

論文 酸性環境における連続繊維シートを用いたコンクリート補強

山本貴士^{*1}・嘉指成詞^{*2}・服部篤史^{*3}・宮川豊章^{*4}

要旨：酸性環境下での連続繊維シートのコンクリート補強への適用性を検討する目的で、連続繊維シート、樹脂、FRP板および補強コンクリートを硫酸水溶液に所定期間浸漬する促進試験後に引張、曲げ、微小硬度および中性化深さ試験を行った。得られた結果より、樹脂には劣化が見られたものの、連続繊維シート、FRP、また連続繊維シート、樹脂およびコンクリートの複合構造としての補強コンクリートに顕著な劣化は認められなかった。

キーワード：連続繊維シート、樹脂、曲げ補強、耐酸性、下水道施設

1. はじめに

近年、連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修・補強が注目されており、橋脚や桁への施工例が増加している。一方、耐久性に期待して、厳しい環境にさらされるコンクリート構造物への適用も考えられている。それらのうち下水道施設は、微生物の作用により生成される硫酸により酸性環境となることが多く[1]、沈殿池や下水管内面では腐食劣化が顕著になっている事例が報告されている。これに対し、日本下水道事業団では「コンクリート防食指針(案)」[2]を制定し、腐食環境に応じた防食被覆の設計仕様を示している。しかし、これらの仕様は化学的劣化要因に対しコンクリートをあらかじめ保護し、劣化の進行を防ぐ意味合いが強く、すでに劣化が著しく、強度低下が生じている場合には、補強的要素をも兼ね備えた連続繊維シートの適用が期待される。しかし、この場合には、酸性環境下における連続繊維シートを用いたFRP層自身の耐久性、環境遮断性および付着安定性が重要であり、連続繊維シート、樹脂およびコンクリートとの複合構造としての検討を行う必要がある。

本研究では、まず各種連続繊維シート、樹脂およびそれらを組み合わせたFRP板について、酸浸漬後に主として引張試験を行うことにより耐酸性を検討した。次に、それらの仕様の連続繊維シート貼付けによるコンクリート供試体の曲げ性状の改善効果の耐酸性を、同様の酸浸漬後の曲げ試験により検討した。さらに、これらの供試体の

うち代表的なものについては、浸漬後のFRP層の劣化程度を把握するために微小硬度試験を、また環境遮断性を把握するために中性化深さ試験を行った。

表1 連続繊維および連続繊維シートの特性

種類	引張強度 (kN/mm ²)	ヤング率 (kN/mm ²)	目付量 (g/m ²)	断面積 (mm ² /m)
炭素*	3.43	230	300	167
アラミド	3.43	72.5	233	168
ガラス	1.47	72.5	102**	40.2

* :PAN系

** :軸方向繊維量で、クロスとしては203g/m²

2. 実験概要

2.1 各材料の引張試験

*1 京都大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 サンユレジン(株) 技術部

*3 京都大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻、工修 (正会員)

*4 京都大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻、工博 (正会員)

(1) 連続繊維シート

用いた連続繊維シートとその特性を表1に示す。連続繊維シートの試験は炭素繊維シートのみを行い、促進環境として10%硫酸水溶液に23℃で0、1、2、6ヶ月間浸漬を行った後、引張強度を測定した。なお、10%硫酸水溶液への2ヶ月浸漬は、文献[2]に示されている防食ライニング材の標準仕様のうち、最も厳しい腐食条件に適用するためのD種が、各種試験に合格しなければならない耐酸性の試験期間に相当する。

(2) 樹脂

用いた樹脂とその特性を表2に示す。これらはいずれもエポキシ樹脂(主剤:エポキシ樹脂、硬化剤:変性脂肪族ポリアミン)であり、シートへの含浸性を考慮した標準的なもの(普通)、さらに架橋構成の調整により耐酸性を高めたもの(耐酸)、および耐酸と引張強度は同程度であるが架橋密度をやや低くして伸びを高めたもの(柔軟)の3タイプである。(1)と同様の条件で浸漬を行った後、質量増加率および引張強度の測定を行った。

