

論文の内容の要旨

論文題目 格子状連続繊維補強材のコンクリート構造物への
適用に関する基礎研究

氏名 関島謙蔵

本研究は、格子状連続繊維補強材をコンクリート構造物の補強材として適用することを目的として実施したものであり、格子状連続繊維補強材自体の材料特性およびこれを使用したコンクリート部材の諸性状について検討した。

第3章では、格子状連続繊維補強材の力学的性状について検討した。最初に、径の異なる7種類の連続炭素繊維補強材の引張試験を行った。荷重とひずみの関係は、径が大きくなるほど若干下に凸の形状を呈する傾向があった。また、終局ひずみと引張強度は径が大きくなるにつれて低下しており、明らかな寸法効果が認められた。ヤング係数は径よってばらつきがあるが、100kN前後であった。次に、交差部を一つ設けた連続炭素繊維補強材をコンクリートブロックに埋め込んで引抜き試験を行って、交差部強度を検討した。交差部の破壊形式は、A：横筋の二面せん断破壊、B：交差部の軸筋の破断、C：主に軸筋の破断、一部に軸筋のすり抜けあり、の3種類に分類された。交差部強度は引張強度の3～5割程度の値であり、C25以上の太径については寸法効果が現れていた。細径の場合は炭素繊維束の積層回数が少なくなるので、交差部強度は増加しなかった。荷重と自由端変位の関係は傾きが急変する点があり、その時の変位は連続繊維補強材の径が大きくなるにつれて増加した。続いて、曲げ成形した連続ガラス繊維・炭素繊維補強材をコンクリートブロ

ック内に埋め込んで引抜き試験を行い、曲げ成形部の引張耐力について検討した。引張力が作用すると、曲げ成形部の内側には曲げ内半径が小さいほど大きな引張ひずみが生じ、反対に外側には圧縮ひずみが生じた。そのため、曲げ成形部の内側の繊維から順次破断し、曲げ内半径が小さくなるほど引張耐力は低下した。また、交差する軸方向筋が異形鉄筋の場合より連続繊維補強材の方が引張耐力が低下した。交差部の形状については、「角折れ」する場合よりも交差部に円弧を設けた方が引張耐力は増加した。

第4章では、格子状連続繊維補強材使用したコンクリートはりの曲げ性状について検討した。最初に、平面格子状連続ガラス繊維補強材およびエポキシ樹脂塗装鉄筋を主筋に使用したコンクリートはりの曲げ試験を行って、両者の曲げ性状を比較した。連続繊維補強材は主筋と直交する配力筋との交差部でコンクリートとの付着を確保しているため、ひずみの算定においては従来の曲げモーメントを受ける鉄筋コンクリート部材の弾性理論が適用できる。曲げひび割れ発生荷重はエポキシ樹脂塗装鉄筋を使用した供試体よりも低く、交差部が曲げひび割れを誘発したと考えられる。曲げひび割れはすべて交差部に沿って生じ、曲げひび割れ間隔は格子間隔にほぼ等しく、ひび割れ幅は格子間の主筋の伸び量にほぼ等しかった。たわみは、曲げひび割れ発生後はコンクリートの引張応力を無視した弾性計算値に近くなった。降伏荷重以下の荷重におけるたわみは、エポキシ樹脂塗装鉄筋を使用した供試体の約5倍の大きさであった。このことは、弾性範囲内においては約5倍のエネルギー吸収能力を有すると言える。次に、主筋と共にスターラップを一体成形した立体格子状連続ガラス繊維・炭素繊維補強材を使用したコンクリートはりの静的曲げ試験および曲げ疲労試験を行って、材料特性がはりの疲労性状に及ぼす影響について検討した。スターラップの間に生じたひび割れの幅は、スターラップ間の主筋の伸び量にほぼ等しく、スターラップに沿って生じたひび割れの幅はスターラップ間隔の2倍の長さの主筋の伸び量にほぼ等しくなった。これらのことを考慮して、ひび割れ幅は格子間隔の整数倍の長さの主筋の伸び量に等しいという算定式を提案した。繰返し回数が増加しても、等曲げモーメント区間のひび割れの幅はほとんど変化しなかったが、せん断スパンのひび割れの幅は次第に増加した。上限荷重時のたわみは、繰返し回数の増加と共に次第に増加した。連続繊維補強材が破断する場合は、主筋とスターラップの交差部で破断が生じ、疲労強度は、等しい引張耐力を持つ等価な異形鉄筋の疲労強度より同等以上の結果を示した。

