

PC鋼材定着部の力学的挙動について

中塚 侑*1・溝口 茂*2

1. まえがき

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、定着部において鋼材の引張力が定着具を介してコンクリートに局部強圧として伝達される。したがって、定着部の設計法を補強方法も含めていかに行うかが同構造の設計における一つの重要なポイントとなるため、各種の工法ごとに定着部の仕様が決められていたり、同構造に関する種々の規準書や示方書にその設計法が示されている^{1)~3)}。しかし、表-1に示すように、それらの設計法では、無補強の場合の支圧強度に基づく支圧応力の検討が主項目となっていて、補強筋の効果や荷重状態などを十分考慮したものとはなっていない。たとえば日本建築学会のPC規準では、無補強の場合の弾性時割裂応力分布に基礎をおく補強筋設計も示されているが、割裂補強筋がひび割れ耐力や破壊耐力に及ぼす影響は言及していない。また、いずれの規準書・示方書においても定着部に持続的に作用する鋼材緊張力、および地震時に予想される鋼材緊張力の変動などが定着部の力学的挙動に及ぼす影響は、全く取り入れられていない。

本報告は、現状では規準書・示方書等に十分考慮されていないが、PC鋼材の材端定着部の一般的な設計法の構築に不可欠な、定着部の力学性状に及ぼす諸要因の影響に関する知見の現状を紹介するものである。

表-1 各種規準における支圧応力度および設計法の特徴点

規準等	支圧応力度	設計法の特徴点
日本建築学会 「プレストレストコンクリート設計・施工指針同解説」(1987年)	$f_a = f_{na} \sqrt{A/A_0}$ ($A/A_0 \leq 2.0$) $f_{na} : F_{ci}/1.25$ or $0.6 F_c$ (小さい方) F_c : コンクリートの設計基準強度 F_{ci} : 導入時のコンクリート強度	〈許容応力度設計〉 耐力: 無補強の強度にて決定 割裂応力に対する補強: 弾性応力解析による。 補強筋量は計算式あるものの、ひび割れ耐力、破壊耐力への影響の記述なし。
土木学会 「コンクリート標準示方書」(1996年)	$\sigma_{\mu} = \eta \cdot f'_{ck}$ ($\eta = \sqrt{A/A_0} \leq 2.0$) f'_{ck} : コンクリートの設計基準強度 A : 支承面積, A_0 : 支圧面積 支圧面下部が補強されている場合、 η は大きくとることができる。	〈限界状態設計〉 コンクリートの材料強度の安全率は、終局時1.3 or 1.5 (標準示方書)。 定着部はPC鋼材が破断する荷重に耐えればよく、それ以上の荷重がかかる可能性がないので作用荷重時の最大値が明確→安全率が設定しやすいので終局強度設計が経済的にも有利。ACIも終局状態の検討が基本。
ACI 318-89 (1995年)	$\sigma_{\mu} = \phi_i \cdot F_c \sqrt{A/A_0}$ ($\sqrt{A/A_0} \leq 2.0$) ϕ_i : 強度係数 0.7 ポストテンション定着部 0.9	〈許容応力度設計〉 補強筋量計算式なし。
CEB-FIP (1990年)	$\sigma_{\mu} = 0.7 \cdot F_c \sqrt{A/A_0}$ 支承面積は有効支承面積をとる。	〈許容応力度設計〉 補強筋量計算式なし。
DIN 1045 (1996年)	$\sigma_{\mu} = f_{cd}/2.1 \cdot \sqrt{A/A_0}$ $\leq 1.4 \cdot F_{cd}$	〈許容応力度設計〉 補強筋量計算式なし。

2. 現設計法では十分考慮されていない諸要因の影響

まえがきで述べたように、PC鋼材の材端定着部は各工法ごとの仕様に従って行われることが多いが、定着部の一般的な設計法の確立には次のような諸要因の影響の解明が必要と考えられる。

- ① 割裂補強筋が定着部のひび割れ耐力、ひび割れ幅性状、最大耐力および定着板の支圧荷重-めり込み変形関係等に及ぼす影響
- ② 持続荷重下におけるめり込み変形性状、ひび割れ幅性状ならびにそれら諸性状に及ぼす割裂補強筋の影響
- ③ 繰返し荷重下での疲労強度性状
- ④ 定着部の力学性状に及ぼすスケール、定着板の剛性およびシース孔の影響等

以下にそれら影響に関する知見の現状について述べる。

2.1 割裂補強筋の影響

材端定着部では局部荷重によって割裂応力や、剥裂応力が生じ、それらに対する補強筋が配置される。割裂補強筋は定着部のひび割れ耐力、ひび割れ幅性状および破壊耐力などに影響を及ぼすことが指摘されている。以下にその概要を紹介する。

