

論文

[2087] 鉄道ラーメン式高架橋における柱・はり接合部が部材じん性に及ぼす影響に関する実験的研究

正会員 ○ 渡辺忠朋 (鉄道総合技術研究所)  
 正会員 松本信之 (同上)  
 正会員 三島徹也 (前田建設技術研究所)

1. はじめに

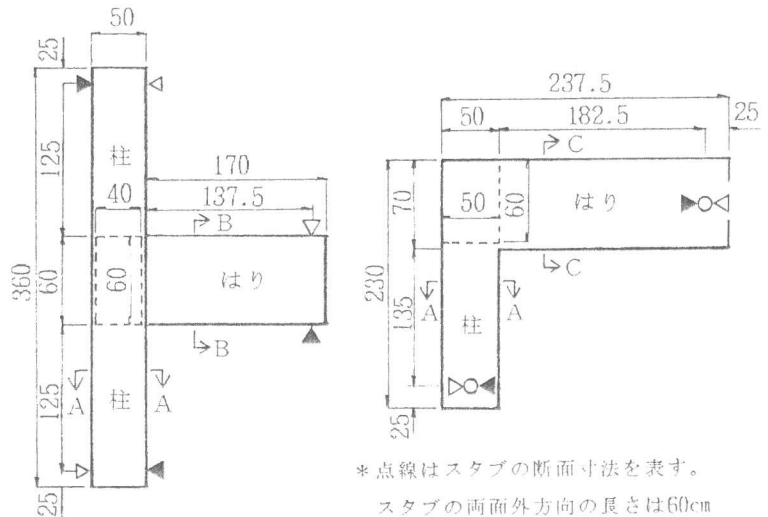
大地震に対するRCラーメン高架橋の耐震設計法として、柱・はり部材のじん性（一般に降伏変位の4倍程度の変形まで耐荷力を保持することを期待している〔1〕）を利用する設計法を適用する場合、部材接合部（以下、接合部）は相対的に弱点となる可能性があり、接合部周辺の部材のじん性の発揮にも影響を与えることが懸念される。

このため高架橋の構成部材に期待するじん性を十分に発揮させるために必要な接合部の補強方法について検討することを目的として、鉄道高架橋の接合部および周辺部材をモデルとした供試体を用いて交番載荷実験を行ったので、その結果の概要および接合部の補強方法が部材のじん性の発揮に及ぼす影響についての考察を示す。

2. 実験方法の概要

2.1 供試体形状および諸元

供試体形状および諸元を図-1および表-1に示す。T型供試体3体、L型供試体3体の合計6体を用いて実験を行った。実験のパラメータは接合部の補強方法とし、供試体No.1, 4には柱のせん断補強鉄筋量と等量のせん断補強鉄筋量、供試体No.2, 5には柱のせん断補強鉄筋量の2倍のせん断補強鉄筋量をそれぞれ接合部内に配置



\*点線はスタブの断面寸法を表す。  
 スタブの両面外方向の長さは60cm

図-1 供試体形状

した。また、供試体No.3, 6は供試体No.2, 4の接合部の面外面にスタブを設けたものである。

表-1 供試体諸元

No.	形状	柱				梁				接合部のAw	スタブの有無	f'c	
		B	H	As	Aw	B	H	As	Aw				
1	T			D13					D13etc	10cm	無	251	
2	T	50	50	D19-18	etc	45	60	D25-16	etc	D13etc	5cm	無	271
3	T				10cm				7.5cm	D13etc	5cm	有	260
4	L			D13					D13	D13etc	10cm	無	335
5	L	50	50	D22-18	etc	45	70	D25-14	etc	D13etc	5cm	無	339
6	L				10cm				10cm	D13etc	5cm	有	300

注) B: 部材幅(cm) H: 部材断面高さ(cm) As: 軸方向鉄筋量  
 Aw: せん断補強鉄筋量 f'c: コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

表-2 鉄筋の強度

鉄筋径	強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	
	降伏強度	引張強度
D13	4260 (4230)	6000 (5960)
D19	4340 (3360)	5800 (5160)
D22	4040 (4120)	5350 (6030)
D25	4070 (3780)	5520 (5270)

