

内部劣化を有する RC 部材の曲げ耐荷性能について

Flexural behavior of RC members with simulated internal deterioration

(国研)土木研究所 寒地土木研究所 ○正会員 角間 恒 (Ko Kakuma)
 (一社)施工技術総合研究所 正会員 渡邊晋也 (Shinya Watanabe)
 (国研)土木研究所 寒地土木研究所 正会員 西 弘明 (Hiroaki Nishi)
 北海道大学大学院 正会員 松本高志 (Takashi Matsumoto)

1. はじめに

道路橋 RC 床版の劣化形態は多岐にわたるが、凍害やアルカリシリカ反応（以下、ASR）、塩害といった材料劣化に起因するものに関しては、劣化が床版内部から発生する特徴がある。また、疲労荷重のみで破壊に至る場合にも、鉄筋位置、すなわち床版内部に水平ひび割れが進展することが輪荷重走行試験により確認されている¹⁾。

RC 床版内部に発生する劣化については、各種の非破壊・微破壊調査手法の開発²⁾により、劣化が表面の変状として顕在化する以前での検出が可能になりつつある。一方、健全度評価は主にコアの各種試験結果に基づいて行われており、劣化形態を考慮した構造性能評価は行われていない。これは、劣化性状（形態や程度）と構造性能（耐荷性や疲労耐久性）との関係性が明らかでないことに起因しており、RC 床版を適切に維持管理するためには、内部劣化に関する調査結果を基に構造性能を適切に評価する手法を確立する必要がある。

本研究では、内部劣化が生じた RC 床版の性能評価手法の確立に向けた基礎的検討として、各種模擬劣化を導入した RC 梁部材の曲げ載荷実験を実施し、内部劣化の形態が曲げ耐力や剛性などの曲げ耐荷性能に与える影響の把握を試みた。

2. 実験方法

2.1 実験ケース

表-1 に、本研究に使用した供試体 7 体の概要を示す。N は劣化を導入しない基準供試体、L/50、L/150、L/50+150 は梁軸方向に 1 または 2 本の局所的な水平ひび割れを導入した供試体（以下、L シリーズ）、D/50、D/100、D/200 は梁の所定箇所ランダムなひび割れを導入した供試体（以下、D シリーズ）である。ここで、L シリーズは疲労により発生する軸方向鉄筋近傍での水平ひび割れを、D シリーズは凍害や ASR により発生する複数の水平ひび割れを想定している。

2.2 供試体

2.2.1 概要

(1) 基準供試体

基準供試体 N の形状・配筋図を図-1 に示す。実験には幅 100mm、高さ 200mm の矩形断面を有する長さ 1,700mm の梁供試体を使用した。引張鉄筋、圧縮鉄筋、せん断補強鉄筋には D13 (SD345)、D6 (SD345)、D6 (SD295A) を使用し、引張側鉄筋比 1.56% とした。鉄筋の降伏強度（ミルシート記載値）はそれぞれ

402N/mm²、371N/mm²、340N/mm² である。支点間隔は 1,400mm、せん断スパン比は 3.3 であり、せん断余裕度 1.83 の曲げ破壊型として設計した。

実験開始時におけるコンクリートの圧縮強度は 27.8N/mm²、静弾性係数は 21.6kN/mm² である。

(2) L シリーズ

L シリーズでは、水平ひび割れ位置を供試体パラメータとし、L/50 では上面から 50mm、L/150 では 150mm、L/50+150 では 50mm および 150mm の位置にひび割れを導入した。本シリーズの製作では、ひび割れ導入位置をコンクリートの打ち重ね箇所とし、打ち重ね面（先打ち側）に散布した膨張材とコンクリートの練混ぜ水との反応による膨張圧を利用してひび割れを導入した。

表-1 実験ケース一覧

供試体名	劣化性状 (想定する劣化要因)	ひび割れ位置 または 劣化深さ*
N	健全	なし
L/50	鉄筋近傍での 水平ひび割れ (疲労)	50
L/150		150
L/50+150		50、150
D/50	複数の水平ひび割れ (凍害、ASR)	50
D/100		100
D/200		200