- (1) ひび割れ耐力とひび割れ幅

図-1⁴⁾は、横軸に $\beta = A_1/A_c$ (A_1 : 支圧面積, A_c : 支承面

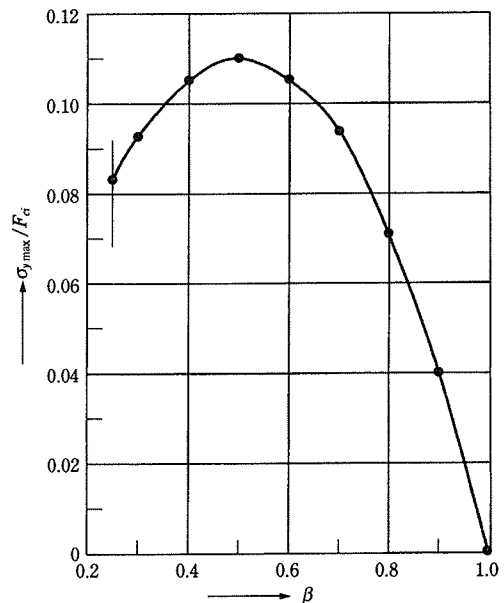


図-1 $\sigma_{y \max} / F_{ci}$ と β の関係

*1 Tadashi NAKATSUKA: 大阪大学 工学部 建築工学科

*2 Shigeru MIZOGUCHI: 高周波熱錬(株) 開発営業課

積)をとって、弾性時の最大割裂応力の導入時コンクリート強度 (F_{ci}) に対する比がプロットされたものである。同図によれば、 F_{ci} の1/9 ($\sigma_{y\max} / F_{ci} = 0.11$) 程度の最大引張応力が生ずることとなり、通常のコンクリートの引張強度が圧縮強度の1/8~1/14であることを考えると、導入時にひび割れ発生の危険性があると指摘されている。

図-2⁵⁾は、かぶりコンクリートおよび補強筋がひび割れ発生荷重に及ぼす影響を示したものである。巻き径が同じで太さ (ϕ) が異なる円形スパイラル筋およびかぶり厚さが違う各種角柱試験体を角形支圧板で局部載荷した実験結果の例示である。同図によれば、それぞれのひび割れ発生荷重は対応するプレーン試験体の破壊荷重にほぼ等しく、かぶり厚さ、載荷板大きさおよび補強筋太さによってひび割れ発生荷重はほとんど影響を受けないことが推測されている。補強筋の巻き径についても同様の傾向のある⁶⁾ことが、さらに、ひび割れ耐力はコンクリート強度の上昇に比例して増大するが、スパイラル筋、フープ筋はひび割れ耐力にほとんど影響しないなどと指摘されている⁷⁾。

単調荷重下でのひび割れ幅の増大に及ぼす割裂補強筋の影響も調べられている。図-3⁸⁾はひび割れ後、ひび割れ幅が0.1, 0.2, 0.3mmの時の荷重比と補強筋巻き径の関係を示したものであるが、巻き径が大きくなるほどひび割れ幅の抑制には有効であることが示されている。図-4^{5),9)}は、支

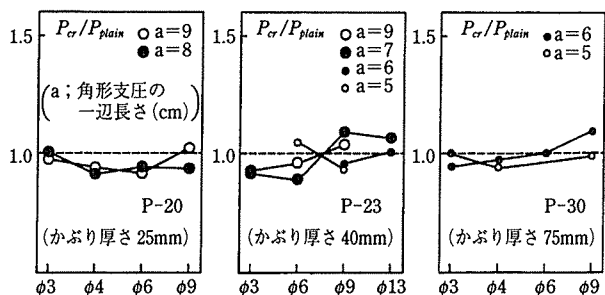


図-2 かぶりコンクリートおよび補強筋がひび割れ耐力に及ぼす影響

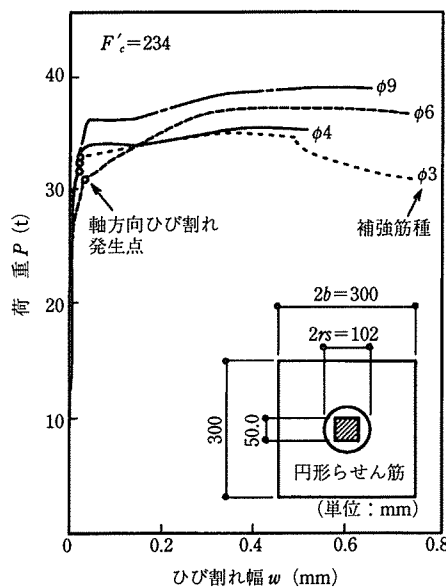
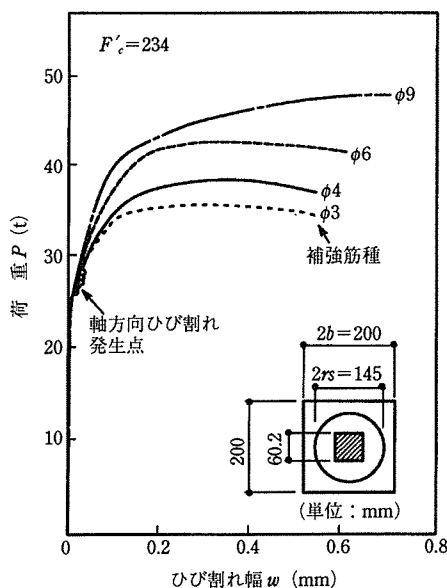


