

集中配置鉄筋で高引張強度領域を構築したRC梁のせん断破壊挙動に関する基礎的検討

Study on the shear fracture behavior of RC beams with high tensile strength region by rebar



小林 薫*



佐々木 尚美*



伊東 佑香*



伊藤 隼人*

In this study, it is possible to place a region of high tensile strength by the RC member was subjected to experimental and analytical investigation for the purpose of controlling the shear fracture path. The high tensile strength region to be placed in the RC member, focusing on how to concentrate place the rebar, it was subjected to shear fracture experiment of RC Beams. In the experimental results, than specimens of resin concrete, shear strength is reduced about 20%. From numerical results rebar concentrated arrangement the specimens, causes the assumed shear strength was reduced by about 20%, because the shear fracture path is formed longer.

●キーワード：せん断耐力、せん断破壊経路、高引張強度領域、鉄筋集中配置

1. はじめに

RC梁部材の設計では、曲げ性能で断面が決定され、せん断性能は要求性能を満足するせん断補強鉄筋量の配置が行われる。このような設計では、RC梁部材にせん断補強鉄筋が多量に配置される場合がある。鉄道のRCラーメン高架橋梁部材におけるせん断補強鉄筋の配筋状況の例を図1に示す。

RC梁部材におけるせん断補強鉄筋の多量の配置を抑制する方法として、何らかの方法によりRC部材におけるコン



図1 RCラーメン高架橋梁部材の配筋例

クリートが負担するせん断耐力 V_c を高めることができればよい。 V_c の潜在能力を發揮させるための既往の研究では、主鉄筋の付着力を人工的に切ることや¹⁾、プレート等の人工亀裂材を埋め込み、ひび割れの進展経路を制御する^{2) 3)} ことなどが報告されている。

一方、著者らは、RC部材内に高引張強度領域を意図的に配置し、せん断破壊経路制御に関する実験的な検討結果を報告⁴⁾している。高引張強度領域は、骨材に樹脂を充填したレジンコンクリートで製作している⁵⁾。2体の試験体による実験結果⁴⁾から、せん断破壊経路に応じたコンクリートが負担するせん断耐力 V_c が發揮された。これにより、例えば、せん断スパン比 (a/d) が3.0程度の梁内に引張強度の高い領域を配置し、仮に破壊経路でせん断スパン比 (a/d) を1.5程度にすることが可能となれば、間接的に低せん断スパン比 (a/d) のせん断破壊形態に誘導することになり、コンクリートが負担するせん断耐力の向上が期待できる。

本研究は、せん断破壊制御を目的に、せん断スパン内に高引張強度領域を配置する構造について、模型試験体による実験的な検討を行った。検討に用いた模型試験体は、著者らが実施したレジンコンクリートの試験体⁴⁾と同じ諸元のもの

で鉄筋を集中配置にしたものである。二種類の引張強度の高い領域を配置したRC部材の破壊性状や既往のせん断耐力式での検討、3次元非線形FEMを用いた数値解析による破壊時状況の検討を行ったので報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表1に、試験体諸元を示す。表1には、比較対象とした既往の実験⁴⁾における試験体Type-1～3の諸元も掲げる。既往の実験⁴⁾におけるType-1は、本研究における基本となる試験体で高引張強度領域を配置していない。Type-2とType-4は、支点側に引張強度の高い領域を配置し、載荷点側に破壊経路を誘導する試験体である。Type-3とType-5は、2箇所に引張強度の高い領域を配置し、せん断スパンの中央付近をせん断破壊経路となるようにした試験体である。Type-2とType-3はレジンコンクリートで、Type-4とType-5は鉄筋集中配置で高引張強度領域を製作している。図2に、試験体形状を示す。

模型試験体は、載荷点から可動支点側を破壊側とした。載荷点から固定支点側は補強側としD16 (SD345) のせん断補強鉄筋を100mm間隔で配置し、せん断破壊が生じないようにした。これは、せん断破壊領域を明確にするために設定した。

