

論文 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破壊挙動に関する研究

石黒 裕崇*1・中村 光*2・山本 佳士*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が RC 床版の押抜きせん断破壊挙動に及ぼす影響を、実験的ならびに解析的に検討した。実験では、段ボールを用いて、領域・厚さがともに明確な模擬水平ひび割れを有する供試体を作製し、水平ひび割れの存在によりひび割れ性状が変化するとともに、押抜きせん断耐力が低下することを確認した。解析では、3次元剛体バネモデルを用い、水平ひび割れの影響が確認された実験結果が妥当なものであることを示した。さらに、解析より得られたひび割れ進展挙動をもとに、水平ひび割れの存在による耐荷力の低下メカニズムを明らかにした。

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

交通量や大型車混入率の増加による疲労損傷や凍結防止剤散布による塩害の影響により、道路橋 RC 床版の劣化が大きな問題となっている¹⁾。RC 床版において、引張側の鉄筋が腐食すると鉄筋断面積の減少による安全性能の低下や、第三者被害を引き起こしかねないかぶりの剥落などが起こる可能性がある。そのため、従来は引張側鉄筋の腐食に関する研究が多く行われてきた²⁾。しかしながら、凍結防止剤を大量に散布するような地域では、塩化物が床版上部より徐々に侵入することから、引張鉄筋よりも圧縮鉄筋の方がより腐食しやすいことが予想される。前島らは、塩害による鉄筋腐食を模擬した RC 床版供試体による輪荷重走行試験と、疲労損傷を考慮できる FEM 解析により、圧縮鉄筋の腐食が大きいと、疲労荷重による鉄筋とコンクリート間の付着が急激に低下し、これに起因して水平ひび割れが早期に発生することで、著しく耐疲労性が低下する可能性があることを示している³⁾。これは、圧縮鉄筋近傍の水平ひび割れの存在が、RC 床版の押抜きせん断耐力に影響することを示唆するものと考えられるが、その水平ひび割れの影響度を具体的に評価した研究は見当たらない。

そこで本研究では、圧縮鉄筋近傍に模擬水平ひび割れを有する RC 床版を作製し、水平ひび割れの有無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実験的に評価した。次に 3次元剛体バネモデル⁴⁾（以下、3D-RBSM）を用いて、初期ひび割れを導入したモデルを作製し、実験結果を評価するとともに、水平ひび割れが RC 床版のひび割れ進展挙動や押抜きせん断耐力に影響を及ぼすメカニズムを考察した。

2. 模擬水平ひび割れを有する 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。供試体は健全供試体に加え、模擬水平ひび割れを導入した供試体の 2 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⁵⁾に基づいて以下の条件を満足するように諸元を決定した。鉄筋は D10(SD295A)、鉄筋の中心間隔は 50mm 以上 150mm 以下、床版の厚さは 85mm、鉄筋のかぶりは 15mm、鉄筋のあきは 25mm とした。なお、道路橋示方書⁵⁾における諸元は、鉄筋は異形鉄筋の D19、鉄筋の中心間隔は 100mm 以上 300mm 以下、床版の厚さは車道部における最小全厚が 160mm、鉄筋のかぶりは 30mm 以上、鉄筋のあきは 40mm 以上であることから、本研究で用いた供試体が、道路橋示方書に示されている数値を半分にした値をすべて満足していることがわかる。

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 7 日間の湿布養生を行い、載荷を行った。載荷日におけるシリンダーの圧縮強度は 30N/mm²であった。

2.2 模擬水平ひび割れの導入方法

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

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
52.0	42.8	25	176	339	732	998	3.39

*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 教授 博士(工) (正会員)

*3 名古屋大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 准教授 博士(工) (正会員)

*4 名古屋大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 助教授 博士(工) (正会員)

