

鐵筋 캐스터블 耐火物の 高温特性에 關한 연구*

朴金喆, 崔泳燮, 韓文熙, 張榮宰, 朴根遠
漢陽大學校 無機材料工學科
(1980年 4月 3日 接受)

A Study on Steel Wire Fiber Reinforced Refractory Castable

Keum Chul Park, Young Sub Choi, Mun Hi Han, Young Jai Chang and Keum Won Park
Dept. of Inorganic Material Eng. Han Yang Univ.
(Received April 3, 1980)

ABSTRACT

This study deals with the wire content, wire diameter, aspect ratio, it's arrangements of steel wire fiber and the sorts of castable which affect the character of steel wire fiber reinforced refractory castable. Two kinds of alumina based refractory castables, one is for 1650°C and the other is for 1800°C, and stainless steel which is SUS 304 type 0.25, 0.34, 0.37 and 0.50m/m in diameter were used respectively. Aspect ratio was adjusted to 50, 75, 100 and steel fiber content was also adjusted to 1-4 wt% each.

The results of the experiment were as follows;

1. At firing temperature around 1,000°C, the MOR is increased with increasing wire content and aspect ratio with decreasing firing temperature, which depends on the Romualdi's Fiber Spacing Theory. But for calculation of the fiber spacing, Swamy equation is more applicable to the extensive fiber mixing conditions. However the condition differs from the above at firing temperature around 1,350°C. because of the degradation of wire and the progress of sintering of castable.
2. Linear change is getting larger corresponding to the increase of wire content, and the spalling resistivity is increasing corresponding to the increase of wire content and to aspect ratio, and with decreasing wire diameter.
3. Firing shrinkage under load is getting greater as higher wire content, and the shrinkage of the test pieces which fiber is vertically oriented is getting greater than the test pieces which fiber is randomly oriented.

1. 緒 論

시멘트나 콘크리트에 鋼線 纖維를 混入시키던 強度, 乾燥 收縮 等 製品의 特性이 改善되며^{(1)~(3)} 混入된 鋼線 纖維는 強度 弱化的 原因이 되는 製品 内部의 가장 큰 缺陷部分, 卽 氣孔이나 龜裂 等の 크기를 減少시키는 役割을 하므로써 強化된다고 한다⁽¹⁾. 이와같은 鋼線 纖維의 混入 效果에 着眼하여 Lankard 等⁽²⁾은 直徑

0.013in., 길이 1.0in. 인 스테레스 鋼線(SUS 310)을 1900°C 用 高 알루미나質 캐스터블에 0.127~0.179wt% 混入하여 그 特性 變化를 報告한 바 있다.

本 研究은 鋼線 纖維 混入 캐스터블의 特性이 鋼線의 混合 比率 뿐 단 아니라 鋼線의 種類, 直徑, aspect ratio(길이/直徑), 配列 및 캐스터블의 種類 等에 따라서도 變化될 것으로 보고 이 關係를 調査 究明한 것이다.

*이 논문은 1979년도 문교부 학술 연구 조성비에 의하여 연구된 것임.

2. 實 驗

2-1 使用 材料

本 實 驗 에 使 用 한 材 料 中 케 스티 블 은 2 種 류 이 며, 그 中 하 나 는 용 融 알 루 미 나-알 루 미 나 시 멘 트 시 의 1800°C 用 이 고, 다 른 하 나 는 알 루 미 노 실 리 케 이 트-알 루 미 나 시 멘 트 시 의 1650°C 用 이 다. 또 한 混 入 用 스텐 레 스 鋼 線 은 直徑 이 각 각 0.25, 0.34, 0.37, 0.50mm 인 高 크롬 니 크 륜 系 耐 熱 鋼 이 다.

