

凍害劣化した RC 梁の耐衝撃性に及ぼす劣化位置の影響

Influence of deterioration area on impact resistant behavior of RC beam with frost damage

室蘭工業大学大学院

室蘭工業大学大学院

(国研) 土木研究所寒地土木研究所

(国研) 土木研究所寒地土木研究所

○ 学生員 戸上 卓也 (Takuya Togami)

正 員 栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)

正 員 野々村佳哲 (Yoshinori Nonomura)

正 員 今野 久志 (Hisashi Konno)

1. はじめに

高度経済成長期に建設された数多くの鉄筋コンクリート (RC) 構造物を適切かつ合理的に維持管理することが求められている。特に、北海道や東北地方などの積雪寒冷地においては、RC 構造物の著しい凍害劣化が問題となっており、美観のみならず構造性能の低下も懸念されている。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関する研究が推進されている¹⁾。

著者らは、これまで壁高欄や落石防護構造物などの衝突作用を受ける構造物を対象として、耐衝撃性に及ぼす凍害劣化の影響について RC 梁を対象に実験的な検討を行ってきた。その結果、凍結融解作用によって圧縮側が劣化した RC 梁は梁中央部に損傷が集中し、変形量が大きくなることなどを明らかにしている^{2),3)}。

しかしながら、これらの研究成果は、圧縮側コンクリートの劣化が著しく発生している RC 梁を対象とした結果である。一方、海岸線沿いのロックシェッド等は越波による水がかりと塩化物イオンの供給および凍結融解作用を受ける極めて厳しい環境にさらされており、頂版下面(引張側)が劣化している事例も見受けられる。この場合は、主鉄筋の付着切れやコンクリートの剥落などが生じる可能性があるものと考えられる。凍害劣化度と構造性能の関係を適切に評価するためには、引張側コンクリートに劣化が著しく発生する場合の検討も進める必要があるものと考えられる。

このような観点から、本研究では凍害劣化した RC 梁の耐衝撃挙動を検討することを目的に、断面寸法 20×25 cm、全長 2 m のせん断補強筋を有する RC 梁を製作して、凍結融解繰返しにより表面が著しくスケールンし粗骨材が露出する程度まで凍害劣化させ、その劣化度を調査・診断した後、重錘落下衝撃実験を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表-1 には、RC 梁に用いたコンクリートの配合を示している。本研究では、凍結融解による劣化を促進させるため水セメント比 (W/C) を 55% とし、コンクリート打込みに必要な最小量の混和剤 (AE 減水剤) を添加し空気量が極力少なくなるようにした。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 $20 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$ の複鉄筋矩形 RC 梁である。また、純スパン長は後述するように梁両端の劣化が著しいことから 1.4 m とした。軸方向鉄筋として D13 (SD345) を上下に 2 本ずつ配筋しており、せん断補強筋として D6 (SD295A) を配筋している。

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 ³)				スランブ (cm)	空気量 (%)
		C	W	S	G		
55	48	308	169	931	1,017	8.0	1.3

*セメントの種類: 早強セメント, 骨材の最大寸法: 25 mm

表-2 試験体の一覧

試験体名	劣化集中部位	凍害劣化の度合	落下高さ H (m)	実測衝突速度 V (m/s)
N	-	無	1.0	4.51
DU-1	圧縮側	小		4.51
DU-2		大		4.44
DL-1	引張側	小		4.52
DL-2		大		4.45

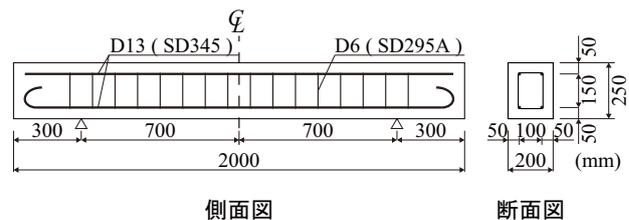


図-1 試験体概要

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°C および 5°C 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、温度管理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。

2.3 載荷実験の概要

表-2 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、凍害劣化が圧縮側に集中している場合には DU、凍害劣化が引張側に集中している場合には DL としている。DU/DL 試験体の場合 2 ケースの実験を行ったため、第 2 項目に通し番号を付した。なお DL 試験体の場合には、図-1 に示した試験体を上下逆にして載荷を行った。

衝撃載荷実験は、質量 300 kg、先端直径 200 mm の鋼製重錘を設定落下高さ $H = 1.0$ m 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。測定項目は、重

