

# 凍害劣化した RC 梁の耐衝撃挙動と残存耐力に関する実験的研究

Experimental study on impact resistant behavior and residual capacity of RC beam damaged by freeze and thaw action

室蘭工業大学 ○ 学生員 角田泰基 (Daiki Kakuta) 室蘭工業大学大学院 正 員 栗橋祐介 (Yusuke Kurihashi)  
 (国研) 理化学研究所 正 員 水田真紀 (Maki Mizuta) (国研) 寒地土木研究所 正 員 野々村佳哲 (Yoshinori Nonomura)  
 室蘭工業大学大学院 学生員 池田和隆 (Kazutaka Ikeda) 釧路工業高等専門学校 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

## 1. はじめに

北海道や東北地方などの積雪寒冷地において、鉄筋コンクリート (RC) 構造物は、長期間にわたる凍結融解作用や塩害との複合劣化により、美観のみならず構造性能が低下することが懸念される。そのため、諸研究機関では、RC 部材の構造性能に及ぼす凍害劣化の影響について様々な研究を推進している<sup>1)</sup>。特に、壁高欄や落石防護構造物等の耐衝撃用途道路構造物は、冬期の融雪剤散布による塩害と凍結融解作用を受ける極めて厳しい劣化環境に晒される場合がある。道路交通の安全性確保のためには、その劣化度と耐衝撃性能の関係を明らかにすることが重要であるものと考えられる。

著者らはこれまで、RC 梁の耐衝撃挙動に及ぼす凍害劣化の影響を解明することを目的に、凍害劣化度やその分布性状の異なる RC 梁に対する重錘落下衝撃実験を行っている。その結果、凍害劣化した RC 梁は劣化度分布の偏りによって、損傷形式が異なる傾向にあり、大きく3つの形式 (曲げ損傷型、複合損傷型、せん断損傷型) になることなどを明らかにしている<sup>2)</sup>。また、衝撃的外力により損傷した凍害劣化 RC 梁の残存耐力についても検討し、残留変位が大きい場合やせん断破壊の兆候が見られる場合には残存耐力が低下する可能性があることなどを明らかにしている<sup>3)</sup>。しかしながら、これらの知見は、一部の試験体において残存耐力評価実験を行ったものであり、限定的な条件下において得られたものである。そのため、本研究では、種々の衝撃的外力に対する凍害劣化 RC 梁の耐衝撃挙動や残存耐力を評価することを目的に、重錘落下高さの異なる衝撃載荷実験およびその後の残存耐力評価実験を行い、既往の実験結果と併せて総合的に評価検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

表-1 には、実験に使用したコンクリートの配合およびフレッシュ性状を示している。コンクリートの配合においては、凍結融解による劣化を促進させるため水セメント比

表-1 コンクリートの配合とフレッシュ性状

W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )					スランプ (cm)	空気量 (%)
		C	W	S	G	AE 減水剤		
57	44	275	157	886	1,117	C×1%	12	2.0

\*セメントの種類：早強セメント，骨材の最大寸法：25 mm

表-2 RC 梁の計算静的耐力

計算曲げ耐力 (kN)	計算せん断耐力 (kN)	せん断余裕度
4.1	7.18	1.75

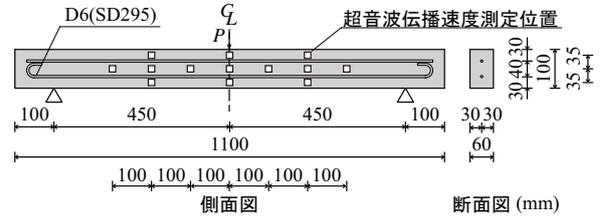


図-1 試験体概要

を 57%，コンクリート打込みに必要最小量の混和剤 (AE 減水剤) を添加した。また、試験中の材齢による強度増進を極力低くするためにセメントには早強セメントを用いて、養生期間を 6 週間として十分に養生し、コンクリートの強度増加が概ね停止した後、凍結融解促進劣化を最大で 850 サイクルまで実施した。

図-1 には、試験体の形状寸法を示している。本実験に用いた試験体は、断面寸法 (幅 × 高さ) が 60 mm × 100 mm、純スパン長が 900 mm の複鉄筋矩形 RC 梁である。軸方向鉄筋として D6 (SD295) を上下に一本ずつ配筋しており、せん断補強筋は配筋していない。

