

有望한 콘크리트용 新素材와 그 活用方案

柿崎正義

〈鹿島建設(株) 技術研究所 主管研究員〉

目 次

1. 序 言
2. 실리카흙에 대하여
 - 1) 概 要
 - 2) 基本的 性質
 - 3) 실리카흙 콘크리트의 性質
 - 4) 실리카흙 콘크리트의 장점 및 有効利用
3. 高爐슬래그 微粉末에 대하여
 - 1) 概 要
 - 2) 基本的 性質
 - 3) 굳지 않은 콘크리트의 性質
 - 4) 硬化한 콘크리트의 性質
 - 5) 高爐슬래그 微粉末 모르타·콘크리트의 長點 및 有効利用
4. 無機系 早強混和材(아람系 鑛物)
 - 1) 概 要
 - 2) 基本的 性質
 - 3) 콘크리트의 性質
 - 4) 아람系 鑛物 콘크리트의 長點 및 有効利用
5. 맺는말

1. 序 言

최근에는 콘크리트도 高級化와 多樣化를 크게 指向하는 추세이며 우수한 품질 또는 多機能의 구조물이 요구되고 있다. 또 콘크리트는 원래 建設材料 중에서 耐久性이 뛰어난 재료로 알려져 왔다. 한편 都市型 集合住宅은 30층에서 50층 정도의 高層化 추세이며 鐵筋콘크리트 造를 적용하기 위한 연구개발이 진행되고 있다. 이 경우 高層鐵筋콘크리트造는 高强度化 및 高品質化한 콘크리트를 어떻게 높은 신뢰성을 가지고 시공할 수 있는냐가 문제이다. 高强度콘크리트를 확보하기 위해서는 아래에 나타낸 조건을 적절히 선정할 필요가 있다.

- a. 材料選定 - 시멘트의 종류, 골재의 種別과 種類, 高性能減水劑, 混和材 등
- b. 配合設計 - 단위시멘트량, 물結合材比
- c. 混合方法
- d. 치기방법
- e. 養生方法

그래서 本報告는 産業副産物을 시멘트 콘크리트에 적극적으로 이용하기 위하여 콘크리트의

強度增加나 耐久性의 향상에 유효한 混和材로서 주목 받고 있는 실리카흙, 高爐슬래그 微粉末, 기타의 品質 및 用途開發에 대하여 기술하였다.

2. 실리카흙에 대하여

1) 概 要

실리카흙은 製鋼用的 脫酸·脫黃劑로서 사용되는 페로우 실리콘이나 실리콘 메탈 등의 硅素合金을, 電氣爐에서 제조할 때에 발생하는 廢가스를 集塵할 때에 얻어지는 超微粒子의 産業副産物로서 실리카 함유량이 높은 플라야쉬(포조란系)이다. 그 化學成分, 物理的 性質은 製鋼의 종류나 製法에 따라 변화한다. 시멘트콘크리트용 混和材料로서의 실리카흙은 省資源, 省에너지 및 콘크리트의 性能改善을 목적으로 노르웨이, 미국, 캐나다, 덴마크 등에서 연구가 진행되어 1976년경 實用化 되었다. 이들에 관한 연구는 현재 세계 각국에서 진행되고 있으며 국제회의도 1983년에 제 1 회(캐나다), 1986년에 제 2 회(스페인)가 개최되었다.

따라서 실리카흙은 高價의 콘크리트용 混和材로서 변신하였고 특히 高強度材料로서 주목되고 있다.

실리카흙의 주요 생산국은 미국(30만톤), 소련, 노르웨이, 일본(7만톤), 기타 14개국으로 전세계 생산량은 1981년에 약 110만톤으로 나타났는데 電力이 값싼 노르웨이, 캐나다 등의 생산량은 크게 增産될 것으로 생각된다. 이에 반해 일본의 생산량은 1982년에 약 2.5만톤이었는데 그 이후는 電力事情에 의해 해마다 생산량이 감소되는 경향이다.

2) 基本的 性質

a) 化學成分

실리카흙은 대부분이 非晶質(無定形)의 SiO_2 (90% 이상)이며 微量成分으로 Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO 등이 함유되어 있다. 또 화학성분은 제품

의 종류에 따라 다소 변화한다.

b) 色調와 形狀

i) 色調는 일반적으로 회색인데 炭素殘留量에 따라 白色系 또는 無色系인 것이 있다.

ii) 粒子의 形狀은 球形의 超微粒子로서 粒徑 $0.05\sim 0.15\mu\text{m}$ (平均粒徑: 약 $0.1\mu\text{m}$)이다 (사진-1).



사진-1. 실리카흙粒子的 전자현미경사진

iii) 比表面積은 제품의 종류에 따라 $18\sim 25\text{m}^2/\text{g}$ 의 범위이다.

c) 比重 및 單位容積重量

진비중은 2.2 정도이며, 겉보기비중은 $0.15\sim 0.5$ 이다. 한편 單位容積重量은 $250\sim 300\text{kg}/\text{m}^3$ 로 가볍기 때문에 부피가 크다.

