

함수상태에 따른 콘크리트의 역학적성상

Mechanical Properties of Concrete as the Condition of Contained Water

김 인 수* 오 창 희**
Kim, In Soo Oh, Chang Hee

요약

일반적으로 콘크리트 내부의 수분은 주로 중심부에 분포되어 있으며, 노출된 콘크리트의 표면은 주위의 온습도영향에 따라 건조하게 된다. 이에 따라 동일 부재내에서도 부위에 따라 함수율이 달라지게 된다. 이는 콘크리트의 내부공극에 존재하고 있는 수분의 증발과 이동으로 인하여 함수상태가 달라지기 때문이다. 이와 같이 콘크리트의 함수상태변화로 인하여 압축강도, 탄성계수, 용적변화 등의 제성상이 각 부위에 따라 달라질 것으로 예상된다. 따라서, 콘크리트의 함수상태에 따른 콘크리트의 제성상을 명확히 파악함은 매우 중요하다고 판단된다. 본 연구에서는 콘크리트의 함수상태와 역학적 성상을 규명하는 데 그 목적이 있다.

콘크리트의 함수량이 증가할 수록 압축강도와 인장강도는 감소하나, 탄성계수는 증가한다. 본 연구에서 실험을 통하여 이와 같은 콘크리트의 성상과 함수상태와의 상관관계를 밝혔다.

Abstract

Generally speaking, the internal moisture of concrete is mainly distributed in inner part and concrete surface which is exposed are dried according to influence of temperature and humidity. So, the properties which are compressive strength, modular elasticity, and volume change are different at each part even in same concrete. This is because moisture distribution is changed according to the evaporation and movement of moisture, exist in the inner porosity of concrete. Therefore, it is necessary that we investigate the properties of concrete according to moisture distribution. The purpose of this study is investigating correlation between the moisture content and mechanical properties in concrete.

Compressive and tensile strength decrease according to increasing moisture content, but modular elasticity increase. Those increasing or decreasing ratio at drying ratio 100% (absolute dries) is as follows in comparative of drying ratio 0 % (saturated condition).

	Age 28days	Age 91days
○ Compressive Strength : W /C=0.45	46%	33%
(Increase) 0.55	33%	28%
0.65	40%	42%

* 정희원, 한양대학교 대학원

** 정희원, 한양대학교 건축공학과 교수, 공박

○ Tensile Strength	: W/C=0.45	22%	6%
(Increase)	0.55	13%	13%
	0.65	29%	15%
○ Modular Elasticity	: W/C=0.45	31%	20%
(Decrease)	0.55	28%	24%
	0.65	46%	12%

Key words : moisture content, moisture distribution, absolute dries, saturated condition, drying ratio, correlation

1. 서론

일반적으로 콘크리트 내부의 수분은 주로 중심부에 분포되어 있으며, 노출된 콘크리트의 표면은 주위의 온습도영향에 따라 건조하게 된다. 그러므로, 동일 부재내에서도 압축강도, 탄성계수, 용적변화 등의 제성상이 각 부위에 따라 다르게 된다. 이는 콘크리트의 내부공극에 존재하고 있는 수분의 증발이나 이동으로 인하여 함수상태가 달라지기 때문이다. 따라서, 이에 따른 콘크리트의 제성상을 명확히 파악함은 매우 중요시된다.

본 연구에서는 콘크리트의 함수상태에 따른 콘크리트의 역학적 성상을 규명하고, 이 성상과 함수율과의 상관관계를 파악하는 데 그 목적이 있다. 본 실험의 인자 및 수준은 물시멘트비를 45%, 55%, 65%의 3수준과 건조율을 0%(포수상태), 50%, 100%(절건상태)의 3수준, 공시체의 재령을 1개월, 3개월의 총 8개 수준으로 하였다.

2. 실험

2.1 사용재료

1) 시멘트 : KS L 5201에 규정된 보통포틀랜드시멘트를 사용하였다.

2) 골재 : 본 실험에 사용된 골재는 한강 양평산의 산 골재, 굵은 골재로, 골재의 최대크기를 5, 25mm로 입도조정 하였으며, KS F 2502-KS F 2506의 시험방법에 따랐다.

3) 물 : 실험에 사용된 물은 KASS 5. 2. 3의 규정에 따라 유효량의 기름, 산, 알카리, 염류 및 유기물 등을 함유하지 않은 상수도수를 사용하였다.