2-2 試 片 의 製 造

1) 成 形 및 養 生

스텐레스 鋼線은 各各 所定의 길이로 切斷한 다음 케 스티 블 과 一 定 한 무게 비 가 되 게 달 아 Habert type beater mixer 에서 미리 乾 式 으 로 混 合 한 後 8wt% 의 물 을 加 하 여 濕 式 混 合 을 하 였 다. 混 合 된 것 은 鋼 製 型 에 넣 어 搖 動 板 위 에 서 成 形 하 였 으 며 軋 延 강 도, 線 變 化 率 및 스프링 抵 抗 性 測 定 用 은 4×4×16cm 의 角 棒 形 으 로, 또 荷 重 軟 化 性 測 定 用 은 內 徑 1cm, 外 徑 5cm 의 圓 筒 形 으 로 하 였 다. 成 形 試 片 은 20°C-飽 和 水 蒸 氣 條 件 下 에 서 48 時 間 養 生 시 켜 주 며, 처 음 24 時 間 은 鋼 製 型 에 담 기 게 나 머 지 24 時 間 은 脫 型 狀 態 로 하 였 다.

2) 燒 成

燒 成 試 片 은 炭 化 硅 素 發 熱 體 의 電 氣 爐 內 에 서 平 均 4°C/min. 의 速 도 로 上 溫 시 킨 다음 各 各 所 定 의 最 高 溫 度 에 서 2 時 間 維 持 시 켜 얻 었 다.

2-3 特 性 測 定

1) 鋼 線 의 酸 化 率

2.54cm 길이로 切斷한 鋼線과, 이를 軋 延 도 가 니 에 넣 어 試 片 燒 成 과 같 은 條 件 下 에 두 었 을 때 의 鋼 線 의 무게 變 化 率 로 測 定 하 였 다.

2) 軋 延 강 도

試 片 의 軋 延 강 도 는 KSL 3503 에 따 라 서 測 定 하 였 으 며 各 各 試 片 3 個 의 平 均 值 을 取 하 였 다. 實 溫 강 도 는 48 時 間 養 生 한 後 110±5°C 로 乾 燥 한 것 을, 燒 成 강 도 는 燒 成 冷 却 後 110±5°C 로 乾 燥 한 것 을 各 各 試 片 으 로 하 였 다.

3) 線 變 化 率

養 生 試 片 을 基 準 으 로 하 여 길 이 方 向 의 線 變 化 率 을 求 하 였 다.

4) 荷 重 軟 化 性

高 溫 荷 重 軟 化 試 驗 機 (日 本 眞 空 理 工 (株) DLCR-1500VH 型) 로 2kg/cm² 의 荷 重 下 에 서 溫 度-線 變 化 率 을 測 定 하 였 다.

5) 스프링 抵 抗

1350°C 로 燒 成 한 試 片 과, 이 를 900°C 의 電 氣 爐 內 에 서 50 分 間 維 持-水 中 急 冷 의 操 作 을 10 回 反 復 한 試 片 과 의 軋 延 강 도 變 化 率 을 測 定 하 였 다. 試 片 의 크 기 는 4×4×4cm 이 며 軋 延 강 도 測 定 으 로 半 切 된 部 分 에 서 얻 었 다.

6) 鑛 物 相

알 루 미 나 시 멘 트 와 乾 燥 또 는 燒 成 된 試 片 의 鑛 物 相 은 粉 末 法 에 의 한 X 線 回 折 圖 에 서 解 釋 하 였 다.

3. 實 驗 結 果 및 考 察

3-1 鋼 線 의 酸 化 率

使 用 한 스텐 레 스 鋼 線 의 溫 度-重 量 增 加 曲 線 은 圖 1 과 같 으 며, 鋼 線 은 加 熱 溫 度 가 增 加 함 에 따 라 서, 또 鋼 線 의 直徑 이 減 少 됨 에 따 라 서 重 量 增 加 率 이 커 지 고 있 다. 이 와 같 은 重 量 變 化 는 主 로 鋼 線 의 酸 化 에 의 한 것 이 며 미 른 試 片 中 의 鋼 線 은 케 스티 블 에 의 하 여 一 部 包 藏 되 겠 지 만 800°C 以 上 의 高 溫 에 서 는 一 部 酸 化 와 더 곁 어 軟 化 를 일 으 켜 鋼 線 의 特 性 變 化 가 豫 想 된 다.

