

論文

[2125] 逆T形埋設型枠を用いたT形梁の曲げせん断実験

正会員○岡本公夫 (鹿島技術研究所)

渡辺茂雄 (鹿島技術研究所)

正会員 張 愛暉 (鹿島技術研究所)

正会員 田中恭哉 (富士ピー・エス)

1. はじめに

建設現場においては、人手不足への対応、工期短縮を目指した施工の合理化のために複合化工法が大幅に採用されている。床スラブ工法にはハーフPCa板が多く使われ、既成のものもあるが、新たに逆T形埋設型枠（以下、FR板と記す）を用いた床スラブ（以下、FR床スラブと記す）工法を開発したので、その構造性能について報告する。

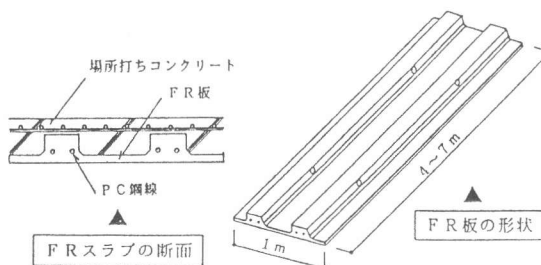


図-1 FR床スラブの概念図

FR床スラブ工法の概念を図-1に示す。FR板はリブ付きのプレキャスト・プレストレスト・コンクリート板であり、リブ部に配置されたPC鋼材により所定のプレストレスを導入したものである。本工法は鉄筋コンクリート (RC) 造、プレキャスト鉄筋コンクリート (PCa) 造および鉄骨(S) 造のいずれの架構にも採用可能であり、スパン4m~7mの床スラブに対しても適用できる。設計面での特徴は、小梁がなくてもクリープ撓みが通常のRC床スラブより少なく、施工面では、下面がフラットで直天井仕上げが可能となり、

支保工の削減・工期短縮を図ることができる。本研究では、既にFR板およびトッピングコンクリートを打設した床スラブ単体に関して構造的安全性の確認を行っている¹⁾²⁾。

本実験は、RC梁、PCa梁およびS梁とFR床スラブが一体として構成されるT型梁の合成効果を確認することを目的に、地震力を対象とした大野式加力方法による曲げ・せん断実験を行い、その構造安全性を検討した。

2. 試験体

試験体の一覧を表-1に示す。試験体の形状・寸法および配筋を図-2に示す。使用材料の試験結果を表-2および表-3に示す。試験体の設定は、対象建物をスパン約6mの一般的なRC造、PCa造およびS造を想定し、縮尺を約1/2とした。試験体は大野式加力方法による逆対称

表-1 試験体の一覧

試験体記号	断面形状	梁の種類	スラブの種類	主筋比 P t (%)	剪断補強筋比 P w (%)
BR-0		RC	—	1.28	0.26
TR-C		RC	RC	1.28	0.26
TR-F		RC	FR	1.28	0.26
TP3-F		PCa	FR	1.28	0.26
TP6-F		PCa	FR	1.28	0.52
TS-C		S	RC	—	—
TS-F		S	FR	—	—

載荷用の形状とし、スラブの幅は梁幅の5倍として設定した。また、試験体両側の加力梁は梁せいを60cmとし補強した。試験体は、梁の種類をRC梁、PCa梁およびS梁の3種にFR床スラブを組合わせたT型梁試験体4体(TR-F, TP3-F, TP6-F, TS-F)と、比較用の試験体としてRC梁単体試験体1体(BR-0)、さらにRC造のT型梁試験体1体(TR-C)およびS梁を用いたT型梁試験体せん断1体(TS-C)の合計7体とした。PCa梁を用いたT型梁試験体(TP6-F)は、補強筋量を通常の2倍に配筋したのもも製作した。FR板は梁間方向と直交する方向で配置し、掛り代はいずれの試験体も1cmとした。これはFR板が梁間方向に不連続板となる方が連続板となる梁間方向より構造的に弱いものと判断したためである。本実験ではFR板のPC鋼線は梁の長さ方向と直交する方向になり、影響は小さいものと判断して配置しなかった。

