

CFRP 材補強による経年無筋コンクリートビームの補強効果と非線形強度

邊 吾一（機械工学科）

小澤 延行（榊福井ファイバーテック・技術顧問，前株ヴァンテック・開発部長）

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一千二百万戸ある。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，剛性及び靱性は耐震性，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。コンクリートの側面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，CFRP 補強効果を確認する。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. 四点曲げ試験

2.1 試験体

CFRP 補強コンクリートは無筋コンクリート側面にスリットを入れ，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制作した 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 4 種類とする。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 である。

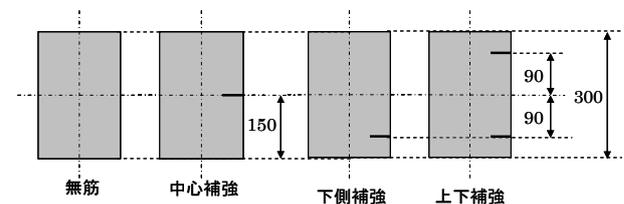


Fig.1 試験体の断面

2.2 試験条件

試験条件は荷重点間距離 333mm，支点間距離 1000mm とした四点曲げで行った。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，試験体の負荷点には幅 100mm の加圧用鋼板を使用する。

2.3 試験結果

2.3.1 無筋コンクリート

2 体の無筋コンクリートの試験結果を Fig.2 に示す。無筋コンクリートはクラック後（たわみ 0.12mm 付近）において荷重をそれ以上受け持たず，クラック発生時が最大荷重となった。最大荷重は，No.1-1，No.1-2 それぞれ，40.9kN，44.5kN となった。曲げ強度は，No.1-1，No.1-2 それぞれ 3.88MPa，4.17MPa となり，曲げ弾性率は，No.1-1，No.1-2 それぞれ 22.4GPa，21.1GPa となった。2 体とも同様な挙動を示し，両試験体の曲げ強度の差も 7%程度になったことから無筋コンクリートの曲げ挙動に大きな違いはない。破壊様相は，スパンの中央において試験体の下側（引張側）からクラックが発生し，曲げ引張破壊したと考えられる。また，No.1-2 の破壊様相も No.1-1 と同様にスパン中央付近での曲げ引張破壊となった。そして，No.1-1，No.1-2 の吸収エネルギーはそれぞれ 8.2J，6.1J となった。

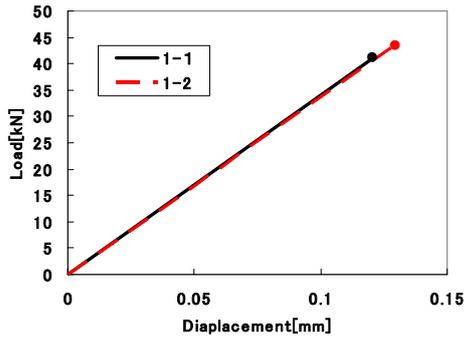


Fig.2 無筋コンクリート試験結果

2.3.2 中心補強

2体の中心補強の荷重—変位線図を Fig.3 に示す。Fig.2.3 において、●印が最大荷重点で■印がクラック発生点である。両試験体ともクラック発生後も荷重を受け持ち、最大荷重を得ることが確認できる。しかし、最大荷重、クラック発生時には両試験体に差があった。得られた最大荷重より、曲げ強度を求めると No.2-1 と No.2-2 はそれぞれ、4.43MPa、5.56MPa となる。弾性率は No.2-1、No.2-2 それぞれ、17.0GPa、24.9GPa となり、両試験体に曲げ強度、曲げ弾性率にばらつきがあった。No.2-1、No.2-2 の破壊様相をそれぞれ、Fig.4、Fig.5 に示すが、両試験体の破壊様相の違いが生じる。No.2-1 の破壊様相は試験体の長手方向の曲げ変形以外に側面でも変形しており、この側面での変形により破壊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.5 においては、はりの中央で曲げ圧縮破壊していることが確認できた。したがって、側面での曲げ変形を起こさない曲げ圧縮破壊になれば曲げ強度は著しく向上すると考えられる。今回の試験では同じ2体の試験体の破壊様相が異なる結果となった。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普通の曲げ圧縮破壊した 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 を上回る結果となった。

