

表-1に供試体諸元を示す。Case1は無補強、Case2~4はシートの補強効果を評価するシリーズである。なお、CFシートの物性値は、破断強度 4840N/mm^2 、シート厚 0.111mm 、弾性係数 $2.53 \times 10^5\text{N/mm}^2$ である。

3. 実験結果

まず、図-3に、各供試体の最大荷重時における破壊性状を示す。図より、何れの供試体も破壊形態は斜め引張せん断破壊となっており、CFシートで補強した供試体については、まず、せん断ひび割れ発生位置付近のシートが剥離し始め、最大荷重付近で載荷点から1~5列目のシートのほぼ全域が剥離した後、2~4列目のシートが次々と破断した。なお、5本の破断したシートの破断箇所は、概ねせん断ひび割れ箇所と一致しており、剥離したシートにはコンクリートの表層部が付着していた。

次に、ひび割れが横切り剥離の発生が確認された5本のシートを対象に、式(1)より算出したCFシートが負担するせん断力 V_{cf} と、式(2)より算出したコンクリートが負担するせん断力 V_c と鉛直変位の関係を図-4に示す。

$$V_{cf} = \sum_{i=1}^n (2 \times \varepsilon_{cfi} \times E_{cf} \times A_{wi}) \quad (1)$$

$$V_c = V - V_{cf} \quad (2)$$

ここに、

V_{cf} : CFシートが負担するせん断力

ε_{cfi} : CFシートの最大ひずみ

E_{cf} : CFシートの弾性係数

A_{wi} : CFシートの断面積

n : 載荷点から n 列目のシート

V_c : コンクリートが負担するせん断力

V : 部材が受け持つせん断力

図より、各ケースともまずコンクリートがせん断に対して抵抗しており、せん断ひび割れ発生時(鉛直変位 5mm 付近)において V_c は最大値となる。その後は、変形量の増加に伴って V_c

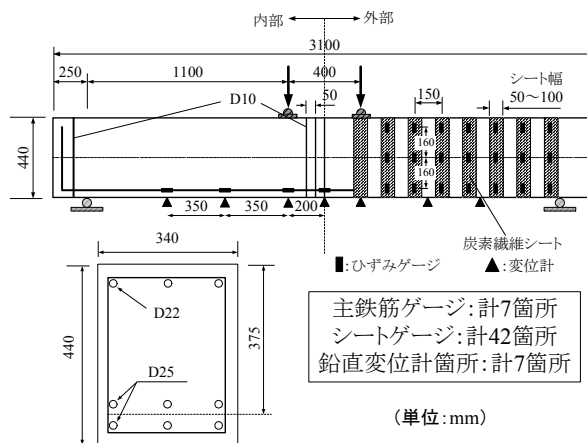


図-2 実験供試体

表-1 供試体諸元

供試体	シート幅 (mm)	間隔 (mm)	曲げ耐力 P_{yo} (kN)	せん断耐力 V (kN)	補強比率 (%)
Case1	無補強	0	302.0	131.0	0
Case2	50	150	302.0	212.3	0.022
Case3	75	150	302.0	253.0	0.032
Case4	100	150	302.0	293.6	0.043

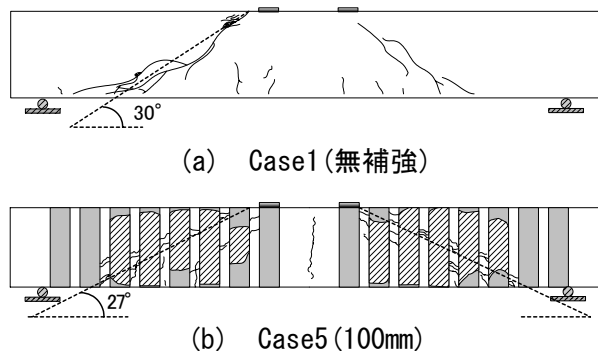


図-3 供試体の破壊性状(最大荷重時)

