

일본에서의 고강도콘크리트에 관한 기술동향

著作 : Yasuo Tanigawa

翻譯 : 李 相 洙

〈대우건설기술연구소 연구원〉

1. 서 론

1. 1 고강도콘크리트의 개발동향

최근 고강도콘크리트를 사용하는 철근콘크리트구조물에 관한 연구개발이 여러 연구자와 건설회사들에 의해 일본에서는 매우 활성화되고 있고 이런 활동들을 기반으로 많은 철근콘크리트구조물들이 건설되고 있다. 또한 새로운 분야에서의 철근콘크리트구조물에 관한 기술개발이 미래에도 계속될 것이다. 여러 시방서들에 의하여 규정하는 콘크리트의 압축강도 범위에 대하여 그림 1에서 나타낸 것처럼 JASS 5(일본건축표준시방서 5 : 철근콘크리트공사)에서는 $360\text{kgf}/\text{cm}^2$ 혹은 그이하, JIS(일본공업표준협회)A 5308에서는 $400\text{kgf}/\text{cm}^2$ 로 제안하고 있다. 과거에 사용했던 콘크리트 중 약 95%가 $300\text{kgf}/\text{cm}^2$ 혹은 그이하의 범위에 있는 것들이었다. 그러므로 강도가 상한치를 초과하는 콘크리트를 사용한다면 재료, 조합, 시공 등과 같은 구조체콘크리트의 제조과정들은 보다 새로운 품질관리체계를 설정해야 할 필요가 있다고 하겠다.

1. 2 일본 국내 프로젝트(New RC)의 개요

이러한 배경을 기반으로 일본 건설성의 건축

연구소에서는 “고강도콘크리트와 고강도철근을 사용하는 보다 진보된 철근콘크리트구조물의 개발”(이후 New RC라함)이라는 명칭으로 5년 연구계획을 수행해 왔으며, New RC 프로젝트에서는 다음과 같은 4개의 기술위원회가 설립하였다.

콘크리트 위원회

1. 고강도 및 초고강도콘크리트를 제조하기 위하여 필요한 재료개발, 재료의 품질 기준들
2. 고강도 및 초고강도콘크리트의 물리적 성상
3. 조합설계, 치어붓기 및 양생작업과 품질 관리

철근 위원회

1. 고강도 및 초고강도철근의 개발, 철근의 역학적 특성
2. 콘파인드 콘크리트의 역학적 특성
3. 유한요소법의 적용과 철근콘크리트 요소에 대한 설정방정식
4. 철근과 콘크리트와의 접합, 철근의 이음과 정착

구조요소 위원회

1. 보와 기둥의 역학적 특성

2. 전단벽의 역학적 특성
3. 보, 기둥과 전단벽에 관한 전단력의 영향
4. 보-기둥 연결부와 프레임의 역학적 특성
5. 기초의 역학적 특성

구조설계 위원회

1. 구조체의 모델화 및 분석에 대한 방법
2. 구조 프레임의 실제 이용 방식들
3. 구조성능에 대한 요구 및 설계하중
4. 설계방법론

□ Architectural Institute of Japan (AIJ)	
· Standard for RC Structures	$F_c = 150 \sim 360$ (150~270)
· JASS 5 *1	$F_c = 270 \sim 360$ (240~270)
· Standard for Prestressed Concrete	$F_c \geq 350$ (Post-tension)
	$F_c \geq 300$ (Pre-tension)
□ JIS*2: Ready-mixed Concrete	$F_c = 135 \sim 400$ (135~300)
□ Japan Society of Civil Engineers (JSCE)	
· Standard Specification for Concrete	$F_c = 180 \sim 600$ (180~400)
· Specification for High-Strength Concrete	$F_c = 600 \sim 800$

*1 Japanese Architectural Standard Specification 5: Reinforced Concrete Work
 *2 Japanese Industrial Standard

Fig 1 Design Strength of Concrete Specified in Various Standards and Specifications in Japan [Unit : kgf/cm²]

본 논문에서는 콘크리트위원회에 의해 얻어진 결과를 주로 소개하기로 한다.

프로젝트에서 취급하는 철근과 콘크리트의 강도는 콘크리트가 300~1,200kgf/cm², 철근이 4,000~12,000kgf/cm²의 범위이다. 그림 2에 나타난 바와같이 프로젝트의 주연구분야들은 수직축이 철근의 항복강도, 수평축이 콘크리트의 압축강도로 평면에 나타내고 있으며 작은 A와 B영역은 현재의 보통철근콘크리트구조물과 고층철근콘크리트구조물에 대한 지역과 일치한다. 또한 영역 I, II-1, II-2, III은 프로젝트에서 취급한 영역이며, 그것들은 위 2영역과 비교하면 대규모 영역에 속한다. 현재의 철근콘크리트 구조물에 관한 지식으로 단지 New RC의 구조적인 거동을 이해할 수 있다고 생각하는 것은 명백히 비현실적이다.

고강도 및 초고강도콘크리트의 개발은 주로

현장치기 구조물에 사용하였으며, 이 고강도 및 초고강도콘크리트는 현재설계강도 600kgf/cm²에 의해서 구분하였으며 600kgf/cm² 이하의 설계강도인 콘크리트는 현재 실제건물에 적용되고 있는 반면 600kgf/cm² 이상의 초고강도콘크리트의 경우 실제적으로 실용화하기에는 다소 기간이 걸릴 것으로 본다.

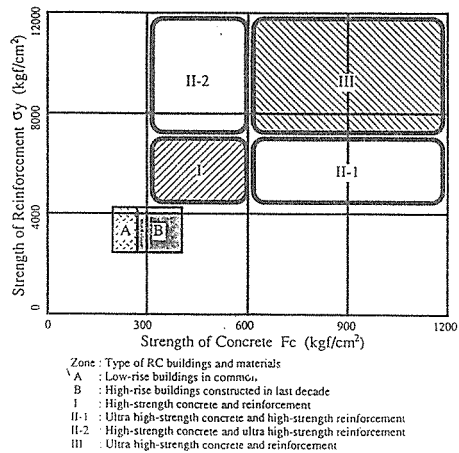


Fig 2 Strength of Materials and Fields of Research in New RC Project

물시멘트비 25~30%의 범위에서 고성능감수제를 사용하여 설계기준강도 600kgf/cm²인 콘크리트의 제조가 가능하였으며, 설계기준강도 600kgf/cm² 이상의 콘크리트에서는 강도가 높아질수록 콘크리트를 제조하기에는 더욱더 어렵다. 몇몇 실험실시험에서 설계기준강도가 1,000kgf/cm²에서 배합강도 1,200kgf/cm² 정도의 콘크리트를 제조하는데 성공하였다. 그러나 만약 강도가 1,200kgf/cm²까지 상승한다면 실제 건물에서 압축강도의 표준편차는 100kgf/cm²를 넘을 위험도 있고 그런 경우 배합강도는 1,400~1,500kgf/cm²가 된다. 이와 같이 초고강도콘크리트의 제조는 실험실조차도 특별한 재료를 사용하여 특수제조방법이나 양생방법을 사용할 필요가 있으며, 현재로서 현장타설 콘크리트로 실현시킨다는 것은 어렵다고 생각한다.

1. 3 일본에서 활성화하거나 건설된 고층철근콘크리트구조물

표 1은 건물의 최고층, 높이, 사용한 콘크리트의 최대설계 기준강도 및 고층철근콘크리트 구조물의 수를 나타내고 있다.

Table 1 Maximum Stories and Height of RC Buildings, and Maximum Design Strength of Concrete in Japan

Appraised year	Number of buildings	Maximum stories	Maximum height (m)	Maximum design strength of concrete (kgf/cm ²)	Number of buildings
1972	1	18	48.1	300	1
1978	1	25	71.4	360	1
1984	2	30	88.0	420	2
1985	1	30	87.3	420	1
1986	5	30	88.4	420	5
1987	8	31	92.5	420	8
1988	6	41	129.8	420	6
1989	8	31	98.3	420	8
1990	14	33	121.2	480	14
1991	22	35	120.8	480	22

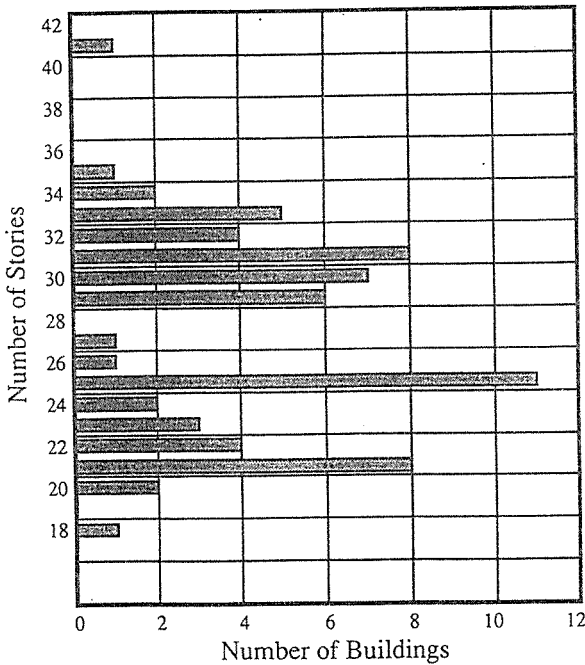


Fig 3 Number of Stories of RC Buildings in Japan

그림 3은 층수와 건물수와의 관계를 나타내고 있다. 일본에서 첫 철근콘크리트구조물(높이 : 48.1m, 18층)이 1972년 건설되었으며, 콘크리트의 설계기준강도는 300kgf/cm² 이었다.

표 1에 나타난 바와 같이 일본에서 건설된 많은 고층철근콘크리트구조물은 1986년부터 급속하게 증가하였다. 왜냐하면 고층건물의 건설에 대한 기술이 정립되고 일본경제상황이 그 당시 매우 양호했기 때문이다.

사진 1은 일본에서 1992년에 건설한 초고층 철근콘크리트구조물을 보여주고 있듯이 층수는 41층이고 콘크리트의 설계기준강도는 420kgf/cm²이다. 사진 2는 층수 45층과 콘크리트의 설계기준강도 600kgf/cm²인 현재 건설하고 있는 건물을 보여주고 있다.

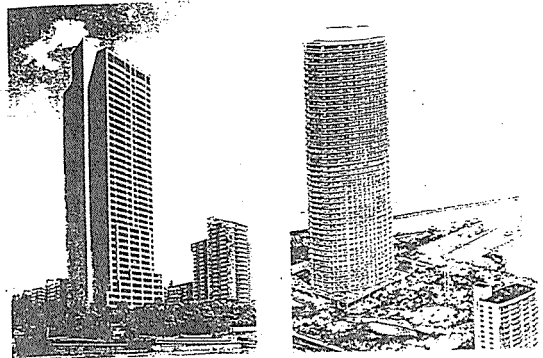


Photo 1
The Highest RC Building Constructed in Japan (FC=constructed in 1992)

Photo 2
RC Building being Constructed Now (FC=constructed in 1992, 600kgf/cm², 45 Stories)

1. 4 고강도 및 초고강도콘크리트의 제조과정

그림 4는 고강도콘크리트를 제조하기 위한 방법들을 보여주고 있으며, 그것들은 다음과 같은 3가지 방법으로 대략적으로 분류하고 있다.

- (1) 결합재 특성의 개선
- (2) 골재 특성의 개선
- (3) 골재와 결합재 사이의 간격력의 개선

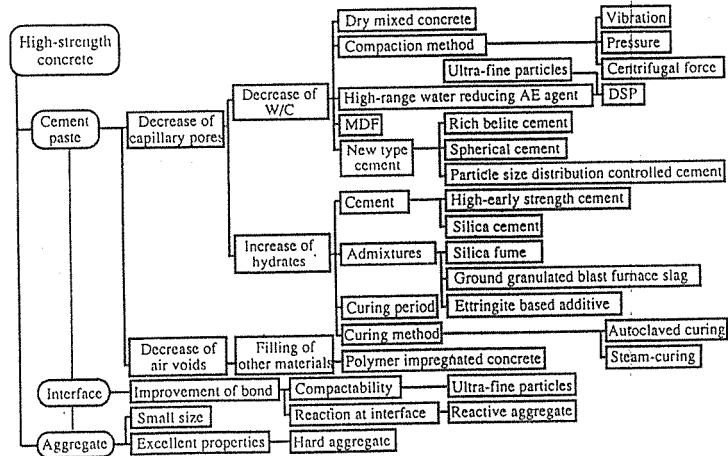


Fig 4 Methods for Manufacturing High-Strength Concrete

(3) 항은 (1) 항 및 (2) 항과 관련이 깊다. 많은 연구자들은 결합재의 강도개선에 대하여 연구하고 있으며 한편 새로운 형태의 시멘트, 혼화제 및 혼화제를 개발중에 있다.

