

論文 コンクリート引張場に定着された鉄筋におけるスパイラル筋の補強効果に関する実験

谷澤 史剛^{*1}・斉藤 修一^{*2}・松島 学^{*3}・関 博^{*4}

要旨：コンクリート構造物に埋め込まれた鉄筋の定着域に引張荷重が作用するような場合、定着断面は引張応力状態になり、鉄筋定着算定位置や定着耐力の定量的な評価が困難となる。本研究では、スパイラル筋の補強効果を加え、コンクリート引張場における定着耐力を模型実験から評価したものである。

キーワード：スパイラル筋、定着耐力、引張応力場、模型実験

1. はじめに

上部構造に横方向から外力が加わると基礎に引抜荷重が生じる。その構造物の基礎の形式が深礎基礎の場合では上部構造の脚材の基礎に定着した部分が、フーチングではフーチング内の杭頭群との接合部が引張応力の状態となる。例えば、文献 1) に示したように送電線鉄塔の基礎のフーチングにはこのような力が働く。このように、コンクリート中に埋め込まれた鉄筋の定着域に引張荷重が作用するような場合、この定着断面は引張応力状態になるため、深礎基礎及びフーチングでは、その評価方法と所要の定着長及び定着耐力の評価が必要である。

本研究は、引張場に定着された鉄筋の付着耐力を定量的に評価することを目的に、引張場におけるスパイラル筋により補強した異形鉄筋の付着耐力を求めるための基礎的な実験を行ったものである。

2. 実験概要

2.1 試験体

本実験の試験体では、基礎体内部に埋め込まれた鉄筋の一部を取り出し、その鉄筋の引張力に対する挙動を見るためのモデル化を行った。

試験体は、図—1 に示すように中心に引張力を受ける鉄筋（本文では引張筋と称す）、そして反力として引張力を受けるための鉄筋（本文では反力筋と称す）を試験体の両側に 1 本ずつ設置し、試験装置に固定した。

試験体は以下の 2 点を考慮している。

- (1) 試験体は割裂破壊（放射応力によって破壊する形式）するように設計している。固定反力を受け持つ反力筋を、引張荷重を受ける引張筋の両側に配置することで、反力筋は引張筋の半分の引張力を負担する。それにより反力筋近傍で破壊せず、引張筋近傍のコンクリート部が割裂破壊するように設計している。破壊時に鉄筋は降伏しないように、鉄筋の代わりに PC 鋼棒を使用した。
- (2) 試験体を試験装置で引張ることで、試験体のコンクリート内に引張応力状態を再現した。この時、試験体内のコンクリートが反力筋と引張筋によって生じる曲げ及びせん断作用の影響を受けないように、試験体の幅と長さ（定着長 L ）の比 L/ϕ を十分大きくした。

*1 鹿島建設(株) 工修 (正会員)

*2 東電設計(株) 送変電土木部 工修 (正会員)

*3 香川大学教授 工学部 安全システム建設工学科 工博 (正会員)

*4 早稲田大学教授 理工学部 土木工学科 工博 (正会員)

2.2 荷重方法

荷重装置は写真-1 に示した 2000kN 万能試験機を用いた。荷重速度 0.2kN/min 程度でゆっくりと荷重し、5.0kN 毎に荷重を一時停止させて、試験体の変化（ひび割れ状況等）を観察した。

2.3 パラメータ

本実験の試験体のパラメータは以下の 4 種類である。

- (1) スパイラル筋の配筋量 (A_{spc})
- (2) スパイラル筋の環内径 (D)
- (3) 定着長 (L)
- (4) コンクリートかぶり (c)

(1)において、 $A_{spc} = \frac{\pi D A_{sp}}{s}$ は配筋量（換算断

面積）と表す。（ここに、 D ：スパイラル筋の環内径、 A_{sp} ：スパイラル筋の断面積、 s ：スパイラル筋のピッチと定義する。）このパラメータでは、 A_{sp} と s を変化させている。スパイラル筋は試験体内部のリングテンションに対抗することにより耐力増加を考えている。このパラメータでは、スパイラル筋の補強量に対する拘束効果の相違を評価するのが目的である。

