

論文 打込み型枠FRC薄板を用いた鉄筋コンクリート部材の力学的性状に関する研究

高実子 光*¹・榎谷 栄次*²

要旨：FRC板を用いたRC部材の一部を切り出した要素部材に関して引張・純曲げ実験を行い、FRC板を用いた複合部材においてのFRC板の合成効果及び付着性状を調べる。これに基づいてFRC板を用いたRC梁部材の曲げ終局強度に関する評価式の提案を行う。その結果、複合部材において底面にあるFRC板は初期剛性に、側面にあるFRC板は鉄筋降伏前後の剛性、靱性の向上に大きく寄与していることが認められた。また評価式においては、今後幅広く適用しさらに適合性を高めることが必要であると考えている。

キーワード：打込み型枠板、複合部材、試験方法、合成効果、曲げ終局モーメント、曲率

1. はじめに

型枠プレキャスト工法の普及により、打込み型枠板等の需要は増加しており、各社から様々なものが製品化されている。また、打込み型枠板を用いたRC部材の実験研究も数多く行われており、昨年度行われた打込み型枠板(以下、FRC板と略す)を用いた鉄筋コンクリート部材、梁・柱・壁部材の実験¹⁾において、FRC板と躯体との一体性、FRC板を用いた複合部材の剛性、強度、破壊性状についての研究を行い、その結果、FRC板は一体性があり、剛性、強度の向上に寄与することが確認された。しかし、現在FRC板に対する需要は増加しているものの、FRC板そのものの強度、剛性、破壊性状についての実験研究はあまり行われておらず、それを評価する試験方法の確立が待たれている。

本研究は、昨年度の実験研究を踏まえ、部材の一部を切り出した要素部材に関して引張・純曲げ実験を行い、FRC板を用いた複合部材においてFRC板が剛性、強度の向上に寄与することを再度確認し、FRC板の合成効果及び付着性状を調べることを目的とし、この実験資料に基づいてFRC外殻RC梁の曲げ強度に関する評価式の提案を行う。

2. FRC板

図-1にFRC板の断面形状を示す。FRC板は、主原材料として無機結合材・繊維質添加剤(セロアベ-ス)・増粘材・水を使用し、押出成形により製造されている。本研究で使用するFRC板は、Aタイプ、Bタイプの2種類とし、Aタイプは平板部が8mm、リブ部が12mm、リブ幅が50mmで、Bタイプはリブ幅のみAタイプと異なり36mmで角が面取りされて製作されている。

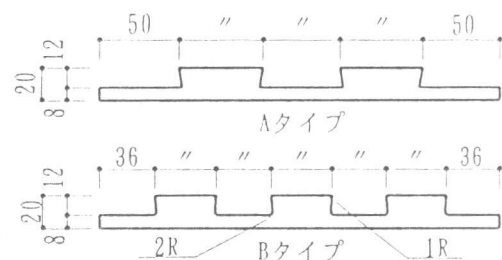


図-1 FRC板の断面形状 (単位:mm)

3. 実験概要

3.1 試験体

表-1に試験体一覧を示し、図-2に試験体形状図を示す。試験体は、引張実験(Tシリーズ)、曲げ実験(Mシリーズ)共に、打込み型枠板工法によりFRC板を使用して躯体コンクリートと一体化させた複合部材が

* 1 (株)熊谷組 (正会員)

* 2 関東学院大学教授 工学部建築学科、工博 (正会員)

それぞれ4体 (TPF、MPFシリーズ)、

表-1 試験体一覧

| 試験体名 | 型枠使用有無 | リブ幅 (mm) | 型枠使用面 | 試験体寸法 | | 使用鉄筋径・種類 |
|--------|--------|----------|-------|--------|--------|---------------|
| | | | | a (mm) | b (mm) | |
| TRC | 無 | — | — | 200 | 128 | D19 SD295A |
| TPF-A1 | 有 | 50 | 底面 | 200 | 144 | |
| TPF-A2 | | 50 | 側面 | 216 | 128 | |
| TPF-B1 | | 36 | 底面 | 200 | 144 | |
| TPF-B2 | | 36 | 側面 | 216 | 128 | |