S梁の試験体は、S梁に頭付きスタッド(13φ, 長さ60mm)を合成梁の設計に従って⁶⁾、梁の長さ方向に15cm間隔で2列配置した。スラブはRC造のT型梁試験体と同様とした。

コンクリートは設計基準強度が $F_c=240\text{kgf/cm}^2$ の普通コンクリートとし、FR板は平板部に直径2.6mmのワイヤメッシュ筋(10cm間隔)を配筋し、目標強度 500kgf/cm^2 のモルタルを用いたPCa板である。試験体の製作順序は、最初にFR板とPCa梁を同時に製作し、2週間養生した後、RC梁および床スラブのコンクリート打設した。実験は試験体を製作後25~78日の間で行った。

3. 実験方法

加力装置を図-3に示す。加力方法は、油圧ジャッキ4台(P1, P2, P3, P4)を用いて逆対称に加力する大野式加力方法による曲げ・せん断力を正負繰返し作用させた。荷重は2台のジャッキ荷重の平均値を荷重(P)とした。また、試験体の自重たわみをキャンセルするために、加力装

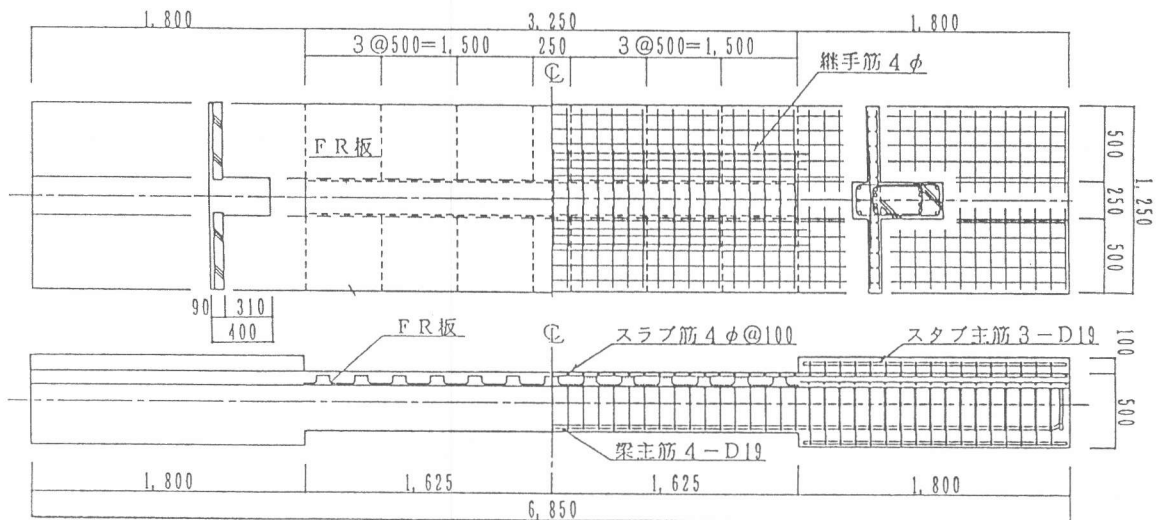


図-2 試験体の形状寸法および配筋図

表-2 コンクリートの強度試験結果

種類	材令(日)	ヤング係数(kgf/cm ²)	圧縮強度(kgf/cm ²)	割裂強度(kgf/cm ²)	最大ひずみ(μ)
現場打ち	25~74	1.97×10^5	225	21.1	2300
PCa梁	78~86	2.55×10^5	328	30.6	2360
FR板	69~88	2.75×10^5	574	35.0	2260

表-3 鉄筋および鉄骨の試験結果

種類	ヤング係数(kgf/cm ²)	降伏強度(kgf/cm ²)	降伏ひずみ(μ)	引張強度(kgf/cm ²)	伸び(%)
D19	1.94×10^6	3870	1990	5770	19
D6	1.89×10^6	3960	2090	5090	17
φ4	2.00×10^6	5500 ¹⁾	2750	5500	—
鉄骨梁	2.13×10^6	3320	1550	4740	28