表2 樹脂の特性			
樹脂	比重	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)
普通	1.1	49.0	3
耐酸	1.1	25.0	8
柔軟	1.1	20.6	20

(3) FRP板

FRP板には炭素+普通、炭素+耐酸、アラミド+耐酸の組み合わせを用いた。(1)と同様の条件で浸漬を行った後、引張強度の測定を行った。

2.2 補強供試体の曲げ試験

供試体には、図1に示すように、100×100×400mmの無筋コンクリートの下縁中央に深さ25mmのノッチを設け、支点外も含み下縁全面に連続繊維シートを貼付けたものを用いた。接着方法は、①表面ケレン仕上げ、②素地調整((2)の

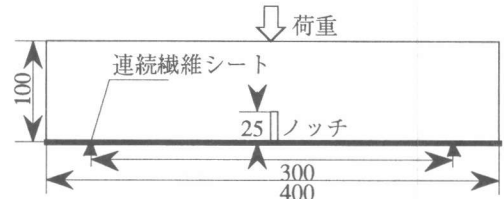


図1 曲げ試験供試体 (単位:mm)

樹脂+7号珪砂)、③連続繊維シート含浸・接着、である。10%硫酸水溶液に室温(5~10℃)にて浸漬を行った後、載荷スパン300mmで中央1点載荷曲げ試験を行うことにより曲げ性状の改善効果の耐久性を検討した。試験要因を表3に示す。なお、防食被覆仕様として用いられる樹脂モルタルも併せて用い、主として耐酸性を比較した。浸漬0ヶ月時のコンクリート強度は44.1N/mm²であり、供試体は1要因につき3ないし2体作成した。

表3 曲げ試験

連続繊維シート	エポキシ樹脂	積層方法	硫酸水溶液浸漬期間
炭素繊維シート*	普通：軸1層、軸2層、軸1層＋軸直角1層	1層	0(非浸漬)、1、2、6ヶ月 (浸漬は軸1層のみ)
アラミド繊維シート*	耐酸、柔軟：軸1層		
ガラス繊維クロス**	普通2		
樹脂モルタル(セラミックパウダー＋普通3)	3mm厚		0(非浸漬)、1、2、6ヶ月

*:繊維方向が一方のみ **:繊維方向が互いに直角の二方向

2.3 微小硬度試験

FRP層表面からの深さ方向における硫酸浸漬による影響を調査することを目的として、微小硬度試験を行った。試料には、図2に示すように、浸漬0および6ヶ月後の曲げ試験を終了した供

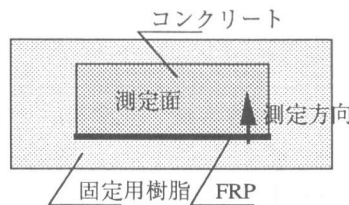


図2 微小硬度試験試料

表4 微小硬度試験

繊維	樹脂	浸漬期間
炭素	普通	0、6ヶ月
	耐酸	
	柔軟	
アラミド	普通	
	耐酸	
	柔軟	

試体から、連続繊維シート貼付け面より厚さ10～20mmの薄片を切り出し、周辺をエポキシ樹脂で固めたものを用いた。試料一覧を表4に示す。測定面は研磨紙等を用いてターンテーブル上で鏡面仕上げした。研磨の工程を表5に示す。測定は荷重設定を5gfとしてFRP層の樹脂部分およびコンクリートのセメントペースト部分で行い、FRP層では50 μ m、コンクリート部分は100 μ m間隔で行った。微小硬度はVickers硬度として算出した。

表5 研磨工程

研磨紙	潤滑剤	研磨方向および時間
#80	水	直角方向に2分ずつ
#220		
#800		
#1200		
#2400		直角方向に4分ずつ
アルミナ粉		直角方向に6分ずつ

