

해양시멘트 개발에 관한 연구

韓 基 成

〈仁荷大學校 教授〉

1. 緒 論

해양시멘트라함은 해양에 관계되는 構造物의 構築에 사용할 콘크리트용 시멘트를 말한다.

地球上에서 해양이 차지하는 面積은 全體表面의 약 70%에 달한다. 人口의 폭발적인 증가와 더불어 限定된 陸地面積은 점점 減少해져감을 실감하게 되어 해양을 利用할 필요성에 착안하게 되었다. 그만큼 해양에는 우리가 利用할 수 있는 潛在力이 賦存되어 있으며 이를 再認識하게 되었다.

해양개발의 必要性은 여러가지 觀點에서 다룰 수 있겠으나 1) 動物性 蛋白質을 얻기 위한 海洋生物資源의 確保 2) 原子力 燃料로서 이용되는 우라늄이나 重水등과 같이 海水中에 溶存되어 있는 物質의 利用 3) 海底에 賦存하는 石油, 天然가스 또는 망간(Mn) 團塊와 같은 海底資源의 채취 4) 波力, 潮力 또는 海水溫度差를 利用한 發電과 같이 海洋에너지의 利用 5) 海上空港, 交通輸送路, 産業施設用地, 레저施設 및 海底터널 埋設과 같은 海洋空間의 利用 등을 들 수 있다. 우리나라에서도 近年 海洋을 利用하는 계획들이 실천되어 가는 단계에 이르렀다.

그러나 海水中에서 構築되는 構造物은 陸上에서의 것과는 판이하게 다른 特殊性을 갖는다. 즉 海水에 의한 侵蝕作用, 가혹한 氣象 및 海象作用에의 暴露, 構築후의 補修 및 補強工事의 어려움 등으로 構造物의 耐久性에 특별한 배려를 하지 않을 수 없다. 따라서 海洋構造物에 있어서는 構造의 形式, 材料의 品質, 設計 및 施工

方法 등 모든 면에서 신중한 檢討를 요한다.

海洋構造物에 사용되는 資材로서는 鐵鋼材와 콘크리트를 들 수 있겠으나 鐵鋼材는 海洋환경 하에서의 腐蝕性, 低溫에서의 脆弱性, 溫度變形 등의 不合理한 점들과 에너지 集約性材料로서의 高價도 問題가 되며 콘크리트는 材料의 品質, 設計, 施工方法 등에서 多角度로 研究를 하면 價格도 低廉하여 앞으로 利用性이 많은 材料라 하겠다.

여기서는 시멘트를 海洋構造物용 콘크리트로 사용함에 있어 海水成分에 대한 耐久性을 중심으로 다루었으며 海洋環境下에서의 콘크리트의 劣化原因들에 대하여 先行研究者들의 研究結果와 著者등이 研究한 結果들을 綜合하여 기술하기로 한다.

2. 콘크리트의 劣化現象과 耐海水性

1) 콘크리트의 劣化現象

콘크리트는 시멘트와 骨材등을 물과 함께 混練하였을 때 硬化生成한 複合材料로서 常溫에 있어서의 시멘트의 水和反應이 硬化體의 強度發現에 대한 主體로서 作用한다. 그러나 自然環境 특히 海水中에서는 여러가지 化學的 또는 物理的 作用을 받게 되어 微視的 破壞로부터 部材의 破損에 이르기까지 各種 劣化現象¹⁾이 나타나며 이들을 완전히 防止한다는 것은 매우 곤란한 일이다.

海洋에 있어서의 콘크리트의 劣化現象은 여러가지 原因에 다르게 되며 더구나 이들이 상

호, 복합작용을 하기 때문에 매우 복잡하다. 이들劣化原因은 콘크리트가 폭로되는 환경과 콘크리트 자체의 特性에 따르게 되며 또한 이를 化學的인 要因과 物理的인 要因으로 나누어 생각할 수 있다.

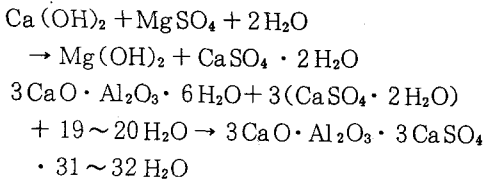
폭로되는 조건에서는 凍結作用, 溫度條件, 海水와의 接觸條件 및 波浪作用 등을 들 수 있으며 物理的 또는 化學的인 侵蝕 및 劣化作用에 의하여 表層破壞와 膨脹破壞 및 多孔化現象도 일어난다.

