論文　定着長の短い機械式定着強度に関する検討

丸田　誠[*1]・永井　覚[*2]

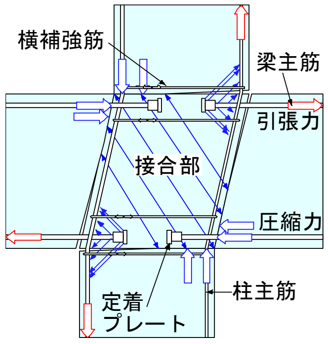
要旨：定着長の短い梁筋の機械式定着に関して RC 柱からの引抜実験を行った。想定破壊形式はコーン状破壊で，実験因子をコンクリート強度，定着長，横補強筋の有無，補強筋量および横補強筋の配置とし，16 体（32 箇所）の試験体に関して実験を実施した。その結果，45 度に破壊線を想定した場合，コーン状ひび割れ強度を，$0.313\sqrt{\sigma_B}\cdot A_c$（Ac：有効水平投影面積，$\sigma_B$：コンクリート圧縮強度）の 0.5 倍，横補強筋の効果（(Σ$a_w\cdot\sigma_{wy}$：コーン状破壊面を横切る全横補強筋力)を 0.7 として両者を加算すれば，定着長の短い機械式定着の引抜実験結果を概ね安全側に評価できることが分かった。

キーワード：柱梁接合部，機械式定着，引抜実験，コーン状破壊，短定着

1. はじめに

近年，鉄筋コンクリート建物において梁主筋の外柱への定着には機械式定着法が多く用いられている。その定着法に関しては，文献 1）などに詳細に示されている。また最終破壊強度は，側面剥離強度式 [2)]，掻き出し破壊強度式 [3)]，コーン状破壊に対するマクロモデル [4)]などが提案されている。

側面剥離破壊とコーン状破壊（掻き出し破壊）の両者を比較して機械式定着の最終強度は定められるが，その定着長を柱せい D の 2/3D 以上もしくは 3/4D 以上，かつ定着長を 15db（db：主筋径）以上と規定することで事実上，側面剥離強度の計算のみで設計は行われている。これは地震時にコーン状破壊を避けるため，柱梁接合部の圧縮ストラット内に引張定着部を配置する仕様規定となっている。しかし，コーン状破壊の耐力を正確に把握し，短い定着長での設計の可能性を探ることや，**図－1** に示す柱梁接合部左右の梁主筋をそれぞれ単独に接合部内に機械式定着させる「梁主筋定着型接合部」[5)]の検証には，コーン状破壊強度の検討が不可欠となる。特に梁主筋の定着長が柱せい D の 1/2D 以下の場合，定着部から斜め 45 度に生じるコーンひび割れが拡大して破壊する「コーン状破壊」が生じる可能性が高い [2)]。そこで，



図－1　梁主筋定着型接合部

本研究では，柱梁接合部内に短定着された梁主筋機械式定着部のコーン状破壊強度などを検討するため，引抜実験を実施した。特に，定着長によるコーン状ひび割れ発生強度と定着強度への横補強筋の影響やコーン状破壊強度式について本論文では報告する。

2. 実験計画

表－1 に試験体一覧を，**図－2** に試験体形状・加力方法を示す。試験体配筋を**図－3** に示す。試験体は縮尺 1/2 程度の部分架構を想定した引抜試験体 16 体で，1 体につき 2 箇所の試験箇所を有しており，合計 32 箇所の実験を実施した。

実験は窪田ら [2)]に倣い，引抜く鉄筋（以後，「梁主筋」）の両側を単純支持させて，単調載荷の引抜実験とした。支持点位置は，柱の反曲点位置と梁の圧縮合力位置を想定した。梁主筋は降伏が生じない様に 2-D25-SD685 で共

表－1　試験体一覧

試験体	ｺﾝｸﾘｰﾄ強度 Fc [σB]*1 (N/mm^2)	梁主筋定着長 *2	横補強筋 *3	柱主筋*4
No.1		11d_b		2-D16
No.2	36 [42.0]	8d_b		2-D13+1-D10
No.3		5 d_b		3-D10
No.4	60 [62.5]	11d_b	無し	2-D19
No.5	60 [62.5] 60 [57.0]	8d_b		2-D16
No.6	60 [57.0]	5d_b		2-D13
No.7			8－D10	2-D22
No.8	36 [42.0]		4－D10	2-D19+1-D13
No.9			4－D13	2-D22
No.10	60 [62.5]		8－D10	2-D22＋1-D13
No.11			4－D10	2-D19+1-D10
No.12		8d_b	16-D10	2-D22
No.13			12-D10	2-D19+1-D10
No.14	36 [42.0]		8-D10	2-D19
No.15			16-D10 束ね	2-D22
No.16			8-D16	2-D22

