

# 論文 凍結融解作用を受けたコンクリートはり部材の曲げ強度評価

松尾 豊史\*1・松村 卓郎\*2・鈴木 裕\*3・齋藤 敏樹\*4

**要旨：**本研究は、載荷実験と有限要素解析により、凍結融解作用を受けたコンクリートはり部材の曲げ強度を評価したものである。載荷実験では、寸法が 30cm×30cm×120cm のコンクリートはり部材に対して、ASTM C 672「コンクリートのスケーリング試験」に準拠した凍結融解サイクルを 16 週間作用させた結果、凍結融解期間 16 週で曲げ強度は約 85%に低下した。これは、主に、コンクリートの引張強度が低下した影響が大きかったと考えられる。また、載荷実験に対して、有限要素解析に基づく検討を行った結果、曲げ強度を評価するためには、凍結融解の程度および凍結融解深さを適切に把握することが重要であることが分かった。

**キーワード：**凍結融解, 曲げ強度, 有限要素解析, 凍害, 超音波伝播速度

## 1. はじめに

積雪寒冷地域に生じるコンクリート構造物の代表的な経年劣化に凍害がある。凍害を受けたコンクリート構造物を合理的に維持管理するにあたっては、構造物に求められる性能を明確にした上で、点検、評価、判定、補修などの作業を実施する必要があるが、凍害劣化したコンクリート構造物の力学性能については必ずしも明確になっていないのが現状である<sup>1),2)</sup>。

本研究では、凍害を受けた栈橋やダムなどのコンクリート構造物の力学性能を定量的に評価することを目的に、基礎的な検討として、凍結融解作用を受けたコンクリートはり部材の曲げ載荷実験を行った。まず、2 章において、実験方法について記載した。次に、3 章では凍結融解結果および載荷結果に対する考察をとりまとめた。さらに、4 章において、有限要素解析を用いて、コンクリートの曲げ強度に与える凍結融解の程度と凍結融解深さの影響評価を行った。

## 2. 実験方法

### (1) 実験条件

実験に用いた供試体の仕様を図-1 に示した。寸法が高さ 30cm×奥行 30cm×幅 120cm である比較的大型のコンクリートはり部材を供試体とした。なお、供試体には、温度計測用の熱電対が埋め込まれている。また、実験ケースを表-1 に示す。供試体の数は 3 体である。実験パラメータは凍結融解期間であり、なし、4 週間、16 週間の 3 種類である。

実験に用いたコンクリートの配合を表-2 に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを用いて、水セメント比は 60%とした。凍結融解作用を促進させるために、

A E 剤は使用しなかった。なお、コンクリート打設後は湿潤養生を行った。

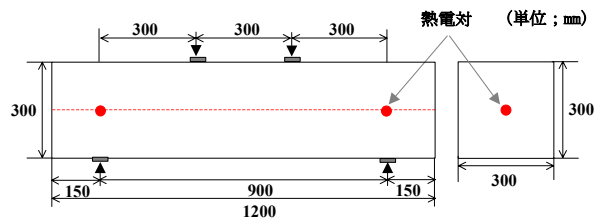


図-1 供試体の仕様

表-1 実験ケース

ケース名	凍結融解期間
N-0w	なし
N-4w	4 週間
N-16w	16 週間

表-2 コンクリートの配合

粗骨材最大寸法 (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )				フレッシュ性状		
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	スラフ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
25	60	43	170	283	806	1078	11.0	1.5	25.0

### (2) 凍結融解方法

凍結融解サイクルは、図-2 に示す ASTM C 672「コンクリートのスケーリング試験」<sup>3)</sup>に準拠した。凍結融解開始材令は 28 日とした。常温 23°C、低温 -18°C とし、1 サイクル 24 時間とした。なお、供試体と同時に、材料試験片 (φ 100mm×h200mm) にも凍結融解作用を与えた。

また、凍結融解後には、コンクリートの圧縮強度試験と超音波法による相対弾性係数の計測を実施した。コンクリートの圧強度試験は JIS A 1108「コンクリートの圧

\*1 電力中央研究所 地球工学研究所 構造工学領域 主任研究員 工修 (正会員)

\*2 電力中央研究所 地球工学研究所 構造工学領域 上席研究員 工博 (正会員)

\*3 北海道電力株式会社 土木部 土木エンジニアリンググループ (非会員)

