

[2040] 横補強筋の降伏応力度がRC部材の付着強度に与える影響について

角 徹三^{*1}・服部 覚志^{*2}・松野 一成^{*3}・松井 洋和^{*4}

1. はじめに

著者らはNew RCプロジェクトの一環としてサイドスプリット型破壊をするRC部材の付着割裂実験を行い、超高強度コンクリートレベル(1000kgf/cm²)を含む付着割裂強度式として以下の式(1)を提案した[1]。さらに、使用コンクリートの強度に比べて横補強筋の降伏応力度が相対的に小さい場合($p_w \cdot \sigma_{wy} < 1.32\sqrt{\sigma_B}$)は横補強筋の降伏によって付着強度が頭打ちになるとして式(1)の代わりに、式(5)を用いることを提案した[2]。

$$\tau_{bu} = [0.55 + 0.18 \cdot b_i + k_n(q \cdot b_i + 18.2 \cdot p_w \cdot b / (N \cdot d_b))] \cdot \sqrt{\sigma_B} \quad (1)$$

$$\text{ここで、 } b_i: \text{主筋間コンクリートの効果係数} = (b - Nd_b) / (Nd_b) \quad (2)$$

$$k_n: \text{副帯筋の効果係数} = 1.0 + 0.84 \cdot n / N \quad (3)$$

$$q: \text{付着長さの効果係数} = (2.5 + 875 \cdot p_w) / (l_b / d_b + 7000 \cdot p_w) \quad (4)$$

$p_w \cdot \sigma_{wy} < 1.32\sqrt{\sigma_B}$ の場合、

$$\tau_{bu} = [0.55 + 0.18 \cdot b_i + k_n(q \cdot b_i + 18.2 \cdot p_w \cdot b / (N \cdot d_b))] \cdot 0.76 \cdot p_w \cdot \sigma_{wy} \quad (5)$$

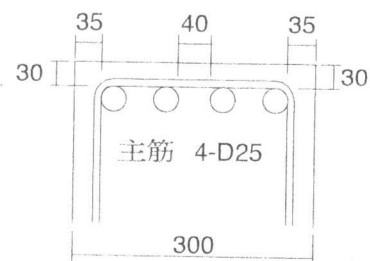
但し、 τ_{bu} : 付着割裂強度(kgf/cm²)、 σ_B : コンクリート実強度(kgf/cm²)、 b : 部材幅(cm)、 N : 主筋本数、 d_b : 主筋径、 n : 一組の横補強筋の足数、 $p_w = A_{st} / (bs)$: 横補強筋比、 A_{st} : 一組の横補強筋の断面積(cm²)、 s : 横補強筋間隔(cm)、 l_b : 付着長さ(cm)

しかし、式(5)は、その時点での実験の裏付けがなかったことによる安全側の措置であり、実験による検証が必要とされていた。そこで、本研究では横補強筋の降伏応力度を極端に変えた付着割裂実験を行い、横補強筋の降伏応力度が部材の付着強度に与える影響を実験的に調べることとした。

2. 実験概要

2. 1 試験体

全試験体とも、はり断面30×40cm、主筋4-D25使用とし、その配筋を図-1に示す。側面かぶりを35mm、頂面かぶりを30mmとした。藤井・森田式による主筋間コンクリートの効果係数は $b_i = b_{si} = 2.0$ となりサイドスプリット型の付着割裂破壊を指向している[4]。載荷方法は単純はり3分点載荷とし、せん断スパン域で付着破壊が生じるような配筋とした。典型的な配筋詳細図を図-2に示す。載荷点(スパン中央より20cm)から、はり成40cmだけ離れ



$$bsi = \frac{b}{Nd_b} - 1 = 2.0$$

$$bci = 2 \left(\frac{Cs + Cb}{db} + 1 \right) - 1 = 4.2$$

$$bi = bsi = 2.0 < bci$$

図-1 主筋配置

* 1 豊橋技術科学大学教授 建設工学系、工博(正会員)

* 2 豊橋技術科学大学大学院 修士課程 工学研究科建設工学専攻

* 3 豊橋技術科学大学大学院 修士課程 工学研究科建設工学専攻(正会員)

