

論文 鋼板補強された鉄筋コンクリート部材の付着割裂強度

鈴木 英之*1・西原 寛*2・田畑 卓*3

要旨：外周部を鋼板補強された鉄筋コンクリート部材を対象とし、主筋の付着性状に及ぼす鋼板の効果を調べるために梁型試験体を用いた付着割裂実験を実施した。実験の要因は、横補強筋量、中子筋の有無、鋼板の有無、およびその厚さとした。実験の結果より、部材幅方向の外側の主筋に対しては鋼板による補強効果がみられ、内側の主筋に対してはその効果が小さいことが確認された。また、付着割裂強度の増大に寄与する鋼板の厚さには上限値があった。実験結果を基に鋼板による補強効果を定量的に評価し、鋼板補強された鉄筋コンクリート部材の付着割裂強度算定式を提案した。

キーワード：鉄筋コンクリート、鋼板補強、主筋、付着割裂強度、横補強筋、提案式

1. はじめに

鉄筋コンクリート(以下RC)構造の柱の靱性能を高める目的で、帯筋量を増やす代わりに、柱の外周を鋼板で覆う工法が考えられる。現在までに耐震改修を目的として、既存柱の外周部に分割された鋼板を設置し、所定箇所を溶接し、既存躯体と鋼板の隙間にグラウト材を注入する工法が一般的に実施されている¹⁾。一方で、高軸力とせん断力が作用する下層階の柱を対象として、新設のRC造の柱部材に鋼板補強を適用することが考えられる。

RC造の柱部材が軸力とせん断力を受けた場合にその終局耐力を決定させる主な破壊形式として、曲げ破壊、せん断破壊および付着割裂破壊の3種類が考えられる。これらの破壊形式に対応する終局耐力を算出することは部材の構造性能を決定する上で極めて重要なことである。

そこで、本研究では鋼板補強された部材の付着割裂破壊に着目した。せん断補強筋を用いたRC部材の付着割裂強度に関する研究は多く行われており(例えば^{2),3)}、通常の配筋に対しては、その強度を比較的精度良く推定することができる。鋼板補強された部材の付着割裂強度に関す

る研究もいくつか行われており、付着割裂破壊に対する鋼板の補強効果が有ることは報告されているが⁴⁾、定量的な評価がされていないのが現状である。

本研究では、主に鋼板によって外周部を補強されたRC部材を対象とし、梁型試験体を用いた主筋の付着実験を実施した。本研究の目的は部材の外周部に配された鋼板が、内蔵された主筋の付着割裂強度にどのように寄与するかを実験的に確認し、その効果を定量的に評価し、鋼板補強された部材内に配された主筋の付着割裂強度算定式を提案することである。

2. 試験体および実験方法

2.1 試験体

表-1に試験一覧表、図-1に試験体形状図を示す。試験体は角らの実験³⁾を参考とした単純梁であり、1試験体の両側に試験区間を有する。試験体数は9体であり、18種類の付着実験を計画した。なお、本研究では、試験鉄筋である主筋にかかる肋筋を横補強筋、試験区間の外周部を覆う鋼板を補強鋼板または単に鋼板と称する。梁の最下端の主筋(4-D19 SD685)が試験

*1 安藤建設(株)技術研究所 博士(工学) (正会員)

*2 安藤建設(株)技術研究所 室長 (正会員)

*3 安藤建設(株)技術研究所 (正会員)

