

공명주기식 동탄성계수를 이용한 초기재령 콘크리트의 역학적 성질 예측

Estimation of Mechanical Properties of Concrete in Early Age by Resonance Frequency Test

김진근* 김 훈** 노재호***

Kim, Jin-Keun Kim, Hoon Noh, Jae-Ho

요 약

재령 초기에 발생하는 부등건조수축과 시멘트의 수화반응에 의한 수화열은 초기재령 콘크리트 균열의 주요 원인이다. 따라서 재령 초기 콘크리트의 균열 발생 여부를 예측하기 위해서는 수화열과 부등건조수축에 의하여 발생하는 응력의 계산이 필수적이며, 이를 위해서는 초기재령 콘크리트의 역학적 성질 파악이 매우 중요하다.

이 연구에서는 콘크리트의 동탄성계수와 압축강도, 정탄성계수와 같은 역학적 성질들과의 관계를 규명하기 위하여 공명주기법을 이용한 비파괴 실험을 실시하였으며, 얻어진 실험결과를 기존 예측식과 비교하였다. 또한 기존의 실험치와 이 연구의 실험치를 이용하여 보다 정확한 예측식들을 제안하였다.

Abstract

Drying shrinkage and hydration heat are important factors on the initiation of the crack in concrete at early age. Therefore, the stress caused by hydration heat and drying shrinkage should be analyzed to predict whether the crack occurs or not. And, mechanical properties of early age concrete is also required for the predicting crack formation

In this study, non-destructive test method of resonance frequency was used to find the relation between dynamic modulus and mechanical properties of concrete in early age. Test results were compared with existing equations, and a new equation based on test results in this study and other data was also proposed

Keywords : early age concrete, non-destructive test, dynamic modulus, static modulus, resonance frequency

* 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 교수
** 정희원, 동양중앙연구소 연구원
*** 정희원, 동양중앙연구소 선임연구원

• 본 논문에 대한 토의를 1995년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 1996년 2월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

콘크리트는 경화과정에서 수화열을 발생시키며, 그에 따라 내부 수분량이 시간에 따라 부분적으로 달라져 재료적 성질이 변화한다. 이러한 수화열과 부동건조수축으로 인하여 초기재령에서 콘크리트의 균열이 빈번히 발생하므로 초기재령에서의 콘크리트 구조물의 수화열 및 부동건조수축에 의한 응력의 해석이 필요하며 이를 위하여는 초기재령 콘크리트의 역학적 성질, 즉 강도 및 정탄성계수 등의 파악이 필요하다.

초기재령시 실험이 어려운 콘크리트의 정탄성계수 및 강도를 직접 측정하는 대신에 공명주기방법에 의한 비파괴 실험을 통하여 콘크리트의 동탄성계수를 측정하고 이로부터 정탄성계수 및 강도를 예측하는 것은 콘크리트의 제반 성질을 구하는 매우 간편한 방법이며 국내에서도 이에 대한 연구 결과⁽¹⁻⁶⁾가 많이 발표되었다.

따라서 이 연구에서는 초기재령 콘크리트의 동탄성계수, 정탄성계수, 압축강도 등을 측정하고 그 결과로부터 동탄성계수와 정탄성계수와의 관계 및 동탄성계수와 압축강도와의 관계식을 구하고자 하였다.

2. 정탄성계수와 동탄성계수와의 관계

동탄성계수를 구하는 방법에는 초음파 전파속도와 종진동에 의한 공명주기를 이용하는 등의 여러 방법이 있으나 콘크리트 공시체의 1차 공명주기, 즉 고유진동수에 의한 방법이 널리 이용되고 있다. 일반적으로 고유진동수를 이용한 동탄성계수는 다음 식(ASTM C 215-85 참조)에 의해 구하여진다.

$$E_d = 4 L^2 d N^2 \quad (1)$$

여기서, L : 공시체의 길이

d : 공시체의 단위중량

N : 콘크리트의 고유진동수

(1차 공명주기)