* 4 豊橋技術科学大学 建設工学課程

た曲げ引張側コンクリート上面にせん断ひびわれを誘発させるためのスリット（深さ30mm、隙間幅2mm）を設け、この位置から試験体端部までの距離を付着長さ l_b とした。載荷点から77.5cmの位置のはり成中央部に鋼管（内径82mm、肉厚3mm）を埋め込み、鋼管シャフトを貫通させ、これにより支点反力をとることで試験鉄筋の横拘束の影響を除いた。鋼管の周囲は大きな応力集中が予想されるため $\phi 9.2$ の高強度スパイラルで二重に補強した。さらに、付着試験域のせん断破壊防止のための用心鉄筋として、軸方向主筋2-D19、肋筋2- $\phi 9.2@80$ を上下試験主筋に配した（図-2 最下欄参照）。

2. 2 使用材料および測定事項

表-1に目標強度別のコンクリートの配合を示す。目標強度1000kgf/cm²のコンクリートにのみシリカヒュームを用いた。表-2に使用した鉄筋の機械的性質を示す。付着割裂以前に曲げ破壊やせん断破壊が先行することのないよう、部材主筋およびスリットと載荷点間のせん断スパン域の横補強筋には高強度鉄筋を用いた。

スリット位置での主筋ひずみ、横補強筋のひずみ分布、スパン中央および載荷点位置のたわみ、せん断力を測定した。さらに、スリット位置での主筋の滑り量も測定した。

2. 3 実験変数

本実験で取り上げた主たる実験変数は横補強筋の降伏応力度（ $\sigma_{wy}=13930$ or 3600kgf/cm²）とし、それ以外の実験変数としては、コンクリート目標圧縮強度（ $\sigma_B=1000$ or 400kgf/cm²）および横補強筋量（ $p_w \approx 0.3, 0.6$ or 1.05%）とし、これらを適宜組み合わせ表-3に示すような8体の試験体について実験を行った。付着

長さは全試験体について共通（ $l_b=20d_b=50$ cm）とした。コンクリート打設時の上端となる主筋を付着試験の対象とした。はり試験体の左右のせん断スパンでは横補強筋以外はすべて同じ条件として対称荷重を加え、横補強筋量の少ない側のスパンの付着破壊を確認した後、損傷部分をエポキシ樹脂にて補修し、かつ、高張力ボルト（12- $\phi 12$ ）と鋼板を用いて締め付けて付着を復元させ、再度荷重を加え反対スパン上端主筋の付着試験を行った。

3. 実験結果と考察

3. 1 付着応力度の定義

表-3に実験結果の概要を示す。試験体はすべて予想どおりサイドスプリット型の付着破壊を呈した。付着応力度（ τ ）の値は、付着域での主筋応力が直線分布する（試験体端部で応力ゼロ

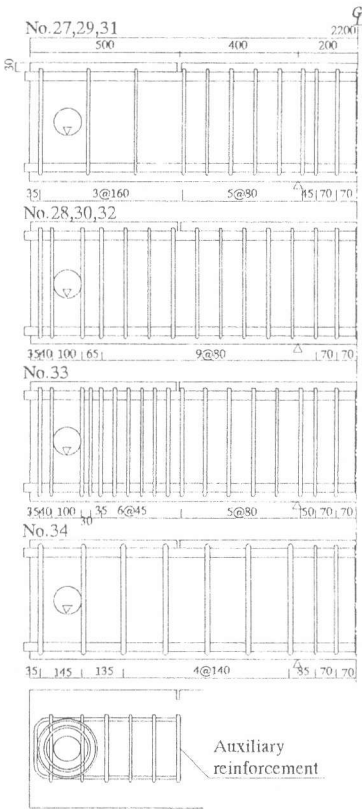


図-2 配筋詳細図

表-1 コンクリートの配合

目標 σ_B (kgf/cm ²)	w/c (%)	S/A (%)	単位量 (kgf/m ³)					
			水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤*	シリカヒューム
400	58.0	45.0	222	381	737	902		
1000	30.0	42.0	165	525	699	988	11	25

