

凍結融解作用により劣化したコンクリートの圧縮特性

Compressive Characteristic of Concrete Deteriorated by Freezing and Thawing Action

北海道大学大学院工学研究科 ○学生員 奥山英俊 (Hidetoshi Okuyama)
北海道大学大学院工学研究科 正 員 佐藤靖彦 (Yasuhiko Sato)
共和コンクリート工業 (株) 正 員 進藤邦雄 (Kunio Shindo)
共和コンクリート工業 (株) 正 員 成田義昭 (Yoshiaki Narita)

1. はじめに

現在、凍結融解試験は ASTM によるものが一般的であるが、本研究では、実際に寒冷地で起こっていると考えられる凍結融解作用に近い凍結融解試験として、気中に置かれたコンクリートの気温を制御して実条件に近い凍結融解試験を行い、その劣化性状について考察した。

2. 試験機概要

本研究では、幅：約 1.8m、奥行き：約 3.5m、高さ：約 1.6m の外的環境制御式載荷システム(写真-1)を用い、実験を行った。

この試験機は、環境室内の温度、湿度、散水、照射を制御することができ、アクチュエータにより、静的荷重、動的荷重を加えることができる。以下に詳細を述べる。

- ・温度 1 時間単位で-25℃~+25℃で制御可能
- ・湿度 1 時間単位で 20%~80%で制御可能
- ・散水 任意の時点での設定水量の散水可能
- ・照射 任意の時点での設定量の照射可能
- ・最大静的荷重 750kN
- ・最大動的荷重 500kN

3. 実験概要

セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は沙流川産（比重 2.70）、粗骨材は当麻町月形山産碎石（吸水率 2.0%・比重 2.87）を用いた。混和剤には、ポゾリス 70（10 倍液）と AE-101（100 倍液）を使用した。コンクリートの配合を表-1 に示す。目標スランプは 10±2cm、目標空気量は 4.5±1%とした。コンクリートの練り混ぜには 100 リットル強制練パンタイプミキサを用い、セメント、細骨材、粗骨材を投入して 30 秒空練りし、水と混和剤を投入して 1 分 30 秒本練りした。練り量は 1 バッチ 40 リットルとした。

凍結融解試験は、外的環境制御式載荷システムにコンクリート円柱供試体を 15 本配置し、気温を図-1 のように制御して行った。コンクリート内部の温度は、熱電対を供試体上部から 5cm、10cm、15cm の所に 1 本ずつ計 3 本挿入したコンクリートを外的環境制御式載荷システムの手前側と奥側に 1 本ずつ配置して測定し、気温とコンクリート温度の関係を調べた。また、凍結融解試験中のひ

ずみを測定するために、ひずみゲージを供試体 1 体につき縦と横に 2 枚ずつ貼り付け、コンクリートが凍結融解試験中にどのような挙動を示すかを調べた。各供試体の凍結融解試験のサイクル数、散水の有無を表-2 に示す。

凍結融解試験終了後、気温 20℃、コンクリート内部の温度を 20℃にし、圧縮試験を行い、凍結融解作用による損傷と圧縮強度および静弾性係数との関係を調べた。圧縮強度は JIS A 1108-1993、静弾性係数は JSCE-G 502-1988 により比較、検討した¹⁾。