| 試験体名 | 型枠使用有無 | リブ幅 (mm) | 型枠使用面 | 試験体寸法 | | | 使用鉄筋径・種類 |
|--------|--------|----------|-------|--------|--------|--------|---------------|
| | | | | a (mm) | b (mm) | c (mm) | |
| MRC | 無 | — | — | 200 | 388 | 64 | D19 SD295A |
| MPF-A1 | 有 | 50 | 底面 | 200 | 396 | 72 | |
| MPF-A2 | | 50 | 側面 | 216 | 388 | 64 | |
| MPF-B1 | | 36 | 底面 | 200 | 396 | 72 | |
| MPF-B2 | | 36 | 側面 | 216 | 388 | 64 | |

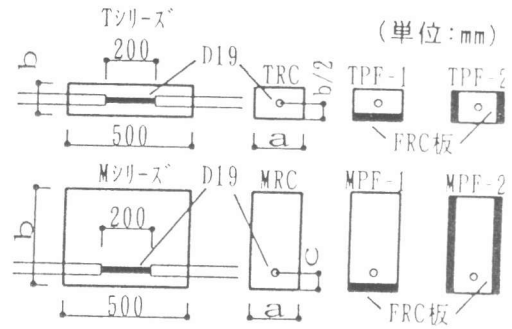


図-2 試験体形状図

在来型枠板工法により製作する比較用のRC部材が、それぞれ1体(TRC、MRC)の合計10体である。

A、BはFRC板のタイプ。その後の数値はFRC板の使用箇所を示し、1は底面のみ、2は側面のものに配したものである。表-2にコンクリート試験結果を示し、表-3に鉄筋引張試験結果を示す。また引張、曲げ試験体共に試験体中央部に応力を集中させ、ひび割れを発生させるために、中央部の

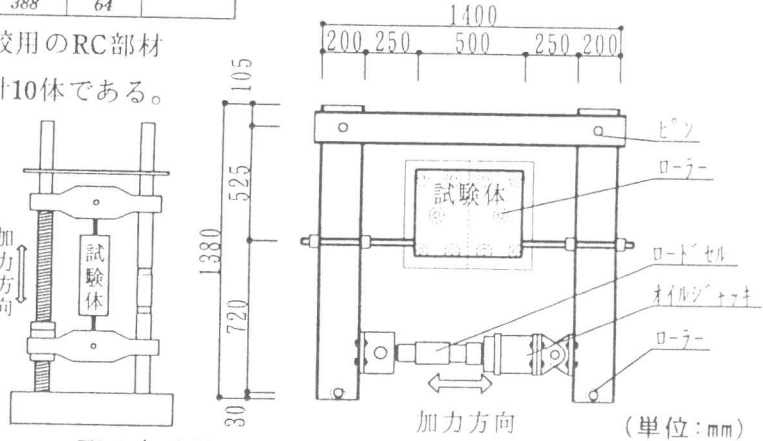


図-3 加力装置図(左:引張実験)(右:曲げ実験)

鉄筋(D19)の両端にD22-SD390を圧接する。

3.2 加力及び計測計画

引張試験体の試験方法は、図-3に示すよ

うな50tf万能試験機を用いて、両端の鉄筋(D22)を引張り、一方向

単調荷重によって実験を行う。また、試験体の鉄筋(D19)を破断させないため、最大荷重を12tfとする。計測方法は、FRC板及びコンクリート表面の中央部に生じたひび割れ幅をパイ型変位計で測定し、鉄筋(D19)ひずみは、中央部に貼付したワイヤーストレインゲージで計測する。

曲げ試験体の試験方法は、図-3に示すような門型の治具を使用し、50tfオイルジャッキを用いて梁の下端筋を想定した鉄筋に引張荷重を与え、試験体の曲げ荷重とする。また引張実験と同様、単調荷重、最大荷重12tfとする。計測方法は、図-4に示すようにFRC板及びコンクリート表面の中央部に生じたひび割れ幅をパイ型変位計で測定し、鉄筋(D19)ひずみは、中央部に貼付したワイヤーストレインゲージで計測する。