* 混和剤は高性能AF減水剤を使用

表-2 使用鉄筋の機械的性質

	主筋	横補強筋			補助筋
	D25	D10	$\phi 9.2^*$	$\phi 13$	D19
降伏強度 (kgf/cm ²)	10200	3600	13930	13690	3230
最大強度 (kgf/cm ²)	11500	5240	14510	15060	5020
弾性係数 ($\times 10^6$ kgf/cm ²)	1.97	1.82	2.08	2.14	1.88

* : 鋼管部補助筋（スパイラル）にも使用

ロ)としてスリット位置での主筋の応力より求めた平均付着応力度である。 $\tau_{\max}$ は隅角筋・中間筋の個々についての最大付着応力であり、 τ_{ucxp} は最大耐力 Q_{ucxp} 時の隅角筋・中間筋の付着応力度の平均値を意味し、以下では、これを試験体の付着強度と定義して議論を進めることにする。

3. 2 付着応力度と滑りの関係

スリット位置主筋軸方向ひずみから付着応力 τ_{exp} を求め、この位置での主筋滑り量との関係を示したのが図-3である。横補強筋の90°折曲げ部にある隅角部主筋と横補強筋の水平辺上にある中間主筋とを区別して示している。図中各段の左右の試験はペアになっているため耐力の高い(p_w の大きい)試験体では1方向繰返しを受ける。しかし、荷重をゼロに戻しても主筋の残留ひずみがあるため付着応力度はゼロとはならない。 p_w の増加、コンクリート実強度の増加と共に最大付着応力度およびその時の滑り量も増大するが、横補強筋の降伏応力度の相違による差はみられない。 $p_w \leq 0.6\%$ では中間筋と隅角筋の差はほとんどみられないが、 $p_w = 1.05\%$ (No.33)では中間筋の剛性が隅角筋に比べて極端に低下している。これは、今回のように副帯筋を持たない主筋の外周のみに配された横補強筋の場合は、辺で接する中間主筋より折曲げ部で接触する隅角部主筋のほうが付着滑りに対する拘束効果が大きく、しかも p_w が増大するほどその効果が顕著になるためと思われる。これは既往の実験結果とも一致する[3]。

3. 3 横補強筋の応力分布とひびわれ

図-4には横補強筋の鉛直方向中央部で測定したせん断スパン全域の応力分布およびひびわれ状況を示す。スリットより内側の横補強筋は全試験体とも高強度筋($\sigma_{wy} = 13930 \text{ kgf/cm}^2$)とし、この領域でのせん断破壊を防いでいる。スリットより外側の付着試験域では図中 $\sigma_{wy} = 3600 \text{ kgf/cm}^2$ と表示してあるのが普通強度筋、表示のないのが高強度筋である。全試験体とも、スリット

