

経年戸建住宅及び各種機械用回転軸の高耐震化技術の発展と地下埋設パイプの健全性評価技術の確立

一方向 CFRP 帯板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)
今村 仙治 (日大工・教授)
青木 義男 (日大理工・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を使用している場合が多い。建築物の基礎とは建物と地面の間にあるが、建物の荷重を地盤に伝える重要な構造部材であり、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 1/10 程度しかないので、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性がある。

本研究では、無筋コンクリートが曲げ負荷を受けると、引張り応力が作用している部分を引張強度に優れている炭素繊維強化プラスチック(以下 CFRP と記す)の帯板を用いて補強することで、地震等で曲げ負荷を受けた場合にも安全な CFRP 補強コンクリートの開発を目指した。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 を固定させ作成した。作成した試験体を曲げ試験することにより CFRP 帯板による無筋コンクリートの補強効果を調べた。また、はり理論と有限要素法を用いて解析を行い、補強メカニズムについて言及する。

2. 圧縮試験

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。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。

コンクリートの調合を Table 1 に示し、圧縮試験の結果の一例を Fig. 1 に示す。得られた結果を Table 2 に示す。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、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、ひずみが 50×10^{-6} [%]のときの応力とを結ぶ線分の勾配として算出した。

Table 1 コンクリート調合

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 ³]					
				普通セメント	水	細骨材 (砕砂)	粗骨材 (陸砂)	混和材	
20	4.5	73.9	51.6	248	183	698	233	890	2.48

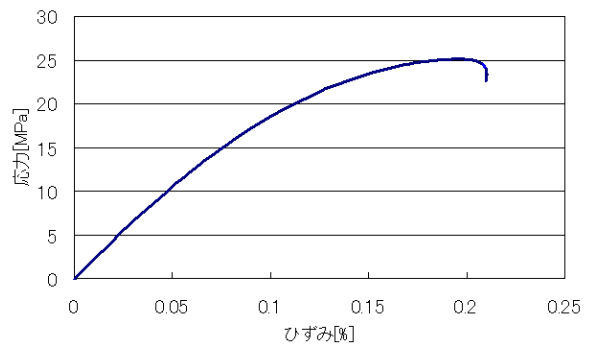


Fig.1. 圧縮試験の応力-ひずみ線図

Table 2 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

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、エポキシ樹脂にて固定した試験体である。

ここで使用したエポキシ樹脂は JIS A 6024「建築補修用注入エポキシ樹脂」に準じた。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とし、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て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、試験はそれぞれについて 2 体ずつ行った。

試験体の寸法は、長さ 1200[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、上下補強は下端もしくは上端から 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]の位置にいった。また CFRP 帯板の寸法は厚さ 1.2[mm]、幅 25[mm]とした。CFRP 帯板の物性値を Table 3 に示す。

3.2 試験条件

Fig.4 に示すように試験体を支点間距離 1000[mm]、支持点直径 70[mm]の丸棒の上に乗せ、荷重点間距離 333[mm]である治具を試験体の上に乗せた。さらに支持点、荷重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 が補強されている面と反対側の側面（両側補強の場合は片面）に取り付けた。

Table 3 CFRP 物性値

F_L [MPa]	E_L [GPa]	F_T [MPa]	E_T [GPa]	F_{LT} [MPa]	G_{LT} [GPa]	ν_{LT} [MPa]	ϵ_L [%]
2697	150	75	10.4	109	4.6	0.32	1.6

