

[114] 円形補強筋を有する PC 鋼材定着部の破壊強度に関する研究

正会員 鈴木 計 夫 (大阪大学工学部)

正会員 中 塚 信 (大阪大学工学部)

増 田 安 彦 (大阪大学大学院)

1. はじめに

ポストテンション型プレストレストコンクリート構造では、定着具を介して緊張力が局部的に作用する定着部の設計をその補強方法も含めていかに行うかが設計上の重要なポイントとなっている。しかし、一般的によく用いられる角形定着板と角形支承面および円形補強筋とから構成される定着部でもその設計は単に各工法毎の仕様に従って行われることが多いため、定着部の終局耐力域性状を考慮し、またそれに基づく補強筋の設計法も含む適用範囲の広い統一した定着部設計法は未だ確立されていない。

本研究は、角形アンカープレートと角形支承面および円形補強筋とからなる補強定着部の破壊強度性状におよぼす定着板大きさ、補強筋量あるいはかぶり厚さの影響を明らかにすると同時に、プレストレスト鉄筋コンクリートの実用化によってその使用範囲がより広くなったコンクリート強度の影響ならびにスケールの効果を調べ、本形式の補強定着部に対する上記諸要因の影響を考慮したより一般的な破壊強度算定式を誘導し、また本算定式が実用的に十分な精度を有することを示したものである。

2. 実験概要

本実験で用いた試験体の概要を表1および図1に示す。試験体はかぶりコンクリートのない定着部の基本的な破壊強度性状を調べるC試験体と、それに種々の厚さをもつかぶりコンクリートを付加した角柱体のP試験体とで構成されている。取り上げた実験要因は補強筋量 (P_{sasy})、

試験体大きさ ($2a \times H$)、載荷板大きさ ($2a$) およびコンクリート強度 (f_c) である。補強筋量は実構造部材で予想される補強筋量の範囲を考慮して表1に示す値を選び、また補強筋配置範囲は既報と同様に巻径に等しい区間とした。コンクリート強度はプレストレスト鉄筋コンクリートで用いられる低強度のものからプレストレストコンクリートで用いられる高強度のものまでの6種とした。

図1に示すように、C試験体は角形アンカープレートと角形支承面とからなる定着部のみを有する。P試験体は角形アンカープレートと角形支承面とからなる定着部に加え、その周囲に厚さ $2b$ のかぶりコンクリートを付加した角柱体構造となっている。図1の左側はC試験体の断面図、右側はP試験体の断面図を示している。C試験体の断面には、アンカープレート (Ac) と支承面 (Acr) が示されており、その間には長さ $2a$ の定着部がある。P試験体の断面には、C試験体の断面に加え、外周に厚さ $2b$ のかぶりコンクリートが示されている。また、両試験体の高さ H 、定着部の長さ $2a$ 、かぶり厚さ $2b$ 、および定着部の位置 $2r_s$ が示されている。

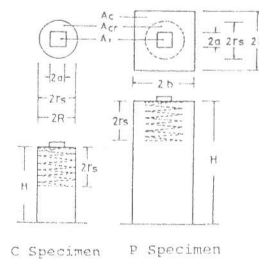


図1 試験体

載荷は図2に示す様に、キャッピングを施こさない面を載荷面として行った。正方形載荷板 (鋼製、厚さ20mm) の大きさは表1に示したのものの中から後述する各破壊タイプが得られる様に適宜選択して使用した。荷重をロードセルで、また支圧板めり込み変形量をひずみ式変位変換器を用いて測定し、荷重-めり込み変形関係をメモリーレコーダーにより自動記録した。

