

콘크리트用 碎石骨材의 化學反應性 研究

李 章 和

(한국건설기술연구원 수석 연구원)

金 成 旭

(한국건설기술연구원 연구원)

1. 서 론

1940年 T.E. Stanton에 의해서 알칼리-骨材 反應이 최초로 보고된 이후 美國을 비롯하여 유럽과 일본 등지에서 알칼리-骨材 反應에 의한 콘크리트 構造物의 劣化損傷이 꾸준히 발견되었다. 國內에서도 알칼리-骨材 反應과 乾燥收縮, 凍結融解 作用의 複合的인 要因으로 추측되는 大田 근교의 콘크리트 構造物의 劣化損傷이 報告된 바 있다.¹⁾

最近 多目的Dam 建設로 水理施設이 整備되고, 河川 維持管理, 上水源 및 絶對農地 確保, 開發制限 등으로 인하여 河川骨材採取가 困難해지고 大部分의 賦存量을 開發·利用하므로써 良質의 河川骨材는 점차 枯渴狀態에 直面해 가고 있다. 이에 따라서 우리나라에서는 碎石骨材가 物理的인 所要品質에 대해서만 考慮되고 化學反應性 問題는 檢討되지 않은 채로 콘크리트 骨材로서 使用이 보편화되어 있는 실정이다.

대부분의 自然産 河川骨材는 수많은 세월동안 물과 태양 및 대기에 직접 露出되어 骨材內部の 不安定한 鑛物이나 化學的反應을 일으키는 物質 등이 대부분 鎔解되어 比較的 骨材自體가 安

定된 상태가 된다. 반면에 물과 태양 및 대기에 직접 露出되지 않고 깊숙히 埋藏되어 있는 岩石을 粉碎한 碎石骨材는 相對的으로 化學反應에 影響을 미칠수 있는 物質들이 함유될 可能性이 높으며 지금까지 발생한 알칼리-骨材 反應에 의한 콘크리트 構造物의 被害事例는 주로 不安定한 鑛物質을 포함한 碎石骨材를 사용한 경우이다.

본 研究에서는 國內에서 콘크리트용 骨材를 실제로 生産하는 238곳 중에서 63곳의 碎石骨材를 採取하여 化學的, 鑛物學的, Mortar-Bar 分析試驗을 수행하여 骨材의 有害 可能性을 分析하였다.

2. 골재화학반응

骨材속에 포함된 反應性 鑛物이 시멘트 硬化體의 空隙中 알칼리, 물과 反應하여 콘크리트 硬化體가 膨脹되어 龜裂이나 脫落(Pop out)이 發生하는 現象이다.

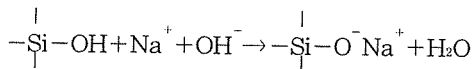
2. 1 알칼리-실리카 反應

(alkali-silica reaction)

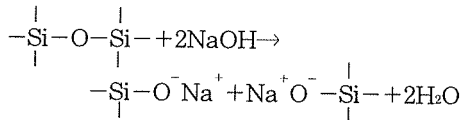
콘크리트 중에 존재하는 알칼리 이온, 수산기

이온이 骨材中에 포함되어 있는 非結晶質 실리카, 혹은 熱力學的으로 不安定한 狀態의 실리카 사이에 발생하는 대표적인 骨材의 化學反應이다.

이 반응은 시멘트의 알칼리(Na₂O와 K₂O)에서 파생된 알칼리 水化合物에 의해 骨材의 硅素 鑛物質이 反應하는 過程에서 알칼리-실리카 겔이 형성되고 겔이 수분을 계속 吸水함으로써 體積膨脹을 일으켜 콘크리트에 균열이 발생된다. 알칼리-실리카 반응식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.



수산화나트륨의 濃度가 충분히 높을 경우는 다음 反應으로 진행된다.



2.2 시멘트-骨材 反應

(cement-aggregate reaction)

콘크리트에 低알칼리 시멘트를 사용한 경우에도 化學反應이 일어나는 特殊地域(미국 Kansas, Nebraska 등)의 특수한 알칼리-실리카 反應으로서 심한 乾燥와 水分移動으로 인해 콘크리트의 局部領域으로 알칼리를 집중시킴에 따라 발생하며 일종의 알칼리-실리카 反應이다. 長期間에 걸쳐 反應이 서서히 발생하고 생성되는 겔의 양도 적은 특징을 갖고 있으며 천연 骨材에서도 발생할 수 있는 점이 알칼리-실리카 反應과 다르다.

2.3 알칼리-炭酸鹽 反應

(alkali-carbonate reaction)

1955年 Canada Ontario 州의 Kingston에서 발생하여 1975年 Swenson에 의해 처음 보고된 것으로서 粘土質의 돌로마이트 石灰石과 시멘트 알칼리 사이의 有害한 反應이며 시멘트

