

CFRP 補強による経年戸建住宅基礎の耐震化の向上

邊 吾一 (日大生産工・教授)

小澤延行 ((株) ヴァンテック前開発部長)

坂田憲泰 (日大生産工・助手)

1. 緒言

耐震設計法が見直される 1981 年以前に設計された建築物は強度、剛性及び靱性が不足し、耐震性が十分備わっていない可能性が高く、無筋コンクリートを基礎に使用している戸建て住宅が日本に約 1200 万戸あると言われている。基礎に使用されるコンクリートには地震発生時、上に立つ建物や地盤から各種の外力を受けるが、曲げ強度は圧縮強度の 1/5~1/7 程度¹⁾ となるため、コンクリートの曲げ強度、靱性の向上が求められる。コンクリートに曲げ荷重が作用すると、引張り応力が作用する部位で引張り破壊することから引張強度の向上が曲げ強度の向上につながると考えられる。本研究では、コンクリートの側面にスリットを加工し、引張り強度に優れた炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP) 帯板を補強が必要な引張り応力側のみに差込み、エポキシ樹脂で固定させる CSI (Carbon fiber Slit Insert) 工法による補強方法を提案する。

本報では、CSI 工法での補強効果を確認するために、CFRP を挿入する箇所を 3 種類変化させたコンクリートはりの 4 点曲げ試験を行い、荷重増分法を用いた積層はり理論で CFRP 補強コンクリートはりの荷重-たわみの非線形挙動求め、実験結果と比較した結果について報告する。

2. 4 点曲げ試験

2.1 試験体

JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準じコンクリートの圧縮試験を行った結果を Fig.1 に示す。コンクリートの平均圧縮強度は

22.78MPa、最大ひずみは 0.203%であり、弾性率は平均で 20.22GPa となった。なお、弾性率は最大荷重の 1/3 に相当する応力までを線形とし勾配を算出した。さらに、コンクリートの引張り強度、曲げ強度、せん断強度はそれぞれ圧縮強度の 1/9~1/13, 1/5~1/7, 1/4~1/7 と推測できる²⁾ ことから、引張り強度は 1.8~2.5MPa、曲げ強度は 3.3~4.6MPa、せん断強度は 3.3~5.7MPa と考えられる。試験体は無筋コンクリート側面にスリットを入れ、そこに CFRP 帯板を挿入し、JIS A 6024「建築補修用注入エポキシ樹脂」に準じたエポキシ樹脂にて接着する。CFRP の母材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用いて、引抜成形にて CFRP 帯板を製作した。CFRP の材料特性を Table 1 に示す。また、CFRP とコンクリート間の接着強度を調べるために引抜試験を行った³⁾。試験体の寸法は、コンクリート部で長さ 60mm、幅 34mm、厚さ 40mm とした。CFRP 部は幅 25mm、厚さ 1.2mm で、全長は 300mm とし、CFRP とコンクリートをエポキシ樹脂にて 60mm の長さを接着した。試験で得た応力-ひずみ曲線を Fig.2 に示すが、弾性率は 1.15GPa、接着強度は 17.9MPa となり、接着強度はコンクリートの引張り強度、曲げ強度、せん断強度より大きくなる。コンクリート試験体の断面図を Fig.3 に示す。試験体は無筋コンクリートと、中心、下、上下をそれぞれ CFRP で補強した 4 種類とした。試験体の寸法は、長さ 1400mm、幅 120mm、高さ 300mm とし、CFRP は中心補強のものは中央

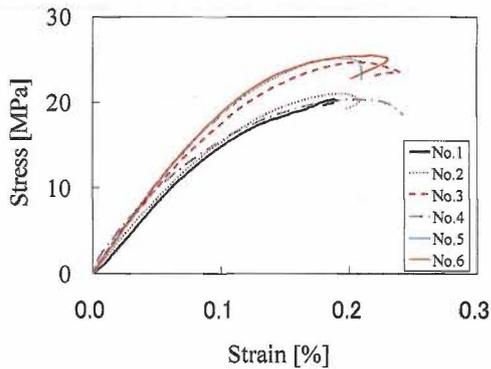


Fig.1 Stress-strain curves obtained from compressive test of concrete.

