

[2031] PC 鋼材の群定着に関する基礎的研究

玉置一清^{*1}・藤田 学^{*2}・藤井 学^{*3}

1. まえがき

PC 鋼材定着部の配置は、PC 工法設計施工指針に示される最小配置間隔によって制約され、そのために部材厚は、PC 鋼材の必要数量から決定される例が多い。したがって、高強度コンクリートの適用等から桁断面の小型化（軽量化）を図ろうとした場合にも、この制約から十分な小型化ができない場合もあり得る。

現在、PC 鋼材定着部の設計は、定着群の中から一つの定着部のまわりのブロックを重複しないように切り出し、その個々の仮想ブロックに対して行われるというのが一般的である。PC 鋼材定着部に関する研究も、この単一ブロックに1つの定着部として扱ったものがほとんどであり、複数の定着部を同時に扱った研究・実験は少ない。^[1]

そこで、本研究は、この複数の定着群に対して体系的な設計手法を確立することを目的として、複数定着部の支圧強度と定着間隔との関係を明らかにしようというものである。

2. 実験概要

載荷版中心から縁端までの距離を固定($c=75\text{mm}$)とし、2枚の載荷版の中心間距離を変化させた実験供試体を図1に示す。供試体の高さは、全て長辺の2倍としている。載荷版は、 $75 \times 75\text{mm}$ 、厚み 25mm の1種類のみとした。

Cタイプは、縁端距離の2倍が中心間距離であり、仮想ブロックがコンクリート断面を余すことなく、全断面を有効として分割することができるものを意図する。A, Bタイプは、仮想ブロックが中心間で重複する定着部が密集しているタイプである。D, Eタイプは、逆に仮想ブロックが重複しないで、十分に離れているタイプである。

載荷装置を図2に示す。試験は、1台の油圧ジャッキで2枚の載荷版を同時に載荷して行った。この時、2枚の載荷版の拘束条件により、その破壊荷重・形態が大きく異なることが予想され、事前に行った予備試験から、PC鋼棒定着部の挙動に最も近い拘束条件として、載荷版上面とジャッキ載荷面の間に潤滑油を塗布することにより、水平方向の拘束のみを除去し、回転は拘束したものを採用した。

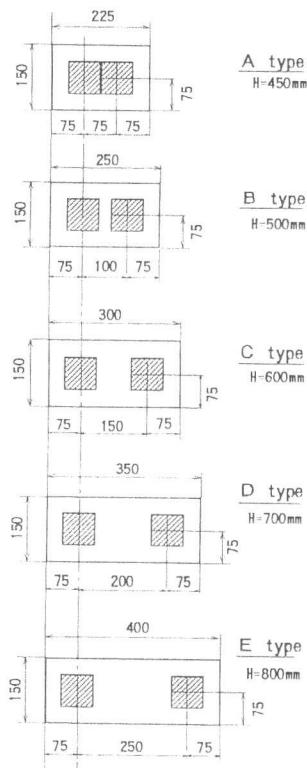


図1 供試体断面

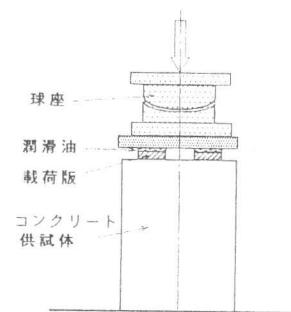


図2 載荷装置

^{*1} 住友建設(株) 技術研究所 工修 (正会員)^{*2} 住友建設(株) 技術研究所、主任研究員 工修 (正会員)^{*3} 京都大学教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

3. 実験結果

1)コンクリート試験

配合及び硬化後のコンクリート試験結果を表1に示す。高強度コンクリートの配合は、筆者らの既往の研究成果[2]を基に、シリカフュームの代換率を10%とし、実機プラントによって打設した。テストピースは、 $\phi 10 \times 20$ を用い、支圧実験供試体同様、現場養生とした。

