

고강도 시멘트 경화체의 강도 및 파괴인성에 관한 연구

A Study on the Strength and Fracture Toughness of High Strength Hardened Cement Paste

김정환*

Kim, Jung Hwan

요 약

본 연구에서는 수경성 시멘트 경화체의 구조적 결함인 휘강도를 향상시키기 위해 보통 포틀랜드 시멘트에 물-시멘트비를 0.1로 하여 혼합수량을 줄이고 수용성 고분자 물질인 Hydroxy Propyl Methyl Cellulose (HPMC)를 첨가하여 시멘트 입자의 윤회작용에 따른 균일한 분산효과와 결합효과를 얻도록 하였으며, twin roll mill로 혼련 성형하여 치밀하고 균일한 경화체 시편을 제조하였다. 이러한 고강도 시멘트 경화체의 휘강도는 약 96MPa, 탄성계수는 60GPa로 우수한 특성을 나타내었다. 고강도시멘트의 고강도화 기구는 100 μ m 이상의 큰 기공체가 및 균열성장경로인 모세관 기공의 감소, 미수화 시멘트의 증가로 인한 탄성계수의 증가와 crack toughening (입자 가교, 고분자 섬유 가교, frictional interlocking)에 의한 파괴 인성의 향상 때문인 것으로 판단된다.

Abstract

In this work, in order to improve the flexural strength of hardened portland cement paste, mixing water was reduced to water cement ratio of 0.1 and water soluble polymer such as hydroxy propyl methyl cellulose was added to the paste to obtain a better dispersion. The paste was kneaded by the twin roll mill for compact and homogeneous mixing. The high strength mechanism of the hardened cement paste may be due to the removal of macropores larger than 100 μ m, the reduction of capillary pores acting as the passage of crack propagation, the increase of Young's modulus with increase of unhydrated cement and the increase of fracture toughness with the crack toughening mechanism (grain bridging, polymer fibril bridging and frictional interlocking).

Keywords : MDF Cement, high strength cement, fracture toughness, young's modulus, flexural strength, crack toughening.

* 정회원, 한일시멘트 대천연구소 시멘트연구소

• 본 논문에 대한 토의를 1995년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 1995년 4월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

토목 및 건축의 구조재료로 사용되는 포틀랜드 시멘트의 압축강도는 상당히 우수하나 인장 및 휨 강도는 5-10MPa 정도는 낮다. 이러한 결점을 보완하기 위하여 철근과 같은 보강재료를 사용하여 결점을 보완하거나 보강재료없이 시멘트 경화체만으로 높은 휨강도 및 인장강도를 갖도록 하는 연구가 진행되어 왔다.

일반적으로 시멘트 경화체의 고강도화에 관한 연구는 1960년대 autoclave 양생에 의한 고강도화^(1,2) 및 hot pressing법⁽³⁾, 섬유보강에 의한 고강도화로서 석면⁽⁴⁾, 유리섬유⁽⁵⁾, 강철섬유⁽⁶⁾, 탄소섬유⁽⁷⁾ 등을 통한 연구가 이루어지고 있으며, silicafume, flyash, slag 등의 혼합재를 첨가하여 포졸란 반응에 의한 강도 증진의 효과를 나타내는 시멘트 복합체도 개발되고 있다.⁽⁸⁾

한편, 1980년에 Birchall⁽⁹⁾ 등은 시멘트에 소량의 물과 적당한 수용성 고분자 물질을 첨가시키고 twin roll mill로 전단력을 가함으로써 첨가한 고분자 물질이 시멘트 입자간의 유험성과 충전효과를 높이도록 하는 macro-defect-free (MDF) 시멘트 경화체를 개발하였다. Birchall등은 조직의 치밀화로 기공율을 감소시키고 특히 100 μm 이상의 기공 (macro defect)을 제거함으로써 고강도화를 이룰 수 있었다. 이러한 MDF 시멘트의 개발로 인해 최근 시멘트는 일반적인 토목 및 건축용 구조재료로서의 개념에서 탈피하여 특수 용도로서의 응용이 가능하게 되었으며 또한 이에 관한 많은 연구 발표가 있어왔다.⁽¹⁰⁻¹⁵⁾ 또한 시멘트 경화체의 파괴인성 증가가 강도와 밀접한 관계가 있고, 탄성계수가 큰 미세입자를 첨가한 시멘트 복합체도 강도를 증가시킨다는 연구 결과도 있다.⁽¹⁶⁾

본 연구에는 이미 발표된 MDF 고강도 시멘트 경화체의 관련연구⁽¹⁷⁻¹⁹⁾에 이어 0.1의 물-시멘트비로 제작된 MDF 시멘트 경화체의 고강도 기구 및 파괴인성 기구를 규명 하였다. 또한 물-시멘트비가 0.4인 일반 시멘트 경화체와 물-시멘트비가 0.1인 고강도 시멘트 경화체의 비교 연구를 병행하였다.

