

論文 圧縮鉄筋近傍に模擬水平ひび割れを有する RC 床版の耐力低下に関する研究

石黒 裕崇^{*1}・池端 信哉^{*2}中村 光^{*3}・三浦 泰人^{*4}

要旨: 本研究では、圧縮鉄筋近傍の水平ひび割れの幅や領域が RC 床版の押抜きせん断耐力低下に及ぼす影響を、実験的ならびに解析的に検討した。実験では、載荷点下部の圧縮鉄筋位置に段ボールの中芯を用いて水平ひび割れを模擬し、模擬水平ひび割れの幅や領域を変化された場合の載荷を行い、水平ひび割れの幅や領域に応じて押抜きせん断耐力は、無損傷の場合に比べ低下することを明らかにした。一方解析では、3次元剛体バネモデルを用い、水平ひび割れ幅の影響を評価し、水平ひび割れ幅が大きくなるにつれて押抜きせん断耐力が低下することを示すとともに、その低下メカニズムを検討した。

キーワード: RC 床版, 水平ひび割れ, 圧縮鉄筋, 押抜きせん断破壊, 3D-RBSM

1. はじめに

道路構造物の維持管理における最重要課題として、RC 床版の疲労の問題がある。既に多くの RC 床版が疲労損傷を受けている状態であり、高速道路株式会社 3 社では、2015 年から 15 年間で、橋梁延長 224km, 事業費 1 兆 6 千億円規模の RC 床版の大規模更新を行っていく計画としている¹⁾。そのため、RC 床版の疲労を評価する検討が現在積極的に行われており、例えば前島らは、塩害による鉄筋腐食を模擬した RC 床版の輪荷重試験と疲労損傷を考慮できる FEM 解析により鉄筋腐食量と耐疲労性の関係を明らかにしている²⁾。また、前川や藤山らは、FEM 解析による疲労損傷の進展を評価できる手法を開発し、各種条件や既往の損傷状態を考慮した場合の RC 床版の疲労寿命の予測を可能にしている^{3),4)}。RC 床版の疲労寿命に及ぼす影響要因として、前島らは上面鉄筋の腐食により発生する水平ひび割れを挙げている。しかし、水平ひび割れが最終的な破壊モードである押抜き挙動と直接関係すると考えられる静的な押抜きせん断耐力に及ぼす影響は明確になっていなかった。それに対し、著者らは模擬水平ひび割れを導入した供試体により、圧縮鉄筋近傍の水平ひび割れが押抜きせん断耐力に影響を与えることを実験的および解析的に明らかにするとともに、その耐力低下過程について検討をした⁵⁾。しかしながらその検討は、水平ひび割れ領域 200mm 四方と水平ひび割れ幅 0.6mm の 1 ケースのみであり、水平ひび割れの範囲や幅などの進展状況が、押抜きせん断耐力に与える影響を明らかにするには至っていない。

そこで、本研究では、著者らの既往の実験と同様に模擬ひび割れを導入した供試体を用い、まず RC 床版の上

面鉄筋近傍に発生するひび割れの幅や領域が異なる場合における押抜きせん断耐力への影響を実験的に評価した。また、荷重載荷過程でのひび割れ進展状況についても確認した。次に、3次元剛体バネモデル (3D-RBSM) を用いて、初期ひび割れを導入したモデルを作製し、水平ひび割れのひび割れ幅に着目して、ひび割れ幅がひび割れ進展挙動や押抜きせん断耐力に及ぼす影響を検討した。

2. RC 床版の押抜きせん断試験

2.1 供試体概要

図-1 に示すような縦 1200mm, 横 1200mm, 厚さ 85mm の複鉄筋 2 方向床版を作製した。図-1 において、赤線が主筋、青線が配力筋を示している。供試体は健全供試体に加え、模擬水平ひび割れ領域を導入した供試体 4 体の合計 5 体とし、実床版の 2 分の 1 の大きさを想定して、道路橋示方書⁶⁾に基づいて諸元を決定した。詳細は著者らの既報の供試体概要を参照して頂きたい⁵⁾。