(2)において、スパイラル筋の環内径とはスパイラル筋の中心線の直径を示している。スパイラル筋が拘束する範囲や位置による拘束効果の相違を評価するのが目的である。

(3)において、定着長は引張筋が試験体中に埋め込まれている長さを示している。定着長は長くすると、定着耐力は増加することがわかっている。しかし、ある一定の長さ以上になると耐力の増加に寄与しなくなる領域が存在することが予想される。

(4)において、コンクリートかぶりは引張筋外縁から試験体表面までの最小距離を示している。コンクリートかぶりが厚ければ、割裂に対する耐力は増加することがわかっている。しかし、ある一定の厚さ以上になると耐力の増加に寄与しなくなると予想される。

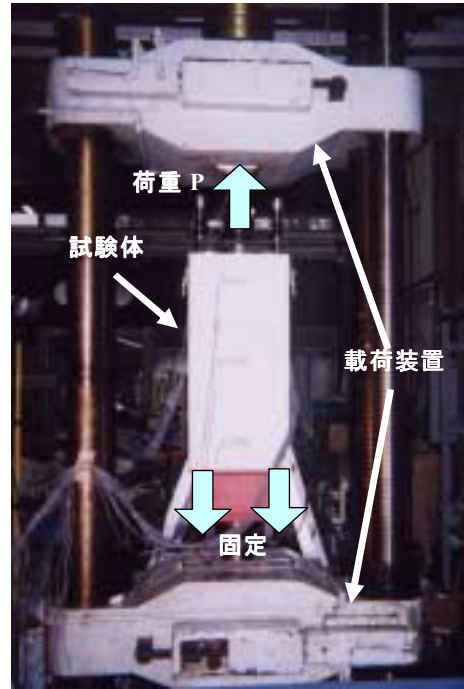


写真-1 荷重装置と試験体

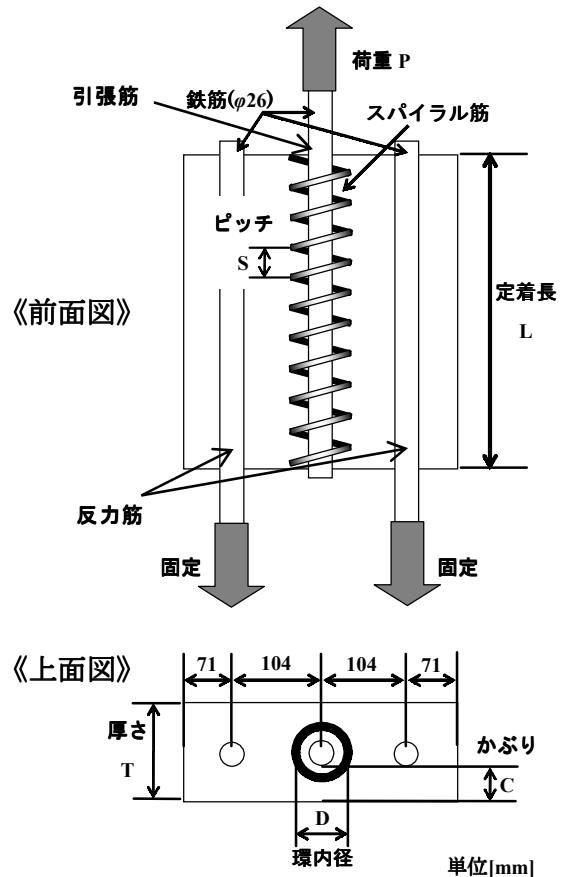


図-1 試験体図

表-1 試験体の一覧および試験結果

試験体	全般			鉄筋	スパイラル筋				コンクリート強度		c/φ	L/φ	D/φ	破壊耐力	
	かぶり	定着長	厚さ	径	径	環内径	ピッチ	配筋量	圧縮強度	引張強度				P _u	P _u /f _{ct}
	c mm	L mm	T mm	φ mm	φ _{spi} mm	D mm	s mm	A _{spe} mm ²	f _{c'} N/mm ²	f _{ct} N/mm ²				(kN)	×1000mm ²
3	39.0	650	104	26.0	5.00	50.0	50.0	61.7	22.2	1.82	1.50	25.0	1.92	145.2	79.9
4	26.0	650	78.0	26.0	4.00	50.0	50.0	39.5	22.5	1.83	1.00	25.0	1.92	115.4	63.0
5	39.0	650	104	26.0	4.00	50.0	50.0	39.5	22.5	1.83	1.50	25.0	1.92	136.0	74.3
6	39.0	650	104	26.0	-	-	-	-	23.7	1.90	1.50	25.0	-	99.4	52.4
7	52.0	650	130	26.0	4.00	50.0	50.0	39.5	21.3	1.77	2.00	25.0	1.92	163.7	92.5
8	65.0	650	156	26.0	4.00	50.0	50.0	39.5	23.6	1.89	2.50	25.0	1.92	174.8	92.5
9	39.0	650	104	26.0	2.00	50.0	50.0	9.9	22.5	1.83	1.50	25.0	1.92	119.2	65.1
11	39.0	650	104	26.0	3.00	50.0	50.0	22.2	21.3	1.77	1.50	25.0	1.92	120.7	68.3
