

論文

[2089] 梁端部における根巻きコンクリートの力学特性に関する  
実験的研究

正会員 塚越英夫 (清水建設技術研究所)  
下村英男 (清水建設設計本部)  
羽切道雄 (清水建設技術開発本部)  
正会員 香田伸次 (清水建設技術研究所)

1. はじめに

鉄骨柱脚を鉄筋コンクリート (以下RCと称す) でかため、その固定度を確保する根巻き型柱脚に関しては既に多くの実験的研究がなされているが、RC部の耐荷機構は複雑で未だ明確な評価を得るに到っていない。その中で、秋山 [1] はRC造の根巻き部の耐荷機構はせん断補強筋が支配的であると、耐力評価法と設計法を提案して実験的に検証を行っている。また、森田ほか [2] は根巻き型柱脚のせん断破壊は鉄骨柱の支圧によるパンチングシアー破壊であると考え、せん断終局耐力の評価を行っている。本論文は秋山の考え方をもとにして梁端部に鉄骨柱脚のRC造根巻き構法を採用し、更にプレキャスト化した場合のRC造部分の挙動を把握するために実験を行い、靱性確保のための条件について検討したものである。

2. 曲げせん断実験 (Phase-I)

2.1 試験体

この実験の目的はRC造根巻き構法の力の伝達機構の確認と破壊モード毎の耐力算定法を得ることである。試験体は実大スケールの8体でありRC造と鉄骨造の大梁をそれぞれ4体ずつとし、図-1に示す片持梁形式とした。施工手順は図-2に示すように、下端主筋とU型せん断補強筋を入れたRC造プレキャスト (以下PCと称す) のU字型のブラケットにPC大梁を載せ、30mm程の大梁周囲の隙間にモルタルを流し込み、上端主筋 (通し配筋) とキャップ筋を配して後打ちコンクリート

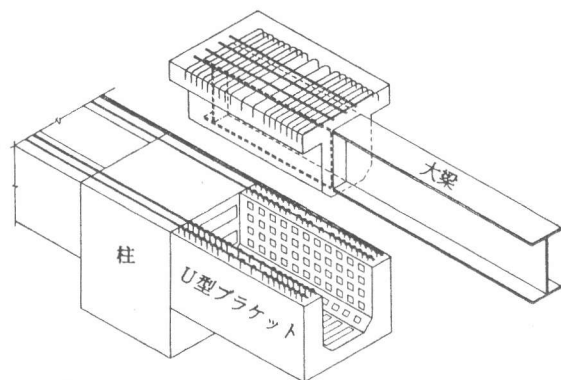
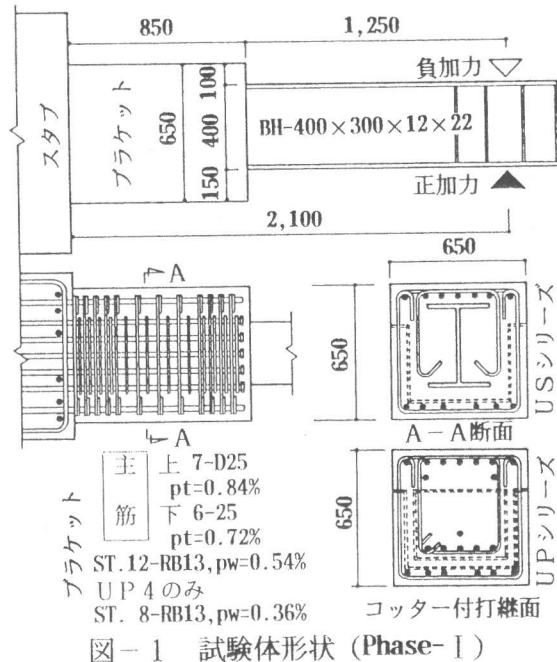


表-1 試験体一覧 (Phase-I)

試験体	特徴	大梁	試験体	鉄骨大梁端部
UP 1	一体打ち	BxD=450x530 主筋 上 7-D25 pt=1.49% 下 6-25 pt=1.28% ST. D13@90 pw=0.62%	US 1	75逃げ リッププレート
UP 2	標準試験体		US 2	ベースプレート
UP 3	コッター無		US 3	D10@200 異形フランジ
UP 4	pwを減少		US 4	