2.4 中性化深さ試験

FRP層の環境遮断性を把握することを目的として、浸漬6ヶ月後の曲げ試験を終了した供試体にFRP層から垂直に数センチの深さの切り込みを設け、断面にフェノールフタレインエタノール溶液を噴霧し中性化深さを測定した。測定は1要因につき1体ずつ行った。

3. 実験結果および考察

3.2 各材料の引張試験

(1) 連続繊維シート

炭素繊維シートの引張強度の経時変化を図3に示す。6ヶ月浸漬後も引張強度の低下は見られず、耐酸性に優れていることがわかる。

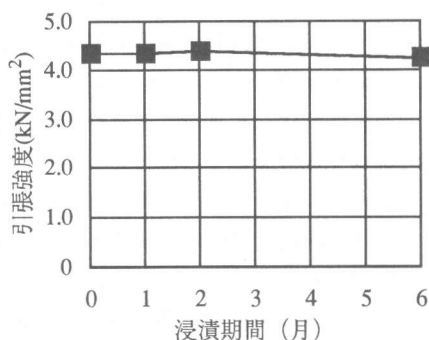


図3 引張強度の経時変化(炭素繊維シート)

(2) 樹脂

樹脂の質量増加率および引張強度の経時変化をそれぞれ図4、図5に示す。質量増加率では、耐酸タイプが6ヶ月浸漬後も4.2%であり、比較的優れた耐酸性を有している。引張強度でも、他の2タイプに比べ強度の保持率が高い。柔軟タイプでは、ほとんど引張強度はなくなっており、普通タイプは、0ヶ月時には耐酸のほぼ倍の引張強度を有していたにも関わらず、6ヶ月時には耐酸を下回っている。

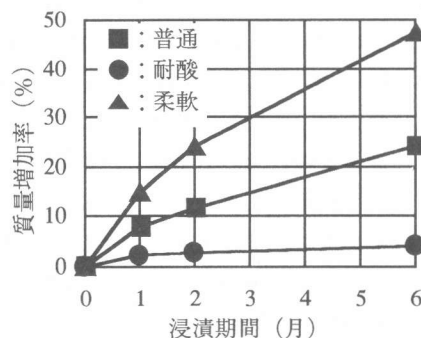


図4 質量増加率(樹脂)

(3) FRP板

FRP板の引張強度の経時変化を図6に示す。FRPとした場合、樹脂単独の浸漬試験では強度低下の著しかった普通タイプを用いたもので

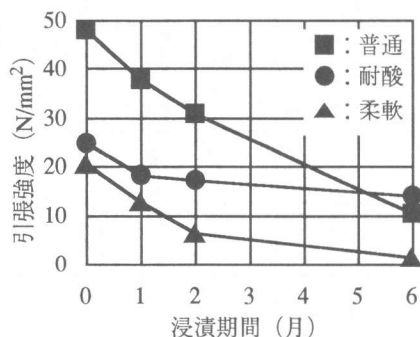


図5 引張強度の経時変化(樹脂)

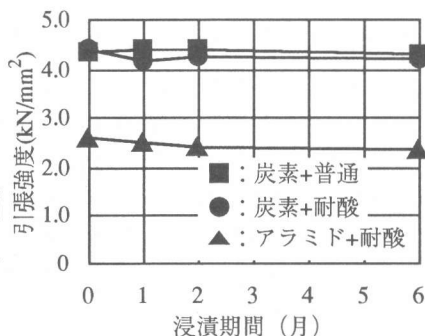


図6 引張強度の経時変化(FRP板)

も引張強度の低下は見られず、FRPの強度特性の耐酸性は繊維に依存することが確認できる。また、環境条件によっては炭素繊維に比べ耐久性に劣ると言われている[3]アラミド繊維においても、耐酸タイプ樹脂と組み合わせたFRPとすることにより、優れた耐酸性を有するものとなっている。

3.1 補強供試体の曲げ試験

まず、曲げ性状の改善効果の耐酸性を検討する上で、基準となる浸漬0ヶ月(非浸漬)の曲げ性状について検討した。繊維含浸用に用いた3タイプの樹脂の違いによる顕著な差が見られなかったので、ここでは普通タイプの結果を示す。

