

論文

[2021] RC部材の付着割裂強度に関する実験的研究

正会員○前田匡樹（東京大学大学院）

正会員 小谷俊介（東京大学建築学科）

正会員 青山博之（東京大学建築学科）

1. 研究の目的

異形鉄筋を用いた鉄筋コンクリート造の梁および柱部材の破壊モードのひとつである付着割裂破壊に対して、横補強筋が有効であることが知られている。特に、断面外周部の主筋だけでなく、中間部の主筋に配する中子筋や中吊り筋などの副補強筋の効果が指摘されている。現在、「鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針」[1]で、横補強筋の効果として副補強筋も加えた付着割裂強度精算式を示している。しかし、実験的な裏付けが充分とはいえず、また、実験結果に対して副補強筋の効果が過小評価であると指摘されている。そこで、本研究では、単純梁型の付着実験を行い、付着強度に及ぼす各種パラメータの検討を行った。

2. 実験の概要

試験体は、なるべく実際の部材の応力状態に近く、加力方法も簡単であり、横補強筋の影響を調べる目的に適しているため、単純梁型の試験体とした。試験体の配筋図を図1に示す。試験鉄筋の表面の異形筋の形状を損うことなく、歪度を測定するため、また、せん断ひび割れを誘発するため、試験区間端の荷重点側コンクリートに切り欠きを設けた。試験鉄筋端部は、支点反力による拘束を受けないように、主筋にスチール製のパイプを被せることにより付着をなくする。付着をなくしたアンボンド区間のコンクリートが、試験区間の付着強度に影響しないように、アンボンド区間と試験区間の境目に主筋中心までかぶりコンクリートに切り欠きを設けた。試験体が、付着割裂破壊する以前に曲げ降伏及びせん断破壊することを防ぐ目的で、試験鉄筋の内側に、補助の鉄筋（2段筋と呼ぶ）

を配し（No.1～3は4-D16、No.4は3-D16、No.5は3-D19とした。）、横補強筋を掛けた（2-6φ@60）。試験区間の横補強筋については、上端側が付着破壊した後、下端側を試験する際に横補強筋が伸びプレストレスを受けた状態になることを避けるため、上端筋と下端筋の横補強筋をそれぞれ反対側の2段筋に掛け別に配筋することとした。試験体は、図1に示すように1体に付

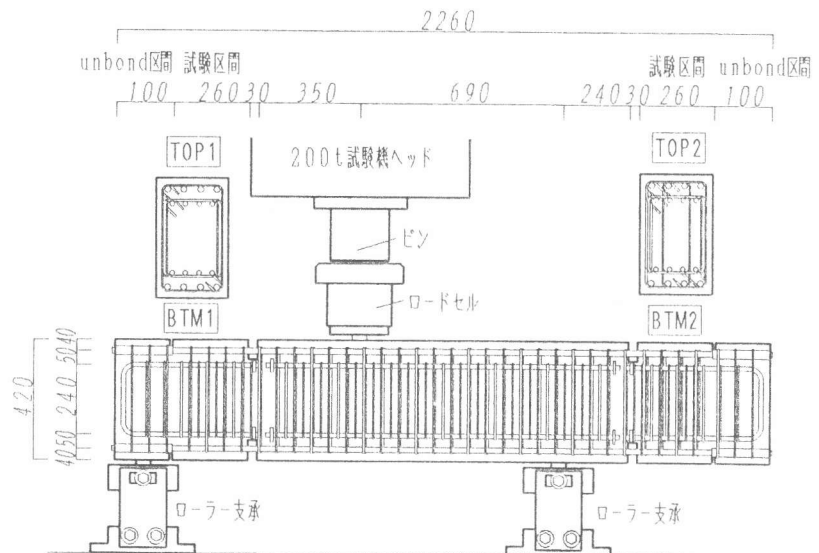


図1 配筋図（単位mm）

き4ヵ所の試験区間を持ち、それぞれの試験区間は、コンクリート打設方向に対する上端筋には"TOP"、下端筋には"BTM"の記号を付す。また、横補強筋を断面外周部のみに配したものを"-1"、副補強筋を用いてすべての主筋を拘束したものを"-2"の記号で示す。