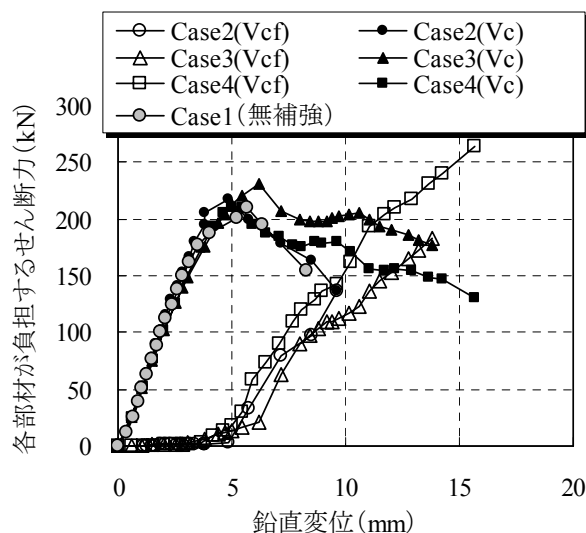


図-4 V_{cf} および V_c と鉛直変位の関係

が低下し、CF シートがせん断に対して抵抗することとなる。なお、 V_c の低下勾配は補強量が多いほど緩やかになる傾向にある。次に、図-5 にせん断ひび割れが横切る 5 本のシートを対象に、最大荷重時におけるシートが負担するせん断力を破断強度で除したものを示す。これによると、CF シートは平均で破断強度の 49% に達すると破断する結果となっている。

一方、ひび割れ幅の測定方法は、供試体の上、中、下段の 3 箇所の子断ひび割れ発生箇所にデジタルカメラ（400 万画素相当）を設置し、荷重状態でのひび割れ幅の記録を行った。その後、図-6 に示すように、各荷重ステップ毎に計測線を横切るひび割れ幅を、画像診断支援ソフトを用いて合計 30 箇所測定した。評価方法としては、計測線を横切る複数のひび割れ幅の中から、最もひび割れ幅の大きい主要な子断ひび割れを特定し、30 箇所の平均値を用いている。

ここで、 V_c とひび割れ幅の関係を図-7 に示す。これによると、 V_c とひび割れ幅との間には、補強量の違いによらず一定の関係が得られており、ひび割れ発生時において V_c の値は最大値となる。その後、ひび割れ幅が大きくなるに従って V_c は低下しており、最終的にはひび割れ発生時の約 7 割程度にまで低下している。

4. 簡易的フレーム解析

4.1 解析概要

実験結果から、コンクリートが負担するせん断力 V_c はせん断ひび割れ発生以降低下するため、せん断補強耐力として、 V_c の低下と併せて全体の評価が必要となる。また、補強効果を適切に評価する際には、シートの剥離過程を評価する必要性が指摘されている⁵⁾。したがって、CF シートによるせん断補強耐力の評価について、実験供試体を対象とした簡易的な解析モデルを用いて検討することとした。

