

基盤 11 疲労と凍害の複合劣化を受けた RC はりの耐荷力評価に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：耐寒材料チーム

研究担当者：林田 宏

島多 昭典

【要旨】

劣化順序や劣化程度を変数とした円柱供試体を用いて、複合劣化を受けたコンクリートの力学特性の検討を行った結果、超音波速度から複合劣化コンクリートの力学特性を評価できることを明らかにした。また、劣化種類を変えたRCはりの静的載荷試験データを用いて耐荷力に関する検討を行った結果、引張鉄筋の降伏が先行する破壊形態では、既往の耐力算定式に圧縮域の強度低下を考慮することにより、耐荷力が評価できることなどを明らかにした。さらに、凍害を受けたコンクリートの圧縮応力下における応力ひずみモデルを提案した。

キーワード：疲労、凍害、複合劣化、RC はり、耐荷力

1. 非破壊試験等を用いた凍結融解と疲労試験による劣化後の材料物性の把握などに関する検討

1. 1 目的

気象条件などの厳しい積雪寒冷地における道路橋の RC 床版などは車両による疲労単独劣化だけではなく、実際には、疲労と凍害との複合劣化を受けていることが多い。

疲労と凍害の複合劣化を受けた道路橋の RC 床版の疲労耐久性に関しては、輪荷重走行試験などにより、疲労単独の場合と比べて、疲労寿命が短くなることなどが報告されている¹⁾。しかし、疲労と凍害の複合劣化に伴う道路橋の RC 床版などの構造性能の変化や力学特性評価に関する検討はほとんど無く、現段階では十分に明らかになっていない。

そこで、疲労と凍害の複合劣化が RC 構造物などの構造性能の変化に与える影響について検討を行う際に必要となる疲労と凍害の複合劣化を受けたコンクリートの力学特性とその評価方法について検討を行った。

1. 2 実験概要

1. 2. 1 供試体

供試体はφ100×200mm の円柱を用いた。配合表を表-1.1 に示す。セメントには普通ポルトランドセメントを、骨材には粗骨材最大寸法 20mm の碎石を用いた。打設後 60 日まで水中養生を行った後、後述する各試験を開始した。なお、打設後 60 日目のコンクリートの圧縮強度は 29.6MPa である。なお、供試体は後述する実験変数毎に各 3 体ずつ用意した。

実験変数は劣化種類と劣化程度である。まず、劣化

表-1.1 配合表

単位水量 (kg/m ³)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	空気量 (%)
184	61	47.6	2.0

種類については、「疲労のみ」(以下、「H シリーズ」)、「凍害のみ」(以下、「T シリーズ」)、「疲労と凍害の複合劣化」の 3 つに大別し、複合劣化に関しては、疲労を先行して与えた後、凍害を与えたシリーズ (以下、「HT シリーズ」) と、凍害を先行して与えた後、疲労を与えたシリーズ (以下、「TH シリーズ」) の 2 種類を設定した。

次に、劣化程度については、「疲労」は 3 水準、「凍害」は 2 水準を設定し、複合劣化では、「疲労」と「凍害」の劣化程度をそれぞれ組合せた。表-1.2 に供試体の名称と実験変数が示されている。供試体名の H は疲労を意味し、H の後の数字は、疲労寿命に対する繰返し載荷回数比を意味する。また、T は凍害を意味し、T の後の数字は、凍結融解回数を意味する。双方の数字とも、数字が大きいくほど、劣化程度が大きいくことを意味する。なお、劣化を与えていない基準供試体を供試体 N と呼ぶ。

1. 2. 2 試験方法

(1) 繰返し載荷試験

繰返し載荷試験は、周波数 5Hz、正弦波形の片振り、最小、最大応力比を 60 日目の圧縮強度の 8%、68% とし、後述する所定の繰返し回数比に達するまで、アクチュエータを用いて、繰返し載荷を行った。なお、

最大応力比の設定に当たっては、凍害後に疲労を与える際、載荷回数 1 回で破壊しない範囲でなるべく高い値を設定し、最小応力比の設定に当たっては、JSTM C 7104 を参考に、圧縮強度の 10%に近い値を設定した。また、実験変数は繰返し回数比であり、3 水準の繰返し回数比を設定した。繰返し回数比の設定に当たっては、予備試験にて、疲労破壊までの繰返し回数－ひずみ関係を求め、繰返し載荷試験中の最大ひずみが、疲労寿命の概ね 20、50、80%に対応するひずみに達するまで、繰返し載荷を行った。なお、TH シリーズについても、所定の凍害劣化を受けた供試体の疲労破壊までの繰返し回数－ひずみ関係を求めて、設定した。

(2) 凍結融解試験

凍結融解試験は、JIS A 1148 A 法に準じて行った。実験変数は凍結融解回数であり、相対動弾性係数が概ね 60、20%となるように、12、24 回の 2 水準を設定した。

1. 2. 3 測定項目

(1) 超音波伝播速度

劣化終了後に、透過法で円柱軸方向の超音波伝播速度（以下、「超音波速度」）を測定した。なお、超音波速度は含水状況によって、速度が変化するため²⁾、含水状況がなるべく同じになるように、測定は表乾状態で行った。具体的には、H、TH シリーズは、繰返し載荷終了後、供試体を 3 日間水没させた後、表乾状態にしてから、超音波速度の測定を行った。また、T、HT シリーズについても、凍結融解終了後、水槽から取り出した後、表乾状態にしてから、測定を行った。また、測定に用いたセンサーは周波数 28kHz、電圧 1KV、センサー径はφ20mm である。

(2) 圧縮強度、静弾性係数

JIS A 1108 に準じて、圧縮強度試験を行い、圧縮強度を測定した。また、コンプレッソメータにより、荷重の計測とともに載荷中のひずみの計測を行い、JIS A 1149 に準じて、静弾性係数を算出した。

1. 3 実験結果および考察

1. 3. 1 超音波速度を用いた力学特性評価に関する検討

(1) 超音波速度と力学特性との関係

図－1.1 に示す超音波速度－圧縮強度関係および図－1.2 に示す超音波速度－静弾性係数関係に着目すると、ばらつきの大小はあるものの、劣化種類ごとに超音波速度－各力学特性関係は、ある程度の相関を示しており、劣化種類ごとに超音波速度から力学特性を求める推定式を定めることはできる。しかし、劣化種類ごとの超音波速度－各力学特性関係が分散して分布し

表-1.2 供試体一覧

シリーズ	名称	回数比(%)	凍結融解(回)
Hシリーズ 疲労のみ	H20	20	0
	H50	50	0
	H80	80	0
Tシリーズ 凍害のみ	T12	0	12
	T24	0	24
HTシリーズ 疲労 +凍害	H20T12	20	12
	H50T12	50	12
	H80T12	80	12
	H20T24	20	24
	H50T24	50	24
THシリーズ 凍害 +疲労	H80T24	80	24
	T12H20	20	12
	T12H50	50	12
	T12H80	80	12
	T24H20	20	24
	T24H50	50	24
健全	T24H80	80	24
	N	0	0

ていることから、推定式を 1 本化することは、このままでは難しい。

(2) 圧縮強度と静弾性係数との関係

劣化を受けていない健全なコンクリートの場合、圧縮強度と静弾性係数には相関があることから、圧縮強度を用いた推定式（式(1.1)）が土木学会のコンクリート標準示方書³⁾に示されている。

$$E_c = \left(2.2 + \frac{f'_c - 18}{20} \right) \times 10^4 \quad (1.1)$$

ただし、 $E_c(N/mm^2)$ ：静弾性係数、 $f'_c(N/mm^2)$ ：圧縮強度

そこで、疲労と凍害の複合劣化を受けたコンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係と劣化を受けていない健全なコンクリートの関係との比較を行った。図－1.3 は疲労と凍害の複合劣化を受けたコンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係を示している。また、図には、健全なコンクリートにおける既往の推定式（以下、「推定式」）も併せて示している。

図－1.3 に示すとおり、いずれのシリーズも既往の推定式とは異なる傾向を示しているが、ばらつきの大小はあるものの、シリーズ毎にまとまった範囲に分布する傾向が見られた。

個別に見ていくと、H シリーズについては、概ね推定式の下に平行に分布する傾向にある。すなわち、同じ圧縮強度に対する静弾性係数は低下しているが、その低下程度は大きくない。

+ H20	× H50	× H80	- T12	- T24
□ H20T12	■ H50T12	■ H80T12	◇ H20T24	◇ H50T24
◆ H80T24	△ T12H20	△ T12H50	▲ T12H80	○ T24H20
● T24H50	● T24H80	★ N		

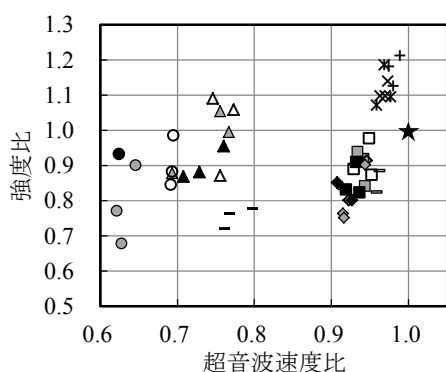


図-1.1 超音波速度-圧縮強度関係

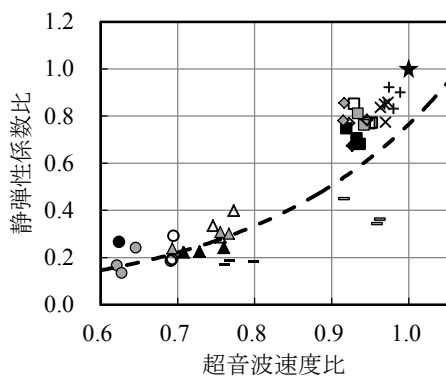


図-1.2 超音波速度-静弾性係数関係

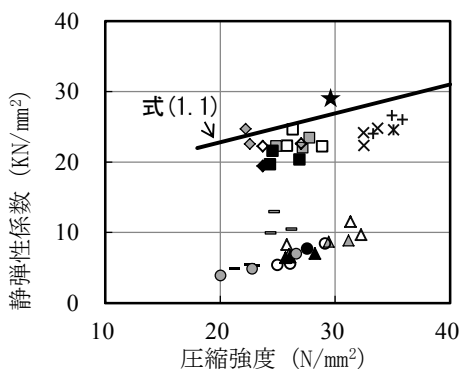


図-1.3 圧縮強度-静弾性係数関係

T シリーズについては、推定式に比べ、傾きが大きくなるような分布となっている。これは、既往の研究⁴⁾でも報告されているとおり、凍結融解作用による圧縮強度の低下よりも、静弾性係数の低下の方が大きくなるためである。

HT シリーズについては、概ね推定式の下に平行に分布する傾向や静弾性係数の低下程度が大きくない点

は、H シリーズと同様であるが、H シリーズに比べ、左にシフトした位置に分布しており、圧縮強度が大きく低下している。

TH シリーズについては、H シリーズや HT シリーズと同様に、概ね推定式に平行に分布する傾向にあるが、他の劣化に比べ、最も下の位置に分布している。すなわち、同じ圧縮強度で比較すると、TH シリーズの静弾性係数は健全である推定式に対して、低下程度が非常に大きい。

(3) 超音波速度による複合劣化コンクリートの力学特性評価に関する検討

単独劣化の場合、前述したように、劣化種類ごとに、ある程度の相関があることから、劣化種類ごとの推定式を用いることによって、力学特性評価を行うことができる。

一方、複合劣化の場合、今回の実験のように、劣化順番が分かっていたら、劣化種類ごとの推定式により、力学特性評価を行うことができるが、実構造物では、疲労と凍害が交互または同時に作用するため、超音波速度により、複合劣化を受けたコンクリートの力学特性評価を行うためには、推定式を 1 本化する必要がある。

まず、図-1.2 に示すように、圧縮強度と比べ、超音波速度との相関が比較的高いと考えられる超音波速度-静弾性係数関係に着目して、1 本化の検討を行った結果、複合劣化を受けたコンクリートの静弾性係数の推定式は図-1.2 の点線のように定めることができる。なお、推定式の 1 本化に当たり、以下の理由により、HT シリーズを除外した。詳細については 1.3.2 (2) で後述するが、HT シリーズの凍結融解によるひずみ変化は、繰返し載荷時のひずみ変化の範囲内であり、HT シリーズの静弾性係数は、T シリーズの静弾性係数に比べてあまり低下しなかった。しかし、実際には、疲労と凍害が交互または同時に作用するため、より値の小さい TH シリーズに近づいていくことが想定されたためである。