콘크리트 자체의 特性과 劣化關係는 시멘트의 종류에 의한 硬化體와 海水中 鹽類와의 反應關係, 시멘트페이스트의 品質, 使用한 骨材와 海水中 鹽類와의 反應關係 및 콘크리트 施工에 따른 콘크리트의 均一性 등과 밀접한 關係를 갖는다.

여기서는 주로 海水의 시멘트硬化體에 대한 化學的 侵蝕作用에 대하여 검토하기로 한다.

(1) 黃酸鹽의 作用

黃酸鹽에 의한 侵蝕은 C_3S , C_2S 등의 水和生成物인 $Ca(OH)_2$ 와 黃酸鹽의 反應 및 이때 生成되는 石膏($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)와 C_3A 의 水和生成物인 C_3AH_6 와의 反應으로부터 이루어지는 것으로 본다. 즉



와 같은 反應으로 ettringite를 生成한다. 이 ettringite는 팽창성 물질이므로 콘크리트硬化體를 팽창파괴시키는 원인이 된다. 石膏는 海水중에서 可溶性이므로 硬化體의 多孔化를 촉진시키게 되기도 한다.

黃酸鹽에 의한 侵蝕은 시멘트의 品質, 水温, 乾濕條件등에 따라 다르다. 시멘트 중에 C_3A 함량이 많을수록 ettringite의 生成量은 증가하고 팽창량도 커진다. 이를 줄이기 위해서는 CaO 나 Al_2O_3 成分이 적은 시멘트를 사용하고 포조란物質이나 슬래그 등을 사용함으로써 硬化體

중의 $Ca(OH)_2$ 양을 감소시키는 것이 좋다. 黃酸鹽이 시멘트硬化體에 미치는 영향에 관하여는 많은 研究^{2~6)}가 이루어져 있다. 여기서는 시멘트를 構成하는 각 클링커鹽物과 여기에 각종 混合材를 여러가지 비율로 混合한 試片을 4% $MgSO_4$ 溶液에 7日과 60日 동안 浸漬하였을 때 黃酸鹽과 試片과의 反應關係⁷⁾를 검토하였다.(Table 2 참조)

각종 試片의 제작에 사용한 試料의 混合比率는 <Table 1>과 같으며 이들 試片을 所定日間 4% $MgSO_4$ 溶液에 浸漬한 후 反應生成物을 X線廻折分析으로 分析한 結果를 <Fig.1>에 표시하였다.

1-系列에서 $Ca(OH)_2$, $Mg(OH)_2$ 및 gypsum은 浸漬期間에 따라 生産量이 증가하고 있으나 $Ca(OH)_2$ 는 混合材를 混合한 試片들에 있어서 상대적으로 生成量이 감소되고 있어 이것은 混合材의 포조란反應등에 기인한 것임을 알 수 있다.

2, 3-系列에서는 다량의 C_3AH_6 과 gypsum이 生成되며 ettringite의 生成은 오히려 소량이거나 生成된 뒤 소멸되는 現象을 보여주고 있다. C_3A 단독 試料의 試片(2-1)에서는 7일 침지에서 다량의 C_3AH_6 와 ettringite가 生成된 뒤

Table 1. Mixing Ratio of Samples (wt %)

No.	C ₃ S	C ₂ A	C ₃ A,F	Slag	Diatomaceous earth	Silica fume	Silica gel
1-1	100						
2	70			30			
3	80				20		
4	90					10	
5	90						10
2-1		100		30			
2		70			20		
3		80				10	
4		90					10
5		90					10
3-1			100	30			
2			70		20		
3			70			10	
4			80				10
5			90				10
4-1	90	10					
2		70		30			
3		80			20		
4		80				10	
5		90					10
5-1	90		10				
2		70		30			
3		80			20		
4		90				10	
5		90					10
6-1	80	5	15				
2		70		30			
3		60			20		
4		90				10	
5		90					10
7-1	80	15	5				
2		70		30			
3		80			20		
4		90				10	
5		90					10

Table 2. XRD Analysis of Samples Immersed in MgSO₄ Solution.