Table 1 Material properties of CFRP.

Fiber volume fraction	67 %
Modulus of elasticity	
Longitudinal	150 GPa
Transverse	10.4 GPa
Shear	4.60 GPa
Poisson's ratio	0.32
Strength	
Longitudinal	2697 MPa
Transverse	74.8 MPa
Shear	109.0 MPa

部、下補強、上下補強では基礎が地面に埋まっている事と補強工事の簡便性を考慮して中心から90mmの位置にそれぞれ挿入した。CFRPの寸法は、長さ1400mm、幅25mm、厚さ1.2mmとなっており、コンクリート試験体に対するCFRP帯板1本あたりの体積比は0.08%となっている。

2.2 試験条件

4点曲げ試験は、荷重点間距離333mm、支点間距離1000mmとして行った。荷重は支点に埋めたロードセルより計測し、変位は電気式ダイヤルゲージを用いて、スパン中央点500mmのたわみを計測した。また、試験体の負荷点には幅100mmの加圧用鋼板を試験体との間に挿入した。

2.3 試験結果

2.3.1 無筋コンクリートはり

2体の無筋コンクリートはりの試験結果をFig.4に示す。無筋コンクリートでは、たわみ0.12mm付近で、試験体中央付近の下側（引張り

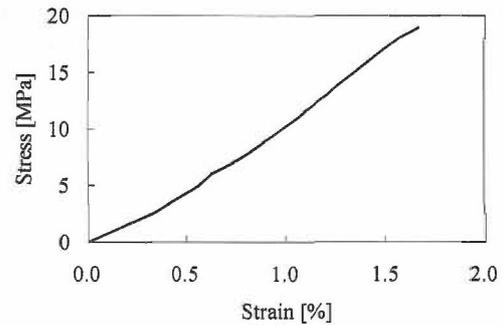


Fig.2 Stress-strain curve in pull out test.

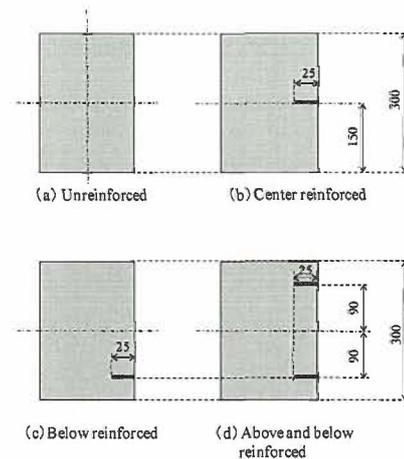


Fig.3 Cross section of specimens (unit mm).

側)にき裂が形成され、その後き裂が上側まで急激に進展して破壊した。最大荷重は、No.1-1, No.1-2で40.9kN, 44.5kNとなった。実験結果から曲げ強度と曲げ弾性率を求めた結果、No.1-1, No.1-2の曲げ強度は3.88MPa, 4.17MPa, 曲げ弾性率は22.4GPa, 21.1GPaとなった。両試験体とも破壊まで線形的な挙動を示し、曲げ強度は前述2.1の公称値範囲内であった。また、試験体の吸収エネルギーを荷重-たわみ曲線の最大荷重とたわみの面積から求めた結果、No.1-1, No.1-2でそれぞれ8.2J, 6.1Jとなった。

2.3.2 中心補強コンクリートはり

2体の中心補強コンクリートはりの荷重-たわみ曲線をFig.5に示す。No.2-1の最大荷重が47.9kNに対し、No.2-2の最大荷重は60.0kNとなり、両者には約20%の差が生じた。実験結果から曲げ強度と曲げ弾性率を求めた結果、No.2-1, No.2-2の曲げ強度は4.43MPa, 5.56MPa, 曲げ弾性率は17.0GPa, 24.9GPaとなった。No.2-1, No.2-2

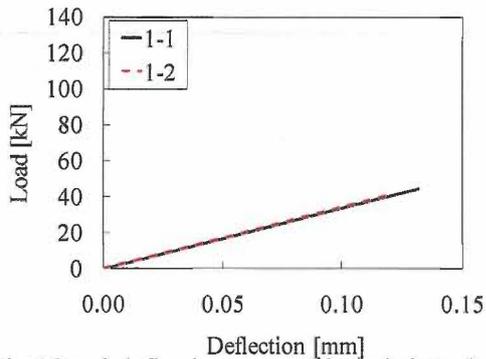


Fig.4 Load-deflection curves of unreinforced concrete beams.

