

連続繊維シートとコンクリートの 付着・剥離挙動の解析

上原子晶久¹・下村 匠²・丸山久一³・西田浩之⁴

¹学生会員 工修 長岡技術科学大学大学院 材料工学専攻 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

²正会員 工博 長岡技術科学大学助教授 工学部環境・建設系 (同上)

³正会員 Ph.D. 長岡技術科学大学教授 工学部環境・建設系 (同上)

⁴工修 オリエンタル建設株式会社 名古屋支店 (〒450-0002 愛知県名古屋市中村区名駅 4-27-20)

(元 長岡技術科学大学大学院 建設工学専攻)

本研究は、コンクリートに接着した連続繊維シートの剥離挙動を数値計算で予測するための構成モデルについて検討するものである。一軸引張試験で得られた連続繊維シートのひずみ分布よりシートとコンクリート間の付着応力と相対変位との関係を導き、これを弾性-軟化-剥離型モデル、および弾性-剥離型モデルによりモデル化した。これら2種類のモデルを用いて一軸引張試験のシミュレーションを行い、その感度と適用性について論じた。

Key Words : CF sheet, bond, constitutive model of bond characteristics, bilinear model, linear model

1. はじめに

近年、連続繊維シート (Continuous Fiber Sheet ; 以下 CF シートとする) を橋梁などの既設コンクリート構造物に接着する工法は、補修・補強の一工法として確立されつつある。この分野に関しては多くの研究成果が公表されており、知見の集約や補強設計への応用に対する取り組みが積極的に進められている^{1)~3)}。

CF シートで補強されたコンクリート部材の変形・破壊性状を評価するためには、まず、CF シートとコンクリートとの付着・剥離を把握することが必要である。このことは、佐藤ら⁴⁾および呉ら⁵⁾による CF シートの付着・剥離に関する研究で明らかにされている。著者らもまた、CF シートの付着・剥離性状を力学モデルによって評価した上で、連続繊維シートで補強された RC 部材のせん断耐力の評価を試みた⁶⁾。この方法によって、補強後の部材が有するせん断耐力を十分な精度で予測できることを示した。

CF シートおよびコンクリートからなるシステムの付着・剥離挙動を数値解析により予測するためには、CF シートとコンクリートの境界層に、付着に関する構成則を設定する必要がある²⁾。付着構成則としては、CF シートとコンクリート間の付着応力 τ と

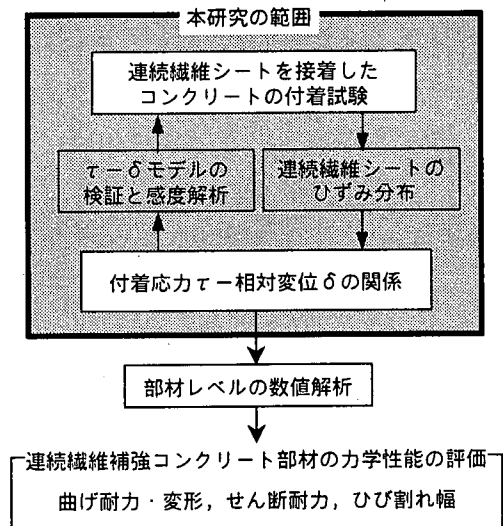


図-1 本研究の範囲と方法

相対変位 δ との関係 (τ - δ 関係) を想定するのが一般的である。著者らを含めた既往の研究では、弾塑性型⁴⁾や弾性-剥離型^{6),7)}の τ - δ 関係を仮定し、シートの付着・剥離挙動の解析を行っている。しかしながら、これまでの多くの研究では、 τ - δ 関係を仮定しているだけで、それが実現象をどこまで表しているかを実験で確認した研究例は皆無に等しい。

表-1 試験体の一覧

試験体名	繊維種類	接着剤種類	接着幅 (mm)	接着長さ (mm)	層数	コンクリート強度 (N/mm ²)	表面処理の有無	終局荷重 (kN)	破壊モード*
S1-1	C	EA	10	145	1	34.9	有	6.25	破断
S1-2	C	EA	10	250	1	36.3	有	5.78	破断
S1-3	C	EA	20	145	1	36.3	有	9.84	破断
S1-4	C	EA	20	175	1	36.3	有	8.78	剥離
S1-5	C	EA	30	100	1	34.9	有	12.89	剥離
S1-6	C	EA	30	175	1	34.9	有	14.71	破断
S1-7	C	EA	30	250	1	38.8	有	12.83	剥離
S1-8	C	EA	50	250	1	36.3	有	22.52	破断
S1-9	C	EA	70	175	1	41.5	有	29.84	剥離
S1-10	C	EA	90	175	1	41.5	有	29.38	剥離
S2-1	A	EA	30	175	1	38.8	有	9.93	剥離
S2-2	A	EA	30	200	1	36.5	有	10.01	剥離
S3-1	C	EB	30	175	1	42.4	有	14.25	破断
S3-2	A	EB	30	200	1	36.5	有	14.7	剥離
S4-1	C	EA	30	175	2	35.1	有	28.91	剥離
S5-1	C	EA	30	175	1	53.4	有	17.45	破断
S5-2	C	EA	30	175	1	75.5	有	9.68	剥離
S6-1	C	EA	30	175	1	42.4	無	12.16	剥離

*: 破断-シートが破断して終局に至った試験体, 剥離-終局時に試験区間全域でシートが剥離した試験体

以上を踏まえ本研究は、CFシートを接着したコンクリートの付着試験に基づき、シートの付着・剥離現象の実体を検討するとともに、シートのひずみ分布から $\tau-\delta$ 関係を導出する。さらに得られた $\tau-\delta$ 関係をモデル化し、付着試験体の数値シミュレーションを行い、部材の挙動に及ぼす $\tau-\delta$ モデルの感度を検討した。以上の手順を、本論文における研究の範囲、並びに方法として図-1に示した。

2. 連続繊維シートを接着したコンクリートの付着試験

(1) 試験方法

本研究で実施した付着試験は、日本コンクリート工学協会 (JCI)、連続繊維補強コンクリート研究委員会が提案した「引張試験による連続繊維シートとコンクリートとの付着試験方法(案)」²⁾に準拠した。作製した試験体は18体である。全試験体の実験水準と実験結果の一覧を表-1に示した。実験の主なパラメータとしては、CFシートの種類 (炭素繊維, アラミド繊維), 接着長さ, 接着幅, 接着樹脂の弾性係数などである。図-2に試験体の形状・寸法を示す。表-2に使用材料の物性値を示す。

CFシートの接着方法は、JCIの提案する方法に従った。すなわち、寸法100×100×500mmのコンクリートブロック表面のレイタンス層をディスクサンダ

表-2 使用材料

記号	材料	厚さ (mm)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
C	炭素繊維シート	0.111	3500	270
A	アラミド繊維シート	0.169	2800	80
EA	接着樹脂A	-	50.3	1.5
EB	接着樹脂B	-	12.5	0.7