Type-4とType-5における鉄筋集中配置を行うための籠状鉄筋は、レジンコンクリートの引張強度に高引張強度領域の断面積を乗じた全引張強度を鉄筋の降伏強度で除して配置する鉄筋本数を決定した。

2.2 実験方法

載荷方法は、単純支持条件下で、スパン中央の2点集中載荷で実施した。載荷に伴うひび割れ発生状況を確認するため、50～100kN程度毎に載荷を一時止めた。ひび割れの先端が上縁近傍に達し、破壊の発生が予測されてからは、連続的に載荷した。

3. 実験結果の概要

3.1 破壊挙動

(1) Type-1～3試験体破壊状況の概要⁴⁾

Type-1試験体は、基本の試験体である。載荷荷重が336kN時に破壊側の載荷点端部に斜めひび割れが貫通し、急激な荷重低下となった。破壊形態は、斜め引張破壊となった。

Type-2試験体は、載荷点近傍にせん断破壊経路を誘導することを目的とした試験体である。載荷荷重が551kN時に等曲げ区間の圧縮縁で圧壊が発生し、同時に斜めひび割れが圧壊部を貫通するように到達し、荷重が急激に低下した。破壊形態はせん断圧縮破壊であった。せん断破壊経路は引張強度の高い領域を避けて形成され、Type-1試験体の約1.6倍の破壊荷重を示した。

Type-3試験体は、せん断スパン内に2箇所引張強度の高い領域を設け、その間にせん断破壊経路を形成するようにした試験体である。載荷荷重が329kN時に、引張強度の高い領域を避けて載荷点と支点を結ぶように斜めひび割れが発生した。破壊形態としては、斜め引張破壊となった。

(2) Type-4試験体

Type-4試験体は、載荷点側にせん断破壊経路を誘導することを意図した試験体である。

載荷荷重が320kN時に載荷荷重270kN時に発生した斜めひび割れが、大きく進展した。このひび割れは、引張強度の高い領域端部を通過し、載荷点直下から等曲げ区間側に進展した。さらに載荷を続けると、載荷荷重は増加した。載荷荷重が444.7kN時に等曲げ区間の圧縮縁で圧壊が発生し、斜めひび割れは圧壊部に到達し、荷重が急激に低下した。圧縮縁の圧壊とほぼ同時にせん断ひび割れが断面を貫通し、耐荷性能を喪失したことから、せん断圧縮破壊と判定された。図3に、Type-4試験体の破壊状況を示す。

(3) Type-5試験体

Type-5試験体は、引張強度の高い領域を2箇所設け、引張強度の高い領域間にせん断破壊経路を誘導することを狙った試験体である。

ん断破壊経路を誘導することを狙った試験体である。

載荷荷重が190kN時に曲げひび割れが斜めひび割れに移行した。さらに載荷を続けると載荷荷重が258.7kN時に、支点側の引張強度の高い領域の載荷点側を通過し載荷点近傍に到達する斜めひび割れが発生した。この時点での斜めひび割れ幅は微小で目視でようやく確認できる程度であった。

載荷を継続すると、載荷荷重が低下し始め、同時に、斜めひび割れ幅が急激に拡大した。この時点での載荷荷重は150kN程度で、スパン中央の鉛直変位は6.2mmであった。それ以降、荷重の低下はゆるやかではあったが、スパン中央の鉛直変位が11mm付近から破壊側載荷点から支点側に250mm程度離れた上縁が盛り上がり、ひび割れの発生が確認された。最終的には、上縁盛り上がり箇所局所変形が大きくなり、載荷点近傍をひび割れが貫通し、斜め引張破壊となった。図4に、Type-5試験体の破壊状況を示す。

3.2 荷重変位関係

実験結果として、各試験体の最大荷重とスパン中央の鉛直変位を表2に示す。表2には、後述する3次元FEM解析結果も示す。既往の実験結果⁴⁾を含め、5体の実験結果として、図5に荷重変位曲線を示す。Y軸は、載荷点荷重の合計値、X軸はスパン中央の鉛直変位である。

