

碩士學位論文

濟州道產 碎石 粗骨材를 사용한 高強度
콘크리트에서 圓柱供試體의 크기 效果에
關한 實驗的 研究



濟州大學校 產業大學院

建設環境工學科

李 在 宗

2000

碩士學位論文

濟州道產 碎石 粗骨材를 사용한 高强度
콘크리트에서 圓柱供試体の 크기 效果에
關한 實驗的 研究

指導教授 徐 日 教



濟州大學校 產業大學院

建設環境工學科

李 在 宗

2000

濟州道産 碎石 粗骨材를 使用한 高強度
콘크리트에서 圓柱供試体の 크기 效果에
關한 實驗的 研究

指導教授 徐 日 教

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

2000年 8月 日



建設環境工學科

建築工學專攻

李 在 宗

李在宗의 工學 碩士學位論文을 認准함.

2000年 8月 日

委員長 _____ 印

委員 _____ 印

委員 _____ 印

목 차

목차	i
Summary	iii
Figure Contents	v
Table Contents	vii
Photo Contents	viii
I. 서 론	1
1. 연구의 배경	1
2. 연구의 목적	2
3. 연구 방법 및 범위	3
II. 고강도 콘크리트의 역학적 특성	5
1. 고강도 콘크리트에 대한 기준 및 장점	5
2. 고강도 콘크리트 제조상의 사용재료	8
3. 응력-변형률 관계	18
4. 공시체 치수와 콘크리트 강도 관계	22
5. 고강도 콘크리트 시공 현황	23
III. 시험체 계획 및 실험	31
1. 사용 재료의 성질	31
2. 시험체	34
IV. 실험 결과 및 분석	36
1. 보통 강도의 콘크리트에서 형상비에 따른 강도 변화	37
2. 고강도 콘크리트	42
3. 원주공시체의 형상비 및 크기가 콘크리트 강도에 미치는 영향 비교	45

4. 고강도 콘크리트의 시공성 확보 방안	47
V. 결 론	49
참고문헌	54



An Experimental Study on Size Effects of Cylindrical Specimen
for High Strength Concrete Using Coarse Aggregates from Cheju-Do

Lee, Jae-Jong

Department of Construction and Environmental Engineering
Graduate School of Industry
Cheju National University
Supervised by Professor Suh, Ill-Gyo



Summary

Recently and globally, there have been trends to use high-strength concrete in reinforced concrete structures. The application of high-strength concrete has several advantages to reduce the design cross section, increase the strength of structures, and reduce the demolished concrete. However, due to the different properties of aggregates from Cheju-Do and poorly accumulated data regarding high strength concrete, its utilization has big obstacles. Also, the strength of concrete depends on the size and shape ratio of cylindrical specimen compared with the standard cylindrical specimen, and we need the correction factors to convert into the design strength. However, due to the poor domestic researches on this field, we adopt the foreign data. Accordingly, in this study we consider the high strength concrete and the influences on the size and shape ratio of cylindrical specimen, and we obtained the followings

(1) We observed the aggregate failure at the compression, split tension, and flexural tests. This phenomenon resulted from the weak strength of aggregates, and appeared more definitely at the high strength concrete.

(2) As the shape ratio on the concrete specimen with the same size decreased, the compressive strength of concrete was reduced. This result is contrary to the existing

results. This also resulted from the weak strength of coarse aggregates. And the specimens with small size does not nearly have been influenced on the shape ratio. We obtained the similar results on the split test.

(3) Comparing the normal strength concrete with the large difference of compressive strength according to the shape ratio. We can conclude that in the case of high strength concrete, the correction factor to convert into the design strength may be revised.

(4) The objective of utilization of admixture in high strength concrete is to maintain the proper workability. However, we conclude from this study that the admixture is desirable to inject on the construction site for maintaining the workability.



Figure Contents

Fig. 1 Relationship of cement powder grade and concrete strength	9
Fig. 2 Relationship of curing temperature and strength of concrete	11
Fig. 3 Stress and strain relationship of concrete	19
Fig. 4 Stress-strain curve of concrete according to compressive strength	21
Fig. 5 Tangent modulus and secant modulus	21
Fig. 6 Relationship of compressive strength and size of specimen	21
Fig. 7 Relationship of compressive strength and H/D of cylindrical specimen	23
Fig. 8 Compressive strength variation according to shape ratio	39
Fig. 9 Compressive strength variation according to specimen size under the same shape ratio	39
Fig. 10 Relationship of shape ratio and split strength of concrete	41
Fig. 11 Ratio of split strength of specimen according to specimen size	41
Fig. 12 Compressive strength variation according to shape ratio	43
Fig. 13 Compressive strength variation according to specimen size under the same shape ratio	43
Fig. 14 Relationship of shape ratio and split strength of concrete	44
Fig. 15 Ratio of split strength of specimen according to specimen size	44
Fig. 16 Relationship of compressive strength ratio and shape ratio	46

Fig. 17 Relationship of split strength ratio and shape ratio	47
Fig. 18 Slump variation corresponding to lapsed time	48



Table Contents

Table 1. Definition of international design code and range of high strength concrete	7
Table 2. Compressive strength of concrete according to water cemen ratio	10
Table 3. Strength comparison of stones	13
Table 4. Water content in aggregates	14
Table 5. Water suction content of aggregates	15
Table 6. Specific gravity of stones	16
Table 7. Specific gravity, weight per unit volume, and actual occupi rate of aggregates	16
Table 8. Compressive strength ratio according to size of specimen	24
Table 9. Correction factor of compressive strength	24
Table 10. Domestic reinforced concrete buildings using high strength concrete	27
Table 11. Physical properties of cement	31
Table 12. Chemical components of cement	31
Table 13. Quality test of fine aggregate	32
Table 14. Quality test of coarse aggregate	33
Table 15. Concrete mixing proportion	34
Table 16. Compressive strength of concrete according to size and shape ratio	36
Table 17. Split strength of concrete according to size and shape ratio	37
Table 18. Flexural tensile strength according to concrete design strength	37
Table 19. Comparison of experimental and existing results	38

Photo Contents

Photo 1. Forms of specimens	51
Photo 2. Concrete placing	51
Photo 3. Shape of specimens	52
Photo 4. Compressive test of concrete	52
Photo 5. Split test of concrete	53
Photo 6. Flexural test of concrete	53



I. 서 론

1. 연구의 배경

최근 들어 건축물은 고층화, 장대화 하는 경향이 있다. 건축물의 고층화와 장대화는 구조물의 경량화 및 고강도화를 요구하고 있으며, 따라서 철근콘크리트 구조물에서도 경량콘크리트에 의해 자중을 줄이거나 고강도 콘크리트를 사용하여 단면을 줄임으로써 전체적인 중량을 줄임과 동시에 강도를 확보하고 있다. 또한, 폐콘크리트의 양을 줄임으로써 환경적인 측면에서 유리하다.

콘크리트는 강도 외에 시공성의 확보가 중요한 사항으로 이들 두 요소를 동시에 만족하여야 한다. 고강도 콘크리트는 물 시멘트비의 감소가 필수적으로 이에 따른 시공성의 저하가 우려된다. 따라서, 적당량의 혼화제의 사용에 의해 시공성을 확보하여 시공성과 강도를 동시에 만족하는 콘크리트의 배합 설계가 이루어져야 한다.

제주도는 지역적으로 낮은 강도와 흡수율이 큰 현무암질의 쇄석 조골재를 사용하고 있으므로 강도의 저하 및 큰 흡수율로 인한 골재의 분리가 예상되는 시공성의 저하가 우려되고 있다. 그러나 고강도 콘크리트의 수요가 점점 증가하는 추세에 있으므로 이러한 재료의 특성을 고려한 고강도 콘크리트의 제조의 필요성이 대두되고 있다. 특히, 프리캐스트 콘크리트는 고강도의 콘크리트를 요구하고 있으며, 서귀포의 월드컵 경기장은 고강도 콘크리트를 사용한 시공이 고려되었으나, 제주도내의 여건에 비추어 그 사용에 부정적인 측면들이 많다. 또한 건축물 외에 토목 구조물의 경우에 고강도 콘크리트의 사용이 필수적으로 제주도내에서도 고강도 콘크리트의 활용에 적극적으로 대처할 필요가 있다.

설계용 콘크리트 강도란 $\phi 15 \times 30$ cm인 원주 공시체의 4주 압축강도로

구조물의 안전 진단시에 파괴 시험으로 코아 콘크리트는 크기나 형상비가 표준 공시체와 다르므로 콘크리트 강도를 결정함에 있어서 보정 계수를 요한다. 즉, 코아 콘크리트 강도를 측정하여 재령에 따른 보정 계수 외에 크기와 형상비에 따른 보정 계수를 곱하여 콘크리트의 강도를 역추적하게 된다. 그러나 이들 보정 계수는 보통 콘크리트 강도에 국한되어 사용되고 있으며 국내에는 이에 대한 연구가 불충분하여 국외의 연구 자료에 의존하고 있는 실정이다. 특히, 제주도는 타지역의 골재와는 다른 성질을 취하므로 보정 계수의 타당성이 검증될 필요가 있다.

따라서 제주도 지역내의 쇄석 골재를 사용한 고강도 콘크리트의 물리적인 특성을 파악하고 고강도 콘크리트 구조물의 코아 채취에 의한 콘크리트 강도 역추적에서 크기 및 형상비에 따른 보정 계수를 설정하여 콘크리트 배합 설계나 현장에서 사용할 수 있는 기초적인 자료들의 제공에 연구의 필요성이 있다.

2. 연구의 목적



건설 분야에서 철근콘크리트 구조에 고강도 콘크리트의 요구가 점차 증가함에 있으며, 실내 실험에서 벗어나 현장에 적용하는 추세에 있다. 이는 고강도 콘크리트의 사용으로 구조적인 장점 외에 점차 고갈되는 골재의 사용을 줄일 수 있으며, 환경적인 측면에서 폐콘크리트의 양을 줄일 수 있는 등 경제성이나 환경적인 면에 큰 잇점들이 있기 때문이다.

그러나 제주도는 이러한 사회적인 요구에 부응함에 있어서 현무암질의 쇄석 조골재를 사용한 고강도 콘크리트의 제조에 많은 의구심을 지니고 있다. 이는 사용 조골재의 물리적인 특성들이 타지역의 골재와 비교하여 그 타당성이 입증되지 않은 점에서 그 원인을 들 수 있다.

또한, 고강도 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 구조물의 안전 진단시에 사용하는 코아 콘크리트는 설계용 원주공시체와 그 크기나 형상비가 상이하므로 강도 추적에 있어서 이들 변수들을 고려한 보정 계수의 사용이 필

요하다. 그러나 이에 대한 자료들은 대부분 국외의 자료들에 의존하고 있으며, 고강도 콘크리트에도 보통 강도 콘크리트와 동일한 보정 계수를 적용하고 있는 실정에 있다.

따라서 본 연구에서는 제주도산 현무암질의 쇄석 조골재를 사용한 고강도 콘크리트를 제조하고 동시에 시공성 확보 방안을 검증한다. 그리고 원주 공시체의 크기와 형상비에 따른 강도 변화를 살피고 보통 강도의 콘크리트와 동일한 보정 계수의 사용 가능 여부에 대해 검증한다. 이러한 연구의 결과들은 향후에 고강도 콘크리트의 제조나 고강도 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 구조의 설계 및 안전 진단시에 콘크리트 강도 추적에 광범위하게 사용되며, 제주 지역 특성을 고려한 양질의 고강도 콘크리트 제조에 사용될 것이라 판단된다.

3 연구 방법 및 범위

연구는 기존의 실험 결과들과 제주 지역 콘크리트 제조업체들로부터 고강도 콘크리트 제조상 문제시되는 점들에 대해 의견들을 수렴하였으며, 고강도 콘크리트에 대한 문헌 조사를 실시하였다. 그리고 콘크리트 강도에 대한 재료 실험을 실시하여 고강도 콘크리트의 배합 설계, 강도 및 시공성을 측정하였다. 고강도 콘크리트는 강도 외에 시공성의 확보를 요하므로 많은 참고 문헌을 통하여 혼화제 사용시에 혼화제가 콘크리트의 물리적인 성질에 미치는 영향들을 파악하였으며, 고강도 콘크리트 배합 설계표는 반복 실험을 실시하여 최종으로 배합 설계를 얻었다.

고강도 콘크리트의 배합 설계에 추가로 혼화제의 특성을 파악하고 시중에 가장 많이 사용하고 있는 혼화제를 선택하여 그 투입량과 투입 시기에 따른 시공성과 강도에 미치는 영향을 파악하였다. 시공성은 슬럼프 실험을 실시하여 그 결과를 근거로 시공성을 결정하였다. 이와 같은 방법에 의하여 콘크리트 배합 설계를 행한 후에 이를 근거로 공시체의 크기 및 형상비에 따른 영향을 압축강도, 활렬강도, 휨인장강도 등을 실험을 통해

살펴보았다. 다음으로 보통 강도의 콘크리트를 사용한 실험 결과들과 비교하였으며, 본 연구의 범위는 다음으로 요약된다.

첫째, 압축, 할렬, 휨인장 실험을 통한 보통 강도의 콘크리트와 고강도 콘크리트의 역학적 특성 비교

둘째, 보통 강도 콘크리트 및 고강도 콘크리트 공시체의 형상비에 따른 강도 변화 비교

셋째, 콘크리트 강도와 형상비에 따른 표준 원주 공시체 강도와의 관계 설정

넷째, 고강도 콘크리트에서 혼화제 타설 시기에 따른 슬럼프 변화

이와 같은 연구를 통해 고강도 콘크리트의 강도 확보 및 시공성을 개선할 수 있는 방법을 제시하였으며, 크기와 형상비에 따른 기존의 보정 계수의 타당성을 검증하였다.



II. 고강도 콘크리트의 역학적 특성

1. 고강도 콘크리트에 대한 기준 및 장점

가 고강도 콘크리트

고강도 콘크리트의 정의는 콘크리트 강도의 한계에 따라서 그들의 제조, 시공 그리고 구조 설계식 등이 다를 수 있기 때문에 그 정의의 설정이 매우 중요하다. 그리고 이러한 정의는 외국과의 여건차이 뿐만 아니라, 국내에서 사용되고 있는 분야(건축, 토목), 사용되는 대상(일반콘크리트, P·S콘크리트), 기준(KS, 콘크리트시방서, 건축공사 표준시방서) 그리고 기술자나 제품생산업자에 따라 달라질 수 있기 때문이다. 현재 고강도 콘크리트를 건축물에 가장 많이 쓰고 있는 미국에도 1950년대에는 $350\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상이던 고강도로 간주되었으며 아직도 국내 일부분에서는 이 $350\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상이 물리적이거나 심리적 한계로 여겨지고 있다 이후 1960년대에는 $420\text{kg}/\text{cm}^2$ 에서 $520\text{kg}/\text{cm}^2$ 정도가 상업용으로 이용되어 왔으며, 1970년 초에는 $630\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 콘크리트가 시카고 지역을 중심으로 생산되어 왔다. 1980년대에 들어와서는 $770\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 콘크리트를 사용한 건축물 Chicago Merchuntile Exchange이 1982년 완공되었으며, 1987년에는 Two Union Square 건물에 $1330\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 강도를 사용한 실적이 있다. 이에 미국 콘크리트 학회(American Concrete Institute) 고강도 콘크리트 분과위원회(Committee 363)는 1984년 보고서를 통해 그의 제조에 관한 주의사항과 함께 보통 중량 콘크리트(Normal Weight Concrete)는 $420\text{kg}/\text{cm}^2$ 그리고 경량콘크리트(Light Weight Concrete)는 $280\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상을 고강도로 정의하고 있다. 일본의 경우 건축에서는 $270\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상 그리고 $360\text{kg}/\text{cm}^2$ 이하를 그리고 토목에서는 $600\sim 800\text{kg}/\text{cm}^2$ 정도를 고강도로 정의하고 있으며, 건축물에서는 최근 $600\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상 사용할 때 심의위원회를 통과하여 사용하도록 규정하고 있다. 국내에서는 1986년에 발간된 건축공사표준시방서에 보통 중량 콘크리트는 $270\text{kg}/\text{cm}^2$ 에서 $360\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 콘크리트를 그리고 경량콘크리트는 $240\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상을 고강도 콘크리트로 간주하고 있으나 이는 1994년에 보통중량은 $300\text{kg}/\text{cm}^2$ 으로 그리고 경량콘크리트

는 270kg/cm² 이상으로 상향 조정되었으며 상한 범위를 두지 않음으로 콘크리트 기준상의 선진화를 기하였다. KS에서는 프리캐스트 콘크리트에 대하여 400~800 kg/cm²의 강도를 요구하고 있거나, 1988년에 도입된 건설부 제정 극한강도 구조 설계기준이 대개 400~560kg/cm²의 강도의 콘크리트를 대상으로 한 구조 설계기준인 점으로 보아 국내에서도 고강도 콘크리트에 대한 정의가 달라져야 할 필요성이 제기되어 1994년도에 개정된 극한강도 설계법에서는 구조용 콘크리트의 정의로 150kg/cm²이상으로 하고 420kg/cm²의 상한선을 철폐함으로써 고강도화의 사용을 용인하도록 하여 향후 실용화를 위한 기틀을 마련하고 있다. Table 1은 고강도 콘크리트에 대한 각국의 기준을 요약하였다.

