

# 고속도로 콘크리트교의 실태 및 전망

## Realities and Prospects of Highway Concrete Bridges

정 현 구\*

Jung, Hyun Ku

### 1. 고속도로 현황

우리나라의 고속도로는 1968년 2월 1일 경부고속도로를 착공한 이래 꾸준히 증가하였으며 2002년 현재 2,637km가 건설되었다. 이는 전체 도로 연장(91,396km)의 약 2.9%에 해당한다(표 1 참조). 고속도로는 그림 1에 나타낸 바와 같이 1990년 이후 급격히 증가하였으며, 앞으로도 계속 증가하여 2004년까지 약 3400km, 2020년까지 남북방향으로 7개축(3,291km), 동서방향으로 9개축(2,869km)의 7×9 간선도로망을 목표로 총 6,000km 이상이 건설될 예정이다.

이와 같이 고속도로는 장기적인 계획에 의거하여 지속적으로 증가하였으나 고도의 경제성장과 국민소득의 증대로 도로시설 공급에 비해 교통수요가 크게 증가하여 소통 수준은 크게 향상되지 못하고 있다. 이로 인하여 고속도로의 역할이나 경제적인 파급효과도 과소평가되고 있는 실정이다.

표 1 대한민국 도로 현황(2001. 12 기준)

노선명	총연장	포 장 도						미포장	미개통
		소계	2차로	4차로	6차로	8차로	10차로		
계	91,396.4	70,146.0	54,976.6	10,624.2	3,128.7	1,149.0	267.6	13,505.4	7,745.0
고속국도	2,636.6	2,636.6	224.7	1,939.7	230.3	241.9			
일반국도	14,253.7	13,759.0	9,401.1	3,736.3	321.7			84.9	409.7
특별·광역시도	17,809.8	16,662.5	12,937.3	1,792.2	1,114.6	565.6	252.8	87.9	1,059.4
지방도 (국가지원 지방도)	15,704.1	12,319.7	11,305.9	856.3	108.2	49.3		2,245.6	1,138.8
시도	17,533.6	13,054.7	9,454.8	2,246.0	1,048.2	290.9	14.8	1,061.7	3,417.1
군도	23,458.6	11,713.4	11,652.8	53.7	5.7	1.2		10,025.3	1,719.9

우리나라의 육상 교통의 수송 분담률을 고찰하면 2000년 기준으로, 여객의 경우 국도 41%, 고속도로 39%로서 국도 연장의 17%에 불과한 고속도로의 수송분담률은 상대적으로 매우 크다고 할 수 있다. 또한 화물차량의 수송분담률은 고속도로가 46%로서 여객수송 분담률보다 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 따라서 산업물동량의 원활한 수송을 위한 건설 목적에 부합됨을 알 수 있다.

\* 한국도로공사 도로연구소 소장

고속도로 건설에 따른 경제적인 효과는 3가지로 설명될 수 있다. 첫째는 연료비, 엔진오일비, 차량수선비 등의 주행경비 절약이고, 둘째로는 주행에 쓰이는 비용과 시간절약과 같은 주행시간 단축 효과, 마지막으로 운전자의 피로도 경감과 차량통행의 안전성 증대로 인한 교통사고 감소 효과로 정리할 수 있다. 고속도로의 직접적인 효과는 위에서 언급한 세가지 경제 효과를 합한 것으로서 1996년 기준으로 연간 7조 8천억원, 2000년에는 약 9조 8천억원으로 추산하고 있다. 이러한 고속도로의 경제적인 효과는 2020년이 되어 7×9의 간선도로망 체계가 구축되면 연간 200조 이상의 경제적인 효과를 유발할 것으로 판단된다.