表-2 コンクリート試験結果

| 試験体名 | 圧縮強度 (kgf/cm ²) | 引張強度 (kgf/cm ²) | ヤング係数 (x10 ⁴ kgf/cm ²) | 材齢 (日) |
|---------------|-----------------------------|-----------------------------|---|--------|
| MRC,MPF-A1,B1 | 221 | 23.8 | 2.31 | 18 |
| MPF-A2,B2 | 214 | 19.7 | 2.00 | 19 |
| Tシリーズ | 253 | 28.0 | 2.14 | 34 |

表-3 鉄筋引張試験結果

| 径 | 種類 | 降伏強度 (kgf/cm ²) | 引張強度 (kgf/cm ²) | 伸び率 (%) | ヤング係数 (x10 ⁴ kgf/cm ²) |
|-----|--------|-----------------------------|-----------------------------|---------|---|
| D19 | SD295A | 3550 | 5170 | 18.5 | 1.90 |
| D22 | SD390 | 3880 | 5730 | 20.5 | 2.00 |

(単位:mm)

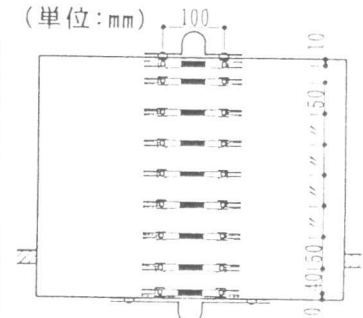


図-4 パイ型変位計配置図

表-4 引張実験結果一覧

| 試験体名 | 初期ひび割れ荷重 (tf) | 鉄筋降伏荷重 (tf) | 最大荷重 (tf) | 鉄筋降伏変位 (mm) | 最大変位 (mm) |
|--------|---------------|-------------|-----------|-------------|-----------|
| TRC | 2.3 | 9.8 | 12.0 | 0.46 | 3.76 |
| TPF-A1 | 3.3 | 9.8 | | 0.33 | 3.44 |
| TPF-B1 | 2.8 | 9.5 | | 0.30 | 3.20 |
| TPF-A2 | 4.5 | 10.2 | | 0.27 | 3.05 |
| TPF-B2 | 5.5 | 10.0 | | 0.31 | 3.38 |

4. 実験結果

4.1 引張実験結果

引張実験結果一覧を表-4に示し、荷重-ひずみ曲線を図-5、荷重-開口変位(ひび割れ幅)曲線を図-6に示す。初期ひび割れ荷重、降伏荷重及びそれ以降について、TRCに比べFRC板を使用

したTPFシリーズの試験体全てが同等又はそれ以上の値を示している。その荷重-開口変位曲線

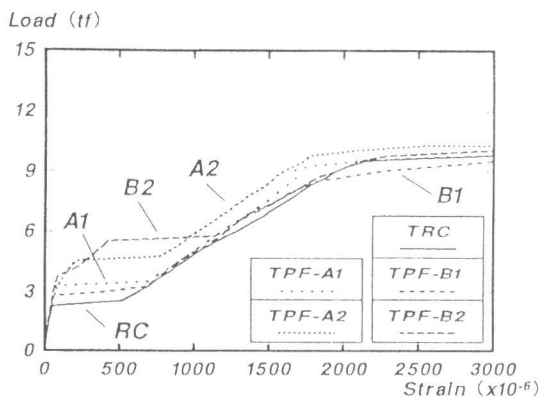


図-5 荷重-ひずみ曲線

線のTRCとTPFシリーズの荷重の差からFRC板引張応力を導き、FRC板引張応力-開口変位曲線を図-7に示す。この図は、FRC板を使用した複合部材における開口変位に対して、FRC板のみにかかる引張応力度を示す図である。ここで、TPFシリーズの試験体全てにおいて、開口変位が0.25mm前後でFRC板の最大引張応力度を示していることがわかる。