*1　Fc：ｺﾝｸﾘｰﾄ設計基準強度，σ_B：実験時ｺﾝｸﾘｰﾄ圧縮強度，*2　d_b：梁主筋径，*3　図 2 に示したコーン破壊面を横切る横補強筋で，ロの字型補強筋は 2 本と換算。横補強筋強度は No.7~No.11：SD785，No.12~No.16：SD345，*4　D10：SD785，その他：SD490

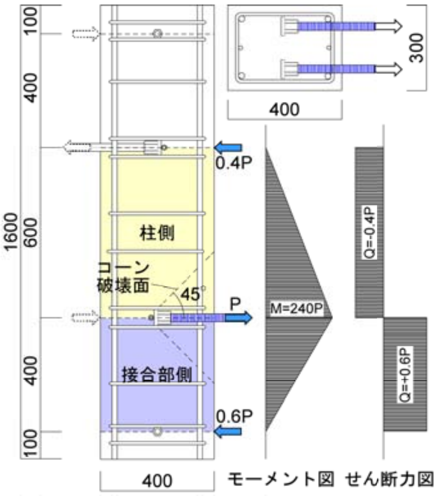
*1 島根大学　総合理工学部　材料プロセス工学科　教授　博(工)　(正会員)
*2 鹿島技術研究所　建築構造グループ　上席研究員　工修　(正会員)

通としたが，柱筋は柱梁耐力比率を約 1.2 と設定し，梁主筋定着部のコーン状破壊強度計算値（式(1)）[6]の 1.2 倍程度の柱曲げ終局強度となるように柱筋を配した。

$$Pcu = \gamma \cdot \phi \cdot 0.313\sqrt{F_c} \cdot A_c + k_w \cdot a_w \cdot \sigma_{wy} \qquad (1)$$

ここに，

γ　：ひび割れの低減係数で γ ＝0.6



図－2　試験体形状・加力方法(No. 8)

表－2　鉄筋の機械的性質

	鋼種	降伏強度 (N/mm^2)	ﾔﾝｸﾞ係数 Es (10^5N/mm^2)	降伏ひずみ (μ)
柱	D10-SD785	836	2.05	4071
	D13-SD490	570	1.89	3014
	D16-SD490	543	1.85	2929
	D19-SD490	527	1.93	2736
	D22-SD490	547	1.94	2814
梁	D25-SD490	724	1.98	3658
横補強筋	D10-SD785	848	2.05	4144
	D13-SD785	856	1.89	4525
	D10-SD345	392	1.89	2076
	D16-SD345	387	1.89	2051

曲げひび割れが発生しない場合は γ ＝1.0

ϕ　：ϕ ＝1.0

A_c　：コーン破壊面の有効鉛直投影面積

k_w　：横補強筋有効係数で k_w=0.7

a_w　：定着筋の直上直下に配置された 2 組のせん断補強筋の合計断面積

σ_{wy}：補強筋の短期許容応力度

この式は，各種合成構造設計指針 [7]のコーン状破壊の引張力に，文献 3) の掻き出し破壊式の中の横補強筋の項を加えた式で，定着板の上下 1 組ずつの横補強筋のみ有効としている。

