

論文 凍結融解繰返しにより凍害劣化した RC 梁の耐衝撃挙動

戸上 卓也^{*1}・栗橋 祐介^{*2}・野々村 佳哲^{*3}・今野 久志^{*4}

要旨：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リング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。その結果、1) 超音波伝播速度で評価した RC 梁の凍害劣化度分布は、衝撃載荷実験後のコンクリートの損傷状況と概ね対応すること、2) 凍害劣化の有無によらず、各種応答波形の性状は概ね同様である。ただし、凍害劣化した RC 梁は上縁コンクリートの損傷が顕在化し、変位が大きくなる傾向にあること、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、劣化度

1. はじめに

近年、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実験的な検討を行ってきた。その結果、凍害劣化によって RC 梁の破壊モードが曲げ破壊からせん断破壊に移行する場合があ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、断面寸法 6 × 10 cm でせん断補強筋を有しない小型 RC 梁を対象とした結果である。一方、既設の RC 梁や柱などの構造部材は、通常せん断補強筋が配置されており、かつ断面が大きいため部材表面と内部で凍害劣化度が著しく異なるものと考えられる。凍害劣化度と構造性能の関係を評価するためには、実構造物に近い条件において検討を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リング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。

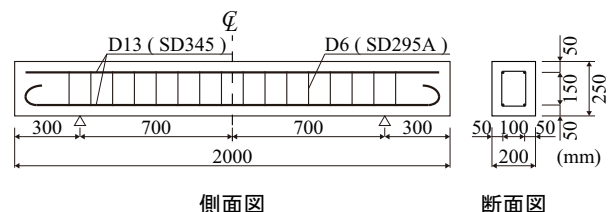
表－1 コンクリートの配合とフレッシュ性状

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：早強セメント，骨材の最大寸法：25 mm

表－2 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)	
52.5	34.7	32.5	67.2	1.28



図－1 試験体概要

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、6 週間気中養生した。

*1 室蘭工業大学大学院 工学研究科 博士前期課程 環境創生工学系専攻 (学生会員)

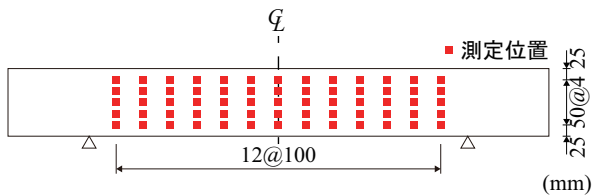
*2 室蘭工業大学大学院 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 講師 博(工) (正会員)

*3 (国研) 土木研究所寒地土木研究所 耐寒材料チーム (正会員)

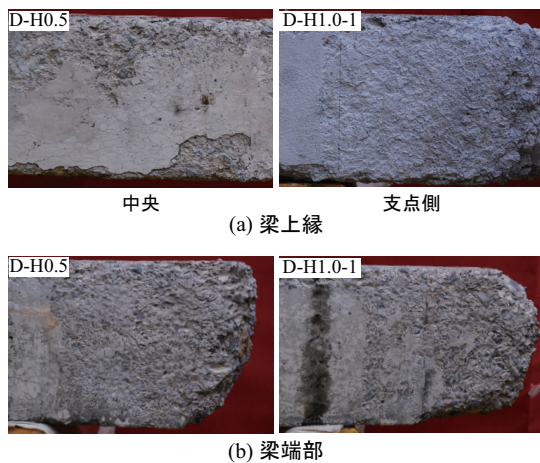
*4 (国研) 土木研究所寒地土木研究所 寒地構造チーム (正会員)

表－3 試験体の一覧

試験体名	凍害劣化の有無	凍結融解サイクル数(回)	落下高さ H (m)	実測 衝突速度 V (m/s)	入力 エネルギー E (kJ)
N-H0.5	無	-	0.5	3.18	1.52
N-H1.0			1.0	4.51	3.05
D-H0.5	有	872	0.5	3.15	1.49
D-H1.0-1			1.0	4.51	3.05
D-H1.0-2			1.0	4.44	2.96