〈표 1〉 알칼리-골재반응에 관한 試驗方法的의 比較³⁾

| NO | 시 험 명 | 시 험 및 판 정 방 법 |
|----|---|---|
| 1 | ASTM C 289 (화학법) | 골재시료와 NaOH를 반응시켜서 알칼리 감소량(Rc), 용해 실리카량(Sc)를 구하여 판정 |
| 2 | ASTM C 227 (Mortar-Bar법) | 공시체를 온도 37.8℃, 상대습도 100%에서 3개월, 6개월 경과후 팽창량으로 판정 |
| 3 | ASTM C 227 (광물학적 방법) | 편광현미경, 분말 X선회절시험, 적외선 분석, E.P.M.A 시험 등을 통해서 암석이 유해광물질을 포함하는지 여부 판정 |
| 4 | 콘크리트 Prism법 (CSA CNA 3A 23·1-M77) | 23℃±3℃, 상대습도 100%에서 습윤 3개월 팽창: 0.02%, 건조 3개월: 0.04%, 재령무관: 0.03%이상일 때 유해 판정 |
| 5 | 독일법 | 4mm이하: 4% NaOH 용액시험 4mm이상: 암석학적 방법 opal 사암: 10% NaOH 용액시험을 실시하고 참고표로 판정 |
| 6 | Gel Pad법 | W/C=0.4인 시멘트 풀 중에 골재를 넣고 Ca(OH) ₂ 포화용액+0.5N NaOH+0.5N KOH의 용액에 침적 gel의 형상을 보고 판정 |
| 7 | Gratten-Bellew법 | 38℃ 수중에 길이가 일정할 때까지 담근 후 38℃ 2N NaOH용액 중에 침적, 팽창량 측정 |
| 8 | 중국 Autoclave법 | 100℃ 4시간 증기양생 후 6시간 10% KOH 용액속에 침적 시킨 다음 150℃ autoclave 양생후 팽창량 측정 |
| 9 | 덴마크법 | 28일까지 수증양생 후 50℃ NaCl 포화용액에 침적, 20℃에서 팽창 측정 |

가 水化될 때 발생하는 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 대기중의 이산화탄소가 反應해서 탄산칼슘을 形成한다. 또한 炭酸鹽과 알칼리가 反應하거나 또는 岩石中の 粘土鑛物이 수분을 吸水, 膨脹하여 콘크리트에 균열을 일으킨다.

실리카 質의 生成物이 없고 반응고리를 가진 骨材粒子가 적은 점이 알칼리-실리카 反應과 구분된다. 알칼리-炭酸鹽 反應式의 일례를 다음과 같이 나타낼 수 있다.



여기서, M은 K, Na 혹은 Li

2. 4 알칼리-silicate 反應 (alkali-silicate reaction)

Canada의 Nova Scotia 지방의 greywackes, argillites, phyllites 등의 骨材를 使用한 콘크리트에서 비교적 장기간에 걸쳐 反應이 進行되며, 생성질의 양도 적다. 정확하지는 않지만 岩石中の 層狀構造인 Vermiculite가 알칼리와 수분의 存在하에 膨脹하는 것이 그 원인으로 알려져 있다.

2. 5 骨材化學反應 試驗方法

지금까지 骨材의 化學反應, 특히 주를 이루는 알칼리-실리카 反應에 대한 試驗方法은 ASTM C 289(化學法), ASTM C 295(鑛物學的方法), ASTM C 227(Mortar-Bar 法)의 3가지 試驗法이 가장 많이 적용되고 있으며 이들을 종합하여 알칼리-실리카 反應性 與否를 判定하는 것이 일반적이다. JIS A 5308 附屬書 7의 化學的 試驗方法은 ASTM C 289와 비슷하나 判定基準에서 차이를 나타낸다.

〈표 1〉은 각국의 알칼리-骨材 反應性에 대한 試驗規定을 나타낸 것이다.

3. 알칼리 및 반응성 광물

3. 1 알칼리²⁾

알칼리 骨材反應에 직접 관계하는 콘크리트 중의 알칼리는 細孔溶液 중의 알칼리로 판단되고 있다. 콘크리트 細孔溶液 중의 알칼리로는 시멘트, 骨材, 鑛物質混和材, 化學混和劑와 같이 콘크리트용 材料로부터 內部的으로 공급되는 것과 콘크리트 構造物이 완성된 후 海砂와 제설염 등과 接觸하여 外部的으로 공급되는 것도 있다. 이 중에서 콘크리트 알칼리 成分의 대부분은 시멘트 原料用 粘土에 포함된 알칼리 含有鑛物인 正長石($\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$)과 曹長石($\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$)으로부터 도입된다.

알칼리 化合物은 물에 쉽게 녹는 황산알칼리(Na_2SO_4 , K_2SO_4)와 물에 쉽게 녹지 않는 固溶의 鑛物 狀態로 存在하며 시멘트 내의 主 알칼리량 보다는 活性 알칼리량이 骨材와의 反應性

〈표 2〉 ASTM C 295의 反應性 鑛物·岩石(미국)⁴⁾

| 反應區分 | 反應性 鑛物·岩石 |
|-----------|--|
| 알칼리-실리카反應 | <ul style="list-style-type: none"> • Opal • Cristobalite • Tridymite • Siliceous and some intermediate Volcanic glass • Chert • Glassy to cryptocrystalline acid Volcanic rocks • Synthetic Siliceous glasses • Some argillites • Metamorphic greywackes • Rocks containing highly metamorphic quartz such as greywackes • Phyllites • Schists • Gneisses • Gneissic granites • Vein quartz • Quartzite • Sandstone |
| 알칼리-炭酸鹽反應 | <ul style="list-style-type: none"> • Calcareous dolomites or dolomitic limestones with clayed insoluble residues |

〈표 3〉 콘크리트내에서 化學反應하는 岩石(日本)⁵⁾

| 反應의 種類 | | 反應性物質 | 反應性 鑛物을 포함한 岩石 |
|------------------------------------|-------------------------|---|---|
| 시멘트 또는 시멘트 成分과 의 反應 | 알칼리-骨 材 反應 | Glass | 安山岩, 玄武岩, 流紋岩, 墨曜石, Perlite, 凝灰岩 等 |
| | | Cristobalite | 安山岩, 玄武岩, 流紋岩, 凝灰岩 等 |
| | | Tridymite | |
| | | 微小石英 | 粘板岩, 頁岩, 流紋岩, 砂岩 等 |
| | | 微小雲母 | Hornfelse, 片岩, 仟枚岩, 粘板岩, 頁岩, 砂岩, 等 |
| | 坡動消光石英 | 片麻岩, 片岩, Chert, 花崗岩, 閃綠岩 等 | |
| | 알칼리-骨 材反應 이의 의 反應 | Laumontite | 安山岩, 流紋岩, 玄武岩, 凝灰岩, 閃綠岩, 砂岩, 粘板 岩, 頁岩, 角閃石, 片岩 等 |
| | Montmorillonite | 玄武岩, 安山岩, 流紋岩, 凝灰岩, 砂岩, 粘板岩, 頁岩 | |
| Ca(OH) ₂ 存在하에 分解反應 | 黃鐵鑛 | 砂岩, 粘板岩, 頁岩, 安山岩, 玄武岩, 流紋岩, 片岩, 閃綠岩, Hornfelse 等 | |
| 물과 反應하는 것 | MgO | 蛇紋岩, 돌로마이트질, 石灰岩 | |

에 더욱 밀접한 관계를 가진다. 일반적으로 시멘트 등의 알칼리량은 Na와 K를 합한 “等價 Na₂O量”으로 표시한다.

