

補強コンクリート部材の付着割裂性状に関する研究

論文概要

補強コンクリート部材は、主に引張力を負担する補強材と圧縮力を負担するコンクリートが一体となって挙動し、補強材とコンクリートが相互に応力伝達することによって成立するシステムである。相互の応力伝達は補強材とコンクリートの境界面における付着特性が大きく関連しており、補強されたコンクリート部材の構造性能把握や破壊過程の検討において、付着特性を力学的考察に基づいて明らかにし、適切に評価することは、補強材やコンクリートの構成則と並んで非常に重要である。また、柱・梁部材の脆性的な破壊モードのひとつである付着割裂破壊は、主筋に沿った斜めひび割れが発生し、変形の増大によりひび割れが進展すると共に大幅な剛性低下を起こして逆S字型の履歴吸収エネルギーの小さいループを描くため、設計する際には回避すべき破壊形式である。

付着割裂性状における局所的な性状と部材中の平均的な性状は、同一の破壊メカニズムによると考えられ、局所的な付着性状と部材の付着性状を総合的に論じようとする場合、破壊メカニズムに立脚した力と変形に対する検討が不可欠である。しかしながら、補強材とコンクリートの応力伝達のメカニズムは極めて複雑であるために、その伝達機構の定量的把握、局所性状と柱・梁部材の平均的な性状の関連性、付着特性の力学的評価について、十分な研究がなされていないのが現状である。現在までの付着割裂性状に関する研究は、付着長が主筋径の20倍程度と、ある程度長い試験体による単調載荷の付着実験を行い、その実験結果を回帰的に分析した評価式が多く、終局時の応力状態や塑性理論に基づいた曲げやせん断評価とは異なり、応力伝達機構や破壊メカニズムに基づき、力学に立脚した検討がほとんど行われていないことが重大な問題点である。

本研究は、付着割裂破壊のメカニズムに焦点をあて、局所的性状と平均的性状を実験的および解析的に関連づけ、力学に基づいた付着割裂評価を行うことを主たる目的としている。既往の研究で定量化されている横補強のない場合の局所付着応力-主筋すべり量関係を踏まえ、その囲む面積と等価な面積を有する等価付着ストレスブロックを用いて、力学的考察に基づいた簡易な方法により、横補強のない場合の付着割裂強度算定式を構築する。また、横補強筋を有する実部材中の局所付着性状について検討し、横補強筋による拘束効果を把握する。実部材中の拘束効果および横拘束力の局所付着性状に与える影響の実験的検討に基づき、横補強のある場合の局所付着割裂性状を定量化し、局所付着応力-主筋すべり量関係を提案する。さらに、横補強のない場合と同様に等価付着ストレスブロックを用いて、横補強のある場合の付着割裂強度算定式の構築を行う。また、付着割裂破壊した試験体を含む既往の部材実験データについて、付着余裕度と破壊形式の判定について検討する。

本論文は、7章から構成される。各章の概要は以下の通りである。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的を示すとともに、既往の付着割裂に関する研究および現在までに提案されている付着割裂強度算定式を概観し、各評価式の特徴について整理する。また、現行の付着割裂破壊に対する設計法について概括し、柱・梁部材のせん断および曲げ抵抗機構との関係について整理する。

第2章では、既往の研究で定量化され、本研究の起点である横補強のない場合の局所付着割裂性状および柱・梁部材の平均的な性状に与える種々の構造因子の影響について整理する。

既往研究では、付着長が短い局所の付着性状の場合も、付着長が長い実部材の付着割裂挙動の場合も同一の付着割裂破壊メカニズムによるものと捉え、両者の関連性および種々の構造因子の影響について実験的および解析的に検討し、付着長がある程度長い場合に起こる荷重端側からの連鎖的な割裂破壊に関して究明している。主筋が力を受けたときに生じる周辺コンクリートの応力状態を、内圧を受ける中空シリンダーにモデル化し付着割裂強度を求めた **Tepfers** の付着割裂に関する考察をもとに、主筋の種類、かぶり厚等を変動因子とした付着長の短い付着割裂実験を行い、主筋が周辺コンクリートを押し広げようとする力の主筋方向とのなす角および内部ひび割れの大きさと主筋すべり量との関係を求め、コンクリートが割裂する横補強のない場合の局所付着応力-主筋すべり量関係を定式化している。また、この関係と主筋すべり量に関する基礎微分方程式を利用した数値計算により付着長が大きい場合の平均的な付着割裂性状を求め、付着長が大きい場合の荷重端側からの連鎖的な割裂破壊および付着割裂強度に関して、既往の実験結果と解析結果の比較した結果、比較的良好に表現できることを確認している。さらに、付着長、主筋ヤング係数、コンクリート割裂強度、かぶり厚、試験体の相似比の各構造因子が付着長の大きい平均的な付着割裂性状に与える影響を、パラメトリックな解析により把握し、以下の知見を得ている。