表1 配合 及び 硬化後のコンクリート試験

| シリーズ | W/C (%) | S/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | 硬化後のコンクリート試験(kgf/cm ²) | | |
|------|------------|------------|--------------------------|-----|----|-----|------|------------------------------------|------|-------------------|
| | | | W | C | SF | S | G | 圧縮強度 | 割裂強度 | 弾性係数 |
| S400 | 43 | 42 | 159 | 370 | — | 743 | 1046 | 373 | 28.4 | 3.1×10^5 |
| S800 | 30 | 42 | 170 | 510 | 57 | 676 | 970 | 874 | 41.0 | 4.2×10^5 |

SF:シリカフューム

2)仮想ブロック法による最大荷重推定

複数定着部に対する支圧面積(仮想ブロック)の分割法としては、各々の支圧面積は重複しないで、載荷面積と図心を一致させることが原則である。しかし、複数の載荷版が接するような配置を考えた時、図心を一致させるためには支圧面積幅と載荷面積幅とは等しくなり、複数の載荷版を一体と考えた場合に比して過小評価となる。そこで、本研究では支圧面積分割法に対し、次のような解釈を行った。

①載荷面積からコンクリート縁辺に対して各々対称にとった面積とする。

②重複した面積は、その重複した個数によって等分される。

この時、支圧面積と載荷面積の図心は一致しない。本解釈は「図心を一致させる」という項目に反するが、複数枚の載荷版が接し一つの載荷版とみなせる時にも矛盾しないものとなる。

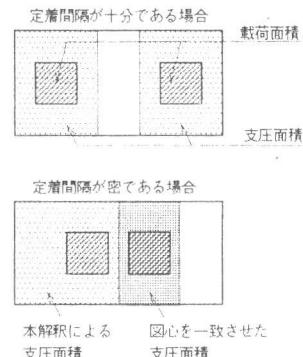


図3 支圧面積の解釈

最大荷重実験値及び上記仮想ブロック法による計算値を図4に示す。普通強度コンクリートにおいては、圧縮強度をパラメータとした既往式[3]による計算値に一致している。高強度コンクリート供試体の最大荷重実験値は、既往式による計算値の60%程度の値となった。筆者らが、円柱試験の結果をもとに提案した引張強度をパラメータとした理論式[2]から求めた計算値を破線で示す。理論式は、円柱に生じる割裂応力最大値が引張強度に達した時を破壊とする条件から導いたものであるが、 $A_c/A_a=4$ 程度の場合、表面ひび割れ発生が、その破壊条件となる。(かぶりコンクリートの横拘束力の喪失と同時に破壊) 実験結果は、横方向Strainゲージから推測して、提案式・計算値よりも低荷重において表面クラックは発生し、非常に緩やかな進展をしたと考えられる。供試体はクラック発生後も相当の耐力を有し、破壊荷重は、理論式・計算値を1.2倍程度上回った。