No.	Days immersed	Ca(OH) ₂	Mg(OH) ₂	C ₃ AH ₆	Gypsum	Ettringite	Mono-sulfate	5MgO·2Al ₂ O ₃ ·15H ₂ O
1-1	7	xxxxx	x		x			
	60	xxxxx	xxx		xx			
2	7	xxxxx	xx		x	x		
	60	x	xxx		xxx	x		
3	7	xxxxx	xx		x			
	60	x	xxx		xx			
4	7	xx	xxx		x			
	60	x	xxx		xx			
5	7	xxxxx	xx		x			
	60	xx	xxx		x			
2-1	7	x	xxxxxx		xxxx	x	x	xx
	60	x	x		xxxx	xx		xx
2	7	xx	xx		xxxxxx			xx
	60	xx	x		xxxxxx			xx
3	7	xx	xx		xxxxxx			x
	60	x	x		xxxxxx		x	x
4	7	xxxxx	xx		xx			x
	60	x	xx		xxxxxx			xxx
5	7	xxxxxx	xx		xxxxxx	x		
	60	xxxx	xxxx		xx	x		
3-1	7	xxxx	xx		xxxx	x	x	
	60	xx	xx		xxxxxx			x
2	7	xx	xx		xxxxxx			
	60	x	x		xxxxxx			x
4	7	xx	xx		xx			
	60	x	xx		xxxxxx			x
5	7	xxxx	xx		xxxx			
	60	x	x		xxxxxx			
4-1	7	xx	x		x			
	60	xxxx	xxx		x	x	x	
2	7	xxxx	xx		xx	x		
	60	x	xxx		xx	x		
3	7	xx	xxx		x	x		
	60	x	xxx		x			
4	7	xxxxx	xx		x			
	60	xx	xxx		x	x		
5	7	xxxxx	xx		x			
	60	xx	xx		xx	x		
5-1	7	xxxxx	xx		x			
	60	xxx	xx		x	x		
2	7	xxx	xx		x			
	60	xxx	xxx		xx	x		
3	7	xxxxx	xx		x			
	60	xx	xx		x			
4	7	xx	x		x			
	60	xx	xxx		x			
5	7	xxx	x		x			
	60	x	xx		x			
6-1	7	xxxxx	x		x			
	60	xxx	xx		x	x		
2	7	xxxxx	xx		x	x		
	60	x	xxx		xx	x		
3	7	xxx	xx		x	x		
	60	x	xx		x			
4	7	xxx	xx		x			
	60	xx	xx		xx	x		
5	7	xxxxx	xx		x			
	60	xx	xxx		x	x		
7-1	7	xxxxx	x		xxxx	x		
	60	x	xxx		xxxx	x	x	
2	7	xxxx	xx		xxxx	xx		
	60	x	xxxx		xxxx	xx	x	
3	7	xxx	xx		xx	x		
	60	x	xxx		xx	x		
4	7	xx	xx		x			
	60	x	xx		xx	x		
5	7	xxx	xx		xx	x		
	60	xx	xxx		xxxx	x		

Remark, x: very little, xx-xxx: little, xxxx-xxxxx: medium
 xxxxxx: much, xxxxxxx: very much

60일 침지에서는 대부분의 C₃AH₆와 전부의 ettringite가 없어지고 새로운 수화물인 gypsum과 Koenenite (5MgO · 2Al₂O₃ · 15H₂O)가 생성되었다. 이 Koenenite는 C₃A 화합물이 MgSO₄ 용액에서 생성되는 것으로 지금까지 알려지지 않았던 새로운 사실이다.

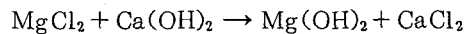
4, 5, 6, 7系列에 있어서는 浸漬期間에 따라 일반적으로 Ca(OH)₂는 감소하고 Mg(OH)₂는 증가하였으며 slag를 혼합한 것보다는 珪藻土, silica fume 및 silica gel 등 pozzolana 材料를 혼합하였을 때가 Ca(OH)₂의 감소는 더욱 현저하였다.

보통 포틀랜드 시멘트와 여기에 slag, silica fume 및 white carbon 등의 混合材料를 혼합한 試片에서 SO₄ 이온의 擴散關係⁸⁾를 검토하였다. (Fig.1) SO₄ 이온의 투과량을 보면 混合材의 混合量에 따라 상당히 큰 차이를 나타낸다. slag를 40%, 60% 섞었을 때, slag 38%와 silica fume 2%를 섞어서 混合했을 때, slag 18%와 white carbon 2%를 섞어 混合했을 때 투과량이 감소하였다.

