

論文 機械式定着法を用いた鉄筋コンクリート造ト型柱梁接合部の動的な定着性状に関する研究

奥田 明久*¹・安達 洋*²・中西 三和*³・飯島 園子*⁴

要旨：近年、鉄筋コンクリート造柱梁接合部の施工法の合理化の一つとして、機械式定着法が開発された。しかし、その地震時の動的な定着性状については報告されていない。筆者等は、機械式定着法を用いたト型柱梁接合部を対象に静的及び動的載荷実験を行い、結果の比較から、載荷速度が最大耐力、定着性状に及ぼす影響を明らかにした。

キーワード：機械式定着法、ト型接合部、動的加力、静的加力、ひずみ速度

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以後、RC）造建物において、外柱と梁の接合部（以後、ト型接合部）は、通常梁主筋を接合部内で折り曲げ定着している。一方、近年施工法の合理化の一つとして梁主筋の端部に定着板、ナット等の突起物を設けることによって、接合部への埋込長さも短く、梁主筋を直線のままで定着させ得る機械式定着法が開発された。その実用化に際しては、静的載荷実験によって従来の折り曲げ定着と同等あるいはそれ以上の定着性能を持つことが確認されている [1]。しかし、近年のRC造建物の高層化に伴う材料の高強度化によって接合部に働く力が増大したこと、また最近の地震被害調査で柱梁接合部のせん断破壊や定着破壊が報告されていることから、地震時における柱梁接合部の動的な定着性状を調べる必要があるものと考えられる。

本論文は、RCに及ぼす載荷速度の影響を紹介するとともに、機械式定着法を用いたト型接合部の地震時の定着性状を把握することを目的として行ったRC造ト型接合部の静的及び動的載荷実験（以後、静的及び動的加力）に関する検討結果を報告したものである。

2. RCに及ぼす載荷速度の影響

一般に、地震時にRC造建物の部材の主筋が経験するひずみ速度（以後、動的ひずみ速度）の最大値の範囲は、 $10^{-3} \sim 10^{-1}$ [1/s]とされている [2]。また、静的材料実験を行う際に採用されるひずみ速度（以後、静的ひずみ速度）の範囲は、鉄筋で $2.5 \times 10^{-5} \sim 2.5 \times 10^{-4}$ [1/s]、コンクリートで $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-5}$ [1/s] ($0.2 \sim 0.3$ [MPa/s]) である [3]。既往の研究成果により、動的ひずみ速度の最大値の範囲で、鉄筋の降伏点強度、コンクリートの圧縮強度は、静的ひずみ速度の時の材料強度（以後、静的材料強度）に対し上昇し、その上昇率は、それぞれ式 (1),(2) で表し得ることが報告されている。また、筆者等は、RC造柱の静的及び動的水平加力実験に関する既往の文献調査より、動的加力した柱部材の最大耐力は、式 (1),(2) に静的材料強度を考慮して求めた材料強度を、各破壊モードの強度推定式に代入することで推定できることを明らかにした [4]。

*1 日本大学大学院 理工学研究科海洋建築工学専攻（正会員）

*2 日本大学教授 理工学部海洋建築工学科、工博（正会員）

*3 日本大学専任講師 理工学部海洋建築工学科、工博（正会員）

*4 日本大学 理工学部海洋建築工学科（正会員）

$$d f_y / s f_y = 1.2 + 0.05 \log | \dot{\epsilon}_D | \quad [2] \quad \dots(1)$$

$$d f_c / s f_c = 1.3699 + 0.1417 \log | \dot{\epsilon}_D | + 0.0135 (\log | \dot{\epsilon}_D |)^2 \quad [5] \quad \dots(2)$$

$d f_y$: 鉄筋動的降伏点強度、 $s f_y$: 鉄筋静的降伏点強度、 $d f_c$: コンクリート動的圧縮強度、
 $s f_c$: コンクリート静的圧縮強度、 $\dot{\epsilon}_D$: 動的ひずみ速度

