

# 動的 引張荷重을 받는 콘크리트의 實際的인 모델

## A Realistic Model for Concrete Subjected to Dynamic Tensile Loading

吳 炳 煥\*  
Oh, Byung Hwan

### Abstracts

Presented is a nonlinear constitutive theory which can model the behavior of concrete under dynamic tensile loads. The microcrack plane theory is introduced to describe the static tensile behavior of concrete. The affinity transformation is then employed to include the effects of strain rate due to the dynamic tensile loads. The comparisons are made with the dynamic tensile test data available in the literature. An equation is proposed to predict the strength gain due to the dynamic tensile loads. The theory allows more realistic dynamic finite element analysis of concrete structures.

### 要 旨

動的 引張荷重을 받는 콘크리트의 舉動을 모델化하기 위한 非線型 構成理論이 提案되었다. 콘크리트의 靜的 引張舉動은 微細龜裂面理論에 依하여 모델하고, 動的 引張荷重으로 인한 變形率速度效果를 고려하기 위하여 유사변환을 利用하였다. 本 모델의 結果를 現존하는 여러 動的 引張實驗資料와 比較하였다. 또한, 動的 引張荷重으로 인한 인장강도의 증가현상을 예측하기 위한 公式이 제안되었다. 本 모델은 콘크리트構造物의 좀 더 실제적인 動的 有限要素解析을 가능케 한다.

### 1. 序 論

콘크리트構造物은 실제로 여러 형태의 荷重을 받게 된다. 그 중에서도 지진하중, 비행기 및 미사일 등에 의한 충격하중, 원자력발전소의 사고로 인한 하중, 폭발에 의한 하중(explosions and air blasts), 海洋構造物에 작용하는 파력하중 등의 動的인 荷重이 작용되는 경우 콘크리트의 力學的 舉動은 매우 복잡하다. 실제로 이러한 하중하에서 콘크리트의 剛度(stiffness)는 작용하중

의 變形率速度(strain rate)에 따라 상당한 영향을 받게 되며, 靜的 荷重狀態의 거동과는 전혀 다른 양상을 나타내게 된다. 따라서, 실제적이고 정확한 구조해석 및 設計를 위해서는 이러한 動的인 荷重下에서의 콘크리트의 舉動이 명확히 규명되어야 하며, 이에 대한 수학적 모델의 개발이 선행되어야 한다.

콘크리트의 이러한 變形率速度效果(strain rate effect)에 대한 研究는 그 동안 本 필자를<sup>(6)</sup> 포함한 여러 연구자들에<sup>(1,2,7,8,10,12~16,18~25)</sup> 의해 수행되어져 왔으나, 이들 연구는 대부분이 압축하중에 대한 動的 舉動研究이었고, 인장하중상태의

\*正會員·서울大學校 工科大學 助教授 土木工學科

동적 거동연구는 아주 극히 적은 편이다. 특히, 인장의 경우에는 몇몇 실험연구는 발표되었으나 수학적 모델 등 理論的研究는 거의 없는 실정이다. Hatano<sup>(16)</sup>는 動的引張強度의 증가현상을 실험을 통하여 연구하였고, Zielinski et al.<sup>(25)</sup>은 콘크리트의 各構成成分 등에 따른 動的引張強度의 변화를 研究하였다. 또한 Birkimir and Lindemann<sup>(8)</sup>, McNeely and Lash<sup>(20)</sup>, Suaris and Shah<sup>(21)</sup> 등도 콘크리트의 動的 파괴계수 등 동적 인장거동에 대한 훌륭한 연구들을 수행하였다. 그러나, 이들 동적 인장거동을 서술할 수 있는 일관성 있는 수학적 모델연구는 아직 별로 이루어져 있지 않다. 따라서, 本研究의 目的은 실제적인 구조해석에 토대가 될 콘크리트의 動的引張舉動을 서술할 수 있는 모델을 개발하는 데 있다.

## 2. 콘크리트의 靜的 引張舉動

콘크리트의 動的 舉動을 모델化하기 위하여는, 먼저 靜的 荷重(static loading)狀態에서의 거동을 규명하여야 한다. 콘크리트의 靜的 引張舉動에 대한 研究도 그리 많지는 않으나, 몇몇의 좋은 실험연구<sup>(11,17)</sup>가 이루어진 바 있고, 또한 本筆者는 참고문헌 26에서 콘크리트의 靜的 引張舉動에 대한 모델을 研究하였다. 콘크리트의 정적 인장거동은 압축상태의 거동과 그 형태가 유사하며 미세균열현상으로 인한 變形軟化(strain-softening)현상을 나타내게 된다.<sup>(11,17,26)</sup> 本研究에서는 콘크리트의 靜的 引張舉動을 서술하기 위하여 필자의 참고문헌 26과 그 기본개념과 원리가 일치하는 微細龜裂面理論에 그 根據를 둔다. 이 理論은 骨材 등의 함유로 인한 콘크리트의 非均質性을 모델化할 수 있는 理論으로서 하중이 증가함에 따라 발생하는 콘크리트內의 많은 미세균열로 인한 거동의 특성을 서술하게 된다.

