

# 건설순환자원을 활용한 재활용 실증화 사례(일본)

## Recycling Demonstration using Circulating Resources (GGBFS, Recycled Aggregate) in Japan



박원준 Won-Jun Park  
강원대학교 건축공학전공, 부교수  
E-mail : wjpark@kangwon.ac.kr

### 1. 고로슬래그미분말을 콘크리트 건축구조물에 적용

출처: 일본콘크리트공학회 학회지 Vol. 52(5), 2014, pp.420-425.

#### 1.1 개요

주요 산업부산물의 하나인 고로슬래그 미분말은 콘크리트 적용시 블리딩저감, 장기강도 증진, 염화이온 침투저감 등의 효과가 있어 고로시멘트로서 지속적으로 사용되어 왔다. 또한, 최근에는 산업부산물의 재활용 측면은 물론 콘크리트 환경부하 저감의 목적으로 콘크리트 혼화재로서 고로슬래그 미분말의 이용이 주목받고 있다. 일본의 경우, 일본 건축학회의 “철근콘크리트조 건축물의 환경배려 시공지침”, 토목학회의 “콘크리트의 환경부하평가”, 일본콘크리트공학회의 “혼화재 적극 이용에 의한 콘크리트 성능으로의 영향평가와 시공에 관한 연구위원회 보고서” 등이 발간되었다. 또한, 일본의 고로슬래그 미분말과 고로시멘트에 관한 기준은 JIS A 6206, JIS R 5211로 규정되어 있다.

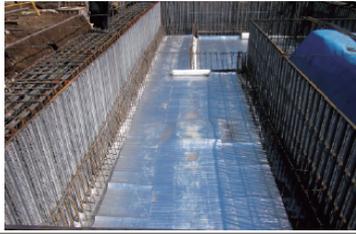
#### 1.2 적용사례

2010년대 이후 3가지 건축구조물에 적용된 사례를 [표 1]과 같이 요약한다. 적용부위는 상대적으로 지하구조부, 버림콘크리트, 기초, 지중보 등에 적용되었으며, 이산화탄소 배출량 저감률은 70% 이상으로 보고되고 있다.

#### 1.3 향후과제

앞서 소개된 적용사례에서 고로슬래그미분말 등의 혼화재를 다량함유한 콘크리트 제조 및 적용시의 과제를 [표 2]와 같이 요약한다.

[표 1] GGBFS 건축구조물 적용사례(일본)

구분	적용사례 1	적용사례 2	적용사례 3
용도	복합건축물(상업+사무소)	연구실험동	연구시설물
구조	철골조 (지하: 철골철근콘크리트조)	철골조 (기초: 철근콘크리트조)	철골조
규모	지상9층, 지하2층	지상2층	지상1층(일부2층)
시기	2011~2013년	2013~2014	2013~2014
주요 결합재	OPC, GGBFS(4000)	조강시멘트, GGBFS(4000)	OPC, GGBFS(4000)
물성	강도 27 MPa / 슬럼프 210	강도 27 MPa / 슬럼프 210	강도 18 MPa / 슬럼프 180
적용부위	지하구체 (약4900 m <sup>3</sup> )	기초+지중보 (약1200 m <sup>3</sup> )	버림 콘크리트 (약760 m <sup>3</sup> )
			
검토사항	압축성, 충전성 등을 현장에서 확인	레미콘 운반시간(약45분)	충분한 습윤피막양생 실시
	BIM을 활용한 타설수순 검토	타설조건(기온) 습윤양생(매트) 7일이상	
품질관리	재료분리, 슬럼프, 공기량, 콘크리트 온도, 단위용적질량, 염화물량, 단위수량, 압축강도 등에 대해서 관리함. 타설 후 2년 후에도 검토결과 이상이 없었음.	목표슬럼프 및 강도 확보 (압축강도: 현장, 현장수중, 표준양생)	시간당 타설속도, 감수제사용, 목표슬럼프 및 강도 확보
			