(2) 鹽化物的 作用

海水중에는 다량의 鹽化物이 溶存되어 있고 이들이 콘크리트의 劣化에 영향을 미치게됨은 당연히 생각할 수 있으며 이에 대해 많은 研究⁹⁻¹³⁾가 이루어졌다.

콘크리트 중에 침투한 鹽化物은 시멘트 수화물과의 反應으로 Friedel 鹽(3CaO · Al₂O₃ · CaCl₂ · 10H₂O)을 形成하여 鹽化物的 一部分이 固定된다. MgCl₂ 溶液 중에서도라면 C₃S와 C₂S의 수화물인 Ca(OH)₂와 反應하여 Mg(OH)₂를 生成한다.



Mg(OH)₂는 콘크리트의 表面層에 生成되는 白色沈澱物이며 CaCl₂는 可溶性이 매우 큰 것이므로 시멘트 硬化體組織의 多孔化를 촉진시킨다. 鹽化物的 侵蝕性은 Cl 이온의 침투에 의한 CaCl₂의 生成과 溶출에 의한 多孔化 現象에 기인하는 것으로 생각되며 黃酸鹽侵蝕에 의한 ettringite의 生成에 기인하는 팽창과괴와 구별하고 있다. 또한 MgCl₂의 침식은 MgSO₄와의 共存으로 억제된다.

鹽化物에 의한 침식을 지연시키기 위해서는 Ca(OH)₂ 수화물 生成이 적은 pozzolan 混合材를 混合한 시멘트의 사용이 바람직하다.

(Table 1)에서 준비한 試料를 사용하여 만든

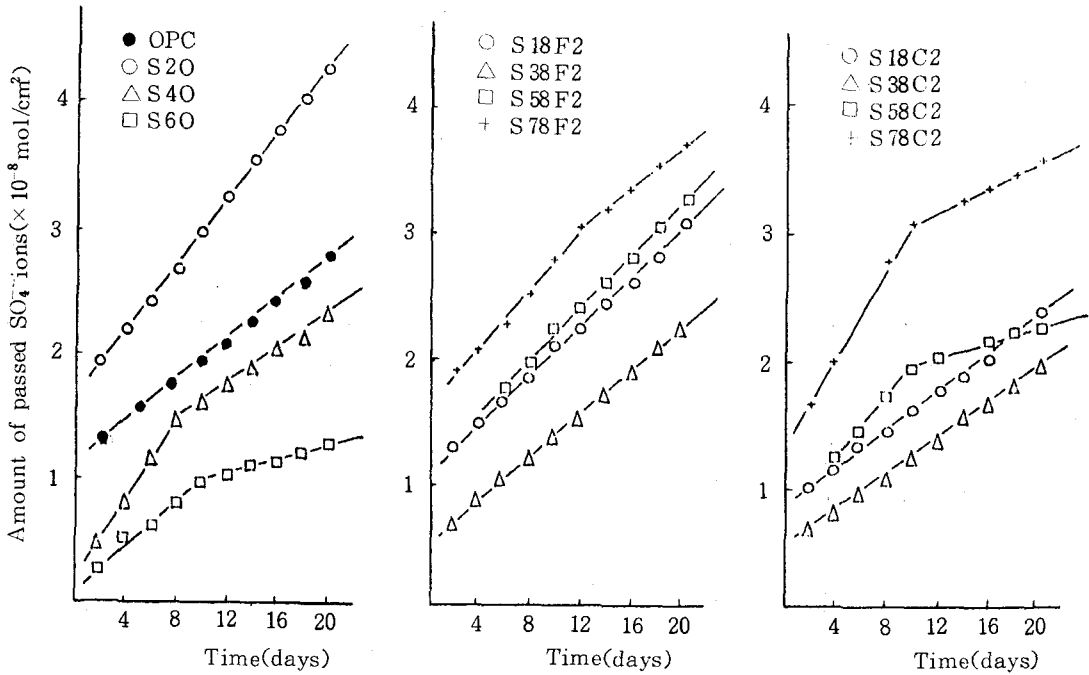


Fig. 1. Amounts of passed SO_4^{2-} ions through various specimens in 0.5N MgSO_4 solution.
Remarks: S slag, F silica fume, C white carbon

試片을 4% MgCl_2 溶液에 7日과 60日間 浸漬한 후 反應生成物을 X線廻折方法으로 分析한 結果를 <Table 3>에 표시하였다.