( ) 内は、供試体No.3, 6の場合

このスタブは実構造物での接合部に直交する部材を考慮したものである。

柱・はりおよび接合部の配筋を図-2に示す。軸方向引張鉄筋の定着は直角折曲げ定着とし、曲げ内半径は  $2.8\phi$  ( $\phi$ : 鉄筋径)、余長は40cmとした。

柱に対する軸力は載荷機構により導入されるもの以外は作用させていない。

実験に用いた鉄筋の強度を表-2に示す。

## 2. 2 載荷および測定方法

載荷は静的正負交番載荷とした。載荷は、ひびわれ発生荷重を確認後、降伏変位  $\pm \delta_y$ 、 $\pm 2\delta_y$ 、 $\pm 3\delta_y$ 、 $\dots$  のステップで変位制御により行い、同一ステップでの繰返し回数は3回とした。変位は、架構中最初に曲げ降伏が生じる部材 (T型供試体でははり部材、L型供試体では柱部材) に着目して制御した。各変位ステップの最大荷重が降伏荷重の50%を下回る時点を実験終了時とした。L型供試体については、図-3に示すトラス構造 (試験体、加力ビーム、供試体固定ビームからなる) を応用した加力装置を用いた。

接合部のせん断変形角および部材軸方向鉄筋の抜け出しによる回転角は、供試体内に埋込んだ測定ピンの変位量から図-4に示す方法により求めた。

## 3. 実験結果の概要および考察

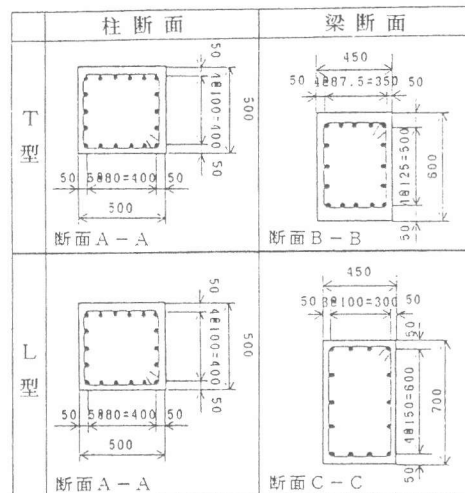
### 3. 1 ひびわれ状況

ひびわれ状況の例を図-5に示す。

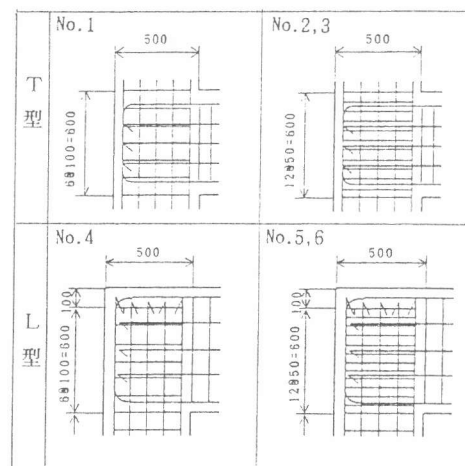
#### (1) T型供試体

供試体No. 1, 2の接合部には、双方とも  $1\delta_y$  時に対角線状にひびわれが発生した。変位の増大とともに劣化が進み、両者ともかぶりコンクリートの剥落が生じたが、せん断補強鉄筋量の少ない供試体No. 1の方が劣化の進行が早い傾向がみられた。しかし、実験終了時の両者のひびわれ状況には大差はなかった。

