

OPC 및 GGBFS를 혼입한 콘크리트의 하중조건과 콜드조인트에 따른 내구수명 변화

Changes in Service life in RC Containing OPC and GGBFS Considering Effects of Loadings and Cold Joint

김혁중¹ · 권성준^{2*}

Hyeok-Jung Kim¹ · Seung-Jun Kwon^{2*}

(Received October 16, 2017 / Revised December 6, 2017 / Accepted December 13, 2017)

RC (Reinforced Concrete) member has varying service life due to varying diffusion characteristics with loading conditions even if it is exposed to constant exterior conditions. In the paper, quantitative parameters are obtained through adopting the previous results for effects of compressive, tensile, and cold joint on chloride diffusion in OPC (Ordinary Portland Cement) and GGBFS (Ground Granulated Blast Furnace Slag) concrete. Service life is evaluated in RC simple beam with 10.0m of span through increasing loading from self weight (2.5kN/m) to the loading to cracking moment (5.5kN/m). In OPC concrete without cold joint, service life changes to 89.4% for tensile region and 101% for compressive region with loadings while GGBFS concrete has 80.0% and 106%, respectively. For cold joint area, GGBFS concrete shows much reduced service life to 82~80% in compressive region and 69~61% in tensile region, which is caused by the lower diffusion in normal condition but relatively higher increasing cold joint effect than OPC concrete.

키워드 : 콜드조인트, 하중조건, 염화물 확산계수, 내구수명, 고로슬래그 미분말

Keywords : Cold joint, Loading condition, Chloride diffusion coefficient, Service life, GGBFS

1. 서론

콘크리트 시공에서 레미콘의 지연 또는 신규 콘크리트의 면처리 불량으로 인해 예상치 못한 이음부가 발생한다. 이렇게 발생한 이음부를 콜드조인트라 하는데, 콜드조인트 면은 전단에 대해 취약하고, 균열보다는 열화의 진전 속도가 느리지만 건전부에 비해서 빠른 열화 진전을 보인다(JSCE 2000; Choi et al, 2015). 투수, 염해, 탄산화 등 물질 이동 현상을 고려한 내구성 문제에서 콜드조인트 면은 콘크리트의 취약부로 알려져 있다. 특히 탄산화의 경우 콜드조인트 부의 콘크리트 박락에 따른 신칸센 사고 등으로 이에 대한 관심이 증가하고 있지만(Abe 1999; Kwon and Na 2011), 콜드조인트 면의 열화는 주로 실태조사에 따른 연구가 주를 이루고 있는 수준이다(Abe 1999; Kwon and Na 2011; Kyo et al, 2000).

최근 들어 하중영향과 콜드조인트 영향을 고려한 연구가 많이 수행되고 있는데, 건전부 콘크리트에 비해 높은 투수 및 염화물 확산특성을 가지고 있다. 또한 이러한 열화 특성은 인장 및 압축 하중 조건에 따라 변화한다(Choi et al, 2015; Kim et al, 2009; Mun 2016; Yoo and Kwon 2016; Oh and Kwon 2017). 건전부의 경우, 압축하중이 증가함에 따라 초기 하중 영역에서는 투수성 및 염화물 확산성이 감소하게 된다. 이는 물질이동 통로인 유효공극이 압밀에 의하며 감소하기 때문인데, 하중이 60% 수준을 넘을 경우 미세균열의 진전으로 인해, 투수 및 확산특성이 하중에 대해 선형적으로 증가한다(Honseini et al, 2009; Banthia et al, 2005). 인장부의 경우 하중의 증가에 따라 초기부터 선형적인 투수 및 염화물 확산계수의 증가가 발생하는 것으로 알려져 있다(Yoo and Kwon 2016; Oh and Kwon 2017). 콜드조인트를 가진 면에서는 압축 및 인장영역에서

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

¹금호석유화학 연구소 (Elastomer TS&D Team, KUMHO PETROCHEMICAL R&BD, 34044, Korea)

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

모두 물질이동이 증가하는데, 신규 콘크리트의 면이 일체 타설된 콘크리트와 다르게 일체성을 확보하지 못하며, 면처리가 완벽하지 않을 경우 골재의 치합작용(Interlocking)이 크게 발현되지 않기 때문이다.