載荷終了後のひび割れ状況を図7に示す。炭素およびアラミド繊維シートでは、曲げひび割れ発生後ノッチを挟んで角折れのような割裂ひび割れが発生し、それが剥離ひび割れへと進展した。連続繊維シートの破断は見られず、剥離ひび割れが支点に達した時点で載荷を終了し除荷した。一方、ガラス繊維クロスおよび樹脂モルタルでは、ひび割れが発生するとほぼ同時に補強層が破断し、耐力を失った。

曲げひび割れ発生荷重を図8に示す。すべての仕様において曲げひび割れ発生荷重の増大効果が見られるが、繊維の弾性係数が大きい炭素繊維シートが最も効果が大きい。また、軸2層では軸1層のほぼ倍であるのに対し、軸1層+軸直角1層では軸方向の繊維量が軸1層のものと同量であるため、曲げひび割れ発生荷重の増大も同程度となっている。このように、補強層軸方向の引張剛性が大きいほど曲げひび割れ発生荷重は大きくなっている。

炭素またはアラミド繊維シートを貼付けた供試体の荷重-たわみ曲線を図9に示す。これらの連続繊維シートを貼付けることによって曲げひび割れ発生後も荷重が増加しており、その曲線は前述のひび割れ状況に対応して3領域に分類できようである。炭素繊維シートは弾性係数が大きいためひび割れ発生以降の曲げ剛性は大きく、同荷重での変位は小さい。また、両シートとも積層枚数を

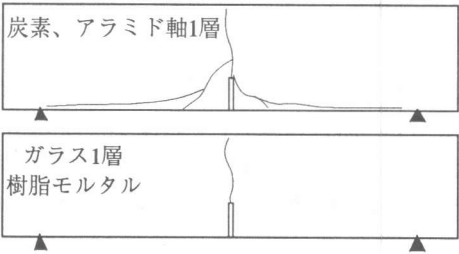


図7 ひび割れ状況

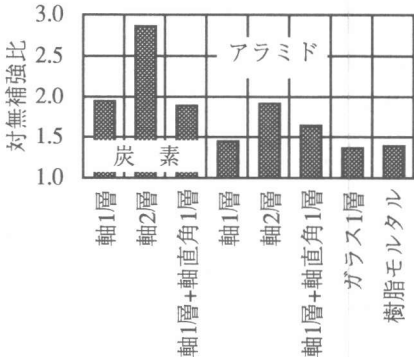


図8 曲げひび割れ発生荷重

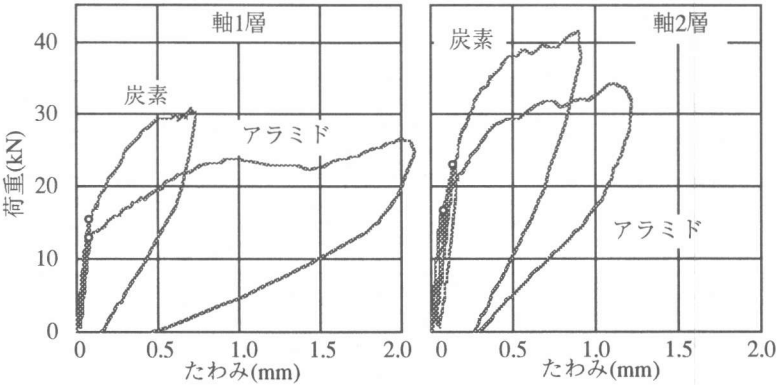


図9 荷重～たわみ曲線(○：ひび割れ発生)

れ発生以降、剥離ひび割れが顕著になるまでの曲げ剛性が若干増加するが、それ以降は軸1層と同程度の曲げ剛性となっている。

供試体下縁中央から軸方向に沿った0、25、50および100mmの位置でのFRP層表面ひずみを図10に示す。荷重が上昇してシートの剥離が中央から支点へと進展していったことが、シートひずみが荷重の上昇により中央から順に急増していることからわかる。また、剥離ひび割れが顕著な時期では、同荷重でのシートひずみが必ずしも中央で最大にはなっておらず、剥離部ではシートにはほぼ一様の引張力が作用するような傾向にある。