4.2 解析モデル

解析モデルは図-8 に示すような立体フレームモデルとした。解析モデルにおいて、コンク

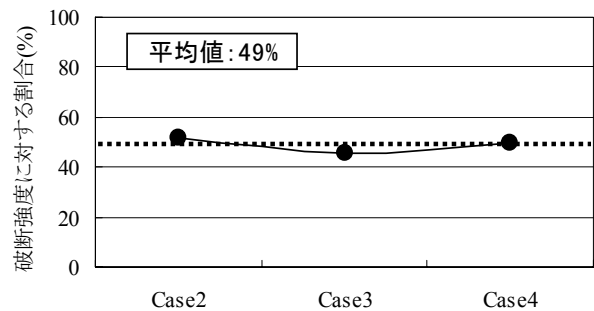


図-5 CF シートの破断強度に対する有効率

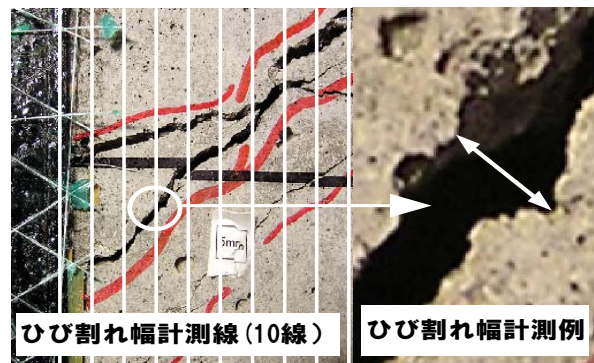


図-6 ひび割れ幅計測例

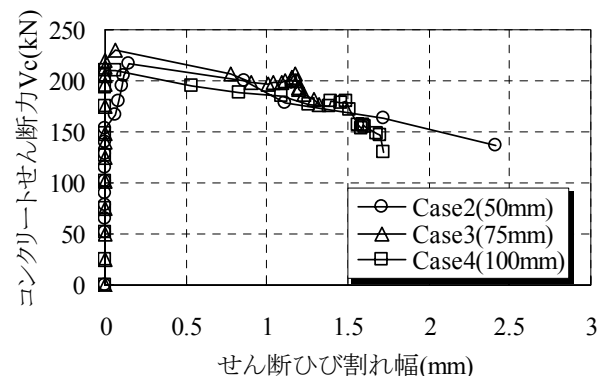


図-7 V_c とひび割れ幅の関係

リート供試体は剛体としており、実験でせん断ひび割れが生じた箇所に、せん断損傷仮定断面を設けた。なお、せん断損傷仮定断面の設定角度は、実験におけるひび割れ角度と同値としている。また、せん断損傷仮定断面を横切る 5 本の CF シートは引張力のみを負担する弾性トラス要素、せん断損傷仮定断面間のコンクリートの抵抗は非線形バネ要素、コンクリートと CF シート間の界面の接着樹脂はすべり方向に非線形バネ要素を用いた。

4.3 各部材のモデル化

(1) 付着構成則と付着バネのモデル化

接着樹脂の付着構成則として、既往の研究では、図-9 (a) に示すような付着応力 τ と相対変

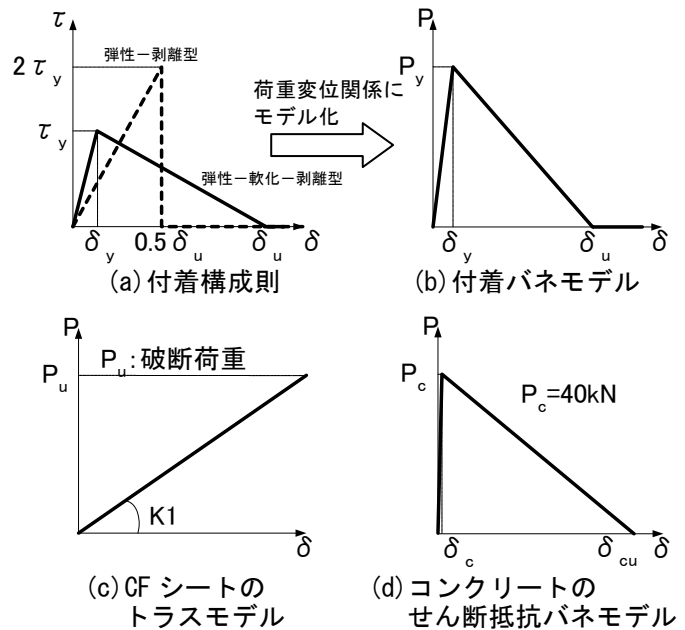
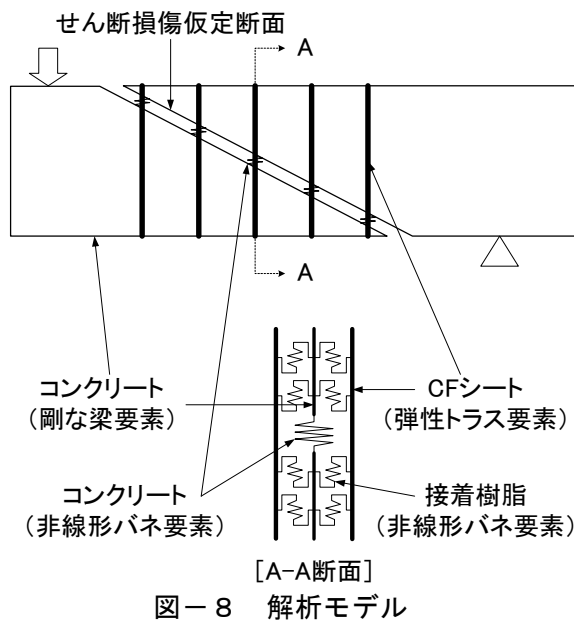