図-4 単調荷重下でのひび割れ幅性状に及ぼす補強筋量の影響

圧荷重-ひび割れ幅関係の例である。定着部断面に対し補強筋巻き径が相対的に大きい場合(同図(a)), ひび割れ耐力は補強筋の太さが大となるほど増大するが、巻き径が相対的に小さい場合は補強筋の太さにかかわらず、ひび割れ発生後急激にひび割れ幅は増大する傾向がみられる。

次に、ひび割れ幅 (w) がひび割れ荷重 (P_{cr}) 後、最大荷重 (P_u) までにどのように変化するかを、横軸に $w/2b$ ($2b$: 支承面の一辺長さ)、縦軸に $kw((P_w - P_{cr}) / (P_u - P_{cr}))$ をとって表現した図-5¹⁰⁾によれば、 $kw - w/2b$ 関係は支圧板大きさ、補強筋特性およびコンクリート強度などにかかわらず、ほぼ同様な曲線になることが指摘されている。さらに、樹脂圧入法で内部ひび割れ状況を調べた結果、ひび割れ幅は側表面から内部に向かうほど小さくなり、補強筋がひび割れの進展を抑制していることが示されている(図-6¹⁰⁾)。

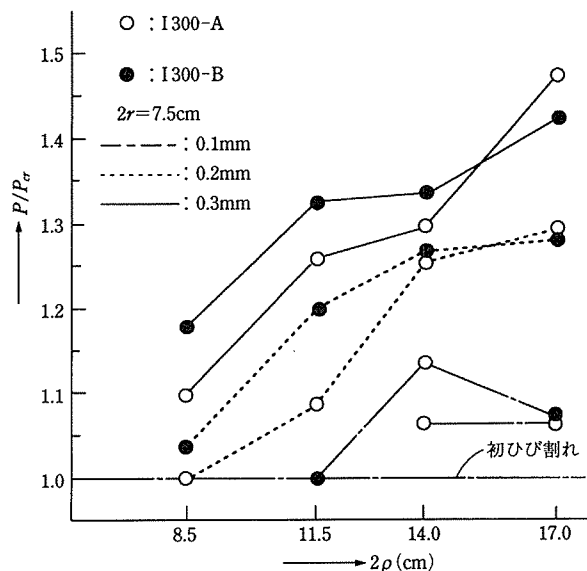


図-3 P/P_{cr} と 2ρ との関係

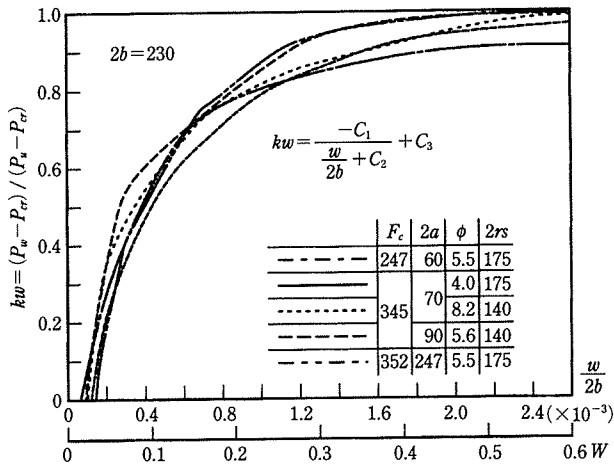


図-5 上昇耐力比 (kw) - (ひび割れ幅) / (支承面一辺長さ) ($w/2b$) 関係

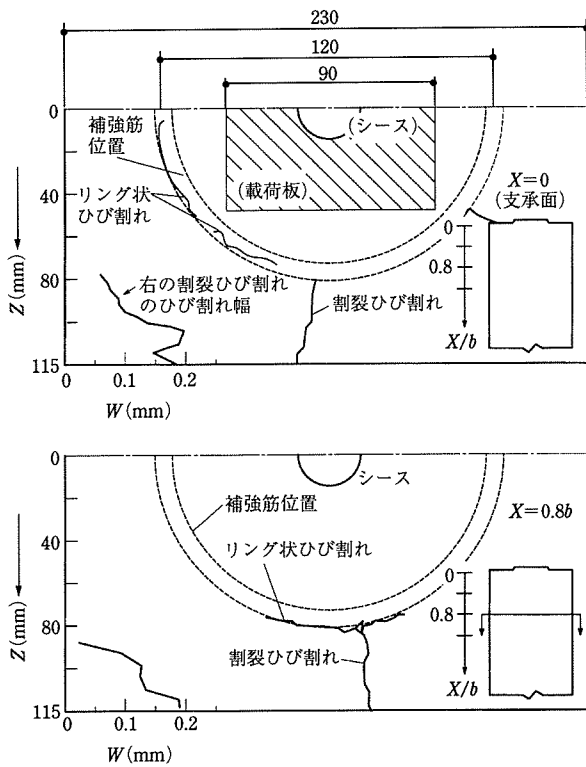


図-6 試験体内部のひび割れ性状

(2) 破壊タイプと破壊耐力

定着部には割裂補強筋の量および巻き径と載荷板大きさとの相対関係などによって、いくつかの破壊タイプがあると指摘されている^{11), 12), 14), 15)}。図-7¹¹⁾はその一つの例であるが、次のような2種の破壊タイプが報告されている。