各試験体間のパラメータは、主筋本数、主筋径、横補強筋比、パラメータの一覧を表1に示す。また、使用した鉄筋の特性を表2に示す。使用したコンクリートは、早強コンクリートで、目標強度を270kgf/cm²とした。材料試験によるコンクリート強度 σ_B は、No.1~No.3は317kgf/cm²、No.4およびNo.5は341kgf/cm²である。

加力は、すべて単調載荷とした。4つの試験区間は、比較的付着強度の弱い上端側を先に加力し、その後反転し下端側を加力することとし、"TOP-1"、"TOP-2"、"BTM-1"、"BTM-2"の順に加力を行った。

荷重は、試験機ヘッドと試験体とのロードセルにより測定した。荷重点のたわみは、試験機床に固定した変位計により測定した。また、試験鉄筋のすべりは、試験体端部のコンクリートに変位計を固定し、試験鉄筋端部のすべりを測定した。試験区間の主筋及び横補強筋の歪度は歪ゲージにより測定した。

表1 試験体パラメータ一覧

試験体名	位置	主筋	横補強筋	
			配筋	$\rho_w(\%)$
No. 1	TOP-1	4-D19	2-6 ϕ @120	0.19
	BTM-1		4-6 ϕ @120	0.37
No. 2	TOP-1	4-D19	2-6 ϕ @60	0.37
	BTM-1		4-6 ϕ @60	0.75
No. 3	TOP-1	4-D19	2-6 ϕ @40	0.56
	BTM-1		4-6 ϕ @40	1.12
No. 4	TOP-1	3-D19	2-6 ϕ @60	0.37
	BTM-1		3-6 ϕ @60	0.56
No. 5	TOP-1	3-D25	2-6 ϕ @60	0.37
	BTM-1		2-6 ϕ @60	0.56

表2 使用鉄筋の特性

鉄筋	降伏強度 σ_y kgf/cm ²	初期剛性 E_s 10 ⁹ kg/cm ²
6 ϕ	5385	1.992
D16	3746	1.855
D19	3670	1.850
D25	3623	1.816

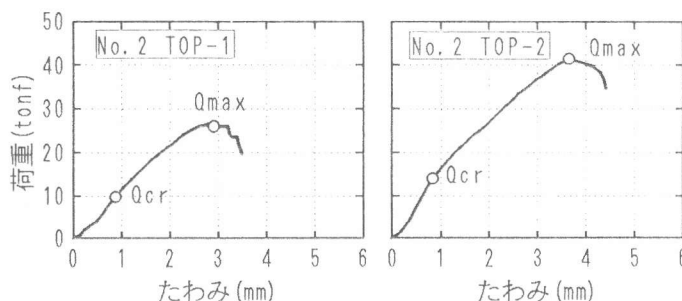


図2 荷重変形関係

3. 実験結果

破壊性状：荷重変形関係の例を図2に示す。いずれの試験体も、曲げひび割れ、せん断ひび割れが順次発生した後、試験区間の主筋沿いに細かいひび割れが何本も生じた。最終的には、主筋沿いのひび割れが1本につながり大きく開き、サイドスプリット型の付着割裂破壊をし、耐力低下した。典型的な最終ひび割れ状況図を図3に示す。図中において、以前の加力で生じたひび割れは点線で、最終加力で生じたひび割れは実線で示した。