동탄성계수 측정 실험은 비파괴 실험이므로 초기재령 콘크리트에서도 실험이 가능하다. 일반적

으로 동탄성계수는 정탄성계수에 비하여 20~40% 정도 크게 나타나며 기존의 연구에서 나타난 동탄성계수의 특징⁽⁷⁾은 첫째 동탄성계수는 정탄성계수에 비하여 크게 나오고, 그 차이는 약 20~40% 정도 된다고 알려져 있으며, 둘째 재령이 증가하면 정탄성계수에 대한 동탄성계수의 비는 증가하며, 정탄성계수가 커질수록 정탄성계수와 동탄성계수의 값이 거의 동일하게 된다.

영국 BS 규준에서 규정한 동탄성계수와 정탄성계수의 관계에 대한 식은 다음과 같다.

단위시멘트량 500kg/m³ 이하, 보통중량골재 콘크리트의 경우,

$$E_c = 1.25E_d - 19 \quad (\text{GPa}) \quad (2)$$

$$E_c = 1.25E_d - 1.938 \times 10^5 \quad (\text{kg/cm}^2)$$

여기서, E_c : 정탄성계수

E_d : 동탄성계수

기타의 경우,

$$E_c = 1.04 E_d - 4.1 \quad (\text{GPa}) \quad (3)$$

$$E_c = 1.04 E_d - 0.4182 \times 10^5 \quad (\text{kg/cm}^2)$$

Sharma 와 Gupta에 의하면 정탄성계수와 동탄성계수의 관계는 다음과 같다.⁽⁸⁾

$$E_c/E_d = 0.368 + 0.0871 \times 10^{-6} E_c \quad (\text{psi}) \quad (4)$$

$$= 0.368 + 0.12443 \times 10^{-5} E_c \quad (\text{kg/cm}^2)$$

윗 식들에서 BS에서는 정탄성계수와 동탄성계수의 관계를 선형으로 규정하고 있으나, Sharma 와 Gupta가 제안한 식에는 정탄성계수와 동탄성계수의 관계를 비선형으로 나타내고 있다. 따라서 Fig 1에 제시한 바와 같이 Sharma와 Gupta가 제안한 식에 따르면 동탄성계수에 대한 정탄성계수의 비는 정탄성계수와 선형관계이다. Sharma와 Gupta의 모델식은 작은 동탄성계수에 대해서는 다른 연구자들의 연구결과와 부합하고 있으나, 큰 동탄성계수에 대해서는 상대적으로 큰 값으로 나타나고 있다.

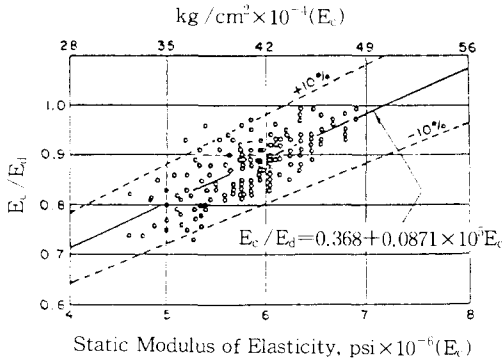


Fig. 1 The relation between static and dynamic modulus

3. 실험

3.1 실험계획

콘크리트가 완전히 경화하지 않은 초기재령에서는 정탄성계수를 측정하기 어려우므로 간접적으로 역학적 성질을 나타낼 수 있는 동탄성계수를 측정하여 정탄성계수를 추정하기 위하여 콘크리트를 제조한 후 3일, 7일 및 28일 재령에서 정탄성계수와 동탄성계수 측정을 실시하고 그 관계식을 구하였다. 6시간, 12시간, 18시간, 24시간, 3일, 7일 및 28일에 각각 동탄성계수를 측정하고 앞에서 구한 정탄성계수-동탄성계수 관계식으로부터 정탄성계수를 추정하였다.

콘크리트의 강도 수준은 저강도, 중간강도, 고강도 콘크리트를 대표하는 300, 500, 800 kg/cm²으로 선택하였다.

