

콘크리트 鐵筋腐蝕의 有害 鹽化物量에 對하여

張 復 基

〈全南大學校 無機材料工學科 副教授〉

目

次

1. 序 言

2. 鹽化物의 문제성

2. 1 歷史的 背景

2. 2 철근 및 철근부식

3. 有害 鹽化物

3. 1 시멘트-鹽化物 反應

3. 2 有害 鹽化物의 量

4. 結 言

5. 參考文獻

I. 序 言

콘크리트 구조물의 鹽害 또는 海砂使用 문제는 1990년 수도권 신도시 아파트건설 中 커다란 사회문제가 되면서 일반인에게도 널리 알려지게 되었다. (그러나 그 機構, 특히 有害 鹽化物의 量에 對하여서는 學者들 間에도 意見이 매우 相異하다.)

各種 鹽(CaCl₂, NaCl, MgCl₂ 等)의 鹽素이 온은 철근콘크리트의 철근을 腐蝕하여 결과적으로 구조물의 劣化를 가져오기 때문에 各國의 工業規格은 콘크리트에 含有되는 鹽素의 量을 制限하고 있으며, 이와 相應하여 鹽害 또는 콘크리트骨材로서의 海砂에 關한 報告文도 많은 편이다^{1) 2)}.

鹽害問題는 크게 두가지 形態로 分類하여 생각할 수 있다. 1) 콘크리트成分으로서 海砂·海水를 使用하거나, 鹽化物을 含有한 콘크

리트混和劑(早強用)의 使用 또는 水溶性鹽化物을 함유한 골재를 使用할 때 等과 같이, 시멘트 自體가 본래 含有하고 있는 鹽素 量(0~0.06% Cl⁻: 以下 別도의 表記가 없는 限 尙尙 重量 %를 뜻함)과 더불어 콘크리트製造時 過量의 水溶性鹽化物이 含有되는 경우가 있고, 2) 冬季에 結氷을 막기 爲하여 교량의 路面에 鹽化物을 撒布하거나 또는 海岸地方에 있어 各種 鹽을 約 3% 含有하고 있는 海水가 霧相(aerosol)(직경 약 0.1~100 μ m 크기의 固相 또는 液相粒子)으로서 海風을 타고 육지로 날아와 콘크리트構造物 表面에 附着한 다음 콘크리트內部로 擴散해 가는 경우와 같이, 二次的인 原因에 依한 鹽害가 있다. (海水의 경우는 海水 中의 MgCl₂가 시멘트硬化體(Ca(OH)₂)와 다음과 같이 反應하여: MgCl₂+Ca(OH)₂→Mg(OH)₂+CaCl₂, 易溶性의 CaCl₂를 生成하면서 化學的 侵蝕을 일으키기도 한다. 이런 理由에서 結氷防止用으로

MgCl₂는 사용하지 않는다). 또 后者의 다른 例로서 오늘날 多量으로 使用고 있는 熱硬化性 合成樹脂인 PVC(Polyvinylchloride)의 연소(火災)로 因한 鹽害를 들 수 있다³⁾. PVC는 120℃ 以上 加熱時 分解하여 鹽素개스를 발생시키며 수증기 存在 下에 염산증기를 形成하면서 철근을 부식시키는 原因이 될 수 있다. 특히 연속적으로 PVC燃焼개스에 노출되는 콘크리트구조물에서는 본 염해를 豫想해야 할 것이다.

筆者는 이러한 염해들 가운데서 前者, 즉 콘크리트 원자재로서 海砂(또는 海水)를 使用하는 문제에 대하여 考察해 보고자한다. KS F 4009에 依하면, 레디믹스콘크리트용 천연골재(잔골재)는 염분의 含量이 0.04% 以下여야 한다고 규정한다—그렇다면, 0.04%를 초과하는 천연골재는 어떠한 레미콘에도 使用이 不可한가? 그리고 이 “0.04%”의 規定은 어디에 根據를 두고 있는가? 또 한국과 일본 公業규격에서는 許容鹽分 總量을 콘크리트 單位量(m³)當 염소이온量(KS F 4009에 依하면 0.30kg/m³)으로 規定하는 反面에, 歐美규정은 콘크리트 內 시멘트量 當 염소이온 量으로 表示하고 있다—이 두가지 表示法은 大略(% Cl⁻/콘크리트)×7=(% Cl⁻/시멘트)로 나타낼 수 있지만, 그러나 여기서 單位 콘크리트量 當 시멘트量이 콘크리트에 따라서 크게 다를 수 있음에 留意할 필요가 있다.