### 2.2 凍結融解による促進劣化の概要

凍結融解による促進劣化は、JIS A 1148 を参考にして気中凍結水中融解法により行った。凍結融解時のコンクリートの最低および最高温度はそれぞれ -18℃ および 5℃ とした。なお、温度は装置内中心部に配置された梁のスパン中央断面に挿入したセンサーにて管理した。また、温度の測定のために用いた梁は載荷試験に使用していない。凍結融解 1 サイクルの所要時間は 7 時間程度であった。

また、RC 梁の支点部が凍結融解作用によって劣化損傷し断面欠損する可能性があるため、RC 梁の両端部から 100 mm の範囲は発泡ポリスチレンフォームをコーキング材で接着して保護することとした。なお、実験は発泡ポリスチレンフォームを除去してから実施している。

本論文における凍害劣化度の評価は、文献<sup>4)</sup>において超音波伝播速度と動弾性係数に高い相関性があることが明らかにされていることから、超音波伝播速度測定器で得られた超音波伝播速度を用い、式 (1) により算出した相対動弾性係数を用いて行った。

$$\text{相対動弾性係数 (\%)} = v_d^2 / v_0^2 \times 100 \quad (1)$$

ここに、 $v_d$ ：促進劣化後の超音波伝播速度、 $v_0$ ：促進劣化前の超音波伝播速度である。

また、図-1 には、RC 梁における超音波伝播速度の測定位置を示している。測定位置は全 13 箇所あり、所定のサイクル数毎に超音波伝播速度を測定した。

### 2.3 載荷実験の概要

表-3 には、試験体の一覧を示している。試験体名の第 1 項目は、凍害劣化なしの場合には N、凍害劣化ありの場合

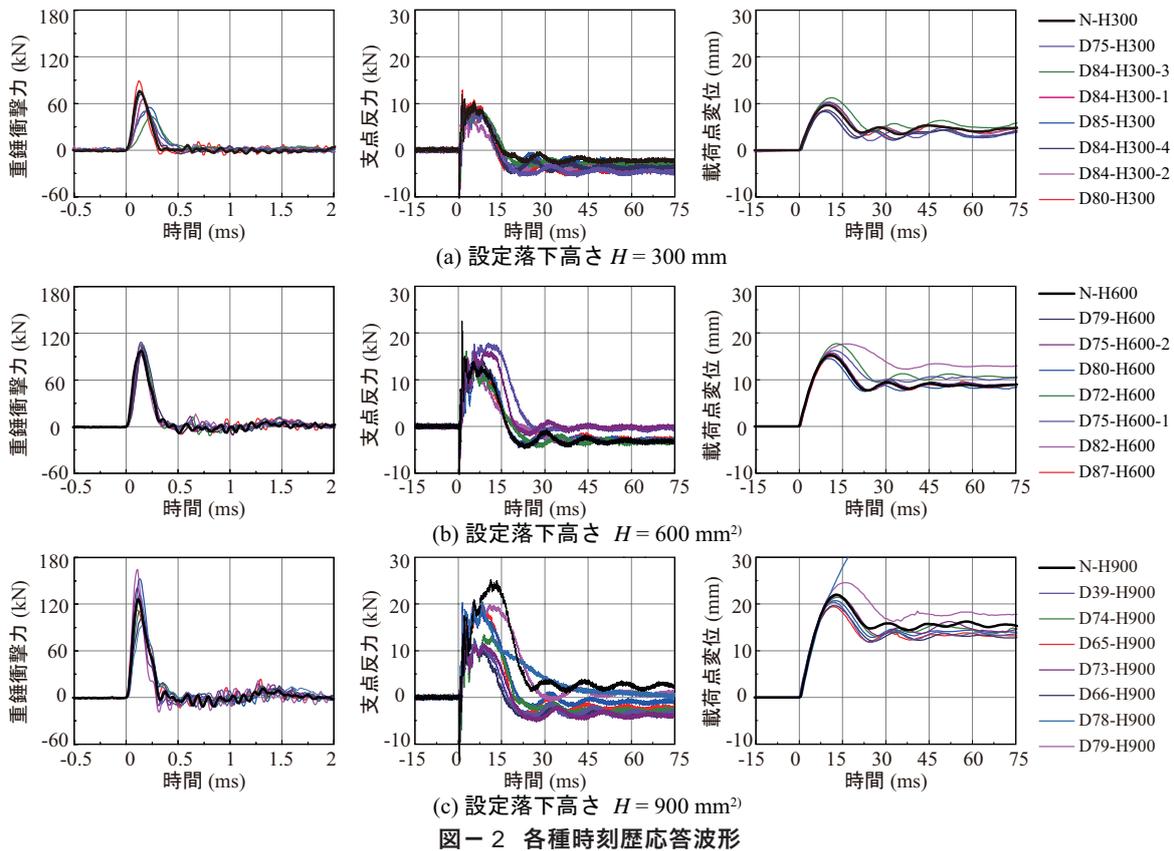


表-3 試験体の一覧

試験体名	設定重錘 落下高さ (mm)	平均相対 動弾性係数 (%)	最大変位 (mm)	残留変位 (mm)
N-H300	300	—	9.65	4.57
D84-H300-1		83.6	11.21	5.38
D80-H300		80.5	8.44	3.46
D85-H300		84.7	8.23	3.35
D84-H300-2		84.1	10.25	4.31
D84-H300-3		83.6	10.26	4.38
D84-H300-4		83.7	8.58	3.61
D75-H300		74.9	10.24	3.60
N-H600	600 <sup>2),3)</sup>	—	15.25	8.77
D80-H600		80.1	14.51	8.39
D82-H600		81.5	17.67	12.96
D72-H600		72.4	17.72	10.68
D75-H600-1		75.1	16.23	10.36