표2는 시멘트 종류에 따른 강도범위를 보여주고 있으며, 여기에서 MDF는 Macro-Defect Free, DSP는 Densified System containing homogeneously arranged ultra-fine Particles의 약자이다.

Table 2 Strength of Various Cement-Based Materials

Kind of cement-based materials	Strength (kgf/cm ²)		
	Compression	Flexure	Tension
Concrete	200~900	40~200	20~90
MDF cement	3000~5000	1500~3000	-
DSP	1800~3000	150~400	-
Polymer cement concrete	400~1000	80~200	40~100
Polymer concrete	800~1600	150~350	90~140
Polymer impregnated concrete	2500~2900	-	170~190
Slurry infiltrated fiber reinforced concrete	800~1000	400~600	-
Cement paste manufactured by hot-pressure method (by D.M.Roy)	6650	-	650

고강도 및 초고강도콘크리트를 제조하는 가장

실용적인 방법은 고성능 AE감수제(이후 HWRA라 칭함)를 적용함으로써 물시멘트비를 감소하는 방법이다. 그러므로 HWRA의 개발이 고층과 초고층현장치기 철근콘크리트건물들을 건설할 수 있다고 말해도 지나치지 않는다.

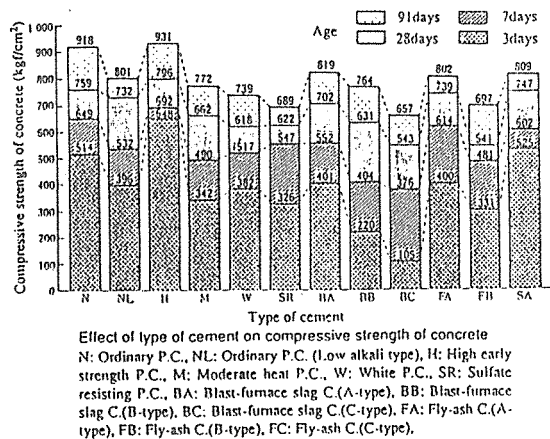


Fig 5 Effect of Type of Cement on Compressive Strength of Concrete(W/C=25%)

2. 고강도콘크리트를 제조하기 위한 재료들

2. 1 시멘트

2. 1. 1 JIS에서 규정한 보통시멘트들

그림5는 JIS에서 규정한 시멘트의 종류에 따른 물시멘트비 25%인 콘크리트의 압축강도를 나타내고 있다. 초기재령에서 콘크리트의 강도는 시멘트의 종류에 따라 변하지만 재령이 증가함에 따라 그 차이는 감소한다.

2. 1. 2 고강도콘크리트를 위하여 개발된 새로운 시멘트들

(1) 구상시멘트(Spherical Cement)

구상시멘트는 고속압밀처리법에 의해서 보통포틀랜드시멘트로부터 생산한다. 그것은 시멘트입자표면을 강한 압밀에 의해 수정되어진다. 보통포틀랜드시멘트와 구상시멘트사이의 입형비교가 사진 3에서 나타난 바와 같이 구상시멘트입자들은 둥글고 모나지 않았다. 또한 두 시멘트의 입도분포는 그림 6에 보여주는 바와 같이 직경 40 μ m 혹은 그 이상을 가진 대립자는 사라지고 또한 직경 3 μ m 혹은 그이하를 가진 세립자는 감소하며, 표면비중은 감소하고 겉보기비중은 증가한다.

사진 4는 보통포틀랜드시멘트와 구상시멘트를 사용한 모르타의 플로우비교를 보여 주고 있으며, 그림 7은 모르타의 물시멘트비와 플로우치사이의 관계를 나타내고 있다. 구상시멘트를 가진 아직 굳지 않은 모르타는 보통포틀랜드시멘트보다 더 유동적이고 물시멘트비는 보통포틀랜드시멘트와 유동성이 같을때 약 10%의 저감효과를 보이고 있다.

압축강도와 재령사이의 관계를 보여주는 그림 8에서 구상시멘트를 사용한 경화콘크리트의 압축강도는 특히 낮은 물시멘트비 범위에서 보통포틀랜드시멘트를 사용한 것보다 10~15

% 크다. 왜냐하면 보통포틀랜드시멘트와 비교해서 재령에 따라 수화가 급속하게 일어나고 공극의 감소비가 더 크며 결화체가 밀집하고 있기 때문이다.

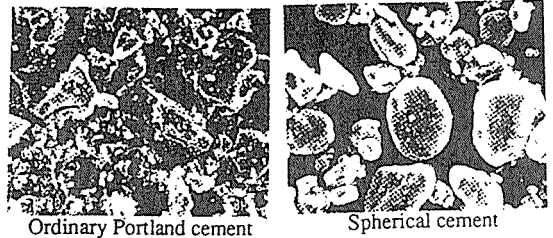


Photo 3 SEM of Cement Particle

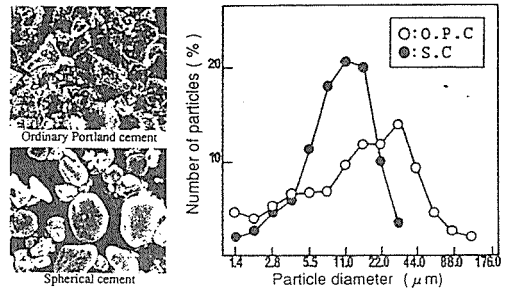


Fig 6 Particle Distribution of Cements

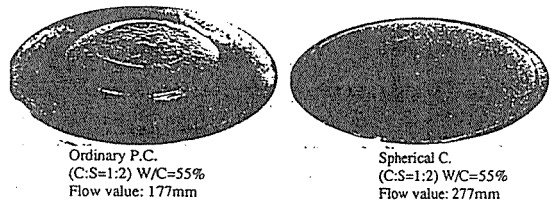


Photo 4 Flow of Mortars Using Ordinary Portland Cement and Spherical Cement

그림 9는 이산화탄소=100%, 압력=3kgf/cm²의 가속상태에서 구상시멘트(물시멘트비 48%)와 보통포틀랜드시멘트를 사용한 콘크리트의 탄산화 깊이는 노출 96시간 후에 7mm였으나 구상시멘트를 사용한 콘크리트의 탄산화 깊이는

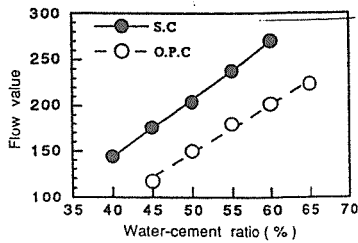


Fig 7 Relationship between Flow Value and Water-Cement Ratio

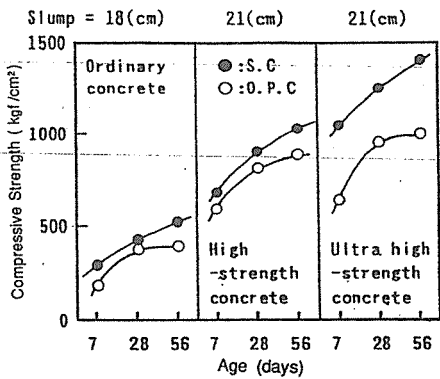


Fig 8 Relationship between Compressive and Age

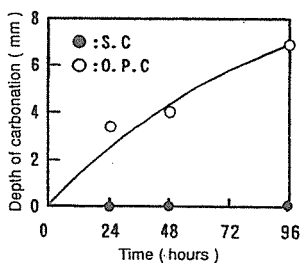


Fig 9 Depth of Carbonation of Concrete under Accelerated Condition

0mm 이다. 이 노출시기는 보통노출상태하에 약 100년과 일치한다. 그리하여 구상시멘트를 사용한 콘크리트는 작은 공극비와 시멘트-미세골재 혼합의 적합성이 높기 때문에 이 시기에 탄산화가 거의 없는 것으로 사료된다. 그렇기

때문에 구상시멘트는 고강도, 고유동성과 고내구성 콘크리트 적용에 매우 유용하다고 할 수 있다.

Table 3 Materials used

Materials	Notation	Specific Gravity	Specific Surface (cm ² /g)	Mean Particle Size (μ)
Normal Cement	N	3.17	3400	19.57
Coarse Cement	C	3.17	600	90.74
Calcium Carbonated	W	2.71	18000	6.04
Silica Fume	S	2.26	200000	-
Fly Ash	F	2.18	4320	17.38
Blast Furnace Slag	K	2.92	6260	7.86

Table 4 Mix Proportions of PSDC Paste

Type	Percentage(%)						Additive (Bwt%)	W/B (%)
	N	C	W	S	F	K		
N	100	0					2.2	21.3
N82	80	20					1.9	19.1
N73	70	30					1.7	18.4
N64	60	40					1.6	18.2
N7W5	70	25	5				1.7	17.9
N6W8	60	32	8				1.6	16.3
N7S5	70	25		5			1.8	20.3
N6S8	60	32		8			1.7	20.8
N7F5	70	25			5		1.8	19.4
N6F8	60	32			8		1.8	19.2
N7K5	70	25				5	1.8	18.2
N6K8	60	32				8	1.7	17.8

(2) 입도조절시멘트(Particle Size Distribution Controlled Cement)

입도조절시멘트(PSDC)는 초고강도콘크리트를 얻기위하여 개발하여 왔으며 초고강도콘크리트는 낮은 물결합재비에서의 유동성과 물결합재비 25% 이하를 필요로 하기때문에 초고강도콘크리트를 위한 결함재는 최소공극과

최대의 밀도에 접근하기 위하여 입도를 조절 · 혼합 사용해야 한다.

PSDC는 보통포틀랜드시멘트에 대하여 표 3에서 나타난 것처럼 고로슬래그, 플라이애시, 실리카흙, 탄산칼슘처럼 미세하게 분쇄한 광물 첨가제와 굵은 시멘트입자를 첨가하여 만들어진다.

Table 5 Mix Proportions of PSDC Mortar

Type	Percentage(%)			W/B (%)	S/B (%)	Additive (Bwt %)
	N	C	W			
N	100	0	0	24.0	0.8	2.2
N8W5	80	15	5	22.0	0.8	1.9
N8W10	80	10	10	21.0	0.8	1.9
N7W5	70	25	5	21.0	0.8	1.7
N7W10	70	20	10	20.5	0.8	1.8
N6W5	60	35	5	20.1	0.8	1.6
N6W10	60	30	10	19.9	0.8	1.6
N4W10	40	50	10	19.5	0.8	1.3

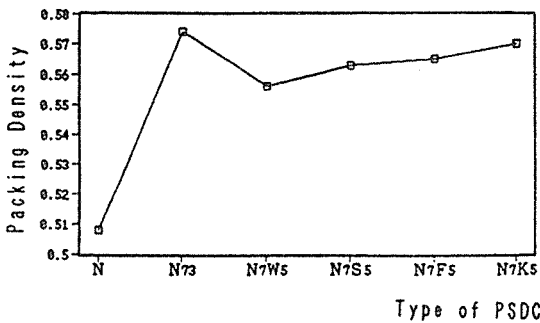


Fig 10 Packing Density of PSDC

표 4 및 표 5는 *どもさわ*에 의해 보고된 PSDC를 사용한 모르타와 페이스트의 조합비를 나타내고 있으며 실험결과는 다음과 같다.

