

내구성 설계 변수에 따른 최적 고로슬래그 미분말의 치환율 도출

Derivation of Optimum GGBFS Replacement with Durability Design Parameters

장승엽¹ · 윤용식² · 권성준^{2*}Seung-Yup Jang¹ · Yong-Sik Yoon² · Seung-Jun Kwon^{2*}

(Received December 18, 2017 / Revised March 9, 2018 / Accepted March 9, 2018)

GGBFS(Ground Granulated Blast Furnace Slag)-replacement is very effective for improving resistance to chloride attack and this can induce a long service life for RC(Reinforced Concrete) structures exposed to chlorides. In the work, the design parameters such as cover depth, surface chloride content, critical chloride content, and replacement ratio of GGBFS are considered, and optimum replacement ratio of GGBFS are derived with intended service life. The changes of surface chloride content and cover depth show 3.16~3.38 and 3.02~3.34 times of service life variation, which are most influencing parameters. Critical chloride content shows 1.53~1.57 times of service life variation regardless of w/b(Water to Binder) ratios. In the case of surface chloride content 18.0kg/m³, the most severe condition, cover depth over 70 mm and GGBFS replacement ratio over 42% are required with concrete containing w/b ratio under 0.42 for 100 years of intended service life. The condition of 13.0kg/m³, GGBFS replacement over 35% is required. For reasonable durability design, quantitative exterior condition and critical chloride content should be determined, and the criteria in Domestic Specification is evaluated to be conservative.

키워드 : 고로슬래그 미분말, 내구수명, 설계 인자, 내구성 설계, 최적 치환율

Keywords : GGBFS, Service life, Design parameter, Durability design, Optimum replacement ratio

1. 서론

염해에 노출된 콘크리트는 염화물 이온의 침투를 통하여 부식이 쉽게 발생하므로 이에 대한 대책이 항상 필요하다. 부식이 발생한 콘크리트는 초기에 균열이 진전되고 이후 피복콘크리트의 박락이 발생한다. 이렇게 표면이 열화된 RC(Reinforced Concrete) 구조체에서는 염화물 및 산소의 확산이 더욱 빠르게 진전되므로 부식이 더욱 활성화되고 철근의 슬림이 발생하여 구조체로서의 사용성 및 안전성을 기대할 수 없다(Kwon et al. 2009; Broomfield 1997; Maekawa et al. 2003). 피복두께를 증가시키는 것은 가장 확실한 내구성 확보 대책이지만, 수화열의 증가 및 단면의 증대 등 많은 문제가 야기되므로 재료를 통한 염해 저항성 개선이 꾸준히 시도되고 있다(Seoul Metro 1999; Kim et al. 2014).

1990년 이후로 플라야애쉬(FA: Faly Ash), 실라카 폼(SF: Silica

Fume), 왕겨재(RHA: Rice Husk Ash)와 같은 혼화재료가 콘크리트에 사용되고 이를 통해 내구성을 개선하려는 연구가 많이 수행되고 있다. FA를 사용한 콘크리트에서는 볼-베어링 효과로 작업성이 개선되고 단위 발열량이 매우 낮아 수화열 제어에 큰 도움이 된다. 또한 포졸란 반응으로 인해, 낮은 염화물 확산계수에 따른 높은 염해 저항성을 나타내고 있다(Kim et al. 2012; Chindaprasirt et al. 2005). SF를 사용한 콘크리트에서는 초기에 일부의 포졸란 반응과 높은 공극 충전효과로 인해 뛰어난 염화물 침투 차단효과를 나타내고 있다(Song et al. 2010; Zhang and Gjrv 1991). RHA의 경우 SF와 비슷하게 다량의 SiO₂를 포함하고 있으며, 지속적인 포졸란 반응을 통해 콘크리트 구체의 밀실화에 기여한다(Rukzon et al. 2009; Saraswathy and Song 2007). 그러나 최적 소성온도가 산지에 따라 다르고 수입에 대한 부담으로 인해 국내에서는

* Corresponding author E-mail: jjuni98@hannam.ac.kr

¹한국교통대학교 교통대학원 교통시스템공학과 (Department of Transportation System Engineering, Graduate School of Transportation, Korea National University of Transportation, Uiwang, 16106, Korea)

²한남대학교 건설시스템공학과 (Department of Civil Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea)

Copyright © 2018 by Korean Recycled Construction Resources Institute

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

활발하게 연구되지 못하고 있는 실정이다.

