

## 論文 不陸修正材を有する炭素繊維シート補強 RC はりの補強性能解析

鴨谷 知繁\*1・森川 英典\*2・吉田 隆浩\*3

要旨：不陸修正材を有する炭素繊維シートとコンクリートの付着試験から、シートとコンクリートの付着構成則を導出し、2次元 FEM 解析を用いて炭素繊維シート補強 RC はりの補強性能解析を行い、曲げ載荷試験結果と比較した。その結果、本解析手法を用いてシート補強 RC はりの補強性能を妥当に評価できることがわかった。また、本解析手法において、付着構成則に不確定性を考慮し、モンテカルロシミュレーション解析を行うことで、シートとコンクリート間の接着界面状態に不確定性を有するシート補強 RC はりの補強性能を解析的に評価した。

キーワード：不陸修正材, RC はり, 炭素繊維シート, FEM 解析, 不確定性

## 1. はじめに

昨今、曲げ補強が必要なコンクリート構造物を補強する工法として炭素繊維シート補強工法が注目されている。本工法において合理的な補強設計を行うためには、様々な条件によって発生する炭素繊維シート（以下、シート）とコンクリートの接着界面状態の相違によって、補強性能が大きく影響を受ける<sup>1)2)</sup>ということを適切に評価することが必要であると考えられる。そこで、本研究ではシート施工時に用いられる不陸修正材（以下、パテ）に注目し、パテを有するシートとコンクリートの付着試験から、シートとコンクリートの付着構成則を導出し、2次元 FEM 解析を用いてシート補強 RC はりにおける補強性能解析<sup>3)</sup>を行い、同様のシートとコンクリートの接着界面状態を有する曲げ載荷試験結果と比較した。また、本解析手法において、付着構成則に不確定性を考慮し、モンテカルロシミュレーション解析を行うことで、シートとコンクリート間の接着界面状態に不確定性を有するシート補強 RC はりの補強性能を解析的に評価した。

## 2. シートとコンクリートの付着試験

## 2.1 試験概要

付着試験供試体の概略図を図-1に示す。本試験供試体は、土木学会「連続繊維シートとコンクリートとの付着試験方法(案)」<sup>4)</sup>に準拠し、供試体は、断面が100×100mm、全長300mmのコンクリートブロックを2つで1対とした。中心軸には引張荷重伝達用に軸を一致させた2本のM16の鋼ボルトをあらかじめ配置した。シートは、幅50mm、長さ480mmのものを使い、定着長さを200mmとして供試体両面に貼り付けた。試験区間は、試験供試体の中央から片側一方とした。試験区間と対称の側には、定着の

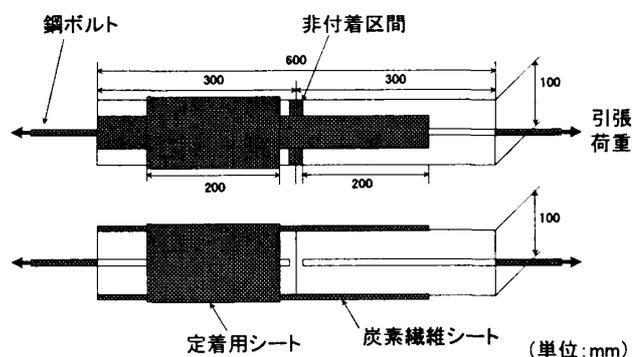


図-1 付着試験供試体図

\*1 神戸大学大学院自然科学研究科建設学専攻 博士課程前期課程 (正会員)

\*2 神戸大学助教授 工学部建設学科 工博 (正会員)

\*3 西日本旅客鉄道(株) 工修 (正会員)

ために幅 200mm のシートをコンクリートブロック周方向に接着することとし、この区間のシートはく離を防止した。また、試験体中央部にはコンクリートブロックの角欠けを防止するためビニールテープを貼付して、非付着区間を設けた。