12	39.0	650	104	26.0	6.00	50.0	50.0	88.8	20.8	1.74	1.50	25.0	1.92	132.4	76.0
14	39.0	780	104	26.0	4.00	50.0	50.0	39.5	20.2	1.71	1.50	30.0	1.92	152.1	89.0
15	39.0	650	104	26.0	3.00	40.0	50.0	17.8	21.3	1.77	1.50	25.0	1.54	93.2	52.8
16	39.0	650	104	26.0	3.00	60.0	50.0	26.6	20.8	1.74	1.50	25.0	2.31	127.5	73.2
17	39.0	650	104	26.0	4.00	50.0	50.0	39.5	21.6	1.78	1.50	25.0	1.92	135.9	76.2
18	39.0	650	104	26.0	5.00	50.0	30.0	103	24.3	1.93	1.50	25.0	1.92	137.3	71.2
19	39.0	650	104	26.0	6.00	50.0	20.0	222	21.9	1.80	1.50	25.0	1.92	142.2	79.0
20	78.0	650	182	26.0	4.00	50.0	50.0	39.5	24.3	1.93	3.00	25.0	1.92	210.9	109.3
21	39.0	520	104	26.0	4.00	50.0	50.0	39.5	21.9	1.80	1.50	20.0	1.92	120.7	67.1
22	39.0	585	104	26.0	4.00	50.0	50.0	39.5	24.0	1.91	1.50	22.5	1.92	132.4	69.2
23	39.0	715	104	26.0	4.00	50.0	50.0	39.5	24.3	1.93	1.50	27.5	1.92	173.6	90.0

2.4 本実験試験体

表-1 に本実験で行った試験体の一覧および試験結果を示す。試験体 No.17 はモルタルとコンクリートの違いの影響を見たものである。

2.5 測定方法

次の5つを測定した。(1)最大耐力(試験体の破壊時の荷重)、(2)破壊形式、(3)引張筋のすべり量(荷重とすべりの関係)、(4)鉄筋及びコンクリートの応力伝達機構、(5)スパイラル筋の応力状態。(4)、(5)は、ひずみゲージを貼り付け測定した。ひずみゲージ貼付位置は試験体長さの中心と両端から100mmの位置の合計3つの位置に貼り付け、試験体載荷側から上・中・下と呼称する。

2.6 試験体の使用材料及び配合

試験体の使用材料は、セメント(早強ポルトランドセメント)、細骨材(川砂)、粗骨材(砕石(No.17のみ使用))、練混ぜ水(水道水)、鉄筋(PC鋼棒)、スパイラル筋である。試験体のモルタル及びコンクリートの設計強度は20N/mm²であり、配合強度は23.9N/mm²(変動係数10%)とし配合設計を行った。また、使用したPC鋼棒の規格は降伏強度930N/mm²以上

