

論文内容の要旨

論文題目 鋼繊維及び PET 繊維補強コンクリートの 開発と応用に関する研究
氏名 越智 恒男

コンクリートは、鉄鋼材料と並んで土木、建築の主要材料として古くからあらゆる構造物に使用され、優れた特性を持つ反面、引張強度が圧縮強度に比べて小さい、ひび割れしやすい、破壊時の挙動が脆性的であるなどの欠点を有する。そのため、重要なコンクリート構造物には鉄筋を併用するなどの方法で、安全性、耐久性に対する設計・施工面での配慮が重要となる。本研究で取り上げる繊維補強コンクリートは、不連続の短い繊維をコンクリートやモルタルの中に一様に分散・配向させることによって、脆性的なコンクリートやモルタルの引張、曲げ靱性、ひび割れに対する抵抗性、耐衝撃性などの改善を図った複合材料である。コンクリート補強用短繊維には、炭素鋼を素材とする鋼繊維、炭素を原料としたカーボン繊維、プラスチックを原料とした化学繊維などの無機或いは有機物繊維がコンクリート補強材として利用されている。当初は鋼繊維を混入した鋼繊維補強コンクリートが主に利用されていたが、最近になって、表面に露出した鋼繊維の錆や吹付け時の鋼繊維の跳ね返りや吹付け後の露出面で露出した鋼繊維の錆や指などを切創する可能性あるなどを指摘する声が上がってくるようになり、覆工コンクリートや吹付けコンクリートにはプラスチック繊維も使用されるようになった。

本論文では鋼繊維及び PET 繊維補強コンクリートの開発と応用に関する長年にわたる研究成果を述べる。まず、第 2 章では、コンクリート補強用各種短繊維の特性と繊維補強コンクリートに関する強化機構について調査・検討結果を述べる。

第 3 章では著者が長年取り組んできた鋼繊維の製造技術開発及び鋼繊維補強コンクリート(SFRC)の力学特性、耐久性と適用に関する研究について述べる。SFRC は、繊維補強コンクリートの中で最も曲げ強度、せん断強度及び破壊靱性が大きく、耐衝撃性、耐疲労性、耐摩耗性に優れており、ひび割れ、乾燥収縮、温度変化に対する抵抗性が大きいなどの特性を有する複合材料であることを示すとともに、土木・建築及びアルミナセメント耐火物など広い分野にわたる用途開発をおこない多くの知見を得たことを述べる。例えば、SFRC をトンネル覆工に利用した場合には、以下の効果が挙げられることを明らかにした。

1. 覆工コンクリートの巻き厚減少 無筋コンクリートに比べて、SFRC は曲げ強度、せん断強度などの強度特性が改善され、変形性能や靱性が向上するため、巻き厚を減少できる場合が多い。
2. 亀裂破損の防止 SFRC は靱性や変形性能が大きいので、地山の変動に対しても十分に

追従して構造亀裂の発生やコンクリートの破損を防ぐ。

3. 安全性・信頼性の向上 SFRC は耐衝撃性、靱性が大きいため、地震、火災などの災害時の破壊までのエネルギー吸収能力が大きくなるので、安全性や信頼性が向上する。
4. 早期強度の確保 NATM 工法において一次覆工に吹付け SFRC を採用することによって地山に密着された薄肉で靱性の高いライニング層により、比較的地山の地質条件の良好な場所では支保工の設置を省略できる。また、SFRC の優れた靱性により膨張性地山、断層破砕帯、褶曲部など地殻構造的に大きな地圧が作用する悪条件下においても有効にその効果が発揮される。
5. 吹付け 鉱山、先進導坑などの簡易仮設トンネルで吹付け SFRC を採用すれば、枠型、仮設材も不要で、種々な形状の自由面に所定厚みのライニングすることができる。法面保護工の場合には、従来工法に比べ吹付け厚さの減少、ラス金網敷設の省略などが期待でき、ひび割れに対する抵抗性や凍結融解作用に対する抵抗性がプレーンコンクリートに比べて大幅に改善されるなどにより、構造物の耐久性が向上するという利点があげられる。

ダム・河川構造物の場合にはひび割れに対する拘束性があることや、土砂、石礫などの流出による越流部の衝撃破壊や摩耗に対して改善効果があることを明らかにした。

路面舗装への適用の場合には、以下の効果があげられることを明らかにした。

1. 舗装厚さを薄くできる プレーンコンクリートや鉄筋コンクリートに比べ、曲げ強度、繰返し疲労強度が大きいので、舗装厚さを薄くすることができる。
2. 収縮目地間隔を大きくできる 膨張、収縮、そりなどがある程度自由に起こさせることによって応力を軽減する目的で目地を設けているが、引張、曲げに対する抵抗性に優れているので、収縮目地間隔を 3 ~ 5 倍に大幅に延長することができる。その結果、走行車両の快適性が向上し、通過車両の発生騒音も低減できる効果がある。
3. 舗装寿命が長くなる ひび割れ抵抗性や摩耗性もよく、繰返し疲労に対する抵抗性も大きいので、舗装道路のいたみが少なくなり、道路寿命の延長が図れる。
4. 欠けが減少する 通過車両の衝撃、路面のひび割れなどに起因するコンクリートの欠けに対し、抑止効果があり、コンクリート欠けが減少する。
5. 凍結融解作用に対し、優れた抵抗性を示す AE 剤を入れた SFRC は、寒冷地帯に特に大きい効果を発揮し寿命延長が期待できる。
6. そり応力が生じにくい 普通コンクリートに比べて熱伝導率が大きいので、全体への熱伝導が早く、上下面の熱膨張差による舗装版のそり応力が低減できる。