## 2.2 シート接着方法

全国上下水道エポキシ工事業協会が示している炭素繊維シート補強工法<sup>5)</sup>や阪神高速道路公団<sup>6)</sup>などが示しているように実施工ではプライマーをコンクリート表面に施工した後に、パテを施工し、シートを貼付けて補強する方法をとっていることが多い。よって本試験ではこれと同様な施工方法で作成した供試体で評価することが望ましいと考え、シートの貼付け方法は以下の通りとした。コンクリートは打設後、約 2 週間湿布養生を施した後、約 3 日間、気中に放置し、コンクリート表面をディスクサンダーにより研磨し、プライマーを塗布する。プライマーの乾燥後、パテの塗布面積と塗布厚さを制御するため所定の位置に所定の厚さまで貼重ねたガムテープを貼付け、パテを塗布し、1 週間養生する。その後接着樹脂の面積を制御するため、所定の位置にガムテープを貼付け樹脂の下塗りを施し、シートを貼付け含浸させ、脱泡ローラーで脱泡した後、上塗りを施す。その上に離型シートをかぶせ、表面を均一に整え 1 週間養生させ、試験を行った。なお、プライマーを 2 回塗布したものについては、1 度塗布し、指触乾燥させた後、2 回目を塗布した。用いた材料の性質は表-1、表-2、表-3 にそれぞれ示した通りであり、表-1 に示した値はシートに樹脂を含浸硬化させた状態で行った引張試験結果である。

## 2.3 付着試験要因

表-4 に付着試験要因を示す。シート層数は全て 1 層とした。パラメータは、プライマー塗布回数(1 回, 2 回), パテ塗布厚さ(1mm, 2mm), 接着樹脂の弾性率(高弾性率, 低弾性率), コンクリート強度(標準強度: 26N/mm<sup>2</sup>, 高強

表-1 炭素繊維シートの性質

接着樹脂の種類	繊維目付(g/m <sup>2</sup> )	設計厚さ(mm)	引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	引張弾性率(kN/mm <sup>2</sup> )	破断ひずみ(%)
低弾性率	300	0.167	3.98 × 10 <sup>3</sup>	252.72	1.58
高弾性率	300	0.167	4.51 × 10 <sup>3</sup>	252.58	1.82

表-2 パテの性質

圧縮強さ(N/mm <sup>2</sup> )	圧縮弾性率(N/mm <sup>2</sup> )
71.9	5.18 × 10 <sup>3</sup>

表-3 接着樹脂の性質

接着樹脂の種類	圧縮強さ(N/mm <sup>2</sup> )	圧縮弾性率(N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ(N/mm <sup>2</sup> )	引張弾性率(N/mm <sup>2</sup> )
高弾性率	92.8	3.20 × 10 <sup>3</sup>	50.9	3.65 × 10 <sup>3</sup>
低弾性率	-	1.70 × 10 <sup>3</sup>	-	-

表-4 付着試験要因

供試体名	プライマー塗布回数	パテ塗布厚さ(mm)	接着樹脂弾性率	コンクリート強度
F1	1	1	高	標準
F2	2	1	高	標準
F3	1	2	高	標準
F4	1	1	高	低
F5	1	1	高	高
F6	1	1	低	標準

度:35N/mm<sup>2</sup>, 低強度:20N/mm<sup>2</sup>) を考慮した。

## 2.4 測定項目および載荷方法

測定項目は、荷重、試験供試体中央部の開口変位、シートひずみ、破壊形式とした。開口変位については、シートを接着した 2 面に配置したクリップゲージにより測定を行った。また、シートひずみについてはシート中央の表面にひずみゲージを 15mm 間隔で配置し、測定を行った。これらの結果から各供試体の付着性能を評価した。載荷方法は、供試体に埋設した鋼ボルトを介し、引張力を与えた。

## 2.4 試験状況

付着試験供試体における試験状況は以下の様であった。コンクリートブロックに埋め込んだ鋼ボルトに引張力を与えることで、シートに引張力を与えていくと、次第に付着試験供試体の引張剛性が低下していき、供試体中央部から徐々にシートと一体化したパテとコンクリートの界面においてはく離破壊が進展していき、全面はく離破壊に至った。

