# 凍結融解作用により劣化した曲げ破壊型 RC 梁の重錘落下衝撃実験

Weight falling impact tests on flexural failuer type RC beams damaged by freezing and thawing action

室蘭工業大学大学院	$\bigcirc$	学生員	勝見	悠太 (Yuta Katsumi)
室蘭工業大学大学院		正 員	栗橋	祐介 (Yusuke Kurihashi)
(国研) 土木研究所		正 員	水田	真紀 (Maki Mizuta)
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 (Norimitu Kishi)

## 1. **はじめに**

北海道や東北地方などの積雪寒冷地では,凍害による鉄 筋コンクリート (RC)構造物の劣化が数多く報告されてい る.その中でもコンクリート製剛性防護柵は凍害劣化を受 けやすい耐衝撃用途構造物であり,耐荷性能と劣化度の関 係に着目した研究が進められている<sup>1)</sup>.

その一方,衝撃荷重が作用した場合の耐衝撃性能やひび 割れ性状の変化については検討が進んでいないのが現状で ある.よって,壁高欄を適切に維持管理するためには,衝 撃荷重が作用した場合の動的挙動についても明らかにする 必要がある.

著者らの研究グループでは、これまで新設の RC 梁を対 象とした重錘落下衝撃実験を数多く実施し、その耐衝撃挙 動を明らかとすると共に、合理的な耐衝撃設計法の定式化 を試みている<sup>2)</sup>.また、昨年度は RC 梁の耐衝撃挙動に及 ぼす凍害劣化の影響について劣化の有無を変化させた漸増 繰り返し重錘落下衝撃実験を行った<sup>3)</sup>.その結果、凍害劣 化した RC 梁は健全な RC 梁と比較して小さな入力エネル ギーにおいて斜めひび割れが発生することや、繰返し衝撃 荷重の影響を受けて損傷が進展しやすい傾向にあることな どを明らかにしている.

しかしながら、これまでの検討は、1 ケースの漸増繰返 し重錘落下衝撃実験による結果であることから、RC 梁の 劣化程度と耐衝撃挙動の関係について明らかにするために は、種々の劣化度のRC 梁を対象とした載荷実験を行う必 要があるものと考えられる。

このような背景から、本研究では、RC 梁の耐衝撃挙動 に及ぼすコンクリートの凍害劣化の影響を検討することを 目的に、RC 梁を気中凍結水中融解法により凍害劣化させ た、劣化度やその分布の異なる場合に対する重錘落下衝撃 実験を行った.

## 2. 実験概要

## 2.1 コンクリートの配合

**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は,凍 結融解による劣化を促進させるために水セメント比を 57% とした.また,材齢による強度増進を極力小さくするため に,セメントには早強セメントを用いると共に,養生期間 を6週間と十分に取った後に凍結融解装置による促進劣化 を行った.

#### 2.2 試験体概要

図-1 には、試験体の形状寸法および超音波伝播速度の 測定点を示している。本実験に用いた試験体は、断面寸法

#### 表-1 コンクリートの配合とフレッシュ性状

W/C	s/a	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			スランプ	空気量		
(%)	(%)	С	W	S	G	AE減水剤	(cm)	(%)
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

(幅×高さ)が60mm×100mm,純スパン長が900mm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.試験体の設計にあたっては、凍結融解による劣化が 内外部で均等化するように断面を小さく設定した.**表**-2 には、RC 梁の計算耐力を示している。表より、計算せん 断余裕度は1.75 であり、破壊形式は曲げ破壊型である。な お、計算曲げ耐力およびせん断耐力は土木学会コンクリー ト標準示方書<sup>4)</sup>に準拠して算出した。

## 2.3 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、気中凍結水中融解法により 行った. RC 梁の温度は梁中央の断面に挿入したセンサー にて測定し、-18 ℃ まで低下した後に5 ℃ まで上昇する過 程を1サイクルとした.なお、1サイクルの所要時間は7 時間程度である.

RC 梁の支点部が凍結融解作用によって劣化損傷し断面 欠損すると、載荷実験を適切に実施することが困難になる 可能性がある.そのため、劣化防止のために RC 梁の両端 部から100 mm の範囲はスタイロ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.