次に、複合劣化の圧縮強度の推定方法について検討する。超音波速度から静弾性係数が推定できたとすると、図-1.3 に示す圧縮強度と静弾性係数の関係を用いて、圧縮強度を推定する方法が考えられる。複合劣化の圧縮強度と静弾性係数の関係は、前述したように、実際には、疲労と凍害が交互または同時に作用するため、HT シリーズではなく、より値の小さい TH シリーズに近いと考えられる。しかし、詳細については 1.3.2 (1) で後述するが、繰返し載荷によるひずみ硬化現象

のため、凍害後に疲労を与えた TH シリーズの圧縮強度は、凍害のみを与えた T シリーズの圧縮強度よりも増加した。したがって、図-1.3 に示す圧縮強度と静弾性係数の関係を用いて、静弾性係数から、より安全側に圧縮強度を推定する場合は、ひずみ硬化現象による強度増加の影響を除外し、より値の小さい凍害単独劣化の推定式を用いることが望ましいと考えられる。

1. 3. 2 疲労と凍害の複合劣化がコンクリートの力学特性に与える影響

凍結融解作用や繰返し載荷作用に伴う力学特性等の推移について検討するため、図-1.1、1.2 のデータを用いて整理した超音波速度の推移を図-1.4 に、圧縮強度の推移を図-1.5 に、静弾性係数の推移を図-1.6 に示す。

各図の(a)は、疲労が凍害の進行に与える影響について検討するため、T シリーズと HT シリーズを記載しており、「H20T」は HT シリーズの回数比 20%、「H80T」は HT シリーズの回数比 80%のデータを用いている。また、(b)は、凍害が疲労の進行に与える影響について検討するため、H シリーズと TH シリーズを記載しており、「T12H」は TH シリーズの凍結融解回数 12 回、「T24H」は TH シリーズの凍結融解回数 24 回のデータを用いている。なお、各プロットの力学特性等の値は、表-1.2 に示す劣化水準が同じ 3 体の供試体の平均値を用いている。

(1) 力学特性等の推移

a) 超音波速度

図-1.4(a)に着目すると、T シリーズについては、凍結融解回数の増加に伴い、超音波速度が大きく低下している。一方、HT シリーズについては、T シリーズの変化に比べ、超音波速度の低下は小さい。同じ凍結融解回数で超音波速度の値を比較すると、凍結融解回数 12 回では、HT シリーズと T シリーズは、ほぼ同じ程度であるが、24 回では、HT シリーズが T シリーズよりも高い。また、「H80T」と「H20T」とを比較すると、いずれの凍結融解回数においても、「H80T」は「H20T」に比べて、低くなっているが、その差は大きくない。

また、図-1.4(b)に着目すると、H シリーズについては、繰返し載荷回数比（以下、「回数比」）の増加に伴い、超音波速度が低下している。一方、TH シリーズについては、回数比の増加に伴い、「T12H」は回数比 20%まで、「T24H」は回数比 50%まで、超音波速度が大きく低下し、これ以降の低下は非常に小さい。同じ回数比で超音波速度の値を比較すると、いずれの回

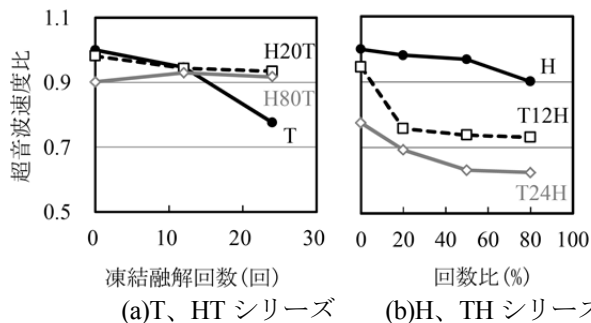


図-1.4 超音波速度の推移

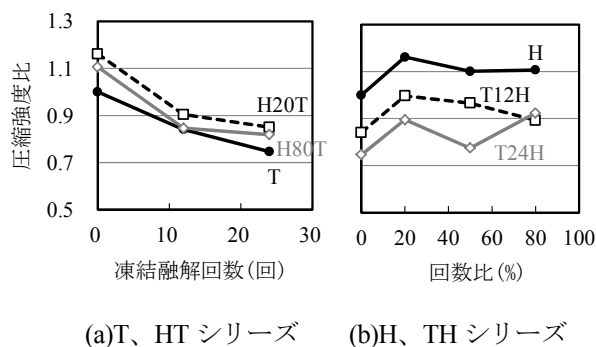


図-1.5 圧縮強度の推移

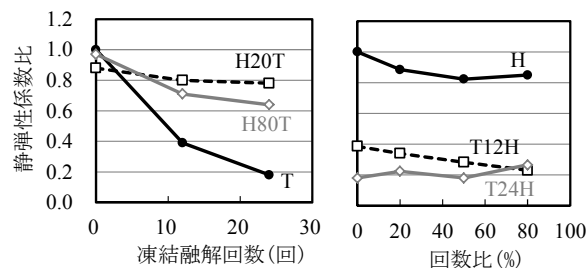


図-1.6 静弾性係数の推移

数比においても、H シリーズ、「T12H」、「T24H」の順に超音波速度が低くなっている。

b) 圧縮強度

図-1.5(a)に着目すると、T シリーズについては、凍結融解回数の増加に伴い、圧縮強度が低下している。一方、HT シリーズについては、凍結融解回数 12 回まで、圧縮強度が大きく低下し、その後は緩やかに低下している。同じ凍結融解回数で圧縮強度の値を比較すると、いずれの凍結融解回数においても、HT シリーズが T シリーズに比べて、同等以上の値になっている。また、「H80T」と「H20T」とを比較すると、超音波速度の場合と同様に、いずれの回数比においても、「H80T」は「H20T」に比べて、低くなっている。

また、図-1.5(b)に着目すると、H シリーズについては、回数比 20%の圧縮強度は、回数比 0%である健全

な供試体 N の圧縮強度よりも増加し、以降は、回数比の増加に伴い、圧縮強度は低下する傾向にあるが、いずれの回数比においても、健全な供試体 N の圧縮強度を上回っている。H シリーズの圧縮強度が健全な供試体 N の圧縮強度を上回っている理由として、一軸圧縮による繰返し载荷では、疲労限界以下の荷重履歴を受けたコンクリートは、金属材料のひずみ硬化に類似した現象が起るため、その静的強度が高くなることが報告されており⁵⁾、今回もこの現象によって、H シリーズの圧縮強度が増加したものと考えられる。一方、「T12H」についても、H シリーズと同様に、回数比 20%の圧縮強度は、回数比 0% (供試体 T12) の圧縮強度よりも増加し、以降は、回数比の増加に伴い、圧縮強度は低下する傾向にあるが、いずれの回数比においても、回数比 0%の圧縮強度を上回っている。また、「T24H」についても、H シリーズや「T12H」と同様に、回数比 20%の圧縮強度は、回数比 0%(供試体 T24) の圧縮強度よりも増加し、回数比 50%まで低下する傾向を示している。しかし、回数比 80%の圧縮強度は回数比 50%よりも増加している。これは、回数比 80%のデータの基となる供試体 T24H80 の本数が 1 本だけであり、このデータが平均的な値よりも高くなっている可能性があるためである。なお、供試体 T24H80 の本数が 1 本となっているのは、先行して与えた凍結融解作用により大きく低下した疲労寿命の 80%の繰返し载荷を与える際に、2 本は破壊に至ったためである。また、同じ回数比で圧縮強度の値を比較すると、超音波速度の場合と同様に、いずれの回数比においても、概ね H シリーズ、「T12H」、「T24H」の順に圧縮強度が低くなっている。

c) 静弾性係数

図-1.6(a)に着目すると T シリーズについては、凍結融解回数の増加に伴い、静弾性係数が大きく低下している。一方、HT シリーズについては、T シリーズの変化に比べ、静弾性係数の低下は小さい。同じ凍結融解回数で静弾性係数の値を比較すると、いずれの凍結融解回数においても、HT シリーズが T シリーズに比べて、高くなっている。また、「H80T」と「H20T」とを比較すると、超音波速度の場合と同様に、いずれの回数比においても、「H80T」は「H20T」に比べて、低くなっている。なお、凍結融解回数 0 回 (凍害なし) については、上記の傾向は当てはまらない。これについては、図-1.6(b) の H シリーズで後述する。

また、図-1.6(b)に着目すると、H シリーズについては、回数比の増加に伴い、静弾性係数は回数比 50%

まで低下しているが、その後は、ほとんど変化がない。一方、「T12H」は、回数比の増加に伴い、静弾性係数が非常に緩やかに低下している。また、「T24H」は、回数比 80%の静弾性係数が、圧縮強度と同様に、平均的な値よりも高くなっている可能性があるため、回数比 50%よりも増加しているが、その他の回数比では、回数比が増加しても、ほとんど変化はない。同じ回数比で静弾性係数の値を比較すると、いずれの回数比においても、超音波速度の場合と同様に、概ね H シリーズ、「T12H」、「T24H」の順に静弾性係数が低くなっている。

(2) 疲労が凍害の進行に与える影響

前述のように、HT シリーズについては、凍結融解回数の増加に伴い、圧縮強度は、T シリーズと同様に低下したが、超音波速度と静弾性係数はあまり低下しなかった。この理由として、以下のようなことが考えられる。

図-1.7 は、T シリーズと HT シリーズのコンクリートについて、凍結融解回数 6 サイクルまでの各サイクル終了時のひずみの推移を示している。この図から、T シリーズは凍結融解回数の増加とともに、膨張しているが、HT シリーズは T シリーズのような膨張が見られず、「H20T」については、6 サイクル終了時には、逆に収縮している。この現象について、詳細に検討するため、図-1.8 に示す 6 サイクル時の凍結融解中の温度-ひずみ関係に着目すると、T シリーズは、温度がマイナスの領域で、大きく膨張し、凍結融解終了後も膨張方向の残留ひずみとなっている。一方、HT シリーズは、温度がマイナスの領域で収縮し、凍結融解終了後も収縮方向の残留ひずみとなっている。なお、温度がマイナスの領域での最大収縮ひずみは「H80T」の方が「H20T」よりも大きくなっている。このように、温度がマイナスの領域で、収縮挙動を示すのは、AE コンクリートで見られる現象である。AE コンクリートにおいて、温度がマイナスの領域で、収縮挙動を示

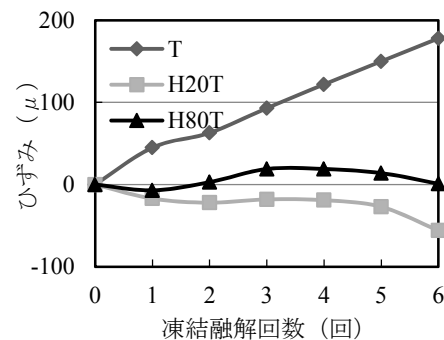


図-1.7 各サイクル終了時のひずみの推移

すのは、空隙に生成された氷晶がその周囲の組織から水分を吸収し、移動した水分の量だけコンクリートが収縮するため⁶⁾とされている。このことから、HT シリーズについては、疲労によって生じた微細ひび割れが、AE コンクリートの空隙の役割を果たしている可能性がある。

また、繰返し载荷時のひずみの推移については、繰返し载荷中の最大ひずみと载荷終了後の残留ひずみの差が、「H80T」では約 1000 μ 、「H20T」では約 900 μ であった。これに対して、凍結融解作用による収縮ひずみの振幅は、6 サイクル時において、「H80T」では約 130 μ 、「H20T」では約 90 μ であり、繰返し载荷時の最大ひずみと载荷終了後の残留ひずみの差の範囲内であった。すなわち、凍結融解作用による変形は、先行して与えた繰返し载荷によって生じた変形の範囲内であり、かつ、変形量も最大ひずみと载荷終了後の残留ひずみの差の 1 割程度と小さいため、凍結融解作用による外力の影響は小さいと考えられる。