\*4 北電総合設計株式会社 技術研究所 材料研究室 (正会員)

縮強度試験方法」に基づいた。超音波伝播速度は JCI-SND2「超音波パルス伝播速度の標準測定方法(試案)」に準拠して、図-3 に示す箇所にて計測した。

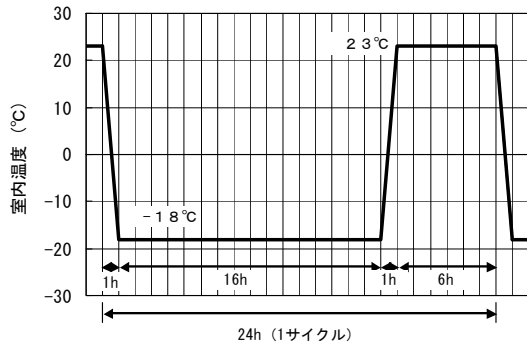


図-2 凍結融解サイクル

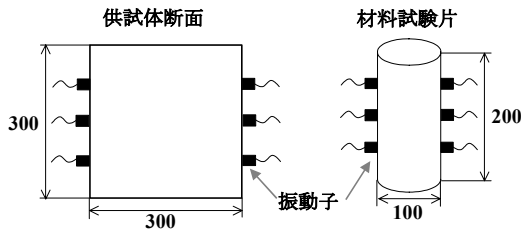


図-3 超音波伝播速度の計測箇所

(4) 荷重方法

荷重方法の概略は、図-4 に示す。単純支持の 4 点荷重とし、油圧アクチュエーターを用いて変位制御で漸増荷重した。なお、計測項目は、図-4 中に示した供試体荷重、供試体変位および、供試体のコンクリートひずみである。

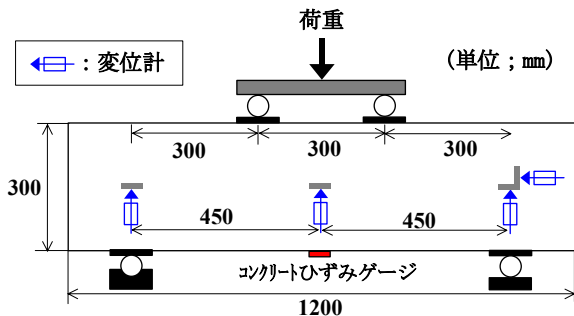


図-4 荷重方法および計測項目

3. 実験結果に基づく検討

3.1 凍結融解結果および考察

(1) 凍結融解サイクル

凍結融解サイクルの代表的な例として、開始 31 日目から 34 日目にかけて計測した凍結融解装置の槽内温度と N-16w 供試体の内部温度を図-5 に示す。これによると、凍結融解装置の槽内温度は、概ね設定した凍結融解サイクルに沿った履歴を示している。しかしながら、N-16w 供試体の内部温度については、槽内温度にしたがって増

減しているものの、必ずしも凍結融解装置の槽内温度とは同じにならなかった。これは、供試体における温度の計測箇所が、表面から 15cm 内部の位置であったためであると考えられる。これより、寸法が大きい場合には、このように表面から内部にかけて温度勾配が生じることが分かる。

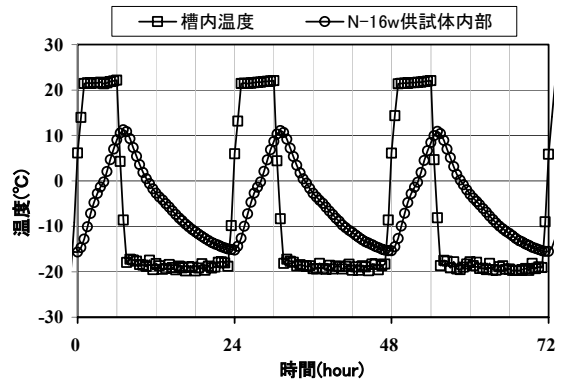


図-5 凍結融解サイクル時の温度計測の例

(2) コンクリート材料強度

各供試体のコンクリートの材料試験結果を表-3 に示す。これによると、凍結融解期間が長い場合の方が、圧縮強度および静弾性係数は低下している傾向が認められた。凍結融解期間が 16 週で圧縮強度の低下割合は約 5%であり、静弾性係数の低下割合の方が大きかった。

