

衝撃荷重を受けるコンクリート円柱供試体の応力伝播に関する基礎的研究

防衛大学校 学生員 ○丸山 實司
 " 学生員 平岡 伸一
 " 正 員 内田 孝

防衛施設庁 下田 治
 防衛大学校 正 員 高橋 芳彦

1 はじめに 衝撃荷重を受けるコンクリート構造物の応答には、衝突直後衝突位置近傍に比較的短時間発生する応力波による応答（第1次応答）と、第1次応答の後比較的長時間継続する構造物全体の動的弾塑性応答（第2次応答）の2つがある¹⁾。特に、第1次応答が破壊を支配するような場合、その破壊機構は、衝突物の衝突速度や衝突により発生する応力波およびその伝播速度などが大きく関係するものと考えられる。しかしながら、コンクリート構造物への応力波応答に関する研究はほとんど行われていない現状にある。

そこで本研究は、コンクリート構造物の応力波応答を解明するための第1段階として、波動論による理論解析に、コンクリートの応力～ひずみ関係としてひずみ速度効果を考慮した梅村のe関数式²⁾を用い、コンクリート円柱供試体内の応力波の伝播状況および衝突速度による破壊形態の違いについて検討したものである。さらに、コンクリート円柱供試体の衝突実験を行い、応力波の伝播速度について調べた。

2 解析方法 解析対象であるコンクリート円柱供試体を等方性連続体と仮定すると、内部を伝播する縦波の波動方程式は式(1)で与えられる。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = C^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad \text{---- (1)}$$

ここで、Cは縦波の伝播速度で、ポアソン比 ν ，発生する応力 σ およびひずみ ϵ ，コンクリート密度 ρ を用いると、

$$C^2 = \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)} \cdot \frac{1}{\rho} \frac{d\sigma}{d\epsilon} \quad \text{のように表される。}$$

式(1)の特性曲線およびその適合条件は式(2)に示すとおりである。ここで、Vは粒子速度である。

$$\frac{d\epsilon}{dx} = \frac{1}{C}, \quad d\sigma - \rho' C dV = 0 \quad \text{---- (2)}$$

$$\left(\rho' = \frac{(1+\nu)}{(1-\nu)} \rho \right)$$

特性曲線を与える式(2)から、粒子速度Vと発生応力 σ およびその伝播速度Cとの関係を求めると式(3)のようになる。

$$V = \int_0^\sigma \frac{1}{\rho' C} d\sigma = \int_0^\epsilon C d\epsilon \quad \text{---- (3)}$$

式(3)に式(1)を代入することにより、式(4)のように書き換えられる。

$$V = \int_0^\epsilon \sqrt{\frac{d\sigma}{d\epsilon}} \cdot \frac{1}{\rho'} d\epsilon \quad \text{---- (4)}$$

式(4)中の $d\sigma/d\epsilon$ はコンクリートの応力～ひずみ関係における任意の応力に対応するひずみの勾配を示す。すなわち、本解析においては、式(5)に示す梅村のe関数式の中の圧縮強度 σ_c および最大応力時のひずみ ϵ_{co} に、コンクリート円柱供試体の高速載荷実験より求めたひずみ速度効果を考慮した値を導入し、解析を行う。梅村のe関数式にひずみ速度効果を考慮することにより、それぞれのひずみ速度に対応する応力

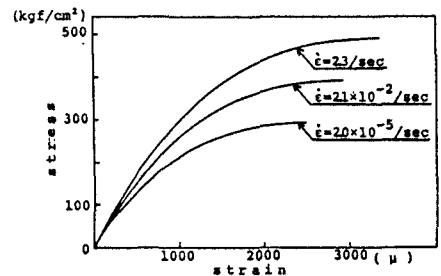


図-1 応力～ひずみ曲線

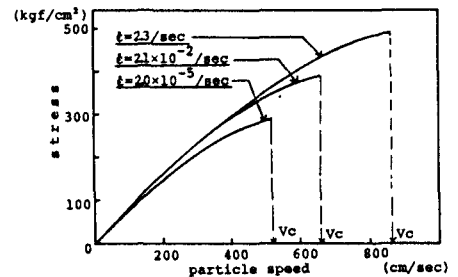


図-2 粒子速度～発生応力関係

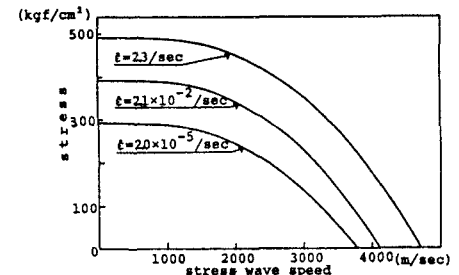


図-3 応力～応力波伝播速度関係

～ひずみ曲線は図-1に示すとおりとなる。ここで、 K 、 α および β は材料定数で次の値を用いた。 $K=6.75$ 、 $\alpha=0.812$ 、 $\beta=1.218$

$$\sigma = \sigma_c \cdot K \{ \exp(-\alpha(\epsilon/\epsilon_{co})) - \exp(-\beta(\epsilon/\epsilon_{co})) \} \quad \text{----- (5)}$$