表-1 試験一覧表

No. 試験部名	RC部横補強筋				補強鋼板			補強筋比 合計 $p_w + p_{sp}$ (%)	コンクリート				
	種類	一組の 断面積 A_{st} (mm ²)	試験区間 内組数	間隔 s (mm)	横補強筋比 p_w (%)	鋼板厚さ			鋼板 補強比 p_{sp} (%)	圧縮強度 σ_c/B (N/mm ²)	1/3割線剛性 E_c (kN/mm ²)		
						公称 t (mm)	実測 spt (mm)						
1 T00-S32	2-UHD10	143	2	150	0.32	1.0	0.99	0.66	0.32	29.4	23.8		
2 T00-S63			4	75	0.63				0.63	29.4	23.8		
3 T00-S95			6	50	0.95				0.95	29.6	23.9		
4 T00-S143			9	33	1.43				1.43	29.6	23.9		
5 T00-W63			4-UHD10	285	2				150	0.63	0.63	29.9	24.0
6 T00-W95					3				100	0.95	0.95	29.9	24.0
7 T10-00	0	—			0.0	0.66	30.2	24.0					
8 T10-S63	2-UHD10	143	4	75	0.63	1.6	1.56	1.03	1.29	31.0	24.3		
9 T10-S63R0			4	75	0.63				1.29	31.0	24.3		
10 T10-S95			6	50	0.95				1.61	30.2	24.0		
11 T10-W63			4-UHD10	285	2				150	0.63	1.29	31.3	24.4
12 T10-W95	3	100			0.95	1.61	31.3	24.4					
13 T16-00	0	—			0.0	1.03	31.6	24.4					
14 T16-W63	4-UHD10	285	2	150	0.63	2.3	2.18	1.43	1.43	31.9	24.5		
15 T23-00			0	—	0.0	2.06	31.9	24.5					
16 T23-W63	4-UHD10	285	2	150	0.63	4.5	4.29	2.78	2.78	32.1	24.6		
17 T45-00			0	—	0.0	3.41	32.1	24.6					
18 T45-W63	4-UHD10	285	2	150	0.63	—	—	—	3.41	32.1	24.6		

試験部名 T00-W95 T10-S63R0 横補強筋比 $p_w = A_{st} / (s \cdot b)$ b: コンクリート幅 (mm)
 ① 鋼板厚さ ① ②③ ① ②③④ 鋼板補強比 $p_{sp} = 2 \cdot spt / B$ B: 部材幅 (= $b + 2 \cdot spt$) (mm)
 ② 中子筋の有無 ② 中子筋の有無 S: 無し W: 有り
 ③ 横補強筋比 00: 無し, 32: 0.32%, 63: 0.63%, 95: 0.95%, 143: 1.43% ④ 鋼板隅角部の面取り R0: 面取り無し

鉄筋であり、他の主筋 (D22 SD490) は試験鉄筋の付着割裂破壊を先行させるために配された補強鉄筋である。試験区間は図-1aに示すように、加力点からの距離が500~800mmの範囲の斜線部分である。試験区間両側の試験鉄筋の被り部分には幅15mmのひび割れ誘発目地を設けた。また、試験区間の外側では試験鉄筋に塩ビ管 (VE22) を被せ、コンクリートとの付着を絶縁した。試験体の計画にあたって、試験区間が付着割裂破壊する以前に、主筋の降伏、部材のせん断破壊、および試験区間以外の付着割裂破壊が生じないように主筋および筋筋を配した。

実験の変動要因は横補強筋量、中子筋の有無、補強鋼板の有無、およびその厚さとした。No.1~6は鋼板補強されていない試験部であり、横補強筋比 p_w は0.32%から1.43%の4種類とし、 $p_w = 0.63%$ と0.95%については、中子筋の有無を要因とした。No.7~18は鋼板補強された試験部であり、鋼板の厚さは公称値で1.0mm, 1.6mm, 2.3mm, 4.5mmの4種類とした。鋼板の厚さを1.0mmとした試験部では横補強筋比を0%, 0.63%, 0.95%の3種類とし、 $p_w = 0.63%$ と0.95%については、中子筋の有無を要因とした。鋼板厚さが1.6mm以上の試験部については、横補強筋が無いものと中子筋を有する $p_w = 0.63%$ の各2種類の試験部を各々計画した。なお、No.9は部材

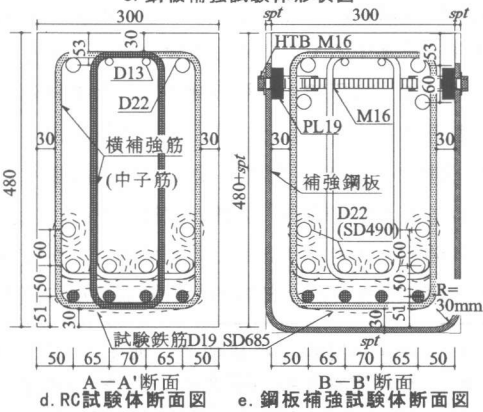
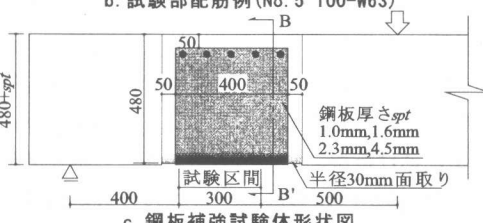
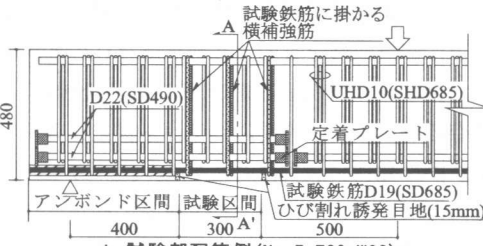
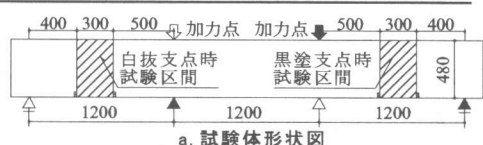