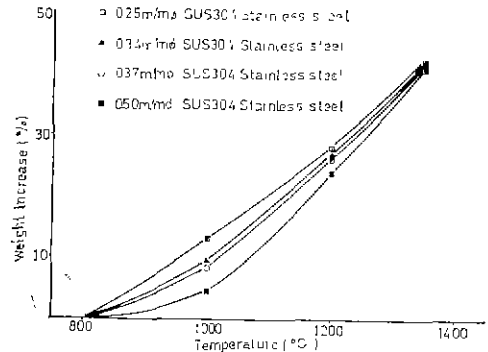


Fig. 1. Variation of weight increase with wire diameter and firing temperature.

3-2 케 스티 블 의 鑛 物 相 變 化

未 水 和 알 루 미 나 시 멘 트 와 鋼 線 이 混 入 되 지 않 은 케 스티 블 을 1650°C 用 그 리 고 1800°C 用 의 燒 成 溫 度 別 X 線 回 折 圖 은 各 各 圖 2-a, 圖 2-b 와 같 다. 圖 2-a 와 圖 2-b 의 最 下 段 에 圖 示 된 알 루 미 나 시 멘 트 의 主 鑛 物 은 CaO·Al₂O₃ 이 다, 圖 2-a 卽 1650°C 用 케 스티 블 의 燒 成 48 時 間 養 生 한 것 은 3Al₂O₃·2SiO₂, α-SiO₂ 및 2CaO·Al₂O₃·8H₂O 가 主 構 成 鑛 物 이 며 燒 成 溫 度 가 높 아 짐 에 따 라 서 2CaO·Al₂O₃·8H₂O 의 peak 높 이 는 相 對 的 으 로 漸 次 減 少 된 것 을 알 수 가 있 다. 그 리 고 圖 2-b 에 서 48 時 間 養 生 시 켜 1800°C 用 케 스티 블 은 α-Al₂O₃ 와 2CaO·Al₂O₃·8H₂O 가 主 鑛 物 이 며, 燒 成 溫 度 가 上 昇 함 에 따 라 서 2CaO·Al₂O₃·8H₂O 의 peak 높 이 도

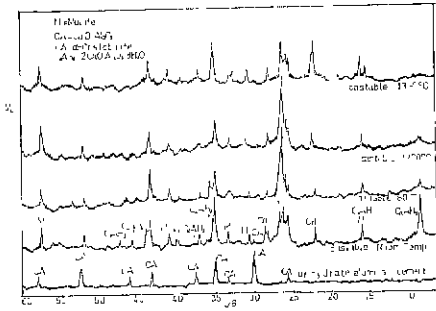


Fig. 2-a. X-ray diffraction patterns of Alumina cement and Castable used for 1650°C according to firing temperature.

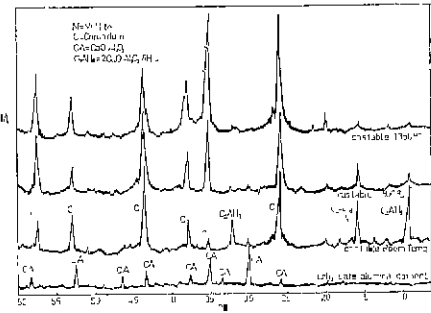


Fig 2-b. X-ray diffraction patterns of Alumina cement and Castable used for 1800°C according to firing temperature

1650°C用 케스터블에서와 같이 相對的으로 減少되고 있다. 이와같은 事實中, 알루미늄 시멘트의 主構成 鑛物은 $CaO \cdot Al_2O_3$ 인데 養生한 케스터블에는 $CaO \cdot Al_2O_3$ 의 存在는 確認되지 않고 그의 水和反應 生成物로 보아지는 $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 8H_2O$ 가 確認된 點, 그리고 燒成된 케스터블에서는 $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 8H_2O$ 의 存在를 確認하기 어렵진 點으로 미루어 水和로 硬化된 케스터블은 燒成되면 그 結合成分인 水和된 알루미늄 시멘트의 成分鑛物이 漸次 熱分解될 일으킨 것으로 思料된다.