載荷点側にせん断破壊経路を誘導することを意図したType-2試験体とType-4試験体は、基本試験体であるType-1試験体の実験結果より、Type-2試験体で1.6倍、

表1 試験体諸元表

試験体名 TYPE	B 幅(mm)	H 高さ(mm)	L 長さ(mm)	上鉄筋	下鉄筋	引張鉄筋比	有効高 d (mm)	せん断 スパン a (mm)	a/d	高引張強度領域	コンクリート 圧縮強度 f _c (N/mm ²)	高引張材料圧 縮強度 f _{ct} (N/mm ²)	高引張材料引 張強度 f _{ctk} (N/mm ²)	主鉄筋降伏 強度σ _y (N/mm ²)	主鉄筋降伏 ひずみε _y	せん断補 強鉄筋降 伏強度σ _y (N/mm ²)	せん断補 強鉄筋降伏 ひずみε _y
1 ⁴⁾	300	500	5000	D16-2本	D32-3本 (SD390)	1.89%	420	1360	3.24	—	32.3	—	—	420	2383	365	2032
2 ⁴⁾	300	500	5000	D16-2本	D32-3本 (SD390)	1.89%	420	1360	3.24	300×140× 940	31.7	(レジコン クリート) 71.97	6.5	420	2383	365	2032
3 ⁴⁾	300	500	5000	D16-2本	D32-3本 (SD390)	1.89%	420	1360	3.24	(載荷点側) 300×140× 1180 (支点側) 300×140× 520	32.5	(レジコン クリート) 71.97	6.5	420	2383	365	2032
4	300	500	5000	D16-2本	D32-3本 (SD390)	1.89%	420	1360	3.24	300×140× 940	32.4	鉄筋集中配置 SD345D13:399N/mm ² SD345D19:388N/mm ²	420	2383	365	2032	
5	300	500	5000	D16-2本	D32-3本 (SD390)	1.89%	420	1360	3.24	(載荷点側) 300×140× 1180 (支点側) 300×140× 520	19.9		420	2383	365	2032	

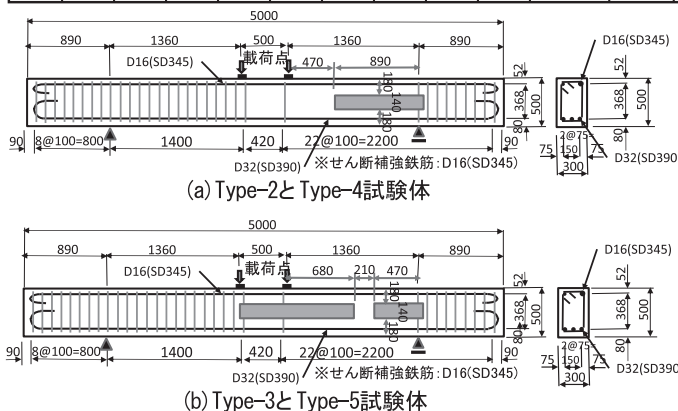


図2 試験体配筋略図

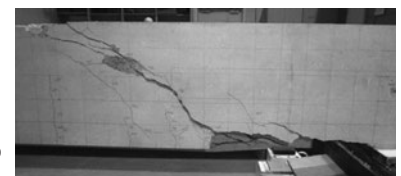


図3 Type-4試験体の破壊状況

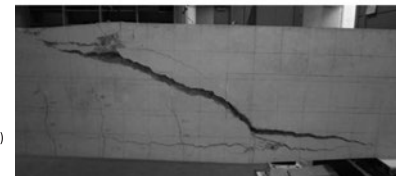


図4 Type-5試験体の破壊状況

表2 荷重変位の実験値と解析値のまとめ

試験体名称	実験結果			解析結果		
	最大荷重 P _実 (kN)	最大荷重時ハ ン中央鉛直変位 δ _実 (mm)	Type-1と の比率	最大荷重 P _解 (kN)	最大荷重時ハ ン中央鉛直変位 δ _解 (mm)	Type-1 との比率
Type-1	337	5.1	1.00	311	8.6	1.00
Type-2	551	15.1	1.64	523	14.6	1.68
Type-3	329	5.2	0.98	318	5.4	1.02
Type-4	445	11.5	1.32	441	12.0	1.42
Type-5	259	4.6	0.77	252	9.7	0.81