콘크리트 구조물은 경제적이고 내구성이 확보된 재료이지만, 재료 특유의 공극을 가지고 있으며, 공극을 통하여 수분과 염화물 이동이 발생하게 된다. 내부로 진행된 염화물 이동의 경우 일부가 해리하여 자유염화물 이온이 되고 이러한 이온은 내부에 매립된 철근에 공식(pitting)을 야기하여 부식을 발생시킨다(Broomfield 1997; RILEM 1994; Song et al. 2006; Ishida and Maekawa 2003), 염해에 따른 철근부식은 균열폭, 미관과 같은 사용성 저하에서 문제가 시작되지만, 이후 피복 콘크리트의 박락과 철근 단면적의 감소로 인해 구조 안전성에 치명적인 영향을 준다(Broomfield 1997; RILEM 1994). 일반적으로 염화물 침투 거동을 평가하는 Fick's 2nd Law나 Nernst-Einstein 방정식에서 염화물 확산 또는 이동 플럭스는 확산계수에 지배적인 영향을 받게 되는데(Ishida and Maekawa 2003; Thomas and Bentz 2002; Kwon et al. 2009), 확산계수는 콘크리트의 품질(취약부) 및 하중조건에 따라 변화하게 된다.

하나의 콘크리트 구조물이 동일한 환경에 노출된다 하더라도, 콜드조인트 유무와 인장 및 압축하중의 영향에 따라 내구수명은 변화하게 된다. 즉 동일한 표면염화물 농도를 가지고 있다 하더라도, 압축부 및 인장부의 응력특성에 따라 확산 계수가 변화하고 이에 따른 염화물의 유입량이 달라지기 때문이다.

본 연구에서는 기존의 연구결과에 따라 91일, 365일 재령의 OPC(Ordinary Portland Cement) 콘크리트와 GGBFS(Ground Granulated Blast Furnace Slag)를 사용한 콘크리트에 대하여 하중 및 콜드조인트 조건을 고려한 염화물 확산계수를 조사하였다. 이후 재하 된 응력비를 기준으로 각 실험결과를 함수화 하였으며, 경간 10.0m의 단순보를 가정하여 휨하중의 증가에 따른 내구수명의 변화를 분석하였다. 기존의 연구에서도 이러한 콜드조인트 및 하중특성을 고려한 연구가 있었으나, OPC에 국한된 연구였으며, GGBFS의 특성을 고려하지 않았으며, 하중조건이 균열하중이 이르지 못하였다(Kwon 2017).

본 연구의 결과는 시공 이음부를 가진 대형 부재의 내구수명 평가와 보수시기에 따른 잔존수명 평가에 합리적인 판단기준을 제공할 수 있다.

2. 하중 및 콜드조인트에 따른 확산계수의 정량화 및 환경 설정

2.1 하중과 콜드조인트의 확산계수에 대한 영향

기존의 연구에서는(Mun 2016; Yoo and Kwon 2016; Oh 2017)

Table 1. Diffusion coefficient with ages and mixture types

Types	OPC concrete		GGBFS concrete	
	Normal	Cold joint	Normal	Cold joint
Age (days)	Diffusion coefficient($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$)		Diffusion coefficient($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$)	
Control				
91**	22.0	23.7	6.6	8.6
365***	19.7	21.2	5.3	7.3
Tensile 30%				
91**	28.7	29.5	8.2	12.6
365***	25.6	26.5	6.9	10.3
Tensile 60%				
91**	31.5	32.4	12.2	15.6
365***	31.3	32.2	9.5	12.6
Compressive 30%				
91**	20.8	37.9	6.5	13.8
365***	18.7	28.9	5.1	10.4
Compressive 60%				
91**	29.5	42.2	15.3	21.7
365***	23.1	34.2	10.8	15.4

*: Thomas and Bentz, 2002; Thomas and Bamforth, 1999,

** : Mun, 2016, ***: Oh, 2017

Table 2. Mix proportions for the previous study

Case	G _{max} (mm)	Slump (mm)	S/a (%)	W/B	Air (%)	Unit weight: kg/m ³				
						W	Binder		S	G
							C	Slag		
OPC	25	180	41.4	0.6	4.5	180	300	-	735	1040
GGBFS							180	120		1020

W/B: Water to binder ratio, C: Cement, S: Sand, G: Coarse Aggregate

재령 91일 및 365일 콜드조인트 콘크리트를 대상으로 파괴하중의 30% 및 60%의 하중을 인가하고, 하중비에 따른 염화물 확산계수를 평가하였다. 실험 및 배합에 대한 정보는 기존의 연구를 참고하는 것이 바람직하다. Table 1에서는 건전부 및 콜드조인트부의 하중에 따른 확산계수를 OPC 및 GGBFS를 사용한 콘크리트에 대하여 정리하였다. Table 2에서는 사용된 OPC 및 GGBFS 콘크리트의 배합표를 나타내고 있다(Mun 2016; Oh 2017).

2.2 하중 및 콜드조인트에 따른 확산계수의 정량화

각 재령(91일 및 365일)에 따른 하중영향은 OPC와 GGBFS 콘크리트의 콜드조인트 유무를 고려하여 Fig. 1과 같이 도시할 수 있다.

