

고강도 콘크리트의 제조 및 특성

1. 서 론

현재 국내에서는 고강도 혹은 초고강도 콘크리트라는 용어가 특별히 정의되어 사용되고 있지는 않다. 토목 분야의 콘크리트에 있어서는 압축강도가 600~800kgf/cm² 정도의 콘크리트를 고강도 콘크리트라 하고, 800~1000kgf/cm² 정도 이상의 콘크리트를 초고강도 콘크리트라 부르는 경우가 많지만 이것은 환경의 변화나 기술의 진보와 함께 변할 수 있다.

콘크리트의 압축강도를 현저하게 높이는 연구는 오래 전부터 행해져 왔고, 외국에서는 1930년대에 이미 1000kgf/cm² 이상의 강도를 얻었다는 보고가 있었다. 그러나 이 당시의 1000kgf/cm² 이상의 초고강도 콘크리트는 연구단계에서 얻어질 수 있는 것으로, 실용적으로 사용되기에는 미흡하였다.

콘크리트의 고강도화가 본격적으로 시작된 것은 1960년대에 들어 콘크리트의 단위수량을 대폭으로 줄일 수 있는 고성능감수제가 개발되면서부터 인 것으로 일반적으로 정리할 수 있다. 이러한 고성능감수제는, 서독에서 멜라민 설폰산염계의 고성능감수제, 일본에서는 나프탈렌 설폰산염계의 고성능감수제가 각각 개발되었고, 그 사용목적은 서독에서는 시공성의 향상을 위한 유동화 콘크리트인 데 반해, 일본에서는 물시멘트비의 저하에 의한 고강도 콘크리트의 실용화를 위한 것이었다.

이것과는 별개로 Menzel 등에 의해 이미 연구된 고온고압증기 양생(오토클레이브 양생)이 도입되어 일본에서는 오토클레이브 양생에 관한 연구가 열심히 행해졌다. 1970년대에는 고성능감수제를 사용한 콘크리트를 오토클레이브 양생하여 800kgf/cm² 이상의 초고강도 콘크리트를 쉽게 얻을 수 있는 기술이 개발되었다. 이 기술은 고강도 PC파일의 제조에 응용되어 초고강도 콘크리트가 공업적으로 대량생산될 수 있었다. 국내에서의 오토클레이브 방식의 고강도 PC파일 제조는 1993년도에 처음으로 적용되어 양산되고 있다.

또 고성능감수제의 성능도 개선되어 이것을 사용하면 콘크리트를 일반적인 다짐과 양생을 행함에 따라 800~1000kgf/cm² 정도의 초고강도도 어렵지 않게 얻을 수 있게 되었다.

1980년대는 무수석고를 주성분으로 하는 고강도용 특수 혼화재가 개발되어, 이것과 고성능감수제를 병용하여 상압 증기 양생을 시킴에 따라 800kgf/cm² 정도의 고강도 콘크리트를 얻는 기술이 실용화되었다. 이 기술 또한 국내에서는 1993년도에 고강도 PC파일에 적용되어 최근에는 양산되고 있다.

또한 북미를 중심으로 하여, 산업부산물인 실리카폼과 고성능감수제를 병용하여 사용함에 따라 1000kgf/cm² 이상의 초고강도 콘크리트가 실용화되었으며 미국의 상징인 초고층빌딩의 건축에 다수 사용되어 콘크리트의 고강도 달성을 위한 안정적인 기술의 하나로 자리잡게 되었다.

이 이외에도 연구적으로는 폴리머의 사용, 특수한 혼화재의 사용, 특수한 제조기술(가압 프레스 등) 혹은 반응성 골재(클링커 등) 등을 사용한 고강도에의 접근도 계속 모색되고 있다.

여기서는 실용적으로 사용되고 있는 고강도 콘크리트로서 압축강도가 400~800kgf/cm²전후의 콘크리트를 대상으로 하여 그 제조방법, 제반 성질 및 응용 예에 대한 개요를 서술한다.

2. 고강도 콘크리트의 제조의 원리와 방법

고강도 콘크리트를 얻는 방법에 대해서는 이미 많은 보고가 있었고, 또 실용면의 제조방법에 대해서도 최근에는 많이 알려져 있다. 콘크리트의 강도를 높이는 원리는 표 1과 같이 분류할 수 있다. 표의 내용중에서,

1. 물시멘트비를 저감하는 방법은 일반적이며 가장 확실한 방법으로서, 고성능감수제를 사용함에 따라 워커빌리티를 잃어버리지 않고 물시멘트비를 대폭으로 저감시킬 수 있다.
2. 공극률을 저감하는 방법은 시멘트경화물 중의 공극을 감소시키는 것으로 원심력다짐이나 가압다짐 등의 방법에 의해 강도발현에 기여하지 않는 여분의 물이나 공극부분을 제거하는 것이다.
3. 골재와의 부착력의 증대를 위해 충분한 강도의 시멘트 매트릭스와의 부착이 양호한 표면조직을 갖는 골재를 이용하는 방법이며, 클링커골재, 고로 슬래그 등을 이용한다.
4. 수화물의 물성을 개선하는 방법으로서 상압의 증기

