

論文 載荷位置や水平ひび割れの範囲が RC 梁の耐力に与える影響

吉田 有希^{*1}・木作 友亮^{*2}・轟 菁^{*3}・藤山 知加子^{*4}

要旨 : RC 床版に生じた水平ひび割れは、発生範囲と載荷位置との相関関係が床版の破壊形態や耐力に影響を与える。本研究では、床版の支間方向に着目して一方向の RC 梁として扱い、載荷試験により載荷位置と水平ひび割れの範囲が耐力や破壊形態に与える影響を検討した。水平ひび割れを貫通させた試験体では、載荷位置によらず載荷初期の曲げ剛性の低下や耐力の低下が見られたが、水平ひび割れを一部に導入した試験体は、耐力が水平ひび割れ無しの試験体と同程度であった。必ずしも水平ひび割れの存在が耐力を低下させるわけではなく、水平ひび割れ範囲、載荷位置、主桁位置の相対関係が複雑に耐力へ影響することが示された。

キーワード : RC 梁, 水平ひび割れ, 静的載荷試験, セン断スパン比, 支点外載荷, 耐力, 重ね梁

1. はじめに

日本には、老朽化した RC 床版が数多く存在する。劣化した RC 床版の残存耐力は、床版更新の優先順位を決定する際の指標となり得る。床版の耐力を低下させる要因の一つとして、床版内に生じた水平ひび割れが挙げられる。水平ひび割れは、疲労劣化した RC 床版の上側または下側の鉄筋位置の近くに見られることが多く¹⁾、床版の一部領域だけではなく床版全域に及ぶ²⁾こともある。池端らや林田は、水平ひび割れを有する RC 床版は、押抜きせん断耐力が低下することを示している^{3), 4)}。床版の耐力評価時は、一般的に支間中央載荷を想定している。しかし、実橋の RC 床版で観察される水平ひび割れの範囲や載荷位置は複雑であり、こうした水平ひび割れの範囲と載荷位置の相関関係が、床版の破壊形態や耐力に影響すると考えられる。そこで本研究では、床版の支間方向に着目して一方向の RC 梁として扱い、載荷位置と水平ひび割れの範囲をパラメータとした載荷試験により、これらが耐力や破壊形態に与える影響を検討する。

2. 試験の概要

2.1 試験体の概要

本試験では、水平ひび割れは偶発的に様々な範囲に発生し得ること、これに対して主桁の位置は相対的に変化すること、また床版支間方向の様々な位置に車両荷重が載荷されることを想定した。これらを単純な RC 梁の試験で再現するため、載荷位置や水平ひび割れの導入範囲を変化させて 8 体の静的載荷試験を行った。試験体長さおよび 2 点載荷時の載荷スパン (500mm) を一定とした。各試験体の主要寸法を表 1 に示す。試験体長さおよび 3000mm、試験体幅は 250mm、厚さは 200mm、有効高さは 160mm とした。他の諸元は、床版支間を 3m と仮定し、

昭和 48 年の道路橋示方書⁵⁾に準じて設定した。下側の主鉄筋は D19、上側の主鉄筋は D13 とし、どちらも 125mm ピッチで配置した。配力鉄筋は上下どちらも D19 とし、下側は主鉄筋の上に 150mm ピッチで、上側は主鉄筋の下に 300mm ピッチで配置した。

試験体の概要を図 1 に示す。支点間スパンは、Case 1~5 が 2400mm、Case 6~8 が 2200mm とした。Case 1, 2 は、床版支間中央が載荷されることを想定し、試験体の中央を 2 点載荷 ($a/d=5.94$) した。Case 3~5 は、床版支間中央から主桁側に寄った位置へ車両が走行することを想定し、右側の載荷点を支点から 250mm の位置 ($a/d=1.56$) とした。Case 6~8 は、張出床版部に車両が通行することを想定し、支点から外側に 200mm の 1 点を載荷した。水平ひび割れは上側鉄筋の下 (試験体上面から 70mm 下方) に導入した。松江らの研究⁶⁾に基づき、コンクリート打設時に膨張材を散布し、最大 2.0mm 幅程度の模擬水平ひび割れを導入した。ひび割れの導入後、すべての試験体で長さ方向にひび割れが貫通していることを試験体側面から確認した。載荷位置ごとに、水平ひび割れ無し、水平ひび割れを一部に導入 (以下、途中止めと呼ぶ)、水平ひび割れを長手方向に貫通の 3 ケースを用意した。ただし、 $a/d=5.94$ の水平ひび割れ無しは省略した。