3. 2 反應性 鑛物 및 岩石

콘크리트내에서 有害한 化學反應을 일으키는 岩石과 이를 構成하고 있는 鑛物은 대단히 多種多樣하며 이러한 反應性 岩石·鑛物이 콘크리트내에서 有害한 反應을 일으키는지의 여부는 여러가지 影響要因에 따라 결정된다. 콘크리트내에서 有害한 化學反應을 일으키는 反應性 鑛物에 대해 미국과 일본에서 分類하고 있는 것을 요약 정리하면 〈표 2〉 및 〈표 3〉과 같다.

〈표 2〉와 〈표 3〉에 나타나 있는 岩石들은 反應性 鑛物을 포함할 可能性이 높은 것을 의미하며 이 反應性 鑛物의 특징은 모두 微粒이거나 微粒鑛物로 構成된 岩石이라는 점이다. 알칼리-골재반응을 일으키는 대표적인 鑛物은 실리카(SiO₂)로서 大氣條件下에서는 극히 안정된 물질이지만 pH가 높은 強알칼리 條件하에서는 어떤 형태의 結晶形이나 相(Phase)의 形態를 가지며 알칼리 金屬과 反應하여 알칼리-silicate

겔을 形成한다. 실제로 상온의 대기압에서 존재하는 실리카相(Phase)은 石英, Tridymite, Cristobalite 및 非晶質 실리카의 4종이다. 이중 상온 대기압에서 안정된 상태는 石英 뿐이고 다른 3가지는 모두 불안정한 상태로서 상온 대기압에서 刺戟이 가해지면 化學反應을 일으키는 潛在力을 가지고 있다. 또한 안정된 것으로 보이는 石英의 結晶도 潛晶質, 隱微晶質, 微晶質로 불리는 형태로 있는 경우에는 反應性을 나타내며 또한 結晶格子가 높은 應力하에서 변형된 상태에 놓이면 反應을 나타내는 것으로 알려져 있다. 알칼리-실리카 反應을 일으키는 反應性 骨材란 이러한 反應性 실리카 鑛物 1種 이상을 함유한 것을 지칭한다고 할 수 있다.

4. 시험 및 결과 분석

4. 1 試料採取

우리나라에서는 콘크리트용 骨材를 생산하는 570여 곳의 石山 중 실제 碎石骨材를 생산하는 곳은 1992년말 현재 238곳이다. 그 중에서 63 곳의 試料採取源을 大韓地質圖(한국동력자원연



〈그림 1〉 試料骨材 採取源

구소 1981년 발행)에 根據하여 岩石의 種類가 多樣하게 分포되도록 선정하여 試料를 직접 현장 채취하였다.

〈그림 1〉은 骨材採取源을 대략 圖式化 한 것이다.

4. 2 化學的 試驗(ASTM C 289)⁶⁾

4. 2. 1 試驗過程

(1) 試料加工

시료골재들을 소형 crusher로 粉碎한 후 No.50(0.3mm)체를 通過하고 No.100(0.15mm)體에 남는 試料의 微分을 없애기 위하여 물洗滌을 하고 다시 체가름하여 입도 調整이 완료된 試料를 準備하였다.

(2) 反應過程

준비된 試料 25g을 1N NaOH에서 24시간 反應시킨 다음 冷却, 濾過過程을 거친 후 NaOH 용액에 湧出된 鎔解 실리카량을 측정할 수 있다

록 20배 희석시켜서 용기에 담아 보관한다.

(3) 檢定曲線

化學法에서 鎔解 실리카량을 측정하는 방법은 比重計法과 光度測定法이 있는데 본 試驗에서는 分光光度計(UV-Visible Recording Spectro Photometer)를 利用한 光度測定法을 적용하였다.

光度測定法에서는 먼저 실리카 標準溶液을 이용하여 실리카 濃縮度와 빛의 傳達度를 나타내는 檢定曲線 및 適用式을 구하여야 한다. 본 試驗에서 구한 실리카 濃縮度(C)式은 다음과 같다.

$$C=40.287 \times ABS+0.0181(\text{ppm})$$

$$=0.0167 \times (40.287 \times ABS+0.0181)(\text{mmol/l})$$

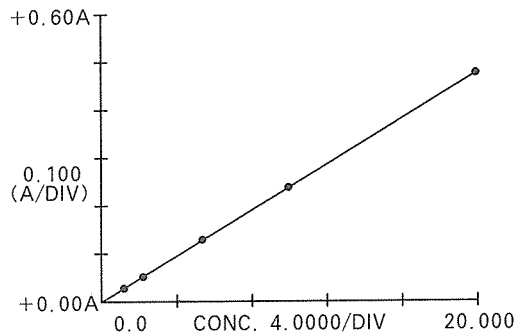
여기서, ABS=빛의 흡수량

〈그림 2〉는 본 試驗에서 구한 실리카 濃縮度와 빛의 傳達度를 나타내는 檢定曲線이다.