1) φ4には明瞭な降伏点がないので0.2%のオフセット法を採用した。

置に取付けた滑車を介して試験体重量の約1/4のカウンターウェイトを吊り下げた。加力サイクルは、正負の漸増繰返し载荷とし、曲げひびわれ、短期設計荷重および部材角 $R=1/200\text{rad}$ 、までを各1回、 $R=1/100\text{rad}$ 、で2回、 $R=1/50\text{rad}$ 、で1回繰返した後、破壊まで加力する合計7回とした。

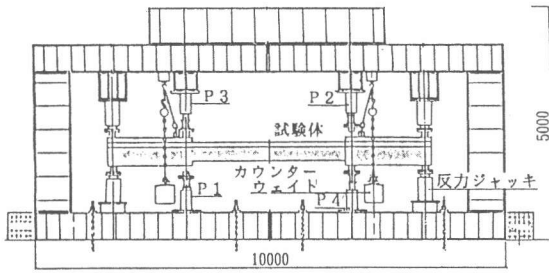


図-3 加力装置

荷重は、容量50tfのロードセルを用いて測定した。変位の測定位置を図-4に示す。変位は、試験体のたわみ(VL, VR)、梁端部の拔出し(RL, RR)を全試験体について測定し、FR板を用いた試験体は、梁とスラブの剥離とずれ(ss)、およびFR板と場所打ちコンクリートの剥離とずれ(FS, FV)を電気式変位計を用いて測定した。梁主筋、せん断補強筋、スラブ筋および梁鉄骨には、主要な位置にひずみゲージを貼付け、鉄筋および鉄骨のひずみを測定した。コンクリートのひび割れは目視観察とし、ひびわれ幅をクラックゲージで測定した。

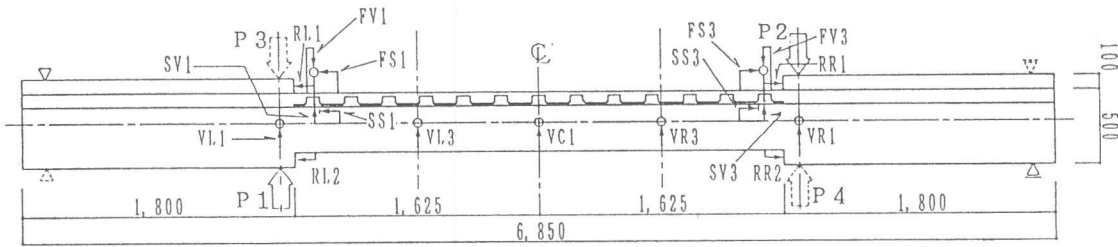


図-4 変形測定方法

4. 実験結果および考察

1) 諸耐力の実験値と計算値の比較

試験体の代表的な荷重-変形曲線を図-5に、RC造梁を用いたRCスラブとFR床スラブの最終ひびわれ状況の比較を図-6に示す。諸耐力の実験値と計算値を表-4に示す。

曲げひび割れ発生耐力の実験値は $P=3.0\text{tf}\sim 4.7\text{tf}$ の範囲にあり、試験体ごとの顕著な差は見られなかった。また、実験値を日本建築学会のRC規準³⁾に示されている略算式の計算値と比較すると、RC梁試験体(BR-0)およびRC造梁を用いたT型梁試験体(TR-C, TR-F)の実験値は、計算値の1.11倍~1.74倍で実験値の方が高く、PCa梁を用いたT型梁試験体(TP3-F, TP6-F)では0.92倍~0.95倍で実験値と計算値が良い一致を示した。S梁を用いたT型梁試験体(TS-C, TS-F)はいずれも計算値の0.73倍で実験値が低い結果となった。曲げ降伏耐力の実験値は、日本

