

論文 1275MPa 級の高強度横補強筋を用いた RC 部材の付着割裂性状

遠藤英之^{*1}・中澤 淳^{*2}・南 宏一^{*3}

要旨:1275MPa 級の高強度横補強筋と 60MPa の高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート部材において、横補強筋比と中子筋の有無を主な実験変数として、7 体のキャンティレバー型付着割裂破壊実験を行い、破壊性状及び、付着割裂強度を確認した。その結果、横補強筋比が付着割裂強度に大きな影響を及ぼすこと、高強度コンクリートを使用した鉄筋コンクリート部材における、高強度横補強筋の使用の有効性を確認し、既往の付着割裂強度算定式による計算値と実験値の比較検討を行った。

キーワード:付着割裂破壊、高強度横補強筋、高強度コンクリート、横補強筋比、中子筋

1.はじめに

近年、高強度材料を用いた鉄筋コンクリート部材において、付着割裂破壊実験、及び研究が多く行われた。その結果、付着割裂強度には、コンクリート強度が大きく影響し、横補強筋における中子筋が有効に作用するなどの貴重な成果が得られている。しかし、付着割裂強度には、それを支配する要因が、数多く考えられることや実験方法が多様なことから、高強度材料を用いた場合における付着割裂破壊のメカニズムの解明や付着割裂強度算定式の改善などには、更なる実験、及び研究が必要であるといえる。

そこで、本研究では、1275MPa 級の高強度横補強筋と 60MPa の高強度コンクリートを組合わせた鉄筋コンクリート部材において、主な実験変数を横補強筋比、中子筋の有無、上端筋と下端筋の差異に設定し、キャンティレバー型付着割裂破壊実験を行い、破壊性状、及び付着割裂強度を確認し、付着割裂破壊における横補強筋の効果を重点的に考察し、既往の付着割裂強度算定式により求めた計算値と実験値との比較検討を行った結果を報告する。

2.実験概要

2.1 試験体

表-1 に実験変数を示す。計画した試験体は 7 体である。図-1 に試験体の形状寸法及び、断面構成を示す。各試験体は一段配筋とし、いずれも上端筋、下端筋を想定した試験鉄筋を有し、コンクリート打設方向に対して上端筋、下端筋とする。実験変数は、A1 の試験体では、横補強筋なし、その他の試験体は横補強筋間隔を 100mm, 50mm, 35mm の 3 種類とし、配筋方法は中子筋のあり、なしの 2 種類とし、これら

表-1 実験変数

試験体名	試験部分名	試験鉄筋	横補強筋		
			配筋	補強筋タイプ	Pw
A1	A1-613-T	上端筋	—	—	0.00
	A1-613-B	下端筋			
A2	A2-613-10N-T	上端筋	2-φ6.2@100	N	0.20
	A2-613-10N-B	下端筋			
A3	A3-613-10M-T	上端筋	4-φ6.2@100	M	0.40
	A3-613-10M-B	下端筋			
A4	A4-613-5N-T	上端筋	2-φ6.2@50	N	0.40
	A4-613-5N-B	下端筋			
A5	A5-613-5M-T	上端筋	4-φ6.2@50	M	0.80
	A5-613-5M-B	下端筋			
A6	A6-613-3.5N-T	上端筋	2-φ6.2@35	N	0.57
	A6-613-3.5N-B	下端筋			
A7	A7-613-3.5M-T	上端筋	4-φ6.2@35	M	1.15
	A7-613-3.5M-B	下端筋			

Pw: 横補強筋比(%) N: なかご筋なし M: なかご筋あり

*1 福山大学大学院 工学研究科建築学専攻 修士課程 (正会員)

*2 福山大学大学院 工学研究科地域空間工学専攻 博士課程 川鉄テクノワイヤ(株) (正会員)

*3 福山大学教授 工学部建築学科 工博(正会員)

の影響により、横補強筋比 p_w は、0.0%，0.2%，0.4%，0.57%，0.8%，1.15%の6種類とした。

共通因子としては、コンクリート強度 $F_c=60\text{MPa}$ ，試験鉄筋は、5-D16（SD685 相当：斜めふし），高強度横補強筋は、 $\phi 6.2\text{mm}$ （1275MPa 級の細径異形 PC 鋼棒）である。試験鉄筋の荷端は、補強治具を溶接し引張力を伝達させた。付着長さは 300mm であるが、梁部材の一部を想定した試験体であるため荷端付近の 50mm と鉛直反力による悪影響を除くため鉛直反力支持部の 250mm は、付着を絶縁した。かぶり厚さは上面、側面とも 13.6mm であり、破壊モードは全試験体とも藤井、森田式による割裂パターンを判定する係数は $b_i=bs_i=2.75$ となり、サイドスプリット型の破壊モードを想定した。¹⁾なお、中子筋を有した試験体の横補強筋には外周筋と中子筋を一筆書きに曲げ加工したマルチタイプを採用した。そして、試験体内部には、せん断破壊を起こさないように内部補強鉄筋を配置した。