2.2 試験材料

コンクリートには早強ポルトランドセメントを使用し、水セメント比は 55.6%、スランプは $12.0 \pm 2.5\%$ 、空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ とした。強度試験用の供試体は、載荷試験体と同環境の室温で保管した。載荷試験開始時 (材齢 27 日) の圧縮強度は 35.0 N/mm^2 、静弾性係数は 31.2 kN/mm^2 、割裂引張強度は 2.37 N/mm^2 であった。ミルシートで把握した鉄筋 (SD345) の降伏強度は、D19 が 385 N/mm^2 、D13 が 390 N/mm^2 であった。

*1 株式会社 IHI 技術基盤センター 材料・構造グループ 工修 (正会員)

*2 株式会社 IHI 技術基盤センター 材料・構造グループ 工博 (正会員)

*3 株式会社 IHI 技術基盤センター 材料・構造グループ 工修

*4 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 都市イノベーション部門准教授 工博 (正会員)

最大荷重までの変位量から5段階に分類した。

支間中央載荷($a/d=5.94$)で水平ひび割れを途中止めした Case 1 は、水平ひび割れの左側端部から斜め方向のひび割れ（以下、斜めひび割れと呼ぶ）が進展し、斜めひび割れが大きく開口して荷重低下した。一方、水平ひび割れを貫通させた Case 2 は、下側鉄筋の降伏後に水平ひび割れの下側でコンクリートが圧縮破壊に至った。

載荷位置を右側支点に寄せた Case 3~5($a/d=1.56$)は、載荷中に載荷桁が傾き、左側載荷点に荷重が集中した。水平ひび割れの無い Case 3 は、左側載荷点付近で斜めひび割れが進展した後、左側載荷点付近でコンクリートが圧縮破壊するせん断圧縮破壊が生じた。一方、水平ひび割れを途中止めた Case 4 は、右側載荷点を起点に水平ひび割れ右端から斜め下方にひび割れが発生し、最終的には左側載荷点付近でコンクリートが圧縮破壊した。水平ひび割れを貫通させた Case 5 は、Case 2 と同様に水平ひび割れの下側でコンクリートが圧縮破壊した。水平ひび割れの開きおよび相対ずれを比較すると、Case 4 は載荷スパン中央が最大であったが、Case 5 は左側載荷点付近