<표 1> 고강도 콘크리트의 제조의 원리와 방법

원 리	방 법	감수제	결 합 제		활 성 골 재	양 생 (오토클레이브)	다 짐 (가압)	보강재 (섬유)
			혼화제	폴리머래진				
a) 물시멘트비의 저감		○					○	
b) 공극률의 저감			○	○			○	
c) 골재와의 부착의 증대				○	○			
d) 시멘트 수화물의 개선						○		
e) 보강재의 이용								○
f) 시멘트 이외의 결합제의 이용				○				

양생 후 오토클레이브 양생함에 따라 통상의 조건하에서 생성하는 시멘트수화물과는 다른 조직의 수열반응수화물(tobermorite)을 생성시켜 고강도를 얻는 방법이다.

- 보강재를 이용하는 방법은 각종의 섬유를 혼합하여 인장강도나 휨강도를 증가시키는 것이다. 또한 구조적으로는 3축응력상태로 만들어 겉보기강도를 증가시키는 방법도 있다.
- 시멘트 이외의 결합제를 이용하는 방법은 폴리머래진 등을 결합제의 일부 혹은 전부에 사용하여, 고강도를 얻고자 하는 것이다.

고강도 콘크리트를 제조하기 위해서 표 1에서 나타낸 것과 같은 각종의 방법을 실용화시킨 방법이 채용되고 있고, 이들 방법은 단독으로 이용하는 것보다 서로 혼합하여 이용함으로써 보다 경제적으로 고강도를 얻을 수 있는 경우가 많다.

설계기준강도가 800kgf/cm² 이상의 고강도 콘크리트를 공업적으로 대량생산하는 방법으로 고성능감수제를 이용한 오토클레이브 양생방법, 고성능감수제 및 고강도용 혼화제를 병용하여 증기 양생하는 방법 등의 2종류가 현재의 주류가 되고 있다.

한편, 현장에서 초고강도 콘크리트를 얻는 방법으로는 고성능감수제를 사용하는 방법이 압도적으로 많다. 여기서는 표 1에 나타난 것과 같이 고강도 콘크리트를 제조하는 방법에 대해서 그 개요를 다음과 같이 정리한다.

2.1 고성능감수제의 이용

콘크리트를 고강도화시키기 위한 단순하고도 확실한 방법은 물시멘트비를 감소시키는 것이다. 이 방법으로는 종래의 감수제보다 훨씬 더 고성능인 감수제를 사용함에 따라 물시멘트비를 대폭으로 저하시킬 수가 있다.

고성능감수제는 종래의 감수제와는 달리 고분자계를 주성분으로 하여 시멘트의 분산력을 크게 높여 감수효과를 높이고, 공기연행성이 대단히 작고, 응결지연을 억제한 계면활성제이다.

이러한 종류의 감수제는 1960년대의 중반에 일반감수제로 사용되기 시작하였으나 오토클레이브 양생 등에 의해 고강도 PC파일이 생산되면서부터 콘크리트의 초고강도화가 허용되어, 감수제로서의 평가가 정착되었다.

현재 이용되고 있는 고성능감수제는 그 주성분의 화학구조에서 다음과 같은 2개의 계통으로 대별된다.

- 폴리 알킬아릴 설펜산염계
- 멜라민 포르말린 수지 설펜산염계

시판품은 거의가 (1)의 범주에 속하는 것이다.

고성능감수제의 감수율은 보통 20~30%정도로 극히 높고 다량의 혼입도 가능하며, 단위시멘트량이 많을수록, 시멘트의 분말도가 클수록, 또 고온일수록 감수효과가 크다. 또한 먼저 섞은 시멘트페이스트에 나중에 고성능감수제를 첨가한 경우가 감수효과가 크다. 고성능감수제를 혼입한 콘크리트는 기포작용이 작기 때문에 공기연행성이 작고 그 사용량을 증가시켜도 공기량은 거의 변하지 않는다.

표 2는 고성능감수제를 사용한 콘크리트의 압축강도의 예를 나타낸 것이다. 시멘트량 500~700kg/m³, 물시멘트비 25~30%의 범위에서도 충분히 위커블한 콘크리트를 얻을 수 있고, 양질의 골재를 선정하면 1000kgf/cm² 정도의 초고강도 콘크리트를 제조할 수도 있다.

고성능감수제는 콘크리트의 고강도용으로 사용되는 외에도 특히 서독을 비롯한 유럽이나 미국에서는 콘크리트의 시공성을 개선하기 위한 유동화제로서의 사용방법도 보급되어 있다.

