

## 論文 補強と電気防食の機能を有するアラミド繊維シートに関する検討

荒木 茂<sup>\*1</sup>・白濱 昭二<sup>\*2</sup>・久保 隆史<sup>\*3</sup>・益永 達則<sup>\*4</sup>

要旨：電気防食機能を有する AFRP (アラミド繊維強化プラスチック)シート補強工法の確立を目的として、AF (アラミド繊維)シートにニッケルめっきチタン線を編みこんだものを導電性樹脂で接着し、電気防食用陽極及び補強の機能を有したシステムとする検討を行っている。始めに導電性樹脂の開発を行い、コンクリート供試体を用いた急速通電試験を行って陽極としての性能を調べた。次にコンクリート供試体を用いた一軸引張付着実験、RC 梁供試体の曲げ載荷実験で補強効果を調べた。結果、陽極としては早期劣化が確認された。補強効果に関しては既存の AFRP シート補強工法と同等の効果が確認できた。

キーワード：電気防食，陽極，急速通電試験，補強，AFRP，界面剥離破壊エネルギー，導電性樹脂

## 1. はじめに

道路橋などの構造物の多くは高度経済成長期に建設されたが、現在これらの社会資本が一斉に老朽化し、その機能が損なわれることが問題となっている。一方、建設投資額の減少などに伴って、これらの構造物の更新は困難となっており、維持補修して健全に利用していく必要性が高まっている。このような状況の中、コンクリート構造物に対しては、塩害や中性化、凍害、アルカリ骨材反応などの劣化や耐荷力不足が問題となっている。これらの問題に対してそれぞれ対策工法が検討、実用化されているが、複合的な劣化を起こしている構造物に対しては、複数の問題に対して対策が必要となってくる。電気化学的防食工法は、塩化物の影響によるコンクリート構造物中の鉄筋腐食に対して有効な対策であるが、鉄筋腐食に加え、耐荷力不足などが懸念される構造物に対しては、さらに補強対策が必要となる。一方、FRP(連続繊維強化プラスチック)シートを用いた補強工法は、耐荷力の向上に有効な対策であると同時に、劣化因子の浸入を抑制する効果も期待できるが、すでに塩害で鉄筋腐食などが進行している構造物に対して、その進行を止めることは困難であり、腐食に起因するひび割れの進行によって、補強効果が損なわれることも懸念される。

以上のような背景を踏まえ、FRP シートに電気防食用陽極の機能を付加して、耐荷力不足と鉄筋腐食どちらに対しても有効な工法を検討することとした。FRP シートとしては、通電による影響を抑えるため、非磁性、非導電性素材である AF シートを選び、陽極としての性能を持たせるため、ニッケルめっきチタン線を編みこんだ。これを導電性樹脂によってコンクリートに貼り付けることによって、補強部材としての機能に加え、電気防食用陽極としての機能を付加した。

## 2. 導電性樹脂の検討

## 2.1 検討概要

エポキシ樹脂に炭素粉末を混入することによって導電性樹脂の検討を行った。炭素添加量 5, 15, 20, 25% の樹脂を用いて、4 端子法にて導電性樹脂の体積抵抗率を測定し、炭素添加量 0, 5, 15% の樹脂を用いて曲げ強度、引張強度、引張せん断強度を JIS に準拠して測定した。以上の調査より導電性樹脂を決定したが、炭素添加の影響で樹脂の粘性が高くなり、シートへの含浸不良が懸念されることから、目付量 415g/m<sup>2</sup> の AF シートに、選定した樹脂を含浸して AFRP シートの引張試験を実施した。試験は JSCE-E-541-2000<sup>1)</sup>に準拠して行った。試験ケースは、導電性樹脂を含浸したケースの CC、下塗樹脂に導電性樹脂、上塗樹脂に現行市販品の補強用樹脂を用いたケースの CE、現行市販品の補強用樹脂を含浸したケースの EE とし、各ケース 3 体試験を行った。CE は導電性樹脂の含浸性の悪化を補う目的で含浸性の良い補強用樹脂を上塗したケースで、下塗樹脂を 0.3mm 程度塗布してシートを設置し、2 種類の樹脂が混ざらないように約 1 日硬化させた後、上塗樹脂を含浸させて作製した。