3) 실리카흙콘크리트의 性質

실리카흙은 微粒充填材効果와 포조란反應性이 높기 때문에 콘크리트의 개선, 強度增加 및 耐久性 向上 등의 특징이 있다. 아래에 실리카흙콘크리트의 특징을 나타낸다.

i) 굳지 않은 콘크리트의 性質

(a) 실리카흙 添加率에 따른 單位水量

실리카흙은 超微粉末이기 때문에 반죽질기가 저하하여 같은 슬럼프를 얻기 위해서는 單位水量을 증가시켜야 한다(圖-1, 2). 그 개선책으로는 高性能減水劑를 첨가하여 單位水量을 낮출 필요가 있다(圖-3). 또 圖-4와 같이 실리카

흡의 첨가량 10%에서 結合材 100kg에 대한 사용량이 3,000ml 인 콘크리트는 材料分離가 일어나 슬럼프 측정이 불가능하다.

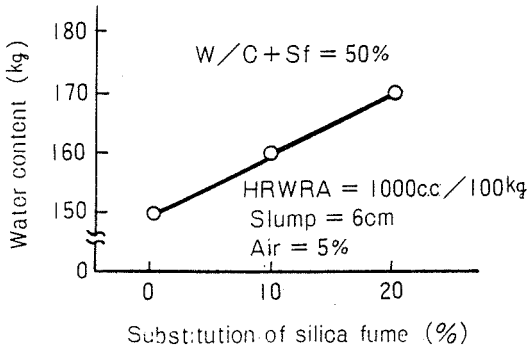


圖-1 Relation between substitution of silica fume and water content per unit volume

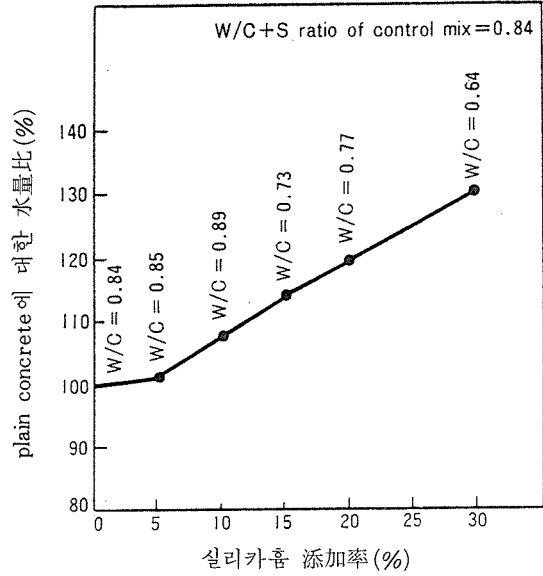


그림 2. 실리카흡량과 單位水量의 관계 (슬럼프 一定)