図-1 試験体形状図

の下端において鋼板を直角に近い状態で折り曲げ加工した試験部であり、他の試験部は鋼板の折り曲げ半径を30mmとした。

補強鋼板はU字形であり、試験体の上端主筋の付近でボルト等を介して閉鎖型としている。この時、鋼板に生じる引張力に対しては、ボルトのせん断耐力、および補強金物のコンクリートに対する支圧耐力によって十分に抵抗できるように計画した。

表-1中に各試験部のコンクリート圧縮強度および1/3割線剛性を、表-2に鉄筋および鋼板の材料試験結果を示す。コンクリートの打設は図1-d, eに示す梁断面の上端から行ったので、試験鉄筋は全て下端主筋として扱った。試験鉄筋は引張降伏が生じないように高強度鉄筋を使用した。その鉄筋表面は竹ふし形状である。また、補強鋼板は厚さが2.3mm以下をSPCC材、厚さが4.5mmの鋼板をSS400材とした。

表-2 鉄筋および鋼板の材料試験結果

種類	材質	使用箇所	降伏強度 σ_y (N/mm ²)	弾性係数 E_s (kN/mm ²)	伸び (%)
D19	SD685	下端主筋	706	195	10.7
UHD10	SHD685	横補強筋	797	209	11.7
PL1.0	SPCC	補強鋼板	183	190	46.4
PL1.6	SPCC	補強鋼板	210	193	45.9
PL2.3	SPCC	補強鋼板	230	201	44.6
PL4.5	SS400	補強鋼板	336	213	40.2

2.2 加力および計測方法

図-1aにおいて、△印の支点に対して白抜き矢印の加力点に対応した単純梁形式の加力とし、載荷は一方向単調載荷とした。図中左側の試験が終了後、▲印の支点に対して黒塗り矢印の加力点に対応するように試験体を横方向に移動し、図中右側の試験を行った。

図-2に試験鉄筋の抜け出し変位と、ひずみゲージの位置図を示す。試験体の端部に変位計の

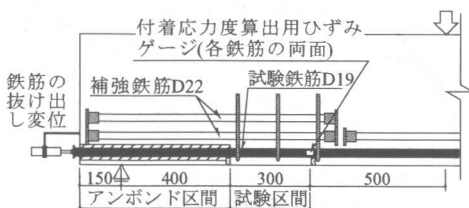


図-2 鉄筋の抜け出し変位と付着応力度の計測

ホルダーを取り付け、変位計の先端を試験鉄筋に当て、各試験鉄筋の抜け出し変位を計測した。また、各試験鉄筋の両面には図中に示す位置にひずみゲージを貼付し、そこから計測された歪みの値を基に、式(1)より試験区間の平均付着応力度を算出した。以降、本実験における各試験鉄筋の付着応力度の実験値は式(1)から得られる $e\tau_{bu}$ とする。

$$e\tau_{bu} = m\epsilon \cdot mE \cdot ma / (\phi \cdot L_b) \quad (\text{N/mm}^2) \quad (1)$$

ここで、 $m\epsilon$ ：主筋(試験鉄筋)のひずみ、 mE ：主筋の弾性係数(N/mm²)、 ma ：主筋の断面積(mm²)、 ϕ ：主筋の周長(mm)、 L_b ：主筋の付着長さ(試験区間長さ=300mm)。

3. 実験結果

3.1 試験鉄筋の最大付着応力度

表-3に実験結果の一覧、図-3に最終ひび割れ状況の一例を示す。試験体のひび割れ状況より、全ての試験部においてサイドスプリット型の付着割裂破壊が生じたと判断した。また、試験鉄筋および横補強筋の降伏はみられなかった。本論では、サイドスプリット型の付着割裂破壊を対象として検討を進める。

