

論文

[2125] 高強度材料を用いた RC 部材の変形能評価に関する研究

菊池政智*¹・加藤大介*²

1. はじめに

建築学会の鉄筋コンクリート (RC) 造建物の終局強度型耐震設計指針 [1] (学会指針) の主筋の付着に対する設計法は、曲げ作用に対する付着強度の確保とトラス機構に対する強度の確保の2本だてになっており、曲げ作用に対するものは曲げによる付着応力度と付着強度の比較という形で評価されている。付着強度は本文に簡略化された設計式が提案されているが、解説に示されている精算式を用いても良いことになっている。このとき、塑性ヒンジが生じないかあるいは片側のみに生じる部材については、藤井らの提案式 [2] を簡略化した最大強度式を、両側にヒンジが生じる部材については、塑性変形により付着が厳しくなることを考え、最大強度後の最終付着強度を用いている。また、対する付着応力度は曲げひび割れによる影響を考慮し、付着長さを全せいから有効せいを引いたものとしている。

筆者らは、この付着に対する設計法が、塑性変形を生じる高強度材料を用いた部材にも適用できるかどうかを検討することを目的に、高強度材料を用いた RC 造高軸力柱の曲げ実験を行った [3,4]。その結果、高軸力を受ける試験体では、試験体としての曲げ降伏後に圧縮筋が降伏し歪硬化域に入るため、付着長さが学会指針による評価式より短くなり、このために付着指標によるすべりの評価とは相反して主筋がすべりを起こしやすくなっていることが明らかになった。また、この主筋の滑りと同時に試験体の復元力が徐々に低下し、主筋の滑りが試験体としての靱性限界点の原因となっていることも分かった。

さらに、筆者らは以上の実験結果を基に、主筋の付着滑りの変形能に及ぼす評価式を検討した [5]。しかしながら、データ数が少なく、また、その時点では高強度材料にも対応する付着強度式が提案されていないこともあって、提案式の精度等の評価が困難であった。そこで、本報告では、最近提案された高強度材料用の付着強度式 [6,7] も用いて、付着破壊で靱性が決定される場合の変形能評価式について検討し、さらに、設計法に対しても提案をおこなった。なお、実験データに関しても最近、実験が行われたもの [8~16] について、低強度から高強度材料までを広く対象とした。

2. 研究方法と対象試験体

文献 [5] では、主筋の付着性能と付着滑り開始部材角の関係について検討したが、主筋の滑り開始部材角を測定している報告は少ない。そこで、本報告は主筋の滑り開始部材角の代わりに試験体としての限界部材角を評価した。限界部材角は最大耐力の80%に低下した点の部材角の正方向と負方向の小さい方とした (どちらか一方しか示されていない場合にはその値)。図-1に文献 [5] で検討した試験体11体の主筋滑り開始部材角と靱性限界部材角との関係を示しておく。この図よりデータのばらつきは見られるが、限界部材角を主筋滑り開始部材角の代わりに使うことができると考えられる。

*1 新潟大学大学院 工学部建設学科 (正会員)

*2 新潟大学助教授 工学部建設学科、工博 (正会員)

具体的な評価法は文献 [5] と同じであり、付着性能と実験で報告された限界部材角との関係を図示し、その相関関係を調べた。付着性能は付着応力度の付着強度に対する比として評価した。また、付着強度は最大強度を表す式として、学会指針の解説で示されている精算式（本報告では τ_{bu1} と呼ぶ） [1]、高強度コンクリートを対象に最近開発された文献 [6] の角らの式（本報告では τ_{bu3} と呼ぶ）、および、同じく高強度コンクリート用に開発された文献 [7] の前田・小谷らの式（本報告では τ_{bu4} と呼ぶ）の3つを用いて評価した。なお、検討した試験体は両端にヒンジが形成されるため、本来指針では最終付着強度を用いて検討することになっているので、学会の指針の解説に示されている最終付着強度式（本報告では τ_{bu2} と呼ぶ） [1] も強度の評価の対象とした。各式は原論文に忠実に適用したが、角らの式における付着長さ $1b$ は試験体全長さから有効せいを減じた長さの半分とした。また、角および前田・小谷による付着割裂強度算定式はサイドスプリット型のみを対象にしているため、これらの式を適用する場合はコーナースプリット型の強度式として学会指針の精算式を併用した。