## 2.5 付着力-相対変位関係の導出

付着試験より得られたシートひずみ分布より、

付着力-相対変位関係を導出する。シートとパテは一体となつてはく離することから、シートの付着応力を、次式を用いて算出した。

$$\tau(x) = (E_f \cdot t_f + E_p \cdot t_p) \cdot \frac{d\varepsilon_{cf}(x)}{dx}$$

ここで、 $\tau(x)$  : 付着応力

$E_f, E_p$  : シートおよびパテの弾性係数

$t_f, t_p$  : シートおよびパテの塗布厚さ

$\varepsilon_{cf}(x)$  : シートのひずみ

付着力は付着応力分布を積分し、シートの幅を乗じることにより算出した。また相対変位は、シートとコンクリートとの剛性の差を考慮して、コンクリートを剛体と仮定し、シートひずみをシート端部より積分し算出した。図-2にシートはく離開始時以前の付着力-相対変位関係の履歴を示す。

### 3. シート補強 RC はりの補強性能解析

#### 3.1 付着構成則の導出

図-3に付着力-相対変位関係とシートひずみ分布との相互関係を示す。(a)に示すように、試験結果から求めた付着力-相対変位関係は、A点、B点で勾配の変わるトリリニアで近似できる。(a)のトリリニアモデルの原点からA点までの過程、A点からB点までの過程、B点からC点までの過程はそれぞれ、(b)に示すシートひずみ分布の曲線aまでの過程(シート中央部のひずみ値が最大値に収束するまで増大する過程)、曲線aから曲線bまでの過程(シート中央部のひずみの増大は微小であるが、ひずみ値が大きく発生する領域が増大する過程)、曲線bから曲線cまでの過程(はく離が発生し進展していく)過程と対応している。このモデルをFEM解析における個々の要素のはく離条件とする際には、付着力が一定となった時点である(a)のB点で要素としてはく離破壊と判定することとする。これより、(a)において原点からB点までのバイリニア型の付着力-相対変位関係を、シート接着面積で除すことで

平均化し、付着応力-相対変位関係として付着

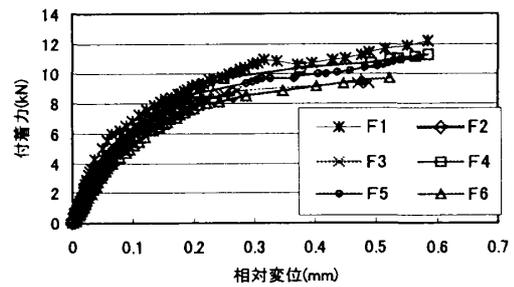
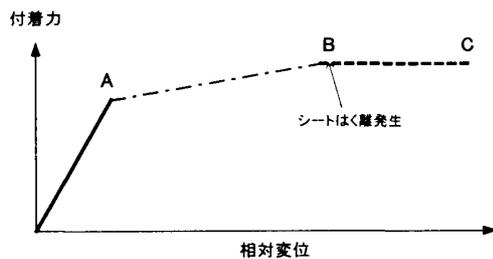
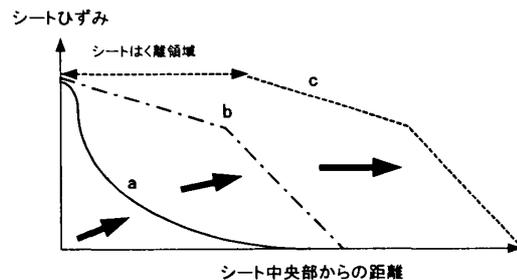