供試体は、早強ポルトランドセメントを用いて表-1 に示す配合をもとに作製した。材齢 1 日で脱型後、屋外にて一週間湿布養生を行い、載荷試験を行った。

2.2 模擬水平ひび割れの幅と領域

本研究では、圧縮鉄筋の腐食によって生じると予想される圧縮鉄筋近傍の水平ひび割れの影響評価を対象としている。電食試験などで鉄筋を腐食させる場合、ひび割れ幅やひび割れ領域をコントロールすることは困難であ

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	G_{max} (mm)	単位量(kg/m ³)				
			W	C	S	G	Ad
44.5	39.5	25	169	380	671	1045	3.42

*1 名古屋大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 修士課程 (学生会員)

*2 名古屋大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 MS (正会員)

*3 名古屋大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 教授 博士(工) (正会員)

*4 名古屋大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 助教 博士(工) (正会員)

り、水平ひび割れの存在のみの影響を検討することができない。そこで、段ボールの構成要素の一つである中芯と呼ばれる波型の部分を用いることで、ひび割れ領域やひび割れ幅を明確にした模擬水平ひび割れを導入した。なお、本手法では波の向きは1次元的な方向であり、主筋直角方向に波が存在する。段ボールを用いたのは、波型のひび割れ面を再現できるうえ、剛性や強度が小さく、部材の変形には影響を与えず、入手や加工が容易なためである。模擬水平ひび割れの領域は、既往の研究で設定した、圧縮側主筋間隔が150mmの場合に複数の圧縮側鉄筋が腐食しひび割れが鉄筋間でつながった場合の最小範囲程度と想定される200×200mmを基本とし、ひび割れ幅を0.6mmと1.2mmの2通りに変化させた。0.6mmの供試体は、既報の供試体と同じ諸元であるが、既報の実験結果は剛性や耐力において解析結果との差が大きかったため、実験精度の検証の意味も含め2体行った。またひび割れ領域の影響として、ひび割れ幅を0.6mmとし、その領域長さが2倍となる400×400mmの供試体も作製した。本研究で作製した5体の供試体一覧を表-2に示す。

2.3 荷重および計測概要

荷重時の支持条件、荷重方法、変位測定点は既報と同様であり、支持条件は直角2方向スパンがともに1000mmの4辺単純支持として、供試体中央において100×100mmの鋼板を介し、油圧ジャッキにより静的荷重を行った。変位測定点の詳細は既報を参照されたい⁵⁾。

2.4 荷重-変位関係

実験より得られた荷重-変位関係を、図-2に示す。

表-2 供試体一覧

供試体名	領域(mm)	ひび割れ幅(mm)
健全	—	—
200-0.6 a,b	200×200	0.6
400-0.6	400×400	0.6
200-1.2	200×200	1.2