혼화재료로 사용되는 산업부산물(By-product) 중, 가장 대표적인 재료는 고로슬래그 미분말(GGBFS: Ground Granulated Blast Furnace Slag)을 들 수 있다. GGBFS를 혼입한 콘크리트는 잠재수경성 반응을 통하여 공극구조가 밀실해지고 화학 저항성 개선 및 내구성 향상에 매우 효과적이다. 또한 자유염화물의 흡착량이 OPC(Ordinary Portland Cement)보다 매우 크므로 염화물 침투로 인한 철근부식제어에 큰 장점이 있다(Song and Saraswathy 2006; Antiohos et al, 2007). 최근 들어 단위수량이 충분한 GGBFS 콘크리트에 대해서는 희석효과(Dilution Effect)로 인해, Alite 및 Ferrite의 수화가 촉진되므로 초기재령 강도가 상당히 개선되는 결과도 보고되고 있다(Jeong et al, 2015 a; Jeong et al, 2015 b).

현재 염해 대책으로는 혼화재료 치환에 따른 확산계수의 감소가 실용적이며 내구수명 확보에 매우 효과적으로 알려져 있다. 동일한 외부조건 및 피복두께에서는 혼화재료 사용을 통한 시간 의존성 확산계수의 감소가 염화물 해석방정식의 주된 변수이기 때문이다. 본 연구에서는 노출환경과 설계변수에 따른 내구수명을 평가하고 이에 따른 최적의 슬래그 치환율을 도출한다. 이를 위해 표면염화물량을 3 수준, 물-결합재 비를 3 수준, 피복두께를 4 수준, GGBFS의 치환율을 4 수준, 임계염화물량을 2 수준으로 고려하여 다양한 해석을 수행하였으며, 목표내구수명 확보를 위한 최적의 GGBFS 치환율을 도출하였다.

2. 염화물 거동 평가를 위한 내구성 설계 변수 및 조건

2.1 염화물 평가의 개요

본 해석을 수행하기 위해 일반적으로 사용되는 Life 365 프로그램을 사용하였는데, 지배방정식은 Fick's 2nd Law를 이용하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다(Thomas and Bentz 2002; Thomas and Bamforth 1999).

$$C(x,t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D(t)t}} \right) \quad (1)$$

여기서, C_0 는 콘크리트 표면에 있어서 염화물이온 함유량, erf 는 오차함수, $D(t)$ 는 시간 의존성 확산계수, t 는 노출시간, x 는 피복두께를 나타낸다.

시간 의존성 확산계수 $D(t)$ 는 식 (2)와 같이 제안되고 있으며, 기준확산계수 D_{ref} 는 식 (3)과 같이, 시간 의존성지수 m 은 식 (4)와 같이 제안되고 있다(Thomas and Bentz 2002; Thomas and Bamforth 1999).

$$D(t) = D_{ref} \cdot \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad (2)$$

$$D_{28} = 1 \times 10^{[-12.06 + 2.40 W/CM]} \quad (3)$$

$$m = 0.2 + 0.4(\%FA/50 + \%SG/70) \leq 0.6 \quad (4)$$

여기서, $D(t)$ 는 재령일 t 의 확산계수, D_{ref} 는 재령 28일의 기본확산계수, t 는 재령일, t_{ref} 는 28일, W/CM 은 물-결합재 비, FA , SG 는 각각 플라이애쉬와 고로슬래그의 치환율을 나타내며 식 (4)에서 m 의 최댓값은 0.6으로 가정된다.

식 (2) 및 식 (4)에 대해서는 많은 연구들이 수행되고 있으며, 국내에서도 합리적인 m 을 선정하기 위한 실험과 연구들이 수행되고 있는데, 시간 의존성 지수는 장기실험 및 실태조사 연구에 의존하므로 많은 변동성을 가지기 때문이다(Thomas and Bamforth 1999; Lee and Kwon 2012).