図-2 付着力-相対変位関係の導出



(a) 付着力-相対変位関係



(b) シートひずみ分布

図-3 付着力-相対変位関係とシートひずみ分布の相互関係

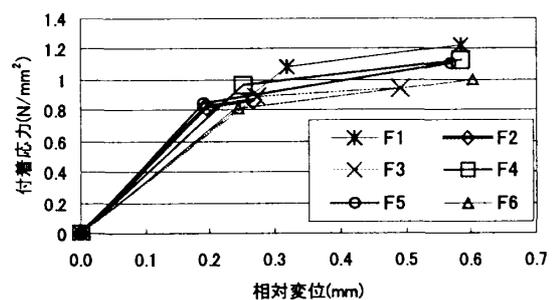


図-4 付着構成則一覧

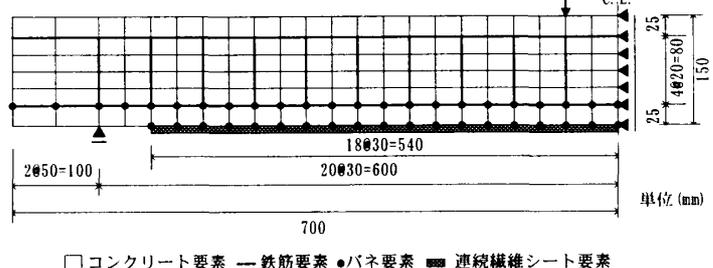


図-5 解析モデル

構成則とした。図-4に付着構成則の一覧を示す。図-4に示す付着構成則は、土木学会の「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指針」<sup>7)</sup>に示された求め方から得られるバイリニアモデルと比較して、破壊エネルギーにおいてほぼ等価であることを確認した。また得られた最大付着応力の値は、 $1.0\text{N/mm}^2 \sim 1.2\text{N/mm}^2$ であり、この値は、RCはりの実験結果と解析結果が合致したとして李ら、劉ら<sup>8)</sup>が用いている局部付着強度の値、それぞれカットオフ型で  $2\text{N/mm}^2$ 、バイリニア型で  $1.5\text{N/mm}^2$  に対して、若干小さいものとなっている。

### 3.2 解析概要

図-5に解析モデルを示す。解析モデルは比較対象としたシート補強RCはり曲げ載荷試験供試体<sup>1)</sup>を想定したものであり、断面が  $150 \times 150\text{mm}$ 、長さが  $1400\text{mm}$  のRCはりで、幅  $75\text{mm}$ 、長さ  $1100\text{mm}$  のシートを接着樹脂により供試体下面に接着した供試体である。解析モデルは、対称供試体であるため、片側のみをモデル化して、スパン中央断面を軸方向に拘束した。また、コンクリートを平面応力要素、鉄筋要素を線要素とし、コンクリート要素と引張鉄筋要素の接触節点において、付着を考慮したバネ要素を導入している。さらに、はり下面に貼り付けたシート要素を軸力のみを伝える棒要素でモデル化し、コンクリート要素と繊維シート要素との接触節点において、付着を考慮したバネ要素を導入している。また、各要素の構成則を図-6に示す。コンクリート要素については、圧縮側はトリリニア型でモデル化した。引張側については、土木学会コンクリート標準示方書〔構造性能照査