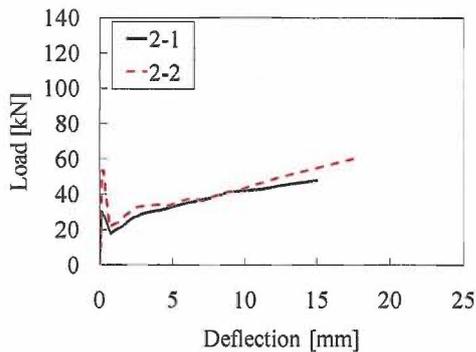


Fig.5 Load-deflection curves of center reinforced concrete beams.

の破壊様相をそれぞれ, Fig.6, Fig.7 に示すが, 両試験体の破壊様相で違いが生じた. No.2-1 の破壊様相の Fig.6 では試験体が側面に曲げ変形していることが確認でき, この側面での変形により最大荷重が小さくなったと考えられる. No.2-2 の破壊様相の Fig.7 においては, はりの中央下部で引張り破壊, 上部で圧縮破壊していることが確認できる. したがって, 側面での曲げ変形を起こさずに破壊に至れば曲げ強度は向上する. No.2-1, No.2-2 の吸収エネルギーはそれぞれ 552J, 752J となり吸収エネルギーにおいても No.2-2 が側面での曲げ変形を伴って変形破壊した No.2-1 の約 1.4 倍となった.

2.3.3 下補強コンクリートはり

2 体の下補強コンクリートはりの荷重-たわみ曲線を Fig.8 に示す. No.3-1, No.3-2 の最大曲げ荷重は 119kN, 105kN となった. 実験結果から曲げ強度と曲げ弾性率を求めた結果, No.3-1 と No.3-2 の曲げ強度は 11.0MPa, 9.76MPa, 曲げ弾

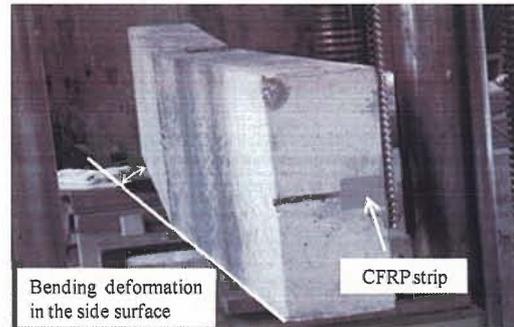


Fig.6 Failure aspect after bending test (No.2-1).

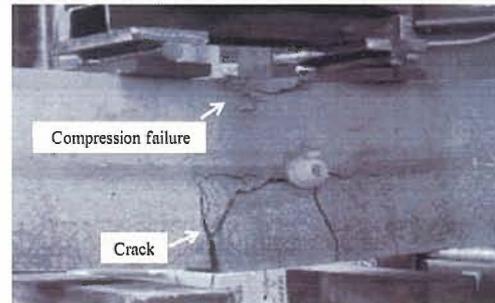


Fig.7 Failure aspect after bending test (No.2-2).

性率は 35.5GPa, 32.0GPa となった. 破壊様相の一例として No.3-2 の試験後の模様を Fig.9 に示す. 試験体破壊後の観察から CFRP 帯板に破断はなく, き裂は支点と荷重点とを結ぶ斜め方向に進展しており, 荷重点間では圧縮破壊が発生していた. No.3-1, No.3-2 の吸収エネルギーはそれぞれ 1852J, 1904J となった.

