

CFRP 帯板による無筋コンクリートはりの曲げ強度の増加

日大生産工(院) ○ 齋藤一真

日大生産工 邊 吾一

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、靱性が不足し、耐震性が十分備わっていない可能性が高い¹⁾。特に、無筋コンクリートを基礎に使用している住宅が日本に約 1 千 200 万戸ある。基礎は建築物の荷重を地盤に伝える重要な構造部材である。その曲げ強度、靱性は耐震性、人命に大きく関わると考えられ、コンクリートの強度特性の確保は必須である。コンクリートに曲げモーメントが作用すると曲げ引張破壊する（引張強度は圧縮強度の $1/9 \sim 1/13$ ²⁾）ことから、引張強度に優れた炭素繊維強化プラスチック(以下 CFRP)で補強することにより曲げ強度、靱性の向上を図る。コンクリートにスリットを加工し、CFRP 帯板を差込み、エポキシ樹脂で固定させる CSI (Carbon fiber Slit Insert) 工法により補強されたコンクリートの力学評価、最適補強を行うことを本研究の目的とする。そのために 4 点曲げ試験を行い、ハイブリッド効果を確認する。そして、積層はり理論での計算や有限要素法による解析を行い、実験値と解析値と比較することにより、CFRP 補強コンクリートの曲げ特性のメカニズムについて言及する。

2. 4 点曲げ試験

2.1 試験体

CFRP 補強コンクリートは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、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固定した試験体である。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。Fig.1 に示すよう試験体の種類は、無筋と、中心、下、上下を CFRP で補強したものとする。無筋コンクリート試験体の寸法は、長さ 1400mm、幅 120mm、高さ 300mm とし、CFRP 挿入高さは中心補強のものは 150mm、下補強、上下補強は中心から 90mm の位置とする。CFRP の寸法は、長さ 1400mm、幅 25mm、厚さ 1.2mm とした。

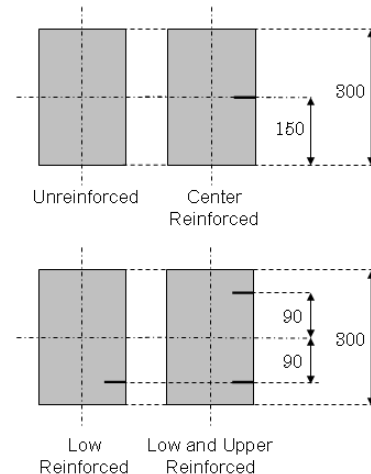


Fig.1 試験体の断面

2.2 試験条件

試験条件は荷重点間距離 333mm、支点間距離 1000mm とする。荷重は試験機のロードセルより計測し、変位は電気式ダイヤルゲージ、ひずみゲージを用いて、スパン中央点 500mm の相対たわみを計測する。また、試験体の加力には幅 100mm の加圧用鋼板

Increase of Bending Strength for Unreinforced Concretes with CFRP Strip

Kazuma SAITOH and Goichi BEN

を使用する。

2.3 試験結果

Fig.2 に無筋コンクリート，CFRP 補強コンクリートの一例として下補強コンクリートの静的 4 点曲げ試験結果を示す。無筋コンクリートはクラック発生後，荷重を受け持たず，直に最大荷重に達し，破壊に至るが，CFRP 補強コンクリートはクラック発生後も荷重を引き続き受け持ち，クラックが徐々に進展していき，無筋コンクリートより大きな最大荷重，最大たわみで最終破壊に至った。各試験体の実験結果を Table 1 に示す。無筋コンクリートと比較し，CFRP 補強コンクリートの曲げ強度，吸収エネルギーの向上が確認でき，下補強は中心補強と比較すると，引張側に補強材を用いたことにより曲げ強度，吸収エネルギーの向上が確認できた。Fig.3 より曲げ強度は，無筋コンクリートと比べると約2.5倍の強度が得られた。下補強と上下補強の曲げ強度は，ほぼ同等の値となった。よって，静的試験の場合は上側を補強しても曲げ強度の向上効果は得られない。下補強は吸収エネルギーが最大となり，CFRP を2本用いた上下補強とほぼ同等の強度が得られたことから，今回の静的試験の中では下補強が最も優れた補強方法であると言える。

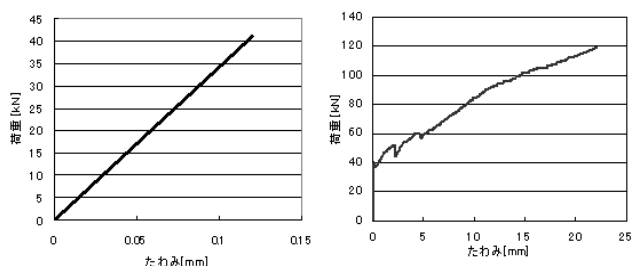


Fig.2 無筋コンクリート(左)と
下補強(右)の荷重 - たわみ線図

Table 1 各試験体の実験結果

	No.	最大荷重時		曲げ強さ [MPa]	単位体積あたりの 吸収エネルギー[J/m ³]
		荷重[kN]	たわみ[mm]		
無筋	1-1	40.9	0.120	3.88	0.23
	1-2	44.5	0.132	4.17	0.17
中心補強	2-1	47.9	15.0	4.43	15.3
	2-2	60.0	17.7	5.56	20.9
下補強	3-1	119	22.1	11.0	51.5
	3-2	105	22.1	9.76	52.9
上下補強	4-1	119	20.9	11.0	49.1
	4-2	124	17.9	11.5	41.2