D87-H600		86.9	14.93	8.68
D79-H600		79.5	15.64	9.12
D75-H600-2		75.1	15.37	9.14
N-H900	900 <sup>2)</sup>	—	21.99	15.50
D78-H900		78.9	46.28	38.63
D79-H900		79.3	24.57	17.84
D74-H900		74.3	21.45	14.65
D65-H900		64.6	26.00	17.79
D66-H900		66.2	19.64	13.26
D39-H900		39.4	20.38	13.22
D73-H900		73.3	21.79	14.82

合にはDと平均相対動弾性係数の組み合わせとしている。また、第2項目はHと落下高さの組み合わせとして示している。

重錘の設定落下高さは、 $H = 300, 600, 900 \text{ mm}$ の3水準とした。ここでは、各落下高さに対して、凍害劣化なしのRC

梁を1体、および凍害劣化度の異なるRC梁を7体用いた。なお、 $H = 600 \text{ mm}$ のRC梁は、文献<sup>2),3)</sup>においてそれぞれ衝撃載荷および残存耐力評価実験の結果を示しており、 $H = 900 \text{ mm}$ のRC梁は、文献<sup>2)</sup>において衝撃載荷実験の結果を示している。

衝撃載荷実験は、質量20kg、先端直径60mmの鋼製重錘を設定落下高さ $H$ からRC梁のスパン中央部に1度だけ自由落下させる単一載荷法により行った。また、試験体の両支点部は回転を許容し、浮き上がりを拘束するピン支持に近い構造となっている。なお、重錘の衝突速度は、レーザ式センサーを用いて測定した。衝撃載荷実験の測定項目は、重錘衝撃力および支点反力、衝突速度、載荷点変位である。なお、支点反力は両支点部の合算値である。

残存耐力評価実験は、載荷速度を3.14mm/分とし、三点曲げ載荷法によりRC梁のスパン中央部に鉛直荷重を作用させることにより行った。載荷はスパン中央部変位が27mm(純スパン長の3%)程度まで継続した。なお、測定項目は、荷重および載荷点変位である。また、衝撃載荷実験と異なり、試験体の浮き上がりは拘束していない。

### 3. 衝撃載荷実験結果

#### 3.1 各種応答波形

図-2には、設定重錘落下高さ $H$ 毎に全試験体の重錘衝撃力、支点反力および載荷点変位波形を示している。図より、重錘衝撃力波形は、継続時間が0.3ms程度の三角波で構成されており、設定重錘落下高さ $H$ の増加に伴って最大値が増加する傾向にあることが分かる。また、最大重錘衝撃力が小さく主波動の継続時間が長いケースが見られるが、これは、重錘衝突部のコンクリートが凍結融解により