を打設した。大梁が鉄骨造の場合はグラウチングの工程がなく  
 〇型の補強筋を上端に入れた。試験部分はRC造ブラケットで  
 あり、実験変数はPC大梁（UP 1～UP 4）では仕口部のブ  
 ラケット・大梁のコッターの有無、ブラケット部のせん断補  
 筋比とし、比較のために一体打ちを加えた。鉄骨大梁（US 1  
 ～US 4）では鉄骨のコンクリートに呑み込まれている部分の  
 形状を表-1に示すようにした。ブラケットの耐力算定には図  
 -3に示すようなブラケット端部に集中荷重が作用する簡略化  
 した応力状態で考え、文献[1]の秋山の式を用い必要せん断補  
 筋量と必要頂部補強筋比を定めた。更にせん断補強筋に高張  
 力鋼を使用しその効果も調べた。また、せん断耐力算定時の有  
 効幅を図-4に示すものとし、ブラケット主筋の曲げ降伏で耐  
 力が決まる形状と考えた。用いた材料の機械的性質を表-2、  
 表-3に示す。加力は表-4に示す正負交番の漸増载荷とした。

## 2.2 実験結果

実験から得られた载荷点でのせん断力 vs. 部材角関係を図-  
 5に示す。PC大梁の試験体ではブラケットの斜めひびわれが  
 多く入ったものの上端主筋が通し配筋のため、上端引張時には  
 安定した曲げ降伏性状を示した。下端引張時には曲げ降伏とは

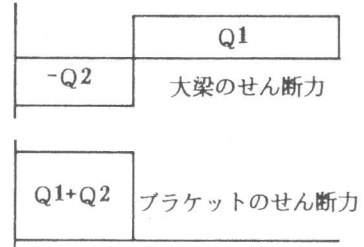
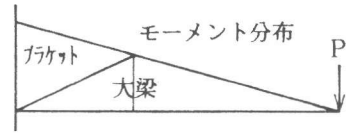


図-3 試験体の応力状態

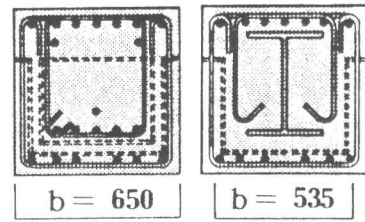


図-4 せん断耐力算定時の有効幅

表-2 鋼材の引張試験結果 表-3 コンクリートの材料試験結果 表-4 加力サイクル

呼び名	降伏強度 (tf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (tf/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (tf/cm <sup>2</sup> )
D25	3.84	5.97	1980
D13	3.61	5.46	1890
RB13	13.8	14.9	1990
P-22	3.93	5.37	2080
P-12	3.42	5.41	2050

	強度 (kg f/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (tf/cm <sup>2</sup> )	ポアソン比
ブラケット部 圧縮割裂	308 26.7	297 —	0.20
グラウトモルタル 圧縮割裂	415 30.2	198 —	0.20
後打ち部 圧縮割裂	454 32.3	311 —	0.22

サイクル	部材角	サイクル	部材角
1	1/1000	7-8	1/67
2	1/400	9-10	1/50
3-4	1/200	11	1/25
5-6	1/100		

