

# 고강도 콘크리트의 한계

大濱 嘉産

번역: 권 순 옥

〈한일시멘트공업(주) 대전연구소 2차제품연구실 연구원〉

## 1. 머릿말

최근에는 압축강도가 1,000kgf/cm<sup>2</sup> 정도의 고강도 콘크리트를 비교적 용이하게 제조할 수 있게 되었고, 그의 실용화의 진전에 따라서 콘크리트 강도의 한계에 관심이 높아지고 있다. 그러므로 콘크리트와 같이 재료과학적으로 복잡한 재료의 강도한계를 밝혀내기는 쉬운일이 아니다.

본고에서는 콘크리트의 강도한계를 검토한 후에, 콘크리트의 고강도화 방법에 대해 논하고 각종의 방법에 의해서 얻어진 고강도를 이론적인 한계와 비교해 보도록 하겠다.

## 2. 콘크리트강도의 이론적인 한계

일반적으로 콘크리트를 포함해서 각종재료의 시험편 또는 공시체로 측정된 강도는 화학결합에 기인하고, 원자간 또는 분자간의 결합에너지에서 구한 이상강도의 1/10~1/10,000 정도이다.

이것의 주된 원인은 재료중에 포함되는 잠재결합에 의한 응력집중의 영향이라고 생각

된다. 따라서 콘크리트의 강도도 기본적으로는 고체재료의 파괴강도에 적용되는 다음과 같은 Griffith의 이론식을 이용해서 검토할 수있다.

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}} \dots\dots\dots(1)$$

여기에서  $\sigma_0$ : 재료의 고유강도(인장강도), E: 영계수 (탄성계수),  $\gamma$ : 표면에너지, 2a: 잠재결합을 타원공극이라고 가정한 경우의 장경

(1)식에 나타난 것과 같이, 재료의 고유강도를 높이기 위해서는 E와 $\gamma$ 을 크게하고 잠재결합 a를 작게 할 필요가 있는 것을 알 수 있다. (1)식은 2차원탄성판 모델에 관한 것이지만, 이것을 3차원 탄성판 모델로 확장하면 다음식과 같다.

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\pi E\gamma}{2(1-\nu^2)a}} \dots\dots\dots(2)$$

여기에서  $\nu$ : 재료의 포아송비

(2)식에서  $E=2 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ ,  $\gamma = 2 \times$

10<sup>3</sup>(시멘트 페이스트), 4×10<sup>3</sup>(모르타르), 10×10<sup>3</sup>(콘크리트)erg/cm<sup>2</sup>, ν : 0.2, 잠재결합의 크기 a(타원공극의 반경)를, 시멘트 페이스트는 0.0001~0.01mm, 모르타르는 2mm, 콘크리트는 10mm라고하고, (2)식에 대입하면 (표1)과 같이 시멘트페이스트, 모르타르 및 콘크리트의 고유강도(인장강도)를 산정할 수 있다. 이 경우 모르타르와 콘크리트에서는 잠재결합의 촌법(寸法)a를 거의 골재 크기로 간주하고 있다. (표1)에 의하면 잠재결합의 촌법a가 시멘트페이스트<모르타르<콘크리트의 순서로 커짐에 따라서 그것들의 고유강도가 현저하게 저하하는 것을 잘 알 수 있다.

다시말하면, 골재입경이 커지는 만큼 잠재결합의 영향이 두드러지기 때문에, 높은 고유강도를 얻는 것이 어렵게 된다. 따라서 재료의 잠재결합으로서, 장경 2a, 단경 2b의 타원공극으로 가정하고, 이것을 포함한 2차원 탄성판 모델을 고려하면, 재료의 인장강도는 일반Griffith규준을 적용하고, 그 고유강도를 이용하면 다음식과 같이 표현된다.

