

連続繊維シート貼付けによる 下水道コンクリートの補修・補強

服部篤史¹・山本貴士²・嘉指成詞³・宮川豊章⁴

¹正会員 工修 京都大学大学院助手 土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²学生会員 工修 京都大学大学院 土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³正会員 工修 サンコレジン(株) 技術部 (〒569-0011 高槻市道徳町 3-5-1)

⁴フェロー会員 工博 京都大学大学院教授 土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

連続繊維シート貼付け工法の下水道施設への適用に際しては、長期にわたる供用性を確保するため、力学的性質のみでなく、各構成材料およびコンクリートも含めた複合材料としての耐酸性を明らかにする必要がある。本研究では、FRP層を形成する種々の連続繊維シート、樹脂およびそれらを組合わせたFRP板の耐酸性を調査するとともに、コンクリート供試体へ適用し、曲げ補修・補強効果とその耐酸性を検討した。さらに、下水道施設として健全および管内面ひび割れ発生後のヒューム管を取り上げ、内外面に適用した種々の仕様のFRP層による外圧に対する補修・補強効果を検討した。得られた結果から、適切な材料選択により、連続繊維シート貼付け工法は下水道施設の補修・補強仕様として適用可能と考えられた。

Key Words: fiber, fiber sheet, resin, fiber reinforced plastic, sewerage concrete, hume pipe, repair and strengthening, acid resistance

1. はじめに

近年、織物状の高強度連続繊維(以下、連続繊維シート)をコンクリート表面に樹脂で含浸、接着してFRP層を形成し、補修・補強を行う試みがなされている。この工法は、特に阪神・淡路大震災以降、その施工性の良さや材料自身の高い耐久性への期待などから橋脚をはじめ広く適用が検討されている¹⁾。

一方、下水道施設では、細菌の生物学的作用による硫酸の生成によりコンクリートが腐食することが広く知られており²⁾、地中に埋設された下水管では、腐食に伴う強度低下や上載荷重によるひび割れの発生、漏水あるいは崩壊が問題となっている。これに対し、使用材料の耐久性、施工断面および表面粗度等の制約からコンクリート表面に樹脂ライニングを適用する防食被覆工法がよく用いられる³⁾が、劣化因子の侵入を防止する意味合いが強く、既設劣化構造物の補強効果をも兼ね備えた有効な工法が望まれている。これに対し、連続繊維シート貼付け工法の適用が考えられる。

下水道施設という過酷環境下におかれたコンクリート構造物へ適用し、長期にわたる供用性を確保するためには、力学的性質のみでなく、酸性雰囲気における耐久性が重要である。複合材料であるFRP層

の強度を支配するのは一般には繊維であるが、構成材料ごとの、またコンクリートも含めた複合材料としての耐酸性を明らかにする必要がある。

本研究では、下水道施設への連続繊維シート貼付け工法の適用を目的として、FRP層を形成する種々の連続繊維シート、樹脂およびそれらを組合わせたFRP板の耐酸性を調査するとともに、コンクリート供試体へ適用して曲げ補修・補強効果とその耐酸性を検討した。さらに、下水道施設として健全および管内面ひび割れ発生後の遠心力鉄筋コンクリート管(以下、ヒューム管)を取り上げ、内外面に適用した種々の仕様のFRP層による外圧に対する補修・補強効果を検討した。

2. 実験概要

(1) 連続繊維シートおよび樹脂材料

連続繊維シートおよび樹脂の基本特性の代表値をそれぞれTable 1, Table 2に示す。連続繊維シートには、主として高強度(HS)タイプの炭素繊維からなるもの(CS)およびアラミド繊維からなるもの(AS)を用いた。これらは単位幅当たりでほぼ同じ繊維断面積を有している。また、CSの目付量を2/3に減らしたものの(C2)、高弾性(HM)タイプの炭素繊維からなるもの

Table 1 Typical Properties of Fiber Sheets

Name	CS	AS	C2	CM	GC
Type	Carbon (HS)	Aramid	Carbon (HS)	Carbon (HM)	Glass
Specific Gravity*	1.80	1.39	1.80	1.84	2.54
Tensile Strength* (kN/mm ²)	4.90	3.43	4.90	4.20	1.47
Young's Modulus* (kN/mm ²)	230	72.5	230	436	72.5
Elongation* (%)	2.1	4.6	2.1	1.0	2.0
Plain Weave	Unidirectional				Cross
Weave Density (g/m ²)	300	233	200	300	203**
Fiber Cross Section (mm ² /m)	167	168	111	163	40.0

*Data of fiber strand. **1/2 in longitudinal direction.

Table 2 Typical Properties of Resins

Name	NR	AR	FR	GR*	CR**
Epoxy Resin	Bisphenol with reactive diluent***				
Hardening Agent	Modified aliphatic polyamine				
Specific Gravity	1.1	1.1	1.1	1.3	1.8
Tensile Strength (N/mm ²)	42.7	25.0	20.6	16.7	11.8
Young's Modulus (kN/mm ²)	1.57	0.794	0.706	—	—
Flexural Strength (N/mm ²)	76.5	35.3	22.5	29.4	25.5
Elongation (%)	3.0	8.0	20	—	—

*For the glass cloth. **For the resin mortar.

*** NR/AR/FR/GR: with inorganic filler, GR: with pigment

の(CM)およびガラスクロス(GC)も用いた。CS, C2 および CM では細いガラス繊維を, AS ではポリエステル繊維を横方向に使用しており, 織物の構造により縦方向繊維に大きな強度低下がないようにしてある。なお, いずれも幅 200mm のものを用いた。

樹脂はいずれも常温硬化型エポキシ樹脂であり, 主として連続繊維シートへの含浸性を考慮した標準的なもの(NR), 含浸性に加えて架橋構成の調整により耐酸性を高めたもの(AR), および後者と引張強度が同程度であるが架橋密度を低くして伸びを高めた耐酸性を考慮していないもの(FR)の3種類を用いた。なお, GC には別の樹脂(GR)を用い, また耐酸性の比較のためセラミックパウダーを混入して樹脂モルタルとして用いる別の樹脂(CR)も用いた。なお, GC および CR の仕様は, コンクリート防食指針(案)に示されている防食被覆ライニングの標準仕様のうちそれぞれC-1 および C-3 種に適合する市販材料の組合せであり, 補強を目的としたものではない。

- (2) 連続繊維シート, 樹脂および FRP 板の耐酸性
 連続繊維シート, 樹脂およびそれらを組合せて作

Table 3 Test Programs for Fiber Sheet, Resin and FRP Plate

Name		Fiber Sheet	Resin	FRP Plate*
Name		CS	NR AR FR	CS-NR CS-AR CS-FR** AS-AR
Test Standard		JIS R7601	JIS K 7113	JIS K 7073
Resin Curing		1 day in room and drying 2 hours at 80°C	2 weeks at 23°C	2 weeks at 20°C
Loading	Rate (mm/min)	20	2	1
	Temperature (°C)	Room temperature	23	Room temperature
Measure-ment	Gauge length (mm)	200	50	100
	Tensile strength	○	○	○
	Strain	○ (Elongation meter)	○ (Divider)	○ (20mm Strain gauge***)
	Young's Modulus	○	○	○
	Elongation	—	○	○
Weight		—	○	—

○: Done *Fiber Sheet-Resin. **Not immersed.