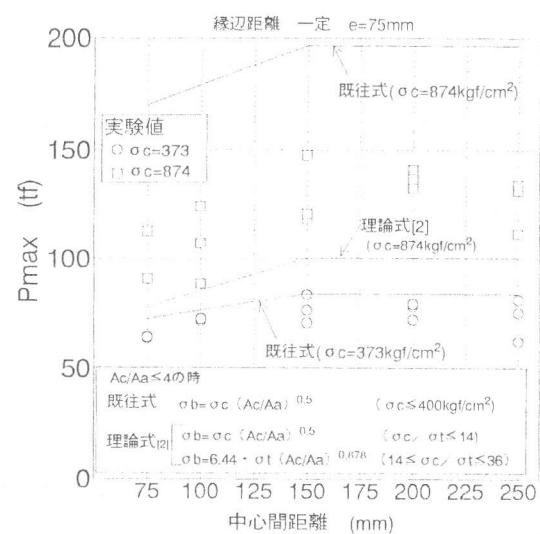
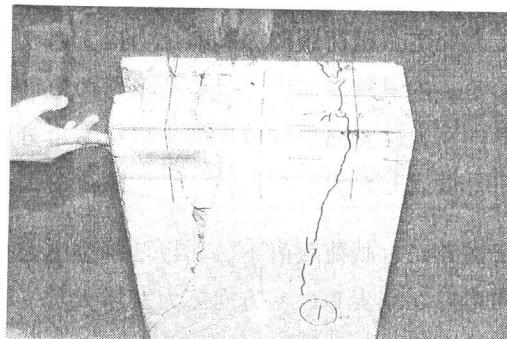
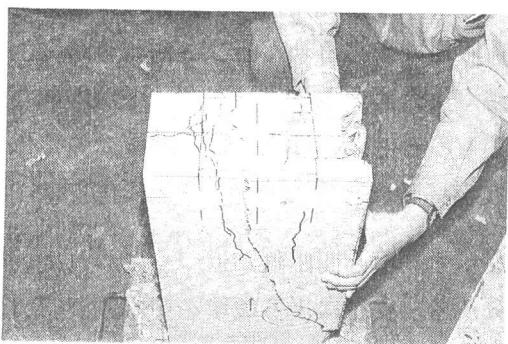
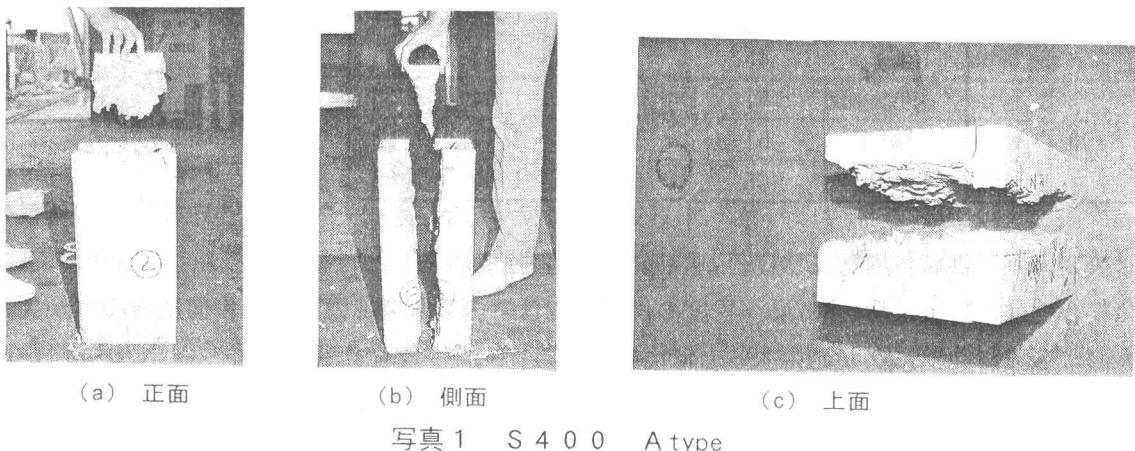


図4 最大荷重実験値及び計算値

3)破壊形態

載荷版の中心間距離が縁端距離の2倍以上となるC～Eタイプでは、その破壊荷重は $15 \times 15\text{cm}$ ブロックを2個並べたと仮定した計算値に等しく、破壊形態も単体ブロックの破壊試験同様に放射状の割裂ひび割れによるものとなった。中心間距離が縁端距離の2倍より小さいA, Bタイプでは、若干の耐力低下が見られる。また、破壊形態もC～Eタイプとは異なり、2枚の載荷版の中心を繋ぐ長手方向のひび割れにより二つに分断される破壊となった。なお、コンクリート強度による、破壊形態の相違は認められなかった。



4)割裂応力

3Dソリッドモデルを用いたFEM弾性解析による、表面及び中心割裂応力の最大値を表2に示す。また、 $15 \times 15\text{cm}$ のブロックに中央載荷された单一ブロックモデルの解析結果を参考のために示す。載荷荷重は、載荷版1枚当たりP=22.5tf（2枚でP=45tf、支圧応力 $\sigma_b=400\text{kgf/cm}^2$ ）で、強制変位として与えている。

表2 P=45tf(2枚合計)載荷時の割裂応力最大値(FEM弾性解析)

| 中心間 距離 | 割裂応力最大値 (kgf/cm ²) | | | |
|----------------|--------------------------------|-------|-------|-------|
| | 表 面 | | 内 部 | |
| | (x方向) | (y方向) | (x方向) | (y方向) |
| 15×15 | - | 29.9 | 29.9 | 15.5 |
| A type | 75mm | 25.8 | 36.5 | 10.8 |
| C type | 150mm | 29.3 | 30.4 | 10.7 |
| E type | 250mm | 33.5 | 28.4 | 15.1 |
| | | | | 15.4 |