供試体No. 3は、スタブを有しているため接合部内のひびわれの観察はできなかったが、スタブに大きなねじれ



(a) 部材の配筋



(b) 接合部の配筋

図-2 配筋状況

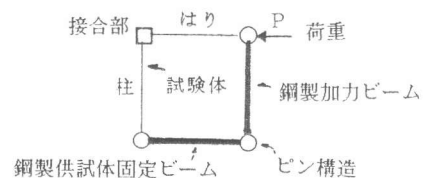


図-3 L型供試体載荷装置モデル図

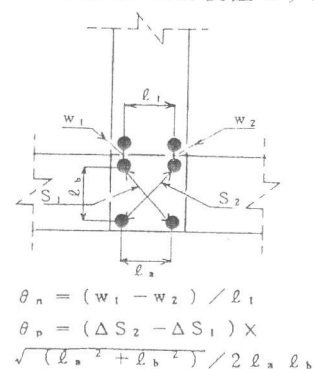


図-4 変形の測定方法

ひびわれが生じているのがみられた。

(2) L型供試体

供試体No. 4, 5の接合部は、T型供試体と同様に双方とも $1\delta_y$ 時に対角線状にひびわれが発生した。L型供試体の接合部の劣化は柱側に集中し、変位の増大とともにかぶりコンクリートの剥落等が生じて荷重も低下した。なお、正方向載荷(+方向)時は、比較的早い段階に柱の圧壊が観察されたが、負方向載荷(-方向)時は、接合部は $4\delta_y$ 載荷時までは比較的健全な状態であり、載荷方向による劣化性状の違いが生じた。供試体No. 6は、供試体No. 3と同様にスタブに大きなねじれひびわれが生じていた。

3. 2 架構の強度と変形

各供試体の降伏荷重時および最大荷重時の荷重と変位、接合部のせん断変形角および降伏荷重を保持する限界変位と降伏変位の比として表されるじん性率を表-3に示す。ただし、ここでいう荷重と

変位は、T型供試体は載荷荷重とはり先端の変位(荷重載荷点変位)、L型供試体は載荷荷重と柱先端変位(支持点と接合部中心点との相対変位)にそれぞれ着目して整理したものである。

降伏荷重は多少のばらつきはあるもののT型供試体 (No.1,2,3), L型供試体 (No.4,5,6)それぞれではほぼ同程度であった。

表-3 実験結果

(1)荷重と変位の関係

供試体の荷重および変位を、降伏荷重 $P_y$  および降伏変位 $\delta_y$  でそれぞれ除して無次元化した荷重-変位曲線の包絡線を図-6に示す。T型、L型供試体ともに接合部内のせん断補強鉄筋量の増加により最大荷重およびじん性が向上した。また、スタブ付の供試体については、L型供試体の負方向載荷を除き、せん断補強鉄筋量が同量である供試体よりもじん性が向上した。