3 解析結果 図-2に粒子速度と発生応力の関係を、図-3に応力と応力波伝播速度との関係を示す。図-2から、発生応力がコンクリートの圧縮強度に達する粒子速度（限界速度 V_c ）がわかる。すなわち、コンクリートよりも剛な物体が衝突し、限界速度 V_c 以上の粒子速度を発生させる場合、衝突位置近傍において局部的破壊が生じることが予想される。また、衝突にともなう、ひずみ速度効果によりコンクリートの圧縮強度が増大すると、限界速度も上昇すると考えられる。図-3から、コンクリートの非線形な応力～ひずみ関係を用いることにより、応力の増加にともない応力波の伝播速度が小さくなることがわかる。また、ひずみ速度効果を考慮することにより、ひずみ速度の増大にともない、任意の応力に対応するひずみ勾配が大きくなるため、応力波の伝播速度が速くなるものと予想される。

このように、粒子速度による発生応力、各応力に応じる応力波の伝播速度がひずみ速度効果により変化するため、応力波による第1次応答がコンクリートの破壊を支配するような場合、コンクリート円柱供試体内部の応力状態は静的載荷時のように一様にはならず、きわめて複雑になるものと考えられる。

4 実験および結果

(1) 実験概要 衝撃荷重を受けるコンクリート円柱供試体内部の応力波の伝播速度を求め、解析結果と比較するために衝突実験を行った。供試体の寸法は、応力波の伝播状況が明確に把握できるように、 $\phi 10 \times 40 \text{ cm}$ とした。載荷は高速変形負荷装置を用い、載荷体（円柱鋼製）と供試体の間に一定の隙間（約5mm）を設け、載荷体がほぼ一定速度（2m/sec、4m/sec）になった後、供試体に衝突するようにした。なお応力波の伝播速度は、図-4に示すように供試体軸方向に貼付したゲージ長30mmのひずみゲージに発生するひずみの時間差から求めた。なお、データのサンプリングタイムは5 μsec である。

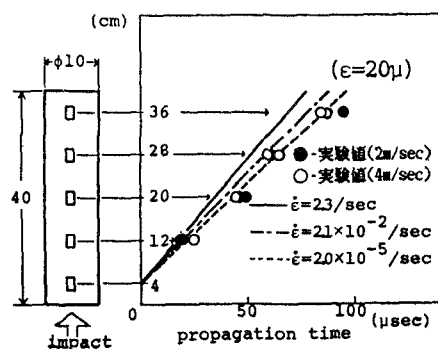


図-4 応力波伝播速度

(2) 実験結果 応力波の伝播速度について、実験値と解析値の比較を図-4に示す。各解析値は、実験で捉えたひずみ（約20 μ ）に対応するよう、図-3より20 μ のひずみが生じる応力の応力波伝播速度を表している。図-4より、2m/secおよび4m/secの両衝突速度での応力波伝播速度に差はほとんどなく、静的（ $\dot{\epsilon}=2.0 \times 10^{-5}/\text{sec}$ ）な場合の解析値と、両実験値は近い値を示している。これは実験値が、ひずみゲージが初めて反応する、ひずみ速度がきわめて小さい状態でのひずみ、すなわち衝突により発生した応力波の前面部の伝播速度を捉えたことによるものと考えられる。

5 まとめ 本研究より以下の点が明らかとなった。

- (1) 発生応力がコンクリートの圧縮強度に達する粒子速度（限界速度 V_c ）が存在する。
- (2) ひずみ速度効果により圧縮強度が増大することにより、限界速度 V_c も上昇する。
- (3) 応力～ひずみ曲線に梅村の e 関数を用いると、応力の増加にともない応力波の伝播速度が減少する。
- (4) 波動論による本解析値によって、応力波伝播速度を推定できる。

なお、衝突時に発生する応力波によるひずみ速度は、粒子速度の変化率（粒子加速度）および応力による応力波の伝播速度の違いに起因するものと考えられ、今後はこの点を考慮した研究が必要である。

1) 竹田, 河村: 爆発による鉄筋コンクリート構造物の変形, 破壊の定量的予測, 工業火薬協会誌, Vol. 46, No. 4, 1985
2) 小阪, 森田: 鉄筋コンクリート構造, 丸善株式会社, 昭和52.10