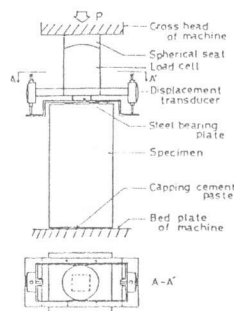


図2 載荷方法

表1 試験体概要

Specimen	P_{sasy}		ϕ	S	2rs	2b x H (2R x H)	2a	σ_{sy}	f _c
	mm ²	mm ²							
C15R	13.5	3.2	—	—	145	(150 x 300)	—	3050	—
P15R	22.4	4.0	—	25	144	150 x 300	—	3200	165
P23R	35.1	5.5	—	30	142	230 x 460	—	2300	—
P30R	98.5	8.9	—	30	139	300 x 600	—	3300	—
C15P	172.0	12.8	—	35	135	(150 x 300)	—	3260	—
P15P	—	—	—	—	—	150 x 300	—	—	—
P23P	—	—	—	—	—	230 x 460	—	—	—
P30P	—	—	—	—	—	300 x 600	—	—	—
P20R	13.3	3.2	—	—	147	—	—	3050	—
	22.2	4.0	—	25	145	200 x 400	—	3200	—
	43.8	5.6	—	—	141	—	—	3150	234
	102.0	9.3	—	30	143	—	—	3200	—
P30R	19.2	3.2	—	—	102	—	—	3050	—
	31.8	4.0	—	25	101	300 x 600	—	3200	—
	61.5	5.6	—	—	100	—	—	3150	—
	148.0	9.3	—	30	99	—	—	3200	—
C15P	—	—	—	—	—	(150 x 300)	30.0	—	—
P15P	—	—	—	—	—	150 x 300	40.2	—	—
P20P	—	—	—	—	—	200 x 600	50.0	—	—
P30P	—	—	—	—	—	300 x 600	60.2	—	—
	—	—	—	—	—	300 x 600	70.2	—	—
	—	—	—	—	—	(150 x 300)	75.0	—	—
C15R	22.3	4.0	—	—	144	(150 x 300)	—	3200	—
P15R	37.9	5.6	—	25	142	150 x 300	—	2780	306
P23R	99.5	8.8	—	30	139	230 x 460	—	80.2	—
P30R	176.0	12.9	—	35	135	300 x 600	—	90.2	—
C15P	—	—	—	—	—	(150 x 300)	100.0	—	—
P15P	—	—	—	—	—	150 x 300	—	—	—
P23P	—	—	—	—	—	230 x 460	—	—	—
C15R	24.6	3.9	—	—	143	(150 x 300)	—	3620	—
	65.6	5.5	—	—	144	—	—	5000	402
	98.8	8.6	—	30	134	—	—	3400	—
	169.2	12.7	—	35	134	—	—	3140	—
C15P	—	—	—	—	—	(150 x 300)	—	—	—
C15R	24.9	3.9	—	—	141	(150 x 300)	—	3620	—
	66.8	5.5	—	—	141	—	—	5000	528
	97.2	8.6	—	30	136	—	—	3400	—
	170.6	12.7	—	35	133	—	—	3140	—
C15P	—	—	—	—	—	(150 x 300)	—	—	—
P23R	24.5	3.9	—	—	144	—	—	3620	—
	66.3	5.5	—	—	142	230 x 460	—	5000	538
	97.2	8.6	—	30	137	—	—	3400	—
	170.6	12.7	—	35	133	—	—	3140	—
C15P	—	—	—	—	—	(150 x 300)	—	—	—
P23P	—	—	—	—	—	230 x 460	—	—	—

P_s : 補強筋比 ($P_s = \rho / \rho_{sc}$)
 σ_{sy} : 補強筋の降伏強度
 ϕ : 補強筋の直径
 S : 補強筋のピッチ
 $2r_s$: 補強筋の芯々直径
 $2b$: 試験体の一切長さ
 H : 試験体の高さ
 $2a$: 試験体の直径
 $2a$: 支圧板の一切長さ
 f_c : $\phi 10 \times 50$ のコンクリート強度