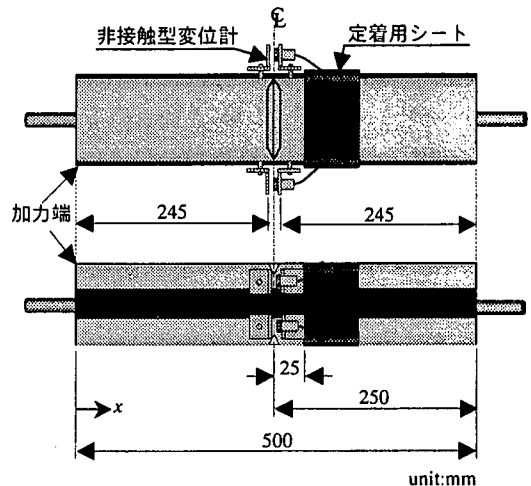


図-2 試験体の形状・寸法

一により除去し、さらに隅角部の面取りを行った後に、プライマーを塗布して下地処理を施す。その後に、CFシートをコンクリートブロック表面に接着した。接着剤にはエポキシ樹脂を使用した。

試験区間は、試験体の中央から片側半スパンとし、

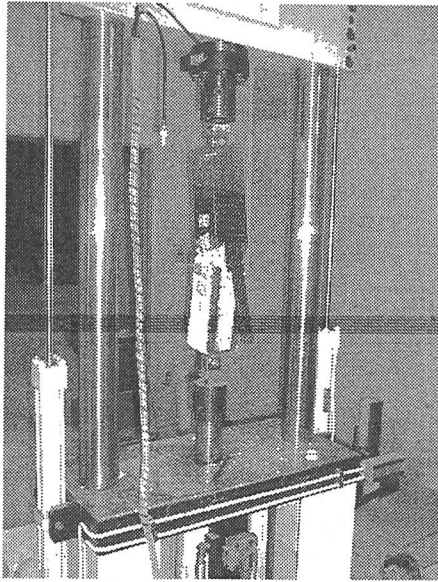


図-3 荷重方法

試験区間と対称の側には、定着のために幅 150mm の CF シートをコンクリートブロック周方向に接着して、この区間のシート剥離を防止した。また、試験体中央部に幅 50mm (中心から 25mm) のアルミテープを貼付して、非附着区間を設けた⁸⁾。試験体の中央部にはひび割れの誘発を目的として、シート接着面の直交 2 面に幅 15mm、深さ 7.5mm のノッチを設けた。

試験体への荷荷は、図-3 に示すようなアクチュエーター (容量 50kN) を使用し、変位制御 (0.05 mm/min) で実施した。引張力は、試験体に埋設した鋼棒 (直径 12mm) を介して試験体に伝達される。

計測は、荷重、試験体中央での開口変位 (ひび割れ幅)、および CF シートひずみの 3 項目について実施した。荷重はアクチュエーター付属のロードセルにより検出した。開口変位は、CF シートを接着した 2 面に (片面 2 本、計 4 本) 設置した非接触型変位計 (測定範囲 0~5mm) により計測した。CF シートひずみは、シート表面にストレインゲージ (検長 5mm) を試験区間全長に 20mm 間隔で貼付して計測した。

(2) 試験結果

以上の方法に従って得られた試験結果の一例を図-4、5 に示す。図-4 は荷重と試験体中央の開口変位の関係について、図-5 は CF シートのひずみ分布についてそれぞれ示したものである。これらの試験結果に対する詳細な考察は、著者らの既往の研究⁸⁾

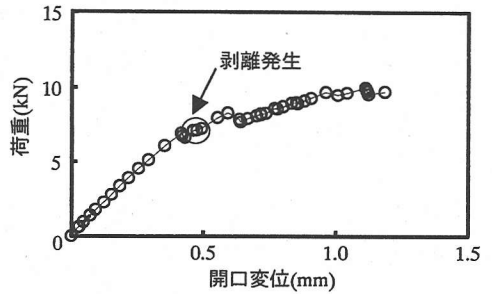


図-4 荷重-開口変位関係 (試験体S1-3)

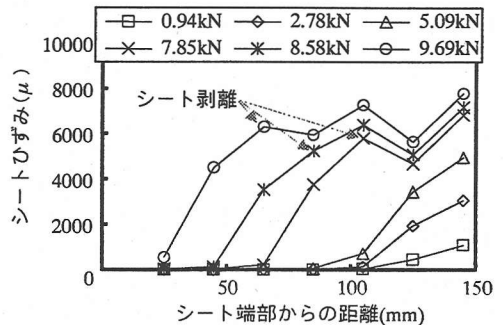


図-5 荷重ステップごとのひずみ分布 (試験体S1-3)

に示した。概略は以下のものである。図-4 に示すように CF シートの剥離発生後、附着剛性は低下し、開口変位の増加に比べて荷重の増加は少なくなる。これは、図-5 の CF シートのひずみ分布を見ても明らかのように、剥離発生後は附着応力が一定の長さの区間に分布するためであると考えられる。このことは、佐藤ら⁴⁾によっても明らかにされている。

また、図-5 より、剥離領域を示すひずみ分布に凹凸が見られる。これは、剥離した CF シートに、コンクリートブロック表面のモルタル片が部分的に附着しているためである。すなわち、CF シートの剛性が、モルタルの附着している部分で変化していることが原因と考えられる。

3. $\tau - \delta$ 関係の導出

(1) 計算方法

附着試験より得られた CF シートのひずみ分布より、シートとコンクリート間の附着応力 τ と相対変位 δ との関係を以下の方法⁹⁾により導出する。なお、以下の方法では、加力端をコンクリートブロックの左右両端と定義した。材軸方向の位置 x は、左側の加力端を原点 ($x=0$) とする。

a) 相対変位 δ

まず、位置 x における CF シートとコンクリートとの相対変位 $\delta(x)$ は、以下のように定義される。

$$\delta(x) = u_{cf}(x) - u_c(x) \quad (1)$$

ここに、 $u_{cf}(x)$: 位置 x における CF シートの変位、
 $u_c(x)$: 位置 x におけるコンクリートの変位である。

ここで、CF シートとコンクリートとの剛性の差を考慮して（4章参照）、コンクリートを剛体と仮定する。すなわち、コンクリートのひずみ、および絶対変位はゼロと仮定すると、式(1)より以下の式が成り立つ。

$$\delta(x) = u_{cf}(x) \quad (2)$$

図-6 に計算の対象とする CF シートのひずみ分布の測定結果を示す。CF シートの変位 $u_{cf}(x)$ 、すなわち相対変位は、加力端における相対変位をゼロと仮定して加力端から該当点まで CF シートのひずみを積分して求める。