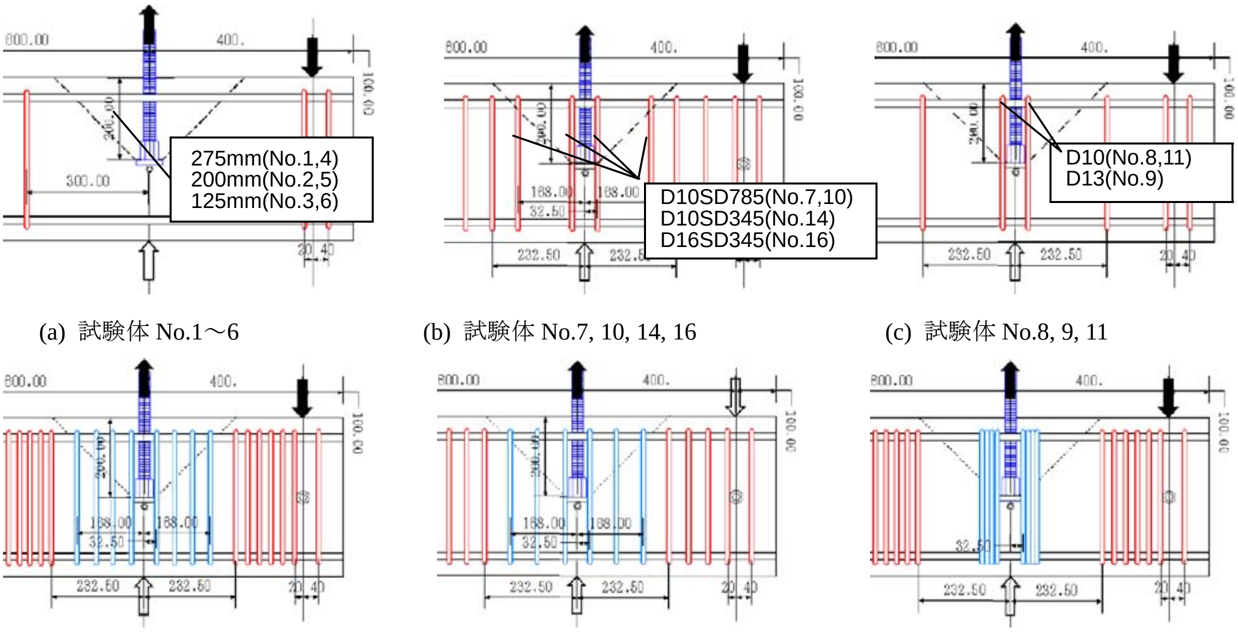
一方，多くの機械式定着ではコーン状破壊の検討に，折り曲げ定着法で折り曲げ内部のコンクリートを塊状に掻き出す破壊強度算定法 [3]を用いている [1]。本論文では，式(1)をコーン状破壊強度式，文献 3）による方法を掻き出し破壊強度式と区別して検討する。

表－1 中に試験体のコンクリート強度を，**表－2** に使用した鉄筋の機械的性質を示す。

実験因子は，コンクリート強度，定着長，横補強筋の有無，補強筋量および横補強筋の配置（太径，束ね）とした。

コンクリート強度が定着耐力に影響すると考えられることから，本実験でもコンクリート強度（Fc36, Fc60）を実験因子とした。定着長さは，コーン状ひび割れ面の大きさ，即ち，コーン状ひび割れ強度に影響すると考えられる。そこで，定着長さとして，横補強筋が無い場合について 11db，8 db，5 db（db：梁主筋径）を実験因子とした。

コーン状ひび割れが入った後，梁主筋引張力はコンク



(a) 試験体 No.1～6　(b) 試験体 No.7, 10, 14, 16　(c) 試験体 No.8, 9, 11

(e) 試験体 No.12　(e) 試験体 No.13　(f) 試験体 No.15

図－3　試験体配筋

リートを介して横補強筋に伝達されると予想される。そこで横補強筋を有する試験体では，定着長を 8 d_b と統一し，横補強筋量，横補強筋強度を因子とした。また，配筋方法である横補強筋径や束ね配筋の影響も把握するためにこれも因子とした。なお，45 度のコーン状破壊面を横切る全横補強筋量を本論文での補強量と定義した。横補強筋量は，4-D10，4-D13，8-D10（SD785），4-D10~16-D10，8-D16（SD390）と変化させた。径や束ね配筋の検討には No.12, 15, 16 試験体を用いた。No.12, 15,試験体は，同じ横補強量（16-D10 SD390）だが，No.12 はコーン状破壊面に均等に，No.15 は定着板にほぼ隣接して束ね鉄筋とした。また，No.16 は太径鉄筋 8-D16(SD390)を配し，配筋方法の影響を検討することとした。

試験体製作にあたり，横補強筋は全て溶接閉鎖型とし，コンクリートは柱側面から打設した。各試験体の梁主筋の引張荷重，載荷点の柱変形，梁主筋の抜出し変形，柱主筋ひずみ，横補強筋ひずみ，梁主筋ひずみを主に計測した。

