委員会報告　「コンクリート構造物の補強技術研究委員会報告」

上田　多門[*1]・三井　雅一[*2]・上原子　晶久[*3]

委員長	上田 多門	北海道大学		
幹事	呉 智深	茨城大学	金久保 利之	筑波大学
WG 主査	上原子 晶久	弘前大学	三井 雅一	茨城大学
委員	犬飼 端郎	国土技術政策総合研究所	毛井 崇博	竹中工務店
	小林 朗	日鉄コンポジット	斉藤 仁	太平洋マテリアル
	佐野 正	ショーボンド建設	佐藤 貢一	奈良建設
	佐藤 靖彦	北海道大学	佐藤 裕一	京都大学
	高橋 順	電気化学工業	田才 昇	横浜国立大学
	中野 克彦	東京理科大学	野島 昭二	日本道路公団
	萩尾 浩也	大林組	林 啓司	安部工業所
	等 俊一	日鉄防蝕	古田 智基	バンドー化学
	水越 睦視	住友大阪セメント		
旧委員	黒木 康貴	太平洋マテリアル	寺村 悟	電気化学工業
通信委員	磯 雅人	東急建設	TAN Kiang Hwee	National University of Singapore
事務局	井上 和久	日本コンクリート工学協会		

（50 音順）

1．はじめに

コンクリート構造物の主な補強工法として，接着工法，巻立て工法，増厚工法などがあげられる。これらの工法には，種々の補強材が用いられ，補強材と既設構造部との付着，および，補強材の力学的特性が，補強構造物の力学的特性に大きな影響を及ぼす。補強材には，鉄筋コンクリート，プレストレストコンクリート，その他のコンクリート系材料，鋼板，さらに連続繊維シートや板またはグリッドなどがある。これまで多くの研究成果が蓄積されつつあるが，付着界面でのすべり，はく離現象などの応力伝達機構がまだ完全には解明されていないこと，補強材の種類が多くその力学的特性も様々であることから，補強部材の耐力，終局変形，剛性などの力学的特性を精度よく評価する手法の開発がまだ必要である。このような背景の下，本研究委員会は 2001 年度に設置され，付着界面の応力伝達機構，補強部材の力学的特性を明らかにし，合理的な補強設計法の確立に資する知見の提供，補強材や補強設計法の最適化に関する提言を行うことを目的とし，局所特性WG（三井主査）と部材特性WG（上原子主査）を設置して活動を行った。次章で委員会報告書の概要を示す.

2．委員会報告書の概要

報告書は 7 章からなっており，2 章において，現在適用されている一般的な補強工法の分類と，その中で報告書が対象とした補強材と既設構造部との間に付着界面を有する補強工法を明示した. 3 章において，付着界面でのミクロ的（局所）応力伝達機構を明らかにし，それに基づき，4 章ではマクロ的（巨視的）付着特性を数値的に予測する手法を示した.5 章では付着特性と関連付けさせながら補強後の部材の特性を示し，6 章では，3 章から 5 章までの内容を基に，補強後の部材の特性を念頭に置いた場合の最適な補強材の特性と補強効果を提示している. 2.1 から 2.4 で 3 章から 6 章の概要を紹介する.

*1 北海道大学助教授　大学院工学研究科　工博　（正会員）
*2 茨城大学研究員　工学部　博士（工学）　（正会員）
*3 弘前大学助手　理工学部　博士（工学）　（正会員）

2.1　各補強工法における局所付着特性の検討

各補強工法における力学的メカニズムを検討すると，母材であるコンクリート部材に作用する力を補強材が分担し補強効果を発揮する点については補強工法に因らず同一である。つまり，補強材がコンクリート部材に対する作用力を分担する力学的メカニズムを解明することが補強工法における補強効果を正確に評価し，最適な補強設計が行えるため重要な検討課題であるといえる。

これまでの補強技術に関する研究報告は，図－１に示すように，「要素レベル」そして「部材レベル」の研究に大別される。要素レベルにおける検討では，主として補強材とコンクリートとの間の付着特性について，とくに付着界面における力学的挙動を正確に把握すべく供試体を工夫し実験的な検討が行われている。また，部材レベルにおける検討では，曲げ性能やせん断性能などを，より実大の構造物に近い形状にて供試体を作製し実験が行われている。さらに，この部材レベルにおける報告では，有限要素法などの数値解析手法を用いて補強を行った構造部材の力学的挙動に関してシミュレーションが試みられている。

本報告書では，補強工法を，増厚工法，連続繊維シート接着工法，鋼板接着工法，FRP 板・グリッド接着および FRP 吹き付け工法に分類し，それぞれの補強工法について，これまでの「要素レベル」における研究報告を以下の３点について纏めるとともに最新のデータを報告した。