※供試体上面からの距離 (mm)

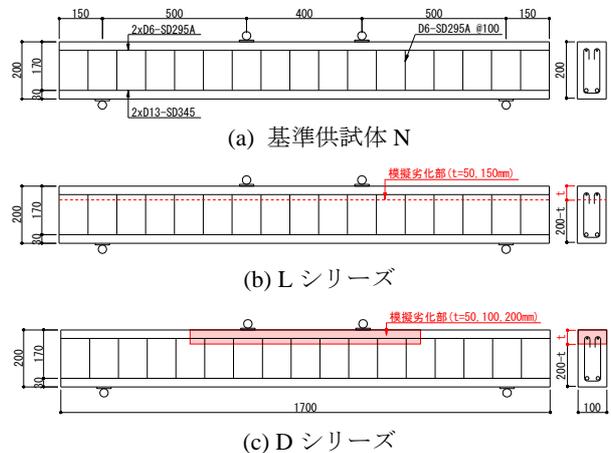


図-1 供試体の形状・配筋図

(3) D シリーズ

D シリーズでは、上面からの劣化深さを供試体パラメータとし、D/50 では上面から 50mm、D/100 では 100mm、D/200 では 200mm を劣化深さとした。本シリーズの製作では、劣化部分に打設するコンクリートの練混ぜ時に膨張材を添加し、練混ぜ水との反応による膨張圧を利用してひび割れを導入した。コンクリート自体に膨張材を練混ぜるため、L シリーズと比較してひび割れ本数が多く、ひび割れ発生方向のランダム性が強いものになる。

2.2.2 供試体の外観と劣化状況

後述する図-5 には、実験開始前の膨張過程において生じた供試体表面のひび割れ状況を示しており、L シリーズでは梁全長にわたった水平ひび割れの発生が、D シリーズでは劣化部分において梁軸方向を卓越方向とする複数のひび割れの発生が確認できる。実験開始時に実施したクラックスケールによるひび割れ幅計測では、L シリーズおよび D シリーズともにひび割れ幅が 0.2~0.5mm の範囲に分布する傾向が見られた。

また、コンクリートの劣化状態を把握するため、透過法による超音波速度の測定を行った。図-2 には、梁高さ方向を透過方向としたときの測定結果を示す。劣化部での超音波速度の平均値は、N の 3,417m/sec に対し、L/50、L/150、L/50+150、D/50、D/100、D/200 の順に、それぞれ 0.93、0.94、0.80、0.64、0.71、0.56 まで低下し、D シリーズで超音波速度の低下が顕著であった。

2.3 荷重方法

荷重は、等曲げスパン 400mm、せん断スパン 500mm とする 4 点曲げにより実施した。荷重には油圧ジャッキを使用し、目視できる曲げひび割れが発生するまでは荷重制御により、その後は変位制御に切替え、供試体が破壊に至るまで単調に荷重を増加させた。なお、膨張過程で荷重板付近にコンクリートのポップアウトや角落ちが生じた供試体については、実験開始前に当該箇所をエポキシ樹脂系接着剤により補修した後、実験に供した。

2.4 計測方法

実験における計測項目は、荷重、供試体変位および供試体表面ひずみとし、荷重および供試体変位の計測は動的に、供試体表面ひずみの計測はコンタクトゲージ法（標点距離 100mm）により静的に実施した。静的計測のタイミングは、降伏荷重までは荷重 10kN ごと、降伏荷重後は供試体中央変位が降伏荷重時の 1.5、2.0、2.5、3.0、3.5 倍になるときとした。

3. 実験結果

3.1 荷重-変位関係

図-3 に、各供試体の荷重と供試体中央変位（以下、中央変位）の関係を示す。図中の破線は、土木学会コンクリート標準示方書³⁾に基づいて計算した基準供試体 N の降伏荷重である。L シリーズおよび D シリーズにおいて、ひび割れ発生荷重は N と同程度であり、ひび割れ発生後の剛性、降伏荷重、最大荷重は低下した。また、供試体の破壊形態はいずれも曲げ破壊であったが、両シリーズとも上縁コンクリートの圧壊に伴う急激な荷

