

순환골재 콘크리트의 리스크 평가

Risk Evaluation for Recycled Aggregate Concrete



박 원 준^{1)*}

Park, Won Jun

1. 머리말

지속가능한 건설환경 구축을 위한 다양한 분야에서의 연구가 꾸준히 수행되고 있으며, 이 가운데 건축재료 분야에서는 고내구성 재료설계와 유지관리 기술, 탄소저감형 건축재료 개발과 같은 연구가 대표적으로 수행되고 있다. 한편, 수명이 다한 건축물의 철거와 그에 따른 폐콘크리트의 발생과 처리는 근래에 사회적인 문제로 부각되고, 그에 따라 폐콘크리트를 재활용한 순환골재의 재사용은 기존의 노반재 활용과 더불어 콘크리트로서 재활용에 초점을 맞추고 있다. 하지만, 순환골재는 천연골재와는 구별되는 프로세스(해체공사-선별작업-생산공정-품질구분-재사용)를 가지고 있으며, 이에 따른 다양한 불순물의 순환골재 내로 필연적으로 포함되고 콘크리트로 적용할 경우 성능에 악영향을 끼칠 것으로 예상된다. 또한, 순환골재에는 부착 모르타르가 상존하고 보통포틀랜드 시멘트를 적용한 경우, 고로슬래그B중에 비해서 염화물량이나 알칼리양이 많아서 내구성에 큰 문제가 될 수밖에 없다. 따라서, 순환골재에 부착된 상당량의 모르타르와 여기에 함유되어 있는 성분을 정량적으로 추정하고 최종적으로 순환골재 콘크리트 배합에 총알칼리양을 예측해야할 필요성이 있다.

이에 본고에서는 순환골재내 불순물과 알칼리양을 순환

골재 콘크리트의 리스크로 가정하고 정량적인 평가를 개략적으로 소개하고자 한다.

2. 순환골재 불순물 리스크

2.1 불순물량의 예측

순환골재의 품질과 불순물이 가지는 리스크를 평가하기 위해서는 ①해체공사 시나리오의 가정, ②RC구조물의 발생폐기물 예측, ③폐콘크리트의 내의 불순물량 예측, ④골재생산 공정상의 불순물 회수가능성, ⑤ 생산된 골재 내 잔존 불순물량의 예측이 필요하다.

먼저, 해체시나리오는 Table 1과 같이 설정할 수 있으며, 그에 따른 RC구조물의 발생폐기물은 Table 2와 같이 예측이 가능하다. 이 가운데, 콘크리트 폐기물을 순환골재로 생산할 경우, 단위 폐콘크리트 분류 및 회수에 관한 구성은 Table 3과 같이 구성할 수 있다.

Table 1 해체시나리오의 가정

Scenario 1	4대 폐기물 분리해체, 내장재, 설비재
Scenario 2	4대 폐기물 분리해체, 내장재, 구체중심
Scenario 3	4대 폐기물 분리해체, 구체중심
Scenario 4	4대 폐기물
Scenario 5	Scenario 1 + Scenario 4

4대 폐기물은 (아스팔트)콘크리트, 목재, 금속으로 가정

1) 한양대 친환경건축연구센터 연구조교수

* E-mail : jooney1010@hanyang.ac.kr

Table 2 시나리오별 발생 폐기물 비율 예측

시나리오	Total	C	M	W	E
Scenario 1	0.9	98	1.8	0.16	0.04
Scenario 2	0.93	97.7	1.86	0.16	0.31
Scenario 3	0.97	92.8	3.8	0.5	2.9
Scenario 4	1.0	90	6.7	0.5	2.8
Scenario 5	0.95	90.9	3.7	0.49	4.91

C = Concrete, M = Metal, W = Wood, E = etc.