$$\begin{aligned} u_{cf}(x) &= \int_0^x \varepsilon_{cf}(x) dx \\ &= \frac{\Delta x}{2} \left(\varepsilon_{cf}(x_0) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \varepsilon_{cf}(x_i) + \varepsilon_{cf}(x_n) \right) \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 Δx : ひずみゲージの貼付間隔、 $\varepsilon_{cf}(x_0)$ 、 \dots 、 $\varepsilon_{cf}(x_n)$: シートひずみ測定位置 x_0, \dots, x_n での CF シートひずみである。

b) 付着応力 τ

図-7 に CF シート-コンクリートシステムにおける微小区間 dx の応力状態を示す。シートに作用する応力の釣り合いより以下の式が得られる。

$$t_{cf} \cdot \frac{d\sigma_{cf}(x)}{dx} - \tau(x) = 0 \quad (4)$$

ここに、 t_{cf} : CF シートの厚さ [mm]、 $\sigma_{cf}(x)$: 単位幅あたりの CF シートの引張応力 [N/mm²] である。

CF シートを弾性体と仮定すると、引張応力 $\sigma_{cf}(x)$ と CF シートひずみ $\varepsilon_{cf}(x)$ に関して、以下の式が成り立つ。

$$\sigma_{cf}(x) = E_{cf} \cdot \varepsilon_{cf}(x) \quad (5)$$

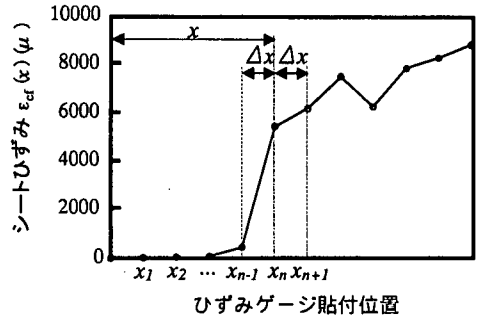


図-6 計算の対象となるひずみ分布 (実測データより抜粋)

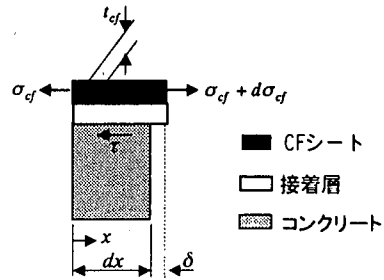


図-7 微小区間における力の釣り合い

ここに、 E_{cf} : CF シートの弾性係数 [N/mm²] である。

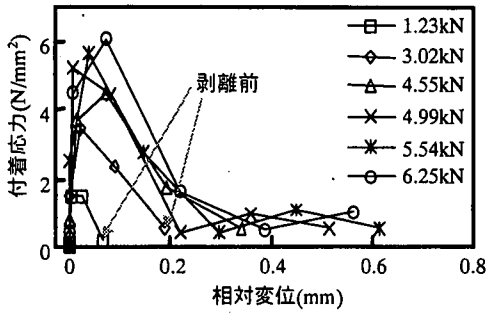
式(4)、(5)および図-6 より、位置 x における付着応力 $\tau(x)$ は、シートのひずみ分布の測定値より、次のように計算される。

$$\begin{aligned} \tau(x) &= E_{cf} \cdot t_{cf} \cdot \frac{d\varepsilon_{cf}(x)}{dx} \\ &= E_{cf} \cdot t_{cf} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{cf}(x_{n+1}) - \varepsilon_{cf}(x_{n-1})}{\Delta x} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

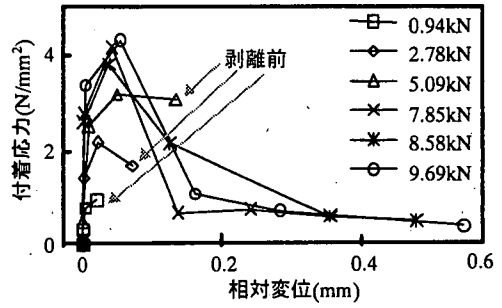
なお、式(6)で評価される付着応力がひずみゲージの貼付間隔 Δx に影響を受けることが予想される。しかしながら、既往の研究では付着応力が分布する区間は 20~100mm 程度²⁾とされていることを考慮すれば、式(6)で算定される付着応力は Δx が 20mm 以下であれば、大きく影響されないと考えられる。

以上より、各荷重ステップ、各位置における相対変位と付着応力の関係が得られる。実験結果を基に連続的な $\tau - \delta$ 関係を描く方法として、以下の2つの方法が考えられる。

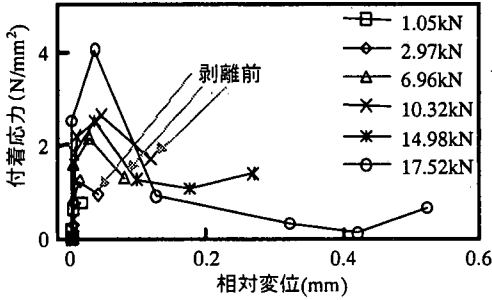
- ① 試験体の位置ごとの $\tau - \delta$ 関係を求める
 - ② 荷重ステップごとの $\tau - \delta$ 関係を求める
- 著者らは既往の研究¹⁰⁾において、①の方法では実験結果から適切な $\tau - \delta$ 関係が得られないことを報告している。よって、本稿では②の方法を採用する。



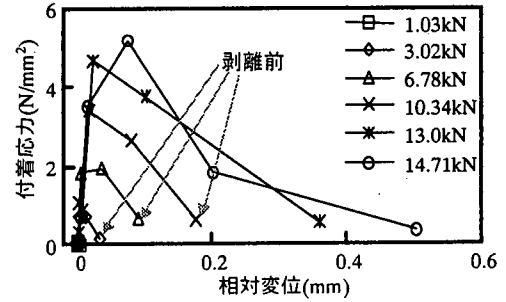
(a) 試験体S1-1



(b) 試験体S1-3

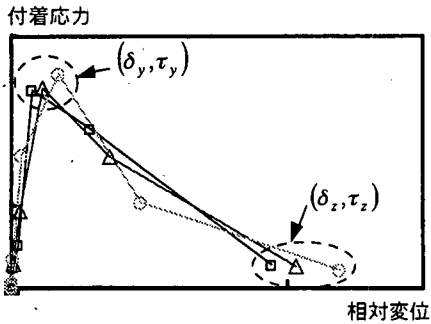


(c) 試験体S1-6

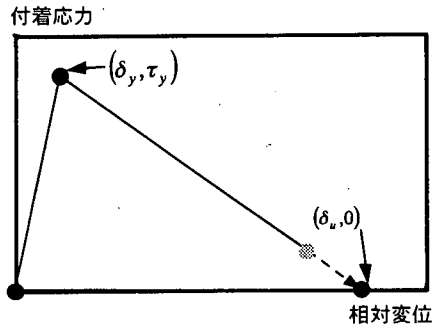


(d) 試験体S5-1

図-8 τ - δ 関係の一例



(a) 座標の探索



(b) 平均して座標を決定

図-9 τ - δ 関係を2直線によりモデル化する方法

(2) 計算結果

(1) 節で定式化した方法によって得られた計算結果の一例を図-8に示す。シートの端部から剥離が開始した荷重ステップ7.85kN以降は、 τ - δ 関係が概ね弾性域と軟化域より構成され、一定の曲線に収斂することが分かる。