図-9 各要素の荷重-変位関係

位 δ との関係 ($\tau - \delta$ 関係) が与えられている⁶⁾。ここで、弾性-軟化-剥離型の構成則は、一軸引張付着試験の結果を忠実に再現したもので、弾性-剥離型の構成則は、数値計算の簡便を考慮して、弾性-軟化-剥離型モデルと剥離破壊エネルギー ($\tau - \delta$ 曲線で囲まれる面積) が等価になるように線形でモデル化したものである。既往の研究結果⁶⁾では、どちらのモデルを用いても耐力算定上十分な精度で評価できることが確認されているが、今回はより忠実にシートの剥離挙動を再現するため、弾性-軟化-剥離型の構成則を用いている。

また、指針の中では弾性-剥離型モデルを用いる際、一般的な抵抗値として $2\tau_y = 7.5\text{N/mm}^2$ 、 $0.5\delta_u = 0.2\text{mm}$ とされているため³⁾、本解析では、 $\tau_y = 3.75\text{N/mm}^2$ 、 $\delta_y = 0.1\text{mm}$ 、 $\delta_u = 0.4\text{mm}$ と設定している。

次に、接着樹脂を先述した付着構成則 ($\tau - \delta$ 関係) から、非線形バネ要素を用いて、(b) のような荷重変位関係となるバネモデルに置き換えた。付着バネモデルの抵抗値 P_y は式(3)を用いて算出し、 δ_y および δ_u は付着構成則と同値とした。また、本解析では 50mm毎に接着樹脂のバネモデルを配置した。

$$P_y = \tau_y \times b \times l \quad (3)$$

ここに、

- P_y : 最大付着力(kN)
- b : CFシート幅(mm)
- l : 付着長(=50mm)

(2) CF シートのモデル化

一方、CFシートは一軸方向のみに抵抗すると考え、トラス要素を用いてモデル化を行った。初期剛性 $K1$ および破断荷重 P_u は、シートの物性値を用いて式(4), (5)により算出し、図-9(c)に示す荷重-変位関係とした。

$$P_u = f_{wyd} \times A \quad (4)$$

$$K1 = E \times A / L \quad (5)$$

ここに、

- P_u : CFシート破断荷重(kN)
- f_{wyd} : CFシート破断強度(N/mm²)
- A : CFシート断面積(mm²)
- E : CFシート弾性係数(N/mm²)
- L : CFシート部材長(mm)

(3) コンクリートのせん断抵抗のモデル化

せん断損傷仮定断面間におけるコンクリートのせん断抵抗はバネ要素を用いてモデル化を行った。非線形バネモデルは、図-7で示したVc

とせん断ひび割れ幅の関係から、図-9(d)に示す荷重変位関係とし、 $\delta_c=0.01\text{mm}$ 、 $\delta_u=8.0\text{mm}$ とした。

一方、解析における外力としては強制変位を与えており、終局状態の判定としては、図-5を参考にシートが負担するせん断力 V_{cf} が破断荷重の49%に達した時点としている。

5. 解析結果

まず、各ケースの最大荷重時における、CFシートとコンクリートが負担するせん断力の割合を図-10に示す。これによると、各ケースにおいて、シートが負担するせん断力 V_{cf} およびコンクリートが負担するせん断力 V_c は、実験、解析ともに比較的一致していることが分かる。したがって、解析モデルは比較的精度良く、せん断耐力の評価が可能であると考えられる。