1-系列에서는 初期부터 다량의 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 生成되고 2, 3-系列에서는 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 와 C_3A 의 水和物인 C_3AH_6 가 CaCl_2 와 反應하여 많은 양의 Friedel 鹽을 生成하였다. 4, 5, 6, 7-系列에서는 주로 다량의 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 와 소량의 Friedel 鹽 및 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 볼 수 있다. 이는 試料의 構成이 클링커鑛物組成을 달리하고 混合材의 종류와 양을 달리한 때문이다.

<Fig. 2>는 보통포틀랜드 시멘트와 이에 slag, silica fume, white carbon 등의 混合材를 섞은 試片에 대한 Cl^- 이온의 擴散關係¹⁴⁾를 검토한 것이다.

일반적으로 보통포틀랜드 시멘트硬化體에서의 Cl^- 이온 투과량이 가장 많고 여기에 포조란질 混合材를 다량으로 섞을수록 투과량이 적어졌다. 그만큼 硬化體에서의 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生産량이 적고

치밀화 되었음을 알 수 있는 것이다.

시멘트硬化體중에서 Cl^- 이온의 透過速度는 SO_4^{2-} 이온보다 약 50~100배 빠르다. 그러나 C_3A 가 함유된 硬化體가 SO_4^{2-} 이온과 Cl^- 이온이 공존하는 溶液안에서는 우선 Friedel 鹽의 生成으로 Cl^- 이온이 固定되므로 내부까지의 Cl^- 이온의 擴散을 억제하게 된다.

(3) 시멘트水和物の 溶出作用

海水에 접하는 콘크리트는 각종 鹽類의 作用에 의해서 生成된 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 나 CaCl_2 가 可溶性이어서 溶出될 뿐 아니라 시멘트水和物の 일부도 可溶性이다. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 溶解度도 海水와 같은 복수의 이온이 공존하는 곳에서는 증가하게 된다.

3倍濃度の 人工海水중에 시멘트硬化體를 浸漬한 후 浸漬期間에 따른 海水중의 成分濃度變化를 <Fig. 3>¹⁵⁾에 표시하였다.