## 2.2 検討結果

図 - 1 に炭素添加量と体積抵抗率の関係、図 - 2 に炭素添加量と各強度の関係を示す。体積抵抗率、各強度共に 1 ケースにつき 1 体のデータである。図 - 1 より、コンクリートの体積抵抗率  $10^2 \sim 10^4 \cdot \text{cm}$  と比較して、炭素添加量 15% 以上ならば十分な導電性が確保できることが分かった。次に図 - 2 に着目すると、曲げ強度の低下が確認されが、AF 工法での含浸樹脂の規格値<sup>2)</sup>である、引張強度 30N/mm<sup>2</sup>、曲げ強度 40 N/mm<sup>2</sup>、引張せん断強度 10 N/mm<sup>2</sup> と比較すると、各強度共に満足している。以上の結果より、導電性および機械的性質が確保される

\*1 神鋼鋼線工業株式会社 開発本部開発部 工修 (正会員)

\*2 神鋼鋼線工業株式会社 開発本部開発部副部長 工博 (正会員)

\*3 神鋼鋼線工業株式会社 開発本部開発部 (非会員)

\*4 サンコレック株式会社 建設材料事業部技術グループ研究開発チーム (非会員)

範囲で、最小の添加量である 15%の樹脂で検討を行うこととし、AFRP シートの引張試験を行った。試験結果を表 - 1 に示す。試験は各ケース 3 体で実施したが、試験結果には平均値と変動係数  $C_v$  を示した。EE と比較して、CC, CE は引張強度及び弾性係数が低下し、若干ばらつきも大きい傾向が確認された。炭素添加によって粘性が高くなり、繊維に樹脂が行き渡りにくくなるために応力が偏って付加される部分が生じ、その部分が破壊の基点となって弾性係数および引張強度が低下、ばらつきが大きくなったと考えられる。以上より実際の現場で作業する場合、含浸不良による品質の低下が懸念されることから、更なる改善が望まれる。しかし試験値に着目すると AF 工法での AFRP シートの規格値<sup>2)</sup>と、同等以上となっており、ある程度の補強効果は期待できると考えられる。

### 3. 急速通電実験

#### 3.1 実験要因

陽極システムの通電性能を調べるため、コンクリート供試体を用いて急速通電試験を行った。表 - 2 に急速通電実験ケースを示す。検討ケースは、基本ケースとして CC-Ni,Ti, 樹脂の含浸性が良いケースとして CE-Ni,Ti, 鋼線の耐久性が高いケースとして CC-Pt とした。鋼線に関しては  $\phi = 0.5\text{mm}$  の線径のものを使用した。

#### 3.2 実験概要

図 - 3 に急速通電実験供試体形状、表 - 3 に急速通電実験コンクリート配合を示す。供試体中央に丸鋼を配置して陰極とし、コンクリート上面に陽極を設置した。陽極の排流端子は、鋼線をディストリビュータに溶接して作製した。コンクリートは激しい塩害を想定し、塩化物含有量で  $9\text{kg/m}^3$  を添加した。また、コンクリートの比抵抗を低く抑えるため、供試体高さの 1/3 程度を NaCl 水溶液中に浸して実験を行った。1/3 とした理由は、鉄筋や陽極が水溶液に浸ってしまうことによって、電流が流れる経路に影響を与えることを懸念したためである。

#### 3.3 通電条件

陽極材の耐久性評価基準である NACE Standard TM0294-01<sup>3)</sup>では電流密度  $110\text{mA/m}^2$ 、供用期間 40 年を想定し、それと等価な積算電流密度となるように電流密度  $8.9\text{A/m}^2$  を 180 日与えて評価を行う。本試験も同様の通電を行うこととし、電流密度  $8.9\text{A/m}^2$  で試験を行った。

#### 3.4 実験結果

図 - 4 に急速通電による電位の推移(オン電位)と 図 - 5 に急速通電による付加電圧の推移を示す。本来はインスタントオフ電位で評価するべきであるが、インスタントオフ電位のばらつきが大きく、ほとんど傾向が確認できなかったことや、早期に結果が出たためにコンクリー