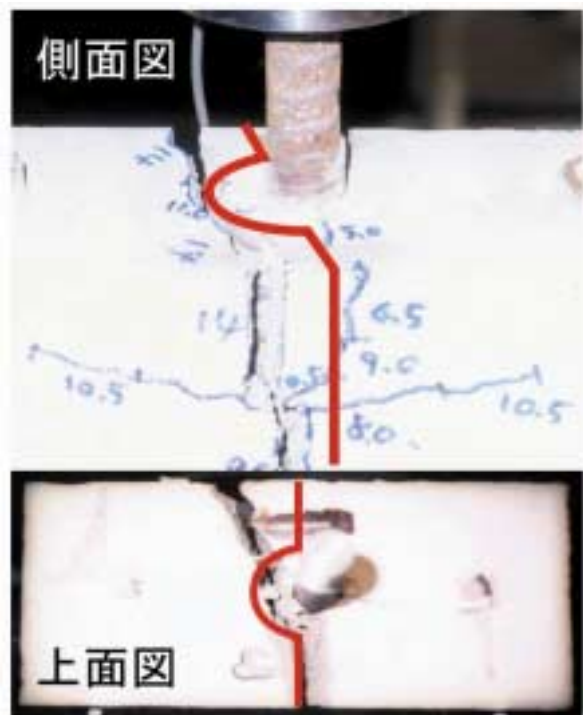


写真-2 破壊状況

引張強度1080N/mm²以上である。リブの寸法は高さ1.7mm幅6.5mmピッチ12.7mmである。

3. 実験結果

3.1 破壊形式

ひび割れは、全ての試験体で、試験体の載荷

端上面→試験体前表面→試験体表面の下方への進展と進み、脆性的な割裂破壊を起こした。No.6（スパイラル筋無補強）以外の試験体は、割裂破壊時にスパイラル筋外周に沿った新たなひび割れが発生した（写真-2, 図-2 参照）。これは、リングテンションにより、スパイラル筋内側のコンクリート塊に割裂ひび割れが発生するが、スパイラル筋の拘束力が大きいいため破壊には至らず、それらが一体となってスパイラル筋外側のコンクリートを押し広げながら引抜かれ、割裂破壊時にスパイラル筋に沿ったひび割れが発生させたと考えられる（図-3 参照）。

3.2 荷重と引張筋すべりの関係

図-4に代表例として試験体 No.4, 5, 8, 14, 17, 19の荷重と鉄筋のすべり量の関係を示す。この関係から、どの試験体においても荷重に対する引張筋のすべり量がほぼ等しいことがわかる。No.17の試験体はモルタルの代わりにコンクリートを使用したものであるが、影響は認められなかった。

荷重に対する引張筋のすべり量の増加量は、ほぼ一定であるが、破壊時にはやや軸剛性が低下している。これは、破壊時に発生したコンクリート内部のひび割れによる影響だと考えられる。

3.2 荷重と引張筋ひずみの関係

図-5に、供試体 No.14の荷重と引張筋のひずみの関係を代表例として示した。引張筋のひずみは引張力・荷重側端が最も大きく、試験体内に入り・荷重端から離れるにつれて小さくなる。これは引張筋の受ける引張応力をコンクリートが付着応力として一部を負担するため、鉄筋のひずみは荷重側端から離れるほど小さくなったと考えられる。また、荷重途中で剛性の低下も観察された。図-5では、荷重80kNの時に、引張筋のひずみの伸びの割合が増加している。特に中部や下部では、ひずみの増加の割合が大きくなっている。剛性の低下が観察された点は、引張筋軸方向ひび割れ（縦ひびわれ）が試験体前表面に進展してきた荷重であった。これは試