Type-4試験体で1.3倍となるせん断耐力を示した。せん断スパン中央付近にせん断破壊経路を誘導することを狙ったType-3試験体とType-5試験体では、Type-1試験体と比較して、Type-3試験体で1.0倍、Type-5試験体で0.8倍であった。

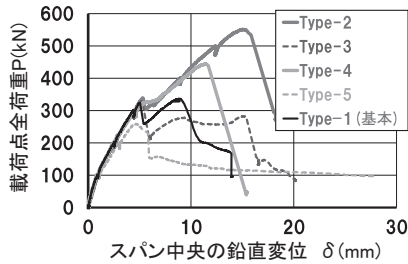


図5 各試験体の荷重変位曲線

荷重変位曲線からは、Type-5試験体以外の4体の初期剛性はほぼ同じだったが、Type-5試験体は他の試験体より小さかった。これは、コンクリートの圧縮強度が他の試験体より小さかったことが影響していると思われる。

鉄筋を集中配置して高引張強度領域を製作したType-4とType-5試験体は、レジンコンクリートで製作したType-2とType-3試験体に比べて約20%程度せん断耐力が小さかった。この理由は、せん断破壊経路が関係すると考えられ、次章以降で検討を行う。

4. 既往のせん断評価式による検討

せん断破壊経路とコンクリートが負担するせん断耐力V_cとは密接な関係がある。本実験結果において、鉄筋を集中配置したType-4とType-5試験体が、レジンコンクリートを用いたType-2とType-3試験体より、約20%程度せん断耐力が小さかった。その理由を検討するため、実験結果から得られたせん断耐力と計算式から一致するせん断スパン比を間接的せん断スパン比(a'/d)とし、既往のせん断耐力算定式から検討⁴⁾を行う。検討には、式(1)に示す二羽らの式⁶⁾と式(2)に示す石橋らの式⁷⁾を用いた。

$$V_c = 0.2(p_w f'_c)^{1/3} d^{-1/4} \cdot [0.75 + 1.4(a/d)] bd \quad (1)$$

ここで、V_c：せん断補強鋼材を用いない棒部材のせん断耐力、p_w：軸方向鉄筋比、f'_c：コンクリート圧縮強度(N/mm²)、d：有効高さ、b：断面幅、a：せん断スパン

$$V_c = 0.761(f'_c)^{1/3} (a/d)^{-1.166} \cdot (1 + \beta_p + \beta_d) bd \quad (2)$$

ここで、f'_c：コンクリート圧縮強度(N/mm²)、a：せん断スパン、d：有効高さ、β_p： $\sqrt{100p_w - 1} < 0.73$ (p_w：軸方向鉄筋)、β_d： $\sqrt[4]{100/d} - 1 \geq 0$

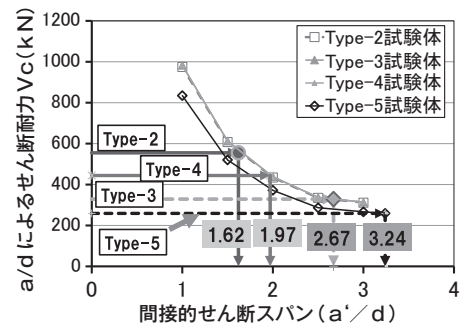


図6 間接的なa/dによるせん断耐力の検討結果

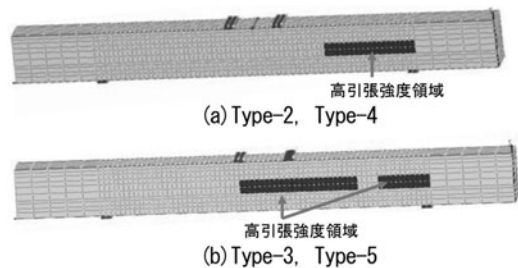


図7 非線形FEM解析用モデル

式(1)のa/dの適用範囲は、2.5以上である。式(2)のa/dの適用範囲は0.5以上から2.5以下となっている。本検討では、材料強度の試験結果を用いて、a/dの値に応じて、式(1)と式(2)を使い分けて計算を行った。検討結果を図6に示す。