Fig. 1에서 알 수 있듯이 인장조건에서는 91일 및 365일 재령의

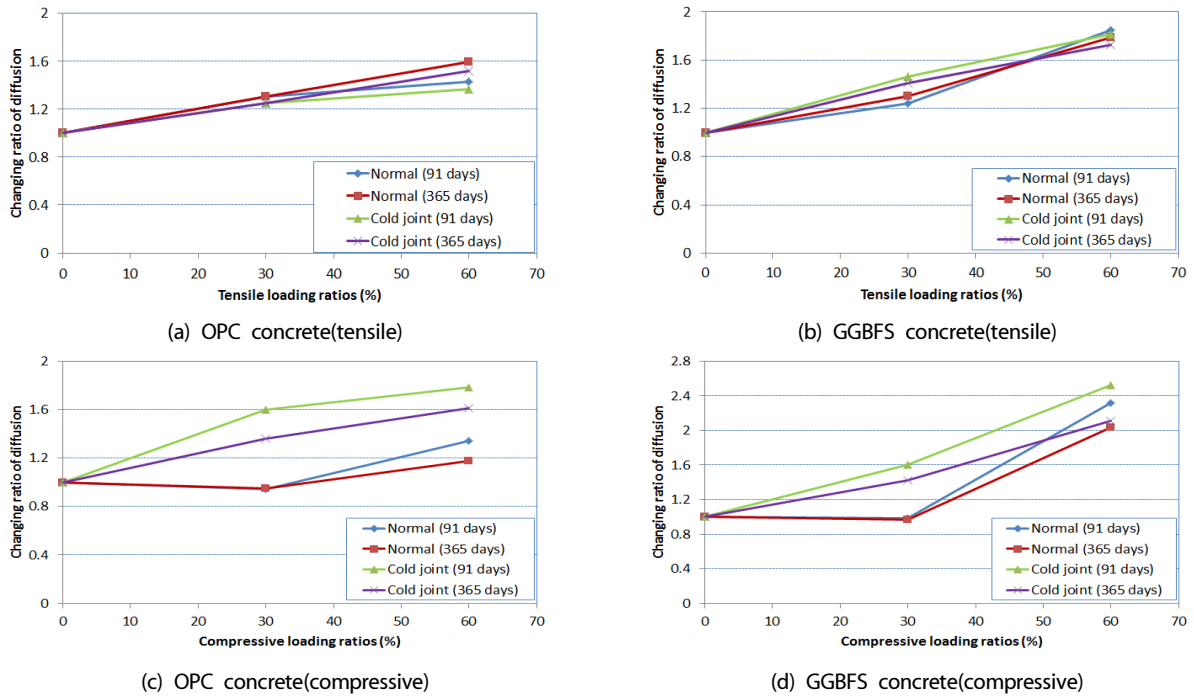


Fig. 1. Changes in diffusion coefficient with loading and cold joint

Table 3. Parameter for diffusion changes

Loading conditions	Mixture	Parameter		R^2
		y : changing ratio, x : loading ratio		
Tensile	OPC	N	$y = 0.8833x + 1$	0.93
		CJ	$y = 0.7554x + 1$	0.94
	GGBFS	N	$y = 1.2735x + 1$	0.95
		CJ	$y = 1.3173x + 1$	0.98
Compressive	OPC	N	$y = 2.019x^2 - 0.7809x + 1$	0.89
		CJ	$y = 1.2529x + 1$	0.87
	GGBFS	N	$y = 6.8171x^2 - 2.127x + 1$	0.97
		CJ	$y = 2.1002x + 1$	0.93

N: Normal condition, CJ: Cold joint condition

콘크리트 모두 하중의 증가에 따라 선형적인 증가가 발생하였다. 압축조건에서는 콜드조인트를 가진 조건에서는 선형적인 증가가, 보통조건에서는 감소 후 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 경향은 OPC 및 GGBFS를 사용한 콘크리트에서 모두 동일하게 발생하였다. 변화 패턴을 고려하여 선형 및 2차 함수로 확산계수 변화를 함수화 하였으며, 이를 Table 3에 정리하였는데 결정계수는 0.87 이상으로 모두 높게 평가되었다. 기존의 연구에서 압축강도는 32.7MPa로, 인장강도는 3.7MPa로 평가되었으므로(Oh 2017), 이 값을 이용한 하중비를 고려하였다.

2.3 염해 평가 대상 구조물 및 환경 설정

내구수명 평가를 위하여 RC 단순교를 가정하였으며, 노출환경은 Table 4와 같이 나타내었다. 직사각형 단면과 콜드조인트를 가진 보의 제원을 Table 5에 설계상수와 같이 나타내었다. 하중의 재하하는 자중에서 시작하여 균열모멘트까지 순차적으로 재하 하여, 균열이 발생하기 전까지의 내구수명 변화를 분석하였다. 시간지수(m)에 대해서는 기존의 연구에 따라 OPC 콘크리트 대해서는 0.2를, GGBFS 40% 치환 콘크리트에 대해서는 0.428을 적용하였다(Thomas and Bentz 2002; Thomas and Bamforth 1999).

