論文 凍結融解作用を受けた RC 梁の耐衝撃挙動

勝見 悠太*1·水田 真紀*2·栗橋 祐介*3·岸 徳光*4

要旨:本研究では,凍結融解作用によるコンクリートの材料特性値の変化が RC 部材の静的および耐衝撃挙動 に及ぼす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凍害劣化させた RC 梁の静的および漸増 繰り返し衝撃実験を行った。その結果,1)凍結融解作用を受けることにより RC 梁の動的耐力が低下すると ともに応答変位が大きくなる,2)凍害劣化した RC 梁は,衝撃荷重を受けることによって内在していた数多 くのひび割れが顕在化する。また,3)小さな入力エネルギーにおいて,健全な RC 梁と比較して上縁コンク リートの圧壊や斜めひび割れが顕在化する傾向にある,こと等が明らかになった。

キーワード: RC 梁,凍結融解作用,衝撃荷重載荷実験,ひび割れ性状

1. はじめに

北海道のような積雪寒冷地における鉄筋コンクリート (RC)構造物は、凍結融解作用に伴う凍害劣化や凍害と塩 害の複合劣化により、外観のみならず構造性能が著しく 低下しているケースが少なくない。そのため、これまで 諸研究機関では、コンクリートの耐凍害性向上法¹⁾や凍害 劣化したコンクリートの補修方法²⁾等に関する検討が行わ れている。また、RC 壁高欄のような橋梁部材は複合劣化 の影響を受けやすい構造物の1つとされ、近年その耐荷性 能と劣化度の関係に着目した研究も進められている³⁾⁻⁶⁾。

また,壁高欄や重要建築物等のように,その耐衝撃性 が重要な性能照査項目となる場合には,凍害劣化程度と 耐衝撃性能の関係を明確にする必要がある。これまで著 者らの研究グループでは,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を確立している ⁷⁾⁻⁹⁾。しかしながら,RC梁の耐衝撃性に及ぼす凍害劣化 の影響に関しては,ほとんど検討されていないのが現状 である。

このような背景より,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,気中凍結水中融解法により凍害劣化させたRC 梁の静的および漸増繰り返し衝撃荷重載荷実験を行った。

2. 実験概要

2.1 コンクリート配合

表-1には、本実験に用い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低くする

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)				スランプ	空気量	
(%)	(%)	С	W	S	G	AE	(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



図-1 試験体概要

ため,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週間として十分に取った後,凍結融解による促 進劣化を行うこととした。

2.2 RC 梁試験体の形状寸法

図-1には、試験体の概要を示している。本実験に用 いた試験体は、断面寸法(幅×高さ)が60mm×100mm、 スパン長が900mmで、上下端鉄筋にD6(SD295)を1本 ずつ配筋した複鉄筋 RC 梁である。なお、スターラップ は配置していない。試験体の設計にあたっては、凍結融 解による劣化度合いが梁の内外部で均等化するように、 断面寸法を小さく設定した。また、表-2に示すように、 RC 梁の耐力設計は曲げ破壊型となるように行った。

2.3 凍結融解による促進劣化法の概要

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。凍結融解1サイクルは、スパン中央の断面中 心部に挿入したセンサーにて測定した RC 梁中心部の温

*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 独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所 研究員 博(工)(正会員)
*3 室蘭工業大学 くらし環境系領域 社会基盤ユニット 講師 博(工)(正会員)
*4 (独)国立高専機構 釧路工業高等専門学校 校長 工博(正会員)

試験 体名	相対 動弾性係数 (%)	載荷方法	コンクリート 圧縮強度 (MPa)	主鉄筋 降伏強度 (MPa)	計算 曲げ耐力 (kN)	計算 せん断耐力 (kN)	せん断 余裕度	破壊形式
N-S	100	静荷重載荷	20.7	- 335	4.1	7.18	1.75	・曲げ破壊型
N-I	100	衝擊荷重載荷	50.7					
D-S	82.6	静荷重載荷	25.7		3.9	6.76	1.73	
D-I	81.3	衝擊荷重載荷	23.1					

表-2 試験体一覧



度が,-18℃に低下した後5℃に上昇するまでとした。1 サイクル当りの所要時間は7時間程度である。なお,RC 梁の支点部が劣化損傷し断面欠損すると,載荷試験を適 切に実施することが困難になる可能性があるため,RC 梁 の両端部から100 mm の範囲は,劣化防止のためにスタイ ロフォームをコーキング材で接着し保護することとした。