図-8において、シートの剥離前に軟化領域が形成されている。これは、試験体中央の非付着区間によって、ひずみ分布に若干の勾配が形成されたことにより、見かけ上軟化領域が存在していることが考えられる。よって、CFシートの剥離挙動に直接影響を与えるものではない。

(3) 弾性-軟化-剥離型モデル

まず、実験で得られた τ - δ 曲線を基に、 τ - δ 関係を弾性と軟化の2つの領域から成る2直線モデルによりモデル化する。2直線を同定する方法を以下に示す。

- ① 荷重と開口変位との関係より、CFシートの剥離開始点を探索する。(図-4)
- ② 剥離開始以後の τ - δ 曲線より付着応力 τ が最大および最小になる点(それぞれ、 (δ_y, τ_y) 、 (δ_z, τ_z) とする)を探索する。(図-9(a))
- ③ 得られた荷重ステップごとの δ_y, τ_y 、および

表-3 全試験体における材料パラメータ

試験体名	繊維種類	接着剤種類	シート幅 (mm)	接着長さ (mm)	層数	表面処理の有無	コンクリート強度(N/mm ²)	τ-δモデルの材料パラメータ		
								δ _y (mm)	τ _y (N/mm ²)	δ _u (mm)
S1-1	CF	A	10	145	1	有	34.9	0.043	4.76	0.40
S1-2	CF	A	10	250	1	有	36.3	0.053	5.56	0.49
S1-3	CF	A	20	145	1	有	36.3	0.035	4.17	0.43
S1-4	CF	A	20	175	1	有	36.3	0.040	3.17	0.54
S1-5	CF	A	30	100	1	有	34.9	0.030	4.19	0.32
S1-6	CF	A	30	175	1	有	34.9	0.044	4.69	0.40
S1-7	CF	A	30	250	1	有	38.8	0.039	3.19	0.40
S1-8	CF	A	50	250	1	有	36.3	0.053	4.30	0.34
S1-9	CF	A	70	175	1	有	41.5	0.052	3.11	0.37
S1-10	CF	A	90	175	1	有	41.5	0.028	2.93	0.28
S2-1	AF	A	30	175	1	有	38.8	0.052	4.56	0.58
S2-2	AF	A	30	200	1	有	36.5	0.057	3.21	0.55
S3-1	CF	B	30	175	1	有	42.4	—	—	—*
S3-2	AF	B	30	200	1	有	36.5	0.061	2.96	0.56
S4-1	CF	A	30	175	2	有	35.1	0.042	3.74	0.40
S5-1	CF	A	30	175	1	有	53.4	0.031	3.27	0.31
S5-2	CF	A	30	175	1	有	75.5	0.043	4.20	0.36
S6-1	CF	A	30	175	1	無	42.4	0.032	3.50	0.27

*: シートの剥離以前にシートが破断したため、軟化域が現れなかった

δ_z, τ_z をそれぞれ平均する。2点(δ_y, τ_y)と(δ_z, τ_z)を通る直線とδ軸との交点を(δ_u, 0)とする。δ_uは剥離開始点に対応する相対変位である。本モデルにおいてτ-δモデルを決定する材料パラメータはδ_y, τ_y, δ_uの3つである。(図-9(b))

④ 以上の計算をCFシートが接着された2面について行い、それぞれの値を平均する。

この方法により表-1に示した全ての試験体について、付着応力τ_yと相対変位δ_y, δ_uを同定した結果を表-3に示す。実験のパラメータが、τ-δモデルに及ぼす影響については、一部既報⁸⁾において論じたが、表-3の結果に基づき、以下に総合的に検討する。

a) コンクリートの圧縮強度

コンクリートの圧縮強度を変化させても、τ-δモデルの材料パラメータは大きく変化しない。実験ではCFシートが表層部のコンクリートをともなって剥離した。この剥離形態より推察すると、CFシートの付着性状は、コンクリートの圧縮強度よりもむしろ、コンクリート表層部での剥離に抵抗する能力が直接関係していると考えられる。

b) 表面処理

表面処理を施さない場合は、付着応力τ_yと相対変位δ_uが小さくなる。表面処理を施さないことによってコンクリート表面での骨材の露出が少なくなり、

CFシートとコンクリートの接着が不十分になると考えられる。

c) CFシートの幅

CFシートの幅が10mm以上の場合、τ-δモデルの材料パラメータはシートの幅によらずほぼ等しいが、10mm以下の場合、付着応力τ_yが大きくなる。

この原因は、シートの幅以上のコンクリートが剥離する影響が現れるためであると考えられる。

d) CFシートの長さ

CFシートの長さを100~250mmまで変化させても、τ-δモデルの材料パラメータは大きく変動しない。すでに述べた通り、付着応力の分布する区間が100mm以下であることより、本研究の範囲では、CFシートの長さが、τ-δモデルに及ぼす影響は小さいと推察される。

e) CFシートの積層数

CFシートの層数が2層の場合でも1層の場合と比較して、τ-δモデルの材料パラメータは大きく変化しない。シートとコンクリート間に比べて、シート間の接着が強固であり、2層のシートが一体化して挙動しているためと考えられる。

f) CFシートの弾性係数 (CFシートの種類)

弾性係数の小さいアラミド繊維を用いた場合は、炭素繊維の場合より相対変位δ_uが大きくなる。しかしながら、その他のパラメータτ_y, δ_yは大きく変化しない。CFシートの弾性係数がτ-δモデルに及ぼす影響は小さいと考えられる。

g) 接着樹脂の弾性係数（接着樹脂の種類）

炭素繊維シートと低弾性接着樹脂を用いた供試体 (S3-1) は、シートの剥離以前にシートが破断したために、実験結果から $\tau-\delta$ 関係を同定することはできなかった。この実験結果は、低弾性接着樹脂を用いることにより、剥離を生じる相対変位 δ_u が大きくなり、シートの破断が先行したことを示唆するものである。しかしながら、破断ひずみの大きいアラミド繊維シートを用いたシリーズ (S2-1, S2-2, S3-2) では、接着樹脂の種類によらず、ほぼ同じ $\tau-\delta$ 関係が得られている。本研究の範囲では、これら 2 種類の結果を统一的に説明することはできない。接着樹脂の弾性係数が $\tau-\delta$ 関係に及ぼす影響は、今後の研究により明らかにしたい。