表－4　実験結果・計算値一覧

試験体	実験結果		計算値		
	最大強度 Pu1, Pu2 (kN)*1	破壊形式 *2	コーン状破壊強度 Pc(kN)*3	掻き出し破壊強度 Ps(kN)*4	側面剥離破壊強度 Psf(kN)*5
No.1	178, 169	S, S	218	406	668
No.2	130, 137	Cc, S	163	272	668
No.3	90, 93	Cc, Cc	108	159	708
No.4	241, 235	S, S	266	495	810
No.5	171,65	Cc,Cc	199, 90	332,317	801,839
No.6	111, 112	Cc, Cc	126	186	825
No.7	449, 461	Cf, Cf	502	611	808
No.8	362, 388	Cw, Cs	333	441	784
No.9	430, 462	Cf, Cf	467	576	808
No.10	518, 499	Cw, Cs	538	671	892
No.11	341, 379	Cw, Cs	368	501	872
No.12	475, 454	Cw, Cw	477	586	808
No.13	348, 388	Cw, Cw	398	507	808
No.14	313, 310	Cw, Cs	320	429	808
No.15	460, 470	Cf, Cf	477	586	808
No.16	473, 476	Cf, Cf	591	661	760

*1　試験箇所 2 箇所／1 体のうち，Pu1：最初の結果，Pu2：2 回目の結果
*2　Cc：コンクリートひび割れによるコーン破壊，S：せん断破壊，
Cw：補強筋降伏後コーン状破壊，Cs：コーン状ひび割れ後せん断破壊，
Cf：柱主筋の引張降伏後コーン状破壊
*3　式（1）に示されるコーン状破壊強度計算値。ただし，コーン破壊面を横切る補強筋全てを考慮
*4　文献 3)に示される掻き出し破壊強度計算値
*5　文献 2),6)に示される側面剥離破壊強度 ただし，60N/mm^2 以上のコンクリートの場合，文献 8）の式を用いた

3. 実験結果

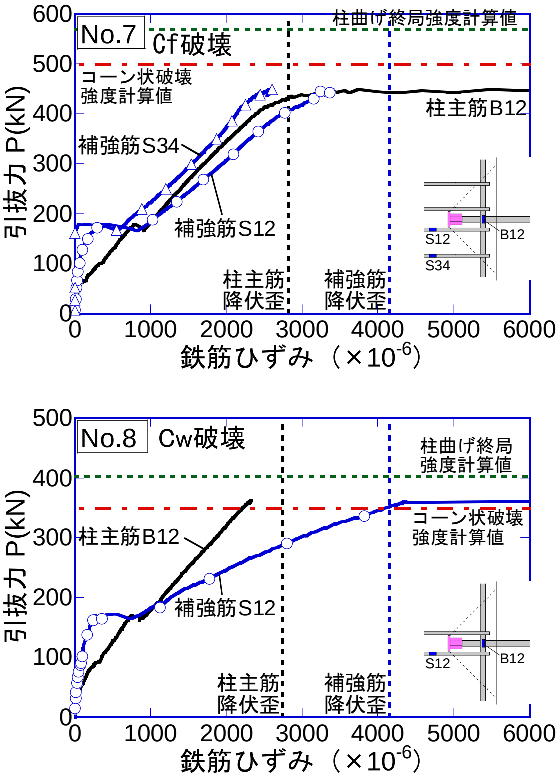
表－4 に実験結果一覧及び計算強度一覧を，**図－4** に代表的な梁主筋引抜力－各鉄筋のひずみ関係例を，**写真－1** に代表的な最終状況を示す。

3.1 破壊状況

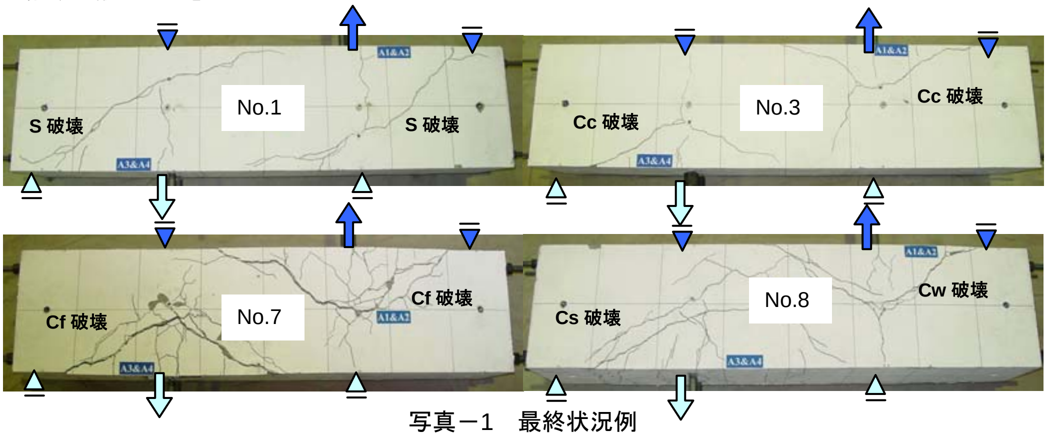
最終破壊性状を下記の 5 種類に定義した。

① コーン破壊（Cc 破壊）
② せん断破壊（S 破壊）
③ コーン状ひび割れ後横補強筋降伏（Cw 破壊）
④ コーン状ひび割れ発生後せん断破壊（Cs 破壊）
⑤ コーン状ひび割れ後柱主筋降伏（Cf 破壊）