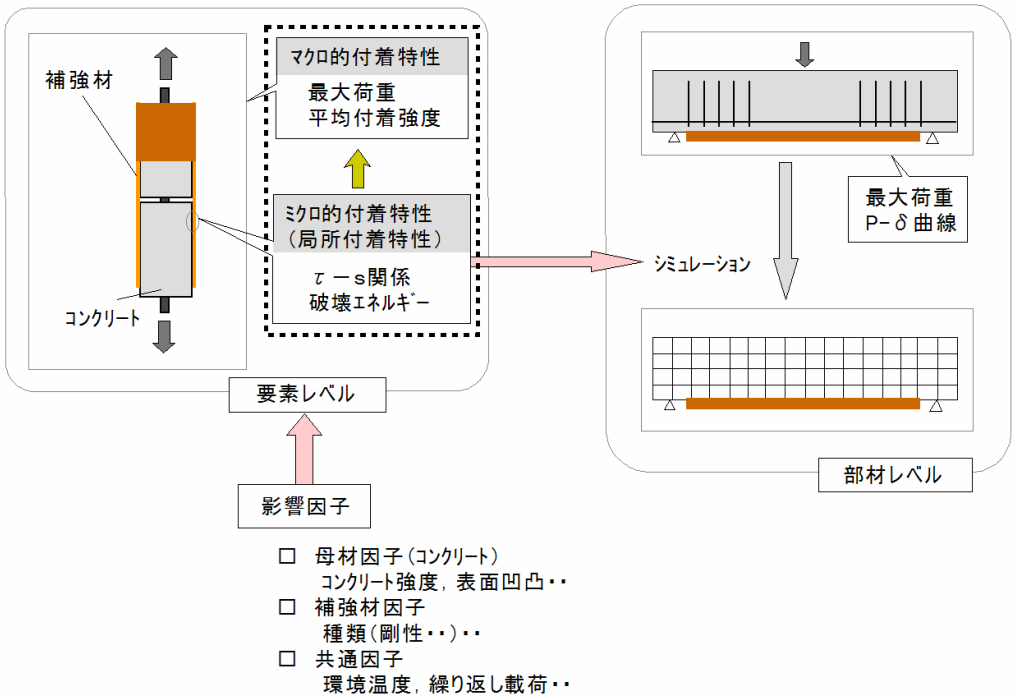
１）付着界面の材料構成

２）付着界面における局所付着特性および影響因子の検討

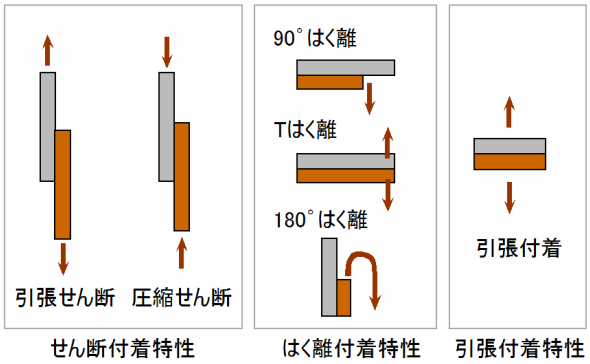
３）今後の課題

１）では，各補強工法に使用する構成材料を挙げ，構成材料間の付着界面について付着特性を検討した。

２）では，補強効果に最も影響を与える付着界面について，その付着特性を「要素レベル」にて検討を行った既往の研究を纏めた。なお，本章ではコンクリートと補強材との付着界面における付着特性を「マクロ的（巨視的）付着特性」と「ミクロ的（局所）付着特性」に分けて検討を進めた（図－１参照）。前者は，付着試験供試体から得られる最大荷重（破壊荷重）や



図－１　要素レベルおよび部材レベルにおける付着特性

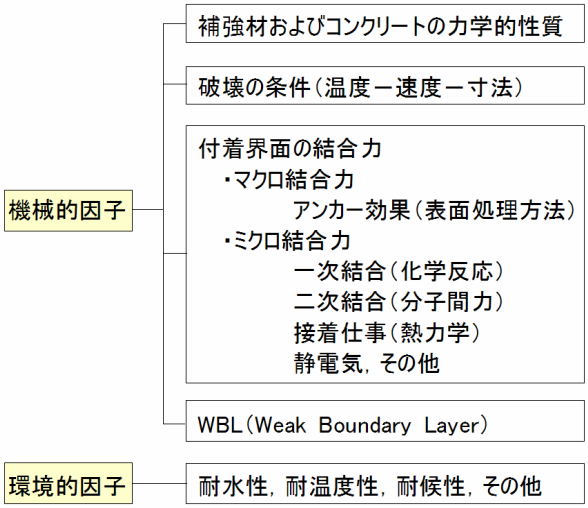


図－２　付着特性の分類 [1)]

その最大荷重を付着面積で除した平均付着強度などを示す。それに対し，後者は，付着界面のある一点における局所的付着特性を示し，例えば，局所的せん断付着応力τ－すべり量ｓ関係や破壊エネルギーG_f などがそれに当たる。この局所的付着特性は，図－１に示すように，部材レベルの力学的挙動を有限要素法解析などの数値解析手法を用いてシミュレーションを行う場合，付着界面要素の入力値として直接的に使用することができるため，現在，盛んに研究が行われている。本章では，各補強工法について，この局所的付着特性の研究の現状についても整理した。なお，本委員会では，補強材の種類に因らない付着特性を検討するうえで，①作用力の方向に応じたコンクリートと補強材との付着特性の分類および②その付着特性に及ぼす影響因子の抽出を行い付着特性の調査・研究を進めた。それぞれについて以下に詳細を示す。