3.2 공시체 제작

실험에 사용된 시멘트는 S사 제품의 1종 포틀랜드 시멘트이며, 시멘트의 화학적 성분은 Table 1에 나타낸 바와 같고, 물리적 성질은 Table 2에 나타나 있다.

Table 1 Chemical composition of cement

Component	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Ig. loss	Insol. Res.	Free CaO
Content(%)	20.9	5.4	3.3	62.1	2.8	3.1	0.07	1.19	1.1	0.33	0.9

Table 2 Physical properties of cement

Specific gravity	Blain Surface Area (cm ² /g)	Setting Time (hour)		Compressive Strength (kg/cm ²)		
		Initial	Final	3days	7days	28days
3.15	3,250	3.83	6.5	178	245	331

잔골재는 조립율이 2.92인 금강 유역의 대평리 산 강모래를 사용하였고, 조골재는 최대치수가 19mm인 화강암 쇄석골재를 사용하였다. 사용된 골재의 물리적 성질은 Table 3에 나타낸 바와 같다.

고강도 콘크리트를 제조할 때는 적절한 작업성을 얻기 위하여 화학혼화제로서 ASTM C 494 type F의 규격을 만족시키는 고성능감수제를 사용하였다. 고성능감수제의 성분 및 상세한 물성은 Table 4에 나타낸 바와 같다.

Table 3 Physical properties of aggregates

Type	Max. Size	Specific Gravity	Absorption Ratio(%)	F.M.
Sand	-	2.59	0.78	2.92
Coarse Aggregate	19mm	2.60	1.25	6.7

Table 4 Physical properties of superplasticizer

Appearance	Principle Component	Specific Gravity	Standard Dosage (C×%)
Dark Brown Liquid	Naphthalene Sulphonate	1.21	0.4 ~ 3.0

또한 고강도 콘크리트의 제조시, 노르웨이산 Elkem Microsilica 분말제품의 실리카흄을 일부 사용하였다.

압축강도 및 동탄성계수 측정용 콘크리트 공시체를 각각 제작하였다. 압축강도 측정용 원추형 공시체의 크기는 100×200mm이었으며 동탄성계수 측정용 직육면체 공시체의 크기는 100×100×400mm이었다. 압축강도용 콘크리트 공시체는 KS F 2404, 동탄성계수 측정용 콘크리트 공시체는 KS F 2437에 따라서 제조하였으며 몰드에 타설한 후에 소형 봉형진동기를 이용하여 다짐하였다. 타설과 동시에 KS F 2402에 따라 슬럼프 실험을 실시하였다. 콘크리트 공시체는 상대습도 약

60%, 온도 23°C의 상온에서 24시간 동안 기중 양생후, 물성 측정시까지 온도가 23±3°C의 수중에서 양생을 실시하였다.

실험에 사용된 콘크리트의 배합설계를 Table 5에 나타내었다.

Table 5 Mix proportion of concrete

Target Compressive Strength at 28days (kgf/cm ²)		300	500	800
Unit Weight (kg/m ³)	Cement	317	500	529
	Silica Fume	—	—	59
	Water	206	175	147
	Sand	723	503	545
	Aggregate	998	1175	1107
Dosage of S.P.(%)		—	1	3
Slump(cm)		18	21	20

3.3 실험방법

1일까지의 초기에는 종진동에 의한 공명진동 측정기를 사용하여 콘크리트의 동탄성계수만 측정하였다. 초기재령에서 콘크리트의 동탄성계수를 측정하기 위한 실험에 있어서는 공시체 탈형시에 많은 주의를 요한다.