- 1) 그림 10에서 보여진 것처럼 PSDC의 고밀도 때문에 PSDC페이스트의 유동성은 그림 11에서 보여진 것처럼 개선되고 모르타의 유동학적인 상수로서 항복치는 감소한다.
- 2) PSDC는 보통포틀랜드시멘트보다 초기 수화에서 수축이 거의없고 그림 12에서처럼 수화열이 보다더 낮다.

3) PSDC의 사용은 낮은 물결합재비와 낮은 단위수량을 필요로 한다.

4) 재령 28일 압축강도 1,250kgf/cm²와 슬럼프-플로우 70cm를 가지는 고유동성 및 고강도콘크리트는 그림 13에서 보여주는 것처럼 물결합재비 20%에서 제조할 수 있다.

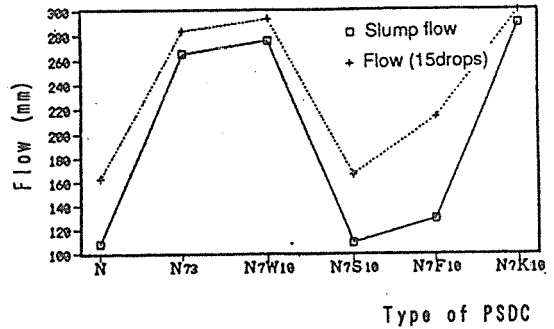


Fig 11 Flow of PSDC Paste

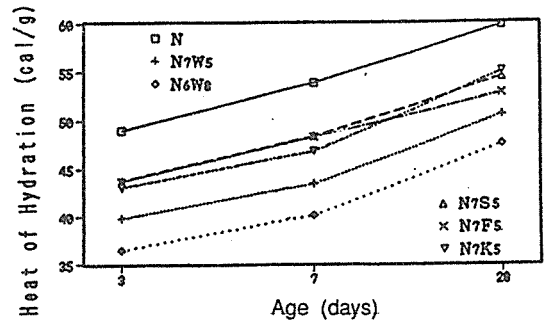


Fig 12 Heat of Hydration of PSDC

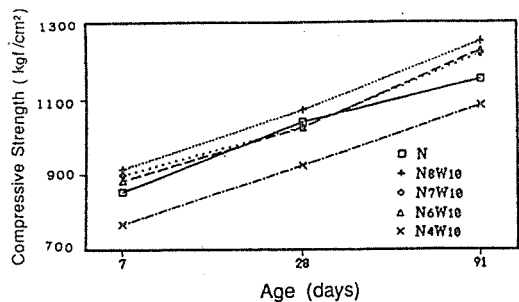
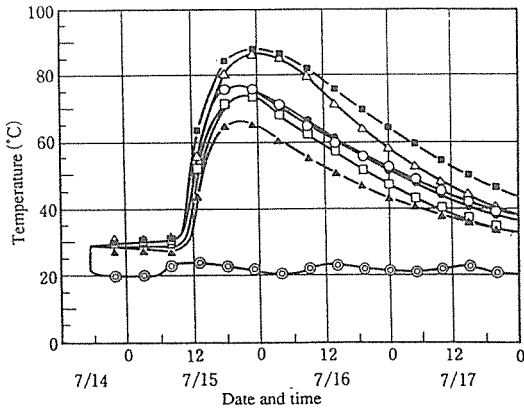


Fig 13 Compressive Strength of PSDC Mortar

(3) 베리트포틀랜드시멘트(Belite Portland Cement)

고강도콘크리트에서 단위시멘트량은 부배합이다. 그리하여 온도는 시멘트수화가 높기 때문에 상승하고 온도 때문에 열균열이 구조체에서 일어난다. 그림 14는 110×110cm 단면을 가진 철근콘크리트 기둥에서의 온도 상승의 예를 보여주듯이 최대온도는 단면 중심부에서 약 90°C이다.



Temperature change of concrete in full-scale column ($F_c \approx 1000 \text{ kg/cm}^2$)
 Upper portion : □Comer △Center
 Middle portion : ○Comer ■Center
 Lower portion : ▲Comer ●Center ●Air temperature

Fig 14 Temperature Rise of Concrete in Full-scale Column($FC \approx 1,000 \text{ kgf/cm}^2$)

베리트포틀랜드시멘트는 대규모 구조물과 부배합인 단위시멘트량을 가진 고강도콘크리트에 적용할 수 있는 저열시멘트로서 개발하였다.

대개 열을 조절하는 포틀랜드시멘트, 플라이애시, 고로슬래그를 혼합한 혼합시멘트가 일본에서 저열시멘트로서 사용하여 왔으나 혼합시멘트의 탄산화가 빠르기 때문에 품질을 안정화시키기는 어렵다. 이런 문제를 해결하는 방법으로 열을 조절하는 포틀랜드시멘트보다 베리트의 용적이 많이 포함하는 베리트부시멘트를 개발해 왔다.

단열온도의 상승과 재령사이의 관계를 보여

주는 그림 15에서 75, 60 등과 같은 숫자는 포틀랜드시멘트의 광물조성에서 베리트 용적분을 나타내고 있으며, 단열온도의 상승은 베리트의 증가량에 따라 감소하고 B-75의 용적은 B-30(보통포틀랜드시멘트와 일치한다)의 용적의 약 1/3이다.

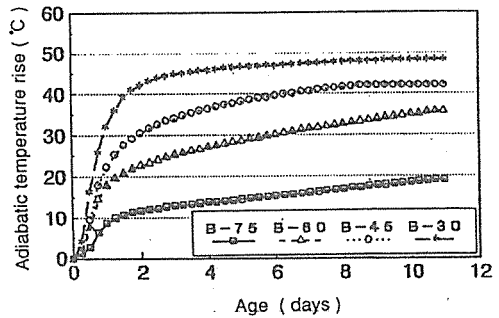


Fig 15 Adiabatic Temperature Rise

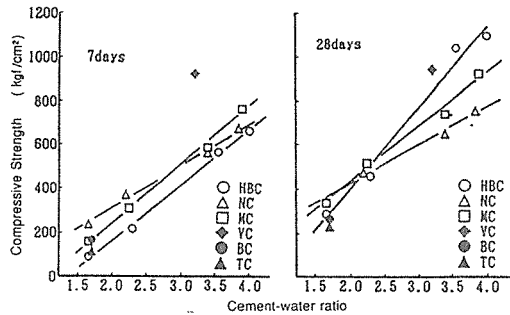


Fig 16 Relationship between Compressive Strength and Cement-Water Ratio

그림 16은 압축강도와 시멘트물비 사이의 관계를 나타내고 있다. 숫자에서 심볼은 다음과 같이 표현한다 : HBC=고베리트시멘트(C_3S 양 50%), NC=보통포틀랜드시멘트, MC=조절열시멘트, VC=초조강포틀랜드시멘트, BC=2가혼합시멘트(NC=20% + 고로슬래그=80%), TC=3가혼합시멘트(NC=20% + 고로슬래그=50% + 플라이애시시멘트=30%)

그림 17에 따르면 재령 7일 베리트시멘트를 사용한 콘크리트의 압축강도는 다른 시멘트보

다 낮으나 재령 28일에서 베리트시멘트를 시멘트몰비 2.5이상의 범위에서 다른 시멘트보다 높고 시멘트몰비 4.0일 때 압축강도는 약 1,100kgf/cm²이다.

그림 18은 시멘트의 종류에 따른 콘크리트의 중성화계수를 보여주고 있다. 베리트시멘트를 가진 콘크리트의 중성화계수는 열조절시멘트와 거의 같다.

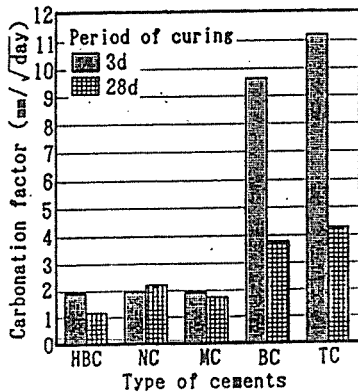


Fig 17 Carbonation Factor of Concretes with Various Cements

2. 2 골재

2. 2. 1 세골재

보통강도콘크리트에서의 압축강도는 세골재의 품질에 의한 영향은 크지않지만 고강도콘크리트에서는 세골재의 품질에 따라 상당히 변화한다. 그림 18은 세골재의 종류에 따른 모래-시멘트비와 압축강도와의 관계를 보여주고 있다. 강도는 모래와 시멘트비의 증가에 따라 감소하고, 세골재의 종류에 따라서 압축강도 200kgf/cm²의 차이를 나타내고 있다. 그림 19는 모르터와 결합재몰비의 압축강도와 휨강도 사이의 관계를 보여주고 있는 것처럼 초고강도 모르터는 보통포틀랜드 시멘트, 고순도 실리카, 실리카흄, 고성능 AE감수제, 세골재로서 실리카 모래와 스테인레스 철입자들로 구성하고 있다. 1.06의 세골재 결합비와 15%의 물

결합재비를 가지고 오토클레이브 양생을 한 모르터는 스테인레스 철입자의 경우 압축강도 약 3,000kgf/cm²와 휨강도 220kgf/cm² 혹은 그 이상이고, 실리카 모래의 경우 압축강도 2,200kgf/cm², 휨강도 180kgf/cm² 혹은 그 이상을 발현하고 있다. 또한 초고강도콘크리트의 제조는 시멘트 수화물과 세골재사이 간극을 초립실리카 성분이 보충함으로써 가능하게 한다.

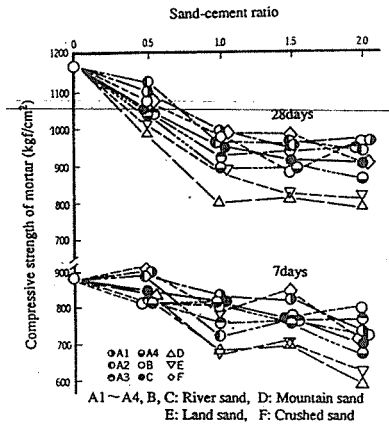


Fig 18 Effect of Kind of Fine Aggregate on Compressive Strength of Mortar

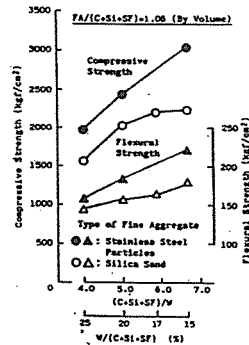


Fig 19 Relationship between Compressive and Flexural Strength of Mortar and Binder - Water Ratio

그림 20에서 모르터의 압축강도와 물-고체비 사이의 관계를 나타내고 있는 바와 같이 모르터들은 실리카 모래, 슬래그 모래, 에머리와

철 파우더와 같은 여러가지 세골재를 사용하였고, $\phi 60 \times 13\text{mm}$ 의 강섬유를 첨가하였다. 또한 물-고체비가 낮으면 낮을수록 압축강도는 더 높았으며 견고한 세골재로 DSP모르터를 기초로 한 칼슘실리게이트모르터의 압축강도는 실리카 모래를 가진 것보다 훨씬 더 크게 나타나고 있었다.

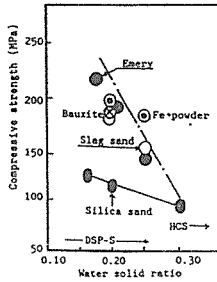


Fig 20 Relationship between Compressive Strength of Mortar and Water-Solid Ratio

2. 2. 2 조골재

조골재의 품질은 세골재의 품질보다 압축강도에 상당한 영향을 미친다. 그림 21은 압축강도와 조골재의 종류 사이관계를 보여주고 있는 바와 같이 콘크리트의 물시멘트비가 25%이고 조골재의 크기는 5~10mm이다. 압축강도는 골재의 종류에 따라서 변하며 가장 큰 강도는 견고한 사암과 셰석형 사암을 사용하는 콘크리트에서 얻어지고 있다. 골재의 종류로 인한 압축강도의 최대의 차이는 재령 28일에 약 250kgf/cm²이었다. 그림 22는 압축강도와 표본암석의 압축강도 사이 관계를 나타내고 있는 바와 같이 조골재로서 석회석 혹은 안산암을 사용한 경우 콘크리트 압축강도는 암석의 압축강도와 대략 같다. 그러나 견고한 사암 혹은 석영시트를 사용한 경우 콘크리트 압축강도는 암석의 압축강도보다 작다. 이는 조골재와 모르테 매트릭스 사이의 이질성 증가로 인하여 강도저하를 보이고 있다고 사료된다. 또한 조골재의 40ton 파쇄치와 압축강도 사이 관계는 그림 23에 나타내고 있는 바와 같이 물시멘트비 40~65%

인 경우 압축강도는 파쇄치에 따라 거의 변하지 않으나 물시멘트비 20~31%인 경우 전자는 후자의 증가에 따라 감소하였다.