고강도 콘크리트와 제조방법에 관하여는 여러 가지 방법이 소개되고 있으나 미국 ACI 363에서 정의하고 있는 바와 같이 재료에 배합비를 달리하여, 고성능 감수제를 첨가하는 방법으로 한정하고 있는데 이는 그의 제조가 경제성이 있어야 될 뿐 아니라 시공상 등의 어려움 때문이다.

나. 고강도 콘크리트 사용상의 장점

고강도 콘크리트가 보통 강도 콘크리트 보다 그 사용이 증가하고 있는 경우는 단위면적당 높은 강도로 인한 부재단면의 축소로 사용면적이 넓어지며, 또한 단면 축소로 인한 자재 수량 감소, 그리고 하부 단면의 일정화에 따른 거푸집 능률향상 이외에도 많은 이점이 있으며 이들은 다음과 같이 정리될 수 있다.

(1) 단위 제조 경비당 강도(strength)가 크다.

콘크리트 제조단가 상승에 비하여 강도의 증가가 큼으로 경제적 재료이다. 이는 240kg/cm²가 50,000원/m³일 경우 300kg/cm²는 56,000원/m³, 400kg/cm²는 70,000원/m³, 그리고 500kg/cm²는 80,000원/m³ 이어서 강도가 2배 가까이 증가 하는데 비하여 가격은 60%의 상승에 머물어 있어 경제적 자재로서의 이점이 있다.

(2) 단위 무게당 강도(strength)가 크다

고강도 콘크리트의 중량이 2.3 - 2.5 t/m³로서 일반 콘크리트의 무게에 비하여 거의 차이가 없기 때문에 시공하여도 구조물의 자중이 늘지 않는다.

(3) 단위 경비당 강성(stiffness)이 크다.

고강도 콘크리트의 경우 강도의 증가에 따라 콘크리트 탄성계수(E_c)가 증가

Table 1 Definition of international design code and range of high strength concrete

각 국 기 준		보통콘크리트 (kg/cm ³)	고강도콘크리트 (경량고강도) (kg/cm ³)	경량콘크리트 (kg/cm ³)	비고
미국	ACI 318-89 ACI 363	210 이상	420 이상	280 이하	고강도의 강도상한이 없음
영국	BS 8110			255 이하	내구성 고려시 350-510 까지 고려
일본	일본건축학회 철근콘크리트 구조계산 기준	135-360	270-360 (240-270)	120-270	고 내구성 210-360
	고강도 철근콘크리트조 설계시공 지침안 JASS 5(철근 콘크리트 공사)	150 - 240	270 - 360	150-225	
	PSC 설계시공기준 pre-tension	350이상 300이상			
	토목학회 콘크리트표준시방서 PSC	180-600 300-600	600-800		
	고강도 콘크리트 설계시공지침(안) 건축기준법 시행령 74조	120이상		30이상	
뉴질랜드	nzs 3101	205-560			
한국	건축학회 허용응력도 설계법 건축공사 표준시방서 1986년	150-300			
	1994년	150-270 150-300	270-360 300이상	240이하	
	극한강도 설계법 1988년 기준 1994년 기준	150-420 150이상		110이상 110이상	
	토목학회 KS KS4009	150-400	400이상은 특주품	PS 경우 800까지 가능	

하며 이는 강성(stiffness)의 상승으로 연결되어 수평부재의 하부처짐 이외에도 구조물의 좌우 흔들림(side sway)도 줄여 주어 초고층 시스템 응용에 매우 효과적이다.

2. 고강도 콘크리트 제조상의 사용재료

가. 시멘트

고강도 및 고성능 콘크리트용 시멘트로서 일반적으로는 보통 포틀랜드 시멘트가 많이 사용되고 있으나 500kg/cm² 이상의 고강도 콘크리트 제조시에는 콘크리트 배합의 특성상 단위 시멘트량이 증가되어 수화열과 작업성의 조절에 부담이 커진다. 따라서 최근에는 실리카 흙, 슬래그 미분말, 플라이 애쉬 등의 혼합재료를 첨가하거나 이것들이 혼합된 혼합시멘트가 많이 사용되고 있다.

그리고 최근 외국에서는 고강도- 고성능 콘크리트제조시 단위시멘트량 증가에 따른 수화열의 억제와 작업성증진을 위해 시멘트의 구성성분중 벨라이트(C₂S)성분을 증가시킨 벨라이트 시멘트, 입도 분포를 강도발현과 작업성에 맞추어 조정한 입도 조정 시멘트 등이 개발 사용되고 있다.

(1) 시멘트 경화체의 강도 발현

시멘트 페이스트의 강도 발현은 응결에 영향을 미치는 요인과 유사하게 시멘트의 조성, 입도, 물-시멘트비, 수화온도 등의 요인에 큰 영향을 받는다.

구조적으로 살펴보면 시멘트 페이스트의 강도는 미수화 시멘트와 시멘트 겔과의 접촉력에 의하여 발현된다. 이 접촉력의 본질에 대해서는 많은 논의가 있으며, 아직까지는 분명한 결론을 내리지 못하고 있지만 초기 흡착력, 반테트발스힘, 수소결합과 같은 약한 결합에서부터 경화단계에서 강한 결합이 생겨나는 가능성도 충분하다.

응결의 종결기가 되면 경화 페이스트의 체적은 그 후 거의 변하지 않는다. 완전히 수화된 경화체에서 약 1/2은 시멘트 입자를 채우는 공간이며, 나머지 반은 물로 채워진 공간이다.

시멘트 겔은 시멘트 입자와 물의 소모와 동반하여 양자를 채운 공간에서 성장하고 시멘트입자를 채운 공간의 두 배까지 부풀어 올라 경화가 끝난다. 그사이 물-시멘트비가 0.38로 되면 시멘트겔 중에는 28%의 공극의 남는다고 한다.

결국 시멘트 경화체는 크게 나누어 미수화 시멘트입자, 시멘트겔, 공극의 세가지로 이루어지고 그 양적 비율에 의해 콘크리트 강도의 높고 낮음이 좌우된다.

(2) 시멘트의 조성과 강도

시멘트 경화체의 강도는 시멘트 중 클링커 광물의 수화와 밀접한 관계가 있으나 시멘트 화합물의 수화열 곡선과 강도곡선을 비교해 보면 C_3A 와 C_4AF 는 수화열이 상당히 크지만 강도의 증가에 크게 기여하지 않는다. 여기에 비해 C_3S 와 C_2S 는 수화에 따라 강도증가가 현저하고 단기 강도는 C_3S 에 의해, 장기강도는 C_2S 에 의해 지배되는 것으로 나타나고 있다.

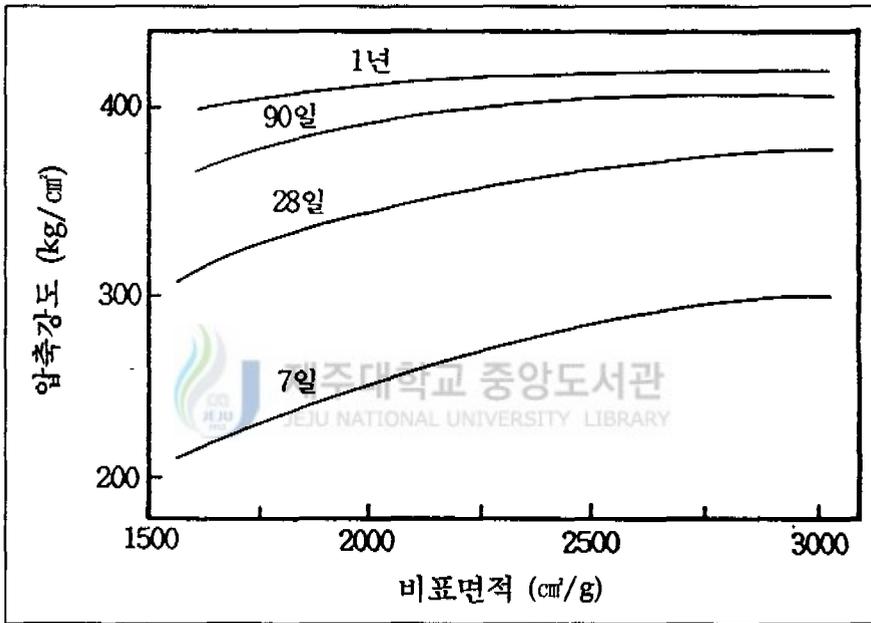


Fig. 1 Relationship of cement powder grade and concrete strength

① 분말도

미분쇄한 시멘트는 물과의 접촉면적이 크므로 수화도 빠르고 특히 단기 강도를 증가시키게 된다. 콘크리트와 물탈에 있어서, 미세한 시멘트는 골재와 균일하게 혼합되어 골재간 결합을 강하게 하기 때문에 강도는 증대한다. Fig. 1은 시멘트의 분말도와 콘크리트의 강도 관계를 나타내고 있다.

그러나 시멘트를 지나치게 분쇄하면 주수와 동시에 알루미늄이트와 물과 접촉하므로 석고가 갑자기 소모되고, 모노설페이트로의 변화도 빠르고 모노설페이트와 C-A-H겔이 알라이트 입자를 감싸 수화가 방해되어 강도가 저하하게 되

므로 석고의 첨가량을 증가시키는 것이 가장 바람직하다.

시멘트의 수화속도는 시멘트입자와 물과의 접촉 면적에 따라 좌우되므로 일반적으로 입도보다는 비표면적으로 나타내는 것이 편리하다.

② 물시멘트비

모르타르 및 콘크리트의 강도는 배합과 양생 조건이 일정할 경우 Table 2에서 보는 바와 같이 물시멘트비에 반비례한다. 시멘트의 수화에 필요한 물의 양은 시멘트의 조성분과 분말도에 따라서 다르지만 거의 물시멘트비 0.22~0.24 정도이고 그 이상의 물은 대부분 건조되어 증발되거나 시멘트 젤 기공 중에 느슨한 결합 상태로 머물게 된다.

경화 페이스트의 물시멘트비 결합수치와의 관계를 살펴보면 물시멘트비가 큰 만큼 결합수는 많아지고 시멘트 젤의 체적도 커져 치밀한 구조체를 얻기가 어렵다.

Table 2 Compressive strength of concrete according to water cement ratio

물시멘트비	압축강도(kg/cm ²)			
	3일	7일	28일	90일
0.	169	253	366	492
0.	120	190	295	378
0	77	141	218	302
0.	49	105	176	247

③ 양생온도

시멘트의 수화반응은 온도, 압력, 수량 등의 요인에 의해 영향을 받는다. 특히 화학반응은 온도 의존성이 크고 온도가 10℃ 이상이면 반응속도는 2배로 증가하게 된다.

포틀랜드 시멘트 페이스트의 온도 차이에 따른 수화발열 속도를 초기 단계에서 살펴보면 온도가 높은 만큼 C₃S의 수화는 촉진된다. 즉, 온도가 높으면 유도가 짧아지게 되고 온도가 낮아지면 응결 경화가 늦어져 공사에 지장을 받는다.

콘크리트의 양생온도와 강도와의 관계는 Fig. 2에 나타나고 있는데, 높은 양

생온도는 초기강도를 증대시키지만 장기강도를 저하시키게 된다. 이는 수분의 증발이 빠르며 수화가 충분히 이루어지지 않는 가운데 경화가 그치기 때문이다. 시멘트는 사용하는 형틀에 따라 여러 가지 조형이 가능하고 PC 판 등의 시멘트 제품 제조가 가능하지만 이 경우 생산성을 높이기 위해서는 형틀로부터 빨리 탈형할 필요가 있다. 콘크리트를 고온에서 양생하면 특히 초기강도를 증가시키므로 시멘트 제품의 경화를 촉진시키기 위하여 주로 증기양생과 오토클레이브 양생을 하고 있다. 오토클레이브 양생에서는 콘크리트에서 발생하는 경화반응은 상압 양생과는 전혀 다르고 수열 반응에 의해 시멘트 젤의 결합작용은 한층 촉진된다.

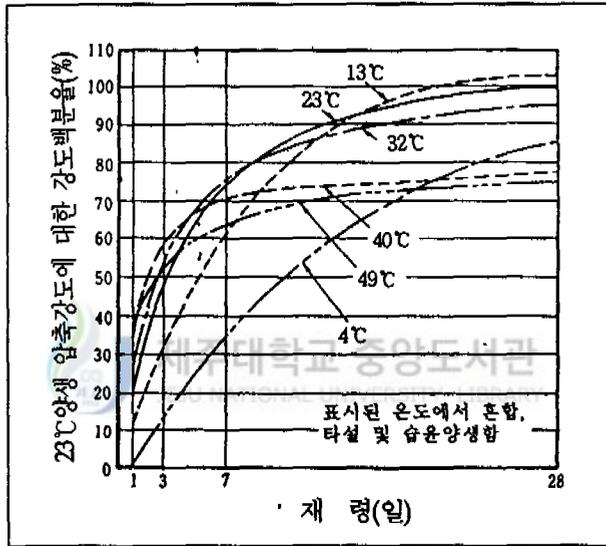


Fig. 2 Relationship of curing temperature and strength of concrete

나. 골재

일반적인 콘크리트에서 골재는 그 용적의 65~85% 정도를 차지하므로 골재의 성질은 콘크리트의 굳기전·후의 물성에 큰영향을 미친다. 따라서 골재가 구비해야 되는 성질 및 성능은 콘크리트의 요구성능과 밀접한 관련을 가지게 된다. 콘크리트용 골재가 가지는 중요한 역할로서는 우선 굳기전의 콘크리트의 작업성을 양호하게 하고, 굳은 후에는 시멘트 페이스트와 완전히 밀착하여 구조물의 강도와 내구성, 수밀성을 소정의 내구연한까지 보전시켜야 함과 동시에 페이스트의 건조수축을 완화시켜야 한다.

따라서 고강도-고성능 콘크리트용 골재로서는 큰 것과 작은 것이 적당히 혼합된 입도조성을 가지면서 깨끗하고 단단하며 내구적인 것이고 유해한 흙, 점토, 유기 불순물이 포함되지 않으며 경화 페이스트의 강도보다 높은 강도를 가져야만 한다.

(1) 고강도 콘크리트용 골재로서의 갖추어야 될 성능

① 물리적으로 안정할 것

골재는 열이나 기상작용에 대해 안정해야 된다. 예를 들면 기온의 변화에 따라 체적이 크게 변화하거나 변형되어서는 안되며, 습윤, 건조의 반복에 대해서도 변화되어서는 안된다.

② 화학적으로 안정할 것

시멘트는 알칼리성 물질이므로 이것에 대해 불안정한 것은 사용할 수 없으며 콘크리트에 작용할 수 있는 여러 가지 물질 즉, 대기 중의 탄산가스, 아황산가스 이외의 각종의 지중, 지하의 화학적 물질에 대해 안정해야만 된다.