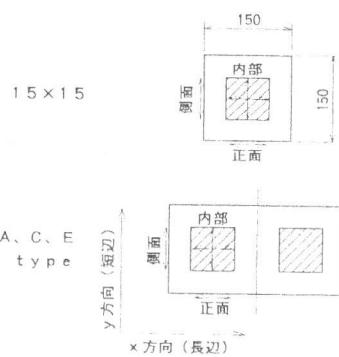


図5 FEM計算値出力位置

この表面及び中心割裂応力が、それぞれ引張強度に達する時の荷重と最大荷重実験値との比較を表3に示す。

表3 ひび割れ発生荷重計算値と最大荷重との比較

| | | 実験値 | 計算値 (tf) | | 実験値 /表面 | 実験値 /内部 |
|------|--------|--------------|----------------|----------------|------------|------------|
| | | 最大荷重 (tf) | 表面クラック 発生荷重 | 内部クラック 発生荷重 | | |
| S400 | A type | 64.4 | 35 | 60 | 1.84 | 1.07 |
| | C type | 77.0 | 42 | 79 | 1.83 | 0.97 |
| | E type | 73.2 | 45 | 83 | 1.63 | 0.88 |
| S800 | A type | 99.1 | 51 | 86 | 1.94 | 1.15 |
| | C type | 128.8 | 61 | 114 | 2.11 | 1.13 |
| | E type | 125.7 | 65 | 120 | 1.93 | 1.05 |

S400シリーズ

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_c = 373 \text{ kgf/cm}^2 \\ \sigma_t = 28.4 \text{ kgf/cm}^2 \end{array} \right.$$

S800シリーズ

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_c = 874 \text{ kgf/cm}^2 \\ \sigma_t = 41.0 \text{ kgf/cm}^2 \end{array} \right.$$

表3より、供試体内部における割裂応力が引張強度に達した時を破壊と考える方が、実験値との整合性はよい。なお、 $A_c/A_a=4$ 程度の供試体では、中心割裂応力に比べ表面応力の方が大きく、表面から先にクラックが発生すると考えられ、表面クラック発生後の中心割裂応力を弾性計算により求めることは当然矛盾する。しかし、載荷実験においては、表3に示す表面クラック発生荷重計算値付近において側面にクラックは発生するものの、Aタイプを除いて写真3、4に示すように表面に発生したクラックは、破壊面とは明らかに異なった。その他、供試体には低荷重状態において、載荷版間の剥離応力によるクラック、載荷版縁に生じるせん断ひび割れ等が発生している。本計算においては、それらの表面クラックは浅く、表面かぶりコンクリートが内部に与える拘束力は表面クラック発生以後も十分に有しているものと考え、供試体は破壊まで弾性体であると仮定した。

図6に、載荷版直下における割裂応力分布計算値を示す。中心間距離が近づくにつれて、x方向応力が減少し、y方向応力が増大していることが分かる。支圧による破壊を中心割裂応力が引張強度に達した時と仮定するのであれば、中心間距離の近接に伴う耐力低下は、この中心割裂応力y方向成分の増大が原因であると考えられる。

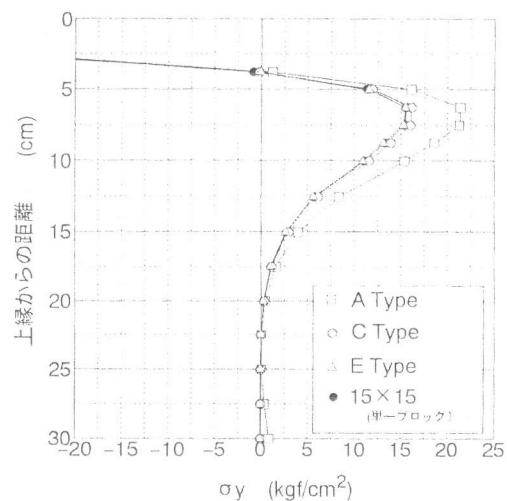
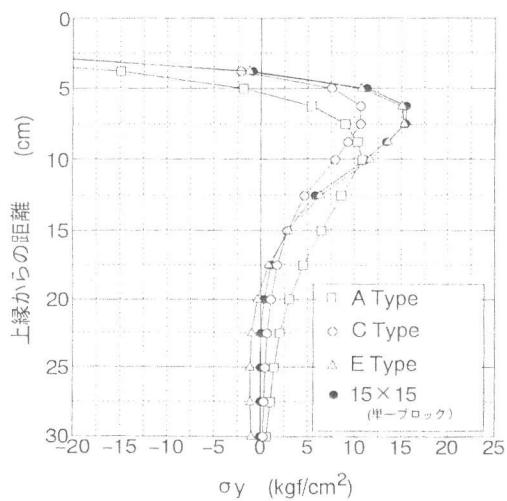