4.2 曲げ実験結果

曲げ実験結果一覧を表-5に示し、荷重-ひずみ曲線を図-8、荷重-開口変位曲線を図-9に示す。初期ひび割れ荷重は、MPFシリーズがすべてMRCを上

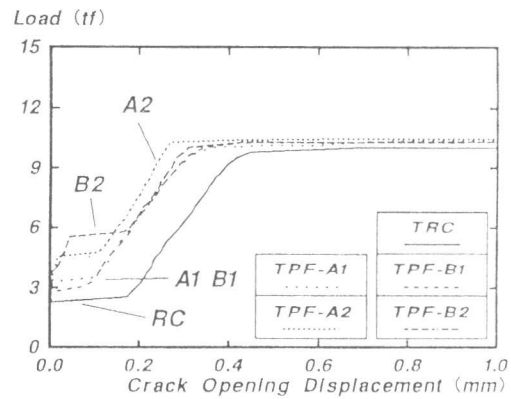


図-6 荷重-開口変位曲線

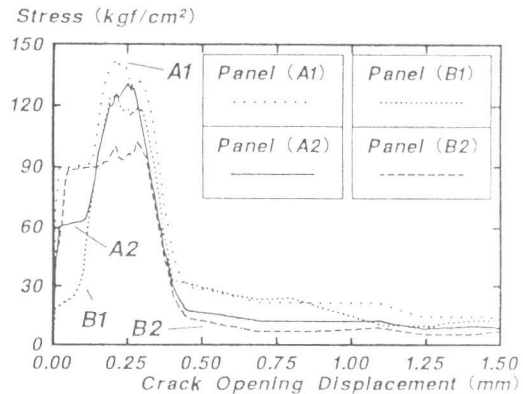


図-7 FRC板引張応力-開口変位曲線

回っている。特に底面に配されている1型が大きい。また、鉄筋降伏直後の図-8に関して1型の荷重の変動を見ると、MRCと同様に

| 試験体名 | 初期ひび割れ荷重 (tf) | FRC板初期ひび割れ荷重 (tf) | 鉄筋降伏荷重 (tf) | 最大荷重 (tf) | 降伏変位 (mm) | 最大変位 (mm) |
|--------|---------------|-------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| MRC | 3.7 | | 9.6 | 12.0 | 0.46 | 7.62 |
| MPF-A1 | 6.3 | 7.0 | 9.0 | | 0.58 | 1.73 |
| MPF-B1 | 7.3 | 7.3 | 9.4 | | 0.62 | 5.36 |
| MPF-A2 | 5.2 | 8.2 | 9.8 | | 0.35 | 7.07 |
| MPF-B2 | 6.6 | 6.6 | 10.3 | | 0.35 | 5.09 |

荷重が一時的低下していることがわかる。これは、ひび割れがFRC板を貫通したためFRC

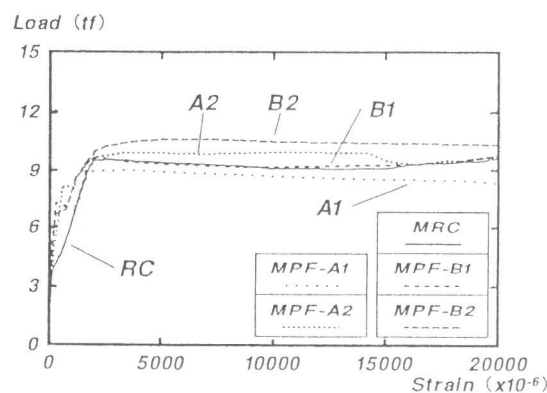


図-8 荷重-ひずみ曲線

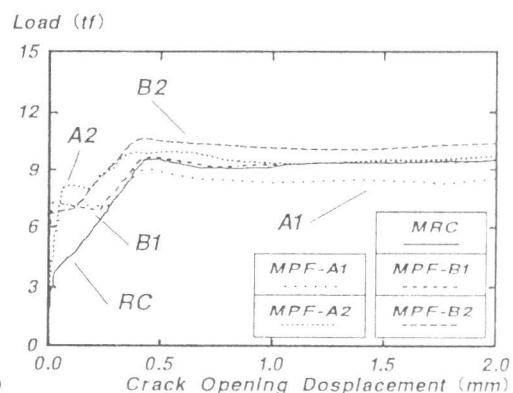


図-9 荷重-開口変位曲線

板の効果が無くなったためと思われる。側面にFRC板を配した場合(2型)の鉄筋降伏時は、MRCよりも荷重が上回っており、開口変位は下回っている。また、鉄筋降伏直後に目立った荷重低下は見られない。しかし、FRC板のひび割れ貫通前後からはMRCとほぼ同等の性状が認められた。

