

論文

[2139] プレキャスト部材の接合隅角部における力学的挙動に関する研究

高橋 秀直<sup>\*1</sup>・上原 匠<sup>\*2</sup>・梅原 秀哲<sup>\*3</sup>・野澤 文明<sup>\*4</sup>

1. まえがき

近年、熟練工の不足や工期延長に伴う交通阻害など建設現場において様々な問題点が生じており、省力化技術の向上は建設業界の発展のためにも必要不可欠となっている。コンクリート構造物を作製する場合においても、部材をブロックごとにプレキャストコンクリートで作製し、プレストレスの導入によって部材を一体化する工法が見られるようになってきている。その際に、耐食性の優れたアンボンドPC鋼材を用いてグラウト注入を省略するアンボンド工法が注目されつつあるが、ひびわれ幅の増加や耐力の減少など力学的性能はグラウチングが行われた場合に比べ低下することも事実である。特にプレキャスト部材の接合隅角部は、モーメントが最大となるため、繰り返し荷重を受ける際の弱点となりやすい。そこで本研究では、ブロック数、鋼材の付着状態および導入プレストレス量を変化させたPC柱に対して、静的正負交番載荷実験を行うとともに、二次元有限要素法を用いた数値解析を行い、プレキャスト部材の接合隅角部における挙動を総合的に把握することを目的とする。

表-1 供試体の種類

供試体名	分割数	プレストレス量 (kgf/cm <sup>2</sup> )	付着状態
A-100-UB	分割なし	100	アンボンド
A-70-UB	分割なし	70	アンボンド
A-70-B	分割なし	70	ボンド
A-50-UB	分割なし	50	アンボンド
A-50-B	分割なし	50	ボンド
A-35-UB	分割なし	35	アンボンド
A-35-B	分割なし	35	ボンド
A-15-UB	分割なし	15	アンボンド
A-15-B	分割なし	15	ボンド
A-10-UB	分割なし	10	アンボンド
A-10-B	分割なし	10	ボンド
B-50-UB	2分割	50	アンボンド
B-50-B	2分割	50	ボンド
B-35-UB	2分割	35	アンボンド
B-35-B	2分割	35	ボンド
C-50-UB	3分割	50	アンボンド
C-50-B	3分割	50	ボンド
C-35-UB	3分割	35	アンボンド

2. プレキャスト部材の静的正負交番載荷実験

2.1 実験概要

供試体の種類は表-

1に示すように、付着状態、分割数、導入プレストレス量を変化させた計18体を作製した。供試体は、図-1に示すように道路橋脚等を想定して、柱部の断面は20×15の矩形断面で、部材長は120(c

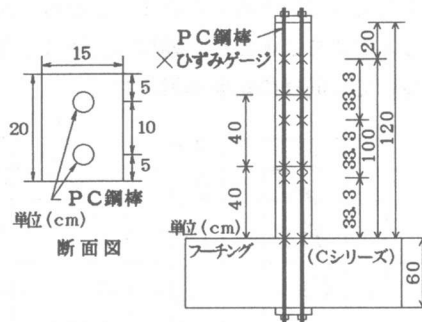


図-1 供試体の概要

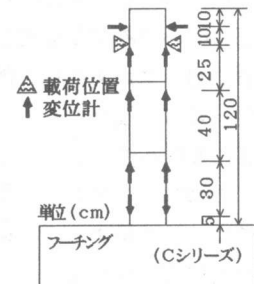


図-2 柱部の変位計の位置

\*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻 (正会員)  
 \*2 名古屋工業大学助手 工学部社会開発工学科、工博 (正会員)  
 \*3 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科、Ph. D. (正会員)  
 \*4 矢作建設工業 (株) 土木工務部 (正会員)

m)とした。この柱部をフーチング部に2本のPC鋼棒φ17mmを用いて、アンボンドの場合は材令8日でプレストレスを導入し、ボンドの場合は同じく材令8日でプレストレスを導入した後、直ちにグラウトを注入して材令13日で載荷実験を行った。なお、帯鉄筋としてD6を10cm間隔で設置した。また、フーチング部と柱部の接合面はドライジョイントとし、B、Cシリーズのブロックとブロックの間はエポキシ系接着剤を塗布した。載荷方法は、図-2に示すように静的正負交番載荷とし、載荷サイクルは載荷位置での変位が10mmの整数倍となるようにした。コンクリートの圧縮強度は約300kgf/cm<sup>2</sup>、PCグラウトの圧縮強度は約200kgf/cm<sup>2</sup>とした[1]。測定項目は水平変位、回転変形角、PC鋼材のひずみおよびひびわれ性状で、ひずみゲージおよび変位計を設置した位置を図-1および、図-2に示す。