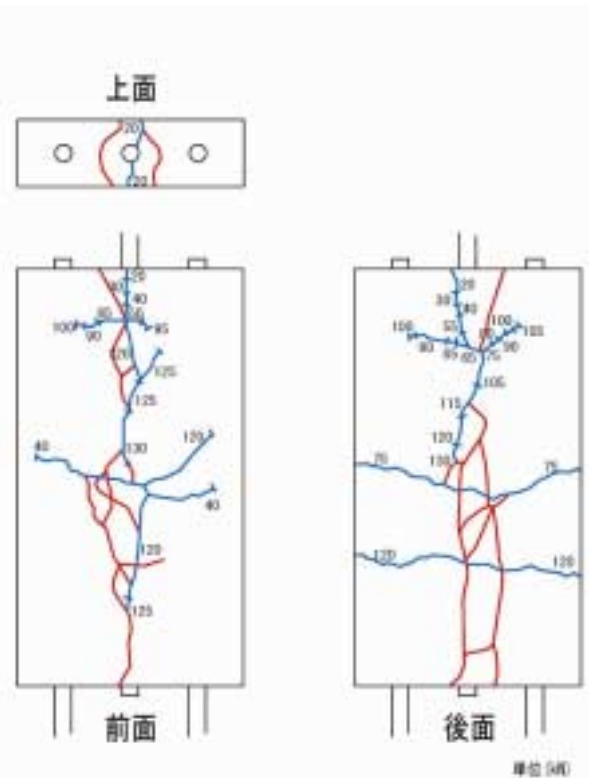


図-2 ひび割れ線図 (No. 12)

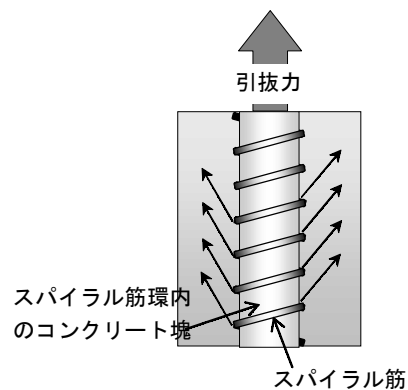


図-3 破壊形式の概念図

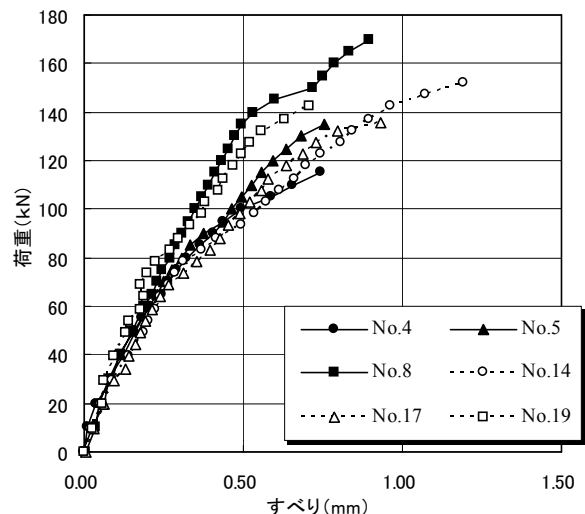


図-4 荷重と引張筋すべりの関係

験体の載荷端からの縦ひびわれの進展によりコンクリートに伝達される応力が低下したためコンクリートと鉄筋間のすべりが起こり、引張筋の中部、下部での引張筋ひずみの増加が生じたと考えられる。

これらの傾向は全ての試験体において観察された。

4 考察

図-6, 7, 8, 9 に、破壊強度と各パラメータの関係を示した。縦軸は破壊強度がモルタル及びコンクリートの引張強度に影響されないよう破壊時の荷重を試験体モルタル及びコンクリートの引張強度で除して示した。(試験結果は表-1を参照)

4.1 配筋量 A_{spe} の影響

図-6 にかぶり $c/\phi=1.5$ 、定着長 $L=650(\text{mm})$ で配筋量のみを変化させた試験体群(No.3, No.5, No.6, No.9, No.11, No.12, No.15, No.16, No.17, No.18, No.19)における、破壊耐力と配筋量の関係を示す。配筋量のパラメータには、環内径を変化させた試験体 No.15, No.16 も含めて示した。図-6 より、配筋量が大きくなるのに伴い、破壊耐力はほぼ線形に増加し、配筋量が $40\sim 45\text{mm}^2$ を超えた時点で、破壊耐力の伸びが横ばいになった。この理由は、配筋量が $0\sim 40\text{mm}^2$ までは引張筋周辺のコンクリート塊を拘束することで、引張筋から周囲コンクリートに伝達される放射方向応力を抑え、耐力が増加する。しかし、配筋量が $40\sim 45\text{mm}^2$ を超えるとスパイラル筋拘束内のコンクリート塊ごと引抜かれる影響が支配的になり、拘束力の増加が耐力の増加に影響しなくなると考えられる。