2.2 결합제의 개선

시멘트 페이스트 중에는 수화에 불필요한 여승수나 공기 등에 의한 공극이 있고 이 공극의 비율이 클수록 경화체의 구조결합이 되어 강도는 저하한다. 이에 반해 매트릭스를 형성하는 결합제 자체를 개선시키거나 혼화제를 섞거나 하는 것에 의해 공극률을 저하시켜 고강도를 얻는 방법이 있다.

(1) 고강도용 혼화재의 이용

포틀랜드시멘트에 특수한 혼화재를 섞어 800kgf/cm² 이상의 초고강도 콘크리트를 얻는 방법은 이미 PC말뚝 등의 콘크리트 제품의 제조에 응용되고 있다. 이 특수한 고강도용 혼화재는 무수석고를 주성분으로 하는 것으로 보통 시멘트와 비교하여 SiO₂나 CaO를 상당량 감소시키고 그 대신에 SO₃의 비율을 50%정도까지 늘인 화학성분으로 되어 있다. 이것이 시멘트 중의 알루미늄네이트상과 반응하여 에트링가이트를 생성하는 과정에서 시멘트의 주된 수경성광물인 칼슘실리케이트상의 수화가 촉진되어 시멘트의 수화량이 증가하여 화학적 결합수가 증대한 결과 시멘트 페이스트 중의 공극이 감소되어 초고강도가 얻어진다.

<표 2> 고성능감수제를 사용한 콘크리트의 압축강도 (보통시멘트, 슬럼프 8±1cm)

첨가량(%) 액상폼으로	W/C (%)	물 (kg/m ³)	시멘트 (kg/m ³)	압축강도(kgf/cm ²)	
				7일	28일
0	42.5	170	400	352	508
0.6	40.0	160		462	627
1.2	37.3	149		519	700
1.8	34.3	137		632	735
2.4	31.5	126		659	781
0	37.0	185	500	474	642
0.6	35.0	175		562	747
1.2	32.0	160		715	829
1.8	29.6	148		724	842
2.4	27.4	137		732	879
0	33.3	200	600	602	681
0.6	31.7	190		668	757
1.2	29.2	175		743	853
1.8	27.2	163		770	872
2.4	25.3	152		786	920

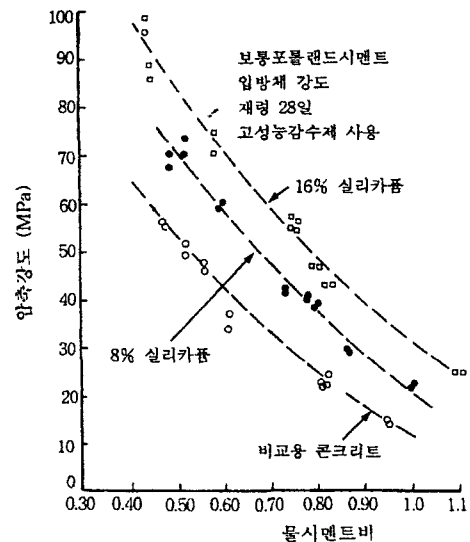
이런 종류의 고강도용 혼화재를 시멘트에 대하여 8~13% 사용하고 상압의 증기 양생 시킴으로써 그림1에 나타난 것처럼, 재령 1일에서 700kgf/cm² 정도, 재령 28일에서 1000kgf/cm² 이상의 초고강도 콘크리트를 얻을 수가 있다.

이것과 별개로 페로실리콘이나 실리콘 메탈의 제조 공장에서 발생하는 폐가스를 집진하여 얻어지는 산업부산물인 실리카폼을 이용하는 방법에 관해서 북유럽를 중심으로 연구가 시작되어 최근에는 고강도 및 초고강도 콘크리트의 제조에 많이 이용되고 있다.

실리카폼은 비결정질에서 평균 입경이 0.1미크론 정도의 구형의 초미립자이며, 비표면적은 20만 cm²/g로서 극히 높고 SiO₂ 함유량이 90%정도의 고순도 실리카 미분말이다. 실리카폼은 초미립자로서 포졸란 활성이 높으므로 그 수화광물은 페이스트 중의 미세한 공극 중에도 생성되고, 수화

과정중의 Ca(OH)₂와 급속히 반응하여 표면에 실리카가 풍부한 층을 만들어 겔상태로 되는 것 등의 이유에 의하여 초고강도가 얻어진다고 생각된다.

그림 1은 실리카폼의 혼입률과 물시멘트비를 변화시킨 경우의 압축강도를 나타낸 예이다. 보통 실리카폼의 혼입률을 15~30%정도로 하여 고성능감수제를 병용함에 따라 1000kgf/cm² 이상의 초고강도를 얻을 수 있다.