各試験体ともに，まず，梁主筋の定着位置に柱の曲げひび割れが生じ，次に，定着プレートから接合部側約 45 度方向にせん断ひび割れが生じた。**写真－1** の No.1 のよ



図－4　引抜力－鉄筋ひずみ関係例



写真－1　最終状況例

うにせん断破壊(S 破壊)した試験体では, コーン状ひび割れを形成せずに，このせん断ひび割れが伸展・拡大して最大強度を示した。一方，各種コーン状破壊した試験体では，柱側にも定着プレート位置から約 45 度方向にせん断ひび割れが生じ，コーン状のひび割れを形成した。補強筋が無い試験体は, この時点で最大強度を示した(Cc 破壊，例として**写真－1** の No.3)。補強筋を有する試験体は，その後，柱主筋の降伏(Cf 破壊，例として**図－4** 及び**写真－1** の No.7) または，補強筋の降伏(Cw 破壊，例として**図－4** 及び**写真－1** の No.8) ，のいずれかで最大強度を示した。Cw 破壊では，**図－4** の No.8 の様に柱主筋の降伏前に補強筋が降伏したが，Cf 破壊では，**図－4** の No.7 の様に，補強筋が降伏ひずみに達する前に，また，柱の曲げ終局強度計算値に達する前に柱主筋が降伏する現象が見られた。柱主筋には，曲げモーメントによるひずみと定着機構に起因する付加的なひずみが生じたため，早期に降伏が生じたと考えられる。短定着の場合，柱梁耐力比率を大きくした柱配筋とする必要がある。

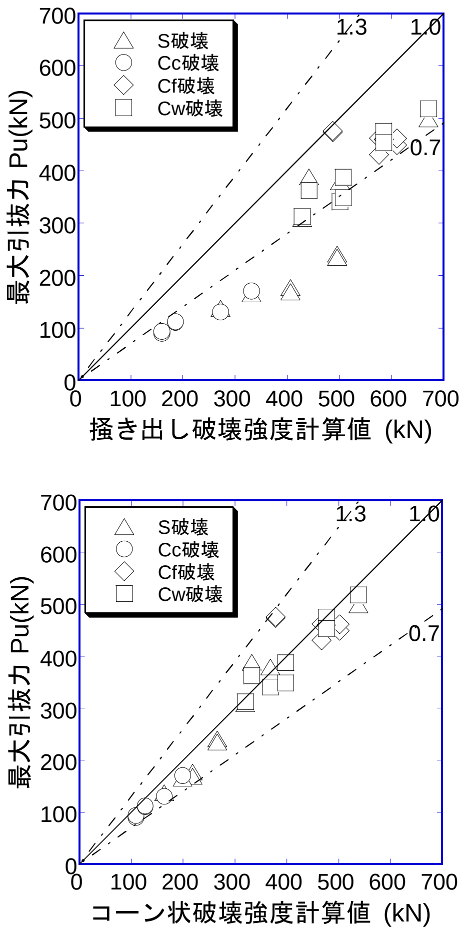
3.2 最大強度

定着長が長いほど，コンクリート強度が高いほど，横補強筋量が多いほど，より大きな定着強度が発揮された。No.12, 15 試験体では，束ね配筋の影響によらず，ほぼ同等な最大強度が得られた。

表－4 中に各計算強度を示した。この中で側面剥離破壊強度 [2]は，定着長の短い場合には対象外であるが参考のため示した。側面剥離破壊強度は，実験よりかなり大きな値となった。

図－5 に，掻き出し破壊強度式 [3]及びコーン状破壊強度式(1)による計算値と最大引抜力の関係を示す。簡単化のため，Cs 破壊は S 破壊としてプロットした。コーン状破壊強度の算定ではコーン状破壊面を横切る補強筋全てを考慮した。これより，コーン状破壊(Cc, Cf, Cw)した実験結果に対して，掻き出し破壊式は折り曲げ定着を対象にしていることもあり，本実験のような短定着の機械式継手の場合，過大評価となった。一方，コーン状破壊強度式は掻き出し破壊式に比べ良い一致を示し，破壊形式別の実験値／計算値の平均値は Cc 破壊：0.85，Cf 破壊：1.03，Cw 破壊：0.97 であった。これより，Cc 破壊は若干大きめに評価するが，Cf 破壊，Cw 破壊は大凡一致している。ただし，Cf 破壊の No.16 試験体では実験値に比べて計算値が非常に小さく，これを除いた Cf 破壊の実験値／計算値の平均値は 0.94 である。No.16 は，式(1)中の横補強筋力が他の試験体より過大で，二組目の横補強筋が十分効く前に柱筋が降伏したためである。既往評価式(1)は，Cf 破壊を対象としておらず，今後の検討課題である。