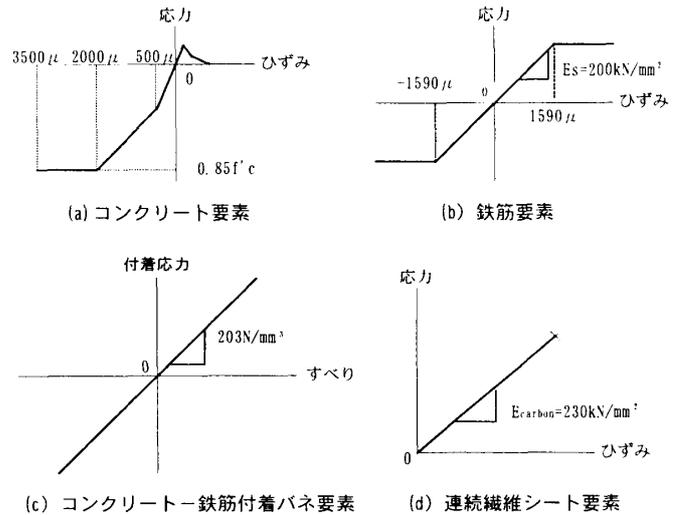


図-6 各要素の構成則

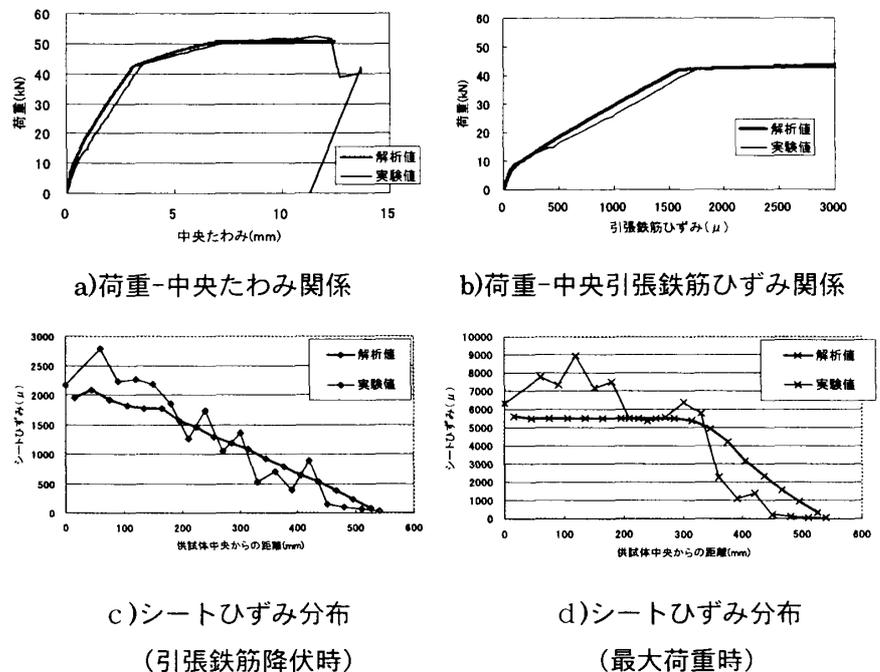


図-7 解析精度検証

編<sup>9)</sup>に示されている引張軟化モデルを用いている。鉄筋要素については完全弾塑性型でモデル化する。降伏ひずみ値は鉄筋の引張試験より求めた降伏応力を弾性係数  $200\text{kN/mm}^2$  から逆算して求め、 $1590\mu$ とした。コンクリートと引張鉄筋との付着を表すバネについては完全弾塑性とする。また、シートについては、引張破断時まで弾性的で降伏点が存在しないことから、弾性-破断型とする。また、シートとコンクリートとの間の付着構成則は、図-4で示したモ

デルを用いる。

3.3 解析精度検証および解析結果

図-7に F2 の接着界面状態を有する、シート補強 RC はり補強性能解析結果を示し、これより本解析手法の妥当性を評価する。荷重-中央たわみ関係、荷重-中央引張鉄筋ひずみ関係において解析値、実験値<sup>1)</sup>ともほぼ同等の値を示している。破壊モードにおいても実験結果同様はく離破壊となった。本解析は分散ひび割れモデルであるため、実験結果におけるひび割れの局所化の影響を表現できない。そのために、はく離破壊が発生した範囲のシートひずみ値が一定となって表現され、シートひずみ分布において、載荷試験結果より小さな値を示す傾向にあるが、載荷試験結果を再現していると考えられる。これらより本解析手法の妥当性が示されていると考えられる。

表-5に F1 から F6 のそれぞれのシート接着界面状態を有するシート補強 RC はりの解析結果を示す。いずれも本解析手法によって載荷試験結果を精度良く再現している。ただし、シートはく離時中央たわみにおいては、必ずしも載荷試験結果を精度良く再現できているとは言えない。この原因としては、実験において、測定誤差の可能性とシートはく離時の中央たわみのばらつきが大きいことが考えられる。