2.2 배합 및 시험체제작

배합은 단위시멘트량을 일정하게 하고, 단위수량을 변화시켜 Table. 1과 같이 배합하였다.

Table. 1 Mix proportion of concrete

W/C %	Slump cm	S/A %	W kg/m ³	C kg/m ³	S kg/m ³	A kg/m ³	Air %
45%	6	40	153	340	768	1171	1
55%	15	40	187		731	1117	1
65%	22	40	221		694	1064	1

배합량은 1 batch당 40L를 기준으로 하였으며, 압축공시체, 인장공시체는 KS F 2403 『실험실에서 콘크리트의 압축 및 휨 강도시험용 공시체를 제작하고 양생하는 방법』에 의하여 크기 $\phi 10 \times 20$ cm 실린더형 강제모울드를 사용하여 제작하였다. 공시체의 수는 실험인자에 따라 각 3개씩 제작하였다. 성형완료된 공시체는 23℃로 유지된 실내에서 24시간 기중양생한 다음, 몰드에서 탈형하여 이 때의 중량을 측정후 표준양생하였다.

2.3 건조방법

양생방법은 Table. 2와 같이 건조율 0%는 수조에서 소정의 재령까지 표준양생하였으며, 이외의 건조율에 대해서는 소정의 재령에서 공시체를 수조에서 집어내어 함수율 조정을 위하여 2일간 건조로에서 건조하였다. 이후, 공시체가 평형상태가 유지되도록 5일간 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 인 항온실에서 보관하였다.

건조방법은 소정의 재령까지 양생한 다음, 수조에서 꺼낸 직후의 시험체를 건조율 0%로 하였고, 이 시험체를 Fig. 1과 같은 $105 \pm 5^\circ\text{C}$ 인 건조로에서 건조시켰다. 건조과정 중 시험체의 중량이 변화하지 않을 때를 건조

율 100%(절건상태)로 하고, 수분증발량이 건조율 100%인 시험체 수분증발량의 50%일 때를 건조율 50%로 하여 각 공시체의 함수율을 조정하였다. 공시체의 함수율조정이 끝난 후, 공시체의 수분증발을 방지하기 위하여 비닐로 밀봉한 다음, 내부수분이 평형상태가 되도록 23±2℃인 항온조에 5일간 보관하였다.

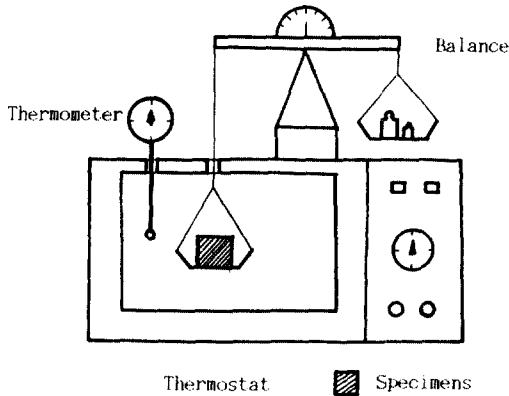


Fig. 1 The shape of dry oven

Table. 2 Curing method

Drying rate	0%	50%	100%
Ages	Water curing (35days) (98days)	Water curing (28days) (91days)	
		Controlling water content (2days)	
		Keep specimens in thermostat (5days)	

2. 4 실험방법 및 기기

2. 4. 1 실험방법

- 1) 공시체의 함수량을 조절하기 위하여 소정의 재령에 달한 공시체를 105±5℃ 인 건조로에 넣어 강제건조에 의하여 질량감소를 측정하여 함수율을 조절하였다.
- 2) 함수율 조절이 끝난 공시체의 수분증발을 방지하기 위하여 항온조에서 꺼낸 직후 P, V, C 비닐로 밀봉하여 냉각시켰다.
- 3) 공시체의 함수분포가 평형이 될 때까지 5일간 항온실에 보관하였다.
- 4) 공시체의 함수상태가 평형에 도달된 공시체로 압

축강도, 인장강도, 탄성계수를 측정하였다.

콘크리트의 압축강도는 KS F 2505 『콘크리트의 압축강도 시험방법』에 준하여 시험하며, 인장강도는 KS F 2423 『콘크리트의 인장강도 시험방법』에 준하여 시험하였다.

