

論文 圧縮鉄筋の腐食がせん断補強筋のない RC はりのせん断強度に及ぼす影響

宇田 好一郎^{*1}・川本 卓人^{*2}・出路 康夫^{*3}・佐藤 良一^{*4}

要旨：鉄筋腐食が RC 部材の力学挙動に与える影響を明らかにすることを目的として，本研究では圧縮鉄筋の腐食の有無に着目した。実験パラメータとしては，圧縮鉄筋の腐食の有無，鉄筋の腐食レベルを3種と設定し，それらの影響によるせん断補強筋のない RC はりのせん断耐力を実験的に検討した。その結果，圧縮鉄筋を腐食させたはりには，引張鉄筋のみを腐食させたはりにみられるせん断耐力の増大はみられず，耐力は同一腐食レベルの比較において下回った。圧縮鉄筋に沿った腐食ひび割れによる，圧縮部コンクリートのせん断抵抗面積の減少が，耐力低下の理由であることを考察した。

キーワード：圧縮鉄筋，鉄筋腐食，腐食ひび割れ，せん断耐力

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物はこれまで数多くが建造され，わが国の重要な社会資本となっている。しかし，これらの早期劣化が社会的な問題となり久しいにもかかわらず，塩害劣化に関する構造物の性能照査技術は確立されていない。これまで，鉄筋腐食が RC 部材の付着性能や RC はりの耐力に及ぼす影響に関する研究^{例えば1), 2)}が行われている。しかし RC 部材のせん断耐力に，引張・圧縮・せん断補強鉄筋の腐食が及ぼす影響をそれぞれ検討した事例は少ない。そこで本研究では，連続桁で部材下面が圧縮場になる場合などに考えられる，圧縮鉄筋に沿った腐食ひび割れに着目し，その腐食ひび割れの有無及びひび割れ幅が RC はりの力学挙動に及ぼす影響を把握することを目的として，実験的検討を行った。

部材として，比較的腐食程度のコントロールが容易な電食法により，促進腐食させた RC はりを用いた載荷試験を行った。実験パラメータは，1.圧縮鉄筋の腐食の有無，2.腐食レベルとして平均腐食ひび割れ幅の2種とした。まず圧縮鉄筋の腐食は，先に述べた鉄筋の腐食劣化が圧縮部となる場合を想定し，実験においては圧縮鉄筋と引張鉄筋を電氣的に絶縁した上で，圧縮鉄筋を腐食させる場合はそれぞれの鉄筋に接続されたリード線を外部で電氣的に接続し，一方腐食させない場合は引張鉄筋のみに電流を印加することにより圧縮鉄筋の腐食を制御した。

供試体は図-1に示すように，150×330×

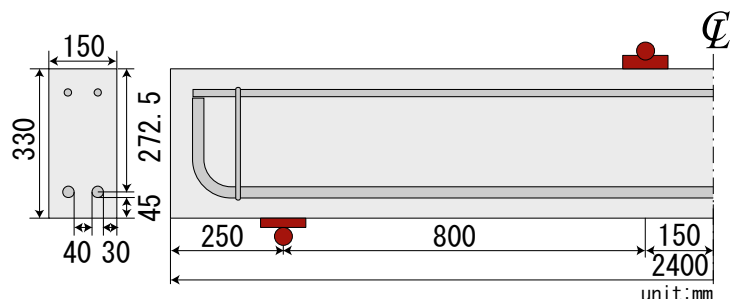


図-1 RC はり供試体

2. 実験概要

2.1 供試体概要

本研究の対象である腐食劣化した RC

*1 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻 (正会員)

*2 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻

*3 国土交通省中国地方整備局 中国技術事務所 調査試験課長

*4 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻教授 工博 (正会員)

表－１ コンクリートの示方配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ の範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	水セメ ント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	示方配合 (kg/m ³)				
					水	セメント	粗骨材	細骨材	混和剤 AE 減水剤
20	10±2	4±1	60	47	175	292	841	962	2.92