このため、HT シリーズについては、凍結融解作用を受けても、疲労によって生じた微細ひび割れの幅や密度などが、あまり進展しなかったため、微細ひび割れの影響が大きいと考えられる超音波速度や静弾性係数は、凍結融解作用であまり低下しなかったものと考えられる。

(3) 凍害が疲労の進行に与える影響

前述のように、TH シリーズについては、圧縮強度と静弾性係数が、凍害を与えた時点で、すでに大きく低下しており、疲労による低下の程度は小さい。また、超音波速度についても、回数比が 20%と小さい段階で大きく低下し、その後は回数比が増加しても、低下の程度は小さい。すなわち、TH シリーズについては、先行する凍害の劣化程度が、力学特性等に与える影響は大きく、凍害が与える影響と比較すると、疲労の影響は小さい。

ただし、先行して与えた凍害が疲労耐久性（疲労寿命）に与える影響は非常に大きい。図-1.9 は、先行して与えた凍害の劣化程度を表す相対動弾性係数毎の疲労寿命（対数値）を示している。相対動弾性係数 60%（凍結融解 12 回）の疲労寿命（対数値）は 4.17 であり、健全である相対動弾性係数 100%の疲労寿命（対数値）4.38 に比べ、若干低下した程度であるが、相対動弾性係数 20%（凍結融解 24 回）の疲労寿命（対数値）は 3.24 と大きく低下している。

このように、先行して与えた凍害により疲労耐久性が低下する理由として、以下のようなことが考えられ

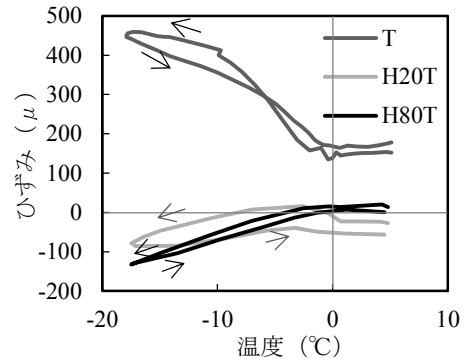


図-1.8 温度-ひずみ関係 (6 サイクル時)

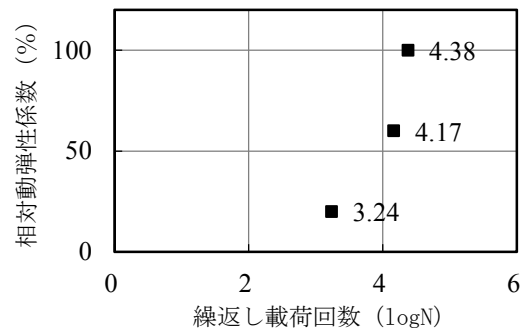


図-1.9 相対動弾性係数と疲労寿命

る。疲労破壊とは、コンクリート内部に発生したひび割れが、繰返し応力を受けることにより、漸次成長伝播し、ついには破壊に至る現象のこと⁵⁾である。しかし、先行して凍害を受けたコンクリートは、繰返し応力を受ける前から、凍結融解作用による微細ひび割れが生じた状態になっており、凍害劣化程度が大きいほど（相対動弾性係数が低いほど）、微細ひび割れ密度は高くなっている。このため、先行して凍害を受けたコンクリートが繰返し応力を受けると、凍害による微細ひび割れを介して、ひび割れが急速に伝播することとなるため、疲労寿命が短くなったと考えられる。

1.4 まとめ

劣化順序や劣化程度を変数とした円柱供試体を用いて、疲労と凍害の複合劣化がコンクリートの力学特性等に与える影響や超音波速度を用いた力学特性評価に関する検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 疲労と凍害の複合劣化を受けたコンクリートの力学特性の評価については、相関が比較的高い超音波速度-静弾性係数関係を利用して、超音波速度から静弾性係数を推定できる可能性がある。また、圧縮強度については、圧縮強度と静弾性係数との関係を用いて推定することが考えられる

基盤 11 疲労と凍害の複合劣化を受けた RC はりの耐荷力評価に関する研究

が、複合劣化の圧縮強度は、ひずみ硬化現象により、凍害単独劣化に比べて強度が増加していることから、安全側に圧縮強度を推定する場合は、より値の小さい凍害単独劣化の推定式を用いることが望ましい。

- 2) 疲労後に凍害を与えた複合劣化コンクリートについては、凍結融解回数の増加に伴い、圧縮強度は、凍害単独劣化と同様に低下したが、超音波速度と静弾性係数はあまり低下しなかった。この理由として、疲労によって生じた微細ひび割れが、AE コンクリートの空隙の役割を果たしている可能性があること、また、凍結融解作用による収縮ひずみの振幅が繰返し載荷時の最大ひずみと載荷終了後の残留ひずみの差の範囲内であることなどが考えられる。
- 3) 凍害後に疲労を与えた複合劣化コンクリートについては、圧縮強度と静弾性係数が、凍害を与えた時点で、すでに大きく低下しており、疲労による低下の程度は小さかった。また、超音波速度についても、回数比が小さい段階で大きく低下し、その後は回数比が増加しても、低下の程度は小さかった。ただし、先行して与えた凍害が疲労寿命に与える影響は非常に大きかった。この理由として、先行して凍害を受けたコンクリートが繰返し応力を受けると、凍害による微細ひび割れを介して、ひび割れが急速に伝播することとなるため、疲労寿命が短くなることなどが考えられる。

2. 凍結融解と疲労の組み合わせ、劣化程度や範囲等を変えた RC はりの耐荷力試験に関する検討および耐荷力評価技術の提案

2. 1 目的

積雪寒冷地の道路橋の RC 床版は、疲労と凍害の複合劣化を受け、陥没などが生じ、安全性に深刻な影響を受けている。疲労と凍害の複合劣化を受けた道路橋の RC 床版に関する検討として、輪荷重走行試験などにより、疲労単独劣化の場合と比べて、疲労寿命が短くなることなどが報告されている⁷⁾。これらの知見に関しては、新設の RC 床版を対象として、環境作用を考慮したより合理的な耐疲労性の評価方法への反映が期待される。一方で、実際に供用されている既存の RC 床版の安全性を確認するには、劣化状況に応じた残存耐荷力などの評価が必要である。しかし、疲労と凍害の複合劣化を受けた RC 床版について、耐荷力の変化に関する検討はほとんど無く、現段階では十分に明ら

かになっていない。一方、耐寒材料チームでは、前中期計画において、凍害を受けた鉄筋コンクリート部材の構造性能評価手法の検討を行った。参考文献⁸⁾では、劣化域の位置や劣化程度が耐荷力や破壊形式に影響を及ぼすことを実験的に明らかにした。

本研究では、「凍害単独劣化」の検討を発展させ、RC 床版で問題が深刻化している「疲労と凍害の複合劣化」に伴う耐荷力の変化について検討するため、RC はりを用いた静的載荷試験により、耐荷力変化に関する基礎的な検討を行った。

2. 2 実験概要

2. 2. 1 供試体

供試体は RC 床版を模擬したせん断スパン比や鉄筋比であることが望ましい。しかし、凍結融解試験装置にサイズの制約があるため、RC 床版を模擬した供試体の製作はできなかった。そこで、本研究では、すでに得られている「凍害単独劣化」の構造性能の変化に関する知見を生かすため、参考文献⁸⁾と同じ RC はりを用意することとした。図-2.1 に供試体の形状寸法および配筋状況を示す。供試体は、断面寸法（はり幅×はり高）が 200×200mm、スパン長が 1200mm であり、主鉄筋に D13 を 2 本配置した曲げ破壊型の RC はりである。また、早期に凍害劣化を顕在化させるために、コンクリートに AE 剤を使用せず、水セメント比を 65%と大きめに設定した。なお、セメントには普通ポルトランドセメントを、骨材には粗骨材最大寸法 20mm の砕石を用いた。実験変数は劣化種類であり、「疲労単独劣化」、「凍害単独劣化」、「疲労後に凍害を与えた複合劣化」の 3 種類とした。表-2.1 に供試体名称と実験結果を示す。なお、供試体名の H は疲労を、

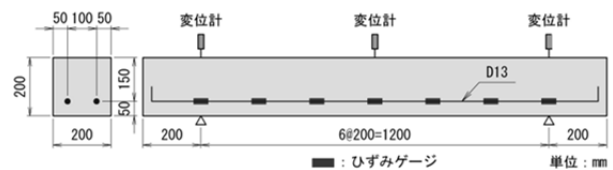


図-2.1 供試体の形状寸法および配筋状況

表-2.1 供試体名称、実験変数、実験結果等一覧

供試体概要		実験結果	
名称	劣化種類	P_u (kN)	d_u (mm)
N	健全	61.1	52.0
H	疲労	67.2	33.4
T	凍害	49.3	26.3
HT	疲労+凍害	49.5	33.1

※ P_u は最大荷重、 d_u は最大荷重時の変位

基盤 11 疲労と凍害の複合劣化を受けた RC はりの耐荷力評価に関する研究

T は凍害を意味する。また、劣化を与えていない基準供試体を供試体 N と呼ぶ。

2. 2. 2 疲労載荷試験

疲労載荷試験は周波数 5Hz の正弦波で定点載荷により行った。載荷荷重は鉄筋応力度により設定した。上限荷重は道路橋示方書の鉄筋許容応力度の上限値 (180N/mm^2)、下限荷重は死荷重作用時の鉄筋応力度の上限値 (100N/mm^2) となるように設定した。コンクリート標準示方書の疲労強度式を用いて、コンクリートと鉄筋の疲労寿命を計算すると、それぞれ約 1000 億回、約 70 万回となり、本研究で用いた RC はりの疲労寿命は鉄筋によって決まる。したがって、繰返し載荷回数は鉄筋の疲労寿命を基に、3 割程度のバラツキを考慮し、50 万回とした。

2. 2. 3 凍結融解試験

凍結融解条件については、JIS A 1148 B 法に準拠して気中凍結水中融解とし、最低温度 -18°C 、最高温度 5°C の凍結融解を 308 回与えた。この凍結融解回数は、超音波伝播速度が 2km/s 程度まで低下するのに要した回数である。

2. 2. 4 静的載荷試験

本実験では、単純支持した供試体の中央部 1 点を載荷する曲げせん断試験を行った。変位計は支点上および中央部の 3 点に設置した。また、主鉄筋には 200mm 間隔でひずみゲージを貼付した (図-2.1)。測定項目は荷重、変位および主鉄筋ひずみである。なお、供試体 N は 4 週の水中養生後に、劣化供試体は、所定の劣化に達した後、静的載荷試験を行った。

2. 3 実験結果

2. 3. 1 超音波伝播速度測定結果

繰返し載荷作用を受けたコンクリートのひずみと超音波伝播速度 (以下、「超音波速度」) の低下は良好な相関関係にあることが報告されており⁹⁾、また、超音波速度は凍結融解作用を受けたコンクリートの劣化度評価手法としてもコンクリート標準示方書などに記載されていることから、今回の実験では、劣化終了後の劣化範囲と程度を定量的に評価するため、超音波速度測定を行った。測定は、図-2.1 に示す、ひずみゲージを設置した 7 断面について、高さ方向に 20mm 間隔で、透過法により測定を行った。なお、測定は、供試体 H は載荷終了後に、供試体 T および HT は凍結融解終了後の含水が多い状況で行った。また、測定に用いたセンサーは周波数 28kHz 、電圧 1KV 、センサー径は $\phi 20\text{mm}$ である。

各供試体の超音波速度が最も低下していた断面の測

定結果を図-2.2 に示す。まず、供試体 T については、目標とした 2km/s 程度まで超音波速度が低下していた。次に、供試体 HT については、圧縮域である $0\text{--}40\text{mm}$ および引張鉄筋を含む引張域である $120\text{--}200\text{mm}$ の超音波速度が供試体 T よりも低下していた。なお、供試体 H の超音波速度は、供試体 N に比べて低下したが、その低下程度は、供試体 T および HT と比較すると、低下程度は小さかった。

2. 3. 2 静的載荷試験結果

各供試体の最大荷重やその時の変位 (以下、「ピーク変位」) を表-2.1 に示す。また、供試体 N の曲げ耐力 (P_{uc}) とせん断耐力 (V_{uc}) を表-2.2 に示す。これら耐力は、打設後 4 週目のコンクリートの圧縮強度 $f_c = 22.7\text{N/mm}^2$ および鉄筋降伏強度 $f_y = 370\text{N/mm}^2$ を用い、すべての安全係数を 1.0 としてコンクリート標準示方書に準拠して算出した値である。