$$\text{Working curve } C = K * ABS+B$$

$$K = 40.287$$

$$B = 0.0181$$



〈그림 2〉 檢定曲線

(4) 鎔解 실리카량(Sc), 알칼리度 減少量(Rc) Ammonium Molybdate로 發色시킨 試料 稀釋溶液을 波長 410NM의 狀態에서 빛의 傳達度를 읽은 다음 檢定曲線에 의한 C값을 計算하여 아래의 計算式에 의하여 용해실리카량을 구하고 페닐프탈레인 指示溶液을 稀釋溶液에 投入

〈표 4〉 Sc와 Rc 試驗結果值

| 一連番號 | 溶解 silica量 (Sc) (mmol/l) | Alkali度 減少量(Rc) (mmol/l) |
|------------|--------------------------------|--------------------------------|
| * 京畿 地域(8) | | |
| SK-1 | 16.08 | 118.1 |
| SK-2 | 18.27 | 10.5 |
| SK-3 | 28.82 | 238.5 |
| SK-4 | 12.25 | 76.5 |
| SK-5 | 23.62 | 90.4 |
| SK-6 | 19.87 | 83.4 |
| SK-7 | 18.88 | 134.4 |
| SK-8 | 10.01 | 97.3 |
| * 江原 地域(8) | | |
| KW-1 | 2.14 | 210.9 |
| KW-2 | 10.62 | 48.7 |
| KW-3 | 16.10 | 86.9 |
| KW-4 | 17.07 | 85.7 |
| KW-5 | 0.38 | 420.0 |
| KW-6 | 12.88 | 140.0 |
| * 忠北 地域(9) | | |
| CN-1 | 11.98 | 250.2 |
| CN-2 | 32.01 | 66.0 |
| CN-3 | 16.71 | 246.8 |
| CN-4 | 38.37 | 27.8 |
| CN-5 | 26.11 | 66.0 |
| CN-6 | 10.76 | 38.3 |
| CN-7 | 10.53 | 154.9 |
| CN-8 | 20.48 | 95.5 |
| CN-9 | 22.80 | 10.5 |
| * 忠南 地域(9) | | |
| CS-1 | 17.70 | 250.3 |
| CS-2 | 20.37 | 65.0 |
| CS-3 | 37.92 | 170.3 |
| CS-4 | 22.06 | 130.0 |
| CS-5 | 17.57 | 128.6 |
| CS-6 | 28.35 | 114.7 |
| CS-7 | 15.29 | 27.8 |
| CS-8 | 22.13 | 55.6 |

| 一連番號 | 溶解 silica量 (Sc) (mmol/l) | Alkali度 減少量(Rc) (mmol/l) |
|---------------|--------------------------------|--------------------------------|
| CS-9 | 41.55 | 150.0 |
| CS-10 | 21.99 | 83.5 |
| CS-11 | 14.48 | 137.5 |
| CS-12 | 23.82 | 86.9 |
| CS-13 | 7.78 | 132.1 |
| CS-14 | 19.19 | 69.5 |
| * 慶北 地域(10) | | |
| KN-1 | 25.51 | 146.0 |
| KN-2 | 21.86 | 232.9 |
| KN-3 | 21.77 | 141.3 |
| KN-4 | 22.03 | 69.6 |
| KN-5 | 26.09 | 229.4 |
| KN-6 | 24.43 | 250.2 |
| KN-7 | 30.38 | 215.5 |
| KN-8 | 23.66 | 86.9 |
| KN-9 | 19.05 | 201.6 |
| KN-10 | 28.29 | 205.1 |
| * 慶南 地域(10) | | |
| KS-1 | 41.25 | 102.0 |
| KS-2 | 25.55 | 192.3 |
| KS-3 | 32.59 | 83.4 |
| KS-4 | 44.28 | 66.0 |
| KS-5 | 47.75 | 238.3 |
| KS-6 | 32.23 | 127.4 |
| KS-7 | 25.28 | 276.6 |
| KS-8 | 19.78 | 128.5 |
| KS-9 | 20.32 | 171.5 |
| KS-10 | 19.78 | 267.6 |
| * 全南·全北 地域(6) | | |
| JL-1 | 21.90 | 48.7 |
| JL-2 | 17.59 | 92.5 |
| JL-3 | 33.36 | 225.0 |
| JL-4 | 28.53 | 131.7 |
| JL-5 | 62.33 | 242.5 |
| JL-6 | 41.83 | 115.0 |

한 다음 適正시켜서 아래 計算式으로 알칼리度 減少量을 計算한다.

$$Sc = 20 \times (100/V) \times C$$

여기서, Sc=SiO₂의 濃縮度

(최초의 濾過液 11당 mmol)
C=光度計로 측정한 용액의 실리카 濃縮度(mmol/l)
V=사용된 稀釋溶液의 容積(10ml)

$$Rc = (20N/V_1) \times (V_3 - V_2) \times 1000$$

여기서, Rc=알칼리도 減少量(mmol/l)

N=滴定에 사용된 鹽酸(HCl)의 濃度 (=0.05N)

V₁=사용된 稀釋溶液의 容積(=20ml)

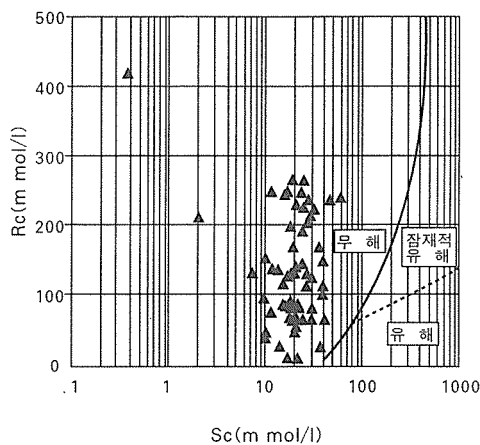
V₂=試料 稀釋溶液의 페놀프탈레인 終末粘을 얻는데 사용된 鹽酸의 容積 (ml)

V₃=NaOH 空試料의 페놀프탈레인 終末粘을 얻는데 사용된 鹽酸의 容積(ml)

4. 2. 2 試驗結果 및 分析

各 試料의 Sc와 Rc에 대한 試驗結果는 <표 4>와 같다.