2.2 내구성 설계 영향인자의 설정

본 절에서는 내구성 설계를 위한 조건을 현재 사용 중인 토목구조물 배합을 참고하여 나타내었다. 물-결합재 비를 0.37~0.47로, 피복두께를 50~80mm로, 슬래그 치환율을 30~60%로, 표면염화물은 5.0~18.0kg/m³으로 설정하였다. 임계염화물량은 국내 기준인 1.2kg/m³과 일본기준(물-결합재 비 0.4~0.5인 경우)인 1.87kg/m³을 사용하였다.

국내의 임계염화물량인 1.2kg/m³은 기존의 연구에서 알 수 있듯이 매우 보수적인 설계이므로 일본기준과 국내기준의 평균값을 가정하여 해석을 수행하였다(JSCE 2013). Table 1에는 해석조건을 나타내고 있다.

Table 1. Simulation condition for service life evaluation

W/b ratio (%)	Cover depth (mm)	GGBFS replacement ratio(%)	Surface chloride content(kg/m ³)	Critical chloride content(kg/m ³)
37, 42, 47	50, 60, 70, 80	30, 40, 50, 60	5.0 13.0, 18.0	1.2, 1.87

3. 내구성 설계인자에 따른 최적 슬래그 치환량

3.1 내구성 설계 인자의 변화에 따른 내구수명

3가지 수준의 물-결합재 비, 2가지 수준의 임계염화물량, 3가지 수준의 표면염화물량을 고려한 내구수명 해석결과를 Tables 2~4에 나타냈다. 또한 각 내구수명 해석 결과를 Fig. 1에 나타내었다.

고로슬래그 치환율이 높을수록, 피복두께가 증가할수록 높은 내구수명이 평가되었으며, 표면염화물량이 증가할수록 내구수명이 감소하는 경향이 나타났다. 고로슬래그 치환율이 30%에서 60%로 증가함에 따라 물-결합재 비 0.37에서는 내구수명이 2.69~2.77배, 물-결합재 비 0.42에서는 2.66~2.76배, 물-결합재 비 0.47에서는 2.69~2.75배로 내구수명이 증가하였다.

물-결합재 비 조건에서 고로슬래그 치환율의 변화에 따른 내구수명 증가는 비슷한 증가율을 나타냈다. 피복두께가 50mm에서 80mm로 증가함에 따라 내구수명은 물-결합재 비 0.37에서는 2.65~3.02배, 0.42에서는 2.66~3.18배, 0.47에서는 2.67~3.37배의 증가율을 보이고 있으므로, 피복두께가 매우 큰 영향인자임을 알 수 있다. 또한, 임계염화물량이 1.2kg/m³에서 1.87kg/m³으로 증가하게 되면 내구수명이 물-결합재 비 0.37에서는 1.27~1.79배,

Table 3. Service life in the condition of w/b 0.42

Cover depth (mm)	GGBFS ratio (%)	Service life with surface chloride content and critical chloride content(years)					
		1.87kg/m ³			1.20kg/m ³		
		5.0 kg/m ³	13.0 kg/m ³	18.0 kg/m ³	5.0 kg/m ³	13.0 kg/m ³	18.0 kg/m ³
50	30	44.0	13.7	10.4	23.2	10.8	7.8
	40	62.4	20.5	14.7	32.9	13.5	10.8
	50	85.8	26.2	19.6	47.1	19.3	16.3
	60	119.3	37.9	28.7	63.9	26.5	20.9
60	30	65.2	21.5	16.6	35.5	15.3	12.5
	40	92.5	30.4	23.4	50.3	21.7	18.7
	50	124.1	41.1	31.9	71.5	31.3	25.3
	60	176.4	59.1	45.8	95.6	42.6	36.3
70	30	90.6	30.7	24.1	49.7	22.3	18.3
	40	128.3	45.6	36.1	70.6	32.0	26.3
	50	171.7	58.8	47.8	100.4	45.5	37.3
	60	245.4	83.8	65.8	133.9	61.6	50.6
80	30	119.4	41.5	32.6	66.2	30.7	25.3
	40	169.2	58.9	46.5	94.1	43.4	36.1
	50	228.4	79.1	62.3	133.3	62.0	51.2
	60	321.2	112.7	89.2	177.9	83.8	71.2

