

# 一方向 CFRP 材による経年戸建住宅基礎コンクリートの補強に関する研究

邊 吾一 (日大生産工・教授)  
小澤 延行 ( (株)ヴァンテック・開発部長)

## 1. 緒言

耐震設計が見直された昭和 53 年以前に建てられた戸建住宅の基礎には鉄筋が入っていない無筋コンクリート基礎を使用している場合が多い。建築物の基礎は建物と地面の間にあり、建物の荷重を地盤に伝える重要な構造部材である。無筋コンクリートを基礎に使用していると、大地震等で倒壊する危険があるため、基礎には高い強度やエネルギー吸収率が必要となる。

コンクリートは圧縮強度と比較して引張強度は充分な値でなく、圧縮強度の 1/10 程度しかない。そこで、無筋で作ったコンクリート基礎に引張強度の優れている炭素繊維強化プラスチック (以下 CFRP と記す) を用いて、住宅が建ったままで補強することで、引張強度にも優れた CFRP 補強経年無筋コンクリートを開発し、無筋コンクリート基礎の戸建住宅の住民に地震時に安全・安心を与えることを本研究では目指した。

ここでは、コンクリート単体の機械的特性を調べるために圧縮試験を行った。次に、CFRP 補強コンクリートはスリットを入れた無筋のコンクリートに CFRP 帯板を入れ、エポキシ樹脂を注入することで CFRP をコンクリートに接着させて作成し、4 点曲げ試験することにより CFRP 補強無筋コンクリートの曲げ特性を調べた。また、有限要素法を用いて解析を行い、CFRP 補強のメカニズムについて言及する。

## 2. 圧縮試験

コンクリートの機械的特性を調べるために圧縮試験を行った。試験体は高さ 200[mm]、直径 100[mm]の円柱であり、合計 6 本試験した。コン

クリートの調査を Table 1 に示し、圧縮試験の結果の一例を Fig.1 に、すべての結果を Table 2 に示す。

Table1 コンクリート調査

粗骨材の最大寸法 [mm]	空気量 [%]	水セメント比 [%]	細骨材率 [%]	単位量 [kg/m <sup>3</sup> ]					
				普通セメント	水	細骨材 (砕砂)	細骨材 (陸砂)	粗骨材	混和材
20	4.5	73.9	51.6	248	183	698	233	890	2.48

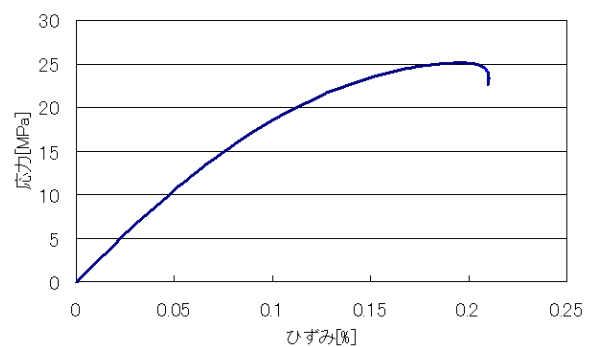


Fig.1. 圧縮試験の応力-ひずみ線図

Table2 コンクリート圧縮試験

	最大応力 [MPa]	最大ひずみ [%]	ヤング率 [GPa]
No.1	20.31	0.134	22.34
No.2	20.95	0.192	18.02
No.3	24.54	0.214	21.10
No.4	20.33	0.260	17.03
No.5	25.11	0.198	21.88
No.6	25.41	0.218	20.93
平均	22.78	0.203	20.21

6 本の平均として、圧縮強度は 22.78[MPa]、最大ひずみは 0.203[%]であり、圧縮弾性率は 20.21[GPa]であった。ただし、弾性率は最大荷重の 1/3 に相当する応力と、原点を結ぶ線分の勾配として算出した。

### 3. 4点曲げ試験

#### 3.1 試験体

CFRP 補強コンクリートは Fig.2 に示すように無筋コンクリートにスリットを入れ、そこに CFRP 帯板を挿入後、エポキシ樹脂をポンプで注入して CFRP を接着・接合した試験体である。

使用したエポキシ樹脂系接着剤は JIS A 6024「建築補修用注入エポキシ樹脂」に準じ、主剤をビスフェノールA型エポキシ樹脂、硬化剤を変性脂環式ポリアミンとしたエポキシ樹脂系接着剤である。また、CFRP の樹脂は主剤をビスフェノールA型エポキシ樹脂、硬化剤を芳香族ポリアミンとしたエポキシ樹脂、炭素繊維は PAN（ポリアクリロニトリル）系高強度炭素繊維をそれぞれ用い、引抜成形にて製作した CFRP 帯板である。