(1)　作用力の方向に応じた付着特性の分類

作用力の方向に応じたコンクリートと補強材の付着界面特性は，接着工学における分類方法を参考にすると図－２のように分類できる [1)]。一つは，付着界面に対して水平な方向に作用力が加わるせん断付着特性，一つは，付着界面に対して垂直方向に開口させるような作用力が加わるはく離付着特性，一つは，付着界面に対して垂直方向に面的に作用力が加わる引張付着特性である。また，破壊力学においてクラック先端付近の破壊性状の分類を参考にすると，開口型特性(Mode-I)および面内せん断型特性(Mode-II)



図－３　付着特性に支配的な影響因子

とに分類される。ここで，開口型特性は図－２のはく離付着特性（T はく離）を示し，面内せん断型特性はせん断付着特性を示す。そこで，報告書では，とくに局所付着特性に関する報告である 3 章については付着特性を図－２に示すせん断付着特性，はく離付着特性および引張付着特性に分類し，それぞれの付着特性について既往の研究報告および最新の研究成果について纏めた。

(2)　付着特性に及ぼす影響因子の抽出

図－３に示すような付着特性に支配的な機械的因子および環境的因子について，補強工法毎に抽出を行い，それぞれの影響因子が付着特性に及ぼす影響程度について既往の研究報告をもとに検討を行った。機械的因子としては，補強材およびコンクリートの力学的性質，破壊の条件，付着界面の結合力，WBL（Weak Boundary Layer）が挙げられる。補強材およびコンクリートの力学的性質については，例えば，補強材の弾性係数や剛性，コンクリートの強度などがそれにあたる。破壊の条件としては，付着界面において破壊が生じる際の温度，載荷速度そして部材寸法の影響およびそれらの複合的な影響を示す。付着界面の結合力は，マクロ結合力およびミクロ接合力として分類できる。コンクリートと補強材との付着特性には，それら結合力が複合的に作用するものと考えられる。とくに，

前者のマクロ結合力はアンカー効果と呼ばれる力学的作用により生じ，コンクリートの表面凹凸による噛み合い力を示す。機械的因子としてWBL もあげられる。この WBL は付着界面の脆弱層を示し，例えば，コンクリート表面のレイタンスや作業不良などにより生じた欠陥などがそれにあたる。これら外力による破壊に対する影響が機械的因子であるのに対し，環境的因子は環境条件による破壊に対する影響因子といえる。機械的因子に対して最適な付着特性を得るような補強技術であっても環境的因子に対して最適な付着特性を有するとは限らない。この環境的因子は，主として補強材に使用する材料の物理的および化学的性質に依存する。

そして３）の今後の検討では，１）および２）の検討を通して，各補強工法において今後の課題について報告を行った。

ここでは，各補強工法における局所付着特性のまとめと今後の課題について以下に要約する。

(1) 増厚工法

増厚工法の界面付着性状に関する研究は定性的なものが主で定量的な研究は少ないのが現状である。報告書では，既往の研究から界面性状に影響する因子として，コンクリートの表面粗さ，乾湿状態，打ち継ぎ方向などについて概説した。なお，定量的な研究として PCM（ポリマーセメントモルタル）を用いた下面増厚工法の付着面内せん断はく離に関する研究が行われ，その付着メカニズムの解明が行われている。今後，多くの定量的な研究が行われデータが蓄積されることにより，増厚工法の設計精度が向上するものと期待される。

(2) 連続繊維シート接着工法

阪神大震災以降，連続繊維シート接着工法に関する技術開発は多くの企業，研究機関において精力的に行われ，比較的新しい補強技術であるにもかかわらず，その信頼性，安全性のレベルは格段に向上している。報告書では，コンクリートと連続繊維シートとの付着特性に関する要素レベルの実験を行った既往の研究を調査し，その影響因子ごと概説した。さらに，これまで提案されてきた平均付着強度および局所付着特性（局所せん断付着応力τ－すべり量ｓ関係）の定量式についてまとめた。また，連続繊維シート接着工法の付着特性について，まだ解明されていない問題点として, 1)温度応力発生メカニズムの検討, 2)水分移動の阻害による付着界面の劣化に関する検討，そして，3)新しい樹脂材料を用いた場合の破壊性状および耐久性の検討を取り上げた。

(3) 鋼板接着工法

報告書では，鋼板接着工法の施工手順を説明しながらその接着層の構成について説明した。コンクリートと鋼板との局所接着特性について，接着幅，接着長，コンクリート強度，繰り返し載荷の影響，コンクリートの表面状態などの影響因子について研究成果を纏めた。今後の課題としては，以下のように纏めた。1)鋼板接着のはく離現象に関する界面はく離エネルギーなどのエネルギー的検討, 2)実際の施工ではコンクリートアンカーを鋼板の位置確保そして樹脂の注入圧に対して使用されるが，このアンカーの接着特性に対する影響の検討，そして，3)これまでは定性的な研究が多いが定量的な評価を進め，設計へのフィードバックの検討が今後の課題である。