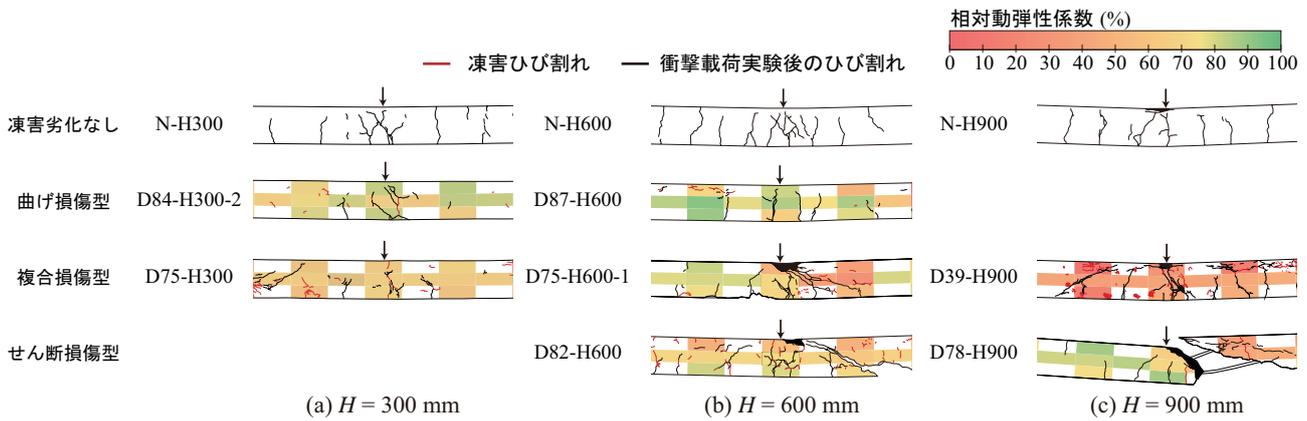


図-3 衝撃载荷実験終了後におけるひび割れ分布性状と相対動弾性係数分布の例

著しく劣化していたことによるものと考えられる。

支点反力波形は、継続時間が20 ms程度の正弦半波に高周波成分が合成された波形性状を示している。最大振幅は、 $H$ の増加に伴って大きくなる傾向にある。また、 $H$ が大きい場合ほど支点反力波形が試験体毎に大きく異なる傾向にある。これは、入力エネルギーが大きいためRC梁の凍害劣化による耐衝撃挙動の違いが明確に現れたことによるものと考えられる。

载荷点変位波形は、設定重錘落下高さ $H$ の増加に伴って、その最大振幅も増加している。また、一部の試験体を除き、全ての試験体において、設定重錘落下高さ $H$ によらず正弦半波状の第1波が最大値を示した後、減衰自由振動に移行していることが分かる。なお、残留変位が大きい試験体は、後述するようにせん断破壊もしくは、せん断ひび割れが卓越していることを確認している。このような傾向は、 $H=300$  mm、 $H=900$  mmの場合においてもおおむね同様であることを確認している。ただし、最大変位および残留変位は、表-3に示すように、 $H$ が大きい場合ほど大きくなる傾向にある。

### 3.2 ひび割れ性状

図-3には、衝撃载荷実験終了後におけるひび割れ分布性状を相対動弾性係数分布の色表示を重ねて示している。図中の赤線と黒線はそれぞれ凍害劣化によって発生した既存のひび割れ(以後、凍害ひび割れ)および衝撃载荷実験によって発生したひび割れを示している。また、既往の文献<sup>3)</sup>と同様に、各試験体の損傷形式を、重錘衝突部の圧壊や曲げひび割れの開口が卓越する「曲げ破壊型」、斜めひび割れの発生・開口が卓越する「せん断破壊型」、またはその両方の傾向を示す「複合破壊型」に分類し表記している。

図より、N試験体の場合には、設定落下高さによらず上下縁から進展する曲げひび割れが载荷点から左右の支点側にかけて分布していることが分かる。また、落下高さ $H$ が大きい場合ほど、ひび割れ幅や変形量が大きく、特に $H=900$  mmの場合には上縁コンクリートが重錘衝撃力により、梁幅にわたって圧壊しており、正面、裏面ではコンクリートが剥離している。一方、D試験体のひび割れ性状は、曲げひび割れのみならず斜めひび割れも発生する傾向にあり、設定落下高さ $H$ が大きい場合ほど、斜めひび割れが多数発生する場合や、大きく開口する場合が多く見受けられる。