## 2.2. 実験結果および考察

図-3に、各変位ごとの鋼材ひずみ分布について、それぞれの付着状態についての一例を示す。プレストレス量が10kgf/cm<sup>2</sup>、50kgf/cm<sup>2</sup>の場合、アンボンドの供試体はいずれもボンドの供試体に比べるとひずみ分布はかなり平均化されているが、一様に分布せず接合隅角部でのひずみ増加が大きくなっている。これは、回転変形が大きくなると、接合隅角部で鋼材がシースに接触するためと考えられる。一方、ボンドの供試体では接合隅角部以外の鋼材のひずみ増加は、0~20mmの変位内ではアンボンドに比べかなり抑えられており、鋼材の付着がそれほど低下していないと考えられる。しかし、20mm以上の変位になると、先端部分のひずみが多少大きくなっていることから、鋼材の付着低下が生じていると考えられる。なお、他のプレストレス量についても同様の結果が得られた。

図-4に、接合隅角部におけるモーメントと鋼材のひずみ関係について示す。図の点線は、プレストレス導入時のひずみ量を示している。柱部材が回転変形を

した場合に、導入プレストレス量が大きいときには、圧縮側の鋼材のひずみはプレストレス導入時のひずみより減少するが、導入プレストレス量が小さいときには、圧縮側の鋼材のひずみはプレストレス導入時のひずみより増加する。これは、導入プレストレス量が大きい場合には、回転するときその中心が2本の鋼材の内側にあるが、小さい場合その中心が鋼材の外側に存在し、2