콘크리트의 탄성계수는 JIS원안에 준하여 측정하였다. 공시체의 응력도-변형도곡선상에서 최대응력도의 1/3응력도를 나타내는 점과 변형응력도가 50×10⁻⁶을 나타내는 점을 연결한 선분의 기울기를 탄성계수로 하였다. 공시체의 크기는 콘크리트의 압축강도공시체와 동일한 것으로 하였다. 변형측정기는 최소눈금 0.01mm의 다이알게이지가 장착된 Compresso Meter를 이용하였다.

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \quad \text{식(1)}$$

여기서, E : 탄성계수 (kg/cm²)

σ_1 : 응력도 50×10⁻⁶에 해당하는 응력도 (kg/cm²)

σ_2 : 최대응력도 σ_{max} 의 1/3에 해당 하는 응력도 (kg/cm²)

ϵ_1 : 50×10⁻⁶

ϵ_2 : 응력도 σ_1 에서의 변형도

2. 4. 2 실험기기

본 실험에 사용된 주요 실험 기기는 다음과 같다.

- 1) 압축강도시험기 : Universal Testing Machine 강도시험기
- 2) 인장강도시험기 (최대하중 100t)
- 3) 탄성계수 측정기 : Compresso Meter
- 4) 항온조 : 온도10~60℃
- 5) 건조로 : 온도105±5℃
- 6) 온도계 : Data Logger

3. 결과 및 고찰

3. 1 함수율과 강도

3. 1. 1 압축강도

Fig.2 및 Fig.3은 건조율과 압축강도의 관계를 나타낸 것이다. 압축강도는 함수율이 적을 수록 증가하는 경

향을 나타냈으며, 건조율100%(절건상태)인 경우가 건조율 0%(포수상태)인 경우에 비하여 압축강도는 재령 28일에서 33%~46%정도, 재령 91일에서 28%~42%정도 증가하였다.

이는 기존 연구결과에 의하면 함수량이 증가함에 따라 표면장력이 저하하기 때문인 것으로 설명되고 있다.

또한, 함수율 1%증가(강도증진량/포화함수율)에 대한 압축강도의 감소율은 재령 28일에서 2.3%~3.7%, 재령 91일에서 2.0%~2.8%정도 이었다.

Fig. 4는 재령에 따른 콘크리트의 압축강도를 나타냈다. 압축강도는 재령이 증가할수록 다소 증가하는 경향을 나타냈다. 재령 28일에 대하여 재령 91일에서의 압축강도의 증가는 다음과 같다.

물시멘트비 45%인 경우, 건조율 0%에서 10.6%(34kg/cm²), 건조율 50%에서 4.2%(16kg/cm²), 건조율100%에서 1.1%(6kg/cm²)로 각각 증가하였다. 물시멘트비 55%인 경우, 건조율 0%에서 12.7%(31kg/cm²), 건조율 50%에서 10.2%(29kg/cm²), 건조율 100%에서 8.6%(28kg/cm²)로 각각 증가하였다. 물시멘트비 65%인 경우, 건조율 0%에서 6.5%(12kg/cm²), 건조율 50%에서 15.5%(32kg/cm²), 건조율 100%에서 7.8%(20kg/cm²)로 각각 증가하였다.

특히, 물시멘트비가 낮을수록 압축강도의 증가량이 크게 나타났다. 실제, 구조물에 있어서 콘크리트의 내부는 중심부에 수분이 많이 분포되어 있고 표면부에는 거의 건조상태에 있으므로, 압축강도는 각 부위마다 다르게 나타난다. 따라서, 콘크리트 내부의 함수상태를 고려하여 콘크리트 부재를 설계하여야 할 것으로 판단된다.

3. 1. 2 인장강도

기존 연구에 의하면, 함수량이 적을수록 인장강도는 저하하거나 변화하지 않는 것으로 보고되고 있다. 그러나, 본 실험결과에서는 Fig. 5 및 Fig. 6 같이 함수량이 적을수록 다소 증가하는 경향을 나타냈다. 건조율 100%(절건상태)인 경우가 건조율 0%(포수상태)인 경우에 비하여 그 인장강도는 재령 28일에서 13%~29%, 재령 91일에서 6%~15%정도 증가하였다. 이는 물의 유효작용, 건조에 의한 마찰계수의 증가 등으로 설명되고 있으나, 아직 일반화된 연구결과는 없는 것으로 사료된다. 따라서, 금후 이에 대한 연구가 요망된다.