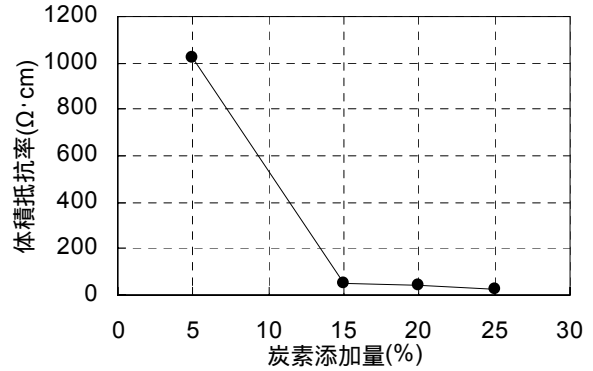


図 - 1 炭素添加量と体積抵抗率の関係

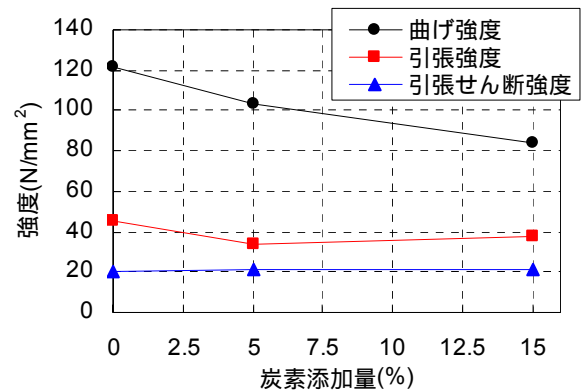


図 - 2 炭素添加量と各強度の関係

表 - 1 AFRP シートの引張試験結果

記号	下塗樹脂	上塗樹脂	引張強度		弾性係数	
			$f_{tu}$ N/mm <sup>2</sup>	$C_v$ %	E kN/mm <sup>2</sup>	$C_v$ %
CC	導電性	導電性	2091	10.1	120	11.2
CE	導電性	補強用	2290	11.4	130	1.6
EE	補強用	補強用	2508	9.7	138	3.2
規格 <sup>2)</sup>	補強用	補強用	2060		118	

表 - 2 急速通電実験ケース

記号	下塗樹脂	上塗樹脂	鋼線	
			plating	base
CC-Ni,Ti	導電性	導電性	Ni	Ti
CE-Ni,Ti	導電性	補強用	Ni	Ti
CC-Pt	導電性	導電性	-	Pt

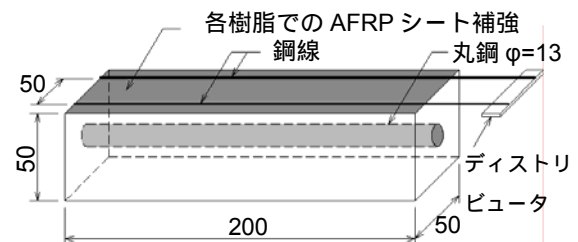


図 - 3 急速通電実験供試体形状

トの変質などの影響は少なく、オン電位の推移は陽極自体の電位にほぼ対応していると考え、今回はオン電位で評価を行った。鉄筋電位はおおむね-1.6V vs.CSE 近辺を推移しており安定しているが、陽極電位は通電初期から上昇し、それに伴って付加電圧も上昇してすべて早期に通電が出来なくなってきた。樹脂で被覆したため、陽極近傍で発生した酸素が外環境に放出されなくなり、酸素発生反応( $2H_2O \rightarrow O_2+4H++4e^-$ )が抑制されたためだと考えられる。NACE の判定基準である陽極の初期電位に対する変化が4V となるまでの時間はCC-Ni,Ti, CE-Ni,Ti, CC-Pt でそれぞれ, 24h, 2h, 39h となった。上塗樹脂に補強用樹脂を用いた場合と、ニッケルめっきチタン線を用いた場合、特に耐久性が低下した。上塗樹脂に補強用樹脂を用いた場合、シートへの含浸性が良いために比較的密封性が高く、酸素が拡散しにくくなり他のケースより早期劣化を起こしたと考えられる。一方鋼線についてであるが、表 - 4 に試験後の鋼線表面の EPMA 分析結果を示す。ニッケルめっきチタン線表面は、試験前はほぼ100%でニッケルが検出されるのに対して 試験後はニッケルが溶解してベースのチタンが検出されている。酸素発生反応が抑制されたために、代わりにニッケルが溶解する反応が起きたと考えられる。以上より、通電性能に関しては 陽極で酸素発生反応が生じるようにすること、チタン線の表面にニッケルよりも耐食性が良い処理を施すことなどが今後の課題として挙げられる。