以下に各供試体の終局までの状況を説明する。

(1) 供試体 N

各供試体の荷重-変位曲線を図-2.3 に示す。なお、図中の矢印は、最大荷重となった点を示している。また、荷重-変位曲線のうち、変位が $0\text{--}8\text{mm}$ の範囲を拡大したものを図-2.4 に示す。

図-2.4 に示す供試体 N の荷重-変位曲線で、剛性勾配が大きく低下する変位 4mm 付近の点 (以下、「降伏点」) におけるひび割れに関しては、図-2.5 上段の図の灰色線で示すように、中央から概ね -50cm と $+30\text{cm}$

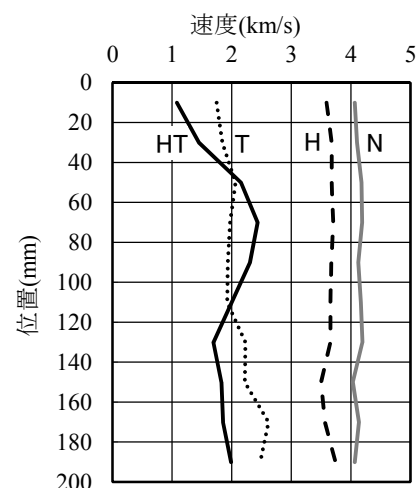


図-2.2 超音波伝播速度測定結果

表-2.2 計算曲げ、せん断耐力

計算曲げ耐力	P_{uc} (kN)	43.1
計算せん断耐力	V_{uc} (kN)	48.2

の範囲に 9 本の曲げひび割れ（平均間隔約 10cm）が発生していた。また、支間中央付近のひび割れの高さは、上縁まで達していた。

次に、図-2.3 において、矢印で示す最大荷重時のひび割れに関しては、図-2.5 上段の図の黒線に示すように、-17cm、-8cm、+15cm に位置する 3 本の曲げひび割れの幅が拡大していた。なお、表-2.1 に示すように最大荷重は 61.1kN、ピーク変位は 52mm であった。

さらに、荷重を増加させると、図-2.5 の写真に示すように、-17cm と +15cm に位置する 2 本の曲げひび割れから引張鉄筋に沿ったひび割れが発生するとともに、急速に荷重が低下して、終局に至った。

(2) 供試体 H

降伏点におけるひび割れに関しては、図-2.6 上段の図において細い黒線で示す繰返し載荷時に発生した曲げひび割れと、灰色線で示す静的載荷試験時に発生した曲げひび割れが概ね-45cm から +35cm の範囲に 6 本（平均間隔約 16cm）発生していた。また、支間中央付近のひび割れの高さは上縁まで達していた。

次に、最大荷重時のひび割れに関しては、図-2.6 上段の図の太い黒線で示すように、既存の曲げひび割れから進展する形で-23cm と -10cm の位置に新たなひび割れが発生し、また、+4cm に位置する曲げひび割れの幅が拡大していた。なお、図-2.3 に示すように、最大荷重は供試体 N と比べて約 9% 上昇したが、ピーク変位は約 36% 低下した。

さらに、荷重を増加させると、図-2.6 の写真に示すように、斜めひび割れが載荷点から +40cm の位置で新たに発生するとともに、急速に荷重が低下して、終局に至った。

(3) 供試体 T

降伏点におけるひび割れに関しては、図-2.7 上段の図において、灰色線で示すように、概ね-15cm から

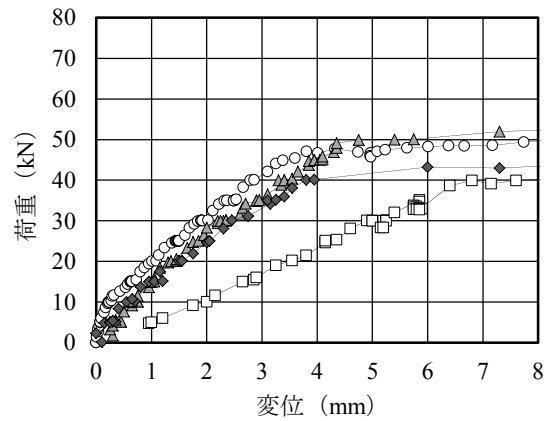
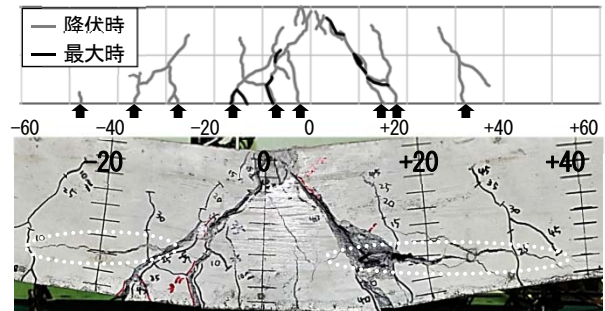
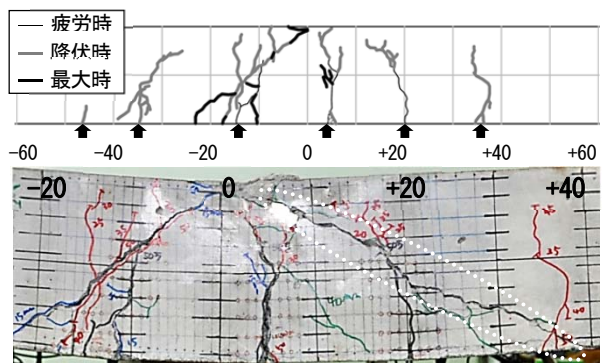


図-2.4 荷重-変位曲線 (0~8mm)



(上：最大時、下：終局時)

図-2.5 ひび割れ状況 (供試体 N)



(上：最大時、下：終局時)

図-2.6 ひび割れ状況 (供試体 H)

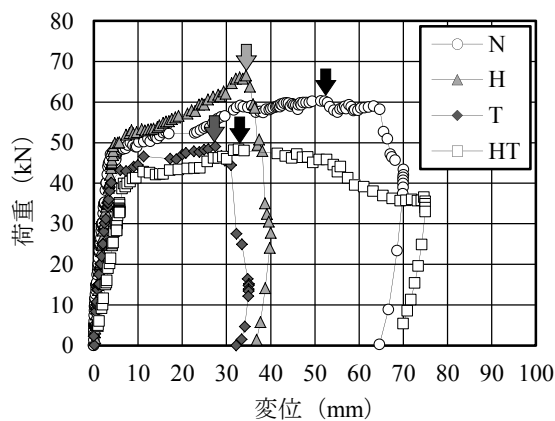
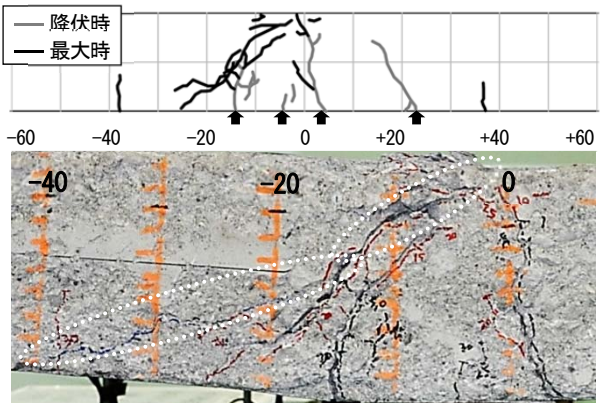


図-2.3 荷重-変位曲線



(上：最大時、下：終局時)

図-2.7 ひび割れ状況 (供試体 T)

+20cm の範囲に 4 本の曲げひび割れ(平均間隔約 12cm)が発生していた。また、支間中央付近のひび割れの高さは、上縁まで達していた供試体 N、H とは異なり、上縁から 5cm の位置で止まっていた。

次に、最大荷重時のひび割れに関しては、図-2.7 上段の図の太い黒線で示すように-14cm に位置する曲げひび割れから進展する形で、載荷点から-25cm の位置に斜めひび割れが発生し、また、-37cm と+37cm の位置に比較的短いひび割れが発生していた。なお、図-2.3 に示すように、最大荷重は供試体 N と比べて約 19%低下し、ピーク変位は約 50%低下した。

さらに、荷重を増加させると、図-2.7 の写真に示すように、載荷点から伸びる斜めひび割れが下縁まで進展するとともに、急速に荷重が低下して、終局に至った。

(4) 供試体 HT

降伏点におけるひび割れに関しては、図-2.8 上段の図において、細い黒線で示す繰返し載荷時に発生した曲げひび割れと、灰色線で示す静的載荷試験時に発生した曲げひび割れが、概ね-30cm から+20cm の範囲に 5 本(平均間隔約 13cm)発生していた。特に、+10cm に位置する曲げひび割れからは、引張鉄筋に沿ったひび割れが+30cm の範囲まで発生していた。また、-20cm から+10cm に位置する支間中央付近の 3 本のひび割れの高さに関しては、両外 2 本のひび割れが上縁から 2cm、真ん中のひび割れが上縁から 7cm の位置で止まっていた。なお、図-2.4 に示すように、降伏点までの剛性勾配は、他の供試体に比べて大きく低下していた。

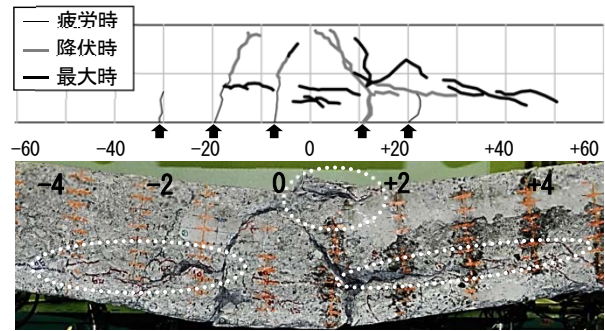
次に、最大荷重時のひび割れに関しては、図-2.8 上段の図の太い黒線で示すように、降伏点で発生していた曲げひび割れが一部進展するとともに、引張鉄筋に沿ったひび割れがさらに進展し、-20cm から+50cm の範囲に広がっていた。なお、図-2.3 に示すように、最大荷重は供試体 N と比べて約 19%低下し、ピーク変位は約 36%低下した。

さらに、荷重を増加させると、図-2.8 の写真に示すように、-7cm と+10cm に位置する 2 本の曲げひび割れの幅が拡大するとともに、引張鉄筋に沿ったひび割れがさらに進展した。また、載荷点右側でコンクリートが徐々に圧壊した。この圧壊に伴い、荷重が緩やかに低下し、終局に至った。

2. 4 考察

2. 4. 1 材料劣化が RC はりの最大荷重等に与える影響

供試体 H、T、HT の最大荷重、ピーク変位、終局時の



(上：最大時、下：終局時)
図-2.8 ひび割れ状況(供試体 HT)

状況は、供試体 N とは異なる結果となった。さらに、供試体 H、T、HT の間でも、終局時の状況などが異なっていた。以降では、異なる結果となった原因について考察を行う。

(1) 供試体 H

供試体 H については、供試体 N に比べて、最大荷重は大きくなったが、ピーク変位は小さくなった。繰返し荷重が変形性能に与える影響については、既往の研究¹⁰⁾で、以下のことが指摘されている。部材に曲げ降伏レベル以上の変形を繰返し与えると、曲げ降伏が先行しているため、荷重-変位曲線上では、最大耐力の低下ではなく、耐力が低下し始める変位が小さくなる形で影響が表れるというものである。今回の実験でも、繰返し載荷によりピーク変位が低下するという同様の機構が作用した可能性がある。しかし、今回の繰返し載荷では、曲げ降伏レベル以下の変形であり、詳細については今後の課題としたい。

(2) 供試体 T

供試体 T については、最大荷重、ピーク変位ともに、供試体 N に比べて小さくなった。この原因として、以下のことが考えられる。今回の実験で用いたようなせん断補強筋を持たない RC はりの場合、載荷に伴って発生する斜め引張応力はコンクリートが負担することとなる。しかし、超音波速度が 2km/s 程度となるまで凍害を受けたコンクリートの場合、その引張強度は、健全なコンクリートの 20%程度しかない¹¹⁾。したがって、供試体 T については、負担できる斜め引張応力が大きく低下しており、荷重と変位が比較的小さな段階で、斜めひび割れが卓越したため、最大荷重およびピーク変位が供試体 N に比べて小さくなったと考えられる。