Cc 破壊に関して，No.1～No.6 まで定着長を因子としたが，定着長が長くなるとコーン状破壊強度は上昇し，この実験結果と式(1)の関係は概ね比例していた。



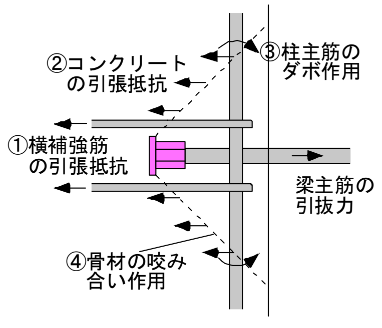
図－5 既往評価式計算値と最大引抜力の関係

4. 考察

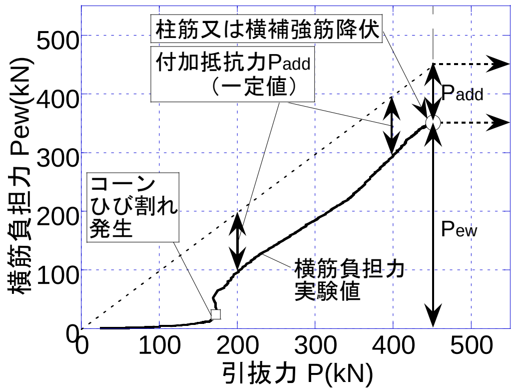
4.1 コーン状破壊の抵抗機構に関する検討

一般的に，コーン状破壊に対する抵抗機構としては，**図－6** の様に，①横補強筋の引張抵抗，②コンクリートの引張抵抗，③柱主筋のダボ作用，④ひび割れ面の骨材の咬み合い作用，などが考えられる。コーン状破壊強度式(1)では，上記のうち，①と②の抵抗成分が大きいとして評価式が示されている。ここでは，本実験結果を用いて，コーン状破壊に対する抵抗機構の検討を行った。

コーン状破壊に対する抵抗機構を把握するため，横補



図－6 抵抗要素概要



図－7　引抜力－横筋負担力関係例（No. 7）

強筋の引張抵抗寄与分の検討を行った。**図－7** に引抜力 P と横補強筋負担力 P_{ew} の関係例を示す。Cf 破壊又は Cw 破壊した試験体について，コーン破壊面を横切る全横補強筋のひずみから，横補強筋の引張抵抗による負担力 P_{ew} を求めた。その結果，引抜力 P と横筋負担力 P_{ew} の関係は試験体によらず，各試験体ともほぼ同様な傾向を示し，P_{ew} はコーンひび割れ（**図－7** では約 175 kN）まで小さいが，それ以後増大する傾向となった。また，コーン状ひび割れ発生後から，P と P_{ew} の差分がほぼ一定となり，横筋又は柱筋が降伏（**図－7** の○印）に至るまで保つ傾向が示された。この一定値は，先に示した抵抗機構のうち，②～④の抵抗機構に起因すると考えられる（以後，この一定値($P-P_{ew}$)を「付加抵抗力 P_{add}」と呼ぶ)。したがって，コーン状破壊強度は，横筋負担力 P_{ew} と付加抵抗力 P_{add} の累加強度で評価できることを示している。しかし，これら②～④の抵抗機構を分離し評価するまでには今回の検討では至っておらず，今後の検討課題としたい。

