

報告

[2087] 断面が変化する RC 部材のせん断に関する実験的研究

武田三弘\*1・齊藤 啓一\*2・奥石 逸樹\*3・井料 青海\*4

1. まえがき

鉄道における鉄筋コンクリートラーメン高架橋（以下高架橋）やボックスカルバート等においてはハンチを設ける場合が多い。特にボックスカルバートでは隅角部に1：1のハンチを設けることが多く、このような角度が大きな傾斜部材での設計上の取り扱いが重要となる。このような有効高さが変化する棒部材に対する設計法としては、土木学会示方書によれば、設計せん断力は部材軸と上下面との角度による曲げ圧縮力および曲げ引張力のせん断力に平行な成分を考慮して求めることや、部材の設計の項には、ハンチ部の断面の検討は、角度が大きなハンチが付いている場合においても、ハンチは1：3よりゆるやかな部分のみを有効とすることが定められている[1]。しかし、角度が大きな傾斜部材になるにしたがって、その耐荷機構はディーブームあるいはコーベルとして取り扱われる領域に近づくとも考えられるため、傾斜部材の破壊性状を明らかにする目的で、模型試験体による載荷試験を行い、主としてせん断破壊性状を調査したので結果を以下に報告する。

2. 実験方法

2. 1 試験体の形状寸法

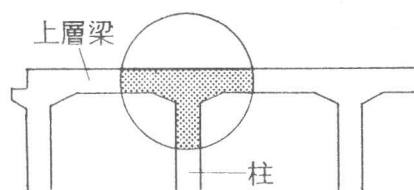


図-1 高架橋

試験体は、図-1に示すような、高架橋の上層梁と柱の接合部を想定した形状のものである。試験体の形状寸法ならびに配筋状況の一例を図-2に示す。高架橋では両側にハンチが付くのが一般的であるが、まず片ハンチでの

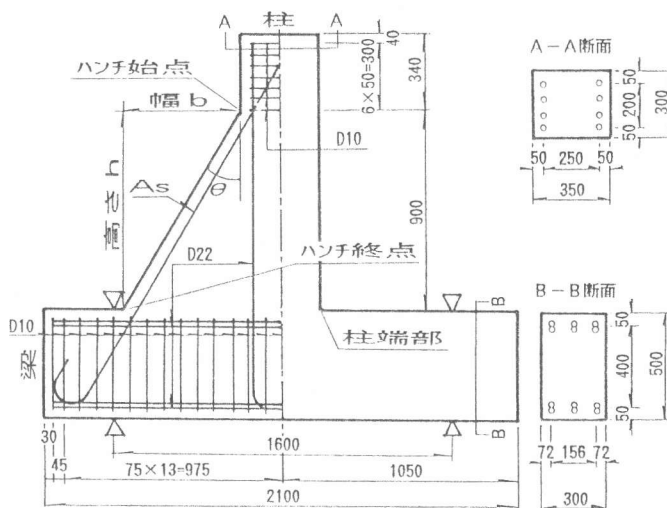


図-2 試験体形状寸法

破壊性状を調べるために今回、試験体は全て片ハンチとした。また、ハンチ部でせん断破壊させるために梁にはD10のスターラップを75mmピッチで配置し、梁部でのせん断耐力を大きくしてある。柱部材の載荷点や梁部の支持点についても、帯鉄筋を配置し、せん断破壊ならびに支圧破

\*1 東日本旅客鉄道株式会社東北工事事務所新仙台工事区施設係（正会員）

\*2 東日本旅客鉄道株式会社東北工事事務所工事管理室設計管理第一係長（正会員）

\*3 東日本旅客鉄道株式会社東北工事事務所工事管理室課長代理（正会員）

\*4 東日本旅客鉄道株式会社東北工事事務所工事管理室課員（正会員）

壊が生じることのないように補強を行っている。

柱の主鉄筋の定着部はU形の形状とし、圧縮側・引張側ともに連結した1本の鉄筋とした。ハンチ部及び柱部には帯鉄筋は配置していない。ハンチ部の軸方向鉄筋（以下ハンチ筋という）の両端の形状は半円形フックとした。試験体の諸元を表-1に示す。

## 2. 2 使用材料

使用したコンクリートの配合を表-2に示す。また、鉄筋の引張試験結果を表-3に示す。

## 2. 3 試験体の着目点

試験体と着目点の関係を表-4に示す。ここで、ハンチ部における各名称は図-2に示すとおりである。今回は、帯鉄筋の影響を除いたハンチの角度によるもののみの影響を調べるため、基本形であるタイプIを含め、全ての試験体においては、柱部及びハンチ部に帯鉄筋は入っていない。