이 理論의 특징은 콘크리트의 全變形率  $\epsilon_{ij}$ 가 彈性變形率  $\epsilon_{ij}^{el}$ 와 不均勻로 인한 非彈性變形率  $\epsilon_{ij}$ 의 합, 즉  $\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^{el} + \epsilon_{ij}$ 로 表示되는 점이다. 여기서, 아래첨자(subscript)는 直交座標系(Cartesian coordinates)  $x_i (i=1, 2, 3)$ 를 나타낸다. 이에 대한 流性學的 모델이 그림 1에 表示되어 있

다. 콘크리트의 全應力  $\sigma_{ij}$ 와 不均勻면상의 응력  $s_n$  사이의 관계는 假想일의 原理로부터 다음과 같이 表例될 수 있다.

$$\delta W = \frac{4}{3} \pi \sigma_{ij} \delta \epsilon_{ij} = 2 \int_S s_n \delta e_n dS \quad (1)$$

여기서  $(4\pi/3)$ 는 半徑 1의 球에 대한 積分을 나타내는 계수이고,  $S$ 는 單位半球의 表面을 표시하며,  $dS = \sin \phi d\theta d\phi$ ,  $\phi$ 와  $\theta$ 는 球座標系를 나타낸다. 아래 첨자  $n$ 은 各方向으로 分布된 임의의 不均勻면상의 수직방향성분을 표시한다. 따라서, 不均勻면상의 변형도  $e_n = e_{ij} n_i n_j$ 로 표시될 수 있으며, 여기서  $n_i$ 는 不均勻면상의 單位法線벡터  $n$ 의 方向餘弦(direction cosines)이다. 한편, 不均勻면상의 응력  $s_n$ 은 그 面의 法線變形度  $e_n$ 에 따라 변하게 되며 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$s_n = \beta F(e_n) \quad (2)$$

여기서  $\beta = 2\pi/3$ 로서 적분을 간편화하기 위해 사용되며,  $F(e_n)$ 은  $e_n$ 의 함수임을 表示한다. 式(2)는 콘크리트의 非彈性舉動을 특징짓는 아주 중요한 관계식이 된다.

式(2)를 利用하여 式(1)을 다시 정리하면

$$\sigma_{ij} \delta \epsilon_{ij} = \int_S F(e_n) n_i n_j \delta \epsilon_{ij} dS \quad (3)$$

가 되며 이 式은 임의의  $\delta \epsilon_{ij}$ 에 대해서도 成立되어야 하므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma_{ij} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} F(e_n) n_i n_j \sin \phi d\phi d\theta \quad (4)$$

式(4)를 미분형태로 表示하면

$$d\sigma_{ij} = \left[ \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} n_i n_j n_k n_m F'(e_n) \sin \phi d\phi d\theta \right] de_{km} = B_{ijkm} de_{km} \quad (5)$$

여기서  $B_{ijkm}$ 은 각 不均勻면들로 이루어진 콘크리트의 接線剛度(tangential stiffness)가 된다. 이제 全變形率를 얻기 위하여 彈性變形率  $\epsilon_{ij}^{el}$ 에 대한 콤플라이언스(compliance)를 표시하면 다음과 같다.

$$C_{ijkm}^{el} = \frac{1}{9K} \delta_{ij} \delta_{km} + \frac{1}{2G} \left( \delta_{ik} \delta_{jm} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \delta_{km} \right) \quad (6)$$

여기서,  $\delta_{ij}$ =Kronecker delta이며,  $K$ =질بوط기 체적계수(bulk modulus)이고,  $G$ =전단탄성계수이다.