0基準線 가까이 있는 成分은 Na^+ , K^+ , Cl^- 등으로 이들은 시멘트硬化體와의 反應성이 낮

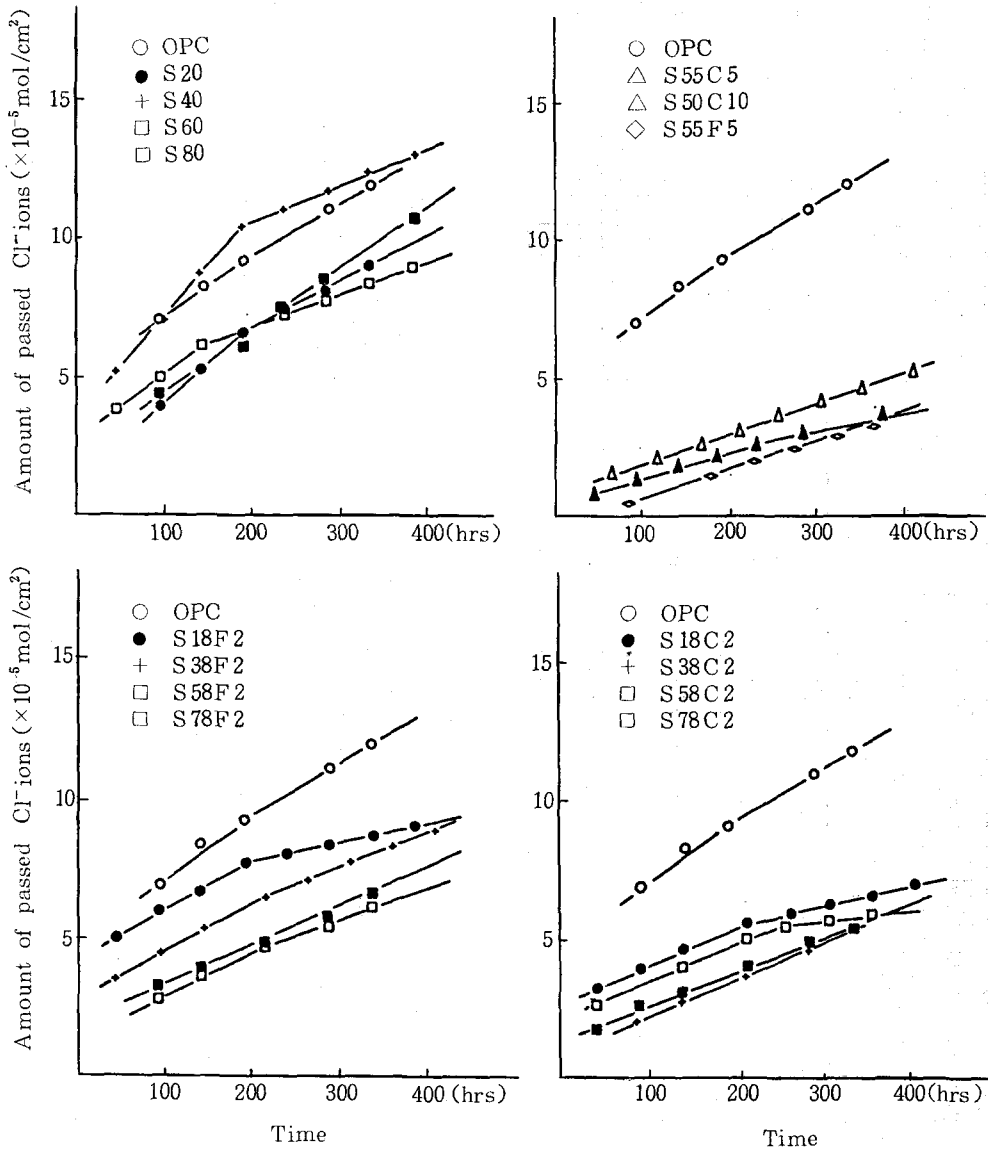


Fig. 2. Amounts of passed Cl⁻ ions through hardened cement paste.

은 것이다. 濃度減少가 심한 것은 Mg²⁺와 SO₄²⁻로 Mg²⁺는 시멘트硬化體中の Ca(OH)₂와 反應하여 Mg(OH)₂를 生成하기 때문이며 SO₄²⁻은 C₃A와 反應하여 ettringite를 生成하기 때문이다. Mg(OH)₂의 生成으로 대신 Ca²⁺가 液相中에 유리되어 나오나 3個月 경부터는 Ca(OH)₂의 炭酸化로 溶出作用이 몇게 된다.

2) 콘크리트의 耐海水性

위에서는 콘크리트의 劣化現象을 주로 化學的 侵蝕作用을 위주로 檢討하였는 바 耐海水性이란 化學的인 要因만으로 오는 것은 아니다. 그 이외의 중요한 項目에 대하여 들어보기로 한다.

(1) 시멘트의 種類

Table 3. XRD Analysis of Samples Immersed in MgCl₂ Solution

No.	Days immersed	Ca(OH) ₂	Mg(OH) ₂	C ₃ AH ₆	Friedel's salt	Mg ₂ (OH) ₂ (Cl·4H ₂ O)	
1-1	7	xxxx	xxxxxx				
	60		xxxxxxxx				
	7		xxxxxx		x		
	60		xxxxxxxx		x		
	7	xx	xxxxxx				
	60	x	xxxxxx				
2-1	7		xxxxxx				
	60		xxxxxx	xxxxxxx	xxxxxx		
	7		xx	xxxxxx	xx		
	60		xx	xxxxxx	xxxxxxx	xxxxxxx	x
	7		xx	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	
	60		xx	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	
3-1	7		xx	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	
	60		xx	xxxxxx	xx	xxxxxx	
	7		xx	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	
	60		xx	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	x
	7		xx	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	
	60		xx	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	
4-1	7	xx	xxxxxx	xxxxxx	xx		
	60	x	xxxxxx	xxxxxx	xx	xxxxxx	
	7		xxxxxx	xxxxxx	xx		
	60		xxxxxx	xxxxxx	xx		
	7		xxxxxx	xxxxxx	xx		
	60		xxxxxx	xxxxxx	xx		
5-1	7	xx	xxxxxx	xxxxxx	xx		
	60		xxxxxx	xxxxxx	xx		
	7		xxxxxx	xxxxxx	xx		
	60		xxxxxx	xxxxxx	xx		
	7	xx	xxxxxx	xxxxxx	xx		
	60		xxxxxx	xxxxxx	xx		
6-1	7	xxx	xxxxxx	xxxxxx	xx		
	60		xxxxxx	xxxxxx	xx		
	7	x	xxxxxx	xxxxxx	xx		
	60		xxxxxx	xxxxxx	xx		
	7	x	xxxxxx	xxxxxx	xx		
	60		xxxxxx	xxxxxx	xx		
7-1	7	xx	xxxxxx	xxxxxx	xx	xx	
	60		xxxxxx	xxxxxx	xx	xx	
	7	x	xxxxxx	xxxxxx	xx		
	60		xxxxxx	xxxxxx	xx		
	7	x	xxxxxx	xxxxxx	xx		
	60		xxxxxx	xxxxxx	xx		