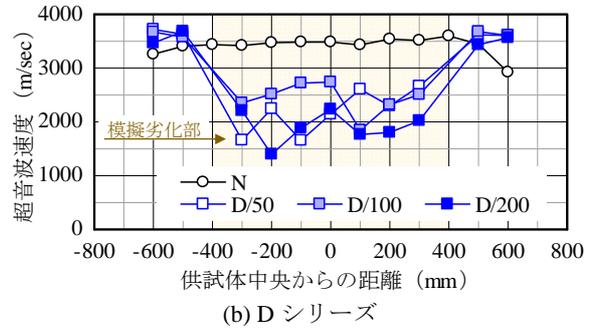
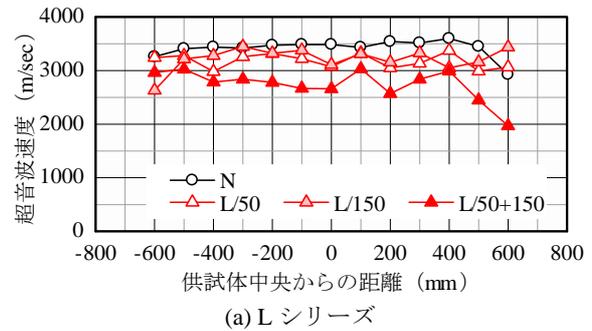


図-2 超音波速度

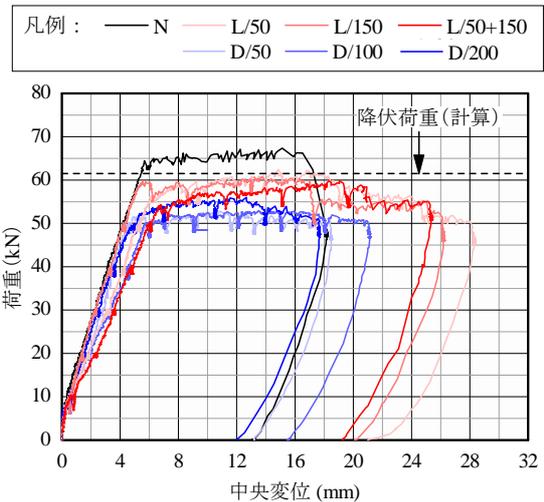


図-3 荷重-中央変位関係

重低下は見られず、圧壊後に緩やかな荷重低下を呈した。

3.2 剛性および耐力

図-4 に各供試体の降伏荷重、降伏時の割線剛性および最大荷重（これらをまとめて以下、曲げ耐荷性能）と超音波速度との関係を示す。ここで、縦軸は N の計測値で無次元化した値、横軸は梁全長での平均値（N、L シリーズ）あるいは劣化部での平均値（D シリーズ）である。

(1) L シリーズ

L シリーズでは、超音波速度の低下に比例して曲げ耐荷性能の低下が大きくなる傾向がある。水平ひび割れは、剛性に与える影響が特に大きく、圧縮鉄筋位置に水平ひび割れがある L/50 および L/50+150 で剛性の低下が顕著であった。また、L/50+150 では、引張鉄筋位置での水平ひび割れにより鉄筋・コンクリート間の応力伝達機構が低下するため、L/50 と比較して曲げ耐荷性能の低下が大きい。