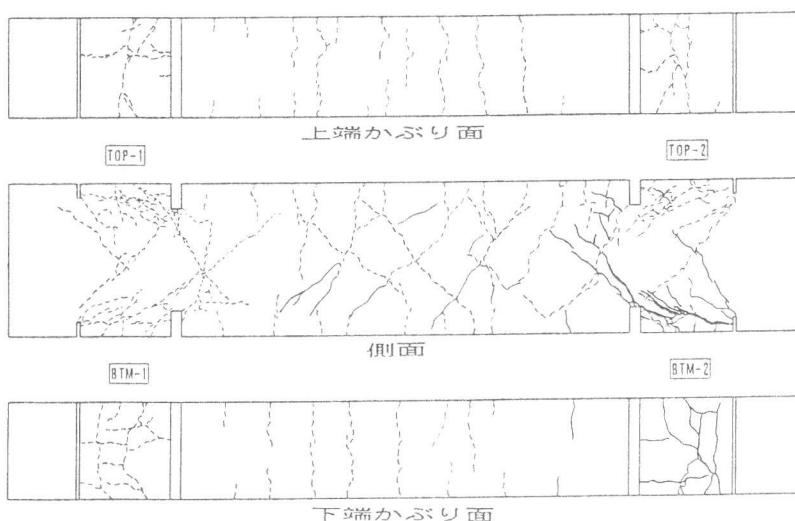


図3 最終ひび割れ状況図 (試験体 No. 2)

荷重～付着応力度関係：試験区間の主筋の荷重点側に貼り付けた歪ゲージにより得た主筋の歪度から、主筋に生じる応力度を求めた。最も付着強度の高い"No.3-BTM-2"は、最大耐力時には、試験区間引張側端で主筋が降伏したもののその歪度は、降伏歪をわずかに上回る2200 μ 程度であ

った。その他はすべて、主筋は弾性範囲であった。この主筋の応力度 σ に主筋の断面積 A_s を掛け、主筋周長 ϕ および付着長さ l_b で割った値を付着応力度 τ とした。図4に示すように、試験区間の荷重点側端部に切り欠きを設けたため、付着応力度の低い区間が生じることを考慮し付着長さ l_b を定めた。荷重と主筋付着応力度の関係を図5に示す。荷重と共に付着応力度は増加し、副補強筋がある場合は、付着応力度が最大に達すると共に荷重も低下し始める。副補強筋がない場合は、中主筋の付着応力度が最大に達し低下し始めても耐力低下せず、隅主筋の付着応力度が、上昇し続ける。

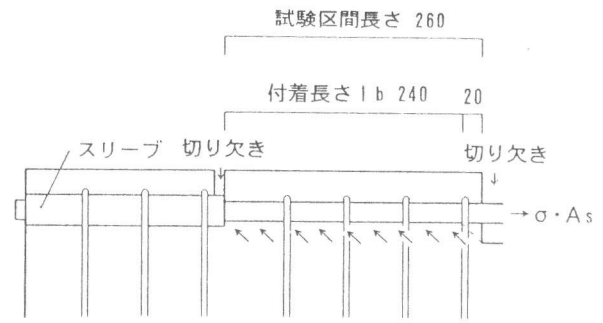


図4 付着長さ (単位mm)

主筋付着応力度～すべり関係：得られた付着応力度と自由端すべりの関係

の典型的な例を図6に示す。横補強筋比 p_w が等しく、配筋形状の異なる“No.1 TOP-2”と“No.2 TOP-1”と“No.2 TOP-1”を比較すると、付着応力度の最大値はほぼ同程度であるが、副補強筋のない“No.2 TOP-1”では、中主筋の付着応力度は隅主筋に比べて最大値も低く、小さなすべりの段階で低下し始める。一方、副補強筋のある“No.1 TOP-

