

論文 シート状炭素繊維により補強された RC 造非構造壁の性能に関する実験的研究

杉山智昭*1・松崎育弘*2・中野克彦*3・福山洋*4

要旨：本論文では、複数開口を有する鉄筋コンクリート造非構造壁を内蔵するラーメンのせん断実験を行うことにより、構造性能評価のために必要な知見を得るとともに、シート状炭素繊維により補強することで非構造壁の破壊性能（ひび割れ状況と破壊性状）を改善できることを明らかにした。ここでは、非構造壁の破壊性能の改善による扉開口部の変形抑制（避難経路の確保）、中小地震時におけるひび割れ幅拡大の抑制等に対する補強法（貼り付け量・貼り付け箇所）の制御効果を明らかにしている。

キーワード：非構造壁、耐震補強、炭素繊維シート、ひび割れ、開口部の変形

1. はじめに

1968年の十勝沖地震、1978年の宮城県沖地震と地震が発生する度に、鉄筋コンクリート（以下 RC）造非構造壁（垂れ壁・腰壁・方立て壁）が付帯ラーメンに剛接合することで、構造体のせん断スパンが短くなり柱がせん断破壊する被害や、非構造壁自身がせん断破壊する事によって、壁板内に存在する開口部（扉）が変形・破損し避難経路が確保されず住人が住戸内に閉じこめられる被害が問題となっている。これらの地震被害に対し、『鉄筋コンクリート短柱の崩壊防止に関する研究』¹⁾や、構造部材とともに非構造壁の破壊防止のため、非構造壁－構造部材間にスリット（構造目地）を採用する提案²⁾等の研究が行われ、対策がとられるようになった。また、1994年の「建築物の構造規定」³⁾では、慣用的に無視されてきた厚さの薄い非構造壁であっても構造的な影響を考慮するよう改訂されている。

しかしながら今現在においても、非構造壁を内蔵したラーメンの剛性・強度等を明確に評価できる方法はなく、構造目地を使用する場合でも

適切な構造目地が使用されていない等多数の問題が指摘されている。また、1995年の兵庫県南部地震においては先の地震と同様な被害と共に、非構造壁のひび割れによって補修に大きな費用が掛かる、住人の構造体に対する不安を招く、耐久性に問題を生じる、等の新たな問題がクローズアップされている。さらに、これからの性能設計への移行のにあたって、非構造壁の破壊プロセスをどの様にコントロールして設計するかが求められる。

そこで本論文では、複数開口を有する RC 造非構造壁を内蔵するラーメンの構造性能評価に必要な知見を得るとともに、炭素繊維シート補強を施すことによって非構造壁の破壊性能（ひび割れ状況と破壊性状）が改善されることを明らかにするために実験を行った。ここでは、非構造壁の破壊性能の改善による扉開口部の変形の抑制（避難経路の確保）、中小地震時におけるひび割れ幅の拡大抑制等に対する補強法（貼り付け量と貼り付け箇所）の制御効果について検討するものである。

*1 東京理科大学大学院	工学研究科建築学専攻	(正会員)
*2 東京理科大学教授	工学部建築学科 工博	(正会員)
*3 東京理科大学助手	工学部建築学科	(正会員)
*4 建設省建築研究所	国際地震工学部第一耐震工学室主任研究員 工博	(正会員)

表-1 試験体一覧

No.	試験体名	コンクリート 強度 σ _B [N/mm ²]	柱部			壁部							最大耐力 Q[kN]
			柱断面 B _c ×D _c [mm×mm]	柱主筋 (SD345)	せん断 補強筋 (SD295)	壁厚 t [mm]	壁補強筋 (縦・横)	開口 形式	炭素繊維シート				
									貼付 形状	貼付 面	総貼付量	施工法	
1	RC-A-0-0	24.1	240×240	12—D13	□ 2—D6 @50 (0.53%)	40	D4 @105 (0.30%)	A-Type	I型	片面	1層	既往 (一般) 施工法	318.3
2	CF-AS-I-1	23.1							L型	片面	2層		328.1
3	CF-AS-I-2	24.1									1層		321.7
4	CF-AS-L-1	23.6									1層		349.2
5	RC-B-0-0	24.7						B-Type	I型	片面	1層	簡易 施工法	346.8
6	CF-BS-I-1	23.9									2層		364.0
7	CF-AT-I-2D	24.9						A-Type	I型	両面	2層		326.6
8	CF-AT-L-2D	24.6							L型	両面	2層		361.0