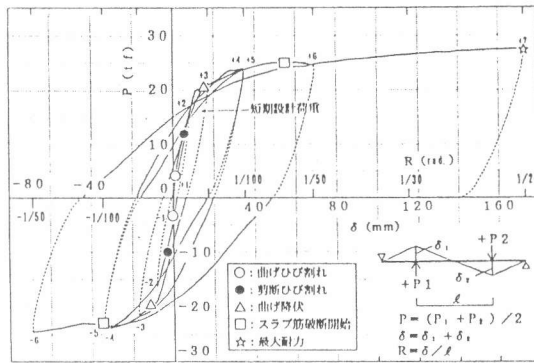


図-5 荷重-変形曲線 (TP6-F 試験体)

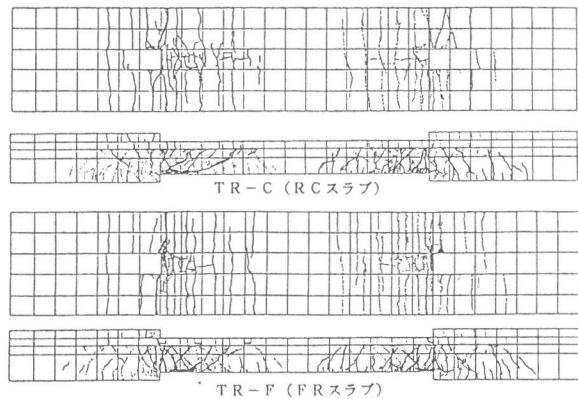


図-6 最終ひびわれ発生状況の比較

表-4 諸耐力の実験値と計算値の比較

試験体記号	BR-0	TR-C	TR-F	TP3-F	TP6-F	TS-C	TS-F	
初期剛性 K_e (tf/cm)	27.8	67.6	69.5	49.0	49.2	25.0	17.3	
曲げひび割れ発生	実験値	3.5	3.0	4.7	3.5	3.6	4.1	4.1
	計算値 1 ¹⁾	2.2	2.7	2.7	3.8	3.8	5.6	5.6
曲げ降伏	実験値	19.5	21.3	20.1	19.8	20.6	23.3	23.0
	計算値 2 ²⁾	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	20.9	20.9
最大耐力	実験値	19.7	26.9	25.4	26.1	(27.5)	(31.1)	(32.1)
	計算値 3 ³⁾	26.7	26.7	26.7	25.8	25.8	30.7	30.7
	計算値 4 ⁴⁾	25.9	26.1	26.1	29.3	35.5	63.0	63.0
	計算値 5 ⁵⁾	27.5	34.4	34.4	42.9	53.9	—	—
	計算値 6 ⁶⁾	19.8	24.7	24.7	30.1	34.8	—	—
破壊モード	主筋曲げ降伏後の付着割裂破壊	主筋曲げ降伏後スラブ筋破断、主筋座屈	主筋曲げ降伏後スラブ筋破断、主筋座屈	主筋曲げ降伏後スラブ筋破断、主筋座屈	主筋曲げ降伏後スラブ筋破断	梁フランジ曲げ降伏後スラブ筋破断	梁フランジ曲げ降伏後スラブ筋破断	

1) 曲げひび割れ発生耐力: $M_c = 1.8\sqrt{F_c} \cdot Z_e$, $Q_c = M_c/a$, $P = Q_c/0.473$

2) 曲げ降伏耐力: $M_y = s_a t \cdot s \sigma_y \cdot j$, $Q_y = M_y/a$, $P = Q_y/0.473$

3) e関数法による最大耐力

4) せん断終局耐力: $\tau_{su} = k_u \cdot k_p \cdot (180 + F_c) \frac{0.12}{M/(Qd) + 0.12} + 2.7\sqrt{P_w \cdot \sigma_{wy}}$, $Q_{su} = \tau_{su} \cdot b \cdot j$ (RC造梁)
 $Q_{su} = F/\sqrt{3} \cdot t_1 \cdot h$ (S造梁)