破壊性状として、側面にAタイプのFRC板を配したMPF-A2に関する

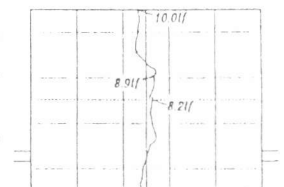


図-10 ひび割れ性状図

ひび割れ性状図を図-10に示す。ひび割れは、8.2(tf)で中央までひび割れが進展し、10.0(tf)でひび割れが貫通した。これは、他試験体も同様な傾向を示して

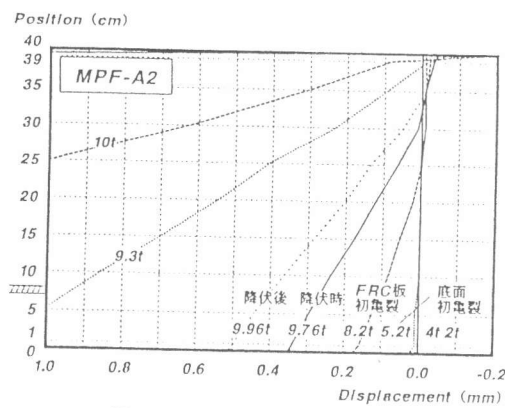


図-11 ひび割れ分布図

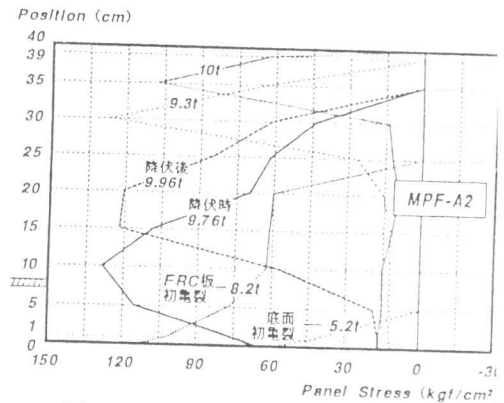


図-12 FRC板引張応力分布図

いる。側面にAタイプのFRC板を配したMPF-A2に関しての、パイ型変位計から得たひび割れ

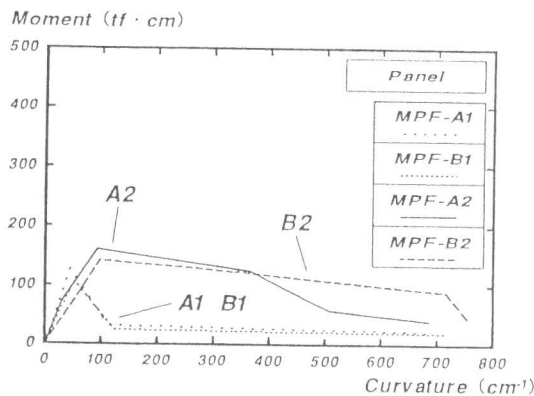


図-13 FRC板の曲げモーメントと曲率の関係

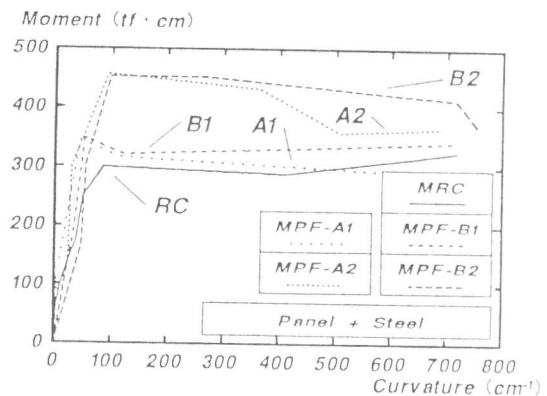


図-14 FRC板と引張鉄筋を累加した曲げモーメントと曲率の関係

分布図を図-11に、図-7と図-11から導いたFRC板引張応力分布図を図-12に示す。初期ひび割れ時にはFRC板の引張応力度は引張側縁で最大となるが、鉄筋降伏に近づくにつれ最大引張応力度位置は圧縮側に近付いていく。これは、他試験体についても同様に見られる。

