

# 論文 凍結融解作用を受けた腹鉄筋のない RC はりのせん断耐力

内藤 英樹<sup>\*1</sup>・山洞 晃一<sup>\*2</sup>・古賀 秀幸<sup>\*3</sup>・鈴木 基行<sup>\*4</sup>

**要旨：**3点曲げ荷重によって初期ひび割れを導入した腹鉄筋のない RC はり供試体の凍結融解試験 (水中凍結水中融解法) を行った。AE 剤を混入したはり供試体では、軸方向鉄筋を配置することにより、凍結融解に伴うひび割れ進展が抑制された。AE 剤を混入しないはり供試体では、初期ひび割れの有無によらず材料劣化に起因すると考えられる相対動弾性係数の低下が見られ、いずれの供試体のせん断耐力も健全時の 60 % 程度まで低下した。そして、実験時の相対動弾性係数からコンクリートの引張強度を推定することにより、既往のせん断耐力評価式を用いて凍結融解作用を受けた RC はり供試体のせん断耐力を妥当に評価できた。

**キーワード：**RC はり、凍結融解試験、載荷試験、振動試験、せん断耐力、相対動弾性係数

## 1. はじめに

寒冷地においてコンクリート構造物の耐久性向上を図るためには、凍結融解抵抗性を確保することが重要課題のひとつとなる。著者ら<sup>1)</sup>は、初期ひび割れの影響を検討するため、無筋コンクリート、繊維補強コンクリートおよび鉄筋コンクリートの3種類の供試体の凍結融解試験を行ってきた。参考文献 1) では、AE コンクリートを使用した場合でもひび割れ部に浸入した水の凍結膨張圧によってひび割れが大きく開口・進展することや、鉄筋を配置することによりひび割れ進展が効果的に抑制することなどの知見を得た。しかし、これらは 100 mm × 100 mm × 400 mm の角柱供試体の水中凍結水中融解法 (JIS A 1148 A 法) に基づく知見であり、角柱供試体とは諸元が大きく異なる RC 部材に対しては、さらなる検討が必要である。

凍結融解を受けた RC 部材の構造劣化特性の研究は、これまでも幾つか報告されている。Diao et al.<sup>2)</sup> は常時荷重と凍結融解を同時に与えたはり供試体の実験において、ひび割れが進展し、部材の耐力が低下することを示している。しかし、既往の研究では、凍結融解を受けた RC 部材の現場試験方法と構造性能評価手法まで整理されたものは少ない。

本研究はその基礎的検討として、初期ひび割れを導入した RC はり供試体の凍結融解試験を行い、相対動弾性係数と耐力との関係を整理する。RC はりの曲げ耐力の算定を考慮すると、軸方向鉄筋とコンクリートの付着が損失しない限り、コンクリートの劣化による耐力の低下は小さいことが推察される。一方、せん断耐力の算定においてはコンクリートの分担する力が大きいため、凍結融解によるひび割れの進展や材料劣化の影響が無視

できないと考えた。そこで、本研究では凍結融解作用を受けた腹鉄筋のない RC はり供試体のせん断耐力に関する検討を行った。

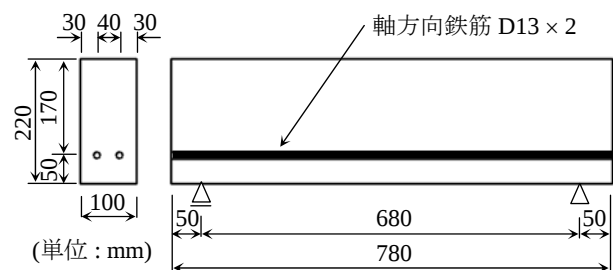
## 2. 実験概要

### 2.1 凍結融解試験

供試体諸元および概略図をそれぞれ表一 および図一に示す。供試体の寸法は、部材長さ 780 mm、断面高さ 220 mm、断面幅 100 mm である。軸方向鉄筋は D13 (SD345) を 2 本配置し、せん断破壊を先行させるために腹鉄筋は配置していない。後述するように、せん断耐力

表一 供試体諸元

| 供試体名      | コンクリート配合 | 初期ひび割れの有無 | 載荷試験の条件      |
|-----------|----------|-----------|--------------|
| AE        | AE 配合    | 無し        | ---          |
| AE_cr     |          | 有り        |              |
| N (100)   | NonAE 配合 | 無し        | 健全           |
| N (70)    |          |           | 相対動弾性係数 70 % |
| N_cr (70) |          | 有り        |              |