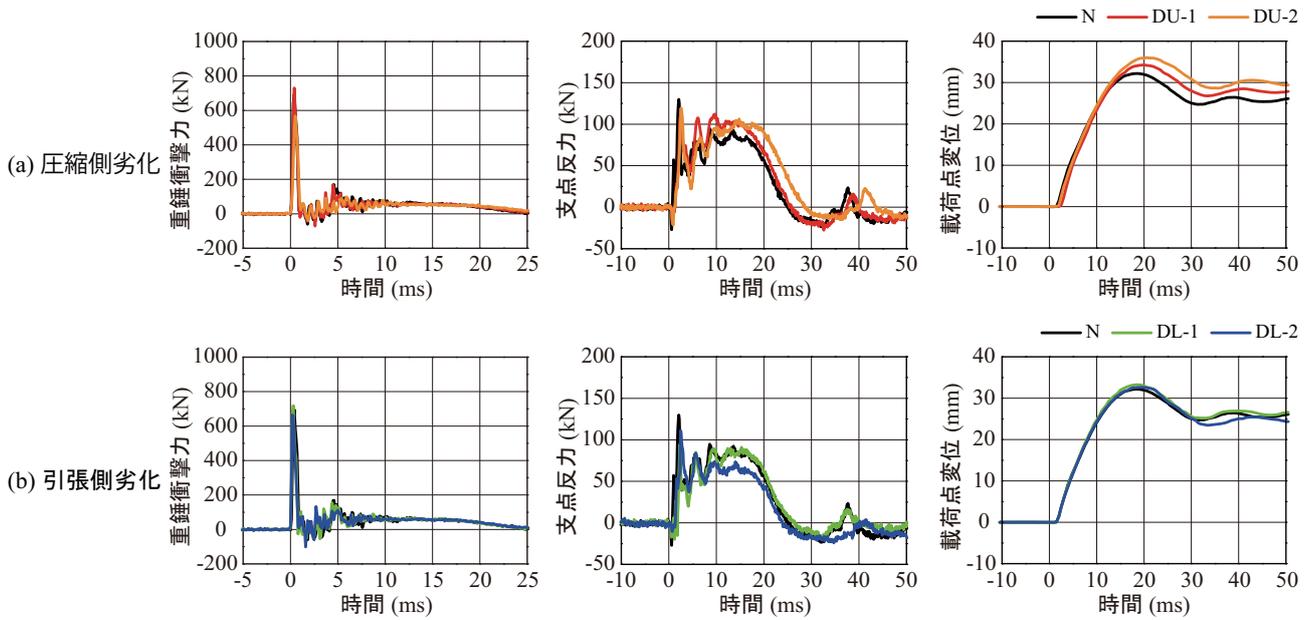


図-3 各種時刻歴応答波形

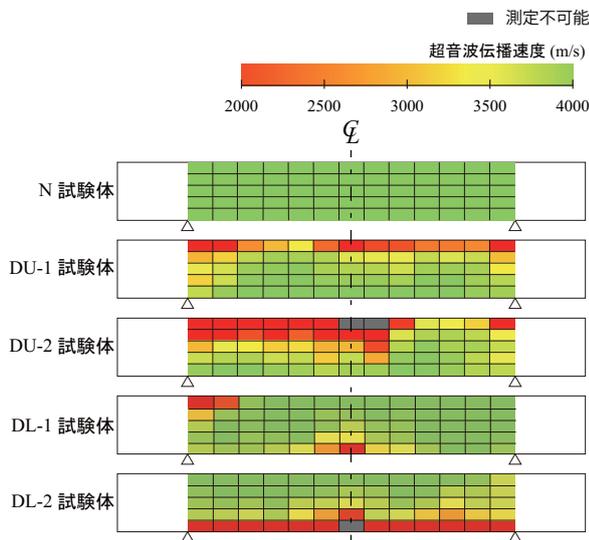


図-2 超音波法伝播速度

錘衝撃力および支点反力，衝突速度，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。

2.4 凍害劣化度の分布

本研究において，凍害劣化度分布は超音波伝播速度により評価した。図-2には，超音波伝播速度の測定結果を示している。図より，N試験体の場合には，伝播速度は4,000 m/s程度であり，文献4)を参考にすると概ね健全であることがわかる。DU試験体は，圧縮側に伝播速度の小さい部位が散見される。特にDU-2試験体の場合において伝播速度の小さい部位が圧縮側に広く分布しており劣化度を高く評価した。またDL試験体は，引張側に伝播速度の小さい部位が散見される。特にDL-2試験体の場合において伝播速度の小さい部位が引張側に広く分布しており劣化度を高く評価した。