③ 유해물질을 함유하지 않아야 할 것

시멘트의 경화 즉 수화반응에 유해한 물질(유기불순물 특수한 염류 등)이 포함되지 않아야 하며, 또한 점토, 실트등의 미세립자, 점토 덩어리, 약한입자(연석, 사석) 등은 일정량 이상 함유되면 콘크리트의 품질을 현저하게 저하시킨다. 그리고 염화물은 콘크리트 중의 철근을 부식시키므로 일정량 이상 함유되어서는 안된다

④ 치밀하고 단단해야 할 것

골재의 강도는 콘크리트 강도에 큰 영향을 미친다. 콘크리트의 강도는 기본적으로 물시멘트비에 의해 좌우되지만 골재 자체의 강도가 약하면 어느 한도 이상의 콘크리트 강도를 얻을 수 없다. 또한 마모에 대해서는 강한 것이 요구된다.

⑤ 입형이 둥글고 입도가 적절해야 할 것

골재 입자의 형상(입형)은 납작하거나 각이 지거나, 가늘고 긴 모양보다는 구형에 가까운 다면체 형상이 좋다. 입형이 나쁜 골재는 콘크리트의 유동성을 나쁘게 하여 단위수량과 시멘트량을 증가시키고 충전성을 나쁘게 하여 최종적으로는 경화 콘크리트의 품질을 저하시킨다.

그리고 콘크리트용 골재는 크고 작은 입자가 적당히 섞여 있어야 하며 입도

가 적당하지 않으면 굳지 않은 콘크리트가 필요로 하는 유동성, 점착성, 혹은 충전성을 얻을 수 없고, 골재의 분리나 블리딩이 생기기 쉬워 경화 콘크리트의 품질을 나쁘게 한다.

- ⑥ 시멘트 페이스트와 부착력이 큰 표면 조도를 가질 것
- ⑦ 같은 종류의 골재로서 가능한 한 품질의 편차가 적을 것

(2) 고강도 콘크리트의 제조에 영향을 미치는 골재의 물성

① 골재의 강도

일반적으로 골재의 강도는 이들을 사용한 콘크리트의 강도보다 높다. 콘크리트의 강도는 일반적으로 몰시멘트비에 의해 결정되지만 이것은 골재가 파괴되기 이전에 콘크리트가 먼저 파괴되어야 한다는 것을 전제로 하고 있으며 골재 강도가 경화 시멘트 페이스트 보다 강해야 한다는 것을 의미하고 있다. 따라서 일반적으로 콘크리트 강도가 700~800kg/cm² 이상의 고강도 콘크리트에 있어서는 골재 강도의 파악 및 골재의 선정에 특히 신중을 기해야 한다.

골재의 강도는 골재 자체가 다양한 모양을 하고 있으므로 강도시험을 하는 것이 어렵지만 원석으로부터 만들어지는 골재는 원석의 강도를 알수가 있다. 원석으로부터 규정된 크기의 시험체를 잘라 내어 강도 시험을 할 수가 있다. 석재의 압축강도 시험방법은 10×10×20cm의 각주형 시험체를 가압하여 구하게 되며 시험한 일예가 Table 3에 나타나 있다.

Table 3 Strength comparison of stones

종류	비중	강도(kg/cm ²)		
		압축	휨	인장
화강암	2.65	1500	140	55
안산암	2.50	1000	85	45
용회암(연질)	1.50	90	35	8
사암(연질)	2.00	450	70	25
점판암	2.70	700	700	-
대리석	2.70	1200	110	55
석회암	2.70	500	-	-
경석(연질)	0.7	30	-	-

밀실한 암석에서는 압축 강도가 1000kg/cm² 이상이 되나 사암 등은 강도의 폭이 넓으므로 경질 사암은 충분한 강도를 가지나 연질 사암의 경우는 골재로서 부적합하다.

② 골재의 입도(粒度)

골재의 크고 작은 입자가 혼합되어 있는 정도를 입도라 한다. 입도는 표준체를 통과하는 골재의 중량백분율 혹은 체에 남는 것의 중량백분율로 나타낸다. 입도가 적당한 (KS의 표준입도에 포함되는) 골재를 사용하면 일반적으로 강도와 작업성이 양호한 콘크리트를 경제적으로 얻을 수 있다.

③ 골재의 함수상태

거의 모든 종류의 암석은 표면에서 내부로 통하는 아주 작은 크기의 미세한 공극을 가지고 있어 물을 흡수한다. 골재는 콘크리트로 혼합할 때 물과 접촉하므로 건조해 있으면 물을 내부로 흡수한다. Table 4는 골재 상태에 따른 표면수율을, Table 5는 골재의 흡수율을 나타내고 있다.

굳지 않은 콘크리트의 워커빌리티나 슬럼프, 굳은 콘크리트의 강도, 내구성 등의 중요한 성분에 대해서 물은 골재 내부에 흡수된 물이 아니고 골재 외부 즉 혼합시 투입된 시멘트 페이스트 중의 물이다.

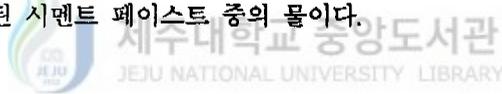


Table 4 Water content in aggregates

골재의 상태	표면수율(%)	1m ³ 에 포함되는 수량(kg)
많이 젖은 모래	5~10	67~134
보통 젖은 모래	3~5	45~67
습기가 있는 모래	1~3	17~45
습기가 있는 자갈, 쇄석	0.5~2	8~34

그러므로 정해진 물성의 콘크리트를 만들기 위해서는 골재에 흡수된 물의 양을 파악하여 배합 설계시에 고려해 주어야만 한다. 반대로 골재가 젖어 있는 경우에는 골재 표면의 물은 골재 외부의 물 즉 시멘트 페이스트에 포함된(윌) 물로써 계산을 해 주어야 한다. 따라서 골재가 어느 정도의 물을 가지고 있는가 즉 함수량을 정확히 파악하여야 하며 이것은 양질의 콘크리트를 만들기 위해 극히 중요한 요소가 된다.

고강도-고성능 콘크리트의 제조시에는 특히 골재에 포함된 수분의 영향이 크며 골재 표면수의 관리가 고강도 제조시의 작업성 및 강도편차의 주된 요인이 된다.

④ 골재의 비중, 단위용적중량, 실적을 및 공극율

골재의 비중이란 골재 입자의 비중을 의미하여 같은 단위로 계산한 골재입자의 중량을 같은 체적의 물의 중량으로 나눈 값이다. 수치적으로는 g/ml, kg/l, t/m³로 나타내어지는 밀도와 같은 값이다. 골재는 각종의 암석 입자의 집합체이므로 골재의 비중은 그 중에서 가장 많이 포함되어 있는 암석의 비중에 영향을 받는다. 그리고 비중 값은 그 골재의 강도와 직접적인 관계가 있어 골재품질을 판단하는 중요한 지표로 사용되며 콘크리트 배합을 결정하는데 반드시 고려되어야 한다. 즉, 골재의 비중이 높을수록 골재의 강도는 높아지므로 고강도 콘크리트용으로는 비중값 2.6이상의 공극율이 낮은 골재를 선정하도록 하여야 한다. Table 6은 골재의 종류에 따른 비중을 비교하고 있다.

Table 5 Water suction content of aggregates

골재의 종류	재료에 관한 시방의 등급	흡수량(%)
굵은 골재	1급	2.0이하
	2급	3.0이하
	3급	4.0이하
잔골재	1급	3.0이하
	2급	3.5이하
	3급	4.0이하

콘크리트는 골재 입자간의 공극을 시멘트 페이스트로 채워서 만들어지므로 공극율이 적은 즉 실적이 큰 골재를 사용하는 것이 시멘트 페이스트의 소요량을 적게 할 수 있다. 그리고 시멘트 페이스트의 양이 적다는 것은 일정량의 콘크리트를 만들기 위해 필요한 시멘트 및 물의 양이 적어도 된다는 의미이며 경제적으로 유리한 콘크리트를 만들 수 있을 뿐만 아니라, 품질면에 있어서도 콘크리트의 강도, 마모 저항, 수밀성, 내구성을 증진시키고 건조수축을 줄일 수 있으며, 콘크리트의 온도 상승도 적게 할 수 있다. Table 7은 일반적인 골재의

비중, 단위용적 중량 및 실적율을 나타내고 있다.

Table 6 Specific gravity of stones

종류	비중
화강암	2.6~2.7
안산암	2.5~3.0
대리석	2.6~2.8
석회석	2.6~2.7
사암	1.9~2.9
용회암	2.0~2.5
부석(경석)	0.7~1.4

Table 7 Specific gravity, weight per unit volume, and actual occupied rate of aggregates

골재의 종류	절건비중	단위용적 중량(kg/ℓ)	실적율(%)
자갈 (최대치수20~25m m)	2.5~2.6	1.6~1.7	63~65
쇄석 (최대치수 20mm)	2.5~2.7	1.45~1.55	55~60
모래			
굵은것 F.M 3.3	2.5~2.6	1.65~1.75	66~68
중간 F.M 2.8	2.5~2.6	1.6~1.7	64~65
가는 것 F.M 2.2	2.5~2.6	1.55~1.65	61~62

크고 작은 골재 입자가 섞여 적당한 입도를 가지면서 골재 입형이 둥글면 공극율은 적으며 입도가 불량하고 각이 진 것이나 편평한 입자를 많이 포함하고 있으면 공극율은 키진다. 콘크리트용 쇄석(갠 자갈)의 품질을 규정하고 있는 KS F 2527에서는 슬래브, 보, 기둥 등에 많이 사용되는 쇄석 67번 골재(입자크기 20~5mm)에 있어서는 쇄석골재의 입형 판정에 실적율을 사용하며(입형 판정 실적율), 그 값은 55% 이상이어야 한다고 규정하고 있다. 또한 KS F 2558의 쇄사(갠 모래)의 품질 규정에 있어서는 실적율 53% 이상으로 하고 있다.

골재의 입형은 콘크리트의 강도 및 작업성 등의 품질에 큰 영향을 미칠 뿐만 아니라 콘크리트의 경제성에도 직접 관련되며 입형이 나쁜 골재는 실적율이 낮아 시멘트를 많이 사용하게 되고 콘크리트의 원가가 높아지게 된다. 각이 많이 지거나 편평하여 입형이 나쁜 골재는 구형에 가까운 골재보다 실제의 체적이 적고 공극이 많아진다.

따라서, 공극에 채워야 할 모르타르나 시멘트페이스트의 양이 많아지게 된다. 쇄석은 일반적으로 강자갈보다 입형이 나쁘고 동일 슬럼프를 얻기 위한 단위수량도 많아지지만, 쇄석과 같이 표면 형상이 거친 것은 콘크리트의 강도면에서는 유리하게 작용한다. 이것은 거친 골재의 표면이 시멘트 페이스트의 부착을 좋게하기 때문이며, 이 때문에 입형이 좋은 쇄석(가늘거나 편평하지 않은 것)이라면 시멘트양을 증가시키지 않더라도 강자갈을 사용한 콘크리트와 동등 혹은 그 이상의 강도를 낼수 있다.

다. 혼화재료

최근의 건설공사가 기술적으로 고도화, 복잡화됨에 따라 콘크리트 자체의 내구성, 신뢰성을 향상시키기 위한 요구가 다양화 되고, 골재 품질의 악화에 따른 콘크리트 물성 확보 등의 환경이 변화함에 따라 각종의 혼화재료들이 사용되고 있다.

특히, 고강도 및 고성능 콘크리트의 제조에는 감수제, 유동화제, 고성능 감수제는 혹은 고성능 AE 감수제 등의 혼화제 사용이 필수적이다. 고성능 감수제는 종래의 일반적인 콘크리트용 혼화제와 그 화학성분이 다르고 시멘트 입자에 대한 흡착성분과 분산성능이 우수하여 콘크리트의 단위수량을 대폭적으로 감소시킬수 있다.

감수율은 AE제가 8%, 일반 감수제가 5~10% 그리고 고성능 감수제는 10~20%정도까지 감수시킬 수 있다.

최근에 시판이 시작되고 있는 고성능AE감수제의 경우에는 고성능감수제와 동등 혹은 그 이상의 높은 감수율과 함께 슬럼프 손실이 현저하게 줄어 고강도 콘크리트의 문제점이었던 시공상의 난점들이 개선되어 향후 많은 사용이 예상된다.

그리고 혼화제로서는 플라이 애쉬, 슬래그 미분말, 실리카 흙, 무수석고등이 사용되고 있으며 주로 수화열의 억제와 간극 충전 효과 및 자체 반응성에 의한

강도증진 혹은 유동성 및 점착성 증대 등을 목적으로 사용되고 있다. 고강도·고성능 콘크리트에 사용되는 주된 혼화재료는 다음과 같다.

(1) 감수제, AE 감수제

감수제, AE 감수제란 콘크리트 중의 시멘트입자를 분산시켜서 단위수량을 감소시키거나 콘크리트중에 미세기포를 연행시키면서 작업성을 향상시키는 한편 분산효과에 의해 단위수량을 감소시킬수 있는 혼화제이다

감수제, AE 감수제는 표면 활성 작용 중 시멘트 입자에 대한 습윤, 분산작용이 특히 강한 것으로 기포성이 큰 AE제와는 구분되며, 콘크리트의 응결시간에 미치는 영향에 따라 표준형, 지연형, 촉진형으로 분류할 수 있다.

또한 AE제만을 첨가한 경우는 감수효과가 8% 내외인 것에 비해, 우수한 감수제와 병용하거나, AE감수제를 사용하면 10~15% 정도의 감수 효과를 나타내며 공기량 증가에 따른 강도의 감소 현상이 없다. 감수제는 겨울이 있는 온대지방에서는 내동결융해성의 부여를 위해 단독으로 쓰이지 않고 AE제를 혼합 첨가하거나 감수제 자체에 공기연행성이 부여된 AE 감수제의 형태로 사용되고 있으며, 최근에는 콘크리트의 강도 및 내구성 증대와 경제성 향상을 위해 거의 모든 레디믹스트 콘크리트 및 토목, 건축용 콘크리트에 광범위하게 사용되고 있다.

(2) 압축강도와 시험방법

고강도 콘크리트의 압축강도 시험결과에 영향을 미치는 시험법상 요인은 공시체 형상, 높이 대 직경 비율, 단면처리방법, 재하속도, 단면구속상태 시험기 강성 등이 있으며 특히 공시체의 단면처리 방법과 시험기 성능에 의해 큰 영향을 받는다.

3. 응력 - 변형률 관계

가. 콘크리트의 압축 변형

콘크리트의 응력-변형률 관계는 콘크리트 내부 균열형성에 따라 큰 영향을 받게 되는데 콘크리트 내부에는 외력을 받기전에 시멘트페이스트의 용적변화가 발생하여 골재와 모르타르 사이에 응력이 발생하게 된다. 이러한 응력의 증가는 최종적으로 콘크리트의 파괴를 조장한다. 실험용 콘크리트 공시체에 일축 압축력을 가하면 종방향으로 압축 변형과 동시에 공시체 단면의 횡방향으로 인장

변형이 발생한다.

압축변형을(+)라 하고 인장 변형을(-)라 하여 응력-변형을 관계를 Fig. 3에 나타내고 있다. 이 그림에 있어 종변형을 ϵ_l 과 횡변형을 ϵ_t 는 실험을 통하여 얻은 실측치로 다음 식에 의해서 용적변형을 ϵ_v 를 얻을 수 있다.

$$\epsilon_v = \epsilon_l + 2\epsilon_t \quad (1)$$

일반적으로 콘크리트는 압축력을 분담하도록 설계를 행하는 바, 콘크리트의 응력-변형을 관계는 주로 압축력에 의하여 대표된다.

횡변형이나 용적변형을 측정하는 것은 일반적으로 드문 일이나 이들의 변형의 변화가 콘크리트 조직에 생긴 변화를 규명하는데 도움이 될 때가 있다. 예를 들면 Fig. 3에서 보는 바와 같이 응력 350kgf/cm²에서 횡변형이 급격한 증가는 이 응력에서 콘크리트 내의 조직에 현저한 변화가 생긴 것으로 추정할 수 있다. 용적변화도 유사하게 추정될 수 있다. 즉 초기 재화 단계에서는 용적의 감소를 보이나 350kgf/cm² 이상에서는 오히려 역으로 용적이 증대함을 알 수 있다. 콘크리트 조직에 메카니즘의 변화 즉 치명적인 파괴가 생기기 시작한 것으로 볼 수 있다.