[표 2] GGBFS 다량 혼입 콘크리트 제조 및 구조물 적용시 해결과제

항목	내용
재료조달	제철소(산지) 의존성이 높기 때문에 운반에 의한 비용상승이 발생
콘크리트 제조	레미콘설비 및 공급플랜트의 한정과 적용실적이 적기 때문에 사전에 충분한 실험적 검토가 수반됨. 레미콘 운반시간 및 슬럼프 저하 발생을 고려한 혼화제 선정이 필수적으로 검토되어야 함.
콘크리트 시공	보통 콘크리트보다 다소 점성이 높음. 초기 강도발현에 대한 양생방법에 대한 면밀한 검토가 요구됨. 타설량(타설속도) 변경에 대응하기 어려움.
콘크리트 품질	구조체 강도보정 및 중성화에 대한 데이터가 부족함. 실험/해석에 의한 품질설정이 필요함.
콘크리트 적용	적용사례가 부족하기 때문에 충분하고 면밀한 사전설명이 수반되어야 함.

## 2. 고로슬래그미분말을 고속도로 구조물에 적용

출처: 일본콘크리트공학회 학회지 Vol. 52(5), 2014, pp.426-431.

### 2.1 개요

일본의 고속도로 연장길이는 2014년 기준으로 약 9000km로 보고되며, 이 가운데 40%가 30년 이상 경과하여 구조물의 노후화로 인한 문제가 예상된다. 고속도로를 구성하는 구조물 가운데 교량의 경우 아래 그림과 같이 상판의 균열발생, ASR, 비래염분 또는 동결융해 방지제로 인한 분리대를 비롯한 수직 부재의 열화가 대표적이다.

고속도로 구조물(교량)에 발생하는 열화에 대응하기 위하여, 바닥판 교체 또는 증가를 고려할 수 있다. 신설 교량에서의 열화대책은 피복두께의 증가가 기본적으로 고려될 수 있다. 하지만, 대규모 보수에서는 전체 부재 두께의 증가로 인한 하부구조에 작용하는 하중이 증가하고 별도의 보강이 필요한 경우가 발생할 수 있다. 또한, 피복의 증가에 의한 열화대책은 도로면의 높이가 증가하기 때문에 열화부위와 정도에 따라 도로면의 고저차가 발생하게 되고 주행성 저하에 이르는 문제가 예상된다. 이러한 문제에 대한 종합적인 대처로서 고로슬래그 미분말을 적용한 몇가지 대규모 보수(상판 교체공사) 사례를 소개한다.

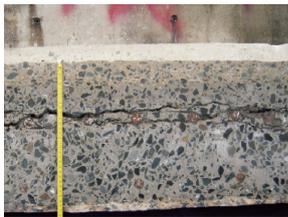


그림 1. 상판 수평 균열 발생



그림 2. 난간벽 열화



그림 3. 보수 예1) PC중공바닥판+현장타설



그림 4. 보수 예2) PC바닥판+현장타설

### 2.2 적용사례

고속도로 교량구조물 보수에 적용된 사례는 두께 증설이 아닌 바닥판 교체에 관한 사례로서, 적용방법은 PC, PC바닥판, 현장타설로 구성된다. [표 3]에 BFS 6000를 혼입한 일본 고속도로교 대규모 보수공사 사례를 정리한다.

사례별 적용된 콘크리트 정보를 [표 4]와 같이 요약한다. 이산화탄소 배출량 저감에서 BFS 6000적용에 의한 교량 단위면적당 0.04t-CO<sub>2</sub> 정도이며, 230km RC바닥판 보수의 경우 약 10만 톤의 이산화탄소배출 저감의 효과이다.

### 2.3 제작 및 시공

BFS 6000 혼입 콘크리트의 PC 제작 및 현장 바닥판 시공에서의 고려사항은 크게 양생과 현장타설의 관점에서 요약된다. 일본 콘크리트공학회지에 소개된 사례에서 조강시멘트의 사용과 증기양생(프리텐션방식 PC부재 적용)을 고려한 콘크리트 성숙도(Maturity)를 확보가 우선적으로 고려되었으나, 이산화탄소 배출량 억제에 의해서 콘크리트 수화열을 이용한 단열축진양생법을 사용하였다. 한편, 현장타설 콘크리트의 제조는 제조방법에 따라 다양한 방식이 논의되었으며, 실제 적용사례는 BFS용 사일로와 프리믹스용 사일로가 사용되었고, 주요 내용을 [표 5]와 같이 요약한다.