2. 実験概要

2. 1 試験体

表-1 に試験体一覧、表-2 に鉄筋・炭素繊維シート材料特性、図-1 に試験体形状図、図-2 に炭素繊維シート貼り付け模式図、図-3 に炭素繊維シート貼り付け図を示す。

試験体は、集合住宅の北側構面を想定した、実大の 1/3 スケールの大きさで、付帯ラーメン内に非構造壁を有する形状である。試験体総数は 8 体で無補強の基準試験体が 2 体(A-Type 開口：中央扉・両脇窓型、B-Type 開口：扉並列型)、補強試験体が 6 体である。なお、非構造壁の破壊制御の手段としては、シート状炭素繊維貼り付けによる補強法を用いることとした。

共通要因は、試験体形状の付帯ラーメン部分（壁全長=2240mm、加力点高さは1400mm、壁内法高さは1100 mm、柱断面 $B_c \times D_c = 240 \times 240$ mm）、壁厚 $t = 40$ mm、柱主筋 12-D13(SD345)、柱せん断補強筋量 D6 (SD295) @ 50 ($p_w = 0.53\%$)、壁せん断補強筋量 D4 @ 105 ($p_s = 0.30\%$) である。なお、使用する炭素繊維シートは、図-2 に示すとおり、壁表面に『1 枚』の炭素繊維シート（目付量 200g/m²、厚さ 0.0111cm）を直交方向に各 1 枚それぞれ貼り付けたものを『1 層』とする。シートの貼り付け順序は①横方向を貼り付け、その上から②縦方向を貼り付けるものとした。片面 2 層の場合は『1 層』の上に、③ 2 層目横方向④ 2 層目縦方向の順に貼り付けるものとした。

変動要因は、開口の形状(A,B-Type 開口)と、炭素繊維シートの補強法である。炭素繊維シー

表-2 鉄筋・炭素繊維シート材料特性

材種	降伏点強度 (N/mm ²)	降伏歪み (μ)	ヤング係数 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	破断伸び (%)
壁補強筋(D4)	250	1170	2.15×10^5	317	35.4
柱補強筋(D6)	292	1770	1.80×10^5	517	16.2
柱主筋(D13)	350	1930	1.81×10^5	505	17.9
炭素繊維シート	—	—	2.50×10^5	4079	—

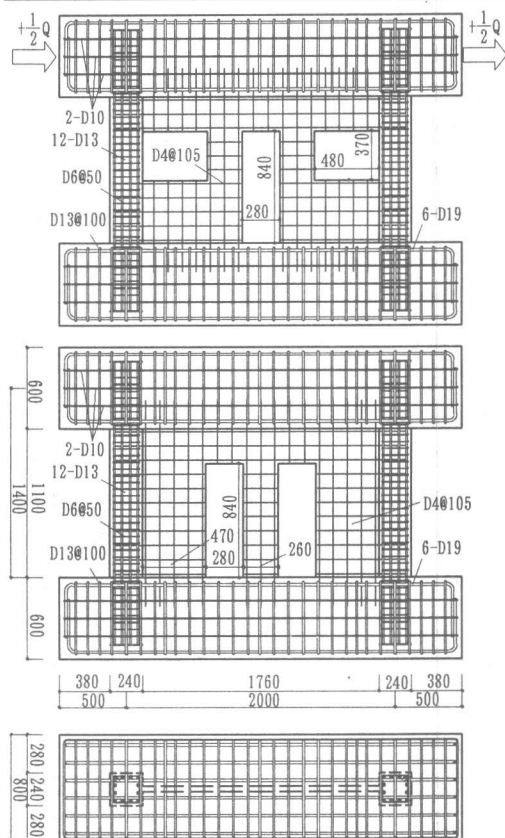


図-1 試験体形状図

(上段：A-Type、下段：B-Type)

