

技術会議報告 T3-2 新材料のプレストレストコンクリートへの適用

今井 義明*¹・加藤 博人*²・睦好 宏史*³

1. 全体概要

新材料のセッションには、テクニカルセッション 17 件、ポスターセッション 8 件の合計 25 件の発表があった。発表件数は、国内 19 件、海外 6 件（イギリス 2 件、アメリカ、オランダ、カナダ、ロシアがそれぞれ 1 件）であり、本セッションの 76 % が日本からの発表であった。国内での開催とはいえ、この数字は他のセッションと比べてもかなり高いものである。新材料の分野においては、日本の研究開発が非常に盛んであり、関心の高いことがうかがわれる。

本セッションでは、ロシアからの 1 件を除いては、すべて FRP（連続繊維補強材: Fiber Reinforced Plastics）に関する発表であった。このことより、PC に関する新材料の話題は FRP が中心であり、新材料としていかに期待され、注目を集めているかがわかる。FRP の中でも、CFRP（炭素繊維補強材）および AFRP（アラミド繊維補強材）に関する発表が、GFRP（ガラス繊維補強材）に関するものに比べてやや多く、優勢の感がある。内容としては、FRP の材料特性および FRP を用いた PC 梁の曲げ耐力やせん断耐力に関する実験、解析などの基礎的研究に関するものが約 7 割を占めたが、FRP を PC 緊張材や斜張橋の斜ケーブルに使用した実橋の設計・施工についての発表が 6 件もあり、

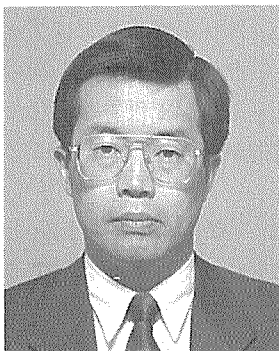
FRP が、研究段階でとどまることなく、すでに実用段階に移行しつつあることがわかった。ただ、現状ではゴルフ場内の小規模橋梁のように実験的なものが多く、また設計・施工指針も十分確立しているとはいえない。今後ますます研究の発展が望まれる。

テクニカルセッションは、19 日（火）の午後、2 回に分けて約 4 時間にわたり、Room D で行われた。座長は、それぞれ、前半が C.J. Burgoyne 氏（ケンブリッジ大学）と加藤博人氏（建設省）、後半が S.H. Rizkalla 氏（マニトバ大学）と睦好宏史氏（埼玉大学）が務めた。長時間のセッションであるにもかかわらず、会場は熱心な聴講者でほぼ埋めつくされ、盛況の内に発表が終了した。

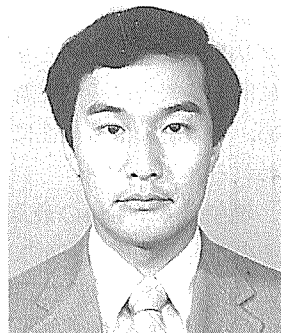
2. 現状と今後の動向

前述のとおり、新材料のセッションはそのほとんどが FRP に関する発表である。この分野の研究においては、我が国が最も進んでいるものと思われ、発表件数も多く、内容も興味深いものが多い。以下にまず国内における実橋への適用例、基礎的研究について各々具体的に述べる。

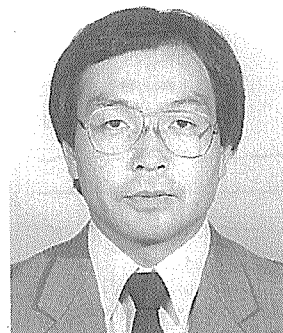
我が国では FRP の実用化が進んでおり、本セッションにおいても試験施工や実施工についての発表などにその動向が顕著に現われている。



*¹ Yoshiaki IMAI
大成建設(株)
土木設計第 2 部
第 3 室 室長



*² Hiroto KATO
建設省
建築研究所
第 4 研究部



*³ Hiroshi MUTSUYOSHI
埼玉大学
工学部
助教授

FRPの非磁性に着目したものとして、航空機のコンパスをチェックするためのメンテナンスエプロンのPC舗装にFRP緊張材を適用する実験に関して報告されている。この舗装には、磁気偏差が極めて小さいことが要求されており、CFRPやAFRPを用いてその適用性が確認されている。また、鋼製の定着具を用いずにグラウトの付着で定着し、完全な非磁性化を図っている。

ゴルフ場内のPC浮橋にFRPを適用した実例においては、耐久性の向上、函体自重の軽量化、製作作業の省力化を図るため、PC浮橋を構成するPC函体にPC緊張材や鉄筋の代わりにAFRPを使用している。これは、FRPの軽量、耐腐食性に着目した利用である。同様に、FRPの耐腐食性に着目して、CFRPを鉄筋の代わりにプレキャスト製橋部材に適用するための研究が報告されており、CFRPの橋部材への適用可能性が確認され、試験施工が実施されている。