***Elongation meter was used for 6 months specimen.

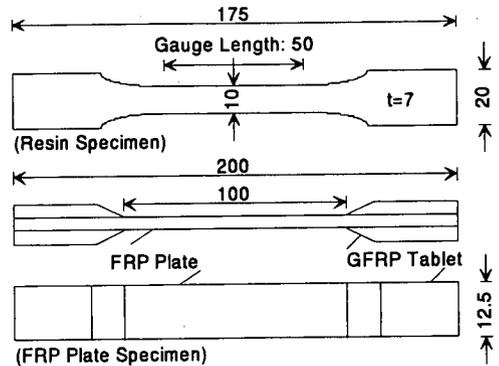


Fig. 1 Resin and FRP Plate Specimens (Unit: mm)

成した FRP 板の耐酸性を, 主として酸浸漬による引張特性の経時変化により評価した。試験要因および試験条件を Table 3 に示す。なお, FRP 板試験片の名称は(連続繊維シート)-(樹脂)としている。これらの試験は, それぞれ JIS K 7601「炭素繊維試験方法」, JIS K 7113「プラスチックの引張試験方法」および JIS K 7073「炭素繊維強化プラスチックの引張試験方法」に準拠して行った。

a) 試験片とその作成

連続繊維シート試験片は, 12,000 フィラメントの繊維を手作業でほぐし出し常温硬化型ビニルエステ

ル樹脂を含浸、硬化させた樹脂含浸ストランド(幅約4mm)とした。樹脂試験片は、比較的伸びの小さい材料に用いる1号形試験片(厚さ7mm)とした。FRP板試験片は、連続繊維シートのコクリートへの適用を想定し、ハンドレイアップ法で作成した。連続繊維シートを平行に2層使用し、繊維体積比 V_f が約30%となるように樹脂を均一に塗布して含浸させた後、常温で硬化させFRP板とした。所定の浸漬期間経過後、ガラス繊維強化プラスチック製のタブを接着し、連続繊維に平行な所定の幅に切断してI形試験片(厚さはCSを用いたもので約1.1~1.2mm, ASで約1.4~1.5mm)とした。いずれの試験も各要因につき5体の試験片を作成した。樹脂およびFRP板試験片の形状・寸法をFig. 1に示す。

b) 試験方法および測定項目

1) 硫酸への浸漬

下水道施設への適用を考慮し、耐酸性を検討するために促進環境として使用した溶液は、コンクリート防食指針(案)を参考に、10%の硫酸水溶液とした。各材料を室温(樹脂は23°C)にて1, 2, 3または6ヶ月間浸漬(CS-FRを除く)し、引き上げた後十分に水洗して表層の硫酸を除去してから試験時まで気中乾燥した。これらのうち2ヶ月は、上記指針(案)に示されている防食被覆材の標準仕様のうち最も厳しい腐食環境に適用するためのD種に対し、ふくれ、割れ、軟化、溶出がないことを確認する浸漬期間に相当する。なお、連続繊維シートは、繊維配向乱れを極力減らすため織物状態のまま浸漬した。また、樹脂試験片については引き上げ後に質量を測定した。

2) 引張試験

所定の荷重速度で破断までの引張試験を行い、荷重およびひずみを測定した。なお、FRP板試験片の引張応力は本来全断面積で除した値とすべきであるが、ハンドレイアップ成形のため厚さのばらつきが大きく、浸漬による影響の精確な検討が困難となるため、繊維の断面積で除して求めた。ヤング率は、連続繊維シートでは破断時ひずみの30~70%、FRP板では10~60%間の割線勾配から求め、樹脂ではチャック間の値を用いて荷重初期の直線部(荷重で0.3~0.6kN程度)で求めた。

(3) コンクリートの曲げ補修・補強効果とその耐酸性

次に、種々の仕様のFRP層の補修・補強効果をコンクリートの曲げ試験により検討するとともに、その耐酸性を、主として酸浸漬による曲げ特性の経時変化により評価した。試験要因をTable 4に示す。

a) 供試体とその作成

供試体には、100×100×400mmの無筋コンクリー

Table 4 Test Program for Concrete

Fiber Sheet	Resin	Fiber Layer	Immersion Period (Month)	Number
CS	NR, AR, FR	1 ply	0, 1, 2, 6	3+2+1*
AS	NR	0° 2 plies	0	3
		90° 2 plies		
GC	GR	1 ply	0, 1, 2, 6	2+2*
—	CR**	Thickness=3mm		

*+2 for each immersion period, +1 for the pull-off bond test.

**Resin mortar.

Table 5 Mix Proportion of Concrete

N.M.S. (mm)	Sl. (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	Unit Mass (kg/m ³)				W.R.A. (cc/m ³)
					W	C	S	G	
15	8±1	4.5	51	50	175	343	825	818	858

Table 6 Mechanical Properties of Concrete

Compressive Strength (N/mm ²)	Young's Modulus (kN/mm ²)	Tensile Strength (N/mm ²)
43.4	32.4	3.86

Table 7 Layer Processes* and Design Values

	1 ply		Additional Resin (kg/m ³)	Longitudinal Fiber Volume Fraction (%)**	Hardened Thickness
	Resin (kg/m ³)	Fiber Sheet			
NR	0.50	CS	0.30	18.6	—
AR		AS		18.7	
FR		C2		13.3	
		CM		18.3	
GR	0.38	GC	0.38	6.40	> 0.7mm
CR	6.0	—	—	—	> 3.0mm

*All processes included concrete surface roughing and puttying.

