

NaCl 水溶液 중에서 高爐슬래그微粉末의 알칼리실리카反應에 대한 膨脹抑制 메카니즘

Mechanism on Suppression of Alkali Silica Reaction by Ground Granulated
Blast-Furnace Slag in NaCl Solution



金昌吉*

Kim, Chang Gil



三浦 尚**

Miura, Takashi



姜圓鎬***

Kang, Won Ho

요 약

본 연구는 NaCl 水溶液 중에서 高爐 슬래그微粉末의 알칼리실리카反應에 대한 膨脹抑制 특성 및 그의 메카니즘에 관한 것이다.

실험에 사용된 NaCl 水溶液의 濃度는 0%(水道水), 2.8% 및 20%였으며, 骨材는 安山岩을 사용하였다. 슬래그는 比表面積이 $4,100\text{cm}^2/\text{g}$, $5,960\text{cm}^2/\text{g}$ 및 $7,950\text{cm}^2/\text{g}$ 인 3종류를 사용하였고, 置換率은 시멘트중량에 대하여 40%, 60%, 70% 및 80%로 하였다.

NaCl 水溶液에 있어서 슬래그를 添加한 供試體는 置換率이 많을수록 收縮率은 높게 되었고, 그의 값은 比表面積이 클수록 높게 나타났다. 슬래그에 의한 알칼리실리카反應의 유해한 膨脹의 抑制는 슬래그의 添加에 의한 硬化 콘크리트의 화학적 收縮에 의해서도 달성됨이 확인되었다.

Abstract

This study deals with the suppressing characteristics of alkali-silica reaction by ground

* 정회원, 국립수산진흥원, 공박

** 일본 동북대학교 토목공학과 교수, 공박

*** 정회원, 동아대학교 건설공학부 부교수, 공박

• 본 논문에 대한 토의를 1997년 4월 30일까지 학회로 보내주
시면 1997년 6월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

granulated blast-furnace slag(GGBS) in NaCl solution.

NaCl contents used in the experiment ranges over 0%, 2.8% and 20%. Reactive aggregate used is Japanese andesite. Also, three GGBSs of about 4,000, 6,000 and 8,000cm²/g were used in the experiment. The replacement proportions of portland cement by GGBSs were 40%, 60%, 70% and 80%, respectively.

The specimens with GGBS were severely contracted according to the increasing replacement ratio in NaCl solution. The contraction rate increases according to the increasing in NaCl content. Also, it does with increasing the blaine fineness of GGBS. It is concluded that the suppression of alkali-silica reaction by GGBS in NaCl solution is accomplished by contraction of GGBS due to chloride ion induced chemical shrinkage.

Keywords : alkali-silica reaction, ground granulated blast-furnace slag, NaCl solution, contraction rate, replacement ratio

1. 서론

高爐슬래그微粉末(이하 슬래그)는 鐵을 製鍊할 때 생성되어지는 副産物로 潛在水硬性을 갖고 있으며, 비교적 큰 表面積 때문에 콘크리트에 添加할 경우, 細孔構造가 緻密하게 되고 Cl 등의 유해한 물질에 대한 浸透 抵抗性이 높게 된다⁽¹⁾. 알칼리실리카反應(이하 ASR)에 있어서는 슬래그를 添加함으로써 細孔溶液 중에 알칼리가 희석되거나⁽²⁾, 혹은 시멘트 페이스트 중의 pH가 낮게 되어⁽³⁾ ASR이 감소된다.

그러나, 슬래그의 ASR에 대한 효과는 置換率이 동일하다 할지라도 比表面積에 따라 다르며, NaCl의 공급에 의해서 ASR이 촉진되는 환경하에서는 유해한 膨脹을 抑制하기 위해 置換率을 높게 할 필요가 있다. 이 경우 슬래그의 置換率이 증가하면, NaCl의 浸透에 대한 ASR의 膨脹抑制은 시멘트水和生成物에 의한 것의 크고, 건조收縮 거동도 달라지게 된다.