3. 実験結果および考察

3-1 無補強試験体の破壊強度

本節では定着部設計の基礎となる無補強試験体の支圧強度におよぼすコンクリート強度およびスケールの影響について考察する。まず、図3は白抜き記号で各コンクリート強度をもつ C15F 試験体の支圧強度比 (F_{BR}/F'_c) を、また黒塗りの記号で角柱体の R15F 試験体の支圧強度比を、横軸に支承面積比 Ac/A_1 をとって示した1例である。同図によれば、同一コンクリートからなる一辺長さあるいは直径が 15cm である試験体の支圧強度比は、支承面の形状が円形か角形かにかかわらずほぼ同一の $\ln F_{BR}/F'_c - \ln Ac/A_1$ 関係を示し、さらに同一の Ac/A_1 においてコンクリート強度が大なる程小さくなる傾向がみられる。また、 Ac/A_1 の増大による支圧強度比 F_{BR}/F'_c の増加率はコンクリート強度にかかわらずほぼ同一となり、 $\ln F_{BR}/F'_c - \ln Ac/A_1$ 関係を補強定着部での Ac/A_1 の範囲と考えられる $Ac/A_1 > 2$ の範囲で直線で近似すると各コンクリート強度に対応する後述の β の値はほぼ等しくなり直線はそれぞれ隣り平行となることが明らかとなった。従って無補強試験体の支圧強度比と支承面積比との関係を両者が面対数軸上で直線関係となる形で実用的な(1)式を用いて示し、その直線関係での勾配を表す β の値を各コンクリート強度に対する平均的な値、すなわち $\beta=0.54$ として係数 α_1 の値を求めると図4

で示す結果を得た。同図によれば α_1 は F'_c の増加に従って減少する傾向を示し、この $\alpha_1 - F'_c$ 関係の近似式として(2)式を得た。次に、図5は試験体大きさが支圧強度比におよぼす影響を調べた結果の1例を示したものである。同図より、試験体の一辺長さの大きいもの程支圧強度比は小さくなる傾向がみられるが、 Ac/A_1 の増大による支圧強度比の増加率は試験体大きさにかわらず前述した図3の場合とほぼ同様であると考えられる。

$$F_{BR} = \alpha_1 (Ac/A_1)^\beta F'_c \quad (1)$$

$$\alpha_1 = 1.28 - 6.92 F'_c \times 10^{-4} \quad (2)$$

$$\beta = 0.54 \quad (3)$$

$$F_{BR} = \alpha_1 \alpha_2 (Ac/A_1)^\beta F'_c \quad (4)$$

$$\alpha_2 = 1.15 - 9.9 \times 2b \times 10^{-3} \quad (5)$$

それ故、支圧強度におよぼす試験体大きさの影響を前記の(1)式で表わされる一辺長さが 15cm である試験体の強度を基準とする係数 α_2 で表し、その他の大きさの試験体の支圧強度を(1)式に α_2 を乗じた(4)式で表すことにすると、係数 α_2 の値として図6および式(5)で示す結果が得られた。

3-2 補強定着部の破壊強度

(1) 補強試験体の破壊性状：試験体の破壊性状は補強筋量の多寡および載荷板の大きさによって変化するが、図7に補強試験体でみられる典型的な2種の破壊タイプを示している。第1の破壊タイプは載荷板が小さい場合に見られるもので、最大耐力近傍で載荷板が顕著にめり込み、載荷板直下のコンクリートが靱性的に破壊するタイプである。本破壊タイプでは補強筋に沿うリング状きれつや材軸方向の縦きれつが観察される。第2の破壊タイプは載荷板が大きい場合に観察されたもので、補強筋で囲まれた部分が補強筋と一体となりその下部の無筋部分を割裂破壊させるタイプである。この破壊タイプの特徴は補強筋で囲まれた部分の外側にあるかぶりコンクリートの