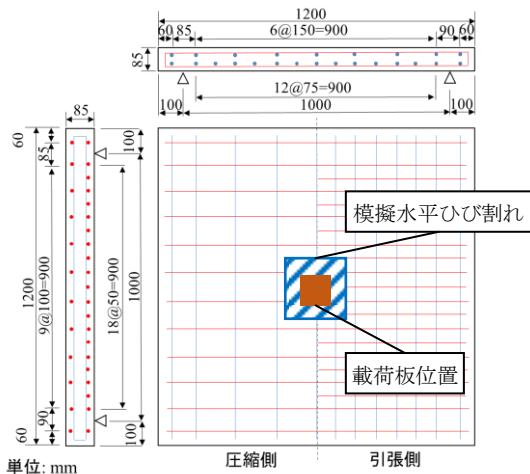


図-1 供試体概要

変位は供試体底面中央における絶対変位を用いた。一方荷重は、荷重試験時に、各供試体間で圧縮強度にばらつきがあったため、コンクリート標準示方書⁶⁾の面部材の押抜きせん断耐力算定式を参考にし、健全供試体の圧縮強度に合わせるように圧縮強度の比の平方根を用いて荷重の補正を行った。表-3にそれらの最大荷重、補正した最大荷重および圧縮強度を示す。健全、200-0.6 a, 200-0.6 b, 200-1.2 供試体においては、剛性変化後、各々でおおよそ一定の剛性を保ちながら最大荷重に達する挙動を示した。一方、400-0.6 供試体は、初期剛性以降は徐々に剛性が低下していく挙動を示した。表-3に示すように最大荷重は、圧縮強度で補正した値で健全供試体が147.8kNであったのに対し、200-0.6a 供試体が102.1kN、200-0.6b 供試体が119.5kN、200-1.2 供試体が95.2kN、400-0.6 供試体が99.0kNであった。なお、200-0.6 供試体は、2体で耐力にばらつきはあったが、いずれも既報⁵⁾の結果より大きいもので、後ほど示す解析結果とも概ね整合していることを付記しておく。健全供試体を基準として、200-0.6 供試体は64.1%と80.9%、200-1.2 供試体で64.4%、400-0.6 供試体で67.0%程度まで最大荷重が低下する結果となった。これより、模擬水平ひび割れが存在することで最大荷重が低下する傾向が既報に続き確認された。さらに、ひび割れ領域やひび割れ幅が大きくなることで、より最大荷重が低下するという傾向が今回の検討結果から新たに確認された。

表-3 最大荷重および圧縮強度

供試体名	最大荷重(kN)	補正最大荷重(kN)	圧縮強度(MPa)
健全	147.8	147.8	33.9
200-0.6 a	94.76	102.1	29.12
200-0.6 b	124.8	119.7	36.8
400-0.6	103.2	99.0	36.8
200-1.2	90.9	95.2	30.8

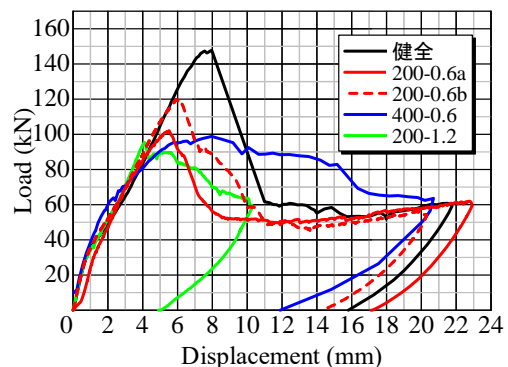


図-2 荷重-変位関係

2.5 供試体のひび割れ性状

載荷後に供試体の中央部において主筋直角方向に供試体を切断し、内部のひび割れ性状を確認した。図-3に、健全供試体、200-0.6 a 供試体、200-0.6 b 供試体、400-0.6 供試体および 200-1.2 供試体の内部ひび割れ性状をそれぞれ示す。図において、茶色い四角形は載荷板位置を示すものであり、赤線は導入した模擬水平ひび割れの位置を示している。

健全供試体においては、ひび割れが、載荷板の端部から約 45 度の角度で斜めに進展し、引張鉄筋付近からは鉄筋に沿うように生じていることが確認できる。

一方、200-0.6 a 供試体においては、載荷板端部から模擬水平ひび割れに向かってひび割れが進展した後、模擬水平ひび割れに沿って端部位置まで進展し、その後は斜めひび割れとなっている状況を確認できる。このひび割れ進展挙動は既報の実験と同様の挙動である。同様の模擬水平ひび割れである 200-0.6 b 供試体では、打設時の施工の影響で模擬水平ひび割れ位置は想定していた位置よりも右に 50mm ほどずれた位置となっている。そのため載荷板左端部からは、健全供試体と同様のひび割れ進展が見られる。一方、載荷板右端部からは 200-0.6

a と同様のひび割れ状況となっている。両者の荷重は 200-0.6 a の方が小さくなっているが、このひび割れ状況から、載荷板と模擬水平ひび割れの中心位置が一致していなくても、載荷板の下部に模擬水平ひび割れが存在していれば、荷重低下率やひび割れ進展は類似する可能性が示唆される。

200-1.2 供試体については、載荷板両端部から、模擬水平ひび割れの端部に向かってひび割れが進展した後、角度をほとんど変えることなく進展していき、載荷板左端部より伸びるひび割れはそのままの角度で下面まで貫通していった。載荷板右端部より伸びるひび割れは、引張鉄筋付近に到達した後、鉄筋に沿うように進展し、基本的にはひび割れ幅が半分の 200-0.6 供試体の状況と類似している。

400-0.6 供試体については、載荷板左側では角度の小さいひび割れが、右側からはほぼ垂直に模擬水平ひび割れに向かうひび割れが確認できる。載荷板左端部から伸びたひび割れは、そのまま模擬水平ひび割れ端部まで、模擬水平ひび割れに沿うように進展していき、その後斜めひび割れとなって、引張鉄筋付近に到達すると鉄筋に沿うようにひび割れが進展している。一方で載荷板右端部