落下高さ $H=300$  mmの場合には、主に曲げ損傷型であり著しい損傷は認められないものの、凍害ひび割れ部から

のひび割れの進展が認められる。また、D75-H300試験体の場合には左側スパンに斜めひび割れが発生している。

落下高さ $H=600$  mmの場合には、上縁コンクリートの圧壊や斜めひび割れ発生・開口する場合が見受けられる。D82-H600試験体の場合には斜めひび割れが開口し、せん断破壊に至り、その先端の下縁かぶりコンクリートが剥落している。

落下高さ $H=900$  mmの場合には、損傷度が高く、上縁コンクリートが広範囲に渡って圧縮破壊する場合や斜めひび割れが大きく開口する場合などが見受けられる。特に、D78-H900試験体の場合には、せん断破壊に至り、载荷点右側のコンクリートが大きく脱落している。

このように、N試験体の場合には、落下高さの大きい場合においても、曲げ損傷型を示すのに対し、D試験体の場合には上縁コンクリートの圧壊や斜めひび割れの発生・開口およびせん断破壊に至る場合のあることが明らかになった。また、これらの損傷は相対動弾性係数が周辺よりも低い部位に生じる傾向にあり、その部位がスパン中央部にある場合には曲げ損傷型、せん断スパンに位置する場合にはせん断損傷型に至る傾向にある。

従って、相対動弾性係数分布と作用断面力との関係から、損傷形式をある程度推定できる可能性があるものと考えられる。特にせん断力が作用する部位に局所的な劣化がある場合には、せん断破壊のような脆性的な破壊に至る可能性がある。

### 4. 残存耐力評価実験結果

図-4には、残存耐力評価実験後におけるひび割れ分布性状を示している。また、図-5には、残存耐力評価実験における荷重-変位関係を示している。図には、衝撃载荷実験時の設定落下高さ $H$ 毎に整理して示している。

図-5(a)より、 $H=300$  mmの衝撃载荷を受けたRC梁は、D75-H300試験体を除き、最大荷重到達後荷重が緩やかに低下していることが分かる。D75-H300試験体の場合には、衝撃载荷時に左側スパンに発生した斜めひび割れが、荷重 $P=4$  kNに到達した直後に開口しせん断破壊に至った。

図-5(b)より、 $H=600$  mmの衝撃载荷を受けたRC梁において、D87-H600の場合には、荷重 $P=4.5$  kN以上の曲げ耐力を有しており、図-4を見ると、上縁コンクリートの圧壊により終局に至っていることが分かる。一方、D75-H600-1およびD82-H600試験体は、急激な荷重低下は