재령 3일 이후의 공시체에 대해서는 동탄성계수, 정탄성계수 및 압축강도를 측정하였다. 정탄성계수와 압축강도의 측정은 KS F 2438에서 규정한 방법에 의하여 실시하였고, 동탄성계수는 Fig. 2에 나타낸 바와 같은 장비를 이용하여 KS F 2437에서 제시한 방법에 의하여 실험을 실시하였

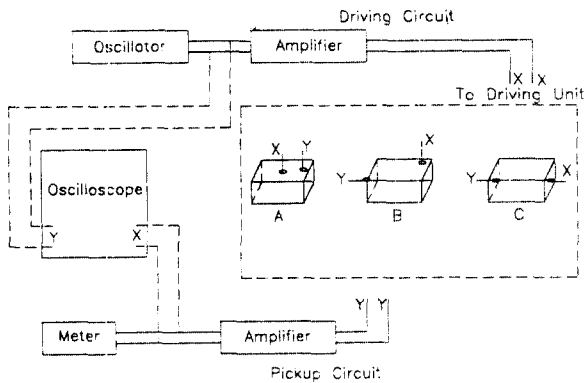


Fig. 2 Install of dynamic modulus tester

다. 이 실험에서 사용된 기기는 C.N.S. Electronics 사의 ERUDITE Resonant Frequency Tester 이다.

3.4 실험결과

콘크리트의 압축강도 및 탄성계수를 측정한 실험결과가 Table 6에 나타나 있다.

Table 6 Elastic modulus and compressive strength of concrete

Type	Target Strength (kg/cm ²)									
	300			500			800			
Strength (kg/cm ²)	3days	7days	28days	3days	7days	28days	3days	7days	28days	
	110	174	223	391	382	480	509	588	780	
Elastic Modulus	static		static		static		static		static	
	dynamic		dynamic		dynamic		dynamic		dynamic	
Age (days)	0.25	—	—	—	2.65×10 ⁹	—	—	—	0.82×10 ⁹	
	0.5	—	0.50×10 ⁹	—	2.74×10 ⁹	—	—	—	2.98×10 ⁹	
	0.75	—	1.08×10 ⁹	—	2.93×10 ⁹	—	—	—	3.21×10 ⁹	
	1	—	1.49×10 ⁹	—	3.63×10 ⁹	—	—	—	3.82×10 ⁹	
	3	1.45×10 ⁹	2.99×10 ⁹	2.95×10 ⁹	4.06×10 ⁹	3.31×10 ⁹	4.22×10 ⁹	—	—	
	7	2.27×10 ⁹	3.39×10 ⁹	3.36×10 ⁹	4.34×10 ⁹	3.63×10 ⁹	4.71×10 ⁹	—	—	
	28	2.80×10 ⁹	3.88×10 ⁹	3.46×10 ⁹	4.54×10 ⁹	3.99×10 ⁹	5.12×10 ⁹	—	—	

Fig. 3은 각 재령에 따른 콘크리트의 동탄성계수를 나타내고 있으며, 대체로 강도가 증가할수록 동탄성계수가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 그

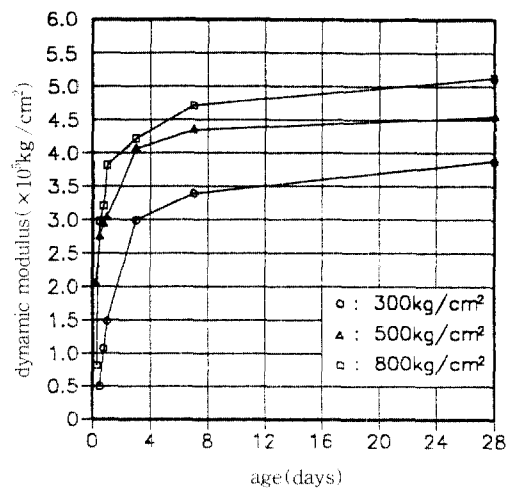


Fig. 3 Dynamic modulus of aging effect by mixing strength

러나 800kg/cm²의 경우에 재령 0.25일에서 동탄성계수가 극히 낮게 나타나고 있으며, 이는 콘크리트 제조시에 고성능 감수제를 다량 첨가하였기 때문에 초기의 수화반응이 지연된 것으로 사료된다.