또한, 함수율 1%증가(강도증진량/포화함수율)에 대

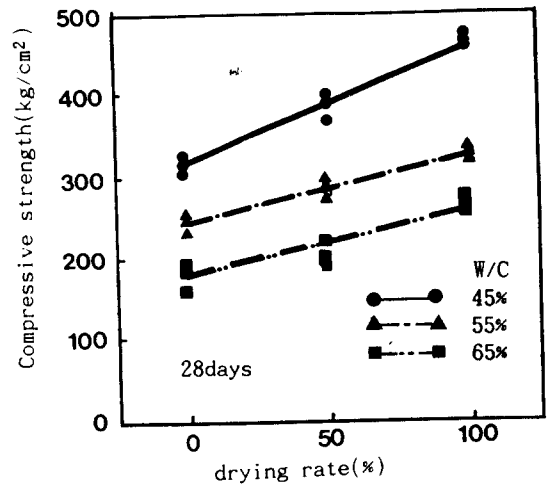


Fig. 2 Compressive strength as a drying rate(28 days)

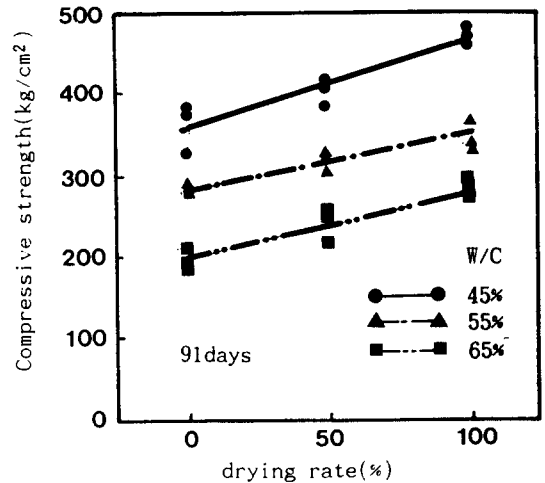


Fig. 3 Compressive strength as a drying rate(91 days)

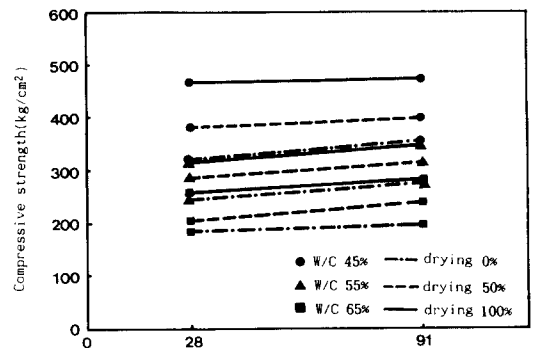


Fig. 4 Compressive strength with ages

한 인장강도의 감소율은 재령 28일에서 1.0%~1.8%, 재령 91일에서 0.5%~1.1%정도이었다.

인장강도는 압축강도에서와 같이 물시멘트비가 낮을수록 약간 증가하였다. 일반적으로 콘크리트 부재를 설계할 경우에는 인장강도를 고려하지 않으나, 건조수축이나 크리프 변형에 의한 응력을 추정하는 경우에는 반드시 고려하여야 한다. 따라서, 본 실험결과는 이에 대한 기초자료로써 활용될 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 7은 재령에 따른 콘크리트의 인장강도를 나타냈다.