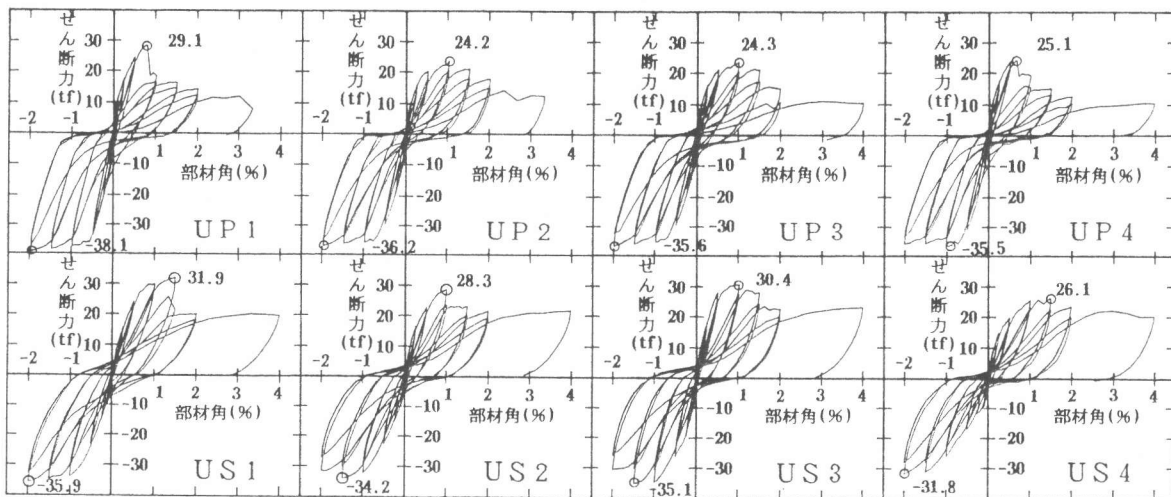


図-5 せん断力-部材角関係 (Phase-I) (Qy上端=-34.5tf、Qy下端=29.5tf)

ならず、UP 1とUP 4の破壊形状はブラケット頂部の付着割裂破壊となり、UP 2とUP 3はブラケット側面のせん断破壊となった。この時のせん断補強筋の歪値は3000 $\mu$ 程度であり降伏に至っていないが、顕著な斜めひびわれが発生していた。鉄骨大梁の試験体は上端引張時には全ての試験体でブラケット主筋の曲げ降伏となった。これは上端に配した補助スターラップ筋がせん断力を負担しており(図-6)、ブラケット部のせん断耐力が上昇したためである。一方、下端引張時にはリブプレート(US 1)のある試験体とD10鉄筋をフランジに溶接した(US 3)試験体は主筋の降伏に至ったものの、全ての試験体とも部材角1%前後で最大耐力を記録し変形能力の少ない性状を示した。図-7にUS 3の鉄骨大梁の部材角1%での主応力の大きさと方向を示す。これより図-3で想定した通りブラケット内部でせん断力が反転していることが判る。

### 2.3 破壊モードの検討

実験での破壊パターンは図-8に示す、①頂部の付着割裂破壊(UP 1、UP 4)、②せん断破壊(UP 2、UP 3)、③せん断付着破壊(USシリーズの下端)でありこれらの作用力と耐力を以下に示す式により計算し、各試験体の破壊モードを検討したものを表-5(斜線)の値で耐力が決まる)に示す。ただし、せん断力は載荷点での値に換算しており、応力状態は図-3に示す簡略化したもので考えた。

#### ①頂部の付着割裂破壊

ブラケット頂部のせん断抵抗機構をせん断補強筋の引張力とコンクリートの圧縮ストラット及びこれに釣合う主筋の引張力と考え図-9に示すような応力状態とした。これを文献[3]によるトラス機構として捉え、式(1)及び式(2)から付着作用力 $[\tau_v]$ と付着耐力 $[\tau_{sv}]$ を求める。