4. シート接着界面に不確定性を有するシート補強 RC はりの補強性能評価

4.1 不確定性を考慮した付着構成則

本研究で構築した付着構成則に以下のような方法で不確定性を導入した。図-8に示すように付着構成則の折れ曲がる点の相対変位を  $U_1$ 、端点の相対変位を  $U_2$ 、折れ曲がるまでの傾きを  $\theta_1$ 、折れ曲がった後の傾き  $\theta_2$  として、それぞ

表-5 解析結果

供試体名		引張鉄筋降伏荷重(kN)	部材降伏荷重(kN)	最大荷重(kN)	無補強に対する耐力比	シートはく離時の荷重(kN)	シートはく離時の中央たわみ(mm)
RC1	①実験値	41.7	43.6	52.1	1.28	51.5	12.2
	②解析値	42.1	43.0	50.7	1.25	50.7	12.5
	②/①	1.01	0.99	0.97	0.98	0.98	1.02
RC2	①実験値	43.1	44.1	48.5	1.19	48.1	8.8
	②解析値	42.2	43.1	47.4	1.16	47.4	8.4
	②/①	0.98	0.98	0.98	0.97	0.99	0.96
RC3	①実験値	44.1	45.6	52.5	1.29	52.0	9.7
	②解析値	42.0	42.7	49.1	1.21	49.1	10.0
	②/①	0.95	0.94	0.94	0.94	0.94	1.03
RC4	①実験値	42.2	44.1	49.8	1.23	49.7	10.7
	②解析値	40.1	41.2	48.5	1.19	48.5	12.5
	②/①	0.95	0.93	0.97	0.97	0.98	1.17
RC5	①実験値	41.7	44.6	54.9	1.34	54.2	12.4
	②解析値	46.5	47.6	54.5	1.36	54.5	10.8
	②/①	1.11	1.07	0.99	1.01	1.01	0.87
RC6	①実験値	39.7	41.7	49.4	1.22	48.5	11.2
	②解析値	42.5	42.9	49.4	1.21	49.4	9.9
	②/①	1.07	1.03	1.00	0.99	1.02	0.89

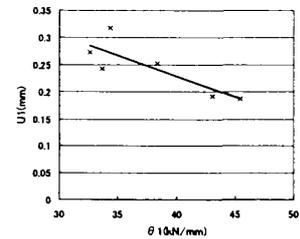
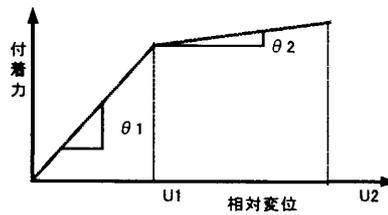


図-8 不確定性を考慮した付着構成則 図-9  $\theta_1$  と  $U_1$  の相関

れを変動係数 20%の正規分布と仮定した。 $\theta_1$  と  $U_1$  に関しては図-9に示すように付着試験結果において相関が見られたので相関係数 -0.831 を与えて考慮した。

4.2 解析概要

モンテカルロシミュレーション法を用いてシート接着界面状態に不確定性を有するシート補強 RC はりの補強性能解析を行った。概要を表-6に示す。F1の接着界面を有する場合(RC1)を基準として、図-5に示す19個のバネ要素に  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  の不確定性を導入した。試行回数は収束性を確認して300回とし、 $U_1 < 0$ ,  $U_2 < U_1$ , コンクリート圧縮破壊先行型のものを除いた。

表-6 解析概要

試行回数	300
変動係数(%)	20
$\theta_1$ と $U_1$ の相関係数	-0.83
基準とする $U_1$ (mm)	0.317
基準とする $U_2$ (mm)	0.585
基準とする $\theta_1$ (N/mm <sup>3</sup> )	3.43
基準とする $\theta_2$ (N/mm <sup>3</sup> )	0.49