Type-4試験体は、間接的せん断スパン比(a'/d)が1.97で実験結果から得られるせん断耐力V_cと一致した。比較となるType-2試験体では(a'/d)が1.62であった。同様な検討から、Type-5試験体の間接的せん断スパン比(a'/d)は3.24、Type-3試験体で2.67であった。

間接的せん断スパン(a'/d)は、鉄筋集中配置の試験体Type-4、Type-5が、レジンコンクリートでの試験体Type-2、Type-3の約1.2倍大きくなっている。

以上の結果から、間接的せん断スパン比(a'/d)は、鉄筋を集中配置する場合、レジンコンクリートを用いる場合の1.2倍程度大きく、その結果としてV_cの実験値が小さくなったものと考えられる。

5. 3次元FEM解析による破壊挙動の検討¹⁰⁾

各試験体のせん断破壊挙動の検討を行うため、3次元非線形FEMによる解析を実施した。

5.1 解析モデルの概要

本検討に用いた解析モデルを図7に示す。解析モデルは、試験体全体をモデル化した。解析に適用した構成則は、東京大学コンクリート研究室で開発された任意の載荷経路依存性を考慮した材料構成モデルに基づくRC平面モデル⁸⁾を3次元に拡張したものである。

解析に用いた材料特性は、Type-2とType-3試験体のレジ

ンコンクリート部は材料試験結果の圧縮強度と引張強度を与えた。Type-4とType-5試験体の鉄筋を集中配置箇所はRC要素として、配置鉄筋強度を与えた。

5.2 解析結果

(1) 荷重・変位曲線の比較

Type-2～5試験体の解析結果と実験結果の荷重・変位関係の比較を図8に示す。解析結果は、表2、図8から実験結果を概ね妥当に評価していると思われる。

(2) 最大荷重時のひび割れ発生状況

Type-2～5試験体の解析として、図9に最大荷重付近のひび割れ発生状況⁹⁾を示す。引張強度の高い領域は、図9中に点線で表示した。

レジンコンクリートで高引張強度領域を製作したType-2とType-3試験体の解析結果は、高引張強度領域へのせん断

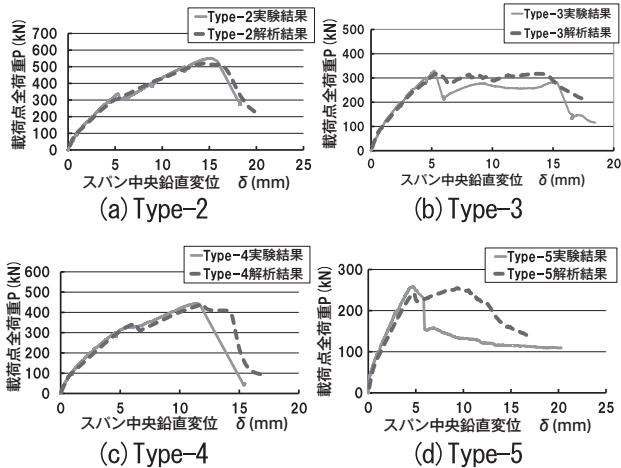


図8 荷重変位曲線の実験値と解析結果の比較

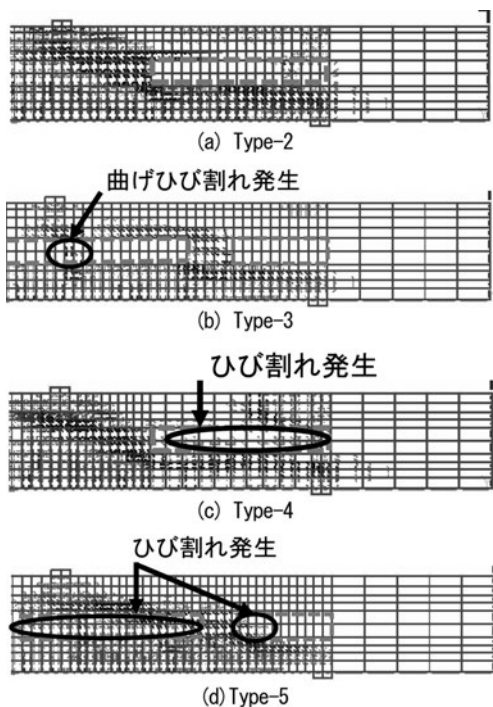


図9 最大荷重付近のひび割れ発生状況

ひび割れの進展はなかった。鉄筋集中配置したType-4とType-5試験体では、鉄筋集中配置領域への曲げひび割れやせん断ひび割れの進展が認められた。鉄筋集中配置だけでは、ひび割れ発生を回避できなかった。このため、せん断破壊経路が想定より長く形成され、せん断耐力がレジンコンクリートより低下したと考えられる。

6. まとめ

RC部材内に高引張強度領域を構築し、せん断破壊経路を制御することを目的に実験的な検討を行った。本検討結果を以下に示す。

- (1) 鉄筋を集中配置して高引張強度領域を構築したType-4試験体とType-5試験体のせん断破壊経路は、高引張強度領域の一部にひび割れが進展して形成された。
- (2) せん断破壊経路を短くなるように誘導したType-4試験体の最大荷重は、基本試験体 (Type-1) の1.32倍となった。Type-5試験体の最大荷重は、基本試験体 (Type-1) の0.77倍となった。レジンコンクリートで高引張強度領域を製作した試験体の実験結果より、約20%程度小さかった。