Table 3 제조방식별 폐콘크리트의 분류 및 회수

골재품질	순환골재 생산방식		굵은골재 (t)	잔골재 (t)	노반재 (t)	잔여물 (t)
	가열 분쇄식	HS				
H	가열 분쇄식	HS	0.35	0.3	0	0.35
H	기계 분쇄식	MS	0.3	-	0.69	0.01
H, M	중량 선별	GC	0.27	0.46	0.27	-
H	습식 분쇄	WS	0.27	0.46	0.27	-
M, L	파쇄+분쇄	CS	0.25	0.35	0.4	-
M	다중파쇄+분쇄	MCS	0.25	0.40	0.35	-
M, L	기계 파쇄	MC	0.2	0.2	0.6	-

골재품질 H, M, L은 JIS A 5021에 준함.

Table 4 폐콘크리트의 세부구성 (시나리오 4의 경우)

생산방식		혼합폐기물의 세부구성비율 (추정, %)			
		C	M	W	E
방식	생산	90	6.7	0.5	2.8
MC	순환골재	36.0	-	-	2.8
	부산물	54.0	-	-	-
	폐기물	-	6.7	0.5	-

Table 5 불순물 제한 규정

분류 및 구성		제한	분류 및 구성		제한
A	타일, 세라믹	1.0%	D	무기질 보드	0.5%
B	유리	0.5%	E	플라스틱	0.2%
C	석고보드	0.1%	F	목재, 종이류	0.1%
G1	알루미늄, 아연	1.0%	G2	철재	미정

해체시나리오 4를 기준으로 할 때, Table 3의 C의 발생량과 Table 3에 기반한 폐콘크리트의 제조 방식별 혼합폐기물의 세부구성비율은 Table 4와 같다. 한편, 순환골재의 불순물 구성 및 제한량은 Table 5와 같고, Table 3에서 제시한 생산방식별 불순물 선별기능의 여부는 Table 6과 같이 정리된다.

Table 6 생산공정별 불순물 선별

방식	불순물 분류							
	A	B	C	D	E	F	G1	G2
HS	○	○	◎	◎	◎	◎	×	◎
MS	○	○	△	△	△	△	×	○
GC	○	○	○	○	◎	◎	×	○
WS	○	○	○	○	◎	◎	×	○
CS	○	○	△	△	△	△	×	△
MCS	○	○	○	○	△	△	×	△
MC	○	○	○	○	△	△	×	×

◎(매우우수) ○(우수) △(불량) ×(불가능)

Table 7 순환골재 내 불순물 혼입량 추정

생산 방식	순환골재 비율	불순물	골재대비 질량비	불순물 조합의 가정(%)							
				A	B	C	D	E	F	G1	G2
				20	10	5	5	10	30	15	5
WRA	WTotal	$\frac{W_{Total}}{W_{RA}}$	순환골재에 대한 질량비 (WTotal의 세부 구성비, %)								
			1.6	0.8	0.4	0.4	0.8	2.3	1.2	0.4	
MC	36.0	2.8	7.78	0.8	0.4	0.2	0.2	0.5	1.8	1.2	0.4
		불순물 선별 후 최종추정량									

Table 8 불순물이 콘크리트 성능에 미치는 영향

	강도/탄성계수	단위용적 질량	슬럼프	응결	중성화	영화이온 침투	동결융해
A	○	×	×	△	×	×	×
B	○	×	×	△	×	×	×
C	○	△	○	◎	×	◎	○
D	○	×	×	△	×	×	×
E	○	△	×	△	×	×	×
F	○	△	◎	◎	×	◎	◎
G1	◎	×	×	×	◎	×	×
G2	○	△	×	×	×	△	×

여기서, ◎: 매우 큰 성능저하, ○: 성능저하, △: 약간의 성능저하, ×: 영향이 없거나 불확실함

2.2 불순물에 의한 리스크 평가

이상과 같이, 예상 잔류량을 Table 7(시나리오 4)과 같이 정리하여, 해체시나리오별, 생산별, 골재별 불순물에 대한 예측과 그에 따른 콘크리트에 대한 영향(Table 8)을 대조하여 ISO/IEC Guide 51에서 제시하는 Risk-Map으로 나타내면, Table 9와 같이 순환골재를 사용한 콘크리트의 리스크가 평가될 수 있다

