

碩士學位論文

角柱 콘크리트 供試體와 標準 圓柱 供試體의
強度 關係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

姜 秀 喆

2000

碩士學位論文

角柱 콘크리트 供試體와 標準 圓柱 供試體의
強度 關係에 關한 實驗的 研究

指導教授 殷 熙 昌



濟州大學校 產業大學院

建設環境工學科

姜 秀 喆

2000

角柱 콘크리트 供試體와 標準 圓柱 供試體의
強度 關係에 關한 實驗的 研究

指導教授 殷 熙 昌

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

2000年 8月 日

濟州大學校 産業大學院



建設環境工學科
제주대학교 중앙도서관
建築工學專攻 LIBRARY

姜 秀 喆

姜秀喆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. 압축력에 의한 콘크리트의 파괴	5
1. 콘크리트의 응력-변형률 곡선	5
2. 콘크리트 공시체의 파괴양상	9
3. 콘크리트 파괴에 미치는 요인	12
4. 표준공시체의 압축강도	21
5. 제주도 현무암 쇄석	22
III. 실험방법 및 결과	25
1. 실험개요	25
2. 실험결과	27
3. 기존 결과와의 비교	35
IV. 결 론	37
참고문헌	43

An Experimental Study on the Strength Relationship of Square Cross-Section and Standard Cylindrical Concrete Specimens

Kang, Soo-Chul

*Department of Construction and Environmental Engineering
Graduate School of Industry
Cheju National University
Supervised by Professor Eun, Hee-Chang*

Summary

The strength of concrete for design or core concrete for destructive test depends on several parameters including the size and type of specimen. The Korean and European Standard take $\phi 15 \times 30$ cylindrical and 15cm cubic specimens for measuring the concrete strength, respectively. There have been rare attempts to decide the relationships according to the shape and size of squared specimens. Especially, it is incorrect to use the existing data due to the different material properties in Cheju from the others. Therefore, in this experimental study, we investigate the relationships and compare with the existing results. The experimental results will be utilized to grasp the material and mechanical characteristics of concrete in Cheju. From this study we obtain the following conclusions.

1. Unlike the general failure shape of concrete, we found the aggregate failure of concrete specimens. Through the strength comparison of aggregates from Iksan, we found that the crushed aggregates from Cheju have the weak strength. By the abrasion test of coarse aggregates, we examined the appropriateness on it. Accordingly, we observed that the strength deterioration come from the weak coarse aggregates to these observations.

2. Under the same slenderness ratio, the strength of standard cylindrical specimen is more strength than the one of the squared specimen. This result was similar to the Gonnerman's results but showed the quantitative difference.

3. As the slenderness ratio under the same cross section increases, the

compressive strength decreases. This result is contrary to the Gonnerman's result and we can find the cause from the weak coarse aggregates.

4. In the column design of reinforced concrete structure, the code specifies the reduction factor of concrete strength as 0.85. However, in this experiment the reduction factor is overspecified, and we realized that it is necessary to reduce the factor.



Figure Contents

Fig. 1 Stress and strain relationship of concrete	6
Fig. 2 Stress-strain curve of concrete according to compressive strength	7
Fig. 3 Tangent modulus and secant modulus	8
Fig. 4 Normal and shear stress at failure surface	10
Fig. 5 Taylor-Broms theory on bond crack	11
Fig. 6 Specimen to confirm Taylor-Broms theory	11
Fig. 7 Occurrence of bond crack using a circular aggregate	12
Fig. 8 Model of finite element method for analysis of crack and cement element	14
Fig. 9 Variation of tensile stress according to horizontal movement of cement element at the upper 2ρ of crack	14
Fig. 10 Development of crack according to the location of coarse aggregate	15
Fig. 11 Relationship of compressive strength and coarse aggregate size	16
Fig. 12 Development of micro crack	16
Fig. 13 Experimental specimen for examining influence on direction of acting force and placing direction	17
Fig. 14 Relationship of compressive strength and size of specimen	18
Fig. 15 Relationship of compressive strength and H/D of cylindrical specimen	19
Fig. 16 Failure mechanism of cubic specimen	20
Fig. 17 Compressive strength variation of squared specimens according to curing time	32
Fig. 18 Strength variation of $8.9 \times 8.9 \times 17.8$ cm squared specimens according to curing time	33

Fig. 19 Size effect comparison corresponding to the same slenderness ratio	35
Fig. 20 Comparison with the Gonnerman's results	36



Table Contents

Table 1. Compressive strength ratio according to size of specimen	19
Table 2. Correction factor of compressive strength	19
Table 3. Compressive, tensile, and flexural tensile strength of stones	23
Table 4. Distribution state of domestic granite	23
Table 5. Properties of domestic granite	24
Table 6. Summary of experimental results	26
Table 7. Concrete mixing table	26
Table 8. Strength comparison of aggregates	28
Table 9. Strength comparison with standard cylindrical specimen	30



Photo Contents

Photo 1. Specimen forms for compressive tests	39
Photo 2. Concrete placing	39
Photo 3. Concrete curing	40
Photo 4. Experimental scene I	40
Photo 5. Experimental scene II	41
Photo 6. Failure shape of specimens I (bond and mortar failure)	41
Photo 7. Failure shape of specimens II (bond and aggregate failure)	42
Photo 8. Failure shape of specimens III (bond and aggregate failure)	42



I. 서 론

1. 연구의 배경

철근콘크리트는 철근과 콘크리트의 합성 구조물로 각 재료의 물성치를 파악하는 것은 구조물 설계에 필수적이다. 특히 콘크리트는 시멘트, 물, 모래, 및 자갈 때때로는 혼화제 첨가로 이루어지는 합성 재료로 그 조합이나 형상, 채취 장소 등은 콘크리트 성질에 크게 영향을 미친다. 콘크리트는 경화전후에 요구되는 성질로 시공성과 강도를 들 수 있다. 시공성은 workability로 정의되며 일반적으로 슬럼프 실험을 통해 결정된다. 강도는 배합 정도에 따라 변할 수 있으며, 또한 사용 재료의 물성치, 형상 그리고 조립의 정도에 의해 영향을 받는다. 이들 시공성과 강도를 동시에 만족하는 양질의 콘크리트를 생산하는 것이 가장 바람직한 사항이 된다. 그러나 사용 재료로써 골재는 타지역에 비하여 제주 지역은 현무암질의 쇄석 골재를 사용하고 있는 바, 타지역의 콘크리트 제조와는 차이가 있다. 콘크리트 강도에 크게 영향을 미치는 골재는 콘크리트 중에 약 65% 정도를 차지하므로 골재의 강도와 콘크리트 강도는 가장 밀접한 관계를 지니고 있다.

일반적으로 국내나 ACI 기준에서 콘크리트의 강도라 함은 $\phi 15 \times 30\text{cm}$ 인 원주 공시체를 표준 공시체로 4주 압축강도를 규정하고 있으며, 철근 콘크리트 구조 설계의 재료 특성으로 사용된다. 그러나 영국, 독일 등과 같은 유럽 지역에서는 10cm 혹은 15cm의 입방 공시체의 강도를 표준으로 사용하고 있다. 입방 공시체를 포함한 각주 공시체는 원주 공시체와는 달리 시험체의 측면에서 콘크리트가 타설되므로 켈핑을 요하지 않으며, 시험체 단면의 모양 차이로 원주 공시체와 각주 공시체의 강도 관계를 설정하기 위하여 적절한 보정계수를 요한다. 그러나 콘크리트 구성 재료들의 물리적인 성질들이 동일하다는 가정하에 국외의 연구에서 얻은 보정계수를 사용하고 있는 실정므로 이들 관계는 국외의 연구에 의존하고 있

는 실정이다. 특히, 이들 공시체는 형상의 차이 외에 공시체 제작시에 콘크리트 타설 방향이 다르므로 이들 강도의 상관 관계를 설정하는 것은 건설 시장 개방화에 따른 건설 공사의 혼돈을 막는다는 의미에서 중요한 사항이 될 것이다.

철근콘크리트 기둥의 설계에서 기둥의 단면은 원형과 장방형이 주로 많이 사용되며 세장비는 공시체의 세장비인 2이상 사용되고 있다. 형상비 혹은 세장비가 2이상일 경우에 콘크리트의 강도는 표준 공시체의 강도와 비교하여 작으며, 기존의 실험에 의하면 이들 값은 0.85에 수렴한다. ACI 기준에 의한 철근콘크리트 기둥의 설계에 있어서 콘크리트가 분담하는 축압축력은 $0.85f_{ck}(A_g - A_{st})$ 으로, 여기서 콘크리트의 설계용 압축강도 f_{ck} 를 85%로 감소시킨 것은 표준 원주 공시체에서 얻은 강도와 기둥에서 사용된 콘크리트 강도와와의 차이를 설명하는 계수를 나타낸다. 즉, 장방형 기둥의 세장비와 단면의 모양을 고려한 감소계수로 형상비가 2인 표준 원주공시체에 대한 보정계수를 나타내고 있다. 즉, 기둥의 세장비가 크더라도 콘크리트의 강도는 표준 강도의 0.85이상의 값을 나타낸다고 보고되고 있으며, 이를 기준에서 사용하고 있다. 그러나 이 또한 국외의 연구 결과로 국내에서는 이에 대한 연구가 미흡한 실정이다.

제주도는 지역적인 여건상 현무암질의 쇄석 조골재를 사용하고 있으며, 조골재의 물리적인 성질이 아직 명확히 파악되고 있지는 않으나, 타지역의 골재보다 흡수율이 크고 강도가 작은 것으로 보고되고 있다. 따라서 타지역의 골재와 동일한 물성치를 보유하고 있지 않은 바, 이에 대한 연구의 필요성이 있다.

따라서, 본 연구는 제주지역의 쇄석 골재를 사용한 콘크리트의 물성치를 파악하여 철근콘크리트 구조 설계에 기초 자료를 제공할 필요성에서 원주 표준 공시체와 입방 및 각주 공시체와의 강도 관계, 세장비에 따른 강도 변화, 그리고 제주 쇄석 골재가 콘크리트 강도에 미치는 영향 등을 파악한다.

2. 연구의 목적

콘크리트의 물성치에 영향을 미치는 요인들은 다양하나 이들 영향들을

정성적으로만 평가가 될 뿐, 정량적으로 그 영향을 평가하는 데에는 상당한 어려움이 있다. 정량적인 평가는 많은 실험과 연구를 요하나 국내에서는 재료 실험에 대한 결과들이 미흡하여 이를 결정하는데 어려움이 있다. 특히, 제주 지역은 현무암질의 쇄석 골재를 사용하는 바, 타지역의 콘크리트 배합 설계나 물성치와는 다르나 이에 대한 연구의 부족으로 그 신뢰성에 의구심이 제기되고 있다. 따라서 본 연구에서는 현무암질의 쇄석 골재를 사용한 콘크리트의 물리적인 성질들을 파악하여 철근콘크리트 구조 설계의 기초 자료를 제공하고자 다음의 연구 목적을 두고 연구가 진행되었다.

첫째, 원주 표준 공시체와 입방 및 각주 공시체와 강도 관계를 설정한다. 이들 시험체에는 형상의 차이 외에 세장비 및 콘크리트의 타설 방향이 다르므로 이를 실험 변수로 실험을 실시하며, 그 결과를 기존의 연구 결과와 비교를 실시한다.

둘째, 기존의 연구 결과와 비교하여 제주 지역에서 사용하는 쇄석 골재가 콘크리트의 강도에 미치는 영향을 비교 분석한다. 특히, 세장비에 따른 콘크리트 강도의 변화를 파악하여 세장 효과에 따른 콘크리트 강도 변화를 측정한다.

셋째, 철근콘크리트 기둥 설계에서는 콘크리트 강도를 85% 감소시킨 값을 사용하여 설계를 행하는 바, 세장비의 증가에 따른 콘크리트 강도의 변화 분포로부터 그 감소계수의 타당성을 검증한다.

이상의 결과로부터 제주 지역 콘크리트의 물성을 파악하여 철근콘크리트 구조 설계에서 요구되는 기본적인 재료의 특성과 설계를 위한 기초 자료를 제공하는 것이 본 연구의 주목적이 된다.

3. 연구의 방법 및 범위

본 연구는 콘크리트의 물성치를 파악하는데 연구의 목적이 있으므로 재료 실험에 의해 그 특성을 파악한다. 먼저, 실험 방법을 결정하고자 각국의 실험 기준을 조사하여 실험 방법을 결정하였으며, 자료 조사를 통하여 실험 결과들을 예측하였다. 또한, 제주 지역의 골재에 대한 기존 연구 결

과나 자료 수집을 실시하였다.

제주 지역에서 콘크리트 재료로 사용하는 현무암질의 쇄석 조골재와 타 지역에서 생산되는 조골재의 강도를 측정·비교하였다. 또한, 콘크리트에 사용하는 골재의 마모 실험을 실시하여 그 사용성을 검증하였다. 콘크리트의 압축강도는 210 kgf/cm^2 로 현장에서 제작된 거푸집에 보통 강도의 콘크리트를 타설하여 4주 후에 실험을 실시하였다.

시험체는 원주공시체 외에 입방 공시체 및 각주 공시체를 세장비가 최대 4까지로 변화시켜 강도 측정을 하였다. 강도 측정은 압축강도만 측정하였으며, 인장강도나 휨강도 측정은 본 연구에서 배제하였다. 원주 표준 공시체와 실험 결과들이 비교되었으며, 각주 공시체의 세장비에 따른 강도 변화를 비교 분석하였다. 특히, 최대 세장비에서 원주공시체와의 강도를 비교하여 세장비 증가에 따른 콘크리트 강도 감소 계수를 결정하였다. 또한, 실험의 결과와 기존의 연구 결과들을 비교하여 제주 지역 콘크리트의 특성을 비교 분석하였다.