3. 実験概要

3-1. 実験方法

本実験の対象とした試験体は、RC造建物における外柱と梁からなるT型接合部を模擬したものである。T型接合部の応力状態を図1に、その応力状態を再現させる実験装置を図2に示す。加力装置には、アクチュエータを使用し、梁部を変位制御で加力した。また静的油圧ジャッキを用いて、柱に一定軸力147[kN]を加えた。動的加力スケジュールを表1に、その変位振幅波形を図3に示す。変位振幅波形は、最大変位速度を一定として、各振幅ごと2サイクルずつ合計14サイクルの正弦波とした。動的加力に用いた変位振幅波形の最大変位速度は、対象構造物の最大層間変形速度が100[mm/s]であるとし[6][7]、柱長さ、梁長さの関係から93.75[mm/s]とした。また静的加力における最大変位速度はその1/1000倍とした。

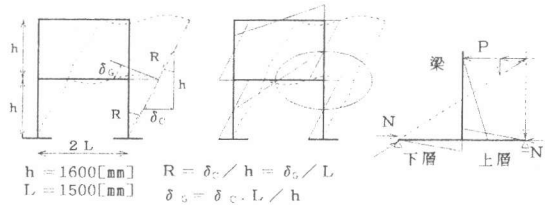


図1 T型接合部の応力状態

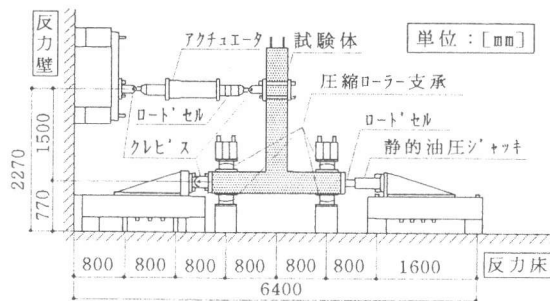


図2 実験装置

表1 動的加力スケジュール

サイクル	部材角 R	層間変位 δ_c [mm]	梁片振幅 δ_G [mm]	周期 T [s]
1-2	1/400	4.00	3.75	0.25
3-4	1/300	5.30	5.00	0.33
5-6	1/200	8.00	7.50	0.50
7-8	1/100	16.0	15.0	1.00
9-10	1/50	32.0	30.0	2.00
11-12	1/25	64.0	60.0	4.00
13-14	1/12	133.3	125.0	8.38

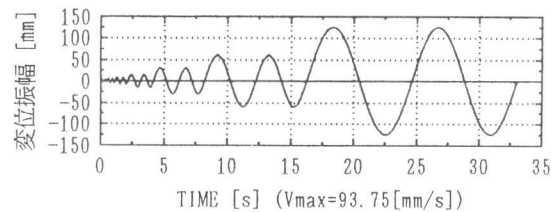


図3 変位振幅波形(動的加力)

3-2. 試験体及び使用材料

試験体は梁降伏先行型のT型接合部とし、配筋の異なる2種類の試験体について、それぞれ静的加力用、動的加力用の合計4体とした。試験体の詳細図を図4に、構造諸元を表2に示す。また、同図に梁主筋のひずみゲージ貼付位置も示す。梁主筋の定着金物の諸元を図5に示す。埋込長さが十分確保されている機械式定着法を用いたT型接合部の破壊モードは、梁主筋の降伏、接合

部ハネリゾーン（以後、ハネリ）のせん断破壊、定着金物周辺のコンクリートの支圧破壊等に分類される。B7MS,B7MD は、静的加力、動的加力ともに梁が曲げ降伏した後、ハネリのせん断破壊、支圧破壊をするように、B8MS,B8MD は、梁の曲げ降伏耐力、ハネリのせん断耐力を上げ、動的加力時に支圧強度の下限値（表 5、式 (4) 参照）が梁降伏強度（表 5、式 (10) 参照）と近い値になるように設計した。コンクリートの調査を表 3 に、コンクリート及び鉄筋の静的材料実験結果を表 4 に示す。梁及び柱の主筋にはネジ鉄筋（D19,D16）を、せん断補強筋には、異形鉄筋（D10）を使用した。