4.2 環内径 D の影響

図-7 にかぶり $c/\phi=1.5$ 、定着長 $L=650(\text{mm})$ でスパイラル筋環内径のみを変化させた試験体群(No.11, No.15, No.16)における、破壊耐力と配筋量の関係を示す。図-7 より、環内径の増加に伴い、破壊耐力はやや増加していることがわかる。これは環内径が本試験範囲では大き

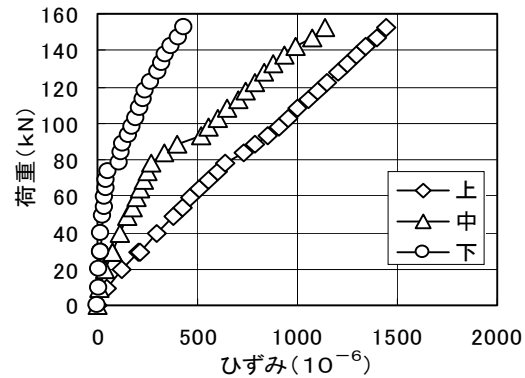


図-5 引張筋の荷重—ひずみ関係 (No. 14)

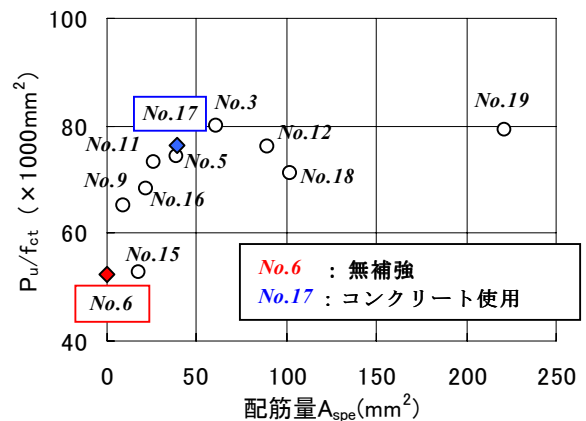


図-6 破壊耐力と配筋量の関係

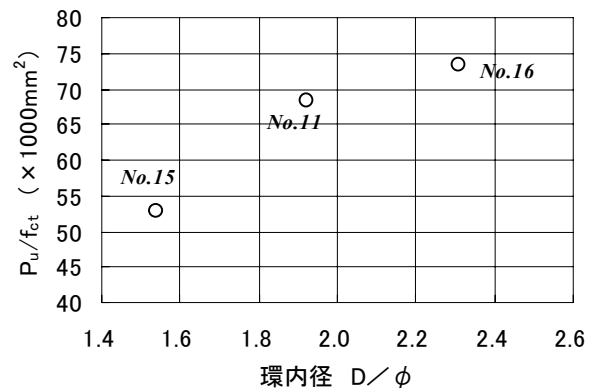


図-7 破壊耐力と環内径の関係

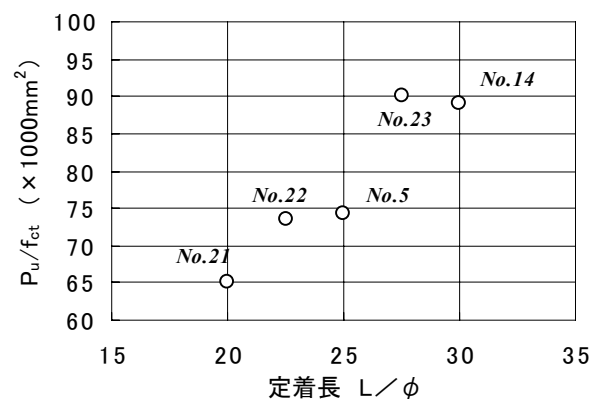


図-8 破壊耐力と定着長の関係

くなると、配筋量が大きくなるため、破壊耐力が増加したと考えられる。

4.3 定着Lの影響

図-8 は配筋量 $A_{spe}=39.5\text{mm}^2$ 、かぶり $c/\phi=1.5$ 、環内径 $D/\phi=1.9$ で定着長のみを変化させた試験体群 (No.5, No.14, No.21, No.22, No.23) における、破壊耐力と配筋量の関係を示す。図-8 より、定着長の増加の伴い、破壊耐力はほぼ線形に増加している。定着長が長いほど、鉄筋とコンクリートの接触面積が大きくなり、引張筋から伝達される応力が大きくなるからである。したがって、大きい荷重に耐えることが出来ると考えられる。

4.4 かぶりcの影響

図-9 に配筋量 $A_{spe}=39.5\text{mm}^2$ 、定着長 $L=650(\text{mm})$ 、環内径 $D/\phi=1.9$ でかぶりのみを変化させた試験体群 (No.4, No.5, No.7, No.8, No.20) における、破壊耐力と配筋量の関係を示す。かぶりを増加させると試験体の厚さを増加させることになるため、付着耐力に大きく影響を及ぼすかぶりを要因として、考察を加えることにする。