

氏名	角田 敦
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記号番号	博理工乙第180号
学位授与年月日	平成21年3月24日
学位授与の条件	学位規則第4条第2項該当
学位論文題目	コンクリート用新規耐熱性連続繊維補強材に関する基礎的研究
論文審査委員	委員長 教授 睦好 宏史 委員 教授 川上 英二 委員 准教授 奥井 義昭 委員 准教授 牧 剛史

## 論文の内容の要旨

本論文の構成は、耐熱性の優れた連続繊維補強材（FRP ロッド）を生産するための基本技術の開発過程と開発した FRP ロッドの耐熱性に関する諸性状について研究した結果からなる。

第1章では、FRP ロッドの適用状況、問題点について取りまとめた。

第2章では、既往の研究に関する文献をレビューした。その結果、FRP ロッドの耐熱性の低いことが多くの研究で指摘されていることが確認された。また、FRP ロッドの構成等を変えて、積極的に耐熱性を向上させるという研究報告は見当たらないことも確認された。

第3章では、市販されている代表的な FRP ロッドおよび特別にそれに使用されている樹脂の成型体入手し、FRP ロッドの形状、樹脂および FRP ロッドの耐熱性状に関する特性を含む諸特性を測定した。この結果より、FRP ロッドの耐熱性を決定する要因は主としてマトリックス樹脂であることが改めて確認され、市販の FRP ロッドで適用されているエポキシ樹脂（EP）、ビニルエステル樹脂（VE）では耐熱性が不足することが明らかとなった。従って、耐熱性の高い樹脂をマトリックス樹脂として適用することが必要であることが確認された。

第4章では、工業的に FRP ロッドに加工可能な耐熱性の高い樹脂を選定した。耐熱性樹脂の候補として、レゾールタイプフェノール樹脂（PH）、M タイプ架橋ポリエステルアミド樹脂（CP）が候補として挙げられた。耐熱性の高いポリイミド樹脂（PI）、ポリアミドイミド樹脂（PAI）は樹脂濃度が低すぎ、溶媒の沸点が高すぎるので、複合材料として正常な樹脂体積分率を達成できないので、適用を断念した。従来使用されてきたエポキシ樹脂、ビニルエステル樹脂、不飽和ポリエステル樹脂の耐熱性に限界があることが確認され、適用を断念した。

フェノール樹脂（PH）や架橋ポリエステルアミド樹脂（CP）は従来のエポキシ樹脂やビニルエステル樹脂と異なり、溶媒に溶解され、フェノール樹脂（PH）の場合には硬化時に分解物が発生する。溶媒や分

解物を系外に速やかに排除しないと、FRP ロッド内にボイドが発生し、力学特性を低下させることとなる。調査の結果、溶媒や分解物を系外に容易に排出するため、補強材に適用する連続繊維を組紐に加工して、樹脂含浸・硬化することが最適であることが明らかとなった。フェノール樹脂（PH）の場合、さらに硬化時の分解物を極力減少させるため、樹脂の組成を適正化した。また、FRP ロッドの熱風による硬化付加を極力少なくし、硬化温度や時間設定に自由度の高いポストキュアに負担を大きくすることにより、分解物発生に起因するボイドを解消することに成功した。炭素繊維またはアラミド繊維を補強繊維とし、フェノール樹脂（PH）や架橋ポリエステルアミド樹脂（CP）を適用した直径 7, 13mm の FRP ロッドを試作した。

第 5 章ではこのようにして得られた FRP ロッドの耐熱性、熱間・冷間の引張破断耐力、熱間の引張剛性および耐久性の指標のひとつである耐アルカリ性能を実験により明らかにした。その結果、マトリックス樹脂としてフェノール樹脂（PH）がベストであることが明らかとなった。また、マトリックス樹脂の耐熱性が飛躍的に高くなったため、従来の FRP ではあまり問題とならなかった繊維の耐熱性が重要であることがわかり、補強繊維として炭素繊維がアラミド繊維より優れていることも確認された。以上を総合すると、炭素繊維－フェノール樹脂（PH）を組み合わせた FRP ロッドの耐熱性は鉄筋に近いことが明らかとなった。なお、フェノール樹脂を適用した FRP ロッドの引張破断耐力および CV 値（ばらつき）はエポキシ樹脂 FRP ロッドよりやや劣るので、もう一段のボイド対策が必要と考えられる。

