

損傷を有するコンクリートの凍結融解作用後の圧縮強度

Compressive strength of concrete with damage after freezing and thawing cycles

北海道大学大学院工学研究科 ○学生員 福島佳志美 (Yoshimi Fukushima)
 北海道大学大学院工学研究科 正員 佐藤靖彦 (Yasuhiko Sato)
 北海道大学大学院工学研究科 正員 上田多門 (Tamon Ueda)
 北海道大学大学院工学研究科 ムッタキン ハサン (Muttaqin Hasan)

1. まえがき

著者らは、凍結融解のみでなく凍結融解前に力学的荷重・乾燥収縮によって異なる損傷履歴を与えられ、その後、凍結融解を受けた場合に、その複合的な劣化を表現できる応力-ひずみモデルを提案することを目的に研究を行っている。研究の全体計画は図-1のような流れであるが、今回はその途中経過として、損傷をあらかじめ与えられたコンクリートの塑性ひずみの増加が凍結融解試験前の損傷過程によりどのように異なるのか、また、損傷をあらかじめ与えられたコンクリートの圧縮強度が凍結融解作用を受けることで、どのように低下するのか、ということを報告するものである。

2. 実験概要

2.1 供試体

実験に用いたセメントは早強ポルトランドセメントである。AE 剤は混入されておらず、その配合は、表-1に示すとおりである。

供試体は図-2に示すような寸法 $150 \times 150 \times 60 \text{ mm}$ の直方体である。図-2の写真は、凍結融解試験中の供試体が散水されているところである。

また、供試体には、1体につき鉛直・水平・奥行き方向(X軸・Y軸・Z軸方向)に表裏2枚ずつ計6枚のひずみゲージが貼られている。これらはエポキシ樹脂およびコーティング剤で防水保護されている。

2.2 実験の流れ

実験は図-1に示すように、凍結融解試験前の損傷過程により供試体が4シリーズに分けられ、これらの損傷過

程を経た後、半数は凍結融解試験(224 サイクル)にかけられ、残りの半数は凍結融解作用を与えないでおき、その後、一軸圧縮試験が行われるという流れで進められた。

3. 実験結果

3.1 凍結融解前の乾燥収縮および静的載荷試験

DD シリーズの供試体は凍結融解前に、打設後気乾養生で乾燥収縮作用を受け、図-3に示すように約 1000μ の収縮ひずみが生じるまで乾燥された。

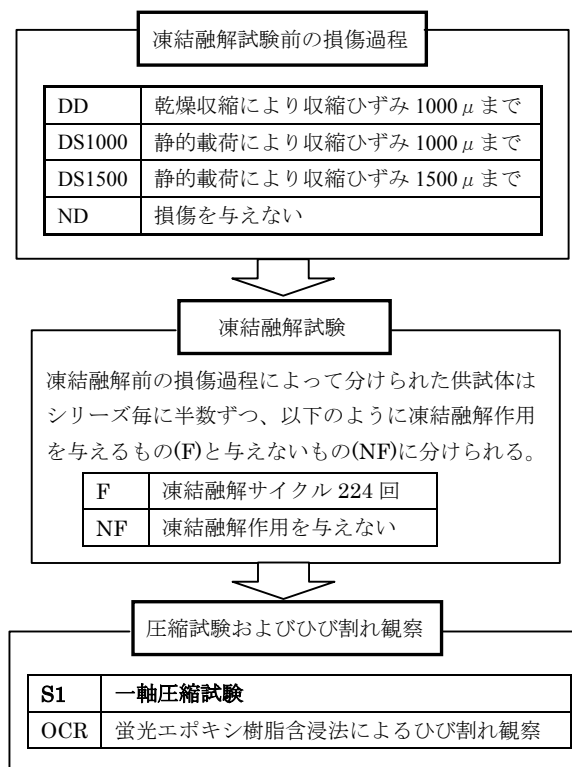


図-1 全体計画

表-1 配合

水セメント比(%)	細骨材率(%)	AE 剤	空気量(%)
50	40	0	1.5
単位量 (kg/m ³)			
水	セメント	粗骨材	細骨材
320	160	1202	781