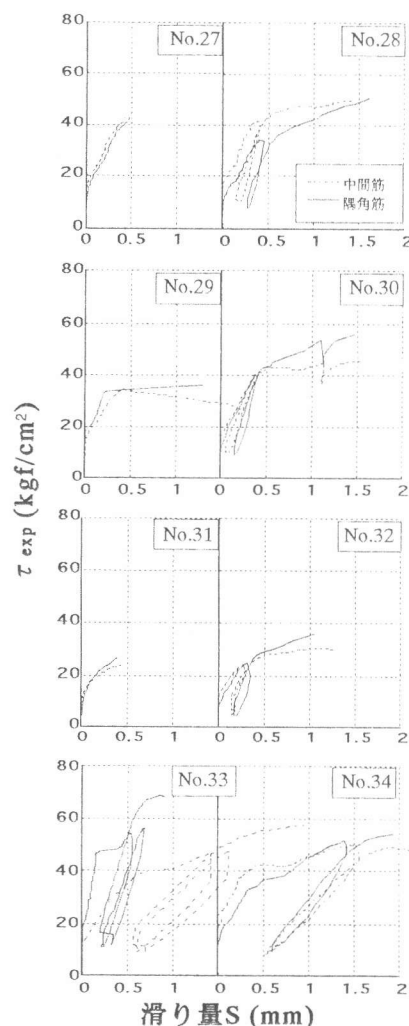


図-3 付着応力と滑り量の関係

表-3 実験結果の概要

No.	横補強筋			σ_B (kgf/cm ²)	Q_{ucxp} (tonf)	τ_{max} (kgf/cm ²)		τ_{ucxp} (kgf/cm ²)	τ_{ucal} (kgf/cm ²)			
	配筋	pw (%)	σ_{wy} (kgf/cm ²)			隅角筋	中間筋		藤井・森田式[4]	指針式[5]	角・張式[1]	
											σ_{wy} の 制限あり	σ_{wy} の 制限なし
27	2-D10@160	0.3	3600	964	34.8	42.4	42.7	42.5	39.2	39.0	24.5	46.5
28	2-D10@ 80	0.6		964	45.1	50.6	49.6	49.5	46.0	45.7	28.3	53.7
29	2-φ 9.2@160	0.27	13930	964	32.0	33.7	33.9	33.8	38.5	38.3	45.8	45.8
30	2-φ 9.2@ 80	0.54		964	41.9	55.8	45.5	50.7	44.7	44.4	52.3	52.3
31	2-D10@160	0.3	3600	379	22.5	26.5	23.5	24.9	24.6	24.5	24.5	29.2
32	2-D10@ 80	0.6		379	28.5	35.6	30.2	32.7	28.9	28.7	28.3	33.7
33	2-D10@ 45	1.05		1169	55.0	68.5	57.2	62.7	62.5	61.4	34.0	71.1
34	2-φ 13@140	0.6	13690	1169	47.5	54.1	49.9	50.8	50.8	50.3	59.2	59.2

より内側にありここから斜め下方へ進展するせん断ひびわれを横切っている補強筋の応力が最大となる。付着試験域の応力に着目すると、普通強度筋 ($\sigma_{wy}=3600\text{kgf/cm}^2$) 使用の試験体では応力が極端に小さな値にとどまっているものがみられる (No.27,31,32)。コンクリート強度が小さいか又は横補強筋比が小さい、したがって耐力の小さいものほどこの傾向が強い。

横補強筋として普通強度筋 (表面形状は通常の横ふし異形鉄筋) を使用した試験体 No.27 と高強度筋 (ゆるやかな螺旋状の凹みはあるものの限りなく丸鋼にちかい表面形状) を使用した試験体 No.29 については、横補強筋の鉛直方向中央部以外の主筋に近い 90° 折り曲げ直下にも F.S.G. を貼付し両者を比較した。図-5 はそれぞれの各位置での荷重と F.S.G. による歪みとの関係および 2 点間の付着応力と荷重との関係を示している。わずかなデータなので断定はしがたいが、異形筋に近い普通強度筋では、この 2 点間の応力差は無視できないものがあり、付着割裂ひびわれの生じている位置で応力を測定することが肝要であることを示唆している。

3. 4 横補強筋の降伏応力度と付着強度の関係

図-6 は副帯筋なし $p_w=0.6\%$, $l_b=20d_b$ の試験体について、付着耐力に達した時の横補強筋の最大応力 σ_{wmax} を縦軸に、 σ_B を横軸にとって示したものである。図中の白抜きは $\sigma_{wy}=8890\text{kgf/cm}^2$ の横補強筋を使用した既往実験結果 [2] であり、これより $\sigma_{wmax}=220\sqrt{\sigma_B}$ を得た。この式は $p_w=0.6\%$ の場合に限られるのでこれを任意の横補強筋の場合に拡張するため左辺に p_w を、右辺に 0.6% を乗じて、 $p_w \sigma_{wmax}=1.32\sqrt{\sigma_B}$ を得た。したがって、 $p_w \sigma_{wy} > 1.32\sqrt{\sigma_B}$ のときは横補強筋の降伏応力度に無関係に求められた式 (1) を付着強度算定式とするが、