次に、Case4を例に、シートとコンクリートの各部材が負担するせん断力と、ひび割れ幅の関係を図-11に示す。ここで、解析におけるひび割れ幅は、せん断損傷仮定断面間に配置したコンクリートバネの変形量としている。図より、コンクリートが負担するせん断力 V_c とひび割れ幅の関係は、実験、解析ともに比較的一致しているものの、シートが負担するせん断力 V_{cf} に関しては、実験ではひび割れ幅が1.5mmに達した以降、急激に V_{cf} が増加する傾向にあるのに対し、解析では、ひび割れ幅が0.5mmに達するまでの早い段階で V_{cf} が増加しており、その後、ひび割れ幅が1.5mmに達するまで V_{cf} の値は一定となった後、再びひび割れ幅の進展とともに V_{cf} が増加する傾向にある。

一方、図-12にシートのひずみと剥離面積関係を示す。これによると、実験、解析ともに、シートのひずみが一定となり剥離面積のみが進展する箇所が存在している。しかしながら、実験では4000 μ 程度のひずみが生じると、シートが剥離し始めているのに対し、解析ではシートのひずみが7000 μ 程度生じると剥離し始め、剥離面積も実験より少ない結果となる。

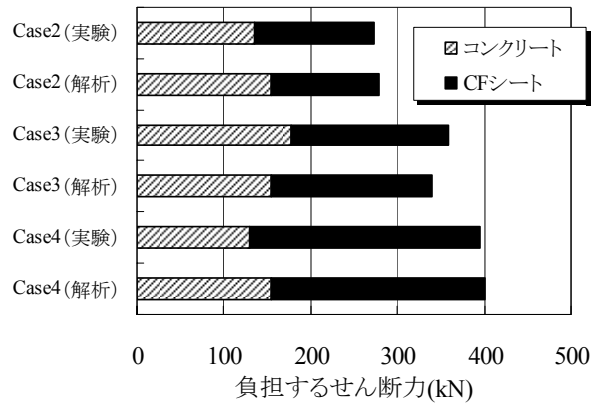


図-10 各部材が負担するせん断力

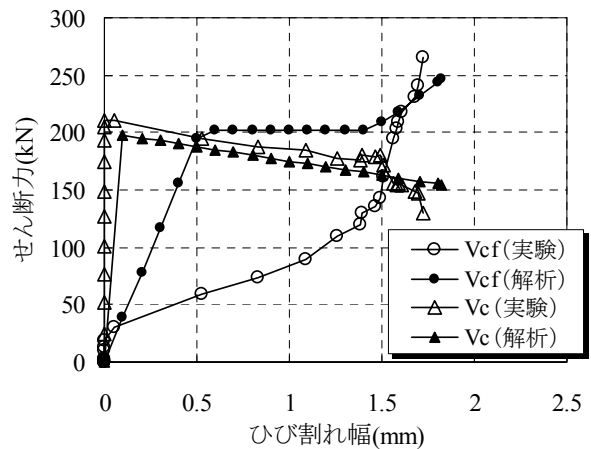


図-11 せん断力-ひび割れ幅関係 (Case4)

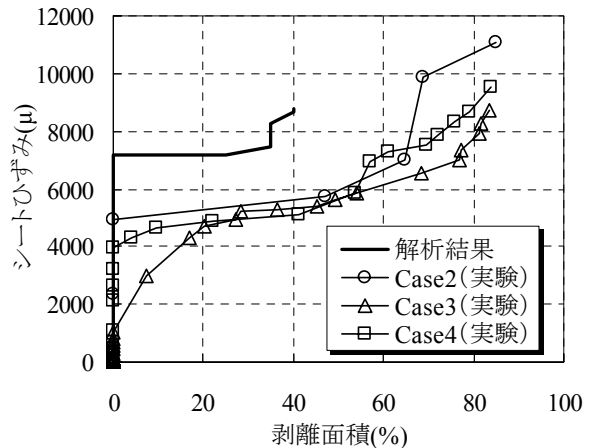


図-12 シートひずみ-剥離面積関係

このように、実験と解析でシートが負担するせん断力の進展状況に差が生じる原因として、シートの付着強度と剛性の違いが考えられる。

ここで、ひび割れ幅が進展する際の、シートと接着樹脂(付着バネ)の変形状態の模式図を図-13に示す。同一ひび割れ幅で比較した場合、

付着バネの剛性が大きい場合は(a)のように、付着バネの変形が小さくなるため、シートの変形が大きくなる。逆に、付着バネの剛性が小さい場合は(b)のように、付着バネの変形が大きくなるため、シートの変形は小さくなる。