(3) 供試体 HT

供試体 HT については、終局に至るまでに、-40cm から+50cm の広い範囲に引張鉄筋に沿ったひび割れが

発生し、また、ピーク以降は荷点右側でコンクリートが徐々に圧壊するなど、他の供試体と比べて、明らかに異なる挙動を示していた。このような挙動となった原因として、以下のことが考えられる。図-2.9 は荷重が約 40 kN 時の各供試体の鉄筋ひずみを示している。供試体 N と供試体 HT について、右スパンの鉄筋ひずみを比較すると、供試体 HT の鉄筋ひずみは、供試体 N に比べて、中央部分でのピークが低下するとともに、中央から離れた位置まで大きなひずみが生じている。また、前述したように、供試体 HT に関しては、降伏点である約 40kN 時には、図-2.8 上段の図に示すように、供試体右スパンに引張鉄筋に沿ったひび割れが発生していた。これらのことから、供試体 HT は付着が低下し、タイドアーチ機構に移行していたと考えられる。しかし、アーチを形成する圧縮域のコンクリートは、凍害により圧縮強度が低下していたため、荷重と変位が比較的小さな段階で圧壊したと考えられる。以上のような「タイドアーチ機構への移行」や「圧縮域コンクリートの早い段階での圧壊」のため、最大荷重およびピーク変位が供試体 N に比べて小さくなったと考えられる。また、2. 3. 2 (4) で前述したように、供試体 HT の降伏点までの剛性勾配が、他の供試体に比べて大きく低下した原因も「タイドアーチ機構への移行」によるものと考えられる。

なお、供試体 HT に発生した引張鉄筋に沿ったひび割れは、RC 床版でその発生が指摘されている下鉄筋近傍の「水平ひび割れ」¹²⁾ とひび割れの状況が類似している。今後、このひび割れの発生メカニズムなどについて検討するため、複合劣化を受けた場合の付着挙動などについて検討を行っていきたい。

2. 4. 2 複合劣化を受けた RC はりの耐荷力評価

安全性の観点からは、耐荷力が低下している「凍害単独劣化」と「疲労と凍害の複合劣化」を受けた RC はりの耐荷力を定量的に評価する必要がある。今回のように引張鉄筋の降伏が先行する曲げ引張破壊形態では、鉄筋降伏時の曲げ耐力を耐荷力とすることで評価が可能となる。具体的には、曲げ耐力の計算時に、劣化により低下した圧縮域の圧縮強度を考慮するものである。

「凍害単独劣化」の供試体 T の曲げ耐力の計算過程を、以下に示す。まず、凍害により低下した圧縮強度の算出を行った。図-2.2 より、健全時の超音波速度を 4km/s、凍結融解後の超音波速度を 2km/s とし、式(2.1)¹³⁾、式(2.2)¹⁴⁾ を用いて、圧縮強度比を算出すると、圧縮強度比 R_c は 0.47 となる。

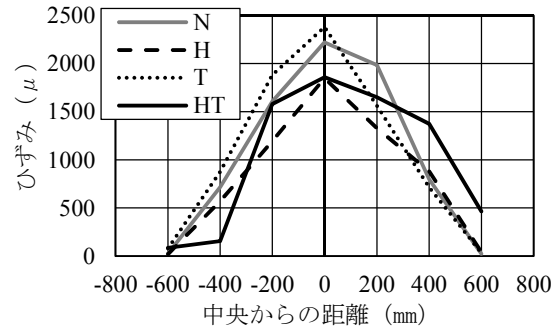


図-2.9 約 40kN 時の各供試体の鉄筋ひずみ

表-2.3 供試体 N、T、HT の曲げ耐力

	(a)計算値 (kN)	(b)実験値 (kN)	a/b
供試体N	43.1	45.7	94%
供試体T	38.8	42.2	92%
供試体HT	35.5	40.7	87%

$$DM = \frac{V_n^2}{V_0^2} \times 100 \quad (2.1)$$

$$R_c = 0.0071(DM - 100) + 1 \quad (2.2)$$

ただし、 DM ：凍結融解後の相対動弾性係数の概算値 (%)、 V_n ：凍結融解後の超音波速度 (km/s)、 V_0 ：健全時の超音波速度 (km/s)、 R_c ：圧縮強度比

次に、この圧縮強度比と打設後 4 週目の圧縮強度を用いて、供試体 N と同様に、コンクリート標準示方書に準拠して、供試体 T の曲げ耐力を算出した。表-2.3 に算出結果を示す。表-2.3 に示すように、供試体 T の曲げ耐力の計算値と実験値の比は 92% であり、概ね供試体 N の比と同程度である。

また、「疲労と凍害の複合劣化」の場合にも、同様の手順により耐荷力の評価が可能であると考えられる。しかし、複合劣化の超音波速度と圧縮強度の関係は「凍害単独劣化」のように定式化されていない。一方、別途行った実験¹⁵⁾では、複合劣化の圧縮強度は、疲労によるひずみ硬化のため、同じ超音波速度の「凍害単独劣化」の圧縮強度に比べ大きくなっていった。そこで、安全側に曲げ耐力を求めるため、「凍害単独劣化」の関係式である式(2.1)、式(2.2)を用いて、供試体 T と同様に、供試体 HT の曲げ耐力を計算した。その結果、表-2.3 に示すように、供試体 HT の曲げ耐力の計算値と実験値の比は 87% であり、供試体 N の比と比べると、やや安全側となった。

基盤 11 疲労と凍害の複合劣化を受けた RC はりの耐荷力評価に関する研究

以上のように、引張鉄筋の降伏が先行する曲げ引張破壊形態では、圧縮域のコンクリートの強度低下を考慮することにより、耐荷力が簡易に評価できる。しかし、以下のような課題もある。曲げ破壊型の RC はりも、劣化範囲や程度によっては、引張鉄筋の降伏前にせん断破壊に至る場合があり⁸⁾、この場合、上記の方法では耐荷力を評価できない。この課題を解決するためには、劣化を受けた RC 部材のせん断耐力算定式の確立などが必要である。

2. 5 まとめ

疲労単独、凍害単独、疲労と凍害の複合で劣化させた、せん断補強筋を持たない RC はりの曲げせん断試験を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 劣化を与えた RC はりの最大荷重などは、健全な RC はりとは異なる結果となった。さらに、疲労単独劣化、凍害単独劣化、複合劣化の間でも、終局時の状況などが、それぞれ異なる結果となった。
- 2) 「疲労単独劣化」の最大荷重時の変位が低下したのは、繰返しによってせん断耐力の低下の勾配が急になったためと考えられる。
- 3) 「凍害単独劣化」が「健全」と異なり、斜めひび割れで終局となったのは、凍害による引張強度の低下に伴い、せん断耐力が大きく低下したためと考えられる。
- 4) 「疲労と凍害の複合劣化」では、引張鉄筋に沿ったひび割れが卓越し、載荷点近傍のコンクリートが圧壊するなど、他の供試体と異なる挙動を示していた。これは、付着の低下に伴ってタイドアーチ機構に移行していたためと考えられる。
- 5) 引張鉄筋の降伏が先行する曲げ引張破壊形態では、圧縮域の強度低下を考慮することにより、耐荷力が簡易に評価できる。

3. 有限要素法などの解析及び実験との比較・分析によるパラメータ等の設定に関する検討

3. 1 目的

北海道における橋梁点検結果では、凍害もしくは凍害と塩害の複合劣化を受けた国道橋は約 4 割¹⁶⁾にも及んでおり、凍害は、積雪寒冷地におけるコンクリート構造物の構造性能に深刻な影響を与えている。凍害に対して、小型の RC 供試体を用いた検討¹⁷⁾などが行われてきたものの、凍害を受けたコンクリート構造物の定量的な構造性能の評価方法の確立には至っていない。

耐寒材料チームでは、凍結融解作用により劣化した RC はり部材の構造性能の評価方法として有限要素解

析に着目し、RC はり供試体の実験結果⁸⁾と汎用プログラムを用いた解析結果の比較¹⁸⁾により、その適用性を検討した。土木学会コンクリート標準示方書[維持管理編]においても、有限要素解析は、変状を有するコンクリート構造物の性能を、精度良く求めることができる評価手法として位置付けられている¹⁹⁾。検討の結果、凍結融解作用によるコンクリートの劣化の影響を材料強度の低下として考慮したモデル化では、凍結融解作用により材料特性が大きく変化している RC はり部材の部材剛性（最大荷重までの荷重-変位関係）の評価は困難であった。この理由として、解析に用いた汎用プログラムのコンクリートの材料構成則は、健全なコンクリートを前提としたものであり、凍結融解作用により劣化したコンクリートが圧縮を受けた際に見られる、小さな初期弾性係数や、微細ひび割れの閉口に伴う剛性の回復が表現されないことが一因として考えられた。

一方、HASAN らは、凍結融解作用によってコンクリート内部に生じる微細なひび割れが、劣化したコンクリートの圧縮時の挙動に影響することを指摘し、凍結融解作用を受けたコンクリートの力学性状を実験的に示した上で、劣化したコンクリートの圧縮応力下における応力-ひずみモデルを提案している²⁰⁾。HASAN らのモデルでは、コンクリートの劣化程度を表す指標として残留ひずみが用いられているが、耐久設計など将来予測への展開などを考慮すると、凍結融解作用を受けたコンクリートに関する研究で多く用いられ、また、時間軸での材料劣化予測¹⁸⁾にも用いられている相対動弾性係数を劣化指標として用いた方が、より汎用性があると考えられる。

そこで本研究では、相対動弾性係数を劣化指標として、凍結融解作用により劣化したコンクリートに対する圧縮の応力-ひずみモデルの構築を試みた。

3. 2 凍結融解作用により劣化したコンクリートにおける相対動弾性係数と超音波伝播速度や力学特性との関係

(1) 試験概要

a) 供試体

供試体は $\phi 100 \times 200$ mm の円柱を用いた。コンクリートの配合を表-3.1 に示す。打設後 4 週目のコンクリートの圧縮強度は 29.9 N/mm^2 であった。コンクリートの配合については、水セメント比は 65%、セメントは普通ポルトランドセメント、粗骨材最大寸法は 20 mm であり、AE 剤は使用していない。

b) 凍結融解試験

基盤 11 疲労と凍害の複合劣化を受けた RC はりの耐荷力評価に関する研究

コンクリート打設後、4 週目まで水中養生を行った後、凍結融解試験を開始した。凍結融解試験は JIS A 1148 A 法に準じて行った。実験変数は相対動弾性係数であり、相対動弾性係数が概ね 80 % から 20 % まで 20% 間隔で、4 水準の供試体を各水準 3 体ずつ作製し、圧縮試験を行った。

c) 圧縮試験

圧縮試験は、JIS A 1108 に準じて行った。コンプレッソメータにより、荷重の計測とともに载荷中のひずみを計測した。なお、最大応力時の円柱供試体のひび割れ状態を観察するため、圧縮試験は最大応力の 95% まで応力が低下した時点で終了した。

d) 超音波伝播速度

円柱供試体が凍結融解試験で所定の劣化水準に達した後、円柱供試体の上面と下面の中心に発・受信子をあてて、円柱軸方向の超音波伝播速度（以後、超音波速度と呼ぶ）を測定した。なお、測定に用いたセンサーは周波数 28 kHz、電圧 1 kV、センサー径は φ 20 mm である。

(2) 圧縮試験結果

圧縮試験における各供試体の応力-ひずみ関係を図-3.1 に示す。既往の研究²⁰⁾ で指摘されているように、凍結融解作用によるコンクリートの強度低下、剛性低下、さらには、微細ひび割れの閉口に伴う剛性の回復などが見られた。