一方、付着応力度は2通り想定した。すなわち、学会指針の式である(1)式と、高軸力により圧縮筋が降伏し歪硬化域に入ることを考慮し、付着長さを軸力の1次関数とし減少させた(2)式である。なお、主筋は両端とも降伏するとしている。また、文献 [5] では、引張主筋と圧縮主筋が同時に降伏する点を軸力比が1/3の時と考え、この時に圧縮側で引張側と同じ d だけ付着長さが減少する式となるように、(2)式の α を3としたが、本報告ではこの妥当性を検討した。なお、軸力が0のときに(1)式と(2)式は一致する。

$$\tau_f = db \cdot (2 \cdot \sigma_y) / (4 \cdot (L - d)) \quad (\text{学会指針の式}) \quad (1)$$

$$\tau_f' = db \cdot (2 \cdot \sigma_y) / (4 \cdot Lb) \quad (\text{付着長さを軸力により減少させたもの}) \quad (2)$$

$$Lb = L - d - d \cdot \gamma$$

$$\gamma = \alpha \cdot N / (b \cdot D \cdot \sigma_B) \quad (\leq 1) \quad (\alpha = 3)$$

ここで、 db 、 σ_y は主筋の径と降伏応力度、 L 、 D 、 d 、 b は試験体の全長、全せい、有効せい、幅、 σ_B はコンクリート強度、 N は軸力である。

用いた実験データは、文献 [2, 3, 8~16] の中で、曲げ降伏後の付着破壊と記述されている梁および柱試験体計60体とした。材料の強度の範囲はコンクリートは182~815kgf/cm²、主筋強度が2717~10180kgf/cm²、帯筋強度が3160~17700kgf/cm²、軸力比が0~0.5である。

3. 検討結果

3. 1 学会指針の付着応力度 τ_f ((1)式)を用いた場合

図-2(a)は中子筋の無い梁、柱試験体について試験体の限界部材角と学会指針による付着強度と付着応力度を用いて τ_f / τ_{bu1} で表される付着指標1の関係を示したものである。同様に、図-2(b)(c)は中子筋のある試験体、および、全試験体について示したものである。塑性変形が大きくなると、付着指標が1以下でも滑り破壊が生じる割合が大きくなるのがわかる。また、各図ともばらつきが大きい。なお、文献 [5] では、中子筋の有るものの精度が、中子筋の無いも

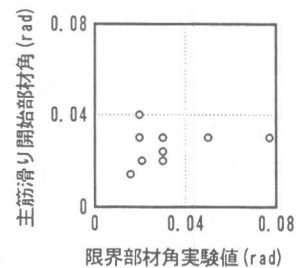
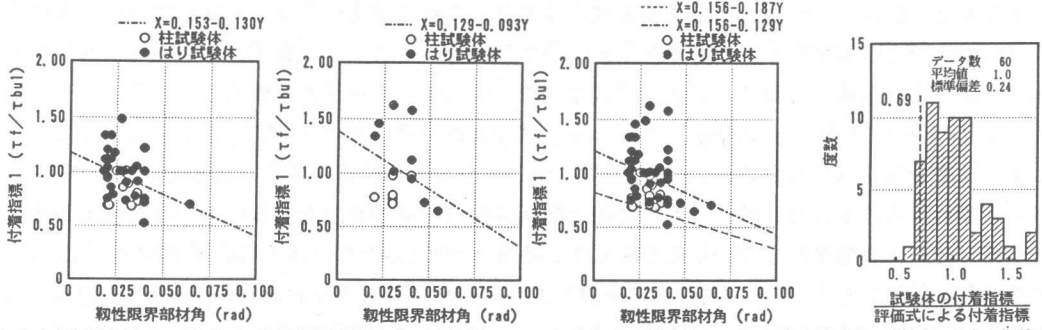
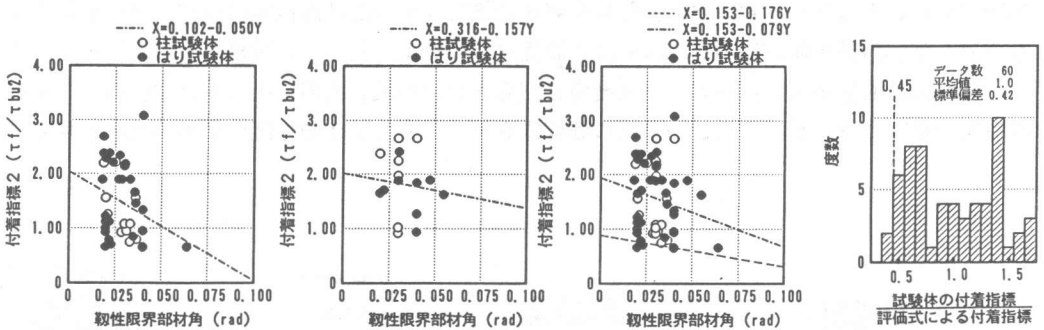


