과 장기 모니터링, 워크샷, 전시회와 세미나의 준비 및 개최를 포함하고 있다. 연구는 9개 과제를 포함하여 2단계로 나누어져 있다.

1단계 연구에서는 전반적인 프로젝트의 계획에 적합한 배합설계를 개발하는데 초점을 맞추었

다. 131가지 배합에 대해 크리프, 건조수축, 탄성계수, 파괴계수(휨인장강도) 및 투수성을 측정하였다. 몇 개의 중요한 배합은 품질관리, 양생 절차 및 콘크리트 공급자를 훈련시키기 위하여 시험 batch를 실시하였다. 연구목적에 적합한 배합설계 목록을 공급자에게 제공하였다.

2단계에서는 교량의 건설, 콘크리트의 타설과 양생과정에서의 바닥판에 대한 추적조사를 포함하고 있다. 바닥판 콘크리트의 구속 및 비구속 건조수축 변형률과 수화열을 모니터링하기 위해 장비들을 사용하였다.

### (3) 시방규정

본 프로젝트에서는 바닥판 콘크리트는 56일 재령에서의 압축강도는 55 MPa, AASHTO T 277 규정에 따른 56일 재령에서의 염소이온 침투량 1,800 coulomb 이하 및 공기량은 5~7.5%를 가져야 한다는 특별 규정을 요한다. 시공자는 강도와 투수성에 대해 56일 재령으로 규정하는 것은 계약 기간에 있어 장애가 되고 입찰 가격을 증가시킨다고 주장하였다. 그러므로 28일 시험결과를 제출하는 선택권을 계약자에게 주는 특별규정을 두었다. 콘크리트의 압축강도가 56일 강도의 95% 이상이고 염소이온 침투율이 1,900 coulomb 이하이면 콘크리트는 납품된다.

시공자는 콘크리트를 타설하기 전에 30일 재령에 대한 다음과 같은 실험결과를 제출하도록 요구하고 있다. 100 mm×200 mm 실린더 최소 시편에 대한 56일 압축강도, 염소이온 침투율, 휨강도, 재령 16일과 30일에서의 알칼리-골재반응 시험결과, 탄성계수, 쪼갬인장강도, 건조수축 및 마모저항성 시험결과를 제출하여야 한다. 이와 같은 실험들은 배합 특성의 자료를 일차적으로 제공한다. 그러나, 염소이온 침투 실험결과는 콘크리트 사용의 승인 또는 취소의 기본자료로 쓰이고 있다.

협동연구 정신을 유지하기 위해 계약자들은 혼화제 제조사, 콘크리트 생산자, 대학 그리고 다른 콘크리트 재료의 공급자의 대표자들과 함께 예비타설 회의(pre-placement conference)에 참가하였다. 이 회의는 배합, 배합절차, batch 크기, 작업순서, 적용 규정, 마감 작업원에 대한 특별

훈련, 시험에 대한 요구사항, 시험 배치, 수용 기준, 조치계획(contingency plans) 및 대학에서 제시한 기기 배치에 초점을 맞추었다.

#### (i) 배합비 및 배합

특별시방서에서는 재료의 계량 및 취급과 콘크리트의 배합에 대한 Nebraska주의 표준 요구조건을 약간 수정하였다. 실리카흙을 사용한 콘크리트의 경험을 토대로 배합을 제안하였다. 배합 절차는 다음과 같다.

1. 소요 수량의 75%와 공기연행제 및 감수제를 첨가
2. 모든 실리카흙을 첨가하고 50회전 동안 혼합
3. 골재와 시멘트를 배합
4. 나머지 물을 첨가하고 20회전 혼합
5. 필요하다면 현장에서 2단계에 고성능감수제(HRWRA)를 첨가해도 된다. 공기연행제는 공급자의 승인이 있으면 현장에서 첨가해도 된다.

최대 허용 슬럼프를 20 cm로 하여 Type IV 고성능 감수제를 첨가하여 조절하였으며, 실제 슬럼프는 소요 슬럼프에서  $\pm 2.5$  cm가 되도록 하였다. 콘크리트의 혼합 후 또는 현장으로 운반하기 위해 트럭에 실은 후에는 물을 첨가하는 것을 허용하지 않았다.