2. 鹽化物의 問題性

2. 1 歷史的 背景

1960年代 初까지 數十年동안 鹽化物(CaCl₂)은 固相이나 液相의 形態로 클링커분쇄 時 또는 콘크리트混合 時 投入하여 使用되어왔다. 冬寒季에 콘크리트 水硬化를 促進시키거나 早期強度를 增進키 爲하여 염화칼슘이 使用되었으며, 當時 高品級(高強度)시멘트에는 大部分 CaCl₂를 添加해서 製造하였다. 그 때까지 CaCl₂ 2%까지의 첨가는 無難한 것으로 考慮

되었으며, Cl⁻은 시멘트礦物과 化學反應함으로써 不溶性의 Frieded鹽(3CaO · (Al₂O₃, Fe₂O₃) · CaCl₂ · 10H₂O)를 形成한다고 생각했다.

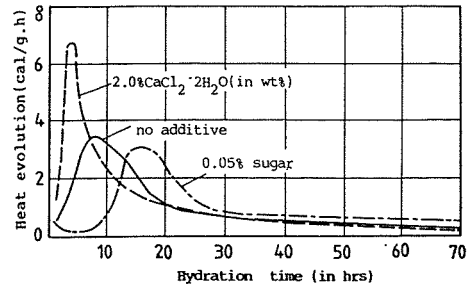


Fig. 1. Effect of Calcium chloride and sugar on the hydration heat evolution.

CaCl₂는 3CaO · SiO₂의 水和反應을 促進시키거나(그림 1 참조) 또는 빨리 結晶化하는 섬유상의 CSH形成을 助長함으로써 早期強度 발현에 기여한다. 따라서 염화칼슘은 大部分의 早強型混和劑의 主要成分으로 活用되며, 無機質 또는 有機質할 것 없이 염화칼슘만큼 직접시멘트 水硬化를 촉진시키는 혼화제가 없는 것으로 認識되고 있다.(그러나 一例로 독일公業규격의 경우 모든 혼화제를 포함하여 시멘트에 염화칼슘 添加를 一切禁하고 있다).

이러한 염화칼슘(염소이온)使用에 對한 엄격한 規制는 高알루미나시멘트를 使用하여 만든 鐵筋콘크리트構造物(家畜우리의 지붕)이 1960年頃 처음 붕괴한데서 비롯되었다. 勿論 本구조물의 경우는 염화칼슘의 作用 以外에 다른 영향들, 즉 高알루미나 시멘트의 낮은 PH값(11~12), 알루미나 시멘트水和物이 溫濕한 분위기에서 쉽게 相轉移를 일으키며 그 微構造가 느슨해지는 點, 家畜우리의 온습하고 암모니아 及 탄산개스와 硫物物을 含有한 大氣條件 등이 複合的으로 作用한 結果였다. 如何튼 이러한 鐵筋콘크리트構造物의 잇따른 붕괴를 계기로, 後續 研究들의 結果 염화칼슘은 그 含量이 많을수록 시멘트의 pH값을 低

下시키고 콘크리트 鐵筋의 腐蝕을 招來한다는 事實을 認知하기에 이르렀다. 그리고 이후 1967年(독일) 철근腐蝕에 關한 規定이 나오 고, 특별한 경우에는 슬래그含量이 많은 高爐 슬래그 시멘트의 使用을 制限하며 시멘트에 함유된 鹽化물을 원료 및 연료로 말미암은 최소한의 量(可溶性 鹽化물含量 : 0.10% Cl^-) 으로 限定하고 철근을 덮는 콘크리트表面層의 최소한 두께를 要求하는 등의 規制를 加하게 되었다.