따라서, 增分形態의 콘크리트應力-變形率關

係는 式(5)와 (6)으로부터 다음과 같이 쓸 수 있다(그림 1 참조):

$$d\sigma_{ij} = D_{ijkl} d\epsilon_{km} \quad (7)$$

$$\text{그리고, } D_{ijkl} = [C'_{ijkl} + (B_{ijkl})^{-1}]^{-1} \quad (8)$$

여기서 明記할 것은  $C'_{ijkl}$ 은 常數이지만 균열거동을 특징짓는 式(5)의  $B_{ijkl}$ 은 數値積分을 통해서 얻어야 한다<sup>(26)</sup>. 式(4)와 (5)에서 필요한  $F(e_n)$ 은 콘크리트의 인장균열거동의 특성을 서술할 수 있어야 하며 다음과 같이 表示될 수 있다<sup>(26)</sup>.

$$F(e_n) = E_n \epsilon_n e^{(-p e_n^q)} \quad (9)$$

여기서  $E_n$ ,  $p$  및  $q$ 는 常數이다.

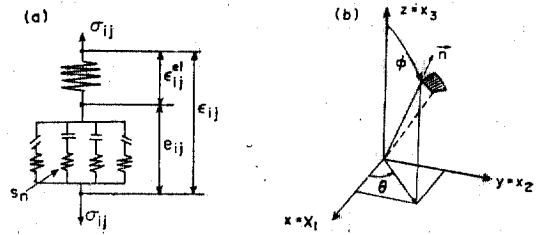


그림 1. (a) 콘크리트의 流性學的 모델, (b) 球座標系

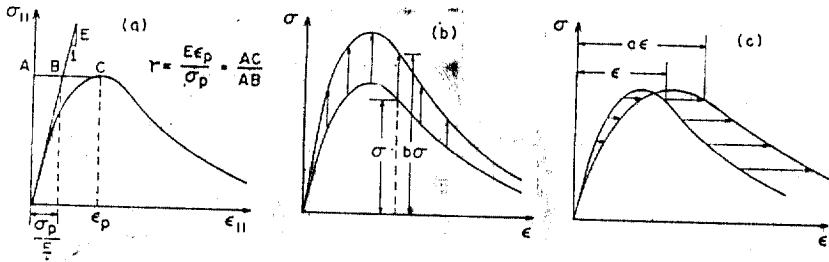


그림 2. 콘크리트 응력-변형도 관계의 特性

### 3. 變形率速度效果를 고려한 콘크리트의 動的 舉動모델

이제 動的 引張荷重을 받는 콘크리트의 거동을 모델化하기 위하여 이들의 영향을 고려할 수 있는 理論을 定立하여야 한다. 여기서 유도되는 理論을 前節에서 기술한 靜荷重狀態의 理論에 포함함으로써 動的 舉動 및 靜의 舉動을 함께 모델化할 수 있게 된다.

콘크리트를 여러 가지 變形率速度(strain rates)에 따라 실험할 때 얻어지는 응력-변형도 관계는 그 형태는 유사하지만, 콘크리트 強度等 그 特性이 변화하게 된다. 이러한 현상은 콘크리트 응력-변형率곡선의 특성을 연구함으로써 서술될 수 있다. 즉, 콘크리트의 응력-변형率관계는 콘크리트 강도에 따라 변하게 되며, 일반적으로 저강도콘크리트는 같은 응력수준에서 非彈性變形率(inelastic strain)이 크고 곡선도 완만한데 비하여 高強度콘크리트는 곡선이 어느 정도 예리해지게 된다<sup>(10,18,19)</sup>. 이러한 특성은 매개변수  $r$ 에 의해 설명될 수 있는데, 여기서  $r$ 은

$$r = \frac{E\epsilon_p}{\sigma_p} \quad (10)$$

로 表示되며,  $E$ =초기탄성계수,  $\sigma_p$ =최고응력(peak stress)으로서 정적하중인 경우에는 압축강도에 해당하고,  $\epsilon_p$ =최고응력에서의 변형도이다. 이 매개변수(parameter)  $r$ 은 최고응력에서의 변형도와 탄성변형도( $\sigma_p/E$ )의 比를 나타내며, 최고응력점의 이탈정도를 특성짓는다(그림 2(a) 참조). 따라서, 일반적인 일축응력-변형율관계는 세 개의 기본매개변수, 즉  $E$ ,  $\sigma_p$ ,  $r$ 로 서 특성지을 수 있게 된다.