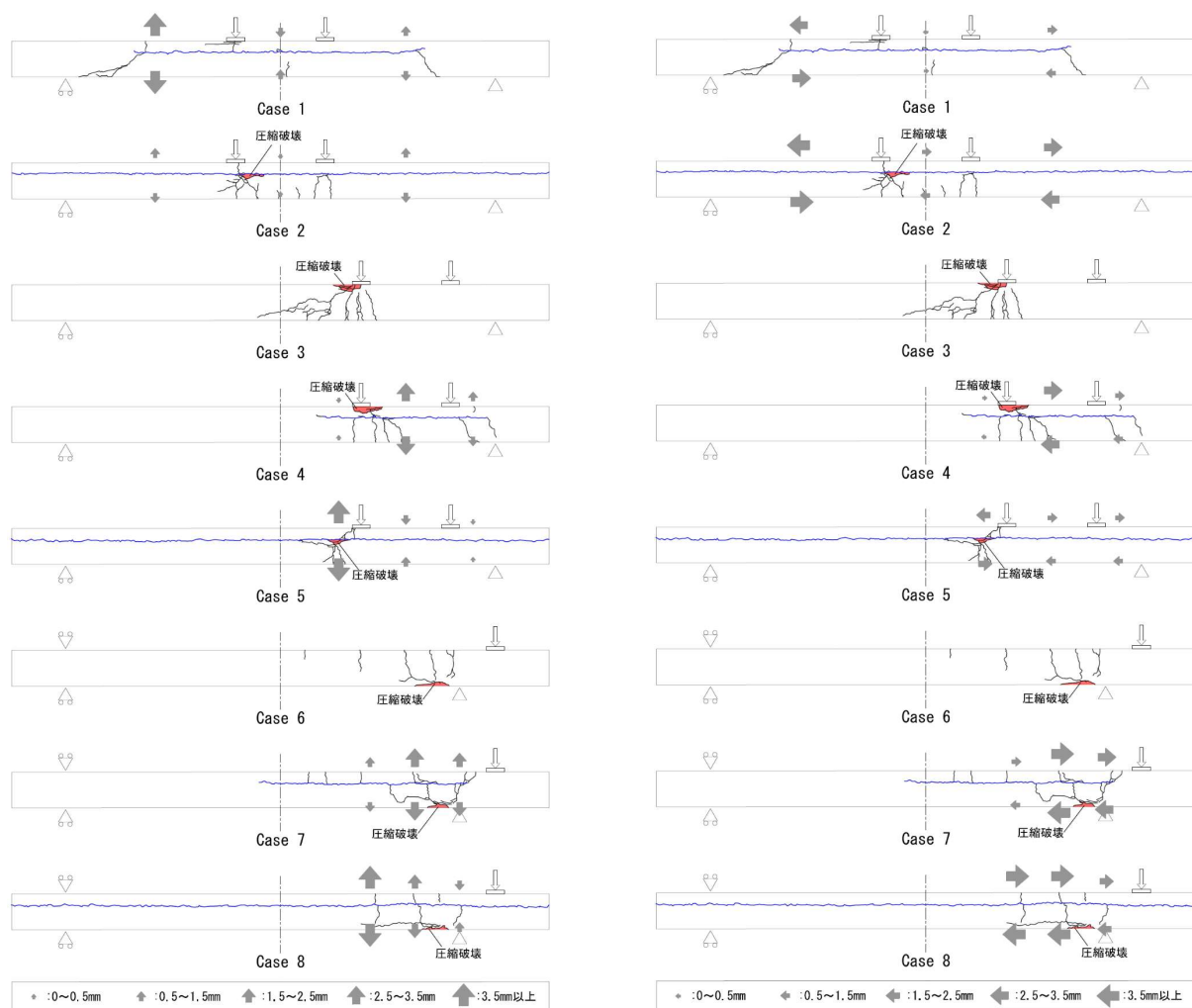
が最も大きかった。

支点外載荷の Case 6~8 は、右側支点とその左側に曲げひび割れが発生し、鉄筋降伏後に右側支点付近の試験体下面でコンクリートが圧縮破壊した。Case 7 では、水平ひび割れと右側載荷点を結ぶ斜めひび割れが発生した。Case 7 の開口変位および相対ずれ変位は、中央の計測位置が最大であった。一方 Case 8 は、載荷位置から離れるほど開口変位と相対ずれ変位が大きくなった。

3.2 最大荷重と荷重 - たわみ曲線

各ケースの荷重 - たわみ曲線を図-3 に示す。水平ひび割れ無しを黒、途中止めを赤、貫通を青の線で表している。荷重値には試験時に用いた治具重量を加算した。

水平ひび割れを貫通させた試験体では、載荷位置によらず載荷初期の曲げ剛性の低下や耐力の低下が見られた。これは、載荷前から水平ひび割れによって梁が2層化しており、ひび割れ面の噛み合わせ抵抗に依存する構造となっていたためと考えられる。一方、水平ひび割れを途中止めた試験体は、耐力が水平ひび割れ無しの試験体と同程度であった。なお、全ケースで、引張領域の鉄筋が