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しんと呼ばれる波型の紙を用いることで、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。中しんを用いたのは、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。本研究では200×200mmの正方形に加工した中しんを2枚貼り合わせ、厚さ0.6mmの模擬水平ひび割れとした。圧縮側主筋間隔が150mmであるため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して200×200mmという大きさを採用した。模擬水平ひび割れは、模擬水平ひび割れの中央部と供試体の中央部が重なるように、圧縮鉄筋直上に据え置き、結束線で数か所を固定した状態で打設を行うことで導入した。なお、ブリ

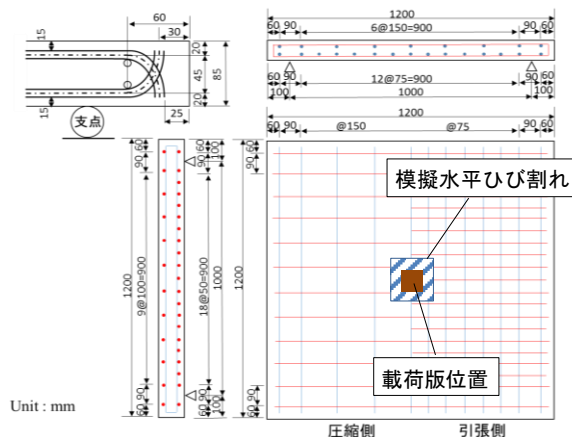


図-1 供試体概要



図-2 載荷用支点治具

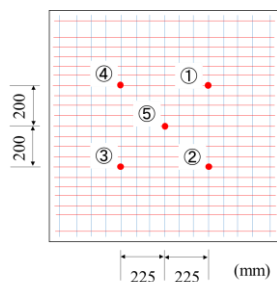


図-3 変位計測点

ーディング水が模擬水平ひび割れ直下で停留しないよう、キリを用いて数か所に小さい穴をあけた。

2.3 載荷および計測概要

支持条件は図-2に示すような支点ジグを使用し、直角2方向スパンがともに1000mmの4辺単純支持とした。載荷は供試体中央部に100×100mmの鋼板を据え置き、油圧ジャッキによって静的載荷を行った。なお、荷重の測定は鋼板と載荷版の間にロードセルを設置することで行った。変位の測定は、図-3に示すように、支点の四隅、供試体中央部、および供試体中央を中心とした、配力筋方向400mm×主筋方向450mmからなる長方形の四隅の計9点を計測点とし、それぞれに変位計をとりつけ、鉛直変位を測定した。なお、本実験においては、載荷用支点治具の変形による影響が想定されたため、供試体底面中央における変位から、配力筋方向400mm×主筋方向450mmからなる長方形の四隅(図-3における①から④の4点)における計測値の平均値を差し引いた相対変位指標を用いて論じることとする。

2.4 荷重-変位関係

実験より得られた荷重-変位関係を、図-4に示す。これより、黒で示す健全供試体、および赤で示す模擬水平ひび割れ導入供試体ともに、初期剛性、および全体的な挙動が同様の傾向となっていることが確認できる。最大荷重は、健全供試体が100.8kNであったのに対し、模擬水平ひび割れ導入供試体は81.9kNであった。模擬水平ひび割れが存在することで、最大荷重が80%程度まで低下することが確認された。また、最大荷重前後において、健全供試体では、最大荷重前後で荷重の変化率が比較的