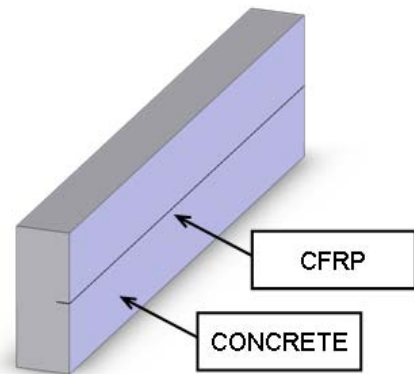


Fig.2 CFRP 補強コンクリート

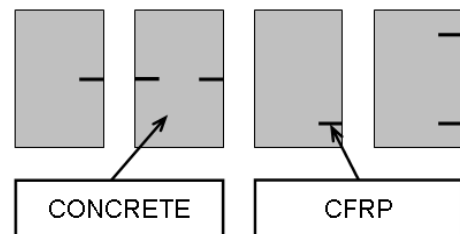


Fig.3 試験体の断面

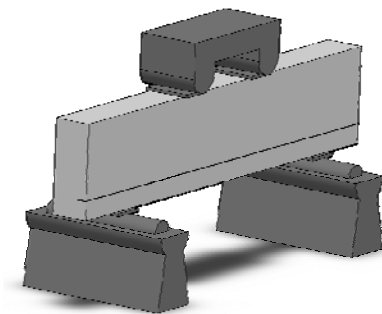


Fig.4 試験概要

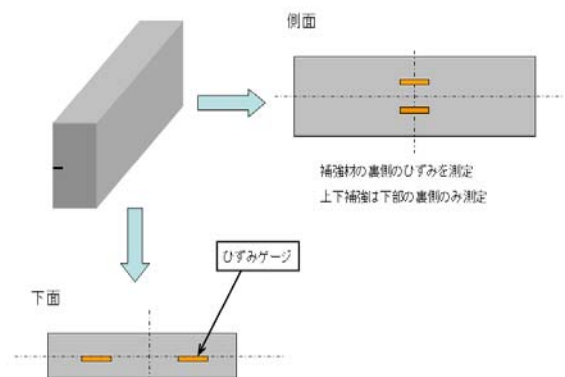


Fig.5 ひずみゲージの位置

3.3 試験結果

無筋コンクリートで CFRP 補強をしていない場合の荷重—たわみ線図と破壊後の試験体の様子を Fig.6 に示す。無筋コンクリートは荷重に比例して変位が線形的に増加 (Fig.6a) しており、0.12[mm] 41.9[kN]で引張応力が働く下面からクラックが入り、瞬時に破壊(Fig.6b)をした。

無筋コンクリートの中心位置の片側に CFRP 帯板で補強した場合の荷重—たわみ線図と破壊後の様相を図 7a と b に示す。両試験体は 30kN と 53kN でクラックが入るが、瞬時に破壊せずに、荷重は 20kN まで低下する。その後荷重と変位がほぼ比例して増加し、コンクリートの上部で圧縮破壊するまで荷重は増加し、最高荷重は初期にクラックが入った荷重よりも大きくなる。また、たわみも Fig.6a の無補強の場合に比べて、10 倍以上の 15mm 変形した。この「中心片側補強」に限り、CFRP で補強されていない側面 (幅と長さの面) で、Fig. 7c に示すように、曲げ変形を起こした。

次に、「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荷重と近い 38.0kN と 36.8 kN で初期クラックが入るものの、その後も荷重を受け持ち、最終的には 119 kN と 105kN, 最大たわみは 22.1mm(Fig.8a)となった。この場合も、無筋コンクリート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(Fig8b)ことから引張破壊の他にせん断破壊も起こしている。また、無補強のコンクリートはクラックが下面から入ると同時に上面まで

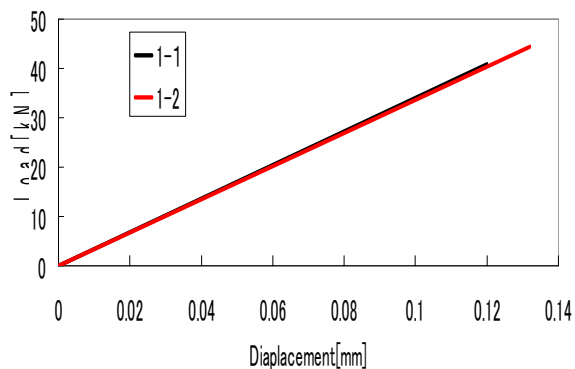


Fig.6 a 無筋コンクリートの荷重—たわみ線図

達し、はり全体の破壊が瞬時に起こるが、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、最終破壊に至るのは、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。