#### 4. 一軸引張付着実験

##### 4.1 実験要因

導電性樹脂を用いて補強した際の付着特性に関して一軸付着実験を実施した。表 - 5 に一軸引張付着実験ケースを示す。既存工法として PEE, 基本ケースとして NCC, 樹脂の含浸性が良いケースとして NCE, プライマーの影響を調べるためのケースとして PCE を試験した。各ケース 3 体試験を行った。

##### 4.2 供試体概要

図 - 6 に一軸引張付着実験供試体形状, 表 - 6 に一軸引張付着試験コンクリート配合を示す。試験時のつかみ部として D19 鉄筋を 320mm 埋め込んでいる。供試体の中心部にスリットを入れひび割れを誘導しているが、試験時の角がけを防ぐために、切り欠きに沿って幅 20mm のフィルムを配置した。シート貼り付け部の下地処理に関しては、ディスクサンダーを用いて粗骨材が表面に現れる程度までケレン処理を行い、その後 PCE, PEE についてはプライマーを塗布し 1 日後にシートの施工を行った。NCC, NCE に関してはケレン処理で下地処理を終了した。シートの施工に関しては、下塗樹脂と上塗樹脂の種類が違う NCE, PCE については下塗樹脂を 0.3mm 程

表 - 3 急速通電実験コンクリート配合

スランブ cm	W/C %	空気量 %	s/a %	単位量 kg/m <sup>3</sup>			
				W	cm	%	%
10	37	8	49	168	451	773	817

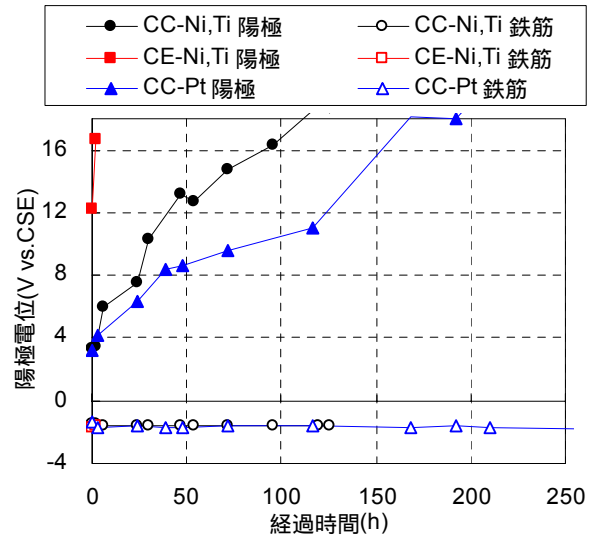


図 - 4 急速通電による電位の推移(オン電位)

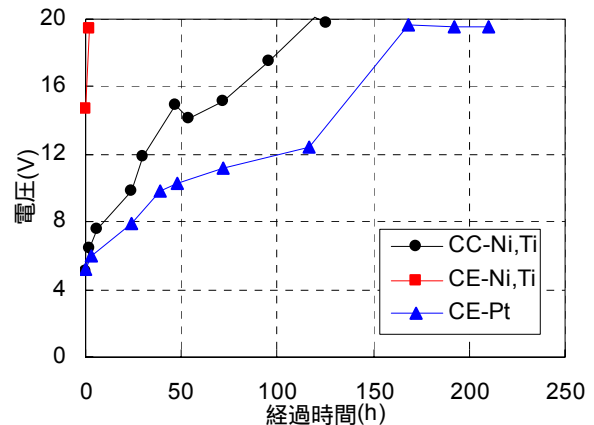


図 - 5 急速通電による付加電圧の推移

表 - 4 試験後の鋼線の EPMA 分析結果

記号	C	N	O	Ni	Al	Cl	Ti	Pt
CC-Ni,Ti	40	-	17	-	-	7	37	-
CE-Ni,Ti	34	9	12	15	1	-	29	-
CC-Pt	10	-	-	-	-	-	-	90

表 - 5 一軸引張付着実験ケース

記号	プライマー	下塗樹脂	上塗樹脂	試験数
PEE	あり	補強用	補強用	3
NCC	なし	導電性	導電性	3
NCE	なし	導電性	補強用	3
PCE	あり	導電性	補強用	3