Table 9 순환골재를 사용한 콘크리트의 리스크 평가모델

불순물종류 및 중량비(%)		순환골재 생산방식						리스크 범위
		HS	GC, WS	MS	CS	MCS	MC	
A-G	3이상	-	S-5 (B, C, D, E, F, G1)	S-3, 4, 5	S-5 (A, B, C, D, E, F, G1, G2)	S-5	S-3, 4, 5	◎
A-G	1~3.0	S-3, 5(G1)	S-4 (B, C, G1)	-	S-3,4 (B, C, D, E, F, G1)	S-3,4	-	○
A-D G	0.1~1.0	S-4	S-3 (B, C, G1)	S-2 (G1)	S-2 (F)	S-2 (F)	S-2 (F, G1)	△
A-D, G1	0.05~0.1	S-2	S-2	-	-	-	-	
A, B, G1	0.05 이하	S-1	S-1	S-1	S-1	S-1	S-1	×
S: 시나리오		×		△		○		◎

여기서, ◎: 매우 큰 성능저하, ○: 성능저하, △: 약간의 성능저하, ×: 안전

3. 순환골재 알칼리 리스크

3.1 알칼리량의 예측

순환골재 모르타르 부착률과 흡수율과의 관계는 다양하게 보고되고 있지만, 한 예로서 다음과 같은 관계를 인용할 수 있다.

$$\text{모르타르 부착률} = 9.81 \times \text{흡수율} - 5.16 \quad (1)$$

신뢰구간: 95%

모르타르 부착률과 흡수율과의 관계를 설정한다면, 알칼리총량의 정량적인 추정치는 다음과 같이 1)~5)의 흐름으로 가능할 것으로 판단된다.

1) 순환골재의 부착모르타르의 알칼리량의 계산

순환골재는 흡수율이 클수록 부착된 모르타르량도 많아진다. 여기서, 흡수율 4%를 가정한 모르타르의 알칼리량을 추정한다면, 식 (2)에 의해 산출이 가능하다.

$$R_{adm} = RG_W \times ADM_r \times C_r \times R_c \quad (2)$$

여기서, R_{adm} : 부착모르타르의 알칼리량 (kg/m^3)

RG_W : 굵은 순환골재 단위량 (kg/m^3)

ADM_r : 굵은 순환고재의 모르타르 부착률

C_r : 모르타르에 함유된 시멘트함유물

R_c : 모르타르 내 시멘트의 알칼리량 (kg/m^3)

2) 순환골재의 흡수율과 모르타르 부착률의 관계

Table 10 콘크리트 배합

W/C (%)	s/a (%)	단위량 (kg/m^3)			
		W	C	S	G
60	47.2	179	298	840	963

흡수율 4%를 가정한 순환골재의 모르타르 부착률은 식 (1)에 의해서 약 34.1%가 되고, 95% 신뢰구간의 상한은 51.0%가 된다.

3) 모르타르에 함유된 시멘트량 (함유율)

순환골재 생산으로 활용되는 원콘크리트의 표준적인 배합(예-Table 10)을 가정하여 시멘트 질량의 40%에 상당하는 수분이 결합수로서 콘크리트에 고정되어 있다고 했을 때, 순환골재에 부착된 모르타르의 시멘트 함유율(C/M)은 다음 식 (3)와 같이 계산된다.

$$\text{시멘트 함유율} = \frac{298}{1.4 \times 298 + 840} = 0.237 \quad (3)$$

4) 시멘트의 알칼리량

여기서 고려해야할 점은 원콘크리트가 발생된 해체구조물의 건설시점의 설정이다. 만약에 1975년정도에 건설된 구조물이라고 가정하면, 해당 기간에 사용된 시멘트의 최대 알칼리량의 0.95%를 이용한다.

