

論文

[2188] 連続繊維補強筋を壁筋に用いた耐力壁の耐震性能に関する実験的研究

藤崎忠志*1・山川哲雄*2・郝洪涛*3

1. 序

鉄筋コンクリート造建築物には塩害等により鉄筋が腐食し、その結果コンクリート内部に膨張圧が発生し、コンクリートにひび割れが生じるなどの弱点が存在する。近年、これらの鉄筋コンクリート造構造物の弱点を克服することを目的に、鋼より引張強度が高く、軽量でかつ磁性を帯びにくく、耐薬品性にも優れ、しかも錆びない新素材繊維をコンクリートの補強材に利用する研究開発が活発に行なわれている[1]。本研究は高強度の連続炭素繊維を樹脂に含浸させながら、格子状に一体成形した連続繊維補強筋[1]を壁筋として、ダブルに配筋した耐力壁の耐震性能を検討したものである[2]。さらに、この連続繊維補強筋を壁筋に用いた耐力壁に、かぶり厚さを十分確保した在来鉄筋で部分的に補強した場合についても検討を加える。本論では連続繊維補強筋をFRP筋と以後呼称する。なお、本研究は文献2) で発表したように、亜熱帯の塩害環境下における耐力壁の耐震性能と耐久性能に関する実験的研究の一環でもあり、1992年12月10日以来東シナ海に面した沖縄の海岸で壁筋に鉄筋を用いたRC造耐力壁3体と、壁筋にFRP筋を用いた耐力壁3体の合計6体を現在自然暴露中である。ただし、これらの暴露試験体に関しては本論ではふれない。

