

73120

碩士學位論文

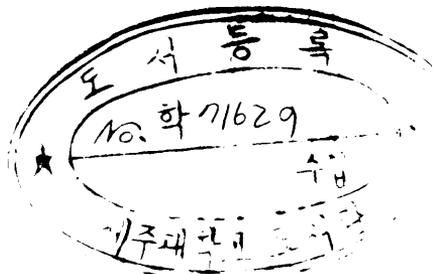
圓柱供試體의 形象比 및 크기와 콘크리트 強度
關係에 관한 實驗的 研究

— 玄武岩質 碎石骨材를 使用한 콘크리트를 中心으로 —

指導教授 殷 熙 昌



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



濟州大學校 產業大學院

建設環境工學科

高 奉 秀

1 9 9 9

圓柱供試體의 形象比 및 크기와 콘크리트 強度 關係에 관한 實驗的 研究

— 玄武岩質 碎石骨材를 使用한 콘크리트를 中心으로 —

指導教授 殷 熙 昌

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

1999 年 月 日

濟州大學校 產業大學院



建設環境工學科
建築工學專攻

高 奉 秀

高奉秀의 工學 碩士學位論文을 認准함.

1999 年 月 日

委員長

委員

委員

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
4. 기존의 연구현황 -----	4
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-----	22
5. 제주도 현무암 선택-----	22
III. 실험방법 및 결과-----	24
1. 실험개요-----	24
2. 실험방법 및 결과-----	25
IV. 실험결과의 분석 및 고찰-----	38
1. 실험결과와 이론 해석 결과의 비교-----	38
2. 기존의 실험결과와의 비교-----	39
3. 실험결과의 고찰-----	39

V. 결 론-----	43
참고문헌-----	47



An Experimental Study on Concrete Strength
According to Aspect Ratio and Size of Concrete Cylinder

Ko, Bong-Soo

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

Summary



Strength and deformation of prototype concrete are dependent on several parameters including the nature and magnitude of stresses. There are many attempts to investigate size effects of concrete specimens. The effects of size on properties of concrete is particularly important if small scale models are to be used to predict the behavior of prototype structures. An objective of this study is to investigate the strength relationship of $\phi 15 \times 30$ and other cylindrical specimens with the variables of aspect ratio and diameter.

From this experimental study, we obtained the following results.

1. The results showed some different phenomena compared with the existing results due to the properties of soft aggregate of basalt gathered from Cheju island.
2. As the aspect ratio or the size of concrete cylinder decreases, the compressive strength of concrete increases. These results are contrast to the existing results which the reduction of the aspect ratio or the size of specimens fosters the improvement of compressive strength of concrete. On the other hand, the more aspect ratio or size than standard cylinder, the less compressive strength. This result is similar to the existing result.
3. The above results are derived from the failure shape of concrete specimens. There are three kinds of failure shapes, which are the failure of cement mortar, the bond

failure of cement mortar and aggregates, and the aggregate failure in concrete. The general failure results from the failure of cement mortar or the bond failure. However, by this experiment, the failure shape was governed by the aggregate failure which is the failure shape of lightweight concrete. This is analyzed by the distributed load per unit volume of cylinder. As the aspect ratio or the size of cylinder decreases, the carried load by aggregates increases with the increment of the distributed load per unit volume in concrete. Accordingly, the utilization of soft aggregates leads to the deterioration of concrete strength.

4. As this experiment is confined to the limited specimens, we did not determine the quantitative relationship of the aspect ratio and size, and concrete strength. Therefore, we need more study in this area in the future.



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 a ggregate 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-----	20
Fig. 16 Failure mechanism of cubic specimen-----	21
Fig. 17 Relationship of Compressive strength and specimen's diameter with H/D=2-----	28
Fig. 18 Strength ratio according to aspect ratio and	

	diameter of cylinder-----	34
Fig. 19	Stress-strain curve of cylinder specimens-----	35
Fig. 20	Load capacity per unit volume according to aspect ratio and diameter of cylinder-----	37
Fig. 21	Comparison of this experimental and Cho's analytical results-----	39
Fig. 22	Strength ratio according to diameter and aspect ratio-----	42



Table Contents

Table 1. Compressive strength ratio according to size of specimen -----	20
Table 2. Correction factor of compressive strength-----	20
Table 3. Summary of specimens-----	26
Table 4. Concrete mixing table-----	27
Table 5. Summary of Test Result-----	29



Photo Contents

Photo 1. Forms of cylindrical specimens for test-----	45
Photo 2. Slump test-----	45
Photo 3. Placing of concrete in forms-----	46
Photo 4. Test of compressive strength of concrete-----	46



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

I. 서 론

1. 연구의 배경

철근콘크리트 구조 설계는 구성 재료의 물리적인 성질의 파악으로부터 시작되어 콘크리트의 응력-변형을 관계를 선정하는 것이 기본적인 사항이 되나, 동일 조건하에서 콘크리트의 배합이 불가능함으로 기존의 연구 결과들을 근거로 응력-변형을 관계를 설정한다. 콘크리트의 강도에 영향을 미치는 요인들은 매우 다양하며, 강도 측정용 시험체만을 고려한다면 공시체의 단면적, 형상비(Aspect ratio) 그리고 콘크리트의 타설 방향 등에 의해 강도는 달리 평가된다. 여기서 형상비는 공시체의 지름(D)에 대한 높이(H)의 비를 나타내며, 형상비(H/D)가 증가함에 따라 콘크리트의 압축강도는 감소하며, 동일한 형상비에 대해 공시체의 단면적이 증가하면 압축강도는 감소하게 된다. 공시체로는 원주 공시체 외에 유럽에서는 각주 공시체를 사용하고 있는 바, 각주 공시체에서는 특히 콘크리트의 타설 방향에 따라 그 강도를 달리한다. 이러한 공시체의 영향을 고려하여 콘크리트의 강도를 결정하기 위한 표준 공시체를 각국에서 규정하고 있다.

국내의 표준 공시체는 지름 15cm, 높이 30cm인 원주 공시체로, 이러한 공시체는 미국, 일본, 프랑스 등에서 채택되고 있으며, 한국공업규격인 KS에서의 규정은 10×20cm의 공시체의 사용을 인정하고 있다. 그러나 표준 공시체와 다른 지름을 갖는 원주 공시체의 압축강도는 표준 공시체의 강도와 차이를 보이며, 이 상관관계를 규정하는 보정 계수가 필요하다. 그러나, 국내에는 아직 이에 대한 연구가 부족하여 이 보정계수는 국외의 연구 자료에 의존하고 있는 실정이다. 특히, 콘크리트 구조물로부터 채취한 코아의 치수 H/D는 표준 공시체의 형상비와 다르므로 콘크리트 강도의 환산에 필요한 보정 계수의 결정에 어려움이 있다. 또한 철근콘크리트 기둥은 그 형상비가 2이상인 경우가 대부분으로, 설계 기준에서는 이러한

형상비를 고려하여 콘크리트가 분담하는 하중에서 보정 계수 0.85의 사용을 규정하고 있다. 그러나 이 값은 설계용 계수로써 실제 실험을 실시한 결과들을 보면 이 계수와 차이를 보이는 것으로 나타났다.

제주도는 지역 여건상 현무암질의 쇄석을 콘크리트용 조골재로 사용하고 있다. 기존의 콘크리트 압축강도 실험결과에 의하면 공시체의 파괴 양상은 골재의 파괴에 기인함을 알 수 있었다. 콘크리트의 파괴 양상으로는 시멘트 페이스트의 파괴, 골재와 시멘트 페이스트와의 표면에서의 부착파괴, 골재의 파괴를 들 수 있다. 일반적으로 경석을 사용할 경우에 시멘트 페이스트 혹은 부착면의 파괴를 일으키나 골재의 파괴는 경량 골재에서 볼 수 있는 파괴 양상이다. 이와 같은 현무암질 골재의 성질은 콘크리트의 강도와 시공성에 크게 영향을 미칠 것으로 판단된다. 특히 고강도 콘크리트에 있어서 골재의 파괴는 예상 압축강도의 저하를 나타낼 수 있을 것이다. 또한 국외에서 제안한 형상비에 따른 보정 계수에 변화도 고려할 필요가 있다. 그러나 기존의 연구들은 일반 골재를 사용한 공시체의 단면적, 형상비의 영향에 국한되어 있는 바, 현무암질의 연석을 사용할 경우에 기존의 연구 결과에 적용의 타당성을 검증할 필요가 있다.

2. 연구의 목적

국내의 표준 공시체는 지름 15cm, 높이 30cm인 원주 공시체이며, KS에서의 규정은 형상비가 2인 $\phi 10 \times 20$ cm의 공시체의 사용을 인정하고 있다. 그러나 형상비 $H/D=2.0$ 로써 표준 공시체와 지름을 달리 취할 경우에 표준 공시체에서 얻은 압축강도와의 상관관계에 대한 연구는 미흡하다. 특히, 철근콘크리트 구조물로부터 콘크리트 강도 실험을 위해 채취한 코아의 압축강도 추정에서 형상비와 코아의 지름이 표준 공시체와 다른 경우에 강도환산을 위해 보정계수를 요한다.

현무암질의 쇄석을 골재로 사용할 경우에 콘크리트 공시체는 때때로 골재가 파괴되는 경우들을 볼 수 있다. 일반적으로 경석을 사용할 경우에 시멘트 페이스트 혹은 부착면의 파괴를 일으키나 골재의 파괴는 경량 골재에서 볼 수 있는 파괴 양상이다. 따라서 기존에 사용하고 있는 콘크리트 강도 추정용 보정 계수들은 보통 골재를 사용한 결과들로써 골재의 파

괴로 콘크리트가 파괴되는 경우는 배제되었다.

형상비가 2보다 작거나 공시체의 지름이 작은 경량골재를 사용한 원주 공시체일 경우에 시험기의 양면에 의해 공시체가 구속되어 골재의 파괴에 의한 콘크리트의 파괴를 예상할 수 있다. 이러한 골재의 파괴는 콘크리트 압축강도의 저하를 유발할 수 있을 것이다. 반면에 동일한 형상비에 대해 체적이 표준 공시체에 비하여 큰 경우에는 골재 파괴보다는 시멘트 모르타르의 미세한 균열에 의한 파괴로 콘크리트 강도의 저하가 예상되며, 이는 일반 골재를 사용한 경우와 유사하다.

따라서 본 연구에서는 이러한 점들을 고려하여 다음을 연구 목적으로 두고 있다.