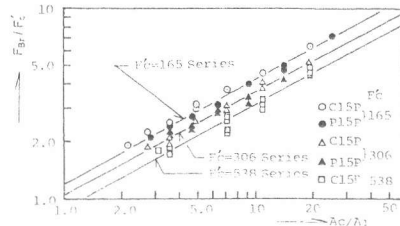


図3 $\ln F_{BR}/F'_c - \ln Ac/A_1$ 関係への F'_c の影響

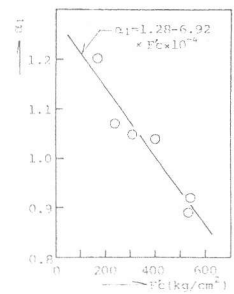


図4 $\alpha_1 - F'_c$ 関係

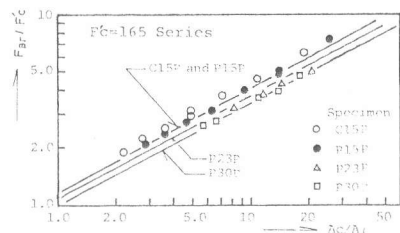


図5 $\ln F_{BR}/F'_c - \ln Ac/A_1$ 関係へのスケールの影響

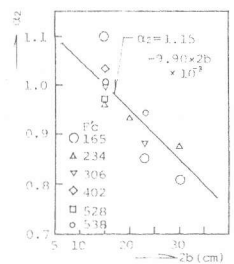


図6 $\alpha_2 - 2b$ 関係

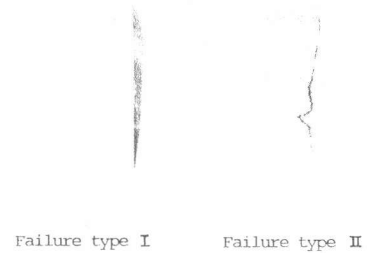


図7 典型的な破壊タイプ

剝離や補強された部分の直下での逆円錐コーンの形成である。

(2) 破壊強度算定式：図8は望ましい破壊性状と考えられるタイプIの破壊を起した補強試験体の破壊強度におよぼす補強筋量およびコンクリート強度の影響を調べるため、かぶりコンクリートの影響のない補強試験体の破壊強度 (R_0F_{Br}) を補強筋巻径に等しい直径をもつ無補強の場合の支圧強度推定値 (p_0F_{Br} 、前記(4)式による算定値) で除した m_0 を、横軸に補強筋の効果を表す指標 Ps_{0sy} をとって示したものである。同図によると、 m_0 は

Ps_{0sy} の増加によって増大するがその増加率はコンクリート強度の低い方が大きい。また、図9は m_0 におよぼす載荷板大きさの影響を調べるため、図8において同一 Ps_{0sy} における数個の点で示されている、同一補強筋を有する試験体に大きさの異なる載荷板を用いたときの結果を横軸に載荷板一辺長さをとって表したものである。同図によれば載荷板大きさが m_0 におよぼす特に明確な影響はみられない。従って、各コンクリート強度に対する m_0 を支圧板大きさの影響を考慮せずに Ps_{0sy} のみの関数として(6)式で近似し、係数 a 、 b の値を求めると図10に示す結果を得、それらの近似式として(7)、(8)式を求めた。

$$m_0 = 1.0 + a(Ps_{0sy})^b \quad (6)$$

$$a = 2.6 F_c^{-0.63} \quad (7)$$

$$b = 0.28 F_c^{0.14} \quad (8)$$

次に、破壊強度におよぼすかぶり厚さの影響をかぶりのない場合の m_0 と同様に、かぶりのある補強試験体の破壊強度 (R_{FBr}) と補強筋巻径に等しい直径をもつ無補強の場合の(4)式による支圧強度推定値 (p_0F_{Br}) との比 m を用いて検討する。図11は $F_c = 306 \text{ kg/cm}^2$ シリーズでのP15R試験体とP23R試験体の結果を横軸に Ps_{0sy} をとってプロットしたものである。同図より、かぶり厚さが支圧強度比 m におよぼす影響は Ps_{0sy} が小さい範囲では大きいが Ps_{0sy} の増加に従って漸減する。この現象を数式処理し、かぶりのある補強定着部の破壊強度を推定する方法として次の方法を考案した。すなわち、かぶりの効果を含まない m_0 曲線が Ps_{0sy} についての勾配漸減形の曲線であるから、 m_0 曲線をそのまま左に水平移動させれば上述のかぶりの効果が表現できるものと考えて、かぶりを有する補強定着部の破壊強度比 m を、図12に示すように(6)式で表される m_0 曲線をそのまま Sc だけ Ps_{0sy} の負方向に水平移動させた(9)式で示す曲線によって推定することとした。ここで水平移動量 Sc はかぶりの効果を等価な補強筋量に置きかえたものとも解釈できるが、この値 Sc は $Ps_{0sy} = 0$ における値が(4)式で与えられるかぶりコンクリート部分をもつ無補強試験体の強度 (pF_{Br}) と(4)式の A_c を A_{cr} に置きかえたかぶりのない無補強の場合の強度 (p_0F_{Br}) との比 m_A ((11)式) に等しくなる条件から(10)式のように求められる。従って(9)式で与えられる強度比 m を用いれば、かぶりのある補強定着部の破壊強度 (F_{Br}) はかぶりのない無補強定着部の (p_0F_{Br}) とこの m の積として(12)式のように表される。