실험의 결과들을 기존의 연구 결과와 비교를 실시하여 철근콘크리트 구조 설계에서 요구되는 재료의 물리적인 성질 외에 설계에 필요한 자료들을 제공하게 된다.



II. 압축력에 의한 콘크리트 파괴

1. 콘크리트의 응력 - 변형률 곡선

가. 콘크리트의 압축 변형

콘크리트의 응력-변형률 관계는 콘크리트 내부 균열형성에 따라 큰 영향을 받게 되는데 콘크리트 내부에는 외력을 받기전에 시멘트 페이스트의 용적변화가 발생하여 골재와 모르타르 사이에 응력이 발생하게 된다. 이러한 응력의 증가는 최종적으로 콘크리트의 파괴를 조장한다.

실험용 콘크리트 공시체에 일축압축력을 가하면 종방향으로 압축 변형과 동시에 공시체 단면의 횡방향으로 인장 변형이 발생한다. 압축 변형을 (+)라 하고 인장 변형을 (-)라 하여 응력-변형률 관계를 Fig.1에 나타내고 있다. 이 그림에 있어 종변형률 ϵ_1 과 횡변형률 ϵ_t 는 실험을 통하여 얻은 실측치로 다음 식(2.1)에 의해서 용적변형률 ϵ_v 를 얻을 수 있다.

$$\epsilon_v = \epsilon_1 + 2\epsilon_t \quad (2.1)$$

일반적으로 콘크리트는 압축력을 분담하도록 설계를 행하는 바, 콘크리트의 응력-변형률 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.1에서 보는 바와 같이 응력 350 kgf/cm^2 에서 횡변형의 급격한 증가는 이 응력에서 콘크리트 내의 조직에 현저한 변화가 생긴 것으로 추정할 수 있다. 용적변화도 유사하게 추정될 수 있다. 즉, 초기 재하 단계에서는 용적의 감소를 보이나 350 kgf/cm^2 이상에서는 오히려 역으로 용적이 증대함을 알 수 있다. 콘크리트조직에 메카니즘의 변화 즉, 치명적인

파괴가 생기기 시작한 것으로 볼 수 있다.

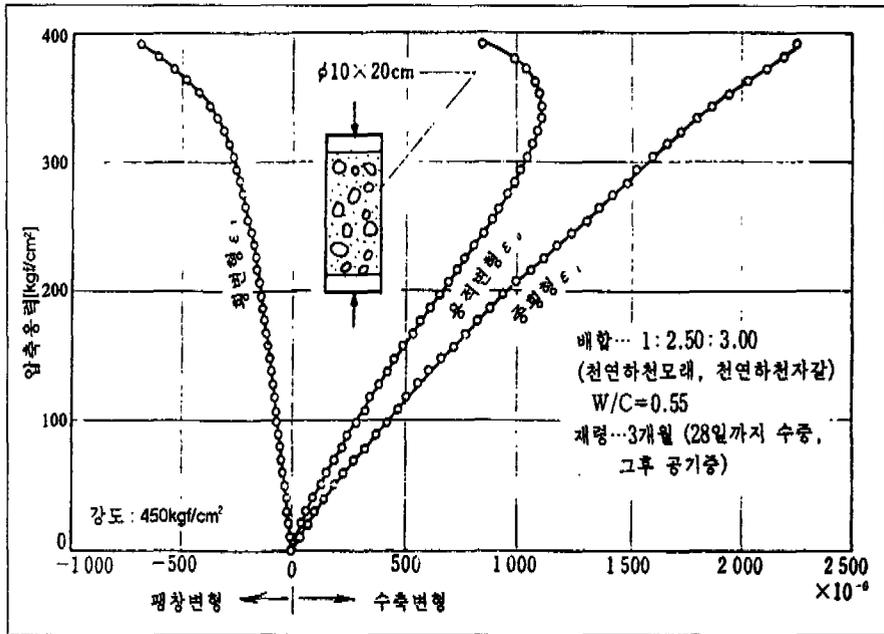


Fig. 1 Stress and strain relationship of concrete

나. 콘크리트의 압축강도와 탄성계수

콘크리트의 압축강도는 일반적으로 제령 28일되는 콘크리트 표준 공시체의 일축방향 압축강도를 말한다. 우리나라의 표준 공시체는 $\phi 15\text{cm} \times 30\text{cm}$ 혹은 $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ 인 원주형태이며, 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 퍼센트 더 높게 측정되는 것으로 알려져 있다.

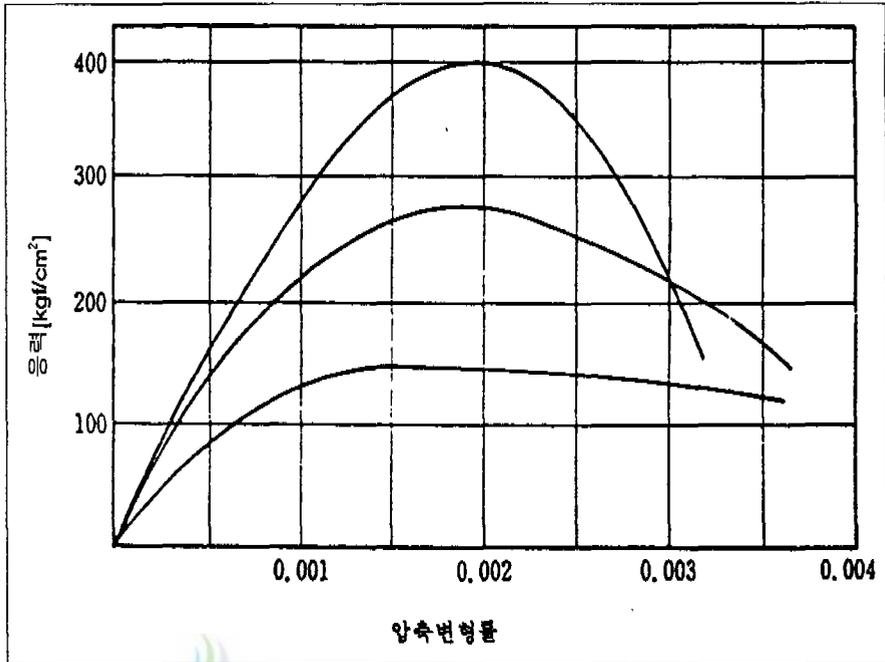


Fig. 2 Stress-strain curve of concrete according to compressive strength

콘크리트의 탄성계수는 철근콘크리트 구조물 설계에서 철근과 콘크리트의 응력-변형률 성질과 밀접한 관계를 가지고 있다. Fig.2는 여러 가지 압축강도를 가진 콘크리트의 전형적인 응력-변형률 곡선이다. 이 곡선에서 나타난 바와 같이 일축 압축력을 받는 콘크리트는 응력이 30~40 퍼센트에 이를 때까지는 탄성거동을 하나, 그 이상의 응력상태에서는 미세한 균열의 발생으로 점차 비선형을 나타내고, 응력이 압축강도의 80~90 퍼센트에 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 변형률연화(Strain softening)현상이 생기며, 철근콘크리트 구조 설계용 극한강도법에서는 극한변형률을 0.003으로 규정하고 있다.

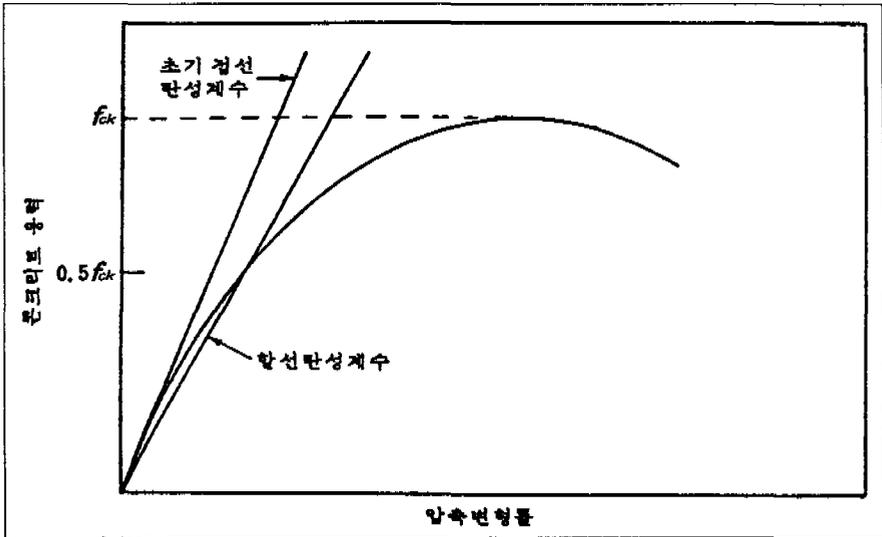


Fig. 3 Tangent modulus and secant modulus

Fig.3과 같은 응력-변형률 곡선에서 초기 선형상태의 기울기를 초기 접선 탄성계수(Initial tangent modulus), 임의의 응력상태를 잇는 직선의 기울기를 할선탄성계수(secant modulus)라 하며, $0.5 f_{ck}$, 또는 $0.25 f_{ck}$ 에 대한 할선탄성계수를 콘크리트의 탄성계수 E_c 로 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 탄성계수의 1.5~5배 정도 되며, 경량골재의 탄성계수는 시멘트 페이스트와 거의 비슷한 값을 가진다.

따라서 콘크리트의 탄성계수는 콘크리트의 무게와 강도의 함수로 나타낼 수 있으며 기준에서는 단위체적질량이 $1,500 \sim 2,500 \text{kgf/m}^3$ 인 콘크리트의 탄성계수를

$$E_c = 0.136 \gamma_c^{1.5} \sqrt{f_{ck}} \text{kgf/cm}^2 \quad (2.2)$$

으로 하고 있다. 이 식에서 γ_c 는 콘크리트의 단위체적질량으로 kgf/m^3 의 단위를 가지며, 콘크리트의 압축강도 f_{ck} 의 단위는 kgf/cm^2 이다. 일반 콘크리트의 단위체적질량은 대략 $2,300\text{kgf/m}^3$ 이 되므로 식(2.2)로 부터

$$E_c = 15,000 \sqrt{f_{ck}} \text{kgf/cm}^2 \quad (2.3)$$

이 된다.

식(2.2)나 식(2.3)에 의한 탄성계수 산정식에서는 골재의 무게만 고려되어 있고, 골재의 강도는 무시되어 있기 때문에 실험결과와 비교해 보면, 산포도(散布度)가 큰 편이나, 철근콘크리트 구조체의 응력해석에서 이 식들에 의한 값들은 큰 오차없이 사용되고 있다. 식(2.2)와 (2.3)으로부터 콘크리트의 압축 강도가 증가하면 탄성계수가 또한 증가함을 알 수 있다.

2. 콘크리트 공시체의 파괴양상

콘크리트가 압축력을 받으면 용적변화에 의해 궁극적으로 콘크리트의 파괴를 야기한다. 용적변화는 콘크리트내에 골재의 재배열이 일어나 골재와 시멘트 페이스트간에 부착 균열이 발생함을 알 수 있다. Taylor와 Broms는 이와 같은 경계면에 발생하는 전단응력에 의해서 본드 균열의 발생을 유추하였다.

Fig.4(a)에서는 공시체의 수직방향으로 압축력이 작용하면 압축 응력 σ 가 발생하여 경사지게 파괴되었다고 가정하자. 탄성역학에 의하면 파괴면에 작용한 수직응력 σ 과 전단응력 τ 의 조합에 의해 Fig.4(b)에서와 같은 Mohr의 응력원을 그릴 수 있다. 즉, Mohr원의 원점 O에서 파괴면과 평행한 선과 원과의 만나는 점의 수직응력(δ)과 전단응력(τ)을 결정한다.

Taylor와 Broms는 Fig.5(a)와 같은 각주 공시체를 사용하고 박절로한 암석편의 경사를 변화시켜서 압축시험을 실시했다. 그에 의하면 암석의 면에 작용하는 수직응력 δ 과 전단부착강도 τ 와의 사이에 Fig.5(b)의 파선과 같은 관계가 있다. 이 파선과 Mohr원의 교점 B에서 접선과 만나는 전단응력 c 와 이 접선의 기울기 ϕ 를 각각 결정할 수 있다. 이 접선방정식을 사용하여 전단응력은

$$\tau = c + \delta \tan \phi \quad (2.4)$$

이다. 여기에서 c 는 Coulomb의 파괴조건에서 점착력을, ϕ 는 마찰력을 각각 의미한다. 마찰력 ϕ 는 실험에 의해

사암의 경우 32°

석회암의 경우 36°

로 시멘트량, 물시멘트비에는 관계없이 일정하다. 원형의 골재를 가정하여 콘크리트 공시체에 작용하는 축방향 하중을 증가시키면 임의 하중에서 Fig.5(c)와 같이 부착면인 C점에서 균열이 발생한다. 이 점은 대칭의 관계에서 4개소가 있다. 그들의 실험에 의하면 α 는 암석의 종류에 관계없이 약 35° 였다고 한다.