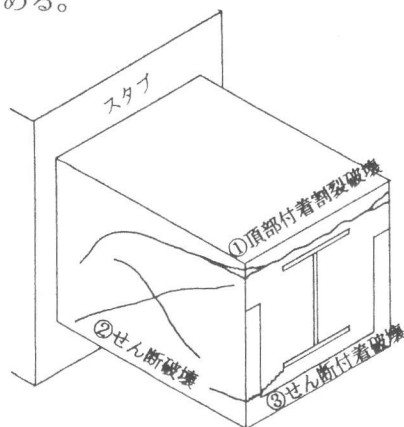


図-8 破壊パターン

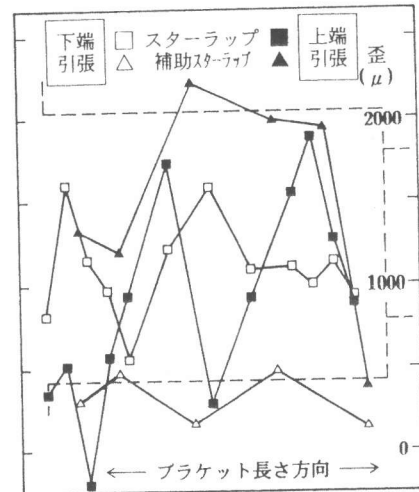


図-6 せん断補強筋の歪分布 (US 1: 部材角 $\pm 2\%$ )

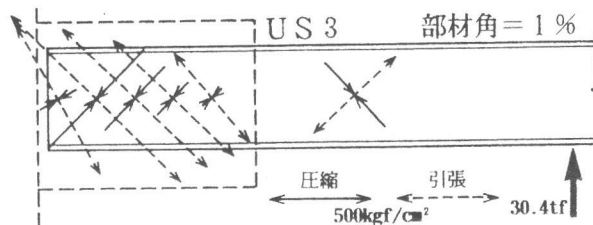


図-7 鉄骨大梁の主応力の大きさと方向

表-5 計算耐力一覧 (Phase-I)

	UPシリーズ		USシリーズ	
	上端引張	下端引張	上端引張	下端引張
曲げ降伏時の作用せん断力 [tf]	34.5 <sub>*1</sub> (38.1)	29.5 <sub>*1</sub> (29.1)	34.5 <sub>*1</sub> (35.9)	29.5 <sub>*1</sub> (31.9)
横筋の引張耐力	20.9 [72.3]		43.1 <sub>*3</sub>	20.9 [72.3]
せん断耐力-A	39.4 (32.0)		32.4	
せん断耐力-B	44.6 (41.5)	43.4 (40.8)	36.6	35.9
せん断付着耐力	—	34.8 (25.9)	54.3	26.3
頂部付着作用力	—	20.7	35.6	20.7
頂部付着耐力	—	17.6	39.6	17.6

- \* 1 : ( ) 内はUP 1、US 1の実験での最大耐力値
- \* 2 : 秋山[1]の提案式
- \* 3 : 補助スターラップを有効としている
- ・せん断力はA:文献[3]のA法、B:荒川mean式
- ・( )内はUP 4の場合
- ・[ ]内は $\sigma_{wy}$ を降伏強度とし、他は3.98tf/cm<sup>2</sup>( $\epsilon=0.2\%$ 時)
- ・単位は頂部付着力: [kgf/cm<sup>2</sup>]、他は載荷点での換算値: [tf]

②せん断破壊

有効幅を図-4と考え、文献[3]によるA法及び荒川mean式でせん断耐力を求める。ここでは計算に用いたせん断補強筋の高張力鋼の値 ( $\sigma_{wy}$ ) を  $3.98\text{tf/cm}^2$  ( $\epsilon=0.2\%$ 時) とした。

③せん断付着破壊

図-10に示す応力中心間距離を用いて、文献[4]による式(3)を準用したせん断付着耐力 ( $rQ_u$ ) を求める。ただし、割裂面がブラケット外郭部となる場合とブラケットの内側の後打ちコンクリート部となる場合がある。

$$\tau_t = b p_{wt} \sigma_{wy} \cot \phi / \Sigma \phi \quad \dots (1)$$

$$\tau_{st} = \{(20+5N_u+15N_s)/N_t p_w' b \sqrt{\sigma_B}\} / d_b \quad (N_t/2 \geq N_u \text{ の場合}) \quad \dots (2)$$