第5章では、格子状連続繊維補強材を緊張材として使用したプレストレストコンクリートはりの曲げ性状について検討した。最初に、連続ガラス繊維補強材を緊張材として使用

し、コンクリートブロックとメカニカルジャッキを利用した新しい緊張方法によるプレテンション方式の PC はりを製作し、曲げ試験を行った。コンクリートにプレストレスを導入する場合、交差部が定着の役割を果たし、緊張材としての伝達長は部材端から 2 本目の配力筋までの距離となり、極めて短かった。連続繊維補強材は交差部でコンクリートとの付着を確保しているため、これを緊張材に使用した PC 部材は、従来の PC 部材の曲げ理論が適用できることが確認された。ひび割れ幅は、格子間隔の 2 倍の長さの連続繊維補強材のディコンプレッション状態からの伸び量にほぼ等しかった。プレストレスを導入すると、曲げひび割れ発生後の曲げ剛性の急激な低下が防止され、変形性状が改善された。次に、連続ガラス繊維補強材を緊張材として使用した実物大のプレテンション方式の PC 床版歩道橋を試作し、13 年間実用に供している例を紹介した。

第 6 章では、格子状連続繊維補強材と鋼材の継手について検討した。最初に、連続炭素繊維補強材を主筋に使用し、異形鉄筋との重ね継手を有する大型コンクリートはりの曲げ試験を行った。重ね継手を有する供試体は継手部での破壊は起こらず、継手部の外側の連続繊維補強材の破断または異形鉄筋の降伏によって破壊に至った。継手部における引張力の分担割合は、連続繊維補強材よりも異形鉄筋の方がはるかに大きいため、連続繊維補強材のひずみ分布は下に凸となり、異形鉄筋のひずみ分布は上に凸の形状を呈した。曲げ引張破壊荷重は、自重の影響を考慮すれば精度よく、または安全側に推定することが可能である。継手部に横方向の拘束筋が十分に配置してある場合は、連続繊維補強材と異形鉄筋の重ね合わせ長さが異形鉄筋の呼び名の数字 (mm) の 30 倍以上であれば継手部での破壊が生じなかったため、重ね合わせ長さとして十分であると言える。ただし、継手内部には交差部が 3 個必要である。次に、鋼板を加工した機械式継手を新たに考案し、連続炭素繊維補強材との継手を設けた供試体の引張試験を行って、継手の性能について検討した。軸筋が鋼管から抜け出した 2 体を除くすべての供試体は、継手と鋼管の間に露出した軸筋の破断によって破壊に至った。継手性能はほとんど 90% を超えていたので、内部に交差部を 3 個含んだ機械式継手は連続繊維補強材のほぼ全強を伝達することが可能である。

第 7 章では、格子状連続繊維補強材の長期性状について検討した。最初に、棒状の連続ガラス繊維補強材を対象として、4 連垂直載荷方式のクリープ試験機を用いてクリープ試験を行った。クリープ破壊線図の近似直線を用いて推定した 100 万時間クリープ破壊荷重比および強度は、それぞれ 53.1% および 423N/mm^2 となった。載荷後のクリープひずみの増加は極めて小さいが、その後クリープひずみが増加する供試体が多く、ま

た破断前に突然増加する供試体もあった。次に、連続ガラス繊維補強材を緊張材としたプレテンション方式の PC はりを多数製作し、屋外に長期間放置した後に、連続繊維補強材を取り出して、引張試験および走査型電子顕微鏡による断面の観察を行って、実際のコンクリート中における諸物性の変化について検討した。連続繊維補強材の外観については、ビニルエステル樹脂が初期の状態よりも若干赤く変色していた。最大引張荷重の保持率は、初期緊張力が 0 の供試体は約 80% であり、その他の供試体は平均で 90% を超えていた。引張剛性の保持率は、初期緊張力が 0 の供試体が若干低いけれども、他の供試体では平均値がほぼ 100% であり、引張剛性に対するコンクリートのアルカリの影響は極めて少なかった。また、ガラス繊維の断面はきれいな円形であり、アルカリによって浸食されていないことが認められた。

第 8 章では、光ファイバーを配置した格子状連続繊維補強材の破壊予知センサー機能について検討した。最初に、光ファイバーを中心に配置して成形した棒状の連続炭素繊維補強材の単調引張試験および繰り返し引張試験を行って、荷重やひずみと共に可視光線を光源として光ファイバーを通過する光量を測定した。ひずみがある値を超えると、光ファイバーを通過する光量が急激に減衰した。その後、除荷しても光量はわずかにしか増加せず、著しい減衰はそのまま残った。さらに荷重を増加すると、光量は少しずつ減衰した。前者の現象は光ファイバーの破断によると考えられ、後者の現象は光ファイバーの破断面の距離の増加であると考えられる。次に、光ファイバーを中心に配置して成形した連続炭素繊維補強材を引張側の主筋に使用したコンクリートはりの曲げ試験を行った。ひずみがある値を超えると光量が急激に減衰する現象が認められ、その後、除荷しても光量の著しい減衰はそのまま残った。さらに荷重を増加したところ、前サイクルの上限荷重以内では光量の減衰は小さく、上限荷重を超えると光量の減衰は大きくなった。再現性を確保できるように成形方法を改良すれば、光ファイバーを通過する光量を測定することによって、連続繊維補強材が破断という致命的な損傷を受ける前に検知することが可能になると思われる。光ファイバーを配置した連続繊維補強材は、過去に受けた最大荷重を記憶する能力を有すると言える。