

論文 コンクリートの長さ変化及び凍害劣化に及ぼす鉄筋拘束の影響

鈴木 邦康^{*1}・濱 幸雄^{*2}・原田 彩加^{*3}

要旨: コンクリートの耐凍害性を評価するための凍結融解試験には、無筋コンクリート供試体がいわれている。しかし、実構造物は鉄筋で補強されており、この鉄筋が凍害によるコンクリートの膨張を拘束する可能性が考えられる。本研究では、凍結融解試験中のコンクリートの長さ変化及び凍害劣化に及ぼす鉄筋拘束の影響について検討した。その結果、鉄筋で拘束した供試体は無拘束のものと比較して、長さ変化及び相対動弾性係数の低下が小さいこと、凍結融解試験後の供試体断面の単位長さ当たりのひび割れ発生数も少なく、凍害劣化が抑制されることが明らかとなった。

キーワード: 凍害劣化, 鉄筋拘束, 凍結融解試験, 耐凍害性

1. はじめに

コンクリートの凍害劣化は膨張による劣化であると言われており、耐凍害性を評価するための凍結融解試験には無筋コンクリート供試体がいわれている。しかし、実構造物の鉄筋コンクリート部材には補強鉄筋が配されており、鉄筋はコンクリートの乾燥収縮によるひび割れの拡大を防止する役割を担っている。ここで、補強鉄筋はコンクリートの収縮を拘束するだけでなく、凍害劣化による膨張を拘束することもできる。しかし、鋼材で拘束したコンクリート供試体を用いた耐凍害性に関する研究は國府¹⁾や高橋ら²⁾による研究があるものの、これらはいずれも膨張コンクリートの膨張を鋼材で拘束することを意図したものである。

そこで本研究では、コンクリートの長さ変化及び凍害劣化に及ぼす鉄筋拘束の影響を把握することを目的として、鉄筋で拘束したコンクリート供試体を用いて凍結融解試験を行った。

2. 実験の概要

2.1 実験計画

実験は目的別にシリーズ1と2からなる。シリーズ1, 2の実験計画をそれぞれ表-1, 2に示す。

シリーズ1では、鉄筋の拘束方法の違いによる影響を検討するため、拘束なし(無筋), 一軸拘束(軸筋1本), 三軸拘束(軸筋4本あばら筋有)の3水準の供試体を作製した。図-1に供試体詳細図を示す。軸筋1本にはD16の異形棒鋼を、軸筋4本あばら筋有には軸筋にφ6のなまし鉄線、あばら筋にφ1.2の針金を使用した。養生条件は

表-1 シリーズ1の実験計画

| 供試体記号 | W/C (%) | 供試体寸法 (cm×cm×cm) | 拘束方法 | 養生条件 |
|-------|---------|------------------|------|---------------|
| 35A2 | 35 | 10×10×40 | 拘束なし | 4週水中 20℃乾湿 |
| 35B2 | | | 一軸拘束 | |
| 35C2 | | | 三軸拘束 | |
| 35A5 | | | 拘束なし | 4週水中 50℃乾湿 |
| 35B5 | | | 一軸拘束 | |
| 35C5 | | | 三軸拘束 | |
| 55A2 | 55 | 10×10×40 | 拘束なし | 4週水中 20℃乾湿 |
| 55B2 | | | 一軸拘束 | |
| 55C2 | | | 三軸拘束 | |

表-2 シリーズ2の実験計画

| 供試体記号 | W/C (%) | 供試体寸法 (cm×cm×cm) | 拘束鉄筋 | 養生条件 |
|--------|---------|------------------|------|---------------|
| 10N | 35 | 10×10×40 | 鉄筋なし | 4週水中 50℃乾湿 |
| 10D16 | | | D16 | |
| 7.5N | | | 鉄筋なし | |
| 7.5D10 | | D10 | | |
| 7.5D16 | | D16 | | |
| 7.5D19 | | D19 | | |

*1 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科講師 博士(工学) (正会員)

*2 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科助教授 博士(工学) (正会員)

*3 室蘭工業大学大学院 工学研究科建設システム工学専攻 (非会員)