Lea⁽⁴⁾는 콘크리트 중 침상체의 溶解度는 물보다도 Cl이 溶存된 水溶液에서 약 3배 정도 높다고 하였다. 따라서 NaCl이 공급되는 환경하에서는 Cl의 浸透에 의해서 膨脹性이 비교적 낮은 침상체相의 형성도 생각할 수 있다⁽⁵⁾. 현상면으로서, 金等⁽⁶⁾은 水道水 및 NaCl 水溶液을 이용하여 超低發熱 시멘트(中熱 波特랜드 시멘트를 기본으로 하여 슬래그 및 석탄

재를 혼합한 3成分系 시멘트)에 의한 ASR의 膨脹抑制效果를 조사한 결과, NaCl 水溶液 중에 沈沈한 供試體의 것이 비교적 큰 값으로 收縮했다고 보고하고 있다. 이들의 연구결과에 의하면, NaCl이 공급되는 환경하에서의 슬래그에 의한 ASR의 膨脹抑制은 細孔溶液 중 알칼리의 희석 및 시멘트 페이스트 중의 pH 감소 등과 같은 것 이외에도 다른 메카니즘에 의해서도 달성된다고 생각된다. 따라서, 슬래그의 ASR에 대한 抑制材로서 有效하게 활용하기 위해서는 그의 抑制특성을 충분히 파악해야 할 것이다.

본 연구에서는 NaCl이 공급되는 환경하에서 ASR에 대한 슬래그의 膨脹抑制 특성을 조사하여 그의 抑制 메카니즘을 구명하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

본 연구에서 사용한 포틀랜드 시멘트(이하 시멘트)와 슬래그는 일본산이며, 슬래그는 比表面積이 4,100cm²/g(이하 슬래그 4,000), 5,960cm²/g(이하 슬래그 6,000) 및 7,950cm²/g(이하 슬래그 8,000)인 3종류를 사용하였다. 또한, 骨材도 일본산인 反應性을 갖는 安山岩을 사용했다. 시멘트와 슬래그의 화학적 조성은 Table 1, 骨材의 물리적 특성은 Table 2에 각각 표시하였다.

실험방법은 JIS A-5308 附屬書 8(日本 工業規格

중의 骨材의 알칼리실리카反應性 시험방법:모르타르(바법)에 따랐다. 모르타르 제작은 질량비로 물, 結合材, 細骨材의 비를 1 : 2 : 4.5로 하였고, 1회 비빔수량 및 結合材량은 300ml 및 600g, 細骨材량은 1.350g으로 하였다. 供試體는 4cm×4cm×16cm의 크기의 것을 3개씩 제작하고, 脫型 후 供試體를 여과지에 2~3겹으로 감싸은 후 소정의 NaCl 水溶液을 10~20cc 넣은 비닐봉지에 供試體를 담아 40±0.5℃의 항온조에 넣어 促進養生을 실시하였다. 供試體의 膨脹率은 供試體를 항온기에서 꺼낸 후, 20±0.5℃에서 16시간 정도 저지하고 나서 측정하였으며, 3개의 供試體 값을 평균했다. 濕度를 95% 이상 유지하기 위한 수단으로써는 水道水 대신 2.8%(사용海水와 동일濃度) 및 20%의 NaCl 水溶液을 사용했다. 2.8%의 NaCl 濃度는 海水에 용존된 Cl량을 NaCl로 환산한 값이며, 海水와 순수 NaCl 水溶液에 의한 ASR의 영향을 비교하기 위한 것이다.

본 연구에서는 NaCl이 계속적으로 공급되는 환경하에서의 슬래그의 置換率별 抑制效果 특성을 구명하기 위하여 슬래그의 粉末度가 다른 3종류를 시멘트

Table 1 Chemical composition of cement and GGBS

Material(%)	Cement	GGBS*		
		S 4,000*	S 6,000*	S 8,000*
CaO	64.40	42.40	42.10	42.10
SiO ₂	21.80	33.10	33.50	33.20
AlO ₃	4.90	13.90	13.80	14.20
Fe ₂ O ₃	3.00	0.20	0.20	0.20
MgO	1.40	6.70	6.80	6.80
MnO		0.33	0.35	0.34
Na ₂ O	0.38	0.20	0.24	0.24
K ₂ O	0.48	0.31	0.37	0.31
SO ₃	1.80	0.90	0.90	0.90
TiO ₂		1.12	0.94	1.18
ig. loss	1.40	0.10	0.20	0.10

1)GGBS* : ground granulated blast-furnace slag.
2)S 4,000*, 6,000* and 8,000* indicate the specific surface area of GGBS, respectively.