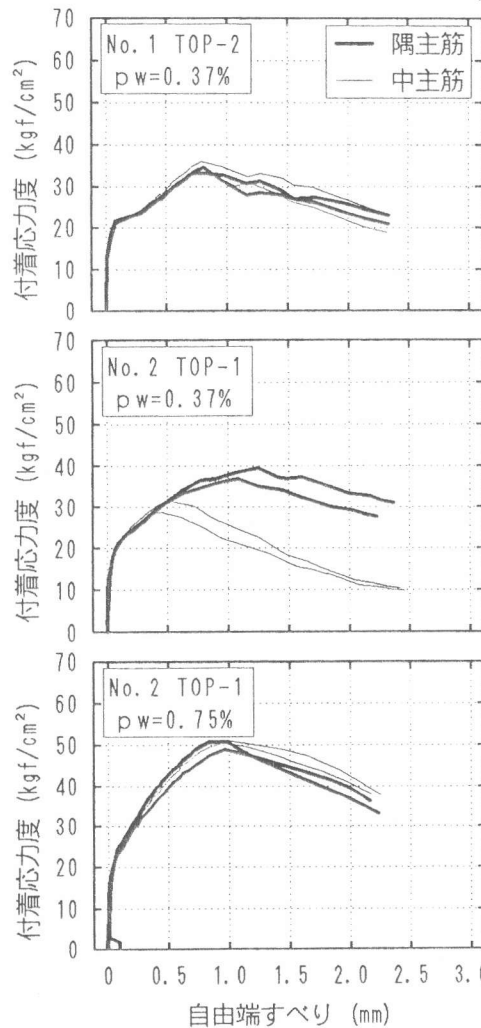


図6 付着応力度—すべり関係

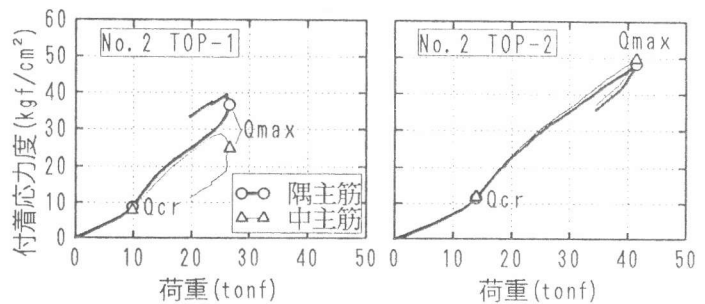


図5 荷重～付着応力度関係

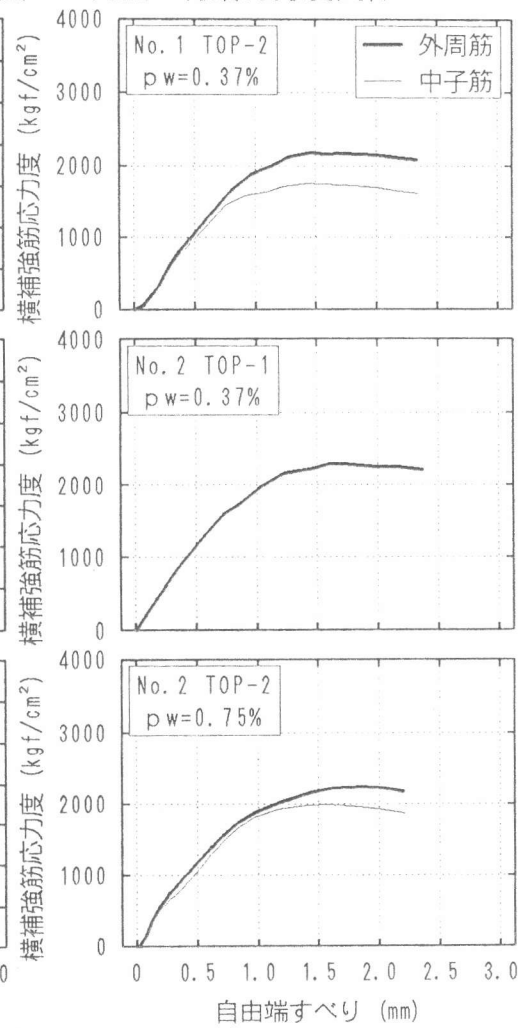


図7 横補強筋応力度—すべり関係

2"では、隅主筋、中主筋が同時に最大値に達する。"No. 2 TOP-1"に副補強筋を加えた"No. 2 TOP-2"は、隅、中主筋共に最大値が高くなっている。

横補強筋応力度：横補強筋は、全て弾性範囲であり降伏したものはなかった。横補強筋の応力度は、外周筋と副補強筋ごとに、試験区間内の全ての横補強筋の応力度を平均して求めた。図7に、各試験体の横補強筋応力度～自由端すべり関係を示す。横補強筋の応力度は、付着応力度がピークに達するまでは、すべりと共に増加している。付着応力度が低下し始めると、横補強筋の応力度は、上昇せずほぼ横這いとなった。その時の応力度は、いずれの試験体でも2000kgf/cm²程度であった。