図一 供試体の概略図

\*1 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻准教授 博(工) (正会員)

\*2 (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部 東北新幹線建設局

\*3 (株) オリエンタルコンサルタンツ 東北支店

\*4 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

表－2 コンクリートの示方配合

| 配合名      | 粗骨材<br>の最大<br>寸法<br>(mm) | スラ<br>ンプ<br>(cm) | 水セメ<br>ント比<br>W/C<br>(%) | 空気量※<br>(%) | 細骨<br>材率<br>s/a<br>(%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |           |          |          |                |
|----------|--------------------------|------------------|--------------------------|-------------|------------------------|--------------------------|-----------|----------|----------|----------------|
|          |                          |                  |                          |             |                        | 水<br>W                   | セメント<br>C | 細骨材<br>S | 粗骨材<br>G | AE<br>減水剤<br>A |
| AE 配合    | 25                       | 8                | 53                       | 5.5         | 40.6                   | 148                      | 279       | 755      | 1143     | 2.790          |
| NonAE 配合 | 25                       | 8                | 53                       | 2.0         | 43.0                   | 177                      | 334       | 785      | 1078     | ---            |

※ AE 配合では、バイブレータによる締め固め後の空気量 ( $\pm 0.25\%$ ) とスランプ ( $\pm 2.5\text{ cm}$ ) を管理した<sup>1)</sup>。  
NonAE 配合では、スランプ ( $\pm 2.5\text{ cm}$ ) のみを管理した。

表－3 コンクリートの物性

|                            | AE 配合 | NonAE 配合 |
|----------------------------|-------|----------|
| 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )  | 29.4  | 37.4     |
| 引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )  | 2.61  | 2.92     |
| 静弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> ) | 22000 | 26400    |
| 動弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> ) | 36500 | 39200    |
| 密度 (kg/m <sup>3</sup> )    | 2360  | 2460     |

の検討は、凍結融解による劣化が著しいと予想される AE 剤を加えない NonAE 配合の供試体のみ行った。供試体のせん断スパン比は 2.0、NonAE 配合を用いたはり供試体の曲げせん断耐力比の計算値<sup>3)</sup>は 0.82 である。

実験パラメータはコンクリート配合と初期ひび割れの有無とした。コンクリートの示方配合を表－2 に示す。普通ポルトランドセメントを使用し、水セメント比とスランプが同じである AE 配合と NonAE 配合を準備した。初期ひび割れの導入については後述する。

打設後は、鉄道構造物の施工を想定して、気温や湿度を調整せずに実験室内に 5 日間型枠を設置し、その後材齢 28 日まで実験室内に気中静置した<sup>1)</sup>。試験開始前の 3 日間程度は、水を満たした容器内に供試体を静置し、水を含ませた状態を基準として質量減少率を計測した。材齢 28 日のテストピース ( $\phi 100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ ) によるコンクリートの物性を表－3 に示す。ただし、動弾性係数および密度は水を含ませた角柱供試体 ( $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ ) から求めた。鉄筋の物性は、降伏強度  $372\text{ N/mm}^2$ 、引張強さ  $518\text{ N/mm}^2$ 、伸び 26 % である。

凍結融解試験は水中凍結水中融解法として、供試体中心部の温度が  $-18 \sim +5^\circ\text{C}$  に変化するように温度履歴を与えた。本実験での凍結融解速度は 1 日に 2～3 サイクル程度であった。供試体の質量と動弾性係数の測定は 20 サイクル毎を基本とした。

## 2.2 強制加振試験

著者らは、動電式加振器を用いた強制加振試験によって道路橋 RC 床版のひび割れ調査<sup>4)</sup>や、橋梁上部工の起振実験<sup>5)</sup>などを行っている。将来的には、この振動試験



写真－1 振動試験の状況

法を RC 桁の凍害調査などにも応用することを考えている。そこで、本実験のはり供試体の相対動弾性係数を評価する際には、加振器によって供試体の長さ方向の縦振動を励起させ、1 次の共振周波数を測定した。