3-3. 測定項目

測定は、梁の水平荷重（以後、荷重）をアクチュエータに取り付けられているロードセルで、梁と柱の相対変位（以後、梁変位）を作動トランス型変位計で、また梁主筋のひずみをひずみゲージ（図 4 参照）で行った。

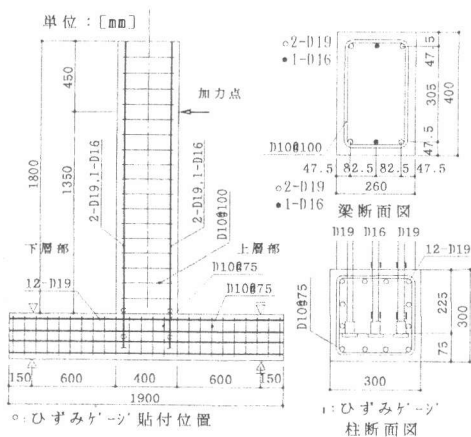


図 4 試験体詳細図

表 2 構造諸元

試験体名	梁		柱		接合部
	主筋	補強筋	主筋	補強筋	補強筋
B7MS 静的	4-D19	2-D10	12-D19	2-D10	2-D10
B7MD 動的	2-D16	2-D10 φ100			
B8MS 静的	6-D19	Pw=0.55 [%]	12-D19	Pw=0.63 [%]	2-D10
B8MD 動的					

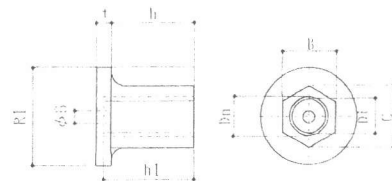
4. 実験結果の比較

4-1. 破壊状況

各試験体の最終破壊状況を比較して、図 6-a)~d) に示す。静的、動的加力にかかわらず各試験体の初期の破壊経過は同様で、部材角が 1/100 までに梁端の曲げひび割れ、梁主筋の曲げ降伏、ハネリのせん断ひび割れが発生している。各試験体で以後の破壊状況に差異が見られるが、以下の通りである。

B7MS ハネリのせん断破壊が顕著に起こり、定着部の支圧破壊によると思われる側方へのはらみ出しが見られた。

B7MD B7MS と同様、ハネリのせん断破壊が顕著であるが、支圧破壊によるはらみ出しは見られ



サイズ	ネジ部寸法		外径寸法					
	Dn	Di	R1	B	C	t	h	h1
D16	18.6	15.7	43	26	29	7	39	40
D19	22.3	18.9	50	32	36	6	40	40

単位:[mm]

図 5 定着金物の諸元

表 3 コンクリート調査

設計強度 [MPa]	配合強度 [MPa]	w/c [%]	単位量[kg/m ³]				
			セメント	水	細骨材	粗骨材	混和材
30	33	52.9	333	176	827	965	0.832

表 4 静的材料実験結果

コンクリート[MPa]			鉄筋[MPa]		
圧縮強度	引張強度		D19(SD490)	D16(SD345)	D10(SD295A)
32	3	降伏点強度	525	369	330
		引張強度	720	579	482
		ヤング係数	2.00x10 ⁵	1.95x10 ⁵	1.79x10 ⁵

なかった。

B8MS は、初めのせん断ひび割れは大きく進展せず、接合部背面に定着金物の押し抜きによると思われるひび割れが多数見られる。また、B7MSと同様、支圧破壊によると思われるはらみ出しも見られた。

