

動的荷重을 받는 콘크리트의 力學的 舉動에
관한 理論 및 實驗研究

A Theoretical and Experimental Investigation on the Mechanical
Behavior of Concrete under Dynamic Loads

吳	炳	煥*
Oh,	Byung	Hwan
姜	榮	振**
Kang,	Young	Jin
申	修	泰***
Shin,	Soo	Bong

Abstract

An experimental and theoretical investigation was conducted in the present study to explore the mechanical behavior of concrete under dynamic loads. The stress-strain behavior and mechanical characteristics of concrete under various strain-rates were studied from several series of experiments. A new constitutive theory was derived on the basis of viscoplasticity to model the dynamic behavior of concrete. The theory is verified by the present test results as well as other previous test data.

It is found from the present study that the strength of concrete is greatly increased with the increase of strain rate and that the rate of strength increase is greater in tension than in compression. The present theory as well as present test results will provide very useful basis to explore the dynamic behavior of concrete structures.

要 旨

本 論文에서는 動的荷重을 받는 콘크리트의 力學的 舉動을 규명하기 위하여 일련의 실험 및 이론연구를 수행하였다. 實驗研究에서는 荷重의 變形速度를 변화시켜 가며 力學的 特性的의 변화와 應力-變形 관계를 조사분석하였다. 콘크리트의 이러한 動的 舉動을 모델하기 위하여 本 論文에서는 점소성이론에 근거를 둔 새로운 이론을 유도하였다. 본 논문에서 유도된 構成方程式은 變形速度와 응력완화함수의 함수로 表示된다. 本 理論을 本 研究의 實驗資料 및 他 實驗資料와 比較한 結果 本 理論이 실험결과를

*正會員 · 서울大學校 工科大學 土木工學科 副教授

**正會員 · 서울大學校 工科大學 土木工學科 副教授

***서울大學校 大學院 (在美中)

비교적 잘 서술하는 것으로 나타났다. 本 研究結果 變形速度가 증가함에 따라 콘크리트의 強度가 증가하며, 動的強度의 증가율이 압축하중보다 인장하중에서 더욱 큰 것으로 밝혀졌다. 本 研究의 실험결과 및 이론모델은 콘크리트構造物의 動的舉動 규명에 유용한 기초를 제공할 것으로 사료된다.

1. 序 論

콘크리트가 폭발, 충격하중, 지진하중 또는 波力荷重 등과 같은 動的荷重을 받을 때의 그 力學的舉動은 매우 복잡한 것으로 알려져 있다. 이러한 動的荷重下에서의 콘크리트의 強度 및 力學的特性은 작용되는 荷重 또는 變形速度에 따라 크게 달라지게 된다. 콘크리트에 대한 이 荷重速度效果는 지금까지 비교적 많은 研究가 이루어져 왔다(2, 7, 11~13, 16~18, 21~27). 이들 대부분의 研究는 荷重速度에 따른 단순한 실험들로서 주로 強度의 變化特性 등을 分析하는데 주안점을 두었다. 지금까지의 실험자료 가운데 또 한가지의 특징은 各 實驗資料 사이에 서로 일치하지 않는 경향을 나타내는 점이 있다는 것이다. 즉, 荷重速度 (loading rate)에 따른 最高應力에서의 變形率이 研究者마다 서로 다르게 나타나 있는 점이다(7, 25).

또한 그동안 콘크리트의 變形速度效果(strain-rate effect)에 대한 實驗的 研究는 어느 정도 수행되어 온 반면, 이들에 대한 理論的 研究는 극히 제한된 실정이다. 다만 Bresler 等(2), Dilger 等(7), Hughes 等(12)의 研究者들이 變形速度에 따른 強度變化現象을 실험자료로부터 단순히 회귀분석한 정도이고, 변형속도에 따른 응력-변형거동을 서술할 수 있는 理論모델에 대한 研究는 찾아 보기 어려운 실정이다.

本 研究者는 참고문헌 2에서 變形速度에 따른 콘크리트의 力學的 舉動을 서술할 수 있는 모델을 유사변환이론을 利用하여 誘導한 바 있다.

本 研究의 主 目的은 動的荷重下에서의 콘크리트의 제반 역학적 거동을 실험적으로 규명하고, 이 舉動을 실제적으로 서술할 수 있는 합리적인 이론 모델을 유도하여 제시하는데 있다. 실험연구에서는 그동안의 不分明했던 결과를 규명하기 위하여 포괄적인 실험을 수행하고, 이론모델은 콘크리트의 크리프(creep)과 응력완화(stress relaxation)를 고려하여 점소성 이론에 근거를 둔 콘크리트에 좀더

실제적인 이론모델을 誘導하고자 한다.

2. 콘크리트의 動的舉動實驗

2.1 實驗 概要

本 研究에서는 荷重速度에 따른 콘크리트의 動的舉動을 규명하기 위하여 일련의포괄적인 실험을 수행하였다. 그동안의 實驗資料(11~17, 16~18, 21~25)들은 주로 強度의 變化특성에 중점을 두어 왔으나 本 研究에서는 動的荷重下에서의 應力-變形舉動等諸 特性을 포괄적으로 규명하고자 하였다. 이를 위하여 콘크리트의 強度가 각각 다른 세가지 시리즈에 대하여 실린더 시편을 제작하였고, 작용하중도 變形速度 (strain-rate)를 4 단계로 변화시키면서 실험을 수행하였다.

2.2 實驗試片의 製作 및 養生

本 研究에서는 우선 콘크리트 압축강도의 크기에 따라 變形速度效果 (strain-rate effect)의 영향이 어떻게 달라지는가를 보기 위하여 強度가 다른 세가지 시리즈 즉 低強度, 普通強度 및 高強度콘크리트의 3種類로 분류하였다. 이것은 콘크리트의 強度 수준에 따라 荷重의 速度效果가 다르게 나타날 수 있기 때문이다. 本 研究에서 사용된 콘크리트의 배합비율이 表 1에 要約되어 있다. 여기서 굵은 골재의 최대치수는 실험시편의 크기를 고려하여 10mm로 하였다.

모든 콘크리트 시편들은 各 시리즈마다 한 번의 배합으로 만들어 졌으며, 실험에 사용된 실린더 공시체의 크기는 50×100mm로서 각 시리즈마다 20개씩 제작하였다. 실린더 공시체의 크기를 50×100mm로 한 것은 시험에 사용된 인스트론(instron) 시험기의 시험용량(25ton, dynamic) 제한 때문이었으며, 정적강도의 참고를 위하여 100×200mm 실린더 공시체도 제작하였다.

모든 콘크리트시편들은 各 series 別로 配合하여 몰드에 成形한 후 2일제 탈형하여 試驗前日까지 水中養生을 실시하였다.