図-9 より、かぶりの増加に伴い、破壊耐力は線形に増加している。かぶりが増すと、引抜筋から伝達される放射応力によりひび割れたコンクリート塊のさらに外周のコンクリート塊が厚くなる。つまり試験体の厚みが増すと、割裂ひびわれの進展を制御することが出来ると考えられる。

5 まとめ

本実験で明らかとなった事項をまとめると、以下の通りである。

- (1)すべての試験体において脆性的な破壊であり、ひび割れが破壊時にスパイラル筋に沿って発生し、引張筋とスパイラル筋によって拘束されたコンクリート塊が一体となって引抜かれ破壊される。
- (2)スパイラル筋の補強効果はひび割れがスパイラル筋近傍まで発生してから働くと考えられる。

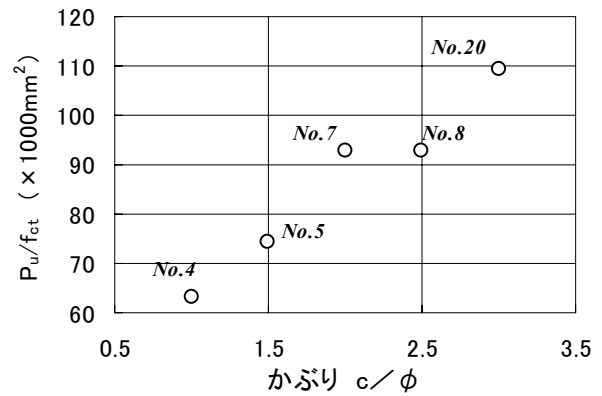


図-9 破壊耐力とかぶりの関係

- (3) 配筋量のパラメータを変化させた場合、配筋量が大きくなると拘束力が増加して耐力は増した。しかし、配筋量が $40\sim 45\text{mm}^2$ を超えたところで拘束力の増加が耐力の増加に影響しなくなった。
- (4) 定着長およびかぶりのパラメータを増加させた場合、耐力は線形に増加し、逐次破壊の影響が見られなかった。

謝辞

本研究の実施にあたり、御示唆頂いた三井共同建設コンサルタント高橋健一氏、および実験および実験データ整理において御協力頂いた早稲田大学理工学部関研究室 桑原大亮氏、大和田貴博氏、千葉洋行氏に記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 齊藤修一, 谷澤史剛, 松島学, 関博: 引張場に配置された鉄筋定着のスパイラル筋による補強効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.3, pp.829-834, 2001
- 2) 高橋健一, 齊藤修一, 松島学, 関博: 引張場に定着された鉄筋のスパイラル筋補強効果に関する実験的研究, 土木学会年次学術講演会公演概要集 第5部, Vol.55th, pp.1154-1155, 2000