## 2.4 劣化の評価方法

本論文における劣化度の評価は,超音波測定器にて測定 した超音波伝播速度を用いて,下式(1)より算出した相対 動弾性係数を用いて行った。

## 平成27年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第72号



図ー2 各種応答波形

#### 表-3 試験体一覧

凍害ひび割れ ── 実験終了後のひび割れ ※ 網掛けは圧壊もしくは剥落部分

設定重錘落下高さ <i>H</i> = 600 mm		設定重錘落下高さ <i>H</i> = 900 mm		
試験体名	平均 相対動弾性係数(%)	試験体名	平均 相対動弾性係数(%)	
N-H600	100	N-H900	100	
D86-H600	86.9	D92-H900	92.8	
D82-H600	82.2	D85-H900	85.2	
D81-H600	81.5	D82-H900	82.2	
D79-H600	79.5	D79-H900	79.2	
D75-H600-1	75.1	D74-H900	74.3	
D75-H600-2	75.1	D73-H900	73.3	
D73-H600	73.5	D69-H900	69.3	

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

ここに、*v<sub>d</sub>*:促進劣化後の超音波伝播速度、*v*<sub>0</sub>:促進劣 化前の超音波伝播速度である。

測定位置は、図-1に示すように全19箇所あり,RC梁 の劣化がある程度進むごとに超音波伝播速度を測定した. なお、本論文において、支点部付近の劣化度は,RC梁の 耐衝撃挙動にほとんど影響を与えないことが全実験ケース の結果から明らかになったことから、検討を単純化するた めに左右両端の3箇所(図中,黒塗り箇所)の測定値は検討 から除外することとした.また、本論文では、上記の6箇 所を除く全測定点における相対動弾性係数の平均値を平均 相対動弾性係数と呼ぶこととする.

## 2.5 実験方法

表-3 には、本実験に用いた試験体の一覧を示してい る.表中,試験体名の第1項目は凍害劣化の有無(N:劣化 無し,D:劣化有り)を示しており,Dに付随する数値は試 験体の平均相対動弾性係数を示し,Hに付随している数字 は設定重錘落下高さを示している.実験は,試験体に質量 20 kg,先端直径 60 mmの鋼製重錘を繰り返し自由落下さ せる方法で行った.

重錘の落下位置は試験体のスパン中央部であり,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



## 図ー3 ひび割れ性状

持に近い構造となっている.

本実験の計測項目は、重錘衝撃力および支点反力であり、 サンプリングタイムを 0.01 ms としデジタルデータレコー ダーで一括収録している.また、載荷点変位に関しては、 高速度カメラによって撮影された画像を用いて試験体に貼 付したターゲットマーカーの移動量から算出した.なお、 実験終了後、試験体のひび割れ分布を撮影している.

### 3. 実験結果

#### 3.1 各種応答波形

図-2 には,設定落下高さごとの各種応答波形を重ねて示している.

## 平成27年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第72号



図より,重錘衝撃力波形および支点反力波形は,設定重 錘落下高さ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,*H* = 900 mm の場合には,*H* = 600 mm よりも重錘衝撃力および支点反力波形のばらつきが大きい ことが分かる.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.

載荷点変位波形は設定重錘落下高さの増加に伴って最 大値が増加している.また,D82-H900 試験体を除いた他 の試験体では,正弦半波状の第1波が最大値を示した後, 減衰自由振動へ移行していることが分かる.試験体の劣化 が比較的進行している場合には,最大載荷点変位および第 1波の継続時間が増加し,減衰自由振動における振幅が小 さくなっている.これは,凍害劣化の影響によってコンク リート強度の低下やひび割れが進行し,曲げ剛性が低下に したことによるものと推察される.なお,D82-H900 試験 体のみ異なる波形性状を示しているが,これは後述するよ うに試験体が著しいせん断破壊へと至ったためであり,そ の最大変位は44 mm であった.

## 3.2 ひび割れ性状

図-3 には, N/D86/D81/D79-H600 および N/D85/D82/D74-H900 試験体における実験終了後のひび割れ性状を示してい 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(以下,凍害ひび割れ)および載荷によっ て発生したひび割れを示している.図より,N試験体の場 合には、上下縁から進展する曲げひび割れが載荷点から左 右の支点側にかけて分布していることが分かる.これは、 重錘衝突直後においては曲げ応力が載荷点から両支点側に 伝播し、見かけ上の固定端が両支点側に推移する状況とな るため、負の曲げモーメントが発生し上縁に曲げひび割れ が発生したことによるものである.なお、N-H600 および N-H900 試験体の残留変位は 9 mm および 15 mm であった.

一方,D試験体の場合には、そのひび割れ性状は重錘衝 突部の圧壊や曲げひび割れの開口が卓越する「曲げ型」、斜 めひび割れの発生・開口が卓越する「せん断型」、または その両方の傾向を示す「複合型」があることが分かる.ま た、D85-H900を除いて、曲げ型および複合型のひび割れ 性状を示した試験体の場合には、残留変位がN試験体とほ ぼ同程度であったが、D81-H600およびD85/D82-H900試験 体のような載荷点から支点にかけて大きく斜めひび割れが 発生している試験体の場合には、残留変位がそれぞれ13 mm、18 mm および37 mm とN試験体の残留変位を大きく 上回っていることを確認している.