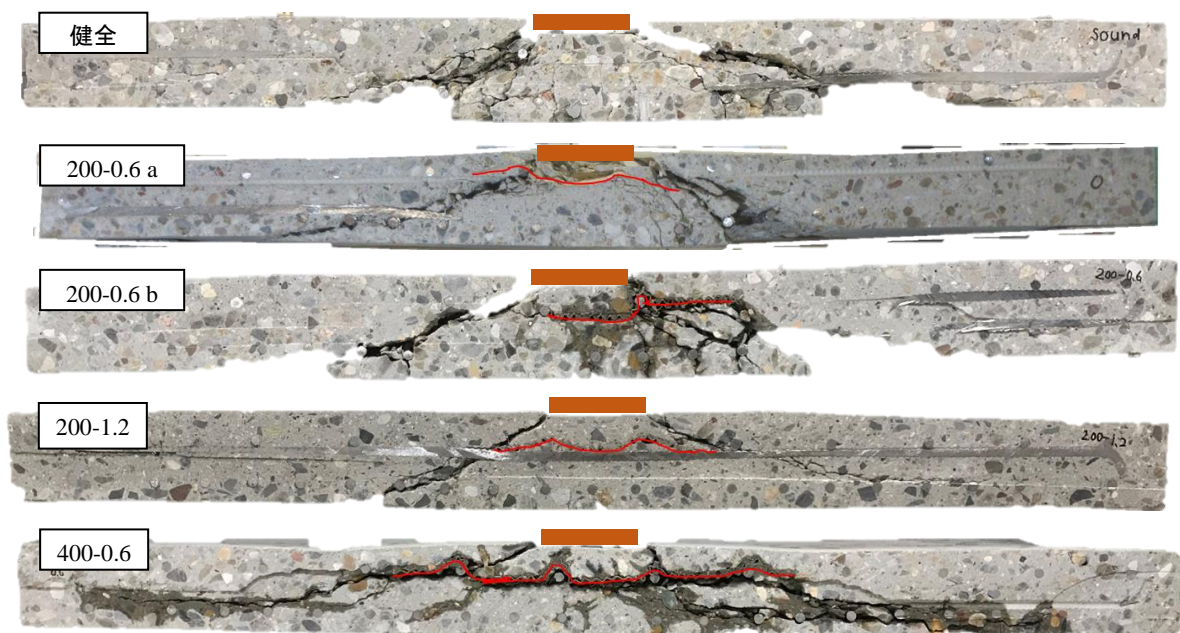


図-3 供試体中央断面におけるひび割れ進展

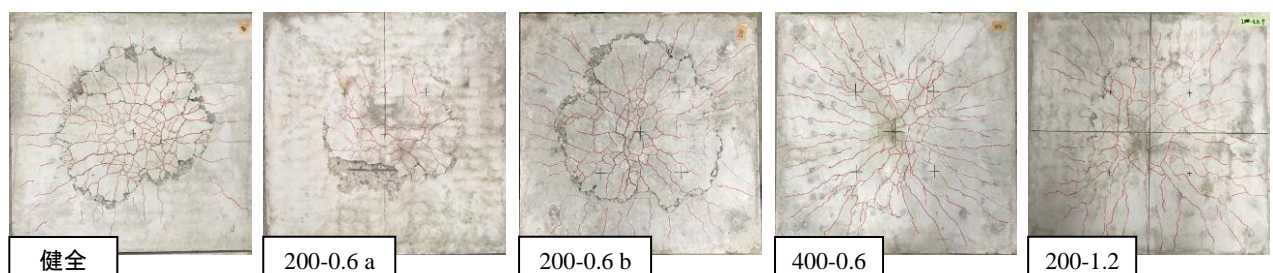


図-4 供試体底面におけるひび割れ進展

から垂直に伸びたひび割れは、模擬水平ひび割れに沿うように進展したものと、急な角度のまま引張鉄筋付近まで進展したものの2種類に分岐した。前者は模擬水平ひび割れ端部まで進展した後、斜めひび割れとなり、その後引張鉄筋に沿うように進展している。後者についても、最終的には引張鉄筋に沿うようなひび割れとなっている。