(4) FRP 板・グリッド接着および FRP 吹き付け工法

FRP 板・グリッド接着および FRP 吹き付け工法は，ほかの補強工法に比べ新しい工法であり，これら工法における補強材とコンクリートとの局所付着特性を検討した報告は，ほとんどない。要素レベルの実験を調査したところ，一面せん断試験や二面せん断試験によるマクロ的付着性状の報告が確認され，報告書では，このマクロ的付着特性から間接的に局所付着特性を推察した。今後は，これまでの連続繊維シート接着工法などの研究成果をもとに局所付着特性を定量的に検討する必要がある。

2.2　局所付着特性による要素レベルの応力伝達のシミュレーション

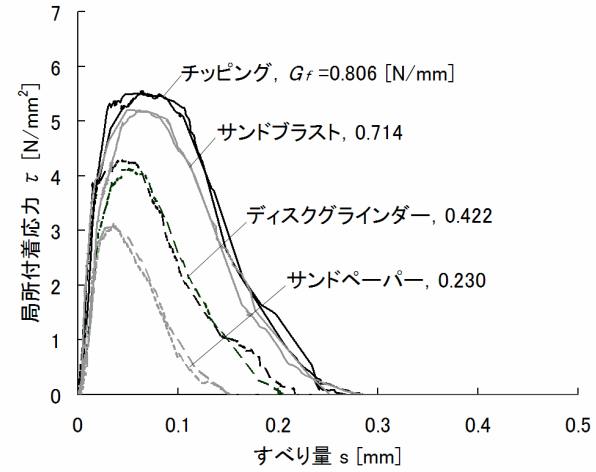
図－１に示すように，コンクリート構造物の補強技術に関する研究は，「要素レベル」そして「部材レベル」の研究に大別される。部材レベルにおける研究では，有限要素法などの数値解析手法を用いて部材の曲げやせん断などの力学的挙動に関して力学的シミュレーションが報告されている。このシミュレーションを精度良く行うためには，補強材とコンクリートとの界面特性を正確に入力する必要がある。その界面特性として，一般的に破壊エネルギーや局所付着応力τ－すべり量ｓ関係などのミクロ的付着特性（局所付着特性）を用いてシミュレーションが行われている。この局所付着特性は，補強材とコンクリートとの界面状態や加力方向を単純化した要素レベルの実験により正確に同定される。局所特性 WG では，この得られた局所付着特性を界面特性値として入力した数値解析により要素レベルの実験をシミュレーションして，マクロ的付着特性を再現することが可能であるかについて検証を行った。なお，検討を行った補強工法は(1)連続繊維シート接着工法および(2)鋼板接着工法である。それぞれの検証結果を以下に要約する。

(1)　連続繊維シート接着工法

報告書では，せん断付着特性およびはく離付着特性のそれぞれについて検証を行った。ここでは，前者のせん断付着特性について報告する。2 面せん断付着試験によりコンクリートの表面処理方法を変化させた場合の局所せん断付着特性（局所的せん断付着応力τ－すべり量ｓ関係）を図－4に示す。これら得られた局所付着特性を用いて付着試験を再現する数値シミュレーションを行った。FRP シートのひずみ分布そして最大荷重の比較をした結果，精度良く表現することが可能であることを確認した。

(2)　鋼板接着工法

報告書では，樹脂層のせん断変形を考慮した応力解析および FEM による数値解析により検証



図－４　局所せん断付着特性

を行った。ここでは，前者の応力解析結果について報告する。解析対象は，両引き供試体の上側 1/2 の範囲とし，力と変形の釣り合い条件に基づき，樹脂層のせん断変形を考慮して鋼板に作用する力の分布を求め，次いで任意区間の鋼板の作用力の変化量からその区間における接着応力度を求める方法とした。解析を行った結果，その計算値は実測値の応力分布傾向をほぼ表現しているといえるが，鋼板端部付近では計算値と実測値とにずれを生じ，その差は作用力が大きい場合の方が大きくなっている。このような差異を生じた原因として，応力解析では樹脂層およびコンクリート部分ともに断面内の応力分布が一様であると仮定しているが，鋼板端部付近では，この仮説が成立しないことに因るものと考えられる。また，実測値から鋼板端部付近では計算値に比べて大きな接着応力度が発生していることから，端部における応力集中が鋼板の接着破壊の原因でないかと考察できる。

2.3　各補強工法の部材特性に関する検討

部材特性 WG では，連続繊維補強，鋼板接着，コンクリート増厚の各工法の研究開発動向について，既往の研究や委員各自が行った数値解析結果に基づいてとりまとめを行った．この作業を進める上で留意したことは，補強後の部材特性に，補強材の付着やはく離に代表されるミクロ的特性がどのように影響するのかを明らかに