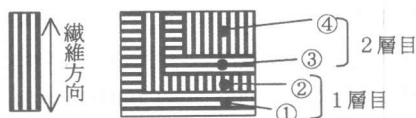


図-2 炭素繊維シート貼り付け模式図

トの貼り付けは、貼り付け形状(I型：開口脇の壁のみ，L型：I型+腰壁部)，貼り付け面(片面：試験体表面の片面のみ，両面)，炭素繊維シート量(1層，2層)，シート貼り付け施工法(既往施工法：一般的に使用されている施工法，簡易施工法(TRM 工法)：エポキシ樹脂含浸型シートを用い，熱を与えることによりエポキシ樹脂を短時間で硬化させる方法)である。

2. 2 加力方法

図-4 に加力装置図を示す。

軸力は2台の油圧ジャッキを用いて，左右側柱芯上のスタブ上部鉄骨に一定力 ($N=1/6 B_c \times D_c$) を与え，水平力は，2台の油圧ジャッキを用いてスタブ梁芯の位置に加力治具を介し，左右押し引きの荷重が等しくなるよう載荷した。

加力の制御は変位制御とし，層間変形角で $\pm 1/6400, \pm 1/3200, \pm 1/1600, \pm 1/800, \pm 1/400, \pm 1/200, \pm 1/100, \pm 1/50[\text{rad}]$ を正負各1回ずつ繰り返した後， $+1/25[\text{rad}]$ まで加力を行った。

3. 実験結果及び検討

3. 1 破壊性状

図-5 に最終破壊状況の一例を示す。A,B-Type(No.1,5)共に， $1/3200[\text{rad}]$ 前後の小さい変形角より，開口隅角部からのひび割れがみられた。A-Type(No.1)試験体では，約 $1/800[\text{rad}]$ 前後で，方立て壁の窓開口の位置，左右腰壁の順に大きなせん断ひび割れが生じ，方立て壁の著しいせ

図-3 炭素繊維シート貼り付け図

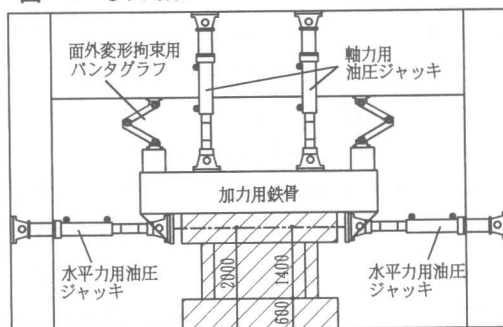
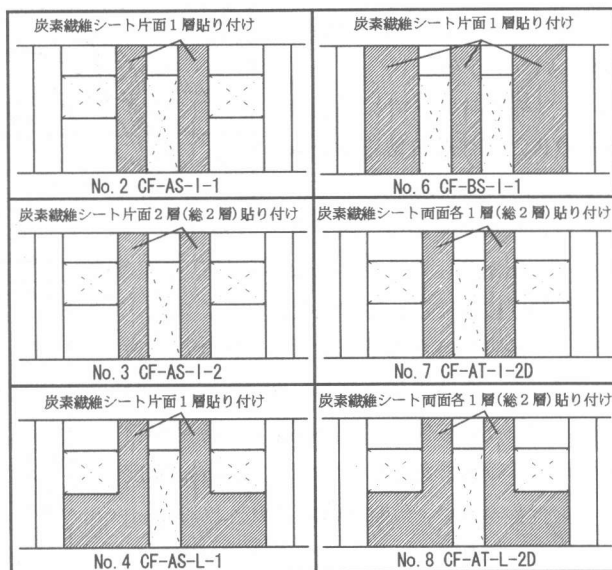


図-4 加力装置図

ん断破壊の後に，柱-壁接合部の圧壊によって最大耐力に達した。B-Type(No.5)試験体では， $1/1600[\text{rad}]$ で大きなせん断ひび割れが袖壁部に生じ，その後，柱に最も近い壁縦筋に沿ったひび割れが進展し，柱と袖壁がずれる状態で最大耐力に達した。なお，A,B-Type 試験体共に壁板