表 1. 콘크리트의 配合成分과 壓縮強度

Test Series	重 量 化			물-시멘트비 (W/C)	壓縮強度 (kg/cm ²)
	시멘트	잔골재	굵은골재		
Series 1	1	2.49	2.62	0.71	89
Series 2	1	2.09	2.10	0.60	265
Series 3	1	1.60	1.74	0.49	419

2.3 實驗修行 및 測定

콘크리트의 變形速度效果를 규명하기 위한 動的 實驗을 수행하기 위하여 각 시리즈 별로 4단계 이상으로 구분하여 실험을 실시하였다. 荷重의 變形速度는 시험기의 能力과 실제 상황을 고려하여 대체로 靜的荷重 수준인 $1 \times 10^{-5}/\text{sec}$ 에서부터 動的荷重 수준인 $1 \times 10^{-2}/\text{sec}$ 의 범위에서 조절하였다. 실험은 instron 회사제품의 자동제어 動的試驗機에 의해 수행되었으며, 시험기로부터 荷重과 變位曲線이 自動으로 기록되었다. 또한, 따로부착된 전기식 변위기와 하중 셀(load cell)로부터 荷重-變位를 二重으로 기록하였다.

2.4 實驗結果

上記의 實驗過程에 따라 각 시리즈별로 실험이 수행되었으며 그 結果를 기록하여 요약한 것이 表 2이다. 또한 本 實驗에서 얻어진 變形速度에 따른 應力-變形曲線이 그림 1에서 그림 3까지 각 시리즈 별로 나타나 있다.

이 실험결과를 요약한 그림들에서 보는 바와 같

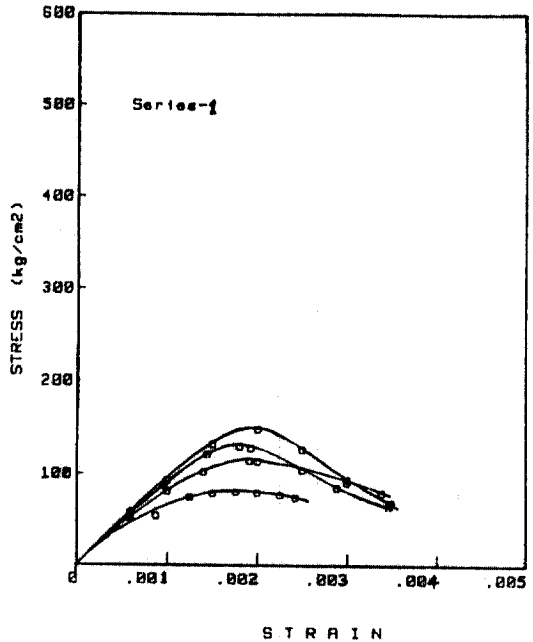


그림 1. 變形速度에 따른 콘크리트의 應力-變形關係 (Series-1)

이 變形速度가 빨라짐에 따라 콘크리트 強度가 증가함을 보여주고 있다. 또한, 시멘트 탄성계수(secant elastic modulus)도 變形速度에 따라 증가하고 있음을 알 수 있다.

그림 1~3에서 알 수 있는 또 한가지 사실은 最高應力 (peak stress)에서의 變形度가 變形速度에

表 2. 變形速度에 따른 각 시리즈별 實驗結果

Test Series	Strain Rate (1/sec)	Ultimate Stress (kg/cm ²)	Peak Strain	Strength Ratio fd/fs
Series 1	1×10^{-5}	89	0.00176	1.00
	1×10^{-4}	116	0.00191	1.30
	1×10^{-3}	132	0.00180	1.48
	1×10^{-2}	150	0.00200	1.68
Series 2	1×10^{-5}	265	0.00198	1.00
	1×10^{-4}	286	0.00194	1.08
	1×10^{-3}	300	0.00200	1.13
Series 3	5×10^{-6}	401	0.00303	0.96
	1×10^{-5}	419	0.00297	1.00
	1×10^{-4}	481	0.00253	1.14
	1×10^{-3}	518	0.00260	1.23

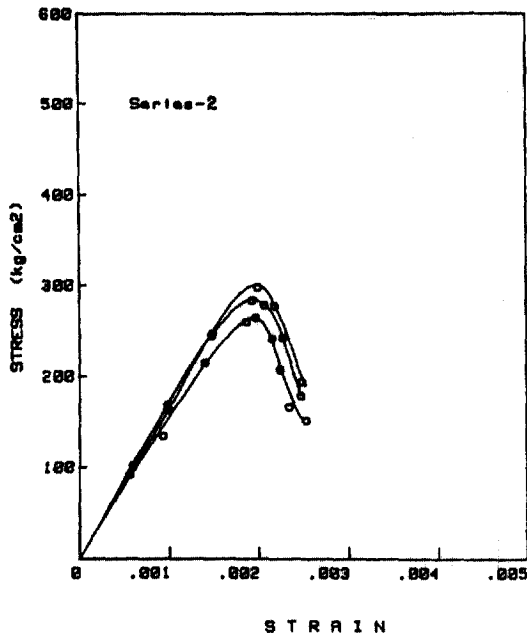


그림 2. 變形速度에 따른 콘크리트의 應力-變形關係 (Series-2)

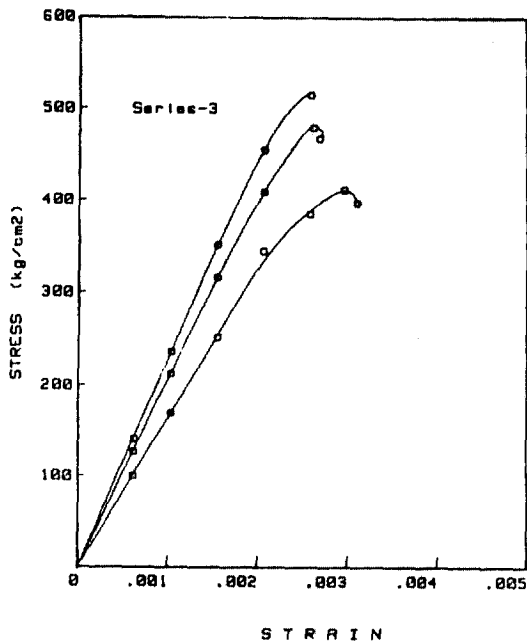


그림 3. 變形速度에 따른 콘크리트의 應力-變形關係 (Series-3)