2.4 コンクリートの性能評価法の概要

劣化度は, RC 梁の各点における超音波伝播速度を測定 し,下式(1)により相対動弾性係数を求めて評価するこ ととした。

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

ここに, v_d:促進劣化後の超音波伝播速度, v₀:促進劣 化前の超音波伝播速度である。

また,コンクリートの圧縮強度および弾性係数は,RC 梁の側面からコア抜きにより採取した円柱供試体を用い て評価した。円柱供試体の直径および高さは,それぞれ 25 mm および 60 mm である。圧縮強度試験は,汎用の万 能試験機を用いて行った。また,静弾性係数を評価する ため,検長 30 mm の箔ひずみゲージを接着して縦ひずみ を測定した。

2.5 RC 梁の載荷実験の概要

表-2には、本実験に用いた RC 梁の試験体一覧を示 している。試験体数は、凍害劣化の有無 (N:健全,D:劣 化) および載荷方法 (S:静荷重載荷,I:衝撃荷重載荷)を 変化させた全4体である。また、表中の計算曲げ耐力お よび計算せん断耐力は、コンクリートおよび鉄筋の材料 表-3 コンクリート供試体一覧

試験体	コマ釆旦	相対	圧縮強度	静弹性係数	
種類	コノ留与	動弾性係数(%)	(MPa)	(GPa)	
	1		34.3	22.8	
	2		30.8	14.7	
Ν	3	100	26.1	19.3	
	4		26.7	23.1	
	5		35.6	22.5	
Z	区均		30.7	20.5	
	1	81.5	26.0	11.1	
	2	74.8	20.7	7.9	
D	3	86.5	30.1	16.6	
	4	_	26.1	16.0	
2	区均		25.7	10.32	

試験結果を用い、土木学会コンクリート標準示方書¹⁰に 準拠して算出したものである。なお、各材料試験には常 温で数日間放置した試験体を用いている。表より、せん 断余裕度は1.7 程度であることから、静載荷実験におい ては曲げ破壊により終局に至る設計となっている。なお、 せん断余裕度は計算せん断耐力を計算曲げ耐力で除して 算出している。

静載荷実験は,三点載荷法に基づき RC 梁のスパン中 央部に変位制御で鉛直荷重を作用させて行った。載荷速 度は0.12 mm/分とした。また,測定項目は,荷重および 載荷点変位である。衝撃荷重載荷実験は,質量 20 kg,先 端直径 60 mm の鋼製重錘を所定の高さから梁のスパン中 央部に自由落下させて行った。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。

載荷方法は初期および増分落下高さを 100 mm とする 漸増繰り返し載荷法とした。RC 梁の終局は,既往の研究 ⁷⁾⁻⁹⁾と同様に,初期からの合計残留変位が純スパン長 (900 mm)の 2% (18 mm) に達した時点と定義した。なお, N-I および D-I 試験体は,落下高さ H がそれぞれ 600 mm, 500 mm で終局に至ったため,その時点で実験を終了した。

衝撃荷重載荷実験の計測項目は,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にて一括収録している。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,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,各衝撃載荷ステップおよび実 験終了後における試験体のひび割れ性状を観察し,記録 している。

3. 実験結果

3.1 コンクリート試験結果

図-2には、N および D 試験体に関するコンクリー ト供試体の圧縮応力-ひずみ曲線を示している。また、 表-3には、各コンクリート供試体の相対動弾性係数、圧 縮強度および弾性係数を示している。これらの試験結果 は、小径のコア抜きにより採取した円柱コンクリートを 用いて行っているため、ばらつきが大きい傾向にある。 ただし、D 試験体のばらつきが N 試験体の場合よりも大 きい。これは、小径コアであることの他に、劣化度が均 一でないことが影響しているものと推察される。また、 平均圧縮強度および平均静弾性係数は、D 試験体の場合 が N 試験体よりも小さい。このことから、D 試験体の場 合には、凍結融解作用を受けたことにより、材料の強度 特性がばらつくと共に力学性能が低下することが明らか になった。

図-3には、D-S/I 試験体の相対動弾性係数分布を示し ている。図より、両試験体の相対動弾性係数は、測定位 置によりばらつきはあるものの、平均すると概ね 80% 程 度であることが分かる。なお、試験体の上縁側において 相対動弾性係数が著しく低下しているが、これは上縁側 が打設面のためであると推察される。

3.2 静載荷実験

(1)荷重-変位関係

図-4には,静載荷実験結果の荷重-変位関係を示して いる。図より, N-S 試験体の場合には,荷重 *P*=1 kN 程



図-5 静載荷実験終了後のひび割れ分布

度において曲げひび割れの発生により剛性勾配が低下している。その後、P = 3.5 kN程度において主鉄筋が降伏し、剛性勾配がさらに低下している。最終的には、P = 5 kNにおいて上縁コンクリートが圧壊し、変位 $\delta = 15 \text{ mm}$ において荷重が低下して終局に至っている。