그러나 여기서 문제가 되는 것은 이러한 엄격한 규정과 제한을 모든 철근콘크리트에 一律적으로 적용할 必要가 있느냐하는 点이다. 한 때 高品級시멘트 製造時 鹽化칼슘을 첨가 하였어도 別다른 문제가 없었고 結氷防止用으로 2% $CaCl_2$ /시멘트까지 투입하였으며, 알루미나 콘크리트 구조물의 붕괴가 여러 要因들이 複合적으로 作用하여 일어난 点等으로 보아, 프리텐션 콘크리트가 아닌 일반 철근콘크리트를 위해서는 "0.10% Cl^- /시멘트"라는 아주 낮은 鹽化物 含量制限은 不必要한 것으로 보는 見解가 支配的이다. 또 콘크리트의 鹽化物 含量 1% $CaCl_2$ /시멘트 역시 大部分의 콘크리트 경우 無難할 것으로 여기고 있다. 事實 各國의 工業規格이 시멘트 및 콘크리트 內 鹽化物含量을 매우 낮은 값으로 制限하고 있는 것은 鹽化물을 制限值 以上 含有하고 있는 시멘트/레미콘이 혹시 프리텐션 콘크리트에 使用되지 않을까하는 우려에서이다. 바로 프리텐션 콘크리트에서야말로 鹽害로 인한 철근(鋼材)腐蝕의 防止는 絶代的인 安定性을 要하기 때문이다. 큰 應力을 받고있는 鋼材의 表面(不動態膜)이 鹽化물침식으로 파괴되고 강재結晶表面 上에 미세한 균열이 발생하면, 이를 계기로 프리텐션 鋼材는 豫表도 없이 갑자기 끊어지고 콘크리트構造물을 위태롭게하거나 더 이상 지탱할 능력을 상실하게 될 수 있다.

2. 2 鐵筋腐蝕

콘크리트의 重要한 役割은 높은 強度를 내는 外에 철근을 부식작용으로부터 保護하는 것이다. 즉 正常的으로 製造된 콘크리트의 철근이 부식되지 않는 이유는 시멘트의 강한 알카리(石炭)反應 때문이다. 시멘트硬化體의 氣孔들에는 pH 12.5에 達하는 石炭飽和溶液이 存在하는데, 이러한 強알카리 媒質에서는 철근表面에 얇은(1~1.5mm) 酸化物層(所謂 不動態膜)이 形成되며 이 膜은 매우치밀하여 철이 더 以上 酸化되지 않도록 保護하는 作用을 한다. 그리고 이러한 不動態膜은 pH>9 ($CaCO_3$ 의 pH값)의 條件下에서 계속 維持된다(그림 2 參考). 그러나 萬一 媒質(氣孔水)의 알카리성이 低下되거나(例 : 콘크리트層이 充分히 두껍지 못하거나 치밀하지도

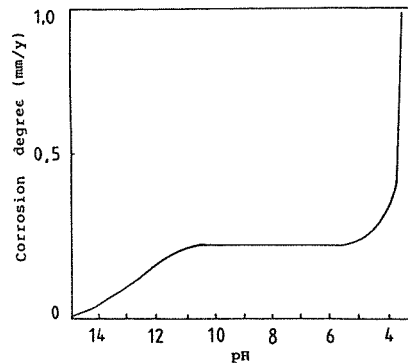
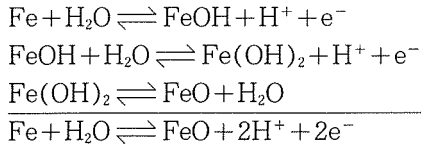


Fig. 2. pH and steel corrosion²⁾

않고 또 시멘트 含量이 不足할 때 등), 大氣中の CO_2 로 인한 中性化, 또는 pH값은 充分하여도 不動態膜을 파괴할 수 있는 水溶性鹽(例 : 鹽化物, 질산염)이나 氣스(CO_2 , SO_2)와 接하게 되면, 保護膜層이 局部的으로 파괴되면서 鐵의 酸化가 進行될 수 있다. 이 때 生成되는 酸化鐵層은 鐵 自體에 比하여 그 容積이 매우 커서 철근을 덮고있는 피복층(콘크리트)을 파괴하고 이후 산화반응은 아무 妨害도 받지 않고 계속되어, 보수를 잃고 放置해 두면, 마침내 구조물 자체를 危殆롭게하기에 이른다.