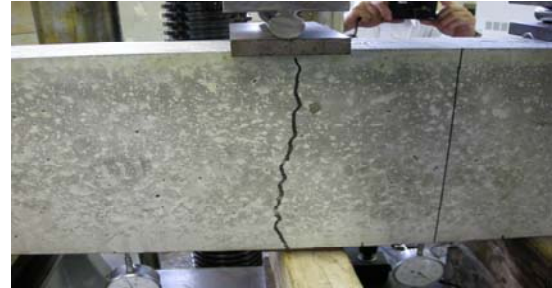


Fig.6b 無筋コンクリートの破壊様相

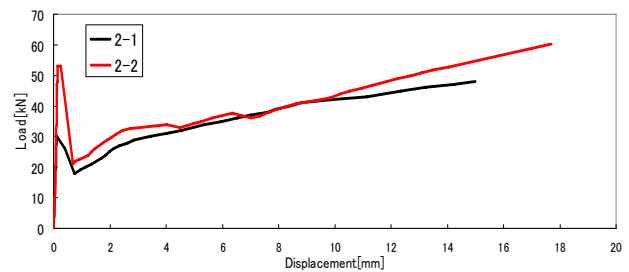


Fig.7a 中心片側補強コンクリートの荷重—たわみ線図



Fig.7b 中心片側補強コンクリートの破壊様相

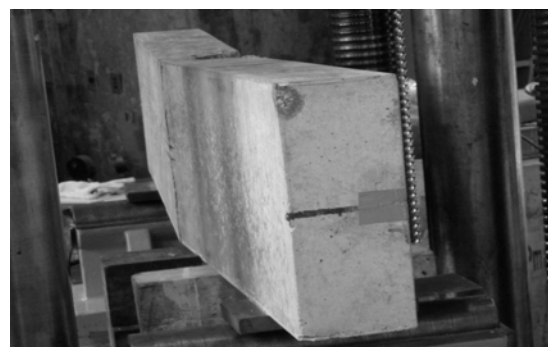


Fig.7c 中心片側補強コンクリートの破壊様相

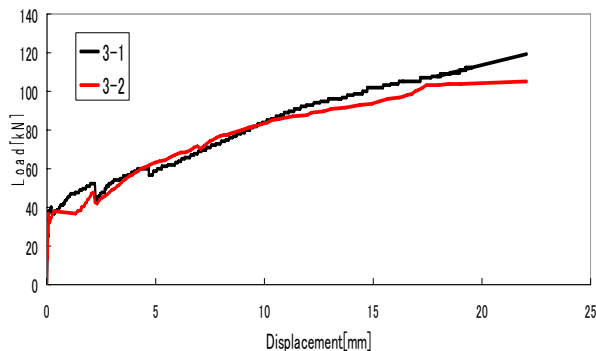


Fig.8a 下側補強コンクリートの荷重-たわみ線図



Fig.8b 下側補強コンクリートの破壊様相

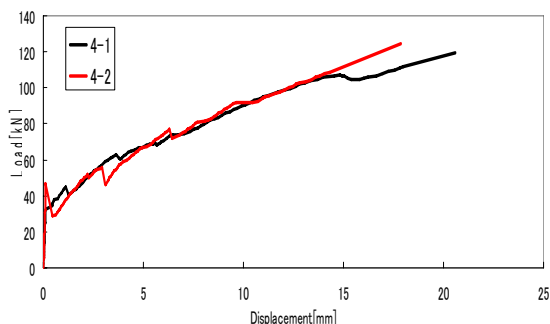


Fig.9.上下補強コンクリートの荷重-たわみ線図

「上下補強」の場合の荷重-たわみ線図を Fig.9 に示すが、この場合の最大荷重、最大たわみは下側補強の場合とほぼ同じで結果を得られた。この事は、圧縮側になる上部に CFRP 帯板を挿入しても、効果が余りないことを意味している。

Table 4 に実験結果は省略した中心両側補強の結果を含めて全実験結果の最大荷重、最大荷重時のたわみ、曲げ強さを示す。「中心片側補強」は他と比べ変位は同等だが、最大荷重の値は低かった。原因としては Fig.7c に示したように、側面で曲げ変形を起こしたためと考えられる。