Table 4에서 임계염화물량(C_{cr})은 최외측 철근의 부식을 야기하는 염화물량으로 국내 시방서에서는 1.2kg/m^3 으로 제안되어 있으며, 시간지수(m)은 식 (1)과 같이 시간에 따른 확산계수 저감을 나타낸다.

$$D(t) = D_{ref} \cdot \left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^m \quad (1)$$

여기서, $D(t)$ 는 시간에 따른 확산계수, D_{ref} 는 기준재령에서의 콘크리트 확산계수, t 는 사용기간(일), t_{ref} 는 일반적으로 28일

Table 4. Exposure conditions for chloride penetration analysis

Cover depth (mm)	Surface chloride content (kg/m ³)	Built up period (years)	C _{cr} (kg/m ³)	m	Monthly temperature (°C)
55.0	5.0	10	1.2	0.2 or 0.428	-6.7 ~ 20.5

Table 5. Geometry and design parameters

	<ul style="list-style-type: none"> · Cover depth: 55mm · Concrete strength: 32MPa · Steel: f_y: 400MPa · Initial self weight: 2.5kN/m · A_s: 3096.8mm², A_s': 774.2mm² · E_s = 2.0×10⁵MPa · I_g: 54×10⁸mm⁴, f_r: 3.56MPa · d: 515mm d'=60mm
Design parameters	
Load case	<ul style="list-style-type: none"> · w1: 2.5kN/m · w2: 3.5kN/m · w3: 4.5kN/m · w4: 5.5kN/m (Unit load causing cracking)

로 고려된다(Thomas and Bentz 2002).

하중재하방법은 초기에 고정하중(2.5kN/m)을 고려하였으며, 이후 1.0kN/m 씩 증가시켜, 균열 모멘트를 야기하는 등분포 하중(5.5kN/m)까지 증가시켰다. 하중의 증가와 Table 3의 하중함수를 고려한 확산계수의 변화는 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다.

3. 하중 및 콜드조인트 특성을 고려한 OPC 및 GGBFS 콘크리트의 내구수명

3.1 OPC 및 GGBFS 콘크리트의 내구수명 변화

본 절에서는 Table 4의 환경에 노출된 콘크리트 단순보의 내구수명을 평가하도록 한다. 지점에서 3.0m 위치의 콜드조인트 영향을 고려하였으며, 하중을 w_1 에서 w_4 로 증가시키면서 변화하는 내구수명의 변화를 압축부 및 인장부에 대하여 분석하였다.

Fig. 3에서는 하중의 변화에 따른 내구수명의 변화를 나타내고 있다. 전체적으로 인장부에서는 확산계수의 증가를 통해 내구수명이 감소되었으며, 압축부에서는 하중의 크기가 작은 탄성영역의 해석이므로 내구수명이 증가하는 경향을 나타내었다. 다만 콜드조