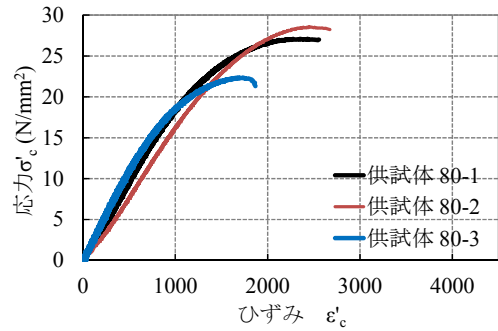
(3) 相対動弾性係数と超音波伝播速度との関係

図-3.2 は、先の圧縮試験の供試体における、相対動弾性係数の低下率と健全な状態を基準とした超音波速度比との関係を示している。図に示すように、相対動弾性係数の低下に伴って、超音波速度も低下しており、水セメント比を 65 % と大きめに設定した今回のコンクリートにおいても、既往の研究²¹⁾ と同様に、相対動弾性係数と超音波速度は良好な相関を示している。このことから、超音波速度は凍結融解作用により劣化したコンクリートの劣化程度を良好に評価していると言える。

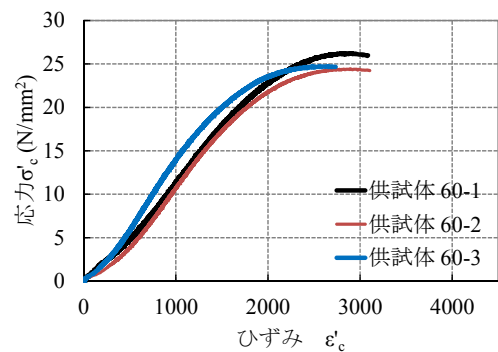
(4) 相対動弾性係数と力学特性の関係

図-3.3 ~ 図-3.5 は、相対動弾性係数の低下率と、健全な状態を基準とした圧縮強度比、静弾性係数比、圧縮ピークひずみ比の関係を示している。全ての関係において、コンクリートの劣化程度を示す相対動弾性係

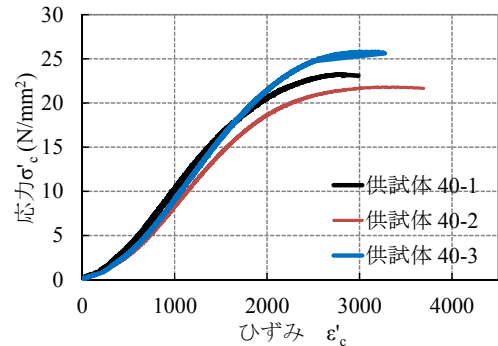
数の低下に対して、物性値は良好な相関を示している。ただし、個別に見ると、その変化の程度には差が認められる。図-3.3 に示す圧縮強度は概ね直線的に低下



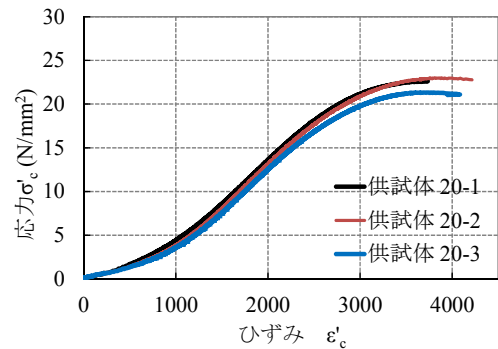
(a) 相対動弾性係数 80 %



(b) 相対動弾性係数 60 %



(c) 相対動弾性係数 40 %



(d) 相対動弾性係数 20 %

図-3.1 凍結融解作用により劣化したコンクリートの応力-ひずみ関係（圧縮試験結果）

表-3.1 配合表

単位水量 (kg/m ³)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	空気量 (%)
163	65	48.3	2.0

基盤 11 疲労と凍害の複合劣化を受けた RC はりの耐荷力評価に関する研究

し、相対動弾性係数が10%低下すると圧縮強度は3%低下する。相対動弾性係数の低下率が80%の場合でも、強度比は0.8程度までしか低下していない。一方、図-3.4に示す静弾性係数は指数関数的に低下し、相対動弾性係数の低下率が20%の場合でも、静弾性係数比は0.6程度と大きく低下し、相対動弾性係数の低下率が80%の場合では、静弾性係数比は0.2程度まで低下する。

以上のように、凍結融解作用による力学特性の低下に関しては、既往の研究²²⁾でも報告されているとおり、圧縮強度よりも静弾性係数の方が低下程度は大きい。この原因として、静弾性係数に関しては、凍結融解作用によってコンクリート内部に生じた微細ひび割れにより空隙が生じるため、材料の剛性が著しく低下するものと考えられる。

(5) 圧縮強度と静弾性係数との関係および既往の関係式との比較

劣化を受けていない健全なコンクリートの場合、圧縮強度と静弾性係数には相関があることから、圧縮強度を用いた関係式(式(3.1))が土木学会コンクリート標準示方書[設計編]³⁾に示されている。

$$E_c = \left(2.2 + \frac{f'_c - 18}{20} \right) \times 10^4 \quad f'_c < 30 \text{ N/mm}^2 \quad (3.1)$$

ここに、 E_c ：静弾性係数、 f'_c ：圧縮強度である。

そこで、凍結融解作用により劣化したコンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係が、劣化を受けていない健全な場合と同じであるかどうかの確認を行うため、実験結果から求められる関係式と既往の健全な場合を対象とした関係式を比較した。

図-3.6は、凍結融解作用により劣化したコンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係を示している。また、図中には健全なコンクリートにおける既往の関係式を破線で示している。図に示すように、凍結融解作用により劣化したコンクリートの関係式は健全なコンクリートの関係式よりも下に位置している。

以上のことから、凍結融解作用により劣化したコンクリート構造物の構造性能評価を行う際に用いる力学特性は、健全時に用いられている既往の関係式を適用して力学特性を推定することは適切ではないことがわかる。また、(4)で述べたように、凍結融解作用により劣化したコンクリートは、部材の剛性に影響を与える静弾性係数やピークひずみも劣化程度に応じて変化し

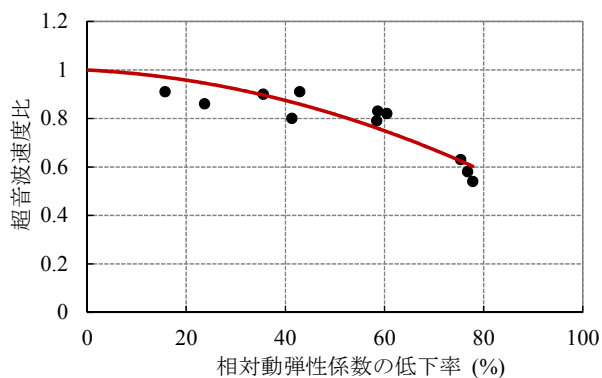


図-3.2 相対動弾性係数の低下率と超音波速度比の関係

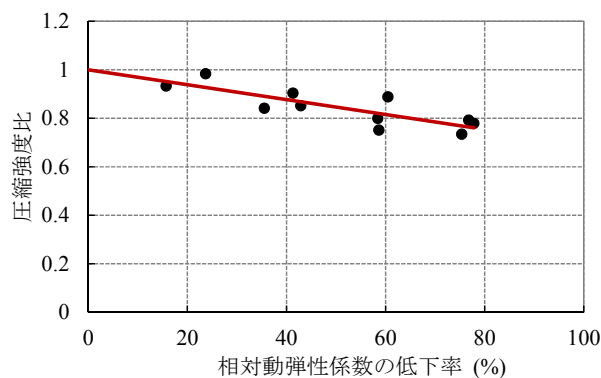


図-3.3 相対動弾性係数の低下率と圧縮強度比の関係

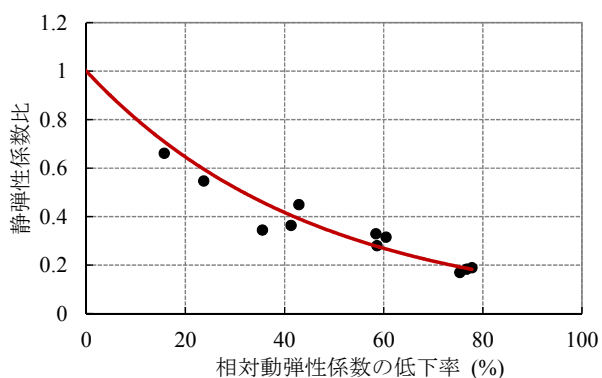


図-3.4 相対動弾性係数の低下率と静弾性係数比の関係

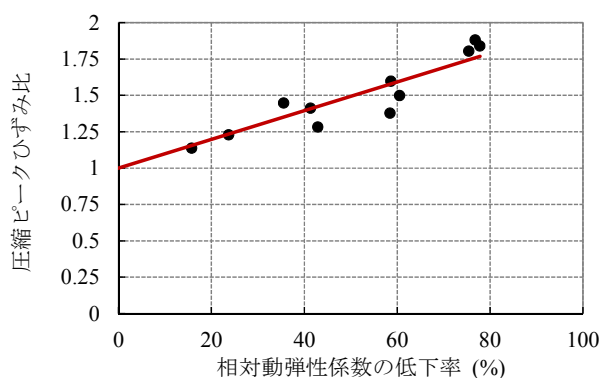


図-3.5 相対動弾性係数の低下率と圧縮ピークひずみ比の関係

ていることから、構造性能評価の際は、強度の低下のみならず、変形に関わる材料特性の変化も考慮する必要があると考えられる。

3.3 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

(1) モデル化における仮定と提案式

3.2で述べたように、凍結融解作用により劣化したコンクリートは、強度の低下のみならず、変形に関わる力学特性の変化についても考慮する必要がある。

そこで本研究では、最終的に有限要素解析プログラムの材料構成則として反映することを目的として、圧縮応力下における応力-ひずみ関係のモデル化について検討した。

凍結融解作用により劣化したコンクリートは、コンクリート内部に微細な間隙が生じる。そこで、本研究では、コンクリートが圧縮力を受けた際に生じる、この微細な間隙の閉合をモデルに考慮することで、凍結融解作用により劣化したコンクリートの圧縮時の挙動を表現できるものと仮定した。このことを、土木学会コンクリート標準示方書³⁾に記載された圧縮応力下におけるコンクリートの応力-ひずみ関係に、劣化によって生じる間隙が閉合することで生じるひずみ（以後、間隙閉合ひずみと呼ぶ）を考慮することで、下記に示す簡易なモデルで表現した。

$$\sigma'_c = E_0 \cdot K \cdot (\varepsilon'_c - \varepsilon'_e - \varepsilon'_p) \quad (3.2)$$

$$E_0 = \frac{2 \cdot f'_c}{\varepsilon'_{peak}}$$

$$K = \exp \left\{ -0.73 \frac{\varepsilon'_{max} - \varepsilon'_{e max}}{\varepsilon'_{peak}} \left(1 - \exp \left(-1.25 \frac{\varepsilon'_{max} - \varepsilon'_{e max}}{\varepsilon'_{peak}} \right) \right) \right\}$$

$$\varepsilon'_p = \varepsilon'_{max} - \varepsilon'_{e max} - 2.86 \cdot \varepsilon'_{peak} \left\{ 1 - \exp \left(-0.35 \frac{\varepsilon'_{max} - \varepsilon'_{e max}}{\varepsilon'_{peak}} \right) \right\}$$

間隙閉合ひずみ ε'_e は、次式により表される。

$$\varepsilon'_e = \frac{\varepsilon'_c}{\alpha} \left(2 - \frac{\varepsilon'_c}{\alpha \cdot \varepsilon'_{e0}} \right) \quad (0 \leq \varepsilon'_c \leq \alpha \cdot \varepsilon'_{e0}) \quad (3.3)$$

$$\varepsilon'_e = \varepsilon'_{e0} \quad (\alpha \cdot \varepsilon'_{e0} < \varepsilon'_c) \quad (3.4)$$

ここに、 f'_c : コンクリートの圧縮強度、 ε'_{peak} : 健全な状態の圧縮強度に対応するひずみ (0.002とする)、 ε'_{max} : 過去に受けた圧縮ひずみの最大値、 $\varepsilon'_{e max}$: 過去に生じた間隙閉合ひずみの最大値、 ε'_{e0} : 間隙閉合ひずみの上限値、 α : 係数である。