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sigma_t}{1 + (2a/b)}} \dots\dots\dots(3)$$

여기에서 σ<sub>t</sub>: 재료의 인장강도  
a/b: 편평도

(표1) 시멘트페이스트, 모르타르 및 콘크리트의 고유강도와 인장강도

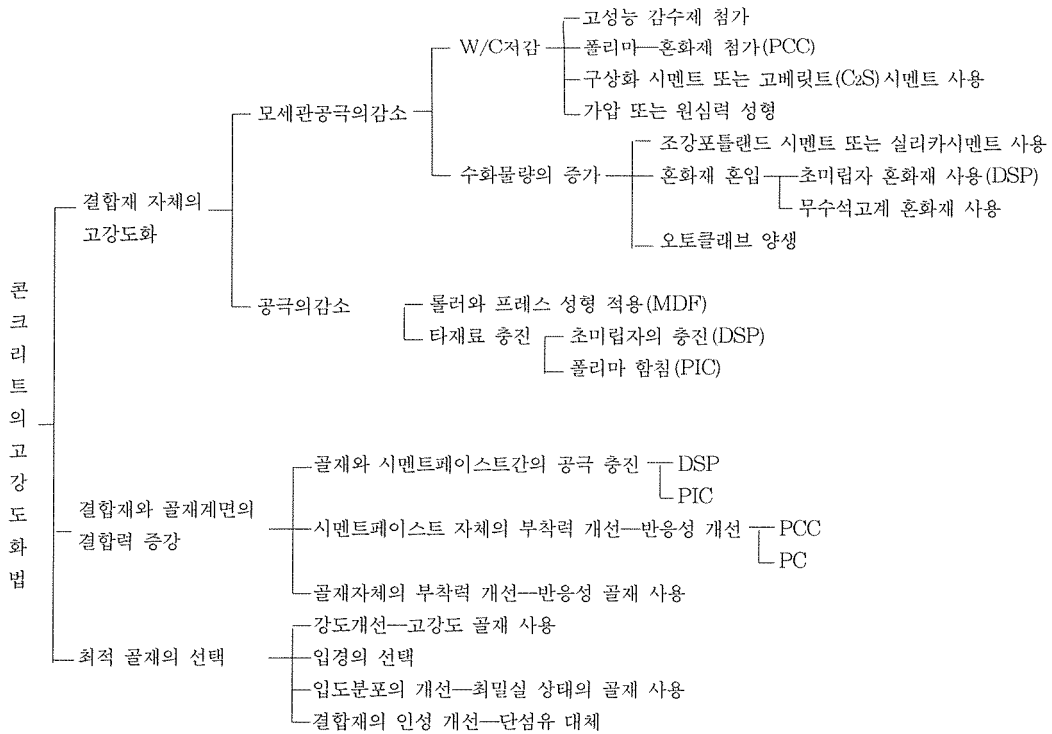
材料定數	시멘트페이스트	모르타르	콘크리트
E(kgf/cm <sup>2</sup> )	2×10 <sup>5</sup>	2×10 <sup>5</sup>	2×10 <sup>5</sup>
γ (erg/cm <sup>2</sup> )	2×10 <sup>3</sup>	4×10 <sup>3</sup>	10×10 <sup>3</sup>
ν	0.2	0.2	0.2
a(mm)	0.0001	0.01	2
σ <sub>0</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	8000	800	80
σ <sub>t</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	400	40	26
	(a/b=10)	(a/b=10)	(a/b=1)

시멘트페이스트의 경우, a/b=10으로 하면 식(3)은 σ<sub>t</sub>≒0.05σ<sub>0</sub>가 되며, 이 식으로 구한 인장강도는 (표1)에 나타냈다.

또 골재입경이 커짐에 따라서 a/b는 1에 가깝게 되므로, 모르타르 및 콘크리트에서는 a/b=1로 하면 식(3)은 σ<sub>t</sub>≒0.33σ<sub>0</sub>가 되고, 이 식으로 구한 인장강도는 (표1)에 나타냈다. (표1)에 나타낸 시멘트페이스트의 인장강도 계산치 σ<sub>t</sub>=400kgf/cm<sup>2</sup>는 Roy가 Hot Press법에 의하여 제조한 시멘트페이스트의 시험치 650kgf/cm<sup>2</sup>에 매우 가까운 값이고, 시멘트페이스트의 인장강도 한계라 할 수 있다. (표1)에 나타낸 데이터의 경향을 보면 모르타르 또는 콘크리트에서도 잠재결합의 촌법을 될 수 있는 한 작게하면 높은 인장강도를 얻을 수 있다. 그러므로 모르타르 및 콘크리트의 공학적 요인인 골재촌법을 작게하는데는 한계가 있으므로 모르타르 및 콘크리트의 한계 인장강도는 시멘트페이스트의 값만큼 얻기는 힘들 것으로 생각된다.