## 3. 혼합(천연+순환)골재 콘크리트를 발전소 건설에 적용

출처: 일본콘크리트공학회 학회지 Vol. 50(11), 2012, pp.998-1005.

### 3.1 개요

일본의 재생골재(이하, 순환골재) 및 재생골재 콘크리트는

[표 3] BFS 혼입 콘크리트의 도로공사 적용 사례(일본)

사례	공사내용	보수규모	BFS 적용부위	공사기간
1	RC바닥판 교체	L=153.00 m, W=2×15.45 m	PC바닥판+현장타설	2010~2011
2	IB합성 바닥판 교체	L=387.25 m, W=10.65 m	PC바닥판+현장타설	2011~2012
3	RC바닥판 교체	L=303.90 m, W=10.00 m	PC바닥판+현장타설	2013~2014

[표 4] BFS 혼입 콘크리트의 정보

사례	PC 바닥판		연결부, 현장타설 바닥판		난간벽, 분리대		CO <sub>2</sub> 배출저감량 t-CO <sub>2</sub>
	호칭강도 (MPa)	용량 (m <sup>3</sup> )	호칭강도 (MPa)	용량 (m <sup>3</sup> )	호칭강도 (MPa)	용량 (m <sup>3</sup> )	
1	50	938	50	397	50	238	220
2	50	721	50	200	36	284	156
3	50	556	50	164	30	197	122

[표 5] BFS 혼입 콘크리트 제조 방식 비교

제조방법	레미콘공장(기존 플랜트)사용		이동식 플랜트	임시 플랜트
	BFS용 사일로	프리믹스용 사일로		
개요	BFS를 사일로에 저장	시멘트와 BFS를 프리믹스하여 사일로에 저장	차량용 연속믹서 또는 배치믹서에서 제조	유닛방식(임대) 플랜트를 건설하여 제조
경제성	1~2	2~3	8~15	6~30

\*경제성: 해당 수치는 동일강도에서 BFS나 다른 결합재 없이 시멘트만 혼입한 콘크리트를 기존 플랜트에서 제조한 경우와의 비율

[표 6] 일본 순환골재 콘크리트 이용률

연도	사용량(단위: 천톤)			순환골재 이용률 (%, A/C)
	순환골재(A)	순환쇄석(B)	콘크리트용 골재(C)	
2009	73	17,764	278,000	0.026
2011	71	18,573	264,000	0.027
2013	123	20,009	296,000	0.042
2015	88	18,276	264,000	0.033

분명 큰 잠재력을 가지고 있지만, JIS가 제정된 후에도 그 이용률은 [표 6]과 같이 침체를 계속하고 있다.

가장 큰 원인으로는 JIS 제정시 순환골재와 순환골재 콘크리트의 품질면에서 문제가 발생할 경우의 책임소재 규명과 부정적 결과로 인한 순환골재 보급저해의 우려로 인한 리스크 회피의 목적이 제기된다. 특히, 2018년 개정에서는 순환골재와 일반골재와의 혼합사용에 관한 기준이 추가되었다. 이번

개정 가장 중요하게 주목해야 할 부분은 원골재의 특정방법과 혼합골재(저품질 순환골재 + 보통골재)를 사용한 콘크리트 사용, 콘크리트 종류의 일체화 부분이다. 중품질 순환골재에 관한 개정에서 저품질 순환골재와 보통골재를 혼합한 혼합골재의 이용을 추가함으로써 제조자의 부담을 경감시키고자 하였고 혼합골재의 구성과 혼합비율, 품질검사 방법을 체계화하였다. 따라서, 국내 콘크리트용 순환골재 품질기준 수준을 고

려할 때, 혼합골재에 대한 사용성 검토 및 활용방안 도출은 시의성이 매우 높다 하겠다. 본고에 소개하는 발전소 건설(일본 북해도 수력발전) 적용사례는 간이처리에 의한 순환골은골재의 제조방법, 혼합골재 방식을 이용한 순환골재 콘크리트의 품질에 관한 내용이다.