- (1) 付着長が主筋径の5倍程度までは、付着割裂強度は局所付着応力の最大値をとり、付着長が大きくなるにしたがい付着割裂強度は減少する。
- (2) 主筋ヤング係数が平均的な付着割裂性状に与える影響は大きく、ヤング係数が小さい場合では付着応力を担う区間の長さが小さくなり、付着割裂強度が減少する。
- (3) コンクリート割裂強度が大きくなれば付着割裂強度も増大するが、その関係は比例関係ではなく、付着長の度合いにより異なる。
- (4) コンクリートかぶり厚さの影響は、割裂線の長さの1次式で表現できる。
- (5) 付着割裂強度に寸法効果が存在し、相似な試験体の場合、断面の絶対寸法が大きくなるほど強度が低下する可能性がある。

第3章では、第2章の局所付着応力-すべり量関係の囲む面積に着目し、その面積と等価な面積を有する付着応力-すべり量関係を利用し、主筋すべり量に関する基礎微分方程式を解くことで、横補強のない場合における補強材とコンクリートの付着割裂強度算定式を、力学的考察に基づいた簡易な手法により構築した。また、本算定式による計算値と既往の付着実験の結果を対比させ、すでに提案されている諸算定式の適合性と比較検討した。

横補強のない場合の局所付着応力-主筋すべり量関係と等価な面積を有する等価付着ストレスブロックを用い、付着長の大きさにより区別して、力学的意味付けに基づいた手法により補強材とコンクリートの付着割裂強度算定式を導出した。また、有効に付着応力を担う区間を有効付着長と定義し、付着長が有効付着長より大きい場合では等価付着ストレスブロックの応力係数（定付着応力の局所最大付着応力に対する比）は0.643であり、付着長が有効付着長より小さい場合では付着長が大きくなるにしたがって応力係数の値が0.643に近づく近似式を定めた。

本算定式による付着強度は、若干実験結果を安全側に評価しているものの、全試験体の実験値と計算値の比較値の平均値が1.21、変動係数が13%で、既往の付着割裂実験の結果と比較的よい適合性があり、提案されている諸算定式と比較しても十分な精度で評価できることを示した。

第4章では、実部材の応力状態に近い片持梁形式の付着実験結果を通じて、局所付着割裂性状に及ぼす横補強筋による拘束効果を把握するため、主筋および横補強筋に異形鉄筋および種々の弾性係数を持つ連続繊維補強筋を使用した試験体の局所付着割裂性状に着目し、特に局所付着応力、主筋すべり量、横補強筋応力の関係について検討した。検討対象とした試験体は、補強材が鉄筋であるフライアッシュ高強度人工軽量骨材を用いた試験体および補強材に鉄筋、カーボン繊維筋、アラミド繊維筋を使用した普通コンクリートの試験体である。

横補強筋応力と主筋すべり量の関係において、補強筋の種類に関わらず最大荷重までは横補強筋の応力と主筋すべり量はほぼ比例関係にあることが確認された。また、横補強筋による拘束効果は、コンクリート圧縮強度および主筋すべり量により定められる直線により表現可能であることを指摘した。さらに、横補強筋の応力と主筋すべり量による直線の傾きは、上端筋と下端筋で異なっていることを示した。

第5章では、横拘束力が局所付着性状に与える影響の実験的検討および横補強筋による拘束効果に基づき、横補強のある場合の局所付着応力-すべり量関係の構築を行った。さらに、この関係と主筋すべり量に関する付着基礎微分方程式を用いて、付着長が大きい場合の平均的な性状を数値解析により求め、過去に行われた付着割裂実験の結果との対応を検証した。

実部材中での横拘束力を受ける局所付着性状を得ることを念頭に置き、主筋種類、コンクリート強度、横拘束力、かぶり厚、節角度、節高さ、節間隔を変動因子とした主筋引抜き形式による付着実験の結果において、最大付着応力は主筋径、かぶり厚、節高さ、節間隔、節角度の違いによる影響をほとんど受けず、拘束応力が大きくなると最大付着応力が線形的に増大することを示

した。また、最大応力時のすべり量は、節高さが大きくなると若干減少する傾向があり、節間隔が大きくなると比例的に増大することを確認し、コンクリート強度の増大によりすべり量が大きくなることを示した。さらに、最大応力時の割裂ひび割れ幅は、コンクリート圧縮強度および節高さの増大に伴って大きくなり、コンクリート強度および節高さに大きな影響を受けることを確認し、節前面コンクリートの剛性および支圧強度、横拘束力の拘束効果と密接に関係していることを指摘した。

横拘束による付着増分としての付着応力-すべり量関係のモデル化では、節前面コンクリートに作用する支圧強度、最大付着応力、主筋すべり量および横拘束効果と割裂ひび割れ幅の関連性について整理し、節前面コンクリートの応力状態および破壊メカニズムに基づき、最大付着応力までの応力上昇域と最大応力以降の下降域に区別して曲線を表現した。また、最大付着応力時に横補強筋の付着力が横補強筋の付着有効長さ全域において一様に分布すると仮定し、横補強筋の応力による拘束応力を割裂ひび割れ幅に比例する直線と支圧強度で決定される拘束効果の上限の曲線との交点で表現した。