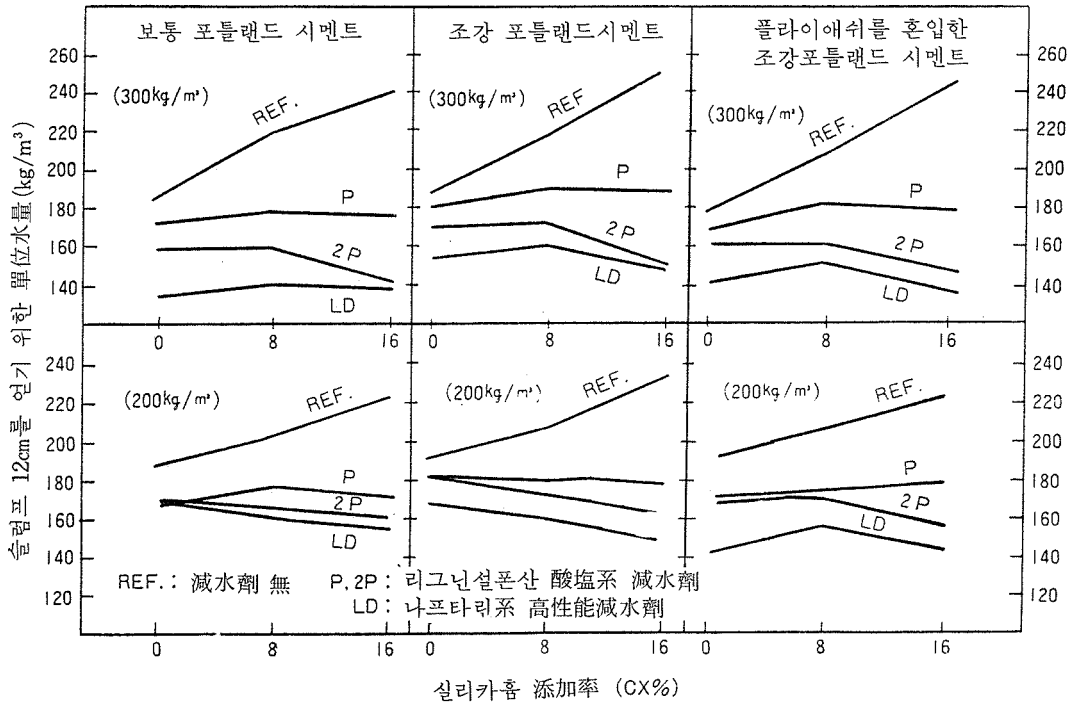


그림-3. 高性能減水劑의 사용에 의한 콘크리트 單位水量의 減少

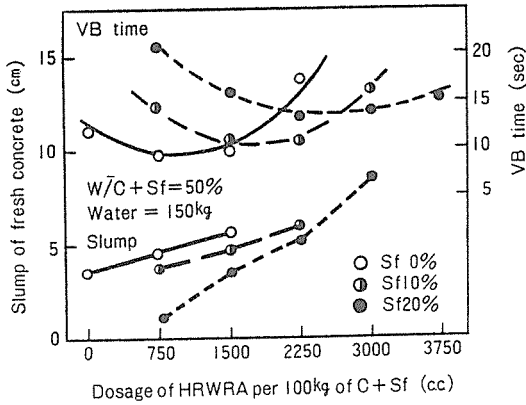


圖-4 Effect of dosage of high-range water-reducing agent on slump and VB time of fresh concrete

(b) 分離抵抗性

골재의 分離性은 실리카흙의 첨가에 의해 콘크리트의 粘着性이 증대되기 때문에 작아진다. Skrastins 등은 貧配合 또는 골재가 많은 配合에서 워커빌리티의 개선효과가 있다고 하였다.

(c) 블리딩

블리딩은 실리카흙의 첨가량이 증가하는데 따라서 감소하는데 (圖-5, 6) 특히 첨가량이 10% 이상으로 되면 극히 적어진다고 한다. 물結合材比 0.6의 블리딩율은 低減效果가 한층 현저하다. 이러한 사실로부터 실리카흙은 콘크리트의 沈下防止에 효과가 있다고 지적되고 있다.

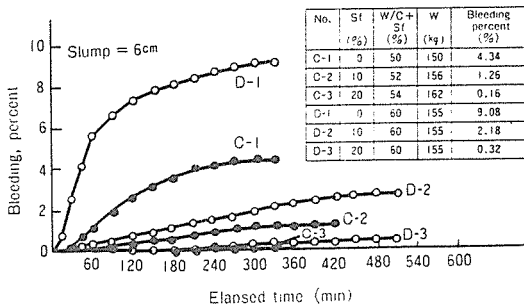


圖-5 Effect of silica fume on bleeding of fresh concrete

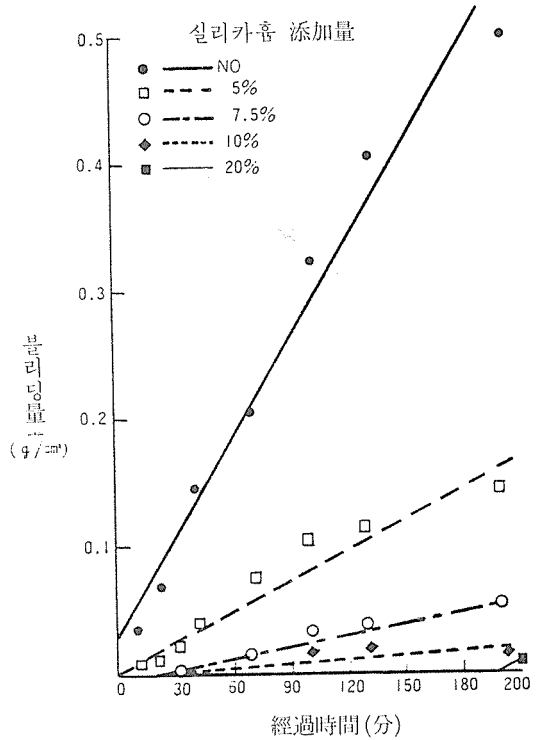


그림 6. 실리카흙이 블리딩에 미치는 영향 (輕量骨材 콘크리트)

(d) 空氣量

소요의 空氣量을 얻기 위한 AE劑量은 실리카흙의 첨가량이 많게 되면 증가시킬 필요가 있으며 (圖-7) 그 정도는 시멘트의 종류와 단위시멘트량, 高性能減水劑의 有·無, 실리카흙의 종류, 특히 함유된 炭素量 및 比表面積의 영향을 크게 받는다.