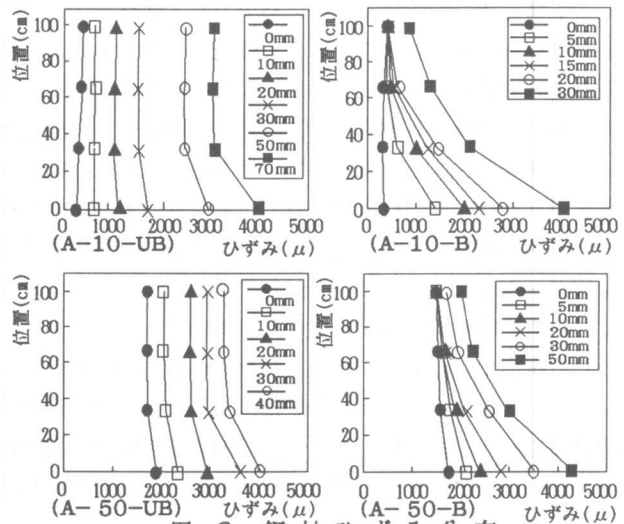


図-3 鋼材ひずみ分布

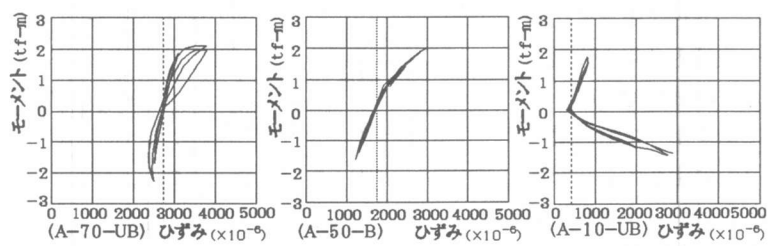


図-4 接合隅角部におけるモーメント-鋼材ひずみ曲線

本の鋼材に引張ひずみが生じているものと考えられる。

図-5に、実験より得られた荷重-変位包絡線を示す。供試体A-70-BやA-100-UBなどでは、最大荷重時の

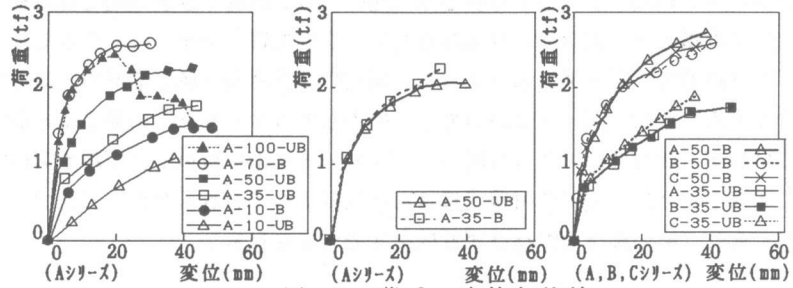


図-5 荷重-変位包絡線

変位が小さく早期に耐力が低下している。これは、プレストレス量を70~100kgf/cm<sup>2</sup>とかなり多く導入したため、供試体は剛性が高まる一方じん性に乏しく、圧縮側のコンクリートが圧壊したことが原因と考えられる。供試体A-35-UBやA-50-UBでは、A-100-UBで見られたような初期段階でのコンクリートの圧壊もなく、安定した曲線を得ることができた。それに比べてプレストレス量が10kgf/cm<sup>2</sup>のアンボンドの供試体では、初期段階から変位が大きい。このことから、部材をプレストレスによって圧着接合しアンボンドで使用する場合、35~50kgf/cm<sup>2</sup>程度のプレストレス量の導入が望ましいといえよう。また、供試体A-50-UBとA-35-Bを比較すると、初期段階の挙動はほぼ一致している。これは、アンボンド状態をボンド状態に近づけるためにプレストレス量を約40%程度上昇させればよいことを示している。また、部材を分割したものに着目した場合、付着状態および導入プレストレス量が等しければ、A、B、Cすべてのシリーズの荷重-変位包絡線における挙動はほぼ一致している。このことから、分割による影響は認められず、モーメントが最大となる接合隅角部の挙動を考慮にいれてプレキャスト部材の挙動を考慮することが重要であると思われる。

### 3. 解析

#### 3.1 解析概要

本解析は、著者らの開発したPC解析プログラムを用いて行った[2]。このプログラムは二次元有限要素法を用いており、PC鋼棒によって接合したブロック柱の挙動を、接合隅角部に長さ $\delta$ 、ヤング係数Eをパラメータとした隅角部要素を導入することによって考慮することができる。すなわち、プレキャスト部材をPC鋼棒によって接合した構造物の力学的挙動の顕著な特徴として、作用するモーメントが大きくなると、しだいに接合隅角部の剛性が低下し、コンクリートの圧縮側のひずみが大きくなるに伴って、接合隅角部が回転する可能性がある。このため、剛性を低下させ回転変形を増大させる目的で隅角部要素を導入した。特に、接合隅角部はひずみの直線性が成り立たないと考えられこのようなモデルを仮定した。そして、 $\delta$ とEの値を変化させることによって実験結果を追従するものを求めることにした。接合隅角部を考慮した解析モデルの一例を図-6に示す。

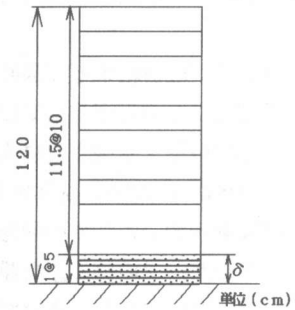


図-6 隅角部を考慮した解析モデル

ところで解析では、鋼材の付着状態については、一つの部材に対してコンクリートと鋼材の付着すべり係数を与えることによりその挙動を考慮している。鋼材の付着力が完全で、鋼材とコン