콘크리트 內 氣孔水の pH값이 $11.5 \leq pH$

≤ 13.8의 범위에 있을 때 安定한 保護層役割을 하는 不動態膜(FeO)의 形成은 다음과 같은 反應을 通하여 이루어진다.



그리고 이러한 부동태막은 前述한 바와 같이 pH값의 變化 以外에도 콘크리트의 液相에 鹽素이온 등이 存在할 때도 파괴되는데, 즉 이는 염소 이온이 鐵表面의 산소이온 및 水酸이온(OH⁻)과 可逆的으로 置換하여 不動態化 된 鐵表面을 局部的으로 活性化하기 때문이다. 그 結果 철근의 보호역할이 失効되는데, 이러한 鹽素의 作用은 電流密度-電位 關係實驗에서 쉽게 알 수 있다. 그림 3¹¹⁾을 보면, 石炭溶液의 염소이온 함량에 따라 電流密度-電位 關係가 變하며 이 때 鐵筋表面에 局部的의 孔蝕(1.1 × 10⁻² mol Cl⁻/ℓ 時)乃至全表面層 腐植(1.4 × 10⁻¹ mol Cl⁻/ℓ 時)이 始作됨을 보여준다. 그리고 A Bukowiecki⁴⁾는 그림 4

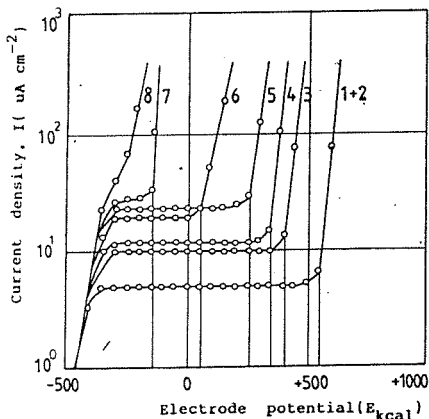


Fig. 3. Potentiodynamic current-density and potential relationship of concrete steel in Ca(OH)₂ solutions with chloride ions.

1. No Cl⁻ : steel in passive state
3. 1.1 × 10⁻² mol Cl⁻/ℓ : beginning of hole corrosion
8. 1.4 × 10⁻¹ mol Cl⁻/ℓ : beginning of planelike corrosion

에서 보는 바와 같이 갈바노腐蝕電池의 作用法으로 철근부식현상을 설명하였다. 즉 염소이온으로 因하여 局部的으로 不動態膜이 파괴되면, 이 때 露出되는 鐵은 anode가 되고 아

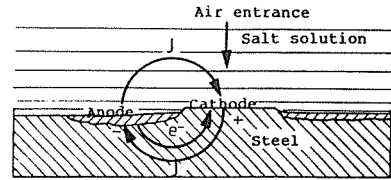
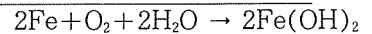
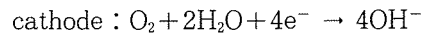
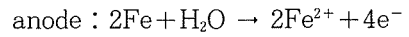


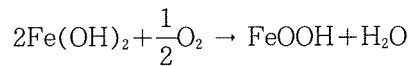
Fig. 4. Operating way of a galvanic corrosion element in the system of steel/air-bearing salt solution.
(J:galvanic current)

직 存在하는 부동태막部位는 cathode役을 하여 一種의 局部電池가 形成된다. 그리고 各電極에서는 다음과 같은 反應이 일어난다 :



(anode에서 생기는 電子는 물 媒質에 함유된 산소와 반응함)

그리고 이 水酸化鐵은 酸素와 다시 反應하여 느슨한 組織을 가지면서 金屬 鐵表面에 거의 密着치 않는 二次침전물(FeOOH, 녹)을 形成한다 :



염소이온은 이와 같이 充分히 強한 알칼리性 媒質에서도 철근을 부식시키는 作用을 誘發하는데, 결국 문제는 철근 부식 때문에 우려해야 할 콘크리트 內鹽化物의 最大含有量이다. 其實學者들 사이에 아직 許容可能한 鹽化物量에 對한 見解가 一致하지 못한 狀況이다.