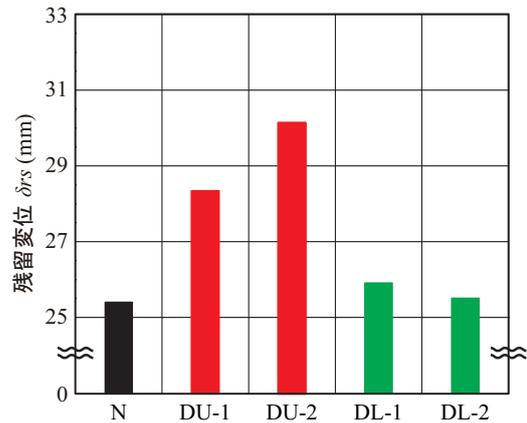


図-4 残留変位

3. 衝撃荷重実験結果

3.1 各種応答値

図-3には，劣化部位毎に全試験体の重錘衝撃力，支点反力および荷点変位波形を示している。また，図-4には，各試験体の残留変位を整理して示している。

図-3より，重錘衝撃力波形は，凍害劣化の有無，劣化部位によらず，継続時間が1 ms程度で振幅500～700 kNの第1波が励起していることがわかる。

支点反力波形は，いずれの試験体においても継続時間が25 ms程度の正弦半波に高周波成分が合成された波形形状を示している。圧縮側劣化の場合には，劣化度が大きくなるほど主波動継続時間が大きくなっていることがわかる。これは，凍害劣化によりRC梁の曲げ剛性が低下したことによるものと考えられる。一方，引張側劣化の場合には，DL-2試験体の正弦半波のピークが多少小さいものの波形形状や継続時間は概ね同様である。