することである．以下に概略を述べる．

(1)　連続繊維補強工法

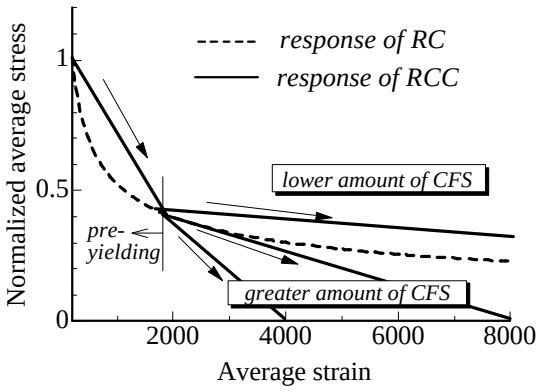
連続繊維シート補強部材の一軸引張付着性状

これまで，連続繊維シート補強後の曲げ性状などについては，実験・解析的な検討が多く行われてきた．しかし，変形，耐力を総合的に予測するために不可欠となる一軸引張付着性状の評価については，これまで検討が行われてきていなかった．そこで，シート補強 RC 部材におけるテンションスティフニング効果とひび割れ間隔予測式について検討を行った．

テンションスティフニング効果については，実験，並びに解析結果より得られたテンションスティフニング曲線を示した（図－５）．すなわち，シート補強後のテンションスティフニングは，鉄筋降伏後において，シートの補強量が影響していることを示した．ひび割れ間隔予測式については，CEB-FIP のひび割れ間隔予測式を改良して，シート補強後でも適用可能なひび割れ間隔予測式を示した．ここで示したひび割れ間隔予測式は，シートとコンクリートとの局所付着特性，すなわち付着応力とすべりとの関係を考慮したものである．

連続繊維シート補強部材の曲げ性状

シート補強 RC 部材の曲げ性状をシートとコンクリートの付着応力とすべりの関係を考慮した有限要素解析手法とその結果を示した．この結果に基づいて，連続繊維シートによる曲げ補強に関する簡便な設計手法と設計例について検討を行った．



図－５　テンションスティフニング曲線

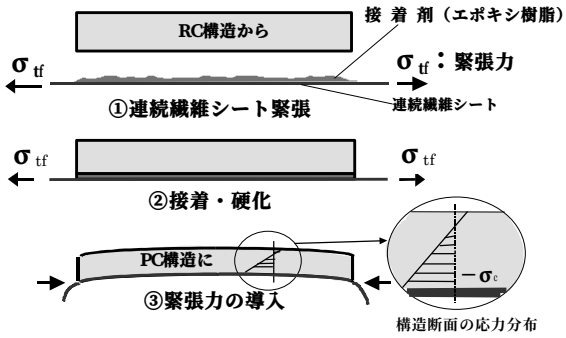
連続繊維シート補強部材のせん断補強効果の評価

これまで，シート補強 RC 部材のせん断性状については多くの検討が行われてきた．この中でも，部材特性 WG では，せん断補強効果の評価手法について調査することにした．対象としたのは，修正圧縮場理論よる解析手法，有限要素解析による手法，及びマクロモデルによる解析手法の３つである．共通のバックデータを用いて各解析手法について計算を行い，その結果を比較した結果，シートとコンクリートとの付着応力とすべりの関係を適用した解析手法においては，シート付着の有無によって終局せん断耐力に差が生じること，及びシート－コンクリート間の界面破壊エネルギーは，シート補強後のせん断性状に大きく影響していることを示した．

連続繊維補強材を用いた補強工法の開発動向

例えば，連続繊維シート接着工法に関しては，はく離などの影響により，構造性能が十分に発揮されな場合がある．このような連続繊維補強材の有する欠点を補いつつ，補強材の力学的性能を最大限に引き出す様な工法の開発が進んでいる．部材特性 WG では，このような比較的新しい工法について，それらの開発動向を紹介した．工法ごとに概略を以下に示す．

主に RC 床版の補強を目的として，近年，連続繊維シート・板の緊張接着工法が開発されている（図－６）．この工法では，樹脂硬化後にシートに与えた緊張力を解放することで，部材にプレストレスが導入された PC 構造形式となる．連続繊維シートを緊張接着することにより，部材



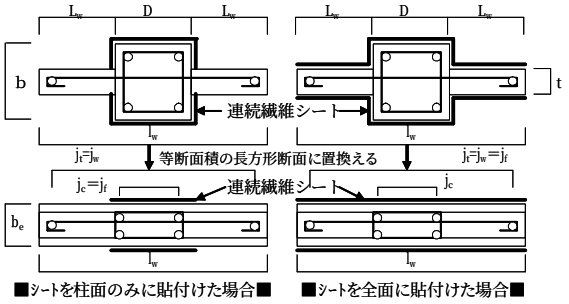
図－６　連続繊維シート緊張接着工法

降伏荷重の向上や曲げひび割れ幅の抑制が期待できる．

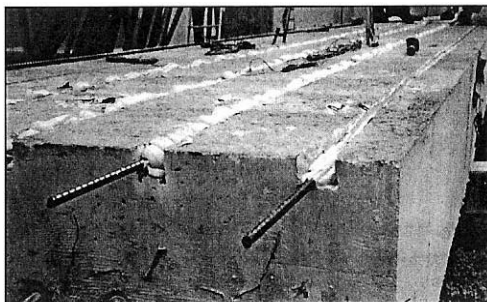
腰壁付きの RC 柱を連続繊維シートで補強する工法は近年提案されたものであり，この工法の有効性については，これまでの研究により明らかにされている．しかしながら，シート補強後のせん断耐荷機構については，明らかにされていない部分が多い．そこで，シート補強後の腰壁付き RC 柱のせん断耐力について，シートのはく離耐力に着目し，その評価式について紹介した．この評価式は，腰壁付き RC 柱を長方形断面にモデル化することにより提案されたものである（図－７）．検証の結果，実験値を満足のゆく精度で予測しうることを示した．