また、圧縮試験により得られた応力-ひずみ関係を用いて、凍結融解作用による損傷を、前川モデルにより考察した²⁾。

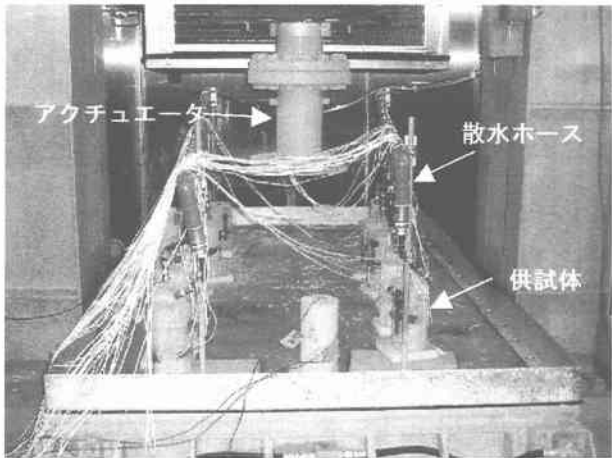


写真-1 外的環境制御式載荷システム

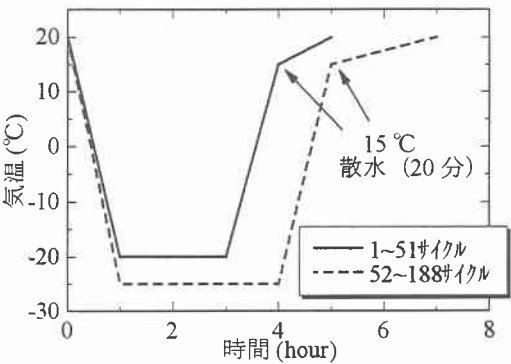


図-1 凍結融解試験温度履歴

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	G (kg/m ³)	S (kg/m ³)	ポゾリス 70 (cc/m ³)	AE-101 (cc/m ³)	SL (cm)	air (%)
60	45.3	267	160	1116	869	0.668	0.004	9.5	4.5

表-2 凍結融解サイクル数

サイクル数 (回)	0	88	148	188	
供試体本数 (本)	3	3	3	3	3
散水	有	有	有	有	無

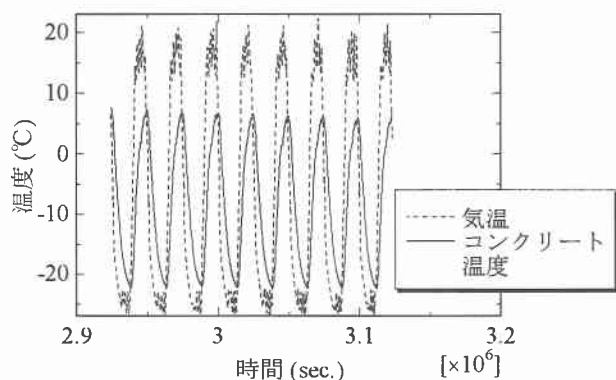


図-2 気温とコンクリート温度の関係 (52~188 サイクル)

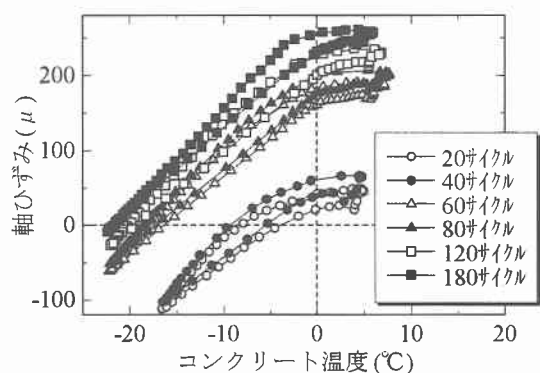


図-3 軸ひずみとコンクリート温度の関係

4. 実験結果および考察

4.1 凍結融解試験

気温を変化させても、コンクリート温度はすぐには変化せず、時間差があってから変化した。51 サイクルまで、図-1 のように気温制御で凍結融解試験を行ったところ、コンクリート温度は約 -15°C ~ $+5^{\circ}\text{C}$ の範囲で凍結融解作用を繰り返した。既往の研究³⁾によると、コンクリート温度が、 -20°C 以上では凍結融解作用による劣化は少ないとされているため、コンクリート温度が約 -25°C ~ $+5^{\circ}\text{C}$ の範囲で凍結融解試験を行い、コンクリートをより劣化させるために、52 サイクルから気温制御を変えたところ、図-2 のようにコンクリート温度が変化した。

図-3 は、軸ひずみとコンクリート温度の関係を示したものである。コンクリート温度が低くなっていくと、温度収縮によりコンクリートは収縮し、コンクリート温度が上昇し同じ温度に戻ってきてもひずみは0には戻らず、残留膨張ひずみを示す。そして、凍結融解作用を繰り返すたびに残留膨張ひずみが増加した。軸直角方向ひずみに関しても同様の結果が得られた。また、52 サイクルからコンクリートの最低温度を変化させたが、コンクリー