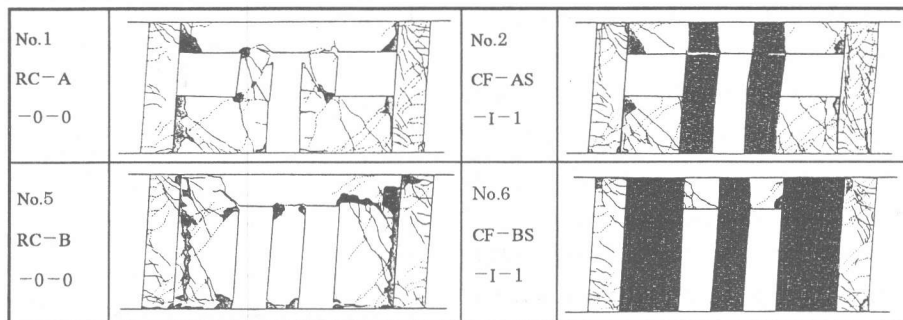


図-5 破壊状況図($\gamma=1/25[\text{rad}]$)

が原因と考えられる柱の破壊は認められなかった。

シート補強試験体では、無補強試験体と同様な破壊経過を示したが、A-Type 試験体方立て壁の著しいせん断破壊は、炭素繊維シートを貼り付けることによって、曲げ破壊に近い性状に変化した。また、シートを貼り付けた箇所では、ひび割れが分散し幅が小さくなる性状を示し、逆にシートを貼り付けていない箇所では、ひび割れの進展が稍大きくなる傾向であった。なお、1/200[rad]程度からシートの剥離・破断が観察され、1/100[rad]以降で著しくなった。シートを片面に補強したNo.2,3,4 試験体は、1/200[rad]以降シートを貼り付けていない面外へ変形を起こしたが、両面に補強したNo.7,8 では観察されなかった。

3. 2 変形状性

図-6 に No.1,5 試験体の $Q-\delta$ 関係を示す。比較のため、柱と梁の断面・配筋が同一である既往実験⁴⁾の付帯ラーメン試験体と耐震壁試験体(壁厚 $t=6\text{cm}$)についても同じく示す。また、表-3 に以上4体の初期剛性と最大耐力一覧を示す。

A, B-Type 試験体の初期剛性 K_e は、ラーメン試験体に比べ壁板が存在することで、それぞれ3.4,4.5 倍と高い値となっている。また、最大耐力 $Q_{\max}$ はラーメン試験体より稍大きい、単位面積あたりの最大耐力 $\tau_{\max}$ では、耐震壁試験体に比べ1/2程度で、ラーメン試験体と同程度である。更に、履歴性状は紡錘形に近く、耐力低下は、耐震壁試験体が急激であるのに対して、緩やかにラーメン試験体の包絡線に近づく性状で、良好な靱性能が認められる。

柱・方立て壁を線材に置換して初期剛性 K_e の計算を行うと(雑壁部の剛域を考慮して剛域端までを $1/4D$ と仮定)、ラーメン、耐震壁(片持ちとして置換)試験体はよい対応を示したが、No.5 では若干計算値が高い。さらに、垂れ壁・腰壁により計算上せん断スパンが非常に短く計算されるNo.1では差が大きく、壁の考慮が重要である。