試驗結果의 Sc와 Rc의 값을 ASTM C 289의 有害性 判定 基準圖表와 비교하여 볼 때(그림 3 참조) 대부분의 試驗骨材가 化學的으로 알칼리-骨材 反應에 대해 안정한 것으로 나타났으며 1989년에 개정된 JIS A 5308 附屬書 7의 '骨材의 알칼리 骨材反應 試驗方法(化學法)'의 基準(Sc ≥ 10 mmol이고, Rc < 700 mmol일 때 Rc ≤ Sc이면 有害)에 따르면 試驗骨材 중 忠北 中原郡 利柳面(CN-4), 忠北 忠州市 木行洞(CN-9), 京畿道 江華郡 佛恩面(SK-2)의 3곳의 骨材가 有害可能性이 있는 것으로 나타났다.



<그림 3> Sc와 Rc값에 따른 有害性 判定度

<그림 3>은 전체 試料의 Sc와 Rc값을 有害性 判定基準 圖表에 plotting한 것이다.

4. 3 鑛物學的 試驗⁴⁾ (ASTM C 295)

4. 3. 1 試驗課程

分析對象 骨材가 모두 碎石骨材이며 대부분 1

<표 5> 試料骨材의 岩石名

| 一 連 番 號 | 岩 石 名 | 一 連 番 號 | 岩 石 名 | |
|----------|---------|---------|--------|-------|
| SK-1 | 花崗閃綠岩 | CS-1 | 花崗岩 | |
| 2 | 花崗閃綠岩 | 2 | 黑雲母片岩 | |
| 3 | 閃長岩 | 3 | 酸性脈岩 | |
| 4 | 鹽基性脈岩 | 4 | 花崗閃綠岩 | |
| 5 | 花崗閃綠岩 | 5 | 黑雲母片岩 | |
| 6 | 石英閃綠岩 | 6 | 花崗閃綠岩 | |
| 7 | 花崗閃綠岩 | 7 | 花崗閃綠岩 | |
| 8 | 花崗閃綠岩 | 8 | 酸性脈岩 | |
| KW-1 | 炭酸鹽脈岩 | 9 | Shale | |
| | 炭酸鹽脈岩 | 10-a | 黑雲母花崗岩 | |
| | 花崗閃綠岩 | 10-b | 砂岩 | |
| | 石英-조閃綠岩 | 11 | 花崗閃綠岩 | |
| | 炭酸鹽脈岩 | 12 | 酸性脈岩 | |
| | 花崗岩 | 13 | 石英花崗岩 | |
| CN-1 | 酸性脈岩 | 14 | 花崗閃綠岩 | |
| | 花崗閃綠岩 | JL-1 | 石英化崗岩 | |
| | 片麻岩 | | 2 | 花崗岩 |
| | 閃長岩 | | 3 | 酸性脈岩 |
| | 閃長岩 | | 4-a | 閃綠岩 |
| | 花崗閃綠岩 | | 4-b | 石英閃綠岩 |
| | 花崗閃綠岩 | | 5 | 石英閃綠岩 |
| | 花崗岩 | | 6 | 酸性脈岩 |
| | 酸性脈岩 | | KN-1 | KS-1 |
| 花崗岩 | 2 | | | 鹽基性脈岩 |
| 黑雲母花崗岩 | 3 | 花崗閃綠岩 | | |
| 花崗閃綠岩 | 4 | 石英閃綠岩 | | |
| 化崗岩 | 5 | 石英閃綠岩 | | |
| 花崗閃綠岩 | 6 | 石英花崗岩 | | |
| 石英-花崗閃綠岩 | 7 | 石英花崗閃綠岩 | | |
| 閃長岩 | 8 | 花崗閃綠岩 | | |
| 花崗岩 | 8-a | 花崗閃綠岩 | | |
| 花崗閃綠岩 | 8-b | 花崗岩 | | |
| 閃綠岩 | 9 | 花崗閃綠岩 | | |
| 10 | 閃綠岩 | 10 | 石英閃綠岩 | |