<그림 1> 실리카폼을 사용한 콘크리트의 압축강도

2.3 활성 골재의 이용

클링커 골재와 같은 활성의 골재를 사용하면 시멘트 매트릭스와 골재 경계면의 수화반응에 의해 부착력이 증가되어 고강도인 콘크리트를 얻을 수 있다.

보통포틀랜드시멘트 클링커는 초고강도 콘크리트용 골재로도 뛰어난 성질을 가지고 있다고 각종 시험에 의해 확인되고 있다. 클링커는 반응성 골재이며 흡수에 따른 수화의 진행에 의해 골재강도를 늘려 골재표면에서 결합재와도 반응하여 부착력이 증가된 강고한 조직을 구성한다.

표 3은 시멘트량 500kg/m³, 물시멘트비 30%, 굵은골재로서 포틀랜드시멘트 클링커를 사용하고, 잔골재에 하천사를 사용하여 1000kgf/cm²의 초고강도 콘크리트를 얻은 예이다.

<표 3> 클링커를 골재로 사용한 콘크리트의 압축강도

클링커의 입경범위	압축강도(kgf/cm ²)			정탄성계수28일 (×10 ⁵ kgf/cm ²)
	1일	7일	28일	
1.2~20mm, 1.2 이하 하천사	535	915	985	4.90
"	599	965	1049	4.79
"	549	818	929	4.59
"	693	895	1027	4.47
5~20mm, 5 이하 하천사	735	947	1058	4.77
전부 클링커	805	980	1091	4.90

알루미나시멘트를 사용한 예에서는, 양질의 화강암을 굵은골재로 사용하고, 알루미나시멘트 제조시의 합성골재인 알루미나시멘트 클링커를 잔골재로 하여 사용한 경우 물시멘트비 30~40%에서 1250kgf/cm²의 초고강도 콘크리트를 얻었다는 보고가 있다.

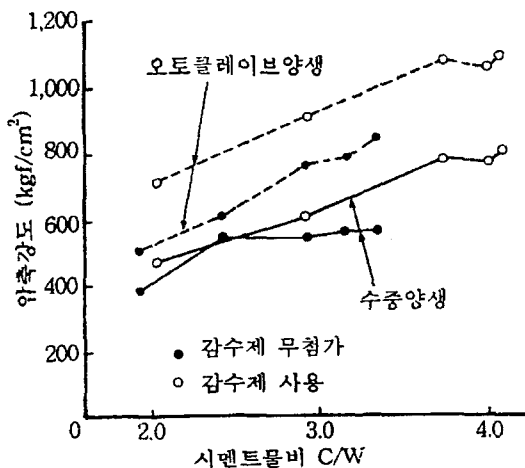
2.4 양생방법의 개선

(1) 오토클레이브 양생

오토클레이브 양생은 포화증기압하에서 승온, 최고 온도 유지, 강온 등의 3단계에서 이루어지고 최고온도(압력)와 그 유지시간이 콘크리트의 강도발현에 크게 영향을 미친다. 고온고압의 포화증기 중에서는 광화제로서의 물의 작용이 활발하여 수열반응이 일어나게 되고 시멘트의 수화반응, 결합반응은 현저히 촉진되어 상압의 증기 양생에서는 얻을 수 없는 tobermorite 그룹인 특정의 칼슘실리케이트 수화물을 생성시킬 수 있고, 이에 따라 1000~1200kgf/cm² 정도의 초고강도 콘크리트를 얻을 수가 있다.

오토클레이브의 최적양생조건은 사용하는 시멘트의 종류에 따라 달라지나, 180℃(10.0kgf/cm²)~200℃(15.9kgf/cm²)정도에서 최고강도를 얻을 수가 있으며, 실리카질 분말을 시멘트에 혼합하여 사용하는 것이 강도증진에 효과가 있고, 그 최적 혼합량은 약 40%정도인 것으로 알려지고 있다. 최근에는 슬래그분말을 특별히 혼합하지 않고 고성능 감수제의 첨가량을 많게 하여 물시멘트비를 저감한 콘크리트를 오토클레이브 양생하여 초고강도 콘크리트를 제조하는 경우도 있다. 이 경우에도 오토클레이브 양생중에 시멘트 페이스트와 골재의 접촉면에 있어서 화학반응을 일으키는 것이 많으며, 이러한 경계반응생성물은 콘크리트 강도에 주요한 영향을 미치므로, 가능한 한 실리카질의 단단한 골재를 사용하는 것이 바람직하다.

그림 2는 오토클레이브 양생을 시킨 고강도 콘크리트의 시멘트물비와 압축강도의 관계를 나타낸 것이다.