이제 動荷重에 의한 變形率速度效果를 고려하기 위하여 이 매개변수들을 變換해야 한다. 이를 위하여 먼저 콘크리트 強度와 매개변수  $r$ 과의 관계를 규명해야 한다. 여기서 附記할 것은, 콘크리트강도와 매개변수  $r$ 과의 관계규명에 있어서 콘크리트의 인장강도보다는 압축강도를 사용하는 것이 合理的이다. 왜냐하면, 압축강도의 변이성은 인장강도에 비하여 훨씬 적으며, 또한 압축강도는 실험수행이 용이하고 標準化되어 있기 때문에 이것을 기준하여 모델化하는 것이 合理的이며 實際的(realistic)이라고 할 수 있다. 따

라서, 이 관계를 식으로 表示하면

$$\sigma_{ca} = f_1(r) \quad (11)$$

이 되며, 이 식은 다음 項에서 구체화된다. 또한, 콘크리트 탄성계수는 일반적으로 압축강도의 함수, 즉  $E = E(\sigma_{ca})$ 로 表示되기 때문에  $r$ 의 함수로도 表示할 수 있다. 즉,

$$E = f_2(r) \quad (12)$$

前節에서 기술된 構成方程式 (7)의  $D_{ijklm}$ 은 현재상태의 變形率, 應力 및 압축강도의 함수이기 때문에 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$d\sigma_{ij} = D_{ijklm}[\dot{\epsilon}, \sigma; f_1(r)]d\epsilon_{klm} \quad (13)$$

여기서, 요구되는 응력-변형률곡선에 해당하는  $r$  값이  $r^*$ 일 때, 식(13)은 최고응력  $f_1(r^*)$ 와 탄성계수  $f_2(r^*)$ 를 계산해 주게 된다. 이제  $r^*$  값을 유지하면서 최고응력과 탄성계수를 변화시킬 수 있는 변환이 필요한데 이를 위하여 유사변환 (affinity transformation) 方法을 利用할 수 있다. 이 方法은 그림 2에 나타나 있듯이 변형률  $\epsilon$  대신에  $a\epsilon$ , 응력  $\sigma$  대신에  $b\sigma$ 로 치환함으로써 이루어 질 수 있다. 즉, 식(13)은 다음과 같이 정리된다.

$$bd\sigma_{ij} = D_{ijklm}[a\dot{\epsilon}, b\sigma; f_1(r^*)]ad\epsilon_{klm} \quad (14)$$

여기서, 매개변수  $r$ 은 이러한 변환에 무관하지만 최고응력  $f_1(r^*)$ 와 탄성계수  $f_2(r^*)$ 는 다음과 같이 변환된다.

$$\sigma_p^* = \frac{1}{b}f_1(r^*) \quad (15)$$

$$E^* = \frac{a}{b}f_2(r^*) \quad (16)$$

上記式(15)와 (16)으로부터 變換係數  $a$ 와  $b$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$b = \frac{f_1(r^*)}{\sigma_p^*} \quad (17)$$

$$a = \frac{E^*}{f_2(r^*)}b \quad (18)$$

이제 上記 式들의 係數값들을 얻기 위하여, 變形率速度(strain rate),  $\dot{\epsilon}$ ,에 따른 매개변수들의 변화를 결정해야 한다. 이를 위하여 本 筆者가 研究한 動的 壓縮荷重을 받는 경우의 變形率速度效果(참고문헌 6)의 연구개념을 토대로 하고자 한다. 그러나, 여기서 明記할 것은 動的 引張荷重에 대한 變形率速度效果는 動的 壓縮荷重의 경우보다 훨씬 민감하고 크게 나타난다는 사실이

다. 이러한 현상은 Suaris and Shah<sup>(4)</sup>에 의해서도 언급되었으며, 이것은 變形率速度效果가 콘크리트균열에 예민하기 때문인 것으로 파악되고 있다. 따라서, 動的 引張舉動을 모델化하기 위해서는 動的 壓縮荷重에 대한 결과의 수정이 필요하며, 이를 위하여 動的 引張荷重에 대한 실험자료를 이용하였다. 동적 인장하중에 대한 실험자료는 그 數가 적고, 특히 응력-변형률관계에 대한 실험자료는 극히 적어 Hatano<sup>(15)</sup>의 실험자료가 대표적이라고 할 수 있다. 本 研究의 理論을 동적 인장실험자료와 비교함으로써 다음과 같이 변형률속도에 따라 최적결과를 주는 매개변수를 求하였다.

$$g(\dot{\epsilon}) = \frac{1 - \dot{\epsilon}^{1/8}}{2.2 + 3.2\dot{\epsilon}^{1/8}} \quad (19)$$

$$r^* = 2.09 - 0.0215\sigma_p + g(\dot{\epsilon}) \quad (20)$$

$$\sigma_p^* = [1.95 - 3.32g(\dot{\epsilon})]\sigma_p \quad (21)$$

$$f_1(r^*) = (110 - 46r^*) \quad (22)$$

$$f_2(r^*) = 4,740\sqrt{f_1(r^*)} \quad (23)$$

여기서,  $\sigma_p$  = 靜的 一軸壓縮強度로서 단위는  $N/mm^2$ 이다. 식(22)의  $f_1(r^*)$ 는 식(11)에서와 같이 콘크리트의 압축강도와  $r^*$ 와의 관계로부터 얻어지는데, 압축거동에 관한 構成모델을 여러 가지 強度에 따라 계산을 수행함으로써  $f_1(r^*)$ 와  $r^*$ 의 관계를 求할 수가 있다<sup>(6)</sup>. 또한, 식(23)의  $f_2(r^*)$ 는 탄성계수와 압축강도와의 관계로부터 구해지게 된다. 여기서  $f_1(r^*)$ 와  $f_2(r^*)$ 의 단위는 모두  $N/mm^2$ 이다.