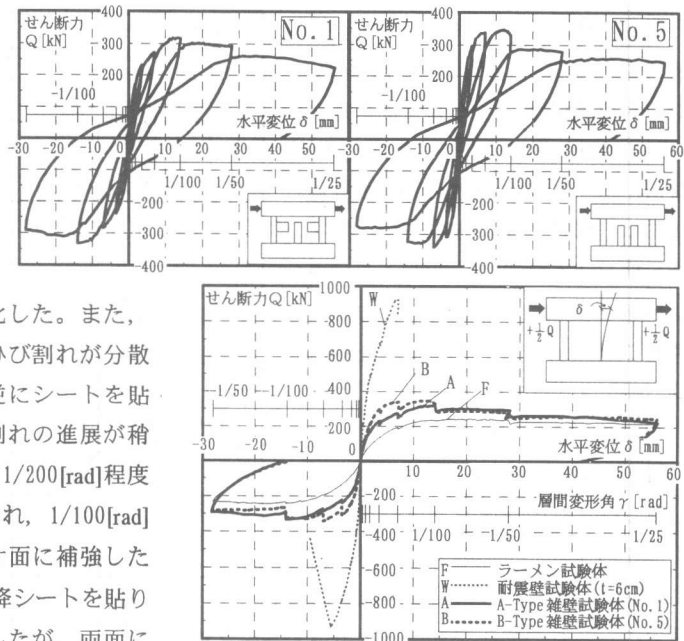


図-6 せん断力-水平変位関係

表-3 初期剛性・最大耐力一覧

	初期剛性		最大耐力 $Q_{\max}$ [kN]	断面積 A [cm ²]	$\tau_{\max}$ $=Q_{\max}/A$ [N/mm ²]
	実験値 K_e [kN/mm]	計算値 K_e [kN/mm]			
ラーメン試験体	79.66	91.92	244.75	1152	2.12
耐震壁試験体	713.40	778.61	922.60	2208	4.18
A-Type試験体 (No. 1)	269.84	1009.60	318.30	1360	2.34
B-Type試験体 (No. 5)	359.79	449.34	346.82	1632	2.13

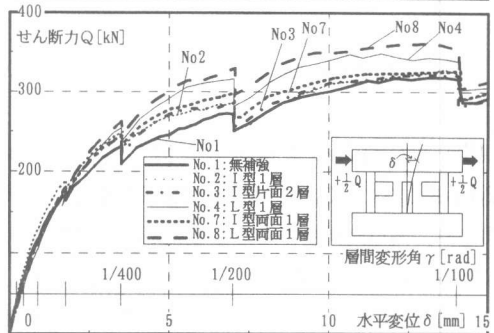


図-7 せん断力-水平変位関係包絡線

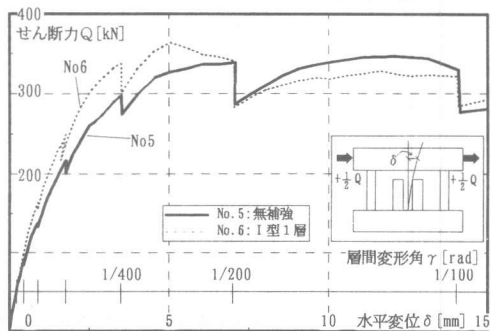


図-8 せん断力-水平変位関係包絡線

図-7に A-Type 開口試験体Q- δ 関係包絡線を示す。壁部ひび割れが顕著になり始める $\gamma=1/800\sim 1/400[\text{rad}]$ で剛性低下が生じるが、補強試験体では剛性の低下が緩やかであり、I 型補強よりも L 型補強で、シート1層貼り付けよりも2層貼り付けでより緩やかである。 $\gamma=1/200[\text{rad}]$ 以降では、剛性低下の緩やかな試験体ほど保持しているせん断力(Q)が大きくなる傾向であった。

図-8に B-Type 開口試験体Q- δ 関係包絡線を示す。B-Type では、袖壁部にひび割れが多く発生し始める $\gamma=1/1600 [\text{rad}]$ から無補強試験体の No.5 よりも補強試験体の No.6 で剛性が大きくなり、保持せん断力(Q)とともに大きな差が認められた。最大耐力時変形においても差があり、シート補強を行うことで、剛性・最大耐力・最大耐力時変形角に差が生じた。

なお、補強試験体の包絡線は、変形が進むほど無補強試験体の包絡線に近づいていく傾向があり、壁板に炭素繊維シートの補強をする事で、柱部に著しい損傷が生じることはなく、靱性に富んだ性状である。

3. 3 シート補強効果

炭素繊維シート補強による破壊性状の改善を扉開口変形角、ひび割れ幅を観点に検討を行う。

(1) 開口部変形角

図-9,10に A-Type, B-Type の平均せん断応力 τ -扉開口部変形角 γ_D 関係を示す。なお、 $f_{s,長}$ 、 $f_{s,短}$ は、それぞれ鉄筋コンクリート構造計算基準におけるコンクリートの長期、短期許容せん断応力度であり、 τ_{su} は、既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準の1次診断における終局時せん断応力度である。 τ_{su} の計算は、柱及び方立て壁で 10kgf/cm^2 、袖壁については 20kgf/cm^2 として計算した。