表-2 載荷試験後の塑性ひずみ

	X 軸方向	Y 軸方向	Z 軸方向
DS1000	-52.25μ	30.5μ	14.94μ
DS1500	-145.5μ	42.56μ	42.94μ

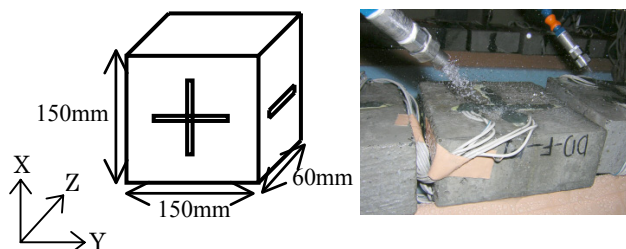


図-2 実験供試体

DS1000 および DS1500 シリーズの供試体は打設後、30日間水中養生され、その後、図-4, 5 の応力-ひずみ曲線に示されるように静的一軸圧縮試験によって軸圧縮ひずみが 1000μ および 1500μ に達するまで荷重が与えられた。図-4, 5 には、一軸圧縮試験における応力-軸圧縮ひずみ、体積ひずみ関係と破壊時の応力-ひずみ曲線が描かれている。与えられた応力は DS1000 では圧縮強度の約 65.3% であり、DS1500 では約 89.7% の応力レベルであることが分かる。応力レベル約 65.3% が与えられたコンクリート内部では、マイクロクラックが遷移帯のみならずマトリックスにも形成され始めており、さらに大きな応力レベルの 89.7% が与えられたコンクリート内部では、遷移帯とマトリックスの両方でクラックは急速に伝播し、連続的になっていると考えられる。なお、これらの載荷試験後の供試体における塑性ひずみは表-2 に示すとおりである。

3. 2 凍結融解試験

凍結融解試験は、室温と散水がコンピュータ(PC)により制御できる環境室内で行われた。PC に入力される温度履歴、実際の環境室内の温度履歴、供試体内部の温度履歴は図-6 に示す通りである。凍結融解による劣化が促進されるように、環境室内の温度が 19 度に達してから 10 分間、散水するよう設定された。散水は図-2 の写真から分かるように、 $150\times 150\text{mm}$ の面が上下にくるように設置された供試体の上面にかかるようにされた。

次に、凍結融解により生じた塑性ひずみをシリーズ毎に図-7 に示す。凍結融解前の損傷の与え方によらず、X,Y 軸方向の塑性ひずみの生じ方に差はあまりみられず、等方的に塑性ひずみが生じていることが分かる。つまり、載荷試験によって生じたマイクロクラックは X,Y 軸方向に関しては、方向による偏りがなく発生したと考えられる。ただし、Z 軸方向に関しては、X,Y 軸方向の塑性ひずみの値に比べ小さな値が示された。DS1000, DS1500 シリーズにおける Z 軸方向の塑性ひずみの値が 180 サイクル付近から低下しているのは、実際にコンクリートが収縮を始めたとは考えられず、コンクリート表面の劣化によりひずみゲージがコンクリート表面から剥がれかかってしまったためだと考えられる。つまり、ひずみが大きくなりすぎると、ひずみゲージでは対応できなくなるものと考えられる。

図-7 から、生じた塑性ひずみの大きさは、DD, ND, DS1000, DS1500 シリーズの順に大きくなっている。つまり、損傷の与え方が同じ(一軸圧縮)DS1000 および DS1500 シリーズでは、与えられた圧縮ひずみが 1000μ よりも 1500μ と、大きい方が凍結融解によって生じる塑性ひずみも大きくなる。そして、与えられたひずみはほぼ同じ 1000μ である DD および DS1000 シリーズを比較すると、載荷によって損傷を与えられた DS1000 シリーズの方が凍結融解によって生じる塑性ひずみも大きくなる事が分かる。また、DD シリーズは、凍結融解前に何の損傷も与えていない ND シリーズに比べ、生じた塑性ひずみは小さくなっている。これは、凍結融解試験を行った環境室内で、ND シリーズの供試体のみに多量