試験体の CFRP 挿入位置は、Fig.3 に示すよう、「下側補強」、「中心片側補強」、「上下補強」、「中心両側補強」とし、さらに無筋コンクリートも用意した。

CFRP 補強コンクリートの各寸法は、長さ 1400[mm]、幅 120[mm]、高さ 300[mm]、スリットの幅 30[mm]、スリットの高さ 3[mm]とし、スリットを入れる位置は下側補強と上下補強は下端もしくはは上端から 60[mm]とし、中心補強の場合はコンクリート高さの中心である 150[mm]の位置にいた。また CFRP 帯板の寸法は厚さ 1.2[mm]、幅 25[mm]とする。また、CFRP 帯板の物性値を Table 3 に示す。

#### 3.2 試験条件

Fig.4 に示すように4点曲げ試験を行い、試験体を支点間距離 1000[mm]、支持点直径 70[mm]の上に乗せ、負荷点間距離 333[mm]である治具を試験体の上に乗せた。さらに支持点、負荷点にコンクリートへの食い込みを防ぐために長さ 100[mm]の平板を付けた。試験体長さの中心で底にダイヤルゲージを置き、たわみを測定し、試験機のロードセルにより荷重を測定した。また、Fig.5 に示すように、ひずみゲージを試験体の底と CFRP が補強されている

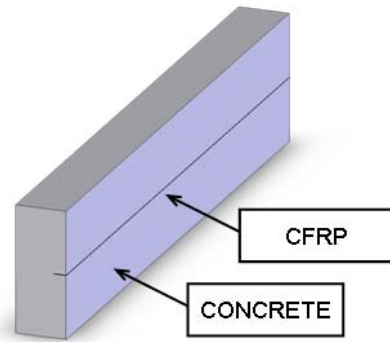


Fig.2 CFRP 補強コンクリート

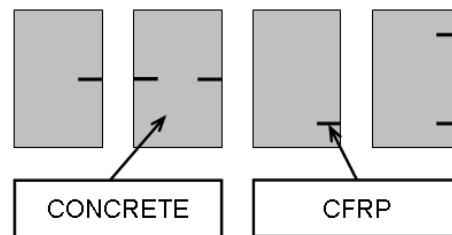


Fig.3 試験体断面

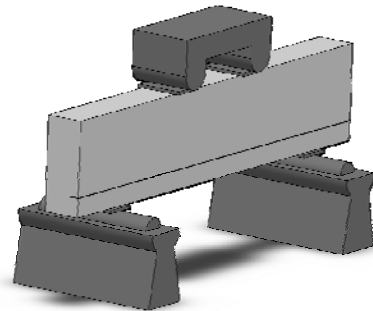


Fig.4 試験概要

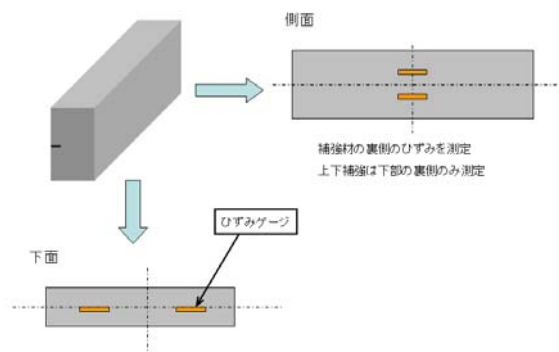


Fig.5 ひずみゲージの位置

Table.3 CFRP 物性値

$F_L$ [MPa]	$E_L$ [GPa]	$F_T$ [MPa]	$E_T$ [GPa]	$F_{LT}$ [MPa]	$G_{LT}$ [GPa]	$\nu_{LT}$ [MPa]	$\epsilon_L$ [%]
2697	150	75	10.4	109	4.6	0.32	1.6

面と反対側の側面（両側補強の場合は片面）に貼り付けた。

### 3.3 試験結果

結果の一例として、Fig.6, Fig.7に無筋コンクリートと下側補強したコンクリートの荷重-変位線図を示す。

無筋コンクリートはたわみに比例して荷重が増えている。そして、0.12[mm], 40.9[kN]の時に引張応力が働く下面からクラックが入り、瞬時に曲げ破壊した。一方、下側補強したコンクリートは無筋コンクリートが破壊した38.0[kN]付近にてクラックは入るものの、その後も荷重を受け持ち、最終的にはたわみは無筋の場合に比べて荷重は3倍、たわみは20倍近く大きくなり、119.2[kN], 22.05[mm]で破壊した。破壊様相の一例をFig.8に示す。