$$\tau_{st} = 5 p_w' b \sqrt{\sigma_B} / d_b \quad (N_t/2 < N_u \text{ の場合})$$

$$rQ_u = b r_j (b'/b * 0.1 \sigma_B + p_w \sigma_{wy}) \quad \dots (3)$$

ここで、 $b$ 、 $p_{wt}$ 、 $\sigma_{wy}$ 、 $\phi$ 、 $\Sigma \phi$ はそれぞれ梁幅、部材中間部のせん断補強筋比、せん断補強筋強度、コンクリートの圧縮束の角度、主筋の周長の和である。また、 $N_u$ 、 $N_s$ 、 $N_t$ 、 $p_w'$ 、 $\sigma_B$ 、 $d_b$ はそれぞれ横補強筋のかかっている主筋の本数、副帯筋のかかっている主筋の本数、全主筋の本数、断面外周のせん断補強筋比、コンクリートの圧縮強度、主筋径(ただし、径の異なる場合は相加平均とする)である。式(3)では、 $b$ 、 $r_j$ 、 $b'$ は図-10に示す長さであり( $r_j * b' = \min[r_{1j} * b_{1j}', r_{2j} * b_{2j}']$ )、 $p_w$ は割裂部でのせん断補強筋比である。

表-5に示した計算結果からUPシリーズでは頂部付着作用力が耐力より大きく、USシリーズではせん断付着耐力が作用せん断力より小さくなり、実験での破壊モードと一致している。また、せん断耐力は曲げ耐力と同等以上と算定したが、実験ではせん断系の破壊となっていた。ブラケット部に作用するせん断力は複雑であり、かつブラケットと大梁または後打ち部との一体性にも多少問題がある。従って、せん断耐力を小さめに評価すべきである。

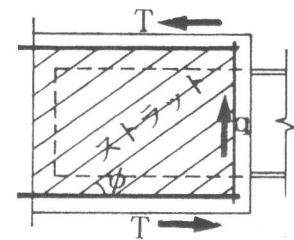
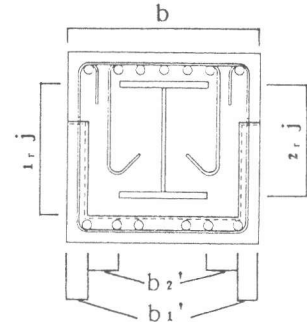


図-9 頂部付着割裂のモデル化



$[r_{1j} * b_{1j}'] [r_{2j} * b_{2j}']$  の組合せの中の小さい値  
図-10 せん断付着力計算用の寸法

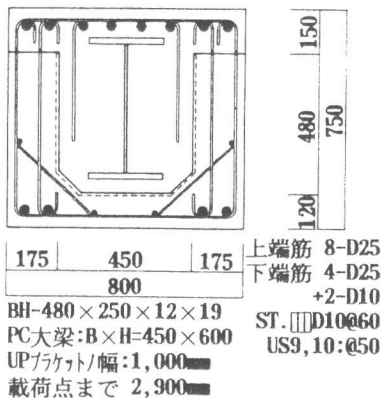


図-11 試験体形状 (Phase-II)

表-6 試験体一覧 (Phase-II)

試験体	UP5	US5	US7	US9
断面形状				
ブラケット長	120cm	120cm	120cm	110cm
試験体	UP6	US6	US8	US10
断面形状				
ブラケット長	120cm	120cm	120cm	110cm

### 3. 曲げせん断実験 (Phase-II)

#### 3.1 試験体

この実験では、先述の耐力式をもとに設計すれば靱性能のある復元力特性が得られることを検証する目的とした。また、密集するせん断補強筋を簡略化して作業性の向上もめざした。試験体は実大スケールの片持梁形式の8体とし、PC大梁を2体(UP5~UP6)、鉄骨大梁を6体(US5~US10)とした(図-11、表-6参照)。試験体の計算耐力の一覧を表-7に示すが、実験変数はせん断補強筋の量と形状及びブラケット長であり、US6、US8、US10は頂部付着割裂破壊を想定した。また、Phase-Iで変形状の改善に有効であった鉄骨大梁のリッププレートと異形フランジは全ての試験体に付けた。UPシリーズのブラケットと大梁の間は側面で各100mm、底面で30mmとしてコンクリートを充填した。用いた材料の機械的性質を表-8、表-9に示す。尚、載荷履歴はPhase-Iと同一(表-4)とした。