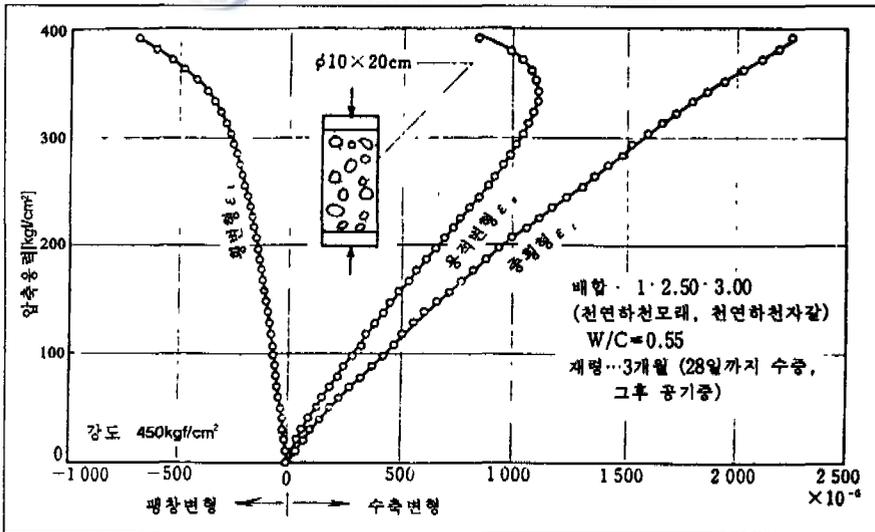


Fig. 3 Stress and strain relationship of concrete

나. 콘크리트의 압축강도와 탄성계수

콘크리트의 압축강도는 일반적으로 재령 28일되는 콘크리트 표준 공시체의 일축방향 압축강도를 말한다. 우리나라의 표준 공시체는 $\phi 15 \times 30$ cm 혹은 $\phi 10 \times 20$ cm인 원주 형태이며 시험방법은 KSF 2405(콘크리트 압축강도 시험방법)에 명시되어 있다. 이러한 원주 공시체에 의한 압축강도 측정은 우리나라 이외에 미국, 일본, 프랑스 등에서 채택되고 있으며, 영국, 독일, 이탈리아 등에서는 가로, 세로, 높이가 모두 10cm되는 입방형 공시체가 사용되고 있다. 동일 콘크리트에 대해 입방형 공시체에 의한 압축강도는 원주 공시체에 의한 압축강도보다 20~25% 더 높게 측정되는 것으로 알려져 있다. 콘크리트의 탄성계수는 철근콘크리트 구조물 설계에서 철근과 콘크리트의 응력-변형률 성질과 밀접한 관계를 가지고 있다.

Fig. 4는 여러 가지 압축강도를 가진 콘크리트의 전형적인 응력-변형률 곡선이다. 이 곡선에서 나타난 바와 같이 일축 압축력을 받는 콘크리트는 응력이 30~40퍼센트에 이를 때까지는 탄성거동을 하나 그 이상의 응력 상태에서는 미세한 균열의 발생으로 점차 비선형을 나타내고, 응력이 압축강도의 80~90퍼센트에 이르러서는 균열들이 서로 연결되어 응력을 더 이상 지지하기 어려운 상태가 되어 파괴되며, 이 때 변형률은 0.002에서 0.0025의 범위에 있다. 이 이후에는 변형률은 증가하나 응력은 떨어지는 변형률 변화(Strain softening) 현상이 생기며 철근콘크리트 구조 설계용 극한강도법에서는 극한변형률을 0.003으로 규정하고 있다.

탄성계수(Initial tangent modulus)는 임의의 응력 상태를 잇는 직선의 기울기를 할선탄성계수(secant modulus)라 하며 $0.5f_{ck}$ 또는 $0.25f_{ck}$ 에 대한 할선탄성계수를 탄성 계수로 사용하고 있다.

Fig. 5의 응력-변형률 곡선에서 초기 선형상태의 기울기를 콘크리트의 탄성계수로 하고 있다. 콘크리트의 탄성계수는 콘크리트의 압축강도에 따라 값을 달리한다. 그 이유는 콘크리트 탄성계수는 콘크리트를 구성하고 있는 골재와 시멘트 페이스트의 탄성계수에 좌우되는데 골재의 탄성계수는 일정하게 유지되나 시멘트 페이스트에서는 물시멘트비에 따라 시멘트 페이스트의 공극률도 증감하고 이에 따라 시멘트 페이스트의 탄성계수와 아울러 콘크리트의 강도도 영향을 받기 때문이다. 일반 콘크리트용 골재의 탄성계수는 시멘트 페이스트 탄성계수

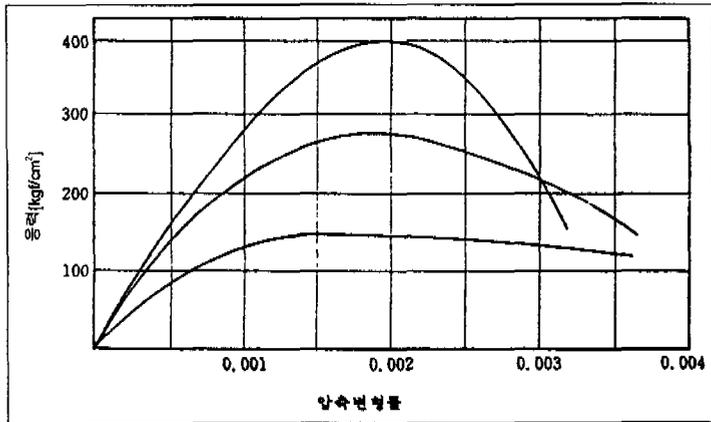


Fig. 4 Stress-strain curve of concrete according to compressive strength

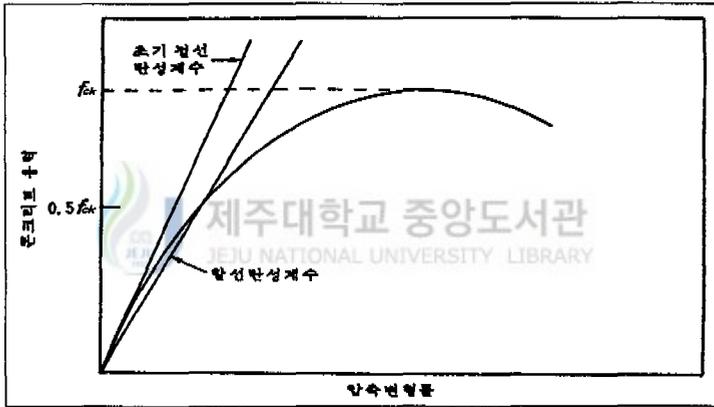


Fig. 5 Tangent modulus and secant modulus

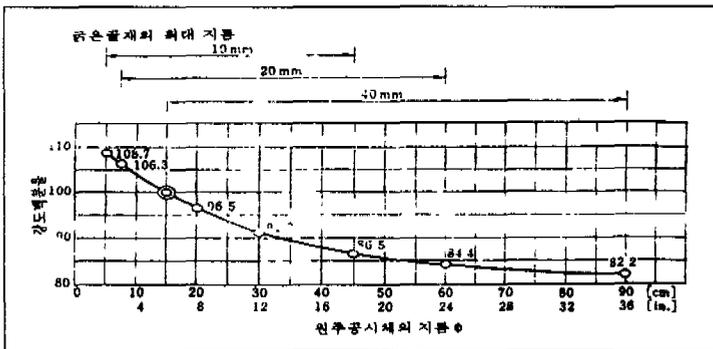


Fig. 6 Relationship of compressive strength and size of specimen

의 1.5~5배 정도 되며, 경량골재의 탄성계수는 시멘트페이스트와 거의 비슷한 값을 가진다.

따라서, 콘크리트의 탄성계수는 콘크리트의 무게와 강도의 함수로 나타낼 수 있으며 기준에서는 단위체적질량이 1,500-2,500kgf/m³인 콘크리트 탄성계수를 다음과 같이 정하고 있다.

$$E_c = 0.136 \gamma_c^{1.5} \sqrt{f_{ck}} \text{kgf/cm}^2 \quad (2)$$

여기서 γ_c 는 콘크리트의 단위체적질량으로 kgf/m³의 단위를 가지며, 콘크리트의 압축강도 f_{ck} 의 단위는 kgf/cm²이다. 일반콘크리트의 단위체적질량은 대략 2,300kgf/m³이 되므로 식(2)로부터 다음을 얻을 수 있다.

$$E_c = 15,000 \sqrt{f_{ck}} \text{kgf/cm}^2 \quad (3)$$

식(2)와 (3)에 의한 탄성계수 산정 식에서는 골재의 무게만 고려되어 있고, 골재의 강도는 무시되어 있기 때문에 실험결과와 비교해 보면, 산포도가 큰 편이나 철근콘크리트 구조체의 용력해석에서 이 식들에 의한 값들은 큰 오차없이 사용되고 있다. 식(2)와 (3)으로부터 콘크리트의 압축강도가 증가하면 탄성계수 또한 증가함을 알 수 있다.

4. 공시체의 치수와 콘크리트 강도관계

콘크리트 압축강도 측정용 공시체의 치수가 작을수록 압축강도는 크게 나타난다. 공시체의 지름을 D, 높이를 H라 하여 일반적으로 H/D=2인 표준 공시체에 대해 Fig. 6은 원주 공시체의 지름에 따른 압축강도를 나타낸다. 이 그림에서 $\phi 15 \times 30$ cm 원주 공시체의 압축강도를 100%라 하여 강도비를 나타내며 공시체의 치수가 작을수록 압축강도는 증가함을 볼 수 있다.

또한 Table 8과 Fig 7에서는 H/D=1.0과 2.0의 치수를 가진 공시체에 대해 압축강도의 관계를 나타낸다. 이로부터 다음을 얻을 수 있다.

① 원주형 또는 각주형 공시체의 경우, 지름 혹은 변장 D와 높이 H의 비가 작을수록 압축강도가 커진다.

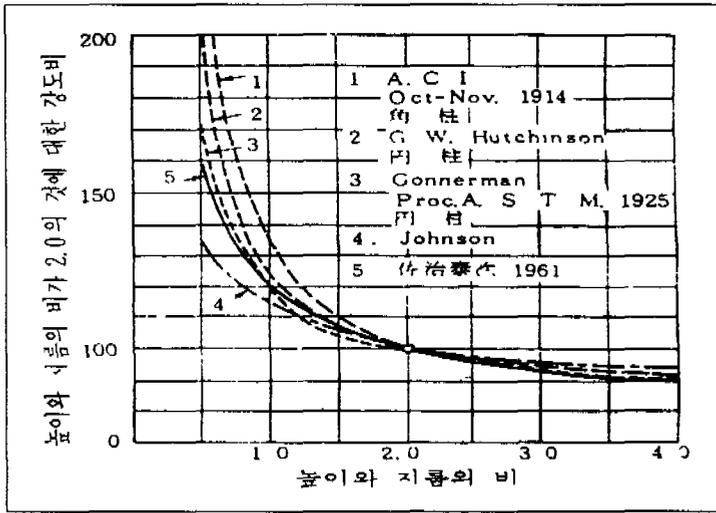


Fig. 7 Relationship of compressive strength and H/D of cylindrical specimen

- ⑤ H/D가 동일할 경우에 원주 공시체가 각주 공시체보다 큰 강도를 나타낸다.
- ⑥ 형상이 닮은 꼴이면 치수가 작은 공시체가 큰 강도를 나타낸다.
- ⑦ 입방체 공시체의 강도가 원주 공시체의 강도에 비하여 큰 강도를 나타낸다.

그리고 콘크리트 구조물로부터 코어를 채취하여 강도시험을 행할 때 코어의 치수 H/D=2.0에 같게 할 수 없는 경우가 많다. 이 때문에 표준 공시체의 강도로 환산하기 위하여 측정치에 곱할 보정 계수를 Table 9와 같이 사용한다.

5. 고강도 콘크리트 시공현황

근래 각국에서 70층 이상의 초고층 철근콘크리트(R/C) 구조물의 등장과 더불어 중·저층의 경우에도 장경간을 요구하는 건축이나 토목구조물에 대한 요구가 급증하고 있다. 건축물의 경우 1990년에 높이 순으로 본 세계의 초고층 건축물 50동이 철골조 29동, 복합구조 15동, 철근콘크리트 6동으로 구축되어 1930년대에 건설된 4동의 건물이 모두 철골조임에 비추어 콘크리트의 성능 향상에 획기적인 발전으로 볼 수 있다. 이는 1980년도 이후로 한정시켜보면 철골조 10

동, 복합구조 11동, RC조 6동으로 복합구조 RC조로 보면 철골조와 철근콘크리

Table 8 Compressive strength ratio according to size of specimen

재령	원주공시체			입방형공시체		각주 공시체	
	φ15×15	φ15×30	φ20×40	15	8	15×30	20×40
7일	0.67	0.51	0.48	0.72	0.66	0.48	0.48
28일	1.12	1.00	0.95	1.16	1.15	0.93	0.92
3개월	1.47	1.49	1.27	1.55	1.42	1.27	1.27
1년	1.95	1.70	1.78	1.90	1.74	1.68	1.60

* φ15×30 원주 공시체의 28일 강도를 1로 하였음.

Table 9 Correction factor of compressive strength

높이와 지름의 비	2.0	1.75	1.5	1.25	1.0
보정계수	1.00	0.98	0.96	0.93	0.89

* H/D가 위의 값 중간에 있는 경우에는 보간법에 의해 구함.

트조의 비는 1:2가 되어 철근콘크리트가 근래에 들어 획기적인 발전을 거듭하고 있음을 알 수 있다.

이러한 구조물에 사용되는 콘크리트 강도(설계기준 강도)는 대개 450kg/cm² 이상으로 40종 이상인 경우 400~600kg/cm² 정도를 사용하고 있는 것이 보편화 되어 있으며 이에 관한 연구 및 사용지침 방안이 발간되고 있다. 예를 들어 미국의 경우에는 1983년 ACI고강도 콘크리트 분과위원회(ACI-363)에서 보통중량 콘크리트 경우 400kg/cm² 이상이 고강도 콘크리트를 대상으로 제조방법 그리고 구조설계 기준을 발표한 이후 1988년에 시애틀의 Two union square 빌딩에 1330kg/cm²를 시공하였으며 일본에서는 270kg/cm²이상의 콘크리트를 JASS 5에 고강도 콘크리트 사용범위 및 지침을 발표하였으며 일본토목학회에서 1985년에 콘크리트 강도 600~800kg/cm²을 대상으로 「고강도 콘크리트 설계시공 지침(안)」을 발표한 바 있으며, 이외에도 1988년에 건설성 구도로 산·학·관이 「새로운 철근콘크리트(New RC) 5개년 계획」을 세워 제조, 설계, 시공등으로 구분하여 그 연구가 1993년 완료되었으며 근래에 오사카에 600kg/cm²의 고강도

콘크리트를 건축구조물에 사용하고 있다. 이외에도 캐나다의 경우 「High performance concrete Network」이 4개년 계획으로 1994년에 종료되었으며, 2단계 안이 4개년 계획으로 다시 채택되어 「Concrete Canada」라는 이름으로 고성능 콘크리트의 일반 시공화에 초점을 맞추고 있다. 그밖에도 프랑스에서는 「New ways for concrete」라는 연구과제를 통해 건설현장에서의 고강도-고성능 콘크리트의 시공을 연구하고 있으며, 미국-유럽이 공동으로 3년마다 개최하는 「High strength(performance) concrete congress」 등의 국제공동세미나도 이 분야의 발전에 견인차 역할을 하고 있다.