図-4に一列に並んだ試験鉄筋の最大付着応力度を各試験部のコンクリート圧縮強度の平方根

表-3 実験結果一覧

No.	試験部名	q_{st}	$c\tau_{co}$	$au\tau_{bu}$	$in\tau_{bu}$	$ave\tau_{bu}$
1	T00-S32	0.0125	2.76	4.01	3.29	3.37
2	T00-S63	0.0250	2.76	6.57	3.83	4.72
3	T00-S95	0.0375	2.77	7.54	4.66	5.75
4	T00-S143	0.0563	2.77	8.55	4.56	6.04
5	T00-W63	0.0250	2.78	4.79	5.12	4.94
6	T00-W95	0.0375	2.78	6.42	5.69	6.06
7	T10-00	0	2.79	4.57	3.72	3.91
8	T10-S63	0.0250	2.83	7.86	4.73	5.48
9	T10-S63R0	0.0250	2.83	7.77	4.25	5.55
10	T10-S95	0.0375	2.79	8.72	4.92	6.11
11	T10-W63	0.0250	2.85	6.79	5.53	6.10
12	T10-W95	0.0375	2.85	7.46	5.96	6.64
13	T16-00	0	2.86	6.02	4.36	4.58
14	T16-W63	0.0250	2.86	8.38	5.96	6.91
15	T23-00	0	2.87	6.02	3.91	4.45
16	T23-W63	0.0250	2.87	8.31	5.77	6.82
17	T45-00	0	2.88	6.02	4.22	4.74
18	T45-W63	0.0250	2.88	8.31	6.14	7.05

$q_{st} = A_{st} / (s \cdot N \cdot db)$
 $c\tau_{co}$ (N/mm²):コンクリート負担付着強度計算値;式(6)
 $au\tau_{bu}$, $in\tau_{bu}$ (N/mm²):外主筋,内主筋の最大付着応力度
 $ave\tau_{bu}$ (N/mm²):一列に配された主筋の最大平均付着応力度

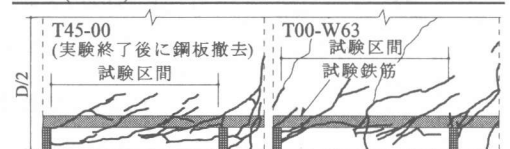


図-3 最終ひび割れ状況

で除したものを示す。ここで、試験鉄筋の最大付着応力度とは各試験鉄筋単体の最大付着応力度であり、必ずしも部材の付着割裂破壊時の付着応力度とはなっていない。図-4aは中子筋が無いT00-S95とそれに厚さ1mmの補強鋼板を加えたT10-S95を比較したものである。また、図-4bは図-4aと横補強筋比が等しく、中子筋を使用した試験部である。これらによると、中子筋無し試験部では横補強筋の隅角部に配された主筋(以下、隅主筋)である①と④の最大付着応力度と比較して、横補強筋の辺上に配された主筋(以下、辺上主筋)である②と③の最大付着応力度は著しく小さくなっていた。また、鋼板補強された試験部ではいずれも鋼板による最大付着応力度の上昇がみられ、その補強効果は梁幅方向内側の主筋(以下、内主筋)と比べて外側の主筋(以下、外主筋)の方が大きく、その傾向は中子筋の有無とは無関係であった。

図-5に横補強筋比と鋼板補強比の和(p_w+p_{sp})と、最大付着応力度をコンクリート圧縮強度の平方根で除した値の関係を示す。隅主筋と辺上主筋では同じ補強比でも最大付着応力度には大きな差がみられる。いずれも補強比の和が大きくなるにつれ最大付着応力度が大きくなる傾向