3. 有害 鹽化物의 量

3. 1 시멘트-염소 반응

알칼리 용액(例 : Ca(OH)₂ 水溶液) 自體보

다 콘크리트氣孔水가 더 많은 鹽化物最大許容量을 收容할 수 있는데, (表 1 參考), 이는 시멘트가 염화물과 화학적으로 반응할 수 있기 때문이다.

포틀랜드 시멘트는 대략 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \geq 4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \approx 10\%$ 의 클링커礦物을 함유하고 있으며, 이들은 염소이온과 반응하여 安定한 Friedel鹽($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) - 또는 $3\text{CaO}(\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3) \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ - 을 形成한다. 또 不安定한 3염화물($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaCl}_2 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$)이 生成될 수도 있으며, CSH相 約 0.1%까지 염화물을 結合할 수 있다⁵⁾.

그리고 加熱(40~80°C) 처리 時는 석고 存在下에 Ettringite에 우선하여 Friedel염이 만들어진다. 일반적으로 加熱養生을 하였을 경우 염소이온의 固定化가 촉진되어 普通 시멘트에서보다 훨씬 많은 염소량이 無害한 狀態로 된다고 알려져 있다⁵⁾.

이러한 시멘트-염화물 사이의 反應으로 因하여, 그림 5 및 그림 6에서 보는 것처럼 시멘트에 첨가한 염화물량이 增加하면 시멘트에 依해 結合된 염화물량도 增加한다. 그림 6은

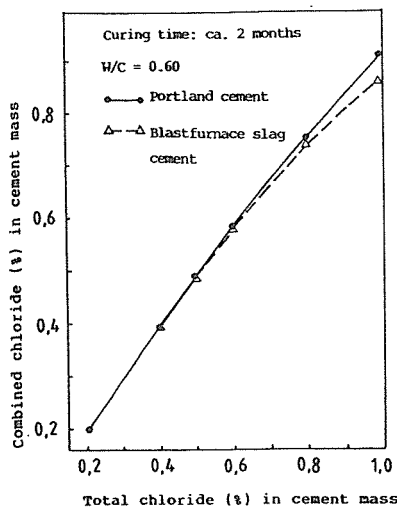


Fig. 5. Combined chloride as a function of the total chloride content.

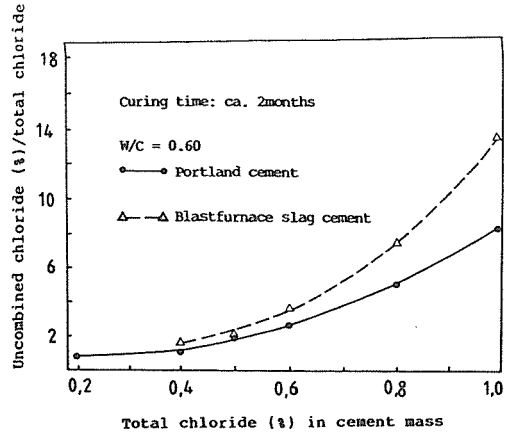


Fig. 6. Uncombined chloride(as a percentage of the total chloride) plotted against the total chloride content.

염화물 첨가량에 따라 시멘트경화체 氣孔水에 未反應狀態로 存在하는 自由염화물량도 增加함을 보여준다. 그리고 시멘트와 反應하여 安定한 複合鹽을 形成한 이 염화물은 철근부식을 惹起치 못하기 때문에, 시멘트의 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 / 4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量이 클수록 콘크리트의 염화물침식에 대한 低抗性은 커진다(이 이유에서 슬래그 함량이 많은 高秩슬래그시멘트를 특별한 철근콘크리트제조에 使用치 못하도록 규정한다).