B8MD B8MSとは異なり、梁端部の圧壊が激しく起こり、定着金物の押し抜きによると思われる接合部背面コンクリートの押し抜き破壊、梁端部主筋の座屈が確認された。

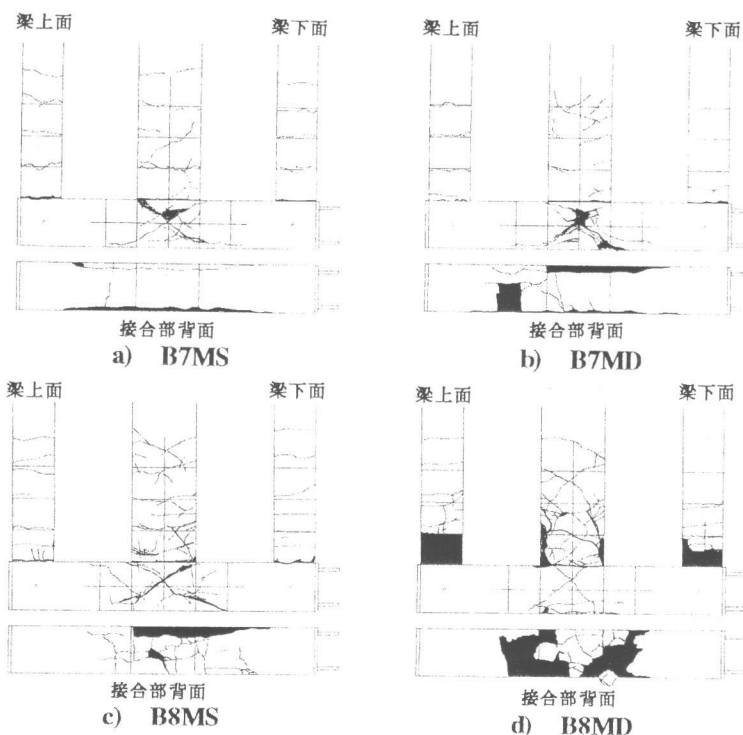


図 6 最終破壊状況

4-2. 荷重-変形関係

B7MSとB7MDの荷重-梁変位曲線を比較して図7-a),b)に示す。B7MDの最大耐力は、B7MSと比べ23[%]ほど上昇しているが、荷重-梁変位曲線の履歴形状は、双方ともせん断破壊や支圧破壊の特徴を表す逆S字型を示した。B8MSとB8MDの荷重-梁変位曲線を比較して図7-c),d)に示す。B8MDの最大耐力は、B8MSと比べあまり差が見られなかった。荷重-梁変位曲線の履歴形状は、部材角1/50サイクル以降、B8MSが逆S字型を示したが、B8MDは部材角1/12の第1サイクルまで、曲げ破壊の特徴である紡錘型を示した。