Remark, x: very little, xx: little, xxx: medium, xxxxx: much, xxxxxx: very much

비교적 양호한 耐海水性を 갖는 것은 中庸熟 포틀랜드 시멘트나 슬래그나 良質의 포조란 混合材 등을 混合한 混合시멘트가 효과적이다. 시멘트의 成分으로서는 C₃A의 量을 적게하는 것이 ettringite의 生成에 의한 膨脹과괴현상을 방지하게 되나 C₃A의 一部는 鹽化合物과 化合하여 Friedel 鹽을 生成, 鹽化合物을 固定시켜 内部까지의 浸透를 방지하므로 C₃A 量을 아주 적게하는

것이 바람직한 것은 아니다.

(2) 骨材

일반적인 콘크리트에서 耐久性에 미치는 骨材의 品質이 미치는 영향은 매우 크다. 특히 알칼리骨材反應과 骨材와 海水와의 反應에 양호한 骨材를 선별 사용해야 한다.

(3) 混和劑

凍結融解作用을 받는 地域에서는 潮汐帶 一部分의 콘크리트에 AE劑의 사용이 좋은 효과를 보여주고 있다. 일반적으로 AE劑나 減水劑를 混和함으로써 workability를 향상시켜 국부적으로 결함이 없는 均質한 콘크리트體를 만들고, 水密性を 향상시키며 따라서 黃酸鹽의 침투를 억제할 수 있을 것이다.

(4) 콘크리트의 配合과 施工

配合과 耐海水性과의 관계는 構造物 材料의 種類, 海水作用의 相違, 凍結融解作用의 有無, 시멘트의 種類와 品質등에 따라 다르다. 施工에 있어서도 海水에 대한 低抗性을 높이고 内部鋼材의 腐蝕因子의 침투를 억제하기 위해서는 材料分離 등이 일어나지 않도록 적합한 材料와 配合設計에 따른 workable한 콘크리트를 사용하여 打設하고 충분한 養生을 할 필요가 있다.

3. 結 論

이상에서 기술한 바와 같이 海洋시멘트의 開發이라 하는 問題는 매우 복잡하고 어려운 것이다. 올바른 試驗이나 研究도 10年, 20年, 50年의 長期間에 걸친 다각적인 結果를 종합함으로써만 어느 基準에 합당한 材料를 찾아낼 수 있을 것이다.

世界的인 추세나 우리나라 자체로서의 필요성에 따라서도 이 海洋시멘트 開發이란 問題에 좀더 뜻을 모아 깊이 파고들어야 할 것이다.

<參 考 文 獻>

1) 關 博·大友忠典, “콘크리트技術進書 6” (海洋 콘크리트·水中콘크리트), pp. 27~41, 山海堂, 東京(1982).