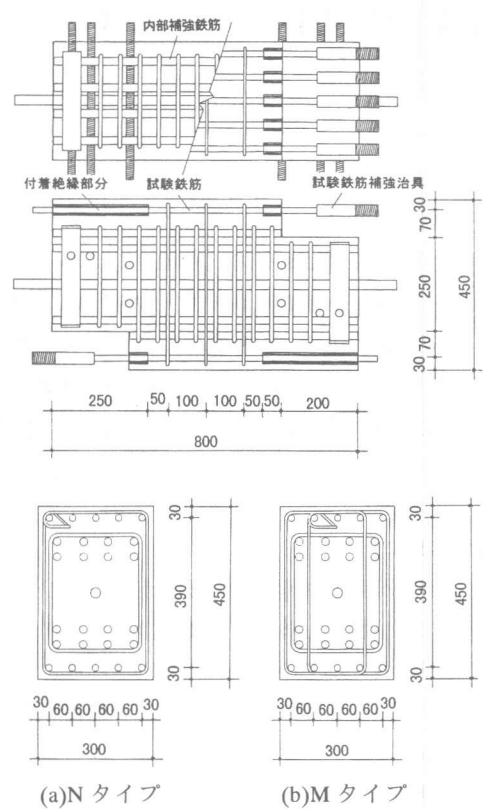


図-1 試験体形状（A2，A3）

2.2 使用材料

コンクリート設計強度は 60MPa として、普通ポルトランドセメントと最大粒径 15mm の粗骨材（碎石），細骨材（海砂），高性能 AE 減水剤を用いて、水セメント比 35%，細骨材率 41%，スランプ 20 として調合した。コンクリート配合表を表-2 に、コンクリート試験結果を表-3 に、鉄筋の機械的性質を表-4 に示す。

2.3 実験方法

図-2 に荷重装置を示す。付着割裂破壊実験方法としては、キャンティレバー型の引抜き試験方法を採用し、荷重実験は、L 型反力フレームと 980kN 油圧ジャッキを用いて行った。荷重方法は一方向単調荷重で行い、加力初期においては、試験鉄筋の荷端近傍に設置した抵抗線ひずみゲージの出力を確認しつつ加力しそれぞれの試験鉄筋の引張力が均等になるように調整した。

表-2 コンクリート配合表

設計強度 (MPa)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)				
			水	セメント	粗骨材	細骨材	混和剤
60	35.0	41.0	194	554	633	965	11.08

表-3 コンクリートの試験結果

材令	圧縮強度(MPa)	割裂強度(MPa)	弾性係数(GPa)
7日	34.08	2.56	27.35
28日	55.15		29.77
158日(実験開始時)	62.41	3.82	32.40
323日(実験終了時)	63.79	4.36	41.36

表-4 鉄筋の機械的性質

鉄筋名	降伏強度 (MPa)	降伏ひずみ (μ)	引張強度 (MPa)	伸び (%)	弾性係数 (GPa)
試験鉄筋(D16)	671.7	3820	850.5	11.36	176.49
横補強筋(φ6.2)	1374.0	8518	1470.4	7.75	196.42

2.4 測定事項

荷重は、ジャッキヘッドに取付けた、980kN ロードセルで計測し、試験鉄筋 5 本の引張合力を試験体に作用する荷重とし、各試験鉄筋に作用する荷重は載荷端近傍に貼付した抵抗線ひずみゲージの出力より計算した。載荷端滑り量は、試験体中央部に固定した測定枠に変位計を取り付け、載荷端側のコンクリート端から約 50mm 外側の位置における試験鉄筋の軸方向変位量によって測定した。なお、試験鉄筋のコンクリートに埋め込まれていない部分における伸びの補正は行っていない。図-3 に抵抗線ひずみゲージ貼付位置を示す。試験鉄筋のひずみは、断面の両隅に位置する試験鉄筋と中央の試験鉄筋のそれぞれに載荷端から 60mm、140mm、240mm の位置の計 9 箇所抵抗線ひずみゲージを貼付し測定を行った。横補強筋には、試験鉄筋近傍に貼付した。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