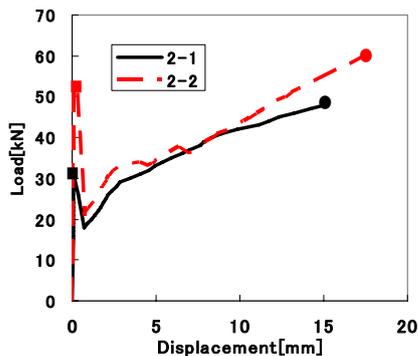


Fig.3 中心補強試験結果

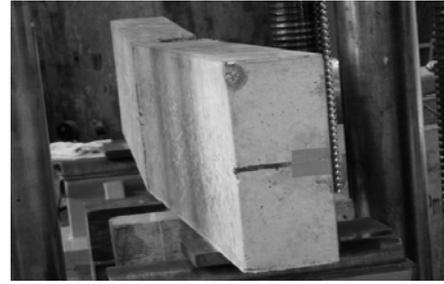


Fig.4 No.2-1 の破壊様相



Fig.5 No.2-2 の破壊様相

2.3.3 下補強

2体の下補強の荷重—変位線図を Fig.6 に示す。Fig.6 より下補強もクラック発生後も荷重を受け持ち、最大荷重を得た。さらに両試験体とも同様な挙動を示した。得られた最大荷重より、曲げ強度を求めると No.3-1 と No.3-2 はそれぞれ 11.0MPa、9.76MPa となる。弾性率は No.3-1、No.3-2 それぞれ 35.5GPa、32.0GPa となった。曲げ強度、曲げ弾性率共にほぼ同等の値が得られた。

No.3-2 の破壊様相を Fig.7 に示す。両試験体共にスパンの左右で斜め方向のせん断クラックが確認できた。鉄筋コンクリートなどの曲げ試験においてもせん断クラックは確認され、せん断クラックの影響により、試験体の応力分布は複雑になると知られている。最終破壊は CFRP の破断が確認できなかったため、コンクリートのせん断破壊または接着層の破壊と考えられる。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。

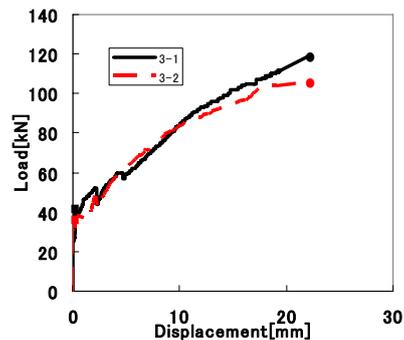


Fig.6 下補強試験結果

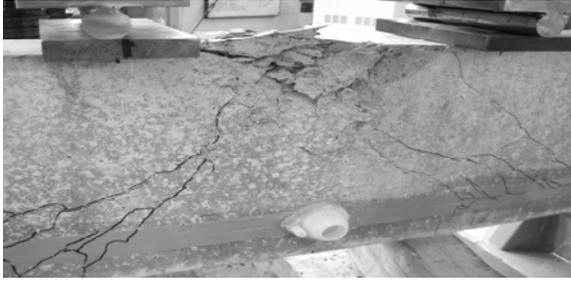


Fig.7 No.3-2 の破壊様相

2.3.4 上下補強

2体の上下補強の荷重—変位線図を Fig.8 に示す。Fig.8 より上下補強もクラック発生後でも荷重を受け持ち、最大荷重を得た。さらに両試験体とも同様な挙動を示した。得られた最大荷重より、曲げ強度を求めると No.4-1 と No.4-2 はそれぞれ 11.0MPa, 11.5MPa となる。弾性率は No.4-1 と No.4-2 はそれぞれ 16.8GPa, 25.6GPa となった。曲げ強度は同等の値が得られたが、曲げ弾性率はばらついた。No.4-1 の破壊様相を Fig.9 に示す。両試験体共にスパン左右で斜め方向のせん断クラックが確認でき、支点付近で破壊となった。曲げ試験の負荷点では、せん断力が最大となることと、両試験体の CFRP は破壊していないことから、コンクリートのせん断破壊か接着層の破壊であると考えられる。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。