(a) 載荷後（開口変位を可視化）

(b) 載荷後（相対ずれ変位を可視化）

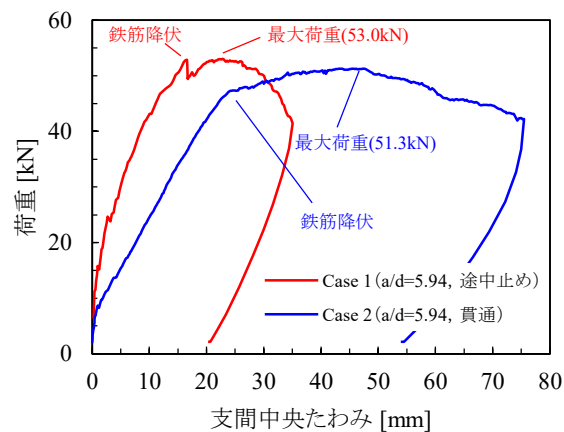
図-2 試験体のひび割れ図（試験体正面）

降伏した。

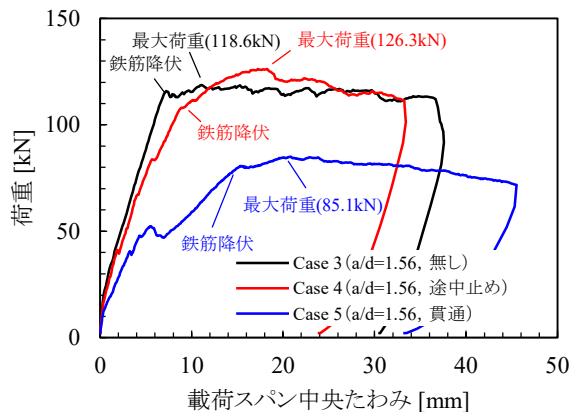
Case 6 は、計画とは異なり载荷中も支点治具がボルトで固定されていた。破壊形態や耐力に影響するため、载荷位置たわみ 10mm で回転拘束を解除した。他と試験条件が異なるため、結果は参考値として取り扱う。

3.3 耐力と破壊形態の考察

実験の最大荷重と破壊形態について、設計耐力と共に表-2 へ整理する。せん断に対する設計耐力は、コンクリート標準示方書⁷⁾に示されている棒部材の設計せん断耐力を採用した（部材係数は 1.0 として算出）。Case 3~5 は、载荷が左側に偏っていたと想定されるため、左側を一点载荷した場合の設計耐力を括弧内に記載した。以降



(a) Case 1, 2 ($a/d=5.94$)



(b) Case 3~5 ($a/d=1.56$)

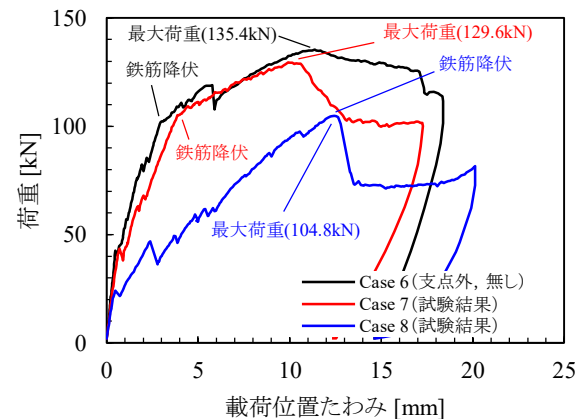
は、設計耐力と実験値を比較し、各試験体の破壊挙動や耐力について考察する。

(1) Case 1, 2 ($a/d=5.94$)

a/d が 5.94 である Case 1, 2 について、载荷初期の荷重-たわみ曲線を図-4 に示す。同図には、ひび割れ発生等のイベントや 4 ケースの曲げ剛性の計算値（全断面有効、コンクリートの引張抵抗を無視、重ね梁の全断面有効、重ね梁の引張抵抗無視）を示した。

途中止めの Case 1 は、水平ひび割れを有していても曲げひび割れが生じる約 10kN までは、曲げ剛性が全断面有効の計算値と同等であり、その後は引張抵抗無視の曲げ剛性に移行した。また、約 20kN で水平ひび割れの左端から斜めひび割れが発生すると曲げ剛性がさらに低下した。最大荷重は 53.0kN であり、設計曲げ耐力である 63.4kN の約 84%に留まった。これは、曲げ引張破壊に至る前に斜めひび割れが下面まで到達し、断面の一体性が失われたためだと考えられる（図-5）。

水平ひび割れが貫通している Case 2 は、8kN までの初期段階では、曲げ剛性が全層の全断面有効と重ね梁の全断面有効の中間に位置していた。以降は、引張抵抗を無視した重ね梁の曲げ剛性に沿った挙動を示した。この時点で、水平ひび割れ面の噛み合わせ抵抗が減少したと考えられる。一方で Case 2 の最大荷重は 51.3kN であり、重ね



(c) Case 6~8 (支点外载荷)