2.3.4 上下補強コンクリートはり

2 体の上下補強の荷重-たわみ曲線を Fig.10 に示すが, No.4-1, No.4-2 の最大荷重は 119kN, 124kN となった. 実験結果から曲げ強度と曲げ弾性率を求めた結果, No.4-1 と No.4-2 の曲げ強度は 11.0MPa, 11.5MPa, 曲げ弾性率は 16.8GPa, 25.6GPa となった. 両試験体の曲げ強度は同等の値が得られたが, 曲げ弾性率ではばらつきが生じた. 破壊様相の一例として No.4-1 の試験後の模様を Fig.11 に示す. 下補強コンクリートと同じように, CFRP 帯板の破断はなく, き裂が試験体のほぼ支点と荷重点とを結ぶ斜め方向に進展し, 荷重点間で圧縮破壊が発生していた. No.4-1, No.4-2 の吸収エネルギーはそれぞれ 1767J, 1483J となった.

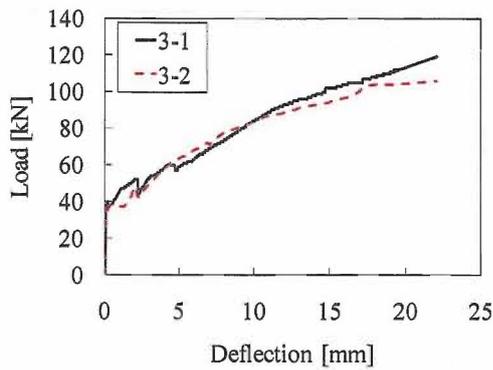


Fig.8 Load-deflection curves of below reinforced concrete beams.



Fig.9 Failure aspect after bending test (No.3-2).

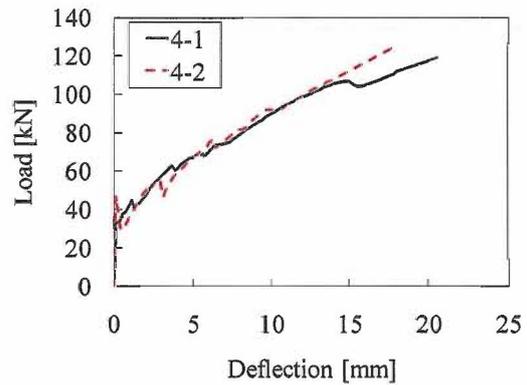


Fig.10 Load-deflection curves of above and below reinforced concrete beams.



Fig.11 Failure aspect after bending test (No.4-1).

2.3.5 4点曲げ試験結果のまとめ

各試験体結果の一覧を Table 2 に示す。無筋コンクリートと CFRP 補強コンクリートを比較すると、最大荷重、曲げ強度共に向上しており、CFRP による補強効果が確認できた。中心補強において、側面に変形を伴って変形破壊した No.2-1 の試験体では、無筋コンクリートはり（平均値：4.03MPa）に比べ約 1.1 倍の曲げ強度の向上しか確認できないが、No.2-2 の試験体では約 1.4 倍の向上が確認できた。さらに、下、上下補強コンクリートはりにおいては無筋コンクリートはりに比べ、2.4 倍以上の曲げ強度が向上した。中心補強と下補強コンクリートを比較し、下補強コンクリートはりの方が曲げ強度が向上したのは、引張り応力の大きい部分に CFRP を用いたためだと考えられる。下補強と上下補強コンクリートはりでは、曲げ強度はほぼ同等の値となり、圧縮応力の作用する部位に CFRP を配置しても十分な補強効果が得られないことが分かる。

CFRP 補強コンクリートはりでは、無筋コンクリートはりと比較して最大たわみが大きくなる

ことから吸収エネルギーが大幅に向上した。吸収エネルギーの向上は下補強コンクリートはりで最大となり、無筋コンクリートはり（平均値：0.20J/m³）と比較して 257 倍以上向上する結果となった。下補強コンクリートはりと同程度の曲げ強度となった上下補強コンクリートはりより吸収エネルギーが下回った原因は、CFRP 補強を 2 本用いたことで剛性が高くなりその結果、変形量が減少したためだと考えられる。

以上のまとめとして吸収エネルギーと曲げ強度の関係を Fig.12 に示すが、下補強と上下補強コンクリートはりでは曲げ強度、吸収エネルギー共に大幅な向上が確認できる。下補強コンクリートはりは吸収エネルギーが最大となり、CFRP を 2 本用いた上下補強コンクリートはりと同程度の曲げ強度が得られたことから、静的 4 点曲げ試験では、下補強コンクリートはりが最も優れた補強方法であると言える。ただし、実際の地震では交番荷重が負荷されるため、上下補強を施す必要があると考えられる。

Table 2 Bending test results.