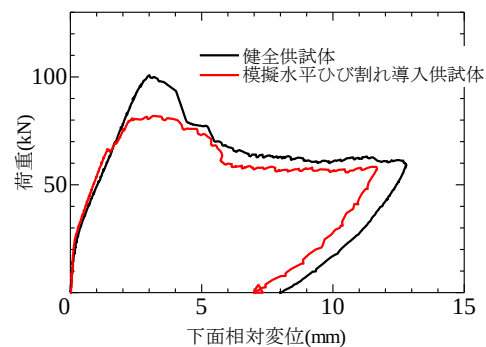


図-4 荷重変位関係



図-5 健全供試体の内部ひび割れ性状



図-6 模擬水平ひび割れ導入供試体の内部ひび割れ性状

大きい挙動を示したが、模擬水平ひび割れ導入供試体では、変化率が小さい挙動を示した。

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供試体を切断し、内部のひび割れ性状を確認した。図-5 および図-6 に、健全供試体、および模擬水平ひび割れ導入供試体の内部ひび割れ性状をそれぞれ示す。両図において、茶色い四角形は載荷版位置を示すものである。図-5 に示す健全供試体においては、ひび割れが、載荷版の端部から約 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。さらに、載荷版直下に、圧縮鉄筋間をつなぐように存在する水平方向のひび割れも確認できる。

一方で、図-6 に示す模擬水平ひび割れ導入供試体においては、健全供試体と異なるひび割れ性状が観察される。図-6 の供試体内部の赤線は、導入した模擬水平ひび割れの位置を示している。ここでは、供試体の右側に着目して述べる。供試体上面から模擬水平ひび割れまでの領域においては、載荷版の端部を起点に、模擬水平ひび割れに向かって鉛直に進展しているひび割れと、模擬水平ひび割れの端部に向かってひび割れの 2 本が確認できる。これらのひび割れは、圧縮側鉄筋から供試体下面までの領域において、前者は模擬水平ひび割れを貫通するように床版の面に対して大きい角度で鉛直に進展しており、後者は模擬水平ひび割れの端部から床版の面に対して比較的小さい角度で進展し、引張側鉄筋に到達すると引張側の鉄筋に沿うように進展していることが分かる。また、両者のひび割れ幅を比較すると、後者のひび割れの方が、明らかに大きいことが見て取れる。したがって、押抜きせん断破壊の支配的なひび割れは、後者として示した模擬水平ひび割れ端部から床版の面に対して小さい角度で緩やかに進展している斜めひび割れであ

ったと考えられる。なお、供試体右側においても、載荷版右端部より、同様なひび割れの進展が見られる。

図-7 および図-8 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、載荷後の底面のひび割れ性状をそれぞれ示す。これより、図-8 に示す模擬水平ひび割れ導入供試体の方が、図-7 に示す健全供試体に比べ、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。これは、図-6 に示したように、模擬水平ひび割れ導入供試体では、ひび割れの進展が、載荷版からではなく、水平ひび割れの端部から、RC 床版の面に対して小さい角度で、斜め方向に進展したためと考えられる。

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。

3.初期ひび割れを有する RC スラブの解析的検討

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がひび割れ進展挙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 では、ボ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-9 にモデルの概要を示す。構成則などの詳細は参考文献を参照して頂きたい⁹⁾。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。

3.2 解析概要

本研究においては、要素数と計算負荷を低減するために、

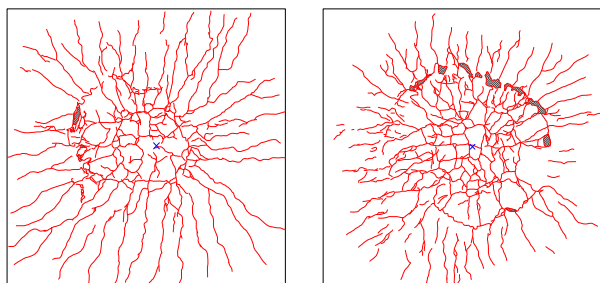


図-7 健全供試体

図-8 模擬水平ひび割れ導入供試体

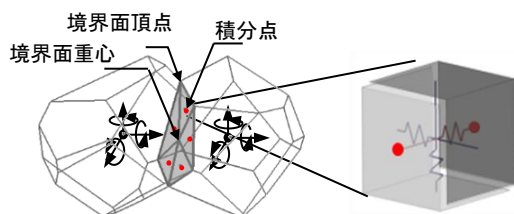
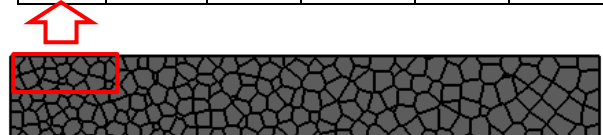