炭素繊維強化プラスティック板をはりの底面に貼り付けて部材の曲げ性能を向上させる工法については，ここ数年，日本での施工例が増加している．この工法について，実際の補強設計に役立てるための調査結果を示した．曲げ補強で重要となる板端部の定着方法や疲労性状などについて情報を提供した．

板状や棒状の連続繊維補強材を既設構造物の表面に設けた溝に埋め込んで樹脂などの充填材を介して部材の一体化を図る工法が近年，米国やスイスなどで，開発されている[2)]（図－８）．日本では，施工実績が無いため，主に海外での研究成果について紹介した．この方法では，補強材をコンクリート内に埋め込むことで，シート補強の場合と比較してより高い付着強度が得られるため，シート補強の欠点である補強材のはく離をほぼ完全に抑制できるという大きな利



図－７　シート袖壁付き柱のモデル化



図－８　補強材埋め込み工法

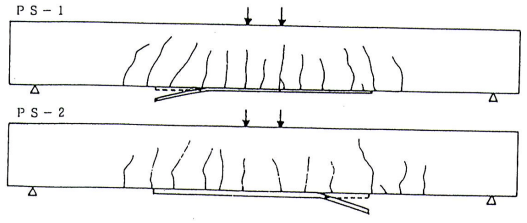
点がある．また，コンクリートの表層部分を切削する必要があるが，シート補強と異なり，全面をケレンする必要が無く，施工上の利点も大きい．しかしながら，補強材とコンクリート間との付着応力伝達機構や補強設計手法などについては，研究開発の途上であり，これらを明らかにすることが今後の検討課題である．

一方，連続繊維シート補強において，シートとコンクリート間の付着特性を改善することにより，シートのはく離を抑制する研究も行われている．シートの付着強度を向上させるため，シート接着前の表面処理にサンドブラストやウオータージェットなどを適用して，コンクリート表層部の粗度を大きくした場合の検討が紹介されている．この場合，シートの付着強度やはりの曲げ補強効果は表層部の粗度に依存する結果を示している．また，低弾性の含浸樹脂を用いた研究例や，不陸修正材を厚めに塗布した後にシートを接着してシートのはく離を抑制した検討例も紹介されている．このような方法は，すでに実用化されているものもあり，シートのはく離抑制を比較的簡便に行うことができる．

(2)　鋼板接着工法

<u>曲げモーメントを受ける補強部材</u>

RC はりの底面に鋼板を接着した部材において，鋼板の定着長が短い場合には，鋼板の端部が面外にはく離して終局状態に至ることがある（図－９）．このような面外はく離は，連続繊維シート補強の場合の面内はく離と異なり，鋼板接着補強や連続繊維プラスティック（FRP）板補強の場合に特有のはく離破壊モードである．こ



図－９　鋼板の面外剥離状況

の原因については，曲げひび割れなどの影響により，鋼板端部での付着応力が急激に増加することが一因と考えられる．

せん断力を受ける補強部材

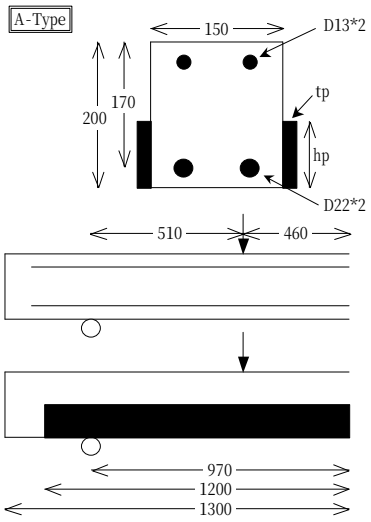
鋼板を RC はりの側面に接着してせん断補強を行った研究例が紹介されている[3)](図－１０)．この場合は，鋼板がはらみだして面外変形を生じてせん断破壊に至ること，及びはり高方向に対する鋼板の高さがせん断補強効果に影響することを示している．

有限要素法を用いた部材の性能評価

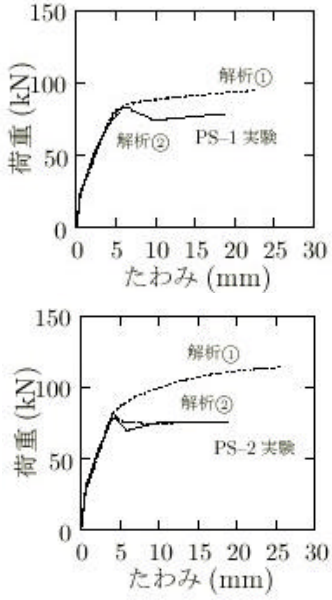
鋼板接着により曲げ補強された RC はりの２次元非線形有限要素解析結果について紹介している．解析例では，(1)鋼板のはく離が生じないと仮定した場合と，(2)鋼板のはく離を考慮した場合とについて検討している．この結果，鋼板のはく離を考慮した場合には，実際の挙動を精度良く予測しうることを示した（図－１１）．