荷点変位波形において，圧縮側劣化したDU試験体の場合には，劣化度が大きくなるほど変位が大きくなってい

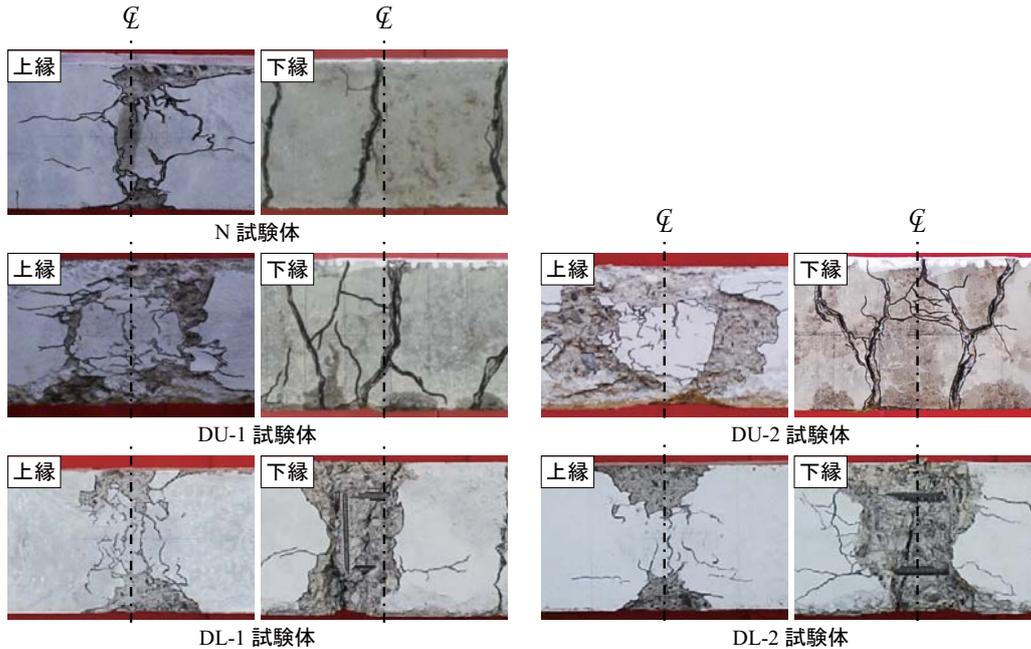


写真-1 実験終了後のスパン中央部上縁・下縁コンクリートのひび割れ性状

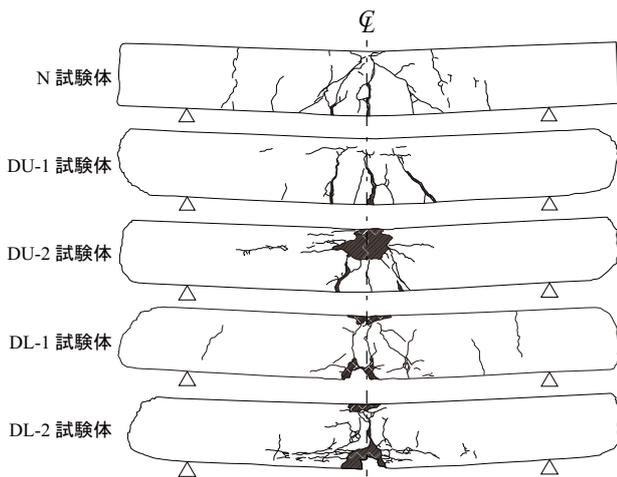


図-5 ひび割れ分布性状

ることがわかる。特に、図-4より、DU-2の残留変位はNに比べて1.2倍程度大きくなっていることがわかる。これは、圧縮側コンクリートの凍害劣化によるスケーリングや圧縮強度の低下および微細ひび割れの発生によりRC梁の曲げ耐力が低下したことによるものと考えられる。

また、引張側劣化度が大きいDL試験体の場合には、劣化度の違いにかかわらず、劣化無しのN試験体と概ね同様の値を示している。これは、引張側劣化によりかぶりコンクリートは劣化しているが、主鉄筋は腐食していないため耐力の低下が著しくなかったためと考えられる。

3.2 ひび割れ性状

図-5には、各試験体における実験終了後のひび割れ分布性状を示している。また写真-1には、各梁の実験終了後における上・下縁の損傷状況を示している。図より、いずれの試験体も概ね左右対称の曲げ変形を呈していることがわかる。また、劣化の有無によらず曲げおよび斜めひ

び割れの発生が見られるが、劣化ありのDU/DL試験体の場合には、損傷が中央部に集中していることがわかる。これは、重錘衝突時に曲げおよびせん断力の作用が最も早いスパン中央部において、凍害劣化によってコンクリートの引張強度が低下している領域に損傷が集中したことによるものと考えられる。なお、圧縮側の劣化度が高いDU-2試験体の場合には、スパン中央部において側面上側のかぶりコンクリートが剥落している。また、引張側に劣化が発生しているDL-1/2試験体の場合には、スパン中央部において下縁のかぶりコンクリートが剥落している。このような性状は、図-2の超音波伝播速度分布と対応している。

写真-2には、ひび割れの進展状況に関する高速度カメラ画像を示している。写真より、劣化なしのN試験体の場合には、経過時間 $t = 2.5$ msにおいて曲げおよび斜めひび割れが発生していることがわかる。 $t = 5$ msでは、スパン中央部の曲げひび割れに加え、その両端の曲げせん断ひび割れが発生し、 $t = 10$ msにおいてこれらのひび割れが開口していることがわかる。また、 $t = 20$ msではひび割れ幅がさらに大きくなるとともに上縁ではコンクリートの圧縮破壊が見受けられる。

一方、圧縮側劣化ありのDU試験体の場合には、 $t = 2.5$ msにおいてN試験体に見られた曲げや斜めひび割れは明瞭には見られない。これは、図-2より、N試験体の超音波法伝播速度4,000 m/sに対し、DU試験体の圧縮域の超音波法伝播速度が2,000~3,000 m/sであることから、弾性係数は3~6割程度まで低下していると推察される。そのため、弾性係数の低下に伴い衝撃応力の伝達が遅くなり、ひび割れの開口が遅れたと推察される。その後DU-1試験体の場合には、 $t = 5$ msで曲げひび割れが開口し、 $t = 10$ msでは右側に斜めひび割れが、左側に曲げひび割れが発生している。また、 $t = 20$ msでは、右側の斜めひび割れが大きく開口している。これは、図-2に示すように、左右の劣