クリートとの間にすべりが存在しない場合には、鋼材のひずみ増分は鋼材各位置のコンクリートのひずみ増分と一致しなければならない。逆に付着力がまったく存在しない場合、すなわちアンボンド状態では図-7に示すように、鋼材のひずみ増分は、鋼材の一方の端から他端まで一様に分布する。なお、図-7において、一例としてコンクリートの要素は8個のはり要素に分割されているが、鋼材については5個のコンクリート要素を貫いてひずみを考慮することになる。多くの実構造物では、鋼材の付着状態はある程度すべりをもったボンドとアンボンドの間であると考えられ、その場合の鋼材ひずみは次式で与えられる。

$$\Delta \epsilon_s = K_s \left( \frac{1}{L} \int_0^L \Delta \epsilon_{cs} dx - \Delta \epsilon_{cs} \right) + \Delta \epsilon_{cs} \quad (1)$$

ここに、 $\Delta \epsilon_s$ ：鋼材のひずみ増分、 $K_s$ ：付着すべり係数、

$\Delta \epsilon_{cs}$ ：鋼材位置のコンクリートのひずみ増分、 $L$ ：鋼材の長さ

式(1)は $K_s=0.0$ のときには $\Delta \epsilon_s$ が $\Delta \epsilon_{cs}$ と等しくなり、コンクリートと鋼材が完全に付着しているボンドの状態を示し、 $K_s=1.0$ のときには $\Delta \epsilon_s$ が鋼材長さ $L$ で平均化された値となって、付着のないアンボンドの状態を示している。コンクリートと鋼材との間にすべりが存在する場合には、 $0.0 < K_s < 1.0$ となり、 $K_s$ の値が1.0に近づいていくほど鋼材の付着が低下した状態を示している。

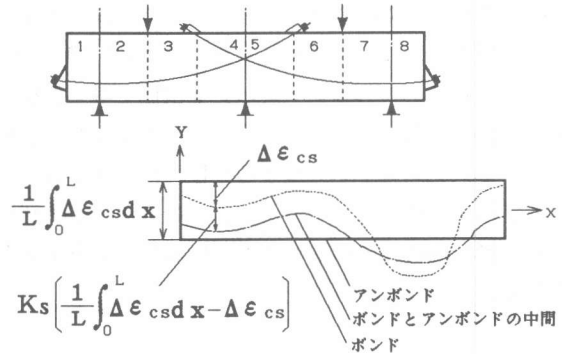


図-7 付着状態により異なる鋼材ひずみ分布

### 3.2. 解析結果と実験結果との比較

解析は付着の程度が結果に影響することを防ぐために、まずアンボンドの供試体について行った。実験結果より適度な導入プレストレス量は $35 \sim 50 \text{ kgf/cm}^2$ 程度であるとの結果が得られたため、ここではA-35-UBの供試体を対象とした。図-8にモーメント-回転変形角について実験および解析結果を示す。ここでの回転変形角とは、柱部とフーチング部の境界において、並列に設置したダイヤルゲージの値の差を設置幅で割ったものである。実験結果において付着状態に着目すると、アンボンドはボンドに比べて約2倍程度回転している。これは、アンボンドの鋼材ひずみはかなり平均化されているため、ボンドと同様の耐力を得るにはより多くの回転変形を要するためであると考えられる。また、導入プレストレス量が $35 \text{ kgf/cm}^2$ の供試体は $50 \text{ kgf/cm}^2$ の供試体に比べ大きく回転変形しているが、最大モーメントは小さかった。これらの実験結果をもとに接合隅角部要素を $\delta = 4 \text{ cm}$ 、 $E = 32000 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\delta = 5 \text{ cm}$ 、 $E = 40000 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\delta = 6 \text{ cm}$ 、 $E = 48000 \text{ kgf/cm}^2$ のものを導入したときに、解析値は実験値にほぼ近い値を示した。なお、接合隅角部要素を $\delta = 5 \text{ cm}$ 、ヤング係数をコンクリートと等しくして解析を行うと、最大モーメントはほぼ一致しているが回転変形角は実測値よりかなり小さくなり、剛性の低い接合隅角部要素を導入するモデル化の妥当性が示されている。また、これらより得られた $\delta$ と $E$ は、いずれも $E/\delta = 8000 \text{ kgf/cm}^3$ を示してお

り、これは次式より回転変形角がモーメントに比例することを意味している。

$$\frac{\theta}{M} = \frac{1}{M} \int_0^{\delta} \frac{M}{EI} dx = \frac{1}{M} \frac{M\delta}{EI} = \frac{\delta}{EI} \quad (2)$$