図-3 荷重 - たわみ曲線

表-2 各ケースの実験値・破壊形態・設計耐力

	実験		設計耐力(kN)							
	最大荷重 (kN)	破壊形態	全層		上層		下層		重ね梁 ^{*2}	
			曲げ	せん断	曲げ	せん断	曲げ	せん断	曲げ	せん断
Case 1	53.0	斜めひび割れの進展	63.4	88.5	7.0	26.8	35.0	60.3	41.9	87.1
Case 2	51.3	曲げ引張破壊								
Case 3	118.6	せん断圧縮破壊	257.2 (85.7)	88.5	26.4 (8.8)	26.8	134.4 (44.8)	60.3	160.8 (53.6)	87.1
Case 4	126.3	曲げ引張破壊								
Case 5	85.1	下層の曲げ引張破壊								
Case 6 ^{*1}	135.4 (参考)	曲げ引張破壊（負曲げ）	171.2	67.4	33.9	22.1	56.2	29.4	90.1	51.5
Case 7 ^{*1}	129.6	曲げ引張破壊（負曲げ）								
Case 8 ^{*1}	104.8	下層の曲げ引張破壊（負曲げ）								

^{*1}: Case 6~8 は、負曲げ载荷と見なして耐力を算出

^{*2}: 重ね梁の耐力は、水平ひび割れの上層の耐力と下層の耐力を加算

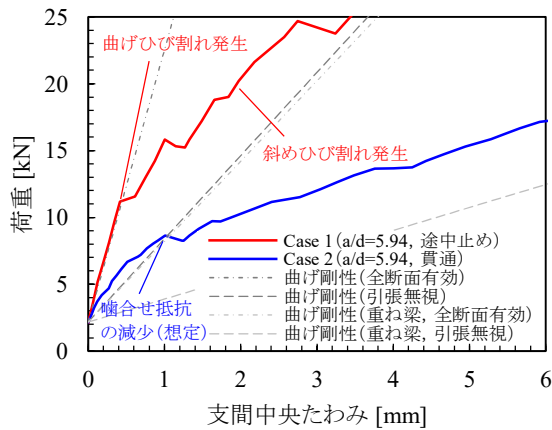


図-4 荷重 - たわみ曲線 (Case 1, 2, 曲げ剛性追加)



図-5 荷重中の斜めひび割れの開口・進展 (Case 1)

梁の設計曲げ耐力 41.9kN に比して 10kN 程度大きかった。この耐力差は、骨材の噛み合わせ抵抗の影響によるものであると考えられる。

(2) Case 3~5 ($a/d = 1.56$)

荷重位置を支点側に寄せた Case 3~5 について、荷重初期段階の荷重 - たわみ曲線を図-6 に示す。Case 3, 4 は、初期段階に全断面有効の計算値に近い曲げ剛性を有し、曲げひび割れの発生後は引張抵抗を無視した曲げ剛性の計算値へと移行した。貫通の水平ひび割れを有する Case 5 は、Case 2 と同様の傾向を示し、初期は全層または重ね梁の全断面有効の曲げ剛性の中間程度であり、12kN 以降は引張抵抗を無視した重ね梁の曲げ剛性に沿った挙動を示した。

水平ひび割れの無い Case 3 は、左側荷重点付近の斜めひび割れの進展による破壊であるのに対し、途中止めの Case 4 は左側荷重点で曲げ引張破壊に至っており破壊形態が異なる。Case 4 は、80kN 程度で水平ひび割れの右端を起点に斜めひび割れが発生した。図-7 に示すように、右側の荷重点と支点が近い場合、右側にはアーチ機構が働くと考えられる。ここで、水平ひび割れが無いまたは水平ひび割れの幅が狭い場合は、上下の層が一体的な挙動を示すため、右側に流れる力は通常の範囲である。一方で今回の Case 4 のように、水平ひび割れを起点とする斜めひび割れが存在すると、水平ひび割れの開口変位が大きくなって噛み合わせ抵抗が機能しなくなるため、上層だけでアーチ機構を形成して右側支点到に流れる力が相対的に大きくなると考えられる。これにより、Case 4 の水平ひび割れの左側には、斜めひび割れが生じなかったものと考えられる。

