

論文 CFRP シートで補強した T 型梁の靱性能

有留 義朗*¹・金久保 利之*²・古田 智基*³・松井 雅明*³

要旨： CFRP シートを用いて補強した T 型 RC 梁において、シートの定着方法が靱性能に及ぼす影響について検討することを目的とし、定着方法を変動要因とした試験体に建研式加力を行った。実験の結果、せん断破壊先行型（せん断補強筋比 $p_w=0.18\%$ ）の試験体においては、シート補強することによって最大耐力が 20～60%増加し、また、シートの定着方法により靱性能が影響を受けることが分かった。特に、長プレートより短プレートを用いた定着、プレートよりアングルを用いた定着が優れており、アングルの場合、スラブ面より梁スラブ両面またはスラブ貫通アンカーで定着された場合の靱性能が改善された。

キーワード： CFRP シート、靱性能、定着、T 型梁、補強効果

1. はじめに

阪神・淡路大震災以降、被災構造物および既存不適格建物を対象とした耐震補強・補修が急務となっている。その中でも CFRP シート（炭素繊維シート、以下シートと略す）を用いて補強する方法が脚光を浴びている。独立柱の場合は、単に周囲にシートを巻き付け硬化させることで補強効果が得られるが、一般に、柱には壁が、梁にはスラブが付いており容易にシートを巻き付けることができない。そこで、本研究ではスラブ付きの梁（T 型梁）に焦点をあて、なるべく施工が容易で十分な補強効果の得られるシートの定着方法を探索し、定着方法の違いが靱性能に及ぼす影響について検討することを目的とする。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表-1 に試験体一覧、表-2～4 にシート、鉄筋およびコンクリートの力学的性質、図-1 に試験体形状および配筋、図-2 に補強方法を示す。試験体は旧規準で設計された中層建物の梁（スラブ付

き）を想定した 1/2.5 縮小モデルで、せん断補強筋比 p_w を 0.18%（せん断余裕度 $cQ_{su}/cQ_{mu}=0.80$ ）としたせん断破壊先行型 9 体（試験体 No.11～14 および No.21～25）と、 p_w を 0.46%（せん断余裕度 1.00）とした曲げ降伏先行型 6 体（試験体 No.15～17 および No.26～28）の合計 15 体である。共通要因は、断面形状 $b \times D=200 \times 300\text{mm}$ 、主筋 5-D13(SD295、引張鉄筋比 $p_t=1.23\%$)、せん断スパン $L_0=1200\text{mm}$ 、せん断スパン比 $M/QD=2.0$ 、スラブ幅片側 500mm、スラブ厚 50mm、スラブ軸方向筋 D6@145(SD295)、スラブ配力筋 D6@135(SD295)、コンクリート設計強度 $F_c=15\text{MPa}$ 、補強に用いたシートは目付量 200g/m^2 のもの 1 層である。変動要因は、①既存 RC 部のせん断補強筋 (2-D4@70 または 2-D6@70)、②補強方法（図-2 参照）である。No.11 と No.15 はそれぞれ $p_w=0.18\%$ と $p_w=0.46\%$ の CFRP 補強のない基本試験体である。No.12,16 は U 字型にシートを貼り、シート端部をプレート（幅 1180mm、梁片側 1 枚、以下長プレートと呼ぶ）を介して梁面にアンカーボルトで定着し、No.14 もシート端