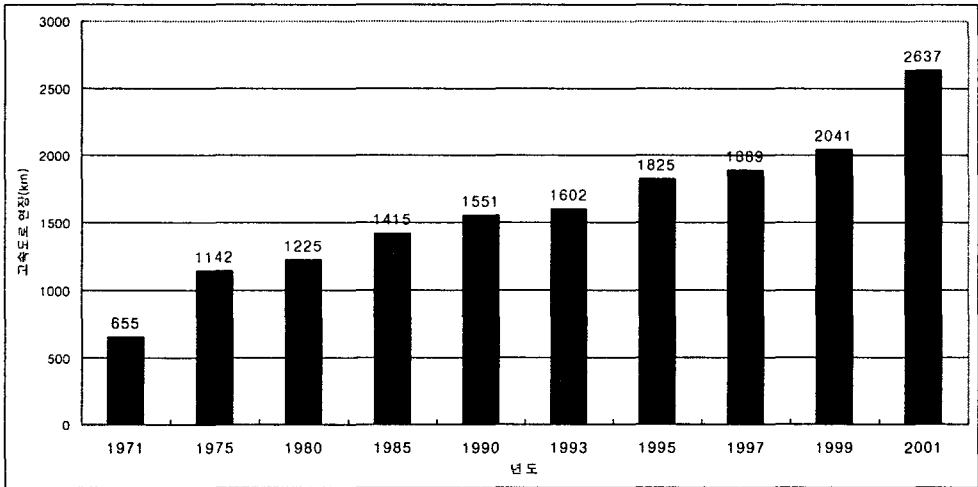


그림 1 고속도로 연장 증가 현황

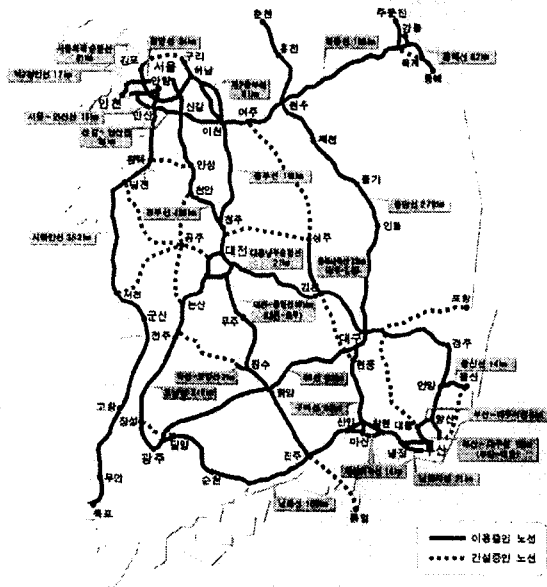


그림 2 고속도로 노선도(2002년)

## 2. 고속도로 교량 현황

우리나라의 교량은 2001년을 기준으로 17,000개소를 초과하고 있으며, 이중 고속도로의 교량은 2,826개 교량이 건설되어 전체의 약 16.4%에 해당한다(표 2). 이와 같이 고속도로의 교량은 도로연장이 전체 도로의 약 2.9%인데 반하여 교량의 비중이 상대적으로 높다는 것을 알 수 있다. 이는 고속도로가 일반 국도나 지방도와 달리 주행성 확보를 위하여 중단구배와 회전반경을 제한하기 때문인데, 최근에 건설되는 고속도로일수록 교량과 터널과 같은 구조물이 차지하는 비중이 크게 높아지고 있다.

그림 3에 나타낸 바와 같이 고속도로 교량의 증가는 80년대까지는 서서히 증가하였으나 90년대 이후 급격히 증가하였다. 한편 교량의 수는 1978년과 비교할 때 약 2.7배 증가하였으며, 교량의 면적은 약 15배 이상 증가하였다. 이것은 고속도로 건설 과정에서 대형 교량이 크게 증가하였다는 것을 의미하는 것이다. 고속도로의 교량은 그림 3에서 볼 수 있는 바와 같이 1990년에 1000개를 초과하였으며, 10년 만에 2배 이상 증가하였다. 이와 같은 고속도로 교량은 2000년대에 급격히 증가하여 2006년까지는 4182개 교량이 건설될 예정이다.

고속도로의 교량을 구조형식에 따라 정리하면 표 3과 같다. 현재 고속도로에서는 콘크리트라멘 형식의 교량이 가장 많이 시공되었으며, PSCI형교와 강박스교도 큰 비중을 차지하고 있다. 고속도로에 시공된 교량의 연장을 비교하면 PSCI형교, 강박스교, PSC박스교가 주를 이룬다.

강박스교는 유지관리 비용이 고가이기 때문에 하부가 도로인 경우, 시가지 구간에서 공사기간의 제약, 소음이나 먼지의 우려가 있는 경우, 고속도로의 램프구간과 같이 다른 형식의 교량의 시공이 어려운 경우에 한하여 시공되고 있다. 따라서 고속도로에 설치되는 대부분의 교량이 콘크리트로 시공되고 있다고 할 수 있다. 그런데 모든 고속도로 교량의 교대와 교각이 콘크리트로 시공되었기 때문에 강교량으로 분류된 경우에도 그 재료는 대부분 콘크리트라고 할 수 있다.