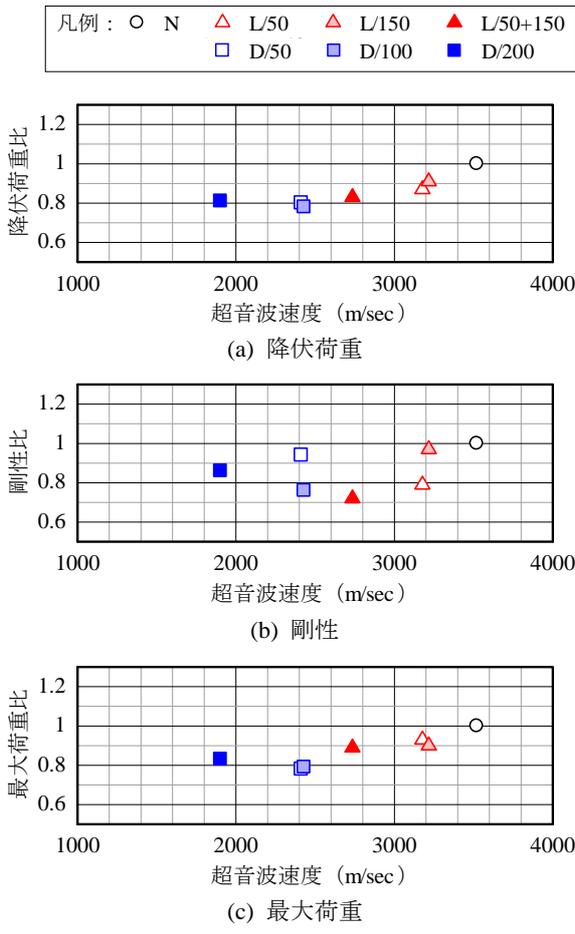


図-4 曲げ耐荷性能

(2) D シリーズ

D シリーズでは、L シリーズと比較して降伏荷重および最大荷重の低下が大きい。D/50 と D/100 では超音波速度が同程度であるにも関わらず D/100 で剛性の低下が顕著であり、凍害や ASR に関しては、ある特定の範囲で著しく劣化が進行するよりも、コンクリートの劣化が軽度であっても深さ方向に広く進行した場合に部材性能が低下する可能性があることを示唆する。一方、全断面劣化となる D/200 では、D/100 から剛性が改善される結果であった。ASR を対象にした既往の実験⁴⁾では、コンクリートの膨張が鉄筋により拘束される場合、ケミカルプレストレスが導入され、部材剛性が増加することが報告されているが、劣化部に引張鉄筋を配置した D/200 において同様の効果が得られたものと考えられる。一方で、N と同等までの剛性改善は見られなかったが、これには膨張過程で発生した鉄筋位置での水平ひび割れによる鉄筋付着強度の低下などが影響していると考えられる。

3.3 ひび割れ性状

図-5 に、実験終了時における供試体のひび割れ性状を示す。

(1) L シリーズ

L/50 では、曲げひび割れの発生範囲や進展が N と同様であり、等曲げスパン内では下方からのひび割れが水平ひび割れ位置でも連続的に上方に進展する。一方、せん断スパンにおいては、水平ひび割れ位置より上方へひび割れが進展しにくくなる傾向がある。