Table 2. Service life in the condition of w/b 0.37

Cover depth (mm)	GGBFS ratio (%)	Service life with surface chloride content and critical chloride content(years)					
		1.87kg/m ³			1.20kg/m ³		
		5.0 kg/m ³	13.0 kg/m ³	18.0 kg/m ³	5.0 kg/m ³	13.0 kg/m ³	18.0 kg/m ³
50	30	59.9	19.2	14.8	32.0	13.7	11.1
	40	84.7	27.3	20.9	45.4	20.4	15.7
	50	113.4	37.0	28.5	66.8	27.9	22.5
	60	161.6	53.2	41.2	86.8	38.0	32.6
60	30	87.7	29.8	23.0	48.1	21.5	17.6
	40	124.6	42.2	33.0	68.2	30.8	25.1
	50	166.7	56.7	44.3	96.9	44.0	36.1
	60	238.6	81.1	63.4	129.3	61.1	48.8
70	30	121.0	41.8	32.9	66.8	31.0	25.6
	40	173.7	59.6	46.9	94.8	43.8	36.5
	50	231.6	79.8	63.0	136.5	62.7	51.9
	60	325.7	113.7	90.0	181.6	84.3	70.0
80	30	159.7	56.1	44.7	88.7	41.8	34.8
	40	226.0	79.6	63.1	125.8	59.3	49.2
	50	302.3	106.8	84.6	178.4	84.3	70.3
	60	428.7	151.8	120.7	237.6	115.0	94.4

Table 4. Service life in the condition of w/b 0.47

Cover depth (mm)	GGBFS ratio (%)	Service life with surface chloride content and critical chloride content(years)					
		1.87kg/m ³			1.20kg/m ³		
		5.0 kg/m ³	13.0 kg/m ³	18.0 kg/m ³	5.0 kg/m ³	13.0 kg/m ³	18.0 kg/m ³
50	30	32.3	10.8	7.4	16.6	6.6	5.4
	40	45.9	13.5	10.1	23.6	9.2	7.3
	50	63.6	18.1	13.3	33.8	13.0	10.2
	60	90.2	26.5	19.3	46.1	17.7	13.7
60	30	48.5	15.3	11.6	25.6	10.9	8.5
	40	68.7	21.7	16.4	36.7	15.2	12.2
	50	92.1	29.4	22.4	54.1	21.8	17.4
	60	131.4	42.3	32.2	70.2	30.0	23.7
70	30	67.5	22.2	17.3	36.7	16.0	13.0
	40	95.6	31.6	24.3	51.9	22.7	18.4
	50	130.1	44.6	35.1	74.1	32.5	26.5
	60	182.4	61.3	47.7	99.0	44.2	36.0
80	30	89.6	30.4	24.8	51.0	22.2	18.1
	40	127.0	43.4	33.9	69.7	31.6	25.9
	50	169.8	58.2	45.5	99.1	45.2	37.0
	60	241.3	83.2	65.1	132.3	61.0	52.1