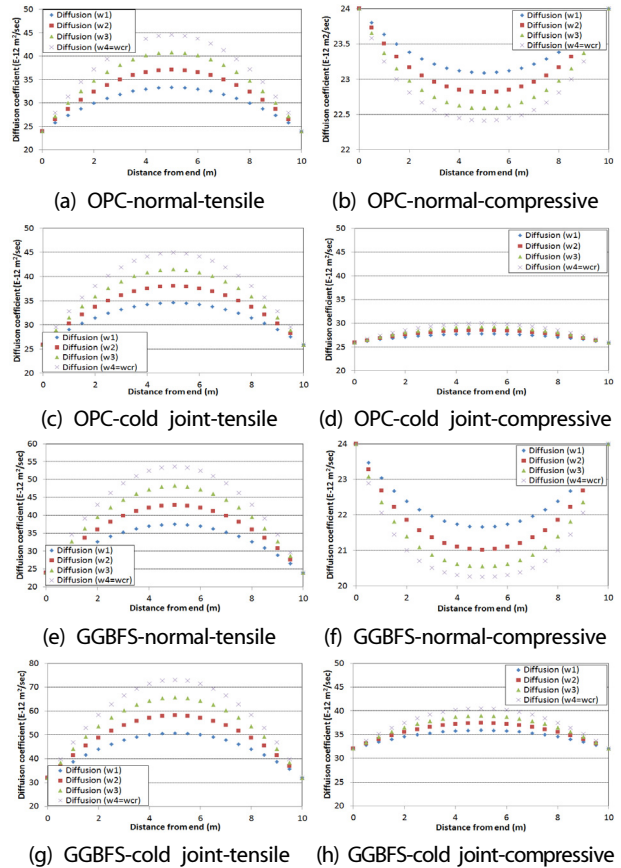


Fig. 2. Changes in diffusion coefficient with loading conditions

인트부에서는 모두 불연속적인 내구수명의 감소가 나타났는데, 압축부에서는 이러한 영향이 크게 평가되었다. 단부에서 GGBFS를 사용한 콘크리트에 대해서는 내구수명이 9.9년에서 20.9년으로 크게 증가하였는데, 이는 LIFE 365 프로그램 사용시 시간지수(m)의 값이 0.428로 크기 때문이다. GGBFS를 사용한 콘크리트의 수밀성 개선(Song and Kwon 2009; Escalante et al. 2001), 염화물 고정화량의 증가(Ishida et al. 2007; Arya and Newmann 1990), 확산계수의 감소(Thomas and Bentz 2002; Thomas and Bamforth 1999)는 많은 연구에서 보고되고 있다. 하중의 증가에 따른 내구수명의 변화를 컨투어로 도시하여 Fig. 4에 나타내었다.

3.2 하중의 증가에 따른 OPC 및 GGBFS 콘크리트의 내구수명 변화 분석

본 절에서는 하중의 증가에 따른 각 위치의 내구수명 변화를 정량적으로 분석하기 위해, 경간중앙 및 콜드조인트부의 내구수명 변화를 분석하도록 한다. 인장부의 내구수명 변화는 Fig. 5(a)에