Fig. 4는 정탄성계수와 동탄성계수의 관계를 나타내고 있다. 이 연구에서 동탄성계수의 측정값이 3~5×10⁵kg/cm²인 범위에서는 BS 표준식과 거의 일치하고 있다. 그리고 Sharma와 Gupta의 제안식과 비교하면 측정된 동탄성계수값이 작은 경우는 서로 유사하게 나타나고 있으나, 동탄성계수가 클 경우에는 예측값이 실험값보다 훨씬 크게 나타나고 있다.

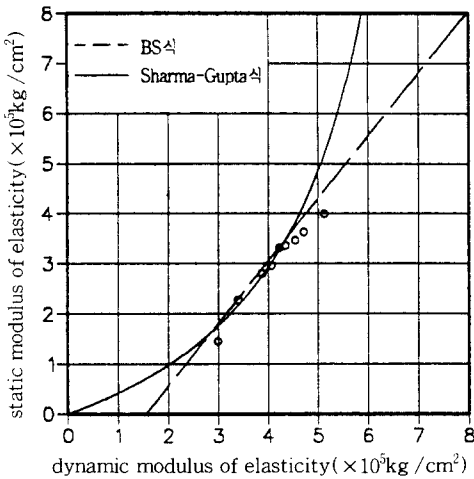


Fig. 4 Relation between static modulus and dynamic modulus

4. 실험결과 분석

4.1 동탄성계수와 정탄성계수와의 관계

일반적으로 경화된 콘크리트의 정탄성계수와 동탄성계수는 선형적인 관계를 가지는 것으로 알려져 있다. 그러나 기존의 모델식은 재령 7일 이후의 실험결과를 토대로 개발되었기 때문에 이러한 식을 이용하여 초기재령 콘크리트의 탄성계수를 추정하는 것은 적절하지 않다고 판단된다.

따라서 이 연구의 실험결과와 기존의 실험결과

(3~6)를 가지고 다음과 같은 가정(7,8)에 적합한 관계식을 구성함으로써 초기재령 콘크리트에 적용하기 위한 적절한 모델식을 개발할 수 있다고 판단된다.

(1) 초기에는 정탄성계수에 대한 동탄성계수의 비가 크다.

(2) 후기에는 정탄성계수에 대한 동탄성계수비가 1에 가깝게 된다.

위에서 제시한 가정에 적합한 회귀식은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$E_c = E_d (1 - k_1 e^{-k_2 E_d^n}) \quad (5)$$

여기서, k_1, k_2, n : 실험상수

E_c : 정탄성계수(×10⁵, kg/cm²)

E_d : 동탄성계수(×10⁵, kg/cm²)

위에서 제시한 회귀식에서 k_1 값은 1보다 작아야 하고, k_2 값은 0보다 작아야 한다. 1차 회귀분석 결과에 근거하여 또한 수식의 간편성을 위하여 n 을 1, 2로 가정한 후에 다시 회귀분석을 실시하였다. Fig. 5에서 보면 n 을 1로 한 경우에 작은 동탄성계수범위에서는 정탄성계수의 값이 0이하로 나타내므로 관계식으로써 적합하지 않다. 따라서 정탄성계수와 동탄성계수와의 관계에 대한 제안식을 회귀분석하여 다음과 같은 식을 얻었다.

$$E_c = E_d(1 - 0.52 e^{-0.05E_d}) \quad (6)$$

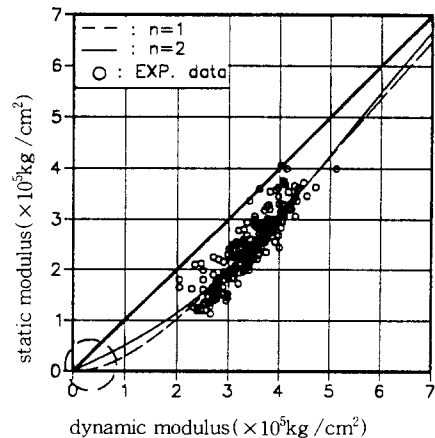


Fig. 5 The relation of static and dynamic modulus(3~8)