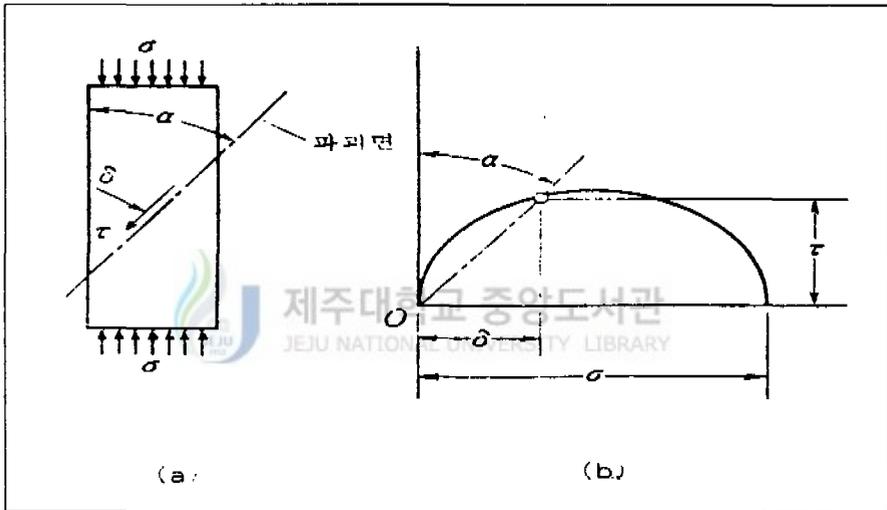


Fig. 4 Normal and shear stress at failure surface

이상의 결과에서 Taylor와 Broms는 부착면 균열의 발생각 α 는 약 35° 이라고 결론하고 있다. Taylor와 Broms 이론의 진의를 확인하기 위해 Fig.6과 같은 공시체에 하중을 가할 경우, 균열의 발생 상황을 조사한 결과, Fig.7에서 보는 바와 같이 변형률 ϵ 이 1030×10^{-6} 일 때에 부착면 균열의 발생위치가 대개 Fig.5(c)에서 지시하는 점들과 거의 일치하였다. 또 Fig.6의 요령으로 제작한 8개의 공시체에 대해서 본드 크랙의 발생각 α 를 조사해 보았더니 $30 \sim 40^\circ$ 의 것이 가장 많았다. 이상의 결과로부터 Taylor와 Broms 이론은 신빙성이 있음을 알 수 있다.

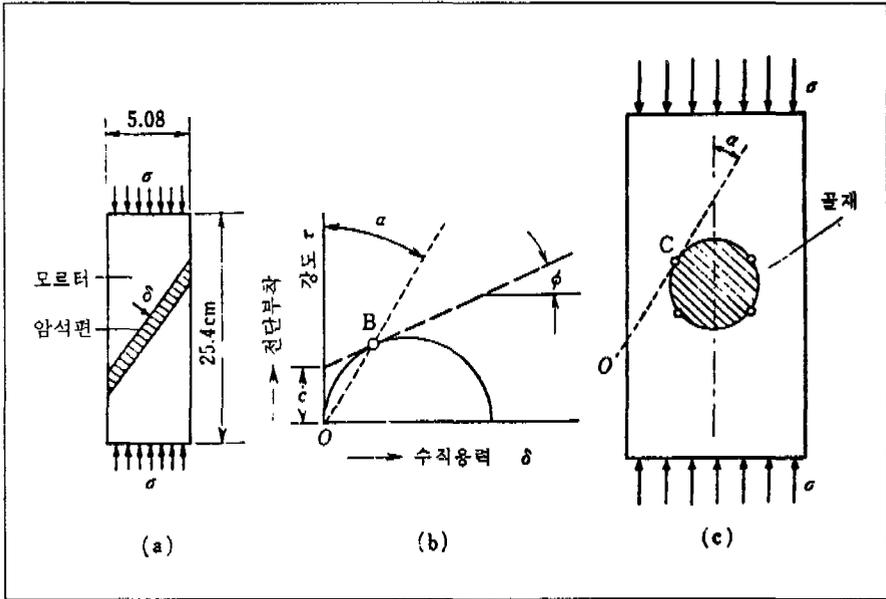


Fig. 5 Taylor-Broms theory on bond crack

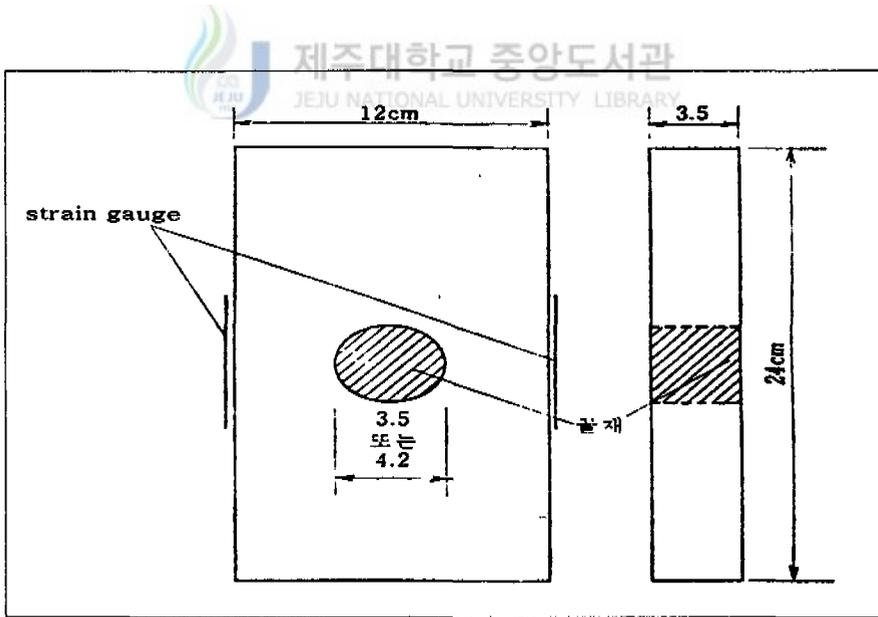


Fig. 6 Specimen to confirm Taylor-Broms theory

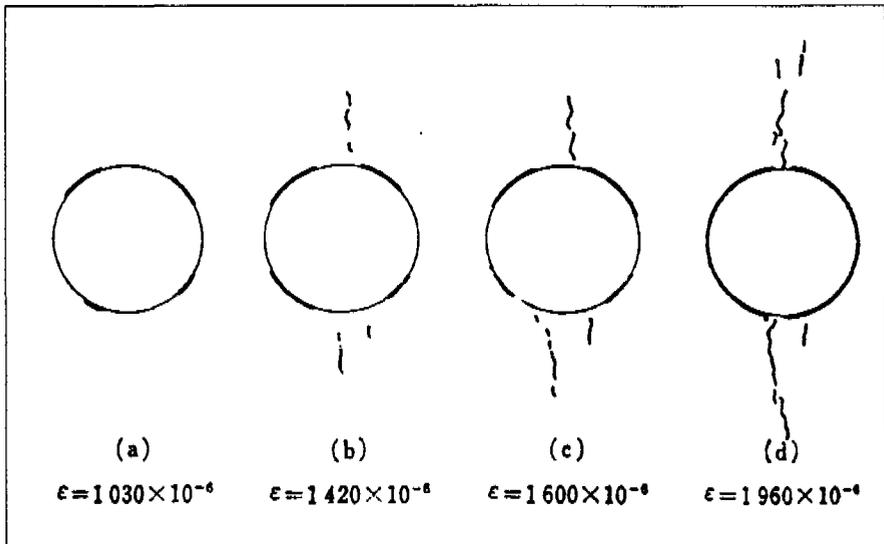


Fig. 7 Occurrence of bond crack using a circular aggregate



3. 콘크리트 파괴에 미치는 요인

콘크리트는 시멘트, 골재, 물, 혼화재료로 이루어진 혼합재료이고 각 구성재료의 비중과 성질이 다르며 시멘트의 수화반응에 의해 점진적으로 강도를 발현하는 구조재료이다. 콘크리트의 강도는 일반적으로 압축강도를 의미하며 콘크리트의 압축강도는 구성재료의 품질, 사용비율에 따라 특성이 다르게 나타나 강도의 변동이 심한 재료이다.

가. 시멘트입자

실제의 콘크리트 공시체에는 페이스트 부분에 시멘트입자의 파괴에 의해서 생긴 공동이 산재하고 있고 이것이 균열의 성장에 어떠한 영향을 미친다. 이 영향은 유한요소법에 의해 해석이 가능하다. 해석용 시험편은

Fig.8에서와 같이 폭 $2b$, 높이 $2h(h=2b)$ 의 공시체의 중심에 폭 2ρ , 길이 $2a$ 의 균열을 가정하였다. 이 균열의 상하 끝은 반원으로 그 반경을 ρ 로 한다. 파괴시멘트 입자는 원으로 그 반경은 ρ 라 한다.

균열 상단에 반원 파괴시멘트 입자의 모양을 원으로 가정한 것은 해석의 편이를 위해서다. 이 해석 모델을 사용한 해석 결과는 균열의 성장 메카니즘을 결정하는데 용이하다.

Fig.9에서는 균열의 상단으로부터 2ρ 의 위치에서 파괴시멘트 입자(원형공동)의 위치를 수평으로 이동시켜 균열 상단에 인장응력 σ_1' , σ_1'' 의 변화를 조사했다. 이 경우에 공시체중심에서 $(a/h)=0.1$ 이라는 짧은 균열을 가정하여 균열이 짧음은 단면구속력의 영향은 없는 것으로서 해석하였다.

Fig.9로부터 균열이 성장함과 동시에 원형 공동에서도 새로운 균열이 발생한다고 볼 수 있다. 이 경우 원래의 균열과 새로운 균열의 간격은 아주 적다. 즉, e/ρ 가 작을 경우에 원형 공동 상단에서의 큰 인장응력이 발생하여 이 부근에서 균열의 발생이 예상되나, e/ρ 가 증가함에 따라서 원형 공동의 하단에서 큰 인장응력이 발생하여 이 부근에서 균열의 발생이 예상됨을 지지하고 있다. 원형 공동의 지름은 최대 0.99mm 로 ρ 를 0.045mm , 균열의 중심과 파괴시멘트 입자와의 거리를 e 라 하여 $(e/\rho)=0.9\sim 5.5$ 의 범위에 원형 공동이 위치한다면 e 의 값은 $0.04\sim 0.25\text{mm}$ 이 된다. 이 수치를 그대로 실제의 현상에 맞출 수는 없으나 양 균열이 근접해 있다는 것은 두 개의 균열이 서로 결합 할 수 있음을 의미한다. 실제로 균열을 현미경으로 확대해 보면 도중에서 갈라진 것에서 서로 만나는 것을 볼 수 있다.

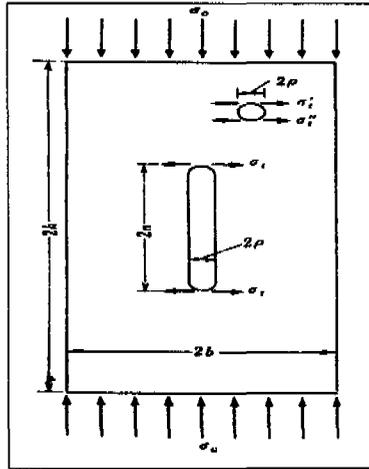


Fig. 8 Model of finite element method for analysis of crack and cement element

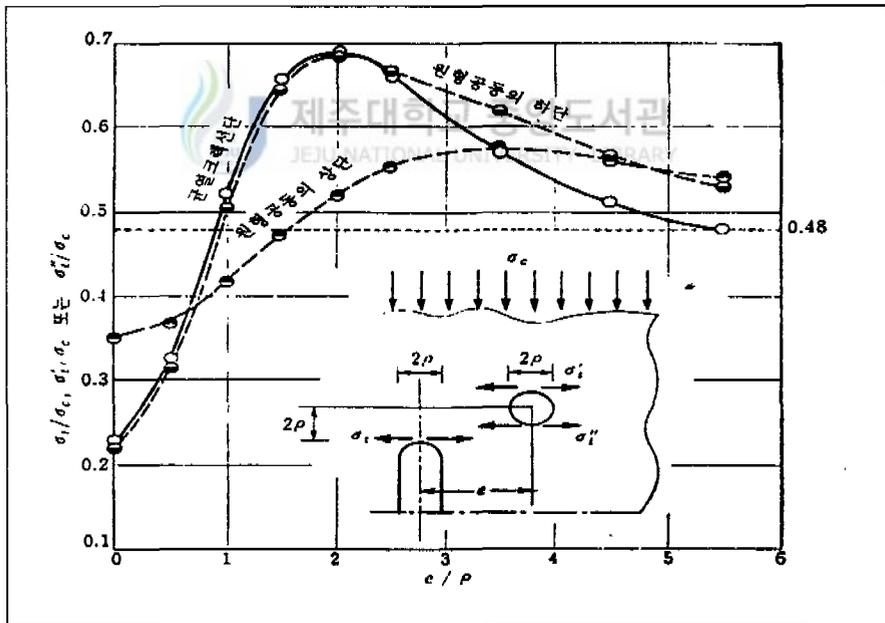


Fig. 9 Variation of tensile stress according to horizontal movement of cement element at the upper 2ρ of crack (Elastic modulus = $2.1 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$, Poisson's ratio=0.2, $a/h=0.1$, unconstrained ends)

나. 굵은 골재

전절의 해석 모델에서는 굵은골재의 존재를 무시해서 균열이 균질한 물체속을 형성해 가는 상태를 고려하였다. 균열이 무시할 정도로 작을 경우에는 굵은 골재의 영향은 거의 없으나, 균열을 무시할 수 없는 경우에는 굵은 골재의 영향을 무시할 수 없을 것이다.

균열의 근방에 굵은 골재가 있는 경우에는 골재의 그 위치에 따라서 균열의 확산이 빠를 수도 있고 반대로 느릴 수도 있다. 이것은 두가지 경우로 고려할 수 있으며 Fig.10(a)와 같이 균열의 정면에 굵은골재가 있는 경우는 균열이 더 이상 진행되지 않는다. 그러나 Fig.10(b)와 같이 굵은골재와 모르타르의 경계면을 따라 균열이 뻗어가는 경우에는 균열의 성장이 빠르다. 이는 Hus 등의 실험에 의하여 굵은골재와 모르타르와의 부착강도는 모르타르 부분의 강도보다 현저하게 낮으므로 굵은 골재와 모르타르와의 경계면에서 균열이 빠르게 진행되는 것으로 밝혀졌다.