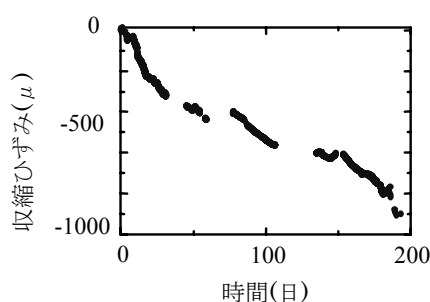


図-3 乾燥収縮中の時間-収縮ひずみ関係

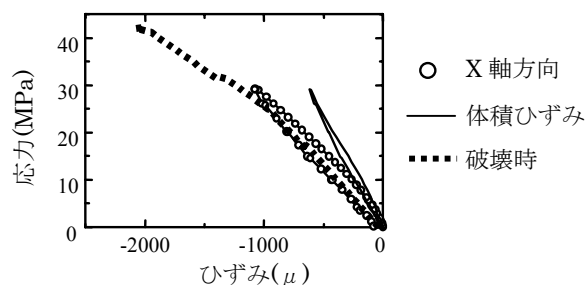


図-4 DS1000 での応力-ひずみ関係

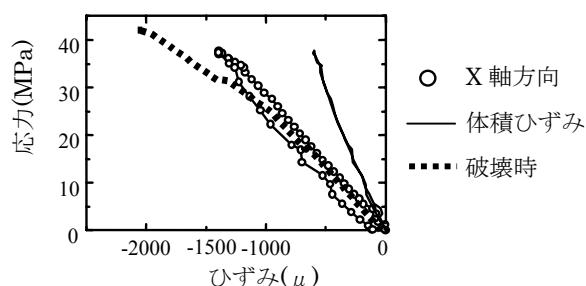


図-5 DS1500 での応力-ひずみ関係

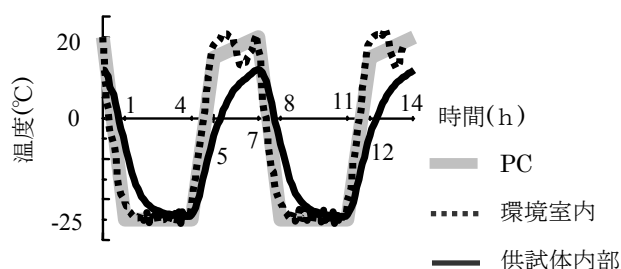


図-6 温度履歴

に散水してしまったためと考えられる。よって、ND シリーズと他のとの比較は行えない。

本研究により、凍結融解による塑性ひずみに与える事前の損傷過程の影響は、乾燥収縮<載荷試験、の順であることが言える。このような、凍結融解前に与えられる損傷過程の違いから生じた塑性ひずみの差は、損傷過程におけるマイクロクラックの生じ方によると考えられるので、今後、蛍光エポキシ樹脂含浸法により、マイクロクラックを視覚的に評価する予定である。