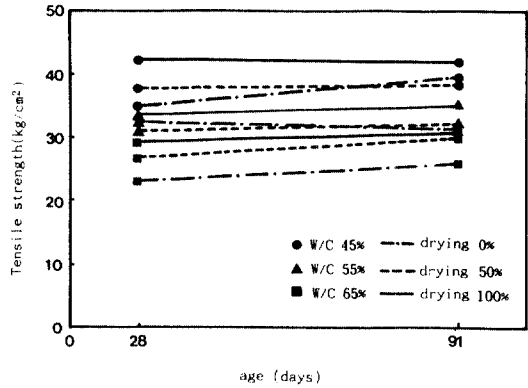


Fig. 7 Tensile strength with ages

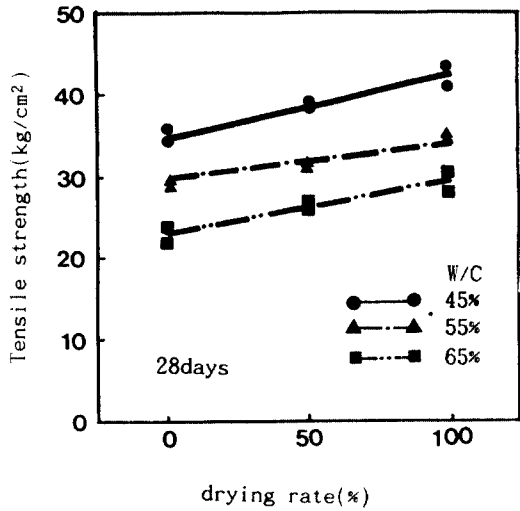


Fig. 5 Tensile strength as a drying rate(28 days)

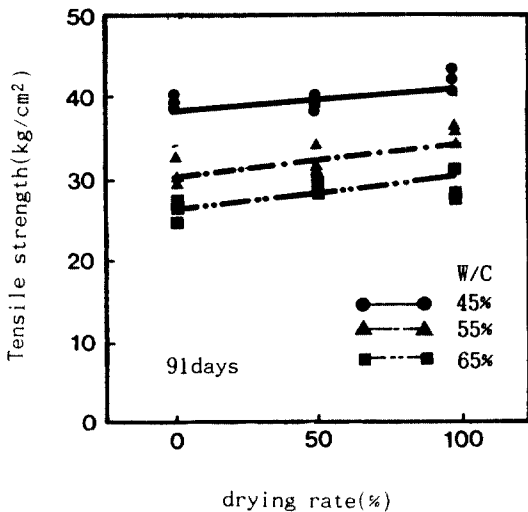


Fig. 6 Tensile strength as a drying rate(91 days)

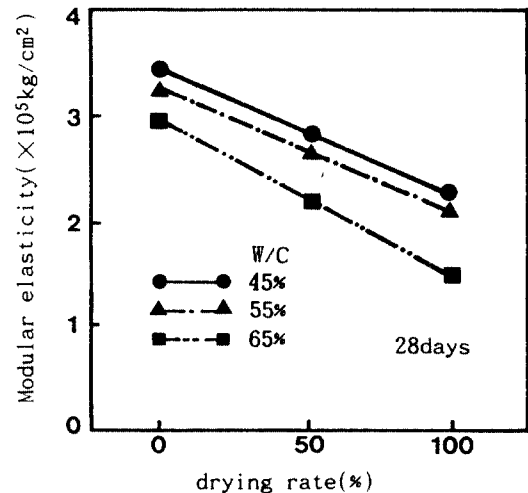


Fig. 8 Modular elasticity as a drying rate(28 days)

3. 1. 3 탄성계수

건조율에 따른 탄성계수는 Fig. 8 및 Fig. 9와 같이 콘크리트의 함수량이 많을수록 증가하는 경향을 나타냈다. 건조율 100%(절건상태)인 경우가 건조율 0%(포수상태)인 경우에 비하여 그 탄성계수는 재령 28일에서 28%~46%, 재령 91일에서 12%~24%정도 감소하였다.

또한, 함수율 1% 증가(강도증진량/포화함수율)에 대한 탄성계수의 증가는 재령 28일에서 1.9%~2.5% 정도 증가하였으며, 재령91일에서는 0.4%~1.7%정도 증가하였다.

탄성계수는 압축강도 및 인장강도와는 달리 콘크리트의 함수율이 증가할수록 증가하는 것을 알 수 있다.

이는 콘크리트의 내부공극에 수분을 함유하게 되면,

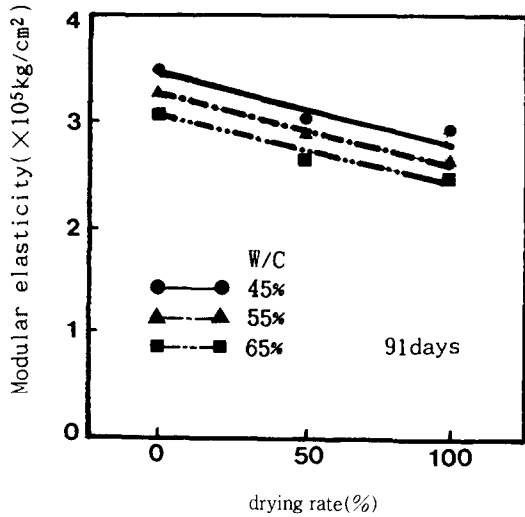


Fig. 9 Modular elasticity as a drying rate(91 days)