*1 筑波大学大学院理工学研究科（正会員）

*2 筑波大学構造工学系、講師、博士（工学）（正会員）

*3 ショーボンド建設㈱ 建築事業部

表-1 試験体一覧

試験体名	筋筋 (規格)	せん断補強筋比 p_w (%)		補強方法 (図-2)	
		既存 RC p_w (%)	シート補強後*1 Σp_w (%)	シートの貼付	定着方法 (アンカー取付位置)
No.11	2-D4@70 SD295 相当	0.18	0.58	無	無補強
No.12				有	プレート定着 (梁面)
No.13				有	スラブ下面定着 (アンカーなし)
No.14				有	プレート定着 (梁面)
No.15	2-D6@70 SD295	0.46	0.78	無	無補強
No.16				有	プレート定着 (梁面)
No.17				有	スラブ下面定着 (アンカーなし)
No.21				無	アングル補強 (梁・スラブ両面)
No.22	2-D4@70 SD295 相当	0.18	0.68	有	アングル定着 (梁・スラブ両面)
No.23				有	アングル定着 (スラブ面)
No.24				有	アングル定着 (スラブ面貫通)
No.25				有	プレート定着 (梁面)
No.26	2-D6@70 SD295	0.46	0.78	無	アングル補強 (梁・スラブ両面)
No.27				有	アングル定着 (梁・スラブ両面)
No.28				有	プレート定着 (梁面)

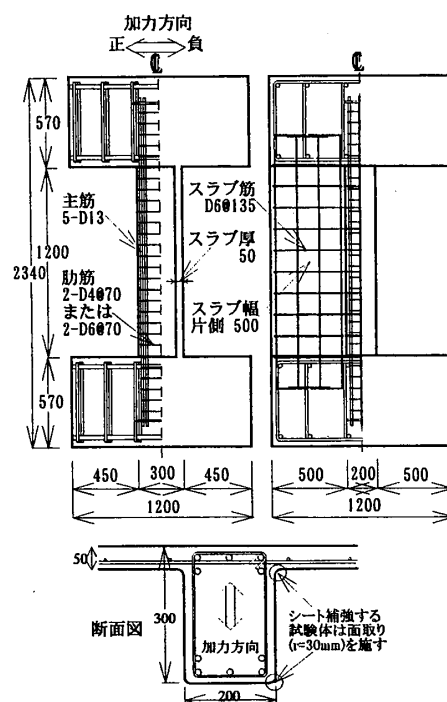
*1 補強後のせん断補強筋比 $\Sigma p_w = p_w + (\sigma_{fu} / \sigma_{sy}) \times p_{wf} \cdot 1)$ p_w : 既存 RC 部のせん断補強筋比 p_{wf} : シートのせん断補強筋比 (0.111%) σ_{fu} : シートの設計破断強度 (980MPa) σ_{sy} : せん断補強筋の降伏強度

図-1 試験体形状および配筋 (単位: mm)

表-2 炭素繊維シートの力学的性質

目付量 (g/m ²)	厚さ (mm)	織物幅 (mm)	破断強度 σ_{fu} (MPa)	ヤング係数 E_f (GPa)
200	0.114	250.5	4747	229

表-3 鉄筋の力学的性質

鉄筋種別 (規格)	降伏強度 σ_{sy} (MPa)	引張強度 σ_{su} (MPa)	ヤング係数 E_s (GPa)	備考
D13 (SD295)	330 337	463 488	182 180	No.11~17 No.21~28
D6 (SD295)	354* 336*	533 520	185 177	No.11~17 No.21~28
D4 (SD295 相当)	272 218	342 332	214 199	No.11~17 No.21~28

* 0.2%offset 法による耐力

表-4 コンクリートの力学的性質

コンクリート 種類	圧縮強度 σ_B (MPa)	割裂強度 σ_{sp} (MPa)	ヤング係数 E_c (GPa)
普通	16.8~21.8	1.34~1.53	18.6~21.8

部をプレート (幅 136mm、梁片側 9 枚、以下短プレートと呼ぶ) で、No.25,28 もシート端部をプレート (幅 68mm、梁片側 17 枚、以下短プレートと呼ぶ) で梁面にアンカーボルトで定着した。No.13,17 はシートをスラブ下面まで 500mm 延長して定着した。No.22,27 は U 字型にシートを貼り、シート端部を断面形状が L 字型のアングルを介して梁・スラブ両面にアンカーボルトで定着し、No.23 もシート端部をアングルを介してスラ