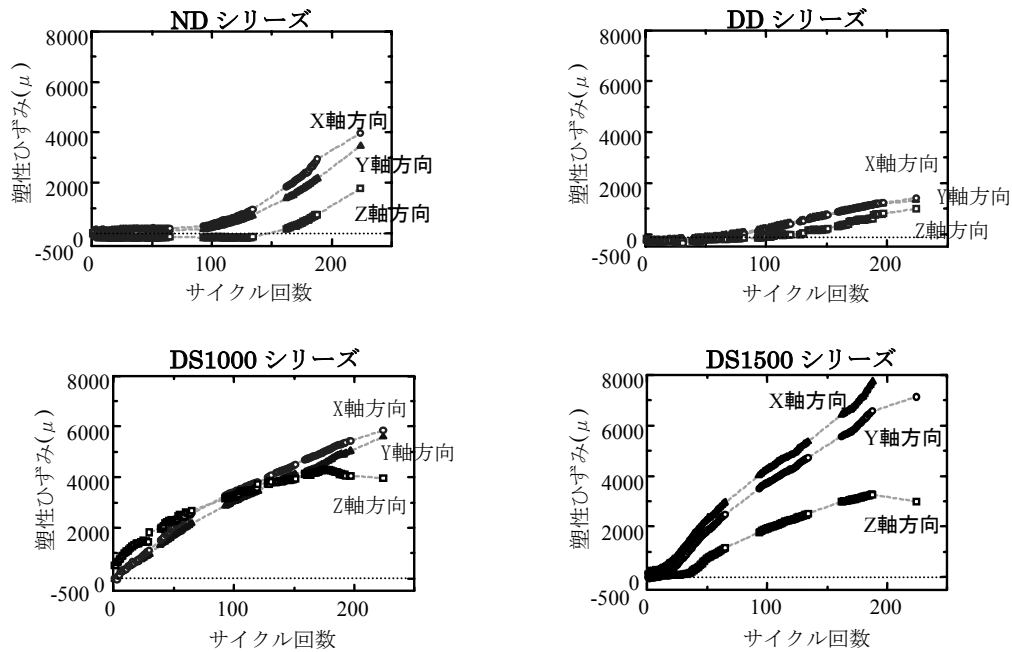


図-7 凍結融解試験サイクル数と塑性ひずみ関係

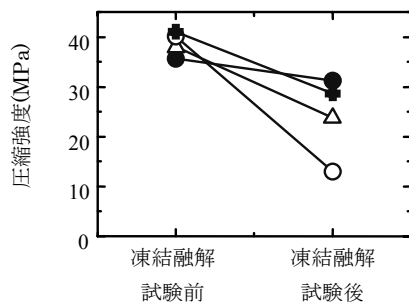


図-8 凍結融解試験前後の圧縮強度

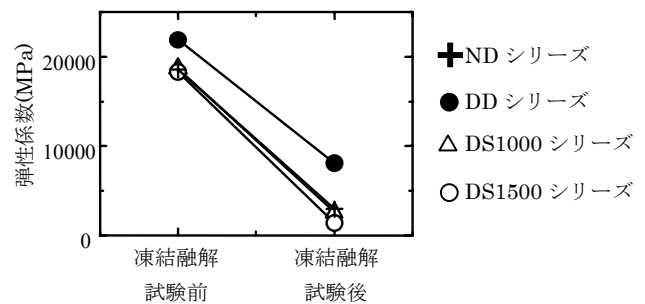


図-9 凍結融解試験前後の弾性係数

表-3 圧縮強度(MPa)低下率

	ND	DD	DS1000	DS1500
FTC 前 f_{C0}'	41.06	35.71	38.28	40.11
FTC 後 f_C'	28.78	31.18	23.78	12.93
f_C'/f_{C0}'	0.70	0.87	0.62	0.32

表-4 弾性係数(MPa)低下率

	ND	DD	DS1000	DS1500
FTC 前 E_{C0}	18611	21911	18718	18352
FTC 後 E_C	2926	8110	2578	1345
E_C/E_{C0}	0.16	0.37	0.14	0.07

3.3 一軸圧縮試験

凍結融解 224 サイクル後に、環境室内のアクチュエータにより静的一軸圧縮試験が行われた。図-8 に圧縮強度、図-9 に弾性係数を示す。ここでは凍結融解試験を作用させたものとさせてないものを比較し、事前の損傷過程が凍結融解後の圧縮強度および弾性係数の低下に与える影響を考える。表-3, 4 には具体的な数値として各シリーズの圧縮強度および弾性係数の低下率を示している。

圧縮強度の試験結果から分かる傾向は、3.2 で示した凍結融解試験により生じた塑性ひずみと同様に、損傷の与え方が同じ(静的一軸圧縮)DS1000 および DS1500 シリーズを比較すると、DS1500 シリーズの方が圧縮強度の低下は大きくなり、そして、損傷の与え方が乾燥収縮

による力学的荷重によるかで異なっているが、与えられた収縮ひずみはほぼ同じ 1000μ である DD および DS1000 シリーズを比較すると、DS1000 シリーズの方が圧縮強度の低下が大きい。つまり、乾燥収縮<載荷試験、の順で圧縮強度の低下に与える影響は大きくなっている。弾性係数の低下に関しても圧縮強度の低下と同様の傾向が見られる。

よって、凍結融解試験による劣化を塑性ひずみ、圧縮強度、弾性係数の3点から評価しても、乾燥収縮<載荷試験、の順に劣化への影響が大きくなるという同様の結果となることが分かった。

4. 既往のモデルから算出した圧縮強度と実験値の比較

4. 1 既往のモデル

ここで、Muttaqin によって提案された応力-ひずみモデルを、その基礎となる前川により提案されている等価応力-等価ひずみモデルと併に示す。

前川と岡村により提案された等価応力-等価ひずみモデル(Eq.1)は次の通りである。

$$S = K_0 C_0 (E - E_p) \quad (1)$$

S :等価応力, E :等価ひずみ, C_0 :初期剛性(=2.0), K_0 :破壊パラメータ, E_p :等価塑性ひずみ

ここで、 K_0 , E_p は最大等価ひずみ E_{max} の関数である。

この等価応力-等価ひずみモデルでは、コンクリートを平行に配置された構成要素のグループから成り立つと仮定し、つまり、力学的荷重下では可塑性となると仮定している。また、破壊パラメータ K_0 を用いることで、除荷-再載荷剛性が、マイクロクラック、微視的座屈、モルタルと骨材の崩壊といった累積された力学的損傷のために一定ではなくなることが表されている。