3-3 燒成 強度

i) 鋼線 含量, 燒成 溫度의 影響

直徑(0.37m/mφ)과 길이(2.54cm)가 같은 鋼線을 含量을 달리하여 1650°C用 케스터블에 加하고 燒成 溫度를 變化시켰을 때 試片의 韌性 強度는 圖-3과 같다. 여기서 보면 室溫에서 1000°C까지는 鋼線 混入量이 많을 수록 強度가 크게 나타나고 있으나, 燒成 溫度가 높아짐에 따라 各各의 試片의 強度는 減少되고 있다. 그러나 1350°C로 燒成한 試片은 鋼線 含量이 작을 수

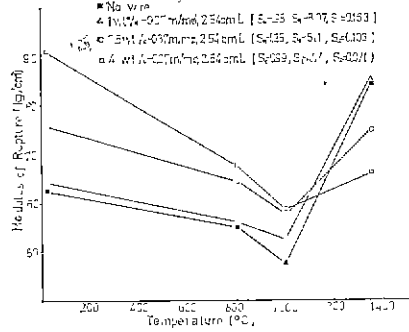


Fig. 3. Variaton of modulus of rupture with wire content and firing temperature.

록 強度는 增加하고 있으며 鋼線이 含有 안된 것과 1wt% 含有된 것은 48時間 養生한 것 보다 強度가 크게 增加하고 있다.

또한 1wt%의 鋼線 混入 試片은 室溫~1350°C間에서는 鋼線을 混入시키지 않은 것 보다 強度가 크다.

ii) 鋼線徑, 燒成 溫度의 影響

2.54cm길이의 鋼線을 1650°C用 케스터블에 2.5wt%가 되게 加하되, 鋼線의 直徑을 0.25, 0.34, 0.37, 0.50m/m로 달리 하였을 때 燒成 溫度別 韌性 強度關係는 圖-4와 같다. 여기서 보면 燒成 溫度 800°C까지는 鋼線의 直徑이 작을 수록 強度가 크며 鋼線徑이 같을 境遇는 燒成 溫度가 높아짐에 따라서 強度의 弱化現象을 나타내고 있다. 그러나 1350°C로 燒成한 것들은 48時間 養生한 것과 거의 같은 큰 強度를 보이고 있다.

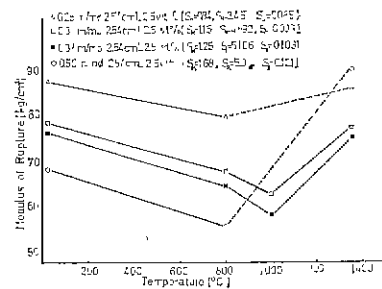


Fig. 4. Variation of modulus of rupture with diameter and firing temperature.

iii) aspect ratio, 燒成 溫度의 影響

直徑이 0.37m/m인 鋼線을 1650°C用 케스터블에 2.5 wt%씩 含有되게 하되, 鋼線의 長이를 각각 1.850, 2.775, 3.700cm로 하여 길이 對 直徑의 比, 卽 aspect

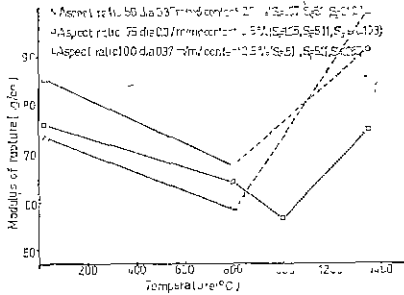


Fig. 5. Variation of modulus of rupture with aspect ratio and firing temperature.