5) 순환골재 콘크리트의 총알칼리량의 계산

총알칼리량의 계산은 다음 식 (4)와 같이 정량적으로 추정이 가능할 것으로 판단된다.

$$R_t = R_c + R_s + R_m + R_{adm} \quad (4)$$

Table 11 순환골재 콘크리트의 총알칼리량의 계산 (F_0 : 호칭강도(MPa))

	W	C	S	RG	R_c	R_s	R_m	$R_c+R_s+R_m$	R_{adm}	R_t	판정
F_0	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	0.0065	0.0001	0.010				≤3.0
30	185	378	746	910	2.457	0.039	0.038	2.534	1.045	3.579	NG
27	185	353	767	910	2.295	0.041	0.035	2.370	1.045	3.415	NG
24	185	327	788	910	2.126	0.042	0.033	2.200	1.045	3.245	NG

여기서, R_t : 알칼리 총량 (kg/m³)

R_c : 콘크리트 내 시멘트의 전알칼리양 (kg/m³)

Na_2O 및 K_2O 의 함유량을 이것과 등가인 Na_2O 양(Na_2O_{eq})로 환산하여 표현한 값으로서, $Na_2O_{eq}(\%) = Na_2O(\%) + 0.658K_2O(\%)$ 로 함.

R_s : 콘크리트 내 골재의 전알칼리양 (kg/m³) = 단위골재량(kg/m³) × 0.87 × 골재 내 Cl^- 량(%)

R_m : 콘크리트 내 혼화제의 알칼리량 (kg/m³)

모르타르 부착률을 51%, 시멘트 함유율을 0.237, 시멘트의 알칼리량을 0.95%, 이때의 부착모르타르의 알칼리량을 0.115%로 추정할 때, Table 11과 같이 순환골재 콘크리트의 총알칼리량을 정량적으로 추정할 수 있다. 이와 같은 과정을 설정하여, 순환골재 콘크리트 배합의 알칼리량의 정량적인 추적이 가능할 것으로 판단된다.

4. 맺음말

국내 해체공사 기준 및 다양한 용도의 건축물들의 해체 과정에서 발생하는 폐기물의 구성비율과 순환골재 생산방식을 고려하고, 방식별 순환골재의 품질 및 불순물 선별 및 주요 불순물의 영향에 대한 연구가 보완된다면, 향후 순환골재를 사용한 콘크리트의 리스크를 효과적으로 평가할 수 있을 것으로 사료된다. 순환골재 콘크리트 배합의 알칼리량의 정량적인 추정은 매우 중요할 것으로 판단되지

만, 국내 순환골재 생산 프로세스에서는 골재의 물리적인 특성(비중, 흡수율)에 초점을 두고 있기 때문에, 출처(원 콘크리트의 정보)가 불확실한 순환골재를 사용하는 콘크리트에 적용하는데 한계가 있다. 따라서, 향후에는 기존의 순환골재 품질확보 방안과 더불어 원콘크리트의 발생정보가 해체공사 단계부터 확보되고 제공되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 日本コンクリート工学協会、再生骨材コンクリートの現況と将来展望, 2006.11, pp.198.
2. Cement Journal, The Earth and Eco-concrete Magazine, Vol. 3, 2008, pp.38-45 (Japanese).
3. ISO/IEC Guide 51, 1999.
4. JCI: JCI-TC081A Committee Report, 2010.
5. T. Noguchi and W. J. Park, Concrete Recycling in Consideration with a Risk of Deleterious Impurities. 12th International Conference on Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues, Prague, Czech, 2012.
6. Y. Yamaguchi, M. Kikuchi, K. Aoyama and K. Akio: Estimation of the weight of construction material waste discharged from demolition work. Journal of structural and construction engineering. AIJ (610). 2006.

담당 편집위원: 김태수
(한밭대학교 건축공학과 부교수)
tskim@hanbat.ac.kr