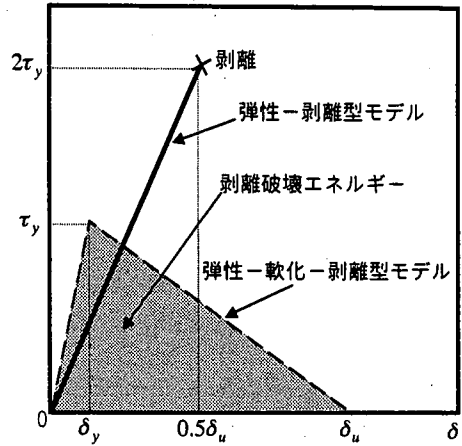


図-10 弾性-剥離型モデルを同定する方法

(4) 弾性-剥離型モデル

弾性-軟化-剥離型モデルは、実験で得られた $\tau-\delta$ 関係の形状を忠実に表現し得るモデルである反面、4章で示すように数値計算が煩雑になる。シートの付着・剥離特性をどの程度精緻に表現すべきかは、部材、構造レベルの挙動に及ぼす感度を検討して議論しなければならない。そこで、本研究では、より簡便な弾性-剥離型の $\tau-\delta$ モデルについても検討した。 $\tau-\delta$ 曲線で囲まれた面積、すなわち剥離破壊エネルギーが、(3)の方法により同定した弾性-軟化-剥離型モデルと等価になるように弾性-剥離型モデルを定める。この方法を図-10 に示した。弾性-剥離型モデルにおいて、剥離破壊基準となる付着応力と相対変位をそれぞれ、 $2\tau_y, 0.5\delta_u$ と定めた理由は、4章で論じた方法によるパラメータスタディの結果に基づいて、弾性-軟化-剥離型モデルを用いた計算結果と同様の結果を与える材料パラメータを選定したためである。両者の $\tau-\delta$ モデルを適用した計算結果の比較・検討は 4章で議論する。

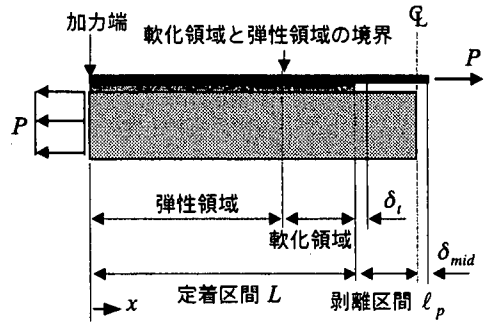


図-11 一次元シート-コンクリートシステム

図-10 に表した $\tau-\delta$ モデルを定式化する。まず、弾性-軟化-剥離型モデルについては、以下のように表される。

$$\tau = \begin{cases} \frac{\tau_y}{\delta_y} \cdot \delta & (0 \leq \delta \leq \delta_y) & (8) \\ \frac{\tau_y}{\delta_u - \delta_y} (\delta_u - \delta) & (\delta_y \leq \delta \leq \delta_u) & (9) \end{cases}$$

4. 付着試験体の数値シミュレーション

(1) 基礎方程式

3章と同様にコンクリートを剛体と仮定する。CF シートの変位とひずみは次式で関係づけられる。

$$\epsilon_{cf}(x) = \frac{du_{cf}(x)}{dx} \quad (7)$$

同様に、弾性-剥離型モデルは以下のようなになる。

$$\tau = \frac{4\tau_y}{\delta_u} \cdot \delta \quad (0 \leq \delta \leq 0.5\delta_u) \quad (10)$$

式(3)~(5), (7)~(10)より、弾性-軟化-剥離型モデルおよび弾性-剥離型モデルを用いた場合の CF シートとコンクリートの付着・剥離挙動に関する基礎方程式が得られる。

計算の流れ 強制変位 δ_i のレベル

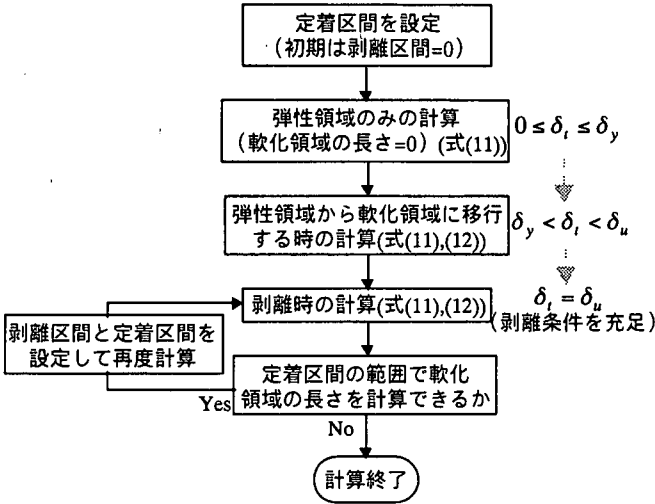


図-12 計算フロー

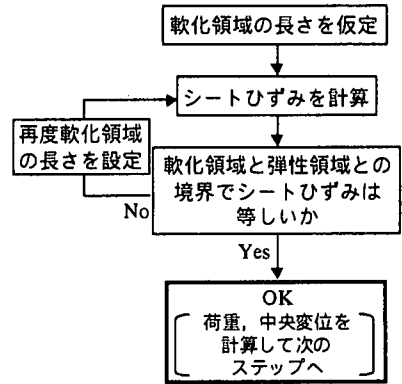


図-14 収束計算の方法

弾性-軟化-剥離型モデル:

$$E_{cf} \cdot t_{cf} \cdot \frac{d^2 u_{cf}(x)}{dx^2} - \frac{\tau_y}{\delta_y} u_{cf}(x) = 0 \quad (0 \leq \delta \leq \delta_y) \quad (11)$$

$$E_{cf} \cdot t_{cf} \cdot \frac{d^2 u_{cf}(x)}{dx^2} - \frac{\tau_y}{\delta_u - \delta_y} (\delta_u - u_{cf}(x)) = 0 \quad (\delta_y \leq \delta \leq \delta_u) \quad (12)$$

弾性-剥離型モデル:

$$E_{cf} \cdot t_{cf} \cdot \frac{d^2 u_{cf}(x)}{dx^2} - \frac{4\tau_y}{\delta_u} u_{cf}(x) = 0 \quad (0 \leq \delta \leq 0.5\delta_u) \quad (13)$$