A-Type 開口では、 $f_{s,長}$ 、 $f_{s,短}$ 、 τ_{su} の各応力度レベルの範囲内では明確な差は認められないが、B-type 開口では、 $f_{s,長}$ より、補強試験体と無補強試験体との変形の差が顕著になっており、開口形式の影響が生じていると考えられる。

$f_{s,短}$ を越えたせん断応力度レベルでは A, B-type

開口共に、同一せん断応力時における扉開口部変形角は、補強試験体が無補強試験体よりも小さく、シート補強による効果が認められる。シート補強法の違いでは、I 型一層、I 型二層、L 型一層、L 型二層の順に扉の剛性低下が緩やかであり、貼り付け形状、貼り付け枚数を変えることにより効果の向上がある。

扉の開閉がどの程度の扉開口変形角で困難になるかについては、ドアクリアランスや材料の種類などによって異なり明確ではないが、約 $1/300\sim 1/100[\text{rad}]$ 時と見込まれる⁵⁾。ここで、開口部変形角 $\gamma_D=1/300, 1/150[\text{rad}]$ (それぞれ層間変

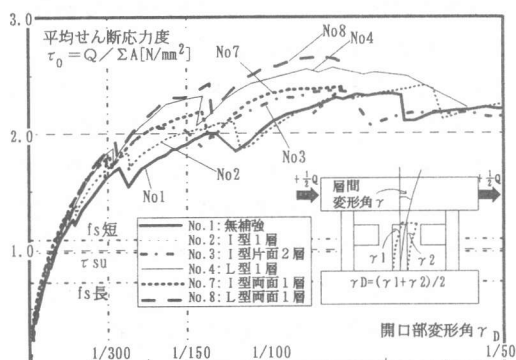


図-9 平均せん断応力度-扉開口変形角関係

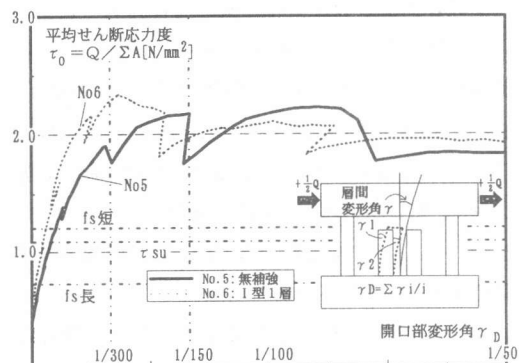


図-10 平均せん断応力度-扉開口変形角関係

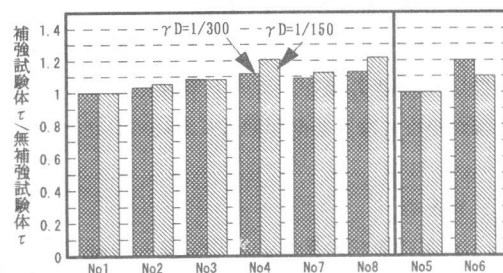


図-11 平均せん断応力度比

形角では約 $1/400[\text{rad}]$,約 $1/200[\text{rad}]$)を基準として各試験体の平均せん断応力度を考える。

図-11 は, $\gamma_D=1/300, 1/150[\text{rad}]$ 時の補強試験体平均せん断応力度を無補強試験体平均せん断応力度で除した値である。値の範囲は, $\gamma_D=1/300[\text{rad}]$ 時で I 型が $1.03\sim 1.11$, L 型が $1.12\sim 1.13$, $\gamma_D=1/150[\text{rad}]$ 時で I 型が $1.05\sim 1.13$, L 型が $1.20\sim 1.22$ であり, シート補強法を選択する事で限界時のせん断応力度を上昇できると考えられる。