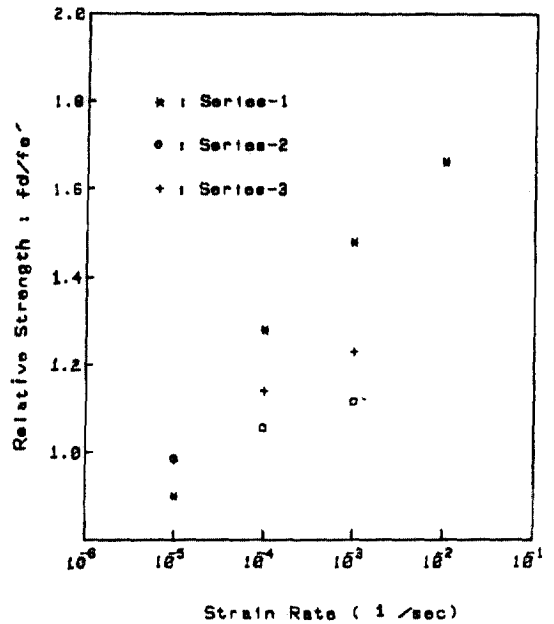


그림 4. 變形速度의 증가에 따른 각 콘크리트의 強度增加比

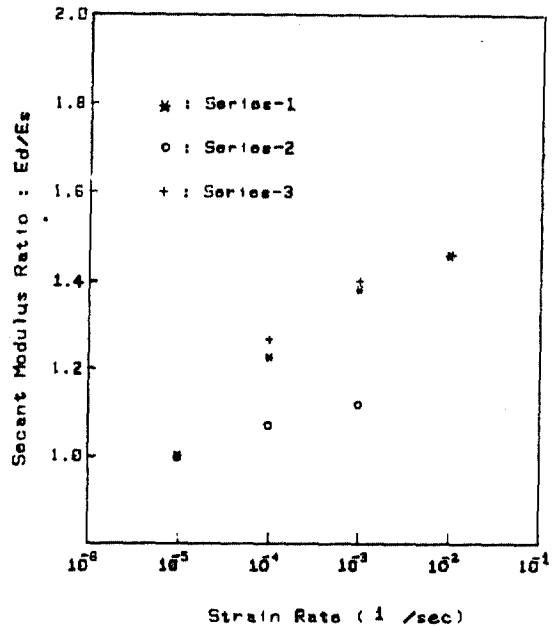


그림 5. 變形速度의 증가에 따른 각 콘크리트의 $\epsilon=0.001$ 에서의 시컨트 탄성계수비

따라 크게 변하지 않고 비슷한 값 주위에 위치하고 있다는 사실이다.

그림 4는 그림 1~3의 결과로부터 얻어진 변형 속도에 따른 압축강도의 증가비를 요약하여 그린 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 각 시리즈 공히 변형속도의 증가에 따라 콘크리트의 강도가 증가되고 있음을 알 수 있으며, 특히 강도가 낮은 콘크리트(series-1)에서 변형속도의 효과가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그림 5는 변형속도에 따른 각 시리즈 콘크리트의 시컨트탄성계수(secant modulus)의 변화 양상을 보여주고 있다. 이 그림에서도 보는 바와 같이 변형속도의 증가에 따라 시컨트탄성계수가 증가하고 있음을 알 수 있다.

3. 콘크리트의 動的 舉動理論

3.1 構成方程式의 誘導

본 논문에서는 콘크리트의 변형속도효과를 서술할 수 있는 이론모델을 유도하기 위하여 점소성모델(viscoplastic theory)을 근간으로 하여 출발하기로 한다. 점탄소성이론의 일반식은 다음과 같이 쓸 수 있다⁹⁾.

$$q_0 \dot{\epsilon} + q_1 \epsilon = \dot{\sigma} + P_1 \sigma \quad (1)$$

式(1)을 콘크리트에 적용시키기 위하여 좀더 일반적인 함수형으로 表示하면 다음과 같다.

$$m(\cdot) \dot{\epsilon} + g(\epsilon) = k(\cdot) \dot{\sigma} + \sigma \quad (2)$$

여기서, $m(\cdot)$, $k(\cdot)$, $g(\epsilon)$ 는 각각 괄호 안의 함수를 뜻하고 그의 意味와 誘導過程은 다음 節들에서 상세히 토의된다.

式(2)를 적분하여 應力 $\sigma(t)$ 와 變形度 $\epsilon(t)$ 를 구하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma(t) = g(\epsilon(t)) + \int_0^t \left\{ \frac{m(\cdot)}{k(\cdot)} - g'(\epsilon(\tau)) \right\} \exp\left(-\int_{\tau}^t \frac{dx}{k(\cdot)}\right) \dot{\epsilon}(\tau) d\tau \quad (3)$$

$$\epsilon(t) = \int_0^t \left\{ \frac{\sigma(\tau)k(\cdot)}{m(\cdot)} + \frac{\sigma(\tau)}{m(\cdot)} \right\} \exp\left(-\int_{\tau}^t \frac{g(\epsilon(s))}{\epsilon(s)m(\cdot)} ds\right) d\tau \quad (4)$$

여기서, $g'(\epsilon(\tau))$ 는 함수 $g(\cdot)$ 의 미분을 뜻하고, $\sigma(t=0)=0$, $\epsilon(t=0)=0$ 이다.

3.2 一定한 變形속도에서의 舉動

變形속도 $\dot{\epsilon}=\alpha$ 에서의 콘크리트의 거동을 서술하기 위하여 이제 式(3)을 변환하기로 한다. 變形속도 $\dot{\epsilon}=\alpha$ 로부터 $\epsilon=\alpha t$ 로 쓸 수 있고, 應力은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\hat{\sigma}(\epsilon) = \hat{\sigma}(\epsilon; \alpha) = \sigma(t) \Big|_{\epsilon=\alpha t} \quad (5)$$

式(3)을 式(5)에 연결하면 다음 式을 얻는다.

$$\hat{\sigma}(\epsilon; \alpha) = \hat{\sigma}(\epsilon) = g(\epsilon) + \int_0^{\epsilon} \left\{ \frac{m(\cdot)}{k(\cdot)} - g'(x) \right\} \exp\left(-\frac{1}{\alpha} \int_x^{\epsilon} \frac{ds}{k(\cdot)}\right) dx \quad (6)$$

荷重의 速度가 극히 느린 하중에 대해서는 式(6)이 다음과 같이 된다.

$$\hat{\sigma}(\epsilon; 0) = \lim_{\alpha \rightarrow 0} \hat{\sigma}(\epsilon) = g(\epsilon) \quad (7)$$

또한, 극히 빠른 하중에 대해서는

$$\hat{\sigma}(\epsilon; \infty) = \lim_{\alpha \rightarrow \infty} \hat{\sigma}(\epsilon) = \int_0^{\epsilon} \frac{m(\cdot)}{k(\cdot)} dx \quad (8)$$

式(7)은 콘크리트의 基本的인 靜的 應力-變形度 曲線을 나타내는 式이다. 또한, 빠른 하중에 대한 式(8)의 형태를 다음과 같이 정의할 수 있고, 이 때 $g^*(\epsilon)$ 는 빠른 하중하에서의 應力-변형관계가 된다.

$$g^{*'}(\epsilon) = \frac{m(\cdot)}{k(\cdot)} \quad (9)$$

式(9)를 式(6)에 代入하면 다음의 應力-변형도곡선을 얻게 된다.

$$\hat{\sigma}(\epsilon; \alpha) = \hat{\sigma}(\epsilon) = g(\epsilon) + \int_0^{\epsilon} \{g^{*'}(x) - g'(x)\} \exp\left(-\frac{1}{\alpha} \int_x^{\epsilon} \frac{ds}{k(\cdot)}\right) dx \quad (10)$$

式(10)은 변형속도에 따른 콘크리트의 應力-변형도 관계를 서술할 수 있는 構成方程式이며, 이 形態를 미분하면 増分型의 구성방정식이 유도된다.

$$\frac{d\hat{\sigma}}{d\epsilon} = g^{*'}(\epsilon) - \frac{1}{\alpha k(\cdot)} \int_0^{\epsilon} \{g^{*'}(x) - g'(x)\} \exp\left(-\frac{1}{\alpha} \int_x^{\epsilon} \frac{ds}{k(\cdot)}\right) dx \quad (11)$$

式(11)을 $\alpha \rightarrow 0$, $\alpha \rightarrow \infty$ 의 경우에 대하여 求하면 式(6)의 경우와 같이 式(7)과 式(8)을 얻게 된다. 또한 式(11)로부터 다음 관계를 얻을 수 있다. 즉, 모든 變形속도 α 에 대하여

$$\frac{d\hat{\sigma}}{d\epsilon}(\epsilon=0) = g^{*'}(0) \quad (12)$$

式(12)는 應力-변형도곡선의 초기 기울기가 변형속도에 관계없이 공통된 값을 갖게 된다는 것을 意味하고 있다. 그러므로 변형속도 $\alpha \rightarrow 0$ 인 경우의 $g(\epsilon)$ 의 초기 기울기 $g'(0) = g^{*'}(0)$ 이 되어야 한다.

