

I-29

凍結融解作用によるコンクリートの劣化の一力学的考察

東北大学 正会員 ○堀 宗朗

東北大学 正会員 三浦 尚

1. 序

コンクリートは凍結融解作用（常温～ -20°C ）の繰り返しを受けると劣化を生じることがある。この劣化は、内部の水分が氷へ相変化する際引き起こす約9%の体積膨張によって、コンクリートに引張応力がくわわり、その組織が緩むことに起因する。コンクリート中には $10^{-3}\sim 10^{-9}\text{m}$ の径の微小な細孔が多数存在するため、このコンクリート組織の緩みは微視的に見ると細孔構造の変化と考えられている¹⁾。また、凍結融解作用による劣化の目安として、コンクリートの弾性の低下が用いられることが多い。

以上の観察を基に、損傷体の平均弾性の理論²⁾を適用して、凍結融解作用によって劣化したコンクリートの弾性低下と細孔構造変化の関係を考察する。すなわち、細孔構造の変化を損傷とみなし、1) 損傷に伴う平均弾性低下の理論解析と、2) 劣化したコンクリート供試体の細孔構造変化と弾性低下の実験測定、の比較検討を行なう。実際のコンクリート構造物では局所的な弾性の測定は難しいが細孔構造の測定は可能であるため、細孔構造変化と弾性低下の関係が判明すれば、それを劣化度診断に用いることが期待できる³⁾。

2. 損傷体の平均弾性の解析

凍結融解作用による弾性の相対的な低下は60%を越えることもあり、この大幅な低下の原因として微小亀裂の発生や進展が考えられる。コンクリートには多数の微小亀裂が存在しているため、亀裂密度自体は測定できない。したがって、劣化前のコンクリートを均質な材料として、劣化による亀裂密度の増加に伴う平均弾性の相対的な低下を推定する。この推定は微分公式²⁾に基づいている。亀裂密度が不明であるので、他の平均弾性推定法は適用できない。

コンクリート中に発生する微小亀裂の形は多岐にわたるため、図1に示す軸長が a と ρa の楕円状の亀裂を考える（ $\rho \geq 1$ ）。亀裂密度の増加を d 、平均弾性を $\bar{C} = \bar{C}(d)$ とする。図2のように単位体積中に N 個の亀裂がランダムな方向に新たに発生すると考えた場合、 $d = 3\pi N \rho a^3/4$ であり、 $\bar{C}$ は等方的となる。微分公式にしたがえば、 $\bar{C}$ の逆テンソルとして定義される平均コンプライアンス $\bar{D}$ （ $=\bar{C}^{-1}$ ）は次の初期値問題を満足する²⁾。

$$\frac{d\bar{D}(d)}{dd} = \frac{1}{1-d} H(\rho, \bar{D}(d)),$$

$$\bar{D}(0) = D. \quad (1)$$

ここで、初期値 D は劣化前のコンクリートのコンプライアンスである。また、テンソル H は等方であり、 ρ と $\bar{D}$ が決定する2つの定数 H_1 と H_2 によって、成分が $H_{ijkl} = H_1 \delta_{ij} \delta_{kl} + H_2 (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk})$ とし

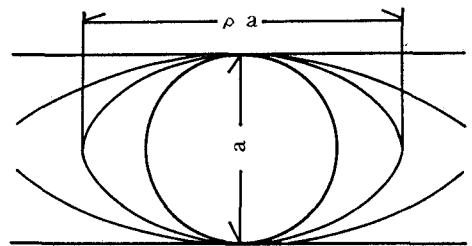


図1 亀裂の形状

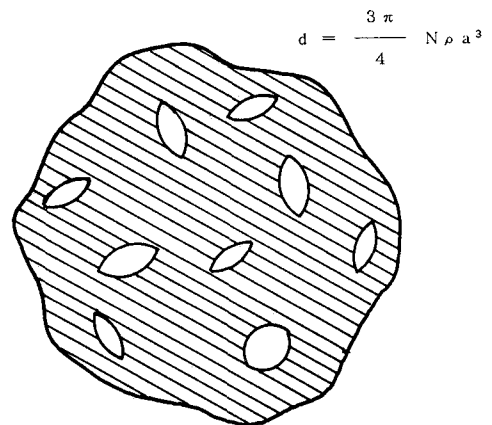


図2 亀裂のランダム分布

て与えられる²⁾。

初期値問題(1) について、 $d \rightarrow 0$ での漸近解は、 $\bar{D} \sim D + d H(\rho, D)$ である。 $\bar{D}$ は等方であるから、平均のヤング率 $\bar{E}$ の漸近解は