FRC板の曲げモーメントと曲率の関係を、図-13に、FRC板と引張鉄筋を累加した曲げモーメントと曲率の関係を図-14に示す。さらに、図-15に複合部材におけるFRC板と引張鉄筋のモーメントの割合を、それぞれ初期ひび割れ時、鉄筋降伏時について

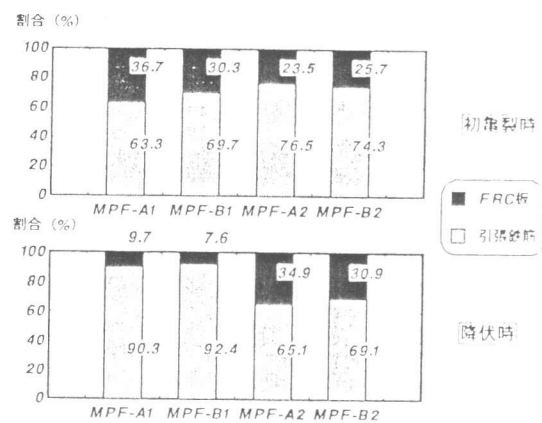


図-15 複合部材におけるFRC板と引張鉄筋の割合

示す。MPF-A1、B1は、FRC板が引張側縁に1枚のみの配置なので、FRC板のひび割れ貫通時に曲げモーメントの最大を迎え、その直後に急減し以後最大荷重までほぼ一定値で推移している。MPF-A2、B2は、側面にFRC板を配しており、引張側から圧縮側に至る全面をFRC板が覆っているので、引張側縁にひび割れが生じてもモーメントの低下は起こらず、鉄筋降伏まで増加し、降伏と同時に滑らかに低下している。割合を見ても、FRC板を底面のみに配した場合の試験体MPF-A1、B1では、初亀裂発生時のFRC板のモーメントの割合が、降伏時よりも大幅に高い。また、初亀裂発生時の側面のみに配した場合の試験体MPF-A2、B2と比べても高くなっている。FRC板を側面のみに配した場合の試験体MPF-A2、B2では、FRC板にかかる引張応力が引張側か

ら次第に圧縮側に移動していき、それに沿ってひび割れが進むので、初亀裂発生時から降伏時に至るまでモーメントは増加しており、大幅にモーメントの値は大きい。

4.3 考察

以上から、FRC板を用いた複合部材は、RCに比べ剛性、強度が高く、FRC板が剛性、強度の向上に寄与することが確認された。また、FRC板を底面に配した場合は初期剛性の向上に寄与することがわかり、FRC板を側面に配した場合は鉄筋降伏前後の剛性、靱性の向上に寄与していることが認められた。これによりFRC板を側・底面両方に配した場合は、部材の弾・塑性全域において剛性、靱性が高まるものと思われるが、今後の課題として、側・底面にFRC板を配した試験体で実験する必要があると考えている。

5. 曲げ終局強度評価式の提案

打込み型枠板工法により躯体コンクリートと一体化された複合部材、FRC外殻RC梁の曲げ終局モーメントを評価するため、①式のように仮定を行う。

$$\begin{aligned} M_{cr} &= M_{crR} + M_{crF_1} + M_{crF_2} \dots \textcircled{1} \\ M_{crR} &= 0.9 \cdot a_t \cdot \sigma_y \cdot d \end{aligned}$$

FRC外殻RC梁の曲げ終局モーメント(M_{cr})は、略算式によるRC梁の曲げ終局モーメント(M_{crR})、底面のみにFRC板を配した場合の曲げ終局モーメント(M_{crF_1})、側面のみにFRC板を配した場合の曲げ終局モーメント(M_{crF_2})を累加したものと与えられる。ここで、FRC板のみの曲げ終局モーメントは引張応力のみを考慮する。また、FRC板のモーメントを②式のように仮定し、モデル図を図-16に示す。釣り合う圧縮モーメントは、コンクリートの圧縮モーメントに含まれることと仮定する。

$$\begin{aligned} M_{crF_1} &= t \cdot b \cdot \sigma_{f_1} \cdot (D - X_n) \dots \textcircled{2} \\ M_{crF_2} &= 2t \cdot hf \cdot \sigma_{f_2} \cdot j \end{aligned}$$