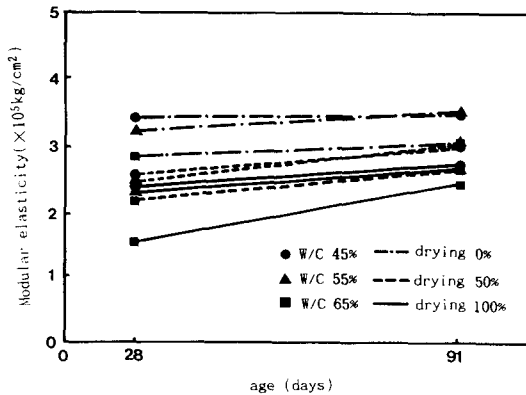


Fig. 10 Modular elasticity with ages

재하시 수분에 저항력이 발생하여 탄성계수가 증가하는 것으로 판단된다.

Fig. 10은 재령에 따른 콘크리트의 탄성계수를 나타냈다.

3. 2 압축강도와 인장강도

건조율에 따른 콘크리트의 압축강도와 인장강도의 관계는 Fig.11~Fig.13과 같이 비례적인 관계를 나타냈다. 재령 28일에서 인장강도와 압축강도의 비율은 건조율에 관계없이 물시멘트비 45%, 55%, 65%에서 각각 9.9%, 11%, 12.1%이며, 재령 91일에서는 각각

10.2%, 9.5%, 8.3% 이었다. 재령에 따른 이들에 대한 회귀식을 구하면 다음과 같으며, 그 상관계수는 0.925~0.974(평균0.950)로써 매우 높게 나타났다.

$$\text{재령28일 } F_t = 12.16 + 0.066 F_c \quad (r=0.974)$$

$$\text{재령91일 } F_t = 14.25 + 0.061 F_c \quad (r=0.925)$$

$$\text{재령28+91일 } F_t = 12.99 + 0.064 F_c \quad (r=0.950)$$

여기서, F_t : 인장강도(kg/cm²)

F_c : 압축강도(kg/cm²)

r : 상관계수

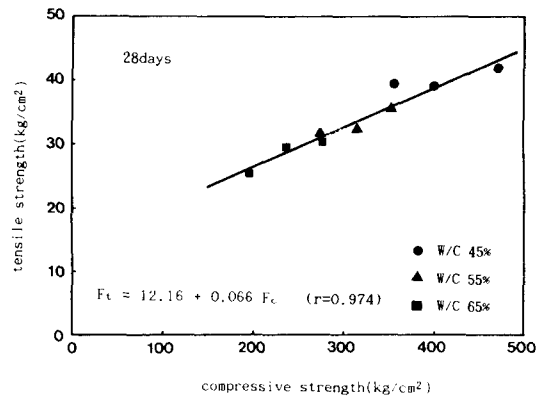


Fig. 11 Relation between compressive strength and tensile strength(28days)

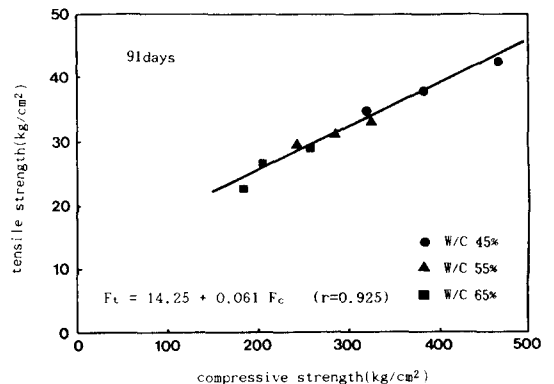


Fig. 12 Relation between compressive strength and tensile strength(91days)

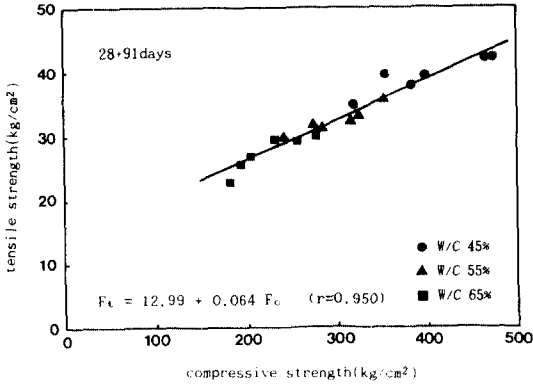


Fig. 13 Relation between compressive strength and tensile strength(28+91days)