図-9 剛体要素の自由度と要素境界面上の積分点

表-2 材料諸元

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)
28	30	2.22	90.86	180	295



赤枠に含まれる要素に強制変位を与える



ひび割れ導入後の供試体 (倍率 10 倍)

図-10 水平ひび割れの導入方法

供試体の対称性を考慮した 1/4 モデルとし、供試体中央領域において要素寸法を 10mm と設定し、端部に向かうにつれて徐々に要素寸法を大きくしており、最大で 20mm とした。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については、表-2 にその値を示す。

3.3 水平ひび割れの導入方法

解析においては、水平ひび割れは図-10 のように水平ひび割れを導入する領域の上側に存在するコンクリート要素(赤枠で囲まれた領域のコンクリート要素)に対し、鉛直上向きに強制変位を与えることで導入した。水平ひび割れ発生後、強制変位による荷重を除荷し、残留したひび割れ幅を初期の水平ひび割れとした。なお、本解析では、残留ひび割れ幅が実験のひび割れ幅同様の 0.6mm となるように、変位を制御した。

3.4 荷重－変位関係

解析より得られた荷重－変位関係を、実験とともに図-11 に示す。解析においても、実験と同様変位は下面における相対変位を用いている。解析結果は、ひび割れ発生後の剛性、耐力、ポストピーク挙動を過大に評価する結果となった。その原因は今後詳細に解明する必要があるが、部材の引張強度が乾燥収縮の鉄筋拘束の影響などで設計値より小さくなったことなどが理由として考えられる。実験と解析における水平ひび割れの有無による荷重の低下率に注目してみると、実験では 80% 程度であり、解析においても 80% 程度となり、水平ひび割れの存在により耐力が明確に低下することが本解析においても示

された。また、最大荷重前後の挙動についても、水平ひび割れが存在することで荷重の変化率が小さくなることなど、実験と同様の傾向が示された。

3.5 ひび割れ性状

図-12 に実験、解析により得られた供試体内部のひび割れ図を示す。実験は載荷終了時のもの、解析は絶対変位が 18mm 近辺におけるものとした。図中の二点鎖線は水平ひび割れの概ねの位置を示している。図より、解析結果は健全供試体では、載荷版の端部よりひび割れが進展するという点や、およそ 45 度の角度でひび割れが進展するといった点は実験、解析ともに同様の傾向であるといえる。一方、水平ひび割れを有する供試体については、水平ひび割れより上部においては、載荷版から少し角度をもって水平ひび割れに向かうひび割れと、水平ひび割れの端部に向かうひび割れの 2 種類が確認できる。水平ひび割れより下部においては、水平ひび割れの端部付近からのびる斜めひび割れと、水平ひび割れの途中の部分からのびる斜めひび割れが確認できる。また、図-13 に載荷解析終了後の供試体底面の様子を示す。図より、供試体中央部においては網目状のひび割れが観察され、網目状のひび割れより外の領域においては、放射状に広がるひび割れが確認できる。また、水平ひび割れの存在により、底面のひび割れの領域が広がることも確認できる。