3.3 크리프(creep) 과 응력완화(relaxation)

(1) 크리프변형

콘크리트의 力學的 舉動의 중요한 要素中의 하나가 크리프현상이다. 콘크리트의 크리프현상은 일정한 응력하에서의 시간에 따른 거동으로서 여기서는 응력이 σ_0 까지 임의의 응력속도로 증가한 후 $\dot{\sigma}=0$ 으로 일정한 값을 유지하는 크리프현상을 고려한다. 즉,

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} &= \sigma(t) & 0 < t < t_0 \\ \dot{\sigma} &= 0 & t_0 < t \end{aligned} \quad (13)$$

式(4)에 式(9)를 代入하여 정리하면

$$\begin{aligned} \epsilon(t) &= \int_0^t \left\{ \frac{\dot{\sigma}(\tau)}{g^*(\epsilon(\tau))} + \frac{\sigma(\tau)}{m(\cdot)} \right\} \\ &\quad \exp\left(-\int_0^t \frac{g(\epsilon(s))}{\epsilon(s) m(\cdot)} ds\right) d\tau \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 $\sigma(t_0) = \sigma_0$ 이고, 式(13)의 $t > t_0$ 구간에 대하여 式(14)를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \epsilon(t) &= \exp\left(-\int_{t_0}^t \frac{g(\epsilon(s))}{\epsilon(s) m(\cdot)} ds\right) \left\{ \epsilon(t_0) + \sigma_0 \int_{t_0}^t \right. \\ &\quad \left. \exp\left(-\int_{t_0}^s \frac{g(\epsilon(s))}{\epsilon(s) m(\cdot)} ds\right) \frac{d\tau}{m(\cdot)} \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

이제 單位應力(unit stress)에 대한 크리프변형, 즉 크리프함수 $J(t, t_0)$ 를 式(15)로부터 다시 쓰면, $\sigma_0 = 1$ 에서 $\epsilon(t) = J(t)$ 이므로

$$\begin{aligned} J(t, t_0) &= J(t) = \exp\left(-\int_{t_0}^t \frac{g(J(s))}{J(s) m(\cdot)} ds\right) \left\{ J(t_0) + \right. \\ &\quad \left. \int_{t_0}^t \exp\left(\int_{t_0}^s \frac{g(J(s))}{J(s) m(\cdot)} ds\right) \frac{d\tau}{m(\cdot)} \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 $t_0 = t - t_0$ 이다. 또한, 變形速度 $\dot{\epsilon} \rightarrow 0$ 일 때 $g(J(t)) = \sigma_0 = 1$ 이 되고 $m(\cdot) = m_0$ 로 되므로 $\epsilon' (= \alpha) \rightarrow 0$ 에서 式(16)은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \lim_{\alpha \rightarrow 0} J(t) &= \exp\left(-\int_{t_0}^t \frac{ds}{J(s) m_0}\right) \left\{ J(t_0) + \int_{t_0}^t \right. \\ &\quad \left. \exp\left(-\int_{t_0}^s \frac{ds}{J(s) m_0}\right) \frac{d\tau}{m_0} \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

(2) 응력 완화

응력완화(stress relaxation) 현상은 變形度가 어느 값 ϵ_0 까지 도달한 후에 $\dot{\epsilon} = 0$ 으로 일정한 값을 유지할 때 응력이 완화되는 현상으로 점소성이론에서 크리프현상과 함께 근간을 이룬다. 여기서는 前節들에서 유도된 式들 가운데 함수 $k(\cdot)$ 가 바로 응력완화현상을 나타내는 함수라는 것을 도출하게

된다.

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon} &= \dot{\epsilon}(t) & 0 < t < t_0 \\ \dot{\epsilon} &= 0 & t_0 < t \end{aligned} \quad (18)$$

式(9)를 利用하여 式(3)을 $t > t_0$ 구간에 대하여 완화응력(relaxation stress)을 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_R(t) &= g(\epsilon_0) + \{\sigma_R(t_0) - g(\epsilon_0)\} \\ &\quad \exp\left(-\int_{t_0}^t \frac{dx}{k(\cdot)}\right) \end{aligned} \quad (19)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \sigma_R(t_0) - g(\epsilon_0) &= \int_0^{t_0} \{g^{*'}(\epsilon(\tau)) - g'(\epsilon(\tau))\} \\ &\quad \exp\left(\int_{t_0}^{\tau} \frac{dx}{k(\cdot)}\right) \dot{\epsilon}(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (20)$$

이제 $t = t_0$ 에서 순간적으로 변형도가 $\epsilon = 0$ 에서 $\epsilon = \epsilon_0$ 까지 증가할 경우 다음식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon(t) &= \epsilon_0 h(t - t_0) \\ \epsilon(t) &= \epsilon_0 \delta(t - t_0) \end{aligned} \quad (21)$$

여기서, $h(\cdot) = \text{step}$ 함수, $\delta(\cdot) = \text{delta}$ 함수를 표시한다. 式(21)을 이용하여 式(19)로부터 $t > t_0$ 구간에서 순간완화응력 σ_R 를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_R(t) &= g(\epsilon_0) + \{g^*(\epsilon_0) - g(\epsilon_0)\} \\ &\quad \exp\left(-\int_{t_0}^t \frac{dx}{k(\cdot)}\right) \end{aligned} \quad (22)$$

式(19)와 式(22)에서 $t \rightarrow \infty$ 일때 $\sigma(t \rightarrow \infty) = g(\epsilon_0)$ 임을 알 수 있고, $t \rightarrow t_0$ 일때는 式(19)에서 $\sigma_R(t \rightarrow t_0) = \sigma_R(t_0)$, 또 式(22)에서 $\sigma_R(t \rightarrow t_0) = g^*(\epsilon_0)$ 을 얻는다. 즉, $g(\epsilon_0)$ 는 응력완화곡선이 시간이 지남에 따라 접근하는 下限値이고, $g^*(\epsilon_0)$, $\sigma_R(t_0)$ 는 上限値가 된다. 따라서 式(22)는 빠른 동적하중에 의한 응력완화가 $t = t_0$ 에서 $g^*(\epsilon_0)$ 로 부터 시작됨을 보여주고 있다.