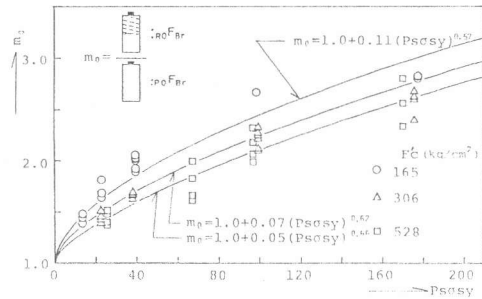


図8 $m_0 - Ps_{0sy}$ 関係におよぼすコンクリート強度の影響

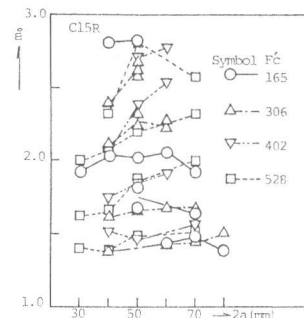


図9 m_0 への支圧板大きさの影響

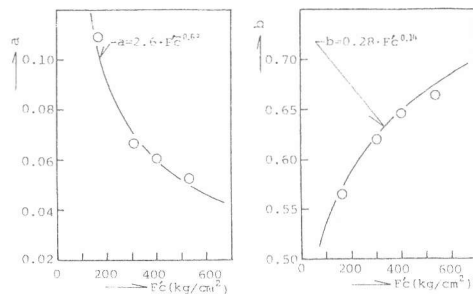


図10 (6)式における係数 a 、 b への F_c の影響

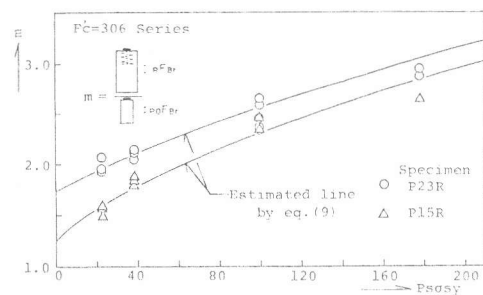


図11 支圧強度比 m におよぼすかぶり厚さの影響

$$m = 1.0 + a(Ps_{osy} + Sc)^b \quad (9)$$

$$Sc = \{ (m_A - 1.0) / a \}^{1/b} \quad (10)$$

$$m_A = pF_{Br} / p_0F_{Br} = \{ \alpha_1 \alpha_2' (Ac / A_1)^\beta \} / \{ \alpha_1 \alpha_2 (Acr / A_1)^\beta \} \quad (11)$$

$$F_{Br} = m \cdot \alpha_1 \alpha_2 (Acr / A_1)^\beta F_c' \quad (12)$$

次に、破壊タイプIIの強度算定式は、この破壊タイプの特徴である補強筋で囲まれた部分の外側にあるかぶりコンクリートの剝離と補強部分直下の無筋部分の割裂破壊とを考慮すると、既報と同様に断面積が Acr である補強筋で囲まれた部分を新たな荷重板と考えたときの無補強定着部の強度として求め得ると思われる。その破壊強度 F_{Br} は荷重板面積が Acr の場合の無補強定着部の最大耐力 $Pu = \alpha_1 \alpha_2 (Ac / Acr)^\beta F_c' \cdot Acr$ を A_1 で除した次式で与えられる。

$$F_{Br} = \alpha_1 \alpha_2 (Ac / Acr)^\beta (Acr / A_1) \cdot F_c' \quad (13)$$