Fig.10(b)와 같이 굵은 골재의 측면을 따라서 균열이 진행할 경우에 굵은 골재의 치수가 클수록 빠르게 진행된다. 이는 굵은 골재의 치수가 클수록 모르타르와의 부착력이 약하기 때문이다. Fig.11에서는 40, 30, 20, 15 및 10mm인 굵은 골재와 이를 사용한 콘크리트의 압축강도와의 관계를 나타낸다. 이 그림으로부터 골재의 최대치수가 15~40mm의 범위에서는 골재의 치수가 클수록 압축강도가 저하됨을 알 수 있으나, 10~15mm 범위에서는 역관계를 보인다.

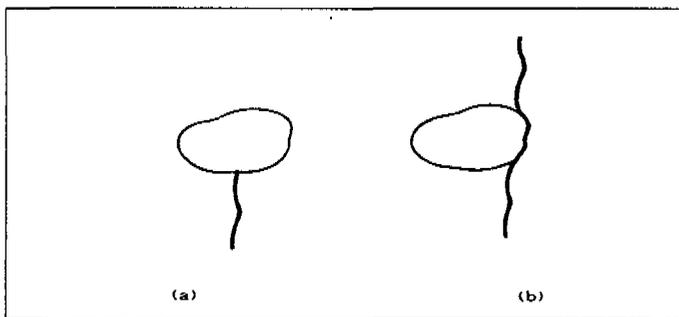


Fig. 10 Development of crack according to the location of coarse aggregate

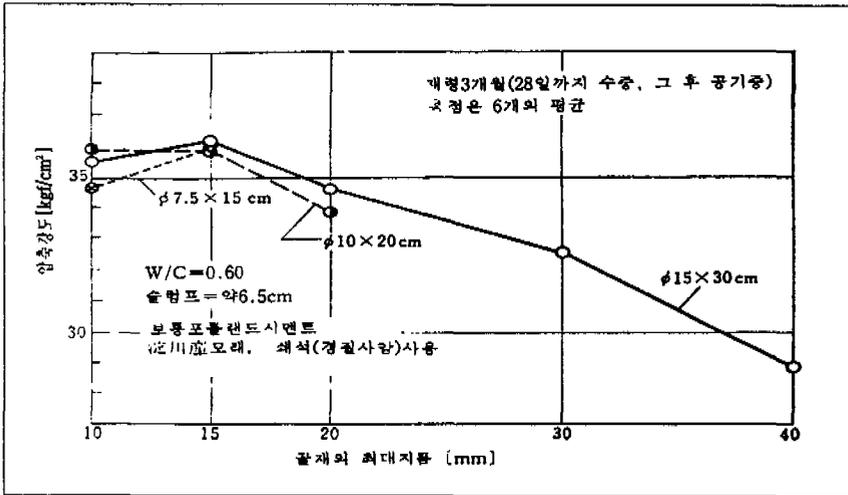


Fig. 11 Relationship of compressive strength and coarse aggregate size

Fig.12는 고속도 카메라를 사용해서 균열의 발생, 성장을 조사한 결과이다. 사용한 공시체는 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 의 원주 공시체로부터 절단한 $7 \times 7 \times 14\text{cm}$ 의 각주체에서 그 측면에 대하여 균열 진행 경로를 나타낸다. 이 그림으로부터 모르타르 균열은 굵은 골재에 의해서 일시 성장이 저지되더라도 궁극적으로는 굵은 골재의 저항없이 균열은 계속 크게 진행됨을 알 수 있다.

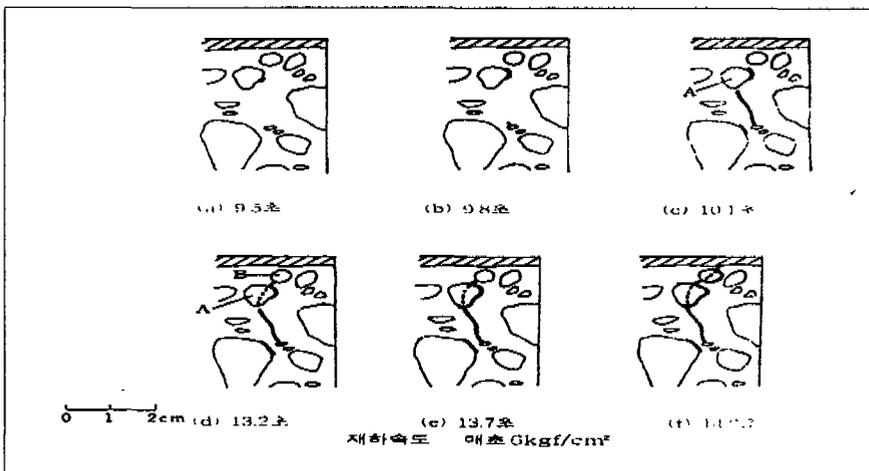


Fig. 12 Development of micro crack

다. 가력방향과 타설방향

콘크리트를 타설할 때 블리딩에 의해서 굽은 골재 하부의 부착강도는 상부에 비하여 떨어진다. 그 때문에 동일한 콘크리트 부재에서도 가력하는 힘의 방향에 의해서 다른 강도를 보인다.

Fig.10(b)와 같이 균열이 굽은 골재의 측면에 발생하는 경우에 굽은 골재와 모르타르의 경계면중 부착강도가 작은 면이 굽은 골재의 측면에 위치하느냐 혹은 하면이나 상면에 위치하느냐에 따라서 균열의 성장속도는 다르다. 이 그림과 같은 균열은 굽은 골재의 측면의 부착강도가 작다면 균열이 빠르게 진행될 것이다. 그러나 Fig.10(a)와 같이 균열의 정면에 굽은 골재가 위치할 때는 굽은 골재에 의해서 균열의 성장이 저지된다.

타설방향에 따른 영향을 고려하여 일변 20cm의 콘크리트의 입방 시험체를 제작하여 Fig.13의 파선을 따라 절단하여 4개의 각주 공시체를 제작하여 Fig.13(a), (b)와 같이 화살표 방향으로 가력하여 압축강도를 측정할 수 있다. 단, 재하시에 (a)의 시험체에는 부착이 약한 부분이 굽은 골재의 하면에, (b)의 공시체에는 굽은 골재의 측면에 각각 위치한다. 이 두가지 경우에 대해 균열의 방향과 가력의 방향이 평행한 (b)의 시험체의 압축강도가 현저하게 작다. 따라서 콘크리트의 파괴는 가력방향에 의해 크게 영향을 받음을 알 수 있다.

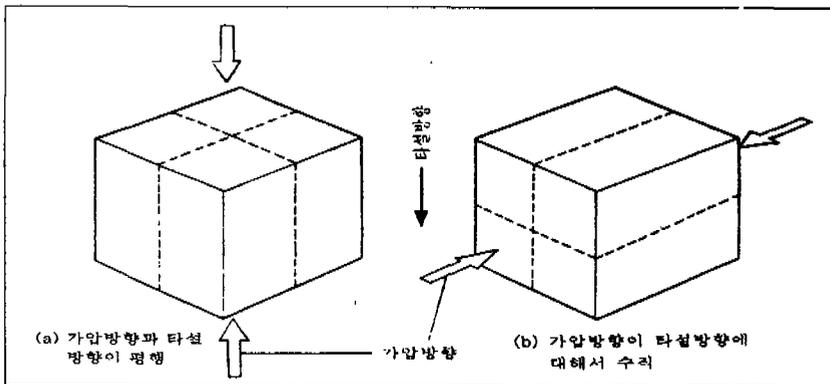


Fig.13 Experimental specimen for examining influence on direction of acting force and placing direction

라. 공시체의 치수

콘크리트 압축강도 측정용 공시체의 치수가 작을수록 압축강도는 크게 나타난다. 공시체의 지름을 D, 높이를 H라 하여 일반적으로 H/D=2인 표준 공시체에 대해 Fig.14는 원주 공시체의 지름에 따른 압축강도를 나타낸다. 이 그림에서 $\phi 15 \times 30\text{cm}$ 원주 공시체의 압축강도를 100%라 하여 강도비를 나타내며, 공시체의 치수가 작을수록 압축강도는 증가함을 볼 수 있다.

또한, Table 1과 Fig.15에서는 H/D=1.0과 2.0의 치수를 가진 공시체에 대해 압축강도의 관계를 나타낸다. 이로부터 다음을 얻을 수 있다.

- i) 원주형 또는 각주형 공시체의 경우, 지름 혹은 변장 D와 높이 H의 비가 작을수록 압축강도는 커진다.
- ii) H/D가 동일할 경우에 원주 공시체가 각주 공시체보다 큰 강도를 나타낸다.
- iii) 형상이 닮은 꼴이면 치수가 작은 공시체가 큰 강도를 나타낸다.
- iv) 입방체 공시체의 강도가 원주 공시체의 강도에 비하여 큰 강도를 나타낸다.

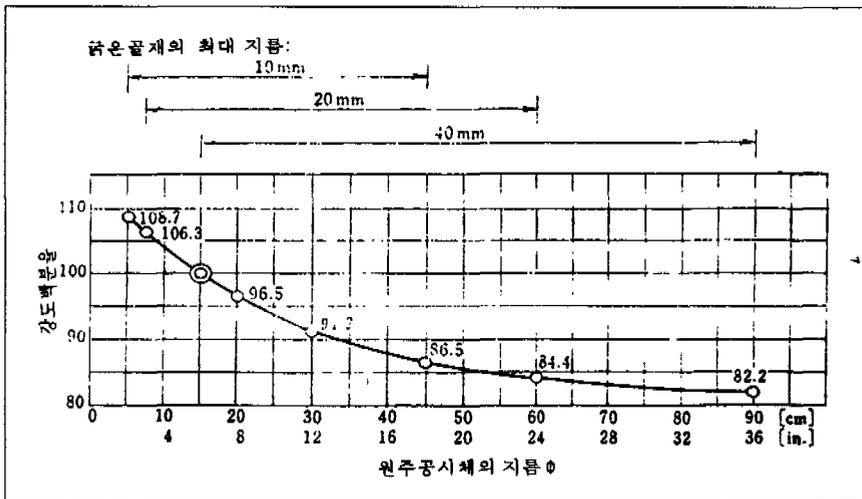


Fig. 14 Relationship of compressive strength and size of specimen

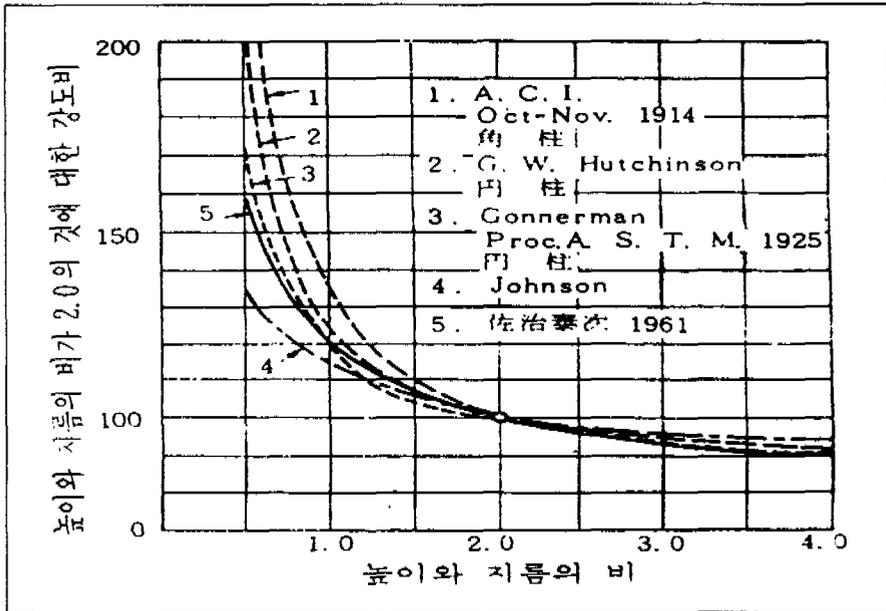


Fig. 15 Relationship of compressive strength and H/D of cylindrical specimen



Table 1. Compressive strength ratio according to size of specimen

재령	원주 공시체			입방형 공시체		각주 공시체	
	$\phi 15 \times 15$	$\phi 15 \times 30$	$\phi 20 \times 40$	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

* $\phi 15 \times 30$ cm 원주 공시체의 28일 강도를 기준으로 하였음.

Table 2. 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.

그리고 콘크리트 구조물로부터 코어를 채취하여 강도시험을 행할 때 코어의 치수 H/D를 표준 공시체의 값 H/D=2.0에 같게 할 수 없는 경우가 많다. 이 때문에 표준 공시체의 강도로 환산하기 위하여 측정치에 곱할 보정 계수를 Table 2와 같이 사용한다.

마. 입방 공시체

콘크리트 입방 공시체의 파괴는 전단에 의하여 북모양을 보인다. 탄성 역학에 의하면 막대를 끌어 잡아 당길 때 막대의 축과 45° 를 이루는 면에서 전단응력이 최대가 된다. 막대에 압축력을 작용시켜도 같다.

입방 공시체의 파괴 메카니즘은 다음과 같이 생각할 수 있다. 하중을 증가해 가면 먼저 공시체의 측면에 가깝게 종방향의 균열이 발생한다. 공시체 끝면과 가압판사이에는 마찰이 존재하나 공시체 측면 가깝게는 마찰에 의한 구속력은 거의 없으므로 처음에 발생한 균열은 공시체 끝면 또는 그 근처까지 달한다. 측면에서 떨어졌던 공시체의 내부에는 횡방향 구속력의 영향으로 종방향 균열 크랙의 발생이 늦어진다. 또 크랙이 공시체의 끝면근처까지 성장하는 일이 어렵다. Fig.16은 이 모양을 도식적으로 표시한 것이다.