4.2 콘크리트 압축강도와 동탄성계수와의 관계

일반적으로 정탄성계수와 압축강도의 관계는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다. 따라서 앞절에서 제안한 식을 식 (7)에 대입하여 회귀분석을 실시하면 동탄성계수와 압축강도와의 관계식을 구할 수 있다.

$$f_c = k E_c^m \quad (7)$$

위의 근거에 따라서 동탄성계수와 압축강도와의 관계를 파악하기 위한 회귀분석 결과는 다음과 같다.

$$f_c = 39.1(E_d(1-0.52 e^{-0.05E_d^3}))^{2.21} \quad (8)$$

이 연구에서는 위의 식 (8)에서의 $m = 2.21$ 의 m 을 2와 3으로 고정하여 회귀분석을 실시하였으며 각각의 경우에 있어서 모델식은 식 (9)와 식 (10)에 나타난 바와 같다. 그리고 각각의 모델식과 실험결과와의 관계는 Fig. 6에 나타난 바와 같다.

$$f_c = 48.7(E_d(1-0.52 e^{-0.05E_d^3}))^2 \quad (9)$$

$$f_c = 16.1(E_d(1-0.52 e^{-0.05E_d^3}))^3 \quad (10)$$

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

f_c : 압축강도 (kg/cm^2)

그리고 보다 정확한 콘크리트와 압축강도와 동탄성계수의 관계식을 유도하기 위해서는 압축강

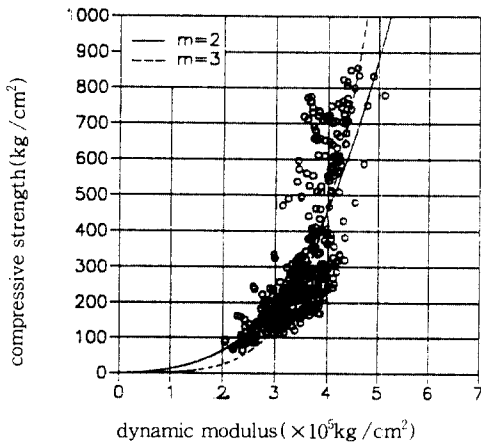


Fig. 6 The relation of compressive strength and dynamic modulus^(3,4,5,6,9,10)

도 400kg/cm^2 이상의 콘크리트에 대한 많은 실험이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

4.3 초기 콘크리트 탄성계수의 예측

기존의 제안식으로는 초기재령시 동탄성계수를 이용하여 콘크리트 정탄성계수의 예측이 어려운 것으로 판단된다. 그러나 Table 7에 나타난 바와 같이 식(5)중 k_1, k_2 값이 재령에 따라서 변화하므로 이 실험치에 의하여 k_1, k_2 값을 시간에 관한 함수로 나타낼 수 있다고 판단된다. 한편, k_1 값은 재령의 증가에 비하여 서서히 감소하는 결과를 나타내며, k_2 값도 재령의 증가에 비하여 서서히 증가하는 것을 알 수 있다.

Table 7 k_1, k_2 with age

Aging(day)	3	7	28	60	90	180
Factor						
k_1	0.66	0.60	0.59	0.58	0.51	0.50
k_2	-0.09	-0.07	-0.05	-0.043	-0.038	-0.02
Data Number	3	54	65	55	11	11

위와 같은 사실을 근거로 하여 재령에 따른 정탄성계수와 동탄성계수와의 실험값을 이용하고,⁽³⁻⁶⁾ 다음의 식을 사용하여 회귀분석을 실시하였다.

$$E_c(t) = E_d(t)(1-k_1(t))e^{k_2(t)E_d(t)^3} \quad (11)$$

$$k_1(t) = \alpha_1 + \beta_1 \log(t/28)$$

$$k_2(t) = \alpha_2 + \beta_2 \log(t/28)$$

여기서, t : 재령(days)