無筋コンクリート同様下面からクラックが入るものの、クラックが斜めに入っていることから引張破壊の他にせん断破壊もしている。また、無筋コンクリートはクラックが下面から入ると瞬時に上面まで達し、はり全体の破壊に至るが、CFRPで補強されているコンクリートは徐々に下側からクラックが進展していき、破壊に至るのは、上面にて圧縮破壊し、荷重を受け持たなくなるときであった。

さらに「中心片側補強」の破壊様相をFig.9に示す。中心片側補強に限り、CFRPが補強されていない側面（長さ幅からなる面）に折れ曲がる変形を起こしていた。

試験は各試験体について2体ずつ行ったが、そのすべての結果を比較してTable 4に示す。補強されている試験体はほぼ同様な荷重-変位線図を画いたが、「中心片側補強」は他と比べ変位は同等だが、受け持つ荷重が低かった。要因として、上記のように中心片側補強のみが、面外に変形していることが挙げられる。

さらに、荷重-変位線図の面積を求めることにより、試験体が吸収したひずみエネルギーを算出した結果をTable 5に示す。

結果を比較してみると「下側補強」と「上下補

Table 4 曲げ試験の結果の比較

	No.	荷重 [kN]	応力 [MPa]	最大荷重時変位 [mm]	曲げ強さ [N/mm <sup>2</sup> ]
無筋	1	44.5	4.12	0.13	3.10
	2	40.9	3.79	0.12	2.84
下側補強	1	119.2	11.04	22.05	8.28
	2	105.4	9.76	22.06	7.32
上下補強	1	119.2	11.04	20.61	8.28
	2	125.0	11.57	17.86	8.68
中心片側補強	1	47.9	4.44	15.00	3.33
	2	60.4	5.59	17.70	4.19
中心両側補強	1	83.3	7.69	12.95	5.78
	2	122.9	11.38	18.97	8.53

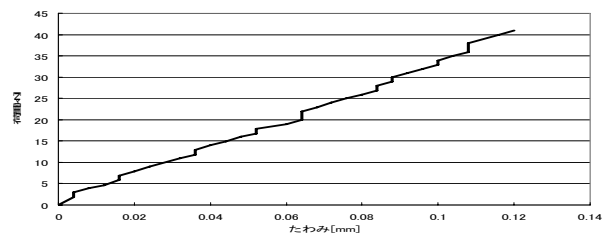


Fig.6 無筋コンクリート荷重-変位線図

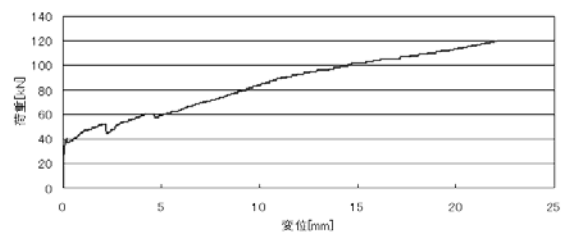


Fig.7 下側補強コンクリート荷重-変位線図

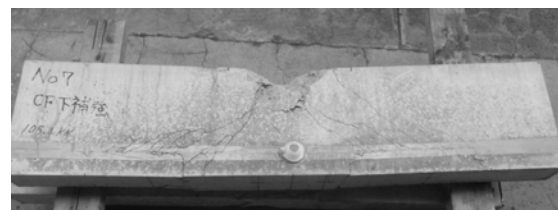


Fig.8 下側補強無筋コンクリートの破壊様相

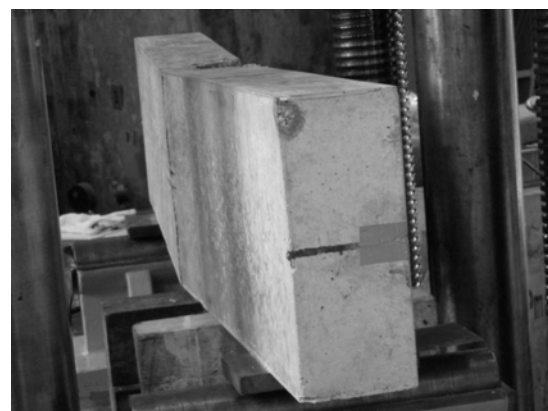


Fig.9 中心片側補強コンクリートの破壊様相

強」が他と比較して高い値を示している。以上より、中立軸から離れた位置にあり、引張応力が働く下面に CFRP が補強されているコンクリートが優れていることが示された。