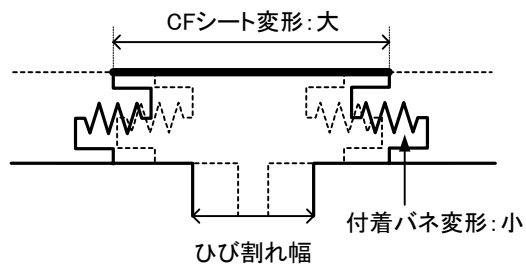
したがって、今回の解析では、接着樹脂の付着バネを一般的な付着構成則の値を用いて設定しているが、バネの剛性が実験値より大きかった可能性が高いため、図-12のようにシートが剥離するまでにシートのひずみが大きくなり、また、剥離が十分進展する以前に、ひび割れ付近のシートの変形量が増加するため、図-11のようにVcfの進展状況が異なると考えられる。

以上より、今回提案した解析モデルでは、シートの剥離挙動の再現およびせん断補強耐力の評価は可能であるが、付着構成則に関しては、別途に付着試験等を行い、試験結果から得られた付着構成則を用いてバネモデルを設定することが望ましいと考えられる。

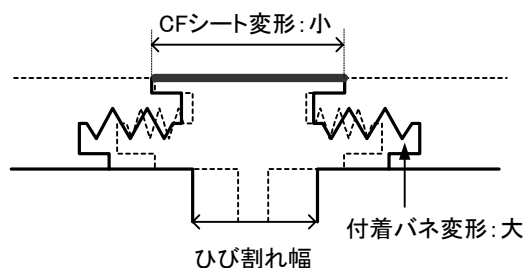
6. まとめ

以下に、本研究で得られた結論を示す。

- (1) コンクリートのせん断破壊の進展に伴うCFシートのせん断抵抗機構として、まず、せん断ひび割れ発生後にひび割れ付近のシートが局所的に剥離し始め、せん断抵抗するシートのほぼ全域が剥離した後、シートが1本でも破断した時点で最大荷重に達する結果となる。
- (2) 最大荷重時において、シートが負担するせん断力Vcfは、破断荷重の約49%程度負担し、コンクリートが負担するせん断力Vcは、ひび割れ発生時の約7割程度負担する。
- (3) CFシートで補強されたコンクリート部材のせん断補強耐力について、今回提案した解析モデルを用いることで、シートの剥離挙動を含め概ね評価できるが、シートのひずみおよび剥離の進展状況に付着構成則が与える影響が大きいことが分かった。



(a) 接着樹脂(付着バネ)の剛性が大きい場合



(b) 接着樹脂(付着バネ)の剛性が小さい場合

図-13 ひび割れ付近の変形の模式図

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：炭素繊維シートによる鉄道高架柱の耐震補強工法．設計施工指針，1996.7
- 2) 丸山久一：委員会報告「連続繊維補強コンクリート研究委員会報告」，コンクリート工学年次論文報告集 Vol.20, No.1, pp.1-10, 1998.6
- 3) 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.23-29, pp301-308, 2000.3
- 4) 武内康裕，幸左賢二，松本茂，橋場盛：炭素繊維を用いた梁のせん断補強効果に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集 Vol.26, No.2, pp.1039-1044, 2004
- 5) 宇治公隆，横田和直，池田尚治：シート状連続炭素繊維補強材を用いた既設鉄筋コンクリート部材のせん断耐力向上効果に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集 Vol.14, No.2, pp.695-700, 1992
- 6) 上原子晶久，下村匠，丸山久一：連続繊維シート補強コンクリート部材のせん断耐力評価法に関する研究，土木学会論文集 No.648/V-47, pp217-226, 2000.5