4.2 横補強筋の引張抵抗寄与分

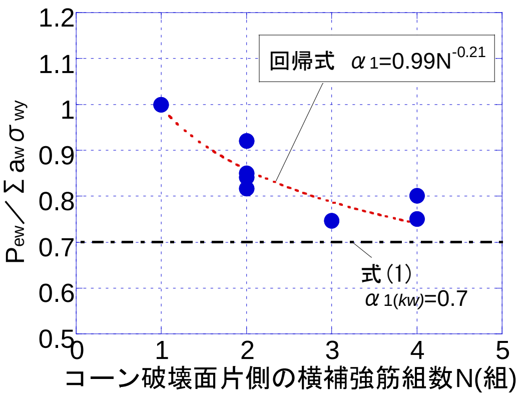
Cw 破壊した試験体で，定着板の上下に横補強筋を一組ずつ配した試験体ではコーン状破壊時に横補強筋が降伏したが，複数組みの横補強筋を配した試験体では，定着板に最近傍の横補強筋だけが降伏した。そこで，**図－8** に，$P_{ew}/\Sigma a_w\cdot\sigma_{wy}$　($\Sigma a_w\cdot\sigma_{wy}$：コーン状破壊面を横切る全横補強筋力)と補強筋組数の関係を示す。横補強筋組数はコーン破壊面片側の組数として表示している。これより，$P_{ew}/\Sigma a_w\cdot\sigma_{wy}$ は，横補強筋組数が多くなると減少する傾向が明確であり，横補強筋組数が 1 の場合には $P_{ew}/\Sigma a_w\cdot\sigma_{wy}$ は 1.0 であるが，それ以上では概ね 0.75～0.8 程度である。一方，コーン状破壊強度式(1)の $P_{ew}/\Sigma a_w\cdot\sigma_{wy}$ の規程値は k_w =0.7 であり，本実験結果を安全側に評価している。

4.3 コンクリートの引張抵抗

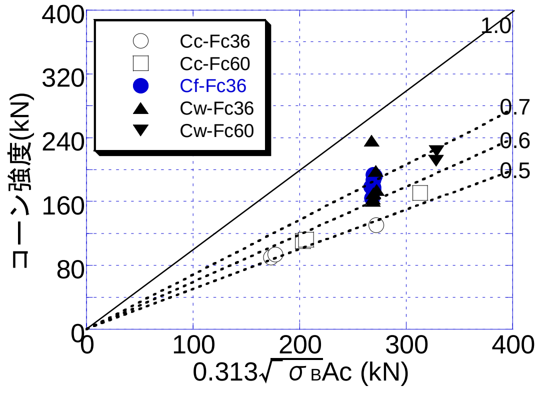
3.2 節では，コーン状破壊強度式(1)は Cc 破壊を大きめに評価した。そこで**図－9** に，コンクリートのコーン強度と $0.313\sqrt{\sigma_B}\cdot A_c$（Ac：有効水平投影面積，$\sigma_B$：コンクリート圧縮強度）の関係を示す。コーン強度としては，Cc 破壊試験体では最大強度とし，また，Cf 及び Cw 破壊試験体ではコーン状ひび割れ強度とした。これより，コンクリート圧縮強度や定着長の因子に影響を受けずに，横補強筋の無い試験体のコーン強度は $0.313\sqrt{\sigma_B}\cdot A_c$ の 0.5 倍程度，横補強筋を有する試験体のコーンひび割れ強度は $0.313\sqrt{\sigma_B}\cdot A_c$ の 0.7 倍程度となった。特に，横補強筋の多い No.12 試験体では $0.313\sqrt{\sigma_B}\cdot A_c$ の 0.88 倍であったことも勘案すると，横補強筋量が多いほどコンクリートの引張抵抗寄与分は大きくなると考えられる。

4.4 コーン状破壊強度

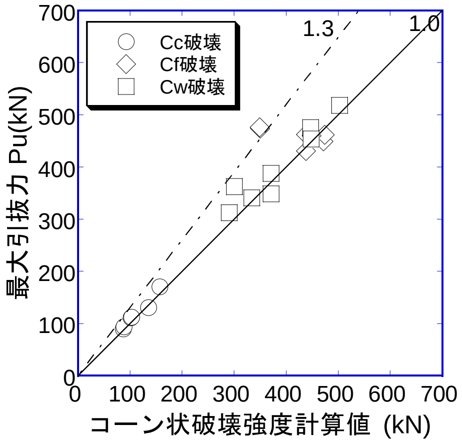
4.2～4.3 節より，本研究で対象とするような短定着の場合のコーン状破壊強度は，横筋負担力 P_{ew} と付加抵抗力 P_{add} の累加強度として評価することが可能であるが，現状では P_{ew} と P_{add} として，①横補強筋の引張抵抗，及び，②コンクリートの引張抵抗のみを考慮する。この場合，式(1)と同様な評価式となる。ただし，**図－5** から式(1)では Cc 破壊などの下限を抑えられていない。4.3 節の検討から，実験最大引抜力と式(1)の γ を無補強試験体での 0.5（$0.5\times 0.313\sqrt{\sigma_B}\cdot A_c$）とし，45 度のコーン状破壊面を横切る全横補強筋量を考慮し k_w=0.7 で評価した場合の新規計算値と実験結果の比較を**図－10** に示す。ただし，