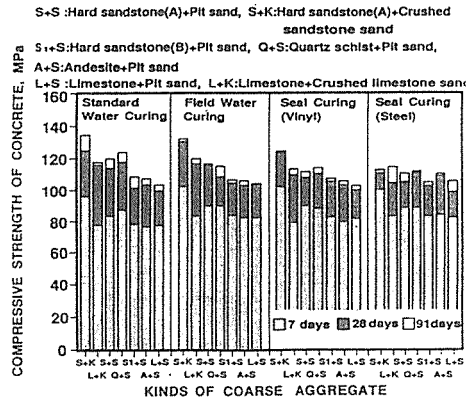


Fig 21 Relationship between Compressive Strength of Concrete and Kind of Coarse Aggregate

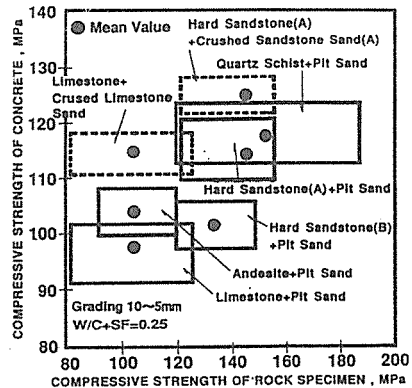


Fig 22 Relationship between Compressive Strength of Concrete and that of Rick Specimen

그림 24와 25는 압축강도별 조골재 용적의 영향을 보여주고 있으며, 그림 24의 종축은 모르테 매트릭스 압축강도와 콘크리트 압축강도의 차를 나타내고 있다. 보통강도콘크리트에서 압축강도는 조골재 용적면 증가에 따라 감소한다. 그러나 매우 양질의 조골재를 사용한 고강

도와 초고강도 콘크리트에서는 용적면 증가에 따라서 증가한다. 즉 조골재는 품질에 따라서 콘크리트를 강경하게 할 수 있기 때문이다.

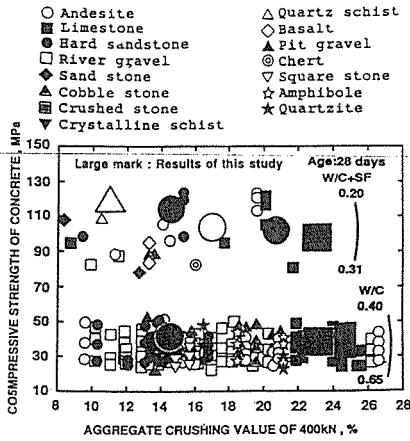


Fig 23 Relationship between Compressive Strength of Concrete and Aggregate Crushing Value

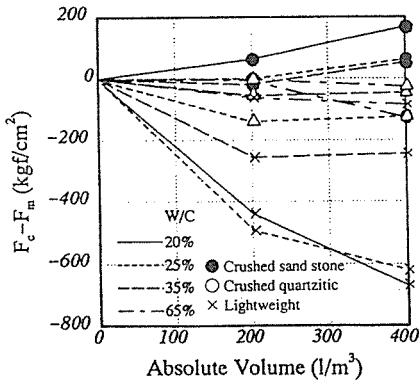


Fig 24 Effect of Volume of Coarse Aggregate on Compressive Strength of Concrete

2. 3 고성능AE감수제

고성능AE감수제는 높은 시멘트 분산능력을 가지며 일반적인 고감수제보다 콘크리트 슬럼프를 장시간 유지할 수 있다. 고성능감수제의 개발이야말로 현장치기 고강도철근콘크리트구조물의 건설에 대하여 주도적인 역할을 했다. 일본에서 사용하는 고성능AE감수제의 종류는 나프탈렌계, 폴

리카르보실계와 아미노설포닉계로 분류한다.

그림 26은 물과 수용해성 복합폴리머계에 속하는 혼화제의 화학적 구조를 보여주고 있다.

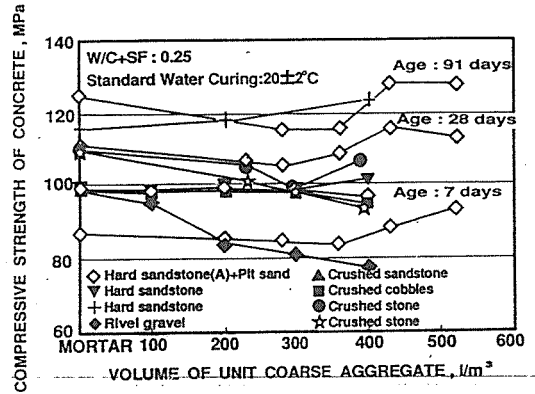


Fig 25 Effect of Volume of Coarse Aggregate on Compressive Strength of Concrete

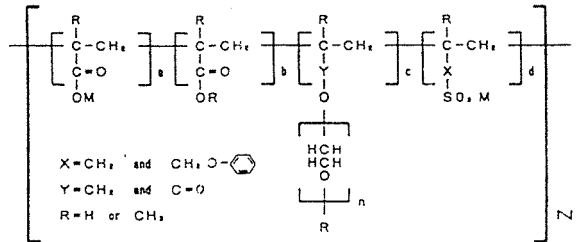


Fig. 26 Chemical Structure of New Type of HWRA

Fig 26 Chemical Structure of New Type of HWRA

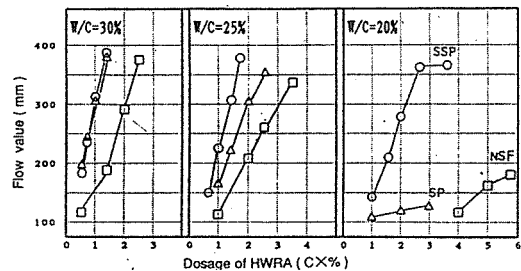


Fig 27 Flow Value of Cement Paste used Various Types of HWRA

그림 27은 고성능AE감수제의 종류에 따른 시멘트페이스트의 유동성을 나타내고 있다. 심볼은 다음과 같이 표시된다. SSP=접목성 복합폴리모계의 고성능AE감수제, SP=폴리카르보실계의 고성능AE감수제 NSF=나프탈렌계의 고성능AE감수제

물시멘트비 30%인 경우 SSP를 첨가한 시멘트페이스트의 플로우치는 SP를 첨가한 것과 거의 같다. 그러나 낮은 물시멘트인 경우 SSP는 시멘트페이스트의 유동성을 상당히 개선시킨다. 그림 28은 모르터의 플로우와 비빈후 경시변화사이관계를 보여주고 있다. 시멘트의 종류에 따른 모르터의 플로우치는 조강시멘트를 제외하고 비빈후 경시변화에 따라 결코 감소하지 않고 오히려 증가한다. 재령과 압축강도사이의 그림 29에 나타난 바와 같이 물시멘트비 19%의 경우 압축강도는 재령 28일 1,300~1,400kgf/cm²에 달한다.

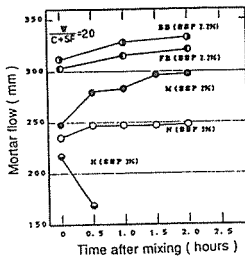


Fig 28 Relationship of Mortar Flow and Time after Mixing

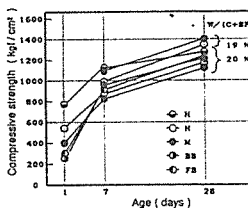


Fig 29 Relationship of Compressive Strength of Concrete and Age

2. 4 혼화재

2. 4. 1 실리카흙

실리카흙은 극히 작은 평균입자크기 0.1 μ m를 가지는 산업 부산물이고 콘크리트에서 미세 공극을 채우며 포졸란반응을 일으킨다. 그리하여 고강도콘크리트 개발에 있어서 매우 전망있는 재료로 각광을 받고 있다. 1980년대에 물시멘트비가 극히 낮은 초고강도실리카흙 콘크리트는 시멘트, 실리카흙과 고성능감수제 결합에 의해서 발전하여 왔다. Bache는 실리카흙콘크리트와 보오크사이트를 사용한 모르터의 압축강도가 2,175kgf/cm²와 2,683kgf/cm²였다고 보고하였으며 Burge는 물시멘트비 23%보다 낮고 골재로서 석영을 사용한 실리카흙콘크리트의 입방체 압축강도는 재령 1일 1,000kgf/cm²이고 재령 28일 1,400kgf/cm²이었다고 보고했다. 고강도콘크리트를 제조하기 위해서는 결합제와 골재사이의 간극 및 결합재자체를 강화하는 것, 견고한 골재를 선택하는 것등이 필수적인 조건이라 할 수 있다. 그림 30은 실리카흙양과 물시멘트비의 영향을 나타내고 있는 바와같이 최대강도는 물결합재비 0.25와 실리카흙양 20%인 경우 재령 91일 후 121MPa에 달한다. 실리카흙을 포함한 콘크리트의 압축강도는 재령 28일 이후 실리카흙이 없는 것보다 크다. 예를들어 그 차이는 재령 91일에 6~12MPa이다. 그림 31은 재령과 압축강도사이의 관계를 보여 주고 있다.

2. 4. 2 고로슬래그

고로슬래그는 고강도콘크리트를 제조하기 위하여 개발하여 왔으며, 그림 32와 33은 재령별 고로슬래그를 혼입한 콘크리트의 강도 발현을 보여주고 있다. 고로슬래그 블레인치가 증가할수록 재령 28일 압축강도는 증가하지만 재령 91일에 콘크리트강도는 블레인치에 따라 거의 변하지 않고 있고 또한 고로슬래그와 무고로슬래그와의 강도차이는 재령 91일에 약 200~300kgf/cm²이었다. yad는 실리카흙 10%와

고로슬래그 20%를 첨가한 콘크리트가 고강도를 얻기 위해서는 습윤상태 및 초기재령시 적당한 온도하에서 충분히 양생해야 한다고 했다.

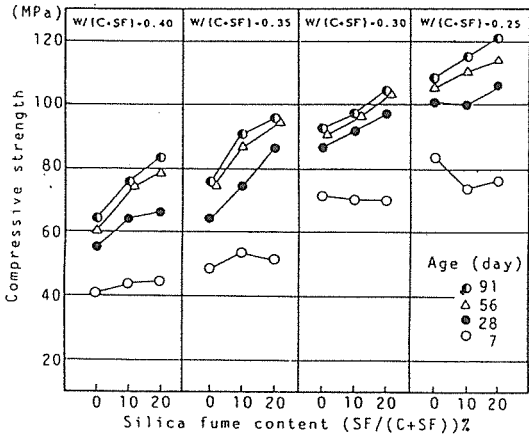


Fig 30 Effect of Water/(Cement+Silica Fume) Ratio on Compressive Strength of Concrete

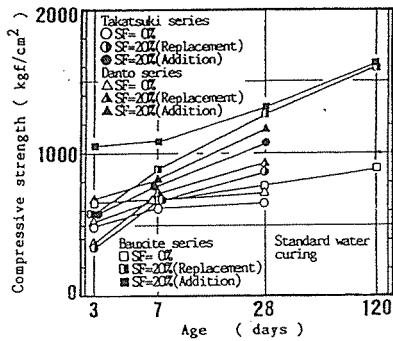


Fig 31 Relationship between Compressive Strength of Concrete with Silica Fume

2. 4. 3 에트린자이트혼화재 (Ettringite Additives)

실리카흄, 고로슬래그와 같은 초미립자를 가진 고강도콘크리트가 실제 구조물에 적용하는데 있어서의 많은 문제점을 가지고 있다. 즉

① 아직 굳지 않은 콘크리트플랜트에서 초미립자 취급상의 어려움 ② 콘크리트 부재에서 높은 온도상승 ③ 고온도를 받는 콘크리트의 장기강도 증가 실패. 그리하여 たれば는 혼화재의 새로운 형태인 엔트린자이트혼화재 (이후 ETT라고 칭함.)를 개발하였다. 이 혼화재는 취급이 쉽고 비록 건조하거나 열을 받기 쉬울 지라도 장기강도를 증가시키는 장점을 가지고 있다.