今回の解析により、対象とした実験の挙動を妥当に評価可能であるといえる。

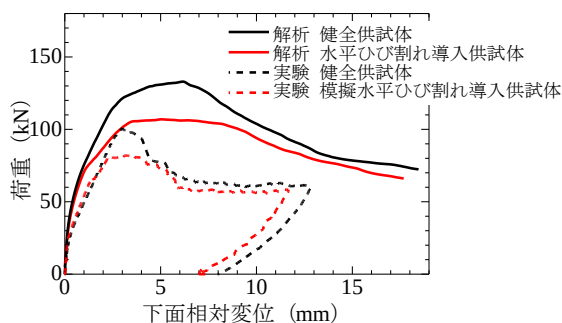
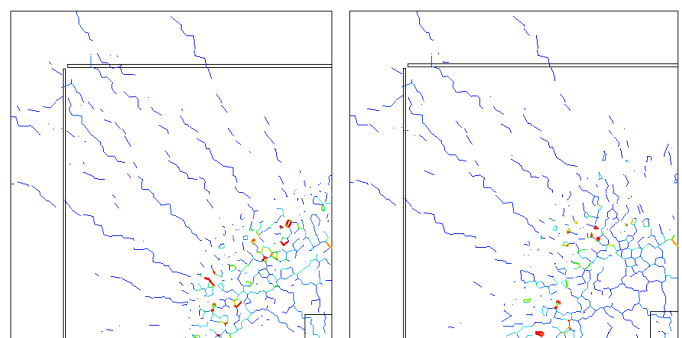


図-11 荷重－変位関係（解析値）



健全供試体 水平ひび割れ導入供試体
図-13 載荷終了後の底面の様子

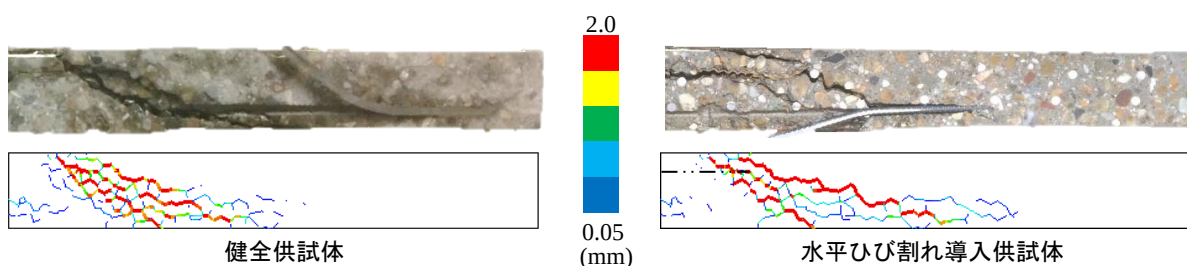


図-12 供試体内部のひび割れ図

4. 荷重低下のメカニズムに関する検討

2章では、水平ひび割れの存在によってRC床版の押抜きせん断耐力が低下することを実験的に示した。そこで、本章では解析により得られるひび割れの進展過程を確認し、押抜きせん断耐力が低下するメカニズムについて考察する。図-14にRC床版底面中央の絶対変位を用いた荷重－変位関係を、図-15に解析より得られた供試体内部のひび割れ性状を示す。図-15において、黒色の実線は荷重版の端部位置を示し、黒色の一点鎖線は水平ひび割れの端部を示す。また、黒色の二点鎖線は水平ひび割れの概ねの位置を示す。図-14中の番号は、図-15のひび割れ図に記された番号に対応する。また、ひび割れは0.05mm以上のものを示している。初期剛性が一致している段階（図-14の①）においては、健全供試体、水平ひび割れ導入供試体ともに荷重によるひび割れは確認できない。なお、水平ひび割れ導入供試体について、水平ひび割れ端部において鉛直ひび割れが確認されるがこれは水平ひび割れ導入時に入ったものである。水平ひ

び割れ幅が0.6mm程度であるのに対し、鉛直ひび割れ幅は0.05mm程度であり、力学的に影響しないひび割れであると考えられる。健全供試体と、水平ひび割れ導入供試体の剛性の差が生じ始めた点付近（図-14の②）において、水平ひび割れ導入供試体では、荷重版端部から水平ひび割れに向かう斜めひび割れが確認できる。これに