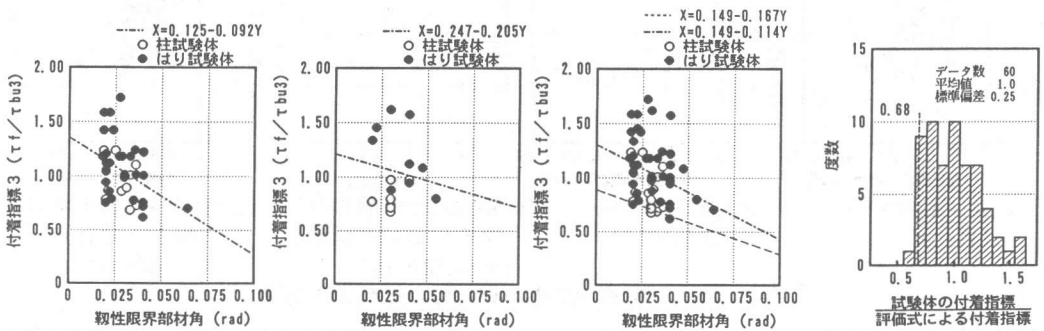
図-1 主筋の滑り開始部材角と限界部材角の関係（滑りにより塑性が決まった試験体）



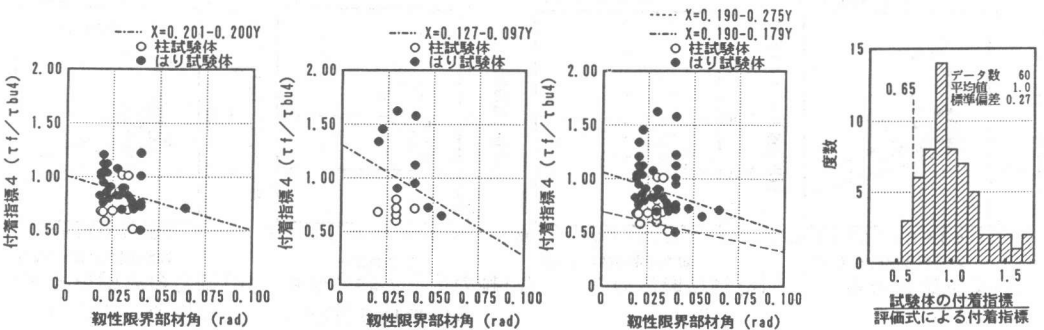
(a) 中子筋が無い場合 (b) 中子筋が有る場合 (c) 全試験体 (d) 指標の精度 (全試験体)
 図-2 学会指針の付着強度を用いた付着指標と靱性限界部材角の関係(式(1))



(a) 中子筋が無い場合 (b) 中子筋が有る場合 (c) 全試験体 (d) 指標の精度 (全試験体)
 図-3 学会指針の最終付着強度を用いた付着指標と靱性限界部材角の関係(式(1))