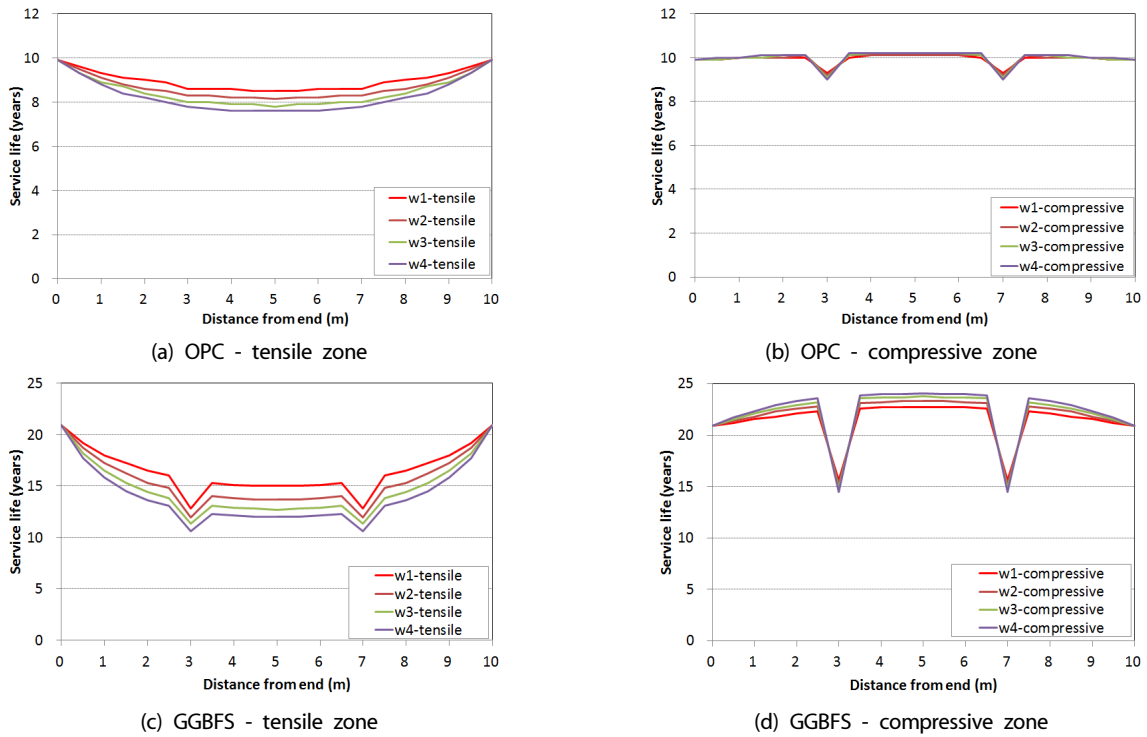


Fig. 3. Changing service life with effects of loading and cold joint

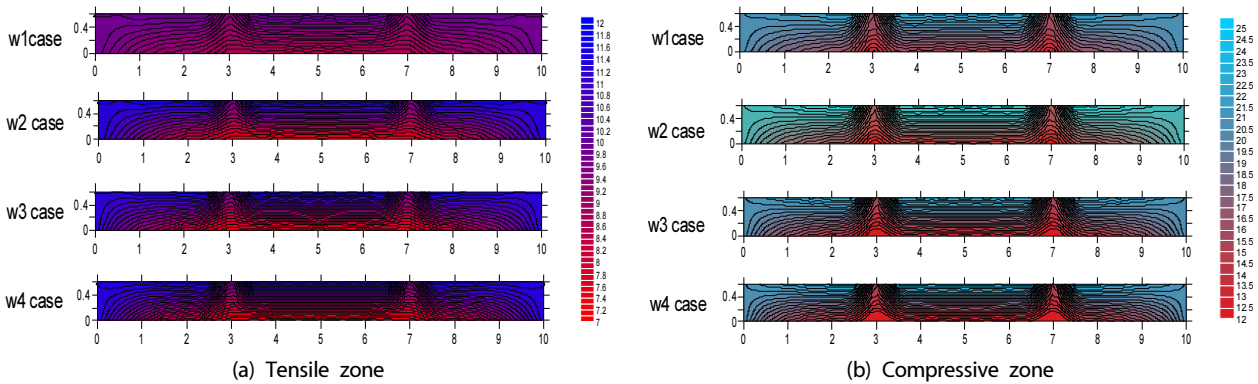


Fig. 4. Contour of service life with loadings

나타내었으며, 압축부의 내구수명 변화는 Fig. 5(b)에 나타내었다.

Fig. 5(a)에서 알 수 있듯이 인장하중의 증가에 따라서 최종적으로 89.4%의 내구수명 감소가 OPC에서 평가되었으며, 80%의 감소가 GGBFS 콘크리트에서 평가되었다. 이는 GGBFS 콘크리트가 높은 내구수명을 확보한다 하더라도 확산계수의 빠른 증가로 인해 내구수명이 감소하므로 응력이 집중되는 곳에서는 주의를 기울여야 함을 알 수 있다. Fig. 5(b)의 압축조건에서는 내구수명의 큰 변화는 없었으나 점차적으로 증가하는 경향을 나타낸다. 하중이 2.5kN/㎡에서 최대 5.5kN/㎡로 증가할 때, OPC에서는 101%가,

GGBFS에서는 106%의 내구수명 증가가 발생하였다. OPC에 대한 GGBFS의 내구수명 증가비는 인장부에서는 124%~176%로, 압축부에서는 151%~200%로 OPC 콘크리트에 비하여 뚜렷한 증가를 나타내었다.

또한 콜드조인트 발생 전·후의 내구수명 변화비율을 분석하면 하중의 변화에 따른 내구수명의 변화비를 Fig. 6과 같이 나타낼 수 있다.

인장부에서는 하중의 증가에 따라 콜드조인트부의 급격한 내구수명 감소는 보이지 않았다. 인장영역에서 OPC에서는 96~98%

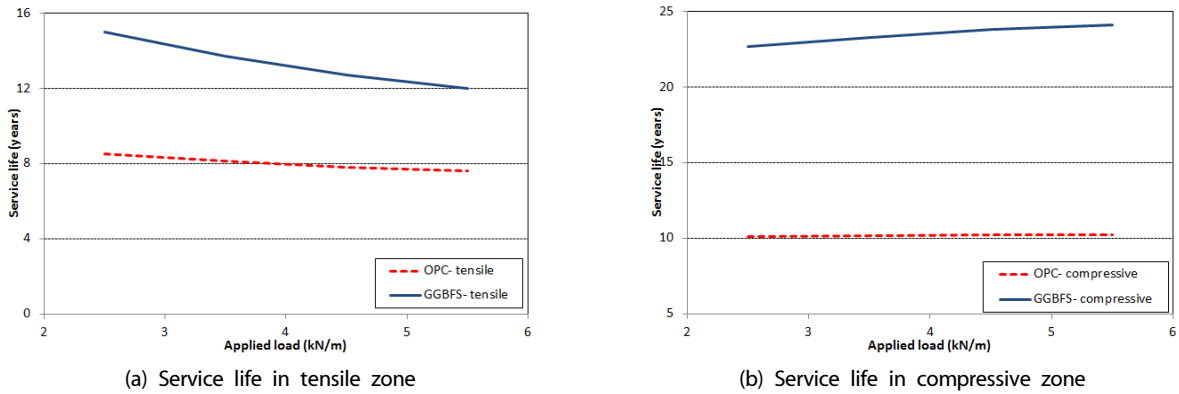


Fig. 5. Service life with increasing loads (mid-span)