FRPを緊張材として橋梁に本格的に使用した例として、CFRPをPCラーメン橋のカンチレバーケーブルに適用し、その設計手法、施工方法、緊張管理手法について報告したものがある。橋長111.0m(支間長75.0m)は、これまでFRPを用いた橋梁の中でも最大規模である。これまでのFRPを用いた橋梁の設計では、安全性の観点から終局時の破壊形態をコンクリートの圧縮破壊としていたが、この橋では、終局時の破壊形態をCFRPの破断として設計を行っている。

FRPを緊張材として使用する場合、定着方法が重要な問題であるが、本セッションでは、膨張材を用いた定着システムについて報告されている。膨張材は硬化すると400kgf/cm²以上の膨張圧を生じ、これにより応力集中の少ない確実な定着が可能であるとしている。CFRPを用いた引張試験より十分な定着性能が認められており、200万回の疲労試験でも問題ないことが確認されている。

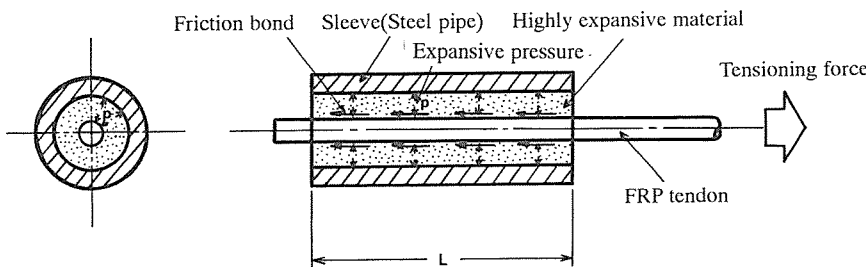


図-1 新しく開発されたFRP定着装置

FRPの緊張材への実用例は増加している一方で、設計手法や施工方法については確立されていないのが現状である。現在、建設省の新素材総プロにおいて、新素材の実用化への研究が行われているが、その研究成果が2件報告されている。1件は、FRP緊張材の材料特性に

ついてのものである。炭素、アラミド、ガラス繊維などの5タイプのFRPを用いて、引張特性、劣化促進、リラクゼーション、付着性能についての試験が行われている。また、緊張材とシース間の定着効率や摩擦係数についても試験されている。

FRP緊張材を用いたPCの動的特性についての報告では、炭素繊維およびアラミド繊維を用いて、曲げ耐力、曲げ疲労、せん断耐力に関する実験を行い設計方法を提案している。これら2件の結果をまとめた「FRP緊張材を用いたPC橋の設計施工指針」が土木学会コンクリート委員会にて作成される予定であり、今後新素材の実用化に大きく貢献すると思われる。

FRPを用いたPC梁の基礎的な研究では、以下のものが報告されている。

CFRPおよびAFRPを用いたPC梁の曲げ疲労試験についての試験では、上限荷重がひび割れ荷重とほぼ等しい場合、200万回疲労試験においても問題が認められず、残存破断強度も静的引張強度とほぼ等しいとされている。200万回の疲労強度は静的な終局強度に比べて、AFRPで65~70%、CFRPで80%となっている。疲労耐久性は、初期導入力ではなく、繰り返し荷重の上限値により決まるとされている。

引張力とせん断力の作用するFRPロッドの破壊基準に関する研究においては、曲げせん断領域におけるひび割れ部分をモデル化し、その実験および解析を行っている。引張力とせん断力が同時に作用した場合、FRPはその本来の強度に至らずに破壊するが、ここではFRPの異方性、コンクリートとの付着すべり等を考慮した二次元および三次元の有限要素解析を行っており、その破壊基準を引張力とせん断力の関係のみならず、ひび割れ幅とせん断変位の関係で捉えることを試みている。

FRPを外ケーブルに用いたPC梁の曲げ破壊耐力試験の報告では、CFRP、AFRPと従来のPC鋼より線を

使用して比較を行っている。実験より、荷重と変形の関係においては、FRPはPC鋼より線とほぼ同様の挙動を示している。しかし、デビエーターでケーブルを曲げると強度が低下し、例えばCFRPでは一方向引張強度の約80%に低下している。したがってFRPを曲げて使用

する場合には、設計強度を慎重に決定する必要があるとしている。終局時の曲げ耐力を、これまでに提案されているアンボンドPC部材の算定式では正確に算定できないとされており、耐力評価法の検討が必要である。FRPを用いた外ケーブル方式のPC部材はFRPの特性を有効に利用できる構造形式であり、