2. 실험방법

2.1 시편 제조

고강도 시멘트 경화체 시편은 Birchall⁽⁹⁾의 MDF시멘트 제조공정과 동일한 방법으로 제작하였다. 먼저 MDF 시멘트 경화체 제조시 고분자 물질의 역할을 그림 1에 나타내었다. 먼저 물을 가하면 수용성 고분자 물질이 우선 시멘트 입자와 강하게 접촉하게 되고 여기에 강력한 전단력이 가해지면 시멘트 입자는 고분자 물질의 효과적인 유험작용으로 인하여 쉽게 분산이 된다. 이때 미수화 시멘트 입자의 수화가 진행되면서 수용성 고분자 물질의 탈수가 일어나게 되고 입자는 재배열되어 기공을 감소시키고 조직의 치밀화가 이루어지게 된다. 따라서 조직의 치밀화를 위해 I종 보통 포틀랜드 시멘트에 수용성 고분자 물질인 Hydroxy propyl methyl cellulose (HPMC)와 sulfonate naphthalene formaldehyde condensate의 고성능 감수제를 각각 시멘트에 대한 무게비로 3%씩 첨가한 후 물-시멘트비가 0.1이 되도록 물을 첨가하여 혼합하였다. 이것을 twin roll mill로 혼합 성형한 후 아크릴 판으로 압력을 가하여 두께 2mm 정도의 판상 경화체를 제조하였다. 이들 시편을 습윤함에서 3, 7, 14, 28, 60일간 양생한 후 60 $^{\circ}\text{C}$ 로 7일간 건조하였다. 또한 비교실험을 위한 일반 시멘트 경화체는 시멘트에 W/C=0.4가 되도록 물을 첨가한 후 몰드에 주입성형하였다. 이것을 습윤함에서 24시간 양생 후 탈형하여 25 $^{\circ}\text{C}$ 수중에서 3, 7, 14, 28, 60일간 썩 양생하였다.

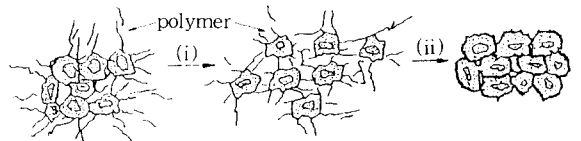


Fig. 1 The role of the polymer in the formation of MDF cement doughs.⁽⁹⁾
(i) shear : (ii) hydration of particles, dehydration of polymer.

2.2 측정 방법

2.2.1 휨강도 및 탄성계수 측정

제조된 시편의 휨강도 (σ_{fl})는 KSL 1591 (고성능 요업제품의 시험방법)에 의한 3점 휨 시험법 (Three point bending method)으로 다음식에 따라 구하였다.

$$\sigma_{fl} = \frac{3PL}{2d^2w} \quad (1)$$

여기서 σ_{fl} 는 휨강도, d 는 시편의 높이(depth), P 는 하중, w 는 시편의 폭(width) 그리고 L 은 지간거리이다.

휨강도와 탄성계수의 측정에는 Instron 4302를 사용하였다. 하중제어는 0.05mm/min으로 하였고 지간 거리는 40mm로 하였으며 시편의 크기는 길이 100mm, 높이 10mm, 폭 2mm로 하여 측정하였다. 또한 탄성계수 (E_b)는 KSL 1594 (고성능 요업제품의 탄성을 측정방법)에 따라 다음식으로 계산하였다.

$$E_b = \frac{PL^3}{4wd^3y} \quad (2)$$

여기서 E_b 는 탄성계수이며 d 는 시편의 높이(depth), P 는 하중, w 는 시편의 폭(width), L 은 지간 거리 그리고 y 는 비틀림이다.