次に、浸漬後の曲げひび割れ発生荷重の経時変化を図11に示す。いずれの供試体も浸漬による顕著な低下は見られない。また、ひび割れ状況や他の曲げ性状についても、6ヶ月時に剥離ひび割れの発生がやや急激となるものも見られたが、上記の非浸漬供試体とはほぼ同様の結果が得られた。6ヶ月までの浸漬では、いずれのFRP層も浸漬に対してコンクリートの曲げ性状に影響を与えるまでの影響を受けておらず、引張強度のみでなくせん断強度などを調べる必要がある。また、コンクリートを十分に保護しており、3.4でも述べるように、繊維の存在により環境遮断性が高まり、接着面の樹脂への硫酸の影響が少なく、付着に与える影響も少なかったものと考えられる。

3.3 微小硬度試験

FRP層断面の微小硬度分布を、樹脂および浸漬期間ごとにそれぞれ図12、図13に示す。樹脂の硬度は断面内ではほぼ一様で、また普通、耐酸、柔軟の順に小さくなっており、樹脂の特性に依存しているようである。一方、樹脂の浸漬試験では柔軟、普通タイプの樹脂で引張強度の顕著な低下が見られたが、耐酸タイプはもちろん柔軟、普通タイプの樹脂においても浸漬後の硬度に低下は見られず、劣化程度を把握することはできなかった。一般に、熱硬化性樹脂の環境条件による劣化機構は非可逆的な変化が多いが、吸水膨張によるエポキシ樹脂の力学的特性の低下現象は、湿気が分散し元の状態に戻れば力学的な特性も回復する可逆的な変化である場合があることが知られている[4]。本実験では、6ヶ月の曲げ試験終了後、5～6ヶ月間室内に静置