表-3 材料試験結果

ケース名	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
N-0w	37.2	37.5
N-4w	36.4	33.8
N-16w	35.4	33.6

(3) 相対動弾性係数

各供試体および材料試験片に対して超音波法による相対動弾性係数の計測を行った結果を表-4 に示す。これによると、供試体、材料試験片ともに凍結融解期間が長い場合の方が相対動弾性係数は低下しているが、相対動弾性係数の数値は供試体よりも材料試験片の方が大きかった。これは、供試体の寸法が異なることでコンクリートの凍結速度が変化し、凍結膨張による未凍結水の移動による水圧の発生の仕方が異なったためと考えられる。

表-4 相対動弾性係数(超音波法)

ケース名	供試体(%)	材料試験片(%)
N-0w	100	100
N-4w	60.3	43.4
N-16w	52.9	22.6

#### (4) 凍結融解深さ

解析上の評価で参考とするため、各供試体および材料試験片における超音波伝達速度の測定値に文献<sup>4)</sup>に示された式(1)を準用して、凍結融解深さを推定した結果を表-5に示す。これによると、供試体、材料試験片ともに凍結融解期間が長い場合の方が、凍結融解深さは大きくなっているが、供試体と材料試験片で異なる傾向にあった。これは、測定距離に対する最大粗骨材寸法の割合が異なり、粗骨材の影響が大きいためと推察される。

$$t = \frac{X_0}{2} \sqrt{\frac{V_s - V_d}{V_s + V_d}} \quad (1)$$

ここに、 $t$ :劣化厚さ(mm),  $X_0$ :測定距離(mm),  $V_s$ :健全部の超音波伝達速度,  $V_d$ :劣化部の超音波伝達速度

表-5 凍結融解深さ(超音波法)

ケース名	供試体(mm)	材料試験片(mm)
N-0w	0	0
N-4w	53.3	22.7
N-16w	59.6	29.8

### 3.2 荷重結果および考察

#### (1) 荷重-変位関係

荷重結果のうち、鉛直荷重と供試体中央部の鉛直変位の関係を図-6に示す。これによると、荷重-変位関係は最大荷重の1/3程度までは概ね線形的に挙動し、その後は勾配が若干低下した。各供試体で勾配が少し異なるのは、後述するひび割れの発生位置などが影響していると考えられる。最大荷重に達した後は供試体中央部に発生したひび割れが進展し、脆性的に破壊した。ただし、最大荷重近傍まで外観上の明確なひび割れは認められなかった。

#### (2) コンクリートひずみ

荷重結果のうち、鉛直荷重と供試体中央部底面に貼付したコンクリート引張ひずみの関係を図-7に示す。これによると、各供試体は最大荷重の1/3程度までは概ね同様な挙動を示しているが、その後は異なる挙動を示した。これは、コンクリートひずみゲージを貼付した位置からひび割れが発生するかどうかの影響したものと考えられる。すなわち、ひび割れが発生した初期段階では、引張ひずみは全体的に増加するが、ひび割れの局所化が進行すると、ひび割れが発生していない箇所では引張ひずみは減少する。

#### (3) 損傷破壊状況

荷重結果のうち、終局時の損傷状況を図-8に示す。試験体の表面状況は、凍結融解期間が長い場合の方がスケーリングなどの部分的な劣化が多く生じていた。荷重

後のひび割れ状況としては、概ね供試体中央部からひび割れたが、N-4w供試体(凍結融解4週)については、中央部から若干ずれた位置にひび割れが発生した。このため、図-7におけるN-4w供試体の引張ひずみも最大荷重手前から減少傾向にあった。

#### (4) 力学特性に与える凍結融解の影響評価

凍結融解が力学特性に及ぼす影響として、凍結融解期間と最大荷重(曲げ強度)および初期剛性(静弾性係数)の関係を比較した結果を図-9に示す。なお、初期剛性は最大荷重の約3割の荷重における割線剛性とした。これによると、凍結融解期間が長くなるにしたがって、最大荷重は低下し、凍結融解16週の場合で、最大荷重が15%程度低下した。しかしながら、初期剛性についてはあまり低下しなかった。図-10には、コンクリートはり部材の中央断面における最大荷重時応力分布の概念図を示した。これによると、曲げ強度には圧縮強度や静弾性係数よりも引張強度が大きく影響すると考えられる。一般に、凍結融解作用を受けた場合は、コンクリート中の水分が凍結膨張し、空隙中の未凍結水が移動する。この未凍結水の移動にあたり水圧が発生し、コンクリートに微細なひび割れが生じる水圧説が知られている。このため、凍結融解の作用がコンクリートの圧縮強度や静弾性係数よりも引張強度を低下させる効果が大きかったものと考えられる。