5) 付着割裂破壊耐力(精算式): 参考資料 5) による。 $Q_{bu} = \tau_{bu} / \tau_f \cdot Q_y$, $P = Q_{bu} / 0.473$

6) 付着割裂破壊耐力(略算式): 同上

() は実験時最高荷重

建築学会のRC規準に示されている主筋のみを有効とした略算式より約10%高かった。

最大耐力の実験値は、BR-0がP=19.7tfで付着割裂破壊耐力の略算式⁵⁾と一致し、破壊モードも一致した。また、TR-CおよびTR-Fの最大耐力は、e関数法¹⁾を用いた曲げ耐力と荒川 mean 式³⁾によるせん断耐力および付着割裂破壊耐力の略算式による計算値のいずれとも一致したが、破壊モードはいずれもほぼ同様に曲げ破壊であった。BR-0の付着破壊は、試験体が1/2縮尺模型であり、コンクリートのかぶり厚さが20mmと小さく、また、実験時のコンクリート強度が、ほぼ設計基準強度に等しかったことにより生じたものと考えられる。一方、T型梁では床スラブコンクリートが梁上端を拘束しているため曲げ破壊を示した。PCa梁を用いた試験体は、せん断耐力および付着割裂破壊耐力の計算値が曲げ耐力よりも高く、実験結果は曲げ耐力と一致した。TP3-Fの破壊モードは、主筋が曲げ降伏した後スラブ筋が破断し、主筋の座屈を伴った曲げ破壊モードであったが、TP6-Fは、せん断補強筋が主筋の座屈を拘束し、曲げ破壊モードであった。

一方、TS-CおよびTS-Fは、S梁のせん断耐力の計算値が曲げ耐力計算値の約2.2倍の耐力を有しており、実験値は曲げ耐力と一致し、せん断に対しては十分安全なものであった。S梁を用いたTS-CおよびTS-Fの破壊モードは、S梁のフランジが降伏した後スラブ筋が破断し、S梁の塑性変形が支配的となる曲げ破壊モードであった。

2) 荷重-変形曲線

各試験体の荷重-変形曲線包絡線の比較を図

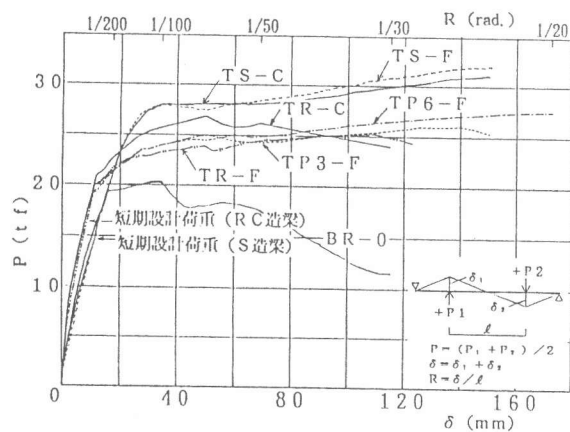


図-7 荷重-変形包絡線の比較

－ 7 に示す。

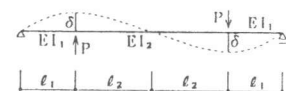
図－ 7 より、RC造梁を用いたT 型梁試験体の剛性および耐力は、RC梁試験体 (BR-0) の剛性および耐力より高くスラブの効果が確認された。また、場所打ちRC梁を用いたT 型梁試験体のTR-CとTR-Fの剛性は、曲げ降伏に至るまで差がなかった。なお、FR板を用いたTR-Fの最大耐力はTR-Cより6%程度低くなったが、最大耐力時の変形はTR-Fの方が大きい結果となった。さらに、PCa 梁を用いたTP3-F とTP6-F の剛性および耐力は、TR-Fとほぼ同じであるが、変形性能はTP3-F およびTP6-F の方が大きかった。一方、S 梁を用いた試験体では、低荷重域においてFR板を用いたTS-Fの剛性がTS-Cより低くなっているが、その後の剛性および耐力に差はなく、ほぼ同じ性状を示した。