ii) 硬化한 콘크리트의 性質

(a) 실리카흙의 첨가량에 따른 壓縮強度

圖-8~10에 실리카흙의 첨가량과 壓縮強度의 관계를 나타냈다. 河野 등에 의하면 실리카흙 첨가량 10%의 材令14日強度는 첨가량 20%와 無添加한 경우에 비하여 높은 값을 나타냈다. 또 첨가량 20%의 材令28日強度는 첨가량 10%보다 높게 나타났다. 河野 등에 의하면 中·長期의 強度는 內割인 경우 첨가량 10%, 外割에

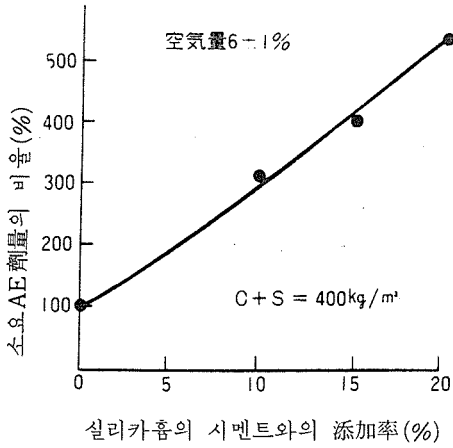


그림-7. 실리카흙콘크리트의 所要AE劑量

서는 첨가량이 많을수록 증대된다고 한다. 高木 등의 실험에서는 材令28日強度는 첨가량이 증가 하는데 따라서 증대되는 경향이 있지만 材令7 日에서는 역으로 저하되었다. 따라서 長期材令 의 강도는 실리카흙의 사용효과가 현저한 것으 로 생각된다. 長瀧 등에 의하면 蒸氣養生 (65℃, 80℃), 오토클레이브 養生에 의한 실리카흙모 르터 強度는 無添加의 1.5~2배가 얻어졌다고 한다. 대체로 強度發現에 있어서의 실리카흙 첨 가량은 10% 정도가 적당하다고 생각된다.

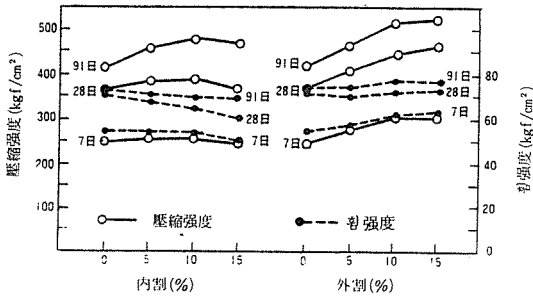


그림-8. 실리카흙 混入率과 모르터 強度

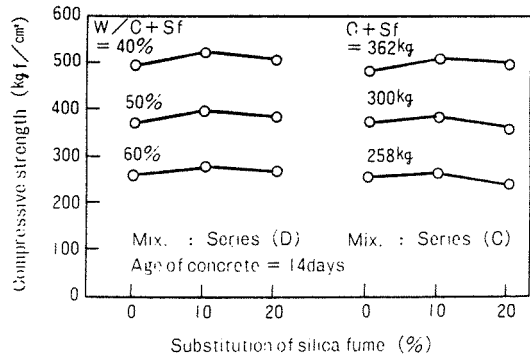


圖-9 Effect of substitution of silica fume on compressive strength of concrete

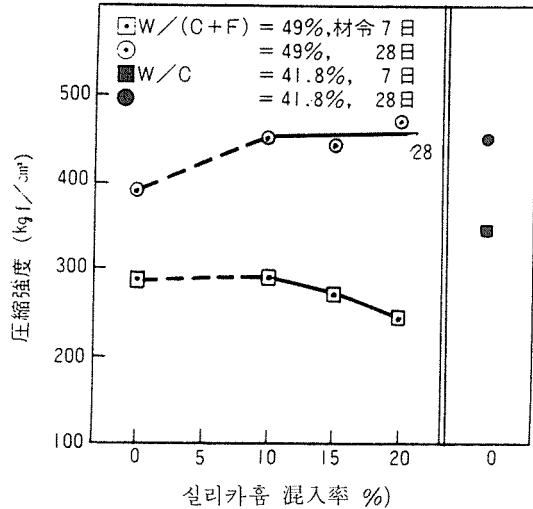


그림 10. 실리카흙의 混入率과 콘크리트 壓縮強度의 관계

(b) 물結合材比에 따른 壓縮強度

Sellevold에 의하면 壓縮強度는 실리카흙의 첨가량에 관계 없이 물結合材比가 작게 되는데 따라서 증대한다(圖-11).