<그림 2> 오토클레이브 양생한 콘크리트의 압축강도

(2) 가압증기 양생

가압증기 양생은 굳지 않은 콘크리트에 직접 기계적인 압력을 주어, 그 압력을 유지한 상태에서 상압증기 양생을 함으로써 고강도를 얻는 방법으로, 콘크리트 PC패널의 제조에 채용되고 있고, 그 밖에 슬래브 혹은 세그먼트 등의 제조에도 사용된다. 일반적인 양생방법은 가압력 8~10kgf/cm², 가압시간을 4~8분 정도로 하여 다짐을 하지 않고, 이 가압력을 유지한 상태에서 최고 온도 100℃, 2~3시간의 상압증기 양생을 하고 있다. 이 방법에 의하면 시멘트량 450kg/m³의 콘크리트를 사용한 경우, 가압력 10kgf/cm², 100℃ 3시간의 가압증기 양생을 한 후의 압축강도는 700~800kgf/cm²정도가 된다.

2.5 다짐방법의 개선

(1) 원심력 다짐

금속제 거푸집을 고속회전시켜, 그때 발생하는 원심력과 가압력 및 회전진동에 따라 콘크리트를 다짐과 동시에, 원심분리작용에 따라 비중이 제일 가벼운 수분을 내측으로 뽑아내는 방법이며, 과일, 전신주, 흙관 등의 제조에 가장 많이 사용되고 있다.

거푸집의 회전에 의해 주어지는 원심력은 보통 중력의 30~50배 정도이지만, 콘크리트에 대한 가압력은 2kgf/cm² 정도로 비교적 작다. 콘크리트의 고강도화에 기여하는 것은 가압력보다도 오히려 회전중의 미진동에 의한 충분한 다짐과 원심분리 작용에 의해 물이 배출됨으로써 물시멘트비가 저하하는 효과가 크다.

물시멘트비가 35% 전후의 콘크리트 말뚝의 경우, 원심력 다짐을 한 후의 물시멘트비는 배합에 따라서 달라지지만, 대략 27~30% 정도까지 저하시킬 수 있다.

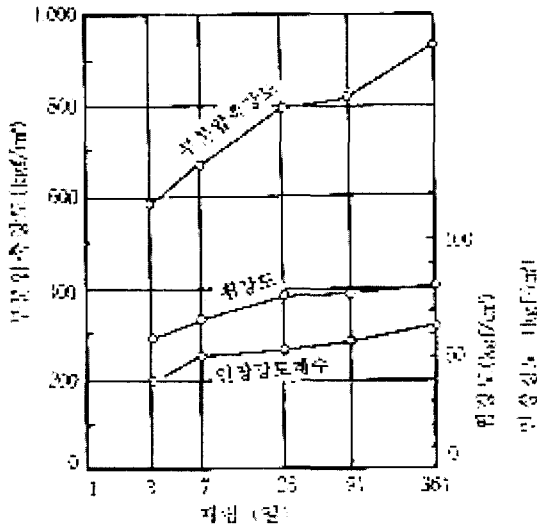
(2) 가압다짐

가압다짐은 콘크리트에 직접 기계적 압력을 주어 불필요한 수분과 공기를 빼내어 물시멘트비를 현저히 감소시키고, 더욱이 공극률도 감소시킴에 따라 고강도 콘크리트를 얻는 방법이다. 이 방법으로 시멘트 페이스트에 직접 압력을 줌에 따라 1500kgf/cm²의 압축강도가 얻어졌다는 보고도 있다. 실험에 의하면 물시멘트비 31%의 콘크리트를 100kgf/cm²로 가압다짐함에 따라 물시멘트비는 22%까지 저하하였다고 보고되어 있다. 또한 물시멘트비 37%의 콘크리트는 가압력 10kgf/cm², 가압시간 8분의 다짐에서 물시멘트비가 28%로 저하한 보고도 있다. 현재 가압다짐 방법은 가압양생 방법과 병용하여 콘크리트 PC패널의 제조에 응용되고 있다.

(3) 가압진동다짐

가압진동다짐 방법은 미립자인 시멘트페이스트에 유효한 가압력과 미립자에 대하여 효과가 있는 진동을 함께 가하는 것으로서, 최근의 흙관 등의 전압 철근 콘크리트관의

제조방법은 이것을 응용한 것이라 말할 수 있다. 그림 3은 시멘트량 510kg/m³, 물시멘트비 28%의 콘크리트를 진동수 7000rpm, 가압력 2.5kgf/cm²에서 다짐한 결과, 900kgf/cm² 이상의 고강도 콘크리트를 얻은 예이다.



<그림 3> 가압진동 다짐한 콘크리트의 강도

(4) 기타의 다짐방법

다짐효과의 좋고 나쁨은 입자의 크기와 진동수에 관계가 있고, 미립자인 시멘트 페이스트를 다짐하기 위해서는 고주파 진동다짐이 효과가 있다고 한다. Maus는 매초 10,000사이클의 초고주파진동을 주어 다져서 1,600kgf/cm²의 페이스트 강도를 얻었다. 그러나 초고주파진동 혹은 초음파 진동을 이용하여 콘크리트를 다지는 방법은 아직 확립되지 않았고, 실용화되지 못하고 있다.