図－2 超音波伝播速度測定位置



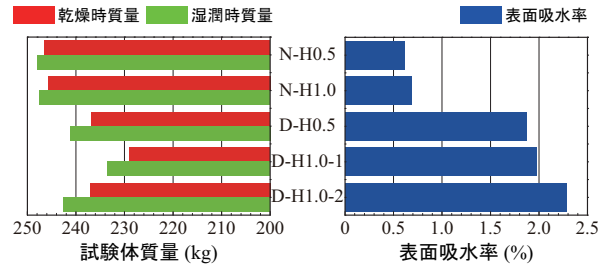
写真－1 梁の凍害劣化状況

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 cm×25 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－2 には、計算耐力の一覧を示している。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。コンクリート強度は設計基準強度(30 MPa)、鉄筋の降伏強度はJISの規格値を用いた。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1.2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



図－3 試験体質量と表面吸水率

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時間程度であり、サイクル数は872サイクルである。

凍害劣化を受けたコンクリートは、静弾性係数や超音波伝播速度が低下することが知られている。そこで、本論文では、RC梁の凍害劣化度を評価するため、図－2の位置で透過法により梁幅方向の超音波伝播速度を測定した。なお、梁幅は、一律200 mmとして評価している。

2.3 載荷実験の概要

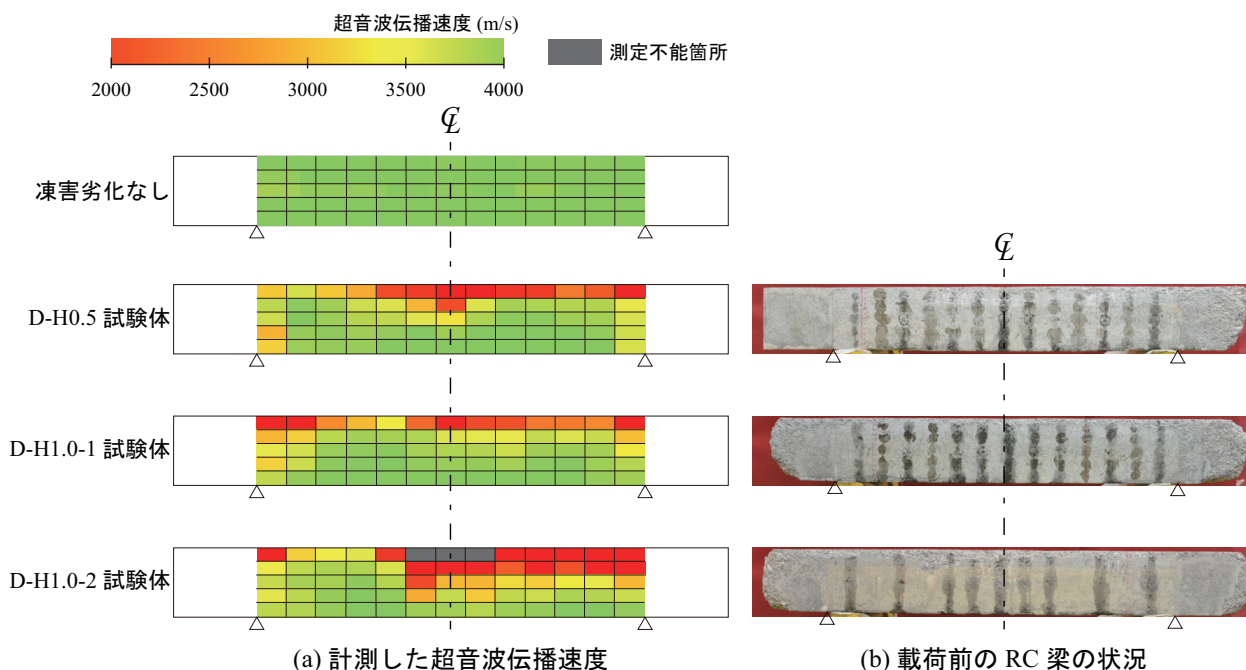
表－3 には、試験体の一覧を示している。試験体名の第1項目は、凍害劣化なしの場合にはN、凍害劣化ありの場合にはDとしている。また、第2項目は H と重錘落下高さの組み合わせとして示している。重錘の設定落下高さは、 $H=0.5, 1.0$ mの2水準とした。なお、D-H1.0試験体の場合は第3項目に通し番号を付した。

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 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、重錘衝撃力および支点反力、衝突速度、載荷点変位である。重錘衝撃力と支点反力は、起歪柱型の衝撃荷重測定用ロードセルを用いて計測し、載荷点変位はレーザ式非接触型変位計を用いて計測した。なお、支点反力は両支点部の合算値である。