첫째, 원주 공시체의 지름에 따른 압축 강도와 표준 공시체에서 얻은 압축강도와의 상관관계

둘째, 형상비에 따른 원주 공시체의 압축강도와 표준 공시체에서의 압축강도와의 관계

셋째, 원주 공시체의 형상비와 지름에 따른 공시체의 파괴 양상의 비교

넷째, 보통 골재(강자갈이나 쇄석)를 사용한 기존의 연구 결과들과 비교

3. 연구 방법 및 범위

본 연구는 표준 공시체인 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 의 공시체를 비롯하여 형상비와 원주 공시체의 지름을 변수로 시험체를 제작하여 실험을 실시하였다. 원주 공시체의 형상비는 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0로 변화시켰으며, 지름은 7.5cm, 10.0cm, 15.0cm, 20.0cm를 취하였다. 시험체는 동일 조건에 대해 각 6개씩 총 144개로, 압축강도, 응력-변형률 및 탄성계수를 측정하였다. 실험은 제주대학교 소재의 300tonf용량 만능시험기(Universal Testing Machine)를 사용하여 실시하였으며, 변형률 측정은 변형률 측정 게이지를 부착하여, 이를 데이터 로거(Data Logger)에 의해 재하하중에 따라 측정하였다. 또한, 기존의 보통 골재를 사용한 연구 결과들과 비교를 실시하였다.

또한, 본 연구는 현무암질의 골재 사용으로 기존의 일반 골재를 사용한 공시체의 크기에 따른 실험 결과들과 비교를 실시하여, 이 때의 파괴 양상과 공시체 크기와 콘크리트의 압축강도와와의 관계 등을 고려하여, 기존의 연구 결과의 적용 여부를 연구의 범위로 한다.

4. 기존의 연구 현황

콘크리트 원주 공시체의 크기가 커짐에 따라 압축강도가 감소한다는 사실은 Gonnerman(1925)에 의하여 최초로 실험으로 증명되었다.

Johnson(1962), Blanks와 McNamara(1935)등도 그 크기 효과에 대하여 다양한 실험을 하였다. 그 후, Gyengo(1938)와 Neville(1966)은 정육면체와 직육면체 형태의 공시체에 대한 크기 효과를 실험을 통하여 보였으며, Powers(1956), Kuczynski(1960)도 유사한 실험을 하였다. 그러나 대부분의 이러한 실험들은 물-시멘트비, 양생기간, 배합비, 최대골재의 크기 등의 요인을 동시에 변화시키면서 실험을 실시하였기 때문에 크기 효과에 대한 명확한 관계를 보이지 못하였다.

Weibull(1939), Tucker(1941), Nielson(1954)등은 크기 효과에 대한 이론적인 연구를 행하였으며, 이러한 이론들은 콘크리트의 비균질성에 따른 통계적 해석으로 크기 효과를 설명하였다.

그러나 국내에서는 문 영호(1986), 박 홍기(1987), 조 수연(1987)에 의해 이론적으로 기존의 실험 결과들을 근거로 통계적인 해석을 실시하여 공시체의 크기 효과를 산정하였다. 이외에는 어떠한 실험이나 해석이 이루어지지 않은 바, 대부분이 외국에서 행한 결과에 의존하고 있다. 특히 Gonnerman(1925) 의해 제시한 결과에 의존하고 있다. 또한 지역적인 여건상 제주도에서 골재로 현무암질의 굵은골재를 사용하고 있으나 이러한 골재의 재료적인 성질을 고려하지 않고 기존의 결과에 의존하는 어려움이 있으므로 이에 대한 연구의 필요성이 대두된다.

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_l 과 횡변형률 ϵ_t 는 실험을 통하여 얻은 실측치로 다음 식(2.1)에 의해서 용적변형률 ϵ_v 를 얻을 수 있다.

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

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/cm²에서 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/cm²이상에서는 오히려 역으로 용적이 증대함을 알 수 있다. 콘크리트조직에 메카니즘의 변화 즉, 치명적인

파괴생기기 시작한 것으로 볼 수 있다.

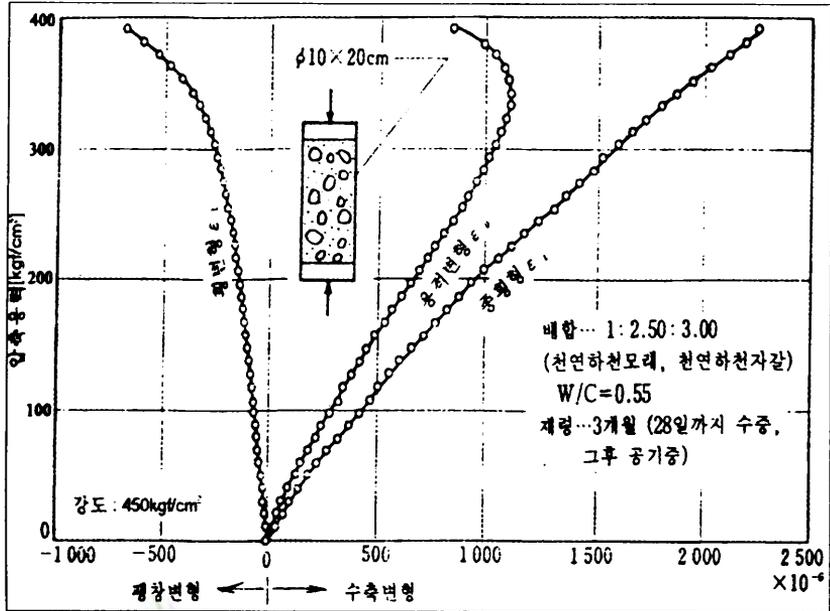


Fig. 1 Stress and strain relationship of concrete

나. 콘크리트의 압축강도와 탄성계수

콘크리트의 압축강도는 일반적으로 재령 28일되는 콘크리트 표준 공시체의 일축방향 압축강도를 말한다. 우리나라의 표준 공시체는 $\phi 15\text{cm} \times 30\text{cm}$ 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.

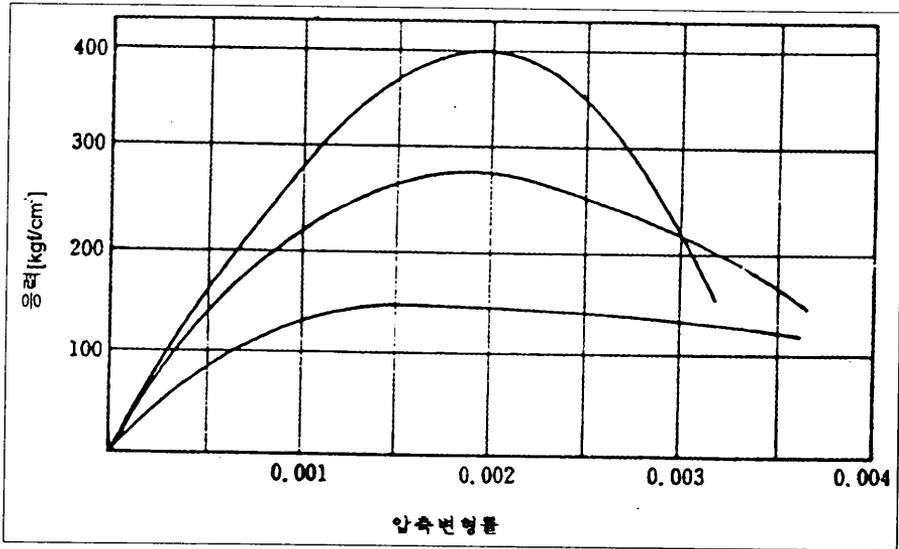


Fig. 2 Stress-strain curve of concrete according to compressive strength

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.

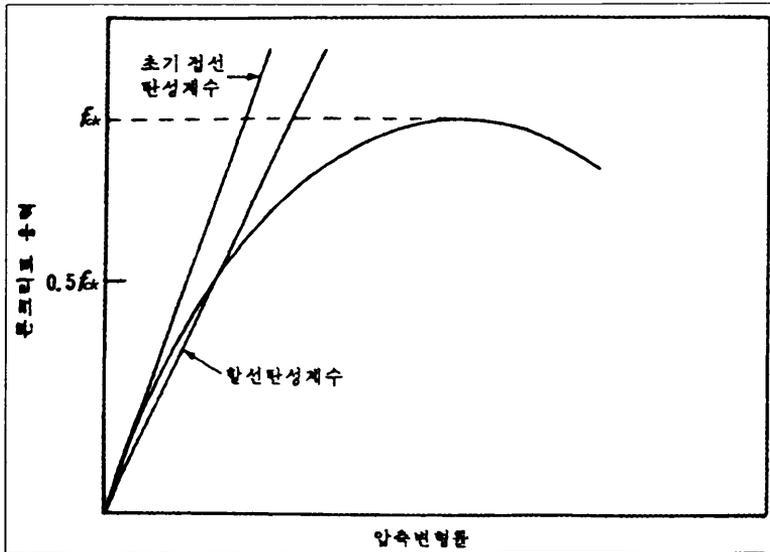


Fig. 3 Tangent modulus and secant modulus

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)로부터

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

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 탄성계수 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)과 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 ψ 를 각각 결정할 수 있다. 이 접선방정식을 사용하여 전단응력은

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

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

사암의 경우 32°

석회암의 경우 36°

로 시멘트량, 물시멘트비에 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.

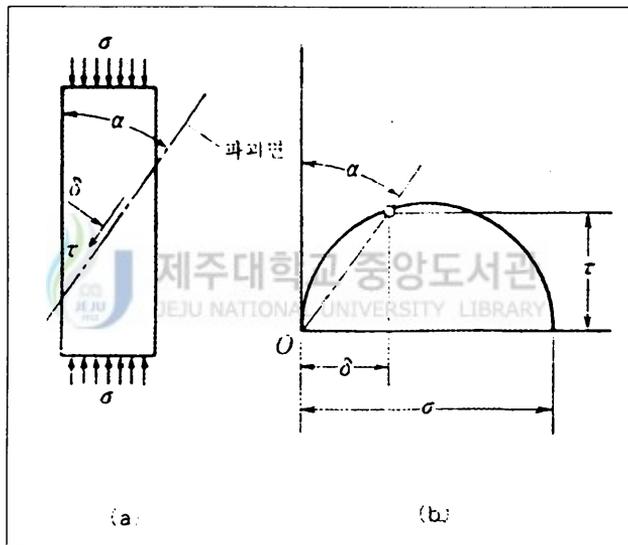


Fig. 4 Normal and shear stress at failure surface

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.