콘크리트에 작용하는 하중이 적은 응력-변형 거동의 초기단계에는 콘크리트가 선형점탄성(linear viscoelastic)거동에 있으므로 콤플라이언스 함수(compliance function),  $J(t, t')$ 에 의해 그 거동의 특성을 서술할 수 있다. 이  $J(t, t')$ 은 크리프 함수(creep function)라고도 정의하며, 단위응력이 시간  $t'$ 에 작용했을 때 시간  $t$ 에서의 변형율을 의미한다<sup>(3-5)</sup>. 콘크리트의 이  $J(t, t')$ 은 비교적 많은 실험자료를 토대로 얻어진 二重指數法則(double power law)에 의해 잘 서술될 수 있다<sup>(4,5)</sup>. 즉,

$$J(t, t') = \frac{1}{E_0} [1 + \phi_0(t - t')^m] \quad (24)$$

여기서,  $\phi_0 = \phi_1(t'^{-m} + \alpha)$ 이고, 각 재료상수들의

표준치는  $m=1/3$ ,  $n=0.1$ ,  $\phi_1=5$ ,  $\alpha=0.03$  이며  $E_0=1.5 E_{28}$  로서 탄성계수점근치이고,  $E_{28}$  은 28 일표준탄성계수이다<sup>(4)</sup>. 上記式(24)는 빠른하중, 즉 하중기간이 아주 짧은 하중에도 비교적 잘 일치하는 것으로 나타나 있다<sup>(3-6)</sup>. 일반적으로 유효탄성계수(effective modulus)  $E_{eff}=1/J(t, t')$  으로 表示할 수 있고, 초기탄성계수  $E^*$  를  $0.05 \epsilon_p$  의 변형율에 도달하는 시간동안에 대한 유효탄성계수로 하면, 하중재하시간  $t-t'=0.05 \epsilon_p/\dot{\epsilon}$  이 된다. 여기서  $\epsilon_p$ =최고응력에서의 변형도,  $\dot{\epsilon}$ =變形率速度이다. 콘크리트의 인장거동에서  $\epsilon_p$  는 0.0002 정도이므로<sup>(11)</sup>,  $t-t'=(1 \times 10^{-5}/\dot{\epsilon})\text{day} \simeq (1/\dot{\epsilon}) \text{ sec}$  가 된다. 따라서,

$$E^* = \frac{1}{J(t, t')} = \frac{E_0}{1 + \phi_0(\dot{\epsilon})^{-n}} \quad (25)$$

Hatano<sup>(15)</sup> 등이 수행한 인장실험에서도 나타남과 같이 靜的 引張試驗에서의  $\dot{\epsilon} \simeq 2 \times 10^{-6}/\text{sec}$  이므로 이 값을 式(25)에 代入하면, 靜荷重에서의  $E = E_0/[1 + \phi_0(2 \times 10^{-6})^{-n}]$  이 된다.

結果的으로 變形率速度效果(strain rate effect) 를 고려한 콘크리트의 引張應力-變形率관계는 式(14) 및 式(17)~(25)에 의해 결정되며, 따라서 動的 舉動을 위한 構成關係式의 일반형태는 式(13)으로부터 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$d\sigma_{ij} = D_{ijkl}(\epsilon, g, \dot{\epsilon}) d\epsilon_{kl} \quad (26)$$