ひびわれ発生状況などから

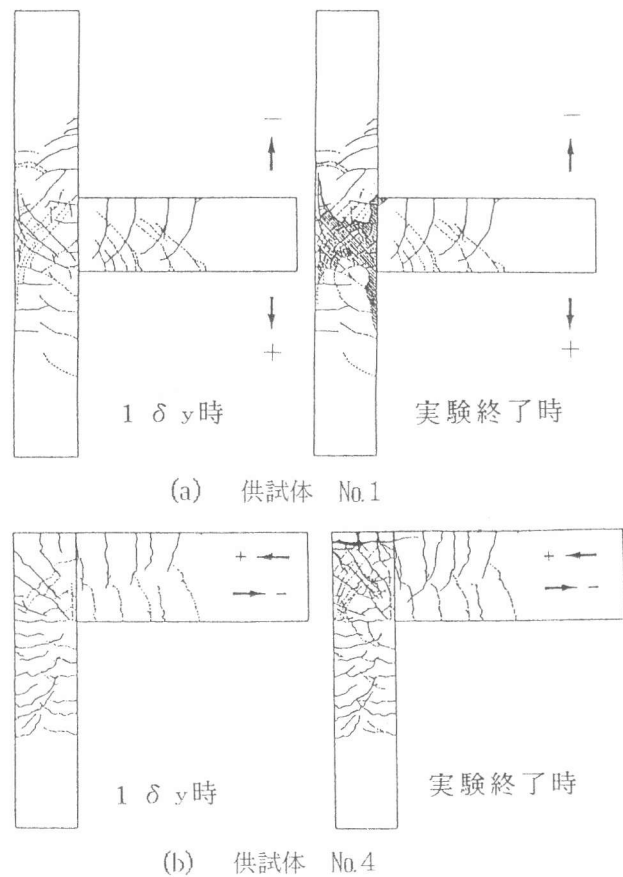


図-5 ひびわれ状況の例

供試体No.		$P_y$	$\delta_y$	$\theta_y$	変位	$P_{max}$	$\delta_{pmax}$	$\theta_{pmax}$	$\mu$
1	+	41.6	19.02	39.5	$1\sigma_y$	---	---	---	2.0(1.9)
	-	-41.9	-22.50	-42.1	$-1\sigma_y$	---	---	---	1.0(1.0)
2	+	42.8	16.54	33.1	$2\sigma_y$	43.9	31.35	84.3	3.5(4.2)
	-	-41.9	-16.37	-37.2	$-2\sigma_y$	-45.9	-32.25	-109.8	2.3(---)
3	+	46.8	16.64	4.8	$2\sigma_y$	54.8	33.47	11.5	5.0(5.2)
	-	-44.7	-16.80	-1.1	$-3\sigma_y$	-52.9	-50.69	-6.9	7.0(5.9)
4	+	35.9	11.90	17.7	$2\sigma_y$	33.2	29.67	26.0	2.5(2.8)
	-	-24.9	-10.85	-9.3	$-2\sigma_y$	-23.9	-23.39	-62.6	3.4(---)
5	+	34.9	10.44	17.5	$2\sigma_y$	42.9	30.76	29.7	5.5(6.0)
	-	-25.0	-12.11	-8.1	$-3\sigma_y$	-31.1	-39.11	-84.5	5.7(---)
6	+	35.8	14.39	0.4	$3\sigma_y$	42.7	42.21	8.9	4.7(4.5)
	-	-25.9	-16.27	-2.8	$-3\sigma_y$	-33.2	-48.78	-8.2	5.6(---)

$P_y$   $P_{max}$  : 降伏荷重及び最大荷重 (ton)

$\delta_y$   $\delta_{pmax}$  : 降伏荷重時及び最大荷重時の変位 (mm)

$\theta_y$   $\theta_{pmax}$  : 降伏荷重時及び最大荷重時の接合部のせん断変形角 ( $\times 10^{-4}$  rad)

$\mu$  : じん性率 (但し ( ) 内は部材自身のじん性率、(---) はせん断変形角測定不能のため部材自身のじん性率を算定不能であることを示す。)

みて、いずれの供試体においても最大荷重を与える主要因は接合部の劣化によるものと考えられる。(2)接合部のせん断強度およびせん断剛性

接合部のせん断強度とせん断補強鉄筋比の関係を図-7に示す。ここで接合部のせん断強度は、最大荷重時のせん断応力度とした。せん断強度の増加に対するせん断補強鉄筋量およびスタブの効果は、L型供試体よりもT型供試体において顕著となった。

接合部のせん断変形角とせん断応力度の包絡線を図-8に示す。スタブ無しの供試体では、いずれも $1\delta_y$ 以降にせん断変形角が大きく増加して、せん断剛性(せん断応力度とせん断変形角の比 $(\tau_p/\theta_p)$ )で表される剛性が低下した。一方、スタブ付の供試体では $2\delta_y$ 時にはまだせん断変形角が小さく、大きな剛性が保持されていた。

