

N-74 コンクリートの破壊条件の微視的考察

小野田セメント中研 正員 渡木 幸

岡上

大塩 明

I. はしがき

コンクリートに限らず、セラミックス、粉体固結物など、不均一な固体の強度 σ と空隙率 P との関係として、次式が広く知られている。コンクリートの場合には、さらに、結

$$\sigma = \sigma_0 (1-P)^N, \quad (N=3 \sim 8) \quad \text{----- (1)}$$

合材の中の空隙率 μ も考慮して、 $\sigma_0 = \sigma_{00} (1-\mu)^n$ の成立することが確かめられている。

また、コンクリートの圧縮強度 σ_c 、曲げ強度 σ_b 、引張強度 σ_t の間には、おおよそ、次のような関係のあることが知られている。式(1)の中の係数 N は、すでに詳細に検討されて

$$\sigma_t = R_t (\sigma_c)^{3/2} \quad \text{または} \quad \sigma_b = R_b (\sigma_c)^{3/2} \quad \text{----- (2)}$$

あり、微視的には、固体の構成粒子と結合している結合材の接触面積に依存することがわかった。コンクリートの場合、この係数 N は、圧縮、曲げなどの破壊形態には関係せず、また骨材の量、水セメント比にも関係せず、骨材の粒度だけに依存している。

コンクリートのような不均一な混合固体の破壊現象はきわめて複雑であって、物理的には厳密な取り扱いが困難であるため、式(2)の関係は実験的に経験式であるだけで、その係数 R_t 、 R_b などの物理的な意味は不明のまま残されている。演者らは、コンクリートの内部構造または各構成成分が、コンクリートの強度にどのような役割を果たしているかという基礎的な問題を種々検討しているが、ここでは、これまでに得られた研究成果を基にして、微視的な立場から式(2)の物理的な意義を明らかにした。

II. 破壊仮説と圧縮破壊の定義

演者らは、すでに、コンクリートの引張、曲げ破壊に関して、高応力になると破断面ではさき微小な局部 ($4L \approx 10mm$) だけが塑性を示すことも確かめた。このため、この破断局部は降伏点 E_T で破壊せず、一定の塑性変形を経た後、破壊ひずみ E_B に達して破壊する。このことは、引張破断局部において、微視的なひびわれが一定の中見に成長するまで安定して存在しうることに起因するものと思われる。この微視的なひびわれの安定性は別の実験でも確認したが、現在まだ、均一弾性体の場合のような理論的裏づけがない。

このような立場から、コンクリートの単純引張強度 σ_t と曲げ強度 σ_b の間には、式(3)

$$\sigma_b = \sigma_t \phi(\mu, \alpha), \quad \mu = E_B/E_T \quad \text{----- (3)}$$

の関係があることを理論的に、実験的にも確認した。この場合、 $\alpha = E_t/E_t$ は破断局部におけるコンクリートの引張弾性係数 E_t と圧縮弾性係数 $E_c = E_t$ との比である。

一方、コンクリートの圧縮破壊は、供試体の形状、寸法によってそれなりに異なる形態を示すが、微視的な破断局部の挙動には差はないものと思われる。すなわち、圧縮荷重が最大値に達した時、破断局部に多数発生していると考えられる微視的なひびわれの中は平均的には他の引張破壊の場合と等しいものと思われる。圧縮破壊もこのように仮定して以下の考察を進める。

III. 圧縮破壊の2次元の考察

いま図1のように、1ヶの破断面 S_i を含む体積要素 $V_i = \sum_j \Delta V_{ij}$ (図1の点線領域) について、コンクリートが圧縮破壊するまで巨視的な弾性エネルギーと微視的なひびわれのする内部仕事とは等しくなければならぬ。巨視的な弾性エネルギー W_{ei} はコンクリートが圧縮破壊の瞬間まで連続弾性体としての挙動を示すと仮定した場合のみかけの弾性エネルギーであるから、コンクリートを均一弾性体と考へ、その圧縮強度を σ_c 、弾性係数を E_c とすれば