試験体の破壊状況は、最初に上面の試験鉄筋材軸に直交する方向にひび割れが発生し、側面に斜めひび割れ、上面に試験鉄筋軸に沿うひび割れの順に発生し、それらのひび割れが増加、増大することにより耐力を失った。代表的な最終ひび割れ図を図-4 に示す。横補強筋比に比例して、ひび割れは細かく多く発生し、M タイプの試験体では、両隅試験鉄筋と中央の試験鉄筋に沿うひび割れが発生したが、N タイプの試験体では、全試験鉄筋に沿うひび割れが発生した。これより、中子筋が割り裂きひび割れ発生後における試験鉄筋の浮上りを拘束していることが確認できる。これは同時に横補強筋の中子筋が拘束力を増大させ付着割裂強度を向上させることを証明している。

3.2 付着応力度

表-5 に最大荷重、最大平均付着応力度($\tau_{av,max}$) 上端筋と下端筋の耐力の比率、 $\tau_{av,max}$ 時にお

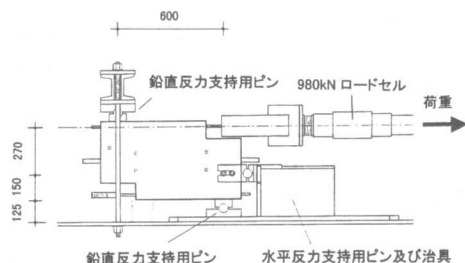


図-2 載荷装置概要

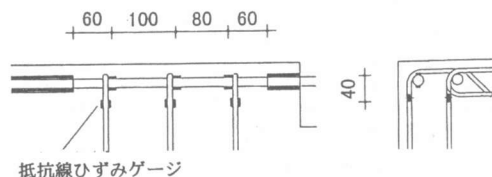


図-3 抵抗線ひずみゲージ貼付位置

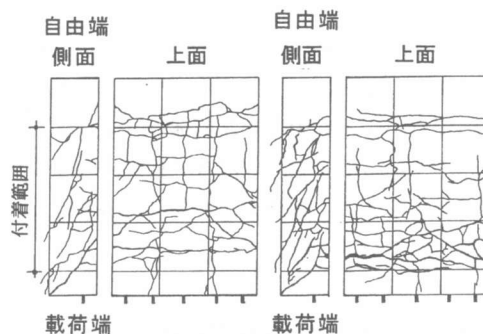


図-4 最終ひび割れ図

る載荷端滑り量 (S) , 及び既往の付着割裂強度算定式により求めた計算値を示す。^{1) 2) 3)}

なお、平均付着応力度(τ_{av})とは、各試験鉄筋に作用する付着応力度を平均化したものであり各試験鉄筋に作用する付着応力度(τ)とは後に述べるように区別して考察する必要があることに注意を要する。算定方法を以下に示す。

$\tau_{av} = P_{\text{試験体}} / (N \cdot \pi \cdot d_b \cdot l_b)$: 平均付着応力度

$\tau = P_{\text{各試験鉄筋}} / (\pi \cdot d_b \cdot l_b)$: 付着応力度

$P_{\text{試験体}}$: 試験体に作用する荷重

$P_{\text{各試験鉄筋}}$: 各試験鉄筋に作用する荷重

N : 試験鉄筋本数 (5 本) d_b : 試験鉄筋径 (16mm)

l_b : 付着長さ (300mm)