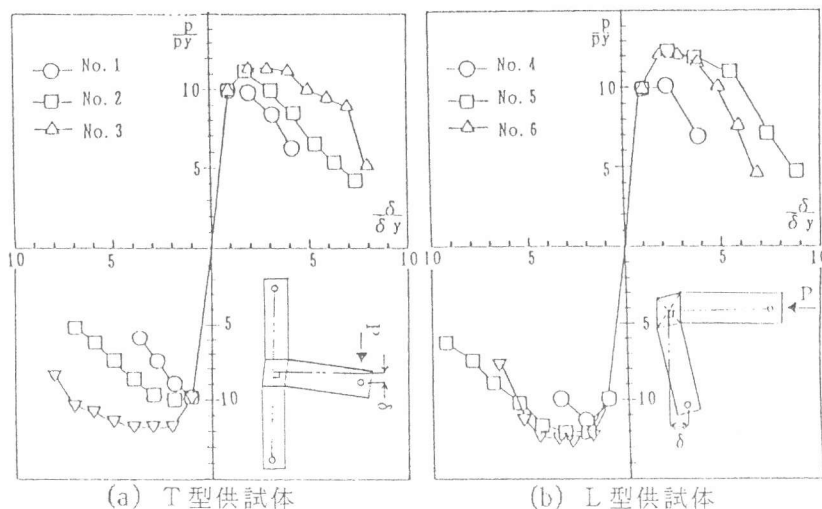


図-6 荷重-変位の包絡線

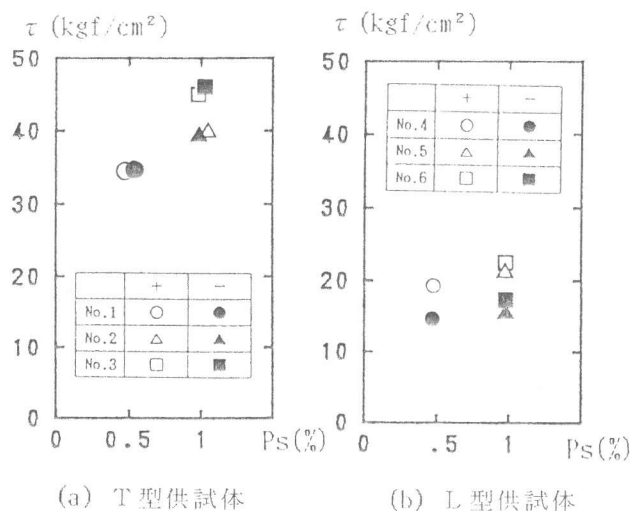


図-7 せん断補強鉄筋比とせん断強度の関係

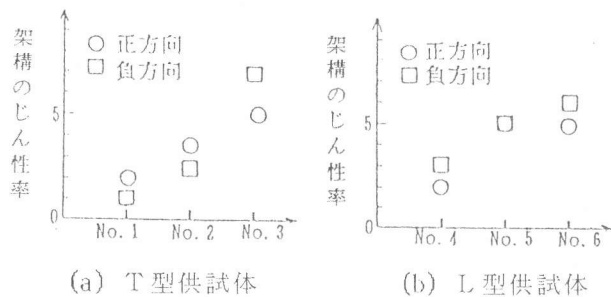
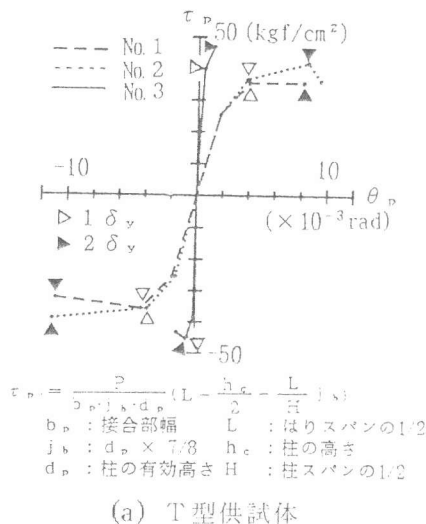
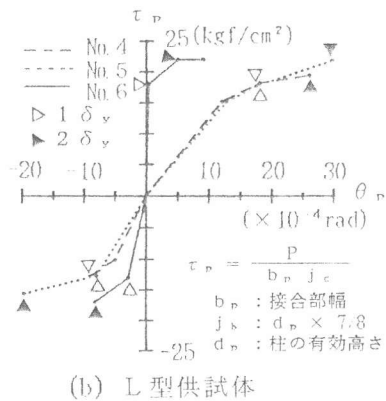


図-9 補強方法と架構のじん性率の関係



(a) T型供試体



(b) L型供試体

図-8 せん断変形角とせん断応力度の包絡線

### (3) 架構のじん性

供試体の種類と架構のじん性率の関係を図-9に示す。いずれの場合でも接合部のせん断強度が大きい供試体ほどじん性が向上し、両者には相関性があるようにみられた。

### 3. 3 変位成分の分離とエネルギー吸収能力

#### (1) 部材のじん性発揮に与える影響

接合部の補強方法の違いによる部材のじん性発揮に与える影響を把握するために、架構の着目点の変位を接合部のせん断変形の影響分、軸方向鉄筋の抜出しの影響分および部材自身の変形の影響分による成分に分離して、各成分の影響度合いを検討した。架構の着目点の変位は、次式に示す成分の和とした。ただし、各々の変形の影響は図-10に示す方法により算出した。なお、L型供試体も同様の方法により算出した。

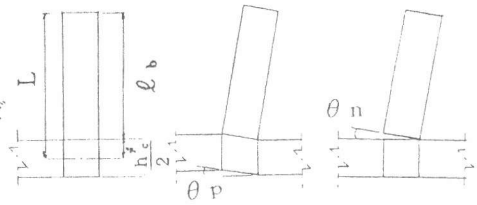
$$\delta_{total} = \delta_b + \delta_n + \delta_p \quad \dots (1)$$