2. 試験体

標準的な試験体の形状、寸法及び配筋図を図-1に示す。格子状に一体成形し

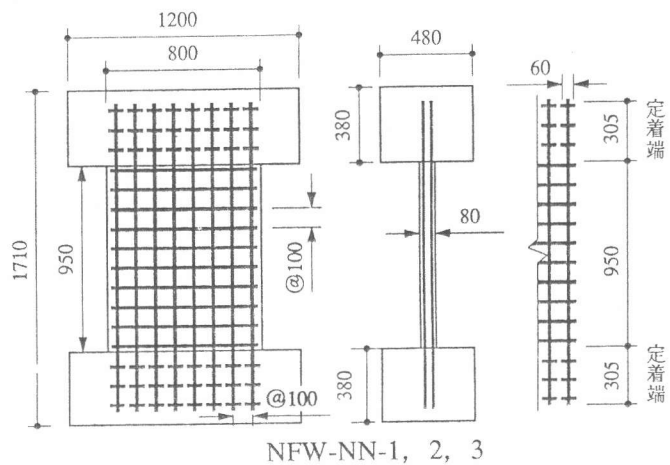


図-1 FRP筋を用いた耐力壁の形式、寸法、配筋図

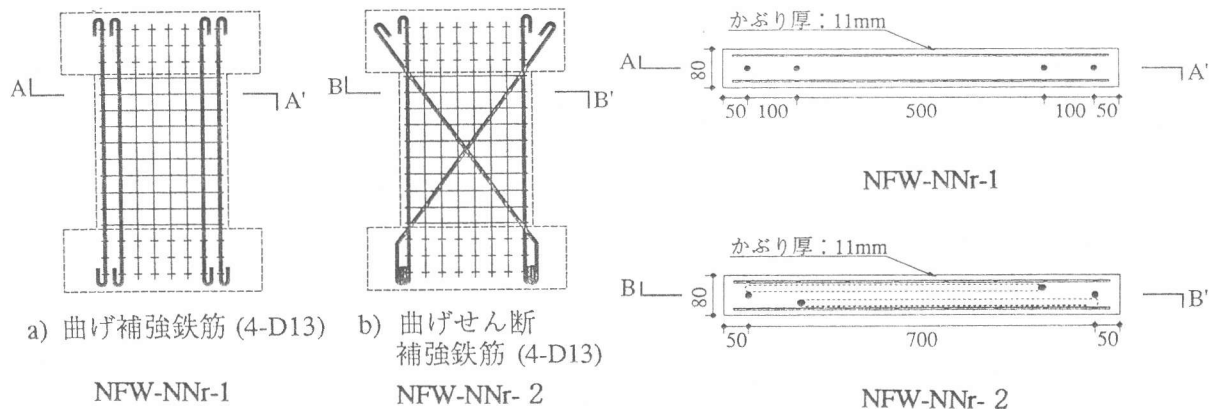


図-2 FRP筋を用いた耐力壁の補強鉄筋形式

*1 清水建設(株) 技術開発センター, 主査(正会員) *2 琉球大学助教授 工学部環境建設工学科, 工博(正会員)
*3 琉球大学大学院 工学研究科建設工学専攻(正会員)

た連続繊維補強筋 (FRP筋) を壁筋として、縦横 10cmピッチで壁厚8cmにダブル配筋 ($P_s \approx 0.8\%$) した試験体 (NFW-NN-1,2,3) を標準試験体とする。FRP筋の断面積は鉄筋D6 (公称断面積: 0.32cm^2) とほぼ同じ 0.31cm^2 である。このFRP筋の周長は約2.2cmであり、D6の公称周長2cmより若干長い。付着強度がほとんど期待できないので、上下のスタブには横筋の切株をアンカー筋として残してある (図-1 参照)。上記の試験体にかぶり厚さを十分確保できることを条件に、曲げ補強鉄筋 (D13-SD295A) をさらに配筋した試験体 (NFW-NNr-1) と、同じ鉄筋 (D13-SD295A) を曲げせん断補強筋として配筋した試験体 (NFW-NNr-2) についても検証実験を行った (図-2 参照)。FRP筋を壁筋に用いた試験体の弾塑性性状を把握するために、ほぼ同じ壁筋比を有する在来鉄筋 (D6-SD295A) を壁筋に用いた基準試験体 (RCW-NN-1,2) も2体用意し、合計7体の実験を行った。これらの試験体一覧を表-1に示す。表-2,3に使用材料の力学的性質を示すとともに、在来鉄筋とFRP筋の応力-ひずみ曲線を図-3に示す。FRP筋は図-3に示すよう

表-1 耐力壁の試験体一覧

補強筋の有無	在来鉄筋	連続繊維補強筋 (FRP筋)		
	-	補強筋なし	補強筋(D13)あり	
試験体名	RCW-NN-1 RCW-NN-2	NFW-NN-1 NFW-NN-2 NFW-NN-3	NFW-NNr-1	NFW-NNr-2
配筋形状				

注) RCW-NN-1, NFW-NN-1,2の3体は1992年度に実験を行った試験体 [2]

表-2 鉄筋とFRP筋の力学的性質

	a (cm ²)	$s\sigma_y$ (MPa)	$s\epsilon_y$ (%)	$s\sigma_u$ (MPa)	sE (GPa)	
FRP筋	0.31	1794.6	1.78	1794.6	99.0	
鉄筋	D 6	0.32	429.2	0.21	559.3	200.6
	D 13	1.27	388.8	0.19	501.9	209.2

注) a: 断面積, $s\sigma_y$: 降伏点応力, $s\epsilon_y$: 降伏点ひずみ
 $s\sigma_u$: 引張強度, sE : ヤング係数

表-3 コンクリートの力学及び材料的性質

	試験体名	$c\sigma_B$ (MPa)	$c\epsilon_1$ (%)	cE (GPa)	スランプ (cm)
在来鉄筋	RCW-NN-1	24.6	0.154	25.3	16.5
	RCW-NN-2	22.1	0.205	24.5	17.0
FRP筋	NFW-NN-1	28.4	0.193	26.3	16.5
	NFW-NN-2	28.3	0.203	25.0	16.5
	NFW-NN-3	17.8	0.175	21.9	9.5
	NFW-NNr-1	18.5	0.178	21.2	9.5
	NFW-NNr-2	20.6	0.248	19.5	9.5