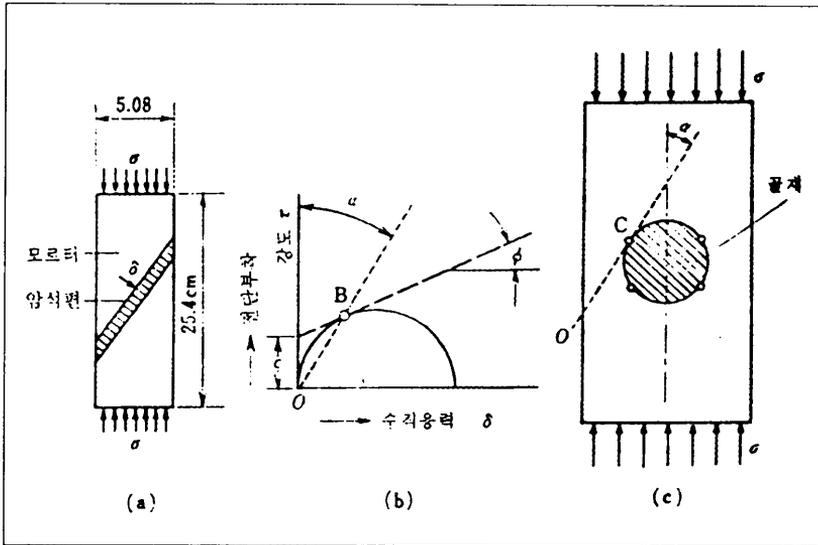


Fig. 5 Taylor-Broms theory on bond crack

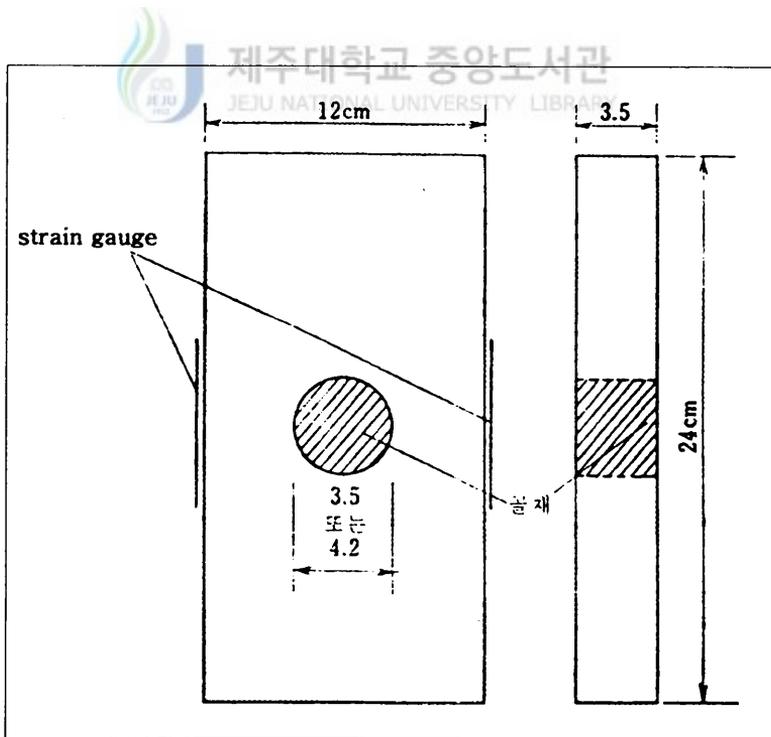


Fig. 6 Specimen to confirm Taylor-Broms theory

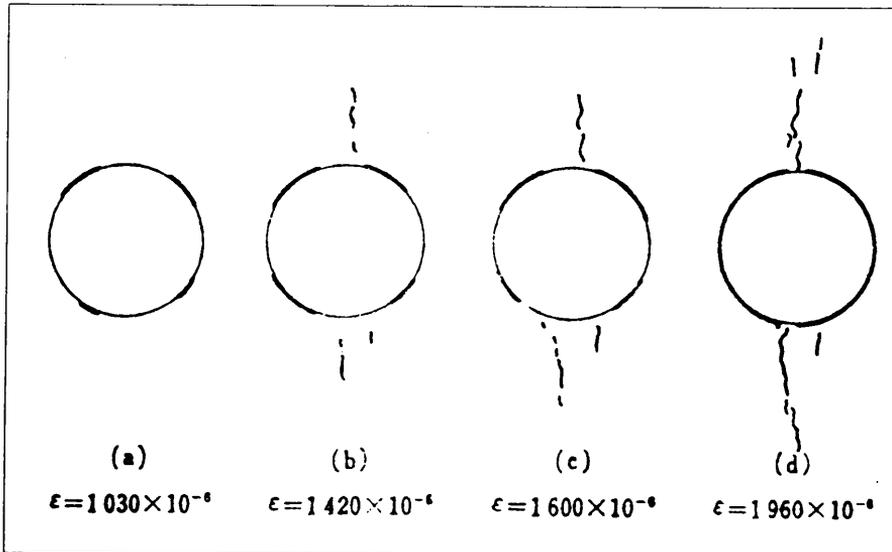


Fig. 7 Occurrence of bond crack using a circular aggregate



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_t' , σ_t'' 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 지시하고 있다. 원형 공동의 지름은 최대 0.99mm로 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 0.04~0.25mm이 된다. 이 수치를 그대로 실제의 현상에 맞출 수는 없으나 양 균열이 근접해 있다는 것은 두 개의 균열이 서로 결합할 수 있음을 의미한다. 실제로 균열을 현미경으로 확대해 보면 도중에서 갈라진 것에서 서로 만나는 것을 볼 수 있다.

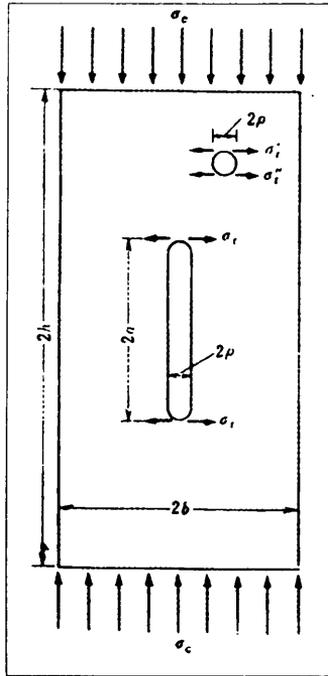


Fig. 8 Model of finite element method for analysis of crack and cement element

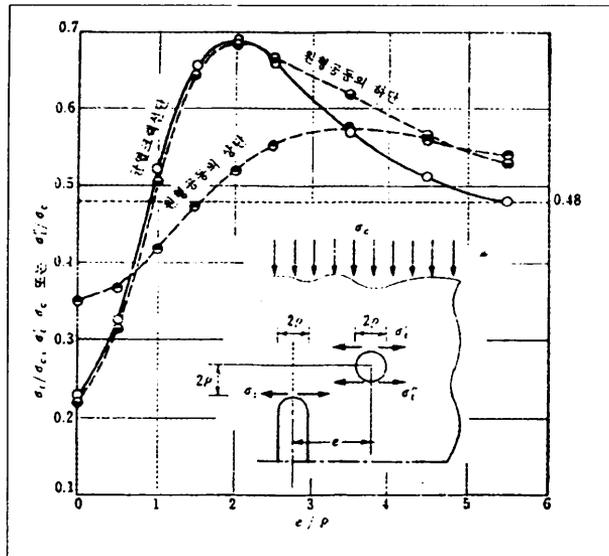


Fig. 9 Variation of tensile stress according to horizontal movement of cement element at the upper 2ρ of crack (Elastic modulus $= 2.1 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$, Poisson's ratio $= 0.2$, $a/h = 0.1$, unconstrained ends)

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.

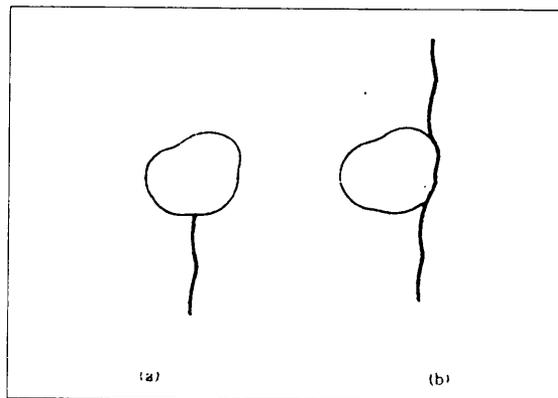


Fig. 10 Development of crack according to the location of coarse aggregate

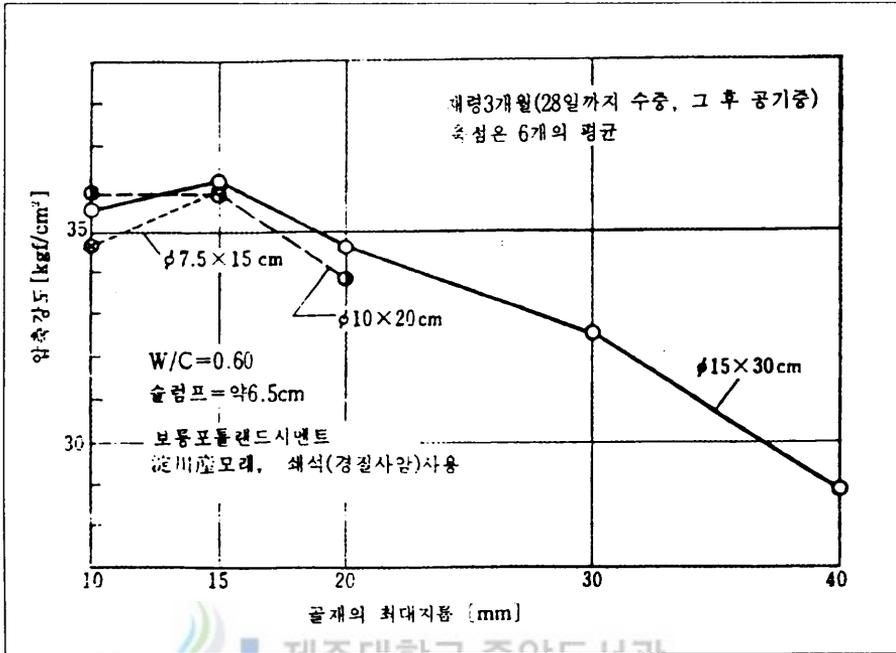


Fig. 11 Relationship of compressive strength and coarse aggregate size

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.

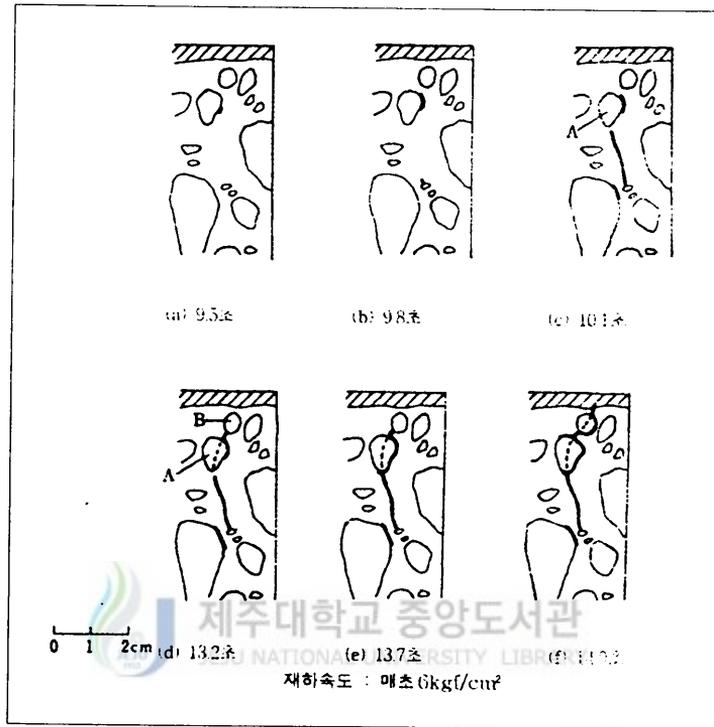


Fig. 12 Development of micro crack

다. 가력방향과 타설방향

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

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

은 골재가 위치할 때는 굵은 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 굵은 골재의 하면에, (b)의 공시체에는 굵은 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.