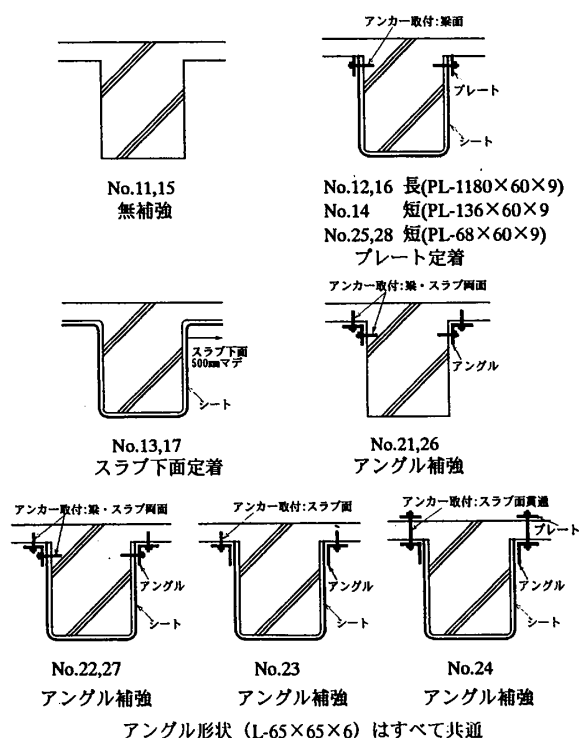


図-2 補強方法

ブ面にのみアンカーボルトで定着した。No.24 はシート端部をアングルとスラブ上部プレートを介して、スラブ面を貫通させたアンカーボルトにより定着した。また、No.21 と No.26 はシートを用いずアングルを介して梁とスラブ両面にアンカーボルトで補強した。定着に用いたアングルの形状

表-5 諸強度の計算値および実験結果一覧

試験 体名	せん断 強度 (mean 式) cQ_{su} (kN)	せん断 余裕度 $cQ_{su} /$ cQ_{mu}	降伏 強度 eQ_y (kN)	最大荷重 (正負平均) eQ_{max} (kN)	$eQ_y /$ cQ_{mu}	$eQ_{max}/$ cQ_{mu}	降伏 変形角 R_y (rad.)	限界 変形角 R_u (rad.)	限界 塑性率 $\mu = R_u / R_y$	破壊形式 *1
No.11	80.6	0.80		76.7		0.76		1/23		ST
No.12	102	1.01	102	105	1.01	1.04	1/154	1/37	4.19	F→BS
No.13	109	1.07	87	95	0.86	0.94	1/214	1/50	4.27	F→ST,BS
No.14	109	1.07	96	105	0.95	1.04	1/185	1/25	7.46	F→SC
No.15	101	1.00	107	112	1.06	1.11	1/98	1/23	4.33	F→BS
No.16	116	1.14	110	113	1.09	1.12	1/99	1/19	5.25	F→BS
No.17	116	1.14	111	116	1.10	1.15	1/115	1/22	5.29	F→ST,BS
No.21	82.5	0.81	91.2	99.4	0.89	0.97	1/207	1/20	10.4	F→ST
No.22	106	1.04	102	123	1.00	1.20	1/179	1/22	8.06	F→SR
No.23	106	1.04	118	122	1.15	1.19	1/129	1/31	4.14	F→AF
No.24	106	1.04	126	126	1.23	1.23	1/97	1/19	5.15	F→SR
No.25	104	1.01	102	105	1.00	1.03	1/158	1/30	5.22	F→BS→AF
No.26	104	1.02	115	118	1.12	1.16	1/117	1/19	5.98	F→SC
No.27	120	1.17	120	122	1.17	1.19	1/105	1/20	5.35	F→SR
No.28	120	1.17	109	118	1.07	1.15	1/136	1/21	6.38	F→BS→AF

注) 曲げ強度 (HFW 指針式) は各試験体とも $cQ_{mu}=102$ (kN)

*1 破壊形式 F: 曲げ降伏, BS: 梁とスラブの境界面の分離破壊, SC: 梁端部でのせん断圧縮破壊, ST: せん断引張破壊, SR: シート破断, AF: アンカー破壊