河野 등에 따르면 結合材물比 1.6~2.5 범위의 強度는 첨가량 10%가 첨가량 0, 20% 보다 크게 된다고 한다. 또 다른 실험에인 圖-12에서 는 실리카흙의 효과는 壓縮強度의 증가에 현저 하며 早強포틀랜드시멘트에 실리카흙을 20% 첨 가한 경우 材令28日에서 약 38%의 強度增加를

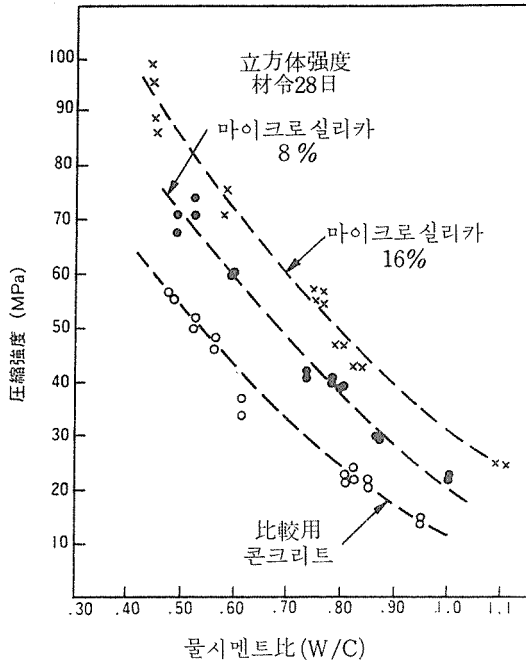


그림 11. 물시멘트비와 壓縮強度의 관계

보였다. 또 실리카흙은 보통포틀랜드시멘트 보다 早強포틀랜드시멘트에 첨가한 쪽이 強度에 대한 효과가 크다.

(c) 휨強度 및 引張強度

휨強度 및 引張強度는 壓縮強度에 비하여, 다른 因子의 영향을 받기 쉽고 또 強度의 편차가 큰 경향이 있다.

휨強度는 壓縮強度에 비하여 실리카흙의 효과가 작은 경우도 있으며 첨가량 10% 이하에서 최대가 된다고도 한다.

高木, 明石 등에 따르면 실리카흙은 引張強度 보다도 휨強度에 효과가 있다고 한다.

(d) 彈性係數

실리카흙에 의한 일반콘크리트의 彈性係數는 첨가량에 거의 영향을 받지 않는다고 한다. 高木, 明石 등이 실험한 결과인 圖-13을 보면 高強度콘크리트의 彈性係數는 실리카흙 첨가량의 증가에 따라 壓縮強度가 증가하는데도 불구하고 감소하는 것을 나타냈다. 이같은 사실은 圖

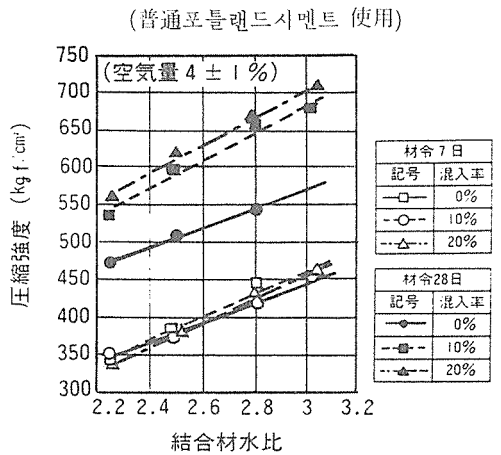
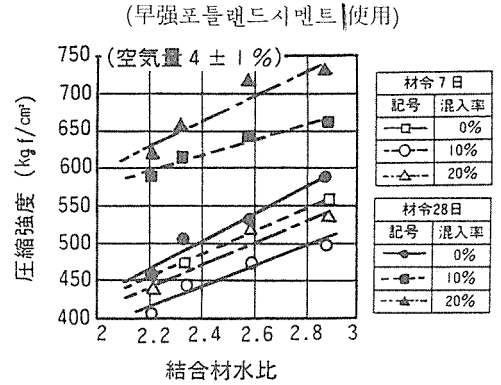


그림 12. 壓縮強度와 結合材水比의 관계

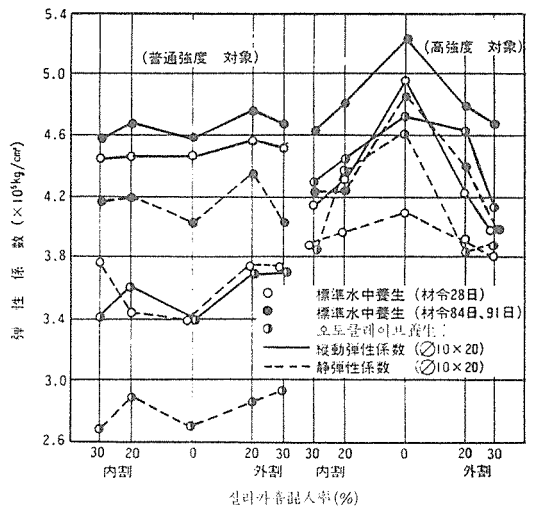


그림 13. 彈性係數와 실리카흙混入率의 관계

-14에서도 지적된다. 또 오오토클레이브 養生에 의한 실리카흙콘크리트의 彈性係數는 無添加의 경우보다 작다고 한다. 輕量骨材콘크리트의 彈性係數는 ACI Building Code의 算定式으로 계산한 값과 거의 같다고 한다.