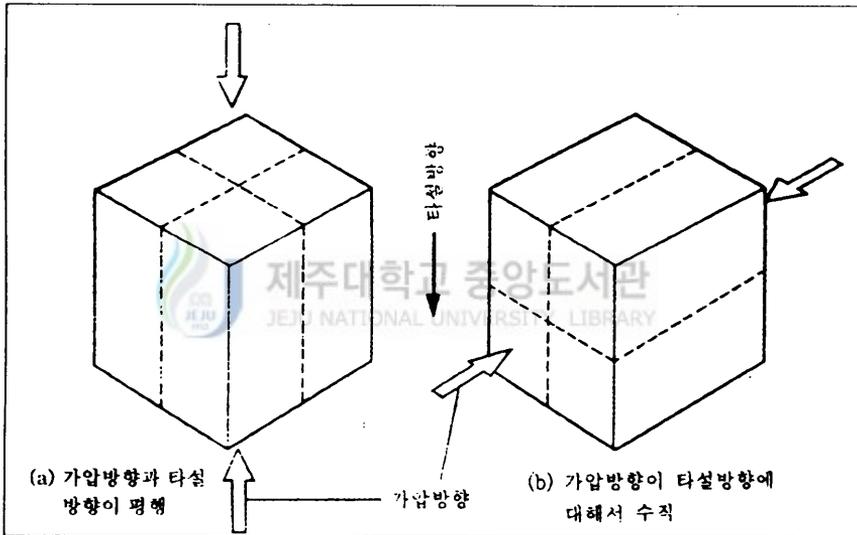


Fig.13 Experimental specimen for examining influence on direction of acting force and placing direction

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.

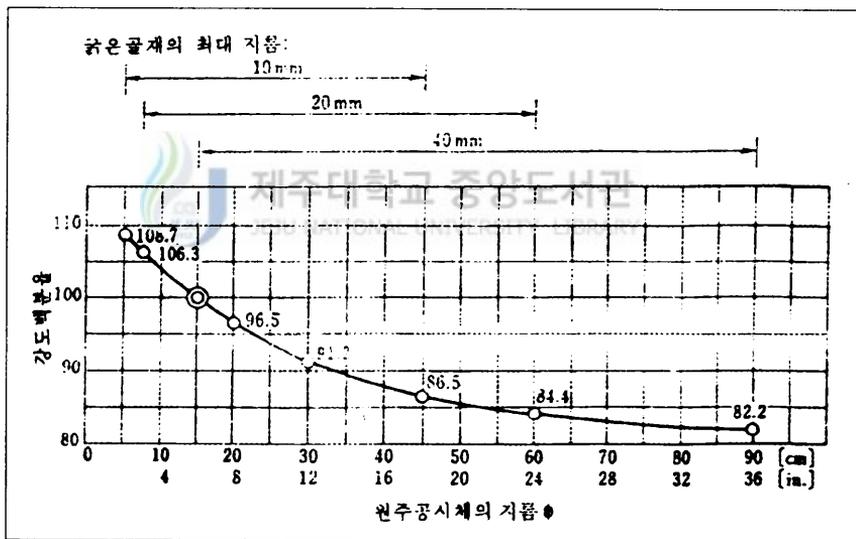


Fig. 14 Relationship of compressive strength and size of specimen

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

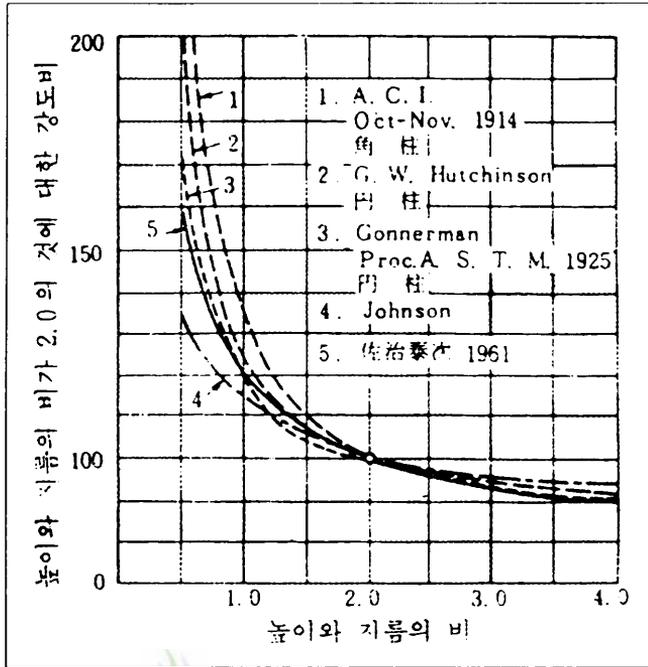


Fig. 15 Relationship of compressive strength and H/D of cylindrical specimen

Table 1. Compressive strength ratio according to size of specimen

재령	원주공시체			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.

마. 입방 공시체

콘크리트 입방 공시체의 파괴는 전단에 의하여 복모양을 보인다. 탄성역학에 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 끝면 근처까지 성장하는 일이 어렵다. Fig.16은 이 모양을 도식적으로 표시한 것이다.

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

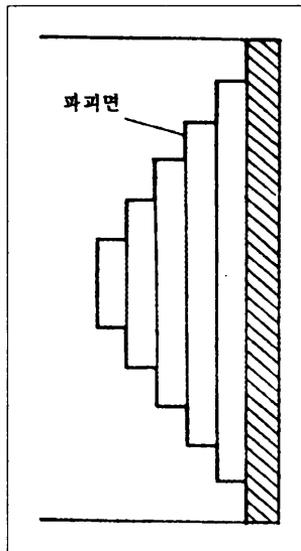


Fig. 16 Failure mechanism of cubic specimen

4. 표준공시체의 압축강도

콘크리트의 압축강도는 콘크리트 재료의 가장 중요한 재료적 특성이나, 그 파괴거동의 특이성으로 인하여 시험용 콘크리트의 시험체의 크기에 따른 그 영향을 달리 한다. 이러한 현상은 콘크리트가 완전한 연속체(Continuum)가 아닌 합성구조체로써, 그 거동은 배합 정도에 따라 크게 달라진다. 특히, 크기에 따라 다른 압축강도는 콘크리트의 기본적 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 이르르게 된다. 즉, 변형에 대한 더 이상의 에너지 흡수 능력의 저하로 파괴가 발생하게 된다.

5. 제주도 현무암 쇄석

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 Olivine 질 현무암과 쇄설물 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.

III. 실험 방법 및 결과

1. 실험개요

가. 시험체 계획 및 형상

실험의 변수로 원주 공시체의 형상비와 공시체의 지름을 고려하여, 각 변수에 대해 각각 6개의 시험체를 제작, 총 144개의 시험체를 제작하였다. 이들 시험체들에 대해 4주 압축강도를 측정하여 편차가 심한 실험 결과를 제외한 3개의 결과를 근거로 압축강도 및 응력-변형률 관계를 산정하였다.

각 시험체의 거푸집으로는 표준 공시체를 제외하고 원형 PVC 파이프를 사용하여 제작하였다. 그러나 상용의 PVC 파이프는 Table3에서 보는 바와 같이 지름에 차이를 나타냄으로 이를 버어니어 캘리포스를 사용하여 정확한 치수를 측정하였다. 또한 PVC 파이프의 길이 방향으로 파이프를 절단하여 시험체의 높이를 맞췄다. 콘크리트의 타설후 거푸집의 제거를 위해 특별한 사전의 방법없이 절단기에 의해 시험체의 측면을 절단하는 방법을 사용하였다.

나. 콘크리트

사용한 콘크리트는 레미콘 제작사인 (주)세기산업으로부터 운반된 콘크리트를 사용하였으며 그 배합표는 Table4와 같다. 콘크리트의 배합에 있어서 소정의 시공연도를 얻기위하여 AE감수제를 사용하였음을 볼 수 있다. 레미콘의 사용은 동일한 조건하에서 실험이 이루어질 수 있기 때문이다. 슬럼프 실험은 콘크리트 타설전에 실시하여 약 18cm의 슬럼프치를

었으며, 콘크리트를 거푸집에 타설후에 붕상 진동기에 의해 충분히 다짐을 행하였다.

사용 골재는 지역여건상 잔골재는 조립율이 2.80, 비중이 2.58인 영산강 소재의 강모래를, 굵은 골재는 제주도 애월의 석산에서 채취한 조립율 6.50, 비중 2.68로 최대 치수가 25mm인 쇄석을 각각 사용하였다. AE 감수제는 ECONEX 제품을 사용하였다. 또한 물시멘트비는 약 57%, 잔골재율은 46%를 사용하였다.

콘크리트 타설후 24시간후에 시멘트와 물을 사용하여 시험체의 가력면에 캡핑하였으며, 3일후에 거푸집을 제거하여 대기중에 양생을 하였다. 모든 조건을 동일하게 하기위하여 수중양생 등을 취하지 않았다.

2. 실험 방법 및 결과

가. 압축강도 실험 및 결과

콘크리트 타설후 28일 압축강도를 측정하였다. 압축강도 실험은 Photo2에서 보는 바와 같이 제주대학교 소재 300tonf 용량의 만능시험기(Universal Testing Machine)를 사용하였으며, 실험 결과 가장 근접한 시험체 3개의 실험 결과를 데이터로 사용하였다. 편차가 심한 실험의 결과는 시험체 제작시에 원주면이 매끄럽게 절단이 되지 않아 편심의 작용으로 강도가 타 시험체보다 현저히 작게 나왔기 때문이다.

실험 결과를 Table 5에 요약하였으며, 1개의 시험체에는 스트레인 게이지를 부착하여 이를 데이터 로거(Data Logger)에 연결하여 재하동안 변형률을 측정하여, 할선탄성계수로 콘크리트의 탄성계수를 산정하였다. 또한 공시체의 단위 체적당 분담하중을 산정하였다.

Table 3. Summary of specimens

시험체(지름×높이) 단위 : mm	갯수	실제지름 (mm)
75×37.5	6	84.2
75×75	6	
75×112.5	6	
75×150	6	
75×187.5	6	
75×225	6	
75×300	6	
100×50	6	106.45
100×100	6	
100×150	6	
100×200	6	
100×250	6	
100×300	6	
100×400	6	
150×75	6	154.1
150×150	6	
150×225	6	
150×300	6	
150×375	6	
150×450	6	
200×100	6	203.1
200×200	6	
200×300	6	
200×400	6	

Table 4. Concrete mixing table

단위 : kgf/m³

시멘트	물	모래	자갈	혼화제
333	190	818	998	0.83

Fig.17은 형상비가 2인 시험체의 지름에 따른 콘크리트의 압축강도를 나타내고 있다. 이 그림에서 표준 공시체보다 지름이 작거나 큰 경우에 콘크리트의 압축강도가 작게 나타났다. 이 결과는 기존의 보통 골재를 사용한 표준 형상비의 콘크리트일 경우에 지름의 감소는 콘크리트 강도의 증가를 나타낸다는 결과와 상반된 결과를 보인다. 그러나 표준 형상비보다 큰 경우에는 보통 골재의 콘크리트와 유사한 경향을 보였다.