$$W_{ei} = (\sigma_c)^2 / 2 E_c \cdot V_i \quad \text{----- (4)}$$

次に、微視的なひびわれが限界中に成長するまでの内部仕事 W_{pi} を考えてみる。このため、図1のように、微視的なひびわれ一本を含む程度の体積要素 ΔV_{ij} に分割する。図2のように Δl_{ij} のひびわれが発生すると、この体積要素の横ひずみ $(\epsilon_t)_{ij}$ は解放されて、その代わりに端面摩擦のため、横応力 $(\sigma_t)_{ij}$ を発生する。この横応力は端面摩擦によるものであるから、ひびわれの終局安定中 l_{ij} の領域に集中しているものと、近似的には考えることができる。すなわち

$$\Delta L_{ij} (\sigma_t)_{ij} = l_{ij} (\alpha_j \sigma_c) \quad \text{----- (5)}$$

ここに、 σ_c : コンクリートの巨視的な単純引張強度、 α_j : 微視的な応力集中係数

したがって、横力 $\Delta S_{ij} (\sigma_t)_{ij}$ に抵抗して、ひびわれが安定中 l_{ij} まで成長することによる内部仕事 W_{pi} は次のようになる。微視的な応力集中係数は、この場合、各体積要素に

$$W_{pi} = \sum_j \left[\int_0^{l_{ij}} (\Delta S_{ij} \cdot (\sigma_t)_{ij}) \cdot dl_{ij} \right] = \frac{\sigma_c}{2} \sum_j \left[\alpha_j \cdot \left(\frac{l_{ij}}{\Delta L_{ij}} \right)^2 \right] \cdot \Delta V_{ij} \quad \text{----- (6)}$$

いて差はないと思われるから、 $\sum_j (l_{ij}^2 / \Delta L_{ij}) \Delta V_{ij} = (l^2 / \Delta L) V_i$ とおけば、 $\sum_j (l_{ij}^2 / \Delta L_{ij}) \Delta V_{ij} \approx (l^2 / \Delta L) V_i$ となる。一方 II. 項に述べたように、 $l / \Delta L = \epsilon_B = (\mu \sigma_c = \mu \sigma_t / \epsilon_t)$ と考えられるから、 $W_{ei} = W_{pi}$ より、結局、圧縮強度と単純引張強度との関係は次のようになる。式(3)をこれに代入すれば

$$\sigma_c = [\mu \cdot (\alpha \sqrt{E_c} / \epsilon_t)] \cdot (\sigma_t)^{3/2} \quad \text{----- (7)}$$

ば、曲げ強度との間にも同様の関係が成立する。

IV. 実験結果との比較

演者らの実験結果は、 $\sigma_c = 5.3 (\sigma_t)^{3/2}$ 、 $\sigma_c = 1.03 (\sigma_t)^{3/2}$ となった。係数 R_1 、 R_2 は式(7)から明らかのようにコンクリートの配合の影響を受けるものと思われ、他の研究者の実験結果および、モルタルの実験結果と併せて、それほど差がないことは興味深い。また、1例として、 $\mu = 2$ 、 $E_c = 3 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\epsilon_t = 1 \times 10^{-5}$ を(7)式に代入すれば $\alpha \approx 10^5$ となる。これは分子的なオーダーでモルタルの破壊を取扱った場合に得られた値 $\approx 10^2$ に比べて著しく大きい。この差が取り扱うモデルの尺度に起因するのは当然である。

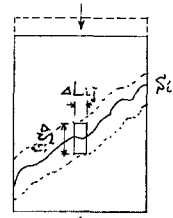


図 1.

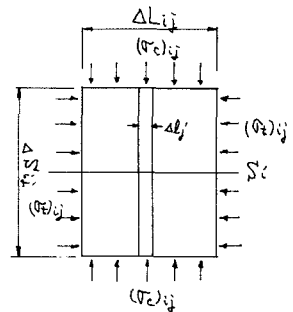


図 2.