

論文

凍害劣化した RC 梁の耐衝撃挙動に及ぼす劣化部位の影響

栗橋 祐介^{*1}, 野々村 佳哲^{*2}, 今野 久志^{*3}, 濱 幸雄^{*4}, 戸上 卓也^{*5}

Influence of Degradation Location on Impact Resistance Behavior of RC Beam Deteriorated by Frost Damage

Yusuke KURIHASHI^{*1}, Yoshinori NONOMURA^{*2}, Hisashi KONNO^{*3}, Yukio HAMA^{*4} and Takuya TOGAMI^{*5}

要旨: 本研究では、劣化位置の異なる凍害劣化 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 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リングし粗骨材が露出する程度まで凍害劣化させ、その超音波伝播速度分布を調査した後、重錘落下衝撃実験を実施した。その結果、劣化位置が圧縮側の場合には、上縁コンクリートの圧縮破壊が顕在化し応答変位が増大する傾向にあることや、劣化位置が引張側の場合には、応答変位は劣化がない場合と同様であるものの下縁かぶりコンクリートが大きく剥落する危険性があること、などが明らかになった。

キーワード: RC 梁, 凍害劣化, 耐衝撃性, 劣化部位

1. はじめに

既設鉄筋コンクリート (RC) 構造物を持続可能な方法で維持管理していくことが、我が国における将来の大きな課題の 1 つになっている。特に、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、圧縮側の凍害劣化が著しい場合には RC 梁の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) が劣化する事例が発生し増加するものと考えられる。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。従って、凍害劣化の程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 梁の耐衝撃挙動を明らかにすることを目的に、劣化部位が圧縮側および引張側に位置する凍害劣化 RC 梁を対象に重錘落下衝撃実験を実施した。RC 梁の耐衝撃性は、応答変位およびコンクリート剥落の有無を性能指標とし、それらを劣化のない RC 梁と比較検討する形で評価した。

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とフレッシュ性状を示している。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、促進劣化期間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

*1 金沢大学理工研究域地球社会基盤学系 准教授

*2 (国研) 土木研究所寒地土木研究所耐寒材料チーム 研究員

*3 (国研) 土木研究所寒地土木研究所寒地構造チーム 総括主任研究員

*4 室蘭工業大学大学院もの創造系領域建築土木工学コース建築学トラック 教授

*5 (株) オリエンタル白石

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)				スランプ (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，骨材の最大寸法：20 mm

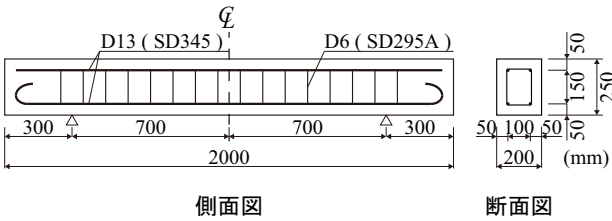


図-1 試験体概要

験に用いた試験体は、断面寸法(幅×高さ)が20 cm × 25 cm、全長が2 mの複鉄筋矩形 RC 梁である。また、梁両端の劣化が著しかったため、支点は梁端部から300 mm内側の位置とした。そのため、純スパン長は1.4 mとなっている。軸方向鉄筋にはD13 (SD345)を用い上下に2本ずつ配筋した。せん断補強筋にはD6 (SD295A)を用い部材軸方向に100 mm間隔で配置した。凍害劣化のないコンクリートの圧縮強度は39.0 MPa、鉄筋の降伏強度はD13 および D6 でそれぞれ353 MPa および 370 MPa であった。

表-2には、劣化のないRC梁の計算曲げ耐力および計算せん断耐力を示している。表中の計算曲げ耐力および計算せん断耐力はコンクリート標準示方書⁴⁾に準拠して算出した。コンクリート圧縮強度および鉄筋降伏強度には、上述の材料試験値を用いた。表より、計算せん断耐力を計算曲げ耐力で除したせん断余裕度は2.6程度であり、設計上曲げ破壊で終局に至ることがわかる。

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、温度管理に用いた梁は荷重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8時間程度であり、サイクル数は872サイクルである。促進劣化は、粗骨材が露出する程度まで実施した。ただし、鉄筋腐食は生じていないことを確認している。

2.3 荷重実験の概要

表-3には、試験体の一覧を示している。試験体

表-2 劣化なし RC 梁の設計耐力の一覧

曲げ耐力 (kN) (1)	せん断耐力 (kN)			せん断余裕度 (2)/(1)
	コンクリート分担分	鉄筋分担分	合計 (2)	
56.8	66.7	81.5	148	2.61

表-3 試験体の一覧

試験体名	劣化部位	凍害劣化の度合	衝突速度 V (m/s)	入力エネルギー E (kJ)
N	-	無	4.51	3.05
DU-1	圧縮側	小	4.51	3.05
DU-2		大	4.44	2.96
DL-1	引張側	小	4.52	3.06
DL-2		大	4.45	2.97