가까운 동남아시아 각국에서도 압축강도 400-500kg/cm²의 고강도 콘크리트시공이 일반화 되어 있으며, 홍콩에서는 900kg/cm²을 시공하였고 최근에 말레이시아 KLCC Project(446m)에는 콘크리트 압축강도 800kg/cm²(Cube강도)의 초고강도 콘크리트 삼성건설이 시공했다. 그러나 국내 건축물의 경우 400kg/cm² 이상을 구조설계에 반영한 경우는 1993년의 양재동 삼성생명사옥 이후 삼성 신대방동 주상복합구조물에서 420kg/cm²을, 그리고 우성 도곡동 캐릭터 199의 420kg/cm²을 합하여 3개의 경우 뿐이며 나머지는 시험시공으로 1990년에 삼성분당 시범단지 109동 28층에 500kg/cm²을 지하층을 대상으로 그리고 1991년에 산본 삼성아파트(15층)의 13층 코아 부분에 플라이 애쉬를 이용하여 500kg/cm²을 타설함으로써 수화열 조절이후에도 고강도-고성능 콘크리트의 고층부분 펌프압송성을 조사하였다. 이후 1993년 대우 진해현장(3층)에 700kg/cm²을 시도하였고, 1994년에는 삼성 신대방동 주상복합건축물(지상 28층, 지하 8층) 지하 4개층 코아 부분에 700kg/cm²을 본격적으로 타설하였으며 지상 1층 부분에 1,200kg/cm²을 시험 시공하였다.

이와 같이 고강도 콘크리트의 시공은 구조물이 초고층화와 초대형화에 부응하기 위하여 각국에서 고강도 콘크리트를 적극적으로 실용화한 덕분에 그 사용빈도가 급격히 상승되어 왔다.

이런 경향은 향후 국내에서도 400-600kg/cm² 정도의 콘크리트 압축강도를 중심으로 활기를 띄게 될 것으로 보인다. 더욱이 업무용 구조물 이외에도 집합주거주택인 경우 철골조의 높은 골조공사비 이외에도 높은 소음전달성과 고층화에 따른 흔들림 등 진동문제 때문에 일본과 같이 지진이 많은 국가에서도 고강도 콘크리트를 이용한 구조시스템이 개발이 급속히 이루어 지고 있어 국내에서도 참조가 될 것으로 보인다.

가. 국내 적용사례

국내의 경우 고강도 콘크리트에 관한 연구는 대학 및 건설회사의 연구소 중심으로 진행되어 왔으며 최근에는 비교적 활발히 연구가 진행되어 이 분야에 대한 논문 발표로 증가하고 있으며 또한 고강도 콘크리트에 관한 발표 및 국제 워크숍도 개최되기도 하였으며 국내 자체의 기술개발 결과를 분석하여 고강도 콘크리트 시공지침서를 제작하기도 하였다. 그러나 국내의 경우는 주로 실험실에 국한된 연구가 거의 대부분이며, 현장적용의 예는 극히 미비한 실정으로 실제 구조물에 적용한 사례를 살펴보면 특히 $300\text{kg}/\text{cm}^3$ 이상은 건축구조물에 적용한 실적보다는 토목 구조물에 사용한 실적이 많은 편이다. 현재 국내 건축구조물에 사용한 고강도 콘크리트를 살펴보면 Table 10과 같다.

1985년에 여의도 럭키 쌍둥이 빌딩(Lucky Twin Tower)에 압축강도 $280\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 콘크리트를 사용한 이후 분당 신도시 삼성 시범단지 28층 초고층 아파트에 $610\text{kg}/\text{cm}^2/365\text{일}(530\text{kg}/\text{cm}^2/28\text{일})$ 의 압축강도를 갖는 고강도 콘크리트를 지하 전체에 시공한 후, (주)대우 진해현장 3층 건물과 삼성건설이 순천에서 Mock-up 시험용으로 실리카 흙을 사용하여 $700\text{kg}/\text{cm}^2$ 까지 시험시공을 하였으며 구조설계에 대한 반영으로서는 1993년에 준공된 양재동 삼성생명 사옥이 $420\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 고강도 콘크리트를 최초로 사용한 후 대방동 삼성 주상복합건물(28층)과 우성 도곡동캐릭터 199에 실용화를 실시하였다.

현재 국내에서는 사무소 건축물만 아니라 주거용 아파트 건축물로 초고층화가 이루어 지고 있으나, 기존의 보통강도 콘크리트를 사용함에 따라서 이러한 초고층 건물의 경우, 하부층의 수직부재(벽, 기둥)단면의 커지게 되므로 실제로 사용하게 되는 면적이 상부층에 비해 하부층이 다소 적게 되는 경향이 발생하게 된다. 더욱이 고강도 콘크리트는 개발될 경우 수입원자재 및 철골 부재를 대체할 수 있어 국제 경쟁력 향상이 이점도 있다.

이를 위하여 국내에서도 관력 학자의 노력의 일환으로 1994년도에 건축학회에서 개정된 극한강도 설계법(USD)에 의한 철근 콘크리트 구조물설계법에서는 기존의 콘크리트 강도 상한선을 미국 등 선진국과 같이 철폐하였으며, 표준적 지침을 위하여 건설부 용역에 의해 1994년 건축공사 표준 시방서에 고강도, 유

Table 10 Domestic reinforced concrete buildings using high strength concrete

공사명	발주처	시공회사	시기	배합강도 (kg/cm ²)	비고
포철 연주빌딩	포항제철	삼환건설	82	450	Fc=450
Lucky Twin Tower	럭키	럭키개발	85	280	336(28일)
올림픽수영 장	럭키	코오롱건설	87.10	400	
랜드로바	랜드로바	한일건설	87.3	유동성목 적	
영등포지점	국민투자신 탁	(주)신성	89.11	300	8층
마포사옥	한국신용유 통	(주)대우	89.12	300	Post-Tension
분당 시범 초고층아파 트	삼성,현대, 한양 등	삼성,현대 한양 등	90	300	Fc=300 자체 B/P
삼성 분당 초고층아파 트	삼성	삼성종합건 설	90	530	Fc=300 자체 B/P
영남일보사 옥	영남일보	(주)대우	91	280	Fc=280
삼성 산본아파트	삼성	삼성종합건 설	91	500	Fc=270 fy-ash사용(12층)
삼성생명 양재사옥	삼성생명	삼성중공업	93	420	Fc=428 보-기중분리타설
대우진해현 장	(주)대우	(주)대우	93	700	· 시험시공 Fc=240 · 실리카흙사용
삼성 대방동 주상복합	삼성건설	삼성건설	94	400, 700, 1200	Fc=420 =700,1200
우성도곡동 개릭터 199	우성건설	우성건설	95	420, 500	Fc=420 고려,동양레미콘
한국통신 복동사옥	한국통신	두산건설	96	500	시험시공 고려레미콘

동화, 고내구성 부분을 추가 및 보완함으로써 고강도 콘크리트의 이용을 위한 제반규정을 보완하고 있어 이 분야의 개선을 위한 발판을 마련하였으나, 이의 실용화는 이미 선진국에서 시작된 연구결과가 각 나라별로 특색이 있고 기술도입에서도 한계가 있으므로 국내실정에 맞는 고강도 콘크리트의 개발 및 이의 실용화를 위한 연구투자가 절박한 시점에 와 있다.

나 고강도 콘크리트 시공지침

일부 선진외국에서의 고강도 시공 실패가 문헌을 통하여 많이 소개되고 있으나, 이들의 생산 및 시공기술이 각 제조회사의 기밀로 되어 있고, 그의 시공방법 등도 일반강도 콘크리트와 다른 점이 있다. 그밖에 이들의 기술도입에는 계약조건이 따르며 도입되더라도 국내의 시멘트, 골재, 혼화제 등의 품질이 외국 제품과 일부 차이가 나며 국내 시공수준과 차이가 나기 때문에 문제가 될 수 있어 국내 실정에 적합한 제조방법과 시공기술 및 역학적 연구가 절실한 시점에 와 있다 국내에서도 이의 필요성에 따라 일부대학과 건설기술연구소에서 고강도 콘크리트에 관한 연구를 꾸준히 하고 있으나 아직 구체적 실패는 많지 않으며 더욱이 미국이나 일본에서와 같이 표준제조와 시공규격이 아직 제정되어 있지 않은 실정이다.

국내에서의 고강도 콘크리트 생산 및 시공을 위하여 국내 및 선진각국의 기술을 참조하여 다음과 같이 기술하면

(1) 계획된 배합, 타설, 다지기, 양생

고강도 콘크리트의 배합과 타설, 다지기, 그리고 양생은 미리 계획된 시공계획에 따라 적절히 이루어져야 하며, 콘크리트 품질이 균일하게 되도록 하여야 한다.

① 물시멘트비

고강도 콘크리트를 제조하기 위하여 낮은 물시멘트비는 필수적이며 대개 $400\sim 500\text{kg}/\text{cm}^3$ 의 범위는 $0.33\sim 0.38$ 이 사용되고 $700\text{kg}/\text{cm}^3$ 의 초고강도 콘크리트는 $0.27\sim 0.3$ 그리고 $1000\text{kg}/\text{cm}^3$ 이상인 경우는 0.22 이하가 요구된다. 이러한 낮은 물시멘트비는 시공성이 저하되므로 고성능 감수제를 사용하여 슬럼프 값을 증가시킬 수 있으며, 따라서 워커빌리티를 개선 시킬수 있다.

그러나 고강도 콘크리트 제조시 일률적인 물시멘트비는 한계가 있으므로 반드시 사전 시험배합이 이루어져야 하며, 특히 현장투여시 함수량과 표면수량 측

정후 최종배합이 결정되어야 한다.

㉞ 재료투입 순서

일반 콘크리트와 비슷하나 재료의 투입순서, 시기 등을 달리하여 고성능 감수제의 효율을 높이도록 시도를 해 보는 것이 좋으며 특히 AE감수제의 관계에 주의를 기울여야 하고 고성능 감수제를 투여하는 장치가 배처(Batcher)에 마련되어야 하며 물을 투입한 후 고성능 감수제를 투여하는 순서로 하여야 한다.

㉟ 운반

여러 가지 방법과 장비에 의해 운반될 수 있지만 가능한 슬럼프 손실을 피하기 위하여 신속히 운반되어야 하며, 운반 중의 콘크리트 온도 비빔으로 부터의 경과시간, 고성능 감수제의 종류에 따라 별도 계획을 수립하여야 한다. 하절기에는 슬럼프 감소지연을 위한 지연형 고성능 감수제가 추천되고 있다. 그리고 레미콘 트럭에 고성능 감수제를 투여할 수 있는 장치의 마련도 시급하다. 대개 운반에 요구되는 시간은 일반콘크리트와 같이 60~90분을 한계로 하고 있으나 계절이나 외기온도에 따라 적절한 조치가 필요하다. 이외에도 운반량은 최대적재량의 80~85%만 넣어 재비빔시 적절한 혼합이 되도록 해야하고 근래에는 선진외국에서 이용하는 Dry Mixer 방법도 권장될 수 있다.

㊱ 타설

고강도 콘크리트의 타설을 위하여 버킷이나 펌프가 많이 이용되고 있는데 이는 타설량 높이 등에 따라 세심하게 결정되어야 한다. 펌프시에는 펌프관의 굽힘이 최소화 되도록 하여야 하며, 타설장소와 작동기는 직접 연결되도록 그리고 연속적인 펌프가 이루어져야 하며, 높은 부분에 고압펌프할 경우에는 점성의 증가가 급격히 이루어지므로 펌프압력의 계산에 주의하여야 한다.

㊲ 다지기

유동성이 좋은 고강도 콘크리트는 다른 감수제와 달리 골재의 분리가 일어나기 쉬우므로 철근 등이 밀집하게 배근된 경우에 다지기를 할 경우 세심한 주의가 필요하다. 대개 1개소에 긴 진동을 주지 않고 내부진동기의 삽입간격을 좁게 하며 진동시간을 짧게 하는 것이 좋다. 현장 타설시에는 충분한 진동기를 준비하여야 하며 이때 작업에 필요한 3대의 진동기에 1대꼴로 비상용 진동기를 비치하여야 한다.

㊳ 양생

고강도의 발현에 수화열이 많이 발생되므로 특히 하절기에는 충분한 수분양생이 이루어져야 하고, 동절기에는 보온양생이 이루어져야 한다. 수분을 공급하

기 위해서는 배합시에 습기를 유지하는 피막양생에 비해 추가로 물을 공급하는 습윤양생(Ponding Spray, Wet Durlap 등)이 효율적일 수 있다. 주차장이나 교량상판 같이 강도 보다 내구성이 우선되는 경우에는 노출표면의 양생방법을 결정하는 것이 중요하다.

㉔ 높은 내부 수화열 방지

고강도 콘크리트의 제조에는 높은 시멘트량과 더불어 미세한 시멘트 입자가 사용되기 때문에 콘크리트 내부에 높은 수화열을 발생시키는데 국내에서도 40×60cm 기둥에 86℃(외기온도 : 32℃)까지 온도가 상승하였다.

이렇게 급격한 내부온도를 외부표면과의 온도차이에 의해 콘크리트에 온도 균열 등을 발생시키므로 세심한 주의가 필요하다.

㉕ 잔연수 제거

B/P에서 레미콘 트럭의 드럼 내부를 씻은 물이 40ℓ까지 남을 수 있으므로 반드시 역토출하여 레미콘을 실어야 한다.

III. 시험체 계획 및 실험

1. 사용 재료의 성질

가. 시멘트

본 실험에 사용된 시멘트는 S회사의 보통 포틀랜드 시멘트로서 S사가 제공한 시멘트의 물리적인 성질을 Table 11에, 화학적 성분을 Table 12에 각각 나타내고 있다.

Table 11 Physical properties of cement

구 분	분말도 (cm^2/g)	안정도 (%)	용결시간		압축강도(kgf/cm^2)		
			초결 (분)	종결 (시간)	3일	7일	28일
실험결과	3,140	0.13	275	06:55	187	279	365
KS규격	2,800이상	0.8이하	60이상	10:00 이하	130이상	200이상	290이상

Table 12 Chemical components of cement

구 분	실리카	알루미나	산화철	석회	수경율	규산율	철 율
범위(%)	20~25	4~6	2~4	62~66	1.8~2.4	2.3~2.9	1.0~2.3

나. 세골재

본 실험에서 고강도 콘크리트 제조를 위해 사용한 모래는 전라남도 진도군에서 채취한 자연산 바다 모래로써 염분량을 기준치 이하로 확보하기 위해 24시간 이상 스프링 클러에 의한 표면 살수시킨 후 건조 포화 상태로 만들어 사용하였으며, 모래의 물리적 실험 결과 및 조립율은 Table 13과 같다. 실험 결과 조립율은 2.81로 중모래에 속함을 알 수 있다. 일반적

으로 세골재의 크기는 콘크리트 강도에 영향을 미치며 가급적 굵은 세골재의 사용이 콘크리트의 강도를 증진시키므로 본 실험에서 사용된 세골재는 적절한 것으로 판단되었다.

Table 13 Quality test of fine aggregate

구분	비중	흡수율(%)	점토(%)	염분(%)	조립율
세골재	2.59	1.53	0	0	2.81
KS규격	2.5이상	3.0	3.0	0.04이하	2.3~3.1

다. 조골재

제주도는 한반도에서 약 90km 떨어진 곳에 있는 섬 전체가 화산 활동에 의해서 만들어진 큰 화산섬이다. 섬의 크기는 장경 약 80km, 단경 약 40km인 타원형으로 섬의 중앙부에는 높이 약 2,000m의 순상화산이 있다. 특히, 분석구에서의 기생화산들은 높이 50~200m 정도로서 섬 전체에 산재되어 있으며, 외형상으로는 모양과 구성 물질이 같은 것 같으나, 자세히 살펴보면 여러 특징을 지니고 있다.

제주도의 기생화산 수는 360여개 이상이 되며, 원형은 그대로 간직하고 있는 것도 있으나, 어떤 것은 풍화되어 화산의 흔적만 남아 있는 것도 있다. 기생화산은 제주도의 장축 방향에 주로 많이 분포하고 있으며, 그 중 60% 이상은 해발 200m 이상 되는 곳에 위치하고 있다. 이는 지하의 마그마가 용암으로 지표에 분출할 때 제주도의 지각구조와 밀접한 관계를 갖고 있다.

기생화산의 모양을 몇가지로 구분해 보면, 화산의 윗부분에 화구가 없는 원추형, 화구가 있는 둥근형, 한 쪽부분이 열린 U자형, 그리고 원형과 U자형이 같이 한 복합형이 있다.