以上の等価応力-等価ひずみモデルに基づいて、Muttaqin は凍結融解試験を受けたコンクリートの等価応力-等価ひずみモデル(Eq.2)を以下のように提案した。

$$S = \alpha \beta K_0 C_0 (E - E_p) \quad (2)$$

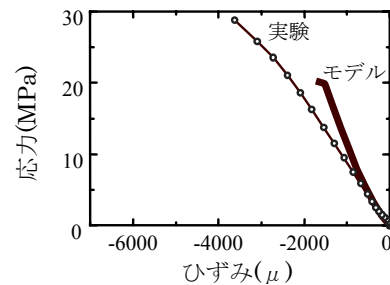
ここで導入された α , β および E_p は凍結融解作用により生じた等価塑性ひずみ E_{pf} の関数である。つまり、Muttaqin は、凍結融解作用により生じた塑性ひずみを用いるだけで凍結融解作用後の応力-ひずみ関係が求められるモデルを提案したのである。

4. 2 圧縮強度の比較

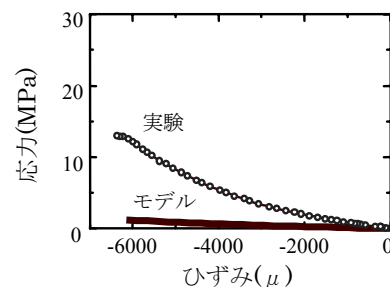
Eq.2 の Muttaqin モデルを用いて求められた応力-ひずみ曲線と 3. 3 における一軸圧縮試験結果の比較を図-10 に示す。図-10(a)では、比較的等価塑性ひずみ E_{pf} の値が小さい($E_{pf}=0.79$)供試体での比較を行い、図-10(b)では、等価塑性ひずみ E_{pf} の値が大きい($E_{pf}=2.52$)供試体での比較を行っている。これらの図から、等価塑性ひずみ E_{pf} の値が大きくなればなるほど、モデルとの差が大きくなっていることが分かる。各供試体について同様の比較を行い、等価塑性ひずみ E_{pf} と圧縮強度の実験値および計算値比の関係を図-11 に示す。この図-11 から、実験で得られた等価塑性ひずみ E_{pf} は、Muttaqin モデルを適用するには大きすぎ、適用外にあると考えられる。このように、等価塑性ひずみ E_{pf} が大きな値を示すのは、本研究が Muttaqin のモデルとは異なり、凍結融解試験前に乾燥収縮または静的荷重により損傷を与えているからであり、今後は、その損傷過程を考慮したモデルに発展させていく予定である。

5. 結論

1) コンクリートの初期損傷がその後の凍結融解試験によるコンクリートの劣化に与える影響が、大きいことが、塑性ひずみ、圧縮強度、弾性係数の3つの特性値から評価された。劣化への影響の大きさは、乾燥収



(a) $E_{pf}=0.79$



(b) $E_{pf}=2.52$

図-10 モデルと実験での圧縮試験結果

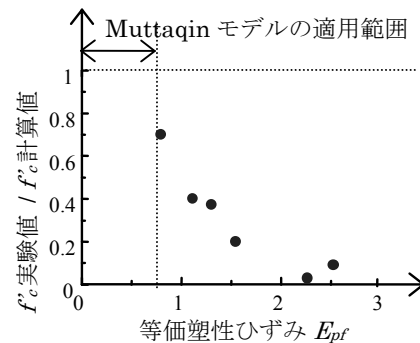


図-11 等価塑性ひずみ-圧縮強度の実験値および計算値比関係

縮・載荷試験、の順で大きくなる。

2) Muttaqin により提案されたモデルを用いて得られた一軸圧縮試験結果と実験結果を比較すると、等価塑性ひずみ E_{pf} が増加すればするほど両結果の差が開く結果となった。

参考文献

- 1) Muttaqin Hasan : Modeling of stress-strain relationships for concrete damaged by freezing and thawing cycles、北海道大学工学博士論文、2003