度塗布してシートを設置し、2種類の樹脂が混ざらないように1日養生した後、上塗樹脂を含浸させて作製した。樹脂が1種類のPEE、NCCに関しては下塗樹脂の塗布、シート設置、上塗樹脂含浸と、一連の工程を連続して行った。また、剥離防止側に定着用シートを施工して、片側で剥離が生じるようにした。

#### 4.3 実験方法

シート施工後、1ヶ月程度室温にて気中養生を行ってから試験を実施した。試験機への取り付けは、偏心の影響を少なくするために鉄筋のつかみ部にねじ切り加工を施し、Iナット及びシャックルを組み合わせで行った。载荷には油圧ジャッキを用いた。試験時のコンクリート圧縮強度は3体の平均値で48.3N/mm<sup>2</sup>、AFシートはシート破断を防ぐため、目付け量830g/m<sup>2</sup>のものを用いた。

#### 4.4 実験結果

図-7に界面剥離破壊エネルギーの試験結果を示す。界面剥離破壊エネルギーは式(1)より算出した。

$$G_f = \frac{P_{\max}^2}{8b^2 \cdot E_f \cdot t} \quad (1)$$

ここで、 $G_f$ : 界面剥離破壊エネルギー、 $P_{\max}$ : 最大荷重、 $b$ : シート幅、 $E_f$ : シート弾性係数、 $t$ : シート厚さ

界面剥離破壊エネルギーの試験結果の平均値は、すべてのケースで標準値0.5N/mm<sup>1</sup>)よりも大きな値を示した。また、既存工法であるPEEと比較して、その他のケースは同等かそれ以上の値を示した。以上より剥離性状については導電性樹脂を用いた場合、既存工法と同等もしくはそれ以上の補強効果があると考えられる。また、プライマーの影響に関しては本実験では確認できなかった。

次に剥離に着目すると、以下の剥離形態が確認された。コンクリートの表層破壊。試験後のシートにコンクリートが付着している状態。

樹脂とコンクリートの界面で生じた剥離。試験後コンクリート面に樹脂が残っており、シートにもコンクリートが付着していない状態。

樹脂とシートの界面で生じた剥離。試験後のコンクリートに樹脂が付着し、シートが露出している状態。

以上の剥離破壊面が生じた割合を整理し、試験ケースごとに平均値でまとめた。図-8に各剥離破壊面の割合を示す。既存工法であるPEEは樹脂とコンクリートの界面で剥離している割合が高い。導電性樹脂を下塗樹脂に用いたNCC、NCE、PCEに関しては、コンクリートの表層破壊の割合が高いが、部分的に樹脂とシートの界面で剥離している箇所が確認された。この傾向から考えると、導電性樹脂は既存の補強用樹脂に比べ、コンクリートとのせん断方向の接着力は高いが、シートとの接着力が若干低いと考えられる。コンクリートとのせん断方向の接

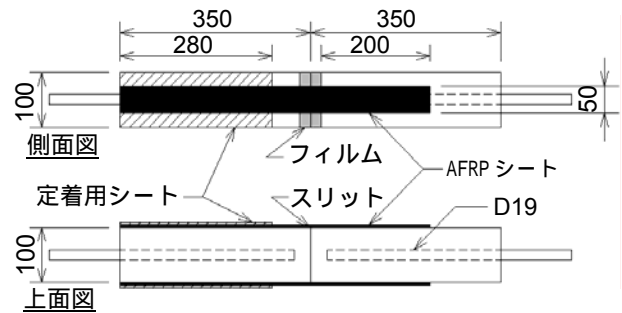


図-6 一軸引張付着実験供試体形状

表-6 一軸引張付着実験コンクリート配合

スランブ cm	W/C %	空気量 %	s/a %	単位量 kg/m <sup>3</sup>			
				W	C	S	G
18	45	4.5	45.2	197	438	726	895