第1のタイプは、定着板直下のコンクリートが破壊を起こして最大耐力に達するタイプで、無補強試験体ならびに補強試験体で定着板の小さなもの、あるいは大きくても補強筋量が少ない試験体で観察されたもので、材軸方向のひび割れで特徴づけられる。第2の破壊タイプは、載荷板直径が大きくかつ多量の補強筋が配置された試験体に見られたもので、補強筋で囲まれた部分直下の無筋部分が割裂破壊するタイプである。このタイプの特徴は縦ひび割れとリング状ひび割れによってかぶり部分が補強筋で囲まれた部分

から剥離し、補強された部分の直下に逆円錐コーンが形成されることである。定着板の荷重-めり込み変形関係でも各破壊タイプによる特徴が見られる。図-8¹²⁾に例を示すが、破線で示される無補強試験体が割裂によって瞬時に破壊するのに対し、実線で示される補強試験体では耐力の改善がほとんどない補強量の少ない試験体 (Curve (1)) でも最大耐力の以降の粘りは改善されていることが分かる。載荷板は同じで補強量が多くなった試験体 (Curve (4)) は耐力のみならず粘りも示している。第2の破壊タイプに属した試験

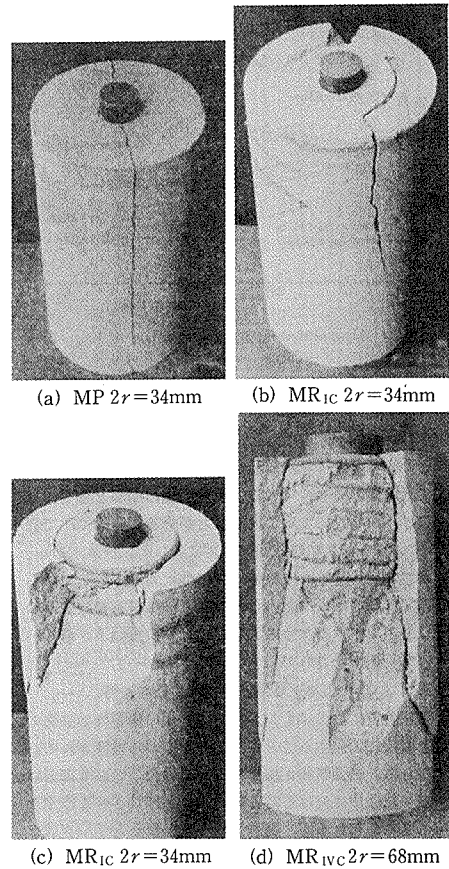


図-7 円柱供試体の破壊後のモード

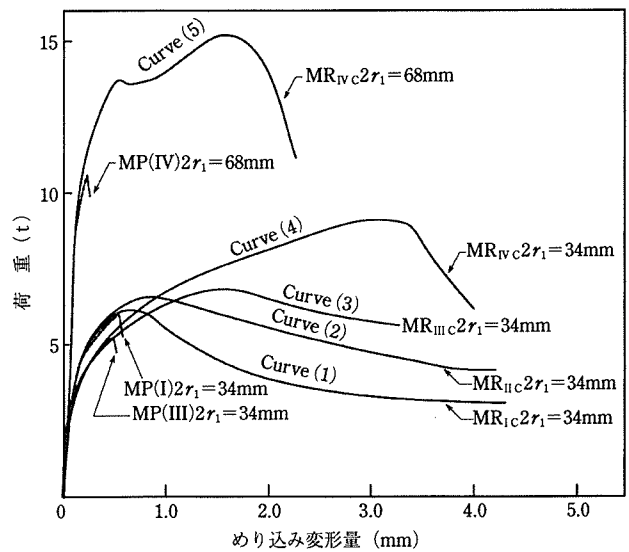


図-8 荷重-めり込み変形関係

体 (Curve (5)) は、無補強試験体に対して耐力ならびに変形量の増大は認められるが、破壊が補強部直下の割裂きで生ずるため最大耐力以降の荷重低下が著しい。

上述した割裂補強筋の存在による終局耐力の上昇については、既往のいくつかの研究によっても指摘されているが、系統的な研究によって次のような考え方の終局耐力式も提案されている。すなわち、支圧板面積比、割裂補強筋の量および巻き径、コンクリート強度などによって異なる終局耐力は、