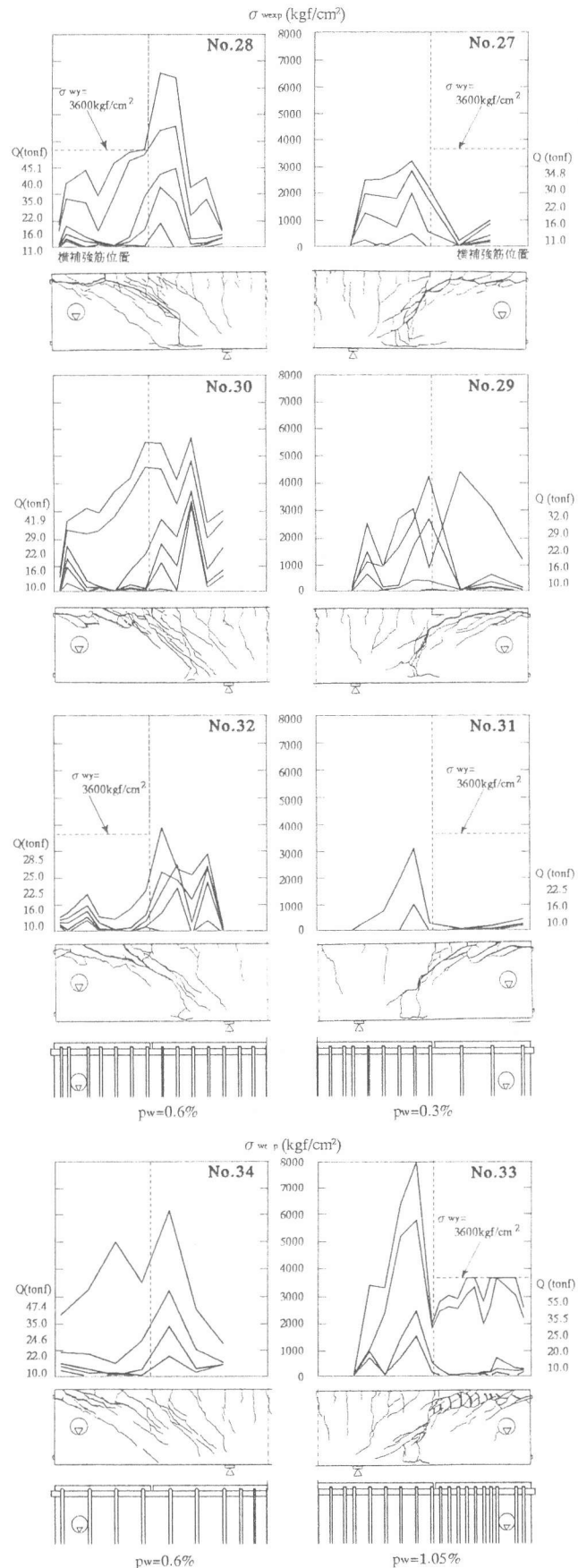


図-4 横補強筋の応力分布とひびわれ図

$p_w \sigma_{wy} \leq 1.32 \sqrt{\sigma_B}$ のときは横補強筋の降伏によって耐力の頭打ちが生じると考え、式(5)を提案した。図-6には今回の実験が黒塗りで示されている。式(5)が妥当であれば、図-6のNo.28 ($\sigma_{wy}=3600\text{kgf/cm}^2$) は、 $p_w \sigma_{wy} \leq \sqrt{\sigma_B}$ となり耐力がNo.30 ($\sigma_{wy}=13930\text{kgf/cm}^2$) より低下するはずである。図-7は付着強度を縦軸に付着耐力時の σ_{wmax} を横軸にとって既往の実験[2](白抜き)と今回の実験(黒塗り)を比較したものである。今回の実験のうちアスタリスクのついているのは $\sigma_{wy}=3600\text{kgf/cm}^2$ を使用したものである。図から判るようにNo.28

($\sigma_{wy}=3600\text{kgf/cm}^2$) の付着強度はNo.30 ($\sigma_{wy}=13930\text{kgf/cm}^2$) のそれとほとんど等しく、横補強筋の降伏応力度が付着強度に与える影響は認められない。図-8は過去10年間のわが国で行われた付着割裂試験で主筋の外周のみを補強したものの付着強度の実験値と式(1)による計算値との比較である。今回の実験結果は黒塗りで示されており、▲印の試験体のみが $p_w \sigma_{wy} \leq 1.32 \sqrt{\sigma_B}$ となり式(5)にしたがって付着強度を計算した。この図からも判るように σ_{wy} の制限をしない式(1)のままのほうが実験値とよく一致するという結果になった。しかし、本実験の結果のみから「横補強筋の降伏応力度は付着強度に影響を与えな