ここに、 $\theta$ ：回転変形角、 $I$ ：断面二次モーメント、 $M$ ：作用モーメント

次に付着状態に対するモデルの妥当性を検討するため、この解析モデルを同一プレストレス量の $35\text{kgf/cm}^2$ でボンドの場合に適用した。この時、接合隅角部要素には $\delta = 5\text{cm}$ 、 $E = 40000\text{kgf/cm}^2$ のものを用いた。図-8に示すように、完全な付着状態を仮定した $K_s = 0.0$ の場合よりも、多少の付着の低下を見込んだ $K_s = 0.4$ のときの解析値が実験値とよく一致した。なお、グラウチングを行ってもPC鋼材の径が太くなるほど付着が悪くなり、

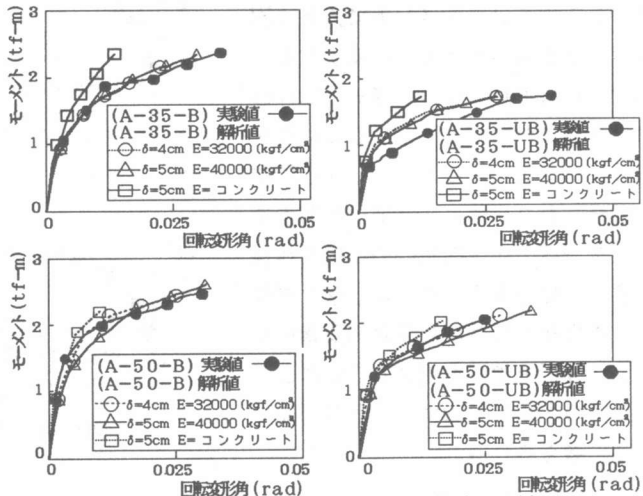


図-8 モーメント-回転変形角曲線の比較図

径が $22\text{mm}$ で $K_s = 0.7$ 、 $10\text{mm}$ で $K_s = 0.3$ のとき実際の挙動に一致した結果が報告されている[2]。したがって、 $\phi 17\text{mm}$ の本実験では $K_s = 0.4$ は妥当であると考えられる。そこで $K_s = 0.4$ を固定し、アンボンドと同様の $E/\delta = 8000\text{kgf/cm}^3$ の接合隅角部要素を導入した場合に、ほぼ実験値と一致した結果が得られた。さらに、同様の解析モデルを導入プレストレス量が異なる場合に適用し、モデルの妥当性を検討することにした。対象としたシリーズは導入プレストレス量が $50\text{kgf/cm}^2$ のシリーズで、 $35\text{kgf/cm}^2$ と同様に $E/\delta = 8000\text{kgf/cm}^3$ のものを用いて解析を行った場合に、解析値は実験値によく一致した。またこの場合も、接合隅角部要素に $\delta = 5\text{cm}$ でヤング係数 $E$ がコンクリートに等しいものを用いると、回転変形角が小さくなる傾向がみられた。以上のことから、導入プレストレス量が同一であればいずれの付着状態にも同じモデルを適用できるものと考えられ、さらに導入プレストレス量が異なってもこの解析モデルの適用は可能であると考えられる。

図-9に荷重-変位包絡線の実験値と解析値の比較を示す。接合隅角部要素にはいずれの場合も、先ほどのモーメント-回転変形角の結果より得られた $\delta = 5\text{cm}$ 、 $E = 40000\text{kgf/cm}^2$ のものを用いた。本解析は、上縁のコンクリートひずみが $3500\mu$ に達したときを破壊として取扱っているため、その時点で計算を終了させている。しかし実験においては、コンクリートの圧壊で耐力が減少した後もPC鋼棒で曲げモーメントに抵抗しているものと考えられ、コンクリートの破壊以降もそれほど耐力の低下はみられない。この傾向は、導入プレストレス量が比較的高い $70\sim 100\text{kgf/cm}^2$ のシリーズにおいて顕著にみられた。導入プレストレス量が $35\text{kgf/cm}^2$ や $50\text{kgf/cm}^2$ のときにボンド、アンボンドいずれの場合においても解析値と実験値がよく一致した。導入プレストレス