(a) 中子筋が無い場合 (b) 中子筋が有る場合 (c) 全試験体 (d) 指標の精度 (全試験体)
 図-4 角式の付着強度を用いた付着指標と靱性限界部材角の関係(式(1))



(a) 中子筋が無い場合 (b) 中子筋が有る場合 (c) 全試験体 (d) 指標の精度 (全試験体)
 図-5 前田・小谷式の付着強度を用いた付着指標と靱性限界部材角の関係(式(1))

のより大きく劣っていたが、データ数の増加により、両者の精度の差はなくなっている。図中の1点鎖線は回帰直線であるが、右下がりの傾向がみられ、これは、付着指標が低いほど靱性能が高くなることを意味しており、この回帰式は付着強度に依存する靱性評価式といえる。一方、各試験体についてこの回帰式の精度、すなわち、試験体の付着指標の回帰式による付着指標に対する比の頻度分布を示したものが図-2(d)であるが、ばらつきが非常に大きく実用的な評価式ではないことがわかる。そこで、設計において曲げ降伏後の付着破壊を防止するための基準値を設定するためにデータの分布を正規分布と仮定して、危険率が約10%となるように横軸を標準偏差の1.3倍だけ左に移動したものが、図(d)中の破線であり、これに対応する評価式が図(c)の破線となる。

図-2(a)~(d)と同じ形式で、付着強度式として学会指針の最終付着強度を用いたものを図-3(a)~(d)に、角らの強度式を用いたものを図-4(a)~(d)に、前田・小谷らの強度式を用いたものを図-5(a)~(d)に、それぞれ示す。学会指針の最終付着強度は本来曲げ降伏以後の付着破壊を防止するものであり、指標自体が他のものより高く設定されている。しかし、指標が1を下回るものも多く、精度も最も悪かった。一方、高強度用に開発された角式、前田・小谷式は学会指針式とほぼ同程度の精度であった。また、いずれの強度式を用いても、柱は同程度の指標の梁と比較して