境界条件を与えて式(11)~(13)を解くことにより、各荷重ステップにおける試験体に沿った各位置でのCFシートの変位・ひずみが得られる。

(2) 付着試験体の挙動をシミュレートする計算方法
a) $\tau-\delta$ 関係に弾性-軟化-剥離型モデルを適用した場合

図-11 に、数値シミュレーションの対象となる、一次元シート-コンクリートシステムを示す。このシステムは対称性を考慮して、試験体半スパンの上下 1/2 をモデル化したものである。計算はCFシートの定着区間先端での強制変位 δ_i を順次増加させることによって行う。計算フローを図-12に、荷重と中央変位との関係を用いた計算の概念図を図-13に示す。強制変位のレベルと $\tau-\delta$ モデルとの対応

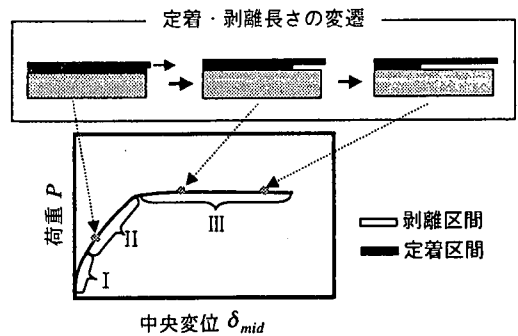


図-13 シミュレーションの概念図

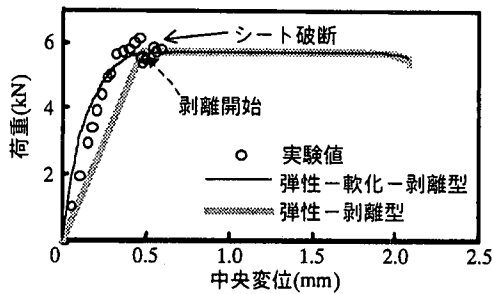
表-4 境界条件

$\tau-\delta$ モデル	段階	境界条件
弾性-軟化-剥離型モデル	I	式(11)で $x=0: \sigma_{cf}=0, x=L: \delta=\delta_i$
	II, III	式(11)で $x=0: \sigma_{cf}=0, x=\ell_c: \delta=\delta_y$ 式(12)で $x=\ell_c: \delta=\delta_y, x=L: \delta=\delta_i$
弾性-剥離型モデル	-	式(13)で $x=0: \sigma_{cf}=0, x=L: \delta=\delta_i$

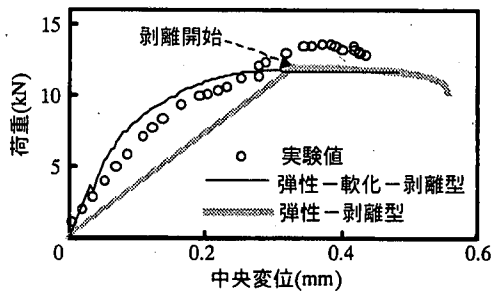
によって以下に挙げる3つの段階に分類する。

I 段階: $0 \leq \delta_i \leq \delta_y$ の範囲、すなわちシート全区間が $\tau-\delta$ モデルにおいて弾性域に対応するとき。
II 段階: $\delta_y < \delta_i < \delta_u$ の範囲、すなわちシート先端に軟化領域が形成されたとき。
III 段階: $\delta_i = \delta_u$ となり、定着区間先端が剥離条件を満足しながら、剥離が進展するとき。

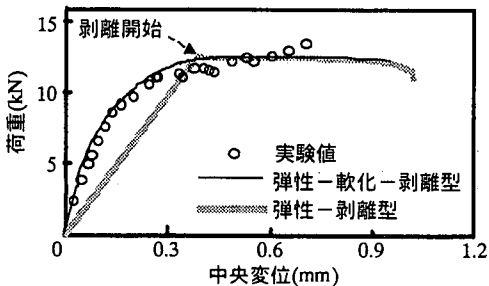
II, III 段階では、収束計算が必要となる。本研究では、CFシートのひずみが弾性領域と軟化領域との



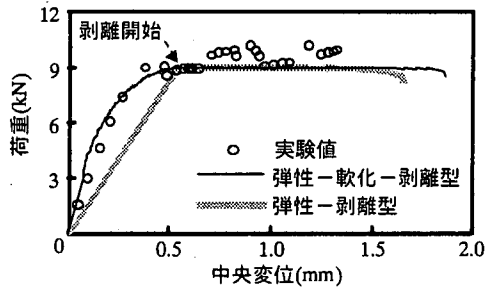
(a) 試験体S1-2



(b) 試験体S1-5



(c) 試験体S1-9



(d) 試験体S3-2

図-15 提案手法による付着試験のシミュレーション結果

境界で一致することを収束条件にして、軟化域の長さの仮定と修正を繰り返して解を得た。この方法を図-14に示す。各々の段階において式(11),あるいは式(12)を表-4に記した境界条件を与えて解くことによって、CFシートのひずみ、変位、付着応力、荷重、試験体中央でのシート変位が得られる。荷重 P と試験体中央でのシート変位 δ_{mid} は以下の式によって求める。

$$P = \varepsilon_{cf}(L) \cdot E_{cf} \cdot t_{cf} \cdot b_{cf} \times 2 \quad (14)$$

$$\delta_{mid} = \frac{P}{2 \cdot E_{cf} \cdot t_{cf} \cdot b_{cf}} \times \ell_p + \delta_u \quad (15)$$

ここに、 $\varepsilon_{cf}(L)$: 定着区間先端でのCFシートひずみ、 L : 定着区間の長さ、 b_{cf} : CFシートの接着幅、 ℓ_p : 剥離区間の長さである。

CFシートの剥離の進展を表現するため、III段階で剥離条件が満たされた後、新たに剥離区間と定着区間を設定して、III段階と同様の手順を繰り返す。設定した定着区間が極端に短くなり、軟化領域の長さを計算で得ることが不可能となった時点で計算を終了させる。

b) $\tau - \delta$ 関係に弾性-剥離型モデルを適用した場合

弾性-剥離型モデルを適用した場合には、弾性-軟化-剥離型モデルの解法で用いた収束計算や、強制変位のレベルに応じた段階は考慮する必要が無い。弾性-軟化-剥離型モデルの解法における剥離時(III段階)および剥離後の手順に従い、境界条件(表-4)の下で式(13)を解くことにより、シミュレーションを行う。