현재 고속도로에는 98년에 준공된 서울외곽순환선의 부천고가교(7.754km)와 2001년의 서해안선의 서해대교(7.31km)를 비롯하여 총 연장이 1km 이상인 교량이 18개소 있으며, 교각의 높이가 50m 이상인 교량도 영동선의 황성대교(92m)를 비롯하여 20여개교에 이르고 있다. 이와 같이 대형 교량이 증가 추세는 교량 기술의 발전과 함께 더욱 가속화될 것으로 기대된다.

표 2 전국 교량 현황 ( 2001.12 기준 )

계	고속 국도	일 반 국 도			특별 시도	국가지원 지방도	지방도	시도	군도
		소계	건교부 관 리	시관리					
17,225	2,826	4,029	3,392	637	1,231	854	2,824	1,654	3,807
100%	16.4	23.4	19.7%	3.7%	7.1%	5.0%	16.4%	9.6%	22.1%

표 3 고속도로 교량의 상부구조 형식

비고	아 치 교	사 장 교	프리 플렉 스교	강관 형교	강 박스 형교	강 I형교	PSC 박스 형교	PSC 중공 슬라 브교	PSCI 형교	PSC 슬라 브교	라 멘 교	RC 박스 형교	RC 중공 슬라 브교	RC 슬라 브교	RCT 형교	총 합 계
개수	6	1	127	59	534	54	96	11	710	41	908	7	65	183	24	2826
교장 (km)	0.6	7.3	7.1	9.0	103.4	1.5	44.4	0.9	98.0	3.5	18.1	0.5	4.5	7.1	0.9	306.9

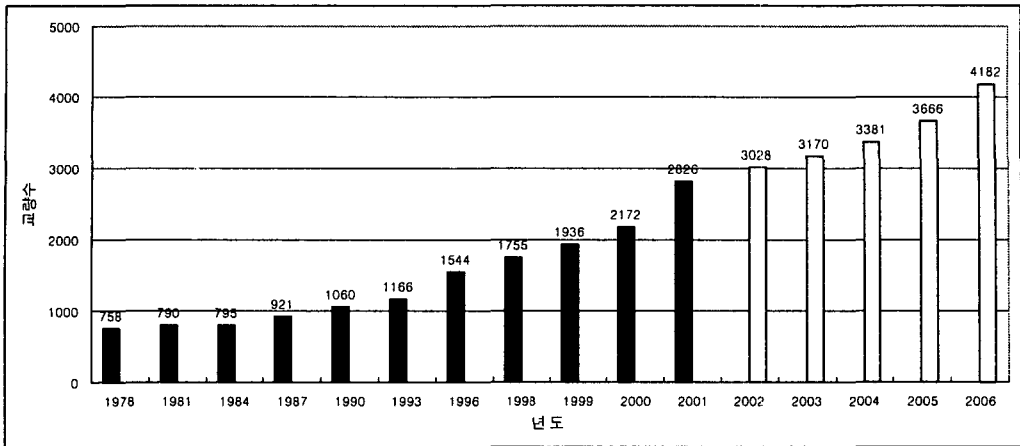


그림 3 고속도로 교량의 증가 현황

### 3. 콘크리트 교량의 오늘

#### 3.1 콘크리트의 균열

콘크리트는 시멘트, 모래, 부순 돌과 물을 적절하게 섞어서 경화시킨 것으로 가장 널리 사용되고 있는 구조재료이다. 콘크리트가 구조 재료로서 널리 활용되는 이유는 내화성, 내식성 등과 같이 다양한 자연 환경에 대한 저항성이 우수하고, 임의의 형상과 크기로 쉽게 만들 수 있으며, 손쉽게 구할 수 있는 재료이기 때문이다. 그러나 콘크리트는 인장강도가 작기 때문에 균열 발생 가능성이 항상 존재한다. 균열의 발생 메카니즘은 다양하게 설명되고 있지만, 간편하게 이해될 수 있는 것은 주응력이 인장강도를 초과하는 순간에 균열이 발생한다고 보는 것이다.