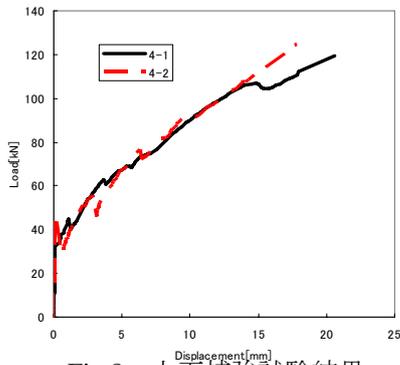


Fig.8 上下補強試験結果



Fig.9 上下補強の破壊様相

2.3.5 まとめ

各試験体の実験結果を Table 1 に示す。Table 1 より、無筋コンクリートと CFRP コンクリートを比較すると、CFRP コンクリートの強度の向上が確認できた。中心補強において、破壊様相が側面に変形を伴って変形破壊した No.2-1 は無筋コンクリートに比べ 10%の向上しか確認できないが、No.2-2 は 38%の向上が確認できた。さらに、下、上下補強においては無筋コンクリートに比べ、約 2.5 倍と大幅な強度の向上が確認できた。中心補強と下補強を比較し、下補強の強度が向上したのは引張応力の大きい部分に CFRP を用いたことによると考えられる。また、下補強と上下補強を比べるとほぼ同等の強度の値が得られた。

また、CFRP により補強を行った試験体は、たわみが大きくなることから大幅な吸収エネルギーの向上が確認できた。中でも下補強が最大となった。下補強と同等の強度を得た上下補強と差が出た原因は材料の剛性に関係すると考えられる。上下補強は補強材を二本用いていることから剛性が高くなり、変形が減少したためと考えられる。

以上のまとめとして縦軸に単位体積あたりの吸収エネルギー、横軸に曲げ強度をとった図を Fig.10 に示す。Fig.10 より無筋コンクリートと CFRP コンクリートを比較すると CFRP コンクリートの強度、吸収エネルギーの向上が確認できる。特に下、上下補強に大幅な向上が確認できる。下補強は吸収エネルギーが最大となり CFRP を二本用いた上下補強と同等の強度が得られたことから静的四点曲げ試験では下補強が最も優れた補強方法であるといえる。しかし、地震の変動荷重の場合は上下補強を施す必要があると考えられる。

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

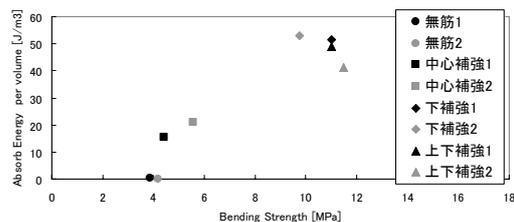


Fig.10 曲げ強度と吸収エネルギーの比較

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。

3.1.1 圧縮試験

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試験片の代表的な応力-ひずみ線図を Fig.11 に示す。

圧縮試験により、圧縮強度は 22.78MPa、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、曲げ強度はそれぞれ圧縮強度の 1/13~1/9, 1/7~1/4, 1/7~1/5 と推測できることから、引張強度は 1.8~2.5MPa、せん断強度は 3.3~5.7MPa、曲げ強度は 3.3~4.6MPa とした。

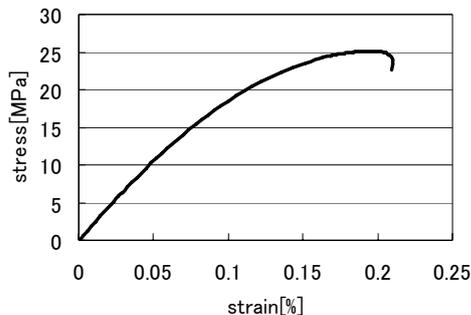


Fig.11 コンクリート圧縮試験

3.1.2 接着強度試験

CFRP とコンクリートの接着強度を調べるために引抜試験を行った。試験体は Fig.12 に示す。試験体の寸法は、コンクリート部は、幅 34mm、厚さ 40mm であり、長さは 60mm と 70mm の 2 本用意した、CFRP は幅 25mm、厚さ 1.2mm、全長は 300mm 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。固着長さはそれぞれ 60mm と 70mm である。

結果を Fig.13 に示す。これより、付着強度は 17.9MPa、また、その場合の弾性率は 1.15GPa であった。以上の物性値を用いて解析を行う。

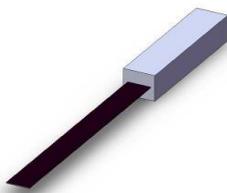


Fig.12 引抜試験体

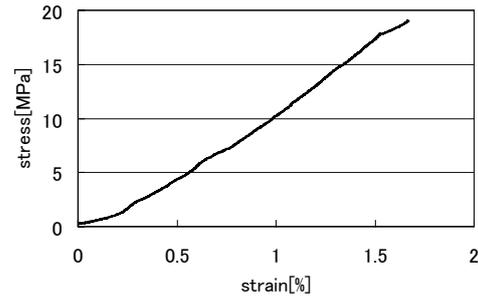


Fig.13 引抜試験結果

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.5 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し、CFRP だけが引張り応力を受け持つと考えた。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.14 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。