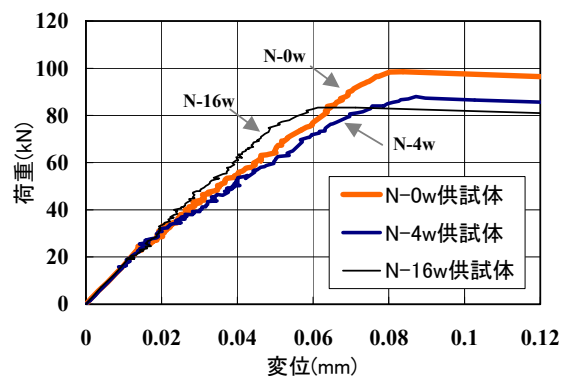


図-6 荷重-変位関係

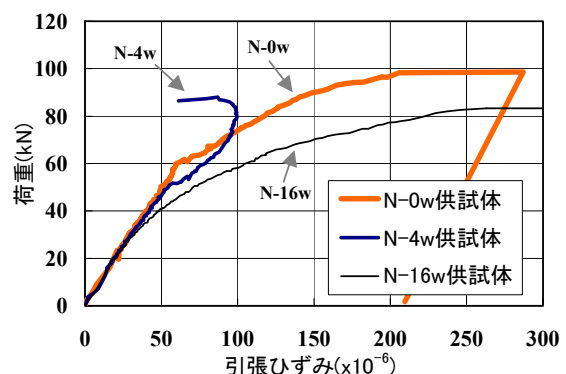
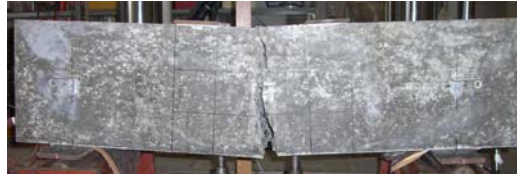


図-7 荷重-コンクリートひずみ関係



(a) N-0w (凍結融解なし)

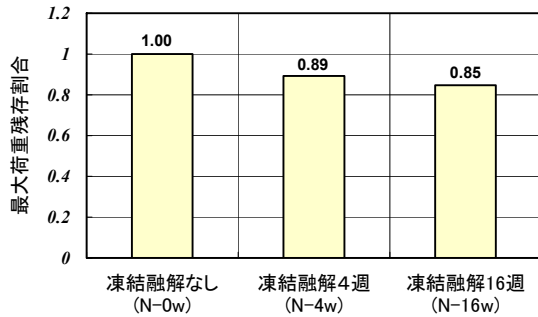


(b) N-4w (凍結融解 4 週)

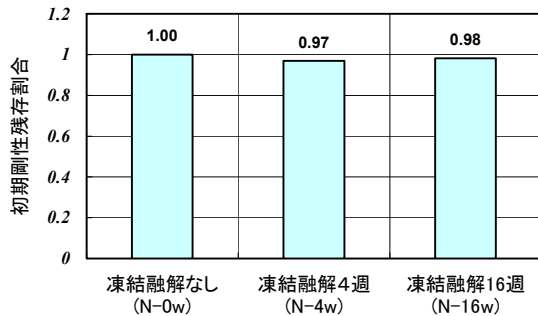


(c) N-16w (凍結融解 16 週)

図-8 供試体の損傷状況



(a) 最大荷重(曲げ強度)



(b) 初期剛性(静弾性係数)