ここで、 M_{cr} はFRC外殻RC梁の曲げ終局モーメント($kgf \cdot cm$)、 M_{crR} は略算式による曲げ終局モーメント($kgf \cdot cm$)、 M_{crF_1} はFRC板を底面のみに配した場合のFRC板のみの曲げ終局モーメント($kgf \cdot cm$)、 M_{crF_2} はFRC板を側面のみに配置した場合のFRC板のみの曲げ終局モーメント($kgf \cdot cm$)、 a_t は引張鉄筋の断面積(cm^2)、 σ_y は引張鉄筋の降伏強度(kgf/cm^2)、 d は梁の有効せい(cm)、 t はFRC板の等価断面幅(cm)、 b は梁幅(cm)、 D は梁せい(cm)、 X_n は圧縮側縁から中立軸までの距離(cm)、 hf は引張側縁から中立軸までの距離(cm)、 σ_{f_1} 、 σ_{f_2} は引張鉄筋降伏時のFRC板の等価引張応力(kgf/cm^2)、 j は応力中心距離(圧縮応力の中心と引張応力の中心との距離)(cm)である。しかし、 j についてはFRC板の圧縮応力を考慮に入れないので、 j は引張応力の中心から中立軸までの距離とする。ここで、FRC板のみの曲げ終局モーメント($M_{crF_1} \cdot M_{crF_2}$)をFRC板の材料物性で表現するため、次頁(③式の上の括弧内)のような仮定を行う。

ここで、 σ_c はFRC板の圧縮強度(kgf/cm^2)、 D は梁せい(cm)である。 α 、 β 、 γ 、 ρ は係数で

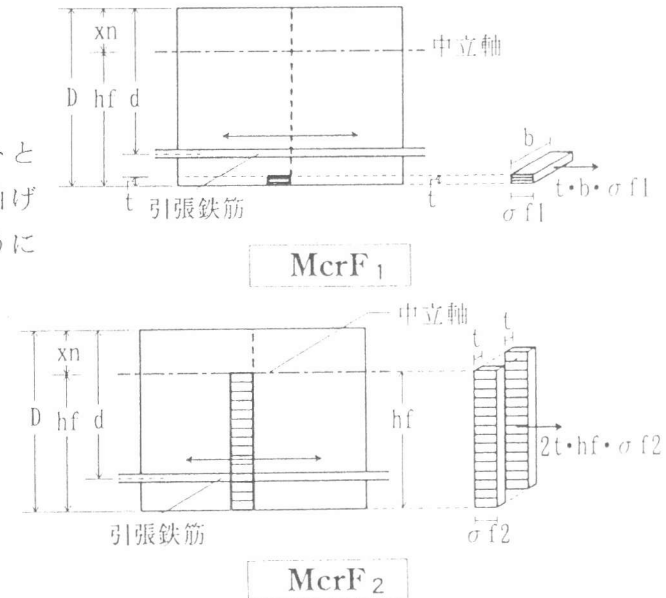


図-16 FRC板のみの曲げ終局モーメント($M_{crF_1} \cdot M_{crF_2}$)のモデル図

$$\left[\begin{array}{l} \sigma f_1 = \alpha_1 \cdot \sqrt{\sigma_B} \\ \sigma f_2 = \alpha_2 \cdot \sqrt{\sigma_B} \end{array} \quad \begin{array}{l} hf = \beta \cdot D \\ j = \gamma \cdot D \end{array} \quad D-X_n = \rho \cdot D \right]$$

$$\begin{aligned} M_{cr} = & (0.9 \cdot a_t \cdot \sigma_y \cdot d) + (\alpha_1 \cdot \rho \cdot t \cdot b \cdot D \cdot \sqrt{\sigma_B}) \\ & + (\alpha_2 \cdot \beta \cdot \gamma \cdot 2t \cdot D^2 \cdot \sqrt{\sigma_B}) \end{aligned} \quad \dots \textcircled{3}$$