제주도의 지질은 주로 조면암과 조면 안산암 그리고 그 이후 250만~300만년 전인 신생대 말기 홍적세 초기에 분출한 것으로 보이는 Olivine 질 현무암과 쇄설물 등에 의해 구성 되었으며, Olivine질 현무암은 모두 다공질 또는 주상 절리를 나타낸다. 그 후, 화산활동에 의해 한라산과 360여개의 기생화산들에서 분출된 화산암으로 현무암, 조면암류, 조면질 안산

암류, 기생화산 분출물인 화산쇄설 퇴적암류와 사구로 이루어졌다.

현무암류는 감람석, 휘석, 현무암을 기저로 하여 침상장석 감람석 현무암, 반상휘석 현무암은 비현정질 현무암, 장암 현무암 등이며, 전체 면적의 95%이상의 분포로 보이고 있다.

본 실험에서 사용한 조골재는 현무암질의 쇄석 조골재로 타지역의 골재와는 물리적인 성질들이 다름을 문헌을 통해 알 수 있다. Table 14는 현무암질의 쇄석 골재와 기타 지방의 골재의 성질들을 비교하고 있다. 이 표에서 알 수 있는 바와 같이 제주 지역인 상가나 상창의 골재가 타지역에 비하여 약 2~4배 정도 높은 흡수율을 보이고 있으며, 비중, 실적율, 조립율은 타지역과 유사하게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 흡수율이 클 경우에 콘크리트 중에 골재의 분리를 야기할 수 있으며, 특히 고강도 콘크리트의 경우에 낮은 물 시멘트비로 인하여 골재의 분리에 세심한 주의

Table 14 Quality test of coarse aggregate

구분	비중	흡수율(%)	실적율(%)	조립율
상가	2.68	1.87	63.9	6.46
상창	2.68	1.60	61.0	6.54
안양	2.61	0.84	58.9	7.13
공영사	2.64	0.78	59.3	7.09
곤지암	2.72	0.49	56.6	7.20
신갈	2.74	0.67	59.2	6.79
용원	2.60	1.02	57.4	7.13
KS규격	2.5이상	3.0이하	60~65	6~8

가 필요함을 인지할 수 있다.

조골재는 콘크리트 용적의 약 65% 정도 이상을 차지하는 바, 조골재의 강도는 콘크리트 강도에 크게 영향을 미친다. 기존의 연구 결과에 의하면 제주산 현무암질의 쇄석 조골재의 평균 강도는 타지역의 골재에 비하여 낮게 나타난다. 따라서, 타지역에서 생산되는 콘크리트와는 달리 단위 시멘트량을 늘리고 낮은 물시멘트비의 사용을 요구한다. 그러나 전술한 바와 같이 현무암질의 쇄석 조골재는 흡수율이 크므로 오히려 더 높은 물시멘트비가 필요하다. 즉, 강도를 우선으로 고려한다면 시공성이 저하되고 시공성을 우선으로 한다면 강도가 저하된다. 이는 고강도 콘크리트 배합

설계에 난점으로 현무암질의 쇄석 조골재의 경우는 더 심하여 낮은 물시멘트비에 의해 콘크리트의 강도를 확보하고 혼화제의 사용에 의해 시공성을 확보하는 적절한 배합 설계를 요한다.

2. 시험체

가. 콘크리트

본 실험의 주요 변수로 콘크리트의 배합 강도가 210kgf/cm^2 인 보통 콘크리트와 400kgf/cm^2 인 고강도 콘크리트의 두 종류를 선택하였다. Table 15는 이들 콘크리트에 대한 배합 설계를 나타내고 있다.

Table 15 Concrete mixing proportion unit : kgf/m^3

구분	시멘트	물	모래	자갈	혼화제	물시멘트비	세골재율
210kgf/cm^2	333	190	818	998	0.83	57%	45%
400kgf/cm^2	470	150	732	1100	4.7	32%	40%

이 표에서 보는 바와 같이 보통 강도의 콘크리트 경우에도 혼화제를 사용하고 있으며, 타지역에 비하여 낮은 물시멘트비를 사용하고 있음을 볼 수 있다. 즉, 골재의 흡수율과 낮은 강도를 고려하여 설정되었으며, 고강도 콘크리트의 경우에도 보다 낮은 물시멘트비를 사용하고 있음을 볼 수 있다.

보통 강도의 콘크리트는 레미콘을 사용하여 한 번에 타설하였으며, 고강도 콘크리트의 경우는 제주대학교 소재의 간이 믹서기를 사용하여 콘크리트를 제작하였다

나. 시험체 제작 및 형상

시험체는 기존의 철제 거푸집으로 제작된 $\phi 15 \times 30\text{cm}$, $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 의 원주 볼드에 형상비가 1.0, 1.5, 2.0이 되도록 원형 철판을 끼워 넣어 높이를 조정하였다.(Photo 1 참조) 각 시험체는 압축강도 실험용으로 3개, 할렬강

도 실험용으로 3개로 6개씩 제작하여 총 72개, 각 콘크리트 강도에 대해 3개의 휨인장강도 실험용 시험체를 제작하였다.

콘크리트의 배합 설계 강도는 210kgf/cm^2 , 400kgf/cm^2 의 두 종류로 보통 강도의 콘크리트는 레미콘에 의해 타설하여 가급적 균질성을 고려하였다.(Photo 2 참조) 고강도 콘크리트의 경우는 소정의 강도를 얻기위해 반복 실험을 통해 배합표를 결정하였으며, 제주대학교 소재의 간이 믹서기를 사용하여 시험체를 제작하였다. 각 타설시에 콘크리트의 슬럼프를 측정하였으며, 보통 강도 콘크리트의 경우는 약 18cm를, 고강도 콘크리트의 경우는 약 16cm의 초기 슬럼프를 보였다. 배합시에는 ECONEX AD-R의 혼화제를 투입하였으며, 콘크리트 타설 후 약 72시간 후에 거꾸집을 제거하였으며, 시험체에 켈핑을 실시하였다.(Photo 3 참조)

다. 실험

실험은 제주대학교 소재의 300tonf 용량의 만능시험기를 사용하여 콘크리트 타설 후 4주 후에 압축강도, 할렬강도, 휨인장강도(Photo 4, 5, 6 참조)를 각각 측정하였다. 각 실험들은 KS기준에서 정하는 방법들에 의해 취했으며, 휨인장강도는 일점 재하를 실시하여 순수 휨인장강도를 측정하였다.

매 실험 후에 시험체의 파괴 양상을 육안으로 파악하여 그 양상을 기록하였다.

IV. 실험 결과 및 분석

콘크리트 타설 4주 후에 제작된 시험체들에 대해 압축 강도, 할렬 강도 및 휨인장강도를 제주대학교 소재 300tonf 용량의 만능시험기를 사용하여 각각 측정하였다. 실험 변수로는 콘크리트의 예상 압축 강도, 공시체의 크기 및 형상비를 사용하였으며, 고강도 콘크리트의 시공성을 확보하기 위해 혼화제의 투입 시기를 결정하였다. 실험 결과들을 Table 16에 압축강도를, Table 17에 할렬강도를, Table 18에 휨인장강도를 각각 요약하였다. 예상 콘크리트 강도가 210kgf/cm²과 400kgf/cm²인 콘크리트의 4주 압축 강도는 각각 243kgf/cm²과 434kgf/cm²를 얻었다. 이들 표에서 보는

Table 16 Compressive strength of concrete according to size and shape ratio

예상강도	원주지름	형상비	시험체1	시험체2	시험체3	평균	강도비
210kgf/cm ²	10cm	1	254.7	234	248	245.6	0.95
		1.5	242.3	250.6	245	246	0.95
		2	249	264.9	259.2	257.8	1
	15cm	1	206.6	206.4	207.5	206.8	0.85
		1.5	216.8	225.5	221.6	221.3	0.91
		2	246	252	230.5	242.8	1
400kgf/cm ²	10cm	1	352.7	402.1	417.2	390.1	0.88
		1.5	409.7	440.3	421.6	423.9	0.96
		2	423.2	435.5	465.7	441.5	1
	15cm	1	369.9	410.2	388.8	389.6	0.90
		1.5	432.3	410.1	370.1	404.2	0.93
		2	420.5	450.4	430.6	433.8	1

* 여기서 강도비는 형상비가 2인 시험체의 강도에 대한 비를 나타냄.

Table 17 Split strength of concrete according to size and shape ratio

예상강도	원주지름	형상비	시험체1	시험체2	시험체3	평균	강도비
210kgf/cm ²	10cm	1	18.3	20.7	18.5	19.2	0.99
		1.5	19.9	19.2	19.5	19.5	1.0
		2	20.9	18.7	18.6	19.4	1
	15cm	1	16.8	14.8	16.1	15.9	0.81
		1.5	19.4	17.9	18.4	18.6	0.95
		2	19.2	18.5	21.1	19.6	1
400kgf/cm ²	10cm	1	28.2	36.9	34.7	33.3	0.86
		1.5	36.9	33.1	33.8	34.6	0.89
		2	34.8	40.5	41.5	38.9	1
	15cm	1	31.5	31.9	33.4	32.3	0.84
		1.5	33.7	35.4	36.2	35.1	0.91
		2	38.8	40.2	36.6	38.5	1

* 여기서 강도비는 형상비가 2인 시험체의 강도에 대한 비율 나타냄.

Table 18 Flexural tensile strength according to concrete design strength

예상강도	압축강도	시험체 1	시험체 2	시험체 3	평균
210kgf/cm ²	243 kgf/cm ²	36.2	38.2	38.4	37.6
400kgf/cm ²	434 kgf/cm ²	70.3	85.1	83.4	79.6

바와 같이 선정된 실험 변수들에 대해 보통 강도의 콘크리트와 고강도 콘크리트, 형상비와 크기에 대한 콘크리트의 역학적인 특성에 차이를 나타냄을 볼 수 있다. 이들 결과들을 근거로 다음 절들에서 각 실험 변수들에 대한 영향을 분석하였다.

1. 보통 강도의 콘크리트에서 형상비에 따른 강도 변화

가 압축강도

배합 설계 강도가 210kgf/cm²인 보통 강도의 콘크리트에 대하여 표준

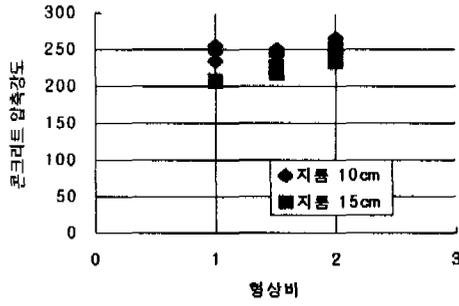
공시체에 대한 4주 압축강도는 243kgf/cm^2 의 강도를 얻었다. 배합 설계 강도의 약 15%정도의 오차로 배합 설계는 적절하게 이루어진 것으로 판단된다.

Fig. 8은 형상비에 따른 콘크리트의 압축 강도를 나타내고 있다. 일반적으로 표준공시체란 $\phi 15 \times 30\text{cm}$ 를 원칙으로 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 인 원주공시체도 기준에서는 허용하고 있다. 이들 그림에서 보는 바와 같이 형상비가 2인 경우에는 거의 유사한 결과를 나타내고 있으나 형상비가 작을 경우에는 표준 원주공시체의 크기가 작아짐에 따라 형상비의 영향이 감소됨을 볼 수 있다. 즉, 공시체 전체의 체적이 증가함에 따라 강도가 저하되는 경향을 볼 수 있다.

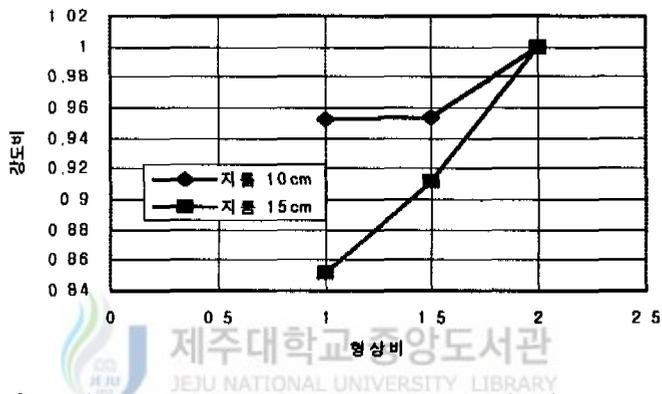
Fig. 9는 동일 원주 공시체의 지름에 대해 형상비가 감소함에 따라 압축강도는 감소됨을 볼 수 있다. 이는 Table 19에서 보는 바와 같이 기존의 국외 자료와 비교하여 상반되는 보정 계수를 나타내고 있다. 그 원인은 실험에 사용된 현무암질의 골재에서 찾을 수 있다. 파괴 시험체에 대한 형상을 보면 골재의 파괴를 동반하고 있음을 실험을 통해 관찰할 수 있었다. 골재의 파괴는 외부 하중에 대해 에너지 흡수의 능력이 저하되어 급격한 에너지 발산에 의한 파괴를 일으키는 취성적인 성질을 나타낸다. 따라서 사용 골재가 충분한 강도를 확보하지 않는 경우에는 이와 같은 현상이 나타남을 예견할 수 있으며, 특히 제주도내에 사용하는 현무암질의 쇄석 조골재를 사용한 콘크리트는 경량 콘크리트의 파괴 양상을 지니고 있음을 알 수 있다. 만약 골재가 충분한 강도를 지니고 있다면 부배합에 의한 시멘트 페이스트에 의해 에너지 흡수가 행해지고 궁극적으로 시멘트 페이스트의 파괴를 일으키게 될 것이다.

Table 19 Comparison of experimental and existing results

형상비	기존의 보정계수	실험 결과에 의한 보정계수	
		지름 10cm	지름 15cm
2.0	1.0	1.0	1.0
1.5	0.96	1.05	1.10
1.0	0.89	1.05	1.17



(a) Compressive strength of concrete according to shape ratio



(b) Strength ratio according to specimen size under the same shape ratio

Fig. 8 Compressive strength variation according to shape ratio

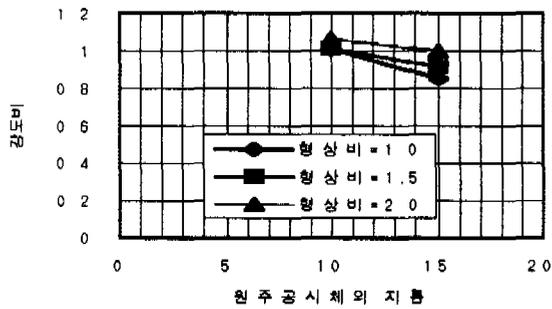


Fig. 9 Compressive strength variation according to specimen size under the same shape ratio

나. 할렬강도

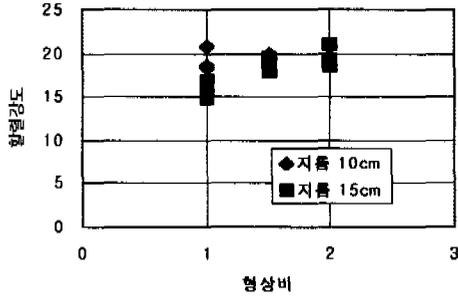
철근콘크리트 구조 설계에 있어서 콘크리트의 인장강도는 무시되므로 설계에 있어서는 그다지 중요한 사항이 아니다. 그러나 장기 하중에 의한 처짐 및 균열과 같은 구조물의 사용성에 있어서 중요한 역할을 한다. 일반적으로 콘크리트의 할렬강도는 콘크리트 강도의 약 10% 정도 내외를 가정하고 있다.

본 실험에서는 시험체의 크기와 형상비가 할렬강도에 미치는 영향을 파악하였다. Fig. 10은 형상비와 콘크리트의 할렬강도와의 관계를 나타내고 있다. 일반적으로 콘크리트의 할렬강도는 콘크리트 압축강도의 제곱근과 비례 관계에 있으므로 이 그림들은 압축강도와 유사한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한, 형상비가 감소하면 할렬강도가 감소됨을 볼 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 골재의 파괴를 동반하며 압축강도와의 관계를 고려한다면 상반되는 결과를 보임을 알 수 있다.