2.2.2 파괴인성 (K_{IC})의 측정

파괴인성 (K_{IC}) 값은 KSL 1591에 의한 시편으로 그림 2와 같은 시편을 사용하여 다음의 Brown 공식으로 부터 계산하였다.⁽²⁰⁾

$$K_{IC} = Y\sigma_{fl}aF \text{ (MPa}\mu\text{m}^2\text{)} \quad (3)$$

$$\sigma_{fl} = \frac{3PL}{2d^2w} \quad (4)$$

$$Y = \frac{1.93 - 3.07(a/d) + 14.53(a/d)^2 - 25.11(a/d)^3 + 25.80(a/d)^4}{(a/d)^3 + 25.80(a/d)^4} \quad (5)$$

여기서 a 는 notch의 길이이며, Y 는 a/d 에 의존하는 상수이다. 또한 $L/d=4$, $a/d=0.5$ 가 되도록

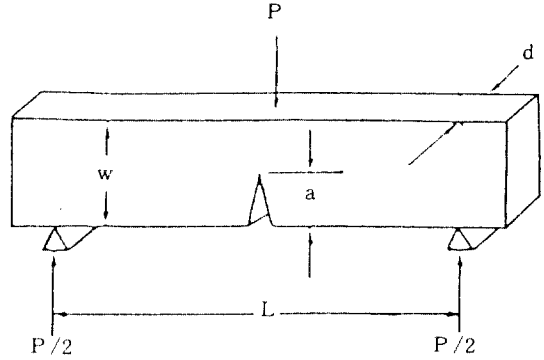


Fig. 2 The single edge notched beam specimen.

록 하였다.

2.2.3 균열발생 및 미세구조 관찰

강도 및 파괴인성에 대하여 미세구조를 관찰하기 위하여 그림 3과 같이 double cantilever beam 시편을 사용하여 인위적으로 균열을 발생시켰으며 균열성장시 일어나는 균열성장방해기구를 주사 전자 현미경으로 관찰하였다. 일반적으로 균열성장억제기구는 균열선단에서 판단하는 것이 마땅하나, 측정에 많은 어려움이 있어 본 연구에서는 균열이 성장한 균열선단 후면을 관찰하여 균열성장억제기구를 관찰하였다.⁽²¹⁻²²⁾

3. 결과 및 고찰

3.1 휨강도 및 탄성계수

그림 4는 $W/C=0.4$ 인 일반 시멘트 경화체와

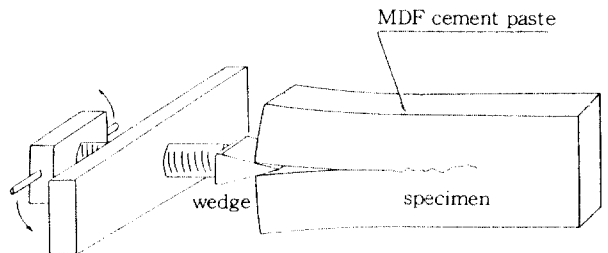


Fig. 3 Schematic diagram of double cantilever beam specimen used to observe crack growth.

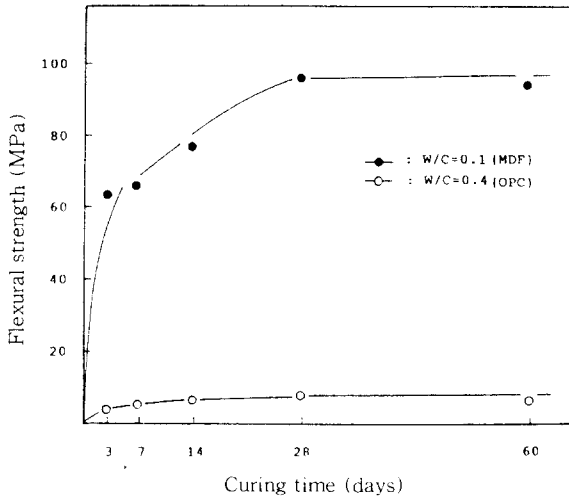


Fig. 4 Flexural strength of hardened cement paste with various curing time.

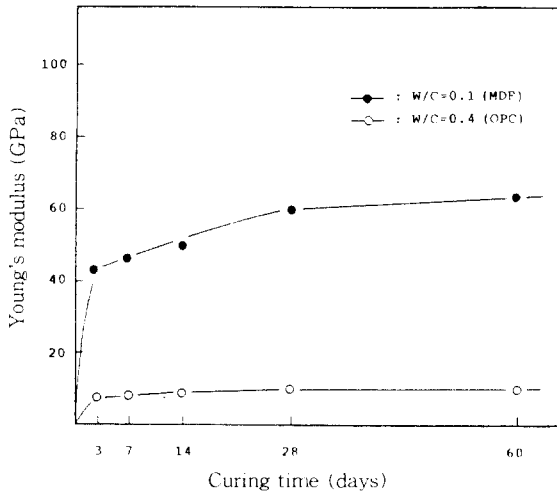


Fig. 5 Young's modulus of hardened cement paste with various curing time.