## 3.3 ひび割れ性状と相対動弾性係数分布の関係

図-4には、実験終了後のひび割れを相対動弾性係数分 布の色表示と重ねて示している.また、相対動弾性係数の 低下とひび割れ性状の関係性を明確にするために、支点部 近傍は表記していない.なお、図中の赤線と黒線はそれぞ れ凍害ひび割れおよび載荷によって発生したひび割れを示 している.

## 平成27年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第72号



(a) 曲げ型

写真-1 試験体の破壊性状の推移

図より, 平均相対動弾性係数が小さいほど, 斜めひび割 れや上縁コンクリートの圧壊が顕在化する傾向があること が分かる。また、そのひび割れ分布性状は各部位の相対動 弾性係数に影響を受ける傾向がある。 すなわち, 相対動弾 性係数が周囲の値よりも相対的に小さい箇所がスパン中央 部に分布する場合には「曲げ型」のひび割れ性状を示し, せん断スパンに分布する場合には「せん断型」のひび割れ 性状を示すことが分かる さらに、相対動弾性係数の低下 が一様に発生している場合には「複合型」のひび割れ性状 を示す傾向にあることが分かる.

#### 3.4 RC 梁の破壊性状

写真-1には、試験体の破壊性状の推移を示している. 写真の試験体表面の黒線は凍害劣化によって発生した凍害 ひび割れである.また,破壊性状に影響を及ぼしたと思わ れる凍害ひび割れは赤枠で囲っている.

写真より, D82-H600 および D74-H900 試験体は, 共に載 荷点近傍において曲げひび割れが卓越していることが分か る. また、曲げひび割れの開口幅は、重錘の落下高さの増 加に伴って大きくなっている。せん断ひび割れが卓越する D81-H600 試験体の場合には、t = 5.0 ms において、試験体 の断面高さ中央部に斜めひび割れが開口し、t = 15.0 ms に おいて、載荷によって発生したひび割れが凍害ひび割れと つながり、せん断破壊に至っていることが分かる.一方で、 D82-H900 試験体の場合には、せん断破壊に至るような凍害 ひび割れは確認できないが,結果的にせん断破壊に至って いる.これは、試験体内部において、せん断破壊に至るよ うなひび割れが存在していた可能性があることが推察され る. また, t = 20 ms において, D82-H900 試験体の場合に は、衝撃荷重載荷によってコンクリート片が激しく飛散し ている様子が確認できる。このような傾向は H = 600 mm よりも H = 900 mm の場合において顕著に見られた.これ は、設定重錘落下高さが大きく入力エネルギーが大きいこ とによるものと考えられる.

以上のことから, 凍害劣化した RC 梁は凍害ひび割れの 発生位置によって破壊モードが変化する可能性があること が分かった。また、入力エネルギーの増加に伴ってひび割 れの開口幅が大きくなり、剥落したコンクリート片の飛散 が激しくなる傾向にあるものと考えられる.

## 4. まとめ

本研究は、RC 梁の耐衝撃挙動に及ぼす凍結融解作用の 影響を検討することを目的に,気中凍結水中融解法により 劣化させた RC 梁の重錘落下衝撃実験を行った。ここでは、 平均相対動弾性係数が100%~70%程度までの試験体を対 象に, 設定重錘落下高さを2種類として実験を行った. 本 研究によって得られた知見をまとめると、以下のとおりで ある.

- 1) スパン中央部近傍の相対動弾性係数が小さい場合に は、上縁コンクリートが圧壊するとともに曲げひび割 れが発生・開口し、 せん断スパンの相対動弾性係数が 小さい場合には斜めひび割れが卓越する傾向にある.
- 2) 凍結融解作用による凍害ひび割れや内在するひび割れ がRC 梁の破壊モードに影響する場合がある.
- 3) 凍害劣化を受けた RC 梁に過大な衝撃荷重が作用する と、コンクリート片の剥落や飛散が生じる可能性があ り、第3者への影響度が増大する.

#### 参考文献

- 1) 水田真紀, 野々村佳哲, 嶋田久俊, 田口史雄: 積雪寒冷 地のRC 壁高欄の耐荷挙動に影響する各種要因の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.931-936, 2013,
- 2) 岸徳光,三上浩:衝撃荷重載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の性能照査型耐衝撃設計法に関する一提案,構造 工学論文集, 土木学会, Vol.53A, pp.1251-1260, 2007.3
- 3) 勝見悠太, 水田真紀, 栗橋祐介, 岸徳光: 凍結融解作 用を受けた RC 梁の耐衝撃挙動,コンクリート工学年 次論文集, Vol.37, No32, pp595-600, 2015.7
- 4) 土木学会:コンクリート標準示方書 [規準編],土木学 会, 2012