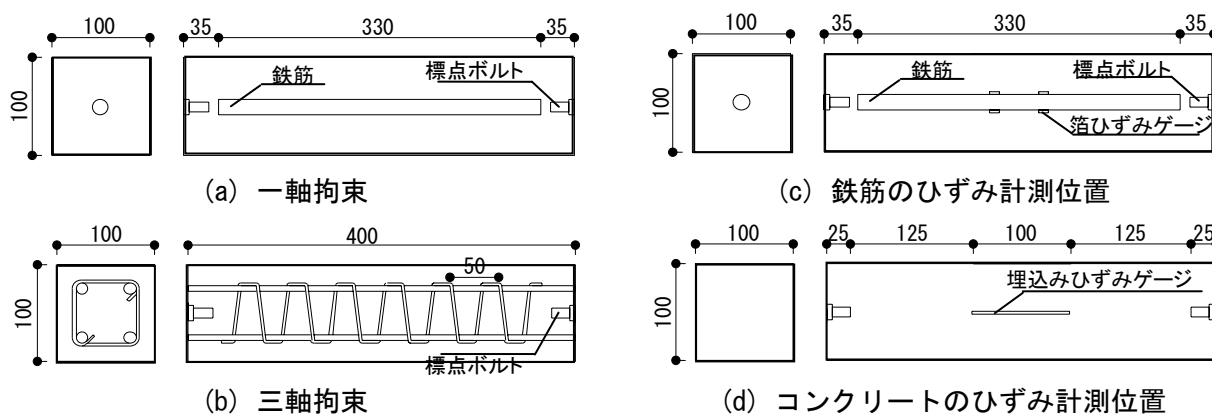


図-1 供試体詳細及びひずみ計測位置

表-3 鉄筋比

| 供試体記号 | 鉄筋比(%) |
|----------|--------|
| C | 1.13 |
| B, 10D16 | 1.99 |
| 7.5D10 | 1.27 |
| 7.5D16 | 3.54 |
| 7.5D19 | 5.10 |

表-4 コンクリートの調合

| W/C (%) | スランプ (cm) | Air (%) | s/a (%) | 単位水量 (kg/m ³) | 絶対容積 (ℓ/m ³) | | | 混和剤 [C×wt(%)] |
|---------|-----------|---------|---------|---------------------------|--------------------------|-----|-----|---------------|
| | | | | | セメント | 細骨材 | 粗骨材 | |
| 35 | 21 | 2.0 | 44.2 | 175 | 159 | 286 | 361 | 0.80 |
| 55 | 18 | 1.0 | 46.8 | 187 | 108 | 325 | 370 | — |

※高性能AE減水剤は原液で使用

表-5 コンクリートの練り上がり性状

(a) シリーズ1

| W/C (%) | スランプ (cm) | Air (%) | 単位容積量 (kg/m ³) | 練温 (°C) | フロー (mm) |
|---------|-----------|---------|----------------------------|---------|----------|
| 35 | 23.5 | 1.6 | 2451 | 22.4 | 420×382 |
| 55 | 18.4 | 1.8 | 2429 | 20.9 | — |

(b) シリーズ2

| W/C (%) | スランプ (cm) | Air (%) | 単位容積量 (kg/m ³) | 練温 (°C) | フロー (mm) |
|---------|-----------|---------|----------------------------|---------|----------|
| 35 | 23.3 | 1.0 | 2460 | 19 | 598×605 |

4週水中養生後、乾燥条件を20℃と50℃の2水準に設定し、乾燥5日水中2日の繰返しを4サイクル行った(以下、乾湿繰返しとする)。

シリーズ2では、拘束方法をD16の一軸拘束とし、供試体の断面の違いによる影響を検討するため、断面を7.5×7.5cm²と10×10cm²の2水準、鉄筋量の違いによる影響を検討するために断面が7.5×7.5cm²のものについて軸筋をD16のほかD10及びD19を配した3水準の供試体を作製した。養生条件は4週水中養生後、50℃の乾湿繰返しとした。各供試体の断面積に対する軸筋の断面積の比(鉄筋比)を表-3に示す。

2.2 使用材料および調合

セメントは普通ポルトランドセメント($\rho = 3.16\text{g/cm}^3$)、細骨材は登別産陸砂(表乾密度=2.69g/cm³, 粗粒率=2.70, 吸水率=1.52%), 粗骨材は敷生川水系安山岩砕石(表乾密度=2.67g/cm³, 粗粒率=6.64, 吸水率=1.83%)を使用した。化学混和剤として、ポリカルボン酸エーテル系高性能