W/C=0.1인 고강도 시멘트 경화체에 대하여 양생기간별로 휨강도를 측정한 결과이다. W/C=0.4인 일반 시멘트 경화체는 양생기간에 따라 강도가 서서히 증가하여 28일 양생시 10MPa 정도로서 양생기간을 증가시켜도 더 이상의 강도 증가는 없었다. 그러나 W/C=0.1인 고강도 시멘트 경화체에서는 3-7일 양생시켰을 때 이미 60MPa 정도의 값을 나타내어 W/C=0.4인 일반 시멘트 경화체 보

다 6배 이상의 강도값을 나타내었고 28일 양생시켰을 때 약 96MPa의 값을 나타내어 10배 정도의 고강도화를 보여주었다.

그림 5는 경화체의 탄성계수의 변화를 양생기간별로 나타낸 것이다. W/C=0.4인 일반 시멘트 경화체는 3일에서 60일까지 양생시키면 8GPa에 약 10GPa로 다소 증가하는 경향을 보였으나, W/C=0.1인 고강도 시멘트 경화체의 탄성계수는 3일 양생시 40GPa, 60일 양생시 60GPa 정도로서 W/C=0.4인 일반 시멘트 경화체 보다 크게 증가하는 것을 알 수 있었다.

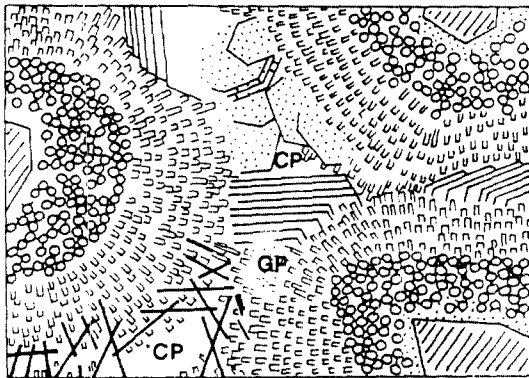
시멘트 경화체의 탄성계수에 대하여 Hansen⁽²³⁾은 mixture rule로서 설명하였으며, 이러한 mixture rule에 의하여 Alford⁽¹⁶⁾ 등은 MDF 시멘트 경화체의 탄성계수의 증가는 미수화 시멘트가 많기 때문이라고 하였다.

본 연구에서 고강도 시멘트 경화체의 탄성계수가 일반 시멘트 경화체 보다 6배 정도 증가한 것은 twin roll mill에 의한 전단 혼합 및 양생에 의한 조직의 치밀화, 즉 기공을 감소에 따른 식 $E = E_0(1-P)^3$ (E_0 = 기공이 없는 경우의 탄성계수, P=기공율, E=탄성계수)에 의해 탄성계수가 증가하고 수화물인 CSH보다 상대적으로 탄성계수가 큰 약 70%에 달하는 미수화 시멘트의 존재⁽¹⁹⁾ 때문에 탄성계수가 증가한 것으로 생각된다.

3.2 파괴인성 (K_{IC}) 및 미세구조 관찰

Brown의 공식에 의하여 계산된 K_{IC} 값은 W/C=0.4인 일반 시멘트 경화체를 60일 양생시켰을 때 0.30MPa mF, W/C=0.1인 고강도 시멘트 경화체는 1.28MPa mF 정도로서 고강도 시멘트 경화체가 약 4배 정도 높은 파괴인성값을 나타내었다.

한편 K_{IC} 값은 경화체내의 각 물질 (미수화 시멘트, 수화 시멘트겔) 사이의 결합력에 크게 영향을 받는다. 즉 K_{IC} 값의 증가로 파괴시 균열성장을 저해하는 정도를 나타내는 균열성장방해기구에 의해 결정된다. 이것을 확인하기 위하여 균열성장방해기구를 주사 전사현미경으로 관찰하였다.



- : unhydrate alite
- : inner C-S-H
- : outer C-S-H
- CP : capillary pore
- : $\text{Ca}(\text{OH})_2$
- : ettringite
- : monosulphate
- GP : gel pore

Fig. 6 The structure of the hardened cement paste.^[25]

먼저 그림 6에 시멘트 경화체의 미세구조를 모식적으로 나타내었다.^[24] 그림과 같이 시멘트 경화체는 미수화 시멘트(alite)입자 주위에 수화에 의하여 생성된 CSH겔 등이 자리잡고 있으며 그사이를 C_3A 및 C_4AF 의 수화에 의하여 생성된 ettringite 와 monosulphate 및 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 결정이 채우고 있다. 이러한 수화물 사이의 공간 특히 CSH겔층 사이의 비교적 큰 공간이 모세관 기공이며 CSH겔 사이에 형성된 미세한 기공이 겔기공이다. 따라서 시멘트 경화체의 결합력은 CSH겔의 결합력 및 형성된 수화물의 충전 정도에 크게 좌우되며, 일반적으로 균열성장은 CSH 겔층 사이의 모세관 기공을 따라 진행된다.^[25]