여기서 한가지 重要的 사실은 式(19)와 式(22)로부터 알 수 있듯이 응력완화가 함수 $k(\cdot)$ 에 의해 決定됨을 알 수 있다.

따라서, 이 함수 $k(\cdot)$ 는 그 단위가 시간인 응력완화함수(relaxation function)가 되며 이제 이 함수를 決定해야 한다.

3.4 各 特性函數의 決定

(1) 응력완화함수 $k(\cdot)$ 의 決定

응력완화함수 $k(\cdot)$ 는 변형속도 $\dot{\epsilon} \rightarrow 0$ 일때 즉, 정적하중에서 $k(\cdot) = k_0$ 인 임의의 常數가 된다고 생각할 수 있다. 이 사실을 보기 위하여 Brooks & Neville⁽⁴⁾의 응력완화(stress relaxation)에 대한 실

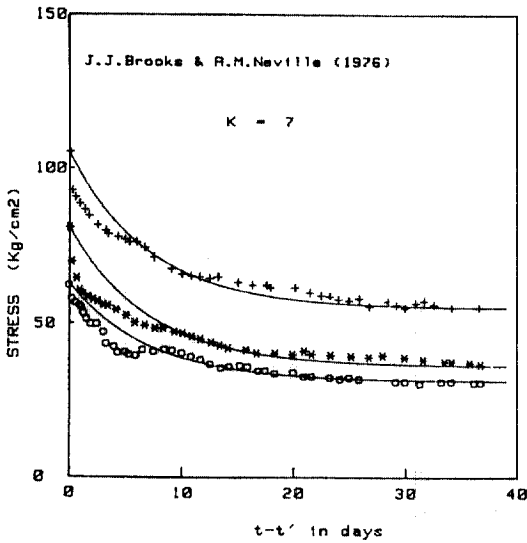


그림 6. 응력완화 실험자료와 본理論(式(22))과의 비교

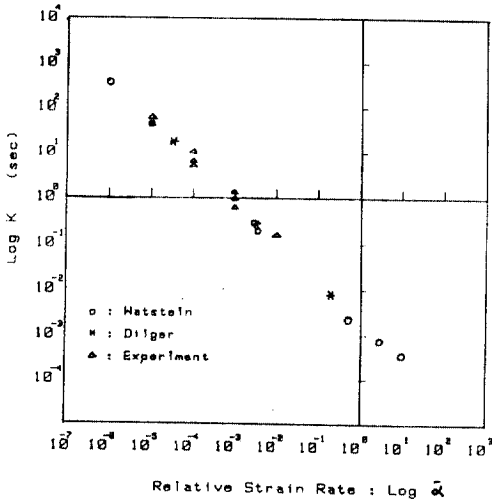


그림 7. 상대변형속도에 따른 응력완화 함수 $k(\alpha)$

험자료를 본理論과 비교한 것이 그림 6이다. 이 그림에서 보듯이 常數의 k 값이 콘크리트 응력완화에 대한 실험자료를 잘 서술하고 있음을 알 수 있다. 이제 이 응력완화함수가 변형속도에 따라 달라질 것이므로 변형속도의 함수 즉, $k=k(\dot{\epsilon})$ 로決定한다. 이 함수를 결정하기 위하여 변형속도에 따른 응력의 증가비에 따라 각 변형속도마다의 상수 k_c 값을 log-log 좌표로 옮겨 X-축은 무차원의 相對

變形速度 (α)로表示하고, Y-軸은 응력완화함수 k_c 를 변수로 하여 그림으로表示한 것이 그림 7이며, 이 그림에서 보는 바와같이 $k(\dot{\epsilon})$ 함수가 변형속도에 따라 선형관계를 이룸을 알 수 있다. 따라서, $k(\dot{\epsilon})$ 함수를 다음과 같이表示할 수 있다.

$$k(\dot{\epsilon}) = c_0 \alpha^{-c_1} \quad (23)$$

여기서, α =相對變形速度, c_0 =常數(sec), c_1 =常數를 나타낸다. 式(23)을 본 研究의 실험자료와 他 研究의 實驗資料에 적용한 결과 $c_0=0.0013\sim 0.004$, $c_1=0.80\sim 0.91$ 사이에 위치하고 있는 것으로 나타났다.

(2) 함수 $g(\epsilon)$ 의 決定

式(7)에서 본 바와 같이 $g(\epsilon)$ 는 느린 속도의 기본적 應力-變形度 曲線을 나타내며, 본 研究에서는 지금까지 가장 잘 表現되어 利用되고 있는 Saenz의 다음 式을 基本으로 한다⁽⁶⁾.

$$g(\epsilon) = \frac{E\epsilon}{1 + (E/E_0 - 2)(\epsilon/\epsilon_0) + (\epsilon/\epsilon_0)^2} \quad (24)$$

여기서, E =콘크리트의 탄성계수, σ_0 =最高應力(強度), ϵ_0 =最高應力에서의 變形度, $E_0 = \sigma_0/\epsilon_0$ 를 나타낸다. 함수 $g(\epsilon)$ 는 변형속도가 아주 느릴때 ($\alpha \rightarrow 0$)의 應力-變形度 곡선이고 σ_0 는 이때의 最高應力이므로 實驗資料⁽²⁾에 의하면 하중속도가 아주 느린 경우 이 最高應力은 보통 압축강도의 약 73% 즉, $\sigma_0 = 0.73f_c'$ 가 되는 것으로 나타나 있다.

(3) 함수 $g^*(\epsilon)$ 의 決定

上記의 式(8), (9)에서도 토의된 바와 같이 $g^*(\epsilon)$ 은 매우 빠른 動的 荷重下에서의 應力-變形度 곡線을 나타낸다. 이 함수식은 式(12) 등과 같이 초기 기울기등의 조건을 만족시켜야 하며, 이것은 式(24)의 基本式의 形態에 근거를 둬서 이루어질 수 있다. 즉,

$$g^*(\epsilon) = \frac{E\epsilon}{1 + (E/E_0^* - 2)(\epsilon/\epsilon_0^*) + (\epsilon/\epsilon_0^*)^2} \quad (25)$$

여기서, $\sigma_0^* = g^*(\epsilon)$ 곡선에서의 最高應力, $\epsilon_0^* =$ 最高應力 σ_0^* 에서의 變形度, $E_0^* = \sigma_0^*/\epsilon_0^*$ 를 나타낸다. 여기서, σ_0^* 는 아주 빠른 動的 荷重下에서의 最高強度로서 變形速度에 따른 強度增加比에 대한 실험자료들^(2, 7, 11, 12, 16)로부터 靜的 強度 f_c' 의 약 2배가 되는 것으로 定하였다. 따라서 $\sigma_0^* = 2f_c' = 273\sigma_0$ 가 된다.