Schwiete等⁶⁾이 에타놀로 Cl^- 溶出量을 실험한 결과에 依하면, 포틀랜드시멘트(10% $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, W/C=0.50, 양생기간 200日)는 1% Cl^- 을 첨가했을 때 全염화물량의 96%~97%까지를 그리고 2% Cl^- 첨가 時는 約 95%까지를 化學的으로 結合하고, 全염화물 첨가量 中 다만 3~5%만이 氣孔水에 溶解되어 存在한다. 또 Richartz는 시멘트硬化體가 염화물을 0.4% Cl^- /시멘트量까지 固定化할 수 있음을 보였다. 즉, 시멘트에 첨가한 염화물의 量이 0.4%일 때 氣孔水에는 150mg Cl^- / ℓ 의 염화물이 自由 Cl^- 로 存在하며 이 自由 염화물은 石炭蝕和溶液中에서 Friedel鹽과 安定한 平衡狀態에 놓인다. 그리고 이러한 根據에서 以後 시멘트量의 最大 0.4%까지라

표 1. 시멘트 경화체 및 알카리 용액에서 철근 부식이 일어나지 않기 위한 각 매질내 최대 염화물 함량

	시멘트 경화체		알카리 용액		지 자 (참고문헌)
	염화물 량 ¹⁾ (% Cl ⁻ /시멘트)	비 고	염화물 량 ¹⁾ (mg Cl ⁻ /l)	용 액	
1	2.0	장기간 습식 양생	22	수산 칼슘 포화용액	Bäumel et al. ¹²⁾
2	—	—	400	수산 칼슘 포화용액	Polster et al. ¹³⁾
3	—	—	373	0.1 N KOH	Rechberger ¹⁴⁾
4	0.91	7주간 양생 10 ~12% C ₃ A	—	—	Rechberger ¹⁵⁾
5	0.4	150mg Cl ⁻ /l 기공수 ²⁾	—	—	Richartz ⁷⁾

1) $(Cl^-) = 0.63 \cdot (CaCl_2)$

2) 0.4% Cl⁻/시멘트의 염화물 첨가에 상당.

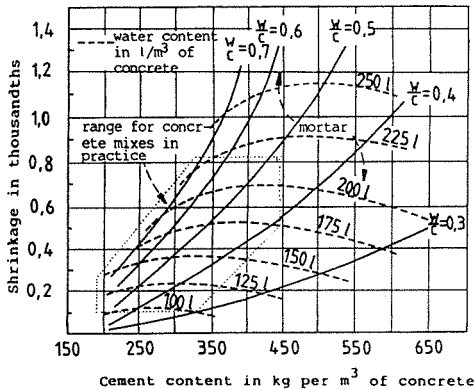


Fig. 7. Shrinkage of mortar and concrete as a function of cement content and w/c ratio.

는 이 “Cl⁻량 規制値”가 一般的으로 受容되기에 이르렀다.

3. 2 有害鹽化物의 量

철근부식을 安全하게 避할 수 있는 염화물 含量의 최대치에 대한 몇몇 研究者의 實驗結果를 表1에 提示하였다.

이 外에도 많은 研究⁸⁾⁹⁾¹⁹⁾에 依하면 실제 철근부식은 염화물량이 1~2% CaCl₂(0.6~1.3% Cl⁻/시멘트)에 이를 때 비로소 豫期할 수 있다.

表 1(及 文獻 8~10)에서 우선 研究者들에 따라 시멘트硬化體 內 철근부식을 惹起하는 염

화물량이 各各 크게 差를 볼 수 있다. 그리고 순수 알카리용액과 시멘트硬化體 경우의 有害 염화물량이 서로 다르다. 시멘트硬化體(氣孔水)에서는 150mg Cl⁻/ℓ (Richartz) 以上인 反面에 알카리용액의 경우는 많은 報文에서 約 350mg Cl⁻/ℓ 로 記述하고 있다.