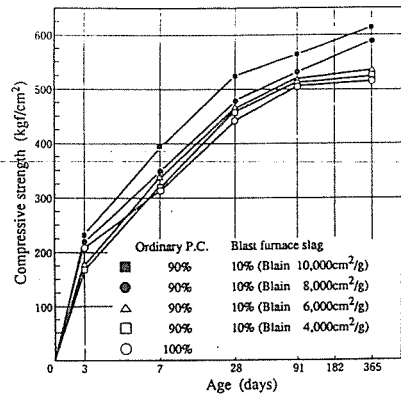


Fig 32 Relationship between Compressive Strength of Concrete with GBFS and Age

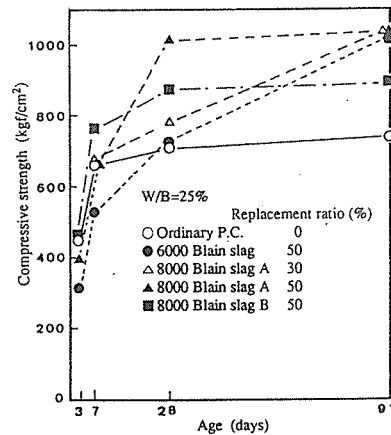


Fig 33 Relationship between Compressive Strength of Concrete with GBFS and Age

표6은 Ett의 화학적 성분을 나타내고 있는 것처럼 주성분이 세립자와 무수화물로 이루어졌다. 그림 34는 Ett의 유무에 따른 콘크리트의 단열온도상승을 나타내고 있듯이 Ett를 첨가한 콘크리트의 온도는 부Ett 콘크리트의 온도보다 약 15°C 정도 낮게 나타내고 있다. 그림 35는 압축강도와 재령과의 관계를 나타내고 있는 것처럼 재령 1~7일에서 무Ett 콘크리트와 Ett 콘크리트의 압축강도와의 차이는 작으나 재령이 증가함에 따라 동일한 물결함재비하에서 재령 56일 일때 약 200kgf/cm²에 달하고 있으며, Ett 20%를 첨가한 콘크리트에서는 약 1,350kgf/cm²이었다.

Table 6 Chemical Composition of Ettringite Based Additive

Ig.loss	In sol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Total
12.2	0.2	27.5	6.4	30.6	3.1	17.7	0.8	0.2	99.7

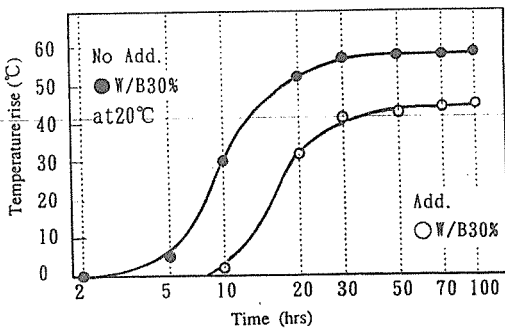


Fig 34 Adiabatic Temperature Rise of Concrete with Ett

2. 4. 4 플라이애시흙

플라이애시흙은 보통 플라이애시흙의 크기가 매우 세립이기 때문에 입자들은 시멘트입자사이들을 채우고 포졸란반응에 의해 콘크리트를 결속시킨다. 그림 36은 혼화재의 대체율

과 압축강도와의 관계를 나타내고 있는 것처럼 초기재령시 혼화재를 첨가한 콘크리트의 압축강도는 대체율의 증가에 따라 감소한다. 그러나 재령 91에서는 무혼화재 콘크리트보다 약 100kgf/cm² 크다. 그리고 대체율 15% 및 그 이하에서 실리카흙과 플라이애시흙 사이의 차이는 없는 것으로 나타나고 있어 플라이애시흙 콘크리트를 실리카흙의 대체로 사용할 수 있다.

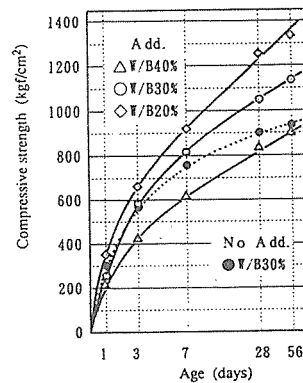


Fig 35 Relationship between Compressive Strength of Concrete with Ett and Age

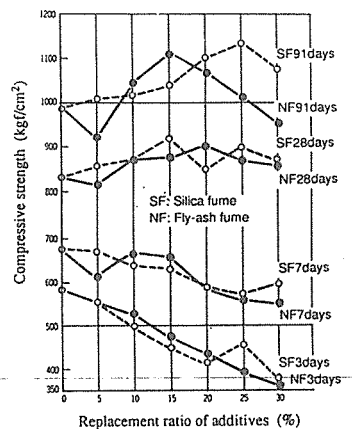


Fig 36 Relationship between Compressive Strength of Concrete and Replacement Ratio of Additives

3. 고강도콘크리트의 특성

3. 1 아직굳지않은 콘크리트의 특성

3. 1. 1 응결시간

그림 37에서 나타난 것처럼 HWRA를 첨가한 콘크리트의 응결시간은 무HWRA를 첨가한 콘크리트와 비교해서 증가하고 있다. 그림 38은 응결시간에 따른 HWRA의 영향을 나타내고 있다. 응결시간의 증가는 HWRA의 주요 성분중의 하나인 지연작용을 하는 카르본실계의 양의 증가로 기인한 것이다. New RC프로젝트의 콘크리트위원회에서는 초결시간 5~12시간, 종결시간 15시간이하로 HWRA의 특성에 대한 시방규준을 작성하고 있다.

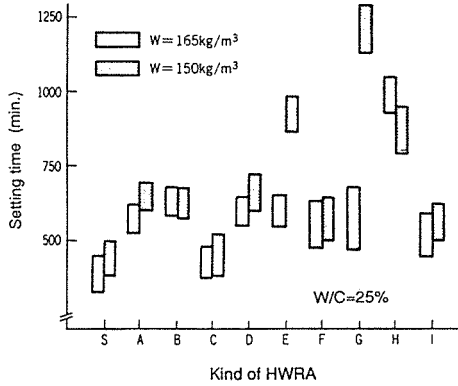


Fig 37 Effect of Kind of HWRA on Setting Time of Fresh Concrete

3. 1. 2 컨시스턴시를 평가하기 위한 시험방법

낮은 물결합재비를 가지는 후레쉬콘크리트의 컨시스턴스에서 단지 슬럼프치에 의한 평가는 콘크리트의 점도가 크기 때문에 합리적일 수가 없다. 높은 점도는 후레쉬콘크리트의 성형, 다짐, 압밀등등 매우 어렵게 한다. 그러므로 그것은 컨시스턴시를 평가하기 위한 적당한 시험방법을 조사할 필요가 있다. たゞがわ는 그림

39에서 나타난 여러 시험방법을 가지고 후레쉬콘크리트의 특성을 평가하였다. 경시에 따른 슬럼프치의 실험결과는 그림 40에 나타내고 있는 것처럼 낮은 물시멘트를 가진 콘크리트는 물시멘트비 55%의 콘크리트보다 적은 슬럼프를 나타내고 있다. 이 실험에서 슬럼프 손실량은 거의 관찰되지 않고 있고 슬럼프치는 오히려 몇몇 콘크리트에서 증가하고 있다.

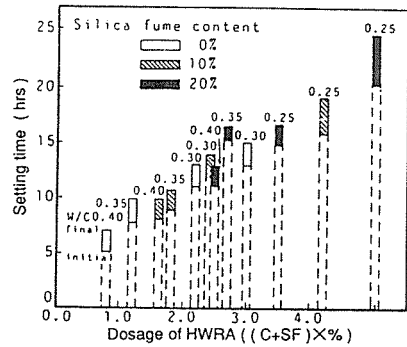


Fig 38 Effect of Dosage of HWRA on Setting Time of Concrete with Silica Fume

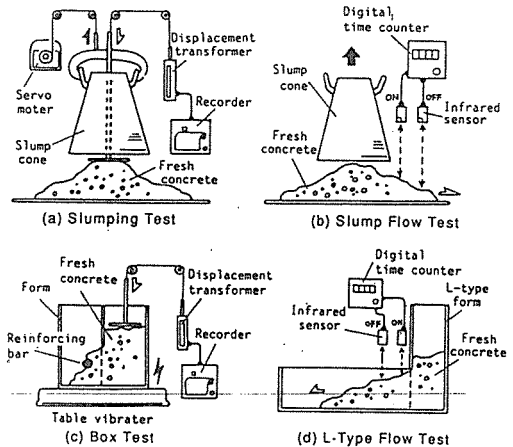


Fig 39 Various Consistency Tests

그림 41(a), (b), (c) 및 (d)는 시멘트물비와 슬럼프-플로우, 콘크리트플로우의 차이, L형 플로우의 초기속도, L형 플로우의 평균속도와 관계의 관계를 나타내고 있다. 각 값은 콘크리트의

점도와 물시멘트비의 증가함에 따라 감소하고 있다. 그러나 콘크리트와 플로우대의 표면사이의 마찰이 크면 콘크리트플로우의 값은 작게 된다. 비록 콘크리트의 점도가 비교적 작을지라도 모든 컨시스턴시 시험은 마찰에 의해 다소 영향을 끼친다. 그리고 특히 실리카흙을 가진 콘크리트의 경우 컨시스턴시의 평가를 어렵게 한다.

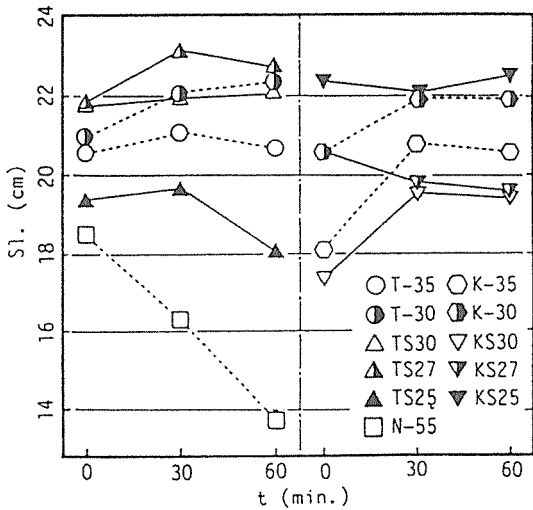


Fig 40 Slump Value Varying with Time

한편 타きがわ는 콘크리트의 유동학적인 상수를 평가하기 위한 방법을 제안하고 있다. 즉, 항복치와 빙햄모델의 유동점도, 슬럼프와 콘크리트플로우시험 평가방법에서 콘크리트의 유동학적인 상수는 점도유동유한요소법과 실험 결과에 의해 시뮬레이션 결과를 비교함에 따라서 결정하였다. 2개의 유동학적인 상수는 2가지 측정치를 사용함으로써 분석학적으로 평가되어질 수 있다. 2개의 유동학적인 상수사이의 관계는 그림 42에 나타내고 있다. 이것은 슬럼프와 콘크리트플로우치에 의해 평가하고 있으며, 항복치는 동일한 슬럼프와 플로우치에서 유동학적 점도가 증가함에 따라 감소한다. 그러므로 낮은 물시멘트비와 높은 점도를 가진 콘크리트의 항복치는 상대적으로 낮다. 실리카흙을 사용한 물시멘트비 30%의 콘크리트는 실리카흙을 사용하지 않은 콘크리트보다 유동점도가 크고 항복치는 작다.