注) $c\sigma_B$: シリンダー強度, $c\epsilon_1$: シリンダー強度時のひずみ
 cE : 割線ヤング係数

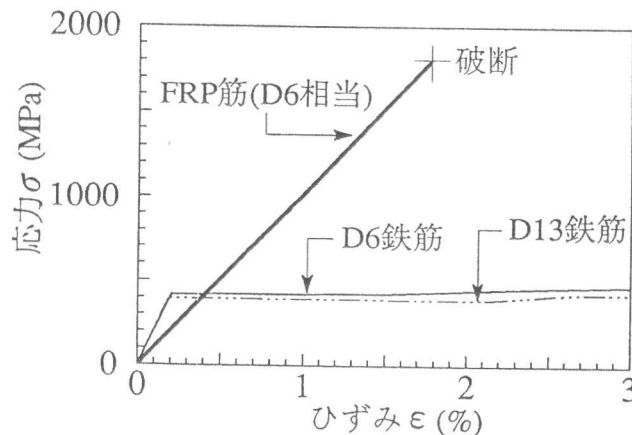


図-3 FRP筋と鉄筋の $\sigma - \epsilon$ 曲線

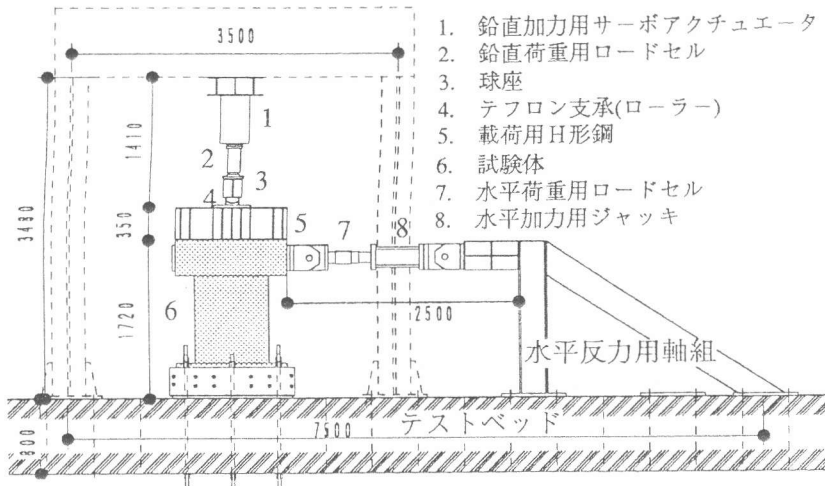


図-4 加力装置と耐力壁試験体取り付け状況

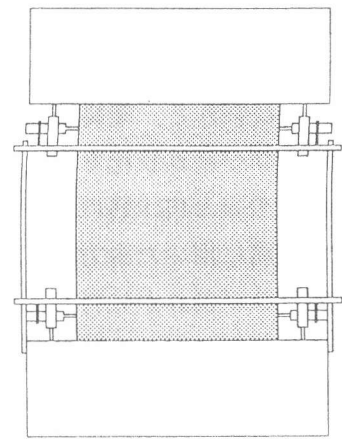


図-5 変位計による測定

に鉄筋のような塑性流れはなく、 $\sigma - \epsilon$ 関係が破断するまで線形関係を維持するが、圧縮破断強度とその時のひずみは引張時の約半分と言われている [1]。また、本試験体のせん断スパン比は1.425である。

3. 载荷及び測定方法

壁脚部固定，壁頂部自由の片持ち柱タイプで，かつ一定軸圧縮力（壁板の圧縮応力 $\sigma = 2 \text{ MPa}$ ）下の正負繰り返し水平加力実験装置を図-4に示す。水平加力はひび割れが発生するまでは荷重制御により行い，ひび割れ発生後は変位制御により壁板部分の層間変形角を0.25%ずつ増大させながら，同一振幅で2サイクルずつ正負水平加力が可能なところまで繰り返した。変位計を用いた測定概略図を図-5に示す。