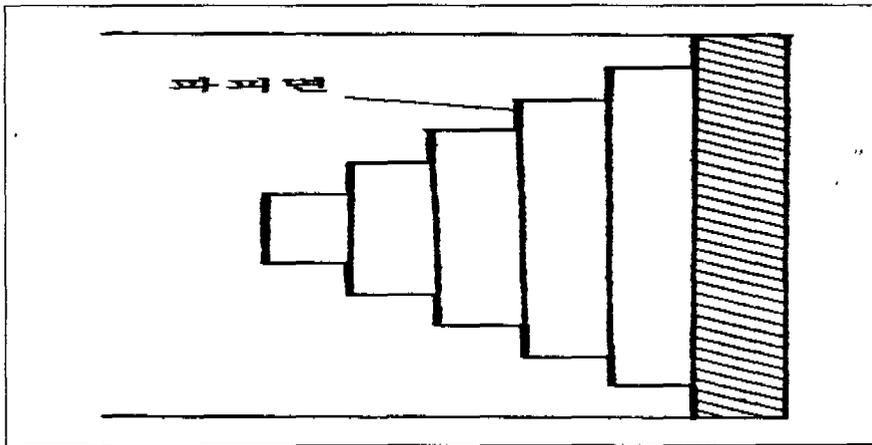


Fig. 16 Failure mechanism of cubic specimen

균열의 발생에 의해서 생긴 콘크리트편은 아주 얇으므로 좌굴현상을 일으키어 사방으로 튄다. Fig.16에 있어서는 먼저 사선부분의 콘크리트가 사방으로 튀고 하중의 증가에 따라서 순차내부로 미쳐 간다. 균열길이는 후에 발생하는 정도로 짧으므로 계단모양의 파괴면이 형성된다.

4. 표준공시체의 압축강도

콘크리트의 압축강도는 콘크리트 재료의 가장 중요한 재료적 특성이나, 그 파괴거동의 특이성으로 인하여 시험용 콘크리트의 시험체의 크기에 따른 그 영향을 달리 한다. 참고문헌[11,12] 이러한 현상은 콘크리트가 완전한 연속체(Continuum)가 아닌 합성구조체로써, 그 거동은 배합 정도에 따라 크게 달라진다. 특히, 크기에 따라 다른 압축강도는 콘크리트의 기본적인 재료 특성으로 볼 수 없음을 의미한다.

그러나 철근콘크리트 구조물의 해석이나 설계시에 압축강도는 재료적 특성으로 가정되어 이용되고 있는 실정이다. 모든 재료는 엄밀한 의미에서 모두 미세균열을 갖고 있다고 볼 수 있다. 그러나 공시체의 크기에 대한 미세균열들의 크기 정도, 미세균열의 분포 상황 및 균열 진행 특성에 따라 재료의 파괴거동은 달라진다. 콘크리트는 모르타르와 골재사이에 힘을 받지 않은 상태에서도 이미 부착균열이 존재하고 있으며, 이러한 균열은 전체적으로 분포되어 있기 때문에 공시체가 미세균열보다 상당히 크고, 미세균열이 크게 확장되지 않은 상태에서 구성재료가 항복에 의해 파괴된다면 콘크리트 재료는 압축에서 크기효과를 보이지 않을 것이다.

그러나 콘크리트에 $0.6 \sim 0.8 f_{ck}$ 정도의 응력이 가해지면, 부착균열에 비해서 매우 작은 미세균열이 존재하는 모르타르에도 균열이 생기게 되며, 이러한 균열은 콘크리트 전체에 걸쳐 존재하는 것이 아니고, 몇 개의 균열로 나타난다. 이때 응력이 더욱 증가되면 몇 개의 주균열단에서 응력 집중현상이 일어나 파괴에 이르게 된다. 즉, 변형에 대한 더 이상의 에너지 흡수 능력의 저하로 파괴가 발생하게 된다.

5. 제주도 현무암 채석

제주도는 한반도에서 약 90km 떨어진 곳에 있는 섬 전체가 화산 활동에 의해서 만들어진 큰 화산섬이다. 섬의 크기는 장경 약80km, 단경 약40km인 타원형으로 섬의 중앙부에는 높이 약2,000m의 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 200m이상 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 등근형, 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 Olivine질 현무암과 쇠설물 등에 의해 구성 되었으며, Olivine질 현무암은 모두 다공질 또는 주상 절리를 나타낸다. 그 후, 화산치동에 의해 한라산과 360여개의 기생화산들에서 분출된 화산암으로 현무암, 조면암류, 조면질 안산암류, 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.

Table 3~5는 국내에서 생산하는 석재들의 역학적인 성질을 나타내고 있다. 이 표에서 알 수 있는 바와 같이 석재의 강도들은 종류에 따라 상이함을 알 수 있다. 즉, 사용 골재에 따라 콘크리트 특성에 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

Table 3. Compressive, tensile, and flexural tensile strength of stones (kgf/cm²)

종 류	압 축 강 도	인 장 강 도	휨 강 도
화 강 암	500~1,940	35~50	104~132
안 산 암	1,035~1,680	36~82	78~177
웅 회 암	86~372	8~35	23~60
사 암	266~674	25~29	54~94
대 리 석	1,180~2,140	39~87	34~90
사 문 암	740~1,200	28~74	-
점 판 암	1,410~1,640	-	-

* 조 준현, “건축공사감리요람”, 1202쪽 표 인용

Table 4. Distribution state of domestic granite

도 명	산 지 별 명 칭	색 상
경 기 도	종암석, 상계석, 홍제석, 불광석, 포천석, 가평석, 김포석, 강화석, 덕정석, 여주석, 신산리석, 신북석, 양주석	백 색 계 분 홍 색 계 회 색 계 녹 색 계
충 청 도	계홍석, 아산석, 은양석, 충주석, 음성석, 보은석, 제천석, 도고석, 괴산석, 천안석	백 색 계 흑 색 계 분 홍 색 계
경 상 도	보성석, 마천석, 함천석, 지리산석, 영천석, 영주석, 상주석, 거창석, 경주석, 왜관석, 남해석, 성주석, 문경석	백 색 계 녹 색 계 흑 색 계 속 색 계
전 라 도	황등석, 김제석, 광양석, 함열석, 여수석, 고흥석, 여천석, 남원석, 정읍석, 순천석	백 색 계 속 색 계 분 홍 색 계
기 타	경원석, 대광석, 봉암석, 후동석, 원주석	백 색 계 속 색 계 흑 색 계

* 조 준현, “건축공사감리요람”, 1202쪽 표 인용

Table 5. Properties of domestic granite

도 명	명 칭	압축강도(kg/cm ²)	비 중	흡수율(%)
경 기 도	강화석	1,760	2.68	0.39
	가평석 A	1,227	2.68	0.49
	가평석 B	1,610	2.62	0.41
	신북석	1,730	2.75	0.19
	여주석	1,340	2.66	0.24
	포천석A	1,533	2.61	0.39
	포천석B	1,145	2.70	0.38
	포천석C	1,390	2.61	0.35
충 청 북 도	보은석	1,440	2.61	0.27
	제천석	1,220	2.68	0.41
충 청 남 도	아산석	1,480	2.69	0.43
전 라 북 도	김제석	1,547	2.68	0.32
	익산석A	1,480	2.66	0.38
	익산석B	1,690	2.66	0.43
	황등석A	1,371	2.67	0.37
	황등석B	1,207	2.66	0.40
전 라 남 도	광양석	1,630	2.57	0.76
강 원 도	후동석	1,059	3.02	0.26
경 상 북 도	상주석	1,720	2.62	0.27
경 상 남 도	거창석A	860	2.65	0.61
	거창석B	770	2.64	0.52

* 조 준현, "건축공사감리요람", 1203쪽 표 인용

III. 실험 방법 및 결과

1. 실험 개요

가. 시험체 제작 및 형상

실험은 표준의 원주 공시체와 입방 및 각주 시험체와의 압축 강도 비교를 위해 실시되었다. 원주 공시체는 기존의 철제 거푸집을 사용할 수 있으나 입방이나 각주 시험체의 경우는 목재 거푸집으로 제작하였다(Photo 1). 원주시험체의 경우는 코아 콘크리트와의 강도 관계를 설정하기 위해 단면이 작은 경우가 고려될 수 있으나, 각주시험체의 경우는 무의미하다. 따라서, 본 연구에서는 단면의 크기 및 세장비를 실험기기의 용량을 고려하여 단면이 10, 15, 20, 25cm, 세장비가 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0인 각주, $\phi 15 \times 30$, $\phi 10 \times 20$ 원주, $\phi 10 \times 20$ 와 동일한 단면적과 세장비가 8.9cm 각주 시험체를 제작하였다. 이들 세장비와 크기를 변수로 재형에 따른 강도 변화를 측정하기 위하여 Table 6에서 보는 바와 같이 각 변수에 대해 9개씩 제작하였다. 각주시험체의 거푸집은 콘크리트의 타설 방향을 고려하여 횡방향으로 가로 놓혀 제작되었다.

나. 콘크리트

배합 강도가 210kgf/cm^2 인 균일한 콘크리트를 위하여 레미콘을 사용하였으며 그 배합설계는 Table 7과 같다. 시험체에 콘크리트 타설 전에 슬럼프를 측정하여 약 18cm의 슬럼프치를 얻었다(Photo 2). 사용 골재로는 지역연건상 잔골재는 조립율이 2.8, 비중이 2.58인 영산강 소재의 강모래를, 굵은 골재는 제주도 애월의 석산에서 채취한 조립율 6.5, 비중 2.68, 최대 치수가 25mm인 쇄석을 각각 사용하였으며, 혼화제로는 고강도용 혼화제 일반형인 ECONEX 액체형을 사용하였다.

모든 시험체(Photo 3)는 3일 후 거푸집을 제거하여 동일 조건하에서 대

Table 6 Summary of experimental results

시험체명 (가로×세로 ×높이)	재령에 따른 평균 압축강도 (kgf/cm ²)		
	7일	14일	28일
10×10×5	312.5	331.7	386.2
10×10×10	170.5	208.7	244.3
10×10×15	176.0	185.1	227.8
10×10×20	132.7	185.0	216.4
10×10×30	157.5	173.7	215.2
10×10×40	164.4	189.4	232.3
15×15×7.5	214.0	310.2	362.2
15×15×15	176.5	195.6	231.0
15×15×22.5	176.2	190.6	203.8
15×15×30	179.6	195.6	224.2
15×15×45	153.4	169.6	211.3
20×20×10	272.6	297.2	346.4
20×20×20	179.6	187.6	225.8
20×20×30	143.8	160.5	205.2
20×20×40	169.6	182.0	201.3
25×25×25	119.2	132.3	173.0
25×25×37.5	140.7	155.3	170.9
φ10×20	163.4	225.6	266.2
φ15×30	-	-	265
8.9×8.9×17.8	179.0	208.8	258.4

Table 7 Concrete mixing table unit : kgf/m³

시멘트	물	모래	자갈	혼화제
333	190	818	998	0.83

기중에 양생을 실시하였다. 실험은 콘크리트 타설후 7일, 14일, 28일에 각각 3개의 시험체에 대해 압축강도 실험을 실시하였다(Photo 4, 5). 압축강도는 제주대학교 소재 300tf 용량의 만능시험기를 사용하였으며, 매 실험 후 콘크리트의 파괴 양상을 육안으로 판별하였다.

2. 실험 결과

가. 파괴양상

물, 모래, 자갈, 시멘트로 이루어진 콘크리트는 골재와 모르타르 강도 사이의 범위에 강도를 보인다. 따라서 콘크리트 공시체의 파괴 양상은 모르타르와 골재의 접착면의 부착파괴나 모르타르 파괴를 나타내며, 때론 골재의 파괴 양상을 볼 수 있으나 이 양상은 경량 콘크리트에서 볼 수 있다(Photo 6, 7, 8). 골재의 강도가 약하다면 골재 파괴를 나타내어 전체적으로 콘크리트의 강도가 저하될 것이다.

콘크리트 중에 골재가 차지하는 체적은 약 65% 정도로 콘크리트 강도는 골재의 강도와 밀접한 관계를 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트 실험에 앞서서 골재의 강도를 비교하고자 5×5×10cm인 석재 시험체에 대해 전북 익산의 쇠석과 제주 지역에 현무암의 압축강도를 비교하였다. 각각 3개의 압축강도를 측정하여 평균 압축강도를 Table 8에 나타내고 있다. 이 표에서 볼 수 있듯이 익산 지역의 골재 강도가 제주지역 골재 보다 약 2배 정도 강한 것으로 나타났다. 그러나 제주 지역은 화산 활동을 한 지역으로 지역마다 골재의 강도에 차이를 보이므로 일반화 시킬 수는 없으나 타지역의 골재에 비하여 골재의 강도가 상대적으로 작음 알 수 있다.

시험체의 압축강도 실험결과, 시험체의 파괴 양상은 부착이나 모르타르의 파괴 외에 모든 시험체내의 일부는 골재의 파괴를 보였다. 특히 시험체의 크기가 작은 경우에는 골재의 파괴 부분이 많이 나타났다. 이는 현무암질의 쇠석인 골재의 강도가 작다는 것으로부터 유추될 수 있다.

콘크리트의 강도는 골재의 강도와 모르타르 강도 사이의 범위에 있는 것이 일반적이므로 본 실험에 의하면 골재의 강도가 276 kgf/cm² 이상 확보한다는 것은 어려움을 알 수 있다. 그러나 전술한 바와 같이 지역마

다 골재의 성질이 판이하므로 고강도의 골재를 사용한다면 고강도 콘크리트 제조는 가능할 것이다. 그러나 타지역에 비하여 제주 지역 골재는 상대적으로 약하다는 연구 결과들을 볼 수 있다. 이 때에 골재의 파괴는 급격한 파괴를 야기하므로 전체적으로 인성계수(resilience modulus)의 저하 혹은 에너지 흡수 능력의 저하가 우려됨으로 콘크리트 배합 설계에 골재의 강도를 감안하여야 할 것이다.