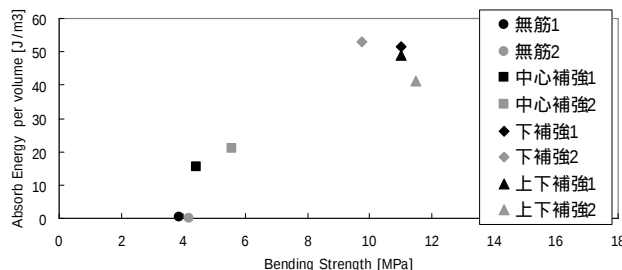


Fig.3 曲げ強度と吸収エネルギーの比較

3. 解析

3.1 基礎実験

解析に用いる材料物性値を求めるために基礎実験を行った。

まず 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。応力 - ひずみ線図を Fig.4 に示す。

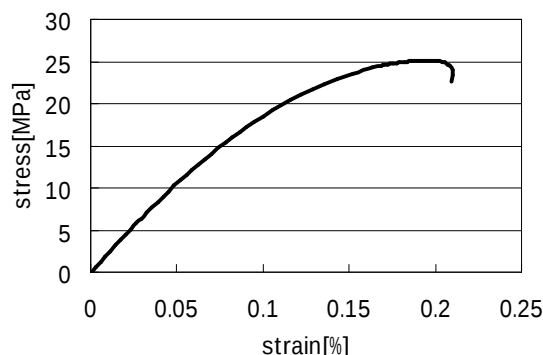


Fig.4 コンクリート圧縮試験結果

圧縮試験により，圧縮強度は 25MPa，最大ひずみは 0.203%であり，弾性率は 20.22GPa であった。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強度，せん断強度はそれぞれ圧縮強度の 1/13 ~ 1/9，1/7 ~ 1/5 と一般的に知られていることから，引張強度は 1.9 ~ 2.8MPa，曲げ強度は 3.6 ~ 5.0MPa となる。

さらに接着強度を調べるために引抜試験を行った。試験体は Fig.5 に示す。コンクリートは幅 厚さ 34mm，長さ 150mm，CFRP は幅 25mm，厚さ 1.2mm，長さ 400mm とし，CFRP とコンクリートをエポキシ樹脂にて固着してある。

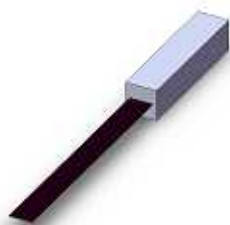


Fig.5 引抜試験体

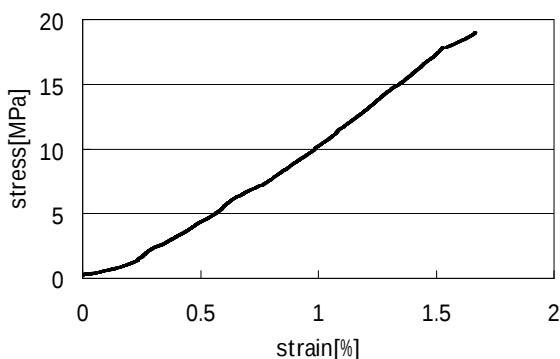


Fig.6 引抜試験結果

結果を Fig.6 に示す．

これより，接着強度は 19.0MPa，また，接着剤の弾性率は 1.38GPa であった．

以上の物性値を用いて解析を行う．

3.2 破壊様相からの最大荷重の計算

中心，下補強の積層はり理論による計算を行い，実験値と比較した．中心補強の最終破壊様相は，はりの長手方向中央で曲げ圧縮破壊であった．よって，はりの試験体中心付近の応力分布に着目した．Fig.7 より，試験体下側（引張側）に縦のクラックが確認できる．これはコンクリート曲げ引張破壊後に生じたもので，その後，はり中央において圧縮力は受け持つが引張力は受け持たないと考えられる．すると中立軸の位置が変化する．

そのときの中立軸の位置を積層はりの式により計算した．ただし，Fig.8 に示すように，このとき CFRP 上部のコンクリートは通常の剛性をもつものとし，引張力は中立軸より下のコンクリートの代わりに CFRP が受け持ち，圧縮力はコンクリートが受け持つことで軸方向の力の釣合いを考えた．そして，コンクリートの圧縮強度より破壊荷重を計算すると 67.1kN となった．実験との誤差は 11.8%となり，中