1900mm（幅×高さ×スパン長），有効高さ 272.5mm とした。引張鉄筋端部は 90 度折り曲げ直角フックとし，支点外に補強筋を設置した。圧縮側に 2-D16（SD295），引張側に 2-D25（SD490）を配した複鉄筋断面とし，鉄筋比（ A_s/b_wd ）は 2.48% で一般に比べ大きい，これはせん断破壊を曲げ破壊に先行させるためである。コンクリートかぶりは，断面横方向に貫通する腐食ひび割れを導入するために，側面かぶりを高さ方向のかぶりよりも小さくした。

使用するコンクリートは水セメント比 60%，細骨材率は 47% である（表－１）。使用した鉄筋の公称径及び強度試験結果を表－２に示す。打設後，28 日間養生を行ったコンクリート試験体（標準養生を含む）及び載荷時材齢（81 日）における試験体の材料特性を表－３に示す。材齢 28 日で圧縮強度は 35N/mm² 程度であり，81 日では 44N/mm² と増加している。これは，塩水中に浸漬されていたために水和反応が進んだものと考えられる。

2.2 電食試験

はり供試体はコンクリート打設後 28 日間，屋内にて水分を十分に含んだ新聞紙とラップフィルムで供試体を密封し，湿潤養生を行った。その後，電食中の腐食ひび割れの拡大を把握するために，引張鉄筋及び圧縮鉄筋位置コンクリート表面に基長 40mm でコンタクトチップを添付した。その際，水中での劣化・脱落を防ぐために，エポキシ樹脂，シリコンシーリング剤により防水加工した。

供試体は海水相当 3%NaCl 水溶液に約 1 週間浸漬した。電食試験時の電氣的接続のため，鉄筋組立時に腐食対象鉄筋端部にリード線をはんだづけした。またその接続部に水分が浸入することによる，局所的な劣化を避けるために，ブ

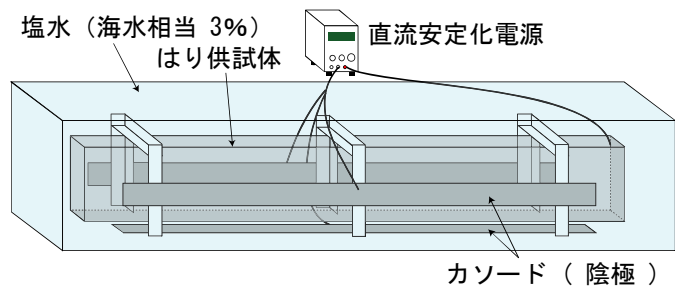
表－２ 鉄筋の材料特性

使用用途	呼び名	規格	降伏強度	静弾性係数
引張鉄筋	D25	SD490	554.1	187399
圧縮鉄筋	D16	SD295A	336.4	184384
横補強筋	D10	SD295A	321.7	178887

単位：N/mm²

表－３ コンクリートの材料特性

材齢	圧縮強度	静弾性係数	引張強度	養生方法
28 日	35.5	33036	3.02	標準養生(20℃水中)
28 日	34.7	31538	2.91	湿潤養生(はりと同様)
81 日	43.9	32696	3.23	28日湿潤その後塩水浸漬

単位：N/mm²

図－２ 電食試験装置

チルゴム，エポキシ樹脂及びアクリル樹脂により，防水コーティングを行った。

促進腐食電流は図－２に示されるように，直流安定化電源装置を用いて，供試体内部鉄筋（陽極）と供試体下面，両側面にそれぞれ設置された鋼板（陰極）の間に，腐食電流密度 100 μ A/cm² 相当の一定電流を強制的に印加した。また，試験中はコンタクトゲージにより測定区間の変位を一定期間毎に測定した。

電食試験にて与える実際の腐食電流密度は，自然状態での 0.1～1.0 μ A/cm² 程度³⁾，厳しい腐食環境下での 10 μ A/cm² 程度⁴⁾に比べて，10 倍程度と比較的自然状態に近い促進速度といえる。