横補強のある場合の局所付着割裂性状を、横補強のない場合の局所付着応力-すべり量関係に横補強筋による付着増分としての付着応力-すべり量関係を付加させることで定式化した。この関係と主筋すべり量に関する基礎微分方程式を用いた数値計算により、既往の片持梁形式の付着割裂実験試験体の付着割裂強度を求めた結果、全試験体の比較値の平均値が 1.07、変動係数が 19% であり、解析値は既往の実験結果を良好に表現できることを示した。

第 6 章では、定量化した横補強のある場合の局所付着応力-主筋すべり量関係と主筋すべり量に関する基礎微分方程式による数値計算を利用し、付着長、横補強筋比、コンクリート強度、ヤング係数の各構造因子が付着長の大きい平均的な付着割裂性状に与える影響を、パラメトリックな解析により把握し、既往の付着実験結果と比較検討した。また、横補強のない場合と同様に局所付着応力-すべり量関係の囲む面積に着目し、その面積と等価な面積を有する付着応力-すべり量関係を利用して主筋すべり量に関する基礎微分方程式を解くことで、横補強のある場合の付着割裂強度算定式を力学的考察に基づいた簡易な手法により構築した。さらに、付着割裂破壊した試験体を含む既往の部材実験データ 413 体について、局所の最大付着応力を設計用付着応力度で除した付着余裕度、せん断余裕度、最大耐力を曲げ耐力で除した最大荷重比を用いて部材の破壊形式の判定について検討した。

パラメトリックな解析による付着割裂性状の検討において、付着割裂強度は周辺コンクリートの割裂によって確定される場合と横補強筋による拘束応力で確定される場合の 2 種に大別できることを示した。また、付着長が短い場合、付着割裂強度は局所付着応力の最大値をとり、付着長が大きくなるにともなって、横補強筋比による違いはあるものの、付着割裂強度が減少することを示した。横補強筋比が大きくなれば付着割裂強度も増大するが、付着長が短い場合はその関係がほぼ線形的に増大し、付着長が大きい場合には比例関係ではないことを把握した。さらに、解析値が既往の実験因子による付着割裂強度の傾向を的確に捉えていることを確認した。

横補強のある場合の局所付着応力-主筋すべり量関係と等価な面積を有する等価付着ストレス

ブロックを用いて付着基礎微分方程式を解き、コンクリートの割裂による場合と横補強筋の拘束による場合に区別し、付着長の大きさに応じて、付着割裂強度算定式を力学的意味付けに基づいた簡易な手法により導出した。コンクリートの割裂による場合と横補強筋の拘束による場合の各々において、有効付着長を定義し、等価付着ストレスブロックの応力係数を付着長が有効付着長より大きい場合では一定とし、付着長が有効付着長より小さい場合では付着長が大きくなるにしたがって減少する近似式で表した。付着余裕度を用いた破壊形式の判定に関する検討では、横補強のある場合の局所付着応力の最大値を設計用付着応力度で除した付着余裕度によりほぼ降伏前の付着割裂破壊と降伏後の付着割裂破壊を判別でき、本提案方法による付着余裕度により破壊モード判別が可能であることを示した。

第7章では、本論文全体をまとめるとともに、今後の研究課題について述べる。

本論文に関する投稿論文

- [1] 八十島 章, 金久保利之: 補強コンクリート部材の付着割裂性状に関する研究 (その3: 横補強のない場合の付着割裂強度算定式), 日本建築学会構造系論文集, 第567号, pp.117~123, 2003.5
- [2] 八十島 章, 金久保利之, 石川嘉崇: フライアッシュ高強度人工軽量骨材を用いた片持梁型試験体による付着割裂性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.961~966, 2003.7
- [3] 八十島 章, 金久保利之: 横拘束下における補強コンクリート部材の局所付着性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.853~858, 2004.7
- [4] A. Yasojima, T. Kanakubo: Effect of Lateral Confinement in Bond Splitting Behavior of RC Members, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Conference Proceedings DVD, Paper No.644, 2004.8
- [5] A. Yasojima, T. Kanakubo: Bond Splitting Strength of RC Members Based on Local Bond Stress and Slip Behavior, 11th International Conference on Fracture, Proceedings CD-ROM, No.4486, 2005.3
- [6] 八十島 章, 金久保利之: 補強コンクリート部材の付着割裂性状に関する研究 (その4: 横補強のある場合の局所付着割裂性状), 日本建築学会構造系論文集, 第607号, pp.141~148, 2006.9
- [7] 八十島 章, 金久保利之: 補強コンクリート部材の付着割裂性状に関する研究 (その5: 横補強のある場合の付着割裂強度算定式), 日本建築学会構造系論文集, (投稿中)