心補強の最大荷重を積層はり理論により近似計算することができた．



Fig.7 中心補強 破壊様相

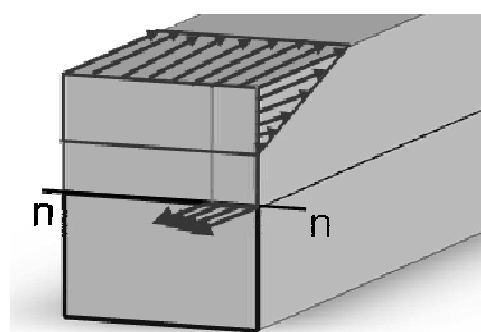


Fig.8 中心補強の場合の応力分布

下補強も同様にして計算を行った結果，破壊荷重は実験結果より大きくなり，大きな誤差となった．この原因を破壊様相から検討する．下補強の破壊様相を Fig.9 に示す．Fig.9 より，せん断力による斜め方向のクラックが確認できる．このクラックの影響により，中立軸付近の圧縮力は受け持たないと考えられる．よって，Fig.10 に示す応力分布となり，圧縮力を上部の少ない部分で受け持つことになる．Fig.9 に示す下補強 No.3-2 の破壊様相より，圧縮力を受け持つ高さは 0.096m と求められ，それより破壊荷重を求めた．その結果，実験との誤差は 5.3%となり，破壊荷重を破壊様相より求めることができた．



Fig.9 下補強 破壊様相

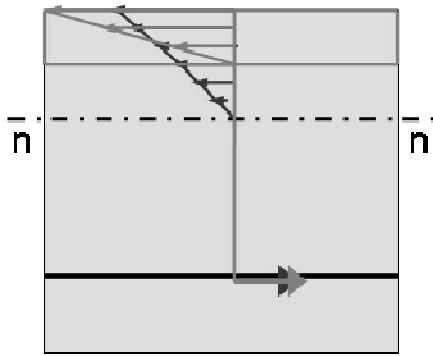


Fig.10 下側補強の場合の応力分布

3.3 積層はり理論による荷重、たわみの計算

積層はり理論を用いて、CFRP 補強コンクリートの荷重 - たわみ線図を算出した。方法としては(1)式のように荷重を徐々に増加させていき、そのときのたわみを(2)式により算出した。その際に曲げ剛性 (EI) を得るため(3)式を用いて CFRP 補強コンクリートの応力分布を調べた。応力分布は、コンクリートが引張強度に達した部分をクラックとし、クラックには微小な剛性を持たせた。また CFRP の材料物性値を Table2 に示す。

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

$$y_n = \frac{23P_n l^3}{1296 \sum_{i=1}^N E_i I_i} \quad (2)$$

$$\sigma_n = \frac{P_n l E_i \eta}{6 \sum_{i=1}^N E_i I_i} \quad (3)$$

Table 2 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

一例として下補強の結果を Fig.11 に示す。はり理論による計算では最終破壊は接着層の破壊となり最大荷重 124.4kN, 最大たわみ 20.05mm となった。誤差はそれぞれ 4.36%, 6.76%となり良好な一致が見られた。

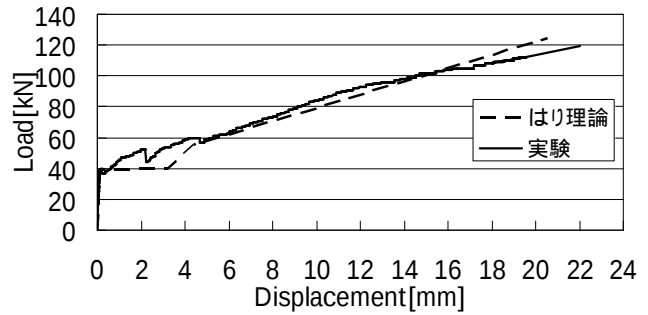


Fig.11 はり理論による計算結果

3.4 CFRP 補強コンクリートの FEM 解析

CFRP 補強コンクリートの破壊様相を明らかにするために FEM 解析により CFRP の破壊基準、エポキシ樹脂の接着条件と CFRP およびコンクリート間の付着強度を定義し、1/2 対称拘束モデルを用いて、現在解析を実施している。

4. 結言

- 1) 4 点曲げ試験の結果より、無筋コンクリートと CFRP 補強コンクリートを比較した結果、曲げ強度と吸収エネルギーの向上を確認できた。
- 2) 静的 4 点曲げ試験において中心、下、上下補強の中で下補強が最も優れた補強方法であることがわかった。
- 3) 無筋コンクリートの実験結果と FEM 解析結果を比較した結果、概ね一致を示すことができた。
- 4) 中心、下補強の実験結果を積層はり理論と破壊様相より、最大荷重の近似計算することができた。
- 5) 荷重増分法を用いた積層はり理論により荷重 - たわみ線図を得ることができた。
- 6) 今後は経年の無筋コンクリートはりに CFRP 補強を行い、地震荷重の下での解析と実験を行う予定である。

参考文献

- 1) 社団法人 日本建築構造技術者協会 編
これからの耐震設計<阪神大震災に学ぶ> 略
- 2) 村田 二郎 著 建設材料 コンクリート 略