Table 2 Physical property of aggregate used in experiment

Specific gravity	2.69
Absorption(%)	1.64
Fineness modulus	2.90
Weight of per unit volume(kgf/m ³)	1.750
T.M.F*(%)	3.10

T.M.F* : Test for materials finer than 0.074mm sieve.

중량에 대해서 40%, 60%, 70% 및 80%로 각각 置換하여 제작한 供試體를 脫型한 후, NaCl 水溶液에서 일정시간 沈漬하여 膨脹率과 鹽化物이온량을 비교했다.

鹽化物 이온량은 材齡 26주까지 促進시험을 실시한 후 측정하고, 3개의 供試體를 평균하여 全鹽分量과 水用性 鹽分量으로 나타냈다. 측정방법은 JCI-SC4(일본 콘크리트 공학회의 硬化 콘크리트 중에 포함된 鹽分분석방법)을 이용하였다.

3. 슬래그의 置換率별 ASR의 膨脹抑制 특성

Fig. 1, 2, 3은 슬래그 4,000, 6,000 및 8,000을 시멘트 중량에 대하여 40%, 60%, 70% 및 80%로 각각 置換한 供試體를 26주간 2.8% 및 20% NaCl 水溶液에 沈漬하여 膨脹率을 비교한 결과이다.

NaCl 水溶液에 있어서의 슬래그 4,000의 膨脹率은, 2.8%의 NaCl 水溶液에 沈漬한 것보다 20%의 NaCl 水溶液에 沈漬한 것에서 큰 값을 나타냈다. 20% NaCl 水溶液에 있어서의 置換率별 膨脹量은, 置換率 40%의 경우 실험 개시 후 13주째에 JIS에서 규정하고 있는 ASR의 6개월 膨脹率의 판단 기준치인 0.1%를 넘었고, 그 이후에도 큰 값으로 膨脹하였다. 한편, 置換率 60%의 것은 최종 膨脹率이 0.06%로 비교적 낮은 膨脹값을 나타냈다. 그러나, 置換率

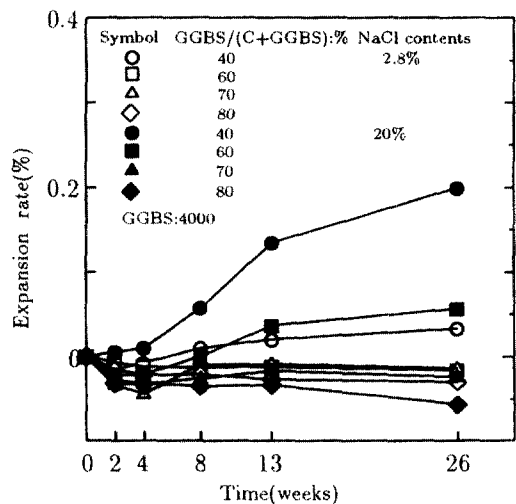


Fig. 1 Effectiveness of slag 4,000 replacement to prevent alkali silica reaction in different NaCl solution

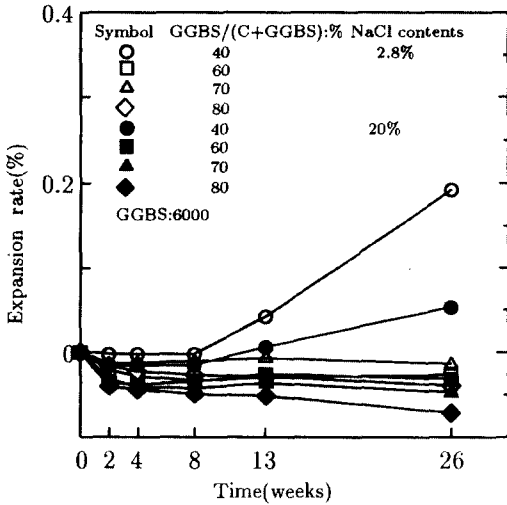


Fig. 2 Effectiveness of slag 6,000 replacement to prevent alkali silica reaction in different NaCl solution