4. 実験結果の検討

既往の付着割裂強度式との比較：得られた隅主筋、中主筋のそれぞれの最大付着応力度 τ_{max1} 、 τ_{max2} 、および全主筋の平均の付着応力度の最大値 $\tau_{max.av}$ を表3に示す。また、既往の付着割裂強度算定式であるOrangun, Jirsa, Breen式[2] (以下、OJB式と略す)、藤井・森田式[3]、指針の付着割裂強度精算式[1]および、山田・角式[4]による計算値を表3に示す。 $\tau_{max.av}$ と各算定式による計算値を比較し図8に示す。OJB式、藤井・森田式は、横補強筋による付着強度の増分 τ_{st} を横補強筋の配筋形状にかかわらず横補強筋比 ρ_w に比例して与えている。OJB式は実験値と傾向が一致しているがばらつきが大きい。指針式は、副補強筋の有無により τ_{st} を与えているが、藤井・森田式と同様に、副補強筋のある"TOP-2"、"BTM-2"でかなり過小評価となっている。山田・角式は、付着強度の低い範囲では非常に良く実験結果と一致するが、横補強筋比が副補強筋があり、付着強度の高いもので、かなり過大評価となるものがある。

表3 実験結果一覧

試験体名	位置	最大付着応力度実験値(kgf/cm ²)			付着強度計算値(kgf/cm ²)			
		τ_{max1}	τ_{max2}	τ_{maxav}	τ_{ojb}	τ_{fm}	τ_{bu}	τ_{yk}
No. 1	TOP-1	27.8, 28.3	27.5, 25.7	27.1	26.6	22.8	22.7	21.7
	BTM-1	39.4, 38.1	37.5, 34.3	37.3	34.6	27.8	28.4	26.5
	TOP-2	33.1, 34.5	33.9, 36.1	34.4	26.6	25.5	24.5	30.9
	BTM-2	47.2, 50.0	44.2, 45.2	46.0	34.6	31.1	30.6	37.7
No. 2	TOP-1	39.5, 37.0	28.7, 31.3	31.3	33.5	25.5	25.3	26.7
	BTM-1	51.8, 53.8	40.6, 34.7	44.6	43.5	31.1	31.7	32.6
	TOP-2	48.9, 50.8	50.5, 51.2	49.4	33.5	31.0	28.9	63.5
	BTM-2	57.5, 57.4	58.2, 57.5	57.2	43.5	37.8	36.1	77.5
No. 3	TOP-1	47.0, 40.2	30.2, 34.2	36.3	33.5	28.2	28.0	35.2
	BTM-1	54.0, 57.3	40.8, 37.6	46.6	43.5	34.4	35.0	42.8
	TOP-2	57.9, 62.0	63.3, 64.1	61.9	33.5	36.4	33.3	117.9
	* BTM-2	73.2, 73.2	73.2, 73.2	73.2	43.5	44.5	41.6	143.9
No. 4	TOP-1	50.3, 53.1	40.1	47.0	41.6	34.5	33.3	34.8
	BTM-1	56.3, 54.3	43.0	49.6	54.1	42.1	41.7	42.4
	TOP-2	53.5, 57.8	57.0	56.1	41.6	38.3	35.8	45.7
	BTM-2	69.8, 68.5	65.1	67.5	54.1	46.7	44.7	55.8
No. 5	TOP-1	49.6, 49.3	31.6	42.5	33.8	26.5	25.4	27.7
	BTM-1	51.8, 46.8	35.4	43.7	44.0	32.3	31.8	33.9
	TOP-2	50.2, 47.6	51.2	49.5	33.8	29.4	27.3	37.0
	BTM-2	56.0, 52.9	52.3	53.7	44.0	35.8	34.1	45.1

τ_{max1} : 隅主筋の最大付着応力度(kgf/cm²) τ_{max2} : 中主筋の最大付着応力度(kgf/cm²)
 $\tau_{max.av}$: 全主筋の平均付着応力度の最大値(kgf/cm²)
 τ_{ojb} : OJB式(kgf/cm²) τ_{fm} : 藤井・森田式(kgf/cm²) τ_{bu} : 指針式(kgf/cm²)
 τ_{yk} : 山田・角式(kgf/cm²) *) 主筋降伏後の付着破壊