〈표 6〉 Modal 分析에 의한 構成鑛物 分布

| 試料 番號 | 石基 | 微小 雲母 | 白雲 母 | 波動 石英 | 方解 石 | 石英 | 斜長 石 | 正長 石 | 角閃 石 | 輝石 群 | 黑雲 母 | 綠泥 石 | 粘土 | 不透明 鑛物 | Spine | 磷灰 石 | 綠炎 石 | Chert | 岩片 | 合計 |
|----------|----|----------|---------|----------|---------|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----|-----------|-------|---------|---------|-------|----|-----|
| SK-1 | | 5 | | 16 | | 11 | 31 | 34 | | | 5 | | | | | | | | | 102 |
| 2 | | | 1 | | | 42 | 32 | 28 | | | 13 | | | | | | | | | 116 |
| 3 | 47 | 20 | | | | | 41 | | | | | | | 1 | | | | | | 109 |
| 4 | | | | | 1 | | 1 | 2 | 84 | | | | | 24 | | 1 | | | | 113 |
| 5a | | | | 16 | | 23 | 12 | 22 | | | 2 | | | | | | | | | 75 |
| 5b | | 6 | | 2 | | 34 | 13 | 50 | | | 8 | 1 | | | | | | | | 114 |
| 6 | | 3 | | 2 | | 22 | 52 | 3 | | | 3 | 7 | | | | | | | | 92 |
| 7 | | | | | | 37 | 39 | 27 | | | | 1 | | | | | | | | 104 |
| 8 | | 2 | | 3 | | 31 | 49 | 7 | | | | 9 | | 1 | | | | | | 102 |
| KW-1 | | | | | 100 | | | | | | | | | | | | | | | 100 |
| 2 | | | | | 100 | | | | | | | | | | | | | | | 100 |
| 3 | | 45 | | 10 | 2 | 49 | 22 | 37 | 1 | | 1 | 24 | | | | | | | | 191 |
| 4 | | 4 | 2 | | | 31 | 41 | 11 | | | 10 | 3 | | 1 | | | | | | 103 |
| 5 | | | | | 100 | | | | | | | | | | | | | | | 100 |
| 6 | | 13 | 4 | | | 36 | 15 | 51 | | | 1 | 1 | | | | | | | | 121 |
| CN-1 | | 50 | | 8 | | 30 | | | | | | 2 | | 2 | | | | | | 92 |
| 2 | 60 | | | | 1 | 13 | 5 | 10 | | | 3 | 2 | | | | | | | | 94 |
| 3 | 10 | 30 | | | | 51 | 3 | 1 | | | 4 | | | 3 | | | | | | 102 |
| 4 | | | 30 | | | 69 | | | | | | | | 1 | | | | | | 100 |
| 5 | | 1 | | 1 | | 8 | 11 | 70 | | | 2 | | | | | | | | | 93 |
| 6 | | | | | | 14 | 15 | 11 | | | 1 | 8 | | | | | | | | 49 |
| 7 | | | | | | 28 | 34 | 23 | 3 | | 16 | | | | | | | | | 105 |
| 8 | | | 1 | | | 39 | 18 | | | | 9 | | | | | | | | | 66 |
| 9 | | | 25 | | | 54 | | | | | | 20 | | 1 | | | | | | 100 |
| CS-1 | | 1 | | 22 | | 40 | 7 | 46 | | | | | | | | | | | | 116 |
| 2 | 9 | | | 81 | | 38 | 11 | | | | 8 | | | | | | | | | 109 |
| 3 | 22 | 17 | | 40 | | | | | | | | | | | | | | | 14 | 131 |
| 4 | | 3 | | 35 | | | 26 | 45 | | | 2 | 1 | | | | | | | | 112 |
| 5 | | 14 | | 40 | | | 14 | 32 | | | 5 | | | | | | | | | 105 |
| 6 | | 3 | | 38 | | | 27 | 31 | | | | 1 | | | | | | | | 100 |
| 7 | | 5 | | 7 | | 13 | 30 | 37 | | | 10 | 5 | | | | | | | | 107 |
| 8 | 26 | 17 | | 12 | | 29 | | | | | | | | 2 | | | | | 15 | 101 |
| 9 | | 12 | | | | 61 | | | | | | | 28 | | | | | | | 101 |
| 10a | | 6 | | 30 | | 13 | 28 | 31 | | | | | | | | | | | | 108 |
| 10b | 14 | 10 | | 28 | | 39 | 1 | | | | | | | 3 | | | | | 8 | 103 |
| 11 | | | | 19 | | 12 | 30 | 36 | | | 10 | | | | | | | | | 107 |
| 12 | | 31 | | | | 70 | | | | | | | | | | | | | | 101 |
| 13 | | 11 | 1 | 11 | 6 | 54 | 13 | 19 | | | | 2 | | 1 | 2 | | | | | 120 |
| 14 | | 3 | | 9 | | 32 | 25 | 30 | | | | 6 | | | | | | | | 105 |
| KN-1 | | 1 | | 24 | | 22 | 13 | 53 | | | | | | | | | | | | 113 |
| 2 | | | | 1 | | 25 | 17 | 53 | | | 1 | | | 1 | | | | | | 98 |
| 3 | | | | 11 | | 12 | 45 | 21 | | | 8 | 2 | | | | | | | | 99 |
| 4 | | 39 | 1 | 6 | | 33 | 13 | 40 | 1 | | | 9 | | | 1 | | | | | 143 |
| 5 | | 6 | 3 | 15 | 28 | 19 | 15 | 24 | | | | | | 1 | | | | 8 | | 119 |
| 6a | | 17 | 1 | 20 | 16 | 32 | 8 | 2 | | | | 4 | | | | | | 3 | | 103 |
| 6b | 65 | | 1 | 12 | | 6 | 3 | 1 | | | | | | 12 | | | 7 | | | 107 |