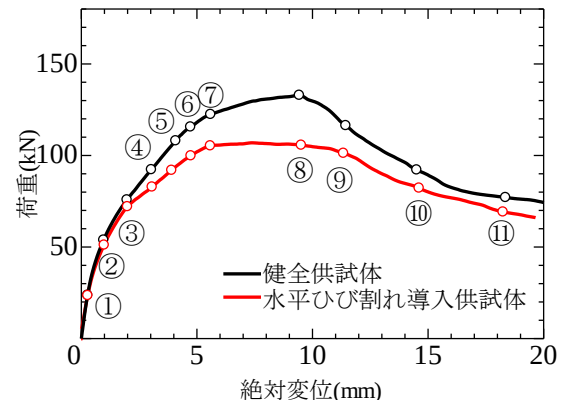


図-14 解析における荷重－変位関係

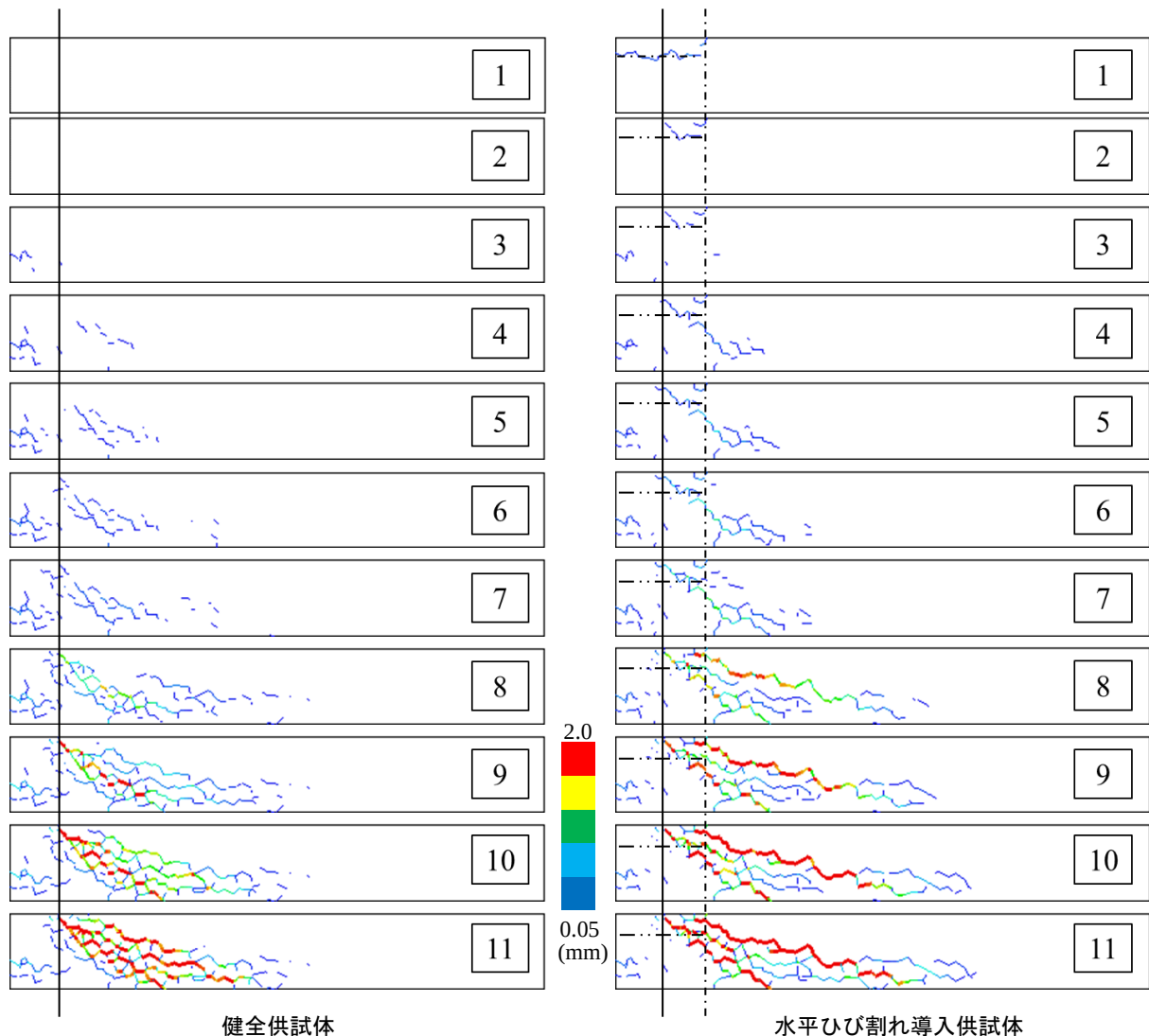


図-15 供試体内部のひび割れ性状

より圧縮領域のコンクリートの損傷が増加し、剛性がより低下するものと考えられる。③から⑥において、健全供試体ではウェブで斜めひび割れが進展しているが、ひび割れは圧縮領域に至っていない。一方、水平ひび割れ導入供試体では、健全供試体との差が顕著になる③から④の段階において、圧縮側に生じたひび割れから水平ひび割れが端部位置まで開口するとともに、水平ひび割れ端部から斜めひび割れがウェブに存在している。さらに⑤から⑦までにおいて圧縮領域までつながる斜めひび割れが拡大している。⑦の段階での両者の大きな差は、斜めひび割れが圧縮領域まで存在しているかどうかであり、この違いが耐力の差となったと考えられる。前田ら⁶⁾によって提案された RC 床版の押抜きせん断破壊モデルは、耐力は圧縮側のコンクリートのせん断抵抗と引張側鉄筋のダウエル効果によるとされている。解析では、水平ひび割れが存在すると圧縮鉄筋上方に早期の斜めひび割れが発生することを示すことから、その部分のせん断抵抗が低下することが、押抜きせん断耐荷力の低下に結びついたと想定される。一方、健全供試体では、⑧から荷重が低下し始めるが、その時から圧縮領域の斜めひび割れが顕著になっていることから、圧縮領域のコンクリートのせん断抵抗が耐力に大きく寄与していることが理解できる。また、水平ひび割れ導入供試体で確認された水平ひび割れ端部からの緩やかな角度のせん断ひび割れは、⑧の段階で顕著になっており、このひび割れの進展により最終的な耐力低下に至ったことが予想される。

5. まとめ