4. 実験結果と考察

表-4 各層間変形角と壁板のひび割れ進展状況

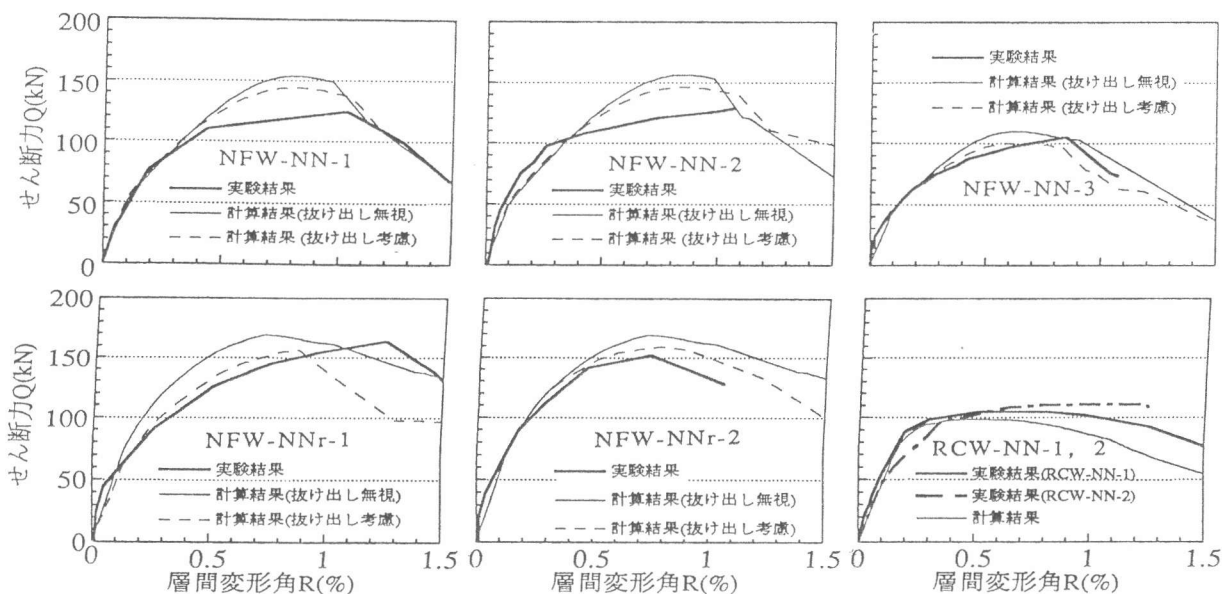
層間変形角	0.25%	0.50%	0.75%	1.00%	最終層間変形角	
鉄筋のみ	RCW-NN-1					
	RCW-NN-2					
FRP筋のみ	NFW-NN-1					
	NFW-NN-2					
	NFW-NN-3					
FRP筋+補強鉄筋	NFW-NNr-1					
	NFW-NNr-2					

表-4に各耐力壁試験体の層間変形角 $R \doteq 0.25, 0.5, 0.75, 1\%$ 時で、かつ2サイクル終了後のひび割れと、最終層間変形角時のひび割れ状況を示す。在来鉄筋のみとFRP筋のみをそれぞれ壁筋に用いた耐力壁試験体は曲げひび割れが先行し、この曲げひび割れがせん断ひび割れに進展していく傾向を示している。しかし、FRP筋にさらに補強鉄筋を配筋すると曲げ強度が上昇し、壁板全体にせん断ひび割れが生じている。

各耐力壁のせん断力 Q と層間変形角 R の関係である $Q-R$ 曲線に関する実験結果と、鉛直方向の耐力壁の伸縮変形を壁の内のり高さで除した平均伸縮ひずみ ϵ_v と部材角 R の関係も合わせて表-5に示す。スケルトンカーブ（正側）に関する実験結果と計算結果の比較を図-6に示す。平面保持を仮定したfiberモデルに梅村の e 関数と表-3に示したコンクリートのシリンダー強度をそれぞれ用い、かつせん断変形と $P-\delta$ 効果も考慮し、さらにFRP筋に関しては壁筋のスタブからの抜け出しも考慮した計算も参考までに行った[2]。なお、解析仮定の詳細については文献3)を参照されたい。これらのスケルトンカーブから実験結果のみをまとめて図-7に示す。初期剛性を比較するために、図-7のスケルトンカーブを $R=0.15\%$ まで拡大して描いた図を、参考までに図-8に示す。コンクリート強度が低いに

表-5 各耐力壁の $Q-R$ 曲線および伸縮ひずみ曲線 (実験結果)