ratio가 50, 75, 100이 되게 하였을 때 燒成溫度別 적임強度變化는 圖-5와 같다. 여기서 보던 燒成溫度 1000°C까지는 aspect ratio가 클수록 強度가 증가되고 있으나 燒成溫度가 높아질에 따라서 強度가 弱화되며 1350°C로 燒成한 것의 強度는 各各 48時間 養生한 것보다 크거나 거의 비슷한 값을 나타내고 있다.

iv) 캐스터블 種類의 影響

直徑 0.34mm, 길이 2.54cm인 鋼線을 各各 1650°C用과 1800°C用 캐스터블에 2.5wt% 含量이 되게 混入한 것의 燒成溫度別 적임強度變化는 圖-6과 같다. 여기서 鋼線을 混入한 것과 混入 않은 것 그리고 이들의 燒成溫度別 적임強度變化의 傾向은 캐스터블의 種類와는 크게 關係되지 않는 것을 알 수가 있다.

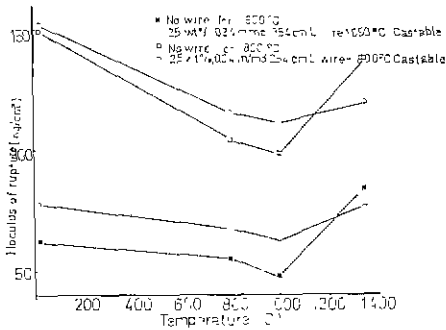


Fig. 6. Variation of modulus of rupture with Castable and firing temperature.

Griffith의 線形破壞 方學에서는 材料 内部의 가장 큰 缺陷, 例컨데 가장 큰 氣孔이나 龜裂에 依하여 材料의 強度가 定해 진다. Romualid, Batson等⁽⁶⁾은 萬若 材料中에 纖維를 混入하여 纖維間의 距離 S를 缺陷의 크기 보다 작게 하면 龜裂이 纖維에 부딪치거나 마주친 곳에서 停止되므로 纖維의 間隔이 缺陷의 크기를 決定

하며, 材料의 強度 σ 와 S는 $\sigma \propto 1/\sqrt{S}$ 인 關係에 있다고 하였다.

그리고 S의 算出式으로써 Romualdi⁽¹⁾는 $S_R = 13.8 \sqrt{1/P}$, Mckee⁽²⁾는 $S_M = 2.4 \sqrt{V/P}$, Swamy⁽³⁾은 $S_S = 0.25 \sqrt{d/pl}$ 을 各各 提示하고 있으며 이 들式에서 d는 纖維의 直徑, P는 纖維의 容積 百分率(%), V는 纖維 1個의 容積(mm³), l은 纖維 1個의 길이이다.

鋼線의 混入 條件에 따라서 鋼線의 間隔 S_R, S_M, S_S 를 各各 計算하고 材料의 적임 強度와의 關係를 보면 圖-3과 圖-4에서의와 같이 1000°C까지는 鋼線의 混入量이 增加할 수록, 鋼線徑이 減少될 수록 S_R, S_M, S_S 는 다 같이 減少되고 있으므로 鋼線의 間隔 減少 傾向과 적임 強度 증가 傾向은 一致되고 있다.