があるが、 p_w+p_{sp} が大きい領域では最大付着応力度の頭打ちがあった。

3.2 付着応力度-鉄筋の抜け出し変位関係

図-6に試験鉄筋の付着応力度(τ)と鉄筋の抜け出し変位(δ_{slip})関係を示す。これらのグラフは、横補強筋によって補強された試験部と鋼板

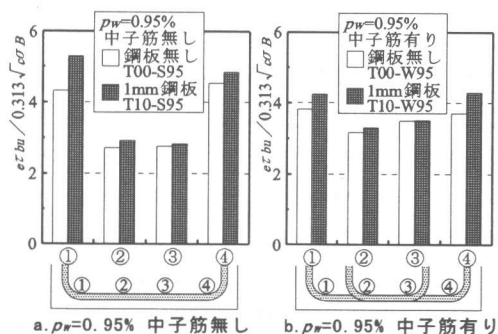


図-4 各試験鉄筋の最大付着応力度

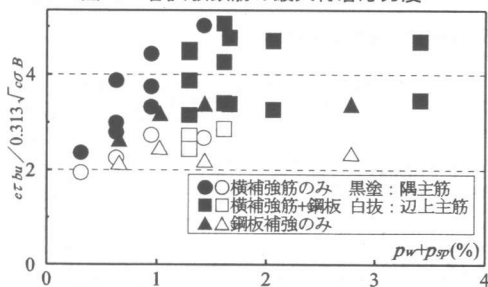


図-5 最大付着応力度と p_w+p_{sp} の関係

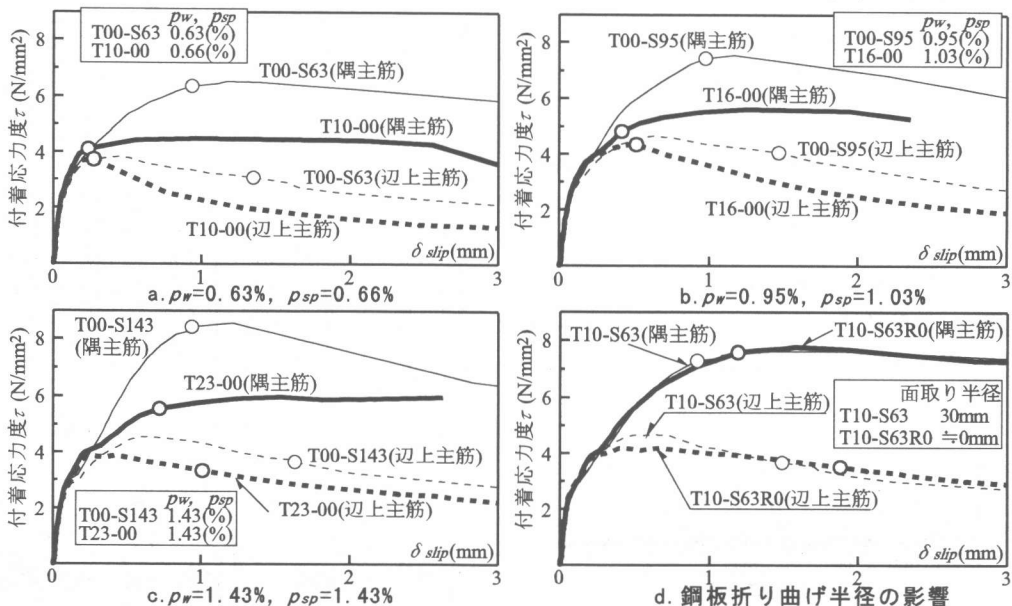


図-6 付着応力度と鉄筋の抜け出し変位関係

によって補強された試験部を、横補強筋比 (p_w) と鋼板補強比 (p_{sp}) がほぼ等しくなるもの同士を比較しており、図-6aは $p_w=0.63\%$ ($p_{sp}=0.66\%$)、図-6bは $p_w=0.95\%$ ($p_{sp}=1.03\%$)、図-6cは $p_w=1.43\%$ ($p_{sp}=1.43\%$) となっている。ここに示した試験部はいずれも中子筋が無い。図中の○印は一列に並んだ全試験鉄筋の付着応力度の平均が最大となった時(以下、部材の最大付着応力度時)を表す。横補強筋による p_w と鋼板による p_{sp} がほぼ等しい場合には鋼板補強された試験部の方が補強効果が劣っていた。また、部材の最大付着応力度時には鋼板補強された試験部の方が、試験鉄筋の抜け出し量が小さいが、隅主筋についてみると、横補強筋によるものと比較して部材の最大付着応力度時以降の付着応力度の低下が少なかった。

図-6dは隅角部における鋼板の折り曲げ半径を変化させた比較である。T10-S63R0は鋼板の折り曲げ半径をほぼ0mmとした試験体であるが、同じく30mmとしたT10-S63との差異はなく、本実験の範囲では鋼板の折り曲げ半径が主筋の付着特性に与える影響は見られなかった。