**For 1 ply layer

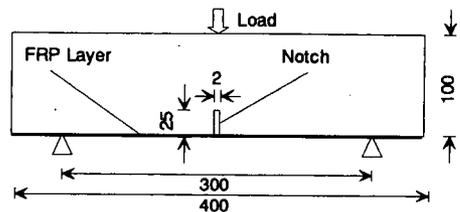


Fig. 2 Concrete Specimen (Unit: mm)

トの下縁中央に、曲げひび割れ位置を特定するためノッチを設け、支点外側を含む下縁全面にFRP層を適用したものをを用いた。FRP層には主としてCSまたはASのそれぞれにNR, ARまたはFRの3種類を組合せたものをを用い、軸方向1, 2層あるいは直交2層で貼付けた。さらに、1層のGCおよび厚さ3mmのCRも用いた。各要因につき3ないし2体の供試体を作成し、また各浸漬期間経過後の荷重時用に2体の無補強で非浸漬の供試体を作成して基準とした。供試体の形状・寸法をFig. 2に示す。

コンクリートの示方配合および載荷時の強度試験結果をそれぞれTable 5, Table 6に示す。また、各FRP層の施工手順および設計値をTable 7に示す。FRP層は2週間以上室内で養生した。

b) 試験方法および測定項目

1) 硫酸への浸漬

FRP層適用面を、連続繊維シート等と同様に、10%の硫酸水溶液に室温(5~10°C)にて所定の期間浸漬した。供試体側面(喫水約25mm)および上面には、コンクリート保護のため厚さ約1mmのエポキシ樹脂ライニングを施し腐食を防いだが、曲げ試験時には削り取った。供試体は引き上げた後十分に水洗して表層の硫酸を除去してから試験時まで気中乾燥した。

2) 曲げ試験

Fig. 2に示すように、載荷スパン300mmで中央一点載荷の曲げ試験を室温で行った。荷重制御により静的漸増載荷を行い、ノッチ先端のひび割れ発生時に一旦除荷し、再載荷して耐力を失うかFRP層の剥離が支点付近に到達した時点で除荷し載荷を終了した。載荷中の測定項目は以下の通りである。

荷重、スパン中央たわみ：ロードセル(容量100kN)を用いて載荷荷重を測定するとともに、支点沈下をキャンセルするための治具を用い、スパン中央のたわみを変位計(容量10mm)により測定した。

中央断面のひずみおよびFRP層表面ひずみ：スパン中央の上縁から10mmの位置にひずみゲージ(検長30mm)を、また75(ノッチ先端)および90mmの位置にπ型ひび割れゲージ(検長50mm、容量2mm)を取り付けるとともに、FRP層表面のスパン中央から支点に向かって0、25、50および100mmの4か所にひずみゲージ(検長5mm)を貼付け、中央ひび割れ断面およびFRP層表面ひずみを測定した。

なお、曲げ試験に先立ち、CSまたはASを1層用いた非浸漬の供試体各1体(測定箇所はそれぞれ3箇所)に対して建研式付着試験(40×40=1600mm²の鋼製アタッチメントを使用、アタッチメント4辺の切込みは深さ5mm程度)を室温で行い、最大付着応力および破壊性状を確認した。

3) 中性化深さ試験

6ヶ月の浸漬および曲げ試験を終えた供試体について、支点より外側のFRP層の剥離が発生していないコンクリート断面の中性化深さをフェノールフタレイン溶液により測定した。

(4) ヒューム管の外圧補修・補強効果

下水管路施設に適用されるヒューム管を対象として、健全および管内面ひび割れ発生後の供試管の内外面に対する種々の仕様のFRP層による補修・補強

Table 8 Test Program for Hume Pipe

Fiber Sheet	Resin	Fiber Layer		Internal Crack
		Internal	External	
CS	AR	1, 2 plies	—	No
		—	1, 2 plies	
		1 ply	1, 2 plies	
—	1, 2 plies	—		
AS	AR		1 ply	
			—	
C2	AR	1, 2 plies	—	
		—	1, 2 plies	
CM	AR	—	1, 2 plies	
GC	GR	1, 2 plies	—	
		—	1, 2 plies	
—	CR*	Thickness=3, 5mm	—	
CS	AR	1, 2, 3 plies	—	Yes
		1 ply	—	
		1, 2 plies	—	
		1, 2 plies	—	
GC	GR	1, 2 plies	—	
—	CR*	Thickness=3, 5mm	—	

*Resin mortar.

Table 9 Mix Proportion of Concrete for Hume Pipe

N.M.S. (mm)	Sl. (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	Unit Mass (kg/m ³)				W.R.A. (cc/m ³)	
					W	C	S	G15 G20		
20	7±2	2.0	40	48	183	468	817	551	368	468

Table 10 Mechanical Properties of Reinforcing Steel

JIS G 3532	Diameter (mm)	Yield Strength (N/mm ²)	Young's Modulus (kN/mm ²)	Tensile Strength (N/mm ²)
SWM-F	5	492	165	558

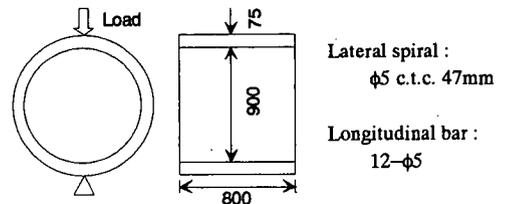


Fig. 3 Hume Pipe Specimen

効果を外圧試験より検討した。試験要因をTable 8に示す。この試験は、JIS A 5303「遠心力鉄筋コンクリート管」に準拠して行った。

a) 供試管とその作成

供試管には、外圧管 A 形 1 種(直管)と呼び径(内径)900 のものを3等分し、有効長を800mmにしたものを用いた。これらは型枠を3つに区切って同時に遠心成形した。管内面にひび割れを発生させる供試管では、b)に示す載荷方法で、FRP層適用前にひび割れ発生荷重まで載荷した。FRP層としては、主としてCSに、耐酸性を期待してARを組合せたものを

用い、内面あるいは外面の円周方向全面に1~3層貼付けた。さらに、連続繊維シートとしてAS, C2, CMまたはGCや、CRも用いた。連続繊維シートは1周ごとに切断して用い、円周方向に100mm、軸方向に0~10mm程度の重ね継手を設け、円周方向の重ね継手は各周で位置をずらして集中しないようにした。各要因につき1体の供試管を作成し、供試管ごとの形状・寸法、コンクリート強度および配筋によるばらつきを極力減らすため、同時作成の3体のうち1体を無補強管に供して基準とした。供試体の形状・寸法の規格値をFig. 3に示す。

コンクリートの示方配合および補強筋(軸筋と螺旋筋を溶接し格子状にしたもの)の機械的性質をそれぞれTable 9, Table 10に示す。示方配合は推進管に用いる配合を基本としたもの(膨張剤不使用)で、載荷時の圧縮強度は54.5N/mm²であった。各FRP層の施工手順および設計値は曲げ試験と同様とした。

b) 試験方法および測定項目

Fig. 3に示すように、品質管理試験に通常用いられる外圧試験を室温で行った。管軸方向に均等な線荷重を荷重制御により静的に与え、ひび割れ発生時に一旦除荷し、再載荷して最大耐力まで漸増載荷を行った。載荷中はひび割れ・破壊性状の記録とともに荷重の測定を行った。

3. 連続繊維シート、樹脂およびFRP板の耐酸性

(1) 連続繊維シート(CS)