2.3 載荷試験

載荷方法は，はりスパン 1900mm のうちせん断スパンを 800mm（せん断スパン比 2.94），残り 300mm を等曲げモーメント区間とする 2 点集中

荷重の単調載荷とした。試験中は、荷重、はり中央のたわみを、それぞれロードセル、高感度変位計（精度 1/1000mm）により測定した。また一定荷重毎に、ロゼット法を参考に、コンタクトチップを用いた測定長 100mm のロゼットを、はり高さ中央位置を中心としてはり軸方向に複数設置し、コンタクトゲージで測定されたそれぞれの変位から、各ロゼットの主ひずみを算出した。さらにその最大主ひずみに測定基長をかけ、斜めひび割れ幅とした。

載荷試験後はひび割れ状況の確認の後、供試体のコンクリートをはつり、腐食鉄筋を取り出した。取り出した腐食鉄筋は約 3 日間、常温の 10%クエン酸二アンモニウム水溶液に浸漬し、ナイロン製のブラシにより腐食生成物を丁寧に除去した。その後一定長さに切断し、正確な長さ重量を測定した後、同様に処理した健全鉄筋の長さあたりの重量と比較し、腐食重量減少率を算出した。また測定後の鉄筋は引張試験を行い、健全鉄筋を含めたそれぞれの降伏荷重を比較することにより、降伏荷重低下率を算出した。本研究では、腐食重量減少率と降伏荷重低下率あわせて 2 種の腐食度を指標とした。

3. 実験結果

3.1 腐食ひび割れの進展

電食試験による平均腐食ひび割れ幅の変化を図-3に示す。ここで NN は圧縮鉄筋を腐食させないシリーズ、NC は圧縮鉄筋を腐食させるシリーズを表す。また数字は腐食レベルを、つまり 1 はひび割れ幅 0.3mm 程度、2 は 0.6mm 程度を表している。平均腐食ひび割れ幅は、供試体側面の支点、載荷点、せん断スパン中央の計 12 か所における軸方向鉄筋の腐食ひび割れ幅の平均とした。

電流印加開始から 10 日程度は、腐食反応に伴う気泡以外に測定値、目視においても大きな変化は認められなかった。その後、供試体表面での腐食生成物の溶出とともに、引張鉄筋に沿った腐食ひび割れが確認された。ひび割れ発生直後は、10 日間で 0.2mm 程度の速度でほぼ線形的に拡大し、

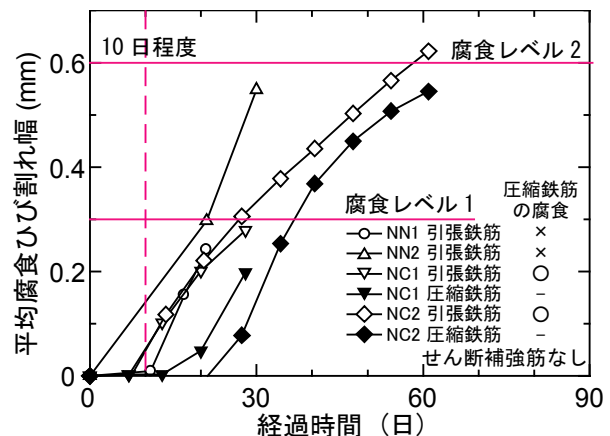


図-3 平均腐食ひび割れ幅の経時変化

20～30 日で 0.3mm に、30～60 日で 0.6mm に到達した。ひび割れ幅 0.2mm 以降は、開口速度は若干緩やかとなるものの、巨視的には線形的に増加しているといえる。一方圧縮鉄筋に沿ったひび割れは、引張鉄筋に遅れて発生し急激に開口が進んだ。圧縮鉄筋のコンクリートかぶり、引張鉄筋のそれに比べ大きいためにひび割れ発生が遅れたが、発生後はひび割れを通じて電流が流れやすくなったために、その後のひび割れ開口は急激に進展したものと考えられる。このとき NN2 は電流印加から線形的に拡大しているわけではなく、他に比べて測定期間間隔が長く、ひび割れ発生前後の測点が少ないためそのように見えるものである。