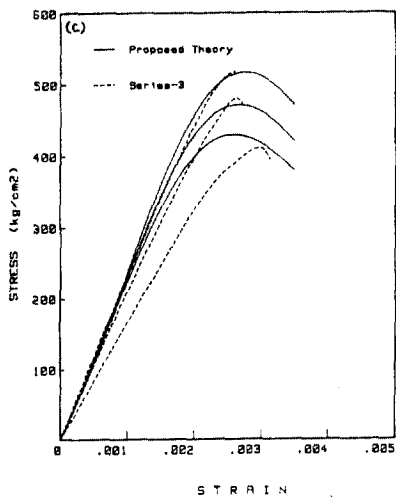
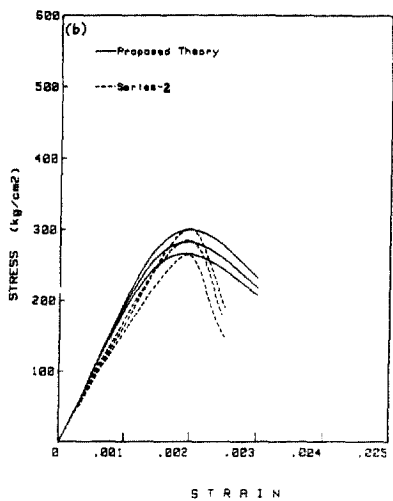
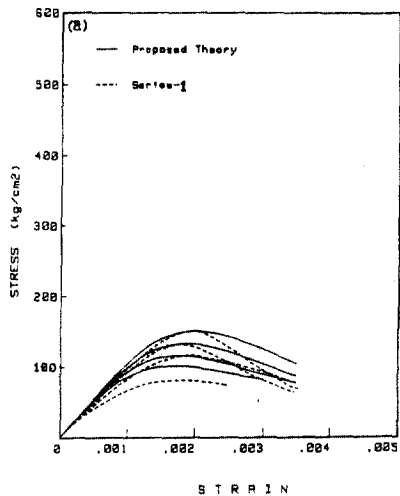


그림 8. 本理論과 本 研究의 실험자료와의 비교

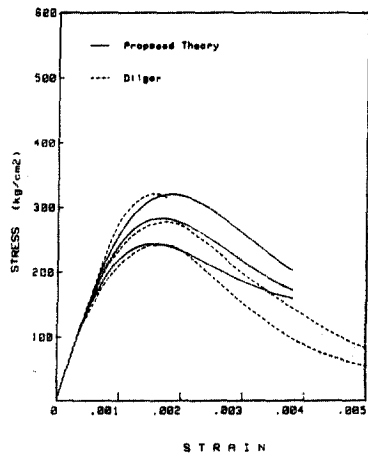


그림 9. 本理論과 Dilger의 실험자료와의 비교

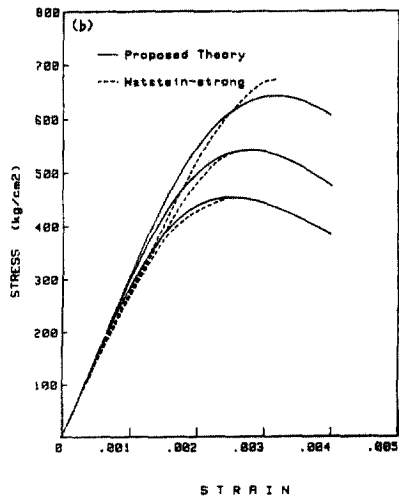
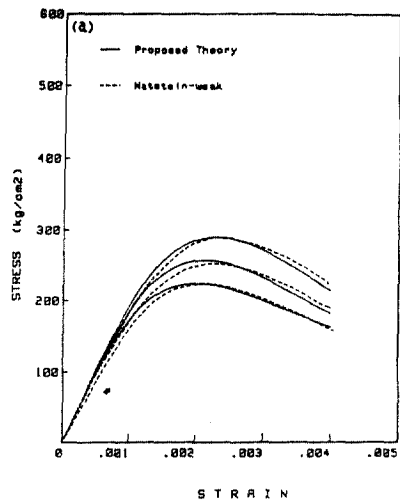


그림 10. 本理論과 Matstein의 실험자료와의 비교

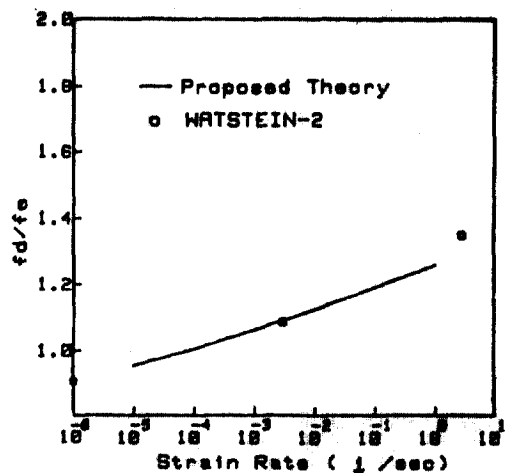
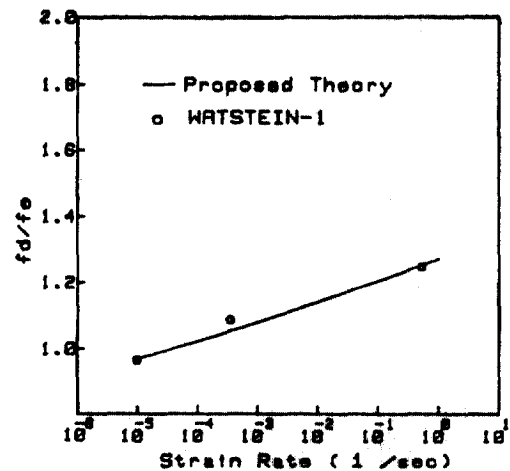
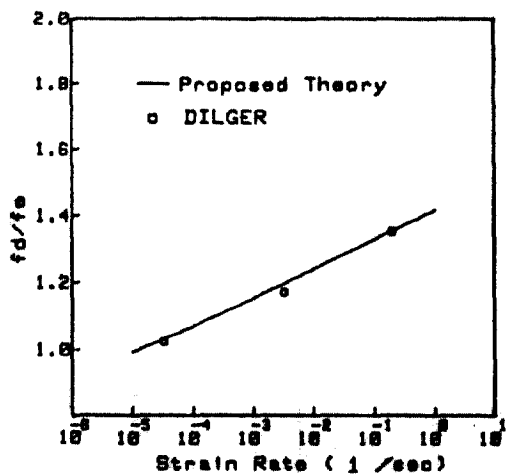
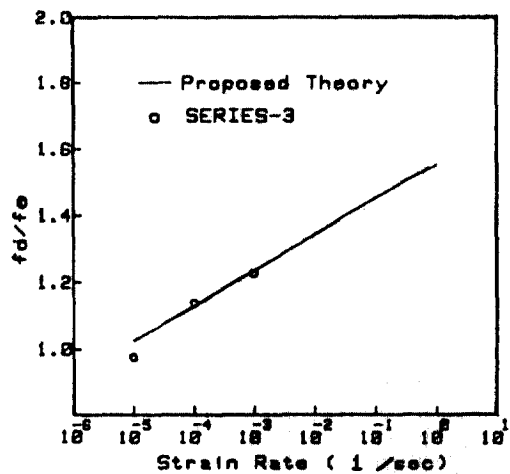
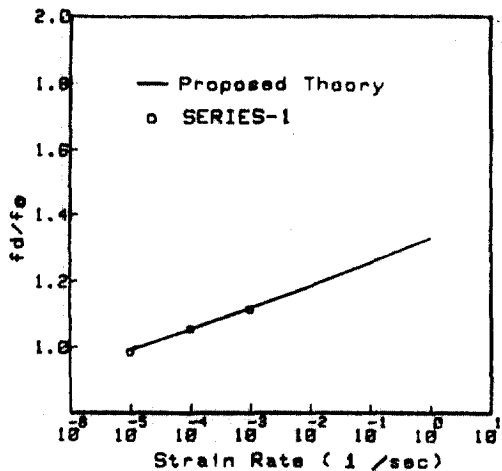
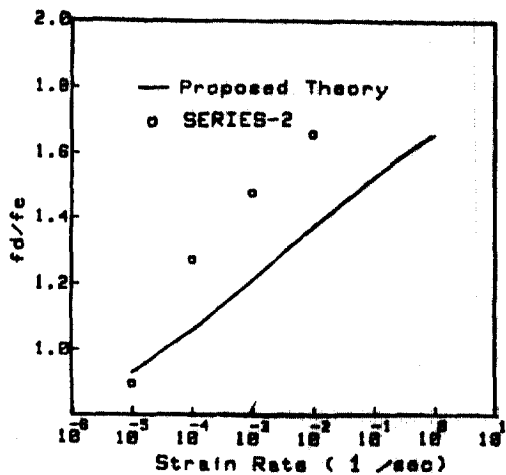