$E_c(t)$: 시간 t 에서의 정탄성계수
($\times 10^5 \text{kg/cm}^2$)

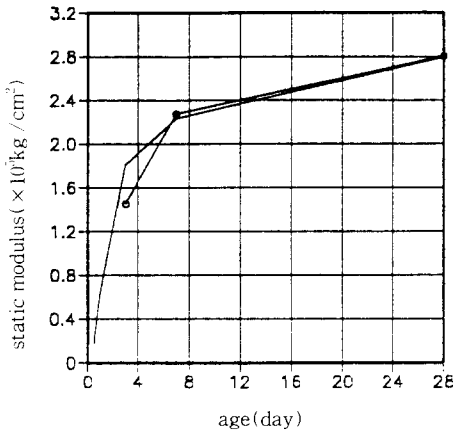
$E_d(t)$: 시간 t 에서의 동탄성계수
($\times 10^5 \text{kg/cm}^2$)

식 (12)는 식 (11)을 이용하여 회귀분석을 실시한 결과를 나타내고 있다.

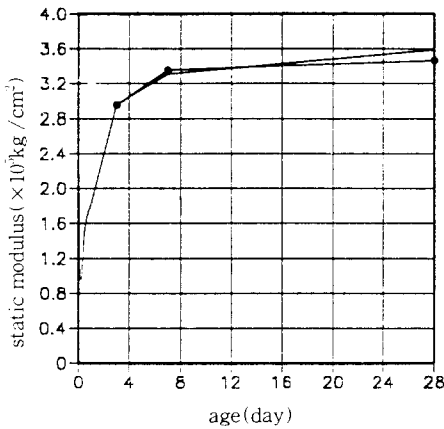
$$k_1(t) = 0.59 - 0.03 \log(t/28) \quad (12)$$

$$k_2(t) = -0.05 + 4 \times 10^{-3} \log(t/28)$$

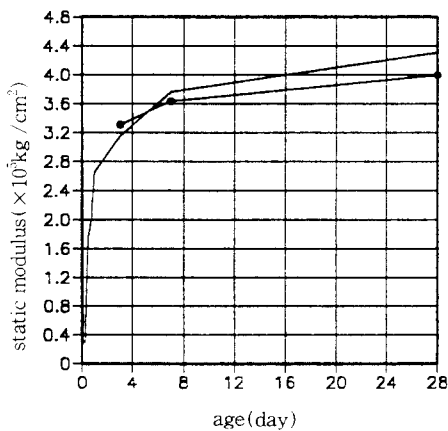
식 (12)에서 보면 $k_2(t)$ 의 값중에서 β_2 의 값이 0



(a) $f_c = 300 \text{ kgf/cm}^2$



(b) $f_c = 500 \text{ kgf/cm}^2$



(c) $f_c = 800 \text{ kgf/cm}^2$

Fig. 7 Comparison of experimental and predictive value

에 가까운 값으로 나타나므로 $k_2(t)$ 의 값은 재령에 대한 영향이 거의 없는 것으로 사료된다. 따라서 제안식에서는 k_2 의 값을 -0.05으로 고정하여도 큰 오차가 없을 것으로 판단되어 정탄성계수와 동탄성계수와와의 관계식을 다음 식 (13)과 같이 나타내었다.

$$E_c(t) = E_d(t)(1 - k(t)e^{-0.05E_d(t)^2}) \quad (13)$$

$$k(t) = 0.59 - 0.03\log(t/28)$$

위에서 제안한 식을 이용하여 예측한 정탄성계수와 본 연구의 실험결과를 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. 300kg/cm^2 의 경우에는 재령이 증가할수록 정탄성계수의 예측값이 실험값과 거의 일치하고 있으며, 500kg/cm^2 의 경우에도 7, 28일에 대해서는 동탄성계수를 이용한 정탄성계수의 예측이 비교적 정확하게 나타났다. 800kg/cm^2 의 경우에는 재령이 증가하면서 예측값과 실험값 차이가 약간 나타났으나 이 연구의 제안식을 사용한 재령에 따른 정탄성계수의 합리적 예측이 비교적 적절히 가능하다고 사료된다.