本研究では、圧縮鉄筋近傍に模擬水平ひび割れを導入した RC 床版を対象として水平ひび割れの影響を実験ならびに解析的に検討することにより以下の結論を得た。

- (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。

- (2) 実験で観察された圧縮鉄筋近傍の水平ひび割れによる押抜きせん断耐力の低下およびひび割れ性状の変化は、3D-RBSM による解析でも示されたことから、実験結果で得られた知見は妥当であることを確認した。
- (3) 圧縮鉄筋近傍の水平ひび割れによる耐力低下は、水平ひび割れが存在することで、圧縮鉄筋上部に斜めひび割れが早期に発生することで、圧縮域コンクリートのせん断抵抗力が低下するメカニズムにより生じることを明らかにした。

参考文献

- 1) 西川和廣，杉山純，山本悟司：道路橋床版の実態調査結果の分析，第 20 回日本道路会議論文集，pp.1002-1003，1993
- 2) 横山和昭，本荘清司，葛目和宏，藤原規雄：道路橋 RC 床版の鉄筋腐食に伴う劣化機構の解明に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.1687-1692，2008
- 3) 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
- 4) 山本佳士，中村光，黒田一郎，古屋信明：3 次元剛体パネモデルによるコンクリート供試体の圧縮破壊解析，土木学会論文集 E，Vol.64，No.4，pp.612-630，2008
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I，2012
- 6) 前田幸雄，松井繁之：鉄筋コンクリートの押抜きせん断耐荷力の評価式，土木学会論文集，第 348 号，V-1，pp.133-141，1984.8