2. 4 載荷方法  
載荷装置を図-3に示す。試験体は載荷装置の都合上、上下を逆にし、梁の両端をPC鋼棒で固定し、梁には水平方向の移動を防止するために軸力5tを導入した。支点は鋼板（

表-1 試験体諸元

ハンチ部									
試験体	角度 $\theta$ (度)	幅 b (cm)	高さ h (cm)	ハンチ筋 A <sub>s</sub> (cm <sup>2</sup> )	試験体	角度 $\theta$ (度)	幅 b (cm)	高さ h (cm)	ハンチ筋 A <sub>s</sub> (cm <sup>2</sup> )
9301	0	0	0	0	9314	33.7	300	450	0
9305	18.4	300	900	0	9315	48.0	500	450	0
9306	24.0	400	900	0	9316	18.4	225	675	0
9307	29.1	500	900	0	9317	18.4	300	900	15.48
9309	18.4	300	900	0	9318	24.0	400	900	15.48
9310	24.0	400	900	0	9319	29.1	500	900	15.48
9311	29.1	500	900	0	9321	29.1	500	900	11.46
9313	18.4	150	450	0	9322	29.1	500	900	7.94
共	柱			梁				梁主筋	
	断面 (cm <sup>2</sup> )	主鉄筋 (片端) (Pt %)	帯鉄筋	断面 (cm <sup>2</sup> )	主鉄筋 (片端) (Pt %)	スラップ	軸力 $\sigma$ (Kgf/cm <sup>2</sup> )	定着 方法	
通	350 × 300	D22 × 4 (1.77)	なし	300 × 500	D22 × 6 (1.55)	D10075	3.33	U形	

※ ハンチ筋は 9317~9319:D22、9321:D19、9322:D16使用

表-2 コンクリート配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スラップの 範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	水セメ ント比 (%)	細骨 材率 (%)	単位量(kgf/m <sup>3</sup> )				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
25	8±2	4±05	45.9	42.1	320	158	742	1090	1.0

表-3 鉄筋の力学的特性

種類	降伏点 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強さ (kgf/cm <sup>2</sup> )
SD345, D22	3578	5511
SD295, D19	3828	5680
SD345, D16	3558	5428
SD295, D10	3647	5498

表-4 試験体と着目点の関係

基本形 (9301) [タイプI]															
ハンチ位置	載荷荷重に対して引張側にハンチを設ける							載荷荷重に対して圧縮側にハンチを設ける							
ハンチ筋の有無	ハンチ筋有り							ハンチ筋無し							
	鉄筋量 (cm <sup>2</sup> )														
ハンチ筋量 (cm <sup>2</sup> )	7.96	11.5	15.49												
ハンチ高さh (cm)	90							45		67.5		90			
ハンチの角度 $\theta$ (度)	29.1		24.0	18.4	18.4	24.0	29.1	18.4	33.7	48.0	18.4	18.4	24.0	29.1	
試験体名	9322	9321	9319	9318	9317	9309	9310	9311	9313	9314	9315	9316	9305	9306	9307
破壊パターン	[タイプIII]			[タイプII]				[タイプV]			[タイプIV]				

幅5 cm、厚さ1 cm)を用いた。載荷はアクチュエーターにより行ったが、両端をヒンジ構造とし、試験体にモーメントが作用しないように注意した。荷重は、0.5 t ずつ静的に増加させ、試験体がせん断破壊するまで一方向に載荷した。

### 2. 5 測定項目

測定を行った主な項目は、載荷荷重、柱主鉄筋・ハンチ筋のひずみ、ひび割れ発生状況などである。

### 3. 実験結果

#### 3. 1 試験体のひび割れならびに破壊状況

図-4 に試験体の破壊時のひび割れ状況を示す。ひび割れ発生ならびに破壊状況を観察すると、ひび割れ性状は試験体の形状等により表-4 に示す5つのタイプに分類されるようである。

タイプIでは、曲げひび割れが柱端部に発生し、荷重が増すごとに載荷点方向にも発生していく。そして、最大荷重時に、載荷点から圧縮側の柱端部へ向かうせん断ひび割れが発生し、破壊に至る。なお、このせん断ひび割れは、柱主鉄筋に影響され、両端では主筋に沿うひび割れとなっている。また、柱主鉄筋は、せん断破壊する寸前まではひずみゲージ取付け位置において降伏は認められなかった。