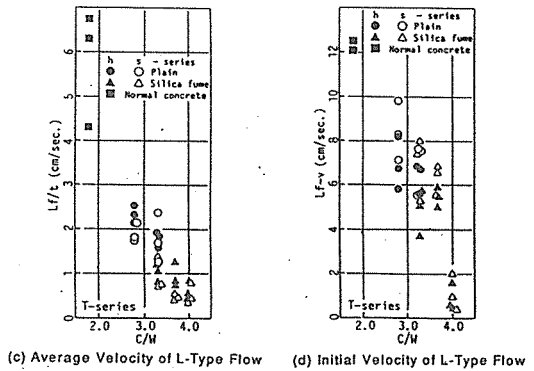
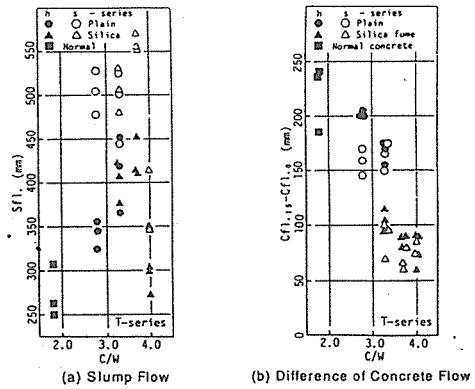


Fig 41 Relationship between Various Consistency Values and C/W

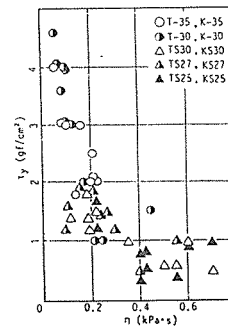


Fig 42 Relationship between Yield Value (T_y) and Plastic Viscosity (η)

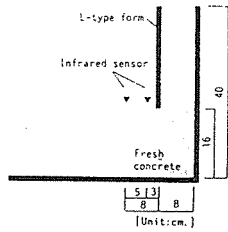


Fig 43 Apparatus of L-Type Flow Test

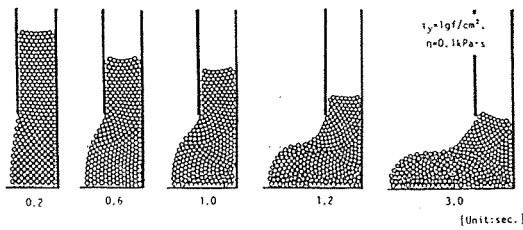


Fig 44 Analytical Results of L-type Flow Test Obtained by Suspension Element Method

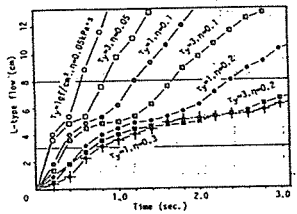


Fig 45 Relationship between L-Type Flow and Time (Analytical)

그림 43는 고강도와 초고강도콘크리트의 컨 시스템을 평가하기 위하여 개발된 L형 플로우 시험기기를 나타내고 있다. 이 기기에서 콘크리트 플로우거동의 시뮬레이션은 타키가와에 의해 행하였다. 분석학적인 결과의 예는 그림 44에 나타내고 있고 분석에 의해 얻어진 플로우와 시간과의 관계는 위 시험결과를 비교한 그림 45에 나타내고 있다. 또한 L형 플로우의 출구로부터 3~8cm의 범위에서 초기속도 사이의 관계는 그림 46에 나타내고 있는 것처럼

L형 플로우의 초기속도가 유동점도에 매우 민감하고 유동점도가 클때 항복치에 의해 거의 영향을 미치지 않는다는 것이 명백하게 나타내고 있다. 결과적으로 그것은 L형 플로우의 초기속도로 후레쉬콘크리트의 유동점도를 평가하는 것이 가능하다고 하겠다. 그림 47은 실리카흄대체율과 L형 플로우 속도 사이의 관계를 나타내고 있는 것처럼 밀실한 실리카흄을 사용할 때 L형 플로우 속도는 실리카흄 10%까지 첨가할 때 약간 증가하나 대체율 15%의 경우에는 감소하는 경향을 보이고 있다. 밀실하지 않은 실리카흄을 사용할 때 콘크리트는 밀실한 실리카흄으로 만든 것보다 L형 플로우가 크고 L형 플로우 속도는 15% 대체율까지 증가하였다.

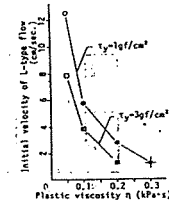


Fig 46 Relationship between Initial Velocity of L-Type Flow and Plastic Viscosity (Analytical)

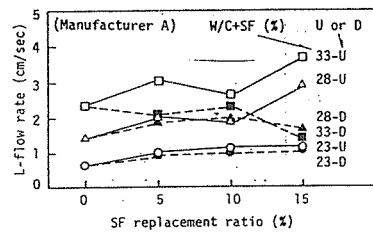


Fig 47 Relationship between L-Type Flow Velocity and Silica Fume Replacement Ratio

그림 48은 상자컨시스템 시험을 위한 기구를 나타내고 있다. 그리고 상자안의 철근배근은 그림 49에서 보여준다. 우선 후레쉬콘크

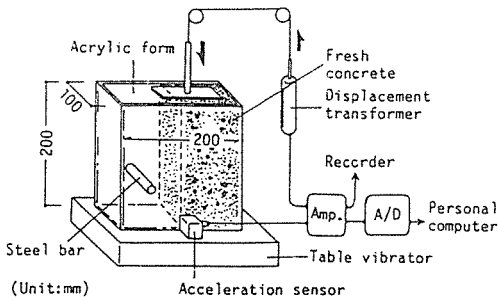


Fig 48 Box Test

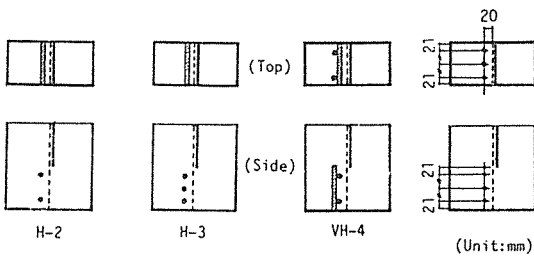


Fig 49 Arrangement of Steel Bars

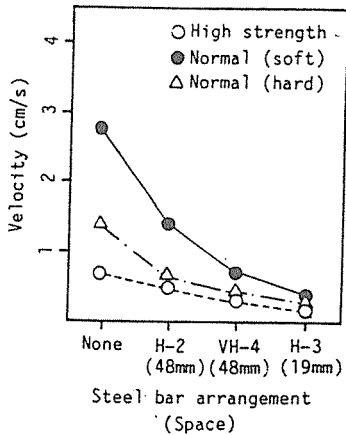


Fig 50 Effect of Arrangement of Steel Bars on Flow Velocity

리트를 상자의 오른쪽 반정도 채우고 중심 분리대를 끌어 당기면 후레쉬콘크리트는 왼쪽부분으로 흐른다. 그림 50은 철근의 배근과 플로우 속도사이의 관계를 나타내고 있다. 철근이 없는 경우 묽은비빔보통콘크리트의 플로우 속도는 고강도콘크리트보다 훨씬 크다. 그러나

철근사이의 작은 공간의 경우 플로우 속도는 콘크리트 종류와 관계없이 거의 같다.

유동상수는 고강도콘크리트의 컨시스턴시의 컨시스턴시를 정확하게 평가하는데 사용해야 한다. 슬럼프와 슬럼프-플로우와 같이 점도에 관련된 몇몇 측정된 값들은 사용해서는 안된다. 왜냐하면 여러 컨시스턴시 시험에 의해 측정된 값은 비록 그것들이 점도와 관련이 있을 지라도 항복치, 마찰과 같이 다른 유동특성에 따라 변하기 때문이다.

3. 1. 3 유동학적 특성

그림 51은 *야나じた에* 의해 얻어진 여러 콘크리트에 관한 유동점도와 항복치사이의 관계를 나타내고 있다. 고로슬래그를 사용한 고강도콘크리트에 대한 플로우의 값은 고유동 콘크리트와 HWRA를 사용한 콘크리트와 비교한 항복치는 훨씬 적고 유동점도는 훨씬 크게 나타내고 있다. 고로슬래그를 사용한 콘크리트에 대한 유동점도와 항복치는 고로슬래그 배합비율과 단위수량과 같은 요인에 의해 영향을 미치기 때문에 넓게 변한다.

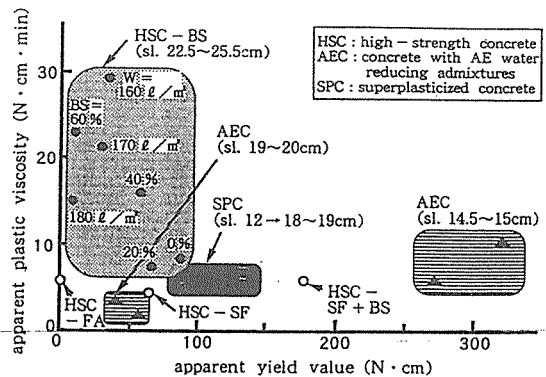


Fig 51 Relationship between Apparent Plastic Viscosity and Apparent Yield Value

실리카흄을 사용한 고강도콘크리트의 경우 유동점도는 낮고 플로우는 HWRA를 사용한 콘크리트와 비슷하다. AE감수제를 사용한 콘크리트의 유동점도는 상대적으로 작다.

3. 1. 4 분리저항성

고강도콘크리트는 높은 점도 때문에 고분리 저항성을 가진다고 말한다. 일반적으로 현장에서 사용하는 고강도콘크리트는 보통콘크리트보다 슬럼프치 20cm 이상을 가지는 높은 유동성을 가진다. 그러므로 고강도콘크리트의 재료분리를 조사하는 것이 매우 중요하다.

たじがわ는 고강도콘크리트의 재료분리를 평가하기 위한 실험을 행하였다. 이 실험에서 다량의 HWRA는 의도적으로 분리를 일으키기 위하여 첨가하였다. φ10X20cm의 시험공시체는 경화후에 수직축에 따라 절단하였다.

그림 52는 진동시간(Vt)과 골재침전비(Dag) 사이의 관계를 나타내고 있다. 골재침전비는 다음과 같이 정의한다.

$$Dag = \frac{\sum_{all} Ag/a}{L-10} / 10$$

여기서, Ag : 절단면의 각 조골재 면

A : 절단면의 각 조골재 전체면

L : 각골재와 공시체의 상부표면사이 거리

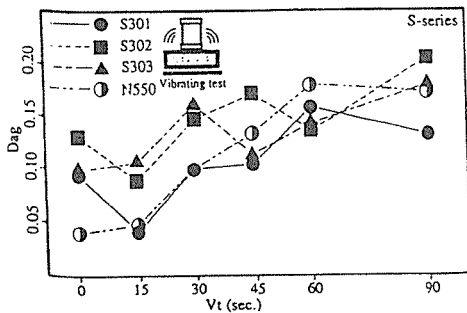


Fig 52 Variation of Aggregate Sinking Ratio (Dag) with Vibration Time (V)

Dag의 값은 조골재의 침전에 따라 증가하고 침전이 없을 때 0과 같다. 그림 52에 따르면 분리는 진동시간의 증가에 따라 매우 뚜렷하다. 그림 53은 콘크리트의 압축강도와 진동시간을 나타내고 있다. 실리카흙을 첨가한 고강도콘크리트의 압축강도는 분리의 증가에도 불구하고

진동시간 증가에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 물시멘트비 55%를 가지는 보통콘크리트의 압축강도는 재료분리 때문에 진동시간의 증가에 따라 감소하고 있다. 그것은 고강도콘크리트의 압축강도가 재료분리에 의한 영향을 거의 받지않는다고 할 수 있다.