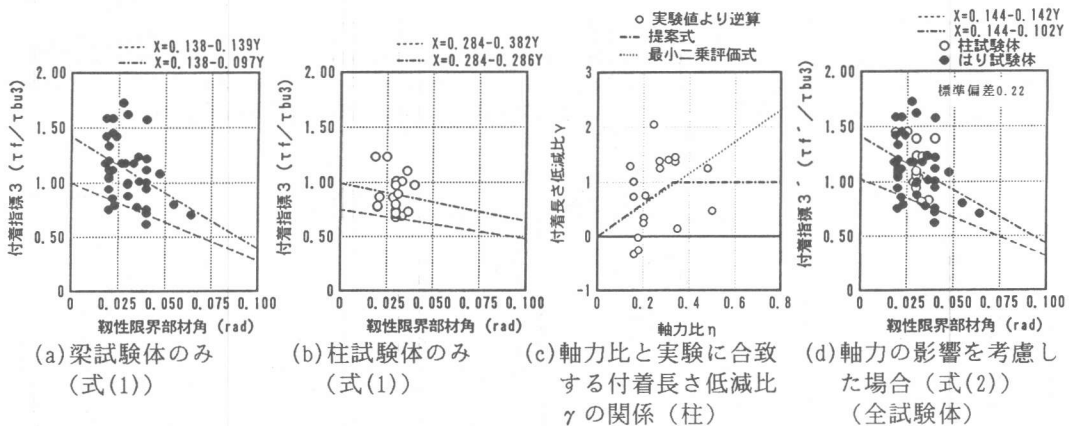


図-6 角式の付着強度を用いた場合の軸力の影響

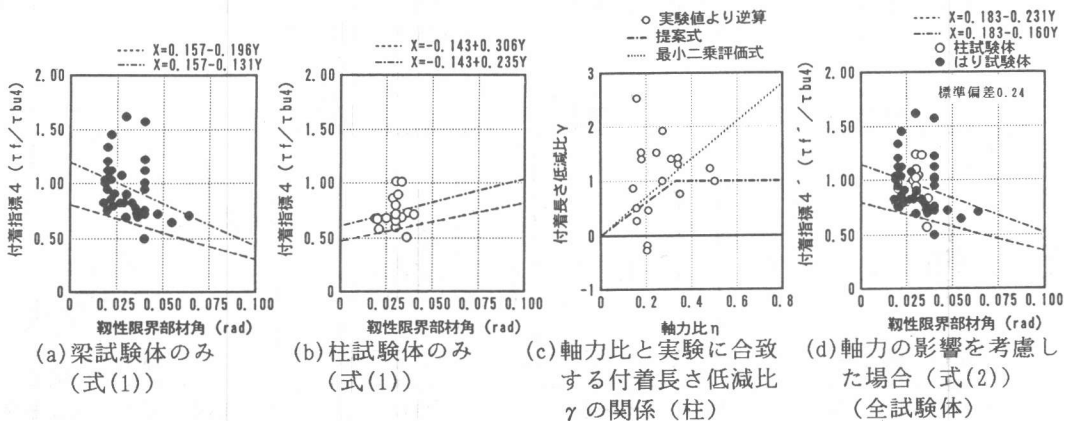


図-7 前田・小谷式の付着強度を用いた場合の軸力の影響

変形能が悪くなる傾向があり、付着指標に軸力が影響していることがわかる。

3. 2 軸力の影響の評価 ($\tau f'$ (2)式)における α の検討)

本節では、付着指標 $\tau f'$ (式(2))における軸力の影響を検討した。図-6(a)(b)は、図-4(c)で示した角式を用いた場合の付着指標3と変形能の関係を、梁と柱に分離して示したものである。同様に前田・小谷式についても図-7(a)(b)に示した。柱と梁で傾向が異なるので、設計において梁と柱を分離して扱うこともありうるので、各図において回帰式および危険率約10%の下限式も示してある。なお、データが少ないために前田・小谷式の柱で回帰式の傾きが逆になっているが、他のものと同様の形式で評価した。

図-6(c)、7(c)は、柱試験体の付着応力度を式(2)で計算する時に、梁の回帰式に一致するための付着長さ低減比 γ を逆算して、軸力比との関係を示したものである。両図ともばらつきが大きいのが、軸力の存在による付着長さの低減の必要性を示している。これらのデータを原点を通る直線で近似したものが図中の点線である。一方、文献[3]で提案した $\alpha=3$ とした式を1点鎖線で示したが、傾きは近似式とよく一致し、式(2)の妥当性が確認された。

図-6(d)、7(d)は、式(2)を用いて計算した付着指標 $3'$ 、 $4'$ と限界部材角とを比較したものであるが、式(1)を用いた付着指標3、4と比べ精度は上昇した。ただし、柱試験体の数が梁試験体比べ少ないので、精度の上昇度は少ない。これらの回帰直線が付着性能に依存する靱性能評価式となるが、ある変形能を確保する(その変形まで滑りを生じない)ための条件を示した方が設計では有効であろう。例えば角式を用いた場合、部材角 0.02rad を危険率約10%の確率で確保するための条件は、以下のようになる。

$$\tau f / \tau \text{bu}3 \leq 0.69 \quad (R \geq 0.02\text{rad}) \quad (\text{柱、付着応力度は式(1)}) \quad (3)$$

$$\tau f / \tau \text{bu}3 \leq 0.85 \quad (R \geq 0.02\text{rad}) \quad (\text{梁、付着応力度は式(1)}) \quad (4)$$

$$\tau f' / \tau \text{bu}3 \leq 0.87 \quad (R \geq 0.02\text{rad}) \quad (\text{柱・梁、付着応力度は式(2)}) \quad (5)$$

4. まとめ

(1) 各付着強度指標と靱性限界部材角の関係を検討した内容を、以下の(a)~(d)にまとめる。

(a)各付着強度指標と靱性限界部材角の関係はばらつきが大きいのが、回帰直線を求めてみると右下がりの傾向がみられ、これは付着強度に依存する靱性評価式となる。また、設計において曲げ降伏後の付着破壊を防止するための基準値を設定するために、危険率が約10%となるような評価式も作成した。