Table 8 Strength comparison of aggregates

전북 익산 쇄석	제주 현무암
559.2 kgf/cm ²	276.0 kgf/cm ²

나. 골재의 마모 실험

제주도내에 사용하고 있는 골재의 닳음에 대한 저항을 측정하고자 제주대학교 소재의 로스엔젤스 시험기를 사용하여 골재의 마모 실험을 실시하였다. 실험 방법은 KS F 2508 기준에 의거 실험을 실시하였으며, C급의 시료 2,500 kgf를 로스엔젤스기에 철구 8개와 더불어 투입 후 500회 회전시켜 시험기로부터 들어내어 No.12체로 체가름하였다. 이 때에 통과한 골재의 양은 850g으로 사용 골재의 마모율은 약 26% 정도를 보였다. 기준에 의하면 골재의 마모율은 40%이하를 요구하고 있는 바, 사용 골재의 마모율은 적절한 것으로 나타났다.

참고문헌[27]의 실험 결과에 의하면 제주도내의 골재는 흡수율이 타지역 보다 크다고 보고하고 있다. 흡수율이 클 경우에는 콘크리트의 재료 분리를 야기시킬 수 있는 경량 골재의 성질을 포함하고 있음을 알 수 있다. 이상의 골재에 대한 실험과 보고 자료로부터 제주도내에 현무암질의 쇄석 조골재는 지역마다 다른 성질을 지니고 있으나 타지역의 골재와 비교하여 연질인 경량 골재의 성질을 일부 포함하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 고강도 콘크리트 제조시에 사용 골재의 채취 장소를 구분하여 골재의 특성을 파악한 후에 사용하는 것이 바람직하다 판단된다.

다. 표준공시체와 각주공시체의 강도 관계

국내에서는 표준공시체로 $\phi 15 \times 30$ 의 원주공시체를 규정하고 있으며, $\phi 10 \times 20$ 인 시험체의 사용도 인정하고 있다. Table 9는 표준공시체의 28일 압축강도에 대한 각 시험체의 평균 강도비를 재령에 따라 나타내고 있으며, 콘크리트는 재령에 따라 강도가 증가됨을 볼 수 있다.

이 표에서 28일 압축강도를 비교한다면 각주공시체의 세장비가 0.5일 경우를 제외하고는 각주공시체의 강도가 작다는 것을 알 수 있다. 즉, 28일 압축강도는 원주공시체의 압축강도가 각주공시체의 압축강도를 상회함을 알 수 있다. 또한, 입방형 시험체의 압축강도는 표준공시체의 강도보다 작으며, 각주공시체의 크기가 작아짐에 따라 압축강도는 증가되는 것을 볼 수 있다.

세장비가 동일할 경우에 원주공시체가 각주공시체 보다 큰 강도를 나타낸다는 기존의 결과와 동일하나 정량적으로는 차이를 나타내고 있다. 그러나 세장비가 1인 입방형 공시체의 강도가 원주공시체 보다 크다는 기존의 결과와는 상반되는 실험 결과를 나타내고 있다. 이는 사용 재료 특히 골재의 특성에 의한 것으로 판단된다. 이와 같이 제주 지역에서 생산되는 골재는 강도가 낮으므로 배합 설계시에 제주 지역내에 채석지를 표시하여 골재의 강도를 파악하는 것이 중요한 사항이 될 것이다.

Table 9로부터 원주공시체와 입방 혹은 각주 공시체와의 강도 관계를 얻을 수 있다. 그러나 이들 값은 제한된 시험체에 의한 것으로 정량적으로 그 관계를 설정하는데에는 어려움이 있다. 특히, 골재의 강도가 콘크리트 강도에 크게 영향을 미침을 감안한다면 이에 대한 보다 많은 시험체에 의한 실험 결과들이 요구됨을 알 수 있다.

라. 세장비에 따른 강도 변화

각주공시체에서 세장비는 단면의 폭에 대한 공시체의 높이의 비로, Fig. 17은 동일 단면의 각주공시체에서 세장비와 표준공시체의 28일 강도에 대한 압축강도비를 재령에 따라 나타내고 있다. 이 그림에서 세장비가 작아짐에 따라 압축강도가 증가하는 추세를 보이며, 특히 세장비가 0.5일 경우 28일 압축강도는 원주공시체의 강도보다 크게 나타났으며, 표준공시체와

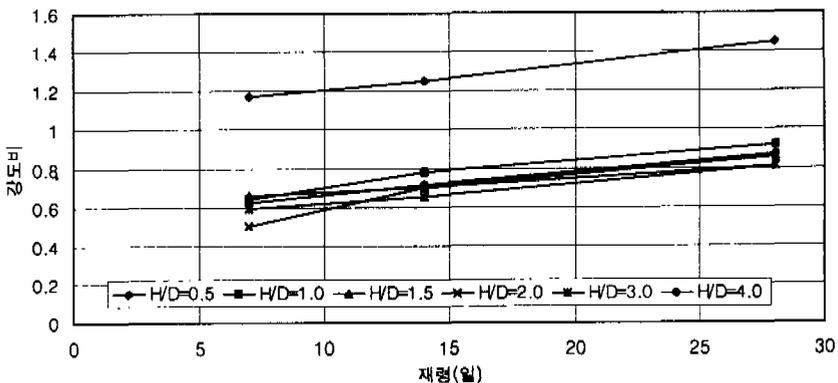
Table 9 Strength comparison with standard cylindrical specimen

시험체명	표준공시체와의 강도비		
	7일	14일	28일
10×10×5	1.17	1.25	1.45
10×10×10	0.64	0.78	0.92
10×10×15	0.66	0.7	0.86
10×10×20	0.5	0.7	0.81
10×10×30	0.59	0.65	0.81
10×10×40	0.62	0.71	0.87
15×15×7.5	0.8	1.17	1.36
15×15×15	0.66	0.74	0.87
15×15×22.5	0.66	0.72	0.77
15×15×30	0.67	0.73	0.84
15×15×45	0.58	0.64	0.79
20×20×10	1.02	1.11	1.30
20×20×20	0.67	0.7	0.85
20×20×30	0.54	0.60	0.77
20×20×40	0.64	0.68	0.76
25×25×25	0.45	0.5	0.65
25×25×37.5	0.53	0.58	0.64

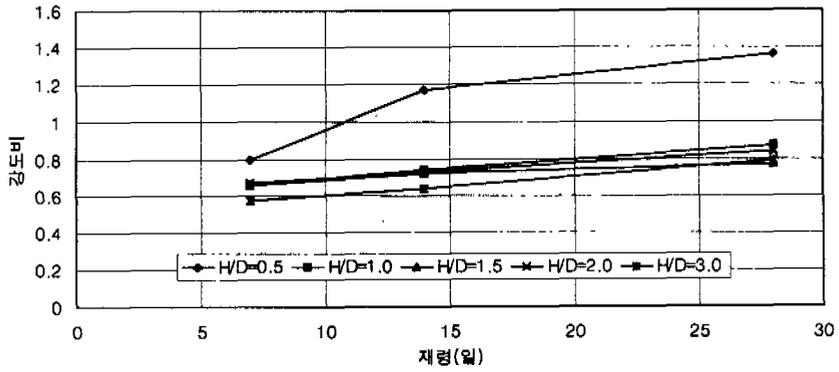
동일한 세장비를 지닌 각주공시체의 28일 압축강도가 또한 저하됨을 볼 수 있다.

철근콘크리트 기둥에서는 세장비가 대부분 2이상의 값이 된다. 철근콘크리트 기둥의 설계에서 콘크리트의 강도 감소 계수인 0.85는 미국의 Lehigh 대학교에서 다양한 세장비에 따른 강도 측정된 결과 0.85를 제안하였으며, 그 값을 ACI 기준에서 채택하여 설계에 반영하고 있다. 감소 계수인 0.85는 세장비가 증가함에 따라 콘크리트의 강도는 감소하여 수렴되는 값이다. 그러나 본 실험 결과에 의하면 세장비가 클 경우에 0.85보다 작게 나타나, 제주 지역의 골재를 사용할 경우에 철근콘크리트 기둥 설계의 기준이 과대 평가되고 있음을 알 수 있다. 이는 본 실험에서 사용된 재료의 성질로부터 판단될 수 있으며, 이러한 골재를 사용하였을 경우에 골재의 특성을 고려한 설계가 행해지는 것이 바람직하다고 판단된다.

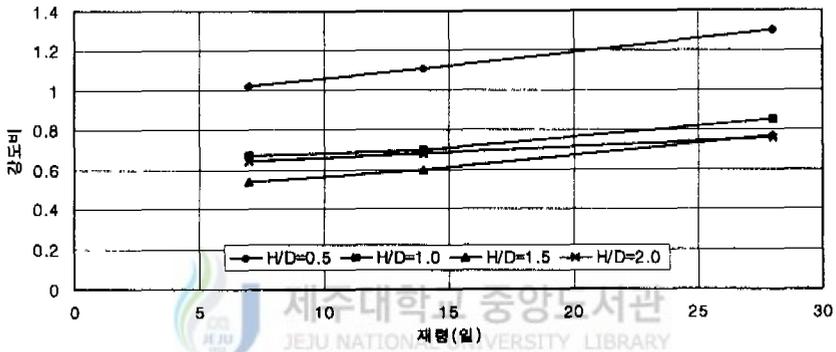
Fig. 18은 표준공시체와 동일한 단면적을 지닌 세장비가 2인 각주시험체와의 강도 관계를 재령에 따라 비교하였다. 이 그림에서 표준공시체와의 강도 차이가 약 $\pm 10\%$ 정도이며, 28일 강도는 약 3% 차이를 보인다. 즉, 단면이 $8.9 \times 8.9\text{cm}$ 이며 세장비가 2인 각주공시체는 표준 원주공시체와 거의 유사한 압축 강도를 보였다. 이 결과로부터 세장비가 2인 원주공시체와 각주 시험체는 콘크리트 타설 방향에 크게 영향을 받고 있지 않음을 알 수 있다. 그러나 이외의 시험체일 경우에는 콘크리트 타설시 골재가 먼저 낙하되기 때문에 타설 방향에 의해 콘크리트 강도는 영향을 받게 될 것이다.



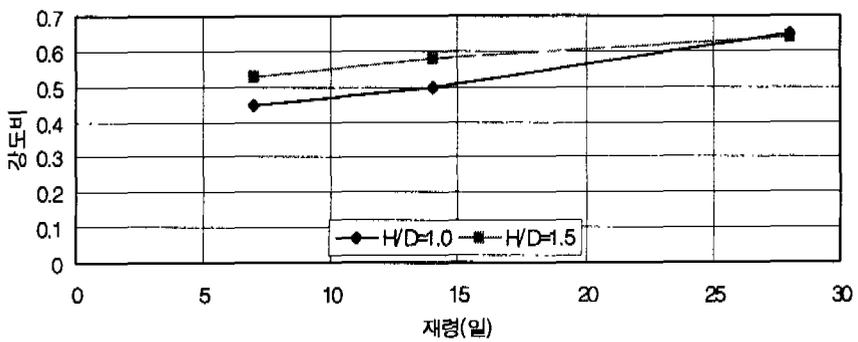
a) Squared specimens with $10 \times 10\text{cm}$ cross section



b) Squared specimens with 15×15cm cross section



c) Squared specimens with 20×20cm cross section



d) Squared specimens with 25×25cm cross section

Fig. 17 Compressive strength variation of squared specimens according to curing time

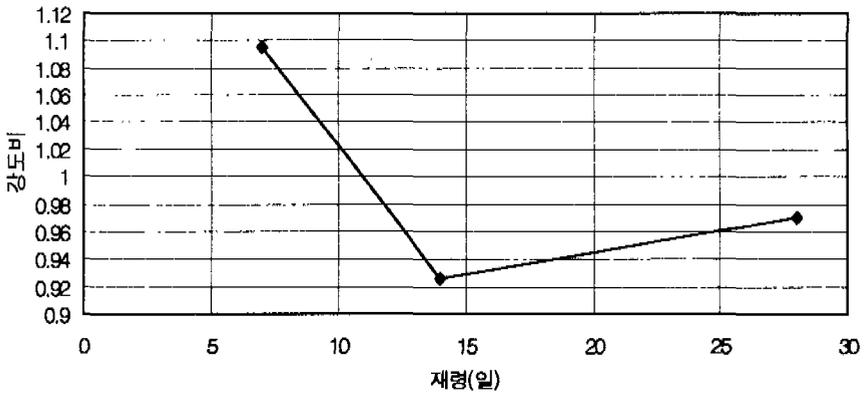
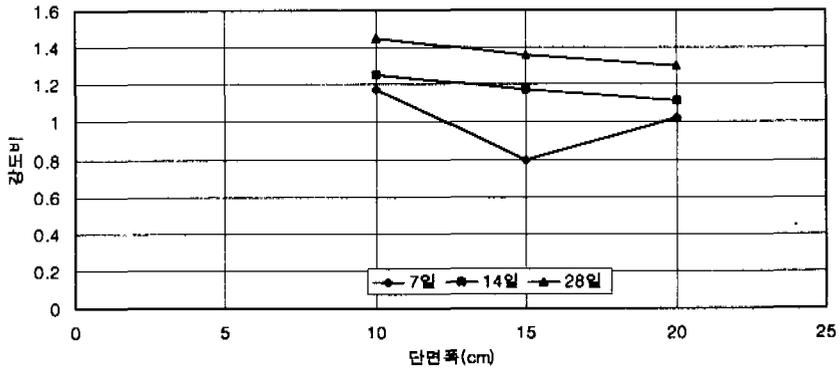