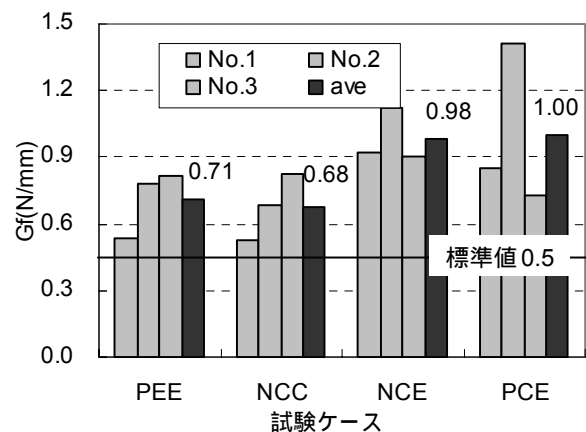


図-7 界面剥離破壊エネルギー

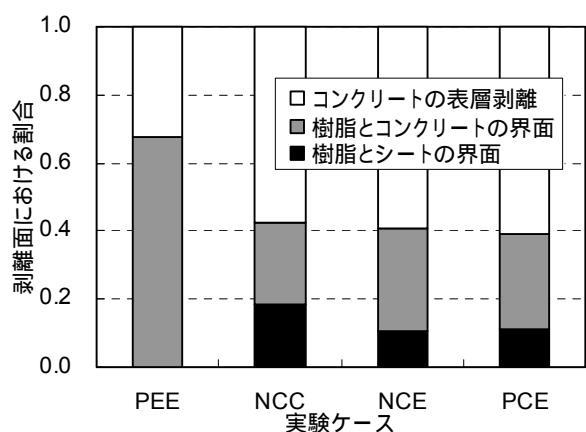


図-8 各剥離破壊面の割合

着力が高い理由は、導電性樹脂の粘性が高いことからコンクリート面に塗りつける場合に凹凸に樹脂が充てんされやすく、アンカー効果が大きくなったためと考えられる。プライマーの有無について影響が確認できなかった理由についても、導電性樹脂とコンクリートとのせん断方

向の接着力が高いためと考えられる。導電性樹脂とシートとの接着力が低い理由は、導電性樹脂の粘性が高く、繊維束内部まで樹脂が行き渡らないため、樹脂とシートが完全に一体化していないためだと考えられる。

## 5. RC 梁供試体の曲げ補強効果確認実験

### 5.1 実験要因

実際に導電性樹脂を用いた場合の補強効果を確認するため、RC 梁供試体を用いて補強効果を確認した。

表 - 7 に曲げ補強効果確認実験ケースを示す。無補強のケースとして NNN, 既存工法として PEE, 基本ケースとして NCC, 樹脂の含浸性が良いケースとして NCE を試験した。実験数は各ケース 1 体とした。

### 5.2 供試体概要と試験方法

曲げ補強実験供試体形状を図 - 9, 曲げ補強実験コンクリート配合を表 - 8 に示す。供試体は補強供試体の破壊モードがシートの剥離破壊となるように設計した。AF シートは目付け量  $415\text{g/m}^2$  のものを用い、補強範囲は幅  $150\text{mm}$ , 長さ  $2120\text{mm}$  とした。下地処理及びシートの貼り付けは、一軸引張付着実験と同様の方法で行った。載荷は静的載荷とし、 $30\text{kN}$  までは単調載荷とし、 $30\text{kN}$  以上より  $10\text{kN}$  毎に除荷して AFRP シートの剥離発生状況を調べた。AFRP シートの剥離発生は叩き点検により判断した。

### 5.3 実験結果

#### (1) 補強効果

図 - 10 に曲げ補強実験荷重 - 変位関係、表 - 9 に曲げ補強実験結果と計算結果を示す。計算で用いた材料特性値は、試験時のコンクリート圧縮強度  $39.4\text{N/mm}^2$ , 表 - 1 の AFRP シートの引張試験結果、図 - 7 の界面剥離破壊エネルギー、鉄筋降伏強度  $380\text{N/m}^2$  である。

降伏荷重及び最大荷重より、NNN に比べ補強したケースは耐力力の増加が確認でき、鉄筋降伏後の剛性に関しても低下が小さいことから、補強効果が確認できた。また、既存工法である PEE と比較して、NCC, NCE は同等もしくは以上の補強効果が確認できた。

剥離に着目すると、PEE と NCC が同程度の剥離発生荷重となり、それに比べ NCE は若干荷重が高くなった。この傾向は一軸引張付着試験の結果と一致した。加えて、界面剥離破壊エネルギーから算出した剥離発生荷重の計算値と実験値もよく一致しており、本実験では界面剥離破壊エネルギーより剥離挙動を精度良く照査できたと考えられる。