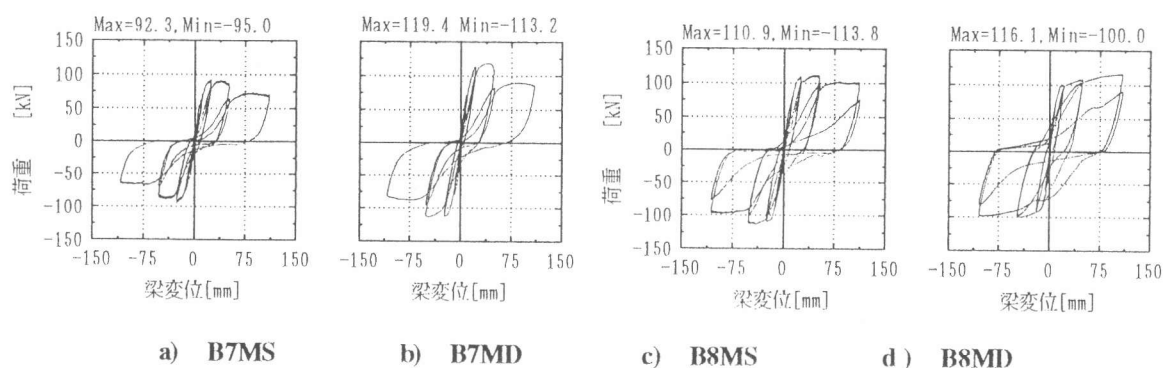


図 7 荷重-梁変位曲線

4-3. ひずみ速度の影響

動的加力を行ったB7MD,B8MDの降伏直前までの梁端部の主筋のひずみ速度と梁荷重の関係をそれぞれ図8-a),b)に示す。図8より動的加力による降伏直前までのひずみ速度の最大値は、約 10^{-2} [1/s]であることが分かる。また、静的加力では約 10^{-4} [1/s]であった。実験で得られた最大耐力を用いて、接合部の力の釣り合いから梁端部の主筋引張力(実験値)を算出し、実験値

と計算値を比較した。その結果を図9-a),b)に示す。計算に用いた各破壊モード時の強度推定式(3)~(10)を表5に示す[8][9]。各破壊モード時の主筋引張力の計算値は、前述した式(1),(2)と表4の静的材料強度からひずみ速度を考慮した材料強度を算出し、その材料強度を強度推定式(3)~(10)に代入して求めた。図9よりB7MS,B7MD,B8MSの実験値は、図中の σ_c がせん断破壊するときの下限値にほぼ一致している。またB8MDは図中の主筋降伏点強度の値にほぼ一致している。動的加力を行った試験体は、支圧破壊を引き起こしていないことから、支圧破壊耐力は載荷速度の増加に伴い計算値よりも上昇したことが推測される。

4-4. 押し抜きコン破壊耐力の検討

B7MDの最大耐力が、B7MSに比べ上昇しているにも関わらず、B8MSとB8MDの最大耐力にあまり差が見られなかった。これはB8MDでは、梁端部圧壊後、接合部背面の押し抜きコン破壊したことが要因と考えられる。ここでは、押し抜きコン破壊耐力(式(11))の検討を試みた。図10に押し抜きコン破壊の概念図と耐力式(11)[10]及び押し抜きコン破壊時には接合部内梁主筋の付着がなくなったものとして誘導した圧縮ひずみの計算式(12)を示す。実験で得られた接合部内の梁主筋最大圧縮ひずみ(実験値)と、圧縮ひずみの計算値を比較し表6に示す。

なお、計算値にはひずみ速度の影響を考慮した。表6よりB8MDの実験値は計算値を大きく上回っており、梁端部圧壊後、接合部内の付着が劣化し押し抜きコン破壊を併発させたものと考えられる。