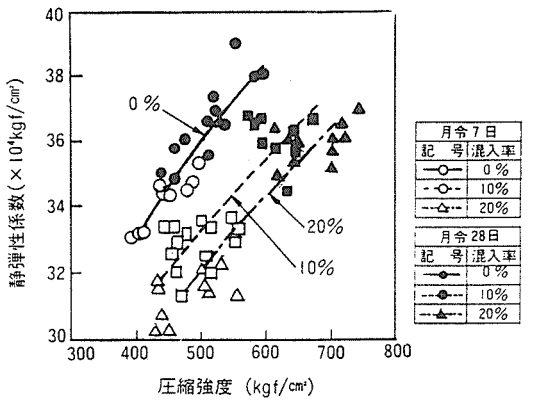


그림 14. 靜彈性係數와 壓縮強度의 관계

(e) 乾燥收縮率

물結合材比 0.5의 收縮率은 실리카흙 첨가량의 증가와 함께 크게 되며(圖-15), 이 경향은 모르터의 경우도 같다.

또 역으로 실리카흙콘크리트의 收縮率은 無添加의 경우에 비해 동일한 물結合材比(30, 23%)에서 단위시멘트풀량이 많은데도 불구하고 50% 정도로 작게 되는 경우도 있다(圖-16). 이것은 실리카흙콘크리트의 壓縮強度가 같은 물結合材比에서 無添加한 경우보다 크기 때문이다. 또한 시멘트풀이 많은 콘크리트는 실리카흙의 첨가에 의해 毛細管空腔이 미세하게 되며 물의 이동 및 泔水의 乾燥에 저항이 있었던 것으로 생각된다. 그리고 실리카흙콘크리트의 材令 6개월의 收縮率은 $3.3 \sim 4.5 \times 10^{-4}$ 으로 日本建築學會 龜裂指針인 6×10^{-4} 보다 작아서 龜裂低減에 유효한 재료로 판단된다.

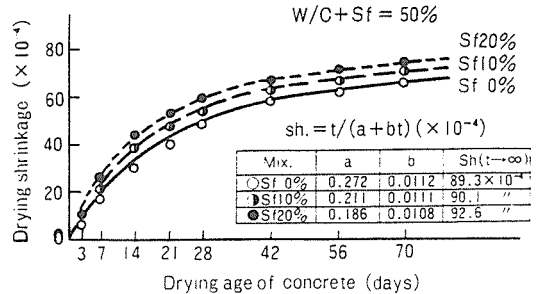


圖-15 Drying shrinkage of concrete containing silica fume.

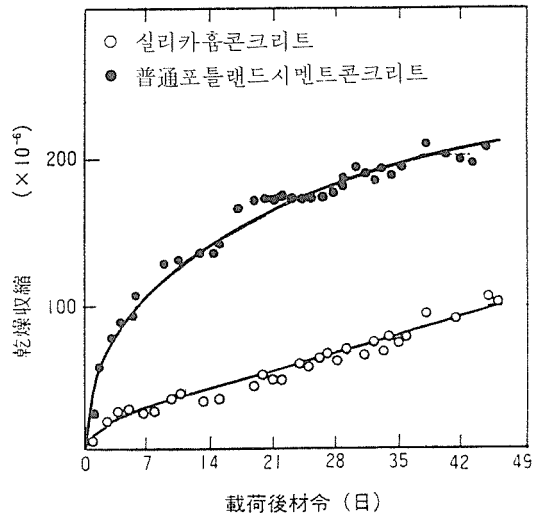


그림-16. 乾燥收縮과 載荷後材令의 관계

(5) 水密性

실리카흙의 첨가량이 20%, 30%인 경우의 水密性은 $10 \sim 11 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 로서 無添加보다 약 44% 작게 되어 효과적이다.

또 河野 등도 水密性은 실리카흙의 첨가량 증가와 더불어 작게 된다고 한다. 이와같이 水密性이 향상되는 것은 미세한 실리카흙이 콘크리트중의 空腔을 채워 조직이 치밀하게 되었기 때문이라고 할 수 있다. Gjörv도 같은 설명을 하고 있다.

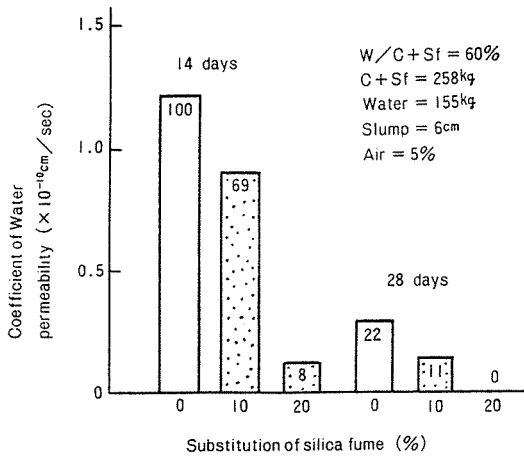


圖-17 Results of water permeability test of concrete containing silica fume.