3. RC梁の凍害劣化状況

3.1 外観

写真－1 には、凍害劣化状況の一例としてD-H0.5/1.0試験体の衝撃載荷実験前の状態を示している。写真より、凍害劣化によって梁上面における外縁のコンクリートが剥落し、粗骨材が露出していることがわかる。特に梁の



図－４ 測定した超音波伝播速度

両端において、劣化が著しい。また、全面的にスケールリングを生じており、表層が剥落していることがわかる。

3.2 表面吸水率

本研究では、RC 梁の 24 時間吸水率を測定し、梁表面の凍害劣化度の概略評価を試みた。測定方法は、1) まず気中乾燥状態の RC 梁の質量を測定し、2) 水道水を満たした水槽に RC 梁を設置して 24 時間浸漬し、3) 梁を水槽から引き揚げ、周囲の水分を軽く拭き取った後、再度質量を測定した。なお、表面吸水率は、浸漬後の質量増分を浸漬前の質量で除して評価した。

図－３には、各 RC 梁の浸漬前後の質量と表面吸水率を示している。

図より、N 試験体より D 試験体の方が試験体の質量が小さいことがわかる。これは、D 試験体の劣化により表層や梁端部が剥落したことが影響していると考えられる。また、N 試験体より D 試験体の方が吸水率が高いことがわかる。このことから、凍害劣化した RC 梁は、劣化のない梁よりも多くの水分を吸収していることが明らかになった。D 試験体の場合は、表面吸水率が 2.0 % 程度でありコンクリートの空気量と同程度となっている。このことから、D 試験体の場合には、梁の深部まで水が侵入している可能性があるものと考えられる。なお、以降の超音波伝播速度の測定や衝撃载荷実験は水から引き揚げ、5 日程度気中で保管した後、実施した。

3.3 超音波伝播速度の分布

図－４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、伝播速度はいずれも 4,000 m/s 程度であり、文献 5) を参考にすると概ね健全であることがわかる。一方、D 試験体は、いずれの場合も梁上側に伝播速度の小さい部位が散見される。特に D-H1.0-2 試験体の場合において伝播速度の小さい部位が広く分布しており劣化度が高いことがわかる。なお、全般的に梁の上側の劣化が著しいものの、载荷試験後に鉄筋を観察すると、節が残ったままであり表面錆程度であった。このことから、下側の引張鉄筋の腐食や付着強度の低下などの影響は極めて小さく、圧縮側のコンクリートの劣化度と梁の耐衝撃挙動に特化した検討ができるものと考えられる。

なお、前述の表面吸水率を参考にすると、D-H1.0-2 試験体の表面吸水率が最も大きいことから、超音波伝播速度による劣化度評価は表面吸水率による評価と対応していることが分かる。