그러나 圖-5에서 鋼線의 aspect ratio가 增加하면 S_S 는 減少되지만, S_M 은 增加하고, S_R 은 一定한 값을 나타내고 있으며, Swamy가 提示한 纖維 間隔과 적임 強度 傾向이 一致된다. 따라서 鋼線 纖維 混入 캐스터블의 養生 後 부터 1000°C 近方까지의 冷間 적임 強度는 Romualdi, Batson等의 纖維 間隔說에 따르되 纖維 間隔 算出式으로는 Swamy等이 提示한 것이 보다 廣範한 纖維 混入 條件에 適用된 듯하다. 또한 이 溫度 範圍에서 各 試片의 적임 強度가 燒成溫度가 높아질에 따라서 減少되는 理由는 圖-1, 圖-10에 나타난 마와 같이 酸化, 軟化, 熔融等으로 鋼線의 強度가 크게 變化되고 있지 않으므로 圖-2a에서의와 같이 主로 養生 後 水和로 硬化된 材料가 加熱로 脫水를 일으켜 強度 弱화를 일으키는 것으로 보아진다. 그러나, 1350°C로 燒成한 試片은 鋼線의 間隔과 적임 強度의 傾向이 纖維 間隔說에 따르지 않고 있으며, 이는 圖-1, 圖-10의 結果로 미루어 纖維의 一部 酸化, 反應等이 일어나므로 材料의 強化 支配 機構는 材料의 構成 鑛物間의 燒結이 보다 支配의이기 때문이라고 思料된다.

3-4 線 變化率

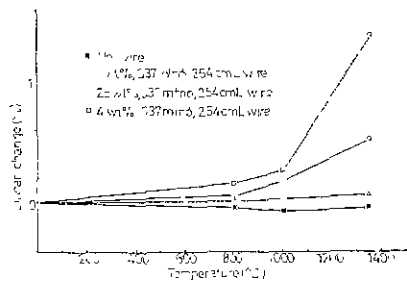


Fig. 7. Variation of linear change with wire content and firing temperature.

1650°C 用 케스터블에 直徑 0.37m/m, 길이 2.54cm 의 鋼線을 各各 1, 2.5, 4wt% 씩 加한 것의 燒成 溫度別 線 變化率은 圖-7과 같다. 여기서 보면 鋼線을 混入한 것은 그 含量이 많을 수록 燒成 溫度가 높아질 수록 많은 膨脹을 하고 있으며, 이는 鋼線의 酸化 膨脹 現象이 主된 原因일 것이라고 생각된다.

3-5 스펠링 抵抗性

鋼線의 混入量, 直徑, aspect ratio 變化에 따른 스펠링 傾向度는 圖-8과 같다. 여기서 보면 스펠링 傾向度와 逆數 關係에 있는 스펠링 抵抗度는 各各 鋼線의 混入분과 aspect ratio가 增加할 수록, 鋼線의 直徑이 작을 수록 커지고 있다. 이와 같은 事實에서 스펠링 抵抗은 鋼線이 高르게 또 많이 케스터블 構成 成分과 接觸되는 것이 効果的임을 말해 주고 있다.

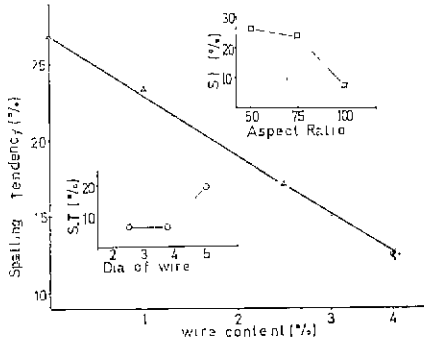


Fig. 8. Variation of Spalling tendency with wire content, wire diameter and aspect ratio.

3-6 荷重軟化性

1800°C 用 케스터블에 直徑 0.34 m/m 길이 2.54cm 인 鋼線을 含量과 配列 方式이 다르게 加했을 때 2kg/cm²의 荷重 下에 1700°C 에서의 線 變化率은 圖-9와 같

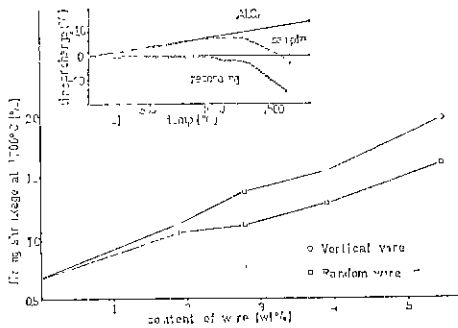


Fig. 9. Firing shrinkage under load according to firing temperature of a sample and, firing shrinkage under load at 1700°C with wire content and wire orientation.