한편 콘크리트의 압축강도는 일반 Griffith규준을 적용해서, 압축하중하에서 잠재결합에 의한 균열발생응력을 구할 수 있지만 이 값으로 압축강도를 계산하는 것은 불가능하다. 또 압축강도는 공시체라고 하는 일종의 구조체 내력이기 때문에 그 한계 압축강도를 구하는 것은 어렵다고 생각된다. 따라서 종래부터 콘크리트 압축강도에 관한 이론인 물시멘트비이론, 공극이론등은 경험에 의한 것으로서 공극율(포로시티)에 의존한 것이다. 어쨌든 공극율이 감소와 함께 콘크리트의 압축강도가 증가하는 것이 확인되고 있다.

공극율을 극한적으로 작게하기 위해 Hot Press를 적용한 Roy의 실험에서 시멘트페이스트의 공극율이 1.78%가 되었으며 이때 6,650 kgf/cm<sup>2</sup> 라고하는 경이적인 압축강도를 얻었다. 앞으로도 시멘트페이스트의 공극율을 1.78%이하로 저하시키는 것은 어려운 것으로 예상되므로, 6,550kgf/cm<sup>2</sup> 가 압축강도의 한계라고 생각해도 좋을 것이다.



(그림 1) 콘크리트의 고강도화 방법

### 3. 콘크리트의 고강도화 수법

콘크리트는 시멘트페이스트라고 하는 결합재에 모래, 쇠석등과 같은 골재로 이루어진 2상계복합재료라고 생각할 수 있기 때문에 이것을 고강도화 하기 위해서는 다음과 같은 방법이 필요하다.

- (1) 결합재 자체의 고강도화
- (2) 결합재와 골재계면의 결합력증강
- (3) 최적골재의 선택
- (4) (1)~(3)조합에 의한 효과

이와같은 효과에 기초하여, 콘크리트의 고강도화가 실현될 수 있는 방법과 이것에 의해 현재까지 개발되고 있는 주요한 초고강도 및 고강도콘크리트계 재료의 예를 (그림1)에 표시했다.

(그림 1)에 나타난 콘크리트의 고강도화방법에 대하여 약간의 설명을 하겠다.

#### 3.1 결합재 자체의 고강도화

콘크리트의 결합재인 시멘트페이스트는 (그림 2)에 나타냈듯이 시멘트수화물(시멘트겔), 미반응시멘트, 모세관공극(capillary pore), 젤공극(gel pore) 및 잠재공기(entrapped air)에 기인한 공극(pore)으로 구성되어있다. 또 시멘트페이스트의 공극이 시멘트페이스트의 성질에 미치는 영향을 (표2)에 나타냈다.

이 공극들중에서 시멘트페이스트의 강도에 영향을 주는 것은, 주로 모세관공극과 잠재공기에 기초한 공극이다. 따라서 콘크리트의 결합재인 시멘트페이스트의 고강도화를 위해서는 모세관공극과 잠재공기에 기인한 공극으로 이루어진 직경 10nm이상의 공극을 효과적으로 감소시킬 필요가 있다. 이것이 시멘트페이스트의 고강도화의 원리이다. 시멘트페이스트의 공극을 감소시키기 위해서는 물시멘트비의

(표 2) 시멘트페이스트중의 공극분류

Designation	Diameter	Designation (Name of corresponding pore)	Role of water	Paste properties affected
Macropores	1000-15 $\mu$ m	Large spherical voids	Behaves as bulk water	Strength, permeability
Capillary pores	15-0.05 $\mu$ m	large capillaries	Behaves as bulk water	Strength, permeability
	50-10 nm	Medium capillaries Capillary cavity Inter gel-particle pores	Moderate surface tension forces generated	Strength, permeability, shrinkage at high humidities
Gel pores	10-2.5 nm	small (gel) capillaries	Strong surface tension forces generated	Shrinkage to 50% RM
	2.5-0.5 nm	Micropores Gel pores Inter-crystallite pores	Strongly adsorbed water, no menisci form	Shrinkage, creep
	< 0.5 nm	Micropores "interlayer" (interlayer space) Intra-crystallite pores	Structural water involved in bonding	Shrinkage, creep