ここで、 f'_c 、 ε_{e0} 、 α は、相対動弾性係数の低下率に対する関係式として、3.2に示した一軸の圧縮試験結果に基づき次に示す回帰式(3.5)~式(3.7)が得られる。次節から、回帰式(3.5)~式(3.7)の導出方法を示す。なお、回帰式の作成にあたっては、図-3.1(a)の供試体80-3を除いた供試体の圧縮試験結果を用いた。

$$\frac{f'_c}{f'_{c0}} = 1 - 0.0031 \cdot \left(100 - \frac{E_D}{E_{D0}} \cdot 100 \right) \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_{e0} = 0.000019 \cdot \left(100 - \frac{E_D}{E_{D0}} \cdot 100 \right) \quad (3.6)$$

$$\alpha = 6.4 - 0.059 \left(100 - \frac{E_D}{E_{D0}} \cdot 100 \right) \quad \alpha \geq 2.0 \quad (3.7)$$

ここに、 f'_{c0} : 健全な状態のコンクリートの圧縮強度、 E_D : 動弾性係数、 E_{D0} : 健全な状態の動弾性係数である。

(2) 圧縮強度比

圧縮強度比 f'_c/f'_{c0} は、健全な供試体の圧縮強度の試験結果に対する、凍結融解作用を受けたコンクリートの圧縮強度の試験結果の比として表される。圧縮強

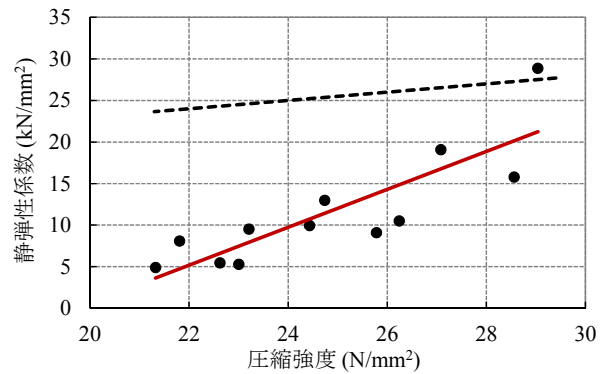


図-3.6 圧縮強度と静弾性係数の関係

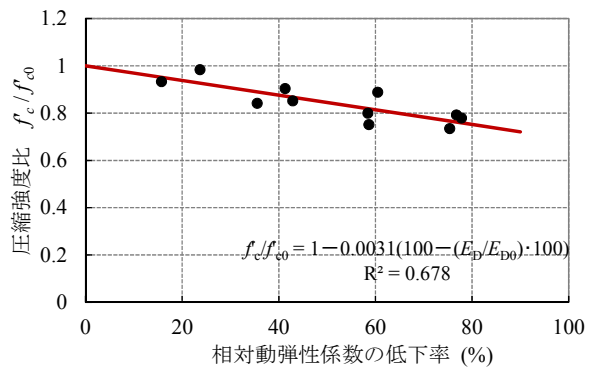


図-3.7 圧縮強度比と相対動弾性係数の低下率の関係

度比と相対動弾性係数の低下率の関係を図-3.7に示す。図から、圧縮強度比と相対動弾性係数の低下率に線形の関係が見られたことから、圧縮強度比の回帰式を、相対動弾性係数の低下率に対して切片を1として、式(3.5)のように定めた。

(3) 間隙閉合ひずみの上限値

間隙閉合ひずみの上限値 ε'_{e0} は、凍結融解作用を受けたコンクリートの圧縮強度時のひずみと、健全なコンクリートの圧縮強度時のひずみとの差分として算出した。これは、圧縮強度到達時においては、凍結融解作用により生じた間隙がすべて閉合するものと仮定して、健全な場合に対する凍結融解作用を受けた場合の圧縮強度時のひずみの増加分を、最終的に閉合する間隙の総量、すなわち、間隙閉合ひずみの上限値としたものである。したがって、間隙閉合ひずみの上限値は、一軸の圧縮試験結果に基づき、式(3.8)により算出される。

$$\varepsilon'_{e0} = \varepsilon'_{peak-EXP} - \varepsilon'_{peak} \quad (3.8)$$

ここに、 $\varepsilon'_{peak-EXP}$ ：凍結融解作用を受けたコンクリートの圧縮強度に対応するひずみ、 ε'_{peak} ：健全なコンクリートにおける圧縮強度に対応するひずみであり、本検討では示方書³⁾に準拠して0.002を仮定した。

上述の算出方法から得られる間隙閉合ひずみの上限値と相対動弾性係数の低下率の関係を図-3.8に示す。図から、間隙閉合ひずみの上限値と相対動弾性係数の低下率に線形の関係が見られたことから、間隙閉合ひずみの上限値の回帰式を、相対動弾性係数の低下率に対して切片を0として、式(3.6)のように定めた。

図-3.9は、上述の間隙閉合ひずみの上限値と角柱供試体の長さ変化から求めたひずみとを比較したものである。角柱供試体(10×10×40 cm)は、円柱供試体と同配合で製作し、凍結融解試験により所定の相対動弾性係数に達した後、JIS A 1148の付属書Aに準じて測定した長さ変化から、ひずみを算出した。図のように、間隙ひずみの上限値と、凍結融解によって生じた長さ変化によるひずみが概ね一致している。このことは、コンクリートが凍結融解作用を受けることで生じる微細な損傷による体積の膨張量と、本検討で仮定した、圧縮を受けた際に閉合する微細な間隙が一致していることを表しているものと考えられ、本モデルの仮定の妥当性を示している。

(4) 係数 α

係数 α は、間隙閉合ひずみが上限値に達するまでの、コンクリートひずみの増加に対する間隙ひずみの増分を制御するための係数である。各供試体の実験結果の

うち圧縮強度に達するまでの範囲を対象に、実験結果の応力-ひずみ関係と式(3.2)との誤差が最も小さくなる時の係数 α を供試体ごとに算出した。このとき、圧縮強度や圧縮強度に対応するひずみは、その供試体の実験結果を用いた。得られた係数 α と相対動弾性係数の低下率の関係を図-3.10に示す。

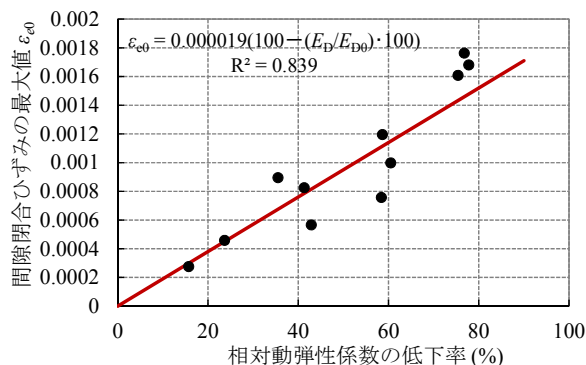


図-3.8 間隙閉合ひずみの上限値と相対動弾性係数の低下率の関係

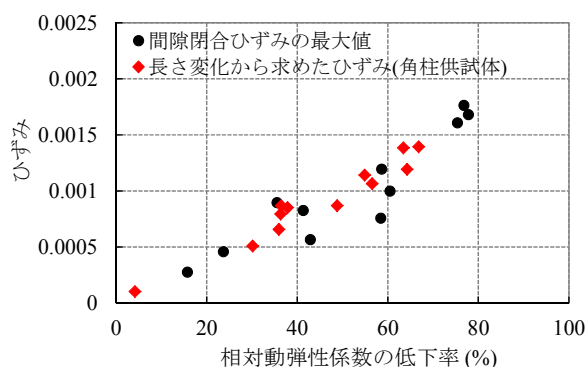


図-3.9 間隙閉合ひずみの上限値と角柱の長さ変化から求めたひずみの比較

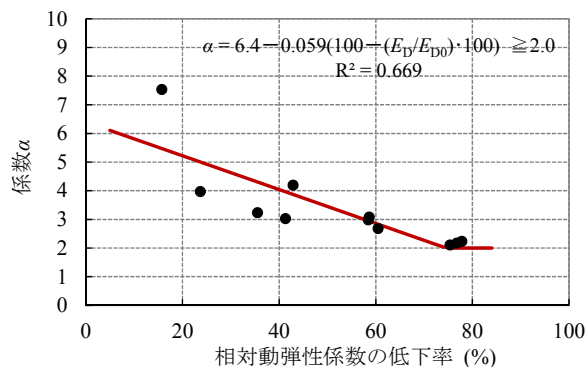


図-3.10 係数 α と相対動弾性係数の低下率の関係

図から、係数 α の回帰式は、式(3.7)のように定めた。
 なお、係数 α の下限値 2.0 は、式(3.3)により算出される
 間隙閉合ひずみ ε'_e が、コンクリートのひずみ ε'_c を上
 回らないようにするための制限として設定している。

(5) 提案式から得られる応力-ひずみ関係

式(3.2)から得られる応力-ひずみ関係を図-3.11に
 示す。図は、相対動弾性係数に応じた5段階を示した。
 図のように、相対動弾性係数の低下に応じて、圧縮強
 度の低下と剛性低下や、相対動弾性係数の小さな場合
 に見られる剛性の回復が表現されている。

式(3.2)中の各項の挙動の詳細を示す。図-3.12に、
 式(3.3)~式(3.4)によって算出される間隙閉合ひずみと
 コンクリートのひずみの関係を示す。図のように、コ
 ンクリートのひずみの小さな段階で、間隙閉合ひずみ
 は曲線により表現される。そして、コンクリートのひ
 ずみ ε'_c が大きくなるにつれて、間隙閉合ひずみが増
 大し、上限値 ε'_{e0} に達したところで間隙がすべて閉合
 したこととなり、この後は一定値となる。コンクリー
 トのひずみが小さな段階では、相対動弾性係数が小さ
 なコンクリートほど、ひずみ ε'_c の中で間隙閉合ひず
 みが占める割合が増加するため、曲線部は図中の破線に
 近づく。

図-3.13に弾性剛性残存率 K とコンクリートのひず

みの関係を、図-3.14に塑性ひずみ ε'_p とコンクリー
 トのひずみの関係を示す。図のように、劣化によって相
 対動弾性係数が小さくなったコンクリートほど、同じ
 ひずみで比較して、弾性剛性残存率の低下と塑性ひず
 みの増加が少ない。このことは、劣化の程度が進むほ
 ど、コンクリートに生じるひずみ ε'_c の中で間隙閉合
 ひずみが占める割合が増加するため、同一のひずみ ε'_c
 であっても劣化を受けない場合に比べてコンクリートの
 損傷および塑性化の進展が遅れることを示している。
 このことは、式(3.2)の弾性剛性残存率 K および塑性ひ
 ずみ ε'_p の算式で、間隙閉合ひずみ ε'_e を含むことで表
 現している。

式(3.2)から得られる応力-ひずみ関係と実験結果を
 重ねて示した図を、図-3.15に示す。図から、今回提
 案した応力-ひずみ関係のモデルは、実験における一
 軸の応力-ひずみ関係を概ね再現できていることが確
 認できる。

(6) 実構造物への適用方法

上記のモデルの検討に当たっては、劣化が一般的な円
 柱供試体の実験データを用いている。しかし、実構造
 物における凍害は、劣化要因である水分供給や温度変
 化が大きい構造物表面から内部に向けて、徐々に劣化
 が進行するため、劣化程度は深さ方向で一様ではない。