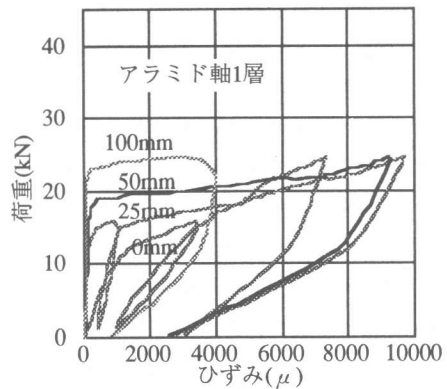


図10 FRP層表面ひずみ

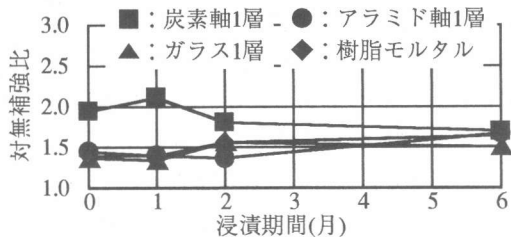


図11 曲げひび割れ発生荷重の経時変化

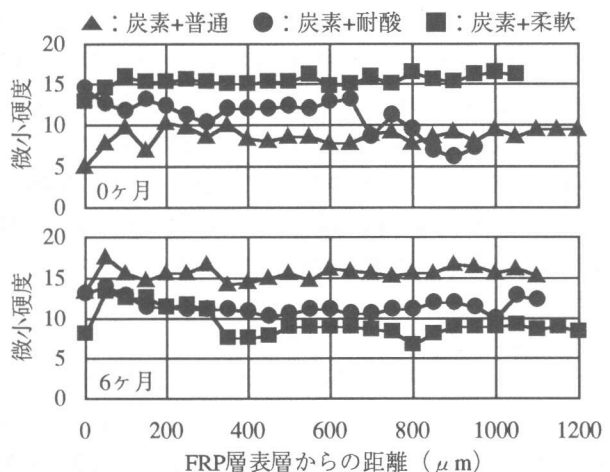


図12 樹脂の種類による影響

してあった供試体から採った試料を用いて微小硬度試験を行ったため、測定時までの乾燥によって樹脂の力学的特性が回復した可能性がある。

なお、コンクリート部分の微小硬度は各試料ともほぼ同様の値となっており、セメントペーストは浸漬により大きな影響は受けていないと推察される。

3.4 中性化深さ試験

いずれの供試体においても中性化深さは0mmであり、曲げ試験や微小硬度試験結果と同様に、コンクリート部分は浸漬により大きな影響を受けていないようである。樹脂の試験では顕著な質量増加が見られたものもあったが、連続繊維シートにより樹脂の微細ひび割れやクレーズなどが拘束され、環境遮断性能が高まった可能性がある。ただ、微小硬度試験と同様、室内静置期間があったため、コンクリート中のアルカリが再拡散した可能性も考えられる。

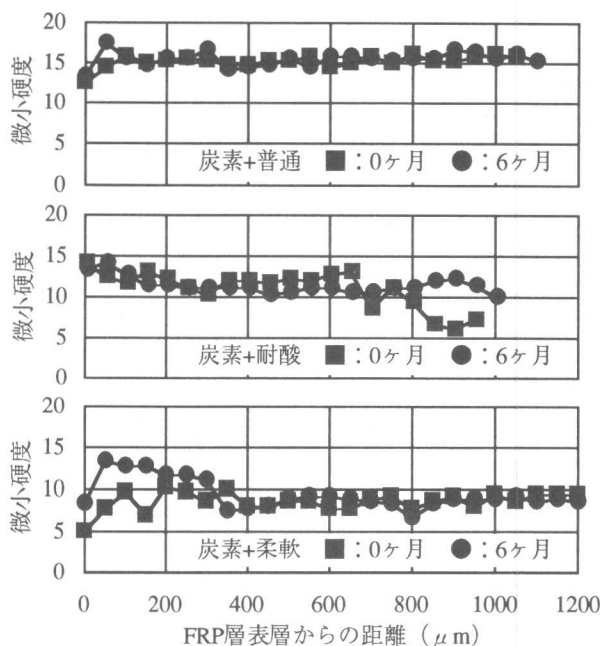


図13 浸漬期間による影響

4. 結論

本研究から得られた主な結果をまとめて結論とする。

- (1) 各材料の10%硫酸水溶液への6ヶ月間浸漬試験では、樹脂の引張強度は種類によって顕著な差が確認されたが、繊維およびFRP板では浸漬による引張強度の低下は見られなかった。
- (2) 補強供試体では、FRP層の軸方向の引張剛性が大きいほど、曲げひび割れ発生荷重は大きくなる。また、炭素およびアラミド繊維シートでは曲げひび割れ発生後もシートが破断せず引張剛性に応じて荷重が増加するが、剥離ひび割れにより曲げ剛性は低下する。
- (3) 補強供試体の10%硫酸水溶液への6ヶ月までの浸漬では、その補強効果は低下せず、いずれのFRP層も浸漬に対してコンクリートの曲げ性状に影響を与えるまでの影響を受けておらず、コンクリートを十分に保護しており、また付着に与える影響も少なかったものと考えられる。
- (4) 補強供試体断面の微小硬度試験、中性化深さ試験より、FRP層の環境遮断性能を確認した。微小硬度試験では、浸漬による樹脂の劣化程度を把握することは出来なかったが、相対的な樹脂の力学的特性を検討できる可能性がある。

参考文献

- [1] 木下 勲：下水道管のコンクリート腐食、セメント・コンクリートNo.577、pp.14～19、1995.3
- [2] 日本下水道事業団：コンクリート防食指針(案)、1993.6
- [3] 奥田 聡：プラスチックの耐食性とその試験・評価、日刊工業新聞社、pp.89～93、1996.2
- [4] D.Hull：複合材料入門、培風館、pp.211～214、1984.1