그림 11. 變形速度에 따른 強度增加比의 비교

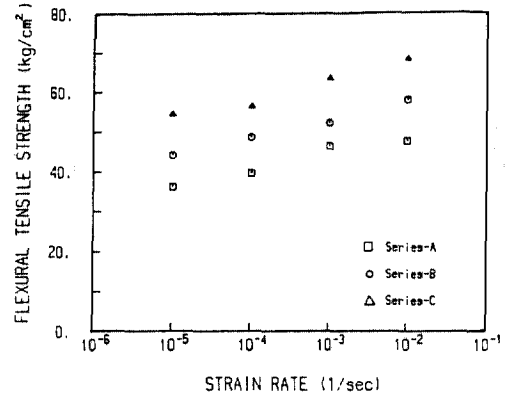
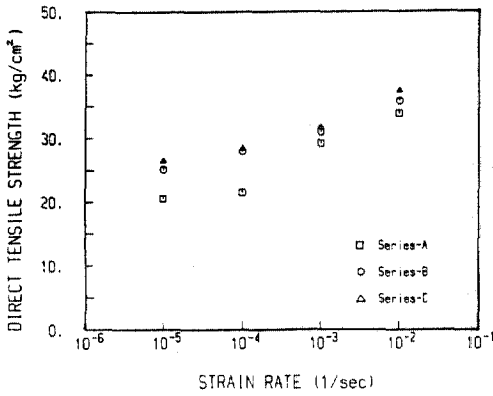


그림 12. 變形速度에 따른 직접인장강도 및 휨강도의 변화

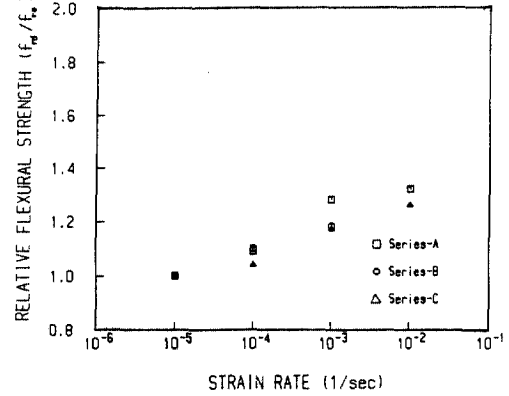
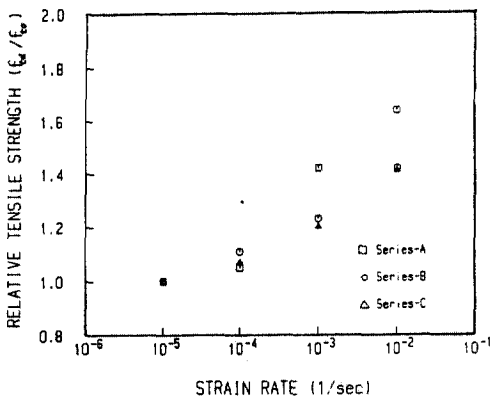


그림 13. 變形速度에 따른 各 引張強度의 相對強度比

表 3. 變形速度에 따른 動的引張實驗結果

Test Series	變形速度 (1/sec)	直接引張強度 (kg/cm ²)	휨引張強度 (kg/cm ²)
Series A (壓縮強度 : 306kg/cm ²)	1 × 10 ⁻⁵	20.5	36.2
	1 × 10 ⁻⁴	21.5	39.6
	1 × 10 ⁻³	29.2	46.4
	1 × 10 ⁻²	33.7	47.7
Series B (壓縮強度 : 449kg/cm ²)	1 × 10 ⁻⁵	25.1	44.1
	1 × 10 ⁻⁴	27.9	48.6
	1 × 10 ⁻³	30.9	52.2
	1 × 10 ⁻²	35.7	58.1
Series C (壓縮強度 : 637kg/cm ²)	1 × 10 ⁻⁵	26.5	54.5
	1 × 10 ⁻⁴	28.3	56.4
	1 × 10 ⁻³	31.7	63.5
	1 × 10 ⁻²	37.4	68.4

4. 實驗資料와의 比較 및 檢討

이제 본 研究에서 유도된 3장의 理論을 본 研究의 실험자료 및 他 實驗資料와 比較하고자 한다. 그림 8은 본 理論(실선)과 본 실험자료(점선)를 비교한 것으로서 본 理論이 強度에 대한 증가현상 등을 비교적 잘 서술하고 있음을 볼 수 있다. 그림 9는 본 理論과 Dilger⁽⁷⁾의 동적 실험자료를 비교한 것이고, 그림 10은 Watstein⁽⁸⁾의 실험자료와 비교한 것이다. 또한 그림 11은 動的 荷重의 變形速度(strain-rate)에 따른 콘크리트 압축강도의 增加比를 본 理論과 여러 실험자료를 상호비교한 것이다. 즉, 정적강도에 대한 동적강도의 比를 변형속도에 따라 비교한 것으로서, 본 理論이 실험결과를 비교적 잘 설명하고 있음을 알 수 있다.

5. 動的 引張舉動과의 比較

本 研究에서는 콘크리트의 動的 壓縮舉動과 動的 引張舉動을 比較 分析하기 위하여 일련의 動的 引張實驗을 아울러 수행하였다. 動的 引張實驗은 직접인장실험과 휨인장실험을 병행하여 수행하였으며, 그 실험결과가 각 시리즈 별로 表 3에 요약되어 있다. 이 실험결과를 그림으로 表示한 것이 그림 12이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 변형속도에 따라 引張強度가 增加하고 있으며, 이 引張強度의 증가현상을 靜的強度에 대한 相對比로 表示한 것이 그림 13이다. 이 그림 13에서 알 수 있는 사실은 直接引張強度가 휨引張의 경우보다 變形速度에 대한 영향을 더 많이 받아 動的強度의 增加率이 더 크다는 사실이다. 또한, 動的壓縮舉動과 비교할 때 表 2나 그림 11의 결과와의 比較에서 알 수 있듯이 動的效果가 壓縮荷重보다 引張荷重에서 더 크게 나타나고 그것도 단면에 인장부분이 많을수록 더 크게 나타난다는 사실을 알 수 있다.