### 3.2 현장파쇄-제조 순환골재의 콘크리트 적용

[표 7]과 같이 순환골재 콘크리트의 구체적인 적용부위는 수력발전소 수차기초 부위로서 해체 후 신규 콘크리트 타설에 해당한다. 실구조물에 순환골재 콘크리트를 적용하기 위해서 크게 두 가지가 고려되었다. 첫째는 흡수율 7%이하를 만족하는 순환골은골재를 확보하는 측면이고, 두 번째는 순환골재 콘크리트와 고유동 콘크리트의 경계가 케이싱 중앙에 위치하기 때문에 여기에 작용하는 내수압에 대응하는 콘크리트 변형특성을 고려했다.

한편, 해체구조물에서 발생한 원콘크리트의 성상시험결과 [표 8]과 [표 9]와 같이 요약되며, 순환골재 원료로서 적당하고 순환골재 제조시 콘크리트 적용에 적합한 판단된다.

원콘크리트 분석 후 순환골은골재의 현장 간이제조는 300mm크기로 콘크리트를 해체하여 죠크리서를 통하여 입경 40mm정도로 처리 후 체가름기를 통하여 5mm 이하를 배제하고, 40~20mm 입경과 20~5mm 입경으로 구분하여 제조하여 관리하였다.

현장파쇄-제조한 순환골은골재의 물리적 성질은 [표 10]과 같이 요약한다. 혼합골재로서의 사용을 고려한 다양한 검토결과, 흡수율과 관련하여 20분 정도의 프리웨팅(Pre-wetting)과 표건상태 확인 후 시공에 적용하였다.

### 3.3 현장적용 순환골재 콘크리트의 평가

수차기초에 적용하는 순환골재 콘크리트는 구조부재로서 경화전 성상(슬럼프, 공기량, 콘크리트 온도, 펌프압송성)과 경화후 성상(압축강도, 정탄성계수, 건조수축률)을 갖추어야 했다. 배합의 조건을 골재최대치수 40mm 기준으로 [표 11]

[표 7] 해체물량 및 신규 콘크리트 소요량

항목	수량
해체콘크리트(우측 그림)	472 m <sup>3</sup>
재구축 콘크리트	496 m <sup>3</sup>
① 순환골재콘크리트	144 m <sup>3</sup>
② 고유동콘크리트	352 m <sup>3</sup>
철근가공조립	9.1 t



그림 5. 수차기초 해체



그림 6. 현장 간이 파쇄



그림 7. 현장 입도 선별

과 같이 요약한다. 현장적용 콘크리트 배합을 도출하기 위한 예비 실험평가에 적용된 콘크리트 배합 및 수준은 [표 12]와 같다.

시공에 적용하기 위한 사전 실험평가에서 요구수준을 만족하는 결과를 획득하였다. 경화 전 콘크리트의 물성은 충분한 프리웨팅으로 경시변화 큰 영향이 없었다. 압축강도 측면에서

[표 8] 해체 대상 콘크리트 물성

코어	콘크리트코어		파쇄시료		분쇄시료
	압축강도 (MPa)	밀도 (t/m <sup>3</sup> )	흡수율(%)		불용잔분(%)
			최대 (60 mm 시료)	최소 (30 mm 시료)	
1	25	2.286	5.23	8.74	51
2	24	2.297	3.87	9.60	48
3	20	2.283	5.11	8.44	52
4	38	2.208	4.29	11.43	45

[표 9] 원콘크리트 모르타르 페이스트 성분구성

코어	분쇄시료(모르타르)			페이스트			경화체
	Ca(OH) <sub>2</sub> (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)	CSH (%)	Ca(OH) <sub>2</sub> (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)	CSH (%)	CSH (%)
1	0.94	0.53	14.99	1.92	1.08	30.60	41.53
2	0.71	0.44	10.11	1.37	0.84	19.41	33.14
3	0.67	0.67	17.16	1.03	1.40	35.64	45.23
4	0.93	0.78	26.69	1.42	1.42	48.53	53.35