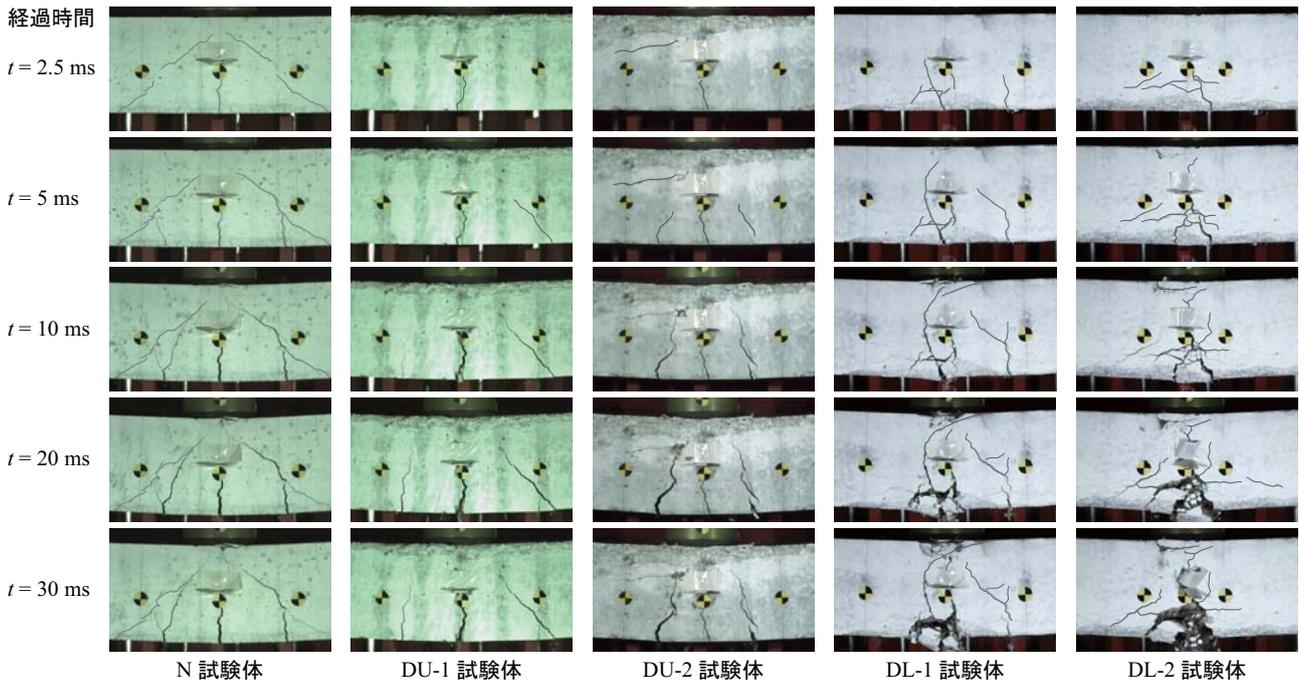


写真-2 高速度カメラで観測されたひび割れの進展状況

化度が均一ではなく右側において劣化度が幾分高いことによるものと考えられる。

DU-2 試験体の場合には、 $t = 5$ ms で三本の曲げひび割れが発生し、 $t = 10, 20$ ms でこれらのひび割れが開口していることがわかる。なお、左側のひび割れが特に大きく開口しているが、これも 図-2 の超音波伝播速度分布と対応しており、劣化度の高い部分に損傷が集中したことによるものと考えられる。

引張側劣化の DL 試験体の場合には、 $t = 2.5$ ms においてスパン中央部の主鉄筋位置近傍に水平ひび割れが生じ、その後 $t = 5, 10$ ms には下縁から生じた曲げひび割れと連結してブロック化し、 $t = 20$ ms 以降では剥落に至っていることがわかる。これは、重錘衝突位置から同心円状に伝播する応力波の影響によりコンクリート強度の低い部位に水平ひび割れが生じ、その後梁の変形量の増大に伴って水平ひび割れと曲げひび割れが顕在化したことによるものと考えられる。

4. まとめ

- 1) 劣化位置が圧縮側の場合には、圧縮側コンクリートの圧壊が著しく、応答変位も大きくなる。
- 2) 劣化位置が引張側の場合には、引張側コンクリートの剥落が生じるものの、応答変位は健全の場合と同じである。
- 3) 超音波伝播速度が低い箇所と実験後におけるコンク

リートの損傷箇所は概ね対応する。

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 梁部材の破壊性状, 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) 土木研究所 寒地土木研究所: 凍害が疑われる構造物の調査・対策手引書(案), 2016
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], 土木学会, 2012
- 6) 林田宏, 坂口淳一: 凍結融解作用により劣化したコンクリートの圧縮応力下における応力-ひずみ関係のモデル化に関する研究, 土木学会論文集, Vol.71, No.2, 2015
- 7) 土木学会: 防災・安全対策技術者のための衝撃作用を受ける土木構造物の性能設計-基準体系の指針-, 土木学会, 2013