콘크리트 교량의 열화와 손상은 그 발생 원인이 재료적인 특성에 의한 것인지 아니면 구조적인 원인에 의한 것인지에 관계없이 균열로서 나타난다고 할 수 있다. 콘크리트의 균열은 구조적인 균열(structural crack)과 비구조적인 균열(nonstructural crack)로 구분될 수 있으며, 과거에는 비구조적인 균열에 큰 의미를 부여하지 않았다. 그러나 비구조적인 균열을 방치하면 시간이 경과함에 따라 철근이 부식되어 구조물의 안전에 영향을 끼칠 수 있기 때문에 무시할 수 없다는 것이 현실이다. 초창기 고속도로 콘크리트 교량들에는 많은 비구조적인 균열이 발생되었으나 교량 전체의 안전에 영향을 끼칠 정도의 심각한 손상으로 발전하지는 않았다. 이것은 교량들의 안전율이 상대적으로 높게 설계되었고, 교량 형식이 단순하면서 규모가 크지 않았기 때문이다.

최근에 시공되는 교량들은 구조계가 복잡하고, 부식이나 피로 저항성이 높지 않은 고강도 강선이나 강봉을 이용한 프리스트레스트 콘크리트 구조가 많기 때문에, 균열의 제어는 교량의 안전성과 내구성을 확보하는 데 필수적이다. 이와 같이 균열에 대한 인식이 증가함으로 인하여 콘크리트 교량의 시공 시에는 균열의 제어가 1차적인 목표가 되고 있다.

#### 3.2 설계와 시공

고속도로 건설 초기에는 강도(strength)가 설계나 시공과정에서 초점이 되었지만, 규모가 크고, 시공이 복잡한 교량의 시공이 증가하고 있는 오늘날에는 콘크리트의 타설 위치, 구조적인 형상, 또는 시공 방법에 따라 다양한 구조·재료적인 특성을 요구하고 있다. 예를 들면, 대형 교각의 경우에는 단면이

크기 때문에 수화열이나 건조수축에 따른 균열 발생 가능성이 높기 때문에, 균열제어를 위하여 적절하게 시멘트와 혼화제를 선정하거나, 파이프쿨링과 같이 인위적인 균열 제어 방법을 강구하는 경우도 있다. 여러 개의 세그(SEG)를 순차적으로 연결하여 교량을 단계적으로 건설하는 세그멘탈 PSC 박스 교량에서는 콘크리트의 강도보다는 건조수축과 크리프와 같은 시간의존적인 거동에 대한 정확한 예측이나 단계적인 타설에 따른 캠버(Camber) 관리가 설계 및 시공에서 매우 중요한 요소가 되고 있다. 또한 교량이 건설되는 환경이 해수의 영향을 받는 경우에는 염해방지대책을 수립하는 등 교량의 주변 환경까지 고려하여, 필요한 경우에는 설계와 시공시에 보완을 요구하고 있다.

이와 같이 교량의 설계와 시공이 복잡해지는 것과 아울러 시공성과 유지관리성을 설계 단계에서 고려해야 할 필요성이 제기되고 있다. 교각이나 바닥판, PC 강재의 정착부와 같이 철근이 복잡하게 배치되어 콘크리트 타설에 많은 어려움이 있었던 곳에 대해서는 정밀해석을 통하여 국부적인 거동을 규명하여 구조적으로 필요한 철근만을 배근하는 등 시공성을 개선하여 콘크리트의 품질을 확보하려는 노력이 결실을 맺고 있다. 이와 관련하여 한국도로공사에서는 2001년도에 교량 바닥판의 철근을 경험적 설계법에 의한 등방배근으로 배치하여 경제적 설계가 되도록 하였으며, 아울러 시공성과 유지관리가 용이한 교량 설계에 노력하고 있다. 기존 교량에서 교량 열화의 주요한 원인이 되어 왔던 상부로부터의 누수와 이로 인한 철근의 부식을 최소화하기 위하여 신축이음부를 최소화하는 교량의 연속화, 내식성이 뛰어난 신소재를 이용한 신형식 교량이 시험적용되고 있으며, 머지 않은 장래에 이러한 신형식 교량이 일반화될 수 있을 것으로 기대하고 있다. 장차 좀더 유지관리가 용이한 교량설계를 위해 무조인트 교량, 소수주형 및 더블T형 교량, 고강도 PSC 교량, 상부구조와 하부구조를 강결하여 교좌장치를 최소화하는 등과 같은 다양한 연구가 수행되고 있다.