(3) 計算結果

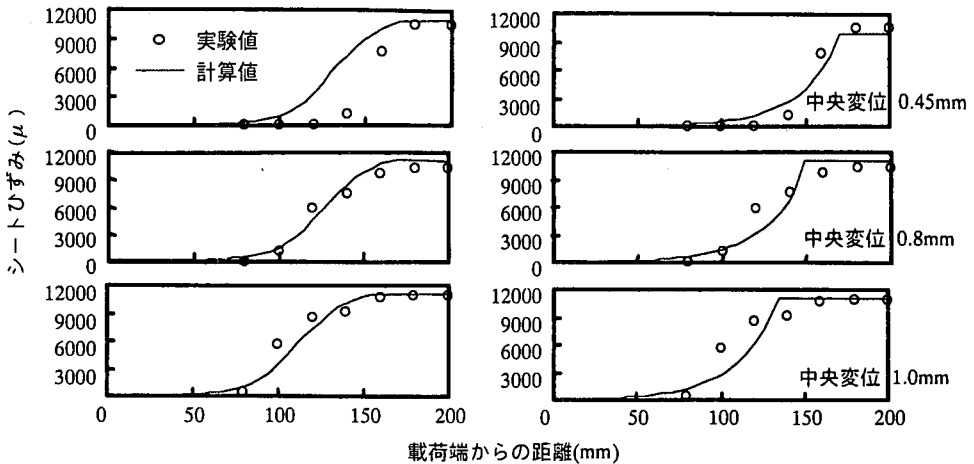
a) $\tau - \delta$ 関係に関する検討

図-15(a)~(d)に、荷重 P と中央変位 δ_{mid} の実験値と計算値の比較を示す。実験値については、以下の値を使用した。

- ・ 荷重：ロードセルにより検出した値
- ・ 中央変位：CFシートを接着した2面についてひずみ分布を載荷端から試験体中央まで積分し、平均した値(この理由は付録に記す)

計算値は、前節に説明した方法で計算した結果である。図には、弾性-軟化-剥離型モデルと弾性-剥離型モデル、それぞれの $\tau - \delta$ モデルを用いて計算した結果を併記してある。

図-15より、いずれの結果においても、弾性-軟化-剥離型モデルを適用した場合において、提案した手法は実験結果を精度良く予測し得ることが分か



(a) 弾性-軟化-剥離型モデル (b) 弾性-剥離型モデル

図-16 ひずみ分布の実験値と計算値の比較 (試験体S3-2)

る。特に、シート剥離が発生するまでの整合性は良好である。ただし、図-15(a)で示した試験体(S1-2)は、試験区間以外の定着部付近で破断していた。このように、実験においてシートが破断してしまう場合については予測することができない。終局時の中央変位について、計算値が実験値を過大に評価しているのは、計算では上下両面におけるシートの剥離が安定に進行すると仮定しているが、実験では上下面におけるシートの剥離の進展が均一でないこと、及び終局時には片面のシートの剥離が急激に進行することが原因と考えられる。また、実験において、シート剥離後に荷重が増減しているのは、以上が関係しているものと解釈している。

剥離発生荷重、および剥離後の挙動の計算結果については、弾性-剥離型モデルを適用した場合も、弾性-軟化-剥離型モデルによる場合とほぼ同様であることが分かる。両者の計算結果の相違を詳細に検証するため、図-16(a),(b)に各中央変位に対応したCFシートのひずみ分布の実験値と計算値の比較(一例)を示した。この図より、弾性-軟化-剥離型モデル(図-16(a))による計算値の方が、弾性-剥離型モデル(図-16(b))による場合よりも、ひずみ分布を忠実に再現しているものの、両者の違いはあまり大きくないことが分かる。以上の考察より、簡略化した弾性-剥離型の付着・剥離構成モデルを用いても材料パラメータを適切に与えることにより、弾性-軟化-剥離型モデルの計算結果とほぼ同等の精度でCFシートとコンクリートの剥離挙動を評価し得ることが分かる。

b) コンクリートを剛体と仮定することに関する検討

本手法では、コンクリートを剛体と仮定して計算

表-5 計算条件と境界条件

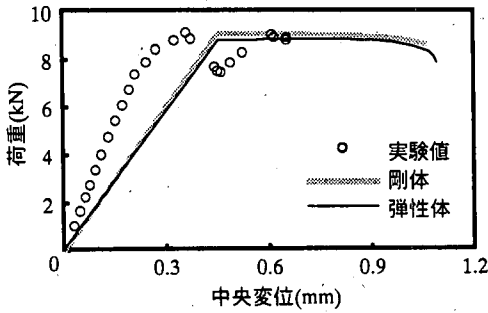
コンクリート		境界条件
厚さ (mm)	弾性係数 (kN/mm ²)	
50	28.2	式(13)で $x=0: \sigma_{cf}=0, x=L: \sigma_{cf}=P/t_{cf}$ 式(16)で $x=0: \sigma_c=P/t_{cf}, x=L: \sigma_c=0$

を行っている。この仮定について検証を行うため、図-17(a),(b)にコンクリートを剛体、並びに弾性体として計算した例を示す。計算において適用した $\tau-\delta$ モデルは弾性-剥離型モデルである。コンクリートを弾性体とする場合には、式(13)と以下の式(16)を連立させて計算を行う⁶⁾。

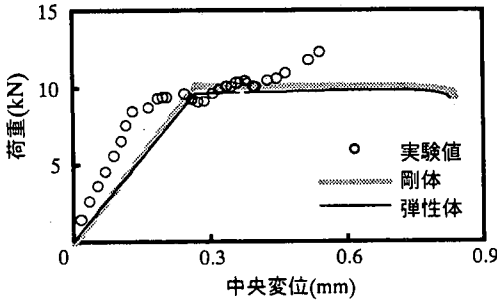
$$E_c \cdot t_c \cdot \frac{d^2 u_c(x)}{dx^2} + \frac{4\tau_y}{\delta_u} u_c(x) = 0 \quad (0 \leq \delta \leq 0.5\delta_u) \quad (16)$$

ここで各記号について、添字「c」はコンクリートに関する物理量であることを示す。計算に用いた定数と境界条件は表-5に示した。コンクリートの弾性係数は、コンクリート標準示方書¹¹⁾に基づいて圧縮強度より推定した。

図-17より、コンクリートを剛体、弾性体とした場合の計算結果は、ほぼ同様であることがわかる。弾性体とした場合には、コンクリートが若干、引張力を分担するため、荷重、中央変位とも僅かに下回っている。しかしながら、両者の違いは僅かであり、剥離挙動全体に及ぼす影響は極めて小さい。これは、剛性(弾性係数と材料の厚さとの積)で比較すると、コンクリートの方がCFシートよりオーダが2桁大きいためである。以上より本稿で提案した方法において、コンクリートを剛体と仮定したことは妥当であると言える。