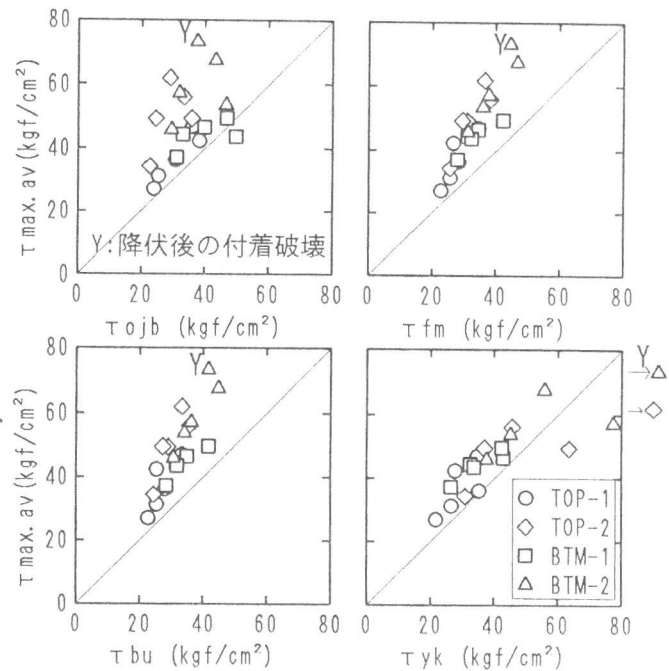


図8 既往の付着応力度算定式と実験結果

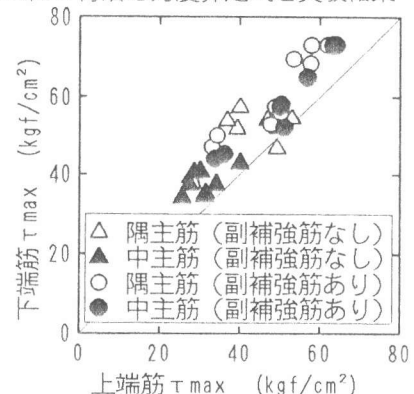


図9 上端と下端の付着強度の比較

上端筋と下端筋の比較：コンクリート打設方向に対する水平上端筋と下端筋の付着強度は、ブリージングなどの影響で上端筋が弱くなることが知られている。実験結果を図9に示す。得られた、下端主筋の上端主筋に対する付着強度の比は、平均値 1.22、標準偏差 0.14となった。この平均値は、現在一般に用いられている藤井、森田[3]が示した値と一致している。そこで、以下の検討には、上端筋の τ_{max} は、上端筋と下端筋の強度の比1.22をかけて下端筋の強度に基準化して扱うこととする。

横補強筋の効果：横補強筋比 p_w 以外のパラメータが共通である No. 1~3 について、 p_w と付着割裂強度の関係を各主筋の位置と横補強筋による拘束状態で分類して図10に示す。ここでは、コンクリート強度の影響を排除するために、付着割裂破壊がコンクリートの引張系の破壊であることから、付着割裂強度 τ_{max} を $\sqrt{\sigma_B}$ で基準化した。 $\tau_{max}/\sqrt{\sigma_B}$ と p_w は、いずれの場合もほぼ直線の関係にある。図中に、OJB式、指針式、山田・角式による計算値を示した。OJB式は、横補強筋の効果を頭打ちにしているが、実験結果では付着強度は p_w に比例して上昇している。指針式では、副補強筋の有無、隅主筋・中主筋にかかわらず計算値は過小評価となるが、特に副補強筋のある場合に、実験値と計算値の差が大きい。山田・角式は、横補強筋による付着強度の増分 τ_{st} を実験結果を統計処理して定量化した式である。この式では、 τ_{st} が p_w の2乗に比例して与えられる。そのため、 p_w が大きくなると計算値が急激に増加し、過大評価となっている。

主筋配筋の効果：横補強筋比などのパラメータが共通で、主筋本数が異なる No. 2とNo. 4について $\tau_{max}/\sqrt{\sigma_B}$ と主筋本数の関係を図11に示す。図中に、各算定式に