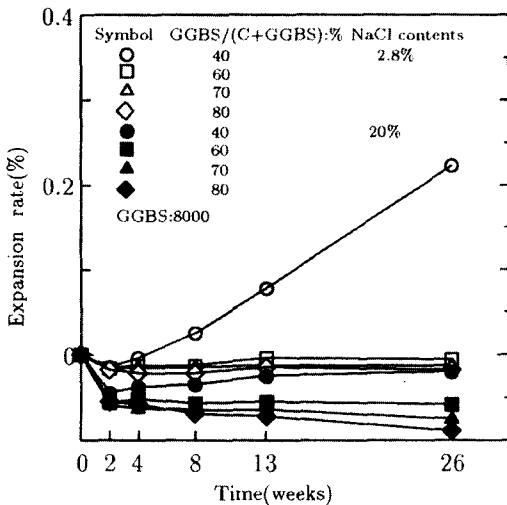


Fig. 3 Effectiveness of slag 8,000 replacement to prevent alkali silica reaction in different NaCl solution

70% 이상의 것에서는 收縮하는 경향을 보였으며 그 收縮率は 置換率에 높을수록 크게 되었다.

슬래그 6,000 및 8,000의 膨脹率은, 20% NaCl 水溶液에서 沈漬한 供試體보다 2.8% NaCl 水溶液에 沈漬한 것에서 큰 값으로 나타내어 슬래그 4,000의 것과는 다른 경향을 보였다. 2.8% NaCl 水溶液에 있어서의 置換率별 膨脹率은, 置換率 40%의 供試體의 경우 큰 값으로 膨脹하였지만, 置換率 60%의 것에서는 거의 膨脹하지 않고, 약간 收縮했다. 이와

같은 경향은 置換率에 높을수록 그리고 比表面積이 클수록 큰 경향을 나타냈다.

본 연구에 있어서 NaCl 水溶液에 의한 슬래그의 比表面積별 膨脹率은, 슬래그 4,000의 경우는 NaCl 濃도가 높은 20% 水溶液에서, 그리고 슬래그 6,000 및 8,000은 비교적 낮은 2.8% 水溶液에서 각각 크게 나타내어 슬래그의 比表面積별로 다른 膨脹특성을 나타냈다. 이와 같은 결과를 고려하여 볼 때, NaCl 이 공급되는 환경에 있어서 슬래그를 ASR의 膨脹抑制材로서 유효하게 사용하기 위해서는 슬래그 종류별로 그의 膨脹抑制 특성을 파악하여 사용하는 것이 중요하다고 생각한다.

4. NaCl이 공급된 環境下에 있어서 슬래그에 의한 ASR의 膨脹抑制 메카니즘

NaCl이 공급되는 環境하에 있어서 ASR에 의한 유해한 膨脹을 抑制하는 하나의 방법으로 鹽化物이온浸透量의 억제를 생각할 수 있다. 그러나, Fig. 4~6으로부터 알 수 있는 바와 같이, 슬래그의 경우 置換率에 높게됨에 따라 鹽化物이온浸透량은 낮게 되었지만, 비교적 큰 값으로 收縮하는 경향을 나타냈다. 따라서 슬래그의 ASR에 대한 膨脹抑制 效果는 細孔構造의 緻密化 등과 같은 기존 이론으로는 설명하기 어려운 점이 있다고 생각한다.

본 연구에 있어서 NaCl 水溶液을 이용한 경우, 슬래그의 置換率에 높을수록, 그리고 比表面積이 클수록 큰 값으로 收縮한 것은 슬래그와 콘크리트의 硬化 후 외부로부터 浸透한 Cl 등과 같은 유해한 물질과의 반응에 의한 화학적 특성에 기인한 것이라고 생각된다. 본 연구에서는 NaCl의 水溶液에 있어서의 슬래그의 收縮이 NaCl의 고유의 특성에 의한 것인지, 혹은 骨材에 의한 것인가를 膨脹率을 이용해서 구명했다.