表－ 5 諸剛性の実験値と計算値の比較

試験体	初期剛性			短期設計荷重時の割線剛性		
	実験値	計算値 ¹⁾	実/計	実験値	計算値 ²⁾	実/計
	Kc (tf/cm)	K _K (tf/cm)	Kc/K _K	K _a (tf/cm)	Kc (tf/cm)	K _a /Kc
BR-0	27.8	37.9	0.73	13.7	13.7	1.00
TR-C	67.6	58.4	1.25	21.6	19.7	1.10
TR-F	69.5	58.4	1.29	19.6	19.7	1.00
TP3-F	49.0	68.8	0.77	19.5	20.7	0.94
TP6-F	49.2	68.8	0.77	19.7	20.7	0.95
TS-C	25.0	25.6	1.21	13.5	—	—
TS-F	17.3	25.6	0.84	12.9	—	—

$$1) K = -\frac{3E(\ell_1 + \ell_2)}{2\ell_1^2 \ell_2^2} \cdot \left(\frac{\ell_1^3}{3} + \frac{\ell_2^3}{3} \right)$$

2) 日本建築学会のRC規準の剛性低下率を用いた弾性計算値



3) 初期剛性および短期設計荷重時の割線剛性の比較

初期剛性および短期設計荷重時の割線剛性の実験値と計算値の比較を表－ 5 に示す。

BR-0の初期剛性は、弾性剛性計算値の約70% であり、若干低めの値となった。FR床スラブを用いたTR-Fの実験値は、RCスラブを用いたTR-Cの初期剛性と一致し、その剛性は日本建築学会のRC規準によるスラブの有効幅を対象とした弾性剛性計算値を上回り、スラブの合成効果が確認できた。しかしながら、PCa 梁を用いたTP3-F およびTP6-F の初期剛性は、RC規準によるスラブの有効幅を対象とした弾性剛性計算値を下回った。これは、加力する前に発生したスラブのひび割れの影響と考えられる。また、S 梁を用いたT 型梁試験体 (TS-C, TS-F) の初期剛性についても同様の傾向が見られた。

短期設計荷重時の割線剛性と初期剛性を比較すると、RC造梁を用いたT 型梁試験体は、初期剛性実験値の30%~50% であり、S 梁を用いたT 型梁試験体では55%~75% であったが、試験体ごとの差異は小さかった。また、ひび割れ発生状況によっても明確な差異はなかった。さらに、RC造梁を用いたT 型梁試験体の割線剛性を日本建築学会のRC規準に示されている剛性低下率 α_y を用いた計算値と比較した結果、実験値は計算値の0.95倍~1.10倍と良い対応を示し、短期設計荷重時の剛性も α_y を用いて評価できることがわかった。このことより、FR床スラブは短期設計荷重レベルにおいて通常のRCスラブと同等の性能であることが確認された。

4) FR床スラブの一体性

梁主筋のひずみ分布の比較を図－ 8 に、試験体ごとの部材角とエネルギー吸収能力の比較を図－ 9 に示す。

RC梁T 形試験体 (TR-C, TR-F) PCa 梁T 形試験体 (TP3-F) の梁主筋ひずみ分布を比較すると、中立軸位置は短期設計荷重時 (1~3 サイクル) までいずれの試験体も移動が少なくほぼ同じ位置にあり、FR床スラブ試験体はRC床スラブ試験体と同じ挙動を示している。

PCa 梁とFR床スラブのずれ発生は主筋降伏後に発生しており、短期設計荷重を越えても一体性

は十分確保されていた。FR板と場所打ちコンクリートの一体性が損なわれるのは、スラブ筋が破断する時であり、ほぼ終局耐力まで一体性が保たれていた。

エネルギー吸収はRC梁試験体 (BR-0) を除き、いずれの試験体もほぼ同じ性状を示しており、FR床スラブを用いたT型梁は通常のRCスラブのT型梁と同等の性能を有しており、スラブの合成効果が確認された。