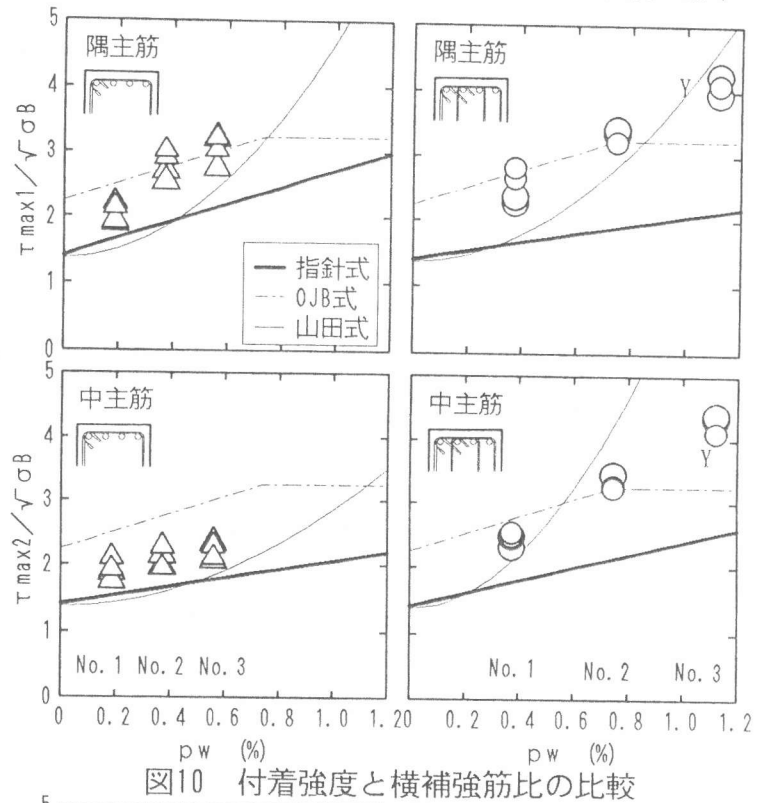


図10 付着強度と横補強筋比の比較

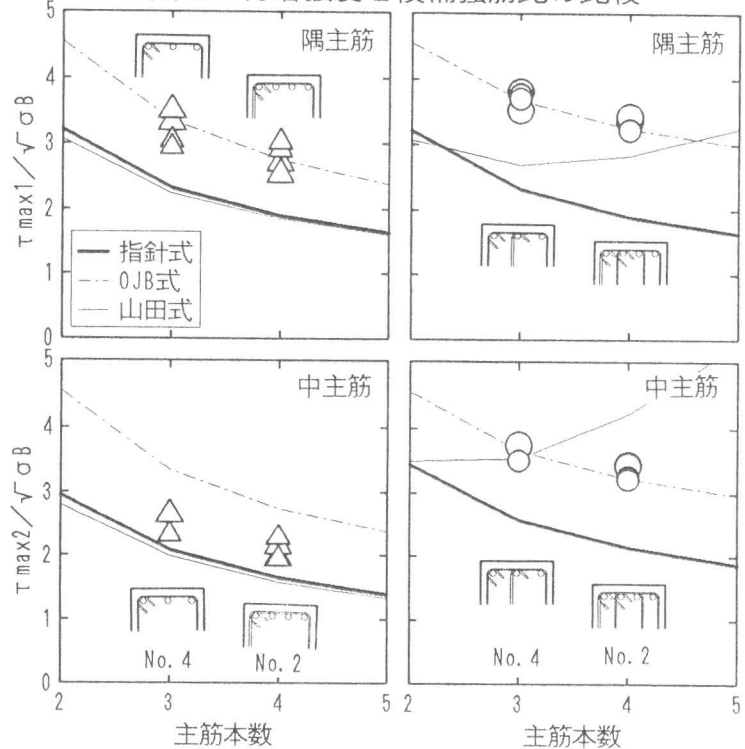


図11 付着強度と主筋本数の比較

よる計算値を示した。いずれの場合も、主筋本数が増えると付着強度実験値は低くなり、その傾向は、OJB式、指針式による計算値と概ね一致している。山田・角式では、副補強筋がある場合に、主筋本数が多い方が計算値が高くなり、他の算定式および実験結果と逆の計算結果を示す。