		Q-R 曲線	ϵ_v-R 曲線
鉄筋のみ	RCW-NN-1		
	RCW-NN-2		
FRP筋のみ	NFW-NN-1		
	NFW-NN-2		
	NFW-NN-3		
FRP筋+補強鉄筋	NFW-NNr-1		
	NFW-NNr-2		



注) RCW-NN-1, 2の計算結果は表-3の $c\sigma_c = 24.6, 22.1\text{MPa}$ の平均値を用いた。

図-6 スケルトンカーブ(正側)に関する実験結果と計算結果の比較

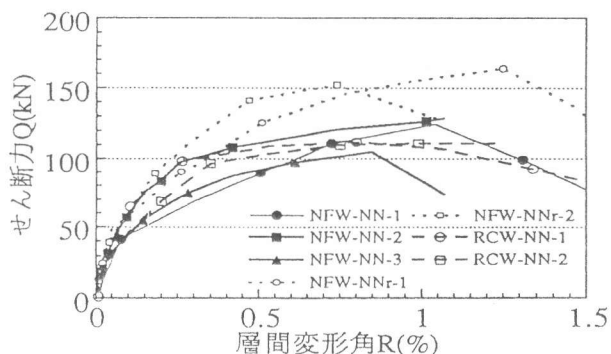


図-7 スケルトンカーブの比較 (実験結果)

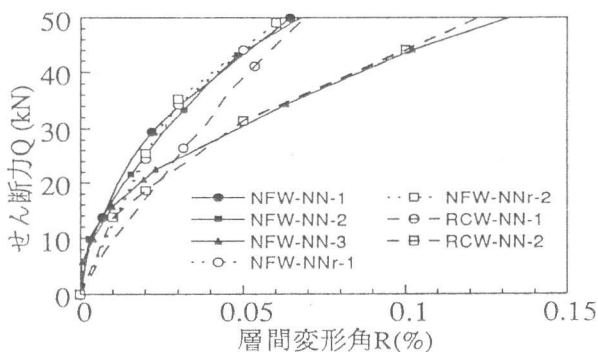


図-8 初期剛性の比較 (実験結果)

もかわらず、NFW-NNr-1,2の初期剛性が高いのは補強筋による効果だと推定される。各耐力壁の累積ひずみエネルギー吸収量 W と部材角 R の関係を図-9に示す。表-5より、鉄筋を壁筋に用いた耐力壁試験体RCW-NN-1,2やFRP筋を壁筋に用い、さらに鉄筋を補強筋として配筋した耐力壁試験体NFW-NNr-1,2の $Q-R$ 曲線は最も望ましいとされる防錘形状のループに近い性状を示している。なかでもFRP筋に曲げ補強鉄筋を配筋したNFW-NNr-1の弾塑性

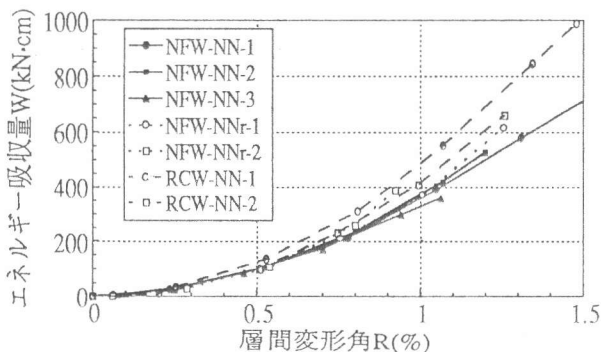


図-9 累積ひずみエネルギー吸収量 W の比較 (実験結果)

性状が最も卓越し(表-5, 図-6~9参照), FRP筋のみで配筋した試験体の耐震性能を改善していることがわかる。しかし、層間変形角 R が1.25%を越えるあたりからFRP筋の圧縮破断音が一部聞こえ、1.5%前後で圧縮側コンクリートの圧壊と曲げ補強筋の座屈により急激に耐力が低下していった。鉄筋を曲げせん断補強したNFW-NNr-2は層間変形角 R が小さい間はNFW-NNr-1と