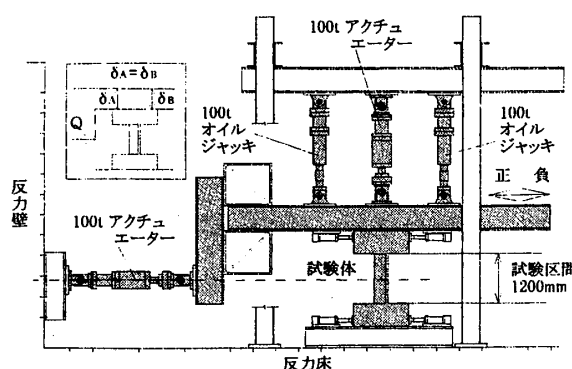


図-3 加力装置

はすべて共通で幅 65mm、梁片側 17 枚とした。シート補強する試験体の梁断面コーナー部には、応力集中によるシートの強度低下を緩和するため、あらかじめ面取り成形 ($r=30\text{mm}$) を施し、シートはエポキシ系樹脂を用いて貼り付けた。現場での施工性は、アンカーボルトを用いない方法が一番容易で、プレートやアングルの大きさ・重さを考慮すると 1 枚ものより小分けにしたもの、さらにはアンカーボルトの取付位置が少ない方が施工性は良いといえる。

2.2 加力および計測方法

図-3 に加力装置を示す。加力は建研式加力装置を用い、軸力を 0 に保ちながら試験体に逆対称モーメントが作用するようにせん断力 Q を与えた。加力履歴は正負繰返しの静的加力で、変形角

($R = \delta / L_0$) が $R = \pm 1/400\text{rad.}$ で 1 回、 $\pm 1/200$, $\pm 1/100$, $\pm 1/50$, $\pm 1/33\text{ rad.}$ で 2 回、 $\pm 1/20\text{ rad.}$ で 1 回、その後 $+1/15\text{ rad.}$ の加力とした。また、計測は試験体の水平変位および鉛直変位を変位計で、主な位置の鉄筋およびシートの歪を歪ゲージで測定した。

3. 実験結果

3.1 破壊状況

表-5 に諸強度の計算値および実験結果一覧を示す。せん断強度 cQ_{su} は修正荒川 mean 式、曲げ強度 cQ_{mu} は HFW 指針式により算出した。また、 cQ_{su} / cQ_{mu} をせん断余裕度と定義する。

図-4 に代表的な試験体についての最終破壊状況を示す。無補強の試験体 No.11 (せん断補強筋比 $p_w=0.18\%$) は、梁端部に生じたせん断ひび割れが徐々に拡大し、耐力が低下しせん断引張破壊に至った。それと比較して、既存 RC の p_w が 0.18% の試験体を補強した No.12~No.14 および No.21~No.25 はすべて、補強することにより主筋の曲げ降伏が先行した。まず、No.12 (長プレート定着) は、プレートが梁の変形を拘束しているため最終的に梁とスラブの境界面で分離破壊を起こした。また、No.14 (短プレート定着、プレート幅 136mm) は、プレートが梁の変形を拘束せずに



No.11 無補強
No.12 長プレート定着 (梁面)
No.21 アングル定着 (梁スラブ両面)
No.22 アングル定着 (梁スラブ両面)
No.24 アングル定着 (スラブ面貫通)
No.25 短プレート定着 (梁面)