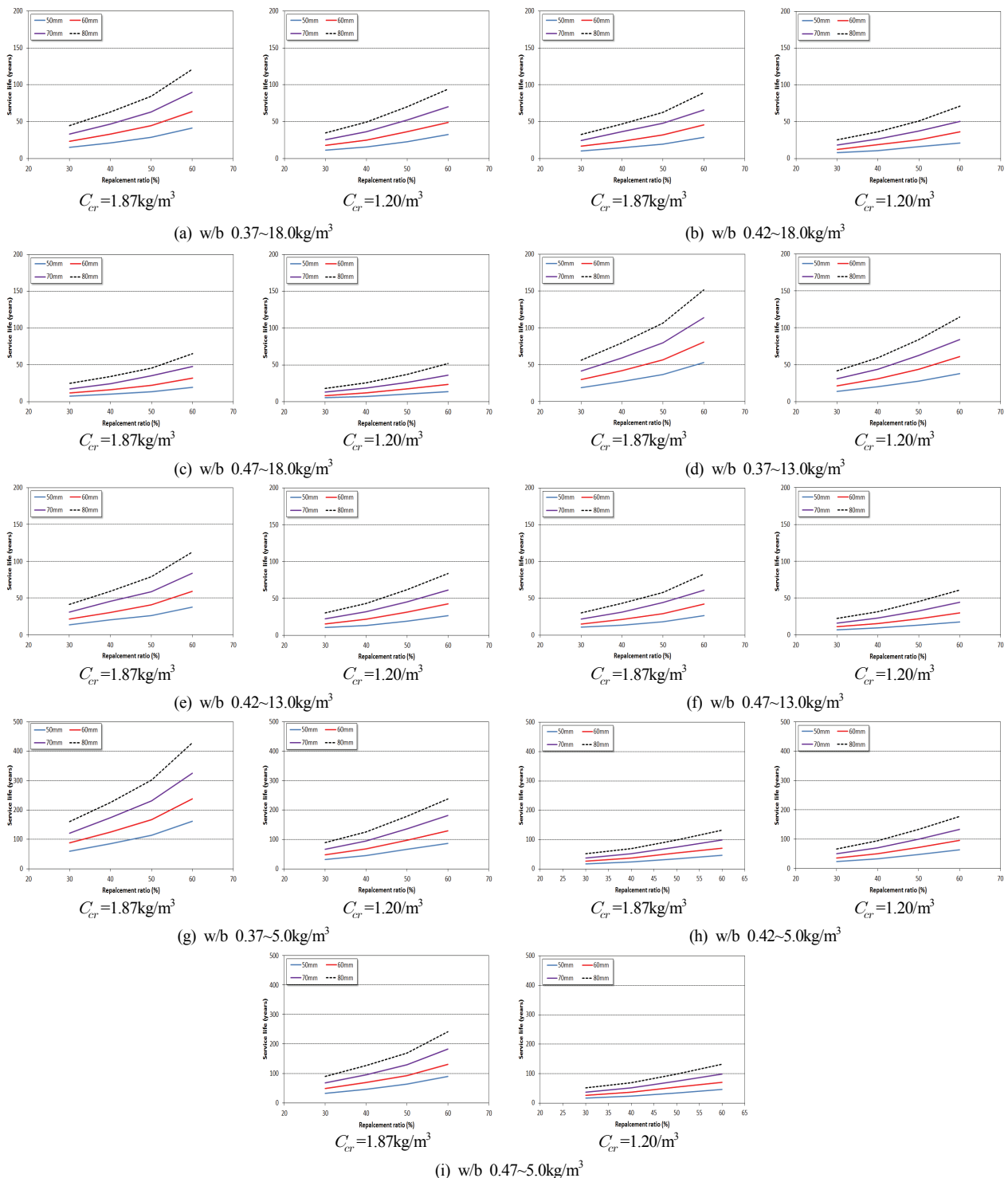


Fig. 1. Changes in service life with GGBFS replacement ratios

0.42에서는 1.28~1.80배, 0.47에서는 1.31~1.82배 증가하였다.
 구조 해석 시 외력에 해당하는 표면염화물량이 18.0kg/m³에서
 5.0kg/m³으로 감소함에 따라 내구수명은 물-결합재 비 0.37에서

는 2.62~3.69배, 0.42에서는 2.68~3.77배, 0.47에서는 2.83~
 3.93배 증가하였다.
 각 내구수명의 변화율을 평균으로 도시하면 상대적인 비교가