3. 3 압축강도와 탄성계수

Fig. 14는 동일한 건조율의 조건에서 압축강도와 탄성계수와의 관계를 나타낸 것이다. 이 결과에서 압축강도가 증가할 수록 탄성계수는 증가하는 것을 보이고 있다. 그러나, Fig. 15와 같이 함수상태를 고려한 콘크리트의 압축강도와 탄성계수의 관계에서는 압축강도가 증가할 수록 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 탄성계수가 콘크리트의 함수량에 큰 영향을 받는다는 사실을 알 수 있다.

이들의 상관관계식은 다음과 같다.

○ 동일한 건조율조건인 경우

건조율 0% $E=2.19+0.0038F_c$ ($r=0.960$)

건조율 50% $E=1.88+0.0018F_c$ ($r=0.710$)

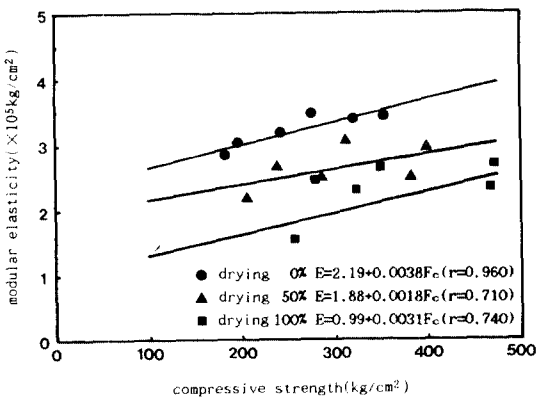


Fig. 14 Relation between compressive strength and modular elasticity(in case of same drying rate)

건조율 100% $E=0.99+0.0031F_c$ ($r=0.740$)

○ 함수상태를 고려한 경우

W/C=0.45 $E=5.22-0.0064F_c$ ($r=-0.880$)

W/C=0.55 $E=6.06-0.0120F_c$ ($r=-0.920$)

W/C=0.65 $E=5.52-0.0156F_c$ ($r=-0.940$)

여기서, E : 탄성계수 ($\times 10^5 \text{ kg/cm}^2$)

F_c : 압축강도 (kg/cm^2)

r : 상관계수

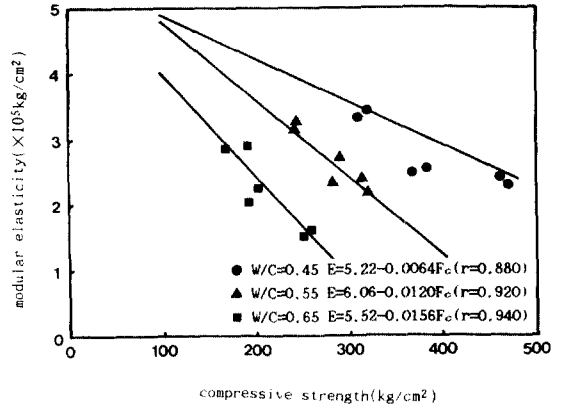


Fig. 15 Relation between compressive strength and modular elasticity(in case considering contained water)

4. 결론

함수상태에 따른 콘크리트의 역학적성상에 대한 실험 결과와 이들의 상관관계에 대하여 고찰한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 콘크리트의 함수량이 증가할 수록 압축강도와 인장강도는 감소하지만, 탄성계수는 증가한다. 재령에 따른 그 증감율은 건조율100%(절건상태)인 경우가 건조율 0%(포수상태)인 경우에 비하여

	재령 28일	재령 91일
○ 압축강도 W/C=0.45	46%	33%
0.55	33%	28%
0.65	40%	42%
○ 인장강도 W/C=0.45	22%	6%
0.55	13%	13%
0.65	29%	15%

정도 증가한다.

○탄성계수 W/C=0.45	31%	20%
0.55	28%	24%
0.65	46%	12%

정도 감소한다.

(2) 함수율 1% 증가에 대하여

	재령 28일	재령 91일
○압축강도 W/C=0.45	3.7%	2.8%
0.55	2.3%	2.0%
0.65	2.5%	2.6%
○인장강도 W/C=0.45	1.8%	0.5%
0.55	1.0%	1.0%
0.65	1.8%	1.1%

씩 감소한다.