	No.	Maximum value		Bending strength [MPa]	Absorbed energy [J/m ³]
		Load [kN]	Deflection [mm]		
Unreinforced	1-1	40.9	0.120	3.88	0.23
	1-2	44.5	0.132	4.17	0.17
Center reinforced	2-1	47.9	15.0	4.43	15.3
	2-2	60.0	17.7	5.56	20.9
Low reinforced	3-1	119	22.1	11.0	51.5
	3-2	105	22.1	9.76	52.9
Low and upper reinforced	4-1	119	20.9	11.0	49.1
	4-2	124	17.9	11.5	41.2

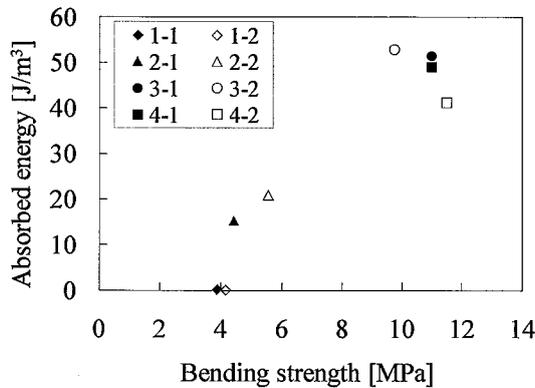


Fig.12 Relation between absorbed energy and bending strength.

3. 解析

3.1 荷重増分法

積層はり理論を用いて、CFRP 補強コンクリートの荷重-たわみの非線形挙動を計算した⁵⁾。計算方法は、式(1)のように荷重を徐々に増加させ、式(2)から試験体の応力分布を計算した。応力分布で引張強度に達した部分は破損と見なし、破損部には微小な剛性値を与えた。そして、試験体全体の剛性と中立軸の位置を再計算して、再度応力分布を計算し、破損が進展しているかを確認する。破損がさらに進展している場合は再度破損進展分に微小剛性を与えて、試験体全体の剛性と中立軸の位置を考慮して応力分布を計算する。そして、破損が進展しなくなった状態での試験体全体の剛性を使用し、式(3)のたわみを計算して次の荷重ステップへ移る。CFRP の材料物性値には Table 1 の値を使用し、コンクリートの材料物性値は 2.1 項の圧縮試験で得られた結果を用い、引張強度は 2.5MPa とした。

$$P_{n+1} = P_n + \Delta P \quad \dots (1)$$

$$\sigma_n = \frac{P_n E_i \eta}{6 \sum_{i=1}^n E_i I_i} \quad \dots (2)$$

$$y_n = \frac{23 P_n l^3}{1296 \sum_{i=1}^n E_i I_i} \quad \dots (3)$$

ここで、 P : 負荷荷重、 y : たわみ、 l : 試験体長さ、 E : 弾性率、 I : 断面 2 次モーメント、 σ : 応力、 η : 中立軸からの距離を示す。

また、試験体は破損が最外のコンクリートに達した時、あるいは CFRP 帯板の引張り応力が引張り強度の 2697MPa に達するか、CFRP 帯板の接着層のせん断応力が 2.1 項の接着強度試験で得られた接着強度 17.9MPa になった時に試験体全体が破壊するとみなした。なお、接着層のせん断応力は、単鉄筋長方形断面におけるせん断応力の式(4)から求めた^{6,7)}。

$$\tau_{\max} = \frac{P_n}{2bz} \quad \dots (4)$$

ここで、 b : 試験体の幅、 z : CFRP 層とコンクリートの圧縮応力分布の重心位置間の距離を示す。

3.2 解析結果と実験結果の比較・検討

下補強コンクリートはりの実験結果と解析結果の比較を Fig.13 に示す。解析結果では、最大荷重が 110.0kN、最大たわみが 22.50mm となり、解析値と実験値との誤差はそれぞれ 4.4%、2.0% となり良好な一致を示した。また解析結果では、破壊は下側(引張り側)の破損から始まり最終的に