(3)　コンクリート増厚工法

コンクリート増厚工法においては，設計・施



図－１０　鋼板によるせん断補強



図－１１　有限要素解析結果の一例

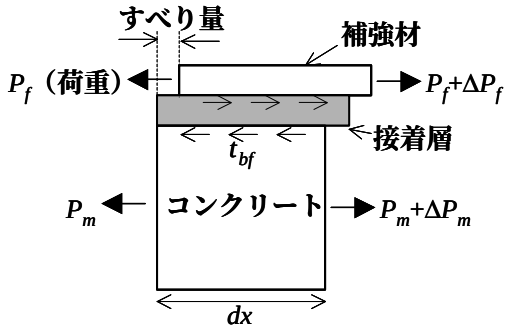
工の合理化への取り組みが進んでいる．特に，床版などを対象とした下面増厚工法では，収縮ひび割れを制御するためのポリマーセメントや高じん性モルタルを既設構造物の表面に吹き付ける工法などが開発されている．

増厚部のコンクリートと既設部のコンクリート間の応力伝達に関する研究は途上である．本報告書では，既往の研究事例を調査して，特に RC はりの下面増厚補強された部材の数値解析手法について紹介している．これらの多くは，既設部と増厚部の間に接合要素を設けて，その要素にバイリニア型やカットオフ型の付着応力とすべりとの構成関係を与えて数値計算を行っている．今後，既設部と増厚部との界面における付着特性のデータが蓄積されれば，数値計算精度の向上が期待できる．

2.4　補強材および補強効果の最適化

(1)　マクロ付着特性を最適化するためのミクロ付着特性

要素レベルにおけるマクロ付着特性に対しては，ミクロ付着特性とともに各種の因子が影響することにより，最大荷重やすべり量に代表される様なマクロ的特性が変化する．ここでは，マクロ的付着特性として界面破壊エネルギー，その影響因子として補強材の剛性（厚さと弾性



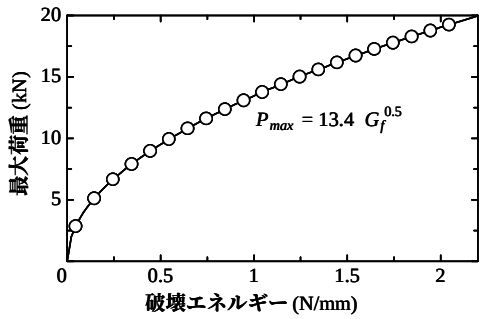
図－１２ 解析対象のイメージ

係数との積）を抽出し，これらが独立に変化する場合のマクロ的付着特性に及ぼす影響を解析により検討する．図－１２に解析対象のイメージを示す．

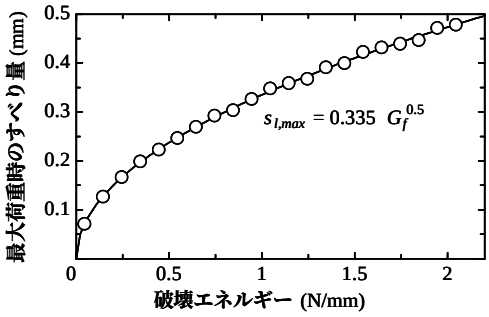
図－１３は界面破壊エネルギーと最大荷重，並びに最大荷重時のすべり量の関係を示したものである．この図より，マクロ的な付着強度を増加させるためには，破壊エネルギーを増加させることが有効であると言える．ただし，破壊エネルギーが増加することにより，付着応力の分布する区間を表す有効付着長が変化する場合があるので，補強材の付着長が有効付着長よりも大きくなければならない．一方，すべり量については，界面破壊エネルギーの平方根に比例して大きくなる結果が得られた．これは，図－１４に示した様に，本検討例では，数値解析において付着構成則を相似で与えているため，有効付着長が界面破壊エネルギーの大小によって変化しないためである．

図－１５は，界面破壊エネルギーを一定にした場合の補強材の剛性と最大荷重，並びに最大荷重時のすべり量との関係を示したものである．これより，図－１４の検討例と同様に補強材の剛性を大きくすることも，マクロ的付着強度を増加させることに有効であることが分かる．しかし，この場合は界面破壊エネルギーの場合と異なり，荷重端すべりは補強材の剛性によらず一定となる．

以上の検討より，付着強度やすべり量などのマクロ的付着特性について要求性能を満たすためには，補強材の剛性のみならず界面破壊エネルギーとの関係を適切に考慮する必要があると言える．