タイプIIでは、曲げひび割れがハンチ中央部に一本発生し、柱の引張鉄筋付近まで伸展するが、その後は荷重の増大にもかかわらず他にひび割れの発生が認められない。そして、最大荷重時にひび割れが載荷点から柱主筋に沿って伸展し、曲げひび割れとの交点まで伸びるとともに、圧縮側の柱端部へとせん断ひび割れが発生し、破壊に至る。なお、タイプI同様、柱主鉄筋の降伏は認められていない。

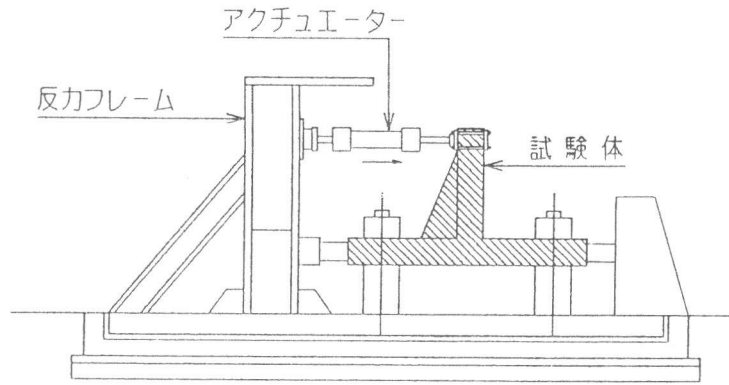


図-3 載荷装置

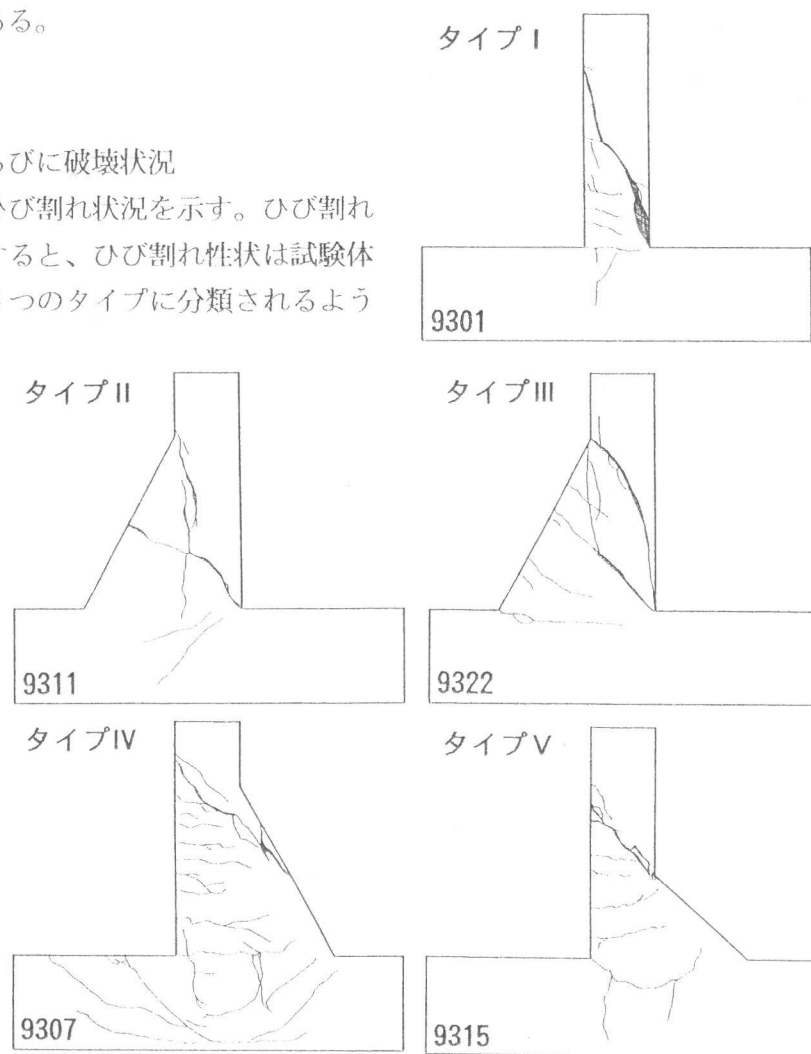


図-4 試験体ひび割れ状況

タイプⅢの場合  
は、曲げひび割れ  
がハンチ終点に発  
生し、荷重の増大  
とともにハンチ部  
の中央にも発生す  
る。そして、さら  
にそれぞれの間に  
順次発生を繰り返  
してゆく。また、  
この曲げひび割れ  
は、圧縮側の柱端  
部に向かって伸展  
しているようであ  
った。最大荷重時  
に載荷点から柱の  
引張鉄筋に沿うひ  
び割れが発生する  
が、同時に比較的  
初期に発生してい  
る微細な載荷点か  
ら圧縮側の柱部材  
端に向かうせん断

