

CS 1-30〔I〕 凍結融解作用によるコンクリートの劣化に関する一力学的考察

東北大学 学生員 ○森広 英和
 東北大学 学生員 松井 淳
 東北大学 正会員 堀 宗朗

1. 序

寒冷地等のコンクリートは、凍結融解作用の繰り返しによって劣化を生じることがある。この種の劣化に関しては実験を中心とした種々の研究が行われてきた¹⁾。現在、コンクリート構造物はLNG等の極低温物質の貯蔵にも使用されており、凍結融解の条件はより過酷なものとなっている。このような極低温状態での劣化に対処するために、劣化のメカニズムをより詳細に解明することは重要であると思われる。

凍結融解作用による劣化は、弾性の低下や膨張をコンクリートに引き起こし、最終的には剥離や破壊をもたらす。この原因は、内部の水分が氷へ相変化する際の約9%の体積膨張によって、コンクリートに引張応力が加わり組織が緩むこととされている。劣化の原因が力学的現象であるため、コンクリートに外荷重が作用する場合、荷重の違いによって同じ凍結融解作用を受ける場合でも劣化が異なる。劣化には種々の要因が関与するものの、荷重という力学的要因が劣化に及ぼす影響を調べることで、劣化のメカニズムを考察することは合理的であると思われる。この観点から、本研究では、微小亀裂の進展をモデル化し、凍結融解作用による劣化メカニズムを考察する。

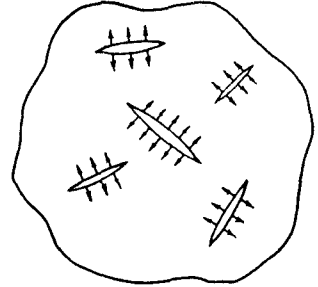


図1 劣化現象の捉え方(亀裂損傷体)

2. モデル化(亀裂損傷体)

本研究は、凍結融解作用によるコンクリートの劣化を図1に示すように捉えている。すなわち、水分の凍結によって微小亀裂が進展する際、1)コンクリートに損傷が加わることで弾性が低下し、2)亀裂が開き、滑ることで膨張をもたらす、という仮定である。この仮定の下に、多数の亀裂によって損傷を受けた材料(亀裂損傷体)の解析を用いて、劣化メカニズムを検討する。

モデルは、図2に示す単純化された2次元無限体中の孤立亀裂である。重ね合わせの原理を用いて、種々の孤立亀裂が弾性低下と膨張に及ぼす影響の和を取り、亀裂群が材料にもたらす影響を推定する(簡単のため相互作用は無視)。図2の亀裂は、初期長さ $2a_0$ 、 X_1 軸に対する角度 θ のスリットであり、荷重を遠方一様圧縮応力 σ 、水分の凍結による圧力を亀裂中央に働く自己平衡集中力 P とする。また、無限体は破壊靱性 K_c 、ヤング率 E 、ポアソン比 ν の弾性体である。亀裂が a に進展した時の応力拡大係数を K_I 、 K_{II} とすると、亀裂の進展条件は $K_I^2 + K_{II}^2 = K_c^2$ と仮定する。参考文献²⁾により、図2の亀裂が単位面積当たり1個存在する場合、損傷体の平均ヤング率 E と亀裂の開口による歪 ϵ_{nn} と ϵ_{ss} は、

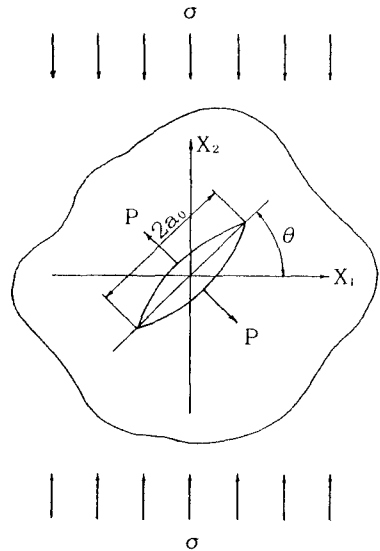


図2 モデル

$$E/E = 1 - a^2 \times \pi (1 + \nu) (9 - 7\nu) / 15 \quad (1a)$$

$$\varepsilon_{nn} = 1/E \times (4Pa - 2\pi\sigma a^2 \cos^2\theta) \quad (1b)$$

$$\varepsilon_{ss} = 1/E \times (-\pi\sigma a^2 \cos\theta \sin\theta) \quad (1c)$$