AE減水剤標準形の低空気連行タイプを使用した。表-4にコンクリートの調合を、表-5に練り上がり性状を示す。

2.3 凍結融解試験および測定項目

コンクリートの耐凍害性を評価するために、JIS A 1148A法(水中凍結融解試験)に準じた凍結融解試験を行った。凍結融解の条件は最低温度-18℃から最高温度+5℃で1日6サイクルの凍結融解をシリーズ1では300サイクル、シリーズ2では相対動弾性係数が60%に達するまで繰返し、質量減少率、長さ変化、相対動弾性係数を測定した。長さ変化の測定は、JIS A 1148の付属書にしたがって行った。さらに、シリーズ2では供試体のひずみ挙動を把握するため、図-1に示す位置でコンクリート及び鉄筋のひずみを測定するとともに、凍結融解試験終了後の供試体断面のひび割れ本数を測定した。ひび割れ本数の測定は、松村ら³⁾の方法に準じて断面を研磨後、蛍光塗料を塗布してクラック内に浸透さ

せ、さらに研磨シマイクロスコープを用いて測線上を横切るマイクロクラックの本数を計測した。

3. 実験結果および考察

3.1 拘束方法の違いによる影響 (シリーズ1)

図-2に凍結融解試験中の質量減少率の変化を示す。鉄筋拘束の有無にかかわらず、水セメント比 35%で 20°C 乾湿繰返し試験の供試体では、スケーリング劣化が少なく吸水による質量増加がみられた。また、水セメント比 35%で 50°C 乾湿繰返し試験の供試体は、サイクル数が増大した時点で質量が減少しておりスケーリング劣化が進行していた。

図-3に凍結融解試験中の長さ増加比の変化を示す。水セメント比 35%では養生条件にかかわらず、長さ増加比は拘束なし供試体より鉄筋

拘束供試体のほうが小さくなっており、鉄筋拘束により長さ変化が抑制されていると言える。また、拘束方法の違いが長さ変化に及ぼす明確な差は見られない。

図-4に凍結融解試験中の相対動弾性係数の変化を示す。水セメント比 35%では、相対動弾性係数の低下は拘束なし供試体がか最も大きく、次に三軸拘束、一軸拘束の順に小さくなっている。これらのことから、鉄筋拘束によりコンクリートの膨張量が小さくなることで劣化が抑制されたと考えられる。また、本実験では水セメント比 55%の供試体は拘束の有無にかかわらず劣化しなかったため、拘束方法の違いによる差はみられなかった。劣化しなかった理由としては、養生中の乾燥条件を 20°C とした結果、軽微な乾燥が耐凍害性を向上させたためと考えられる。