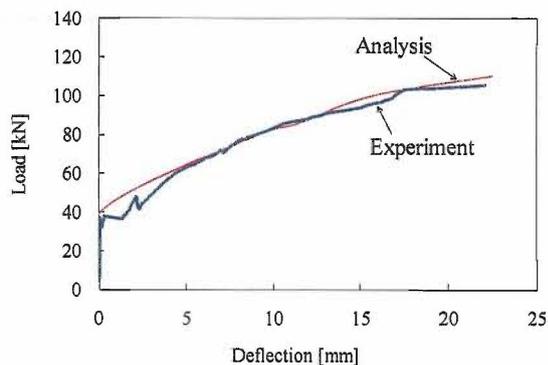


Fig.13 Comparison of experimental curve with analysis of low reinforced concrete.

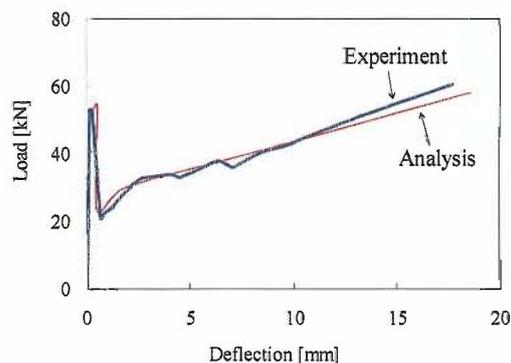


Fig.14 Comparison of experimental curve with analysis of center reinforced concrete

最外部に達して破壊する結果となり、この結果は Fig.9 の実験結果と良く一致している。中心補強コンクリートはりの実験結果と解析結果の比較を Fig.14 に示す。実験結果では、荷重が 53kN に到着した直後に 20.9kN まで急激に低下し、その後荷重の増加に伴ってたわみが増加し最終破壊となっている。そのため、解析ではまず破損が試験体中央部の CFRP 帯板に達するまで荷重を増分させた。その結果、CFRP 帯板に達する際の荷重は 54kN となり実験結果と良好な一致を示した。次にコンクリートの下部がすべて引張り破損し、引張り応力の大部分を CFRP 帯板が受け持つとして、荷重を増加させた結果、解析では最大荷重が 58.0kN、最大たわみが 18.6mm となり、実験値と比較して誤差はそれぞれ 4.0%、5.1%となり良好な一致を示した。下補強の場合と同じように、破損が最外部に達して最終破壊となり、この結果も Fig.7 の実験結果と良く一致していると考えられる。以上の結果から、中心補強コンクリートはりでは引張り側のコンクリートが破損しても CFRP 帯板が引張り応力を負担するため、無筋コンクリートはりのように直ぐに最終破壊に至らなく、最終破壊までに時間を要する。

4. 結 言

無筋コンクリート基礎の耐震性能の強化として、CFRP 帯板を用いて補強を行う CSI 工法を提案し、実験を通して補強効果を確認し、積層はり

理論を用いて破壊のメカニズムを解明した。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) 試験体の全体積に対して僅か 0.08%の CFRP 補強で曲げ強度と吸収エネルギーの向上を確認することができた。
- 2) 4 点曲げ試験の結果、下補強、上下補強コンクリートはりが優れており、無筋コンクリートと比較すると、曲げ強度は約 2.4 倍、吸収エネルギーは約 206 倍と大幅な向上となった。
- 3) 曲げ強度、吸収エネルギーを向上させるためには、CFRP を挿入させる位置が重要となる。
- 4) 無筋コンクリートはりでは、き裂発生後、すぐに最終破壊となるが、CFRP を挿入することでたわみは 100 倍以上向上した。これは家屋が倒壊するような大規模な地震が発生した際に、住人が屋外に避難できる時間を確保することにつながると考えられる。
- 5) 荷重増分法を用いた積層はり理論による解析結果は実験結果と良く一致し、CFRP 補強コンクリートはりの破壊メカニズムを解明するために使用できることを示した。
- 6) CSI 工法により補強された無筋コンクリート基礎の耐震性をより明確にするため、地震荷重による評価や実際の建築物を模擬した大型試験体での実験する必要があるが、これらについては今後の課題としたい。

参考文献

紙面の都合上省略する。