5. むすび

以上の結果より、FR板を用いた合成スラブ工法は、構造的に通常のRCスラブと同等以上の構造性能を有しており、RC梁およびPCa梁、さらにはS梁との合成床スラブとして設計可能と判断された。施工合理化を目標にFR床スラブ工法の開発研究を進め、1991年10月、日本建築センターの一般構造評価を得ることができ、現在、施工実績の蓄積に努めている。

本研究を進めるに当たり、ご指導戴いた小森長崎大教授殿、岩原熊工大助教授殿および芳村都立大助教授殿に感謝の意を表す。

参考資料

- 1) 田中恭哉, 小森清司, 永藤政敏, ほか: 『逆T型埋設型枠にプレストレスを導入した合成床スラブの耐力とひびわれ』, コンクリート工学年次論文報告集, 13-2, 1991
- 2) 山下正吾, 岩原昭次, 小森清司: 『逆T型PC板埋設型枠を用いた合成床スラブの長期性状』, コンクリート工学年次論文報告集, 13-2, 1991
- 3) 日本建築学会: 『鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説』, 1988
- 4) 武藤清: 『耐震設計シリーズ2 鉄筋コンクリート構造物の塑性設計』, 丸善株式会社, 1974
- 5) 日本建築学会: 『鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針 (案)・同解説』, 1988
- 6) 日本建築学会: 『プレキャスト鉄筋コンクリート構造の設計と施工』, 1986

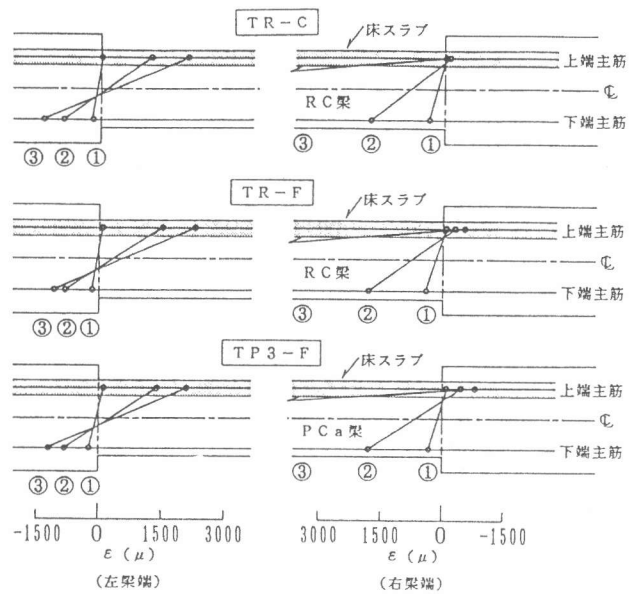


図-8 梁主筋のひずみ分布の比較

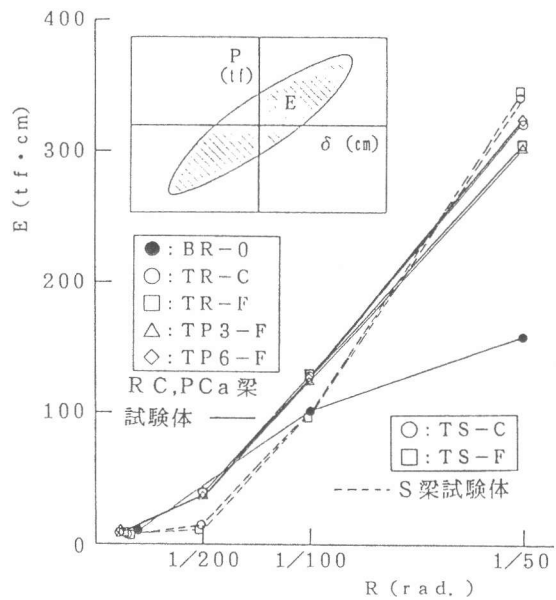


図-9 部材角(R)と吸収エネルギー(E)