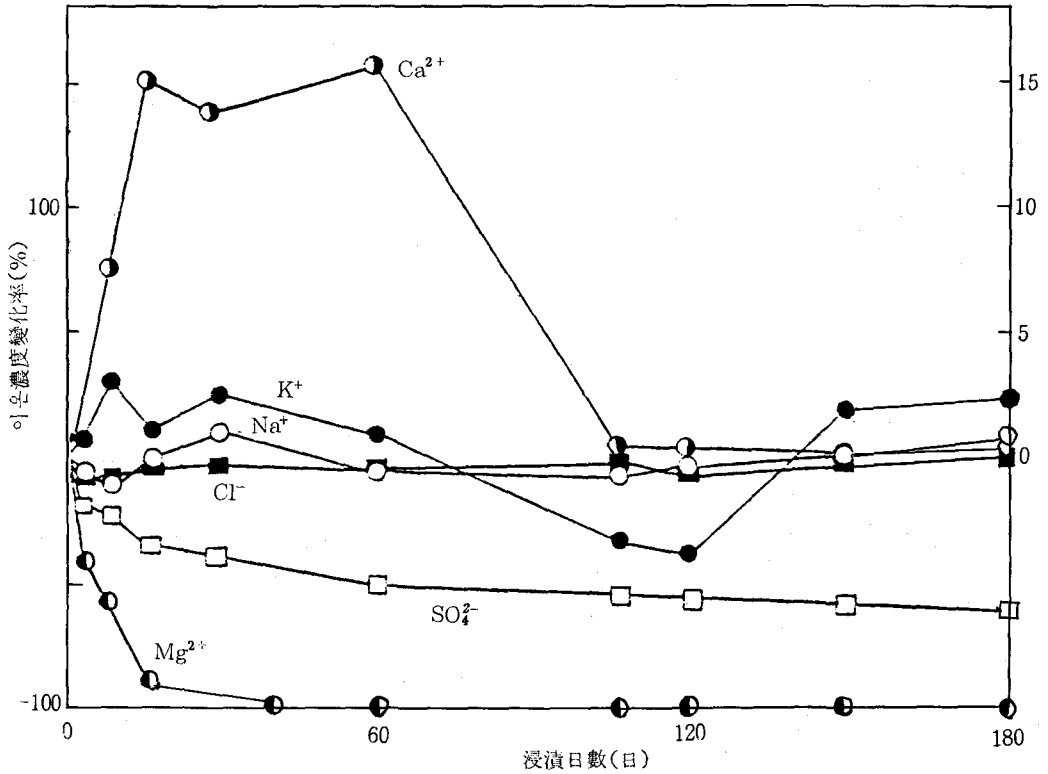


Fig. 3. 3倍濃度人工海水의 이온濃度變化

- 2) Katharine Mather "Factors Affecting Sulfate Resistance of Mortars", 7th Int. Symp. Cem. Cem. Paris, 4, 580-585 (1980).
- 3) S. Chatterji, "Mechanism of Sulfate Expansion", 7th Int. Symp. Cem. Cem. Paris, 4, 586-591 (1980).
- 4) C. Samanta & M. K. Chattajee, "Sulfate Resistance of Portland-Pozzolamic Cements in Relation to Strength", Cem. & Conc. Res. 12, 726-734 (1982).
- 5) 小林和一, 岡林茂生, 片岡信裕, "各種セメントの耐硫酸性に関する研究", セ技年報, 28, 116~120 (1974).
- 6) 牛山宏隆, 岩倉博之, 福永敏宏, "セメント硬化體中における硫酸根の擴散", セ技年報, 30, 77~81 (1976).
- 7) 申道喆, 宋泰雄, 韓基成, 崔相紇, "시멘트클린커 鑛物에 미치는 海水成分의 영향", Jour. Kor. Soc. 24, 77~85 (1987).
- 8) 김태현, 최 상훈, 한 기성, "슬래그-규산질 미분말을 함유하는 시멘트 경화체중에서의 이온의 확산(II) SO₄⁻ 이온의 확산", Jour. Kor. Cer. Soc. (투고 중).
- 9) H. G. Midgley & J. M. Illston, "Effect of Chloride Penetration on the Properties of Handmade Cement Pastes", 7th Int. Symp. Cem. Cem., Paris, 3, VII-101-103 (1980).
- 10) H. G. Smolczyk, "Chemical reactions of Strong Chloride-Solutions with Concrete", 5th Int. Symp. Cem. Cem. Tokyo, 3, 274-280 (1968).
- 11) P. Lambert, C. L. Page & N. R. Short "Pore Solution Chemistry of the Hydrated system Tricalcium Silicate/Sodium Chloride/Water, Cem & Conc. Res. 15, 675-680 (1985)
- 12) 近藤連一, 佐竹 実, 牛山宏隆, "セメント硬化體中のイオン擴散", セ技年報, 28, 58~61 (1974).