6. 結 論

本 論文에서는 動的荷重을 받는 콘크리트의 力學的 舉動을 규명하기 위하여 일련의 실험적 연구와 이들을 모델하기 위한 理論研究를 수행하였다. 實驗研究에서는 荷重의 變形速度를 변화시켜가며 力學的 特性的 變化를 측정하였으며, 應力-變形關係를 조사 분석하였다. 콘크리트의 이러한 動的 舉

動을 모델하기 위하여 本 論文에서는 점소성이론에 근거를 둔 새로운 理論을 유도하였으며 이 構成方程式은 荷重의 變形速度의 함수로 表示된다. 本 研究에서 유도된 이론을 本 研究의 實驗資料 및 他 實驗資料와 比較한 결과 本 理論이 實驗結果를 비교적 잘 서술하고 있는 것으로 나타났다.

本 研究結果 變形速度가 증가함에 따라 콘크리트의 強度는 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 變形速度에 따른 動的強度의 增加率이 壓縮荷重에서보다 引張荷重에서 더욱 큰 것으로 나타났다.

또한, 強度가 낮은 콘크리트가 높은 強度의 콘크리트보다 變形速度效果가 크게 나타남을 알 수 있었다. 本 研究의 實驗結果 및 理論 모델은 콘크리트 構造物의 動的 舉動 규명 및 해석에 기초를 이룰 것으로 사료된다.

謝 辭

이 論文은 1987년도 문교부 자유공모과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

參 考 文 獻

1. Bazant, Z. P. and Asghari, A., "Computation of Age-dependent Relaxation Spectra", *Cement & Concrete Research*, Vol. 4, 1974, pp. 567-579.
2. Bazant, Z. P. and Oh, B. H., "Strain-rate Effect in Rapid Triaxial Loading of Concrete," *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 108, EM 5, *Proceedings*, Oct. 1982, pp. 764-782.
3. Bodner, S. R. and Partom, Y., "Constitutive Equations for Elastic-viscoplastic Strain-hardening Materials," *Journal of Applied Mechanics*, June 1975, pp. 385-389.
4. Brooks, J. J. and Neville, A. M., "Relaxation of Stress in Concrete and its Relation to Creep," *ACI Journal*, April 1976, pp. 227-232.
5. Cernocky, E. P. and Krempl, E., "A Nonlinear Uniaxial Integral Constitutive Equation Incorporating Rate Effects, Creep and Relaxation," *International Journal of Nonlinear Mechanics*, Vol. 14, 1979, pp. 183-203.
6. Desayi, P. and Krishnan, S., "Equation for the Stress Strain Curve of Concrete," *ACI Journal, Proc.*, Vol. 61, No. 3, Sep. 1964, pp. 1227-1239.
7. Dilger, W. H., Koch, R. and Kowalczyk, R., "Ductility of Plain and Confined Concrete under Different Str-

- ain Rates," *ACI Journal*, Jan.-Feb, 1984, pp. 73-81.
8. Elvery, R. H. and Haroun, W., "A Direct Tensile Test for Concrete under Long-or Short-term Loading," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 20, No. 63, June 1968, pp. 111-116.
 9. Flugge, W., "Viscoelasticity," Second Revised Edition, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, New York, 1975.
 10. Gopalaratnam, V. S. and Shah, S. P., "Softening Response of Plain Concrete in Direct Tension," *ACI Journal*, May-June 1985, pp. 310-323.
 11. Green, H., "Impact Strength of Concrete," *Proc., Instn. Civil Engineerings*, July 1964, pp. 383-396.
 12. Hughes, B. P. and Gregory, R., "Concrete Subjected to High Rates of Loading in Compression," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 24, No. 78, Mar. 1972, pp. 25-36.
 13. Hughes, B. P. and Watson, A. J., "Compressive Strength and Ultimate Strain of Concrete under Impact Loading," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 30, No. 105, Dec. 1978, pp. 189-199.
 14. Kumar, S. and Gupta, V. B., "A Nonlinear Viscoelastic Model for Textile Fibers," *Textile Research Journal*, July 1978, pp. 429-431.
 15. Lorrain, M. and Loland, K. E., "Damage Theory Applied to Concrete," *Fracture Mechanics of Concrete*, edited by Wittman, F. H., 1983, pp. 341-369.
 16. Mainstone, R. J., "Properties of Materials at High Rates of Straining or Loading," Building Research Establishment Current Paper, July. 1975.
 17. Mindess, S. and Nadeau, J. S., "Effect of Loading Rate on the Flexural Strength of Cement and Mortar," *Ceramic Bulletin*, Jan. 1977, pp. 429-430.
 18. Nilsson, L. and Glemberg, R., "A Constitutive Model for Concrete in High Rate of Loading Conditions," pp. 185-199.
 19. Perzyna, P., "The Constitutive Equation for Rate Sensitive Plastic Materials," *Q. Applied Mathematics*, Vol. 20, No. 4, 1963, pp. 321-332.
 20. Richard, R. M. and Abbott, B. J., "Versatile Elastic-Plastic Stress-Strain Formula," *Proc. ASCE*, Vol. 101, No. EM4, Aug. 1975, pp. 511-515.
 21. Sparks, P. r. and Menzies, J. B., "The Effect of Rate of Loading upon the Static and Fatigue Strengths of Plain Concrete in Compression," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 25, No. 83, June 1973, pp. 73-80.
 22. Suaris, W. and Shah, S. P., "Properties of Concrete Subjected to Impact," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 109, No. 7, July 1983, pp. 1727-1741.
 23. Swamy, N. and Rigby, G., "Dynamic Properties of Hardened Paste, Mortar and Concrete," *Materiaux et Constructions*, Vol. 4, No. 19, 1971, pp. 13-39.
 24. Taylor, M. A. and Maurer, G. K., "Short-term Stress Relaxation of Concrete," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 25, No. 84, Sept. 1973, pp. 123-135.
 25. Watstein, D., "Effect of Straining Rate on the Compressive Strength and Elastic Properties of Concrete," *ACI Journal, Proc.*, Vol. 49, No. 49-52, April 1953, pp. 729-744.
 26. 吳炳煥, "動的 引張荷重을 받는 콘크리트의 실제적인 모델," 대한토목학회 논문집, 제5권 제2호, 1985, 6. pp. 59-66.
 27. Oh, Byung Hwan, "Rate-dependent Constitutive Theory of Concrete in Tension," *Computational Mechanics of Concrete Structures, IABSE Colloquium*, August 1987, pp. 107-112.

(接受: 1989. 3. 8)