Fig. 7, 8, 9는 슬래그 4,000, 6,000 및 8,000을 시멘트 중량에 대하여 각각 60%, 70% 및 80% 置換한 供試體를 26주간 水道水에 沈漬하여 膨脹率을 비교한 결과이다. 反應性 骨材를 이용한 경우, 水道水에 있어서는 슬래그 4,000, 6,000 및 8,000의 供試體는 거의 膨脹하지 않았고, 또한, 置換率별 膨脹率의 차이도 인정되지 않았다. 이와 같은 膨脹특성은

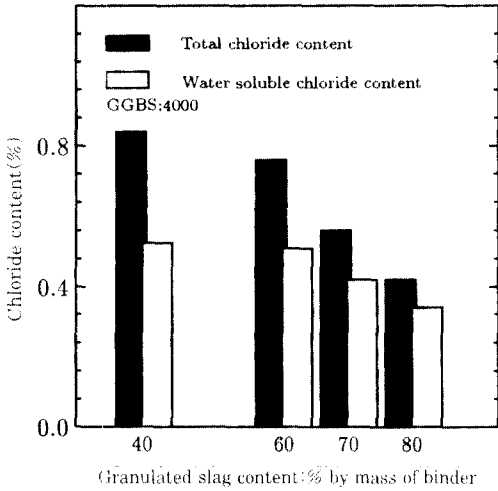


Fig. 4 Chloride ion concentration in mortar bars containing different slag 4,000 replacement after 6 months in 20% NaCl solution

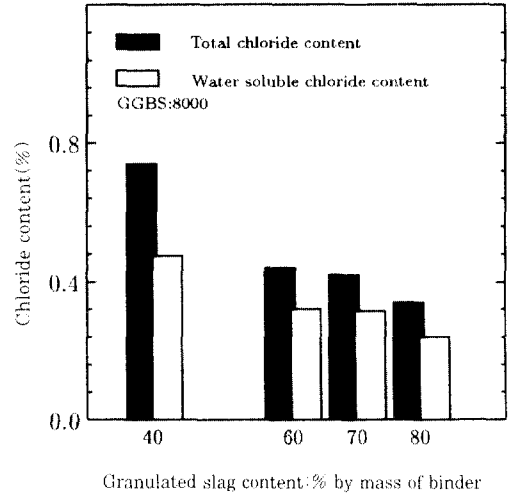


Fig. 6 Chloride ion concentration in mortar bars containing different slag 8,000 replacement after 6 months in 20% NaCl solution

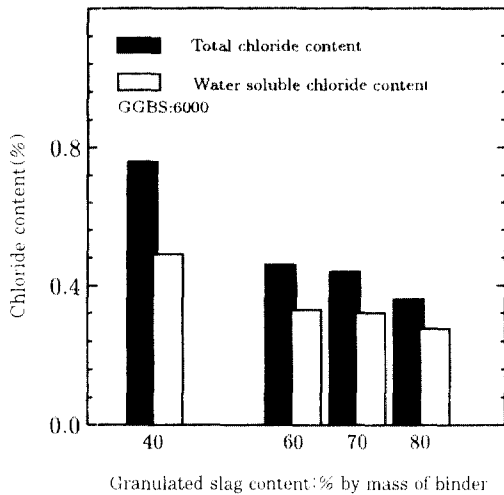


Fig. 5 Chloride ion concentration in mortar bars containing different slag 6,000 replacement after 6 months in 20% NaCl solution

非反應性 骨材에 있어서도 비슷한 경향을 나타냈다.

그러나, 20%의 NaCl 水溶液에서는 Fig. 10, 11, 12와 같이 反應性 骨材를 이용한 경우, 置換率이 증가함에 따라서 收縮率이 크게 되었고, 이와 같은 현상은 슬래그의 比表面積이 클수록 크게 나타났다. 非反應性 骨材를 사용한 供試體에 있어서도 反應性 骨材에서와 유사한 膨脹특성을 나타냈지만, 收縮率은 反應性 骨材를 이용한 것보다 非反應性 骨材의 것이

크게 되었다. 이것은 슬래그가 NaCl 水溶液에 의해서 收縮하지만, 反應性 骨材의 경우 ASR에 의한 膨脹이 일어나 상대적으로 收縮率이 相殺되었기 때문이라고 생각된다.

따라서, 슬래그의 置換率이 큰 供試體에서의 收縮 현상은 NaCl에 기인한 것이며, 슬래그 혼합에 의한 硬化 콘크리트 중의 침상체의 존재형태와 관련있다고 생각한다. Ogawa⁽⁵⁾의 20% NaCl 水溶液에 의한 침상체의 형성 및 그의 메카니즘에 관한 연구결과