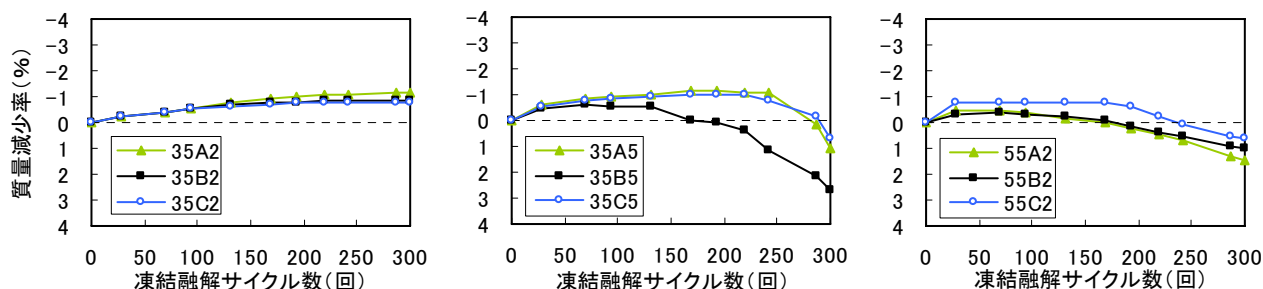


図-2 凍結融解試験中の質量減少率の変化

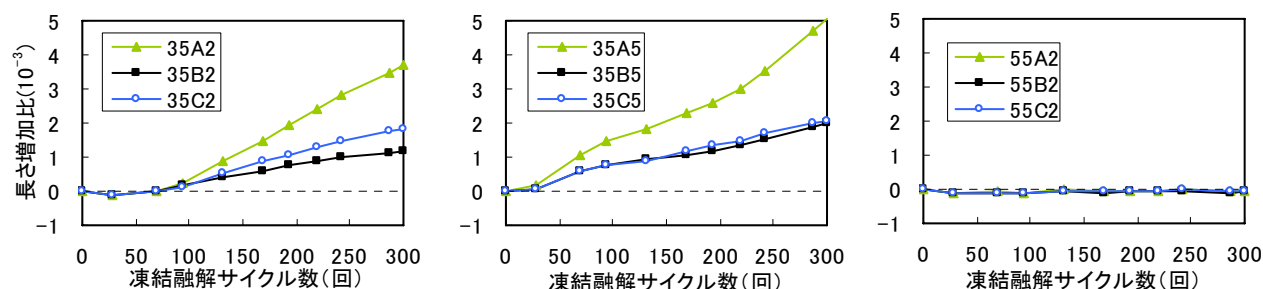


図-3 凍結融解試験中の長さ増加比の変化

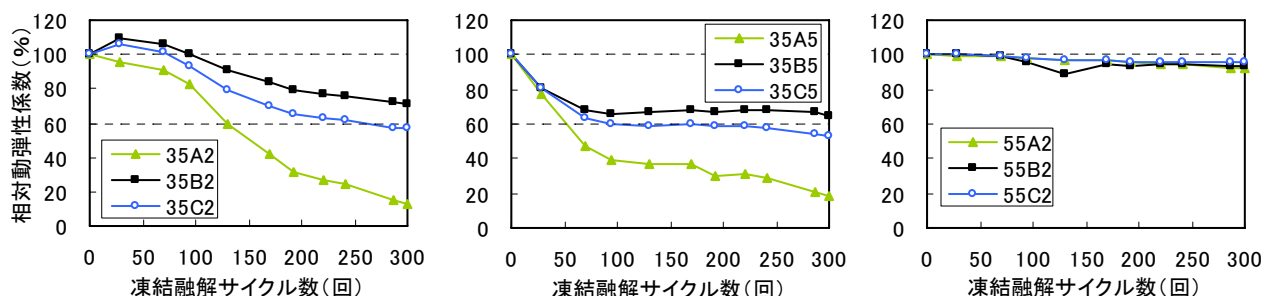


図-4 凍結融解試験中の相対動弾性係数の変化

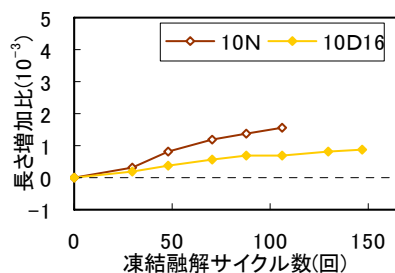


図-5 断面の違いによる比較（長さ増加比）

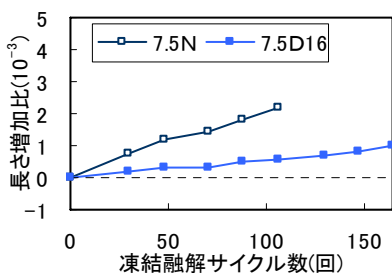


図-7 鉄筋量の違いによる比較（長さ増加比）

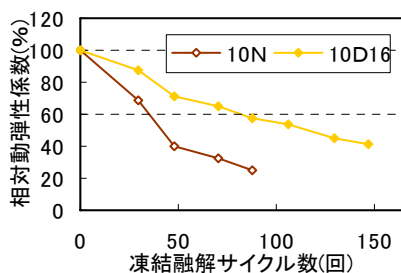
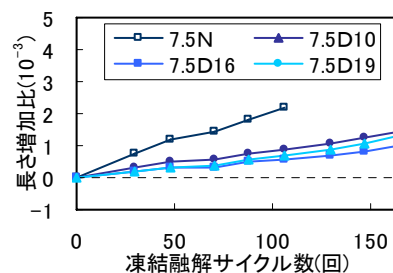