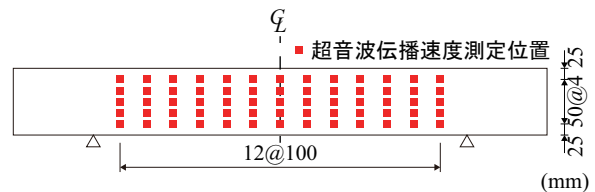


図-2 超音波伝播速度測定位置

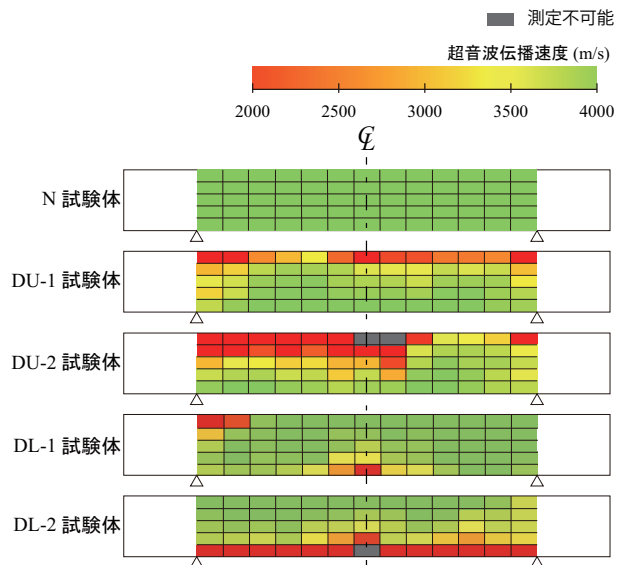


図-3 超音波伝播速度

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試験体の場合には各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、前述2.2節の凍結融解による促進劣化では、RC梁の上部の劣化が顕在化する結果となった。そのため、凍害劣化

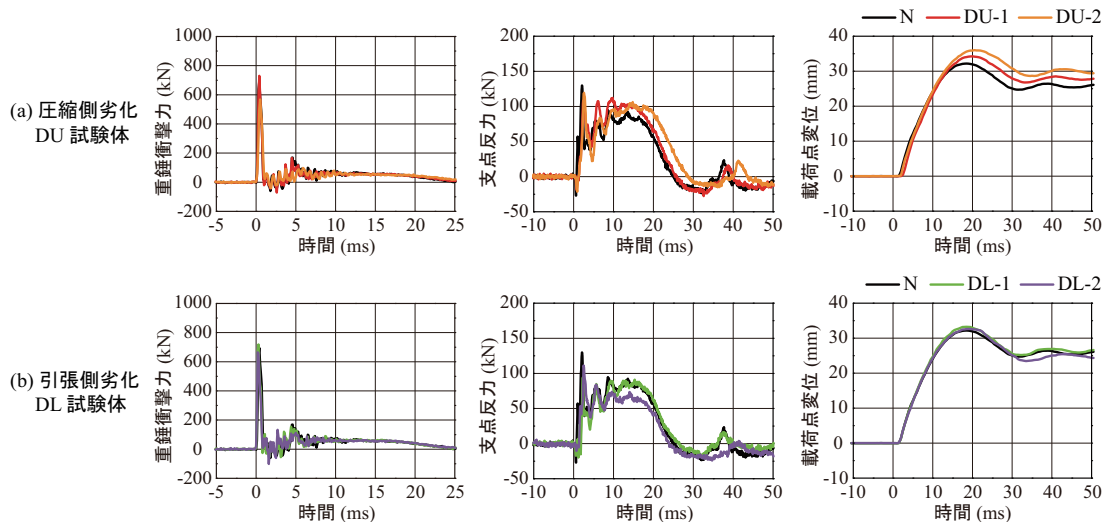


図-4 各種時刻歴応答波形

部位が下側の DL 試験体については、図-1 に示した試験体を上下逆にして実験に供した。凍害劣化の度合いは、同じ種類の試験体の相对比较により「大」もしくは「小」と呼ぶこととした。

衝撃载荷実験は、質量 300 kg、先端直径 200 mm の鋼製重錘を落下高さ $H = 1.0$ 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载荷法により行った。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、重錘衝撃力および支点反力、衝突速度、载荷点変位である。なお、支点反力は両支点部の合算値である。

2.4 凍害劣化の分布

本研究では、コンクリートの凍害劣化の程度は超音波伝播速度に基づいて評価した。図-2 には、超音波伝播速度の測定位置を示している。また、図-3 には、超音波伝播速度の測定結果を示している。なお、コンターが灰色の箇所は、スケーリングによりコンクリート表面の平坦性が保たれていないため測定不可能であった。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 5) などを参考にすると概ね健全であるものと評価される。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凍害劣化の程度が大きい結果となった。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いる。