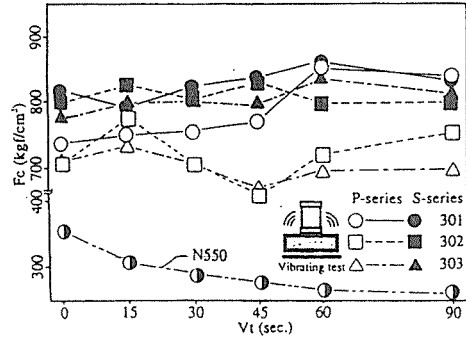


Fig 53 Variation of Compressive Strength (Fc) with Vibration (V)

3. 2 경화콘크리트의 특성

3. 2. 1 강도특성

(1) 압축강도

(a) 시멘트물비의 영향

그림 54와 55는 시멘트물비와 압축강도 사이의 관계를 보여주고 있다. 압축강도는 시멘트물비 약 4% 이하의 범위에서 시멘트물비의 증가에 따라 직선적으로 증가한다. 이 시멘트물비의 범위에서 콘크리트의 파괴는 모르타르 매트릭스 파괴에 따른 것이다. 그러나 시멘트물비 4% 이상의 범위에서 압축강도는 골재의 파괴가 콘크리트의 강도를 결정하기때문에 거의 증가하지 않는다. 이 범위에서 골재의 품질의 콘크리트의 강도에 뚜렷하게 영향을 미친다.

(b) 시험방법의 영향

たじがわ는 압축강도에 관한 공시체 표면재하조건의 영향을 조사하였다. 표 7은 시험의 개요를 나타내고 있으며, 그림 56(a), (b) 및

(c)는 압축강도하의 재하면의 각도와 평활도, 취급방법의 영향을 나타내고 있다. 다음의 결론은 이런 시험결과를 기초로해서 얻어졌다.

- 1) 공시체의 재하면 평활도는 $\pm 0.5\text{mm}$ 이하이어야 한다. 바람직한 평활도를 얻기 위해서는 양쪽면에 기계적인 그라인딩 혹은 실리카흙을 첨가한 시멘트모르터로 캡핑하는 것이 추천되어 있다.
- 2) 틸팅평판은 재하를 통하여 자유로와야 하고 혹은 상당한 양의 재하후에 고정되는 것을 적용하였다.

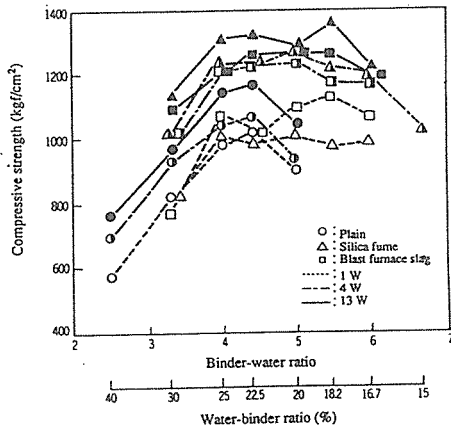


Fig 54 Relationship between Compressive Strength and Binder-Water Ratio

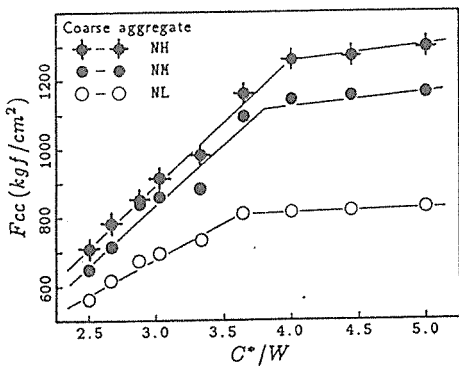
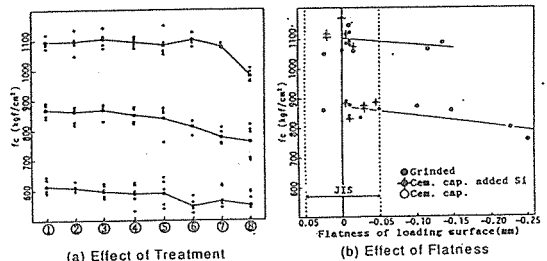


Fig 55 Relationship between Compressive Strength(F_{cc}) and Binder-Water Ratio (C^*/W)

Table 7 Treatment Methods of Loading Surface of Specimen

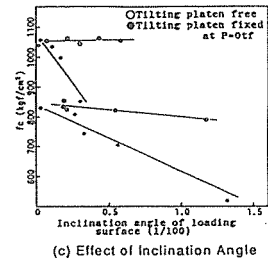
Mark	Treatment of loading surface of specimen	Thickness of glass plate for capping
①	grinded	-
②	capped with silica fume added cement paste ¹⁾	19mm
③	same as above	10mm
④	capped with cement paste (ordinary capping)	19mm
⑤	same as above	10mm
⑥	ordinary capping+reinforcement at both ends ²⁾	10mm
⑦	ordinary capping+polypropylene fibres with holes ³⁾	10mm
⑧	ordinary capping+friction reducing pads ⁴⁾	10mm

[Notes] 1) Silica fume of 25% weight of cement was added.
 2) Two rolls of spiral hoops (diameter: $\phi 3\text{mm}$, yield strength: 5500 kg/cm^2) are placed at both ends of a specimen.
 3) Polypropylene fibres (thickness: 0.1mm) with 1mm holes at the pitch of 1cm are placed on both ends of a specimen.
 4) Friction reducing pads made of a couple polypropylene fibres with silicon grease in-between are placed at both ends.



(a) Effect of Treatment

(b) Effect of Flatness



(c) Effect of Inclination Angle

Fig 56 Effect of Conditions of Loading Surface on Compressive Strength (f_c)

그림 57은 압축강도에 따른 캡핑재료의 영향을 나타내고 있다. 물시멘트비 35%, 55%의 경우 캡핑재료로 인한 압축강도의 편차는 상대적으로 작다. 그러나 물시멘트비 25%의 경우 압축강도는 캡핑재료에 따라서 영향을 미친다. 시험체의 양끝면이 거울같은 표면을 가지도록 마감하는 것이 추천되고 있다.

(2) 인장강도

골재의 종류에 따른 콘크리트의 압축강도와 인장강도 사이의 관계는 그림 58에 나타내고

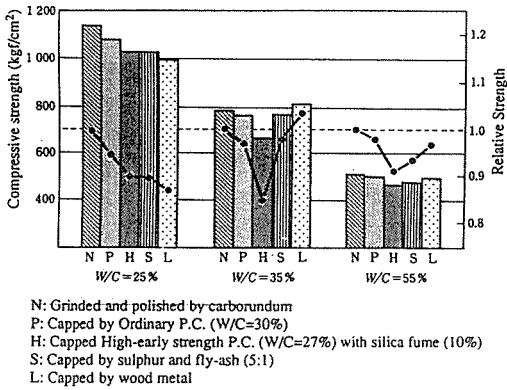


Fig 57 Effect of Capping Materials on Compressive Strength

있다. 인장강도의 증가율은 압축강도의 증가함에 따라 감소하고 인장강도는 대략 다음과 같이 나타내고 있다.

$$f_t = 1.07f_c^{0.566}$$

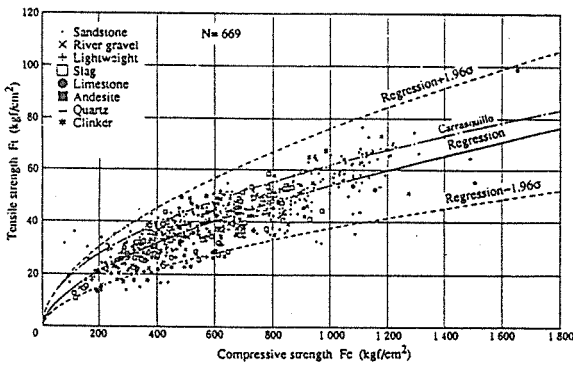


Fig 58 Relationship between Tensile Strength and Compressive Strength

3. 2. 2 변형특성

(1) 압축에서의 응력-변형곡선

콘크리트 응력-변형곡선 예는 그림 59에서 보여주고 있다. 응력-하강부위에서 응력-변형곡선의 음경사는 압축강도가 높을수록 보다 가파르게 되고 취성적 파괴를 일으키기때문에 보통시험기에 의해서 측정할 수가 없다.

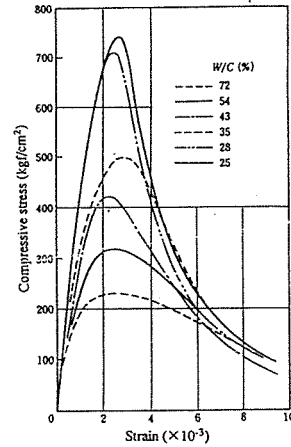


Fig 59 Stress-Strain Curve of Concrete

그림 60은 초고강도콘크리트의 압축응력-변형곡선을 나타내고 있다. 응력-상승부위에서 경사는 거의 초고강도콘크리트에서 선형적이다.

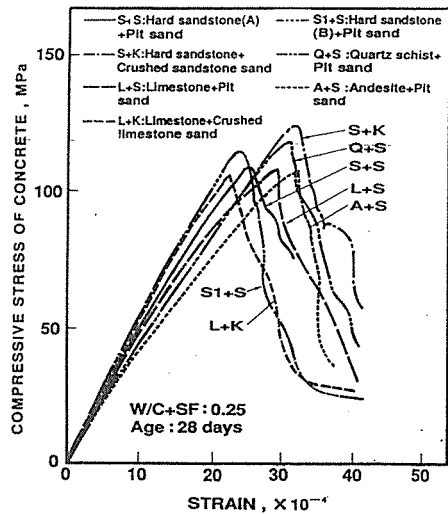


Fig 60 Effect of Coarse Aggregate on Stress-Strain Curve of Concrete

(2) 영계수

그림 61은 조골재의 종류에 따른 콘크리트의 영계수($E: \sigma/f_c = 0.3-0.4$ 에서의 세컨트모듈러스)를 나타내고 있다. E와 f_c 사이의 관계는 New RC프로젝트에서의 콘크리트위원

회에서 제안한 다음의 방정식에 의해 표현한다.

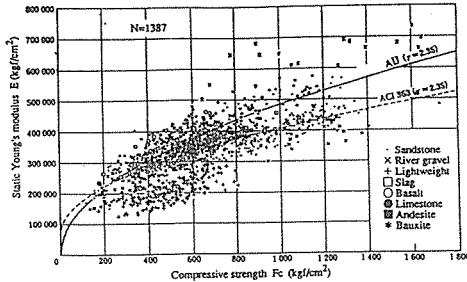


Fig 61 Relationship between Young's Modulus (E) and Compressive Strength (Fc)

$$E = k_1 \times k_2 \times 3.35 \times 10^4 \times (r/2.4)^2 \times (f_c/60)^2$$

여기서, E : 영계수(MPa)

r : 콘크리트의 단위용적중량(t/m³)

f_c : 압축강도(MPa)

k₁ : 조골재 종류에 관련한 수정계수

k₂ : 혼화재 종류에 관련한 수정계수

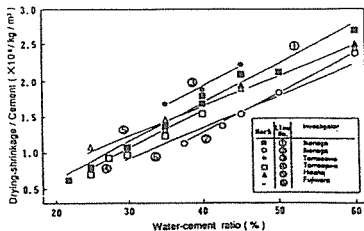


Fig 62 Relationship between Drying Shrinkage and Water-Cement Ratio

(3) 건조수축

그림 62에 나타난 것처럼 고강도콘크리트의 건조수축은 단위수량에 따라서 거의 변하지 않지만 그림 63에서 나타난 것처럼 물시멘트비의 증가에 따라 직선적으로 증가한다.

(4) 크리프

그림 64와 65는 압축강도와 콘크리트의 크리프계수, 압축강도와 비크리프 사이의 관계를

보이고 있다. 둘 값은 압축강도의 증가와 함께 직선적으로 감소하고 F_c=1,000kgf/cm²인 콘크리트의 비크리프는 F_c=400kgf/cm²인 콘크리트의 약 1/6이다.