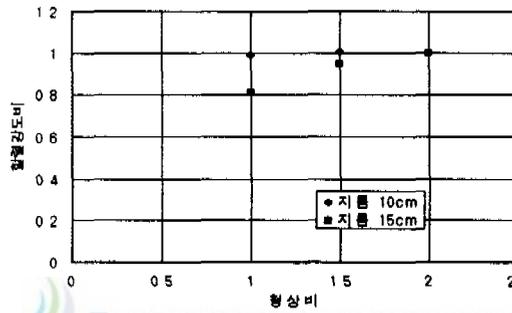
Fig. 11은 표준 원주 공시체의 할렬강도에 대한 각 시험체의 할렬강도 비를 나타내고 있다. 이 그림에서도 형상비가 작아짐에 따라 할렬강도는 저하되고 있음을 볼 수 있다.

다. 휨인장강도

휨인장강도를 측정한 결과, 이들 강도들을 36.2, 38.2, 38.4kgf/cm²로 콘크리트 압축강도의 약 14.9~15.8% 정도를 나타내고 있다. 인장강도를 측정하는 방법으로는 직접 인장, 할렬강도, 휨인장강도 측정법을 들 수 있으며, 이들 중에 할렬강도 측정법이 가장 많이 적용되고 있다. 여기서는 휨인장강도가 할렬강도 보다 큰 값을 나타내고 있음을 볼 수 있다.



(a) Split strength of concrete according to shape ratio



(b) Split strength ratio according to specimen size under the same shape ratio

Fig. 10 Relationship of shape ratio and split strength of concrete

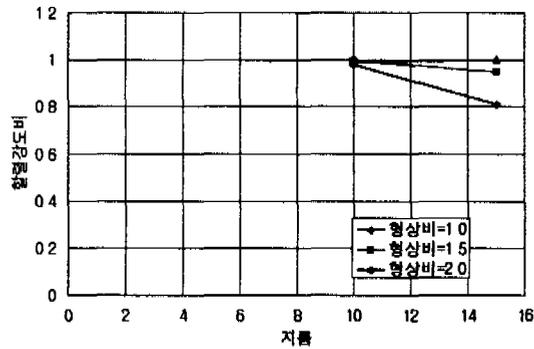


Fig. 11 Ratio of split strength of specimen according to specimen size

2. 고강도 콘크리트

가. 압축강도

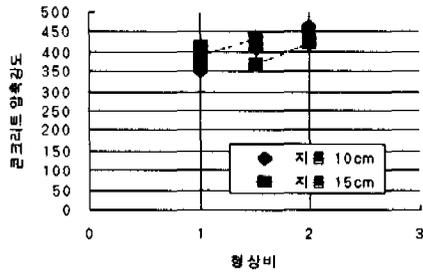
고강도 콘크리트는 보통 강도의 콘크리트와 비교하여 단위 시멘트의 양을 늘리고 세골재율과 물시멘트비를 감소시킨다. 특히 시공성을 고려하여 혼화제의 사용은 필수적이라 볼 수 있다. 세골재율의 감소는 상대적으로 굵은 골재의 양의 증가를 나타내므로 골재의 파괴가 보다 심하게 나타난다 따라서 고강도 콘크리트에서 형상비에 대한 영향은 보다 크게 나타날 것이다.

예상 강도 400 kgf/cm^2 는 4주 압축강도가 434 kgf/cm^2 로 약 8.5%의 오차를 보이므로 적절한 배합이 이루어졌음을 알 수 있다. Fig. 12는 형상비에 따른 콘크리트 강도의 변화를 나타내고 있다. 이 그림에서도 보통 강도의 콘크리트의 경우와 유사하게 형상비가 작을수록 콘크리트의 강도는 작게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이 결과도 기존의 결과와는 상반됨을 알 수 있다.

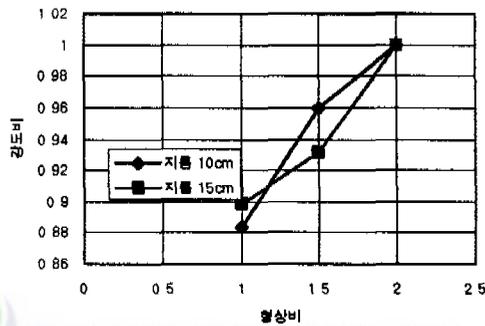
Fig. 13에서도 형상비가 감소함에 따라 강도 또한 저하되는 것을 볼 수 있다. 또한 시험체의 지름이 작을 경우에 강도는 크게 나타나고 있으므로 시험체의 전체 체적이 감소하면 보다 큰 강도를 나타냄을 알 수 있다. 보통 강도의 콘크리트와 고강도 콘크리트의 강도에 형상비에 따른 강도 변화는 다음 절에서 비교한다.

나. 활렬강도

고강도 콘크리트에서도 콘크리트의 활렬강도는 압축강도의 제곱근에 비례하므로 형상비에 따른 압축강도의 변화와 거의 유사한 결과를 나타내고 있다. Fig. 14에서 형상비가 감소함에 따라서 콘크리트의 활렬강도가 작아짐을 볼 수 있다. 또한, Fig. 15에서는 동일 형상비에 대해 원주공시체의 크기는 콘크리트의 활렬강도에 큰 영향을 미치지 않는 것을 볼 수 있다.



(a) Compressive strength of concrete according to shape ratio



(b) Strength ratio according to specimen size under the same shape ratio

Fig. 12 Compressive strength variation according to shape ratio

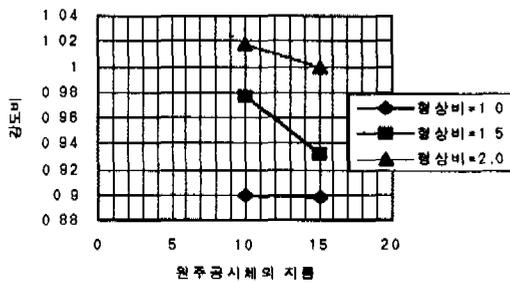
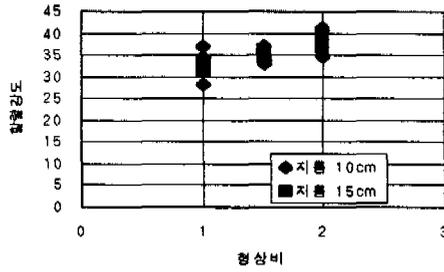
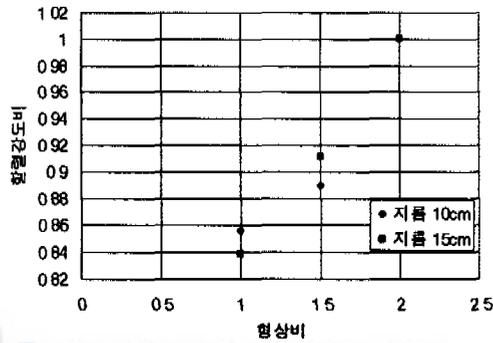


Fig. 13 Compressive strength variation according to specimen size under the same shape ratio



(a) Split strength of concrete according to shape ratio



(b) Split strength according to size under the same shape ratio
 Fig. 14 Relationship of shape ratio and split strength of concrete(400 kgf/cm²)

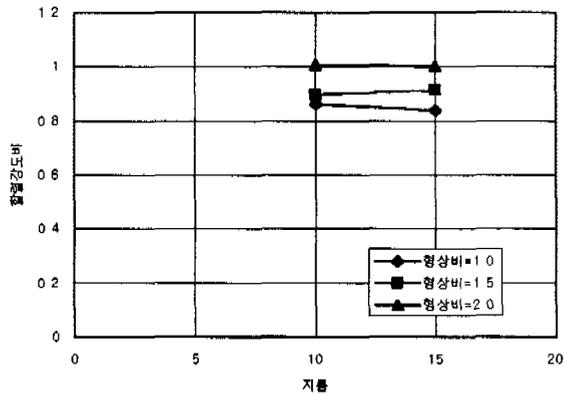


Fig. 15 Ratio of split strength of specimen according to specimen size(400kgf/cm²)

다. 휨인장강도

휨인장강도는 70.3, 85.1, 83.4kgf/cm²로 콘크리트 압축강도에 약 16.2~19.6% 정도의 값을 나타내고 있다. 이 값은 보통 강도의 경우와 비교하여 약 1.3~3.8% 정도 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이 증가는 콘크리트의 휨인장강도 또한 콘크리트 압축강도의 제곱근에 비례하기 때문에 본 실험의 결과는 타당함을 알 수 있다.

3. 원주공시체의 형상비 및 크기가 콘크리트 강도에 미치는 영향 비교

가. 압축강도

전절들에서 원주공시체의 크기와 형상비가 콘크리트의 압축강도에 영향을 미침을 볼 수 있었다. 본 절에서는 콘크리트 강도의 변화에 따른 형상비와 크기 효과를 비교하였다. Fig. 16은 동일 지름의 원주공시체에 대해 콘크리트의 압축강도와 형상비 관계를 나타내고 있다. 이 그림에서 보통 강도의 콘크리트가 고강도의 콘크리트에 비하여 형상비에 따른 압축강도의 차가 크게 나타나는 경향을 볼 수 있다. 그리고 원주공시체의 지름이 커질수록 형상비의 영향이 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이러한 차이는 콘크리트의 압축강도에 관계없이 동일한 보정계수를 사용하는 것이 바람직하지 않음을 의미한다.

나. 할렬강도

콘크리트의 할렬강도도 압축강도와 거의 유사한 경향을 나타낸다. Fig. 17은 동일 지름의 원주공시체에서 형상비에 따른 콘크리트의 할렬강도를 나타내고 있다. 이 그림에서 지름이 작은 경우에 보통 강도의 콘크리트는 형상비에 대한 영향을 크게 보임을 알 수 있다. 그러나 지름이 15cm인 원주공시체는 콘크리트의 압축강도에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

다. 휨인장강도

보통 강도의 콘크리트에서는 콘크리트의 압축강도의 약 14.9~15.8% 정도를, 고강도 콘크리트에서는 약 16.2~19.6% 정도의 휨인장강도를 각각 나타냈다. 따라서, 콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라 휨인장강도의 증가율이 크게 나타남을 알 수 있으며, 콘크리트의 휨인장강도는 콘크리트 압축강도의 제곱근에 비례한다는 기준과 거의 동일한 결과를 얻을 수 있다.

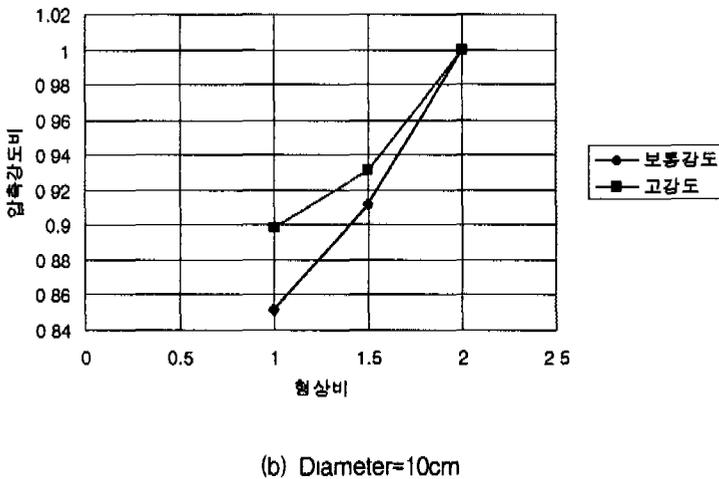
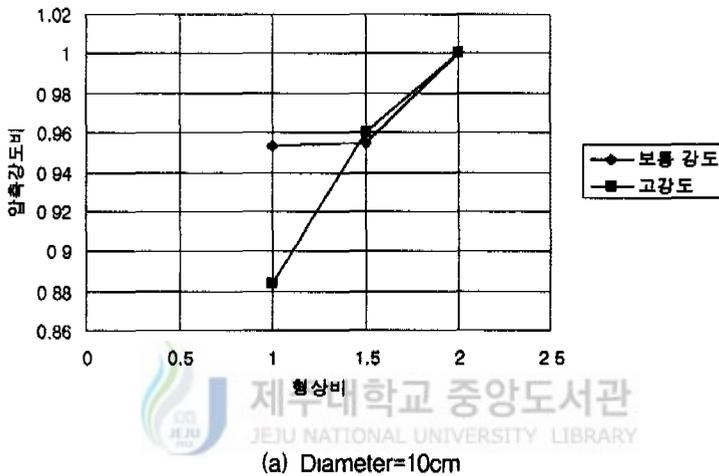
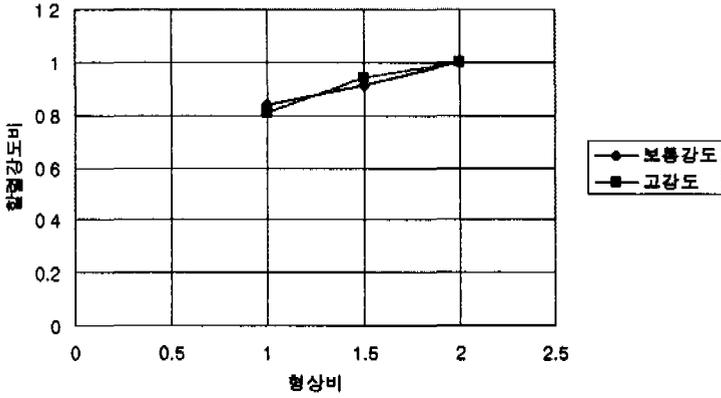
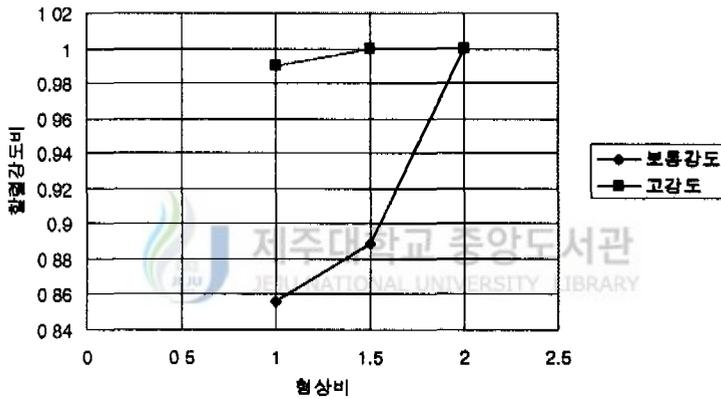


Fig. 16 Relationship of compressive strength ratio and shape ratio



(a) Diameter=10cm



(b) Diameter=15cm

Fig. 17 Relationship of split strength ratio and shape ratio

4. 고강도 콘크리트의 시공성 확보 방안

고강도 콘크리트는 단위 시멘트의 양을 늘리고 물시멘트비를 줄임으로써 시공성 확보가 어렵다. 따라서, 혼화제를 투입하여 시공성을 확보한다. 그러나 혼화제의 투입은 크게 콘크리트 혼합시, 레미콘으로 운반시 혹은 현장에 도착하여 투입하는 등의 세 가지 방법을 택하고 있다.

제주도의 현무암질의 쇄석 조골재는 흡수성이 크고 평균적으로 강도가 낮으므로 흡수성을 고려한다면 물시멘트비를 늘려야 하나 강도를 고려한

다면 물시멘트비를 가급적 줄여야 할 필요가 있다. 그러므로 이들 둘을 동시에 만족하는 물시멘트비의 선정이 필수적이다.

일반적으로 콘크리트는 약 60-90분 동안에 슬럼프의 손실이 거의 없어야 시공성이 확보된다고 보고 있다. 따라서 본 실험에서는 압축 강도가 400 kgf/cm^2 인 고강도 콘크리트의 경우에 약 2시간 동안의 슬럼프 로스를 기록하여 적정의 혼화제 투입 시기를 결정하였다. Fig. 18에서 콘크리트 혼합시에 단위 시멘트량에 약 0.6%의 혼화제를 투입한 결과 약 16cm의 슬럼프를 보였으며, 약 1시간 경과 후에 슬럼프는 약 6cm로 큰 슬럼프 로스를 기록하였다. 이 때에 재차 나머지 혼화제인 단위 시멘트량에 약 0.4%를 재투입하여 21cm의 슬럼프를 얻었으며 약 2시간 후에 슬럼프는 12cm로 시공성을 확보할 수 있음을 알 수 있었다. 결과적으로 혼화제를 혼합시에 투입하는 것보다는 현장에 도착하여 투입하는 것이 시공성을 확보하는데 필요함을 알 수 있었다.