- ① 無補強の場合の耐力、支圧板直下の拘束コンクリートの耐力ならびに補強部直下の無補強コンクリートの耐力いずれかで決定される¹¹⁾。
- ② 無補強コンクリートの耐力、スパイラル筋による耐力増加およびフープ筋による耐力増加の累加で与えられる¹⁴⁾。

2.2 試験体の大きさの影響

実施構造体における定着部挙動を調べるための大型試験体に関する実験例はいくつか見られるが、定着部の各種耐力に及ぼす試験体のスケールに注目した研究はほとんどない。図-9⁷⁾は、試験体寸法、支圧板寸法、シース孔径、スパイラル筋巻き径、フープ筋加工寸法および定着板寸法等がほぼ相似である試験体を用いて、試験体のスケールが定着部のひび割れ耐力および最大耐力に及ぼす影響を調べた研究結果である。同図より支承面積が大きくなるほどひび割れ荷重時および最大荷重時の支圧応力比 (σ_c/F_c , σ_u/F_c , F_c : コンクリート圧縮強度) は小さくなり、支承面積が約 1770cm² (42cm×42cm角, 図中の数字は部材幅を示す) 以上になると支圧応力比はほぼ一定となる傾向のあることが示されている。このことは、実構造物に用いられるような、大容量テンドンの定着具を使用した支承面積が大きい大型試験体の耐力評価を、小試験体の結果に基づいて行うと危険側に評価する可能性のあることを示す。それゆえ、図-10⁷⁾に示すように部材幅が42cmである部材を基準とした耐力増減係数が提案されている。

2.3 荷重条件の影響

最も基本的な荷重条件で、プレストレス導入時にも対応づけられる単調増大荷重下における定着部の力学性状は、上述のように、不十分ではあるが明らかにされてきている。しかし、定着部には導入後、緊張力が定着具を通して構造物の耐用年限中、持続的に作用する。また、定着部は通常、地震時にPC鋼材の引張力の変動が最も大きくなる梁のクリティカル断面に近い場合、グラウトの付着性能によっては大きな変動荷重を繰返し受けることが予想される。これまで、緊張力はコンクリートのクリープなどによって減退し、コンクリート強度は導入時に比べ増大するので、導入後、定着部は安全であるとする傾向も見られた。しかし、各種の限界状態に基づく性能設計に対しては、それら荷重条件に対する力学性状を明らかにする必要があるだろう。持続荷重および繰返し荷重を受ける定着部の力学性状に関する研究は極めて少ないが、以下に、無補強および円形割裂補強筋を有する定着部についての研究結果を紹介する。