Fig.18은 형상비와 콘크리트의 압축강도와의 관계를 나타낸다. 이 그림에서도 알 수 있는 바와 같이 형상비가 표준 형상비인 2보다 작거나 클 경우에 표준 공시체보다 작은 압축강도를 보인다. 이 역시도 공시체의 지름이 작은 경우에 콘크리트의 압축강도가 증가한다는 기존의 연구 결과와는 상반되는 결과를 보인다. 단, 공시체의 지름이 20cm인 경우에는 기존의 결과와 유사한 경향을 보인다. 또한, 동일 형상비에서 원주 공시체의 지름이 표준 공시체에 비하여 작거나 클 경우에 압축강도가 저하됨을 볼 수 있다.

이와 같이 기존의 연구 결과와 상반되는 결과는 콘크리트의 파괴 양상으로부터 유추할 수 있다. 즉, 보통 콘크리트의 파괴 양상은 시멘트 모르타르나 골재와 모르타르의 부착면의 파괴가 지배적이나 골재의 파괴에 의한 콘크리트의 파괴는 주로 경량 콘크리트의 파괴 양상이다. 따라서 이 상반된 결과는 사용 골재가 경량 골재와 유사한 성질을 지니고 있음을 알 수 있다. 결과적으로 제주도산 현무암질의 쉐석 골재가 연암과 유사한 성질을 지니고 있음을 의미한다.

지름이 작은 원주 공시체일 경우에 보통 콘크리트와 비교하여 압축강도 저하는 원주 공시체의 단위 부피당 분담하중으로부터 예측할 수 있다. 지름이 작은 원주 공시체에서는 단위 부피당 분담하중이 증가하여 밀실한 콘크리트내에 경질의 골재일 경우에는 충분히 하중을 분담할 수 있으나, 연질의 골재일 경우에는 오히려 골재의 파괴를 조장하게 될 것이다. 반면에, 지름이 큰 원주 공시체에서는 단위 부피당 하중의 분담정도는 감소

하나 콘크리트 내부의 에너지 흡수 능력의 저하로 골재의 파괴보다는 일반 골재의 경우와 동일한 파괴 양상 즉, 보통 콘크리트와 유사한 압축강도를 발휘하게 된다.

나. 파괴양상

콘크리트 파괴 양상은 골재와 시멘트 페이스트와의 관계로부터 ① 시멘트 페이스트의 파괴, ② 골재 표면에서의 부착파괴, ③ 골재의 파괴를 들 수 있다. 일반적으로 깎자갈이나 강자갈은 ①과 ②의 파괴 형태를, 경량골재에서는 ③과 같은 파괴 양상을 보인다.

실험 결과, 공시체의 크기가 작은 경우에는 골재가 파괴되는 양상을 보였으나, 크기가 클 경우에는 ①과 ②의 파괴 형태를 보였다. 따라서, 공시체의 크기가 작은 경우에 골재가 파괴된다함은 사용 골재가 경량 골재에 속한다고 볼 수 있다. 전절에서 언급한 바와 같이 공시체의 크기가 작은 경우에 압축강도가 감소한다함은 골재가 약하여 공시체의 압축내력이 저하되었음을 유추할 수 있다. 반면에, 표준 공시체보다 큰 지름의 원주 공시체에서는 일반 콘크리트와 동일한 파괴 양상 ①과 ②의 양상을 보였다. 이는 표준 공시체보다 큰 시험체에서는 내부 에너지의 흡수 능력의 저하에 의한 파괴를 의미한다.

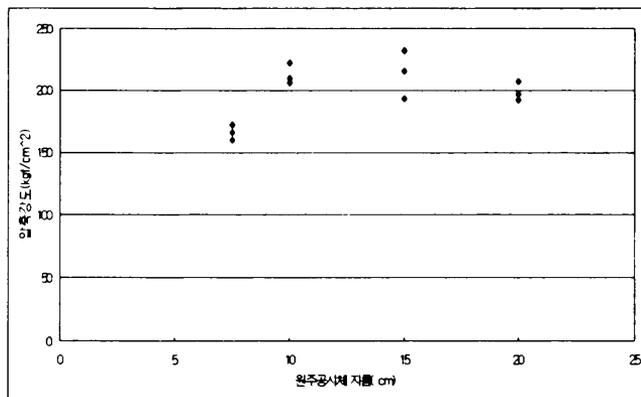


Fig. 17 Relationship of Compressive strength and specimen's diameter with H/D=2

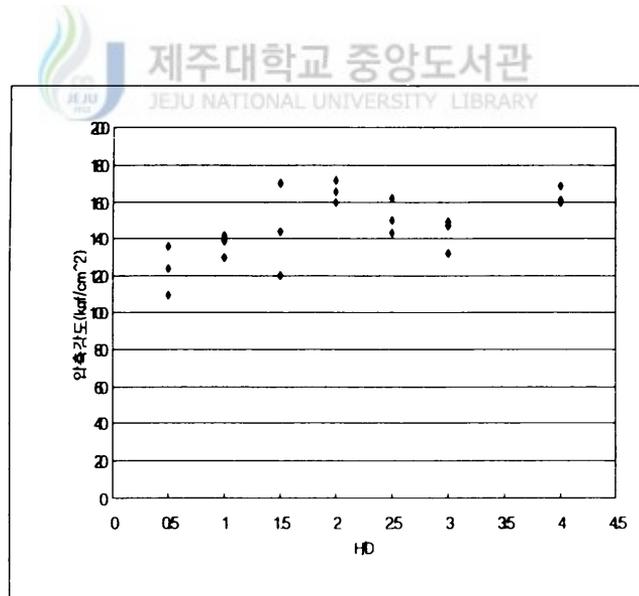
Table 5. Summary of Test Result

시험체	압축강도 (kgf/cm ²)	단위부피당 강도(kgf/cm ³)	탄성계수 (×10 ⁵ kgf/cm ²)
φ75×37.5	110	29.3	1.60
	124	33.1	
	136	36.3	
평균	123.3	32.9	
φ75×75	142	18.9	1.74
	130	17.3	
	139	18.5	
평균	137	18.2	
φ75×112.5	170	15.1	1.78
	144	12.8	
	120	10.7	
평균	144.7	12.9	
φ75×150	172	11.5	1.82
	160	10.7	
	166	11.1	
평균	166	11.1	
φ75×187.5	162	8.6	1.73
	150	8.0	
	143	7.6	
평균	151.7	8.1	
φ75×225	149	6.6	1.77
	147	6.5	
	132	5.9	
평균	142.7	6.3	
φ75×300	160	5.3	1.77
	169	5.6	
	161	5.4	
평균	163.3	5.4	

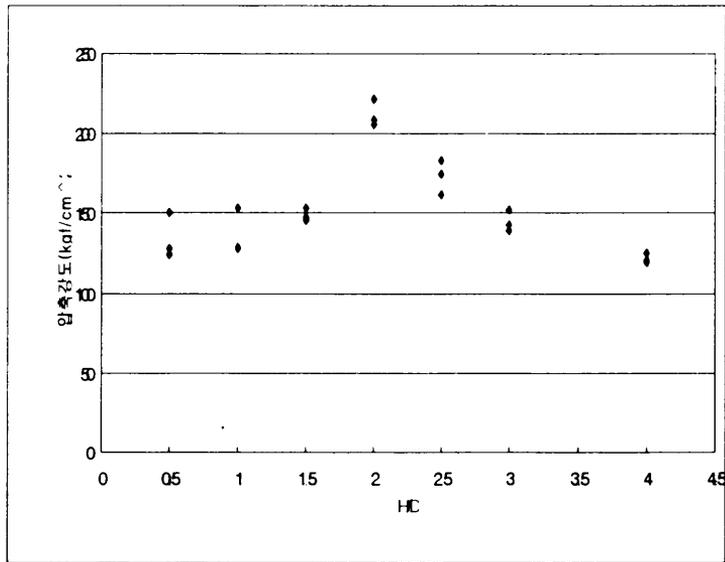
시험체	압축강도 (kgf/cm ²)	단위부피당 강도(kgf/cm ³)	탄성계수 (×10 ⁵ kgf/cm ²)
φ100×50	128	25.6	1.53
	124	24.8	
	150	30	
평균	134	26.8	
φ100×100	129	12.9	1.79
	128	12.8	
	153	15.3	
평균	136.7	13.7	
φ100×150	148	9.9	1.72
	146	9.7	
	153	10.2	
평균	149	9.9	
φ100×200	206	10.3	2.04
	209	10.4	
	222	11.1	
평균	212.3	10.6	
φ100×250	175	7.0	1.86
	162	6.5	
	183	7.3	
평균	173.3	6.9	
φ100×300	152	5.1	1.79
	139	4.6	
	143	4.8	
평균	144.7	4.8	
φ100×400	120	3.0	1.54
	119	3.0	
	125	3.1	
평균	121.3	3.0	

시험체	압축강도 (kgf/cm ²)	단위부피당 강도(kgf/cm ³)	탄성계수 (×10 ⁵ kgf/cm ²)
φ150×75	207	12.4	2.13
	252	14.2	
	222	13.6	
평균	227	13.4	
φ150×150	215	12.54	2.13
	193	12.0	
	231	11.85	
평균	213	12.13	
φ150×225	216	11.47	1.96
	201	10.67	
	210	11.07	
평균	209	11.07	
φ150×300	197	10.3	1.95
	212	10.45	
	205	11.1	
평균	204.7	10.62	
φ150×375	161	8.76	1.84
	185	8.16	
	192	8.04	
평균	179.3	8.32	
φ150×450	167	6.57	1.68
	162	7.07	
	155	6.83	
평균	161.3	6.83	
φ200×100	236	23.6	2.08
	215	21.5	
	230	23.0	
평균	227	22.7	

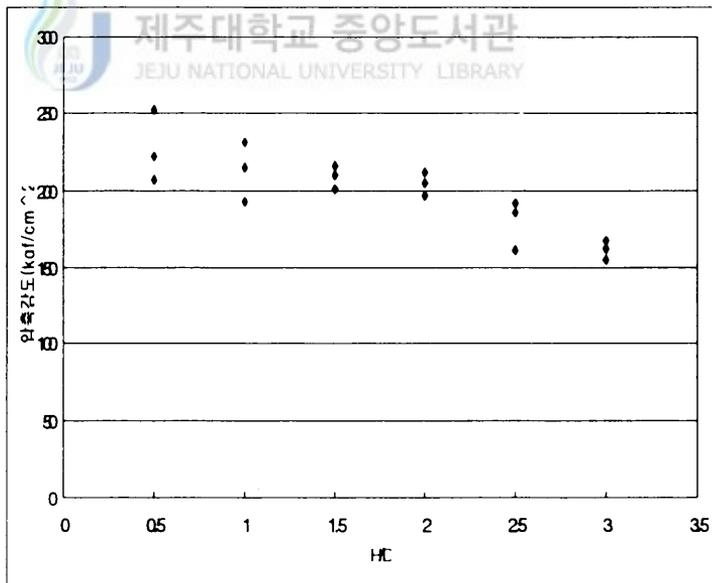
시험체	압축강도 (kgf/cm ²)	단위부피당 강도(kgf/cm ³)	탄성계수 (×10 ⁵ kgf/cm ²)
φ200×200	208	10.4	1.92
	198	9.9	
	192	9.6	
평균	199.3	9.97	
φ200×300	205	6.83	1.90
	195	6.5	
	191	6.37	
평균	197	6.57	
φ200×400	207	5.2	1.96
	192	4.8	
	197	4.9	
평균	198.7	5.0	