図-4 に平均腐食ひび割れ幅と腐食度との関係を示す。ここで腐食度は、載荷試験後に取り出された鉄筋の重量減少率である。圧縮鉄筋の腐食の有無どちらの場合も、ひび割れ幅と腐食度はほぼ線形関係となっている。これはひび割れ幅が腐食生成物の膨張に依存する、つまり腐食生成物の量と関係が深いことから妥当な結果といえる。しかし、圧縮鉄筋を腐食させるはりは、腐食ひび割れの開口に必要な腐食生成物が、圧縮鉄筋を腐食させないはりに比べて多い結果となった。これは引張鉄筋と圧縮鉄筋を同時に腐食させるために、それら鉄筋の腐食特性が相互に影響を及ぼしているものと考えられるが、現時点では解明には至っておらず、今後の検討課題である。

表－４ 供試体試験結果一覧

供試体 名	腐食度(%)				平均腐食 ひび割れ幅 (mm)		せん断耐力時の荷重(計算)		最大荷重 (実験値)	破壊形態
	圧縮鉄筋		引張鉄筋				断面減少 考慮せず	断面減少 考慮		
	重量	降伏	重量	降伏	圧縮	引張				
NN0			0.0%	0.0%		0.000	108.1	108.1 (1.00)	176.3 (1.00)	せん断圧縮破壊
NN1			0.4%	0.7%		0.242	108.1	107.8 (1.00)	215.7 (1.22)	せん断圧縮破壊
NN2			0.8%	1.2%		0.548	108.1	107.6 (1.00)	259.2 (1.47)	曲げ圧縮定着同時破壊
NC0	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.000	0.000	108.1	108.1 (1.00)	144.2 (1.00)	斜め引張破壊
NC1	2.5%	2.5%	2.2%	2.0%	0.199	0.279	108.1	107.4 (0.99)	127.4 (0.88)	斜め引張破壊
NC2	7.2%	12.0%	3.4%	3.6%	0.621	0.622	108.1	106.8 (0.99)	155.0 (1.07)	せん断圧縮破壊

重量:重量減少率 降伏:降伏荷重低下率 括弧内の数値は健全の場合に対する割合を示す 単位:kN

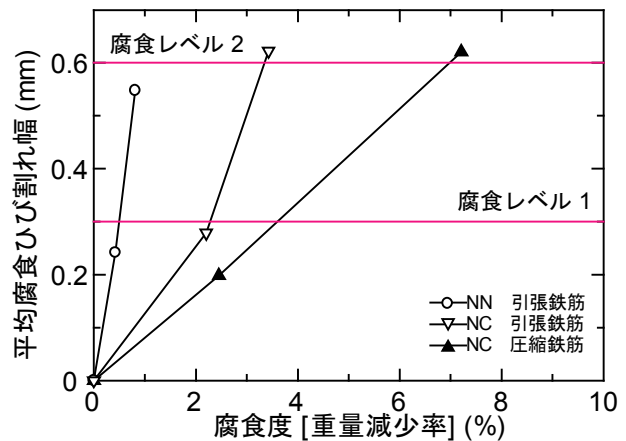
3.2 載荷試験結果

載荷試験結果を鉄筋の腐食度、腐食ひび割れ幅と合わせて表－４に示す。表中のせん断耐力時荷重は、土木学会の示方書式⁵⁾に実験時の材料特性値と鉄筋の断面減少を考慮して計算したものである。断面減少が数%であるものも、耐力計算値では最大1%程度しかその影響をとらえられず、付着劣化による斜めひび割れ性状の変化が大きく影響しているものと考えられる。

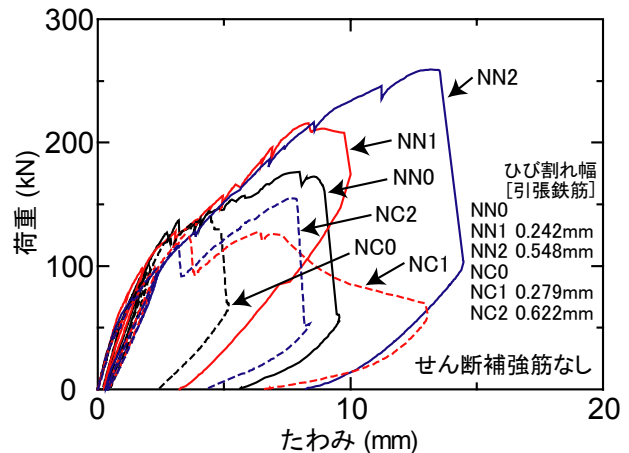
図－５に荷重－たわみ関係を示す。圧縮鉄筋を腐食させないはりでは、既往の研究²⁾と同様に、腐食の進行とともに耐力は増大した。一方圧縮鉄筋を腐食させたはりでは、それぞれ同程度の腐食ひび割れを有する圧縮鉄筋を腐食させないはりに比べ、耐力が低下する結果となった。