또 철근 부식현상은 염분함량이 같은 條件이더라도 경우에 따라, 즉 콘크리트의 水密性(diffusivity) 또는 물/시멘트 比(W/C<0.65)²⁾, 시멘트種類, 단위 콘크리트量 當 시멘트量 等等에 따라 달라질 수 있다. 한 例로, 單位(m³) 콘크리트量 當 시멘트量은 그림 7에서 보는 것처럼 매우 다를 수 있는데(200~500kg 시멘트/m³ 콘크리트), 이 시멘트量만을 比較한다면 콘크리트 內 安定염화물量은 2倍 以上 差異를 나타낼 수 있다.

그러나 이러한 意見의 不一致와 條件의 多樣性에도 不拘하고 現在 有效한 規定에 따라, 콘크리트의 各 成分(시멘트, 물, 골재, 콘크리트用 화학혼화제) 및 콘크리트 自體 內에 含有될 수 있는 可溶性염화물의 安定許容量을 比較的으로 提示하면 表 2에 나타낸 바와 같다.

끝으로 철근부식은 철근化學, 組成에 따라 서로 크게 左右된다. 니켈이나 크롬으로 合金을 만들 경우 부식성향은 크게 改善될 수 있다. 그림 8에 化學組成에 따른 鋼材腐蝕性的 變化關係를 圖示하였다. 勿論 合金의 경우 鋼

<表 2> 수용성 염화물 함유 허용량

재 료	Cl ⁻ 량(wt. %)	주 (참고문헌)
시멘트	0.10	DIN 1164, Locher ³⁾
	규정 없음	KS L 5120
	0.05	Schulze ¹¹⁾
잔골재(모래)	0.04	KS F 4009
	0.02	Locher ³⁾
	0.03	Schulze ¹¹⁾
물	150ppm 이하	KS F 4009
	0.03(=300mg/1몰)	Locher ³⁾
	0.05	Schulze ³⁾
혼화제	첨가금지	DIN 1045
	제한 규정 없음	KS F 2560
콘크리트	0.4%/시멘트 ¹⁾	Locher ³⁾ , DIN
	0.30kg/m ³ 콘크리트 ²⁾	KS F 4009
	0.05%/시멘트	Schulze ¹¹⁾

1) 프리텐션 경우는 0.2% Cl⁻/시멘트.

2) (%/시멘트)≃7·(콘크리트), 단 “중량”단위 당.

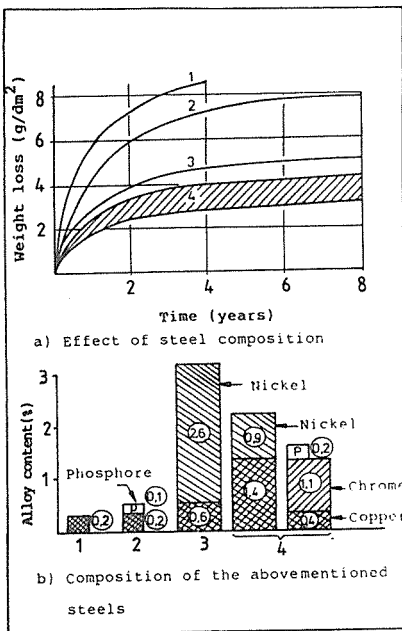


Fig. 8. Steel corrosion.

材의 強度 및 기타 重要한 物性에 變化가 생길 수 있다.

4. 맺는말

염화물이 레미콘에 문제되는 것은 염소이온

에 의한 철근콘크리트의 철근부식 때문이다. 그리고 이 염해가 문제되지 않는다면, 염화물(특히 염화칼슘)은 오히려 早強이나 結水防止 등의 作用을 爲하여 2%까지 그 使用이 오히려 先好되는 상황이다. 海砂 及 海水를 레미콘 製造에 活用하는 문제와 關連하여 다음 事項을 特記할 수 있다.