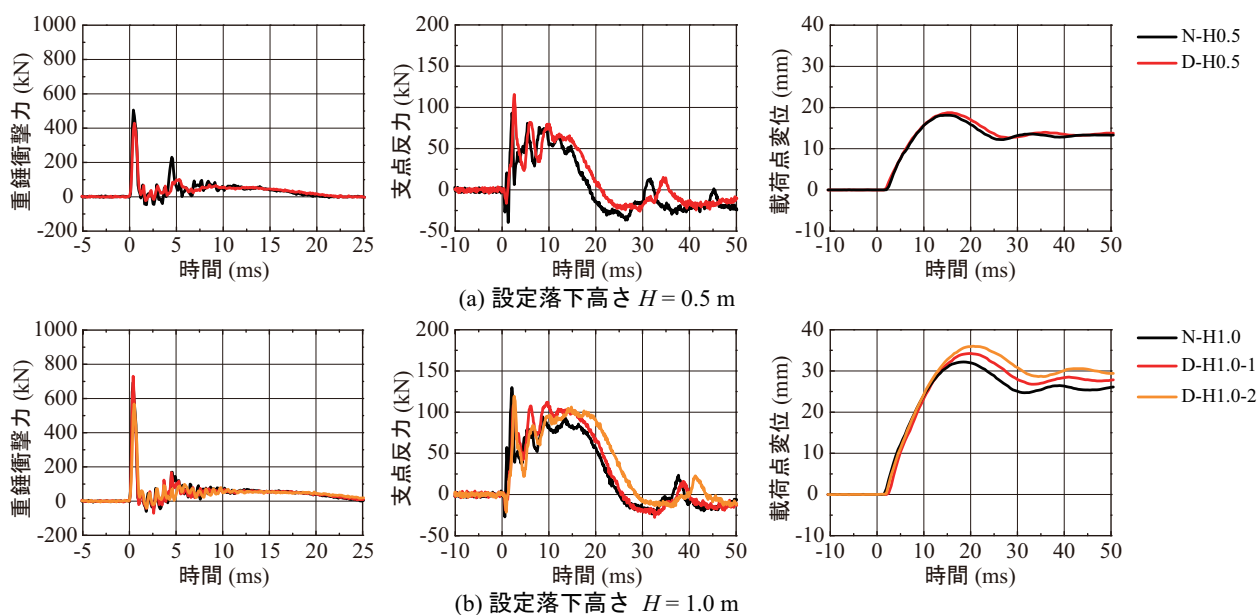
4. 衝撃载荷実験結果

4.1 各種応答波形

図－５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。また、振幅は重錘落下高さが高いほど大きくなる傾向を示している。

支点反力波形は、いずれの試験体においても継続時間



図－5 各種時刻歴応答波形

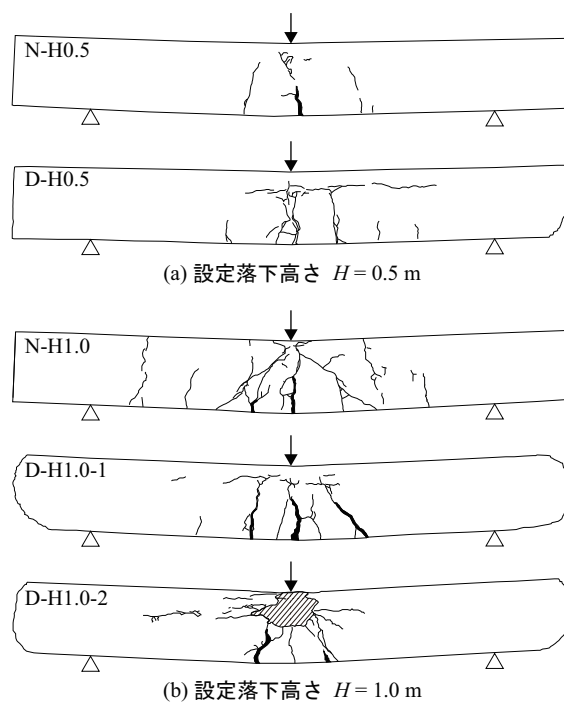
が 25 ms 程度の正弦半波に高周波成分が合成された波形性状を示している。図より、最大振幅や主波動継続時間は重錘落下高さが高いほど大きいことがわかる。また、劣化度が大きくなるほど主波動継続時間が大きくなっていることがわかる。これは、凍害劣化により RC 梁の曲げ剛性が低下したことによるものと考えられる。

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、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、変位が残留し減衰自由振動に移行していることがわかる。 $H = 1.0$ m 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ることがわかる。これは後述するように、凍害劣化によってコンクリート強度が低下したことにより、上縁コンクリートの剥落や斜めひび割れの開口などが生じたためであるものと考えられる。

4.2 ひび割れ性状

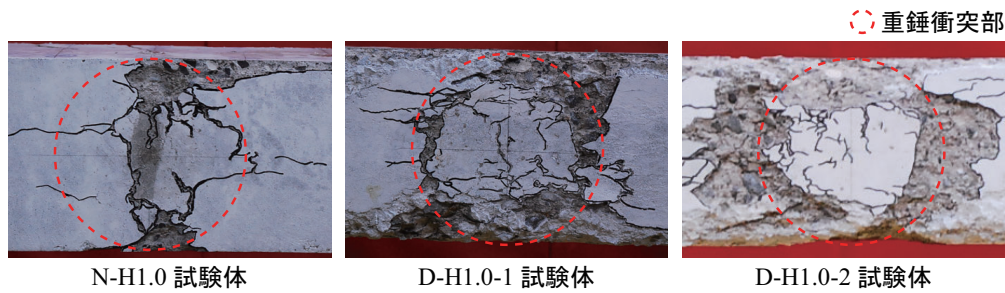
図－6 には、各試験体における実験終了後のひび割れ分布性状を示している。図より、いずれの試験体も概ね左右対称の曲げ変形を呈していることがわかる。図－6 (a) より $H = 0.5$ m の場合には、両試験体ともに梁中央部に曲げひび割れの発生が見られるが、凍害劣化ありの D-H0.5 試験体の場合には、上側に水平ひび割れの発生も見られる。これは、図－4 に示したように上側の劣化度が高いためであるものと考えられ、実験においては復元時に健全部と劣化部の界面で割裂ひび割れが生じていることを別途高速度カメラ画像で確認している。