量が $10\text{kgf/cm}^2$ の場合には、アンボンドにおいて初期の変位段階で解析値が実験値を多少上回る傾向を示しているが、変位が $40\text{mm}$ 以上の大きなものになった場合は逆に実験値が解析値を上回る傾向を示している。これは、導入したプレストレス量が他のものに比べて小さいため、特にアンボンドの場合初期の段階から小さいモーメントで大きく回転変形するものと考えられる。なお、導入プレストレス量の小さい $15\text{kgf/cm}^2$ の供試体においても同じような結果が得られた。以上のことから、PC鋼棒で接合したプレキャスト部材の解析を行う上では、接合隅角部の挙動を無視することはできず、長さ $\delta$ 、ヤング係数 $E$ を変化させた接合隅角部要素を導入した解析モデルを用いることによって、その挙動を予測することが可能であると考えられる。

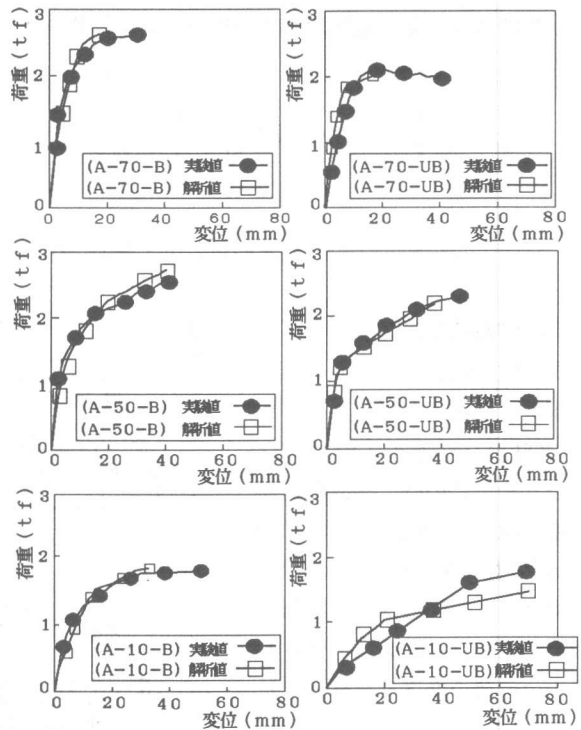


図-9 荷重-変位包絡線の比較図

#### 4. 結論

本研究で得られた結果を要約すると、以下のようになる。

(1) 鋼材ひずみ分布ならびにモーメント-回転変形角曲線より、プレストレス量が同じであればアンボンドは鋼材ひずみが平均化しているためボンドに比べ大きく回転しており、その回転変形角は約2倍程度になっていることが明らかとなった。

(2) 本研究で導入した $35\sim 50\text{kgf/cm}^2$ のプレストレスの範囲内では、2分割、3分割の柱部材の荷重-変位包絡線はほぼ一体化のものと同様の挙動を示すことが明らかとなった。また、アンボンドでも導入プレストレスレベルを40%程度上昇させることにより、ボンドとほぼ同様の耐力を得られることが明らかとなった。

(3) グラウチングを行っても鋼材とコンクリートの付着は完全にはならず、鋼材の径が太くなるほど付着は低下する。そのためプレキャスト部材の挙動の解析にあたっては、鋼材の径等によって付着すべり係数を変化させ、その付着特性を考慮する必要があることが明らかとなった。

(4) PC鋼棒によって接合したプレキャスト部材の解析を行うには、接合隅角部の挙動は無視することができず、長さ $\delta$ とヤング係数 $E$ の比が $E/\delta=8000\text{kgf/cm}^3$ の接合隅角部要素を導入した解析モデルを適用することによって、プレキャスト部材の挙動を予測することが可能となった。

#### 参考文献

- [1] 土木学会：コンクリート標準示方書（施工篇），PP.260 1991.10
- [2] 梅原秀哲・田辺忠顕・吉田彌智：鋼材の付着状態を考慮したPCラーメンの履歴挙動に関する研究、土木学会論文集、第396号/V-9、pp.89-98、1998.8