図-4 最終破壊状況

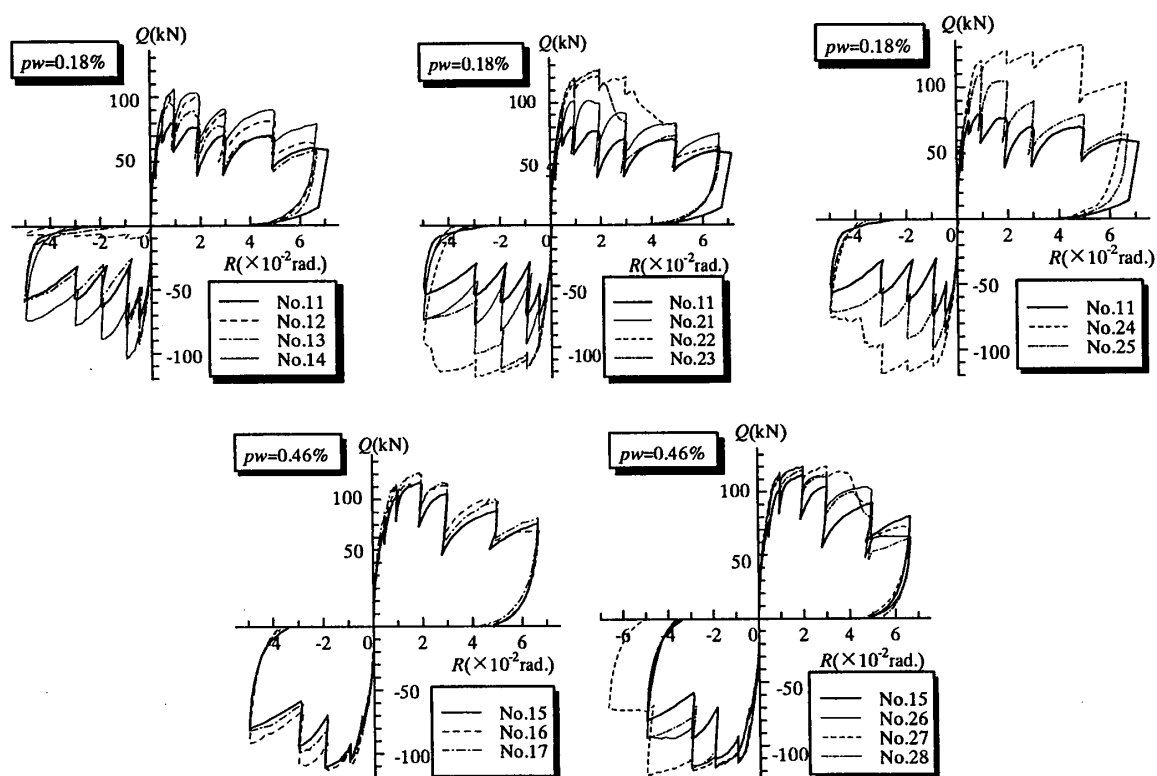
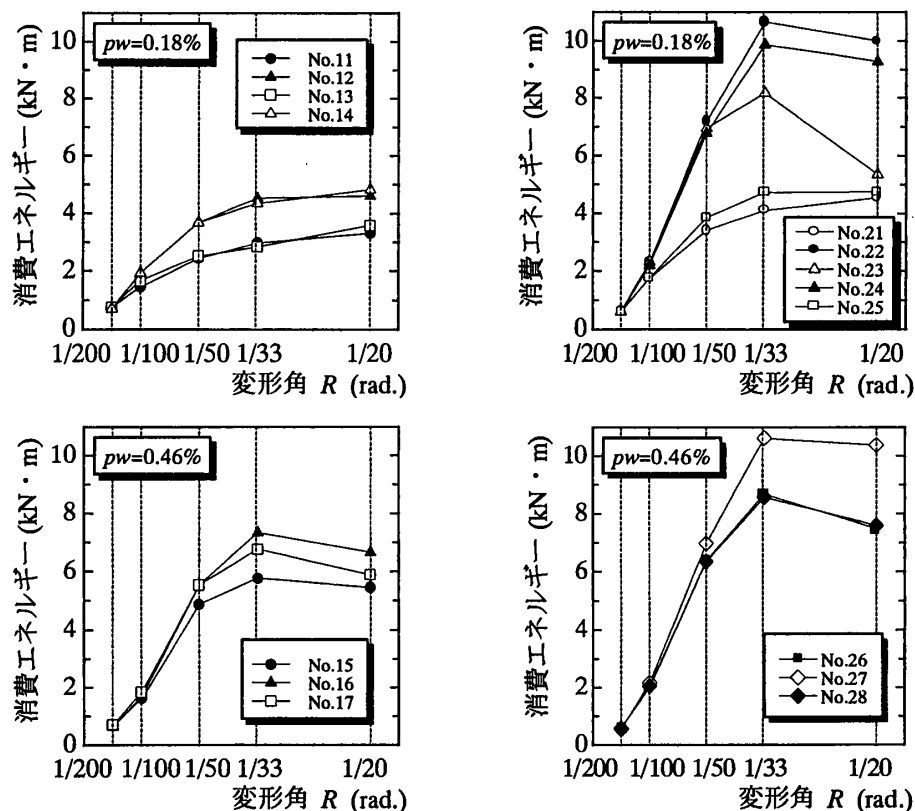