○탄성계수 W/C=0.45	2.5%	1.7%
0.55	1.9%	0.4%
0.65	2.9%	0.7%

씩 증가한다.

(3) 콘크리트의 압축강도와 인장강도와의 관계는 물시멘트비에 관계없이 다음 식으로 추정이 가능하다.

$$\circ F_t = 12.99 + 0.064 F_c (r = 0.950)$$

여기서, F_t : 인장강도(kg/cm²)

F_c : 압축강도(kg/cm²)

(4) 함수상태를 고려한 콘크리트의 압축강도와 탄성계수의 관계에서 압축강도가 증가할 수록 탄성계수는 감소한다.

이들의 상관관계식은 다음과 같으며, 상관계수는 -0.880 ~ -0.960(평균 -0.9133)이다.

$$W/C = 0.45 \quad E = 5.22 - 0.0064 F_c (r = -0.880)$$

$$W/C = 0.55 \quad E = 6.06 - 0.0120 F_c (r = -0.920)$$

$$W/C = 0.65 \quad E = 5.52 - 0.0156 F_c (r = -0.940)$$

여기서, E : 탄성계수(10³kg/cm²)

F_c : 압축강도(kg/cm²)

r : 상관계수

참 고 문 헌

1. 尹在煥, 포틀랜드시멘트 및 콘크리트, 世進社, 1990. 6.
2. Sandor Popovics, "Effect of Curing Method and Final Moisture Condition on Compressive Strength of Concrete", ACI Journal, Vol. 83 No. 4, American Concrete Institute, July-Aug. 1986,

p.p. 650 657.

3. 岡島達雄, "콘크리트의力學的性質と水分", セメントコンクリート No. 464, Oct. 1985 p.p. 18~26.
4. 岡島達雄, "2軸壓縮應力下のコンクリート強度に及び含水率と強度レベルの 影響に關する實驗的研究", 日本建築學會學術講演梗概集(北東), 昭和 57 年 10月, p.p. 333 334.
5. 岡田清, 小柳洽, 六郷惠哲, "含水量の異なる コンクリートの壓縮破壞過程に關するエネルギー的考察", 土木學會論文報告集, 第248號, 1976年 4月, p.p. 129~136.
6. 森脇哲男, 山本幸雄, "含有水の狀態變化を指標とするセメント硬化物の物理的・力學的性質", 日本建築學會學術講演梗概集(關東), 昭和45年 9月, p.p. 71~72.
7. 大岸佐吉, "콘크리트의組織構造と力學的性質", 콘크리트工學, Vol. 19, No. 11, Nov. 1981, p. p. 58~67.
8. 岡島達雄, 石川時雄, 棚橋男, "セメントモルタルの力學的性質に及ぼす含水率の影響", 日本建築學會學術講演梗概集(近畿), 昭和55年 9月, p.p. 89~90.
9. 高橋久雄, 川口徹, "콘크리트の水分による影響について", 日本建築學會學術講演梗概集(北陸), 昭和49年 10月, p.p. 307~308.
10. 金子林爾, "含水狀態の異なる 콘크리트の壓縮疲勞強度と變形特性", セメント技術年報 第34號, 昭和55年, p.p. 276~279.
11. 岡島達雄, 一瀬賢一, "表面エネルギーからみた 콘クリート強度の含水率依存性", 日本建築學會學術講演梗概集(九州), 昭和56年9月, p.p. 171~172.
12. 大岸佐吉, 小野博宣, "콘크리트の一軸, 三軸壓縮クリップに及ぼす含水の影響", 日本建築學會學術講演梗概集(關東), 昭和54年 9月
13. 大岸佐吉, 棚橋男, 小野博宣: "콘크리트の常溫一軸, 三軸壓縮クリップ含水率依存性", 日本建築學會學術講演梗概集(東北), 昭和57年 10月
14. 仕入豊和, 坂本哲郎, 鄭尙鎮, 中根淳, 長尾賞博, "加熱される 콘크리트 部材の諸物性に 關する研究(その1 模擬供試體の溫度および 含水率の測定結果)", 日本建築學會學術講演 梗概集(東海), 昭和 62年10月

(접수일자 : 1992. 2. 17)