| 試料 番號 | 石基 | 微小 雲母 | 白雲 母 | 波動 石英 | 方解 石 | 石英 | 斜長 石 | 正長 石 | 角閃 石 | 輝石 群 | 黑雲 母 | 綠泥 石 | 粘土 | 不透明 鑛物 | Spine | 磷灰 石 | 綠炎 石 | Chert | 岩片 | 合計 |
|----------|-----|----------|---------|----------|---------|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----|-----------|-------|---------|---------|-------|----|-----|
| KN-7 | 117 | 6 | | | | | 10 | | | | 1 | | | 1 | | | | 3 | | 138 |
| 8 | | 70 | | | | 19 | 11 | 21 | 7 | | | 15 | | | | | | | | 143 |
| 9 | | 39 | 1 | | | 17 | 23 | 11 | | | | 13 | | 1 | | | 2 | 3 | | 110 |
| 10 | 105 | | 1 | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | 107 |
| KS-1 | 79 | 4 | | | | 13 | 13 | | | | | | | | | | | | | 109 |
| 2 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 100 |
| 3 | | | | 2 | | 31 | 10 | 15 | | | | | | 7 | | | | | | 65 |
| 4 | 180 | | | | | 23 | 15 | | | | | | | 2 | | | | | | 220 |
| 6 | 39 | | 2 | 21 | | 18 | 13 | 11 | | | | 3 | | 2 | | | | | | 109 |
| 7a | 40 | 3 | | 16 | | 8 | 7 | 3 | | | | 8 | | 1 | | | | 27 | | 113 |
| 7b | 117 | 6 | | | | | 10 | | | | 1 | | | 1 | | | | 3 | | 138 |
| 8a | | 43 | | 15 | 1 | | 17 | 19 | | 5 | 5 | 22 | | | 1 | | | | | 128 |
| 8b | | 1 | | 11 | | 24 | 24 | 58 | | | | 3 | | | | | | | | 121 |
| 9 | | 14 | | 14 | | 7 | 26 | 40 | | | 2 | 23 | | 3 | | | | | | 129 |
| 10 | 94 | | 1 | | | 2 | 7 | | | | 1 | | | | | | | | | 105 |
| JL-1 | 11 | | 2 | 27 | | 43 | 2 | 12 | | | 4 | 1 | | | | | | | | 102 |
| 2 | | | 1 | 10 | | 36 | 8 | 96 | | | | 16 | | | | | | | | 167 |
| 3 | | | 3 | 23 | | 85 | 4 | 6 | | | 7 | | | 9 | | | | | | 137 |
| 4a | | 19 | | | 4 | 2 | 218 | | | | | | | 2 | | | | | | 245 |
| 4b | 253 | | | | | 28 | 49 | | | | | | | | | | | 52 | | 382 |
| 5 | 360 | 55 | | | | 24 | 13 | | | | | | | | | | | | | 452 |
| 6 | 241 | | | | 14 | 12 | | | | | | | | | | | | | | 280 |

종류 또는 2종류의岩石으로 構成되어 있다. 본 試驗에서는 우선 偏光顯微鏡을 이용하여 構成鑛物을 鑑定 및 定量하였으며 동일 지역의 骨材일 지라도 構成岩石이 여러 종류이면 岩石種類 수 만큼 顯微鏡分析用 薄片을 製作하였다.

構成鑛物質의 定量은 point count법을 적용하였고 엄밀한 測定値를 구하기에 앞서 근사적인 構成比를 얻고자 하였다.

4. 3. 2 試驗結果 및 分析

偏光顯微鏡 薄片에 의한 試料骨材의 岩石名 分類는 <표 5>와 같으며 Modal 分析에 의한 構成鑛物의 分포는 <표 6>과 같다.

鑛物學的 分析結果를 要約하면 다음과 같다.

- (1) 有害鑛物로서 일본의 경우 흔히 나타나는 광물인 Tridymite와 Cristobalite는 국내에서는 잘 나타나지 않았으며 이 鑛物이 石基에 포함될 수도 있는데 이는 X-

Ray 回折分析, EPMA 分析을 통하여 深層 試驗을 해야 할 것으로 판단된다.

- (2) 일반적으로 有害하다고 볼 수 있는 鑛物 成分은 微小雲母, 白雲母, 黑雲母, 波動消光石英, 粘土 등을 들 수 있는데, 分析한 骨材試料에서 이들을 포함한 것이 상당수 있었다. 그러나 이들 成分을 함유한 骨材試料가 모두 콘크리트내에서 有害성이 있는지에 대해서는 국내의 경우 확실하지 않다.
- (3) 化學法에서 JIS基準으로 有害可能性이 있다고 여겨지는 3곳의 試料骨材는 공통적으로 白雲母를 포함한 것으로 나타났으며 지역적으로 反應性 骨材를 포함할 가능성이 많은 南部 地方의 骨材에서 石基成分이 다량 함유되어 있는 공통점이 있었다.

4. 4 Mortar-Bar 試驗 (ASTM C 227)⁷⁾

4. 4. 1 試驗過程

(1) 骨材加工

骨材는 粉碎過程을 통하여 No.4~No.100 사이의 5단계 粒度分布別로 正해진 무게 百分率로 調整하였다.

(2) 시멘트

알칼리-실리카 反應에 關連되는 시멘트 中の 성분은 主로 K_2O 와 Na_2O 의 알칼리 成分이며 本 實驗에 使用된 시멘트의 K_2O 량은 1.39%, Na_2O 량은 0.08%로써 等價알칼리량(0.658 K_2O+Na_2O)으로 換算하면 0.99%이다.

국내에서 生産되는 시멘트의 平均 等價알칼리량은 0.77%로서 試驗基準인 0.6%이상에 만족하며 最大等價알칼리량은 1.2% 미만이므로 실제 使用환경에 近接한 1.2%를 試驗 等價알칼리량으로 正했다. 1.2% 等價알칼리량을 맞추는 方法으로 0.21%에 해당하는 NaOH를 첨가하여 調整하였다.

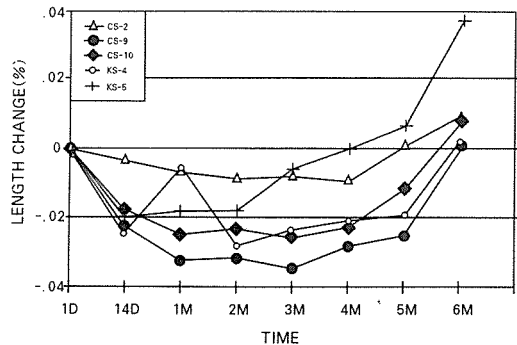
(3) 試驗體 製作 및 保管

試驗體의 製作은 ASTM C 227의 基準에 準하여 製作하였으며 $37.8 \pm 1.7^\circ C$, 相對濕度 95% 이상을 유지할 수 있는 恒溫恒濕機에 保管하였으며 측정은 $23 \pm 1.7^\circ C$, 相對濕度 50% 이상을 유지하는 恒溫恒濕室에서 측정하였다.