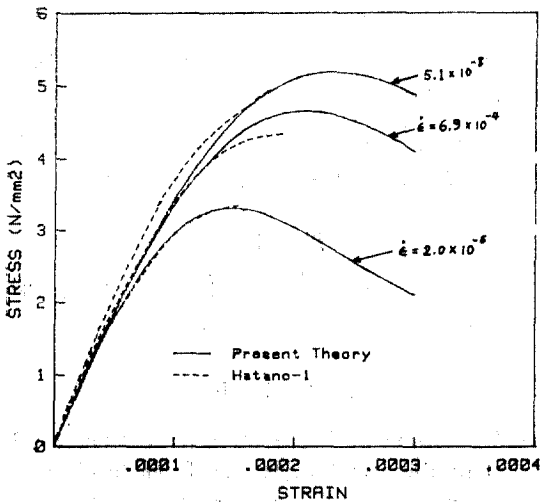


그림 3. 콘크리트의 動的 引張實驗資料와의 비교

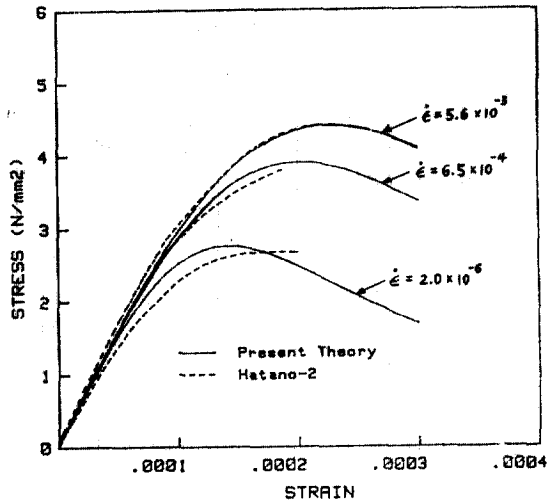


그림 4. 콘크리트의 動的 引張實驗資料와의 비교

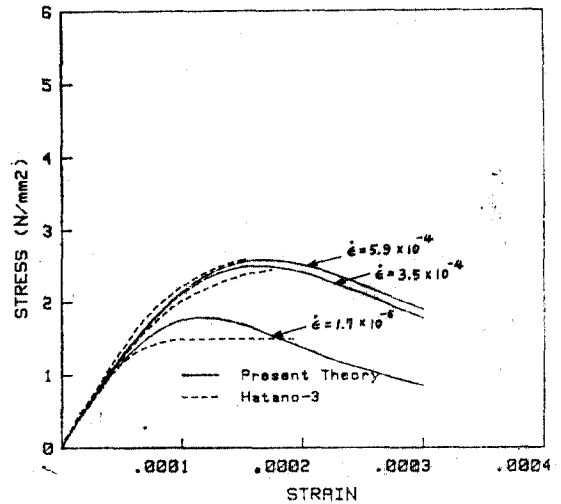


그림 5. 콘크리트의 動的 引張實驗資料와의 비교

#### 4. 解析節次 및 實驗結果와의 比較分析

前節에서 유도된 本理論의 解析要領은 式(7), 式(14) 및 式(26)에 依해서 表示되는 增分形態의 構成方程式을 各 단계적으로 계산해 나가면 된다. 먼저, 어느 특정한 動的 荷重에 대한 變形率速度(strain rate)가 주어지면, 式(26)을 이용하여 未知의 應力 및 變형율을 求하게 되는데, 이를 위해서는 式(5) 및 (8)에서와 같이  $D_{ijkl}$  을 數值積分하여야 하며, 이 요령은 前述한 바와 같다. 有限要素解析時에는 이 수치적분을 各 要素

및 積分點에 대하여 수행해야 한다. 이와 같은 계산이 각 하중단계마다 반복 계산된다.

이러한 해석요령에 따라 本理論을 動的 引張實驗資料와 비교한 결과가 그림 3~7에 表示되어 있다. 그림 3~5는 변형율에 따른 Hatano<sup>(15)</sup>의 인장실험자료와 비교한 결과를 보여 주고 있는데, 여기서 實線은 本理論에 依한 결과이고 點線은 실험결과를 表示한다. 이 그림에서 보듯이 하중의 변형율속도가 커짐에 따라 인장강도가 크게 증가하고 있음을 알 수 있다. 여기서 한 가지 附記할 것은 Hatano<sup>(15)</sup>의 실험자료 중 일부 곡선이 圓滑(smooth)하지 않고, 같은 곡선에서 경사가 바로 변하는 등의 약간 圓滑하지 않은 점이 보이고 있다.

그림 6은 動的 引張強度와 靜的 引張強度와의 비를 變形率速度에 따라 그린 것으로, 變形率速度에 따른 콘크리트인장강도의 증가율을 여러 실험자료와 비교한 것이다. 이 그림에서 보듯이 本理論에 의한 결과는 여러 실험자료들의 평균값을 주고 있어 비교적 만족스러운 결과를 주고 있다. 그림 7은 변형율속도에 따른 최고응력에서의 변형율의 변화현상을 보여 주고 있다.