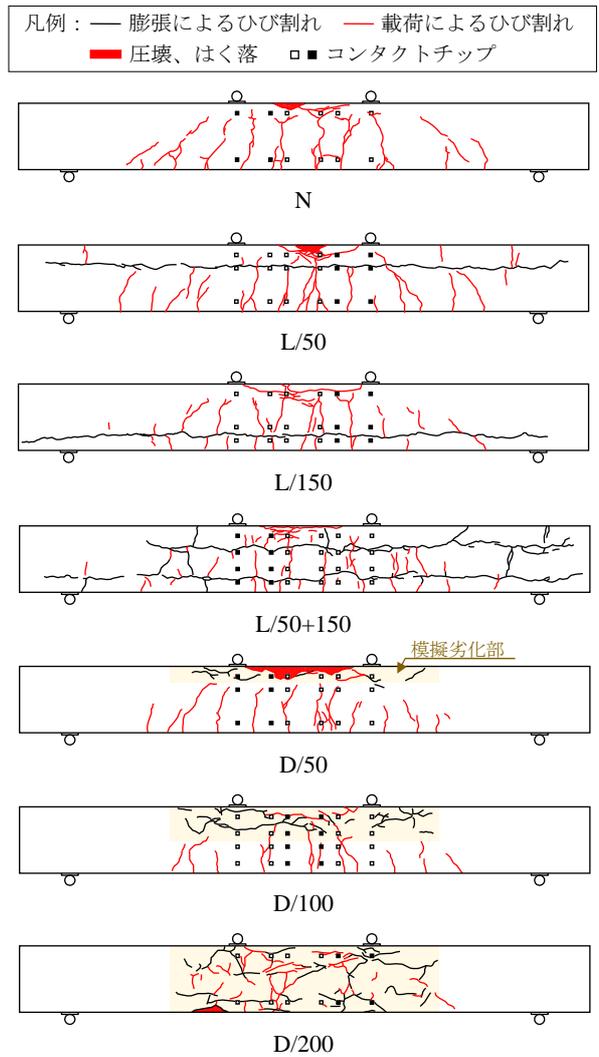


図-5 ひび割れ性状

L/150 では、ひび割れの進展傾向は N と同様であるが、下縁側では曲げひび割れが水平ひび割れを貫通せず不連続に進展しており、引張鉄筋位置への水平ひび割れの導入によりダウエル効果が消失していたことを表している。

L/50+150 では、供試体の上方においては L/50 と同様に等曲げスパンのみ曲げひび割れが水平ひび割れより上方に進展し、下方においては L/150 と同様にせん断スパンで曲げひび割れが不連続に進展する性状が見られる。

(2) D シリーズ

D/50 および D/100 では、曲げひび割れの本数や間隔に N との大きな差異はないが、劣化部へのひび割れは等曲げスパンに限られている。また、D/100 においては、圧縮鉄筋位置で水平方向に進展するひび割れが見られている。

D/200 では、典型的な曲げひび割れの発生・進展がなく、ひび割れ幅の拡大も特定の領域で発生した。また、荷重により発生したひび割れの多くは膨張過程で導入されたひび割れを起点・終点とする特徴がある。これらは、コンクリートの膨張により鉄筋付着が消失してひび割れの分散性が低下したこと、供試体に予め導入された領域内の弱部に沿ってひび割れの進展が卓越したことを表している。