[표 10] 현장파쇄-현장제조 순환골재 물리적 성질

시험항목	기준	시험결과			토목학회규격
		40~20mm	20~5mm	40~5mm	
조립률(%)	JIS A 1102	8.00	6.80	7.54	-
미립분량(%)	JIS A 1103	-	-	1.3	2.0이하
단위용적질량(kg/L)	JIS A 1104	1.285	1.269	-	-
실적률(%)	JIS A 1104	58.4	58.3	-	55이상
건조밀도(g/cm <sup>3</sup> )	JIS A 1110	2.35	2.35	2.35	-
절건밀도(g/cm <sup>3</sup> )	JIS A 1110	2.20	2.18	2.19	-
흡수율	JIS A 1110	6.88	8.00	7.26	7이하

토목학회규격: 발전시설 해체콘크리트를 이용한 순환골재 콘크리트의 설계시공지침

는 순환골재 혼입률 증가에 따라 압축강도가 저하하였으나 모두 목표강도를 만족하는 40 MPa를 보였다. 기존 구조물에서 채취한 코어 공시체의 압축강도 범위가 25.1~40.2 MPa였으나, 실험에서는 상대적으로 낮은 물시멘트비의 조건이기 때문에 강도에 영향을 미쳤다고 분석되었다. 한편, 정탄성계수와 길이변화율의 경우 85 % 순환골재를 혼입한 경우에서

낮은 결과를 보였다. 배합 1을 바탕으로는 최종적으로 현장에 적용할 콘크리트 배합은 [표 13]와 같이 정리한다.

끝으로, 현장적용 콘크리트의 시공성을 평가한 결과 전반적으로 양호한 타설(펌프 압송, 슬럼프 로스, 다짐 작업성) 결과를 얻었다. 품질관리 면에서 압축강도 측정결과 평균 40 MPa로 나타났으며, 현장반입 콘크리트 품질검사에서도 모든

[표 11] 현장적용 순환골재 콘크리트 요구물성

슬럼프	공기량	배합강도	길이변화율
(콘크리트 비빔 직후) 180±25 mm (1시간 경시변화) 120±25 mm	(콘크리트 비빔 직후) 4.5±1.5 % (1시간 경시변화) 3.5±1.5 %	28 MPa (재령 28일 기준)	800×10 <sup>-6</sup> 이하 (보존기간 182일)

[표 12] 예비 실험 배합 및 수준

배합	실험인자 및 수준				
	시멘트 종류	플라이애쉬 치환율	물시멘트비	순환굵은골재 혼입율	혼합골재 흡수율
1	플라이애쉬 B종	15 %	45 %	40 %	3.73 %
2				85 %	6.43 %
3				0 %	1.33 %

[표 13] 현장적용 콘크리트 배합

잔골재율	단위량(kg/m <sup>3</sup> )								
	물	결합재		잔골재		굵은골재		순환골재	
		시멘트	플라이애쉬	육상모래	해사	쇄석 20~5 mm	쇄석 40~20 mm	순환 20~5 mm	순환 40~20 mm
42 %	146	276	49	350	428	249	373	166	249

[표 14] 기존 재활용과 현장파쇄-현장재활용과의 경제성 비교

구분	폐콘크리트 처리	신규 콘크리트타설	노반재 일부활용	배합시험	골재제조	순환골재 콘크리트 타설
기존	36 %	29 %	35 %	-	-	-
현장재활용	-	-	30 %	24 %	14 %	32 %

검사항목을 만족하는 결과를 얻었다. 비용적 측면에 크게 두 가지 측면에서 비교하였다. 첫 번째 경우는 발생한 폐콘크리트를 폐기물로서 처리하고 일부를 현장 도로정비에 사용하고 소요되는 콘크리트를 별도로 공급하는 경우이다. 두 번째 경우는, 이번 현장적용 사례와 같이 현장 발생 폐콘크리트를 사용하여 순환골재 및 순환골재 콘크리트를 현장에서 제조하고 순환골재 제조과정의 잔여물을 현장 도로정비에 사용하는 경

우이다. 각각의 경우에 소요되는 비용의 구성은 [표 14]와 같이 구성되며 경제적 측면에서 현장재활용이 우수한 경제성을 보였다. 특히, 재활용규모(공사규모)가 클수록 비용적 측면에서 유리한 결론을 보고한다.

담당 편집위원 : 박원준(강원대학교)