振動試験の状況を写真－1 に示す。はり供試体端部の断面に両面テープによって加振器の振動テーブルを接地し、調和振動を与える。加振の基本設定は、振動テーブルの加速度振幅  $5\text{ m/s}^2$  を一定として、周波数を 3 分間で連続的に変化させる。加振器稼働部の錘は  $0.13\text{ kg}$  である。周波数は  $2000 \sim 4000\text{ Hz}$  など、供試体の劣化状況に応じて  $2000\text{ Hz}$  程度の幅をもって設定した。このとき、加振点付近に計測加速度ピックアップを貼付し、共振曲線（周波数－応答加速度関係と位相特性）を得る。共振周波数の測定は 2 回とした。使用した測定機器の仕様や実験方法の詳細は、参考文献 4),5) に示した。

## 2.3 載荷試験

初期ひび割れの導入は、図－1 に示す 3 点曲げ載荷によって行った。支点間距離を  $680\text{ mm}$  として、スパン中央に鋼製ピンを介して鉛直荷重を加えた。スパン中央に 2 箇所、両支点にそれぞれ 1 箇所の鉛直変位計を設置した。事前に計算<sup>3)</sup>した NonAE 配合による供試体のせん断破壊時荷重は  $68\text{ kN}$  であり、初期ひび割れの導入は載荷中に目視でひび割れが確認できた  $50\text{ kN}$  まで載荷した。AE 配合による AE\_cr 供試体も同様に  $50\text{ kN}$  まで載荷し

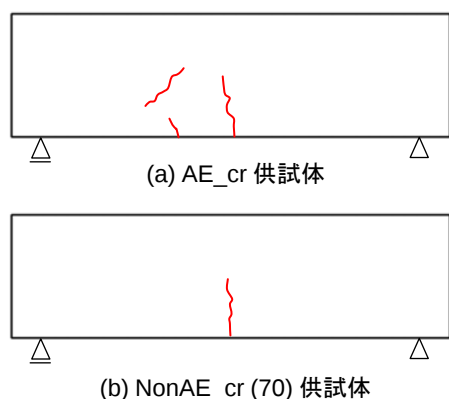


図-2 初期ひび割れの導入

た。初期ひび割れの導入の状況を図-2 に示す。図-2 は、除荷後の供試体に対して目視で確認できたひび割れの状況である。NonAE\_cr (70) 供試体では、スパン中央に鉛直方向の曲げひび割れが断面中央付近まで発生しており、AE\_cr 供試体ではさらに若干の斜めひび割れも確認できた。

表-1 に示すように、NonAE 配合を使用した N (70) と N\_cr (70) 供試体では、相対動弾性係数が 70 % 程度まで低下したとき凍結融解試験を終了し、載荷試験によって供試体のせん断耐力を求めた。

### 3. 凍結融解試験

#### 3.1 強制加振試験による動弾性係数の測定

実験結果の一例として、0 サイクル時の N (70) 供試体の共振曲線を図-3 に示す。図中の 2588 Hz に応答加速度のピークが表れており、このとき位相が  $-90^\circ$  と概ね対応した<sup>6)</sup>。鉄筋を無視したコンクリート棒部材の縦振動を考えたとき<sup>1)</sup>、共振周波数を用いて動弾性係数が次式で表される。

$$E_d = 4\rho L^2 f^2 \quad (1)$$

ここで、 $E_d$  は動弾性係数、 $\rho$  は密度、 $L$  は部材長さ、 $f$  は共振周波数である。

式 (1) に  $f = 2588 \text{ Hz}$  を代入して得られる動弾性係数は  $40600 \text{ N/mm}^2$  であり、表-3 の物性値 ( $39200 \text{ N/mm}^2$ ) と概ね対応した。このことから、写真-1 に示す強制加振試験によって RC はり供試体の動弾性係数が測定できた。

0 サイクル時の各供試体の共振周波数 (2 回の測定結果の平均) と、これを式 (1) に代入した動弾性係数を表-4 に示す。初期ひび割れの有無をパラメータとした AE と AE\_cr 供試体の比較、および NonAE (70) と NonAE\_cr (70) 供試体の比較より、図-2 の初期ひび割れがはり供試体の共振周波数に及ぼす影響は小さかった。RC 部材の復元力特性によって、除荷時にはひび割れが閉じるため、縦振動がひび割れ部を伝播したものと推察される。