#### 3.2 実験結果

実験から得られた載荷点でのせん断力 vs. 部材角関係を図-12に示す。下端引張時には全ての試験体でエネルギー吸収の大きい安定した靱性能に富んだ性状を示した。上端引張時には補助スターラップ筋のないUS6、US8、US10は想定通り頂部付着割裂破壊となり急激な耐力低下を起こしたが、他の試験体は安定していた。

表-7 計算耐力一覧 (Phase-II)

	UPシリーズ		USシリーズ	
	上端引張	下端引張	上端引張	下端引張
曲げ降伏時の作用せん断力[tf]	33.1 <sub>.1</sub> (42.5)	17.6 <sub>.1</sub> (26.6)	33.1 <sub>.1</sub> (42.3)	17.6 <sub>.1</sub> (26.0)
横筋の引張耐力 <sup>*2</sup>	47.0		47.0(43.6) <sup>*3</sup>	
せん断耐力-A	59.9		49.9(51.8) <sup>*3</sup>	
せん断耐力-B	70.3	64.5	58.3(56.1) <sup>*3</sup>	53.1(51.1) <sup>*3</sup>
せん断付着耐力	—	94.5	68.7	77.2
頂部付着作用力	—	34.3	19.3	32.5
頂部付着耐力	—	35.9(26.9) <sup>**</sup>	20.4(15.8) <sup>**</sup>	35.9(26.9) <sup>**</sup>

- \*1 : ( ) 内はUP5、US5の実験での最大耐力値
- \*2 : 秋山[1] の提案式
- \*3 : ( ) 内はブラケット長の短いUS9、US10
- \*4 : ( ) 内は船底型の下部補強筋を考慮しない場合
- ・ [ ] 内は補助スターラップのないUS6、US8、US10
- ・ 単位は頂部付着力 : [kgf/cm<sup>2</sup>]、他は載荷点での換算値 : [tf]

表-8 鋼材の引張試験結果

呼び名	降伏強度 (tf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (tf/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (tf/cm <sup>2</sup> )
D25	3.81	5.94	1940
D10	3.48	5.08	1930
P-19	3.81	5.45	2070
P-12	3.34	5.17	2040

表-9 コンクリートの材料試験結果

		強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (tf/cm <sup>2</sup> )	ポアソン比
ブラケット部	圧縮	359	338	0.22
	割裂	30.6	—	
後打ち部	圧縮	397	353	0.22
	割裂	32.6	—	

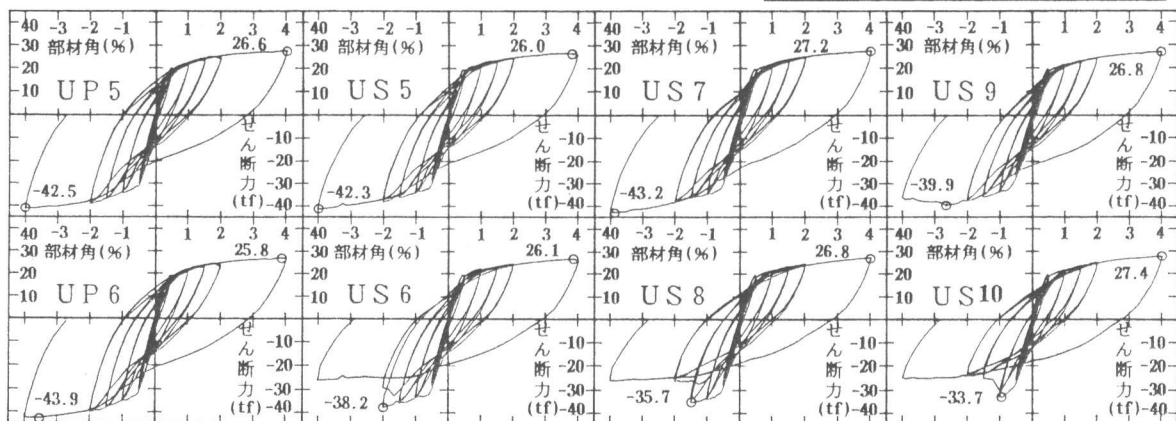


図-12 せん断力-部材角関係 (Phase-II) (Qy上端=-33.1tf、Qy下端=17.6tf)