그림 7은 $W/C=0.1$ 인 고강도 시멘트 경화체에서 CSH겔의 결합상황을 균열단면에서 살펴본 것으로 균열성장 후 미세하게 물려있는 CSH겔의 형태를 모식도와 함께 보여주고 있다. 결국 시멘트 경화체가 파괴될 때 균열성장은 모세관 기공을 따라 CSH겔의 결합을 끊고 진행하게 되어 시멘트 경화체의 파괴인성값(K_{IC})은 CSH겔의 결합력 및 모세관 기공에 의하여 영향을 받게된다. 따라서 $W/C=0.1$ 인 고강도 시멘트 경화체의 K_{IC} 값 증가는 조직의 치밀화에 의한 모세관 기공의 감소와 입자간의 접촉 면적이 증가되어 CSH겔의 결

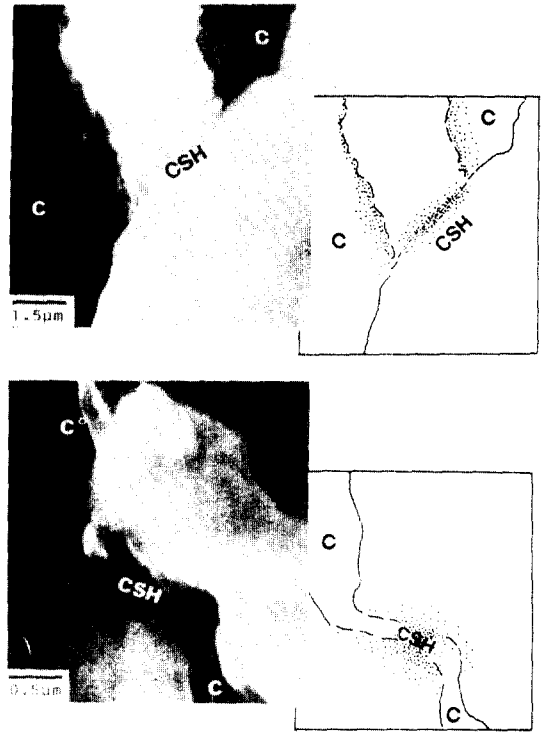
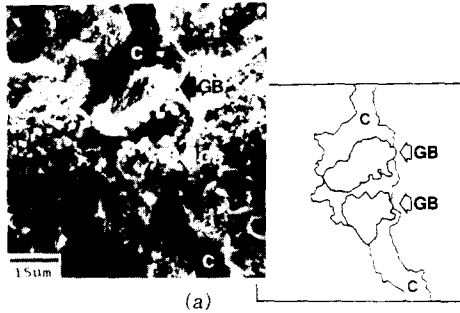
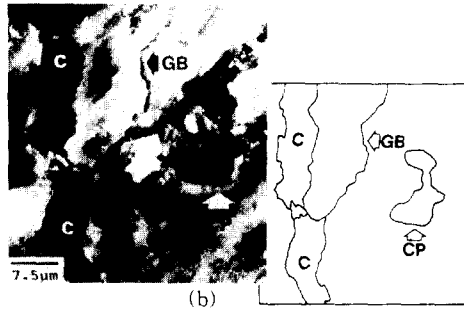


Fig. 7 Scanning electron micrographs and schematic illustrations of MDF cement paste, showing examples of C-S-H bonding at crack sites. ($W/C=0.1$, cured for 60 days)
CSH : C-S-H bonding
C : crack

합력이 향상되었기 때문인 것으로 생각된다. 또한 $W/C=0.1$ 인 고강도 시멘트 경화체는 미수화 시멘트 입자가 다수 존재하여 그림 8의 미수화 입자에 의한 입자가교 및 그림 9의 입자가교 부근에서의 입자간 frictional interlocking 및 그림 10의 첨가된 HPMC의 고분자 섬유가교등에 의한 균열성장을 방해하는 요인의 증가 때문에 높은 파괴인성치를 갖는 것으로 생각된다.^[21~22] 이들 각각에 대하여 살펴보면, 먼저 입자가교부근에서의 frictional interlocking은 두입자간의 물리적 접촉에 의해 균열성장이 저해되며, frictional interlocking이 발생하는 곳에 위치하고 있는 입자에서는 제 2차 미세균열 (secondary crack)이 발생하는 경우가 많아 이로 인해 1차 균열의 응력 집중이 분산되어 파괴인성이 증가하게 된다. 또한 고분자 섬유가교