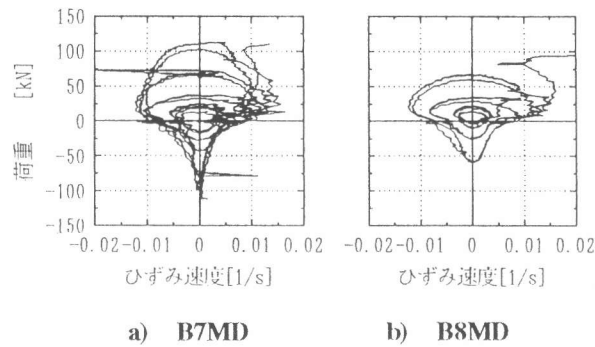


図8 荷重-ひずみ速度曲線

表5 各破壊モードの強度推定式

支圧破壊時の梁端部の主筋引張力(村上式[8]) $P_{s,A}$ 支圧破壊時の梁主筋の応力度 $\sigma_s = 324K\sqrt{f_c}$ [kgf/cm ²] $p_w \leq 0.4$: $K = 62.5 p_w - 0.12 p_w (f_c - 277) + 1$ $p_w > 0.4$: $K = 1.25 - 0.0005 (f_c - 277)$ 平均値 $P_{s,A}$ 、 下限値 $P_{s,L}$ $P_{s,A} = a_s \sigma_s$ (3) $P_{s,L} = 0.8 P_{s,A}$ (4)	
せん断破壊時の梁端部の主筋引張力 $P_{s,hL}$ (下限値) 終局強度型設計指針改訂案接合部せん断耐力[9] $V_{ju} = \kappa \phi F_j b_j D_j$ (5) 接合部形状係数(ト型) $\kappa = 2$ せん断強度の基準値: $F_j = 0.1 f_c$ ($210 \leq f_c \leq 360$) $F_j = 0.04 f_c + 20$ ($f_c > 360, \phi = 0.9$) $b_j = (b_c + b_a) / 2, D_j = \beta D_c$ $\beta = l_a / D_c$ 接合部の力の釣り合いより、 $Q_h = \frac{2j l_c}{(L l_c - l_b j)} \times V_{ju}$ $P_{s,hL} = \frac{L}{2j} Q_h$ (6)	
せん断破壊時の梁端部の主筋引張力 $P_{s,hA}$ (平均値) 接合部せん断耐力平均値[9] $V_{jA} = v_j l_a b_j$ $f_c \leq 360 \Rightarrow v_j = f_c \cdot 0.2 + 0.44 p_w \sigma_{wy} / f_c$ $f_c > 360 \Rightarrow v_j = 0.11 f_c + 56$ $Q_h = \frac{2j l_c}{(L l_c - l_b j)} \times V_{jA}$ $P_{s,hA} = \frac{L}{2j} Q_h$ (8)	
梁端部の主筋引張強度時の引張力 P_t $P_t = a_s f_t$ (9)	
梁端部の主筋降伏時の引張力 P_y $P_y = a_s f_y$ (10)	
p_w : 外周の横補強筋比 f_c : コンクリート圧縮強度 [kgf/cm ²] p_{wy} : 横補強筋比 l_c : 柱長 l_b : 梁長 L : 梁内法長 D_c : 柱せい b_j : 接合部有効幅 b_c : 柱幅 b_a : 梁幅 j : 応力中心距離 f_t : 梁主筋引張強度 f_y : 梁主筋降伏点強度 [kgf/cm ²] l_a : 定着長さ D_j : 接合部有効せい a_s : 梁主筋断面積	

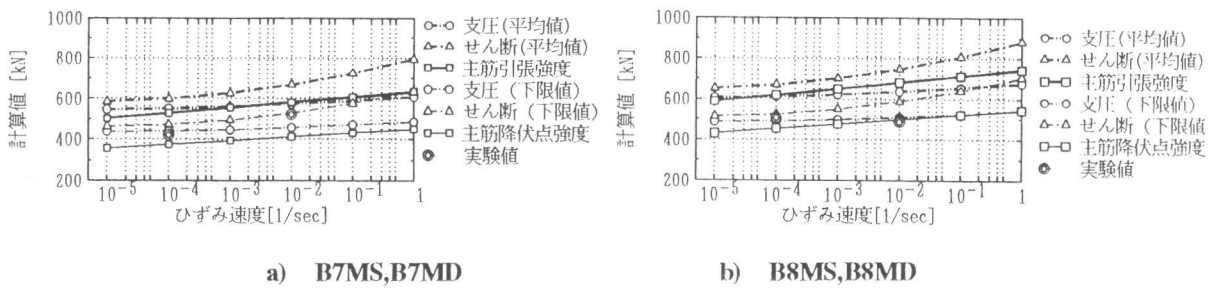


図9 実験値と計算値の比較

5. まとめ

機械式定着法を用いた梁降伏型T型接合部を対象に静的及び動的载荷実験を行い、両実験結果の比較から以下の知見を得た。

1) B7MS, B7MDの結果の比較から、最大耐力に差が見られた。B7MDの最大耐力は、B7MSに対し23[%]ほど上昇した。

2) B8MS, B8MDの結果の

比較から、破壊性状に差異が見られた。梁の曲げ降伏後に、B8MSにH¹初のせん断破壊、支圧破壊が見られたのに対し、B8MDには梁端部のコンクリートの圧壊後の接合部背面のコンクリートの押し抜きコン破壊が見られた。B8MDの最大耐力はB8MSとあまり差がなく、梁端部コンクリートの圧壊後の押し抜きコン破壊を併発したことが要因と考えられた。