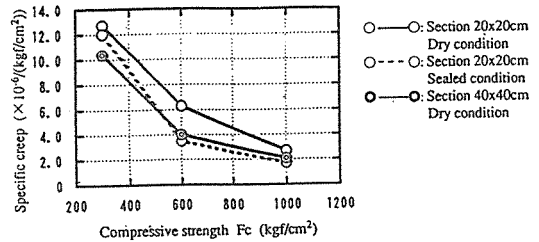


Fig 63 Relationship between Specific Creep and Compressive Strength of Concrete

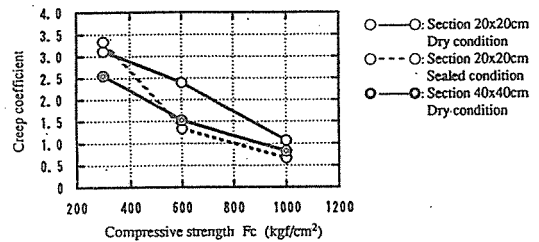


Fig 64 Relationship between Creep Coefficient and Compressive Strength of Concrete

3. 2. 3 내구성

(1) 탄산화 작용

그림 66는 물시멘트비와 탄산화깊이 사이의 관계를 보여주고 있다. 시멘트 종류에 따른 고강도콘크리트의 탄산화깊이는 그림 9와 17에서 보여주는 것처럼 물시멘트비의 감소함에 따라 뚜렷하게 감소하고 물시멘트비 25% 혹은 그이하의 초고강도콘크리트는 탄산화가 거의 보이지 않고 있다.

(2) 동결융해저항성

그림 67과 68은 실리카흙콘크리트와 무AE 콘크리트의 동결융해사이클과 상대동탄성계수 사이의 관계를 나타내고 있다. 그림 67에 따라

면 고강도콘크리트의 동탄성계수는 무AE의 경우조차도 300사이클 혹은 그이상에서 거의 감소하지 않는다. 그러나 실리카흙콘크리트에서 실리카흙량이 많으면 많을수록 동탄성계수는 그림 66에 나타난 것처럼 더 적어진다. 이 경향은 물시멘트비가 높을 때 더욱더 뚜렷하다.

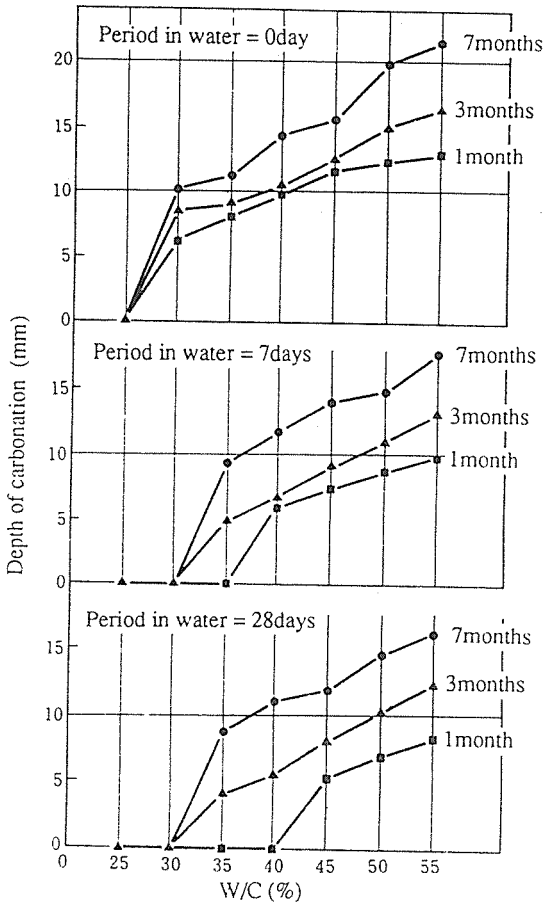


Fig 65 Relationship between Depth of Carbonation and Water-Cement Ratio

(3) 알카리-실리카반응

그림 69은 반응성골재를 사용한 모르터의 팽창과 재령 사이의 관계를 보여주고 있다. 수산화나트륨은 알카리성분으로서 모르터에 첨가하였다. 그것은 알카리-실리카반응이 고강도

콘크리트에서 단위시멘트량이 많기 때문에 보통강도콘크리트에서보다 고강도콘크리트에서 더 자주 일어날 수도 있다고 말할 수 있다. 또한 보통강도콘크리트 뿐만아니라 고강도콘크리트에서 플라이애시, 실리카흙과 고로슬래그를 사용하면 알카리-실리카반응을 제거하는데 효과적이다.

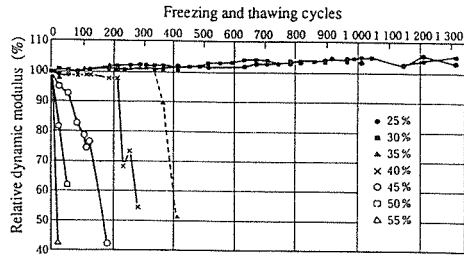


Fig 66 Relationship between Relative Dynamic Modulus of non-AE Concrete and Freezing and Thawing Cycles

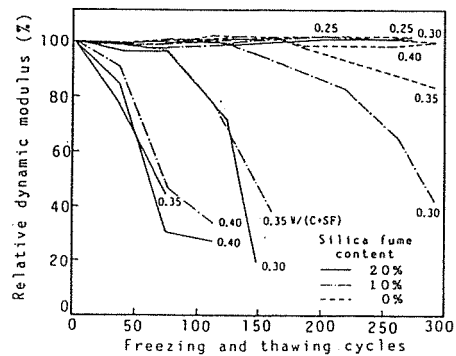


Fig 67 Relationship between Relative Dynamic Modulus of Silica Fume Concrete and Freezing and Thawing Cycles

(4) 내화성

고강도콘크리트에서 심각한 문제중의 하나가 내화성에 이르지않다는 것이다. 표 8은 1시간 동안 불에 의한 파열 실험결과를 보여주고 있다. 공시체 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 는 수증양생 후에 즉시 적용하였으며 최대온도는 JIS A1304에서 규

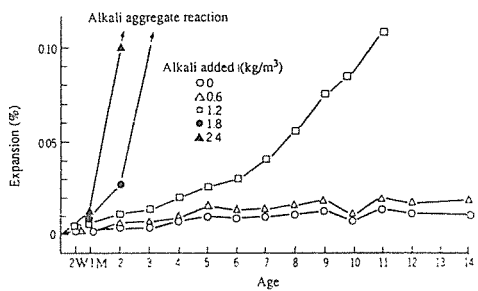
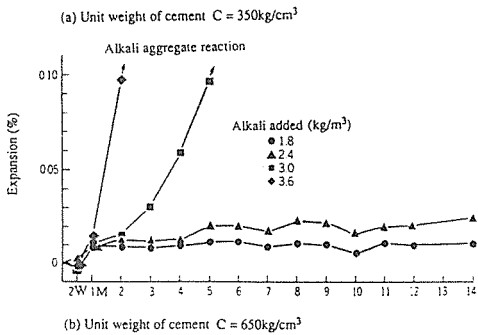


Fig 68 Relationship between Expansion of Mortar and Age

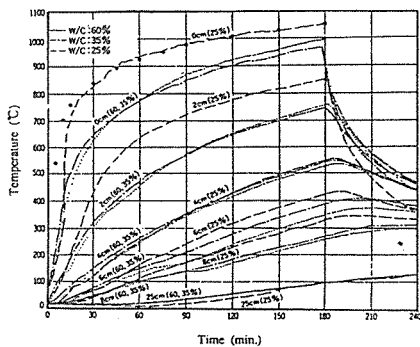


Fig 69 Relationship between Temperature and Time (Fire Resistance Test)

정한 온도의 1/3, 1/2, 2/3로 변화하였다. 표에서 심볼 ×는 파열발생을 나타내고 있으며, 파열이 물시멘트비가 감소함에 따라 보다 자주 발생한다는 것이 명확하게 나타나고 있다. 그림 70은 온도-시간곡선의 예를 보여주고 있다. 각주형 공시체 50×50×50cm는 대기양생

후 시험하였다. 파열은 물시멘트비 25%인 콘크리트에서 발생하였으나 물시멘트비 35%인 콘크리트에서는 일어나지 않았다. 그리고 그것은 콘크리트의 피복이 불에 3시간 동안 500°C 이하로 되기 위해서는 철근의 온도를 유지하기 위하여 4~6cm가 되어야 한다고 결론지었다.

고강도콘크리트의 내화성 개선하기 위한 방법 중의 하나로서 일본에서 철근에 여러 종류의 페인팅이 적용되고 있다.

Table 8 Fire Resistance of High-Strength Concrete

W/C (%)	W (kg/m³)	Water content	○: No spalling ×: Spalling												
			Standard × 1/3		Standard × 1/2		Standard × 2/3		Standard heating			Rapid heating			
			I	II	I	II	I	II	I	II	III				
25	200	4.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	185	4.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	170	3.7	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	155	3.4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	140	3.3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
35	200	4.9	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	185	4.5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	170	4.2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	155	4.0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	140	3.7	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
45	200	5.6	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	185	5.4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	170	4.8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	155	4.6	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	140	4.0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
55	200	6.0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	185	5.8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	170	5.3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	155	4.9	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	140	4.5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
65	200	6.7	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	185	6.0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	170	5.7	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	155	5.2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	140	5.2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

4. 결 어

본 논문에서는 일본에서의 고강도콘크리트에 관한 기술현상을 콘크리트재료의 측면에서 주로 언급하였다.

고강도콘크리트와 초고강도콘크리트에 대한 도전은 미래의 철근콘크리트의 기술을 결정하는데 있어서 우리의 지식을 크게 향상시킬 것이다. 비록 1,200kg/cm² 이상의 압축강도를 가

지는 초고강도콘크리트가 실험실에서 실현되었
드라도 그것을 실제로 구조물에 적용함에 있어
서도 여러가지 곤란한 점이 있으며 기술적인
문제점의 검토 뿐만아니라 경제적인 측면에서
의 검토도 필요하다.

근래의 고강도콘크리트와 초고강도콘크리트
의 개발움직임은 콘크리트기술혁신으로 연계되
어 철근콘크리트공사의 품질개선에도 공헌할
것으로 기대된다.

[REFERENCES]

1. Aoyama, H., Murota, T., Hiraishi, H. and Bessho, S., "Outline of Japanese National Project on Advanced Reinforced Concrete Buildings with High-Strength and High-Quality Materials," The Second Int. Symp. on Utilization of High-Strength Concrete, pp. 1-11, May 1990
2. Tomosawa, F., Masuda, Y., Abe, M., "High-Strength Concretes for High-rise Buildings in Japan," The Second Int. Symp. on Utilization of High-Strength Concrete, pp. 44, May 1990
3. Concrete Committee in the New RC Project, "Report on Results Obtained in 1992," March 1993
4. Yoshioka, K., "Challenge to High-Rise Reinforced Concrete Buildings on Higher Stage," Cement and Concrete, No.546, pp. 77-85, Aug. 1992
5. Ohama, Y., "Limit of Achievable Concrete Strength by Trying Possible Measures." Cement and Concrete, No.546, pp. 64-69, Aug. 1992
6. Committee of High-Strength Concrete, "State-of-Art-Report on High-Strength Concrete," Architectural Institute of Japan, pp.290, Jan. 1991

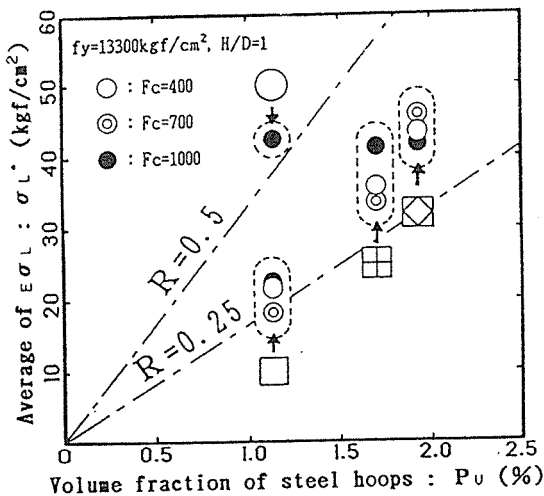


Fig 70 Reinforcing Efficiency R ($f_y=13,300\text{kg f/cm}^2$)