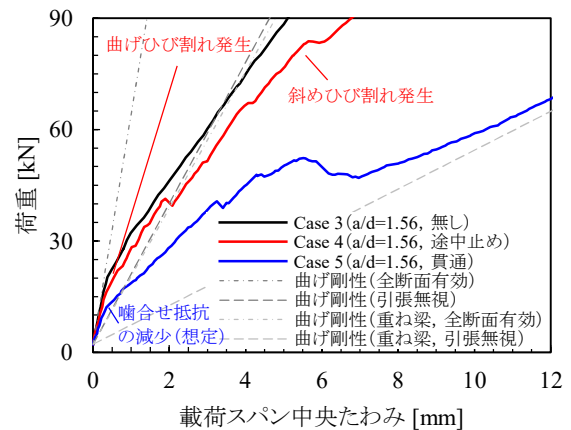


図-6 荷重 - たわみ曲線 (Case 3~5, 曲げ剛性追加)

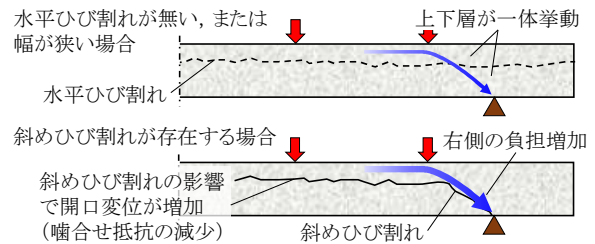


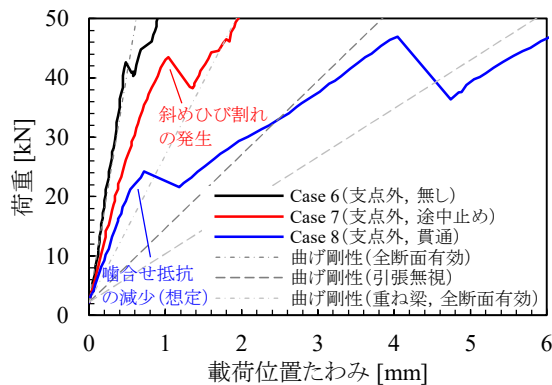
図-7 斜めひび割れ発生後の荷重の流れ

Case 3 の最大荷重は 118.6kN であり、全層の設計せん断耐力である 88.5kN よりも大きい。これは、右側荷重点と右側支点との間に圧縮ストラットが形成され、鉛直荷重に抵抗したためだと考えられる。この影響は、Case 4 や Case 5 だけではなく、支点外荷重の Case 6~8 にも現れていると推察される。Case 4 の最大荷重は 126.3kN であり、2 点荷重時の設計曲げ耐力 (全層) 257.2kN と左側 1 点荷重時の設計曲げ耐力 (全層) 85.7kN の間に位置することが示された。荷重桁の傾きを含めた曲げ耐力の予測は難しいため、解析的な評価を行うことが今後の検討課題である。左側 1 点荷重の重ね梁の設計曲げ耐力が 53.6kN であるのに対し、Case 5 の最大荷重は 85.1kN であった。これには、完全なる 1 点荷重ではないこと、ひび割れ面の噛み合わせ抵抗が一定以上の耐力増加効果を示したこと、右側荷重点と右側支点が近く圧縮ストラット機構が発現したことが影響していると考えられる。

Case 3 に比して Case 4 の最大荷重が高いことから、必ずしも水平ひび割れの存在が耐力を低下させるわけではなく、水平ひび割れの範囲や荷重位置が複雑に影響することが本研究の結果から示された。

(3) Case 6~8 (支点外荷重)

支点外荷重を行った Case 6~8 について、荷重初期段階の荷重 - たわみ曲線を図-8 に示す。Case 6, 7 の曲げ剛性は、Case 3, 4 と同様の傾向を示した。Case 6 は、曲げ引張破壊が生じたが、最大荷重は設計曲げ耐力 171.2kN よりも小さい 135.4kN であった。これは、荷重試験の途中まで、支点の回転が拘束されていたことが影響していると考えられる。Case 7 の最大荷重は 129.6kN であり、



図－8 荷重 - たわみ曲線 (Case 6～8, 曲げ剛性追加)