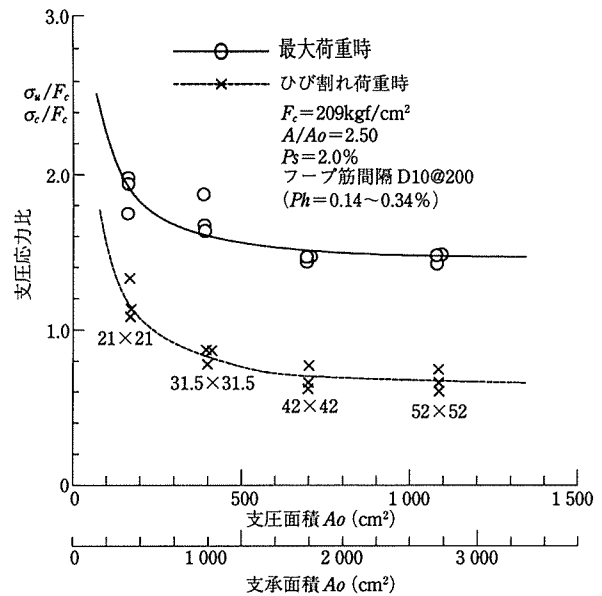


図-9 支圧応力比と支承面積Aの関係

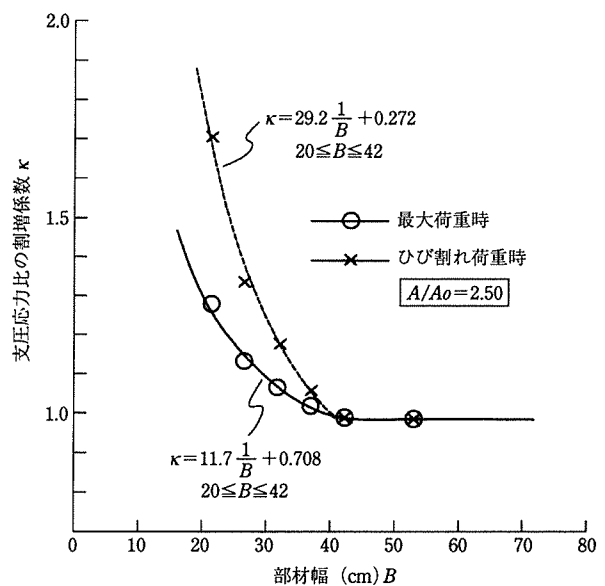


図-10 部材幅と支圧応力比の割増係数の関係

(1) 持続荷重

図-11¹⁶⁾は、単調荷重試験体の破壊荷重の85%の持続荷重を載荷した無補強試験体におけるひび割れ幅-載荷日数関係である。同図によれば、ひび割れ幅は載荷後ほぼ7日ほどで収束する傾向を示すが、その収束値は初期ひび割れの1.7, 3.8程度となっている。また、図-12^{9), 16)}は補強試験体の支承面から材軸方向の各位置におけるひび割れ幅の推移を調べたものであるが、いずれの位置のひび割れ幅も除荷材齢ではひび割れ幅が初期値の2.0~3.5倍程度となっている。なお、持続荷重した試験体の除荷後の破壊耐力は単調荷重のものとの差がなく、持続荷重履歴の影響は見られなかったと報告されている。さらに、樹脂圧入法で調べた内部ひび割れ幅性状は単調荷重下でのそれと同様の性状であることが示されている^{10), 13)}。

(2) 繰返し荷重

図-13^{9), 16)}は単調荷重時の破壊荷重に対する比が、90,

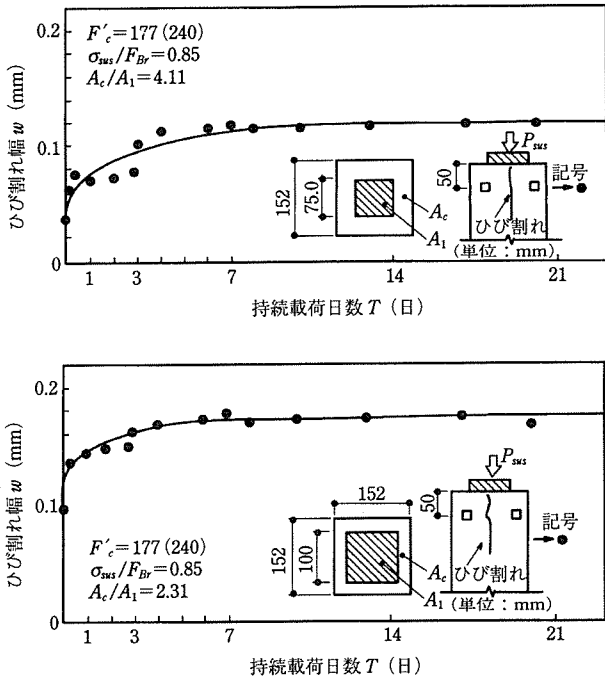


図-11 無補強定着部の持続荷重下におけるひび割れ幅

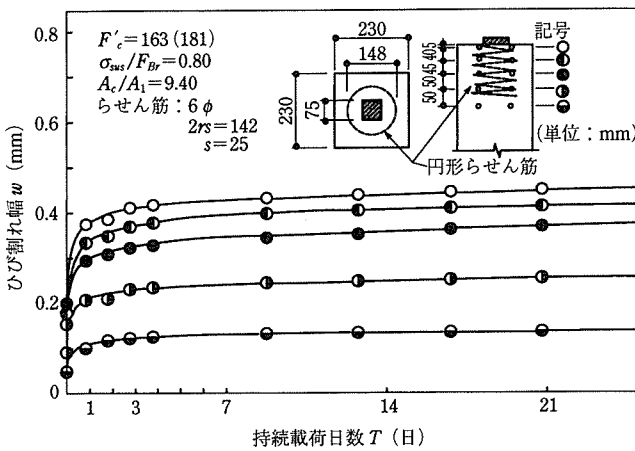


図-12 補強定着部の持続荷重下におけるひび割れ幅

92.5, 95%である上限荷重と、零トンの下限荷重による繰返し載荷試験での、表面ひび割れ幅 (w) - 繰返し回数 (N) の関係の例である。ここで下限荷重を零としたのは、最も低い疲労強度を与えること、および梁部材実験では大変形時定着板が浮き上がり支圧荷重が零となる可能性があるためである。同図によれば、ひび割れ幅は繰返し回数に対し単調に増大すること、また下限荷重時では、残留ひび割れ幅が上限荷重の50%程度もあり、ひび割れが大きく開口した状態になることなどが示されている。図-14^{9), 16)}は、下限応力レベルが零である繰返し荷重下での、無補強定着部および補強定着部の疲労強度比 ($S = \sigma_{up} / \sigma_{MB}$, σ_{up} : 上限応力, σ_{MB} : 単調載荷時強度) と繰返し回数 (N) との関係を示したものである。同図(a)より $S - \ln(N)$ 関係は、コンクリート強度、支圧板の大きさおよび供試体の大きさにかかわらず、ほぼ同一の直線関係となることが分かる。次に、同図(b)は補強定着部についての同様の実験結果を示したものである。データのバラツキは大きいですが、繰返し荷重に対