図－６に斜めひび割れ発生荷重と平均腐食ひび割れ幅の関係を示す。こちらも同様に、圧縮鉄筋が健全なはりでは、腐食の進行とともに斜めひび割れ発生荷重が増大した。この際、0.6mmクラスのひび割れ幅を有するNN2は、斜めひび割れが発生せず、曲げ圧縮定着同時破壊となったため、定着破壊時の荷重とした。一方圧縮鉄筋を腐食させるはりでは、徐々にではあるが、腐食進行に伴い斜めひび割れ発生荷重が低下した。

次に腐食させたはりと健全なはりの斜めひび割れ発生荷重比を、上縁かぶりコンクリートを割裂するひび割れに対する健全コンクリート幅の残存率と関連づけて、図－７に示す。ここでの腐食ひび割れの進展が、最終的に圧縮縁コンクリートとの一体性を奪い、せん断力に抵抗す



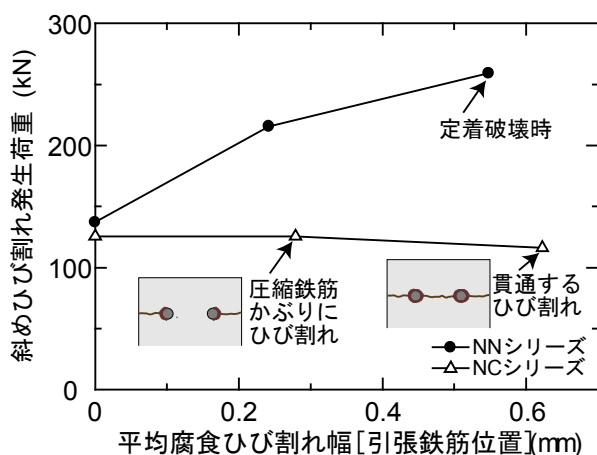
図－４ 平均腐食ひび割れ幅－腐食度関係



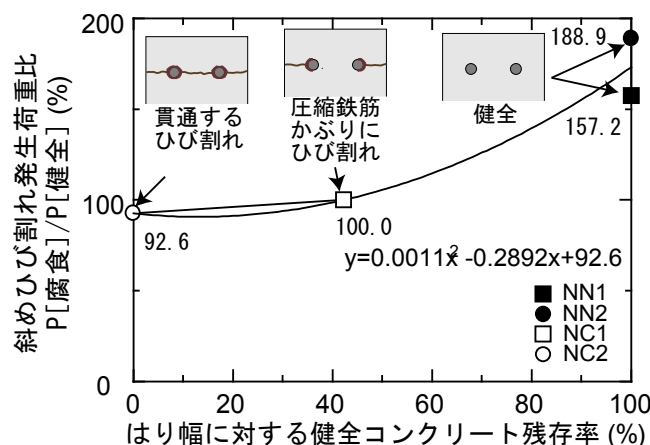
図－５ 荷重－たわみ関係

る面積を減少させ、斜めひび割れ発生荷重の低下を招いたと考えられる。本研究の範囲において、側面かぶりに存在するひび割れのみでは、荷重の低下は見られなかった。

図－８に供試体解体時の圧縮鉄筋の状況を示す。この写真は圧縮部コンクリートを慎重に取り除き、撮影したものである。左上は圧縮鉄筋を腐食させないはりの圧縮鉄筋周辺である。右