5. 결 론

초기재령 콘크리트의 역학적 성질에 관한 실험적 연구에 관한 결론은 다음과 같다.

(1) 콘크리트 정탄성계수와 동탄성계수의 관계식을 재령의 영향을 고려하여 다음과 같이 제안하였다.

$$E_c(t) = E_d(t)(1 - k(t)e^{-0.05E_d(t)^2})$$

$$\text{여기서, } k(t) = 0.59 - 0.03\log(t/28)$$

t : 재령(일)

$E_c(t)$: 시간 t 에서의 정탄성계수
($\times 10^5 \text{kg/cm}^2$)

$E_d(t)$: 시간 t 에서의 동탄성계수
($\times 10^5 \text{kg/cm}^2$)

$t = 28$ 일인 경우의 식은 다음과 같다.

$$E_c = E_d (1 - 0.59 e^{-0.05E_d^2})$$

(2) 콘크리트의 압축강도와 동탄성계수의 관계식을 다음과 같이 제안하였다.

$$f_c = 16.1(E_d (1 - 0.52 e^{-0.05E_d})^3)$$

여기서, f_c : 압축강도(kg/cm²)

E_d : 시간 t에서의 동탄성계수
($\times 10^3$ kg/cm²)

(3) 초기재령 콘크리트의 동탄성계수를 측정하면 이 논문에서 제시된 식에 의하여 재령에 따른 동탄성계수 및 압축강도를 예측할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 1994년도 학술진흥재단의 공모과제 연구비 지원에 의하여 연구된 결과이며, 동 재단에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김무한, 권영진, "유동화콘크리트의 시공항상 및 강도특성에 관한 기초적 연구(II)," 한국콘크리트학회 학술발표논문집, 제1권 1호, 1989. 11., pp.21-24
2. 권영진, 김무한, "실리카·흙을 혼입한 고강도 콘크리트의 시공성 및 공학적 특성에 관한 기초적 연구," 한국콘크리트학회 학술발표논문집, 제2권 1호, 1990. 5., pp.29-34
3. 송하영, 김무한, "유동화 콘크리트의 시공성 및 공학적 특성에 미치는 고성능 감수제의 첨가시기 및 방법에 관한 기초적 연구," 한국콘크리트학회 학술발표논문집, 제2권 2호, 1990. 11., pp. 117-122
4. 남상일, 김무한, "高強度콘크리트의 工學的 特性에 미치는 單位시멘트량의 影響에 관한 實驗的 研究," 한국콘크리트학회 학술발표논문집, 제4권 1호, 1992, pp.41-46
5. 김무한, 정수영, 윤석천, 한천구, "고강도 콘크리트의 개발과 공학적 특성에 관한 실험적 연구," 대한건축학회논문집, 제5권 2호, 1989. 4., pp. 153-189
6. 노재호, 정재동, 조일호, 이선우, "지역별 골재 품질변화가 콘크리트 물성에 미치는 영향," 한국콘크리트학회 학술발표논문집, 제5권 1호, 1993. 5., pp.34-39
7. Malhotra, V.M., and Carino, N.J., "Handbook on Nondestructive Testing of Concrete," CRC Press, 1991
8. Sharma, M.R., and Gupta, B.L., "Sonic Modulus as related to Strength and Static Modulus on High Strength Concrete," Journal of Indian Concrete, Vol.34, No.4, 1960, pp. 139-141
9. 坂静雄, "コンクリートの静弾性係數と動弾性係數" セメント技術年報, Vol.8, 1954, pp.322-325
10. 渡邊照彦, "コンクリートの各種弾性係數の比較" セメント技術年報, Vol.10, 1954, pp.374-380

(접수일자 : 1995. 7. 15)