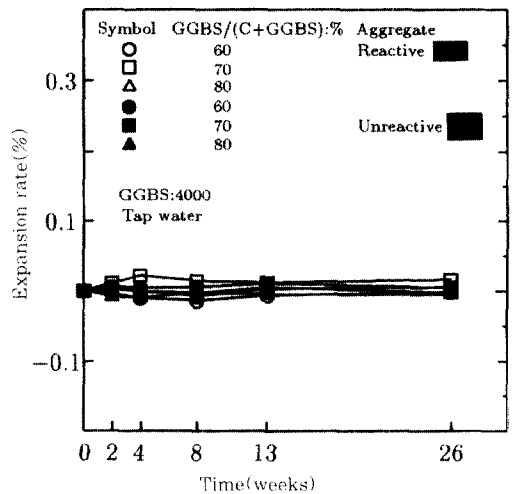


Fig. 7 Expansion of mortar bars containing slag 4,000 due to alkali silica reaction in tap water.

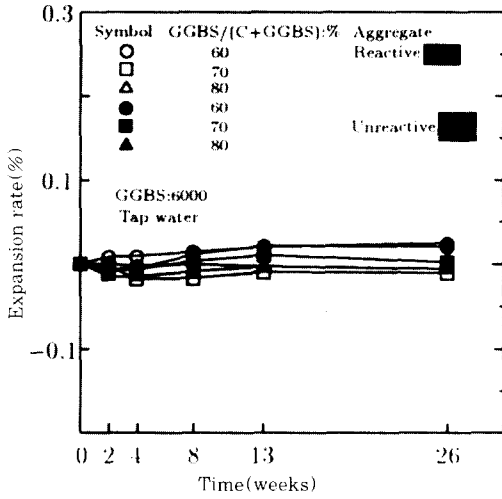


Fig. 8 Expansion of mortar bars containing slag 6,000 due to alkali silica reaction in tap water

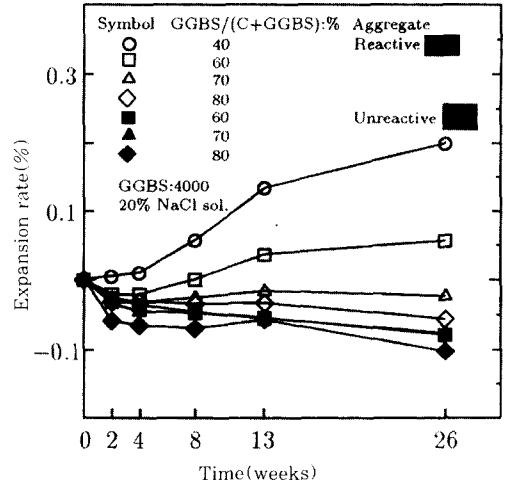


Fig. 10 Expansion of mortar bars containing slag 4,000 due to alkali silica reaction in 20% NaCl solution

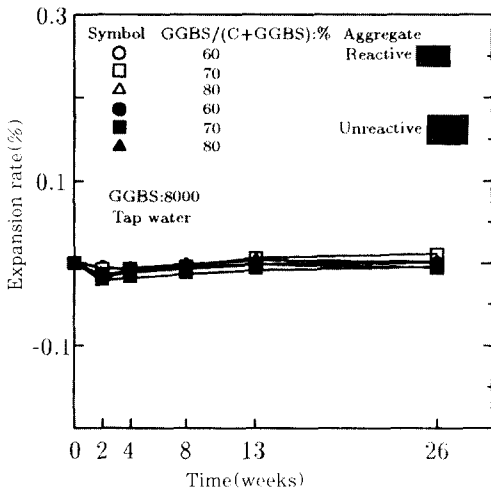


Fig. 9 Expansion of mortar bars containing slag 8,000 due to alkali silica reaction in tap water

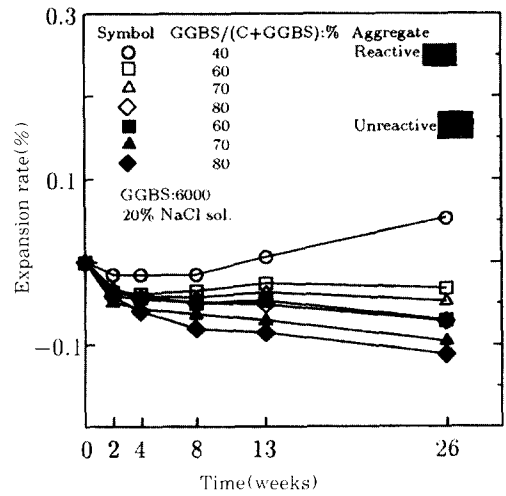


Fig. 11 Expansion of mortar bars containing slag 6,000 due to alkali silica reaction in 20% NaCl solution

에 의하면, 침상체의 分子構造 중의 일부의 이온은 Cl에 의해서 置換되어 膨脹性이 비교적 낮은 침상체相이 형성된다고 했다.