(3) 破壊強度推定式の検討：まず、図13は本実験で用いた補強試験体の破壊強度比 (F_{Br} / F_c') の実験値と算定値を比較したものであるが、同図より本算定式の推定精度は±15%程度であると考えられる。次に $30 \times 30 \times 60cm$ の角柱補強試験体を角形荷重板で局部荷重試験した Wurm 等の実験³⁾ の中で用いられている本実験と同様の円形補強筋を有する試験体に本算定式を適用した場合の実験値と推定値とを比較したものが図14である。いずれの試験体の破壊強度も補強筋で囲まれた内部が破壊するタイプIの場合の算定式(9式)によって推定されたが、その推定精度は図13に示した本研究での試験体に対するそれと同程度である。このことから本算定式は±15%程度の実用上十分な精度で実験値を推定できると考えられる。なお、Wurm等が用いている立方体強度 (W) から破壊強度の推定に必要な円筒強度 (F_c') への換算式としては坂等が提案する⁴⁾ $F_c' = 0.83W - 14.7$ を用いた。

4. まとめ

1) 無補強試験体の支圧強度比 (F_{Br} / F_c') におよぼすコンクリート強度およびスケールの影響を明確化し、これらの影響を考慮した無補強定着部の支圧強度算定式(4式)を誘導した(図3～6参照)。

2) 補強試験体の破壊タイプとして次の2種のタイプ、すなわち補強筋で囲まれた支圧板直下のコンクリートが破壊し、補強筋の拘束作用によって耐力および変形能力が無補強の場合に比べ顕著に増大する破壊タイプIと、補強部分直下の無補強部分が脆性的に割裂破壊するタイプIIとが観察された(図7参照)。

3) 上記タイプIの破壊を起す補強試験体の破壊強度比 ($m = RF_{Br} / p_0F_{Br}$) におよぼすかぶりコンクリートおよびコンクリート強度の影響を明らかにし、これらの結果を考慮した破壊タイプIに対する破壊強度推定式(12)を導いた。破壊タイプIIに対する破壊強度式は既報に倣って(13)式のように誘導した(図8～12参照)。

4) ここで提案する補強定着部破壊強度算定式の他者の実験結果に対する推定精度(図14参照)は原データである本実験結果に対する推定精度(図13参照)とほぼ同一の実用上十分と考えられる±15%であることを示した。

<参考文献>

- 1) 鈴木・中塚、円形補強筋を有するFRC鋼材定着部の強度および破壊機構に関する研究、日本建築学会論文報告集 第315、昭和57.5、PP17～28
- 2) 鈴木・中塚、同上(角形荷重板、角形支承部、円形補強筋の組み合わせの場合)、日本建築学会論文報告集 投稿中
- 3) P. Wurm・E. Dasherok, Versuch über Teilflächenbelastung von Normal Beton, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 286, 1977
- 4) 岡田浩・大車親 編、コンクリート工学ハンドブック、昭和56年、PP378

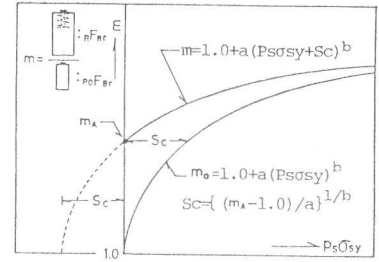


図12 支圧強度比mの推定方法

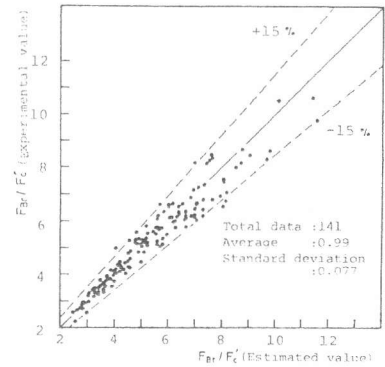


図13 本実験結果に対する強度推定式の適用性

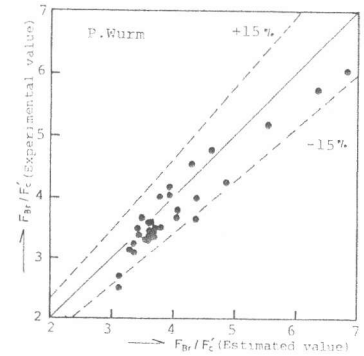


図14 Wurmの実験結果に対する強度推定式の適合性