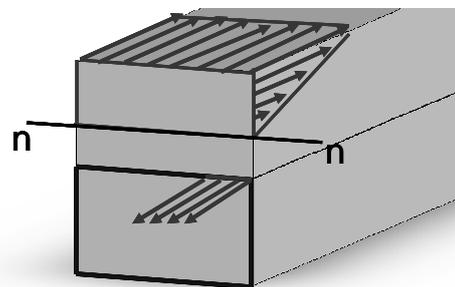


Fig.14 中心補強の場合の応力分

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.7 に示す。Fig.7 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.15 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.7 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上端から 96mm と求められ，それより破壊荷重を求めた結果，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．

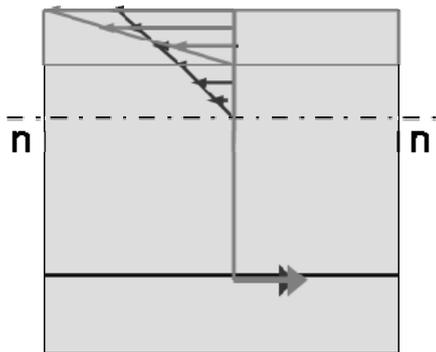


Fig.15 下側補強の場合の応力分布

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-たわみの非線形挙動を求めた．計算方法は，式(1)のよう荷重を徐々に増加させ，その際のたわみを式(2)より求めた．たわみを求める際に剛性が必要となるため，試験体の応力分布を式(3)より調べた．応力分布では引張強度に達した部分をクラックと見なし，クラック部には微小な剛性を付加した．そして，クラックを考慮した剛性を用いて応力分布を計算し直しクラックがさらに進展しているかを確認する．クラックがさらに進展している場合は再度クラック進展分の剛性を考慮し応力分布を計算する．そして，クラックが進展しなくなった状態の剛性を使用したたわみを算出し，次の荷重ステップへと移った．また CFRP の材料物性値を Table 2 に示す．コンクリートの材料物性値は 3.2.1 項の圧縮試験より得られた結果を用い，引張強度は 2.5MPa とした．

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

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

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

ここで P : 負荷荷重， y : たわみ， l : 試験体長さ， E : 弾性率， I : 断面二次モーメント， σ : 応力， η : 中立軸からの距離とする．

下補強の結果を Fig.16 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った．その時の最大荷重は 124.4kN，最大たわみは 20.05mm となり，誤差はそれぞれ 4.36%，6.76% となった．

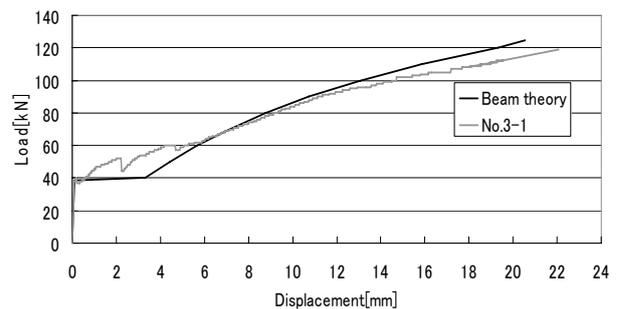


Fig.16 はり理論による計算結果

Fig.16 において，クラック発生後からたわみが 4mm までの荷重に開きがある．これを破壊様相から検討する．実験結果ではたわみが 4mm の時点では約 188mm クラックが進展していた．一方，はり理論による計算では，たわみが 4mm の時点でクラックは試験体下部から 196mm 進展している．クラックが入ることにより曲げ剛性は大幅に減少するため，クラック発生時に多くクラックが進展している積層はり理論の方が荷重が低くなると考えられる．

そして最終破壊時では，実験では Fig.7 に示す下補強の最終破壊様相より，最終的にクラックは試験体下部から約 204mm 進展していると求められる．積層はり理論ではクラックは 208mm まで進展し，試験結果と同程度クラックが進展しているため良い一致を示した．