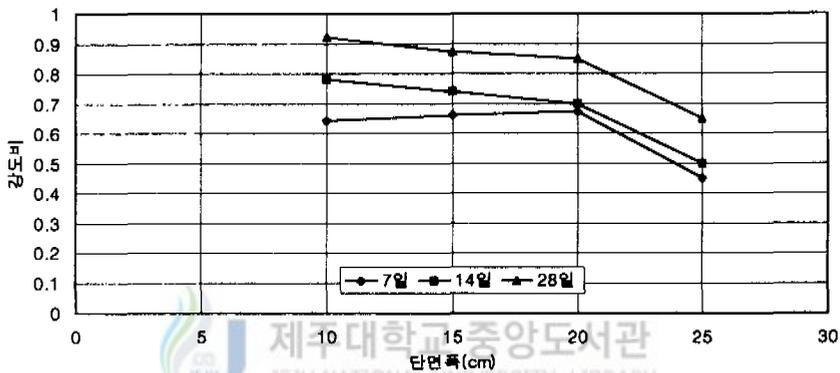
Fig. 18 Strength variation of $8.9 \times 8.9 \times 17.8$ cm squared specimens according to curing time

마. 동일 세장비에서 공시체의 크기 영향

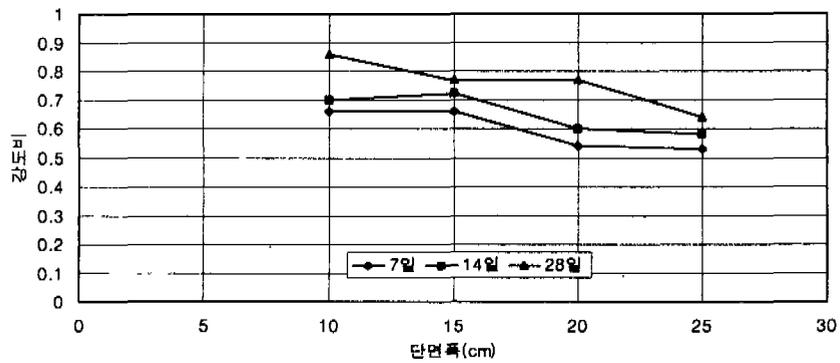
콘크리트의 강도는 동일 세장비의 각주시험체에 대해 단면의 크기에도 영향을 받는다. 본 실험에서는 동일 세장비에서 공시체의 크기가 증가하면 압축강도가 감소됨을 Fig. 19에서 볼 수 있다. 이 그림에서 표준 원주 공시체의 28일 강도 또한 각주공시체 보다 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이 결과 또한, 보통의 철근콘크리트 기둥의 단면이 25cm 이상임을 감안한다면 0.85 계수가 과대 평가됨을 알 수 있으며, 사용 재료의 차이로 부터 그 원인을 찾을 수 있다.



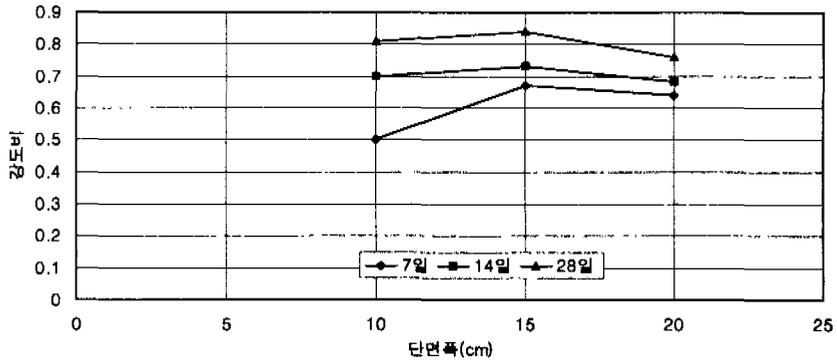
a) Squared specimens of 0.5 slenderness ratio



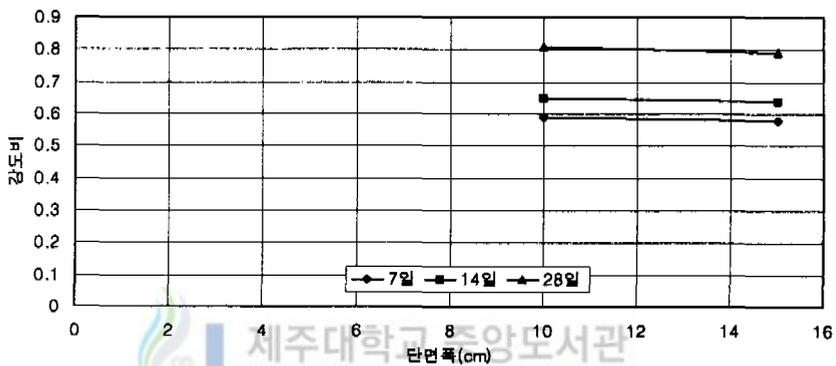
b) Squared specimens of 1.0 slenderness ratio



c) Squared specimens of 1.5 slenderness ratio



d) Squared specimens of 2.0 slenderness ratio



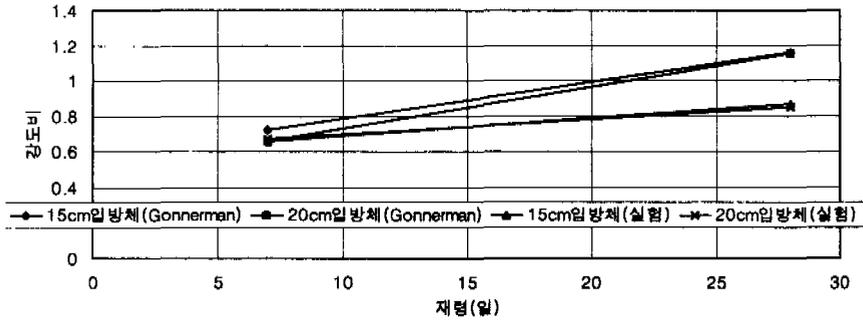
e) Squared specimens of 3.0 slenderness ratio

Fig. 19 Size effect comparison corresponding to the same slenderness ratio

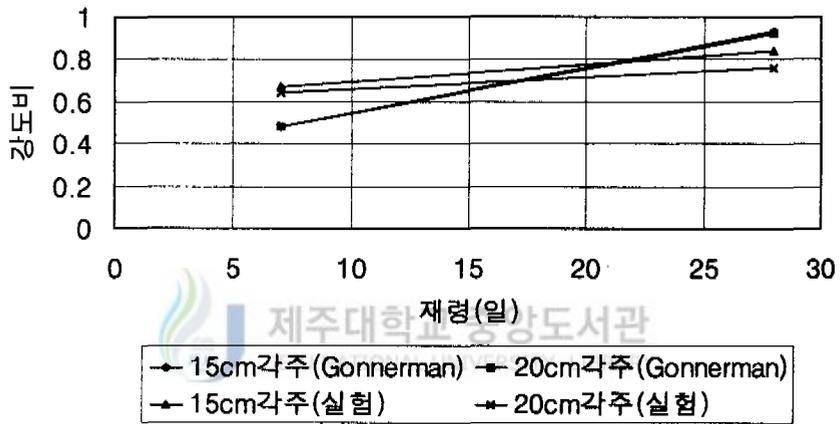
3. 기존 연구 결과와의 비교

기존의 연구결과로 가장 많이 활용되고 있는 Gonnerman의 결과와 비교를 Fig. 20에 나타내고 있다. 이 그림에서 입방형 공시체의 경우 7일의 강도는 거의 유사하게 나타났으나, 28일 강도는 실험의 결과가 작게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 반면에 각주시험체의 경우 7일 강도는 실험 결과가 크게 나타났으나 28일 강도는 오히려 작게 나타났음을 볼 수 있다.

이상의 결과로부터 사용 골재의 성질이 콘크리트의 역학적인 특성에 크게 영향을 미침을 알 수 있으며, 기존의 국외 자료보다는 새로운 자료의 축적이 필요함을 알 수 있다.



a) Cubic specimens



b) Squared specimens

Fig. 20 Comparison with the Gonnerman's results

IV. 결 론

국내나 ACI 기준에서는 설계용 콘크리트의 강도를 $\phi 15 \times 30$ cm인 원주공시체를 표준공시체로 4주 압축강도를 규정하고 있다. 그러나 유럽에서는 주로 입방공시체를 표준공시체로 사용하고 있으므로 시험체 단면의 모양 차이로 원주공시체와 입방 및 각주공시체의 강도 환산을 요한다. 세장비가 2이상인 각주공시체는 표준 원주공시체보다 작은 압축강도를 보이나 입방형 공시체 이하의 각주시험체에서는 큰 것이 기존의 연구 결과다.

골재의 성질은 콘크리트의 강도에 영향을 미치며 특히 제주도는 타지역과는 달리 현무암질의 조골재를 사용하는 바, 콘크리트의 역학적인 성질이 규명되어야 할 필요성에서 각주공시체의 세장비와 단면의 크기를 변수로 실험을 실시하여 다음과 같은 결과들을 얻었다.

(1) 각주시험체에 대한 압축강도 실험으로부터 골재의 파괴 양상을 볼 수 있었다. 이 결과는 제주지역에 사용되는 조골재는 현무암으로써 내륙 지방중 전북 익산의 쇠석과 골재의 강도를 비교한 결과 약 2배정도 작은 것으로 설명된다. 골재의 마모 실험을 실시한 결과 마모율은 약 26%로 기준에서 정하는 40%이하의 값을 나타내므로 적절한 것으로 나타났다. 또한, 흡수율은 타지역에서 사용하는 골재 보다 크므로 재료 분리의 우려가 있다.

(2) 동일한 세장비에 대해 표준 원주공시체가 각주공시체 보다 큰 강도를 나타내는 추세는 Gonnerman의 연구 결과와 유사하나 정량적인 값에 차이를 나타내고 있다.

(3) 동일 단면에 대해 세장비가 클 경우에 강도는 저하됨을 볼 수 있다. 그러나 입방형 공시체의 강도가 표준 원주공시체의 강도에 비하여 큰 강도를 나타내는 Gonnerman의 연구 결과와는 상반되는 결과를 나타내었다. 본 실험의 결과에 의하면 표준 원주공시체와 유사한 강도를 나타내는 각주공시체는 $8.9 \times 8.9 \times 17.8$ cm인 것으로 나타났다.

(4) 철근콘크리트 기둥 설계시에 콘크리트 강도의 감소율을 85%를 보

고 있으나 본 실험 결과 세장비가 증가함에 따라 콘크리트 강도가 크게 감소하여 감소 계수를 0.85 미만을 사용하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

(5) 이상의 결과로부터 사용 골재의 성질이 콘크리트의 역학적인 특성에 크게 영향을 미침을 알 수 있으며, 기존의 국외 자료보다는 새로운 자료의 축적이 필요함으로 이에 대한 연구를 보다 광범위하게 행할 필요성이 있다 사료된다. 특히 철근콘크리트 부재의 설계에 있어서 이러한 영향을 고려한 콘크리트의 재료적인 특성을 검토할 필요성이 있다고 판단된다.