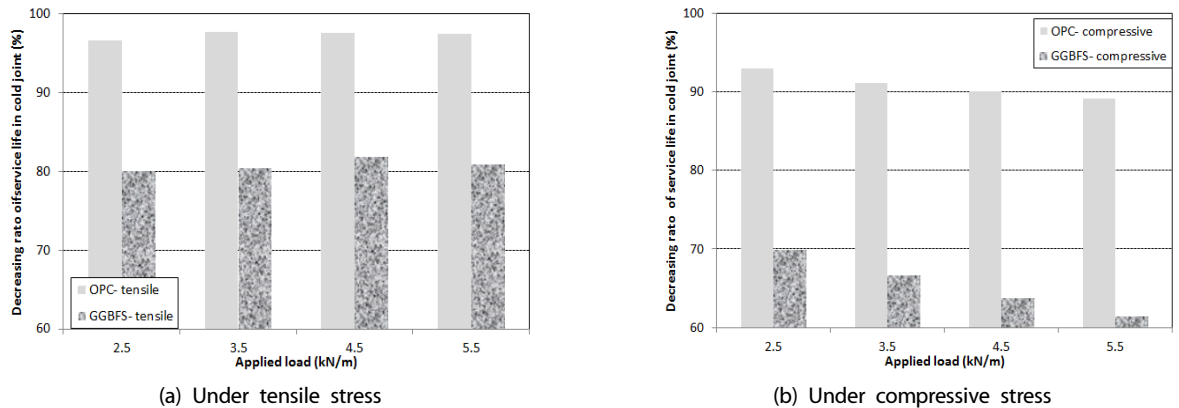


Fig. 6. Decreasing ratios of service life of cold joint to normal area(3m and 7m location)

수준으로 감소, GGBFS에서는 82~80% 수준으로 내구수명이 감소하였다. 압축부에서 OPC 콘크리트는 89~93% 수준으로 감소하였으나, GGBFS를 사용한 콜드조인트부에서는 69~61% 수준으로 감소하였으며, 하중의 증가에 따라서 선형적인 감소가 발생하였다. 이는 GGBFS를 사용했다 하더라도 압축부 콜드조인트의 경우, 응력비에 따른 확산계수의 기울기가 2.019로 다른 조건보다 매우 크므로 내구수명이 뚜렷하게 감소하였다.

콜드조인트를 가진 부재의 경우 GGBFS를 사용한 콘크리트가 압축력을 받는 경우라 하더라도 확산계수의 증가가 발생하고 이로 인한 내구수명이 감소하므로 내구성 설계시 이에 대한 고려가 필요함을 알 수 있다.

4. 결론

OPC 및 GGBFS를 혼입한 콘크리트의 하중조건과 콜드조인트에 따른 내구수명 변화를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 기존의 문헌조사를 통하여 하중 및 콜드조인트 효과를 고려한 확산계수식을 OPC 및 GGBFS 콘크리트에 대하여 정량화 하였다. 이후 10.0m 경간의 단순보를 가정하여 자중부터 균열하중까지 하중을 증가시키면서 내구수명을 도출하였다.
- 2) 작용 모멘트가 가장 작은 단부에서 OPC 콘크리트는 9.9년으로, GGBFS를 사용한 콘크리트에 대해서는 내구수명이 20.9년으로 크게 증가하였는데, 이는 시간지수(m)의 값이 0.428로 크기 때문이다.
- 3) 건전부 인장영역에서는 하중의 증가에 따라서 최종적으로 89.4%의 내구수명 감소가 OPC에서 평가되었으며, 80%의 감소가 GGBFS 콘크리트에서 평가되었다. 압축부에서는 큰 차이는 발생하지 않았는데, 하중이 자중에서 최대 5.5 kN/m로 증가할 때, OPC에서는 101%, GGBFS에서는 106%의 내구수명 증가가 발생하였다.
- 4) 콜드조인트 인장부에서는 하중의 증가에 따라 인장영역 OPC에서는 96~98% 수준으로 감소, GGBFS에서는 82~80% 수

준으로 내구수명이 감소하였다. 압축부에서 OPC 콘크리트는 89~93% 수준으로 감소하였으나, GGBFS를 사용한 콜드조인트부에서는 69~61% 수준으로 크게 감소하였다. GGBFS를 사용한 콘크리트는 내구수명이 크게 증가하지만 콜드조인트를 압축부의 경우, 응력비에 따른 확산계수 변화가 크므로 지속적으로 관심이 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 한남대학교 교내 연구비의 지원을 받아 수행되었으며 저자는 이에 감사드립니다.