図-5 荷重変形角曲線の包絡線比較

変形に伴っており、梁端部のせん断圧縮破壊に至った。類似定着の No.25 (短プレート定着、プレート幅 68mm) は、梁とスラブの境界面での分離が進展し、最終的にアンカー部分で破壊を起こしたプレートがシートと共に梁から剥がれた。シートをスラブ下面まで定着させた No.13 は、梁とスラブのコーナー部分のシートにしわがより、シートの剥離が進展し梁とスラブの境界面が分離し、せん断引張破壊に至った。

次に、アングル (幅 65mm) を用いた試験体

(No.21~No.24) ではすべて、梁とスラブの分離破壊を防ぐことができた。まず、シート補強をせずアングルのみで補強した No.21 は、主筋が曲げ降伏した後、無補強の No.11 の破壊状況と同様せん断引張破壊に至った。シート補強をして梁・スラブ両面にアンカーを取り付けた No.22 は、 $R=1/30\text{rad.}$ でアングルがアンカー部分で破壊し、急激に耐力が低下し、その後シートが破断した。シート補強をしてスラブ面にアンカーを取り付けた No.23 も、 $R=1/47\text{rad.}$ でアングルがアンカー部

図-6 変形角 R と消費エネルギーの関係

分で破壊し、急激に耐力が低下し破壊に至った。スラブ面を貫通させてアンカーを取り付けた No.24 は、シートがコンクリートから剥離するものの、耐力は $R=1/20\text{rad.}$ まで上昇し、シート破断に至った。

また、無補強の試験体 No.15 (せん断補強筋比 $pw=0.46\%$) およびそれを補強した No.16,17 および No.28 は破壊形式に大きな違いはなく、主筋が曲げ降伏した後梁スラブ分離破壊に至った。シート補強をせずアングルのみで補強した No.26 は曲げ降伏後、梁端部でのせん断圧縮破壊に至った。シート補強をして梁・スラブ両面にアンカーを取り付けた No.27 は曲げ降伏後、シート破断し急激に耐力が低下した。

3.2 包絡線比較

図-5 にせん断補強筋比による荷重変形角曲線の包絡線比較を示す。せん断補強筋比 $pw=0.18\%$ の試験体を補強した No.12~14 および No.21~25 は、いずれも耐力の増加がみられ、その割合は 20 ~ 60%に達した。特に、No.14 (短プレート定着)

の方が No.12 (長プレート定着) より耐力が優れている。No.21 に関してはシート補強を行わなくてもアングル補強するだけで耐力が 30%上昇した。最大耐力時の変形角は、No.21~23,25 では $R=1/100 \sim 1/50\text{rad.}$ 程度であるのに対して、スラブ面を貫通させてアンカーを取り付けた No.24 では、 $R=1/20\text{rad.}$ と変形性状に大きな向上が見られた。また、せん断補強筋比 $pw=0.46\%$ の試験体を補強した各試験体 (No.16,17 および No.26~28) は、耐力の増加がみられたものの、その割合は 10%に満たなかった。

4. 実験の検討

4.1 消費エネルギー

図-6 に変形角 R と消費エネルギー (荷重変形角曲線のループ面積) の関係を示す。せん断補強筋比 $pw=0.18\%$ の無補強試験体 No.11 の消費エネルギーを基準とし、それを補強した試験体と比較すると、補強した試験体の消費エネルギーは、約 1.5~3.6 倍増加しており、靱性が改善された。特

に、シートをプレートで定着した試験体は約 1.5 倍程度の増加に対して、シートをアングルで定着した試験体は約 2.8~3.6 倍の消費エネルギーの増加を見せた。さらに、アングルはシートが閉鎖型 (No.24: スラブ貫通型) になるようにアンカーボルトを取り付けるほど、消費エネルギーは増加する。また、スラブ下面定着 No.13 の消費エネルギーは、無補強の試験体 No.11 と同等で補強効果は得られなかった。