図－６ 斜めひび割れ発生荷重－平均腐食ひび割れ幅関係

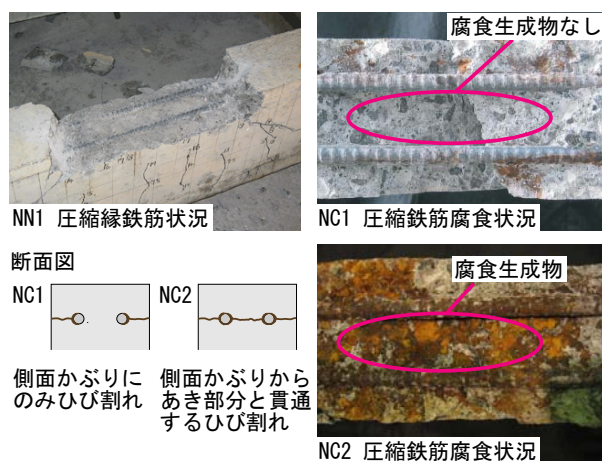


図－７ 斜めひび割れ発生荷重比－健全コンクリート残存率

上は圧縮鉄筋を腐食させるはり NC1 であり、かぶり位置には腐食生成物が確認できるが、鉄筋のあき部分にはみられなかった。一方右下 NC2 は、全体的に腐食が進んでいることが確認でき、これらの違いが耐力低下の一因を圧縮鉄筋の腐食ひび割れ性状と考える理由である。

ひび割れ状況を図－９に示す。点線は腐食、実線は載荷によるひび割れを示しており、太線は破壊に至った主要なひび割れである。腐食ひび割れは、腐食対象鉄筋周辺の供試体表面にあられ、どの供試体もほぼ同じ分布であった。

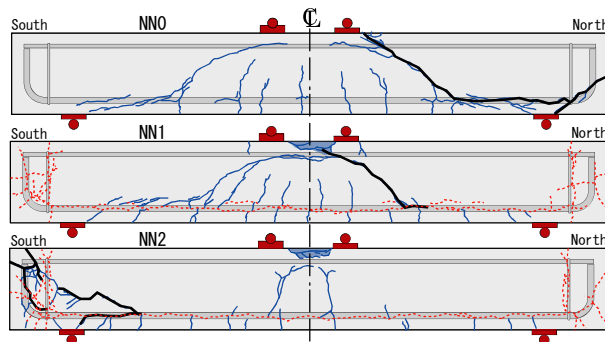
圧縮鉄筋が健全なはりでは、腐食進行に伴い載荷ひび割れがはり中央によった。これに伴いせん断区間コンクリートがアーチリブを形成し、耐力が増加したと考えられる。また腐食が激しい NN2 は、圧壊と同時に定着部が破壊するなど、付着劣化の程度と定着状態によっては、直角フ



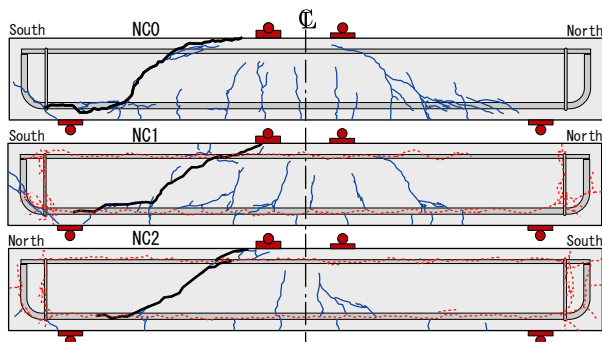
図－８ 圧縮鉄筋の腐食状況

ックでも定着破壊が起こる可能性がある。

圧縮鉄筋を腐食させたはりもひび割れは中央によったが、破壊に至った主要な斜めひび割れはほぼ同じ位置に現れ、すべてせん断破壊であった。圧縮鉄筋を腐食させたはりでは共通して、



a) 圧縮鉄筋の腐食なし



b) 圧縮鉄筋の腐食あり

図－９ 腐食及び載荷によるひび割れ分布(点線：腐食ひび割れ，実線：載荷ひび割れ)

斜めひび割れが圧縮鉄筋のひび割れに到達した時点で、荷重が大きく低下した。しかし、NC2は腐食ひび割れが斜めひび割れを等曲げ区間に誘導し、アーチ的耐荷機構により荷重が増加した。載荷点外の圧縮縁を斜めひび割れが突き抜け、終局に至った（図-10）。これらは前述したように、圧縮鉄筋に沿った腐食ひび割れ性状が破壊形態に影響を及ぼした結果と考えられる。