引張強度およびヤング率の経時変化を、非浸漬のものを1としてFig. 4に示す。6ヶ月後も引張強度やヤング率の低下は見られず、良好な耐酸性を有しているものと考えられる。

(2) 樹脂

引張強度、ヤング率および伸びの経時変化、ならびに質量変化を、非浸漬のものを1としてFig. 5に示す。樹脂の違いにより耐酸性の有意差が認められる。引張強度は、いずれの樹脂も低下しているが、ARでは1ヶ月以降での低下は比較的緩やかとなった。FRでは大きく低下し、6ヶ月後ではコンクリートの引張強度をかなり下回るようになった。ヤング率は、1ヶ月でいずれも大きく低下しているが、その後の挙動は樹脂ごとに異なったものであった。伸びは、NR, ARでは低下傾向となる時期があるが、6ヶ月後では増加し、NRで2.0%(CSの伸びと同程度、ASの半分以下)であった。質量変化は、引張強度の経時変化とよく対応しているようである。FRにみられるように、質量が1.5倍程度となった時には、ほとんどの引張強度が失われている。なお、浸漬後の目視観察によ

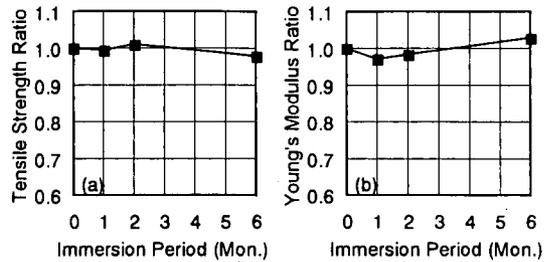


Fig. 4 Property Changes of Fiber Sheet (■: CS)

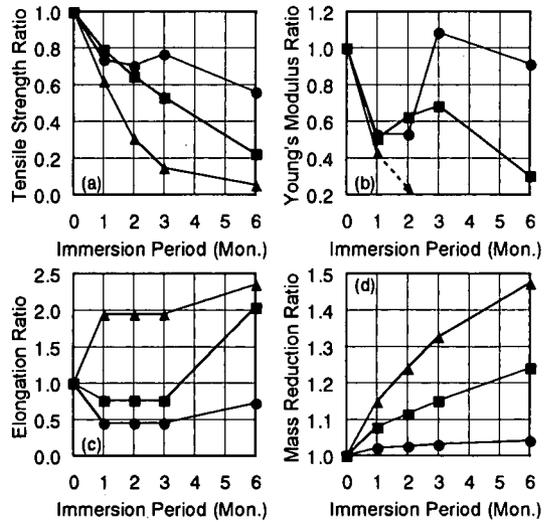


Fig. 5 Property Changes of Resins (■: NR, ●: AR, ▲: FR)

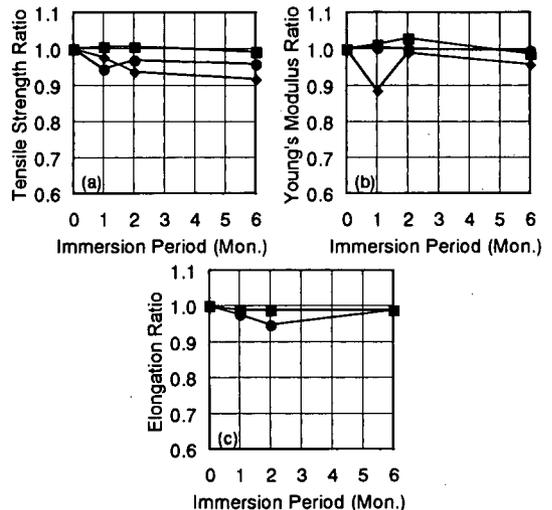


Fig. 6 Property Changes of FRP Plates (■: CS-NR, ●: CS-AR, ◆: AS-AR)

れば、いずれの樹脂も6ヶ月では、原色のクリーム色から明らかに変色し褐色化していたが、目視可能な程度のひび割れや膨れは認められなかった。

(3) FRP 板

引張強度およびヤング率の経時変化を、非浸漬のものを 1 として Fig. 6 に示す。引張強度は、CS-NR ではほとんど変化がみられず、連続繊維シートとの値とほぼ同じであった。CS-AR や AS-AR でも 6 ヶ月後にそれぞれ 4%、8% 程度の低下にとどまっており、樹脂の試験結果と混合則を考慮すれば、FRP 板の引張強度が主として耐久性に富む繊維に依存していることが確認できる。AR を用いた場合の若干の低下傾向については、原因は明らかではないものの、AR の伸びの浸漬による低下が影響した可能性も考えられる。すなわち、FRP とする場合は、樹脂の引張強度の低下に加え伸びの変化も併せて考慮して複合する必要があるものと思われる。一方、CS-FR(非浸漬)では CS を用いた他のものより若干引張強度が小さかった。ヤング率は、いずれの繊維、樹脂を用いた場合も変化はほとんど認められなかった。ヤング率測定時の応力レベルでは、引張強度に見られたような樹脂の影響と考えられる現象が発生しなかったものと考えられる。

以上より、CS あるいは AS を用いる FRP 板の耐酸性は、樹脂の違いやその劣化程度によらず、FRP 層に対して要求される引張特性についてはほぼ良好な結果となった。しかし、多層の連続繊維シートを用いる場合は、二次応力などによる樹脂から繊維への応力伝達の影響が大きくなることが予想され、その耐酸性にはさらに検討が必要であろう。

4. コンクリートの曲げ補修・補強効果とその耐酸性

(1) 付着試験

付着破壊はすべて基盤コンクリートを伴ったものであり、アタッチメント面積で除して得た最大付着応力は 3.72~4.88N/mm² とコンクリートの引張強度と同程度となった。樹脂の引張強度はいずれもコンクリートよりかなり大きいことをから、FRP 層はこの試験に対して最大の初期付着力を発揮したものと考えられる。したがって、連続繊維シートや樹脂の違いによる付着力の相違は明らかではなかった。

(2) 曲げ補修・補強効果

a) ひび割れ性状と曲げひび割れ発生荷重

載荷終了後のひび割れ状況の一例を Fig. 7 に示す。CS または AS を用いた場合、曲げひび割れ発生後、耐力の増加とともにノッチを挟んで斜めひび割れが発生し、それが下縁から 10mm 程度以内での剥離ひび割れへと進展した。FRP 層の破断は見られず、剥離ひび割れが支点に達した時点で除荷し載荷を終了した。ほとんどの供試体では斜めひび割れに挟まれ

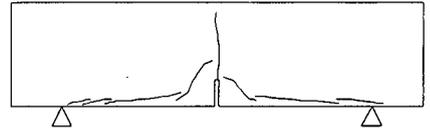


Fig. 7 Crack Pattern Example After Loading (CS-AR)