これに対し D-S 試験体の場合には,初期勾配が N-S 試 験体の場合よりも小さく,かつ主鉄筋降伏時まで明瞭な 剛性勾配の変化は見られない。これは,凍結融解作用に よって既に RC 梁にひび割れが発生していたためと推察 される。なお,D-S 試験体は N-S 試験体よりも同一荷重 時の変位が大きいものの,主鉄筋降伏および上縁圧壊時 の荷重はほぼ同様である。

(2) ひび割れ分布性状

図-5には、静載荷実験終了後のひび割れ分布を示し ている。図中の赤線および黒線は、それぞれ凍結融解作 用によって発生した既存の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-S 試験体の 場合には、載荷点近傍において曲げひび割れが発生し大 きく開口している。これに対し、D-S 試験体の場合には、 載荷点近傍における曲げひび割れの他、上縁近傍におい ては斜めひび割れも発生している。

3.3 衝撃荷重載荷実験

(1) 各種応答波形

図-6には、衝撃荷重載荷実験における(a)重錘衝撃力, (b)支点反力,(c)載荷点変位の時刻歴応答波形を示して



いる。図-6(a)より,重錘衝撃力波形において,その最 大振幅は試験体の種類によらず落下高さHに対応して大 きくなっていることが分かる。また,D-I 試験体が終局 に至るH = 500 nmより低い落下高さの場合には,両試 験体ともに類似の波形性状を示している。すなわち,重 錘衝突後から波形が急激に立ち上がり継続時間が短い第 1 波と,振幅が小さい第2波により構成されていること が分かる。なお,第2波の立ち上がりは,H = 300 nmを 除き N-I 試験体よりも緩やかになっている。また,D-I 試 験体の最大振幅は,H = 500 nmの場合において N-I 試験 体に比較して 50% 小さい。これは, D-I 試験体の上縁コ ンクリートが著しく損傷したことによるものである。

図-6(b)より,支点反力波形は,正弦半波状の第1波 に高周波成分が合成された波形性状を示していることが 分かる。また,最大振幅および主波動の継続時間は,重 錘の落下高さに対応して増加していることが分かる。D-I 試験体の最大振幅は N-I 試験体の場合より小さく,主波 動形継続時間は N-I 試験体よりも長い。これは, D-I 試験 体の曲げ剛性が N-I 試験体に比べて小さいことによるも のと推察される。



図-8 衝撃荷重載荷実験終了後のひび割れ分布

図-6(c)より,載荷点変位波形は,振幅の大きい正弦 半波が励起した後,減衰自由振動状態に至っていること が分かる。最大振幅は重錘の落下高さに対応して大きく なり,同様に第1波の継続時間も長くなることが分かる。 また,各落下高さに対する第1波目の継続時間は,支点 反力波形の主波動継続時間とほぼ対応している。

(2) 各種応答値と落下高さの関係

図-7には, (a) 重錘衝撃力, (b) 支点反力および (c) 載 荷点変位の最大値と落下高さ H との関係を示している。

図-7(a)より,重錘衝撃力は落下高さ*H*の増加に対応 して増加し, N-I および D-I 試験体でそれぞれ *H* = 300 mm および 500 mm で最大値を示した後,低下しているこ とが分かる。

図-7(b)より,支点反力は落下高さHに対応して単調 に増加していることが分かる。また,N-I 試験体の支点 反力はD-I 試験体の場合よりも大きい。これは,N-I 試験 体の剛性がD-I 試験体の場合より大きくなっているため, 動的耐力が大きくなっていることを暗示している。

図-7(c)より,載荷点変位は,落下高さHの増加に対応して増加していることが分かる。また,D-I 試験体の変位が N-I 試験体の場合よりも大きい。これは,D-I 試験体の剛性が凍害劣化により低下していることを暗示している。なお,N-I および D-I 試験体は共に H = 500 mm 以降で載荷点変位の増加勾配が大きくなっている。これは,後述のひび割れ性状に見られるように,剛性低下が進行し載荷点部が角折れ状態に至る傾向を示したことによるものと考えられる。

(3) ひび割れ分布性状

図-8には、衝撃荷重載荷実験終了後におけるひび割 れ分布を示している。図中の赤線および黒線は、それぞ れ凍結融解作用によって発生した既存のひび割れおよび 載荷によって発生したひび割れを示している。