図-6 断面の違いによる比較（相対動弾性係数）

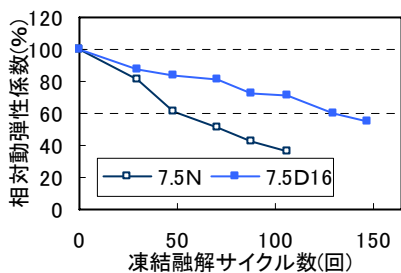


図-8 鉄筋量の違いによる比較（相対動弾性係数）

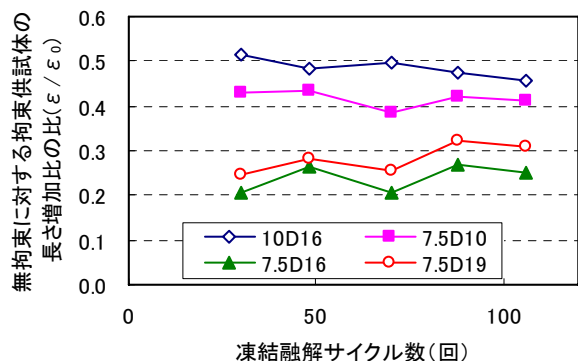
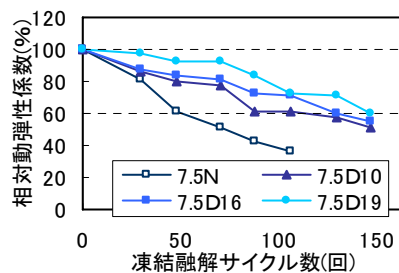


図-9 無拘束に対する拘束供試体の長さ増加比の比

は明確な傾向は見られない。相対動弾性係数の低下は 7.5D19 < 7.5D16 < 7.5D10 の順になっており、鉄筋量の多いもののほうがより劣化を抑制しているといえる。

図-9に拘束なし供試体に対する鉄筋拘束供試体の長さ増加比の比と凍結融解回数との関係を示す。ここで、凍結融解作用によるコンクリート膨張時に、鉄筋はコンクリートと一体となって挙動し、その長さ変化を拘束しているとすれば、拘束なし供試体のひずみに対する鉄筋拘束供試体のひずみの比は式(1)で計算される。なお、ここでのひずみは長さ増加比と同じものである。

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{Ac \cdot Ec}{As \cdot Es + Ac \cdot Ec} \quad (1)$$

ここに、 ε ：鉄筋拘束供試体のひずみ

ε_0 ：拘束なし供試体のひずみ

Ac ：供試体の断面積

As ：拘束鉄筋の断面積

Ec ：コンクリートのヤング係数

Es ：鉄筋のヤング係数

式(1)によると、 $\varepsilon/\varepsilon_0$ の値は7.5D19では約0.75となる。これに対して実験では、0.25 から 0.30 の間の値となっており、計算値と実験値の間には大きな差が見られ、外力による長さ変化とは

3.2 供試体断面の違いによる影響（シリーズ2）

軸筋が D16 と等しく供試体断面の大きさのみ異なる 7.5D16 と 10D16 について、長さ増加比の変化を図-5に、相対動弾性係数の変化を図-6にそれぞれ拘束なし供試体と比較して示す。断面の大きさにかかわらず、拘束なし供試体に比べ鉄筋拘束供試体のほうが長さ変化は小さく、これと対応して相対動弾性係数の低下も小さくなっている。

3.3 鉄筋量の違いによる影響（シリーズ2）

供試体断面が同じで鉄筋量のみ異なる 7.5N、7.5D10、7.5D16 及び 7.5D19 について長さ増加比の変化を図-7に、相対動弾性係数の変化を図-8に示す。鉄筋量と長さ増加比の変化の間に