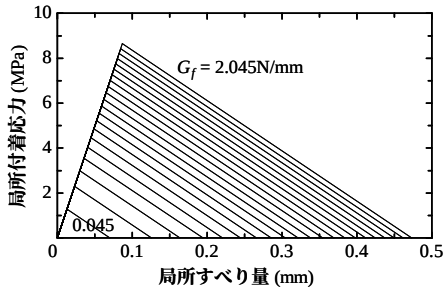


(a)　最大荷重



(b)　すべり量

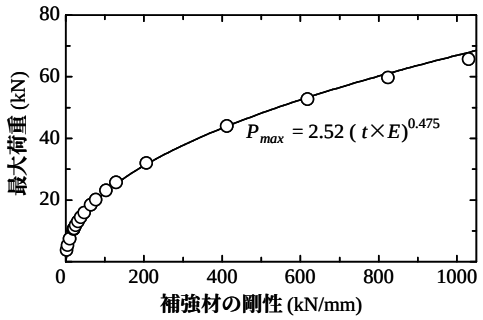
図－１３ 界面破壊エネルギーと最大荷重，並びに最大荷重時のすべり量の関係



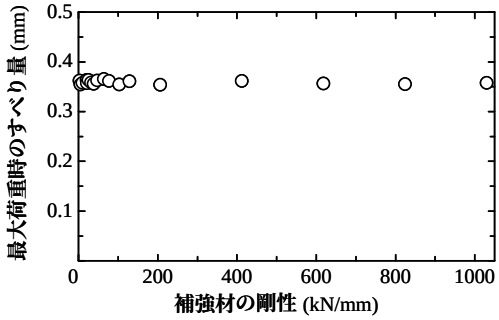
図－１４　付着構成則

(2)　部材の力学特性を最適化するためのミクロ付着特性と補強材の力学特性

(1)節と同様の検討を，連続繊維シート補強後のせん断耐力について行った例を示す．なお，ここでの検討例，及びせん断耐力の算定方法は，既往の研究に従った．表－１に計算条件を，図－１６に界面破壊エネルギーとシートの負担するせん断耐力との関係をシートの厚さ t_f ごとに示した．図より，シートの厚さ，すなわち剛性が小さい場合には，界面破壊エネルギーを増加させても，せん断耐力は増加せずに減少している．これは，数値計算上，シートのはく離条件



(a)　最大荷重



(b)　すべり量

図－１５　補強材の剛性と最大荷重，並びに最大荷重時のすべり量の関係

が満たされる前に破断するという未はく離破断が生じているためである．しかしながら，シートの剛性が大きい範囲では，界面破壊エネルギーが増加してもシートのはく離と破断が混在する破壊モードに転じるため，せん断耐力は大きくなる傾向にある．

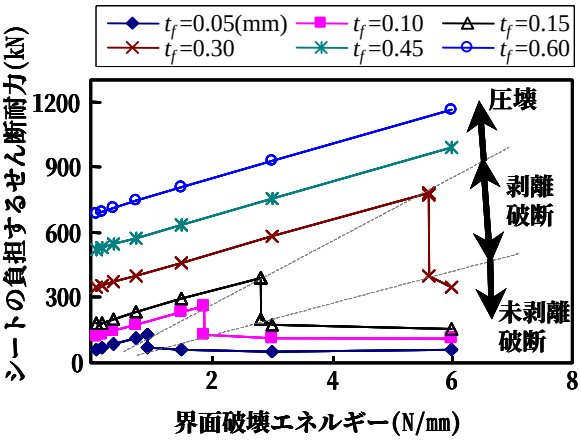
以上については，本検討の範囲内での傾向である．しかしながら，部材特性の最適化，すなわち所望の部材性能を得るためには，界面破壊エネルギーと補強材の剛性や補強量とのバランスを考慮することの重要性は示すことができたと理解している．

3．おわりに

委員会報告書では，従来，接着工法，巻立て工法，増厚工法と工法別に議論されてきた接着界面の性状を横並びで同一の土俵で検討した．工法別というよりは，はく離現象（あるいは付着特性）別に議論すべきであることを示した．ミクロ的付着特性をモデル化し数値計算を行えば，マクロ的付着特性や補強後の部材特性をシ

表－1　計算条件

部材の高さ　(mm)	350
部材の有効高さ　(mm)	300
シートの弾性係数　(GPa)	240
シートの引張強度 (MPa)	3000



図－１６　界面破壊エネルギーとシートの負担するせん断耐力との関係

ミュレーションできることも明らかにした．これらの結果に基づき，マクロ的付着特性および補強部材特性を最適化するための，ミクロ的付着特性もしくは補強材の力学特性の例を提示した．

以上の成果は，世界的にも初めて明らかにされたものが多いことに鑑み，委員会報告書の英訳版を刊行するとともに，委員会成果報告会を兼ね，国際シンポジウムを世界各国の著名な研究者を招聘して開催した．シンポジウム論文集及び英訳版報告書も合わせて参照いただけると幸いである．

参考文献

1) 日本接着学会編：接着ハンドブック，第 3 版，日刊工業新聞社，1996.
2) Rizkalla, S. and Hassan, T.: Various FRP Strengthening Techniques for Retrofitting Concrete Structures, FRP Composites in Civil Engineering, Vol. II, pp.1033-1040, Dec. 2001.
3) Adhikary, B. B. and Mutsuyoshi, H.: Nonlinear FEM Model and Design Formula for Externally Bonded Steel Plates for Shear Enhancement of RC Beams, Proceedings of JCI, Vol.23, No.1, 2001.
4) 新保学幸，下村　匠，丸山久一，上原子晶久：連続繊維シート補強部材のせん断耐力に関する感度解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.3，pp.313-318，2000.