する抵抗性は補強によって改善されること、 $S - \ln(N)$ 関係は補強筋量、かぶり厚さ、支圧板の大きさおよびコンクリート強度にかかわらず、ほぼ同様の直線関係になると報告されている。図-13および図-14の結果から、定着部の単調載荷時破壊耐力の80%程度を上限荷重とする50回程度の繰返し載荷では、ひび割れ幅の進展も少なく破壊も生じないことが推測される。

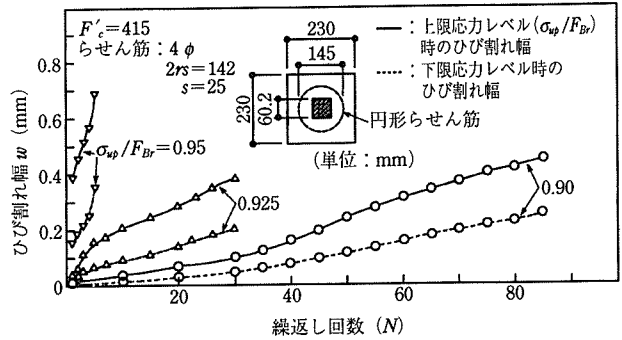
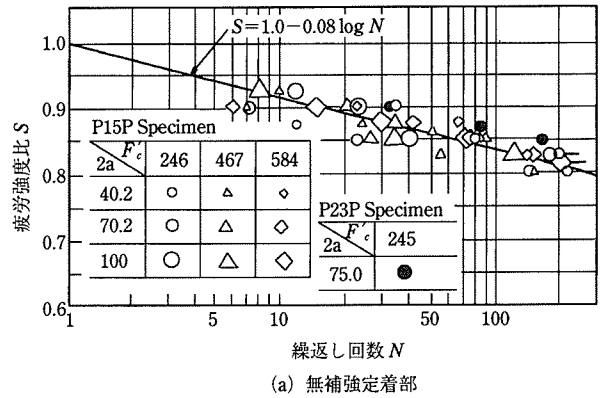
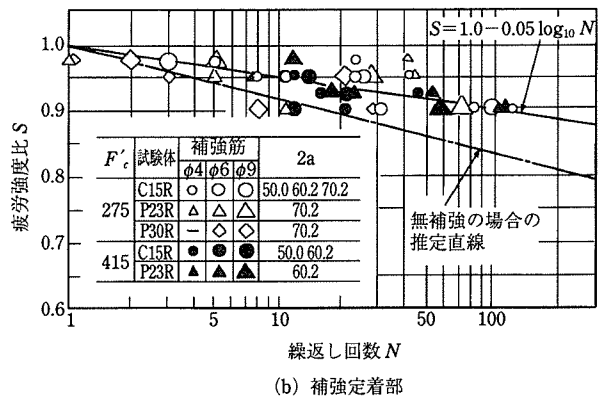


図-13 表面ひび割れ幅と繰返し回数の関係



(a) 無補強定着部



(b) 補強定着部

図-14 疲労強度比 (S) と繰返し回数 (N) の関係

2.4 定着板の剛性とシース孔の影響

図-15¹⁸⁾は、無筋コンクリートを剛な定着板で直接、あるいは通常の定着板をアンカーヘッドを通して載荷した場合の支圧応力比と支承面積比の関係を比較したものである。同図によれば後者の支圧応力比は前者に比べ小さく、これは定着板剛性とシース孔の相対関係による定着板の曲げ変形に起因していると指摘されている。現行の諸規準等では定着板の厚みについての規定はあるが、定着板の剛性、さらにはそれとシース孔との関係などについての規定

はなく、今後明確にする必要があると思われる。なお、シース孔が破壊耐力に及ぼす影響は、剛な定着板を用いた実験によって調べられている¹⁹⁾。シース孔面積が支圧面積に比べ小さければ、破壊形式はさほど影響されないが、大きい場合には定着板直下で圧壊すると指摘されている。定着板が円形の時の破壊耐力式として次式が提案されている。

$$P_u/P_{u0}=1-(r_s/r_1)^2$$

P_u : 破壊荷重

P_{u0} : シース孔がない場合の破壊荷重

r_s : シース孔の半径

r_1 : 定着板の半径

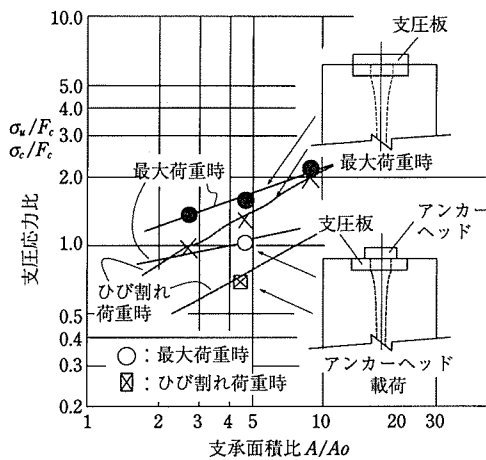


図-15 支圧面積比と支圧応力比の関係

3. まとめ

PC鋼材の材端定着部はポストテンション型プレストレストコンクリート構造における要である。にもかかわらず、導入後、緊張力はコンクリートのクリープなどによって減退するが、コンクリート強度は増大する、あるいはPC鋼材の破断荷重が作用荷重の上限で明確だ、などの理由のためか、その力学性状に対する追究度はあまり高くない印象がある。しかし、少し詳細に考えると、