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「上下補強」が他と比較して高い値を示していることがわかる。以上より、中立軸から離れた位置にあり、引張応

Table 4 全実験データの曲げ強さと最大たわみ

	No.	荷重 [kN]	最大荷重時変位 [mm]	曲げ強度 [MPa]
無筋	1	44.5	0.13	4.12
	2	40.9	0.12	3.79
下側補強	1	119.2	22.05	11.04
	2	105.4	22.06	9.76
上下補強	1	119.2	20.61	11.04
	2	125.0	17.86	11.57
中心片側補強	1	47.9	15.00	4.44
	2	60.4	17.70	5.59
中心両側補強	1	83.3	12.95	7.69
	2	122.9	18.97	11.38

Table 5 全試験体の吸収エネルギー

	No.	吸収エネルギー [J]	単位体積当たりの吸収エネルギー [kJ/m ³]	無筋1との比較
無筋	1	82	0.23	—
	2	61	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

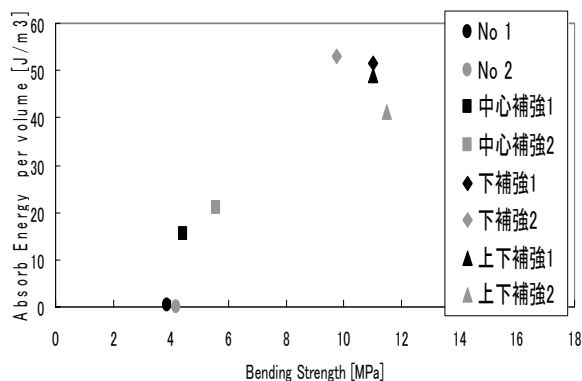


Fig.10 曲げ強度と吸収エネルギーの関

力が働く下面に CFRP が補強されている補強コンクリートが優れていることが示された。

Fig.10 には Table 5 と 6 の結果を図示したが、この図からも無筋コンクリートの下側に CFRP の帯板で補強した場合が最も効果があることが示された。また、無筋の場合は瞬時に破壊するが、CFRP で補強することによって、無筋コンクリートの破壊が延性的になり、破壊までに時間を要するため、住人が避難をするための時間が確保できる。

4. 解析と実験結果の比較

4.1 はり理論と実験結果の比較

無筋コンクリートの破壊時の荷重とはり理論の 4 点曲げの応力の式から求めた両試験体の値は 3.88 と 4.17[MPa]となった。コンクリートの引張り強度は 3.6~5.0[MPa]で与えられるため、はり理論と実験値とは良い一致を見た。

中心片側補強の場合の最大荷重は、引張り側のコンクリートが破壊した後、図 11 に示すように、引張り応力は CFRP 帯板部分のみが受け持つと考える。中立軸を再計算して応力分布を求め、圧縮側のコンクリートの応力の最大値が強度値 25.0[MPa]に達したときの荷重を求めた結果は 67.1[kPa]、実験値は 60.0[kPa]で、両者は大体一致した。

最大の補強効果を示した下側補強の場合は、図 12 に示すように、はりの引張り側での破壊とせん断応力による破壊を考慮して中立軸の位置を求めた後、前と同じように圧縮応力が強度値に達したときの最大荷重を求めた結果は 111[kN]となり、実験値の 105[kN]とほぼ一致した。