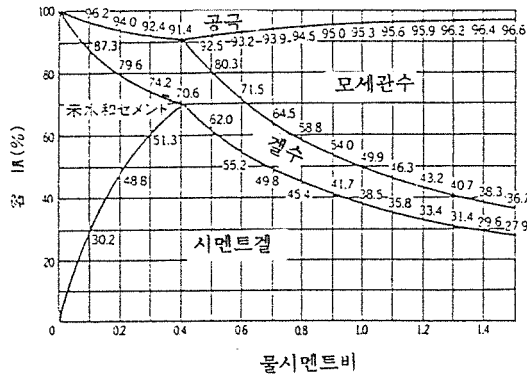


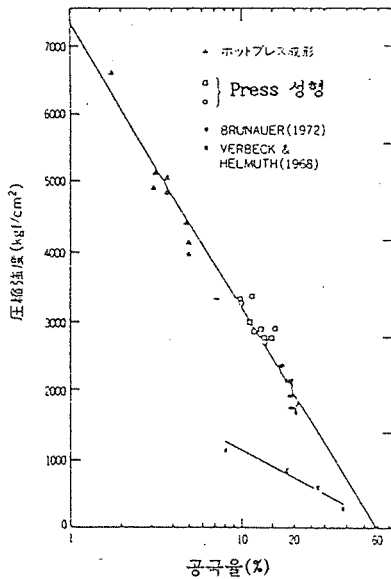
그림 2 시멘트페이스트 구성성분의  
용적백분율(수화도100%)

저감과 수화물의 증가에 의한 모세관공극의 감소 및 성형법의 연구와 타재료의 충진에 의한 공극의 감소가 유효하다. 이와같은 수법을 이용해서, 시멘트 페이스트의 초고강도를 달성한 예로서, 전술한 Roy에 의한 실험이 있다. 이 경우의 시멘트페이스트의 압축강도와 공극율의 관계를 (그림 3)에 나타냈다. 이 그림에서는 공극율의 감소가 시멘트페이스트의

압축강도 발현에 있어서 유효하다는 것을 알 수 있다. 상술한 원리에 기초한 시멘트 페이스트를 고강도화하는 구체적인 방법을 (그림 1)에 나타냈다.

### 3.2 결합재와 골재계면의 결합력 증강.

콘크리트의 강도발현에 있어서 최대의 약점은 결합재인 시멘트페이스트와 골재와의 부



(표 3) 초고강도 시멘트페이스트의 압축강도와 공극율의 관계

착, 다시말하면 상호계면의 결합력이 작은것으로 이것이 콘크리트 강도의 주요한 지배요인으로 되고있다. 결합재와 골재의 계면영역을 거시적으로 보면, 일반적으로는 그계면영역의 구조는 골재입경과 입형에 의존한다고 생각된다. 그러나 결합재와 골재계면의 결합력은 그계면영역의 거시구조보다도 미세구조에 크게 지배된다. 그이유는 (그림 4)에 나타났듯이 그계면영역은 약 $20\mu m$ 의 두께이지만, 커다란 수산화칼슘의 결정을 많이 포함하고 다른 시멘트페이스트 부분보다도 상당히 다공질이기 때문이라고 말할 수 있다. 특히 천이대의 미세구조는 혼합법, 혼합재료(예를 들면 실리카흙과 같이 포조란 반응에 의해서 수산화칼슘을 소비하는 것)의 사용등에 의해서 큰영향을 받는다. 따라서 콘크리트의 결합재인 시멘트페이스트와 골재의 계면의 결합력을 증강하기 위해서는 그계면 영역에 존재하는 많은 공극이 다른재료에 의해 충전되는

(표3) 초고강도 및 고강도 콘크리트계 재료의 강도

콘크리트계 재료의 종류	강도(Kgf/cm <sup>2</sup> )		
	압 축	휨	인 장
콘크리트	200~900	40~200	20~90
MDF 시멘트	3000~5000	1500~3000	—
DSP 재료	1800~3000	150~400	—
PCC	400~1000	80~200	40~100
PC	800~1600	150~350	90~140
PIC	2500~2900	—	170~190
SIFCON	800~1000	400~600	—
Hot Press 성형	6650	—	650

것을 고려할 필요가 있다.