#### (2) シートひずみ分布

図 - 11 に各供試体のシートひずみ分布を示す。また、図 - 11 には界面剥離発生エネルギーから算出した剥離発生ひずみもあわせて表記した。ひずみ分布形状はなだ

表 - 7 曲げ補強効果確認実験ケース

記号	プライマー	下塗樹脂	上塗樹脂
NNN	無補強		
PEE	あり	補強用	補強用
NCC	なし	導電性	導電性
NCE	なし	導電性	補強用

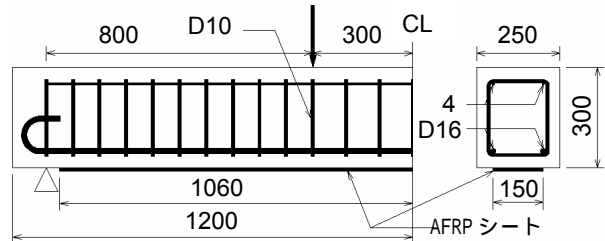


図 - 9 曲げ補強実験供試体形状

表 - 8 曲げ補強実験コンクリート配合

スランブ cm	W/C %	空気量 %	s/a %	単位量 $\text{kg/m}^3$			
				W	cm	%	%
10	50	4.5	45	179	299	858	1064

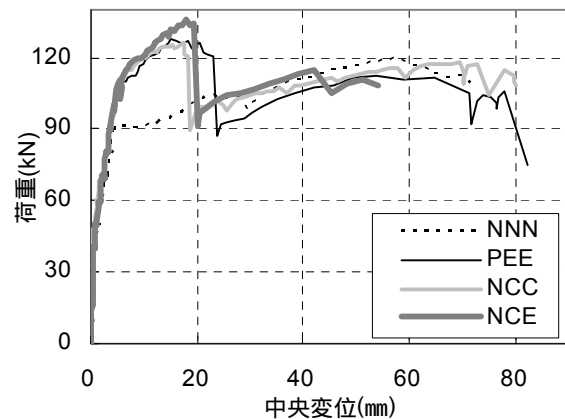


図 - 10 曲げ補強実験荷重 - 変位関係

表 - 9 曲げ補強実験結果と計算結果

記号	降伏荷重 kN		剥離発生荷 kN		最大荷重 kN
	実験	計算	実験	計算	
NNN	88	83	/	/	120
PEE	100	90	110	105	128
NCC	100	89	110	103	127
NCE	106	89	120	109	136

らかな分布にならず、凹凸が確認された。ひび割れの発生状況とあわせて観察すると、ひび割れ近辺の測定箇所は凸となり、ひび割れが発生していない箇所では凹となる傾向が確認できた。以上より、ひび割れ近傍はほかの

部分よりも比較的大きい引張力を受けていると考えられる。ここで、剥離発生に着目すると、剥離領域はひずみが均等化される。また、変形が進んでも剥離領域が拡大するのみでひずみは増加しない。この傾向を踏まえて図-11に着目すると、剥離発生ひずみの実験値は PEE, NCC で 6000~8000  $\mu$ , NCE で 8000~10000  $\mu$  と考えられ、計算値とほぼ一致していると考えられる。

## 6. まとめ

- (1) エポキシ樹脂に炭素を添加することにより導電性を付与できた。特に炭素添加量 15%以上ならばコンクリートの体積抵抗率以下の導電性が確保できた。
- (2) 導電性樹脂を用いた AFRP シートの引張試験結果、規格値を満足しているが、カーボンが含まれない補強用の樹脂を用いた場合と比較して、弾性係数及び引張強度の低下が確認された。樹脂の粘性が高く、含浸不良が生じたことが原因と考えられる。
- (3) コンクリート供試体を用いた急速通電実験の結果、陽極近傍が密封されたために酸素発生反応が阻害され、チタン線表面のニッケルめっきが溶解するなど、陽極の早期劣化が確認された。
- (4) 一軸引張剥離試験より、導電性樹脂はコンクリートとのせん断方向の接着力は高いが、部分的にシートと樹脂の界面で剥離が生じることが分かった。シートと樹脂の界面で剥離が起きた理由は、樹脂の粘性が高く、含浸不良が生じたためと考えられる。
- (5) 導電性樹脂を用いた場合、界面剥離破壊エネルギーは標準値を上回り、既存工法と同等以上となった。
- (6) 曲げ補強効果確認試験の結果、導電性樹脂を用いた補強について、既存工法と同程度の効果が確認できた。また本実験では、一軸引張剥離試験より得られた界面剥離破壊エネルギーを用いて、剥離挙動を精度良く照査できた。