4. 鋼板による補強効果の定量化

式(2)、(3)に藤井らの提案²⁾による、隅主筋および辺上主筋の付着強度に対する横補強筋の効果を表す式を示す。ここでは、式(2)、(3)を基に主筋の付着強度に対する補強鋼板の効果を検証する。

隅主筋に対する補強効果

$$\tau_{st}/0.313\sqrt{c\sigma_B} = 1.22 \cdot 15.9 \cdot \frac{wA}{s \cdot mdb} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (2)$$

辺上主筋に対する補強効果

$$\tau_{st}/0.313\sqrt{c\sigma_B} = 1.22 \cdot 7.63 \cdot \frac{wA}{s \cdot mdb} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (3)$$

ここで、 $c\sigma_B$: コンクリート圧縮強度 (N/mm^2)、 wA : 横補強筋の断面積 (mm^2)、 s : 横補強筋の間隔 (mm)、 mdb : 主筋の公称径 (mm)。

図-7に鋼板厚さを試験鉄筋の公称径で除した値 (spt/mdb) と、補強鋼板による付着応力度の増分 ($e\tau_{sp}$) をコンクリート圧縮強度の平方根で除した値の関係を示す。ここで spt/mdb は、横

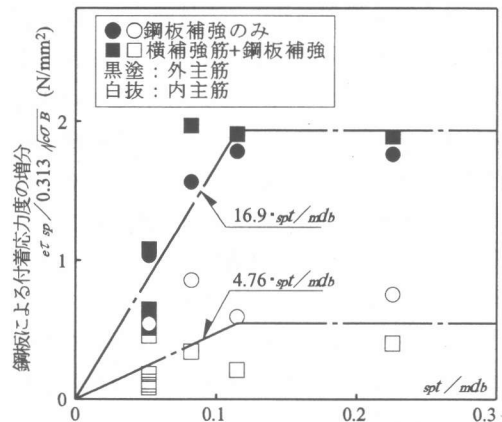


図-7 spt/mdb と鋼板による付着応力度の増分の関係

補強筋による付着強度の増分を表す式(2)および式(3)の右辺の $wA/(s \cdot mdb)$ に相当する。また、 $e\tau_{sp}$ は式(4)および式(5)より算出した。

横補強筋が無い鋼板巻き試験体

$$e\tau_{sp} = e\tau_{bu} - c\tau_{co} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (4)$$

横補強筋が有る鋼板巻き試験体

$$e\tau_{sp} = e\tau_{bu} - c\tau_{co} - \frac{e\tau_{bu0} - c\tau_{co0}}{\sqrt{c\sigma_{B0}}} \cdot \sqrt{c\sigma_B} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (5)$$

$$c\tau_{co} = 0.313 \cdot (0.4b_{si} + 0.5) \cdot \sqrt{c\sigma_B} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (6)$$

$$b_{si} = (b/N \cdot mdb) - 1 \quad (7)$$

ここで、 $e\tau_{bu}$: 実験時最大付着応力度 (N/mm^2)、 $c\tau_{co}$: コンクリートが負担する付着強度 (N/mm^2)、 $e\tau_{bu0}$ 、 $c\tau_{co0}$ 、 $c\sigma_{B0}$: 対象となる鋼板巻き試験体と同一の横補強筋が配された試験体の実験時最大付着応力度 (N/mm^2)、コンクリートが負担する付着強度 (N/mm^2)、コンクリート圧縮強度 (N/mm^2)、 b : コンクリート部分の部材幅 (mm)、 N : 一列に並んだ主筋の本数。

図-7によると、鋼板による補強効果には鋼板厚さの上限值があると思われる、本実験の範囲では鋼板厚さで2.3mm程度である。これは鋼板補強比 ($p_{sp}=2spt/B$) で1.43%となる。そこで、図-7において、鋼板厚さ2.3mm以下のデータを原点を通る直線で回帰すると、外主筋および内主筋に対して各々式(8)および式(9)が得られる。

外主筋に対する補強効果

$$\tau_{sp1}/0.313\sqrt{c\sigma_B} = 16.9 \cdot \frac{spt}{mdb} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (8)$$