1. 점차 稀貴해가는 天然 골재를 節約하기 爲해서라도 無筋의 一般콘크리트(블록, 各種 벽돌·石, 관, 도로포장 等)에는 일 부러 海砂使用을 권장함이 바람직하다. 海岸地方에서는 海水使用도 같은 意味에서 無妨하다(그러나 參考로, 無筋콘크리트라 하더라도 -황산염 또는 알카리侵蝕 等과 類似한 -클로르侵蝕이 매우 多量의 염화물 첨가時 일어날 수 있다).
2. 철근콘크리트를 위해서는, 含有許容量에 對한 研究者들의 見解가 一致하지 않으나, 0.4% Cl⁻/시멘트 值로 制限함이 安定性的 이유에서 바람직하다.

그리고 콘크리트의 시멘트함량이 경우에 따라 큰 差異(200~500kg 시멘트/m³콘크리트)를 나타내므로, 염화물許容基準値를 콘크리트보다 콘크리트內의 量으로 定함이 合理的이다.

또 프리텐션 경우는 염화물을 最大 0.2 %Cl⁻/시멘트로 規制함이 亦是 安定性的 이유에서 必要하다.

3. 海砂(또는 海水)는 鐵筋콘크리트 경우라도 總鹽化物量이 0.4% Cl⁻/시멘트를 초과치 않는 限 시멘트 自體, 혼합水 及 콘크리트用 混和劑가 各各 含有하고 있는 염화물량을 考慮하여, 0.04% 以上 염화물을 含有한 海砂일지라도 使用할 수 있다.

5. 參考文獻

1. 최재진, “콘크리트용 골재로서 해사의 특성에 관한 고찰”, 레미콘, 32호, 49- (1992/6)
2. 최상훈, “콘크리트 구조물의 염해”, 시멘트, 103집, 22-(1986/6)
3. F.W. Locher und S. Sprung, “Einwirkung von salzsäurehaltigen PVC-Brandgasen auf Beton”, beton 20, 63-u. 99-(1970)
4. A. Bukowiecki, Schweiz. Bauztg. 86, 856-(1968)
5. F. Keil, “Zement”, Springer-Verlag Berlin · Heidelberg · New York, 1971
6. J. Tritthart, “Bewhrungskorrosin-zur Frage des Chlorid-bindevermögens von Zement”, Zement-Kalk-Gips 37, 200-(1984)
H. E. Schwiete, U. Ludwig und J. Albeck, “Bindung von Calciumchlorid und der Calciumsulphat bei der Hydratation der aluminatisch-ferritischen Klinkerbestandteile”, Zement-Kalk-Gips 22, 225-(1969)
7. W. Richartz, “Die Bindung von Chlorid bei der Zenenterhärtung”, Zement-Kalk-Gips 22, 447-(1969)
8. A. Bäuml, “Die Auswirkung von Kalziumchlorid auf das Korrosionsverhalten von Stahl im Beton”, beton 10, 256-(1960)
9. J. Tomek und F. Vavrin, “Zur Frage der Stahlkorrosin im Beton durch Calciumchlorid”, Zement-Kalk-Gips 14, 108-(1961)
10. C.A. Lobry de Bruyn und E.M. Thessing, “Elektrochemische Untersuchungsmethoden zur Frage der Betonstahlkorrosion durch Chlorid”, Zement-Kalk-Gips 15, 71-(1962)
11. W. Schulze, “Der Baustoff Beton, Bd. 1”, VEB Verlag für Bauwesen Berlin, 1984
12. A. Bäuml und H.J. Engell, “Korrosion von Stahl im Beton”, Archiv für Eisenhüttenwesen 7, 417-(1959)
13. H. Polster und J. Keucher, “Untersuchungen über die Wirkung von Chlorid auf die Korrosion von Spannstählen im zementgebundenen Beton”, Baustoffindustrie 1, 4-(1974)
14. P. Rechberger, “Grundsätzliche Untersuchungen an Stahl in alkalisch-wässriger Lösung bei Gegenwart von Chloriden als Model für das Verhalten von Stahleinlagen im Beton unter Chlorideinwirkung”, Berichte des Forschungsinstituts des Vereins der Österr. Zementfabrikanten(1980)
15. P. Rechberger, “Elektrochemische Prüfungen von Betonelektroden hinsichtlich der Chlorideinbindung im Zementstein”, Bericht(p10)des Forschungsinstituts des Vereins der Österr. Zementfabrikanten (1982)