図-4に、健全供試体および模擬水平ひび割れを導入した供試体の、荷重後の底面のひび割れ性状をそれぞれ示す。図において縦方向が主筋方向、横方向が配筋方向に対応している。これより、健全供試体、200-0.6 a, b 供試体については円状のひび割れで囲まれるような押し抜かれる領域が大きいことが分かる。しかし、400-0.6 供試体については、他の供試体が亀甲状のひび割れ進展であるのに対し、放射状のひび割れ進展となっていることが確認できる。

これらのことから、圧縮鉄筋近傍の水平ひび割れは、明らかに斜めひび割れの発生、進展に影響を及ぼし、このひび割れ進展の相違が、結果として押抜きせん断耐力を低下させたことが推察される。

2.6 荷重荷重過程の RC 床版のひび割れ進展状況

模擬水平ひび割れ導入供試体のひび割れ状況は、模擬水平ひび割れの影響を明らかに受けたものであったことから、荷重荷重過程における RC 床版内部のひび割れ進

展状況について確認した。ひび割れ進展状況の確認は、200-0.6 供試体と同様の模擬水平ひび割れ導入供試体を2体作製し、それぞれ①ピークまで荷重、②ピーク荷重の80%程度まで荷重、した後除荷し、供試体中央断面にて切断し、内部のひび割れ性状を観察することで行った。図-5にひび割れ図を示す。80%程度まで荷重した RC 床版の断面を確認すると、楕円で囲んで示した位置に荷重右端部から模擬水平ひび割れ端部に向かう幅の狭いひび割れのみが確認できる。また、ピークまで荷重した RC 床版では、荷重板の両側において、端部から模擬水平ひび割れに向かい、その後模擬水平ひび割れ端部付近からウェブにおける斜めひび割れとなっている。これら2体の RC 床版の内部のひび割れ進展状況より、圧縮鉄筋近傍に水平ひび割れを有する RC 床版においては、まず荷重板と水平ひび割れ間の供試体のかぶり部にひび割れが発生し、その後水平ひび割れ端部からウェブ部に斜めひび割れが進展することで最大荷重を迎えることが推察された。

3. RBSMによるひび割れ幅の影響評価

3.1 解析手法

ここでは、本研究で実施した実験により示された水平ひび割れの存在や、ひび割れ幅の違いがひび割れ進展挙

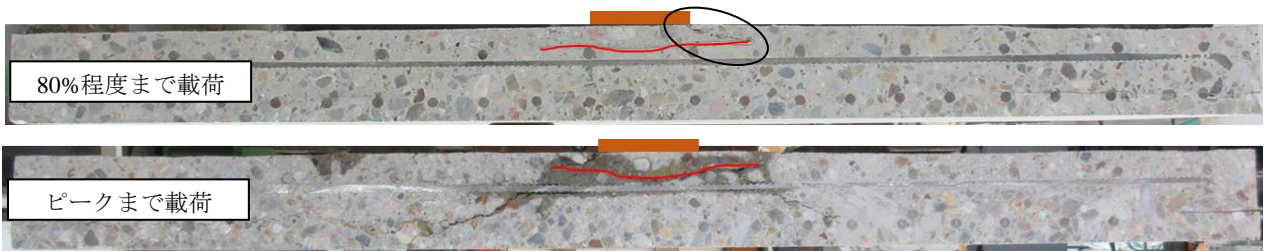


図-5 荷重荷重過程の供試体中央断面

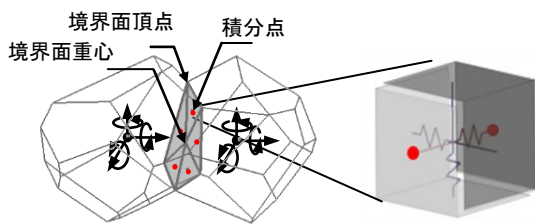


図-6 剛体要素の自由度と要素境界面上の積分点

表-4 材料パラメータ

	コンクリート				鉄筋	
	E (GPa)	f_c' (MPa)	f_t (MPa)	G_F (N/m)	E (GPa)	f_y (MPa)
健全	29.1	33.85	2.41	94.6	180	295
200-0.6b	30.0	36.78	2.54	97.2		
200-1.2	28.2	30.8	2.26	91.7		