これらの実験結果から、FRP が外ケーブルに適している」と報告している。

FRP で補強したコンクリート部材を実構造物に適用するためには、長期間にわたる性状を把握しておくことが必要であるが、組紐状の AFRP を用いた PPC 梁の長期載荷実験についての報告があった。FPR は弾性率が低いので、FRP で補強されたコンクリート部材では、たわみやひび割れ幅が大きくなるが、これを解決するために、パーシャルプレストレスの利用が試みられている。実験結果より、長期にわたるたわみやひび割れ幅の抑制効果が認められている。また、長期のたわみやひび割れ幅を算定する計算式を提案し、計算値と実験値との比較によりこれらの式の有用性を確認している。

以上述べてきたように我が国の新素材に関する研究は、世界的に見てもかなり進んでいると思われる。しかし欧米諸国の最近の成果には目を見張るものがあり、各種の新しい試みがなされている。以下にその内容について具体的に述べる。

この分野に関して多少出遅れ気味のアメリカ・カナダ両国は、産・官・学が一体となった組織的な展開をみせており、その進歩は特筆すべきものがある。

カナダにおいては、凍結防止材を大量に用いるために鉄筋の腐食によるコンクリート構造物の劣化が著しい。そのため、多少建設コストが高くても腐食性に優れた新素材の研究・実用化が急速に進んでいる。本セッションでは CFRP を緊張材として用いた同国で初めての高速度道路橋の開発・設計・施工の報告を行っている。また橋の挙動測定のために光ファイバーセンサーを用いたシステムを開発・導入しており、今後新素材を用いた橋としての有意義な測定データが提供されるものと期待される。この試みは、同国が新素材についての前向きで継続的な開発を行い、実橋に採用するためのステップとして位置付けており、論文からのその意気込みのほどが感じられる。

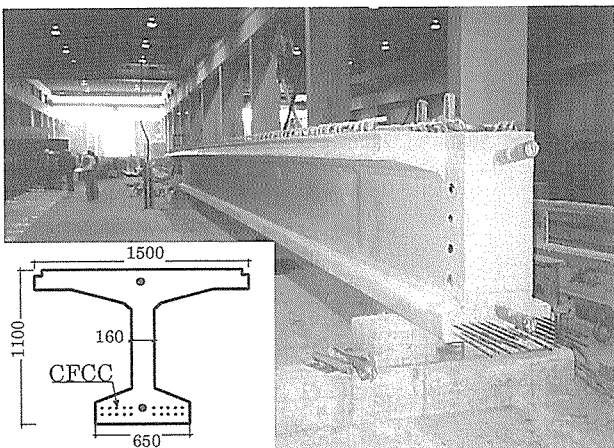


図-2 カナダにおいて用いられた FRP 桁

アメリカからは FRP を用いた構造物の靱性に関する基礎的な研究が報告された。論文によると靱性を増すための手法として、従来提案されている 1) パーシャルプレストレス用としての使用、2) 複数段の配置、3) スターラップの増加、4) 繊維コンクリートの使用等のほか、5) 緊張材が破断する前にコンクリートとの付着を切りアンボンドとすることで靱性を増加できるというユニークな提案もなされている。

早くからこの分野に取り組んでいたヨーロッパからは 3 編の論文が報告された。

イギリスからは、並行連続アラミド繊維ロープの基礎的研究とそれを斜材に適用した斜張橋の施工報告がなされた。基礎的研究では、その短期的および長期的特性、定着方法、さらに梁部材の実験報告等を行っている。論文によれば新素材とコンクリートとの付着力があ場合には、コンクリートに生じるクラック近傍で局所的に大きなひずみが発生し、それが新素材に脆性的な破壊を引き起こさせる可能性があることを指摘し、アンボンド緊張材として設計すべきであるとしている。斜張橋に関しては、新素材を斜材、主桁、主塔に用いたものでは世界で最初であり、橋長 113 m、中央支間 63 m の歩道橋である。この橋では斜材に並行連続アラミド繊維ロープを、主桁、主塔および高欄にはプラスチック製の材料 (GRP) を用いており、その軽量さのために施工性・安全性・経済性において非常に優れている。実際、施工においてクレーン等の重機を使用していないほか、工期も 4 週間とたいへん短い。また耐久性も高く、維持・管理費も僅かでありとしている。

また、オランダからはプレテン桁における新素材の定着機構についての研究結果が報告された。プレテン桁における緊張材とコンクリートとの付着機構の研究に関しては、緊張力を開放したときに緊張材が膨張することでコンクリートとの付着力が増加することを指摘し、緊張材のポアソン比をパラメータとした解析・実験を行っている。それによると従来の PC 鋼材よりも FRP のポアソン比が大きいため、付着力は大きくなるとしている。

以上述べてきたように、新素材に関しては国際間あるいは各国の組織的な活動により、技術ノウハウを評価するためのいくつかの重要なステップが踏まれてきており、近い将来実用基準となるような設計手法・評価法が確立されるものと思われ、今後ますますの発展が期待されている。