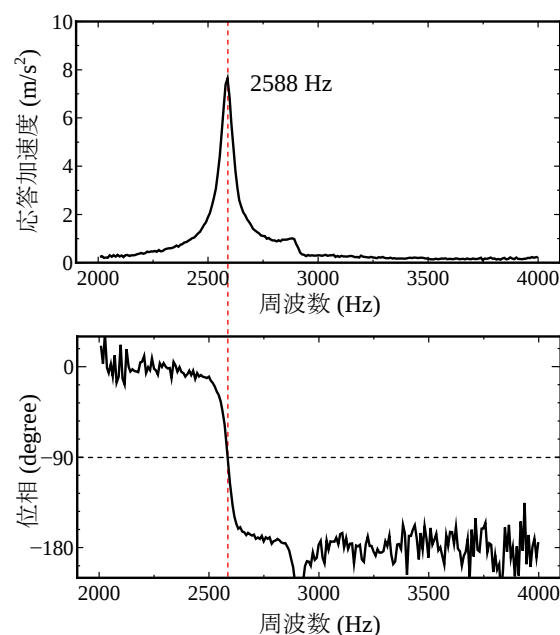


図-3 N (70) 供試体の共振曲線 (0 サイクル)

表-4 共振周波数と動弾性係数 (0 サイクル)

| 供試体名      | 共振周波数 (Hz) | 動弾性係数 ( $\text{N/mm}^2$ ) |
|-----------|------------|---------------------------|
| AE        | 2593       | 39600                     |
| AE_cr     | 2499       | 36800                     |
| N (70)    | 2569       | 39400                     |
| N_cr (70) | 2549       | 39400                     |

#### 3.2 凍結融解サイクル数と相対動弾性係数の関係

凍結融解サイクル数と質量減少率および相対動弾性係数との関係をそれぞれ図-4 および図-5 に示す。ここでは、表-4 に示した動弾性係数を基準として各供試体の相対動弾性係数を求めた。NonAE 配合では、凍結融解に伴う質量減少が大きく、ひび割れの有無によらず、相対動弾性係数も大きく低下した。図-5 に示す N (70) と N\_cr (70) 供試体のみを比較すれば、初期ひび割れによって相対動弾性係数の低下が促進されるようにも考えられるが、目視による供試体表面の観察では、N\_cr (70) 供試体のひび割れの開口や進展は確認できなかった。初期ひび割れのない N (70) 供試体でも相対動弾性係数が大きく低下しているため、供試体ごとの凍結融解による材料劣化のばらつきを検討した上で、初期ひび割れの影響を明らかにする必要がある。

AE 配合では、AE\_cr 供試体の 20 サイクル時に動弾性係数が若干低下したが、その後の凍結融解に伴う動弾性係数の変化は見られなかった。100 mm × 100 mm × 400 mm の角柱供試体を用いた参考文献 1) でも同様の実験結果が得られており、本実験のはり供試体でも軸方向鉄筋