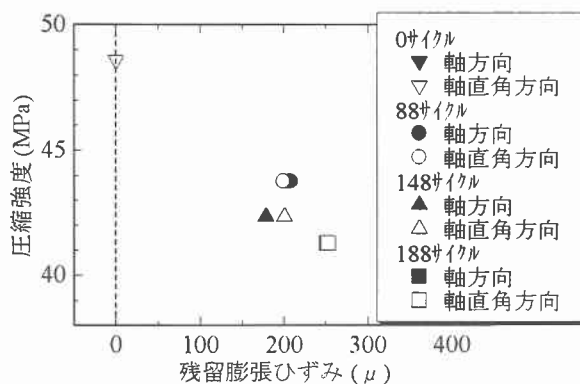


図-4 圧縮強度と残留膨張ひずみの関係

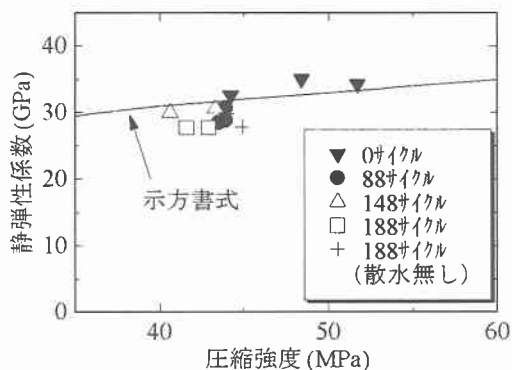


図-5 静弾性係数と圧縮強度の関係

トの最低温度を低くした方が、残留膨張ひずみは大きくなり、劣化の度合いが大きかったことがわかった。

4.2 圧縮試験

図-4 は、圧縮強度と残留膨張ひずみの関係を示したものである。残留膨張ひずみが増加すると、圧縮強度は低下し、強い相関関係が見られた。また、散水を行わなかった 188 サイクルのコンクリートは、散水を行った 88 サイクルのコンクリートの圧縮強度とほぼ等しく、散水を行わないコンクリートの圧縮強度の低下は小さかった。

図-5 は、静弾性係数と圧縮強度の関係を示したものである。凍結融解作用を受けていないコンクリートは、土木学会コンクリート標準示方書の値と同等かそれ以上だったが、凍結融解作用を受けたコンクリートは示方書式よりも若干下回った。

図-6 は、凍結融解試験を行わなかったコンクリートと凍結融解試験 88 サイクル終了後に行った凍結融解試験中の塑性ひずみも含めた圧縮試験の応力・軸ひずみ曲線を示したものである。軸方向ひずみは凍結融解試験中に膨張してから、圧縮試験により圧縮されることとなる。

5. 前川モデルによる凍結融解作用を受けたコンクリートの損傷評価

図-7 は、図-6 を等価応力・等価ひずみで表したものである。凍結融解試験を行ってから圧縮試験を行うと、軸

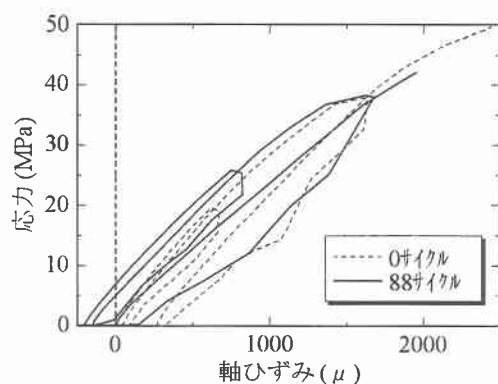


図-6 応力 - 軸ひずみ曲線

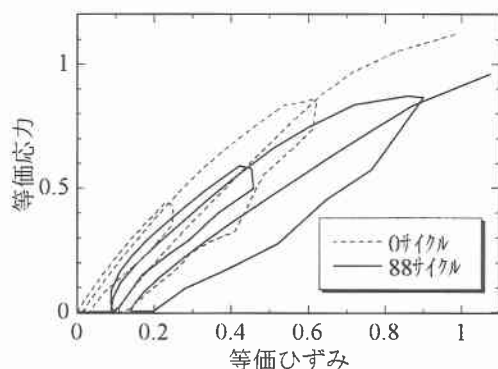


図-7 等価応力 - 等価ひずみ曲線

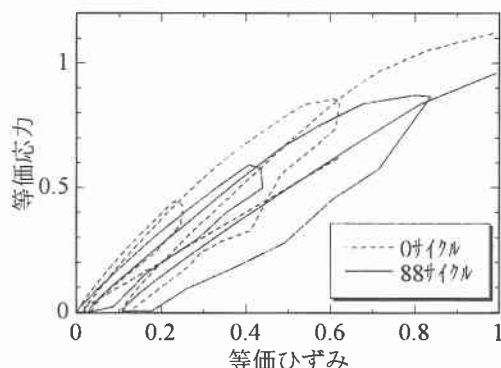


図-8 等価応力 - 等価ひずみ曲線

方向ひずみは膨張してから圧縮される。しかし、等価応力 - 等価ひずみを用いると引張と圧縮のひずみが同符号で表されるため、図-7のように等価ひずみは凍結融解試験中に増加し、圧縮試験を行うと一旦減少してから増加する。本研究では、凍結融解試験による損傷と圧縮試験による損傷を全く別のものとして考え、圧縮試験直前のひずみを0として、図-8のように等価応力 - 等価ひずみを表し、前川モデルにより、凍結融解作用を受けたコンクリートの圧縮特性を調べた。図-9、式(1)～(3)に前川モデルの概要を示す。