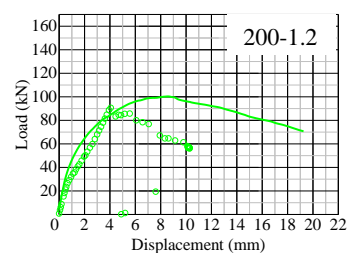
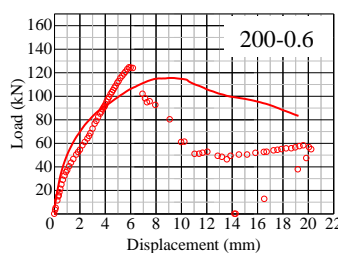
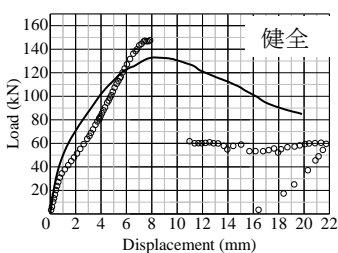


図-7 荷重-変位関係

動および押抜きせん断耐力に及ぼす影響を解析的に検討するため、ひび割れ進展を精度良く評価できる3D-RBSMを用いた。3D-RBSMは様々な部材で適用性が示されており、ひび割れ進展挙動など、コンクリートの不連続面の発生から破壊に至るまで精度よく評価できることが確認されている。3D-RBSMでは、ポロノイ分割を用いたランダム形状を有する剛体要素によりコンクリートのモデル化を行った。図-6にモデルの概要を示す。解析において模擬水平ひび割れの導入は、導入したい模擬水平ひび割れ位置上部に存在するコンクリート要素に強制変位を与えることで導入した。解析方法や構成則などの詳細は参考文献を参照して頂きたい⁹⁾。

3.2 実験結果との比較

解析の妥当性検証のために、本研究の健全、200-0.6b、200-1.2 供試体を対象に解析を行った。平均要素寸法は15mmとし、鉄筋はトラス要素を用いた離散鉄筋要素によりモデル化を行った。解析に用いたコンクリートの材料パラメータは表-4に示す実験供試体と同様の値である。

解析より得られた荷重-変位関係を、実験結果とともに図-7に示す。実線が解析結果を、○が実験結果を示している。解析において、各実験供試体に材料定数を合わせたため、図中の実験結果は圧縮強度による荷重の補正は行っていない。いずれのケースにおいても初期剛性は概ね一致している。最大荷重に関しても概ね一致し、ひび割れ幅の違いによる押抜きせん断耐力の相違を適切に再現している。

3.3 ひび割れ幅の影響評価

本研究の実験結果より、模擬水平ひび割れの存在その

ものだけでなく、ひび割れ幅の大小もRC床版の押抜きせん断耐力に影響を及ぼすことが示された。そこでRBSMを用いて数値解析的にひび割れ幅がRC床版の押抜きせん断耐力に及ぼす影響を検討した。

解析モデルの寸法、ひび割れ導入方法については3.1節に示した内容と同様である。また、本解析で用いた材料パラメータは、表-3中の200-0.6b供試体と同様の値とした。ひび割れ幅は、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.5mmの6ケースとし、全てのケースにおいてひび割れ領域は200×200mmとした。

図-8に解析より得られた荷重-変位関係を示す。初期剛性については、ひび割れ幅の大小に関わらず概ね一致している。約80kN程度から、ひび割れ幅が大きいくほど剛性が低下する傾向が見られた。最大荷重に関しては、ひび割れ幅が大きくなるほど低下しており、数値解析においてもひび割れ幅が押抜きせん断耐力に影響を与える要因の一つであることが確認された。