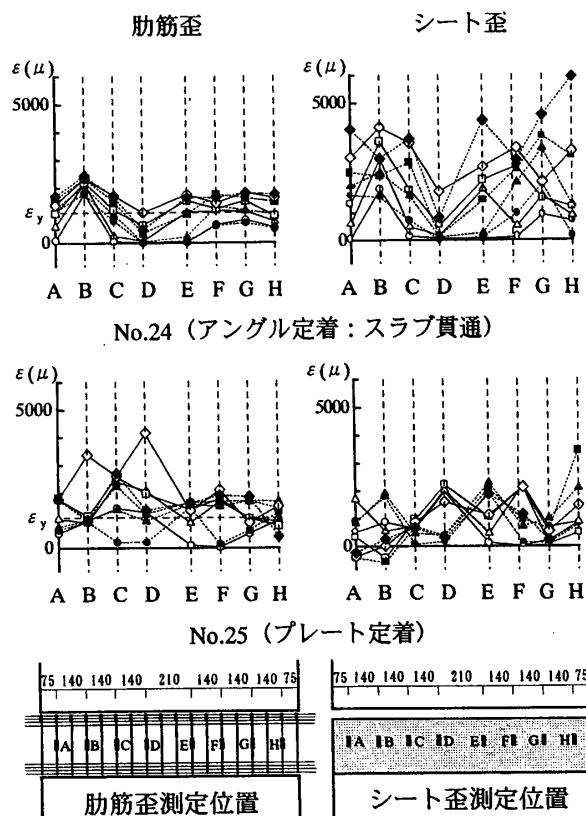
一方、せん断補強筋比 $p_w=0.46\%$ の無補強試験体 No.15 の消費エネルギーを基準とし、それを補強した試験体と比較すると、補強した試験体の消費エネルギーは、増加するものの約 1.2~1.8 倍程度で、アングルを用いて補強した試験体でも、消費エネルギーの増加は $p_w=0.18\%$ を補強した試験体ほど大きく表れていなかった。

4.2 歪分布

図-7 に代表的な試験体の、各変形角ピーク時における肋筋およびシートの歪分布を示す。プレートおよびアングルでシート端部を定着させた試験体のシートの歪はすべて、3000~5000 μ の歪が発生しており、シートの補強効果が表れていた。さらに、アングル定着の方がプレート定着よりもシートの歪が大きく出ている。また、シート端部をスラブ下面定着させた試験体は、シートの歪が表れておらず補強効果はあまり期待できなかった。

5. まとめ

- (1) せん断補強筋比が $p_w=0.18\%$ 程度の試験体 (せん断破壊先行型) を補強することによって、最大耐力は約 20~60% 増加し、また消費エネルギーも約 1.5~3.6 倍程度増加し、シートの補強効果が得られ、靱性能に影響を及ぼした。
- (2) せん断補強筋比が $p_w=0.46\%$ 程度である試験体 (曲げ降伏先行型) を補強することによっても、消費エネルギーは約 1.2~1.8 倍程度の増加であった。
- (3) シート端部の定着方法は、小分けした短プレート定着を用いた方が梁の変形を拘束しないため、



—○—: $R=1/200$, —△—: $R=1/100$, —□—: $R=1/50$, —◇—: $R=1/33$

白抜き: 正加力時, 黒抜き: 負加力時

図-7 肋筋およびシートの歪分布

1 枚板の長プレート定着より靱性能が優れている。また、スラブ下面定着は効果的ではなかった。

(4) シート端部にはプレートよりもアングルを用いて定着させた方が、梁とスラブが分離破壊しないためさらに靱性能は向上する。また、梁スラブ両面アンカーまたはスラブ貫通アンカーが有効であった。

参考文献

- 1) 荒木伸宏ほか: シート状連続繊維によりせん断補強された RC 柱の構造性能に関する実験的研究 (その 1), 日本建築学会大会梗概集, C-2 構造Ⅳ, pp.283-284, 1996.9