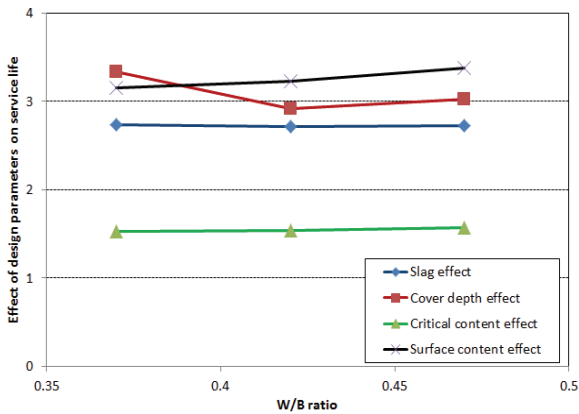


Fig. 2. Effect of design parameters on service life

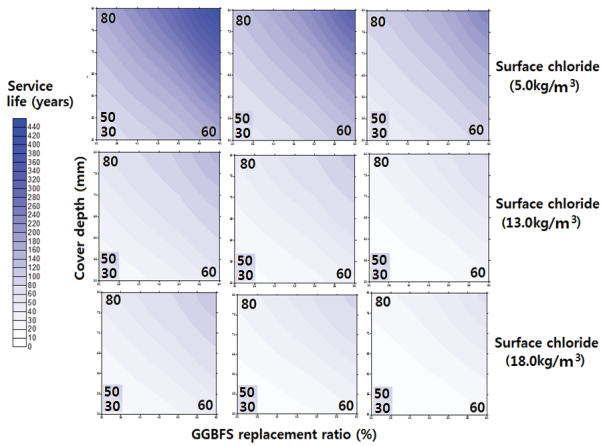


Fig. 3. Service life contour

가능한데, 이는 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. 물-결합재 비에 따른 큰 경향은 보이지 않았으며, 표면염화물량, 피복두께, 슬래그 혼입량 등이 큰 영향인자로 평가되었다. 내구수명 해석결과를 컨투어로 Fig. 3과 같이 나타내었다.

3.2 목표내구수명에 따른 슬래그 치환량 분석

3.1절의 평가 결과를 바탕으로 목표내구수명을 50년, 75년, 100년으로 설정한 경우의 각 목표내구수명을 만족하는 설계인자별 최적 슬래그 치환율을 Tables 5~7에 나타내었다. 최대 슬래그 치환율은 60% 미만으로 하였으며, N/A로 표시한 부분은 내구성 설계가 불가능한 영역으로 피복두께를 늘리거나 목표내구수명을 낮추는 방법이 요구된다.

Tables 5~7에서 표면염화물량이 증가할수록, 목표내구수명이 증가할수록 요구되는 치환율은 증가하게 되며 피복두께가 증가할수록 값은 낮아지게 된다. 또한 오른쪽(임계염화물량이 1.2kg/m³)

Table 5. GGBFS ratio for target service life in the condition of w/b 0.37

Cover depth (mm)	Target service life (years)	Slag containing ratio with surface chloride content and critical chloride content(%)					
		1.87kg/m ³			1.20kg/m ³		
		5.0 kg/m ³	13.0 kg/m ³	18.0 kg/m ³	5.0 kg/m ³	13.0 kg/m ³	18.0 kg/m ³
50	50	0	58	N/A	42	N/A	N/A
	75	36	N/A	N/A	54	N/A	N/A
	100	45	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
60	50	0	46	56	31	54	N/A
	75	0	57	N/A	42	N/A	N/A
	100	33	N/A	N/A	51	N/A	N/A
70	50	0	35	42	0	44	49
	75	0	48	55	33	56	N/A
	100	0	56	N/A	41	N/A	N/A
80	50	0	0	33	0	34	41
	75	0	38	46	0	46	52
	100	0	48	55	33	55	N/A

Table 6. GGBFS ratio for target service life in the condition of w/b 0.42

Cover depth (mm)	Target service life (years)	Slag containing ratio with surface chloride content and critical chloride content(%)					
		1.87kg/m ³			1.20kg/m ³		
		5.0 kg/m ³	13.0 kg/m ³	18.0 kg/m ³	5.0 kg/m ³	13.0 kg/m ³	18.0 kg/m ³
50	50	33	N/A	N/A	52	N/A	N/A
	75	45	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	100	55	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
60	50	0	55	N/A	40	N/A	N/A
	75	33	N/A	N/A	52	N/A	N/A
	100	43	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
70	50	0	44	51	30	53	60
	75	0	57	N/A	42	N/A	N/A
	100	33	N/A	N/A	50	N/A	N/A
80	50	0	35	43	0	44	49
	75	0	49	55	34	56	N/A
	100	0	56	N/A	42	N/A	N/A

으로 갈수록 전반적인 값의 증가가 요구된다.

물-결합재 비 0.37인 경우, 피복두께가 50mm에서는 표면염화물량이 18.0kg/m³일 때 두 종류의 임계염화물에 대해 만족하지 못하였다. 피복두께를 80mm로 증가시킬 경우 최대 55%의 치환율을 가져야만 100년의 내구수명을 확보할 수 있다. 물-결합재 비 0.42에서는 표면염화물량이 13.0kg/m³에서는 55% 이상의 슬래그 치환율과 60mm 이상의 피복두께의 사용이 요구되었다. 또한 0.47