#### 4. 有限要素法による解析

##### 4.1 FEM 解析モデル

解析には汎用有限要素法プログラム「ANSYS 11.0」を使用した。試験体は全てソリッド要素とし、コンクリート部は 3 次元コンクリートソリッド (SOLID65)、CFRP 部は 3 次元積層構造ソリッド (SOLID185)を用いた。モデルは 1/2 対称拘束モデルとし、破壊基準はコンクリート、CFRP 共に最大応力説を用いた。使用した材料物性値は Table 3 と Table 6 に示す。

##### 4.2 FEM 解析モデルの有用性

上の条件より、無筋コンクリート変位-荷重線図の比較を Fig.11 に示す。無筋コンクリートの強度に関しては、2 体の曲げ強度の実験値の平均値と FEM の値は、ほぼ一致している。最大たわみは実験値が FEM 値よりも大きくなる。この理由としては、FEM に用いたコンクリートの圧縮弾性率は、本実験で得た Table2 の平均値を用いたが、引張り側にも同じの値用い、圧縮の大きなヤング率を引張り側に使用したためと考えられる。

#### 5. 結言

CFRP 帯板で補強されたコンクリートの曲げ試験を行うことにより、無筋コンクリートと下側補強の試験体を比較すると荷重は約 2.5 倍、変位は約 180 倍と大幅な向上が見られた。また、有限要素法を用いた解析では、無筋コンクリート単体で良い一致が得られた。また、無筋コンクリートの解析結果を利用し今後は CFRP 補強コンクリートの解析を検討していく。

末筆ながら、試験装置の借用と操作法を指導していただいた櫻田智之教授と師橋憲貴専任講師、試験での計測とデータの処理をした大学院生齋藤一真君と 4 年生中山大輔君に感謝します。

#### 参考文献

- 1) 村田二郎, 國府勝郎, 越川茂雄, 入門鉄筋コンクリート工学, 技術堂出版, 2004

Table 5 吸収エネルギーの比較

	No.	吸収エネルギー [J]	単体積当たりの吸収エネルギー [kJ/m <sup>3</sup> ]	無筋1との比較
無筋	1	82	0.23	—
	2	6.1	0.17	
下側補強	1	1852	51.47	225.8
	2	1904	52.90	232.1
上下補強	1	1767	49.09	215.4
	2	1483	41.20	180.8
中心片側補強	1	552	15.33	67.3
	2	752	20.88	91.6
中心両側補強	1	974	27.04	118.7
	2	1414	39.28	172.3

Table 6 無筋コンクリートの物性値

弾性率 [GPa]	圧縮強度 [MPa]	引張強度 [MPa]	ポアソン比	せん断伝達係数	
				開いたクラック	閉じたクラック
20.21	22.78	2.28	0.2	0.2	0.6

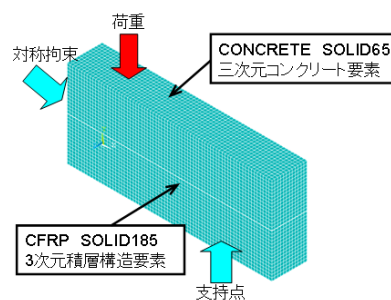


Fig.10 FEM 解析モデル

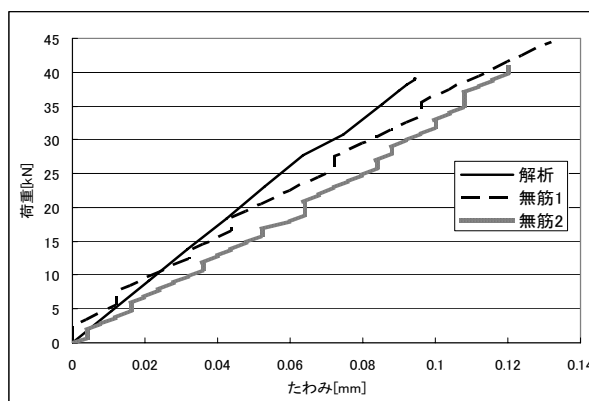


Fig.11 無筋コンクリートの FEM と実験の比較