#### (ii) 타설 및 마감

계약자는 콘크리트 3 m<sup>3</sup>을 예비타설하여 적절한 배합, 타설, 마감 및 양생에 대해 검증하도록 되어 있다. 예비타설의 목적은 플랜트의 조건, 운반장비, 운반시간, 혼화제, 거푸집, 타설 장비 및 작업원을 포함하여 실제의 작업조건을 모사하는 것이다. 예비타설과 본 타설 모두에 있어서의 제약은 다음과 같다.

1. 타설하는 동안에 바닥판의 표면에 물의 직접 첨가는 허용되지 않는다.
2. 계약서에 제시된 계산도표에 의해 결정된 증발율이 0.73 kg/m<sup>2</sup>/hr 이상인 경우에는 콘크리트를 타설해서는 안 된다. 풍속,

대기온도 및 습도는 계약자가 측정을 하고, 발주자가 확인을 한다.

3. 바닥판 콘크리트를 타설할 때 그늘진 곳의 온도가 27°C 이상이면 계약자는 어떤 콘크리트도 타설해서는 안 된다.

#### (iii) 양생

특별 시방 규정은 양생 기간 동안 습윤양생을 요구하고 있다. 여기서 양생 기간은 그늘진 곳에서 측정된 대기온도가 최소한 19시간 동안 10°C 이상인 날 또는 24시간 동안 콘크리트의 표면 온도가 4.4°C 이상인 날로 정의하고 있다. 초결시간 동안에는 표면 위의 공기는 높은 습도를 유지해야 한다. 이를 위해 스프레이로 살수를 하였다. 나머지 기간동안에는 젖은 마포를 덮은 후 양생을 한다.

#### (iv) 승인

콘크리트 압축강도는 발주자가 선택한 원통형 시편으로 측정한다. 각 100 yd<sup>3</sup>(76.5 m<sup>3</sup>) 당 15×30 cm 시편 8개와 10×20 cm 시편 8개를 채취하여, 3, 7, 28, 및 56일 재령에 각 시편 2개씩 압축강도를 측정한다. 56일 재령에서의 승인은 모든 10×20 cm 시편의 평균강도를 기본으로 하고, 소요강도보다 5% 이상 적은 강도를 갖는 시편은 하나라도 있지 않아야 한다.

염소이온 침투성에 대한 승인은 생산된 콘크리트를 타설하기 30일 전에 제출된 배합설계에 대한 결과를 기본으로 한다.

#### (4) 배합설계 (mix design)

강도 55 MPa 인 콘크리트의 실질적인 배합설계(yd<sup>3</sup>당)는 아래와 같다.

시멘트(Type IP) : 340 kg  
플라이애쉬(C등급) : 34 kg  
물 : 116 kg  
잔골재 : 635 kg  
굵은골재(최대치수 13mm) : 635 kg  
공기량 : 6%  
Pozolith(322N):118 mL/45 kg 시멘트  
Rheobuild : 532 mL/45 kg 시멘트

#### 실험결과

56일 평균 압축강도 : 63 MPa  
56일 염소이온 침투성 : 589 coulomb  
타설 시 평균 공기량 : 6%  
탄성계수 : 37,540 MPa(fck = 60 MPa)  
쪼갠 인장강도 : 4 MPa  
마모저항성: 0.84 mm(30분), 1.5 mm(60분)

#### (5) 결과 고찰

바닥판 콘크리트의 배합, 운반 및 타설과 관련하여는 거의 문제가 없었다. 그러나 마감과 양생은 시험타설에서 했던 절차를 변경하는 것이 요구되었다. 마감장비는 초기 마감에서는 만족스러웠으나 자동차가 횡방향으로 미끄러지는 것(hydroplaning)을 방지하기 위해 타설직 후 갈퀴로 실시하는 미끄럼 방지 줄눈(raking)이나 어느 정도 양생 후 기계에 의해 줄눈을 주는 작업(grooving)을 하는 과정 즉, 줄눈을 주는 작업(tining operation) 동안에는 변경이 요구되었다. 낮은 물-결합재비와 플라이애쉬의 혼합 때문에 블리딩이 아주 작게 발생하였으며, 요구된 tining은 콘크리트의 떨어져나간 표면을 벗겨지게 하기 시작하였다. 최종 float와 tining 동안 작업성을 개선하기 위해 마감처리 후 곧바로 양생제(증발지연제)를 표면에 살포하는 것이 그 해결책이었다.