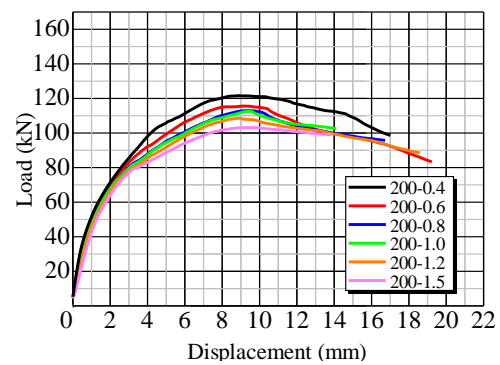


図-8 荷重変位関係

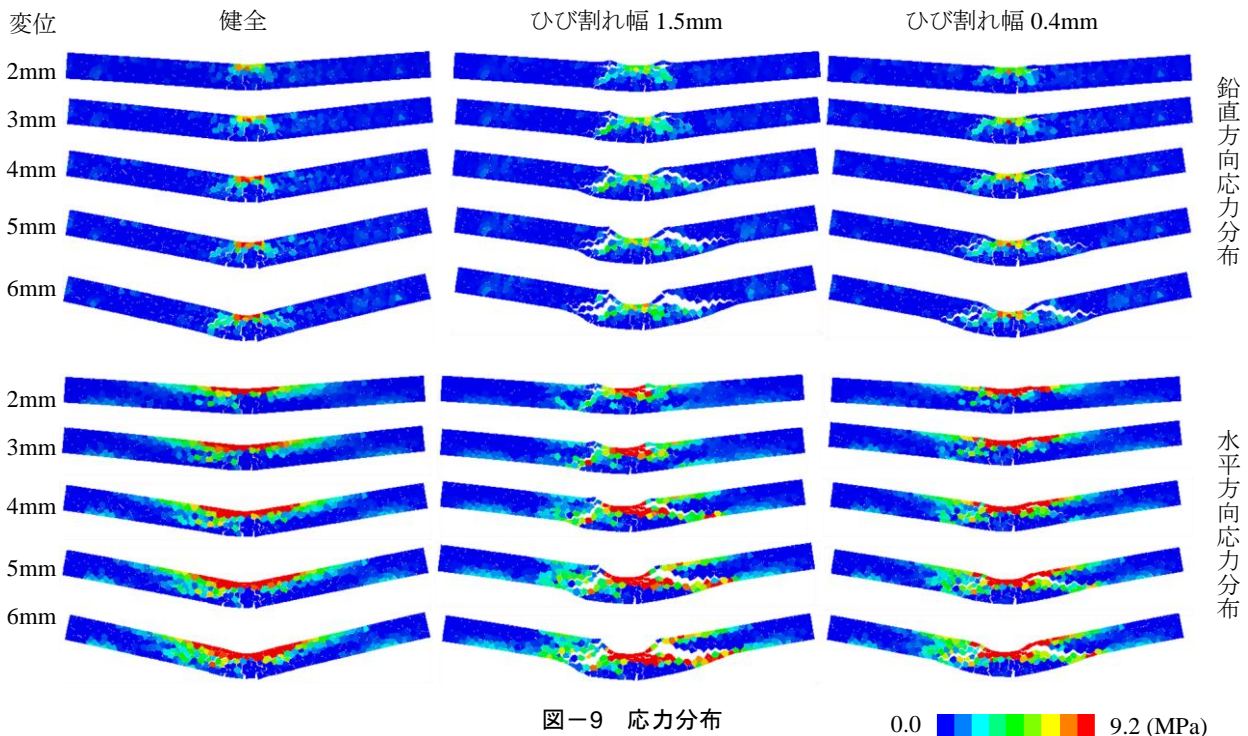


図-9 応力分布

0.0 9.2 (MPa)

ひび割れ幅の相違が、ひび割れ進展挙動や押抜きせん断耐力に及ぼすメカニズムを理解するために、変形・ひび割れ・圧縮応力分布の進展を検討した。図-9 に、最大荷重前の変位 2, 3, 4, 5, 6mm 時点の健全供試体、導入ひび割れ幅が最も大きい 1.5mm の供試体、導入ひび割れ幅が最も小さい 0.4mm の供試体の、変形・ひび割れおよび切断面の鉛直方向と水平方向の圧縮応力分布図を示す。ここで、切断面は供試体中央断面であり、圧縮応力は 9.2MPa を最大値としたコンター図で表示した。また変形は、倍率 20 倍で表示している。