Table 7. GGBFS ratio for target service life in the condition of w/b 0.47

Cover depth (mm)	Target service life (years)	Slag containing ratio with surface chloride content and critical chloride content(%)					
		1.87kg/m ³			1.20kg/m ³		
		5.0 kg/m ³	13.0 kg/m ³	18.0 kg/m ³	5.0 kg/m ³	13.0 kg/m ³	18.0 kg/m ³
50	50	43	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	75	55	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	100	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
60	50	31	N/A	N/A	48	N/A	N/A
	75	43	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	100	52	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
70	50	0	53	N/A	39	N/A	N/A
	75	33	N/A	N/A	50	N/A	N/A
	100	41	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
80	50	0	45	53	0	53	59
	75	0	57	N/A	42	N/A	N/A
	100	33	N/A	N/A	50	N/A	N/A

의 물-결합재 비에서는 70mm의 피복두께와 53%의 치환율이 요구되었다. 현재 국내 시방기준에서 차용하고 있는 임계염화물량은 매우 엄격한 수준이며, 현실적인 내구성 설계를 위해서는 환경에 대한 명확한 표면염화물량의 설정과 합리적인 임계염화물량의 설정이 필요함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 겉보기 확산계수 및 내구성 설계인자를 고려하여 목표내구수명에 따른 최적의 슬래그 치환율을 평가하였다. 본 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 고로슬래그 치환율이 30%에서 60%로 증가함에 따라 물-결합재 비 0.37에서는 내구수명이 2.69~2.77배, 0.42에서는 2.66~2.76배, 0.47에서는 2.69~2.75배가 증가하여 치환율에 따른 내구수명 변화는 큰 차이를 나타내지 않았다. 피복두께가 50mm에서 80mm로 증가함에 따라 내구수명의 변화는 물-결합재 비 0.37에서는 2.65~3.02배, 0.42에서는 2.66~3.18배, 0.47에서는 2.67~3.37배의 증가율을 보였다. 임계염화물량이 1.2kg/m³에서 1.87kg/m³으로 증가할 경우는 1.27~1.82배의 내구수명 증가를 나타내었는데, 표면염화물량, 피복두께, 슬래그 혼입량 등이 내구수명에 큰 영향인자로 평가되었다.
2. 목표내구수명과 표면염화물량이 증가할수록 목표내구수명

을 만족하는 슬래그 치환율은 증가하게 된다. 물-결합재 비가 0.37인 경우, 피복두께 50mm에서는 표면염화물량이 18.0kg/m³일 때는 내구설계를 수행할 수 없었으며, 피복두께를 80mm로 증가시킬 경우 최대 55%의 치환율을 가져야만 100년의 내구수명을 확보할 수 있었다. 물-결합재 비가 0.42인 경우, 표면염화물량이 13.0kg/m³에서는 55% 이상의 슬래그 치환율과 60mm 이상의 피복두께의 사용이, 0.47의 물-결합재 비에서는 70mm의 피복두께와 53%의 치환율이 요구되었다.

3. 국내 시방기준에서 제시하고 있는 임계염화물량은 일본 시방서보다 낮은 값을 제안하고 있다. 일본의 경우 결합재 종류를 고려하여 물-결합재 비의 함수로 임계염화물량을 규정하고 있는데, 국내의 경우 1.2kg/m³을 적용하여 매우 엄격한 내구성 설계를 유도하고 있다. 현실적인 내구성 설계를 위해서는 노출환경에 대한 명확한 표면염화물량과 합리적인 임계염화물량의 정의가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한남대학교 안식년(2016) 연구를 통하여 진행된 것으로 저자는 이에 감사드립니다.

References

Antiohos, S.K., Papadakis, V.G., Chaniotakis, E., Tsimas, S. (2007). Improving the performance of ternary blended cements by mixing different types of fly ashes, *Cement and Concrete Research*, **37(6)**, 877-885.

Broomfield, J.P. (1997). *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair*, E&FN, London, 1-15.

Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., Sinsiri, T. (2005). Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste, *cement and Concrete Composites*, **27(4)**, 425-428.

JSCE. (2013). *Standard Specification for Concrete Structures—Design; JSCE Guidelines for Concrete 15*, Japan Society of Civil Engineering(JSCE), Tokyo, Japan.