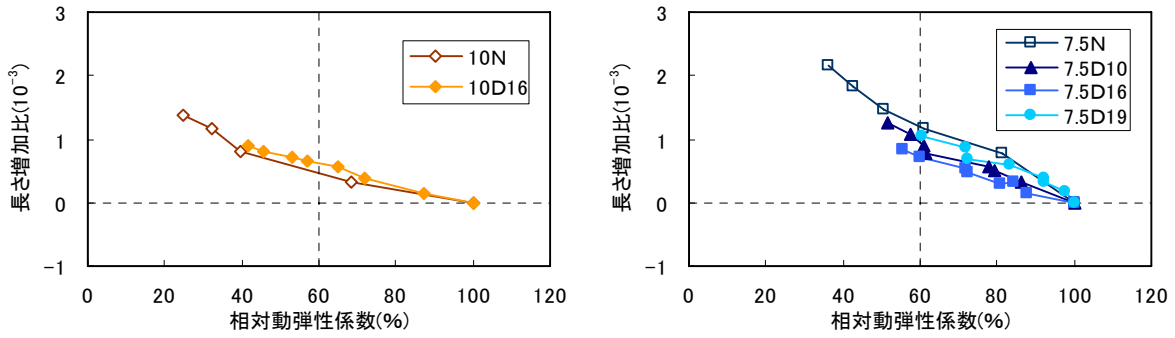


図-10 長さ増加比と相対動弾性係数の関係

異なるメカニズムであると考えられる。

3.4 長さ増加比と相対動弾性係数の関係

図-10 にシリーズ2について、凍結融解試験中の長さ増加比と相対動弾性係数の関係を示す。前述のように鉄筋拘束の有無により、長さ増加比の変化及び相対動弾性係数の変化には大きな違いが見られた。しかし、図-10 に示すように鉄筋拘束の有無あるいは拘束方法や鉄筋量が異なっても、長さ増加比と相対動弾性係数の間にはほぼ同一の関係が見られる。このことは、鉄筋拘束供試体と拘束なし供試体の長さ増加比が等しければ、鉄筋の有無にかかわらず相対動弾性係数もほぼ同じ値となり、凍害劣化が同程度であることを意味すると考えられる。

3.5 コンクリート及び鉄筋のひずみ計測値

図-11 に7.5Nについて凍結融解試験中の供試体内部の温度とコンクリートのひずみ計測値の関係を示す。凍結融解の回数が増加するにつれて、長さ増加比が大きくなることと対応して、コンクリートのひずみは徐々に大きくなっている。図-12 に7.5D16について供試体内部の温度と鉄筋のひずみ計測値の関係を示す。前述のように本実験では鉄筋拘束供試体は、コンクリートの膨張が抑制される結果が得られた。このことから、鉄筋の有無による長さ増加比の差に相当する拘束力を鉄筋が負担するとすれば、鉄筋には引張りひずみが生じると考えられる。しかし、図-12 に見られるように実験では凍結融解の回数が増すにつれて鉄筋には圧縮ひずみが蓄積される結果となった。図示していない他の供試体についても同様の傾向が見られた。このよ