第 4 章では、著者が提案し、開発した再生 PET 樹脂を使用したコンクリート補強用の PET 繊維について述べる。年間 150 億本も生産されているペットボトルのうち、廃棄されたペットボトルを再生した PET 樹脂を土木・建築などのコンクリート構造物のこ

ンクリート補強用短繊維に再利用することによって、コンクリートの脆性的性質を靱性のある性能に改善できことが検証できた。この再生 PET 繊維は、循環型経済システムの中で構築・確立されているリサイクルシステムの中から生み出された繊維であり、製品としての信頼性だけでなく、環境に優しい材料であることが意義深い。本研究から得られた知見の要約と今後の研究開発の方向性をまとめると以下ようになる。

1. PET 繊維は引張強度が高いため、ひび割れ抑制効果があり、コンクリートの靱性を著しく増加させる。また、耐アルカリ性などが他のプラスチックと比較して良好であり、鋼繊維のように腐食しないため、耐久性に優れている。比重が 1.32 で水に沈み、分散性に優れていることから生コン車に直接投入・攪拌してもファイバーボールの発生もなく均一に混ざる。
2. PET 繊維補強コンクリートを打設したり吹付けても繊維が適度に分散・配向し、浮き上がりや偏りはみられず、比較的円滑な表面状態であり、分散性、施工性が良好である。また、鋼繊維補強コンクリートを吹付けする場合には、鋼繊維が選択的に多く跳ね返るためリバンド率が高くなり、リバンド率は一般的に約 30 %にも達するといわれているが、PET 繊維補強コンクリートのリバンド率はその 1/2 である。
3. PET 繊維を混入することにより、曲げ強度及び曲げ靱性係数は、PET 繊維混入率にほぼ比例して増加し、鋼繊維の場合と比較して遜色はない。
4. 日本道路公団が行う第二東名・名神甲南トンネル工事に PET 繊維を混入した繊維補強覆工、繊維補強吹付けコンクリートが採用されたことからわかるように、コンクリート片の剥落現象を未然に防止するコンクリート構造物や海洋コンクリート構造物、法面保護工などの分野に適用できる。

以上述べた研究の結果、PET 繊維補強コンクリートは、鋼繊維補強コンクリートに比べ優るとも劣らない性能を有するため、鋼繊維と同様の用途に適用でき、上述の適用分野以外にも建築土間床、コンクリート二次製品などに好適であると考えられる。今後、さらに使用実績を積み重ねていくとともに、PET 繊維補強コンクリートの基礎特性の研究並びに利用技術の進展にとともに、鋼繊維補強コンクリートでは適用できないトンネル覆工耐火コンクリートや高層ビル高強度耐火コンクリートなどの新しい分野への発展が期待できる。

都合約 30 年にわたる研究と活動の成果について以下で簡潔にまとめてみる。

(鋼繊維補強コンクリート)

1. 鋼繊維の製造方法の一つである薄板せん断法を、わが国で初めて開発した。
2. 力学特性の解明に寄与した。鋼繊維混入の影響は次のとおりである。

どのような荷重条件でも完全に破壊するまでに要するエネルギーは顕著に増大する。繰返し荷重下の疲労や、衝撃荷重の場合ももちろんこれは当てはまる。

強度の増大は荷重条件によって顕著な場合とそうでない場合とに分けられる。顕著なのは曲げ強度であり、受ける影響が小さいのが圧縮強度である。

打ち込んだ SFRC に加えて、吹付け SFRC についても検討し、後者の異方性について明らかにした。

3. 鋼繊維の錆びが開発当初から懸念されたが、通常の使用では（例えば水の比較的少ないトンネル覆工）表面を除いて錆びは発生しない。但し、海洋環境下では 10 年程度でかなり劣化する場合があるので注意が必要である。
4. 凍結融解に対する抵抗性は、AE コンクリートとすれば著しく改善され、例えば鋼繊維混入率 1% でプレーンコンクリートと比較して寿命が約 2 倍になる。
5. SFRC の道路舗装、空港舗装、トンネル、法面保護工、併進工法への応用に成功した。個別の応用については、多くの技術者の協力を得たが、著者は一貫して全ての用途開発に携わり、いずれの用途においても SFRC が有効であることを示した。

（PET 繊維補強コンクリート）

1. プラスチックの中でも強度、親水性、耐薬品性の点で比較的良好な特性を示し、さらに安い材料コストの廃 PET ボトルから再生した PET 繊維を提案し、その製造方法を開発した。
2. 試作した PET 繊維を用いて手練りによる混練試験を実施したところ容易に混ざることが判明した。興味深いことに、3% まで PET 繊維混入率を増加させてもファイバーボールが発生することなく、何ら問題なく混ざりあうことがわかった。この結果から PET 繊維の第一の特徴は取り扱いやすさといえよう。
3. PET 繊維補強コンクリートを打設しても吹付けても繊維が浮き上がったり、偏ったりすることなく、PET 繊維補強コンクリートの表面は比較的円滑な状態であり、分散性、施工性が非常に良好であることが判明した。また、吹付けの場合のリバンド率は、SFRC の 30% に対し、約 1/2 であることを示した。
4. 最も危惧されたのは耐アルカリ性であったが、セメント・アルカリに対するいくつかの耐久性試験を行った結果、通常のコンクリート中では問題ないことが判明した。
5. 鉱山坑道、トンネル覆工、林道舗装への応用を試みたところ、良好な成果をあげた。