表-5 実験結果一覧

試験体	$f'c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$P_{mc}$ (t)	$P_{sc}$ (t)	$P_{max}$ (t)	$P_{max}/f'c^{1/3}$	$\tau_1$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\tau_2$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
9301	311	4	12	12.0	1771	13.3 *1	—
9305	256	6	23	35.5	5591	39.4	19.7
9306	244	6	28	44.9	7201	49.9	21.4
9307	223	6	20	48.0	7915	53.3	20.0
9309	250	4	7	13.8	2191	15.3	15.3
9310	274	6	8	11.7	1801	13.0	13.0
9311	262	2	7	12.4	1938	13.8	13.8
9313	216	4	10	16.0	2667	17.8	11.9
9314	299	4	12	18.5	2767	20.6	10.3
9315	315	4	11	24.5	3601	27.2	10.2
9316	238	4	14	28.0	4518	31.1	17.8
9317	301	6	10	35.7	5327	39.7	19.8
9318	300	4	12	40.7	6080	45.2	19.4
9319	259	10	20	45.0	7060	50.0	18.8
9321	259	6	12	39.5	6197	43.9	16.5
9322	244	12	15	27.0	4320	30.0	11.3

コンクリート強度： $f'c$  (kgf/cm<sup>2</sup>)      曲げひび割れ発生荷重： $P_{mc}$  (t)  
 最大荷重： $P_{max}$  (t)      せん断ひび割れ発生荷重： $P_{sc}$  (t)  
 \*1:最大荷重時の載荷点における平均せん断応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>)       $\tau = P_{max}/(b \cdot d)$   
 最大荷重時のハンチ始点の平均せん断応力度： $\tau_1$  (kgf/cm<sup>2</sup>)       $\tau_1 = P_{max}/(b \cdot d)$   
 最大荷重時のハンチ終点の平均せん断応力度： $\tau_2$  (kgf/cm<sup>2</sup>)       $\tau_2 = P_{max}/(b \cdot d)$   
 b:ハンチ始点・終点の部材幅(cm)      d:ハンチ始点・終点の有効高さ(cm)

ひび割れが、急激に拡大・伸展し、このひび割れが主原因で破壊に至った。なお、このせん断ひび割れの形状は、圧縮側に凸のアーチ状となっていた。なお、ハンチ筋は全て降伏しているが、柱主筋は降伏に至っていない。タイプⅣでは、曲げひび割れが柱端部に発生し、荷重の増大とともに載荷荷重方向にも発生していく。その後、荷重の増大にともない柱の引張鉄筋が降伏するが、耐力を保持し、さらに荷重は増大していく。最大荷重時に載荷点から、圧縮側のハンチ始点～ハンチ終点間のある点に向かうせん断ひび割れが発生し破壊に至る。なおこの点は、ハンチの角度が大きくなるとハンチ始点方向に移動する傾向が認められた。また、最大荷重時においても柱の圧縮側の鉄筋は降伏に至っていない。

タイプⅤでは、曲げひび割れが柱端部に発生し、荷重の増大とともに載荷点方向にも発生し、その先端は、ハンチ始点付近に向かって伸展するようである。そして、最大荷重時に載荷点から圧縮側のハンチ始点に向かうせん断ひび割れが発生し破壊に至る。なお、柱主鉄筋の降伏は認められていない。

以上の破壊性状から、破壊性状は全てせん断破壊したと考え、最大荷重をせん断耐力として取り扱うこととした。

実験により得られた曲げひび割れ発生荷重、せん断ひび割れ発生荷重、せん断荷重を表-5に示す。なお、最大荷重について、コンクリート強度の影響を取除くために $f'c^{1/3}$ で除した値についても同表中に示す。