이경우, 실리카흙등의 초미립자를 이용하면 그계면영역에 존재하는 수산화칼슘과 반응해서 규산칼슘 수화물등이 생성되고 공극을 충당하기 때문에, 시멘트페이스트와 골재와의 부착이 개선된다.

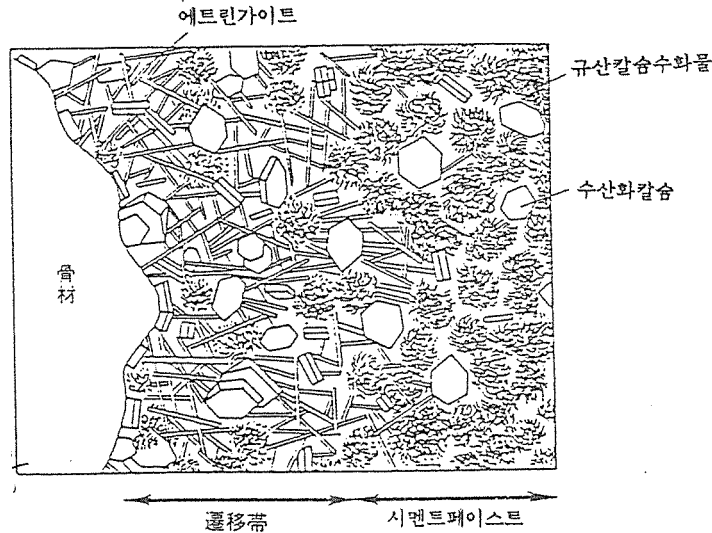
따라서, 시멘트페이스트와 골재와의 부착을 능동적으로 개선하기 위해서는 시멘트페이스트 자체 및 골재 자체의 접착성을 개선하면 좋다.

시멘트페이스트·자체 접착성의 개선에는 폴리마혼화제의 첨가와 시멘트페이스트 전부의 폴리마 결합재에 의한 대체가 있다. 골재 자체의 접착성 개선에는 반응성을 가진 골재로서 크링카를 이용하는 시도등이 있다.

### 3.3 최적골재의 선택

일반적으로 골재의 종류, 입경, 입도분포 및 표면성상은 매우 광범위하기 때문에 콘크리트의 고강도에 합당한 최적의 골재를 선택할 필요가 있다. 최적골재 선택의 각종 요인 중에서 중요한 것은 강도, 최대입경 및 입도분포이다.

우선, 고강도를 가지는 경질골재를 선택하



(그림 4) 시멘트페이스트와 골재계면의 미세구조 모델 (Mehta)

고 이것을 최대입경 10mm이하에서 최밀충진 상태의 입도분포로 사용하는 것이 추천된다. 그 이유는 최대입경이 작은 골재를 사용하면, 시멘트페이스트와 골재와의 계면이 가까워져 큰 결함이 생기기 어려우며, 최밀충진 상태의 입도분포에서는, 골재간의 공극이 감소하는 것등이다. 또 결함재의 인성(toughness) 개선에는 골재의 일부를 각종의 단섬유로 대체하는 것이 바람직하겠다.

#### 4. 초고강도 및 고강도 콘크리트계 재료의 강도

(그림 1)에 나타난 각종의 수법에 따라서 현재까지 세계각국에서는 콘크리트의 고강도화 노력이 이루어지고 있으며, 각종의 초고강도 및 고강도 콘크리트계 재료가 개발되고 있다. 이들이 콘크리트계 재료의 리스트는 다음과 같다.

(그림 1)에서는 이 리스트를 약칭으로 표시하고 있다.