(g) 凍結融解低抗性

凍結融解에 대한 耐久性은 圖-18, 19와 같이 실리카흙 첨가량이 20~30%인 때 저하하는 경향이 있는데 15% 이하이면 無添加한 경우와 큰 차이가 없다.

이러한 사실은 Carette도 지적한 바 있다. 또 凍結融解에 대한 抵抗性은 물結合材比가 작을 때 첨가량이 많게 되는데 따라서 우수해지며 물結合材比가 크게 되면 오히려 抵抗性이 저하한다. 그것은 細孔徑分布가 보다 微小徑側에 있어서 凍結하는 물량이 적어지기 때문이라고 할 수 있다.

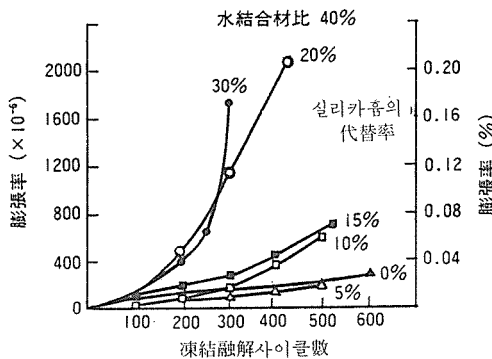


그림 18. 실리카흙을 사용한 콘크리트의 凍結融解에 대한 耐久性(高性能減水劑 添加)

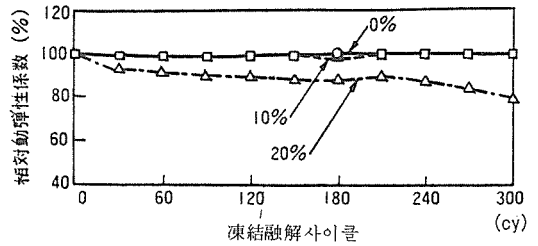


그림 19. 急速凍結融解試驗結果

(h) 알칼리骨材反應性

Gvomundson 등이 실험한 圖-20에 의하면 알칼리骨材反應抑制는 실리카흙 5%일 때 ASTM C 227의 0.1%를 만족한다. 또 Perry, 川村 등은 실리카흙의 첨가량이 10~15%일 때 抑制效果가 있다고 하였다(圖-21). 다만 실리카흙에 의한 알칼리骨材反應의 抑制效果는 反應骨材 및 실리카흙의 종류, 시험조건의 차이에 따라 변화된다.

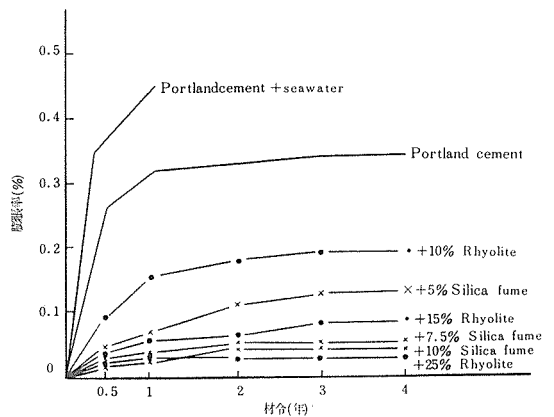


그림 20. 모르터膨脹에 대한 실리카흙 및 Rhyolite 첨가효과

(i) 塩素이온의 浸透性

塩素이온의 平均浸透깊이는 실리카흙의 첨가량이 증가할수록 작아지며 그 효과는 混合시멘트 보다 보통포틀랜드시멘트에 대하여 현저함을

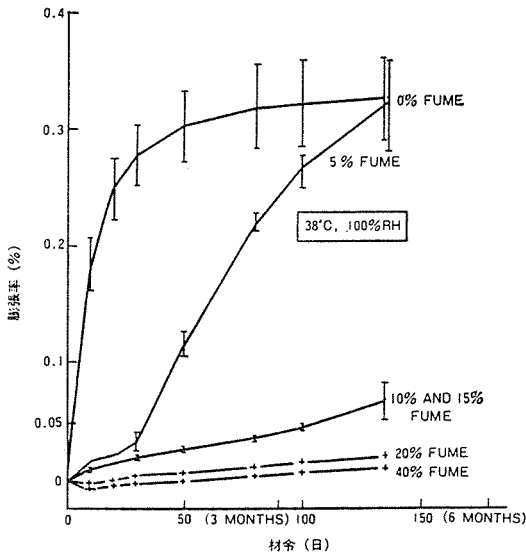


그림 21. 오팔 4% 사용한 모르터 팽창에 대한 실리카흙 첨가량의 영향

나타냈다. Marusin 은 실리카흙의 첨가량은 10%가 가장 좋다고 하고 있다.