横補強筋の付着応力度の算出

$$\tau_w = \frac{(\epsilon_T - \epsilon_C) \cdot E \cdot A_w}{l_w \cdot \phi}$$

F.S.G.貼付位置

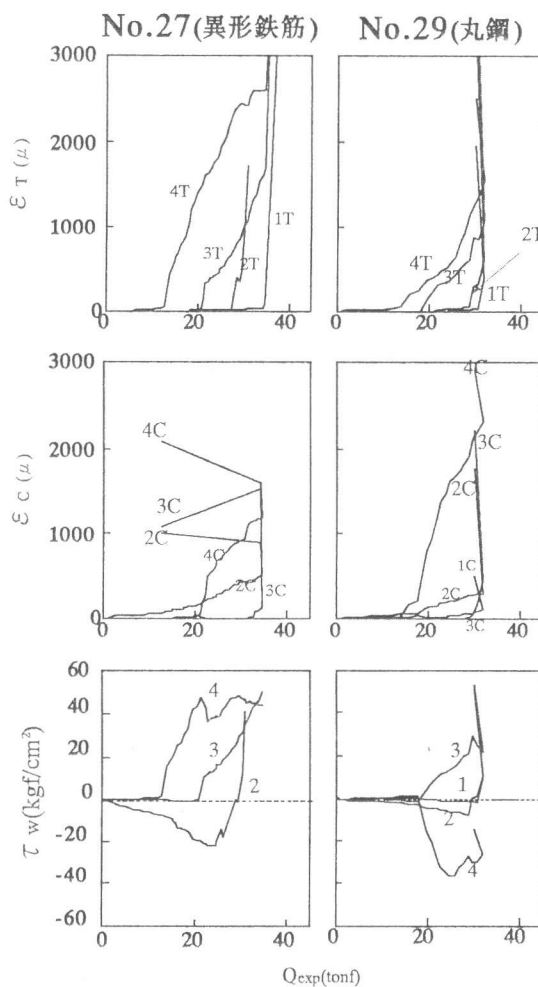


図-5 荷重と横補強筋ひずみの関係

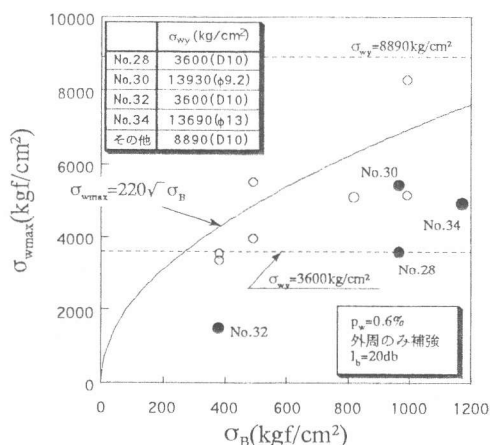


図-6 横補強筋最大応力と
コンクリート強度の関係

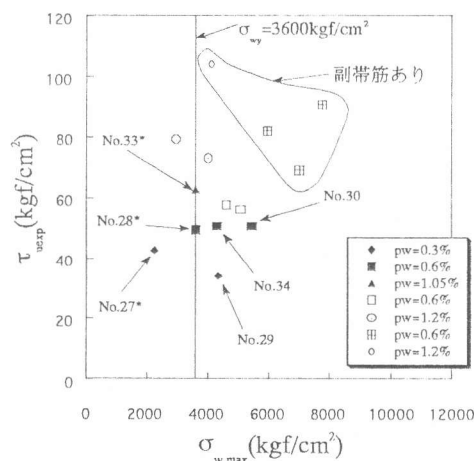


図-7 付着強度と
横補強筋最大応力の関係

い」と断じるのは早計に失しよう。

3. 5 付着強度と最大耐力の関係

図-9は付着強度 τ_{ucxp} と Q_{ucxp} の関係を示したものである。本実験の結果を黒塗りで、これと全く同一断面、同一付着長さ($l_b/d_b=20$)の既往の実験結果[3]を白抜きで示した。ほぼ $\tau_{ucxp}=1.20Q_{ucxp}$ 線上に分布している。付着強度とせん断力の関係を与える慣用式 $\tau=Q/(\sum \phi \cdot jd)=0.88 \cdot Q$ 、および曲げスパン域での引張主筋応力が本実験で設定したスリット位置まで不変であるとして求めた付着応力度とせん断力の関係 $\tau=Q \cdot a/(l_b \cdot \sum \phi \cdot jd)=1.36Q$ も同図に付記してある。実験結果は両者の中間にあるが $\tau=Q \cdot a/(l_b \cdot \sum \phi \cdot jd)$ ラインに非常に近く、スリットの外側で付着応力度を評価したことが妥当であったことを示している。