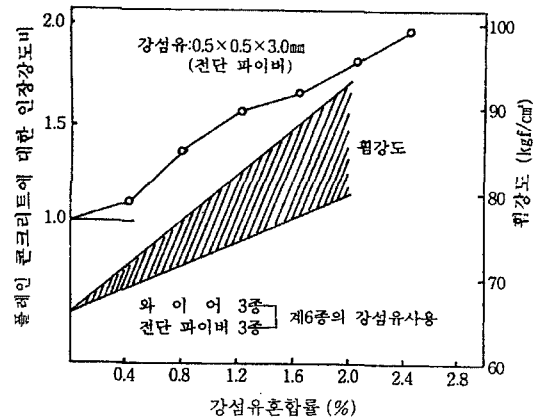
그 밖에 진공탈수법, 가압진공탈수법, 전기탈수법 등에 의해 물시멘트비를 저감시켜 고강도를 얻는 방법이 있고, 가압진공탈수법 등은 콘크리트 패널 등의 제조에 응용되고 있다.

2.6 보강재의 이용

(1) 섬유에 의한 보강

짧은 강섬유를 콘크리트 중에 분산시켜 강화하는 강섬유보강 콘크리트의 연구는 1910년경부터 시작되어 미국, 영국, 일본을 중심으로 많은 연구가 되어 있다. 실용화되기 시작한 것은 1970년대부터로, 뿔철 콘크리트, 터널 복공 콘크리트, 포장 콘크리트, 각종 프리캐스트판 등에 응용되고 있다. 강섬유는 압연인발 가공된 강선을 절단하여 얻어진 커트 와이어나 냉연 박강판을 절단한 전단파이버가 사용되는 경우가 많고, 직경 0.3~0.6mm, 길이 20~40mm 정도의 강섬유를 용적백분율로서 1~2%정도 사용하여 콘크리트 중에 랜덤하게 분산시킨다. 강섬유의 첨가로 콘크리트의

압축강도도 증가하지만, 주된 사용목적은 그림 4의 예에서와 같이 인장강도, 휨강도 및 전단강도의 증가에 있고, 인성, 신율, 에너지 흡수능력 등도 증가된다.



<그림 4> 강섬유 보강 콘크리트의 압축강도

(2) 3축구속에 의한 방법

콘크리트의 주위에 고강도의 PC강선 혹은 철근을 나선형으로 감아서 구속하여 구조적으로 3축응력상태를 만들어 콘크리트의 파손을 막는 방법이다. Harris는 고장력 강선을 감은 원주공시체를 사용하여 4600kgf/cm²의 초고강도 콘크리트를 얻었다.

그리고 최근에는 사각형 혹은 원형의 철제관 내부에 유동성이 큰 콘크리트를 충전함으로써 3축구속력을 높여 고강도화한 콘크리트를 강관충전콘크리트(C.F.T.)라 하여 실용화를 위한 연구개발이 계속되고 있다.

3. 고강도 콘크리트의 제 성질

고강도 콘크리트가 본격적으로 실용화되기 시작한 것은 1970년대초 오토클레이브 양생을 한 초고강도 PC말뚝이 대량생산되면서이며, 그 역사는 10년정도이다(국내에서는 1993년 이후).

따라서 고강도, 초고강도 콘크리트의 제성질에 대해서는 아직 충분하게 해명되지 않은 점도 있다. 여기서는 고강도, 초고강도 콘크리트의 제조방법으로 현재 제일 많이 사용되고 있는 고성능감수제를 사용하는 방법, 및 오토클레이브 양생을 하는 방법에 의해 얻어지는 고강도 콘크리트에 대한 일반적인 성질을 간단하게 서술한다.

3.1 컨시스턴시

고강도 콘크리트를 얻기 위해서는, 보통 시멘트량을 증가시켜 물시멘트비를 작게 함으로써 콘크리트의 슬럼프는 작아진다. 그러나 고성능감수제를 이용하는 경우는 시멘트

량이 크면서 극히 적은 수량에서 워커블한 콘크리트를 얻을 수가 있고 물시멘트비가 25%정도에서도 10~15cm의 슬럼프를 얻을 수가 있다. 이러한 콘크리트의 최대의 특징은 혼합시에는 적절한 워커빌리티를 갖고 있어도 시간의 경과와 함께 슬럼프의 저하율이 일반 콘크리트에 비해 대단히 크다는 것이다.

슬럼프 저하의 정도는 배합조건, 콘크리트의 온도, 운반 시간 등에 의해 달라지지만 감수제의 상용량이 많을수록 저하율도 큰 경향이 있다. 또한 점착성도 크고, 진동을 주면 유동성이 커지지만 변형속도가 작아지면 저항은 커지고, 매우 되어서 취급이 어렵게 된다. 또 약간의 물량의 변화나 온도에 따라 얻어지는 슬럼프수치의 변동이 커지고 운반, 타설, 다짐 등이 적절하지 못한 경우는 재료분리를 일으키거나 하는 성질이 있으므로 주의할 필요로 한다.