図6 P=45tf(2枚合計)時における載荷版直下の割裂応力分布(FEM弹性解析)

以下に、このy方向割裂応力増大のメカニズムについて考察を行う。

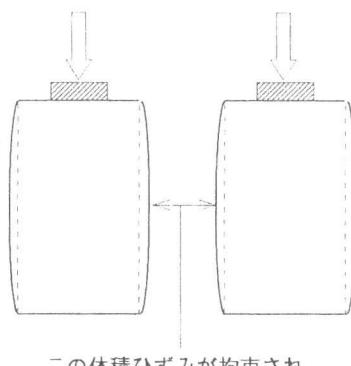
図7に示すように、載荷版間に隣接ブロックの体積ひずみを拘束することによる側圧が生じる。図8に、供試体中心部におけるx方向応力分布を示す。図中の斜線圧縮領域が側圧ということになる。

中心間距離を十分に離したEタイプでは、載荷版間に生じる側圧は、ほとんどなく、載荷版直下の割裂応力は、単体ブロックのものと等しくなる。

中心間距離が縁端距離の2倍となるCタイプでは、載荷面から深さ2~10cm位置に側圧が生じ、この側圧によって載荷版直下のx方向割裂応力は減少しているが、y方向割裂応力に与える影響は小さいようである。したがって、内部に発生する割裂応力の最大値は、単体ブロックに発生する割裂応力とほぼ等しいものとなる。

ここで、C,Eタイプにおける2枚の載荷版間に、上縁付近に非常に大きな剥裂応力が生じていることが分かる。この剥裂応力によって発生したクラックは、破壊実験後の目視では微小なもののが確認されたのみであった。剥裂応力は、定着群を考えるとき、割裂応力よりも卓越した存在であるが、その発生範囲は浅く、特に補強を行わなかった本試験においても、致命的な破壊に繋がる様なことはなかった。

載荷版が接しているAタイプでは、上縁から深さ6cm程度の範囲に非常に大きな側圧が生じ、このために、載荷版直下のx方向割裂応力は小さくなり、y方向割裂応力は、側圧による割裂応力がさらに累加されることによって増大している。



この体積ひずみが拘束され
側圧となる

図7 側圧の概念

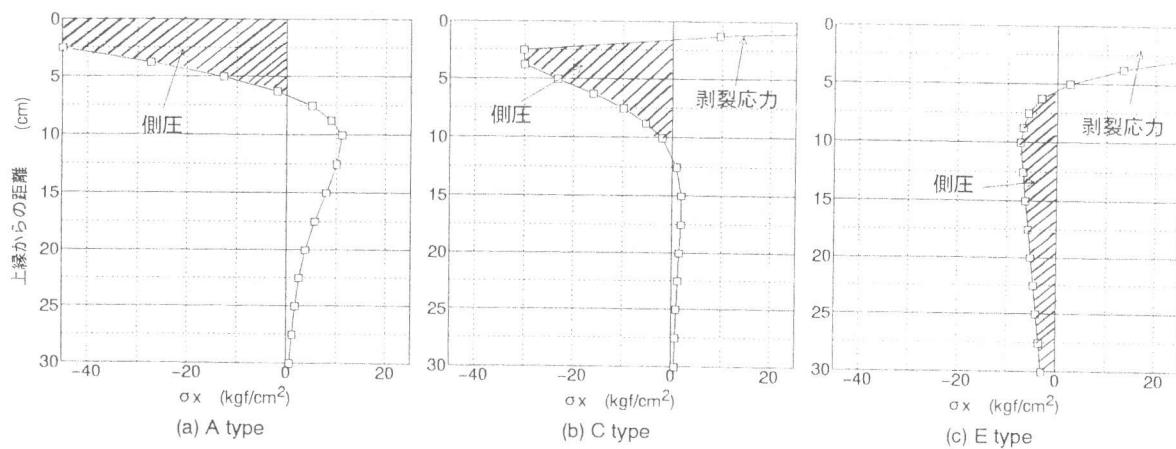
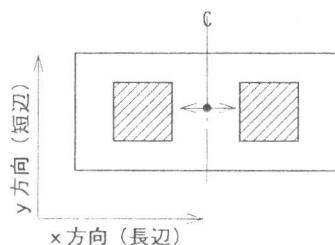