第 6 章ではコンクリートと FRP の熱間付着応力度を付着試験により明らかにした。この結果、耐熱性の高いフェノール樹脂（PH）、架橋ポリエステルアミド樹脂（CP）を適用した FRP ロッドの熱間付着応力度保持率はエポキシ樹脂（EP）ロッドより高いことが明らかとなった。また、樹脂の耐熱性が向上すると、繊維の耐熱性が重要であることも確認された。特に炭素繊維－フェノール樹脂（PH）を組み合わせた FRP ロッドの熱間付着応力度保持率は鉄筋に近いことが明らかとなった。

第 7 章では FRP ロッドを補強筋としたコンクリート梁の熱間曲げ試験を実施した。コンクリート梁の表面にシーズヒーターを取り付けた鋼板を貼り付け、その表面を断熱材で覆って、加熱した。この試験結果より、耐熱性の高いフェノール樹脂（PH）、架橋ポリエステルアミド樹脂（CP）を適用した FRP ロッドを使用したコンクリート梁の高温における終局曲げ耐力保持率は市販のエポキシ樹脂（EP）を適用した FRP ロッドより高いことが明らかとなった。特に炭素繊維－フェノール樹脂（PH）を組み合わせた FRP ロッドの曲げ耐力保持率は鉄筋に近いことが明らかとなった。

第 8 章では第 2 章から第 7 章の結果の全体をとりまとめ、本研究成果の将来への展望を試みた。今回開発した耐熱性 FRP ロッドは非磁性でもあるので、熱核融合発電に適用されるトカマク炉や超伝導設備を格納する鉄筋コンクリート構造物の鉄筋代替材料として使用されることが期待されている。

## 論文の審査結果の要旨

当論文審査委員会は当該論文の発表会を2009年2月4日に公開で実施した。その発表を含めて学位論文の審査を行った結果を以下に要約する。

本論文はコンクリート構造物の補強材に用いる、耐熱性の優れた連続繊維補強材（FRP ロッド）を生産するための基本技術の開発過程と開発したFRP ロッドの耐熱性に関する諸性状について研究した成果をとりまとめたものである。

本論文の内容は以下に示すとおりである。

第1章では、FRP ロッドの適用状況、問題点について取りまとめている。

第2章では、既往の研究に関する文献をレビューしている。その結果、FRP ロッドの耐熱性の低いことが多くの研究で指摘されていること、またFRP ロッドの構成等を変えて、積極的に耐熱性を向上させるという研究報告は見当たらないことが述べられている。

第3章では、市販されている代表的なFRP ロッドおよび特別にそれに使用されている樹脂の成型体入手し、FRP ロッドの形状、樹脂およびFRP ロッドの耐熱性状に関する特性を含む諸特性を測定している。この結果より、FRP ロッドの耐熱性を決定する要因は主としてマトリックス樹脂であることが改めて確認され、市販のFRP ロッドで適用されているエポキシ樹脂(EP)、ビニルエステル樹脂(VE)では耐熱性が不足することを明らかにしている。従って、耐熱性の高い樹脂をマトリックス樹脂として適用することが必要であることを述べている。