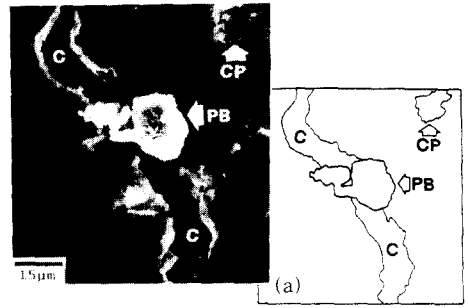
(a)



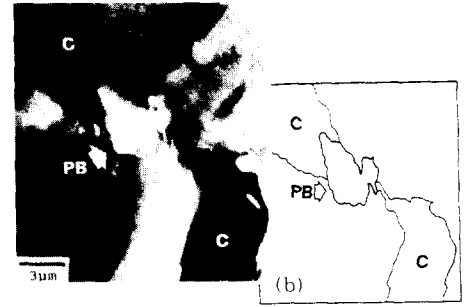
(b)

Fig. 8 Scanning electron micrographs and schematic illustrations of MDF cement paste, showing examples of grain bridging. (W/ C=0.1, cured for 60 days)

GB : grain bridging C : crack CP : capillary pore



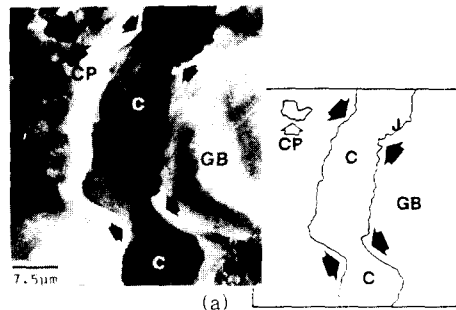
(a)



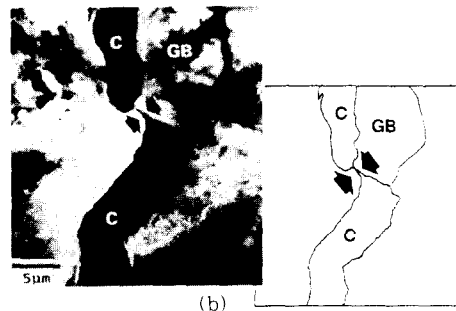
(b)

Fig. 10 Scanning electron micrographs and schematic illustrations of MDF cement paste, showing examples of polymer fibril bridging. (W/ C=0.1, cured for 60 days)

PB : polymer fibril bridging C : crack CP : capillary pore



(a)



(b)

Fig. 9 Scanning electron micrographs and schematic illustrations of MDF cement paste, showing examples of frictional interlocking at grain bridging sites. (W/ C=0.1, cured for 60 days)

: Frictional interlocking at grain bridging
C : crack CP : capillary pore GB : grain bridging

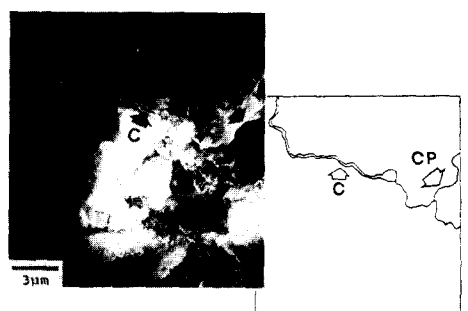
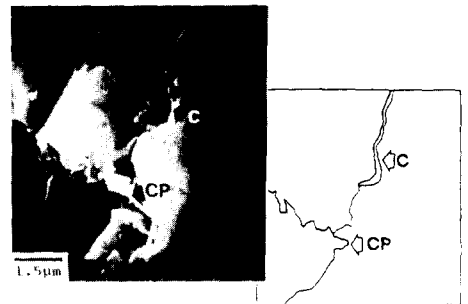


Fig. 11 Scanning electron micrographs and schematic illustrations of MDF cement paste, showing examples of termination of the crack. (W/ C=0.1, cured for 60 days)

CP : capillary pore C : crack

인 경우, Eden과 Bailey의 보고⁽²⁶⁾에 의하며 수용성 고분자 물질은 건조 후 자체적으로 상당한 강도를 갖게 된다. 고분자 물질은 미수화 물질을 결합시키는 섬유상의 CSH와 반응하여 CSH-고분자 물질-CSH구조를 이루어 미수화 입자 주위의 CSH 결합을 끊고 성장하는 균열을 고분자 물질이 방해하여 파괴인성이 증가하게 된다.