4) 실리카흙 콘크리트의 장점 및 有効利用

실리카흙 콘크리트의 實施例은 北歐와 캐나다에 많으며 최근에는 일본에서도 試驗室의 단계에서 實用化의 단계로 들어가 각 방면에 이용되고 있다. 아래에 실리카흙을 混和材로서 사용한 모르터·콘크리트의 장점 및 建築 構造物과

土木構造物에의 有効利用으로서 이용가능한 콘크리트 구조물에의 한 예를 제시한다. 그 중에는 이미 이용되고 있는 것도 있다.

(1) 장점

아래에 실리카흙을 사용한 모르터·콘크리트의 주요 장점을 나타낸다.

a. 高슬럼프 콘크리트의 分離防止 (콘시스턴스의 개선) 및 콘크리트의 표면마무리 작업성의 향상, 블리딩 현상의 감소

b. 高性能減水劑의 多量使用에 기초한 凝結遲延作用

c. 初期强度가 낮은 시멘트에 있어서 높은 初期强度發現

d. 强度增加 (初期强度發現의 개선) 및 初期給熱養生에 의한 强度增進

e. 乾燥收縮率, 크리프低減은 물시멘트비가 작고 高强度콘크리트인 경우 유효

f. 耐透水性의 향상 (水密性 向上)

g. 凍結融解抵抗性 및 凍害抵抗性의 향상

h. 耐摩耗性의 향상

i. 鐵筋腐食抵抗性의 향상

j. 中性化 抑制

k. 알칼리骨材反應의 억제 (다만 高爐슬래그 첨가율 20% 정도)

l. 塩素이온의 耐浸透性 및 高耐電性

(2) 有効利用

表-1에 建築 및 土木分野에 이용 가능한 콘크리트구조를 기술한다. (次號 계속)

번역 : 崔在眞 (檀國大土木工學科講師)

表-1. 실리카흙의 이용 가능한 構造物과 사용목적

구조물	이용 가능한 구조물	사 용 목 적
건 축	a. 高層RC造의 高强度콘크리트	高强度, 部材斷面의 감소
	b. 프리체브用 콘크리트部材	高强度, 部材斷面의 감소, 省에너지化(給熱養生 불필요)
	c. 海洋·海岸에 근접한 건축물 및 船上건축물의 콘크리트	철근의 腐食抵抗性, 耐凍結融解, 耐侵食性, 耐塩素浸透性
	d. 창고의 바닥슬라브 및 貨과 접한 콘크리트 [化學工場(SO ₂ , 硝酸保護), 食品工場, 耐藥品用, 重量車輛用]	耐藥品性, 低透水性, 高强度, 우수한 표면 마무리性, 블리딩 현상의 감소

구 조 물	e. 高强度콘크리트 대피호 f. 防水콘크리트 지붕슬라브 및 防水모르터 g. 穀物 및 시멘트 사이로 등 h. 시멘트콘크리트 二次製品(규산칼슘판, 魚礁, 말뚝, 耐火벽돌, 담, 블록, 기와등) i. 기타: 비료의 固結防止材, 白華防止, 原子力 廢棄物의 封入容器 및 캡셀	高强度, 耐久性 向上, 低透水性 低透水性, 耐凍結融解, 우수한 표면 마무리 性, 블리딩 현상의 감소 高强度, 耐摩耗性, 低透水性, 철근의 腐食 抵抗性, 耐熱性 힘강도의 증대, 耐摩耗性, 低透水性, 블리 딩현상의 감소 耐熱性, 耐塩素浸透性
토 목 구 조 물	a. 고속도로, 교량, 도로교 등의 콘크리트 도로포장 b. 비행장의 활주로 c. 港灣施設 d. 하천(담)의 水路 e. 시멘트콘크리트 二次製品(고속도로의 遮 音판넬, 침목 등) f. 海洋·海中·水中 構造物의 콘크리트 油 田掘削의 콘크리트製 링도 포함) g. 뿜어붙이기 콘크리트(터널, 地下鐵內的 속크리트 및 콘크리트 라이닝)	耐摩耗性, 힘강도 증대, 耐凍結融解, 철근 의 腐食抵抗性, 耐塩素浸透性, 우수한 표 면마무리성 耐摩耗性, 耐凍結融解, 힘강도의 증대 耐摩耗性, 耐侵食性(耐藥品性, 耐化學性), 철근의 腐食抵抗性, 耐凍結融解 耐摩耗性, 耐凍結融解 힘강도의 증대, 耐久性 向上 高强度, 耐凍結融解, 耐摩耗性, 철근의 腐 食抵抗性, 耐塩素浸透性 高强度, 리바운드의 감소, 耐透水性

질서지켜 민주시민 차례지켜 문화국민