あり、本研究の曲げ実験結果から算定する。その結果を下記に示し、それを代入したFRC外殻RC梁の曲げ終局モーメント式をAタイプ、Bタイプに分けて④式に示す。これをFRC板外殻RC梁の曲げ終局モーメント式として提案し、曲げ実験との比較を図-17に示す。全試験体共に±20%に収まっており、係数の妥当性が証明されたと思われる。

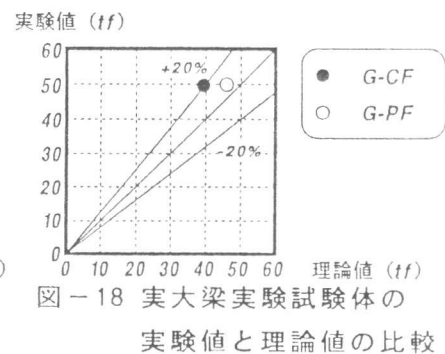
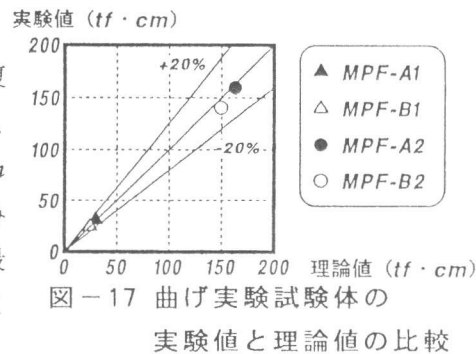
$$\text{Aタイプ} \left[\begin{array}{l} \alpha_1 = 1.19 \quad \alpha_2 = 3.92 \quad \beta = 0.84 \\ \gamma = 0.48 \quad \rho = 0.95 \end{array} \right] \quad \text{Bタイプ} \left[\begin{array}{l} \alpha_1 = 1.00 \quad \alpha_2 = 3.93 \quad \beta = 0.84 \\ \gamma = 0.44 \quad \rho = 0.92 \end{array} \right]$$

$$\begin{aligned} M_{cr}(\text{Aタイプ}) &= 0.9 \cdot a_t \cdot \sigma_y \cdot d + t \cdot D \cdot \sqrt{\sigma_B} \cdot (1.13 \cdot b + 3.16 \cdot D) \\ M_{cr}(\text{Bタイプ}) &= 0.9 \cdot a_t \cdot \sigma_y \cdot d + t \cdot D \cdot \sqrt{\sigma_B} \cdot (0.92 \cdot b + 2.90 \cdot D) \end{aligned} \quad \dots \textcircled{4}$$

④式を昨年に実験が行われた鉄筋コンクリート梁部材<1>(G-CF：在来型枠板工法による梁部材)(G-PF：型枠プレキャスト工法によりFRC板を使用した梁部材)に適用したところ、図-18に示すように、既存の略算式よりも近似値を得たことを報告する。しかし、今後幅広くこの評価式を型枠Pca工法による部材に適用し、さらに適合性を高めることが必要であると考えている。

6. まとめ

- ・ FRC板を用いた複合部材において、開口変位が0.25mm前後でFRC板のみの引張応力度が最大を示していることがわかった。



- ・ FRC板を用いた複合部材は、RCに比べ剛性、強度が高く、FRC板が剛性、強度の向上に寄与することが確認された。
- ・ FRC板を底面に配した場合は初期剛性の向上に寄与することがわかり、FRC板を側面に配した場合は鉄筋降伏前後の剛性、靱性の向上に寄与していることが認められた。
- ・ FRC板を側・底面両方に配した場合は、部材の弾・塑性全域で剛性、靱性が高まるものと思われるが、今後の課題として側・底面にFRC板を配した試験体で実験する必要があると考えている。
- ・ 実験結果から導いた評価式を、今後幅広く様々な部材に適用し、さらに適合性を高めることが必要であると考えている。

謝辞：本研究を行うにあたり、江口 正昭氏、渡辺 英彦氏(㈱熊谷組)を始めとする、讃岐 郁夫氏(㈱クボタ)、前島 毅氏(昭和電工建材㈱)に多大なるご指導、ご協力を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献：<1>江口正昭、舟山勇司他：押出成形セメント板を用いた打込み型枠工法の開発
日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)A材料施工、1995年8月