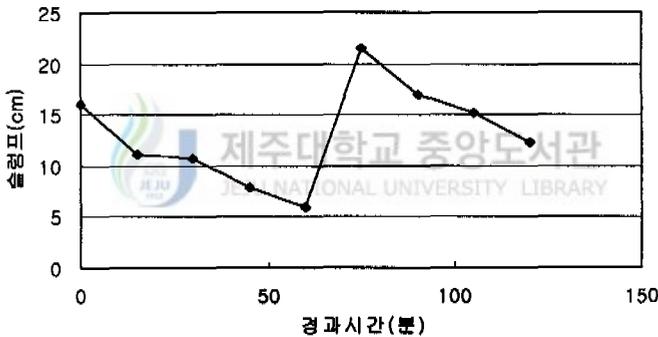


Fig. 18 Slump variation corresponding to lapsed time

V. 결 론

콘크리트는 시멘트, 물, 모래, 자갈 및 혼화제에 의한 합성 재료로 물리적인 특성은 균일하지 않다. 그러나 그 사용성에 있어서는 재료적인 물성치를 규정하고 이를 근거로 설계가 행해진다. 최근에는 부재의 강도를 증진시키고 건물의 중량을 감소시키기 위해 콘크리트의 강도를 고강도화 하는 추세에 있다. 특히, 콘크리트의 사용 재료의 부족 그리고 폐콘크리트 저감에 의한 환경적인 측면에서도 큰 장점이 있으므로 고강도 콘크리트의 사용이 점차 증가하고 있다. 그러나 제주도는 타지역과 달리 콘크리트의 재료 중에 현무암질의 쇄석을 조골재로 사용하는 바, 고강도 콘크리트에 남다른 노력을 요하고 있다.

고강도 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 구조물에 대한 안전진단 시에 콘크리트의 파괴 실험으로 채취한 코아 콘크리트는 표준 원주 공시체와 크기나 형상비가 다르므로 설계용 콘크리트의 강도는 적절한 보정계수를 곱하여 환산하고 있다. 그러나 이에 대한 국내의 자료가 부족하고 사용 재료가 다르고 특히 고강도 콘크리트에서도 동일한 계수를 사용해도 되는지 의구심이 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 사항들을 포함하여 제주도산 쇄석 조골재를 사용한 콘크리트의 특성을 실험을 통해 구별하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 콘크리트의 압축, 할렬 및 휨인장강도 측정 후에 파괴 양상은 골재의 파괴를 동반한 파괴로 골재의 강도가 떨어지고 있음을 볼 수 있었다. 이는 고강도 콘크리트 일수록 그 현상이 많이 나타나고 있었다.

둘째, 원주 공시체의 지름에 대해 형상비가 감소함에 따라 압축 강도는 감소되었으며, 이 결과는 형상비가 감소함에 따라 콘크리트의 압축강도는 증가한다는 기존의 연구 결과와 상이하다. 그 원인은 현무암질의 쇄석 조골재에 있다고 판단된다. 원주공시체의 지름 즉 크기가 작아질 경우에 형상비에 대한 영향은 감소하여 강도에 큰 영향을 미치지 못하였다. 할렬 강도에서도 거의 유사한 결과를 나타내었다.

셋째, 보통 강도의 콘크리트가 고강도의 콘크리트에 비하여 형상비에 따른 압축강도의 차가 크게 나타났으며, 따라서 콘크리트의 압축강도에 관계없이 동일한 보정계수를 사용하는 것은 바람직하지 않은 것으로 나타났다.

넷째, 고강도 콘크리트는 시공성을 확보하고자 혼화제를 사용하여야 한다. 특히, 현무암질의 쇄석 조골재는 흡수성이 크므로 물시멘트비를 늘림으로써 시공성을 확보하게 되나 강도의 저하를 일으킬 수 있다. 따라서, 타지역 보다 물시멘트비를 줄여서 강도를 확보하게 되며, 혼화제의 사용은 필수적으로 혼화제의 타설시기는 현장 도착후에 혼화제를 투입하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

이상의 연구로부터 제주도 지역에 고강도 콘크리트의 사용상 재료적인 특성을 살펴보았다. 그러나 이에 대한 보다 많은 연구에 의해 실용성 있는 데이터의 축적이 필요하며, 제주도내에 산재해 있는 골재의 특성을 분류하여 콘크리트 배합시에 자료로 사용하는 것이 바람직하다 판단된다.



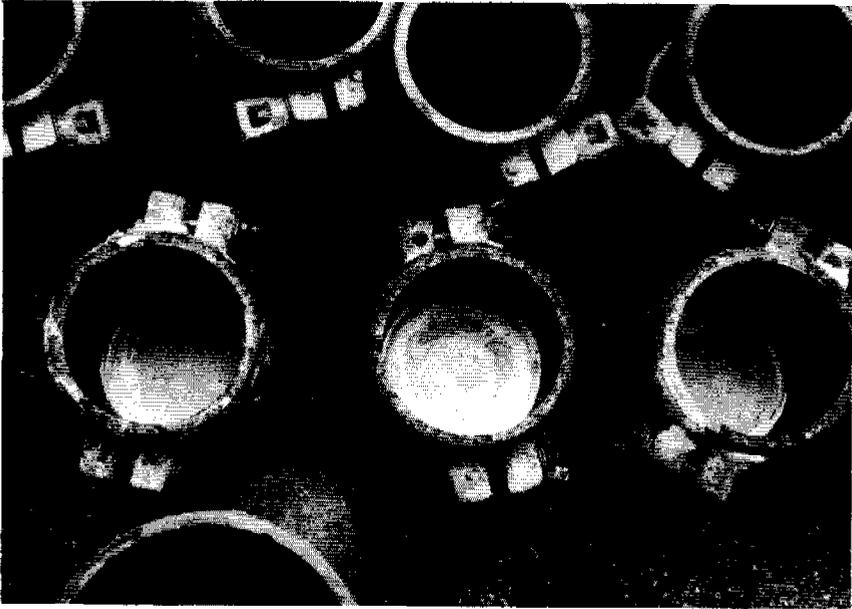


Photo 1. Forms of specimens

제주대학교 중앙도서관



Photo 2. Concrete placing



Photo 3. Shape of specimens



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

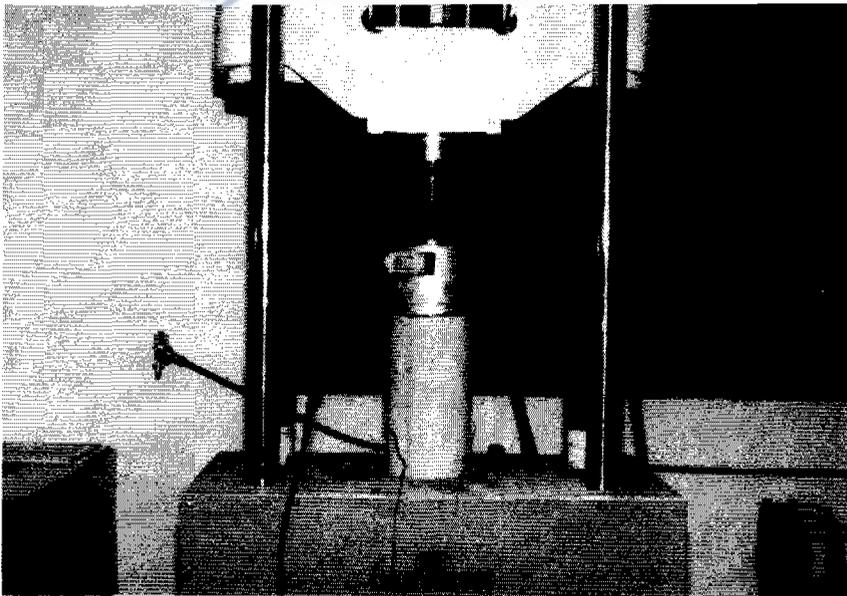


Photo 4. Compressive test of concrete

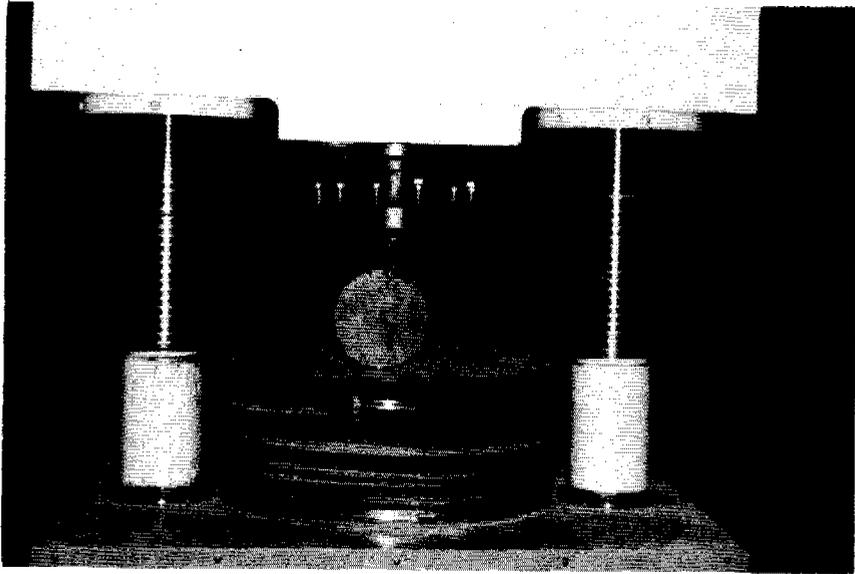


Photo 5. Split test of concrete

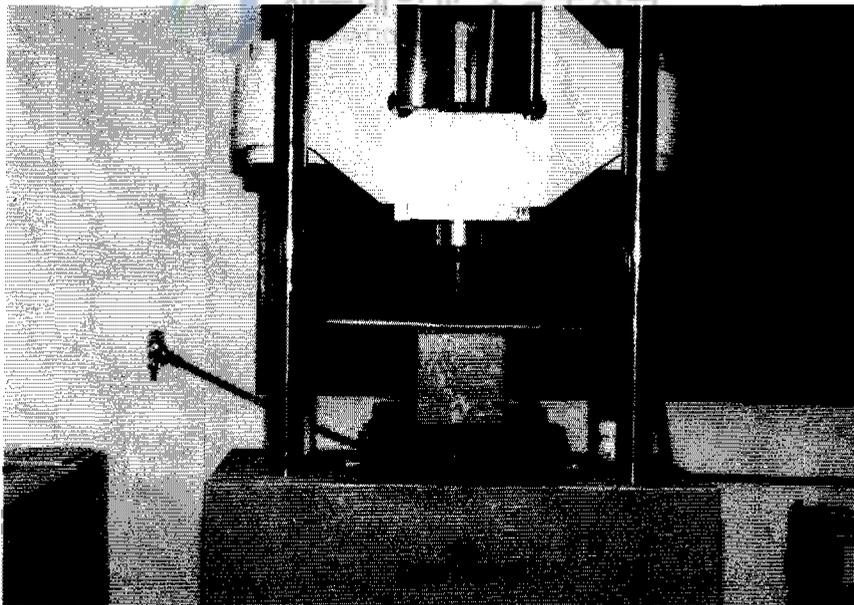


Photo 6. Flexural test of concrete

참고문헌

Blanks, R F and McNamara, "Mass Concrete Tests in Large Cylinders", Journal of ACI Proceedings, for presentation at the 31th Annual Convention, New York, Feb , 1935, pp.19-21.

Gonnerman, H.F., "Effect of Size and Shape of Test Specimen on Compressive Strength of Concrete", Am Soc. Testing Material Proc., Vol 25, 1925, pp.237-250.

Gyengo, T., "Effect of Type of Test Specimen and Gradation of Aggregate on Compressive Strength of Concrete", Journal of ACI Proceedings, Vol.33, 1938, pp.269-282.

Johnson, R F , "Strength Tests on Scaled-down Concrete suitable for Model", Magazine Concrete Research, Vol.14, 1962, pp.47-53.

Kuczynski, "La Resistance du Deton Etudiee sur des Eporouvettes de Diffentes Formes et de Diveres Dimension", RILEM Bulletin, No.8, 1960, pp.77-95.

Neville, A M., "A General Relation for Strength of Concrete Specimens of Different Shape and Size", Journal of ACI Proceedings, Vol.63, 1966, pp 1095-1110.

Powers, T.C., "Concrete Studies at the Bull Run Dam", City of Portland, Oregon, U S Department of the Interior, Bureau of Concrete Research, 1956.

Nielson, A.M., "Effect of Various Factors on the Flexural Strength of Concrete Test Beams", Magazine of Concrete Research, Vol.15, 1954, p p105-114.

Tucker, J., "Statistical Theory of the Effect of Dimensions and Method of Loading on the Modulus of Rupture of Beams", Am. Soc. Testing Materiala Proceedings, Vol.41, 1941, pp.1072-1088.

Weibull, W., "A Statistical Theory of the Strength of Materials", Royal Swedish Proc., No.151-152, 1939.

김 무한 외4인, " 고유동 콘크리트의 제조시스템 및 개발에 관한 실험적 연구", 대한건축학회 논문집, 제13권 제5호, pp. 279-288, 1997년 5월.

吉本 彰 著, 姜 영求 譯, " 콘크리트의 變形과 破壞", 圓技術, 1995년
건설부, "건설부 제정 건축공사 표준 시방서", 대한건축학회, 1986년.

(주) 대우엔지니어링, "고강도 콘크리트의 경제적 배합비 및 실용화에 관한 연구", 기술연구소 보고서, 1988년 4월.

대한건축학회, "고강도-고성능 콘크리트 제조·시공 및 설계", 철근콘크리트분과위원회 기술보고서 ATR 96-1, 1996년.

대한건축학회, "건설부 제정 건축공사 표준 시방서", 건설부, 야정문화사, pp.175-177, 1994년.

문 영호, "파괴역학에 의한 콘크리트의 압축강도에 대한 Size Effect 연구", 한국과학기술원 토목공학과, 1986년.

박 흥기, “초기 균열이 없는 콘크리트 구조물의 크기에 따른 응력감소 효과에 관한 연구”, 한국과학기술원 토목공학과, 1987년.

유 태동, “유동화 경량 골재 콘크리트의 성상에 관한 연구”, 건국대학교 박사학위논문, 1998년 2월.

진 현규 외3인, “혼화재를 혼입한 고유동 콘크리트의 유동성 및 강도 특성에 실험적 연구”, 대한건축학회논문집 제15권 제2호, pp.117-124, 1999년 2월.

조 수연, “콘크리트 압축강도에 미치는 공시체의 크기 효과에 관한 연구”, 한국과학기술원 토목공학과, 석사학위논문, 1987년.

정 현수, “고강도 콘크리트 구조”, 태림문화사, 1987년 8월.

최 영화, “쇄석 콘크리트의 성상에 관한 실험적 연구”, 충남대학교 대학원 박사학위 학위논문, 1994년.

한 천구 외3인, “부순모래 치환 잔골재를 이용한 콘크리트의 배합설계에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회 논문집, 제11권 제10호, pp. 389-396, 1995년.

감사의 글

본 논문을 완성하기까지 끝없는 지도를 아끼지 않으신 서일교 지도 교수님과 은희창 교수님, 질책과 격려로 이끌어주신 김태일 교수님, 웃을수록 미남이신 최동호 교수님, 항상 진지함을 간직한 박철민 교수님, 이 기회를 얻어 모든 교수님에게 진심으로 감사의 말씀 올립니다.

그리고 주경야독으로 피곤함을 잊어버리고 끝까지 성원을 아끼지 않은 선·후배 교우님들에게 뜨거운 마음으로 고마움 전합니다.

특히, 본인의 학업을 적극 지원해주신 성지건설산업(주)·성지건설개발(주) 대표이사이신 백찬호 사장님을 비롯한 선·후배 사우님들에게 그간 격려에 고마움 전합니다.

마지막으로 가정을 굳건히 지키고 직언과 애교로 내조해주신 나의 사랑하는 아내와 항상 멋만 부리는 큰아들 태경, 고3이라 학업에 여념이 없는 나의 공주 소연이 그리고 이 못난 아들을 위해 항상 기도해 주시는 어머님 그리고 형제들의 건강과 행복이 항상 충만하기를 기원하며 그간의 모든 분들에게 감사의 말씀을 올립니다.

2000년 8월

이 재 중 올림