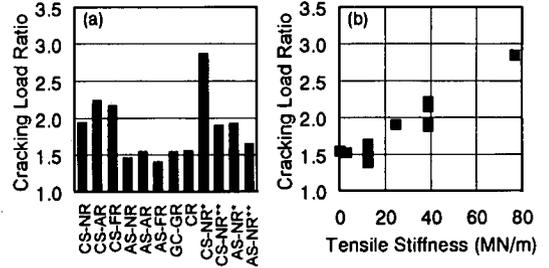


Fig. 8 Cracking Load Ratio (*0° 2 plies, **90° 2 plies)

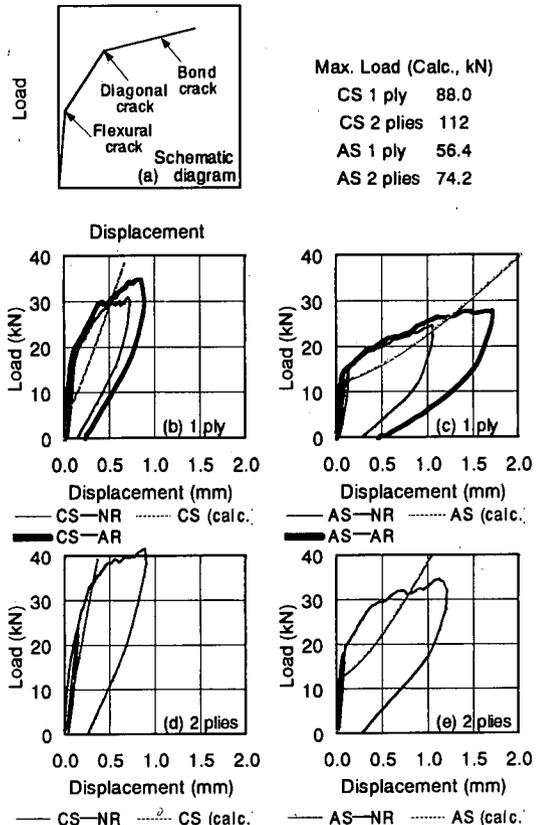


Fig. 9 Load-Displacement Curves

た三角形部分では顕著な剥離はみられないが、支点側では斜めひび割れが剥離を助長した傾向にある。ひび割れの角度により剥離程度が異なることが推察される。一方、GC や CR では曲げひび割れ発生とほぼ同時に FRP 層が破断し、その後の耐力の増加はなかった。

ノッチ先端における目視による曲げひび割れ発生

荷重を、無補強のものを1としてFig. 8(a)に示す。また、連続繊維シートのみ単位幅当たりの軸方向引張剛性に対して表わしたものをFig. 8(b)に示す。どの仕様も曲げひび割れ発生荷重が増大し、ひび割れ抑制効果が見られるが、ヤング率が高いCSが最も効果が大きく、その後の同一荷重時のひび割れ幅が最も小さくなった。曲げひび割れ発生荷重は軸方向1層の場合でCSが約2倍、ASでは約1.5倍で、GCやCRを用いた場合も1.5倍程度の増加が認められた。軸方向2層では1層のほぼ2倍の効果があるのに対し、直交2層では軸方向の繊維量が同量であるため同程度であった。以上のように、FRP層の軸方向引張剛性に比例して曲げひび割れ発生荷重は大きくなる。一方、樹脂の影響は比較的少ない。

b) 荷重—スパン中央たわみ

荷重とスパン中央たわみの関係を示す。樹脂を無視した平面保持による計算値とともにFig. 9に示す。CSやASを用いた供試体では、曲線は前述のひび割れ状況に対応して3領域に分類できるものが多かった。すなわち、Fig. 9(a)に示すように、曲げひび割れ発生以降は曲げ剛性の低下を伴うもののほぼ直線となるが、斜めひび割れ発生後は剥離によって荷重の増加は少なくなり降伏に似た挙動となっている。曲げひび割れ発生以降の曲げ剛性はヤング率が高いCSで大きく、また載荷終了時までの耐力の増加も大きい。ASでは比較的柔なたわみ性状となっている。軸方向2層ではほぼ倍増し、耐力の増加はさらに大きくなるが、剥離ひび割れが顕著な時期には曲げ剛性は低下し軸1層と同程度となった。一方、樹脂の違いが曲げ剛性に与える影響はほとんど認められなかった。計算ではノッチを無視したため、実験値より曲げひび割れ発生までの曲げ剛性が大きく、また曲げひび割れ発生荷重は小さくなっている。その後の剥離開始までの曲げ剛性は、CSを用いた結果に対して若干大きく見積もる傾向が認められる。なお、計算上はいずれも曲げ圧縮破壊であり、最大荷重は実験値の2倍程度となることから、剥離の発生時を明確にしておく必要が確認できる。

c) 中央断面とFRP層表面ひずみ

斜めひび割れ発生程度までの中央ひび割れ断面のひずみ分布をFig. 10(a)に示す。この時期までは、目視では明確な剥離は観察されなかったが、平面保持は失われており、樹脂の変形、連続繊維シートの樹脂からの引抜け、コンクリートの変形が、また、荷重の増加に伴い剥離が相対変位の原因になっていると考えられる。このことがヤング率の大きいCSを用いた場合に曲げ剛性の計算値に上述の相違を与えると考えられるが、ASでは影響は小さい。

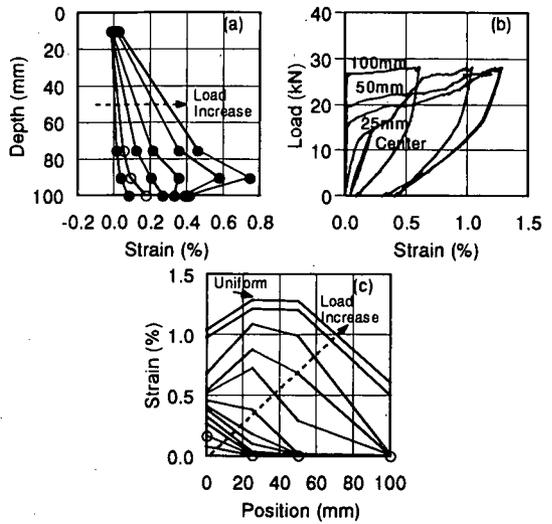


Fig. 10 Strain Distribution in Central Section and FRP Layer (AS—AR, ○: Cracking Load)

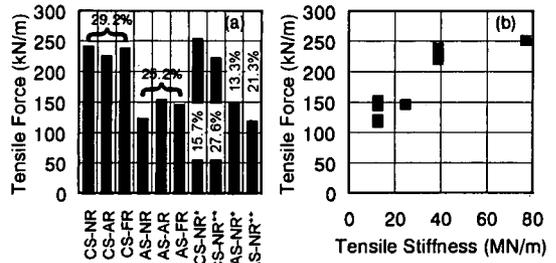


Fig. 11 Max. Tensile Force (*0° 2 plies, **90° 2 plies)

d) FRP層表面ひずみ

FRP層表面のひずみをFig. 10(b)に示す。中央では載荷開始直後から増加するが、中央から25~100mmでは順に急増点があり、FRP層の剥離が支点に向かって進展した様子がうかがえる。