図-9 凍結融解が力学特性に及ぼす影響

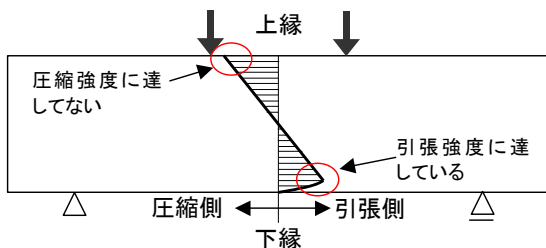


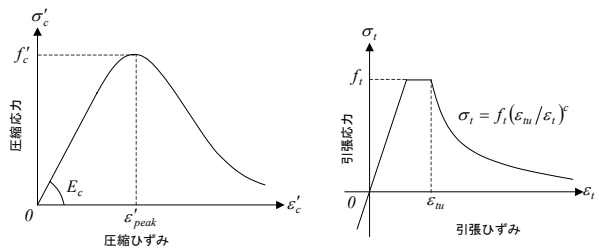
図-10 最大荷重時断面応力分布の概念図

#### 4. 有限要素解析に基づく検討

##### (1) 解析手法

有限要素解析には、コンクリートの材料非線形性を考慮した分散ひび割れモデルを用いた。コンクリートの材料非線形性は、図-11に示すような応力-ひずみ関係として規定される。分散ひび割れモデルでは、要素剛性を分散するひび割れの平均的な剛性として評価する。解析コードは、東京大学の前川らにより開発された二次元非線形 FEM プログラム「UC-win/WCOMD」<sup>5)</sup>を使用した。

コンクリートの材料特性については、表-3に示した凍結融解作用を受けていない N-0w 供試体の圧縮強度を用いた。引張強度については、コンクリート標準示方書[設計編]<sup>6)</sup>に基づいて、圧縮強度から求めた。



(a) 圧縮側

(b) 引張側

図-11 コンクリートの応力-ひずみ関係

##### (2) 解析条件

本解析で実施した解析ケースの一覧を表-6に示す。解析パラメータは、①凍結融解影響深さ、②圧縮強度残存割合、③引張強度残存割合の3種類である。凍結融解深さについては、表-5の凍結融解深さの推定値を参考にして20mmを基本し、凍結融解深さが大きかった場合を想定して、60mmであった場合も加えた。圧縮強度と引張強度の残存割合については、それぞれ1.0, 0.8, 0.5であった場合について検討することとした。

有限要素で用いた解析メッシュ図を図-12に示す。解析では、8節点の平面ひずみ要素を用いてモデル化した。供試体には非線形性を考慮したコンクリート要素を用い、載荷点および支持点は局所的な変形を避けるため弾性要素とした。支持条件は単純支持とし、供試体上面に鉛直下方向きの強制変位を漸増的に作用させた。図-12は、凍結融解深さが20mmであった場合の例である。凍結融解深さに対応した要素のコンクリート強度を低減した。なお、本解析は二次元解析であることを踏まえて、コンクリート要素(一般部)の側面が凍結融解した影響については、奥行300mmと凍結融解深さの比率に応じて、コンクリート強度の残存割合を設定した。



表-6 解析ケース一覧

No.	ケース名	凍結融解 影響深さ	圧縮強度 残存割合	引張強度 残存割合
1	N-NN	なし	1.0	1.0
2	A-MM	20mm	0.8	0.8
3	A-LL	20mm	0.5	0.5
4	A-MN	20mm	0.8	1.0
5	A-LN	20mm <td 0.5	1.0	
6	A-NM	20mm	1.0	0.8
7	A-NL	20mm	1.0	0.5
8	B-NM	60mm	1.0	0.8

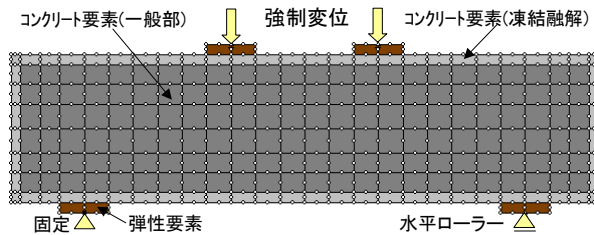


図-12 解析メッシュ図

(3) 解析結果

まず、凍結融解作用がない解析ケース N-NN の最大荷重直後におけるひび割れ変形図を図-13 に示した。これによると、ひび割れは供試体中央部下面から進展しており、図-8 に示した損傷状況とも概ね対応していることが分かる。凍結融解作用があるケースについても概ね同様なひび割れ状況であった。