### 3.3 유지관리

고속도로 교량의 공용기간이 30년 이상 경과되면서 교량에 구조적인 손상이 발견되고, 보수·보강의 필요성이 제기되면서 유지관리에 대한 인식이 크게 개선되고 있다. 특히 공용중인 국내 교량의 붕괴 사고가 보고되면서 합리적인 유지관리를 통하여 교량의 안전을 확보하고자 하는 노력이 진행되고 있다. 제 2 장에서 기술한 바와 같이 관리대상 교량이 급증함에 따라, 한국도로공사에서도 건설 중심에서 유지관리로 중심축이 변화하고 있다. 이러한 시대적 요구에 따라 2002년에는 유지관리부서(지사)에 구조물 관리를 전담하는 구조물과가 신설되는 등 구조물 관리를 위한 조직이 확충되고 있다. 또한 교량관리시스템(BMS, Bridge Management System)의 성공적인 시험적용을 마치고, BMS가 전체 교량 관리 부서로 확대 적용됨에 따라 과학적인 교량의 관리를 위한 기본적인 시스템이 구축된 상태이다. 현재 BMS에서는 모든 교량의 설계도서를 비롯한 기본자료에서부터, 보수·보강 자료, 외관상태를 기록한 외관조사망도 등이 D/B화 되어 있으며, 안전점검이나 안전진단 결과로부터 보수·보강 우선순위를 선정함으로써, 보수·보강이 시급한 교량이나 시급한 부재에 한정된 예산을 우선적으로 할당함으로써 교량을 안전하게 관리할 수 있도록 유도하고 있다. 그러나 BMS를 합리적으로 운영하기 위해서는 다양한 보완작업이 진행되어야 할 것으로 판단하고 있다.

교량의 안전한 관리를 위해 가장 우선적으로 필요한 것이 관리 인력의 전문화임을 아무도 부인하지 못할 것이다. 교량의 과학적인 유지관리를 위해서는 담당자들이 유지관리에 대한 경험 뿐만 아니라 설계와 시공에 대한 전반적인 지식도 겸비해야 한다. 그러나 아직까지 우리나라에서는 교량 전문가들이 유지관리 부서보다는 건설관련 부서를 선호하고 있기 때문에 유지관리 인력의 전문화에 많은 어려움이 따른다는 현실적인 문제도 있다. 또한 전문화 과정에는 많은 시간과 노력이 필요하므로 단기간에 달성될 수는 없지만, 다양한 교육 프로그램을 구축한다면 어느정도의 효과를 얻을 수 있을 것이다. 이

러한 유지관리 담당자들의 전문화가 필요한 가장 이유는 여러 가지가 있겠지만, 가장 주요한 이유는 콘크리트에 균열이 발생하고 철근이 부식되고 교량의 안전에 영향을 미칠 수 있는 손상으로 발전하기 전에 미리 조치를 취할 수 있는 예방적인 유지관리를 기대할 수 있기 때문이다.

#### 4. 콘크리트 관련 연구 개발

도로연구소에서의 콘크리트 교량 관련 연구는 크게 콘크리트의 재료 분야, 구조 분야 및 포장 분야로 나누어 진행되어 왔다. 도로연구소의 기본적인 연구방향은 고속도로 건설 및 유지관리 과정에서 제기된 문제점들을 해결하는 데 초점을 맞추고 있다. 이를 위하여 현장의 다양한 문제점들을 광범위하게 수집한 후, 단기간에 해결이 가능한 문제들은 소과제 형식으로 처리하고, 심층적인 연구가 필요한 문제인 경우에는 우선순위를 정하여 단계적으로 연구를 수행하고 있다. 특히 각각의 분야를 설계, 시공 및 유지관리 영역으로 구분하여 지속적인 연구가 가능하도록 하고 있다. 특히 도로연구소에서는 유지관리의 중요성이 강조되고 있는 시대적 요구에 부응하여 유지관리를 고려한 설계와 시공, 교량에 대한 정확한 평가 및 효과적인 보수·보강과 같은 다양한 유지관리 영역에 연구를 집중할 예정이다. 표 4에는 각 분야에서 기존에 진행된 연구 주제와 앞으로의 연구 방향을 간략히 정리하였다.