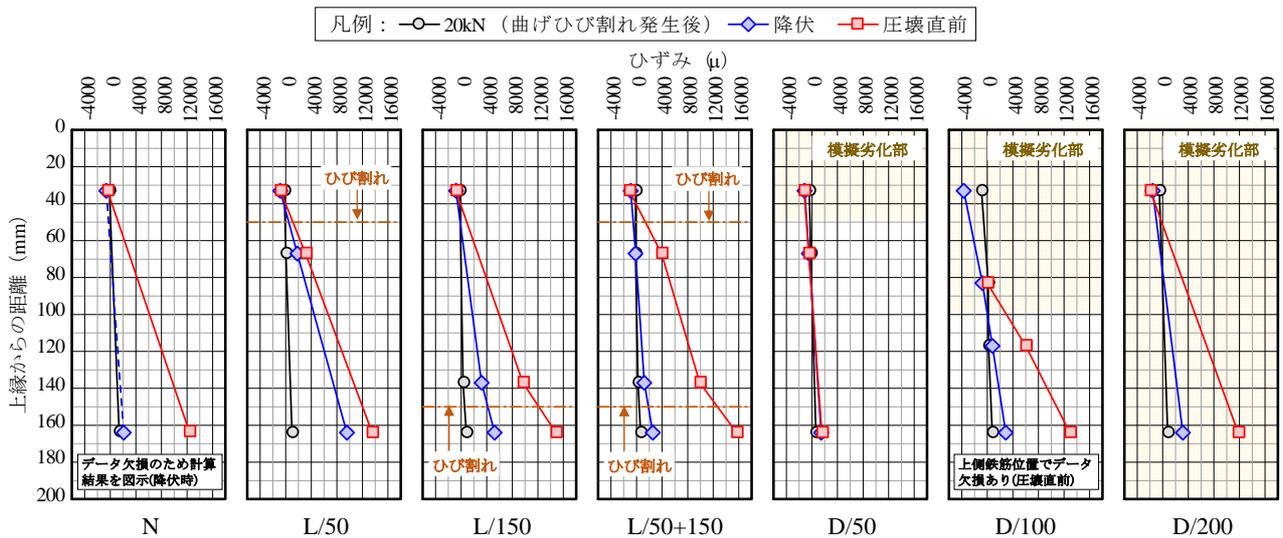


図-6 供試体表面のひずみ分布

3.4 表面ひずみ

図-6 に、コンタクトゲージ法により計測した供試体表面軸方向ひずみの分布を示す。本実験では、供試体中央および供試体中央から±150mm の位置の 3 断面において表面ひずみを計測したが、コンタクトチップと曲げひび割れの位置を考慮して、平均的な曲げ挙動を捉えていると考えられる断面（図-5 中の黒色中塗りで示すコンタクトチップ）に関する結果を図示する。なお、本図に示すひずみは荷重により生じたひずみであり、膨張によるひずみは含んでいない。

(1) L シリーズ

L/50 では、圧壊直前まで高さ方向 3 点でのひずみに線形関係の分布があり、平面保持が成立している。最大荷重直前に着目すると、N と概ね同様のひずみ分布であり、上側のみに水平ひび割れがある場合、水平ひび割れが曲げ挙動に与える影響は小さいと考えられる。実際に、図-4 に示したように、N に対する最大荷重および最大荷重時中央変位の比はそれぞれ 0.93 および 0.98 であり、他の供試体と比較して耐力低下が小さかった。

L/150 および L/50+150 では、水平ひび割れの上下でひずみ分布の勾配変化が見られる。前述したように、本供試体では水平ひび割れ位置で曲げひび割れが不連続となるひび割れ性状が確認されており、水平ひび割れがダウエル効果の消失や鉄筋の付着切れに類似した応力伝達機構の低下をもたらすことで、水平ひび割れのせん断ずれが生じていたと推察される。

(2) D シリーズ

D シリーズでは、本実験の範囲では概ね平面保持が成立し、D/50 および D/100 では劣化部コンクリートでの弾性係数の低下によって劣化深さが大きくなるほど中立軸位置が下がる。また、D/100 では、劣化部と健全部で若干のひずみ分布の勾配変化が見られるが、着目した断面では膨張により発生した水平ひび割れの拡大が見られており、この位置で応力伝達が損なわれたことが影響し

ている。D/200 では、D/50 および D/100 と比較して上方に中立軸が位置しており、ケミカルプレストレス効果により曲げ剛性が改善されていたことを表すものである。

4. おわりに

本研究では、RC 床版に発生する疲労を想定した局所的な水平ひび割れ、あるいは、凍害や ASR を想定した複数の水平ひび割れを導入した RC 梁の曲げ荷重実験を実施し、部材内部の劣化形態が曲げ耐荷性能に与える影響を確認した。その結果、本研究の範囲では、内部劣化により曲げ耐力や剛性が低下し、劣化の位置・深さによって低度度が異なること、ならびに、内部劣化が与える影響は剛性において顕著に見られることを示した。

本実験では、劣化の形態および位置・深さに着目して RC 梁部材の曲げ耐荷性能を評価したが、実際の RC 床版に生じる内部劣化は供用環境によって劣化程度が異なり、また破壊形態も異なる。したがって、内部劣化が生じた RC 床版の性能評価手法を確立するためには、実構造物における破壊形態を対象として、内部劣化の形態だけでなく程度も考慮できるように劣化性状と構造性能との関係性を体系的に整理する必要があると考えている。

参考文献

- 1) 土木学会：道路橋床版の要求性能と維持管理技術、2008。
- 2) 例えば、渡邊晋也、谷倉泉、佐藤智：コンクリート床版内部に発生した水平ひび割れの微破壊調査方法、土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集、CS10-007、2015。
- 3) 土木学会：2013 年制定コンクリート標準示方書、2013。
- 4) 小柳洽、六郷恵哲、内田裕市、長瀬道雄：著しい AAR 損傷を生じた RC はりの挙動、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.1、pp.947-952、1993。