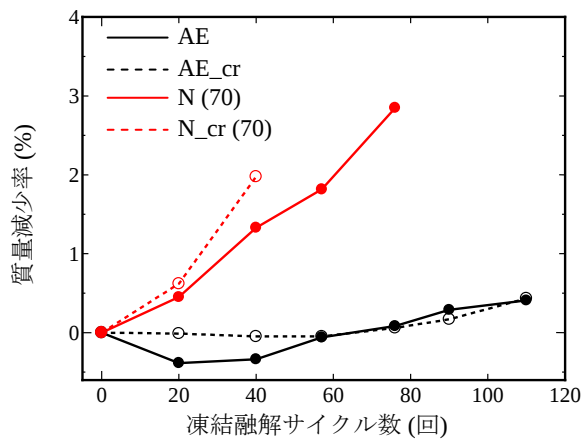


図-4 凍結融解サイクル数と質量減少率

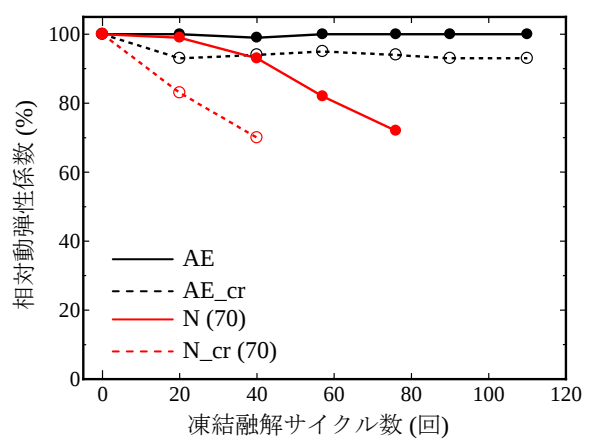


図-5 凍結融解サイクル数と相対動弾性係数

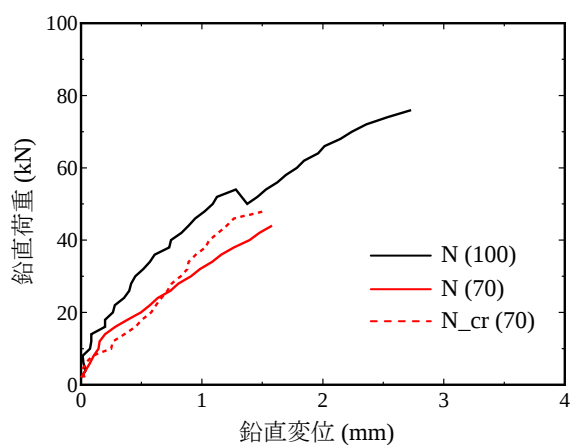


図-6 RC はり供試体の荷重-変位関係



(a) N (100) 供試体



(b) N (70) 供試体



(c) N\_cr (70) 供試体

写真-2 RC はり供試体の破壊性状

によって凍結融解に伴うひび割れの進展が抑制されたものと考えられる。

#### 4. 凍結融解作用を受けた RC はりのせん断耐力

##### 4.1 荷重試験

相対動弾性係数の低下が著しい NonAE 配合については、相対動弾性係数が 70 % 程度まで低下したときに凍結融解試験を終了し、荷重試験によってはり供試体の耐荷力を明らかにした。荷重-変位関係と破壊性状をそれぞれ図-6 と写真-2 に示す。ここでは、凍結融解を与えない健全供試体 N (100) の結果も併せて示す。N (100) 供試体は、荷重 74 kN においてせん断破壊により脆性的に荷重が低下した。これに対して、相対動弾性係数 70 % まで凍結融解を受けた N (70) と N\_cr (70) 供試体では、写真-2 に示すように健全供試体 N (100) と同様のせん断破壊を呈しており、2 つの供試体のせん断破壊時荷重は 44~48 kN まで低下した。N (70) と N\_cr (70) 供試体の比較では、初期ひび割れの有無による破壊性状や耐荷力の違いは見出せなかった。このことから、凍結融解を受けた 2 つの供試体のせん断耐力の低下は、初期ひび割れ

の影響は小さく、いずれも凍結融解に伴う材料劣化に起因すると推察される。

##### 4.2 せん断耐力の算定

腹鉄筋のない RC 棒部材のせん断耐力の算定式<sup>3)</sup>を次式に示す。

$$P_u = \alpha f_v \beta_d \beta_p b d \quad (2)$$

$$\alpha = 3.805 \left( \frac{d}{a} \right)^{-1.166} \quad (3)$$

$$f_v = 0.2 f_c^{1/3} \quad (4)$$

$$\beta_d = \left( \frac{1000}{d} \right)^{1/4} \quad (5)$$

$$\beta_p = 100 p_w^{1/3} \quad (6)$$

表－5 凍結融解を受けた RC はり供試体のせん断破壊時荷重

|           | 相対動弾性係数<br>$R_{Ed}$ (%) | 引張強度比<br>$R_{ft}$ (%) | 引張強度<br>$f_t$ (N/mm <sup>2</sup> ) | せん断破壊時荷重の<br>計算値 $P_u$ (kN) ※ | せん断破壊時荷重の<br>実験値 $P_{exp}$ (kN) ※ |
|-----------|-------------------------|-----------------------|------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| N (100)   | 100                     | 100                   | 2.92                               | 73 (100 %)                    | 74 (100 %)                        |
| N (70)    | 72                      | 55                    | 1.61                               | 54 (74 %)                     | 44 (59 %)                         |
| N_cr (70) | 70                      | 53                    | 1.55                               | 53 (73 %)                     | 48 (65 %)                         |

※ 括弧内は健全時に対するせん断耐力の割合を示す。

$$p_w = \frac{A_s}{bd} \quad (7)$$

ここで、 $P_u$  はせん断耐力、 $f_c$  はコンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $a$  はせん断スパン (mm)、 $d$  は部材の有効高さ (mm)、 $b$  は断面幅 (mm)、 $A_s$  は引張鉄筋の断面積 (mm<sup>2</sup>) である。式 (2) の適用条件は、 $1.0 \leq a/d < 2.5$  である。