또한 슬럼프로스를 일으킨 경우는 고성능감수제를 나중에 더 첨가함으로써(후첨가) 강도에 악영향을 주지 않으면서 유동성을 회복시킬 수 있다.

3.2 강도

오토클레이브 양생을 한 경우를 포함하여 고성능감수제를 사용하는 제조하는 고강도 콘크리트의 압축강도와 시멘트물비와의 관계는, 양호한 품질의 골재를 이용하면 그림 2에 나타난 것과 같이 일반적인 콘크리트의 경우와 같은 비례관계가 성립된다. 고강도 콘크리트의 인장강도는 압축강도가 증대한 것에 비해서는 크지 않고 표 4에 나타난 것과 같이 압축강도의 1/14~1/17정도로써, 보통강도의 콘크리트가 1/8~1/12인 것에 비하여 작다.

<표 4> 고강도 콘크리트의 압축·휨·인장강도(kgf/cm²)

종별 항목	감수제사용 콘크리트 (수중양생 28일)	클링커콘 크리트 (수중양생 28)	오토클레이브 양생콘크리트 (감수제 사용)
압축강도	981	944	913
휨강도	96 (9.7)	135 (14.3)	80 (8.8)
인장강도	64.8 (6.6)	65.2 (6.9)	53 (5.8)

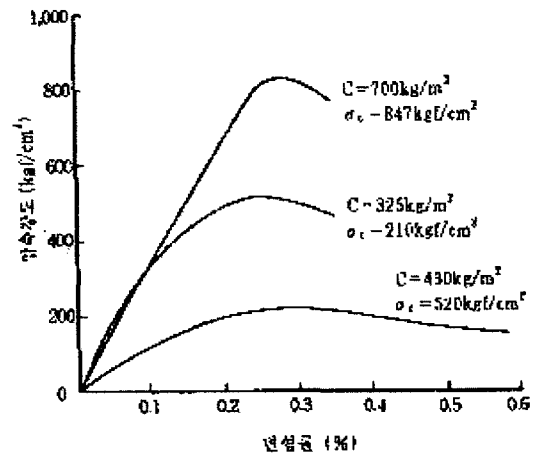
() 안의 수치는 압축강도에 대한 비율이다.

휨강도도 인장강도와 같이 별로 커지지 않고 압축강도의 약 1/10 정도이다. 전단강도에 있어서도 휨강도나 인장의 경우와 같이 크게 늘지 않지만, 부착강도는 보통 콘크리트에 비해 동등 혹은 그 이상이 된다. 압축에 대한 피로상상은 보통 콘크리트와 비슷한 정도이며, 피로한도는 정적강도의 약 50% 정도이다. 충격에 대한 저항력은 거친 충격 작용을 받는 고강도 PC말뚝에 사용되고 있는 것으로 알 수

있듯이 매우 우수하다.

3.3 탄성 및 소성

800~1,000kgf/cm² 정도의 초고강도 콘크리트의 탄성계수는 강도에서의 비율만큼 커지지 않고 3.8~4.5×10⁵kgf/cm²의 범위이며, 보통 4.0×10⁵kgf/cm²정도 이다.



<그림 5> 콘크리트의 응력-변형곡선

그림 5은 콘크리트의 응력-변형곡선을 나타낸 것으로서 콘크리트의 강도가 높을수록 탄성역은 크게 되나 소성역은 반대로 작아지는 경향이 있다. 콘크리트의 압축파괴시의 극한변형은 200~300kgf/cm² 정도의 강도가 낮은 콘크리트의 경우에는 0.5%정도인 것에 비하여, 고강도가 되면 0.3%정도까지 작게 되어 소성의 범위는 좁아진다.

3.4 건조수축 및 크리프

콘크리트의 건조수축은 일반적으로 단위수량에 지배되며 단위수량이 적을수록, 물시멘트비가 적을수록, 동일한 물시멘트비에서는 시멘트량이 적은 만큼 건조수축이 작게 된다. 따라서 고강도, 초고강도 콘크리트의 건조수축은 보통강도의 콘크리트와 비교하여 작고, 오토클레이브 양생한 경우는 그 후의 건조수축은 극히 작아진다.

그리고 크리프도 고강도일수록 작아진다. 그 이유는 고강도 콘크리트는 물시멘트비가 작기 때문에 건조에 의한 탈수에 동반되는 크리프(drying creep)가 극히 작아지기 때문이라고 생각된다.