図－6 (b) より $H = 1.0$ m の場合には、劣化の有無によ

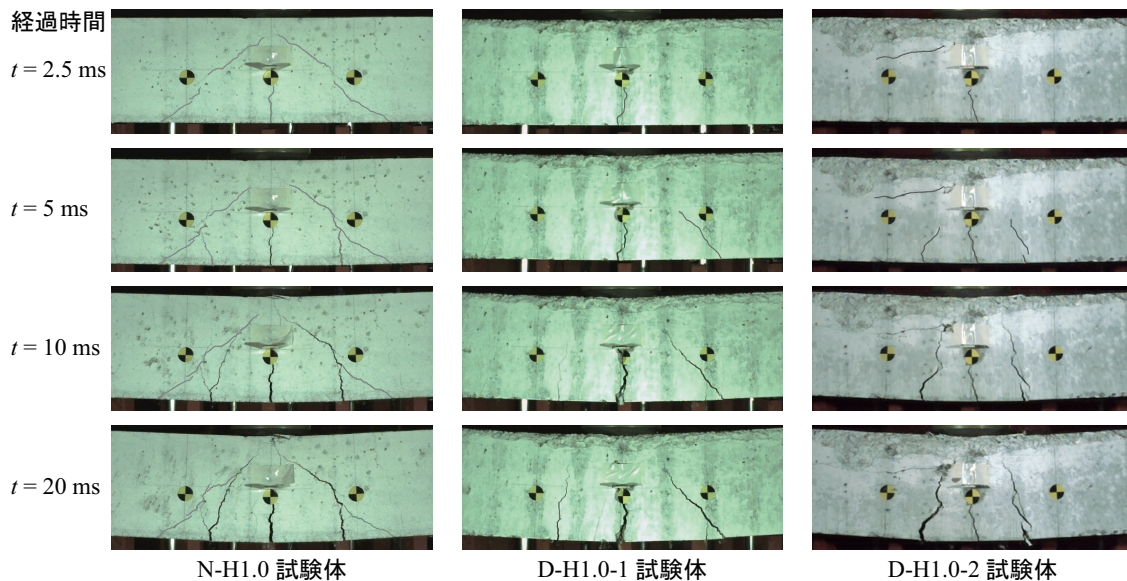


図－6 ひび割れ分布性状

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 D-H1.0 試験体の場合には両試験体とも、損傷が中央部に集中していることがわかる。これは、重錘衝突時に大きな曲げモーメントとせん断力が作用する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、劣化度が高い D-H1.0-2 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。このような性状は、図－4 (a)



写真－２ 実験終了後のスパン中央部上縁コンクリートのひび割れ性状



写真－３ 重錘落下高さ $H = 1.0 \text{ m}$ におけるひび割れの進展状況

の超音波伝播速度分布と対応している。

写真－２には、設定落下高さ $H = 1.0 \text{ m}$ の場合について、実験終了後のスパン中央部上縁コンクリートのひび割れ性状を示している。図より、いずれの試験体も重錘衝突部およびその周辺においてかぶりコンクリートの剥離が生じていることがわかる。劣化なしの N-H1.0 試験体の場合には、梁幅方向の領域で剥離が生じているのに対し、劣化ありの D-H1.0-1/2 試験体の場合には、梁軸方向にも剥離領域が見られる。この傾向は、D-H1.0-2 試験体の方が強く現れており、このことが応答変位の増加に大きな影響を与えているものと判断される。

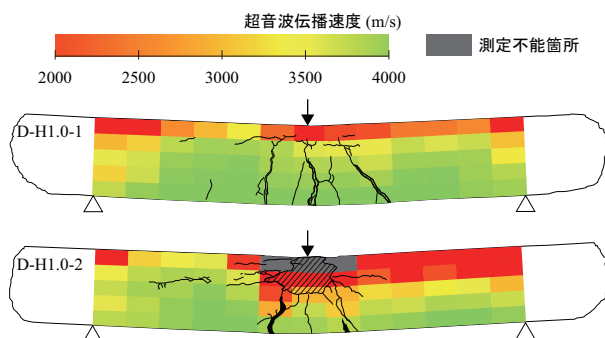
写真－３には、落下高さ $H = 1.0 \text{ m}$ について、ひび割れの進展状況に関する高速度カメラ画像を示している。また、図－７には、参考までにひび割れ図と超音波伝播速度分布を重ねて示している。