式 (2) はコンクリート圧縮強度をパラメータとした算定式であるが、せん断抵抗力はコンクリート引張強度に依存すると考えた。コンクリートの圧縮強度と引張強度の関係式を次式に示す<sup>7)</sup>。

$$f_t = 0.23 f_c^{2/3} \quad (8)$$

ここで、 $f_t$  はコンクリートの引張強度 (N/mm<sup>2</sup>) である。

式 (4),(8) より、 $f_v$  は引張強度をパラメータとした次式で与えられる。

$$f_v = 0.2 \left( \frac{f_t}{0.23} \right)^{1/2} \quad (9)$$

野口<sup>8)</sup>は、凍結融解試験の実験データを整理し、コンクリートの相対動弾性係数と引張強度の関係式を提示している。

$$R_{ft} = 100 \exp \left\{ -0.069 (100 - R_{Ed})^{0.649} \right\} \quad (10)$$

ここで、 $R_{ft}$  は健全時を基準とした引張強度比 (%),  $R_{Ed}$  は相対動弾性係数 (%) である。

相対動弾性係数の測定結果を式 (10) に代入することにより、凍結融解を受けたコンクリートの引張強度  $f_t$  が計算できる。さらに、式 (2),(9) より、凍結融解を受けた RC 部材のせん断耐力が算定できる。本供試体による実験結果と計算結果との比較を表－5 に示す。コンクリートの引張強度の低下を考慮することにより、凍結融解を受けた RC はり供試体のせん断耐力の低下が示された。しかし、本検討はわずか 2 体の実験結果を示したものであるため、今後、追加実験によってせん断耐力算定式の算定精度のばらつきを検討する必要がある。

## 5. まとめ

本研究によって得られた結論を以下に示す。

- 1) 本実験の RC はり供試体では、初期ひび割れを導入しても凍結融解に伴うひび割れの進展は確認でき

ず、初期ひび割れの有無によるせん断耐力の差異も見出せなかった。

- 2) AE 剤を混入しない RC はり供試体では、初期ひび割れの有無によらず凍結融解に伴って相対動弾性係数が著しく低下し、せん断耐力も大きく低下した。実験時に測定された相対動弾性係数からコンクリートの引張強度を推定することにより、既往のせん断耐力算定式を用いて凍結融解を受けた RC はり供試体のせん断耐力の低下を示すことができた。

なお、上記の結論は限られた供試体諸元によって得られたものであり、広範な供試体諸元と実験条件による検討が必要である。これに加えて、今後は強制加振試験の実部材への応用を検討し、寒冷地における RC 桁の現場試験法と構造性能評価手法を構築する予定である。

## 参考文献

- 1) 内藤英樹, 林弘, 齊木佑介, 山洞晃一, 古賀秀幸, 鈴木基行: 初期ひび割れを有するコンクリートの凍結融解抵抗性に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E2, Vol. 67, No. 3, pp. 436-450, 2011.9
- 2) Bo Diao, Yang Sun, Shaohong Cheng and Yinghua Ye: Effects of Mixed Corrosion, Freeze-Thaw Cycles, and Persistent Loads on Behavior of Reinforced Concrete Beams, *Journal of Cold Regions Engineering*, ASCE, Vol. 25, Issue 1, pp. 37-52, 2011.3
- 3) 齋藤啓一, 石橋忠良, 井料青海, 武田三弘, 秋山充良, 鈴木基行: 有効高さが変化する RC 棒部材のせん断耐力評価に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 725 / V-58, pp. 71-83, 2003.2
- 4) 内藤英樹, 齊木佑介, 鈴木基行, 岩城一郎, 子田康弘, 加藤潔: 小型起振機を用いた強制加振試験に基づくコンクリート床版の非破壊試験法, 土木学会論文集 E2, Vol. 67, No. 4, pp. 522-534, 2011.10
- 5) Takakazu WATANABE, Hideki NAITO, Yusuke OHTAKE and Motoyuki SUZUKI: A Method for Determining the Location of Cracks in Concrete Beam Using Anti-Resonance Frequency Change, *Proceedings of ATEM'11*, International Conference on Advanced Technology in Experimental

Mechanics 2011, OS11F024, CD-ROM, 2011.9

- 6) 長松昭男：モード解析入門，コロナ社，2009.
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編]，2007.
- 8) 野口博章：凍結融解作用を受けるコンクリートの劣化予測に関する基礎的研究，法政大学学位論文，2008.