横補強筋比などのパラメータが共通で、主筋径が異なる No. 4 と No. 5 について $\tau_{max}/\sqrt{\sigma_B}$ と主筋径の関係を図12に示す。主筋径が、付着割裂強度におよぼす影響については、実験値と計算値はほぼ同様の傾向を示している。

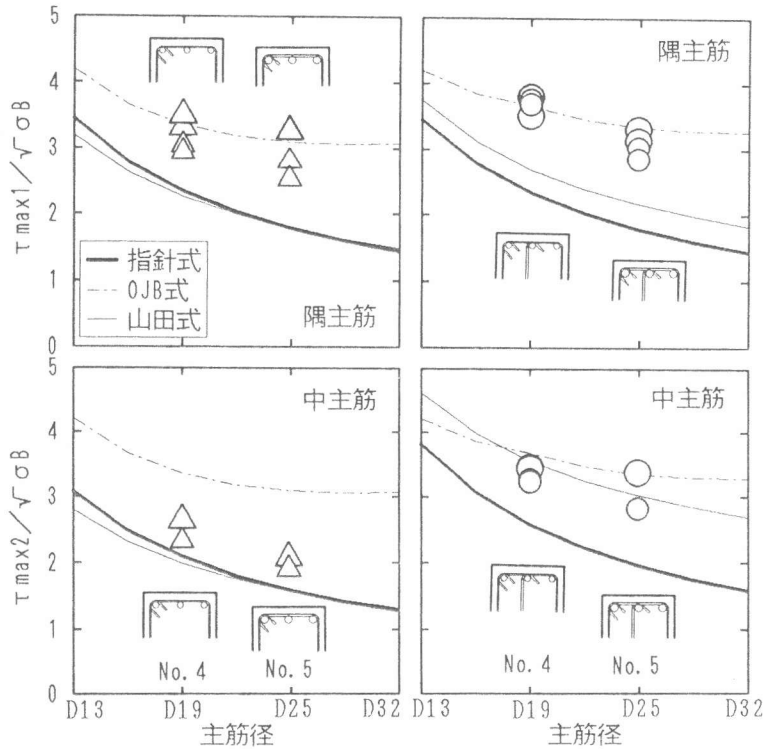


図12 付着強度と主筋径の比較

5. 結論

単純梁の主筋の付着割裂強度に関する実験を行ない、付着割裂強度に影響する要因について検討した結果、

- (1) 横補強筋として副補強筋を用いた場合、偶主筋と中主筋の付着応力度は同時に最大値に達し、その値も同程度であった。一方、副補強筋がない場合には、中主筋の付着応力度が先に最大値に達し、その値は偶主筋よりも低かった。
- (2) 既往の付着割裂強度式は、横補強筋の効果についてはいずれもあまり実験値と一致せず、副補強筋の効果が適切に評価されない。

6. 謝辞

試験体の計画に際して、名古屋工業大学助教授 市之瀬敏勝博士に多くの助言を頂き、同氏の実験計画を参考にさせて頂いた。試験体の製作は、大成建設(株) 戸田P C製作作業所に依頼した。試験体製作・試験実施にあたり、東京大学工学部助手の細川洋治、田才晃両氏に御協力頂いた。ここに記して感謝の意を表わす。

参考文献

- 1) 日本建築学会；「鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説」、1990
- 2) Orangun, C.O., Jirsa, J.O. and Breen, J.E.；「A Revaluation of Test Data on Development Length and Splices」ACI Journal, vol74, pp.114~122, March, 1977
- 3) 角徹三、山田守、合楽将三；「鉄筋コンクリート部材の付着割裂強度算定式の提案」、日本建築学会論文報告集、pp.23~33、1990.8
- 4) 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2報 付着割裂強度算定式の提案—」、建築学会論文報告集、pp.45~52、1983.2