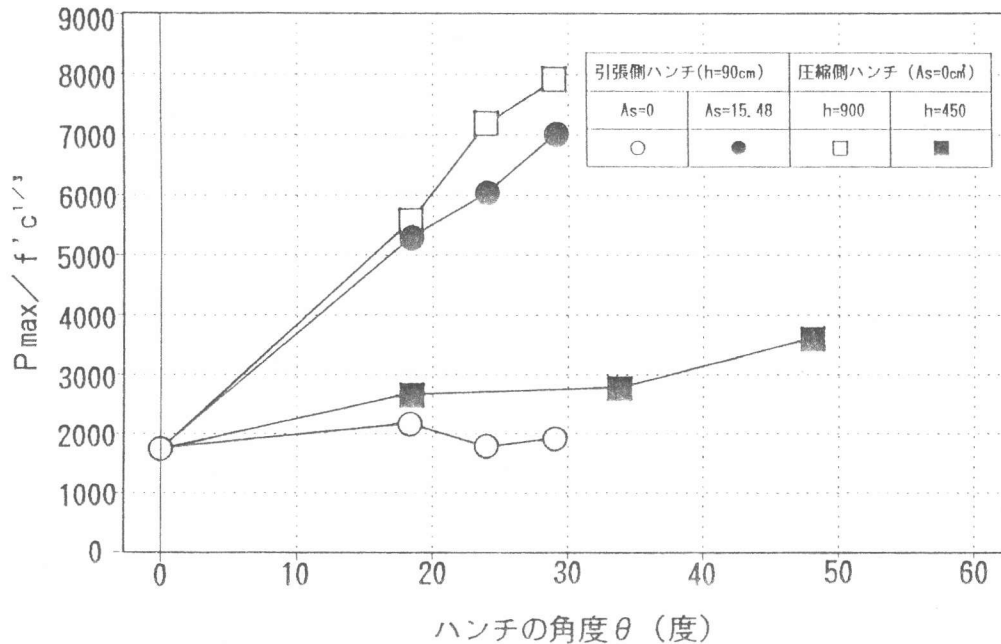


図-5  $P_{max}/f'c^{1/3}$ とハンチの角度 $\theta$ の関係

3.  $2 P_{max}/f'c^{1/3}$ と着目した各パラメーターの関係

$P_{max}/f'c^{1/3}$ と着目した各パラメーターの関係を以下に示す。ただし、ハンチの角度が変化することによって有効高さが変化することは考慮していない。

(1) 引張側にハンチを設けた場合

i) ハンチの角度の影響について

引張側にハンチがあり、ハンチ筋を配置せず、ハンチの高さを載荷点までとし、ハンチの角度のみを変化させた場合のハンチの角度と  $P_{max}/f'c^{1/3}$  の関係を図-5 (記号: ○) に示す。これより、ハンチの角度が増大しても、 $P_{max}/f'c^{1/3}$  は、2000前後の値をとり、引張側にハンチを設けても、ハンチ筋を配置しない場合には、せん断耐力に影響を及ぼさないことがわかる。

また同様の条件で、ハンチ筋を配置 ( $A_s = 15.48 \text{ cm}^2$ ) した場合のハンチの角度と  $P_{max}/f'c^{1/3}$  の関係を同図 (記号: ●) に示す。これより、ハンチの角度が増大するとせん断耐力は急激に増大しており、ハンチ筋を配置しない場合の結果とは非常に異なり、ハンチ筋を配置すれば耐力が増大することがわかる。

ii) ハンチ筋量の影響について

引張側にハンチがあり、ハンチ筋を  $A_s = 15.48 \sim 7.94 \text{ cm}^2$  へと変化させ、ハンチの高さは載

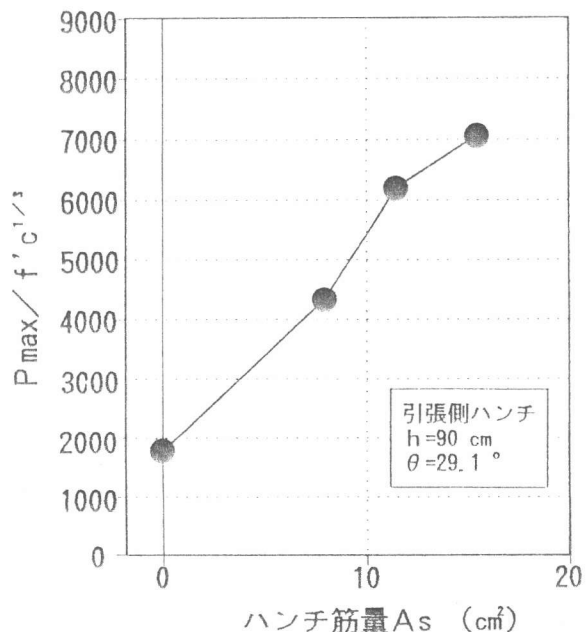


図-6  $P_{max}/f'c^{1/3}$ とハンチ筋量  $A_s$  の関係

荷点まで(一定)とし、ハンチの角度は $29.1^\circ$  (一定)とした場合のハンチ筋の量と $P_{max}/f'c^{1/3}$ の関係を図-6に示す。これより、ハンチ筋の量が減少すると直線的に耐力が減少していき、ハンチ筋を配置しない場合の値に近づく事がわかる。