次に、凍結融解深さが 20mm であった場合に対して、コンクリートの圧縮強度および引張強度をともに低下させた場合の荷重と中央部変位の関係と最大荷重の比較結果を図-14 に示す。図-14(a)によれば、コンクリート強度の低下に伴って、最大荷重および剛性が低下していることが分かる。また、図-14(b)の結果に基づけば、曲げ強度の残存割合は凍結融解期間が 4 週である N-4w 供試体の結果とコンクリート強度を 0.8 に低減させた場合が概ね対応していると考えられる。ただし、図-9 の実験結果では、最大荷重は低下する傾向にあったものの、剛性の低下割合は小さかった。この差異は、解析上では、コンクリート強度に応じて、静弾性係数も低減させていることに基づくと考えられる。

続いて、コンクリートの引張強度を一定として圧縮強度のみを変化させた場合と、コンクリートの圧縮強度を一定として引張強度のみを変化させた場合の最大荷重の比較結果を図-15 に示す。これによると、図-15(a)では、圧縮強度が低下しても最大荷重は低下せず、むしろ微増する傾向があった。これは、図-10 でも示したように、発生する圧縮応力は圧縮強度に達しておらず、圧縮強度の低下に伴って静弾性係数も低下すると、はり中央断面上縁に生じる圧縮応力が軽減されるためでないかと推察される。一方、引張強度のみを低下させた図-

15(b)の結果では、圧縮強度と引張強度をともに低下させた図-14(b)の結果よりも低下割合が若干大きくなった。これは、3.2(4)でも考察したように、コンクリートはり部材の曲げ強度には、主に中央断面下縁における引張強度の低下が大きく影響するためであると考えられる。

さらに、コンクリートの引張強度のみを 0.8 に低減して、凍結融解深さを変化させた場合の最大荷重の比較結果を図-16 に示す。これによると、凍結融解深さが増加するにしたがって、最大荷重は低下しているが、凍結融解深さが 3 倍になっても、最大荷重の残存割合は 4.6%しか減少しなかった。これは、コンクリートはり部材の曲げ強度には、引張縁に近い部分の引張強度の低下がより大きく影響するためである。すなわち、凍結融解深さが小さくとも曲げ強度には影響を及ぼすが、凍結融解が進行しても、加速度的に曲げ強度が低下する訳ではないことを示している。

なお、本研究で対象としたコンクリートはり部材の曲げ強度にはコンクリート引張強度が与える影響が大きかったが、コンクリートの圧縮破壊が卓越する破壊モードとなる場合などには影響程度が大きく異なってくるものと考えられる。

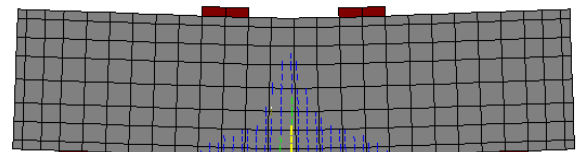
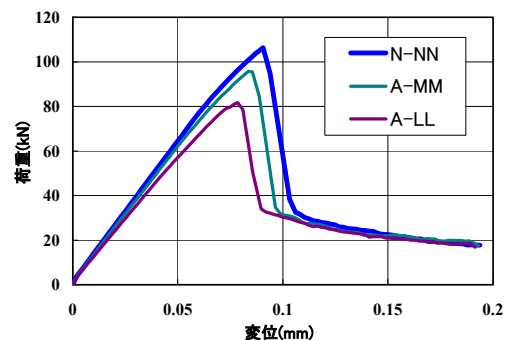
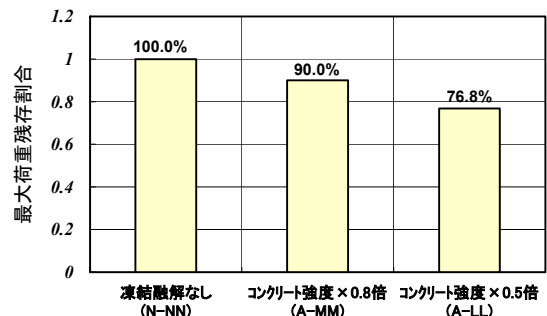


図-13 解析ひび割れ変形図(変形倍率 100 倍)