荷重-変位関係の差が小さい変位 2mm 時点の比較を行えば、健全供試体では鉛直方向応力は載荷板下部に圧縮応力が集中し、水平方向応力はかなり広い領域で 9.2MPa 以上の応力が分布している。一方、導入ひび割れ幅が 1.5mm の供試体では、鉛直方向応力は載荷点下部だけでなく水平ひび割れ下部にもある程度の大きさの圧縮応力が伝達されていることが分かる。また、水平方向応力に対しては、水平ひび割れ領域のみが圧縮応力が高く、その領域は限定的である。また、変形状態からはひび割れで変形した供試体上部が載荷板位置だけで局所的に変形する挙動を示している。このように、水平ひび割れが入ることで載荷板周辺が脆弱化し載荷板下に変形が局所化することで、水平方向の圧縮応力が広がらず、載荷板近傍に集中すると考えられる。このことから、図-5 に示すように載荷板と模擬水平ひび割れ間で斜めひび割れが先行して入ったと思われる。水平ひび割れ幅 0.4mm の場合は、健全と幅 1.5mm の場合の中間的な挙動を示しており、ひび割れ幅の大きさにより載荷板下の脆弱化の程度が異なり局所的な変形が少なかったためと考えられる。さらに、変位 3mm 時点ではひび割れ幅 1.5mm の場合は鉛直方向ならびに水平方向の圧縮応力が水平ひび割れ端部下部に集中するようになることが分かる。このように水平ひび割れ下部への応力の集中が始まることで、図-5 に示すように斜めひび割れが模擬水平ひび割れ端部からウェブ内に進展していくことが推測される。いったん斜めひび割れが進展すればその後は斜めひび割れが開いていく挙動を示す。ひび割れ幅が 0.4mm の場合も生じる挙動は同様であり、初期の水平ひび割れ幅の大きさにより、損傷の進展速度が相違してくることが結果として押抜きせん断耐力に影響したと推測される。

4. まとめ

本研究では、模擬ひび割れを導入した供試体を対象に、実験ならびに解析により、圧縮鉄筋近傍の水平ひび割れ

が押抜きせん断耐力に及ぼす影響を検討し、以下の結論を得た。

- (1) 実験的検討より、圧縮鉄筋近傍に水平ひび割れを有する RC 床版では、水平ひび割れの存在によって押抜きせん断耐力の低下およびひび割れ進展挙動の変化が現れることが示された。また、押抜きせん断耐力の低下度合いは、水平ひび割れのひび割れ幅や領域の影響を受けることが示された。
- (2) 水平ひび割れが存在する場合の内部ひび割れは、水平ひび割れ上部のかぶり部でひび割れが発生した後、水平ひび割れ端部からウェブ部に斜めひび割れが進展することで最大荷重を迎えることが推察された。
- (3) 剛体バネモデルによる数値解析結果から、実験結果と同様に水平ひび割れの幅が大きくなるほど、押抜きせん断耐力が低下することが確認された。
- (4) 水平ひび割れの幅が大きいほど押抜きせん断耐力が低下する理由として、水平ひび割れが大きくなることで載荷板下部の脆弱化が進み、載荷による載荷板下部の変形が局所化することで、載荷板周辺に応力が集中して、水平ひび割れ上部ならびに水平ひび割れ端からウェブに向かう斜めひび割れが発生することが要因である可能性を提示した。

参考文献

- 1) NEXCO 中日本 高速道路の更新計画：http://www.c-nexco.co.jp/koushin/pdf/20150116_keikaku.pdf (閲覧日：2018年1月14日)
- 2) 前島拓，子田康弘，土屋智史，岩城一郎：塩害による鉄筋腐食が道路橋 RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響，土木学会論文集 E2, Vol.70, No.2, pp.208-225, 2014
- 3) 平塚慶達，千田峰生，藤山知加子，前川宏一：RC 床版の疲労余寿命に及ぼす先行荷重履歴の影響，土木学会論文集 E2, Vol.72, No.4, pp.323-342, 2016
- 4) 平塚慶達，前川宏一：乾燥収縮過程が RC 床版の疲労寿命に及ぼす影響，土木学会論文集 E2, Vol.72, No.4, pp.343-354, 2016
- 5) 石黒裕崇，中村光，山本佳士，三浦泰人：圧縮鉄筋近傍に水平ひび割れを有する RC 床版の押抜きせん断試験，コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.331-336
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I，2012