4. まとめ

本実験より得られた知見をまとめると以下の通りである。(1) 本実験の範囲内では横補強筋の降伏応力度が付着割裂強度に与える影響は認められなかった。(2) 外周にのみ横補強筋を配した場合、横補強筋量の増加により付着強度は上昇し、隅角部主筋と中間主筋の付着応力の差が顕著に現れる。(3) 付着割裂実験において、横補強筋の表面形状が異形鉄筋に近い場合、はり成中央部と割裂面に近い横補強筋の応力差が存在するため、割裂面に近い位置での歪みの測定が望ましい。

参考文献

- 1) 角徹三・服部覚志・松野一成：サイドスプリット型付着割裂破壊をするR C部材の付着強度式、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)C構造II、pp.225-226、1993
- 2) 日本建築学会・鉄筋コンクリート構造運営委員会：靱性設計小委員会報告書、pp.43-51、1992.8
- 3) 角徹三・張建東・飯塚信一・山田守：高強度レベルをも包含するR C部材の付着割裂強度式の提案、コンクリート工学論文集、第3巻第1号、pp.97-108、1992.1
- 4) 藤井栄・森田司郎：異形鉄筋の付着割裂に関する研究—第1報、日本建築学会論文報告集、No.319、pp.47-55、1982.9
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造構造物の終局強度型耐震設計指針・同解説、pp.135-141、1990

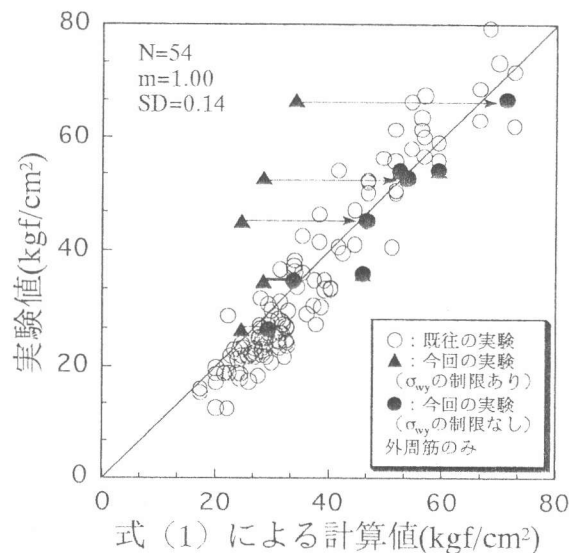


図-8 実験値と式(1)の比較

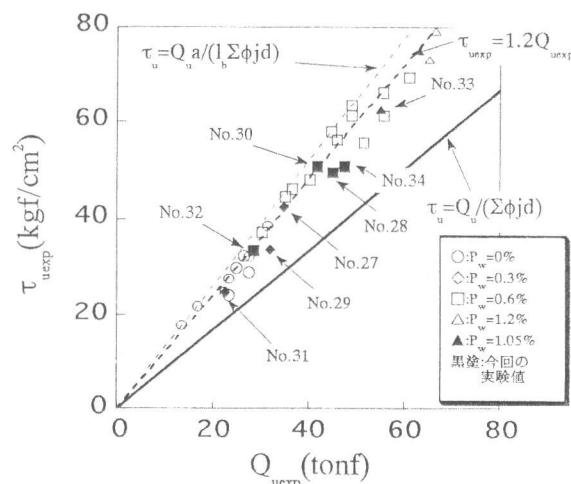


図-9 付着強度と最大耐力の関係