References

- Abe, Y. (1999). "Result of reference review on crack width effect to carbonation of concrete," *Proceeding of Symposium on Rehabilitation of Concrete Structures*, **1(1)**, 7–14.
- Arya, C., Newmann, J.B. (1990). Assessment of four methods of determining the free chloride content of concrete, *Materials and Structures*, **23(5)**, 319–330.
- Banthia, N, Biparva, A, Mindess, S. (2005). Permeability of concrete under stress, *Cement and Concrete Composites*, **35(9)**, 1651–1655.
- Broomfield, J.P. (1997). *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair*, E&FN, 1–15.
- Choi, S.J., Kang, S.P., Kim, S.C., Kwon, S.J. (2015). Analysis technique on water permeability in concrete with cold joint considering micro pore structure and mineral admixture, *Advances in Materials Science and Engineering*, **2015**, 1–10.
- Escalante, J.I., Gómez, L.Y., Johal, K.K., Mendoza, G., Mancha, H., Mendez, J. (2001). Reactivity of blast-furnace slag in Portland cement blends hydrated under different conditions, *Cement and Concrete Research*, **31(10)**, 1403–1409.
- Hoseini, M, Bindiganabile, V, Banthia, N. (2009). The effect of mechanical stress on permeability of concrete: a review, *Cement and Concrete Composites*, **31(4)**, 213–220.
- Ishida, T., Maekawa, K. (2003). "Modeling of durability performance of cementitious materials and structures based on thermohygro physics. In RILEM Proc-PRO29," In RILEM Proc-PRO29, *Proceedings of the 2nd International RILEM Workshop on Life Prediction and Aging Management of Concrete Structures*, Paris, France, 13–14 May 2003; Naus, D.J., Ed.; RILEM Publications: Paris, France, **2003(1)**, 39–49.
- Ishida, T., Maekawa, K., Kishi, T. (2007). Enhanced modeling of moisture equilibrium and transport in cementitious materials under arbitrary temperature and relative humidity history, *Cement and Concrete Research*, **37(4)**, 565–578.
- JSCE (2000). *Concrete Cold Joint Problems and Countermeasures*, Concrete Library, 103.
- Kim, D.H., Lim, N.G., Horiguchi, T. (2009). Effect of compressive loading on the chloride penetration of concrete mixed with granulated blast furnace slag, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, **9(6)**, 71–78 [in Korean].
- Kwon, S.J. (2017). Service life prediction for concrete girder exposed to chloride attack considering effects of loading conditions and cold joint, *Journal of the Korea Concrete Institute (Accepted)* [in Korean].
- Kwon, S.J., Na, U.J. (2011). Prediction of durability for RC columns with crack and joint under carbonation based on probabilistic approach, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, **5(1)**, 11–18.
- 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.
- Kyo, K., Komori, D., Kato, Y., Utomo, T. (2000). "Effect of Mix Proportion and Working Conditions on Cold Joint in Concrete," *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, **22(2000)**, 259–264.
- Mun, J.M. (2016). Chloride Diffusion Coefficients in Cold Joint Concrete Considering Loading Conditions and Slag, Master's Thesis, Hannam University, Korea [in Korean].
- Oh, K.S. (2017). Service life Evaluation of Cold Joint Concrete Considering Loading Conditions and Slag under Chloride Attack, Master's Thesis, Hannam University [in Korean].
- Oh, K.S., Kwon, S.J. (2017). Chloride diffusion coefficient evaluation in 1 year-cured OPC concrete under loading conditions and cold joint, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, **21(5)**, 21–29 [in Korean].
- RILEM (1994). *Durability Design of Concrete Structures*, Report of RILEM Technical Committee 130-CSL, E&FN, 28–52.
- Song, H.W., Kwon, S.J. (2009). Evaluations of chloride penetration

- in high performance concrete using neural network algorithm and micro pore structure, Cement and Concrete Research, **39(9)**, 814–824.
- Song, H.W., Pack, S.W., Lee, C.H., Kwon, S.J. (2006). Service life prediction of concrete structures under marine environment considering coupled deterioration, Journal of Restoration of Build Monuments, **12(4)**, 265–284.
- 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, 12–56.
- Yoo, S.Y., Kwon, S.J. (2016). Effects of cold joint and loading conditions on chloride diffusion in concrete containing GGBFS, Construction and Building Materials, **115**, 247–255.

OPC 및 GGBFS를 혼입한 콘크리트의 하중조건과 콜드조인트에 따른 내구수명 변화

콘크리트 구조물은 동일한 환경에 노출되었다 하더라도 하중특성과 콜드조인트 유무에 따라서 확산특성이 변화하고 이에 따라 내구수명이 변하게 된다. 본 연구에서는 기존의 선행연구를 분석하여 OPC 및 GGBFS를 사용한 콘크리트의 압축특성, 인장특성, 콜드조인트를 고려한 함수를 도출하였다. 경간 10.0m의 단순보를 가정하여 하중을 2.5kN/m에서 균열모멘트에 이르는 5.5kN/m 까지 증가시키면서 내구수명을 평가하였다. 최대 하중에 이를 경우, 건전부 OPC 콘크리트의 경우 인장영역에서는 89.4%로, 압축영역에서는 101%로 내구수명이 변화하였으며, GGBFS 콘크리트의 경우 80.0%와 106%의 변화가 발생하였다. 콜드조인트의 경우 GGBFS를 사용한 콘크리트에서는 압축부에서는 82~80%로, 인장부에서는 69~61% 수준으로 크게 감소하였는데, 건전부의 확산계수가 OPC에 비하여 작지만 콜드조인트부의 확산성 증가가 상대적으로 크기 때문이다.