載荷に伴う斜めひび割れ幅の変化を図-11に示す。斜めひび割れ発生以降は荷重増加に伴い斜めひび割れ幅は増加するが、圧縮鉄筋を腐食させないはりでは、鉄筋の腐食劣化に伴い斜めひび割れ幅が小さくなる傾向が認められた。これは引張鉄筋の付着劣化のため、斜めひび割れがスパン中央により、せん断に比べ曲げが卓越することによると考えられる。一方圧縮鉄筋を腐食させるはりでは、ほぼ同じ荷重で斜めひび割れが入った後、大きく荷重低下するとともに、ひび割れ幅が急激に拡大したが、その値はほぼ同じで、その後アーチ的耐荷機構に移行したNC2がNC1に比べ小さなひび割れ幅となった。

4. 結論

圧縮鉄筋の腐食に着目した RC はりの載荷試験結果から得られた結論を以下に述べる。

1. 圧縮鉄筋が健全な場合、斜めひび割れが腐食進行に伴いはり中央より発生し、アーチ的耐荷機構により耐力は増加した。一方、圧縮鉄筋に沿ったひび割れがある場合、斜めひび割れは局所化するもののほぼ同じ位置に発生し、圧縮鉄筋が健全な場合の同一腐食レベルのはりに比べて、耐力が大きく低下した。
2. 圧縮鉄筋に沿った腐食ひび割れがある場合の耐力低下は、圧縮鉄筋あき部分を貫通するひび割れによる、せん断力に抵抗する圧縮部コンクリートの断面積が減ることに依存すると考えられる。

参考文献

- 1) Rodriguez, J. et al.: Load Carrying Capacity of

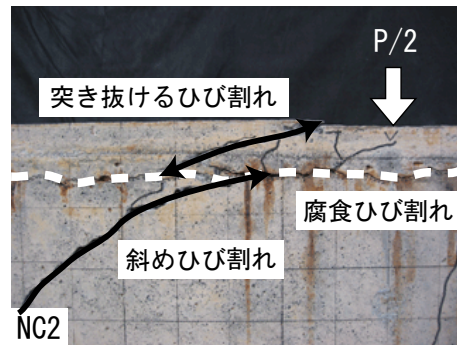


図-10 斜めひび割れの進展 (NC2)

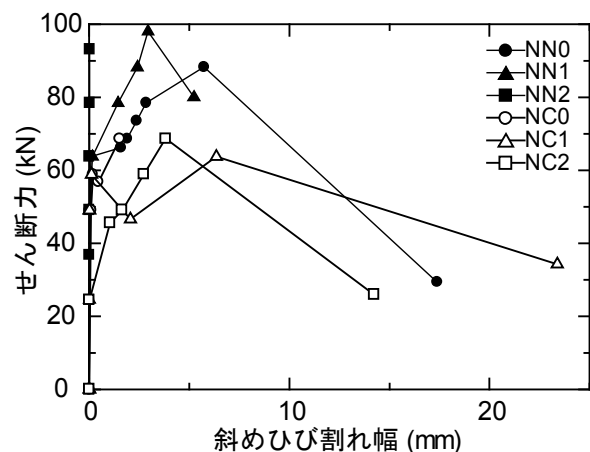


図-11 載荷に伴う斜めひび割れ幅の変化

Concrete Structures with Corroded Reinforcement, Construction and Building Materials, Vol.11, No.4, pp.239-248, Jun. 1997

- 2) 松尾豊史ほか：鉄筋腐食した RC はり部材のせん断耐荷機構に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.15, No.2, pp.69-77, 2004.5
- 3) Andrade, C. et al.: On-site measurements of corrosion rate of reinforcements, Construction and Building Materials, Vol.15, No.2-3, pp.141-145, Mar./Apr. 2001
- 4) Rodriguez, J. et al.: On site corrosion rate measurements in concrete structures using a device developed under the Eureka project EU-401.Int.,Conference on Concrete across Borders, Vol.1, pp.215-226, Odense, Denmark, Jun. 1994
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，2002.3