表-5 実験結果一覧

試験体名	実験結果				既往の付着割裂強度算定式による計算値					
	最大荷重 (kN)	最大平均付着応力度 $\tau_{av,max}$ (MPa)	上端と下端の比	$\tau_{av,max}$ 時の載荷端滑り量 S (mm)	藤井,森田式		角,張式		前田,小谷式	
					$\tau_{bu}(cal.)$ (MPa)	$\tau_{av,max}$ $\tau_{bu}(cal.)$ (MPa)	$\tau_{bu}(cal.)$ (MPa)	$\tau_{av,max}$ $\tau_{bu}(cal.)$ (MPa)	$\tau_{bu}(cal.)$ (MPa)	$\tau_{av,max}$ $\tau_{bu}(cal.)$ (MPa)
A1-613-T	260.58	3.46	1.13	0.17	3.16	1.09	3.10	1.12	3.76	0.92
A1-613-B	294.78	3.91		0.45	3.86	1.01	3.44	1.14	4.13	0.95
A2-613-10N-T	284.10	3.77	1.24	0.54	3.63	1.04	4.29	0.88	4.30	0.88
A2-613-10N-B	353.09	4.68		0.45	4.43	1.06	4.76	0.98	4.72	0.99
A3-613-10M-T	335.45	4.45	1.11	1.97	4.10	1.09	5.92	0.75	5.09	0.87
A3-613-10M-B	371.71	4.93		1.31	5.00	0.99	6.57	0.75	5.59	0.88
A4-613-5N-T	276.75	3.67	1.29	0.81	4.10	0.90	4.91	0.75	4.83	0.76
A4-613-5N-B	356.03	4.72		0.94	5.00	0.94	5.45	0.87	5.30	0.89
A5-613-5M-T	496.57	6.59	1.10	2.18	5.03	1.31	7.04	0.94	6.35	1.04
A5-613-5M-B	544.10	7.22		1.85	6.14	1.18	7.81	0.92	6.97	1.04
A6-613-3.5N-T	294.29	3.90	1.29	1.11	4.50	0.87	5.46	0.72	5.27	0.74
A6-613-3.5N-B	380.53	5.05		2.02	5.49	0.92	6.06	0.83	5.79	0.87
A7-613-3.5M-T	609.76	8.09	1.14	2.02	5.32	1.52	7.04	1.15	7.36	1.10
A7-613-3.5M-B	696.39	9.24		—	6.50	1.42	7.81	1.18	8.08	1.14

3.3 上端筋と下端筋の比較

下端筋と上端筋の耐力比は、藤井、森田による研究¹⁾では、1.22 となっているが、横補強筋のない試験体では、1.13 となりコンクリートが高強度になるに従いブリージングの影響が小さくなることを証明している。しかし、他の試験体では、中子筋のない試験体は 1.2 以上となり、中子筋のある試験体は 1.1 程度と中子筋の有無が下端筋と上端筋の耐力比に影響を及ぼす結果となった。

3.4 付着応力度－載荷端滑り曲線

図-5 に平均付着応力度 (τ_{av})－載荷端滑り曲線(上端筋)を示す。横補強筋のある試験体の初期剛性にはほとんど差がない。最大平均付着応力度以後は、中子筋の有無に関係なく横補強筋比が大きいほど耐力低下を遅らせる傾向にある。これより、部材の靱性を向上させるには、他の破壊と同様に付着割裂破壊に対しても補強筋が有効に働くことを示している。しかし、中子筋のない試験体では、耐力は若干向上しているが、横補強筋比が耐力に大きく影響するとはいえない。ところが、中子筋のある試験体では、横補強筋比が耐力を大きく左右する要因となっている。そして、中子筋のある試験体の滑り曲線では、割り裂きひび割れ発生時(約 4.0MPa)で、勾配が変化している。これらの原因を明確にするために図-6 に各試験鉄筋における付着応力度 (τ)－載荷端滑り曲線を示す。