그림 11은 W/C=0.1인 고강도 시멘트 경화체의 균열성장과정에서 균열이 더이상 성장하지 못하고 모세관 기공에서 균열성장이 멈추는 것을 모식도와 함께 나타내었다. 이후 다시 힘이 가해진 경우 균열은 이 모세관 기공을 따라 다시 성장할 것으로 판단된다. 한편 그림 8(b), 그림 9(a) 및 그림 10(a)에 나타난 균열성장방향에 수직으로 형성된 모세관 기공은 균열성장에 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있었다. 결국 균열성장은 미수화 시멘트 입자 계면을 따라 균열성장방향에 평행한 모세관 기공으로 CSH 결합을 끊으며 성장하는 것으로 판단된다.

3.3 고 찰

MDF 고강도 시멘트 경화체의 고강도화는 우선 Birchall(9)의 이론에 따라 1mm 이상의 큰 기공 즉 Griffith 결함을 제거하므로써 이루어지며, 다른 연구자들은 이러한 Griffith이론이 최대 기공 크기가 90 μ m 정도까지는 잘 부합된다고 하였다.⁽⁴⁴⁻⁴⁵⁾ 한편 기공크기가 90 μ m 이하로 작은 경우에는 또다른 결함, 즉 Alford⁽¹⁶⁾는 입자 사이의 계면(겔/미수화시멘트 계면, 겔/Ca(OH)₂ 결정계면)이 강도에 영향을 미친다고 하였다.

본 연구에서, W/C = 0.1인 고강도 시멘트 경화체의 고강도화는 첫째, 성형시 첨가한 HPMC의 윤활작용과 고성능 감수제의 감수효과 및 강력한 전단응력에 의한 성형으로 1mm이상의 큰기공이 제거되었고⁽⁵⁻⁷⁾ 양생효과에 의한 모세관 기공의 감소로 조직이 치밀화되어^(6,7) Griffith 결함이 제거되었기 때문이며, 둘째, W/C가 감소되므로써 수화물인 CSH겔 보다 탄성계수가 큰 미수화 시멘트 양이 증가하여, mixture rule에 의한 탄성계수 증가 및 기공을 감소에 의해 경화체 전체의 탄

성계수가 증가하게 되고 결과적으로 기공을 감소에 의한 유효 단면적 증가로 강도가 증가한 것으로 판단되며,

셋째, 모세관 기공의 감소로 경화체내에서 균열성장방해 요인을 증가시키게 되고 또한 미수화 시멘트 및 고분자 물질의 가교 현상으로 파괴 저항성이 커지게 되며, 조직의 치밀화로 유효단면적이 증가하고 CSH겔의 결합력이 증가하여 강도 및 파괴인성이 증가한 것으로 판단된다.

4. 결 론

W/C=0.1로 하고 수용성 고분자물질인 HPMC를 첨가한 고강도 시멘트 경화체와 W/C=0.4로 한 일반 시멘트 경화체를 60일간 양생시켰을 때 그들의 강도 및 파괴인성을 측정할 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) W/C=0.1인 고강도 시멘트 경화체의 휨강도는 96MPa정도로서 W/C=0.4인 일반 시멘트 경화체의 휨강도보다 10배 정도 강도가 증가하였으며, 탄성계수 역시 60GPa정도로서 일반 시멘트 경화체 보다 6배 정도 우수한 특성을 나타내었다.

2) W/C=0.1인 고강도 시멘트 경화체의 파괴인성값(KIC)은 1.28MPa mF 정도로서 일반시멘트 경화체의 4배 정도였으며, 이것은 균열전파 경로인 모세관 기공의 감소, 치밀화에 의한 결합력 향상 및 균열성장방해요인의 증가(입자가교, 고분자 섬유가교, frictional interlocking)에 기인한다.

3) W/C=0.1인 고강도 시멘트 경화체의 고강도화 기구는 Griffith 결함인 큰 기공의 제거 및 균열성장경로인 모세관 기공의 감소로 인한 유효 단면적 증가, 미수화 시멘트양의 증가로 인한 경화체의 탄성계수 증가등에 기인하는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Taylor, H.F.W., "The Chemistry of Cement," vol.1-2, Academic Press, London, 1964
2. 竹本國博, "オートクレブ養生によるセメントの水和," 窯協, 73[3-1], 1965, pp.45-51