ここに、 $\delta_{total}$  : 実験から得られる架構の着目点の変位、 $\delta_b$  : 部材自身の変形の影響による変位で $\delta_{total}$ より $\delta_n + \delta_p$ を控除したもの、 $\delta_n$  : 軸方向鉄筋の抜出しの影響による変位、 $\delta_p$  : 接合部のせん断変形の影響による変位

変位ステップ毎に架構の着目点の変位を分離したものを図-11に示す。

T型供試体については、 $1\delta_y$ 時は各供試体とも $\delta_b$ の影響が大きい、スタブ無しの供試体No.1, 2では $2\delta_y$ 以降 $\delta_p$ の影響および $\delta_n$ の影響が大きくなる。特に供試体No.2では、 $\delta_b$ が $2\delta_y$ で頭打ちとなり、さらに $3\delta_y$ では減少する傾向がみられ、部材のじん性がほとんど発揮されていない。一方、スタブ付の供試体No.3では変形が進むに従い $\delta_n$ の影響が若干増加するものの、各変位成分の影響はほぼ一定であり、 $\delta_b$ が直線的に増加して部材のじん性が発揮されている。また、 $3\delta_y$ 時の $\delta_b$ は、 $1\delta_y$ 時のそれに対して4倍弱程度にまで達している。

L型供試体については、載荷方向に関して異なった性状を示した。まず正方向載荷に対しては、スタブ無しの供試体No.4, 5では $2\delta_y$ 時以降 $\delta_p$ の影響が増加する傾向がみられるものの、 $\delta_b$ は増加の傾向を示し、 $3\delta_y$ 時においても部材のじん性が発揮されていることがわかる。しかし、供試体No.4, 5とも $3\delta_y$ 時の $\delta_b$ は、 $1\delta_y$ 時のそれに対して2倍程度に留まっている。スタブ付の供試体No.6では $\delta_p$ の影響は小さいが、 $2\delta_y$ 時以降 $\delta_n$ の影響が増大して $\delta_b$ の増加を妨げる傾向がみられ、部材のじん性の発揮に頭打ちの傾向がみられた。一方、



$$\begin{aligned} \delta_p &= (\ell_b + h_c/2) \times \theta_p \\ \delta_n &= \ell_b \times \theta_n \\ \delta_b &= \delta_{test} - (\delta_p + \delta_n) \end{aligned}$$