- ① 通常配筋される割裂補強筋が定着部の力学性状に及ぼす効果はほとんど考慮されていない、
- ② 導入荷重とPC鋼材破断荷重の関係は一定ではないので、許容応力度では後者に対する安全度を明確にできない、
- ③ 導入時にひび割れ発生も予想されるのに、持続荷重および繰返し荷重などの荷重条件がひび割れ耐力やひび割れ幅性状に及ぼす影響はほとんど検討されていない。さらに繰返し荷重に対する疲労強度が明らかではない、
- ④ 梁-柱接合部における大きなシース孔の影響、あるいは試験体スケールの問題、

など、課題が山積しているのが現状であろう。

本報告が、それらの課題の一部に、また定着部のより一般的な限界状態設計法の確立のために、少しでもお役に立てれば幸いである。

なお、円形スパイラル筋を有する定着部という限られた範囲ではあるが、実験結果から誘導された各種耐力式と、いわゆる2次モーメント法に基づく1つの定着部設計法の試案、すなわち、導入時、使用時および地震荷重時に対して定着部は破壊しないと同時に、無補強定着部にはひび割れは許さず、補強定着部では制御目標幅値を満足するひび割れを許容することを目指す試案も示されている。

参考文献

- 1) 日本建築学会：プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説、1975
- 2) プレストレストコンクリート技術協会：PC定着工法、No.6、1997
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書、1996
- 4) 藤井 学：コンクリート構造物における局部応力とその設計について、コンクリート工学、Vol.14、No.10、p.1、1976.10
- 5) 鈴木計夫、中塚 信、島本 齊：PC鋼材定着部の破壊耐力とひびわれ性状に関する研究、日本建築学会近畿支部研究報告集、p.161、1982
- 6) 藤井 学、荒木 毅、塩屋俊幸：局部支圧を受ける補強コンクリートの変形と破壊、セメント技術年報、p.356、1975
- 7) 杉田和直、服部高重、最上達雄：PC tendon 定着部の評価に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文報告集、第422号、p.75、1991.4
- 8) 藤井 学、鍋野幹夫：局部支圧を受ける補強コンクリートのひびわれおよび破壊安全率について、セメント技術年報、p.444、1973
- 9) 日本建築学会：プレストレスト鉄筋コンクリート(Ⅲ種PC)構造設計・施工指針・同解説、1983
- 10) 鈴木計夫、中塚 信、菅田昌宏、佐々木仁志：円形補強筋をもつPC鋼材定着部の割裂ひびわれ性状ならびにその耐力、コンクリート工学年次論文報告集、p.183、1988
- 11) 鈴木計夫、中塚 信：円形補強筋をもつPC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号、p.17、1982.5
- 12) 鈴木計夫、中塚 信：円形補強筋をもつPC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341号、p.19、1984.7
- 13) 鈴木計夫、中塚 信、佐々木仁志、菅田昌宏：円形補強筋をもつPC鋼材定着部の限界状態設計法に関する基礎的研究、日本建築学会近畿支部研究報告集、p.113、1988
- 14) 杉田和直：PC tendon 定着の耐力評価と設計法に関する研究、日本大学学位請求論文、p.30、1993
- 15) 六車 照、岡本 伸：局部支圧を受けるコンクリートの支圧強度に関する実験的研究、セメント技術年報、p.368、1964
- 16) 鈴木計夫、中塚 信、増田安彦、酒井直哉：繰返し荷重あるいは持続荷重をうけるPC鋼材定着部の破壊耐力および変形性状に関する研究、日本建築学会近畿支部研究報告集、p.25、1985
- 17) 鈴木計夫、中塚 信、増田安彦、酒井直哉：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、プレストレストコンクリート技術協会研究発表会講演概要、p.24、1984
- 18) 杉田和直、服部高重、最上達雄：PC tendon 定着部の耐力性状に関する実験研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、p.1091、1993
- 19) 藤井 学、荒木 毅：コンクリート支圧強度におよぼすシース孔の影響について、土木学会関西支部年次学術講演会、pp.V-12-1~2、1972
- 20) 鈴木計夫、中塚 信、島本 齊：PC鋼材定着部の終局強度設計法に関する基礎的研究、セメント技術年報、p.495、1983

【1998年7月3日受付】