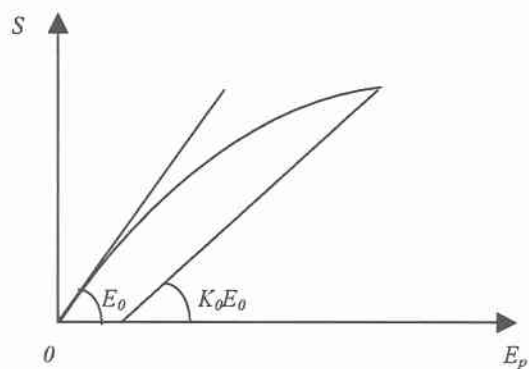


図-9 前川モデル

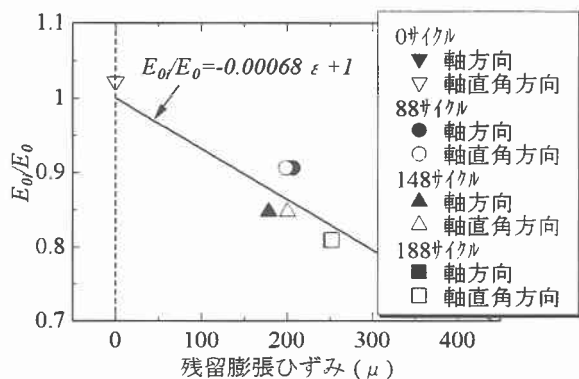


図-10 初期弾性係数の低下率と残留膨張ひずみの関係

$$K_0 = \exp(-0.73E_{max}(1 - \exp(-1.25E_{max}))) \quad (1)$$

$$S = E_0K_0(E - E_p) \quad (2)$$

$$E_p = E_{max} - \frac{20}{7}(1 - \exp(-0.35E_{max})) \quad (3)$$

ここで、

S : 等価応力

E : 等価全ひずみ

E_0 : 初期弾性係数

E_p : 等価塑性ひずみ

K_0 : 破壊パラメータ

図-10 は、初期弾性係数の低下率 E_{0i}/E_0 (E_{0i} : 任意のサイクルの初期弾性係数, E_0 : 前川モデルにおける初期弾性係数(=2)) と残留膨張ひずみ ϵ の関係を示したものである。凍結融解試験後のコンクリートは、0 サイクルのコンクリートよりも初期弾性係数が低下し、残留膨張ひずみとの相関関係が見られた。

図-11 は、破壊パラメータと最大等価ひずみの関係を示したものである。前川モデルでは、破壊パラメータは経験した過去最大の等価全ひずみの関数として、二軸応力下の実験データに基づいて定式化(式(1))されている。前川モデルでは、初期弾性係数は2としているが、図-10で示したように凍結融解作用を受けたコンクリートは初期弾性係数が低下する。そのことを考慮して、初期弾性係数の低下を図-10中の式より求めると、破壊パラメー