(b)各式のばらつきは、学会指針の最終強度式を用いた場合が最も大きく、学会指針の最大強度式、角による提案式、および、前田・小谷による提案式によるものは、同程度であった。

(c)文献[5]では、中子筋の有るものの精度が、中子筋の無いものより大きく劣っていたが、データ数の増加により、両者の精度の差はなくなった。一方、各式とも梁と柱で挙動の差は、認められた。

(d)軸力の影響を再評価したところ、文献[3]で提案した軸力により付着長さが減少するとした式(2)の妥当性が認められた。

(2)以上の結果は両端が曲げ降伏する試験体について検討されたものである。片側のみが降伏する柱部材などの設計に適用する場合には、主筋の応力状態を現実に即して評価する必要がある。この場合、主筋が引張力を受ける場合のみでなく圧縮力を受ける場合についても検討し、厳しい

応力状態になる方で設計する。精算しない場合に学会指針の条文のように降伏する場合には主筋応力度に上限強度を、降伏しない場合には信頼強度を適用すれば、安全側といえる。

[謝辞] 本研究は、建設省総プロNew RC (委員長青山博之東大教授) の一環として行い、New RC構造性能委員会せん断WGで収集したデータベースを使用させていただきました。ここに、関係各位に感謝を表します。

[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年
- 2) 藤井栄、森田司郎、他：異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究 (第1報：付着割裂を支配する要因についての実験結果)、日本建築学会構造系論文報告集第319号、1982年、pp. 47-55
- 3) 加藤大介：高強度材料を用いたRC柱の曲げ性能の評価に関する実験的研究、第13回コンクリート工学年次論文報告集、1991年、pp. 415-420
- 4) 加藤大介、菊池政智：高強度材料を用いたRC柱の曲げ性能の評価に関する実験的研究、第14回コンクリート工学年次論文報告集、1992年、PP. 541-546
- 5) 加藤大介：高強度材料を用いたRC柱の靱性能、第14回コンクリート工学年次論文報告集、1992年、PP. 925-930
- 6) 角徹三、張建東、他2名：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、第3巻第1号、1992年1月
- 7) 前田匡樹、小谷俊介、青山博之：鉄筋コンクリート部材の付着割裂強度式の提案、構造工学論文集、Vol. 38B(1992年3月)、pp. 293-306
- 8) 森田司郎、藤井栄、他2名：鉄筋コンクリート短柱の付着破壊についての検討 (その1、2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造系、1983、PP. 2101-2104
- 9) 森本久雄、森田司郎、他2名：RC短柱における付着破壊時の局所付着応力-すべり曲線、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造系、1984、PP. 1865-1866
- 10) 金久保利之、園部泰寿、他3名：高強度人工軽量骨材コンクリートを用いた構造部材の耐震性能に関する研究 (その1)、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造系、1989、PP. 405-406
- 11) 唐津敏一、清水秀夫、他2名：8000kg/cm²級高強度せん断補強筋を用いた鉄筋コンクリート柱のせん断耐力と曲げじん性 (その1)、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造系、1989、PP. 689-690
- 12) 島崎和司、牧田敏郎、他1名：高強度せん断補強筋を用いた柱、はりの実験 (その2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造系、1989、PP. 723-724
- 13) 川島俊一、平石久廣、他：高強度鉄筋コンクリート造柱の高軸力下の変形性状 (その1、2)、日本建築学会大会学術講演梗概集C構造I、1990年、pp. 845-848
- 14) 藤沢正視、上之園隆志、他：高強度鉄筋コンクリートはりの靱性確保に関する研究 (その1~3)、日本建築学会大会学術講演梗概集C構造I、1990年、pp. 277-282
- 15) 前田匡樹、小谷俊介、青山博之：鉄筋コンクリート部材の付着強度、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造系、1990、PP. 313-314
- 16) 金久保利之、園部泰寿、他3名：高強度人工軽量骨材コンクリートを用いた柱部材の耐震性能に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造系、1990、PP. 843-844