したがって、CFRP 帯板補強無筋コンクリートの最終破壊荷重は、はり理論を用いて予測できることを示した。

4.2 有限要素法による解析

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

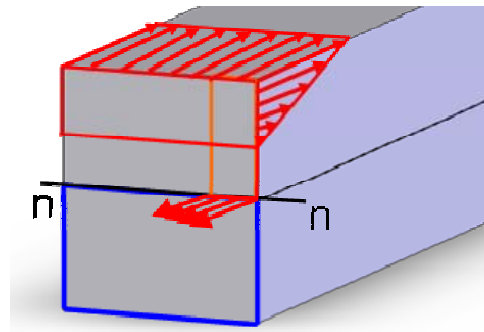


Fig.11 中心補強の場合の応力分布分

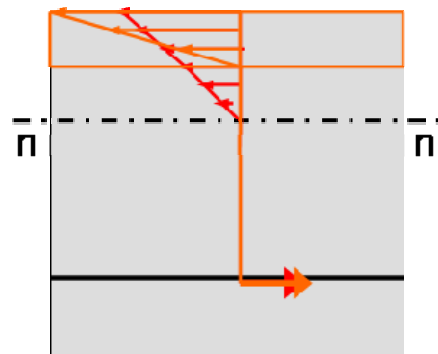


Fig.12 下側補強の場合の応力分布分

Table 7 コンクリート物性値

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
2021	22.78	2.28	0.2	0.2	0.6

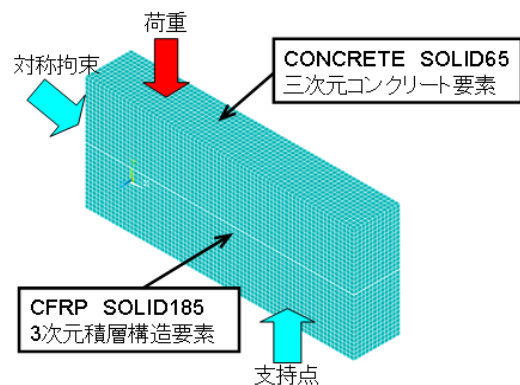


Fig.13 FEM 解析モデル

(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(Fig.13)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 7 に示す。

上の条件より, 解析した結果と実験結果を比較する。まず無筋コンクリート変位-荷重線図の比較を Fig.14 と Table 8 に示す。

無筋コンクリートの強度に関しては, 一致しているが, 剛性に関しては, 材料定数も含めて検討する必要がある。

5. 結言

CFRP 帯板で補強された無筋コンクリートの曲げ試験を行うことにより, 補強されていない無筋コンクリートと比較し, 下側補強の試験体の場合で最大曲げ荷重は約 2.5 倍, 最大変位は約 180 倍と大幅な向上が見られた。

また, 無筋コンクリートはぜい性的に瞬時に破壊するか, CFRP 補強無筋コンクリートは延性的に破壊し。破壊するまでに一定の時間を要することから, 住民が安全のために避難を確保することが可能となる。

はり理論を用いて, CFRP 帯板無筋コンクリートの最大曲げ荷重は予測できることを示した。初期クラックから最終破壊までを解析的に明らかにするためには, 有限要素法の定式化が必要である。無筋コンクリート単体の場合を有限要素法で解析したが, 今後 CFRRP 材とコンクリートの界面強度も含め, 解析精度を向上させる必要がある。

末筆ながら試験機の借用と操作を指導していた櫻田智之教授と師橋憲貴専任講師, また, 実験データの収集と整理にご協力していただいた院生の斎藤一真君と 4 年生の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, 技報堂出版, 2004

Table 12 無筋コンクリートの解析と実験の比較

	荷重 [kN]	最大たわみ [mm]	曲げ強さ [N/mm ²]
無筋2	41.9	0.120	2.91
解析値	39.0	0.094	2.71
誤差[%]	7.44	25.7	7.38

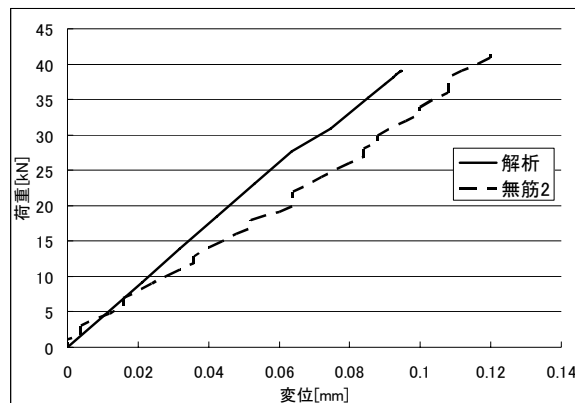


Fig.14 無筋コンクリートの FEM 解析と実験との比較