として計算される。ここで、添字 n と s は亀裂面の法線方向と接線方向を意味する。σ ≠ 0 の場合、進展長 a は θ に依存する（損傷体は異方性を示すが、式 (1a) は簡単のため異方性を無視している）。式 (1) を θ について積分して全方向の亀裂の影響をとり、弾性の低下と荷重方向の直歪を次のように推定する。

$$1 - E/E = \pi \frac{(1 + \nu) (9 - 7\nu)}{15} \times d \quad (2a)$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{N}{2\pi E} \int_0^{2\pi} 4Pa \cos^2\theta - 2\pi\sigma a^2 \cos^2\theta d\theta \quad (2b)$$

ここで、d は次式で計算され、N は単位面積中に存在する亀裂の個数である。

$$d = \frac{N}{2\pi} \int_0^{2\pi} a^2 d\theta \quad (2c)$$

3. 計算結果

コンクリートの局所的な破壊靱性 K_c と、水分凍結に対応する自己平衡集中力 P を直接測定することはできない。そこで両者の影響を除くため、初期亀裂長 a_0 を $r_0 = a_0/a_c$ ($a_c = (P/K_c)^2/\pi$)、荷重 σ を $\alpha = \sigma/\sigma_0$ ($\sigma_0 = K_c^2/P$) として無次元化する。式 (2) で計算される $\sigma = 0$ の場合の弾性の低下に対応する d と直歪 ε_{22} を d_r と ε_r とし、 α と d/d_r 及び $\varepsilon_{22}/\varepsilon_r$ の関係をそれぞれ図 3 と図 4 に示す。

図 3 より、適当な荷重がかかると、弾性の低下は極小となることが示されているが、この傾向は実験的に観察されている。また図 4 では、その荷重で ε_{22} が膨張から収縮に転じているが、この結果も同様に観察されている。さらに、 $\sigma = 0$ の場合に種々の実験で測定される E/E や ε_{22} を用いて K_c を推定したところ、オーダーは 10^{-5} [$\text{Pa}\cdot\text{m}^{1/2}$] となり、セメントペーストの破壊靱性と一致する。以上の結果は、本モデルが定性的、定量的にコンクリートの劣化を解析していることを示唆している。したがって、本研究で仮定された微小亀裂の進展を考慮することで、凍結融解作用による劣化メカニズムを解明することが、可能であると期待できる。

4. 参考文献

- 1) 凍害：長谷川 寿夫、藤原 忠司、技報堂出版、(1988)。
- 2) OVERALL MODULI OF HETEROGENEOUS ELASTIC MATERIALS: M. HORI and T. MIURA, JSCE (1991)。

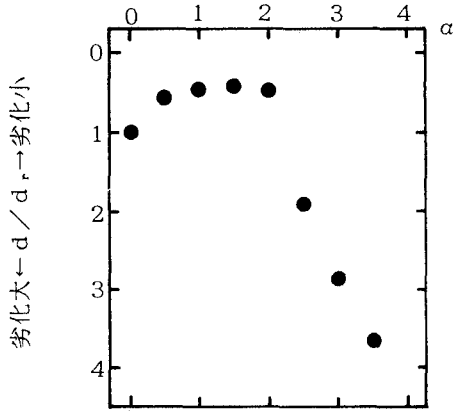


図 3 計算結果 (d/d_r)

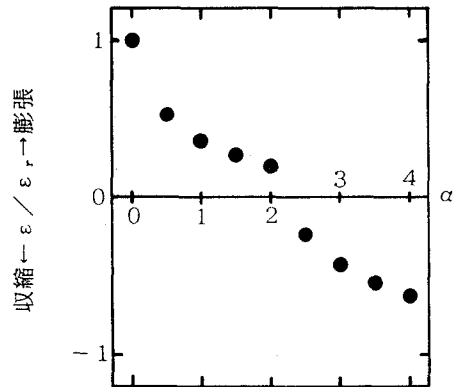


図 4 計算結果 ($\varepsilon/\varepsilon_r$)