3) 動的加力時、支圧破壊が見られなかったことから、载荷速度の増加に伴う支圧破壊耐力の上昇は、計算値を上回っていたことが推察され、今後、動的加力時の支圧破壊の現象を調べる必要がある。

以上のことから、静的材料強度を用いて梁降伏先行型に設計したT型接合部は、地震時に载荷速度の影響により材料強度が上昇し、定着性状や最大耐力に変化が起ることが分かった。

謝辞 実験計画の際、近畿大学の村上雅英先生、株式会社青木建設研究所の北嶋圭二氏に多大なる助言を頂き、加力方法の決定の際には、東海興業株式会社技術開発部の牛丸裕氏に大変お世話になりました。また、東京鉄鋼株式会社より鉄筋材料を提供して頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

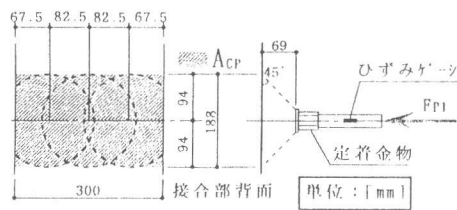
参考文献

[1] 村上他：接合部にはり主筋を機械式定着した部分架構の強度と靱性、コンクリート工学、Vol.16、No.2, pp717、1994
 [2] 小谷俊介：解説・鉄筋コンクリートにおける载荷速度の影響、コンクリート工学、Vol.21、No.11, pp23-34、1983
 [3] JIS 平成5年6月改正
 [4] 奥田他：鉄筋コンクリート造柱の最大耐力に及ぼす载荷速度の影響に関する研究(その1, その2)、日本建築学会大会、pp.409-411, 1995.8
 [5] 藤本他：高速荷重を受ける鉄筋コンクリート造柱に関する実験的研究、日本建築学会大会、pp.753、1988.10
 [6] 細矢他：鉄筋コンクリート部材の耐力と破壊性状に及ぼすひずみ速度の影響に関する研究 - せん断破壊型柱部材の静的及び動的の水平加力実験 -、コンクリート工学、Vol.5、No.1, pp.39-49、1994.1
 [7] 細矢他：鉄筋コンクリート部材の耐力と破壊性状に及ぼすひずみ速度の影響に関する研究 - 材料実験と高軸力が作用する柱部材の水平加力実験 -、コンクリート工学、Vol.4、No.2, pp.43-55、1993.7
 [8] 村上他：高強度電炉鉄筋の開発に関する研究(その20, その21)、日本建築学会大会、pp.125-127、1993.7
 [9] 日本建築学会：靱性設計小委員会報告書、1992
 [10] (株)竹中工務店：竹中鉄筋J¹定着法
 [11] 村上他：高強度材料を用いたRC構造物のはり主筋の機械定着に関する実験(その1, その2)、日本建築学会大会、pp.909-911、1992.8

表6 実験値と計算値の比較

試験体	主筋	位置	実験値	計算値	
B7MS	上端	外	345	762	
		内	368		
	下端	外	278		
	内	334			
B7MD	上端	外	146		812
		内	197		
	下端	外	131		
	内	169			
B8MS	上端	外	761	595	
		内	433		
	下端	外	469		
	内	543			
B8MD	上端	外	1032		635
		内	668		
	下端	外	1172		
	内	717			

単位：[μ]



押し抜きコン破壊の終局耐力
 $P_{PI} = A_{CP} \sqrt{F_c}$ 文献10)....(11)
 A_{CP} : コン破壊面 [文献11]
 F_c : コンクリート圧縮強度
 押し抜きコン破壊時の鉄筋ひずみの計算値
 $\epsilon_{PI} = P_{PI} / (A_s \cdot E_s)$ (12)
 A_s : 圧縮側鉄筋断面積、 E_s : 鉄筋ヤング係数

図10 押し抜きコン破壊概念