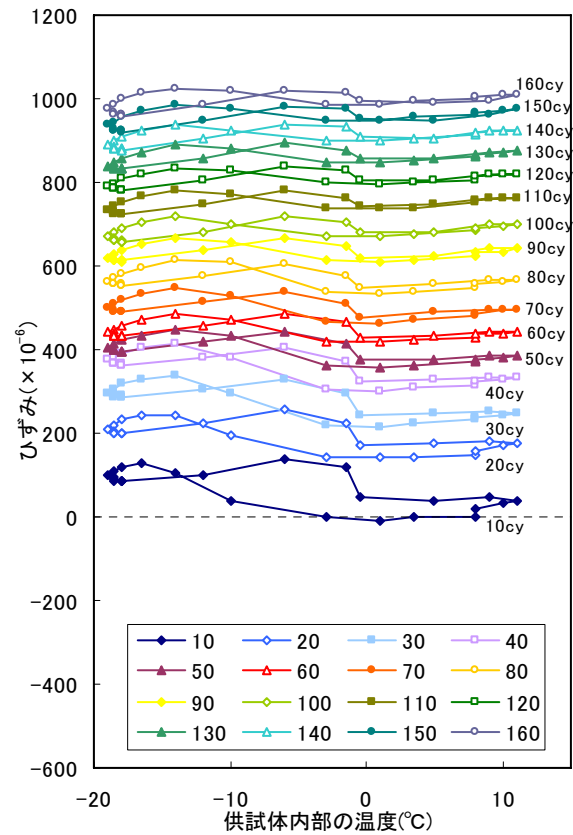


図-11 コンクリートのひずみ計測値

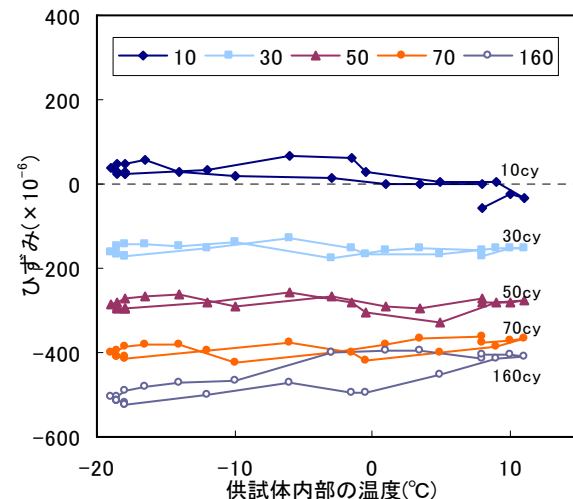


図-12 鉄筋のひずみ計測値

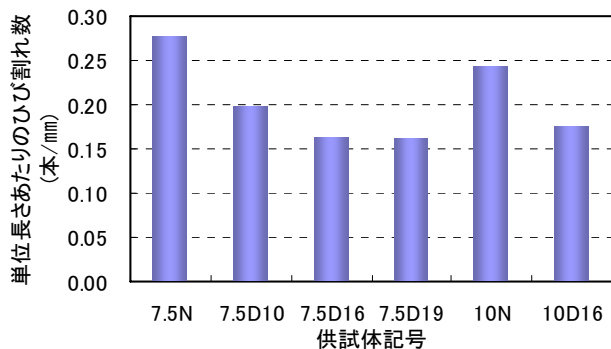


図-13 単位長さあたりのひび割れ発生数

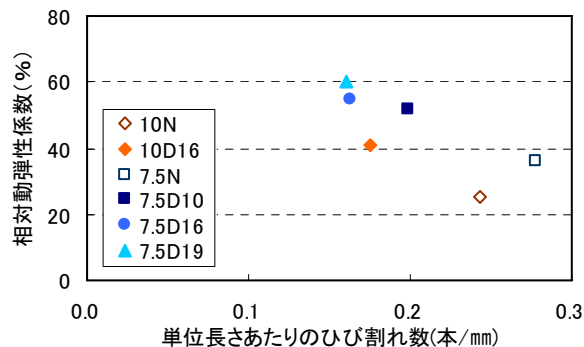


図-14 相対動弾性係数とひび割れ発生数の関係

うな現象が生じるメカニズムの解明については今後の検討課題としたい。

3.6 ひび割れ計測数

図-13 に単位長さあたりのひび割れ発生数を示す。供試体断面の大きさが異なっても鉄筋拘束供試体のひび割れ発生数は、拘束なし供試体よりも少なくなっている。また、鉄筋量のみ異なるもの同士を比較すると、鉄筋量が多いものほどひび割れ発生数が少なくなっている。図-14 に単位長さあたりのひび割れ発生数と相対動弾性係数の関係を示す。供試体断面の大きさが異なっても、ひび割れ発生数の少ない供試体ほど相対動弾性係数が大きくなっているのがわかる。このことから、供試体を鉄筋で拘束し、その鉄筋量が多いものほど凍害劣化が抑制されていることが確認できる。

4. まとめ

本研究では、鉄筋で拘束したコンクリート供試体を用いて凍結融解試験を行い、コンクリートの長さ変化及び凍害劣化に及ぼす鉄筋拘束の影響について検討し、以下のことが明らかとなった。

- (1) 鉄筋拘束供試体は拘束なし供試体と比較して凍結融解による長さ変化が抑制されるが、拘束方法の違いによる明確な差は見られなかった。
- (2) 鉄筋拘束供試体では、一軸拘束及び三軸拘束としたいずれの場合も相対動弾性係数の低下が抑制される。

- (3) 拘束方法を一軸拘束とした供試体では鉄筋量が多いものほど、相対動弾性係数の低下が抑制される。
- (4) 鉄筋拘束供試体の長さ増加比と相対動弾性係数の関係は、拘束なし供試体のものとほぼ一致する。
- (5) 鉄筋量が多いものほどひび割れ発生数は少なく、相対動弾性係数が大きくなっており凍害劣化が抑制される。

謝辞

本実験を実施するにあたり、室蘭工業大学卒業生・川嶋隆介氏(現 (株)間組)と窪田光真氏(現名工建設(株))の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 国府勝郎:膨張コンクリートと鋼材との複合効果に関する研究, 東京都立大学学位論文, 1984.3
- 2) 高橋幸一ほか:膨張コンクリートの耐凍害性に及ぼす影響とその機構について, 「膨張コンクリートによる構造物の高機能化/高耐久化」に関するシンポジウム, pp.79-84, 2003.9
- 3) 松村宇ほか:凍害を受けたコンクリートの劣化性状と劣化度評価に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 563 号, pp.9-13, 2003.1