3.5 내구성, 기타

고강도 콘크리트의 동결융해작용에 대한 내구성에 대해서는 여러 가지 시험결과가 나와 있다. 즉 고강도 콘크리트는 내구성이 증가한다는 설과 증가하지 않는다는 설이 있어 결론은 얻을 수 없다. 그러나 최근에는 특히 엄격한 기

상작용을 받는 경우에는 다소 강도가 희생되어도, 적당량의 공기를 혼합한 고강도 AE콘크리트를 이용하는 것이 좋은 쪽으로 결론이 모아지고 있다.

화학작용에 대해서는 그 조직이 보통콘크리트보다도 치밀하므로 그 내구성(내약품성)은 우수하다. 초고강도 콘크리트의 내화(耐火)성상은 골재의 종류, 콘크리트의 배합, 제조방법, 가열온도 등에 의해 달라지지만 내화성시험을 한 결과, 압축강도와 동탄성계수의 저하율이 커서 내화성에 난점이 있다고 한다.

그 밖에 고강도 콘크리트의 열팽창계수, 비열, 열확산율 등은 보통콘크리트와 비교하여 큰 차이가 없다고 알려지고 있다.

4. 고강도 콘크리트의 활용과 과제

고강도 콘크리트를 유효하게 활용하기 위해서는 그 높은 압축강도를 적극적으로 이용해야 하며, 이에 따라 내하능력이 증대함은 물론 내구성, 수밀성 등도 개선할 수 있고, 콘크리트의 두께를 줄이는 것에 의한 경량화, 부재의 단면 길이의 저감 등이 가능하다.

최근 국내에서도 고강도 콘크리트의 적용이 시작되어 건축에서는 400~600kgf/cm² 정도의 압축강도를 건축물의 주요부분에 사용되기 시작하였고, 토목분야에서는 400~800kgf/cm² 정도의 콘크리트를 교량이나 특수구조물에 적용하기 시작하였다.

그리고 콘크리트 공장제품의 제조에는 고강도 콘크리트를 얻는 각종 방법을 적용하기 쉬운 환경에 있으므로, 800kgf/cm² 이상을 설계기준강도로 하여 대량생산되고 있는 원심력 고강도 PC말뚝의 경우를 필두로 하여 홉판, 세그먼트 등의 PC제품 등의 생산에 사용되고 있다.

고강도, 초고강도 콘크리트의 향후의 과제로서 압축강도의 증대의 비율만큼 탄성계수가 커지지 않는 것, 인장 및 휨강도가 커지지 않는 것 등이 있고, 철근 등의 보강재를 고강도화하여 콘크리트와의 밸런스를 취하는 방법 등의 검토가 필요로 되고 있다.

시공상에 있어서는 특히 고성능감수제를 사용한 콘크리트의 슬럼프의 경시변화가 심한 점이 지적되고 있다. 그리고 부정정력(不靜定力) 등의 계산에 이용되는 크리프, 건조수축의 정수 등 설계상의 검토도 필요로 되고 있으며, 그 밖에도 자원절약, 에너지 절약면에서 고강도, 초고강도 콘크리트의 제조방법의 선택과 구조물의 구조형식의 개발 등이 중요시되고 있다.

참고문헌

1. 최신콘크리트공학 ; 한국콘크리트학회, 1992
2. 윤 제한 ; 포틀랜드시멘트 및 콘크리트, 세진사, 1989
3. 日本コンクリート工學協會 ; 콘크리트技術の要点, 1984
4. 최신 콘크리트재료 ; 공법핸드북, 기시타니 외, (일본)건설산업조사회, 1985년
5. 笠井芳夫, 小林正凡, セメント・コンクリート用混和材料, 技術書院, 1986
6. 岸谷孝一 ; AE劑 特集混和劑(材), 콘크리트 ジャーナル, Vol. 8, No. 3, 1970
7. 富田六郎, 新.콘크리트用混和材料-技術と市場, シ-エムシー, 1988
8. 岡村 甫, 小澤一雅, “締固め不要への挑戦(콘크리트工事の近代化おめざして)”, セメント・コンクリート, No. 539, Jan. 1992. 1.
9. 本間雅人ほか, “ハイパフォーマンスコンクリートを用いた工場製品の構造實驗”, 콘크리트工學年次論文報告集 Vol. 14, No. 1, 1992
10. 渡部 聰ほか, “二成分系低發熱型高流動콘크리트の基礎物性について”, 콘크리트工學年次論文報告集 Vol. 14, No. 1, 1992.
11. 정재동 외 ; “고성능 콘크리트 개발에 관한 실험적연구, 제 1 보 : 초유동 콘크리트의 기초물성”, 한국 콘크리트학회 논문집, Vol. 5, No. 2, 1993.
12. Non-Autoclave 방식 고강도 콘크리트 파일 제조기술개발 및 공정적용, 동양중앙연구소, 원심력콘크리트 제조 기술 세미나, 1993
13. 정재동 : “콘크리트재료공학”, 보성각, 1998.5