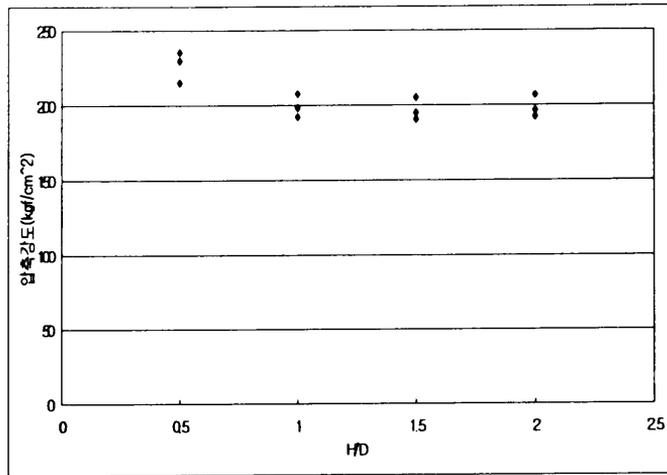
(a) D=7.5cm specimens



(b) D=10.0cm specimens

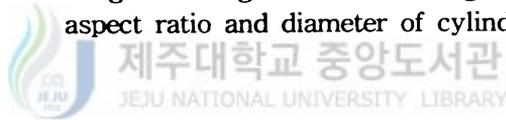


(c) D=15.0cm specimens



(d) D=20.0cm specimens

Fig.18 Strength ratio according to aspect ratio and diameter of cylinder



다. 콘크리트의 응력-변형률 관계

Fig.19는 각 시험체의 응력-변형률 관계를 보인다. 이 그림과 Table5에서 보는 바와 같이 콘크리트의 탄성계수는 공시체의 크기가 작을 경우에 감소되며, 최대 압축강도시에 변형률 역시 감소됨을 볼 수 있다. 단, 각 시험체의 최대 압축강도시에 변형률 이후에 콘크리트가 파괴되는 동안의 변형률은 부착된 스트레인 게이지에 의해 적절하게 측정되지 못하여 인성계수(Rupture Modulus)의 측정이 어려웠다.

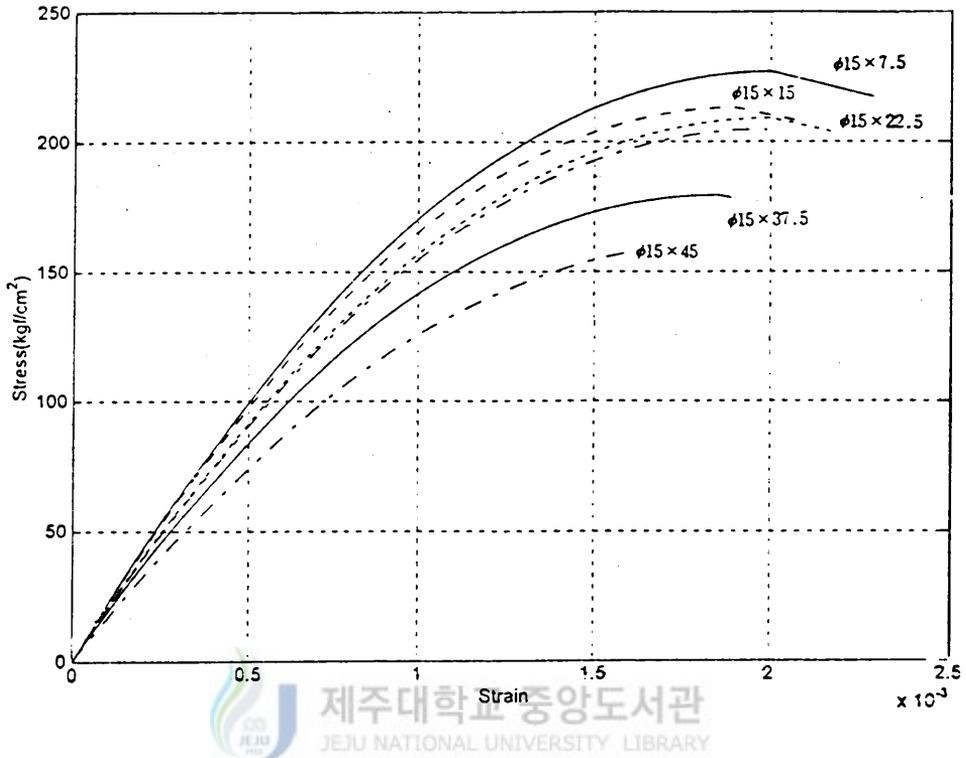
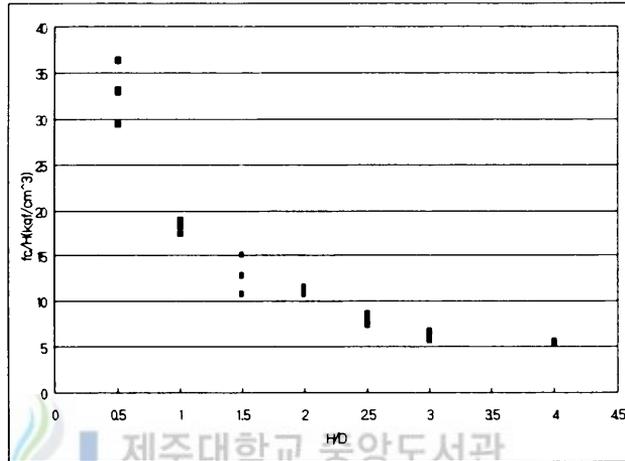


Fig.19 Stress-strain curve of cylinder specimens

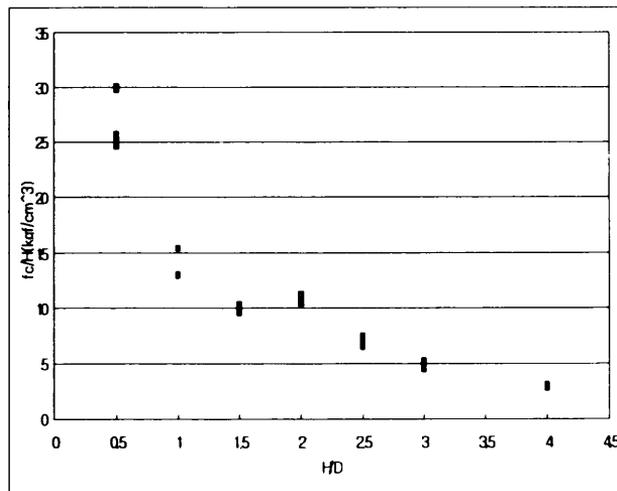
라. 단위체적당 분담하중

일반적으로 콘크리트내에 약65%정도를 골재가 차지한다고 본다면 골재의 강도와 콘크리트의 파괴를 관계지어 생각할 수 있을 것이다. Fig.20은 시험체의 단위 체적당 분담하중을 나타낸다. 이 그림에서 보는 바와 같이 공시체의 전체 체적이 증가함에 따라 단위 체적당 분담하중이 감소되며, 표준 공시체보다 작은 지름의 시험체나 형상비가 작은 시험체에서는 단위 체적당 분담하는 하중이 증가됨을 알 수 있다. 이로부터 지름이나 형상비가 작은 시험체에서는 골재가 분담하는 하중이 증가됨을 유추할 수 있다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 본 연구에 사용된 골재는 이와 같은 하중을 분담하지 못하여 파괴를 일으킨 것으로 판단되며, 따라서 보통 콘크리트와 상이한 결과를 얻었다.

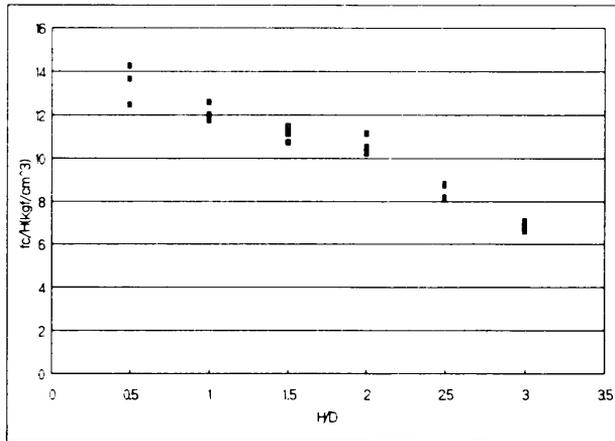
반면에 지름이 크거나 형상비가 큰 경우에 단위 체적당 분담하중은 감소하고 따라서 골재가 분담하는 하중이 감소되어 골재가 연질이더라도 골재에 의한 파괴를 일으키지 않는다. 이와 같은 시험체에서는 내부의 변형 에너지의 발산에 의해 파괴를 일으키게 되며 보통 콘크리트와 유사하게 파괴가 발생하게 될 것이다.



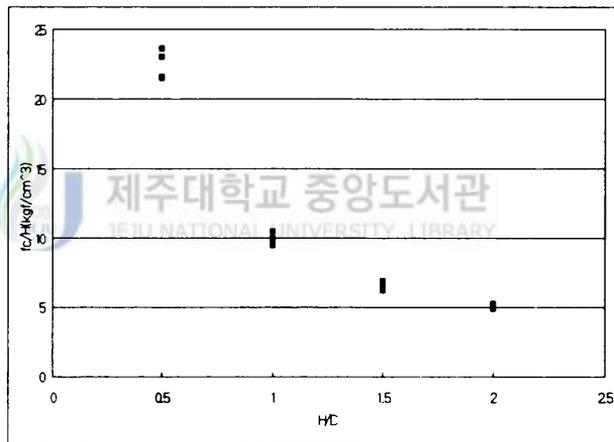
(a) D=7.5cm specimens



(b) D=10.0cm specimens



(c) D=15.0cm specimens



(d) D=20.0cm specimens

Fig.20 Load capacity per unit volume according to aspect ratio and diameter of cylinder

IV. 실험 결과의 분석 및 고찰

1. 실험 결과와 이론 해석 결과와의 비교

콘크리트는 합성재료로써 공시체의 압축강도가 가장 기본적인 재료 특성이 된다. 따라서 압축강도의 값이 공시체나 구조물의 크기에 따라 달라진다면 콘크리트의 재료적인 특성이라 보기에는 어려운 점이 있다.