一方、Fig. 10(c)に示すように、中央部や支点付近以外の剥離ひび割れが顕著な領域では、載荷終了時にほぼ一定の値に近づく傾向にあった。そこで、載荷終了時までFRP層表面で発生したひずみの最大値から得られる引張力により剥離に対する抵抗性を評価することにした。その値を破断荷重に対する割合とともにFig. 11(a)に、繊維のみの単位幅当たりの軸方向引張剛性に対して表わしたものをFig. 11(b)に示す。連続繊維シートの引張剛性が大きいほど負担できる引張力が大きくなっており、すなわち付着応力の積分値が大きくなること分かる。このことにより、ASよりCSで、また軸方向1層より2層で載荷終了時までの荷重の増加が大きくなっている。一方、引張剛性が40~80MN/mではほぼ同様の値を示し、頭打ちの傾向も認められ、耐力増加のための積

層数には上限が存在することが推察される。この引張力は、片引きタイプの付着試験による既往の研究⁹⁾のうち同様に剥離により最大値となっているものより小さい傾向にあり、また引張剛性(積層数)の影響も小さい。これは斜めひび割れの発生が剥離ひび割れを誘発する傾向にあったためと考えられる。

(3) 曲げ補修・補強効果の耐酸性

a) 曲げ試験

ノッチ先端における曲げひび割れ発生荷重の経時変化を、同材令の無補強のものを1としてFig. 12に示す。いずれの供試体も顕著な低下は認められないが、ヤング率が大きくひび割れ抑制効果大きいCSに、ヤング率が低下したNRとFRを用いた場合で若干の低下傾向となった。曲げひび割れに伴う付着応力の発生に対して樹脂から繊維に伝達される応力が小さくなり、連続繊維シートの引張剛性を十分に発揮できなくなったものと考えられる。また、曲げひび割れ発生前にノッチ付近で剥離が発生していた可能性もある。

6ヶ月の浸漬を行った供試体の荷重-たわみ曲線をFig. 13に示す。曲げひび割れ発生以降の曲げ剛性には、ほとんど浸漬の影響は認められなかった。FRP層表面で発生したひずみの最大値から得られる引張力の経時変化をFig. 14に示す。浸漬によるヤング率の低下が大きい樹脂を用いた場合で増加する傾向が認められる。また、その傾向はASを用いた供試体で顕著であった。同じ発生付着応力に対して樹脂の変形が大きくなる結果、付着応力の発生範囲が広くなるとともにその応力が小さくなり、界面のずれ応力やコンクリートへの作用せん断力が小さくなるため、ある程度の樹脂の劣化はむしろ付着応力の積分値を増加する傾向になる可能性がある。

b) 中性化深さ試験

連続繊維シート貼付け工法の耐久性には、FRP層自身の耐環境性能および接着安定性能に加え、防食被覆層としての環境遮断性能が重要である。浸漬供試体のFRP層にはいずれも割れやふくれは認められなかったが、NRやFRでは表面のつやがやや失われており、若干の変色が認められ、洗浄・乾燥後は表面に薄く白い粉が観察された。目視のため明らかでないが、環境剤の取着によりわずかに膨潤している可能性が考えられた。しかし、6ヶ月浸漬後の供試体のコンクリート部分の中性化深さはいずれの仕様の場合も0mmで、FRP層はコンクリートを適切に保護していた。樹脂単体での質量増加程度と比較して、樹脂層の厚みが小さいにもかかわらず浸漬の影響が少ないが、連続繊維シートにより樹脂の微細なひび

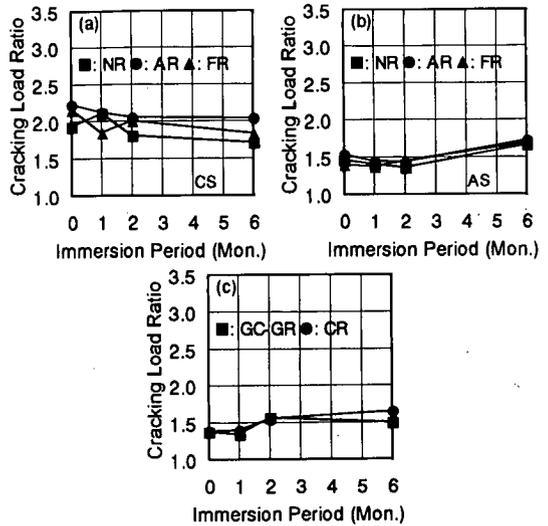


Fig. 12 Cracking Load Ratio

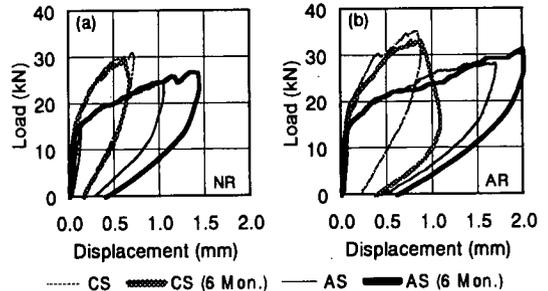


Fig. 13 Load-Displacement Curves

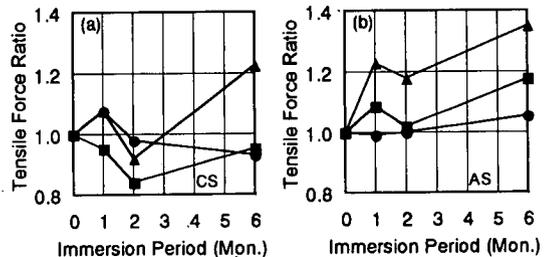


Fig. 14 Tensile Force Ratio (■: NR ●: AR ▲: FR)

割れが押さえられ、環境剤侵入に対する遮蔽効果があるものと推定される。また、そのため付着に与える影響も小さかったものと思われる。

(4) 連続繊維シートおよび樹脂の引張強度の影響

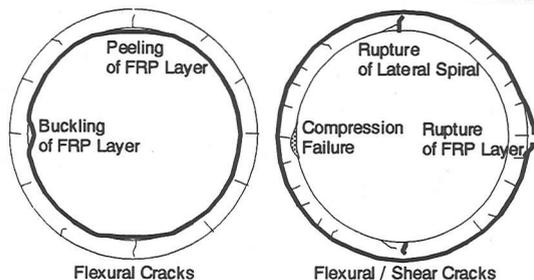
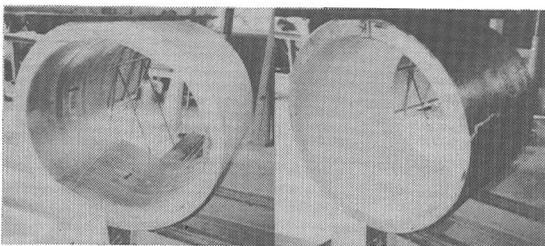
本研究の範囲では、供試体の破壊形式が剥離ひび割れの発生であったため、連続繊維シートの引張強度が曲げ補修・補強効果に与える影響は認められない。一方、浸漬後も含め樹脂の引張強度は広範囲にわたったが、曲げ補修・補強効果との相関性は確認できなかった。