写真－３より、劣化なしの N-H1.0 試験体の場合には、経過時間 $t = 2.5 \text{ ms}$ 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。 $t = 5 \text{ ms}$ では、スパン中央部の曲げひび割れの他、その両端の曲げせん断ひび割れが

発生し、 $t = 10 \text{ ms}$ 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、 $t = 20 \text{ ms}$ 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、劣化ありの D-H1.0-1/2 試験体の場合には、 $t = 2.5 \text{ ms}$ において N-H1.0 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、劣化によりコンクリートの弾性係数が低下し衝撃応力の伝播速度が低いためと推察される。その後 D-H1.0-1 試験体の場合には、 $t = 5 \text{ ms}$ で曲げひび割れが開口し、 $t = 10 \text{ ms}$ 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、 $t = 20 \text{ ms}$ 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－７に示すように、左右の劣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。

D-H1.0-2 試験体の場合には、 $t = 5 \text{ ms}$ で三本の曲げひび割れが発生し、 $t = 10, 20 \text{ ms}$ 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－７の超音波伝播速度分布



図－7 ひび割れ性状と超音波伝播速度分布との関係

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。

このように，凍害劣化した RC 梁の場合には劣化なしの場合に比べて応力伝播が遅く，かつ劣化度の高い部分に損傷が集中する傾向にあることが明らかになった。

4.3 残留変位と入力エネルギーの関係

図－8 には，残留変位と入力エネルギーの関係を示している。また，図には文献 6) を参考にして下式 (1) により評価した入力エネルギー E と残留変位 δ_{rs} の関係式もあわせて示している。

$$\delta_{rs} = 0.42 \cdot E/P \quad (1)$$

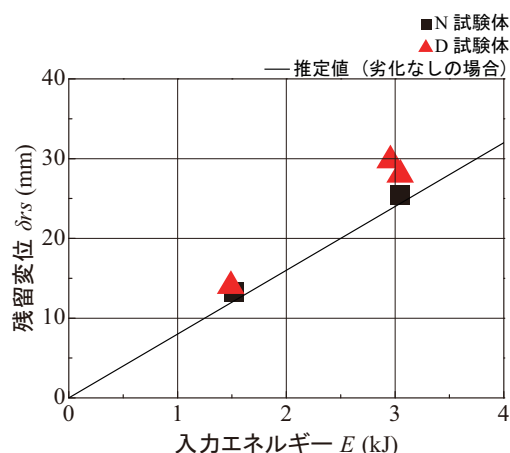
ここに， E ：入力エネルギー (kJ)， P ：梁の静的曲げ耐力 (kN) である。なお，梁の静的曲げ耐力 $P (= 52.5 \text{ kN})$ はコンクリートおよび鉄筋の材料特性値を用いコンクリート標準示方書 4) に準拠して劣化のない場合として算定した。

図より，劣化なしの N 試験体の場合には残留変位は入力エネルギーの増加に伴ってほぼ比例して増加しており，式 (1) と同様の傾向を示していることがわかる。これに対して，D 試験体の場合にはいずれも N 試験体よりも残留変位が大きい。特に D-H1.0-2 は N-H1.0 に比べて 1.2 倍程度大きい。これは，凍害劣化によるスケール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。

5. まとめ

本研究では凍害劣化を有する RC 梁の耐衝撃挙動を検討することを目的に，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グ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。その結果得られた知見は以下の通りである。

- 1) 超音波伝播速度で評価した RC 梁の凍害劣化度分布



図－8 残留変位と入力エネルギーとの関係

は，衝撃载荷実験後のコンクリートの損傷状況と概ね対応する。

- 2) 凍害劣化の有無によらず，各種応答波形の性状は概ね同様である。ただし，本実験に用いた RC 梁のように上縁コンクリートの劣化が著しい RC 梁の場合には，上縁コンクリートの損傷が顕在化し，変位が大きくなる傾向にある。

今後は，本実験に用いた RC 梁の凍害劣化後におけるコンクリートの実圧縮強度や凍害深さを調査するとともに，それらの調査結果を基に曲げ耐力を計算し耐衝撃性の評価を試みる。

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，2012
- 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
- 6) 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