図8 $P=45\text{tf}$ (2枚合計)時における供試体中心部における側圧分布(FEM弾性解析)

この載荷版間に生じる側圧と載荷版中心間距離との関係を明確にし、またその側圧によって隣接載荷版方向の直角方向(y方向)に累加される割裂応力を導くことにより、定着群を体系的に取扱った設計を可能にするものと考える。

以下に、その概念を示す。

定着群の一つの定着ブロックの支圧強度

$$\sigma_b = \frac{\sigma_t}{\sigma_y + \sigma_s} \cdot \sigma_z \left[\frac{A_c}{A_a} \right]$$

ここで、 σ_z : 載荷重を支圧面積で除した平均鉛直応力

σ_y : σ_z 時に、仮想ブロックに生じる割裂応力
(隣接載荷版方向の直交方向)

σ_s : σ_z 時に、隣接ブロック間に生じる側圧によって生じる割裂応力

σ_t : 引張強度

A_c : 支圧面積（仮想ブロックの面積）

A_a : 載荷版面積

定着群

載荷版支圧によって
生じる割裂応力 σ_y

側圧によって生じる
割裂応力 σ_s

定着群に生じる
割裂応力 $\sigma_y + \sigma_s$

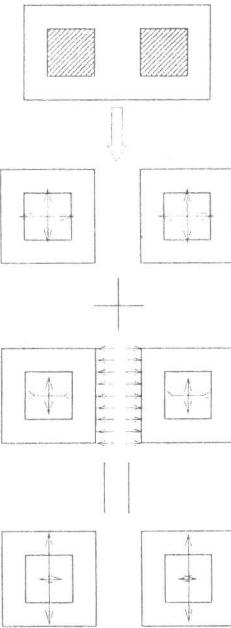


図9 定着群に生じる割裂応力の概念

4. あとがき

以下に、本研究より得られた知見をまとめる。

- ① 載荷版中心間距離を縁端距離の2倍以上とすると、隣接載荷版からの影響は小さく、それぞれ独立した仮想ブロックと考える従来の設計法は妥当である。
- ② 載荷版間距離が接近したときの耐力低下は、隣接ブロックからの側圧によって隣接載荷版方向の直交方向に生じる割裂応力によって生じるものと考えられる。
- ③ 載荷版間の上面に生ずる剥裂応力は卓越したものではあるが、その深さ方向の分布範囲は浅く、特に補強を行わなくても破壊原因となることはない。
- ④ 定着群全体をモデル化したFEM弾性解析を行うことにより、表面ひび割れ発生荷重及び破壊荷重の推定を行うことが可能である。しかし、この方法は相当の労力を要し、あまり実用的であるとは言い難い。

PC鋼材定着部をsystematicに取り扱うためには、今後、載荷版間の中央断面に生じる側圧及びその側圧によって隣接載荷版・直交方向に生ずる割裂応力累加分の評価方法の充実、3枚以上の複数定着部及び2次元的な配置についての検討へと拡張していく必要がある。

5. 謝辞

本研究を遂行するに当たり、多大な御協力をいただいた大阪工大・小林和夫教授、栗田章光助教授に深く感謝の意を表します。

6. 参考文献

- [1]石橋忠良：アンカーレットの配置間隔に関する実験的研究, プレストレスコンクリート, Vol. 23, No. 3, May 1981
- [2]Fujii, M., et al: Basic Research on the Bearing Strength of High Strength Concrete, FIP' 93 Symposium, pp281-288, 1993-10
- [3]土木学会編：コンクリート標準示方書【設計編】、平成三年版