内主筋に対する補強効果

$$\tau_{sp2}/0.313\sqrt{c\sigma_B} = 4.76 \cdot \frac{spt}{mdb} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (9)$$

ここで、 spt : 鋼板の厚さ(実測値) (mm)。

これらは、横補強筋による補強効果を表す式(2)および式(3)と比較して、各々乗数項が小さくなっている。式(8)および式(9)は個々の主筋に対する鋼板の補強効果を表している。部材幅方向に一列に配された鉄筋群としての付着割裂強度は各鉄筋の付着強度を加重平均することで得られる。そこで、鋼板補強された部材の付着割裂強度式として式(10)を提案する。この式は藤井らの式を基に中子筋による補強効果を考慮して簡略化された式⁵⁾に鋼板による補強効果を累加したものである。

$$c\tau_{bu} = \tau_{co} + \tau_{st} + \tau_{sp}$$

$$= 0.313 \cdot \{ (0.4b_{st} + 0.5) + 19 \cdot (n/N + 1) \cdot q_{st} + 9.6 \cdot (5/N + 1) \cdot q_{sp} \} \cdot \sqrt{c\sigma_B} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (10)$$

$$q_{st} = \frac{A_{st}}{s \cdot N \cdot m \cdot d_b} \quad (11)$$

$$q_{sp} = \frac{2 \cdot s_{pt}}{N \cdot m \cdot d_b} \quad (12)$$

$$\text{ただし, } p_{sp} = \frac{2 \cdot s_{pt}}{b + 2 \cdot s_{pt}} \leq 0.0143$$

ここで、 n ：横補強筋が直接かかる主筋の本数、 A_{st} ：一組の横補強筋断面積 (mm^2)。

図-8に本実験から得られた部材の最大付着応力度と式(10)による計算結果の比較を示す。図中の「*」印は鋼板補強比の上限値(1.43%)を無視して算出した結果である。これによると、本実験で変動要因とした、横補強筋量および補強鋼板の厚さの組み合わせ方によるばらつきはみ

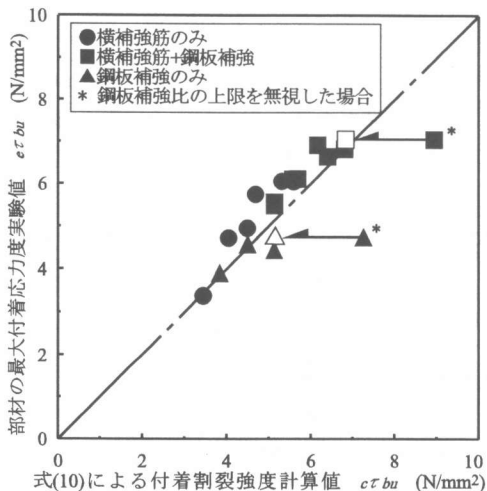


図-8 付着割裂強度実験値と計算値の比較

られず、本研究で提案した式(10)は実験値を良く評価していた。

5. まとめ

鋼板補強されたRC部材を対象とした付着割裂強度に関する実験の結果、以下に示す知見が得られた。

- 1) 部材の外周部を鋼板で覆うことによって、主筋の最大付着応力度が上昇した。その効果は、部材幅の外側の主筋に対しての方が大きく、内側の主筋に対しては効果が小さかった。
- 2) 鋼板厚さを大きくすることにより、主筋の最大付着応力度は上昇するが、本実験の範囲では、鋼板補強比 p_{sp} が1.43%以上では、応力度の上昇がみられなかった。
- 3) 本実験で得られた鋼板による補強効果を定量的に評価し、それを既往の付着割裂強度算定式に累加することによって、鋼板補強された部材の付着割裂強度算定式を提案した。

参考文献

- 1) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計指針同解説，1990.12
- 2) 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，第319号，pp.47-55，1982.9
- 3) 角徹三，山田守，合楽将三：鉄筋コンクリートはりの付着割裂強度に及ぼす横補強筋の効果，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.11，No.2，pp.177-182，1989.6
- 4) 森下陽一，富井政英，崎野健治：鋼管で被覆補強されたコンクリートと異形鉄筋の付着性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9，No.2，pp.365-370，1987.6
- 5) 田畑卓，西原寛，松本智夫，鈴木英之：束ね鉄筋の付着割裂強度に関する研究，構造工学論文集，Vol.43B，pp.211-219，1997.3