시방규정은 표면위의 공기는 공인된 농무시스템(fogging system)에 의해 높은 습도를 유지하도록 요구하고 있다. 이 시스템은 굳지 않은 콘크리트의 전 표면에 걸쳐 습윤상태가 유지되어야 한다. 이 접근방법은 콘크리트의 타설시 바람이 부는 기상조건과 장비의 제약 때문에 실제적이지 못하여 포기하였다. 줄눈(tining)을 준 후 표면은 흰색으로 착색한 양생제(분말)를 살포하였으며, 그런 후 후후 젖은 마포로 덮었다. 양생제가 증발지연제와 화학적으로 접촉한다는 증거가 없었다. 이것은 균열은 방지하는데 성공적으로 증명되었기에 양생제는 앞으로 비 HPC 및 HPC 바닥판 모두에 요구될 것이다.

#### (6) 결론


이 프로젝트로부터 얻은 자료를 토대로

NDOR 교량분과에서는 재료 및 시험분과와 함께 미래의 고성능콘크리트 발전계획을 개발하였다. 바닥판 콘크리트와 관련해서는 기존의 콘크리트 배합설계로부터 고성능 배합설계로의 변환을 제시하였으며, 이것은 더 내구성 있는 바닥판으로 바꾸게 되었다.

Sarny시의 프로젝트는 고성능콘크리트(HPC)는 배합 운반, 타설, 마감 및 양생이 비교적 쉽게 될 수 있음을 보여주고 있다. HPC가 교량의 사용수명을 연장할 수 있는 가능성을 갖고 있기 때문에 Nebraska주에서는 장래에 있어서 HPC의 사용에 관한 위원회를 구성하고 있다. HPC를 사용하면 초기비용의 증가가 조금 있다 해도 유지관리 및 교체 비용의 감소가 더 중요하다고 믿고 있다.

#### 4. 요약

HPC를 사용한 장기수명 바닥판 콘크리트의 시공에 관한 4가지 접근방법을 제시하였다. Nebraska, New Hampshire, Texas 그리고 Virginia 등 4개주의 프로젝트에서 보면 아래와 같이 여러 가지 유사성을 알 수 있었다.

- HPC의 사용은 장기 수명의 교량 바닥판을 건설하기 때문에 life cycle cost와 유지관리비의 감소가 예상된다.
- 교량 바닥판에 대한 HPC의 중요성은 더 큰 강도보다는 내구성과 시공성을 일관성 있게 양호하게 개선한다는 것이다.
- 그 지역의 재료와 기존의 방법을 가능한 최대한 범위로 사용한다.
- 많은 실험실 및 현장 시험 배합표가 개발되었고 배합되었다. 성능 특성은 혼합 재료의 형태, 상품 및 배합에 따라 다르게 나타났다.
- 향상된 성질을 갖는 균일하고 일관성 있는 제품의 사용에 덧붙여 적절한 시공 기술은 장기 수명의 콘크리트 구조물을 위해서는 필수적이다.
- 알칼리-골재 반응을 갖고 있는 지역이나 높은 황산염을 갖고 있는 지역과 같이 특별한 문제점이 예상되는 지역에서는 화학적 내구성을 검토하기 위해 별도의 실험이 필요하다.
- 현장에서 소요의 성능특성을 얻기 위해서는 시작부터 모든 분야 사이의 원활한 의견 교환과 협력이 요구된다. 

**해외학술기사번역에 관심이 있거나 의견이 있으신 분은 콘크리트학회 혹은 국제정보위원회(성균관대학교 이광명 교수 Tel: (0331) 290-7516, E-mail: leekm@yurim.skku.ac.kr)로 연락하여 주십시오.**