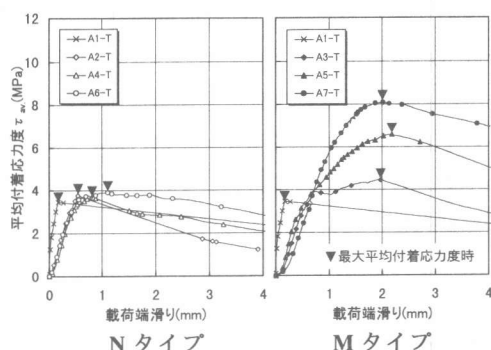


図-5 平均付着応力度－載荷端滑り曲線

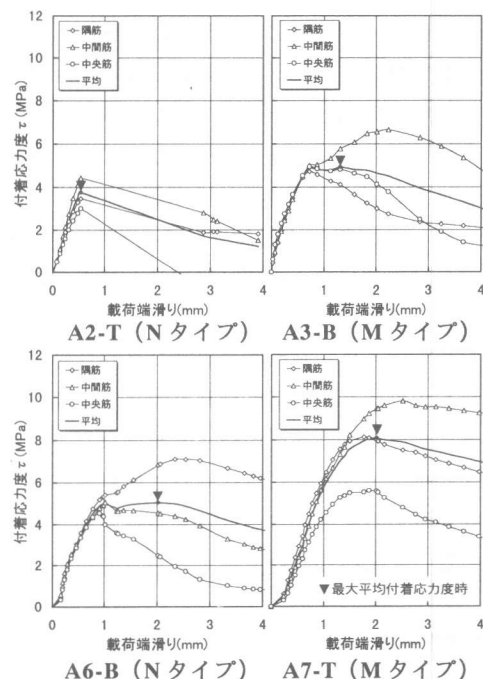


図-6 各試験鉄筋における付着応力度－載荷端滑り曲線

なお、横補強筋の掛り方による区別を行うため、外周筋、中子筋の掛る位置、補強筋が直接掛らない位置にある試験鉄筋をそれぞれ隅筋、中間筋、中央筋と呼ぶことにする。

中子筋のない試験体において、横補強筋比が小さい試験体では、すべての試験鉄筋が同時に最大付着応力度に達し、横補強筋比が大きくなると隅筋の付着応力度は、割り裂きひび割れ発生後も上昇し、横補強筋が掛らない試験鉄筋においても付着応力度の低下量に差異がある。しかし、中央筋と中間筋における付着応力度の低下量の和が、隅筋における上昇量よりも大きいいため結果的に平均すると図-5 に示すように本実験の範囲内では横補強筋比による差が見られない結果となっている。中子筋のある試験体においては、割り裂きひび割れ発生後、中間筋の付着応力度が上昇しており中子筋の影響を大きく受けている。中央筋の最大付着応力度は、横補強筋比による差は小さいが隅筋と中間筋では横補強筋比に比例して向上する傾向にある。

3.5 横補強筋の効果と載荷端からの距離

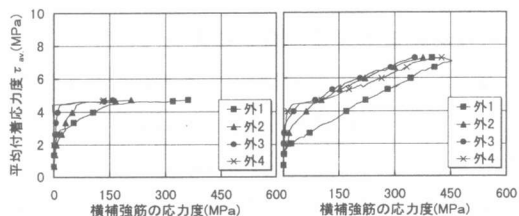
図-7 に代表的な横補強筋(外周筋)の応力度履歴、図-8 に平均付着応力度：4.0MPa 時と最大平均付着応力度時における横補強筋の応力度と載荷端からの距離の関係を示す。外 1, 外 2, 外 3, 外 4 は、それぞれ載荷端から 25mm, 125mm, 175mm, 275mm の断面内に位置する横補強筋の外周筋に貼付したひずみゲージを表す。

平均付着応力度が増加しひび割れが発生するに従い載荷端に近い横補強筋から順に応力が作用し始め、平均付着応力度が低い段階では載荷端からの距離に比例して、横補強筋に高応力度が作用する。それは、横補強筋比が小さい試験体では最大平均付着応力度時においても同様な傾向が見られる。横補強筋比が大きい試験体では最大平均付着応力度時において載荷端からの距離には関係なく各横補強筋に均一な応力が作用している。これより、横補強筋比が小さいときには、付着割裂強度には付着長さが大きく影

響するが、横補強筋比がある程度より小さいと横補強筋による付着割裂強度の向上はあまり期待できないといえる。

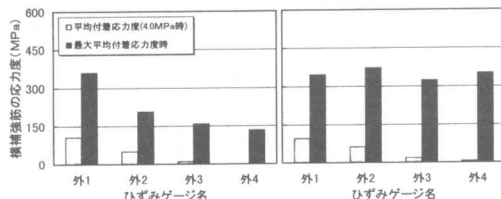
3.6 中子筋の効果

図-9 に載荷端から 125mm の断面に位置する横補強筋における、外周筋と中子筋の応力度履歴曲線を示す。中子筋のある試験体においては、作用している応力度に中子筋と外周筋による差異はない。横補強筋の応力度については、最大平均付着応力度時において 450MPa を超えている試験体もあり、最大平均付着応力度以降の耐力低下時においては、ほとんどの試験体が高応力度に達していることを確認した。このため、高強度コンクリートを使用した場合において、付着割裂強度の向上、及び耐力低下時における靱性の向上には、高強度横補強筋の使用が有効であるといえる。



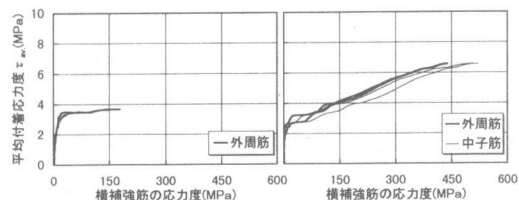
A4-T (N タイプ) A5-T (M タイプ)

図-7 横補強筋の応力度履歴曲線



A4-B (N タイプ) A5-B (M タイプ)