본 연구에 있어서 NaCl 水溶液에 沈漬한 슬래그를 혼화한 供試體가 크게 收縮한 것은 침상체의 溶解度¹⁴⁾, 혹은 膨脹性이 낮은 침상체相의 형성이 많았기 때문이라고 판단되나¹⁵⁾ 별도의 연구가 필요하다고 생각된다.

이상의 결과로부터 NaCl이 공급되는 환경하에서

슬래그에 의한 ASR의 유해한 膨脹을 抑制하는 메카니즘으로는 슬래그 添加에 의한 硬化 콘크리트의 화학적 收縮에 의해서 膨脹率이 相殺됨으로써 달성된다고 생각된다.

5. 결 론

(1) NaCl 水溶液에 있어서 슬래그의 4,000의 膨脹率은 2.8%의 NaCl 水溶液에 沈漬한 것보다 2

참고 문헌

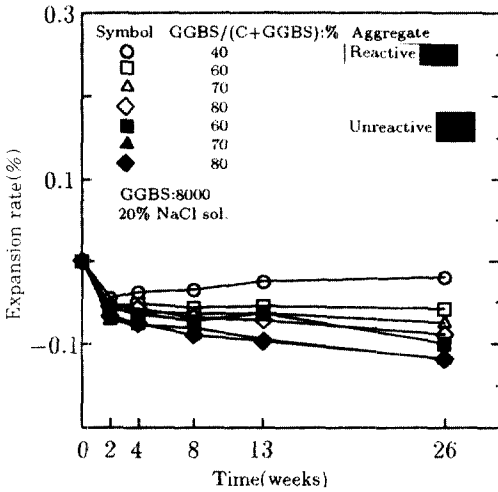


Fig. 12 Expansion of mortar bars containing slag 8,000 due to alkali silica reaction in 20% NaCl solution

0% NaCl 水溶液에 의한 것에서 크게 나타났지만, 슬래그 6,000 및 8,000의 膨脹率은 2.8%의 것이 크게 되어 슬래그 比表面積별로 다른 膨脹경향을 나타냈다.

(2) NaCl 水溶液에 있어서 슬래그의 置換率이 많을수록 收縮率이 크며, 그의 값은 슬래그의 比表面積이 클수록 크게 나타나, 슬래그에 의한 ASR의 유해한 膨脹의 抑制는 슬래그의 添加에 의한 硬化 콘크리트의 化學적 收縮에 의해서도 달성됨이 확인되었다.

1. Malhotra, V. M., Supplementary cementing materials for concrete, Minister of supply and services, Ottawa, 1987, pp. 247-369.
2. Davies, G. and Oberholster, R. E., "Use of the NBRI accelerated test to evaluate the effectiveness of mineral admixtures in preventing the alkali-silica reaction", Cem. Concr. Res., Vol. 17, 1987, pp. 97-107.
3. Diamond, S., "Chloride concentration in concrete pore solutions resulting from calcium and sodium chloride admixtures", Cem. and Concr. Agg., Vol. 8, No. 2, 1986, pp. 97-102.
4. Lea, F. M., The chemistry of cement and concrete, Chemical publishing Co. Inc., New York, 1971, pp. 943-962.
5. Ogawa, K., and Roy, D. M., "Ca₃S hydration, ettringite formation, and its expansion mechanism: III. Effect of CaO, NaOH and NaCl : conclusions", Cem. Concr. Res., Vol. 12, 1982, pp. 247-256.
6. 金 昌吉, 三浦 尚, 内 雅仁, "海洋構造物におけるアルカリ シリカ反應に關する基礎的研究", 콘크리트工學年次論文報告集, Vol. 1, 1994, pp. 1085-1088.
7. 金 昌吉, 海洋構造物におけるアルカリ シリカ反應に關する基礎的研究, 東北大學 博士學位論文, 1996, pp. 67-80.. (접수일자 : 1996. 8. 5)