(a) 試験体S1-4



(b) 試験体S6-1

図-17 コンクリートを剛体、弾性体とした場合のシミュレーション結果

5. まとめ

本研究では、CFシートを接着したコンクリートの一軸引張試験より得られたシートのひずみ分布より、2種類の付着・剥離構成モデル(τ - δ モデル)を導出する方法を示した。 τ - δ モデルの感度解析として、CFシートの剥離挙動について数値計算を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- ①実測のCFシートのひずみ分布より得られた τ - δ 曲線は、概ね弾性と軟化との2つの領域で構成されることを示した。
- ② τ - δ 曲線を2直線モデル(弾性-軟化-破断型モデル)と線形モデル(弾性-破断型モデル)へモデル化する方法を提案した。同定した材料パラメータより影響要因を検討した結果、 τ - δ モデルは接着樹脂の弾性係数に影響されることが示唆された。しかしながら、この結果を合理的に説明するまでには至らなかった。今後の課題である。
- ③ τ - δ モデルを用いて一軸引張試験体を数値シミュレーションした結果、弾性-軟化-剥離型モデルを適用した場合には、引張荷重下における試験体の挙動を精度良く予測し得ることを示した。より簡便な弾性-剥離型モデルを適用した場合でも、剥離後

における挙動の予測精度はほぼ同様である。

④本研究におけるコンクリートの取り扱いについて、剛体および弾性体として数値計算した結果をそれぞれ比較・検討した。その結果、コンクリートを剛体と仮定して支障の無いことを示した。

以上より、本研究で提案した構成モデルは数値計算において、CFシートとコンクリートとの付着・剥離を的確に把握できることが結論づけられる。

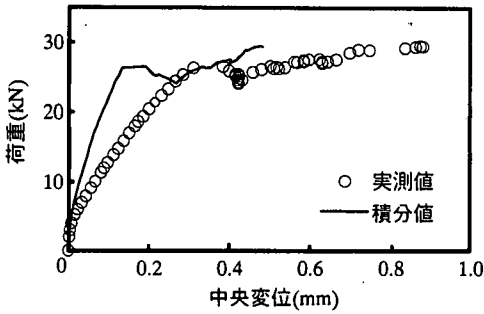
謝辞：一軸引張試験に使用した連続繊維シートは、三菱化学(株)、帝人(株)に、低弾性接着樹脂については東邦天然ガス(株)にそれぞれ提供して頂きました。ここに記して、皆様に深く感謝致します。

付録

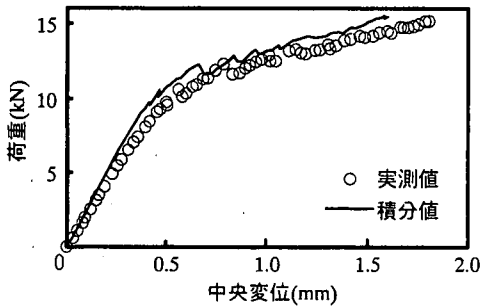
本研究で採用した付着試験では、試験体中央におけるひび割れの開口幅、すなわち中央変位 δ_{mid} を非接触型変位計で測定している。しかしながら本稿では、中央変位の実験値として、変位計の測定値ではなく、実測のCFシートのひずみ分布を加力端から試験体中央まで積分した値を採用した。以下にその理由を述べる。

付図-1に、試験体中央より片側一方に定着用シートを貼り付けた試験体(片引き試験体(S1-10);付図-1(a))と貼り付けない試験体(両引き試験体;付図-1(b))それぞれにおける荷重と中央変位の関係を示す。図には、変位計により測定した中央変位(実測値)とひずみ分布の積分値を併せてプロットした。荷重はロードセルにより検出した値である。

片引き試験体における実測値とひずみ分布の積分値は一致していないが、両引き試験体では両者がほぼ同じであることが分かる。4章で論じた通り、本実験ではコンクリートを剛体と仮定して支障がないことを考慮すると、シートひずみの積分値は変位計で測定した実測値と一致することになる。事実、両引き試験体の場合では両者が一致している。したがって、片引き試験体の場合、ひずみの積分値と実測値が一致しないのは、定着側のCFシートの変形がひび割れの開口に寄与していることが原因であると考えられる。本稿において、式(15)で計算される試験体中央のシート変位 δ_{mid} は、試験区間 $x=L$ におけるCFシート変位である。以上の議論を踏まえ、中央変位 δ_{mid} の計算値の検証に用いる実験値には、実測したシートひずみの積分値を採用した。



(a) 片引き試験体 (S1-10)



(b) 両引き試験体

付図-1 試験体の種類による中央変位の比較

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：連続繊維補強コンクリート委員会報告書，1997.7.
- 2) 日本コンクリート工学協会：連続繊維補強コンクリート委員会報告書（II），1998.5.
- 3) 土木学会：コンクリート構造物の補強設計・施工の将来像—性能照査型補強設計指針（試案）—第I編委員

- 会報告，コンクリート技術シリーズ No.28，1998.4.
- 4) 佐藤裕一，木村耕三，小島克朗：CFPシートとコンクリートの付着挙動（その1），日本建築学会構造系論文集，第500号，pp.75-82，1997.10.
- 5) Wu, Z. S., Matsuzaki, T. and Tanabe, K. : Interface Crack Propagation in FRP-Strengthened Concrete Structure, *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the Third International Symposium*, Vol.1, pp.319-326, Oct. 1997.
- 6) 上原子晶久，丸山久一，下村 匠，西田浩之：連続繊維シートとコンクリートの付着性状を考慮したRCはりのせん断耐力評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 20, No. 1, pp. 497-502, 1998.7.
- 7) Maeda, T., Asano, Y., Sato, Y., Ueda, T. and Kakuta, Y. : A Study on Bond Mechanism of Carbon Fiber Sheet, *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the Third International Symposium*, Vol.1, pp.499-506, Oct. 1997.
- 8) 西田浩之，上原子晶久，下村 匠，丸山久一：連続繊維シートとコンクリートとの付着性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 21, No. 3, pp.1507-1512, 1999.2.
- 9) 上原子晶久，西田浩之，下村 匠，丸山久一：連続繊維シートとコンクリートとの付着挙動に関する研究，第16回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集，pp.11-14, 1998.11.
- 10) 西田浩之：連続繊維シートとコンクリートとの付着特性，長岡技術科学大学修士論文，1999.2.
- 11) 土木学会：コンクリート標準示方書設計編（平成8年度制定），1996.3.

(1999.2.17 受付)

ANALYSIS OF BOND AND DEBONDING BEHAVIOR OF CONTINUOUS FIBER SHEET BONDED ON CONCRETE

Akihisa KAMIHARAKO, Takumi SHIMOMURA, Kyuichi MARUYAMA and Hiroyuki NISHIDA

Based on the experimental bond test of continuous fiber sheet (CF sheet) bonded on concrete, the constitutive model for simulating bonding and debonding behavior of sheet was proposed. The model considering of the bond stress – relative displacement relationships can exhibit pretty good simulation of the actual bond behavior of CF sheet on concrete in terms of the load – end displacement as well as the strain distribution in the sheet.