### 3.3 結果の考察

表-7に示すように、全ての試験体でせん断耐力計算値が曲げ耐力計算値の1.5～2倍となっているが、最終ひびわれ状況（写真-1参照）で観察されるようにUSシリーズでは曲げせん断ひびわれがかなり増えていた。このことよりUSシリーズの試験体はほぼせん断耐力に達していたと考えられる。従って簡略化した応力状態での曲げ降伏時の作用力に対する比から低減係数 $\Phi=0.7$ を乗じた既往の耐力式でせん断設計を行えば良好な変形性能が得られる。

上端に補助スターラップのないUS6、US8、US10の計算値での頂部付着耐力は作用力を下回っており、実験での頂部付着破壊と対応している。下端引張時の頂部付着耐力と作用力は近い値となっているが、船底の形をした下端補助筋（D10@50）の歪値が大きくなっており有効に働いていた。また、せん断補強筋は必ずしも閉鎖型もしくはU型でなくとも良く、上下主筋に渡る幅止め形式でも履歴性状の差異は少なかった。

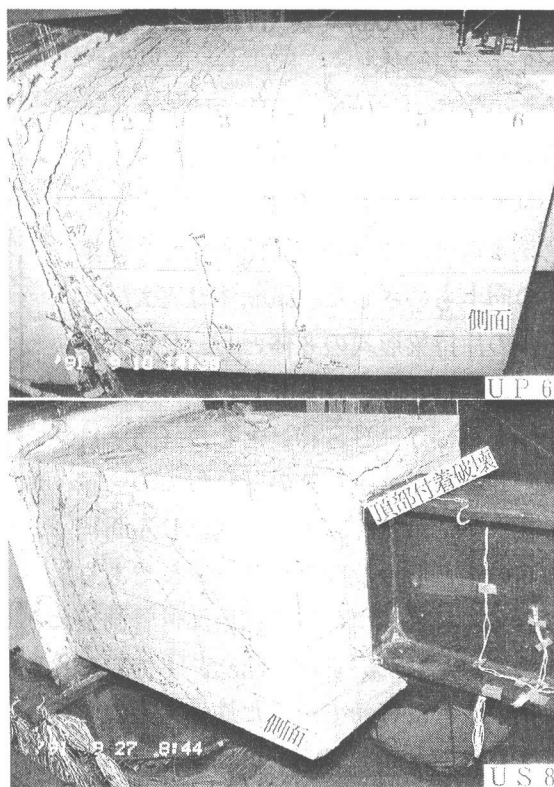


写真-1 最終ひびわれ状況

### 4. まとめ

梁端部に根巻きコンクリートを用いてプレキャスト化した16体の試験体に載荷した結果、ブラケット部の靱性確保のための条件として以下の知見を得た。

- (1) 梁端部におけるプレキャストの根巻き構法は秋山の提案式による必要せん断補強筋量と必要頂部補強筋比を求め、更に頂部の付着割裂破壊と側面のせん断破壊及びせん断付着破壊の検討を行えば良好な履歴性状が得られる。
- (2) ブラケット部に作用するせん断力は複雑でありかつ打継ぎがあるが、簡略化した応力状態での曲げ降伏に対するせん断設計は既往の式に低減係数 $\Phi=0.7$ を乗じたもので評価できる。
- (3) せん断補強筋は必ずしも閉鎖型もしくはU型でなくとも良く、上下主筋に渡る幅止め形式でも履歴性状の差異は少なかった。また、U型の補助スターラップや船底形の下端補助筋は頂部で有効に働いた。

〔参考文献〕

- [1] 秋山宏：鉄骨柱脚の耐震設計、技報堂出版、1985
- [2] 森田耕次・加藤勉・寺田岳彦：根巻き型柱脚のせん断耐力、日本建築学会構造系論文報告集、第354号、1985.8
- [3] 鉄筋コンクリートの終局強度型耐震設計指針・同解説、日本建築学会、1990.11
- [4] 鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、日本建築学会、1987.6