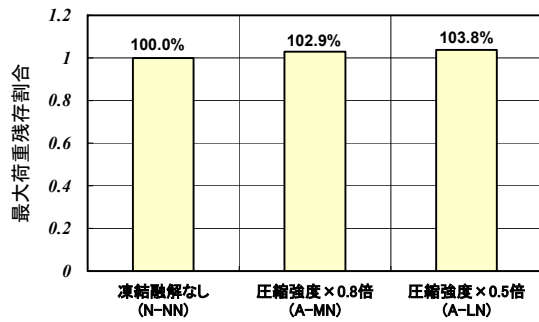


(a) 荷重-変位関係比較

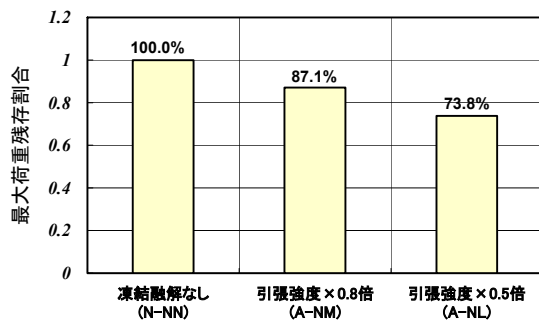


(b) 曲げ強度比較

図-14 解析結果比較



(a) 圧縮強度のみ変化させた場合



(b) 引張強度のみ変化させた場合

図-15 曲げ強度比較(コンクリート強度)

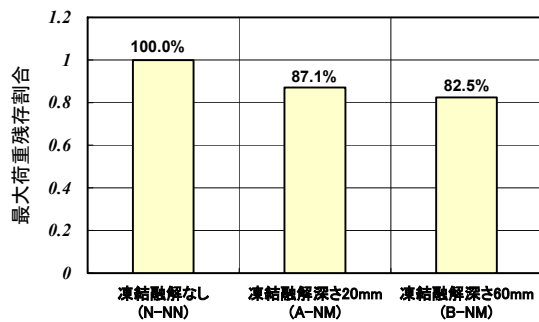


図-16 曲げ強度比較(凍結融解深さ)

## 5. まとめ

本研究は、凍害を受けたコンクリート構造物の力学性能を定量的に評価することを目的として、載荷実験と有限要素解析により、凍結融解作用を受けたコンクリートはり部材の曲げ強度を評価したものである。実験では、寸法が 30cm×30cm×120cm のコンクリートはり部材に対して、ASTM C 672「コンクリートのスケーリング試験」に準拠した凍結融解サイクルを 16 週間作用させた。載荷実験は、単純支持の 4 点載荷とし、変位制御で漸増載荷した。有限要素解析には、コンクリートの非線形性を考慮した分散ひび割れモデルを用いた。本研究で得られ

た成果をまとめる、以下のようなになる。

- (1) 凍結融解作用を与えた結果、コンクリートの圧縮強度や相対動弾性係数は凍結融解期間が長くなるにしたがって低下する傾向にあった。しかし、その低下度合いは、供試体寸法によって異なった。これには、コンクリートの凍結速度および測定距離に対する最大粗骨材寸法の割合が異なることなどが影響したものと推察される。
- (2) 載荷実験の結果、凍結融解期間 16 週でコンクリートはり部材の曲げ強度は約 85%に低下した。コンクリート圧縮強度の低下程度は小さく、荷重-変位関係における初期剛性の低下割合も小さかったため、圧縮強度や静弾性係数の低下よりも引張強度が低下した影響が大きかったものと考えられる。
- (3) 載荷実験に対して、有限要素解析を用いた検討を実施した。この結果、凍結融解作用を受けたコンクリートはり部材の曲げ強度を評価するためには、コンクリート強度の低下程度および凍結融解深さを把握することが重要であることが分かった。特に、表層部におけるコンクリート引張強度の低下が与える影響が大きいたことが明らかになった。

## 参考文献

- 1) 土木学会：【2007年制定】コンクリート標準示方書[維持管理編]，2008.
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関するシンポジウム論文集，JCI-C72，2006.
- 3) ASTM C 672 「Standard Test Method For Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals」
- 4) 遠藤裕丈，田口史雄，林田宏，草間祥吾：非破壊による凍害深さの評価，「コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法」委員会報告会・シンポジウム，pp. 293-298，2008.
- 5) 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，1991.
- 6) 土木学会：【2007年制定】コンクリート標準示方書[設計編]，2008.

謝辞：本研究を実施するにあたっては、(株)セレス，(株)日本ソフトテクニカル，(株)カワシマ計測工業の皆様の実験を担当いただきました。ここに記して，謝意を表す次第です。