3. 衝撃载荷実験結果

3.1 各種時刻歴応答波形

図-4 には、各試験体の重錘衝撃力、支点反力および载荷点変位波形を示している。

図より、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性状を示している。圧縮側劣化の場合には、劣化の程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。

载荷点変位波形において、圧縮側劣化の DU 試験体の場合には、凍害劣化の程度が大きくなるほど変位が大きくなっていることがわかる。これに対し、引張側劣化の DL 試験体の応答変位は、いずれも劣化無しの N 試験体の場合と同様である。

3.2 ひび割れ分布性状

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超音波伝播速度分布と重ねて示している。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が最も早期に作用するス

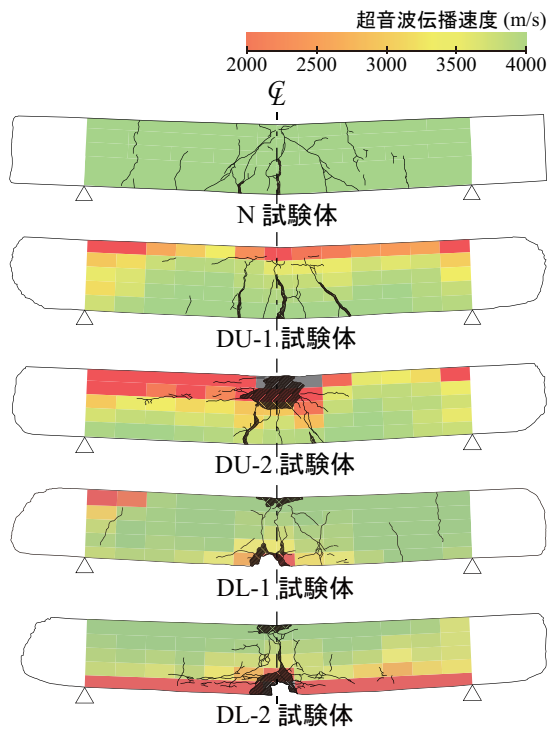


図-5 ひび割れ分布性状

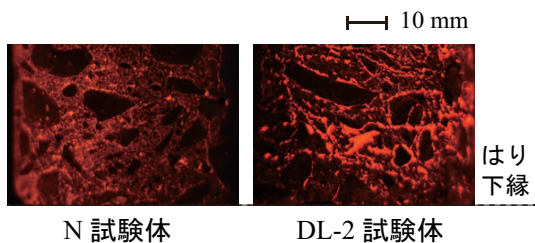


図-6 下縁かぶりコンクリート内部のひび割れ

パン中央部において、凍害劣化によってコンクリートの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、圧縮側の凍害劣化の程度が高い 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。このことから、超音波伝播速度の小さい部位と RC 梁の損傷部位が対応していることが分かる。

図-6 には、N および DL-2 試験体の左側せん断スパンの下縁かぶり部から採取したコアコンクリートのひび割れ状況を示している。なお、ひび割れは、蛍光塗料を塗布しブラックライトを照射した状態で撮影した。写真より、N 試験体よりも、DL-2 試験体のコアコンクリートには、粗骨材周辺のひび割れの他、モルタルマトリクス部にはひび割れが多数発生していることが分かる。これらのひび割れが、衝撃荷重

作用時における下縁かぶりコンクリート剥落の誘因になっているものと考えられる。

以上のことから、圧縮側劣化の場合には上縁コンクリートの圧縮破壊が顕在化し、応答変位が増大する傾向にあり、引張側劣化の場合には下縁かぶりコンクリートが大きく剥落するものの、応答変位は劣化なしの場合と同様である、ことが明らかになった。

4. まとめ

本研究では、凍害劣化した RC 梁の耐衝撃挙動を明らかにすることを目的に、劣化部位の異なる凍害劣化 RC 梁を対象に重錘落下衝撃実験を実施した。本研究により得られた知見は以下の通りである。

- 1) スパン中央部周辺において超音波伝播速度で評価した RC 梁の凍害劣化部位とコンクリートの損傷部位は概ね対応する。
- 2) 圧縮側劣化の場合は、上縁コンクリートの圧縮破壊が顕在化し、重錘衝突部周辺が大きく欠損、応答変位が増大する傾向にある。
- 3) 引張側劣化の場合は、応答波形は劣化がない場合と概ね同様であるが、下縁鉄筋に沿ってひび割れが進行し、下縁かぶりコンクリートが大きく剥落する危険性がある。

今後は、衝撃荷重作用時のひび割れ進展過程を分析するとともに、凍害劣化 RC 梁の耐衝撃性評価法について検討する予定である。

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) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], 土木学会, 2017
- 5) 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