그림 6에서 나타난 바와 같이, 變形率速度에 따른 動的 引張強度의 增加現象에 대한 예측공식을 本理論으로부터 도출할 수 있으며, 그 公式는 다음과 같다.

$$f_d = \left[ 1.95 - 3.32 \left( \frac{1 - \dot{\epsilon}^{1/8}}{2.2 + 3.2\dot{\epsilon}^{1/8}} \right) \right] f_s \quad (27)$$

여기서,  $f_d$  = 콘크리트의 動的 引張強度이며,  $f_s$  =

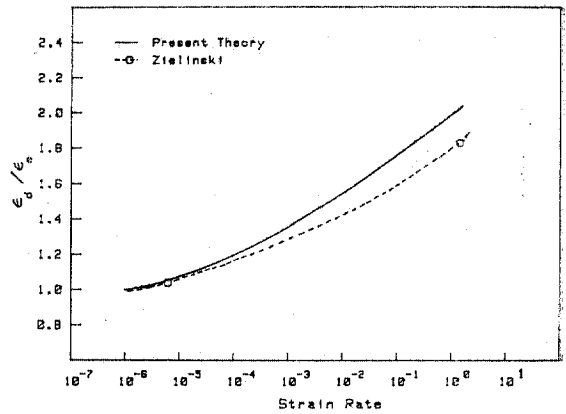


그림 7. 최고응력에서의 변형율에 대한 변형율속도효과  
靜的 引張強度이고, 變形率速度  $\dot{\epsilon}$  은 (1/sec)로 사용된다.

## 5. 結 論

콘크리트가 動的 引張荷重을 받을 때의 舉動에 관한 非線型構成理論이 本 研究에서 제안되었다. 靜的 引張荷重下에서의 콘크리트의 거동은 龜裂面理論을 도입하여 모델화하였으며, 動的 引張荷重下에서의 變形率速度效果를 고려하기 위하여 유사변환(affinity transformation)方法을 利用하였다. 本理論의 結果는 콘크리트의 動的 引張實驗資料를 잘 서술하고 있으며, 變形率速度에 따른 콘크리트의 引張強度增加等 콘크리트의 性質을 잘 나타내고 있다. 또한 變形率速度에 따른 動的 引張強度의 增加現象을 예측할 수 있는 공식이 도출되었다.

本 모델은 콘크리트구조물의 좀더 실제적인 動的 非線型有限要素解析을 가능케 하고 있다.

## 謝 辭

이 論文은 한국학술진흥재단의 1984년도 연구지원에 의하여 연구되었으며, 이에 깊은 감사를 드린다.

## 參 考 文 獻

1. Abrams, D.A., "Effect of Rate of Application of Load on the Compressive Strength of Concrete," *Proceedings, ASTM*, Vol. 17, Part II, p. 364.