Table 11 Failure Mode of Externally Strengthened Hume Pipes

Fiber Sheet	Resin	Fiber Layer Configuration	Failure Mode**
CS	AR	1 ply	FRP Layer Rupture
		2 plies	Concrete Failure
		1, 2 plies*	FRP Layer Rupture
AS	NR	1 ply	FRP Layer Rupture
		2 plies	Concrete Failure
C2	AR	1 ply	Spiral Steel Rupture
CM	AR	1 ply	FRP Layer Rupture
		2 plies	Concrete Failure
GC	GR	1, 2 plies	FRP Layer Rupture

*Also with internal 1 ply.

**FRP layer rupture/concrete failure occurred at 90° and 270°.
Spiral steel rupture occurred at 0° and 180°.



(a) Internal application (b) External application

Fig. 15 Typical Failure Modes of Hume Pipes and Schematic Diagrams

5. ヒューム管の外圧補修・補強効果

内面および外面補強管の載荷終了時の様子を Fig. 15 に、外面補強管の破壊形式の一覧を Table 11 に示す。内面および外面補強とも重ね継手が弱点となることはなかった。

(1) 内面補強管

a) ひび割れおよび破壊性状

内面補強管では、無補強管と同様に、まず載荷点内側と、ほぼ同時に支点内側に、ひび割れが発生した。その後、左右外側を中心に軸筋間隔程度でひび

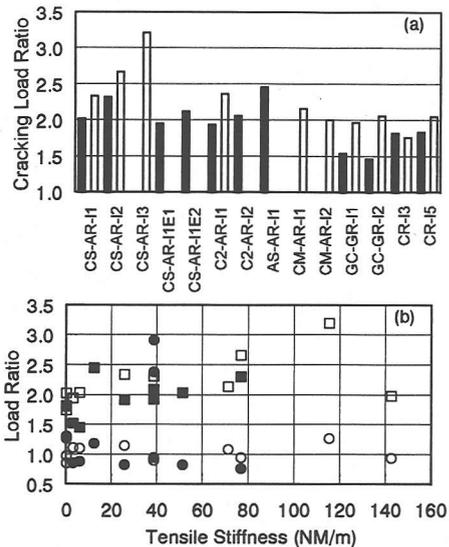


Fig. 16 Load Ratio

(I: Internal application, Number: Layers Number or thickness)
Cracking load ■: no internal crack, □: with internal crack
Maximum load ●: no internal crack, ○: with internal crack
●: no internal crack with external application

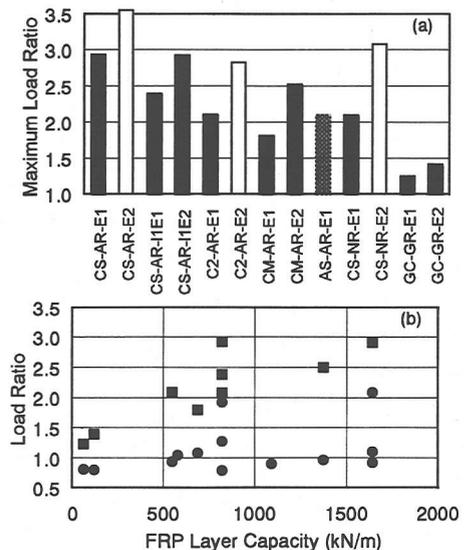


Fig. 17 Maximum Load Ratio

(E: External application, Number: Layers number)
Maximum load ■: FRP layer rupture, □: Concrete failure, ▨: Spiral steel rupture
Cracking load ●, ●: also with internal application

割れが発生し、その付近の螺旋筋の降伏により決まる最大荷重以降も載荷した場合は、その破断により2分された。GC 以外の連続繊維シートを用いた場合、初ひび割れ以降、載荷点や支点内側から弦のように FRP 層の剥離が進展し、最大荷重時付近では左右内側で FRP 層が座屈する場合もあったが、載荷点や支

点での破断はみられなかった。GCやCRはひび割れ発生とほぼ同時に破断した。

b) ひび割れ発生荷重および最大荷重

載荷点内側における目視によるコンクリートひび割れ発生荷重および最大荷重を、無補強のものを1としてFig. 16に示す。管内面にひび割れを発生させた供試管の値は、載荷中に再び荷重の一時低下を確認した時のものとした。曲げ試験と同様に、どの仕様についてもひび割れ発生荷重が増大し、また連続繊維シート引張剛性にほぼ比例しており、曲げ試験での結果との整合性があった。しかし、引張剛性の増加は曲げ試験ほどの影響はなく、供試体形状の相違に加えてヒューム管の場合に内面に生成されやすい脆弱部をさらに処理する必要があるものと考えられる。また、管内面ひび割れを有する場合も、内面へのFRP層の適用により健全な供試体と同程度に回復できることがわかる。一方、剥離または破断が発生した後に鉄筋が降伏する破壊形式のため、最大荷重に対する補強効果は認められなかった。

(2) 外面補強管

a) ひび割れおよび破壊性状

外面補強管では、左右外側のひび割れ分散性が向上していることが、断面における目視により確認できた。CSまたはC2(HSタイプ)を用いた場合、1層(それぞれ300, 200g/m²)では左右外側でFRP層の破断、2層(それぞれ600, 400g/m²)では左右内側でのコンクリートの圧潰により最大荷重となり、CM(HMタイプ, 300g/m²)では1, 2層ともにFRP層が破断した。ASでは大きな変形の後、載荷点と支点で螺旋筋が破断した。載荷点あるいは支点を起点とするせん断ひび割れを伴った供試管もみられた。

b) ひび割れ発生荷重および最大荷重

載荷点内側における目視によるコンクリートひび割れ発生荷重および最大荷重を、無補強のものを1としてFig. 17に示す。最大荷重はいずれもが増加しており、FRP層の破断で最大となる場合はその破断荷重に比例している。一方、内面補強を併せて行った供試管を除き、ひび割れ発生荷重に対する補強効果は認められない。