ほぼ同じ弾塑性挙動を示していたが、 $R=1\%$ 近傍で圧縮ブレース補強筋が一部面外に座屈するような現象のため、かぶりコンクリートが剥離しそうになり、その耐震能力をNFW-NNr-1のように十分発揮することなく耐力が急激に低下していった。FRP筋のみで壁筋を構成したNFW-NN-1, 2, 3のQ-R曲線は残留変形が小さく、かつFRP筋が圧縮破断しない限り耐力は上昇するが、本試験体の場合（せん断スパン比が1.425）、それでも層間変形角が $R=1\%$ 位が限界である。すなわち $R=1\%$ 前後を越えるところからFRP筋が圧縮破断し、そのたびごとに耐力が不連続的に低下していく（表-5, 図-6, 7参照）。NFW-NN-3の耐力がNFW-NN-1, 2より小さく、RCW-NN-1, 2とほぼ同じであるのは表-3に示すようにコンクリートの圧縮強度（シリンダー強度）が小さいからである。一般に圧縮力を受けるRC造鉛直部材の鉛直方向伸縮ひずみ（表-5参照）が、圧縮力が作用しているにもかかわらず層間変形角が大きくなるにつれて縮むことなく伸びれば、まだ十分なじん性を有していると解釈される。この意味では在来鉄筋を壁筋に用いたRCW-NN-1, 2は耐力はやや小さいが、じん性やエネルギー吸収能力（図-7, 9参照）にたけていることになる。しかし、本試験体のようなせん断スパン比（1.425）では $R=1.5\%$ 前後が在来鉄筋を壁筋に用いたRC造耐力壁における層間変形角の限界であるように思われる。表-5より鉛直方向伸縮ひずみは在来鉄筋が大きく、FRP筋を壁筋として配筋した耐力壁試験体が小さい。FRP筋は鉄筋と異なりヤング係数は小さいが、降伏ひずみと破断ひずみが同じであり、塑性領域が存在しないからであると考えられる（表-2, 図-3参照）。さらに、FRP筋が弾性挙動するのでエネルギー吸収能力がやや小さい傾向にある（図-9参照）。すなわち、耐力壁の弾塑性挙動がFRP筋の力学特性に一部引きずられている。総合的に見れば、これらの図表より壁筋をFRP筋のみより、在来の鉄筋のみで配筋した試験体が耐震性能上やや有利な傾向を示している。しかし、FRP筋で構成された壁筋に曲げ補強鉄筋をさらに配筋すると強度、ねばり、エネルギー吸収能力等が改善され、耐震性能の向上が期待できることを示している。したがって、FRP筋と在来鉄筋の混合配筋も今後検討すべき課題のように思われる。ただし、FRP筋と在来鉄筋を混合配筋する場合には、在来鉄筋のかぶり厚さを十分確保するか、エポキシ鉄筋を利用するなどFRP筋の長所である耐久性をいかに活かすような設計法を心がけることが必要となる。

5. 結論

壁筋をFRP筋のみで配筋しても、在来鉄筋のみで配筋した耐力壁試験体以上の耐震性能を期待することは困難である。しかし、FRP筋を用いた壁筋に曲げ補強鉄筋を配筋すると、耐震性能がFRP筋のみや在来鉄筋以上にさらに改善される傾向にあることがわかった。

謝辞：本研究に琉球大学大学院生の松永尚凡君等に加え、1993年度の卒論生として琉球大学4年生の比嘉雅貴君（三井建設（株））が参加した。

参考文献：

- [1]杉田稔, 中辻照幸, 藤崎忠志 他多数：“繊維強化複合素材（NFM）の建築構造への利用に関する研究 その1—その13”，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）,（関東）,（九州）,（中国）, pp.131—138, pp.813—818, pp.147—150, pp.959—966, 1987年, 1988年, 1989年, 1990年
- [2]山川哲雄, 森永繁, 藤崎忠志, 他2名：“亜熱帯の塩害環境下における耐力壁の耐震性と耐久性に関する実験的研究その1—その3”，日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.269—274, 1993年9月
- [3]山川哲雄, 伊良波繁雄 他3名：“亜熱帯の塩害環境下における耐力壁の耐震性能に関する実験的研究”，琉球大学工学部紀要 第46号, pp.115—130, 1993年9月