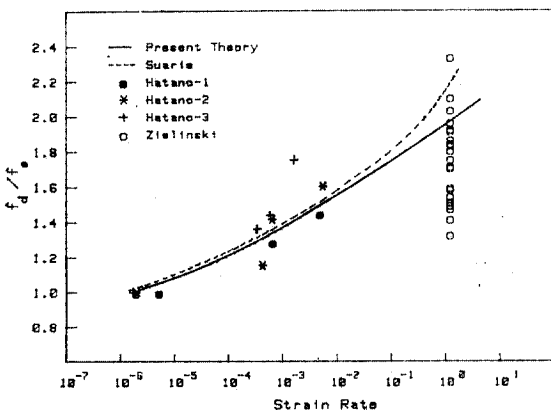


그림 6. 콘크리트의 動的 引張強度에 대한 變形率速度效果

2. Atchley, B.L., and Furr, H.L., "Strength and Energy Absorption Capabilities of plain Concrete Under Dynamic and Static Loadings," *ACI Journal*, Vol. 64, No. 11, Nov., 1967, pp. 745~746.
3. Bazant, Z.P., "Numerical Determination of Long-Range Stress History from Strain History in Concrete," *Matériaux et Constructions*, France, Vol. 5, 1972, pp. 135~141.
4. Bazant, Z.P., "Theory of Creep and Shrinkage in Concrete Structures: A Précis of Recent Developments," *Mechanics Today*, Pergamon Press, Inc., New York, N.Y., Vol. 2, 1975, pp. 1~93.
5. Bazant, Z.P., Carreira, D., and Walser, A., "Creep and Shrinkage in Reactor Containment Shells," *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 101, No. ST10, Proceeding Paper 11632, Oct., 1975, pp. 2117~2131.
6. Bazant, Z.P., and Oh, Byung Hwan, "Strain-Rate Effect in Rapid Triaxial Loading of Concrete," *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol. 108, No. EM5, Oct., 1982, pp. 764~782.
7. Bićanić, N., Hinton, E., Pandé, G.N., and Zienkiewicz, O.C., "Nonlinear Seismic Response of Concrete Gravity Dams," The 6-th European Conference on Earthquake Engineering, Dubrovnik, Yugoslavia, Sept., 1978.
8. Birkimer, D.L., and Lindemann, R.L., "Dynamic Tensile Strength of Concrete Materials," *ACI Journal*, Jan, 1971, pp. 47~49.
9. Branson, D.E., and Christiason, M.L., "Time-dependent Concrete Properties Related to Design-Strength and Elastic Properties, Creep and Shrinkage," ACI Special Publication SP-27, ACI, Detroit, Michigan, Paper No. 13, 1971, pp. 257~277.
10. Dilger, W.H., Koch, R., and Kowalczyk, R., "Ductility of Plain and Confined Concrete under Different Strain Rates," Presented at ACI Meeting, Houston, Nov. 1978, University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada, 1978.
11. Evans, R.H., and Marathe, M.S., "Microcracking and Stress-Strain Curves for Concrete in Tension," *Matériaux et Constructions*, No. 1, Jan.-Feb., 1968, pp. 61~64.
12. Goldsmith, W., Polivka, M., and Yang, T., "Dynamic Behavior of Concrete," *Experimental Mechanics*, Vol. 6, No. 2, Feb., 1966, pp. 65~179.
13. Green, H., "Impact Strength of Concrete," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Vol. 28, 1964, pp. 383~396.
14. Griner, G.R., Sierakowski, R.L., and Ross, C. A., "Dynamic Properties of Concrete under Impact Loading," *Proceedings, 45th Symposium on Shock and Vibration Bulletin*, No. 45, pp. 131~142.
15. Hatano, T., "Dynamic Behavior of Concrete under Impulsive Tensile Load," *Technical Report C-6002*, Central Research Institute of Electric Power Industry, Japan, 1960.
16. Hatano, T., and Tsutsumi, H., "Dynamic Compressive Deformation and Failure of Concrete under Earthquake Load," *Proceedings of the 2nd Word Conference on Earthquake Engineering*, Science Council of Japan, Tokyo, Japan, Vol. III, 1960, pp. 1963~1978.
17. Hughes, B.P., and Chapman, G.P., "The Complete Stress Strain Curve for Concrete in Direct Tension," *Bulletin, RILEM*, No. 30, pp. 95~97 1966.
18. Mainston, R.J., "Properties of Materials at High Rates of Straining of Loading," *Matériaux et Constructions*, Vol. 8, No. 44, pp. 108~116.
19. McHenry, D., and Shideler, J.J., "Review of Data on Effect of Speed in Mechanical Testing of Concrete," ASTM STP No. 185, ASTM, Philadelphia, Pa., pp. 22~82.
20. McNeely, D.J., and Lash, S.D., "Tensile Strength of Concrete," *ACI Journal*, June, 1963, pp. 751~761.
21. Suaris, W., and Shah, S.P., "Properties of Concrete Subjected to Impact," *Journal of the Structural Engineering, ASCE*, Vol. 106, No. 7, July, 1983, pp. 1727~1741.
22. Trott, J.J., and Fox, E.N., "Comparison of the Behavior of Concrete Beams under Static and Dynamic Loading," *Magazine of Concrete Re-*

- search, Vol. 11, No. 31, March, 1959, pp.15~24.
23. Watstein, D., "Effect of Straining Rate on the Compressive Strength and Elastic Properties of Concrete," *ACI Journal*, Vol. 49, No. 8, Apr., 1953, pp.729~744.
24. Watstein, D., "Properties of Concrete at High Speed of Loading," STP No. 176, Symposium on Impact Testing, ASME, New York, N.Y., 1956, pp.156~169.
25. Zielinski, A.J., Reinhardt, H.W., and Körmeling, H.A., "Experiments on Concrete under Uniaxial Impact Tensile Loading," *Matériaux et Constructions*, Vol. 14, No. 80, 1981, pp.103~112.
26. 吳炳煥, "콘크리트의 漸進的 破壞에 대한 非線型 構成모델 확립 연구", *대한토목학회 論文集* 제 4 권 제 2 호, 1984년 6 월, pp.55~64.
27. 김학용, 김상용, "변형율 속도가 PET 섬유유 의 인장응력-변형률 거동에 미치는 영향", *한국섬유공학회지*, 제 20 권 제 2 호, 1983년 4 월, pp.29~34.  
(接受: 1985. 3. 26)