全層や重ね梁のせん断耐力 (67.4kN, 51.5kN) や重ね梁の曲げ耐力 (90.1kN) よりも大きく、全層の曲げ耐力 (171.2kN) よりも小さかった。載荷点と右側支点が近いことや水平ひび割れ面の噛み合わせ抵抗の存在が荷重増加要因であり、一方で水平ひび割れも右端から斜めひび割れが試験体上面に向けて進展していることは荷重低下の要因として挙げられる。斜めひび割れが発生しやすい水平ひび割れの範囲や水平ひび割れより上方に進展する斜めひび割れが耐力に与える影響は、今後の研究課題である。

Case 8 の最大荷重は 104.8kN であり、重ね梁の設計曲げ耐力の 90.1kN に近い値であった。相対差から推測するひび割れ面の噛み合わせ抵抗力は 15kN 程度であった。

以上の結果から、水平ひび割れが発生した RC 梁の耐力は、上層と下層の重ね梁の設計耐力から評価すれば安全に評価できることが分かった。また、本研究の範囲では、水平ひび割れで二層化している試験体は、より厚さのある層で破壊が生じる傾向が見られた。しかしこれらは、上側鉄筋より下方に水平ひび割れを導入していることが影響していると想定される。上側鉄筋と同じ高さに水平ひび割れが存在する場合は、水平ひび割れより上方のコンクリートが無筋となる。この場合は、薄い層が先に破壊して厚い層のみが残り、重ね梁よりも低い耐力を示す可能性がある。また本研究の結果から、水平ひび割れの範囲や載荷位置は、破壊形態や耐力に複雑な影響を及ぼすことが示された。こうした現象を明らかにするため、今後も検討を継続したいと考える。

4. まとめ

本検討で得た知見を以下に整理する。

- (1) Case 3～5 および Case 6～8 を比較したところ、水平ひび割れを貫通させた試験体では、載荷位置によらず載荷初期の曲げ剛性の低下や耐力の低下が見られた。これは、水平ひび割れで梁が 2 層化しており、ひび割れ面の噛み合わせ抵抗に依存する構造であるためだと考えられる。一方、水平ひび割れを途中止めした試験体は、

耐力が水平ひび割れ無しの試験体と同程度であった。

- (2) 載荷位置が主桁に近い場合は (Case 3～8) , 片側の載荷点と支点の間に圧縮ストラットが形成され、棒部材の設計せん断耐力よりもせん断耐力が大きくなる傾向が見られた。
- (3) 水平ひび割れ途中止めの Case 1, 4, 7 は、曲げひび割れが生じるまで曲げ剛性が全断面有効と同等であり、その後は引張抵抗無視の曲げ剛性に移行した。水平ひび割れが貫通している Case 2, 5, 8 は、初期の曲げ剛性は全層の全断面有効と重ね梁の全断面有効の間に位置し、以降は引張抵抗を無視した重ね梁の曲げ剛性程度であった。
- (4) 本試験の結果から、必ずしも水平ひび割れの存在が耐力を低下させるわけではなく、水平ひび割れ範囲、載荷位置、主桁位置の相対関係が複雑に耐力へ影響することが示された。
- (5) 水平ひび割れが発生した RC 梁の耐力は、重ね梁の設計耐力から評価すれば安全に評価できることが分かった。ただし、水平ひび割れ上層のコンクリートが鉄筋を有さない場合は、本研究と異なる結果になると想定される。

参考文献

- 1) 北川真也, 木村定雄, 歌川紀之, 森山守: 内部損傷を有するコンクリート床版の打音特性に関する基礎実験, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.72, No.1, pp.1-11, 2016.6
- 2) 南波謙太, 藤山知加子, 新名勉, 青木康素: 鋼板接着 RC 床版における水平ひび割れ進展過程の分析, 第 10 回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.313-318, 2018.10
- 3) 池端信哉, 佐藤克樹, 中村光: 内部ひび割れが RC スラブの押抜きせん断耐力に与える影響に関する実験的検討, 構造工学論文集, Vol. A66, pp.694-702, 2020.3
- 4) 林田宏: 水平ひび割れの位置や凍害劣化深さの違いが床版の耐力低下に与える影響, 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所月報, No.804, pp.2-13, 2020.4
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 1973
- 6) 松江晃太, 角間恒, 松本高志, 西弘明: 画像解析を用いた水平模擬ひび割れを有する RC 梁の曲げ挙動に関する検討, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 75 号, 2019.1
- 7) 土木学会コンクリート委員会: 2017 年制定コンクリート標準示方書—設計編一, 土木学会,