Jeong, J.Y., Jang, S.Y., Choi, Y.C., Jung, S.H., Kim, S.I. (2015a). Effects of replacement ratio and fineness of GGBFS on the hydration and pozzolanic reaction of high-strength high-volume GGBFS blended cement pastes, *Journal of the Korea*

- Concrete Institute, **27(2)**, 115–125.
- Jeong, J.Y., Jang, S.Y., Choi, Y.C., Jung, S.H., Kim, S.I. (2015b). Effect of limestone powder and silica fume on the hydration and pozzolanic reaction of high-strength high-volume GGBFS blended cement mortars, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **27(2)**, 127–136.
- Kwon, S.J., Na, U.J., Park, S.S., Jung, S.H. (2009). Service life prediction of concrete wharves with early aged crack: probabilistic approach for chloride diffusion, *Structural Safety*, **31(1)**, 75–83.
- Kim, S.H., Ryu, G.S., Koh, K.T., Lee, J.H. (2012). “Micro-structure analysis of fly ash based geopolymer,” *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Korea Concrete Institute, Korea, **24(2)**, 843–844.
- Kim, S.J., Kim, Y.J., Kwon, S.J. (2014). CO₂ evaluation of reinforced concrete column exposed to chloride attack considering repair timing, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **2(1)**, 1–9.
- Lee, S.H., Kwon, S.J. (2012). Experimental study on the relationship between time-dependent chloride diffusion coefficient and compressive strength, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **24(6)**, 715–726.
- Maekawa, K., Ishida, T., Kishi, T. (2003). Multi-scale modeling of concrete performance, *Journal of Advanced Concrete Technology*, **1(2)**, 91–126.
- Seoul Metro. (1999). *Durability Improvement for Underground Structures*, Technical Report, 31–63.
- Song, H.W., Saraswathy, V. (2006). Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag—an overview, *Journal of Hazardous Materials*, **138(2)**, 226–233.
- Saraswathy, V., Song, H.W. (2007). Corrosion performance of rice husk ash blended concrete, *Construction and Building Materials*, **21(8)**, 1779–1784.
- Song, H.W., Pack, S.W., Nam, S.H., Jang, J.C., Saraswathy, V. (2010). Estimation of the permeability of silica fume cement concrete, *Construction and Building Materials*, **24(3)**, 315–321.
- Thomas, M.D.A., Bamforth, P.B. (1999). Modeling chloride diffusion in concrete: effect of fly ash and slag, *Cement and Concrete Research*, **29(4)**, 487–495.
- Thomas, M.D.A., Bentz, E.C. (2002). *Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides*, Life365 Manual, SFA, 2–28.
- Rukzon, S., Chindaprasirt, P., Mahachai, R. (2009). Effect of grinding on chemical and physical properties of rice husk ash, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, **16(2)**, 242–247.
- Zhang, M.H., Gjørv, O.E. (1991). Effect of silica fume on pore structure and chloride diffusivity of low porosity cement pastes, *Cement and Concrete Research*, **21(6)**, 1006–1014.

내구성 설계 변수에 따른 최적 고로슬래그 미분말의 치환율 도출

고로슬래그 미분말의 혼입은 염해에 노출된 콘크리트 구조물에 효과적인 염해 저항성을 나타내며 이로 인해 높은 내구수명을 확보할 수 있다. 본 연구에서는 피복두께, 표면염화물량, 임계염화물량, 슬래그 치환율 등의 내구성 설계인자들을 고려하여 내구수명을 평가하였으며, 목표내구수명에 따른 최적의 슬래그 치환율을 도출하였다. 표면염화물량은 3.16~3.38배의 영향을, 피복두께는 3.02~3.34배의 영향을 나타내어 내구수명에 가장 영향을 많이 미치는 인자로 평가되었으며, 임계염화물량은 1.53~1.57배 수준으로 물-결합재 비에 따라 큰 차이를 보이지 않았다. 100년의 목표내구수명에 대해 표면염화물량이 18.0kg/m³의 매우 혹독한 조건에서는 피복두께를 70mm 이상, 물-결합재 비를 0.37 수준으로 낮추어야 치환율 42% 이상이 요구되었으며, 13.0kg/m³에서는 35% 이상의 슬래그 치환율이 요구되었다. 합리적인 내구성 설계를 위해서는 명확한 환경조건 의 설정과 임계염화물량이 정의되어야 하며, 국내의 임계염화물량 기준은 매우 엄격한 조건임을 알 수 있다.