다. 이 결과를 보면 鋼線 含量이 增加할 수록, 鋼線이 加壓 方向에 垂直 配列이 될 수록 燒成 收縮率은 커지고 있다. 이와 같은 사실은 鋼線의 融점이 1430°C 近方이며 圖-10과 같이 鋼線 周圍가 浸潤된 것으로 보아 高溫에서 鋼線이 熔融되는 한턴 케스터블과의 反應으로 液相을 形成하기 때문이라고 推定된다.

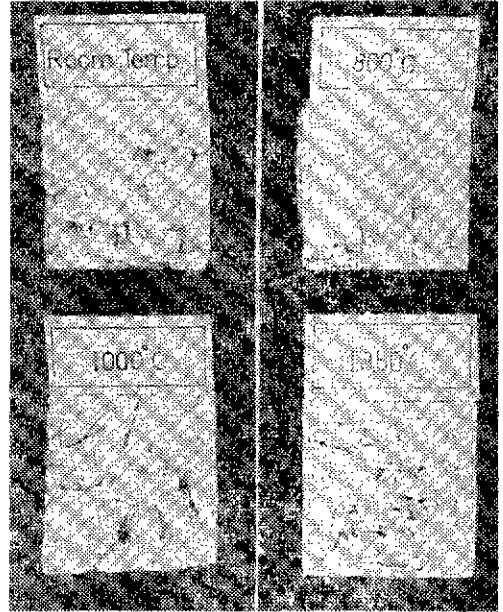


Fig. 10. Photographic view of broken surface of the test pieces (0.34m/mφ-2.54cm L -2.5wt%) according to firing temperature.

4. 結 言

本 研究에서 얻어진 主要 結果는 다음과 같다.

(1) 1000°C 近方까지의 溫度 領域에서는 鋼線의 混入量과 aspect ratio가 增加할 수록, 鋼線의 直徑이 작을 수록, 낮은 溫度에서 燒成한 것일 수록 적임 強度는 增加하며 纖維 強化에 關한 Romualdi의 纖維 間隔說이 適用되나 纖維 間隔 算出式은 Swamy의 式이 보다 腐蝕 固한 纖維 混入 條件에 適用된다. 그러나 1350°C 近方에서는 鋼線의 弱化和 케스터블의 磨結 進行으로 樣相이 달라진다.

(2) 鋼線의 含量이 增加한 수록 燒成 膨脹率이 크며 스펠링 抵抗度는 鋼線의 含量과 aspect ratio가 클 수록 線徑이 작을 수록 커진다.

(3) 荷重 軟化性은 鋼線 含量이 많을 수록 鋼線 配列이 加壓 方向과 垂直일 수록 크다.

文 獻

1. J. P. Romualdi and J. A. Mandel, "Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed and closely spaced short length of wire reinforcement" *J. Amer. Concr. Inst. Proceeding*, **61** [6, Pt. 1] 657-70 (1964).
2. G. R. Williamson et al., "Fibrous reinforcements for Portland Cement Concrete", U. S. Army Corps of engineers, Ohio river division, Tech. rept., 2-40, 29pp, May (1965).
3. S. C. Sanday, "Fatigue strength of closely spaced short wire reinforced concrete", M. S. Thesis, Carnegie Institute of technology, Pittsburgh, Pa. 25pp, December (1963).
4. M. A. Iqbal, "Shrinkage of steel fiber reinforced concrete", M. S. Thesis, Carnegie Institute of technology, Pittsburgh, Pa. 18pp, April (1965).
5. D. R. Lankard and H. D. Sheets, "Use of steel wire fibers in refractory Castables," *Bull. Amer. Ceram. Soc.*, **50** [5] 497-500 (1971)
6. P. Ibrico, "Monolithic refractories" p.188 P. Ibrico, Japan (1979).