콘크리트 재료의 파괴는 주로 균열에 의하며 파괴 거동을 강도에 의한 탄소성이론으로 해석에는 어려운 점이 있다. 따라서 콘크리트의 역학적 해석을 위해서는 실제로 콘크리트의 파괴 메카니즘을 설명할 수 있는 이론을 근거로 할 수 있다. 조수연(1987)은 총 462개의 기존 실험결과들을 사용하여 회귀분석을 실시한 결과, 다음과 같은 원주 공시체의 크기를 고려한 모델식을 제안하였다.

$$f_c = \left[\frac{0.865}{\sqrt{1+0.5D(H/D-1)}} + 0.7 \right] f_{ck} \quad (4.1)$$

d : 공시체의 지름(cm)

h : 공시체의 높이(cm)

f_{ck} : $\phi 15 \times 30$ cm 공시체의 4주 압축강도(kgf/cm²)

이 식(4.1)에서는 표준 공시체의 압축강도를 근거로 형상비 및 지름에 따른 압축강도를 나타내고 있다. 동일한 지름의 공시체에 대해 형상비가 1보다 작은 경우에는 강도의 추적이 어려움을 알 수 있다. 또한 이 식으로부터 형상비가 1보다 크고 표준 형상비보다 작은 경우에 콘크리트의 강도를 과대 평가하고 있다. 이는 본 실험의 결과와 상이하며 이는 앞서 언급한 바와 같이 연질의 골재를 사용한 결과이기 때문이다. 결과적으로 제

주도산 현무암질의 골재를 타지역의 보통 골재와 동일하게 고려할 수 없음을 의미한다. Fig.21은 조 수연에 의한 해석 결과와 본 실험의 결과를 비교하였다. 이 그림에서 H/D=2.0인 시험체에 대해 지름이 작아짐에 따라 강도가 역으로 진행됨을 볼 수 있다. 즉, 사용 골재가 콘크리트의 강도에 크게 영향을 미침을 볼 수 있다.

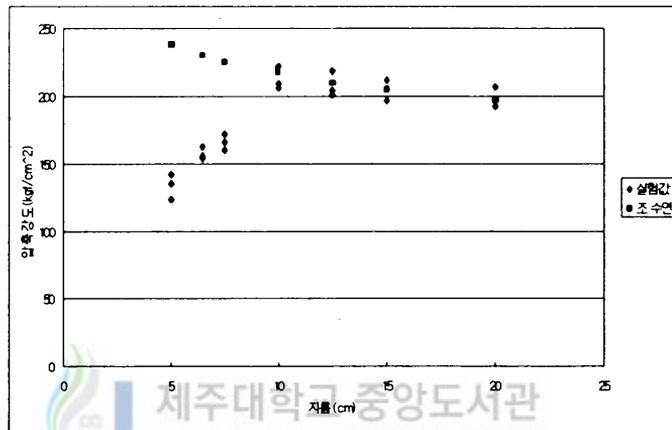


Fig.21 Comparison of this experimental and Cho's analytical results

2. 기존의 실험 결과와의 비교

지름과 형상비를 변수로 기존에 행해진 실험 결과와 본 실험의 결과를 비교하였다. Fig.22는 원주 공시체의 지름이 각각 15cm, 7.5cm, 10cm인 시험체에 대해 형상비가 0.5~4.0 범위내에서 표준 공시체의 4주 압축강도와의 강도비를 나타낸다. 이 그림에서도 본 실험의 결과가 형상비가 작은 경우에 오히려 강도의 저하를 볼 수 있다.

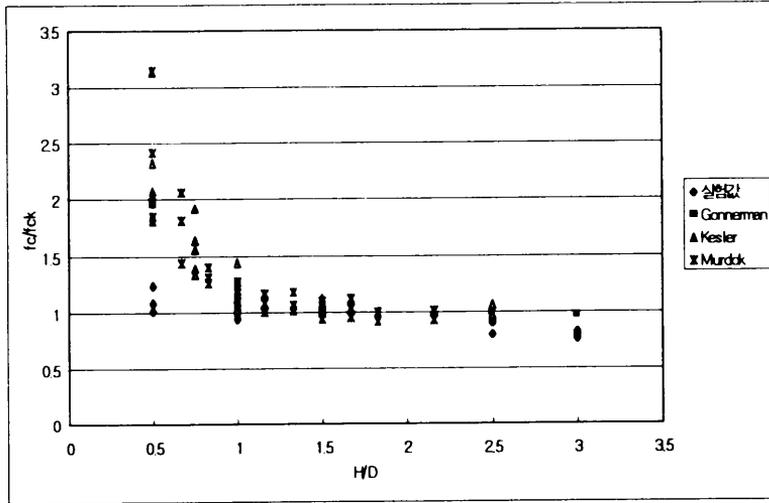
3. 실험 결과의 고찰

본 연구는 표준 공시체와 다른 지름이나 형상이 콘크리트 강도에 미치는 영향을 파악하고자 실시되었다. 이와 같은 연구는 국내에 거의 전무한

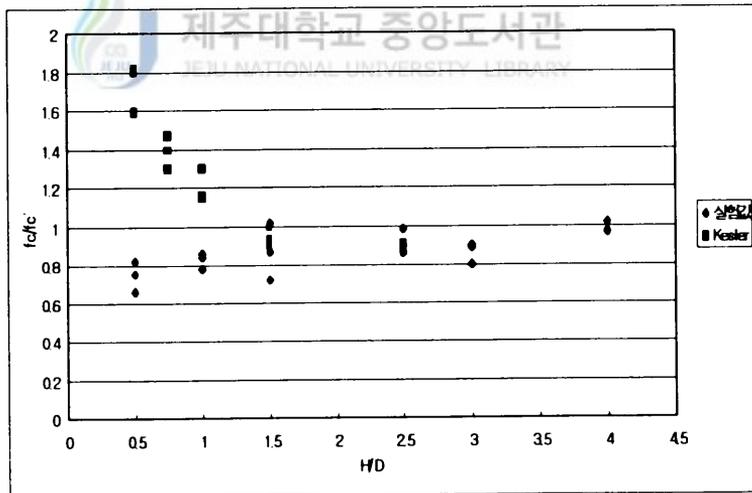
상태로 국외에서 행해진 연구 결과에 의존하고 있는 실정으로, 국외에서 사용하는 재료와 동일한 성질일 경우에는 전적으로 국외의 결과를 사용하여도 무방할 것이다. 그러나 국외와 비교하여 사용 재료가 동일하지 않는다는 가정하에서 국내의 재료를 사용한 결과들을 요하게 될 것이다. 특히, 제주도는 다른 지역과는 달리 현무암질의 골재를 사용하는 바, 국외와는 다른 결과가 예상되어 본 연구가 행해졌다.

실험 결과로 사용 골재가 경량 골재와 유사하므로 기존의 결과와 상반되는 결과를 얻었다. 즉, 지름이나 형상비가 표준 공시체와 비교하여 작을 경우에 오히려 강도의 저하를 볼 수 있었다. 이는 사용 골재가 약하여 골재의 파괴에 의해 공시체가 파괴되었기 때문이다. 따라서 이와 같은 파괴 양상에 대해 골재의 최대 치수를 줄여 단위 체적당 시멘트 페이스트의 체적을 증가시켜 최소한 골재의 파괴를 줄이는 방법을 고려할 수 있을 것이다.

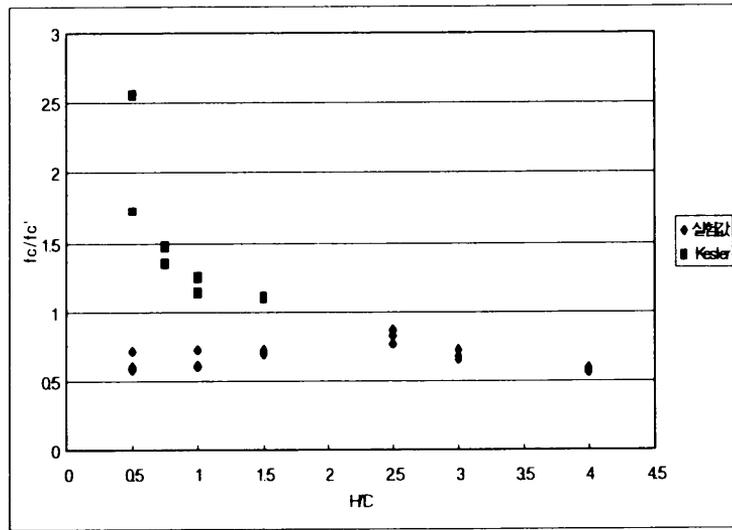
또한 철근콘크리트 구조물에서 코아 콘크리트의 강도 추적에서도 형상비에 따른 계수의 조정을 요하게 된다. 즉, 코아 콘크리트의 강도 추적에서 재령에 대한 계수와 형상비에 대한 계수를 요하나, 형상비에 따른 계수는 기존에 사용하고 있는 계수와 차이를 나타내게 될 것이다. 기존의 형상에 따른 계수는 지름이 작거나 형상비가 작은 경우에 콘크리트 강도를 과대 평가하여 4주 압축강도를 얻기위하여 1보다 작은 계수를 사용하나, 본 실험에 의하면 오히려 과소 평가함으로 1보다 큰 계수를 사용하는 것이 적절하리라 사료된다.



(a) $D=15.0\text{cm}$ 일 경우



(b) $D=7.5\text{cm}$ 일 경우



(c) D=10.0cm일 경우
 제주대학교 중앙도서관
 JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig.22 Strength ratio according to diameter and aspect ratio

V. 결 론

본 연구는 표준 공시체와 형상이 다른 지름과 형상비의 콘크리트 시험체의 강도와 표준 공시체의 압축강도와의 관계를 설정하기 위해 실시되었다. 이 관계는 코아 콘크리트의 강도 추적이나 철근콘크리트 기둥에서 콘크리트가 분담하는 하중을 산정하는데 필요한 자료가 된다. 특히, 제주도는 지역적으로 현무암질의 골재를 사용하고 있는 바, 기존 자료의 적정 여부를 검토할 수 있었으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 형상비가 2.0이고 표준 공시체보다 지름이 작아질 경우에 콘크리트의 압축강도는 감소한다. 지름이 작아질 경우에 콘크리트의 강도는 증가한다는 기존의 연구 결과와 상이한 결과를 나타냈다. 반면에 지름이 클 경우에는 기존의 결과와 유사한 결과를 나타냈다.

(2) 동일한 지름의 원주 공시체에서 형상비가 작아짐에 따라 강도는 기존의 결과와는 반대로 감소하였다. 반면에 형상비가 2보다 클 경우에는 기존의 결과와 유사한 경향을 보였다.

(3) 기존의 연구 결과와 상이한 결과는 주로 사용 골재가 연질의 성질을 지니고 있는 것으로 판단된다. 즉, 골재는 콘크리트중 약65%정도를 차지 하고 있는 바, 원주 공시체의 체적이 감소되어 단위 체적당 분담하중이 증가하면 골재가 분담하는 하중이 증가하게 될 것이다. 따라서 골재가 약하면 골재에 의해 파괴되는 경량 콘크리트와 유사한 파괴를 일으키며, 경질의 골재를 사용한 콘크리트와 비교하여 강도의 저하를 일으키게 된다. 반면에 표준 공시체와 비교하여 지름이 크거나 형상비가 클 경우에는 단위 체적당 분담하는 하중이 감소하나 내부의 변형에너지의 발산에 의해 파괴되므로 기존의 콘크리트와 유사한 파괴 양상을 보이게 될 것이다.