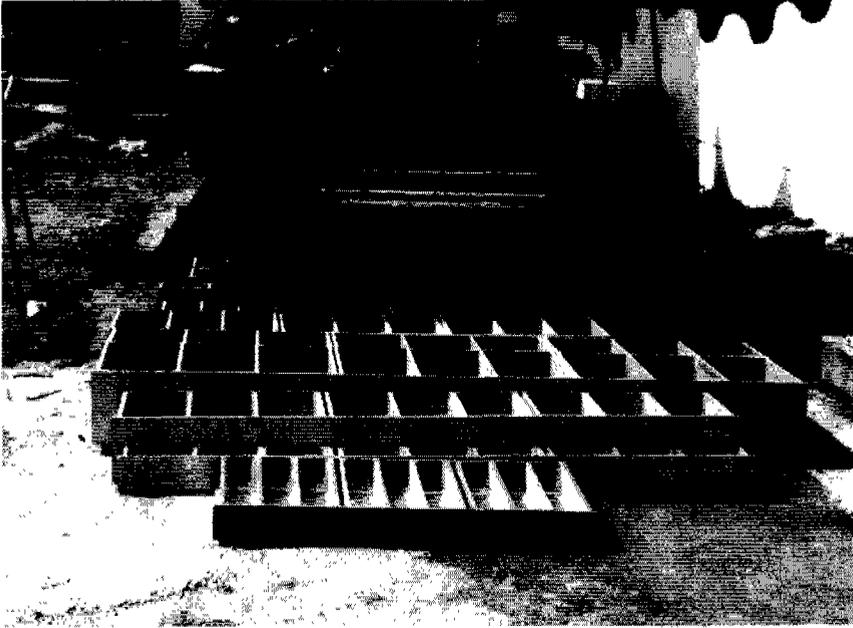


Photo 1. Specimen forms for compressive tests

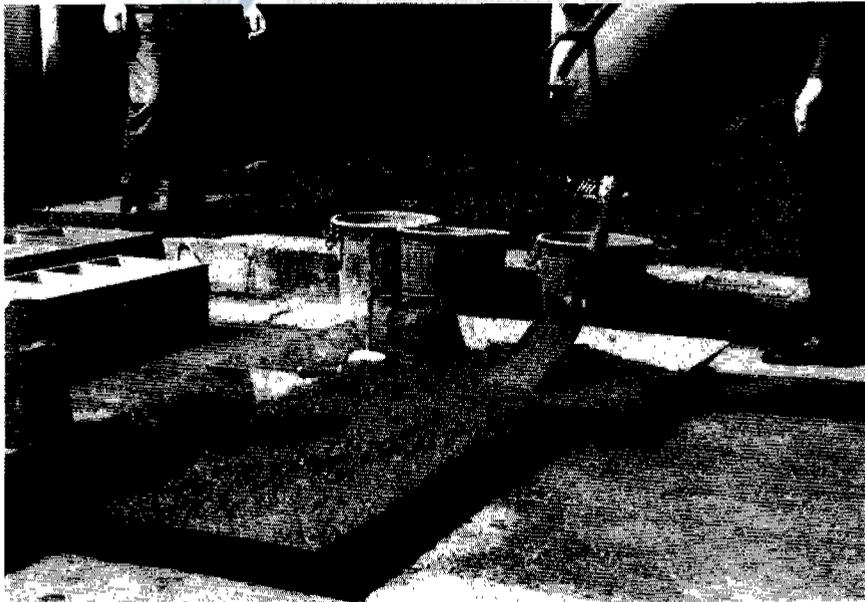


Photo 2. Concrete placing

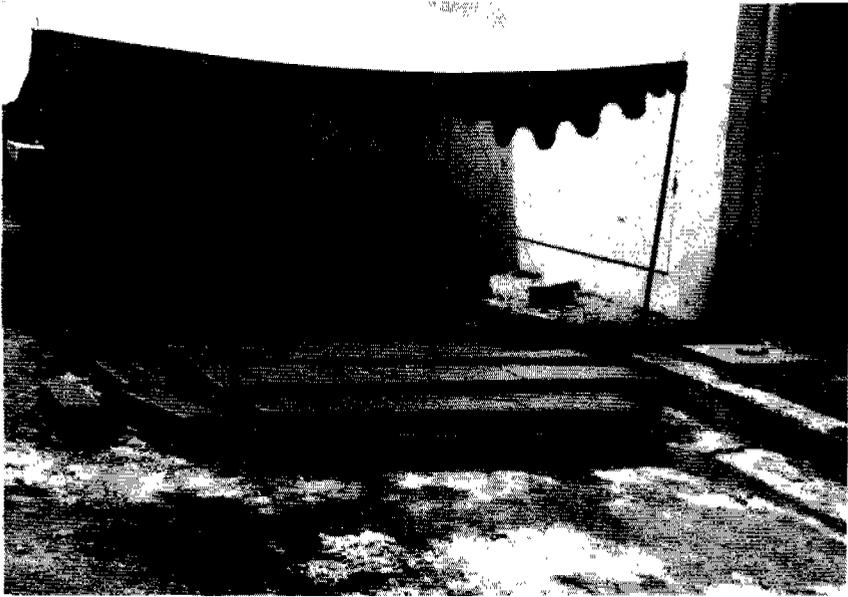


Photo 3. Concrete curing

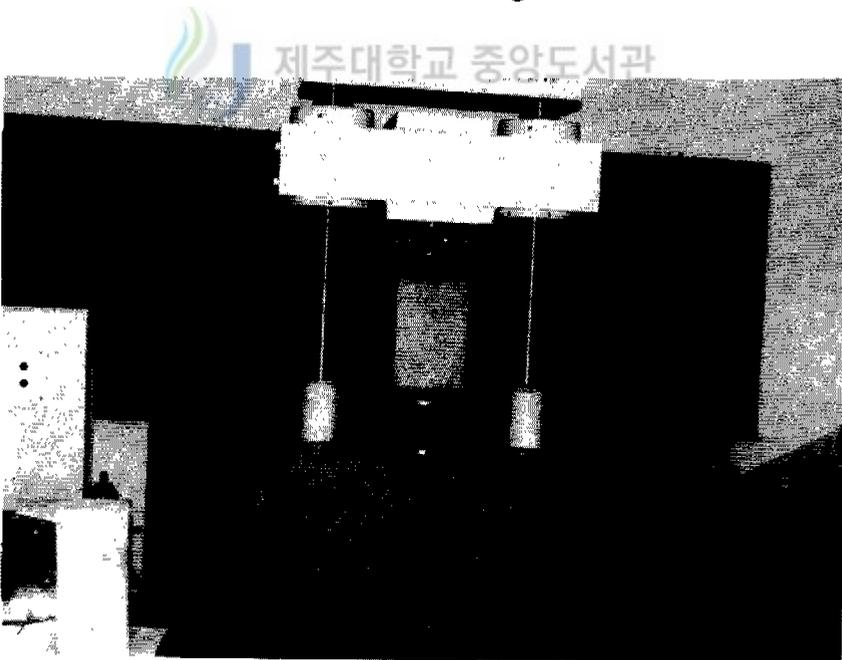


Photo 4. Experimental scene I

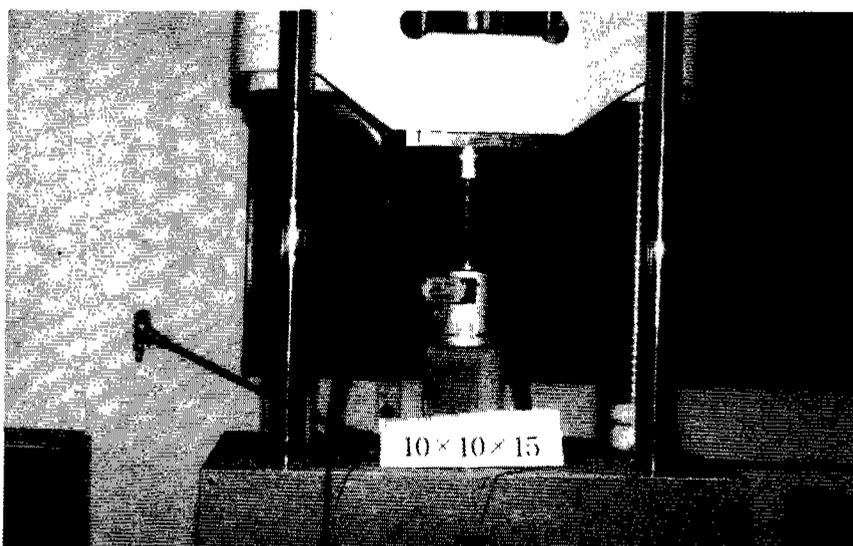


Photo 5. Experimental scene II

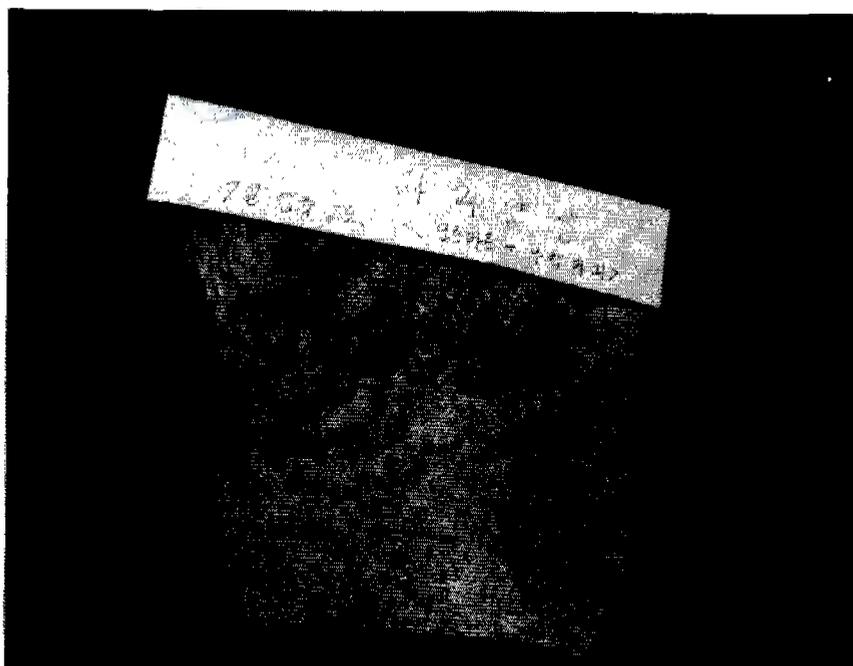


Photo 6. Failure shape of specimens I (bond and mortar failure)

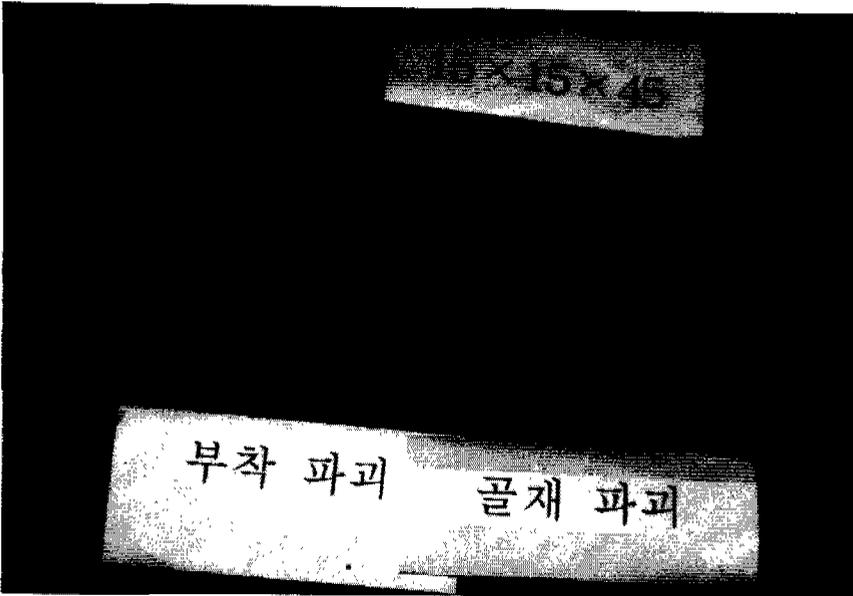


Photo 7. Failure shape of specimens II (bond and aggregate failure)



Photo 8. Failure shape of specimens III (bond and aggregate failure)

참고문헌

- [1] 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.
- [2] Johnson, R.F., "Strength Tests on Scaled-down Concrete suitable for Model", Magazine Concrete Research, Vol.14, 1962, pp.47-53.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Kuczynski, "La Resistance du Deton Etudiee sur des Eporouvettes de Diffentes Formes et de Diveres Dimension", RILEM Bulletin, No.8, 1960, pp.77-95.
- [8] Weibull, W., "A Statistical Theory of the Strength of Materials", Royal Swedish Proc., No.151-152, 1939.
- [9] 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.
- [10] Nielson, A.M., "Effect of Various Factors on the Flexural Strength of Concrete Test Beams", Magazine of Concrete Research, Vol.15, 1954, pp.105-114.

- [11] 문 영호, “파괴역학에 의한 콘크리트의 압축강도에 대한 Size Effect 연구”, 한국과학기술원 토목공학과, 1986년.
- [12] 박 홍기, “초기 균열이 없는 콘크리트 구조물의 크기에 따른 응력감소 효과에 관한 연구”, 한국과학기술원 토목공학과, 1987년.
- [13] 조 수연, “콘크리트 압축강도에 미치는 공시체의 크기 효과에 관한 연구”, 한국과학기술원 토목공학과, 석사학위논문, 1987년.
- [14] 吉本 彰 著, 姜 영求 譯, “ 콘크리트의 變形과 破壞”, 圓技術, 1995년
- [15] 한 친구 외3인, “ 부순모래 치환 잔골재를 이용한 콘크리트의 배합설계에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회 논문집, 제11권 제10호, pp. 389-396, 1995년.
- [16] 최 영화, “쇄석 콘크리트의 성상에 관한 실험적 연구”, 충남대학교 대학원 박사학위 학위논문, 1994년.
- [17] 김 무한 외4인, “ 고유동 콘크리트의 제조시스템 및 개발에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회 논문집, 제13권 제5호, pp. 279-288, 1997년 5월.
- [18] 대한건축학회, “고강도-고성능 콘크리트 제조·시공 및 설계”, 철근 콘크리트분과위원회 기술보고서 ATR 96-1, 1996년.
- [19] (주) 대우엔지니어링, “고강도 콘크리트의 경제적 배합비 및 실용화에 관한 연구”, 기술연구소 보고서, 1988년 4월.
- [20] 정 현수, “고강도 콘크리트 구조”, 태림문화사, 1987년 8월.
- [21] 건설부, “건설부 제정 건축공사 표준 시방서”, 대한건축학회, 1986년.
- [22] 대한건축학회, “건설부 제정 건축공사 표준 시방서”, 건설부, 야정문화사, pp.175-177, 1994년.
- [23] 진 현규 외3인, “혼화재를 혼입한 고유동 콘크리트의 유동성 및 강도 특성에 실험적 연구”, 대한건축학회논문집 제15권 제2호, pp.117-124, 1999년 2월.
- [24] 유 태동, “유동화 경량 골재 콘크리트의 성상에 관한 연구”, 건국대학교 박사학위논문, 1998년 2월.
- [25] 고 봉수, “원주공시체의 형상비 및 크기와 콘크리트 강도 관계에 관한 실험적 연구”, 제주대학교 산업대학원 석사학위논문, 1999. 8월.
- [26] 김 광식, “형상비가 2인 원주공시체의 크기가 콘크리트 강도에 미치는 영향에 관한 실험적 연구”, 제주대학교 산업대학원 석사학위논문, 1999. 8월.

- [27] 양 창희, “제주도 현무암 쇄석조골재를 사용한 콘크리트의 강도에 관한 실험적 연구”, 제주대학교 산업대학원 석사학위논문, 1999. 8월.
- [28] 조 준현, “건축공사감리요람”, 개정판, 서울, pp1202-1203, 1998



감사의 글

우선 이 논문이 완성되기까지 아낌없는 격려와 정성으로 지도하여 주신 은희창 교수님께 깊은 감사를 드리며, 입학에서 졸업 때까지 많은 격려의 말씀과 용기를 주셨던 서일교 교수님, 김태일 교수님, 최동호 교수님, 박철민 교수님께 감사드립니다.

또한 어려운 환경에서도 서로 돕고 격려하며 이끌어준 학우들에게 감사드리고, 그들의 앞날에 무궁한 발전과 행운이 함께하기를 기원합니다.

그리고 제가 학업에 열중할 수 있도록 도와주신 직장 상사와 동료 및 후배, 그 외 저를 위해 애써주신 모든 분들께 감사드립니다.

마지막으로 여러 가지 어려운 여건에서도 학업에 열중할 수 있도록 도와주시고 걱정하여 주신 어머님과 장인, 장모님, 형님, 형수님께 작은 결실을 드리며, 항상 곁에서 묵묵히 내조해준 아내와 학업에 바쁜 부모를 잘 이해 해준 두 딸 수경, 희경이와 함께 이 기쁨을 나누고 싶습니다.

2000년 8월

강 수 철 올림