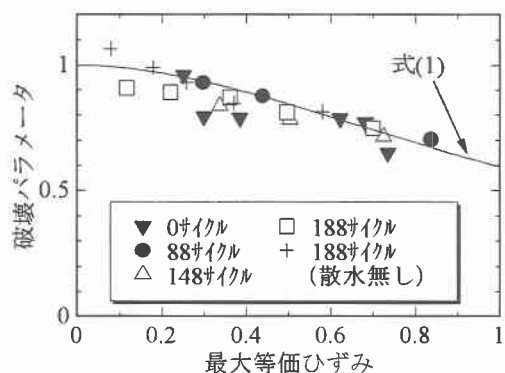


図-11 破壊パラメータと最大等価ひずみの関係

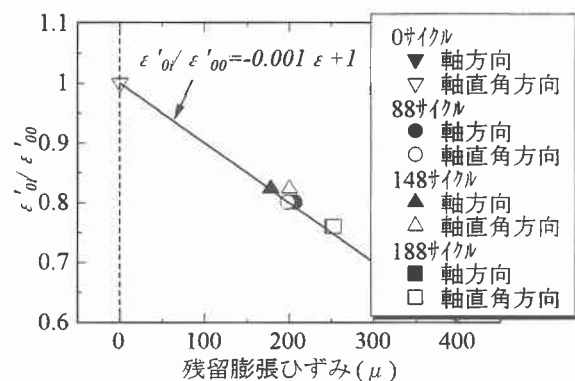


図-12 圧縮強度時のひずみの減少率

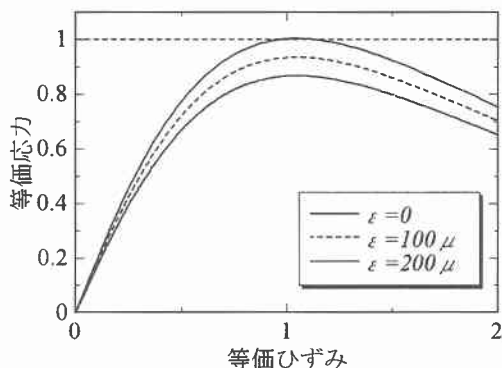


図-13 等価応力と等価ひずみの関係

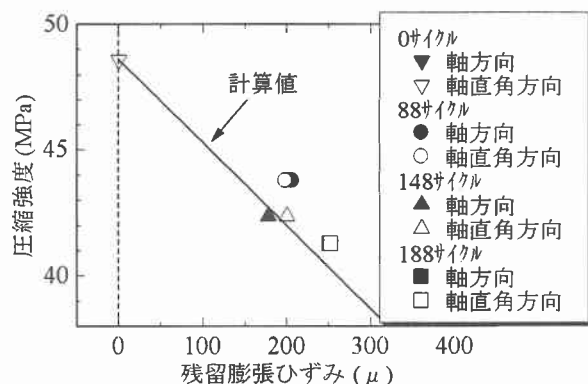


図-14 圧縮強度と残留膨張ひずみの関係

タは、ほぼ式(1)に沿った値となる。よって、凍結融解作用を受けたコンクリートと受けていないコンクリートは初期弾性係数の低下を考慮すれば、圧縮応力下における応力-ひずみ関係は同じであると考えられる。

図-12 は、圧縮強度時のひずみの減少率 $\varepsilon'_{0i}/\varepsilon'_{00}$ (ε'_{0i} : 任意のサイクル数の圧縮強度時のひずみ, ε'_{00} : 0 サイクルの圧縮強度時のひずみ) と残留膨張ひずみの関係を示したものである。残留膨張ひずみが大きくなると、圧縮強度時のひずみが小さくなる傾向がある。

等価応力は、初期弾性係数、破壊パラメータ、等価全ひずみおよび等価塑性ひずみの関数として、定式化(式(2))されている。凍結融解作用による損傷によって引き起こされる初期弾性係数の低下を考慮して、図-10 より、式(2)における E_0 を $(1-0.00068\varepsilon)E_0$ とし、等価応力を残留膨張ひずみ、初期弾性係数、破壊パラメータ、等価全ひずみおよび等価塑性ひずみの関数で表すと式(4)のようになる。

$$S = (1-0.00068\varepsilon)E_0K_0(E-E_p) \quad (4)$$

図-13 は、式(4)を用いて等価応力と等価ひずみの関係を示したものである。凍結融解作用を受けたコンクリートの等価応力-等価ひずみの関係は、初期弾性係数の低下を考慮することにより、残留膨張ひずみを変数として表すことができる。

図-14 は、図-4 に式(4)により得られた応力-ひずみ関係を加えたものである。ほぼ実験データと近い値となった。

6. まとめ

- 1) 凍結融解試験は、コンクリート最低温度が低い方がコンクリートの劣化は大きい。
- 2) 残留膨張ひずみが大きいほど、圧縮強度が低下し、圧縮強度時のひずみも小さくなる傾向にある。また、散水を行わなかったコンクリートの方が圧縮強度の低下は少なかった。
- 3) 静弾性係数は、凍結融解試験を行っていないコンクリートは、示方書式と同等かそれ以上だったが、サイクル数、散水の有無に関わらず、凍結融解試験を行ったコンクリートは示方書式よりも若干下回った。
- 4) 凍結融解作用による損傷によって引き起こされる初期弾性係数の低下を考慮することにより、凍結融解作用を受けたコンクリートの等価応力-等価ひずみの関係を、残留膨張ひずみを変数として表すことができる。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書
- 2) 岡村甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版
- 3) 三浦尚：極低温の世界におけるコンクリート構造物，土木学会誌，Vol.86-9

謝辞

本研究は、平成 12 年度産業技術研究助成事業により実施したものである。