표 4 콘크리트 관련 연구 현황

구분	기수행 연구	향후 연구 방향
재료 분야	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 콘크리트의 균열과 철근의 부식속도</li> <li>- 철근의 부식에 따른 부착강도</li> <li>- 매스콘크리트의 수화열 저감 방안</li> <li>- 용도에 따른 시멘트의 특성 및 최적 배합</li> <li>- 염해방지 대책</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 고성능 콘크리트 개발 : 고강도, 고내구성 콘크리트, 수중 콘크리트</li> <li>- 바닥판 방수 시스템</li> <li>- 콘크리트 균열 제어</li> <li>- 철근 대체제 개발</li> </ul>
구조 분야	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 다양한 교량 형식에 대한 정밀구조해석 기법</li> <li>- 교각, 바닥판, PC 강재 정착부의 철근 배근</li> <li>- PSC 빔의 연속화</li> <li>- 바닥판의 보강 기법</li> <li>- 균열 감소 대책</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 콘크리트의 상태 평가 및 보강 효과 분석 : 철거교량 활용</li> <li>- 신소재를 이용한 철근 대체</li> <li>- 신형식 바닥판 개발 : 프리캐스트 바닥판, 신소재 바닥판</li> <li>- 고강도 콘크리트의 실용화</li> </ul>
포장 분야	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 포장의 균열 억제방안</li> <li>- 구조진단 기법</li> <li>- 보수·보강 기법</li> <li>- 포장가속 시험시설 개발</li> <li>- 미끄럼저항 측정장치 개발</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 콘크리트 포장 설계 기법과 시공법을 개발 : 포장 가속 시험시설과 시험도로의 운영</li> <li>- 전 노선의 포장 상부와 하부 상태 D/B : 미끄럼저항 측정장비를 개발 및 비파괴 장비 활용</li> <li>- 포장 균열 제어 및 보수·보강 기법</li> </ul>

#### 5. 콘크리트 교량의 미래

이제 건설이 지상과제이던 시대가 지나가고, 주변 환경과의 조화를 통한 미적인 요소가 가미된 아름다운 교량을 건설해야 할 시기가 도래하고 있다. 또한 도로의 건설로 인한 환경파괴를 최소화할 수 있

도록 교량을 설계하고 시공해야 하는 숙제도 교량기술자들에게 남아 있다. 특히 대형 건설공사에서는 건설 비용 뿐만아니라 유지관리 비용까지 포괄한 생애주기비용을 고려해야 하는 LCC(Life Cycle Cost) 설계가 의무화되고 있다. 따라서 교량 기술자들은 교량관련 기술 개발과 함께 사회, 환경, 경제적인 문제도 동시에 해결해야 하는 책임과 의무를 지니게 되었다.

이러한 사회전반의 다양한 목소리를 반영하여 최근에 건설되는 고속도로에는 절토와 성토가 최소화 될 수 있도록 교량과 터널의 비중이 증가하고, 교량의 형식도 다양해지고 있다. 따라서 특수 공법을 적용한 교량의 증가와 더불어 고강도, 고품질의 교량에 대한 요구는 지속적으로 증가할 것이다. 이와 같이 복잡한 교량의 건설이 증가되고, 대형 교량의 시공이 많아지는 것은 피할 수 없지만, 뚜렷한 기술적인 방향을 한마디로 요약하면 모든 교량은 유지관리까지 고려하여 설계되고 시공되어야 한다는 것이다. 따라서 교량 기술자들도 유지관리성이 뛰어난 고품질의 교량의 설계 및 시공을 위해서 끊임없는 연구와 노력을 경주해야 할 필요가 있을 것이다.

고속도로에서의 콘크리트 교량의 기술적인 과제를 간략히 소개하면 다음과 같다.

- ① 교량의 유지관리성을 높이기 위한 무조인트화와 교면 방수시스템의 개선
- ② 정밀 해석을 통한 합리적인 철근 배치 및 시공성 개선
- ③ 시공성이 불량하거나 부식이 예상되는 취약지점에 대해 내부식성이 우수한 신재료를 이용한 철근 대체
- ④ 바닥판의 설계 및 시공 기술 개발
- ⑤ 세그멘탈 PSC 박스 교량에서의 강재의 부식 감지 및 방지 대책
- ⑥ 기존 교량의 상태 평가 및 보강 기술