3. Roy, D.M. and Gouda, G.R., Bobrowsky, A., "Very High Strength Cement Pastes Prepared by Hot Pressing and Other High Pressure Techniques," *Cem. Conc. Res.*, vol.2, 1972, pp.349-366
4. Akers, S.A.S. and Garrett, G.G., "Fiber-Matrix Interface Effects in Asbestos-Cement Composites," *J. Mater. Sci.*, vol.18, 1983, pp. 2200-2202
5. West, J.M, Majumdar, A.J. and Vekey, R. C., "Lightweight Glass Reinforced Cement," *Composite*, vol.1, 1980, pp.19-24
6. Bentur, A., Diamond, S. and Mindess, S., "Cracking Processes in Steel Fiber Reinforced Cement Paste," *Cem. Conc. Res.*, vol.15, 1985, pp.331-342
7. Ali, M. A., Majumdar, A.J. and Rayment, D. L., "Carbon Fiber Reinforced of Cement," *Cem. Conc. Res.*, vol.2, 1972, pp.201-212
8. Buil, M., Paillere, A. M. and Roussel, B., "High Strength Mortars Containing Condensed Silica Fume," *Cem. Conc. Res.*, vol.14, 1984, pp.693-704
9. Birchall, J. D., Howard, A. J. and Kendell, K., European Patent Publication No.0021628, Imperial Chemical Industries Ltd., 1981
10. Kendell, K., Howard, A. J. and Birchall, J. D., "The Relation Between Porosity, Microstructure and Strength and Approach to Advanced Cement-Based Materials," *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, A310, 1983, pp.139-153
11. Birchall, J. D., Howard, A. J. and Kendell, K., "Flexural Strength and Porosity of Cement," *Nature*, 298(29), 1981, pp.388-389
12. Sinclair, W. and Groves, G. W., "High Strength Cement Pastes, Part I Microstructure," *J. Mat. Sci.*, 20, 1985, pp.2846-2852
13. Rodger, S. A., Brooks, S. A., Sinclair, W., Groves, F. W. and Double, D. D., "High Strength Cement Paste, Part II Reactions during Setting," *J. Mater. Sci.*, 20, 1985, pp. 2853-2860
14. 田澤榮一, "MDF セメント," *セメントコンクリート*, No.441, 1983, pp.8-9
15. Berg, M and Young, J. F., "Introduction to MDF Cement Composites," *ACBM*, 1(2), 1989, pp.1-4
16. Alford, N. McN, Froves, G. W. and Double, D. D. "Physical Properties of High Strength Cement Pastes," *Cem. Conc. Res.*, 12, 1982, pp.349-358
17. Kim, J. H., Choi, S. H. and Han, K. S., "Effect of Water-Soluble Polymer on the Properties of High Strength Hardened Cement Paste," *J. Kor. Ceram. Soc.*, 26(5), 1989, pp. 698-704
18. Kim, J. H., Choi, S. H. and Han, K. S., "Effect of Microstructure on the Properties of High Strength Hardened Cement Paste(I)," *ibid*, 27(7), 1990, pp.861-868
19. Kim, J. H., Choi, S. H. and Han, K. S., "Effect of Microstructure on the Properties of High Strength Hardened Cement Paste(II)," *ibid*, 27(8), 1990, pp.1034-1042
20. Irwin, G., Paris, P. and Tada, H., *The Stress Analysis of Crack Handbook*, Del Research Corporation, 1973, pp.1.1-2.21
21. Swanson, P. L., Fairbanks, C. J., Lawn, B. R., Mai, Y. U. and Hockey, B. J., "Crack-Interface Grain Bridging as a Fracture Resistance Mechanism in Ceramics; I, Experimental Study an Alumina," *J. Am. Ceram. Soc.*, 70[4], 1987, pp.279-289
22. Mai, Y. W., Baraket, B., Cotterell, B. and Swain, M., "Mechanism of Crack Growth Resistance in Macro-Defect-Free Cement Paste," *MRS*, 13, 1988, pp.187-193
23. Hansen, T. C., "Influence of Aggregate and Void on Modulus of Elasticity of Concrete, Cement Mortar and Cement Paste," *J. Am. Concr. Inst.*, No.62-11, 1965, pp.193-215
24. 内川浩, "セメントゲル," *セメントコンクリート*, No. 407, 1981, pp.46-51
25. Struble, L. J., Stutman, P. E. and Fuller, E. R., "Microstructure Aspects of the Fracture of Hardened Cement Paste," *J. Am. Ceram. Soc.*, 72(12), 1989, pp.2295-2299
26. Eden, N. B. and Bailey, J. E., "The Mechanical Properties and Tensile Failure Mechanism of High Strength Polymer Modified Portland Cement," *J. Mater. Sci.*, 19, 1984, pp. 2677-2690

(접수일자 : 1994. 8. 2)