図-10 変形の計算

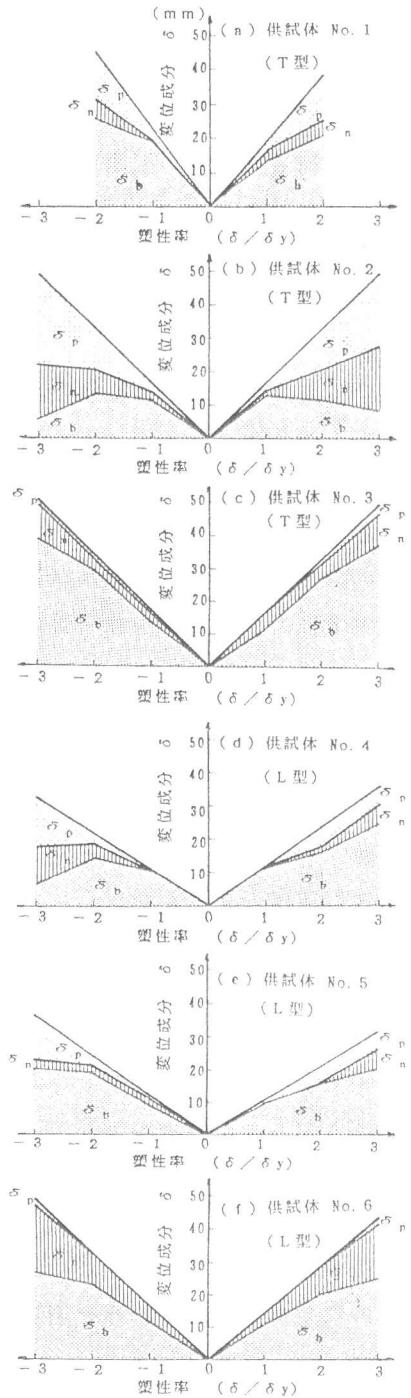


図-11 変形成分の分離

負方向載荷に対しては、変形が進むにつれ各供試体別の特徴が現れた。供試体No.4では、 $2\delta_y$ 以降 $\delta_p$ と $\delta_n$ の影響が増大して $\delta_b$ は減少傾向となり、部材のじん性はあまり発揮されないことが分かる。供試体No.5では $2\delta_y$ 以降 $\delta_p$ の影響が増大して $\delta_b$ は頭打ちの傾向となり、 $3\delta_y$ 時の $\delta_b$ は、 $1\delta_y$ 時のそれに対して2倍程度に留まっている。供試体No.6は変形が進むにつれ $\delta_n$ の影響が増大して $\delta_b$ の増加を妨げる傾向がみられ、やはり部材のじん性の発揮に頭打ちの傾向がみられる。 $3\delta_y$ 時の $\delta_b$ は、 $1\delta_y$ 時のそれに対して2倍半程度となっている。総じて、接合部にスタブを付けることにより接合部のせん断変形の影響による変位 $\delta_p$ を非常に小さく抑えることができるが、鉄筋の抜出しの影響による変位 $\delta_n$ に対する抑制効果は殆どみられないこと、また、部材のじん性の発揮を妨げる主要因は接合部の劣化による $\delta_p$ の増大と考えられるが、これに起因する軸方向鉄筋の定着劣化による $\delta_n$ の増加が促進されることによりさらに部材のじん性の発揮が妨げられると考えられる。また、接合部内に柱のせん断補強鉄筋量の2倍のせん断補強鉄筋量が配置され、さらに直交部材を持つ接合部は周辺部材のじん性を十分発揮させることができる。

#### (2)エネルギー吸収能力への影響

変位振幅の増加に対するエネルギー吸収能力の推移を図-12に示す。ここで、エネルギー吸収能力は各変位段階の荷重・変位履歴曲線の面積の累積とし、正負方向3サイクルすべてを加算したものとした。また図にはそれぞれの供試体の架構のじん性率を与える変位（以下、限界変位）までを示した。スタブ付の供試体はT型、L型供試体とも限界変位に達するまでに大きなエネルギー吸収能力を有している。スタブ無しの供試体については、変形が比較的小さい範囲でのエネルギー吸収能力は供試体の種類によらずスタブ付のそれとほぼ同程度である。しかし、変形が大きくなると、エネルギー吸収能力に差が生じてくる。すなわち、T型、L型供試体ともそれぞれ架構の変位が比較的小さい範囲では、分離された変位成分の影響比率の違いによらずエネルギー吸収能力はほぼ同程度となるが、変位がさらに増大すると部材のじん性が発揮させる架構ほど大きなエネルギー吸収能力が得られることが分かった。

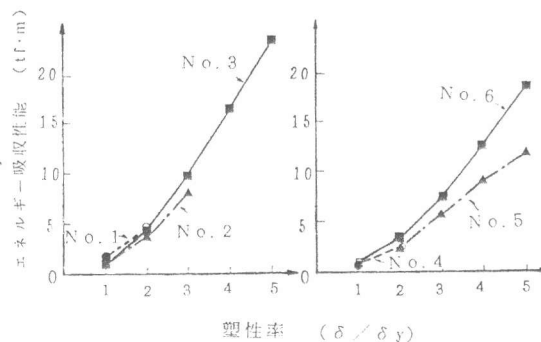


図-12 塑性率とエネルギー吸収性能の関係

#### 4. 結論

本実験の範囲で明らかになったことを以下に示す。

- (1)接合部のせん断補強鉄筋は、接合部の強度の増加および保持に対する効果がある。
- (2)スタブは接合部の強度および剛性の増加に対する効果がある。
- (3)L型の架構は、荷重の作用方向により架構の変位成分に影響を与える要因の比率が異なる。
- (4)接合部を含む部材の変形は、接合部の補強方法により変形成分の影響の度合いが異なるので、じん性の推定にはそれらを適切に考慮する必要がある。

参考文献 [1] 土木学会：国鉄建造物設計標準解説,1983.5 [2] 角 徹三、浅草 肇：鉄筋コンクリート柱はり接合部の研究の動向、コンクリート工学,Vol.26,NO.10,pp.14-22,1988.10