(2) 圧縮側にハンチを設けた場合

i) ハンチの角度の影響について

圧縮側にハンチがあり、ハンチ筋を配置せず、ハンチの高さを荷点までとし、ハンチの角度のみ変化させた場合のハンチ角度と $P_{max}/f'c^{1/3}$ との関係を図-5(記号:□)に示す。これより、ハンチの角度が増大すると、せん断耐力も増大しており、引張側にハンチを設ける場合とは異なり、ハンチの角度が増加すると耐力も増大する結果となった。

また、同様の条件でハンチの大きさを荷点の1/2まで(一定)とした場合の結果を同図(記号:■)に示す。これより、ハンチの角度が増加するとせん断耐力も若干増大するが、ハンチの高さが荷点までの場合の傾向とは異なる結果となった。

ii) ハンチの高さの影響について

圧縮側にハンチがあり、ハンチ筋を配置せず、ハンチの高さを0から荷点までと増加させ、ハンチの角度は $18.4^\circ$  (一定)とした場合のハンチの高さと $P_{max}/f'c^{1/3}$ の関係を図-7に示す。これより、ハンチの高さが増加するとせん断耐力も増大することがわかる。

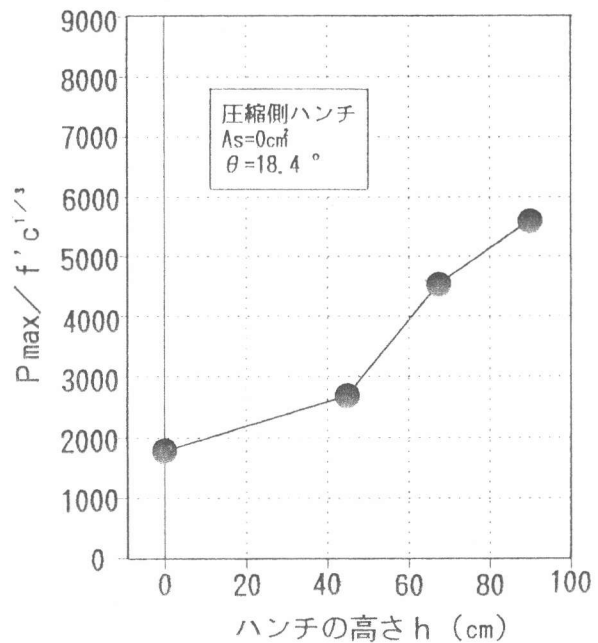


図-7  $P_{max}/f'c^{1/3}$ とハンチの高さ h の関係

4. まとめ

高架橋等のハンチを模擬した片ハンチを有する模型試験体による荷重試験の結果、得られたせん断破壊性状について、主な結果を以下に述べる。

- 1) 全ての試験体は、柱またはハンチ部でせん断破壊した。そのせん断破壊性状は、試験体の形状寸法により5つのタイプに区分されることを示した。
- 2) せん断耐力は、引張側にハンチを設けてハンチ筋を配置しないと、曲げひび割れが発生することによりハンチ部のせん断耐力は、ハンチを設けない場合とほぼ同じになる。しかし、ハンチ部にハンチ筋を配置すれば、ハンチの角度が増加するとせん断耐力も増大した。
- 3) せん断耐力は、圧縮側にハンチがあり、ハンチ筋を配置せず、かつ角度が一定の場合、ハンチの始点と荷点との関係で傾向が異なる。
- 4) せん断耐力は、圧縮側にハンチがあり、ハンチ筋を配置せず、ハンチの高さを荷点までとした場合、ハンチの角度が増加するとせん断耐力も増大した。

〔謝辞〕 実験を行うにあたり、JR東日本東京工事事務所試験室の皆様にご協力をいただき、ここに深く感謝の意を表す。

参考文献 1) 土木学会：コンクリート標準示方書【平成3年度版】設計編 pp.57、pp.170-172