第4章では、工業的にFRP ロッドに加工可能な耐熱性の高い樹脂の候補として、レゾールタイプフェノール樹脂(PH)、Mタイプ架橋ポリエステルアミド樹脂(CP)を候補として挙げている。耐熱性の高いポリイミド樹脂(PI)、ポリアミドイミド樹脂(PAI)は樹脂濃度が低すぎ、溶媒の沸点が高すぎるので、複合材料として正常な樹脂体積分率を達成できないことを明らかにしている。さらに、従来使用されてきたエポキシ樹脂、ビニルエステル樹脂、不飽和ポリエステル樹脂の耐熱性に限界があることも明らかにしている。フェノール樹脂(PH)や架橋ポリエステルアミド樹脂(CP)は従来のエポキシ樹脂やビニルエステル樹脂と異なり、溶媒に溶解され、フェノール樹脂(PH)の場合には硬化時に分解物が発生する。溶媒や分解物を系外に速やかに排除しないと、FRP ロッド内にボイドが発生し、力学特性を低下させることとなる。調査の結果、溶媒や分解物を系外に容易に排出するため、補強材に適用する連続繊維を組紐に加工して、樹脂含浸・硬化することが最適であることを明らかにしている。フェノール樹脂(PH)の場合、硬化時の分解物を極力減少させるため、樹脂の組成を適正化している。また、FRP ロッドの熱風による硬化付加を極力少なくし、硬化温度や時間設定に自由度の高いポストキュアに負担を大きくすることにより、分解物発生に起因するボイドを解消することに成功している。炭素繊維またはアラミド繊維を補強繊維とし、フェノール樹脂(PH)や架橋ポリエステルアミド樹脂(CP)を適用した直径7および13mmのFRP ロッドの試作に成功している。

第5章ではこのようにして得たFRP ロッドの耐熱性、熱間・冷間の引張破断耐力、熱間の引張剛性および耐久性の指標のひとつである耐アルカリ性能を実験により明らかにしている。これらより、マトリックス

樹脂としてフェノール樹脂(PH)がベストであることを明らかにしている。また、マトリックス樹脂の耐熱性が飛躍的に高くなったため、従来のFRPではあまり問題とならなかった繊維の耐熱性が重要であることがわかり、補強繊維として炭素繊維がアラミド繊維より優れていることを明らかにした。以上を総合すると、炭素繊維-フェノール樹脂(PH)を組み合わせたFRPロッドの耐熱性は鉄筋に近いことを明らかにしている。

第6章ではコンクリートとFRPの熱間付着応力度を測定した。この測定により、耐熱性の高いフェノール樹脂(PH)、架橋ポリエステルアミド樹脂(CP)を適用したFRPロッドの熱間付着応力度保持率はエポキシ樹脂(EP)ロッドより高いことが明らかとなった。また、樹脂の耐熱性が向上すると、繊維の耐熱性が重要であることも確認された。特に炭素繊維-フェノール樹脂(PH)を組み合わせたFRPロッドの熱間付着応力度保持率は鉄筋に近いことを明らかにしている。

第7章ではFRPロッドを補強筋としたコンクリート梁の熱間曲げ試験を実施した。コンクリート梁の表面にシーズヒーターを取り付けた鋼板を貼り付け、その表面を断熱材で覆って、加熱した。この試験結果より、耐熱性の高いフェノール樹脂(PH)、架橋ポリエステルアミド樹脂(CP)を適用したFRPロッドを使用したコンクリート梁の高温における終局曲げ耐力保持率は市販のエポキシ樹脂(EP)を適用したFRPロッドより高いことを明らかにしている。

第8章では第2章から第7章の結果の全体をとりまとめ、本研究成果の将来への展望を試みた。今回開発した耐熱性FRPロッドは非磁性でもあるので、熱核融合発電に適用されるトカマク炉や超伝導設備を格納する鉄筋コンクリート構造物の鉄筋代替材料として使用されることを示している。

以上のように、本論文はこれまで行われていなかった、コンクリート補強用耐熱性連続繊維補強材の開発を行い、成功している。これらの成果は、今後建設される特殊建築構造物や実験施設に適用されることが考えられ、建設分野に大きく貢献するものである。よって、本委員会は、本論文が博士(工学)の学位授与に十分値するものであると判断し、合格と認めた。