図より、N-I 試験体の場合は、H = 100 mmの実験終了後にスパン中央付近に曲げひび割れが数本発生し、その後H = 300 mmの実験終了後に曲げひび割れが試験体上面に到達していることが分かる。その後、落下高さHの増加に伴って、スパン中央部における上縁コンクリートの圧壊や、曲げひび割れ幅の拡大および下縁コンクリートの剥離が進展し、H = 600 mmにおいて終局に至っている。

D-I 試験体の場合は, H = 100 mm において載荷点直下 の曲げおよび斜めひび割れの他に,梁全域に渡って微細 なひび割れが多数発生している。これは,凍結融解作用 により相対動弾性係数が低下した箇所において,内在し ていたひび割れが衝撃荷重の作用によって顕在化したこ とによるものと考えられる。その後,H = 300 mm におい てスパン中央部付近に発生した下縁からのひび割れが試 験体上面に達し,かつ上端コンクリートの剥落が発生し ている。また,左側スパンには斜めひび割れが発生し開 口している状況が見られる。その後,H = 500 mm におい て,終局に至るまで上縁コンクリートが著しく圧壊する と共に,曲げひび割れの他,斜めひび割れが開口してい ることが分かる。

(4) 支点反力と載荷点変位の関係

図-9には、支点反力-載荷点変位関係の履歴曲線を 比較して示している。図より、N-I, D-I 試験体共に、落下 高さ H の増加に対応して大きなループ形状を示す傾向に あることが分かる。このことから、入力エネルギーが梁 の塑性変形により吸収されていることが理解される。

また、N-I, D-I 試験体の履歴曲線を比較すると、H = 100 mmの実験終了後までは両試験体共に類似の性状を示していることが分かる。しかしながら、H = 200 mmの



図-9 支点反力-載荷点変位履歴曲線

実験以降では, D-I 試験体の場合が N-I 試験体の場合よ りも支点反力が小さく,かつ載荷点変位が大きくなって いる。また,このような傾向は落下高さ H が大きい場合 ほど顕著である。これは, D-I 試験体の場合には凍害劣 化によって梁の曲げ剛性が低下し,漸増繰り返し載荷に よってその傾向がより明確に現れたことによるものと考 えられる。なお,このような傾向は,前述のひび割れ性 状と対応している。

4. まとめ

本研究では, RC 部材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,気中凍結水中融解法により凍害劣化させた RC 梁の静載荷および 漸増繰り返し衝撃荷重載荷実験を行った。本研究により 得られた知見をまとめると,以下の通りである。

- 1) 凍結融解作用を受けることによって, RC 梁の動的 耐力は低下すると共に,応答変位も大きくなる。
- 2) 凍害劣化した RC 梁は、衝撃荷重を受けることによっ て内在していた数多くのひび割れが顕在化する。ま た、入力エネルギーが小さい場合には、健全な RC 梁と比較して上縁コンクリートの圧壊や斜めひび割 れが顕在化する傾向にある。

今後は,さらに劣化度合が著しい場合や凍害劣化を受けたコンクリートの材料特性値と,静載荷時や衝撃荷重 載荷時における耐荷力との関係について検討を進める予 定である。

参考文献

 吉田行,嶋田久俊,水田真紀,田口史雄:耐凍害性 への養生と評価手法の検討,コンクリート工学年次 論文集, Vol.35, No.1, pp.943-948, 2013.7

- 田代恭平,佐藤あゆみ,新家一秀,六郷恵哲:凍害を 受けたコンクリートを対象とした再劣化しにくい補 修方法の提案,コンクリート工学年次論文集,Vol.35, No.1, pp.907-912, 2013.7
- 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, 2013.7
- 4) 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
- 5) 内藤英樹,山洞晃一,古賀秀幸,鈴木基行:凍結融解 作用を受けた複鉄筋のない RC はりのせん断耐力,コ ンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.916-921, 2012.7
- 6) 水田真紀,野々村佳哲,嶋田久俊,三原慎弘,島多昭典,太田哲司:積雪寒冷地の壁高欄が受ける凍害と塩害の複合劣化程度の評価,独立行政法人寒地土木研究所月報,No.739, pp.2-10, 2014.12
- 7) 岸徳光,三上浩,松岡健一,安藤智啓:静載荷時に曲 げ破壊が卓越する RC 梁の耐衝撃設計法に関する一提 案,土木学会論文集,No.647/I-51,pp.177-190,2000.4
- 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
- N.Kishi and H. Mikami : Empirical formulas for designing reinforced concrete beams under impact loading, ACI Structural Journal, Vol.109, No.4, 2012
- 10) 土木学会:コンクリート標準示方書[規準編],土木学会,2012