$$\frac{\bar{E}}{E} \sim 1 - d E (H_1 + 2H_2) \quad (2)$$

D のヤング率とポアソン比を E と ν とし、 $\rho = 1$ （円盤）と ∞ （スリット）の時の H_1 と H_2 を表1に示す。

3. 実験結果と考察

コンクリート供試体に凍結融解の繰り返しを施して劣化させ、動弾性試験によりヤング率を、水銀圧入式ポロシメータにより細孔構造を測定した。実験の詳細は参考文献3)に述べられている。実験の結果から、比較的大きな径（ $10 \sim 1 \mu\text{m}$ ）の細孔の体積が増加し比較的小さな径（ $0.05 \sim 0.025 \mu\text{m}$ ）の細孔の体積が減少することが観察された。大型と小型の細孔の単位体積中の体積変化を X と Y （ cm^3/cm^3 ）、ヤング率の相対的低下を $Z = 1 - \bar{E}/E$ とし、同一の配合のコンクリートについての測定値を図3に示す。3者の間には、次の相関関係が成立する。

$$Z = 3.5X + 0.75Y - 0.039 \quad (3)$$

相関係数は約0.89と十分高く、凍結融解作用によって劣化したコンクリートに損傷体の理論が適用可能であることが示唆される。配合が異なるコンクリートについても若干相関が落ちるものの同様の結果が得られている。

厚さ $2h$ の亀裂（ $h \ll 1$ ）は、水銀が側部から圧入する場合、 $h a / 2$ の径の細孔として測定される。そこで、劣化による亀裂が小型の細孔を連絡し $10 \sim 1 \mu\text{m}$ の径の細孔として測定されると仮定すると、 $h a / 2$ は $10 \sim 1 \mu\text{m}$ 程度であり、亀裂密度の増加 d は細孔の体積増加 X に対応する。理論式(2)の d を X に代えた場合の X の係数を表2に示す。実験式(3)の X の係数との比較から $h \approx 0.1$ が得られる。したがって、凍結融解作用によってコンクリートに発生する亀裂は、代表長さ a が $200 \sim 20 \mu\text{m}$ 程度、厚さ $20 \sim 2 \mu\text{m}$ 程度であることが推測される。今後、この推測を実証するために、劣化前後のコンクリートの細孔構造を観察することが必要である。

4. 結論

凍結融解作用によって劣化するコンクリートの細孔構造の変化と弾性の低下の間に成立する関係が、損傷体の平均弾性推定の理論を適用することで説明される可能性が示された。

5. 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, 土木学会論文集（印刷中）。
- 3)細孔構造の変化に着目したコンクリートの低温劣化の診断法について：堀 宗朗、その他、J C I（投稿中）。

表1 テンソルHの成分

	$\rho = 1$	$\rho = \infty$
H_1	$-\frac{16(1-\nu^2)}{45(2-\nu)E}$	$-\frac{\pi(1+\nu)}{15E}$
H_2	$\frac{16(5-\nu)(1-\nu^2)}{45(2-\nu)E}$	$\frac{\pi(1+\nu)(10-7\nu)}{30E}$

○ 測定
● (3)上の点

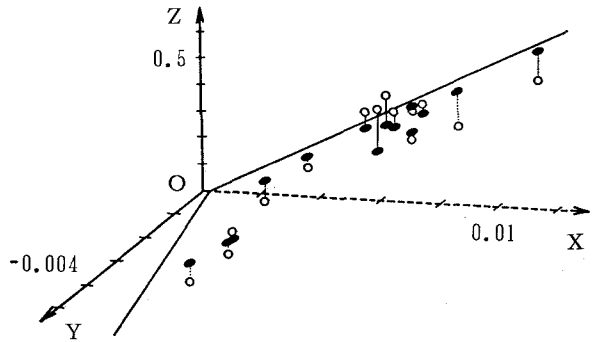


図3 細孔構造変化と弾性低下の関係

表2 亀裂密度の増加と細孔体積の増加の対応

		$\rho = 1$	$\rho = \infty$
Xとの対応		$\frac{4\pi h}{3} d$	$\pi h d$
式(3)による Xの係数	$\nu = 0.2$	$\frac{0.43}{h}$	$\frac{0.67}{h}$
	$\nu = 0.3$	$\frac{0.41}{h}$	$\frac{0.66}{h}$