## 7. 今後の課題

- (1) 導電性樹脂は炭素混入の影響で粘性が高く、シートへの含浸不良が生じやすい。樹脂の粘性を改良する必要がある。
- (2) 急速通電実験結果より、陽極近傍にて酸素発生反応が抑制されて早期劣化が起きることが分かった。酸素発生反応に着目した検討が必要である。
- (3) 急速通電実験結果より、チタン線のニッケルめっきが溶解することが分かった。チタン線の表面処理方法を変更し、耐久性を向上させる必要がある。
- (4) 通電を行うことによって補強効果が低下する可能性がある。積算電流量と補強効果の影響を調べる必要がある。

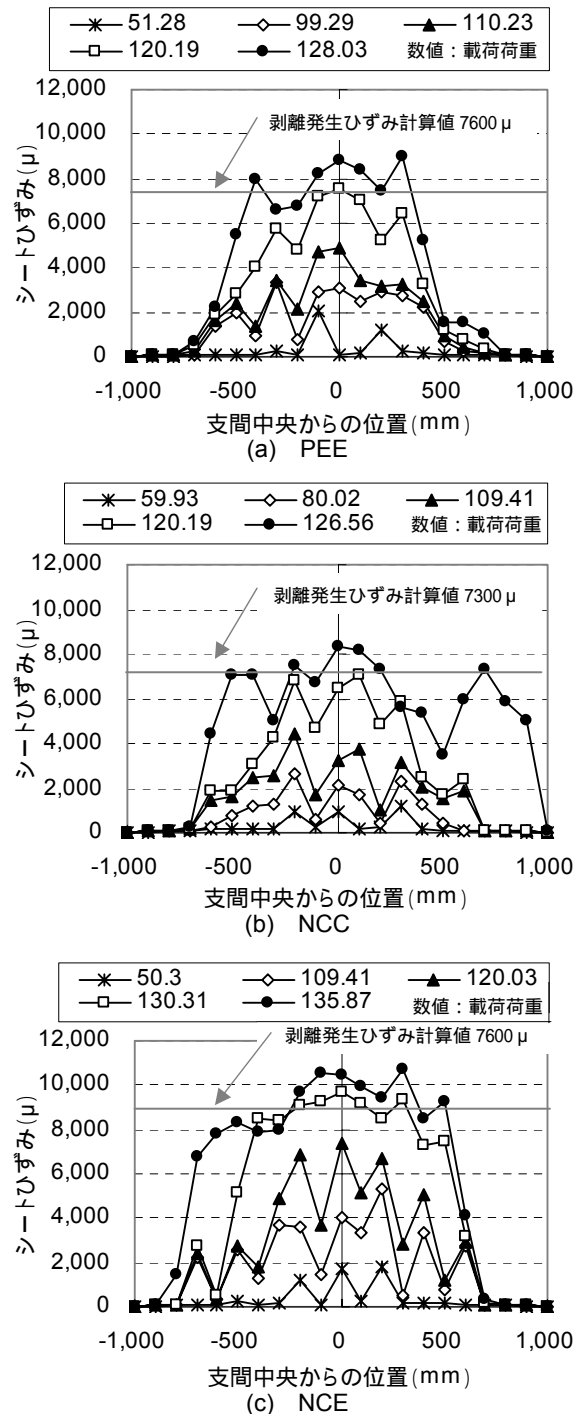


図-11 各ケースのシートひずみ分布

## 参考文献

- 1) 土木学会：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設計指針，コンクリートライブラリー，Vol.9，No.2，pp.175-180，1987.6
- 2) AF 工法研究会：アラミド繊維による耐震補強工法 AF 工法説明資料，1997.7
- 3) NACE Standard：Testing of Embeddable Impressed Current Anodes for Use in Cathodic Protection of Atmospherically Exposed Steel-Reinforced Concrete，TM0294 Item No.21225，2001