(1) MDF 시멘트 (macrodefect-free cement) (MDF)

(2) DSP 재료 (densified system containing homogeneously arranged ultrafine particles) (DSP)

(3) 폴리마시멘트 콘크리트 (polymer cement or modified concrete) (PCC)

(4) 폴리마콘크리트 (polymer concrete) (PC)

(5) 폴리마함침콘크리트 (polymer impregnated concrete) (PIC)

(6) 슬러리 함침 섬유보강 콘크리트 (slurry infiltrated fiber concrete) (SIFCON)

이 리스트의 콘크리트계 재료의 강도성상 중에서 특히 높은 강도의 데이터를 각종의 문헌에서 구하고 (표3)에 나타냈다. (표3)을 보면, 압축강도, 연장강도는 전술의 Roy의 실험 데이터를 초월하는 콘크리트계 재료는 발견되지 않는 것 같다.

그러나 이들의 콘크리트계 재료중에서는 MDF 시멘트의 강도가 가장높다. 따라서 근래에 MDF 시멘트의 제조법이 개선되면 그 강도는 Roy에 의한 강도에 육박할 것으로 생각되어진다.

## 5. 맺음말

“모든 방법을 동원한다면 콘크리트의 강도는 얼마나 높힐 수 있을까?” 라고 하는 테마에 몰두해서 각종의 문헌을 조사하였지만, 이론적인 강도에 가깝다고 생각되는 Roy의 데이터를 초월하는 콘크리트계 재료를 발견할 수 없었다. 그러나 검토해 온 콘크리트계 재료중에서는 MDF 시멘트가 초고강도 발현을 위한 유망한 재료의 하나라고 할 수 있다.

〈セメリト・コンクリト, No. 546, Aug, 1992, PP64~69 번역문임.〉

### 〔參考文獻〕

- 1) F. P. Knudsen, J. Amer/Ceram. Soc. 42, 376, 1956
- 2) D. M. Roy and G. R. Gouda, J. Amer/Ceram. Soc. Vol. 56, p. 549, 1973
- 3) 坂井悦郎/粉體と工業, Vol. 22, No7, 1990
- 4) 秩父セメント/チチブ低熱ポルトランドセメント, 技術資料
- 5) 三宅信雄/工學博士論文, Apl. 1987
- 6) 盧田公伸, 蓑, 伏井康人, 坂井悦郎/コンクリート年次論文報告集, Vol. 9 No. 1, 1987
- 7) 松藤泰典, 大久保孝昭, 原田志津南/コンクリート工學年次論文報告集, Vol. 12 No. 1, 1990
- 8) 松藤泰典, 光畑英哉, 原田志津男/セメント  
コンクリート, 論文集, 45, 1991
- 9) 石井光裕, 浮田和明, 東邦和, 山本和夫/コンクリート工學年次論文報告集, Vol. 13, No. 1, 1991
- 10) H. Muguruma, I. Mino, M. Ashida and E. Sakai/Proc. Utilization of High Strength Concrete, Norway, p. 63, 1987
- 11) 長瀧重義, 坂井悦郎, 콘クリート工學, Vol. 25, No. 28, Aug., 1987
- 12) 電氣化學工業(株)/デソカ「Σ-5000」, 技術資料
- 13) 坂井悦郎, 大門正義/セラミックス, 23, 1988, No. 1
- 14) 中川晃次, 坂井悦郎/Gypsum & Lime, No. 231, 1991
- 15) 坂井悦郎, 淺賀喜與志, 大門正義/セラミックス, 19, 1984, No. 10
- 16) 岡田佳寛/ 콘クリート工學, Vol. 28, No. 12, Dec., 1990
- 17) S. Mindess and J. F. Young/Concrete, Prentice-Hall Inc. New Jersey, p. 99, 1981
- 18) 中川晃次, 渡邊芳春, 中谷清一, セメント技術年報, XXX, 1976
- 19) 中川晃次, 渡邊芳春/セラミックス, 17, 1982, No. 7
- 20) 影山博, 中川晃次, 永劑強/材料, 第29卷 第318號, pp. 220~225
- 21) 藤井學, 官本文, 現晃三/材料, 第36卷 第406號, pp. 751~757

### 〈정 정〉

'93 10월호중 p. 112, 113표의 601-1과 604-1의 그림이 바뀌었기에 이를 정정합니다.