4. 4. 2 試驗結果 및 分析

化學法에서 JIS 基準으로 潛在的 反應 可能性이 있는 試料와 鑛物學的 分析에서 一般적으로 有害鑛物로 알려진 성분들을 1종 以上 포함하는 試料 30개에 대하여 Mortar-Bar 試驗을 수행한 結果 1.2%의 等價 알칼리량의 條件에서 3개월에 0.05%, 6개월에 0.1%의 길이 팽창을 나타내는 試料는 없었다.

〈그림 4〉는 30개의 試料중에서 상대적으로



〈그림 4〉 Mortar-Bar 길이 변화율

길이 변화율이 큰 試料 骨材 5개에 대하여 6개월 간의 측정 結果를 圖式化한 것이다.

5. 結 論

국내 碎石骨材에 대한 알칼리-실리카 反應에 대한 骨材의 有害可能性을 研究하기 위하여 제주도를 제외한 전국에서 골고루 분포 채취한 63 곳의 碎石骨材에 대하여 化學法, 鑛物學的 分析, Mortar-Bar法의 3가지 試驗을 실시한 結果 다음과 같은 結論을 내릴 수 있다.

(1) ASTM C 289의 化學法을 基準으로 試驗한 結果 모든 試驗骨材가 無害한 것으로 나타났으나 判定基準으로 JIS A 5308 附屬書 7을 적용할 경우 京畿 江華 佛恩, 忠北 中原 利柳, 忠北 忠州 木倅 3곳의 試料骨材가 有害 可能性이 있는 것으로 나타났다.

(2) 鑛物學的 試驗 分析의 研究結果 一般적으로 指摘되고 있는 有害 鑛物成分이 試料骨材에 여러종 포함되어 있으며 偏光顯微鏡으로 分析이 어려운 微粒質의 有害鑛物이 南部地方 骨材에 다량 함유된 石基에 포함되어 있을 수 있으므로 鑛物學的 分析側面에서는 有害성이 常存하고 있다고 할 수 있다.

(3) 化學法과 鑛物學的 分析에 의해서 다소 有害可能性이 있는 骨材를 포함한 30개의 試料 骨材에 대하여 Mortar-Bar 試驗을 수행한 結果 有害 基準值 이상의 膨脹을 나타내는 試料는

없었다.

이상의 試驗結果를 分析하면 시험을 수행한 시료골재에 한하여 化學反應性에 비교적 안정된 상태를 나타내는 것으로 판단할 수 있다. 그러나 細骨材의 收給事情이 좋지 않은 시기에 海砂를 사용한 콘크리트내에서 骨材의 化學反應으로 인한 被害가 深刻했던 일본의 경우를 볼 때, 骨材의 收給事情이 악화되고 있는 우리나라의 경우에도 骨材의 化學反應으로 인한 被害를 防止하기 위하여 더욱 깊은 研究가 必要한 것으로 思料된다.

參考文獻

1. 김무한, 정지곤, “콘크리트 골재용 암석의 알칼리-골재 반응에 관한 연구” 「한국광물학회지」 제3권 제1호, 1990, pp. 18-33.
2. 岸谷孝一, 西澤紀昭他編, “コンクリート構造物の耐久性シリーズ アルカリ骨材反應” 持報堂出版, 1986, pp.37-41.
3. 西林新藏, “アルカリ骨材反應, いま”. 「コンクリート工學」 Vol. 28, No.5, May 1990, pp.30-39.
4. Roberta A. Storer(Eds.), ASTM C 295, Standard Practice for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete, Annual Book of ASTM Standards Section, Vol.04.02(Concrete and Aggregates), Easton, 1990
5. 丸章夫, “骨材品質にかかわる 耐久性の診断手法 -岩石・鑛物學的手法-”, 콘크리트工學, Vol. 26, No. 7, July 1988.
6. Roberta A. Storer(Eds.), ASTM C 289, Standard Test Method for Reactivity of Aggregates (Chemical Method), Annual Book of ASTM Standards Section, Vol.04.04(Concrete and Aggregates), Easton, 1990.
7. ASTM C 227, Standard Test Method for Potential 알칼리 Reactivity of Cement-Aggregates Combinations (Mortar-Bar Method), Annual Book of ASTM Standards Section, Vol. 04.02(Concrete and Aggregates), Roberta A. Storer(Eds), Easton, 1990.
8. 윤재환, “알칼리 골재반응에 의한 콘크리트 이상팽창”, 레미콘 통권 제8호, 1986.6, pp.9~22.
9. 현석훈, “국내석산골재의 알칼리반응 조사”, 제4회 시멘트기술세미나논문집, 통권 제4호, 1984, pp.55~62.
10. 김해인, 이장화, 심재황, 임명혁, “알칼리 골재반응성에 관한 광물학적 분석”, 한국콘크리트학회 1989년도 가을학술 발표회 논문집, 1989, 11, pp.1~4.
11. “국내 콘크리트 구조물의 내구성 평가를 위한 조사 연구”, 한국건설기술연구원, 1989, pp.145~152.
12. 노재호, 이양수, 정재동, “국내쇄석골재의 알칼리 실리카반응성 판정에 관한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회 1991년도 봄학술 발표회 논문집, 1991, pp. 93~98.
13. 川村滿紀, “アルカリ骨材反應の機構, アルカリ骨材反應に關するシンポジウム”, 日本材料學會, 1985. 7, pp.3~28.
14. H.E. Vivian, “The Effect of Amount of added Alkalies on Mortar Expansion”, CSIRO Bull. NO.256, 1950, pp.31~47.
15. 中野錦一, “アルカリ骨材反應の試驗方法, セメントコンクリート”, No.475, Sep.1986, pp.26~34.
16. Gratten-Bellew, P.E., “Evaluation of Miniature Rock Prism Test for Determining the Potential Alkali-Expansivity of Aggregates”, Cement and Concrete Research, Vol.11, No.5/6, 1981, pp.669-711.