- (3) 既往のせん断耐力式から求めた実験結果を説明可能な間接的せん断スパン比 (a'/d) は、鉄筋集中配置で高引張強度領域を製作した試験体Type-4、5がレジンコンクリートの試験体の実験結果より約1.2倍程度長くなった。これは、高引張強度領域へのひび割れの進展が原因と考えられる。

参考文献

- 1) 池田尚治, 宇治公隆: 鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷挙動に及ぼす鉄筋の付着の影響に関する研究, 土木学会論文報告集, 第293号, PP.101-109, 1980.1
- 2) 田中泰司, 岸利治, 前川宏一: 曲げせん断力を受けるRC部材の人工亀裂装置とせん断補強筋の併用効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp349-354, 2005
- 3) Amorn PIMANMAS, Koichi MAEKAWA: NUMERICAL SIMULATION OF FAILURE RATHFORMATION AND CRACK SEQUENCE IN RC WITH FULL AND LOCAL SHEAR ANISOTROPY, J. Materials. Conc. Struct., Pavements, JSCE, No.683/V-52, pp157-171, Aug.2001
- 4) 小林薫, 佐々木尚美: RC部材に引張強度の高い領域を付与してせん断破壊制御を行うための基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.7-12, 2014
- 5) 佐々木尚美, 小林薫: 鉄筋コンクリート梁の内部に引張強度の高い領域を有するRC梁試験体の破壊性状について, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.1483-1488, 2013
- 6) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村甫: せん断補強鉄筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, 第372号/V-5, pp167-176, 1986.8
- 7) 石橋忠良, 松田好史, 齊藤啓一: 少数本の杭を用いたフーチングのせん断設計について, 土木学会論文報告集, 第337号, pp197-204, 1983.9
- 8) 岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991.5
- 9) 高橋敏樹, 前川宏一: 没入型多面ディスプレイを用いた3次元RCひび割れ解析結果のビジュアライゼーション, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.1, pp.149-154, 1998
- 10) 小林薫, 佐々木尚美, 伊東佑香: 鉄筋を集中配置し高引張強度領域を構築したRC梁のせん断破壊挙動に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.253-258, 2015