図－8　横補強筋組数の影響



図－9　$0.313\sqrt{\sigma_B}\cdot A_c$ とコーン強度の関係



図－10　新規計算値と最大引抜力の関係

この図では S（Cs）破壊の試験体を省いている。Cf 破壊の試験体は参考のため入れている。

この図より，式(1)の γ を 0.5 として計算した結果は概ね実験結果を安全側に評価できることが分かった。上記に示した式(1)の変更により，定着長の短い機械式定着のコーン状破壊を予想することが可能となり，それを防止するようなコンクリート強度や配筋の組み合わせも可能となる。

5. まとめ

従来に比べて定着長が短い場合の定着性状を把握することを目的に，機械式定着された鉄筋の引抜実験を実施し，以下の知見を得た。

(1) 定着長が長いほど，コンクリート強度が高いほど，横補強筋量が多いほど，より大きな定着強度が発揮された。また，同横補強筋量であれば，その横補強筋径や束ね配筋の影響によらず，ほぼ同等な最大定着強度が得られた。

(2) 破壊形式は，横補強筋が無い場合にはコーン破壊（Cc 破壊）し，横補強筋がある場合にはコーン状ひび割れ後の①横補強筋降伏（Cw 破壊），②せん断破壊（Cs 破壊），③柱主筋降伏（Cf 破壊）に大別された。Cf 破壊は，柱主筋が局部曲げを受けるため，柱曲げ降伏計算値に比べて小さい荷重で柱主筋が降伏した。

(3) 定着長が 2/3D 以上の場合に用いられている，掻き出し破壊強度式[3)]は，短定着の本実験を過大評価した。既往のコーン状破壊強度式(1)で，45 度コーン状破壊面を横切る補強筋全てを考慮した場合，コーン状破壊(Cc, Cf, Cw)した実験結果に対して，実験値／計算値の平均値は 0.85（Cc 破壊），1.03（Cf 破壊），0.97（Cw 破壊）となった。

(4) Cf 破壊は式(1)では対象としておらず，横補強筋力でコーン状破壊強度を大きくとる場合は柱筋量を多くし Cf 破壊を防止することが必要となるが，この点は今後の課題である。

(5) コーン状破壊に対する抵抗機構の検討より，①横補強筋の無い試験体のコーン強度は $0.313\sqrt{\sigma_B}\cdot A_c$ の 0.5 倍程度，横補強筋を有する試験体のコーン状ひび割れ強度は $0.313\sqrt{\sigma_B}\cdot A_c$ の 0.7 倍程度となり，横補強筋量が多いほどコーン強度は大きくなった。

(6) 横補強筋の引張抵抗寄与分として，横筋負担力 $P_{ew}/\Sigma a_w\cdot\sigma_{wy}$ は，横補強筋組数が多くなると減少する。横補強筋組数が 1 の場合には $P_{ew}/\Sigma a_w\cdot\sigma_{wy}$ は 1.0 であるが, それ以上では概ね 0.75～0.8 程度であった。

(7) 式(1)の γ を 0.5，45 度のコーン状破壊面を横切る全横補強筋量を考慮し k_w=0.7 で評価した場合，計算値は，概ね実験結果を安全側に評価できることが分かった。

謝辞：本研究は故 宇佐美滋氏の指導により実施しました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

1) 日本建築総合試験所・機械式鉄筋定着工法研究委員会：機械式鉄筋定着工法設計指針，2010 年
2) 村上雅英，藤達也，窪田敏行：引き抜き試験によるはり主筋の機械式定着耐力の評価，コンクリート工学論文集，第 8 巻，第 2 号，pp.1~10，1997.7
3) 城攻，後藤康明，柴田拓二：RC 柱梁接合部の内に定着される 90° 折曲げ筋の破壊モードと定着性能，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.2，pp.159~164，1993.
4) 中澤春生，松崎育弘，中野克彦：RC 梁主筋の機械式定着部のコーン状破壊に対するマクロモデル，日本建築学会構造系論文集, 第 575 号, pp.89~96, 2004.1
5) 丸田誠，高谷真次：プレキャスト RC 柱梁接合部内梁主筋の定着・付着性状に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅳ，pp.493-496，2003
6) 東京鉄鋼株式会社：プレートナット工法設計施工指針（平成 21 年）
7) 日本建築学会 : 各種合成構造設計指針・同解説, 1985
8) 東京鉄鋼株式会社：高強度プレートナット工法設計指針（平成 17 年）