図-8 横補強筋と載荷端からの距離の関係



A4-T (N タイプ) A5-T (M タイプ)

図-9 外周筋と中子筋の応力度履歴曲線

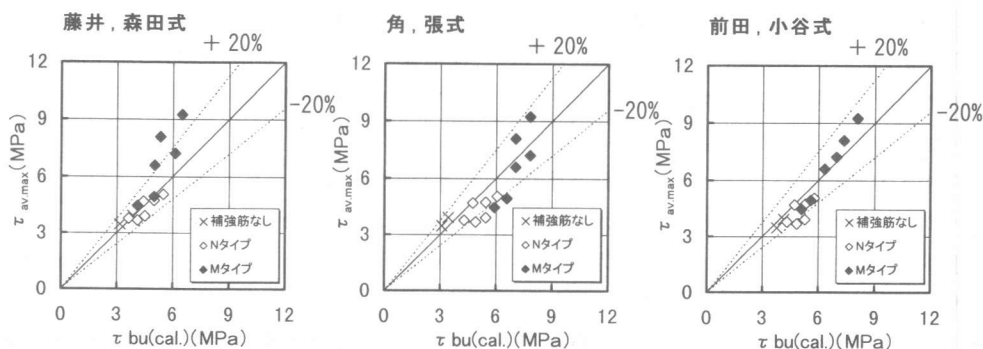


図-10 既往の付着割裂強度算定式の比較

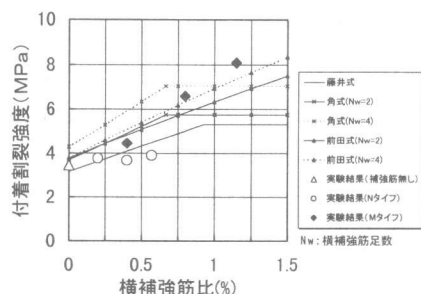


図-11 横補強筋比と既往の算定式との関係

4. 既往の付着割裂強度算定式の比較

図-10 に既往の付着割裂強度算定式より求めた計算値 ($\tau_{bu(cal.)}$) と実験値 ($\tau_{av,max}$) との比較を示す。中子筋のない試験体において、角、張式と前田、小谷式では危険側、中子筋のある試験体においては、藤井、森田式では横補強筋比が大きくなるに従い安全側になり、角、張式では横補強筋比が小さい時に危険側になる傾向を示した。

図-11 に横補強筋比と実験結果、既往の付着割裂強度算定式との関係(上端筋)を示す。本実験では、中子筋ない試験体において、横補強筋比が小さい段階では横補強筋比の増大に関係なく付着割裂強度は補強筋のない試験体と同等の結果を示したのに対し、既往の付着割裂強度算定式では補強筋のない場合の付着割裂強度に横補強筋による効果を比例増加させるという形になっており適合していない。中子筋のある試験体においては、既往の付着割裂強度算定式と同様に横補強筋比に比例して付着割裂強度が向上する傾向を示した。

5. まとめ

- (1) 上端筋と下端筋による付着割裂強度の比は、コンクリート強度の影響のみではなく、中子筋の有無にも影響する。
- (2) 横補強筋における中子筋は、付着割裂強度を顕著に向上させ、靱性も向上させる。
- (3) 横補強筋比が大きいときは、最大平均付着応力度時において載荷端からの距離に関係なく各横補強筋に一樣に応力が作用する。
- (4) 高強度コンクリートを用いた場合、耐力低下時における靱性、及び付着割裂強度の向上に高強度横補強筋の使用が有効である。
- (5) 中子筋を有せず横補強筋比が小さい時における付着割裂強度は横補強筋比に比例して向上しないため、既往の付着割裂強度算定式における横補強筋の効果の更なる検討が必要である。

参考文献

- 1) 藤井栄, 森田司郎: 異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究—第1報付着割裂破壊を支配する要因についての実験結果—, 日本建築学会論文報告集, pp.47~55, 1982.9
- 2) 角徹三, 張建東, 飯塚信一, 山田守: 高強度コンクリートレベルをも包含する RC 部材の付着割裂強度算定式の提案, コンクリート工学論文集, Vol.3, No.1, pp.97~pp.108, 1992.10
- 3) 前田匡樹, 小谷俊介, 青山博之: 異形鉄筋とコンクリートの付着応力伝達機構に基づいた付着強度式, 構造工学論文集, Vol.40B, pp.277~pp.284, 1994.3