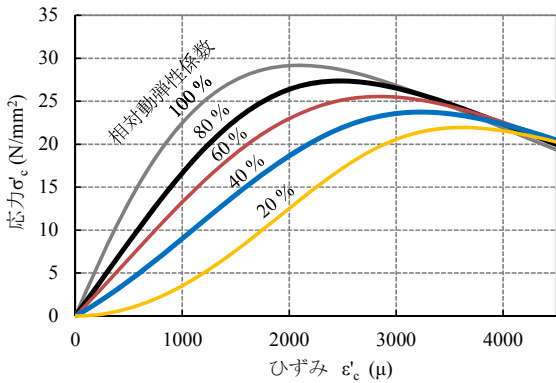


図-3.11 応力-ひずみ関係

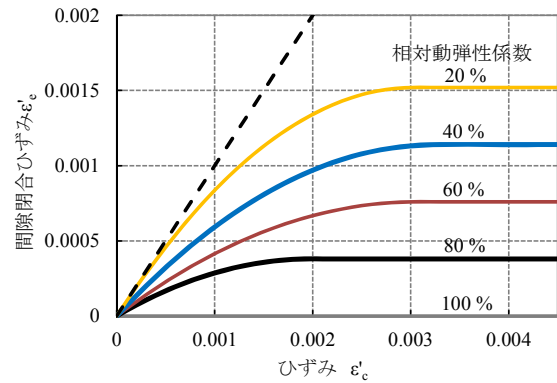


図-3.12 間隙閉合ひずみ-ひずみ関係

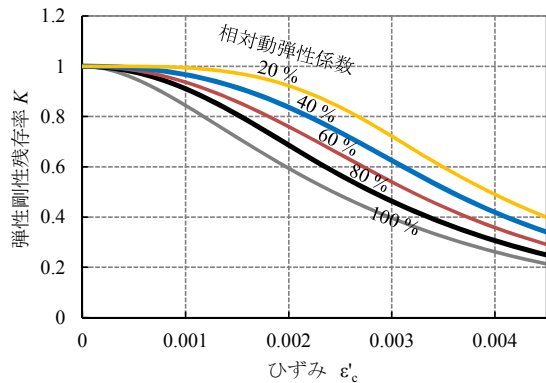


図-3.13 弾性剛性残存率-ひずみ関係

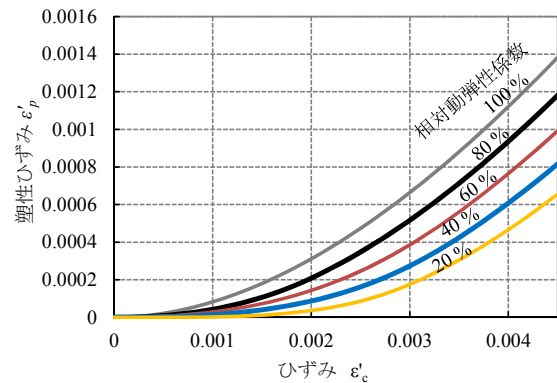


図-3.14 塑性ひずみ-ひずみ関係

基盤 11 疲労と凍害の複合劣化を受けた RC はりの耐荷力評価に関する研究

また、日射や水分供給が部位によって異なるため、劣化程度は平面的にも一様ではない。したがって、有限要素解析によって凍害を受けた実構造物の構造性能の評価を行う場合には、構造物内部の劣化範囲・程度の空間分布を有限要素解析の要素寸法レベルで、適切に考慮する必要がある。

一方、コンクリート標準示方書¹⁹⁾では、凍結融解作用により劣化したコンクリートの劣化の進展範囲を把握する方法として超音波速度が示されており、実構造物から採取したコアの超音波速度を測定する方法やトモグラフィー法を用いて、実構造物の凍害劣化範囲や劣化程度を評価した事例が報告されている²³⁾。本研究においても、3.2(3)で述べたように、モデル構築の際にパラメータとして用いた凍害の劣化指標である相対動弾性係数と超音波速度は良好な相関を示している。

したがって、有限要素解析によって凍害を受けた実構造物の構造性能評価を行う場合、超音波速度を用いた以下の手順により、構造物内部の劣化範囲・程度の空間分布を適切に考慮することが可能であると考えられる。

- 1) 超音波速度測定により劣化範囲・程度を把握
- 2) 関係式を用いて超音波速度を相対動弾性係数

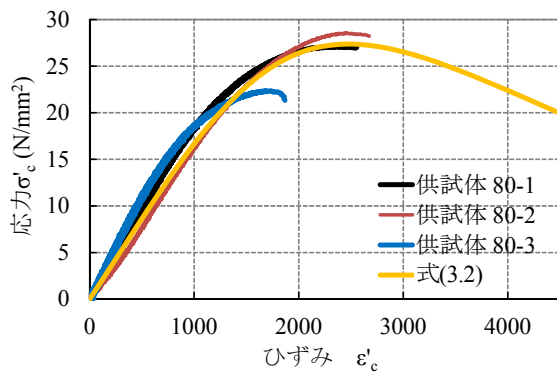
に換算

- 3) 有限要素解析の各要素に相対動弾性係数を入力
- 4) 相対動弾性係数に対応した材料構成則が組み込まれたプログラムで部材の耐荷力等を算出

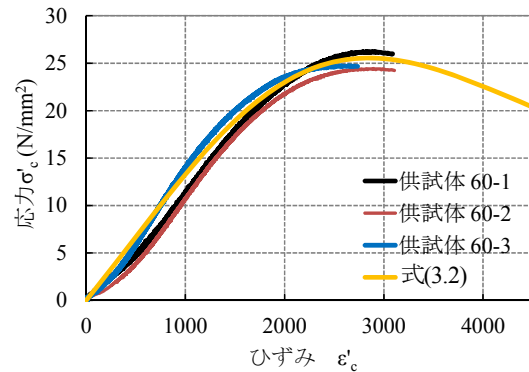
3.4 まとめ

本検討では、凍結融解作用により劣化したコンクリートの圧縮試験結果を用いて、圧縮応力下における応力-ひずみ関係のモデルを提案した。本検討で得られた事項を、以下に示す。

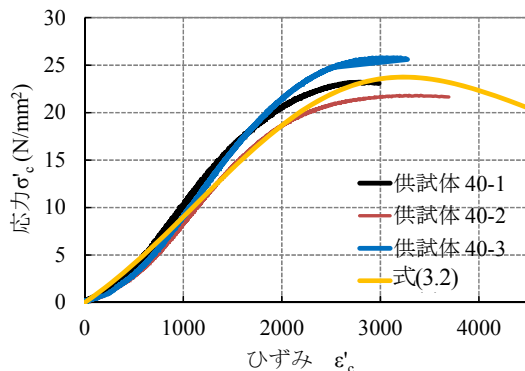
- 1) 提案式は、土木学会コンクリート標準示方書に記載された圧縮応力下におけるコンクリートの応力-ひずみ関係に、凍結融解作用によって生じる間隙が閉合することで生じるひずみを考慮する、簡易なモデルである。
- 2) 圧縮力によって間隙が閉合することで生じるひずみとコンクリートの総圧縮ひずみの関係を、凍結融解作用により劣化したコンクリートの劣化指標として広く用いられている相対動弾性係数を変数として、実験回帰式により求めた。
- 3) 角柱供試体を用いて計測した凍結融解作用によって生じる体積膨張によるひずみと、提案式で仮定



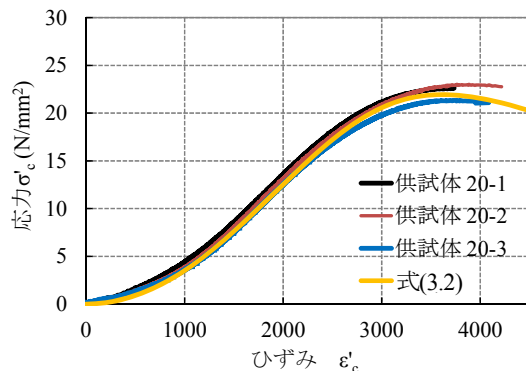
(a) 相対動弾性係数 80 %



(b) 相対動弾性係数 60 %



(c) 相対動弾性係数 40 %



(d) 相対動弾性係数 20 %

図-3.15 凍結融解作用により劣化したコンクリートの応力-ひずみ関係の提案式と実験結果

基盤 11 疲労と凍害の複合劣化を受けた RC はりの耐荷力評価に関する研究

した圧縮時の間隙が閉合することで生じるひずみが概ね一致することから、モデル化の妥当性を確認した。

- 4) 提案式による応力-ひずみ関係が、凍結融解作用により劣化したコンクリートの圧縮試験結果と概ね一致することを確認した。

参考文献

- 1) 三田村浩、安達優、石川博之：積雪寒冷地における既設道路橋床版の余寿命予測式の検討、寒地土木研究所月報、第 651 号、pp.28-34、2007.
- 2) 林田宏、田口史雄、遠藤裕丈、草間祥吾：超音波速度伝播速度測定によるコンクリート構造物の凍害診断に関する基礎的研究、寒地土木研究所月報、No.656、pp.10-15、2008.
- 3) 土木学会、2012 年制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕、2012.
- 4) 高柴保明、堺孝司、熊谷守晃：凍害およびアルカリ骨材反応を受けたコンクリートの力学特性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.20、No.1、pp.221-226、1998.
- 5) 岸谷孝一、西澤紀昭他編：コンクリート構造物の耐久性シリーズ 疲労、技報堂出版、p.52、1987.
- 6) 凍結融解と塩化物による複合劣化に対するコンクリートの耐久性設計法および表面含浸材を活用した耐久性向上に関する研究、寒地土木研究所報告第 133 号、2011.
- 7) 例えば、三田村浩、佐藤京、本田幸一、松井繁之：道路橋 RC 床版上面の凍害劣化と疲労寿命への影響、構造工学論文集、Vol.55A、pp.1420-1431、2009.
- 8) 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.
- 9) 岸谷孝一、西澤紀昭他編：コンクリート構造物の耐久性シリーズ 疲労、技報堂出版、1987.
- 10) コンクリート構造物のせん断耐力に対する設計法研究小委員会報告書、土木学会、2012.
- 11) 林田宏、佐藤靖彦：凍結融解を受けたコンクリートの引張強度に関する基礎的検討、土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集、V-185、pp.369-370、2012.
- 12) 道路橋床版の維持管理マニュアル、土木学会、2012.
- 13) コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関する研究委員会報告書、日本コンクリート工学協会、2008.
- 14) 凍害と耐久性設計研究委員会報告書、日本コンクリート工学協会北海道支部、2006.
- 15) 林田宏、佐藤靖彦：疲労と凍害の複合劣化を受けたコンクリートの力学特性評価に関する基礎的検討、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、第 14 巻、pp.149-156、2014.
- 16) 北海道におけるコンクリート構造物維持管理の手引き（案）、北海道土木技術会コンクリート研究委員会コンクリート維持管理小委員会、pp.2-47、2006.
- 17) 桜井宏、鮎田耕一、佐伯昇：RC 構造物の耐久性評価のための部材のモデル化と促進試験の研究、セメント技術年報 42 号、pp.263-266、1988.
- 18) 林田宏、佐藤靖彦、小林竜太、吉田安寿：凍結融解作用により劣化した RC はり部材の有限要素解析による構造性能評価、コンクリート工学年次論文集、Vol.35、No.1、pp.901-906、2013.
- 19) 土木学会、2013 年制定 コンクリート標準示方書〔維持管理編〕、2013.
- 20) Muttaqin HASAN、Hidetoshi OKUYAMA、Yasuhiko SATO and Tamon UEDA：Stress-Strain Model of Concrete Damaged by Freezing and Thawing Cycles、Journal of Advanced Concrete Technology、Vol.2、No.1、pp.89-99、2003.
- 21) 緒方英彦、野中資博、藤原貴央、高田龍一、服部九二雄：超音波法によるコンクリート製水路の凍害診断、コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関するシンポジウム、日本コンクリート工学協会、pp.63-70、2006.
- 22) 野口博章、満木泰郎、溝渕利明、山田啓介：凍結融解作用を受けるコンクリートの劣化深度評価に関する基礎的研究、土木学会論文集 E、Vol.62、No.3、pp.592-605、2006.
- 23) 例えば、凍害が疑われる構造物の調査・対策手引書（案）、（独）土木研究所寒地土木研究所、参 4-7-参 4-9、2011.

STUDY ON EVALUATING THE LOAD-CARRYING CAPACITY OF AN RC BEAM SUBJECTED TO THE COMBINED DETERIORATION OF FATIGUE AND FROST DAMAGE

Budget : Grants for operating expenses General account

Research Period : FY2011-2015

Team : Cold-Region Maintenance Engineering Research
Group (Materials Research Team)

Author : HAYASHIDA Hiroshi

SHIMATA Akinori

Abstract : The mechanical properties of concrete that had been subjected to the combined deterioration of fatigue and frost damage were examined by using cylindrical specimens. The order of concrete deterioration and the severity of concrete deterioration were used as variables. The examination clarified that the mechanical properties of concrete that has undergone combined deterioration could be evaluated by measuring the speed at which ultrasonic waves propagate through the concrete. Furthermore, the load-carrying capacities of RC beams were examined by using static loading test data for RC beams that had undergone different deterioration types. The examination revealed that the load-carrying capacities could be evaluated by incorporating the strength decrease in a compressive zone into existing yield stress equations. Finally, this study proposes a stress-strain model for concrete that has undergone frost damage under compressive stress.

Key words: fatigue, frost damage, combined deterioration, RC beam, load-carrying capacity