また，有限要素法による解析を行うことにより，CFRP 補強コンクリートの破壊様相をさらに比較検討していく．

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汎用有限要素法プログラム「ANSYS 12.0」を用いて FEM 解析を行った．

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

モデルは 1/2 対称拘束モデルとし、使用した要素は、コンクリートは SOLID65 「3 次元 鉄筋コンクリートソリッド」、CFRP 及び接着剤は、SOLID185 「3 次元構造ソリッド」を使用した。

(Fig.17) CFRP の材料物性値は Table 2 を使用し、CFRP およびコンクリート間の付着強度及びコンクリートの材料物性値は 3.2 項の基礎実験から得られた値を使用した。破壊則は最大応力説とした。また、結合は全て接点共有結合とした。

結果を Fig.18 に示す。解析結果は最大荷重が 134.6kN、最大たわみが 23.21mm となり、解析結果の最終破壊は接着層の破壊となった。また、実験結果と解析結果を比較すると、最大荷重と最大たわみの誤差はそれぞれ 12.9%、5.26%となった。以上より FEM 解析の妥当性を示す。

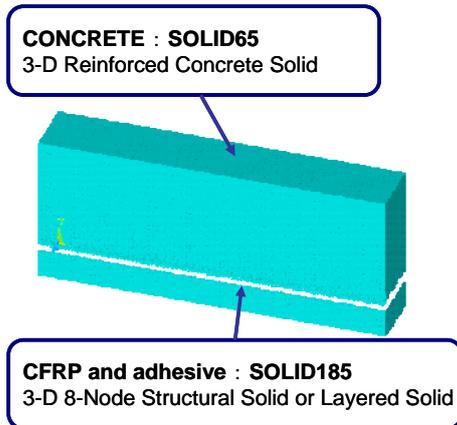


Fig.17 FEM 解析モデル

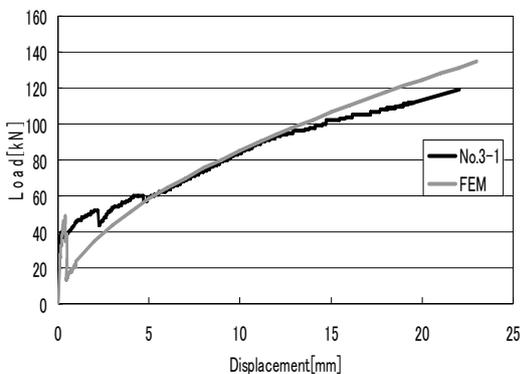


Fig.18 No.3-1 の実験結果と FEM 解析結果の比較

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 帯板にて補強を行い、実験を通して補強効果を確認し、メカニズムの解明として解析を行った。以下に結論を示す。

- 1) 四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することができた。その中でも下側補強、上下補強が優れており、無筋コンクリートと比較し、曲げ強度は約 2.5 倍、吸収エネルギーは約 200 倍と大幅な向上となった。
- 2) 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。
- 3) 荷重増分法を用いた積層はり理論によりクラック発生時のクラック進展率による荷重の誤差はあるが、荷重-たわみの非線形関係を得ることができた。
- 4) FEM 解析を行い、実験結果と良い一致を示したことにより、FEM 解析の妥当性を示した。

5. 今後の展望

- 1) CSI 工法により補強されたコンクリート基礎の耐震性を評価するために、CFRP 補強コンクリートの動的曲げ試験及び繰り返し荷重試験を行うことにより、CFRP 補強コンクリートの耐震性の評価を行う。
- 2) 強度が低下すると考えられる経年コンクリートを用いての試験を行い、CFRP 補強コンクリートの特性の変化を確認する。そして、既に建てられている戸建住宅のコンクリート基礎に応用できるかを確認する。

末筆であるが、実験及び計算のお手伝いを頂いた、平成 21 年度大学院機械工学専攻 2 年齋藤一真氏、平成 20,21 年度卒研究生中山大輔氏、松下優穂さんと積水商事の八代明氏、実験装置の借用と操作のご指導頂いた櫻田智之教授、師橋憲貴准教授に感謝します。

参考文献

- 1) 社団法人 日本建築構造技術者協会：これからの耐震設計<阪神大震災に学ぶ>、オーム社 (1996)
- 2) 村田 二郎：建設材料 コンクリート、共立出版 (2004)