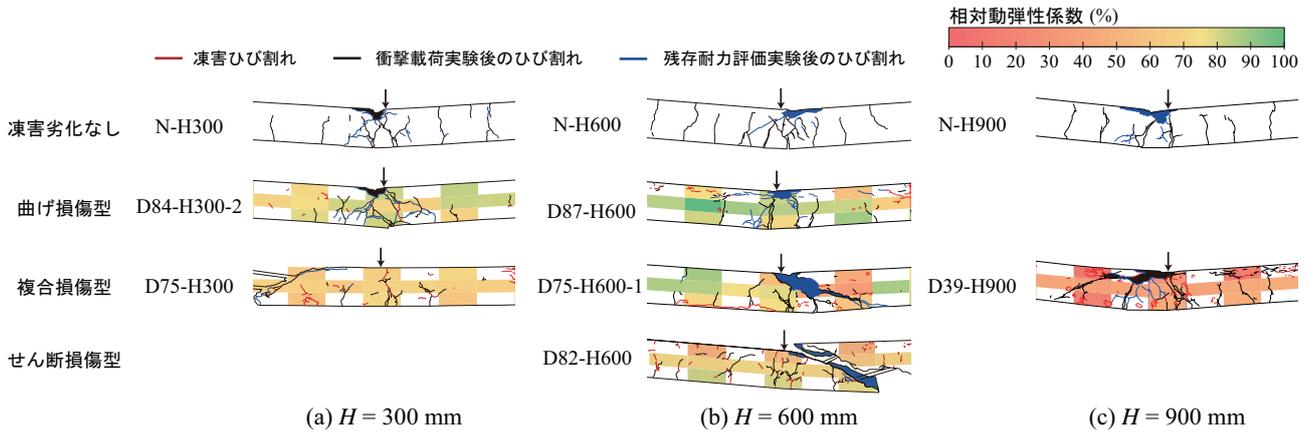


図-4 残存耐力評価実験後におけるひび割れ分布性状の例

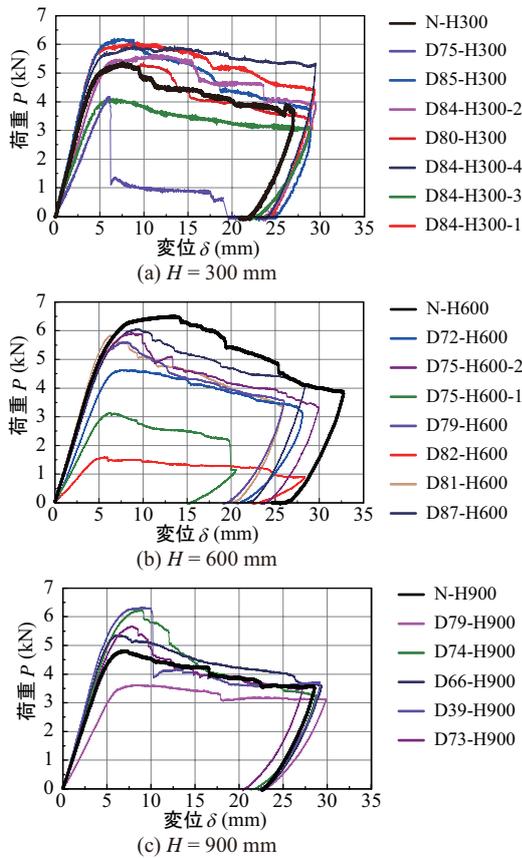


図-5 残存耐力評価実験における荷重-変位関係

見られないものの、最大荷重が他の試験体よりも小さい。  
 図-4を見ると、これらの試験体は斜めひび割れが大きく開口して終局に至っていることが分かる。

図-5(c)より、 $H = 900$  mmの衝撃載荷を受けたRC梁は、いずれの場合も最大荷重到達後荷重が大きく低下して、終局に至っている。これは、衝撃載荷後における残留変位が大きく、すでに上縁コンクリートが圧壊していたため、残存耐力が小さくなっていったと考えられる。

これらの実験結果より、衝撃載荷後における凍害劣化RC梁の残存耐力は、斜めひび割れが顕在化していない場合には、凍害劣化のないRC梁と同程度であることが明らかになった。また、斜めひび割れが発生している場合には、すでにせん断破壊しているため、小さな荷重で終局に至る場

合のあることが明らかになった。さらに、 $H = 900$  mmの衝撃載荷の場合のように残留変位が大きい場合には、上縁コンクリートの圧壊の影響により、他よりも小さな変位増分で荷重が低下する傾向にあることが明らかになった。

### 5. まとめ

- 1) 凍害劣化のないRC梁においては、落下高さが大きい場合においても、曲げ損傷型を示すのに対し、凍害劣化したRC梁の場合には斜めひび割れの発生・開口およびせん断破壊に至る場合がある。ただし、落下高さが大きい場合で、せん断ひび割れが大きく開口するものを除くと、いずれの試験体も上縁コンクリートが圧壊することを確認している。
- 2) 凍害劣化したRC梁の衝撃載荷時における損傷形式は、相対動弾性係数の分布からある程度推定できる可能性がある。特にせん断力が作用する部位に局所的な劣化がある場合には、せん断破壊のような脆性的な破壊に至る可能性がある。
- 3) 衝撃載荷後における凍害劣化RC梁の残存耐力は、斜めひび割れが顕在化していない場合には、凍害劣化のないRC梁と同程度である。
- 4) 衝撃載荷により明瞭な斜めひび割れが発生している場合には、残存耐力が小さく評価される。

### 参考文献

- 1) 林田宏, 佐藤靖彦: 凍害劣化域の大きさと位置に着目したRCはり部材の破壊性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.922-927, 2012.7
- 2) 勝見悠太, 栗橋祐介, 水田真紀, 岸徳光: 凍結融解作用により劣化したRC梁の耐衝撃挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No. 2, pp. 781-786, 2016.7
- 3) 池田和隆, 島多昭典, 栗橋祐介, 水田真紀, 岸徳光: 衝撃的外力により損傷した凍害劣化RC梁の残存耐力, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, 第16巻, pp.477-482, 2016.10
- 4) 高田龍一, 郭世文, 緒方英彦, 服部九二雄: 超音波法によるコンクリートの耐凍結融解性能評価に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, 2004.7