### 4.3 解析結果

図-10にシートはく離開始時および最大荷重時の荷重-中央たわみ関係を示す。シートはく離時および最大荷重時ともに荷重-中央たわみ関係において強い正の相関が見られる。次に、表-7において荷重と中央たわみを比較すると、シートはく離開始時、最大荷重時ともに、中央たわみが、より不確定性の影響を大きく受けていることが分かる。これは、荷重は、シートはく離以前の挙動に支配されるのに対して、中央たわみは、はく離開始以降の挙動に支配されるためと考えられる。

### 5. まとめ

以下に本研究で得られた知見をまとめる。

- (1)パテを有するシートとコンクリートの付着試験より得られた付着力-相対変位関係をバイリニアでモデル化し、平均化して求めた付着力-相対変位関係をシートの付着構成則として導入した、シート補強 RC 部材の補強性能解析を行い、シート補強 RC はり曲げ載荷試験の結果を妥当に表現できることを確認した。
- (2)付着構成則に変動係数 20%の正規分布として不確定性を考慮したシート接着界面に不確定性を有するシート補強 RC はりの補強性能解析を行い、シートはく離時および最大荷重時ともに荷重-中央たわみ関係において強い正の相関が見られることを確認した。
- (3)最大荷重はシートはく離開始以前の挙動によって支配され、最大中央たわみははく離開始以降の挙動に支配されるために、最大中央たわみ分布が不確定性の影響を、より大きく受けると考えられる。

以上より、接着界面状態の不確定性による補強性能における影響を安全係数として適切に評価する必要があると考えられる。

#### 謝辞

実験を行うにあたり、多大なご協力をいただきました神戸大学工学部小林秀恵氏、コニシ(株)若原直樹氏、日鉄コンポジット(株)小林朗氏に御礼申し上げます。

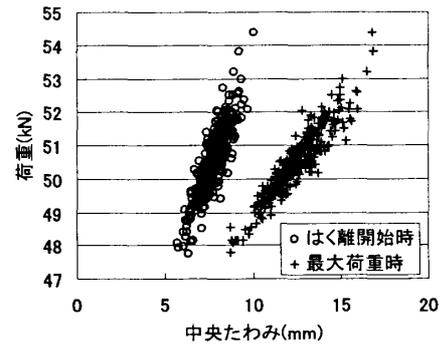


図-10 荷重-中央たわみ関係

表-7 不確定性を考慮した解析結果

		平均値	変動係数
シートはく離開始時	荷重(kN)	50.50	2.02(%)
	中央たわみ(mm)	7.72	9.72(%)
最大荷重時	荷重(kN)	50.52	1.98(%)
	中央たわみ(mm)	12.47	11.96(%)

#### 参考文献

- 1) 吉田隆浩ら：接着界面条件を考慮した連続繊維シート補強 RC 部材の性能評価，コンクリート構造物の補修，補強アップグレードシンポジウム論文報告集第 2 巻 pp73-80, 2002.10.社団法人 日本材料学会，
- 2) 佐藤靖彦ら：緩衝材を用いた炭素繊維シート補強 RC はりの曲げ挙動，コンクリート工学年次論文集，vol.24, No.2, pp.1429-1434, 2002.6.
- 3) 杉山裕樹ら：接着樹脂の材質に着目した連続繊維シート補強 RC はりの付着および耐荷性能の評価，コンクリート工学年次論文集，vol.22, No.3, pp.289-294, 2000.6.
- 4) 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指針，pp.73-82, 2000.7.
- 5) 全国上下水道エポキシ工事業協会：炭素繊維ライニング補強工法，1999.7.
- 6) 阪神高速道路公団：CF シートを用いた RC 床版補強要領(案)，pp.8-11, 1999.3.
- 7) 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指針，pp.81-82, 2000.7.
- 8) 土木学会：性能照査型システムにおけるコンクリート構造物の補強，pp.74, 2001.
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕，pp.27-28, 2002.