(3) ヒューム管の外圧補修・補強効果

FRP層の管内面への適用は、主として既設管を対象としたものであり、管内の劣化要因から管を保護するとともに、ひび割れの発生・進展を防ぐことを意図したものである。一方、外面への適用は新設管のみを対象としたものであり、主として上載荷重に対する耐力の向上を目的としたものである。本研究の範囲では特定の対象供試管に対する限られた種類

のFRP層の適用を検討したに過ぎないが、試験結果は用いたFRP層によりこれらの補修・補強効果が得られていることを示している。内面補強は、ひび割れ発生荷重の増加に加え、FRP層が破断しなかったため漏水防止効果も期待できる点で既往の防食被覆工法より優れている。外面補強はFRP層の引張強度を有効に利用する手段の一つになる。また、内外面ともに適用することにより、両者の効果が得られた。

FRP層の実際の適用にあたっては、さらに検討すべき内容もある。例えば、劣化したコンクリート脆弱層の除去処理の程度や、未除去の劣化因子および非貼付け面からの物質の浸透が補修・補強効果に与える影響等を明らかにする必要がある。また、地震時を含め実際の荷重状況における補修・補強効果を、外面補強量との関連のもとで検討する必要がある。

6. 結 論

連続繊維シート貼付けによる下水道コンクリートの補修・補強効果ならびにその耐酸性を、構成材料から実大レベルの供試体までの載荷試験から確認した。連続繊維シート貼付け工法には適用可能な材料が多く存在し、また複合材料として用いるため、材料選定には十分留意する必要がある。本研究で用いた材料はいずれも補修・補強効果を有していたが、それぞれ特徴があり、ひび割れ、変形、破壊性状および耐酸性において選定基準が設定できるものと考えられる。本研究の範囲内で得られた主な知見をまとめて結論とする。

(1) 樹脂の種類より硬化物の力学的性質、耐酸性に差があるが、連続繊維シートを用いたFRP、コンクリート供試体の力学的性質に対して樹脂の違いによる有為差は見られなかった。

(2) 連続繊維シート引張剛性の増加は、曲げひび割れ発生荷重、その後の曲げ剛性および剥離ひび割れ進展時の最大引張力を増加させる。樹脂のヤング係数の影響は小さいが、連続繊維シート引張剛性が大きい場合に曲げひび割れ発生荷重と最大引張力に影響がある。これらの効果はコンクリートのひび割れ状況の影響を受ける。一方、10%硫酸水溶液への6ヶ月間浸漬ではこれらの効果の変化は小さく、FRP層によりコンクリートが酸に対して保護され、FRP層自身が受けた影響も、曲げ性状に顕著な影響を与えないものではなかった。

(3) ヒューム管の内面補強はひび割れ発生荷重を増加させる。その効果は曲げ試験と同様引張剛性により整理でき、管内面にひび割れを有する場合も耐荷挙動は健全なものに近くなった。また、FRP層は破断せず、漏水防止効果を有するものと考えられる。一

方、外面補強は最大荷重を増加させる。FRP 層の破断が最大荷重を決める場合、その効果は破断荷重により整理できる。

(4)連続繊維シート貼付け工法は、耐酸環境での補修・補強効果の低下が少なく、下水道コンクリートへの適用が有効であると考えられる。

謝辞:最後に、本研究の遂行に当たってご指導いただいた故 藤井 學教授(京都大学大学院), 実験に際してご協力頂いた大西清春氏(サンユレジン(株)), 梅田和助氏(藤村ヒューム管(株)), 西村 明氏(東レ(株)) および卒研生の福本仁志氏(現建設省)をはじめ皆さんに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば, 緒方紀夫, 安藤博文, 松田哲夫, 小島克朗, 大野 了: 炭素繊維による段落し部を有する既存 RC 橋脚の耐震補強に関する研究, 土木学会論文集, No.540/V-31, pp.85-104, 1996.6.
- 2) 例えば, 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.
- 3) 宮川豊章: 下水道施設のコンクリート防食について, 防水ジャーナル, 第 261 号, pp.42-45, 1993.9.
- 4) 日本下水道事業団: コンクリート防食指針(案), 1993.6.
- 5) 例えば, 浅野靖幸, 佐藤靖彦, 上田多門, 小野 定: 炭素繊維シートの付着特性について, 新素材のコンクリート構造物への利用シンポジウム論文報告集, JCI 北海道支部, pp.75-80, 1996.11.
- 6) 奥田 聰: プラスチックによる防食技術, 日刊工業新聞社, 1982.

- 7) 大石不二夫, 成沢郁夫: プラスチック材料の寿命—耐久性と破壊—, 日刊工業新聞社, 1987.
- 8) Hull, D.(宮入裕夫, 池上浩三, 金原勲訳): 複合材料入門, 培風館, 1984.
- 9) コンクリート構造物の表面保護工便覧(案)・同解説/コンクリート床版防水工設計施工指針(案)・同解説, 阪神高速道路公団・日本材料学会, 1989.3.
- 10) 久保忠雄, 西澤 宏: 下水道施設の防食被覆の耐久性に関する調査, 第 31 回下水道研究発表講演集, pp.234-236, 1994.7.
- 11) (財)鉄道総合技術研究所: 炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針, 1996.7.
- 12) Hawkins, G. F., Pattel, N. R. and Steckel, G. L.: Failure Analysis of Highway Bridge Column Composite Overwraps, *Proc. of the 1st Intl. Conf. on Fiber Composites in Infrastructure*, pp.1126-1140, 1996.
- 13) 岡野 素之, 中西 克佳, 田中 常雄, 小島 克朗: シート状炭素繊維を貼付て補強した既存部材の耐久性に関する試験, 土木学会第 46 回年次学術講演会, pp.444-445, 1991.
- 14) 小松憲一, 田中良典: 繊維強化シートによる円筒状構造物の補強実験, 土木学会第 47 回年次学術講演会講演概要集, pp.372-373, 1992.
- 15) 佐野 正, 三浦 尚: 鋼板によるコンクリート部材の補強設計法に関する研究, 土木学会論文集, No.550/V-33, pp.117-129, 1996.11.

(1997.6.26 受付)

REPAIR AND STRENGTHENING OF SEWERAGE CONCRETE STRUCTURES USING FIBER SHEET

Atsushi HATTORI, Takashi YAMAMOTO, Seiji KASHI and Toyoaki MIYAGAWA

To apply the high strength fibers in woven sheet shape to sewerage concrete structures for repair and strengthening, their long term durability in acid environment should be made clear as well as their load carrying behaviors. This paper describes the acid resistance of several kinds of fiber sheets, resins and FRP plates of their combination. Flexural strengthening of concrete prisms using the fiber sheets and the strengthening durability in acid solution were also discussed. Finally, the external loading test of hume pipes strengthened with the fiber sheets was conducted. The results indicate that appropriate combination of fiber sheet and resin can be adopted as one of the repair and strengthening methods for sewerage concrete structures.