(4) 코아 콘크리트의 압축 강도 추적 과정에서 형상비에 대한 계수를 고려하고 있으나, 실험 결과에 의하면 형상에 따른 계수를 사용한다는 것은 부적절한 것으로 나타났다.

본 연구에서는 단지 144개의 시험체에 의한 실험 결과로 지름과 형상비에 대한 상관관계를 수식으로 제안할 수 없었으며, 따라서 이에 대한 보다 많은 연구의 필요성이 있다. 특히, 코아 콘크리트의 압축강도 추정에서 형상에 따른 보정계수는 타지방에서 사용하는 것들과는 달리 평가될 필요가 있으므로 이에대한 비교 연구의 필요성이 있으며 또한 현무암질의 골재를 고려한다면 콘크리트의 고강도화에 어려움이 예상되므로 이에 대한 연구의 필요성이 있다.



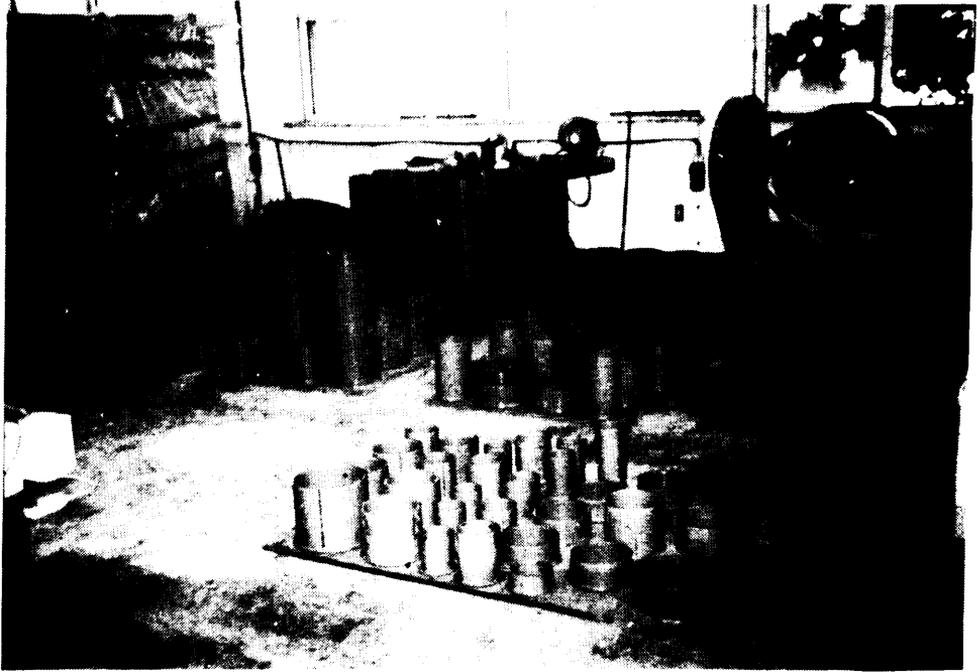


Photo 1. Forms of cylindrical specimens for test



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



Photo 2. Slump test

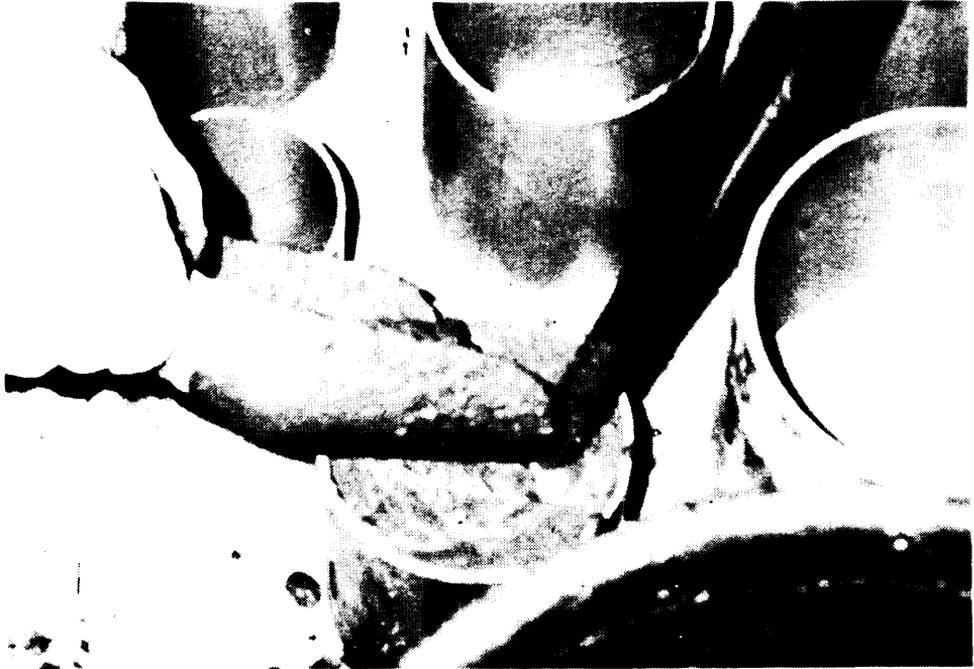


Photo 3. Placing of concrete in forms

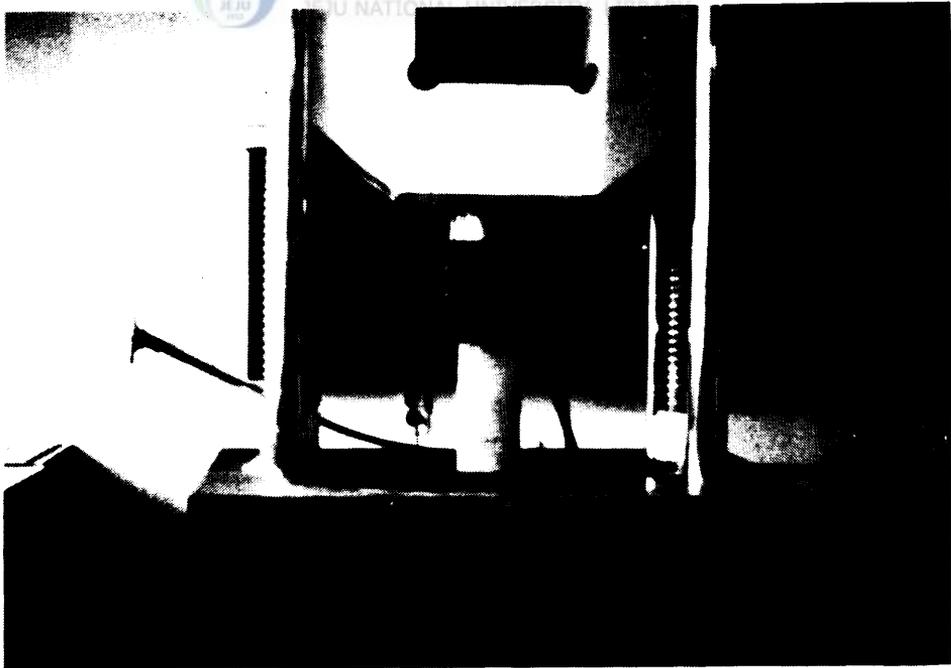


Photo 4. Test of compressive strength of concrete

참고문헌

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

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

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

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

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

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

Nielson, A.M., 1954, "Effect of Various Factors on the Flexural Strength of Concrete Test Beams", Magazine of Concrete Research, Vol.15, pp.105-114.

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

Tucker, J., 1941, "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, pp.1072-1088.

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

건설부, 1995년, “건설부 제정 건축공사 표준 시방서”, 대한건축학회.

고봉수, 김광식의 2인, 1999년 3월, “원주공시체의 크기가 콘크리트 강도에 미치는 영향”, 대한건축학회 논문 심사중.

吉本 彰 著, 姜 昶求 譯, 1995, “ 콘크리트의 變形과 破壞”, 圓技術.

김무한 외4인, 1997년 5월, “ 고유동 콘크리트의 제조시스템 및 개발에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회 논문집, 제13권 제5호, pp. 279-288.

김무한, 1982년, “구조재료실험방법론”, 학문사.

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

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

대한건축학회, 1977년, “철근콘크리트구조계산규준 및 해설”, 창문사.

문영호, 1986년, “파괴역학에 의한 콘크리트의 압축강도에 대한 Size Effect 연구”, 한국과학기술원 토목공학과.

박흥기, 1987년, “초기 균열이 없는 콘크리트 구조물의 크기에 따른 응력 감소 효과에 관한 연구”, 한국과학기술원 토목공학과.

신종순, 1980년, “철근콘크리트설계”, 청문각.

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

일본건축학회, 1984년, “건축공사표준시방서·동해설”, 丸善.

정현수, 1987년 8월, “고강도 콘크리트 구조”, 태림문화사.

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

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

진현규외3인, 1999년 2월, “혼화재를 혼입한 고유동 콘크리트의 유동성 및 강도특성에 실험적연구”, 대한건축학회논문집 제15권 제2호, pp.117-124.

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

한천구 외3인, 1995년, “부순모래 치환 잔골재를 이용한 콘크리트의 배합 설계에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회 논문집, 제11권 제10호, pp. 389-396,

감 사 의 글

본 논문이 완성되기까지 아낌없는 격려와 정성으로 지도하여 주신 은희
창교수님께 깊은 감사를 드리며 더불어 제가 학업을 하는 동안 많은 격려
와 용기를 주셨던 서일교교수님, 김태일교수님, 최동호교수님, 박철민교수
님께 진심으로 감사를 드립니다.

또한 어려운 환경에서도 서로 격려하며 이끌어준 학우들에게 감사 드리
며 그들의 앞날에 무궁한 발전과 행운이 함께하기를 기원합니다.

그리고 저에게 학업의 길을 열어주시고 적극 격려하여 주신 정한종합건
설(주) 장정언회장님, 장진혁사장님과 제가 학업에 열중할 수 있도록 항상
격려와 이해를 베풀어 주신 직장 상사와 동료 및 후배들에게도 감사를 드
립니다.

제가 늦게나마 학업에 임하는 동안 물심양면으로 도와주시고 걱정하여
주신 부모님과 장모님께 이 작은 결실을 드리며, 항상 주위에서 서로 격
려 해 주는 동생들 봉효, 봉진, 성현, 봉성, 지현, 영지와 자신의 학업과
내조라는 두가지 어려움을 참아 준 아내와 학업에 바쁜 부모를 잘 이해하
고 따라준 귀여운 두 딸 유라, 유경이 그리고 지금은 병석에 누워계시지
만 항상 손자들을 위해 기도 해 주시는 할머니님과 이 기쁨을 같이 나누고
자 합니다.