(2) 荷重除荷時ひび割れ幅

図-12, 13 にせん断力除荷時ひび割れ幅-層間変形角関係を示す。ここで検討を行う顕著なひび割れは, A-type 試験体では, せん断スパンが短くなることで生じた右側方立て壁のせん断ひび割れ, B-type 試験体では, 右袖壁部に生じたせん断ひび割れである(図-12, 13 参照)。なお, No.6 の $1/200[\text{rad}]$ 以降は, 壁-柱接合部のひび割れが著しいため, 小さな値となっている。

許容されるひび割れ幅は, 耐久性上 $0.15\sim 0.3\text{mm}$ 程度であれば問題がないとされる⁹⁾。そこで外観の見栄えも考慮し, $0.2[\text{mm}]$ を目安としてそれ以内にひび割れ幅を抑える能力を考える。

ひび割れ幅が $0.2[\text{mm}]$ 以下の値に抑えられる層間変形角は, A-type 補強試験体で $1/400[\text{rad}]$ 以下, B-type 補強試験体において $1/200[\text{rad}]$ 以下となっており, ひび割れ幅の絶対量は, I 型一層, I 型二層, L 型一層の順にそれぞれ約 $2/3$ づつ小さい。また, B-type の補強試験体(No6)では無補強試験体(No5)に比べ, ひび割れ幅は $1/4$ 以下の大きさに抑えられている。このように, シート補強により, ひび割れ幅が小さくなり, 補強法の違いで抑制効果の向上が期待できる。

なお, 各サイクル折り返し時のひび割れは, 除荷時の倍程度の幅で, シート補強によりひび割れ幅が小さくなる傾向が同じく認められた。

4. まとめ

(1) 開口形状の異なる非構造壁を内蔵することで, ラーメン架構の強度・剛性・破壊性状が

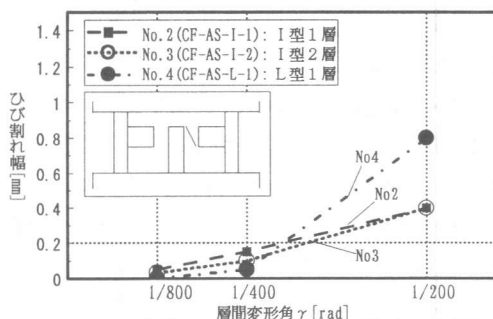


図-12 荷重時ひび割れ幅-層間変形角関係

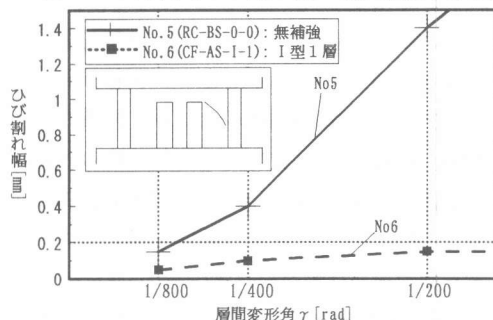


図-13 除荷時ひび割れ幅-層間変形角関係

異なることを示した。

(2) 非構造壁にシート状炭素繊維を貼り付け補強することにより, 非構造壁の性能(破壊における性能: ひび割れ状況や破壊モード)を改善でき, 具体的には, 扉開口部(避難口)の変形, 及び, 非構造壁のひび割れ口開き(ひび割れ幅)を小さくする事ができる。また, その効果は, 補強法(貼り付け量・貼り付け箇所)により制御できる。

謝辞

本研究は, 日鉄コンポジット(株), 新日鉄化学(株), TRM 工法研究会との研究の一環として行ったものである。また, 実験を行うに際しては東急建設(株)技術研究所にご協力を頂いた。ご協力頂いた方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) 東洋一他, 鉄筋コンクリート短柱の崩壊防止に関する総合研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1973, 等
- 2) 構造目地を設けた鉄筋コンクリート造2次壁に関する研究資料, 日本建築学会, 1983
- 3) 建築物の構造規定, 日本建築センター, 1994
- 4) 堀江啓他, 連続繊維シートによる耐震壁の補強に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 pp.595~600, 1997.9
- 5) 非構造部材の耐震設計指針・同解説, 日本建築学会, 1985
- 6) 建築物の耐久計画に関する考え方, 日本建築学会, 1988, 鉄筋コンクリート造のひび割れ対策(設計・施工)指針・同解説, 日本建築学会, 1990, 等